

3D3S

钢结构设计软件 V10

非线性分析模块使用手册



同济大学
TONGJI UNIVERSITY
SHANGHAI
PEOPLE'S REPUBLIC OF CHINA

同济大学 3D3S 研发组



上海同磊土木工程技术有限公司

2009 年 09 月

版 权 声 明

3D3S 计算机程序以及全部相关文档是受专利权法和著作权法保护的产品，版权属于上海同磊土木工程技术有限公司。未经上海同磊土木工程技术有限公司的书面许可，不得以任何形式、任何手段复制本产品或文档的任何部分。

同济大学 3D3S 研发组
上海同磊土木工程技术有限公司

电话：021—65981466

传真：021—65985557

电子邮件：help_3d3s@sohu.com, support@tj3d3s.com sales@tj3d3s.com

网址：www.tj3d3s.com

免 责 声 明

3D3S 软件的开发以及文档的编制投入了相当多的时间和精力, 经过了严格的测试和使用。自 1997 年开发以来, 众多用户的工程应用证明了软件的适用性和正确性。

但在程序使用方面, 使用者接受并清楚的知道开发者或经销商在程序的准确性或可靠度上没有做任何直接或暗示的担保。使用者必须明确了解程序的假定并必须独立的核查结果。

内容摘要

3D3S 软件是通用的三维钢结构及新型建筑结构设计软件，其基本模块可以完成一般刚性钢结构体系的静动力线性分析及按中国规范设计验算。3D3S 软件的非线性分析和计算功能根据结构与计算功能不同分属不同的功能模块，其中非线性分析普通版包括一般建筑结构（不含膜结构）的静动力非线性分析，屈曲分析，弹性时程分析；非线性分析高级版还包括一般建筑结构（不含膜结构）施工全过程数值跟踪模拟；膜结构功能模块包括含有膜材料结构的静动力非线性分析。本书主要介绍 3D3S 钢与空间结构非线性分析与计算功能，并主要以建筑索结构、网壳为例介绍了非线性分析功能的应用。

本书主要作为 3D3S 软件钢与空间结构非线性分析和计算功能的用户手册，也可以供从事土木工程科研，设计的广大技术人员参考。

使用手册目录

总说明	6
第一章 索结构一般特征	9
1.1 索结构的三个状态	9
1.2 索结构的变形特征	10
第二章 初始状态形状确定	12
2.1 索预张力的施加	13
2.2 索杆体系	15
2.3 索网体系	18
2.4 索梁体系	20
2.5 索杆—索梁体系	25
2.6 索网—索梁体系	27
2.7 任意体系迭代平衡	28
第三章 工作状态分析	29
第四章 弹性时程分析	40
4.1 地震波选择	40
4.2 计算内容	42
4.3 计算结果显示查询	42
第五章 施工过程分析	44
5.1 施工步编辑	44
5.2 定义施工步构件	44
5.3 定义截面	44
5.4 定义材性	45
5.5 定义预应力	46
5.6 单元释放	47
5.7 支座边界	48
5.8 拉压限定	49
5.9 施加节点荷载	49
5.10 施加单元荷载	50
5.11 施加杆件导荷载	51
5.12 生成导荷载封闭面	51
5.13 自动导荷载	53
5.14 施加整体温度	54

5.15 定义计算步数	54
5.16 计算参数选择	54
5.17 施工过程跟踪计算	55
5.18 跟踪结果显示	55
5.19 跟踪结果查询	56
第六章 工程实例例题	62
6.1 例题一 张弦桁架	62
6.2 例题二 拉线塔	74
6.3 例题三 网架结构考虑初始缺陷	82

温馨提示：

本手册已加载到 v10.0 版本的软件中。

使用方法：

打开菜单对话框，鼠标放在对话框上，然后同时按住 **CTRL+F1**，即可跳出帮助文件，用户可以通过点击对话框使对话框处于最上层，也可以自由移动帮助文件到窗口的任意位置。另外也可以在左边帮助目录中查找相关帮助命令。

总说明

一、使用环境及安装步骤

3D3S v10.0 在 AutoCAD2004、2005、2006 环境下运行, 操作系统为 WIN9X, WIN2000, WINXP;

安装步骤:

1、双击光驱中的授权单位名称目录下的 setup 应用程序图标, 屏幕弹出欢迎框 (如果以前安装过同版本的 3D3S 软件, 会先提示卸载);

2、单击 next 按钮, 屏幕弹出安装目标目录对话框, 在对话框中按 browse 按钮选择安装目录, 3D3S10.0 可以安装在任何目录下;

3、安装程序执行文件复制;

4、FINISH 表示安装成功, 不必重新启动电脑, 直接可以使用 3D3S (双击 3D3S10.0 图标);

5、第一次使用 3D3S 时, 如果没有出现 3D3S 菜单, 则使用 MENU 命令人工调用 3D3S 菜单 (ACAD 使用的是上次正常退出时的菜单);

Command: menu

选择 3D3S 安装目录下的 3D3S_空间任意结构设计菜单.mnc

需要切换回 ACAD2000 的菜单可以直接使用 3D3S 的菜单切换或仍旧使用 MENU 命令, 选取 ACAD\SUPPORT 下 ACAD.MNC;

二、软件锁使用说明

结构软件的正常使用关系到结构设计的安全性, 请在使用 3D3S 前在详细阅读以下条文:

1、3D3S 的全程运行过程中, **务必保证 3D3S 软件狗和电脑硬件的通讯** (插 3D3S 软件狗), 3D3S 软件狗中存在自定义算法以及与 3D3S 软件的数据交换, 一旦软件运行过程中无法正确找到内置授权号的 3D3S 软件狗, 即便软件还能继续运行, 将不时出现数据错误以影响计算结果;

2、每个授权用户的软件狗都是定制的, 所以不能相互混用, 必须和您的安装盘配套使用; 在菜单切换\帮助菜单下的关于 3D3S 中可以查询到本套软件的正确用户单位, 必须和软件锁的授权单位配套, 软件才能正常使用;

3、安装完成后, 在插上软件狗的基础上仍旧提示不能找到软件狗, 请参看安装光盘中的说明文件;

4、在 3D3S 官方网站 www.tj3d3s.com 中的用户服务区中, 可以通过输入授权号查询到授权单位信息, 如果 3D3S 软件正常使用, 那么使用者的授权号和查询出的授权单位需要一致;

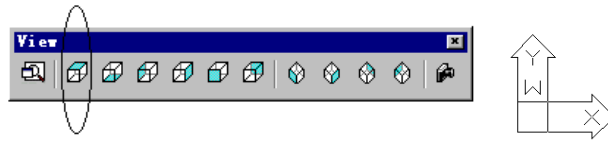
5、开始菜单中, 单机版网络版的切换。打开屏幕左下角“开始”菜单——所有程序——3D3S10.1——单机版 (网络版) 切换, 即可对使用版本进行单机版和网络版的设置切换。

三、使用中的注意事项

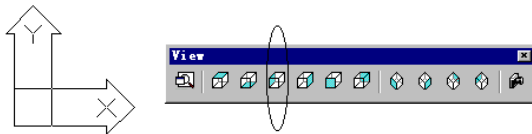
1、3D3S 坐标系统

3D3S 软件在 AutoCAD 环境下运行。ACAD 本身存在一套坐标系统, 即世界坐标和用户坐标 (当坐标系显示 W 时表示

当前为世界坐标系，VIEW 工具条中的 TOPVIEW，如下图)；3D3S 软件中的坐标系统和 ACAD 中的世界坐标系统重合，并且 Z 方向一定要求为建筑物高度方向。



当坐标系显示不出现 W 时，表示当前坐标系为用户坐标，它只是表示用户在建模过程的坐标输入方式，它的 X, Y 方向和 3D3S 的坐标系统规定是不一样的，比如 LEFTVIEW 在世界坐标系统下应该是 X-Z 平面内的，但 ACAD 的用户坐标系统仍旧显示为 X-Y 平面，如下图。



由于 3D3S 坐标系统没有直接显示，而是依靠 ACAD 的坐标，所以对于 3D3S 的坐标系统，使用者应该有一个比较清楚的了解，这样在输入荷载方向、K 节点坐标定义、约束方向等时不会出错。

2、如果出现的图标为小笑脸或者软件截面表丢失，那么可以重新使用 MENU 命令，在 3D3S 安装目录下装载 MNS 菜单文件（在 3D3S 安装目录下会有 MNS, MNC, MNR 三类菜单文件，如果菜单、图标或截面库出现异常，MNC 和 MNR 文件可以删除）。

3、怎样把工程发邮件送给我们

把您的工程用 EMAIL 形式发送给我们是您最便捷的获得和该工程有关解释的方法。

在硬盘中您的工程的存放形式包括两个部分：

- 1) 工程名.DWG 文件
- 2) <工程名目录>

在您发送 EMAIL 前，可以使用最小化另存保存工程，或者可以把<工程名目录>下的所有 USER 子目录删除，并可以把所有的后缀名为 FOXX、DOXX 的文件删除（其中 X 表示数字），然后用 ZIP 或 RAR 压缩后 EMAIL 给我们。

4. 安装 3D3S 完成后，不能正常出现使用图标

使用鼠标右键单击桌面 3D3S 图标（如果安装后没有出现图标，可以手工创建一个快捷图标），在属性一栏里把目标该为机器中 ACAD2004、2005、2006 的执行文件，起始位置为 3D3S 的安装目录。

5、输出文本

软件的计算和设计的结果有两种输出方式：屏幕输出和文本输出。屏幕输出是指软件菜单中提供的显示、查询等命令；文本输出是指把结果以文本文件的形式保留在硬盘上以供查询。输出结果文本文件在 工程目录\USER 子目录下，可以使用 WORD 或写字板等编辑软件直接打开；每个文件最上面几行描述了该文件的格式及使用的单位制。

下表列出了所有的文本文件内容说明，用户可以根据各自的要求查阅（工程名是指用户把当前模型存盘时所起的

那个文件名)。

总体信息			
工程名.doc	结构计算书		
工程名.bao	门式刚架报价结果文件		
荷载文件			
工程名.cob	荷载组合系数		
内力分析结果			
工程名.doc	结构计算书		
设计优化结果文件			
工程名.chk	按规范规程校核设计详细结果	工程名.xinggang	型钢混凝土设计结果
工程名.sat	按规范规程优化设计详细结果	工程名.zct	框架结构判断强弱支撑体系结果
工程名.gangguan	圆钢管混凝土设计结果	工程名.fanggang	方钢管混凝土设计结果
节点和柱脚设计结果			
工程名.wjtxt	屋架设计结果	节点计算.doc	节点\柱脚设计结果
工程名.cra	吊车梁设计结果	工程名.niutui	牛腿设计结果
工程名.boltball	网架螺栓球设计结果	工程名.weltball	网架焊接球设计结果
工程名_cno.doc	圆钢管汇交节点设计结果	工程名_tj.doc	塔架构件及节点设计结果
工程名.collide	螺栓球相碰距离结果	工程名_mes.txt	圆管相贯线切割信息输出
非线性计算结果			
工程名.InitF	非线性计算预应力态内力结果	工程名.NFcxx	非线性组合 xx 的内力结果
工程名.InitD	非线性计算预应力态位移结果	工程名.NRgxx	非线性工况 xx 的反力结果
工程名.NFgxx	非线性工况 xx 的内力结果	工程名.NRcxx	非线性组合 xx 的反力结果
工程名.NDgxx	非线性工况 xx 的位移结果	工程名.NDcxx	非线性组合 xx 的位移结果
膜结构计算结果			
工程名.chushi	初始态计算结果	工程名.hezai	荷载态计算结果
工程名.cut	裁剪片的面积及幅宽	工程名.area	结构投影面积及展开面积

第一章 索结构一般特征

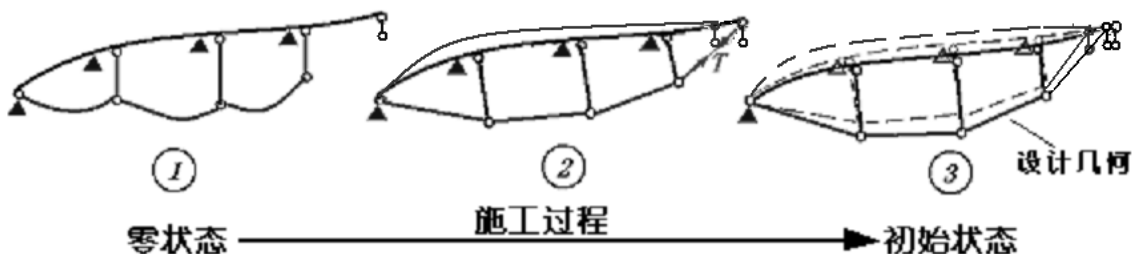
1.1 索结构的三个状态

在建筑索结构中，根据施工控制方式的不同，将建筑用索分成两类：

- 主动索：施工过程中通过主动张拉，控制张拉端索力的建筑用索；
- 被动索：施工过程中事先下料，索力的导入是由于主动索的张拉生成的建筑用索。

下图示意了建筑索结构的一般形成步骤：

- 过程 1：设立支承、安装钢构件及被动索；
- 过程 2：安装、张拉、固定主动索；
- 过程 3：去除支承形成索结构。



索结构的一般形成步骤

过程 1 和过程 3 对应于索结构不同的受力状态。一般地，定义索结构如下三个不同状态：

- 零状态

零状态时的结构是加工放样后的索段和构件集合体。零状态时不存在预应力，不承受外部荷载和自重的作用。上图过程 1 即为索结构的零状态。

- 初始状态

初始状态是指结构仅在预应力和自重作用下的自平衡状态。不考虑外部荷载的作用。结构的初始状态提供了分析结构在外部效应作用下所必需的所有初始条件：包括节点几何、构件预应力值等。上图过程 3 为索结构初始状态。

- 工作状态

工作状态指结构在外部效应作用下所达到的平衡状态。分析工作状态可得到结构在外部效应作用下的位移、内力等一系列反应。上图结构工作状态是在过程 3 的基础上分析得到。

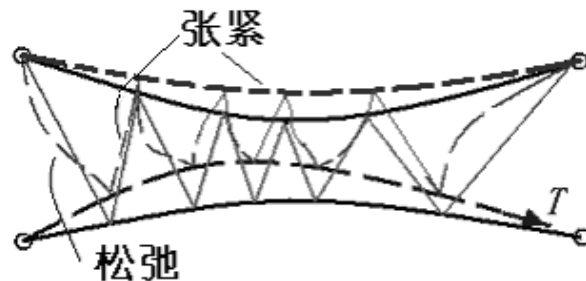
索结构的初始状态对应了结构的设计几何及预张力分布；零状态对应了结构的制作几何和零预应力状态；工作状态对应结构在设计几何及预张力分布基础上在外部荷载作用下的状态。

1.2 索结构的变形特征

在索结构的计算和设计中，初始状态的确定是至关重要的。在初始状态基础上，可以进行结构工作状态和零状态的分析。索结构的初始状态取决于零状态至初始状态的施工过程中结构的变形特征。一般而言，结构在施工过程中的变形有两种：几何不协调的变形和几何协调的变形。

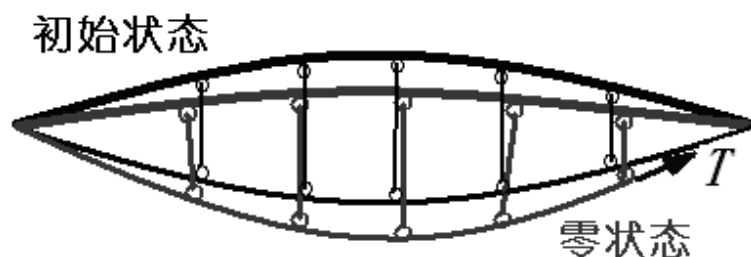
一、几何不协调变形

几何不协调的变形意味着在主动索张拉过程中有部分索段张紧受力而其他索段处于松弛状态。对于几何不协调变形的情况，如果设计几何给定，满足平衡条件的任意一组预张力分布均可作为初始状态的预张力；如果设计几何不定，满足给定支承几何和边界条件的设计几何及其对应的一组平衡预张力可以作为结构的初始状态。如下图的索桁架结构，当上下两根悬索处于张紧状态时，部分斜索处于松弛状态；随着主动索进一步张拉，最终所有索张紧。



二、几何协调变形

几何协调的变形意味着在主动索张拉过程中各构件同时受力，产生几何协调变形最终达到初始状态，在初始状态索结构的预张力分布既满足平衡条件同时又满足几何协调条件。下图的张弦梁结构下弦索张拉，所有中部索同时受力及变形协调。



对于几何协调变形的情况，如果设计几何给定，必须从初始状态的设计几何位置逆序释放主动索，当主动索张力释放至零时，结构各构件内力都趋于零，这时的几何位置可作为零状态几何；如果设计几何不定，可任意设定一个满足给定支承和边界的设计几何，在此位置上逆序释放主动索张力得到结构的零状态；或设定一个满足给定支承和边界的零状态，在此基础上施加主动索张力至设计值以得到初始状态对应的几何和内力分布。

三、初始平衡体系和初始协调体系

在预张力施加过程中索结构的变形特征直接决定了它的初始状态及其确定方法。为了便于分析，可以将预张力施加过程中产生几何不协调变形的索结构定义为初始平衡体系，而将产生几何协调变形的索结构定义为初始协调体系。

一般而言，初始平衡体系必须由“索”和“杆”单元组成，因为只有“索”和“杆”组成的单元才能产生几何不协调的变形，“梁”单元本身的变形总是协调的，所以又将初始平衡体系称为“索杆体系”。而初始协调体系可以由“索”、“杆”单元或“索”、“杆”、“梁”等单元混合组成，这类体系又称为“索梁体系”。

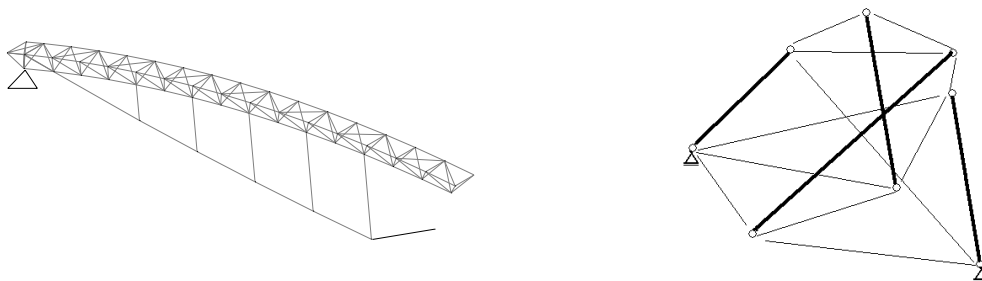
求解初始平衡体系的初始状态时，在设计几何基础上建立平衡方程，任意一组满足平衡条件和主动索预张力值的内力分布均可作为结构的预张内力分布。

求解初始协调体系的初始状态时，必须在零状态几何基础上施加主动索预张力求解结构的变形和对应的内力，最终得到的结构变形后的几何和内力就是结构的设计几何及其对应的预张内力分布。

对于除去主动索后为静定结构的索体系，因为与主动索的预张力相对应的只有一组平衡内力分布，而静定结构的内力生成过程必定是几何协调的，所以这类结构是初始协调体系。但是按照初始平衡体系的初始状态求解方法也能求解得到这类结构唯一的一组平衡预张内力。这时，结构是何种体系并不重要，重要的是如何能够简单地求解得到其初始状态。

对于除去主动索后为超静定结构的索体系，与主动索的预张力对应的有多组可能的内力分布。其中只有一组内力是满足几何协调条件的，即将主动索预张力释放至零时结构内力分布也同时退化为零；而其他内力分布不满足几何协调条件。这时，结构是何种体系取决于零状态至初始状态施工张拉过程中结构的变形特征。

如果结构由“索”和“杆”单元组成，而其中“杆”单元又集成具有了“梁”的功能，这时，应将结构定义为初始协调体系，因为“梁”中“杆”单元在施工过程中不可能存在几何不协调的变形。下图的张弦梁结构中上弦梁是空间桁架，整个结构由索杆组合，但空间桁架具有“梁”的功能，结构属于索梁体系。同样的典型结构还有斜拉网架等。

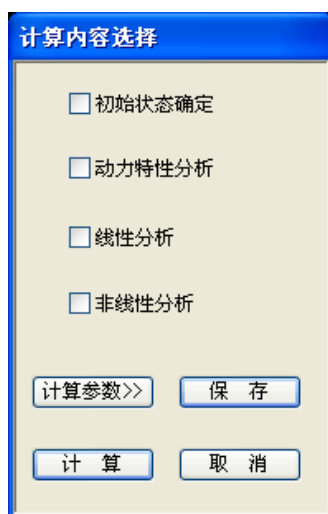


如果结构是由“索”和“杆”组成的离散体系，如上图的整体张拉体系，可以直接按初始平衡体系求解其初始状态，因为超静定的这类体系在施工过程没必要满足几何协调条件，而静定体系只存在一组平衡内力。

第二章 初始状态形状确定

根据第一章对索结构的分类及索结构施工安装的实际情况，3D3S 软件提供了多种初始状态形状确定的方法。本章根据【模块切换/帮助】→【钢与空间结构非线性计算与分析系统】→【普通版】下的【内力分析】→【计算内容选择及执行】为例解释索结构初始状态形状确定的使用方法，其余模块（除索膜结构模块）凡涉及初始状态形状确定的方法与本章类同。

在【模块切换/帮助】→【钢与空间结构非线性计算与分析系统】→【普通版】中选菜单命令【内力分析】→【计算内容选择及执行】，弹出如下对话框：



勾选【初始状态确定】，点击【计算参数>>】，展开对话框，点击【非线性初始态】：



软件提供了索杆体系、索梁体系、索网体系及混合体系的初始状态形状确定方法。

说明：

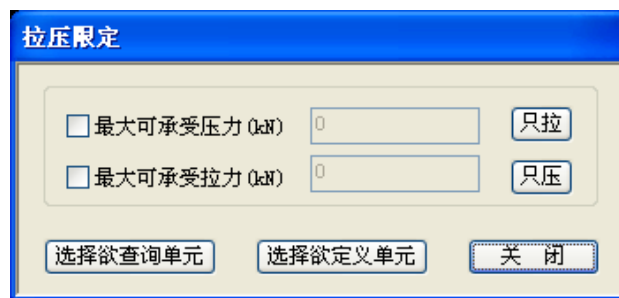
➤ 根据《钢结构设计规范》和上海市地方标准《建筑结构用索技术规程》，索结构的结构设计也应分承载能力极限状态和正常使用极限状态。在工作状态分析中，索结构的预张力分布应该按照相应组合下的恒载考虑相应的分项系数。这项因素在进行工作状态分析时考虑，初始状态形状确定分析不考虑分项系数。

2.1 索预张力的施加

索结构建模完成，进行初始状态分析前需要定义索内预张力。其中，有的索是在施工过程中张拉的，有的索预张力是被动获得的，还有的支撑或拉索没有施加预张力，但具有只拉的属性。在计算前，针对拉索需要对其预张力属性进行定义。

1、拉压限定

【构件属性】→【拉压限定】弹出对话框：



定义结构中的只拉单元、只压单元来定义构件的受力特性，只拉单元仅承受拉力，只压单元仅承受压力；当最大可承受压力为 0 时，表示单元为只拉单元，当最大可承受拉力为 0 时，表示单元为只压单元。

用户可以同时定义最大可承受压力和最大可承受拉力。

【只压单元】：定义的单元在计算分析全过程只能受压；

【只拉单元】：定义的单元在计算分析全过程只能受拉。

2、预张力定义

【内力分析】→【计算内容选择及执行】→【初始状态确定】→【计算参数>>】→【非线性初始态】，在对话框的右上角设置建筑用索的预张力。



【建筑用索定义】：根据拉索施工控制方式定义

【定义主动索】：在初始状态形状确定过程中，控制杆件初张力。主动索意味着在分析过程中索可以“滑动”，其原始长度可以变化，而张拉端的索力控制。

【定义被动索】：在初始状态形状确定过程中，不控制杆件初张力。被动索意味着在分析过程中索的下料原长固定，其索力通过主动索的张拉被动获得。被动索可以认为是人为设置索原长，原长由经典的材料力学公式获得：

$$L_0 = \frac{L}{1 + \frac{N}{EA}}$$

式中： L_0 为构件原长， L 为构件模型长度， N 为定义的索力， EA 为构件属性。

【定义力密度】：索网结构可以采用力密度法形状确定。所谓力密度，就是索内内力除以索长，即： $q = F/l$ ，通过定义力密度，完成索网结构的力密度法找形。

【不定义】：取消索的预张力属性定义。

2.2 索杆体系

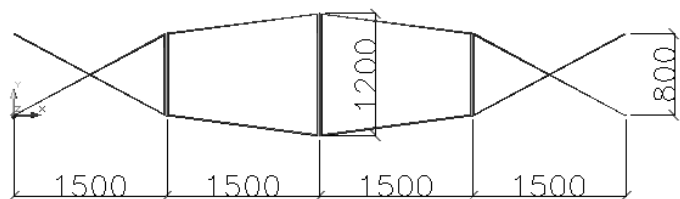


索杆体系属于初始平衡体系，求解其初始状态时，在设计几何基础上建立平衡方程，任意一组满足平衡条件和主动索预张力值的内力分布均可作为结构的预张力分布。

运用索杆体系形状确定的一般结构有点支式玻璃幕墙支承体系中的水平拉索桁架，索膜结构中的飞杆结构等。



例题：如下图，在 XOY 平面坐标系下建立如下尺寸的索杆体系模型，拉索定义为 $\phi 16$ ，撑杆定义为 $\phi 54 \times 5$ 。

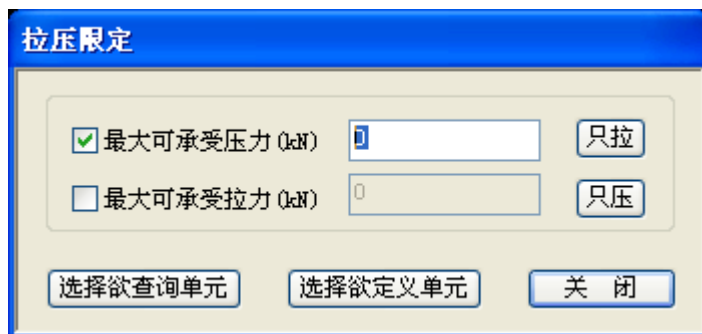


步骤:

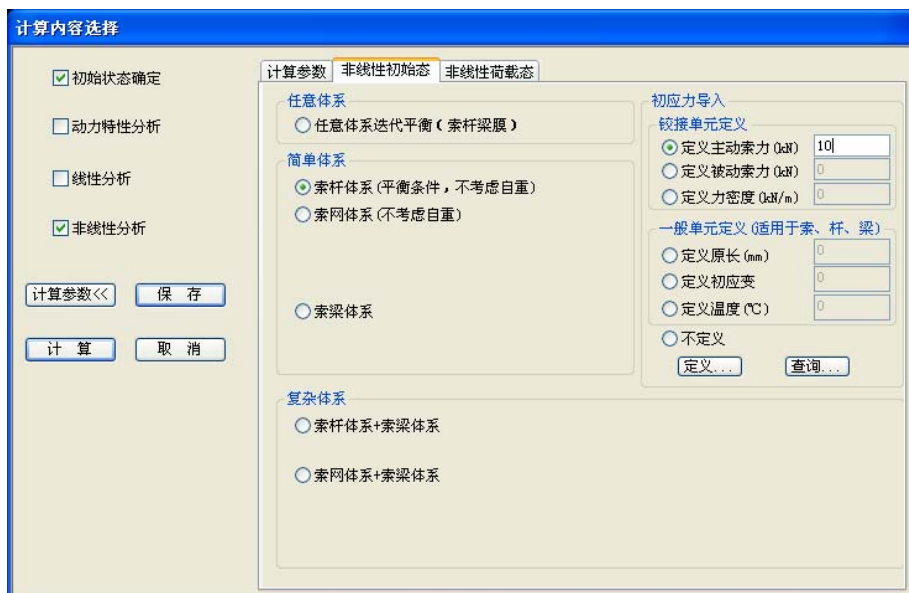
1)、根据上图建立结构几何模型, 定义构件截面, 定义材性为 Q235 钢材, 定义左右端四个节点定义为铰接支座。

2)、【结构编辑】→【结构体系】→【平面桁架】→【确定】;

3)、【构件属性】→【拉压限定】→【最大可承受压力为 0】



3)、【内力分析】→【计算内容选择及执行】→【初始状态确定】→【计算参数】→【非线性初始态】



- 【建筑用索定义】→【定义主动索】→10→【定义】→选择上图一根单元;
- 【索杆体系】→【计算】。

4)、【内力分析】→【初始态分析结果】→【内力显示】，选择所有构件，可以显示结构内力。

【内力分析】→【初始态分析结果】→【内力查询】，选择单根构件，可以查询构件内力。

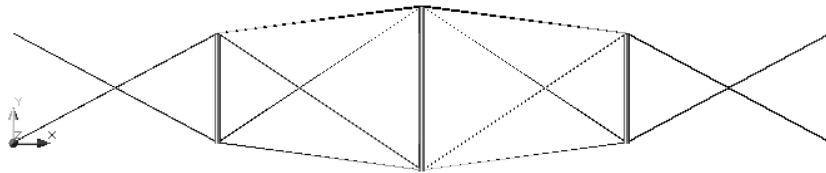
本项计算内容显示的节点位移全为 0。

分析：

1)、索杆体系形状确定是定义若干构件预张力，软件根据力的平衡条件找到一组符合条件的预张力分布。不能将所有杆件都定义预张力，除非所定义的预张力本身是平衡的，否则将提示“定义了多余杆件预张力，不能得到预张力分布”。

2)、如上例所示，根据力的平衡条件，可以将所有杆件的内力求出。在此条件下，结构体系有唯一的预张力分布。

3)、如下图所示，当增加两根构件，根据力的平衡条件并不能得到唯一的预张力分布。在此条件下，软件假定一组预张力分布，通过最小二乘法得到符合条件的预张力分布。假定构件中所设的最大预张力为 P ，则软件假定的预张力分布为：所有未设预张力的拉杆内力为 P ，所有压杆为 $-P$ 。



4)、索杆体系设定的预张力必须为主动索或只拉单元+控制，若设为被动索，软件认为没有定义杆件预张力。

5)、索杆体系计算不得有梁单元的参与，否则软件退出计算。

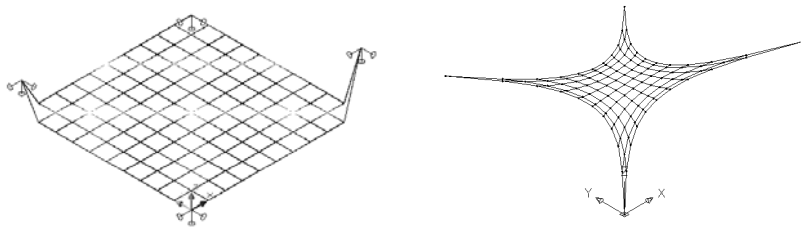
6)、索杆体系形状确定的建模位置为初始态位置，表示在建模位置上有一组符合初始设定预张力条件的平衡预张力分布。

2.3 索网体系



索网体系属于设计几何位置不定的初始平衡体系，求解其初始状态时，可以采用力密度法，也可以采用有限单元法。

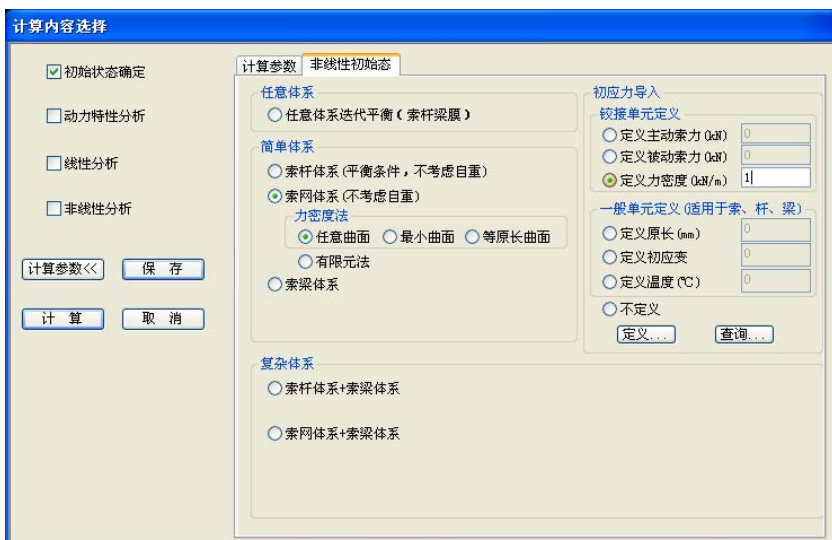
例题：如下图，在 XOY 平面坐标系下建立 10×10 ，网格大小 300mm 的索网格，左右控制点分别在 Z 向升高 500mm 和 1000mm，拉索定义为 $\Phi 20$ ，力密度定为 1kN/m。



步骤：

1)、根据左上图的模型建立索网结构的控制形状，建立 10×10 ，边长 300mm 正方形网格，采用 AutoCAD 拉伸 (Stretch) 命令将左右点延 Z 方向升高 500mm 和 1000mm。定义构件截面，定义材性为 Q235 钢材，定义四个控制端点为铰接支座。

2)、【内力分析】→【计算内容选择及执行】→【初始状态确定】→【计算参数】→【非线性初始态】



- 【建筑用索定义】→【定义力密度 (kN/m)】→1→【定义】→选择所有单元；
- 【索网体系】→【力密度法—任意曲面】→【计算】。

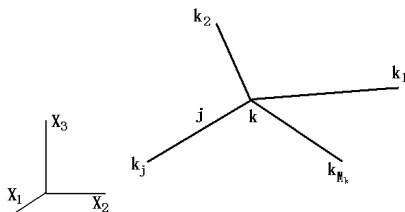
3)、【内力分析】→【初始态分析结果】→【内力显示】，选择所有构件，可以显示结构内力。

【内力分析】→【初始态分析结果】→【内力查询】，选择单根构件，可以查询构件内力。

本项计算完毕后，结构位形将发生变化，控制点保持不变，其余节点坐标为初始形状确定计算得到，节点位移显示为0。

分析：

1)、索网体系采用力密度法完成初始状态形状确定。



对所有索网节点都建立平衡方程，可以得到一个关于索力 s_j 、索长 L_j 以及节点坐标的方程组。观察平衡方程，定义索段力密度为内力除以长度， $q_j = s_j / L_j$ ，假设索内的力密度为定值，那么方程组为与结构节点坐标向量相关的方程组，求解该方程组得到形状确定后的结构几何，根据所求几何的索段长度可以反推构件内部的预张力分布。

2)、索网体系定义不同的力密度可以得到不同的平衡曲面，具体应用可以遵循以下三个原则：

- 任意曲面：假定所有索段力密度相等，一次求解得到的平衡曲面，经证明，该曲面索段长度平方和最小。该曲面计算求解迅速。
- 最小曲面：通过迭代计算，索网中所有的索段拉力相等的曲面。经证明，该曲面索段长度之和最小，但并不是所有曲面都存在最小曲面，计算过程中用户可根据软件提示及工程对曲面的要求中

止迭代，获得较优的曲面。

- 等原长曲面：通过迭代计算，索网中所有索段的下料原长相等。该曲面下料方便，但并不是所有曲面都存在符合用户需求的等原长曲面，计算过程中用户可根据软件提示及工程对曲面的要求中止迭代，获得较优的曲面。

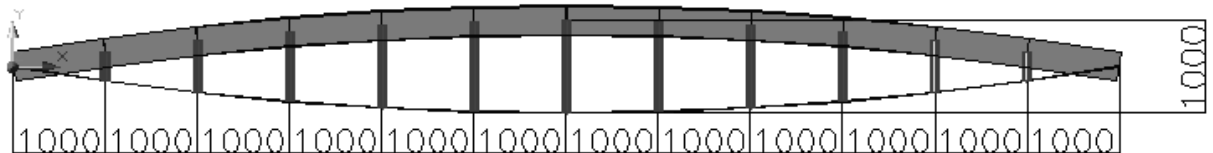
3)、索网体系也可以通过有限元法求解。将所有的索网索段定义成被动索，被动索意味着在分析过程中设定了索网索段的下料原长，可以求得给定索段原长的索网形状及内力分布。

4)、索网体系形状确定的建模位置只是确定了索网的控制点位置以及索网的拓扑形状，形状确定结束后新的结构位置为索网体系的初始状态。

2.4 索梁体系



例题：下图为典型的张弦梁结构，上弦梁采用工字钢 320×180×4×8，撑杆采用 $\Phi 102 \times 6.5$ ，下弦索为 $\Phi 20$ ，选用 Q235 钢材。



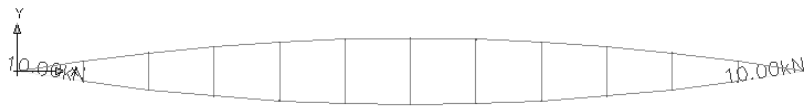
1)、建立模型：在 XOZ 面内的建立两段弧，上弦弧的三点为 (0, 0)、(6000, 500)、(12000, 0)；镜像生成下段弧。将弧按水平间距 1000mm 分段，并打断成线段。

2)、生成基本模型：定义杆件；定义上弦梁为工字钢 320×180×4×8，下弦索为 $\Phi 20$ ，撑杆为圆管 $\Phi 102 \times 6.5$ ；定义材性为 Q235；撑杆方位定义 X 向正无穷，其余构件定义 Z 向正无穷；定义所有撑杆和下弦索为两端转动释放；定义两端节点为铰接支座。

3)、【结构编辑】→【结构体系】→【平面框架】→【确定】；

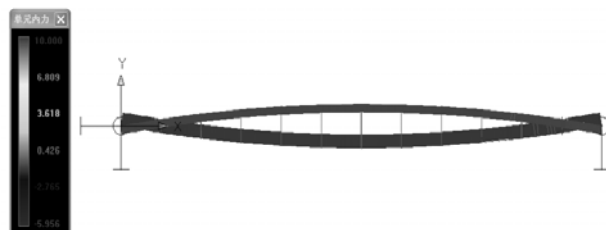
4)、【内力分析】→【计算内容选择及执行】→【初始状态确定】→【计算参数】→【非线性初始态】

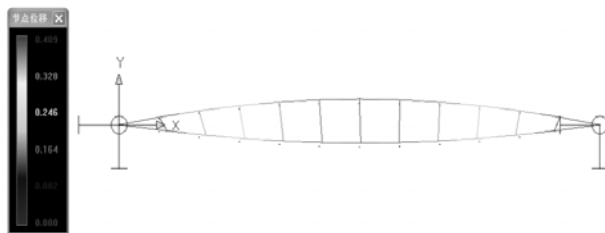
- 【建筑用索定义】→【定义主动索】→10→【定义】→选择两端各一根下弦索段；



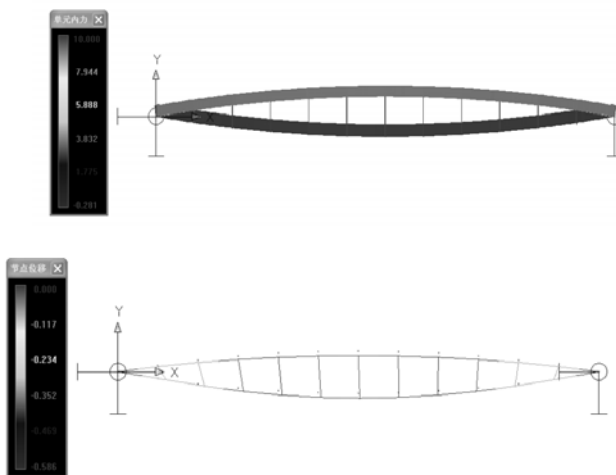
- 【索梁体系】，有如下四种组合选项：

①、【建模位置为张拉后的初始状态】+【√考虑自重】：给定模型几何位置为初始态几何位置，考虑在结构构件自重和预张力共同作用下，结构处于建模位置几何。比如该结构索张拉过程结构竖直且无支撑，结构自重在此过程中起作用。左图为轴力显示，右图为位移显示。对于建模位置为初始状态的初始状态分析，其位移显示的位置是结构近似零状态的位置。

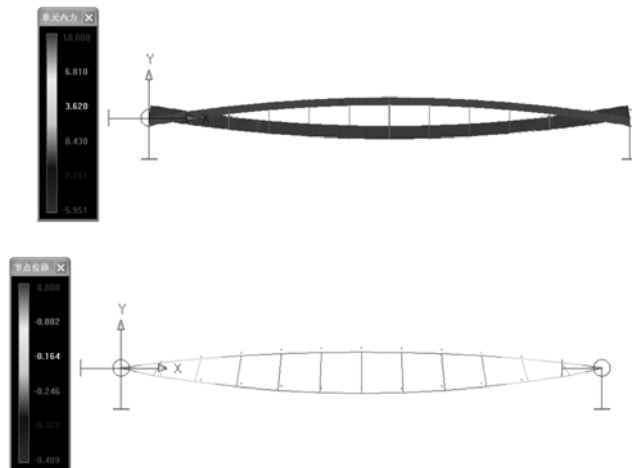
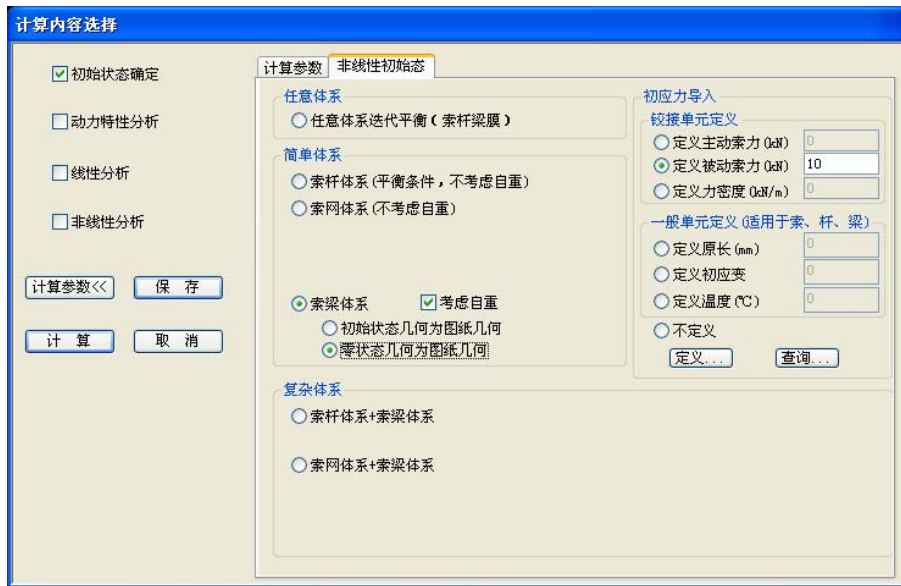




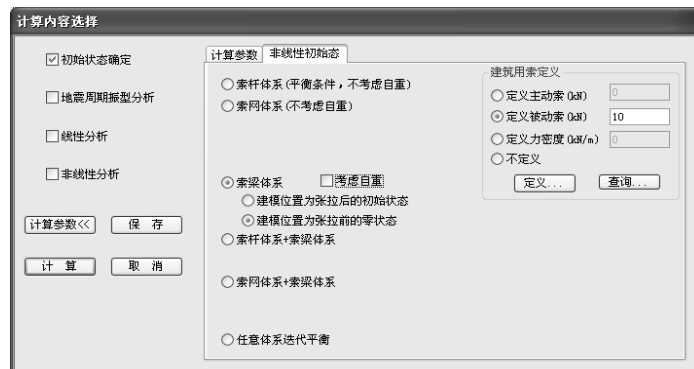
②、【建模位置为张拉后的初始状态】+【×考虑自重】：给定模型几何位置为初始态几何位置。考虑在结构仅有预张力作用下，处于建模位置几何。比如本结构预张力索张拉过程中结构竖向满堂脚手支撑或横向平躺，结构自重张拉过程中不起作用。左图为轴力显示，右图为位移显示。采用本选项，其位移显示也是结构近似零状态的位置。

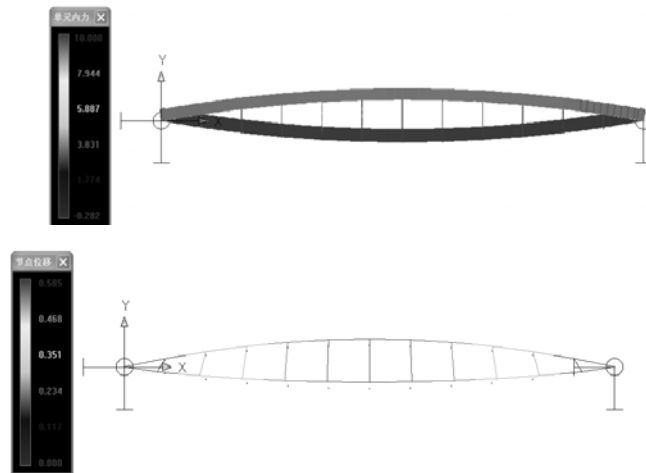


③、【建模位置为张拉前的零状态】+【√考虑自重】：给定模型几何位置为零状态几何位置。考虑在结构构件自重和预张力共同作用下，从模型的几何位置（零状态）变化到初始态位置。结构预张力索张拉过程结构竖直且无支撑，结构自重张拉过程中起作用。左图为轴力显示，右图为位移显示。对于建模位置为零状态的初始状态分析，其位移显示的位置是结构初始状态的位置。



④、【建模位置为张拉前的零状态】+【×考虑自重】：给定模型几何位置为零状态几何位置。考虑在结构仅有预张力作用下，从模型的几何位置（零状态）变化到初始态位置。考虑预张力索张拉过程结构处于满堂脚手支承或平躺位置，结构自重张拉过程中不起作用。左图为轴力显示，右图为位移显示。采用本选项，其位移显示也是结构初始状态的位置。





分析：

1)、索杆体系属于初始协调体系，精确求解索梁体系的初始状态，必须零状态几何基础上施加主动索预张力，采用几何非线性方法求解结构的变形和对应的内力，最终得到的结构变形后的几何和内力就是结构的设计几何及其对应的预张力分布。

一般来讲，结构的建模位置即设计图纸位置，对应的是结构找形后的初始状态位置。有时结构的刚性较大，可以根据不同情况采用灵活的方法。

建模位置为张拉后的初始状态，表示建模位置为初始状态位置，至于零状态位置在哪里，如何张拉获得，在设计阶段不考虑。对于重要的结构，用户可以在初始态基础上，通过施工过程的卸载分析逆向分析获得零状态位置。

建模位置为张拉前的零状态，表示建模位置为零状态位置。在零状态位置上，施加预张力，初始态显示的位移后的位置就是初始态的位置。有些刚性比较大的结构，预张力的施加主要是给主体结构反拱，那么可以采用本选项。当预张力施加，结构反拱，再进行工作状态的分析。

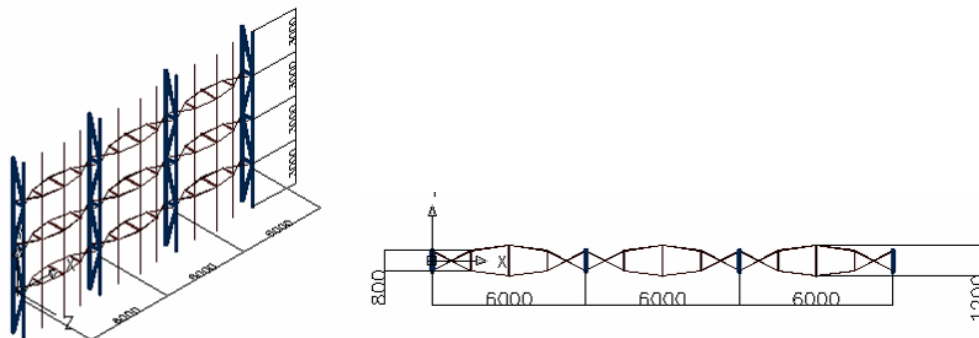
2)、形状确定过程中是否考虑自重须根据实际张拉施工过程确定。

3)、索梁体系初始状态的位移显示体现了结构零状态和初始状态之间的位置关系。当结构的建模位置是初始状态时，显示位移后的结构位置为结构零状态的位置；当结构的建模位置为零状态时，显示位移后的结构位置为结构初始状态的位置。

2.5 索杆—索梁体系



例题：下图为点支式玻璃幕墙结构，立挺桁架间距 6 米，水平支承系统间距 3 米。立挺桁架弦腹杆均为 $\Phi 152 \times 6$ ，水平支承系统撑杆 $\Phi 32 \times 3$ ，索系采用 $\Phi 20$ ，选用 Q235 钢材。立挺桁架无单元释放，系统顶部和底部均设为三向平动约束，索及撑杆构件两端释放。

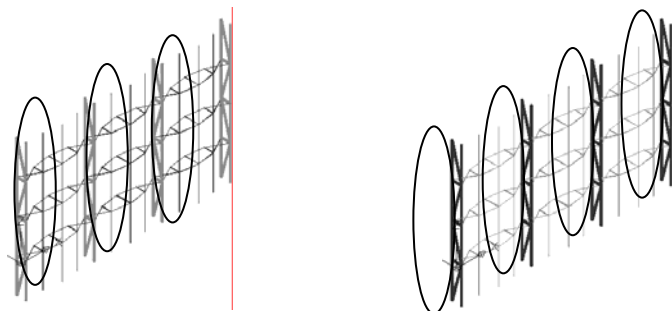


1)、按例题建立模型（略）。

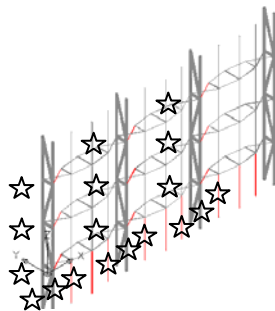
2)、【内力分析】→【计算内容选择及执行】→【初始状态确定】→【计算参数】→【非线性初始态】

- 【索杆体系 定义…】→水平和竖直索支承系统；

下图左图圈中部分为定义的索杆体系，右图中圈中部分为结构的索梁体系部分。

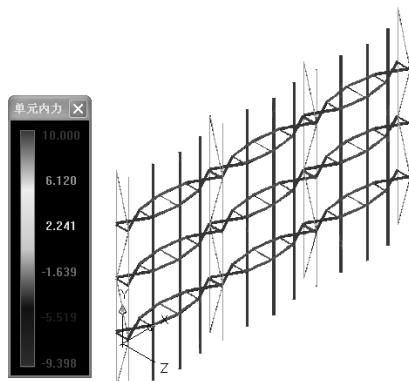


- 【建筑用索定义】→【定义主动索】→10KN→【定义】→定义水平支承体系的端索



及竖索端部；

- 【索杆体系—索梁体系】+【×考虑自重】。下图所示为轴力图。



分析：

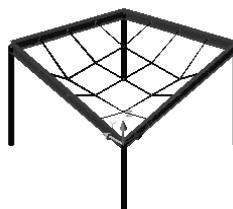
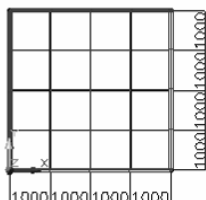
1)、索梁—索梁混合体系将整体结构分成两部分。首先，将连接索梁体系构件的节点全部约束，针对索杆体系按初始平衡体系进行初始状态形状确定；然后，将只连接索杆体系构件的节点全部约束，将索杆体系的反力反向施加在索梁体系上，采用建模位置为张拉后的初始状态对索梁体系进行初始状态形状确定。

2)、索杆—索梁混合体系的形状确定，索杆体系自重不考虑，所谓考虑自重是考虑索梁体系的自重。

2.6 索网—索梁体系



例题：下图为框架结构，平面上尺寸4米正方形，1×1索网格，长柱尺寸3米，短柱尺寸2米。柱子 $\Phi 121 \times 6$ ，梁 $H250 \times 100 \times 4 \times 6$ ，上弦梁采用工字钢 $320 \times 180 \times 4 \times 8$ ，索采用 $\Phi 20$ ，选用 Q235 钢材。刚性的柱子和梁无单元释放，柱底刚接，索构件两端释放。

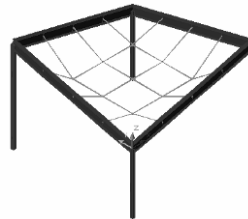
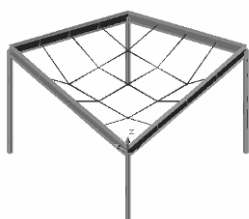


1)、根据例题建立模型（略）。

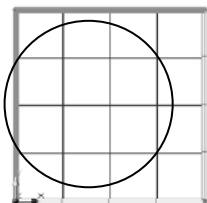
2)、【内力分析】→【计算内容选择及执行】→【初始状态确定】→【计算参数】→【非线性初始态】

- 【索杆体系 定义…】→索网格；

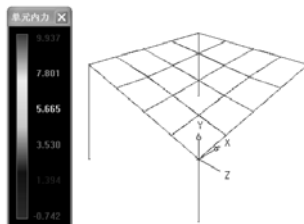
下图左图中间网格部分为定义的索网体系，右图中边框架及柱子部分为结构索梁体系部分。



- 【建筑用索定义】→【定义力密度】→10→【定义】→下图中圈中的索网格单元



- 【索网—索梁体系】+【×考虑自重】→【计算】。下图所示为轴力图。



分析:

1)、索网—索梁混合体系将整体结构分成两部分。首先，将连接有索梁体系构件的节点全部约束，针对索网体系采用力密度法进行初始状态形状确定；然后，将只连接索网体系构件的节点全部约束，将索网体系的反力反向施加在索梁体系上，采用建模位置为张拉后的初始状态对索梁体系进行初始状态形状确定。

2)、索网—索梁混合体系的形状确定，索网部分根据力密度法得到新的位形和预张力分布；索梁部分采用建模位置为张拉后的初始状态，其建模构型即初始状态。

3)、索网结构的找形不考虑自重，所谓考虑自重是考虑索梁体系的自重。

2.7 任意体系迭代平衡

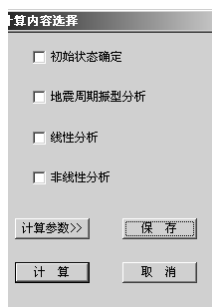


本选项不考虑不同非线性结构体系，按几何非线性有限元在预张力或预张力与结构自重共同作用下完成结构的初始状态形状确定。

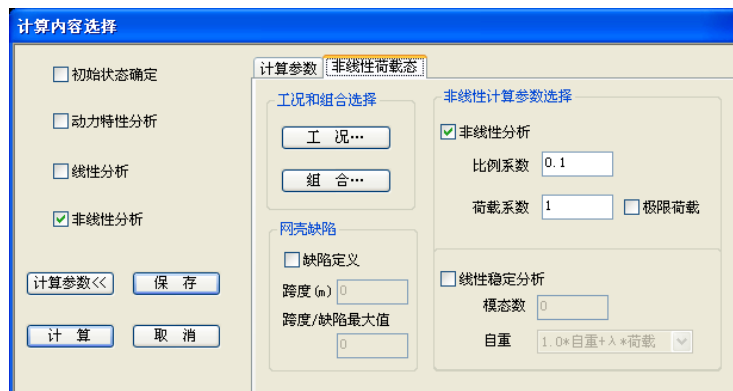
第三章 工作状态分析

在初始态形状确定的基础上，进行结构的非线性工作状态分析。

【钢与空间结构非线性计算与分析系统】→【普通版】→【内力分析】→【计算内容选择及执行】，弹出如下对话框：



【非线性分析】→【计算参数>>】→【非线性荷载态】：



软件提供了非线性极限承载力分析、线性弹性屈曲。对于网壳结构，软件可以考虑初始缺陷。

- 勾中对话框中的【非线性分析】，完成结构的非线性分析。为了保证非线性的收敛性，软件采用分级加载的方式迭代计算。

【比例系数】：荷载分级加载的比例，缺省值为 0.1，也就是每级增加荷载为所施加荷载的 0.1 倍，先保证该级计算迭代收敛后再增下一级荷载。可以根据结构的刚度修改荷载分级比例，刚度大的结构荷载分级比例可适当放大；

【荷载系数】：总的计算工作量达到所施加荷载的倍数，缺省值为 1，表示计算到施加荷载。比如网壳结构需要计算到 5 倍荷载的稳定性，这里可以填 5 计算其稳定性；

【极限荷载】：按【比例系数】的荷载分级加载，一直计算到计算发散，发散前一级荷载为极限值。

- 勾中对话框中的【线性稳定分析】，完成结构的线性弹性屈曲分析。

【模态数】：弹性屈曲的模态。

● 勾中对话框中的【缺陷定义】，完成网壳结构的考虑缺陷的非线性稳定分析。如果选择考虑缺陷，将当前荷载作用下的线性屈曲第一模态作为缺陷形式，考虑的缺陷值作为最大的缺陷。因此每种荷载的计算都包括两部分内容，第一部分为线性屈曲分析，确定缺陷模式和缺陷值；第二部分是在有缺陷情况下的非线性分析。

【跨度】：输入网壳结构的最大跨度。

【跨度/最大缺陷值】：反映考虑缺陷的程度。

● 不论是非线性分析，还是线性稳定分析都与结构所施加的荷载有关。

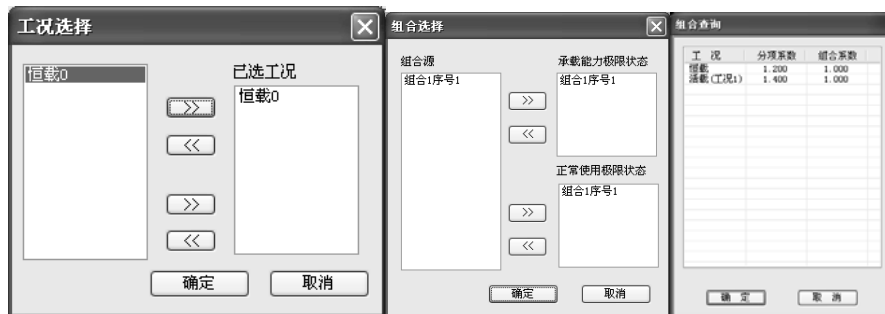
点击【工况…】，弹出工况选择对话框，选择需要计算的荷载内容；

点击【组合…】，可以计算效应组合，双击左边组合源，可以查询组合详细内容。

当没有组合时，设置工况 0 为缺省计算内容；当有组合时，设置组合 1 为承载能力和正常使用极限状态为缺省计算荷载。

承载能力极限状态：考虑组合的分项系数，初始状态确定的分项系数根据组合中恒载的分项系数确定。

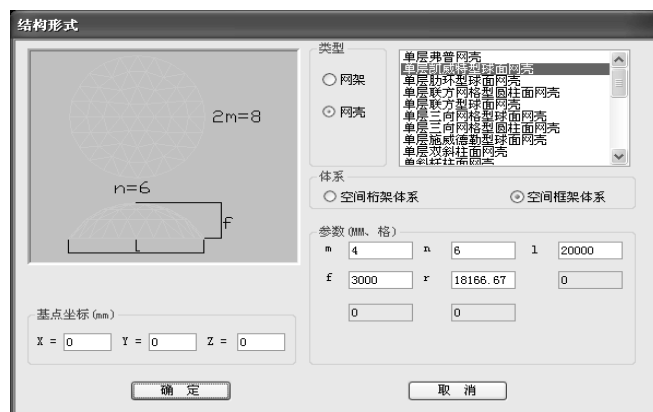
正常使用极限状态：不考虑组合的分项系数，初始状态确定的分项系数为 1。



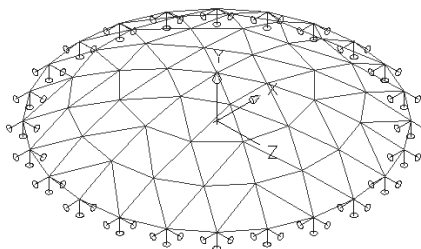
例题 1：本例题演示非线性分析的基本过程

1)、【模块切换/帮助】→【网架网壳菜单】

2)、【结构编辑】→【新建网架网壳】→【单层凯威特型球面网壳】→按缺省值→【确定】



3)、【构件属性】→【支座边界】→铰接支座→【选择节点定义约束】→选择周边所有节点→【确定】。



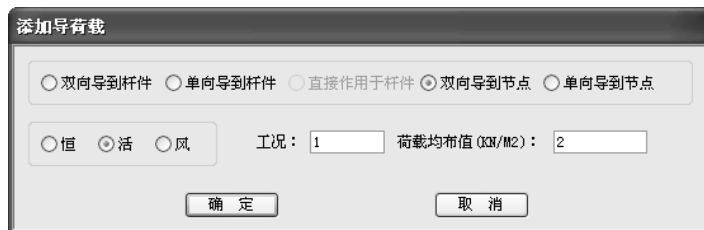
4)、【荷载编辑】→【施加杆件导荷载】→【双击有“...”的行】



双击有“...”的行→【双向导到节点】→【恒载】→【荷载均布值 (KN/m²):】→1→【确定】



双击有“...”的行→【双向导到节点】→【活载】→【工况】→1→【荷载均布值 (KN/m²):】→2→【确定】

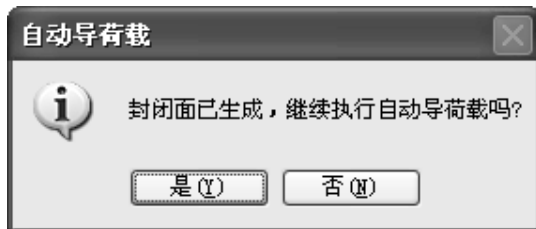
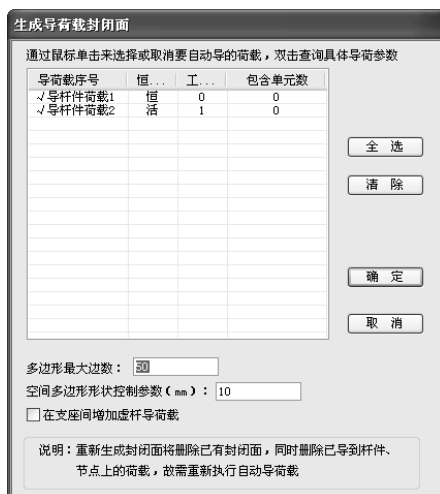


点蓝恒载记录条→【选择受荷范围】→全选单元

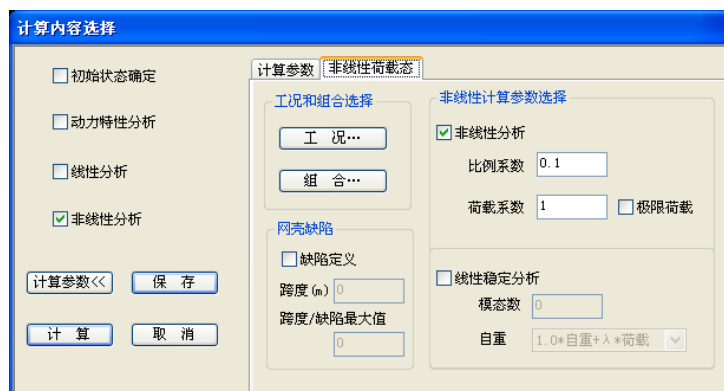
点蓝活载记录条→【选择受荷范围】→全选单元



【荷载编辑】→【生成导荷载封闭面】→【确定】→【是】，完成导荷载。



5)、【内力分析】→【计算内容选择及执行】→【非线性分析】→【计算参数>>】→【非线性荷载态】



【组合】→双击第一条组合→【确定】→【确定】

根据默认组合，以及输入荷载的情况，本工程软件自动生成两组组合（恒+活）和（恒）默认的情况，软件考虑组合 1 序号 1 的承载能力和正常使用能力的分析。



【√非线性分析】→【比例系数】→0.25→【计算】

```
命令: OnCalIntegration General
正在计算承载能力组合 1 序号 1
ERR= 42541.178104 OUT= 42541.178104 IN= 0.000000
退出杆件 0
step=1 item=1 err=1.31564E-002
退出杆件 0
step=1 item=2 err=4.27116E-005
ERR= 40926.457885 OUT= 83467.550081 IN= 42541.105955
退出杆件 0
step=2 item=1 err=6.81246E-003
ERR= 41193.306162 OUT= 124393.930948 IN= 83205.289750
```

命令行中将显示非线性计算完毕。

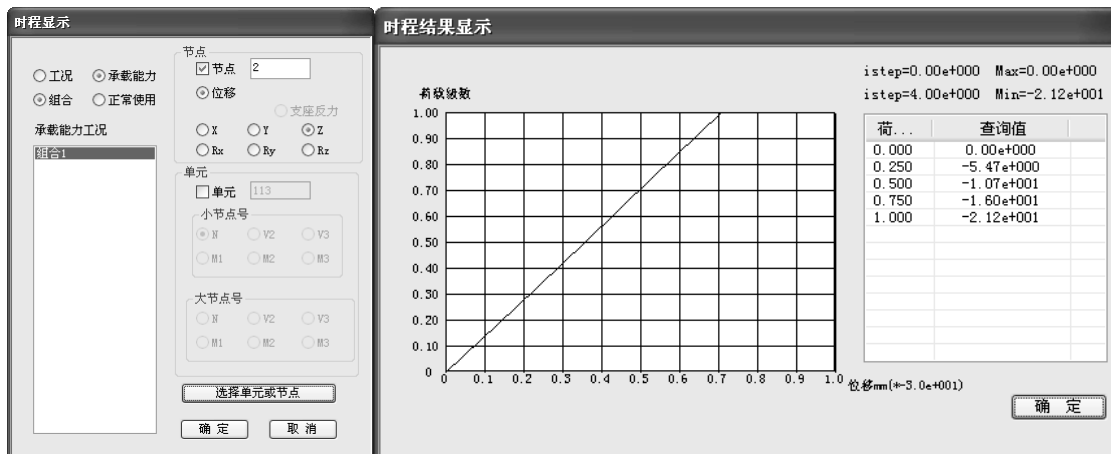
命令行提示内容说明：

ERR=xxx OUT=xxx IN=xxx 内外力差平方和、外力平方和、内力平方和

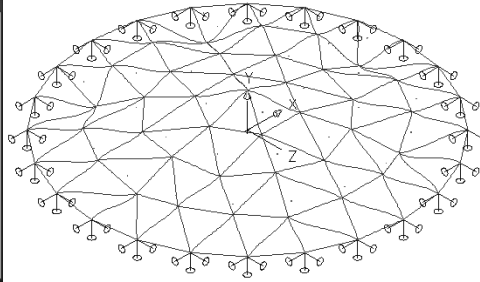
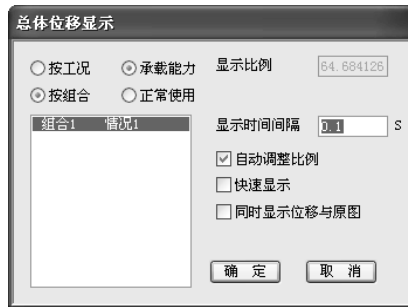
退出杆件 xxx 只拉单元退出的单元数（若退出将显示单元数）

Step=xx item=xx err=xxx 荷载分级号，某分级内的迭代步数，迭代误差

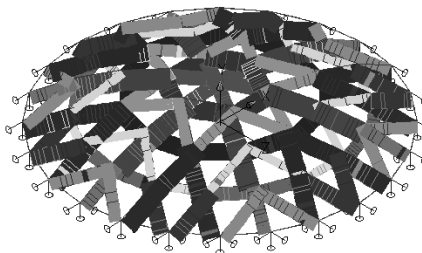
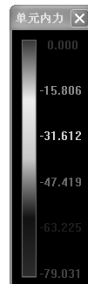
6)、【内力分析】→【非线性分析结果】→【时程曲线】→【组合】→【承载能力】→【组合 1】
→【节点】→【小节点号 N】→【选择单元或节点】→选节点→【确定】



【内力分析】→【非线性分析结果】→【动态位移显示】→【组合】→【承载能力】→【组合 1】
→【确定】



【内力分析】→【非线性分析结果】→【显示内力】→【承载能力】→【组合 1】→【显示颜色】
→【轴力 N】→【确定】

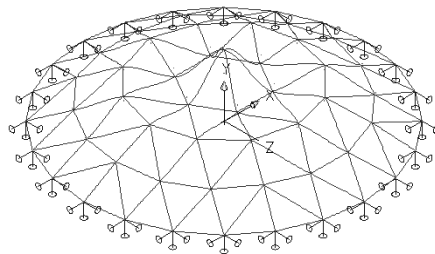
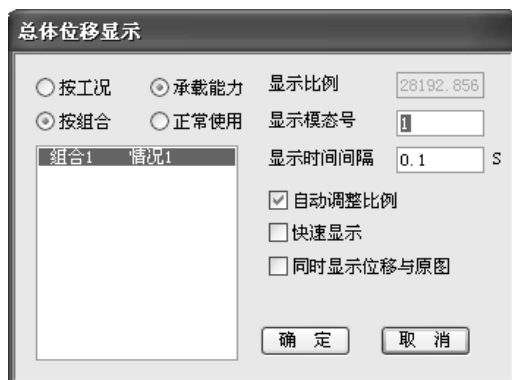


7)、【内力分析】→【计算内容选择及执行】→【非线性分析】→【计算参数>>】→【非线性荷载态】→【√线性稳定】→【模态数】→3→【计算】



【内力分析】→【非线性分析结果】→【线性稳定模态显示】→【组合】→【承载能力】→【组

合 1】→【确定】



8)、【内力分析】→【计算内容选择及执行】→【非线性分析】→【计算参数>>】→【非线性荷载态】→【√非线性分析】→【比例系数】→0.25→【√缺陷定义】→【跨度】→20→【跨度/缺陷最大值】→300→【计算】



```
命令: OnCallIntegration_General
考虑初始缺陷的结构非线性分析
正在计算承载能力组合 1 序号 1 线性稳定
结构线性稳定计算完毕!
正在计算承载能力组合 1 序号 1
ERR= 42541.178104   OUT= 42541.178104   IN= 0.000000
退出杆件 0
step=1   item=1   err=1.31564E-002
退出杆件 0
```

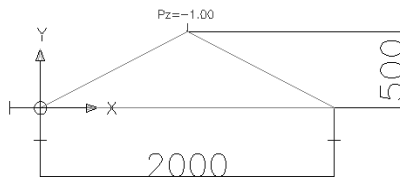
命令行的提示显示计算首先进行了线性稳定，然后计算了非线性分析。软件考虑 20 米跨度的网壳考虑 1/300 缺陷，缺陷按照该组合下的线性稳定的模态确定。

同理可以进行结构计算结果的显示查询。

例题 2: 本例题示意有初始态分析的非线性分析的位移显示和查询，掌握零状态、初始态和工作态之间的相互关系。

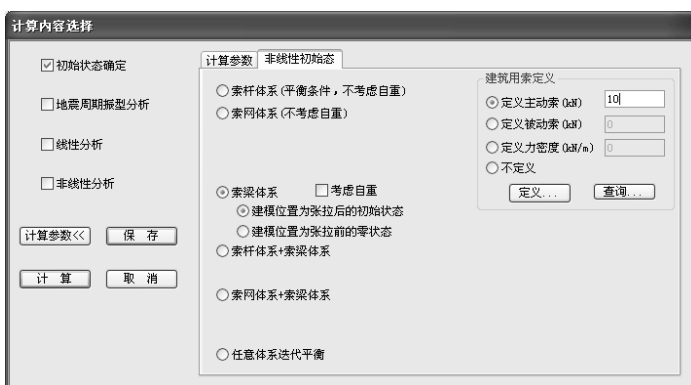
如下图所示平面结构，斜梁截面 250x100x4x6，下弦为索 $\Phi 10$ ，恒载 $P_z = -1\text{kN}$ ，左下端节点铰接，

右下端节点单向约束，下弦索预张力 10kN。



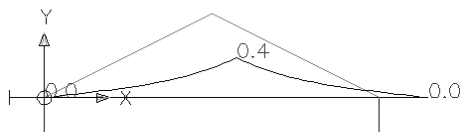
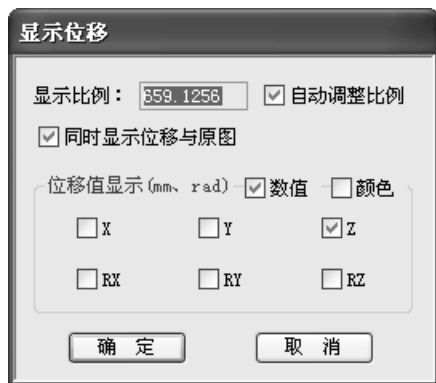
1)、按例题要求建立模型（略）。

2)、【内力分析】→【计算内容选择及执行】→【初始状态确定】→【计算参数】→【非线性初始态】



- 【建筑用索定义】→【定义主动索】→【定义】→选中下弦索
- 【索梁体系】+【×考虑自重】+【建模位置为张拉后的初始状态】→【计算】

3)、【内力分析】→【初始态计算结果显示查询】→【位移显示】



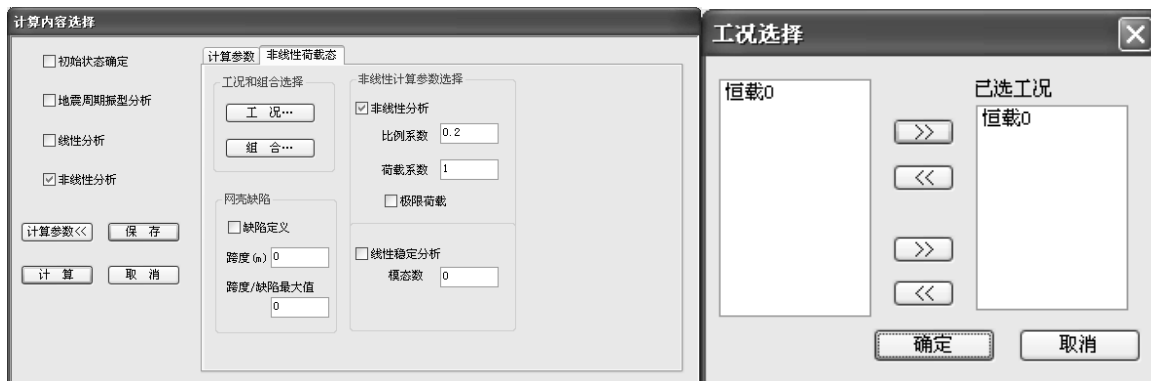
从计算角度的，下弦索张拉，结构似乎应该起拱。但这里显示了初始态计算过程中零状态和初始状态的相互关系，其位移是反向显示的，表示结构从位移显示的零状态位置通过张拉达到初始态的建模位置，显示的位移数值 0.4 表示从零状态向上 0.4 达到建模的初始状态位置。

4)、【内力分析】→【计算内容选择及执行】→【非线性分析】→【计算参数】→【非线性荷载态】

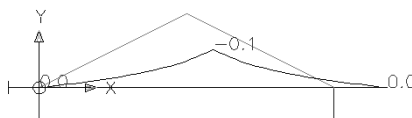
【工况】→【恒载 0】→【>>】

【√非线性分析】→【比例系数】→0.2→【荷载系数】→1

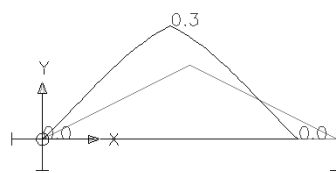
【计算】



5)、【内力分析】→【非线性分析结果显示查询】→【位移显示】→【工况】: 工况 0→【数值】: z→【初始态到工作状态位移】→【确定】



【内力分析】→【非线性分析结果显示查询】→【位移显示】→【工况】: 工况 0→【数值】: z →【零状态到工作状态位移】→【确定】



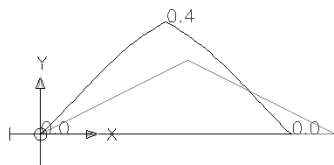
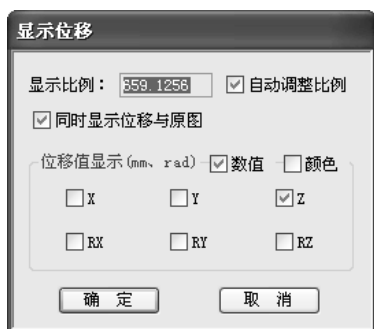
位移的显示是示意性的。第一个图显示位移为-0.1，表示从初始位置（建模位置）计，在荷载作用下，结构有-0.1 的位移；第二个图显示位移为 0.3，在初始预张力作用下，结构起拱了 0.4（见 3），然后在荷载作用下，位移-0.1（见第 1 图），总计从零状态位置计，位移为 0.3。

6)、【内力分析】→【计算内容选择及执行】→【初始状态确定】→【计算参数】→【非线性初始态】



- 【索梁体系】+【×考虑自重】+【建模位置为张拉前的零状态】→【计算】

7)、【内力分析】→【初始态计算结果显示查询】→【位移显示】

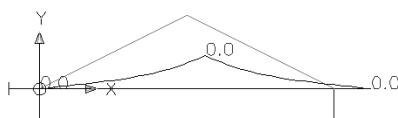
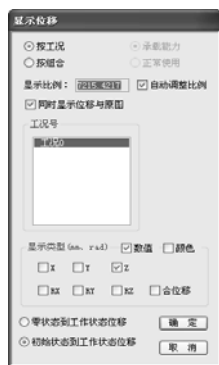


这里显示了初始态计算过程中零状态和初始状态的相互关系,表示结构从建模位置的零状态通过张拉达到起拱后的初始态的位移显示位置,显示的位移数值 0.4 表示从零状态向上 0.4 达到初始状态位置。

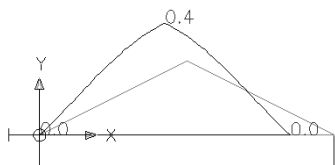
8)、【内力分析】→【计算内容选择及执行】→【非线性分析】→【计算参数】→【非线性荷载态】
 【工况】→【恒载 0】→【>>】
 【√非线性分析】→【比例系数】→0.2→【荷载系数】→1
 【计算】



9)、【内力分析】→【非线性分析结果显示查询】→【位移显示】→【工况】: 工况 0→【数值】:
 z→【初始态到工作状态位移】→【确定】



【内力分析】→【非线性分析结果显示查询】→【位移显示】→【工况】：工况 0→【数值】：z
→【零状态到工作状态位移】→【确定】



位移的显示是示意性的。第一个图显示位移为-0.0，表示从初始位置计，在荷载作用下，结构有0.0（舍入误差）的位移；第二个图显示位移为0.4，在初始预张力作用下，结构起拱了0.4（见3），然后在荷载作用下，位移-0.0（见第1图），总计从零状态位置计，位移为0.4。

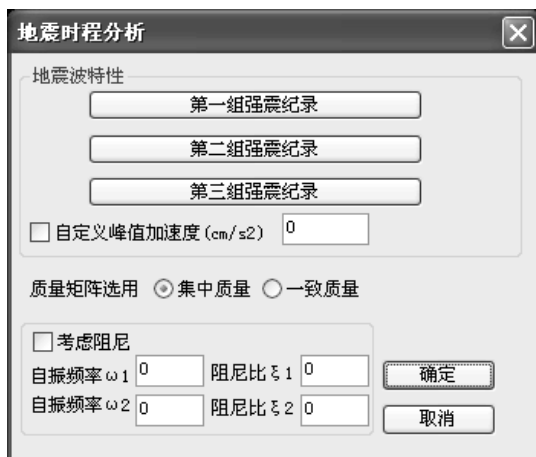
第四章 弹性时程分析

对于非线性结构，规范的振型分解反应谱法可能并不适合非线性的抗震分析。对于刚度较大的非线性结构，软件用线性方法按振型分解反应谱法计算地震作用并迭加在非线性结果中是合适的；对于刚度较柔的结构，需要用弹性时程的分析方法试设计。

采用弹性时程分析分选择地震波、分析、显示查询三步。

4.1 地震波选择

【地震时程分析】→【地震波选择】→【第 x 组强震记录】→【X(Y, Z) 地震波选择】→选择场地土类别→选择合适的地震波→设置合适的取值时间间隔→【确定】



循环取好地震波后→【自定义峰值加速度】→选择质量矩阵→是否考虑阻尼→【确定】。

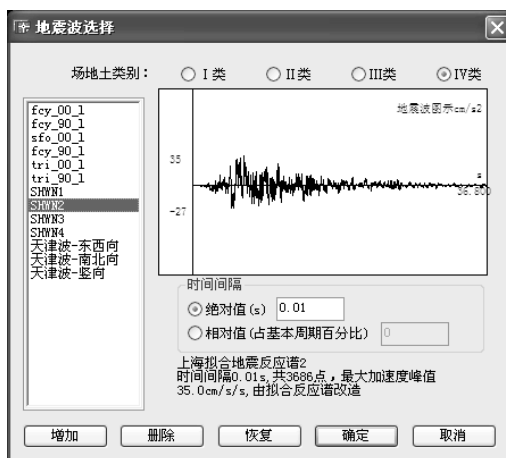
根据《建筑结构抗震设计规范（GB 50011-2001）》、《高层建筑混凝土结构技术规程（JGJ 3-2002）》、《高层民用建筑钢结构技术规程（JGJ 99-98）》的规定，高层建筑的时程分析需要考虑适合当地的两条地震波以及一条人工波进行分析。

本软件可以定义三组地震波记录工况；定义地震波峰值加速度——按本峰值/原地震波峰值放大或缩小地震波记录数据；可采用集中质量矩阵或一致质量矩阵——高层建筑首选集中质量矩阵；并考虑阻尼效应（有剪力墙单元不考虑）。

每组地震波工况均可以定义 X、Y、Z 三个方向的地震波。



每条地震波的选择需要根据当地的实际情况，软件按场地土类别内置了上百条地震波供用户选用。



对话框根据场地土类别给出不同场地土类别下的地震波列表；左列出了地震波的名称，右边给出了地震波图示；时间间隔的绝对值的缺省值为地震波记录的时间间隔，用户可以根据自己的要求按绝对值或与结构基本周期的相对值设定时间间隔，软件自动寻找相应的地震波数值；下方给出了该条地震波的说明。对话框最下面的五个按钮可以增加、删除、恢复地震波数据，可以增加符合软件数据格式的地震波，在软件安装目录下的 wave 目录中，有地震波记录的文件；删除可以删除不需要的地震波记录；恢复可以恢复到软件原有的内置地震波数据。



数据格式：
地震波时间
地震波时间间隔
地震波记录数据
.....

4.2 计算内容

软件可完成以下计算内容：

弹性线性时程分析——计算过程中不考虑构件的刚度采用线性单元刚度矩阵，不考虑几何刚度、应力刚度变化

弹性非线性时程分析——计算过程中考虑构件的几何刚度、应力刚度变化。

4.3 计算结果显示查询

软件可作如下结果的显示和查询。

时程曲线显示
位移包络显示...
内力包络显示...
支座反力包络显示...
位移分步显示...
内力分步显示...
支座反力分步显示...

时程显示查询各组地震波时间历程内节点的各个方向的位移、速度和加速度以及各个方向的杆端内力。



时程显示对话框，用于查询地震波时间历程内的节点位移、速度、加速度及杆端内力。对话框包含以下选项：

- 节点**：
 - ☒ 节点 1
 - ☐ 位移 ☐ 速度
 - ☐ 加速度 ☐ 支座反力
 - ☐ 弯矩 ☐ Y ☐ Z
 - ☐ Rx ☐ Ry ☐ Rz
- 单元**：
 - ☐ 单元 1
- 小节点号**：
 - ☒ N ☐ V2 ☐ V3
 - ☐ M1 ☐ M2 ☐ M3
- 大节点号**：
 - ☐ N ☐ V2 ☐ V3
 - ☐ M1 ☐ M2 ☐ M3

底部有“选择单元或节点”、“确定”和“取消”按钮。

包络显示可以显示各组地震波时间历程内的最大最小计算结果。

时程分析位移包络显示

时程曲线号1

显示内容 (单位: mm, m/s, m/s²)

位移

速度

加速度

显示数值

X

Y

Z

RX

RY

RZ

显示比例1

自动调整比例

同时显示位移与原图

确定

取消

时程分析内力包络显示

时程曲线号1

显示类型

显示数值

显示颜色

轴力N

剪力Q2

剪力Q3

扭矩M

弯矩M2

弯矩M3

单位: kN; kN.m

显示比例1

自动调整比例

确定

取消

时程分析支座反力包络显示

时程曲线号1

显示数值 (kN, kN.M)

X

Y

Z

RX

RY

RZ

确定

取消

分步显示可以显示各组地震波时间历程内的分步计算结果。

时程分析位移分步显示

时程曲线号1

显示内容 (单位: mm, m/s, m/s²)

位移

速度

加速度

显示数值

X

Y

Z

RX

RY

RZ

显示比例1

自动调整比例

同时显示位移与原图

时间间隔倍数1

时间点(秒)0

显示

<<

>>

动态显示

速度

确定

取消

时程分析内力分步显示

时程曲线号1

显示类型

显示数值

显示颜色

轴力N

剪力Q2

剪力Q3

扭矩M

弯矩M2

弯矩M3

单位: kN; kN.m

显示比例1

自动调整比例

时间点(秒)0

<<

>>

确定

取消

时程分析支座反力分步显示

时程曲线号1

显示数值 (kN, kN.M)

X

Y

Z

RX

RY

RZ

时间点(秒)0

<<

>>

确定

取消

第五章 施工过程分析

5.1 施工步编辑



按此命令，可增加、删除、插入施工步。双击施工步列表框或按“显示当前步”按钮可将以后的操作转到指定施工步。没有施工步时只有模型层。

5.2 定义施工步构件

按此命令，可现指定一个施工步，再增加、删除属于该施工步的杆件，属于指定步的杆件在屏幕上变成红色。

5.3 定义截面



● 步骤:

1、定义单元截面

(1) 对话框左侧列出所有截面库中的截面形式，选择欲定义的截面类型；

(2) 选中在建立截面库中激活的截面类型时，对话框右侧出现经增加或删除以后的截面名称系列，选择欲定义的截面名称，并在调色板内选择任意颜色表示所选择的截面；

(3) 按“选择欲定义单元”按钮，对话框隐去，用鼠标在屏幕上选欲定义截面的杆件；

(4) 按鼠标右键表示选择结束，对话框重新弹出，可按步骤(1)(2)(3)再对其单元进行截面定义或查询；

(5) 双击显示的颜色框可改变默认的截面显示颜色；

(6) 按“确定”按钮，则命令结束。

2、查询单元截面

(1) 按“选择欲查询单元”按钮，对话框隐去，用鼠标在屏幕上选取欲查询的杆件。

(2) 按鼠标右键表示选择结束，对话框重新弹出，对话框内显示截面类型及名称为所查询单元的截面，然后可再对其单元进行截面定义或查询。

(3) 按“确定”按钮，则命令结束。

3、修改截面参数

双击右面截面列表中的截面可对相应截面的参数进行修改。

● 说明：

定义范围中，当前步表示只定义当前步的构件截面，已定义的其他各施工步的构件截面保持不变；当前及以后步表示定义大于等于当前步的各施工步的构件截面，当前步以前的各施工步的构件截面保持不变；所有步表示定义已存在的所有步的构件截面。其他命令中的该参数的含义与此相似，详细解释参见 2.5.7.5 节。

如果在将来的单元设计中要求软件进行优选设计，软件将按单元在截面选择对话框右侧的截面名称系列中顺序进行优化，即软件认为截面表从小到大排列，截面优选时是在截面表中从上往下逐个挑选截面的。

5.4 定义材性

定义材性步骤如下：

1、定义单元材性

(1) 在列表内选中要定义的材性；

(2) 按“选择欲定义单元”按钮，对话框隐去，用鼠标在屏幕上选取欲定义材性的杆件；

(3) 按鼠标右键表示选择结束，对话框重新弹出，可按步骤(1)(2)再对其单元进行材性定义或查询；

(4) 按“确定”按钮，则命令结束。

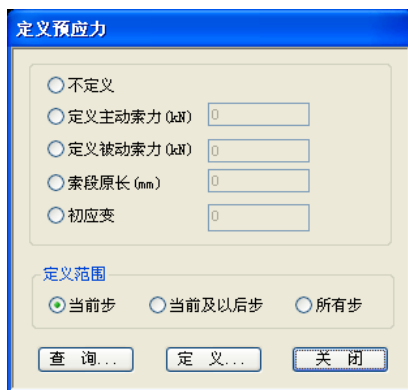
2、查询单元材性

- (1) 按“选择欲查询单元”按钮，对话框隐去，用鼠标在屏幕上选取欲查询的杆件；
- (2) 按鼠标右键表示选择结束，对话框重新弹出，对话框内用深色条显示该单元的材性，然后可再对其他单元进行材性定义或查询；
- (3) 按“确定”按钮，则命令结束。

注意：

- (1) 在进行单元设计时，钢材的设计应力是根据不同的板厚确定的，自定义钢材则是直接读取设计强度；
- (2) 钢砼材性中，包括钢材的所有截面特性和混凝土的等级。

5.5 定义预应力



定义预应力步骤如下：

1、定义单元预应力

- (1) 选择一种定义类型；
- (2) 按“单元...”按钮，对话框隐去，用鼠标在屏幕上选取欲定义预应力的杆件；
- (3) 按鼠标右键表示选择结束，对话框重新弹出，可按步骤（1）（2）再对其单元进行预应力定义或查询；
- (4) 按“确定”按钮，则命令结束。

2、查询单元预应力

- (1) 按“查询...”按钮，对话框隐去，用鼠标在屏幕上选取欲查询的杆件；
- (2) 按鼠标右键表示选择结束，对话框重新弹出，对话框内用深色条显示该单元的预应力，然后可再对其他单元进行预应力定义或查询；
- (3) 按“确定”按钮，则命令结束。

5.6 单元释放

用于刚接体系中存在铰接节点的结构。



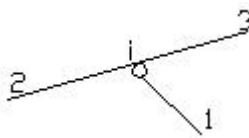
单元释放步骤如下：

(1)选择释放选项；其中对话框内的“小号节点”和“大号节点”分别指单元左右节点号较小的一端和较大的一端；转动释放绕某轴选中时表示绕该轴铰接，一般情况不选择绕1轴释放；对一般结构不选择平动释放，除非构件端部允许相对的滑移。

(3)选择欲释放的单元。

注意：

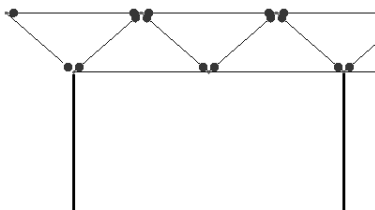
(1) 对于结构体系是平面框架或空间框架的结构，单元与单元之间的节点在不处理时都是刚接的，即该节点可以传递弯矩，当节点是铰接点时，则需要单元释放，使该单元端部相应的力为 0，比如：下图单元 1 的 i 节点端需单元释放；



(2) 可处理为平动释放的一些例子：门式刚架砼柱钢梁，柱子单元不仅绕 3 轴转动释放，而且其中一柱上端沿 2 轴平动释放梁对柱较大的水平推力；

(3)在半刚性连接节点中，需要输入转动刚度值。

(4)通过网架快捷建模得到的网架默认结构体系为空间桁架（即杆件间铰接），如果输入了下部结构，比如支承柱，那么需要在结构体系中修改为空间框架，然后把网架杆件做单元释放（绕 2、3 轴）：



5.7 支座边界

5.7.1 一般支座边界

包含刚性约束、弹性约束、支座位移三种选择。

注意：

(1) X、Y、Z 表示沿 X、Y、Z 向的平动约束；

Rx、Ry、Rz 表示绕 X、Y、Z 向的转动约束；

(2) 支座边界是限制结构运动的装置。实际结构中的节点约束一般都位于支座处。另外，对于平面结构，在用有限元计算时，需要阻止平面外的位移，可以灵活运用支座边界约束节点面外自由度；

(3) 一般梁梁节点，梁柱节点是刚节点，但不是节点约束，不能设支座边界。因为该刚节点是有节点位移的，该点的运动并没有被限制。

5.7.2 斜边界

斜边界提供三个约束方向矢量：{x, y, z}。

注意：

(1) 节点边界中任意节点可以是混合边界，即某些方向是一般或特殊边界中的一类，而另一些方向是其他类，但同一节点同一方向不可以同时重复是几类边界；

(2) 斜边界方向：如 $X=1, Y=Z=0$ ，表示斜边界是整体坐标系下 X 方向， $X=1, Y=1, Z=0$ 表示斜边界在 XY 平面内 45° 方向，其余类同。斜边界不能与其他类边界混合。

5.7.3 正向约束和负向约束

用于单向受力支座，比如 X 正向约束表示支座约束点只对上部结构提供整体坐标 X 正方向的约束。

5.7.4 定义支座边界的步骤：

1、定义约束

(1) 首先在对话框内选择约束情况，若为弹性约束、支座位移或斜边界还应填入相应数值；

(2) 按“选择受约束节点”按钮，对话框自动隐去，用鼠标在屏幕上选择所要定义的节点，按鼠标右键表示选择结束，对话框自动弹出，可按步骤（1）、（2）继续定义节点约束或查询节点约束；

(3) 按“关闭”按钮表示结束。

2、查询约束

(1) 按“查询节点约束”按钮，对话框自动隐去，用鼠标在屏幕上选择所要查询的节点，按鼠标右键表示选择结束，对话框自动弹出，对话框内显示所查询节点所受的节点约束情况。接下来可继续定义节点约束或查询节点约束；

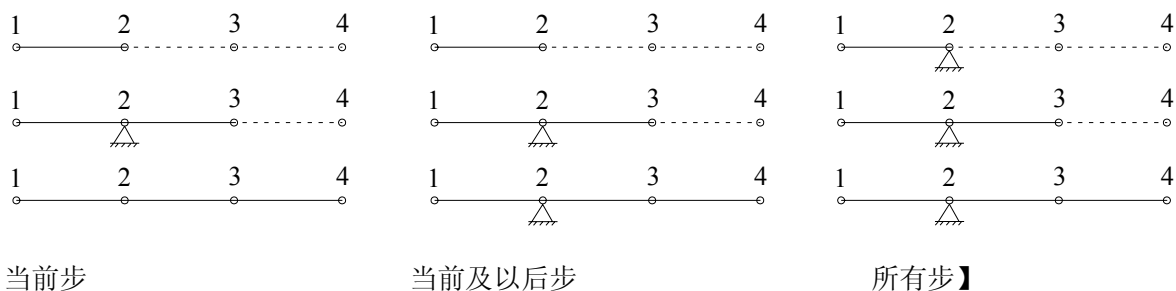
(2) 按“关闭”按钮表示结束。

5.7.5 定义范围解释

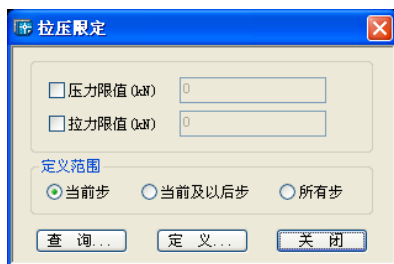
定义范围中，当前步表示只定义当前步的节点约束，已定义的其他各施工步的节点约束保持不变；当前及以后步表示定义大于等于当前步的各施工步的节点约束，当前步以前的各施工步的节点约束保持不变；所有步表示定义已存在的所有步的节点约束。



例：如上图，假设有 3 个施工步，实线表示相应步的单元，当前步为第 2 步。现定义节点 2 支座约束，下图为选择不同定义范围后的支座约束情况。



5.8 拉压限定



定义结构中的只拉单元、只压单元来定义构件的受力特性，只拉单元仅承受拉力，只压单元仅承受压力；当压力限值为 0 时，表示单元为只拉单元，当拉力限值为 0 时，表示单元为只压单元。

用户可以同时定义压力限值和拉力限值。

5.9 施加节点荷载

按此命令后弹出如下对话框：



1、施加荷载

选中将要往节点上施加的荷载列表，按“施加荷载”按钮，选取要施加荷载的节点后按右键表示选择结束即可；

2、删除节点上所选荷载

在荷载列表框内选中将要从节点上去除的荷载列表，按“删除节点上所选荷载”按钮，选取节点后按右键表示选择结束即可，这时若选择的节点原来被施加了选中的荷载，选择完后这些荷载将被从节点上去除掉；

3、查询节点荷载

按了该按钮后选择一个节点，按右键表示选择结束后，该节点上所施加的荷载在列表内以深色条表示。

5.10 施加单元荷载

按此命令后弹出如下对话框：



1、往单元上施加荷载

选中将要往单元上施加的荷载列表，按“施加荷载”按钮，选取要施加荷载的单元后按右键表示选择结束即可；

2、删除单元上所选荷载

在荷载列表框内选中将要从单元上去除的荷载列表，按“删除单元上所选荷载”按钮，选取单元后按右键表示选择结束即可，这时若选择的单元原来被施加了选中的荷载，选择完后这些荷

载将被从单元上去除掉；

3、查询单元荷载

按了该按钮后选择一个单元，按右键表示选择结束后，该单元上所施加的荷载在列表内以深色条表示。

5.11 施加杆件导荷载



1、选择受荷范围

选择杆件来确定导荷载的范围；

2、删除受荷范围

通过选择杆件来删除部分受荷范围；

3、选择受力单元（节点）

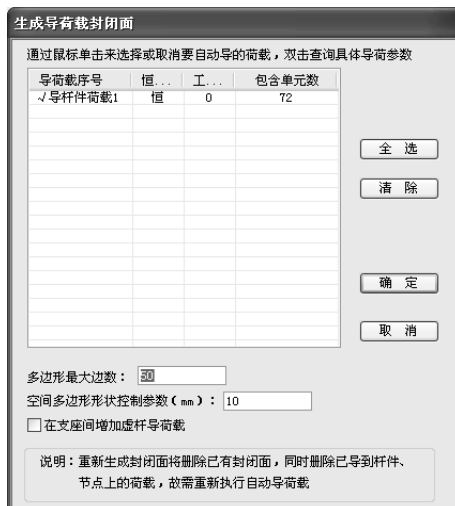
当导荷载方式为单向导到杆件或节点时，用于选择具体受力的单元或节点；

4、删除受力单元（节点）

当导荷载方式为单向导到杆件或节点时，用于删除具体受力的单元或节点。

5.12 生成导荷载封闭面

导荷载是将由杆件或者虚杆围成的封闭区域的面荷载按照一定原则分配到杆件或节点上成为单元荷载或节点荷载，因此封闭面的自动生成是分配荷载的前提；弹出的对话框如下：

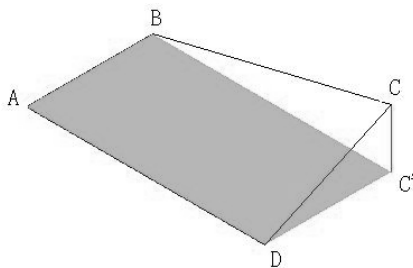


在列表框内用鼠标单击来选择要导的荷载，被选中的导荷载序号前用打勾表示，双击某一导荷载可以查询或修改该导荷载参数。

参数说明：

多边形最大边数：导荷载时软件会自动找封闭区域，该参数用于控制封闭区域多边形的最大边数，这里的边数是指形成封闭区域的杆件数。当形成封闭区域的杆件数小于等于“多边形最大边数”时对该区域进行导荷载，否则不对该区域导荷载。

空间多边形形状控制参数：理论上，导荷载只能在平面多边形上进行，当多边形为空间多边形时，软件通过该参数来控制是否把空间多边形近似为平面多边形来导荷。其具体意义如下图：



ABCD 为空间多边形（四点不共面），其中 ABD 为 AB、AD 所确定的平面，C' 为点 C 在 ABD 平面上的投影，若 CC' 长度若小于或等于“空间多边形形状控制参数”，则对 ABCD 导荷载，否则不对 ABCD 导荷载，空间多边形形状控制参数影响导荷载速度，其值越大，导荷载速度越慢。

在支座间添加虚杆：支座处往往杆件不能围成封闭区域，需要添加虚杆进行导荷载。

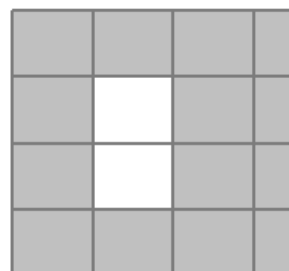
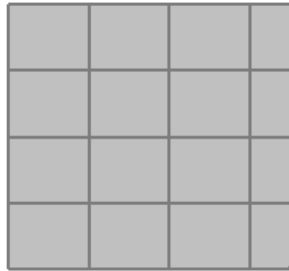
注意：

1) 封闭面生成后会显示在屏幕中，可以使用 shade 命令进行观察以确定自动导荷载所依据的封闭面就是实际的受荷面，避免黑箱操作；在显示查询中按荷载序号显示导荷载中可以选择

显示导荷载面，使用取消附加信息显示可以取消该面的显示；

2) 如果先前导过荷载, 那么使用生成封闭面命令后将自动删除以前的封闭面和已经导过的荷载, 因此使用生成封闭面后需要使用自动导荷载菜单;

2) 显示了封闭面后, 可以使用鼠标选中后用 DELETE 删除若干面, 即开洞, 然后重新进行自动导荷载, 这样得到的导荷载值就是开洞后的荷载分布情况, 如下图。



5.13 自动导荷载

将输入的杆件导荷载导到杆件或节点上。

在输入了杆件导荷载导荷载后，必须使用本命令才能把导荷载参数中的面荷载值转化为节点荷载或单元荷载。

按了该命令后，弹出如下对话框：



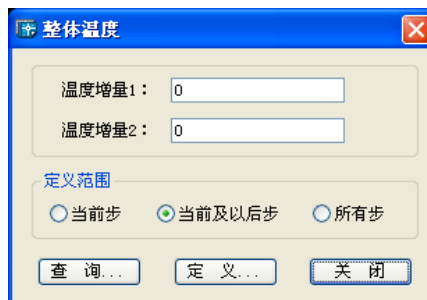
在列表框内用鼠标单击来选择要导的荷载，被选中的导荷载序号前用打勾表示，双击某一导荷载可以查询或修改该导荷载参数。

注意：

自动导荷载时将删除已经导过的同项荷载，因此多次自动导荷载不会导致荷载重复施加。

生成导荷载封闭面和自动导荷载命令只对当前施工步有效。

5.14 施加整体温度



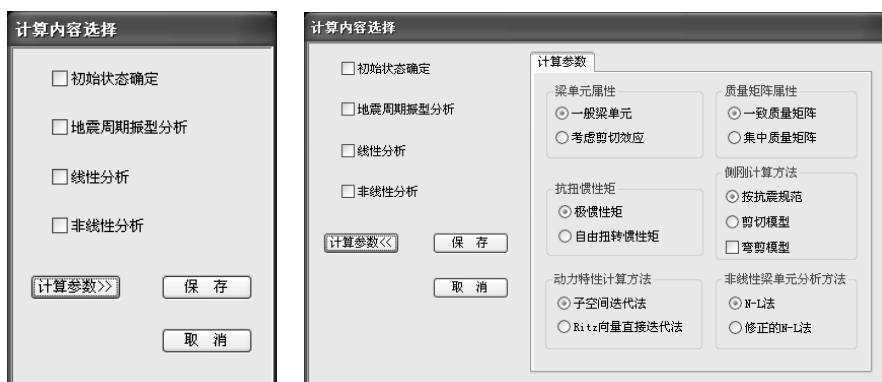
定义、查询各施工步构件的温度荷载

5.15 定义计算步数

定义各施工步步的计算步数。



5.16 计算参数选择



计算参数：

包括一般计算参数、非线性初始态参数、非线性荷载态参数三类；其中非线性初始态参数、非线性荷载态参数具体见非线性说明手册；

梁单元属性：

分一般梁单元与考虑剪切效应梁单元两种；

抗扭惯性矩：

软件可以采用两种抗扭惯性矩，极惯性矩（张大伦、李宗镭主编，《材料力学》，上海：同济大学出版社，1989；）或自由扭转惯性矩（李明昭、周竞欧编著，《薄壁杆结构计算》，北京：高等教育出版社，1992）；

动力特性计算方法：提供子空间迭代法和 Ritz 向量法（爱德华·L·威尔逊著，《结构静力与动力分析》，北京：中国建筑工业出版社 2006）；

质量矩阵属性：高层模块采用集中质量矩阵；

侧刚计算方法：用于高层模块；

5.17 施工过程跟踪计算

输入需计算的施工阶段。



5.18 跟踪结果显示

5.17.1 节点位移显示



在对话框上选择显示的施工步号或按左右箭头改变步号，屏幕显示相应步的节点位移。

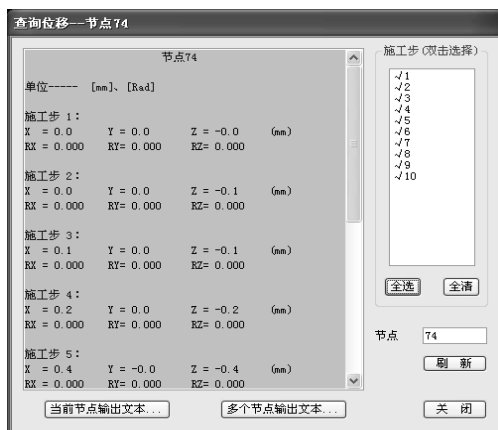
5.18.2 单元内力显示



在对话框上选择显示的施工步号或按左右箭头改变步号，屏幕显示相应步的杆件内力。

5.19 跟踪结果查询

5.19.1 节点位移查询



首先选择节点（若直接按右键，弹出对话框要求输入节点号，用户这时可以通过输入节点号来查询），按鼠标右键结束选择后弹出对话框，填入相应数值后按确定按钮视图出现查询结果。

说明：

按“当前节点输出文本...”按钮，将查询结果输出到文本中并弹出相应文本；按“多个节点输出文本...”按钮，对话框隐去，选择一个或多个节点，点右键后弹出文本结果。

5.19.2 单元内力查询



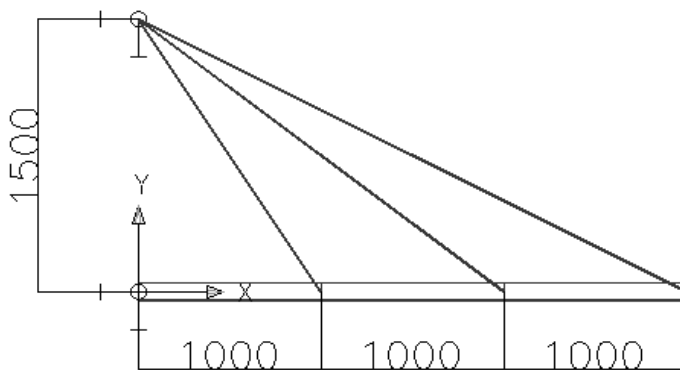
首先选择单元（若直接按右键，弹出对话框要求输入单元号，用户这时可以通过输入单元号来查询），按鼠标右键结束选择后弹出对话框，填入相应数值后按确定按钮视图出现查询结果。

说明：

按“当前单元输出文本...”按钮，将查询结果输出到文本中并弹出相应文本；按“多个单元输出文本...”按钮，对话框隐去，选择一个或多个单元，点右键后弹出文本结果。

例题：

1)、建立结构模型，在 XOZ 面内建立如下模型。三段梁采用工字钢 $100 \times 50 \times 3 \times 4$ ，三段拉索采用 $\Phi 10$ ；材性 Q235；梁端刚接柱脚，索端铰接支座；索两端单元转动释放。



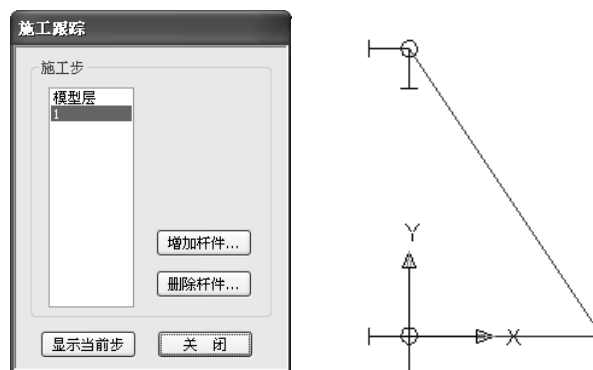
2)、【菜单开关/帮助】→【施工过程跟踪菜单】

3)、【施工过程跟踪】→【施工步编辑】→【增加施工步】→【关闭】

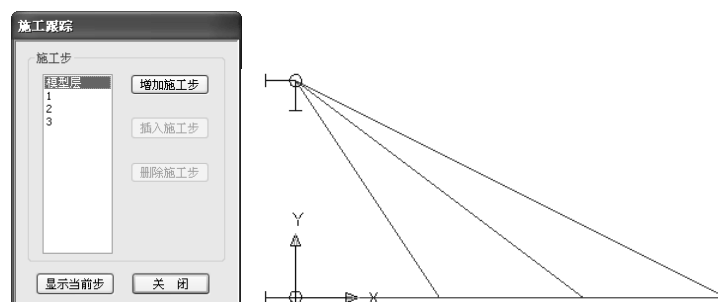
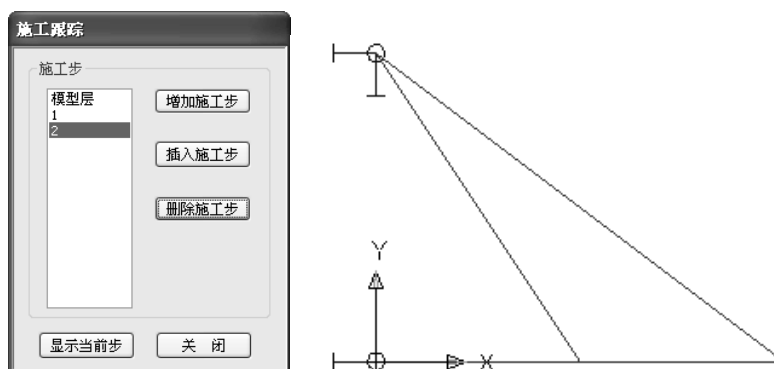
第 1 施工步中还没有结构，这里需要在模型层中定义施工步。



4)、【施工过程跟踪】→【定义施工步构件】→【增加杆件】→选择构件→【显示当前步】→【关闭】。

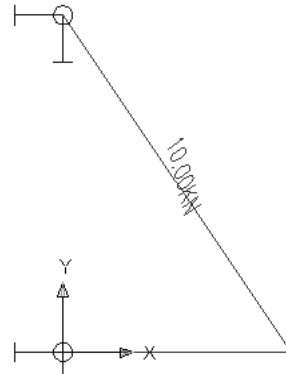
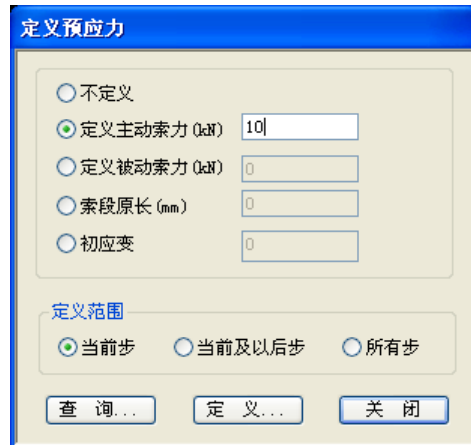


重复 (3)、(4) 步，分别定义施工步 2，施工步 3

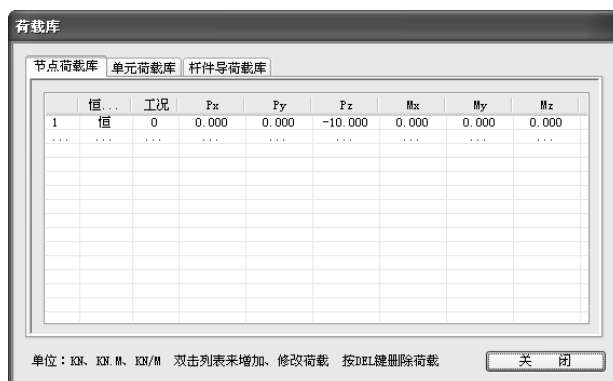


5)、左上角【阶段 1】→【施工过程跟踪】→【定义预应力】→【定义主动索】→10→【当前步】
→【定义】→选拉索 1→【关闭】

【显示查询】→【构件信息显示】→【√单元预应力】→【确定】

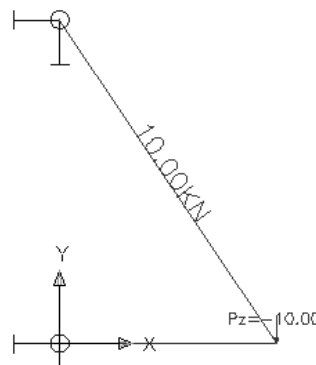


6)、【荷载】→【荷载库】→【节点荷载库】→双击...行→恒载 $P_z = -10$ →【确定】→【关闭】



7)、【施工过程跟踪】→【施加节点荷载】→选中荷载记录→【当前步及以后步】→【施加荷载】
→【关闭】

【显示查询】→【显示节点荷载】→【欲显示工况号】→0→【确定】

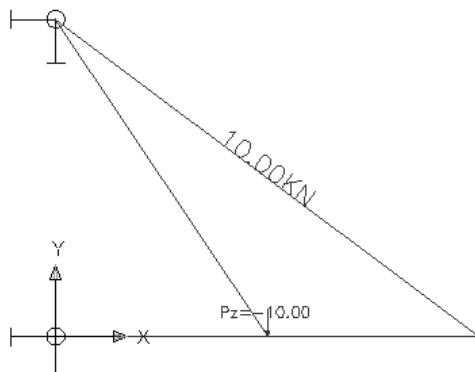
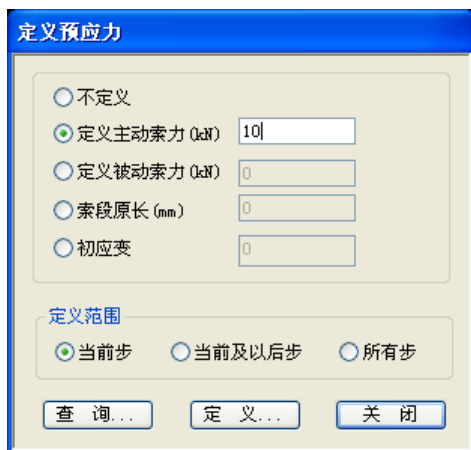


8)、图标栏左上角【阶段 2】

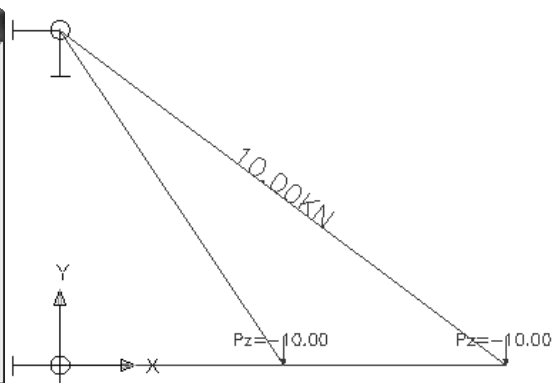
预张力显示消失：因为只定义当前步，只有第 1 施工步定义预张力

荷载显示存在：因为定义了当前及以后步，所有施工步都存在该荷载

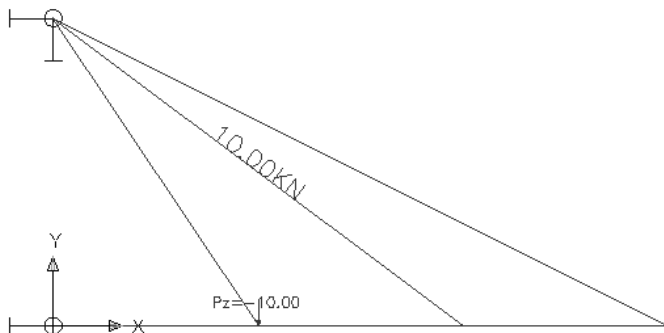
9)、【施工过程跟踪】→【定义预应力】→【定义主动索】→10→【当前步及以后步】→【定义】→选拉索 2→【关闭】



10)、【施工过程跟踪】→【施加节点荷载】→选中荷载记录→【当前步】→【施加荷载】→【关闭】



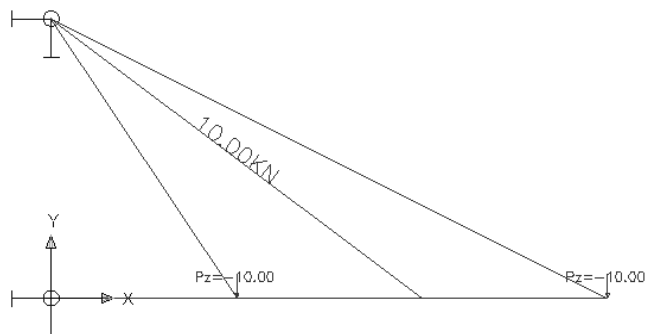
11)、左上角【阶段 3】



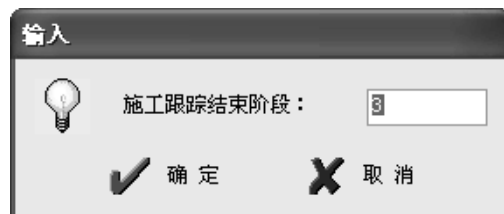
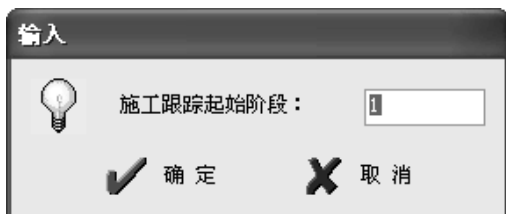
定义了当前及以后步的预张力仍显示；

定义了当前的荷载不显示

12)、【施工过程跟踪】→【施加节点荷载】→选中荷载记录→【当前步】→【施加荷载】→【关闭】

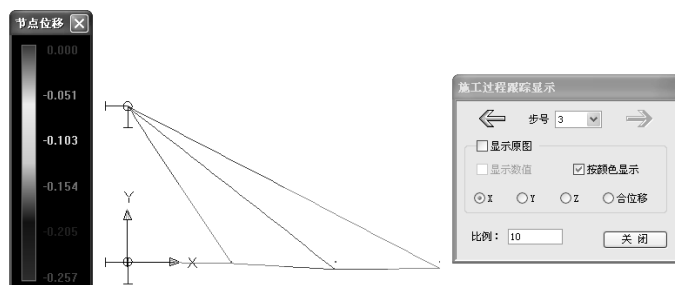


13)、【施工过程跟踪】→【施工过程跟踪计算…】



```
命令: sg
带宽优化完毕!时间 0
INIT err=5.78668e-001
工况=1 step=1 item=1 err=4.09985e-002
工况=1 step=1 item=2 err=1.61199e-005
带宽优化完毕!时间 0
INIT err=1.33620e+000
工况=2 step=1 item=1 err=1.00145e+000
```

14)、【施工过程跟踪】→【跟踪结果显示】→【节点位移显示】



第六章 工程实例例题

下面将介绍几类典型的使用非线性分析的结构，请启动 3D3S 软件，将菜单切换到非线性分析系统（普通版）菜单。

6.1 例题一 张弦桁架

张弦梁尺寸如图 1：

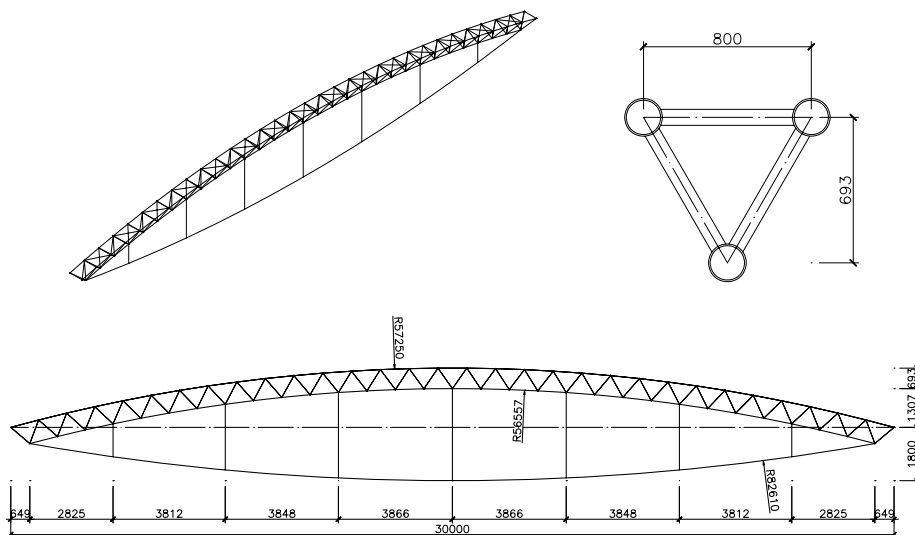
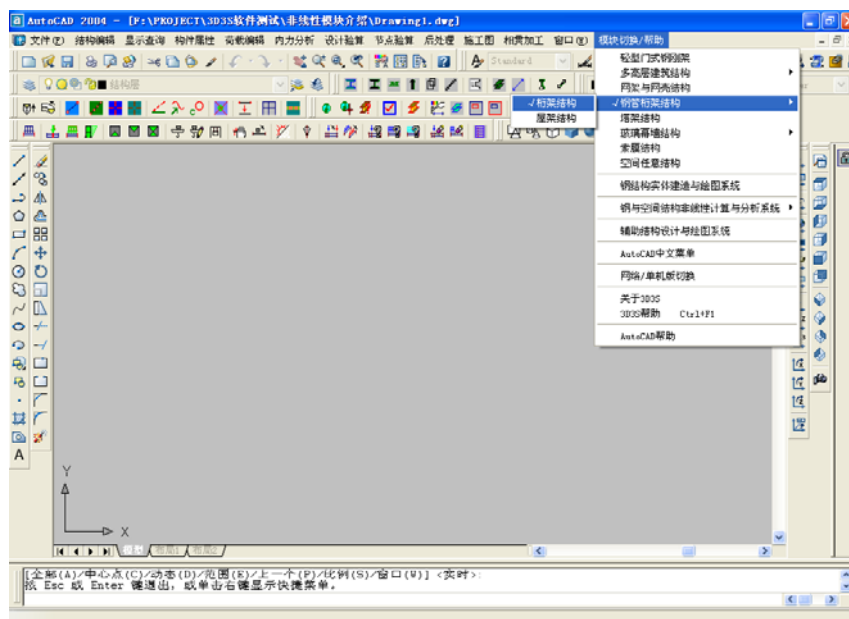


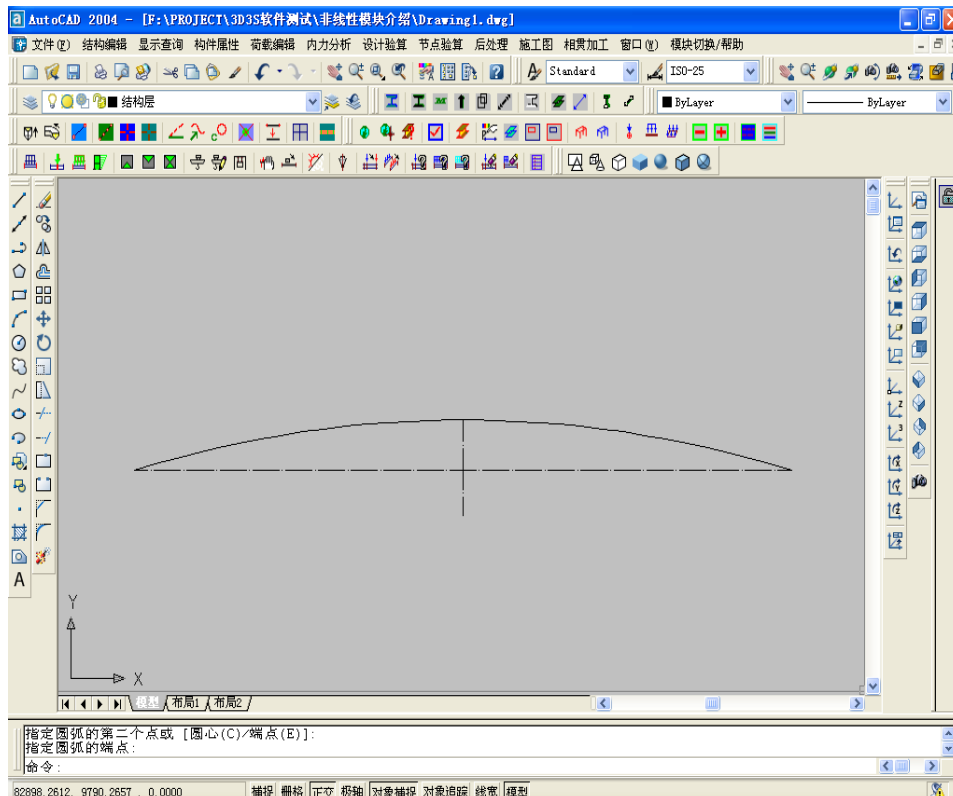
图 1 张弦梁

步骤一：按图 1 建立力学模型，桁架弦杆 $\phi 180 \times 8$ ，腹杆 $\phi 76 \times 4$ ，撑杆 $\phi 114 \times 5$ ，索 $\phi 30$ ；

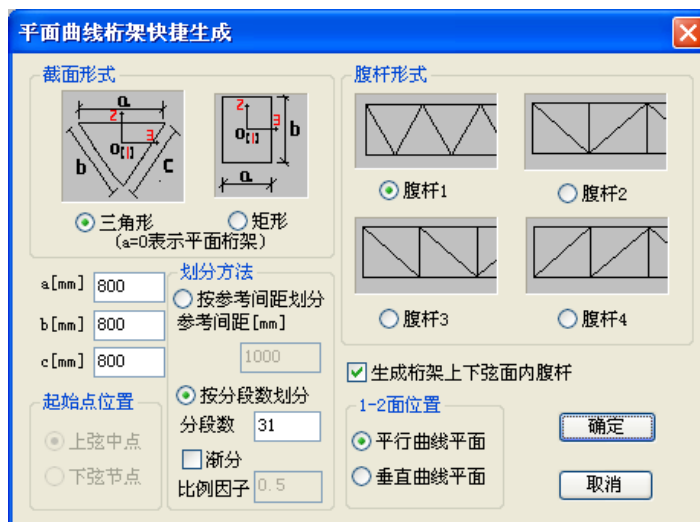
(1) 启动 3D3S，选择【模块切换/帮助】→【钢管桁架结构】→【桁架结构】菜单，程序切换到桁架菜单模块；

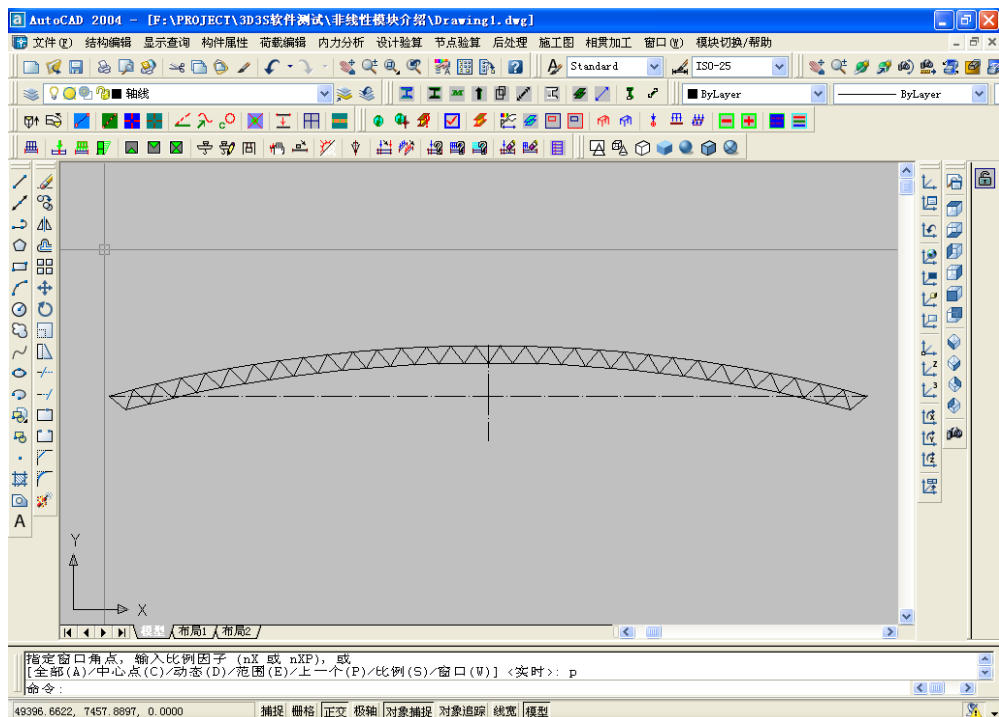


(2) 点击 CAD 主视图按钮，在屏幕上绘制如图示十字线，横线长 30000mm，上部竖线 2000mm，下部竖线 1800mm，用 AutoCAD 的三点绘圆弧命令绘制圆弧：

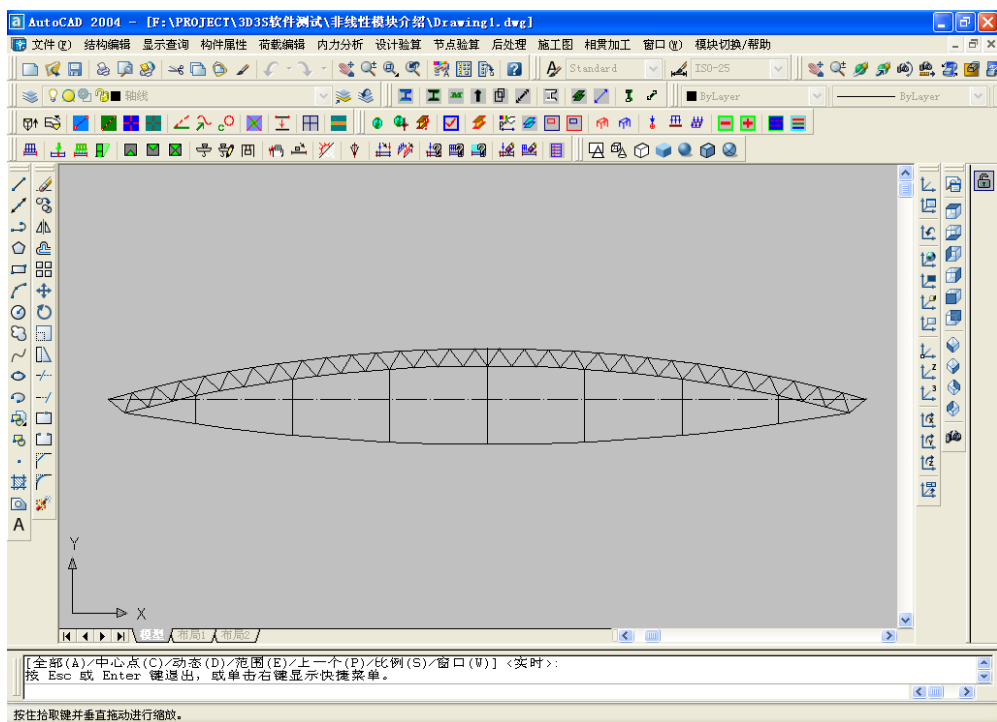


(3) 选择【结构编辑】→【桁架】→【由单线段生成桁架】→【平面曲线桁架...】，按程序提示选择曲线，选择一点确定下弦所在方向，弹出菜单【平面曲线桁架快捷生成】菜单，按输入图示数据，点击【确定】按钮退出，程序自动生成倒三角桁架：

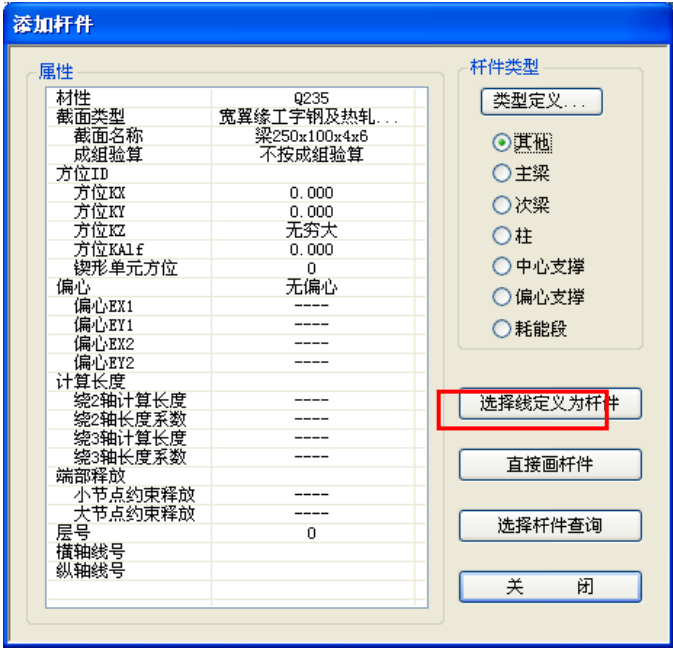




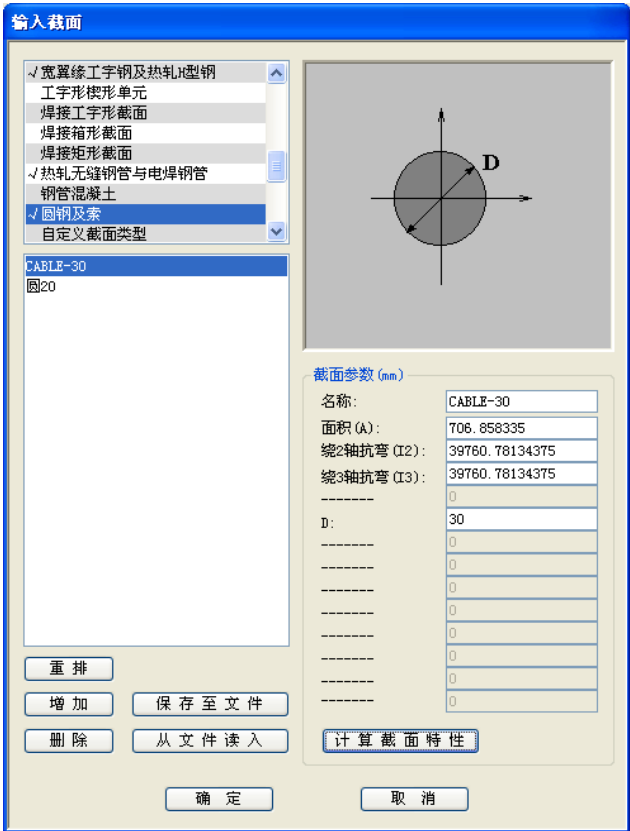
(4) 用 AutoCAD 的三点绘圆弧命令绘制圆弧，并按图示绘制竖线与圆弧相交；. 删除圆弧，用【直线】命令把各点连起来；



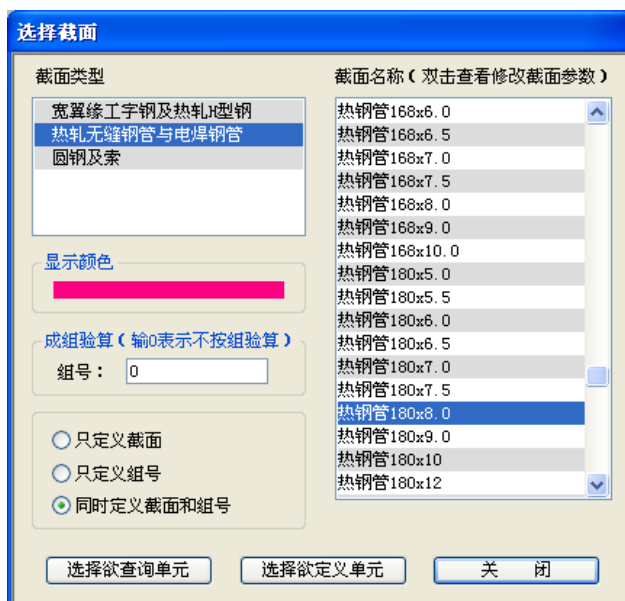
(5) 选择【结构编辑】→【添加杆件...】命令，弹出【添加杆件】菜单，按默认参数点选【选择线定义为杆件】按钮，选择（4）条绘制的直线，把直线变成 3D3S 杆件；



(6) 选择【构件属性】→【建立截面库...】命令，弹出【输入截面】菜单：双击勾选所需截面类型。在【名称】栏里输入截面名称，输入截面尺寸，点击【计算截面特性】按钮；点击【确定】按钮退出。



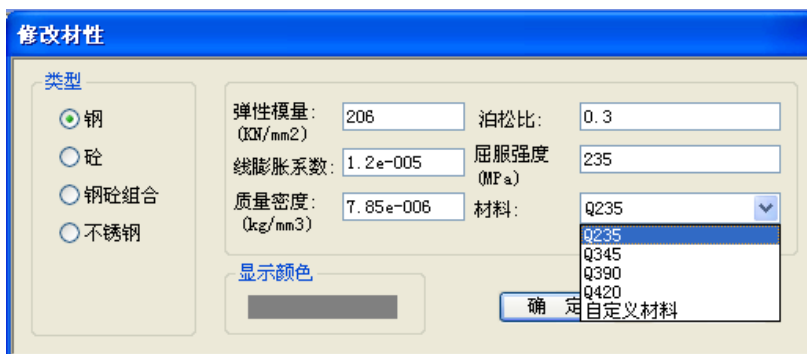
选择【构件属性】→【定义截面】命令，弹出【选择截面】菜单：



选择“热轧无缝钢管与电焊钢”；选择“热钢管 180x8.0”；点选“同时定义截面和组号”选项，点击【选择欲定义单元】按钮进入选择单元界面，选择弦杆（可结合程序的【按层显示】）

将腹杆定义为钢管 $\Phi 76 \times 4$ 截面、撑杆定义为钢管 $\Phi 114 \times 5$ 截面、索定义为 $\Phi 30$ 截面：

(7) 选择【构件属性】→【定义材性...】命令，弹出【定义材性】菜单：双击“...”，弹出修改材性菜单；程序默认材性为 Q235，双击该栏，弹出修改材性菜，程序默认材性类型为“钢”；程序默认材性类型为“钢”；在【材料】栏下拉菜单里选择自定义材料，按图示输入索材料性质，点击【确定】按钮。

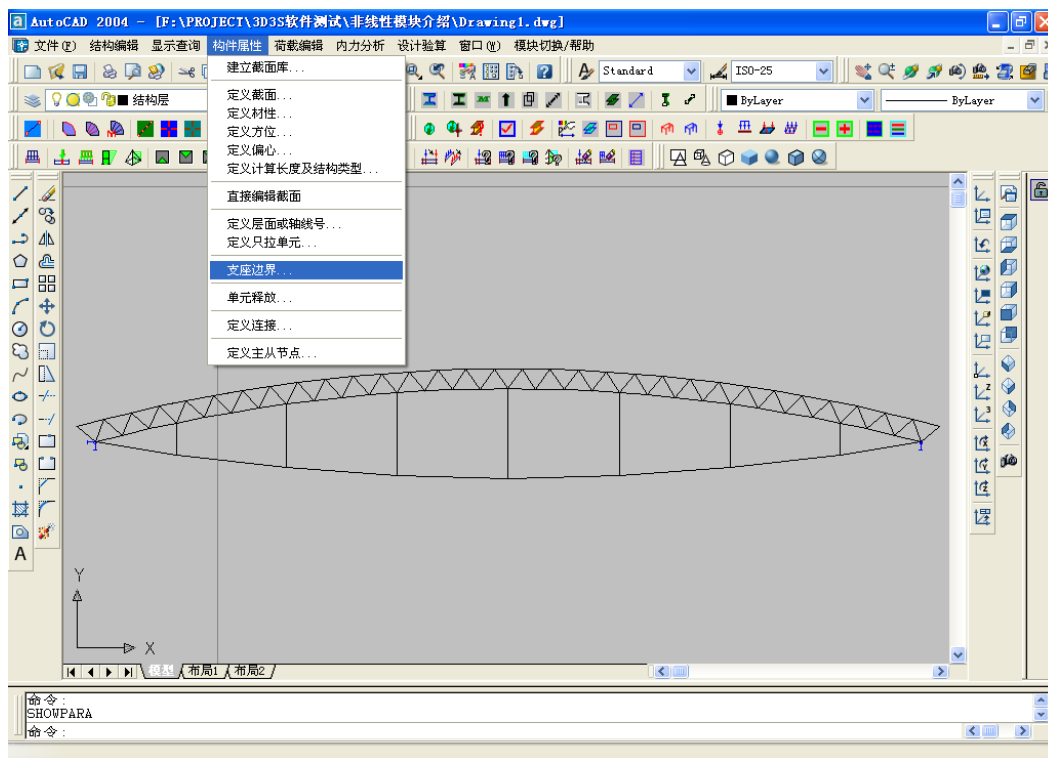


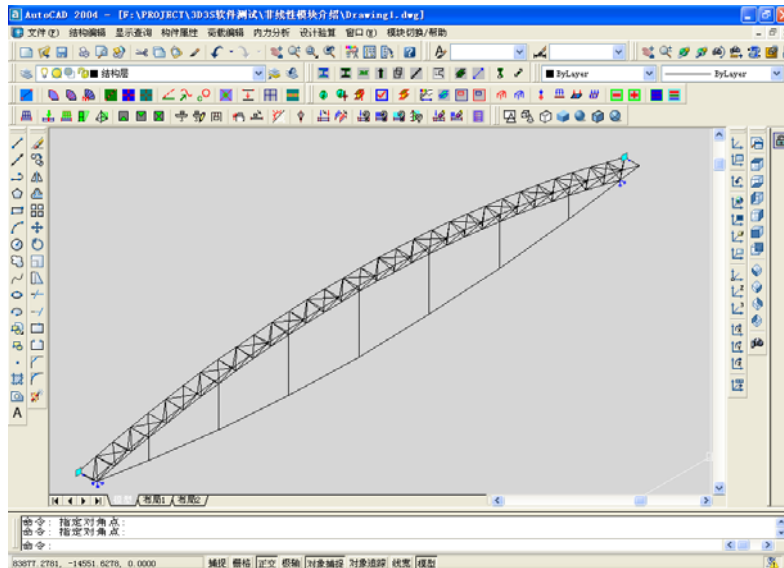


定义杆件材料性质，上下弦杆和腹杆定义为 Q345，索定义为“自定义材料”；

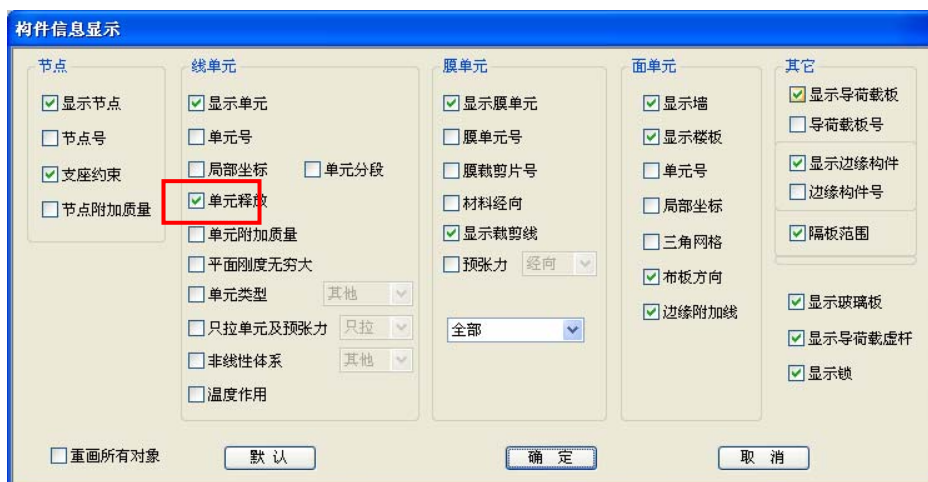


(8) 选择【构件属性】→【支座边界...】，弹出【节点边界】菜单，选择图示节点定义支座边界，左节点为三向铰接约束，右节点约束 y 向和 z 向释放。





(9) 选择【显示查询】→【构件信息显示...】，勾选线单元选项里的“单元释放”选项，显示结构杆件的单元释放属性；



(10) 选择【构件属性】→【单元释放...】，弹出【单元铰接】菜单，程序辅助建的桁架模型默认弦杆两端刚接、腹杆两端是铰接，将桁架杆件两端都为刚接，撑杆和索两端铰接；



步骤 2: 施加模型荷载

结构作用有屋面恒荷载和活荷载，恒荷载作用在上弦平面，上弦最外侧四个节点作用 $F_z=1.47\text{kN}$ ，其余节点作用 $F_z=2.94\text{kN}$ （相当于檩间距 12m，恒荷载 0.5 kN/m^2 ），活荷载与恒荷载数值和作用位置相同；

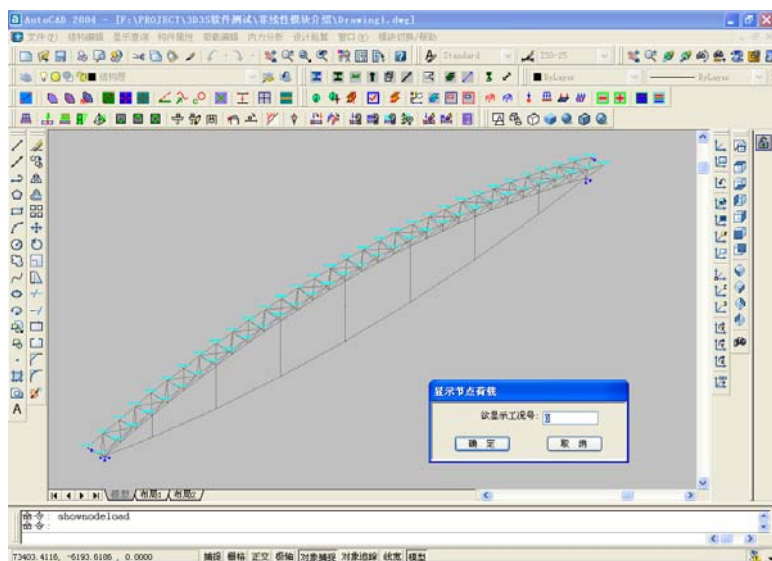
(1) 选择【荷载编辑】→【施加节点荷载...】，弹出【施加节点荷载】菜单；双击“...”，弹出【添加节点荷载】菜单；2. 点选恒载；输入荷载数值：击【确定】退回【添加节点荷载】菜单；



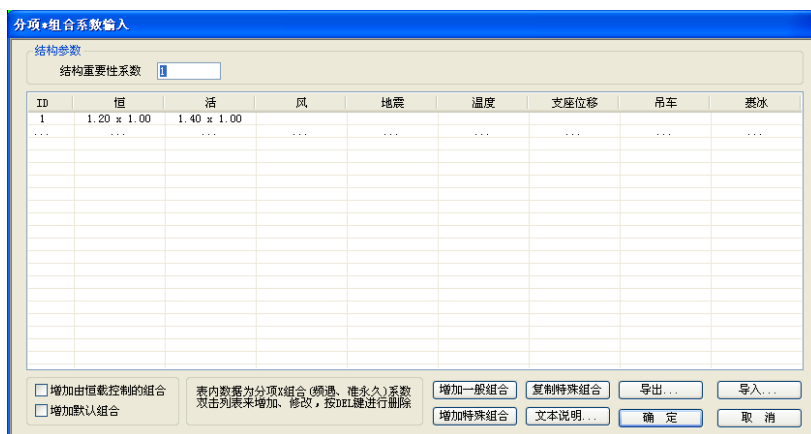
同(1)步骤，添加其它节点荷载，并将荷载施加到节点上；



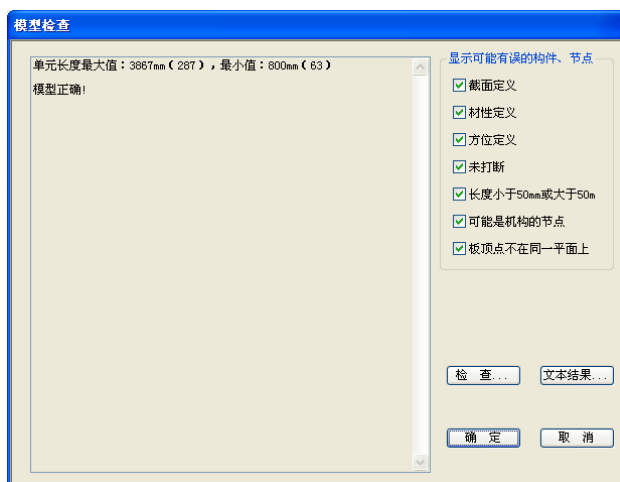
可以通过点击【显示节点荷载】按钮来检查荷载输入的情况；



(2) 选择【荷载编辑】→【组合...】，弹出【分项×组合系数输入】菜单，按图示例输入组合；



(3) 选择【模块切换/帮助】→【钢与空间结构非线性计算与分项系统】→【普通版】，程序切换到非线性计算模块；
选择【内力分析】→【模型检查】；

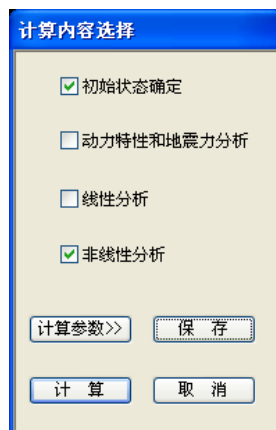


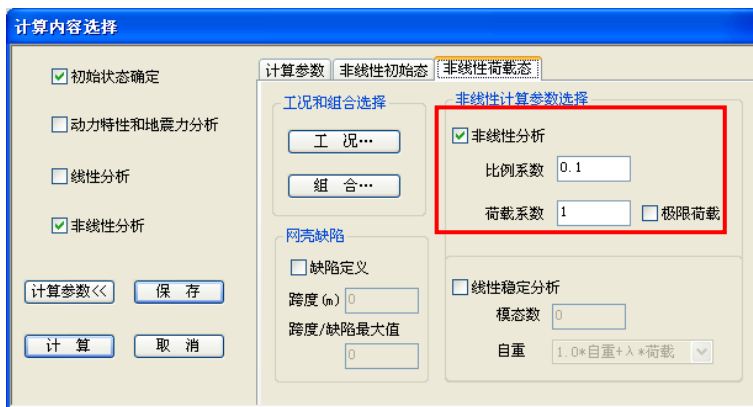
步骤 3: 选择【内力分析】→【带宽优化】，进行带宽优化；

(1) 选择【内力分析】→【计算内容选择及执行...】，弹出计算内容选择菜单；勾选“初始状态确定”和“非线性分析”；点击【计算参数<<】按钮，右侧弹出计算参数的菜单，选择【非线性初始态】选项卡；选择相应选项，选项内容参阅相关技术手册；

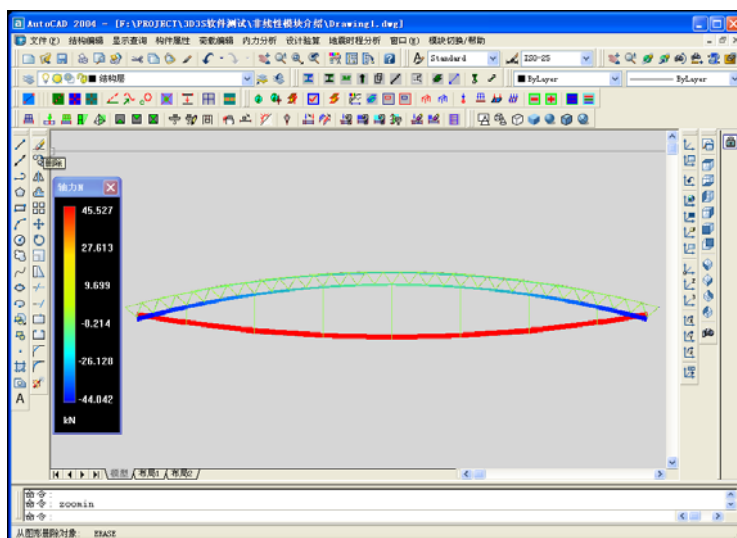
(2) 点选“定义被动索”；输入数值 50；击【定义...】按钮，进入选择界面，选择索单元，选择【非线性初始态】选项卡，切换下图菜单；

点击【工况...】按钮，弹出【工况选择】菜单；选择点击【组合...】按钮，弹出【组合选择】菜单；选择勾选【非线性分析】按钮，按图填入参数；

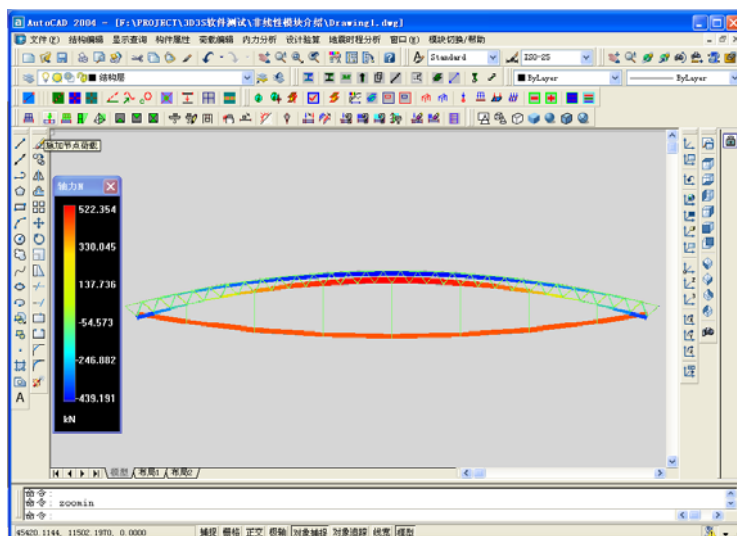




(4) 选择【内力分析】→【初始态计算结果显示查询】里的查询显示功能查询显示非线性的计算结果，如内力显示如下图；

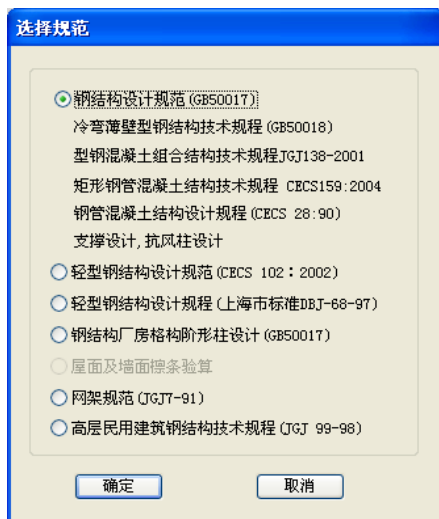


(5) 选择【内力分析】→【非线性分析结果显示查询】里的查询显示功能查询显示非线性分析的计算结果，如内力显示如下图；

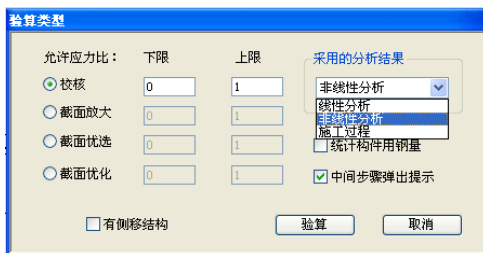


步骤 4：设计验算；

(1) 选择【设计验算】→【选择规范...】，进入选择界面，选择要验算的杆件，弹出【选择规范】菜单，点选【钢结构设计规范（GB50017）】选项，采用普通钢结构规范进行验算；



选择【设计验算】→【单元验算...】，进入选择界面，选择要验算的杆件，弹出【验算类型】菜单；点选【校核】按钮；输入下限和上限值；. 选择“非线性分析”；点击【验算】按钮进行单元验算。



(2) 选择【设计验算】菜单下的一些功能菜单查看验算结果；

步骤 5：选择【模块切换/帮助】→【钢管桁架结构】→【桁架结构】菜单进行桁架出图的操作。

6.2 例题二 拉线塔

拉线塔尺寸如图 1，塔高 30m，拉线点离中心点距离 20m，塔身是等截面的正三角形，边长 600mm。

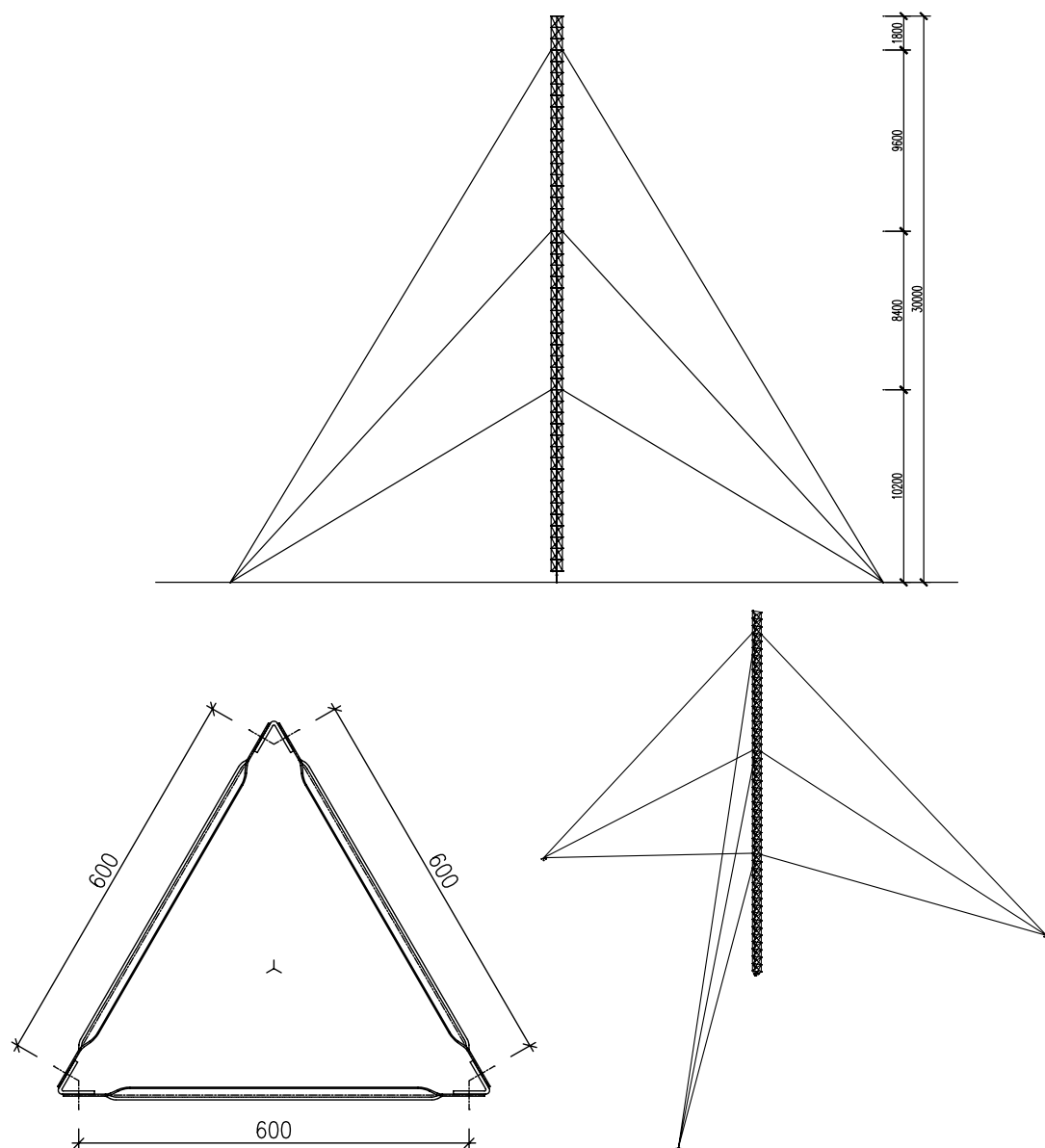
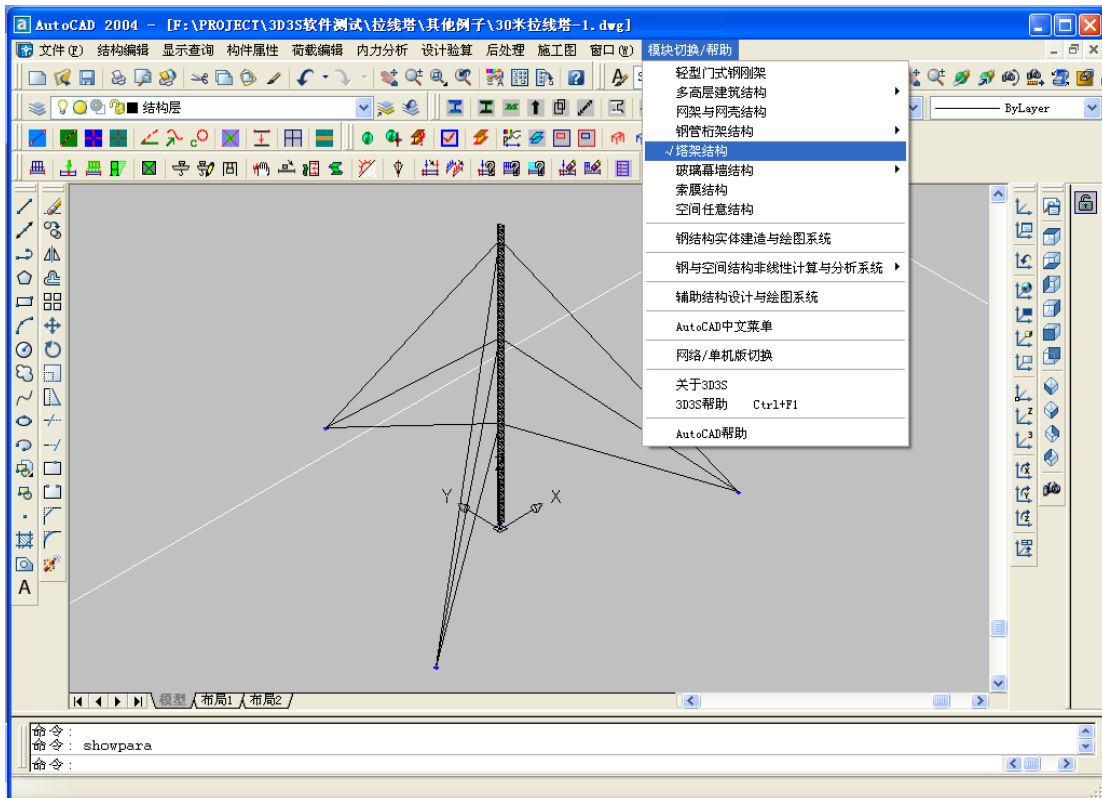


图 1 拉线塔尺寸

步骤一：按图 1 建立力学模型，塔身弦杆 L56×5，腹杆 L25×3，拉索 $\phi 20$ ；

(1) 启动 3D3S，选择【模块切换/帮助】→【塔架结构】菜单，程序切换到塔架结构菜单模块；

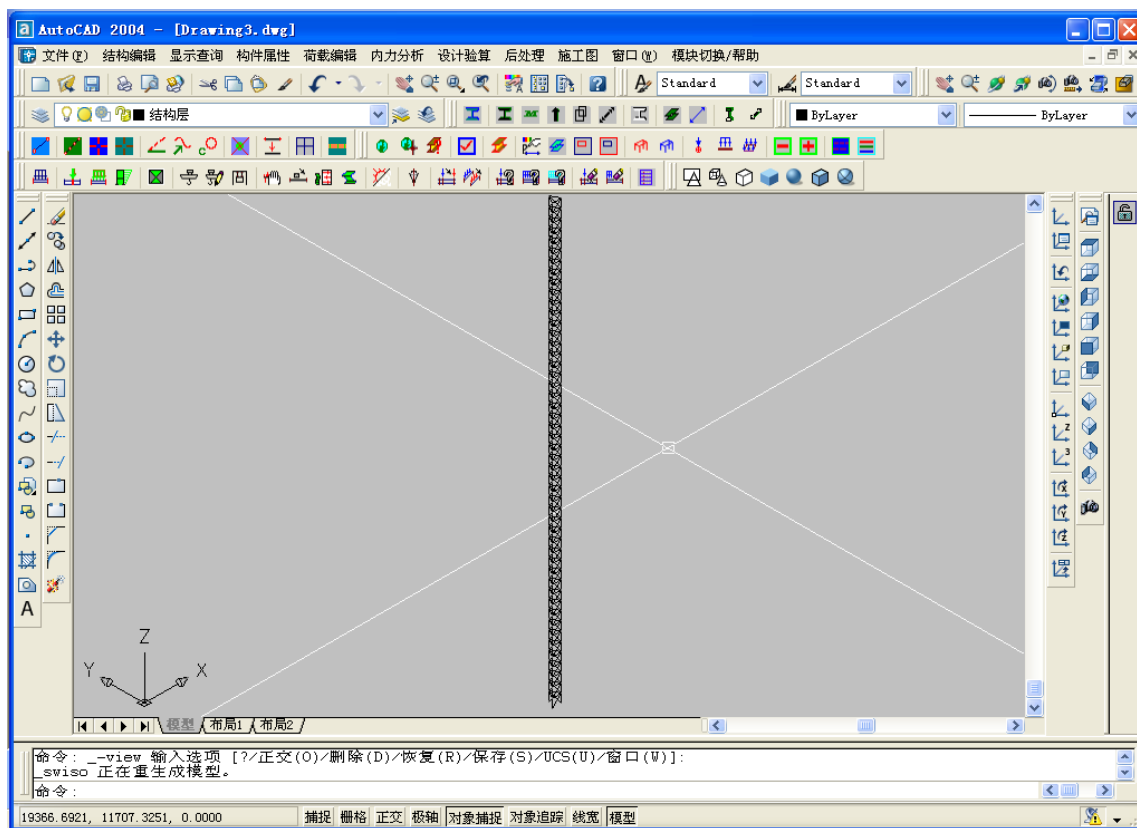


选择【结构编辑】→【塔架生成向导】，弹出【塔架生成向导】菜单；点击【增加】按钮；按图示输入相关参数，各参数意义见软件说明书；点选【正三角形】选项；4. 点击【确定】按钮；

塔架生成向导

段	属性	平截面形状
1	段顶标高 (M): 30 段顶宽度 b (M): 0.6 段形式: 1 层数: 49 段顶 h/b: 0 ☐ 横隔 ☐ 横隔形 0 基底标高 (M): 0.6 基底宽度 b (M): 0.6 基底 h/b: 0 截面类型 ☒ 角钢 ☐ 钢管 ☐ 柱为钢管, 其余角钢 增加 删除 确定 取消	☐ 正方形 ☐ 长方形 ☐ 正六边形 ☒ 正三角形 ☐ 正八边形

步骤二：用 CAD【窗口缩放】命令把放大塔底，选择【结构编辑】→【添加杆件...】，弹出【添加杆件】按钮，按图示添加塔底构件；按图示选择材性和截面型号，也可以在后来通过修改材性和修改截面功能对材性和截面进点击【直接画杆件】按钮，按图示



添加杆件

属性	
材性	Q235
截面类型	普通槽钢
截面名称	普通槽10
成组验算	不按成组验算
方位ID	
方位KX	0.000
方位KY	0.000
方位KZ	无穷大
方位KALF	0.000
楔形单元方位	0
偏心	无偏心
偏心EX1	----
偏心EY1	----
偏心EX2	----
偏心EY2	----
计算长度	
绕2轴计算长度	----
绕2轴长度系数	----
绕3轴计算长度	----
绕3轴长度系数	----
端部释放	
小节点约束释放	----
大节点约束释放	----
层号	0
横轴线号	
纵轴线号	

杆件类型

类型定义...

☒ 其他

☐ 主梁

☐ 次梁

☐ 柱

☐ 中心支撑

☐ 偏心支撑

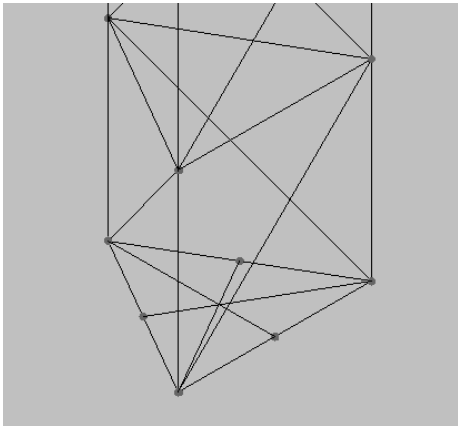
☐ 耗能段

选择线定义为杆件

直接画杆件

选择杆件查询

关 闭



步骤三：在拉索的位置画直线，通过【添加杆件】命令把直线定义成直径为 20 的拉索。并对拉索的两端进行单元释放，包括 1 轴，2 轴，3 轴。定义完成后查询杆件的属性得到如下对话框。

添加杆件

属性

材性

Q235

截面类型

圆钢及索

截面名称

C20

成组验算

不按成组验算

方位ID

方位KX

0.000

方位KY

0.000

方位KZ

无穷大

方位KAlf

0.000

楔形单元方位

0

偏心

无偏心

偏心EX1

偏心EY1

偏心EX2

偏心EY2

计算长度

绕2轴计算长度

绕2轴长度系数

绕3轴计算长度

绕3轴长度系数

端部释放

小节点约束释放

R1 R2 R3

大节点约束释放

R1 R2 R3

层号

结构层

横轴线号

纵轴线号

杆件类型

类型定义...

☒ 其他

☐ 主梁

☐ 次梁

☐ 柱

☐ 中心支撑

☐ 偏心支撑

☐ 耗能段

选择线定义为杆件

直接画杆件

选择杆件查询

关

闭

步骤四：定义支座约束，把拉索支座以及塔架支座设置为铰接

节点边界

边界类型

☒ 一般边界

☐ 斜边界

斜边界方向向量

X=

0

Y=

0

Z=

0

一般边界

X向

刚性约束

Y向

刚性约束

Z向

刚性约束

绕X轴

无约束

绕Y轴

无约束

绕Z轴

无约束

0

0

0

查询节点约束

选择节点定义约束

选线定义节点约束

关

闭

步骤五：对塔架施加杆件导风荷载，因为塔架为镂空结构，所有选择直接作用于杆件的选项，

输入基本风压，根据荷载规范输入风载体型系数，选择地面粗糙度类别，定义作用方向矢量，按下图输入参数。并进行自动导荷载操作。

修改荷载

☐ 双向导到杆件
 ☐ 单向导到杆件
 ☒ 直接作用于杆件
 ☐ 双向导到节点
 ☐ 单向导到节点

☐ 恒
 ☐ 活
 ☒ 固
 ☐ 初始态

工况:
 荷载均布值 (GN/M2):

基本风压标准值 (GN/M2)
☐ 按球面计算体形系数

风载体形系数

地面粗糙度类别: ☒ A ☐ B ☐ C ☐ D
 风压高度变化修正系数 η :

建筑结构类型: ☒ 高耸结构 ☐ 高层建筑

房屋类型: ☒ 钢结构 ☐ 有填充物的房屋钢结构 ☐ 混凝土及砌体结构

风振系数 (手工输入): (输入0表示软件自动计算_但必须先进行地震荷载计算)

☐ 阵风系数 β_{zz}
☐ 考虑裹冰后风荷载增大系数

参考点高度 Z_0 (M): (计算风荷载所用的杆件或节点实际标高为节点Z坐标减去此输入值)

荷载作用方向矢量: X Y

内部参考点坐标 (M):
 X Y Z

确定

取消

分 项 * 组 合 系 数 输 入

结构参数

结构重要性系数

1

ID	恒	活	风	地震	温度	支座位移	吊车	裹冰
1	1.20 X 1.00							
2	1.20 X 1.00		1.40 X 1.0...					
3	1.20 X 1.00		1.40 X 1.0...					
...	...	...	...	...	...	...	...	...

☐ 增加由恒载控制的组合
 ☐ 增加默认组合

表内数据为分项X组合(频遇、准永久)系数
 双击列表来增加、修改，按DEL键进行删除

增加一般组合

复制特殊组合

导出...

导入...

增加特殊组合

文本说明...

确 定

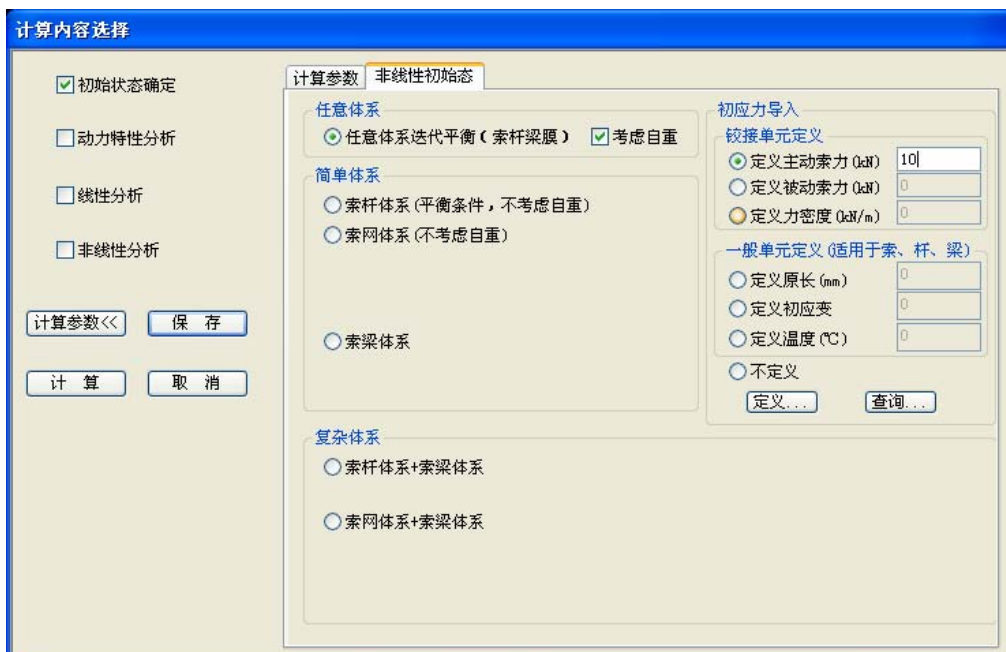
取 消

因为只输入恒载和风载，所以软件把恒、活、风的组合删掉了，因此需要用户用【增加一般组合】命令把恒载和风载的组合加入组合。

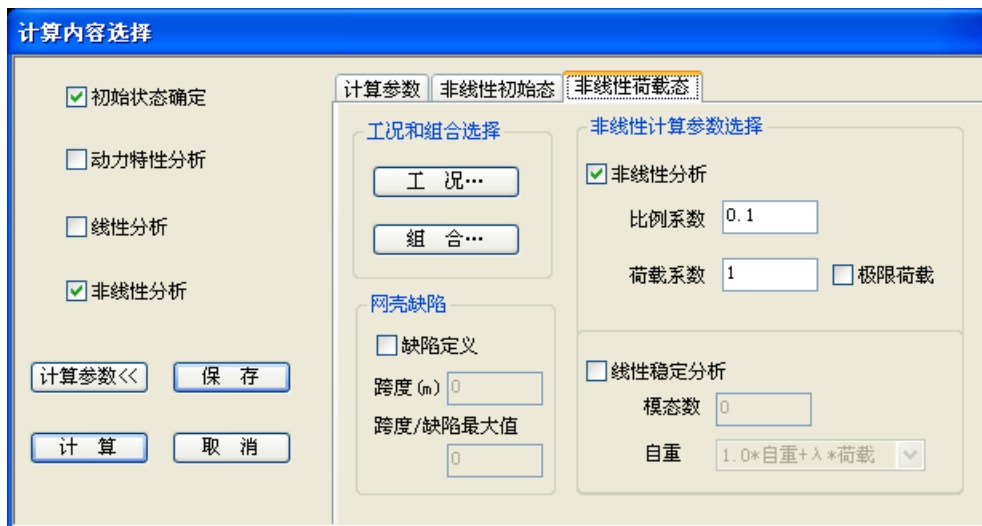
增加组合			
分项*组合 (频遇、准永久)系数			
恒载系数	1.2	×	1
风载系数	1.4	×	1
温度系数	0	×	0
吊车	0	×	0
活载系数	0	×	0
地震系数	0	×	0
支座位移	0	×	0
裹冰荷载	0	×	0

步骤六：定义拉索的预应力，在【内力分析】菜单下面的【计算内容选择及执行】对话框中勾选

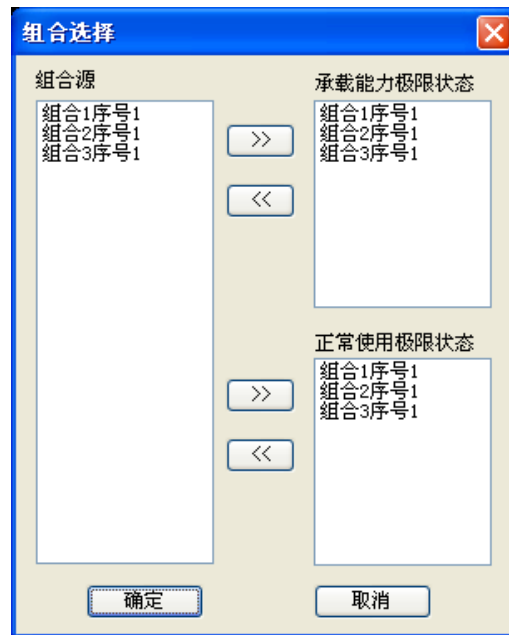
【初始状态确定】选项，点击【计算参数】显示非线性初始态对话框，点选“任意体系迭代平衡”并考虑自重，定义主动索力为 10KN，点击【定义】按钮，选择模型上部 6 根拉索定义为 10KN 的主动索力，下部 3 根拉索定义为 5KN 的主动索力。点击【计算】按钮进项初始态找形。



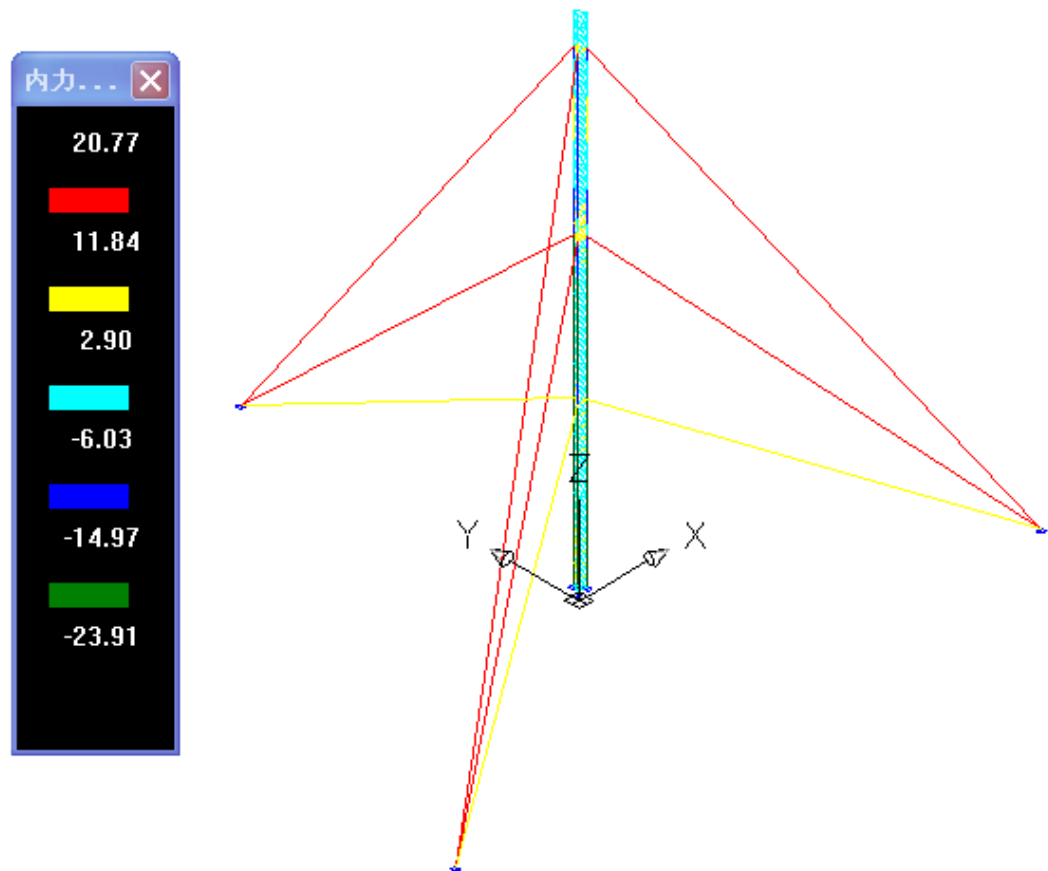
勾选【非线性分析】，点击计算参数进行参数设置，如下图所示，选择【非线性分析】进行非线性计算。



对所选的组合进行非线性分析计算



步骤七：计算完成后，通过【内力分析结果显示和查询】进行非线性分析结果的显示和查询，点击按颜色显示内力最大值，得到如下图所示结果。



查询结果最大位移，得到如下对话框：

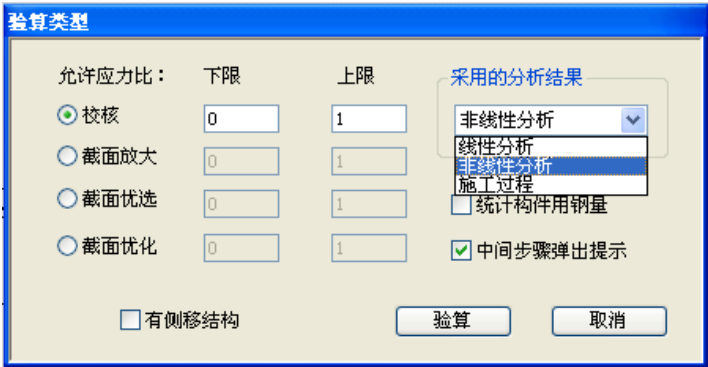


根据高耸规范 3.0.10 第六条的规定：高耸结构在以风为主的荷载标准组合及以地震作用为主的荷载标准组合下的水平位移，不得大于表 3.0.10 的规定。

查得自立塔在以风荷载为主的荷载标准组合下按非线性分析的水平位移限值是 1/50。

而根据此模型最大位移算出来的位移值为 16.249， $16.249/30000=1/1840<1/50$ ，符合规范要求。

步骤八：设计验算，选择规范，选择非线性分析结果进行设计验算。



选择设计验算结果查询功能查询验算结果，根据验算结果进行适当的调整。

步骤九：用户可以选择【模块切换/帮助】→【塔架结构】菜单进行塔架的节点设计以及出图的操作；

6.3 例题三 网架结构考虑初始缺陷

单层球面网壳整体稳定分析

1. 结构参数

单层球面网壳，跨度 60m，矢跨比 $f/L=1/4$ 。

杆件材料：Q235，截面均取圆钢管 $\phi 133.0 \times 4.0$ ，

网壳节点刚接，周边边界点为支座节点，且为固定铰支座。

结构网格形式采用单层凯威特型网壳。

2. 荷载及组合

满跨均布恒载(q)：结构自重(杆件部分)+屋面(0.3 kN/m^2)

半跨均布活载(p)： $p=0.5 \text{ kN/m}^2$

荷载组合：1.0 恒+1.0 活

3. 整体稳定计算内容

1) 结构线性整体稳定分析

列表给出结构线性整体稳定系数，前 20 个稳定因子，前 6 阶失稳模态。

2) 完善结构几何非线性整体稳定分析

给出荷载-位移曲线，确定稳定系数。

3) 带缺陷结构大位移几何非线性整体稳定分析

给出荷载-位移曲线，缺陷取值参考规范，确定稳定系数。

4) 根据规范确定结构的整体稳定临界承载力系数。

4. 讨论

1) 对以上每项分析结果可以变换模型参数数值（例如矢跨比），通论不同类型稳定性的特点，如各种稳定性系数大小变化、稳定性态变化及其比较；

3) 可以分别用一个单元模拟一根杆和两个单元模拟一根杆进行分析，将两种结果进行比较，分析是否有区别，通论原因。

6.3.1、工程概况

6.3.1.1 网壳类型

网壳结构采用单层凯威特型网壳。跨度 60m，矢跨比 $f/L=1/4$ 。在网壳的径向部分 12 等分。网壳的最大单元长度为 3194mm，最小长度为：1309mm。根据《网壳结构技术规程》（JGJ61-2003）规定，当网壳跨度为 50~100m 时，网格尺寸应为 2.5~3m。本工程的网格划分基本满足要求。如图 1-1、1-2 所示：

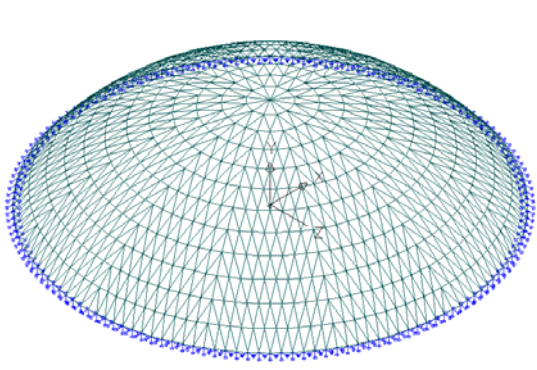


图 1-1 网壳 3D 模型

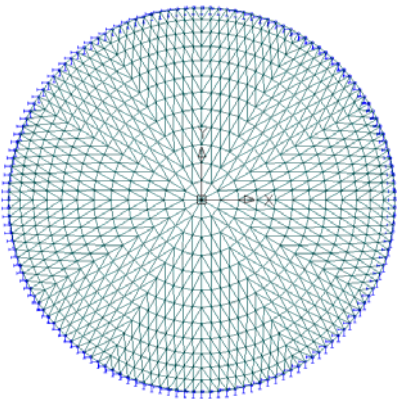


图 1-2 网壳俯视图

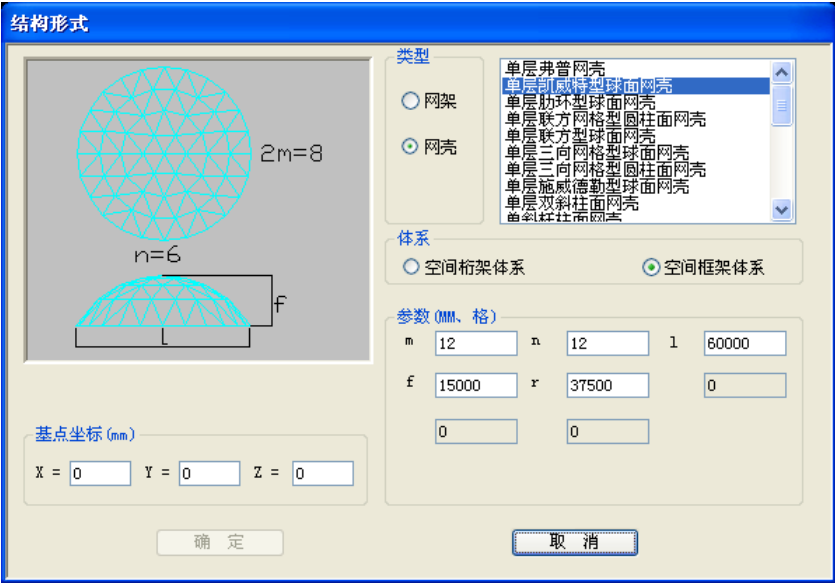


图 1-3 网壳结构快捷建模参数

6.3.1.2 结构参数

6.3.1.2.1 截面形式

网壳的截面都采用圆钢管 $\phi 133.0 \times 4.0$ ，材性为 Q235。

6.3.1.2.2 约束形式

网壳节点刚接，周边边界为支座节点，且为固定铰支座。如图 1-4、1-5 所示。

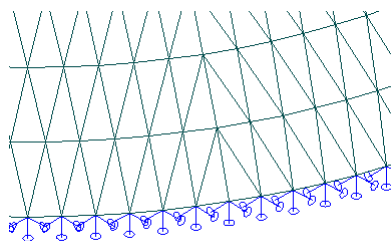


图 1-4 网壳支座约束

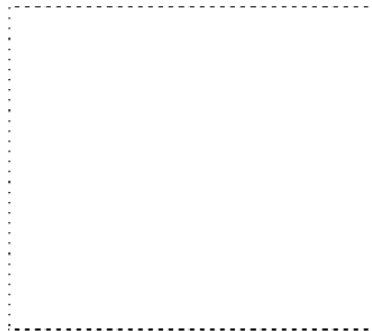


图 1-5 网壳连接节点

6.3.1.2.3 荷载类型

满跨均布恒载(q): 结构自重(杆件部分)+屋面(0.3kN/m^2)。如图 1-6 所示。

半跨均布活载(p): $p = 0.5\text{ kN/m}^2$ 。如图 1-7 所示。

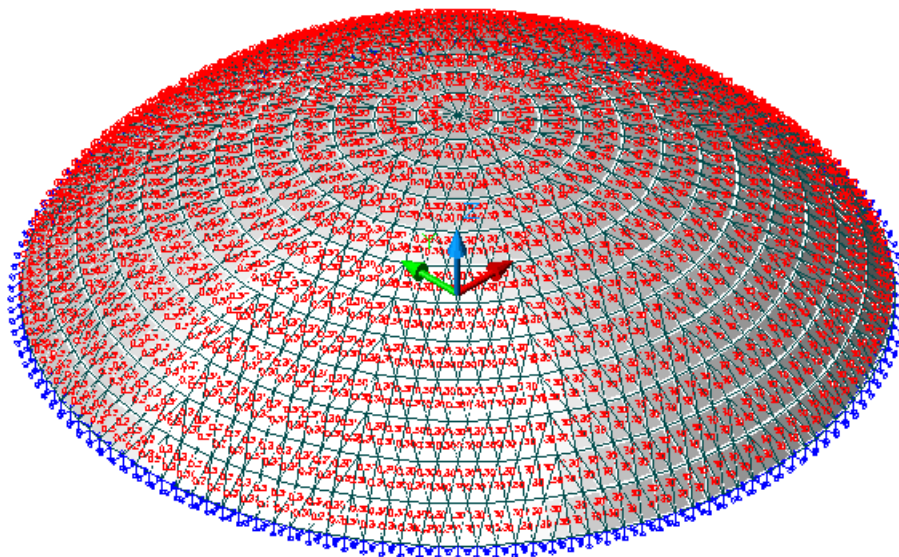


图 1-6 满跨恒载

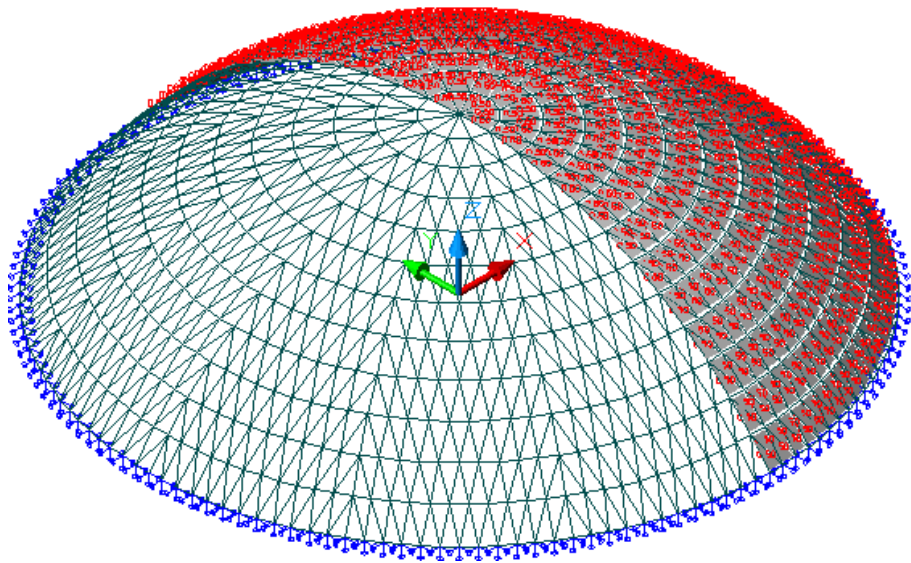


图 1-5 半跨活载

6.3.1.2.4 荷载组合

采用：1.0 恒+1.0 活 组合进行分析

6.3.2、3D3S 计算分析

6.3.2.1 结构线性整体稳定分析

通过线性整体稳定分析可求得线性稳定系数 λ 。最小线性稳定系数 $\lambda_{\min}$ 值的确定是进行非线性全过程跟踪分析的基础。线性整体稳定分析没有考虑结构的任何初始缺陷，但可以预测出极限承载力的上限，了解线性整体稳定的模态。本工程通过分析可以得到网壳结构的线性整体稳定因子，表1给出了网壳结构的前20个稳定因子。

表 1 网壳结构的前 20 个稳定因子

组 合	SET	TIME/FREQ	组合	SET	TIME/FREQ
1	1	23.651	1	11	29.48
1	2	24.09	1	12	30.245
1	3	24.804	1	13	30.519
1	4	24.915	1	14	30.716
1	5	26.568	1	15	31.416

1	6	26.685	1	16	31.609
1	7	27.263	1	17	31.708
1	8	27.893	1	18	31.948
1	9	28.647	1	19	32.369
1	10	28.788	1	20	33.204

从表 1 可以看出，网壳的线性整体稳定系数为：23.651。并且从上表中，也可以看出各阶线性整体稳定系数相差并不是太大。

根据 3D3S 的线性整体稳定性分析可以知道，该网壳结构的前 6 阶失稳模态如图 2-1~2-6 所示：

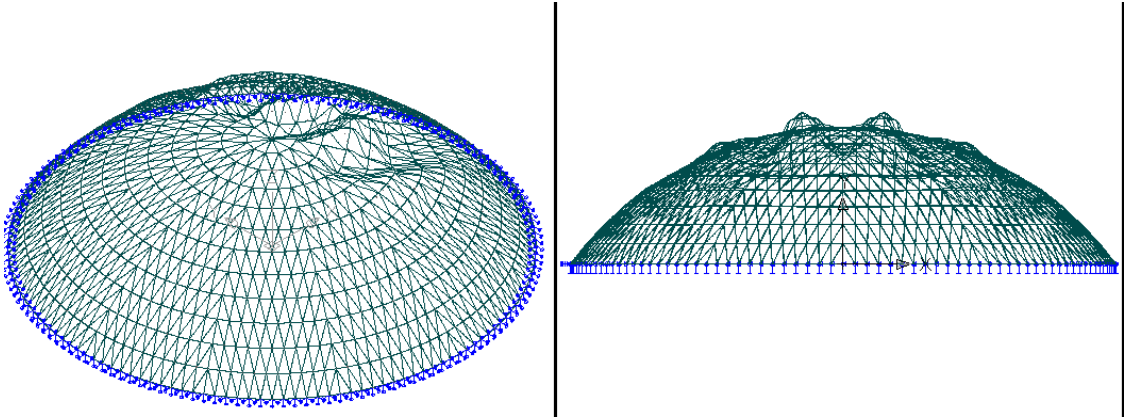


图 2-1 第 1 阶失稳模态

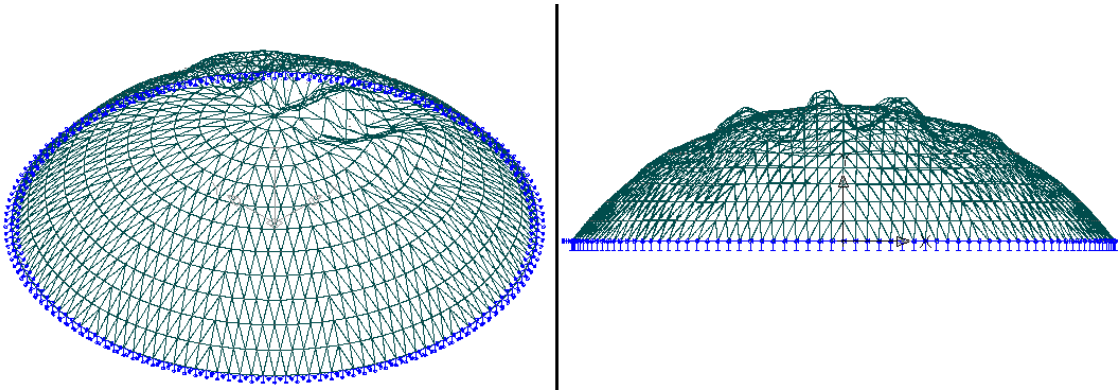


图 2-2 第 2 阶失稳模态

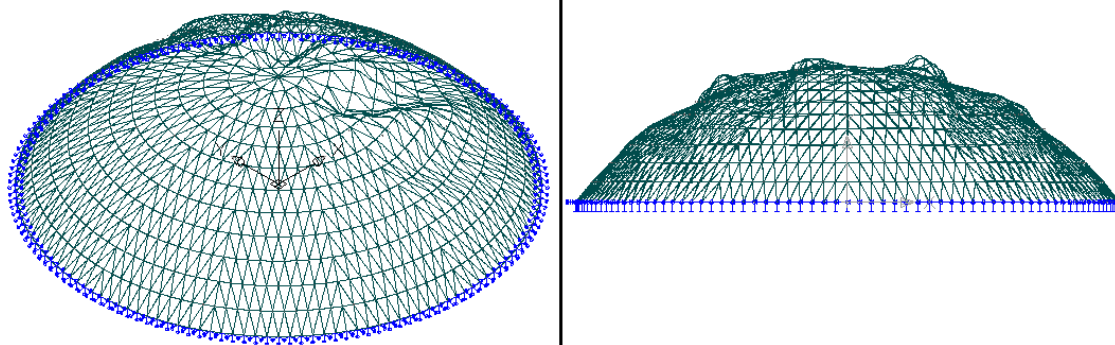


图 2-3 第 3 阶失稳模态

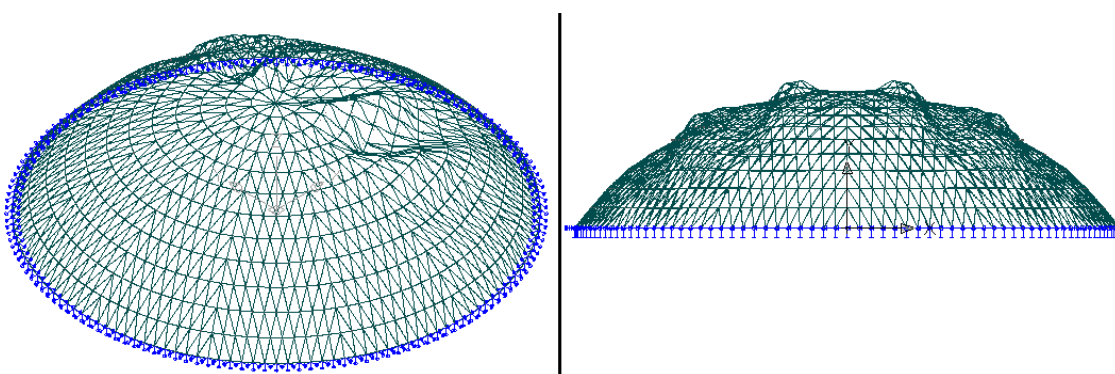


图 2-4 第 4 阶失稳模态

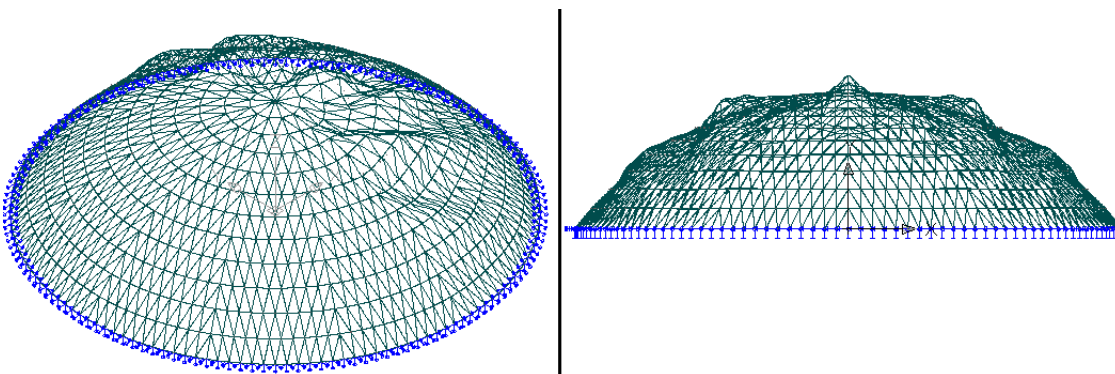


图 2-5 第 5 阶失稳模态

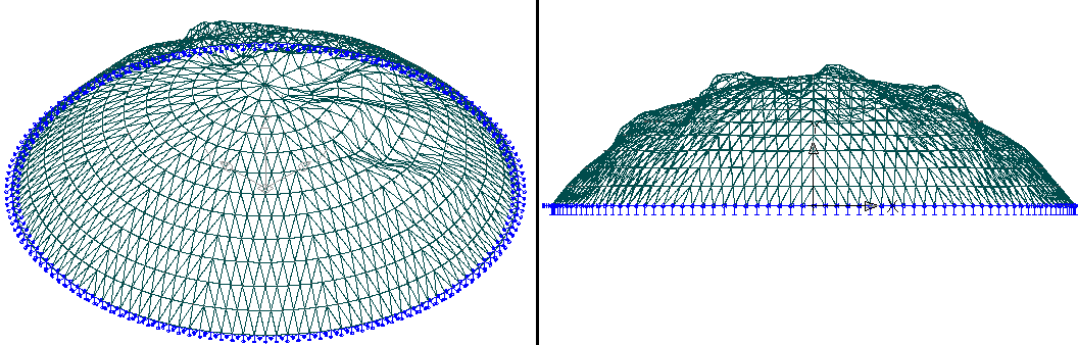


图 2-6 第 6 阶失稳模态

从图 2-1~2-6 可以清楚的看出，由于结构在不对称荷载作用下，因此前六阶失稳模态都是在网壳的有半跨活载的区域发生局部失稳，这六阶失稳位置和模态也很接近，所以其稳定系数就很接近。

6.3.2.2 完善结构几何非线性整体稳定分析

通过 3D3S 中大位移非线性进行分析计算，得出如图 2-7 所示的完善结构几何非线性分析的荷载级数可以达到 18 倍设计荷载。

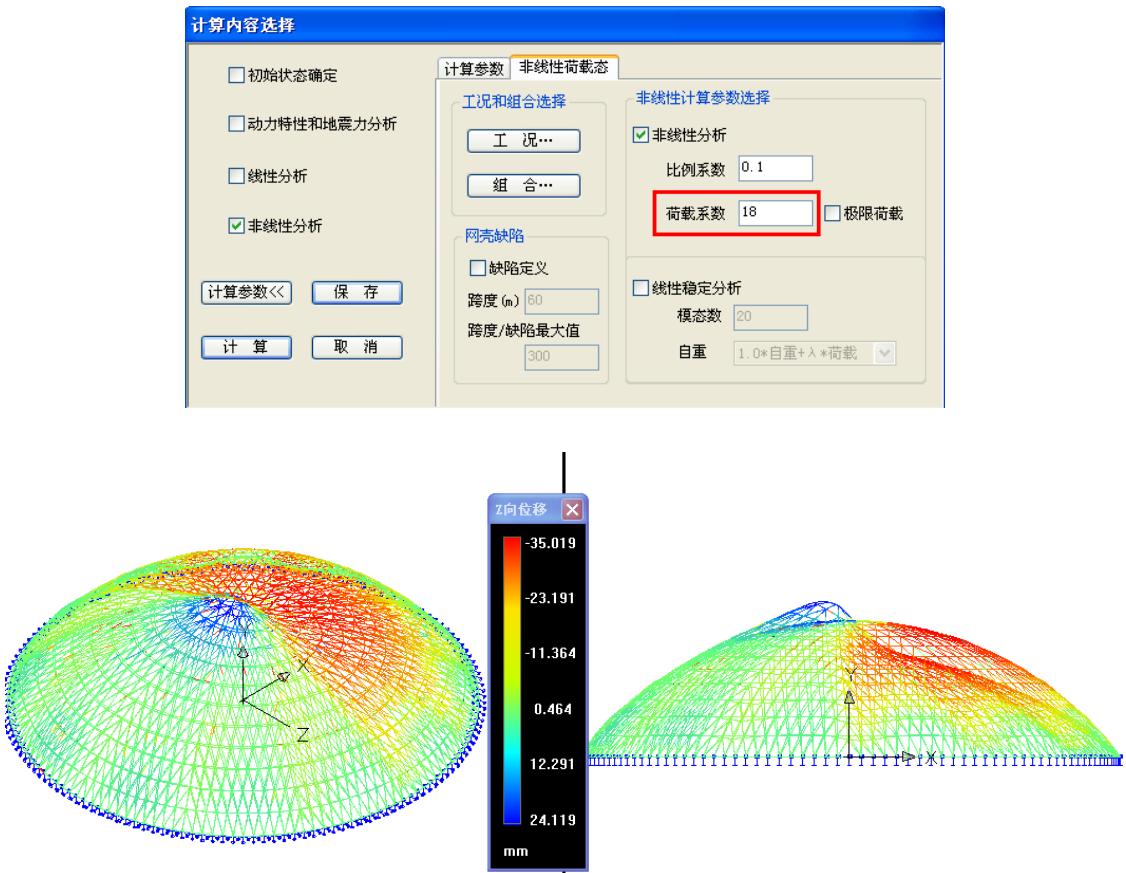


图 2-7 完善结构几何非线性分析的位移云图

由图 2-7 可以看出，网壳结构的整体稳定系数为 18。由于在运算过程中，考虑了网壳的几何非线性，几何刚度矩阵是不断变化的。因此，得出考虑几何非线性的完善结构的极限承载力要低于结构的一阶模态对应的极限承载力。

6.3.2.3 带缺陷结构大位移几何非线性整体稳定分析

本工程根据非线性有限元理论，采用一致模态法对结构的整体稳定性进行了研究。一致模态法认为：当单层网壳结构的初始缺陷分布与该结构在所受某一荷载分布下的失稳模态（一般是第一模态）一致时最为不利，因此假定初始缺陷分布与失稳模态一致，在此基础上得出该荷载情况下的极限荷载的下限值。这种方法将缺陷极端化，虽过于保守，但很有参考价值，而且相对可行，因而常被采用。

根据《网壳结构技术规程》（JGJ61-2003）规定，可采用结构的最低阶屈曲模态作为初始缺陷分布模态，其值可按网壳跨度的 1/300 取值。因此，本工程是取网壳跨度的 1/300 即 200mm 作为初始缺陷，并且根据一致模态对网壳施加初始缺陷，然后进行大位移的几何非线性稳定分析，得出如图 3-8 所示的荷载-位移曲线。

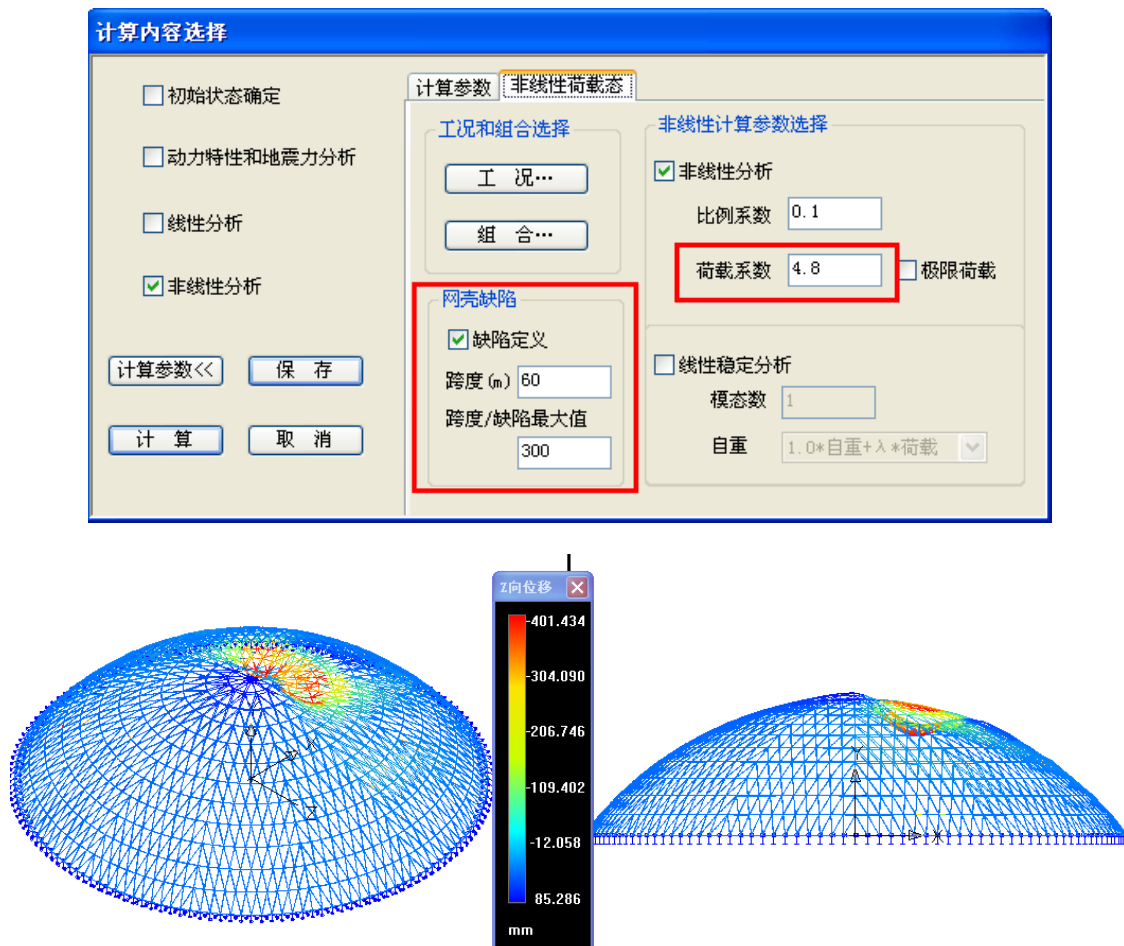


图 2-8 带缺陷结构几何非线性分析的位移

由图 2-8 可以看出，带缺陷的网壳考虑结构几何非线性的整体稳定系数为 7.1。一般来说，网壳结构可以分为缺陷敏感型和缺陷不敏感型，缺陷敏感结构对初始缺陷很敏感，其承载力受缺陷的影响很大。缺陷不敏感型则相反。对于该网壳结构，不加缺陷的极限承载力系数为 18，按规范加上初始缺陷后降为 4.8。因此，该结构是缺陷敏感型的。

6.3.2.4 根据规范确定结构的整体稳定临界承载力系数

根据《网壳结构技术规程》(JGJ61-2003) 规定，对带缺陷结构进行几何非线性有限元分析，得到第一个临界点荷载值为极限承载力，极限承载力除以系数 K (一般网壳结构中 $K=5$) 可得到整体稳定的容许承载力。所以该结构的极限承载力系数为 4.8。由此可知该网壳结构受力比较合理，承载力较高。

6.3.3、单元细分情况的分析与讨论

6.3.3.1 网壳杆件单元的划分

对于本工程的网壳分析，我们选择两种不同的方法进行网格的划分。第一种情况是：所有的网壳杆件都是一个单元，第二种情况是：所有的网壳杆件都是两个单元。对此我们比较如下：

6.3.3.1.1 结构线性整体稳定分析

通过线性整体稳定分析可以比较网壳杆件是一个单元与两个单元时，结构的线性稳定系数 λ ，如表 2 所示。

表 2 网壳杆件划分单元不同时结构前 20 个稳定因子比较

SET	组 合	网壳杆件为 一个单元	网壳杆件为 两 个单元
		TIME/FREQ	TIME/FREQ
1	1	23.651	23.404
2	1	24.09	23.809
3	1	24.804	24.451
4	1	24.915	24.553
5	1	26.568	26.161
6	1	26.685	26.284
7	1	27.263	26.974
8	1	27.893	27.518

9	1	28.647	28.147
10	1	28.788	28.338
11	1	29.48	29.068
12	1	30.245	29.76
13	1	30.519	29.935
14	1	30.716	30.076
15	1	31.416	30.821
16	1	31.609	30.953
17	1	31.708	31.196
18	1	31.948	31.494
19	1	32.369	31.952
20	1	33.204	32.693

6.3.3.1.2 完善结构几何非线性整体稳定分析

通过完善结构几何非线性整体稳定分析可以比较网壳杆件是一个单元与两个单元时，结构的荷载一位移情况。

6.3.3.1.3 带缺陷结构大位移几何非线性整体稳定分析

通过带缺陷结构的大位移几何非线性整体稳定分析可以比较网壳杆件是一个单元与两个单元时，结构的荷载一位移情况。

通过比较可以看出，对于本例网壳杆件分为一个单元和两个单元时，结构的线性整体稳定发生变化。杆件划分的单元多时，整体稳定系数降低。对于完善结构与带缺陷的大位移几何非线性，杆件划分单元增加时，荷载一位移曲线变化不太明显。这主要可以从本工程的网壳类型的选择有关，网壳结构的刚度比较大。所以，当网壳杆件划分的单元增加时候，变化不明显。读者可以自行尝试计算比较。