新能源应用丛书

# 太阳能供暖系统设计与安装

贾英洲　主编

李根华　刘　伟　边志敏　副主编

刘自强　贾朝辉

人 民 邮 电 出 版 社

北 京

## 内 容 提 要

本书从太阳辐射的基础知识入手，系统地介绍了供采暖用的各种太阳能集热器，房屋隔热保温的重要性和实施方法，各种辅助热源的特点及选择；同时对地下长期储存太阳能的理论和实践进行了探索，特别对太阳能集热器阵列的排布安装和整个供暖系统的运行原理、设计方法进行了较充分的分析论述。

本书可供从事太阳能供暖的工程技术人员使用，也可供大专院校相关专业的师生学习参考。

新能源应用丛书

太阳能供暖系统设计与安装

◆ 主　　编　贾英洲

副 主 编　李根华　刘　伟　边志敏　刘自强　贾朝辉

责任编辑　毕　颖

◆ 人民邮电出版社出版发行　　北京市崇文区夕照寺街 14 号

邮编　100061　　电子函件　315@ptpress.com.cn

网址　http://www.ptpress.com.cn

北京　　印刷

◆ 开本：787×1092　1/16

印张：20

字数：454 千字　　2011 年 1 月第 1 版

印数：1–　000 册　　2011 年 1 月北京第 1 次印刷

ISBN 978-7-115-24128-3

定价：　　元

**读者服务热线：(010)67129264　印装质量热线：(010)67129223**

**反盗版热线：(010)67171154**

**广告经营许可证：京崇工商广字第 0021 号**

# Foreword 前言

利用太阳能供暖是多年来人们的梦想和追求，从20世纪70年代起人们就开始了太阳能采暖的研究，由于经济造价等方面的因素，当时的研究主要集中在被动式太阳能采暖，俗称被动式太阳房。

我国对太阳能供暖的研究开发是与太阳能热水器的研究开发同时起步的，但由于经济成本和技术观念等多种因素，太阳能供暖至今未能像热水器那样形成大的市场规模。

进入21世纪以来，随着技术的进步，主要由于真空管集热元件的快速发展和成本的大幅降低，太阳能供暖又受到人们的重视。随着经济的发展以及时代对节能和低碳经济的要求，太阳能供暖将会有快速的发展，成为太阳能热利用的主流。

由于太阳能本身的间歇性和能量密度低的特点，太阳能供暖的发展必然会促进太阳能聚光集能器和储能技术的发展。

本书主要在以下几个方面进行了探索性论述，并提出了见解。

（1）虽然目前聚光集能器在我国的应用还较少，但是，聚光型真空管集热器和聚光电池是未来太阳能集能器的发展方向，其在太阳能供暖工程和电力工程中将发挥主力军作用。

（2）储能技术，尤其是地下长期储存太阳能技术，必然在太阳能供暖工程中发挥举足轻重的作用。发展地下储热和地下储冷技术，充分利用土壤能，对我国的节能减排、绿色低碳经济有着极其重要的意义。因此，本书用了较长的篇幅论述并探讨了太阳能地下长期储热技术。

（3）提出了太阳能供暖的保证率可以达到百分之七八十，甚至全部由太阳能供暖的观点。虽然这一提法与目前主流的提法相比好像“较激进”，但可能更易被广大群众所接受。

（4）探讨分析了各种太阳能供暖系统特有的、与普通太阳能热水工程不同的管路系统，分析了其循环原理和各种设计安装方案，希望能对读者有所启示，对工程设计安装施工有参考价值。

在本书的编写过程中，考虑到广大读者的阅读要求，力求深入浅出，除少数章节的理论推导外，具有初中以上文化程度的读者都能读懂其基本内容。

本书由贾英洲主编，集热器部分主要由李根华高级工程师编写，生物质能辅助热源部分主要由边志敏高级工程师编写，房屋的围护结构和系统控制部分主要由刘伟和刘自强高级工程师编写，太阳辐射能和太阳视运动部分主要由贾朝辉编写，王建国和司淼也为本书的成稿做了大量工作。

编　者

# Preface 序

进入21世纪后，由于全球经济快速发展和人口不断增长，世界一次能源消费量不断增加，而化石能源仍是能源消费的主体，使得温室气体及各种有害物质大量排放，生态环境不断受到威胁。1997年的《京都议定书》要求国际社会采取行动，消除人为对气候系统的破坏；2009年的哥本哈根会议进一步推动了各国在应对气候变化的行动中形成共识，温家宝总理也在大会上作出庄严承诺。在此背景下，世界各国都在积极研究并开发利用新能源特别是可再生能源，约束和减少全球温室气体的排放，中国政府已经把大力推动新能源与可再生能源发展作为国家的一项重大战略任务。

新能源的各种形式都是直接或者间接地来自于太阳或地球内部所产生的热能，包括了水能、太阳能、风能、生物质能、地热能、核聚变能、海洋能以及氢能等。新能源普遍具有污染少、储量大的特点，对于解决当今全球气候变化和环境污染问题，解决化石能源日趋枯竭以及保障能源安全供应等问题具有重要意义。从长远看，我们正处在以化石能源应用为主向新能源应用转变的过渡阶段，应抓住这次能源变革的机遇，加强对能源战略、能源结构、能源布局、能源政策、能源科技、能源价格以及能源合作等一系列重大问题的研究，明确发展目标，理清发展思路和工作方向。

在缓解能源、环境危机的双重压力下，太阳能热利用、沼气、农作物秸秆和生物制液体燃料等由于出色的节能减排效果和经济实用性，多年来已成为国家能源建设，特别是社会主义新农村建设中优先发展的重点领域。

人民邮电出版社顺应时代的需要，出版了这套“新能源应用丛书”。本套丛书包括已具规模效益的太阳能热利用工程和沼气工程，以及前景广阔的燃料乙醇工程和秸秆能源工程等项目，其作者均是相关领域有着丰富实践经验和理论水平的工程技术专家，各册书稿贯穿了实用有效的编写方针，对于新能源工程建设，有很好的指导性、可操作性和成果连续性。

相信“新能源应用丛书”的出版发行，可以为新能源领域的工程技术人员提供一个实用而有效的智力支撑，也可以成为面向广大干部群众的科普读物。

国务院参事、中国可再生能源学会理事长 

2010年9月27日

Contents 目录


**第 1 章　太阳能供暖概述** …… 1

1.1　太阳能是未来世界的主要能源 …… 1
1.2　太阳能发展的 3 个阶段 …… 2
1.3　我国冬季采暖现状 …… 3
1.3.1　我国建筑采暖能耗 …… 3
1.3.2　建筑采暖用能现状 …… 3
1.4　太阳能——城乡低层建筑供暖的必然选择 …… 4
1.5　太阳能供暖的技术和经济分析 …… 6
1.5.1　太阳能供热采暖的技术可行性 …… 6
1.5.2　太阳能供热采暖的经济可行性 …… 9
1.6　太阳能供暖的现状和基本流程 …… 11
1.6.1　太阳能供暖的现状 …… 11
1.6.2　太阳能主动式采暖的基本流程 …… 12
1.7　太阳能供暖与普通热水工程的区别 …… 13
1.7.1　应用的目的和客户不同 …… 13
1.7.2　使用时间不同 …… 13
1.7.3　集热温度不同 …… 14
1.7.4　对储存能量的要求不同 …… 14
1.7.5　系统设计不同 …… 15
1.7.6　管理维护方式不同 …… 15
1.7.7　对集热效果、系统效益的要求不同 …… 16

**第 2 章　太阳辐射能和集热器面积计算** …… 18

2.1　太阳辐射能 …… 18
2.1.1　太阳辐射能简介 …… 18
2.1.2　太阳常数 …… 19
2.1.3　太阳能资源的特点 …… 19

2.2 太阳光谱分布和太阳能的吸收 20
2.2.1 太阳辐射光谱 20
2.2.2 太阳光谱的吸收、反射和透过 22
2.3 大气透明度 22
2.3.1 到达地球表面上的太阳辐射能 22
2.3.2 直接辐射和散射辐射 23
2.3.3 大气层对太阳辐射的衰减作用 23
2.3.4 大气质量 24
2.4 我国太阳能资源的分布 25
2.5 太阳能集热器面积的一般计算方法 27
2.5.1 供暖保证率 27
2.5.2 采热负荷计算 28
2.5.3 太阳能集热器面积 29
2.6 太阳能直接供暖系统集热器面积的确定 30
2.7 有辅助热源的采暖系统太阳能集热面积的计算 31
2.7.1 电辅助热源 31
2.7.2 热泵 31
2.7.3 燃气锅炉 32
2.7.4 柴草锅炉 32
2.7.5 煤锅炉 32
2.8 有能量储存系统的太阳能集热面积的确定 33

**第 3 章 太阳视运动规律和太阳能集热器安装角度 35**

3.1 球面三角基本知识 35
3.1.1 球面几何的一些概念 35
3.1.2 球面三角形边角关系 37
3.2 地球的公转和赤纬角 37
3.3 太阳的周日视运动 40
3.3.1 天球坐标系 40
3.3.2 太阳视运动的轨道 41
3.4 太阳视运动的解析表达式 43
3.4.1 地平坐标系 43
3.4.2 赤道坐标系 44
3.4.3 太阳视运动的解析表达式 45
3.5 我国太阳周日视运动规律 46
3.6 太阳时与时钟的换算 50
3.6.1 真太阳时和平太阳时 50

3.6.2 真太阳时和时钟 51
3.7 太阳能集热器安装倾角的确定 52
3.7.1 集热器的安装角度 52
3.7.2 太阳能集热器方位角的确定 55
3.7.3 太阳能集热器安装的前后间距 56

**第 4 章 太阳能的吸收、传输和储存** 57

4.1 传热学基础知识 57
4.1.1 温度和热量 57
4.1.2 比热容和热量计算 58
4.1.3 热力学基本定律 58
4.1.4 热量传递的基本方式 59
4.2 热传递在太阳能采暖上的应用举例 66
4.2.1 提高器件热传递能力，增强换热功能 66
4.2.2 抑制传热功能，提高设施的隔热保温性能 66
4.3 传热介质 68
4.3.1 水 69
4.3.2 空气 69
4.3.3 液态有机物 70
4.3.4 盐类的水合物、水溶液 71
4.3.5 金属 71
4.3.6 土壤 71
4.3.7 相变换热 72
4.4 能量储存概述 72
4.4.1 蓄电池 72
4.4.2 抽水储能 72
4.4.3 飞轮储能 73
4.4.4 超导线圈储存电能 73
4.4.5 化学储能 73
4.4.6 相变储热 73
4.4.7 显热储存 74
4.5 潜热储存 74
4.5.1 相变储能的优点 74
4.5.2 相变储能技术在建筑采暖上的应用 74
4.5.3 相变储热材料的特性要求 75
4.5.4 常用的无机盐水化物作相变储热材料 76
4.5.5 分层问题（晶液分离）及解决途径 77

4.5.6 “过冷”问题及解决办法 77
4.6 房屋本身的显热储存 78
4.6.1 房屋本身的储热功能 80
4.6.2 房屋的储热、散热能力估算 81
4.7 利用水箱作热储存 82
4.7.1 利用水箱作夜间用热的半日储存 82
4.7.2 利用水箱作隔日用热的整日储存 82
4.8 地下热储存 83
4.8.1 地下储存的基本原则 83
4.8.2 几种基本地下储存方案分析 85
4.8.3 储热总量的估算 86
4.8.4 土壤储热性能分析 87
4.8.5 集热器面积的确定 88
4.8.6 普通家庭 100m$^2$ 左右的建筑面积采暖的短期地下热储存 90
4.8.7 普通家庭 100m$^2$ 建筑面积采暖单水窖长期热储存 97
4.8.8 300m$^2$ 建筑面积的二层小楼或小别墅采暖的长期热储存（7 窖阵列地下储存） 100
4.8.9 阵列式多孔窖大规模长期热储存系统 104
4.8.10 小水窖阵列式地下储存的改进设计 106
4.8.11 6 个 300m$^2$ 二层别墅小楼储热系统 108
4.8.12 长期大规模地下储热系统的一般设计计算方法 111
4.8.13 地下储热系统的建造技术 115
4.9 冷量储存和土壤能的直接利用 116
4.9.1 冷量储存 116
4.9.2 土壤能的直接利用 117
4.10 土壤储能和土壤能利用的技术评价及其经济、社会意义 118
4.10.1 技术评价 118
4.10.2 太阳能地下热储存的技术评价和经济、社会意义 120

**第 5 章 被动式太阳房** 122

5.1 主动式和被动式太阳能采暖 122
5.1.1 主动式太阳能采暖 122
5.1.2 被动式太阳房 123
5.1.3 被动式太阳房的分类 125
5.2 被动式太阳房的设计 127
5.2.1 太阳房的建设地点、朝向和房间距的确定 127
5.2.2 太阳房的墙体设计 130

5.2.3 空气集热器……132
5.2.4 窗、门的设计……134
5.2.5 屋顶保温设计……137
5.2.6 地面保温设计……137
5.2.7 其他……137
5.3 被动式和主动式采暖相结合……138
5.3.1 被动式采暖和主动式采暖的共同处……138
5.3.2 被动式采暖和主动式采暖的差异……139

**第 6 章 采暖用太阳能集热器**……141

6.1 平板型太阳能集热器……142
6.1.1 产品分类……142
6.1.2 平板型太阳能集热器技术要求……145
6.1.3 太阳能空气集热器……146
6.1.4 铜铝复合循环式集热器……147
6.2 真空管型太阳能集热器……148
6.2.1 产品分类……148
6.2.2 真空管型太阳能集热器技术要求……150
6.2.3 全玻璃真空管集热器……150
6.2.4 玻璃—金属真空集热管……152
6.2.5 热管真空管集热器……153
6.2.6 聚光型真空管集热器……155
6.3 采暖用集热器的选择……156

**第 7 章 太阳能聚光器**……157

7.1 光的反射定律……157
7.2 抛物线……158
7.2.1 什么是抛物线……159
7.2.2 抛物线为什么能聚光……159
7.2.3 聚光比……160
7.3 其他几种几何形状的聚光分析……162
7.3.1 圆聚光分析……163
7.3.2 菲涅尔反射镜聚光（平板聚光器）……163
7.3.3 钻进去就出不来——渐开线聚光器……164
7.4 CPC 复合抛物面聚光集热器……166
7.4.1 结构原理……166
7.4.2 收集角和聚光比……168

7.4.3 收集角和日收集时间……168
7.4.4 聚光器安装倾角的确定和调节……170
7.5 一种高使用价值的聚光器——单抛物柱面聚光集热器（SPC）……171
7.5.1 单抛物面 SPC 和复合抛物面 CPC……171
7.5.2 聚光原理 聚光比……172
7.5.3 收集时间……172
7.5.4 固定式采暖用槽式聚光器……173
7.5.5 半固定式槽型聚光器（可调倾角）……177
7.5.6 太阳能开水器……179
7.5.7 太阳能热水、开水、炊事联合装置……180
7.6 太阳能光电、光热联合系统……182
7.6.1 普通太阳能光热、光电联合装置……182
7.6.2 真空管光电、光热组合元件……182
7.7 聚光发电简介……183
7.7.1 太阳能槽式热发电系统……184
7.7.2 太阳能塔式热发电系统……184
7.7.3 太阳能碟式热发电系统……184

**第 8 章 房屋围护结构和室内换热系统的热工计算**……187

8.1 室内外空气计算参数……187
8.1.1 室外空气计算参数……187
8.1.2 室内空气计算参数……188
8.2 建筑热负荷的组成及分析……189
8.2.1 围护结构的基本耗热量……189
8.2.2 围护结构的附加耗热量……190
8.3 门窗缝隙渗入冷空气的耗热量……191
8.4 建筑围护结构的改进……192
8.4.1 减少空气渗透……192
8.4.2 建筑围护结构的绝缘……192
8.5 地板辐射换热系统……193
8.5.1 工程示例……194
8.5.2 设计参数……194
8.5.3 采暖热负荷计算……194
8.5.4 确定管道间距……196
8.5.5 系统设计……198
8.5.6 施工及验收……199
8.6 散热器设计计算……200

8.6.1 散热器性能评价指标……200
8.6.2 散热器的种类……201
8.6.3 散热器的选择、布置……201
8.6.4 散热器的计算……202
8.7 空气换热器换热系统……202
8.7.1 暖风机……203
8.7.2 风机盘管……203

**第 9 章 辅助热源**……205

9.1 辅助电加热系统……205
9.1.1 辅助电加热系统的组成……205
9.1.2 控制装置……206
9.1.3 辅助电加热的安装……207
9.2 热泵……207
9.2.1 热泵热水器的工作原理……208
9.2.2 热泵的选择和安装……209
9.3 生物质能……210
9.3.1 生物质能的优势……210
9.3.2 生物质的能源特性……211
9.3.3 生物质致密化加工……213
9.3.4 生物质压块燃烧炉……216
9.3.5 生物质压块的技术优势和待解决的问题……217
9.3.6 秸秆气化炉……218
9.3.7 直燃式生物质半气化炉……220
9.3.8 太阳能与生物质能的互补及采暖流程……222
9.4 其他辅助热源……223
9.4.1 燃煤锅炉……223
9.4.2 燃油和燃气锅炉……224

**第 10 章 集热器阵列和系统控制**……225

10.1 流体力学基础知识……225
10.1.1 液体内部的压强……225
10.1.2 管内液体的流动……227
10.1.3 管道阻力的计算……229
10.2 自然循环……230
10.2.1 自然循环的动力——压头……230
10.2.2 自然循环产生的必要条件——排气……231

10.2.3 水箱高度……233
10.2.4 强制循环……234
10.2.5 正压运行和负压运行……235
10.3 太阳能集热器的串联和并联……236
10.3.1 3 种基本连接方式……236
10.3.2 串联管路分析……237
10.3.3 并联管路分析……239
10.3.4 混联系统分析……240
10.3.5 竖排真空管模块的串并联……244
10.3.6 排列方式的选择……245
10.4 控制系统……245
10.4.1 循环泵的温差自动控制……246
10.4.2 定温自动控制……246
10.4.3 循环泵的定时自动控制……247
10.4.4 定温放水系统……247
10.4.5 变流量控制系统……248
10.4.6 水箱水位的控制……251

**第 11 章 供暖系统的设计与安装**……253

11.1 系统设计程序……253
11.1.1 集热器面积的确定……253
11.1.2 集热器类型的确定……254
11.1.3 安装角度……255
11.1.4 集热器阵列的设计……256
11.1.5 房屋的设计或改造……257
11.1.6 室内散热系统的确定……258
11.1.7 辅助热源的选择设计……258
11.1.8 储能系统设计……259
11.2 夏季热量过剩问题的解决方法……260
11.2.1 夏季热量过剩问题制约着太阳能供暖的发展……260
11.2.2 覆盖法……261
11.2.3 最佳倾角法……261
11.2.4 采用聚光器法……261
11.2.5 生产开水法……262
11.2.6 夏季地下储存太阳能……263
11.2.7 太阳能制冷……263
11.3 系统运行可靠性解决途径……264

11.3.1 稳定可靠的“傻瓜式”运行系统的必要性……264
11.3.2 采用完善的具有“代偿性”的循环系统……265
11.3.3 其他几种防护措施……266
11.4 太阳能供暖的基本循环系统……268
11.4.1 集热器—散热器系统……268
11.4.2 集热器—储热水箱—散热器系统……269
11.4.3 集热器—辅助热源—散热器系统……269
11.4.4 集热器—水箱—辅助热源—散热器系统……270
11.4.5 集热器—地下储热—散热器系统……270
11.4.6 集热器—水箱—地下储热—散热器系统……271
11.5 集热器—水箱—地暖循环系统……271
11.5.1 集热器—水箱—地暖单泵单循环系统……271
11.5.2 集热器—水箱—地暖双循环系统……274
11.6 地下水窖储存系统……276
11.6.1 地下水窖储存系统基本循环水路分析……276
11.6.2 （水窖储热系统）循环泵的不同安装法……279
11.7 太阳能集热器—储水箱—储水窖—地暖联合循环系统……282
11.7.1 三泵循环系统……282
11.7.2 双泵循环系统……285
11.8 夏季产开水和简易制冷系统……288
11.8.1 夏季产开水系统……288
11.8.2 简易制冷系统……289
11.9 辅助热源系统……290
11.9.1 电辅助加热系统……290
11.9.2 锅炉辅助加热系统……290
11.9.3 热泵辅助加热系统……291
11.10 几种循环系统设计例举……292
11.10.1 40m$^2$集热器、120m$^2$建筑面积热泵加热系统的设计……292
11.10.2 20m$^2$聚光集热器、100m$^2$建筑面积多用炉辅助加热系统的设计……294
11.10.3 300m$^2$建筑面积二层小楼地下储热系统设计……297

**附录**……301

# 第1章 太阳能供暖概述

## 1.1 太阳能是未来世界的主要能源

煤炭、石油等矿石能源是目前人类使用的主要能源，每年的消耗量已达百亿吨之大。人类大规模开采利用煤炭、石油能源只有二三百年的历史，与人类几千年的文明史相比只是很短的一个时期，与几百万年的人类进化史相比更是短短的一瞬。但就这短短的二三百年，煤炭、石油等矿石能源的利用已产生了两大基本问题。

第一，煤炭、石油等矿石能源的开采已出现枯竭之势，已不能满足人类社会发展的需要。

按目前已探明的储量和每年的消耗量相比，石油仅够用四五十年，煤炭储量要多些，也只够开采100多年。即使以后再增加一些新的探明储量，总的来讲其储量也是有限的，恐怕最多也只够用二三百年。但人类还要几百年、几千年地生存下去、发展下去，我们不应该在我们这一代就把资源消耗殆尽。况且煤炭、石油等矿石能源是最基本的化工原料，其价值比作为能源消耗掉要大得多。要继续发展经济，继续提高人民的生活水平，人类必须找出新的替代能源。

另一方面，即使有较多的矿石能源储量，人类也不能无限制地开采。地球的演化经过了几十亿年，生命也经过十几亿年的进化演变，才形成现在的地球大气环境。短短几十年的“工业化”、“现代化”，已把几亿年演化形成的、埋藏在地下的煤炭、石油等矿石能源相当大一部分挖掘出来燃烧掉，每年高达数以百亿吨的碳排放以及大量二氧化硫、磷等有害物质的排放，已严重破坏了人类赖以生存的大气环境。近些年世界各地自然灾害频发，冰川融化、海平面上升，百年不遇的大旱、大涝、洪水飓风、酷热严寒等由温室效应引起的恶性异常气候灾害屡屡发生，正威胁着人类的生存。这些都逼迫人类必须改变大量使用矿石能源的传统做法，寻找新的绿色替代能源，走出一条低碳经济的新路。

人类在寻找新的替代能源时，对核聚变能抱有最大的期望。核聚变是氢的同位素氘、氚在上亿摄氏度的高温下进行聚变反应，其释放的能量比核裂变还要大得多，太阳的能量就是来自于这种核聚变反应能。这种核聚变比核裂变要干净得多，其产生的放射性污染要少得多。另一方面，核聚变所需的原料即氢的同位素氘和氚，在海水中储量丰富，据测算，每升海水所含的氘和氚进行聚合反应所产生的能量等于几百升石油燃烧产生的能量，因此可以说其能量资源是无限的。一旦核聚变技术取得突破，人类就获得了无穷

无尽的能源。

但是，人类距离有效利用核聚变还有相当长的路程要走。在 20 世纪 70 年代末就有一种说法，人类要取得有效利用核聚变技术的突破，还需要至少 50 年的时间。现在 40 年过去了，据说还得需要 50 年的时间才可能取得核聚变技术的突破。

可控核聚变作为未来的能源，确实寄托着人类殷切、厚重的希望，所以现在世界上有包括中国在内的 6 个国家和集团联合起来组成国际技术攻关组，力图尽快突破可控核聚变的利用技术。但是，何时能够实现，其经济性如何，还存在很大的不确定性。

在可替代能源的选择中，还有几种绿色的可再生能源，如生物质能、水力能、地热能、风能、潮汐能等，这些能源在不同国家、不同地区的分布很不均匀。有的国家可能风力比较丰富，可把风力作为主要能源之一；有的国家可能水力比较丰富，可把水力作为主要能源之一。

只有太阳能普照大地，能量巨大，可以担负起未来主要能源的重任。

只要在每户的屋顶上设置好太阳能集热器，就可以满足低层建筑家庭和普通农户的采暖需求，只要较充分利用照射在屋顶的太阳能，甚至可以满足全年的烧水、做饭、采暖、洗浴等生活用热能的需求。若把农村的屋顶都设置好光热、光电联合利用装置，则可满足农村全年的生活用电、用热的需求。

## 1.2 太阳能发展的 3 个阶段

太阳能将经过 3 个发展阶段，最后成为人类的主要能源，目前已基本完成第 1 个发展阶段，正在迈向第 2 个发展阶段，并为向第 3 个阶段发展在技术和经济上积蓄力量。

第 1 阶段是以非聚光的平板型集热器为主，包括非聚光的密排式真空管集热器。其主要功能是为用户提供洗浴等生活用热水。目前这个阶段已发展到其巅峰时期，正向深度和广度进军。在这个阶段，太阳能发电从技术上已得到较充分的发展，并进行了小规模的特殊地区的应用，如在边远无电网地区的应用。这个阶段从 20 世纪 70 年代开始，至今已有近 40 年的历史。

第 2 阶段，近年已开始，其主要标志是太阳能采暖开始被人们重视，太阳能发电开始走向较大规模的示范。从技术上看，太阳能聚光器开始被人们重视。本阶段基本完成的主要标志是：太阳能采暖将在全国大规模开展起来，太阳能采暖在我国低层建筑能耗中将占主要位置，太阳能聚光发电进行了较大规模的试点示范，并开始具有经济上的价值。从技术上说，聚光和非聚光的集能器并存，聚光式集能器从技术上走向成熟，并开始有了较大的发展。第 2 阶段将持续 10～20 年甚至更长的时间。

第 3 阶段，太阳能光热转换和光电转换将有更大的发展，太阳能发电将占全国总发电量的很大比重，太阳能成为主要能源之一，太阳能发电与常规能源相比，已具有技术和经济上的竞争力。太阳能光热利用有了更广更深的发展，太阳能产业在国民经济中已占有举足轻重的位置。从技术上说，不论是聚光集热器，还是聚光发电，都有广泛深入的应用。

## 1.3　我国冬季采暖现状

### 1.3.1　我国建筑采暖能耗

我国严寒和寒冷地区主要包括东北、华北和西北地区（简称三北地区），每年日平均温度低于或等于 5℃的天数一般都在 90 天以上，最长的满洲里长达 211 天。这些地区习惯上被称为采暖地区，其面积约占我国国土面积的 70%。在这些地区的采暖居住建筑中，从总体来看，平房及低层建筑仍占大多数，尤其是在农村、乡镇和中小城市亦是如此。平房及低层建筑，在围护结构保温水平大体相同的条件下，其耗热量指标要比多层建筑高 10%～30%，有的甚至更高。

在采暖区，城郊、小城镇和农村建筑在全社会建筑中所占比重超过 70%，全年供热水和冬季采暖占整年能源消耗的 70%左右。据调查，北京农村家庭平均年用煤 3t，仅冬季采暖用煤就达 2.5t，78%的家庭认为采暖负担重。全国政协调研组就建筑节能问题提交的调研数据显示：按目前的趋势发展，到 2020 年我国建筑能耗将达到 10.9 亿吨标准煤。

10.9 亿吨标准煤意味着什么？它相当于北京五大电厂煤炭的合理库存的 400 倍。据估算，每吨标准煤按照中国的发电成本折合约等于 2 700 度电，那么，2020 年，我国的建筑能耗将达到 29 430 亿度电，比三峡电站 34 年的发电量总和还要多。

提供绿色、清洁、高保证率、高性价比的太阳能供热采暖，是解决我国中部、北部地区能源问题和改变能源结构的基本的途径。

### 1.3.2　建筑采暖用能现状

长期以来，因追求降低建筑造价，加之没有建筑热工程和建筑节能方面的标准规范，广大农村自建房不懂得建筑节能的重要性，又受资金短缺的困扰，能省则省，能减则减，导致建筑围护结构过于单薄，门窗缝隙过大，散热损失很大，采暖能耗很高。

就供暖方式来看，我国三北地区城镇仍以燃煤采暖为主，在采暖住宅建筑中约占 3/4。

目前，我国有 60%以上的人口分布在小城镇和农村。随着国家“三农”政策的出台，农民的生活水平和质量逐渐提高，与此同此也伴随着住宅建筑能源的消耗量大幅攀升。尤其是北方寒冷地区，小城镇冬季采暖所需能耗的比例越来越高，造成煤炭消耗量越来越大。煤的大量使用不仅给居民带来经济压力，也给周围环境带来严重的污染。

我国北方农村家庭住宅供暖大都是采用直接燃煤炉或土暖气，这些采暖方式都较落后，存在以下问题。

（1）燃烧效率低，浪费大量宝贵的矿石燃料。随着人们对采暖要求的不断提高，仍大量使用低效率的燃煤炉，必将加重能源浪费，加剧国家能源的紧缺，推动煤炭价格的大幅上涨，

加重农民的负担。

（2）大量燃煤会加大二氧化碳、二氧化硫等污染气体的排放，尤其是使用低效率的土暖气炉，更是浪费能源，严重污染环境。而且，由于无专业人员管理，燃烧状态不稳定，夜间封火时常发生煤炉死火现象，温度波动较大，供暖质量很差，很容易诱发疾病，危害人民健康。

为提高生活品质，节省传统能源，农村家庭住宅采暖必须改变主要用煤炭的老路。

衣食住行是人们的最基本的生活要素，现在对大多数人来说，已做到衣食无忧。至于“行”，随着我国公共交通事业的发展，这一问题也已得到很好的解决。现在最关键的问题是“住”，“住”的问题已成为国计民生中的最大问题。在城市，高房价困扰着不少的无房住人群；而在农村，虽然大多数人都有房子住，但住房的质量，即居住环境的舒适度却差得多，这主要表现在冬季采暖的质量差得多。一些边远地区还在沿用几百年来的传统方法取暖，即直接利用火炕燃烧柴草、作物秸秆、树叶等来取暖。这些原始的采暖方式往往消耗燃料多，效果差。在农村，老年人冬季的发病率和死亡率都较高，居住环境差、采暖效果差是其主要原因。因此解决广大农村乡镇的冬季采暖问题，不仅是节能减排、低碳经济问题，也是关系国计民生、关系提高人民生活水平的根本性问题。

## 1.4 太阳能——城乡低层建筑供暖的必然选择

低碳经济，这是全世界都关注的话题。一方面是传统石油、煤炭矿石能源的紧缺，长远看，其价格的上涨是必然的。另一方面，近些年来随着人类对能源需求的不断增长，每年高达数以百亿吨的碳排放以及大量二氧化硫、磷等有害物质的排放，已严重影响了人类赖以生存的大气环境。冰川融化、海平面上升、气候异常、暴风雨成灾、久旱不雨温室效应引起的恶性灾害屡屡发生，严重威胁着人类的生存。减少碳排放，实施低碳经济，已成为人类的共识。经济高速发展着的我国，面临着艰巨的节能减排任务。因此，对占很大能耗比重的广大农村和中小城市低层建筑采暖用能，不可能再走传统燃煤采暖的老路，我们必须走出一条绿色能源、低碳经济的新路。

在建筑采暖用能的替代办法中，有哪些路径可走呢？

首先谈燃气。燃气用途广泛，价格较贵，其储量也有限，在生活用能方面仅用作炊事已显紧张，再用于耗能量大得多的房屋供暖，显然是不够的。而且燃气和石油一样，也是一次性能源，会增加碳排放，因此不可能作为主要采暖用能来使用。

再谈电能，电是二次能源，其中一部分来自水利、太阳能等可再生能源，但目前大部分来自煤炭、石油等矿物能源。电能的用处很广，我国的电能也很紧缺，显然，大量使用电能直接供暖会造成很大浪费，是不适宜的，国家电网也承受不起。

近年来发展起来的热泵技术，为用电能采暖似乎开辟出了一条新路。与直接用电加热供暖相比，采用水源热泵或地源热泵技术，其用电量只有原来的 1/3～1/4，节电效果明显。在

某些水源充足的地方，或不适于用其他方式只适宜用热泵的地方，可以用水源或地源热泵供暖。但是，水源热泵要用大量的地下水、河水、污水或其他水资源作为热源，因此必然要受水资源的限制。若用地下水，还要考虑对用过的水进行回灌等措施，防止出现水资源的浪费，毕竟水资源本身与其自身储存的热量相比，是更紧缺、更重要的资源。因此水源热泵不可能大量推广。地源热泵一般不受资源的限制，但其初投资很大，不仅其发展受资金限制，且从长期看经济上是否合算还值得研究。最后，不管是水源还是地源热泵，终究还是要消耗大量电能，在可以预见的一个相当长的时期内，我国电力还是相当紧缺的，且电力的生产还要消耗大量煤炭、石油等一次性能源，因此，只能在某些特定的、适宜的地区发展，不可能是主要发展方向。

至于地热能、风能等可再生代能源不是任何地方都有的，不可能大面积应用于采暖工程中。

农作物秸秆、柴草是最原始的农村生活用能源，几千年来一直被直接作为炊事、房间采暖等生活用能。农作物秸秆等生物质能用于农村建筑采暖，是一个重要方向。

生物质能也是一种绿色能源，本质上也可说是太阳能。虽然从表面看来，燃烧柴草秸秆等生物质能是一个化学反应过程，也要排放二氧化碳，但是这些二氧化碳又可通过植物的光合作用从大气中吸收回来，重新固化成柴草、秸秆等生物质的形式，并不增加大气中的二氧化碳含量。可以说生物质能是通过光合作用把太阳能变成化学能的形式，因此这也是一种可再生的、可循环利用的绿色能源。

充分利用生物质能是我们节能减排、低碳经济的一个重要方面。今后在相当长的一段时间内，生物质能还会是农村生活用能的一个重要组成部分。随着燃烧技术的进步，秸秆气化、压块等新技术的普及、应用，生物质能还会起到更大的作用。

但是，生物质能用于采暖还存在以下几方面问题。

（1）对于作物秸秆，目前在农村大都还是采用较原始的直接燃烧方式，新燃烧技术的推广应用还存在不少技术和经济问题。在燃烧过程中往往烟熏火燎，污染房间居住环境，燃烧使用很不方便，群众不愿意用。

（2）很多作物秸秆要作养殖业的饲料，其应用价值更高。

（3）随着工业技术的发展，一部分作物秸秆可作工业原料，如稻草麦草可造纸，有的秸秆可制作纤维板材等。

（4）为了增强农田土壤的肥力，发展有机农业，相当一部分农作物秸秆还要还田作肥料。

除去上述用处，所剩的秸秆量已不多，用于采暖已不足够，不能独立满足冬季采暖的要求。另外，城乡结合部以及别墅、乡镇医院、学校等，缺乏这些资源，也不适合用秸秆柴草采暖。

可见生物质能难以独自担当起采暖的重任，它只能起一定的辅助配合作用。

看来剩下的只有太阳能一条路了。

从资源方面说，我国主要采暖区在北方，而北方又恰好是我国日照比较好的地区，太阳能资源比较丰富。尤其在需要采暖的冬季，晴天比较多，为太阳能采暖提供了基本的条件。

从技术上说，采暖用的是 50～70℃的低温热能，而我国大量生产使用的太阳能集热器的集热温度也正是这个范围，恰好相匹配。

广大农村、乡镇、中小城市大都是低层建筑，平均每户有较大的屋顶面积，为配置较大面积的采暖用太阳能集热器提供了基本条件。

我国在太阳能热利用方面的技术比较成熟，早已形成世界上最大规模的太阳能集热器生产能力，产品性能优良，质量可靠。经过 20 多年的发展，多次降低成本，其价格已很低廉。所以，利用太阳能采暖将是最现实、最干净、最经济的途径。

太阳能采暖房外观如图 1-1 所示。



图 1-1　太阳能采暖房（采用聚光型集热器）外观图

利用太阳能采暖，尤其是带有辅助热源、储热系统和自动控制系统的太阳能采暖，其供暖质量会远好于原始的燃烧柴草、秸秆供暖和土暖气供暖，可从根本上解决广大农村及城市郊区乡镇等低层建筑的采暖问题，可大大改善农村冬季生活方式和生活状态，增加老百姓生活舒适度，提高老百姓幸福指数，缩短城乡生活质量的差距，提高广大农村人民的整体生活质量，大大减少因冬季寒冷产生的感冒等多发病，降低农村人民的发病率和死亡率。

从广阔的角度看，太阳能采暖将开辟一个更广阔的太阳能利用的市场，把广大农村变成一个新的绿色能源基地，甚至可变劣势为优势，促进人力资源转向农村就业，推进新农村建设的步伐，促进农村城市化。

## 1.5　太阳能供暖的技术和经济分析

### 1.5.1　太阳能供热采暖的技术可行性

我们从能量品位、能量总量、能量储存和辅助热源 4 个方面来分析太阳能供暖在技术上的可行性。

### 1．能量品位

建筑供暖用能，对采用散热器形式的系统来说，一般需要 60～70℃的低温热能。近些年兴起的地板辐射换热系统，只需要 30～40℃的低温热能，这为太阳能供热提供了必要的基本条件。

经过 30 多年的发展，太阳能集热技术已发展得相当成熟，我国太阳能集热器的产量占世界产量的 60%以上，性能先进，质量稳定可靠。目前市场上大量销售的太阳能集热器，不管是平板型的还是真空管型的，在冬季其集热温度一般也能达到 50～70℃，集热效率都可达 50%左右，正好与地板辐射采暖所需的能量品级相匹配，完全可满足集热供暖用。

最近由中国农村能源行业协会太阳能综合利用协调组推出的聚光型太阳能集热器，主要用于太阳能采暖，其集热温度大为提高，在冬季也很容易达到 70～80℃的高温，完全适用于散热片式供暖系统。

### 2．能量总量

一般一个家庭可按 100㎡ 左右的建筑面积估算，每平方米建筑面积所需要供暖热能一般是 20～30W，我们按 30W 估算，则约需要 3 000W 的热能每天 24h 供热。考虑到冬季太阳较好的日照时间只有 6h 左右，要保证全天 24h 供暖，太阳能集热器提供的热能应是：

$$3\,000 \times (24 \div 6) = 12\,000\text{W}$$

在晴朗的天气，太阳的辐射强度约为 1 000W，一般天气可按 700～800W 估算，太阳能集热器的热效率按 40%～50%计算，则每平方米集热器的有效功率为 300～400W，12 000W 供热量需要 30～40$m^2$ 集热器来提供。

从上面的简单计算可知，一个普通家庭 100$m^2$ 的建筑面积，有 30～40$m^2$ 的集热器即可满足其供热需求。这点可用一个简单的比值来描述：

集热器面积：房屋采暖面积 = 1∶2.5～1∶3

只有一层或两层的低层房屋建筑，可提供足够的位置安装这 30～40$m^2$ 的集热器。

上面的结果是按冬季的太阳辐射能直接用来采暖计算的，如果我们能将春夏秋季的太阳辐射能储存起来供冬季用，则对于 3～4 层房屋建筑，也能基本实现太阳能供暖。

总之，主要依靠太阳能即可基本上担负起低层建筑冬季供暖的重任。

### 3．能量储存

太阳能的一个主要缺点是它的间歇性，不仅有白日夜晚之分，还有阴天、雨雪天气无太阳辐射能的情况，因此如何储存太阳能用于房间取暖，自然就被提了出来。

这个问题要分几个层面来讨论。

首先讨论一下每天十几个小时的太阳能储存能否应对夜间无阳光辐射时的采暖需求。

第一种方法可以设置一个较大的保温水箱，能储存白天收集的太阳能的 50%，以用作夜间供热。比如一组 40$m^2$ 的集热器，用 1～2t 的水箱即可（可参看第 3 章）。

第二种方法是不特殊设计大水箱，而是利用房间本身的储热功能储热。为减少房间本身

的热损失，减低能耗，对太阳能采暖房都要求有较好的隔热保温措施。白天阳光辐射把集热器中的水加热，再通过循环泵把热水泵回房间加热房间。房间的地板、墙壁、家具等各种设施同时被加热，都能储存相当部分热能。理论计算和多次试验、示范都证明，对一个隔热保温较好的房间，一个晚上的温度只降低1℃左右，对房间的舒适度影响很小。

可见房间本身具有很好的储热、隔热功能非常重要。利用这一特性，在连续两三天无太阳的情况下，仍可基本保持房间有较适宜的居住温度。这是一种最省工、省材料、经济适用的办法，在太阳能采暖工程中常常采用。

第三种方法是地下储热。连续几天甚至十几天无太阳，这种情况在有些地区是经常出现的，在这种情况下仅靠水箱储热或房间自身储热就不行了。由于受造价和房屋承重等的限制，水箱不可能做得很大，而且靠水箱长时间储热，其热损失也是相当大的。在长时间无太阳的情况下，房间自身的散热损失也会增加，室温就会降下来。要想保证不断用太阳能供暖，必须考虑长期热储存的方法。

地下热储存是一种现实可行的长期储存热的方法，它甚至可以实现季节性的储存热能，即把春、夏、秋季的热量储存在地下，供冬季供暖用。其基本途径是利用地下水窖及其周围的土壤储存热能。在春、夏、秋季利用太阳能把水窖中的水加热，水窖中的水又把周围的土壤加热，这样在水窖周围的土壤就形成一个高温区。在这里土壤既是储热材料，又是隔热材料。由于土壤导热系数不大，有一定的隔热能力，因此，水窖内较高温度的水传向土壤的热量不会传得太远，而是聚集在水窖周围的土壤中，这时土壤起到隔热材料的作用；土壤本身尤其是湿土的热容量也较大，在温度上升的过程中会吸收相当一部分热量，这时土壤起到储热材料的作用。当冬季水窖向房间供热时，水窖内的水温会降低。当水窖内水温低于周围土壤温度时，土壤中的热量就会向水窖内的水中传导，返回到水中，再向房间供热。

热量的长期地下储存是一项有效利用太阳能的新技术，它可以把夏季大量过剩的热量储存起来供冬季用，是最合理的节能方式。经过理论分析和试验证明，这是一种现实可行的、有效的太阳能利用形式。有关这部分内容的详细论述可参看第4章。

#### 4．辅助热源

解决太阳能间歇性缺点的另一个途径是采用辅助热源，即当无太阳时用其他能源补充上。常用的有电辅助加热，燃煤、燃气、燃柴草锅炉，热泵加热等。

电辅助直接加热的优点是设备简单，造价低，用电热管直接加热即可，缺点是耗电量大。只有在阳光充足、日照时间长、用辅助加热较少且电力较充足的地区，比如西藏、青海、甘肃等地区，陕西、山西、河北北部等部分地区，比较适宜用。

用燃柴锅炉作为辅助热源是个不错的选择。当没有太阳时可用燃柴锅炉替代供热，两者配合有很多优势。首先，不管是太阳能还是生物质能，两者都是可再生的绿色能源，最符合低碳经济，甚至零碳经济；其次，柴草、作物秸秆都是农业生产的附带产物，可看成是零成本，现在的问题只是如何充分利用；最后，作物秸秆性能上的一个重要特点是易点燃，启动快，可随时与太阳能相配合，当突然阴天无阳光时，可立刻点燃燃柴锅炉供暖。

当然，有条件的地方也可用燃气或燃煤锅炉作为辅助热源。

在天气不是太寒冷的地区，用热泵作为辅助热源也是一个不错的选择。使用热泵，其冬季的能效比一般也在 2.0 以上，这就是说，消耗 1kW 的电能至少可得到 2kW 的热能，比直接用电加热至少节省一半的电能。

使用热泵的主要缺点是初投资大些，热泵的造价比电热管要高得多。其次，在太寒冷的地区不适宜用热泵，在这些地区热泵的能效比会大大降低，散热器会结霜严重，造成热泵不能正常工作。

从以上的分析可以看出，用太阳能供热采暖在技术上是完全可行的，太阳能的间歇性等问题已有办法解决。

### 1.5.2　太阳能供热采暖的经济可行性

对于太阳能供热采暖的经济可行性问题，我们从太阳能产品成本的降低、综合系统成本的节约、传统矿石能源价格上涨和环境效益几方面来谈。

#### 1．太阳能产品成本大幅降低

经过 30 多年的发展，我国已形成一个很大的太阳能产业，各种太阳能元器件都实现了标准化的大规模生产，从而大大提高了生产效率，降低了生产成本，降低了单件产品的价格。以最基本的集热元件玻璃真空管为例，在 20 世纪 80 年代，一根真空管的价格大约四五十元，而那时一个普通职工的月工资也只有四五十元。也就是说，一个月的工资只够买一根真空管。现在一根同样的真空管不到 10 元，一个普通的农民工的月工资也已达一两千元，也就是说一个月的工资可买上百根真空管，其相对成本降低了数百倍。太阳能产品成本的大幅降低为大面积利用太阳能采暖打下了经济基础，提供了经济上的可能性。

#### 2．综合系统成本和管理成本得到节约

太阳能采暖和普通太阳能热水工程有许多不同的特点。一家一户的太阳能采暖要求与建筑相结合、相匹配。如果我们从房屋的建筑设计上就考虑到太阳能集热器的安装，那么太阳能采暖系统可采用小水箱或无水箱设计，以降低系统成本，这点与热水工程有很大不同。

此外，采用地下季节性长期储热系统的设计，可以大幅减少集热器的面积，若整个系统设计合理，随着修建水窖技术的成熟、完善，也有可能降低系统造价。

目前太阳能热水器和太阳能热水工程销售价格都偏高，其中一个重要原因是维护服务成本高。太阳能热水器的终端零售商一般都是小店铺，一个零售商要对自己销往各地的太阳能热水器负责售后的维护服务。某家的热水器或热水工程出了故障，零售商都要派出维修人员跑几公里甚至几十公里去维修，这大大增加了维护成本。零售商必须把这部分成本提前加到售价中，因此提高了销售价格。

太阳能采暖一般需要的集热面积都较大，每家每户都是一个太阳能工程。一旦这项技术全面推开，则每个乡村几十户、几百户都可能装有大面积的集热器，每个村镇就有可能设置

专门的维护人员，这既可提高集热器的使用质量，也必将大大降低单位集热面积的维护成本，从而降低单位集热面积的造价。

### 3．传统矿石能源价格上涨

随着社会的发展，人类对能源的消耗量将不断增加，这是一个不可逆转的趋势。地球上矿石能源的储量是有限的，虽然我们还会不断发现一些新的油田、煤田，但是付出的代价却越来越大。

煤炭、石油等矿石能源既是燃料，也是宝贵的化工原料，而且作为化工原料其价值比作为燃料大得多。人类文明社会刚过去几千年，近代工业社会只有 300 年的历史，我们不能在短短几十年的时间里就把地球上的资源消耗净，不给子孙留下一点宝贵的资源。因此，世界性的能源紧缺将是长期的。

虽然短期看能源价格会有波动，但从长远看，传统矿石能源的价格上涨是必然的。汽油已从几年前的每升 1 元多上涨到现在的 6 元多，生活用煤已从几年前的每吨 100 多元上涨到 1 000 多元，而且呈现涨幅越来越快的趋势。仅从经济上来看，用太阳能采暖已具有竞争力。随着矿石能源价格的不断上涨，太阳能采暖会越来越有经济上的竞争力。

### 4．环境效益提高和居住环境改善

太阳能采暖对整个社会的环境效益及对低碳经济的贡献是有目共睹的。如果我国大部分采暖区域都采用太阳能采暖，每年就会节省数亿吨的煤炭等矿石能源，减少数亿吨的碳排放。这对改善人类生存的大环境具有不可估量的意义。

对这些大的环境效益，也许各个小家庭没有切身的感受，人们最敏感的是身边周围的生存居住环境。我们就从这方面谈起。

广大农村乡镇的冬季采暖基本上是三种形式，一种是用最原始的柴草烧火炕采暖，一种是在房间卧室直接燃烧煤炉炭火取暖，另一种是靠土暖气供暖。

前两种取暖方式是最原始的，供暖很不稳定，到夜间炉火熄灭室温很快下降。而且，由于燃烧过程大都是在室内进行，燃烧的煤灰、烟气往往会弥漫整个房间，造成室内居住环境严重污染，腐蚀墙壁、衣物、家具、食品，并不断出现煤气中毒事件，直接威胁着人们的生命安全。长期生活在这种环境下，人们的发病率很高。尤其是老年人身体抵抗力差，很容易诱发各种疾病，甚至不治身亡。在农村，冬季的发病率和死亡率都升高，供暖条件差是其主要原因。

安装土暖气的家庭条件稍好些，但土暖气的供暖质量仍较差，一家一户的土暖气不可能有专门的人管理，燃烧状况时好时坏，室内温度很不稳定。而且，不少家庭的土暖气炉也是安装在室内，煤灰和烟气仍会污染室内的居住环境。

采用太阳能供暖可完全避免煤灰、烟气对房间的污染，而且自动控制的供热系统可大大提高其供热质量。

总之，采用太阳能供暖，在技术、经济、环保等方面都已具有了与传统能源的竞争力，它必将迅速地发展起来。

## 1.6　太阳能供暖的现状和基本流程

### 1.6.1　太阳能供暖的现状

太阳能供暖可分为被动式和主动式两大类。

太阳能被动式供暖习惯称为被动式太阳房，简单说就是利用房间窗口或附在南墙上的空气集热器，通过直接接收太阳辐射能使室内温度升高的采暖方式。

具体来说就是通过建筑朝向和周围环境的合理布置，内部空间和外部形体的处理，以及建筑材料和结构、构造的恰当选择，使其在冬季能采集、保持、储存和分配太阳能，从而解决建筑物的采暖问题；同时在夏季又能遮蔽太阳能辐射，散逸室内热量，从而使建筑物降温，达到冬暖夏凉的目的。

被动式太阳房不需要特设太阳能集热器，也不需要水泵、风机等动力设备，它的基本原理就是“温室效应”原理。我国早期的所谓太阳能采暖，主要是指这种被动式太阳房。

被动式太阳房造价低廉，从 20 世纪 80 年代以来，我国很多地方如东北地区和西北的甘肃、西南部的西藏等地区，推广的主要是这种太阳能采暖方式。虽然这种太阳房的采暖质量不如主动式供暖，但在暂时不具备主动式供暖的地方，采用被动式太阳房也能大大改善人们的居住条件。

太阳能主动式供暖是以太阳能集热器、管道、散热器、风机或泵以及储热装置等组成的强制循环太阳能供暖系统，它通过太阳能集热器收集热量，又通过循环泵和管道把载热介质（水）输送到储热装置或房间的散热器，从而实现对房间的供热。供暖示意图如图 1-2 所示。

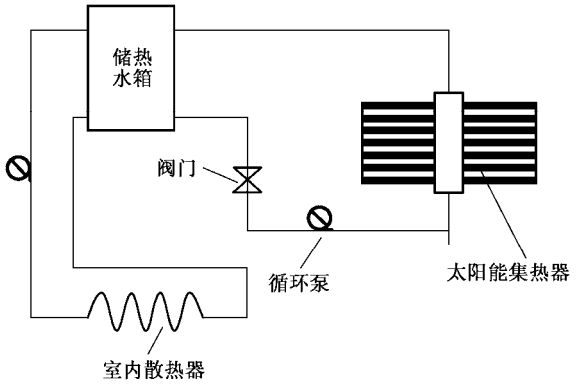



图 1-2　太阳能主动式供暖示意图

随着我国太阳能利用事业的高速发展和人民生活水平的提高，供暖质量较好的主动式太阳能供暖近年来有了很大的发展，目前已成为太阳能供暖的主流。仅北京市有的县区就已安装了几千套太阳能供暖设施，不少企业和个人用户都积极进行太阳能主动式供暖试验示范。

把太阳能主动式供暖和被动式供暖结合起来，可大大提高供暖的综合效益。太阳能供暖正从星星之火形成燎原之势。

本书主要论述的是太阳能主动式供暖，在第 5 章也对被动式供暖进行了介绍，并希望把主动式供暖和被动式供暖结合起来，以求取得最好的经济和社会效益。希望本书能对这呈燎原之势的太阳能供暖之火加一把薪柴，鼓一股东风。

### 1.6.2 太阳能主动式供暖的基本流程

太阳能主动式供暖有多种循环形式，但总的来说有 3 种基本的循环流程。

#### 1．双循环系统

太阳能集热器阵列和储热装置组成一个循环回路，储热装置再和房间换热器组成一个循环回路，两回路相对独立。太阳能集热器不直接向房间供暖，其示意图如图 1-3 所示。

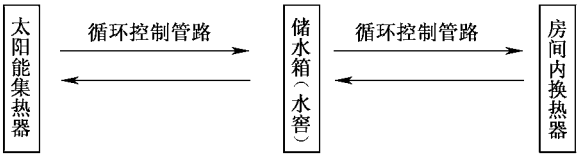



图 1-3 双循环系统

#### 2．三角形循环系统

太阳能集热器、储热装置和房间换热器三者之间每两者都形成循环回路，可按季节通过阀门来调节循环回路，以求系统效率最大化，其示意图如图 1-4 所示。

#### 3．单向循环系统

太阳能集热器—储热装置—辅助热源—房间换热器—太阳能集热器形成一个单向的循环回路。只有在夏季通过阀门调节，太阳能集热器才和储热装置组成循环回路，其示意图如图 1-5 所示。

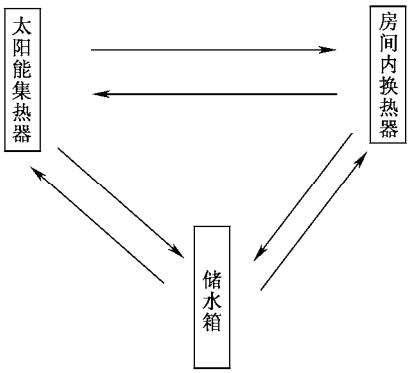



图 1-4 三角形循环系统

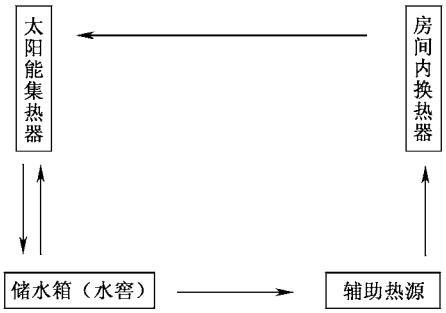



图 1-5 单向循环系统

## 1.7　太阳能供暖与普通热水工程的区别

太阳能供暖与普通热水工程都是太阳能热利用工程，都是利用太阳能集热器收集太阳热能用于工程上，因此很多人把二者等同起来，把热水工程中的设计理念、规程、方法完全移植过来。当然二者之间的确有许多相同之处，但是由于二者在应用目的、地点等方面有很大不同，因此在实际的设计安装中有着许多不同的特点。了解这些不同点，对搞好太阳能采暖工程有重要意义。

### 1.7.1　应用的目的和客户不同

太阳能热水工程与太阳能供暖工程在应用目的、应用的客户和安装场地几个基本方面都是不同的。

（1）普通太阳能热水工程是生产所需要的、特定温度范围的大量热水，这些热水是最终产品，一般被直接用掉；而太阳能供暖需要的只是收集的太阳热能，并把这些热能传输到室内，热水在这里只是工作介质，并不是最终产品。这就决定了二者在循环管路、集热温度、换热部件等多方面的不同。

（2）普通太阳能热水工程的用户一般都是集体用户或企事业、行政单位用户，对系统造价要求往往不太苛求，一般有专门人员管理，对系统设计、系统保障措施、系统运行的完美性要求比较高。而太阳能供暖工程面对的一般是个人家庭用户，无专业人员管理，对系统造价比较敏感、计较，对系统运行的可靠性要求较高。

（3）普通太阳能热水工程一般都是集体单位安装的太阳能热利用工程，规划前一般都有较完整的安装场地或安装平台，故比较容易排布太阳能集热器阵列。而太阳能供暖工程一般都是家庭太阳能热利用工程，太阳能集热器阵列的排布必须与用户的房屋建筑相适应，这就加大了安装排布的难度。

### 1.7.2　使用时间不同

太阳能供暖与普通热水工程在利用时间上有很大不同，太阳能热水工程一般是全年使用，且重点是夏季使用，而太阳能供暖却只是冬季使用，这就造成二者在设计、安装上有很大不同。

太阳能热水工程在设计上首先要考虑全年的应用，要全年的收益最大化。集热器的选择、安装的角度都要考虑全年的使用、尤其是夏季阳光充足时的使用效率。而太阳能供暖则只考虑冬季使用效率的最大化，其集热器的选择、安装的角度都与太阳能热水工程不同。例如，后文中将提到的聚光式真空管集热器，是专门为冬季采暖设计的，只能在冬季使用，在其他季节就没有聚光效果了。

其他如隔热保温措施、控制系统、循环系统、防冻或防过热措施等，因各自的应用季节

不同，也有很大不同。

### 1.7.3 集热温度不同

太阳能供暖与普通热水工程虽然都属于太阳能低温热利用，但其集热温度也是有差异的，这种差异也造成了在集热器的选择、系统设计上的不同。

普通太阳能热水工程的集热温度一般在 50～70℃间，若低于 50℃则往往不具有实用价值。而太阳能供暖工程中，若是采用地板辐射散热，30～40℃的水温同样能用，这在日照不太好的情况下可有较高的效率。反映在集热器的选择上，冬季地板采暖可选用集热温度较低的平板型集热器；而热水工程在冬季应用，只能采用隔热较好、集热温度较高的真空管集热器。

冬季采暖若采用普通散热片散热，则要求供热温度在 70℃以上，这对于平板型集热器和普通密排管型真空管集热器来说，其效率会降低，供热时间缩短，甚至在阳光较差的天气不能供热。而采用聚光式真空管集热器效果会很好，它很容易达到 70℃以上的高温，且有较高的效率。

不同的集热温度反映在系统设计上也有很大不同。平板型或密排管型真空管集热器若用在冬季采暖上，在夏季会产生更大量的低温热水，这些低温热水不能被充分利用，不仅会造成浪费，还可能会影响系统安全。而采用聚光式真空管集热器用于冬季供暖，则在夏季可把系统设计成开水系统，甚至搞成制冷系统，可充分利用夏季的能量。

### 1.7.4 对储存能量的要求不同

普通太阳能热水工程不要求特殊的储能设施，但要求设计的水箱能把每天产生的热水储存下来，故根据集热面积要求有较大的水箱，小到几吨，大到几十吨、几百吨。而太阳能供暖工程则对储热有特殊要求，但一般并不要求大水箱，因为大水箱会大大增加系统的造价、增加热损失，而其效果却不明显。

对只需要日储存的采暖系统，只要利用好房间内部的墙壁、地板、衣物、家具等的储热功能即可，不需要设置大水箱，只需要设置小的膨胀水箱即可。因为即使设置 10t 以上的大水箱，其储存的能量也只够几天用，而这会导致建造成本大幅升高，且热损失大大增加，效率大幅下降。

为应对几天、十几天甚至更长时间无太阳天气的供热问题，一般的储能方法在技术、经济上都不合算，而只能采用地下储能系统。

利用地下水窖储存太阳能可以实现热能的长达几个月甚至一年的季节性储存，可以大量储存热能，其储存量可供数月供暖用。水窖中的水只是作为部分储热材料，其主要功能是作为传热的工作介质。水窖周围的土壤既是隔热介质，又是储热介质，亦是传热介质，而且是最主要的储热材料。把土壤作为储热、隔热、传热材料，几乎是无成本的，因此是最经济的储热系统。

这种地下储热系统规模越大，其热损失越小，储热效率越高，所以最适合大规模的长期热储存。

## 1.7.5　系统设计不同

### 1．循环模式不同

太阳能供暖是三元系统，而普通太阳能热水工程一般是二元系统。

普通太阳能热水工程中一般只包括集热系统和储热系统两个系统，其使用设施作为末端装置，只是分散到各用热水处把热水用掉，一般不与上游的集热和储存两系统发生反馈性关联，因此系统设计时可先不把使用系统考虑在内，只按二元系统设计。其基本流程如图 1-6 所示。

而太阳能供暖系统一般是一个三元系统，包括太阳能集热系统、储热系统、散热系统（用热系统），且 3 个系统相互关联，相互影响。有的在总系统中省掉储热装置，变成纯粹的二元系统，因此，太阳能采暖可以组合成几种不同的循环系统，其流程分别如图 1-7～图 1-9 所示。

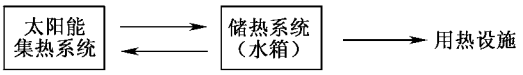



图 1-6　太阳能普通热水工程的流程

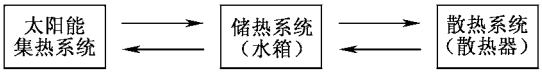



图 1-7　太阳能采暖的基本流程 1

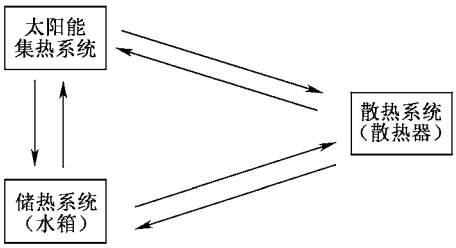



图 1-8　太阳能采暖的基本流程 2

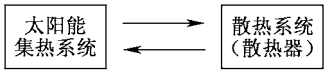



图 1-9　太阳能采暖的基本流程 3

在上述几种基本模式的基础上，可以变换出很多循环系统模式，例如，图 1-8 所示模式可以变换成图 1-10 所示模式。

### 2．控制系统不同

由于太阳能热水工程与太阳能供暖工程在循环系统模式上有很多不同，而其循环是由控制系统控制循环泵来完成的，因此控制系统也有很大的不同。

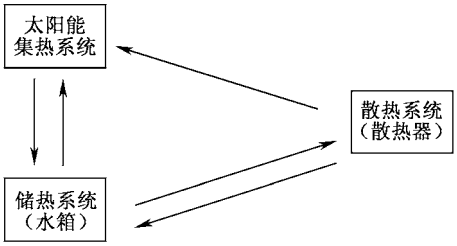



图 1-10　太阳能采暖的基本流程 4

一般来说太阳能热水工程系统较单一，只有一个循环系统，因此一般只由一个控制器控制一个循环泵。

太阳能供暖工程中一般有两个或 3 个循环系统，因此，常需要 2～3 个循环泵以及相应的电子控制系统。各电子控制系统的功能也各有不同，有的是定时控制，有的是定温控制，有的是温差控制等，以满足不同的循环过程。

## 1.7.6　管理维护方式不同

太阳能热水工程和太阳能供暖工程在管理维护方式上也有不同。一般来说，太阳能热水

工程都是集体单位的工程，故一般都设置有专门的专业人员负责管理维护，具有较专业的设备维护技术和丰富的维修经验，可以应对排除各种运行故障。

太阳能供暖工程一般是家庭安装的工程，没有专门设置的专业管理维护人员，而且太阳能供暖工程的循环系统较太阳能热水工程复杂，这就更增加了其维护难度。因此，在太阳能供暖工程设计安装时，更要强调系统的可靠性和免维修性。例如，系统设计时，当性能（热性能、自动化性能等）设计和可靠性设计发生矛盾时，我们宁可牺牲一些性能的先进性，也要保证系统的可靠性；当经济性和可靠性、免维修性发生矛盾，宁可增加些费用也要保证可靠性、免维修性。

### 1.7.7 对集热效果、系统效益的要求不同

#### 1. 热水工程是锦上添花，供暖工程是雪中送炭

太阳能热水工程一般是向集体单位提供热水，以用于洗浴等热水需求。这类工程对热水的需求往往是柔性的，或者是原来单位有常规能源供热水设施，为了节能减排，增加太阳能供热系统；或者是原来没有供热水设施，现在增加了太阳能供热水系统，以提高单位员工的生活水平。上述两种情况对太阳能热水的需求都不是非常刚性、必需不可的。前者一般有常规能源设施作为供热水的保证，可以弥补由于阴天、昼夜等因素造成的太阳能供热的间歇性；后者原来没有热水供应，即对热水的需求不是刚性必需的，其用量可多可少，有则用之，以提高生活质量，无则暂时不用，晚几天用也无碍大局，故也能适应太阳能的不稳定性、间歇性。

太阳能供暖工程则不然，房间内若寒冷，一刻也不舒服。即使过去穷苦的农民，在冬季也要拾一把柴草、烧一盆炭火取暖过冬。条件好一点的，点煤火、烧土暖气御寒。供暖工程是人民生活必需的刚性需求，是人民正常生活的基本保证，且要求供给具有连续性、可靠性。因此，太阳能供暖工程与热水工程相比，其在经济上的位置及在人们生活中的重要性，远较后者重要得多。故在设计上一定要考虑到这点，要求系统的运行稳定可靠。

#### 2. 太阳能热水工程可自成独立供热系统，太阳能供暖工程一般需要辅助热源或季节储能系统

正是由于上述太阳能热水工程在应用上的柔性特点，太阳能热水工程往往可以自成一个独立供热系统，且系统结构较简略、单一。

而对于太阳能供暖工程，由于前面所述的是刚性需求，且要求其有很强的连续性、可靠性，再加上太阳能本身具有的间歇性、不连续性、不稳定性，因此，太阳能供暖工程中必须配合有辅助热源，或者有季节性长期能量储存设施。这就必然增加了系统的复杂性，就必须考虑在总系统中如何使各分系统如太阳能集热系统、辅助热源系统、储热系统、控制系统等之间相互协调和配合。

大面积的太阳能集热器用于房间供暖，必然要求太阳能与建筑相结合，以求取得最大的综合效益，降低系统总造价。新农村建设的一个重要内容是农村建筑的规范化和现代化，而建筑供暖能耗又是农村能耗的一个主要方面。太阳能供暖与建筑相结合，可从根本上改善人

们的生活环境，是建设新能源基地、搞好新农村建设的重要内容。图 1-11 为太阳能供暖与热水工程结合的建筑形式。



（a）



（b）

图 1-11　太阳能供暖与热水工程结合的建筑群

太阳能采暖与新农村建设相结合，甚至在将来实现太阳能光电和光热与建筑相结合，形成国家的新能源建设基地，这将是一个更为广阔的市场。

# 第 2 章 太阳辐射能和集热器面积计算

## 2.1 太阳辐射能

太阳是距地球最近的一颗恒星。它是一个巨大的炽热球状体，直径大约为 $1.39 \times 10^6$km，是地球直径的 109 倍。太阳的体积为 $1.41 \times 10^{18}$km$^3$，是地球的 130 万倍。它的质量为 $1.982 \times 10^{27}$t，比地球质量大 33.3 万倍。而它的平均密度约为 1.41g/cm$^3$，只为地球平均密度的 1/4。太阳的主要组成成分是氢和氦等多种元素，其中氢含量约为 81%，氦的含量为 17%。

### 2.1.1 太阳辐射能简介

太阳所发出的巨大的光和热是其内部热核反应所产生的。根据理论计算，太阳内部小于 0.23 太阳半径以内的区域是一个高温、高压的产能核心。这里的温度大约 $1.5 \times 10^7$℃，占有太阳全部质量的 40%，体积的 15%，产生能量的 90%。在此区域内，太阳拥有的最丰富的元素——氢，氢发生核聚变，释放出巨大的能量。

太阳不停地向宇宙空间各个方向均匀地发射其内部产生的能量，其总量平均每秒钟即达 $4.05 \times 10^{26}$J，相当于每秒钟烧掉 $1.32 \times 10^{16}$t 标准煤所放出的热量。太阳不断地辐射能量，也不断地消耗氢，但是太阳中氢的含量极为丰富，按目前太阳热核聚变的耗氢速率估计，还足够维持上百亿年，所以太阳称得上是一个取之不尽、用之不竭的永久性能源库。

根据理论推算，地球大气上界每秒钟所接收的太阳能仅为太阳总辐射能的 22 亿分之一。尽管如此，每秒钟也有 $1.765 \times 10^{17}$J 之多，折合标煤约 $6 \times 10^6$t，也相当于 $1.723 \times 10^{17}$W 的功率。由此可知，地球每年接收来自太阳的能量约为 $1.51 \times 10^{18}$kWh，此数值是目前全世界每年消耗的总能量的数万倍。实际上，真正到达地球表面的太阳辐射能只有 $8.5 \times 10^{16}$W 左右。

到达地球表面的太阳辐射能大体分为 3 个部分：一部分转变为热能（约 $4.0 \times 10^{16}$W），使地球表面的平均温度大约保持在 13℃，造成适合各种生物生存和发展的自然环境，同时使地球表面的水不断蒸发，造成全球每年约 $50 \times 10^{16}$km$^3$ 的降水量，其中大部分降水落在海洋中，少部分落在陆地上，这就是云、雨、雪、江、河、湖形成的原因；太阳辐射能中还有一小部分（约有 $3.7 \times 10^{14}$W）用来推动海水及大气的对流运动，这便是海流能、波浪能、风能的由来；还有更少一部分（约 $4 \times 10^{13}$W）的太阳能被植物叶子的叶绿素所捕获，成为光合作用的能量来源。

太阳在单位时间内以辐射形式发射出的能量称太阳的辐射功率，也叫辐射通量，它的单位是瓦特（W）。

投射到单位面积上的辐射通量叫辐照度，单位是瓦/米 $^2$（$W/m^2$）。

从单位面积上接收到的辐射能称为曝辐射量，单位为焦耳/米 $^2$（$J/m^2$）。

### 2.1.2　太阳常数

太阳常数 $I_o$ 的数值是指在日地平均距离时，地球大气上界垂直于太阳光线的单位面积上在单位时间内所接受到的太阳辐射的辐照度，其单位一般采用千瓦/米 $^2$（$kW/m^2$）。

我们知道，地球除自转外还循椭圆轨道绕太阳运行，这就说明太阳至地球之间的距离不是一个常数。如：1 月 1 日是近日点，日地距离 $1.471 \times 10^8$km；7 月 1 日是远日点，日地距离 $1.521 \times 10^8$km，一年中每天的日地距离都不一样。对于光和热来说，某一点的辐射强度与距光源（或热源）的距离平方成正比，这就意味着地球大气上界的太阳辐照度随日地距离不同而异。然而，由于日地间距很大，近日点和远日点日地距离差较小，因此地球大气层外的太阳辐照度几乎可看成是一个常数。因此人们使用“太阳常数”来描述大气上界的太阳辐照度。

由于世界各地所定的太阳常数标度不统一，太阳常数的数值有不少差异。现在已能用气球、火箭、卫星等高新技术在空间进行测量，提高了太阳常数的测量精度。1981 年 10 月召开的世界气象组织仪器和观测方法委员会会议上确定太阳常数的数值为 1 367$W/m^2$。

决定太阳常数的数值具有很重要的意义，因为掌握太阳辐射在大气中减弱的规律后，就可以根据已知的太阳常数计算出地面上的太阳辐照度。

### 2.1.3　太阳能资源的特点

太阳能作为一种能源，与煤炭、石油、天然气、核能等矿物燃料相比，具有以下明显的优点。

（1）普遍。太阳光普照大地，无论陆地或海洋，无论高山或岛屿，处处皆有，可直接开发和利用，且无需开采和运输。

（2）无害。开发利用太阳能不会污染环境，它是最清洁的能源之一，在环境污染越来越严重的今天，这一点是极其宝贵的。

（3）巨大。每年到达地球表面上的太阳辐射能约相当于 130 万亿吨标煤，其总量属现今世界上可以开发的最大能源。

（4）长久。根据目前太阳产生的核能速率估算，氢的储量足够维持上百亿年，而地球的寿命也约为几十亿年，从这个意义上讲，可以说太阳的能量是用之不竭的。

太阳能资源虽然具有上述几方面常规能源无法比拟的优点，但作为能源利用时，也有以下缺点。

（1）分散性。尽管到达地球表面的太阳辐射的总量很大，但是能流密度很低。平均来说，北回归线附近，夏季在天气较为晴朗的的情况下，正午时太阳辐射的辐照度最大，在垂直于太阳光方向 1$m^2$ 面积上，接收到的太阳能平均有 1 000W 左右，这样的能流密度是很低的。

因此在利用太阳能时，想要得到一定的转换功率，往往需要面积相当大的一套收集和转换设备，造价较高。

（2）不稳定性。由于受到昼夜、季节、地理纬度和海拔高度等自然条件的限制以及晴阴云雨等随机因素的影响，到达某一地面的太阳辐照度既是间断的又是极不稳定的，这给太阳能的大规模应用增加了难度。为了使太阳能成为连续、稳定的能源，从而最终成为能够与常规能源相竞争的替代能源，就必须很好地解决蓄能问题，即把晴朗白天的太阳辐射能尽量储存起来以供夜间或阴雨天使用，但目前蓄能也是太阳能利用中较为薄弱的环节之一。

## 2.2 太阳光谱分布和太阳能的吸收

### 2.2.1 太阳辐射光谱

现代科学已经证明，包括太阳光在内的一切光线都是一种物质的存在形式，所有的光线都具有波动性和粒子性两重性。这就是说，不管什么光，都是某种频率范围内的电磁波，本质上与普通的无线电磁波没有差别，只是频率较高，波长较短。另一方面，光线又是一粒粒运动着的具有能量、质量和动量的微观粒子所组成的粒子流。这些粒子称为量子或光量子。不同频率（或不同波长）的粒子具有不同的能量，频率越高（或波长越短），能量越大。

由于太阳表面温度大约是 6 000K，因此太阳的辐射谱与 6 000K 的黑体辐射基本一致，如图 2-1 所示，主要由 0.3～3μm 的波长区域组成。根据波长，太阳的光谱大至可以分为 3 个光区：紫外光谱区、可见光谱区、红外光谱区。

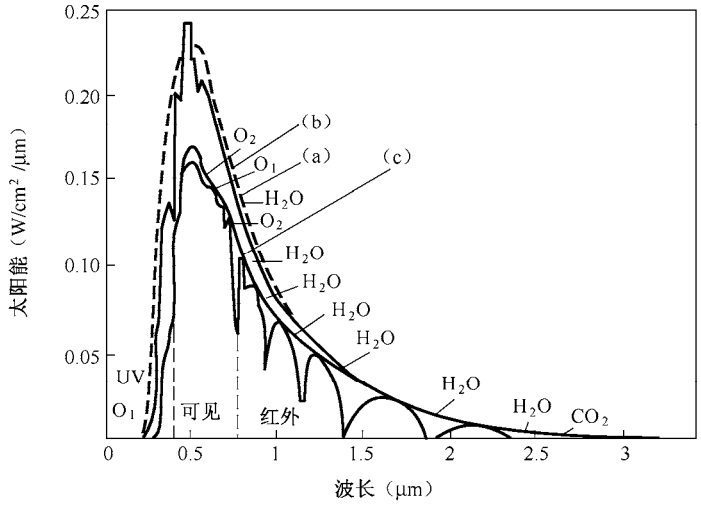



图 2-1 太阳辐射的光谱分布图

（a）大气外 （b）6 000 K 的黑体辐射 （c）海平面上

（1）紫外光谱。

紫外光谱为不可见光，波长小于 0.4μm，有杀菌作用，但大量波长短于 0.3μm 的紫外线对植物生长有害。紫外光谱约占太阳光辐射能量的 8.3%。

（2）可见光谱。

可见光谱又分为红、橙、黄、绿、青、蓝、紫 7 种单色光谱，波长约为 0.4～0.76μm，植物生长（光合作用）取决于可见光谱部分。可见光谱区的能量约占太阳光辐射能量的 40.3%。

（3）红外光谱。

红外光谱也是不可见光谱，波长大于 0.76μm，波长超过 0.8μm 的红外线不能引起光化学反应（光合作用），而仅能提高植物的温度并加速水分的蒸发。红外光谱区的能量约占太阳光辐射能量的 51.4%。

太阳辐射能主要分布在 0.4～3.0μm 之间，即集中在可见光和红外光谱区，表 2-1 列出了各种不同颜色光的波长，表 2-2 列出了不同光区的太阳辐射能量数值。

**表 2-1　　各种不同颜色光的波长**

| 颜　　色 | 波长（μm） | 标准波长（μm） |
|---|---|---|
| 紫 | 0.390～0.455 | 0.430 |
| 蓝 | 0.455～0.485 | 0.470 |
| 青 | 0.485～0.505 | 0.495 |
| 绿 | 0.505～0.550 | 0.530 |
| 黄—绿 | 0.550～0.575 | 0.560 |
| 黄 | 0.575～0.585 | 0.580 |
| 橙 | 0.585～0.620 | 0.600 |
| 红 | 0.620～0.760 | 0.640 |
| 红外光 | 0.76～$10^3$ | |
| 微波 | $10^3$～$10^6$ | |
| 无线电波 | $10^6$～$10^{11}$ | |

**表 2-2　　不同光区的太阳辐射能量数值**

| 光　　区 | 紫 外 光 区 | 可 见 光 区 | 红　外　区 |
|---|---|---|---|
| 波长范围（μm） | 0～0.40 | 0.40～0.76 | 0.76～∞ |
| 相应的辐射能流密度（$W/m^2$） | 95 | 640 | 618 |
| 所占总能量的百分数（%） | 8.3 | 40.3 | 51.4 |

太阳以光辐射的形式将能量传送到地球表面，但由于地球大气层的存在，到达地面的太阳光谱与大气上界的太阳光谱有所不同，其辐射光谱分布如图 2-1 所示，图中阴影部分表示太阳辐射被大气所吸收的部分。

### 2.2.2 太阳光谱的吸收、反射和透过

不同的物质对不同的太阳光谱有不同的吸收率和发射率，有不同的反射率和透过率。太阳能的利用就是根据不同的物质对太阳光谱的这些不同性质制成具有不同功能的太阳能利用装置。

黑色物质能吸收所有光谱的太阳辐射能并转变成该物质的热能，所以太阳能吸收器的表面都是涂以黑色或接近黑色，以吸收太阳辐射能。白色能反射所有光谱的太阳辐射能，所以太阳能接收器表面不能制成白色，正如夏天我们要穿白色衣服，以反射掉投射来的太阳光，免于身体受热。

太阳能吸收器的表面要尽量做成选择性涂层，对太阳光谱辐射有尽量高的吸收率，而在远红外区域，即低温热辐射区域有尽量低的热辐射，以提高太阳能集热器总的集热效率。

玻璃在紫外光区、可见光区和近红外光区是透明的，但是在远红外区域是不透明的。在紫外光区、可见光区和近红外光区域，太阳辐射占绝大部分，所以常用玻璃作为太阳能集热器的透明盖板，以透过这绝大部分的太阳辐射能。集热器吸收太阳光后温度升高，也会向外辐射远红外光，但因为玻璃对远红外不透明，所以远红外热辐射能不易散发出去。通过玻璃这种对太阳光谱最大化的透过率和最低化的远红外透过率（可看成是一种热半导性），实现了太阳能集热器的效率最大化。这就是所谓太阳能温室效应。

对这些问题，更详细的分析请参看第 4 章。

## 2.3 大气透明度

### 2.3.1 到达地球表面上的太阳辐射能

地球大气外的太阳辐射能基本上是一个常数，经过大气层后，要受到一系列因素的影响，实际到达地球表面上的太阳辐射能将有所衰减。一般来说，晴朗天气，赤道上空直射时的太阳辐射能只有大气外的 60%～70%。而阴雨下雪天，地球表面只能接收到一些散射光。据估计，反射回宇宙的能量约占总量的 30%，被吸收的约占 23%，其余 47%左右才能到达地球的陆地和海洋表面，如图 2-2 所示。

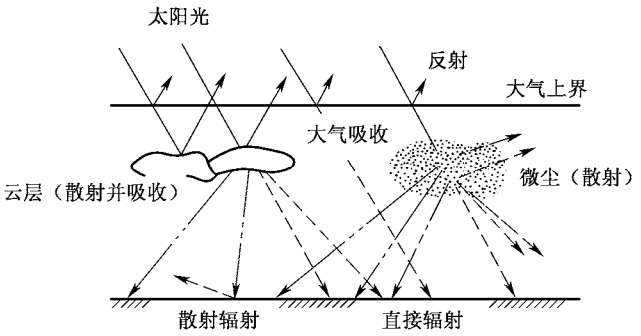



图 2-2 大气对太阳辐射的影响

影响地球表面上太阳辐射能的因素主要有以下几个。

（1）天文因素：日地距离、太阳赤纬角、太阳时角。

（2）地理因素：地理位置，即地区的纬度和经度；海拔高度。

（3）物理因素：大气透明度；接收太阳辐射面的表面物理化学性质，包括表面涂层性质。

### 2.3.2　直接辐射和散射辐射

到达地球表面的太阳总辐射包括直接辐射和散射辐射两部分。

“直接辐射”是不改变方向、直接从太阳辐射来的太阳辐射。在地球大气层上界的太阳能辐射都是直接辐射。

“散射辐射”是指被大气层或云层反射和散射后改变了方向的太阳能辐射。它来自半球天空四面八方的各个方向，所以也称为“天空辐射”或“半球辐射”。

在不同的天气条件下，直接辐射和散射辐射在总辐射中所占的比例差别很大。大气的透明度越差，散射辐射占的比例越大。在晴朗的天气，直接辐射可占总辐射的 80%以上。但在晴天的阴影处，或在阴天，散射辐射可占 100%。在白天的房间内的光线，也都是散射光线。

不管是直接辐射还是散射辐射，对太阳能利用都是很有意义的。平板型太阳能集热器同时利用两种辐射；聚光型太阳能集热器主要利用直接辐射；有一种非聚焦式太阳能聚光器，却能利用大部分散射光（参看第 6 章太阳能聚光器）。

### 2.3.3　大气层对太阳辐射的衰减作用

大气透明度是表征大气对于太阳光线透明程度的一个参数。太阳光线是穿过地球大气之后才到达地面的，因此大气透明度好，到达地面的太阳辐射能就多；相反，大气透明度差，则到达地面的太阳辐射能就少。例如，在天气晴朗无云时，大气透明度很高，我们就会感到太阳很热；而在天空云雾或风沙灰尘很多时，大气透明度很低，就会感到太阳不太热，甚至有时连太阳都看不见。因此大气透明度与天空云量和大气中所含灰沙等杂质的多少有关。大气层与其他介质一样，也不是完全透明的介质，大气的存在是使地面太阳辐射衰减的主要原因，它对太阳辐射的衰减可归结成以下 3 种作用的结果。

（1）吸收作用：太阳光谱中的的 X 射线及其他一些超短波在电离层被氮、氧等大气成分强烈地吸收，大大减少了这些射线到达地球表面的量，避免了这些射线可能对人类、对动植物的伤害；大气外层中的臭氧层对于紫外光区域有强烈的选择性吸收能力，避免了紫外光对地球表面生物的伤害；大气中的气体分子、水汽、二氧化碳对于波长大于 0.69μm 的红外区域的选择性吸收；大气中悬浮的固体微粒和水滴对于太阳辐射中各种波长射线的连续性吸收。

（2）散射作用：大气中悬浮的固体微粒和水滴对于太阳辐射中波长大于 0.69μm 的红外区域的连续性散射。

（3）漫反射作用：大气中悬浮的各种粉尘对于太阳光的漫反射，它与大气被污染而变混浊的程度有关。

上述现象就称为大气衰减，它与太阳光线经过大气的路径长短有关，路径越长，衰减越历害，随着太阳在地面上方的高度不同，经过路径的长度也不同，其衰减程度也不同。为很

好地理解这一问题，我们引入大气质量的概念。

### 2.3.4 大气质量

图 2-3 表明了太阳光线在太阳不同高度时经过地面上方大气的情况。

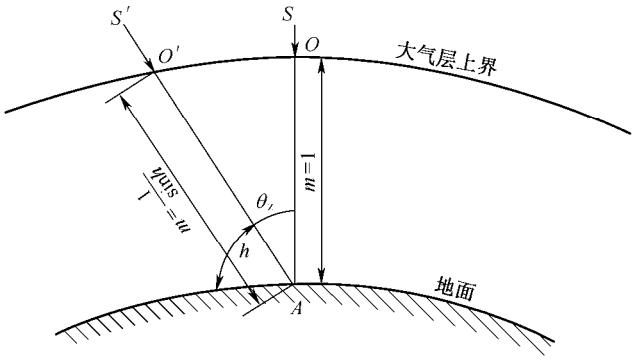



图 2-3 大气质量示意图

图中 $A$ 为海平面，$O$ 为大气层上界，$S'$、$S$ 表示太阳的不同位置。当太阳位于天顶 $S$ 时，它在海平面上方的高度为 90°，太阳光到达海平面所经过的路程最短，受大气衰减作用的影响也最小，这就是为什么中午太阳光最强的原因。

为了能够方便地研究太阳辐射受地球大气衰减作用的影响，将太阳辐射通过大气层路径的长度，即穿过大气层的厚度称为大气质量，以 $m$ 表示。并且把垂直于海平面的整个大气厚度定义为“一个大气质量”，即 $m = 1$。如图 2-3 所示，$A$ 为地球海平面上的一点，$O$ 是太阳 $S$ 在天顶位置时大气层上的点，$S'$是太阳的实际位置，它通过大气层上的界的 $Q'$点射到 $A$ 点，在忽略地球表面曲率和大气折射的影响条件下，这时的大气质量为：（$h$ 为太阳高度角）

$$m = \frac{1}{\sin h} \tag{2-1}$$

很显然地球大气层上界的大气质量 $m = 0$

表 2-3 列出了在不同太阳高度角下，按上式计算的大气质量 $m$ 值。

**表 2-3　　不同太阳高度角下的 *m* 值**

| 太阳高度角 $h$ | 90° | 80° | 70° | 60° | 50° | 40° | 30° |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 大气质量 $m$ | 1.000 | 1.015 | 1.064 | 1.155 | 1.305 | 1.555 | 2.000 |
| 太阳高度角 $h$ | 25° | 20° | 16° | 12° | 8° | 5° | 4° |
| 大气质量 $m$ | 2.37 | 2.92 | 3.63 | 4.81 | 7.18 | 11.5 | 14.3 |

从表 2-3 中可以看出，太阳高度角越小，即太阳在地面上方的高度越低，则大气质量越大，太阳辐射受大气的衰减作用越大。太阳接近地平线时，大气质量是中午时的的几十倍，此时的太阳辐照度很低。

此外，大气透明度与海拔高度有很大关系。一般来说，海拔越高，大气透明度越高；反

之，则大气透明度越低。因此，海拔越高则太阳直接辐射强度越大。由此可见，海拔越高的地方太阳能利用的条件越好些，比如我国的青藏高原大部分地区处于海拔 3 000～5 000m，利用太阳能极其有利。

## 2.4　我国太阳能资源的分布

据估算，我国陆地每年接收的太阳能辐射量约为 $5.02 \times 10^{22}$J，相当于 1.7 万亿吨标准煤，数量是非常巨大的。全国各地太阳能年辐射总量达 3 340～8 370MJ/m$^2$，中值为 5 860MJ/m$^2$。因此，研究和发展太阳能的利用对我国今后能源与电力的发展有着特别重要的意义。

我国太阳能资源分布的主要特点是：太阳能的高值中心和低值中心都处在北纬 22°～35°这一带，青藏高源是高值的中心，那里的平均海拔在 4 000m 以上，大气透明度好，纬度低，日照时间长。有“日光城”之称的拉萨市，年平均日照时间为 3 005.7 小时，相对日照为 68%，太阳年总辐射量为 816kJ/cm$^2$。全国以四川省的太阳年辐射总量为最小，那里雨多、雾多、晴天较少。素有“雾都”之称的重庆市，年平均日照时数仅 1 152.2 小时，相对日照仅 26%，年平均晴天 24.7 天，阴天 244.6 天，年平均云量高达 8.4，太阳年总辐射量为 335～419kJ/cm$^2$。就全国而言，西部地区的太阳年总辐射量高于东部地区，除西藏和新疆两个自治区外，基本上是南部低于北部。

在北纬 30°～40°地区，我国太阳能的分布情况与一般太阳能随纬度变化的规律相反，由于南方多数地区云雾雨多，太阳辐射能不是随着纬度的增加而减少，而随是着纬度的增加而增加。

从太阳能资源开发利用的角度看，还应考虑年日照时数和月平均气温等因素，表 2-4 列出了全国太阳能利用区划系统及分区特征，将全国分为 4 个区：资源丰富区、资源较丰富区、资源一般区和资源贫乏区。

**表 2-4**　　**全国太阳能利用区划系统及分区特征**

| 分　　区 | 太阳辐照度（MJ/m$^2$・年） | 主 要 地 区 | 月平均气温≥10℃、日照时数≥6 小时天数 |
|---|---|---|---|
| Ⅰ 太阳能资源丰富区 | ＞6 280 | 新疆南部、甘肃西北一角 | 275 左右 |
| | | 新疆南缘、西藏北部、青海西部 | 275～325 |
| | | 甘肃西部、内蒙古巴颜淖尔盟西部、青海一部分 | 275～325 |
| | | 青海南部 | 250～300 |
| | | 青海西南部 | 250～275 |
| | | 西藏大部分 | 250～300 |
| | | 内蒙古乌兰察步盟、巴颜淖尔盟及伊克昭盟一部分 | >300 |

续表

| 分　区 | 太阳辐照度（$MJ/m^2$·年） | 主 要 地 区 | 月平均气温≥10℃、日照时数≥6 小时天数 |
|---|---|---|---|
| Ⅱ 太阳能资源较丰富区 | 5 020～6 280 | 新疆北部 | 275 左右 |
| | | 黑龙江、吉林大部、内蒙古呼伦贝尔盟 | 225～275 |
| | | 内蒙古锡林郭勒盟、乌兰察布、河北北部一隅 | ＞275 |
| | | 吉林、辽宁、长白山地区 | ＜225 |
| | | 山西北部、河北北部、辽宁大部分、河北大部分、北京、天津、山东西北部 | 250～275 |
| | | 山西南部、河南大部及安徽、山东、江苏部分 | 200～250 |
| | | 内蒙古伊克昭盟大部分 | 275～300 |
| | | 陕北及甘肃东部一部分 | 225～275 |
| | | 青海东部、甘肃南部、四川西部 | 200～300 |
| | | 四川南部、云南南部一部分 | 200～250 |
| | | 西藏东部、四川西部和云南北部一部分 | ＜250 |
| | | 云南东南一部分 | 175 左右 |
| | | 云南西南一部分 | 175～200 |
| | | 福建、广东沿海一带 | 175～200 |
| | | 海南 | 225 左右 |
| Ⅲ 太阳能资源一般区 | 4 190～5 020 | 湖南、安徽、江苏南部、浙江、江西、福建、广东北部 | 150～200 |
| | | 湖南东部和广西大部分 | 125～150 |
| | | 湖南西部、广西北部一部分 | 125～175 |
| | | 陕西南部 | 150～175 |
| | | 湖北、河南西部 | 125～175 |
| | | 四川西部 | 150～175 |
| | | 贵州西部、云南东南一隅、广西西部 | 150～175 |
| Ⅳ 太阳能资源贫乏区 | ＜4 190 | 四川、贵州大部分 | <125 |
| | | 成都平原 | <100 |

Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ类地区是我国太阳能资源较丰富地区，占全国总面积的 2/3 以上，都具有利用太阳能的有利条件。

## 2.5　太阳能集热器面积的一般计算方法

### 2.5.1　供暖保证率

根据用热量来确定集热器的面积，这似乎是个简单的问题，但是由于太阳能有其间歇性、不稳定性、能量密度较低等特点，往往单靠太阳能不能独立完成任务，常常要设置辅助热源，所以就提出保证率问题，即太阳能所提供的热量占所需总热量的百分比。

到底太阳能的保证率应是多少合适？不同的地区、不同的条件、不同的节能理念有很大的不同。建设部编写的“太阳能供热采暖工程技术规范”中提出的采暖保证率如表 2-5 所示。

**表 2-5　　不同地区太阳能供热采暖系统的太阳能保证率 *f* 的推荐选值范围**

| 资 源 区 别 | 短期蓄热系统太阳能保证率 | 季节蓄热系统太阳能保证率 |
|---|---|---|
| Ⅰ资源丰富区 | ≥50% | ≥60% |
| Ⅱ资源较丰富区 | 30%～50% | 40%～60% |
| Ⅲ资源一般区 | 10%～30% | 20%～40% |
| Ⅳ资源贫乏区 | 5%～10% | 10%～20% |

我国大部分地区属于Ⅱ、Ⅲ类资源较丰富和资源尚可的一般地区。根据表 2-5 提出的太阳能供热采暖的保证率，Ⅱ类资源较富区达到 30%就达标了，Ⅲ类资源一般区达到 10%就达标了。这显然是一个比较低的达标标准，可能是考虑到全国各地各种不同的条件都能使用。

北京地区在奥运会前后几年也搞了不少太阳能采暖工程，例如何梓年等主编的《太阳能供热采暖应用技术手册》中收录了北京市几家太阳能采暖工程，太阳能的采暖保证率都在 30%～40%之间。

（1）北京市平谷区太平庄村太阳能采暖项目

建设时间：2007 年　　项目规模：69 户　　建筑面积：111m$^2$

集热器面积：14.4m$^2$　　安装倾角：55°　　太阳能保证率：30%

（2）北京市平谷区挂甲峪村太阳能采暖项目

建设时间：2005 年　　项目规模：152 户　　建筑面积：172～207m$^2$

集热器面积：28m$^2$　　安装倾角：30°　　太阳能保证率：40%

太阳能供热采暖的保证率定为多少较适宜？这是在设计太阳能供热采暖工程时必需要首先要解决的问题，只有这个问题定下来，才能确定太阳能集热器的面积。当然对于这个问题也有争议，从节能减排角度来说，我们希望太阳能保证率越高越好，但从技术上是否可能实现？从经济上是否合算？

北京市的太阳能采暖工程保证率之所以较低，其中一个原因可能是考虑到太阳能集热器的全年应用。较小面积的集热器在夏季仍能得到较充分的利用，可用来提供洗浴等生活用热水，集热器的全年利用率较高，系统的总造价较低。而较大的保证率必然要求安装大面积的集热器，这一方面会大大增加系统的造价，另一方面，集热器夏天还会产生大量热水，这大量热水仅仅供洗浴等用水远远用不完，造成浪费，而且系统可能过热，影响系统的安全运行。

但是，过低的保证率必然要求增加其他辅助热源，当辅助热源所占的比例超过 50%时，辅助热源就成了主要热源，而太阳能能则成了辅助热源，“主”、“辅”倒置了。北京地区的采暖示范点大都是奥运会前后由政府出资支持的项目，若完全市场化运作，是否可行？有不少实际从事太阳能采暖工程的技术人员和企业在实际的工作中体会到，过低的太阳能采暖保证率往往不能被人们所接受。这主要有以下几方面的原因。

其一，最方便的辅助热源是电能，在实际工程中，常常用电能作为辅助热源，一旦辅助热源所占比例较大，尤其是大于 50%，则系统将消耗大量宝贵的电能，这会大大增加用户的用电成本，不被用户所接受，而且大量用电，国家电网也不能承受。

其二，即便是小的太阳能保证率，集热器面积小些，但其他部件如水箱、控制设备、循环泵等循环系统的配件也不能少，这就使利用太阳能降低成本的作用大打折扣。

实际上，近些年来有不少太阳能企业和个人用户都在进行太阳能采暖试验，为了达到基本用太阳能来供暖，他们加大了集热器面积，使集热器的面积与采暖面积之比达到 1:2～1:3，从而使太阳能的保证率在Ⅱ、Ⅲ类地区达到 60%～80%，甚至 80%以上。

北京市昌平区某别墅区处于北京市的远郊，没有集体供热，各住户都是自己解决冬季采暖问题的。

以某栋别墅为例，该小楼总建筑面积约 300m$^2$，集热器面积约 60m$^2$，不设储热水箱，只设小的补水箱，该补水箱同时用于应对系统中水的热胀冷缩产生的“呼吸”效应。房屋做了较好的外墙保温，进楼的门口设双道门。辅助热源采用 3 匹的热泵。在采暖期的前期，包括还不到采暖期的 10 月后期至 11 月前期，太阳能集热器对整个小楼供暖，效果良好。当天气寒冷后，在大部分采暖季节，太阳能只向一层住人的卧室供暖，基本能保证 15℃以上的温度，只有在冬至前后一个月左右的时间供热不足，需要开动热泵进行辅助加热。

在采暖期的后期，天气转暖，又可以向整个小楼供暖。当 3 月中旬，国家规定的采暖期结束后，一般集体供热都已停止，但自家的太阳能供暖却可一直供到天气暖和为止。到夏季，一个很简单的办法是用遮阳网把太阳能集热器盖上，解决夏季系统过热问题。

在该采暖系统中，太阳能集热器面积和房屋建筑面积之比应按一层楼面积计算，即 60:150=1:2.5，若按两层楼面积计算，则为 60:300=1:5。

更多的企业太阳能采暖工程所采用的太阳能集热器的面积与房屋的建筑面积之比都是在 1:2～1:3 之间，基本上都是以太阳能采暖为主，且效果良好。

### 2.5.2 采热负荷计算

下面我们用计算的方法来分析太阳能采暖的保证率和集热器面积。

一个普通家庭可按 60～100m$^2$ 的建筑采暖面积计算，其中包括 2～3 间卧室，另有中厅

和厨房等（人口多的可适当增加面积）。

为保证太阳能采暖的建筑有较好的采暖效果，要对房屋进行隔热保温处理，一般方法是在房屋外墙粘铺一层 5～8cm 厚的聚苯乙烯泡沫板隔热层，以降低其散热量。对这类房屋的采暖供热量，根据国家标准（参看附录），大都在每平方米约 20W。不过这些标准都是依据城市的楼房制定的，楼房的散热面平均到每个南北跨度的大房间，一般只有南墙和北墙两个较小的散热面，左右和上下四面楼板和墙壁大都是与其他房间共有的，理论上不存在散热问题。但对平房而言，除南墙北墙外，至少还有一个屋顶面散热问题，在同样对外墙进行隔热保温的情况下，其热损失肯定要大些。因此，我们把平房的能耗按 25～30W/$m^2$ 来估算。

按 30W/$m^2$ 计算，则 100$m^2$ 采暖面积每天的总用热量为：

$$30W/m^2 \times 100m^2 \times (3\,600s \times 24h)=259\,200\,000J \approx 62\,200kcal$$

若按 25W/$m^2$ 计算，则 100$m^2$ 采暖面积每天的总用热量为：

$$25W/m^2 \times 100m^2 \times (3\,600s \times 24h)=216\,000\,000J=51\,600kcal$$

### 2.5.3　太阳能集热器面积

在晴朗的天气里，在地球表面，垂直于太阳光辐射平面上的太阳辐射能大约是 1 000W/$m^2$，考虑到大气中常有灰尘、云雾等影响其透明度，我们可按 700～800W/$m^2$ 计算。

由于是在冬季采暖，我们取每天的日照时间为 6h 来计算，即取当地真太阳时上午 9 点至下午 3 点。（实际日照时间要长些，9 点前和下午 3 点后也有日照，正可补充接近 3 点和 9 点时阳光斜射造成的不足。）

太阳能集热器的集热效率可按 40%计算，则太阳能集热器的有效功率为：

$$700～800W/m^2 \times 40\% = 280～320W/m^2$$

为计算方便，我们取太阳能集热器的有效功率为 300W/$m^2$。

现在假定一个家庭房屋的建筑面积为 100$m^2$，冬季采暖需要 30W/$m^2$ 的供热量，则其所需要的集热器面积为：

$$259\,200\,000J \div (300W/m^2 \times 3\,600s \times 6h) \approx 40m^2$$

若按 25W/$m^2$ 的采暖供热量计算，则其则所需要的集热器面积为：

$$216\,000\,000J \div (300W/m^2 \times 3\,600s \times 6h) \approx 33m^2$$

集热器面积与采暖面积之比约为：

$$40:100 = 1:2.5$$

和

$$33:100 \approx 1:3.0$$

即每 1$m^2$ 集热器可向 2.5～3.0$m^2$ 的房间供暖。

在太阳能资源不同的地区，各地阴云天气占一定比例有很大差异，上述比值可根据当地实际情况进行修正，在日照较好的地区可取 1:2.5～1:3，在日照较差的地区可取 1:2～1:2.5。

由于各地的日照情况差别比较大，太阳辐射的有效功率会有较大的差异，故上述计算结果会有一定的不确定性，但至少从计算中可以看出，由太阳能承担主要的供暖功能是完全可能的。

## 2.6 太阳能直接供暖系统集热器面积的确定

太阳能直接供暖系统集热器面积的确定可分以下几种情况考虑。

**第一种情况，该采暖工程处在我国太阳能资源丰富的Ⅰ、Ⅱ类地区。**

这些地区太阳能资源比较丰富，晴天较多，几乎天天有太阳，很少连续多天阴天，在这些地区可以实施单纯依靠太阳能直接供暖，或配置一个较大的水箱能储存一两天的供暖用热；或采取其他一些临时御寒措施，如：火炉、火炕、电热毯等。

在Ⅰ类地区，集热器面积与房屋建筑面积之比可取 1:3，每 100m$^2$ 的建筑面积采用 33～35m$^2$ 的太阳能集热器即可。

在Ⅱ类地区，集热器面积与房屋建筑面积之比可取 1:2.5，每 100m$^2$ 的建筑面积采用 40m$^2$ 的太阳能集热器即可。

**第二种情况，该采暖工程处在我国黄河以北传统的采暖区，属Ⅲ类太阳能资源区。**

这类地区太阳能资源一般，常出现几天甚至十几天的阴天，但是有的家庭出于经济上和管理上的考虑，不愿意再搞辅助热源，也不愿增加储热系统，只搞单纯的太阳能供暖。对于可能出现的阴雪天气，或者家里有冷暖空调可临时启动，或有火炕、电热毯夜间御寒，或是想坚持几天过去就行了。对此应采取如下措施。

（1）房屋的隔热保温要做好，尽量按被动式太阳房设计（参看第 5 章被动式太阳房）。

（2）若有可能，尽量在南墙前面增设“阳光间”（见第 5 章），不少北方农村有在南墙外增设这种用玻璃封闭的阳台夹层间的习惯，这样可增加房屋本身接收阳光的面积和隔热保温能力。

（3）太阳能集热器面积尽量取较大值，集热器面积与采暖面积的比值可取 1:2.5 甚至取 1:2，例如对 100m$^2$ 的采暖面积，集热器面积应取 40～50m$^2$。

采取以上措施，就可以在晴天使房间吸收较多的太阳能，保持较高的室内温度，以应对可能的连续阴天。若在晴天房屋能保持 18～20℃的温度，即使连续 5 天阴天，每天降温 1℃，最后也能保持 13～15℃的较适宜居住的温度。

**第三种情况，该采暖工程处在我国长江以北非传统的采暖区，属资源Ⅲ类地区。**

按国家规定，这些区域属于非采暖区，但实际上在冬季也非常寒冷、当地人们也有采暖的要求。随着人民生活水平的提高，很多家庭也在购置冷暖空调、电暖器等来御寒，但大量使用电能会造成电网难以承受之重，也会增加家庭的巨大负担。太阳能采暖的出现给这些地区的采暖带来了新的契机。

这些地区的采暖有以下特点。

（1）相对于北方传统采暖区，这里环境温度仍偏高些，需要的供暖热量也较小些。

（2）当地本无供暖习惯，增加太阳能供暖，等于改善了人们的居住环境，一般无需再苛求稳定的供暖，故不需要增设辅助热源或增加储热设施。

（3）当地夏季一般较炎热，许多家庭备有冷暖空调，在冬季的阴雪天可临时用空调供热。

（4）由于环境温度相对较高些，若房屋隔热保温做得较好，则冬季阴雪天室内温度的降低也较慢，故可较长时间保持较适宜的居住温度。

根据上述特点，该地区采暖用太阳能集热器的面积可以取得较小些，集热器面积与采暖面积之比可取 1:3～1:4，100m$^2$ 采暖面积可选取集热器面积 25～30m$^2$。

选取较小面积的集热器，一方面可降低系统造价，另一方面，可减少夏季集热器的产热量，有利于夏季集热器的使用和维护。

## 2.7　有辅助热源的采暖系统太阳能集热面积的计算

由于昼夜交替、阴云天遮阳，太阳能具有间歇性、不稳定性，因此，用太阳能采暖一般要有辅助热源。但由于不同的辅助热源有不同的特性，故对太阳能集热器的面积也有不同的要求。

### 2.7.1　电辅助热源

用电热管直接加热作为辅助热源，具有设施简单、投资小的优点，但耗电量大是其最大缺点。电辅助热源一般应在日照天数多、电量较充裕的地区采用，如我国的青海、甘肃等地。由于电能是宝贵的且用途极广的能源，故在采暖中只能作少量的辅助热源使用。对用电直接加热作为辅助热源的太阳能供热采暖系统，集热器面积应尽量大些，至少要保证在晴朗的天气里单独用太阳能就可担负起向房间供热的任务。最好要做到在晴天的热量有些富余，把热量短期（十几天内）储存起来，以应对连续阴天无阳光辐射时使用。

其集热面积应按 1:2～1:2.5 的比值设计，对 100m$^2$ 的房屋建筑面积，至少应设计 40m$^2$ 的集热器，甚至更多些。

### 2.7.2　热泵

热泵作为辅助热源，其特点是成本投资比电热管大得多，但其耗电量不到电热管耗电量的 1/2（关于热泵请参看第 9 章）。

热泵的作用与水泵相似，水在自然状态下是从高处向低处自然流动，水泵的作用是把水泵向高处；热量在自然状态下是从高温处自然流向低温处，热泵的作用是把热量从低温处泵向高温处。高度差较小时，同一功率的水泵可以泵出较多的水流到高处；同样地，当温差较小时，同一功率的热泵能把较多的热量从低温处泵到高温处。

热泵的一个重要性能参数是能效比，它所表述的意思是：在规定的标准条件下，每千瓦电能可把多少千瓦的热量从低温处泵到高温处。例如，若一个热泵的能效比是 4，则这个热泵在标准条件下，每消耗 1kW 的电能，可以把 4kW 的热能从低温处泵到高温处。也就是说，为获得同样大的热量，采用热泵加热所用电能只是用电热管加热所用电能的 1/4。

在实际应用中，由于不可能处处是标准条件，热泵的能效比会随着不同的应用条件而有所不同，应用的温差越大，能效比越小；温差越小，能效比越大。所以热泵一般应在不太寒冷的地区使用，若在寒冷的地区使用，热泵的蒸发器会结霜，这会大大增加换热阻力，从而使热泵效率大大降低。

在我国北方，由于天气较寒冷，一般热泵的能效比只有 2 左右。在冬季不太寒冷的地区，采用热泵作为辅助热源供暖是个不错的选择，其能效比可达 3 左右。

由于热泵同时具有启动快、操作方便、自动化程度高、耗电量小、运行成本低的特点，因此，对于以热泵为辅助热源的系统，太阳能集热器的面积的确定，原则以够当天供暖用为基准。对于不太寒冷的地区，可采用 1:3～1:3.5 的比值计算，100m$^2$ 的建筑面积，可采用 30m$^2$ 的太阳能集热器。对于较寒冷的地区，要尽量少用热泵，集热器面积可采用 1:2.5～1:3 的比值计算，100m$^2$ 的建筑面积，可采用 35～40m$^2$ 的太阳能集热器。

### 2.7.3 燃气锅炉

燃气锅炉的特点是使用方便，但设备投资大，消耗宝贵的煤气、天然气等常规能源，而且必须在气源充足的地方才能使用，所以使用面不可能太广。

在应用燃气锅炉作辅助热源时，应尽量减少燃气的用量，所以太阳能集热器面积的确定，可以和用电作辅助热源时一样。

### 2.7.4 柴草锅炉

用柴草作辅助热源与太阳能采暖相配合，是最好的配合系统。

农作物秸秆、柴草本身也是绿色能源，有柴草资源的地方也可独立用柴草作为供暖的能源。柴草的一个重要特点是易点燃、启动快，很容易与太阳能相配合。

有柴草资源的地方，可根据自己资源的充足程度来决定太阳能集热器的面积，太阳能的保证率可以在 10%～80%之间浮动。

若柴草资源很充足，太阳能采暖的保证率最低可达 10%，其他 90%的热量都由柴草供给。这样做的好处是可最大限度地降低太阳能集热系统的一次性造价，能最大限度地提高太阳能设施的利用率。使太阳能集热器冬季用于采暖，夏季用于产生洗浴用热水。

若柴草资源相对不是那么充足，可以根据实际情况提高太阳能供暖的保证率，以求得综合效益的最大化。

### 2.7.5 煤锅炉

对于用燃煤锅炉作为辅助热源，可分两种情况来分析。

一种是纯供暖锅炉。这种锅炉一天 24h 都不灭火，晴天的白天由太阳能供暖，锅炉处于压火（封火）状态，晚上由锅炉供热，所以上面计算的采暖热负荷中，一半由太阳能承担，另一半由燃煤锅炉承担。太阳能的保证率有 50%就可以了，当然太阳能集热面积有上面计算结果的 50%即可。

当然用户也可根据自己的实际情况，适当增加或减少太阳能的保证率。若煤炭资源紧缺、

价格高，而太阳能资源相对较丰富的地区，可适当增加太阳能在采暖中的保证率，以提高系统的整体综合效益。

若当地煤炭资源相对充裕，而太阳能资源相对贫乏，若提高太阳能采暖的保证率，会大幅提高太阳能集热器的面积，增加系统的成本。在这种地区可适当降低太阳能的保证率，集热器面积与采暖面积的比值可为 1:6～1:8，以降低综合系统成本。冬季太阳能辅助供暖，夏季太阳能提供洗浴等生活用热水。

第二种是炊事采暖两用炉。这种炉具在白天也要工作，在做饭时，同样也有余热供暖，利用每天 3 顿饭的和封火时的余热供暖以及夜晚供暖，其供热量大约占总供暖能耗的 50%～60%或更高，按这种情况估算，则其太阳能的保证率应在 40%～50%之间或更低些。

当然用户也可根据自己的实际情况适当提高太阳能的保证率，以减少夜间的锅炉的供热。尤其是在煤炭资源紧缺、价格较高的情况下，把太阳能的保证率提高到 50%～70%也可以。

## 2.8　有能量储存系统的太阳能集热面积的确定

太阳能储存系统有两种：短期储能系统和季节性长期储能系统。短期储能系统储存的热能只供给几天或十几天的阴天使用，季节性长期储能是把春、夏、秋季收集的太阳能储存起来供冬季用。两种不同的储能系统要求的集热器面积不同。下列因素影响着集热器面积的确定。

（1）热损失。在不同的储能系统中，热储存的时间有很大不同，其热损失量差别很大。

（2）设计储存的热量在冬季采暖用能中所占的比例有较大的差异。

（3）太阳能资源的丰富程度有很大差异。

（4）不同的设计思想、设计理念，不同的设计方案，决定了不同的集热器面积。下面分几种设计方案来分析。

① 第一种方案。

基本设计理念：采用短期储能系统，尽量直接利用太阳能供暖，太阳能集热器收集的热量，除能在晴天满足当天 24h 供暖所需要的热量外，还要有剩余，以便储存起来供阴天或日照较差时使用。这种设计适合在太阳能资源Ⅰ、Ⅱ类地区使用。

这种设计理念是首先考虑在冬季当天接收的太阳能除当天使用以外，还要有富余以供储存。要满足这一点，集热器面积与采暖面之比是 1:2～1:2.5，100$m^2$ 建筑面积的房屋，集热器面积不应少于 40$m^2$，在日照一般的地区要更多些，达到 45～50$m^2$。

② 第二种方案。

基本设计理念：设计小容量的长期储能系统，把春、夏、秋季的太阳能储存起来供阴雪天供暖用，太阳能集热器四季都可工作，但冬季晴天太阳能集热器收集的热量要能满足当日供暖用。

这种设计理念是优先考虑在冬季当天接收的太阳能要够当天使用。要满足这一点，集热

器面积首先必须按2.5.3中所述的方法确定集热器面积，集热器面积与采暖面积之比是1:2.5～1:3，如 100m$^2$ 建筑面积的房屋，集热器面积在 35～40m$^2$ 之间。至于存储热量的大小则放在第二位考虑。实际上用这种方法确定的集热器面积，只要全年都工作运行，其储存的能量一般够冬季用。

③ 第三种方案。

基本设计理念：尽量设计小面积的太阳能集热器，使集热器一年四季都能有效地工作，主要利用储存的热量在冬季供暖。

把春、夏、秋季的太阳辐射能收集起来储存在地下，供冬季采暖用，这种储热系统要求有较大的储热量，其储热系统越大，储热效率就越高，计算表明（参看第 4 章），至少有 60m$^2$ 的集热器全年工作进行能量储存，才有较好的系统效益。对这种储热系统，理论上计算只有第一种方案 1/3 的集热面积即可。实际上，为了提高系统的可靠性，可采用第一种方案 1/2 的集热面积。集热器面积与建筑面积的比值可采用 1:5，300m$^2$ 的建筑面积可采用 60m$^2$ 的集热器面积。详细论述可参阅第 4 章储能部分。

# 第3章 太阳视运动规律和太阳能集热器安装角度

要想利用太阳辐射能，必须要把太阳能收集器对准太阳安装，而太阳又是时时刻刻在运动着的，为此，我们必须懂得一年四季太阳运动的规律。

通过直接观察可以看出，日月星辰都是在我们头顶上方半球形的天空上运动的，因此，研究天体的运动，包括太阳运动规律，就需要建立天球坐标系。这需要懂一点球面三角的基本知识，但是一般教科书很少有球面三角的内容。为了读者阅读方便，本章把与本书有关的球面三角内容简要介绍一下，供感兴趣的读者参考。

## 3.1 球面三角基本知识

### 3.1.1 球面几何的一些概念

#### 1. 大圆、小圆、极

任一平面与球相截，所得截线是一个圆。如果平面过球心，所得的圆是大圆；平面不过球心，所得的圆叫小圆。

如图 3-1 所示，圆 *CD* 是小圆，圆 *AB* 和圆 *PBP'*都是大圆。

垂直于球面上已知圆（大圆或小圆）所在平面的球的直径的端点叫这个圆的极。

如图 3-1 中，*P* 和 *P'*是小圆 *CD* 的极，也是大圆 *AB* 的极。极到圆周上各点距离相等，这距离叫做极距。大圆的极距为一个象限（90°）。

#### 2. 球面角

球面上两个大圆弧相交所成的角叫球面角，其交点叫球面角的顶点，两个大圆弧叫球面角的边。图 3-1 中，球面角 *APB* 的顶点是 *P*，边为 *PA* 和 *PB*。

球面角的大小是以过顶点所作两边的切线的夹角来度量的。

在图 3-2 中，$\angle AOB$ 是由两个半大圆所在的平面 *PAP'*和 *PBP'*组成的二面角，*PE* 和 *PD* 是切线，$PE \parallel OB$，$PD \parallel OA$，故 $\angle DPE = \angle AOB$，即球面角 $APB = AB$ 弧。

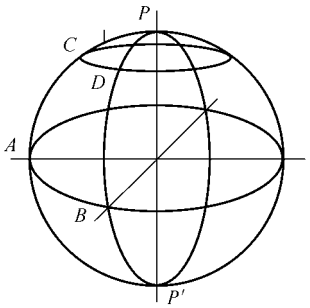



图 3-1 大圆、小圆和极

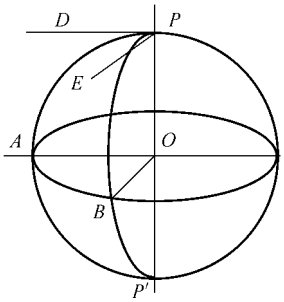



图 3-2 球面角

这就是说，球面角与以其顶点为极而夹在两边间的大圆弧同度。

### 3．球面三角形

球面上相交于三点的大圆弧所围成的图形叫球面三角形。这 3 个大圆弧叫做球面三角形的边，如图 3-3 所示，通常用小写字母 $a$、$b$、$c$ 来表示。各大圆弧所交成的球面角叫做球面三角形的角，通常用大写字母 $A$、$B$、$C$ 来表示。因为球面三角形的边是以其所对的球心平面角所确定的，为研究方便，边长也以角度为单位，这与平面三角有所不同。

图 3-3 中，$AT$ 是大圆 $AB$ 的切线，$AT'$是大圆 $AC$ 的切线，$BE$ 是大圆 $AB$ 的切线，$BE'$是大圆 $CB$ 的切线，$CF$ 是大圆 $AC$ 的切线，$CF'$是大圆 $CB$ 的切线。

要注意，将球面三角形 $ABC$ 的各顶点与球心 $O$ 连接就构成球心三面角 $O\text{-}ABC$。由于大圆的中心角与其所对的弧同度，因而有：

$$a=\angle BOC \quad b=\angle AOC \quad c=\angle AOB \quad \angle A=\angle TAT' \quad \angle B=\angle EBE' \quad \angle C=\angle FCF'$$

这就是说，球面三角形的边与其所对应的球心三面角同度，而球心三面角的角与其所对应的球心三面角的二面角同度。

### 4．球面坐标

如图 3-4 所示，在球面中任意选择两个互相垂直的大圆作基圆，$QmQ'$为第一基圆，$PQP'Q'$为第二基圆。$P$ 和 $P'$都是大圆 $QmQ'$的极。

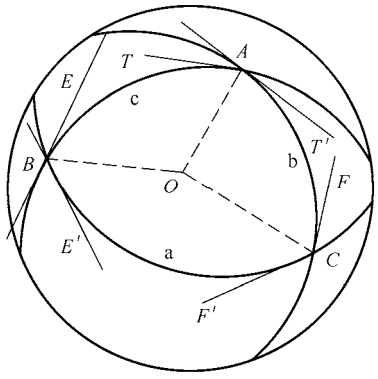



图 3-3 球面三角形

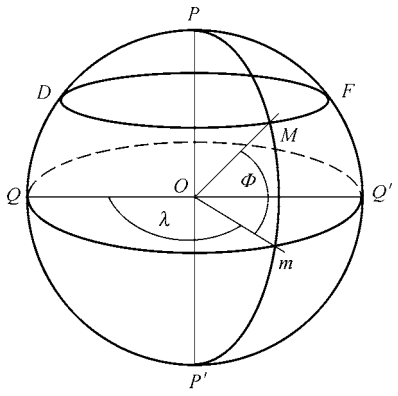



图 3-4 球面坐标系

设 $M$ 是球面上任意一点，过 $M$ 作平行于第一基圆的小圆 $DMF$，又过 $M$ 点与极点 $P$、$P'$ 作半大圆 $PMP'$，它与第一基圆 $QmQ'$相交于 $m$ 点。

连接 $OQ$、$Om$、$OM$，设$\angle MOm=\phi$，$\angle QOm=\lambda$，则球面上任意一点 $M$ 的位置可由$\phi$、$\lambda$两数来确定，一般记为 $M_{(\phi,\ \lambda)}$。

### 3.1.2　球面三角形边角关系

在球面三角里，三角形的边与角之间是有一定关系的。描绘这些关系的有正弦定理、正切定理、余弦定理等。实际上平面三角是球面三角的一种特殊情况。当球的半径无限增大时，球面三角形就变成了平面三角形。在球面三角形里，也有与平面三角里类似的边角关系，不过这些定理的证明不是本书研究的内容，这里不详述。下面把本书用得到的公式叙述一下。

设有球面三角形 $ABC$，用 $A$、$B$、$C$ 表示 3 个角，$a$、$b$、$c$ 表示对应的 3 条边（参看图 3-3）。

（1）正弦定理

$$\frac{\sin a}{\sin A}=\frac{\sin b}{\sin B}=\frac{\sin c}{\sin C}$$

（2）边的余弦定理

$$\cos a=\cos b\cdot\cos c+\sin b\cdot\sin c\cdot\cos A$$
$$\cos b=\cos a\cdot\cos c+\sin a\cdot\sin c\cdot\cos B$$
$$\cos c=\cos b\cdot\cos a+\sin b\cdot\sin a\cdot\cos C$$

（3）角的余弦定理

$$\cos A=-\cos B\cdot\cos C+\sin B\cdot\sin C\cdot\cos a$$
$$\cos B=-\cos A\cdot\cos C+\sin A\cdot\sin C\cdot\cos b$$
$$\cos C=-\cos B\cdot\cos A+\sin B\cdot\sin A\cdot\cos c$$

## 3.2　地球的公转和赤纬角

我们知道，地球除自转外，还绕太阳公转，公转一周 365 天。由于公转，产生一年四季的变化。自转一周 24h，由于自转才有昼夜之分。这些转动，使得投到地球上某一特定地点的光线方向时刻在变化。为了使太阳能收集器最大限度地收集太阳辐射能，就必须使收集器适应太阳光线方向的变化。因此了解日地之间相对运动的规律是很必要的。

地球公转一周，形成四季，四季的重要特征有两点：一是气温高低不同，二是昼夜长短互异。四季的形成主要是由赤纬角$\delta$的变化而引起的。

太阳光线（或称日地矢径）与地球赤道平面夹角称为太阳赤纬角，简称赤纬，以“$\delta$”表示，它是以年为周期的变化量，并规定以北为正值。

我们知道，地球在一个平面上绕太阳做近似圆周的运动。这个轨道平面叫黄道面。为了考虑问题方便，我们把这一公转看作圆周运动。从动力学可知，旋转的物体有使其转轴的方

向保持不变的特性（如陀螺）。由于地球的自转，公转时地轴的方向也总是不变的，即地轴和黄道平面的交角保持不变（其数值是 66.5°）。由于地轴和黄道面交角不是垂直的，因此地轴和日地矢径（太阳光线方向）的交角$\theta$一年中是不断变化的。如图 3-5 所示，冬至时交角为$\theta$= 90° + 23.5° =113.5°，夏至时是$\theta$= 90° − 23.5° = 66.5°，两分日（秋分、春分）时$\theta$= 90°。日地矢径表示了投射到地球上的太阳光线的方向，因此在两分日时，太阳垂直照射地球赤道。在冬至时，正中午阳光垂直照射南纬 23.5° 的地方，夏至时直射北纬 23.5° 的地方。令$\delta$= 90° − $\theta$，$\delta$即太阳赤纬角，它表示在天球上从赤道沿时圈到太阳的角距离，也表征了当日中午太阳垂直照射地球表面的地理纬度，同时表征了太阳光线（或称日地矢径）与地球赤道平面夹角。冬至时$\delta$= − 23.5°，夏至时$\delta$= 23.5°，两分日时$\delta$= 0°。

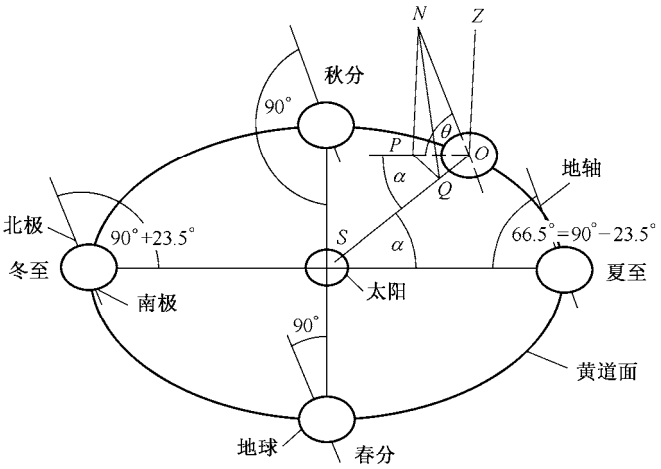



图 3-5　地球的公转

下面推导一下太阳赤纬角的计算方法。（不感兴趣的读者可以忽略推导过程，只记住结论即可。）

如图 3-5 所示，*ON* 是地轴，指向北极，方向不变；角$\theta$是地轴和夏至时日地矢径的夹角，即地轴与黄道面的夹角，$\theta$= 66° 33′；*OZ* 是黄道面的垂线。设地球从夏至点开始运动，*n* 天后运行到 *O* 点。这时，

$$\angle\alpha=\frac{360}{365}\cdot n$$

从北极 *N* 点作黄道面的垂线交黄道面于 *P* 点。过 *P* 点作 *OS* 的垂线 *PQ*，交 *OS* 于 *Q* 点，连接 *NQ*。

根据三垂定理，$NQ\perp OQ$

又$\because\dfrac{OQ}{ON}=\dfrac{OP}{ON}\cdot\dfrac{OQ}{OP}$

而 $\dfrac{OQ}{ON}=\cos(\angle NOQ)=\cos\theta$ （令$\theta$= $\angle NOQ$）

$$\frac{OP}{ON}=\cos\theta_0=\cos 66^\circ 33'$$

$$\frac{OQ}{OP}=\cos\alpha=\cos\frac{360}{365}\cdot n$$

$$\therefore\cos\theta=\cos66^{\circ}33'\cdot\cos\frac{360}{365}\cdot n$$

或

$$\sin\delta=\sin23^{\circ}27'\cdot\cos\frac{360}{365}\cdot n$$

此式即计算赤纬角的公式。这里$\delta$是当日的赤纬角。

也可用下式近似计算：

$$\delta=23.45\times\sin\left[360\times\frac{28+n}{365}\right]$$

式中，$n$ 为一年中从元旦日算起的天数，如春分，$n=81$，则$\delta=0^{\circ}$。

实际上，在一天之内，太阳的赤纬角也是连续变化的，不过变化很小，最大 23′43″（两分日附近），最小 6″（两至日附近）。在太阳能利用中，一般跟踪精度不超过 30′，为了计算方便，我们把一天的赤纬角看成一个常数。

根据以上公式我们可以计算出任一天的赤纬角。由于圆周运动的对称性，实际上我们只要计算出一个季度的数值，就可以推出全年每天的赤纬角了。

表 3-1 给出了一年中的赤纬角。

**表 3-1　　太阳赤纬角**

| 月份 / 日期 / $\delta$ | 1 | 2 | 3 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | −23.1 | −17.3 | −7.9 | +4.2 | +21.9 | +23.2 | +18.2 | +8.6 | −2.9 | −14.2 | −21.7 |
| 3 | −22.7 | −16.2 | −6.4 | +5.8 | +22.5 | +22.9 | +17.2 | +7.1 | −4.4 | −15.4 | −22.3 |
| 9 | −22.2 | −14.9 | −4.8 | +7.3 | +22.9 | +22.5 | +16.1 | +5.6 | −5.9 | −16.6 | −22.7 |
| 13 | −21.6 | −13.6 | −3.3 | +8.7 | +23.2 | +21.9 | +14.9 | +4.1 | −7.5 | −17.7 | −23.1 |
| 17 | −20.9 | −12.3 | −1.7 | +10.2 | +23.4 | +21.3 | +13.7 | +2.6 | −8.9 | −18.8 | −23.3 |
| 21 | −20.1 | −10.9 | −0.1 | +11.6 | +23.4 | +20.6 | +12.4 | +1.0 | −10.4 | −19.7 | −23.4 |
| 25 | −19.2 | −9.4 | +1.5 | +12.9 | +23.4 | +19.8 | +11.1 | −0.5 | −11.8 | −20.0 | −23.4 |
| 29 | −18.2 |  | +3.0 | +14.2 | +23.3 | +19.0 | +9.7 | −2.1 | −13.2 | −21.3 | −23.3 |

注：本表来自 1975 年中国天文年历，每隔 4 天录取资料四舍五入求出，年际间的太阳赤纬角差别是很小的，对太阳能利用，可忽略不计。

太阳赤纬角的日变化幅度是不均匀的，在两至日附近变化最小，随后逐渐增大，到两分日时变化率最大。在两至日前后 40 天的时间里，赤纬角变化不超过 1.5°；而在两分日附近，3 天就变化 1°。图 3-6 所示为夏至日到秋分日间太阳赤纬角的变化。

由于太阳赤纬角的变化，形成了地球上一年四季的变化。在北半球的夏季，太阳直射北回归线，照射北半球的多半地区，所以气候炎热。冬季太阳直射南半球，只照射北半球的少一半地区，所以北半球处于冬季，而南半球处于夏季。在两分日，太阳直射赤道，则两半球分别处于春季和秋季。

图 3-7 所示为对应于上述 4 个典型季节日地球受到太阳照射的情况。

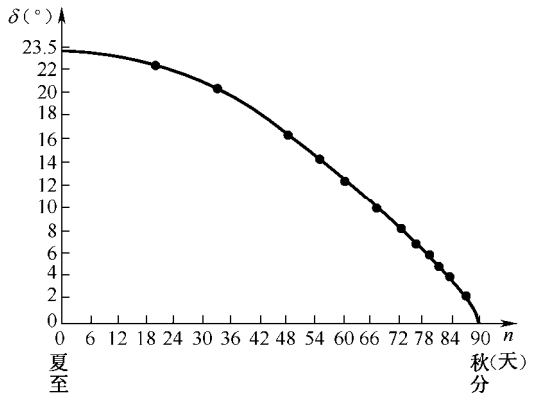



图 3-6 夏至—秋分间太阳赤纬角的变化

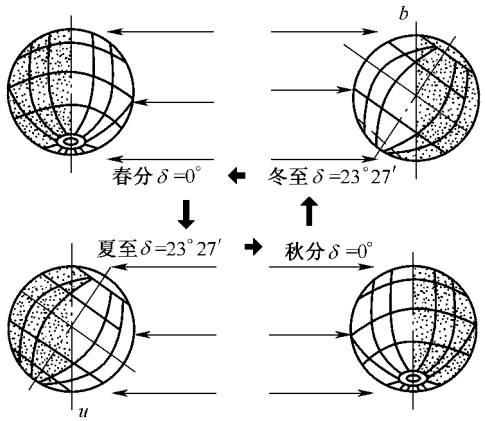



图 3-7 地球公转及日照变化示意图

## 3.3 太阳的周日视运动

我们知道，每天看到太阳从东边升起，从西边落下，太阳的高度一年四季也是变化着的，这些都是由于地球绕太阳的公转和其本身的自转引起的。实际上太阳并没有动。为了考虑问题方便，符合我们的直观感觉，根据运动的相对性，我们仍把地球看作不动，以观察者所在的真地面作为水平地面，而太阳绕地球作周日旋转运动，这就是我们所说的太阳视运动，即我们的眼睛直接看到的太阳运动轨迹。

研究太阳视运动规律对太阳能利用有重要的意义。我们设计制造的所有太阳能收集器，不管是光电收集器还是光热收集器，在收集太阳能时，都是把收集器的安装地点作为固定不动的基本点，而把太阳看作是从东到西连续不断运动着的。所以只有弄懂了太阳一年四季的视运动规律，才能科学地设计、安装太阳能收集器。

### 3.3.1 天球坐标系

在我们看来，整个天空像一个半球，罩在我们上方，白天可以看到太阳在上面运动，晚上可以看到星辰在上面闪烁，而且不管我们走到哪里，总觉得自己位于这个球体中心。

确定球面上点的位置最方便的方法就是采用球面坐标系。因此我们引入天球的概念，即把我们仰望天空时看到的半球形天空定义为天球。天文学把这种坐标系叫天球坐标系，而包括太阳、月亮在内等各种天体是这个坐标系里的一个点。地球的直径不到日地

距离的万分之一，因此在分析太阳的视运动时把地球的直径忽略不计，观察者位于天球的中心。

为了确定太阳在天顶的位置，在进一步讨论之前，有必要介绍一些基本术语。

（1）天顶和天底

现在我们以观察者的位置为球心，取适当长为半径，做一个天球坐标，如图 3-8 所示。通过天球中心 $O$ 作一直线 $OZ$ 与观察者的铅垂线平行，且与天球的交点为 $Z$ 和 $Z'$。其中 $Z$ 恰好位于观察者的头顶，成为天顶，$Z'$位于观察者的脚底，成为天底。

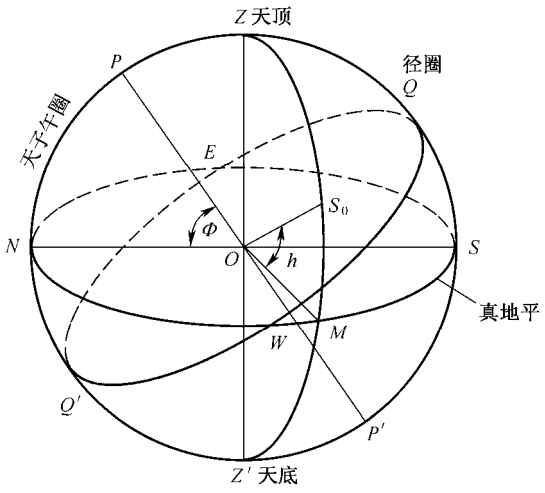



图 3-8　天球坐标系

（2）真地平和太阳高度角

通过球心 $O$ 且与 $ZZ'$相垂直的平面，在天球上截出的大圆 $SENW$ 叫做真地平或数学水平面。连接太阳 $S_0$ 和球心 $O$ 点的直线 $OS_0$ 与真地平的交角 $\angle S_0OM$ 叫太阳高度角，用 $h$ 表示。

（3）天轴和天极

通过球心作一直线 $POP'$与地轴的自转轴平行，这条直线叫天轴。天轴和天球交于 $P$、$P'$两点，其中地球北极对应的点叫北极，与地球的南极对应的点叫南天极。可以证明天轴和真地平的交角便是当地的地理纬度。

（4）天赤道

通过天球球心作一平面与天轴垂直，显然，它与地理赤道面是平行的，这个平面和天球相交所截出的大圆 $QEQ'W$ 叫天赤道。

（5）径圈和子午线

通过天顶 $Z$ 和天底 $Z'$的大圆叫经圈，它与真地平是垂直的。通过天顶 $Z$ 和天极 $P$ 的特殊经圈 $PZSN$ 称为天子午圈，它与真地平相交于 $N$ 和 $S$，靠近北极的点 $N$ 叫北点，而与北点相对应的点 $S$ 叫南点。若观察者面向北，其左方距南北各为 90° 的点 $E$ 叫东点，而与东点相对应的点 $W$ 叫西点。东西两点正好是天赤道和真地平的交点。

（6）时圈

通过北天极 $P$ 和太阳 $S_0$ 的大圆 $PS_0P'$叫时圈，它与天赤道是相互垂直的。

（7）赤纬角

赤纬角在天球坐标里表示太阳沿时圈到赤道的角距离，赤道以北为正，以南为负。（这里时圈即过 $PP'$两点的大圆。）

在图 3-10 中，弧 $AQ$ 和弧 $BQ$ 分别表示夏至和冬至的赤纬角。

### 3.3.2　太阳视运动的轨道

图 3-9 所示是居住在北半球的人们直观感觉的太阳运行轨道。

下面我们分析一下太阳的运动规律，图 3-10 所示是北纬 40° 地带的太阳周日视运动。

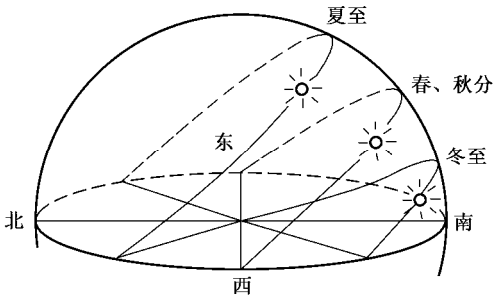



图 3-9　一年内太阳的运行轨迹示意图

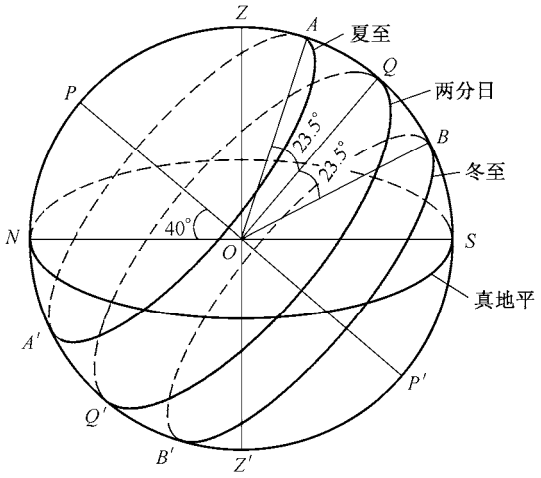



图 3-10　北纬 40°地带的太阳周日视运动

在春分和秋分（两分日），太阳基本上在天赤道上绕天轴旋转，24h 旋转一圈。太阳光线方向与天轴垂直，$Q$ 是上中天（天体经过观察者所在的子午圈叫“中天”，天体每天经过子午圈两次，离天顶近的叫上中天，离天顶远的叫下中天）。两分日这天，赤纬角$\delta=0°$，中午的太阳高度角为：

$$h=90°-\Phi$$

式中：$\Phi$——地理纬度。

当冬至时，太阳沿 $BB'$平面绕天轴作圆周运动，$B$ 点是上中天，这天的赤纬角是；

$$\delta=BQ\text{ 弧}=-23.5°$$

这天中午太阳的高度角为：

$$h=90°-\Phi+\delta$$
$$=90°-\Phi-23.5°$$

当夏至时，太阳沿平面 $AA'$绕天轴转动，$A$ 为上中天，赤纬角$\delta=AQ$ 弧=23.5°，中午太阳的高度角为：

$$h=90°-\Phi+\delta$$
$$=90°-\Phi+23.5°$$

严格地讲，太阳的周日视运动的轨道并不是一个圆，而是以天轴为轴线的连续的螺旋线，共 183 周。在一年 365 天中，太阳从赤纬角 23.5°→0°→−23.5°→0°→23.5°，周而复始不停地转动。在一天内，其赤纬变化是很小的，最大为 23′43″，最小仅为 6″。为考虑问题方便，可以把连续的螺旋曲线看成是 183 个互相平行的平面圆弧封闭曲线。由此，只要求出当日赤纬角，我们可以画出任一天太阳的运行轨道。

如果我们在赤道上，即在地理纬度$\Phi=0$ 的地方看太阳的周日视运动，其轨道如图 3-11 所示，此时天轴在真地平面上，两分日中午的太阳在天顶。冬半年里，太阳在北侧，夏半年里，太阳在南侧。

如果在北极看太阳的周日视运动，其轨道如图 3-12 所示，夏半年，太阳在距地平线不太高的地方（最高 23.5°）沿 360° 的方位上转动，且其高度角在一天中基本不变。一天 24h 都有太阳，整个半年的时间内都有太阳。在冬半年，则完全是寒夜。

从以上分析可以看出，当两分日时，观察者的位置（即球心）正好在太阳运行轨道的圆心。而在其他日子里，观察者的位置 $O$ 点和太阳轨道形成一个圆锥体，观察者位于圆锥体的顶点，太阳轨道是圆锥体的底面周边，半顶角$\theta = 90° - |\delta|$，圆锥的中心轴即为天轴。照射到 $O$ 点的光线扫描成圆锥的侧面，圆锥的中心轴就是天轴 $PP'$，参看图 3-10 和图 3-13。

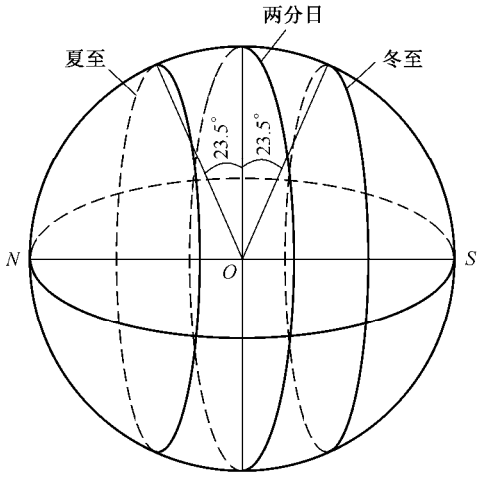



图 3-11　赤道地带的太阳周日视运动

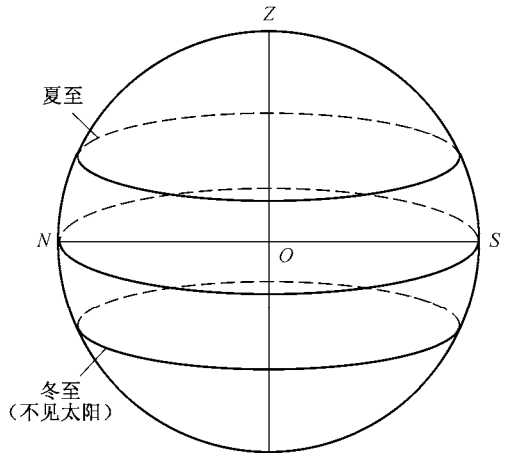



图 3-12　北极地带的太阳周日视运动轨道

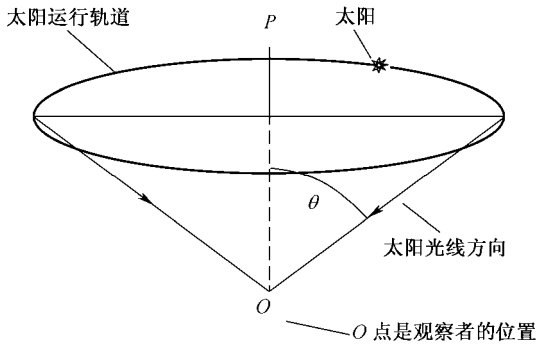



图 3-13　太阳光线扫描的圆锥面

## 3.4　太阳视运动的解析表达式

前面我们分析了太阳视运动的轨道，下面分析一下其解析表达式，以便从量上对太阳的视运动进行计算。为看得清楚，叙述方便，我们先建立两个坐标系。

### 3.4.1　地平坐标系

图 3-14 所示是以真地平为基本圈、南点 $S$ 为原点的天球坐标系，天顶 $Z$ 为基本圈的极。

显然，通过太阳 $S_0$ 和天顶 $Z$ 所作的大圆垂直于地平面，两者相交于 $M$ 点。因此，太阳 $S_0$ 的位置可由下面两个坐标确定：

天顶距弧 $S_0Z$ 或天顶角 $\theta$，也可用太阳高度角 $h$ 表示（$h=90°-\theta$）；

方位角 $\psi_0$，从南点向西为正（顺时针），向东为负（逆时针）。

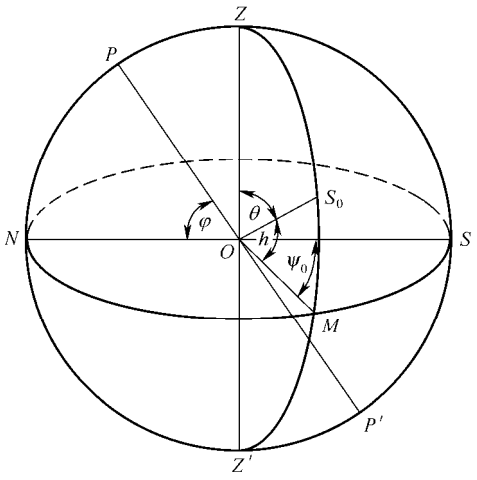



图 3-14　以真地平为基本圈的天球坐标系

### 3.4.2　赤道坐标系

图 3-15 所示是以天赤道为基本圈，以天赤道和天子午线的交点 $Q$ 为原点的坐标系，北天极 $P$ 为基本圈的极。显然，通过 $P$ 点和太阳 $S_0$ 的大圆垂直于天赤道，两者相交于 $B$ 点。在此坐标系中，太阳的位置由下面两个参数确定。

（1）时角 $\omega$。

太阳每天绕天轴转一圈 360°，时角 $\omega$ 表示太阳旋转的角度，从 $Q$ 点算起，即从太阳正中午算起为 0°，按时针方向计量，下午为正，上午为负，每小时转动 15°。

（2）赤纬角 $\delta$。

自天赤道算起，向北极为 0～23.5°，向南极为 0～−23.5°。

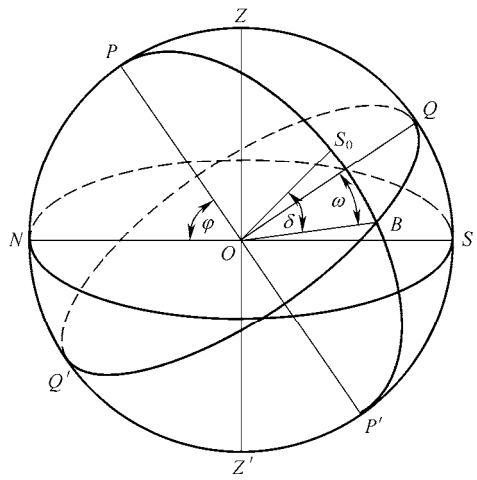



图 3-15　以天赤道为基本圈的天球坐标系

### 3.4.3　太阳视运动的解析表达式

#### 1．任意时刻太阳高度角计算公式

从图 3-14 和图 3-15 可以看出，利用球面三角的余弦定理有：

$$\cos ZS_{0\text{弧}} = \cos PZ_{\text{弧}} \cdot \cos PS_{0\text{弧}} + \sin PZ_{\text{弧}} \cdot \sin PS_{0\text{弧}} \cdot \cos(\angle ZPS_0)$$

从图 3-14 和 3-15 可以看出：

$$PZ_{\text{弧}} = 90^\circ - \phi, \qquad PZ_{\text{弧}} = \theta = 90^\circ - h$$

$$PS_{0\text{弧}} = 90^\circ - \delta, \qquad \angle ZPS_0 = QB_{\text{弧}} = \omega$$

式中：$h$——太阳高度角；

$\phi$——观察者所在的地理纬度；

$\delta$——赤纬角；

$\omega$——时角。

整理后得：$\sin h = \sin\phi \cdot \sin\delta + \cos\phi \cdot \cos\delta \cdot \cos\omega$

根据上式可计算出任意时刻的太阳高度角。

#### 2．正中午的太阳高度角

在中午时，时角$\omega = 0$，上式变为：

$$\sin h = \sin（90^\circ - \phi + \delta）$$

即：

$$h = 90^\circ - \phi + \delta$$

当$\phi = \delta$时，$h = 90^\circ$，太阳在天顶；

当$\phi > \delta$时，$h < 90^\circ$，太阳在南边；

当$\phi < \delta$时，$h > 90^\circ$，太阳在北边。

这与我们的直观感觉是一致的。

#### 3．太阳的方位角

太阳方位角是指某一时刻，从地面某一观察点向太阳中心作连线，该连线在地平面上有一投影，该投影与正南方的夹角为太阳方位角。并规定正南方为 0°，向西为正值，向东为负值，其变化范围为−180°～+180°。方位角以$\psi$表示。

由图 3-14 可以看出，太阳方位角$\psi$和$\angle S_0ZP$ 互补，即

$$\angle S_0ZP = 180^\circ - \psi$$

而在球面三角形 $S_0ZP$ 中，根据球面三角的正弦公式整理后可得：

$$\sin\psi = \frac{\cos\delta \sin\omega}{\cos h}$$

由上式可以求出方位角$\psi$。

总结上述，可得出太阳运动的 3 个基本公式：

$$\begin{cases}\sin\delta=\sin 23.5^{\circ}\cdot\cos\dfrac{360}{365}n\\ \sin h=\sin\phi\sin\delta+\cos\phi\cos\delta\cos\omega\\ \sin\psi=\dfrac{\cos\delta\sin\omega}{\cos h}\end{cases}$$

从以上公式可以看出，赤纬角$\delta$、高度角 $h$ 和方位角$\psi$最终都可以看成是时间和地理纬度的函数。又因为地理纬度对某一特定地区是一个常数，所以本质上说，对一特定地区，$\delta$、$h$、$\psi$都仅是时间的函数。只要时间给定了，就可以找出确定的$\delta$、$h$、$\psi$。

#### 4．太阳日出日落的时间求法

太阳的日出日落时间就是太阳高度角等于 0° 的时间，因此，令 $h=0^{\circ}$ 并代入上面的高度角公式可得：

$$0=\sin\phi\sin\delta+\cos\phi\cos\delta\cos\omega$$

从而得到

$$\cos\omega=\frac{-\sin\phi\sin\delta}{\cos\phi\cos\delta}$$

即

$$\cos\omega=-\tan\phi\tan\delta$$

由上式即可解出时角$\omega$。

对于同一天来说，太阳日出和日落的时间，相对于当日正中午是等时间间隔的。

知道了日出和日照时刻，就可算出每天的日照时间。日照时间表示了昼长的时数。因地球自转和公转的关系，在同一天内，不同的纬度地区其日照时间也不同。在北半球的夏季，纬度越高，日照时间越长；在冬季，北半球纬度越高，日照时间越短。

由上式很容易计算两分日的日出日落时间。在两分日（春分日与秋分日），$\delta=0^{\circ}$，则 $\cos\omega=0$，$\omega=\pm 90^{\circ}$。90/15 = 6，相当于日出时间为早晨 6 点整，日落时间为晚上 6 点整，即日照时间为 12h。另外，$\delta=0^{\circ}$，说明两分日地球上各地的日出时间都相同，与地理纬度无关。

#### 5．太阳日出日落方位角度求法

在方位角计算公式中中，令太阳高度角 $h=0^{\circ}$，得到

$$\cos\psi=\frac{-\sin\delta}{\cos\phi}$$

可算出日出日落方位角$\psi$。

## 3.5 我国太阳周日视运动规律

表 3-2 列出了北纬 40°（北京）、23.5°（北回归线）和 18.5°（海南岛某地）两分日和两

至日日落日出时间及其方位，表 3-3 和表 3-4 列出了北纬 40° 和 18.5° 的太阳方位角的日变程。

**表 3-2　　日落时间及其方位**

| 纬　　度 | $\phi=40^\circ$ | | $\phi=23.5^\circ$ | | $\phi=18.5^\circ$ | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 日落时间 | 方位 | 日落时间 | 方位 | 日落时间 | 方位 |
| 两分日 | 18:00 | 90° | 18:00 | 90° | 18:00 | 90° |
| 夏至 | 19:20 | 121° | 18:47 | 115.7° | 18:25 | 115° |
| 冬至 | 16:40 | 59° | 17:13 | 64.3° | 17:25 | 65° |

**表 3-3　　太阳高度角日变程**

| 纬度 | 时间<br>季节 | 5:00<br>19:00 | 6:00<br>18:00 | 7:00<br>17:00 | 8:00<br>16:00 | 9:00<br>15:00 | 10:00<br>14:00 | 11:00<br>13:00 | 12:00 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $\phi=40^\circ$ | 两分日<br>夏至<br>冬至 | 4° | 0°<br>14° | 13°<br>26° | 23°<br>37°<br>5° | 33°<br>48°<br>14° | 42°<br>59°<br>21° | 48°<br>69°<br>25° | 50°<br>73.5°<br>26.5° |
| $\phi=18.5^\circ$ | 两分日<br>夏至<br>冬至 | | 7° | 14°<br>21°<br>6° | 28°<br>34°<br>18° | 42°<br>48°<br>29° | 55°<br>62°<br>39° | 66°<br>75°<br>46° | 71.5°<br>85°<br>48° |

**表 3-4　　太阳方位角日变程**

| 纬度 | 时间<br>季节 | 5:00 | 6:00 | 7:00 | 8:00 | 9:00 | 10:00 | 11:00 | 12:00 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $\phi=40^\circ$ | 夏至<br>两分日<br>冬至 | −118° | −109° | −100°<br>−82° | −90°<br>−72°<br>−53° | −80°<br>−57°<br>−42° | −65°<br>−42°<br>−29° | −37°<br>−23°<br>−15° | 0°<br>0°<br>0° |
| $\phi=18.5^\circ$ | 夏至<br>两分日<br>冬至 | | −112° | −109°<br>−85°<br>−65° | −106°<br>−80°<br>−56° | −104°<br>−72°<br>−48° | −105°<br>−61°<br>−36° | −112°<br>−40°<br>−20° | 180°<br>0°<br>0° |

| 纬度 | 时间<br>季节 | 13:00 | 14:00 | 15:00 | 16:00 | 17:00 | 18:00 | 19:00 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $\phi=40^\circ$ | 夏至<br>两分日<br>冬至 | 37°<br>23°<br>15° | 65°<br>42°<br>29° | 80°<br>57°<br>42° | 90°<br>72°<br>53° | 100°<br>82° | 109° | 118° |
| $\phi=18.5^\circ$ | 夏至<br>两分日<br>冬至 | 112°<br>40°<br>20° | 105°<br>61°<br>36° | 104°<br>72°<br>48° | 106°<br>80°<br>57° | 100°<br>85°<br>65° | 112° | |

说明两点：（1）由于春分、秋分两天里，太阳运动规律相同，故我们下列各表中均以两分日代表，不再单列春分秋分。（2）每日里太阳日出时刻和日落时刻相对于当日中午间隔时间相等（在计算时，时角$\omega$仅是符号不同），知道了日落时间，也就能知道日出时间。例如下午 5 点日落，则日出时间是 12 − 5 = 7，即上午 7 点日出。因此我们在表中只列出日落时间（下午时数），方位角、日出日落也只是正负不同，故只列日落的方位角。

这里时间均指真太阳时，即把当地中午太阳最高点时作为 12 点。各地真太阳时是不同的，只有在同一经度上的地点，真太阳时才相同。真太阳时与钟表指的时间是不同的，后面将有详细论述。

根据以上各表，我们绘制出太阳周日视运动在水平面上的投影图，如图 3-16 所示。图中的同心圆反映了太阳的高度角；曲线 I 是两分日太阳周日视运动在水平面上的投影；曲线 II 和曲线III分别是夏至和冬至太阳周日视运动在水平面上的投影；曲线Ⅳ是北纬 18.5°的“天顶日”太阳周日视运动在水平面上的投影，在这一天的正中午太阳恰好过天顶。

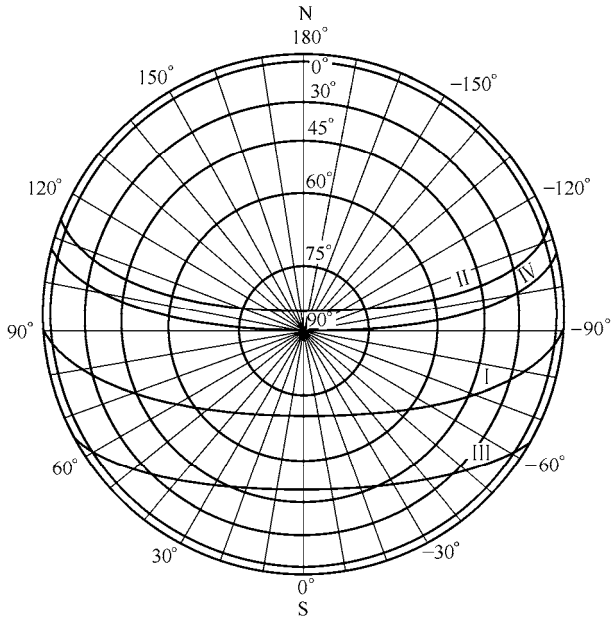



图 3-16　北纬 18.5°的太阳周日视运动在水平面上的投影

根据以上各表和图，我们可以看出，在我国，太阳周日视运动有以下几个规律。

（1）我国绝大部分地区位于北回归线（北纬 23.5°）以上，太阳从东方升起斜倾偏南而上，到中午达到最高位置（其高度随纬度增加而降低），下午转向西方，斜倚偏北而下，其位置恰和上午对称，最后沉没于西方。

两分日时，太阳从正东升起，至正西落下。

在冬半年里（从秋分—冬至—春分之间），太阳从东偏南升起，从西偏南落下。

在夏半年里（从春分—夏至—秋分期间），太阳从东偏北升起，从西偏北落下。

一年四季正中午，太阳总在南方，不会过天顶（即太阳高度 $h$＜90°）。在一年中，正

中午太阳高度呈单峰曲线变化，如图 3-17 所示。从冬至到夏至，中午太阳高度逐日增加，其增量等于赤纬角的增量；从夏至到冬至，中午太阳高度逐日降低，其减少量也等于赤纬角的减少量。

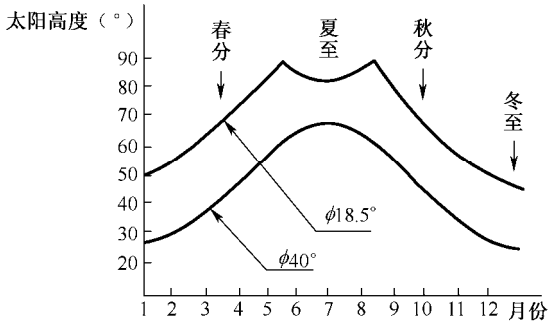



图 3-17　正中午太阳高度年变程

（2）我国南方纬度小于 23.5° 的少数地区，太阳周日运动规律与北方有明显的差异（参看图 3-16），其主要特点是在中午太阳可以在天顶以北。

在北回归线上的一带地区（北纬 23.5°），夏至时正中午太阳恰在天顶（$h = 90°$），在这天的其余时间里太阳都在北面天球运行。

在北纬 23.5° 以南地区，春分后，太阳逐渐北行，太阳高度逐渐升高，一天中太阳在北面半球运行的时间逐渐增多。当太阳赤纬角等于当地纬度时（$\delta = \phi$），正中午太阳高度达到最大值，$h = 90°$，太阳位于天顶（参看图 3-16 中的线 IV），该日可称为天顶日。这日内除中午外，其余时间太阳都在北面天球运行。

然后，太阳继续北行，正中午太阳高度反而逐日下降，全日太阳都在北面天球运行（参看图 3-16 曲线 II），到夏至才停止北行下降，而后太阳南行，高度逐日回升，并再次到天顶，然后继续南行，高度又下降，一直到冬至才终止。一年内太阳正中午高度呈双峰曲线，如图 3-17 所示。

从以上分析可以看出，在我国，北方和南方，冬季和夏季，太阳运行轨道是不同的，差异很大。因此太阳能收集器的放置方向也不能相同，必须适应太阳运行情况。

（3）每日的日照时间也是不同的，夏至最长，超过 12h；夏至以后，日照逐日缩短。到秋分时，日照时间是 12h，恰是一昼夜的 1/2。秋分日照进一步减少，到冬至减至最小。

从冬至—春分—夏至，则与上述过程相反。

（4）在同一天里，南方和北方的日照时间也是不同的。在冬半年里，南方每日日照时间比北方长。如冬至时，北纬 40° 地区，日照仅 9 小时 20 分，而北纬 18.5° 地区，日照是 10 小时 50 分。在夏半年里，北方比南方日照时间长。例如夏至日，北纬 40° 地区日照时间为 14 小时 40 分，而在 18.5° 地区，日照时间仅为 12 小时 50 分。这是因为当太阳光照在地球上时，受日照的一面和背阴的一面的交界线（阴影线）并不与地球的经线重合，而是有一定的夹角。

作为一种极端情况，在北极附近，夏季全日 24h 日照，没有黑夜，太阳总在地平线附

近转动；而在南极，却全日 24h 没有日照。到了冬季，又翻转过来，在南极附近，全日 24h 日照，没有黑夜，太阳总在地平线附近转动；而在北极，却全日 24h 没有日照。

在赤道上，一年中每天的日照都是 12h，总是一天的 1/2。

（5）虽然太阳周日运动是绕天轴以每小时 15° 的角速度匀速转动（即地球自转速度），但是从表 3-2～表 3-4 可以看出，太阳的方位角和高度角的变化速率是不同的，它是随着季节、地点、时间的不同而变化的。

就高度角来说，一般来讲，纬度小的地区比纬度大的地区变化率大。例如在春分日，从 11～12 点的 1h 内，北纬 40° 地区，太阳高度变化了 2°；而在 18.5° 地区，则变化了 5.5°。在同一地区，冬半年比夏半年变化率小。例如在北纬 40° 地区，9～10 点的 1h 内，夏至日太阳高度角变化 11°；冬至日的同一时间区间内，太阳高度角变化了 7°。在同一地区的同一天内，这一变化率以日出日落时大、中午时小。例如在北纬 40° 地区的春分日，7～8 点的 1h 内，太阳高度角变化了 20°；而在 11～12 点的 1h 内，太阳高度角仅仅变化了 7°。

就方位角来说，大致有与高度角相反的情况。

一般来说，太阳的方位角在日出日落时变化率小，中午变化率大。例如在北纬 40° 地区的夏至日，7～8 点的 1h 内，方位角变化了 9°，而在中午 11～12 点的 1h 内则变化了 37°。

由以上分析，我们决不可把方位角和高度角变化以及地球匀速自转速度等同起来。在设计太阳能收集器时要注意这点。

## 3.6 太阳时与时钟的换算

### 3.6.1 真太阳时和平太阳时

在前面叙述的所有太阳角度的计算公式中，所指的时间都是真太阳时，它与时钟所指示的时间是不同的。因此有必要论述一下太阳时和时钟两者的关系。

所谓太阳时是采用真太阳坐标系中的时角来计量的，它的起点是真太阳的上中天（正午），以连续两个上中天的间隔作为一个太阳日。

但是严格地讲，由于地球是在一个椭圆轨道上绕太阳运动的，因此太阳在黄道上是做变速的周年运动，而且黄道又与赤道倾斜，致使太阳日的长短在一年中是变化的。观察证实，一个太阳日，最长的和最短的相差 51s。用它来定时间，在日常生活中很不方便。

为了得到既均匀又适合于日常生活的时间，人们采用了平太阳时，这就是钟表所指的时间。天文学上假想有一个平太阳，它每年和真太阳同时从春分点出发，又同时回到春分点，它在天球赤道上从西向东匀速运动，以平太阳连续两次经过上中天的时间间隔作为一个平太阳的计时系统。这就克服了真太阳日的日长不等的缺点。它的日常等于一回归年里真太阳日日长的平均值。平太阳时和真太阳时的时刻相差不多，有时快，有时慢，一年里有 4 次相一致，而最大的差值不超过 16min。表 3-5 列出了一年中不同日期

的时差。

**表 3-5**　　**时差**

| 月份 / 时差（h） / 日期 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | −3 | −13 | −13 | −4 | 3 | 2 | −4 | −6 | 0 | 10 | 16 | 11 |
| 5 | −5 | −14 | −12 | −3 | 3 | 2 | −4 | −6 | 1 | 11 | 16 | 10 |
| 9 | −7 | −14 | −11 | −2 | 4 | 1 | −5 | −6 | 2 | 12 | 16 | 8 |
| 13 | −8 | −14 | −10 | −1 | 4 | 0 | −6 | −5 | 4 | 13 | 16 | 6 |
| 17 | −10 | −14 | −9 | 0 | 4 | −1 | −6 | −4 | 5 | 14 | 15 | 4 |
| 21 | −11 | −14 | −8 | 1 | 4 | −1 | −6 | −3 | 7 | 15 | 14 | 2 |
| 25 | −12 | −13 | −6 | 2 | 3 | −2 | −6 | −2 | 8 | 16 | 13 | 0 |
| 29 | −13 |  | −5 | 3 | 3 | −3 | −6 | −1 | 9 | 10 | 12 | −1 |

注：本表资料来自 1976 年中国天文年历，每隔 4 天录取一次数据，四舍五入求出。

真太阳时与平太阳时两者时刻之差叫时差，即

$$E = t_0 - t$$

或

$$t_0 = t + E$$

式中：$E$——时差；

$t_0$——真太阳时；

$t$——平太阳时。

### 3.6.2　真太阳时和时钟

我们知道，真太阳时和时钟都是由时角定义的，而时角是以天子午线作为起点计量的。对于地球上不同的观测地点，它们的子午圈是不同的。所以，每一地方都有自己的子午圈，即地方真太阳时和地方平太阳时。由于地球在不停转动，各地地方时刻便不一样。这些差异与它们所在的经度有关。在同一视时系统内，对同一瞬间测得的地球上任意两点地方时之差，在数值上等于两点的地理经度之差。

全世界共分 24 个时区，每 15°（经度）为一时区，相邻两个时区的地方时相差 1h。格林威治的经度是 0°，其地方时叫世界时。我国东西延长约 63°（东经 72°～135°），一律采用东经 120°经圈上的平太阳时作为我国统一的标准时间，叫作北京时间，它是东八区的标准时间，比世界时超前 8 小时。

因此，若已知该地的经度和北京时间，可用下式求其真太阳时 $T_0$：

$$T_0 = \text{北京时间} - 4\,(120^\circ - \text{某地经度}) + E$$

由于太阳每 4min 转 1°，因此，上式的时间单位是 min。

上式表明，将标准时间转化为太阳时必须进行两项休正，一项是当地经度，一项是时差修正。

例如，已知北京市的经度是 116° 19′，求相应于 10 月 9 日 11h20min 的真太阳时：

$$T_0 = \text{北京时间} + E - 4\,(120^\circ - 116^\circ 19')$$

从表中查的时差 $E$ 为 12min，则：

$$T_0 = 11{:}20 + 12 - 15 = 11{:}17$$

## 3.7 太阳能集热器安装倾角的确定

### 3.7.1 集热器的安装角度

我们已搞清楚了太阳的视运动规律，关于太阳能集热器的安装角度问题就好解决了。

最理想的情况是太阳能收集器的接收平面总是与太阳光线的方向相垂直，这样收集的效果最好。但由于太阳光线时时在变化着，这就需要太阳能收集器时时刻刻跟踪太阳，即需要一套太阳能自动跟踪装置。由于自动跟踪装置价格较昂贵，且长期运行的可靠性也是不易解决的问题，因此目前市场上销售的太阳能收集器一般都没有自动跟踪装置。

由于我国位于北半球，一般情况下太阳总是在南方，而在一天中太阳的东西运动轨道是对称的，因此我国的太阳能集热器都是面向南方东西放置的。

但是，一天中不仅太阳的高度角时时在变化，而且由于赤纬角的变化，一年中每天同一时刻的太阳高度角也不同，也是天天在变化中。集热器安装不仅要面向南方而且要与地面有一个倾角，那么多大的倾角合适呢？为此我们首先回忆一下前面太阳视运动一节中论述的太阳高度角变化规律，尤其是正中午太阳高度角的变化情况。

由前面可知正中午太阳高度角 $h$ 的计算公式为：

$$\sin h = \sin(90^\circ - \Phi + \delta)$$

即

$$h = 90^\circ - \Phi + \delta$$

这里 $\Phi$ 是当地地理纬度，$\delta$ 是当日赤纬角。

在两分日（春分和秋分），赤纬角 $\delta = 0^\circ$，则有：

$$h = 90^\circ - \Phi$$

可见，在两分日正中午，若要使集热器与入射的太阳光相垂直，则集热器与地面的交角应等于地理纬度，如图 3-18 所示。

在夏至日正中午，太阳的高度角为：

$$h = 90^\circ - \Phi + 23.5^\circ$$

在冬至日正中午，太阳的高度角为：

$$h = 90^\circ - \Phi - 23.5^\circ$$

在其他日期里，则在夏至日太阳高度角和冬至日太阳高度角之间变化。

在夏至日，中午太阳高度角最高，$h = 90^\circ - \Phi + 23.5^\circ$，之后逐渐降低，到秋分日，降为 $h = 90^\circ - \Phi$。然后继续降低，到冬至日，降到最低，中午太阳高度角变为 $h = 90^\circ - \Phi - 23.5^\circ$。然后又逐渐升高，到春分日变为 $h = 90^\circ - \Phi$，春分过后继续升高，到夏至日又升到 $h = 90^\circ - \Phi + 23.5^\circ$。然后又如此周而复始，循环变化。

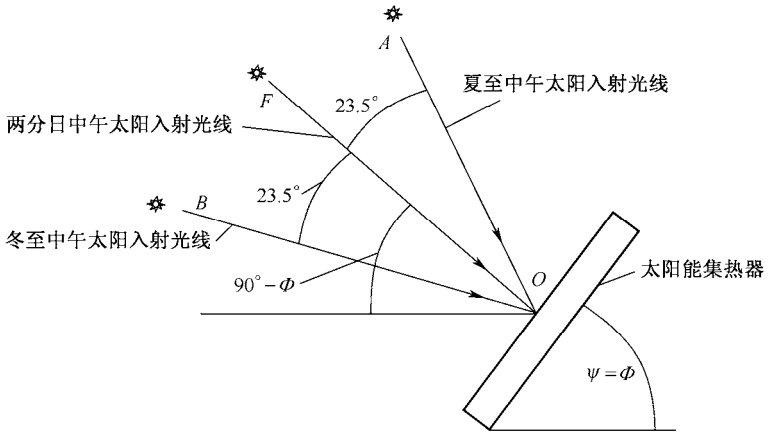



图 3-18　不同日期正中午太阳光辐射的角度

根据太阳的以上变化规律，我们可以确定太阳能集热器的安装倾角。

由于设计理念的不同、应用的情况不同，集热器安装的倾角也不同，下面分几种情况分析。

（1）全年使用的太阳能集热器的安装倾角。

很显然，全年使用的太阳能集热器必须兼顾冬季和夏季的使用，所以应按全年中午太阳高度角的平均值来安装，这个平均值即两分日中午的太阳辐射的角。太阳能集热器的收集平面应与两分日中午的太阳光相垂直，因此，太阳能集热器与地面的夹角 $\psi$ 应等于当地地理纬度 $\Phi$，如图 3-18 所示。

（2）偏向冬季或偏向夏季使用的太阳能集热器的安装倾角。

对于偏向冬季使用的太阳能集热器，其安装角度可在地理纬度上再加 10°，即

$$\psi = \Phi + 10^\circ$$

而偏向偏向夏季使用的太阳能集热器，其安装角度可在地理纬度上再减去 10°，即

$$\psi = \Phi - 10^\circ$$

（3）冬季采暖用平板型和竖排真空管型太阳能集热器的安装角度。

对于冬季采暖，太阳能集热器的安装角度应保证最需要太阳辐射的时刻有最佳的集热效果。我们知道，在冬至日前后几天太阳赤纬角在−23.5° 附近，太阳高度角最低。而冬至日又是三九天的开始，即开始了一年中最冷的季节，这些日子是一年中太阳辐射最低，又是最需要太阳辐射的日子。所以太阳能集热器的安装角度应使这些日子有最好的收集效果。赤纬角从−20° ～−23.5° 占了冬至前后各一个月共约两个月的时间，约占采暖期的 1/2，且是最冷的

一个时期，所以太阳能集热器的安装角$\psi$应是：

$$\psi = \Phi + 20^\circ$$

甚至可以采用：$\psi = \Phi + 23^\circ$

这样就保证了在最需要太阳辐射能的近 1/2 的采暖期，有最好的收集效果。

实际上，采用这样的大的倾角还有另一方面的好处，即在夏季不太需要太阳能时，降低了集热器的集热能力，若取$\psi = \Phi + 23^\circ$，夏季中午集热器与太阳光的交角为 $23^\circ \times 2 = 46^\circ$，如图 3-19 所示，则夏季集热器的有效集热面积 *AC* 与冬季集热面积 *AB* 之比为 $\cos 46^\circ \approx 0.7$，大大缓解了夏季热量过剩的问题。

（4）冬季采暖用横排真空管集热器的安装角度。

横排管集热器中真空玻璃管间有间隙，当太阳高度角在一定范围内变化时，不影响其集热面积，参看图 3-20。

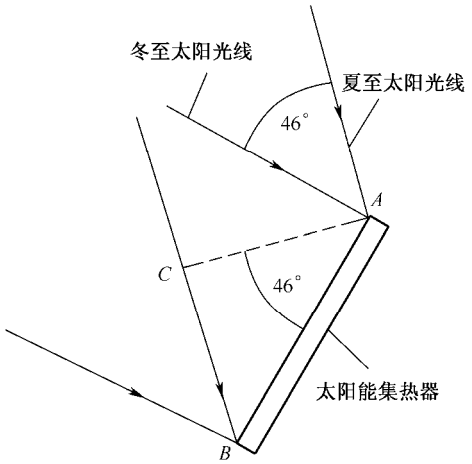



图 3-19 采暖用集热器夏季面积的减少

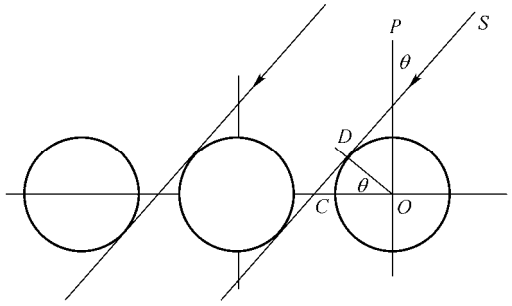



图 3-20 太阳高度角变化对横排真空管接收阳光的影响

图中直线 *SD* 是相邻两个真空管的公共切线，当太阳光沿着 *SD* 方向投射过来时，其截光率与沿垂直方向 *PO* 投射来得阳光的截光率相等。设真空管半径为 3cm，两管间的间隙为 2cm，则 *OC* = 4cm

$$\cos\theta = 3/4 = 0.75$$

$$\theta \approx 41^\circ \quad 2\theta \approx 82^\circ$$

即当太阳光线在集热器正垂直方向上下各 41° 范围内变化，不影响其截光率。

即使我们把玻璃管密排，其间隙变为 1cm，则 *OC* = 3.5cm

$$\cos\theta = 3/3.5 = 0.857$$

$$\theta \approx 31^\circ \quad 2\theta \approx 62^\circ$$

该角度数值也大于一年中太阳赤纬角的变化量 $2 \times 23.5^\circ$。所以其安装倾角可以取当地地理纬度。

全国部分城市的纬度如表 3-6 所示。

**表 3-6**　　**全国部分城市纬度数据**

| 城　市 | 北　纬 | 城　市 | 北　纬 | 城　市 | 北　纬 |
|---|---|---|---|---|---|
| 北京 | 39°57′ | 天津 | 39°07′ | 上海 | 31°12′ |
| 石家庄 | 38°04′ | 保定 | 38°53′ | 太原 | 37°55′ |
| 大同 | 40°00′ | 运城 | 35°00′ | 呼和浩特 | 40°49′ |
| 多伦 | 42°12′ | 哈尔滨 | 45°45′ | 齐齐哈尔 | 47°20′ |
| 长春 | 43°52′ | 延吉 | 42°54′ | 沈阳 | 41°46′ |
| 丹东 | 40°05′ | 济南 | 36°41′ | 青岛 | 36°04′ |
| 南京 | 32°04′ | 徐州 | 34°19′ | 合肥 | 31°53′ |
| 蚌埠 | 32°56′ | 杭州 | 30°20′ | 宁波 | 29°54′ |
| 南昌 | 28°40′ | 赣州 | 25°52′ | 福州 | 26°05′ |
| 厦门 | 24°27′ | 基隆 | 25°09′ | 高雄 | 22°36′ |
| 郑州 | 34°44′ | 信阳 | 32°08′ | 武汉 | 30°38′ |
| 襄樊 | 32°02′ | 长沙 | 28°15′ | 衡阳 | 26°56′ |
| 广州 | 23°00′ | 湛江 | 21°02′ | 海口 | 20°00′ |
| 南宁 | 22°48′ | 桂林 | 25°15′ | 西安 | 34°15′ |
| 延安 | 36°36′ | 银川 | 38°25′ | 兰州 | 36°01′ |
| 酒泉 | 39°45′ | 西宁 | 36°35′ | 玉树 | 32°57′ |
| 乌鲁木齐 | 43°47′ | 喀什 | 39°32′ | 成都 | 30°40′ |
| 重庆 | 29°30′ | 贵阳 | 26°34′ | 遵义 | 27°41′ |
| 昆明 | 25°02′ | 个旧 | 23°22′ | 拉萨 | 29°43′ |
| 昌都 | 31°11′ | | | | |

（5）聚光型真空管集热器的安装倾角。

对全年使用的聚光型真空管集热器，各聚光器要季节性的调整倾角，故对整个集热器框架的安装倾角应等于当地地理纬度。

对主要在冬季采暖使用的固定式聚光型真空管集热器，其安装角度要受聚光器的主要设计参数收集角、收集时间的制约，一般安装角等于地理纬度加 15°～18°，详细内容可参看第 7 章太阳能聚光器。

### 3.7.2　太阳能集热器方位角的确定

对方位角的确定一般不存在困难，朝南向即可。但是在有些村庄，房屋的方位并不朝向正南，尤其是一些山区村庄，其房屋走向或沿河流，或沿山脉，或沿道路。在这类地区，太阳能集热器的安装朝向可以稍微偏离正南向，但一般不要超过左右 15°。cos15°＝0.966，即

当偏离 15° 时，其集热面积约等于正南向安装时集热面积的 96.6%。偏离越大影响越大。当偏离 30° 时，cos30° = 0.866，这时，其集热面积约等于正南向安装时集热面积的 86.6%。

### 3.7.3 太阳能集热器安装的前后间距

大面积太阳能集热器系统都采用阵列联接方式，为使集热器前后排不出现遮阳现象，两排集热器要有一定的距离，两排集热器间的最小间距可由下式计算：

$$D = H\left(\tan\phi - \frac{\sin\delta}{\sin a_s \cdot \cos\phi}\right)$$

式中：$D$——两排集热器不遮阳的最小距离，m；

$H$——集热器顶高，m；

$\Phi$——地理纬度角，°；

$a_s$——太阳高度角，°；

$\delta$——太阳赤纬角，°；

我国冬至时太阳高度角最低，只要冬至日不遮阳，全年就不会出现遮阳现象，所以排列集热器时，只考虑冬至不遮阳即可，太阳能采暖是在冬季进行，所以要特别注意这点。表 3-7 列出了冬至上午 9 时到下午 5 时一些地理纬度不遮阳的 $D/H$ 值。

**表 3-7　　我国部分地理纬度不遮阳的 *D*/*H* 值**

| 地 理 纬 度 | *D*/*H* 值 |
|---|---|
| 25° | 1.52 |
| 30° | 1.85 |
| 35° | 2.31 |
| 40° | 3.00 |
| 45° | 4.19 |

# 第4章 太阳能的吸收、传输和储存

## 4.1 传热学基础知识

无论是太阳灶、太阳能热水器、太阳房、太阳能温室，还是太阳能干燥、太阳能工业加热、太阳能热发电等，都离不开太阳能集热器，都是以太阳能集热器作为太阳能热利用系统的主要部件。太阳能集热器就是太阳能热利用系统中用于吸收太阳辐射并将产生的热能传递到传热工质的关键部件，因此太阳热利用与传热学有密切的联系。为便于学习太阳热利用技术，容易掌握太阳能设备的基本性能和特点，需要介绍一些与太阳能热利用有关的传热学基础知识。

### 4.1.1 温度和热量

温度表示物体的冷热程度。在工程上用摄氏温度（度，℃）与绝对温度（开，K）来度量温度。

摄氏温标取在标准大气压下冰融化的温度为 0℃，水沸腾时的温度为 100℃，将 0～100℃之间分为 100 个刻度，每一刻度就是摄氏温标的 1℃。

绝对温标也称热力学温标，与摄氏温标每度的大小是相等的，所以在热力学中用热力学温度和用摄氏温度计算温差是相等的。但绝对温标的 0K，则是摄氏温标的−273℃，所以，两者有如下的关系：

$$T = t + 273\text{K} \tag{4-1}$$

式中：$T$——绝对温度，开（K）；

$t$——摄氏温度，度（℃）。

热力工程的计算都是以绝对温标计算的。

热量是热能的量度，热量反映了物质内部分子等微观粒子无规则运动的能量。从宏观上说，由于物体之间存在温度差而引起热交换，这种传递的能量称为热量。热量一般用符号 $Q$ 表示。热量的单位与其他能量单位相同，都用焦耳表示，符号是 J，也可用千焦表示，符号 kJ。

热量的另一个单位是卡（cal），或千卡（kcal），千卡也称大卡。每 1g 水在标准条件下升高 1℃所用的热量是 1cal，1kg 水升高 1℃所用热量是 1kcal。1J 约等于 0.24cal，或 1cal

等于 4.186J。

### 4.1.2 比热容和热量计算

（1）质量比热容（或称比热）。

单位质量的物质温度升高 1℃（或 1K）所吸收的热量，或降低 1℃所放出的热量，其数值即是该物质的质量比热容。其单位是 kJ/ (kg•℃)，或 J/ (g•℃)。

比热容是物质的一个基本的热力学性质。不同的物质具有不同的比热容，可以通过实验测得。

某一物质的比热容并不是一个完全确定的值，它随温度、压力等外界条件的变化而变化。但是当外界条件变化不大时，可以认为是不变的值。水的比热容是 4.186kJ/ (kg•℃)。

（2）热量计算。

当物质进行热交换时，利用比热容可以对吸收或放出的热量进行计算。例如，当 5kg 水从 10℃升高到 16℃时，水从外界吸收的热量 $Q$ 为：

$$Q = 4.186\text{kJ/ (kg•℃)} \times (16℃ - 10℃) \times 5\text{kg} = 125.5\text{kJ}$$

（3）体积比热容。

此外，为了计算方便，人们又引入体积比热容的概念，它表示单位体积的某物质温度升高 1℃或 1K 时，所吸收的热量，或降低 1℃或 1K 时所放出的热量。

### 4.1.3 热力学基本定律

#### 1．热力学第一定律

热力学第一定律是能量守恒定律在热力学里的表现形式。能量守恒定律指出：自然界一切物体都具有能量，能量有各种不同的表现形式，既不能消灭也不能创生，它能从一种形式转变成另一种形式，能从一个物体传递给另一个物体，在转化和传递中能量的总量不变。

能量守恒定律适合于热量和其他能量（如电能）之间的转换，也适用于热交换时的能量总量的守恒，在太阳能热利用中我们总是自觉或不自觉地运用这个定律。

在系统与外界交换热量时，作为能量在数量上的守恒关系式，热力学第一定律的一般表现形式可表示为：

系统总能量的变化 = 进入系统的能量 − 离开系统的能量

#### 2．热力学第二定律

人类经过长期的观察和科学研究发现，自然界有很多过程是有方向的，是不能自动逆向进行的。例如一滴墨水滴进清水中会自动地扩散开来，但相反的过程却不能自动地进行：扩散到清水中的墨水不可能自动地重新回聚在一起。热能也有这个性质，高温的物体可以自发地向低温的物体传递热量，但低温的物体则不可能自发地向高温物体传递热量。前者过程不需要任何条件，能自发进行，称为自发过程，而相反的变化却不能自

发进行，称为非自发过程。当然相反的过程并不是不能发生，但这种发生不是自发的而是有代价的。

热力学第二定律就是描述这种有方向性的事物变化过程的，它有多种叙述方式。

克劳修斯的说法：热量不能自发地从低温物体传到高温物体。也就是说不可能不付出代价就能把热量从低温物体（又称低温热源）传给高温物体（又称高温热源）。

开尔文的说法：不可能从单一热源吸收热量使之完全变成有用功而不产生其他影响。

第三种说法：第二类永动机（只用单一热源而能将热能完全转换成功的机械）是不可能制造出来的。

热力学第二定律指明了热量从高温向低温传递的方向性。但只要付出代价，相反的过程也能发生，即只要付出一定代价也能使热量从低温向高温传递，例如空调或热泵就是通过电力做功，在夏季从温度较低的室内把热量传到温度较高的室外；而在冬季，从温度较低的室外把热量传到室内。

热力学第二定律也是宇宙中的普遍法则，在我们的工程实践中要自觉地遵循这一法则。

### 4.1.4　热量传递的基本方式

传热学是研究物体（固体、液体和气体）之间或物体内部因存在温差而发生热能传递的规律。它以热力学定律为基础，用分析的方法来研究热能的传递过程。在自然界，哪里有温差，哪里就会发生传热过程。

热是能量的一种形式，热的传递是一种复杂的过程，它是由温差引起的。为便于研究和计算，一般将热能的传递过程分为 3 种形式：传导、对流和热辐射。这 3 种方式在本质上是不同的。

#### 1．热传导

热传导是在固体中热能传递的唯一方式，在稳定状态下，热传导仅能按一个方向进行，当物体中存在温差时，热能将自发地由高温处向低温处传递。由物体各部分直接接触而引起的热能传递过程称为导热。在固体、液体和气体中都能产生导热现象，但纯导热现象只出现在完全密实的固体中。在导体中，这种传递主要是由自由电子的热运动引起的。热传导的特点是：在传热过程中，物体的各个部分并不发生明显的宏观位移。

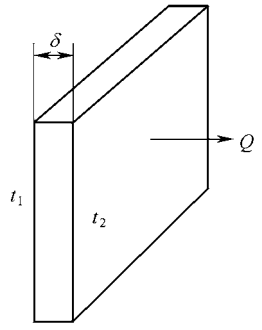


图 4-1　通过固体壁面的导热

（1）稳态导热。

如图 4-1 所示，当固体壁面两侧的温度不相等时（$t_1 > t_2$），热量就会从高温 $t_1$ 侧传向低温 $t_2$ 侧，在开始的传热过程中，$t_1$、$t_2$ 温度是随时间变化的，经过一段时间，工作状况趋于稳定，当 $t_1$、$t_2$ 不随时间变化时，这时的传热称为稳态导热。在这种条件下进行传热分析或计算要简便得多。在以下的分析中都假定 $t_1$ 和 $t_2$ 所在的平面是等温面，且处于稳态传热。

（2）热传导公式。

根据傅立叶（Fourier）热传导定律，物体中的热传导速率（亦称热流率）与垂直于导热方向截面积及温度差成正比，与壁面厚度（或热流传递的距离）成反比。其基本公式为：

$$q_k = \lambda A\,(t_1 - t_2)/\delta \tag{4-2}$$

式中：$q_k$——热导率速率，W；

$\lambda$——导热系数，W/ (m•K)；

$A$——截面积，$m^2$；

$t_1$、$t_2$——导热两表面的高温和低温，℃。

$\delta$——导热壁面的厚度，m。

其微分表达式为：

$$q_k = -\lambda A\,\mathrm{d}T/\mathrm{d}X \tag{4-3}$$

式中：$X$——沿热流方向的距离，m。

在热流方向上，随着距离 $X$ 的增加，温度 $T$ 总是下降，这使得温度梯度总为负值。因此，在热传导公式右边加上负号，使热导率速率 $q_k$ 为正值，表示热流是和距离 $X$ 的正方向一致的。

### 2．导热系数

导热系数是表明材料导热能力大小的一个物理量，有两种计量方式：

一种是千卡/米•时•摄氏度，在数值上等于壁的两表面温差为 1℃，壁厚等于 1m 时，在单位壁面积上每小时所传递的热量（过去的资料上常用这个单位），其符号为 kcal/ (m•h•℃)。

另一种是瓦/米•开在数值上等于壁的两表面温差为 1℃，壁厚等于 1m 时，在单位壁面积上每秒钟所传递的热量，其符号为 W/ (m•K)。

两者的换算关系为：1kcal/ (m•h•℃) = 1.163W/ (m•K)

导热系数与材料的种类有关。对同一种材料，导热系数还与材料所处的温度有关。通常导热系数的数值由实验来测定。

表 4-1 列出了几种常用材料的传热系数值。

**表 4-1　　常用材料的导热系数λ**

| 材 料 名 称 | 导热系数[W/（m•K）] | 材 料 名 称 | 导热系数[W/（m•K）] |
|---|---|---|---|
| 纯铜 | 387 | 混凝土 | 1.84 |
| 纯铝 | 237 | 平板玻璃 | 0.76 |
| 硬铝 | 177 | 玻璃钢 | 0.50 |
| 铸铝 | 168 | 聚四氟乙烯 | 0.29 |
| 黄铜 | 109 | 玻璃棉 | 0.054 |
| 碳钢 | 54 | 岩棉 | 0.035 5 |
| 镍铬钢 | 16.3 | 聚苯乙烯 | 0.027 |

表 4-2 是一些常用隔热材料的导热系数。

**表 4-2　　常用隔热材料的导热系数λ**

| 名　　称 | 导热系数 [kcal/(m•h•℃)] | 名　　称 | 导热系数 [kcal/(m•h•℃)] |
|---|---|---|---|
| 空气 | 0.019 2 | 膨胀蛭石 | 0.45～0.6 |
| 水 | 0.500 | 水泥蛭石板 | 0.08～0.12 |
| 木柴 | 0～0.15 | 脲醛泡沫塑料 | 0.011 9 |
| 干锯木屑 | 0.060 | 聚苯乙烯泡沫塑料 | 0.041 |
| 石炭 | 0.16 | 松散锯末 | 0.08～0.1 |
| 厚纸板 | 0.061 | 木纤维板 | 0.14 |
| 软木板 | 0.036 | 松散稻壳 | 0.104 |
| 混凝土 | 0.7～1.20 | 稻草垫 | 0.047 |
| 干土 | 0.119 | 棉絮 | 0.037 |
| 湿土 | 0.565 | 石棉 | 0.06 |
| 干砂 | 0.28 | 麻毡 | 0.045 |
| 湿砂 | 0.97 | 切碎稻草填充物 | 0.04 |
| 玻璃 | 0.64 | 陶土填充料 | 0.18 |
| 沥青 | 0.60 | 膨胀珍珠岩 | 0.03～0.045 |
| 橡皮 | 0.14 | 泡沫砖 | 0.07～0.16 |
| 矿渣棉 | 0.038～0.046 | 加气砖 | 0.08～0.14 |
| 玻璃棉 | 0.03～0.05 | 加气混凝土 | 0.08～0.12 |
| 玻璃棉毡 | 0.35～0.4 | 水泥珍珠岩制品 | 0.046～0.07 |
| 超细玻璃棉 | 0.26～0.3 | | |

### 3．热阻及热流、温度的计算

为了便于分析计算，我们采用电工学中相似的方法，引进热阻概念。

在电流的欧姆定律表达公式中，电流=电位差（电压）/电阻，或：电位差 = 电流 × 电阻。用类似的方法，我们把公式（4-2）写成如下的形式：

$$q_k = (t_1 - t_2) / (\delta / \lambda A) \tag{4-4}$$

或 $(t_1 - t_2) = q_k (\lambda A / \delta)$

令 $R = (\lambda A / \delta)$，并称其为热阻，则上式就变成：

$$q_k = (t_1 - t_2) / R \tag{4-5}$$

或 $(t_1 - t_2) = q_k R$

在这里我们把 $q_k$ 看成与电流相似的热流，把温度看成温位，把温度差（$t_1 - t_2$）看成与电位差相似的温位差，把（$\lambda A / \delta$）看成与电阻相似的热阻，可以看出上式与电流公式是一样的形式。

从上式可以看出，温差越大，热流越大，热阻越大，热流越小。知道了温差和热阻，可

以计算出热流。同样，知道了热流和热阻，也能计算出温差，并进一步计算出各处的温度。而热阻是由导热物体的固有性质导热系数$\lambda$、导热面积 $A$、导热距离$\delta$决定的。

若热流通过几个连续的平壁面，如图 4-2 所示，则总热阻

$$R = R_1 + R_2 + R_3 \tag{4-6}$$

$$R_1 = \delta_1/\lambda_1 \qquad R_2 = \delta_2/\lambda_2 \qquad R_3 = \delta_3/\lambda_3$$

与串联电路的电流强度处处相等相似，在稳定导热的条件下，通过几个连续的平壁面的热流也相同，即：

$$q = (t_1-t_2) / (\delta_1/\lambda_1 A) = (t_2- t_3) / (\delta_2/\lambda_2 A) = (t_3-t_4) /(\delta_3/\lambda_3 A)$$

即：
$$q = (t_1- t_2) / R_1 = (t_2- t_3) / R_2 = (t_3- t_4) /R_3$$

整理上式得：
$$q = (t_1- t_4) / (R_1+R_2+R_3)$$

即：
$$q = (t_1- t_4) /R \tag{4-7}$$

由此可见，多层平壁的热流量与总的温度降成正比，与各热阻之和（总热阻）成反比。总热阻等于各分热阻之和。

利用上式，只要知道各层材料的热导率，壁厚、和平壁面的温度，再测出多层平面壁两外侧平面的温度，就可以计算出热流量，并进一步计算出各分界面的温度。

### 4．圆筒壁导热

由于圆筒形管道和圆形容器制造方便，受力均匀，节省材料，因此很多管道和容器都采用圆形，太阳能集热器的管道和水箱都是圆形，其外部的保温层就都是圆桶形。此外太阳能地下储存用的地下储水窖也是圆柱形，热量从水窖壁向外层土壤的扩散过程，也是以水窖中心线为轴线按圆桶形的等温面一层一层向外扩散。因此，很有必要讨论一下圆筒壁的导热规律。

由于圆筒壁内外表面面积不同，因此不能用平壁导热公式计算。在稳态导热中，当圆筒的长度大于 10 倍的壁厚时，其轴向导热可以忽略不计，认为壁温仅沿壁厚方向变化，采用圆柱坐标时，可看作是一维导热。图 4-3 所示为内径为 $d_1$ 外径为 $d_2$ 的单层圆筒壁，内外壁面温度分别为 $t_1$ 和 $t_2$，则其单位长度的热流密度为：

$$q = 2 \times 3.14\lambda (t_1- t_2) / \ln (r_2-r_1) \quad (\mathrm{W/m}) \tag{4-8}$$

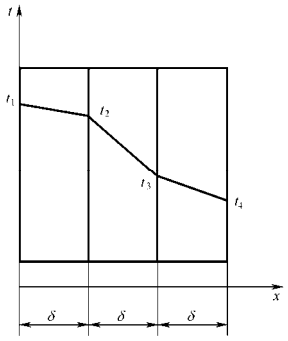



图 4-2　通过多层平壁面的导热

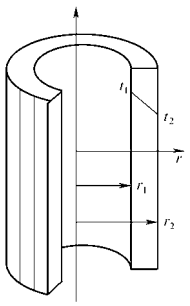



图 4-3　单层圆筒壁的导热

因此单层圆筒壁单位长度的导热热阻为：

$$R_t = \ln (r_2 - r_1) / (2 \times 3.14\lambda) \quad (4\text{-}9)$$

利用上述两式，可以计算任意圆筒壁隔热层的导热量，或在已经知道热量的条件下，计算不同位置的温度。

对于管道直径较大且圆筒壁较薄的情况下，在工程上也常利用一种近似公式（4-10）计算，在公式中，导热的面积用内外圆筒面的平均值来代替。通过分析，在圆筒壁外径和内径之比小于 2 的情况下，用近似公式计算引起的误差不超过 4%，这样的误差在热力学计算中是允许的。这个简化公式是由公式（4-2）变化而来：

在公式 $q_k = \lambda A (t_1 - t_2) / \delta$中，令面积 $A$=$A$ 平均，

而 $A$ 平均 $= 2 \times 3.14 (r_1 + r_2) L/2$

$=3.14 (r_1 + r_2) L$

则有：$q_k = \lambda A$ 平均 $(t_1 - t_2) / \delta$

即：　$q_k = 3.14\lambda (r_1 + r_2) L (t_1 - t_2) / \delta$　（4-10）

式中：$r_1$、$r_2$——圆筒壁的内外半径，m；

$L$——圆筒壁的长度，m；

$t_1$，$t_2$——圆筒壁内外表面的温度，℃；

$\lambda$——圆筒壁的导热系数。

### 5．球壳导热公式

在地下储热系统中，很多小型储热系统更接近圆球形向外发散的传热过程，所以我们再介绍一下球壳导热公式。

$$Q = 4 \times 3.14\lambda (t_1 - t_2) / (1/r_1 - 1/r_2) \quad （W） \quad (4\text{-}11)$$

式中：$r_1$、$r_2$ 为球壳导热体的内外半径。

### 6．对流换热

在流动的流体和流体之间或流体和固体壁面之间进行的热量交换称为对流换热。

对流传递过程可分为自然对流传热和强迫对流传热两大类。自然对流传热是由于流体中存在温度梯度，因而引起密度的改变而产生浮升力所引起的换热现象；强迫对流传热是指流体在外力作用下，流体与所接触的温度不同的壁面所发生的换热现象（如风泵和风机的作用），如在管板式平板太阳集热器中，水与管壁之间的传热就属于对流换热。

无论是自然对流传热还是强迫对流传热，流体的流动状态及热物理性质对于对流传热的换热速率起着非常重要的作用。对流换热的换热速率和表面与流体的温度差以及流体接触的表面积成比例，可用牛顿（Newton）定律公式计算：

$$q_c = h_c A (T_s - T_f) \quad (4\text{-}12)$$

式中：$q_c$——对流换热速率，W；

$h_c$——对流换热系数，W/ ($m^2$•K)；

$A$——与流体接触的表面积，$m^2$；

$T_s$——表面温度，K；

$T_f$——流体温度，K。

表 4-3 给出了几种工作流体在不同换热方式下对流换热系数的量级及近似值。

**表 4-3　　对流换热系数 $h_c$ 的量级及近似值**

| 工作流体及换热方式 | $h_c$ [W/ ($m^2$•K)] | 工作流体及换热方式 | $h_c$ [W/ ($m^2$•K)] |
|---|---|---|---|
| 空气，自然对流 | 6～30 | 水，强迫对流 | 300～6 000 |
| 过热蒸汽或空气，强迫对流 | 30～300 | 水，沸腾 | 3 000～60 000 |
| 油，强迫对流 | 60～1 800 | 蒸汽，凝结 | 6 000～120 000 |

**7．辐射传热**

不需要物质直接接触而进行的热量传递方式称为热辐射传热。

辐射传热的过程是物体的部分热能转变成电磁波辐射能向外发射，当电磁波碰到其他物体时，有部分被后者吸收而重新转变成热能。本质上热辐射也是一种电磁波，与其他电磁波一样，都以光的速度（$3\times10^5$km/s）在空间中传播，不需要任何介质。

所有的物体只要其温度高于绝对零度，总可以发出电磁波；与此同时，所有的物体也吸收来自外界的辐射能。与传导和对流不同，电磁波的传递即使在真空中也可进行，到达地面的太阳辐射就是其中一例；太阳能集热器也是吸收太阳的辐射热，也是辐射传热的一种形式。

为了研究不依赖于物质具体物性的热辐射规律，科学家们定义了一种理想物体——黑体，以此作为热辐射研究的标准物体。

所谓黑体是指入射的电磁波全部被吸收，既没有反射，也没有透射（当然黑体仍然要向外辐射）。

在热平衡状态下，物体所辐射的能量与吸收的能量之比与物体本身物性无关，只与波长和温度有关。在一定温度下，黑体是辐射本领最大的物体，可叫做完全辐射体。

但现实世界不存在这种理想的黑体，真实的物体的发射率都低于黑体的发射率，我们把这些物体称为灰体。在一定温度下，将灰体的辐射能力与同温度下黑体的辐射能力之比定义为物体的黑度，或物体的发射率，用 $\varepsilon$ 表示，灰体的发射率为介于 0 与 1 之间的正数。

物体表面的黑度与物体的性质、表面状况和温度等因素有关，是物体本身的固有特性，与外界环境无关。通常物体的黑度需由实验测定。

凡是将辐射热全部反射的物体称为绝对白体，能全部吸收的称为绝对黑体，能全部透过的则称为绝对透明体或热透体。在应用科学中，常把吸收系数接近于 1 的物体近似地当作黑体。

通常，把物体因有一定的温度而发射的辐射能称为热辐射。热辐射所包括的波长范围近似为 0.3～50μm。在这个波长范围内有紫外、可见和红外 3 个波段，其中 0.4μm 以下为紫外波段，0.4～0.7μm 为可见波段，0.7μm 以上为红外波段。热辐射的绝大部分集中在红外波段。

根据斯蒂芬—玻尔兹曼定律，物体的辐射功率与物体温度的 4 次方及物体的表面积成比例，即

$$q_R = \varepsilon\sigma A T^4 \qquad (4\text{-}13)$$

式中：$q_R$——辐射功率，W；

$\sigma$——斯蒂芬—玻尔兹曼常数，$5.669 \times 10^{-8}$W/ ($m^2$•$K^4$)；

$\varepsilon$——发射率；

$A$——表面积，$m^2$；

$T$——表面温度，K。

发射率是物体发射的辐射功率与同温度下黑体发射的辐射功率之比值。发射率有法向发射率和半球向发射率的区分。在工程应用情况下，一般可用法向发射率近似代替半球向发射率。

根据不同物体在不同温度下具有不同发射率（吸收率）的特点，人们研制出了对太阳能利用有重要意义的选择性涂层。

### 8．选择性吸收涂层

在太阳能利用中，我们当然希望太阳能接收器的表面吸收的太阳辐射尽量多，而向外散发的辐射热尽量少，这就需要所谓的太阳能选择性涂层。

太阳光谱选择性吸收膜是太阳能集热器，尤其是真空集热管必需的光热转换材料。普通的非选择性吸收膜对太阳光的吸收率高，但自身的热发射率也高，故集热效率较低。对于高效集热元件如真空管集热器，则必须选用选择性吸收膜，它要求对太阳辐射有高的吸收率，而在自身工作温度下的热发射率很低。如何实现这一点呢？

由于太阳表面温度高达 6 000℃，其辐射能大部分集中分布在 0.3～2.5μm 的很短的波长范围内，因此，从“吸收”的角度来看，选择性吸收膜只要在太阳辐射能集中分布的这个较小的波长范围（如 0～3μm）内具有高吸收率即可。另一方面，吸收膜工作时要向外发出热辐射，但吸收膜的工作温度低，温度只有 400K（127℃）左右，它的辐射是红外线，所产生的热辐射能 99%以上的波长大于 3μm，吸收膜的发射率基本上是其红外发射率。因此，从“发射”的角度来看，选择性吸收膜只要求对红外光谱具有低发射率就可以了。

这种对短波段（0～3μm）有高的吸收率，对长波段有低发射率的接收器表面就是选择性涂层。

选择性吸收膜通常需要专门制备，其工艺技术很多，如化学转换、电镀、喷涂热分解、氧化着色、真空蒸发、磁控溅射等。全玻璃真空集热管是在内管外壁上沉积选择性吸收膜，玻璃—金属结构的真空集热管是在金属上制备选择性吸收膜，高档的平板型集热器也使用选择性吸收膜。

表 4-4 给出了几种常用材料表面的法向发射率值。

**表 4-4　　常用材料表面的法向发射率$\varepsilon$**

| 材料名称及表面状态 | $\varepsilon$ | 材料名称及表面状态 | $\varepsilon$ |
|---|---|---|---|
| 金：高度抛光的纯金 | 0.02 | 钢：抛光的钢 | 0.07 |
| 铜：高度抛光的电解铜 | 0.02 | 轧制的钢板 | 0.65 |
| 轻微抛光的 | 0.12 | 严重氧化的钢板 | 0.80 |
| 氧化变黑的 | 0.76 | 各种油漆 | 0.90～0.96 |
| 铝：高度抛光的纯铝 | 0.04 | 平板玻璃 | 0.94 |
| 工业用铝板 | 0.09 | 硬制橡胶 | 0.94 |
| 严重氧化的 | 0.20～0.31 | 碳：灯黑 | 0.95～0.97 |

## 4.2 热传递在太阳能采暖上的应用举例

在实际的太阳能利用中，传导、对流和辐射这 3 种传热方式是经常同时发生的，只是在特定的条件下，有时以这种方式为主，有时则以另一种方式为主。了解一下各种太阳能利用设施各自独特的热传递情况，采取有针对性的应对措施，对提高整个太阳能利用系统的效率有重要意义。

### 4.2.1 提高器件热传递能力，增强换热功能

各类换热器大都是通过热传导来交换热量的，因此要求其制作的材料有较高的导热系数。从表 4-1 可以看出，金属的导热系数比较大，而且金属也有较好的刚性、强度、韧性、耐热性等机械性能，所以一般换热器、散热器、管板式的太阳能集热器、闷晒式热水器等都是用金属制造的，而且常用导热系数很高的铜、铝制作。

但是一般来说金属的价格较高，在某些情况下，也可用其他材料。如全玻璃真空管集热器，虽然玻璃的导热性不如金属，但是由于玻璃管的壁厚很薄，根据导热公式，其对导热性能的影响很小。此外，玻璃在其他性能方面有很多优点，尤其是其在透明性、经济性、耐腐蚀性等方面有独特的优势，而且玻璃管的散热系数也较低，所以被广泛采用。

地暖散热管一般用塑料管而不用金属管，其原因在于塑料管价格低，施工方便，可采用较长的塑料管以增加换热面积，提高换热量；地板换热温度低，只有 30～50℃，塑料的耐温性能也适合；地板本身热阻较大，利用金属管意义不大。

### 4.2.2 抑制传热功能，提高设施的隔热保温性能

在太阳能采暖工程中，大部分设施都是防止热量散失的，因此如何从传导、对流、辐射三方面抑制热量的散失，一直是太阳能采暖工程中极其重要的问题，其重要性不低于如何提高太阳能集热器的集热性能。太阳能本身的间歇性和不稳定性，使我们在提高集热性能上难度较大，而在减少热量损失，以提高整个采暖系统的综合性能上，却有很多办法和途径来发挥我们的主观能动性，有很大的操作空间。不论对于太阳能集热器还是被供热的建筑房间，其优良的隔热性能可决定性地影响其综合性能。

#### 1．真空玻璃管集热器优良的隔热性能

与普通的平板型管板式集热器相比，玻璃真空管集热器之所以具有高效的集热性能，在寒冷的冬季也能高效地生产热水，其主要原因并不是其吸收太阳辐射的能力高多少（实际上，其吸收率可能还低些），而是在于其有高得多的抑制散热的性能：双层玻璃管间的真空层，几乎完全隔绝了传导和对流的散热损失；内管表面的选择性涂层在几十摄氏度的低温段，只有很低的发射率，极大地抑制了辐射热损失。所以，即使在寒冷的冬季夜晚，玻璃管内的水也不会因热散失而结冰。

#### 2．房屋建筑的隔热保温

在城市的高层建筑中，一个在楼中间的单元，只有前面和后面两个侧面散热，其他几面都与其他单元相邻而不散热。但是，一个农村平房或独栋别墅，至少有前、后、上、下四面散热，甚至有的房间是五面散热，从而大大增加了其散热量。这从另一方面说明，低层建筑采暖中，房屋的隔热保温具有更重要的意义。

要解决低层建筑的隔热保温问题，首先要了解房屋建筑中的不同部位的散热途径和散热形式。

（1）抑制门窗散热。

门窗散热是房屋散热的主要途径，一些老式房屋门窗的密封性很差，四处缝隙都透风。有句俗话：针大的孔，斗大的风。这说明在冬季由于房屋内外温差大，对流热损失很大。从表 4-1 和表 4-3 可以看出，对流传热能力比传导传热能力要大得多，对于密封性不好的房屋，室内的热空气很容易通过各个缝隙流往室外，而室外的冷空气会同时流入室内，从而使房间内的温度迅速降低。

城市楼房内各单元的门都是在楼道内开的，而农村屋门相当一部分是直接在院中开的，在冬季，门一打开院中的冷空气就会迅速进入室内，房间温度会迅速降低。甚至还有不少农户直接把烧火炕的煤炉放在室内，由于煤炉、烟筒的密封性不好，燃煤释放出的一氧化碳、二氧化硫等有毒、有味的气体常常散发到房间内，因此不得不预留对外通风口以排除这些有害气体，这也会大大增加对流热损失。

因此对于搞太阳能采暖工程，首先要解决门窗散热问题。解决的办法有以下几个。

第一，改用密封比较好的铝合金或塑钢门窗，最大限度地抑制传导和对流热损失。

第二，对直接向院外开的门，最好设置双道门，避免院外冷空气直接进入室内。

第三，采用双层玻璃门窗或中空玻璃窗，尤其是采用中空玻璃，其经济性和隔热性能都比双层玻璃门窗更好。

双层玻璃门窗每一层都需要单独制作，这必然加大制作成本，而且两层窗户间的空隙较大，中间的空气可以在内部形成对流，增强了两层玻璃之间的热传递。而中空玻璃中两层玻璃间空隙较小，不易形成对流，空气的导热系数又很低，故隔热能力更强。

中空玻璃又称密封隔热玻璃，它是由两片或多片性质与厚度都相同或不相同的平板玻璃切割成预定尺寸，中间夹充填干燥剂的金属隔离框，用胶粘结压合后，四周边部再用胶接、焊接或熔接的办法密封所制成的玻璃构件。可以根据要求选用不同性能的玻璃原片，如透明浮法玻璃、压花玻璃、彩色玻璃、钢化玻璃等。

中空玻璃不仅有与单层玻璃相同的采光性能，而且与单层玻璃相比，具有隔热保温、隔声、防结露、安全、美观等一系列优点。若在玻璃之间充以漫射光材料或电介质等，则可获得更好的声控、光控、隔热等效果。

中空玻璃的传热系数一般不大于 3.2W/ ($m^2$•K)，而 4mm 单层玻璃的传热系数为 5.8W/（$m^2$•K），据测算，如果采用 4mm + 12mm + 4mm（4mm 玻璃 + 12mm 隔离框厚度 + 4mm 玻璃制成）的中空玻璃，取代 4mm 厚的单层玻璃，冬季采暖可降低能耗 25%～30%，可节约能源费用 20%～40%。

我国北方地区的门窗冬季结露一直是一个很大的问题，有时即使采用双层门窗也防止不

了结露。如不及时清除，则会继续结冰，不但影响室内环境和采光，而且易损坏门窗。中空玻璃内部的结露点低于−40℃，如采用上述（4mm + 12mm + 4mm）的中空玻璃，当室温为20℃，相对湿度为 40%时，室外温度为−25℃时不结露，而使用 4mm 的单层玻璃，室外温度在−5℃时就结露。

（2）降低墙壁散热。

① 采用新型墙体材料。

实心砖墙或空心砖墙：在外墙内表面抹水泥型或石膏型膨胀珍珠岩砂浆。

加气混凝土墙：加气混凝土热导率低，宜用于框架填充墙和多层住宅外墙。

轻骨料混凝土墙：采用以浮石、火山灰渣或其他轻骨料制作的多空混凝土砌块，并用保温砂浆砌筑墙体。

② 采用复合保温墙体。所谓复合墙体是指由承重材料和高效保温材料进行复合组成的墙体。承重材料可用砖、砌块或混凝土墙体，保温材料可用聚苯板、岩棉板、水泥膨胀珍珠岩板等。

复合墙主要有内保温复合墙、夹芯保温复合墙、外保温复合墙 3 种。

内保温复合墙：保温材料设在承重墙体内侧。其典型结构是承重层＋隔热层＋面层，其优点是对面层无特殊要求，施工便利，不受气候影响，造价适中。其主要缺点是有热桥产生，会减低绝热效率，墙体内表面易发生结露，室温波动大，减少室内有效使用面积。

夹芯保温复合墙：夹芯保温复合墙是将保温材料放在墙体中间，需要在建房时现场施工。其特点是：施工尚便利，绝热性能也可，对绝热层保护得好，造价适中。其缺点是有热桥产生，会降低隔热效率；墙体较厚，影响使用面积。

外保温复合墙：在承重墙外表面上粘贴或吊挂聚苯板或岩棉板，然后贴上网布或挂钢丝网增强，再抹灰面层形成外墙保温复合墙。其主要优点是基本上可消除热桥，隔热效率高；墙体内表面不结露；不减少使用面积；墙体有很好的储热作用，室温波动小；既适用于新建房，也适用于旧房改造，不影响使用。其主要缺点是造价较高，施工较困难，施工质量要求高，否则会造成外墙面开裂、脱落。外保温复合墙的综合性能好，是今后墙体保温的发展方向。

（3）屋顶保温。

① 平屋顶保温：可采用加气混凝土块，架空层填充袋装膨胀珍珠岩、岩棉，还可采用防水层在下、聚苯板在上的倒铺法。

② 尖顶屋面保温：可顺坡顶内铺设聚苯板、岩棉板等隔热材料，也可在天棚上铺设隔热材料。

## 4.3 传热介质

在太阳能热利用中，几乎每个器件都涉及热量的传递，在热量的传递过程中除辐射传热外，对流和传导都需要一定的传热介质作为热的负载体。在太阳能利用中常用的传热介质有水、空气、有机或无机液体、固体（如金属、塑料等）。在太阳能地下热储存中，土壤也是主

要的传热介质。

### 4.3.1　水

在太阳能热利用和太阳能采暖中，水是最主要的传热介质，水作为传热介质有其他材料所不具备的许多优良特质。

（1）水的流动性好，黏稠性低，易于在各种口径的管道中流动，可以短距离传输，也可长距离传输，只要给一定的压力，很容易把热量传输到各个需要热量的位置，这是一些固体传热介质和黏稠度大的液体所不具备的。

（2）水是已知液体中热容量最大的物质，同样流量的水的导热量最大，故用水传热，所用管道最少。这一特性使水既可作为好的传热介质，又可作为好的储热介质。

（3）在 0～100℃的温度范围内，水的稳定性高，自身不易发生化学变化，与很多管道材料相容性好。

（4）水的来源广，几乎处处都有，且价格最低廉。这点也是其他很多传热材料所不具备的。

（5）无毒无味，对环境不造成污染。

当然作为传热介质，水也有缺点，主要有以下几点。

（1）超出 0～100℃范围，水就不适宜作传热介质，高于 100℃，水就变成气体，而低于 0℃又变成固体，失去了流动性。

（2）水在变成固体后，相对于液体其体积要膨胀。在太阳能利用和其他热利工程中，大部分管路是要过冬的，如果冬季管路中还有水，不管是正在运行还是停止运行，若是隔热保温做得不好，就有可能冻坏管道。这点是水作为传热介质的主要缺点，在做工程时要特别注意。

（3）水对一些金属有腐蚀性，当采用钢铁、铝等作为管道或容器时，要采取防腐蚀措施。

### 4.3.2　空气

在太阳能空气集热器中，空气是传热介质，空气作为传热介质有以下优点。

（1）流动性最好，易于在各种口径的管道中流动，可以短距离传输，也可长距离传输，只要给一定的压力，很容易把热量传输到各种需要热量的位置。

（2）化学性能稳定，无毒无味，可以在各种管道中传输，一般来说对管道的材质无特殊要求，若不在高压下运行，对管路的密封性要求也不高，不会造成环境污染。

（3）在环境温度下不会发生液化等现象，无腐蚀性，不会损伤工程器件。

（4）空气无处不在，没有材料费用。

当然，空气作为传热介质，也有缺点，主要有以下两点。

（1）由于空气的密度很小，其体积热容量很低，要传输足够的热量需要很大的体积，因此工程所用的管路和换热器面积都较大，这会增加系统的造价。

（2）换热效率低。由于空气的密度低，要达到一定的换热量需要较大的空气量，这就造成了其换热效率较低。一般用水作传热介质的太阳能热水器，其效率在 40%～60%之间，而

空气集热器只有20%左右。

虽然空气作为传热介质有效率低的缺点，但是在一些高寒地区太阳能采暖也适宜采用空气作传热介质，因为采用太阳能空气集热器不存在对管道冻坏的问题，而且若设计合理，可以把太阳能加热的空气直接导入房屋供暖，减少传递和换热环节，可适当提高总体热效率。

### 4.3.3 液态有机物

很多在常温下是液态的有机物都可以作为传热介质。比如汽车的防冻液就是一种传热介质，它用在汽车上是为了把汽车运行时发动机内部产生的热量传送出来，其工作温度一般在零下几十摄氏度到100℃之间，与太阳能热利用的温度范围基本相同，当然也可用在太阳能热利用上。

防冻液一般分乙醇—水型、甘油—水型和乙二醇—水型3种。乙醇的冰点为−114℃，沸点为78.3℃。乙醇易着火，易蒸发，配制时其含量一般不宜超过40%。甘油（丙三醇）的冰点为−17℃，沸点为290℃，与水混合后的冰点最低可达−46.5℃，水中甘油的含量要相当大时才能得到低冰点防冻液，使用起来不经济。乙二醇的冰点为−11.5℃，沸点为197.4℃，与水混合后的冰点最低可达−68℃。乙二醇易腐蚀金属，调配防冻液时要添加防蚀剂，一般每升防冻液加磷酸氢二钠2.5～3.5g、糊精1g。乙二醇吸湿性强，储存容器应密封。乙二醇不易挥发，配制时用量少，因而使用较广。

对防冻液性能的要求是：沸点和闪点高；比热和传导能力大，在低温时粘度小，蒸汽压不高，不易起泡；不致使冷却系统金属件腐蚀和橡胶软管、密封垫变质。

各类导热油也是专门的商品化有机导热介质，大都是用在100℃至几百摄氏度的中温热利用领域。在太阳能中，高温热利用领域要采用热管真空管集热器或聚光型集热器，其集热和工作温度大都在100℃以上，若仍采用水为导热介质，就会遇到高压等难解决的问题，因此必须采用沸点高的各类导热油作导热介质。

市场上有下列多种类型导热油。

（1）烷基苯型（苯环型）导热油。这一类导热油为苯环附有链烷烃支链类型的化合物，属于短支链烷烃基萘（包括甲基、乙基、异丙基）与苯环结合的产物。其沸点在170～180℃，凝点在−80℃以下，故可作为防冻液使用。此类产品的特点是在适用范围内不易出现沉淀，异丙基附链的化合物尤佳。

（2）烷基萘型导热油。这一类型导热油的结构为苯环上连接烷烃支链的化合物。它所附加的侧链一般有甲基、二甲基、异丙基等，其附加侧链的种类及数量决定了化合物的性质。侧链单与甲基相连的烷基萘，应用于240～280℃范围的气相加热系统。

（3）烷基联苯型导热油。这一类型的导热油为联苯基环上连接烷基支链一类的化合物。它是由短链的烷基（乙基、异丙基）与联苯环相结合构成，烷基的种类和数量决定了其性质。烷烃基数量越多，其热稳定性越差。在此类产品中，由异丙基的间位体、对位体（同分异构体）与联苯合成的导热油品质最好，其沸点大于330℃，热稳定性亦好，是在300～340℃范围内使用的理想产品。

（4）联苯和联苯醚（二苯醚）低熔混合物型导热油。这一类型的导热油为联苯和联苯醚

低熔混合物，由 26.5%的联苯和 73.5%的联苯醚组成。熔点为 12℃，是世界上最早使用的合成芳烃导热油，其特点是热稳定性好，使用温度高（400℃）。此类产品因为苯环上没有与烷烃基侧链连接，所以在有机热载体中耐热性最佳。这种凝点（12.3℃）低熔混合物，沸腾温度在 256～258℃范围内，使用比较经济。由于二苯醚中结合醚物质，在高温下（350℃）长时间使用会产生酚类物质，因此该物质有低腐蚀性，对碳钢等有一定的腐蚀作用。

### 4.3.4　盐类的水合物、水溶液

在后面热量储存一节中将会谈到，各种盐类的水合物是最重要的潜热储存物质，如十水硫酸钠、六水氯化钙等，这些材料都有可能用在太阳能采暖的潜热储存中。这些储热材料在使用过程中要发生固相—液相的反复转化，尤其在固相时，要求这些材料具有较高的导热性能，才有利于能量的储存和释放。

有些盐类的水溶液与水相比，具有较高的沸点（高于 100℃）和较低的凝固点（低于 0℃），在某些高于 100℃的工作条件下或低于 0℃的条件下，可以取代水作为传热介质。

盐类的水合物、水溶液一般都有一定的的腐蚀性，在应用时要注意防腐。

### 4.3.5　金属

钢铁、铝合金、铜等金属是太阳能利用中重要的传热介质，由于金属具有较高的导热系数，很多太阳能接收器都是由金属制成的。早期的管板式太阳能集热器就是用铁板和铁管制成的，由铁板接收太阳辐射能，转化成热能后再传给铁管中的水。后来为进一步提高热性能，转而采用导热性能更高的铝板和铜管，这就是目前大量应用的铜铝复合管板式太阳能集热器。

在热管式集热器中，为了提高热管的吸热和放热特性，其基本集热元件热管大都是用金属制造的，且一般是采用导热性能最好的铜管制造。

### 4.3.6　土壤

土壤本来不是商品传热材料，但是在地源（土壤源）热泵系统中和太阳能地下储存系统中，土壤的导热性能对系统性能的影响有决定性的作用，在这些系统中，土壤是最重要的传热介质。

在土壤源热泵供暖系统中，希望土壤的导热性能越高越好，这样才能把土壤中储存的热能有效地提取出来。

在太阳能地下热储存供暖系统中，土壤同时扮演传热材料、隔热材料和储热材料三重身份，这些身份有的是相互矛盾的。作为传热材料，我们希望土壤的导热性能越高越好；但作为隔热材料，又希望其导热性能越低越好。实际上土壤的导热性能处于中间位置，不算太高，也不算太低，可同时兼顾导热和隔热的不同需求。当然，在对系统的具体设计时，我们要根据系统不同部位对导热或隔热的不同需求，通过优化设计，来提高或降低其导热或隔热能力：在系统的边缘部位通过尽量减少边缘面积，减低其导热能力；在系统内部，通过增大接触面积，来增强导热能力。

### 4.3.7 相变换热

相变换热是另一种特殊的换热形式，它有很强的换热能力，热管就是依靠相变换热制成的高效换热元件。热管具有极强的传热能力，比导热能力最强的铜棒还高 500 倍，难怪有人称其为超导传热。

简要地说，热管的工作原理是：在其蒸发端把工作的液态物质加热汽化，吸收大量的汽化热，然后形成的高速蒸汽进入冷凝端又冷凝成液体，同时放出大量凝结热（汽化热和凝结热在同一温度下是相等的）。由于在同一个热管腔内，冷凝端和蒸发端几乎处于相同的温度和压力下，因此，热管几乎具有等温传热的能力。另一方面，物质的汽化热都很大，例如，1g100℃的液态水变成 1g100℃的蒸汽，温度没有升高，但也需要 539cal 的汽化热量；而 1g 水从 0℃升到 100℃也仅需要 100cal 的热量，因此热管的导热能力极强。

很多物质可以作为热管的工作介质，如水、乙醇、丙酮等，一些沸点低的轻金属，可作高温热管的工作介质，如钠。

相变换热在建筑物的采暖空调中占有重要的位置，热泵、空调机都是利用物质相变换热的原理制造的，过去大量采用氟利昂作工作介质，现在大都采用无氟工质，以减少对大气层的破坏。

## 4.4 能量储存概述

太阳能的一个主要缺点是它的间歇性和不稳定性，不仅夜晚无阳光，阴天、雨雪天气也无太阳辐射能，有时甚至长达十几天或更长的时间没有太阳，而采暖却需要天天进行，因此，如何解决这一问题是太阳能采暖工程中的一个关键、核心问题。

这个问题要从能量储存和辅助热源两个角度来解决。

### 4.4.1 蓄电池

蓄电池是电能和化学能相互转化的装置，已广泛地应用在人类生产生活的各个领域，人们正努力研究开发更大容量的蓄电池以便用于电动汽车等大容量的用电设备上。但总的来说，其价格还是较昂贵，且储电量有限，只能用在小用电量的地方。

### 4.4.2 抽水储能

抽水储能的方法在水电站已得到应用，其方法是在电力有剩余时（例如夜晚），利用多余的电力从下游重新把水抽回水库，即把电能变成水的势能，在白天用电高峰时再用水力把电能重新发出来，从而保持电网电力平衡，保持电网系统的发电设施运行平稳。这种方法只有在有水电站的地方才可行。

### 4.4.3 飞轮储能

靠一个很重的飞轮高速转动来储存动能，这是科学界一直在研究的课题，但尚没有得到广泛的应用。

### 4.4.4　超导线圈储存电能

在接近绝对零度的条件下，导体的电阻可接近零，这就是所谓超导现象。用超导体做成的线圈可容纳巨大的电流量，用这种超导线圈可以储存大量的电能，这是科学研究中的前沿课题，目前的关键是寻找高温超导物体。

### 4.4.5　化学储能

把太阳辐射能转变成化学能储存起来，是一种较理想的储能方式。一般来说这种储能方式容量大，既可以用较小的容积储存较大的能量，且不需要隔热保温，没有热损失，又可以长距离运输。例如，用太阳能制成氢燃料，就有很大希望。氢燃料有很多优点，易储存，运输和使用都很方便。氢燃烧的产物是水，没有污染；制作的原料也是水，取之不尽。因此，把氢作为未来的能源是很有吸引力的。有人设想，一旦找到制氢的好方法，每个家庭都可以安装一台太阳能聚集器，生产廉价的氢燃料，供家庭生活之用。但是目前，分解水制氢的效率还很低，仍处于试验研究阶段。

另一种储能的方法是利用物质和水反应产生的水化热。例如氧化钙和水反应：

$$CaO + H_2O = Ca(OH)_2 + Q$$

大约可放出 15kcal/g 分子的热量，而加热氢氧化钙可还原出氧化钙和水，从而把能量储存起来。还原的方法比较简单，没有危险。氢氧化钙失水的温度是 580℃，对聚光式太阳能集热器来说，这一温度是不难达到的。

但使用这种方法储能也有不少问题需要解决，加热还原氢氧化钙生成氧化钙和水时，要在 580℃以上的高温下进行，所产生的高温氧化钙和水蒸气具有大量的显热和潜热，如何利用这部分热能是个较难解决的技术问题。

总之化学储能还处于试验研究阶段，离实际应用还有一定距离。

### 4.4.6　相变储热

利用物质的相变来储存能量是能量储存中研究最广泛最深入的领域，有的已有实用价值。在太阳能储存研究中，这是一个极重要的方面。

当物质状态变化，如固态变成液态、液态变成固态时，具有“吸收”、“释放”热能的特性。所谓相变储热，就是用物质相变吸收热量来储热。把固体熔解变成液态时要吸收热量，例如把 0℃的冰变成 0℃的水，虽然温度没有升高，但仍需要吸收大量的热能，这部分能量就称为熔解潜热；而把物质由液态凝结变成固态时也要放出同样的热量，这部分能量就称为凝固潜热。正是利用物质相变时吸收和放出热量，可以实现热能的储存和释放。

另外，相变的热量，即从一种晶型过渡到另一种晶型的潜热也可用作储能。

相变储能已有一定的实用价值，后文中还将进一步论述。

### 4.4.7 显热储存

显热是指物质在温度上升或下降时所吸收或放出的热量，在这个过程中物体本身并不发生变化。水的单位质量的热容量在已知物质中是最大的，1kg 水温度升高 1℃就会吸收 1kcal 的热量，然后再冷却到原来的温度，就会放出 1kcal 的热量。

岩石、卵石、土壤都可作为显热的储存介质。

用水、岩石、土壤等物质作显热储存物质的主要优点是成本低，稳定可靠。显热储存的主要缺点是热容量小，所用材料多，占用体积大。

用水作储热材料已广泛应用在太阳能热利用上，常用的储水箱即为最基本的储热设施。在太阳能采暖中更是采用了多种形式的显热储存，后面我们还将进一步分析。

## 4.5 潜热储存

### 4.5.1 相变储能的优点

利用物质的相变热来储存能量是一种“潜在的能量”储存形式，即在热量发生转化时物质的温度没有明显的变化，很显然，利用相变储能有如下优点。

（1）热量在输出和输入时，温度可以基本保持不变，这可以保证恒定的供热能力。

（2）由于相变时储热物质温度基本保持不变，故只要选取适宜的相变储热材料，使其相变温度与供热对象要求的温度基本一致，就可以大大减少储存热量的损失，还可以大大降低温度调节控制系统的费用。

（3）在低温范围内，一般物质在相变时所吸收或放出的潜热（溶解热和凝固热）大多为每千克几百千焦的数量级。所以，如果储存相同的热量，则所需要的相变材料的质量往往仅为水的 1/3～1/4，或岩石的 1/5～1/20，其所占用的体积仅为水的 1/4～1/5，或岩石的 1/5～1/10，即占用空间较小。

### 4.5.2 相变储能技术在建筑采暖上的应用

结合室内建筑进行相变储能是一种比较经济、有实用价值的办法，有下面几种基本形式。

**第一种，在地板辐射采暖换热系统中，在地面下供热的地下盘管周围埋置相变储热模块，这种模块可由钢筒、塑料筒或其他各种适宜的材料制成的不同形状的容器，内装相变储热材料。**白天有阳光时，通过循环泵，把来自太阳能集热器的热水泵入地下盘管，热水把地板和周围的相变储热模块加热，使相变储热材料由固态熔解成液态，同时吸收熔解热，即把热量储存起来供夜间用。到夜间，循环泵停止运行，地下盘管中的水温下降，相变储热材料也慢慢降温，并慢慢由液态凝固成固态，同时放出凝固热，以满足房间采暖的需求。

这种储热方式要求相变储热材料的相变温度（熔点或凝固点）稍高于室内采暖设定的温度。

相变储热材料在地板辐射采暖中的安装示意图如图 4-4 所示。

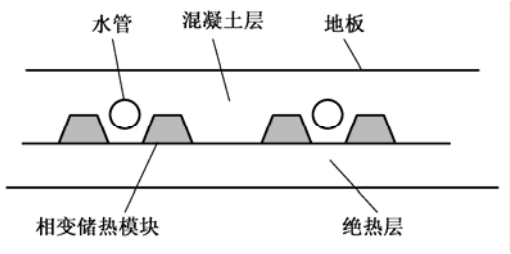



图 4-4　相变储热材料在地板辐射采暖中的安装示意图

**第二种，当不采用地板辐射采暖的形式，而是采用一般金属散热片来供暖时，就不宜采用第一种储热形式。**这时我们可以把相变储热模块做成墙壁砖的样式，或做成其他可以嵌装在墙壁内的形式，装在墙壁内靠近散热片的地方。白天有阳光时，循环泵启动，通过水循环，把太阳能集热器收集的热量带给散热片，散热片在给房间供热的同时也把附近的相变储热模块加热，模块内的相变储热材料熔化吸收熔解热能，把热量储存起来。晚上循环泵停止运行，散热片内的水温下降，相变储热材料也慢慢降温，并慢慢由液态凝固成固态，同时放出凝固热，以满足房间采暖的需求。

由于在这种方法中，散热片只靠辐射传热和小部分对流传热来给相变储热模块加热，而把大部分热量散给了室内的空气，相变储热模块直接从散热片接收的热能较少，因此从设计上，要考虑使这种储热模块还可以从室内空气中吸收热能。故相变储热模块中的相变储热材料熔点温度的选取就非常重要，不能高也不能低，其熔点的要选取在设定室温附近。例如若设定冬季室温保持在 15～18℃之间，则相变储热材料的熔点也必须在 15～18℃之间。熔点高了，相变储热材料熔化不了，不能储热；熔点低了，低于设定的室内温度，也不能凝结释放热量供热。

**第三种，即在室外地下单独设置一个相变储热材料储存窖，或在地上设置相变储热材料储存桶、储存池。**用太阳能集热器的热水加热储存窖内的相变储热材料，然后再由储热窖或储热池向房间供热。用这种方法储热会带来下列问题。

（1）采用储热桶或储热窖保温隔热，会增加大量成本。

（2）因为目前所知的相变储热材料的熔解热大都是每千克几百千焦数量级，热容量不大，用这种方法储热需要大量储热材料，会大大增加系统成本。

（3）在反复的相变过程中，要产生固态物质，而固态物质的换热系数一般都很低，要使热量能够有效地从固态物质中传入传出，就需要增加换热装置，这也会大大增加系统成本。

（4）为实现有效的供热，储热材料的熔点要高于设计室温，而且，为了提高换热效率，系统的工作温度还要比熔点高，虽然有隔热保温措施，但还是会降低系统的总换热效率。

基于上述原因，目前这种储热方式还较少用。

### 4.5.3　相变储热材料的特性要求

不同用途的储热材料，要求有不同的材料性能，对于建筑采暖用相变储热材料，应具有下列特性。

（1）具有较合适的熔点温度。例如，用于地板辐射采暖的系统，其熔点高，最好在 30℃左右。过高会提高系统工作温度，降低系统换热效率；过低会起不到储热作用。

（2）有较大的熔解热。显然，有较大的热容量，可以减少储热材料的用量，降低储热设备的成本。

（3）在固态和液态中都有较大的热导率、热扩散率和比热容（单位容积的热容量）。

（4）只有微小的或没有“过冷”现象和分层现象。

过冷问题和分层问题是无机盐的水化物类相变储能物质能否长期正常使用的关键问题，这个问题下面还要较详细地谈。

（5）具有高度的化学稳定性，与容器壁面之间不发生化学反应。

（6）相变时体积变化很小，无论处于固态还是液态，都能与容器壁面之间接触良好。

（7）具有较低的蒸汽压，不容易燃烧，无毒性。

（8）价格低廉，来源丰富。

### 4.5.4 常用的无机盐水化物作相变储热材料

有不少无机盐的水化物，例如 $CaCl_2 \cdot 6H_2O$、$Cu(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$、$Mn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$、$Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$、$LiNO_3 \cdot 3H_2O$ 等，特别在低温范围内，其熔点都比较适宜作为采暖的相变储热材料，它们的储能密度大都在 120～300kJ/kg 范围内，并且价格比较便宜，来源也比较丰富。

在各种无机盐类组成的相变储热材料中，一般无水无机盐的熔点都较高，多在几百到一千摄氏度，虽然少数无水无机盐类的熔点较低，但往往价格较高，不利于广泛应用。

表 4-5 列出了常用无机盐水化物的热物理性能。

**表 4-5　　常用无机盐水化物的热物理性能**

| 水合物分子式 | 结晶水的变化 | 熔点（℃） | 熔解潜热（kJ/kg） | 熔解熵（kJ/℃） | 比热容 [kJ/(kg•℃)] | | 密度（kg/m³） | 无水盐类含量（%） | 溶解度（%） |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | 固态 | 液态 | | | |
| $CaCl_2$ | 6～2 | 29.5 | 170 | 123 | 1.46 | 2.30 | 1 680 | 50.5 | 56 |
| $Ca(NO_3)_2$ | 4～2 | 39.7 | 140 | 105 | 1.46 | | 1 820 | 69.5 | 74 |
| $Cd(NO_3)_2$ | 4～3 | 59.5 | 106 | 98.3 | 1.09 | 1.59 | 2 450 | 76.5 | 73 |
| $Cd(NO_3)_2$ | 6～4 | 57 | 127 | 112 | 1.55 | 2.10 | 1 870 | 63 | 61 |
| $Cu(NO_3)_2$ | 6～4 | 24 | 123 | 123 | 1.38 | 2.01 | 2 070 | 63.5 | 62 |
| $FeCl_3$ | 6～0 | 37 | 226 | 197 | | | | 60 | 70 |
| $LiNO_3$ | 3～0 | 30 | 297 | 120 | | | | 56 | 61 |
| $MgSO_4$ | 7～1 | 48 | 202 | 157 | 1.51 | | 1 460 | 49 | 39 |
| $MnCl_2$ | 4～2 | 58 | 178 | 107 | | | 2 010 | 63.5 | 52 |
| $Mn(NO_3)_2$ | 3～2 | 35.5 | 102 | 87.9 | 1.42 | 1.72 | | 77 | 极易溶 |
| $Mn(NO_3)_2$ | 6～4 | 26 | 140 | 134 | | | 1 820 | 62.5 | 67 |
| $NaC_2H_3O_2$ | 3～0 | 58 | 180 | 87.9 | 1.97 | 3.35 | 1 450 | 60.5 | 60 |
| $Na_2CO_3$ | 10～1 | 34 | 251 | 237 | 1.88 | 3.35 | 1 440 | 37 | 34 |
| $Na_2CrO_4$ | 10～4 | 20 | 163 | 192 | | | 1 480 | 47 | 48 |
| $Na_2HPO_4$ | 12～2 | 36.5 | 264 | 276 | 1.55 | 3.18 | 1 520 | 40 | 44 |
| $Na_2SO_3$ | 5～0 | 49 | 213 | 155 | 1.65 | 2.38 | 1 680 | 64 | 67 |
| $Na_2SO_4$ | 10～0 | 32.4 | 251 | 266 | 1.78 | 3.31 | 1 460 | 44 | 34 |
| $Ni(NO_3)_2$ | 6～4 | 57 | 152 | 139 | 1.69 | 3.10 | 2 050 | 63 | 64 |
| $Zn(NO_3)_2$ | 6～4 | 36.4 | 130 | 121 | 1.34 | 2.26 | 2 070 | 64 | 67 |

由于常用无机盐水化物的熔点较低，大都在几十摄氏度范围内，与太阳能集热器的的工作温度在同一数量级，较容易相匹配，可以使太阳能集热器在较高的效率下运行。常用的无机盐水化物的种类较多，我们可以根据热负荷的温度和对热量的需要选取适宜的无机盐水化物以及相应的数量。

### 4.5.5　分层问题（晶液分离）及解决途径

利用无机盐水化物作为相变材料虽然具有许多优点，但从实际应用来看，绝大多数无机盐水化物都存在一些问题，这些问题不解决就不能大规模和长期地应用。

分层问题，即晶液分离问题，是影响储热材料长期使用的最主要的问题。所谓晶液分离问题，就是带有结晶水的无机盐水化物其受热熔解和冷却结晶的过程未能做到完全可逆，产生固体物质沉淀，久而久之，固体物质沉淀越来越多，其储热能力就会减退，最后可能完全消失。

当带有 $N$ 个结晶水的无机盐水化物受热时，其一部分结晶水会首先游离出来，变成带有 $M$ 个结晶水的无机盐（$M<N$），这些无机盐水化物继续溶解在已游离出的水中。有些无机盐水化物在加热时甚至会失去全部结晶水，变成不带结晶水的无机盐。这些不带结晶水的无机盐可能会全部溶解在已游离出的水中，但也可能只有部分溶解。当在熔点之上有部分无机盐未溶解时，这些无机盐一般比重都较大，就会沉淀到容器的底部。

当冷却放热时，溶于水的无机盐就会重新结晶，仍变成带 $N$ 个结晶水的无机盐水化物，同时沉淀到容器底部，从而又把热量放出。但是，这些沉淀到容器底部的无机盐水化物会把原先早已沉淀到底部的无机盐包围住，使其不能再和已游离出的水结合，从而，在上层会剩下一部分游离出的水，形成晶液分离现象。经过多次吸热—放热的热力循环后，沉淀物越来越多，其吸放热的功能就会逐渐减退直至消失。

为了解决晶液分离现象，可以在无机盐水化物中加入适当的“增稠剂”，以防止析出的无水无机盐沉淀到底部。这样就有可能使无水盐与其结晶水在熔点温度下重新结合。通常使用的增稠剂为硅胶的衍生物。

### 4.5.6　“过冷”问题及解决办法

对密闭在容器内的无机盐水化物加热，当其温度达到熔点全部溶化后继续加热，使其温度超过熔点，然后再对其进行冷却，这时常常出现这种现象：当温度降到熔点后继续冷却，溶液并不结晶，只有当温度降到低于熔点一定温度时，才会自发结晶。例如 $Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$ 的熔点是 32.4℃，但往往冷却到熔点以下还不结晶，一直冷却到−7℃才自发结晶，与应该结晶的熔点温度相差近 40℃。这种现象叫过冷。不少物质的这种过冷状态的温度与其熔点温度可以相差 30～40℃。

当溶液出现过冷现象时，由于没有产生结晶过程，因此熔解热就放不出来，所以在实际应用时一定要避免过冷现象产生。这就需要我们了解过冷现象的本质是什么。

当物质处于过冷状态时，是处于一种过饱和的不稳定状态，这时只要有震动或其他外界

因素介入，这种过饱和溶液就可能迅速结晶。

结晶现象是一个逐步进行的过程，当饱和溶液降到熔点（或凝固点）温度时，并不会马上全部结晶固化，这时如果溶液中存在一些该物质的微小晶体，这些小晶体可称之为晶核，则溶液中的该物质就会附着在这些小晶核上，结晶过程就开始了，同时放出溶解热。随着溶液中释放的溶解热被不断散发出去，结晶过程就会继续下去。在这个过程中温度保持恒定不变（熔点温度），直到全部结晶完成后，温度才会下降。在这整个结晶的过程中，最初溶液中存在的微小晶体起着重要的作用，若没有这些微小晶体，溶液中的物质就没有可以附着的物体，结晶过程就不能马上开始，结果溶液温度就会继续下降，过冷现象就产生了。

过冷和结晶现象是自然界普遍存在的现象，生活中的人工降雨就是类似这样的一个过程。在将要降雨的云层里，存有大量过饱和的水蒸气，但这些水蒸气却不一定能变成雨滴降下来，若没有足够的晶核就形不成雨滴。所谓人工降雨就是向空中释放大量的微小晶核，以便水蒸气附着在这些小晶核上形成大的雨滴落下来。

可见溶解物中有没有“晶核”是能否出现过冷现象的关键因素，利用这一点，我们可以采取下列办法来防止过冷现象产生。

（1）自我成核法。

在容器里放入比实际需要量更多的储热材料，使得在进行储热时，即使在吸热量最大的情况下仍有一部分相变储热材料没有能溶解，这些过剩的储热材料晶体在冷却过程中便起到小晶核的作用，从而使结晶过程迅速开始。

（2）异质成核剂法。

这种方法是在作为储热材料的无机盐水化物中加入另一种物质，这种物质在结晶时，其结晶形式、晶格间距以及原子排列等方面都必须与原来的无机盐水化物的晶体大致相同，但又不影响无机盐水化物的性质。例如，在 $Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$ 中引入 3%～4%的硼砂作为异质成核剂，便可获得相当的成功。

（3）稍高于熔点法。

当无机盐水化物的温度略高于熔点后就进行冷却时，一般可以立即发生结晶，而且这时晶体是从容器的壁面或容器内的异质材料表面开始生成的，因为这些地方存在着微观的裂痕，微小的晶粒便沉淀在其中，而分界面处的表面张力提高了无机盐水化物的熔点。因此，当无机盐水化物的温度略高于其熔点后就进行冷却，这些微小的晶粒便成为“晶核”，使得结晶过程得以开始进行。

## 4.6 房屋本身的显热储存

虽然我们论述了上述多种储能办法，但是至今人类社会还没有一个很好的办法能把大量的能量廉价地储存下来以供工业生产使用。目前最有实用价值的，还是简易的、较短期的显热储存，太阳能热利用工程中常用的热水储箱就是这样一种显热储能装置。长期的热储存只

有利用地下储水窖作为季节性热储存还比较有实用价值。

在采暖中也是主要采用显热储存的方式来储存的。显热储存大概有如下几种方式。

（1）利用室内的地板、墙壁、衣物、家具等各种家庭建筑设施的温度升高作为热储存。

（2）利用水箱作夜间用热的半日储存。

（3）利用水箱作隔日用热的整日储存。

（4）利用地下储水池作多日用热的储存。

（5）利用地下储热系统作为季节性热储存。

本节先研究利用室内的地板、墙壁、衣物、家具等各种家庭建筑设施的温度升高作为热储存的问题。这种储热方式是最基本的，也是最重要的一种储热方式。

表 4-6 是一些房屋建筑材料的比热容和导热系数。

**表 4-6　　一些建筑材料的比热容和导热系数**

| 材　　料 | 密度（kg/m³） | 比热容[kJ/（kg•℃）] | 导热系数[W/（m•K）] |
|---|---|---|---|
| 钢筋混凝土 | 2 300 | 0.92 | 1.74 |
| 碎石、乱石混凝土 | 2 100 | 0.92 | 1.28 |
| 膨胀矿渣珠混凝土 | 2 000 | 0.96 | 0.77 |
| 自然煤矿石炉渣混凝土 | 1 700 | 1.05 | 1.00 |
| 粘土陶粒混凝土 | 1 600 | 1.05 | 0.84 |
| 加气混凝土 | 700 | 1.05 | 0.22 |
| 泡沫混凝土 | 500 | 1.05 | 0.19 |
| 重砂浆砖砌体 | 1 800 | 1. 05 | 0.81 |
| 重砂浆空心砖砌体 | 1 400 | 1.05 | 0.58 |
| 水泥膨胀珍珠岩 | 800 | 1.17 | 0.26 |
| 乳化沥青膨胀珍珠岩 | 400 | 1.55 | 0.12 |
| 水泥膨胀蛭石 | 350 | 1.05 | 0.14 |
| 锅炉渣 | 1 000 | 0.92 | 0.29 |
| 粉煤灰 | 1 000 | 0.92 | 0.23 |
| 膨胀蛭石 | 300 | 1.03 | 0.14 |
| 膨胀珍珠岩 | 120 | 1.17 | 0.07 |
| 聚苯乙烯泡沫塑料 | 30 | 1.38 | 0.042 |
| 聚氨脂硬泡沫塑料 | 30 | 1.38 | 0.033 |
| 泡沫玻璃 | 140 | 0.84 | 0.058 |
| 泡沫石膏 | 500 | 1.05 | 0.19 |
| 木屑 | 250 | 2.01 | 0.093 |
| 稻壳 | 120 | 2.01 | 0.06 |
| 干草 | 100 | 2.01 | 0.047 |

续表

| 材　　料 | 密度（kg/m³） | 比热容[kJ/（kg•℃）] | 导热系数[W/（m•K）] |
|---|---|---|---|
| 夯实粘土 | 2 000 | 1.01 | 1.16 |
| 轻质粘土 | 1 200 | 1.01 | 0.47 |
| 加草粘土 | 1 600 | 1.01 | 0.76 |
| | 1 400 | 1.01 | 0.58 |
| 花岗岩 | 2 800 | 0.92 | 3.49 |
| 石灰石 | 2 000 | 0.92 | 1.16 |
| 纯铜 | 8 500 | 0.42 | 407 |
| 铝 | 2 700 | 0.92 | 203 |
| 建筑钢材 | 7 850 | 0.48 | 58.2 |

### 4.6.1 房屋本身的储热功能

在用散热器向房间供热的系统中，散热片向房间内四周散发热量时，首先房间内的空气被加热，同时空气也向房间内的衣物、家具、墙壁等加热，尤其是墙壁，所占体积很大，容重也大，所以其热容量也很大。如果我们在房间的外墙壁用隔热性能较好的隔热材料把整个房屋包装起来，使其与外界空气基本隔离，则整个房间墙壁地板和房屋内的家具衣物就都变成显热储热物质。尤其是墙壁，总质量很大，一个房间由前后、左右、上下六面围成，对于平房而言，平均每个房间至少有前后和一个侧面共 3 个面的墙壁，再加上屋顶和地面，每个房间的总质量有几十吨。砖石混凝土的比热容大约是水的 1/4，则每个房间的总热容量大约是近 10t 水升高同样温度的热容量，这是一项很大的显热储热材料。在后面水箱的热容量的计算分析中我们将看到，10t 水的热容量是一个很大的热容量。在外墙壁都有良好的隔热层的情况下，房间通过墙壁散热将是一个缓慢的过程。实际的经验也证明，在对房间进行良好的隔热保温的条件下，房间内一夜的温降一般不超过 2℃。

对于用地板辐射采暖的系统来说，地板的储热作用更是表现明显。在冬季晴日白天，集热器把收集到的太阳热能通过地暖管传入地下，首先加热地板。地板一般是由水泥混凝土或混凝土附加地面瓷砖或加木地板等构成，这些物质的导热能力都不太高，所以整个地面被慢慢加热，然后再慢慢把热量散发到室内空气中去。经验证明，在冬季晴天，在没有其他储热设施、也没有其他辅助热源的条件下，室内温度的最高点并不是在中午，也不是在下午两三点钟，甚至也不是傍晚的五六点钟，而是晚上的七八点钟，直到晚上 10 点钟后睡觉前，室内温度都是维持在一天中较高的水平上，只是到后半夜，温度才开始慢慢有所下降。

可见，对于地板辐射采暖系统，不采用其他储热措施，仅靠房屋自身的储热能力，也能使室内温度基本保持大致平稳。所以我们说房间自身的地板、墙壁等主题构件是最基本的、最重要的，也是最廉价的储热材料。说其廉价也可说是零成本，因为这些是建筑本体必有的，不是另附加的设施，只是在设计时要考虑到这个因素，如果考虑得当，设计合理，甚至可能会降低成本。例如，一般地板采暖都要在底盘散热管下面首先铺设一层防止热量向下传递的

隔热层，但如果我们设计的采暖温度在 15～18℃之间，则可以省去这一隔热层，因为，地下深层土壤本身的温度就是 15～16℃左右，深层土壤本身不会再吸收多少热量，不加隔热层正好可以利用表层土壤本身的储热能力，在白天靠浅层土壤吸收相当一部分热能，到晚间再慢慢散发到房间内的空气中去，从而使房间的温度更平稳。

即使不用地板辐射采暖而是用其他散热片采暖，由于热空气向上升，在一般情况下地表面的温度较低，若我们的设计温度仍是 15～18℃，则地表面的温度一般也就是在 15℃左右，故也不需要地板下面的隔热层。只有设计温度较高时，比如 20℃以上，设计地板下面的隔热层才有意义。

### 4.6.2　房屋的储热、散热能力估算

一般低层住宅东西向往往是建筑，没有对外的散热面，因此可忽略东西侧面的热损失。

我们假定房间的外墙壁粘附有 6cm 厚的聚苯乙烯泡沫塑料隔热保温层，其导热系数为 0.04W/（m•K），每间房屋的东西宽度为 3m，南北跨度为 9m，墙高为 3m，房屋中间还有一面东西向 3m 的界墙。房屋的散热面由南面墙、北面墙和屋顶组成，其总散热面积为：

$$3m \times 3m \times 2 + 3m \times 9m = 45m^2$$

设房间内和外部的温差平均为 25℃，则房屋每 12h（约等于一夜）的总散热量为：

$$0.04W/（m•K）\times 25℃ \times 45m^2 \div 0.06m \times（3\ 600 \times 12）= 32\ 400kJ$$

每个房间可平均有南北共两个东西向 3m 长的外墙、一个 3m 长东西走向的内墙和一个 9m 长南北向的内墙。其总长度为 3m × 2m + 3m + 9m = 18m。设墙的厚度为 0.25m，则墙体的总体积为：18m × 3m × 0.25m = 13.5m³ 。

砖砌墙体的容重按 1 800kg/m³ 计算，则墙体的总质量为：

$$1\ 800kg/m^3 \times 13.5m^3 = 24\ 300kg = 24.3t$$

屋顶和地面的面积都是 27m²，我们假定屋顶的厚度为 0.15m，容重按 2 500kg/m³ 计算，则屋顶的总质量为：

$$2\ 500kg/m^3 \times（27m^2 \times 0.15）= 10\ 100kg = 10.1t$$

我们假定地面的有用厚度为 0.20m，容重平均按 2 000kg/m³ 计算，则地板的总质量为：

$$2\ 000kg/m^3 \times（27m^2 \times 0.2）= 10\ 800kg = 10.8t$$

该房间总储热体的质量为：24.3t + 10.1t + 10.8t = 45.2t = 45 200kg

设墙体的比热容平均为 1kJ/（kg•℃），则房间每变化 1℃的热容量为：

$$1kJ/（kg•℃）\times 45\ 200kg = 45\ 200kJ/℃$$

从上面的计算可以看出，对一个隔热保温比较好的房间，每一个夜晚房间的总散热量约为 32 400kJ，而房间本身降温 1℃释放储存的热量就达 45 200kJ，可见经过一个夜晚房间温度的降低也不到 1℃。在阴天的条件下，一昼夜 24h 的温降不超过 1.5℃。

结论如下。

（1）通过房间的合理设计和墙外侧的有效隔热保温，只要在白天有效利用太阳能，即使晚上不再向房间供热，房间内仍能保持较平稳的温度，温降很小。实际的经验说明，在有阳

光的条件下，由于地板储热和对外辐射热的滞后性，一天中的最高温是在下午七八点钟，整个夜间的温度都较适合居住。

（2）如果在晴天能保持室内温度达到 18～20℃，则即使经过 3 天的阴天，室内温度还可保持在 13～15℃之间，仍处于适宜居住的温度范围。

## 4.7 利用水箱作热储存

### 4.7.1 利用水箱作夜间用热的半日储存

这种储热方式适合于用散热片散热的供暖系统。因为散热片会把热量直接散到室内空气中去，室内温度会立刻升高，一般在下午 1～2 点达到最高温度，但到傍晚，室温就很快降下去了。

可见采用散热片供暖，随着接收的太阳辐射能量的逐渐下降，室内温度也会跟着较快地下降，若没有其他储热措施，室内的昼夜温差就会较大，因此有必要采取一些短期的半日储热措施，其储存量够夜间用即可。这种情况可采用中等水箱作储热设备。

根据第 2 章太阳能集热器面积的计算方法，我们可以得出这类水箱容量的计算方法：

一个普通家庭按 $100m^2$ 建筑采暖面积、每平方米用热量若按 $25W/m^2$ 计算，则其每天的总用热量为：

$$25W/m^2 \times 100m^2 \times（3\ 600s \times 24h）= 216\ 000\ 000J \approx 51\ 600kcal$$

为了在夜间也能供热，我们可以设置一个储热水箱，使其储存的热水的能量等于一天中收集的总能量的 1/2，使白天收集到的太阳能的 50%在白天使用，剩余的 50%晚上用。根据前面的计算，则有：

$$51\ 600kcal \div 2 = 25\ 800kcal$$

设储水温度为 65℃，最低可降到 30℃，温差为 65℃ − 30℃ = 35℃。

则所需水箱容量为：25 800kcal÷[1kcal/（kg • ℃）× 35℃] = 737kg

储热水箱的容量选为 737kg～1t，储存的水温度达到 65℃以上，即可满足夜间采暖之用。

### 4.7.2 利用水箱作隔日用热的整日储存

所谓隔日热储存是指储存的热量要满足第二天一整天的供暖所需的热量。这里要分两种情况。

第一种是地板辐射供暖。根据前面的分析，在这种供暖方式中，仅仅白天循环泵运行向房间供暖，就可以基本满足全天的供暖需求，储水箱储存的热水只够第二天用即可。根据前面对 $100m^2$ 的建筑面积半日用热量的计算，采用 1t 的水箱储热可用半日，则整日的用热量就应当采用 2t 的水箱，因此，利用水箱作隔日用热的整日储存，采用 2t 的水箱即可。

第二种是普通散热片供暖，由于在这种供暖方式中房间本身的储热能力较小，储热水箱内储存的热量既要保证当日夜晚的供热，又要保证第二天一整天的供热，所以水箱的容积还要大些，采用 3t 的水箱即可。

所有上述用水箱储热的方式都要注意两个问题，一是所有水箱要有良好的隔热保温，一般要采用 5～8cm 厚的聚氨酯隔热材料层。一则这种材料隔热性能好，二则其耐温性比聚苯乙烯泡沫塑料要好些，可以在不高于 100℃的条件下常年正常工作。另一个问题是其集热温度要适当高些，要保证其集热温度达到 65℃以上。

## 4.8　地下热储存

在冬季，不少地区会出现连续几天甚至十几天无阳光的情况，在这种情况下，仅靠地上的水箱储热或房间自身储热就不行了。由于受造价和房屋承重等的限制，水箱不可能做得很大，而且靠水箱长时间储热其热损失也是相当大的。在长时间无阳光的情况下，房间自身的散热损失也会增加，室温就会降下来。要想保证不间断地用太阳能供暖，必须考虑较长时间的热储存的方法。

采用地下热储存是一种现实可行的热储存方法，其建造成本和隔热性能与地上水箱相比都有明显的优势。它可以建造中短期的储热系统，也可以建造长期的全年性的储热系统，实现季节性的热能储存，即把春、夏、秋季的热量储存在地下，供冬季供暖用。其储热介质可以是水，也可以是土壤或其他岩石材料。

利用水和土壤的显热储存能量并不存在技术上的难题，这是一种现实可行的途径，其主要问题是如何优化系统设计，使其有较高的技术经济性能。其基本方法是在地下建造一个或多个总容量达几十立方米甚至几百立方米的水窖群，在春、夏、秋季利用太阳能把水窖中的水加热，水窖中的水又把周围的土壤加热，利用水和土壤的显热储存热能。

在长期大型储热系统中，建造由几十个或更多的水窖组成的储水窖阵列，当水窖水温升高时，就向其周围的土壤传热，每一个水窖周围的土壤就形成一个高温区。在这里土壤扮演双重角色：既是储热材料，又是传热介质。土壤本身尤其是湿土的热容量也较大，在温度上升的过程中会吸收大量热量，这时土壤起到储热材料的作用。当冬季水窖向房间供热时，水窖内的水温会降低。当水窖内水温低于周围土壤温度时，土壤中的热量就会向水窖内的水中传导，返回到水中，再向房间供热。

在整个储热系统的边缘部位，由于土壤导热系数不大，有一定的隔热能力，因此，水窖阵列内的热量传向土壤后，不会传得太远，而是聚集在水窖阵列周围的土壤中，这时土壤起到隔热材料的作用。

### 4.8.1　地下储存的基本原则

为了取得较好的地下储存效果，应注意下述原则。

### 1．尽量采用较低的储存温度

很显然，储存温度越低，集热器的工作温度就越低，集热效率就越高；另一方面，储存温度越低，水窖向外散失的热量越少，总的系统效率也就越高。

对于地板辐射散热系统，由于散热管道很长，散热面积大，适合于30～40℃的热水供暖，因此水窖内热水的储存温度控制在40～50℃即可。土壤浅层内部的温度常年维持在15℃左右，越往深层，土壤温度会慢慢升高。40℃和15℃之间只有25℃的温差，再加上土壤也是热的不良导体，故热的散失量不大。

### 2．尽量采用大容量的储热系统

采用大容量的储热系统有多方面的好处。

（1）容量大必然储存热量大。

（2）采用大容量储热可以适当降低储存温度，可提高集热效率降低热损失。

（3）越是采用大容量的储热系统，则单位热容量平均外周面积就越小，单位热容量的热损失就越小。

储热体的体积是按其径度的三次方增加，而外周面积是按径度的二次方增加，储热量是由体积决定，而散热量只和外周面积成正比，体积越大，其边沿面积与体积之比越小，因此其单位热容量的散热量就越小。比如，用一个边长都是10m的立方体储热，其体积是1 000$m^3$，而其表面积是600$m^2$，面积与体积之比为600:1 000 = 6:10。但是若使用一个边长为100m的立方体储热，则其面积与体积之比为60 000:1 000 000 = 6:100，热损失缩小为1/10。若是用边长为1 000m的立方体储热，则其面积与体积之比为6 000 000:1 000 000 000 = 6:1 000，热损失缩小为1/100，热损失变得微乎其微。因此，要尽可能采用大的地下储热系统。若有可能，可以把几户的储热水窖设计在一起，或搞集体储热，这样可以减少储热系统边沿的热损失，提高储热效率。

### 3．尽量把储热材料储存在地下深处

土壤虽然也是热量的不良导体，但比常用的隔热材料导热能力要强得多，只有把储热材料储存在地下深处，增加传热阻力，才可减少地表的热损失。

另一方面储热系统设置得越深，则其对地表环境的影响越小，不会造成“热污染”。

### 4．尽量利用土壤本身的储热、隔热和传热功能

土壤本身的储热功能：土壤的热容量虽然比水小，单位体积的热容量只有不到水的一半，但是土壤的体积要比水大得多，若设计利用得合理，其总储热量几乎是无限的。

土壤本身的隔热功能：土壤的导热性能不高，其导热系数平均为1.0左右，因此有一定的隔热功能，2m的土层相当8cm厚的聚苯乙烯泡沫塑料保温层。

土壤本身的传热功能：土壤的导热系数平均为1.0左右，在各类材料中处于中间位置，有一定的传热功能，由于地下的传热过程是在几个月内慢慢进行的过程，较低的导热性能也

可慢慢地实现其传热功能。

### 4.8.2　几种基本地下储存方案分析

首先要理清地下能量储存要达到的基本目标，才能确定具体的设计方案。

地下能量储存要达到的基本目标有下列几种。

（1）短期储存。

这种储存要求太阳能集热器的面积要稍大些，使其在晴天收集的热能除供当天使用外，还有剩余储存起来，供阴天使用。在整个采暖季节收集的太阳能总量，足够整个冬季采暖用能。

（2）中期储存。

在春、夏、秋季等非采暖季节，收集储存太阳热能，以弥补由于阴天和日照强度较差的天气所短缺的供暖的能量。在这个系统中，在冬季晴天，太阳能集热器当天收集的太阳能除够当日采暖用外，还要稍有剩余，以补偿储热系统的热损失。因此所需集热器面积仍比较大，但可比第一种方案稍小些。

（3）长期储存。

在春、夏、秋季等非采暖季节，收集储存太阳热能供冬季用。要求在春、夏、秋季等非采暖季节收集储存的太阳热能，加上冬季收集的太阳能，能满足整个冬季供暖的需求。在这个系统中，所需太阳能集热器的面积最小。

上述各方案中，第一种方案适合在日照比较好的Ⅰ、Ⅱ类地区采用，如我国的西藏、青海、甘肃、内蒙古等地。因为这些地区冬季几乎天天有阳光，太阳能集热器面积不需要太大，收集的太阳能基本上够当天用稍有富余即可，要求储存的能量够两三天用即可，很少有连续多日的阴天。因此能量储存设施也比较简易。

第一种方案不适宜用在日照较差的Ⅲ、Ⅳ类地区，因为这些地区阴云天比较多，真正的晴朗天气甚至不到一半，要保证冬季的供暖，太阳能集热器面积将需要增大很多，甚至要比Ⅰ、Ⅱ类地区增加 50%～100%，这将大大增加系统的造价。

第二种方案是中期储存，用在哪个地区都存在一些问题。

当用在Ⅰ、Ⅱ类地区时，集热器的面积虽比第一方案略有减少，集热器成本略有降低，但要增加较大的热能储存设施的成本，在经济上不太合算。

若用在Ⅲ类地区，首先集热器面积仍比较大，集热系统的成本仍比较高。另一方面，在Ⅲ类地区日照一般，真正晴朗天气不足 1/2，还有不少虽基本是晴天，但是有薄云或多云，日照强度较低，因此需要有较大的热储存量，至少要储存整个冬季能耗的 1/3～1/2，故储热系统的成本将比较高。

可见这一方案不管用在哪类地区其经济性都较差。但是在某些特定条件下，这一方案仍有实用价值。比如有些地区农户有建储水窖的习惯，如果这些水窖的储水量够中期热储存用，则利用这些现成的储水窖来储能，会大大降低储能系统的建筑费用，仍可能是一种经济实用的选择。

第三种方案，也是全年性长期储存，其储热量最大，储热系统储存的热能要能满足整个

采暖季节用能 2/3～3/4 的能耗量。这一系统虽然储热系统成本较高，但其太阳能集热系统成本却较低，其集热面积只要有第二种方案的 1/3～1/2 即可，因此其整个太阳能供暖系统的综合成本可能是最低的。

根据我国目前的实际情况，太阳能地下储存大致可有下面几种类型。

（1）普通家庭 100m$^2$ 左右建筑面积采暖的短期热储存（满足 10～30 天的供暖需求），水窖容积在 30～60m$^3$ 之间。

（2）普通家庭 100m$^2$ 左右建筑面积采暖的中期热储存（满足 30 天以上的供暖需求），水窖容积在 60m$^3$ 以上。

（3）普通家庭 100～200m$^2$ 的建筑面积采暖的长期热储存，将综合利用水和土壤的储热能力，实现长时间的热储存。

（4）250～350m$^2$ 建筑面积的二层小楼或小别墅采暖的长期（一年至数年）热储存，该系统需要综合利用水和土壤的储热能力，实现长时间大容量的热储存。

（5）大面积（几千平方米至数万平方米）集体供暖的长期（一年至数年）热储存系统，其系统更要充分利用水和土壤的综合储热能力，实现特大容量长时间的热储存。

在短期储存系统中，一般只能储存供一个或几个家庭用 10～30 天的采暖用热量，储热系统周围要设置有隔热层；在小型的（如一个或几个家庭的储能系统）全年甚至数年的长期储存系统中，系统四周一般不需要有隔热层。

在长期大型储热系统中，要求建造能向数十个至几百个家庭供暖的大型储热系统，系统的边缘散热在储能总量中所占的比例将大大缩小，故可以省去隔热层。

### 4.8.3 储热总量的估算

确定储热总量是地下储存系统设计的前提，前面已讨论过，对于一个 100m$^2$ 建筑面积的房屋来说，在冬季每天需要消耗 51 600kcal 的热量，水的比热是 1kcal/kg，若水窖的储热温度按平均 40℃计算，最低为 25℃，可用温差为 40℃−25℃ = 15℃，则每天需要热水量为：

$$51\ 600\text{kcal} \div 15℃ \div 1\text{kcal/（kg • ℃）} \approx 3\ 333\text{kg} = 3.4\text{t}$$

若水窖的储热温度按平均 45℃计算，最低为 25℃，可用温差为 40℃−25℃=20℃，则每天需要热水量为：

$$51\ 600\text{kcal} \div 20℃ \div 1\text{kcal/（kg • ℃）} = 2\ 580\text{kg} \approx 2.6\text{t}$$

通过以上分析，每天储热用水量在 2.6～3.4t 之间，我们可按每天 3t 计算。因此，储存 15 天所用的热能，所用储水量为 45t。储存 1 个月 30 天所用的热能，所用储水量为 90t。储存 3 个月 90 天所用的热能，所用储水量为 270t。

以上只是对于普通家庭 100m$^2$ 建筑面积的采暖需求，若是对于面积高达 300m$^2$ 以上的二层小楼或小别墅，则采暖用的储水量则要在此基础上增加两三倍，高达数百吨。对于一个普通家庭来说，建造几百立方米的储水窖是一个过大的工程，在经济上可能会不合算，但是我们可以通过巧妙、科学、合理的设计，充分利用土壤本身的储热、隔热和传热功能，以较小的储水量来实现全年大容量的热能储存。

### 4.8.4　土壤储热性能分析

#### 1．土壤的热容量

土壤的热容量是个不确定的值，因不同的土壤类型有较大的变化。一般土壤的密度在1.5～2.0 之间，其单位重量的热容量在 1.0 左右，约是水的 1/4，土壤内一般含有一定量的水分，在 5%～15%，这会提高其热容量，含水量越大热容量越大。从几方面综合考虑，我们可把土壤单位体积热容量看作近似等于单位体积水热容量的 0.4～0.5 倍，为了计算方便，我们这里暂按 0.4 倍计算，例如，对于 100m³ 的土壤，相当于 100 × 0.4 = 40m³ 的水的热容量。

#### 2．土壤的储热、隔热和导热性能分析

在太阳能地下热储存系统中，土壤作为主要的储热材料担负着储热、隔热和导热三重功能，了解这三重功能并科学合理地加以利用，对优化储热系统的整体性能有重要的意义。

土壤的储热能力当然是越大越好，其单位体积热容量大约是水的 0.4 倍，虽然比水热容量小，但与其他物质比其热容量还比较适中，且土壤的体积可以说是无限的，所以土壤的总热容量可说是无限的，只要设计合理，就可充分利用土壤巨大的储热潜能。

土壤的隔热性能和导热性能，这是两个相互矛盾的性能。仅从隔热性能本身来说，当然我们希望隔热能力越强越好，即导热能力越低越好，这样就可减少储热系统的热损失。但从另一角度，即从导热性能来说，一方面能有效地把太阳能集热器收集到的热量输送进土壤储热系统，另一方面又能有效地把土壤储存的热量回收释放出来供采暖用，当然是导热能力越高越好。

所幸土壤既不是好的隔热材料，也不是高性能的导热材料，正处于一种中间位置，其导热系数为 1.0W/（m•K）左右，而高导热率材料如金属铁和铝，其导热系数值分别为 58 和 203，比土壤高几十倍甚至几百倍；好的隔热材料如空气和泡沫塑料，其导热系数为 0.02～0.04，又比土壤小几十倍。

正是土壤这种处于中间位置的导热性能，使其具有了隔热材料和导热介质这双重功能，这点对太阳能的地下储存有重要意义。

太阳能地下长期热储存是利用地下储水窖储热和土壤储热的复合储热系统。太阳能集热器先把热量传给水窖中的水，而水的对流换热能力很强，很快就能使水窖内各处的温度趋向均衡，所以可以把水窖内各处看成是同一温度。

水窖的温度升高后，热量就通过水窖壁传导向壁外侧的土壤，这个过程是固体内的传热，故是热的传导过程。由于土壤的导热系数较低，热量不易传导得很远，热量大部分会积聚在水窖壁附近形成一个温度逐渐下降的高温区：距水窖壁越近的地方温度越高，越远的地方温度越低。在这个过程中土壤也逐渐储存了越来越多的热能。在这里，温度升高的土壤可以看成是有一定导热能力的储热材料，而其周围温度较低的土壤可以看成是隔热材料。

在冬季供暖时，由于水窖中的水量不大，储热量有限，随着不断向房间供热，水窖的水温会逐渐降低，当水温低于周围土壤温度时，储存在土壤中的热量就开始向水窖传递。这是

一个储存在土壤中的热量的回收释放过程。

在整个热能的储存和回收释放过程，热流的方向可能会发生多次变化，而热流量的大小与温度梯度有直接关系。另一方面整个储热系统作为一个整体，其温度总是高于远处的土壤温度（因为我们设定最低供热温度为 25℃，而土壤本身的温度为 15℃），所以从整体上说储热系统总是不断地向外扩散热量。因此在系统的整个运行过程中，有多少热量散失掉，有多少热量被储存，又有多少热量能被回收用于供热，这是个较复杂的过程，需要我们仔细分析。

无论是储热还是供热，都有大量的热量传递过程。对于用水作储热和传热介质，由于水的对流换热系数很大，在这个长期热储存系统中，一旦热量传入水中任何一处，可以认为通过对流换热，储热器内的水温处处是均衡一致的，不存在温度梯度。比如，我们说水窖的水温是 40℃，则可认为水窖内水温处处都是 40℃。我们说水窖的水温降到 25℃，则可以认为水窖内的水温都是 25℃。当然，在具体设计水窖内的换热器时，要尽可能使换热器放置位置合理，以尽量保证水窖内水温的均衡性。

但是对于土壤来说，由于是固体介质，没有对流换热，导热系数也不高，只能通过热传导慢慢传热，因此土壤各处的温度并不相等，存在着温度梯度，且只有在有温度梯度的情况下才能传导热。因此其储热量和能回收的热量与用水作介质的储热系统有很大的不同。

土壤的储热、传热过程是个较复杂的过程，后面还将以具体的储存系统来分析其储热、放热过程中热量流动扩散的规律。

### 4.8.5 集热器面积的确定

地下储热系统需要配合多大面积的集热器呢？过小，担当不起储热供热的任务，过大会使造价提高，造成资源浪费，因此我们要找出确定集热器面积的方法。

#### 1．每天太阳的辐射能

（1）冬天每天每平方米收集的太阳能。

第 2 章我们已分析过，在晴朗的天气里，在地球表面上，垂直于太阳光辐射平面上的太阳辐射能大约是 1 000W/$m^2$，考虑到大气中常有灰尘、云雾等影响其透明度，我们可按 700～800W/$m^2$ 计算。

在冬季，我们取每天的日照时间为 6h 来计算，即取当地上午 9 点至下午 3 点（实际日照时间要长些，上午 9 点前和下午 3 点后也有日照）。

太阳能集热器的集热效率可按 40%计算，则太阳能集热器的有效功率为：

$$700\sim800\text{W/m}^2 \times 40\% = 280\sim320\text{W/m}^2$$

为计算方便，我们取中间值，太阳能集热器的有效功率选定为 300W/$m^2$。

则每天每平方米集热器收集的总能量 $Q$ 冬天为：

$$Q_{冬天} = 300 \times（3\,600 \times 6）= 6\,480\,000\text{J} = 6\,480\text{kJ}$$

或

$$Q_{冬天} = 6\,480\text{kJ}/（4.186\text{kJ/kcal}）= 1\,548\text{kcal}$$

（2）在春、夏、秋季每天每平方米收集的太阳能。

在春、夏、秋季的晴天，我们可按 800W/m$^2$ 计算太阳辐射能，每天的日照时间可按 7h 来计算，即取当地真太阳时上午 8 点半至下午 3 点半。（实际日照时间要长些，其他时间正可补充接近 3 点半和 8 点半时阳光斜射造成的不足。）

太阳能集热器的集热效率可按 50%计算，则太阳能集热器的有效功率为：

$$800\text{W/m}^2 \times 50\% = 400\text{W/m}^2$$

每天每平方米集热器收集的总能量 $Q$ 夏天为：

$$Q\text{ 夏天} = 400 \times (3\,600 \times 7) = 10\,080\,000\text{J} = 10\,080\text{kJ}$$

或

$$Q\text{ 夏天} = 2\,408\text{kcal}$$

### 2．冬季晴天每平方米集热器的供暖面积

冬季采暖若按建筑面积 25W/m$^2$ 的供热量，则其每天每平方米的需供热量为：

$$25\text{W/m}^2 \times (3\,600\text{s/h} \times 24\text{h}) \approx 2\,160\text{kJ/m}^2$$

在冬季每平方米集热器可供采暖面积为：

$$6\,480\text{kJ}/(2\,160\text{kJ/m}^2) = 3\text{m}^2$$

即每 1m$^2$ 集热器可向 3m$^2$ 的房间供暖。换一种更通俗、简略的说法：集热器面积与建筑采暖面积之比为 1:3。

上述结论是在晴天的条件下得出的，在实际确定集热器面积时，要根据当地的气候情况来确定集热器面积。

在太阳能资源不同的地区，各地阴云天气所占比例有很大差异，上述比值可根据当地实际情况进行修正：在日照较好的地区可取 1:2.5～1:3，在日照较差的地区可取 1:2～1:2.5。

我国北方采暖区大都属于Ⅱ、Ⅲ类地区，尤其是Ⅲ类地区在冬季常常出现几天甚至十几天的雨雪阴天，此外还有不少薄云浓雾或沙尘天气，都在不小程度上影响了太阳能采暖的效果。为了消除这些不利影响，太阳能集热器的面积应尽量取大一些。

### 3．不同储热方案的集热器面积

**（1）第一种地下储存方案，即短期储存方案，要求其在晴天收集的热能除供当天使用外，还有剩余储存起来，供阴天使用。**在整个采暖季节收集的太阳能总量，足够整个冬季采暖用能。

要求太阳能集热器的面积与采暖面积之比要大于 1:3，对于日照较好的Ⅰ、Ⅱ类地区，如我国的西藏、青海、甘肃、内蒙古等地，可在 1:3～1:2.5 之间选择，这些地区要求储存的能量够两三天用即可，很少有连续多日的阴天。

对于日照较差的Ⅲ类地区，由于常常会出现几天甚至十几天的雨雪、阴天天气，集器面积还应更大些，甚至可达 1:2。

**（2）第二种地下储存方案，即中期储存方案。这个方案要求在春、夏、秋季等非采暖季节收集储存太阳热能，以弥补由于阴天和日照强度较差的天气所短缺的供暖的能**

**量。**在这个系统中，在冬季晴天，太阳能集热器当天收集的太阳能除够当日采暖用外，还要稍有剩余，以补偿储热系统的热损失。因此所需集热器面积仍比较大，但可比第一种方案稍小些。因其经济性差，一般很少采用，若采用也至少应采用集热器面积与采暖面积之比为 1:2.5。

**（3）第三种地下储存方案，即长期储存方案，在春、夏、秋季等非采暖季节收集储存太阳热能，供冬季用。**要求在春、夏、秋季等非采暖季节收集储存的太阳热能，加上冬季收集的太阳能，能满足整个冬季供暖的需求。在这个系统中，所需太阳能集热器的面积最小，采用第一种和第二种方案的集热器面积的一半即可，即：

集热器面积:建筑面积 = 1:5～1:6

长期地下热储存方案较适合于较大的储热系统，因较大的储热系统的单位储热量的平均热损失较小，一般来说较适合 300m$^2$ 以上建筑面积采暖系统的地下热储存。例如对于 300m$^2$ 建筑面积的二层别墅小楼，采用 50～60m$^2$ 的集热器面积即可满足集热、储热、供暖的要求。

对于小于 300m$^2$ 建筑采暖面积，若采用长期地下热储存，则其集热器面积与采暖面积之比要适当增加，因其散热量所占的比例较大。计算表明，采用地下长期热储存，集热器面积一般不低于 40m$^2$。

北京地区的采暖期约 4 个月，占全年的 1:3，在不考虑热损失和无阴天的情况下，理论上若不考虑热损失，其集热器面积与采暖面积之比为（1:3）:3 = 1:9 即可。

但实际上，在长期储存过程中既存在热损失，也存在由阴天造成的集热能力的降低或丧失，这两种因素必须在设计集热器面积时考虑到。

气象资料和经验证明，一年中真正的无云晴天所占比例并不很高，北京地区年日照时数为 2 755h，平均每天 7.5h，有 4.5h 的无日照时间。有很多时间虽有日照但却是薄云遮日或间断性乌云遮日，平均日照强度较低。一年中真正晴朗天气不足一半。所以设计的太阳能集热器的面积应适当大一些，以上述 300m$^2$ 建筑面积房屋来说，集热器面积以 50～60m$^2$ 为宜，集热器面积与采暖面积之比为 1:6～1:5。

当然，在一些日照条件较好的地区，对一些大的供暖系统，比如几千平方米以上的储热系统，或系统设计优化、吸热和隔热效率高的系统，能充分利用春、夏、秋季高日照高环境温度的条件获取更多的能量，且能有效地减少系统的散热损失，也可以采用较小的集热器面积，使集热器面积与采暖面积之比达到 1:6 以上，甚至达到 1:8。

### 4.8.6 普通家庭 100m$^2$ 左右的建筑面积采暖的短期地下热储存

我国北方大都是较干旱的地区，有不少地方建有储水窖提供生活用水，这些储水窖少则 20～30m$^3$，多则 50～70m$^3$，大都在 40～60m$^3$ 之间，这些储水窖有的建在院内，有的建在房屋地下，基本上可以担负起普通家庭 100m$^2$ 左右的建筑面积采暖的短期热储存，利用这些储水窖进行太阳能热储存，可以收到事半功倍的效益。

图 4-5 是建在院内的 50m$^3$ 储水窖储热示意图。

因为这种储水窖大都建在紧靠地表层，通过地面的热损失将比较大，因此要采取一定的隔热保温措施以减少地面向大气散发热量。在储水窖的上部铺设一层较厚的隔热层，可以在顶部铺覆

一层 40～50cm 的蛭石、珍珠岩等隔热材料，也可铺覆一层 20cm 的聚苯乙烯泡沫塑料等隔热材料。如果条件允许，最好在外部再覆盖一层透明塑料。白天，阳光透过透明塑料加热地表层，可使地表温度达到 50～60℃，这样不仅可避免水窖内的热量向地面散发，而且可使地表热量慢慢向水窖内传递；而到晚上又可对地面保温，减少水窖内的热量通过地面向外散发。

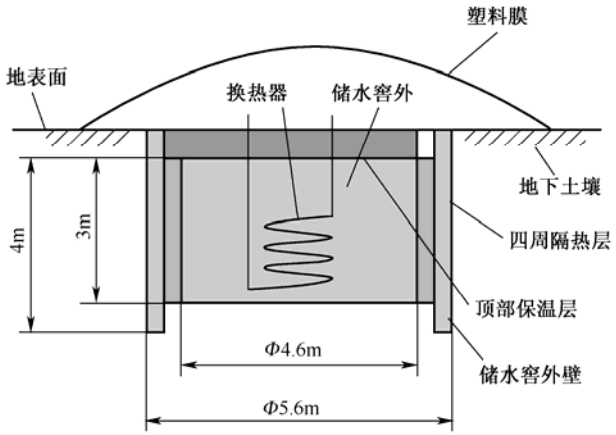



图 4-5　院内储水窖储热示意图
（四周隔热层紧靠水窖外壁）

对于新建的储水窖，在水窖四周水窖壁外侧处也要设置一圈隔热层。

如果储水窖以前已建成，则仍要增加隔热保温措施。对四周隔热，可以在距水窖外壁 1～1.5m 处挖掘一圈宽 40～50cm 深 2～3m 的深沟，放置隔热材料，如图 4-6 所示。隔热沟内放置 20cm 厚的泡沫塑料隔热材料，也可放置 40～50cm 的稻壳、麦壳、蛭石、珍珠岩等隔热材料（放置这些隔热材料时，要用塑料袋装好，防止这些材料受湿后会降低隔热性能）。

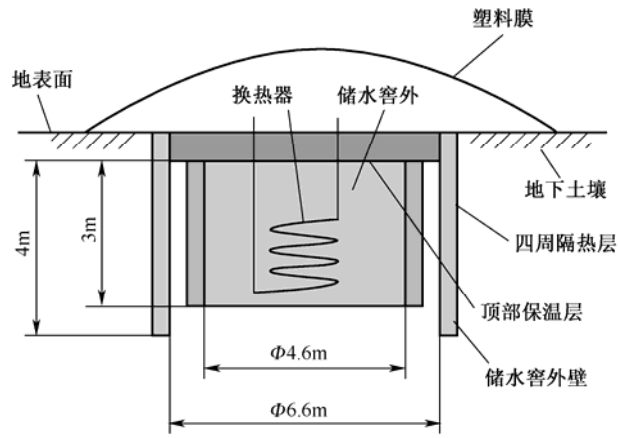



图 4-6　院内储水窖储热示意图
（四周隔热层距水窖外壁 1m）

水窖底面可以不再铺设保温材料，一则可以减少施工难度，降低系统造价；二则，仅底面散热，其总散热面积已大大缩小，对储热性能的影响已大大降低；三则，底面主

要向下面散热，由于土壤并不是热的良导体，这些热量将主要积聚在底面附近，提高了这些区域的土壤温度，使这些区域的温度梯度降低，慢慢会减少热量的散失量。当冬季水窖向房间供热时，随着水窖水温低于底部土壤的温度，土壤中储存的热量还会流向水窖，一部分热量会回收回来，这时土壤就变成了储热材料，增加了系统总的储热能力。

### 1．储热量计算

（1）图 4-5 所示的院内储水池储热方案，四周隔热层紧靠水窖外壁，仅靠水窖中的水来储存热能。

设水窖的直径是 4.6m，深是 3m，则总容积 $V$ 为：

$$V=（4.6m/2）^2\times 3.14\times 3m\approx 50m^3$$

现在我们假设通过春、夏、秋季太阳能集热器的不断加热，使水窖内水温达到 40℃以上。对于地板辐射采暖的方式，25℃以上的水温即可用，则 40℃ − 25℃ = 15℃即是可用的温差，则水窖中储存的可用热量为：

$$1kcal/（kg\cdot ℃）\times 15℃\times 50m^3\times 1\ 000kg/m^3=750\ 000kcal$$

根据前面的计算，$100m^2$ 的建筑面积每天的耗热量为 50 000～6 000kcal 之间，我们取 50 000kcal，则：

$$750\ 000kcal/（50\ 000kcal/天）\approx 15\ 天$$

这就是说，储存 $50m^3$ 40℃的水，可以满足 15 个阴天的供热量。

如果储热温度达到 50℃，则可用温差为：50℃ − 25℃ = 25℃

则水窖中储存的可用热量为：（1 × 25 × 50 × 1 000）1 250 000kcal

则约可用（1 250 000/50 000）25 天

这就是说，储存 $50m^3$ 50℃的水，可以满足 25 个阴天的供热量。

（2）图 4-6 所示的储水池储热方案，四周隔热层距水窖外壁 1～1.5m。

这一方案中水窖周围的土壤也可看作是储热材料，我们假定水窖壁外侧 1m 内的土壤为有效储热层，则储热系统的直径是 6.6m，深是 4m，则总容积 $V$ 为：

$$V=（6.6m/2）^2\times 3.14\times 4m\approx 137m^3$$

参与储热的土壤的体积为：（137 − 50）87（$m^3$）

按前面所述的每一立方米土壤的储热量等于 $0.4m^3$ 水的储热量计算，则有：

$$87\times 0.4=32（m^3）$$

$$32+50=82（m^3）$$

即系统的总储热量相当于 $82m^3$ 水的储热量。

现在我们假设通过春、夏、秋季太阳能集热器的不断加热，使水窖内水温和外侧的土壤温度都达到 40℃以上。对于地板辐射采暖的方式，25℃以上的水温即可用，温差仍为 15℃，则水窖中储存的可用热量为：（1 × 15 × 82 × 1 000）1 230 000kcal

根据前面的计算，$100m^2$ 的建筑面积每天的耗热量为 50 000kcal

则可用（1 230 000/50 000）25 天

这就是说，储存 50m³ 40℃的水，再加上周围土壤储存的热能，可以满足 25 个阴天的供热量。

如果储热温度达到 50℃，则可用温差为：50℃−25℃ = 25℃。

则水窖中储存的可用热量为：（1 × 25 × 82 × 1 000）2 050 000kcal。

约可使用（2 050 000/50 000）41 天

这就是说，储存 50m³ 50℃的水，再加上周围土壤储存的热能，可以满足 41 天阴天的供热量。

### 2．集热器面积

上述 50～87m³ 的储热系统需要配合多大面积的集热器呢？过小，担当不起储热供热的任务，过大，会使造价提高，造成资源浪费，因此我们要找出确定集热器面积的方法。

前一节我们已分析过，在晴天条件下，对 100m$^2$ 建筑面积的房间，要保证一天 24h 的标准供热，需要集热器面积与采暖面积之比为 1:3，即需要 34m$^2$ 集热器面积。我们这个储热系统是短期储热系统，一般只能储存不到 30 天所需热量，因此在晴天，太阳能收集器收集的热量除要能满足当日的供暖需求外，还要有所剩余，一则弥补储热系统的热损失，二则积存些热量供阴天使用，因此集热器面积要尽量稍大些。对于日照较好的Ⅰ、Ⅱ类地区，采用集热器面积与采暖面积之比为 1:2.5，即采用 40m$^2$ 集热器即可。对日照较差的Ⅲ类地区，还应大些，比如 45m$^2$ 甚至 50m$^2$，使集热器面积与采暖面积之比接近或达到 1:2。

### 3．散热分析

（1）图 4-5 所示的储水池储热方案的散热分析。

该方案四周隔热层紧靠水窖外壁，仅靠水窖中的水来储存热能。

首先分析春、夏、秋三季的散热情况。

前面按 40℃的储热温度分析了不同容量的储水池的储热、供热能力，但这里存在一个问题，即没有考虑储水池本身的散热损失。实际上，储水池本身也时时刻刻在向外散发热量，尤其是在冬季外界环境温度很低，其散热损失会大大增加。因此，要使前面的计算符合实际，有一个前提条件，在尽量降低热损失的条件下，弥补散失的热量。图 4-5 中，在整个储水池的上方覆盖了一层透明塑料薄膜，就是为了减少热损失。

在春、夏、秋季，环境温度较高，在白天有阳光的条件下，塑料膜内的温度很容易达到五六十摄氏度以上，远高于水池内的水温，这时不仅储水窖不仅不会向外散热，地表的热量还会慢慢向水窖内传递。在夜间，由于有塑料薄膜的保护，膜内的温度夜间也降得很慢，因此，在整个春、夏、秋季，地表面的平均温度可设定为 25℃，与水窖的平均温差为 15℃。若地面铺设的是 20cm 厚的聚苯乙烯泡沫塑料隔热材料，其导热系数为 0.04，则每天从地表面向外散发热量为：

$$0.04\text{W/ (m•K)} \times 15℃ \times (4.6/2)^2 \times 3.14 \div 0.2\text{m} \times 3\,600 \times 24 \approx 4\,305\text{kJ} = 1\,029\text{kcal}$$

这些散热量与每天至少几万大卡的吸热量相比，所占比例很小。

下面分析水窖侧面（四周）的散热量。

侧壁厚度约为 20～30cm，保温层为 20cm 厚度的聚苯乙烯泡沫塑料，整个储热系统的直径约为 5.6m，外周侧的面积为：（5.6 × 3.14 × 3）53$m^2$。

水窖外侧土壤的初始温度是 15℃，经过一段时间的运行储热，随着水窖水温的提高，外侧土壤的温度也会跟着提高，当水窖水温达到 40℃时，因为土壤导热率也不高，不易向外传热，所以保温层外侧温度完全可能达到25℃甚至更高。我们按 25℃计算，则外侧壁每天的散热量为：

$$0.04W/(m•K) \times (40℃-25℃) \times 53m^2 \div 0.2m \times 3\,600 \times 24 \approx 1\,373\,700kJ = 3\,281kcal$$

侧壁和顶部的总散热量为：

$$3\,281 + 1\,029 = 4\,300kcal$$

最后分析一下底面的散热量。

底部的散热面积为：$2.3^2 \times 3.14 = 16.6m^2$。

经过一段时间的储热运行，由于底面散热主要是向下方传热，随着水窖水温的不断升高，底部土壤的温度也随之慢慢提高。土壤的初始温度为 15℃，当水窖水温达到 40℃时，下方土壤的温度也会形成一个从 40℃→30℃→20℃→15℃由近及远温度逐渐下降的温度梯度，在水窖壁附近完全可能形成一个不高于 10℃/m 温度梯度，我们按 10℃/m 的温度梯度计算，土壤的导热系数按 1.0W/ (m•K) 计算，则水窖底面每天向外的传热量为：

$$1.0W/(m•K) \times 10℃/m \times 16.6m^2 \times 3\,600 \times 24 = 14\,342kJ = 3\,442kcal$$

水窖上下和四周的总散热量为：3 442 + 4 300 = 7 742kcal。

从前面的计算已知，在夏季每平方米集热器每天的产热量为 2 408kcal/$m^2$，则对于 40$m^2$ 的集热器，一天的总产热量为：

$$2\,408kcal/m^2 \times 40m^2 = 96\,392kcal$$

可见在春、夏、秋季，储热系统每天散失的热量占每天太阳能集热器收集吸收热量的 8% 左右，故完全可以实现设计的 40℃温度的储热目标，而实际上，可以大大超过这个目标，其储热温度可能达到 50℃甚至 60℃。

下面再分析一下冬季的散热情况。

到冬季环境温度降低，地表温度随之大幅降低，水窖通过地面向大气层散热量会有较大的增加。我们假定冬季平均环境温度为 0℃，地表与水窖顶部的平均温差为 40℃− 0℃ = 40℃，地表面向大气层的散热量为：

$$0.04W/(m•K) \times 40℃ \times (4.6m/2)^2 \times 3.14 \div 0.2m \times 3\,600 \times 24 \approx 11\,480kJ = 2\,755kcal$$

地面下水窖四周和底部的散热量变化不大，仍按原值计算，则在冬季每天水窖的总散热量为：

$$2\,755 + 3\,442 + 3\,281 = 9\,478kcal$$

即使储热水窖不向房间供暖，水窖本身也要损失消耗 9 478kcal 的热量，若要维持总储热量不变，就需要每天向储热系统补充 9 478kcal 的热量。前面分析过，冬季平均每平方米集热器的有效功率可按 300W 计算，每天日照时间按 6h 计算，每天每平方米集热器可收集热量为：

$$300 \times 3\,600 \times 6 = 6\,480kJ = 1\,555kcal$$

产生 9 478kcal 的热量，需用的集热器面积为：

$$9\,478 \div 1\,555 = 6m^2$$

这就是说，在冬季每天需要 $6m^2$ 的太阳能集热器向水窖储热系统供热，才能抵消水窖本身的散热损失，在不供热的条件下，才能维持总储热量不减少。

前面分析过，对于 $100m^2$ 建筑面积的房屋，一般需用 $33m^2$ 的太阳能集热器，可保证晴天的供暖。实际上我们设计的集热器面积应为 $40m^2$ 或更多一些，其中 $6m^2$ 就可用来向储热水窖供热，以弥补其散热损失。

根据上面的分析，若我们采用上述储热系统，配置 $40m^2$ 以上太阳能集热器，在夏季晴天，集热器可收集到多于 90 000kcal 的热量。通过春、夏、秋三季很容易向储热系统充足热能，水窖的温度完全有可能达到五六十摄氏度甚至更高，储存的热量足够 20 天甚至更长的时间采暖用。

从 11 月中旬开始进入采暖季节，12 月和 1 月是采暖用热量最多的季节，因为这个时期日照时间最短，太阳高度角最低，太阳辐射强度也最低，而且往往在这个季节容易出现雨雪天气。但这时，地下水窖储热系统正储存有较多的热能，正好可以弥补因日照不足而缺少的热能。

进入 2 月份以后，尤其是 2 月下旬至 3 月份，水窖的储存温度已有较大下降，供热能力也有所下降，但这时日照时间已增长，太阳高度角升高，太阳辐射强度也增强，这个时期一般晴天较多，太阳能集热器本身的供热能力已有较大提高，而且这时环境温度也有所提高，供暖所需的热量减少，故整个系统仍能满足房间供暖的需求。

（2）图 4-6 所示储水池储热方案散热分析。

该方案四周隔热层距水窖外壁 1m。靠水窖中的水和四周 1m 内的土壤共同储存热能。储热系统的直径是 6.6m，深是 4m。

如图 4-6 所示，在整个储水池的上方覆盖了一层透明塑料薄膜，以提高地表面温度，在整个春、夏、秋季，地表面的平均温度仍设定为 25℃，与水窖的平均温差为 15℃。地面铺设的是 20cm 厚的聚苯乙烯泡沫塑料隔热材料，其导热系数为 0.04，则每天从地表面向外散发热量为：

$$0.04W/(m\bullet K) \times 15℃ \times (6.6m/2)^2 \times 3.14 \div 0.2m \times 3\,600 \times 24 \approx 8\,863kJ = 2\,117kcal$$

水窖侧面（四周）的散热量分析。

侧壁厚度约为 20～30cm，保温层为 20cm 厚度的聚苯乙烯泡沫塑料，整个储热系统的直径约为 6.6m，外周侧的面积为：$6.6 \times 3.14 \times 4 = 83m^2$。

经过一段时间的运行储热，随着水窖水温的提高，外侧土壤的温度也会跟着提高，当水窖水温达到 40℃时，保温层内侧温度按 35℃计算，保温层外侧温度按 25℃计算，则外侧壁每天的散热量为：

$$0.04W/(m\bullet K) \times (35℃-25℃) \times 83m^2 \div 0.2m \times 3\,600 \times 24 \approx 14\,342kJ = 3\,442kcal$$

最后分析一下底面的散热量。

底部的散热面积为：$3.3^2 \times 3.14 = 34.2m^2$。

经过一段时间的储热运行，由于底面散热主要是向下方储热，随着水窖水温的不断升高，底部土壤的温度也随之慢慢提高。下方 1m 内土壤的温度可能会接近 40℃，也会形成一个从

水窖地面开始由近及远温度逐渐下降的温度梯度：40℃→30℃→20℃→15℃。因此，在水窖壁附近会形成一个不高于 10℃/m 的温度梯度。若温度梯度按 10℃/m 计算，土壤的导热系数按 1.0W/ (m•K) 计算，则水窖底面每天向外的传热量为：

$$1.0W/(m•K) \times 10℃/m \times 34.2m^2 \times 3\,600 \times 24 = 29\,544kJ = 7\,090kcal$$

水窖上下和四周的总散热量为：7 090 + 2 117÷3 442 = 12 649kcal。

前面已知春、夏、秋季晴天每天的产热量为 96 392kcal，则：

$$12\,649kcal/96\,392kcal = 13\%$$

可见在春、夏、秋季，储热系统每天散失的热量约占每天太阳能集热器收集吸收热量的 13%。绝大部分热量仍是储存在系统内用来提高储热物质的温度，故完全可以实现设计的 40℃温度的储热目标。实际上，经过全年 3 个季度的储热，可以超过这个目标，其储热温度也可能达到 50℃甚至更高。

下面再分析一下冬季的散热情况。

到冬季环境温度降低，地表温度随之大幅降低，我们假定冬季平均环境温度为 0℃，地表与水窖顶部的平均温差为 40℃ − 0℃ = 40℃，地表面向大气层的散热量为：

$$0.04W/(m•K) \times 40℃ \times (6.6m/2)^2 \times 3.14 \div 0.2m \times 3\,600 \times 24 \approx 23\,635kJ = 5\,672kcal$$

地面下水窖四周和底部的散热量变化不大，仍按原值计算，则在冬季每天水窖的总散热量为：

$$5\,672 + 3\,442 + 7\,090 = 16\,204kcal$$

即使储热水窖不向房间供暖，水窖本身也要损失消耗 16 204kcal 的热量。若要维持总储热量不变，就需要每天向储热系统补充 16 204kcal 的热量。前面分析过，冬季平均每平方米集热器的有效功率可按 300W 计算，每天日照时间按 6h 计算，每天每平方米集热器可收集热量为：

$$300 \times 3\,600 \times 6 = 6\,480kJ = 1\,555kcal$$

产生 16 204kcal 的热量，需用的集热器面积为：

$$16\,204 \div 1\,555 = 10.4m^2$$

这就是说，在冬季，每天需要 $10m^2$ 的太阳能集热器向水窖储热系统供热，才能抵消水窖本身的散热损失，在不供热的条件下，才能维持总储热量不减少。这会较明显地增加系统的造价。

但是这个系统的储热量明显增大了，若我们采用上述储热系统，仍配置 $40m^2$ 太阳能集热器（不增加系统造价），在春、夏、秋季的晴天，集热器可收集到多于 90 000kcal 甚至更多的热量。通过春、夏、秋三季很容易向储热系统充足热能，水窖的温度完全有可能达到五六十摄氏度甚至更高，储存的热量足够一个多月甚至更长的时间采暖用。即使到了冬季，每天补充的热量低于损失的热量，储存系统的温度在不断下降，也能维持较长的供热时间。

从 11 月中旬开始进入采暖季节到第二年 1 月两个多月的时间，是采暖用热量最多的季节，但这时地下水窖储热系统正好储存有可用一个多月的热能，再加上每天 $40m^2$ 集热器收集的热能，完全可满足 $100m^2$ 建筑面积房间的供暖用热需求。

进入 2 月份以后，水窖的储存温度已有较大下降，供热能力也有所下降，但由于其储热基数较大，尤其是土壤内储存的热量开始慢慢回流到水窖内，故仍有一定的供暖能力。且这个时期日照时间已变长，太阳辐射强度已增强，一般晴天也较多，太阳能集热器本身的供热能力已有较大提高，而随着环境温度的逐渐回升，供暖所需的热量也会逐渐减少，故整个系统仍能满足房间供暖的需求。

### 4.8.7　普通家庭 100m² 建筑面积采暖单水窖长期热储存

对于季节性长期储存，要求储热系统储存的热能能满足采暖系统在整个采暖季节 2/3～3/4 的采暖能耗量。在这种供暖系统中，虽然设置储热系统增加了成本，但其太阳能集热系统成本却较低，其集热面积只有无储热系统集热器面积的 1/3～1/2，因此其整个太阳能供暖系统的综合成本可能升高不多，尤其是对大的储热系统，还有可能使综合建造成本降低。

但是对于 100m² 建筑面积的普通家庭，由于储热量较小，系统的散热量和建造成本所占的比例可能较高，在经济上是否合算，由其设计是否合理、建造技术是否成熟、能否降低建造成本等多方面因素决定。下面以单储水窖方案对其进行分析，其示意图如图 4-7 所示。

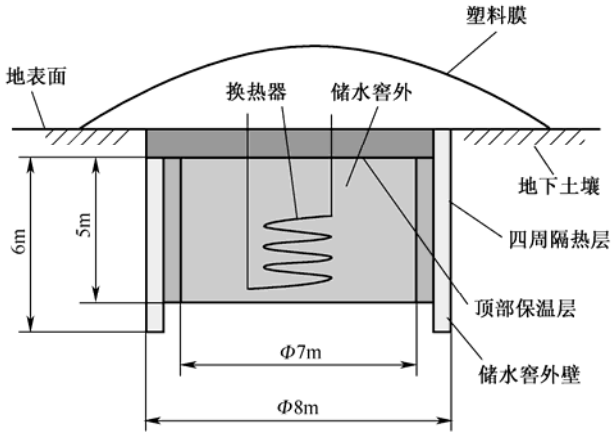



图 4-7　院内储水窖储热示意图

这一方案基本结构与前面的储水窖方案是一样的，也都是采用 20cm 厚的聚氨酯隔热层，只是水窖尺寸变大了。

#### 1．水窖热容量

水窖的直径是 7m，深是 5m，则总容积 $V$ 为：

$$V = (7\text{m}/2)^2 \times 3.14 \times 5\text{m} \approx 192\text{m}^3$$

水窖内水的储存温度仍为 40℃。对于地板辐射采暖的方式，可用温差为 40℃ − 25℃ = 15℃，则水窖中储存的可用热量为：

$$1 \times 15 \times 192 \times 1\,000 = 2\,880\,000\text{kcal}$$

根据前面的计算，100m² 的建筑面积每天的耗热量为 51 600kcal，则:

$$2\ 880\ 000/51\ 600 \approx 56\ 天$$

这就是说，储存 192m³ 40℃的水，可以满足 56 天的供热量。

如果储热温度达到 50℃，则可用温差为：50℃−25℃ = 25℃。

则水窖中储存的可用热量为：1 × 25 × 192 × 1 000 = 4 800 000kcal。

$$4\ 800\ 000/51\ 600 \approx 93\ 天$$

这就是说，储存 192m³ 50℃的水，可以满足 93 天的供热量。

### 2．散热分析

首先分析春、夏、秋三季的散热情况。

仍设定储热温度为 40℃。在春、夏、秋季，环境温度较高，日照较好，并在地表面采取一些保温措施，如覆盖一层塑料薄膜，因此，在整个春夏秋季，地表面的平均温度可设定为 25℃，与水窖的平均温差为 40℃−25℃ = 15℃。若地面铺设的是 20cm 厚的聚苯乙烯泡沫塑料隔热材料，其导热系数为 0.04，则每天从地表面向外散发热量为：

$$0.04W/(m\bullet K) \times 15℃ \times (7m/2)^2 \times 3.14 \div 0.2m \times 3\ 600 \times 24 \approx 9\ 970kJ = 2\ 382kcal$$

水窖侧面（四周）的散热量。

侧壁保温层为 20cm 厚的聚苯乙烯泡沫塑料，外周侧的面积为：

$$8 \times 3.14 \times 5 = 126m^2$$

经过一段时间的运行储热，水窖水温和外侧土壤的温度也会跟着提高，当水窖水温达到 40℃时，保温层外侧温度我们仍可按 25℃计算。则外侧壁每天的散热量为：

$$0.04W/(m\bullet K) \times (40℃-25℃) \times 126m^2 \div 0.2m \times 3\ 600 \times 24 \approx 32\ 659kJ = 7\ 802kcal$$

底部的散热面积为：$(7/2)^2 \times 3.14 = 38.5m^2$

经过一段时间的储热运行，由于地面散热主要是向下方储热，随着水窖水温的不断升高，底部土壤的温度也随之慢慢提高。土壤的初始温度为 15℃，当水窖水温达到 40℃时，下方土壤的温度也会形成一个由近及远温度逐渐下降的温度梯度，由于总温差只有 25℃，因此在水窖壁附近完全可能形成一个不高于 10℃/m 温度梯度，我们按 10℃/m 的温度梯度计算，土壤的导热系数仍按 1.0W/(m•K) 计算，则水窖底面每天向外的传热量为：

$$1.0W/(m\bullet K) \times 10℃/m \times 38.5m^2 \times 3\ 600 \times 24 = 33\ 264kJ = 7\ 983kcal$$

水窖上下和四周的总散热量为：2 382 + 7 802 + 7 983 = 18 167kcal。

下面再分析一下冬季的散热情况。

冬季环境温度降低，地表温度随之大幅降低，我们假定冬季平均环境温度为 0℃，地表与水窖顶部的平均温差为 40℃− 0℃ = 40℃，则有：

$$0.04W/(m\bullet K) \times 40℃ \times (7m/2)^2 \times 3.14 \div 0.2m \times 3\ 600 \times 24 \approx 26\ 587kJ = 6\ 352kcal$$

地面下水窖四周和底部的散热量变化不大，仍按原值计算，则在冬季每天水窖的总散热量为：

$$7\ 983 + 7\ 808 + 6\ 352 = 22\ 143kcal$$

即使储热水窖不向房间供暖，水窖本身也要损失 22 143kcal 的热量，若要维持总储热量不变，就需要每天向储热系统补充 22 143kcal 的热量。前面分析过，冬季平均每平方米集热器的

有效功率可按 300W 计算，每天日照时间按 6h 计算，每天每平方米集热器可收集热量为：

$$300 \times 3\,600 \times 6 = 6\,480\text{kJ} = 1\,555\text{kcal}$$

产生 22 143kcal 的热量，需用的集热器面积为：

$$22\,143 \div 1\,555 = 14.2\text{m}^2$$

这就是说，在冬季每天需要 $14.2\text{m}^2$ 的太阳能集热器向水窖储热系统供热，才能抵消水窖本身的散热损失，在不供热的条件下，才能维持总储热量不减少。

### 3．集热面积和储热供热分析

下面分析集热器对水池的加热过程。

由于是长期储热系统，我们可设定太阳能集热器面积与采暖面积之比为 1:5，则集热气面积可选为 $20\text{m}^2$。在春、夏、秋季的晴天，集热时间可达 7h 以上，我们按 7h 计算（7h 以外的太阳辐射弥补 7h 内因太阳斜射而造成的辐射量不足），太阳辐射强度按每平方米 800W 计算，集热效率按 50%计算，则每天集热器吸收的能量为：

$$800 \times 50\% \times 3\,600 \times 7 \times 20 = 201\,600\text{kJ} = 48\,172\text{kcal}$$

$192\text{m}^3$ 水的温度每升高 1℃需要热量为：$1 \times 192\,000 = 192\,000\text{kcal}$。

因土壤温度为 15℃，故我们可设定水的初始温度也为 15℃，则升高 25℃就达到设计储热温度 40℃，共需热量为：

$$192\,000 \times 25 = 4\,825\,000\text{kcal}$$

$$4\,825\,000 \div 48\,172 = 100 \text{ 天}$$

这就是说 $20\text{m}^2$ 的集热气在晴朗的天气里所收集的热量，在不考虑热损失的情况下，至少需要 100 个连续的晴天才可以使储水量为 $193\text{m}^3$ 的水窖温度升高到设定的储热温度 40℃。

当然，在实际中不可能有 100 个连续晴天，但春、夏、秋三季总的晴天数可能超过 100 天。按北京地区每年 2 755h 日照、每天按 10h 计算，则折合全年日照天数为：

$$2\,755 \div 10 = 275.5 \text{ 天}$$

除去 1/3 采暖期的日照天数，则春、夏、秋三季非采暖期的日照天数为：

$$275.5 \times 2/3 = 183 \text{ 天}$$

下面分析一下储热过程。

在开始储热阶段，由于水窖温度较低，其向外散失的热量一定小于 18 167kcal。即使我们都按 18 167kcal 的散热量计算，每天的有效热量也有：

$$48\,172 - 18\,167 = 30\,005\text{kcal}$$

$$4\,825\,000 \div 3\,005 = 161 \text{ 天}$$

有 161 个晴天就可把水窖水加热到 40℃。春、夏、秋三季太阳能集热器完全可以把水窖水温加热到 40℃，甚至更高。

下面分析冬季的情况。

在冬季，储热系统的散热损失达到了每天 22 143kcal，需要 $14.2\text{m}^2$ 的太阳能集热器收集热量来弥补这一损失，只剩 $5.8\text{m}^2$ 的集热器向房间供热。但是这一系统储存了约 3 个月的供暖热

量需求，完全可满足最需要采暖的前 3 个月的供暖需求。到最后一个月，有 3 个重要因素发生了变化：一是日照时间已大为增长，太阳高度角升高，太阳辐射强度也增强很多，这个时期一般晴天也较多，太阳能集热器本身的供热能力已有较大提高；二是这时环境温度也有所提高，供暖所需的热量减少；三是储热系统每月仍有 5.8m$^2$ 太阳能集热器向系统储存热量，故储热系统仍有一定的供热能力。3 个因素综合起来，就能满足最后一个月的房间供暖的需求。

#### 4．第二年储热能力分析

一般来说，地下储热系统在第二年期间储热性能都会有大幅提高。

从上面的分析可以看出，第一年开始储热时，储热系统周围土壤的温度都是 15℃，储热系统本身的温度也在 15℃左右，由于基础温度较低，一方面，储热系统本身需要热量多，另一方面，向外散失的热量也多，故需要输入的热量多。

但到第二年，储热系统本身的温度已升到 25℃以上，因为 25℃以下就不能向外供热了。而储热系统外围的土壤温度也大有提高，近处的土壤可能达到 20℃以上，远一点的土壤温度也会有所提高，而且经过一年的热量扩散，在储热系统周围形成了一个温度较高的温度场，从第二年开始，对储热系统的加热过程就从较高的温度开始，且由于周围土壤温度较高，储热系同向外的热损失量也会减少。所以第二年储热系统的储热性能会有较大的提高，而且从总体上来说，会一年比一年提高，尤其是向侧面和底面的热损失会逐年减少。

#### 5．经济技术评价

通过前面几节的分析可以看出，地下长期储能系统是可行的，既可以实现热能的有效储存，也可保证稳定可靠的采暖用能的供应，其建造技术也是常规技术，能够实现。

该系统的主要争议是经济上是否合算，每户建造近 200m$^3$ 的储水窖是一个不小的工程，也占用不小的场地，能否被人们接受还需要观察了解。但是另一方面，由于太阳能集热器的面积减少为原来的 1/2，只要水窖建造技术成熟，把水窖建造费用降下来，其总的系统造价不一定会升高。更重要的是这一系统供热稳定，供热质量高。若能实现多户联合建造储能系统，则在建造成本降低的同时储热效率会升高，整个系统的技术经济性能就会大大提升。故这一储热方案也是有前途的。

### 4.8.8 300m$^2$ 建筑面积的二层小楼或小别墅采暖的长期热储存（7 窖阵列地下储存）

一般小别墅都是二层楼，总建筑面积在 250～350m$^2$ 之间，东西宽在 12～15m，南北跨度在 9～12m。与单层建筑相比，同样的建筑面积，其屋顶的面积要减少一半，而太阳能集热器一般是安装在屋顶上，若没有能量储存，单靠在屋顶上安装集热器不能满足整个别墅的太阳能采暖。因此，对小别墅来说，采用地下长期储存太阳能以减少太阳能集热器的面积，就具有非常重要的意义。

下面我们以一个 300m$^2$ 建筑面积的别墅为例进行具体分析，其储水箱的平面图和剖面图分别如图 4-8 和图 4-9 所示。

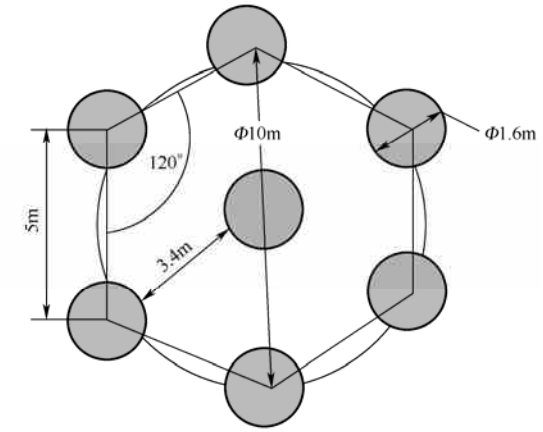



图 4-8　小孔径阵列式储水窖地表平面图

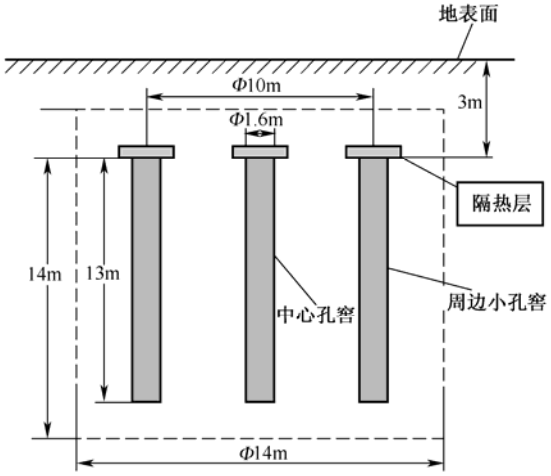



图 4-9　小孔径阵列式储水窖剖面图

### 1．储热能力分析

各小水窖的中心距是 5m，呈正六边形排列，储热体水平面直径 14m，高 14m。水窖直径 1.6m，深 13m。水窖顶部距地面 3m，顶部盖有厚 20cm、直径为 2m 的保温层，使其向地面的散热量降到很小。按每 $100m^2$ 建筑面积需要 $20m^2$ 太阳能集热器计算，对 $300m^2$ 的小别墅，楼顶安装 $60m^2$ 的太阳能集热器。

先计算其总热容量。

小水窖的容积：$V_x = (1.6m/2)^2 \times 3.14 \times 13m = 26m^3$

7 个小水窖的容积：$V_s = 26m^3 \times 7 = 182m^3$

总储热体的容积：$V_z = (14m/2)^2 \times 3.14 \times 14m = 2\ 154m^3$

总储热体内土壤的容积：$2\ 154m^3 - 182m^3 = 1\ 972m^3$

按前面所述，每 $1m^3$ 的土壤的储热量约等于 $0.4m^3$ 水的储热量，则：

$$1\ 972m^3 \times 0.4 = 789m^3$$

$$789m^3 + 182m^3 = 971m^3$$

这就是说，整个储热系统的储热能力相当于 $971m^3$ 水的储热能力。根据前面的分析，当储热系统的平均温度达到 40℃时，$100m^2$ 建筑面积采暖每天约需要 $3m^3$ 水，$300m^2$ 的小别墅采暖每天约需要 $9m^3$ 水，那么 $971m^3$ 40℃的水可满足 108 天（971/9 = 108）的供暖需求，完全满足本系统长期热储存供热的要求。

### 2．系统的充热、散热分析

对每一个水窖而言，可以按圆筒壁型隔热层的公式来计算。

假定在储热的开始阶段，水窖的水温达到 20℃，在距水窖中心 2.5m 处，温度是 15℃（土壤的原有温度），根据圆筒壁导热公式，试计算距水窖中心线 2.5m 由土壤形成的圆筒壁向外侧传导的热量。根据圆筒壁导热公式：

$$Q = 2 \cdot 3.14\lambda L\ (t_1 - t_2)\ /\ln\ (r_2/r_1) \qquad (4\text{-}14)$$

式中：$Q$——土壤圆筒侧壁总导热量，W；

$\lambda$——土壤导热系数，1W/（m·K）；

$L$——水窖深度，13m；

$t_1$——水窖的水温，即水窖壁温，20℃；

$t_2$——距水窖中心线 2.5m 处的温度，15℃；

$r_2$——土壤圆筒外壁半径，2.5m；

$r_1$——水窖壁半径，0.8m。

把上述各数值代入上面的导热公式：

$$Q = 2 \times 3.14 \times 1 \times 13 \times (20-15)\ /\ln\ (2.5/0.8)$$

$$= 6.28 \times 65 \div 1.14 = 358\text{W}$$

一昼夜 24h 的导热量为：

$$358 \times 3\ 600 \times 24 = 30\ 931\ 000 = 30\ 931\text{kJ} = 7\ 389\text{kcal}$$

外侧 6 个水窖每天 24h 的总散热量为：$7\ 389 \times 6 = 44\ 334\text{kcal}$

小孔径阵列式储水窖的热量扩散图如图 4-10 所示。图中的虚线圆表示每一个小水窖热量扩散的过程和范围。在圆心连线形成的六边形之内，各个水窖向内部土壤扩散的热量互相传递累加，除上下两面外，其热量几乎不散失。六边形内的土壤温度可以看作是均一的。在六边形之外，6 个外圆形成一个六边形整体，向外扩散热量，类似于一个大圆形窖向外散热，每个小水窖只分担 1/6 的散热量。

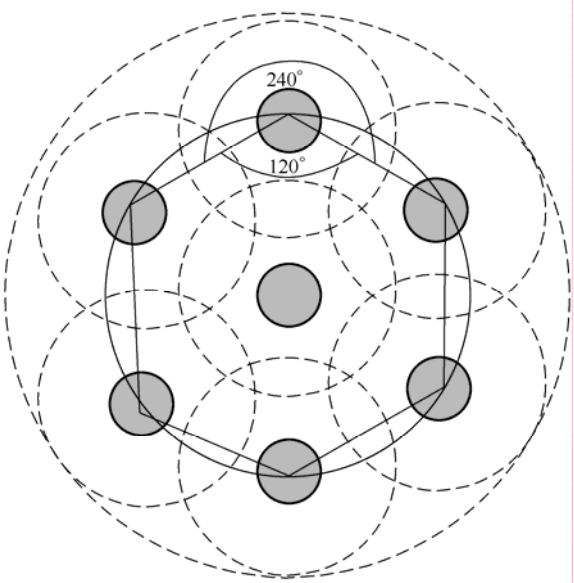



图 4-10　小孔径阵列式储水窖热量扩散图

连接 6 个外侧水窖的中心线形成一个高 13m 的六棱柱体，每个水窖有 120° 的侧面，即 1/3 的侧面向六棱柱内的土壤散热，这部分热量用来提高棱柱内土壤的温度，基本上不向外

散失。另有 2/3 的侧面（240°）向棱柱外侧面散热，用来提高棱柱外土壤的温度，这部分热量的总量为：44 334 × 2/3 = 29 556kcal。

前面曾计算过，在春、夏、秋三季的晴天，20m$^2$ 集热器每天大约可产生 48 172kcal 的热量，那么 60m$^2$ 集热器每天可产生 144 516kcal 的热量输入储热系统。

各个水窖的底面和顶面面积较小，在开始阶段散热量也较少，暂忽略不计。故在上述条件下，储热系统的散热总量约为 30 000kcal，约占输入热量的 20%，有近 80%的热量输入到棱柱体的内侧土壤储存起来，使这些土壤的温度逐渐升高。

随着棱柱内土壤温度和水窖水的温度逐渐升高，上述计算公式中 $t_1$ 和 $t_2$ 的值会逐渐升高，由于水窖水温 $t_1$ 的值增长较快，温差 $t_1-t_2$ 的值也会逐渐升高，当其温差达到 10℃时，其散热量可能达 60 000～70 000kcal，占输入热量的 40%以上，但大部分热量仍会储存在水窖和棱柱形土壤内部。

设经过较长时间的热量扩散，每个小水窖的热量扩散到距各水窖中心线 8m 的地方（即 8m 外的温度仍为 15℃），水窖的温度为 40℃。这种状态是非常可能出现的，因为水窖的水温上升较快，水窖水温每升高 1℃需要 182 000kcal 的热量，而集热器在晴天每天可收集热量 144 516kcal，可使水窖水温升高 0.8℃，约 30 天即可达到 40℃，当达到 40℃后，只要供给的热量不小于散出的热量，就能逐渐达到这个状态。根据上面的计算公式，可以计算出在这种状态下，通过 8m 线圆筒面的散热量：

$$Q = 2 \times 3.14 \times 1 \times 13 \times (40-15) / \ln（8/0.8）= 887\text{W}$$

一昼夜 24h 的导热量为：

$$887 \times 3\,600 \times 24 = 76\,636\,800 = 76\,636\text{kJ} = 18\,308\text{kcal}$$

外侧 6 个水窖每天 24h 的总散热量为：18 308 × 6 = 109 848kcal

仍按 2/3 的侧面（240°）向棱柱外侧面散热，用来提高棱柱外土壤的温度，这部分向外散发的热量的总量为：109 848 × 2/3 = 73 232kcal。

与每天 144 516kcal 的输入热量相比，仍有一半的热量用来提高储热系统的温度。当然，由于不可能总是晴天，在阴天时，输入热量会减少，甚至为零，而系统散失的热量却时时刻刻在进行着，平均每天输入的热量会减少，但总的来说，输入会大于输出，整个储热系统的设计是基本合理的，能基本实现其储热功能。

利用上述圆筒壁型隔热层计算公式，可以计算任意给定状态的温度场中任意给定位置的温度。例如，计算上述状态距中心 2.5m 处的温度。

由于当系统处于稳态时，通过各个圆柱侧面的热量都相等，因此通过 2.5m 处圆柱面的热量也是 887W，通过导热公式（4-14）就可以计算出在这种状态下距中心线 2.5m 处的温度 $t_2$：

$$40℃-t_2 = 887 \times [\ln(2.5/0.8)] \div (2 \cdot 3.14\lambda L)$$

即：$40℃-t_2 = 887 \times [\ln(2.5/0.8)] \div (2 \times 3.14 \times 1 \times 13)$

解得：$t_2 = 28℃$

用同样方法可计算出距中心线 2m 处的温度 $t_3$：

$$40℃-t_3 = 887 \times [\ln(2.0/0.8)] \div (2 \cdot 3.14\lambda L)$$

即：$40℃-t_3 = 887 \times \{\ln(2.0/0.8)\} \div (2 \times 3.14 \times 1 \times 13)$

解得：$t_3 = 32.5℃$

### 3．供热分析

在不考虑热损失的情况下，系统储存的热量可供 100 多天采暖用，而 $60m^2$ 太阳能集热器本身在冬季也能提供一半的供热量，从总量上分析，考虑热损失，应能够满足整个采暖季节的热能需求。

在开始供热阶段，储热系统储存的热量较充足，仅水窖储存的热量就可以用 20 天，再加上太阳能集热器当天收集的热量，除补充热损失外，还能提供一部分热量直接供暖，很容易满足第 1 个月的供暖。

第 2 个采暖月，即 12 月 15 日～1 月 15 日，日照时间和日照强度最差，主要依靠储存在土壤中的热量供暖，当日集热器收集的热量提供一部分热量。这个期间储热系统的温度开始减低，土壤储存的热量有较大幅度的减少，随着储热系统温度的降低，储热系统边缘的热损失也逐渐减少。

第 3 个采暖月，即 1 月 15 日～2 月 15 日，日照时间逐渐增长，日辐射强度逐渐增强，储存在土壤中的热量和当日集热器收集的热量大约各提供一半的供暖热量。这个期间储热系统的温度进一步降低，土壤储存的热量进一步大幅度减少，随着储热系统温度的进一步降低，储热系统边缘的热损失也大幅减少。

第 4 个采暖月，即 2 月 15 日～3 月 15 日，日照时间有较大的增长，日照强度也有较大的增强，储存在土壤中的热量只提供少量阴天的供暖，当日集热器收集的热量提供大部分供暖用热量。这个期间储热系统的温度降到最低，土壤储存的热量也减少到最少。

在这里需要特别指出的是，当采暖期结束后，地下储热系统的温度仍保持在 25℃，因为 25℃以下的热量不能被利用。但这一温度对下一年的储热有很大好处，下一年的储热将从 25℃开始，而不是像第一年那样从 15℃开始，这将节省相当一部分热量，使下一年的储热温度大幅提高，储存的有效能量大幅增加，大大提高储热系统的效能。

### 4．小孔径阵列式储水窖建造工程优势

（1）7 个小水窖的总容量只有 $182m^3$，只有总容量的 1/5，大大降低了系统的总工程量。

（2）小孔径窖的直径设计为 1.6m，其建造施工比大直径窖要容易。比如顶部的盖板更容易建造，水窖内壁的防渗漏问题也较容易解决。

（3）对院内其他建筑影响小得多，对树木、花草等的种植影响小。

## 4.8.9 阵列式多孔窖大规模长期热储存系统

利用水和土壤对热能进行长期地下储存，规模越大，热损失越小。因为热的散失主要在储热系统的边沿进行，由边沿的面积决定，而储热量是由体积决定，前面已论证过，体积越大，其边沿面积与体积之比值越小，即单位热容量的损失量越小。因此，要尽可能采用大的地下储热系统。但大规模储热系统存在一个热量的有效传输问题，阵列式储热系统就是解决

热量传输的一个有效方法。

阵列式水窖储存系统可分为三窖基本单元系统和四窖基本单元系统两类。三窖基本单元系统的优点是水窖间的中心距相等，温度场的分布均匀。四窖基本单元系统的优点是总体布局方正，适于在家庭院内布局。

利用三窖基本单元系统和四窖基本单元系统可以组成一系列大的储水窖阵列，可实现大规模地下储能，这为农村多农户集中供热或楼房的集中供热提供了技术上的支撑，使其变得完全可行。

以三窖为基本单元可组成 7 窖、19 窖、37 窖等一系列按六边形轮廓线组成的阵列，如图 4-11 和图 4-12 所示。

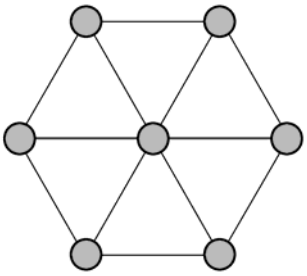


图 4-11　7 孔窖阵列储热系统

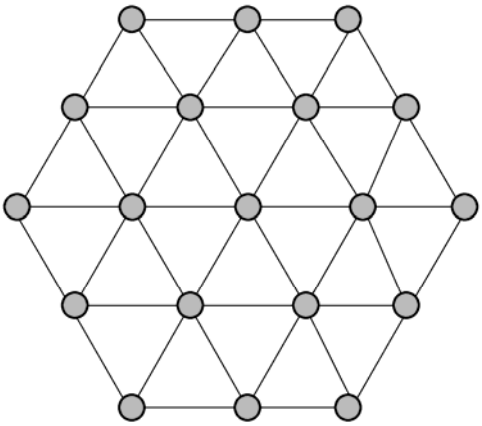


图 4-12　19 孔窖阵列储热系统

以四窖为基本单元可组成 9 窖、16 窖、25 窖等一系列按四边形轮廓线组成的阵列，如图 4-13～图 4-15 所示。

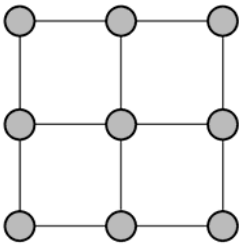


图 4-13　9 孔窖阵列储热系统

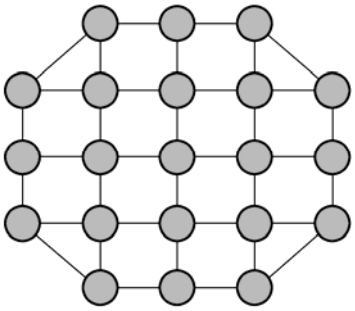


图 4-14　21 孔窖阵列储热系统

当然在实际工程中我们可以根据实际的地形和需要来确定实际的排列次序，并不局限于上述基本类型。如图 4-14 是 21 孔阵列，加上 4 个角就是 25 孔阵列。

阵列排列有以下两个原则。

（1）等距原则。尽量使整列中各个水窖之间的距离相等（如以三孔窖基本单元排列）或接近相等（如以四孔窖基本单元排列）。

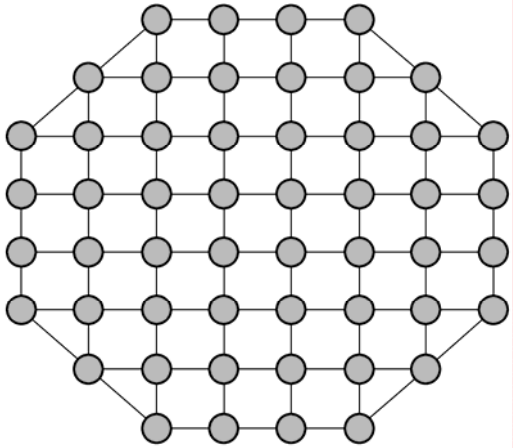


图 4-15　52 孔窖阵列储热系统

（2）最小边缘原则。圆形或接近圆形的边缘线度场最小，因此阵列的外轮廓线要尽量接近圆形。

关于水窖的深度，应遵循下述原则。

（1）水窖应建在地面 2～3m 以下，如有可能建在 4～5m 以下更好，这样可大大减少通过地表面的热损失。

（2）水窖本身的深度应根据储热总量综合考虑，在建造工艺允许的情况下，尽量使水窖深度等于地面水窖阵列的直径，使土壤储热体形成一个近似正圆柱体，这样可使储热体边缘面积最小，散热损失最小。

### 4.8.10　小水窖阵列式地下储存的改进设计

由于在地下深处没有也不可能设置隔热保温层，太阳能地下长期储存系统的设计关键点，在于如何尽量减少储热系统边缘的热损失。当然最有效的办法是尽量采用大的储热系统，储热系统容量越大，其边缘热损失相对越小。理论分析表明，对 100m$^2$ 以下建筑面积供暖的储热系统，不适宜搞长期储热系统，因为相对于储存的热量，其热损失量所占比例太大，在经济上不太合算。但是对于 300m$^2$ 建筑面积的别墅，基本上可以采用地下长期储热系统。不过其热损失量所占比例也较大，影响了其效能的发挥，有时可能还要适当增加太阳能集热器面积，以保证其储热和供热性能。

现在的问题是在储热量一定的条件下，有无可能改进储热系统的性能。下面我们仍以 300m$^2$ 建筑面积的二层楼小别墅为例来分析。

如图 4-16 所示，建立一个五边形 10 窖储存系统。

该图所示储热体的大小与图 4-11 所示的储热体的大小基本相等，储热体直径都为 14m，水窖深度为 13m。所不同的是外圈 5 个水窖的直径变为 1.2m，内圈水窖的直径更小，可在 0.5～1m 间取值。

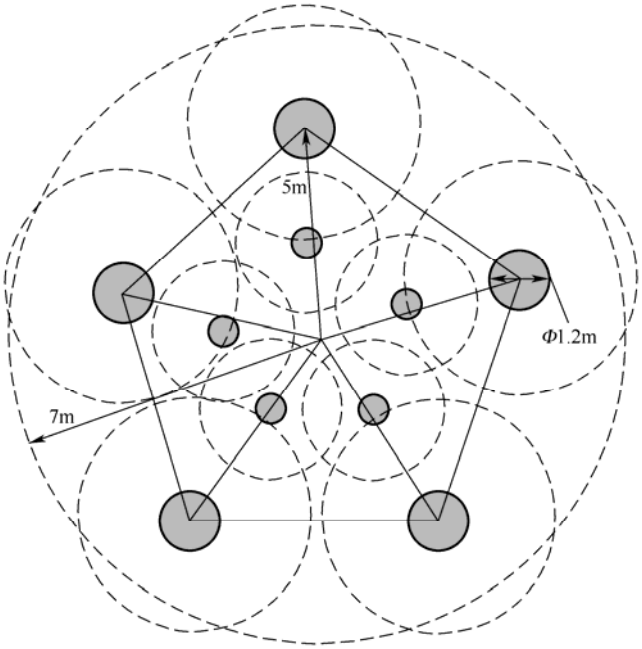



图 4-16　五边形 10 窖储热系统

内圈增加 5 个小水窖可以增加水窖与内部土壤的接触面积，强化对内部土壤的换热，既有利于向土壤充热，也有利于从土壤中回收热量，可以在储热系统的中心区域形成高温区，增大系统的储热量和换热能力。由于高温区位于系统中心，热量不易散发到边缘去，减少了边缘的热损失量。

仍用圆筒壁隔热层计算公式计算系统向外的散热情况。

仍假定在储热的开始阶段，水窖的水温达到 20℃，在距水窖中心 2.5m 处，温度是 15℃（土壤的原有温度），水窖的半径变为 0.6m，根据圆筒壁导热公式，试计算距水窖中心线 2.5m 由土壤形成的圆筒壁向外侧的导热量。

根据圆筒壁导热公式：

$$Q = 2 \cdot 3.14\lambda L\ (t_1 - t_2)\ /\ln\ (r_2/r_1)$$

把上列各数值代入上面的导热公式：

$$Q = 2 \times 3.14 \times 1 \times 13 \times (20 - 15)\ /\ \ln（2.5/0.6）$$

$$= 6.28 \times 65 \div 1.427 = 286\text{W}$$

而对 1.6m 直径的水窖，此数值为 358W，减少了 72W。

一昼夜 24h 的导热量为：

$$286 \times 3\ 600 \times 24 = 24\ 710\ 400 = 24\ 710\text{kJ} = 5\ 930\text{kcal}$$

外侧 5 个水窖每天 24h 的总散热量为：5 930 × 5 = 29 652kcal。

图 4-16 中的虚线圆描述了 10 个水窖的热量扩散情况。5 个内圈小水窖散发的热量基本上留在由外圈 5 个大水窖中心线围成的五棱柱体内，向五棱柱体外散发的热量主要由外圈 5 个大水窖提供。各个圆形水窖向内部土壤扩散的热量互相传递累加，除上下两面外，其余侧

面的热量几乎不散失。在五边形之外，5 个外圆形成一个五边形整体，向外扩散热量，类似于一个大圆形窖向外散热，每个小水窖只分担 1/5 的散热量。

连接 5 个外侧水窖的中心线形成一个高 13m 的五棱柱体，每个水窖有 135° 的侧面向五棱柱内的土壤散热，这部分热量用来提高棱柱内土壤的温度基本上不向外散失。另有 225° 的侧面向棱柱外侧面散热，用来提高棱柱外土壤的温度，这部分热量的总量为：

$$29\ 652 \times 225/360 = 18\ 532\text{kcal}$$

与上一节计算的散热量 29 556kcal 相比，减少了 11 024kcal。

我们已知，在春、夏、秋三季的晴天，60m$^2$ 集热器每天可产生 144 516kcal 的热量，与 18 532kcal 的散热量相比，散失的热量只占输入热量的 13%，有 87%的热量输入到棱柱体的内侧土壤储存起来，使这些土壤的温度逐渐升高。可见改进后的系统储热性能有了较大的提高。

与上一节的情况一样，随着棱柱内土壤温度和水窖水的温度逐渐升高，上述计算公式中的 $t_1$ 和 $t_2$ 的值会逐渐升高，由于水窖水温 $t_1$ 的值增长较快，温差 $t_1$–$t_2$ 的值也会逐渐升高，当其温差达到 10℃时，其散热量大于 20 000kcal，大部分热量仍会储存在水窖和棱柱形土壤内部。

同样设经过较长时间热量扩散，每个小水窖的热量扩散到距各水窖中心线 8m 的地方（即 8m 外的温度仍为 15℃），水窖的温度为 40℃，根据上面的计算公式，可以计算出在这种状态下，通过 8m 线圆筒面的散热量：

$$Q = 2 \times 3.14 \times 1 \times 13 \times (40 - 15) / \ln (8/0.6) = 788\text{W}$$

一昼夜 24h 的导热量为：

$$788 \times 3\ 600 \times 24 = 68\ 083\ 200 = 68\ 083\text{kJ} = 16\ 339\text{kcal}$$

外侧 5 个水窖每天 24h 的总散热量为：16 339 × 5 = 81 699kcal。

仍按 225° 的侧面向棱柱外侧面散热，用来提高棱柱外土壤的温度，这部分向外散发的热量的总量为：

81 699 × 225/360 = 51 062kcal，与原来的 73 232kcal 相比减少了 22 171kcal。

在晴天，散失的热量占太阳能集热器收集到的热量的百分比值为：

$$51\ 062/144\ 516 = 35\%$$

可见对于改进的储热系统，其储热性能大有改善，当水窖储热温度达到 40℃时，每天只有 35%的热量散失，仍有 65%的热量留在储能系统，仍在不断提高储热系统中心区的温度，提高其储热质量。

由此可以得出改进储热系统设计的两个基本途径在于：

**一是提高系统中心区域的换热能力和储热温度；**

**二是缩小边缘位置小水窖的直径，降低其散热能力。**

### 4.8.11 6 个 300m$^2$ 二层别墅小楼储热系统

地下储存热能系统越大，热量的散失量越小，储热性能越好。下面我们以 6 个 300m$^2$ 二层别墅楼整体储热系统为例具体分析这一问题。

本系统的各参数如下。

总采暖面积：$300m^2 \times 6 = 1\ 800m^2$

太阳能集热器面积：$60m^2 \times 6 = 360m^2$

小水窖个数：19

水窖深度：27m

水窖直径：1.6m

水窖间的中心距：5m

小水窖摆列方式：正六边形排列，如图 4-17 所示

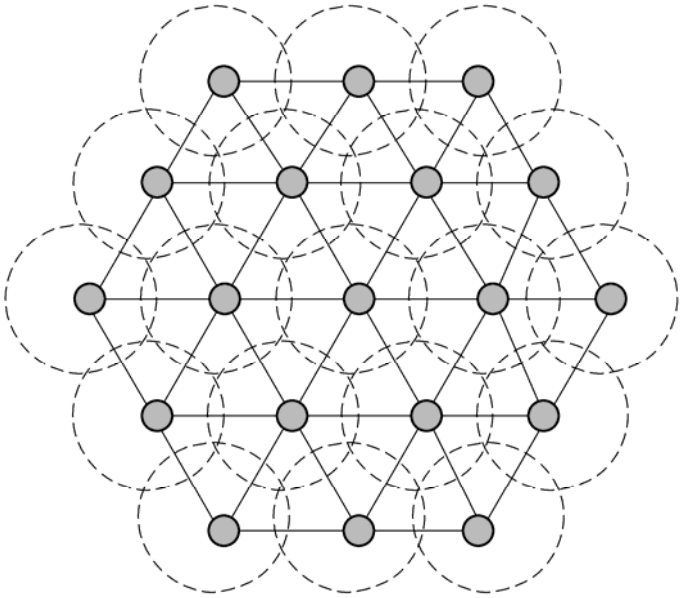


图 4-17　$1\ 800m^2$ 建筑面积 19 孔窖阵列储热系统

储热体尺寸：直径 24m，深 28m

先计算其总热容量。

小水窖的容积：$Vx = (1.6m/2)^2 \times 3.14 \times 27m = 54m^3$

19 个小水窖的容积：$Vs = 54m^3 \times 19 = 1\ 026m^3$

总储热体的容积：$Vz = (24m/2)^2 \times 3.14 \times 28m = 12\ 660m^3$

总储热体内土壤的容积：$12\ 660m^3 - 1\ 026m^3 = 11\ 634m^3$

按前面所述，每 $1m^3$ 的土壤的储热量约等于 0.4 $m^3$ 水的储热量，则：

$$11\ 634m^3 \times 0.4 = 4\ 653m^3$$

$$4\ 653m^3 + 1\ 026m^3 = 5\ 679m^3$$

整个储热系统的储热能力相当于 $5\ 679m^3$ 水的储热能力。根据前面的分析，当储热系统的平均温度达到 40℃时，$100m^2$ 建筑面积采暖约需要 $3m^3$ 水，$1\ 800m^2$ 的小别墅采暖约需要 $54m^3$ 水，那么 $5\ 679m^3$ 40℃的水可满足 5 679/54=105 天的供暖需求，完全满足本系统长期热储存供热的要求。

下面分析其充热、散热情况。

对每一个水窖而言，仍按圆筒壁型隔热层的公式来分别计算。

仍假定在储热的开始阶段，水窖的水温达到 20℃，在距边缘水窖中心 2.5m 处，温度是 15℃（土壤的原有温度），水窖的半径变为 0.8m，深度为 27m，根据圆筒壁导热公式，计算距水窖中心线 2.5m 由土壤形成的圆筒壁向外侧的导热量。根据圆筒壁导热公式，得：

$$Q = 2 \times 3.14 \times 1 \times 27 \times (20 - 15) / \ln (2.5/0.8)$$

$$= 6.28 \times 135 \div 1.14 = 744\text{W}$$

一昼夜 24h 的导热量为：

$$744 \times 3\,600 \times 24 = 64\,281\text{kJ} = 15\,356\text{kcal}$$

图 4-17 中 7 个内圈小水窖散发的热量，基本上留在由外圈 12 个小水窖中心线围成的六棱柱体内。向六棱柱体外散发的热量主要由外圈 12 个水窖提供。各个水窖向内部土壤扩散的热量互相传递累加，除上下两面外，其热量几乎不散失。

连接 12 个外侧水窖的中心线形成一个高 27m 的六棱柱体，6 个水窖有的 120° 的侧面向六棱柱内的土壤散热，这部分热量用来提高棱柱内土壤的温度，基本上不向外散失。另有 240° 的侧面向棱柱外侧面散热，用来提高棱柱外土壤的温度，这部分热量的总量为：

$$15\,356\text{kcal} \times 6 \times 240/360 = 61\,424\text{kcal}$$

另有 6 个水窖有的 180° 的侧面向六棱柱内的土壤散热，这部分热量用来提高棱柱内土壤的温度，基本上不向外散失。另有 180° 的侧面向棱柱外侧面散热，用来提高棱柱外土壤的温度，这部分热量的总量为：

$$15\,356 \times 6 \times 180/360 = 46\,068\text{kcal}$$

总向外散失的热量为：61 424 + 46 068 = 107 492kcal

在春、夏、秋三季的晴天，60m$^2$ 集热器每天可产生 144 516kcal 的热量，则 6 个 60m$^2$ 集热器能产生 144 516 × 6 = 867 096kcal 的热量。散失的热量 107 492/867 096 = 12.4%，只占很小的比例，与 300m$^2$ 建筑面积 20%的散热量相比有了较大的改善，有 87.6%的热量用于向储热系统储热。

可见储热容量增大 6 倍后，系统储热性能有了很大的改善。

同样设经过较长时间热量扩散，每个小水窖的热量扩散到距各水窖中心线 8m 的地方（即 8m 外的温度仍为 15℃），水窖的温度为 40℃，根据上面的计算公式，可以计算出在这种状态下，每个小水窖通过 8m 线圆筒面的散热量为：

$$Q = 2 \times 3.14 \times 1 \times 27 \times (40 - 15) /\ln (8/0.8) = 1\,843\text{W}$$

一昼夜 24h 的导热量为：

$$1\,843 \times 3\,600 \times 24 = 159\,235\text{kJ} = 38\,040\text{kcal}$$

外侧拐角处 6 个水窖仍按 240° 的侧面向棱柱外侧面散热，用来提高棱柱外土壤的温度，每天 24h 的总散热量为：

$$38\,040 \times 6 \times 240/360 = 152\,160\text{kcal}$$

外侧另 6 个水窖仍按 180° 的侧面向棱柱外侧面散热，用来提高棱柱外土壤的温度，每天 24h 的总散热量为：

$$38\,040 \times 6 \times 180/360 = 114\,120\text{kcal}$$

外侧 12 个水窖向外侧面散热每天 24h 的总散热量为：

$$152\,160 + 114\,120 = 266\,280\text{kcal}$$

266 280/867 096 = 30.7%仍有 69.3%的热量储存在六棱柱体内。

可见系统的储热性能大大改善。

## 4.8.12　长期大规模地下储热系统的一般设计计算方法

前面几节我们讨论了几个具体的储热系统，本节讨论长期大规模地下储热系统的一般设计计算方法。

### 1．地下土壤储热圆柱体的设计计算

（1）确定储热总量的大小。

根据供热建筑面积首先确定每天的能耗量，对于以平房和二层小楼房为主的太阳能供暖系统，我们取能耗量为 25W/$m^2$，则 100$m^2$ 建筑面积的能耗为 2 500W。每天 24h 的总能耗是 216 000kJ，或等于 51 613kcal。

对于长期储热系统，储存的可用热量一般能满足整个采暖期用热量的 3/4 即可，因为太阳能集热器在冬季也在继续工作，也能提供部分供暖热量。若采暖期是 4 个月，则储能系统储存 3 个月的能耗量即可，3 个月的总能耗量为：

$$51\,613\text{kcal/天} \times 90\text{ 天} = 4\,645\,170\text{kcal}$$

根据总储热量计算总储热用土壤的体积。

前面已分析过，土壤单位质量的热容量（比热）约是水的 1/4，而土壤的容重约是水的 1.8 倍，综合考虑，我们可以按每立方米的土壤的热容量等于 0.4 倍水的热容量来计算，即设定每立方米土壤的热容量等于 400kcal。按平均储热温度 40℃、释放热量后剩余温度 25℃计算，可用储热温差为 25℃，每立方米土壤的储热量为：

$$400\text{kcal/(m}^3 \cdot ℃) \times 25℃ = 10\,000\text{kcal/m}^3$$

则 100$m^2$ 建筑面积的储热系统需要的土方量为：

$$4\,645\,170\text{kcal} \div 10\,000\text{kcal/m}^3 = 464.5\text{m}^3$$

表 4-7 所示为几种建筑面积的能耗量和储热需要的土方量。

**表 4-7　　几种建筑面积的能耗量和储热需要的土方量**

| 建筑面积（$m^2$） | 100 | 200 | 300 | 600 | 1 800 |
|---|---|---|---|---|---|
| 每天能耗量（kcal） | 51 613 | 103 226 | 154 839 | 309 678 | 929 034 |
| 年总储热量（kcal） | 4 645 170 | 9 290 340 | 13 935 510 | 27 871 020 | 83 613 060 |
| 需土方量（$m^3$） | 464.5 | 929 | 1 393.5 | 2 787 | 8 361 |
| 正圆柱储热体半径（m） | 4.2 | 5.3 | 6.06 | 7.64 | 11 |

（2）土壤储热圆柱体的确定。

根据上述计算出的所需土方量可以计算出土壤储热圆柱体的具体尺寸。

一般土壤储热圆柱体设计成正圆柱体，因为正圆柱体外侧面积最小，故其散热量最小。圆柱体的计算公式为：

$$V = 2 \cdot 3.14r^3 = 6.28r^3 \qquad (4\text{-}15)$$

式中：$r$ 是半径，圆柱高等于 $2r$。

根据上式可以计算出半径 $r$，从而就确定了圆柱体的尺寸。

例如，100m$^2$ 建筑面积的储热体尺寸为：

$$464.5\text{m}^3 = 6.28r^3$$

解得：$r = 4.2\text{m}$

这就是说，一个直径为 8.4m 高为 8.4m 的圆柱体土壤储存的热量可满足 100m$^2$ 建筑面积的房间冬季供暖用。

用同样方法可以计算出 200m$^2$、300m$^2$、600m$^2$、1 800m$^2$ 等建筑面积房屋的储热用土壤圆柱体的具体尺寸（参看表 4-7）。

### 2．地下土壤储热圆柱体的热力学分析

（1）温度场的扩散。

研究储热系统温度场分布规律是确定储热系统性能的基本方法。我们还是以 100m$^2$ 建筑面积储热系统为例来讨论。

由于储热系统是圆柱形，我们仍以圆筒壁传热公式来研究。理论上圆柱的高与直径之比值为 10 时，计算误差才可忽略不计，这里圆柱的高与直径的比值是 1，其值太小，误差会较大，其计算所得散热值会比实际散热值小，但是若再考虑两底面的散热量，仍可得出大致的散热量范围，所以我们仍可用它来计算。

当储热系统达到设计的储热温度时，即该储热圆柱体的外侧面的温度平均达到 40℃时（内部可能超过 40℃），试分别计算温度场边缘达到 8m、12m、16m 时的热流通量（即散热量），这里温度场边缘温度是 15℃。

首先计算温度场边缘达到 8m 时的热流通量：

根据圆筒壁导热公式：

$$Q_C = 2 \cdot 3.14\lambda L (t_1 - t_2) / \ln (r_2/r_1)$$

带入系统相关数值：$\lambda = 1$，$L = 8.4$，$t_1 = 40$，$t_2 = 15$，$r_2 = 8 + 4.2 = 12.2$，$r_1 = 4.2$

则有：

$$Q_C = 2 \times 3.14 \times 1 \times 8.4 \times (40 - 15) / \ln(12.2/4.2) = 1\,318 / \ln 2.9 = 1\,244\text{W}$$

在正圆柱体中，底面面积是 $3.14r^2$，而侧面面积是 $4 \cdot 3.14r^2$，相差 4 倍。由于上下两底面的温度也是 40℃，同样也都在向外散发热量，其量值约等于侧面散热量的 2/4，故储热系统的总散热量 $Q_z$ 为：

$$Q_z = 1\,244\text{W} \times (1 + 2/4) = 1\,866\text{W}$$

同样方法可计算出温度场边缘在 12m 处的热流量：

$$Q_C = 2 \times 3.14 \times 1 \times 8.4 \times (40-15) / \ln (16.2/4.2) = 976W$$

$$Q_z = 976W \times (1 + 2/4) = 1\ 464W$$

温度场边缘在 16m 处的热流量为：

$$Q_C = 2 \times 3.14 \times 1 \times 8.4 \times (40-15) / \ln (20.2/4.2) = 840W$$

$$Q_z = 840W \times (1 + 2/4) = 1\ 260W$$

一般说来，用上述方法计算出的数据偏小，我们再用另一种计算方法，即利用球壳散热公式来计算。

我们把储热体看成一个半径是 $r_1 = 4.2$ 的球体，球体边缘温度 $t_1 = 40℃$，试计算当温度场扩散到距外部 16m 处，此处温度 $t_2 = 15℃$，即当 $r_2 = 16 + 4.2 = 20.2$ 时，向外的热流量 $Q$ 的计算如下。

根据球壳散热公式：$Q = 4 \cdot 3.14\lambda (t_1 - t_2) \div (1/r_1 - 1/r_2)$　　（4-16）

带入相关数据得：$Q = 4 \times 3.14 \times 1 \times (40 - 15) \div (1/4.2 - 1/20.2)$

$$= 314 \div 0.188\ 6$$

$$= 1\ 664W$$

用球壳散热公式计算出的值偏大，因为在球体的上半部是地表面，我们总会在上部采取某些保温措施以降低其散热量。权衡两种计算所得数值，可用加权的方法综合考虑各种因素。可用下式简单计算：

$$Q = 1\ 260 + (1\ 664 - 1\ 260) / 4 = 1\ 361W$$

我们可以取热流量为 1 361W。

（2）集热器的最小面积确定。

从上面的计算可以看出，即使当温度场扩散到储热系统外 16m 处，整个储热系统的向外散热量也有 1 361W。要保持储热系统温度能长期维持不低于这种状态，这些散失的热量需要太阳能集热器来补充，但太阳能集热器每天有效工作时间平均只有 6h，只占每天 24h 的 1/4，故太阳能集热器的功率至少应是：$1\ 361 \times 4 = 5\ 444W$。

如果考虑到阴天和多云天气约占 1/3，则太阳能集热器在晴天的额定有效功率应该是：

$$5\ 444W \div (2/3) = 8\ 166W$$

根据前面的估算，在晴天太阳能集热器的额定有效功率约为 $300W/m^2$，则 8 166W 的有效功率需要太阳能集热器的面积为：

$$8\ 166W \div (300W/m^2) \approx 27m^2$$

这就是说，至少需要 $27m^2$ 的太阳能集热器才能使储热系统维持上述设定温度状态。

当然，上述结果是按热量扩散到 16m 处计算的，若是扩散到更远处，其散热量还要减少；相反，若扩散的距离更小些，比如扩散到 8m 处，若仍想保持储热体边缘温度为 40℃，则需要热流量更大些。

在地下，热量的扩散是个连续不断进行的过程，储存的时间越长，温度场扩散的越大，系统的散热损失将越来越小。所以连年使用的储热系统，其储热性能会大大改善。

（3）$200m^2$、$300m^2$、$600m^2$ 建筑面积储热体的热流场。

用与上面同样的方法可以计算出各种储热体在特定条件下的热流场。

我们设定各储热体的参数如下。

不管是正圆柱形储热体还是球形储热体，其边缘温度都设定为 $t_1 = 40℃$，热量都扩散到边缘外侧 16m 处，即 $r_2 = r_1 + 16m$，此处温度为 $t_2$=15℃。

圆筒壁热流计算公式为：

$$Q = 2 \cdot 3.14\lambda L\ (t_1 - t_2)\ /\ln\ (r_2/r_1)$$

圆筒壁热流模型要考虑上下底面的散热量。

球壳散热热流计算公式为：

$$Q = 4 \cdot 3.14\lambda\ (t_1 - t_2)\ \div\ (1/r_1 - 1/r_2)$$

表 4-8 为计算结果。

**表 4-8　　几种储热体的热流场和所需最小集热器面积**

| 建筑面积（$m^2$） | | 100 | 200 | 300 | 600 |
|---|---|---|---|---|---|
| 储热总量（kcal） | | 4 645 170 | 9 290 340 | 13 935 510 | 27 871 020 |
| 储热体半径 $r_1$（m） | | 4.2 | 5.3 | 6.06 | 7.64 |
| 距储热体边缘 16m 处总向外热流量（W） | 圆筒壁模型计算 | 1 260 | 1 794 | 2 208 | 3 183 |
| | 球壳模型计算 | 1 664 | 2 215 | 2 622 | 3 544 |
| | 加权平均值 | 1 361 | 1 900 | 2 311 | 3 272 |
| 需太阳能集热器功率（kW） | | 8 166 | 11 400 | 13 866 | 19 632 |
| 所需最小集热器面积（$m^2$） | | 27 | 38 | 46 | 65 |
| 最小集热器面积与建筑面积之比 | | 1:3.7 | 1:5.3 | 1:6.5 | 1:9.2 |

从上表可以看出，随着储热体容量的增加，其边缘的热量散失率越来越小，维持这种状态所需要的太阳能集热器功率，亦即所需的最小集热器面积也越来越小。

需要强调说明一点，表中的最小集热器面积并不是我们选定的整个太阳能供暖系统的集热器面积，实际的集热器面积要大于或等于最小面积，确定整个系统集热器面积还要考虑能否满足系统总的能量储存。

从表中也可以看出，$100m^2$ 建筑面积的长期储热系统只需要 $27m^2$ 的集热器，而没有储热系统至少需要 $40m^2$ 的太阳能集热器，这不论在经济上还是在屋顶采光面积的利用上，都有了明显的效果。也就是说，对于 $100m^2$ 建筑面积的普通家庭房屋，完全可以采用地下长期储热系统，从而保证供暖的质量和提高太阳能供暖的保证率。

从上表还可以看出，随着储热体容量的增加，整个系统的性能会大大改善，在 $300m^2$ 建筑面积的储热系统中，集热器面积和建筑面积之比已达到 1:6，在 $600m^2$ 建筑面积的储热系统中，这个比值已达到 1:9，这为 5～6 层的楼房建筑采用太阳能供暖提供了可能。

从整个讨论过程读者可以看到，我们没有引入辅助热源，是太阳能提供了 100%的供暖用能。

### 3．最小储热系统讨论

从上面的分析可以看出，$100m^2$ 建筑储热系统在技术上是可行的，虽然在经济上可能会增加一次性投资，但可以省去辅助热源系统，节省每年辅助热源的消耗，从总体来看还

是可行的。

对于再小的系统，比如 60m$^2$ 建筑面积的长期储热系统，由于其相对热流失量较大，故太阳能集热器面积可能不会减少，还要增加储热系统的费用，在经济上是否合算，还要与其他辅助热源的费用作比较才能得出结论。但是有一点是肯定的，即从技术上说是可行的。

#### 4．水窖的数量、直径与排布方法

从有利于传热的角度来说，水窖的直径越小，排布越密，越有利于热量的传导——既有利于热量的储存，也有利于热量的回收。

水窖设计的重要原则：

在设定的温度梯度下，水窖壁的总面积一方面要能保证储热时热量穿过水窖壁储存到土壤内，另一方面，要能保证供热时热量从土壤回流到水窖内。

不同的水窖数量和不同的排列方式，影响土壤中传热的距离和热阻，而且土壤内的温度梯度也是个变化量，因此，在设计时应尽量采用小直径多水窖的方案，以减小热流阻力。

对阵列式水窖储热系统，水窖直径一般不超过 2m。对人工挖掘的水窖的直径，一般在 1～2m 之间，这样便于施工。对于打井机或其他专门的打井机械，为便于施工，其直径应在 1m 之内，一般在 0.2～0.8m 之间。水窖的总容量要能满足 20 天以上供热之用。

水窖间的距离，可根据水窖直径、数量和储热土壤系统的尺寸来确定，一般要求均匀排布。

### 4.8.13　地下储热系统的建造技术

地下储存热能的关键是储水窖的建造，低成本、高效率的水窖挖掘和建造技术，对能否迅速推广地下储能技术有极其重要的意义。

小水窖挖掘和建造技术只是常规技术，现在社会上已有不少类似的挖掘技术和相应的挖掘设备，把这些技术和设备移植过来加以改进完善，就可以形成专门的技术和专用设备，就能大大提高挖掘效率，降低建造成本。

多年来我国农村广大农民有很多建储水窖的经验和技术，对挖掘和防渗漏都有一套较成熟的方法，总结这些经验对我们修建水窖有很好的借鉴示范作用。

短期储存的水窖深度只有几米，长期储存的小水窖只有十几米至几十米，都属于浅层挖掘建造技术，挖掘和防渗漏的技术难度都不大，成本都不高，对推广地下储存很有利。

#### 1．水窖挖掘技术

（1）敞开挖掘法。适合挖掘单个大型储水池，即从地上开挖大敞口，靠人力或挖掘机挖掘大型储水池。

（2）深水井法。一般是人力在井下挖掘，通过电力机械把挖掘的土壤运上来。

（3）小直径深水井法。靠电力机械挖掘，可采用普通打井机械，也可采用特制的挖井机械。井的深度可从几米到几十米，直径一般只有几十厘米。

2．水窖壁防渗漏技术

（1）抹水泥防漏砂浆法。即在砖砌的水窖壁上或直接在挖好的土壤水窖壁面上抹水泥防漏砂浆。对于较浅的储水窖，可采用在砖砌的水窖壁面上抹水泥防漏砂浆，这样壁面较坚固。而对较深的水井，反而是在土壤壁面上直接抹水泥防漏砂浆效果更好，这样不仅降低造价，而且质量较好。因为抹水泥防漏砂浆层与土层结合得较紧密，无孔穴，抗压性能好。为增加强度，可以在抹水泥防漏砂浆层时铺挂加强网。

若砌砖壁，往往砖壁与外面的土壤结合不好，造成大量孔穴，在长期高水压下墙壁容易裂缝漏水。

（2）用浇注法浇注钢筋混凝土水窖壁面。

（3）对小直径的水窖，可采用塑料管作水井的壁面，也可用其他成型的管道如水泥管作壁面。

（4）用厚塑料布，作水窖壁的防漏层。这种方法适合直径适中的水窖，比如直径 1～2m 的水窖。

3．换热器

换热器占储能系统设备投资的相当一部分，要尽量降低成本，可以采用铜管、不锈钢管作换热器，也可采用耐高温的塑料管作换热器。由于地下储热温度不太高，一般储热系统温度不高于 80℃，耐热塑料管也能使用。

对直径大些的水窖，可采用盘管式水窖换热器，对直径较小的水窖可以采用 U 形管换热器，但都要求布满水窖的上下方，以保证换热均匀。换热器要同时担负从集热器向水窖传热和从水窖取热而向房间供热的双重任务，所以，在排布换热器时要考虑这两方面因素。

## 4.9 冷量储存和土壤能的直接利用

### 4.9.1 冷量储存

用地下储热的方法完全可以用来储“冷”。实际上，在地下储存冷水比储存热水更容易，有更多有利条件。

（1）储存温差小，冷量损失小。

地下储存的冷水温度一般在 5～10℃，土壤温度为 15℃，两者温差在 5～10℃之间，比储热的温差（储热温差在 25° 以上）小得多，因此冷量损失要小得多。

（2）获取冷量更容易。

即使在夏季获取热量也要利用太阳能集热器，因为储存热量至少需要 50℃以上的热水。而储存冷量需要的冷水达到 5℃就行，而在冬季的夜晚，自然环境就很容易达到 5℃以下的温度，不需要特殊的装置，利用环境条件就能获得所需要的“冷量”，比如把换热器直接放在露天即可，甚至可以利用自然存在的河流、湖湾、池塘来获取所需要的冷水。

（3）冷量需求量小。

在夏季，一般房间即使不进行制冷降温，其室温最高也就在 30℃左右，这时只要再降低 3～5℃达到 26℃左右，就会变得很舒服。但是在冬季，房间若没有供暖，其室温会降到接近 0℃，甚至到 0℃以下，一般需要升温 15℃以上才行。可见夏季空调需要的冷量比冬季供热需要的热量要少得多。

以上分析可以看出，储冷是一种非常经济的、几乎不消耗能源的节能方式，这种储冷工程可能会首先在城市推广实行，其原因有以下几方面。

（1）由于城市人口密度大，耗能多，其环境温度比农村相对要高些，夏季更需要空调制冷。

（2）城市有许多人口密集的单位，如商场、超市、会堂、学校、工厂、办公大楼等，在夏季都需要较大规模的空调制冷，因此适合大规模的地下储冷系统。与地下储热系统一样，储冷系统越大，其冷量的损失越小。

（3）即使在城市大型的需制冷的单位，其在冬季获得冷量也比从太阳能获取热量较容易实现。在寒冷的冬季，可以说是处处有冷量。

（4）城市有较大的资金实力，可以进行较大的储冷工程试点。

### 4.9.2　土壤能的直接利用

#### 1．土壤能直接利用现状

实际上人们自古就在利用土壤能，现在也一直在利用土壤能。

在冬季，需要把新鲜蔬菜或红薯等储存在地窖里。这就是利用土壤内几乎是恒定的 15～16℃温度来创造适宜生命体储存的环境。

现在，河北西部太行山内和山西、陕西不少农村还有住窑洞的习惯，窑洞内冬暖夏凉，一直保持 15～16℃的恒温环境，很适宜人居住。夏季不用制冷，冬季不用供暖，是典型的利用土壤能的零能耗绿色建筑。

北京等大城市都有很多人防工程，即地下防空洞，现在大都被充分利用着，其中很多是用来开旅馆。这些人防工程也是冬暖夏凉，夏季不用制冷，冬季不用供暖，也是典型的利用土壤能的节能建筑。

#### 2．利用土壤能建筑的现实性

既然利用土壤能建筑有很多优点，为什么没有能大量推行？究其原因有以下两方面。

一是地下建筑存在不透光、不透风和潮湿等问题。只有在黄土高原地区，人们利用坡岸横向挖窑洞建房，一则基本上解决了透光、透风问题；二则这些地区常年干燥，基本上不存在潮湿问题；三则建筑费用低，所以这些地区人们喜欢建窑洞。

二是在其他地区，若同时解决透光、透风和防潮湿等问题，将增加建筑费用。

但是现在整个社会情况发生了很大变化，这些变化使得利用土壤能的地下建筑有了新的生命力，有了进一步开拓发展的价值。

（1）随着建筑技术的快速发展，地下建筑的透光、透风和防潮湿等问题已完全可以解决。

（2）过去建筑能耗所占比例很小，尤其是在广大农村，很多农户在冬季只是利用柴草来取暖，夏季根本不用空调。现在随着人民生活水平的快速提高，建筑能耗大幅增加，不仅冬季需要消耗大量能源取暖，夏季也需要耗用大量电能制冷。

（3）建筑能耗的大幅攀升和矿石能源的严重短缺形成了尖锐的矛盾，在节能减排的巨大压力下，我们必须走低能耗建筑的道路。因此，充分利用土壤能的建筑又一次被提到我们面前。

笔者相信，地上、地下各一层的二层别墅小楼式的建筑，会首先被人们所认识，必将受到人们的欢迎而迅速发展起来。

### 3．土壤能别墅楼设计

现在各地的城乡结合部非常盛行二层别墅小楼式的建筑，如果我们改变一下思路，将其建成地上、地下各一层的二层别墅小楼，基本结构设计如图 4-18 所示，将会是居住舒适且节能环保的建筑。

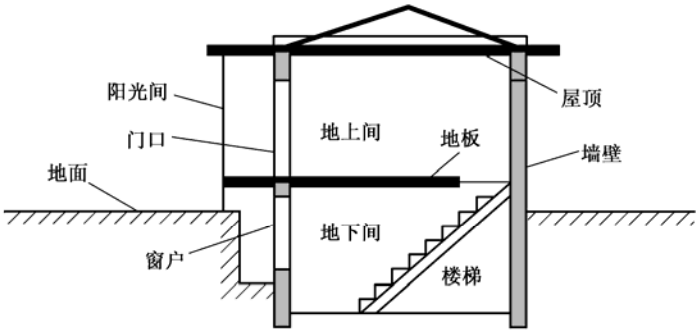



图 4-18　地上、地下各一层的二层别墅小楼示意图

对底层房间，可用油毡、防湿涂料等进行防湿处理，通过对上、下两层楼内结构的精细设计，可以在上、下楼层和阳光间之间实现可控制的空气对流、透风、透光，还可以设置强制通风、除湿设施，既创造出室内舒适的宜居环境，又可实现节能减排，发展新一代环保绿色建筑。

## 4.10　土壤储能和土壤能利用的技术评价及其经济、社会意义

### 4.10.1　技术评价

从前面几节的论述可以得出，利用土壤能和利用土壤长期储存太阳能是可行的。

（1）土壤的主要物理特性宜于被利用。

土壤内部的温度大约是 15℃，其本身就是人类的宜居环境温度，因此可被人们直接利用。

土壤温度与我们要储存的热量的温度只相差 20～30℃，与储存的冷量相差不到 10℃，这对不能设置专门的隔热层的地下储热和储冷系统有重要意义，大大减少了能量储存系统的能量损失。

土壤的热容量适中，其体积热容量较大，接近水热容量的 1/2。

土壤的导热系数大约在 1W/（m•K），比好的隔热材料（如泡沫塑料、空气等）的导热系数高几十倍，而仅为好的导热材料（如钢铁、铝、铜等金属）的导热系数的几十分之一至几百分之一，正处于中间位置。因此土壤在地下储热系统中可以同时扮演着 3 种角色：在储热系统的外部边缘部位，扮演隔热材料的角色；在储热系统内部，扮演着储热材料和导热材料两个角色。这一点在热能的地下储存中具有极其重要的意义。

土壤的体积可以说是无限大的，其总的热容量是无限的，这为大规模能量储存提供了无限的、且几乎是零成本的储热材料。

（2）适宜的建筑类型。

根据前几节的论述，太阳能地下储存适合搞单个家庭或多个家庭联合储热系统。

对低于 100$m^2$ 建筑面积的单层普通家庭采暖，适合搞中长期或短期的地下能量储存。能否搞长期的地下能量储存，与设计理念有关。若设计的目的是保证阴天及日照较弱时全天候的太阳能供暖，而不太计较增加些系统成本，还是可以搞的。

100～200$m^2$ 建筑面积的普通家庭采暖，也可搞长期的地下能量储存。采用地下储热系统，既可保证阴天及日照较弱时全天候的太阳能供暖，还可以适当减少太阳能集热器的面积。

300$m^2$ 及其以上建筑面积的二层别墅小楼式建筑采暖，适合搞长期的地下能量储存。其集热器面积只有无能量储存的系统的集热器面积的 1/2，只要地下储存技术成熟，其总系统造价可能不会升高，反而有可能降低。

对于单户或多户联合采暖，只要总采暖面积达到 300$m^2$ 以上，都很适合搞长期的地下能量储存。这样既可保证阴天及日照较弱时全天候的太阳能供暖，还可以减少太阳能集热器的面积，解决屋顶安装面积不足的问题。

对于联排式二层小楼或二三层的别墅小集群，采用集体储热供暖，会大大减少地下储存的热损失，提高整体的储存效果。

乡镇和城市的 4～6 层楼房能否通过太阳能的长期地下储存，实现主要由太阳能供暖？主要问题在于楼顶上不能放置面积足够大的太阳能集热器。其实这个问题可以通过如下办法来解决，如可以在楼的向阳面上安置一些壁挂式太阳能集热器，或在某些空地设置一部分集热器。另一方面，楼房大部分单元只有前后墙壁两个散热面，其散热量本来就较低，如果我们在楼的前后面和东西两侧面以及楼顶面采取较好的隔热保温措施，例如加双层玻璃窗，前后及两侧砖墙外覆盖泡沫塑料保温层，大大降低各个单元的散热系数，单位面积的能耗量可能会降到 20W/$m^2$ 以下，大大减低冬季供暖所需的热量，完全有可能实现太阳能供暖。

### 4.10.2 太阳能地下热储存的技术评价和经济、社会意义

能量储存是世界性的难题，目前有使用价值的能量储存技术（如蓄电池等），有的储存的量值很小，有的储存的时间很短，而大规模长期的能量储存技术，有使用价值的很少。太阳能的地下热储存有可能第一次实现大规模长期的能量储存，有巨大的技术、经济和社会意义。

对太阳能进行长期的大规模的地下热储存，不是一个技术问题，而是一个设计问题，即不存在技术难题，都是常规技术，只要设计合理就会产生巨大的经济和社会效益。

人类要提高自己的生活水平，就要改善自己的生活居住环境，所以人类的生活用能占人类总能耗的很大部分。地球上并不是真正缺少能源，甚至也不是缺乏有效利用能源的技术，而是缺乏科学利用能源的观念，把大量可利用的能源白白浪费掉了。夏季炽热的太阳光照射大地，天气炎热，此刻我们的环境并不缺少热量，而是热量过剩，但却还需要消耗电能来制冷。到冬季缺少阳光照射，天气寒冷，我们又需要消耗宝贵的矿石能源或电能来供热。实际上我们冬季需要的只是二三十摄氏度的低温热能，只要我们想办法把夏季多余的热能储存一小部分用于冬季，就可解决供暖的问题，就可节省大量的宝贵的电能和矿石能源。

近几十年来，人类对地球几十亿年储存的矿物能源无限制地进行开采，造成温室效应，气候异常，频发百年不遇的旱灾、水灾等，所有这些正迫使人类必须走一条低碳经济的道路。

地球本身就是一个巨大的恒温体，地球表层也是一个巨大的恒温储能层。地表土壤层的温度为 15～16℃，基本上是人们适宜居住的温度。窑洞里一年四季几乎都保持恒温，冬季不用耗热能采暖，夏季不用耗电制冷，是最节能环保的生活方式。当然，我们不可能要求人人都去住窑洞，但是，充分利用地球这个巨大的能源库，利用大地本身巨大的储存能量的功能，是我们走节能环保低碳经济道路的一个重要选择。目前正大力推广的地源（土壤源）热泵就是利用土壤能的一个重要方面。

前面已经分析过，在地面下一层、地面上一层的二层别墅小楼的建设中，通过改进设计可以有效地解决地下一层的通风、透光等问题。通过上、下两层的通风联动，可使两层间的环境状态接近，可能只需要补充少量能量进行制冷或供热，就可使整个两层建筑所有房间一年四季都处于宜居状态。

把太阳能和土壤能这两种几乎无限的能源结合起来利用，就可以解决大部分生活用能问题。在春、夏、秋季热能有剩余的季节，把太阳能集热器收集到的低温热能输送到地下长期储存起来，到冬季再输送到屋内供暖，这是比地源热泵节能效率高得多的节能途径。用这种方法不仅可以解决城市郊区和广大农村低层建筑的供暖问题，而且有可能应用在中小城市为 5～6 层楼房供暖和生产生活用热水，这些对我们未来的低碳经济社会具有举足轻重的作用。

随着太阳能光电技术的发展，同时产生光电、光热效应的太阳能收集器，必将得到广泛

推广应用，既产生大量电力又产生大量热能的太阳能时代，在不远的将来必将到来。利用地下长期储存太阳热能用于冬季采暖和夏季制冷，利用光电产生的电力用于人类生产生活的各个方面，这将是未来基本的能源格局，太阳能必将成为人类的主要能源。

# 第5章 被动式太阳房

太阳能采暖可分为主动式和被动式两大类。

本书主要论述的是主动式太阳能采暖，但被动式太阳能采暖仍在整个太阳能采暖系统中占有重要地位，主动式采暖离不开对房间先进行被动式采暖方式的处理改造，只有把被动式采暖和主动式采暖结合起来，才能取得最佳的采暖效果。因此，本章介绍被动式太阳能采暖。

主动式太阳能采暖是以太阳能集热器、管道、散热器、风机或泵以及储热装置等组成的强制循环太阳能采暖系统。

被动式太阳能采暖习惯上称为被动式太阳房，其基本原理就是“温室效应”原理。它不需要水泵、风机等动力，而是通过房间南墙或玻璃窗直接接收太阳辐射能，并通过屋内墙壁、地板等物品，吸收、储存太阳能，从而解决建筑物的采暖问题；同时在夏季又能遮蔽太阳能辐射，散逸室内热量，从而使建筑物降温，达到冬暖夏凉的目的。

被动式太阳房造价低廉，以前我国推广的主要是这种太阳能采暖方式。虽然这种太阳房的采暖质量不如主动式采暖质量高，但在暂时不具备主动式太阳能采暖的地方，采用被动式太阳房也能大大改善人们的居住条件。如果能把主动式采暖与被动式采暖结合起来，其综合效果、综合效益会更好。

## 5.1 主动式和被动式太阳能采暖

### 5.1.1 主动式太阳能采暖

主动式太阳能采暖是以太阳能集热器、管道、散热器、风机或泵以及储热装置等组成的强制循环太阳能采暖系统，或者是上述设施与辅助热源组成的联合系统。

主动式太阳能采暖的集热系统主要有以空气为工质的集热系统和以水为工质的集热系统两类。

#### 1. 空气加热采暖系统

图 5-1 是以空气为集热工质的太阳能采暖系统示意图。

太阳能集热器加热空气，一方面可通过风机把热空气直接导入房间供暖，另一方面可以把热空气导入储热砾石床，加热砾石从而把热量储存起来，然后再通过风机驱动空气通过砾

石床加热空气，被加热的空气再进入房间供暖。

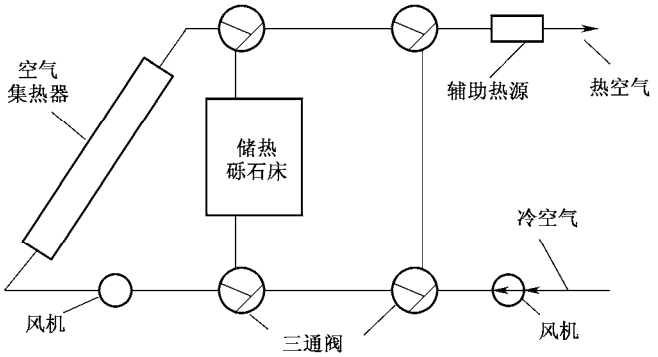



图 5-1　以空气为集热工质的太阳能采暖系统示意图

这种系统的优点是集热器不会出现冻坏和过热情况，可直接用热风采暖，使用控制方便。缺点是集热效率低，所需空气集热器面积大。

### 2．水加热采暖系统

图 5-2 所示是以水为集热工质的太阳能采暖系统示意图。该供暖系统的储热介质和传热介质都是水，通过循环泵驱动水循环，把太阳能集热器收集的热量传给水箱，再使水箱的热水流过室内散热器向房间供暖；也可使太阳能集热器的热水直接流过室内换热器，直接向房间供暖。

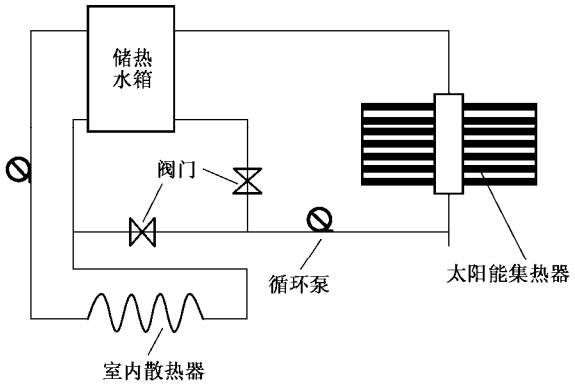



图 5-2　以水为集热工质的太阳能主动式采暖示意图

主动式太阳能采暖的优点是系统控制、调节比较方便、灵活，室内温度波动小，居住舒适度好，人处于主动地位。

## 5.1.2　被动式太阳房

被动式太阳房是不用机械动力而在建筑物本身采取一些措施后，直接利用太阳辐射能采暖的房屋。它通过建筑物南向的玻璃窗接受阳光在冬季采集太阳能，并通过室内的墙壁、地板、家具等物品吸收、储存和分配太阳能，从而解决建筑物的采暖问题；同时在夏季又能遮

蔽太阳能辐射，散逸室内热量，从而使建筑物降温，达到冬暖夏凉的目的。

### 1．被动式太阳房的原理

太阳房的基本原理就是“温室效应”原理。

太阳辐射是在 6 000℃温度下的辐射，太阳辐射能中的 99.9%分布在 0.3～3μm 波长范围内，能透过洁净的空气、普通玻璃、透明塑料等介质而被房间里的材料所吸收，并使其温度升高；而冬季室内物体温度只有 20℃左右，其发射的是长波红外辐射（通常波长大于 5μm），但玻璃等介质对长波辐射几乎是不透明的，所以室温物体的长波辐射基本不能透过窗口的玻璃，于是室内温度就逐渐升高，这就是所谓的“温室效应”。

（1）集热。

要提高被动式太阳房采暖效果，首先要收集尽量多的太阳辐射能，其最简单也是最基本的方法就是尽量开大南向采光窗，减少并缩小北向窗，尽量不设东西窗。对于非窗口占用的南墙部位，增设空气集热器，以尽量充分利用向阳面的太阳辐射能。

（2）隔热保温。

采用双层门窗（夜间设保温窗帘）以减少向外散失的热量。维护结构（墙体、屋面、地面）采用导热系数小的材料（如聚苯板、珍珠岩、矿棉板等），增加维护结构的热阻，降低维护结构的传热系数，减少热量的散失。

另一方面，把建筑物的主要房间（如办公室、卧室、起居室等）布置在朝阳的一侧，辅助房间（如走廊、楼梯、厨房、卫生间、仓库等）布置在朝阴的一侧，这样不仅使这些房间起到了隔热缓冲作用，同时，也能使吸收的有限的太阳热能在有人居住的房间得到充分利用。

有条件的还可在南墙前面增设阳光间，以减缓主房间的热损失。

（3）储热。

白天，当阳光穿过建筑物的南向玻璃窗进入室内后，墙壁和地板以及屋顶中的重质密实材料，如砖、土坯、混凝土和水等，吸收并储存太阳能；当夜晚室内温度降低时，储存在室内实体材料中的太阳热能通过传导、对流、辐射等方式向室内提供热量，以维持室内的温度。

总之，集热、保温、蓄热是被动式太阳房设计的三要素，三者缺一不可。

图 5-3 所示为被动式太阳能采暖图。

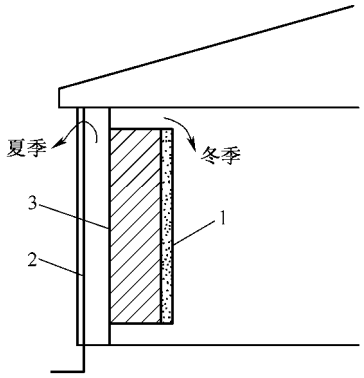



图 5-3 被动式太阳能供暖系统图

1．墙体 2．透明玻璃 3．吸热黑体

### 2．被动式太阳房的特点

根据多年来的测试及统计分析，被动式太阳房具有以下特点。

（1）工程造价相对较低。据统计，被动式太阳房的工程造价与普通对比房相比，造价略有增加，一般增加 10%～15%。

（2）冬暖夏凉。冬季，在无辅助热源的情况下，被动式太阳房比普通对比房室内温度高

5～8℃左右，室内外温差达到 15℃；夏季，太阳房比普通对比房室内温度低 2～3℃。

（3）节能效果显著。据测算，一栋 100m$^2$ 的被动式太阳房和普通对比房，在保证室内温度相同的情况下，被动式太阳房每年可节约薪柴 2t，相当于节约 1t 标准煤；在保证烧柴量相同的情况下，被动式太阳房比普通对比房室内温度可高 5～8℃。

（4）需要辅助热源。当室外温度很低或连续 3 天以上下雪或阴天时，应当有辅助热源提供热量来维持太阳房的室内温度。辅助热源有火炉、火炕、电加热等。

### 5.1.3　被动式太阳房的分类

被动式太阳房按集热形式可分为直接受益式、集热蓄热墙式、附加阳光间式等多种形式。

#### 1．直接受益式

直接受益式是被动式太阳房中最简单也是最常用的一种。它利用南窗直接接收太阳能辐射。太阳能辐射通过窗户直接射到室内地面、墙壁及其他物体上，使它们表面温度升高，通过自然对流换热，用部分能量加热室内空气，另一部分能量则储存在地面、墙壁等物体内，使室内温度维持在一定的水平。

为了使房间能储存较多的热能，墙体应用重质材料如砖石、混凝土等构成，且最好采用外保温复合墙结构，即保温材料包在墙外，整个墙体都成为储热体。白天重质材料吸收热量，到夜晚或阴天，当室外和房间温度开始下降时，重质材料储存的热量就会释放出来。有条件的也可在墙体内埋置相变储热材料。

重质材料还有一种功能，在夏季晚上气温凉爽，重质材料被冷却，在白天当室内温度升高时，能吸收一部分热量，延缓室温的升高，使室内继续保持较凉爽。另外，重质材料都具有较大的热阻，在白天可阻止室外热量传入室内，这样也能延缓室内温度的升高。

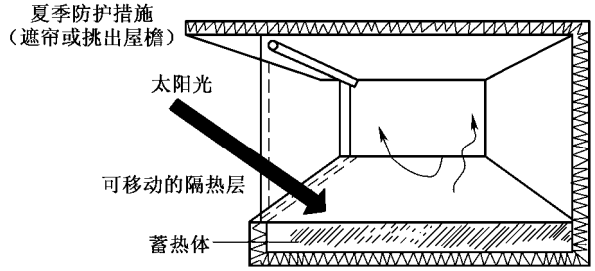
直接受益式系统中的南窗在有太阳辐射时起着集取太阳辐射能的作用，而在无太阳辐射能的时候则成为散热表面，因此，在直接受益式系统中，南窗尽量加大以在白天吸收尽量多的太阳辐射能，同时对窗户应配置有效的保温隔热措施，如双层玻璃、保温窗帘等，以减少夜间的热损失。图 5-4 所示为直接受益式被动太阳房的工作原理图。

#### 2．集热蓄热墙式

集热蓄热墙式被动式太阳房是间接式太阳能采暖系统。房屋南向的的储热墙体外面罩一道玻璃，墙体涂以黑色、深蓝、墨绿等深颜色作为吸热面，玻璃和墙体间形成夹层，墙体上下各开一个风口，阳光透过玻璃首先照射到吸热墙体上，温度升高，空气被加热，并通过上面的风口进入房间，房间内的空气通过下面的风口进入玻璃和墙体的夹层内被加热，如此形成对流循环向室内供热。另外储热实体墙温度升高后，也会直接向室内辐射热，加热室内空气，从而达到采暖的目的。

采用集热蓄热墙式被动式太阳房室内温度波动小，居住舒适，但热效率较低，常常和其他形式配合使用，如与直接受益式及附加阳光间式组成各种不同用途的房间供暖形式，可以调整集热蓄热墙面积，满足各种房间对蓄热的不同要求。但集热蓄热墙的玻璃夹层中间容易

积灰，不好清理，影响集热效果，且立面涂黑不太美观，推广有一定的局限性。图 5-5 为集热蓄热墙式被动式太阳房的原理图。




直接受益式工作原理

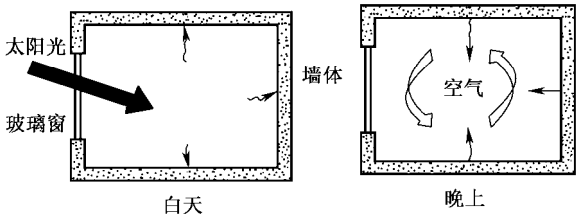



图 5-4　直接受益式被动太阳房工作原理图（白天吸热、晚上放热）

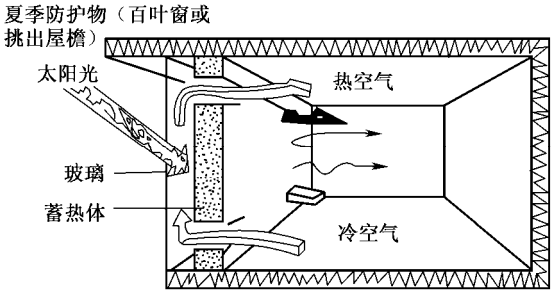



图 5-5　集热蓄热墙式被动式太阳房工作原理图

此外还有花格式集热蓄热墙，即把南面的实体蓄热墙多开几个通风口，搞成花格样式，白天阳光透过玻璃照射在花格墙上，使花格墙充分吸热、储热、传热。在集热墙外要设置保温盖板，保温盖板上可设置反光镜，白天打开盖板，可向集热墙反射阳光，增加集热蓄热墙接受的日辐射量；晚上用保温盖板将玻璃盖上，防止热量散失。

在农村和小城镇，最普遍、最经济实用的是直接受益式、集热蓄热墙式和这两种的组合式太阳房。

### 3．附加阳光间式

附加阳光间式被动式太阳房是集热蓄热墙系统的一种发展，将玻璃与墙体之间的空气夹层加宽，形成一个可以使用的空间——附加阳光间，实质上是在房屋南面再附加一个玻璃温室。这种系统其前部阳光间的工作原理与直接受益式系统相同，后部房间的采暖方式则雷同

于集热蓄热墙式。图 5-6 为附加阳光间式被动式太阳房的工作原理图。

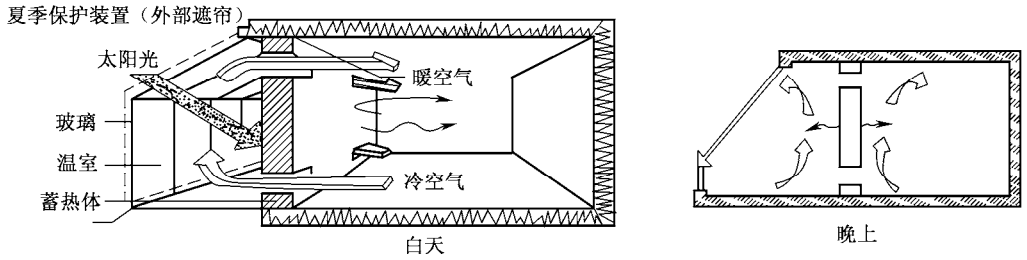



图 5-6　附加阳光间式被动式太阳房工作原理图

白天，太阳辐射透过玻璃照射在房屋主体的集热蓄热墙上。由于温室效应，在一天的所有时间里，附加阳光间内的温度总比室外温度高。因此，附设阳光间不仅在白天可以给房屋主体提供热量，而且在一整天尤其是夜间可以作为一个缓冲区，减少主体房间的热损失。白天，当附设阳光间温度高时，打开通风口可向房间供热；夜间关闭通风口，同时阳光间的隔热和缓冲作用，使主体房间的温度下降缓慢。

在城市一般都有在南墙外设置阳台的设计，而广大农村也有类似的在南墙外设置阳台式的小走廊的习惯，把这些阳台或小走廊的南面用大块玻璃密封起来就是很好的阳光间。它既有很好的隔热保温作用，也有一定的存放物品的功能。

## 5.2　被动式太阳房的设计

### 5.2.1　太阳房的建设地点、朝向和房间距的确定

正确确定太阳房的建设地点、朝向和房间距，是能否充分利用太阳能，达到冬暖夏凉的关键，建房前一定要在当地规划部门允许的情况下，合理地选择建设地点、朝向和房间距。

#### 1．被动式太阳房的建设地点

被动式太阳房的建设地点最好选在背风向阳的地方；周围没有高大建筑物或树木遮挡；附近没有粉尘污染严重的工厂，如水泥厂等。建造太阳房的地区，应该是太阳能资源丰富或可利用的地区，在同一个地区还应该注意建造太阳房的小区环境，要注意周围环境对太阳房的不利影响。同时，注意太阳房的室外绿化，构成所谓“生物气候”，这也是一种太阳能的利用。

#### 2．被动式太阳房的朝向

被动式太阳房应朝向正南方，在偏东、偏西 15° 范围内效果也较好。因为从太阳房设计

的需要来看，在北半球正南朝向的房屋是有利于太阳能采暖的主要条件之一，是能否有效地利用太阳能的关键问题，它直接影响太阳房性能的好坏。设计合理的太阳房，在采暖季节里，它的南向房间可以受到最多的直射阳光，而在夏季时照入室内的直射阳光又最少。

不同纬度的房间南立面接收的太阳辐射能不同，如图 5-7 所示。

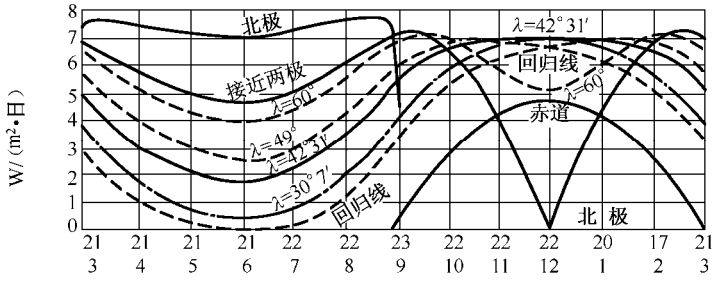



图 5-7 不同纬度南立面接收的太阳辐射能（适用于北半球）

不同方位接收太阳辐射能是不同的，比如在同样月份，建筑物由于偏南角度不同，接收太阳辐射能的情况也是不同的，如表 5-1 所示。

**表 5-1　　偏南角度不同时接收的太阳辐射情况**

| 偏南角度 | 0° | 10° | 15° | 20° | 30° | 40° | 50° | 60° | 70° | 80° | 90° |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 辐射情况 | 100 | 98 | 97 | 93 | 88 | 79 | 70 | 59 | 49 | 41 | 34 |

虽然被动式太阳房建设的朝向是在南偏东、偏西 15° 范围内效果最好，但也要符合村镇总体规划的要求。

根据多年的观测，白天要求升温快的房间或只是白天使用的房间，如教室、办公室等朝向偏东为好，最好的朝向是南偏东 5°～10° 之间；晚上要求温度高的房间，如住宅的卧室等朝向偏西为好，最好的朝向是南偏西 5°～10° 之间。

### 3．被动式太阳房与前栋房屋之间的间距

由于被动式太阳房要求在冬至日从上午 9 时至下午 3 时有 6 个小时的光照条件。由下式可以计算出两栋房屋之间的日照间距：

$$D_0 = H_0 \cdot \cos\gamma_9 / \tan h_9 = \eta_9 H_0 \qquad (5\text{-}1)$$

式中：$D_0$—— 两栋房屋之间的日照间距，当前栋建筑物有挑檐时，计算后的 $D_0$ 应加挑檐长度；

$H_0$—— 前栋建筑物的遮挡高度；

$\gamma_9$—— 冬至日 9 时太阳光线方向与房屋南墙面法线之间的夹角；

$h_9$—— 冬至日 9 时太阳高度角，是太阳光线与水平面之间的夹角；

$\eta_9$—— 冬至日 9 时日照间距系数，$\eta_9 = \cos\gamma_9 / \tan h_9$。

部分城市经纬度及冬至日上午 9 时正南朝向房屋日照间距系数如表 5-2 所示。

**表 5-2　　部分城市经纬度及日照间距系数表**

| 序号 | 城市 | 北纬 | 东经 | 冬至日 9 时 | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | 太阳高度角 $h_9$ | 太阳方位角 $\gamma_9$ | 日照间距系数 $\eta_9$ |
| 1 | 哈尔滨 | 45°45′ | 126°38′ | 9°39′ | 41°09′ | 4.426 8 |
| 2 | 齐齐哈尔 | 47°20′ | 123°56′ | 8°27′ | 40°59′ | 5.080 1 |
| 3 | 佳木斯 | 46°49′ | 130°17′ | 8°50′ | 41°02′ | 4.857 7 |
| 4 | 长春 | 43°52′ | 125°20′ | 11°04′ | 41°23′ | 3.833 9 |
| 5 | 延吉 | 42°54′ | 129°29′ | 11°47′ | 41°30′ | 3.398 9 |
| 6 | 沈阳 | 41°46′ | 123°46′ | 12°38′ | 41°40′ | 3.333 3 |
| 7 | 丹东 | 40°05′ | 124°07′ | 13°54′ | 41°56′ | 3.006 1 |
| 8 | 北京 | 39°57′ | 116°19′ | 13°59′ | 41°57′ | 2.986 8 |
| 9 | 天津 | 39°07′ | 117°10′ | 14°37′ | 42°06′ | 2.844 0 |
| 10 | 石家庄 | 38°04′ | 114°26′ | 15°23′ | 42°17′ | 2.689 6 |
| 11 | 保定 | 38°53′ | 115°34′ | 14°47′ | 42°08′ | 2.811 2 |
| 12 | 太原 | 37°55′ | 112°34′ | 15°30′ | 42°19′ | 2.666 4 |
| 13 | 大同 | 40°00′ | 113°18′ | 13°57′ | 41°57′ | 2.994 0 |
| 14 | 呼和浩特 | 40°49′ | 111°41′ | 13°21′ | 41°49′ | 3.140 3 |
| 15 | 扎兰屯 | 48°05′ | 122°48′ | 7°53′ | 40°55′ | 5.459 5 |
| 16 | 济南 | 36°41′ | 116°58′ | 16°25′ | 42°33′ | 2.499 8 |
| 17 | 青岛 | 36°04′ | 120°19′ | 16°52′ | 42°41′ | 2.424 0 |
| 18 | 西安 | 34°15′ | 108°55′ | 18°12′ | 43°04′ | 2.221 7 |
| 19 | 延安 | 36°36′ | | 16°28′ | 42°34′ | 2.491 5 |
| 20 | 银川 | 38°25′ | 106°16′ | 15°08′ | 42°13′ | 2.737 4 |
| 21 | 兰州 | 36°01′ | 103°59′ | 16°54′ | 42°41′ | 2.420 0 |
| 22 | 酒泉 | 39°45′ | | 14°08′ | 41°59′ | 2.953 5 |
| 23 | 西宁 | 36°35′ | 101°55′ | 16°29′ | 42°34′ | 2.494 1 |
| 25 | 乌鲁木齐 | 43°47′ | 87°37′ | 11°08′ | 41°23′ | 3.814 4 |
| 26 | 喀什 | 39°32′ | | 14°18′ | 42°01′ | 2.915 7 |

### 4．太阳房的外部形状与内部房间的布置

太阳房的外部形状对集热、保温、隔热都有影响，因为南墙是被动式太阳房的主要集热部件，南墙面积越大，所获得的太阳能越多，因此，被动式太阳房的最佳平面形式是沿东西方向伸展的矩形平面形式。

虽然矩形平面形式对集取太阳能有利，但是矩形平面形式的阴面面积也同样增大，散热面积增多，散热量加大，因此，为了充分利用室内收集的有限的太阳能资源，对太阳房的维护结构要进行保温处理。

另外，考虑到太阳能房屋立面造型的美观、灵活，平面形式可进行适当凸凹变化，但变

化不宜太大、太多，否则影响采光窗采光。根据建筑抗震要求，太阳房的平面形状也不宜变化太大，否则影响建筑物的抗震能力。

太阳房的内部房间布置应根据房间的用途来确定，应将主要房间如住宅的卧室、起居室和学校的教室、办公室等放在阳面，将辅助房间如住宅的厨房、厕所、杂物间和学校的走廊、楼梯等放在阴面。

#### 5．太阳房的高度要求

在太阳房面积确定的情况下，房屋越高，散热面积越大，耗热量越多。因此，在不影响太阳房使用功能的情况下，应尽量减小房屋高度，这样对太阳能供暖是有利的。以住宅为例，一般太阳能供暖住宅层高不宜超过 2.8m，层数不宜超过 5 层，6 层以上因风速增加，抵消了热量，不宜采用太阳能采暖技术。

### 5.2.2 太阳房的墙体设计

墙体是建筑物的最主要部分。墙体除了具有承重功能外，还具有维护和分隔房间的作用。太阳房的墙体除了具有一般墙体的功能外，还具有集热、蓄热和保温的作用。墙体是太阳房的重要集热部件，同时也是较大的散热部件，其热损失占整个房屋热损失的 30%左右。

一般民用住宅在确定外墙的保温设计时，是以内墙皮不结露为原则，因而外维护结构的热阻值普遍偏低。我国北方地区通用的一砖半墙（370mm）及二砖墙（490mm），其热阻值仅分别为 0.86～1.15$m^2$ • K/W。所以，实体砖墙必须进行改革或改革墙体构造，满足外维护结构的热工性能，这主要是靠选用导热系数小的维护结构材料、增加墙体的热阻值来达到的。在太阳能建筑中常用的做法是在墙体内增加一层 60～120mm 厚的保温材料，一般可以填充膨胀珍珠岩、矿棉、聚苯乙烯泡沫板等（在气候干燥的地区，也可以利用经过防腐处理的高粱壳、棉秸秆、牛马干粪等）。该做法称为“夹芯复合保温墙”（如图 5-2 所示）。

保温层的厚度由热工计算给出。材料热阻 $R$ 的计算公式为：

$$R = \delta/\lambda \tag{5-2}$$

式中：$\delta$ —— 材料厚度，mm；

$\lambda$ —— 材料导热系数，W/（m • K）。

复合墙体总热阻等于各层材料热阻之和，表 5-3 是常用复合墙体的热阻值。

**表 5-3　　常用复合墙体热阻值**

| 序　号 | 墙体结构（由内向外） | | | | 热阻值（$m^2$ • K/W） |
|---|---|---|---|---|---|
| | 承　重　墙 | 保 温 材 料 | 保温层厚度 | 保　护　墙 | |
| 1 | 240mm 砖墙 | 苯板 | 30mm | 120mm 砖墙 | 1.22 |
| 2 | 240mm 砖墙 | 苯板 | 40mm | 120mm 砖墙 | 1.46 |
| 3 | 240mm 砖墙 | 苯板 | 60mm | 120mm 砖墙 | 1.94 |
| 4 | 240mm 砖墙 | 苯板 | 80mm | 120mm 砖墙 | 2.42 |

续表

| 序　　号 | 墙体结构（由内向外） | | | | 热阻值（$m^2 \cdot K/W$） |
|---|---|---|---|---|---|
| | 承　重　墙 | 保 温 材 料 | 保温层厚度 | 保　护　墙 | |
| 5 | 240mm 砖墙 | 苯板 | 100mm | 120mm 砖墙 | 2.89 |
| 6 | 240mm 砖墙 | 苯板 | 120mm | 120mm 砖墙 | 3.37 |
| 7 | 240mm 砖墙 | 珍珠岩 | 60mm | 120mm 砖墙 | 1.79 |
| 8 | 240mm 砖墙 | 珍珠岩 | 80mm | 120mm 砖墙 | 2.21 |
| 9 | 240mm 砖墙 | 珍珠岩 | 100mm | 120mm 砖墙 | 2.63 |
| 10 | 240mm 砖墙 | 珍珠岩 | 120mm | 120mm 砖墙 | 3.06 |
| 11 | 240mm 砖墙 | 空气间层 | 60mm | 120mm 砖墙 | 0.80 |

表 5-4 是不同纬度室外设计温度和保温层厚度参考值。

**表 5-4　　各纬度地区墙体保温层厚度参考值**

| 纬度 | 45°以北 | 43°～44° | 40°～42° | 37°～39° | 36°以南 |
|---|---|---|---|---|---|
| 保温层厚度（mm） | ＞120 | 100～120 | 80～100 | 60～80 | ＜60 |

被动式太阳房的墙体一般采用两种复合保温墙体，一种是夹芯复合保温墙体，一种是外墙保温复合保温墙体。

### 1．夹芯复合保温墙体

（1）夹芯复合保温墙体的结构如图 5-8 所示。通常做成里外两层墙体中间放保温材料。一般做法是里侧砌 240mm 厚的承重墙，中间放置 60～120mm 厚的保温材料，外侧砌 60mm 或 120mm 厚的保护墙，里外两墙体用拉结筋拉在一起，形成一个整体。

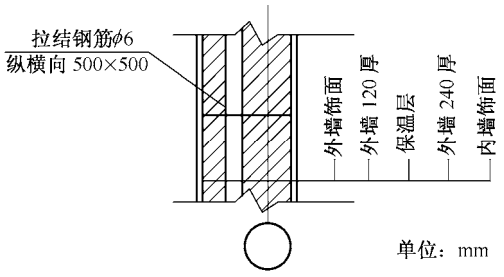


图 5-8　复合保温墙

将承重墙放在内部有两方面的好处：一是承重墙墙体厚，储存的热量多，有利于保持室内温度；二是有利于建筑结构，承重墙置于保温层内部，使承重墙没有冻融循环，因为砖受冻融循环 15 次，其抗压强度降低 25%左右，影响墙体的承载力。

（2）夹芯复合保温墙体施工方法

复合保温墙体施工经常采用以下 3 种方法。

单面砌筑法Ⅰ：先砌筑 240mm 厚的内侧承重墙，砌至一定高度（一般为 8～10 皮砖，高度为 500～600mm）时停下，安放保温材料，然后再砌筑 120mm 外侧的保护墙，承重墙与保护墙之间必须用钢筋拉结使它们形成一个整体，并按设计设置拉结钢筋。设计无要求时，采用$\phi$= 6mm 拉结钢筋，水平间距两砖到两砖半（500～750mm），垂直间距为 8～10 皮砖（500～600mm），拉结钢筋上下两层要交错布置，形成梅花点状布置。

单面砌筑法Ⅱ：先砌筑 240mm 厚的内侧承重墙，砌至平口高度（也就是圈梁或过梁的

下皮），在每砌筑到 8～10 皮砖（高度为 500～600mm）后安放一层$\phi$= 6mm 拉结钢筋，一端带弯钩，一端不带弯钩，将带弯钩的一端压在 240mm 内，不带弯钩的一端伸出墙外，拉结钢筋的水平间距为两砖到两砖半（500～750mm），垂直间距为 8～10 皮砖（500～600mm），拉结钢筋上下两层要交错布置，形成梅花点状布置。当承重墙施工完毕后，将保温材料安放好，然后砌筑保护墙，每砌筑至拉结钢筋位置时，将钢筋弯钩后压在保护墙内。

双面砌筑法：同时砌筑内外两侧墙体，砌至 8～10 皮砖（高度为 500～600mm）时，将保温材料和拉结筋依次放好。

正在施工中的夹芯墙如图 5-9 所示。



图 5-9　正在施工的夹芯墙

（3）这种方法容易在墙体中出现“冷桥”（也有的称之为“热桥”）的部位，如圈梁、门窗过梁及墙体丁字接头和转角处的构造柱等，保温性能比主体部分差，热量容易从这些地方传递出去。为了避免“冷桥”部位出现结露现象，可做局部保温处理，圈梁、过梁等截面可做成 L 形，外侧作保温处理，也可以做成里外两道梁，中间夹保温材料。构造柱的保温可在转角砌筑时安放保温板或在转角外侧抹保温砂浆等。

#### 2．外墙保温复合保温墙体

这种方法是在墙体建成后，再在外侧贴聚苯乙烯泡沫板，然后挂钢丝网抹水泥沙浆保护层。外墙保温的特点是隔热性能好，没有“冷桥”产生，整个墙体都可成为储热体，增大房屋的储热功能，使房间温度波动性减小。其缺点是外墙壁施工难度较大，其耐久性差。

墙体材料可采用实体砖，也可采用空心构件和轻混凝土制品，如空心砖、加气混凝土砌块、陶粒混凝土板材等。

### 5.2.3　空气集热器

空气集热器是设在太阳房窗间墙或窗下墙上获取太阳能的装置。它是由透明盖板（玻璃或其他透明材料）、空气芯道、上下通风口、夏季排气口、吸热板、保温板等几部分构成，如图 5-10 所示。这种空气集热器主要是通过传导和对流来进行热交换的，它的特点是升温快；

还有一种没有上下通风口的空气集热器，它主要是通过辐射的方式来进行热交换的，它的特点是升温较慢，但室内温度较均衡。

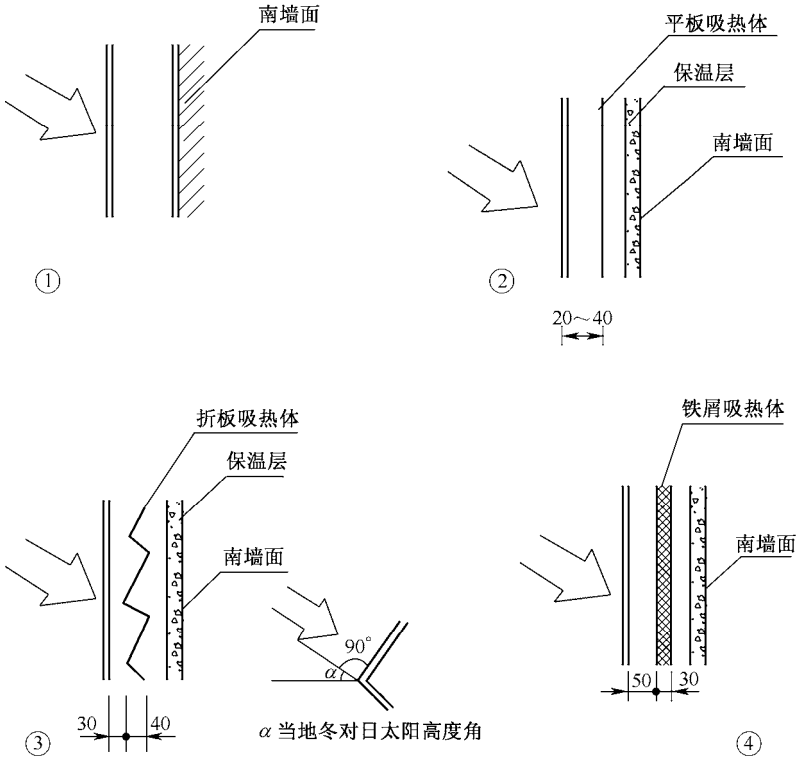



图 5-10　几种空气集热器

设计带空气集热器的太阳房，主要是确定“空气集热器”的形式、位置、尺寸、循环风口尺寸、表面涂层的种类等。

### 1．空气集热器的位置

空气集热器的位置最好放在窗间墙上，因为空气集热器竖向高度越高，空气在其中通行的时间越长，接收太阳能越多，温度越高，室内外温差越大，循环也就越快，室内温度也就越高。

### 2．空气集热器的形式、大小

图 5-10 简介了几种空气集热器形式，第 1 种最简单，只在南墙前面覆盖一层透明玻璃，而把南墙自身作为吸热面。第 2 种是在玻璃和南墙之间放置了一个平板吸热体。第 3 种是在玻璃和南墙之间放置一个折板吸热体，折板的角度使其在最需要采暖的冬至前后，太阳的入射光能垂直投射在吸热板上，以提高对太阳辐射的吸收率。第 4 种是在玻璃和南墙之间放置一个铁屑吸热体，以提高吸热体的热容量和导热性能。

空气集热器的大小取决于当地的气候条件、地理纬度和房屋构造等情况。在可能的情况下，应尽量充分占用南墙面积。

### 3．循环风口的尺寸

上下风口的尺寸，根据房间的使用性质确定，一般为集热器面积的 1%～3%。循环风口应设置开关自由的风门，在夜间或非采暖季节关闭风门，防止空气倒流。

### 4．表面涂层

空气集热器吸热板表面涂层以黑色吸热效果最好，但并不美观，因此推广上受到限制，人们往往喜欢效果较好的墨绿色作为涂层的颜色。

## 5.2.4 窗、门的设计

### 1．窗

窗的功能在太阳房设计中，除了具有一般房屋的采光、通风和观察作用以外，主要是利用窗户来收集太阳能满足房屋采暖的需要。在某些类型的太阳房（如直接受益式）中，窗甚至起着决定性的作用。利用南向窗直接接收太阳辐射能的被动式太阳房，是被动式系统中最简单，也是最重要的一种形式。

窗是获得太阳辐射能的主要构件，同时也是热损失最大的构件，处理好各朝向窗的配置、尺寸、构造、隔热措施是太阳房设计中关键的问题。

一般窗户的保温能力比墙体小得多，有关专家计算得知，冬天从窗户散失的热量占整个房间热量损失的 30%以上，从保温角度来看，在保证房间采光的条件下，似乎窗户开得越小越好。但实际上直接受益式太阳房的南立面都有很大的窗户，主要是要利用窗户的温室效应来为房间采暖。透明的窗玻璃能透过阳光的短波辐射，却不能透过长波的热辐射。透过窗玻璃的阳光将太阳辐射能入射到室内，使室内的地面、墙体及家具等物体被加热；而室内物体发出的长波热辐射却不能透过窗玻璃，这样室内累积的热量就越来越多，使室内温度逐渐升高，所以在冬天晴朗的日子里，室外寒风刺骨，虽然室内未生火，走进房间却感到十分暖和。

温室效应是否真正有效，这还要看通过窗户的能量得失情况。

在白天，当阳光通过窗玻璃时，有的被玻璃反射，有的被玻璃吸收，有的透过玻璃进入室内被室内物质所吸收。透过玻璃的这部分光所占的百分数叫做透过率，国产 3mm 玻璃的透过率约为 80%，这就是说大部分阳光能透过玻璃用来提高室内温度。

夜间或阴天无阳光进入室内时，窗玻璃虽然不透过热辐射，却可以吸收热辐射，通过空气的自然对流还能吸收室内的热量，最后以热辐射和对流传热方式把热量散到室外。所以说，在夜间通过玻璃窗的这种热损失是不小的。如冬天在北京地区要保持室内外温差 24℃，对于南向单层玻璃木窗来说，晴天收集到的太阳能少于全天散失的能量，所以要使窗户真正具有采暖作用，就要设法增加阳光的收集量，减少窗口的热损失。

为了增加阳光的收集量，首先应正确选择窗户的朝向。因为冬天太阳高度角低，南立面的阳光强烈，北立面照不到阳光。所以，在满足抗震要求的情况下，尽量大开南窗，减少并缩小北窗，如果没有特殊要求，尽量不要开东西窗。

图 5-11 绘出了北纬 40° 地区不同方向的每平方米面积上在晴天条件下照射的太阳总辐射热量。由图中全年变化曲线上可知，南向在冬季照射的太阳辐射能最大，而夏季最小；东西向夏季的辐射量大于南向，这一规律证实了采用南向窗可以得到“冬暖夏凉”。

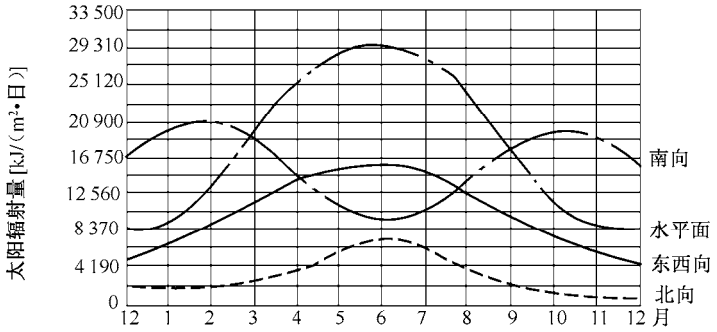



图 5-11　北纬 40°地区不同方向每平方米面积上的太阳总辐射热量

另一方面要注意的是，因窗体构件的不同和选用的透明材料的不同，其总热阻也有很大变化，但总的说一般均比其他维护结构（墙体、屋面、地面等）的热阻小。表 5-5 为墙、窗热阻比值参考表。

**表 5-5　　墙、窗热阻比值参考表**

| 窗的热阻 | 墙的热阻 | |
|---|---|---|
| | 240 墙 $R_0$ = 0.492 | 370 墙 $R_0$ = 0.652 |
| 单层木窗 $R_0$ = 0.203 | 2.4 | 3.2 |
| 单层钢窗 $R_0$ = 0.160 | 3.0 | 4.1 |
| 双层木窗 $R_0$ = 0.416 | 1.2 | 1.6 |
| 双层钢窗 $R_0$ = 0.31 | 1.6 | 2.1 |

注：$R_0$ —— 维护结构总热阻。

对直接受益式来说，南窗是获取太阳能的主要构件，因此，对南窗既要采取保温措施，又不能影响太阳辐射能的透过。

改善和提高窗户的保温性能，主要在构造上和材料上加以解决。

首先，作密缝处理，防止窗缝透风。通常的窗户结构都有一定的缝隙，特别是当窗户用材和制作质量不高时，窗扇翘曲变形造成的缝隙就更严重。在冬天，室外的冷风从缝隙吹入室内就造成附加的热损失。窗缝冷风渗透的热损失约占窗户总热损失的 1/3～1/2。为减弱窗缝冷风渗透的影响，太阳房的窗户在选型时应尽量做到：①采用正方形窗；②选用分格少、玻璃面积大的窗；③在满足通风和使用要求的前提下，尽量采用固定窗；④非南向在满足采光和通风要求的情况下，采用面积小的窗户。在构造上应做密缝处理，较好的办法是在缝隙处设置橡胶、毡片作成的密闭防风条，或在接缝处外面盖压缝压条等。如果在冬天用纸条把窗缝糊严实，可以减少冷风渗透损失的 3/4 以上，是一种简便易行的办法。

第二，减少通过窗框的热损失，主要是金属窗框和混凝土窗框，在窗户中形成极易透霜的“冷桥”。为了减少这一部分的热损失，可将金属窗框作成空心断面，中间填塞保温材料。最好采用保温性能良好的塑钢窗。

第三，提高窗玻璃的保温能力。如表 5-6 所示，增加玻璃的层数，热阻增大，散热减少，透过率降低，由 2 层变 3 层，透过率降低 9.7%，传热系数降低 33%；而采用双层玻璃加保温窗帘效果更好。

**表 5-6　　玻璃层数不同时窗户的传热系数和透过率**

| 窗玻璃层数 | 传热系数 [W/（$m^2$•K）] | 透　过　率 |
|---|---|---|
| 2 层 | 3.5 | 0.72 |
| 3 层 | 2.3 | 0.65 |
| 4 层 | 1.7 | 0.59 |
| 双层加保温窗帘 | 1.0 | 0.72 |

单层玻璃本身的热阻很低，根据室外风速的大小，总传热系数介于 4.14～8.26 W/（$m^2$•K）之间。因此，在我国北方寒冷地区多数是采用双层窗，靠双层玻璃之间的空气间层提高窗户的保温能力。在构造上可做成多扇窗的双层窗或 3 层窗，可采用单层框双层玻璃或中空玻璃等。

应当指出，当采用双层窗时，要尽可能使内侧一层做得严密，而外侧一层留有一定的缝隙，以使从室内进入空气间层的水蒸气能排出到室外去，避免在外层玻璃内侧出现结露或结霜现象。外侧的缝隙宽度不宜超过 1～2mm，缝隙过大，在刮风时，会在两层玻璃之间的空气间层内形成强迫对流，会显著降低双层窗的保温能力。

近年来中空玻璃在建筑上得到越来越广泛的应用。它与单层玻璃几乎具有相同的采光性能，但比单层玻璃有高得多的隔热保温、隔声、防结露等优点。由于其夹层间隙小，可有效抑制内部空气的对流热损失，其隔热性能比双层窗户更高。由于其内部湿度小，其防结露性能更好。

在我国北方地区，门窗结露始终是个很大的问题，有时即使采用双层门窗，也防止不了结露。如不及时清除，则会继续结冰，不但影响室内环境，而且易损坏门窗。中空玻璃的内部露点低于−40℃，在室温为 20℃，相对湿度为 40%，室外温度为−25℃时仍不结露。采用中空玻璃可有效地降低结露温度。

经过对比实验表明，在采暖季节里，环境温度较低，室内外温差大，用单层窗时，其效率是负值，即南窗的热损失大于南窗的太阳得热；采用双层窗时，一般窗的效率都可达到 20%以上，如夜间加聚苯乙烯保温板或保温窗帘，可以使其效率提高到 50%左右。因此，在太阳房设计中，保温窗帘的作用是不容忽视的。

### 2．门

太阳房的外门应采用密封、保温性能良好的材料制作，如果有条件，可以采用塑钢材料制作，外门应采用两道门。如果门开设在北墙和东西墙，应设置门斗，避免冷空气直接侵入室内；如果门开设在南墙，两道门之间应有 800～1 000mm 的间距作为缓冲区，防止冷风直接进入室内。

### 5.2.5　屋顶保温设计

屋顶是建筑热损失面积最大的部位，其热损失占整个建筑热损失的 30%左右，因此，在太阳能被动式采暖中，屋顶的设计一定要引起足够的重视，其热阻值一般应大于墙体的热阻值的 20%～30%。

被动式太阳房的屋顶形式有坡屋顶和平屋顶。一般平屋顶的保温层放在承重层的外侧；坡屋顶的保温层有的放在承重层的外侧，也有的放在屋内吊棚内。常用屋面保温做法如图 5-12 所示。

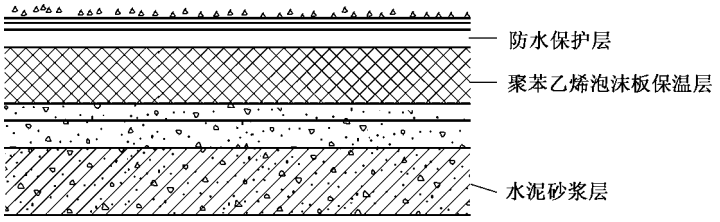



图 5-12　屋顶保温设计

① 注释与图的各部分对应起来，用直线指明

② 注明单位

### 5.2.6　地面保温设计

被动式太阳房地面除了具有普通房屋地面的功能外，还具有储热和保温功能，由于地面散失的热量较少，仅占房屋总散热量的 5%左右，因此，有的太阳房地面就不作保温处理。

### 5.2.7　其他

在被动式太阳房设计中，有一些构件、构造设计虽然不像集热窗、复合墙体、空气集热器那么重要，但也不容忽视，要在整个设计中通盘考虑。

#### 1．挑檐（阳台）挑出长度设计

在一些太阳能建筑中，南立面因使用功能或装饰的需要，往往有一些挑出墙面的阳台或挑檐。这些挑出部分，如果设计合理，能达到夏季遮阳，冬季不影响采光的目的。因此，在设计挑出长度时，应考虑当地不同季节的太阳高度角，使其下层的房间在夏季时阳光能够得到一定程度的遮挡，而到冬季又能充分进到室内去。

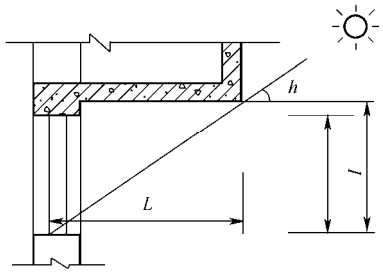



图 5-13　挑檐设计图

挑出长度（$L$）根据太阳房的所在地纬度的不同而异。按图 5-13 所示，由下式计算：

$$L = I \cdot \cot h \qquad (5\text{-}3)$$

式中：$h$ —— 太阳高度角，一般按夏至日中午 12 时太阳高度角计算；

$I$——集热窗下沿至挑出构件根部的距离，m。

为了简化计算，挑出长度可按下面经验公式计算：

$$L = \text{窗口高度}/F \tag{5-4}$$

式中：$F$——系数，与所在地纬度有关。

$F$ 的取值按表 5-7 执行。

**表 5-7　　各纬度的 $F$ 值**

| 所在地纬度 | 36° | 40° | 44° |
|---|---|---|---|
| $F$ 值 | 3.0～4.5 | 2.5～3.4 | 2.0～2.7 |

#### 2．辅助热源的设置

被动式太阳房不可能百分之百地依靠太阳能达到采暖的目的，配置合适的辅助热源是必要的，而且会使太阳房的使用效果大大提高。这一点在设计中应当充分加以考虑。常用的辅助热源有火炕（北方的架空炕或称“吊炕”）、火墙、火炉、家用土暖气、电加热器等。

架空炕、火墙等辅助热源具有造价低、砌筑简单、管理方便、使用灵活的特点，在寒冷地区使用是比较普遍的。

## 5.3　被动式和主动式采暖相结合

把太阳能被动式采暖和主动式采暖结合起来是未来太阳能采暖的发展方向，也是现实的发展途径。

实际上从开始实施太阳能主动式采暖，就是在被动式采暖的基础上进行的。被动式采暖对房间所采取的一切措施如墙体的隔热保温、储热，窗户的透光和隔热等，在主动式采暖中都要保留下来。

在很多方面或者说在主要方面，太阳能被动式采暖和主动式采暖两者在设计上、技术上是共同的、一致的，但在某些方面也有些差异。了解这些特点，并在设计太阳能采暖时，注意把两者的技术有机地结合起来，使其优势互补，可最大限度地充分利用太阳能资源，获得最佳的采暖效果。

### 5.3.1　被动式采暖和主动式采暖的共同处

#### 1．墙壁的隔热和储热

在墙壁的隔热和储热方面，两种采暖方式是完全一致的，都需要对墙壁实施很好的隔热措施，最好采用外墙保温方法，即在墙外吊挂聚苯乙烯泡沫板后再抹水泥砂浆，这种方法保温效果最好，也避免了热桥的产生，同时整个墙壁都可成为储热体，增强了房屋的储热能力，

降低了室内温度的波动性。

另一种方法是采用泡沫板夹芯墙。这种方法也有较好的保温效果，而且主承重墙内墙也能成为储热体，也有较好的储热效果。这种方法的优点是不需要对外墙另做饰面处理，耐久性高，但其保温隔热性能和储热性能比外墙保温法差些。

#### 2．窗户的透光性和隔热性

在窗户的隔热性上，不管是被动采暖还是主动采暖，两者是一致的，都需要窗户有较好的隔热保温作用，一般都要求采用双层玻璃或中空玻璃；窗框应采用隔热较好的塑钢材料，尽量不采用铝合金；要尽量用整块玻璃，以减少缝隙；对缝隙要采取密封措施等。

但对透光性上，二者有差异。对于被动式采暖，窗户不仅是采光照明的功能，更重要的是靠南向窗户透过太阳辐射能供暖，因此，需要尽量大的南向窗户面积。但对主动式采暖来说，窗户的功能可以看作主要是采光照明，因为其在屋顶上面有大面积的太阳能集热器供热，故对窗户接收太阳辐射能供暖的功能没有特别的需求。而且在阴天窗户又起到散热作用，故对主动式采暖，不强调大玻璃窗，能满足照明即可。有人甚至建议在满足照明的条件下，尽量采用小玻璃窗。

#### 3．门的隔热性

对门的隔热性要求是完全一致的，门缝尽量密封，减少由于室内外空气对流造成的热损失。外门口要采用双道门，减少院外冷空气直接进入室内。

#### 4．屋顶的隔热和储热性

屋顶是房间的主要散热面和主要的室内储热体之一，因此，两种采暖方式都要求对屋顶采取好的隔热措施，且隔热层最好放置在屋顶承重混凝土板的外侧，以提高室内的储热性能。

#### 5．设置阳光间

两种采暖方式对设置阳光间的要求是相同的，由于阳光间的缓冲作用，减少了主房间的热损失，也避免了开房门时院外的冷空气直接进入房间内。

#### 6．挑檐（阳台）设计

两种采暖方式对南立面挑出墙面的阳台或挑檐设计要求是一样的。这些挑出部分，要求能达到夏季遮阳，避免室内温度过高；冬季不影响采光，不减少室内接收的太阳辐射能。

### 5.3.2　被动式采暖和主动式采暖的差异

虽然被动式太阳房的主要设计理念在主动式采暖系统中同样适用，而且很多设计思想是共同的，一致的。但是，由于主动式太阳能采暖主要不是依靠房间自身直接吸收阳光采暖，而是主要依靠外面的集热器来供暖，因此在不少方面还是有差异的，有的方面还有较大的差别，甚至有相互矛盾的需求。了解这些不同，对我们科学合理设计建造太阳能主动式采暖系

统是有意义的。

### 1．对窗户的采光要求不同

前面已谈到，主动式采暖对南向的窗户并不要求一定要大开口，窗户的面积能满足采光要求即可，尤其是对于单层大开口窗，虽然在白天接收的阳光较多，但在晚上和阴天，散失的热量也增多，综合考虑其对室内热量的贡献是负值，所以有人提议减小窗户面积。对于双层玻璃窗，虽然其对室内热量的贡献是正值，还要采取边框缝隙的密封、夜间覆盖窗帘等措施，且其绝对贡献值有限，因此对主动式采暖，一般要求窗户面积能满足采光要求即可。

### 2．对地板样式的要求不同

在被动式太阳房中为了使地板能直接吸收照射来的太阳辐射能，一般要求不要采用木地板，也不要铺地毯，因为木地板和地毯的导热性能很差，不能把热能传导进地板内，不能发挥地板的储热作用。

但是对主动式采暖，尤其是地板辐射采暖，却对此没有特殊要求，因为换热盘管埋在地板下面的混凝土层内，不管是木地板还是地毯，都不影响内部混凝土层和土壤层的储热性能，只是热量向房间内传递的速度慢一些，这反而减少了房间温度的波动量。

### 3．对南墙空气集热器的要求不同

在被动式太阳房中，为了增加房间接收太阳辐射能的量，提高室内温度，仅开大南向窗口面积还不够，往往还要在南墙的窗口以外的面积上设置空气集热器。但由此带来的问题是往往影响南墙的外观。

对于主动式采暖，主要靠屋顶大面积的太阳能集热器，南墙空气集热器所起的作用有限，综合考虑造价、外观等因素，一般不采用南墙空气集热器。

但在某些特殊情况下，还是可以采用空气集热器。因某些地理位置原因，有的房屋朝北向，如公路南侧建房，为朝向公路而建造朝北的房屋，南墙就成为后墙，若南墙外有日照空间，则可以采用空气集热器以增加室温。对一些楼房，紧依靠楼顶排列太阳能集热器面积不够用，则可以在南墙上设置壁挂式集热器以增加集热器面积。

### 4．对辅助热源的需求有差异

一般来说，单靠被动式太阳能采暖不能完全解决冬季采暖问题，都要采用辅助热源，所采用的辅助热源都是能独立运行的设施，与太阳能采暖不形成一个统一的运行系统，如火炕、火墙、火炉、电暖器、土暖气等，这些设施的运行一般要靠人工操作管理。

对于主动式太阳能采暖，有的设计有完善的储热系统，例如设计有地下储存太阳能系统，则有可能不需要辅助热源，而完全靠太阳能独立完成供暖任务。有的太阳能采暖系统虽然需要辅助热源，但一般要求辅助热源和太阳能采暖系统组成一个统一的运行系统，通过自动控制仪表和手动阀门来调节辅助热源的启动和循环回路。

# 第6章 采暖用太阳能集热器

太阳能采暖的关键部件是太阳能集热器，选择合宜的太阳能集热器类型，是太阳能采暖成功的关键。因此我们需要了解各类太阳能集热器不同性能特点。

太阳能集热器的种类很多，分类方法也不同。按传热介质分类：可分为液体集热器和空气集热器两大类，其中以液体为传热介质的大多用水作介质，即构成各种太阳能热水器；以空气为传热介质的，则构成多种太阳能干燥器和太阳能采暖。按采光方式分类：可分为聚光型集热器和非聚光型集热器两大类。各类采暖用太阳能集热器结构原理、系统特点各不相同。

确定集热器的类型应根据太阳集热系统在一年中的运行时间、运行期内最低环境温度等因素确定，可按表 6-1 推荐的类型选用。

**表 6-1　　集热器类型选用**

| 运行条件 | | 集热器类型 | | |
|---|---|---|---|---|
| | | 平板型 | 全玻璃真空管型（含聚光） | 热管式真空管型 |
| 运行期内最低环境温度 | 高于 0℃ | 可用 | 可用 | 可用 |
| | 低于 0℃ | 不可用（1） | 可用（2） | 可用 |

注：（1）采取防冻措施后可用。

（2）如不采用防冻措施，应注意最低环境温度及阴天持续时间。

由各种太阳能集热器组成的采暖系统可与辅助能源联合使用，成为带辅助能源的太阳能采暖系统。一般较小规模家庭单独使用的太阳能采暖系统的辅助热源为电、煤或生物质能，其中以生物质能作为辅助热源的太阳能采暖系统已展现出良好的发展前景，它能替代常规能源，从而节约供热采暖系统的能耗，减轻环境污染。

为便于广大读者阅读以了解各类太阳能集热器，我们把太阳能集热器分为平板型太阳能集热器和真空管型太阳能集热器两个大类分别予以介绍。

# 6.1 平板型太阳能集热器

## 6.1.1 产品分类

### 1. 结构类型

根据吸热体的结构类型，平板型太阳能集热器可划分为管板式、翼管式、扁盒式和蛇管式等类型，如图 6-1 所示。

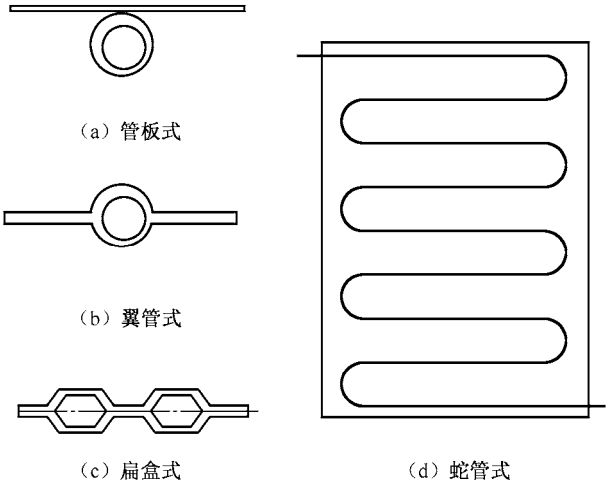



图 6-1 吸热板结构型式示意图

（1）管板式。管板式吸热板是将排管与平板以一定的结合方式连接构成吸热条带，如图（a）所示，然后再与上下集管焊接成吸热板。这是目前国内外使用比较普遍的吸热板结构类型。

（2）翼管式。翼管式吸热板是利用模子挤压拉伸工艺制成金属管两侧连有翼片的吸热条带，如图（b）所示，然后再与上下集管焊接成吸热板。吸热板材料一般采用铝合金。

（3）扁盒式。扁盒式吸热板是将两块金属板分别模压成型，然后再焊接成一体构成吸热板，如图（c）所示，吸热板材料可采用不锈钢、铝合金、镀锌钢等。

（4）蛇管式。蛇管式吸热板是将金属管弯曲成蛇形，如图（d）所示，然后再与平板焊接构成吸热板。这种结构类型在国外使用较多。吸热板材料一般采用铜，焊接工艺可采用高频焊接或超声焊接。

### 2. 产品结构

平板型太阳能集热器基本结构及各主要零部件如图 6-2 所示。

吸热体表面的黑色涂层称为太阳能吸收涂层，它分为非选择性吸收涂层和选择性吸收涂

层两大类。非选择性吸收涂层是指其光学特性与辐射波长无关的吸收涂层；选择性吸收涂层则是指其光学特性随辐射波长不同有显著变化的吸收涂层。一般而言，要单纯达到高的太阳吸收比并不十分困难，难的是要在保持高的太阳吸收比的同时又达到低的发射率。

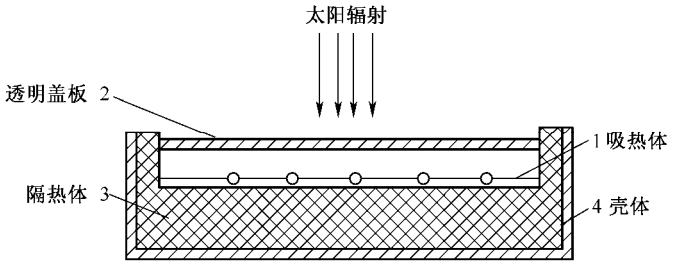



图 6-2　平板型集热器的结构示意图

选择性吸收涂层可以用多种方法来制备，如喷涂方法、化学方法、电化学方法、真空蒸发方法、磁控溅射方法等。采用这些方法制备的选择性吸收涂层，绝大多数的太阳吸收比都可达到 0.90 以上，但是它们可达到的发射率范围却有明显的区别。从发射率的性能角度出发，上述各种方法优劣的排列顺序应是：磁控溅射方法、真空蒸发方法、电化学方法、化学方法、喷涂方法。当然，每种方法的发射率值都有一定的范围，某种涂层的实际发射率值取决于制备该涂层工艺优化的程度。

透明盖板是平板型集热器中覆盖吸热板、并由透明（或半透明）材料组成的板状部件。它的功能主要有 3 个：一是透过太阳辐射，使其投射在吸热板上；二是保护吸热板，使其不受灰尘及雨雪的侵蚀；三是形成温室效应，阻止吸热板在温度升高后通过对流和辐射向周围环境散热。目前国内外还是使用具有红外透射比低、导热系数小、耐候性能好等特点的平板玻璃作为透明盖板的材料。

集热器由于吸收和积聚太阳光辐射热而使集热板的温度不断升高，这样，集热板会向外发射出大量辐射热，透明盖板也起着阻止这种辐射热向外辐射的作用。因此，要求透明盖板对太阳光（可见光部分）有较高的透射率，并且对长波段的红外辐射能起抑制作用，阻止其透过，以减少集热板向周围环境的热损失。

目前，平板型集热器多采用普通玻璃作为盖板，因为玻璃对于太阳光谱（$\lambda = 0.3 \sim 3\mu m$）有很好的透射率（约为 80%），而对于$\lambda > 5\mu m$ 的红外辐射却不能透过。

不同厚度和材质的玻璃，其透射率是不同的，如表 6-2 所示。如采用低铁含量的玻璃，透射率可达 92%。

**表 6-2**　　**不同厚度玻璃的透射率**

| 玻璃厚度（mm） | 透　射　率 |
|---|---|
| 2 | 0.83～0.90 |
| 3 | 0.79～0.83 |
| 4 | 0.75～0.79 |
| 5 | 0.72～0.75 |

另外，透明盖板的层数与平板型集热器的性能也有直接的关系。增加集热器玻璃盖板的层数将会使集热器的热损失减少，但是对于太阳光的透射率却降低了，从而减少了集热器的集热量。显然，它们之间是矛盾的。根据一些单位的试验，当集热器内集热板与周围大气的平均温差在 8.7℃左右的情况下，对于同一个集热器来说，单层玻璃的热效率较双层的高。这说明如果集热器主要是在较暖季节中使用时，采用双层玻璃是毫无意义的。因此，有人建议根据当地的气候环境来决定集热器盖板的层数，其数值如表 6-3 中所列。

**表 6-3　　集热器盖板层数推荐值**

| 气 候 类 型 | 透明顶盖层数 |
|---|---|
| 热带和亚热带沙漠地区 | 1 |
| 热带草原 | 1 |
| 热带和亚热带平原地区 | 1 或 2 |
| 内陆地区或夏季干燥的亚热带 | 1 或 2 |
| 亚热带湿润地区 | 2 |
| 大陆夏季凉爽的地区 | 2 |
| 北半球高纬度寒冷地区 | 2 或 3 |

一般来说，集热器的工作温度越高（＞40℃），双层玻璃的优越性就越明显。有人研究指出，在 1 000W / $m^2$ 的辐射强度下，当集热器的工作温度为 50℃时，双层玻璃集热器的效率比单层的高出 7%，而当集热器的工作温度为 60℃时，则高出 19%；反之，工作温度 20℃时，则单层玻璃集热器效率却比双层的高出 6%。由此可见，决定集热器盖板层数的不是单一因素，除以上提到的几点以外，还有诸如集热器的运行方式、经济投资等方面都应该综合加以考虑。

如果采用双层玻璃，两层玻璃的间距取 5～10mm；如果采用单层玻璃，玻璃与集热板的间距，根据不同结构，可在 10～50mm 之间选取，一般可取 20～30mm。

在多数情况下，集热器大都采用单层透明盖板；当太阳能集热器的工作温度较高或者在气温较低的地区使用，譬如在我国南方进行太阳能空调或者在我国北方进行太阳能采暖，宜采用双层透明盖板；一般情况下，很少采用 3 层或 3 层以上透明盖板，因为随着层数增多，虽然可以进一步减少集热器的对流和辐射热损失，但同时会大幅度降低实际有效的太阳透射率。

隔热层是集热器中抑制吸热板通过传导向周围环境散热的部件。用于隔热层的材料有岩棉、矿棉、聚氨酯、聚苯乙烯等，隔热层的厚度应根据选用的材料种类、集热器的工作温度、使用地区的气候条件等因素来确定。选择时应当遵循这样一条原则：材料的导热系数越大、集热器的工作温度越高、使用地区的气温越低，则隔热层的厚度就要求越大。一般来说，底部隔热层的厚度选用 30～50mm，侧面隔热层的厚度与之大致相同。

外壳是集热器保护及固定吸热板、透明盖板和隔热层的部件。用于外壳的材料有铝合金板、不锈钢板、碳钢板、塑料、玻璃钢等。为了提高外壳的密封性，有的产品已采用铝合金板一次模压成型工艺。

### 3．结构尺寸

平板型太阳能集热器外形尺寸宜参照建筑模数确定，推荐的外形平面尺寸如表 6-4 所示。

**表 6-4　　平板型太阳能集热器推荐外形平面尺寸**

| 长（m） | 宽（m） | 长（m） | 宽（m） |
|---|---|---|---|
| 1.0 | 1.0 | 1.5 | 1.0 |
| 1.2 | 1.0 | 2.0 | 1.0 |

平板型太阳能集热器的进出口管径推荐采用以下 4 种公称尺寸：15mm、20mm、25mm 和 32mm。

## 6.1.2　平板型太阳能集热器技术要求

平板型太阳能集热器的技术要求如表 6-5 所示。

**表 6-5　　平板型太阳能集热器技术要求**

| 编号 | 项目 | 技 术 要 求 |
|---|---|---|
| 1 | 外观 | 集热器零部件易于更换、维护与检查，易固定。吸热体在壳体内应安装平整，间隙均匀。透明盖板若有拼接，必须密封，透明盖板与壳体应密封接触，考虑热涨情况，透明盖板无扭曲、划痕。壳体应耐腐蚀，外表面涂层应无剥落，隔热体应填塞严实，不应有明显萎缩或膨胀隆起现象，产品标记应符合规定 |
| 2 | 耐压 | 传热工质无泄漏，非承压式集热器应承受 0.06MPa 的工作压力，承压式集热器应承受 0.6MPa 的工作压力 |
| 3 | 刚度 | 应无损坏及明显变形 |
| 4 | 强度 | 应无损坏及明显变形，透明盖板应不与吸热体接触 |
| 5 | 闷晒 | 应无泄漏、开裂、破损、变形或其他损坏 |
| 6 | 空晒 | 应无开裂、破损、变形或其他损坏 |
| 7 | 外热冲击 | 不允许有裂纹、变形、水凝结或浸水 |
| 8 | 内热冲击 | 不允许损坏 |
| 9 | 淋雨 | 应无渗水和破坏 |
| 10 | 耐冻试验 | 集热器应无泄漏、损坏、变形、扭曲，部件与工质不允许有冻结 |
| 11 | 热性能 | 瞬时效率截距应不低于 0.72，总热损系数应不大于 6.0W/（$m^2$ • ℃） |
| 12 | 压力降落 | 应作出其压力降落特性曲线 |
| 13 | 耐撞击 | 应无划痕、翘曲、裂纹、破裂、断裂或穿孔 |

续表

| 编号 | 项目 | 技 术 要 求 |
|---|---|---|
| 14 | 涂层 | 吸热体和壳体的涂层应无剥落、反光和发白现象，应给出吸热体涂层的红外发射率，吸热体涂层的吸收比应不低于 0.92 |
| 15 | 投射比 | 应给出透明盖板的透射比 |

对上表涉及的平板型太阳能集热器技术要求的试验方法应符合 GB/T6424-2007 的规定。此外，吸热体材料与工质接触部位不应溶解出有碍人体健康的物质，吸热体焊接应符合 GB/T12467.3 的规定，隔热体热导率不大于 0.055W/(m • ℃)。

### 6.1.3 太阳能空气集热器

太阳能空气集热器是指吸收太阳辐射并将产生的热能传递到空气传热工质的装置，可用于家庭供暖和工业供热，适用于冬天需要供热的较寒冷地区。

#### 1. 结构原理

太阳能空气集热器是由吸热板芯、保温壳、透光盖板、集热器外壳、滤清器等组成。其核心是吸热板芯，吸热板的向阳表面涂有黑色吸热涂层，它的功能是吸收太阳的辐射能，并向传热介质传递热量。进气管道上设置有进气口，出气管道一端伸出透光罩体之外与安装有泵体的管道连接。空气经空气集热装置加热后汇集在出气管道，经泵体吸入输送管道，输送至热空气所需之处。空气集热器可多组并联安装组合成热风系统，产生 80～100℃温度的热风，供烘干物料或采暖之用。

太阳能空气采暖工作原理如图 6-3 所示。

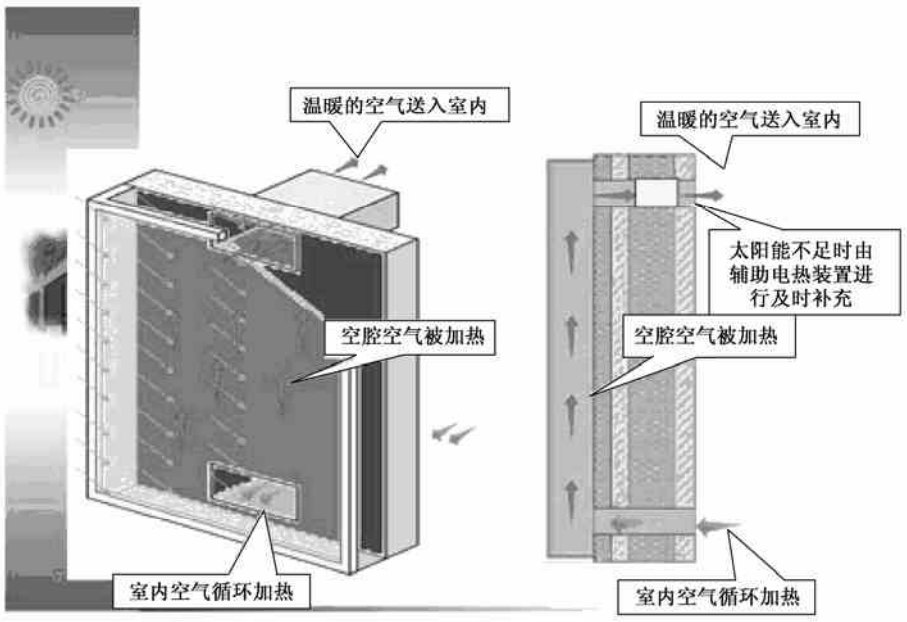



图 6-3 太阳能空气采暖工作原理示意图

### 2．系统特点分析

太阳能空气集热器具有以下优点。

（1）集热器出口空气温度变化范围大，相对热水介质能达到更高的温度，在供暖、通风、制冷方面扩大了使用范围。

（2）空气热容小，加热速度快，增加了可利用时间。

（3）空气介质对结垢、腐蚀、密封性要求不高，结构相对简单，可降低成本，产品的正常使用寿命一般应在 10 年以上。漏气相对于漏水对建筑的损害较小，容易与建筑结合。

（4）热空气密度小，易形成自然对流，与建筑结合可加强室内自然通风；热风与热泵结合，可以减轻冬天热泵的结霜问题。

（5）利用屋面辐照面积大，可充分利用太阳能资源；通过空气集热器与屋面系统的一体化，使集热构件建材化成为可能；较热水集热器而言，空气重量大大降低，并且节省了安置水箱，屋面荷载基本只有原重的 1/3。

（6）由于热水集热器中常有残留水而消耗额外能量，使用效率下降，空气集热器则没有此类隐患。

当然，空气集热器也有缺点，其主要缺点是热效率较低。由于空气的热容量较小，与集热器的换热能力较差，且需要风机强制换热。

利用空气集热器采暖，一般是应用在非常寒冷地区，在这些地区，由于天气非常寒冷，在夜晚或阴天，用水做工质的集热器可能会被冻坏，而用空气集热器就避免了被冻的问题。

## 6.1.4　铜铝复合循环式集热器

该项技术是将一根铜管置于两条铝板之间热碾压在一起，然后再用高压空气将它吹胀成型构成集热器板芯条带，再与上下集管焊接成吸热板。这是目前国内外使用比较普遍的吸热板结构类型。北京市太阳能研究所于 1986 年从加拿大引进一条具有国际先进水平的铜铝复合太阳条生产线，使我国平板型集热器技术跨上一个新的台阶。

### 1．结构原理

铜铝复合循环式集热器是由铜铝复合板芯、底板、保温板和具有强度高、透光性好、反射率低、经过特殊钢化处理表面的玻璃板构成。其核心是铜铝复合吸热板芯，吸热条带采用铜铝复合工艺，将铜质流道与铝质肋片结合一起，吸热体表面经阳极氧化处理，吸收比高。吸热条带与上下两端铜管相连组成铜铝复合吸热板芯，下端设有进水口，水流经铜铝复合吸热板芯升温后经上端设有的出水口流出。

铜铝复合板芯如图 6-4 所示，集热器板芯条带如图 6-5 所示，铜铝复合集热器如图 6-6 所示。

### 2．系统特点分析

铜铝复合循环式集热器具有集热效率高、使用寿命长、承压能力好、耐腐蚀性强、平整美观等优点。



图 6-4 铜铝复合板芯

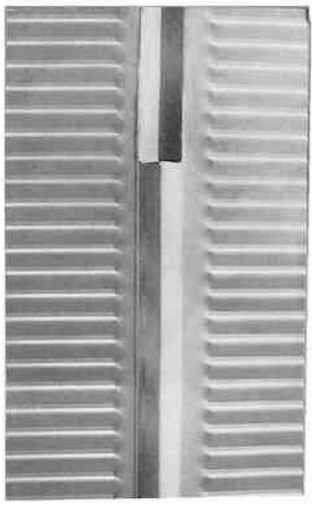


图 6-5 集热器板芯条带



图 6-6 铜铝复合集热器

吸热膜层为铝阳极氧化膜，吸收率为 95.6%，发射率＜20%，寿命长、不脱落，具有良好的光选择性能。

吸热条带将铜质流道与铝质肋片结合一起，热阻很小，导热性良好；能承压运行，易于实现介质自动循环导热，耐空晒，免维护，使用寿命长；水质清洁，太阳条接触水的部分是铜材，与其他流道（如铝、不锈钢）相比，铜质流道具有良好的耐腐蚀能力。

超薄设计，实现建筑一体化，易安装，与环境和谐统一。

铜铝复合板芯设计，降低了产品生产成本，适合于大型太阳能集热工程使用；整个生产过程实现机械化，使产品质量得以保证。其缺点是当系统中采用水作为介质时，在寒冷的北方，冬季需排空，否则会冻裂其铜质流道。目前市场上出现了采用防冻液作为传热工质以防止冻害的间接式的太阳能集热系统。

## 6.2 真空管型太阳能集热器

### 6.2.1 产品分类

#### 1. 结构类型

真空管型太阳能集热器按真空太阳集热管结构型式可分为 3 类：全玻璃真空管型太阳能集热器、玻璃—金属结构真空管型太阳能集热器和热管式真空管型太阳能集热器。

真空管型太阳能集热器按采光方式，可分为聚光型真空管太阳能集热器和非聚光型真空管太阳能集热器两大类。

真空管型太阳能集热器按真空太阳集热管的排列方式可分为竖（真空太阳集热管竖直排列）单排、横（真空太阳集热管水平排列）单排和横双排 3 类，其排列方式如图 6-7 所示。

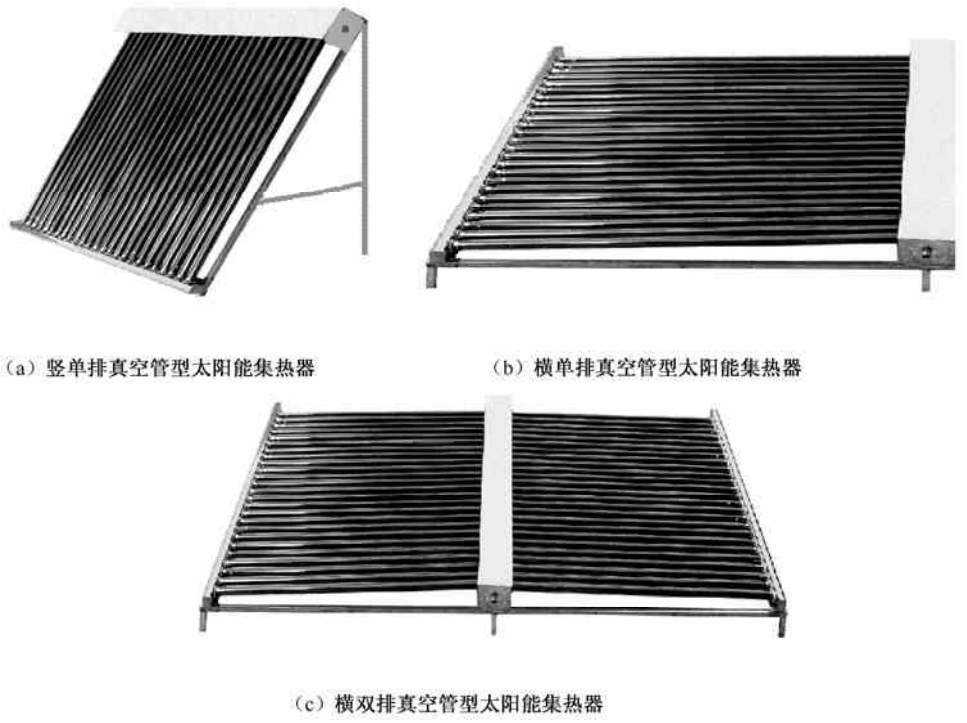



图 6-7　真空管型太阳能集热器排列方式示意图

### 2．产品结构

真空管型太阳能集热器的基本结构和主要部件名称如图 6-8 所示。




图 6-8　真空管型太阳能集热器的基本结构和主要部件

### 3．结构尺寸

按照 GB/T17049 规定，全玻璃真空太阳集热管结构尺寸为：$\phi$47mm × 1 200mm，$\phi$47mm × 1 500mm，$\phi$47mm × 1 800mm；$\phi$58mm × 1 500mm，$\phi$58mm × 1 800mm，$\phi$58mm × 2 100mm；玻璃—金属结构太阳集热管的结构尺寸为：$\phi$47mm × 1 500mm，$\phi$58mm × 1 500mm，$\phi$58mm × 1 800mm；热管式真空太阳集热管的结构尺寸为：$\phi$100mm × 1 700mm，$\phi$100mm × 2 000mm。

真空管型太阳能集热器联集管进出口管径推荐采用以下 4 种公称尺寸：15mm、20mm、25mm 和 32mm。

### 6.2.2 真空管型太阳能集热器技术要求

真空管型太阳能集热器的技术要求如表 6-6 所示。

**表 6-6　　真空管型太阳能集热器技术要求**

| 编号 | 项目 | 技 术 要 求 |
|---|---|---|
| 1 | 外观 | 应对真空管型太阳能集热器主要部件外观存在的问题进行判定；真空太阳集热管外观应符合 GB/T17049 和 GB/T19775 的规定要求，联集管、尾架外表面平整，无划痕、无污垢和其他缺陷；集热器产品标记应符合规定 |
| 2 | 耐压 | 传热工质应无渗漏，非承压式集热器应承受 0.06MPa 的工作压力，承压式集热器应承受 0.6MPa 的工作压力 |
| 3 | 刚度 | 应无损坏及明显变形 |
| 4 | 强度 | 应无损坏和明显变形 |
| 5 | 闷晒 | 应无泄漏、开裂、破损、变形或其他损坏 |
| 6 | 空晒 | 应无开裂、破损、变形或其他损坏 |
| 7 | 外热冲击 | 不允许有裂纹、变形、水凝结或浸水 |
| 8 | 内热冲击 | 不允许损坏 |
| 9 | 淋雨 | 应无渗水和破坏 |
| 10 | 耐冻试验 | 集热器应无泄漏和破损，部件与工质不允许有冻结 |
| 11 | 热性能 | 无反射器的集热器瞬时效率截距应不低于 0.62<br>有反射器的集热器瞬时效率截距应不低于 0.52<br>无反射器的集热器总热损系数应不大于 3.0W/（$m^2$ • ℃）<br>有反射器的集热器总热损系数应不大于 2.5W/（$m^2$ • ℃） |
| 12 | 压力降落 | 应作出其压力降落特性曲线 |
| 13 | 耐撞击 | 不允许损坏 |

对上表涉及的真空管型太阳能集热器技术要求的试验方法应符合 GB/T17581-2007 的规定。此外，与热水接触的联集管内胆材料不应溶解出有碍人体健康的物质。其焊接应符合 GB/T12467.3 的规定；隔热体耐热应不低于 120℃，导热率不大于 0.05W/（m • ℃）。外观应填塞密实，无明显收缩与隆起，不应发霉、变质或释放污染物质；密封件材料外观应无裂痕、划伤或发黏、老化；反射器表面的太阳反射率应不低于 0.7。外观应无划伤、蚀斑或裂痕。

### 6.2.3 全玻璃真空管集热器

#### 1．结构原理

全玻璃真空管集热器是由全玻璃真空太阳集热管、联箱及支架组成。全玻璃真空太阳集

热管是玻璃真空管集热器的核心部件，其结构如一个拉长的热水瓶胆，用双层玻璃管封装，两层玻璃管之间抽成高真空（真空度不低于 $1.33 \times 10^{-3}$Pa），如图 6-9 所示。利用磁控溅射技术在内管外壁沉积多层渐变选择性吸膜，该膜层对太阳能的吸收率可达到 93%以上，发射率低于 6%。真空集热管吸收太阳能，通过热传导将内管中的流体加热升温，玻璃内外管之间的高真空使得对流体传导的热损失很低，因而其集热效率高，保温性能好，空气闷晒温度可达 280℃，在−18℃时也可照常使用。采用硼硅玻璃 3.3 制造的全玻璃太阳能集热管可承受直径 2.5cm 大的冰雹袭击。$\phi$47 和$\phi$58 管管壁厚壁厚达 1.6～1.7mm，$\phi$70 管管壁厚 1.8～2.0mm，真空管镀膜时间长达 45 分钟以上，可快速制热，升温更高。

### 2．循环工作原理

（1）竖排式真空管集热器循环工作原理。

玻璃真空管集热器的冷水由连接箱底部进入，分流到各全玻璃真空太阳集热管内，全玻璃真空太阳集热管将太阳辐射能转化为热能并加热管内冷水，由于热水密度小于冷水密度，因此热水由连接箱的顶部输出。全玻璃真空管工作原理示意图见图 6-10。



图 6-9　全玻璃真空管形状图

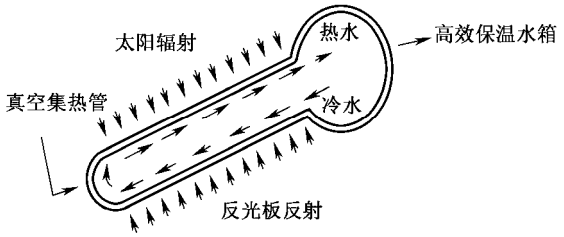



图 6-10　全玻璃真空管工作原理示意图

（2）横排真空管集热器循环工作原理。

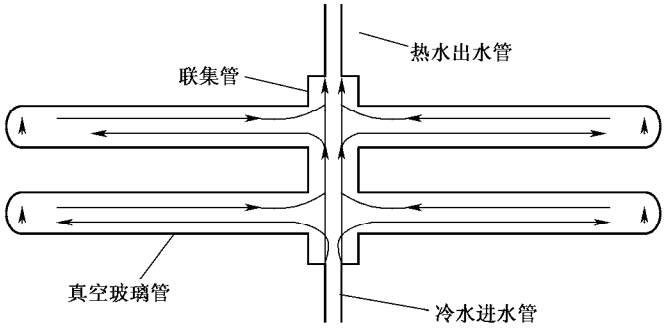
图 6-11 所示为集热管横放的自然循环系统示意图。联集管上端有热水出水管，下端有冷水进水管，当集热管中的水被太阳辐射加热时，上部朝太阳的一面得到的能量多，温度相对较高，水的密度变小，由于浮升力的作用而斜向上流入联集管，而联集管下部的冷水由于密度较大将自动沿真空管下部向真空管内部流动。从真空管出来的热水一部分沿联集管上升，一部分流入上面的真空管，依此类推，最后出来的热水由联集管出口进入水箱。

### 3．系统特点分析

玻璃真空管集热器具有效率高、升温快、热水产量大、耐寒能力强、使用寿命长等特点，在我国北方地区以玻璃真空管集热器构成的太阳能热水器占有绝对的统治地位。

全玻璃真空太阳能集热管是在玻璃壁与吸热体之间抽成一定的真空度，以抑制空气的对流和传导热损失。

真空度是保证真空管太阳集热器具有良好性能的重要指标，真空度单位用毫米汞柱（mmHg），国际单位用帕（Pa），$1\text{Pa} = 7.5 \times 10^{-3}$ mmHg。国家标准规定，集热管的真空度应小于或等于 $5 \times 10^{-2}$Pa。




错误!

图 6-11 横排真空管集热器循环工作原理

要使集热管在长期运行中保持较高的真空度，必须在排气时对玻璃真空集热管进行较高温度与较长时间的烘烤，以除去表面与表层的水汽及其他气体。此外，在集热管内放置了钡—钛吸气剂，它蒸散在抽真空封口一端的管壳内表面上，像镜面一样，能在运行时吸收集热管内释放出的微量气体，以保持管内真空度。一旦银白色的镜面消失，则说明该真空集热管的真空度受到损坏，管子也就报废。

太阳光谱选择性吸收膜是真空集热管必需的光热转换材料。真空管集热器的选择性吸收膜，要求其对太阳辐射的吸收率高，而在自身工作温度下的热发射率很低。由于太阳辐射能大部分集中分布在 0.3～2.5μm 很短的波长范围内，因此，从“吸收”的角度来看，选择性吸收膜只要在太阳辐射能集中分布的这个较小的波长范围（如 0～3μm）内具有高吸收率即可。另一方面，吸收膜工作时要向外发出热辐射，但工作温度低，它的辐射是红外线。如温度 400K（127℃）的黑体表面所产生的热辐射能 99%以上的波长大于 3μm，吸收膜的发射率是指红外发射率。因此，从“发射”的角度来看，选择性吸收膜只要求对红外光谱具有低发射率就可以了。选择性吸收膜通常需要专门制备，其工艺技术很多，如化学转换、电镀、喷涂热分解、氧化着色、真空蒸发、磁控溅射等。全玻璃真空集热管是在内管外壁上沉积选择性吸收膜。

真空管集热器具有比普通平板型集热器更优良的热性能。在高温和低温环境下均有较高的集热效率；真空管最高集热温度可达 90℃，而平板式最高温度只能达到 65℃；在无云晴天，每平方米平板式集热器只能产 50℃热水 35～60L，而每平方米真空管却能产 50℃热水 45～90L，热水产量更大；保温性能好，空气闷晒温度可达 280℃，在−18℃时也可照常使用。玻璃真空管集热器不但能适用于普通供暖供热水工程，而且适用于高温、严寒等恶劣条件使用，并且可用于太阳能发电、制冷等高新领域；只需现场简单组装，安装快捷、方便；制造工艺简便，技术成熟可靠，成本较低。不足之处是玻璃真空管属易碎品，在运输和安装过程中需谨慎小心，特别要防范在大的太阳能供暖和热水工程系统中，由于个别玻璃真空管破裂造成整个系统瘫痪问题。

### 6.2.4 玻璃—金属真空集热管

玻璃—金属真空太阳能集热管的基本结构是在真空集热管内有吸热传热的金属管和翼。翼有平板形和圆筒形两种，其具体结构很多。玻璃为前面所述的硼硅玻璃。它们具有工作温

度高、承压能力大和耐热冲击性能好等共同优点。根据集热取热的不同结构，有 U 形管式、同轴套管式、热管式、内聚光式、直通式、储热式等。

图 6-12 所示为U形管式真空集热管。按吸热体形状不同，有平板翼和圆柱形翼两种。金属翼与 U 形管焊接在一起，吸热表面为选择性涂层，管内抽真空。这种管热效率高、与集管连接简单、并可水平安装。

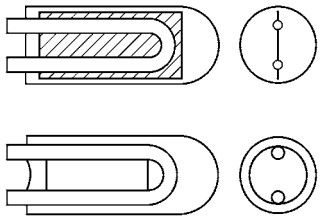


图 6-12　U 形管式真空集热管

图 6-13 所示为直通式真空集热管。其中一种的吸热器为平板，另一种的吸热器为中心金属圆管，圆管表面有高温选择性吸收涂层，传热介质由吸热管的一端流入，经太阳辐射能加热后，从另一端流出，故称直通式。由于金属吸热管和玻璃管之间的两端都要封接，因而封接处需借助波纹管过渡，以补偿金属管的热胀冷缩。这种管的主要优点是运行温度高和易于组装。与聚光反射镜相结合能达 300～400℃的运行温度，可用于太阳能热发电。

图 6-14 所示为同心套管式真空集热管，又称直流式真空集热管。吸热管是两根内外相套的金属管，工作时冷水从内管进入，经吸热板加热后，热水通过外管流出。它的主要特点是热效率高，可水平安装。

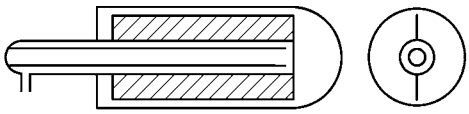


图 6-13　直通式真空集热管

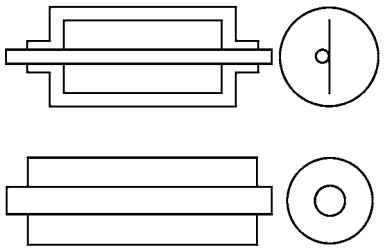


图 6-14　同心套管式真空集热管

## 6.2.5　热管真空管集热器

热管式真空管集热器是在普通全玻璃真空管集热器的基础上采用了热管传热技术，并在真空玻璃管内的热管上辅助有铜、铝传热片传热，吸收太阳辐射并将产生的热能传递到传热工质的装置。

### 1．结构原理

热管真空管集热器由热管真空太阳集热管、联箱及支架组成，热管真空太阳集热管是热管真空管集热器的核心部件。采用特殊的密封结构将辅助有铜、铝传热片的热管与全玻璃真空管结合在一起，热管式真空管的冷凝端与水箱相连接。热管真空管集热器的工作原理是利用热管内工质的汽—液相变循环过程，连续不断地将吸收的能量传递到冷凝端加热水。当阳光照射在真空管内的吸热片上时，热管内的工质受热沸腾汽化，蒸汽不断冲向顶部的冷凝端，在冷凝端放出汽化热冷凝变成液体，在重力作用下沿管壁流回热管蒸发端，完成集热器的传热过程。

热管的形状如图 6-15 所示，其内部结构如图 6-16 所示，传热原理如图 6-17 所示。



图 6-15 热管形状图



图 6-16 真空管热管内部结构

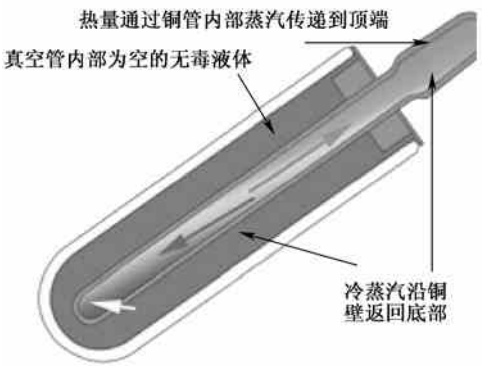



图 6-17 真空管热管传热原理

工程用热管式真空管集热器由真空集热管、导热管块、连集管、隔热材料、保温盒、支架、套管等部分组成，如图 6-18 所示。

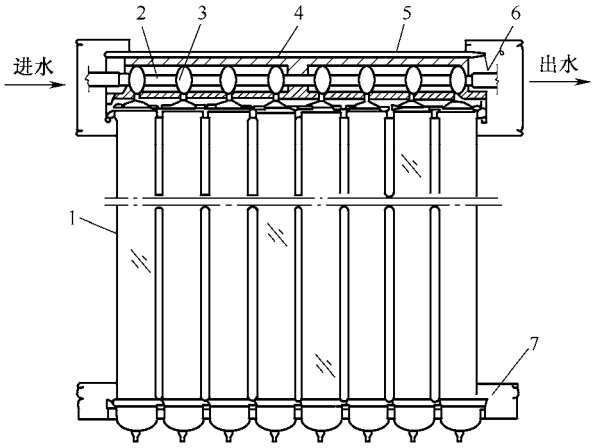



图 6-18 热管式真空管集热器

1．真空集热管 2．连集管 3．导热管块 4．隔热材料 5．保温盒 6．套管 7．支架

### 2．系统特点分析

因为热管内工质的汽化潜热高，工质汽化、冷凝过程的放热系数比较大，所以不用很大

的蒸发量就能传递较大的热量，能最大限度地提高集热器的传热效率。因为热管具有优良的传热性能，其工作温度可达 88～128℃，在集热过程中，热管能迅速地将吸收的热量全部传导给水箱中的水，热量不倒流，即使在天气阴晴多变的情况下也能把低密度散射光能转化为热能，同时由于热管式真空管内不走水，加热系统与循环系统彼此独立分开，从根本上解决了全玻璃真空管结水垢、沉淀脏物、易炸管、寿命短的问题，使用安全可靠，具有效率高、水温高、可靠性高、承压运行的特点。

由于太阳能集热器采用的大都是重力热管，是依靠工质的相变过程来传输热量的，因此在使用中必须将热管的蒸发端置于冷凝端的下方，以利于液态工质从冷凝端回流到蒸发端。这就要求热管与地面的倾角大于一定的角度，在设计或使用中要注意使热管式真空管与地面保持合适的角度。

在热管式真空管太阳集热器中，热管的冷凝端直接插入水箱与水箱里的水实现热交换，由于热管的冷凝端温度高，在水质不好的情况下易结垢，因此需提前做好防垢处理，以防影响其热效率。

### 6.2.6　聚光型真空管集热器

聚光型真空管集热器利用聚焦原理，即利用光线的反射和折射原理，采用反射器或折射器使阳光改变方向，把太阳光聚集，集中照射在吸热体较小的面积上，增大单位面积的辐射强度，从而使集热器获得更高的温度。

#### 1．结构原理

聚光型真空管集热器由聚光器、真空管、联箱等配件组成。聚光器有内置于真空集热管和外置于真空集热管之别，目前以外置于真空集热管偏多。聚光器的材质采用玻璃钢或不锈钢，上覆高反射率的反光材料。目前使用的固定式聚光器的聚光倍数为 4 倍左右，可根据不同的需求而有不同设计。聚光型真空管集热器的工作原理是在玻璃真空管集热器的基础上加入聚光器，把太阳光聚集，集中照射在真空管集热器上，使集热器获得更高的温度。

固定式聚光真空管集热器在冬季采暖期有非常好的聚光作用，聚光比为 3～4 倍，其采用真空管数量只有普通密排式真空管集热器的 1/3。由于固定式聚光器除冬季外其他季节不聚光，因此在夏季其集热面积只有冬季的 1/3，从而解决了夏季热量太多无法利用，甚至可能对系统造成损害的问题。

#### 2．系统特点分析

与平板、真空管等集热器相比，采用聚光型真空管集热器采暖能够解决它们在使用过程中存在的问题。一是可以适当增加集热器与采暖面积的配比比例。二是可降低成本。每一单元聚光器配 1 根真空管，采光面积等于目前普遍使用的真空管集热器的 3 根真空管所占的面积。即同样采光面积，普通真空管集热器是用 3 根真空管密排，而聚光集热器为一单元聚光器配 1 根真空管。三是由于这种设计在冬季采暖期有非常好的聚光作用，其他季节不聚光，可有效解决普通真空管集热器夏季热水产热量过剩问题。

因此，聚光型真空管集热器具有热性能好，热量品味高，热效率高，管内水的温差大，自然循环热量传递速度快，管内水升温速度快，末端散热器启动快等优点，比较适用于太阳能采暖系统。

为防灰尘影响反射率，在采暖期可每月进行一次擦拭维护，设计时要考虑防风问题。

## 6.3 采暖用集热器的选择

不同的太阳能集热器有其不同的性能特点和优势，不同地区不同的气候条件和不同的采暖需求，决定了如何选择不同性能的集热器。

（1）在高寒地区，比如在冬季气温下降到−20℃以下的地区，在夜晚或连阴天气，有可能会把用水做工质的太阳能集热系统冻坏，因此在这些地区可以采用空气集热器。空气集热器系统内流动的工质是空气，其抗冻性能最好。

（2）在偏远的山区、小村庄，若当地没有维修力量，或距维修店很远，不宜采用以水为工质的集热器。若采用以水为工质的集热器，一旦出现小的运行故障，比如真空玻璃管漏水，若不能及时维修，整个系统的水就可能会漏光，从而造成大的故障。而由外地人员去维修，则会产生太大的维修成本，综合费用更高。

在这类地区宜采用空气集热器，因为空气集热器不宜产生故障，即使出现漏气等小故障，一般也不影响整个系统的正常运行。

（3）一般采暖地区采暖应采用真空管集热器，其隔热性能好，尤其在低温条件下，一般比平板型集热器集热效率高。另一方面，真空管集热器在冬季抗冻能力强，经成千上万户的真空管热水器用户多年的使用证明，在我国北纬 40° 线以南大部分地区，真空管热水器大都能越冬使用。

（4）对于室内是普通散热器的用户，应采用聚光型真空管集热器。由于与地板辐射散热相比，普通散热器的散热面积较小，故要求供热温度高。普通真空管集热器在冬季较难达到较高的集热温度，即使达到较高的集热温度，其集热效率也会下降；而聚光式真空管集热器很容易实现较高的集热温度。

（5）要想提高太阳能供暖的保证率，增大集热器的面积，同时又不想在夏季产生大量的难以消化掉的热能，可以采用固定式聚光集热器（参看下章聚光器），因为固定式聚光集热器在夏季将失去聚光功能，其集热面积只有冬季的 1/3，故夏季的产热能力会大大下降。

（6）对于某些采暖或供热工程，由于工程面积大等因素，系统循环的压力较大，普通插管式真空管集热器的耐压力小，可采用 U 形管式真空管集热器或热管式真空管集热器。这些集热器的连接处都是金属连接件，耐压力大。

（7）在某些不太寒冷的采暖区，也可采用平板型集热器，在这类地区，平板型集热器的集热效率也较高。但仍要注意防冻问题，预防可能出现的突然降温天气。防冻措施有下面几种。

① 夜间或阴天，把系统内的循环水放走储存起来，使用时再抽回系统内。

② 增设辅助热源和储热装置，在夜间或阴天定期强制循环，提高循环管道的温度。

③ 管道加强隔热保温并增设电伴热带，需要时可对管道加热防冻。

# 第 7 章 太阳能聚光器

在目前我们所应用的太阳能利用装置中，不管是管板式的，还是真空玻璃管式的，或是热管式的，绝大部分都是所谓平板型集热器，即不需要通过聚光把太阳能收集起来。虽然太阳能的总能量十分巨大，但是它有一个根本性的缺点，即能量密度很低，单位面积到达的能量很小，因此这些非聚光的平板型集热器只能产生低品位的低温热能。

随着我国太阳能热利用向更深更广的领域发展，单纯的非聚光的平板型集热器将越来越不能适应形势的发展。

在太阳能采暖工程中，虽然目前的非聚光型集热器与地板采暖基本上相适应，但是目前更多的建筑是采用散热片供暖，而散热片需要较高的供热温度，而平板型集热器在冬季的集热温度较低，难适应散热片供暖系统。

把春、夏、秋季的太阳能收集起来并实现长期的地下储存，以供冬季采暖用，是将来大规模利用太阳能的一个根本途径。而实现长期地下储存需要多次换热，因此需要提高集热温度以提高其换热效率，而平板型集热器在高温下会降低效率。

现在，非聚光型集热器只是在洗浴用热水方面大量应用，在中高温热利用方面还几乎是空白，而要产生中高温热能，非采用聚光型集热器不可。

发展聚光型太阳能集热器，获得较高品位的高温热能，是我国太阳能利用发展的必然，是当前低碳经济发展的必需。

但是到目前为止，我国较系统地论述聚光器的书籍很少，所以本书把聚光器作为单独一章进行较详细的论述，以抛砖引玉，希望能为聚光型集热器的发展尽点绵薄之力。

本章主要讨论下述有关聚光器的问题。

什么样的几何形状能汇聚太阳光，各种聚光器几何光学性能如何？

太阳的位置时刻在变化着，不仅有一年四季之分，甚至可以说每一天的运动轨道也是不同的，光线投射到地面上的方向时刻在变化着。我们用什么样的装置才能适应太阳运动的规律并以少跟踪或不跟踪的方式，最大限度地把太阳能收集起来？

各类聚光器的技术经济性能如何？

## 7.1 光的反射定律

光的反射规律有 3 条。

（1）入射线、法线、反射线在一个平面上。

（2）入射线、反射线分居于法线两侧。

（3）入射角等于反射角。

如图 7-1 所示。

这 3 条规律是每一条光线都具有的，在运用它分析处理问题时，不能忽视任一条，特别是第一条容易被忽视，要注意。

知道了反射定律，下面我们用它来分析任意两条光线汇聚到一点问题，如图 7-2 所示。

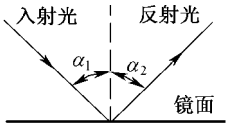



图 7-1 光的反射

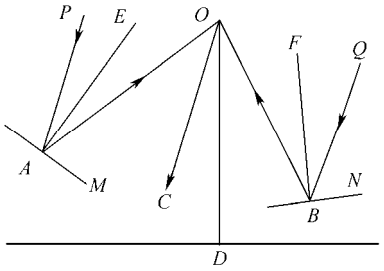



图 7-2 光的反射

设地面上方有一点 $O$，有任意两点 $A$ 和 $B$，阳光沿 $OC$ 方向投射下来，现在想在 $A$ 和 $B$ 两点各放一面镜子，经反射后，阳光能汇聚于 $O$ 点，试求 $A$、$B$ 两镜的放置位置。

分析：因太阳光可近似看作平行的，做 $AP \parallel OC$、$BQ \parallel OC$，$PA$、$BQ$ 即分别是投射到 $A$、$B$ 两镜的阳光线的方向。

连接 $OA$，因入射角等于反射角，故作$\angle PAO$ 的角平分线 $AE$，则 $AE$ 为镜面法线。做 $AM \perp AE$，则 $AM$ 为镜面位置。

同理，可以做出 $B$ 镜的位置 $BN$。

按 $AM$、$BN$ 方向放置镜面，就能汇聚光线在 $O$ 处。

## 7.2 抛物线

我们知道，在平面直角坐标系下，一对数组和一个点是一一对应的，即每一个点都可以找到两个数 $x$、$y$（坐标）和它对应。同样，给了任两个数 $x$、$y$，也能找到一个点 $P$（$x$，$y$）和它对应。

由中学数学知识我们知道，一个二元一次方程对应一条直线。如图 7-3 所示，二元一次方程 $Ax+By+C=0$ 可决定一条直线。

而一个二元二次方程 $Ax^2+Bxy+Cy^2+Dx+Ey+F=0$ 则决定一条圆锥曲线：椭圆、双曲线或抛物线。

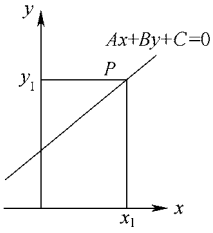



图 7-3 二元一次方程对应的直线

通过直角坐标系，我们可把数学方程和几何图形联系起来了。这种解析方法给我们进一步分析几何图形的各种特性以及描绘这些图形带来很大方便和好处。

## 7.2.1　什么是抛物线

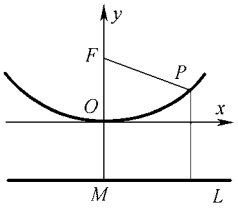



图 7-4　抛物线

顾名思义，抛物线就是我们抛出一个物体（如石子）所运行的路线。这种曲线为什么会聚光呢？我们通过数学上的解析方法，具体地分析一下什么是抛物线以及它的各种特征。

抛物线的定义：

有一动点 $P$，它到一定点 $F$ 和一直线 $L$ 的距离相等，则 $P$ 点的轨迹叫抛物线。

图 7-4 所示为一条抛物线，下面试求其方程。

首先建立坐标系如图 7-4 所示，这里 $OF=OM=f$（$f$ 是正数）

动点 $P$ 的坐标是（$x$，$y$）

根据定义有 $y+f=PF$　　（1）

而根据勾股定理　　$(PF)^2=x^2+(f-y)^2$

代入式（1），得　$y+f=\sqrt{x^2+(y-f)^2}$

化简得　　$x^2=4fy$　　（2）

令　$p=FM=2f$

代入（2）得到　　$x^2=2py$　　（3）

式（2）、式（3）两式即抛物线之标准方程，式中的 $F$ 点称为抛物线的焦点，$O$ 点称为抛物线的顶点，$y$ 轴即过焦点和顶点的直线交抛物线的主光轴。

## 7.2.2　抛物线为什么能聚光

下边我们证明一下抛物镜面能把平行光线汇聚于一点。

如图 7-5 所示，平行光线沿 $y$ 轴方向射到 $P$（$x$，$y$）点，过 $P$ 作抛物线切线 $PM$ 和法线 $PN$，连接 $PF$，若能证明入射角等于反射角即可。为此只要能证明 $\angle\alpha=\angle\beta$ 即可。

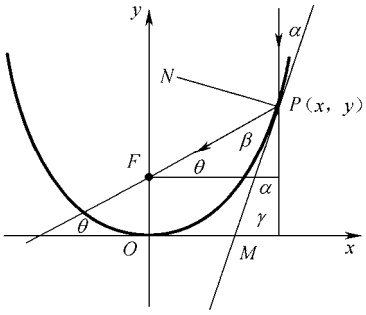



图 7-5　抛物线聚光原理

证明：∵抛物线方程是　$y=\dfrac{x^2}{4f}$

$\therefore\quad y'=\dfrac{x}{2f}=\tan\gamma$

$\therefore\quad \tan\alpha=\tan(90^\circ-\gamma)=\cot\gamma=\dfrac{1}{\tan\gamma}=\dfrac{2f}{x}$

又，$\tan\beta=\tan(90^\circ-\theta-\gamma)=\cot(\alpha+\theta)=\dfrac{\cot\alpha\cdot\cot\theta-1}{\cot\alpha+\cot\theta}$

这里，$\cot\theta=\dfrac{x}{y-f}$，$\cot\alpha=\dfrac{x}{2f}$

$$\therefore\quad \tan\beta=\frac{\dfrac{x}{2f}\cdot\dfrac{x}{y-f}-1}{\dfrac{x}{2f}+\dfrac{x}{y-f}}\quad \text{化简得到}\quad \tan\beta=\frac{\left(x^2-4fy\right)+2fy+2f^2}{x\cdot(y+f)}$$

$$\because\quad x^2-4fy=0\quad \therefore\quad \tan\beta=\frac{2f\cdot(y+f)}{x\cdot(y+f)}=\frac{2f}{x}\quad \therefore\quad \tan\beta=\tan\alpha$$

即 $\angle\beta=\angle\alpha$ 证毕。

因为 $P$（$x$，$y$）是任意取的，所以抛物线上任一点都有同样的性质。到此，我们证明了抛物线所特有的光学性质：只要是平行光线沿对称轴方向投射到抛物线镜面上，反射后就能把光线汇聚一点。这点恰是前面我们讲抛物线定义时的定点 $F$。从这里我们也就明白人们为什么把定点 $F$ 叫抛物线焦点了。焦点 $F$ 到抛物线顶点 $O$ 的距离 $OF$ 叫焦距，用 $f$ 表示。

此外，抛物线标准方程 $x^2=2py$ 或 $x^2=4fy$ 里的 $f$ 和 $p$，都是有确切的几何意义和物理意义的。$P$ 等于定点 $F$ 到准线 $L$ 的距离，也等于 2 倍的焦距。同样，$f$ 等于焦距，也等于定点到准线距离的 1/2。

要注意抛物线聚焦是有条件的：①要求是平行光线；②阳光要以与对称轴平行的方向射入。如果偏离轴线，焦点就会发散。若偏离很大，就会完全聚不成焦。

### 7.2.3 聚光比

在太阳能研究中，聚光比是一个重要概念。

$$\text{聚光比}=\frac{\text{入射面积}}{\text{吸收面积}}$$

它反映了聚光器汇聚光线的能力。较大的聚光比表明聚光器能把阳光从一个较大面积的采光面上，汇聚到一个很小的吸热面上。聚光器的用途不一样，所要求的聚光比也不一样。大多数情况下，我们总希望聚光比大一些。因为聚光比越大，其吸收面积可以做得越小，所以热损失减少（一般讲，聚光比提高 $k$ 倍，能使热损失降至原来的 1/$k$），可提高热效率、提高温度、提高能量质量（即提高可用能的比率）。但是提高聚光比往往会要求有较复杂的制造工艺和精确的跟踪装置，这往往会增加系统的造价。我们的设计目标是以尽量少的费用来尽量提高聚光比。

聚光器的用途不同，所要求的聚光比也不同。80～150℃的热水，一般有 2～10 倍的聚光比即可；太阳灶则要求 100 倍以上的聚光比；而用于太阳能焊接机、高温炉的聚光比要求更高，甚至达 1 000 倍以上。

下边我们对各种抛物型聚光器的聚光比进行分析。

首先引入几个概念。

（1）张角：如图 7-6 所示，曲线 $AOB$ 是反射镜面，曲线 $AOB$ 对 $AB$ 的角是张角。

（2）口径：表示（反映了）收集面积，指 $AB$ 长。

（3）相对口径：即口径和焦距之比。

（4）太阳径角：太阳光线虽然可以近似看成平行光线，但严格地讲是不平行的。地面上任意一点接收到的太阳上各部分发出的光线是有一定角度的。其最大角度即太阳径角，如图 7-7 所示。其数值约等于 32 或 1/107 弧度。

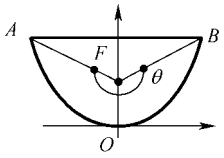



图 7-6　张角和口径

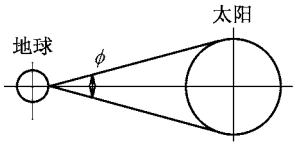



图 7-7　太阳径角

下面分析抛物柱面的聚光比。

抛物柱面反射镜在太阳能聚光器中得到了广泛的应用。因为它虽然不如旋转抛物面镜聚光度大（有时把聚光比也称聚光度），但与其他聚光器比较，仍具有较高的聚光度，且结构简单，可以单轴一维跟踪太阳（旋转抛物面必须双轴二维跟踪）。因此可以降低跟踪装置的费用，它可以为工业提供 100～300℃的集热温度。

下面分析一下抛物线的几何相似性。

在分析抛物线聚光比之前，先证明一下任意两条抛物线都是几何相似的。这个问题可以先从抛物线的标准方程来考虑。

设任意两条抛物线 $\begin{cases} x_1^2 = 4f_1y_1 & \text{(I)} \\ x_2^2 = 4f_2y_2 & \text{(II)} \end{cases}$

若变化抛物线的一个线度参量，例如给 $f_2$ 乘以常数 $k$，使 $kf_2=f_1$，则抛物线（II）变为

$$x_2{}^2=4（kf_1）y_1=4f_1y_2$$

变成和方程（I）完全一样。故两线相似。

所谓几何相似的意义是，对于任意两个张角相同的抛物线，其对应线度 $f$、$x$、$y$ 成比例。

对抛物柱镜来说，张角相同的镜面是几何相似的，因此对于任何几何光学现象也是相似的。也就是说，有相同的相对口径，在焦点处即有相同的聚光度（即聚光比，下同）。因而对抛物镜来说，张角是一个相似准则，聚光度和张角有直接关系。

若光线是绝对平行的，抛物镜是理想的镜面，则聚光度可以达到任意大。但实际上，由于太阳光不是绝对平行射来的，而是以张角 32′射来，因此随着反射点距焦点的距离增大，或反射光角度变化，则由于“径角”造成的焦面也将增大，从而使聚光度不能任意增大。

下面分几种情况进行分析。

（1）与抛物线光轴垂直且朝向镜面的焦平面的平均聚光比。

如图 7-8 所示，聚光比　$k=\dfrac{AB}{CD}$

因为径角 $\phi$ 很小，所以 $AC\approx AF$　$AD\approx AF$　$\angle ADC\approx 90^\circ-\theta$

$$\therefore CD=\frac{AF\cdot\sin\varphi}{\sin(90^\circ-\theta)}=\frac{AF\sin\varphi}{\cos\theta} \qquad (\mathrm{I})$$

$$AB=2AF\sin\theta \qquad (\mathrm{II})$$

$$\therefore k=\frac{AB}{CD}=\frac{\sin 2\theta}{\sin\phi} \qquad (\mathrm{III})$$

当 $\theta=45^\circ$ 时，$\sin2\theta=1$ 最大，$k=1/\sin\phi$ 。

又因为，当$\phi$很小时，$\sin\phi\approx\phi$，$\sin(1/107)\approx1/107$，

所以：$k=1/\sin\phi=107$

即当张角是 90° 时，抛物柱面有最大的聚光度 107。

（2）接收器是圆管时的聚光比。

设 $d$ 是管径，从图 7-9 可知：

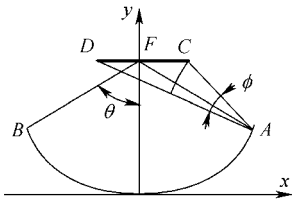



图 7-8 与抛物线光轴垂直日朝向镜面的焦平面的聚光比

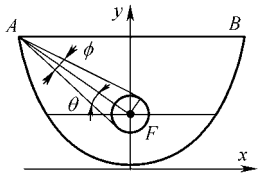



图 7-9 接收器是圆管时的聚光比

$$d=2AF\cdot\sin\frac{\phi}{2} \qquad AB=2AF\cdot\cos\theta$$

于是 $$k=\frac{AB}{\pi d}=\frac{2AF\cdot\cos\theta}{2\pi AF\cdot\sin\frac{\phi}{2}}=\frac{\cos\theta}{\pi\sin\frac{\phi}{2}}$$

当$\phi$很小时，$\sin\frac{\phi}{2}=\frac{\phi}{2}=\frac{1}{2\times107}$

所以，聚光度 $k$ 的极大值是当 $\theta=0$ 即张角为 180° 时，$k=\frac{2\times107}{\pi}\approx68$ 。

以上讲的是理想镜面情况。实际上反射镜总是有误差的。不过其聚光度和张角的关系与上述理想情况是一样的，只是把公式中的径角$\phi$改成“误差角”$\psi$（包含径角$\phi$的偏差）而已。

从上面的分析可以看出，抛物面具有良好的聚光性能，我们可以根据实际的需要选择不同的聚光比，制造出不同样式的聚光器。

## 7.3 其他几种几何形状的聚光分析

除去抛物线以外，还有一些几何形状也能以不同方式汇聚光线。下面进行分析介绍。

### 7.3.1　圆聚光分析

圆聚光如图 7-10 所示。

圆柱面能把平行光线汇聚到一个矩形面上，这个矩形面的宽是圆半径的一半，其位置在主光轴 *OD* 和圆柱轴线所形成的平面上。

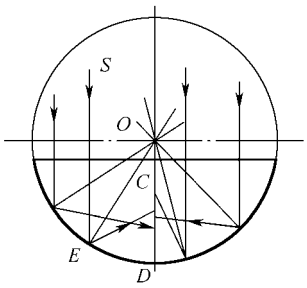


图 7-10　圆聚光分析

由图中可以看出，当阳光 *S* 接近主光轴 *OD* 投射时，*CE*≈*CD*。

因为 *CE*≈*OC*，所以 *CD*≈*OC*，即 *C* 是半径 *OD* 的中点。

当阳光远离 *OC* 投射时，反射光将射到 *CD* 上。

### 7.3.2　菲涅尔反射镜聚光（平板聚光器）

菲涅尔反射镜聚光如图 7-11 所示。

菲涅尔反射镜可以看成由一个共轴、共焦点但焦距不同的抛物线组，被一个垂直于主光轴的平面 *M* 所截取而得到的。

下面对其聚光情况进行分析。

如图 7-12 所示，*AB* 是微反射面（实际上为加工制作方便，*AB* 都是做成直线）。根据光的反射定律：

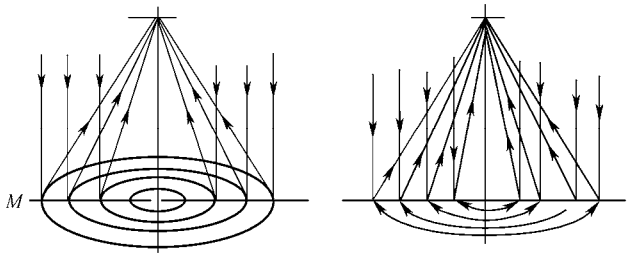


图 7-11　菲涅尔反射聚光示意图

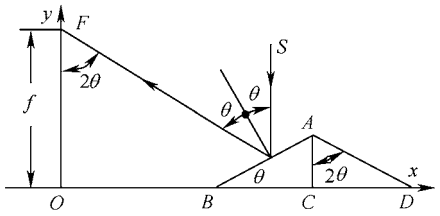


图 7-12　菲涅尔反射聚光分析

$$\tan 2\theta = x/f \qquad (\mathrm{I})$$

即可确定在任一位置微反射面 *AB* 的倾角。这里 *f* 是常数，是焦点 *F* 到平板的距离。

从图中可以看出，这种反射镜是有一定遮光现象的。在图 7-12 中，*CD* 是被遮蔽部分。

令　$\eta = \dfrac{CD}{BD}$，表示在 *BC* 处的遮光率。

由图可知，$BC = AC \cdot \cot\theta$　，$CD = AC \cdot \tan 2\theta$

$$\therefore \eta = \frac{AC \cdot \tan 2\theta}{AC \cdot \tan 2\theta + AC \cdot \cot\theta} = \frac{\tan 2\theta}{\tan 2\theta + \cot\theta}$$

通过计算可得遮光率：

$$\eta = \frac{-f + \sqrt{x^2 + f^2}}{\sqrt{x^2 + f^2}} = 1 - \frac{f}{\sqrt{x^2 + f^2}}$$

根据上式可以求出任意位置的遮光率。如，当 $x=f$ 时，$\eta\approx29\%$；$x=2f$ 时，$\eta\approx55\%$；$x=3f$ 时，$\eta\approx68\%$。可见，当 $x$ 增加时，遮光率迅速增大。故焦距 $f$ 和反射镜宽度之间应该有一定比例限度。一般以（$x/f$）的比值不超过 1 为好。表 7-1 所示为不同 $x$ 值的遮光率。

**表 7-1　　不同 $x$ 值的遮光率**

| | 柱　面 | | | | 圆　面 | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $x$ | 宽度 | 边缘遮光率 | 平均遮光率 | 遮光面积 | 直径 | 边缘遮光率 | 平均遮光率 |
| $x=f$ | $2f$ | 29% | 12% | $0.24f$ | $2f$ | 29% | 17.2% |
| $x=2f$ | $4f$ | 55% | 27.8% | $0.556f$ | $4f$ | 55% | 38.2% |
| $x=3f$ | $6f$ | 68% | 39.4% | $0.788f$ | $6f$ | 68% | 52% |

### 7.3.3　钻进去就出不来——渐开线聚光器

前面研究的各种形状的聚光器都有个条件，即阳光必须与聚光器的主光轴平行，因此在使用时需要连续地跟踪太阳。如果入射光线和主光轴不平行，就聚不成焦，甚至又把光线反射回空中去。下面我们研究另一种聚光器，它不需要跟踪太阳，不管光线从何方向、以任何角度投射到反射面上，反射光线将向聚光器中心射去，经一次或 $n$ 次反射，最终将投射到接收器上。只要“钻进去”，就决不再反射出来。这是一种什么形状呢？它是渐开线。

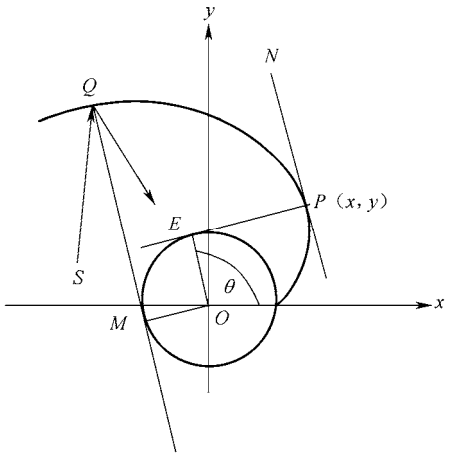


图 7-13　渐开线

#### 1．什么是渐开线

渐开线是指圆的渐开线，如图 7-13 所示。设有一弹性钢条绕在一个圆上，现渐渐放开钢条，钢条的端点所走的路径，我们就叫圆的渐开线。为研究其特性，我们首先导出其解析式。

设：$R$ 是圆的半径，$P$ 点是渐开线上的一点，$PN$ 是渐开线在 $P$ 点的切线，$\theta$ 是钢条弹到 $E$ 点时张开的弧度，显然 $PE$ 是圆在 $E$ 点的切线，则：$PE=R\theta$

因此有：

$$y=R\theta\cdot\sin\left(\theta-\pi/2\right)+R\cdot\sin\theta=R\cdot\left(\sin\theta-\theta\cdot\cos\theta\right)\qquad(\mathrm{I})$$

$$x=R\theta\cdot\cos\left(\theta-\pi/2\right)+R\cdot R\cos\theta=R\cdot\left(\theta\cdot\sin\theta+\cos\theta\right)\qquad(\mathrm{II})$$

从渐开线的定义就可以看出，圆的渐开线有一条重要性质：

渐开线上任意一点 $P$ 的法线是过该点到圆的切线 $PE$（$E$ 是圆上的切点）。

从图中可以看出，$PE$ 正是从圆上伸开的钢条所在的直线。

这是渐开线很重要的一条性质，在太阳能聚光器的设计中有重要应用价值。

我们很容易证明这条性质，且要记住结论。

证明：先计算 $P$ 点处，渐开线切线的斜率 $k$

由（I）得　$\dfrac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}\theta}=R\theta\cdot\sin\theta$

由（II）得　$\dfrac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}\theta}=R\theta\cdot\cos\theta$

$$k_1=y'=\frac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}x}=\frac{\dfrac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}\theta}}{\dfrac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}\theta}}=\frac{R\theta\cdot\sin\theta}{R\theta\cdot\cos\theta}=\tan\theta$$

而切线 $PE$ 的斜率是：$k_2=\tan(\theta-90^\circ)=-\cot\theta$

$\therefore k_1k_2=\tan\theta\cdot(-\cot\theta)=-1$

即 $PE$ 与 $PN$ 垂直，所以说 $PE$ 是渐开线在 $P$ 点的法线。

现假设任一条光线 $S$ 投射到渐开线的 $Q$ 点，作法线 $QM$，$QM$ 必是圆的切线。反射光线必然在法线的另一侧，即光线向内部反射去。经过一次或 $N$ 次这样的反射，最终必射到圆上。我们把圆管作为吸热器，放在这个位置，就可把光辐射能吸收起来。

从以上分析可以看出，渐开线镜面的最大优点是，不管什么方向的光线，只要射入镜面开口，都能最终汇聚到圆上，完全不需要跟踪！但遗憾的是，它汇聚光线的倍数太小了，单独用它做聚光器还不适宜。

### 2．渐开线柱面的聚光度

根据前面分析的渐开线的特性，显然当出现如图 7-14 所示的情况时，有最大聚光度。此时，开口 $AB=2\pi R$。

圆管的周长 $L=2\pi R$，聚光度 $k=AB/L=1$，也就是说，好像没有一点聚光作用！

但是实际上还是有聚光作用的，因为对于普通非聚光真空管集热器，每个管的截光面积仅等于 $2R$，其聚光度 $k=AB/2R=2\pi R/2R=\pi$。

也就是说与常规非聚光真空管集热器相比，其聚光倍数可达 3.14 倍，而且不需要任何跟踪装置，这应该是个不太小的聚光倍数，这种聚光器在太阳能利用中占有重要位置。下边简略介绍一下它的应用。

首先，采用这种结构可把阳光聚集在一个圆的范围内，这为我们合理利用光能提供了方便。下边先就两个例子来谈。

如图 7-15 所示，假设我们用扁盒式集热器来吸收 $AB$ 处的光线，扁盒一定要有上下两个壁面。上壁面等于圆管周长 $2\pi R$，下壁面尽管可以采取较好的保温措施，但也是会有热损失的，也就是说，收集同样的光能，扁盒式热损大。

再如，对于真空玻璃管集热器来说，如图 7-16 所示，现在一般采用排管式，管间距约等于 $1.5D\sim2D$（$D$ 是吸热管外径）。这种排管结构，有相当一部分阳光没有射到管上而损失掉了，特别是在中午，几乎有一半的光线漏掉。

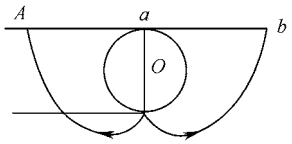



图 7-14 渐开线的聚光度

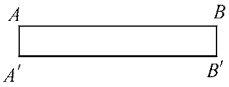



图 7-15 扁盒式集热器

若我们采用渐开线反射镜—管式结构，如图 7-17 所示，就可以把漏光损失减到最小，大大提高了热效率，并可以节省 1/3 的真空管。当然，这要增加曲面反射面的制造费用。但一般制曲面反射面要比真空管制作容易，费用低。

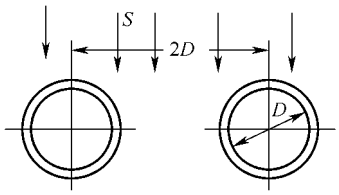



图 7-16 排管式集热器

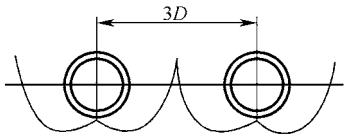



图 7-17 渐开线管式集热器

如果我们把这种渐开线镜面和其他形状的反射面组合起来，还会得到其他形式的具有许多优点的集热器。

## 7.4 CPC 复合抛物面聚光集热器

聚焦式集热器虽然能汇聚阳光，获得高温，但一般都需要较复杂的跟踪装置，这会大大提高整个系统的造价，且一般只能利用阳光中的直射部分，对散射光不能利用。这就限制了它在某些方面的应用。

本节将讨论研究一种复合抛物面聚光集热器，简称 CPC。它不需要连续地跟踪太阳，只需要季节性或间断地调整倾角即可，是一种半固定式的聚光器。它虽然不能把阳光汇聚成一条线或一个点，但也有一定的聚光度，既可利用直射光，也可利用部分散射光，无论在夏季还是冬季，都可以使用。它可以获得较高的温度，可制取热水、开水、蒸汽、热空气等，可以为工业或生活提供 80～200℃的热能供应，因此越来越受到国内外的重视。

### 7.4.1 结构原理

如图 7-18 所示，对于半条抛物线来说，当阳光沿平行于 $y$ 轴的方向 $SP$ 入射时，经反射必汇聚于焦点 $F$。图中，$PN$ 是法线。

当阳光向靠近抛物线 $OM$ 的一侧移动一个角度，即入射角增大，沿 $S'P$ 方向入射时，反射角也将增大，阳光将沿 $PE$ 反射，$E$ 在 $F$ 的下方。这时若在焦距 $OF$ 处置一吸热板，则反射光线将被吸热板所吸收。

根据以上原理，我们设计如下结构的反射面，如图 7-19 所示，*PD* 和 *QC* 分别是抛物线 *PC*（弧）和 *QD*（弧）的主轴线，两轴夹角是 $2\theta$，*QOP*（弧）是以 *F* 为圆心、*FP* 为半径的圆弧。当阳光沿 *DP* 方向射到 *PC* 上时，经反射可以汇聚到 *F* 点。随着光线向 *CQ* 方向移动，根据图 7-18 所示的原理，光线被 *PC* 弧反射后将汇聚于 *PF* 部位，且最终将穿过 *PF* 投射到 *OF* 部位。在 *OF* 处置一吸热板，则阳光将最终被吸热板吸收。

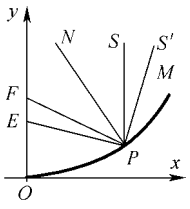



图 7-18　半条抛物线

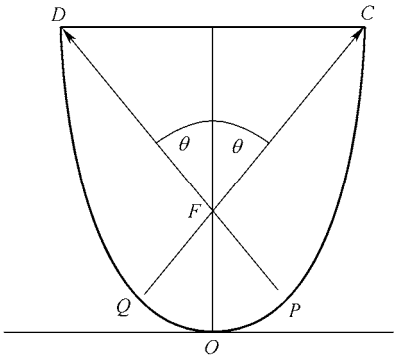



图 7-19　复合抛物面聚光集热器

至于投射到圆弧 QOP 上的光线，我们也可证明能够反射到 *OF* 上。如图 7-20 所示，*F* 是焦点，*QOP* 是圆弧，光线沿 *SN* 方向射到 *N* 点上，*FN* 是法线，则反射光线必落在 *OF* 上。

用同样方法可以证明，左侧与此相同。即在图 7-19 中，光线从 *CQ* 方向向 *PD* 方向转移时，反射光仍然可以被 *OF* 吸收。若阳光从 *DP* 方向开始再向左下偏转时（或从 *QC* 方向向右下偏转），经 *PC* 弧或 *QD* 弧的反射光线将不能汇聚于 *OF* 处。故我们把 *PD* 和 *QC* 叫做阴影线。从以上分析可知，阳光入射方向在∠*DFC* 范围内变化时，聚光器 *DQOPC* 不需要跟踪也能汇聚光线。

为了改善复合抛物面聚光器的性能，我们可以把图 7-19 中的 *QOP* 圆弧改为渐开线，如图 7-21 所示，*QOP* 段为两段渐开线，吸热器为圆管，一般采用玻璃真空集热管。

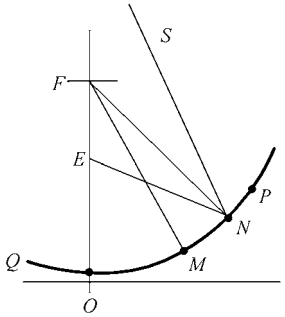



图 7-20　复合抛物面聚光集热器右半部分圆弧

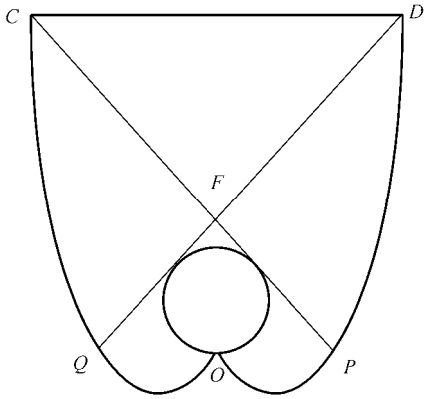



图 7-21　与渐开线组合的 CPC 聚光器

### 7.4.2 收集角和聚光比

从上面的分析可以看出，这种聚光器并不要求精确地跟踪阳光。当光线方向在 *DP* 和 *CQ* 两线之间变化时，反射光线都能被汇聚于 *OF* 处。∠*DFC* 反映了该聚光器收集阳光角度的范围，这个角称为收集角。$\theta$ 角为收集角的一半，称为半收集角。

图中 *CD* 反映了收集器的最大吸收面积，称为孔径面积。*OF* 反映了热吸收器的面积。因该类型吸收器为 *OF* 两侧吸收，故用 2*OF* 表示吸收面积。

聚光比反映了聚光器对阳光的汇聚能力。在这里将聚光比定义为孔径面积与吸收面积之比，即：

$$\text{聚光比 } k=\frac{\text{孔径面积}}{\text{吸收面积}}=\frac{CD}{2\cdot OF}$$

收集角是这类聚光器的最重要参数，它决定了聚光比和收集时间。

通过数学推导（具体推导过程因较复杂，这里不再详述），可以得出两个重要的关系式：

最大聚光比：$k=\dfrac{1}{\sin\theta}$

聚光器槽深：$H=f(1+\cos\theta/\sin^2\theta)$

从以上分析可以得出结论：这种聚光器的聚光比是由收集角决定的。为了提高聚光比，就必须减小收集角。

从聚光器槽深公式可以看出，当 $\theta$ 比较小时，$\cos\theta$ 与 $\sin^2\theta$ 的比值是一个较大的数，所以 *H* 的数值将很大。也就是说，这种收集器将是一个很深的槽，这将耗用大量的反射镜面，不仅笨重，还会大大提高造价。在实际应用时，我们将只截用靠底部的一部分，并且将采用一些组合曲面的办法，以尽量扩大其接收口径宽度，提高其性价比。

图 7-21 所示的与渐开线组合的复合抛物面聚光器，当截短聚光器槽深时，将有较大的开口孔径，是一种常用的 CPC 聚光器。

### 7.4.3 收集角和日收集时间

我们研究和采用复合抛物面聚光器，就是为了在一天内不用跟踪阳光而能达到聚集光能的目的。但从前面的分析已经可以看出，并不是任意方向的阳光都能被汇聚，而是有一定角度范围的。也就是说，收集角和收集时间是有一定关系的。我们的目的是每日内要尽可能多地收集太阳光能，故有必要分析研究一下收集角和收集时间的关系。下面从聚光器的两种放置方向考虑。

#### 1．聚光器南北方向倾斜放置

将聚光器南北方向倾斜放置，如图 7-22 所示。

在两分日，调节倾角使其和地面的倾角等于当地的地理纬度，这时，太阳将在与收集器轴线垂直的平面上作圆周运动，其角速度是 15°/h。即使收集器的收集角设计为 60°，则收集时间为 $t=60°/15°=4$h，

聚光比 $$k=\frac{1}{\sin\theta}=\frac{1}{\sin\frac{60^\circ}{2}}=2$$

每日收集时间只有 4h，太短。而聚光比也很小，只有 2 倍。若再增加收集角，其聚光比就更小了。在其他日子里，其数值稍有不同，但大致情况基本相同。所以一般不采用这种放置方法。

### 2．聚光器东西放置

将聚光器东西放置，如图 7-23 所示。

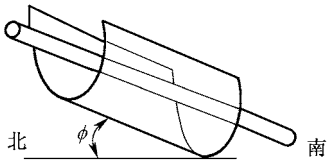



图 7-22　聚光器南北方向倾斜放置

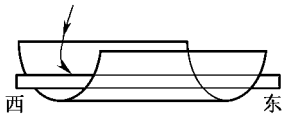



图 7-23　聚光器东西放置

当光线从侧上方斜射下来时，反射后向斜下方射到吸热管上。

两分日时，由于集热管位于太阳轨道的圆心，这时我们调整集热器接收孔径平面，使其面对太阳，即与地面交角等于当地地理纬度，这时相对于集热器，太阳只作由东向西的转动。显然，不管其收集角大小，整个白天都可以收集到阳光。而在其他日子里，由太阳的视运动规律可知，集热器位于由太阳轨道和集热器所形成的圆锥的顶点上。这时，相对于集热器，太阳不仅有从东到西的转动，而且有（南北）上下的偏移。当偏移角度达到一定数值，阳光就反射不到吸收板上了。

在两至日时，收集时间最短。下面进行具体分析。

首先建立天球坐标系，如图 7-24 所示，球半径为任意长。

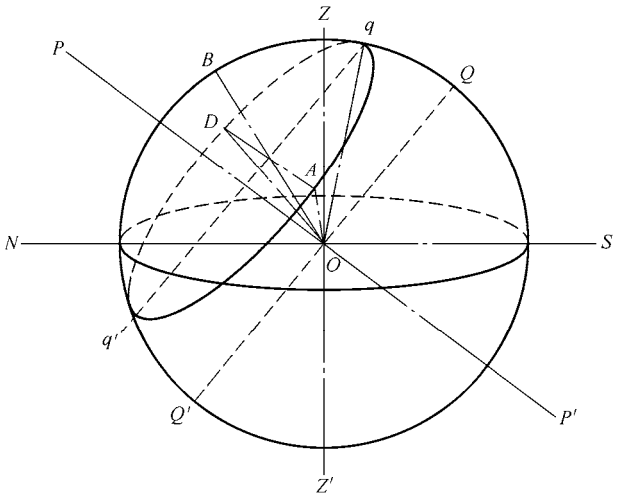



图 7-24　东西放置的复合抛物面聚光器的收集时间

$S$ 是南，$N$ 是北，$SN$ 是真地平面，$PP'$ 是天轴，$PN_{弧}=\phi$，$\phi$是当地地理纬度，$QQ'$ 是天

赤道，$Z$ 是天顶，$qq'$是当日太阳视运动轨道。弧 $Qq=\delta$（当时太阳赤纬），$qB_{弧}=2\theta$（集热器收集角），$OB$ 是下阴影线，$Oq$ 是上阴影线。平面 $AOD$ 是下阴影面，$A$ 点、$D$ 点是下阴影面与太阳轨道的两交点，$AD$ 是下阴影面与太阳轨道平面的交线。正中午，阳光沿 $Oq$ 方向射入收集器，中午前后（从图中可以看出），即在 $qA$ 弧和 $qD$ 弧之间，阳光在两个阴影线之间投射进来，能被集热器吸收。

当太阳运行到 $A$ 点时，阳光沿阴影面上的直线 $AO$ 射入集热器，再向下运行时，阳光就被阴影面遮住，即使射进去也不能汇聚到吸热器上。

同样，当太阳运行到 $D$ 点时，阳光沿阴影面上的直线 $DO$ 射入集热器。而在 $D$ 点前运行时，阳光就被阴影面遮住，即使射进去也不能汇聚到吸热管上。

从上面的分析可以看出，除去两分日我们正处于太阳轨道的圆心可以整天接收阳光外，其他日期，聚光器位置就离开了太阳轨道的圆心，所能接受的阳光都受聚光器上下（南北）方向的张角（收集角）限制，每天的收集时间与聚光器收集角、太阳赤纬角都有关系。

一般来说，当赤纬角 $\delta$ 给定时（即日期确定时），收集角 $2\theta$ 越大，收集时间越长，但相应的聚光比越小；反之，收集角越小，收集时间越长，聚光比越大。

当 $\delta=0$ 时，即是两分日，收集时间是 12h。

当收集角确定之后，赤纬角越小，收集时间越长。

由于具体计算公式较复杂，这里不再给出。表 7-2 列出了在不同时间、不同半收集角、不同赤纬角下的聚光比。

**表 7-2　　半收集角 $\theta$、赤纬角 $\delta$ 与收集时间 $T$、聚光比 $k$ 的关系**

| $\delta$ / $T$（小时） / $\theta$ | 赤纬角 $\delta$ | | | | | | 聚光比 $k$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 23.5° | 20° | 15° | 10° | 5° | 0° | |
| 10° | 8.37 | 8.57 | 9 | 9.63 | 10.56 | 12 | 5.75 |
| 8° | 7.76 | 8 | 8.47 | 9.17 | 10.24 | 12 | 7.18 |
| 7° | 7.41 | 7.64 | 8.15 | 8.9 | 10.07 | 12 | 8.2 |
| 6° | 7 | 7.24 | 7.77 | 8.55 | 9.79 | 12 | 9.6 |
| 5° | 6.54 | 6.8 | 7.32 | 8.13 | 9.47 | 12 | 11.4 |
| 4° | 5.99 | 6.24 | 6.79 | 7.63 | 9.05 | 12 | 14.3 |

### 7.4.4　聚光器安装倾角的确定和调节

对于聚光器来说，一般我们总是希望尽量采用较大的聚光比，以提高集热温度，提高能量品位，降低吸收器面积，降低成本。但是，从聚光比 $k=1/\sin\theta$ 可以知，聚光比是由收集角确定的，要提高聚光比就要减小收集角。从表 7-2 可以看出，当半收集角 $\theta$ 是 10° 时，聚光比只有 5 倍左右。从太阳的视运动规律我们知道，一年中太阳赤纬角变化约 47°，要想东西

放置的复合抛物面聚光器一年中固定不动，不用调整倾角，则其收集角至少应在 50°，这时其聚光比 $k$ 为：

$$k=1/\sin 25^\circ \approx 2.4$$

聚光比很小，应用价值有限。要解决这一问题，就需要使聚光器的南向倾角可以作定期的调整，以最大限度地减少赤纬角对聚光的影响。

聚光比和每天太阳辐射能的收集时间是最终决定聚光集热器性能的主要参数。我们当然希望聚光比尽量大些，收集时间尽量长些。但这两项指标往往是相互矛盾的，而且受赤纬角和收集角两个因素的制约，因此仔细考虑这 4 个因素，以求得最优化的设计，取得最好的系统效果是最重要的。

赤纬角一年的变化量是 47°，若分成 5 个时段，每段平均近 10°，再加上一天内赤纬角对聚光器聚光的影响，则聚光器的收集角至少要大于 10°。

表 7-2 所列的收集时间是按每天调整一次聚光器倾角，使聚光器对准当天的太阳来计算出来的。假设我们设计一年中仅调整 5 次倾角，且保证达到表中所列的收集时间，则聚光器的设计收集角应该在表中所对应的收集角的基础上再加上 10°，相应的聚光器实际的聚光比要比表中所列的数值小得多，其具体数值仍按公式 $k=1/\sin\theta$ 计算。

## 7.5　一种高使用价值的聚光器——单抛物柱面聚光集热器（SPC）

### 7.5.1　单抛物面 SPC 和复合抛物面 CPC

从上节的论述中我们知道，复合抛物面（CPC）聚光器是一种槽型聚光器，当设计的收集角比较小时，可以在不连续跟踪的情况下，实现几倍、十几倍甚至更高的聚光比，可以得到几百摄氏度的集热温度。但是我们也看到，其槽型反射面的深度较大，这一方面会大大提高其制作费用，另一方面裸露在大气环境的聚光器，要常年经受风雨沙尘侵蚀，太深的反射槽会给反射面的清洗带来困难。所有这些因素都影响了这种聚光器的推广使用。CPC 聚光器从提出到实验研究已过了三四十年，虽然不断有些实验装置的报道出现，但至今未能大量推广应用，存在上述问题可能是重要因素。

为了克服复合抛物面聚光器的上述缺点，本小节介绍一种单抛物柱面聚光器（SPC）。

图 7-25 所示是复合抛物柱面聚光器（CPC）和单抛物柱面聚光器（SPC）对比示意图。图中两个聚光器的张口相等，即 $AB$ 等于 $CD$，但是，反射面 $AOB$ 比反射面 $CO'D$ 大得多。

单抛物面的主要缺点是它的聚光比与 CPC 相比要小些，尤其在不跟踪的情况下，很难实现大的聚光比，故其集热温度要低些。但是在不要求高的集热温度，只需低聚光比的条件下，其结构要简单，成本要低得多。

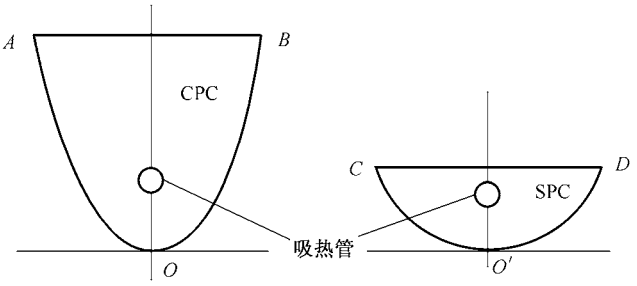



图 7-25 SPC 和 CPC 对比

对于真空管集热器而言，在没有聚光的条件下，也能取得几十摄氏度甚至更高的集热温度，而采用单抛物面聚光器，即使只有 3～4 倍的低倍聚光比，也提高了几倍的集热温度，因此采用低聚光比的单抛物面聚光器就可以大大提高系统的集热性能。

与复合抛物面相比，单抛物面聚光集热器不仅结构简单，制作成本低，而且还有安装容易，便于维护的特点，这为其大面积推广提供了可能。

### 7.5.2 聚光原理 聚光比

单抛物住面聚光器的聚光原理如图 7-26 所示。真空玻璃管集热元件放置在抛物柱面的焦线 *F* 处，玻璃管的轴心与焦线 *F* 重合。*PC* 与抛物面的主光轴平行，沿 *PC* 方向投射来的光线经 *C* 点反射面的反射，会汇聚到焦点 *F* 上。当光线偏离 *PC* 方向沿 *AC* 方向投射到 *C* 点时，经反射仍能沿 *CA′* 方向汇聚到真空玻璃管上。

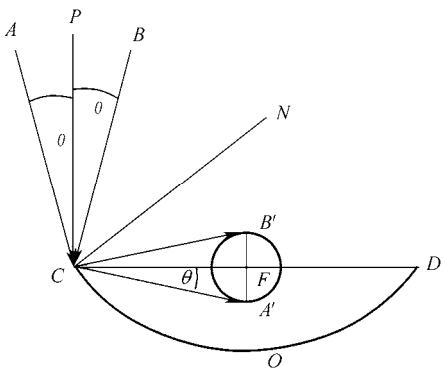



图 7-26 单抛物柱面聚光器的聚光原理

从图中可以看出，只要光线沿∠*ACB* 的范围内投射到 *C* 点，其反射光线都能汇聚到真空玻璃管上。在这里，∠*ACB* 可以看成是收集角，*θ* 是半收集角。

很显然，反射面 *COD* 上任一点都具有与 *C* 点同样的性质，即沿收集角 2*θ* 内投射到 *COD* 上任一点的太阳光经反射都能汇聚到真空玻璃管上。

普通真空玻璃管集热器截光面积等于其直径 *A′B′*，聚光器的截光面积为 *CD*，所以聚光器的聚光比 *k* 为：

$$k=CD/A'B'$$

很容易证明，$k=CD/A'B'=1/\sin\theta$

可见这里的各个参数和公式与复合抛物面的情况基本一样。

### 7.5.3 收集时间

与复合抛物面的情况一样，这种固定式或半固定式抛物柱面聚光器在使用时也应东西放置，

其张口平面与地面的交角也与复合抛物面相同。其收集时间也与半收集角 $\theta$、赤纬角 $\delta$、时角 $\Psi$ 等有关，可参阅 7.4。固定式聚光器实物如图 7-27 所示。

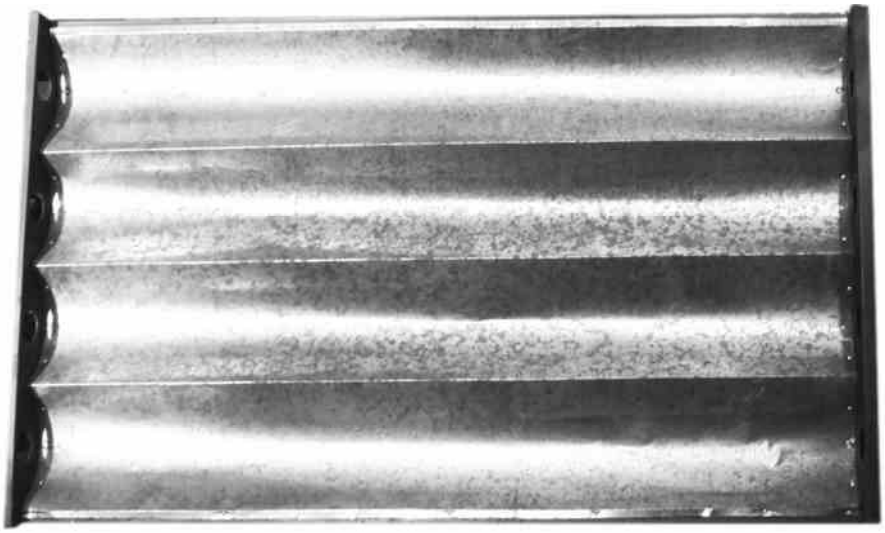


图 7-27　固定式聚光器

收集时间也是这种固定式或半固定式聚光器的重要参数，一般来说要保证每天有不低于 6h 的收集时间。我们总希望有尽量大的聚光比，总希望有尽量多的收集时间，但收集时间与聚光比又往往是相互矛盾的，太大的聚光比往往会使收集时间变短，因此我们要权衡利弊综合考虑，以求得系统效率最大。

### 7.5.4　固定式采暖用槽式聚光器

#### 1．结构特点、设计参数

中国农村能源行业协会太阳能综合利用协调组组织有关专家研制成功专门用于太阳能采暖的固定式槽形聚光器，通过试验和试点示范，效果良好。这种聚光器采用单抛物柱面聚光器，其聚光原理和模块结构分别如图 7-28 和图 7-29 所示。

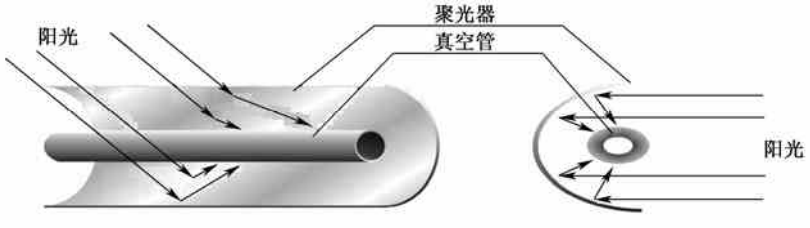



图 7-28　聚光型真空管集热器聚光原理图

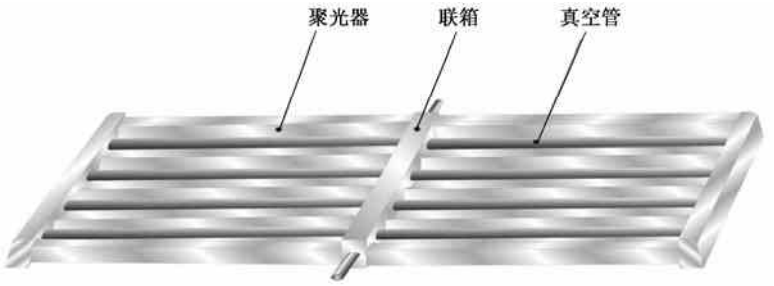



图 7-29 聚光型真空管集热器模块结构

每个聚光器由 4 个连在一起的单抛物柱面组成，两个聚光器和一个联箱组成一个模块，8 根真空管分别设置于每个抛物柱面的焦线上。整个模块朝南向东西放置，与地面倾角 $\Psi=\Phi+16°$（式中 $\Phi$ 是当地地理纬度），参看图 7-30。

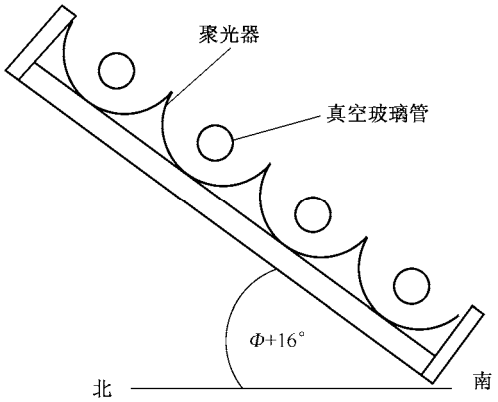



图 7-30 固定式聚光集热器模块的安装角度

聚光型集热器的设计参数如下。

收集角：$2\theta=24°$

聚光比：$k=4$

收集时间：每天 6h（不同日期收集时间不同）

使用时间：整个采暖期。

### 2. 经济技术优势

固定式聚光型真空管集热系统已在多个试点试用，效果良好。实验表明，与普通集热系统相比，这种采暖系统有以下优点。

（1）高效率、高能量品位。

由于采用聚光技术，提高了 3～4 倍的太阳辐射能密度，减少了集热管的散热面积 ，因此减少了热损失，大大提高了集热温度，提高了能量的品位，很容易达到七八十摄氏度甚至超过 100 摄氏度的集热温度，既可用于采暖，也可用于其他生产领域的中温太阳能热利用。

（2）降低了系统成本。

该系统所用真空集热管数量和储热水箱容积，都只有同面积的普通非聚光真空管集热系统的 1/3，其系统造价较低，只有非聚光系统的 70%～80%。

（3）适应性强，用途广。

采用普通非聚光的真空管集热系统，由于其在冬季集热效率和集热温度都较低，故只能应用于供热温度较低的地板辐射供暖系统中，一般不能用于普通的地上散热片系统。而聚光型真空管集热系统，由于其集热温度高，在冬季也很容易达到 60～70℃，甚至可升至更高温度，因此，既可用于地板辐射采暖，也可用于普通散热片采暖；既可用于新采暖系统的建造，又可用于旧的散热片采暖系统的改造；还可用于其他较高温的热利用方面，如开水器、蒸汽发生器等。

另外采用地下储能系统需要多次换热，这需要提高集热温度以提高换热效率。但平板型集热器在高集热温度下集热效率较低，故地下储能系统适宜采用集热温度较高的聚光型集热器。

（4）缓解了夏季产生大量热能无法利用、反而造成危害的难题。

普通非聚光的真空管集热系统，为了满足冬季供暖的能量需求，需要的集热器采光面积较大，但这么大面积的集热器到夏季不需要供暖时，由于环境温度高，便会产生更大量的热能。但此时已不需要供暖，而且对这么大量热量目前尚还没有可靠的技术对其进行其他方面的利用，也难以处理掉。但若不处理，不仅是能量的大量浪费，而且其高温热能还可能会对系统造成危害。这点也是制约太阳能采暖事业发展的一个重要因素。

在聚光型真空管集热系统中，聚光器只在冬季聚光，在夏季，由于太阳赤纬的变化，就不再产生聚光效果，故其夏季的采光面积只有冬季的 1/3，其产热量也只有冬季的 1/3。这 1/3 的热量可用来满足洗浴、做饭、烧水等生活用热能，从而大大缓解了上述普通非聚光真空管集热系统在夏季产生大量的热能、而又无法处理的难题，而且使我们可采用小储热水箱的设计。聚光型真空管集热器的实际应用如图 7-31、图 7-32 所示。

普通密排真空管与聚光型真空管集热器的采暖性能对比如表 7-3 所示。

**表 7-3　　普通密排真空管型与聚光型真空管集热器的采暖性能对比**

| 项　　目 | 普通密排真空管集热器 | 聚光型真空管集热器 |
|---|---|---|
| 聚光性能 | 无 | 有，3～4 倍 |
| 集热温度<br>能量品位 | 低，冬季一般 40～50℃ | 高，60～70℃，可达 100℃产生蒸汽 |
| 真空管需要量 | 多，3 倍于聚光型 | 少，只需普通型的 1/3 |
| 储水箱 | 大，3 倍于聚光型 | 小，只有普通型的 1/3 |
| 适应性（应用范围） | 适应性差，只能用于地板采暖 | 适应性强，不仅用于地板采暖，还可用于散热片采暖 |
| 成本 | 高 | 较低，降低 30%～40% |
| 夏季的集热特性 | 夏季产热量大，用不完，难处理 | 夏季只有冬季采光面积的 1/3，产热和用热相匹配 |



图 7-31　安装在家庭房屋上的采暖用聚光型真空管集热器阵列



图 7-32　某别墅的采暖用聚光型真空管集热器阵列

### 3．聚光器的制作

对于固定式聚光器，可以用金属薄板制作其反射面底壳，也可用玻璃钢制作，甚至可以用水泥混凝土与房屋建筑一起建造，实现与建筑一体化，大大降低总系统成本。

利用模具制作玻璃钢或水泥混凝土聚光器，工艺简单，成本低。

利用镀锌板、彩钢板或不锈钢板等金属薄板可制作聚光器的反射面底壳。

反光材料可采用镀铝聚酯薄膜，也可采用抛光镜面铝板。目前常用的反光材料有普通玻璃镜片、高纯度铝阳极氧化反光材料（抛光镜面铝板）和聚酯膜真空镀铝反光材料 3 种。

（1）普通玻璃镜片。

一般的普通镀铝玻璃镜片，厚 1.5～3mm，其优点是耐磨性好、光洁度高、价格便宜、易切割加工、购买方便，寿命较长，一般可达 6～7 年（如果维护得好，寿命还可提高到 10

年以上）。缺点是反光率不高（一般小于 0.75），质量较大，粘贴比较麻烦，尤其镜片间的缝隙不易粘牢，雨水进入会造成反光层脱落，影响使用。

为改进此缺陷，可用大块曲面镜代替多块镜片，国外已有 2m 长的抛物柱面镜，其反射率高达 0.90 以上，已在太阳能热力发电站中应用。但若用在普通家庭采暖，价格较高。

（2）高纯度铝阳极氧化反光材料。

可以选用高纯度铝板进行抛光和阳极处理等工艺制成。

目前国内有高反射率的镜面铝板出售，其总反射率可达 88%以上，性能优良，但价格较高。

（3）聚酯薄膜真空镀铝反光材料。

这是目前应用最广、性能优良、价格低廉的反光材料。

利用聚酯薄膜做基材，采用高真空沉积技术，将高纯度铝沉积在基材上，然后涂覆有机硅材料的保护层，在薄膜背面涂上压敏胶。该材料具有较高的镜面反射率（一般为 0.80～0.90），厚度极薄，便于剪贴，机械强度大，使用方便，价格便宜。使用寿命一般为 5～6 年，但如果维护得好，可延长使用寿命。必要时可几年更换一次反光材料。

#### 4．聚光型集热器的缺点和注意事项

（1）与非聚光的密排型真空管集热器相比，聚光型集热器可以提高集热温度，提高能量品位，但不一定能提高热效率。两者的综合热效率大体相等。

因为密排管集热器总存在管子之间的间隙，存在漏光现象，故截光率一般只有 80%左右；而聚光器的截光率，虽然可接近 100%，但存在一个反射率问题，一般聚酯薄膜反光材料的反射率也在 80%左右，两者相抵，它们的光效率大体相等。

密排管集热器能吸收天空的所有散射光线，聚光器只能接收在收集角内投射来的散射光线，在这方面密排管集热器有优势；但另一方面，同样的集热面积，聚光器的真空管用量只有密排管集热器所用真空管数量的 1/3，故聚光型集热器的散热面积小，两种因素相抵，其综合效果也大体相当。

（2）灰尘的沉积对各种集热器都有不利影响，但对聚光集热器影响更明显，因此，对聚光器应定期清扫灰尘，一般一个采暖期要清扫 2～3 次。为防止清扫时对反射面造成伤害，可用鸡毛掸或软布轻轻清扫，有条件的最好用水冲洗。

（3）由于聚光集热器单根管接收的能量比普通密排管多 3 倍，故其集热温度高，尤其是当玻璃管内缺水空晒时，温度上升更快，因此，要严防玻璃管内缺水，否则更容易造成炸管故障。

（4）使用几年后，可能会出现有的反光面脱落、变色等现象，要及时对损坏的反光材料进行修补。

### 7.5.5　半固定式槽型聚光器（可调倾角）

#### 1．设计原理

为了使聚光集热器能全年使用，可制成南向倾角可调整的半固定槽形聚光器，如图 7-33

所示。对这种聚光器，一年中要调整几次聚光器张口平面与地面的倾角，以保证太阳光全年都能汇集在玻璃管上。

支撑聚光器的支架平面与地面交角等于当地的地理纬度 $\Phi$，真空管固定在支架平面上，聚光器可绕真空管旋转，并被固定在设定的角度上。图 7-33 的上图表示冬季聚光器张口平面与支架平面的交角等于冬季的赤纬角 $\delta$，下图表示夏季聚光器张口平面与支架平面的交角等于夏季的赤纬角 $\delta$。

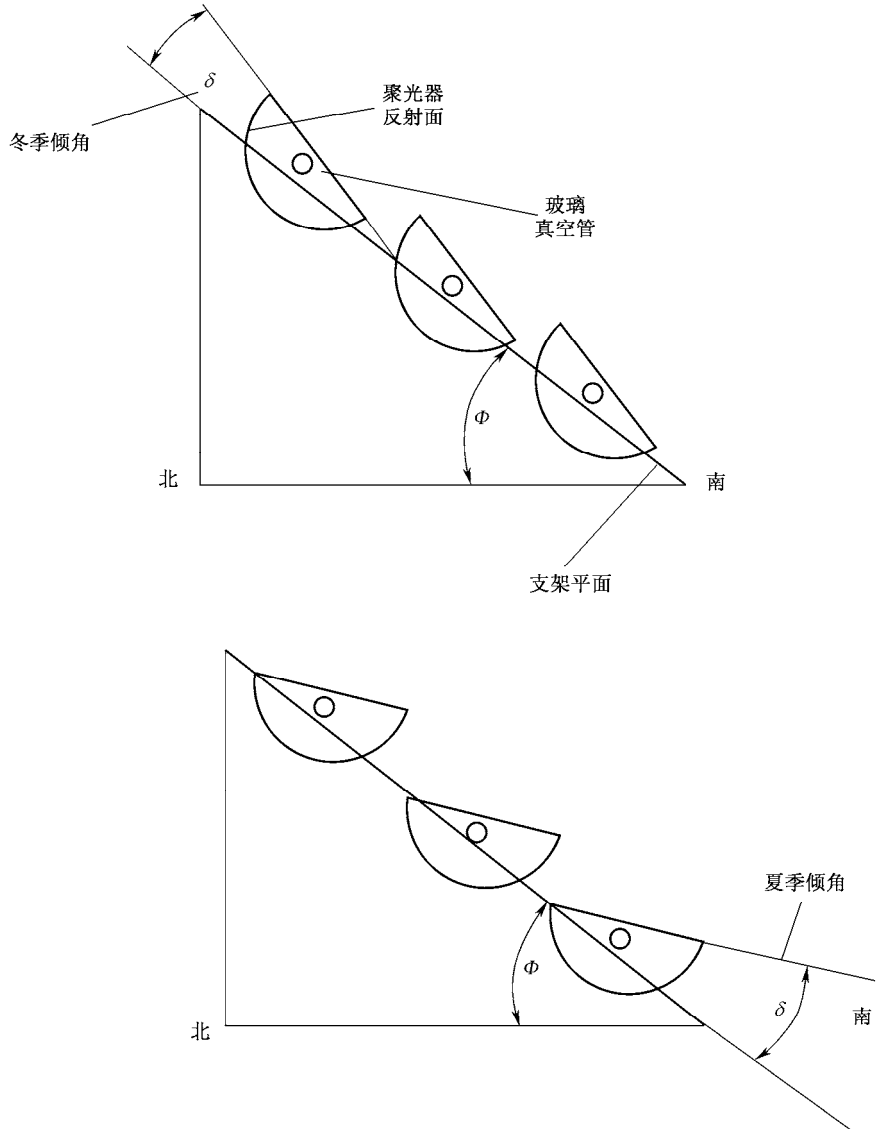



图 7-33 可调倾角的半固定槽形聚光器

对于这种聚光器，我们总希望有较大的聚光比和较少的调整次数，并保有足够的收集时间，但这些参数往往是互相矛盾、相互制约的，因此需要我们仔细分析，兼顾各个因素，找出综合性能较佳的系统参数。

先分析半收集角 $\theta$。

从冬至到夏至，赤纬角变化总量约是 23.5°+23.5°=47°，若我们把它分成 5 个区段，则有：47°÷5≈10°。若想在每特定个区段里聚光器固定不动，则聚光器的收集角至少不应小于 10°，因为这只是考虑到正中午太阳的光辐射，在实际上还应考虑到上午和下午太阳高度角较低的情况，为保证每天不少于 6h 的收集时间，聚光器的收集角至少应再加 4° 成为 14°。若收集角定为 14°，半收集角 $\theta$ 为 7°，则聚光比 $k$ 为：

$$k=1/\sin\theta=1/\sin 7^\circ \approx 8$$

这就是说，若我们把一年中的赤纬角的变化分为 5 个区段来调节聚光器的倾角，在保证每天收集时间不少于 6h 的情况下，聚光倍数可以达到 8 倍。

当然我们可以把赤纬角的变化分成更多的区段，从而实现更大的聚光比，但付出的代价是要调整更多的次数。我们可以根据不同的用途、不同的使用条件来确定不同的聚光比和不同的调节次数。

对于玻璃真空管集热元件，七八倍的聚光比已是一个不太小的聚光倍数，它可以很容易获得 100 多摄氏度甚至二三百摄氏度的高温，足以满足一般太阳能热利用工程的使用。太高的聚光比有时还容易对真空管造成伤害。

如果是建筑在屋顶的户用工程，调整次数太多会造成管理上的难题，故一般设计聚光比要小些，调整次数要少些；而有专人管理的集体工程，则可以设计较大的聚光比和较多的调整次数。

#### 2．聚光器的制造

其制造工艺与固定式聚光器类似，但要增加角度调节机构，更要注意聚光器调整时的稳定性。

### 7.5.6　太阳能开水器

利用半固定式聚光集热器具有高集热温度的特点，可以制成太阳能开水器。

图 7-34 是太阳能开水器的工作原理示意图，各聚光器可分别绕真空管转动以调节其张口

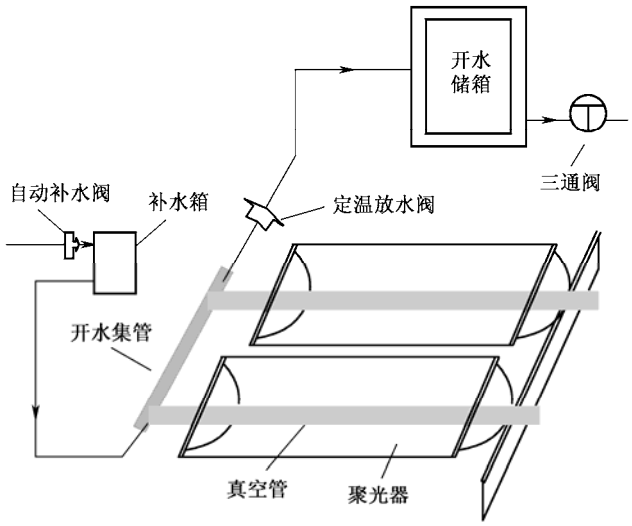



图 7-34　太阳能开水器工作原理示意图

平面与地面的倾角，从而保证反射光线都能汇聚到真空管上。当集管的水温烧开后（一般达到 95℃即可），定温放水阀打开，开水流进开水储箱。这时冷水从自动补水箱自动进入开水集管。整个过程自动进行。

出水管设三通阀，既可用于饮用，也可用于洗浴。

聚光器的聚光比和调节次数可根据不同的使用条件、使用目的进行不同的设计。若把聚光器设置在屋顶上，调节不太方便，可以设计较小的聚光比和较少的调节次数，如上节论述的，若聚光比设计为 6～8 倍，则每隔 1 个多月调节一次即可，每年仅调节几次。

如果聚光器放置在地面上，调节方便，可以设计每天调节一次，这样可获得较大的聚光比。聚光比越大，温升越快，用的聚光器个数越少，用的真空玻璃管数也越少，可降低系统造价。

### 7.5.7 太阳能热水、开水、炊事联合装置

对太阳能开水器系统进行些改进，可以制成太阳能热水、开水、炊事联合装置，如图 7-35 所示。

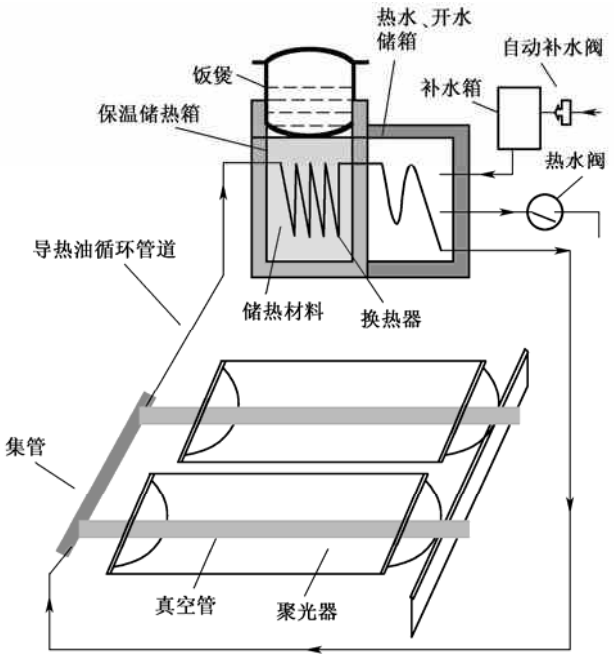



图 7-35 太阳能热水、开水、炊事联合装置示意图

在真空玻璃管内充满导热介质，一般采用能耐 300℃以上高温的导热油。该装置一般放置在地面上，调节方便，可设计成每天调整一次，故其聚光比较大，可达 10 倍以上。因此集热温度较高，真空管内的温度可以达到 200℃以上。被加热到 200℃左右的导热油，经循环管路进入热交换器，加热储热箱中的储热材料。储热材料可以选用相变温度适宜的熔盐，也可选用其他显热储热材料。被加热到 150～200℃的储热材料可直接加热饭煲等锅具来做饭。

导热油从储热箱进入热水储箱，加热箱中的水。从水箱中换热后出来的导热油沿循环管道进入真空玻璃管，被太阳辐射能再一次加热，开始下一次循环。

这种太阳能联合装置与普通的太阳灶、太阳能热水器相比，具有许多明显得优势。

（1）与聚光式太阳灶相比。

普通聚光式太阳灶没有储热装置，只能在中午有太阳时才能做饭，不管上午或下午太阳辐射有多高，只要中午太阳辐射不好就不能做饭，而且需要专人看管，不断手动跟踪太阳，因此使其利用率大打折扣，在我国大部分地区不适宜应用，只在西北甘肃、宁夏青海少数地区有应用。而太阳能联合装置有储能功能，只要上午有太阳，就能保证中午做饭，下午有太阳就能保证晚上做饭，仅其做饭功能就提高了几倍。另外，整个联合装置不需要连续跟踪，不需专人看管，只需每天调整一次倾角即可，而且可以产生大量开水、热水供饮用或洗浴，这是普通太阳灶所不具备的。

（2）与普通太阳能热水器相比。

普通太阳能热水器虽然管理方便，但其功能只是提供热水供洗浴等生活用能。而太阳能联合装置不仅能提供热水，还能提供饮用的开水，甚至能提供部分炊事功能，其使用价值和节能效率比普通热水器有大幅度的提高，而且其造价却增加不多。

下边介绍一种硝酸盐类储热材料。

20%的亚硝酸钠、30%硝酸钠和 50%的硝酸钾混合物在 160℃左右熔化。在 150～200℃时，热容量大约是 60kcal/kg，在一般绝热条件下可良好绝热 2～3h，因此可用在上述太阳能联合装置上。这种混合物按其成分比例不同，熔点也不同，如表 7-4 所示。

这些混合物在 426℃以下是很稳定的，用于炊事可达数年。在 454℃以下对一般钢铁腐蚀不大。

**表 7-4　　不同配方的盐类混合物的熔点**

| 亚硝酸钠（%） | 硝酸钠（%） | 硝酸钾（%） | 熔点（℃） |
|---|---|---|---|
| 100 | 0 | 0 | 284 |
| 50 | 0 | 50 | 138.9 |
| 44 | 3 | 53 | 140 |
| 42 | 3 | 55 | 141 |
| 40 | 0 | 60 | 142.7 |
| 40 | 7 | 53 | 142.2 |
| 38.5 | 11 | 50.5 | 145 |
| 38 | 6 | 56 | 144.4 |
| 35 | 7 | 58 | 154.9 |
| 34 | 13 | 53 | 151.7 |
| 34 | 3 | 63 | 163.5 |
| 30 | 20 | 50 | 151.7 |
| 30 | 10 | 60 | 155.5 |
| 30 | 0 | 70 | 162.2 |
| 0 | 100 | 0 | 307.8 |
| 0 | 0 | 100 | 352 |

## 7.6 太阳能光电、光热联合系统

光热、光电联合系统是未来太阳能利用的发展方向。

虽然几十年来太阳能电池的成本有了大幅降低，但与常规能源相比还是高 3～4 倍，仅依靠光电池的降价，很难与常规能源竞争。降低光伏发电成本的一个重要途径就是聚光发电。只要采用聚光器，将投射到光电池上的光辐射能提高几倍，就能降低几倍的光电池用量，从而能成倍地降低光电成本。

另一方面，提高投射到光电池上的光流密度后，光电池的温度会提高，把这部分热能提取出来加以利用，不仅会降低光电池的温度，提高其发电效率，而且提高了能量的综合利用率。因此，采用聚光电池，综合利用光电、光热综合效应，是最佳的太阳能利用方法。

### 7.6.1 普通太阳能光热、光电联合装置

即在屋顶上铺设一种光热、光电联合装置，图 7-36 是其结构原理图。

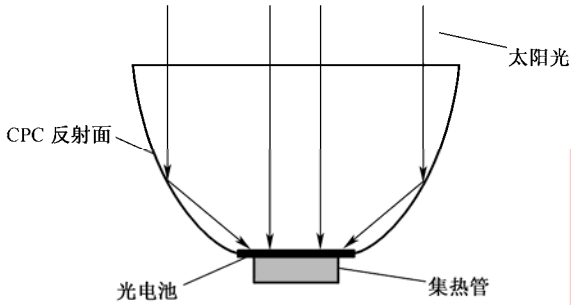



图 7-36 太阳能光热、光电联合装置原理图

在光电池的两侧有两块复合抛物面反射板，投射进窗口的太阳辐射，有的直接投射到光电池板上，有的经抛物面板反射，也反射到光电池板上，提高了光电池接受的光流密度，增加了光电池的发电能力。

光电池板下面的集热管内通有水流，可带走光电池板产生的热量，降低了光电池板的温度，稳定了其发电效率，同时产生的热水可供人们生活用。

为了使这种联合装置全年都能使用，聚光器的收集角应不小于 47°，因此其聚光比较小，一般不会大于 2.5 倍。

### 7.6.2 真空管光电、光热组合元件

为了进一步改进光电、光热联合装置，可采用一种真空管太阳能光热、光电组合元件，

即把上节的光热、光电器件装在一个真空管内，如图 7-37 所示。为了提高其聚光比，可以设计成按季度定期调整聚光器张口的倾角，当然，这会带来设计制作的难度和管理上的麻烦，但提高聚光必会带来巨大的好处：大幅减少光电池的用量，从而可大幅降低制作成本；同时会提高热能的利用率，提高整个系统的综合效益。

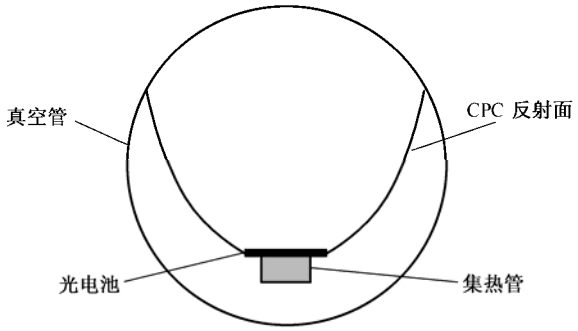



图 7-37　真空管太阳能光热、光电组合元件

目前这种装置还处于设想阶段，但从设计原理分析，并不存在原则上的技术困难，只要精心设计，努力试验，其成功是必然的。

如果广大农村的房屋上都安装上这种光热、光电组合装置，并有专人管理以保证其正常运行，则不仅农村的生活用热水和冬季采暖用热问题可完全解决，还可以每天产生大量电能并入电网，我国的广大农村将成为绿色能源基地。

## 7.7　聚光发电简介

太阳能利用的一个重要方面是太阳能聚光热发电，这一般都是国家投资的大工程，这里简单作一下介绍。

太阳能热发电技术是指利用大规模阵列抛物或碟形镜面收集太阳热能，通过换热装置提供蒸汽，结合传统汽轮发电机的工艺，从而达到发电的目的。这种形式的太阳能利用还有一个特点，即把太阳能所烧热的水储存在巨大的容器中，在太阳落山后几个小时仍然能够带动汽轮发电。

一般来说，太阳能热发电形式有槽式、塔式和碟式 3 种系统。槽式系统是利用抛物柱面槽式反射镜将阳光聚焦到管状的接收器上，并将管内的传热工质加热产生蒸汽，推动常规汽轮机发电；塔式系统是利用众多的定日镜，将太阳热辐射反射到置于高塔顶部的高温集热器（太阳锅炉）上，加热工质产生过热蒸汽，或直接加热集热器中的水产生过热蒸汽，驱动汽轮机发电机组发电；碟式系统利用旋转抛物面聚光反射镜，将入射阳光聚集在焦点处，在焦点处直接放置斯特林发动机发电。这 3 种太阳能热发电技术都有其自身的特点、优势和缺点。

### 7.7.1 太阳能槽式热发电系统


图 7-38 槽式抛物面反射镜

太阳能槽式热发电系统全称为槽式抛物面反射镜太阳能热发电系统（见图 7-38），是将多个槽型抛物面聚光集热器经过串并联的排列，加热工质，产生高温蒸汽，驱动汽轮机发电机组发电。国内槽式太阳能热发电技术出现在 20 世纪 70 年代，在槽式太阳能热发电技术方面，中科院和中国科技大学曾做过单元性试验研究。进入 21 世纪，联合攻关队伍在太阳能热发电领域的太阳光方位传感器、自动跟踪系统、槽式抛物面反射镜、槽式太阳能接收器方面取得了突破性进展，目前正着手开展完全拥有自主知识产权的 100kW 槽式太阳能热发电试验装置。我们采用菲涅尔凸透镜技术可以对数百面反射镜进行同时跟踪，将数百或数千平方米的阳光聚焦到光能转换部件上（聚光度约 50 倍，可以产生三四百摄氏度的高温）。采用菲涅尔线聚焦透镜系统，改变了以往整个工程造价大部分为跟踪控制系统成本的局面，使其在整个工程造价中只占很小的一部分。同时对集热核心部件镜面反射材料以及太阳能中高温直通管采取国产化市场化生产，降低了成本，并且在运输安装费用上降低大量费用。

### 7.7.2 太阳能塔式热发电系统

太阳能塔式发电应用的是塔式系统。塔式系统又称集中式系统（见图 7-39）。它是在很大面积的场地上装有许多台大型太阳能反射镜，通常称为定日镜，每台都各自配有跟踪机构准确地将太阳光反射集中到一个高塔顶部的接收器上。接收器上的聚光倍率可超过 1 000 倍。在这里把吸收的太阳光能转化成热能，再将热能传给工质，经过蓄热环节，再输入热动力机，膨胀做工，带动发电机，最后以电能的形式输出。太阳能塔式发电系统主要由聚光子系统、集热子系统、蓄热子系统、发电子系统等部分组成。1982 年 4 月，美国在加州南部巴斯托附近的沙漠地区建成一座称为“太阳 1 号”的塔式太阳能热发电系统，该系统的反射镜阵列由 1818 面反射镜包括高达 85.5m 的高塔接收器排列组成。1992 年装置经过改装后，用于示范熔盐接收器和蓄热装置。以后，又开始建设“太阳 2 号”系统，并于 1996 年并网发电。今年，以色列 Weizmanm 科学研究院正在对此系统进行改进，据悉仍在研究实验中。


图 7-39 塔式发电系统

### 7.7.3 太阳能碟式热发电系统

太阳能碟式（又称盘式）热发电系统是世界上最早出现的太阳能动力系统，也是目前太阳能发电效率最高的太阳能发电系统，最高可达到 29.4%。碟式系统的主要特征是采用碟（盘）状抛物面镜聚光集热器，该集热器是一种点聚焦集热器，可使传热工质加热到 750℃左右，驱动发动机进行发电。这种系统可以独立运行，作为无电边远地区的小型电源，一般功率为

10～25kW，聚光镜直径约 10～15m；也可用于较大的用户，把数台至 10 台装置并联起来，组成小型太阳能热发电站。

碟式抛物面镜点聚焦集热器的外观如图 7-40 所示。



图 7-40　碟式抛物面镜点聚焦集热器

1983 年，美国加州喷气推进试验室完成的碟式斯特林太阳能热发电系统，其聚光器直径为 11m，最大发电功率为 24.6 kW，转换效率为 29%。

1992 年，德国一农工程公司开发的一种盘式斯特林太阳能热发电系统的发电功率为 9 kW，到 1995 年 3 月底，累计运行了 17 000h，峰值净效率 20%，月净效率 16%，该公司计划用 100 台这样的发电系统组建一座 1MW 的碟式太阳能热发电示范电站。

美国热发电计划还开发了 25kW 的碟式发电系统。25kW 是经济规模，因此成本更加低廉，而且适用于更大规模的离网和并网应用。该系统 1996 年在电力部门进行实验，1997 年开始运行。

就以上几种形式的太阳热发电系统相比较而言，塔式热发电系统的成熟度目前不如抛物面槽式热发电系统，而配以斯特林发电机的抛物面碟式热发电系统虽然有比较优良的性能指标，但目前主要还是用于边远地区的小型电站独立供电，大规模应用成熟度则稍逊一筹。应该指出，槽式、塔式和碟式太阳能热发电技术同样受到世界各国的重视，并正在积极开展工作。美国政府的太阳能热电发展计划并列塔式、槽式和碟式 3 种热发电技术，目的在于满足不同层次应用的需求。

3 种系统目前大都处在示范阶段，都有实现商业化的可能和前景。3 种系统均可单独使用太阳能运行，安装成燃料混合（如与天然气、生物质气等）互补系统是其突出的优点，其性能比较如表 7-5 所示。

**表 7-5　　3 种太阳能热发电系统性能比较**

| | 槽式系统 | 塔式系统 | 碟式系统 |
|---|---|---|---|
| 规模（MW） | 30～320 | 10～20 | 5～25 |
| 运行温度（℃） | 390～734 | 565～1 049 | 750～1382 |
| 年容量因子 | 23%～50% | 20%～77% | 25% |
| 峰值效率 | 20% | 23% | 24% |
| 年净效率 | 11%～16% | 7%～20% | 12%～25% |
| 可否储能 | 有限制 | 可以 | 蓄电池 |
| 互补系统设计 | 可以 | 可以 | 可以 |
| 美元/$m^2$ | 630～275 | 475～200 | 3.100～320 |
| 美元/W | 4.0～2.7 | 4.4～2.5 | 12.6～1.3 |
| 美元/峰瓦 | 4.0～1.3 | 2.4～0.9 | 12.6～1.1 |

与国外对槽式太阳能热发电技术在材料、设计、工艺及理论方面进行的长达 20 多年的研究相比，我国太阳能热发电起步较晚。在太阳能热发电领域中，涉及槽式太阳能热发电中的关键技术是聚光集热装置，其中聚光镜片、跟踪驱动装置、线聚焦集热管是实现槽式太阳能顺利发电的 3 项核心技术。在我国，大力发展槽式太阳能热发电是当前阶段比较符合国内产业发展的方向。我国是世界上最大的低温热水器生产国，在真空管的技术上已经掌握了国际领先技术，玻璃热管与镀银技术处于世界先进水平。槽式热发电的产业基础已经存在，上下游产品供应也可以得到保障。目前各地纷纷有上马太阳能热发电站的意向。在新疆，计划建设我国首座大型 CSP 太阳能热发电站。该工程设计规模 300MW，预计累计发电量可达近 300 亿度，每度电发电成本可以降到 0.3 元人民币以下，接近煤电发电成本。这必将为我国其他地区实施太阳能热发电提供经验。

# 第8章 房屋围护结构和室内换热系统的热工计算

建筑围护结构是指那些包围在需要进行空气调节的空间的建筑物部件，如屋顶、墙体、门、窗等。建筑围护主要用于与室外环境进行热量交换，或者阻止与室外环境进行热量交换。

据统计，建筑中热量（或者冷量）损失的 70%与建筑围护有关。建筑围护的改善可以相应减少制热和制冷的能源消耗，使建筑设备在低负荷下运行，有助于选用低成本的制冷、制热设备，减少运行强度和运行时间，以延长设备使用寿命，同时也是提高居住舒适度的一个关键因素。

在建筑围护结构的能量损失中，门窗损失占 50%，其中大约 20%的损失是由于密封不好室外空气透入所导致；大约 30%的损失是由墙体、屋顶和地板引起。即使现代建筑中拥有高效的围护结构，这些能量损失的分布也大致相同。

在这里，我们要明确一下热负荷的概念。建筑热负荷是指为了补偿房间失热需向房间供应的热量。暖通设备的容量大小主要取决于热负荷。对建筑物的热负荷进行仔细评估后，才能进行建筑围护结构的改进。例如，低层建筑的热传导损失和渗透负荷占主要权重，而内部负荷所占比例较低。高层建筑，如商业、工业和公共设备，有设备、照明及人身体所产生的热量相对较大，所以围护热传导损失仅影响围护结构的附近区域。

## 8.1 室内外空气计算参数

### 8.1.1 室外空气计算参数

室外空气计算参数是指现行的《采暖通风与空气调节设计规范》（简称《规范》）中所规定的用于采暖通风与空调设计计算的室外气象参数。

室外空气计算参数的取值大小，将会直接影响室内空气状态和暖通空调费用。因此，设计规范中规定的室外空气计算参数是按全年有少数时间不保证室内温湿度标准而制定的。若室内温湿度必须全年保证时，需另行确定。

《规范》规定历年平均不保证 1 天的日平均温度作为冬季空调室外空气计算温度，采用历年 1 月份平均相对湿度的平均值作为冬季空调室外空气计算相对湿度。

《规范》规定冬季采暖室外计算温度取历年平均不保证 5 天的日平均温度，冬季通风室外

计算温度取历年最冷月平均温度。冬季采暖室外计算温度用于建筑物用采暖系统供暖时计算围护结构的热负荷，以及用于计算消除有害污染物通风的进风热负荷。冬季通风室外计算温度用于计算全面通风的进风热负荷。

我国 60 个城市冬季室外空气计算温度如表 8-1 所示。

**表 8-1　　我国 60 个城市冬季室外空气计算温度**

| 地名 | 室外空气计算温度（℃） | 地名 | 室外空气计算温度（℃） | 地名 | 室外空气计算温度（℃） |
|---|---|---|---|---|---|
| 哈尔滨 | −31 | 塔城 | −30 | 赤峰 | −23 |
| 嫩江 | −39 | 哈密 | −25 | 二连浩特 | −33 |
| 齐齐哈尔 | −30 | 伊宁 | −30 | 多伦 | −31 |
| 牡丹江 | −29 | 喀宁 | −16 | 太原 | −16 |
| 佳木斯 | −33 | 克拉玛依 | −31 | 大同 | −22 |
| 伊春 | −35 | 吐鲁番 | −21 | 运城 | −11 |
| 长春 | −28 | 和田 | −16 | 北京 | −14 |
| 吉林 | −31 | 西宁 | −18 | 天津 | −12 |
| 延吉 | −24 | 兰州 | −15 | 石家庄 | −15 |
| 通化 | −28 | 酒泉 | −21 | 张家口 | −21 |
| 四平 | −27 | 敦煌 | −20 | 秦皇岛 | −15 |
| 沈阳 | −24 | 天水 | −12 | 保定 | −13 |
| 丹东 | −19 | 银川 | −23 | 唐山 | −14 |
| 大连 | −17 | 西安 | −11 | 承德 | −18 |
| 抚顺 | −27 | 榆林 | −23 | 济南 | −12 |
| 本溪 | −23 | 延安 | −16 | 青岛 | −11 |
| 锦州 | −19 | 呼和浩特 | −24 | 郑州 | −10 |
| 鞍山 | −23 | 锡林浩特 | −34 | 德州 | −15 |
| 葫芦岛 | −18 | 海拉尔 | −41 | 拉萨 | −9 |
| 乌鲁木齐 | −30 | 通辽 | −24 | 日喀则 | −14 |

### 8.1.2　室内空气计算参数

室内空气计算参数的选择主要取决于以下两个方面。

（1）建筑房间使用功能对舒适性的要求。影响人舒适感的主要因素首先是室内空气的温度、湿度和空气流动速度，其次是衣着情况、空气新鲜程度、室内各表面的温度等。

（2）地区、冷热源情况、经济条件和节能要求等因素。

根据《规范》的要求，对舒适性采暖，室内计算参数如表 8-2 所示。

**表 8-2**　　**室内计算参数**

| 民用和工业辅助建筑 | | 生 产 车 间 | |
|---|---|---|---|
| 房间名称 | 室温（℃） | 车间工作性质 | 室温（℃） |
| 民用建筑主要房间 | | 每名工人占用面积不超过 50m$^2$ 时 | |
| 高级民用建筑 | 20～22 | 轻作业 | 15～18 |
| 中级民用建筑 | 18～20 | 中作业 | 12～15 |
| 普通民用建筑 | 16～18 | 重作业 | 10～12 |
| 辅助建筑用房 | | | |
| 盥洗室 | 14～16 | | |
| 厕所 | 12～14 | 当每名工人占用面 | |
| 食堂 | 14～16 | 积较大（50～100m$^2$）时 | |
| 厨房 | 10～12 | | |
| 办公室、休息室 | 16～18 | 轻作业 | ≥10 |
| 技术资料室 | 16 | 中作业 | ≥7 |
| 存衣室 | 16 | 重作业 | ≥5 |
| 哺乳室 | 22 | | |
| 淋浴室 | 25 | | |
| 淋浴换衣室 | 23 | | |
| 女工卫生室 | 23 | | |
| 托儿所、幼儿园 | 20 | | |
| 医务室 | 20 | | |

## 8.2　建筑热负荷的组成及分析

对于民用建筑，冬季采暖热负荷应包括两项：围护结构的耗热量和加热由门窗缝隙渗入室内的空气耗热量。对于生产车间还应包括由外面运入的冷物料及运输工具的耗热量、水分蒸发耗热量，并应考虑车间内设备散热量、热物料散热量等获得的热量。

《采暖通风与空气调节设计规范》（以下简称《规范》）所规定的“围护结构的耗热量”实质上是围护结构的温差传热量，加热由于外门短时间内开启侵入的冷空气的耗热量及一部分太阳辐射热量的代数和。为了简化计算，《规范》规定围护结构的耗热量包括基本耗热量和附加耗热量两部分。

### 8.2.1　围护结构的基本耗热量

围护结构的基本耗热量按下式计算：

$$Q_j = A_J K_j (T_r - T_{o,w})\, a \qquad (8\text{-}1)$$

式中：$Q_j$——j 部分围护结构的基本耗热量，W；

$A_J$——j 部分围护结构的表面积，$m^2$；

$K_j$——j 部分围护结构的传热系数，W/（$m^2$ • ℃）；

$T_r$——冬季室内计算温度，℃；

$T_{o,w}$——冬季室外空气计算温度，℃；

$a$——围护结构的温差修正系数。

### 8.2.2 围护结构的附加耗热量

（1）朝向修正率。

不同朝向的围护结构，受到的太阳能辐射量是不同的；同时，不同的朝向，风的速度和频率也不同。因此，《规范》规定对不同的垂直外围护结构进行修正。其修正率为：

北、东北、西北朝向： 0；

东、西朝向： −5%；

东南、西南朝向： −10%～15%；

南向： −15%～25%。

选用修正率时，应考虑当地冬季日照率及辐射强度的大小。冬季日照率小于 35%的地区，东南、西南和南向的修正率宜采用 0～10%，其他朝向可不修正。

（2）风力附加。

在《规范》中明确规定：在不避风的高地、河边、海岸、旷野上的建筑物以及城镇、厂区内特别高的建筑物，垂直的外围护结构负荷附加 5%～10%。

（3）外门开启附加。

为加热开启外门时侵入的冷空气，对于短时间开启无热风幕的外门，可以用外门的基本耗热量乘以表 8-3 中对应的附加率。阳台门不应考虑外门附加。

**表 8-3　　各种建筑的围护结构耗热附加率**

| 建筑物性质 | | 附加率（%） |
|---|---|---|
| 公共建筑或生产厂房 | | 500 |
| 民用建筑或工厂的辅助建筑物，当其楼层为 $N$ 时 | 无门斗的双层外门 | 100$N$ |
| | 有门斗的双层外门 | 80$N$ |
| | 无门斗的单层外门 | 65$N$ |

（4）高度附加。

由于室内温度梯度的影响，往往房间上部的传热量加大。因此规定：当房间净高超过 4m 时，每增加 1m，附加率为 2%，但最大附件率不超过 15%。应注意，高度附加率应加在基本耗热量和其他附加耗热量（进行风力、朝向、外门修正之后的耗热量）的总和上。

## 8.3　门窗缝隙渗入冷空气的耗热量

由于缝隙宽度不一样，风向、风速和频率不一，因此由门窗缝隙渗入的冷空气量很难准确计算。《规范》规定，对于 6 层以下的民用建筑以及生产辅助建筑物按下式计算门窗缝隙渗入冷空气的耗热量：

$$Q_i = 0.278 L_i \rho_{ao} C_p (t_r - t_{o,w}) m \tag{8-2}$$

式中：$Q_i$——为加热门窗分析渗入的冷空气耗热量，W；

$L$——经每 $m$ 门窗缝隙渗入室内的冷空气量，根据冬季室外平均风速计算，如表 8-4 所示；

$\rho_{ao}$——室外空气密度，$kg/m^3$；

$C_p$——空气定压比热，$C_p = 1kJ/(kg \cdot ℃)$；

$m$——冷风渗透量的朝向修正系数，如表 8-5 所示。

**表 8-4　　民用建筑每 *m* 门窗缝隙渗入空气量 *L*（$m^3/h \cdot m$）**

| 风速 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 单层木窗 | 1.0 | 2.5 | 3.5 | 5.0 | 6.5 | 8.0 |
| 单层钢窗 | 0.8 | 1.8 | 2.8 | 4.0 | 5.0 | 6.0 |
| 双层木窗 | 0.7 | 1.8 | 2.5 | 3.5 | 4.6 | 5.6 |
| 双侧钢窗 | 0.6 | 1.3 | 2.0 | 2.8 | 3.5 | 4.2 |
| 门 | 2.0 | 5.0 | 7.0 | 10.0 | 13.0 | 16.0 |

**表 8-5　　各地区冷风渗入量的朝向修正系数**

| 地区 | 北 | 东北 | 东 | 东南 | 南 | 西南 | 西 | 西北 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 齐齐哈尔 | 0.90 | 0.40 | 0.10 | 0.15 | 0.35 | 0.40 | 0.70 | 1.00 |
| 哈尔滨 | 0.25 | 0.15 | 0.15 | 0.45 | 0.60 | 1.00 | 0.80 | 0.55 |
| 沈阳 | 1.00 | 0.90 | 0.45 | 0.60 | 0.75 | 0.65 | 0.50 | 0.80 |
| 呼和浩特 | 0.90 | 0.45 | 0.35 | 0.10 | 0.20 | 0.30 | 0.70 | 1.00 |
| 兰州 | 0.75 | 1.00 | 0.95 | 0.50 | 0.25 | 0.25 | 0.35 | 0.45 |
| 银川 | 1.00 | 0.86 | 0.45 | 0.35 | 0.30 | 0.25 | 0.30 | 0.65 |
| 西安 | 0.85 | 1.00 | 0.70 | 0.35 | 0.65 | 0.75 | 0.50 | 0.30 |
| 北京 | 1.00 | 0.45 | 0.20 | 0.10 | 0.20 | 0.15 | 0.25 | 0.85 |

## 8.4 建筑围护结构的改进

### 8.4.1 减少空气渗透

通过建筑围护结构和门窗缝隙渗透的空气一般是不可控的。建筑围护的空气渗透主要影响各种建筑的热负荷，对于那些老旧建筑影响尤为明显。如果出现大量空气从门窗或管道、配线、固定设备渗透到室内，则在冬季较寒冷地区会导致室内的人员体感不舒适。

在住宅和商业建筑中，通过墙体的渗透占了总渗透的主要部分。对于高层建筑，比如商厦的其他方面的空气渗透，主要体现在内部和外部通道的空气渗透。

渗透没有一个严密的定义，只可以概括其普遍特征。没有空气过滤的旧式建筑在制热时，我们认为每小时空气交换的经验系数为 1.0。对于结构紧凑的新建建筑，其每小时空气交换系数均值为 0.3～0.5。对于低层建筑，用来弥补渗透的热负荷是比较重要的，据估计，对于那些绝缘性能好的住宅建筑，弥补渗透的热负荷能占总负荷的 40%。

大型商业建筑的渗透比小型商业建筑或住宅建筑要复杂得多，风速和对流都会影响渗透。局部风速会因为海拔、周围地形的差异而不同。风所带来的压力由局部风速、风向、建筑的纵横比决定，那些正面来的风会撞击建筑物，在一些特殊地方也可能受到温度、距离建筑物中心的远近、建筑围护结构的几何特征、内部区域及所有这些因素的综合影响。

为了改善建筑围护结构的密封性，可参照如下几种方法和技术。

（1）堵住缝隙。可以用不同类型的物质（如氨基酸脂、乳胶、乙烯聚合物等）堵住缝隙，如门窗及墙体的漏洞、水管漏洞等。

（2）挡风条。用泡沫乳胶加上粘合剂，增加门窗的密封性。

（3）种植护林带。这是一个长期规划，在建筑物周围种植灌木或树木可以减少风的影响和空气渗透。

（4）空气阻滞层。由一种或多种不透气的成分组成，均匀地涂于建筑物的外表面。可使用的材料包括液体沥青、液体橡胶、沥青薄层、橡胶薄层。AR 隔膜也能阻止建筑围护结构的热蒸发。

### 8.4.2 建筑围护结构的绝缘

如果建筑围护结构的绝缘程度不好，可以通过增加绝缘程度以减少热传导所带来的损失，这项措施具有较高的经济性。

（1）安装管线通路的狭小空间的绝缘。安装管线通路的狭小空间，在某些区域里是占主导的基本类型，在很多不同的区域习惯被认为包含在建筑附属物之内。一般来说，它们建有通风孔，以便减小湿度，并且与那些有绝缘层的建筑有所不同。

其绝缘改造包括堵住通风口、对墙体绝缘、分段建筑周界、使用聚乙烯护墙板或相似材

料覆盖暴露泥土的地基，以防止土壤中的水蒸气进入。有时候也使用给安装管线通路狭小空间增压的方法，使其压力高于室外。

（2）地下室墙体的绝缘。在现存建筑中，对地下室墙体适当位置进行绝缘改造是很具有市场潜力的。大多数在 1990 年以前建造的地下室墙体和地板都没有很好的绝缘，可在墙体表面安装简单便宜的装置，达到一个合适的绝缘程度，并达到审美、防火要求。这种墙体改造方法必须不改变墙体结构、不易发潮、对环境的变化具有很强的抵制力。

（3）绝缘压缩版。有些类型的结构墙体由于太贵重或不便进行空穴绝缘改造，可以使用相对较薄的内部板来改造。如在现存的墙体或顶棚上加装 9.5mm 的石膏和 12.7mm 的泡沫材料。这样的改造将增加墙体的热阻值，同样也会降低空气的渗透。适当的密封盒设计细节也允许使用密封油漆的压缩版，它可以根据具体场合剪切成小的部分使用，这样可以尽可能减少剩余废料。这种产品可以用于不具备绝缘能力的建筑墙体，如框架或混凝土墙体。

（4）在那些现存的老式建筑中，表面翻新是一个比较普遍的工作，经常使用低成本的材料替换那些已经恶化的地方。

（5）顶棚防辐射涂料。用一种高反射率的油漆或涂料喷洒在屋顶甲板下面，能在热的时候保存冷量，也可以限制太阳能辐射进入顶楼。其应用于紧凑空间中的改造尤为重要。新建筑可以用一个具有反射效用的结构表面，但对于现存的建筑却不太实用。

## 8.5　地板辐射换热系统

下面以设计实例的形式介绍一下地板辐射采暖的设计选型。

地板辐射供暖是一种将加热盘管埋置于砼埋管层中，让 40～60℃的低温热水在管内循环流动，加热整个地面，使表层温度上升至 20～29℃，然后通过辐射和部分对流方式向室内散热的一种供暖方式。与传统散热器对流供暖方式相比，它具有许多显著的优点。

（1）舒适卫生。

在辐射温度、实感温度和对流温度的多重作用下，能形成最符合人体舒适条件的理想热环境，温度梯度由地面向上呈下降趋势。人体的头部和脚部的温差约为 2℃。这样的温度环境从生理角度满足人体的舒适要求。俗话说“暖人先暖脚”，脚暖和则全身都感觉暖和；而头部的温度略低，使人不会感觉有闷热压抑，有一种清新的感觉，让头脑能够不会因为温度过高而昏沉。

地板辐射采暖是将加热盘管埋置于砼埋管层中，不会因为散热器而存在卫生死角，室内不需安装散热器的支管与立管，实际上给用户增加了一定数量的使用面积。

（2）高效节能。

热效率提高 20%～30%，即可以节省 20%～30%能耗。

（3）热稳定性好。

地板及混凝土可以储存一定的能量，不因为外网停止供水而导致室内温度很快降低。

（4）使用寿命长。

早在 20 世纪 30 年代，工程中已开始采用这种供暖方式并被公认为是一种最舒适的供暖方

式，由于当时大都采用铜管作为加热盘管，造价很高，因此未能普遍推广。随着塑料工业的发展，20 世纪 80 年代初，以日本、东欧、北美、韩国为代表，生产研制出新型管材——PEX 交联聚乙烯管，从而开创了在地辐射取暖领域以塑代钢（铜）的新时代。PEX 管材使用温度范围大（−70～+110℃），耐压高（长期高温下工作压力大于等于 0.6MPa），耐腐蚀，无毒性，寿命长（50 年以上，基本与建筑物使用寿命相同；而普通散热器使用年限只有 15～20 年）。

（5）维修量小。整个使用期间很少因损坏而维修。

由于以上优点，应大力推广地板采暖系统。下面为一个地板采暖系统设计方案。

### 8.5.1 工程示例

该工程为小区住宅楼，该楼为框架结构，朝向为坐北朝南，外墙为 370mm 红砖墙，内墙为 240mm 砖墙，层高 2.9m。热源为锅炉，统一供给，供水温度为 60℃，回水温度为 50℃，压力为 0.8Mpa。

### 8.5.2 设计参数

（1）室外计算温度：$t_w = -9℃$

（2）室内温度：起居室　$t_n = 20℃$

厨房　$t_n = 16℃$

卧室　$t_n = 25℃$

卫生间　$t_n = 25℃$

温差修正系数：$a = 0.7$

渗透耗热量修正系数　$n$

北：1.00；　南：0.14；　东：0.21；西：0.41。

单位渗透量：

窗：　$L = 2.6 m/m^2$

门：　$L = 7 m/m^2$

传热系数如表 8-6 所示。

**表 8-6　　传热系数**

| 名称 | 外墙 | 内墙 | 组合窗 | 顶棚 | 外门 | 南外窗 | 内门 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 传热系数 $k$ [W/（$m^2$ •℃）] | 1.56 | 1.72 | 3.0 | 0.8 | 4.7 | 4.7 | 2.1 |

### 8.5.3 采暖热负荷计算

根据《低温热水地板辐射采暖工程技术规程》之规定。

（1）房间热负荷计算应按《采暖通风与空调节设计规范》的规定进行。

（2）敷设加热管道地面，不计算采暖热负荷。

（3）垂直相邻各层房间均采用地板辐射采暖时，除顶层以外，各层均应按房间采暖热负

荷扣除来自上层的热量，确定房间所需的热量，来自上层的热量应根据上层楼面的构造、热媒平均温度计算确定。

（4）地板辐射用于房间全面采暖时，所需的热量宜取房间计算采暖热负荷的 90%，或将房间温度降低 2℃计算。

（5）采用集中热源分户热计量，或采用分户独立热源的住宅，房间计算保暖热负荷应按不同热源乘以下列修正系数：

集中热源 （集中供热或个体锅炉房供热） 1.3

分户独立热源 1.5

（6）地板辐射用于房间局部区域采暖，其他地区不采暖时，地板辐射所需散热量可按全面辐射采暖所需散热量乘以表 8-7 的计算系数确定。

**表 8-7　　局部区域辐射采暖耗量的计算系数**

| 采暖区面积与房间总面积的比值 | 0.75 | 0.55 | 0.40 | 0.25 | ＜0.2 |
|---|---|---|---|---|---|
| 计算系数 | 1 | 0.72 | 0.54 | 0.38 | 0.30 |

注：采暖区面积比值在 0.20～0.75 区间的其他数值时，按插入法确认计算系数。

（7）进深大于 6m 的房间，宜以距外墙 6m 为界分区，当作不同的单独房间，分别计算采暖热负荷和进行地板辐射采暖设计。

根据以上规程和以下公式，围护结构基本耗热量为：

$$q = KF(t_n - t_w)a \quad (W) \tag{8-3}$$

式中：$K$ —— 围护结构的传热系数，W/（$m^2$ • ℃）；

$F$ —— 围护结构的面积，$m^2$；

$t_n$ —— 冬季室内计算温度，℃；

$t_w$ —— 供暖室外计算温度，℃；

$a$ —— 围护结构的温度修正系数。

围护结构的附加（修正）耗热量：

$$Q'_1 = q'(1 + \beta) \quad (W) \tag{8-4}$$

式中：$q'$ —— 围护机构基本耗热量，W；

$\beta$ —— 朝向修正率，%。

冷风渗透耗热量：

$$Q'_2 = 0.278\, \upsilon \rho_w C_\rho (t_n - t'_w) \quad (W) \tag{8-5}$$

式中：$\upsilon$ —— 经门窗缝隙渗入室内的总空气量，$\upsilon = L\ln$，$m^3/h$；

$\rho_w$ —— 供暖室外计算温度下的空气密度，$kg/m^3$；

$C_\rho$ —— 冷空气的定压比热，$C$ = 1kJ/kg • ℃；

0.278 —— 单位换算系数，1kJ/h = 0.278W。

冷风侵入耗热量：

$$Q'_3 = 0.278 \upsilon_m \rho_w C_\rho (t_n - t'_w) \quad (W) \tag{8-6}$$

式中：$v_m$ —— 流入的冷空气量，$m^3/h$；

其他符号同前。

### 8.5.4 确定管道间距

根据《低温热水地板辐射采暖工程技术规程》之规定。

（1）敷设加热管的地面是房间的放热源，所以不计算采暖热负荷。

（2）按常规的做法，当地面的绝热层采用导热系数为 0.034W/（m·K）聚苯板时，不同的苯板厚度与向下传热量的关系为：

$\delta = 30mm$ 时，　　$q_x/q_s \leqslant 15\%$

$\delta = 45mm$ 时，　　$q_x/q_s \leqslant 10\%$

$\delta = 100mm$ 时，　　$q_x/q_s \leqslant 5\%$

式中：$q_x$ —— 地面向下传热量；

$q_s$ —— 地面向上传热量。

在楼层间地面不保温的情况下，地面向下的传热量占向上传热量的 30%～50%，从热计算角度来讲，保温是必要的。

（3）在辐射供暖中，既不能单纯地以辐射强度作为供暖效果的标准，也不能一成不变地仍以室内设计温度作为基本标准，通常以实感温度作为衡量辐射供暖的标准。在人体的舒适范围内，实感温度可以比室内环境温度高 2～3℃左右，因此，在保持相同舒适感的前提下，辐射供暖的室内空气温度可以比对流供暖时低 2～3℃，或取对流供暖时热负荷的 0.9～0.95。

（4）根据节能设计标准要求，所有采暖系统均应按连续采暖设计，即达到采暖室外设计设计参数时，必须按设计热媒参数昼夜连续供热才能保证室温；但是，在集体供热系统中，低温热水地板辐射采暖具有容易实现分户计算、分室控制室温的特点，供暖的连续与否决定于居民的作息条件等因素。而在太阳能地板辐射采暖系统中，目前基本上以户为单位供暖，由于太阳能本身的间歇性，常常采用白天供暖、晚上停止的间断性供暖方式。即使采用辅助热源或储热系统，由于地板辐射采暖的储热功能和室温上升的滞后性，人们也长采用间歇式供暖方式，因此宜按间歇供热考虑，地板辐射采暖的热负荷应计算间歇附加。根据陆耀庆主编的《暖通空调设计指南》提供的数据，仅白天供暖者，将基本耗热量附加 20%。此外，地板辐射采暖热惰性很大，供热后温升较慢。综合考虑各种因素，参考其他地区编写的相关规程，得出修正系数。

分户独立热源不可能像集中热源一样连续供热，所以修正系数较大，此系数只修正房间的基本耗热量，修正后的耗热量只作为房间布置加热管和选择独立热源设备的依据，不得将修正后的耗热量累加后作为集中供热管网，供热锅炉的计算依据。

（5）进深大于 6m 的房间，如果按一个房间计算热负荷，进而按一个房间均匀布置加热管，会使得远离外墙的区域由于地面的辐射强度偏大而感觉过热，临近外墙的区域辐射强度偏小而感觉过冷。因此宜以外墙 6m 为界分区，当作不同的房间，这样可使临近外墙的区域加热管布置较密，远离外墙的区域加热管布置较疏，使得整个房间的实感温度较为均匀，从而更加舒适。

地面散热量　　$Q = q \times \beta_1 \times \beta_2 \times \beta_3$　　（8-7）

式中：$q$ —— 各房间的热负荷；

$\beta_1$ —— 热源修正系数；

$\beta_2$ —— 材料修正系数；

$\beta_3$ —— 地采暖修正系数。

当加热管为塑料管或铝塑复合管，公称外径为 20mm，填充层厚度为 60mm，供回水温差为 10℃时，不同的加热管间距，平均水温的地板散热量，可按表 8-8 选取。当公称外径为 16mm，其他做法相同时，表中的散热量应乘以 0.85 的修正系数。

**表 8-8　　PEX 管单位地面面积的散热量和向下传热损失（W/m²）**

| 平均水温 | 室内空气温度 | 加热管间距（mm） | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 300 | | 250 | | 200 | | 150 | | 100 | |
| （℃） | （℃） | 散热量 | 热损失 | 散热量 | 热损失 | 散热量 | 热损失 | 散热量 | 热损失 | 散热量 | 热损失 |
| 35 | 16 | 84.7 | 23.8 | 92.5 | 24.0 | 100.5 | 24.6 | 108.9 | 24.8 | 116.6 | 24.8 |
| | 18 | 76.4 | 21.7 | 83.3 | 22.0 | 90.4 | 22.6 | 97.9 | 22.7 | 104.7 | 22.7 |
| | 20 | 68.0 | 19.9 | 74.0 | 20.2 | 80.4 | 20.5 | 87.1 | 20.5 | 93.1 | 20.5 |
| | 22 | 59.7 | 17.7 | 65.0 | 18.0 | 70.5 | 18.4 | 76.3 | 18.4 | 81.5 | 18.4 |
| | 24 | 51.6 | 15.6 | 56.1 | 15.7 | 60.7 | 15.7 | 65.7 | 15.7 | 70.1 | 15.7 |
| 40 | 16 | 108.0 | 29.7 | 118.1 | 29.8 | 128.7 | 30.5 | 139.6 | 30.8 | 149.7 | 30.8 |
| | 18 | 99.5 | 27.4 | 108.7 | 27.9 | 118.4 | 28.5 | 128.4 | 28.7 | 137.6 | 28.7 |
| | 20 | 91.0 | 25.4 | 99.4 | 25.7 | 108.1 | 26.5 | 117.3 | 26.7 | 125.6 | 26.7 |
| | 22 | 82.5 | 23.8 | 90.0 | 23.9 | 97.9 | 24.4 | 106.2 | 24.6 | 113.7 | 24.6 |
| | 24 | 74.2 | 21.3 | 80.9 | 21.5 | 87.8 | 22.4 | 95.2 | 22.4 | 101.9 | 22.4 |
| 45 | 16 | 131.8 | 35.5 | 144.4 | 35.5 | 157.5 | 36.5 | 171.2 | 36.8 | 183.9 | 36.8 |
| | 18 | 123.3 | 33.2 | 134.8 | 33.9 | 147.0 | 34.5 | 159.8 | 34.8 | 171.6 | 34.8 |
| | 20 | 114.5 | 31.7 | 125.3 | 32.0 | 136.6 | 32.4 | 148.5 | 32.7 | 159.3 | 32.7 |
| | 22 | 106.0 | 29.4 | 115.8 | 29.8 | 126.2 | 30.4 | 137.1 | 30.7 | 147.1 | 30.7 |
| | 24 | 97.3 | 27.6 | 106.5 | 27.3 | 115.9 | 28.4 | 125.9 | 28.6 | 134.9 | 28.6 |
| 50 | 16 | 156.1 | 41.4 | 171.1 | 41.7 | 187.0 | 42.5 | 203.6 | 42.9 | 218.9 | 42.9 |
| | 18 | 147.4 | 39.2 | 161.5 | 39.5 | 176.4 | 40.5 | 192.0 | 40.9 | 206.4 | 40.9 |
| | 20 | 138.6 | 37.3 | 151.9 | 37.5 | 165.8 | 38.5 | 180.5 | 38.9 | 194.0 | 38.9 |
| | 22 | 130.0 | 35.2 | 142.3 | 35.6 | 155.3 | 36.5 | 168.9 | 36.8 | 181.5 | 36.8 |
| | 24 | 121.2 | 33.4 | 132.7 | 33.7 | 144.8 | 34.4 | 157.5 | 34.7 | 169.1 | 34.7 |
| 55 | 16 | 180.8 | 47.1 | 198.3 | 47.8 | 217.0 | 48.6 | 236.5 | 49.1 | 254.8 | 49.1 |
| | 18 | 172.0 | 45.2 | 188.7 | 45.6 | 206.3 | 46.6 | 224.9 | 47.1 | 242.0 | 47.1 |

续表

| 平均水温 | 室内空气温度 | 加热管间距（mm） | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 300 | | 250 | | 200 | | 150 | | 100 | |
| （℃） | （℃） | 散热量 | 热损失 | 散热量 | 热损失 | 散热量 | 热损失 | 散热量 | 热损失 | 散热量 | 热损失 |
| 55 | 20 | 163.1 | 43.3 | 178.9 | 43.8 | 195.6 | 44.6 | 213.2 | 45.0 | 229.4 | 45.0 |
| | 22 | 154.3 | 41.4 | 169.3 | 41.5 | 185.0 | 42.5 | 201.5 | 43.0 | 216.9 | 43.0 |
| | 24 | 145.5 | 39.4 | 159.6 | 39.5 | 174.3 | 40.5 | 189.9 | 40.9 | 204.3 | 40.9 |

### 8.5.5 系统设计

根据房间的热工特性和保证温度均匀的原则，各房间加热管分别采用“S”形或双“回”字的布管方式，热损失明显不均匀的房间一般宜将高温管段优先布置于房间热损失较大的外窗或外墙侧。

（1）地板辐射采暖系统应有独立的热媒集配装置，并应符合下列要求。

① 每一集配装置的分支路不宜多于 8 个，住宅每户至少应设置一套集配装置。

② 集配装置的直径不应小于总体水管径的 1.5 倍。

③ 集配装置应高于地板加热管，并应配置排气阀。

④ 供回水管和每一供回水分支路，均应配置截止阀。

⑤ 总供水管阀的内侧应设置过滤器。

⑥ 使用标准较高的房间，宜设置自动调节室温的控制器。

（2）同一热媒集配装置系统各分支路的加热管长度宜尽量一致，并不宜超过 120m，不同房间和住宅的各主要房间，宜分别设置支路。

根据以上要求，设计得出系统的平面图和立管图。

塑料加热管的沿程损失可按下式计算式：

$$\Delta P_m = \lambda I/d\rho v^2/2$$
$$\lambda = 0.316\ 4/Re^{0.25} \qquad (8\text{-}8)$$
$$Re = vd/\upsilon$$

式中：$\Delta P_m$—— 加热管沿程的阻力损失，Pa/m；

$v$—— 加热管断面平均流速，m/s；

$d$—— 加热管计算内径，m；

$\rho$—— 流体密度，kg/m$^3$；

$\lambda$—— 摩擦阻力系数；

$Re$ —— 雷诺数；

$\upsilon$—— 流体的运动粘滞系数，m$^2$/s。

管道系统局部阻力视材质不同宜分别按沿程水头损失的百分比计算。

PEX 管： 25%～30%

XPAP 管：　25%～30%

PP-R 管：　30%

PB 管：　30%

加热管内热媒流速不应低于 0.25m/s，供回水阀之间不宜大于 30kPa，在各户入口应安装压力平衡阀。

由以上公式及数据校合，系统基本满足水力平衡。

### 8.5.6　施工及验收

地板辐射采暖工程施工前，应了解建筑物的结构，熟悉设计图纸，施工方案及其他工种配合措施。安装人员应熟悉管材一般性能，掌握基本操作要点，严禁盲目施工。

地面施工应按下列顺序进行。

（1）抹水泥沙浆找平层。

（2）铺设保温材料。

（3）铺设窗纱及夹筋钻箔。

（4）按设计要求敷设加热管并加以固定。

（5）回填细卵石混凝土。

（6）按设计要求铺设地面材料。

地板辐射采暖工程施工时，环境温度不低于 10℃。

#### 1．热绝缘层的敷设

热绝缘层应敷设在经过仔细找平的平整基层上，热绝缘层应铺设平整、搭接严密，当铺设有真空镀铝聚脂薄膜或夹筋铝箔贴面的热反射层时，除固定加热管的塑料卡钉穿越外，不得有其他破损。

#### 2．加热管的配管和敷设

按设计图纸的要求进行放线并配管，同一通路的加热管应保持水平。加热管的弯曲半径不宜小于 8 倍的管外径，填充层内的加热管不应接头，采用专用工具断口，管口应平整并垂直于管轴线，加热管固定点的间距，直管段不应大于 700mm，弯曲管段不应大于 350mm。其固定方法如下。

（1）用固定卡子将加热管直接固定在热绝缘层上。

（2）用扎带将加热管绑扎在铺设于绝缘层上的钢丝网上。

（3）卡在铺设于热绝缘层上的专用管架上。

#### 3．热媒集配装置的安装

热媒集配装置应固定于墙壁或专用箱体内，当水平安装时，一般宜将分水器安装在下，集水器安装在上，间距宜为 200mm，集水器距地面宜为 350mm；当垂直安装时，集分水器下端距地面不宜小于 150mm。

加热管末端在地面外，不应超出集配装置外皮的投影面，与集配装置分支路阀门的连接，应采用专用卡箍式连接件。

加热管始末端的适当距离内，应设置套管等保护措施，以防止局部地区温度过高，当采用 PEX 管时，套管宜为黑色。

加热管与热媒集配装置牢固连接后，应对每一道路逐一进行冲洗，直到出水清净为止。

#### 4．混凝土填充层的浇捣和养护

采暖面积大于 30m$^2$ 时应设伸缩缝，当地面短边长度≤6m 时，沿长度方向每隔 7m 设一道 5～8mm 宽的伸缩缝，缝中填充弹性膨胀膏，加热管穿越伸缩缝外，应设长度不小于 100mm 的柔性套管。当采用大理石和花岗岩等不允许留有明显缝隙的地面时，可将沿缝外板下部的角切去 40°，以留出变形空间。

填充层的养护周期应不小于 48h。混凝土填充层浇捣和养护过程中，系统应保持不小于 0.6MPa 的压力。

## 8.6 散热器设计计算

散热器是采暖系统重要的、基本的组成部件，水在散热器内降温向室内供热达到采暖的目的。散热器的金属耗量和造价在采暖系统中占有相当大的比例。因此，散热器的正确选用涉及系统的经济指标和运行效果。

### 8.6.1 散热器性能评价指标

对散热器的要求是多方面的，可以归纳为以下 4 个方面。

（1）热工性能。

同样材质的散热器传热系数越高，其热工性能越好。可采用增加外壁散热面积来提高散热器周围空气的流动速度。强化散热器外表面辐射强度和减少散热器各部件之间的接触热阻等措施，可以改善散热器的热工性能。

（2）经济指标。

散热器单位散热量的成本及金属耗量越低，其经济指标越好。安装费用越低，使用寿命越长，其经济性越好。

（3）安装使用和工艺方面的要求。

散热器应具有一定的机械强度和承压能力。安装组合简单，应便于安装和组合成所需要的散热面积。尺寸应较小，少占用房间面积和空间。安装和使用过程不易破损。制造工艺简单，适于批量生产。

（4）卫生和美观方面的要求。

散热器表面应光滑，方便和易于清除灰尘。外形应美观，与房间装饰协调。

### 8.6.2　散热器的种类

散热器按照传热方式分为辐射散热器和对流散热器。

散热器按材质分为铸铁散热器、钢制散热器、铝合金散热器及塑料散热器等。

（1）铸铁散热器。

20 世纪开始采用的铸铁散热器用灰口铸铁浇铸而成，由于其结构简单、耐腐蚀、使用寿命长、水容量大而沿用至今。它的金属耗量大、外形笨重、金属热强度比钢制散热器低。目前国内应用比较多的铸铁散热器有柱型和翼型两大类。

（2）钢制散热器。

钢制散热器有新型钢制散热器和光排管两种。新型钢制散热器的出现晚于铸铁散热器，它由钢材制成，制造工艺先进，适于工业化生产，外形美观，易于实现产品多样化、系列化，适应于各种建筑物对散热器的多功能要求，金属耗量少，安装简便，承压能力较高，占地面积小。但它耐腐蚀能力差，要求供暖系统进行水处理，非采暖期满水养护。施工安装时要防止磕碰。钢制散热器水容量小，热惰性小。在间歇供暖时，停止供热后，延续供暖效果差，因此不适与铸铁散热器混用在同一个间歇供暖的采暖系统中。不宜用于有腐蚀性气体的生产厂房和相对湿度较大的房间。钢制散热器有柱型、板式、扁管式、串片式等。

（3）铝合金散热器

铝合金的高效导热性，是保持良好散热功能的决定因素和热能转换的最理想介质。特点是：用时少，供热快，效率高。

铝材散热器，它导热性好，耐压高，金属热强度高。散热量大，散热快，散热强度是铸铁的四倍。重量是铸铁的十分之一。美观大方，占用居室空间小，环保节能。很符合我国发展散热器的“轻型、高效、环保、节能”八字要求。

（4）塑料散热器

在实现按户热计量要求的同时，有可能出现单户小系统（自设小锅炉或换热器）。这时散热器就有可能在低温、低压的条件下使用。对此，塑料散热器是很适宜的。塑料散热器也可以作成竖式和水平式两大类，其传热强度约比钢制散热器低 20%上下。工作压力在 0.2MPa 以下。塑料散热器也有可能按住宅供暖的特殊要求，设计成各种尺寸和规格。

### 8.6.3　散热器的选择、布置

（1）散热器的选择。

所选散热器的传热系数应较大，其热工性能应满足采暖系统的要求。采暖系统下部各层散热器承受压力较大，所能承受的最大工作压力应大于采暖系统底层散热器的实际最大工作压力。

散热器的外形尺寸应适应建筑尺寸和环境要求，易于清扫。在标准高的建筑中要考虑外形美观，与室内装修协调。在产尘和对防尘要求较高的工业建筑中，应采用易于清除灰尘的散热器。在具有腐蚀性气体的生产厂房或相对湿度较大的车间、地下水为水源且水处理不佳时，应用铸铁散热器。间歇采暖时，同一系统中不宜混用水容量差别较大的散热器。

（2）散热器的布置。

散热器一般沿外墙，特别是窗布置，可以明装或加罩安装。明装时易于清除灰尘，布置简单，有利于散热。对房间装饰要求较高的民用、公用建筑或要防止烫伤和磕碰的场所，可加装饰罩安装。大多数情况下加罩后散热器的散热量减少。

楼梯间的散热器应尽量布置在底层及下部各层，不能置于两道外门之间；楼梯间底层等有冻结危险处的散热器应远离外门。

### 8.6.4 散热器的计算

在设计条件下，单位时间内散热器的散热量应等于房间需要的采暖设计。散热器传热性能是在标准化的测试小室用一定的片数、明装、同侧上进下出连接散热器，在稳定条件下测出的。将实验结果整理成下式。

$$K = a\Delta t^{b} = a\,(t_{\mathrm{m}} - t_{\mathrm{R}})^{\,b} \text{ 或 } Q = A\Delta t^{B} \tag{8-9}$$

式中：$Q$ —— 散热器的散热量，W；

$K$ —— 散热器的传热系数，W/（$m^2$ • ℃）；

$a$、$b$、$A$、$B$ —— 实验结果整理得到的系数；

$t_{\mathrm{m}}$ —— 散热器的热媒平均温度，℃；

$t_{\mathrm{R}}$ —— 室内空气温度，℃；

$\Delta t$ —— 散热器热媒平均温度 $t_{\mathrm{m}}$ 与室内温度 $t_{\mathrm{R}}$ 之差，℃。

$$\Delta t = (t_{\mathrm{i}} + t_{0})/2 - t_{\mathrm{R}}$$

$t_{\mathrm{i}}$、$t_{0}$ —— 散热器进出水口温度，℃。

各种常有散热器的传热系数见有关设计手册。当已知或查到传热系数后，即可用下式得到其计算面积：

$$A = Q/K\,(t_{\mathrm{m}} - t_{\mathrm{R}})\,\beta_1\beta_2\beta_3 \tag{8-10}$$

式中：$A$ —— 散热器计算面积，$m^2$；

$Q$ —— 采暖设计热负荷，W；

$\beta_1$ —— 散热器的片数修正系数；

$\beta_2$ —— 散热器的连接方式修正系数；

$\beta_3$ —— 散热器的安装型式修正系数；

$K$、$\Delta t$、$t_{\mathrm{m}}$、$t_{\mathrm{R}}$ 同式（8-9）。

当使用条件与测试条件不同时，散热器的传热性能发生变化，要用不同的系数$\beta_1$、$\beta_2$、$\beta_3$进行修正。

## 8.7 空气换热器换热系统

这里所介绍的空气换热器换热系统主要是指通过空气换热器将热媒所携带的热量与室内空

气换热后，满足房间热负荷要求的换热设备。常用的空气换热器主要有暖风机、风机盘管等。

### 8.7.1　暖风机

暖风机是由通风机、电动机和空气换热器组合而成的采暖机组。暖风机的风机有轴流风机和离心式风机两种。轴流风机常用于小型机组，离心式风机主要用于大型机组，暖风机所用热媒可为水和蒸汽。使用时，暖风机直接安装在采暖房间内。在风机作用下，室内空气由吸风口进入机组，流经空气换热器被加热，从出风口送入室内，并造成室内空气循环。

暖风机供暖的优点是供热量大，占地小，启动快，能迅速提高室内温度。缺点是风机运行时有噪声，如全部采用室内循环空气时，不能改善室内空气的质量。

暖风机常用于空间大、要求供热负荷大、间歇工作、允许循环使用室内空气的厂房或场馆。室内空气中含有剧毒性物质、工艺过程产生易燃易爆气体和纤维、粉尘的厂房，空气不能循环使用，则不能采用暖风机供暖。

暖风机采暖有两种方案。一种方案是暖风机供给全部采暖耗热量，适用于气候比较温暖的地方；另一种方案是暖风机供给部分采暖耗热量，用散热器采暖系统维持最低室内温度（一般不得低于 5℃，称为值班采暖），其余热量由暖风机供给。后一方案的优点是非工作时间可以不开启暖风机，节省电能和热能；不需要管理；正常使用时间开启暖风机可迅速提高室温。暖风机提供的供热量为采暖设计热负荷和扣除值班采暖系统的设计供热量。

暖风机的送风温度不宜低于 35℃，以免有吹冷风的感觉；不得高于 70℃，以免热射流上升，不利于有效利用。室内空气循环次数，每小时不宜小于 1.5 次。每台暖风机的热媒进出口应设阀门（蒸汽为热媒时，还应在出口设置疏水器），以便调节、维修和管理。

小型暖风机的安装高度（指出风口离地面的高度）与出口风速有关。当出口风速≤5m/s 时，宜采用 3.5m；当出口风速＞55m/s 时，宜采用 4～4.5m。大型暖风机的安装高度应根据厂房高度和回流区的分布位置等因素确定，不宜低于 3.5m，不宜高于 7m。送风口的风速可采用 5～15m/s。当厂房高、送风温度较高时，送风口处宜设置向下倾斜的导流板。生活地带和作业地带的风速一般不宜＞0.3m/s。

### 8.7.2　风机盘管

风机盘管机组简称风机盘管。它是由小型通风机、电动机和盘管（空气换热器）等组成的空调系统末端装置之一。盘管管内流过冷冻水或热水时与管外空气换热，使空气被冷却去湿或加热来调节室内的空气参数。它是常用的供冷、供热末端装置。

风机盘管机组按结构型式可分为立式、卧式、壁挂式、立柱式、卡式等，按安装方式可以分为明装、暗装和半明装 3 种。壁挂式机组全部为明装机组，其结构紧凑，外观好，直接挂于墙的上方。卡式（天花板嵌入式）机组，比较美观的进、出风口外露于顶棚下，风机、电动机和盘管置于顶棚之上，属于半明装机组。

我国颁布的标准《风机盘管机组》中规定，用高档转速下风机盘管的风量（$m^3/h$）标准其规格，如 FP6.3，即高档风量为 $630m^3/h$ 的风机盘管。标准规定风机盘管共有 12 种规格，风量范围为 250～2 $500m^3/h$。立柱式非标产品最大规格的风量为 4 $000m^3/h$。中外合资厂生产

厂生产的风机盘管机组的规格通常用英制单位的风量（$ft^3$）来表示，如规格 200（或称 002 或 02 型）的风机盘管，风量为 $200ft^3/min$，即 $340m^3/h$。我国标准规定，机组名义工况下的制冷量为 1.4～13.3kW，供热量为 2.1～19.95kW，实际产品中的最大制冷量约为 20kW，供热约 33.5kW。目前国内实际生产的风机盘管的规格在 10 种左右，比上述标准规定的规格少，以 FP3.5～FP20 最为多见。这类机组中标准（机外静压）的输入功率约为 30～170W，高静压型的输入功率约为 50～270W。FP6.3 及以下型号的输入功率约为 30～170W，高静压型的输入功率约为 50～270W。FP6.3 及以下型号的风机盘管，其噪声≤39dB；FP8 以上型号风机盘管的噪声一般都＞40dB（A）。风机盘管的水侧阻力约为 10～40kPa。

风机盘管的选择与安装要求：应选择质量好的风机盘管以免增加维修工作量。应根据房间具体情况和装饰要求选择明装或暗装，确定安装位置、形式。立式机组一般放在外墙窗台下，卧式机组吊挂与房间的上部，壁挂式机组挂在墙的上方，立柱式机组可靠墙放置于地面上或隔墙内，卡式机组镶嵌于天花板上。

明装机组直接放在室内，不需要进行装饰，但应选择外观颜色与房间色调相协调的机组。暗装机组应配上与建筑装饰相协调的送风口、回风口，有时需要在回风口加配风口过滤器。还应在建筑装饰时留有可拆卸或开启的维修口，便于拆装和检修机组的风机和电机。

目前卧式暗装机组多藏于顶棚上，其送风方式有两种：上部侧送和顶棚向下送风。如采用顶棚向下送风，应选用高静压风机盘管，机组送风口可接一段风管，其末端接若干散流器向下送风。卧式暗装机组的回风有两种方式：在顶棚上设百叶或其他型式回风口过滤器，用风管接到机组的回风箱上；不设风管，室内空气进入顶棚，再被置于顶棚上的机组所吸入。

选用风机盘管时应注意房间对静音的要求。为了防止盘管堵塞，应在其供水管上安装水过滤器。进、出水管最好采用橡胶软连接。风机盘管进、出水管上均需要安装阀门，以便检修。从凝结水盘引至排水系统的凝结水管应有较大的坡度，一般不宜小于 0.01。凝结水管管径应大些，避免污物堵塞，同时要定期清理凝结水管。其管外壁可能结露，因此也应保温。

风机盘管风机的供电电路应为单独的回路，不能与照明回路相连接。要连到集中配电盘，以便集中控制操作，在不需要系统工作时可集中关闭机组。

当风机盘管用于冬季供暖时，热水的供水温度一般以 60℃为宜，最高不超过机组生产厂家所规定的使用温度（大多数厂家规定供水温度不得超过 80℃）。

# 第9章 辅助热源

解决太阳能间歇性缺点的另一个途径是采用辅助热源，即当没有太阳时用其他能源补充上。

冬季房间采暖必须保持连续性，房屋本身的储热性能和采用水箱等短期储热技术，基本上可以解决晚上的供暖问题，但是在我国不少采暖区，冬季采暖季节常常会出现连续几天甚至十几天的阴天，对没有或不适宜采用长期储热技术的用户，就需要采用辅助热源以补充太阳能的不足。

常用的辅助热源有电辅助加热、热泵加热、燃煤或燃气燃油锅炉及生物质能供暖等。

电辅助直接加热的优点是设备简单，造价低，用电热管直接加热即可，缺点是耗电量大。只有在阳光充足、日照时间长、辅助加热量较少且电力较充足的地区，才比较适宜使用。

在天气不是太寒冷而太阳能资源又不是太好的地区，可用热泵作为辅助热源。

在我国太阳能资源一般的III类地区，冬季若采用电热管直接加热，会消耗大量电能，不仅经济上不合算，不能为群众接受，而且会浪费宝贵的电力资源，每户三四千瓦以上耗电量，电网也不能承受，在这些地区可以使用热泵。热泵在冬季的能效比一般也在 2.0 以上，这就是说，消耗 1kW 的电能至少可得到 2kW 的热能，比直接用电加热至少节省一半的电能。

使用热泵的主要缺点是初投资较大，热泵的造价比电热管要大得多。而且，在太寒冷的地区不适宜用热泵，在这些地区热泵的能效比会大大降低，散热器会结霜严重，造成热泵不能正常工作。

用生物质能作为辅助热源与太阳能配合冬季供暖，是很多地区最佳的选择。两者配合有很多优势。首先，不管是太阳能还是生物质能，两者都是可再生的绿色能源，最符合低碳经济，甚至可实现零碳经济；其次，柴草、作物秸秆都是农业生产的附带产物，可看成是零成本，现在的问题只是如何把它们充分利用；另外，作物秸秆性能上的重要特点是易点燃、启动快，可随时与太阳能相配合。当突然阴天无阳光时，可立刻点燃燃柴锅炉供暖。

当然，有的地方也可用燃气、燃油或燃煤锅炉作为辅助热源。

## 9.1 辅助电加热系统

### 9.1.1 辅助电加热系统的组成

辅助电加热系统由两部分组成，一部分是电热管，是将电能转化成热能的工具。电加热

有两种加热方式：一种是将电热管安装在太阳能蓄热水箱中，对蓄热水箱中的水进行加热；另一种是将电热管安装在室内，与太阳能蓄热水箱分离。在阴雨天太阳辐射量不够的情况下，这时只要通过电加热给水提高温度就能达到供暖水温要求，从而达到全天候供暖的目的。电加热功率要与采暖所需功率相匹配，可利用下列公式进行计算（假定水箱无热损失）。

$$N=nA \tag{9-1}$$

式中：$N$——辅助电加热功率，$W$；

$n$——单位采暖面积所需供热功率，$W/m^2$；

$A$——采暖面积，$m^2$。

例如 100 $m^2$ 的房屋采暖面积，每平方米需供暖 30W，则电加热管的功率 $N$ 为：

$$N=30W/m^2\times 100\ m^2=3\ 000W$$

电加热辅助系统的另一种组成部分是控制系统，根据控制方式的不同，可分为手动控制、自动控制和半自动控制。

一般家庭对房间内的温度平稳程度要求不是很高，允许有一定的波动，建议采用手动控制，这样一则系统稳定可靠，不容易发生故障；二则便于节省电能。

对于温度平稳程度要求较高的房间，建议采用自动控制系统，其温度探头可以放在室内，根据室内温度来控制；也可放在水箱内，根据水箱温度来控制。两种方法各有特点，根据室内温度控制更有利于保持室内温度的稳定平衡，而根据水箱水温控制有利于与其他控制器如水泵控制装置等相配合。

### 9.1.2 控制装置

辅助电加热的控制装置主要是在阴天控制电热管的启闭。就其控制方式来说，通常有时间控制、流量控制、温度控制等；就控制功能来说，当电加热系统发生漏电时，能自动地切断电源，以防止发生触电事故。控制装置还应有通断电指示和水温温度显示指示。全自动辅助电加热系统控制电路如图 9-1 所示。

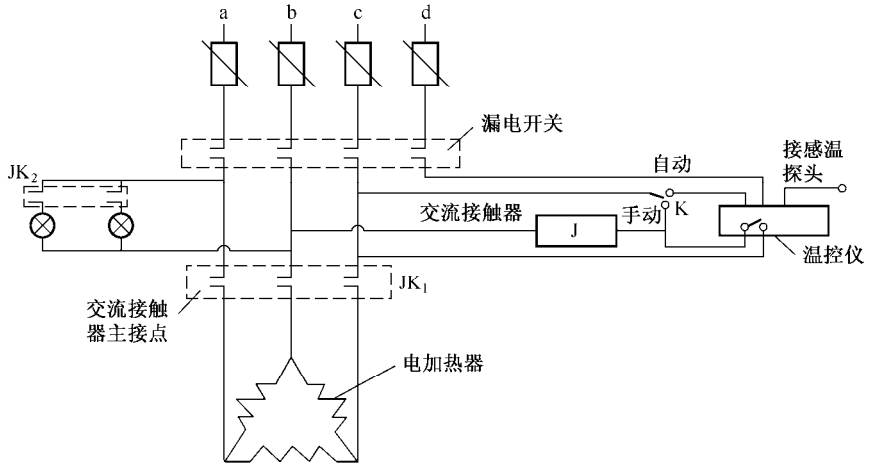



图 9-1 一种辅助电加热系统控制电路

J 为交流接触器启动线圈，K 为自动与手动切换开关，当开关切换到自动位置，接通温控仪的工作电源，温控探头安装在水箱中，直接测量水箱水温。当水箱水温低于控制温度（控制温度可调），控温仪自动接通交流接触器的启动线圈回路，电热管工作，给水加热；当水温达到控制温度或高于控制温度，温控仪自动切断交流接触器启动线圈回路，电加热管停止对水加热。而当水温下降后，温控仪又会自动启动，电加热管又开始给水加热。当切换开关 K 切换到手动位置，温控仪失去工作电源，不再工作，而交流接触器启动线圈回路接通，电热管工作。切换开关 K 在手动位置，电热管将一直工作，不会自行切断。

所谓半自动控制是在温控仪的输出端与启动线圈之间串联一组回位开关，回位开关的常开节点再与交流接触器的一组辅助常开节点并联，形成自保持电路。半自动控制是当压下回位开关的常开按钮后，这时如果水温低于控制温度，整个电路接通，电热管给水加热。当水温升高到控制温度，温控仪自动切断交流接触器启动线圈回路，这时串联在交流接触器启动线圈回路中的自保持也释放。当水温再降低，回路也不会启动，如要启动电加热，只有再次压下回位开关的常开按钮。此控制电路的优点是对水箱中的水只加热一次，以避免开启电加热后忘记关上开关，一直对水加热，造成电能的浪费。全自动方式和半自动方式各有优点，选用何种方式，可根据各用户的实际情况和管理方法而定。

### 9.1.3　辅助电加热的安装

辅助电加热系统的安装首先要安装电热管，安装时应注意电热管的额定电压，对三相供电系统如电热管的额定电压为 380V，电热管应接成三角形接法，如额定电压为 220V，电热管应接成星形接法。在三相供电系统中，电热管最好选用额定电压为 380V。一般电热管都不能干烧，因此，安装电热管时要采取防电热管干烧的措施。除在控制装置中要有漏电保护，还必须对水箱进行接地保护。电热管的安装一般是在水箱的中下部开孔，将电热管直接插入水箱，这就要求电热管和水箱绝缘要好，且与水箱的接触部分不能有渗水现象。对电热管的接线柱，还要采取防雨措施。

控制装置可在工厂将所有零件按图纸安装在控制箱中，在现场只需安装控制箱和接进出线即可。控制箱可做成一个，安装在室内或安装在屋顶。如果安装在屋顶，要采取防雨措施。

辅助电加热系统线路包括两部分，一部分是强电系统，另一部分是弱电控制系统。对于大功率的辅助电加热系统，安装时首先考虑输电线容量要达到要求。采用绝缘导线，并且绝缘导线要装防护管。强电部分除了自身系统达到输电要求外，还要考虑原有变压器容量和输电线的容量，因增加了辅助电加热后是否还能达到要求。对于弱电控制线路，绝缘线必须装防护管，以保证其安全且不易老化，避免造成短路而使控制失灵。

## 9.2　热泵

水泵是“泵”水的机械，它利用电力把水从低处“泵”向高处；同样，热泵是“泵”热的机械，它利用电力把热从低温处“泵”向高温处，从而获得可以利用的高温热源。其本质

是从水、空气、土壤等低温热源处获取能量来利用。热泵最显著的优点是节能，与纯电阻加热相比，一般可节电 70%左右，在冬季采暖至少可节电一半。且热泵安装使用方便，占地面积小，近年来备受关注，在太阳能采暖中必将得到广泛应用。

### 9.2.1 热泵热水器的工作原理

普通的泵都是对接触的物质直接做功。一般人认为“热”不是物质，而是一种能，不可能通过泵来提高位能。那么，热泵究竟是个什么概念，又是怎样工作的呢？在这里想用最浅显的理念、最简单的实例介绍热泵。

热一般要通过载体来携带并传递，载体可以是固体（如金属），可以是液体（如水），也可以是气体。热传递主要方式有对流、传导和辐射。

近年来已被广泛运用的一种传热方式——热管，能把热从一端迅速传到另一端，几乎没有阻力，传热速度是铜的千倍以上，它是通过工质在真空中相变传热来实现的。热泵也是通过在闭合回路里对工质进行冷热交换相变循环，高效地实现热量传递的。热泵热水机组释放到水中的热量不是用电加热器产出来的，而是通过热泵热水机组从其他热源如水、空气、土壤等搬运到水中去的。其基本原理如图 9-2 所示。

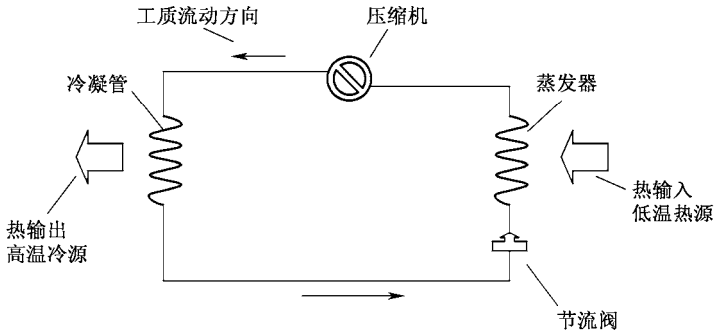



图 9-2 热泵工作原理图

工作介质，简称工质。气态工质通过压缩机压缩，温度和压力都升高，高温高压工质进入冷凝管，将热量放给周围的高温冷源，比如把热量放给水箱，即给水箱加热使水箱水温升高，同时工质的温度降低，凝结成高压液体。

工质在这个由气体变成液体的过程要放出大量的凝结热。我们知道一般物质由气态变液态放出的凝结热都是很大的，这大量的凝结热都传给了周围的水（高温冷源）。

高压液态工质通过节流阀成为低压液体，进入蒸发器。由于液体汽化需要大量的汽化热，进入蒸发器的低压液态工质迅速蒸发汽化吸收大量热量，这些热量来自于周围的低温热源，比如空气、水、土壤等，从而实现了从低温热源吸收热量的过程。蒸发器吸收的热量加上消耗的电功能，与冷凝器散出的热量是相互平衡的，符合能量守恒定律。

汽化的工质再一次进入压缩机被压缩，进入下次的循环。如此周而复始，不断循环，就不断地把热量从低温热源（空气、水、土壤）传输到高温冷源（水箱），以用于房间的供暖。

这是一个逆卡诺循环的过程。

在上述过程中，并不是靠消耗电能直接转化成热能，而是依靠电力驱动压缩机使工质流动，再通过工质在流动过程中的反复相变来传输热量，即把热量从温度较低的空气等低温热源处，搬运到温度较高的水箱内等高温冷源处。热泵的这种搬运能力，即投入热泵的电能与其搬运的热量之比称为能效比，用 COP 表示。

在水泵系统中，水位差越大，泵同样量的水所消耗的电能也越大；同样，在热泵系统中，冷热源的温差越大，泵同样量的热量所消耗的电能也越大。

一般热泵的能效比（COP）值都大于 3，即每消耗 1kW 的电能，可以得到 3kW 的热能，即使在北方冬季，用空气作低温热源，能效比也在 2 左右，比单纯用电热管加热，节省 50% 的电能。

### 9.2.2　热泵的选择和安装

#### 1．热泵形式的选择

目前我国主要有地源（土壤源）热泵、水源热泵、空气源热泵 3 种形式。

土壤源热泵和水源热泵的低温热源段温度较稳定，总保持在十几摄氏度以上，热泵蒸发端不结霜，运行平稳，效率较高。但是水源热泵要求用户备有两眼水井，一个用来抽水，一个用来回灌水，且还存在回灌水能否尽快渗下的问题。而土壤源热泵需要安装大量地下换热管道，其工程量更大，建造成本太高。因此两者作为辅助热源都不适合。

只有空气源热泵成本低，安装简单，适合作为辅助热源。

空气源热泵的主要问题是当环境温度低于 0℃时其蒸发端容易结霜，造成换热受阻，热泵效率降低。有不少类型的热泵通过化霜技术可解决结霜问题，虽然系统的效率会降低些，但一般能效比也达到 2 左右，也比直接使用电热管加热节电 50%，因此仍是较好的选择。

对于水源热泵，如果用户恰好具备某些有利条件，也可考虑使用，比如，自家院旁恰有河流流过可供利用；或恰有排污水道在附近流过可以利用；或家有抽水井和回灌井，抽水井水量充足，可以利用，回灌井能把抽出的水回灌渗回土壤内。在这些情况下，在不增加太多投资的条件下，采用水源热泵，其性能会大有改善，供热能力会有保证，且节省电能。

#### 2．热泵的安装

单机热泵的安装，只需把热泵串联入供暖系统管路即可，并安装好控制装置。

与前面的电热管控制系统相似，可以采用定温控制装置，即把温控仪的温度探头放在水箱的出水口，当出水口水温低于设定的温度时，热泵即启动向系统供热。但出口水温高于设定值时，热泵停止运行。

采暖用热泵根据用户对热量需求的大小，可单机运行也可多台组合运行，多台热泵热水机组合运行，一般都采用并联运行方式，但每个并联机组最好不要超过 4 台，为使每台热泵的流量均匀，热泵的管路也遵行太阳热水系统的“等程原则”。

## 9.3 生物质能

生物质能是太阳能以化学能形式储存在生物质中的能量形式，是以生物质为载体的能量。它直接或间接地来源于绿色植物的光合作用，可转化为常规的固态、液态和气态燃料，取之不尽、用之不竭，是一种可再生能源。生物质能的原始能量来源于太阳，所以从广义上讲，生物质能是太阳能的一种表现形式。生物质能通常被认为是潜在的世界最大可再生能源资源之一。

### 9.3.1 生物质能的优势

为缓解能源需要，减轻环境压力，促进经济增长，必须进行能源结构的调整更新。由于生物质能与太阳能一样也是重要的可再生能源，太阳能、生物质能等可再生能源的开发利用已成为全球大势所趋。预计 21 世纪下半叶，太阳能和生物质能等可再生能源将占世界能源结构的 50%，以矿物能源为主体的世界能源体系将转化为以太阳能和生物质能为主体的世界能源新体系。

生物质资源的优势具有不可替代性。

生物质资源是通过植物、微生物对太阳能的光和作用吸收、转化并储存下来的化学能，一般是指作物秸秆、人畜粪便、树木、水生生物等，它是唯一具有可储存、运输等矿物资源特征的可再生能源资源。

生物质能的载体——生物质是以实物的形式存在的，相对比于风能、水能、太阳能和潮汐能等，生物质能是唯一可存储和运输的可再生能源。生物质的组织结构与常规的化石燃料相似，它的利用方式与化石燃料也类似，常规能源的利用技术无需做大的改动就可以应用于生物质能。但生物质的种类繁多，分别具有不同特点和属性，利用技术远比化石燃料复杂与多样，除了常规能源的利用技术以外，还有其独特的利用技术。

生物质能具有以下优势。

（1）分布广泛，是地球陆地和水体最普及的资源，全球每年生长的生物质约有 1 200 亿吨，是当前世界能源消耗量的 5 倍。

（2）从生物质能资源中提取或转化得到的能源载体更具有市场竞争力。生物质资源经深度转化后生成的甲醇、汽油、柴油、液氢等燃料不含有害成分，而若从石油或煤中提取出零排放的液体燃料，其生产成本会大大提高。

（3）开发生物质能源可促进农林废物的利用，促进农民增收和农村经济繁荣。

（4）在贫瘠的土壤上种植能源作物或能源树种，可改善土壤和生态环境，提高土地利用率。

（5）利用海水、淡水、地面咸水水面生产水生植物或藻类植物，提高国土利用面积。

（6）在城市交通及供热中使用由生物质转化而来的生物质燃料，有利于减排废气，更有利于保护环境。生物质含硫量较低，平均是煤含硫量的 1/7，燃烧后 $SO_2$ 和灰尘的排放量比化石燃料要小得多。同时，生物质在其利用过程中，对大气环境二氧化碳净排放为零，不像化石燃料的燃烧那样形成额外的温室气体。

太阳能的直接热利用和生物质能源化利用相结合，不仅可解决太阳能利用中的储存、运输、高温难题，而且可使广大城镇生活采暖用能中可再生能源的供给比例达到 80%以上。

## 9.3.2　生物质的能源特性

生物质燃料虽然与煤炭同是固体燃料，但化学成分差异较大，这成为生物质燃烧必须研究的问题。

### 1．生物质的工业分析

生物质作为天然有机物是极为复杂的高分子物质，从化学结构上分为纤维素、半纤维素、木质素、果胶质等。从燃烧学的角度分析，主要有工业分析组成和元素分析组成。

工业分析组成。工业分析组成是用工业分析法得出燃料的规范性组成，该组成可给出固体燃料中可燃成分和不可燃成分的含量。可燃成分的组成为挥发分和固定碳，不可燃成分的组成为水分和灰分，各部分以质量百分数来表示，其总和为 100%。

几种主要生物质的工业组成如表 9-1 所示。

**表 9-1　　几种主要生物质的工业组成**

| 种　类 | 挥发分（%） | 固定碳（%） | 水分（%） | 灰　分（%） | LHV（干燥无灰基，kJ/kg） |
|---|---|---|---|---|---|
| 玉米秸 | 76.00 | 13.20 | 6.10 | 4.70 | 17 746 |
| 玉米芯 | 71.95 | 17.25 | 4.87 | 5.93 | 17 730 |
| 麦秸 | 69.70 | 15.80 | 10.30 | 4.20 | 18 532 |
| 棉花秸 | 68.54 | 20.71 | 6.78 | 3.97 | 19 191 |
| 花生壳 | 68.10 | 22.42 | 7.88 | 1.60 | 21 417 |
| 稻草 | 67.80 | 16.39 | 3.61 | 12.20 | 17 636 |

（1）挥发分。

挥发分是指生物质样品在隔绝氧气的条件下，在一定温度一定时间内，从生物质内分解出来的液体和气体产物的和，剩下的固体物质称为焦渣。我国测定固体燃料的挥发分一般采用国家标准《煤的工业分析方法》（GB/ T 212）规定执行。干馏条件：温度 900℃+ 10℃、隔绝空气、时间间隔 7 分钟。

挥发分的多少对燃烧器的设计使用具有较大影响，因此需要测定和积累相关设计。

几种生物质燃料的挥发分含量如表 9-2 所示。

**表 9-2　　生物质燃料和煤炭的挥发分含量**

| 燃料种类 | 挥发分含量（质量百分数，%） |
|---|---|
| 秸　秆 | 63～80 |
| 木　材 | 72～78 |
| 褐　煤 | 40～60 |
| 烟　煤 | 20～40 |
| 无烟煤 | ≤10 |

（2）固定碳。

生物质燃料中以单质碳形式存在的碳称为固定碳。生物质燃料经干馏产生的焦渣减去焦渣燃烧后的灰分即为固定碳的质量数。在柴草中固定碳的含量一般为 14%～25%。

（3）水分。

形态上分为游离水分和化和结晶水分。游离水分是指生物质在 105～110℃温度下存放 1h 可去除的水分，这在工业分析中常用。而化和结晶水分是指生物质中所含的与矿物质成分化合的水分，结晶水需要达到 200℃才能分解出来，此时生物质中的挥发分也开始溢出，所以通常这一部分水与挥发物一起计入挥发分。

（4）灰分。

生物质中的灰分是指将生物质样品进行灼烧试验，在 805～825℃条件下完全燃烧所剩余的残渣。灰分是生物质中不可燃烧的杂质。它分为外部杂质和内部杂质。外部杂质是生物质在采集运输及储存中混进去的不可燃物质，如泥土沙石等。内部杂质主要是生物质体内含有的非可燃物质，多数是一些金属和非金属的氧化物，如氧化硅、氧化铁、氧化铝、氧化钾、氧化钠等。对于生物质的燃烧除需要考虑灰分的多少外，还需要特别注意灰分的熔点，如果碳层的控制温度超过灰分的熔点，就会结渣，破坏正常燃烧操作。

灰分的主要化学成分有氧化硅、氧化铁、氧化铝、氧化钾、氧化钠及其他金属氧化物、硫化物、氯化物等，各成分的熔化温度在 765～2 800℃之间，如表 9-3 所示。在实际燃烧时，灰分中各组分将结合成共晶体，使得其熔融温度降低很多。各种生物质燃料的结渣程度如表 9-4 所示。

**表 9-3　　生物质燃料灰中各成分的熔化温度**

| 成　分 | 熔化温度（℃） | 成　分 | 熔化温度（℃） |
|---|---|---|---|
| $SiO_2$ | 1 460～1 723 | NaCl | 800 |
| CaO | 2 570 | $Na_2SO_4$ | 884 |
| $Fe_2O_3$ | 1 550 | $Na_2S$ | 820 |
| FeO | 1 420 | KCl | 790 |
| $Al_2O_3$ | 2 050 | $CaCl_2$ | 765 |
| $Al_2S_3$ | 1 100 | $CaSO_4$ | 1 459 |
| MgO | 2 800 | $MgSO_4$ | 1 127 |
| $Na_2O$ | 800～1 000 | FeS | 1 195 |
| $K_2O$ | 800～1 000 | $MgO \cdot Al_2O_3$ | 2 135 |
| $CaO \cdot SiO_2$ | 1 540 | | |

**表 9-4　　生物质燃料的灰分和结渣程度**

| 易结渣燃料名称 | 灰分含量（%） | 结渣程度 | 不结渣燃料名称 | 灰分含量（%） |
|---|---|---|---|---|
| 小麦秸 | 7.4 | 严重 | 杏核 | 4.8 |
| 玉米秸 | 6.4 | 严重 | 桃核 | 0.9 |
| 棉花秸 | 17.2 | 严重 | 胡桃壳 | 1.1 |
| 豆　秸 | 10.2 | 严重 | 梅核 | 0.5 |
| 大麦秸 | 10.3 | 严重 | 木材加工边角料 | 0.3 |
| 稻　壳 | 14.9 | 严重 | 玉米芯 | 1.5 |
| 筛选垃圾 | 10.4 | 严重 | | |
| 向日葵杆 | 6.0 | 严重 | | |

### 2．生物质的热值

各类燃料最重要的特性是热值，即燃烧热，又称发热量，是指单位质量（对于液体或固体燃料）或单位体积（对于气体）的燃料完全氧化所释放出的热能。计量单位是 kJ/kg 或 $kJ/m^3$。

热值分为高位热值和低位热值，一般数据手册里给出的热值是低位热值。

### 3．生物质的物理特性

生物质作为固体颗粒状物料，其物理特性如粒度、颗粒形状、密度、堆积密度流动特性对生物质的燃烧具有一定影响。下面分别做一下介绍。

（1）粒度、形状。

粒度是指颗粒在三维空间范围所占据的尺寸，其大小直接影响物料的堆积状况和燃烧状况。粒度的描述分为语言描述和数学描述两类，通常采用二者结合的方式。如球状、片状、不规则状、纤维状、棒状、方块状等，球状以直径表示，方块状以边长 × 边长 × 长度表示，棒状以断面直径 × 长度表示。一般断面尺寸越大，前处理粉碎成本越低，成型成本也较低；反之断面尺寸越小，前处理粉碎成本越高，成型成本也较高。市场上一般以断面直径≤25mm 的燃料称为颗粒燃料，断面直径≥25mm 的燃料称为压块燃料。

（2）堆积角。

堆积角又叫休止角、安息角，当颗粒状物料连续落到水平面上时，会形成一个圆锥体，圆锥体母线与水平底线的夹角称为该物料的堆积角，记作 $\Phi_r$。它反映了物料颗粒间的相互摩擦性能，影响因素主要有颗粒形状、表面光滑度、粒度、含水率等。颗粒越细、含水越大、表面光滑度越低，堆积角愈大，反之亦然。堆积角大的燃料流动性差，堆积角小的燃料流动性好。碎木材块、秸秆压块的自然堆积角一般不超过 45°。

（3）滑动角。

将载有物料的平板逐渐倾斜，当颗粒物料开始滑动时的最小倾角，即平板与水平面间的夹角，称为滑动角 $\Phi_s$，该数据表达颗粒物料与固体壁面之间的摩擦性能。

颗粒物料的堆积角和滑动角不仅是颗粒物料流动性的重要指标，也是设计除灰器灰斗锥度、料仓倾斜角、上料输送带倾角的依据。要求料斗底部必须设计成圆锥状，锥顶角必须大于 $180°-2\Phi_s$，气流输送管道或上料输送带的倾角也要小于 $\Phi_s$。

## 9.3.3　生物质致密化加工

### 1．生物质致密化的优点

农业生产会产生大量作物秸秆，林业生产过程中会产生大量枝丫、锯末、木屑、梢头、板皮、截头、果壳和果核等废弃物。这些农作物秸秆和林业废弃物松散地分散在大面积范围内，具有较低的堆积密度，给收集、运输、储藏和应用带来了困难。

由此，人们提出如果将农业和林业生产的废弃物压缩为成型燃料，提高能源密度，这不仅解决了上述问题，而且可以形成商品能源。将松散的秸秆、树枝和木屑等农林废弃物挤压

成固体燃料，它的密度为 1.1～1.4t/m$^3$，体积缩小为原来的 1/6～1/8，能源密度相当于中质烟煤，火力持久，炉膛温度高，燃烧特性明显得到了改善。

农作物秸秆中的挥发分一般在 76%～86%之间，约 200℃时挥发分开始析出，如果此时无法提供足够助燃空气，则未燃尽的挥发分被气流带出，形成黑烟。普通柴草燃烧之所以产生大量浓烟，就是柴草中大量可燃挥发分迅速裂解挥发出来又不能充分燃烧的缘故。而固体成型燃料由于致密均匀，限制了挥发分溢出速度，延长了燃烧时间，缓解了空气供给矛盾。

农作物秸秆在挥发分析出后成为松散骨架，气流运动使其解体，形成飞扬黑絮。而固体成型燃料剩余的碳结构紧密，形成蓝色火焰包裹的焦炭。

生物质固体成型燃料的燃烧过程近似于煤的燃烧过程，可分为干燥、挥发分析出及着火燃烧、焦炭着火燃烧等过程。当燃料受热时，燃料表面的水分首先蒸发出来，进行干燥；当温度继续升高，将发生热解反应，使成型燃料中挥发分析出，挥发分析出后余下即焦炭；挥发分比焦炭易于着火，当温度足够高时，挥发分首先着火，形成离开颗粒一定距离的明亮火焰；当挥发分被燃尽时，焦炭开始燃烧，出现极短的蓝色火焰。

### 2．生物质能致密化成型原理

固体成型是利用木质素充当粘合剂，将农业和林业生产的废弃物压缩为成型燃料，提高其能源密度，是生物质预处理的一种方式。

我们已经知道，各种农林废弃物主要由纤维素、半纤维素和木质素组成。木质素为光合作用形成的天然聚合体，具有复杂的三维结构，属于高分子化合物，它在植物中的含量一般为 15%～30%。木质素不是晶体，没有熔点但有软化点，当温度为 70～110℃时开始软化，具有一定的黏度；在 200～300℃呈熔融状，黏度高，此时施加一定的压力，增强分子间的内聚力，可将它与纤维素紧密粘接并与相邻颗粒互相粘结，使植物质变得致密均匀，体积大幅度减少，密度显著增加。当取消外部压力后，由于非弹性纤维分子之间的相互缠绕，一般不能恢复原来的结构和形状。在冷却以后强度增加，成为成型燃料。压缩时如果对植物质原料进行加热，有利于减少成型时的挤压力。

对于木质素含量较低的原料，在固体成型过程中，可掺入少量的粘结剂，使成型燃料保持给定形状。当加入粘结剂时，原料颗粒表面会形成吸附层，颗粒之间产生引力（范德瓦尔斯力），使生物质粒子之间形成连锁的结构。这种成型方法所需的压力较小，可供选择的粘结剂包括粘土、淀粉、糖蜜、植物油和造纸黑液等。

### 3．生物质固体成型生产工艺

农林废弃物的固体成型技术按生产工艺分为粘结成型、压缩颗粒燃料和热固体成型工艺，可制成棒状、块状、颗粒状等各种成型燃料。固体成型的工艺流程如图 9-3 所示。

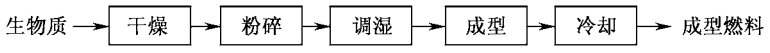



图 9-3　固体成型的工艺流程

主要操作步骤如下。

（1）干燥。生物质的含水率在 20%～40%之间，通过自然晾晒或烘干方法进行干燥，用

滚筒干燥机进行烘干，将原料的含水率降低至 8%～10%。如果原料太干，压缩过程中颗粒表面的碳化和龟裂有可能会引起自燃；而原料水分过高时，加热过程中产生的水蒸汽就不能顺利排出，会增加体积，降低机械强度。

（2）粉碎。木屑及稻壳等原料的粒度较小，经筛选后可直接使用。而秸秆类原料则需通过粉碎机进行粉碎处理，通常使用锤片式粉碎机，粉碎的粒度由成型燃料的尺寸和成型工艺所决定。

（3）调湿。加入一定量的水分后，可以使原料表面覆盖薄薄的一层液体，增加粘结力，便于固体成型。

（4）成型。生物质通过固体成型，一般不使用添加剂，此时木质素充当了粘合剂。生物质固体成型的设备一般分为螺旋挤压式成型、活塞冲压式成型和环模滚压成型。

我国 20 世纪 90 年代开始着手成型燃料技术与燃烧技术的研发推广，通过对引进的螺旋挤压机消化吸收，1990 年中国林科院林产化学研究所与东海县粮食机械厂合作，完成了国家“七五”公关项目——木质棒状成型机的开发研究工作，并建成了 1 000t/年生产线，生产成套技术与设备出口马来西亚、印尼等国。20 世纪 90 年代初，农业部环保能源司组织从日本引进螺旋挤压机，农业工程研究院仿制并下达到部分省市农村能源办公室承担试验示范任务，以木屑为原料挤压成棒，既可以作燃料，又可以进一步碳化成“炭块”产品。“八五”期间，作为国家重点科研攻关项目，中国农机院动力研究所、中国农业工程研究院等单位对冲压、挤压技术及装置、碳化技术及装置、燃烧炉技术进行了攻关，取得了相应的关键技术成果。目前这种螺杆式挤压成型机与土窑碳化工艺得到了推广。2002 年河南农大研制出液压驱动双头活塞式秸秆圆块成型机，先将秸秆粉碎成长度小于 15mm，再通过挤压机生产直径大于 100mm 的秸秆压块，用于代替煤炭燃料。随着能源市场的变化，生物质颗粒燃料生产技术及设备得到推广，生物质颗粒燃料部分用于北京、深圳、广州代油代燃气锅炉市场，部分产品出口欧洲市场。1998 年，河北省科学技术委员会立项，在石家庄潜水泵厂开展环模式秸秆饲料压块机的研制并获得成功，之后大量应用于玉米秸秆和棉花秸秆的加工，压块外形为 32 × 32 ×（32～64），目前这种压块机无故障使用寿命依原料的变化而变化，玉米秸一般在 500h 以上，棉花秸一般在 200～300h。一批机械加工企业投入大量人力物力形成了环模平置生物质压块机产品。由此河北省新能源办公室提出了秸秆燃料压块标准、环模式秸秆燃料压块机的技术要求及生物质压块炉具标准，促使河北省生物质压块加工及燃烧设备达到了新的水平和生产规模。环模式秸秆燃料压块机如图 9-4 所示，这种机器既可以生产饲料压块也可生产燃料压块。平模生物质压块机如图 9-5 所示。秸秆压块机基本参数如表 9-5 所示。



图 9-4　环模平置生物质燃料压块机



图 9-5 平模生物质压块机

表 9-5 秸秆压块机基本参数表

| 型　　号 | JYK- 500 | JYK-1 000 | JYK-2 000 |
|---|---|---|---|
| 主机功率 （kW） | 22～30 | 37 | 45 |
| 模 孔 数 （个） | 30 | 36 | 45 |
| 压轮数量 （个） | 2 | 2 | 2 |
| 生产能力（kg/h） | 500～800 | 800～1 000 | 1 500～2 000 |
| 成型含水率 （%） | 14～25 | 14～25 | 14～25 |

生产的各种生物质能成型燃料如图 9-6 所示。




图 9-6 几种生物质能成型燃料

## 9.3.4 生物质压块燃烧炉

在国外，生物质的燃烧设备在 1973 年第一次石油危机之后开始了比较集中的研究，在欧洲城镇出现了以烧木材块和生物质颗粒料为主的家庭用热水采暖炉。根据我国多年的实践，采用秸秆压块、灌木枝条压块以及果木产区、林区的剪枝间伐枝条削片段均可用作采暖热水炊事用能，其价位是煤炭的 1/2，运行费用大大降低，并且满足环保要求。

2005 年将这种秸秆压块用于低排放生物质炊事炉，并进一步发展为采暖炊事热水多功能

秸秆压块燃烧炉。这种炉具的主要功能是解决家庭、小型单位采暖、炊事、热水供应问题，其主要特点是不用电力鼓风、自动落灰、自动供料，其炊事功率≥2kW、一次加料旺火燃烧≥2h、封火能力≥10h，综合热效率高，燃料品种多，秸秆压块、木屑、烟煤、褐煤可供使用，环保指标优秀。

生物质燃烧炉的类型按照供热能力分为大型锅炉（大于 100kW）、中型锅炉（50～100kW）、小型锅炉（50～30kW）、微型采暖炊事炉（8～25kW）、炊事炉（2kW）等几种，目前已经用于房屋采暖、温室采暖、洗浴用水、采暖炊事，是小城镇新民居的新型配套设施。

生物质成型燃料锅炉一般由储料仓与送料结构、燃烧器、吸热腔、引风结构、除尘器、落灰器等组成。在户用炉具上由储送料仓、燃烧器、吸热腔、引风烟道、炉篦、灰斗组成，运行时不用电力鼓风，消烟效果良好。户用生物质压块采暖炊事炉规格与技术性能如表 9-6 所示，户用生物质压块采暖炊事炉如图 9-7 所示。

**表 9-6**　　**生物质压块采暖炊事炉规格与技术性能**

| 规格型号 | SCN-300 | SCN-200 | SCN-150 | SCN-100 | SCN-80 | SCN-60 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 总　功　率　（kW） | ≥33 | ≥22 | ≥17 | ≥12 | ≥10 | ≥7 |
| 炊事火力强度（kW） | — | ≥2 | ≥2 | ≥2 | ≥1.7 | ≥1.7 |
| 旺火燃烧时间（h） | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| 封火时间（h） | ≥10 | ≥10 | ≥10 | ≥10 | ≥10 | ≥10 |
| 取暖参考面积（$m^2$） | 300 | 200 | 150 | 100 | 80 | 60 |
| 环 保 性 能 | 优良 | 优良 | 优良 | 优良 | 优良 | 优良 |



图 9-7　户用生物质压块采暖炊事炉

## 9.3.5　生物质压块的技术优势和待解决的问题

用生物质压块作冬季房间采暖的燃料有多方面的优势。

（1）便于运输、储存，可专业化生产，实现商品化。

（2）密度增加，单位体积所含物质量大大增加，单位体积压块的燃烧值与煤炭已接近。

因此，同一容积的炉具，一次可容纳更多的燃料，可以像煤炭那样一次填料燃烧几个小时，解决了普通秸秆柴草太松散必须有专人加料的问题。

（3）致密的生物质压块在燃烧时，可以从外到里逐次燃烧，改变了松散秸秆柴草一哄而起、浓烟滚滚的燃烧状态，可以实现有控制的稳定燃烧，基本上可做到无烟化燃烧，提高了燃烧效率。

（4）生物质的共同特点是着火点低，易于点燃。生物质炉与普通煤炭炉具相比，一个主要特点就是启动快，这点与太阳能供暖相配合有很大好处，当太阳辐射较低时，可随时点燃生物质燃烧炉供暖；当太阳辐射较高时，可随时停止燃烧生物质炉。而普通煤炉既不易点火，也不易灭火，有很大的滞后性。

生物质压块技术是目前我国重要的推广项目，对我国的节能减排、低碳经济有重要意义，但是目前来看还有一些问题需要解决。

（1）普及面还不大，还远未做到县县乡乡有压块机。对广大农民来说，压块技术还是个新事物，还远没有得到大多数农民的认可。

（2）压块还未做到真正的商品化，就是有人想烧压块，也难在附近买到。

（3）压制技术还有待完善，压块机生产时 200h 无故障的使用寿命不算高，还有待提高。压块的压制质量有待进一步提高，达到大批量生产商品化的质量。压制成本有待进一步降低，要使广大农民认识到燃烧压块比烧煤炭合算，并愿意像储存煤炭那样储存生物质压块。

但总的来说，生物质压块技术已比较成熟，在已有压块生产的地方，把太阳能采暖与生物质压块炉供暖结合起来，就可实现全天候可再生绿色能源供暖。

### 9.3.6 秸秆气化炉

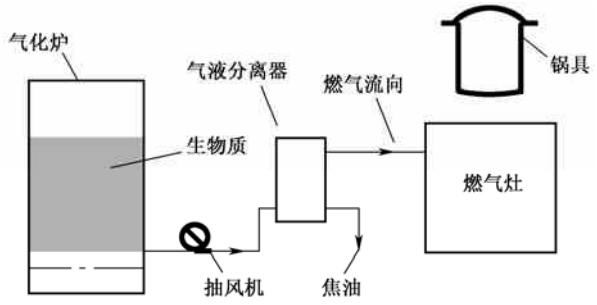
现在在网上和市场上炒作的最响的是秸秆气化炉，如图 9-8 所示不少单位或个人在推销这种技术。那么这种炉具性能如何？能否与太阳能相配合向房间供暖呢？



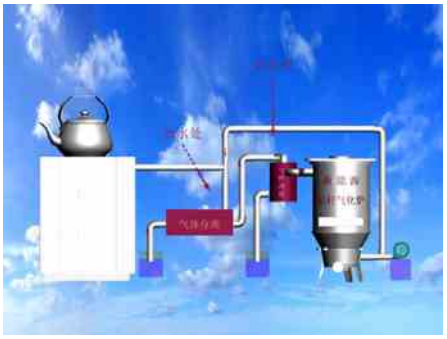
图 9-8 气化炉

我们首先了解一下秸秆气化炉的工作原理，如图 9-9 所示。

秸秆气化炉利用生物质通过在密闭缺氧的条件下，利用干馏热解法及热化学氧化法产生一种可燃气体进行燃烧。这种气体是一种混合燃气，含有一氧化碳、氢气、甲烷等，称为生物质气。秸秆中大约有 70%是这种可气化的成分。




（a）



（b）

图 9-9　生物质气化炉工作原理示意图

这些生物质原料在缺氧条件下加热，会发生复杂的热化学反应过程。此过程实质是植物质中的碳、氢、氧等元素的原子，在反应条件下，裂解成一氧化碳、甲烷、氢气等可燃性气体的分子。这样，植物生物质中的大部分能量就转移到这些气体中。上述生物质的气化过程是通过气化反应装置（即气化炉）完成的。

抽风机把气化炉中产生的可燃性气体抽向气液分离器，在这里燃气中含有的焦油与可燃气体分离，焦油可通过其下部的排油管排走，干净的可燃气体进入燃气灶燃烧以用于炊事、供热水、供暖等。

从各地开发的气化炉的燃烧情况来看，在短期的燃烧过程中，其燃烧状态大都很好，明显具有下述优点。

（1）不需要任何添加剂，取任何生物质物质都可使用。

（2）燃烧状态与液化气基本无差别，燃烧时不产生明显的烟气。

（3）环保节能，每千克燃料可产生燃气 2.1m$^3$，使用过程中无烟尘排放。

（4）使用方便，每次加料可以持续使用燃气 2～3h，可不间断加热。这一特点使其可以用于向房间供暖。

（5）使用安全。秸秆燃气属于常压，基本无安全事故。

（6）用途广，做饭炒菜、烧水取暖等都可。

若生物质气化炉能像短期运行那样长期可靠地运行，则将是一个很好的炉种，也能很好地与太阳能相配合向房间供暖。

但是从各地用户反映出来的情况来看，生物质气化炉长期运行还存在不少问题，总结起

来主要有以下两点。

（1）焦油问题。

在工厂化的气化发生器中，生物质气化效率最高也只达 87.2%，一般就是 70%左右，而宣传中的家庭用的小“气化炉”，其热反应的温度和时间有限，气化率较低，产气量不足。燃料预先没有经过脱硫，产生焦油多，对“气化炉”以及管道腐蚀性都很大。

在长期使用时，灶具上的连接管及气化炉都会有焦油渗出，气味难闻，卫生很差，且易堵塞连接管及灶具。焦油成分复杂，很多是有害物质，这些物质无法分解，长期停留在环境中，会造成环境严重被污染，影响人体健体，影响水源，影响场地的正常使用，也影响人们的居住环境。因此，很多家庭虽然购买了气化炉，但往往用了几天后就不再使用了，这是其中的主要原因之一。

对此目前尚没有好的解决办法。

（2）操作管理问题。

秸秆气化过程对热化学反应的温度和时间控制要求较严格，温度和时间达不到，或不能气化，或气化不充分，产气量不足。

因为家用气化炉都较小，气化条件不易控制，所以产出气体中可燃气成分质量不稳，并且不连续，影响燃用，甚至有安全问题。

气化炉的燃料必须干透才能使用，水分大，烟气多，影响造气，甚至中断产气并产生大量的有害烟雾。

在点炉前必须将燃料在气化桶中压紧压实，不可留有空隙，否则气化效果不好，产生大量的烟雾，而且在燃烧过程中往往会形成烧空状态，上边的料下不来，不能正常产气。

所有上述这些问题说明，气化炉的操作管理是个技术性较强的事情，不可能要求所有家庭主妇都掌握如此难掌握的技术，这也是气化炉难以推广的重要原因。

可见在短期内气化炉还难以大量推广。

但是，秸秆气化炉从整个设计原理看确实有许多可取之处，包括前面所述的很多优点，其燃烧状态很接近液化气，是一种很好的燃烧方式，甚至可说是秸秆、柴草这类生物质能源最好的一种燃烧利用方式。只要我们想办法解决上述焦油和管理两个方面问题，这种燃烧方式将是最有前途的。

也许目前我们就有某些方法可使上述问题得到一定程度的解决，比如由专门的技术人员负责集体产气供气，就可避免家家户户的焦油问题和难于管理的问题。

### 9.3.7 直燃式生物质半气化炉

秸秆气化炉从整个设计原理确实有许多可取之处，但目前有一些问题短期内还不能很好地解决。如果我们改变一下设计理念，不求性能最佳，而以热能的充分利用和性能的综合利用效益最大化为设计目标，就可设计出一种有实用价值的生物质炉具。一种结构简单、造价低廉、使用较方便的直燃式生物质半气化燃烧炉，可能是一种有希望大量推广的炉型。

#### 1. 结构原理

直燃式生物质半气化炉的工作原理如图 9-10 所示。

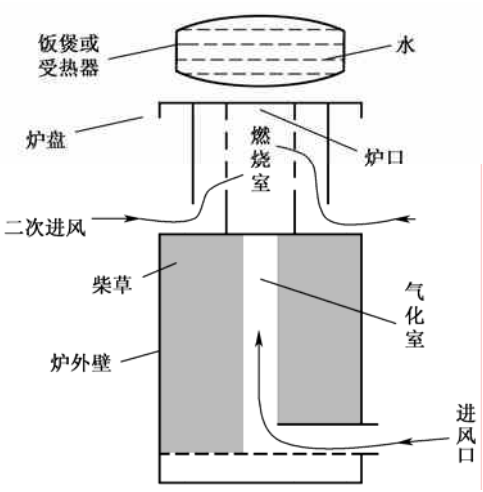



图 9-10　直燃式生物质半气化炉工作原理

如图 9-10 所示，炉内装满柴草，中间有一圆桶形的气化室，从底部点燃柴草，一部分柴草在气化室燃烧，气化室升至几百摄氏度的高温，柴草在气化室裂解气化产生可燃性的烟气，进入燃烧室，燃烧室四壁上有多个通风孔，空气从通风口进入燃烧室与可燃烟气混合产生燃烧反应，燃烧的火焰喷出炉口加热锅具或吸热器。

### 2．主要特点

（1）直接燃烧和气化后再燃烧相结合，气化室和燃烧室直接相连通无中间管道（而气化炉有很长的连接管道），高温燃气直接进入燃烧室进行燃烧，故热损失小，燃烧温度高，燃烧充分。

（2）气化产生的焦油成分仍以高温气态的形式进入燃烧室进行充分的燃烧，因此没有焦油产生。焦油的充分燃烧不仅避免了焦油的污染，而且提高了柴草的燃烧效率。

（3）部分游离碳也参与了燃烧。

（4）使用较方便，一次填料可用 1.5～2h。

（5）与生物质压块相比，燃料无须特殊加工。

### 3．存在的缺点和待解决的问题

（1）燃烧速度较慢，火力较小，按目前见到的炉型用在采暖上功率不够。

（2）一次填料燃烧时间还不算长。若作为太阳能采暖的辅助热源，我们不能设专人长时间管理炉子，因此一次填料应能延长燃烧至 3～5h。

（3）目前多数炉型还需要翻倒炉身填料，不方便，必须改进。

### 4．建议改进途径

（1）可考虑加上小型吹风机进行强制通风，以增强其火力强度。

（2）加大炉身容积，增大填料量，想办法控制燃烧速度，延长燃烧时间。

（3）改进炉型结构，解决填料问题。

（4）对燃料进行初级的加工，如轧碎、捆绑等。

半气化炉存在的上述问题，大多是优化设计问题，难以解决的技术问题较少，恐怕只有燃烧速度的控制问题需要通过多次试验来解决，因此改进成功的机率较高。

#### 5．综合评价

（1）与压块炉具相比，半气化炉不需要对柴草进行难度较大的压制过程，对柴草秸秆只需要进行简单的轧碎或捆绑，不需要耗电量很大的重型压块机，燃料加工成本要低得多，可以在任何乡镇农村推广使用。此外，炉具造价也较低。

（2）与气化炉相比，其综合使用性能相差不多，而热效率偏高。更主要的是没有气化炉存在的焦油和难管理两个难以解决的问题。

综合考虑，半气化炉存在的问题较易解决，一旦解决好，可能是与太阳能采暖相配合供暖的较合适的炉型。

### 9.3.8 太阳能与生物质能的互补及采暖流程

用生物质能作为辅助热源与太阳能配合在冬季向房间供暖，是农村乡镇最佳的选择。

以墙体外墙保温、太阳能被动采暖、太阳能主动采暖、生物质燃烧供能、水箱储能、地板蓄能、电泵驱动循环、电子自动切换控制 8 部分集成，可构成一个四季采暖、热水能源体系。在这个能源系统中，太阳能和生物质能等可再生能源供能量达到 90%以上，电能只作为电泵驱动的能量。这是我国新农村建设、小城镇建设的必由之路。太阳能与生物质能的互补采暖基本流程如图 9-11 所示。

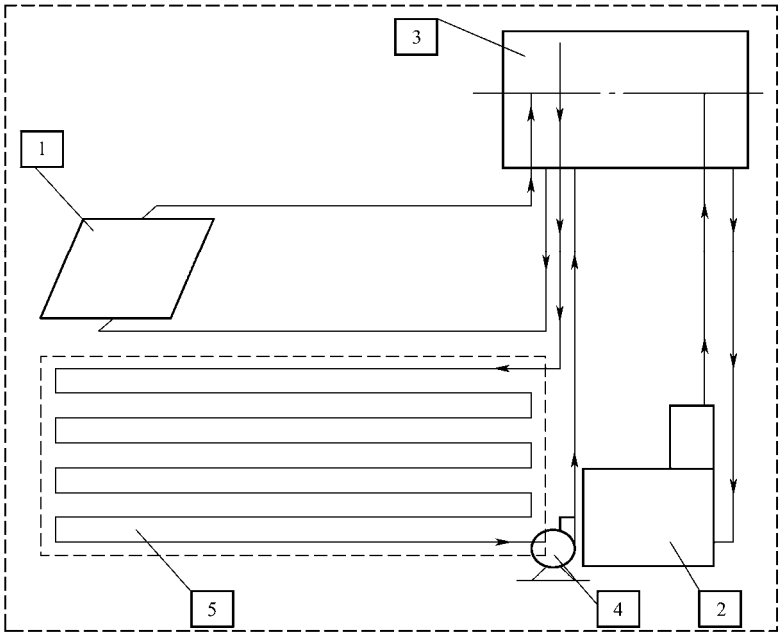



图 9-11 太阳能与生物质能互补采暖的流程示意图

1．太阳能集热器 2．生物质采暖炉 3．集热水箱 4．采暖循环水泵 5．地埋采暖盘管

## 9.4　其他辅助热源

除前面所述的几种辅助热源外，常规能源煤炭、燃油、燃气等仍是重要的甚至是最现实的辅助能源。

### 9.4.1　燃煤锅炉

有不少家庭已有燃煤的土暖气采暖，在这些家庭搞太阳能采暖，利用原有的燃煤锅炉作为辅助热源，是一种节省投资的方案。

在我国北方的广大农村冬季采暖，不管是采用火炕、火炉或土暖气，目前大部分还是以燃煤为主，因此研究以燃煤锅炉为辅助热源的太阳能采暖系统，具有现实意义。

在农村，燃煤炉的作用主要分两种情况：一种是炊事、烧水、采暖 3 种功能兼一身，这种情况占多数；另一种是以采暖为主，兼提供部分热水。这两种不同的情况对与太阳能采暖相结合，有不同的要求。

#### 1．太阳能采暖与炊事、热水、供暖三用炉相结合

这种采暖炉一天要用来做三顿饭，还包括烧制生活用热水、家畜的饮用水，甚至有的家庭还要做猪食，一天中煤炉大部分时间都在工作中，每天仅做饭烧水及夜间封火后的余热就能满足一半的供暖功能。因此太阳能集热器只担负不到一半的热负荷即可。其循环回路如图 9-12 所示。

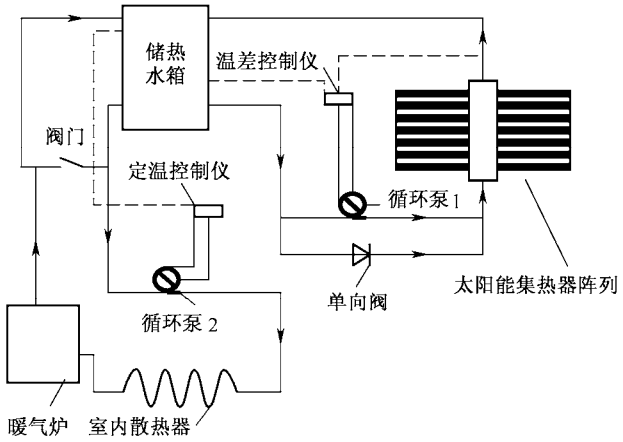



图 9-12　太阳能采暖与炊事、热水、供暖三用炉相结合示意图

在图 9-12 中，太阳能集热器与储热水箱成一个集热循环系统，该系统既可通过启动循环泵 1 进行强制循环，也可通过与循环泵 1 并联的支路经过单向阀进行自然循环。循环泵 1 可由温差控制仪通过测定水箱底部与集热器上部的温差来控制其启动（温差控制仪的两个探头分别放置在水箱底部和集热器上集管处），当温差达到设定数值时，比如高出 10℃时循环泵

启动，当小于 5℃时停止运转。

由水箱、暖气炉和室内散热器组成一个供热系统。在白天，通过暖气炉和太阳能双重加热使水箱的水温提高。循环泵由定温控制仪控制，定温控制仪的温度探头放置在水箱上部，当温度大于设定温度时，循环泵启动，向室内供热；当温差小于设定温度时，循环泵停止转动。

如果出现连续阴天，为了降低水箱的温度以减少系统的热损失，可以打开阀门，使暖气炉加热的热水只有很少一部分进入水箱，而大部分直接通过阀门再通过循环泵 2 进入室内散热器，形成较短路径的循环，从而把大部分热量直接通过散热器散发到室内。

#### 2．太阳能采暖与专用供暖炉相结合

对于专用供暖炉与太阳能采暖相结合，因不同的条件、不同的家庭需求而有不同的设计理念，因此所选定的太阳能供暖的保证率也有很大差别。

（1）为了最大限度地节省常规能源，可以设计太阳能的供暖保证率达到 70%～80%，太阳能集热器面积要尽量大些，而暖气炉只在多日阴天、室内温度明显降低的情况下才启动。

（2）希望全年都能充分利用太阳能，且不希望对太阳能系统一次性投资太大，可以选择较低的太阳能供暖保证率，比如选择 30%，这样暖气炉将担负起大部分供暖的能耗，太阳能集热器面积选择要小些，以在夏季需要太阳能的供热水量来决定集热器面积。

（3）管路循环系统仍可按图 9-12 所示进行安装；也可把锅炉采暖系统设计成独立循环系统，通过手动阀门与太阳能系统连接起来。

### 9.4.2 燃油和燃气锅炉

相对于燃煤锅炉，燃油和燃气锅炉使用较方便且对家庭室内环境污染较小，也基本上没有炉灰等垃圾需要处理。因此，有的家庭为了方便希望采用燃油或燃气锅炉作为辅助热源。相对于煤炭，燃油和燃气是更稀缺、更贵重的燃料，对于这种系统，应尽量扩大太阳能供暖的保证率。燃油和燃气锅炉的一个重要优点是启动快，停止也快，基本上可以像由电能驱动的热泵那样，可根据需要随时启动或随时停止，因此其安装方式、循环回路基本上与热泵系统相似。

# 第10章 集热器阵列和系统控制

在太阳能采暖系统中，大面积的集热器一般要安装在用户的一个房顶或几个房顶上，而用户的房子可能是千差万别的，有的是平房，有的是二三层楼房，有的是平屋顶，有的是斜屋顶，而且集热器的安装角度又有比较严格的要求，因此，集热器的排列安装方式就非常重要，它比一般的热水工程有较大的难度。一般热水工程都有较整齐的安装场地，而太阳能采暖则往往没有这个条件，一般只能依据不同用户的不同房屋条件来安装，这就增加了集热器安装排列的难度。但是万变不离其宗，再复杂的系统也是由几种基本的循环系统组成的。按系统循环动力来分，有自然循环和强制循环两种；按排列方式来分，有串联和并联两种。本章将就系统的循环及控制过程进行讨论。

## 10.1 流体力学基础知识

为深入分析液体循环的规律，我们先了解一些流体力学的基本知识。

### 10.1.1 液体内部的压强

#### 1. 流体的种类

流体是液体和气体的总称，其主要特征是：具有流动性；无固定形状，随容器形状而变化；受外力作用时内部产生相对运动。

流体可以分为不可压缩性流体和可压缩性流体。如果流体的体积不随压强变化而变化，受热时体积膨胀不显著，该流体称为不可压缩性流体，一般液态水等液体可近似看成不可压缩性流体。若流体性体积随压强和温度发生显著变化，则称为可压缩性流体，一般气体可看成可压缩性流体。

本章主要研究液体的性质，即主要研究不可压缩性流体的性质。

#### 2. 压力单位

压强（习惯上称压力）的定义是单位面积上所受到的垂直作用力。压力的大小可用单位面积上作用力的大小或液柱的高度来表示。在国际单位制中，每 $1m^2$ 面积上作用 1N 的力，其压力定为 1Pa。但由于帕（Pa）的单位太小，因此常用的压力单位是巴（bar）。

$$1\text{bar} = 10^5\text{N/m}^2 = 10^5\text{Pa}$$

在工程单位制中，以工程大气压（at）作为压力单位。而 1at 等于 735.6mmHg。1at = $1\text{kgf/cm}^2 = 10^4\text{kgf/m}^2$

$$1\text{bar} = （10^5/9.81）\text{kgf/m}^2 = 10\ 194\text{kgf/m}^2 = 1.019\ 4\text{kgf/cm}^2 = 1.019\ 4\text{at}$$

此外，还有用物理大气压和液柱高度作为压力单位，一般处于海平面大气的压力，由气压计测得平均为 760mmHg，即 1atm，物理上称为物理大气压。

### 3．液体内部的压强

垂直作用于液体内部某一点处单位面积上的力称为液体的静压强，简称压强，习惯上又称为压力。

在静止的液体内部任意点处，都经受着上、下、左、右各个不同方向上的压力，且在数值上各个方向上的力均相同。如图 10-1 所示，同一点在不同方向上受的力 $F1$、$F2$、$F3$ 在数值上都相等，即：$F1 = F2 = F3$。

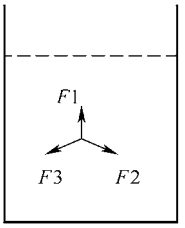


图 10-1 液体内部的静压力

液体内部某点处压力的大小，只和液体的比重（密度）、该点所处液体内部的深度（或液柱的高度）成正比关系。

若流体的比重为 $d$，则液柱高度 $h$ 与压力 $p$ 的关系为：$p = dh$

或用密度公式表示：$p = \rho gh$ （10-1）

这里 $\rho$ 为流体的密度，g 为常量 9.8。

### 4．太阳能采暖系统内的压力问题

太阳能采暖系统中从屋顶（楼顶）到室内散热器、到地下储热系统，其高度差从几米到十几米不等，其内部压力最高可达 1 个多大气压，不同的压力对系统的设施有不同的影响。在设计系统时必须考虑。

（1）集热器阵列内部的压力。

太阳能集热器一般是放在屋顶上，其液柱高度最小，其内部压力也最小。但是对于真空管集热器而言，由于其连接方式大都是插管式，抗压力较小，故对如何排列安装也需要特别注意。这里分 3 种情况。

**第一种情况是在平屋顶面上安装。**对于横排式真空管集热器，其总高度即自然循环系统的水箱液面与底排真空管的高度差，一般不要超过 3m，若超过 3m 则底排真空管将承受较大的压力，真空管尾座将受到较大的后座力，真空管长期受到一个向外的拔出力，容易使密封胶圈漏水。

**第二种情况是在斜屋顶上安装。**更要注意其总高度不要超过 3m 太多，这里总高度仍然是自然循环系统的水箱液面与底排真空管的高度差。一般斜屋顶本身高度就有 2m 左右，再加上集热器的高度和水箱的高度，而且水箱还要高于集热器至少半米，因此总高度容易超过 3m。

**第三种情况是在二层楼的屋顶上安装。**利用太阳能向二层楼供暖，仅靠楼顶面积往往不够用，常需要在前面或侧面的厢房上也安装太阳能集热器。但这些厢房大都是一层平房，与楼顶的高度差在 3m 以上，与楼顶水箱的高度差可达 6m 以上。若搞成一个循环系统，则底排

真空管将受到 6m 高水柱的压力，即 0.6kgf/cm² 的压力，对一个内径 4.7cm 的真空管来说，其底面面积大约 17cm²，其受到的压力为：

$$0.6\text{kgf/cm}^2 \times 17\text{cm}^2 = 10\text{kg}$$

这就是说每个真空管将长期承受 10kg 的力拔出联箱、推向尾座。这么大的力长期作用，会对底排的真空管集热器阵列造成损伤。因此，对这种情况，最好搞两个循环系统，即楼顶搞一个循环系统，平房搞一个循环系统。

（2）水箱内的压力。

自然循环的水箱需要放在集热系统最上部，故承受压力不大。但要想搞水箱储热，就需要几吨或十几吨的大水箱，这样，水箱放在屋顶有个承重问题，不宜做得太大。若放在地面，水箱将承受较大的压力。解决这个问题有 3 种途径。

第 1 种是增加制作水箱的材料厚度，增设耐压结构，提高水箱的承压能力，即做成耐压水箱。

第 2 种是在水箱内加换热器，循环热水在换热器内流动，水箱只承受自身水的重量。

第 3 种是采用高压扬程泵，把水箱内的水直接泵入集热器系统进行循环，再自然流回水箱。水箱水位不十分满，水箱与大气连通，只承受自身水的重量。

（3）地下储热系统的压力。

地下储热系统距楼顶集热器有十几米的高度，一般只能采用换热器闭路循环的办法。换热器的耐压能力大，一般至少能耐几十米的水柱压力（10m 水柱高约为一个大气压）。

## 10.1.2　管内液体的流动

### 1．流体流动中的作用力

流体流动中的作用力包括体积力和表面力两种。

体积力：作用在流体的每一个质点上，并与流体的质量成正比，所以也称质量力。对于均质流体（$\rho$不变），体积力也与流体体积成正比，如重力、离心力。

表面力：表面力与表面积成正比。

作用于流体表面上的表面力可分为压力和剪力。

压力：垂直于表面的力，单位面积上的压力称压强。

剪力：平行于表面的力，单位面积上剪力称剪应力。

如图 10-2 所示，设想有两块面积很大、相距很近的平板，板间充满某种静止液体。若将下板固定，以恒力 $F$ 推动上板，使它以速度 $u$ 向 $x$ 方向运动，此时两板间的液体也分为无数薄层向 $x$ 方向运动。附在上板底面下的一薄层流体以速度 $u$ 随上板运动，其下各层液体的速度依次减慢，到下层板表面时速度降为零。实验证明，对于一定的流体，内摩擦力 $F$ 与两流体层的速度差 $\mathrm{d}u$ 及接触面积 $s$ 成正比，与两层之间的垂直距离 $\mathrm{d}y$ 成反比，即：

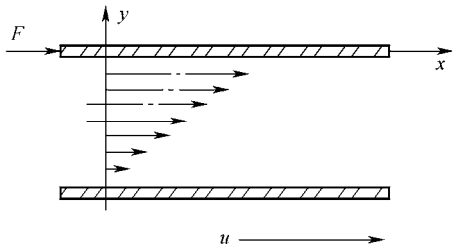


图 10-2　液体的内摩擦力（剪力）

$$F=\mu S\frac{\mathrm{d}u}{\mathrm{d}y} \tag{10-2}$$

式中：$F$——内摩擦力（又称剪力），单位为 N；

$\frac{\mathrm{d}u}{\mathrm{d}y}$——法向速度梯度，即在与流体流动方向相垂直的 $y$ 方向流体速度的变化率，单位为 1/s；

$\mu$——比例系数，称为流体的黏度或动力黏度，单位为 Pa·s。

一般，单位面积上的剪力称为剪应力，以 $\tau$ 表示，单位为 Pa，则上式变为：

$$\tau=\mu\frac{\mathrm{d}u}{\mathrm{d}y} \tag{10-3}$$

上两式称为牛顿粘性定律，表明流体层间的内摩擦力或剪应力与法向速度梯度成正比。

剪应力与速度梯度的关系符合牛顿粘性定律的流体，称为牛顿型流体，水和大多数液体及所有气体都接近牛顿型流体，可基本按牛顿型流体进行计算；不符合牛顿粘性定律的流体称为非牛顿型流体，如高分子溶液、胶体溶液等高黏度液体及悬浮液等。

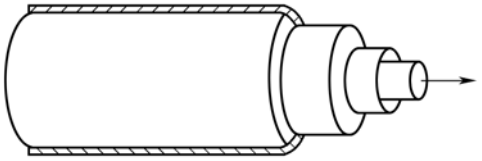


图 10-3 流体在管内分层流动示意图

### 2．流体在圆管内的速度分布

图 10-3～图 10-5 表示了在管道内液体流动速度分布情况，管壁处速度梯度最大，故该处剪应力最大，即对流动的阻力最大，因此流速趋于 0；管中心速度梯度为 0，剪应力亦为 0，因此流速达到最大。

实验和理论分析都已证明，层流时的速度分布为抛物线形状，这是因为层流流动时，流体层间的剪应力服从牛顿粘性定律。

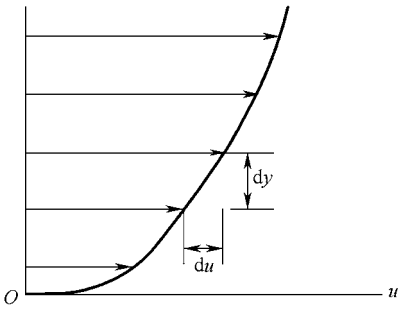



图 10-4 层流时的速度分布图 1

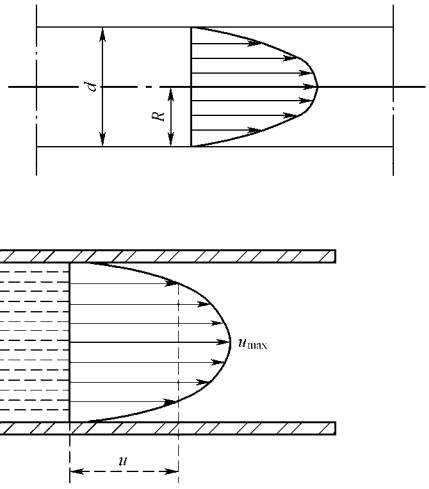



图 10-5 层流时的速度分布图 2

层流时速度分布式为：

$$u=u_{\max}\left[1-\left(\frac{r^2}{R^2}\right)\right] \tag{10-4}$$

式中：$u_{max}$—管中的流体质点最大流速；

$R$—管半径；

$r$—流体内质点到管中心的距离。

计算结果表明，在圆管内作层流流动时的平均速度为管中心最大速度的一半。

对于一定管径的管路，当流速增加时，单位重量（1N）流体因直管阻力所造成的压头损失增加较快，在一定的情况下，阻力增加的倍数将是流速增加倍数的平方。因此在设计管路时，若选用过高的流速，将消耗更多的能量，这在经济上不合算。但也并不是流速选得越小越好，因为若要保证一定的送液量（流量），流体的流速越小，则所需采用的管道直径就越大，这在经济上也是不可取的。因此，要经过经济权衡，在工程上规定在一定操作条件下，不同流体在管道中有一个最适宜的流速范围。

### 10.1.3　管道阻力的计算

太阳能采暖系统的安装主要是管道的安装，了解管道阻力有哪几个主要因素决定，对管路的设计、管道的选材和安装有重要意义。

管道的阻力分两类：一是工质在管道流动因管道壁面摩擦产生的沿程阻力，二是管道连接处的管件（变径、三通等）阀门、水表、水泵等管道附件形成的局部阻力。

太阳能采暖系统管道沿程阻力（水头损失）可按下式计算：

$$i = 105C_h^{-1.85}d^{-4.87}q^{1.85} \tag{10-5}$$

式中：$i$——管道单位长度水头（压力）损失，kPa/m；

$d$——管道计算内径，m；

$q$——管道设计流量，$m^3$；

$C_h$——海登—威廉系数，塑料管取值 140，铜管、不锈钢钢管取值 130，铸铁管、普通钢管取值 100。

从上式可以看出，管道阻力与水流速度的 1.85 次方成正比，这说明随着水流速度的增加，管道的阻力会迅速增加，即管内压力迅速降低。因此在实际运行时，水流速度的选择要适中，以免流速太大造成阻力太大，增加水泵的负荷。

从上式还可以看出，管道的阻力与管径的 4.87 次方成反比。对这个问题有些人可能不太理解其意义，我们举例来分析一下这个问题。为考虑问题简单方便我们用 4 代替 4.87，认为管道的阻力与管径的 4 次方成反比。

现在我们设有两支管道 $D_1$、$D_2$，$D_2$ 直径 $d_2$ 是 $D_1$ 直径 $d_1$ 的 2 倍，即 $d_2 = 2d_1$。那么很显然二者的截面积相差 $2^2 = 4$ 倍。试分析各自的管道阻力。

有人认为 4 根 $D_1$ 管的截面积等于 1 根 $D_2$ 管的截面积，则 4 根 $D_1$ 管并联的阻力与 1 根 $D_2$ 管的阻力应该一样，即 $D_1$ 管的阻力是 $D_2$ 管的 4 倍；在同样的压力下，4 根 $D_1$ 管和 1 根 $D_2$ 管水的流量应一样。实际上这种理解是错误的，根据公式（10-5），管道的阻力是和管径的 4 次方成反比，这就是说在其他条件相同的情况下，$D_1$ 管的阻力是 $D_2$ 管阻力的 $2^4 = 16$ 倍，1 根 $D_2$ 管可等于 16 根 $D_1$ 管并联使用。

从直观上我们也能理解上述结论：虽然 4 根 $D_1$ 管与 1 根 $D_2$ 管的截面积相等，但 4 根 $D_1$ 管有 4 个管子的内管面对水流有摩擦力，其阻碍作用比 1 根 $D_2$ 管的内摩擦力大得多，故在同样的压力下，$D_1$ 管内水流速度要小得多，4 根 $D_1$ 管的流量比 1 根 $D_2$ 管小得多，阻力大得多。

我们不要求每个安装工都能设计计算管路，但懂得上述公式的意义，对管路的设计安装施工会有好处。

## 10.2 自然循环

自然循环是太阳能集热系统最重要、最基本的的循环，就是在强制循环系统中，集热器阵列也要尽量按自然循环系统的要求来排列安装。这是因为：一则使强制循环与自然循环的水流方向一致可节省动力；二则也是最重要的一点，若集热器系统只能进行强制循环，一旦由于停电、循环泵出故障等原因造成强制循环不能进行，则整个系统循环就完全停止，如果这时正处在太阳辐射很强的时刻，则有可能造成系统局部过热，就可能对系统的某些部件造成严重损伤，若系统能进行自然循环，就可避免这些问题的发生。

所以，自然循环是太阳能集热系统最重要、最基本的循环，在安装施工时必须时时刻刻注意这点。

另一方面，一般来说，自然循环的设计安装往往受很多具体条件的限制，如坡度、压头、管径、位置、排气等因素的制约，其难度要比强制循环大得多。而强制循环要单纯一些（当然也有泵的选择和控制以及管路等问题），因此我们首先重点讨论一下自然循环问题。

### 10.2.1 自然循环的动力——压头

所谓自然循环，就是以冷热水的密度差而产生的压力差（压头）为动力，驱动管路里的液体（水）流动。

下面我们做一个实验来分析一下自然循环是如何产生的。

如图 10-6 所示，在一个环形管内部充满深色的水，我们在环形管的右侧底部加热，水温

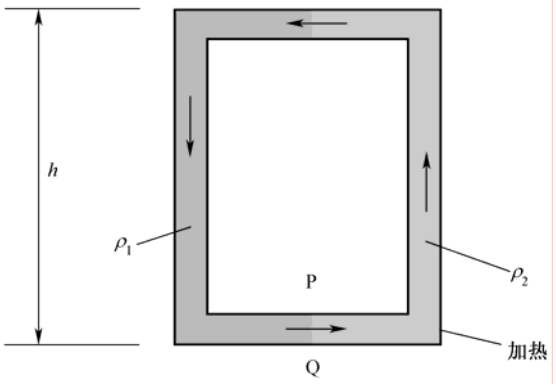



图 10-6 水的自然循环

升高，体积膨胀，密度变小。我们用浅色表示温度升高后的热水，而在左侧未加热的水仍是深色。我们设想在底部水管中间有界面 PQ，两侧水位高度相等，都等于 $h$，但是两侧水的密度不一样，冷水密度大，热水密度小，分别用 $\rho_1$ 和 $\rho_2$ 表示，则 $\rho_1 > \rho_2$，左右两则对分界面 PQ 的压强分别是 $gh\rho_1$ 和 $gh\rho_2$。则界面 PQ 受到的合力 $F$ 为：

$$F = gh\rho_1 - gh\rho_2 = gh(\rho_1 - \rho_2)$$

其中，g 为常量 9.8。

在力 $F$ 作用下，环形管内的水将沿箭头所示的方向流动。

上述过程就是自然循环过程，在这个过程中没有外力推动水流动，其流动的动力来源于冷热水的密度差而形成的压力差，这种压力差只与液体的密度 $\rho$ 和深度 $h$ 有关。通常我们把这种形成自然循环的压力差叫压头。

### 10.2.2　自然循环产生的必要条件——排气

我们再做另一个实验。先不把环形管内的水加满，而是留一段空气，如图 10-7 所示，仍然按上述方法在右侧加热，右侧的浅色水表示热水，左侧深色表示原来的冷水。浅色水受热体积膨胀，密度 $\rho_2$ 变小。由于水管内没有充满水，不能形成图 10-6 那样的自然循环流动，两侧水都处于静止状态，这时 PQ 界面所受合力必为 0，即左右两侧水对于 PQ 界面的压力必然是大小相等、方向相反、互相抵消，即有：

$0 = gh\rho_1 - gh\rho_2$

或：$h\rho_1 = h\rho_2$

但是由于 $\rho_1 > \rho_2$

则有：$h_2 > h_1$

这个实验实际上说明了在一个环形管路中，若不管什么原因管内存留了空气，则自然循环就被打破，不能再进行。虽然右侧水的密度由于温度升高而变小，但是其水位升高，抵消了由于密度降低而造成的对 PQ 界面压力的减少，从而使 PQ 界面两侧所受的压力总是保持相等、平衡，使水的循环流动不能产生。除非有外力推动克服了水管内水的重力，循环才能产生，但这时已不是自然循环，而是强制循环了。

通过图 10-8，我们进一步分析这一问题。

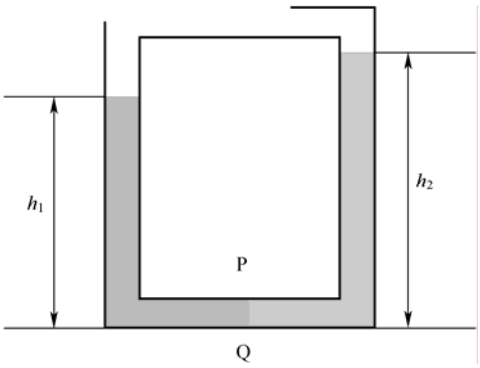



图 10-7　存有空气的环形管路

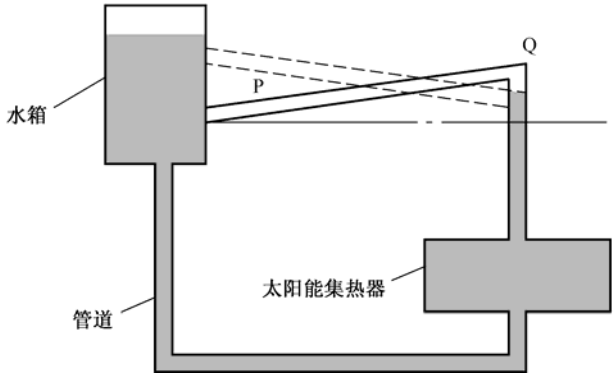



图 10-8　自然循环图例——循环不能进行

这是一个太阳能集热器简略的循环示意图。图中点划线以上 Q 部位的管道内存有空气，虽然由于太阳能集热器的加热，右侧水温升高，密度减少，但其结果只是使右侧液面有所提高。空气柱的存在，使两侧压力得到平衡，水流循环不能产生。这与图 10-7 中的原理是一样的。

有人说之所以这个系统的自然循环不能产生，根本原因是 PQ 处管道安装的倾斜角度不对，若反向按图中虚线的方向倾斜，自然循环就能进行。这种说法有一定道理，确实按这种角度安装自然循环能进行，但是这种说法没有说到问题的本质上。

例如，如果我们不改变 PQ 处管路的安装方向，而是仅在 Q 处安装一个排气管或放气阀，把管内的空气放出，而其他管路都不变动，PQ 段管路也不变化，则自然循环就能正常进行，如图 10-9 所示。可见 PQ 段管路的倾斜度并不是问题的关键点，关键点是循环系统内部不应该有空气。把 PQ 处按虚线改变方向的作用是能把管内空气排出。若管路内没有空气，液体水的流动对管路的安装方式并没有特殊的要求。

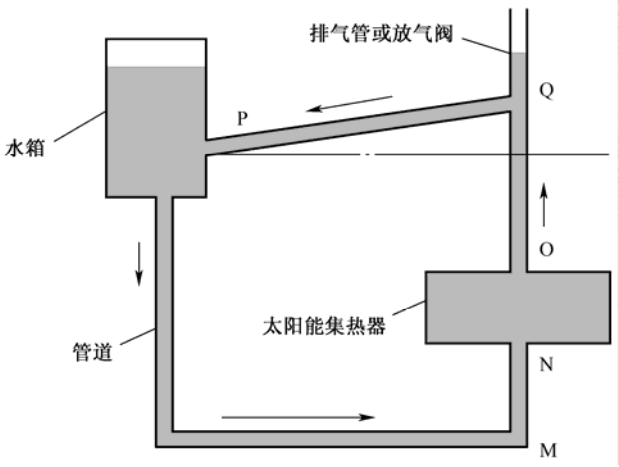



图 10-9　自然循环图例——循环可以进行

能否自动排气，是自然循环系统安装的两个核心问题之一，另一个就是“压头”。由于对压头人们大都容易理解，而对于排气的理解却往往有偏差，甚至有错误理解，所以我们进一步谈谈这一问题。

所有液体循环都是在管道内进行的，管道内一旦进入气体，液体就不能正常流动循环，甚至堵塞，这就是气塞。气塞是所有液体循环的大敌。我们看到医生在给患者注射药液时，总是要把针头向上把针内的气泡排除干净，然后才注射。若是气泡排除不尽注射到患者体内，则造成医疗事故，因为这些气泡在人体内会形成气塞，会堵塞血液的正常流动，使被堵塞的组织缺血甚至坏死。

在太阳能供暖系统中，不论是屋顶上的太阳能集热器系统，还是屋内的散热器供热系统或地板辐射换热系统，都是依靠管路内水的流动来实现的，故都有排气问题。

液体内的气体从哪里来？能否通过一次性排气而一劳永逸呢？回答是否定的，我们不能通过一次性排气而使系统总是正常运行。一方面在运行过程中可能会有某种原因使气体进入管道内，如通过向系统补充水而带进空气；另一方面，液体水内总是会溶解有少量气体，鱼

类就是通过呼吸水中溶解的氧气生存的。我们把一盆从自来水龙头接来的冷水放在太阳底下，一会儿盆壁上就出现许多小气泡，这是受热后溶解在水中的空气游离出来附在盆壁上，这种现象说明水中溶解有大量空气，受热后会游离出来。所以太阳能集热系统内可能随时会产生气体，安装的管路系统必须能随时把产生的气体排放出来。

不管是安装太阳能集热器管路，还是安装室内散热器管路，在一些产品说明书上总是强调管路要保持一定的坡度以利于水流的循环，但并不说明其道理何在，而很多人甚至包括一些安装工并没有真正理解自然循环的原理，只记住了管道要倾斜这个结论，久而久之就造成一种误解，似乎管路的向上倾斜才是问题的关键和本质，只有管路向上倾斜才能使热水向上流动，才能使自然循环产生。因此有的安装工在安装时只注意了管道的倾斜，而不懂得问题的关键是管路能否自动放气，管道安装好后，气体不能自动放出，还是不能自然循环。

强调自然循环管道要保持一定的坡度是对的，但其原因不是热水流动必需这个坡度，实际上只要整个管路系统充满水且有“压头”，即整个系统存在循环动力，整个系统的水就能流动起来，不管是冷水还是热水，都会沿压力的方向流动起来。至于管路本身的倾斜与否对水的流动并没有很直接的影响。从图 10-9 可以看出，热水可以沿 OQ 方向向上流动，也能沿 QP 方向向斜下方向流动；冷水可以从水箱向下流动，也可以沿 MN 方向向上流动。它们的流动方向就是管内“压头”产生的压力方向。

很多说明书上强调管道的倾斜，其真正原因是保证管内气体能够沿向上倾斜的管道自动排出。

由于空气比水轻得多，因此气体在管道中只能向上或沿倾斜向上的方向移动，这点是气体与液体水的根本区别。在管道中，液体水既可以向上流动，也可以向下流动；而在管道中的气体只能向上或斜向上移动，最多是沿水平面水平移动，不可能向下运动。这有点像“过河卒”，只能前进或横向水平移动，不能后退。管道中气体运动的这个特点，在设计安装管道时要特别注意。

在图 10-8 中 Q 点处是个“山峰”点，或叫极高点，这个点的左右两侧都比 Q 点低。当气体从其他处运动到这里后，就不能再移动了。如上面所说，空气不能向下运动，空气聚集在这个“山峰”点处就形成了气塞，自然循环就不能进行了。

这时若在“山峰”点 Q 处安装一个排气管或放气阀，如图 10-9 所示，则气体就从这里排出，所谓“山峰”点也就变成放气点了，自然循环就能进行了。

注意消除“山峰”点的出现，是自然循环系统安装时要特别注意的问题。尤其是当管路比较长时，有些向上拱起的部位，看起来不太明显，但实际上形成了“山峰”点，即出现该点处高、两侧低的现象，这些不明显的“山峰”点同样会聚集气体，形成气塞，影响自然循环的进行。

可见自然循环系统的关键点是“山峰”点，是排气，而不是什么管道的倾斜度，管道的倾斜度也是为有效排气服务的。只要整个循环系统中设计有足够的“压头”，并消除了“山峰”点，自然循环就能进行。

在实际设计管道线路时，有时要必须出现“山峰”式拐点，在这种情况下，就只有像图 10-9 那样，在“山峰”拐点处安装一个排气管或放气阀。

### 10.2.3　水箱高度

太阳能集热器的自然循环系统要正常运行，需要有循环动力，即“压头”，这个要由水箱

的高度来提供。

水在集热器中吸收太阳热能后，随着水温的升高密度降低，比重减小，向上运动，沿上升循环管道进入保温水箱。同时，处于水箱底部和下降管道中的冷水，由于比重较大而流入最低位置的集热器下集管。系统在无需任何外力的作用下，如此周而复始地循环。自然循环系统结构简单，运行可靠，易于维修管理，不消耗其他能源，因而被广泛采用。

自然循环系统需要一定的热虹吸压头才能克服水在整个管道系统的流动中存在的总水头损失，因此必须保证循环水箱与集热器有一定的高度差。

水箱越高，提供的循环动力越大，还可以解决系统中的一些气阻问题。但水箱过高，相应增加了循环管道的长度和散热面积，同时还导致水箱支架结构复杂化，不仅增加了造价而且引起安全、抗震和稳定性等方面的问题。

那么水箱高度多高为好呢？我们知道，在自然循环系统中，系统的热虹吸作用压力可近似表示为：

$$H_T = h \cdot (r_2 - r_1) \qquad (10\text{-}6)$$

式中：$H_T$——热虹吸压力；

$r_2$、$r_1$——冷、热水的比重；

$h$——集热器中心平面与循环水箱中心平面的高差。

当$\Delta r = r_2 - r_1$等于某一个定值时，作用压力$H_T$取决于$h$的大小。也就是说，中心距$h$越大，热虹吸作用压力$H_T$就越大。热虹吸作用压力$H_T$的大小，决定着循环流速的快慢。

在太阳能采暖系统中，一般采用小水箱，承重问题好解决，安装较容易，故水箱的高度可以适当高些，以利于自然循环的进行。

### 10.2.4 强制循环

强制循环系统不是靠由工质密度差所形成的压头来循环流动的，而是依靠水泵作为动力来实现工质的循环流动。与自然循环系统相比，强制循环系统有如下特点。

（1）整个系统可以不受采光面积的限制，系统可以做到上百甚至上千平方米。

（2）储热水箱也不必像自然循环系统那样必须高于集热器，强制循环系统的储热水箱可以根据现场情况，摆放在任意合适高度的位置，即可以安装在集热器下方。

（3）强制循环是由水泵作为循环动力，因此除水泵外，一般还需一套自动控制系统来控制水泵启动、停止和运行。

强制循环系统有定温强制循环、温差强制循环和定时强制循环等多种不同的控制方式。定温强制循环是在集热器的上循环管上安装感温探头，监测集热器的水温，当集热器的水温达到设定温度的上限时，自动控制水泵启动。同时集热器的内水温下降，水温下降到设定下限时，水泵停止运行。控制温度的上下限温度是人为设定的。

温差强制循环是在集热器的上循环管上和储热水箱的底部各安装一感温探头，检测集热器和储水箱底部的温差，当温差达到设定上限时，自动控制以控制水泵启动，集热器中的热水泵到储水箱，同时集热器和储水箱底部之间的温差下降，当温差降到设定下限时，水泵停止运行，等待下一个循环周期。强制循环由于循环动力是水泵，因此热效率高，且系统面积可以很大。

## 10.2.5　正压运行和负压运行

### 1．负压运行

在强制循环系统中，循环泵两侧的压力是不一样的，在水泵出水口一侧，压力较大，为正压；在水泵进水口一侧，压力较小，为负压。

在真空管集热器系统中，由于真空管是直接插入联箱的，靠硅胶圈密封水，因此承压能力较差，在强制循环系统中，真空管插入联集箱处很容易漏水。为减小漏水，可通过降低系统水压力的方法解决，通常采用的方法是循环水泵不安装在下循环管，而是安装在上循环管，将真空管内的热水抽到储热水箱，这样真空管和联集管处就形成一个负压力而不易漏水，如 10-10 所示。

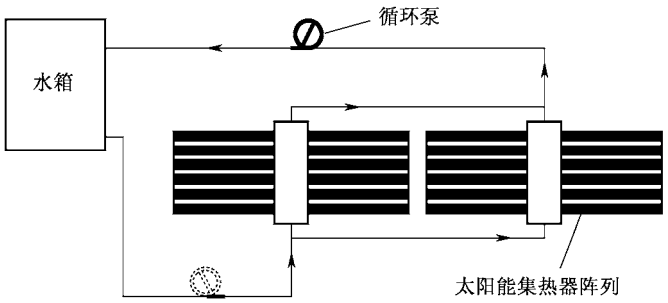



图 10-10　太阳能集热器阵列负压运行

一般在并联系统中都应采用这种负压运行的方式。

### 2．正压运行

但是，在某些情况下却需要正压运行。例如在图 10-11 所示的串联系统中，为防止出现“山峰”点，在管道向下拐弯处安装有放气阀，在这种系统中循环泵就应安装在下循环集管，使太阳能集热器阵列处于正压状态运行。假设把循环泵安装在上集管使集热器处于负压状态，就有可能从放气阀吸进空气，影响系统的正常运行。

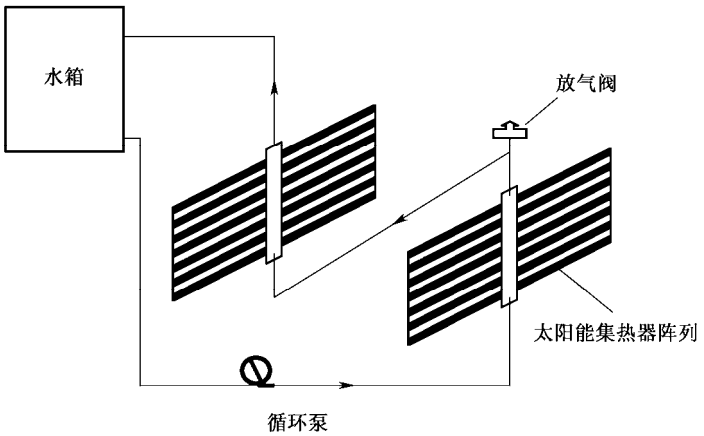



图 10-11　太阳能集热器串联系统正压运行

# 10.3 太阳能集热器的串联和并联

由于太阳能采暖一般要采用几十平方米的集热器，而每一个集热器模块一般只有几平方米，因此，每一个太阳能集热系统必须安装成一个太阳能集热器阵列。不同的排列方式对各集热器的流量和换热均有影响，对系统的整体性能有很大影响，因此阵列内各集热器如何排列就是一个重要问题。

## 10.3.1 3 种基本连接方式

### 1. 真空管集热器的 3 种基本连接方式

像电学中的电路有串联、并联、混联一样，太阳能集热器的安装方式也有串联、并联和混联 3 种基本方式。如图 10-12 所示是真空管集热器的 3 种基本连接方式。

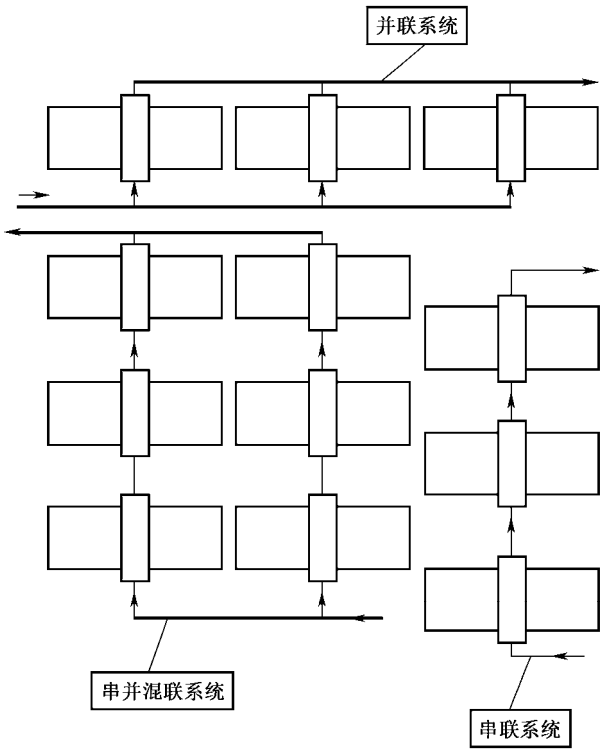



图 10-12 真空管集热器的连接方式

串联：一台集热器的出水口与另一台集热器的入水口相连。

并联：一台集热器的出口和入口分别与另一台集热器的出口和入口相连。

混联：先把若干个集热器并联，各并联集热器组之间再串联，这种混联方式叫并串联；先把若干个集热器串联，各串联集热器组再并联，这种混联方式叫串并联。

### 2. 平板型集热器的基本连接方式

（1）并联。

对于平板型集热器，并联是将集热器一端的顶部和底部分别与另一架集热器的顶部和底部口对口相连，这一组集热器的顶部和底部又与第三架集热器相连，如此顺序连接，如图 10-13 所示。并联后第一架集热器与最后一架集热器各留一个端口，一边留上端口，另一边留下端口，使之形成一个对角通路。

（2）并联阵列。

对于大面积系统，上述连接往往不能满足系统需要，而需采用集热器并联阵列的连接方式。如果将上述连接方式视为一个并联单体，将两个以上单体上端口用管道连接，将下端口也用管道连接，形成一个总的对角通路，如图 10-14 所示，该种连接方式称为集热器并联阵列。大面积系统通常由几个集热器并联阵列所组成。

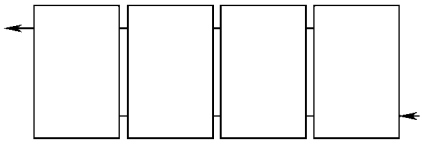


图 10-13　平板型集热器的并联

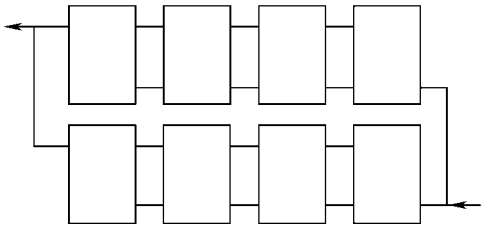


图 10-14　平板集热器的并联阵列

（3）串并联系统。

对于强制循环热水系统，由于集热面积较大，而且又是由水泵作为循环动力，因此集热器的连接多采用串并联或并串联混联方式。集热器的串并联如图 10-15 所示，是将串联成单体的集热器再并联成单体阵列。

（4）并串联系统。

集热器的并串联如图 10-16 所示，是将并联成单体的集热器再串联成单体阵列。

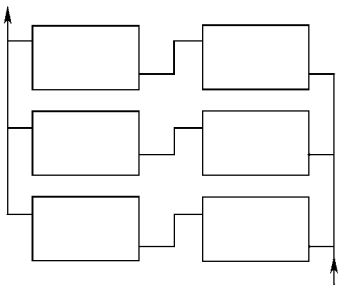


图 10-15　平板型集热器串并联

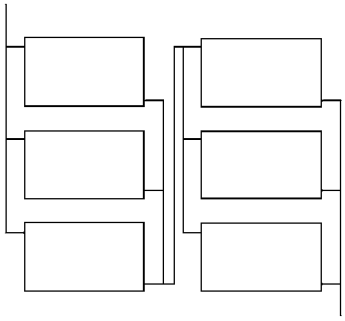


图 10-16　平板型集热器并串联

## 10.3.2　串联管路分析

与电路的电流定律相似，串联的集热器管路的水流量处处相等，但对水的阻力也较大，总阻力等于各集热器分阻力之和。

由于自然循环系统的水流动力较小，而串联系统阻力较大，因此在自然循环系统中应尽

量少采用串联管路。

在强制循环系统中，水流动力较大，可采用串联管路，以保证各个集热器的流量相等，使各集热器的换热效率尽量相同。

对于真空管集热器，如果在同一个斜平面上连续串联排列集热器，使下面的集热器出口与上面的集热器入口直接相接，可以节省管道，减少热损失。如图 10-17 所示。

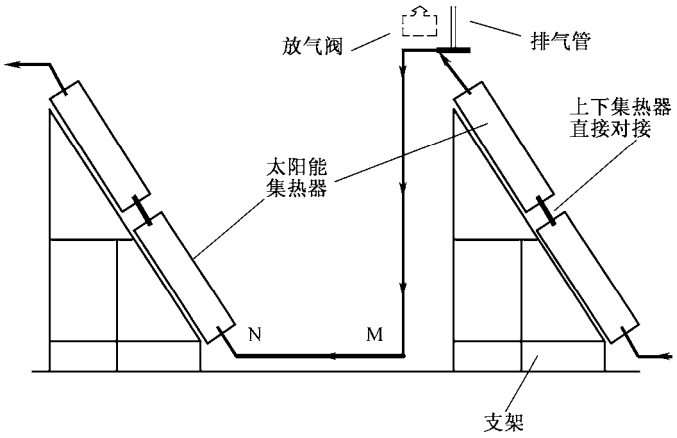



图 10-17　太阳能真空管集热器的串联

但是，由于集热器是安装在斜平面上，尤其是在我国北方采暖区，用于太阳能采暖的集热器安装角度又较大，一般与地面的夹角都在 50° 以上，连续直接串联连接集热器会使支架变得很高，这不仅会增加成本，而且会降低系统的抗风能力。

为了串联更多的集热器，可以采用图 10-17 所示的方法，在前排集热器的顶端安装一个放气阀或排气管，然后再使管道返回地面，与后一排集热器下端的进水口连接，这样就形成一个两排连接的串联系统。

这种串联方式的阻力较大，适宜用在强制循环系统中，其主要优点是各集热器水流速都相等，换热效率一致，而且其管路长度还可能会缩短，可减少材料费用和散热损失。

虽然这种串联方式阻力较大，不适宜在自然循环系统长期应用，但是这并不意味着不能进行循环。从前面自然循环系统的讨论中我们知道，自然循环系统运行的基本要素是“压头”和排气，在图 10-17 中，第一排集热器顶端设置自动放气阀，解决了排气问题，只要有“压头”，自然循环就能进行。而“压头”是由水箱的高度和水温决定的，只要把水箱设置到合适的高度，在有太阳辐射能加热的条件下，水温升高、集热器内水的密度降低后，自然循环一定能运行起来，只是由于阻力大些，循环速度要慢些。这在以强制循环为主的太阳能供暖系统是允许的。

在以强制循环为主的太阳能采暖系统中，太阳能集热器阵列尽量采用以串联为主的串并混联系统，可能会带来以下好处。

（1）各个集热器内的水流速较一致，换热状态均衡，系统效率较高。

（2）管路长度较短，有的高温集热管路放在了地面铺设（如图 10-17 中的 MN 段），减少了悬空架设的高温集热管路，降低了系统成本，减少了热损失。

（3）当遇到停电等意外情况时，强制循环停止，但自动循环仍可进行，可防止系统局部出

现过热的现象，避免因局部过热造成的真空玻璃管、防水胶圈、塑料管件管道等器件的损伤。

虽然这种串联安装会带来安装上的一系列好处，但是也会存在一些问题需要解决。首先要特别注意放气阀（或排气管）部位的的冬季保温问题，因为这部分裸露在外边非常容易受冻结冰，若出现结冰现象，就有可能使放气阀失去作用。为了使系统能正常工作，可以考虑同时设置放气阀和排气管，即使其中一个出现故障也能保证系统能正常运行。

笔者曾做过一个采暖工程试验，40m$^2$ 的太阳能集热器完全采用大串联的方法连接起来，向120m$^2$ 建筑面积的房间供暖。使用不到 100W 的小循环泵，就完全可以使太阳能集热系统和地盘管地板辐射供热系统正常运行起来。可见在强制循环系统中，采用大串联的方法连接各个集热器是允许的，是可以正常运行的。这种系统各个集热器的流量完全相等，各个集热器的温度较均衡。

### 10.3.3　并联管路分析

并联的集热器管路总水流等于各分路水流之和，其总阻力小于各个分阻力。

由于并联集热器管路的阻力较小，因此对水流动力较小的太阳能集热器自然循环系统，一般采用并联方式。

强制循环系统同样可采用并联的方式，而且由于系统的阻力较小，所消耗水泵的功率也较小。

并联系统也有缺点，由于各分支路管线长度不同、管件的种类数量等不同，会造成阻力不等，很容易使各分路的水流量不同，造成其循环换热效率有很大的差异，尤其是在有水泵作动力的强制循环系统中，若管路阻力设计不平衡，有时甚至可造成各分路集热器温度相差几十摄氏度。

图 10-18 显示了不同的集热器并联连接方式。

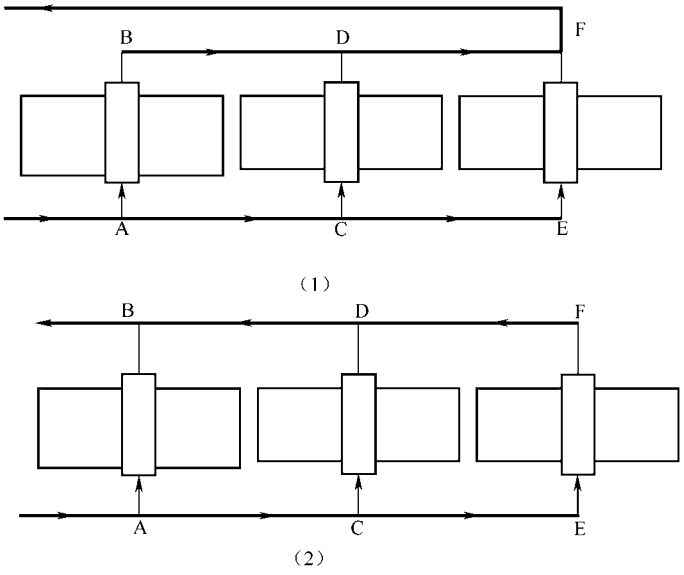
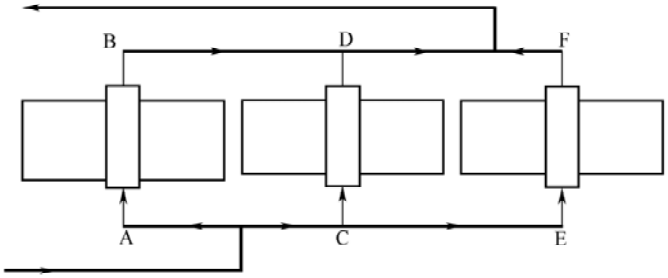



图 10-18　集热器并联连接方式




（3）

图 10-18 集热器并联连接方式（续）

第（1）种方式是同程管路系统，其各个分路所走的路程相等。故各个分路的阻力基本相等，各分路的水流量也基本相等，各集热器的换热效率均衡。但是这种系统所用管路较长，费用较高。

第（2）种方式是异程管路系统，其各个分路所走的路程不相等。故各个分路的阻力也不相等，各分路的水流量差别较大，各集热器的换热效率不均衡。但是这种系统所用管路较短，费用较低。

第（3）种方式是上两种方式的折中，AB 和 EF 分路的路径相同，阻力相同，故水流也相同；CD 分路的路径最短，阻力最小，故水流量也较大。其费用也处于上两者中间。

### 10.3.4 混联系统分析

#### 1. 几项原则

在实际的太阳能采暖系统中，太阳能集热器阵列很少采取纯粹的串联或并联，而是根据实际情况把串联和并联混合使用，以取得最优化的循环系统。

为使系统设计最优化，总结前面几节的分析，可以看出，在管道设计中有几条“经验原则”要注意。

（1）**“等程”原则**：并联系统中各分路的集热器个数和管路长度要相等。

在相互并联循环的热水系统中，每一组集热器都存在一个自己的水头损失。只有尽可能地保证并联着的各组集热器都处于一个相等的水头损失值，它们的热性能才能得到等量的发挥。所谓“等程原则”，就是保证各集热器沿程水阻接近，避免某些集热器管道太长，水阻过大，水流过小，而另一些集热器管道短、水阻小形成“短路”水流，造成换热严重不均衡。

（2）**“一短三大”原则**：在系统中，热水集管长度应该尽量“短”，热水集管要“大”半径转弯，“大”坡度爬升，“大”管径集热。

最大限度地减少热水集管长度，可有效地减少散热损失。加大热水集管的转弯半径，可减小局部水阻，确保流动畅通。热水集管应有不小于 1%的爬升坡度，这样可有利于气泡的排出和热水的升浮。适当加大一些上下总集管的管径，可以有效地减少沿程水阻。

（3）**“直缓”原则**：在系统设计中，集管应尽量走直线，转缓弯，无需追求形式上的“整齐”而转过多的 90° 弯。要注意少转急弯，因为急弯的局部水阻大，而且易被异物阻塞。

### 2．横排真空管集热器串并混联系统

图 10-19 是 9 块横排真空管集热器模块的串并混联示意图。每 3 块集热器模块先分前后 3 排串联起来，由于前一排和后一排串联时，前排集热器出水口的管道要拐弯向下与后排集热器进水口连接，故在拐弯处形成一个“山峰”点，为防止在这里积聚空气产生气塞，故在此安装一个放气阀。最后把各个串联的集热器组再并联起来形成一个统一的阵列。

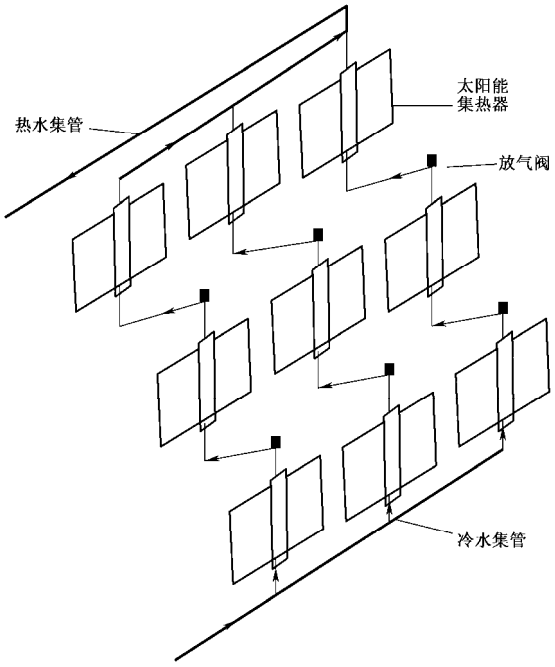



图 10-19　串并混联系统

这种连接方式的优点如下。

（1）上下集水管少。从图中可看出只有一条冷水集管和两条热水集管，与后面的几种混联排列方式相比集管数量都少，故材料费和安装费都较低。

（2）前两排集热器没有热水上集管，减少了对后排的遮阴，这一点对于太阳能采暖很有意义。因为太阳能采暖需要大面积的集热器，尤其是对于二层别墅小楼，仅依靠楼顶面排列太阳能集热器，其楼顶面积非常紧张，往往不够用，因此减少对后排的遮阴，就能排列安装较多的集热器。

这种安装方式的缺点如下。

（1）自然循环时阻力大。

（2）需安装放气阀，增加了放气阀的冬季保温和如何保证其正常工作的问题，增加了系统运行的故障率。

（3）系统只能正压运行，不能负压运行，因为当系统出现负压时，放气阀就不能正常工作。

### 3．并串混联系统

图 10-20 是并串混联系统示意图。每 3 块集热器模块先排成一组并联起来，然后再把 3 排并联的集热器组串联起来。前排有一个集热器出水口的管道要拐弯向下与后排一个集热器进水口连接，故在拐弯处形成一个“山峰”点，在这个“山峰”上安装一个放气阀。从图可看出，系统共有两个“山峰”点，故共安装两个放气阀。各个并联的集热器组串联成一个统一的阵列。

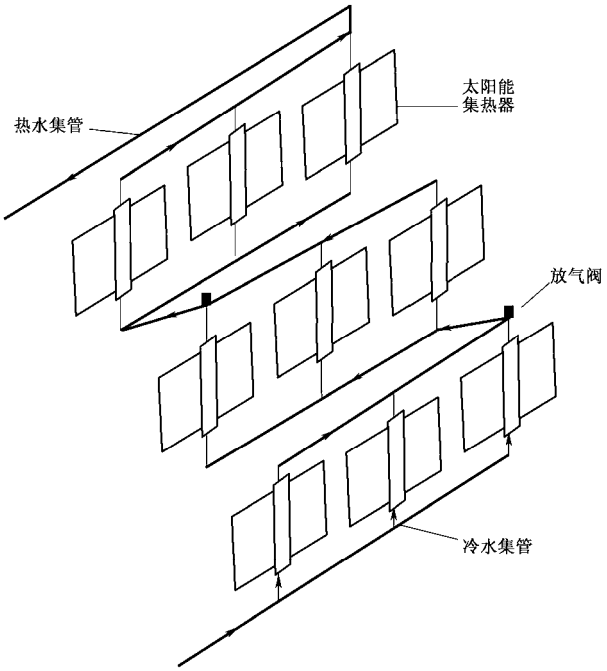



图 10-20 并串混联系统

这种连接方式与前面的串并混联方式相比，虽然只是改变了先并联还是先串联的顺序，但是其优点不多，问题反而增加不少。

（1）上下集水管增多。从图中可看出共有 3 条冷水集管和 4 条热水集管，故材料费和安装费都大幅提高。

（2）由于增加了两排热水上集管，增加了对后排的遮阴，这一点对于太阳能采暖影响很大。尤其是对于二层别墅小楼的太阳能采暖，其楼顶面积本来就非常紧张，往往不够用，增加对后排的遮阴，就可能减少一排集热器，或降低集热器的采光率。

（3）虽然减少了安装放气阀的数量，减少了这方面的费用和故障率，但仍存在放气阀的冬季保温和如何保证其正常工作的问题。

（4）系统仍只能正压运行，不能负压运行，因为当系统出现负压时，放气阀就不能正常工作。

### 4．全并联系统

图 10-21 是全并联系统示意图。每 3 块集热器模块先排成一组并联起来，然后把 3 排并

联的集热器组再并联起来。各个并联的集热器组形成一个统一的阵列。

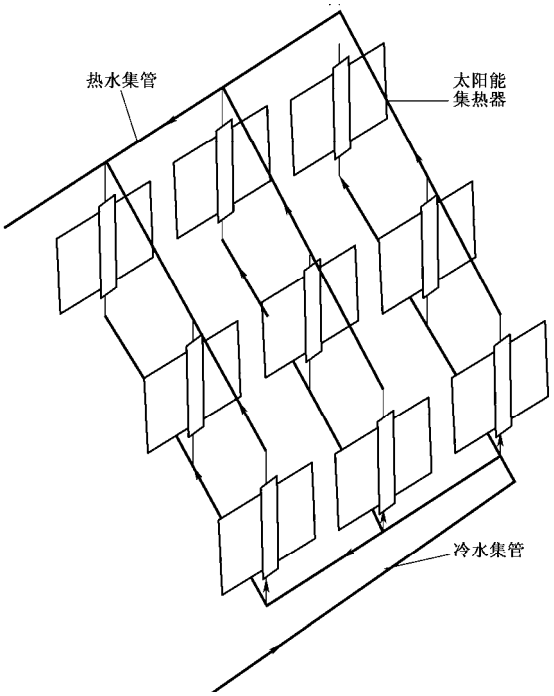



图 10-21　全并联系统（并并联系统）

这种连接方式的优点是：由于采用全并联连接，故其系统阻力最小，可以强制循环，也可以自然循环；一般不用安装放气阀，运行较安全可靠。

这种安装方式的缺点如下。

（1）上下集水管多。从图中可看出，共有 5 条冷水集管和 4 条热水集管，与前面的几种排列方式相比集管数量都多，故材料费和安装费都最高。

（2）集热器上面的热水上集管增加了对后排和侧面集热器的遮阴，这一点对于太阳能采暖影响较大。

### 5．全串联系统

图 10-22 是 9 块集热器模块的全串联示意图，也可叫大串联系统。9 块集热器模块先后依次串联起来，由于总是要求前一个集热器的出口与后一个集热器的入口相接，故前一个集热器出水口的管道都要拐弯向下才能与后排集热器进水口连接，在拐弯处必然形成一个“山峰”点，为防止在这里积聚空气产生气塞，在这里必须安装一个放气阀，整个系统共需要 8 个放气阀。

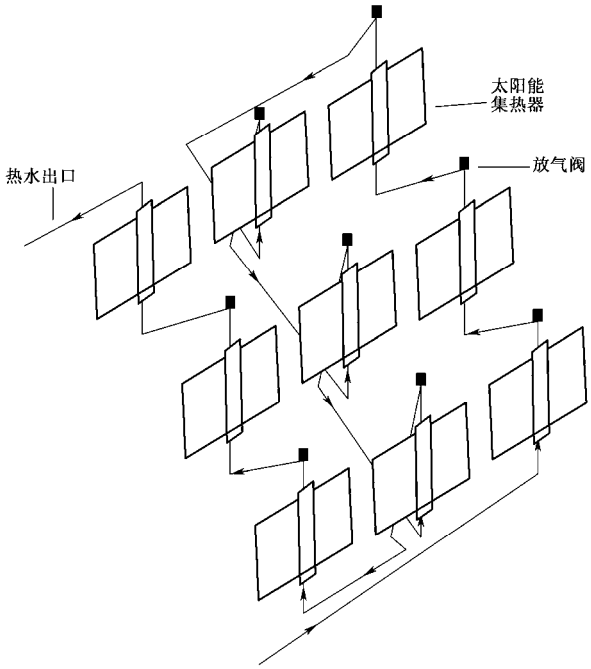



图 10-22 全串联系统（大串联）

这种连接方式的优点如下。

（1）不需要上下集水管。从图中可看出，只用一条水管依次连接而成，与前面的几种混联排列方式相比，材料费和安装费都较最低。

（2）由于没有热水上集管，减少了对后排的遮阴，就能排列安装较多的集热器。

这种安装方式的缺点如下。

（1）循环时阻力最大，工作时必须强制循环，自然循环很难进行。

（2）安装的放气阀数量最多，增加了放气阀的冬季保温和如何保证其正常工作的问题，增加了系统运行的故障率。

（3）系统只能正压运行，不能负压运行，因为当系统出现负压时，放气阀就不能正常工作。

### 10.3.5 竖排真空管模块的串并联

竖排真空管集热器模块在太阳能采暖系统中应用较广泛，因为这种集热器有几个特点适宜在冬季使用。

（1）与地面容易安装成较大的倾角，而冬季采暖需要以较大的倾角安装集热器。

（2）模块本身一般带有支架，不需要现场焊接。

（3）很容易串接安装。

这种模块安装方式如图 10-23 所示，根据屋顶安装现场的尺寸，东西向串联安装多个模块，南北向分成几排再并联起来。

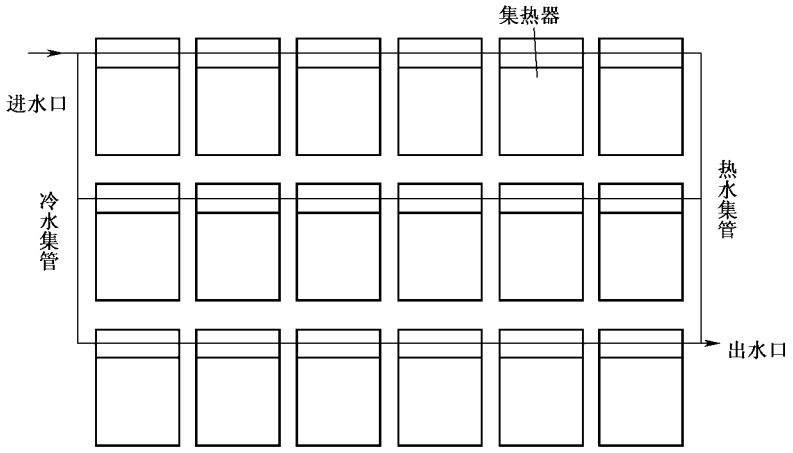



图 10-23　竖排真空管集热器模块串并混联系统

### 10.3.6　排列方式的选择

前面分析了几种混联方式的特点，各有其利弊，在安装工程中如何选择具体的安装方式，应根据具体情况来确定，一般来说应遵循下述原则。

（1）尽量使系统能进行自然循环。采暖系统的太阳能集热器阵列都是采用强制循环，但是当循环泵因故停止运行时，要使集热系统能够进行自然循环，且要使自然循环和强制循环的方向一致。这样可提高系统运行的可靠性，能降低强制循环的耗电量。

（2）尽量满足采暖所需要的集热器面积。对于热水工程，由于所需要的集热器面积较小，一般不存在场地问题。但是对于采暖工程，由于所需要的集热器面积较大，不仅二层以上楼房存在场地问题，就是平房也往往存在场地不够用的问题。因此在确定排列方式时，要把占场地面积的大小作为一个重要因素来考虑。

（3）管路的长度影响系统循环的阻力和系统的成本，因此要尽量采用较短的管路。

（4）各集热器的流量平衡原则。设计管路走向、循环泵安装位置等要保证各集热器的流量尽量相等，以充分发挥各集热器的效能。

（5）正负压原则。尽量采用负压运行，只有当管路中设置放气阀时才采用正压运行。

（6）可靠性原则。要保证系统运行时稳定可靠，即使出现小的运行故障，也要便于维修，不会演变成大的系统故障。如当循环泵出现故障时，系统仍能进行自然循环。

## 10.4　控制系统

太阳能供热采暖系统控制应包括太阳能集热系统运行控制、辅助热源运行控制、供热系统运行控制、防冻保护控制、防过热保护控制及运行工况的切换。控制系统依据温度、压力和水位传感器获得的信号控制水泵、阀门的开启或改变阀门的开度。此外系统一般设计温控阀、自动排气阀、止回阀和安全阀等控制元件以保证系统安全、稳定运行。

太阳能采暖系统的强制循环主要是通过利用水泵和自来水压力来实现系统的工质循环。

太阳能采暖系统的集热系统循环一般采用自然循环和强制循环方式相结合的运行方式，强制循环的运行控制主要包括定温控制、温差控制、定时控制等循环控制方式。

### 10.4.1 循环泵的温差自动控制

温差控制是太阳能集热系统中最常用的控制方式。

温差循环的运行控制方式是：在集热系统出口和储热水箱底部分别设置温度传感器，当集热器出口端和水箱底部的温差大于设定温度时（通常设定为 5～10℃），控制器发出信号，循环泵开启，系统运行，将热量从集热器传输到储热水箱；当温差小于设定值时（通常设定为 2～5℃），循环泵停止运行。

温差控制系统的优点是：根据储水箱温度来调整集热器运行温度，即使在辐照较低的情况下也可以将太阳能转换成热能，系统热效率高。

太阳能采暖系统温差自动控制设计的基本原则：只有当集热系统工质出口温度高于储热装置底部温度（储热装置底部的工作介质通过管路被送回集热系统重新加热，该温度可视为返回集热系统的工质温度）时，工作介质才可能在集热系统中获取有用热量；否则，说明由于太阳能辐照过低，工质不能通过集热系统得到热量，如果此时系统再继续循环工作，则可能发生工质反而通过集热系统散热，使储热装置内的工质温度降低。

### 10.4.2 定温自动控制

#### 1. 集热器—散热器定温控制式循环

若控制从集热器到储热水箱到室内散热器的循环，可采用定温控制器，参看第 9 章图 9-11。在水箱的上部安装感温探头，测量水箱中的水温。温控器上设定两个温度：启动温度和停止温度，高温启动，低温停止。当水箱中的水温达到设定的启动温度时，控温仪启动循环泵 2 运行，水箱中的热水被泵入室内换热器，向房间散热。当水箱中的水温降到设定的停止温度时，控温仪发出信号，循环泵 2 停止运行。控制温度人为设定，为避免水泵频繁启动，控制温度可设定为一个温度段，例如启动温度设定为 40℃，停止温度设定为 30℃，温度达到上限 40℃，水泵启动运行，温度达下限 30℃，水泵停止运行。

#### 2. 辅助热源定温自动控制系统

为保证太阳能供暖系统的稳定运行，可采用辅助热源低温启动、高温停止型定温自动控制系统。当太阳辐照较差，通过太阳能集热系统的工作介质不能获得相应的有用热量时，为使工质温度达到设计要求，辅助热源加热设备可启动工作。温控器设定低温启动温度和高温停止温度。当太阳辐照较差，由于太阳能供热系统不断向房间供热，系统内的工作介质的温度会逐渐降低，当工质温度降到温控器设定的低温启动温度时，温控器发出信号，辅助热源加热设备可启动工作，向系统供热。而当太阳能辐照较好时，工质通过太阳能集热系统加热温度会逐渐升高，当工质温度上升到温控器设定的停止温度时，温控器发出信号，辅助热源

加热设备即停止工作，完全由太阳能集热器提供热量，从而实现了优先使用太阳能，提高了系统的太阳能利用率。

可见，采用定温自动控制，可完成太阳能集热系统和辅助热源加热设备的相互切换，既保证了向房间正常供热，又最大限度地利用了太阳能。

### 10.4.3　循环泵的定时自动控制

储热系统向房间供热可采用定时循环控制方式。

如图 10-24 所示，通过温差控制的循环泵使太阳能集热器向地下储热系统供热，把热量储存起来。该系统可全年在白天工作。连通阀门也可使集热器和小水箱形成一个集热自然循环系统。到冬季启动定时循环泵向房间供热，可根据房间用热量的多少来设定定时的间隔。

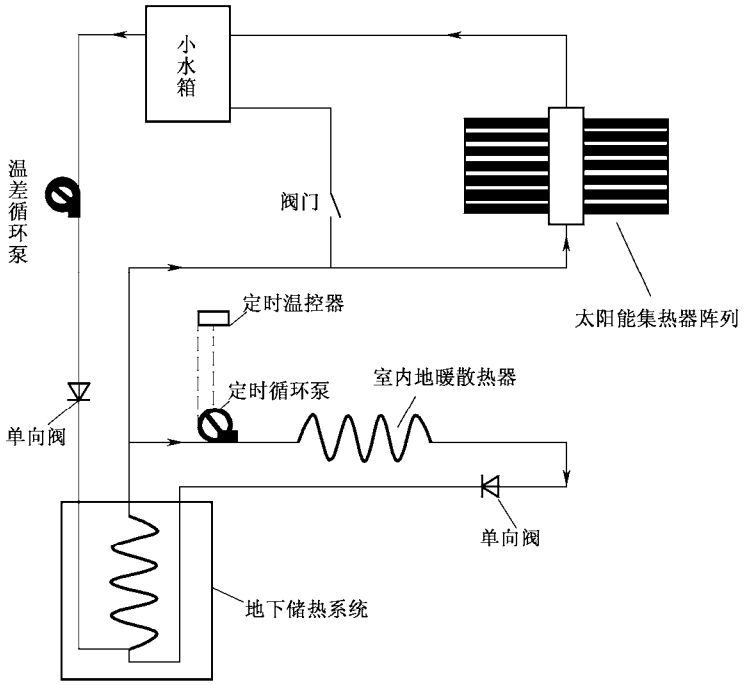



图 10-24　太阳能主动式采暖（定时循环）

### 10.4.4　定温放水系统

定温放水与强制循环的不同点在于系统的水不循环，而是通过温度控制器将集热器内达到控制温度的热水用水源压力或水源加压水泵输送到蓄水箱。其方法是在集热器的上集管上安装感温探头，当集热器内水温达到设定温度时，通过控温仪启动水泵或开启电磁阀，将在集热器内闷晒的水输送到蓄水箱内，此种运行方式也称为直流式。

也可直接用温控阀门代替电磁阀，当水温达到设定温度时，温控阀门自动打开，通过自来水压力将热水顶出。

定温放水式系统结构简单，热水箱可置于集热器上方，也可置于集热器下方，而且只要

有太阳照射，蓄水箱内就可有热水供使用，特别适合于间断用水。

### 10.4.5 变流量控制系统

在较大型的太阳能供热采暖工程中，采用系统变流量运行可实现系统的优化运行。传统的定流量控制，即使负荷很小，水泵仍然保持原有设计流量（即最大流量），水泵的能耗不能随负荷的减少而降低，导致能量浪费严重。采用变流量控制后，把供回水温差固定在一个较高值上，通过改变流量来满足负荷的变化，当系统处于部分负荷时，水泵的做功可以减少，系统能耗降低。具体控制方式可以根据太阳能辐照条件的变化直接改变系统流量，或因太阳辐照不同引起的温差变化间接改变系统流量。

变流量系统的流量调节通常采用调节管路阀门的开度和水泵的转速两种方法来实现。但是，由于阀门节流会导致管路阻力增加，使水泵负担加重，因此，大都使用阀门全开系统而用水泵调速的方法调节流量，这样系统最为节能。

水泵变流量控制是根据采暖负荷的改变，控制系统把负荷变化信息转换成控制水泵转速的信号，根据信息和控制方式分为压差控制、供回水温差控制和流量控制几种。

#### 1．压差控制

在部分负荷工况下，室内温度传感器根据室内温度的变化来改变末端空调设备的二通阀开度，供、回水管间压差传感器通过变送器将感受到的压差变化传到控制器，控制器根据它与设定压差间的偏差输出信号，改变循环水泵的频率，以此达到调节循环水泵流量，满足部分负荷要求的目的。与此同时，供回水管间的压差也回到设定值。根据压差测定部位的不同，压差控制又分为末端压差控制和总管压差控制两种。

（1）末端压差控制。

末端定压差控制将压差传感器设在系统最末端，这是目前变流量系统用得较多的一种控制方式。压差的设定值为设计流量时的压差值，这样无论工况怎样变化，都能保证最不利设备的正常工作，所以该控制方法相对比较安全可靠。

水泵扬程由恒定压差和可变压差两部分组成，恒定压差为传感器控制回路的压差，控制回路由盘管和控制阀等组成，其压差值不随流量变化而变化；可变压差为输配管网压降，与管网流量平方成正比。若将管网曲线向上平移一个恒定压差$\Delta P$，即可得到系统的工作点位控制曲线和水泵特性曲线的交点。恒定压差越小，系统由于末端恒压控制造成的能耗损失越小。实际上，采用小压差控制（如恒定压差为某单个阀门的压降），理论上也是可行的，但在一定流量下一个阀门的压降比较小，这样控制信号的数值相应较小，控制精度和控制能力降低，影响到控制效果；与此相反，控制压差愈大，控制精度、可调节性愈好，但节能效果会降低。

采用末端定压差控制，系统运行时水泵的转速比理论工况要快，因此耗能要比理论值大。这是因为自动控制阀门的调节对系统阻抗有影响，当阻抗值变化明显时，管道特性曲线就会变陡，相同流量下水泵的转速就要高。另外，为了保证末端压差的恒定，在较小流量下需要增大末端管网的阻力，设定压差越高，耗能越大。

设定值的大小受综合因素影响。变流量系统是一个十分复杂的过程，影响因素往往是随机的，用一种控制方法很难解决。由于阀门开启度的变化在一定程度上反映了负荷的大小，因而也可作为调节的参数，为此可以综合考虑压差设定值和阀门的开启度，把设定值考虑成一个可变值。例如当所有的末端两通阀开启度都小于 90%时，并且这种状态连续保持 10 分钟后，就可以把压差传感器的设定值减少 10%；当所有的末端两通阀开度都大于 95%，并且让这种状态保持 8 分钟以后，就可以把压差传感器的设定值增加 10%。

（2）总管压差控制。

供回水管压差控制是将压差传感器设在供、回水干管间（通常设备分集水器间），压差的设定值根据系统的最大流量确定。在这种控制方式下，水泵的可变扬程变得更小，而且主管之间的压差不变，水泵所提供的扬程也就恒定，系统的节能效果将受到很大影响。

采用总管恒压控制变频控制时，系统的总压差保持恒定，水泵克服的阻力不变，总恒压控制时水泵扬程比水泵恒速运行时降低很少，整个流量范围的节能效果有限。

当变流量系统以压力为信号采用恒压控制时，虽然总管恒压差控制的节能效果比末端恒压差控制时要差，但由于供、回水干管定压控制简单，布线方便，很适合用于系统较小的工程或者旧系统的循环泵改造。对于最不利环路不容易确定的太阳能采暖系统，如最不利环路靠近冷源端，或系统由于使用功能差异而造成最不利环路不易确定的场合（如室外温度下降，大多数用户处于部分负荷下，而个别用户仍需保持设计流量而成为最不利环路），采用供、回水干管定压控制具有明显的优势。

实际上，在总管恒压控制系统的运行中，如果设定的压差根据负荷情况调节，系统的节能效果将更好，盲目设置一个恒定压差，不管什么工况都不发生改变，也不能充分发挥变流量系统的优越性。

从上面的分析可以看出，利用压差可以较好地控制变流量系统，单变流量系统的节能效果在一定程度也受到了限制。如果根据实际负荷改变设定压差，可以改善它的节能效果。

变流量系统在运行时，如果能做到在满足负荷要求的情况下所有两通阀的开度最大，即管网阻力系统达到最小，此时设备运行就是最合理、最节能的。为此，设定的恒压控制值应当能让系统中两通阀开度一直保持较大，水泵的频率也将根据这个新的控制压差进行控制。但是两通阀开度与用户的同时使用系数有关。根据同时使用系数，可以分为下面 3 种情况控制运行。

① 系统各部分都在运行，同时使用系数很大。压差设定值应当使绝大部分的空调设备两通阀开度保持在 90%以上（同类建筑中各个末端用户的负荷率非常接近，10%的相差率可以满足要求），否则，对压差设定值进行调整，直至满足这一要求。采用这样的控制措施一定要避免出现供热量不足的情况，当负荷升高，一些两通阀开启度达到 100%时，需要观察这些阀门控制区域的温度是否能降到设定温度，如果不能就应当及时调高控制压差，适当加载；相反，一旦负荷下降，一些两通阀的开启度降低到 90%以下时，就应当及时调低它们的控制压差。在调节控制压差时，变频水泵的运转频率完全按设定压力值来确定。由于系统的阻力始终保持最小，因此水泵的功耗保持最低。另外，这种控制措施的实施也相对简捷易行。

② 系统运行有相当一部分是关闭的，同时使用系数很小，运行中管网阻力与设计值有较

大差异。但是这个系统也可以看作是一个具有新的阻力特性的系统，只要利用运行部分的两通阀开启度来设定控制压差，就不会对控制过程产生影响，控制方法与①相同。

③ 系统各设备的负荷率不同，负荷分布不均匀，比如系统内大部分区域的两通阀开90%，但有个别区域仅开启50%就可满足要求。此时可以把开度较高的区域作为控制目标，根据开启度情况设定控制压差，低负荷区域的空调效果并不会受到影响，整个系统的负荷要求也可以得到满足。

这样控制的最大优点是直接以设备末端阀门开启度为控制要素，使管路和水泵能尽可能在管网阻力最小的状况下运行，系统节能效果更好。但由于压差设定值需要不断重置，系统各区域的地板辐射装置使用情况也要随时监视，这样就对控制人员提出了更高的要求。

### 2．供回水温差控制

利用循环水温差控制变流量系统，使供、回水干管温差保持恒定，也是比较常用的一种变流量控制方式。利用温差控制水泵频率时，末端阀门调节度很小。

负荷相同时，温差控制变频水泵的运行扬程低，节能效果好，但是，温差控制不能兼顾整个系统的负荷情况，因为实际运行中，系统的各组成部分的负荷率并不一定相同，各用户的供水温度虽然相同，但是回水温度并不完全相同。比如，变流量控制把总管的供回水温差设定为5℃，假定供水温度为45℃，运行中要求某区域的回水温度为41℃，另一区域的回水温度为39℃，只要当两个区域的流量相同时，混合后总回水温度才能达到40℃，确保总温差控制为5℃。但是，前一个区域的供回水温差为4℃，说明实际供热能力超过实际需求负荷，需要降低流量；后一个区域的供回水温差为6℃，实际负荷超过供热能力，需要增大流量；两个区域的回水量不同，回水温度就不能保证在40℃。总管温差控制时，各阀门一般是不调节的，这样用户在负荷变化时很难控制区域温度的精度，房间舒适性会受到很大影响。

所以，利用温差控制变流量系统只适于各组成部分的负荷率接近的情况，如果各部分负荷率相差较大，系统的各部分就不能满足实际调节要求。

### 3．流量控制

利用压差控制水泵频率，虽然能比较准确和有效地控制变流量系统的运行并且有一定的节能效果，但它减少了水泵的可变扬程，节能效果也有限。另外，当水泵多台并联时，水泵特性曲线趋于平缓，流量变化较大时，水泵扬程变化很小，较小的压力变化很难反映出较大的流量变化，这就需要提高控制设备的灵敏度和精度，尤其是采用总管压差控制，问题更突出。

以系统流量为控制信号就可以在一定程度上避免压差控制的缺点，根据系统需要流量来控制水泵的频率，控制非常符合实际负荷的需求。但是采用流量控制也存在一些困难，当系统同时使用系数比较小时，系统中各部分支路阀门关闭，管网流量减少但阻力却降低不多，通常要求系统不能轻易卸载，而利用流量为控制信号就会降低水泵频率让系统卸载，这也是流量控制不能推广的重要原因之一。不过以末端两通阀开度为重要控制要素，再通过流量信号对变频水泵系统进行控制，可以解决这个问题，为此可以把末端电动两通阀开

度为主要控制要素。通常，两通阀的开度根据控制区域温度自动调节，系统内各电动阀的开度信息直接反馈到中央控制系统。系统的流量主要通过水泵变速运行达到调节作用，末端阀门的调节只起到辅助作用。在某一负荷时，水泵的工作频率是根据设定循环水流量来确定的，而设定的水量必须满足末端负荷要求，并使所有两通阀开度保持在 90%～95%之间。这样，当系统中有部分环路关闭时系统流量下降，以末端两通开度为控制信号，设定阀门开度保持在 90%～95%，系统就可以根据开启度加载和卸载，避免出现单纯的流量控制可能出现的盲目卸载问题。

在实际运行中，负荷的变化一般不会很快，设定值并不需要逐时变化，而可能逐天、逐月、逐季变化，流量设定值的改变虽然不需要频繁进行，但是这种控制方式对自动控制系统和运行操作人员的要求很高。

与恒压控制相比，利用流量作为变频水泵的控制信号，提高了水泵的可变扬程，系统的运行也更节能，同时还可以避免压差控制因多台水泵并联导致特性曲线平缓引起的困难。准确的流量信息可以确保系统的运行正常，避免出现旁通管中流量过大的现象。同时，控制人员能够随时准确了解系统的实际负荷情况，因此这种控制方案可以实现以流量为信号的控制， 而且节能潜力较大。不过，现在变流量系统往往只是将流量值作为参考，完全利用流量信号控制的做法还不多，主要原因是受目前流量计流量设备缺陷的制约，流量的测定还不够精确。如能解决流量计的准确度，利用流量控制变流量系统应当是一种值得推广的控制方案。

### 10.4.6　水箱水位的控制

对太阳能集热系统中的水箱水位进行长期的显示监控，防止水箱内缺水，这对于系统的正常运行非常重要。

在市场上有各种商品水位控制仪，把水位探头安装在水箱内适当的位置，室内的控制仪的小屏幕上就可随时显示水箱的水位。根据水位的变化，可以用手动方法打开阀门向水箱进水。

把水位控制仪与电磁阀连接在自来水管路上，或与水泵连接上，就可根据水位的变化自动上水：当水位低于设定值时，电磁阀自动打开，或水泵启动，开始进水；当水位达到设定值时，电磁阀关闭，或水泵停转。水位控制的原理如图 10-25 所示。

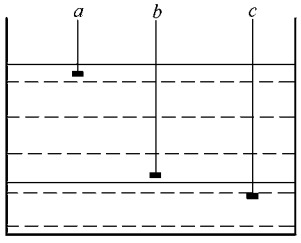


图 10-25　水位控制原理

水位控制仪探头有两种。一种比较简单，只要用铜导线就可以了。水位线 *a* 为控制上线，水位线 *c* 为控制下线，水位线 *b* 为控制中线。当水的液面到达 *a* 线时，由于水的导电作用，*a* 与 *b*、*c* 导通，水位控制仪得到信号，停止水泵运行。当水位下降到 *c* 水位线以下，*a*、*b*、*c* 3 线都断开，控制仪得到信号，启动水泵抽水。为了增加几根水位线的导电能力，在水位线的线头对折两折，然后用焊锡将其焊满包裹，增加与水的接触面。此种探头线简单易作，水位高低也好调节；缺点是探头线的线头易氧化，造成降低导电能力而失效。

另一种探头是将干簧管装在一段密封的铜管内，根据水位上、下限的需要调整好两干簧管的位置，用导线将干簧管接头引到铜管外，再让铜管穿过一内部装有磁铁的一个浮筒，利用干簧管遇到磁铁导通、离开磁铁断开的原理，达到控制水位上、下限的目的。此种探头的优点是导线不与控制液接触，可靠性高；缺点是控制上、下限一旦确定，就不容易改变。

# 第11章 供暖系统的设计与安装

## 11.1 系统设计程序

### 11.1.1 集热器面积的确定

当我们接到一个太阳能供暖工程时，首先要确定的是集热器的面积，为此首先要确定太阳能供暖在整个建筑能耗中所占的比重，即确定太阳能保证率问题。

#### 1．太阳能保证率的选择

确定太阳能供暖的保证率，主要根据当地的气候条件和用户的家庭情况来综合考虑。如果当地日照条件较好，属于Ⅰ、Ⅱ类地区，一般可以选取 70%～80%的太阳能保证率。若采用储能措施，尤其是实施地下长期储能，可以选取高达 100%的保证率。

若是Ⅲ类地区，因日照强度一般，真正的晴天较少，故太阳能的保证率可选择小一些，低于 50%；对于适合搞地下长期储存设施的，也可选取 100%的保证率。

若自家有较充足的生物质能可利用，且有较好的生物质燃烧技术，可以选用 30%左右最高不超过 50%的太阳能保证率。这样既可充分利用可再生的生物质能资源，也可全年充分利用太阳能，提高太阳能设施的利用率，且降低太阳能设施的初投资。

若家庭已有集做饭、烧水和采暖等多功能的燃煤炉具，有充足的煤炭供应，但缺乏液化气等其他生活用能源，还主要靠燃烧煤炭来做饭，则燃煤在供暖中的比重应能达到 50%以上，故太阳能供暖的保证率可低于 50%。

经济因素也是确定太阳能保证率的一个重要条件。若家庭已有常规的做饭采暖设施，又无力投入较大的资金搞太阳能采暖，可以选用 20%～40%的太阳能保证率，这样既可节省冬季采暖对常规能源的消耗，又可全年用太阳能供应生活用热水，达到减少投资、减少能源消耗和提高太阳能设备的利用率等多重目的。

#### 2．太阳能集热器面积确定

确定了太阳能供暖的保证率，就容易确定太阳能集热器的面积了。

首先要根据房屋要供暖的建筑面积来计算集热器面积。最简单的方法是根据第 3 章给出

的集热器面积和采暖面积的比例关系 1:2.5～1:3 来计算。以 100m$^2$ 的建筑采暖面积计算，在Ⅰ、Ⅱ类地区，需要 30～40m$^2$ 的太阳能集热器面积；Ⅲ类地区可根据当地气候条件、晴天所占的比例，适当增加集热器面积。

然后，要根据太阳能保证率、用户的具体情况进行增减，最后确定集热器面积。

若系统设计无热能储存设施，需用电直接加热作辅助热源，应尽量采用较大一些的采暖面积。太阳能集热器面积与采暖面积之比可选为 1:2.5，每 100m$^2$ 采暖面积，可采用太阳能集热器 40m$^2$，甚至更大些。

若系统设计有辅助热源，比如热泵、生物质能炉等较节能的辅助热源，为了减少夏季热量过剩问题，可采用较小一些的采暖面积。太阳能集热器面积与采暖面积之比可选为 1:3～1:5，每 100m$^2$ 采暖面积，可选用太阳能集热器 20～30m$^2$。

若系统设计有热能地下长期储存设施，能把春、夏、秋季的太阳能储存到冬季使用，可采用较小一些的采暖面积。太阳能集热器面积与采暖面积之比可选为 1:5，每 100m$^2$ 采暖面积，可选用太阳能集热器 20m$^2$。

若系统设计没有辅助热源，有短期热能储存设施，也应尽量采用较大一些的采暖面积。太阳能集热器面积与采暖面积之比可选为 1:2.5，每 100m$^2$ 采暖面积，可选用太阳能集热器 40m$^2$，尽量提高太阳能供暖的保证率。

### 11.1.2 集热器类型的确定

要根据用户所处的地理位置、气候条件和不同的供暖需求来选择集热器类型。

#### 1. 空气集热器

在高寒地区，冬季气温会下降到−20℃以下，特别是在夜晚或连阴天气，有可能会把用水作工质的太阳能集热系统冻坏，因此在这些地区可以采用空气集热器。空气集热器系统内流动的工质是空气，其抗冻性能最好。

在偏远的山区、小村庄，若当地没有维修力量，或距维修店很远，则宜采用空气集热器，不宜采用以水为工质的集热器。采用以水为工质的集热器，其抗冻能力差，一旦出现被冻坏或其他小的运行故障，比如真空玻璃管损坏、管路漏水等，若不能及时维修，整个系统的水就可能会漏光，从而造成大的故障。而且，由远离本地的维修点维修会产生较大的维修成本，综合费用更高。空气集热器不宜产生故障，维修成本低，即使出现漏气等小故障，一般也不影响整个系统的正常运行，因此在这类地区宜采用空气集热器。

#### 2. 平板型集热器

在不太寒冷的采暖区，可采用平板型集热器，在这类地区，平板型集热器的集热效率较高。而在一些较寒冷的地区，如果配有有效的防冻措施，也可采用平板型集热器。

平板型集热器的主要缺点是抗冻能力差，采用平板型集热器要特别注意防冻问题，尤其要预防可能出现的天气突然降温，做好防冻准备。防冻措施有下面两种。

（1）夜间或阴天，把系统内的循环水放走储存起来，使用时再抽回系统内。

（2）增设辅助热源和储热装置，在夜间或阴天定期强制循环，提高循环管道的温度。

#### 3．真空管集热器

一般采暖地区可使用真空管集热器，真空管集热器隔热性能好，尤其在低温条件下，一般比平板型集热器集热效率高。另一方面，真空管集热器在冬季抗冻能力强，成千上万户真空管热水器用户多年的使用证明，在我国北纬 40° 线以南大部分地区，真空管热水器都能越冬使用。但管道要加强隔热保温，最好增设电伴热带，必要时可对管道加热防冻。

#### 4．聚光式真空管集热器

对于室内装备普通散热器的用户，应采用聚光式真空管集热器。由于与地板辐射散热相比，普通散热器的散热面积较小，故要求供热温度高。普通真空管集热器在冬季较难达到较高的集热温度，即使达到较高的集热温度，其集热效率也会下降，而聚光式真空管集热器很容易实现较高的集热温度。

要想提高太阳能供暖的保证率，增大集热器的面积，同时又不想在夏季产生大量的难以消化掉的热能，可以采用固定式聚光集热器，因为固定式聚光集热器可在夏季失去聚光功能，其集热面积只有冬季的 1/3，使其在夏季的产热能力大大下降。

#### 5．热管或 U 形管集热器

某些采暖工程，由于工程面积大，系统循环的压力较大，而普通插管式真空管集热器的耐压力小，故可采用 U 形管式真空管集热器或热管式真空管集热器。这些集热器的连接处都是金属连接件，耐压力大。

### 11.1.3　安装角度

要根据用户所处的地理纬度、集热器的类型及不同的采暖供热理念来确定集热器的安装角度。

（1）冬季采暖用平板型太阳能集热器和竖排真空管集热器的安装角度。

对于冬季采暖，这类太阳能集热器的安装角度应保证最需要太阳辐射的时刻有最佳的集热效果。我们知道，在冬至日前后几天，太阳赤纬角在−23.5° 附近，太阳高度角最低，而冬至日又是“三九天”的开始，此后一段时间是一年中最冷的季节。“三九天”这些日子是一年中太阳辐射最低，又是最需要太阳辐射的日子，所以太阳能集热器的安装角度应使这些日子有最好的收集效果。赤纬角从−20° 到−23.5°，占了冬至前后各一个月共约两个月的时间，约占采暖期的 1/2，且是最冷的一个时期，所以太阳能集热器的安装角 $\Psi$ 应是：

$$\Psi = \Phi + 20^\circ$$

甚至可以采用：$\Psi = \Phi + 23^\circ$

这样就保证了在最需要太阳辐射能的近 1/2 的采暖期有最好的收集效果。

实际上，采用这样大的倾角还有另一方面的好处，即在夏季不太需要太阳能时，降低了集热器的集热能力。若取 $\Psi = \Phi + 23^\circ$，夏季中午集热器平面与太阳光辐射的交角为 $23^\circ \times 2=$

46°，则夏季集热器的有效集热面积与冬季集热面积之比为 cos46°≈0.7，可大大缓解夏季热量过剩问题。

（2）冬季采暖用横排真空管集热器的安装角度。

由于横排管集热器中真空玻璃管间有间隙，太阳高度角在一定范围内变化不影响其集热面积（参看第 3 章），故其安装倾角可以取当地地理纬度。

（3）全年使用的太阳能集热器的安装角度。

在太阳能地下长期储存系统中，集热器需要全年运行，很显然，全年使用的太阳能集热器必须兼顾春、夏、秋、冬四季的使用，所以，应按全年中午太阳高度角的平均值来安装，这个平均值即两分日中午的太阳辐射角。太阳能集热器的收集平面应与两分日中午的太阳光相垂直，因此，太阳能集热器与地面的夹角 $\Psi$ 应等于当地地理纬度 $\Phi$。

（4）聚光型真空管集热器的安装倾角。

对全年使用的聚光型真空管集热器，各聚光器要季节性地调整倾角，故整个集热器框架的安装倾角应等于当地地理纬度。

对主要在冬季采暖使用的固定式聚光式真空管集热器，其安装角度等于地理纬度加上 15°～18°（参看第 3 章）。

### 11.1.4 集热器阵列的设计

集热器阵列有并联、串联、混联等多种排列方式，各种连接方式都各有其特点，各有其利弊，应根据各个采暖工程的集热面积、场地状态等具体情况来确定，一般来说应遵循下述程序或原则。

（1）场地的选择和安排。

根据确定的集热器面积，测量和安排安装场地，比如测量二层楼的楼顶面积是否够用，若不够用，查看两侧厢房是否可以安装集热器。一般来说，若两个安装场地高度相差不到 3m，则可以安装成一个循环系统。若高度差超过 3m，最好安装成两个循环系统，因为若装成一个系统，则下部场地的集热器将承受较大的压力，这对插管式的真空管集热器来说，过大的压力容易造成密封圈漏水。

（2）设计集热系统要使其能进行自然循环。我们知道太阳能集热器阵列都是采用强制循环，但是当循环泵因故停止运行时，要使集热系统能够进行自然循环，且要使自然循环和强制循环的方向一致，这样才可提高系统运行的可靠性，降低强制循环的耗电量。

“压头”和“排气”是实现自然循环的两项基本条件。对“压头”，人们一般容易理解，也较易实现，只要把水箱设置到一定高度即可；但对“排气”，却往往注意不够甚至不理解，所以要特别强调这一点，一些系统之所以自然循环不畅，主要是“排气”不好。详细情况请看第 10 章。

（3）要尽量满足采暖所需要的集热器面积。对于热水工程，由于所需要的集热器面积较小，一般不存在场地问题。但是对于供暖工程，由于所需要的集热器面积较大，不仅二层以上楼房采暖存在场地问题，就是只有平房采暖的家庭也往往存在场地不够用问题。因此在确定排列方式时，要把占场地面积的大小作为一个重要因素来考虑。比如全并联系统

往往要把热水上集管排在集热器上部，这会占用不小一部分截光面积，所以要尽量避免这种情况发生。

（4）管路的长度影响系统循环的阻力和系统的成本，因此要尽量采用较短的管路，即遵循最短路径原则。

（5）各集热器的流量平衡原则，即阻力平衡对称原则或等路径原则。设计管路走向、循环泵安装位置等要保证各集热器的流量尽量相等，以充分发挥各集热器的效能。

（6）正负压原则。一般管路要尽量采用负压运行，但当管路中设置放气阀时要采用正压运行，防止负压向系统内吸入气体，影响系统的正常循环。

（7）可靠性原则。要保证系统运行时稳定可靠，即使出现小的运行故障，也要便于维修，不会演变成大的系统故障。如在循环泵旁侧设置并联支路，当循环泵出现故障时，系统仍能通过支路进行自然循环。

### 11.1.5　房屋的设计或改造

从一定意义上说，在农村低层建筑的采暖过程中，房屋的隔热保温比向其供热意义更大。如果房屋没有好的隔热保温措施，供给它很多的热量，却很快散失掉，也不能保持房间温度。就像一根普通玻璃管装满水，在冬季放在太阳底下晒，水温也不能提高多少，因为其隔热性能很差，吸收的热量很快又散发出去了。但如果是一根真空玻璃管，同样充满水放在太阳底下晒，两者吸收的阳光辐射量是一样的，但真空玻璃管内的水很快温度就提高了，甚至还能把水烧开。这是因为真空玻璃管有很好的隔热性能，吸收的热量几乎不散失。

在城市的高层建筑中，一个在中间的单元，只有前面和后面两个侧面散热，上、下和左、右四面都与其他单元相邻而不散热。但是，一个农村平房至少有前、后、上、下四面散热，甚至有的房间是五面散热，从而大大增加了其散热量。因此，在农村低层建筑采暖中，房屋的隔热保温更具有重要意义。

此外，房屋的储热性能、太阳能设施与建筑一体化等也要考虑。

#### 1．墙壁和屋顶的隔热保温和储热功能

（1）不管是新房还是旧房，都可采取墙壁的外墙保温法，即在外墙壁上铺挂 6～8cm 的聚苯乙烯泡沫塑料隔热材料。这种方式隔热性能最好，没有热桥产生，且整个墙壁都能成为储热体。

（2）屋顶也要采取隔热措施，最好在房顶外层铺覆隔热层。对旧房也可采用吊顶的方法铺覆隔热层。

（3）对新房可采用夹芯墙，即把隔热材料放置在内外墙中间。屋顶可根据太阳能集热器安装的需要来设计。

#### 2．门窗散热问题

新旧房屋都要解决门窗散热问题。

解决的办法有以下几个。

（1）采用密封和隔热比较好的塑钢门窗，最大限度地抑制对流热损失。

（2）对直接向院外开的门，设置双道门，避免院外冷空气直接进入室内。

（3）采用双层玻璃门窗或中空玻璃窗，尤其是中空玻璃窗的经济性和隔热性能都比双层玻璃门窗更好。

#### 3．增设阳光间

增设阳光间可有效地改善主房间的居住环境。

广大农村都有类似的在南墙外设置阳台式小走廊的习惯，把这些阳台或小走廊的南面用大块玻璃密封起来就是很好的阳光间。它既有很好的隔热保温作用，也有一定的存放物品的功能。

### 11.1.6 室内散热系统的确定

#### 1．地板辐射采暖

若是安装室内散热系统，最好选用地板辐射采暖方式，这种采暖方式有许多优点。

（1）舒适卫生。安装普通散热器的房间是从头部到脚下温度逐渐降低，而地板辐射采暖恰恰相反，是从地面到头部温度逐渐降低。俗话说：“暖人先暖脚”，脚暖和则全身都感觉暖和，而头部的温度略低，使人不会感觉有闷热压抑，有一种清新的感觉，让头脑能够不会因为温度过高而昏沉。

（2）地板辐射采暖是将加热盘管埋置于地板混凝土埋管层中，人们不会因为散热器而存在卫生死角，室内不需安装散热器的支管与立管，实际上给用户增加了一定数量的使用面积。

（3）高效节能。热效率提高 20%～30%，即可以节省 20%～30%能耗。

（4）有较好的储热效果，热稳定性好。地板及混凝土可以蓄存相当一部分的能量，停止供热后，能保持室温几小时不降低。这点对太阳能采暖极其重要，可在相当程度上解决太阳能的间歇性问题。

#### 2．普通散热片

若原来已有普通散热片，仍可利用，但要求供热温度稍高些，最好采用聚光型真空管集热器，因为这种集热器集热温度较高，在较高集热温度下，仍有较高的集热效率。

### 11.1.7 辅助热源的选择设计

冬季房间采暖必须保持连续性，利用房屋本身的储热性能和水箱等短期储热技术，基本上可以解决晚上的供暖问题。但是在我国不少采暖区，冬季采暖季节常常会出现连续几天甚至十几天的阴天，对没有或不适宜采用长期储热技术的用户，就需要采用辅助热源以补充太阳能的不足。

常用的辅助热源有电辅助加热、热泵加热、燃煤或燃气燃油锅炉、生物质能供暖等。

（1）在太阳能资源较好的Ⅰ、Ⅱ类地区，比如西藏、青海、甘肃、陕西、山西、河北北

部等地区，阳光充足、日照时间长、辅助加热量较少，可采用电辅助直接加热，其优点是设备简单，造价低，用电热管直接加热即可。

（2）在天气不是太寒冷的太阳能资源Ⅲ类地区，可用热泵或冷暖空调作为辅助热源。

（3）在农作物秸秆等生物质能资源丰富的地区，可选用生物质能作为辅助热源。柴草、作物秸秆都是农业生产的附带产物，可看成是零成本；另外，作物秸秆作为燃料的一个重要特点是易点燃，启动快，可随时与太阳能相配合，当突然阴天无阳光时，可立刻用燃柴锅炉供暖。

（4）不少家庭已有燃煤的土暖气，在这些家庭搞太阳能采暖，可利用原有的燃煤锅炉作为辅助热源，是一种比较现实的、节省投资的方案。

农村燃煤炉大都是一种多功能炉，即集炊事、烧水、采暖 3 种功能于一身，太阳能暂时难以取代，安装太阳能采暖设备也要保留这些设施，因此最好的方案是用原有的炉具作辅助热源。

（5）燃油和燃气锅炉。相对于燃煤锅炉，燃油和燃气锅炉使用较方便且对家庭内环境污染较小，也基本上没有炉灰等垃圾需要处理。因此，有的家庭为了方便希望采用燃油或燃气锅炉作为辅助热源。

### 11.1.8　储能系统设计

储能是太阳能采暖系统必须考虑的问题（详细请参阅第 4 章），主要应从以下几方面考虑。

（1）充分利用房屋自身的储热性能，即利用房屋内的墙壁、地板、家具衣物等来储存热能，对太阳能采暖房进行外墙隔热保温是实现自身储能的必须措施，从而实现了太阳能采暖中储能和节能的完全一致。

充分利用好房屋自身的储热功能，可满足当日夜间的采暖需求，即白天利用太阳能供热，晚上太阳能停止供热，仅利用房屋自身储存的热量即可保证昼夜房间温度波动不超过 2℃。

（2）对于相变储能，由于目前还存在一些技术问题，因此一定要在专门技术人员的指导下进行设计安装。

（3）对于采用室内散热片采暖的系统，或由于其他原因造成房屋自身隔热保温和储热性能较差的采暖系统，昼夜温差会较大，可以采用大容量储热水箱来储存热能，晚上利用储存的热水继续向房间供暖。

这种方法最多只能储存一两天供暖所需的热能，较适合在太阳能资源较好的Ⅰ、Ⅱ类地区使用。

（4）100$m^2$ 以上的平房建筑，可以采用地下长期储存太阳能的储能系统，利用夏季储存的太阳能在冬季向房间供暖。太阳能的长期储存方案自然地解决了夏季热量过剩问题。

（5）利用地下几十立方米的储水窖可以进行中短期的太阳能储存，可解决长达十几天阴天的供暖问题。

（6）对于二三层的小楼采暖，要实现主要用太阳能供暖，必须采用长期地下储能系统，

把春、夏、秋季的太阳能储存下来供冬季采暖用。这种方案可大量节省太阳能集热器面积。既解决了阴天问题，也解决了楼顶集热器面积不足的问题。

## 11.2 夏季热量过剩问题的解决方法

### 11.2.1 夏季热量过剩问题制约着太阳能供暖的发展

冬季用太阳能采暖需要较大面积的太阳能集热器，一个普通家庭至少需要 30～40m$^2$ 的集热器，一个建筑面积 300m$^2$ 的二层小楼更是需要上百平方米的太阳能集热器。这么大面积的集热器到夏季会产生大量的热能，热能若不能得到有效利用，不仅是很大的浪费，而且可能会给系统造成损害。由于目前还很少采用季节性长期热能储存技术，故夏季热量过剩问题正困扰着我们，严重影响了太阳能采暖事业的发展。

举一个实例，河北省某县有一户安装了 54m$^2$ 的真空管太阳能集热器为一个二层小楼供暖，用电作辅助热源，一年下来确实节省了不少电费，但是到夏天，54m$^2$ 的集热器会产生大量的热能却无法利用，最后用户干脆把集热器的水放空，把阀门关死，让集热器空晒。这实在是个不太好的方法，在夏季不仅不能利用太阳热能，还有可能烧坏集热器内的胶圈等部件，因空晒的真空管温度可能达到 100℃以上，系统难以承受如此高温。

在奥运会前后期间，一些知名太阳能公司在北京郊县为几千个家庭安装了太阳能供暖设施，但考虑到夏季能量的综合利用，每户只安装了十几平方米的集热器，这点面积的集热器在夏季供生活用热水完全够用，但用于冬季采暖却差得多，只能提供 30%左右的采暖用能，其他大部分能量要靠辅助热源提供，这恐怕又失去了太阳能采暖的本意。

夏季热量过剩这个问题甚至影响了国家住建部关于太阳能采暖标准的制定。2009 年，住建部制定的太阳能供热采暖标准提出，在我国太阳能资源较好的Ⅱ类地区，太阳能供暖的保证率只有 30%～50%；在太阳能资源一般的Ⅲ类地区，太阳能供暖的保证率只有 10%～30%。这样低的太阳能供能保证率，只能靠辅助热源来提供其余 70%～90%的采暖用能。在这里，所谓辅助热源实际上成了主要热源，而太阳能则只起到了辅助作用。用户不仅不能省掉常规能源供暖的设施，反而要主要依靠它。尤其是有不少用户为了方便，采用电直接加热作为辅助热源，从而导致了用电量大幅攀升，这不仅失去了太阳能采暖的本意，使太阳能采暖的意义大打折扣，而且影响了太阳能在人们心目中的形象，影响了人们使用太阳能的信心。

努力解决好夏季太阳能热量过剩问题，使太阳能供暖回归本意，在冬季采暖总能耗中，使太阳能至少能提供一半以上的采暖用能，甚至实现完全靠太阳能供暖，这是我们目前需要解决的重要问题。

这个问题有很多解决途径，下面我们分几个方面讨论。

### 11.2.2　覆盖法

一个最简单的办法就是用覆盖法解决夏季能量过剩问题。现在市场上有遮阳网出售，价格也不贵，用遮阳网把集热器盖上，减少了投射到真空管的太阳辐射量，自然就减少了集热器的产热量。调整遮阳网覆盖的面积，就可调整集热器产热水量，使其满足夏季用热水即可。

对聚光式真空管集热器，其真空管的数量比密排式真空管的数量少得多，因此可不用遮阳网，而是把每个真空管单个包起来。

### 11.2.3　最佳倾角法

太阳能集热器的安装倾角对其集热性能也有重要影响。我们知道，太阳赤纬角每年的变化幅度是 47°，即冬至和夏至中午的太阳高度角相差 47°。冬至时日照最差，是最需要太阳能供暖的时刻。从提高太阳能采暖效率来说，集热器的倾角应按照冬至日接受阳光最佳的原则来安装，即：集热器倾角=地理纬度+23.5°，或等于地理纬度+23°。

以北京地区来说，其地理纬度是 40°，则集热器的倾角应是：40°+23°=63°。

到夏至中午，太阳光与集热器就有一个大约 46° 的交角，因 cos46°=70%，只有 70%的能量被集热器接收。用这种方法既提高了冬季太阳光辐射的接收率，又减少了夏季阳光的产热量，是一个两全其美的办法。

### 11.2.4　采用聚光器法

通过第 6 章我们知道，采用固定式聚光型真空管集热器，使其在冬季能有效地聚光，而到夏季，由于太阳赤纬角的变化，太阳光线的照射方向发生了很大变化，光线就不能再汇聚到真空管上，从而大大减少了太阳光的有效辐射量。由于夏季聚光型真空管集热器所用真空管数减少了 2/3，故在夏季整个系统每天吸收的热量只有冬季的 1/3，大大缓解了夏季热量过剩的问题。如图 11-1 所示。

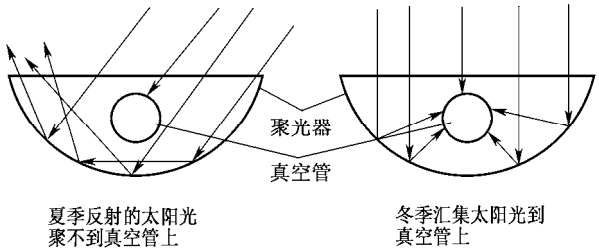



图 11-1　聚光式真空管集热器不同的汇聚光线状态

对于总集热面积低于 30m$^2$ 的集热系统，到夏季有效集热面积不足 10m$^2$，就是不再覆盖，用户也基本上能用掉产生的热能。

对聚集热面积仍较大，需要覆盖一部分集热器的，可以采用毡布把真空管直接包起来。一种附有铝膜的海绵隔热毡（地暖隔热用的），价格不贵，用壁纸刀割开，用胶带粘住即可，使用方便。

对于可以调整角度的聚光型真空管集热器，操作更是简单方便，在夏季，只要把聚光器翻扣过来，使其背面朝向阳光就可了。如图 11-2 所示。

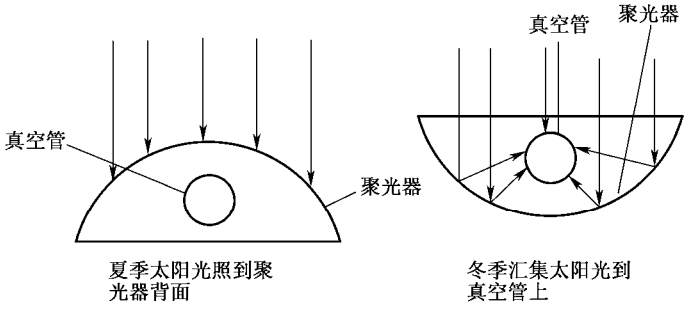



图 11-2 可调角度的聚光真空管集热器

## 11.2.5 生产开水法

利用冬季采暖采用的聚光型真空管集热器，在夏季生产开水，将是一个充分利用能量的方法。

在夏季，聚光型真空管集热器的有效采光面积只是冬季的 1/3。若整个聚光型真空管集热器阵列是 $40m^2$，则夏季只有 $40m^2/3 \approx 13m^2$ 的采光面积，用 $13m^2$ 的集热器生产开水，既可满足用户对开水的需求，也可满足对洗浴等生活用热水的需求。

在夏季，由于天气炎热，人们对饮用开水的需求会增加，用冬季采暖用的集热器生产开水，正可满足这种需求。生产开水集热温度高，系统热效率会降低，其产热量不会太大，而且，其中一大部分还可与凉水混合供洗浴用，十几平方米集热器的产热能力基本可用完，不会造成过多的热量过剩问题。

在初春和入冬前的秋季等非采暖季节，聚光器有少量的聚光作用，同样有利于系统产生高温的开水。

图 11-3 是夏季生产开水系统的示意图。与普通采暖系统相比，这个系统只在几个地方做了小的改动。

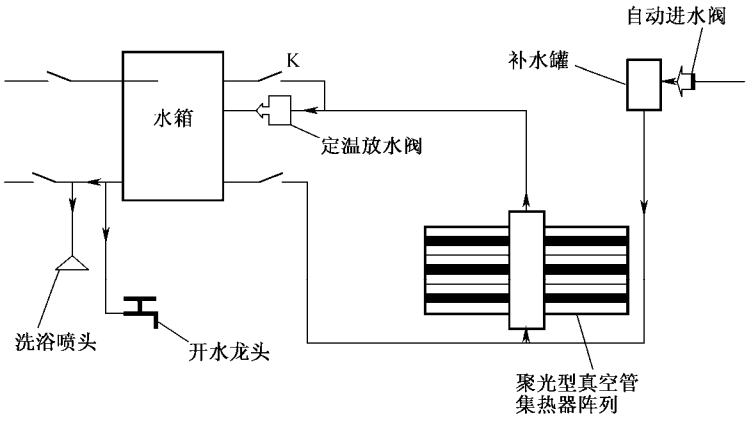



图 11-3 夏季生产开水系统示意图

（1）增加了一个自动补水罐，当系统中水量不足时能自动进水。

（2）在上水管到水箱的进口处增加一个定温放水支路，而把循环回路的进口 K 处用阀门断开，使产生的开水直接进入水箱。

（3）在水箱上增加一个开水出水口。

当然，在设计管路时要考虑开水所经过的管路的耐热问题，至少这些部位要能长期耐 100℃以上的温度，最好采用钢管，不用塑料管。保温材料要用聚氨酯泡沫塑料，不能用聚苯乙烯泡沫塑料。水龙头最好采用不锈钢或铜材质。

此外，要生产饮用开水，还有一个对管道的清洗问题。

### 11.2.6　夏季地下储存太阳能

春、夏、秋季在地下长期储存太阳能，是从根本上充分利用太阳能的最有效途径。采用这种方法，有以下几方面的好处。

（1）太阳能集热器的功能得到充分利用，无论冬季还是春、夏、秋季，太阳能集热器都在满负荷地工作，其利用率最高。

（2）节省了太阳能集热器面积，用较小面积的集热器可以完成较大面积房间的供暖任务。

（3）使二层楼甚至五六层楼主要用太阳能采暖成为可能。

（4）这将是首次实现长期的大规模的热能储存，有重大的实际意义和科学价值。

有关这个问题，在第 4 章已有较详细的论述，这里不再详谈，读者可参阅第 4 章地下储能部分。

### 11.2.7　太阳能制冷

冬季利用太阳能供暖，夏季利用太阳能制冷，两者各得其所，这是很多太阳能爱好者的心愿，也是人们自然提出的问题。

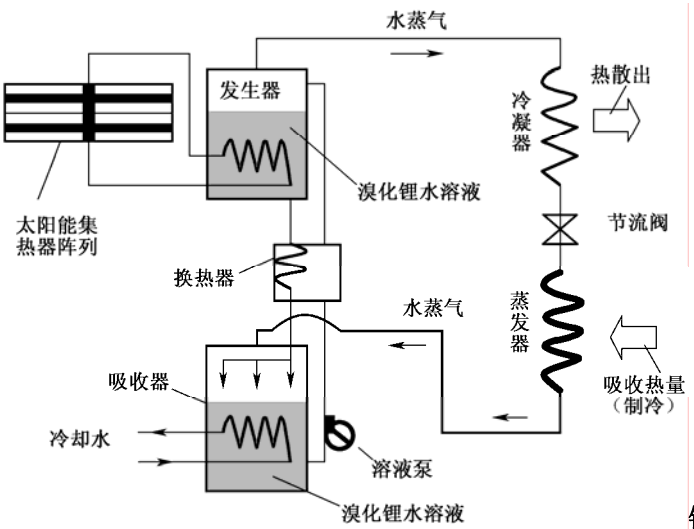
从理论上讲，利用太阳能制冷是完全可行的，图 11-4 是利用溴化锂水溶液太阳能制冷工作原理示意图。

溴化锂是一种稳定性好且极易溶于水的物质。在发生器里装有溴化锂水溶液，通过太阳能集热器向发生器加热，溴化锂水溶液中的水分蒸发，产生高温高压水蒸气进入冷凝器。与此同时，发生器内水分蒸发后剩下的高浓度溴化锂水溶液流入吸收器。

高温高压水蒸气进入冷凝器后，在冷凝器中被冷却，放出大量凝结热后变成高压液态水，高压液态水通过节流阀进入蒸发器，在蒸发器内液态水迅速蒸发变成水蒸气，同时从外界吸收大量的汽化热，从而达到降温制冷的目的。产生的低温水蒸气再从蒸发器进入吸收器。

进入吸收器的水蒸气被高浓度溴化锂水溶液吸收，溶液浓度变低，低浓度溴化锂水溶液被溶液泵经换热器送入发生器，从而完成一个循环。

换热器的作用是把从发生器出来的高温浓溴化锂水溶液的热量传给从吸收器出来的低温低浓度溴化锂水溶液，达到节能的目的。




错误!

图 11-4 溴化锂水溶液太阳能制冷示意图

虽然从理论上说利用太阳能在冬季供暖、在夏季制冷是个理想的、不错的选择，但在实际上，吸收式制冷只在大型工程上有应用，我国还没有商品化的、小型的太阳能吸收式制冷机，尤其是在家庭利用太阳能制冷，经济上还不合算，还有待小型太阳能吸收式制冷机技术上实现突破。

## 11.3 系统运行可靠性解决途径

### 11.3.1 稳定可靠的“傻瓜式”运行系统的必要性

太阳能采暖工程是近几年发展起来的事物，虽然与太阳能热水工程有许多相同之处，很多技术可以借鉴，但是，两者不仅在技术上有不少不同之处，就是在管理上也有许多不同之处。以往的太阳能热水工程基本上都是集体单位使用，一般都有专门的技术人员管理，或至少指定专人负责。这个专门负责人总要学习一点专业维修技术，所以热水工程一般不容易出问题。

但是，太阳采暖要涉及千家万户，我们不可能要求每个家庭都有专门的技术管理人员，因此太阳能采暖比热水工程要求有更高的系统运行的稳定性和可靠性，要求其有“傻瓜式”运行方式。

另一方面，太阳能采暖比热水工程又多了一项供热系统，甚至还多了储能系统，其系统的复杂程度要高，在同样的技术水平下运行的故障率肯定会提高，这就更要求提高系统运行的可靠性。为此我们需要从多方面注意解决这个问题。

## 11.3.2　采用完善的具有“代偿性”的循环系统

### 1．集热系统能同时进行自然循环和强制循环

自然循环系统简单、稳定、运行可靠，不受电力的制约，也不受水泵、自动控制设备等易损部件的影响。把太阳能集热系统设计成可以进行自然循环的系统，可大大提高系统运行的可靠性。

在长期的运行过程中，系统难免会出现停电、水泵运行出故障等问题，一旦出现这些问题，强制循环停止，但自然循环系统仍可正常运行。因此，太阳能集热系统一定要设计成能进行自然循环的系统。

### 2．设计“代偿性”循环支路

太阳能冬季采暖的示意图如图 11-5 所示。为了保证系统运行的可靠性，在循环泵 1 和泵 2 的侧旁都设计了由单向阀 1 和单向阀 2 构成的并联支路。

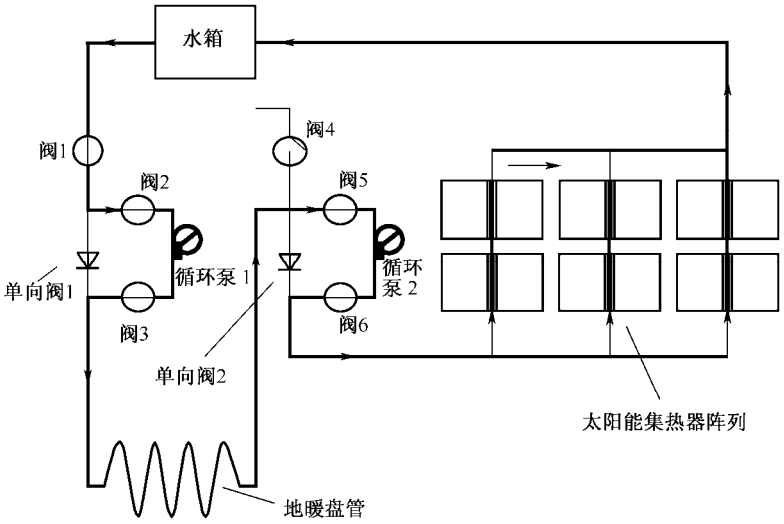



图 11-5　太阳能冬季采暖循环系统

冬季采暖时，循环泵 1 和泵 2 同时运转，热水从水箱抽出，沿阀 1→阀 2→循环泵 1→阀 3→地暖盘管（散热）→阀 5→循环泵 2→阀 6→太阳能集热器阵列（加热）→水箱流动，完成一个循环过程（如图中粗线所示）。

当循环泵 1 出现故障时，可以关闭阀 2 和阀 3，维修或调换泵 1。此时水流就沿单向阀 1 流下，系统的其他部位水流方向不变，整个系统循环由循环泵 2 提供动力，仍能保持系统的正常循环。

同样，当循环泵 2 出现故障时，可以关闭阀 5 和阀 6，维修或调换泵 2。此时水流就沿单向阀 2 流下，系统的其他部位水流方向不变，整个系统循环只由循环泵 1 提供动力，同样能保持系统的正常循环。

在夏季，关闭阀 1，地暖散热部分不再运行，循环泵 2 正常运行，水流从水箱抽出，沿阀 4→阀 5→泵 2→阀 6→太阳能集热器阵列→水箱流动，完成一个循环，如图 11-6 中的粗线所示。

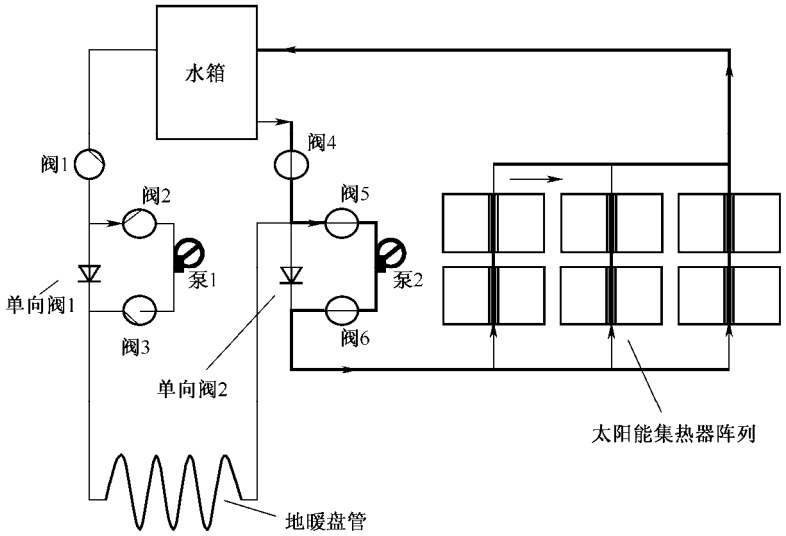



图 11-6 太阳能夏季集热

当循环泵 2 出现故障时，可以关闭阀 5 和阀 6，维修或调换泵 2。此时水流就沿单向阀 2 流下，系统的其他部位水流方向不变，整个系统形成一个自然循环系统，仍能保持系统的正常循环。

总结上述系统的运行过程，可以看出该系统的以下几个特点。

（1）太阳能集热系统按照自然循环管路的安装规则安装，保证了当强制循环因故不能进行时，系统仍能进行正常的自然循环，避免了系统因不能循环而可能发生的更严重的事故，提高了系统运行的可靠性。

（2）在每个循环泵的侧旁都设计了由单向阀构成的并联支路，既保证了循环泵发生故障时可以方便调换或维修，也保证了系统的正常循环运行。

（3）太阳能集热系统和供暖系统两个系统既相互独立、不相互干扰，又相互联系、互相补充。两个循环泵可以分别为各自分系统提供动力，但是当一个泵发生故障时，另一个泵又可为整个太阳能集热供暖系统提供动力，不影响整个系统的正常运行。

### 11.3.3 其他几种防护措施

#### 1. 管路排气

在太阳能集热器阵列中，管路内不积聚气体，不形成气塞，是保证系统能正常循环的重要条件，更是保证系统能自然循环的必要条件，为此可从以下几方面加以注意。

（1）在串联管路中会出现“山峰”形拐点，为了保证在这种拐点处能随时放出产生的气体，在这里要设置排气结构，必要时可设置双排气结构。

（2）强制循环动力较大，可以带走部分管路中的气体，系统要以强制循环为主。

（3）正压循环系统有利于气体的排除，而负压循环循环却容易使气体进入管道内，所以对循环水泵的安装位置和方向一定要认真考虑，水泵流出的方向是正压，水泵背后水流入处是负压状态。要尽量保证太阳能集热器阵列内和地暖盘管内一直处于正压状态，尤其是太阳能集热器阵列，一定要处于正压状态，否则，自然循环就可能无法进行。

要尽量缩小处于负压状态的管路长度。图 11-5 中，除水箱到阀 1 段管路处于负压状态外，其他管路都是处于正压状态。

当由于某种原因某段管路暂时处于负压状态时，要尽快排除故障，恢复正压状态。

### 2．防冻

室外管路的防冻是必须要考虑的问题，可注意从以下几方面加以解决。

（1）对永不见阳光且容易受冻的部位，如从楼顶沿房后侧进入室内的一段室外管路部分，不仅容易受冻，而且受冻后，很难维护，对这些部位应在保温层内贴近管道缠绕电伴热带，可随时对其加热防冻。

（2）适当提高水箱高度，使其晚上能自然形成倒循环，用水箱中的热水防止冷水下集管道被冻坏。

（3）不管有无太阳，即使是连续阴天，每天也要启动循环泵对太阳能集热器阵列进行几次循环，用室内辅助热源的热能对集热器管路加热防冻。

### 3．除尘

除尘是提高集热器效率的重要措施，尤其是聚光型集热器的反射面，更需要定期除尘。

（1）在每年采暖期开始时，要对太阳能集热器进行一次除尘，整个采暖期最好进行 2～3 次除尘。

（2）除尘时最好用水冲洗，或用鸡毛掸子轻轻扫，以免损伤玻璃管和反射面。

（3）若有高压喷水设备，最好用高压水定期清洗。

### 4．抗风

对于采暖用的太阳能集热系统，抗风措施尤其显得重要。

在普通热水工程中，为了提高太阳能阵列的抗风能力，往往把集热器的安装倾角设计得很小，这样虽然提高了抗风能力，但却影响了集热性能。对于采暖用的集热器，因为总是在太阳高度最低的冬季使用，为提高集热器冬季的热性能，集热器与水平面的倾角必须要大很多，我国须采暖的北方地区一定要达到 50°～60°，这么高的倾角一定要注意抗风措施。

（1）要和屋顶面连接牢靠。对平顶屋顶面，可以用混凝土或石板预制较重的底托板，用以固定集热器支架。

（2）对于斜屋顶，若坡度不大，也可以用混凝土或石板预制较重的底托板，用以固定集热器支架。若坡度大，要用角钢、方管等钢材固定好，必要时可在最北侧的集热器处安装防风板。

（3）设计集热器阵列时要注意留有通风道，以减轻风压。

#### 5．稳定可靠的零部件

采用的零部件要质量可靠，且与设计的系统性能相匹配。

（1）集热器的热水上集管要耐 100℃以上的温度，尤其在夏季，上集管的水温可能接近100℃，故需要用能耐高温的铁管等金属管道。同样，其隔热材料也要能耐 100℃的高温，要用聚氨酯或岩棉等耐热隔热材料，而不能用聚苯乙烯泡沫塑料。

（2）循环泵、电子温控仪、地暖管、真空玻璃集热管等主要零部件都要用质量可靠的正规产品，以免频频损坏。

## 11.4 太阳能供暖的基本循环系统

在太阳能采暖系工程中，由于地理位置、气候条件以及用户情况的不同，所采用的供暖系统有很大区别：有的有储热水箱，有的没有；有的有辅助热源，有的没有；有的有地下储热系统，有的没有。总的来说，有下述几种基本的循环系统。

### 11.4.1 集热器—散热器系统

这是最简单也是最基本的太阳能采暖系统，它只有太阳能集热器和室内散热器两个最基本的设施，没有储水箱，只有一个膨胀水箱。这是一个小水箱，主要解决系统中的循环水热胀冷缩问题，同时兼作补水箱。这是一种单循环系统，可分单泵单循环和双泵单循环两种系统。

#### 1．单泵单循环系统

循环路线如图 11-7 所示。

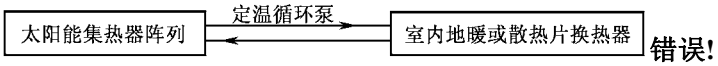



图 11-7 单泵单循环系统

这种系统只有一个定温循环泵，系统结构最简单，当太阳能集热器的温度达到设定值时，循环泵启动，热水流向房间散热器，即给房间供热。

#### 2．双泵单循环系统

循环路线与单泵系统基本相同，示意图如图 11-8 所示。

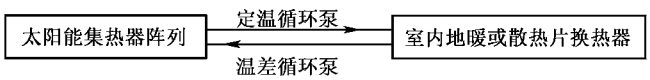



图 11-8 双泵单循环系统

这种系统有两个循环泵。一个是向太阳能集热器泵水用温差循环泵，其控制仪的两个探头分别放置在集热器上集管和室内散热器，当两个探头温差达到设定温度时循环泵启动；另一个是向室内散热器泵水用定温循环泵，其控制仪探头放置在集热器上集管上，当达到设定温度时，定温循环泵启动。

在较大的采暖工程中可采用双泵系统，可避免单个泵动力不足和动力不均衡问题。两个循环泵实际是串联的，当一个泵出现故障时，另一个泵也能保持整个系统的运行。

## 11.4.2　集热器—储热水箱—散热器系统

系统增加一个储热水箱，可以增加系统的储热功能，改善系统的稳定性和可靠性。

### 1．双泵双循环系统

整个系统分为两个循环系统：由集热器和储热水箱组成集热循环系统，主要靠温差循环泵进行强制循环，但该系统也能进行自然循环，自然循环和强制循环的水流方向一致。当循环泵出现故障时，自然循环仍能进行。由储热水箱和室内换热器组成供热循环系统，完全靠定温循环泵进行强制循环。

双泵双循环系统的示意图如图 11-9 所示。

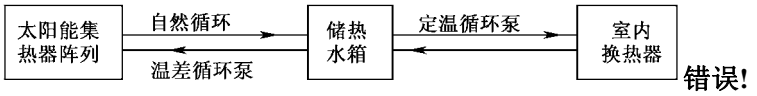



图 11-9　双泵双循环系统

### 2．单泵循环系统

循环流程如图 11-10 所示。

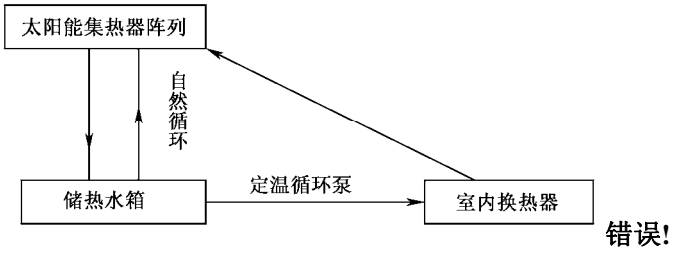



图 11-10　单泵循环系统

集热器—储热水箱—散热器系统也可搞成单泵循环系统，由定温循环泵提供动力，从储热水箱向室内换热器泵入热水，然后已散去热量降温的凉水再流回太阳能集热器继续加热，完成一个循环。当循环泵出现故障时，太阳能集热器与储热水箱之间仍能进行自然循环。

## 11.4.3　集热器—辅助热源—散热器系统

循环流程图如图 11-11 所示。

这是一个单循环系统，当太阳辐射较好时，由太阳能提供热源，定温循环泵提供动力，完成向室内换热器循环供热。当太阳辐射不足时，由辅助热源提供热能向房间供热。

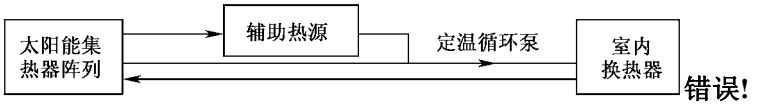



图 11-11　采热器—辅助热源—散热器系统

### 11.4.4　集热器—水箱—辅助热源—散热器系统

由集热器—水箱—辅助热源—散热器系统组成的循环系统会有多种不同的循环路线，主要有以下 3 种，如图 11-12 所示。

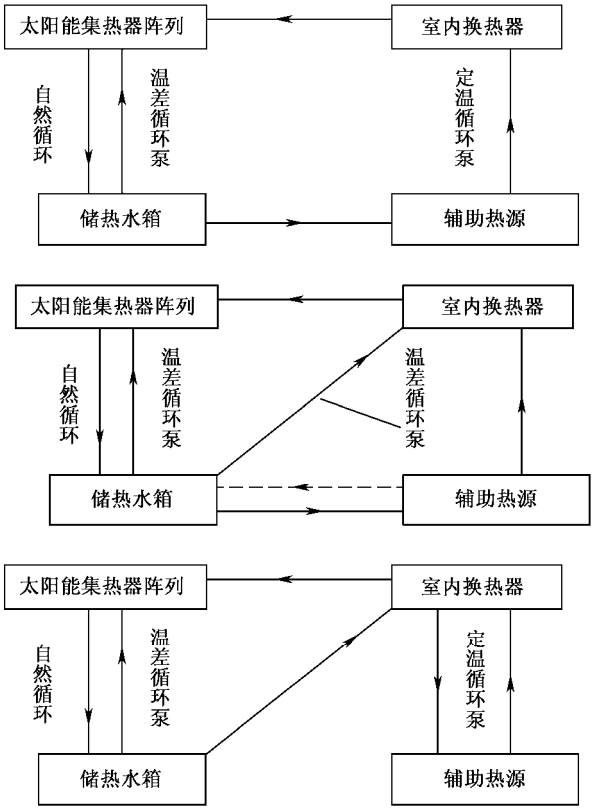



图 11-12　集热器—水箱—辅助热源—散热器系统

### 11.4.5　集热器—地下储热—散热器系统

集热器—地下储热—散热器系统有多种循环回路，其基本管路循环如图 11-13 所示。

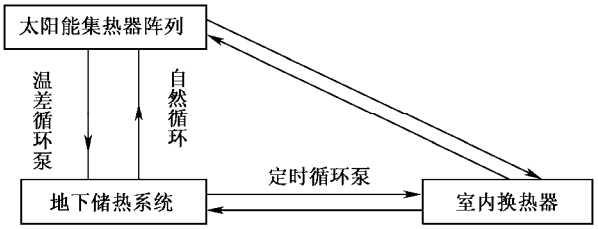



图 11-13　集热器—地下储热—散热器系统的基本管路循环

### 11.4.6　集热器—水箱—地下储热—散热器系统

集热器—水箱—地下储热—散热器系统的基本循环回路如图 11-14 所示。

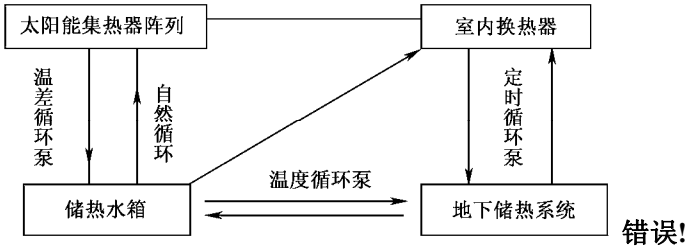



图 11-14　集热器—水箱—地下储热—散热器系统基本回路

该系统由集热器、水箱、地下储热和室内散热器 4 个基本设施组成，可以组合成多种循环回路。

## 11.5　集热器—水箱—地暖循环系统

### 11.5.1　集热器—水箱—地暖单泵单循环系统

#### 1．晴天供热循环

在冬季日照比较好的地区，即很少出现连续阴天、天气不是特别寒冷（最低气温一般不低于−10℃）、基本上可用冷暖空调辅助供暖的地区，可以采用这种集热器—水箱—地暖单循环系统，如图 11-15 所示。其特点是没有专设储能设施，基本上只在冬季采暖时运行，其系统回路简单，运行可靠，成本低。

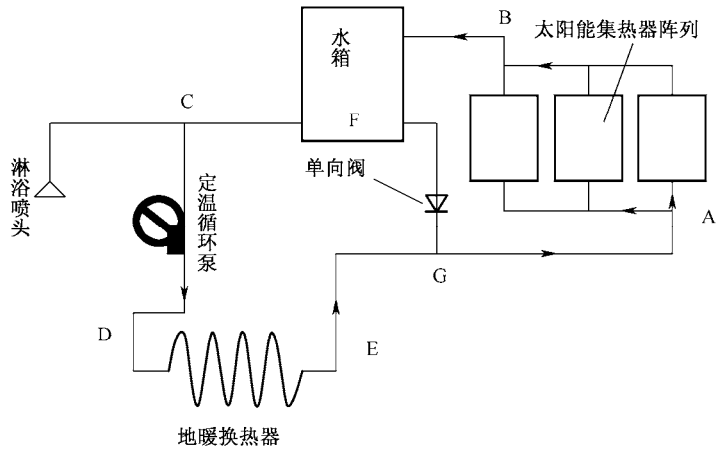



图 11-15 集热器—水箱—地暖单循环系统

定温循环泵的温度探头放置在太阳能集热器的上端 B 处，在冬季晴天的白天，B 点的温度达到设定值时，定温循环泵启动，循环水流沿 F→C→D→E→G→A→B→F 管路流动，把太阳能集热器收集的热量传输到地暖换热器中。当太阳落下后，B 点温度降到一定值时，循环泵停止运行，水流停止流动。

在这个系统中有“小水箱”和“大水箱”两种设计方案，小水箱只有几百千克的容量，其作用有 3 个：膨胀水箱、补水箱和小容量储热，其小容量的储热可以为短期的循环泵停止运行和系统的循环提供支持。

大水箱设计方案有几吨至几十吨的容量，除同样具有膨胀水箱和补水箱功能外，主要是具有较大的储热功能，可提供一两天的供暖耗能，详细请参看第 4 章。

### 2．自然循环

在春、夏、秋季的非采暖季节，断开循环泵的电源，循环泵停止运转，其循环回路如图 11-16 所示。在白天有阳光时，自然循环系统启动起来，水流沿 A→B→F→G→A 管路流动，把集热器收集的热能传输到水箱内，防止了集热器内的温度过高。淋浴用热水可把水箱内的热量消化掉。即使出现用不完热量的情况，水温达到沸点，亦可通过汽化散热把热量散掉，避免了温度和压力过高，对设备造成损伤。

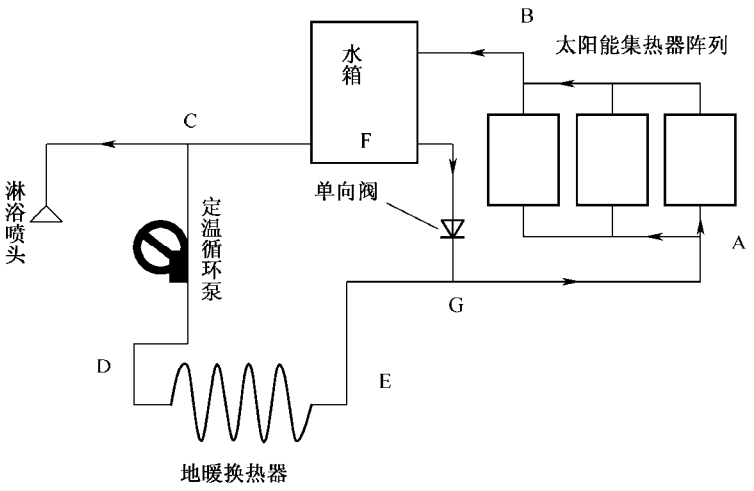


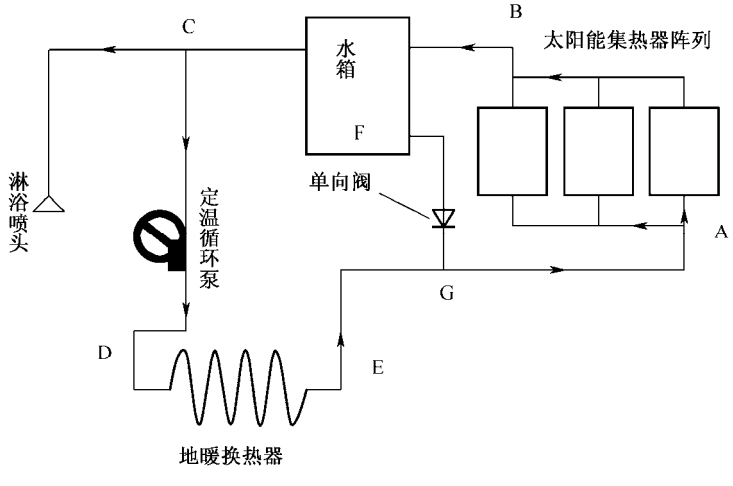

图 11-16　集热器—水箱—地暖单循环系统：自然循环

另外该系统也可改造成夏季产开水系统，详细请参看本章前面的产开水系统。

在冬季有阳光时，若突然电网停电，循环泵停转，与上面情况相同，自然循环系统就启动起来，向水箱传输热量，避免了系统温度过高。

### 3．从水箱高温层泵水

这种系统也可以改成如图 11-17 所示的形式，其特点是循环泵从水箱的上面的高温层泵出水，直接进入地暖散热器，其换热效率要高些。




错误!

图 11-17　集热器—水箱—地暖单循环系统：从高温层泵水

### 4．另一种安装形式

图 11-18 所示是这种循环系统的另一种安装形式，其循环过程与图 11-15 相同，控制器

探头放置在太阳能集热器上端 B 处。冬季有阳光时，循环泵启动起来，循环水流沿 F→C→D→E→G→A→B→F 管路流动，把集热器的热能传输到地暖。春、夏、秋季，断开电源，循环泵停止运行，在有阳光时，太阳能集热器的温度上升，自然循环系统启动起来，循环水流沿 F→C→G→A→B→F 管路流动，把集热器热量传输到水箱内。

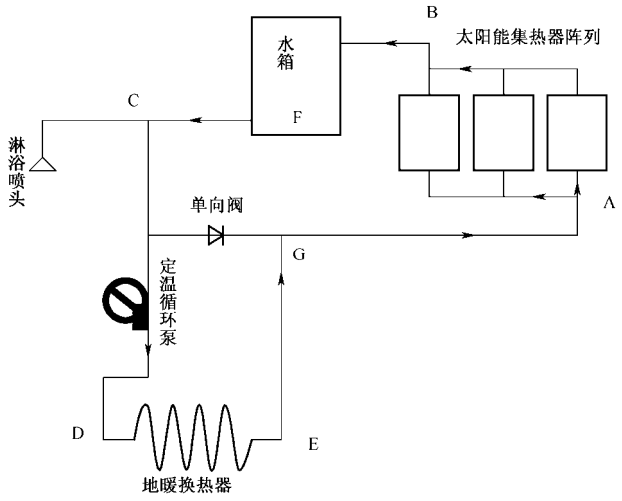



图 11-18　集热器—水箱—地暖单循环系统的另一种安装形式

## 11.5.2　集热器—水箱—地暖双循环系统

### 1. 双泵循环

如图 11-19 所示，集热器、水箱和温差循环泵形成一个集热循环系统，水箱、地暖换热器和定温循环泵形成一个供热循环系统。

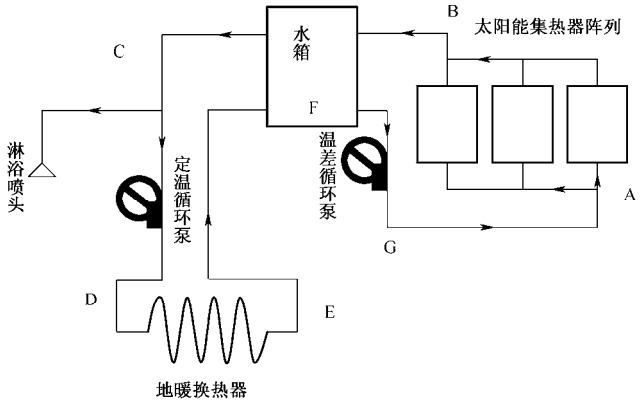



图 11-19　集热器—水箱—地暖双循环系统：双泵循环

温差循环泵的两个探头分别放在太阳能集热器上集管的 B 处和水箱的底部。在冬季白天

有阳光时，当两个探头测出的温差达到设定值时，温差循环泵循环起来，水流沿 F→G→A→B→F 管路流动，把集热器的热能传输到水箱内。

定温循环泵负责向地暖供暖，其温度探头放置在水箱上部高温处。当水箱水温达到设定值时，定温循环泵启动起来，水流沿 F→C→D→E→F 流动，把水箱中的热量传输给地暖。当没有太阳或太阳辐射较低时，水箱水温降低，当降低到设定值时，定温循环泵就停止转动。

这种双泵循环系统的特点是两个循环系统基本不互相干扰，运行可靠性强，维护较方便。当一个系统运行出现故障停止运行或进行维修时，另一个系统仍可正常运行。例如当定温循环泵出现故障进行维修时，向室内供暖系统停止运行，但温差循环泵可仍在转动，集热循环系统仍可正常运行，避免了集热系统停止运行时可能出现的局部过热。把故障限制在定温循环泵身上，避免了事故的扩大化。

### 2．夏季循环

在春、夏、秋季，关闭定温循环泵，如图 11-20 所示，只开启温差循环泵，水流只沿 F→G→A→B→F 环路流动，把集热器的热量传输到水箱内，避免了集热系统温度过高。

相对于单泵单循环系统，这种系统的优点是在春、夏、秋季既可依靠温差循环泵进行强制循环，又可进行自然循环。当有电时进行强制循环，换热效率高，不会出现系统局部过热现象。

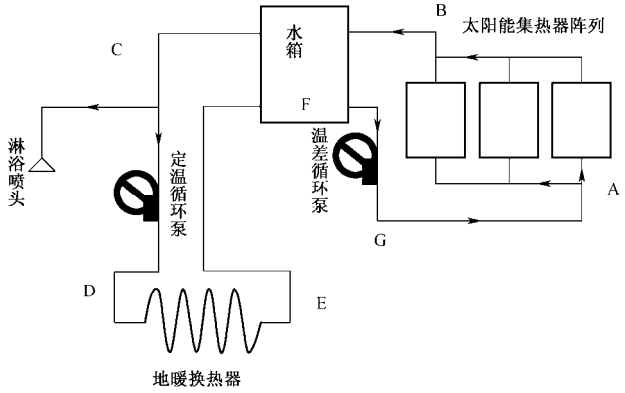



图 11-20　集热器—水箱—地暖双循环系统：夏季循环

当停电时，循环泵停止转动，但自然循环仍能进行，虽然循环动力小，但仍可维持水流沿 F→G→A→B→F 环路流动，不断把热量从集热器传输到水箱内，大大缓解了系统的局部过热现像，降低了系统的故障率。

在夏季，淋浴等生活用水可以消耗掉部分水箱的热能。

### 3．定温循环泵反向安装法

图 11-21 是图 11-20 定温循环泵的反向安装示意图，即水箱和地暖间的水流循环方向正相反。这种安装方式的主要特点是从水箱进入太阳能集热器的水的温度提高了，缩小了与集热器内水的温差，减少了玻璃管的破碎率，提高了系统运行的可靠性。

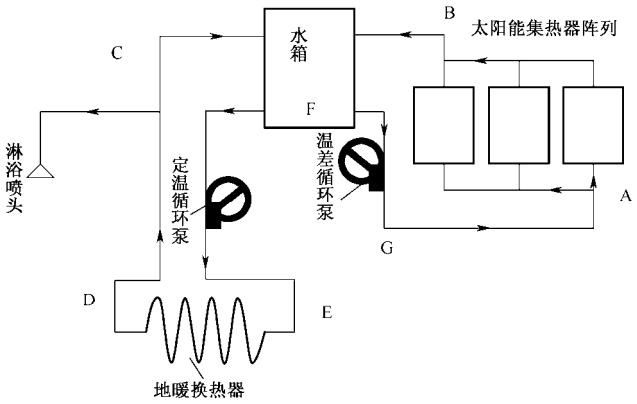



图 11-21 集热器—水箱—地暖双循环系统：定温循环泵反向安装

这种系统对聚光式真空管集热器有特殊的好处。聚光式集热器的每根真空管接收的能量密度比普通非聚光集热器的每根真空管接收的能量密度大几倍，其集热温度要高得多，一旦系统出现运行故障，比如偶然的停电，循环泵停止转动，就可能使真空管内水温迅速提高，甚至很快达到 100℃沸腾。如果此时又突然来电，循环泵又突然转动起来，这时从地暖回流回来的循环水可能只有 20℃左右，若 20℃左右的冷水直接进入装有 100℃热水的真空管内，则真空管将经受 80℃温差的冷热水冲击，这将大大增加玻璃管的破碎率。

采用这种定温循环泵反向安装，就可大大缓解这一矛盾。从地暖出来的低温水不直接进入真空管，而是进入水箱上部的高温水层，与高温水混合，这样从水箱进入太阳能集热器的水的温度就提高了，缩小了与集热器内水的温差，减小了集热器所受的温差冲击，从而减少了玻璃管的破碎率，提高了系统的运行可靠性。

但是从另一方面来说，这可能会降低一些换热效率。

### 4．高温层取水、回水法

为提高系统换热效率，同时又获取较高的系统稳定性，可采用如图 11-22 所示的方法，即在高温层取水、回水法。这种方法对聚光式真空管集热器有特殊的意义。

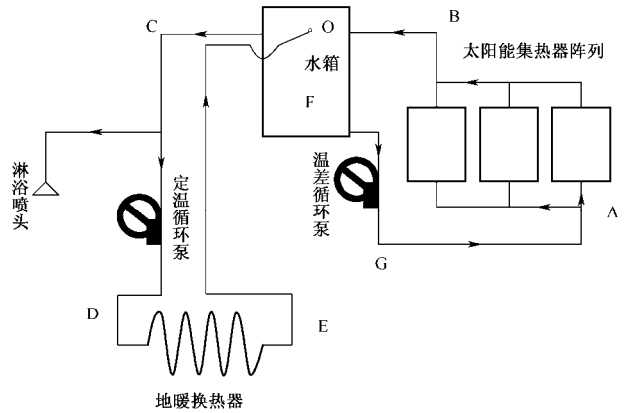



图 11-22 集热器—水箱—地暖双循环系统：取水、回水都在高温层法

采用这种方法，定温循环泵从水箱上部抽取高温水后泵入地暖换热器内，相对于循环泵反向安装法，可提高地暖换热器的换热效率；另一方面，由于从地暖散热流回来的低温水也回到水箱上部，与高温水混合，最后从下部进入太阳能集热器的水温会有所提高，与循环泵反向安装法一样，缩小了与集热器内水的温差，减小了集热器所受的温差冲击，从而减少了玻璃管的破碎率，提高了系统运行的可靠性。

## 11.6　地下水窖储存系统

### 11.6.1　地下水窖储存系统基本循环水路分析

#### 1．水窖储存夏季循环水路

为了把春、夏、秋季的太阳辐射能储存起来供冬季采暖用，可采用地下长期储热系统，其具体循环回路如图 11-23 所示。

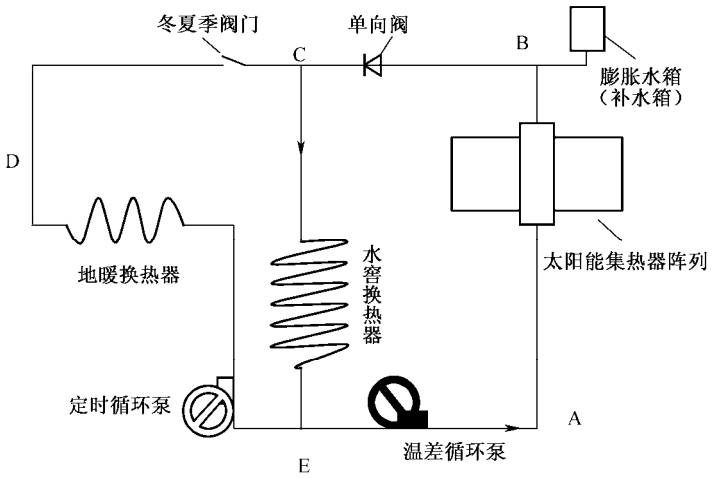



图 11-23　水窖储存夏季循环水路

在夏季断开冬夏季阀门，开通温差循环泵，当集热器温度达到设定值时，温差循环泵启动，太阳能集热器的热水沿 A→B→C→E→A 的方向流向水窖换热器，把水窖中的水加热，从而实现把热能直接储存在水窖中。

#### 2．冬季基本循环水路：双泵启动

在冬季连通冬夏季阀门，此时的水流循环有几种情况，其一，晴天有日光时两个循环泵都启动起来，其循环水流方向如图 11-24 所示。沿 AB 方向从集热器出来的热水和沿 DC 方向从地暖换热器出来的冷水在 C 处混合，共同通过水窖换热器，流出 E 点后，又分别流向集

热器和地暖换热器。这种循环方式又分 3 种情况。

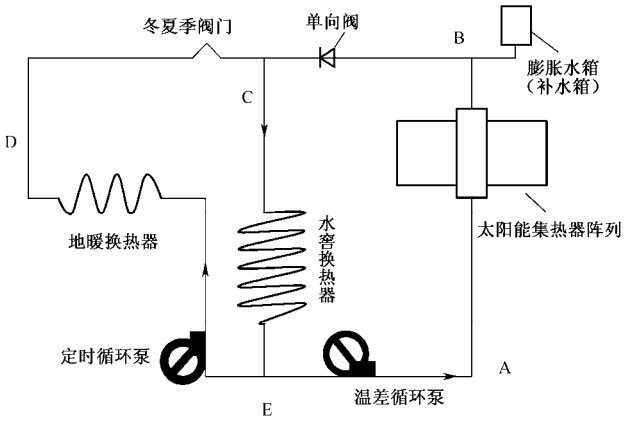



图 11-24 水窖储存冬季基本循环水路：双泵启动

第 1 种情况，在 C 处混合后的水流温度高于储水窖水温，换热器向水窖内的水散热，提高水窖水温，增加了储存的热能。水流在 E 点分流后，一部分进入地暖换热器向房间供热，另一部分进入集热器，进一步去加热。这种情况系统可正常运行供热。

第 2 种情况，在 C 处混合后的水流温度低于储水窖水温，换热器向水窖内的水吸热，降低水窖水温，减少了储存的热能，提高了循环水流温度。水流在 E 点分流后，一部分进入地暖换热器向房间供热，另一部分进入集热器，进一步去加热。这种情况系统亦可正常运行供热。

第 3 种情况，在 C 处混合后的水流温度等于储水窖水温，换热器和水窖内水间没有热交换，水窖水温不变，储存的热能不变化。水流在 E 点分流后，一部分进入地暖换热器向房间供热，另一部分进入集热器，进一步去加热。这种情况系统也可正常运行供热。

### 3．水窖储存冬季基本循环水路：温差循环泵单泵启动

晴天有日光，温差循环泵启动起来，但定时循环泵处于间歇状态，其循环水流方向如图 11-25 所示。沿 AB 方向从集热器出来的热水到 C 点后，一部分向水窖换热器方向流去，另一部分向地暖换热器流去，流出来后在 E 处混合，然后共同再流向太阳能集热器，完成一个循环。在这种情况下，集热器实质上是在直接向地暖供热（请注意，水流方向与原来不同了），同时也向水窖进行少量充热（储存热）。

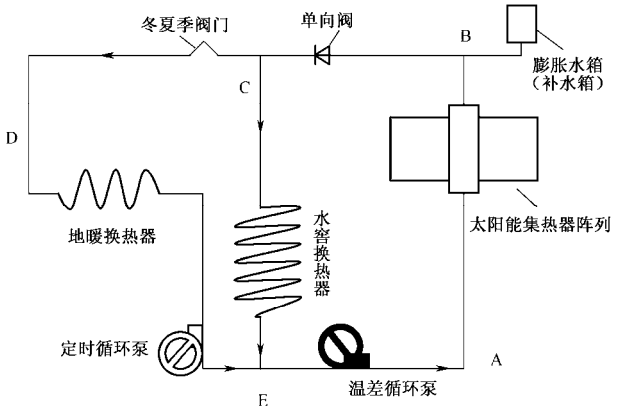



图 11-25　水窖储存冬季基本循环水路：温差循环泵单泵启动

#### 4．水窖储热冬季基本循环水路：定时循环泵单泵启动供热

在冬季阴天或夜晚无日光时，定时循环泵启动起来，向房间供热，但温差循环泵处于停止状态，其循环水流如图 11-26 所示，沿 C→E→D→C 方向流动。从水窖换热器出来的水向地暖换热器方向流去，流到 C 点时，由于有单向阀的阻挡，不能流向集热器，又流向地窖换热器，完成一个循环。在这种情况下，靠地窖储存的热量向地暖供热。

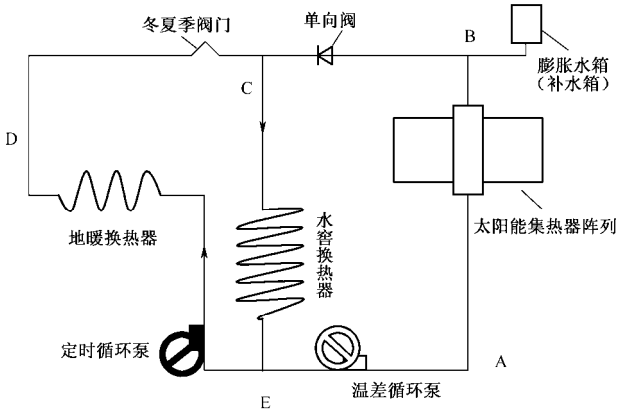



图 11-26　冬季基本循环水路：定时循环泵单泵启动

### 11.6.2　（水窖储热系统）循环泵的不同安装法

实际上，在采用水窖储热的循环系统中，其安装方式有很多种，且各有自己的特点和不足，上一节介绍的是最基本的循环系统，我们可以根据用户的具体情况来确定具体的循环系统。下面我们介绍其他几种不同的循环泵安装法。

#### 1．循环泵的串并联组合

如图 11-27 所示，该系统的不同之处是温差循环泵安装在水窖出口处，在夏季其运行情

况与图 11-23 相同，但在冬季却有以下差别。

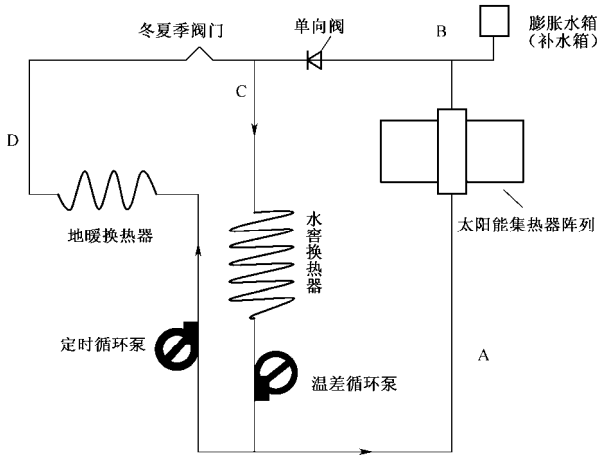



图 11-27　水窖储热循环泵的串并联

（1）当白天有阳光时，两个泵都启动，其水流循环如图 11-27 所示，既向地暖供热，又保证了太阳能集热器的正常热循环。

（2）当白天有阳光时，只有温差泵启动，其水流循环仍如图 11-27 所示，既向地暖供热，又保证了太阳能集热器的正常热循环（这里提示我们，有可能用单泵完成整个循环）。

（3）当阴天或夜晚无日光时，定时循环泵启动起来，温差循环泵处于停止状态，其循环水流沿 C→E→D→C 方向流动。从水窖换热器出来的热水向地暖换热器方向流去，从而实现向房间供暖。流到 C 点时，由于有单向阀的阻挡，不能流向集热器，又流向水窖换热器，完成一个循环，靠水窖储存的热量向地暖供热。

这种安装方式的主要优点是，即使定时循环泵出现故障，只有一个温差循环泵在运转，整个系统也基本上能正常运转，从而大大提高了系统的可靠性和稳定性。

### 2．水窖储热单泵系统

前面我们已提到，用单泵也可能使整个系统运行起来，如图 11-28 所示，该图去掉了单向阀，把定时循环泵安装在水窖换热器的出口处。

（1）在夏季断开冬夏季阀门，水流沿 A→B→C→E→A 方向流动，太阳能集热器向储水窖输送储存热量。

（2）在冬季当白天有阳光时，其水流循环如图 11-28 所示，既向地暖供热，又可使太能集热系统进行热循环。

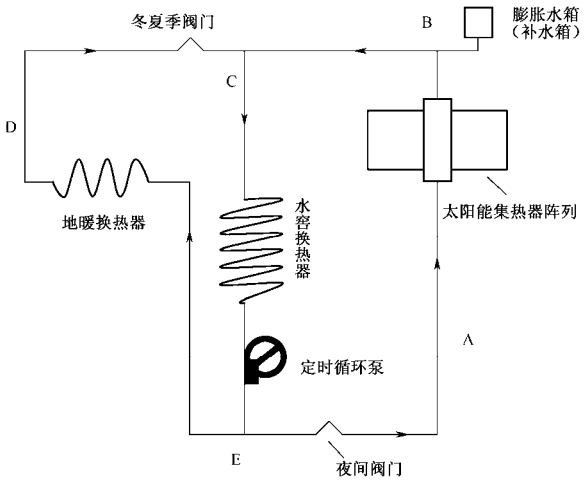



图 11-28　水窖储存单泵系统

（3）晚上无阳光时，其水流方向仍如图 11-28 所示，虽然能正常供热，但由于一部分热水流经集热器，故会加大热损失。但作为一种改进，可在 E 点右侧加以夜间阀门，每天夜间人工关闭，可避免热水通过集热器，减少热损失。

（4）这个系统还有一个缺点，由于需使用定时循环泵，故集热器管道内的循环很不稳定，时停时续，不利于热量从集热器输出来。

这种系统不宜长期使用，不宜作为独立的系统设计使用，但可在某种特殊情况下，例如在设备出现故障需要维修时，临时替代采用这种循环路线。

### 3．水窖储热双泵并联系统

这种系统的运行状态如图 11-29 所示。温差泵的两个探头分别设置于太阳能集热器的上集管 B 处和水窖内，当集热器与水窖的温度差达到设定值比如 10℃时，温差循环泵启动；当小于设定值比如 3℃时，温差循环泵停止转动。

（1）在春、夏、秋季，关闭冬夏阀门，只启动温差循环泵，水流沿 A→B→C→E→A 方向流动，太阳能集热器向水窖储热。

（2）在冬季，不管是两个泵都启动还是只有任意一个泵启动，其水流方向都是一样的，如图 11-29 所示，既可以使集热器的热量向地暖和储水窖传送，又可使水窖的热量向地暖传输。这与单泵系统有点相似。

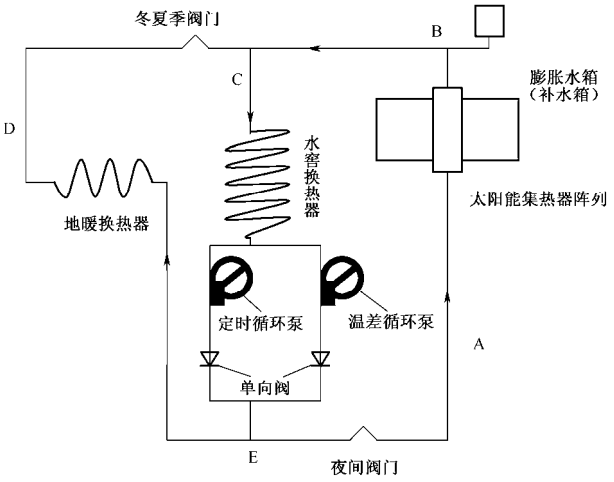



图 11-29　水窖储热双泵并联系统

但与单泵系统的不同点是，温差泵是由集热器和水窖的温差决定的，当白天有太阳辐射时，集热器温度升高，温差泵启动，可有效地把集热器收集的能量传输出来。阴天和晚上温差泵机停止运转。

定时循环泵可根据人们的需要来确定开启时间，以保证向房间供热。

（3）这一系统还有个优点，即当某一个泵出故障时，另一个泵继续运转，可基本上使整个系统正常运行，提高了整个系统的可靠性。

（4）此外，夜间或阴天运行时，水窖内的热量同时向地暖和集热器传输，提高了集热器的温度，可防止夜间或阴天时集热器被冻坏，但另一方面却增加了集热器的热量损失。其补救办法是在集热器回路上加一个夜间阀门，可根据需要开闭此阀门，若集热器内温度较高，可在阴天和夜间关闭此阀门，截断通往集热器的热水；若多日阴天，集热器温度太低，为防止冻坏，可开通此阀门，使热水流过集热器。但这种方法增加了人工工作量。

## 11.7　太阳能集热器—储水箱—储水窖—地暖联合循环系统

前面所述的储水窖系统中没有储水箱，只有一个小膨胀水箱（兼补水箱），系统较简单，建造成本较低。但存在一个问题，若出现电网停电时（在农村乡镇，停电现象时常出现），各水泵都会停止运转，若停电发生在晴天，太阳能集热器管内的水温会迅速上升，尤其是聚光集热器，其温度上升更快，很快会沸腾，很容易造成系统运行障碍。解决这一问题，可有多种方案，增加一个小储水箱用来储存热能是一重要途径，下面分别予以讨论。

### 11.7.1　三泵循环系统

### 1．夏季循环水路

我们在集热系统中加上一个储水箱，以储存停电时集热器收集的热量，如图 11-30 所示。

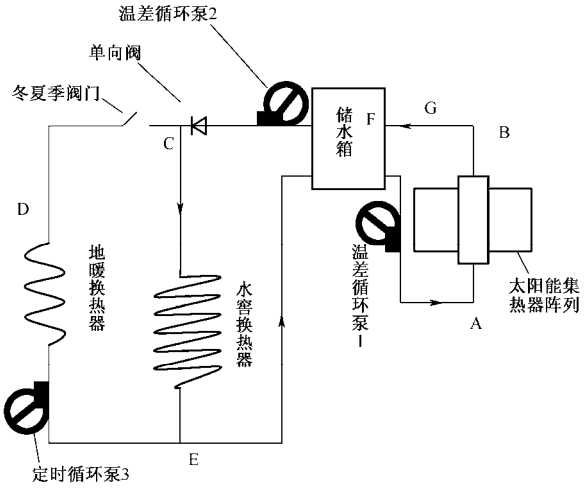



图 11-30　三泵系统：夏季循环回路

（1）太阳能集热器阵列和水箱自成一个单独的循环系统，在温差循环泵 1 的推动下，水流按箭头方向沿 A→B→G→F→A 循环流动。温差循环泵控制器的两个温度探头可分别放在集热器上集管 B 点和水箱的下部，当两点的温度差达到一定值时，比如超过 10℃时，循环泵就启动起来。

当偶然出现停电等事故时，循环泵停止转动，但太阳能集热器阵列和水箱自成一个单独的自然循环系统，人可以通过自然循环把太阳能集热器的热量暂时储存在水箱内，防止了太阳能集热器内部温度过高。

（2）温差循环泵 2 控制器的两个温度探头分别放在水箱上部和水窖处。春、夏、秋季，断开冬夏季阀门，当水箱温度高于水窖温度时，泵 2 就启动起来，水流按箭头方向沿 F→C→E→F 循环流动起来，可不断把集热器的热量传输到水窖内储存起来。

### 2．三泵系统：冬季单泵运行时的循环水路

冬季，定时循环泵 3 昼夜都在按设定的程序定时运转，在阴天或夜晚无日光时，两台温差循环泵都处于停止状态，只有定时循环泵 3 在按设定的程序运转。其循环水流沿 D→C→E→D 方向流动，如图 11-31 所示。从水窖换热器出来的水向地暖换热器方向流去，流到 C 点时，由于有单向阀的阻挡，不能流向集热器，又流向冰窖换热器，完成一个循环。在这种情况下，是靠水窖储存的热量在向地暖供热。

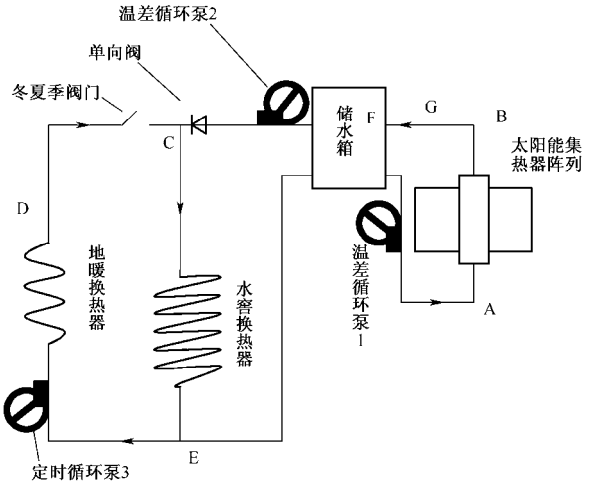



图 11-31 三泵系统：冬季单泵运行时的循环水路

### 3．三泵系统：冬季双泵运行时的循环水路

冬季，打开冬夏季阀门，当晴天有日光时，两个温差循环泵都启动运转起来，但定时循环泵处于间歇状态时，其循环水流方向如图 11-32 所示。

（1）温差循环泵 1 启动起来，集热系统的水流沿 A→B→G→F→A 回路循环，把集热器的热量传输到水箱内。

（2）温差循环泵 2 启动运转起来，沿 FC 方向从水箱出来的热水流到 C 点后，一部分向水窖换热器方向流去，另一部分向地暖换热器流去，流出来后在 E 处混合，然后共同返回流向水箱，完成一个循环。在这种情况下，太阳能集热器实质上是在直接向地暖供热，同时也向水窖进行少量充热（储存热）。

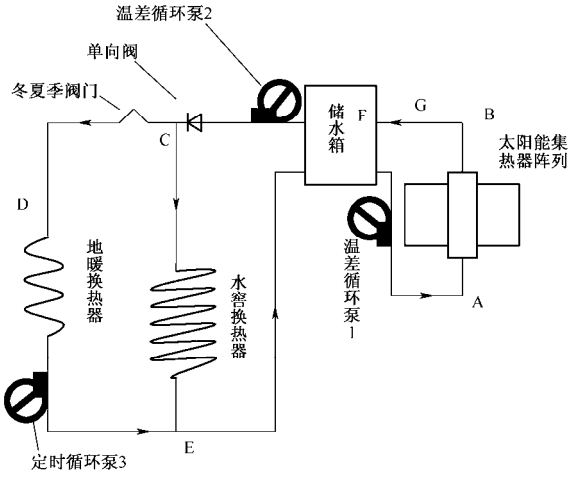



图 11-32 三泵系统：冬季双泵运行时的循环水路

### 4．冬季三泵同时运行时的循环水路

冬季，打开冬夏季阀门，当有较好的太阳辐射能时，3 个泵都处于工作状态，其循环回路如图 11-33 所示。

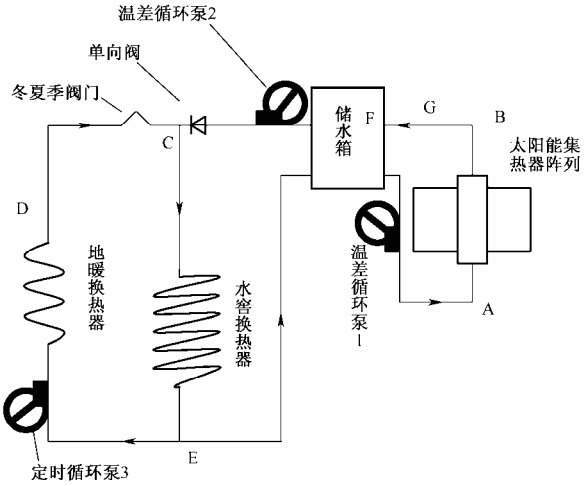



图 11-33　三泵系统：冬季三泵同时运行时循环水路

（1）定时循环泵 3 昼夜都在按设定的程序定时运转，循环水流沿 D→C→E→D 方向循环流动。当水流流到 C 点时，由于单向阀的阻挡，只能沿 CE 方向通过水窖换热器，从而实现把水窖储存的热量传输到地暖换热器向房间供暖。

（2）由于有较好的太阳辐射能，温差循环泵 1 启动运行起来，集热系统的水流沿 A→B→G→F→A 回路循环，把集热器的热量传输到水箱内。

（3）当水箱水温高于水窖温度时，温差循环泵 2 也启动起来。这时沿 FC 方向从水箱出来的热水和在定时泵的推动下沿 DC 方向从地暖换热器出来的冷水在 C 处混合，共同通过水窖换热器，流出 E 点后，又分别流向水箱和地暖换热器，从而实现了向水窖储热和向房间供暖。

### 5．三泵系统：三泵停转时的循环水路

不论冬季还是夏季，当晴天有阳光突然断电时，几个循环泵都会停止工作，向地暖和水窖的水流循环都将停止，这时只有自然循环回路还在正常运行，循环水流沿 A→B→G→F→H→A 回路自然循环，把集热器吸收的太阳热能传输到储水箱内，如图 11-34 所示。

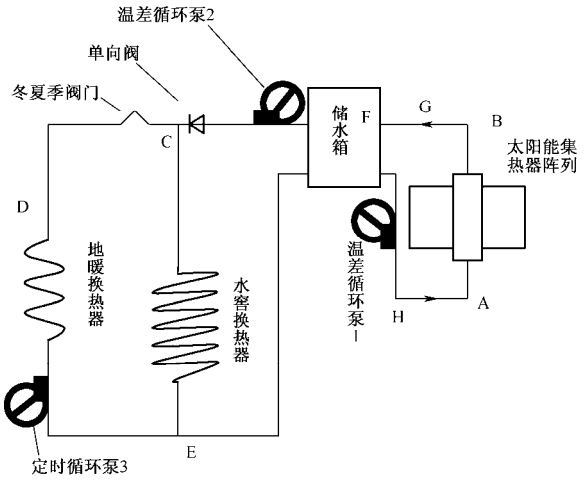



图 11-34 三泵系统：三泵停转时的循环水路

当然由于自然循环动力较小，循环流速慢，且水箱的储热能力有限，太阳能集热器的水温会迅速升高，但集热系统的自然循环仍在进行着，即使水箱内水温接近或达到沸点，仍可通过汽化散热把热量带走，从而避免系统过热，造成器件损伤，为等待整个系统恢复正常争取了时间。

## 11.7.2 双泵循环系统

### 1. 双泵系统：夏季循环水路

为降低系统成本，我们也可采用双泵系统。下边我们先对夏季循环水路进行分析。

如图 11-35 所示，温差泵的两个探头分别放置在太阳能集热器上集管的 B 处和水窖内。在夏季，关闭冬夏季阀门和定时循环泵，当晴天有太阳时，温差循环泵两个探头的温差达到设定值时，温差循环泵启动运行，循环水流沿 F→C→E→H→A→B→G→F 方向流动，从集热器获得的热能传输到水箱，再从水箱传输到水窖，完成储热过程。

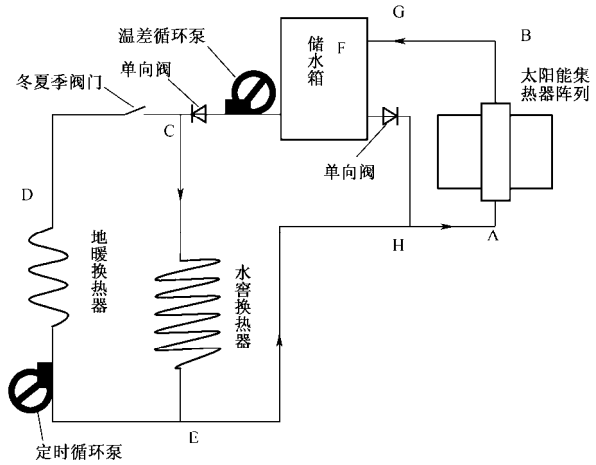



图 11-35 双泵系统：夏季循环水路图

### 2．晴天停电时的循环水路

当突然停电时，虽然循环泵全部停止运行了，但自然循环回路仍在起作用，如图 11-36 所示。自然循环的水流通过 A→B→G→F→H→A 回路流起来，把集热器的热量传输到水箱内，避免了集热器过热。当来电后，温差循环泵又启动起来，恢复正常运行。

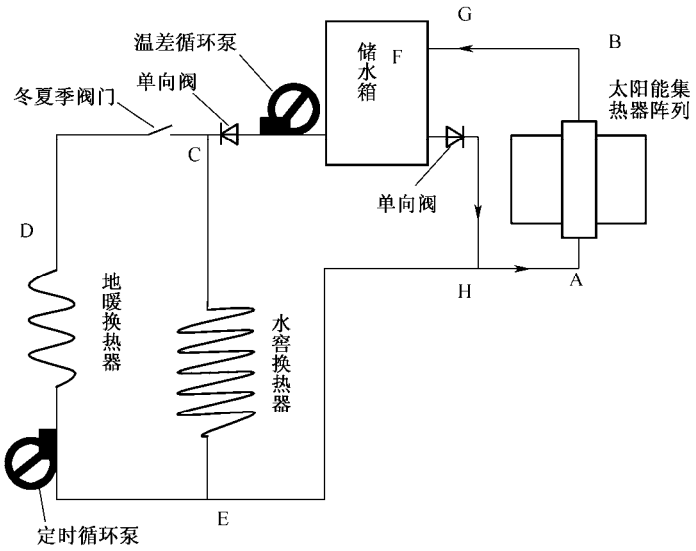



图 11-36　双泵系统：晴天停电时的循环水路图

### 3．双泵循环：双泵运行时的循环水路

冬季，打开冬夏季阀门，当双泵都处于工作状态时，其循环水路如图 11-37 所示。当白天有阳光，水箱水温高于水窖温度时，温差循环泵启动起来，沿 FC 方向从水箱出来的热水和沿 DC 方向和从地暖换热器出来的冷水在 C 处混合，共同通过水窖换热器，流出 E 点后，又分别流向集热器和地暖换热器，从而实现了向水窖充热和向房间供暖。

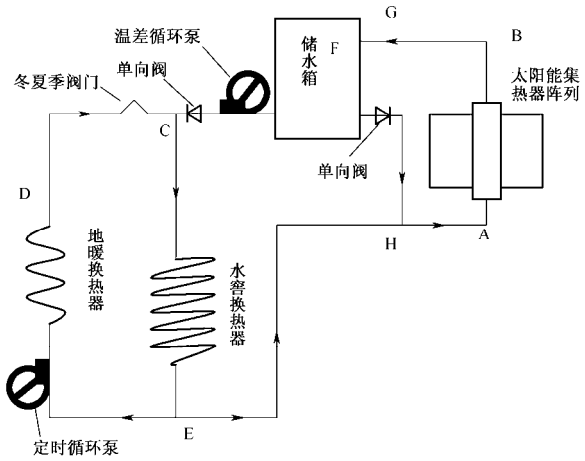



图 11-37　双泵循环：双泵启动时的循环水路图

#### 4．双泵循环：定时循环泵单泵供暖循环水路

阴天或夜晚无日光时，定时循环泵按设定程序正常运行，温差循环泵处于停止状态。其循环水流沿 D→C→E→D 方向流动，如图 11-38 所示。从地暖换热器出来的水流到 C 点时，由于有单向阀的阻挡，不能流向水箱，只能流向水窖换热器，然后又流向地暖换热器，完成一个循环。在这种情况下，是靠水窖储存的热量在向地暖供热。

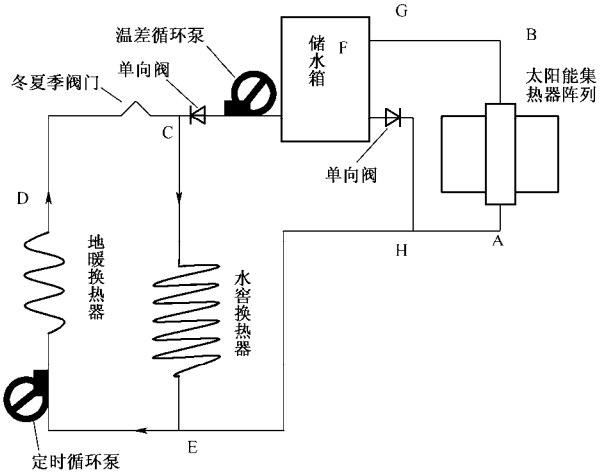



图 11-38 双泵循环：定时泵单泵供暖运行水路图

## 11.8 夏季产开水和简易制冷系统

### 11.8.1 夏季产开水系统

太阳能采暖需要大面积的太阳能集热器，一般家庭需要 20～100m$^2$，这样大面积的集热器在夏季会产生很大的热量，而目前还没有好的利用方法。夏季产生的这些热量不能充分利用，不仅造成能源浪费，使集热器设备的利用率大大降低，而且高温的能量还可能对设备造成危害。虽然通过覆盖等方法可以解决过热问题，但是并非理想之选，因为热能被浪费掉不能利用，且还会增加覆盖器材的成本和人工成本。

在夏季利用太阳能制冷是人们设想的最合理的方案，可惜这项技术目前在经济上很不合算。本章前面曾简述了一种太阳能生产开水的方案，这可能是一种较好的解决方案。下面进一步分析其总系统的循环路线。

#### 1．采暖—开水系统：冬季供热循环水路

图 11-39 是冬季采暖、夏季供开水系统在采暖时的循环水路图，此时冬夏季阀门打开连通，自动开水阀门关闭，定温循环泵启动，水流沿 F→C→D→E→G→A→B→O→F 路径循环，

把太阳能集热器收集的热量传输给地暖换热器。

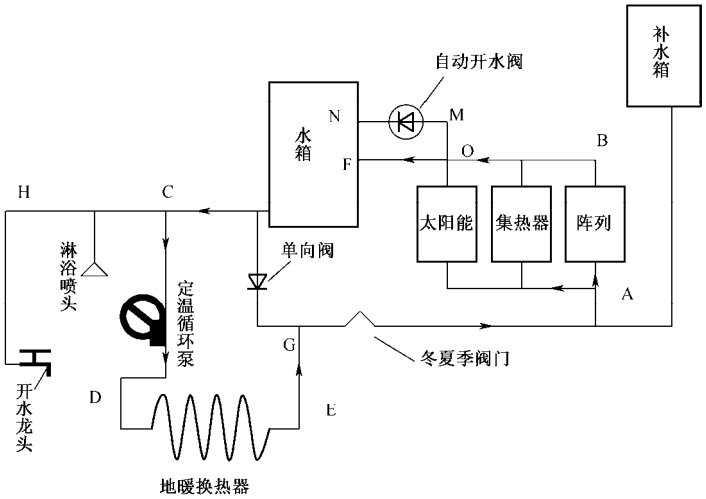



图 11-39　采暖—开水系统：冬季供暖循环水路图

### 2．采暖—开水系统：夏季供开水流程

图 11-40 是冬季采暖、夏季供开水系统在夏季供开水时的流程图，此时冬夏季阀门关闭断开，定温循环泵关闭。当水温达到设定的开水温度时，自动开水阀门打开，开水流沿 K→A→B→O→M→N 路径流入水箱内，然后再沿 F→C→H 流向淋浴喷头或开水阀门。补水箱与自来水管连接，通过浮球阀控制水位。

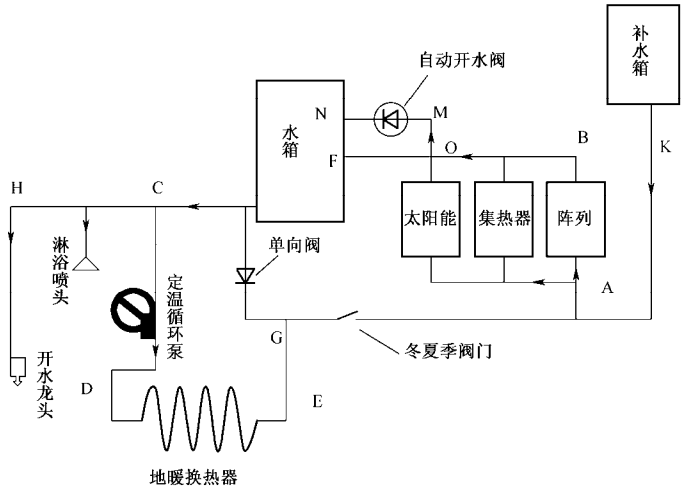



图 11-40　采暖—开水系统：供开水流程图

为使开水达到饮用的清洁度，可先把水箱内冬季的循环水排净，清洗管路。

## 11.8.2　简易制冷系统

图 11-41 是简易制冷系统示意图，在夏季，关闭阀门 P、Q 让自来水沿 DE 方向先通过地

暖换热器，然后再通过各种水龙头、阀门流出，用于洗菜、做饭、洗衣、洗澡、冲洗便池等。由于自来水的温度只有十几摄氏度，而夏季的室温却有近 30℃，地暖换热器内的水可吸收室内空气的热量，达到降温的效果。如果是二层小楼，使自来水通过二层地板的换热器，由于冷空气向下运动，则第一层楼的降温效果将比较明显。

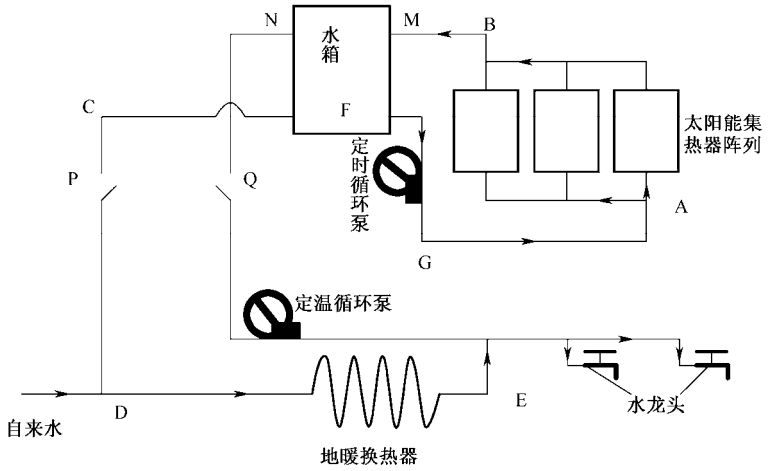



图 11-41 简易制冷系统

由于家庭的用水量每天只有几百千克，其吸收的热量有限，可能降温效果不太明显，有人可能觉得意义不大。实际上这种方案还是有价值的。

（1）夏季一般室内温度最高在 28～30℃范围，从空调机的使用中我们都有这样的经验：只要室内温度能降 1～2℃，例如从 29℃降到 27℃，或从 28℃降到 26℃，人们体感舒适度就很明显。

另一方面，在夏季最热的天气里，人们洗澡、洗衣等更频繁，用水量要增加，这样生活用水吸收的室内的热量也会增加，因此，通过生活用水吸收热量完全有可能使室内温度降低 1～2℃。

（2）不少地区的自来水使用的是地下水，其初始温度在 15～16℃间，直接用来洗衣、洗菜等还感觉有点凉，不太舒服；用其洗衣效果也不好，浪费肥皂、洗衣粉；更是不能直接用来洗澡，还需要用热水器加热后才能用于洗浴。

通过地暖换热器出来的冷水温度由十几摄氏度升高到二十几摄氏度，再用于洗菜、洗衣时，会感觉温和多了，其洗衣效果也好多了，节省了肥皂、洗衣粉。用来洗澡时，用电热水器或燃气热水器稍微加热就可使用，甚至在热天，可直接用来冲凉，节省了昂贵的燃气或电能。

（3）更重要的是，上述这些“节省”效果几乎都是无代价的，只是把管路改装一下即可。

在采用简易制冷系统时，应注意以下事项。

（1）使用前要把冬季地暖里的循环水放掉，洗净管路。

（2）地暖的盘管要能抗自来水压力，或对系统采取一定的减压措施。

（3）对直接饮用水部分，可以不通过地暖盘管，而是从自来水总管路上另装分路，以防水质污染。

# 11.9　辅助热源系统

## 11.9.1　电辅助加热系统

对于电辅助直接加热，可把电加热管直接设置在水箱内部下端，可手动控制开关，也可根据水温或室温自动控制电路开关（具体电路参看第 9 章）。

## 11.9.2　锅炉辅助加热系统

关于锅炉辅助加热系统，在第 9 章已有论述，这里再讨论另一种改进的锅炉辅助供热循环系统。

图 11-42 是改进的锅炉辅助供热循环系统图。温差循环泵控制仪的两个探头分别放置在集热器阵列的上集管 B 处和水箱的下部。

在冬季晴天，当温差控制仪两个探头的温差达到设定值时，温差泵启动运行， 集热系统的水流沿 A→B→M→F→G→A 循环管路流动，把太阳能集热器产生的热量传输到水箱内。

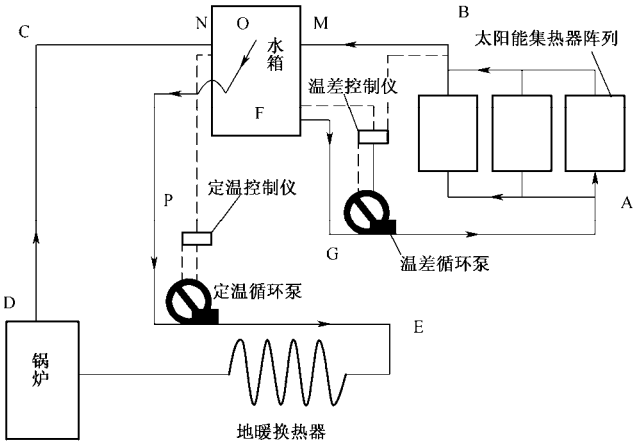



图 11-42　集热器—锅炉辅助加热循环系统

若出现停电，温差循环泵停止运行，但依靠自然循环，集热系统的循环水流仍能沿 A→B→M→F→G→A 管路流动。

定温循环泵的温度探头放置在水箱上部高温水层 N 处，当水箱水温达到设定温度后，定温循环泵启动，水箱内的热水沿 O→P→E→D→C→N 管路循环流动，把水箱的热能传输到地暖换热器。

在夜晚或阴天，锅炉开始加热，热水通过 D→C→N 管路进入水箱内，当水箱水温达到设定温度后，定温循环泵启动，水箱内的热水沿 O→P→E→D→C→N 管路循环流动，把水箱的热能传输到地暖换热器。

图中锅炉上下管道在水箱上的进出口都在水箱的上层高温处，分别在 N、O 两点。从锅

炉加热的热水沿 D→C→N 管路进入水箱后，就直接从 O 点沿 O→P→E 进入地暖换热器，后又返回锅炉，形成一个循环回路。这样无须加热整个水箱的水，减少了热损失。

### 11.9.3 热泵辅助加热系统

图 11-43 是热泵辅助加热系统循环管路图。在晴天，温差循环泵启动运行，集热系统水流沿 A→B→M→F→G→A 流动，把集热器的热量传输给水箱。

当水箱水温达到设定值时，定温循环泵启动运行，水流沿 N→C→D→Q→E→H→F 循环流动，使水箱的热水流过地暖换热器，向房间供暖。

当阴天需要辅助加热时，可启动热泵，循环水流沿 N→C→P→Q→E→H→F 循环流动，使热泵产生的热水流过地暖换热器，向房间供热。两个单向阀可避免产生短路环流。

热泵可以手动控制，也可自动控制，即采用低温启动、高温停止的定温控制仪控制。定温控制仪的温度探头放置在水箱的上部，当水箱的水温低于设定温度时，热泵启动，向地暖换热器输送热水；当水箱水温高于设定温度时，热泵停止运行。

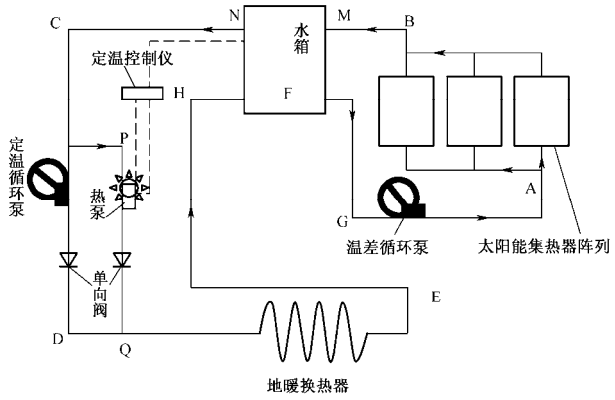



图 11-43 集热器—热泵辅助加热循环系统

## 11.10 几种循环系统设计例举

### 11.10.1 40m² 集热器、120m² 建筑面积热泵加热系统的设计

#### 1. 基本情况

地理位置：北纬 40°。

太阳日照：属太阳能资源Ⅱ类地区，日照较好。

房屋情况：单层平顶房，东西长 15m，南北宽 8m，总建筑面积 120m²，外墙为 370mm 砖混结构，双层玻璃窗。

### 2．与用户协商确定基本设计思想

（1）采用辅助热源方案：由于用电比较方便，而采用其他辅助热源存在污染和垃圾处理等问题，故决定采用热泵作为辅助热源。

（2）集热器选型：为了减少夏季的产热量，采用固定式真空管聚光集热器。

（3）集热器面积的确定：根据集热器面积与建筑面积之比为 1:3 的比例，集热器面积至少应是 40m$^2$；根据集热器的排列计算，刚好能排布下 40m$^2$ 的集热器，再增加面积就需要另找位置，故决定采用 40m$^2$ 的集热器。

（4）水箱选型：为降低成本同时解决夏季用热水问题，采用约 200 千克的小水箱。

（5）热泵的选择：120m$^2$ 的建筑面积，至少需要 3kW 的供热量，故可选用 1.5～2kW 功率的热泵。

（6）夏季热量处理：夏季的有效集热面积为 40m$^2$/3=13.3m$^2$，热量用于生产洗浴等生活用热水，可用覆盖法遮蔽部分真空管。

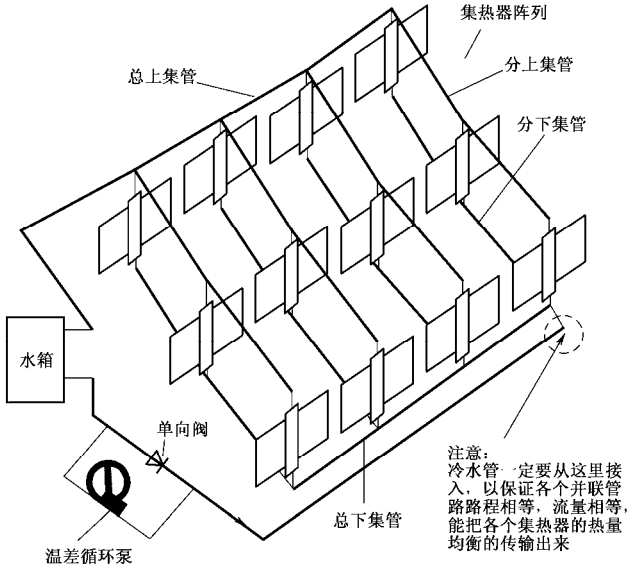
（7）房屋进行外保温处理，采用 6cm 厚聚苯泡沫塑料进行外墙保温。

（8）为提高房屋的隔热性能，在前墙（南墙）外增设阳光间。

（9）室内采用地板辐射供暖方式。

### 3．集热器阵列的排布

每个聚光式真空管集热器模块尺寸为 1.05m×3.7m，其有效采光面积为 3.4m$^2$，共需要 12 个模块。其排列方式如图 11-44 所示。其特点如下。




**错误!**

说明：

1．这是一种全并联的安装方法，其优点是能自然循环，其阻力最小，所用循环动力最小，缺点是上部南北向的 4 根分上集管会遮挡一部分阳光。

2. 安装时要注意自然循环的要点：系统的压头和排气。各集管管路要至少有约0.5%的倾斜度，以利于排气。

图 11-44 40m$^2$ 聚光真空管集热器阵列安装图

（1）该阵列是一个全并联系统，先把每 3 个集热器模块沿南北方向并联成 4 组，再把 4 组并联起来。要求整个阵列完全按自然循环的要求安装，当强制循环因故停止时，系统可以进行自然循环。

（2）由温差循环泵提供循环动力，温差泵的两个探头分别放置在集热器阵列的总上集管处和水箱的下部。在循环泵旁边设置一个支路，当循环泵因故停止运行时，自然循环可通过这一支路实现循环。

（3）聚光器的设计收集角为 24°，故确定集热器倾角（与水平的夹角）为 40°+17°=57°，基本可保证整个冬季采暖期处于良好的聚光状态。

（4）屋顶面本身有 2°的倾斜度，南北向排列 3 组集热器，每个集热器的垂直高度为 1.05m×sin57°=0.88m，两个集热器之间的间距约 2.6m，不遮挡后排的光线。

（5）分集管可用孔径 25mm 的管道，总集管采用 30mm 的管道。上集管采用耐热的金属管材，其他采用耐热塑料管材。

### 4．总系统供暖循环管路

其总的供暖循环管路可按图 11-43 所示的标准形式安装。

这里要讲的是按图 11-45 所示的方式安装，采用这种安装方式有以下几点好处。

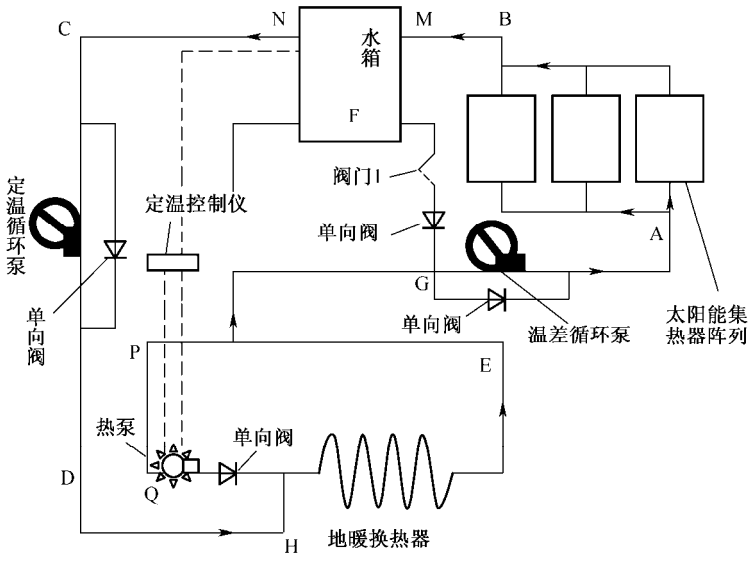



图 11-45 集热器—热泵辅助加热循环系统

（1）当需要热泵供暖时，可沿着 Q→E→P→Q 的循环路线，直接给地暖换热器供暖。

（2）在正常运行时，若断开阀门 1，可使供热和集热系统形成一个大循环系统，两个循环泵成串联关系，任何一个泵出现故障都基本上不影响整个系统的运行。

（3）在连续阴天的情况下，手动启动温差循环泵，可以使热泵产生的部分热水循环进太

阳能集热器，防止集热器冻坏。

（4）连通阀门 1，集热系统既可进行强制循环，也可进行自然循环。在夏季，阀门 1 要一直处于连通状态，各循环泵停转，集热系统将一直处于自然循环状态。

## 11.10.2　20m²聚光集热器、100m²建筑面积多用炉辅助加热系统的设计

### 1．基本情况

地理位置：北纬 38°。

太阳日照：属太阳能资源Ⅱ类偏下地区，日照一般偏好。

房屋情况：东西长 16m，南北宽 6m，单层平顶房，总建筑面积 96m²，外墙为 370mm 砖混结构，双层玻璃窗。

### 2．与用户协商确定基本设计思想

（1）采用辅助热源方案：由于该户原来已有土暖气，故决定利用原有的土暖气作为辅助热源。

（2）集热器选型：为了减少夏季的产热量，采用固定式真空管聚光集热器。

（3）集热器面积的确定：由于原有的暖气炉要担负做饭、烧开水等功能，暖气炉的余热会时刻向房间提供大约 1/2 的采暖用热能，因此，确定集热器面积为 20m²。

（4）水箱选型：为降低成本同时解决夏季用热水问题，采用约 200 千克的小水箱。

（5）夏季热量处理：夏季的有效集热面积为 20m²/3=6.6m²，用于洗浴等生活用热水已基本上可以满足，若有多余，可用覆盖法遮蔽部分真空管。

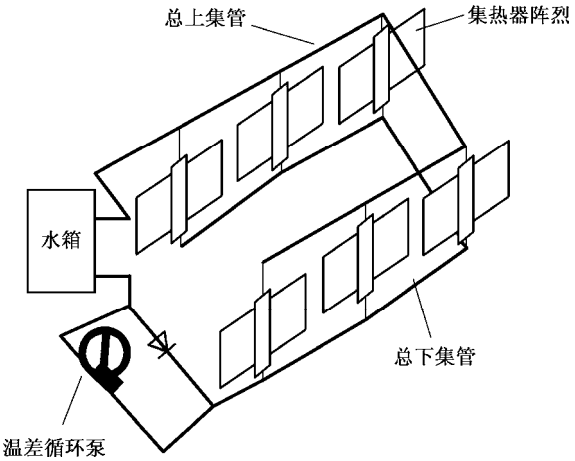
（6）房屋进行外保温处理，采用 6cm 厚聚苯泡沫塑料进行外墙保温。

（7）为提高房屋的隔热性能，同时降低造价，仅改造通向院子的主房门成双道门，以避免冷空气直接进入室内。

（8）室内散热采用原有的散热片，若主要房间散热器散热面积偏小，可适当增加散热器数量。

### 3．集热器阵列的排布

集热器阵列的排布如图 11-46 所示。




说明：

这是一种全联的安装方法，其优点是能自然循环，其阻力最小，所用循环动力最小。安装时要注意自然循环的要点：系统的压头和排气。各集管管路要有一些倾斜度，约 0.5%，以利于排气。

图 11-46 20m$^2$ 聚光真空管集热器阵列安装图

每个聚光式真空管集热器模块尺寸为 1.05m×3.7m，其有效采光面积为 3.4m$^2$，共需要 6 个模块。其排列方式如图 11-46 所示。其特点如下。

（1）该阵列是一个全并联系统，要求整个阵列完全按自然循环的要求安装，由于上集管的管路较长，且有几处直角拐弯，故要特别注意管路要有 0.5%的斜度，以利于排气。

当强制循环因故停止时，系统可以进行自然循环。

（2）由温差循环泵提供循环动力，温差泵的两个探头分别放置在集热器阵列的总上集管处和水箱的下部。在循环泵旁边设置一个支路，当循环泵因故停止运行时，自然循环可通过这一支路实现。

（3）聚光器的设计收集角为 24°，故确定集热器倾角（与水平的夹角）为 38°+17°=55°，基本可保证整个冬季采暖期处于良好的聚光状态。

（4）南北向只有两排集热器，一排在最南端，另一排在最北边。两个集热器之间的间距约 3.6m，不遮挡后排的光线。

（5）集管采用 30mm 的管道。上集管采用耐热好的金属管材，其他采用耐热塑料管材。

### 4．总系统供暖循环管路

总的供暖循环管路可按图 11-42 所示的形式安装，也可按第 9 章图 9-12 的方式安装。

由于本系统采用普通散热片在室内散热，故可以采用图 11-47 所示的循环方式。

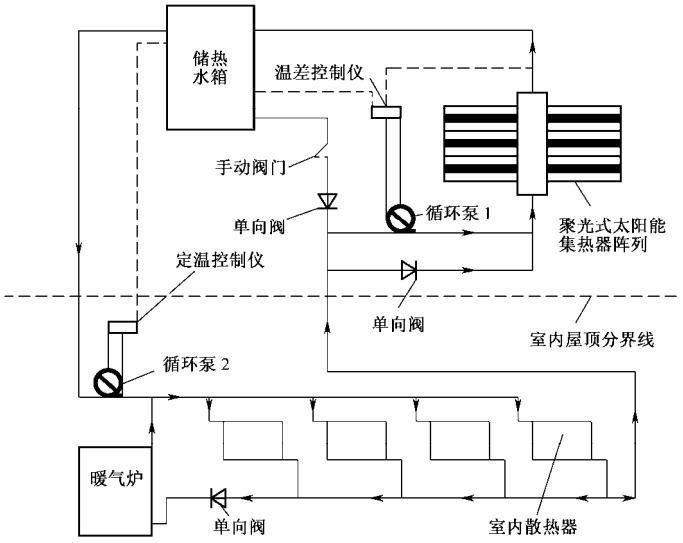



图 11-47　太阳能采暖与炊事、热水、供暖三用炉相结合示意图

采用这种安装方式有以下几点好处。

（1）集热系统可以单独进行自然循环，也可由循环泵 1 进行强制循环。

（2）室内的散热器系统也是一个自然循环系统，即使循环泵 2 不运行，仍可通过自然循环使暖气炉向房间供热。

（3）循环泵 2 运行时既可促进室内散热系统的循环，把暖气炉产生的热量传输到散热器，又可启动集热系统和散热系统的大循环，把集热器收集的太阳热能传输到室内散热器。

（4）在连续阴天的情况下，定期启动循环泵 2 启动大循环，可以避免集热器被冻坏。

（5）若循环泵 2 出现故障，断开手动阀门，则整个系统形成一个大循环，仅有循环泵 1 也能使整个系统运行，把集热器收集的热量传输给室内散热器。同样，若循环泵 1 出现故障，断开手动阀门，整个系统也形成一个大循环，仅有循环泵 2 也能使整个系统运行，把集热器收集的热量传输给室内散热器。因而提高了系统的代偿功能和可靠性。

### 11.10.3　300m² 建筑面积二层小楼地下储热系统设计

#### 1．基本情况

地理位置：北纬 40°。

太阳日照：属太阳能资源 II 类地区，日照较好。

房屋情况：东西长 16m，南北宽 9.4m，双层斜顶房小楼，斜度为 30°，南侧跨度 5m，北侧跨度 4.4m。总建筑面积 300m²，外墙为 370mm 砖混结构，双层玻璃窗。

#### 2．与用户协商确定基本设计思想

（1）采用地下储存方案：由于需供暖的建筑面积较大，需要储存春、夏、秋季的太阳辐射能以用于冬季供暖，故采用地下长期热能储存方案。

（2）集热器选型：由于储能过程需要较高的集热温度，故采用真空管聚光集热器。由于一年四季聚光器都要处于较好的工作状态，需要季节性调整聚光器倾角，故选用可调倾角的半固定式聚光真空管集热器。

（3）集热器面积的确定：无能量储存系统的集热器面积与建筑面积之比应为 1:3 的比例，由于采用了地下长期储能，可大大减少其集热面积，根据第 4 章介绍的方法，对 300m$^2$ 的建筑面积供暖，其比值至少应取 1:6.5，约为 46m$^2$ 集热器。为提高供暖的保证率，本工程采用 56m$^2$ 的集热器面积。

（4）水箱选型：不需要水箱有太大的储热功能，故采用约 200 千克的小水箱。

（5）房屋进行外保温处理，采用 6cm 厚聚苯泡沫塑料进行外墙保温。

（6）为减少房门开启时的对流热损失，改造通向院子的主房门成双道门，以避免冷空气直接进入室内。

（7）室内采用地板辐射供暖方式。

### 3．集热器阵列的排布

每单个聚光器宽 0.41m，长 1.7m，其有效采光面积为 0.7m$^2$，共采用 80 个聚光器，总面积 56m$^2$，其排列方式如图 11-48 和图 11-49 所示。其特点如下。

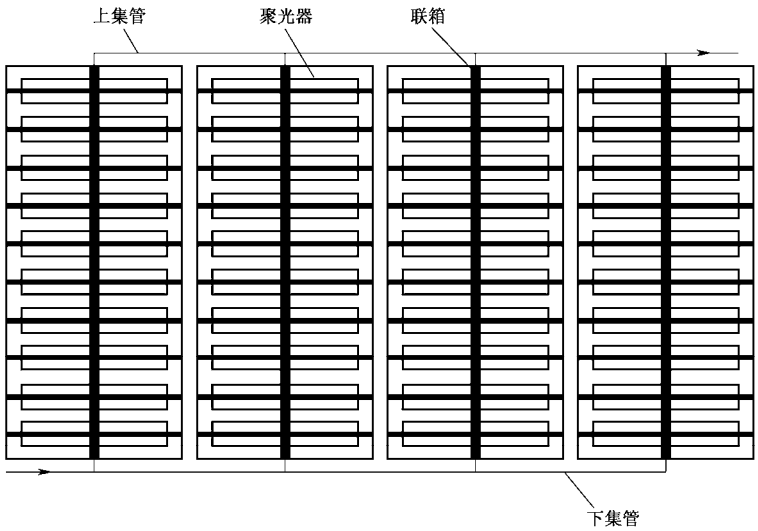



图 11-48　半固定聚光型真空管集热器阵列

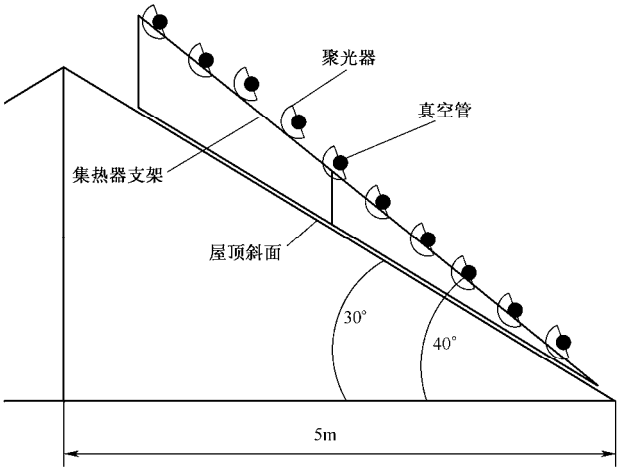



图 11-49　聚光集热器排列横面图

（1）该阵列是一个全并联系统，先把每 10 个聚光器串接成一个集热器模块，沿南北方向排列，由 4 组模块并联而成。要求整个阵列完全按自然循环的要求安装，当强制循环因故停止时，系统可以进行自然循环。

（2）每个聚光器可季节性调整倾角，分 5 个挡，每挡 9°。

（3）屋顶面倾斜度为 30°，集热器支架倾角为当地地理纬度 40°。

（4）集管采用 30mm 的管道。上集管采用耐热好的金属管材，其他采用耐热塑料管材。管道要保温。

### 4．地下储热系统设计

根据第 4 章地下储热系统设计方法，对于 300m$^2$ 的建筑面积，其地下储热正圆柱体的半径为 6m，可采用如图 11-50 所示的储热方案。其基本特征如下。

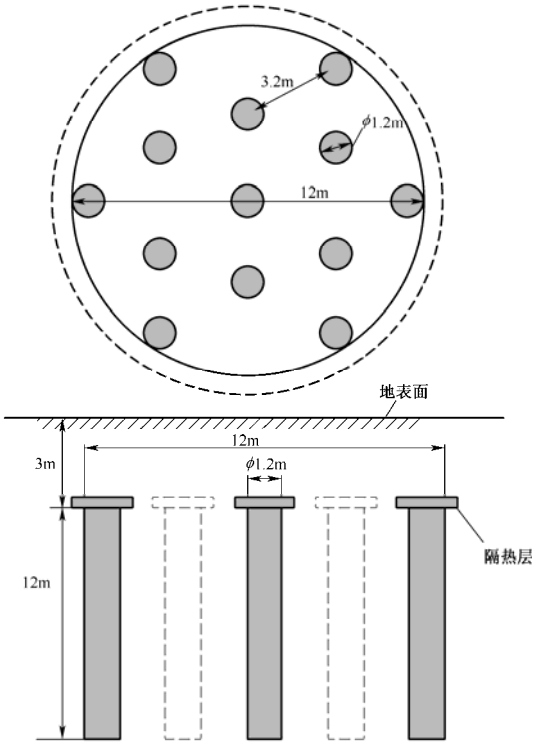



图 11-50 地下储热 13 水窖阵列分布和剖面图

（1）水窖基本参数。

个数： 13 个

中心距： 3.2m

直径： 1.2m

深度： 12m

（2）水窖总容水量：176m$^3$，可以满足近 20 天的供暖需求。

（3）各水窖的中心距为 3.2m，土壤储热层的导热距离大都在 1m 以内，热传导距离短，可有效地实现土壤层内热量的传递：既可有效地把水窖中的热量传导到土壤储热层，又可有效地把土壤中储存的热能回收到水窖内以用于供暖。

（4）图中细实线圆内为主要的储热区，细实线外 1m 的虚线圆内都是可利用的储热区域。

（5）储水窖距地面 3m 以下，每个储热水窖上口都设置有 20cm 厚、直径为 2m 的聚苯泡沫塑料隔热层，以减少向地面的散热量。

关于其储热供热功能分析，读者可参考第 4 章。

### 5．总系统供暖循环管路

关于总系统供暖循环管路，读者可以参看本章 11.6 和 11.7 各节有关地下储热系统的论述，这里不再详谈。

# 附录

**附表 1　　全国主要城镇采暖期有关参数及建筑物采暖耗热量、采暖耗煤量指标**

| 地名 | 计算用采暖期 | | 耗热量指标（$W/m^2$） | 耗煤量指标（$kg/m^2$） |
|---|---|---|---|---|
| | 天数 | 室外平均温度（℃） | | |
| 北京 | 125 | −1.6 | 20.6 | 12.4 |
| 天津 | 119 | −1.2 | 20.5 | 11.8 |
| 河北省 石家庄 | 112 | −0.6 | 20.3 | 11.0 |
| 张家口 | 153 | −4.8 | 21.1 | 15.3 |
| 秦皇岛 | 135 | −2.4 | 20.8 | 13.5 |
| 保定 | 119 | −1.2 | 20.5 | 11.8 |
| 邯郸 | 108 | −0.1 | 20.3 | 10.6 |
| 唐山 | 127 | −2.9 | 20.8 | 12.8 |
| 承德 | 144 | −4.5 | 21.0 | 14.6 |
| 丰宁 | 163 | −5.6 | 21.2 | 16.6 |
| 山西省　太原 | 135 | −2.7 | 20.8 | 13.5 |
| 大同 | 162 | −5.2 | 21.1 | 16.5 |
| 长治 | 135 | −2.7 | 20.8 | 13.5 |
| 阳泉 | 124 | −1.3 | 20.5 | 12.2 |
| 临汾 | 113 | −1.1 | 20.4 | 11.1 |
| 晋城 | 121 | −0.9 | 20.4 | 11.9 |
| 运城 | 102 | 0.0 | 20.3 | 10.0 |
| 内蒙古　呼和浩特 | 166 | −6.2 | 21.3 | 17.0 |
| 锡林浩特 | 190 | −10.5 | 22.0 | 20.1 |
| 海拉尔 | 209 | −14.3 | 22.6 | 22.8 |
| 通辽 | 165 | −7.4 | 21.6 | 17.2 |
| 赤峰 | 160 | −6.0 | 21.3 | 16.4 |
| 满洲里 | 211 | −12.8 | 22.4 | 22.8 |
| 博克图 | 210 | −11.3 | 22.2 | 22.5 |
| 二连浩特 | 180 | −9.9 | 21.9 | 19.0 |
| 多伦 | 192 | −9.2 | 21.8 | 20.2 |
| 白云鄂博 | 191 | −8.2 | 21.6 | 19.9 |

续表

| 地名 | 计算用采暖期 | | 耗热量指标（$W/m^2$） | 耗煤量指标（$kg/m^2$） |
|---|---|---|---|---|
| | 天数 | 室外平均温度（℃） | | |
| 辽宁省 沈阳 | 152 | −5.7 | 21.2 | 15.5 |
| 丹东 | 144 | −3.5 | 20.9 | 14.5 |
| 大连 | 131 | −1.6 | 20.6 | 13.0 |
| 阜新 | 156 | −6.0 | 21.3 | 16.0 |
| 抚顺 | 162 | −6.6 | 21.4 | 16.7 |
| 朝阳 | 148 | −5.2 | 21.1 | 15.0 |
| 本溪 | 151 | −5.7 | 21.2 | 15.4 |
| 锦州 | 144 | −4.1 | 21.0 | 14.6 |
| 鞍山 | 144 | −4.8 | 21.1 | 14.6 |
| 葫芦岛 | 143 | −4.2 | 21.0 | 14.5 |
| 吉林省 长春 | 170 | −8.3 | 21.7 | 17.8 |
| 吉林 | 171 | −9.0 | 21.8 | 18.0 |
| 延吉 | 170 | −7.1 | 21.5 | 17.6 |
| 通化 | 168 | −7.7 | 21.6 | 17.5 |
| 双辽 | 167 | −7.8 | 21.6 | 17.4 |
| 四平 | 163 | −7.4 | 21.5 | 16.9 |
| 白城 | 175 | −9.0 | 21.8 | 18.4 |
| 黑龙江 哈尔滨 | 176 | −10.0 | 21.9 | 18.6 |
| 嫩江 | 197 | −13.5 | 22.5 | 21.4 |
| 齐齐哈尔 | 182 | −10.2 | 21.9 | 19.2 |
| 富锦 | 184 | −10.6 | 22.0 | 19.5 |
| 牡丹江 | 178 | −9.4 | 21.8 | 18.7 |
| 呼玛 | 210 | −14.5 | 22.7 | 23.0 |
| 佳木斯 | 180 | −10.3 | 21.9 | 19.0 |
| 安达 | 180 | −10.4 | 22.0 | 19.1 |
| 伊春 | 193 | −12.4 | 22.4 | 20.8 |
| 克山 | 191 | −12.1 | 22.3 | 20.5 |
| 江苏省 徐州 | 94 | 1.4 | 20.0 | 9.1 |
| 连云港 | 96 | 1.4 | 20.0 | 9.2 |
| 宿迁 | 94 | 1.4 | 20.0 | 9.1 |
| 淮阴 | 95 | 1.7 | 20.0 | 9.2 |
| 盐城 | 90 | 2.1 | 20.0 | 8.7 |
| 山东省 济南 | 101 | 0.6 | 20.2 | 9.8 |
| 青岛 | 110 | 0.9 | 20.2 | 10.7 |
| 烟台 | 111 | 0.5 | 20.2 | 10.8 |
| 淄博 | 113 | −0.8 | 20.5 | 11.2 |
| 兖州 | 106 | −0.4 | 20.4 | 10.4 |
| 潍坊 | 114 | −0.7 | 20.4 | 11.2 |

续表

| 地名 | | 计算用采暖期 | | 耗热量指标（$W/m^2$） | 耗煤量指标（$kg/m^2$） |
|---|---|---|---|---|---|
| | | 天数 | 室外平均温度（℃） | | |
| 河南省 | 郑州 | 98 | 1.4 | 20.0 | 9.4 |
| | 安阳 | 103 | 0.3 | 20.3 | 10.3 |
| | 濮阳 | 107 | 0.2 | 20.3 | 10.5 |
| | 新乡 | 100 | 1.2 | 20.1 | 9.7 |
| | 洛阳 | 91 | 1.8 | 20.0 | 8.8 |
| | 商丘 | 101 | 1.1 | 20.1 | 9.8 |
| | 开封 | 102 | 1.3 | 20.1 | 9.9 |
| 四川省 | 阿坝 | 189 | −2.8 | 20.8 | 18.9 |
| | 甘孜 | 165 | −0.9 | 20.5 | 16.3 |
| | 康定 | 139 | 0.2 | 20.3 | 18.5 |
| 西藏 | 拉萨 | 142 | 0.5 | 20.2 | 13.8 |
| | 葛尔 | 240 | −5.5 | 21.2 | 24.5 |
| | 日喀则 | 158 | −0.5 | 20.4 | 15.5 |
| 陕西省 | 西安 | 100 | 0.9 | 20.2 | 9.7 |
| | 榆林 | 148 | −4.4 | 21.0 | 14.8 |
| | 延安 | 130 | −2.6 | 20.7 | 13.0 |
| | 宝鸡 | 101 | 1.1 | 20.1 | 9.8 |
| 甘肃省 | 兰州 | 132 | −2.8 | 20.8 | 13.2 |
| | 酒泉 | 155 | −4.4 | 21.0 | 15.7 |
| | 敦煌 | 138 | −4.1 | 21.0 | 14.0 |
| | 张掖 | 156 | −4.5 | 21.0 | 15.8 |
| | 山丹 | 165 | −5.1 | 21.1 | 16.8 |
| | 平凉 | 137 | −1.7 | 20.6 | 13.6 |
| | 天水 | 116 | −0.3 | 20.3 | 11.3 |
| 青海省 | 西宁 | 162 | −3.3 | 20.9 | 16.3 |
| | 玛多 | 284 | −7.2 | 21.5 | 29.4 |
| | 大柴旦 | 205 | −6.8 | 21.4 | 21.1 |
| | 共和 | 182 | −4.9 | 21.1 | 18.5 |
| | 格尔木 | 179 | −5.0 | 21.1 | 18.2 |
| | 玉树 | 194 | −3.1 | 20.8 | 19.4 |
| 宁夏 | 银川 | 145 | −3.8 | 21.0 | 14.7 |
| | 中宁 | 137 | −3.1 | 20.8 | 13.7 |
| | 固原 | 162 | −3.3 | 20.9 | 16.3 |
| | 石嘴山 | 149 | −4.1 | 21.0 | 15.1 |

续表

| 地名 | 计算用采暖期 | | 耗热量指标（W/m²） | 耗煤量指标（kg/ m²） |
|---|---|---|---|---|
| | 天数 | 室外平均温度（℃） | | |
| 新疆　乌鲁木齐 | 162 | −8.5 | 21.8 | 17.0 |
| 塔城 | 163 | −6.3 | 21.4 | 16.8 |
| 哈密 | 137 | −5.9 | 21.3 | 14.1 |
| 伊宁 | 139 | −4.8 | 21.1 | 14.1 |
| 喀什 | 118 | −2.7 | 20.7 | 11.8 |
| 富蕴 | 178 | −12.6 | 22.4 | 19.2 |
| 克拉玛依 | 146 | −9.2 | 21.8 | 15.3 |
| 吐鲁番 | 117 | −5.0 | 21.1 | 11.9 |
| 库车 | 123 | −3.6 | 20.9 | 12.4 |
| 和田 | 112 | −2.1 | 20.7 | 11.2 |

**附表 2　　几种法定计量单位和非法定计量单位换算表**

| 量的名称 | 法定计量单位 | | 非法定计量单位 | | 单位换算关系 |
|---|---|---|---|---|---|
| | 名称 | 符号 | 名称 | 符号 | |
| 压力<br>压强 | 帕斯卡 | Pa | 毫米水柱 | $mmH_2O$ | 1 $mmH_2O$=9.806 65Pa |
| | | | 毫米汞柱 | mmHg | 1 mmHg=133.322Pa |
| 功、能、热 | 千焦耳 | kJ | 千卡 | kcal | 1 kcal=4.186 8kJ |
| | 兆焦耳 | MJ | 千瓦小时 | kW•h | 1 kW•h=3.6MJ |
| 功率 | 瓦特 | W | 千卡每小时 | kcal/h | 1kcal/h=1.163W |
| 比热容 | 千焦耳每千克开尔文 | kJ/（kg•K） | 千卡每千克摄氏度 | kcal/（kg•℃） | 1kcal/（kg • ℃）=4.186 8kJ/（kg•K） |
| 热流密度 | 瓦特每平方米 | W/ $m^2$ | 千卡每平方米小时 | kcal/（$m^2$•h） | 1kcal/（$m^2$•h）=1.163W/ $m^2$ |
| 传热系数 | 瓦特每平方米开尔文 | W/（$m^2$ •K） | 千卡每平方米小时摄氏度 | kcal/（$m^2$•h•℃） | 1kcal/（$m^2$•h•℃）=1.163W/（$m^2$•K） |
| 热导率（导热系数） | 瓦特每米开尔文 | W/（m•K） | 千卡每米小时摄氏度 | kcal/（m•h•℃） | 1 kcal/（m•h•℃）=1.163 W/（m•K） |

**附表 3　　全国部分城市纬度数据**

| 城　市 | 北　纬 | 城　市 | 北　纬 | 城　市 | 北　纬 |
|---|---|---|---|---|---|
| 北京 | 39°57′ | 天津 | 39°07′ | 上海 | 31°12′ |
| 石家庄 | 38°04′ | 保定 | 38°53′ | 太原 | 37°55′ |
| 大同 | 40°00′ | 运城 | 35°00′ | 呼和浩特 | 40°49′ |
| 多伦 | 42°12′ | 哈尔滨 | 45°45′ | 齐齐哈尔 | 47°20′ |
| 长春 | 43°52′ | 延吉 | 42°54′ | 沈阳 | 41°46′ |
| 丹东 | 40°05′ | 济南 | 36°41′ | 青岛 | 36°04′ |

续表

| 城　市 | 北　纬 | 城　市 | 北　纬 | 城　市 | 北　纬 |
|---|---|---|---|---|---|
| 南京 | 32°04′ | 徐州 | 34°19′ | 合肥 | 31°53′ |
| 蚌埠 | 32°56′ | 杭州 | 30°20′ | 宁波 | 29°54′ |
| 南昌 | 28°40′ | 赣州 | 25°52′ | 福州 | 26°05′ |
| 厦门 | 24°27′ | 基隆 | 25°09′ | 高雄 | 22°36′ |
| 郑州 | 34°44′ | 信阳 | 32°08′ | 武汉 | 30°38′ |
| 襄樊 | 32°02′ | 长沙 | 28°15′ | 衡阳 | 26°56′ |
| 广州 | 23°00′ | 湛江 | 21°02′ | 海口 | 20°00′ |
| 南宁 | 22°48′ | 桂林 | 25°15′ | 西安 | 34° 15′ |
| 延安 | 36°36′ | 银川 | 38°25′ | 兰州 | 36°01′ |
| 酒泉 | 39°45′ | 西宁 | 36°35′ | 玉树 | 32°57′ |
| 乌鲁木齐 | 43°47′ | 喀什 | 39°32′ | 成都 | 30°40′ |
| 重庆 | 29°30′ | 贵阳 | 26°34′ | 遵义 | 27°41′ |
| 昆明 | 25°02′ | 个旧 | 23°22′ | 拉萨 | 29°43′ |
| 昌都 | 31°11′ | | | | |

**附表 4　　几种典型土壤、岩石及回填料的热物性**

| | | $\lambda$ 导热系数［W/（m•K）］ | $\alpha$扩散率［（1/1 000 000）$m^2/s$］ | $\rho$密度（$kg/m^2$） |
|---|---|---|---|---|
| 土壤 | 致密粘土（含水量 15%） | 1.4～1.9 | 0.49～0.71 | 1 925 |
| | 致密粘土（含水量 5%） | 1.0～1.4 | 0.54～0.71 | 1 925 |
| | 轻质粘土（含水量 15%） | 0.7～1.0 | 0.54～0.64 | 1 285 |
| | 轻质粘土（含水量 5%） | 0.5～0.9 | 0.65 | 1 285 |
| | 致密砂土（含水量 15%） | 2.8～3.8 | 0.97～1.27 | 1 295 |
| | 致密砂土（含水量 5%） | 2.1～2.3 | 1.10～1.62 | 1 295 |
| | 轻质砂土（含水量 15%） | 1.0～2.1 | 0.54～1.08 | 1 285 |
| | 轻质砂土（含水量 15%） | 0.9～1.9 | 0.64～1.39 | 1 285 |
| 岩石 | 花岗岩 | 2.3～3.7 | 0.97～1.51 | 2 650 |
| | 石灰石 | 2.4～3.8 | 0.97～1.51 | 2 400～2 800 |
| | 砂岩 | 2.1～3.5 | 0.75～1.27 | 2 570～2 730 |
| | 湿页岩 | 1.4～2.4 | 0.75～0.97 | |
| | 干页岩 | 1.0～2.1 | 0.64～0.86 | |

续表

| | | λ导热系数［W/（m•K）］ | α扩散率［（1/1 000 000）$m^2/s$］ | ρ密度（$kg/m^2$） |
|---|---|---|---|---|
| 回填料 | 膨润土（含20%～30%的固体） | 0.73～0.75 | | |
| | 含20%膨润土、80%$SiO_2$砂子的混合物 | 1.47～1.64 | | |
| | 含15%膨润土、85% $SiO_2$砂子的混合物 | 1.00～1.10 | | |
| | 含10%膨润土、90% $SiO_2$砂子的混合物 | 2.08～2.42 | | |
| | 含30%膨润土、70% $SiO_2$砂子的混合物 | 2.08～2.42 | | |