ANSYS 5.7 线性和非线性 结构静力分析指南

Chen Woo 译

摘自 **Structural Analysis Guide**ANSYS Release **5.7**

前 言

ANSYS公司曾经推出一套中文版的ANSYS文档资料。但对于目前发行的ANSYS 5.7,我们未见到任何相应版本的中文说明书。这是一个重大缺陷。为此,本人花了一些时间,把 "Structural Analysis Guide (ANSYS Release 5.7)"的一部分内容翻译成中文。在翻译时,主要的准则是忠实。

目前这个文稿还只是一个很粗略的草稿,以后还需要进一步修改。只是本人时间有限,只能利用业余时间来做这项工作,因此先匆忙拿来献丑。希望广大用户和读者喜欢,同时也希望大家帮助。如有任何建议,请通知本人(chenwoo@21cn.com),不胜感激。

Chen Woo 于2001-08-18

目 录

1	结构分析概述	6
	1.1 结构分析定义	6
	1.2 结构分析的类型	
	1.3 结构分析所应用的单元	6
	1.4 材料模式界面	
	1.5 求解方法	
2		
	<i>结构线性静力分析</i>	
	2.1 静力分析的定义	
	2.2 线性静力分析与非线性静力分析	
	2.3 静力分析的例子	9
	2.4 静力分析的求解步骤	9
	2.4.1 建模 2.4.2 沙罗 (4.7.1)	9
	2.4.2 设置求解控制	10
	2.4.3 设置其他求解选项	
	2 4 5	1.0
	2.4.5 水將 2.4.6 检查分析结果	
	2.5 静力分析示例(GUI方法)	
	2.5.1 问题描述	19
	2.5.2 几何和材料特性	19
	2.5.3 求解	19
	2.6 静力分析示例(命令流方法)	27
	2.7 何处找到更多的静力分析示例	29
7		31
	7.1 屈曲分析的概念	31
	7.2 屈曲分析的类型	31
	7.2.1 非线性屈曲分析	
	7.2.2 特征值屈曲分析	
	7.3 屈曲分析的用到的命令	
	7.4 非线性屈曲分析的过程	
	7.4.1 施加载荷增量	32
	7.4.2 自动时间步长功能	32
	7.4.3 注意事项	32
	7.4.4 其他	32
	7.5 特征值(线性)屈曲分析	33
	7.5.1 建立模型	
	7.5.2	33
	7.5.3	34
	7.5.4 扩展解	35
	7.5.5 查看结果	36

7.6 特征值屈曲分析实例(GUI方法)	
7.6.1 问题描述	36
7.6.2 问题详细说明	37
7.6.3 求解步骤	37
7.7 屈曲分析示例(命令流方法)	39
7.8 何处找到更多的示例	40
8 非线性结构分析	41
8.1 结构非线性的定义	41
8.1.1 非线性行为的原因	41
8.1.2 非线性分析的基本信息	42
8.2 几何非线性的应用	44
8.2.1 应力-应变	44
8.2.2)处刀例1化	45
8.2.3 旋转软化	45
8.3 材料非线性的模拟	45
8.3.1 非线性材料	45
8.4 在ANSYS中执行非线性分析	
8.5 非线性静态分析步骤	62
8.5.1 建模	62
8.5.2 设置求解控制	62
8.5.3 设置附加求解选项	66
8.5.4 施加荷载	
8.5.5 求解 8.5.6 考察结果	
8.5.6 与祭结朱	
8.6 非线性瞬态分析步骤	
\$8.6.1 建模	71
§8.6.2 施加荷载和求解	71
§8.6.3 观察结果	73
8.7 非线性瞬态分析示例(输入文件列表)	73
8.8 重启动	74
8.9 非线性(状态改变)单元	
§8.9.1 单元生死	
8.10 非线性分析的提示和指南	
8.10.1	74
8.10.2 克服收敛问题	75
8.11 非线性(静态)分析示例(GUI方法)	79
8.11.1 问题描述	79
8.11.2 基本数据	79
8.11.3 问题求解	
8.12 非线性(静态)分析示例(批处理方法)	84
8.13 其它例子	88
9 接触分析	90

ANSYS结构分析指南

9.1 概:	述	90
9.1.1	显式动态接触分析能力	90
	般接触分类	90
9.3 AN	NSYS接触分析功能	90
9.3.1	面一面的接触单元	91
9.3.2	点一面接触单元	92
9.3.3	点一点接触单元	92
	一面的接触分析	
9.4.1	应用面-面接触单元	92
9.4.2	接触分析的步骤	
9.4.3	建立模型几何实体和划分网格	93
9.4.4	识别接触对	93
9.4.5	指定接触面和目标面	94
9.4.6	不对称接触与对称接触	94
9.4.7	定义目标面	94
	定义柔体的接触面	98
9.4.9	设置实常数和单元关键字	100
	控制刚性目标面的运动(刚体-柔体接触)	
9.4.11		
9.4.12		111
9.4.13		112
9.4.14	- 求解	113
9.4.15	检查结果	113
9.5 点-	-面接触分析	116
9.5.1	使用点—面的接触单元	116
9.5.2	点—面接触分析的步骤	116
	一点的接触分析	127
§9.6.1	建立几何实体及分网	127
§9.6.2	生成接触单元	128
§9.6.3	正义接熈的法线方问	128
§9.6.4	定义初始界面或间隙	129
§9.6.5	5 选择接触算法	129
§9.6.6	施加必要的边界条件	130
§9.6.7	/ 定义求解选项	130
§9.6.8		131
§9.6.9	· 检查结果	131

1 结构分析概述

1.1 结构分析定义

结构分析是有限元分析方法最常用的一个应用领域。**结构**这个术语是一个广义的概念,它包括 土木工程结构如桥梁和建筑物,汽车结构如车身骨架,海洋结构如船舶结构,航空结构如飞机机身 ,还包括机械零部件如活塞、传动轴等。

1.2 结构分析的类型

在 ANSYS 产品家族中有七种结构分析的类型。<mark>结构分析中计算得出的基本未知量(节点自由度)</mark> 是**位移。**其他的一些未知量,如应变、应力和反力可通过节点位移导出。

- **静力分析**—用于求解静力载荷作用下结构的位移和应力等。静力分析包括线性和非线性分析。而非线性分析涉及塑性、应力刚化、大变形、大应变、超弹性、接触面和蠕变等。
- **模态分析**—用于计算结构的固有频率和模态。
- 谐波分析---用于确定结构在随时间正弦变化的载荷作用下的响应。
- **瞬态动力分析**—用于计算结构在随时间任意变化的载荷作用下的响应,并且可计及上述提到的静力分析中所有的非线性特性。
- **谱分析**—是模态分析的应用推广,用于计算由于响应谱或 PSD 输入(随机振动)引起的应力和应变。
- **曲屈分析**—用于计算曲屈载荷和确定曲屈模态。ANSYS 可进行线性(特征值)屈曲和非线性曲屈分析。
- 显式动力分析--ANSYS/LS-DYNA 可用于计算高度非线性动力学问题和复杂的接触问题。

此外,除前面提到的七种分析类型外,还可以进行如下的特殊分析:

- 断裂力学。
- 复合材料。
- 疲劳分析。
- p-Method。

1.3 结构分析所应用的单元

绝大多数的 ANSYS 单元类型可用于结构分析。单元类型从简单的杆单元和梁单元,一直到较为复杂的层合壳单元和大应变实体单元。

注意一显式动力分析只能应用显式动力单元(LINK160、BEAM162、PLANE162、SHELL163、SOLID164、COMBI165、MASS166、LINK167)。

表1-1 结构单元类型

.,	表I-1 结构单儿失型	
分类	单元名	说明
杆	LINK1,LINK8, LINK180	
	LINK10	
	BEAM3, BEAM4	
梁	BEAM54, BEAM44	
	BEAM23, BEAM24	
	BEAM188, BEAM189	
	PIPE16, PIPE17, PIPE18	
管	PIPE59	
	PIPE20, PIPE60	
	PLANE42, PLANE82, PLANE182, PLANE183	
	PLANE2	说明 p-单元, § 13 p-单元, § 13
	HYPER84, HYPER56, HYPER74	
2-D实体	VISCO88	
	VISCO106, VISCO108	
	PLANE83, PLANE25	
	PLANE145, PLANE146	p-单元, § 13
	SOLID45, SOLID95, SOLID185, SOLID186	
	SOLID92, SOLID187	
	SOLID46, SOLID191	
3-D实体	SOLID64, SOLID65	p-单元, § 13
	HYPER86, HYPER58, HYPER158	
	VISCO89	
	VISCO107	
	SOLID147, SOLID148	p-单元, § 13
	SHELL93, SHELL63, SHELL41, SHELL43, SHELL181	
	SHELL51, SHELL61	p-单元, § 13
壳	SHELL91, SHELL99	
	SHELL28	
	SHELL150	p-单元, § 13
	CONTAC48, CONTAC49, CONTA171, CONTA172, CONTA173, CONTA174	
接触	CONTAC12, CONTAC52	
	CONTAC26	
	TARGE169, TARGE170	
	FLUID29, FLUID30, FLUID129, FLUID130, INFIN110, INFIN111	
	PLANE13, SOLID5, SOLID98	
耦合场	PLANE13, SOLID5, SOLID98	
	PLANE13, SOLID5, SOLID62, SOLID98	
	FLUID38, FLUID79, FLUID80, FLUID81	
	FLUID116	
	COMBIN14, COMBIN40, COMBIN39	
	MASS21	
l	COMBIN37	
特殊	SURF153, SURF154	
	COMBIN7	
	LINK11	
	MATRIX27, MATRIX50	

表1-1 结构单元类型(续)

	74 7月141797(玉代)(
分类	单元名	说明
	LINK160	
	BEAM161	
	PLANE162	
显式动	SHELL163	§ 14
力分析	SOLID164	
	COMBI165	
	MASS166	
	LINK167	

1.4 材料模式界面

对于本书论述的分析,除了显式动力分析(ANSYS/LS-DYNA)外,如果应用GUI方法,用户必须应用直观的"材料模式交互界面"来定义材料特性。这种方法应用树状结构的材料分类,使用户在分析中选择合适的材料模式边得更加简单。见《ANSYS Basic Analysis Guide》§1.2.4.4。对于显式动力分析(ANSYS/LS-DYNA),材料定义见《ANSYS /LS-DYNA User's Guide》§7.1。

1.5 求解方法

在 ANSYS 产品中,求解结构问题有两种方法: h-方法和p-方法。h-方法可用于任何类型的结构分析,而p-方法只能用于线性结构静力分析。根据所求的问题,h-方法通常需要比p-方法更密的网格。p-方法在应用较粗糙的网格时,提供了求得适当精度的一种很好的途径。本书主要讨论h-方法,而 § 13 则专门研究 p-方法。

2 结构线性静力分析

2.1 静力分析的定义

静力分析计算在固定不变载荷作用下结构的响应,它不考虑惯性和阻尼影响—如结构受随时间变化载荷作用的情况。可是,静力分析可以计算那些固定不变的惯性载荷对结构的影响(如重力和离心力),以及那些可以近似为等价静力作用的随时间变化载荷(如通常在许多建筑规范中所定义的等价静力风载和地震载荷)的作用。

静力分析用于计算由那些不包括惯性和阻尼效应的载荷作用于结构或部件上引起的位移、应力、应变和力。固定不变的载荷和响应是一种假定,即假定载荷和结构响应随时间的变化非常缓慢。静力分析所施加的载荷包括:

- 外部施加的作用力和压力。
- 稳态的惯性力(如重力和离心力)。
- 强迫位移。
- 温度载荷(对于温度应变)。
- 能流(对于核能膨胀)。

关于荷载,还可参见§2.4.4。

2.2 线性静力分析与非线性静力分析

静力分析既可以是线性的也可以是非线性的。非线性静力分析包括所有的非线性类型:大变形、塑性、蠕变、应力刚化、接触(间隙)单元、超弹性单元等。本节主要讨论**线性静力分析**。对**非 线性静力分析**只作简单介绍,其详细论述见§8。

2.3 静力分析的例子

本章 § 2.5 和 § 2.6 提供了应用 ANSYS 进行静力分析的例子(GUI方法和命令流方法)。

2.4 静力分析的求解步骤

2.4.1 建模

为了建模,用户首先应指定 作业名和分析标题,然后应用 PREP7 前处理程序定义单元类型、实常数、材料特性、模型的几何元素。这些步骤是大多数分析类型共同的,并已在《ANSYS Basic Analysis Guide》 § 1.2 论述。建模的进一步论述,见《ANSYS Modeling and Meshing Guide》。

2.4.1.1 注意事项

在进行静力分析时,要记住如下内容:

- 1、可以应用线性或非线性结构单元。
- 2、材料特性可以是线性或非线性,各向同性或正交各向异性,常数或与温度相关的:
- 必须按某种形式定义刚度(如弹性模量 EX,超弹性系数等)。
- 对于惯性荷载(如重力等),必须定义质量计算所需的数据,如密度DENS。
- 对于温度荷载,必须定义热膨胀系数 ALPX。
- 3、对于网格密度,要记住:
- 应力或应变急剧变化的区域(通常是用户感兴趣的区域),需要比应力或应变近乎常数的区域较密的网格:
- 在考虑非线性的影响时,要用足够的网格来得到非线性效应。如塑性分析需要相当的积

分点密度,因而在高塑性变形梯度区需要较密的网格。

2.4.2 设置求解控制

设置求解控制包括定义分析类型、设置一般分析选项、指定荷载步选项等。当进行结构静力分析时,可以通过"**求解控制对话框**"来设置这些选项。该对话框对于大多数结构静力分析都已设置有合适的缺省,用户只需作很少的设置就可以了。我们推荐应用这个对话框。

如用户不喜欢应用求解控制对话框,则可应用 ANSYS 的标准求解命令集和相应的菜单(Main Menu>Solution>Unabridged Menu>option)来设置求解控制选项。对于求解控制对话框的总体情况,见《ANSYS Basic Analysis Guide》 § 3.11。

2.4.2.1 进入求解控制对话框

用户可通过选择(Main Menu>Solution> -Analysis Type- Sol'n Control)进入求解控制对话框。下面诸小节简要论述该对话框中各标签的选项。关于如何设置这些选项,可在按该标签的Help 按钮进入帮助系统,可以得到详细介绍。此外,§8 还论述该对话框有关非线性选项的内容

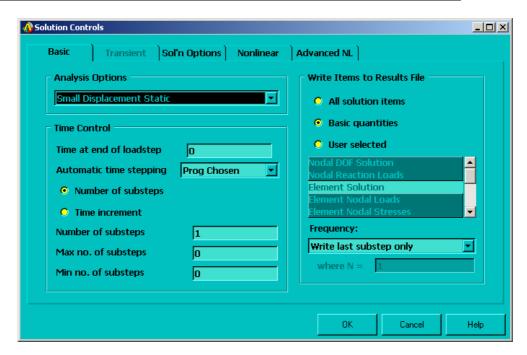
2.4.2.2 Basic标签

在求解控制对话框中有五个标签,这些标签是按最基本的选项出现在第1个标签,而其后每一个标签则提供更高级的控制这样来安排的。根据对话框标签的组织,可使求解设置较为平顺。在进入求解控制对话框时,缺省激活的是Basic标签。

Basic标签的设置,提供了分析中所需的最少数据。一旦在Basic标签中的设置满足以后,就不需要设置其他标签中的选项,除非因为要进行高级控制而修改其他缺省设置。在按 OK 按钮以后,设置存储到ANSYS数据库,并关闭对话框。

用户可以在Basic标签设置的选项如 **表2-1** 所示。有关祥细说明见该标签的Help帮助系统。 表2-1

选项	详细信息
	• 《ANSYS Basic Analysis Guide》 § 1.2.6.1
指定分析类型[ANTYPE, NLGEOM]	• 《ANSYS Structural Analysis Guide》§8
	• 《ANSYS Basic Analysis Guide》 § 3.16
控制时间设置,包括荷载步末的时间	• 《ANSYS Basic Analysis Guide》 § 2.4
[TIME],自动时间步[AUTOTS],在一个荷	• 《ANSYS Basic Analysis Guide》 § 2.7.1
载步中的子步数[NSUBST 或 [DELTIM]	
设置写到数据库中的结果数据[OUTRES]	• 《ANSYS Basic Analysis Guide》 § 2.7.4



在静力分析中这些选项的特殊考虑有:

- 在设置 ANTYPE 和 NLGEOM 时,如进行一个新的分析并忽略大变形效应(如大挠度、大转角、大应变)时,请选择 "Small Displacement Static"项。如预期有大挠度(如弯曲的长细杆)或大应变(如金属形成问题),则选择 "Large Displacement Static"。如想重启动一个失败的非线性分析,或者用户已进行了完整的静力分析,而想指定其他荷载,则选择 "Restart Current Analgsis"项。
- 在设置 TIME 时,记住这个荷载步选项指定该荷载步末的时间,缺省值为1。对于后续的荷载步,缺省为1加上前一个荷载步指定的时间。虽然在静力分析(除蠕变、粘塑性或其他率相关材料行为外)中,时间没有物理意义,但对于追踪时间步和子步却是一种方便的方法,见《ANSYS Basic Analysis Guide》 § 2。
- 在设置OUTRES时,请记住:[警告] 缺省时只有1,000个结果集记录到结果文件 (Jobname. RST)中,如果超过这一数目(基于用户的 OUTRES 设置),程序将出错停机 。应用 /CONFIG, NRES 命令来增大这一限值,见《ANSYS Basic Analysis Guide》 § 20

2.4.2.3 Transient标签

Transient 标签设置瞬态分析控制,只有在 Basic 标签中选择了瞬态分析时才能应用这一标签,如果在 Basic 标签中选择了静态分析,则这一标签不能设置。所以在这里暂不讨论。

2.4.2.4 Sol'n Options标签

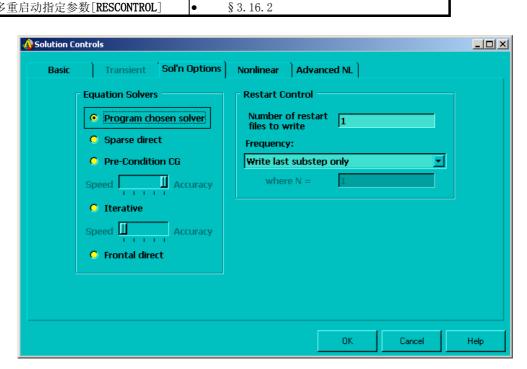
Sol'n Options 标签用于设置 表2-2 所列的选项。祥细说明可从Help按钮进入帮助系统而得到。

 表2-2

 选项
 参见《ANSYS Basic Analysis Guide》

 指定方程求解器[EQSLV]
 ● § 3. 2 ~ § 3. 10

 对于多重启动指定参数[RESCONTROL]
 ● § 3. 16. 2



在静力分析中设置 EQSLV 时,选择下列求解器之一:

- 程序选择求解器(ANSYS 将根据问题的领域自动选择一个求解器);
- 希疏矩阵求解器(对线性和非线性、静力和完全瞬态分析,为缺省项);
- PCG求解器(对于大模型/高波前,巨形结构推荐使用):

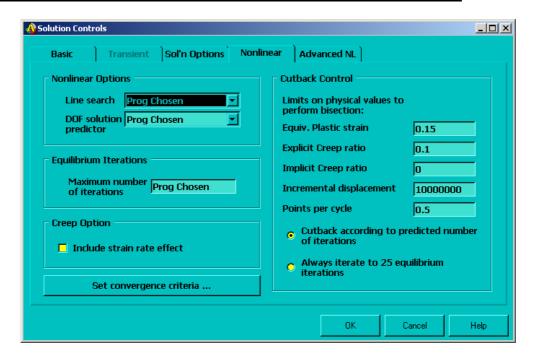
- AMG的求解器(其应用与PCG求解器相同,但提供平行算法;在用于多处理器环境时,转向 更快);
- DDS求解器,通过网络在多处理器系统中提供平行算法;
- 叠代求解器(自动选择; 只适用于线性静力/完全瞬态结构分析, 或稳态温度分析; 推荐)
- 波前直接求解器。

注意-AMG 和 DDS 求解器,是ANSYS平行算法的一部分,需要单独购置。见《ANSYS高级求解技术手册》§9。

2.4.2.5 Nonlinear标签

Nonlinear 标签用于设置 **表2-3** 所列的选项。祥细内容可参见Help按钮进入帮助系统。 表2-3

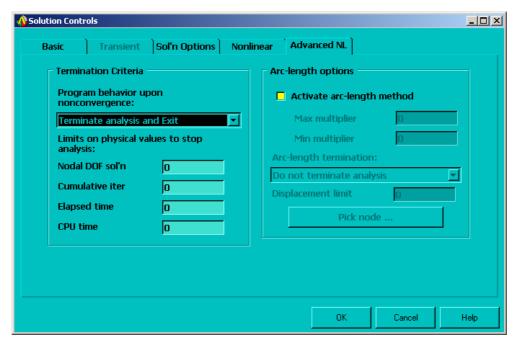
选项	参见《ANSYS Structural Analysis Guide》
激活线性搜索[LNSRCH]	• § 8. 5. 2. 8. 5
	• § 8. 10. 2. 3
激DOF解的预测[PRED]	• § 8. 5. 2. 8. 4
指定每个子步的最大迭代次数[NEQIT]	• § 8. 5. 2. 8. 3
指明是否包括蠕变计算[RATE]	• § 8. 3. 1. 5
	• § 8. 5. 3. 2. 1
设置收敛准则[CNVTOL]	• § 8. 5. 2. 8. 2
控制二分[CUTCONTROL]	• § 8. 5. 2. 8. 6



2.4.2.6 Advanced NL标签

Advanced NL 标签用于设置 **表2-4** 所列的选项。祥细内容见该标签中的Help帮助系统。 表2-4

	72 1
选项	参见《ANSYS Structural Analysis Guide》
指项分析结束准则[NCNV]	• § 8. 5. 2. 8. 3
激活和终止弧长法控制[ARCLEN,ARCTRM]	• § 8. 10. 2. 4



2.4.3 设置其他求解选项

本节讨论求解的其他选项的设置。这些选项并不出现在求解控制对话框中,因为很少用,并且其缺省设置很少需要改变。

本节中的许多选项是非线性选项,因此将在§8进一步讨论。

2.4.3.1 应力刚度效应

一些单元,如 18X 族单元,不论 **SSTIF** 如何,都包括了应力刚度效应。为了确定一个单元是 否包括应力刚度,请见《ANSYS单元参考手册》说明。

在缺省时,如果 NLGEOM 为 ON 的话,应力刚度效应为 ON。用户可能关闭应力刚度效应的一些特殊情况有:

- 应力刚度仅与非线性分析相关。如果执行线性分析[NLGEOM, OFF],则可以关闭应力刚度
- 在分析之前,用户知道结构不会因屈曲(分叉或跳跃屈曲)而破坏。

<mark>通常,包括应力刚度效应时,可以加速非线性分析收敛。</mark>请记住上面所述的各点,用户可能对 一些看起来收敛困难的特殊问题,选择关闭应力刚度效应,如局部破坏。

命令: SSTIF

GUI: Main Menu>Solution>Unabridged Menu>Analysis Options

2.4.3.2 Newton-Raphson选项

这一选项只能用于非线性分析中,它说明在求解时切线矩阵如何修正。用户可以选下列选项之

- 程序选择:
- 完全;
- 修正;
- 初始刚度;
- 完全并且非对称矩阵。

命令: NROPT

GUI: Main Menu>Solution>Unabridged Menu>Analysis Options

2.4.3.3 预应力效应计算

应用这一选项来在同一模型中执行预应力分析,如预应力模型的分析。缺省值为 OFF。

注意一应力刚度效应和预应力效应计算二者都控制应力刚度矩阵的生成,因此在一个分析中不以同时应用。如 二者都指定,则最后选项将覆盖前者。

命令: PSTRESS

GUI: Main Menu>Solution>Unabridged Menu>Analysis Options

2.4.3.4 质量矩阵公式

如果打算在结构中施加惯性荷载(如重力或旋转荷载),就应用这一选项。可以指定下列选项之一:

- 缺省(与单元类型有关);
- 集中质量近似。

注意一对于静力分析,用户所用的质量矩阵并不明显影响求解精度(假设网格密度足够)。然而,如果想在同一模型上作预应力动力分析,选择质量矩阵公式就可能很重要;参见动力分析的有关章节。

命令: LUMPM

GUI: Main Menu>Solution>Unabridged Menu>Analysis Options

2.4.3.5 参考温度

这个荷载步选项适用于温度应变计算。可用[MP, REFT]命令来设置材料相关的参考温度。

命令: TREF

GUI: Main Menu>Solution>-Load Step Opts-Other>Reference Temp

2.4.3.6 模态数

这个荷载步选项用于轴对称简谐单元。

命令: MODE

GUI: Main Menu>Solution>-Load Step Opts-Other>For Harmonic Ele

2.4.3.7 蠕变准则

这个非线性荷载步选项为自动时间步指定蠕变准则。

命令: CRPLIM

GUI: Main Menu>Solution>Unabridged Menu>-Load Step Opts-Nonlinear >Creep Criterion

2.4.3.8 输出选项

这个荷载步选项用于指定在输出文件(Jobname. out)中包括任何结果数据。

命令: OUTPR

GUI: Main Menu>Solution>Unabridged Menu>-Load Step Opts-Output Ctrls>Solu Printout

[警告]一在应用多个 OUTPR 命令时,可能有时会有一些冲突,见《ANSYS Basic Analysis Guide》 § 2.7.4。

2.4.3.9 外插

应用这个荷载步选项,可以通过把单元积分点结果拷贝到节点上,而不是通过外插(在存在材) 料非线性时,这是缺省)。

命令: ERESX

GUI: Main Menu>Solution>Unabridged Menu>-Load Step Opts-Output Ctrls>Integration Pt

2.4.4 施加荷载

用户在设置了求解选项以后,可以对模型施加荷载了。

2.4.4.1 荷载类型

所有下面的荷载类型,可应用于静力分析中。

2. 4. 4. 1. 1 位移(UX, UY, UZ, ROTX, ROTY, ROTZ)

这些自由度约束常施加到模型边界上,用以定义刚性支承点。它们也可以用于指定对称边界条件以及已知运动的点。由标号指定的方向是按照节点座标系定义的。

2.4.4.1.2 力(FX, FY, FZ) 和力矩(MX, MY, MZ)

这些集中力通常在模型的外边界上指定。其方向是按节点座标系定义的。

2.4.4.1.3 压力 (PRES)

这是表面荷载,通常作用于模型的外部。正压力为指向单元面。

2.4.4.1.4 温度(TEMP)

温度用于研究热膨胀或热收缩(即温度应力)。如果要计算热应变的话,必须定义热膨胀系数。用户可以从热分析[LDREAD]中读入温度,或者直接指定温度(应用 BF 族命令)。

2.4.4.1.5 流(FLUE)

用于研究膨胀(由于<u>中子流</u>或其他原因而引起的材料膨胀)或蠕变的效应。只在输入膨胀或蠕变 方程时才能应用。

2.4.4.1.6 重力、旋转等

这是整个结构的惯性荷载。如果要计算惯性效应,必须定义密度(或某种形式的质量)。

2.4.4.2 在模型上施加荷载

除了与模型无关的惯性荷载以外,用户可以在几何实体模型(关键点、线、面)或在有限元模型(节点和单元)上定义荷载。用户还可以通过 TABLE 类型的数组参数(见§2.4.4.2.1)施加边界条件或作为函数的边界条件(见§2.6.15)。

表2-5 汇总了静力分析可以应用的荷载。在一个分析中,可以施加、移走、操作或列表荷载。 表2-5

荷载类型	分类	定义这些荷在的命令和菜单
位移(UX, UY, UZ, ROTX, ROTY, ROTZ)	约束	《ANSYS Basic Analysis Guide》 § 2.6.3
力、力矩(FX, FY, FZ, MX, MY, MZ)	力	《ANSYS Basic Analysis Guide》 § 2.6.6
压力(PRES)	面荷载	《ANSYS Basic Analysis Guide》 § 2.6.7
温度(TEMP)、流(FLUE)	体荷载	《ANSYS Basic Analysis Guide》 § 2.6.8
重力、旋转等	惯性荷载	《ANSYS Basic Analysis Guide》 § 2.6.9

2.4.4.2.1 应用TABLE类数组参数施加荷载

用户可以通过 TABLE 类数组参数施加荷载。对于应用表格边界条件,参见《ANSYS Basic Analysis Guide》 § 2.6.14。

在结构分析中,用户只可以定义随时间(TIME)变化的一维表。在定义这个表时,输入书TIME 作为主变量。其他主变量都是无效的。在定义表时,TIME 必须按升序定义。

用户可以通过命令或交互式定义表格数组参数。参见《ANSYS APDL Programmer's Guide》。

2.4.4.3 计算惯性解除

用户可以应用静力分析来执行<mark>惯性解除计算,即计算与施加荷载反向平衡的加速度。</mark>用户可以把惯性解除想象成一个等价自由体分析。要在 **SOLVE** 命令之前应用这一命令作为惯性荷载命令的一部分。

模型应当满足下面的要求:

- 模型不应当包括轴对称单元、子结构、或非线性。不推荐混合2D和3D单元的模型。
- 对于梁单元(BEAM23、BEAM24、BEAM44和BEAM54)以及分层单元(SHELL91、SHELL99、SOLID46和SOLID191),忽略偏离和斜削效应。也忽略层状单元的不对称分层效应。把斜削变截面单元分解成数个单元将得出更精确的结果。
- 必须提供质量计算的数据,如密度。

- 提供素需的最少位移约束,即保证不发生刚体运动即可。对于2D单元需要三个约束(根据单元类型,可能更少),对于3D单元只需要6个约束(根据单元类型,可能更少)。附加的约束,如对称边界条件也是允许的,但必须对所有约束检查0反力,以确保在惯性解除分析中不出现过约束。
- 应当指定对于惯性解除计算合适的荷载。

命令: IRLE, 1

GUI: Main Menu>Solution>-Load Step Opts-Other>Inertia Relief

2.4.4.3.1 惯性解除的输出

应用 IRLIST 命令来打印惯性解除计算的输出。这个输出包括平衡施加荷载所需要的平移和转动加速度,而且可用于其他程序来进行运动学研究。质量和惯性矩列表汇总是精确解(求解时产生),而不是近似解。约束反力将为0,因为所计算的惯性力与外力平衡。

惯性解除输出存储于数据库,而不是结果文件(Jobname. RST),在用户用IRLIST 命令时, ANSYS 从数据库中提取信息,数据库中保存最新求解[SOLVE 或PSOLVE]的惯性解除输出。

命令: IRLIST

GUI: 无

2.4.4.3.2 部分惯性解除计算

用户还可作部分惯性解除计算。应用部分求解方法[PSLOVE],如下面的例子所示:

/PREP7

. . .

MP, DENS, ...! Generate model, define density

FINISH

D,... ! Specify only minimum no. of constraints

F,...! Other loads

SF, . . .

OUTPR, ALL, ALL ! Activates printout of all items

IRLF,1 $\,\,$! Can also be set to -1 for precise mass and

! load summary only, no inertia relief

PSOLVE, ELFORM ! Calculates element matrices

PSOLVE, ELPREP! Modifies element matrices and calculates

! inertia relief terms

IRLIST ! Lists the mass summary and total load summary tables

FINISH

有关 OUTPR, IRLF, IRLIST, PSOLVE等命令见《ANSYS Commands Reference》。

2.4.4.3.3 应用宏来执行惯性解除计算

如用户要经常作惯性解除计算,可以写一个包含上述命令的宏。参见《ANSYS APDL Programmer's Guide》。

2.4.5 求解

现在可以进行求解。

1、把数据库保存为一个文件以作备份。在以后需要时,可重新进入 ANSYS并用 **RESUME** 命令恢复模型。

命令: SAVE

GUI: Utility Menu>File>Save as

2、开始计算

命令: SOLVE

GUI: Main Menu>Solution>-Solve-Current LS

- 3、如果分析中包括其他荷载条件(即多个荷载步),则应重新施加荷载,指定荷载步选项,保存并求解每一个荷载步。在《ANSYS Basic Analysis Guide》中,还论述了多荷载步的其他操作方法。
 - 4. 退出求解

命令: FINISH

GUI: 关闭求解菜单。

2.4.6 检查分析结果

静力分析结果保存于结构分析结果文件(Jobname. RST)中,包括以下内容:

- 1、初始解
- 节点位移(UX, UY, UZ, ROTX, ROTY, ROTZ)。
- 2、导出解
- 节点和单元应力:
- 节点和单元应变;
- 单元力;
- 节点反力;

2.4.6.1 后处理

可以用一般后处理器 POST1 和时程后处理器 POST26,来进行后处理,查看结果。

- POST1 用于对整个模型在某一子步(时间点)上的结果进行检查,在下面要解释一些 POST1 的操作。
- POST26 用于非线性静力分析中跟踪整个荷载作用历程上的特定结果,参见§8。对于 POST26 的完整说明,参见《ANSYS Basic Analysis Guide》§4。

2.4.6.2 注意事项

- 为了用 POST1 和 POST26 检查结果,在数据库中必须包括与求解时相同的模型;
- 必须存在 Jobname. RST 结果文件。

2.4.6.3 检查结果数据

1、从数据库文件中读入数据

命令: RESUME

GUI: Utility Menu>File>Resume from

2、读入适当的结果集。用荷载步、子步或时间来区分结果数据库集。如果用户所指定的时间 值不存在相应的结果,则 ANSYS 将据全部数据来线性外插得到该时间点上的结果。

命令: SET

GUI: Main Menu>General Postproc>-Read Results-By Load Step

3. 执行必要的 POST1 操作。下面将讨论典型的静力分析中 POST1 的操作方法。

2.4.6.4 典型的后处理操作

1、显示变形图

应用 PLDISP命令(Main Menu〉General Postproc〉 Plot Results〉 Deformed Shape)来显示变形图。PLDISP 命令的 KUND 参数给用户可以在原始图上迭加变形图。

2、列出反力和反力矩

应用PRESOL命令(Main Menu〉General Postproc〉List Results〉Reaction Solu)列出约束节点的反力和力矩。为了显示反力,应用 /PBC, RFOR, ,1, 然后输入所需的节点或单元显示(NPLOT 或EPLOT 命令)。如要显示反力矩,则用 RMOM 代替 RFOR。

3、列出节点力和力矩

应用 **PRESOL,** F(或M) 命令(Main Menu〉General Postproc〉List Results〉 Element Solution) 列出节点力和力矩。

也可以列出所选择的节点集的所有节点力和力矩。首先选择节点集,然后可用这一特点找出作用于这些节点上的所有力。

命令: FSUM

GUI: Main Menu>General Postproc>Nodal Calcs>Total Force Sum

用户也可以在每个已选择的节点上检查所有力和力矩。对于处于平衡状态的实体,除荷载作用 点和存在反力的节点以外的所有节点上,其总荷载为0:

命令: NFORCE

GUI: Main Menu>General Postproc>Nodal Calcs>Sum @ Each Node

FORCE命令(Main Menu>General Postproc>Options for Outp)指明检查那个力分量:

- 全部(缺省);
- 静力分量;
- 阻尼分量;
- 惯性力分量。

对于处于平衡状态的实体,除荷载作用点或存在反力荷载的节点外,其他所有节点的总荷载为 0(应用所有 FORCE 分量)。

4、线单元结果

对于线单元(如梁、杆、管),应用 **ETABLE**(Main Menu〉General Postproc〉 Element Table〉Define Table)来取得导出数据(如应力、应变等)。结果数据用一个标号和一个序列号的组合,或用元件名来区别。参见《ANSYS Basic Analysis Guide》POST1中的 **ETABLE** 命令的说明。

5、误差评估

在实体和壳单元的线性静力分析中,应用 PRERR 命令(Main Menu>General Postproc>List Results>Percent Error)来列出网格离散误差的评估值。这个命令按结构能量模(SEPC)计算和列出误差百分比,代表一个特定的网格离散的相对误差。

6、结构能量误差评估

应用 PLESOL, SERR 命令 (Main Menu>General Postproc>Plot Results>-Contour Plot-Element Solu)来计算单元-单元之间的结构能量误差(SERR)。在等值线图中,SERR 较大的区域是)要进行网格细化的候选区域(用户可用 ADAPT 命令自动激活网格细化,参见《ANSYS Modeling and meshing Guide》)。参见《ANSYS Basic Analysis Guide》 § 5.3.5

7、等值线显示

可用PLNSOL和PLESOL 命令(Main Menu>General Postproc>Plot Results> -Contour Plot-Nodal Solu or Element Solu)显示几乎所有结果项的等值线,如应力(SX,SY,SZ等)、应变(EPELX,EPELY,EPELZ等)和位移(UX,UY,UZ等)。PLNSOL 和 PLESOL 命令的 KUND 域使用户可以在原始结构上选加显示。

应用PLETAB和PLLS命令(Main Menu〉General Postproc〉Element Table>Plot Element Table和 Main Menu〉General Postproc〉Plot Results>-Contour Plot-Line Elem Res)来显示单元表数据和线单元数据。

[**警告]**——导出数据,如应力、应变,在应用 PLNSOL 命令时为节点上的平均值。这种平均的结果对于不同材料、不同厚度的壳或其他不连续时,会得出错误的结果。为了避免这一问题,应当用选择(见《ANSYS Basic

Analysis Guide》 § 7) 来选择相同材料、相同厚度的壳等,然后才能应用 PLNSOL 命令。另一个方法,是应用 PowerGraphics及 AVRES 命令(GUI: Main Menu> General Postproc>Options for Outp)以使在不同材料、不同厚度的壳上不产生平均应力。

8、矢量显示

应用 PLVECT 命令(Main Menu>General Postproc>Plot Results>-Vector Plot- Predefined) 来观察矢量的显示,以及用 PRVECT 命令(Main Menu> General Postproc>List Results>Vector Data)来观察矢量列表。

对于观察矢量如位移(DISP)、转角(ROS)、主应力(S1, S2, S3), 矢量显示(不要与矢量模态混淆)是一种有效的办法。

9、表格列示

应用下列命令来进行表格列示:

命令: PRNSOL(节点结果)

PRESOL(单元-单元之间结果)

PRRSOL(反力)等

GUI: Main Menu>General Postproc>List Results>solution option

在列表前,应用 NSORT 和 ESORT 命令(Main Menu〉General Postproc〉 List Results〉—Sorted Listing—Sort Nodes or Sort Elems)进行数据排序。

10、其他后处理功能

在POST1中,还可以应用许多其他后处理功能,如影射结果到路径上、荷载工况组合等,参见《ANSYS Basic Analysis Guide》§4。

2.5 静力分析示例(GUI方法)

2.5.1 问题描述

一个六角板手(截面高度10 mm), 在端部作用 100 N 的力,同时还作用向下的力 20 N。分析板手在这两种荷载作用下的应力密度。

2.5.2 几何和材料特性

截面高度 = 10 mm;

形状=六角形;

长度 = 7.5 cm;

把手长度 = 20 cm;

弯曲半径 = 1 cm;

弹性模量 = 2.07 x 10E11 P;

扭曲荷载 = 100 N;

向下荷载 = 20 N。

2.5.3 求解

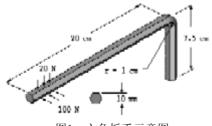


图1 六角板手示意图

2.5.3.1 设置分析标题

- 1、选择"Utility Menu>File>Change Title"。
- 2、输入"Static Analysis of an Allen Wrench"并按"OK"。

2.5.3.2 设置单位

- 1、点击 "ANSYS Input window" 右下角。
- 2、输入"/UNITS, SI"命令然后按回车。注意在"ANSYS Input window"的输入行上方出现了这个命令。
- 3、选择"Utility Menu>Parameters>Angular Units",出现"Angular Units for Parametric Functions"对话框。
 - 4、在其中选择"Degrees DEG"。
 - 5、按"OK"。

2.5.3.3 定义参数

- 1、选择"Utility Menu>Parameters>Scalar Parameters"。出现"Scalar Parameters"对话框。
 - 2、输入下表的参数。在定义每个参数后按"Accept"按钮。

参数	值	描述
EXX	2. 07E11	Young's modulus is 2.07E11 Pa
W_HEX	. 01	Width of hex across flats = .01 m
W_FLAT	W_HEX*TAN(30)	Width of flat = .0058 m
L_SHANK	. 075	Length of shank (short end) .075 m
L_HANDLE	. 2	Length of handle (long end) .2 m
BENDRAD	. 01	Bend radius .01 m
L_ELEM	. 0075	Element length .0075 m
NO_D_HEX	2	Number of divisions along hex flat = 2
TOL	25E-6	Tolerance for selecting node = 25E-6 m

注意一可以用大写或小写字母,但ANSYS总是用大写显示。

- 3、按"Close"。
- 4、在ANSYS工具条中按"SAVE_DB"按钮。

2.5.3.4 定义单元类型

- 1、选择"Main Menu>Preprocessor>Element Type> Add/Edit/Delete"。
- 2、按"Add", 出现"Library of Element Types"对话框。
- 3、在左边选择"Structural Solid"。
- 4、在右边选择 "Brick 8node 45"。
- 5、按 "Apply" 按钮把它定义为单元类型1。
- 6、在对话框右边选 "Quad 4node 42"。
- 7、按"OK"把它定义为单元类型2。并关闭对话框。
- 8、在 "Element Types"对话框中按 "Close" 按钮。

2.5.3.5 定义材料特性

- 1、选择"Main Menu>Preprocessor>Material Props>Material Models",出现"Define Material Model Behavior"对话框。
- 2、在"Material Models Available"窗口中,选择"Structural-> Linear->Elastic->Isotropic",出现一个对话框。
- 3、在 "EX域"输入字符EXX,然后接 "OK",现在在左边的 "Material Models Defined"窗口中出现 "Material Model Number 1"。
 - 4、选择"Material〉Exit"退出"Define Material Model Behavior"对话框。

2.5.3.6 建立六角形截面

- 1、选择"Main Menu>Preprocessor>-Modeling- Create> -Areas- Polygon >By Side Length", 出现"Polygon by Side Length"对话框。
 - 2、输入"number of sides"6。
 - 3、输入边长W FLAT。
 - 4、按"OK"。现在图形窗口出现六角形。

2.5.3.7 沿路径建立关键点

- 1、选择"Main Menu>Preprocessor>-Modeling- Create> Keypoints>In Active CS"。出现 "Create Keypoints in Active Coordinate System"对话框。
 - 2、输入关键点数7。在X, Y, Z域全部输入0。
 - 3、接"Apply"。
 - 4、输入关键点数8。
 - 5、在X, Y, Z域全部输入0,0,-L SHANK, 然后按" Apply"。
 - 6、输入关键点数9。
 - 7、在X, Y, Z域全部输入0, L_HANDLE, -L_SHANK, 然后按"OK"。

2.5.3.8 沿路径建立线

- 1、选择"Utility Menu>PlotCtrls>Window Controls>Window Options"。出现"Window Options"对话框。
 - 2、在下拉菜单中选"At top left"。
 - 3、按"OK"。
 - 4、选择 "Utility Menu〉PlotCtrls〉Pan/Zoom/Rotate", 出现 "Pan-Zoom-Rotate"对话框。
 - 5、按"Iso", 然后按"Close"。
- 6、选择"Utility Menu〉PlotCtrls〉View Settings〉Angle of Rotation"。出现"Angle of Rotation"对话框。
 - 7、输入90度。
 - 8、在 "Axis of rotation"中选" Global Cartes X"。
 - 9. 按"OK".
- 10、选择"Utility Menu>PlotCtrls>Numbering"。出现"Plot Numbering Controls"对话框。
 - 11、按"Keypoint numbers"方框打开它。
 - 12、按"Line numbers"方框打开它。
 - 13、按"OK"。
- 14、选择"Main Menu>Preprocessor>-Modeling- Create> -Lines- Lines>Straight Line"。出现"Create Straight Line"拾取菜单。
 - 15、在关键点4和1上拾取,在这两个点之间建立一根线。
 - 16、在关键点7和8上拾取,在这两个点之间建立一根线。
 - 17、在关键点8和9上拾取,在这两个点之间建立一根线。
 - 18、按"OK"。

2.5.3.9 为板嘴和把手建立线

- 1、选择"Main Menu>Preprocessor>-Modeling-Create>-Lines-Line Fillet"。出现"Line Fillet"拾取菜单。
 - 2、在线8和9上拾取。
 - 3、按"OK"。出现"Line Fillet"对话框。
 - 4、在 "Fillet radius"中输入BENDRAD, 按 "OK"。
 - 5、在工具条中按"SAVE DB"。

2.5.3.10 剪裁六角形截面

在这一步,要把六角形截面剪裁成两个四边形,以满足映射分网的需要。

1、选择 "Utility Menu>PlotCtrls>Numbering"。出现"Plot Numbering Controls"对话框

- 2、按"Keypoint numbers"方框关闭之。
- 3、按"OK"。
- 4、选择"Utility Menu>Plot>Areas"。
- 5、选择"Main Menu>Preprocessor>-Modeling-Operate> -Booleans-Divide > With Options>Area by Line"出现"Divide Area by Line"拾取菜单。
 - 6、拾取阴影的面, 按"OK"。
 - 7、选择"Utility Menu>Plot>Lines"。
 - 8、拾取线 7。
- 9、按"OK"。出现"Divide Area by Line with Options"对话框。在"Subtracted lines will be drop down"菜单中选"Kept"。按"OK"。
- 10、选择"Utility Menu>Select>Comp/Assembly>Create Component"。出现"Create Component"对话框。
 - 11、输入 "component name" 为 BOTAREA。
 - 12、在 "Component is made of"菜单中,选"Areas"。
 - 13、按"OK"。

2.5.3.11 设置网格密度

- 1、选择"Main Menu>Preprocessor>-Meshing- Size Cntrls>-Lines- Picked Lines",出现"Element Size on Picked Lines"拾取菜单。
 - 2、在输入窗口中输入"1,2,6",并按回车。
 - 3、在拾取菜单中按"OK"。出现"Element Sizes on Picked Lines"对话框。
 - 4、在"number of element divisions"域输入"Enter NO_D_HEX",按"OK"。

2.5.3.12 设置截面网格的单元类型

在这一步,设置单元类型为PLANE42,全部采用映射网格。

- 1、选择"Main Menu>Preprocessor>-Modeling-Create> Elements>Elem Attributes"。出现 "Element Attributes"对话框。
 - 2、在 "Element type number"下拉菜单中选"2 PLANE42",按"OK"。
- 3、选择"Main Menu>Preprocessor>-Meshing-Mesher Opts"。出现"Mesher Options"兑换框。
- 4、在"Mesher Type"域,按"Mapped radio"方框,然后按"OK"。出现"Set Element Shape"对话框。
 - 5、按"OK"接受缺省"Quad for 2D shape"。
 - 6、在工具条中按"SAVE_DB"。

2.5.3.13 建立截面网格

在这一步生成截面网格。

- 1、选择"Main Menu>Preprocessor>-Meshing-Mesh> -Areas-Mapped>3 or 4 sided"。出现"Mesh Areas"拾取框。
 - 2、按"Pick All"。
 - 3、选择"Utility Menu>Plot>Elements"。

2.5.3.14 拖拉2D网格成3D单元

- 1、选择"Main Menu>Preprocessor>-Modeling- Create> Elements>Elem Attributes"。出现"Element Attributes"对话框。
 - 2、在"Element type number"下拉框选择"1 SOLID45",并按"OK"。
- 3、选择"Main Menu>Preprocessor>-Meshing- Size Cntrls>-Global- Size"。出现"Global Element Sizes"对话框。
 - 4、在 "element edge length"域输入"L ELEM"并按"OK"。
 - 5、选择"Utility Menu>PlotCtrls>Numbering"。

- 6、选"Line numbers"方框打开它。
- 7、按"OK"。
- 8、选择"Utility Menu>Plot>Lines"。
- 9、选择"Main Menu>Preprocessor>-Modeling- Operate>Extrude>-Areas Along Lines"。出现"Sweep Areas along Lines"拾取框。
 - 10、按"Pick All"。出现第二个拾取框。
 - 11、在线8、10、9上按顺序拾取。
 - 12、按"OK"。在图形窗口出现3D模型。
 - 13、选择"Utility Menu>Plot>Elements"。
 - 14、在工具条中按 "SAVE_DB"。

2.5.3.15 选择BOTAREA组元和删除2D单元

- 1、选择"Utility Menu>Select>Comp/Assembly>Select Comp/Assembly."。出现"Select Component or Assembly"对话框。
 - 2、按"OK"接受缺省选择的BOTAREA组元。
- 3、选择"Main Menu>Preprocessor>-Meshing- Clear>Areas"。出现" Clear Areas"拾取菜单。
 - 4、按"Pick All"。
 - 5、选择"Utility Menu>Select>Everything"。
 - 6、选择"Utility Menu>Plot>Elements"。

2.5.3.16 在板手端部施加边界条件

- 1、选择"Utility Menu>Select>Comp/Assembly>Select Comp/Assembly"。出现"Select Component or Assembly"对话框。
 - 2、按"OK"接受缺省选择的BOTAREA组元。
 - 3、选择、"Utility Menu>Select>Entities"。出现"Select Entities"对话框。
 - 4、在顶部的下来菜单中选择"Lines"。
 - 5、在第二个下来菜单中选择"Exterior"。
 - 6、按"Apply"。
 - 7、在顶部的下来菜单中选择"Nodes"。
 - 8、在第二个下来菜单中选择 "Attached to"。
 - 9、按"Lines, all"方框来选择它。
 - 10、按"OK"。
- 11、选择"Main Menu > Solution > Loads Apply > Structural Displacement > On Nodes"出现"Apply U, ROT on Nodes"拾取框。
 - 12、按"Pick All"。出现"Apply U, ROT on Nodes"对话框。
 - 13、在"DOFs to be constrained"中选择"ALL DOF"。
 - 14、按"OK"。
 - 15、选择"Utility Menu>Select>Entities"。
 - 16、在顶部下拉菜单中选择"Lines"。
 - 17、按"Sele All", 然后按"Cancel"。

2.5.3.17 显示边界条件

- 1、选择"Utility Menu>PlotCtrls>Symbols"。出现"Symbols"对话框。
- 2、按 "All Applied BCs"方框。
- 3、在 "Surface Load Symbols"下拉框中,选 "Pressures"。
- 4、在"Show pres and convect as"下拉框,选"Arrows"。
- 5、按"OK"。

2.5.3.18 在把手上施加压力荷载

在这一步,在把手上施加100 N 的压力,代表手指施加的力。

- 1、选择 "Utility Menu>Select>Entities"。出现 "Select Entities"对话框。
- 2、在顶部的下拉框,选"Areas"。
- 3、在第二个下来菜单中选择"By Location"。
- 4、按"Y coordinates"方框选择它。
- 5、在Min, Max域,输入"BENDRAD, L HANDLE"然后按"Apply"。
- 6、按"X coordinates"选择它。
- 7、按"Reselect"。
- 8、在Min, Max域输入"W FLAT/2, W FLAT", 然后按"Apply"。
- 9、在顶部的下拉框,选择"Nodes"。
- 10、在第二个下来菜单中选择"Attached to"。
- 11、按"Areas, all"方框选择它。
- 12、按 "From Full" 方框选择它。
- 13、按"Apply"。
- 14、在第二个下来菜单中选择"By Location"。
- 15、按"Y coordinates"方框选它。
- 16、按"Reselect"方框。
- 17、在Min, Max域输入"L HANDLE+TOL, L HANDLE-(3.0*L ELEM)-TOL"。
- 18、按"OK"。
- 19、选择"Utility Menu>Parameters>Get Scalar Data"。出现"Get Scalar Data"对话框
- 20、在左侧选"Model Data"。
- 21、在右侧选 "For selected set"。
- 22、按"OK"。出现"Get Data for Selected Entity Set"对话框。
- 23、输入"minyval"作为定义的参数名。
- 24、在左侧选择 "Current node set"。
- 25、在右侧选"Min Y coordinate"。
- 26、按"Apply"。
- 27、在一次按 "OK"选择缺省设置。出现 "Get Data for Selected Entity Set"。
- 28、输入"maxyval"作为定义的参数名。
- 29、在左侧选择 "Current node set"。
- 30、在左侧选择"Max Y coordinate"。
- 31、按"OK"。
- 32、选择"Utility Menu>Parameters>Scalar Parameters"。出现"Scalar Parameters"对话框。
- 33、在"Selection text box"输入"PTORQ=100/(W_HEX*(MAXYVAL-MINYVAL))",然后按"Accept"。
 - 34、按"Close"。
- 35、选择"Main Menu〉Solution〉-Loads-Apply〉-Structural- Pressure >On Nodes"。出现"Apply PRES on Nodes"暑期框。
 - 36、按"Pick All"。出现"Apply PRES on Nodes"对话框。
 - 37、输入"Load PRES value"为"PTORQ",并按"OK"。
 - 38、选择"Utility Menu>Select>Everything"。
 - 39、选择"Utility Menu>Plot>Nodes"。
 - 40、在工具条中按"SAVE DB"。

2.5.3.19 写第一个荷载步

- 1、选择"Main Menu>Solution>Write LS File"。出现"Write Load Step File"对话框。
- 2、输入荷载步文件号1。
- 3、按"OK"。

2.5.3.20 定义向下的荷载

在这一步,要定义向下的荷载 20N (4.5 lb)。

- 1、选择"Utility Menu>Parameters>Scalar Parameters"。出现"Scalar Parameters"对话框。
 - 2、在其中输入 "PDOWN=20/(W_FLAT*(MAXYVAL-MINYVAL))", 帮按 "Accept"。
 - 3、按"Close"。
 - 4、选择"Utility Menu>Select>Entities"。出现"Select Entities"对话框。
 - 5、在顶部的下拉框中选择"Areas"。
 - 6、在第二个的下拉框中选择"By Location"。
 - 7、按"Z coordinates"方框选择它。
 - 8、按 "From Full" 方框选择它。
 - 9、在Min, Max域中输入"-(L SHANK+(W HEX/2))"。
 - 10、按"Apply"。
 - 11、在顶部的下拉框中选择"Nodes"。
 - 12、在第二个的下拉框中选择"Attached to"。
 - 13、按"Areas, all"方框选择它,并按"Apply"。
 - 14、在第二个的下拉框中选择"By Location"。
 - 15、按"Y coordinates"方框选择它。
 - 16、按"Reselect"方框。
 - 17、在Min, Max域输入"L HANDLE+TOL, L HANDLE-(3.0*L ELEM)-TOL"。
 - 18、按"OK"。
- 19、选择"Main Menu>Solution>-Loads-Apply>-Structural- Pressure> On Nodes"。出现"Apply PRES on Nodes"拾取框。
 - 20、按 "Pick All "。出现 "Apply PRES on Nodes"对话框。
 - 21、在"Load PRES value"输入"PDOWN",按"OK"。
 - 22、选择"Utility Menu>Select>Everything"。
 - 23、选择"Utility Menu>Plot>Nodes"。

2.5.3.21 写第二个荷载步

- 1、选择 "Main Menu>Solution>Write LS File"。出现 "Write Load Step File"对话框。
- 2、输入2。
- 3、在工具条中按"SAVE DB"。

2.5.3.22 从荷载步文件求解

- 1、选择"Main Menu>Solution>-Solve-From LS Files"。出现"Solve Load Step Files"对话框。
 - 2、在 "Starting LS file number"中输入1。
 - 3、在 "Ending LS file number"中输入2, 然后按"OK"。
 - 4、在求解完成后,按"Close"。

2.5.3.23 读入第一个荷载步并检查结果

- 1、选择"Main Menu>General Postproc>-Read Results-First Set"。
- 2、选择"Main Menu>General Postproc>List Results> Reaction Solu"。出现"List Reaction Solution"对话框。
 - 3、按"OK"接受缺省的所有项目。
 - 4、检查状态窗口的信息,然后按"Close"。
 - 5、选择 "Utility Menu>PlotCtrls>Symbols"。出现"Symbols"对话框。
 - 6、按"Boundary condition symbol"张按"None"方框,并按"OK"。
 - 7、选择"Utility Menu>PlotCtrls>Style>Edge Options",出现"Edge Options"对话框。
 - 8、在"Element outlines for non-contour/contour plots"下拉框,选择"Edge Only/All
 - 9、按"OK"。

- 10、选择"Main Menu>General Postproc>Plot Results> Deformed Shape"。出现"Plot Deformed Shape"对话框。
 - 11、按"Def + undeformed"框, 然后按"OK"。
- 12、选择"Utility Menu>PlotCtrls>Save Plot Ctrls"。出现"Save Plot Controls"对话框。
 - 13、在选择框中输入"pldisp.gsa", 按"OK"。
- 14、选择"Utility Menu>PlotCtrls>View Settings>Angle of Rotation"。出现"Angle of Rotation"对话框。
 - 15、输入120度角。
 - 16、在 "Relative/absolute"下拉框中选择 "Relative angle"。
 - 17、在"Axis of rotation"下拉框中,选择"Global Cartes Y"。
 - 18、按"OK"。
- 19、选择"Main Menu〉General Postproc〉Plot Results〉-Contour Plot-Nodal Solu"。出现"Contour Nodal Solution Data"对话框。
 - 20、在左侧选择"Stress"。在右侧选择"Intensity SINT"。
 - 21、按"OK"。
- 22、选择"Utility Menu>PlotCtrls>Save Plot Ctrls"。出现"Save Plot Controls"对话框。
 - 23、在选择框中输入"plnsol.gsa",并按"OK"。

2.5.3.24 读入下一个荷载步并检查结果

- 1、选择"Main Menu>General Postproc>-Read Results-Next Set"。
- 2、选择"Main Menu>General Postproc>List Results>Reaction Solu"。出现"List Reaction Solution"对话框。
 - 3、按"OK"接受缺省的所有项目。
 - 4、检查状态窗口的信息。然后按"Close"。
 - 5、选择"Utility Menu>PlotCtrls>Restore Plot Ctrls"。
 - 6、在选择框中输入"pldisp.gsa", 并按"OK"。
- 7、选择"Main Menu〉General Postproc〉Plot Results〉 Deformed Shape"。出现"Plot Deformed Shape"对话框。
 - 8、按"Def + undeformed"方框,并按"OK"。
 - 9、选择 "Utility Menu>PlotCtrls>Restore Plot Ctrls"。
 - 10、在选择矿中输入"plnsol.gsa",并按"OK"。
- 11、选择"Main Menu〉General Postproc〉Plot Results〉-Contour Plot-Nodal Solu"。出现"Contour Nodal Solution Data"对话框。
 - 12、在左侧选择"Stress"。在右侧选择"Intensity SINT"。
 - 13、按"OK"。

2.5.3.25 放大横截面

- 1、选择"Utility Menu>WorkPlane>Offset WP by Increments"。出现"Offset WP tool"框。
 - 2、在"X,Y,Z Offsets"中输入"0,0,-0.067",按"OK"。
- 3、选择"Utility Menu>PlotCtrls>Style>Hidden-Line Options"。出现"Hidden-Line Options"对话框。
 - 4、在"Type of Plot"下拉框选择"Capped hidden"。
 - 5、在 "Cutting plane is" 下拉框,选择"Working plane"。
 - 6、按"OK"。
 - 7、选择"Utility Menu>PlotCtrls>Pan-Zoom-Rotate"。出现"Pan-Zoom-Rotate tool"框
 - 8、按"WP"。
 - 9、把滑块拖到10。

10、在"Pan-Zoom-Rotate"对话框中,按大黑点几次来放大横截面。

2.5.3.26 退出ANSYS

- 1、从工具条选择"QUIT"。
- 2、选择"Quit--No Save"。
- 3、按"OK"。

2.6 静力分析示例(命令流方法)

下面是ANSYS命令流进行六角板手(Allen wrench)静力分析的例子。叹号(!) 开始的句子是说明。

```
/FILNAME, pm02
                  ! Jobname to use for all subsequent files
/TITLE, Static analysis of an Allen wrench
/UNITS, SI
                  ! Reminder that the SI system of units is used
/SHOW
                  ! Specify graphics driver for interactive run; for batch
                  ! run plots are written to pm02.grph
! Define parameters for future use
EXX=2. 07E11
                  ! Young's modulus (2.07E11 Pa = 30E6 psi)
W HEX=. 01
                  ! Width of hex across flats (.01m=.39in)
*AFUN, DEG
                  ! Units for angular parametric functions
                       ! Width of flat
W_FLAT=W_HEX*TAN(30)
                 ! Length of shank (short end) (.075m=3.0in)
L SHANK=. 075
L_HANDLE=. 2
                  ! Length of handle (long end) (.2m=7.9 in)
BENDRAD=. 01
                  ! Bend radius of Allen wrench (.01m=.39 in)
L_ELEM=. 0075
                 ! Element length (.0075 \text{ m} = .30 \text{ in})
NO_D_HEX=2
                  ! Number of divisions on hex flat
TOL=25E-6
                  ! Tolerance for selecting nodes (25e-6 m = .001 in)
/PREP7
ET, 1, SOLID45
                  ! Eight-node brick element
ET, 2, PLANE42
                  ! Four-node quadrilateral (for area mesh)
MP, EX, 1, EXX
                  ! Young's modulus for material 1
RPOLY, 6, W FLAT
                 ! Hexagonal area
K, 7
                  ! Keypoint at (0,0,0)
K, 8, , , -L SHANK
                ! Keypoint at shank-handle intersection
K, 9, , L HANDLE, -L SHANK
                           ! Keypoint at end of handle
L, 4, 1
                  ! Line through middle of hex shape
                  ! Line along middle of shank
L, 7, 8
                 ! Line along handle
L, 8, 9
LFILLT, 8, 9, BENDRAD
                     ! Line along bend radius between shank and handle
                 ! Isometric view in window 1
/VIEW, , 1, 1, 1
/ANGLE, , 90, XM
                 ! Rotates model 90 degrees about X
/PNUM, LINE, 1
                 ! Line numbers turned on
LPLOT
/PNUM, LINE, 0
                 ! Line numbers off
                  ! Hex section is cut into two quadrilaterals
ASBL, 1, 7, , , KEEP! to satisfy mapped meshing requirements for bricks
CM, BOTAREA, AREA! Component name BOTAREA for the two areas
! Generate area mesh for later drag
LESIZE, 1, , , NO_D_HEX
                         ! Number of divisions along line 1
LESIZE, 2, , , NO D HEX
LESIZE, 6, , , NO_D_HEX
TYPE, 2
                         ! PLANE42 elements to be meshed first
```

```
! Mapped quad mesh
MSHAPE, 0, 2D
MSHKEY, 1
SAVE
                         ! Save database before meshing
AMESH, ALL
/TITLE, Meshed hex wrench end to be used in vdrag
EPLOT
! Now drag the 2-D mesh to produce 3-D elements
TYPE, 1
                        ! Type pointer set to SOLID45
                        ! Element size
ESIZE, L ELEM
VDRAG, 2, 3, , , , , 8, 10, 9
                      ! Drag operation to create 3-D mesh
/TYPE, , HIDP
                        ! Precise hidden line display
/TITLE, Meshed hex wrench
EPLOT
CMSEL, , BOTAREA
                        ! Select BOTAREA component and
ACLEAR, ALL
                        ! delete the 2-D elements
ASEL, ALL
FINISH
! Apply loads and obtain the solution
/SOLU
ANTYPE, STATIC
                        ! Static analysis (default)
/TITLE, Allen wrench -- Load step 1
! First fix all nodes around bottom of shank
CMSEL, , BOTAREA
                        ! Bottom areas of shank
LSEL, , EXT
                        ! Exterior lines of those areas
NSLL,,1
                        ! Nodes on those lines
D, ALL, ALL
                        ! Displacement constraints
LSEL, ALL
/PBC, U, , 1
                        ! Displacement symbols turned on
/TITLE, Boundary conditions on end of wrench
NPLOT
!Now apply pressure on handle to represent 100-N (22.5-1b) finger force
ASEL, , LOC, Y, BENDRAD, L HANDLE
                                 ! Areas on handle
ASEL, R, LOC, X, W FLAT/2, W FLAT
                                 ! Two areas on one side of handle...
                                 ! ...and all corresponding nodes
NSLA,,1
NSEL, R, LOC, Y, L_HANDLE+TOL, L_HANDLE-(3.0*L_ELEM)-TOL ! Reselects nodes at
                                 ! back end of handle (3 element lengths)
*GET, MINYVAL, NODE, , MNLOC, Y
                                 ! Get minimum Y value of selected nodes
*GET, MAXYVAL, NODE, , MXLOC, Y
                                 ! Get maximum Y value of selected nodes
PTORQ=100/(W_HEX*(MAXYVAL-MINYVAL))
                                      ! Pressure equivalent to 100 N
SF, ALL, PRES, PTORQ
                                 ! PTORQ pressure on all selected nodes
                                 ! Restores full set of all entities
ALLSEL
                                 ! Pressure symbols turned on
/PSF, PRES, , 2
/TITLE, Boundary conditions on wrench for load step 1
NPLOT
LSWRITE
                                 ! Writes first load step
/TITLE, Allen wrench -- load step 2
! Downward pressure on top of handle, representing 20-N (4.5 -1b) force
```

PDOWN=20/(W FLAT*(MAXYVAL-MINYVAL))

```
ASEL,, LOC, Z, -(L_SHANK+(W_HEX/2)) ! Area on top flat of handle...
                                    ! ...and all corresponding nodes
NSEL, R, LOC, Y, L_HANDLE+TOL, L_HANDLE-(3.0*L_ELEM)-TOL ! Reselects nodes at
                                 ! back end of handle (3 element lengths)
SF, ALL, PRES, PDOWN
                                 ! PDOWN pressure at all selected nodes
ALLSEL
/TITLE, Boundary conditions on wrench for load step 2
NPLOT
LSWRITE
                                 ! Writes second load step
SAVE
                                 ! Save database before solution
                          ! Initiates solution for load step files 1 and 2
LSSOLVE, 1, 2
FINISH
!Review the results
/POST1
SET, 1
                         ! Reads load step 1 results
PRRSOL
                         ! Reaction solution listing
/PBC, DEFA
                        ! No BC symbols
/PSF, DEFA
                        ! No surface load symbols
/EDGE, , 1
                        ! Edges only, no interior element outlines
/TITLE, Deformed allen wrench caused by torque
PLDISP, 2
                        ! Deformed shape overlaid with undeformed edge plot
/GSAVE, pldisp, gsav
                        ! Saves graphics specifications on pldisp.gsav
                        ! Turns on entire legend column
/PLOPTS, INFO, ON
                        ! Turns off legend header
/PLOPTS, LEG1, OFF
/ANGLE, , 120, YM, 1
                        ! Additional rotation about model Y (to see high stress areas)
/TITLE, Stress intensity contours caused by torque
PLNSOL, S, INT
                        ! Stress intensity contours
/GSAVE, plnsol, gsav
                        ! Saves graphics specifications to plnsol.gsav
SET, 2
                        ! Reads load step 2 results
PRRSOL
                         ! Reaction solution listing
/GRESUME, pldisp, gsav
                        ! Resumes graphics specifications from pldisp.gsav
/TITLE, Deformed allen wrench caused by torque and force
PLDISP, 2
/GRESUME, plnsol, gsav
                         ! Resumes graphics specifications from plnsol.gsav
/TITLE, Stress intensity contours caused by torque and force
PLNSOL, S, INT
WPOF, , , -0.067
                         ! Offset the working plance for cross-section view
/TYPE, 1, 5
                         ! Capped hidden display
/CPLANE, 1
                         ! Cutting plane defined to use the WP
/VIEW, 1 ,WP
                        ! View will be normal to the WP
                         ! Zoom in on the cross section
/DIST, 1, . 01
/TITLE, Cross section of the allen wrench under torque and force loading
PLNSOL, S, INT
FINISH
/EXIT, ALL
```

2.7 何处找到更多的静力分析示例

ANSYS 的其他一些出版物,特别是《ANSYS Verification Manual》和《ANSYS Tutorials》,还论述了一些静力分析示例。

《ANSYS Verification Manual》包括了一些用于说明 ANSYS 系列产品功能的例子。这些例子说明如何求解真实问题。这个手册并不提供分析的祥细步骤,但 ANSYS 用户只要具备最低限度的有限元分析知识(经验),就应当可以完成这些计算。该手册包括如下的结构静力分析示例:

```
VM1 -- 静不定反力分析。
VM2 -- 梁的应力和挠度。
```

- VM4 -- 铰支承的挠度。
- VM11 -- 缀余应力问题。
- VM12 -- 弯曲和扭转的组合。
- VM13 -- 受压圆柱壳。
- VM16 -- 实体梁的弯曲。
- VM18 -- 曲杆的面外弯曲。
- VM20 -- 受压圆柱膜壳。
- VM25 -- 长圆柱的应力。
- VM29 -- 支承块上的摩擦。
- VM31 -- 悬挂缆索。
- VM36 -- 极限弯矩分析。
- VM39 -- 有中心圆孔的圆板的弯曲。
- VM41 -- 刚性梁的小挠。
- VM44 -- 自重作用下轴对称薄管的弯曲。
- VM53 -- 受扭弹簧的振动。
- VM59 -- 受轴向力的杆的横向振动。
- VM63 -- 静力Hertz接触问题。
- VM78 -- 悬臂梁的横向剪切应力。
- VM82 -- 受压的简支多层板。
- VM127 -- 铰支杆的屈曲。
- VM135 -- 弹性地基梁的弯曲。
- VM141 -- 圆盘的径向压缩。
- VM148 -- 抛物线曲梁的弯曲。
- VM183 -- 弹簧-质量系统的简谐响应。
- VM199 -- 剪切变形时实体的粘弹性分析。
- VM201 -- 两块平板之间受压的橡胶圆柱。
- VM206 -- 受到电压激励的绞线圈。
- VM211 -- 两块平板之间受压的橡胶圆柱。
- VM216 -- 直角刚架的横向屈曲。

7 屈曲分析

7.1 屈曲分析的概念

屈曲分析是一种用于确定结构开始变得不稳定时的临界载荷和屈曲模态形状(结构发生屈曲响应时的特征形状)的技术。

7.2 屈曲分析的类型

ANSYS 公司 在 ANSYS/Multiphysics 、 ANSYS/Mechanical 、 ANSYS/Structural 以及 ANSYS/Professional中,提供两种结构屈曲载荷和屈曲模态的分析方法: 非线性屈曲分析和特征值(线性)屈曲分析。这两种方法通常得到不同的结果,下面先讨论一下二者的区别。

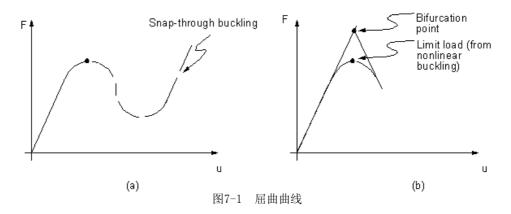
7.2.1 非线性屈曲分析

非线性屈曲分析比线性屈曲分析更精确,故建议用于对实际结构的设计或计算。 该方法用一种逐渐增加载荷的非线性静力分析技术来求得使结构开始变得不稳定时的临界载荷。见图7-1a。

应用非线性技术,模型中就可以包括诸如初始缺陷、塑性、间隙、大变形响应等特征。此外,使用偏离控制加载,用户还可以跟踪结构的后屈曲行为(这在结构屈曲到一个稳定外形,如浅拱的"跳跃"屈曲的情况下,就很有用处)。

7.2.2 特征值屈曲分析

特征值屈曲分析用于预测一个理想弹性结构的理论屈曲强度(分叉点)。 该方法相当于教科书里的弹性屈曲分析方法。例如,一个柱体结构的特征值屈曲分析的结果,将与经典欧拉解相当。但是,初始缺陷和非线性使得很多实际结构都不是在其理论弹性屈曲强度处发生屈曲。因此,特征值屈曲分析经常得出非保守结果,通常不能用于实际的工程分析。



7.3 屈曲分析的用到的命令

用户可以应用与静力分析相同的命令集,来进行屈曲分析。同样,不论何种分析,都可以应用类似的GUI菜单来建立模型和求解。

本章§7.6 和§7.7 示出了用GUI方法和命令流方法求解屈曲分析的例子。有关命令可参《ANSYS Commands Reference》。

7.4 非线性屈曲分析的过程

非线性屈曲分析是在大变形效应开关打开的情况下[NLGEOM, ON]的一种静力分析,该分析过程一直进行到结构的极限载荷或最大载荷。其它诸如塑性等非线性也可以包括在分析中。结构线性静力分析的方法见§2,而结构非线性静力分析方法则见§8。

7.4.1 施加载荷增量

非线性屈曲分析的基本方法是,逐步地施加一个恒定的载荷增量,直到解开始发散为止。尤其重要的是,要一个足够小的载荷增量,来使载荷达到预期的临界屈曲载荷。若载荷增量太大,则屈曲分析所得到的屈曲载荷就可能不精确。在这种情况下,打开二分和自动时间步长功能[AUTOTS, ON] 有助于避免这种问题。

7.4.2 自动时间步长功能

打开自动时间步长功能,程序将自动地寻找出屈曲载荷。如果在一个静力分析中,打开了自动时间步长功能并且加载方式是斜坡加载,而在某一给定载荷下解不收敛,程序就会将载荷载增量减半,在这个载荷下重新进行新一轮求解。在一个屈曲分析中,每一次这种收敛失败都通常伴随着一个"负主对角"信息,这意味着所施加的荷载等于或超过了屈曲载荷。如果程序接着又成功地求得了一个收敛解,则用户可以忽略这些信息。如果应力刚度激活[SSTIF, ON],则用户应当在没有自适应下降[NROPT, FULL, OFF]的情况下运行,以确保达到屈曲荷载的下限。随着这种二分和重新求解过程,使得载荷步增量达到了所定义的最小时间步增量(由 DELTIM 或 NSUBST 命令定义)时,通常也就收敛到了临界载荷。因此用户所定义的最小时间步,将直接影响到求解的精度。

7.4.3 注意事项

特别要注意的是,一个非收敛的解,并不意味着结构达到了其最大载荷。它也可能是由于数值不稳定引起的,这可以通过细化模型的方法来修正。跟踪结构响应的载荷-变形历程,可以确定一个非收敛的载荷步,到底是表示了一个实际的结构屈曲,还是反映了其它问题。用户可以先用弧长法[ARCLEN]命令来进行一个预分析,以预测屈曲载荷(近似值),将此近似值与用二分法求得的更精确的值作比较,来确定是否结构已真正达到了其最大载荷。用户也可以用弧长法本身来求得一个精确的屈曲载荷,但这需要用户自己不断地修正弧长半径,以及人工直接干预程序来执行一系列重求

7.4.4 其他

除上面的论述以外,用户还需注意以下六点:

- 如果结构上的载荷完全是在平面内的(亦即只有膜应力或轴向应力),则将不会产生导致屈曲所必须的面外变形,所进行的分析也就不能求得屈曲结果。要克服这个问题,可以在结构上施加一个很小的面外扰动,如一个适当的瞬时力或强制位移,以激发屈曲响应。(对结构作一个预先的特征值屈曲分析来预测屈曲模态很有用,它可以帮助用户确定施加扰动的合适位置以激起所希望的屈曲响应)。初始缺陷(扰动)应与实际结构在位置和大小上一致,因屈曲载荷对这些参数非常敏感。
- 在大变形分析中,力(和位移)将保持其初始方向,但表面载荷将跟随结构改变了的几何形状,因此,要确保所施加的载荷类型正确。
- 用户在实际工作中应将一个稳态分析进行到结构的临界载荷点,以计算出结构产生非线性 屈曲的安全系数。仅仅说明结构在一个给定的载荷水平下是稳定的,在大多数实际的设计 实践中并不足够。用户通常应提供一个确定的安全系数,而这一点必须通过屈曲分析得到 结构实际的极限载荷来实现。
- 用户可以通过激活弧长法[ARCLEN],将分析扩展到后屈曲范围。使用该特征来跟踪"载荷-变形"曲线通过那些发生了"阶跃(snap-through)"或"回跃(snap-back)"响应的区域。
- 对于那些支持一致切向刚度矩阵的单元(BEAM4、SHELL63、SHELL141),激活一致切向刚度矩阵[KEYOPT(2)=1 和 NLGEOM, ON]可以增强非线性屈曲分析的收敛性,改善求解的精确度。单元的该 KEYOPT 必须在求解的第一载荷步之前定义,并且一旦求解开始后就不能改变。
- 其他许多单元(如BEAM188、BEAM189、SHELL181)将在[NLGEOM, ON] 时提供一致切线刚度矩阵。

7.5 特征值(线性)屈曲分析

再一次提醒用户,<mark>特征值屈曲分析通常产生非保守结果,故通常不应用于实际结构的设计。</mark>若用户认为特征值屈曲分析对于自己的应用是合适的话,则可按如下步骤进行分析:

- 1、建立模型;
- 2、获得静力解;
- 3、获得特征值屈曲解;
- 4、展开解;
- 5、观察结果。

7.5.1 建立模型

定义作业名和分析标题,进入 PREP7 定义单元类型、单元实常数、材料性质、模型几何实体。这些任务与其它大多数分析类似,见《ANSYS Basic Analysis Guide》§1.2 和《ANSYS Modeling and Meshing Guide》。

7.5.1.1 注意事项

- 只允许线性行为。如果定义了非线性单元,则将按线性单元对待。若结构中包含有接触单元,则基于它在静态预应力分析后的状态来进行其刚度计算,而且在后续分析中永不改变
- 必须定义材料的弹性模量EX(或某种形式的刚度)。材料性质可以是线性、各向同性或各向异性,恒值或与温度相关。非线性性质即使定义了也将被忽略。

7.5.2 获得静力解

该过程与 § 2 所论述的一般静力分析过程一致,只是要注意以下几点:

- 必须激活预应力影响[PSTRES]。因该分析需要计算应力刚度矩阵。
- 通常只要施加一个单位载荷就足够了(亦即不用施加实际载荷)。由屈曲分析计算出的特征值,表示屈曲载荷系数。因此,若施加的是单位载荷,则该特征值就表示实际的屈曲载荷,并且所有的载荷都是作相应的缩放。注意,ANSYS允许的最大特征值是 1,000,000 若求解时特征值超过了此限度,则用户应施加一个较大的载荷。
- 注意特征值对所有的载荷都作相应的缩放。如某些荷载是常数(如自重荷载),而其他荷载是可变的(如外荷载),则必须要确保从常数荷载得到的刚度,在特征值求解时不被缩放。达到这一目的的一个策略,是在特征解上迭代,调整可变荷载,直到特征值变成1.0(或接近1.0),即允许一些收敛容差)。用这种迭代方法来得到最终结果时,设计优化功能最有用。如撑杆自重为 W_0 ,支承外荷载 A。为了在特征值屈曲分析中确定A的极限值,可以应用不同的A重复求解,直到由迭代得到特征值为可接受的 1.0。

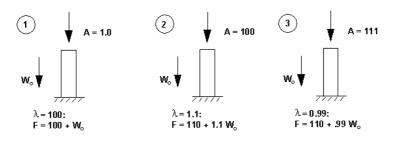


图7-2 调整可变荷载直到得到特征值1

- 如同静力分析一样,可以在前处理阶段施加非0约束。在特征值屈曲分析中得出的解,是 作用于非0约束值的荷载系数。但是,在这些自由度上,模态值为0,而不是指定的非0值
- 求解完成后,退出求解器[FINISH]。

7.5.3 获得特征值屈曲解

这一步需要从静力分析中得到的 Jobname. EMAT 和 Jobname. ESAV 文件。而且,数据库必须包含该模型(需要时可以应用 RESUME 命令恢复)。获得特征值屈曲解有如下几个步骤:

1、进入求解

命令:/SOLU

GUI: Main Menu>Solution

2、定义分析类型

命令: ANTYPE, BUCKLE

GUI: Main Menu>Solution-Analysis Type-New Analysis

注意--在特征值屈曲分析中,重启动分析无效。

注意一在指定特征值分析时,将出现一个适合与屈曲分析的Solution菜单。这个菜单可能是"Abridged(简化)"或"Unabridged(完整)"菜单,这与你在进行这一步之前的操作有关。"Abridged(简化)"菜单仅包括屈曲分析中有效或推荐的求解选项。如处在"Abridged(简化)"菜单上,可以选"Unabridged(完整)"而进入到完整的菜单。参见《ANSYS Basic Analysis Guide》§3.11.1。

3、定义分析选项

命令: BUCOPT, Method, NMODE, SHIFT

GUI: Main Menu>Solution>Analysis Options

不论是用命令流方法还是GUI方法,用户可以指顶下面这些选项:

- Method: 指顶特征值提取方法。选择子空间迭代法或Block Lanczos方法。这两种方法都使用完全系统矩阵。见§3.6.2.3。
- *MMODE*: 指顶提取的特征值数。缺省为1,一般来说已经足够。
- *SHIFT*: 指定要计算特征值的点(荷载作用点)。该选项在遇到数值问题时(例如由负特征值引起的问题)很有用。缺省值是0.0。
- 4、定义载荷步选项

特征值屈曲分析中,有效的载荷步选项是扩展过程选项和输出控制。

命令: OUTPR, NSOL, ALL

GUI: Main Menu>Solution>-Load Step Opts-Output Ctrls>

Solu Printout

可以把扩展过程作为特征值求解过程的一个选项,也可以单独的步骤执行。在本书中,我们按单独执行来考虑。见7.5.4。

5、用一个另外的文件名保存一个数据库的备份文件(SAVE命令)

命令: SAVE

GUI: Utility Menu>File>Save As

6、开始求解

命令: SOLVE

GUI: Main Menu>Solution>-Solve-Current LS

求解过程的输出内容,主要是特征值结果,它被作为输出文件的一部分(Jobname. OUT)。特征值表示了屈曲载荷系数,若在前面静力分析中施加的是单位载荷,则特征值就是屈曲载荷。此时数据库或结果文件中还没有屈曲模态形状,因此还不能对结果作后处理,需先扩展解以后才能做后处理。

有些时候,用户可以发现程序同时计算出了正特征值和负特征值。此时,负特征值表示结构在 相反的方向上施加载荷也会发生屈曲。 7、退出求解器

命令: FINISH

GUI: 关闭求解菜单。

7.5.4 扩展解

若用户想要观察屈曲模态形状,则不管采用何种方法提取的特征值,都必须对解作展开。对于子空间迭代法(这时应用完全系统矩阵),用户可简单地认为此步是将屈曲模态形状写入结果文件。

7.5.4.1 注意事项

- 必须存在从特征值屈曲分析得到的模态文件(Jobname. MODE)。
- 数据库必须包含与求解时相同的模型。

7.5.4.2 展开解

展开屈曲模态形状的过程阐述如下:

1、重新进入求解器

命令:/SOLU

GUI: Main Menu>Solution

注意一用户在进行扩展解前,必须显式地离开求解器(用 FINISH 命令),然后重新进入求解器(用 /SOLU 命令)

2、激活扩展过程及其选项

命令: EXPASS, ON

GUI: Main Menu>Solution>-Analysis Type-ExpansionPass

3、指顶扩展过程选项

命令: MXPAND, NMODE, , , Elcalc

GUI: Main Menu>Solution>-Load Step Opts-ExpansionPass>

Expand Modes

不论是应用命令流方法还是GUI方法,都需要下面的选项:

- NMODE: 指定要扩展的模态数。缺省为提取的总模态数。
- *Elcalc*: 指明是否要计算"应力"。在特征值分析中"应力"并不是真实的应力,只是给出各个模态下一个相对应力或力的概念。缺省是不计算"应力"。
- 4、定义载荷步选项

在屈曲展开过程中,有效的载荷步选项只有下面的输出控制:

• 打印输出

该选项将任何结果数据包含在输出文件(Jobname. OUT)中。

命令: OUTPR

GUI: Main Menu \gt Solution \gt -Load Step Opts-Output Ctrl \gt Solu Printout

• 数据库和结果文件输出

该选项控制结果文件(Jobname. RST)中的数据。

命令: OUTRES

GUI: Main Menu>Solution>-Load Step Opts-Output Ctrl>
DB/Results File

注意--OUTPR 和 OUTRES 命令中的 FREQ 域只能是 ALL 或 NONE, 亦即, 只能进行数据处理所有模态或无模态

35

5、开始扩展

输出包括扩展模态形状,各个模态的相对应力分布(如果需要的话)。

命令: SOLVE

GUI: Main Menu>Solution>-Solve-Current LS

6、退出求解器

命令: FINISH

GUI: 关闭求解菜单。

注意一扩展过程在这里被描述成一个独立的步骤。用户可以把该过程作为特征值求解过程的一部分,方法是在特征值求解时将 MXPAND 命令((Main Menu>Solution>-Load Step Opts-ExpansionPass>Expand Modes)包括进去,作为分析选项之一。

7.5.5 查看结果

屈曲扩展过程的结果写在结果文件(Jobname. RST)中,包括屈曲载荷系数、屈曲模态形状、相对应力分布等,可在 POST1 中对结果进行观察。

注意一在用POST1观察结果时,数据库必须包含与屈曲计算相同的模型(需要时,可以用 RESUME 命令恢复)。而且,必须存在从扩展得到的结果文件(Johname. RST)。

1、显示所有屈曲载荷系数

命令: SET, LIST

GUI: Main Menu>General Postproc>Results Summary

2、读入想要观察的模态,以显示屈曲模态形状(在结果文件中,每个模态是作为一个独立的子步来保存的)。

命令: SET, SBSTEP

GUI: Main Menu>General Postproc>-Read Results-load step

3、显示模态形状

命令: PLDISP

GUI: Main Menu>General Postproc>Plot Results>Deformed Shape

4、等值线显示相对应力分布

命令: PLNSOL 或 PLESOL

GUI: Main Menu〉General Postproc〉Plot Results〉-Contour Plot-Nodal Solution 或

Main Menu>General Postproc>Plot Results>-Contour Plot-Element Solution

有关命令ANTYPE, PSTRES, D, F, SF, BUCOPT, EXPASS, MXPAND, OUTRES, SET, PLDISP, PLNSOL, 参见《ANSYS Commands Reference》

7.6 特征值屈曲分析实例(GUI方法)

在这个实例分析中,我们将进行一个两端铰支杆的特征值屈曲屈曲分析。

7.6.1 问题描述

一根长为L,两端铰支的细长杆,受到轴向荷载作用。此杆截面的高度为h,面积为A。由于对称性,我们只给杆的上端建模,则上半部分的边界条件变为一端自由一端固支。为了描述屈曲模态,在X方向取10个主自由度。杆的惯性矩为I=Ah²/12=0.0052038 in⁴。

7.6.2 问题详细说明

材料特性: E=30E6 psi

几何特性: L=200 in; A=0.025 in²; h=0.5 in

荷载: F=1 lb

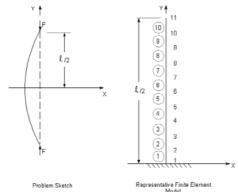


图7-3 (a)问题描述; (b)有限元模型图

7.6.3 求解步骤

7.6.3.1 设置分析标题

在进入ANSYS以后,按下面设置分析标题:

- 1、选择 Utility Menu>File>Change Title。
- 2、输入"Buckling of a Bar with Hinged Ends", 然后按"OK"。

7.6.3.2 定义单元类型

定义单元类型为 BEAM3。

- 1、选择 path Main Menu>Preprocessor>Element Type> Add/Edit/Delete 出现单元类型对话框:
 - 2、按"Add", 出现单元类型库对话框;
 - 3、在左边选 "Structural Beam";
 - 4、在右边选"2D elastic 3";
 - 5、按"OK"。

7.6.3.3 定义实常数和材料特性

- 1、选 "Main Menu>Preprocessor>Real Constants>Add/Edit/Delete", 出现实常数对话框;
- 2、选"Add",出现单元类型的实常数对话框;
- 3、按"OK",出现BEAM3实常数对话框;
- 4、输入面积=0.25, 惯矩I_{ZZ}=52083E-7, 高度=0.5;
- 5、按"OK";
- 6、按"Close":
- 7、选"Main Menu>Preprocessor>Material Props>Material Models", 出现材料模式行为对话框;
- 8、在可用的材料模式窗口中,双击"Structural->Linear->Elastic-> Isotropic",出现一个对话框;
 - 9、输入EX=30E6,按"OK"。这时在左侧窗口出现材料模式1;
 - 10、选择 "Material〉Exit "关闭窗口。

7.6.3.4 定义节点和单元

1、选"Main Menu>Preprocessor> -Modeling- Create>Nodes>In Active CS", 出现 Create Nodes in Active Coordinate System 对话框;

- 2、节点号输入1;
- 3、按"Apply", 节点位置缺省为(0,0,0);
- 4、节点号输入11;
- 5、输入X、Y、Z坐标(0, 100, 0);
- 6、按"OK",图形窗口出现2个节点。

注意一缺省时,显示坐标符号。这样可能会挡住节点1的显示。可以用"Utility Menu>PlotCtrls>Window Controls> Window Options",并选择"Not Shown" 选项隐藏坐标符号。

- 7、选择"Main Menu>Preprocessor>-Modeling- Create> Nodes>Fill between Nds", 出现Fill between Nds picking 拾取菜单。
 - 8、拾取节点1和11, 按"OK"。出现 Create Nodes Between 2 Nodes 对话框。
 - 9、按"OK"接受缺省设置(即在节点1和11之间填充9个节点)。
- 10、选择"Main Menu>Preprocessor>-Modeling- Create> Elements>-Auto Numbered- Thru Nodes", 出现 Elements from Nodes 拾取菜单。
 - 11、拾取节点1和2, 按"OK";
- 12、选择"Main Menu>Preprocessor>-Modeling- Copy> -Elements- Auto Numbered",出现Copy Elems Auto-Num 拾取菜单;
 - 13、按"Pick All"。出现 Copy Elements (Automatically-Numbered)对话框;
 - 14、输入拷贝总数10, 节点增量1;
 - 15、按"OK"。现在图形窗口中, 出现其余单元。

7.6.3.5 施加边界条件和载荷。

- 1、选择"Main Menu>Solution>Unabridged Menu>-Analysis Type- New Analysis", 出现 New Analysis 对话框;
 - 2、按"OK"接受缺省的"静力分析"选项;
- 3、选择"Main Menu>Solution>Analysis Options", 出现 Static or Steady-State Analysis 对话框;
 - 4、在 stress stiffness or prestress 框中,选择 "Prestress ON";
 - 5、按"OK";
- 6、选择"Main Menu>Solution>-Loads-Apply>-Structural-Displacement >On Nodes"。出现 Apply U, ROT on Nodes 拾取菜单;
- 7、在图形窗口中, 拾取节点1, 然后在拾取菜单按"OK"。出现Apply U, ROT on Nodes 拾取菜单:
 - 8、按 "ALL DOF", 然后按 "OK";
- 9、选择"Main Menu>Solution>-Loads-Apply>-Structural-Force/Moment>On Nodes"。出现 Apply F/M on Nodes;
 - 10、拾取节点11,按"OK"。出现 Apply F/M on Nodes 对话框;
 - 11、在 Direction of force/mom 框,选 "FY";
 - 12、输入力/弯矩值-1, 然后按"OK", 在图形窗口中出现力的符号。

7.6.3.6 求解静力分析

- 1、选择菜单路径 "Main Menu>Solution>-Solve-curretn LS";
- 2、认真检查状态窗口的信息,然后关闭之;
- 3、在 Solve Current Load Step 对话框中,单击"OK"开始求解;
- 4、在求解完成后,按"Close"关闭窗口。

7.6.3.7 求解屈曲分析。

1、选择Main Menu>Solution>Analysis Type-New Analysis;

注意一关闭警告窗口,如出现下列警告窗口: "Changing the analysis type is only valid within the first load step"。按"OK"将引起用户退出并重新进入SOLUTION。这将是荷载步记数到1。

- 2、选择 "Elgen Buckling"选项,打开它,然后单击"OK";
- 3、选择 Main Menu>Solution>Analysis Optios, 出现分析选项对话框;
- 4、选择"Block Lanczos"选项,对抽取的模态数输入1;
- 5、单击"OK";
- 6、选择Main Menu>Solution>-Load Step opts-Expansion pass> Expand Modes;
- 7、对扩展的模态数输入1,然后单击"OK":
- 8、选择Main Menu>Solution>-Solve-Current LS;
- 9、认真检查状态窗口的信息,然后关闭之;
- 10、在 Solve Current Load Step 对话框中,单击"OK"开始求解;
- 11、在求解完成后,按"Close"关闭窗口。

7.6.3.8 进行后处理。

- 1、选择 Main Menu〉General Postproc〉-Read Results- First Set;
- 2、选择 Menu>General Postproc>Plot Results>Deformed Shape。出现Plot Deformed Shape 对话框:
 - 3、选择"Def + undeformed", 然后按"OK"。现在在图形窗口中出现变形前后的图形;
 - 4、从输出窗口中,可查到屈曲荷载系数为 38.552928。

7.6.3.9 退出ANSYS

- 1、在ANSYS工具条中选"Quit";
- 2、选择需要的选项,然后按"OK"。

7.7 屈曲分析示例(命令流方法)

下面是前一节例子的命令流方法的输入文件。叹号(!)开头者为说明。

/PREP7

/TITLE, BUCKLING OF A BAR WITH HINGED SOLVES ET, 1, BEAM3 ! Beam element R, 1, .25, 52083E-7, .5 ! Area, IZZ, height

MP, EX, 1, 30E6 ! Define material properties

N, 1 N, 11, , 100 FILL E, 1, 2 EGEN, 10, 1, 1 FINISH

/SOLU

ANTYPE, STATIC ! Static analysis

PSTRES, ON ! Calculate prestress effects

SOLVE FINISH

/SOLU

SOLVE

ANTYPE, BUCKLE! Buckling analysis

BUCOPT, LANB, 1 ! Use Block Lanczos solution method, extract 1 mode

MXPAND, 1 ! Expand 1 mode shape

FINISH /POST1 SET, FIRST PLDISP, 1 FINISH

7.8 何处找到更多的示例

ANSYS的其他一些出版物,特别是《ANSYS Verification Manual》和《ANSYS Tutorials》,还论述了一些屈曲分析示例。

《ANSYS Verification Manual》包括了一些用于说明ANSYS系列产品功能的测试实例。这些测试实例说明如何求解真实问题。这个手册并不提供分析的祥细步骤,但 ANSYS 用户只要具备最低限度的有限元分析经验,就应当可以完成这些计算。该手册包括如下的结构屈曲分析示例:

VM17 -- 铰接拱的跳跃屈曲。

VM127 -- 端部铰接杆的屈曲(线单元)。

VM128 -- 端部铰接杆的屈曲(面单元)。

8 非线性结构分析

8.1 结构非线性的定义

在日常生活中,会经常遇到结构非线性。例如,无论何时用钉书针钉书,金属钉书钉将永久地弯曲成一个不同的形状(图8-1a)。如果用户在一个木架上放置重物,随着时间的迁移它将越来越下垂(图1-1b)。当在汽车或卡车上装货时,它的轮胎和下面路面间接触将随货物重量而变化(图8-1c)。如果将上面例子所载荷变形曲线画出来,用户将发现它们都显示了非线性结构的基本特征一结构刚度改变。

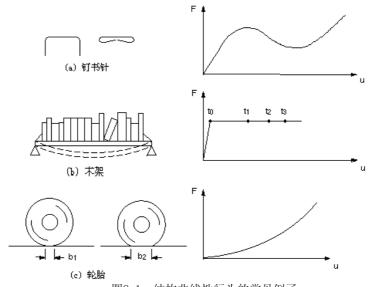


图8-1 结构非线性行为的常见例子

8.1.1 非线性行为的原因

引起结构非线性的原因很多,它可以被分成三种主要类型:状态改变、几何非线性、材料非线性。

8.1.1.1 状态变化(包括接触)

许多普通结构表现出一种与状态相关的非线性行为。例如,一根只能拉伸的电缆可能是松的, 也可能是绷紧的。轴承套可能是接触的,也可能是不接触的。冻土可能是冻结的,也可能是融化的 。这些系统的刚度由于系统状态的改变在不同的值之间突然变化。状态改变也许和载荷直接有关 (如在电缆情况中), 也可能由某种外部原因引起(如在冻土中的紊乱热力学条件)。

接触是一种很普遍的非线性行为。接触是状态变化非线性类型形中一个特殊而重要的子集。参见§9。

8.1.1.2 几何非线性

如果结构经受大变形,它变化的几何形状可能会引起结构的非线性响应。一个例子是**图8-2**所示的钓鱼杆。随着垂向载荷的增加,杆不断弯曲以致于力臂明显地减少,导致杆端显示出在较高载荷下不断增长的刚性。几何非线性的特点是"大"位移和/或"大"转动。

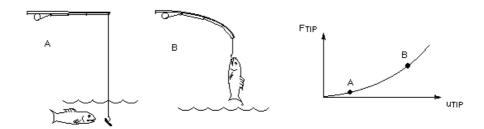


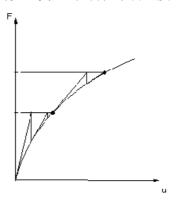
图8-2 钓鱼杆示范几何非线性

8.1.1.3 材料非线性

非线性的应力—应变关系是结构非线性名的常见原因。许多因素可以影响材料的应力—应变性质,包括加载历史(如在弹—塑性响应状况下),环境状况(如温度),加载的时间总量(如在蠕变响应状况下)。

8.1.2 非线性分析的基本信息

ANSYS程序应用NR(牛顿一拉森)法来求解非先行问题。在这种方法中,载荷分成一系列的载荷增量。载荷增量施加在几个载荷步。图8-3说明在单自由度非线性分析中的NR方法。



完全牛顿-拉普森迭代求解(2个载荷增量) 图8-3 牛顿-拉普森法

在每次求解前,NR方法估算出残差矢量,这个矢量是回复力(对应于单元应力的载荷)和所加载荷的差值。程序然后使用不平衡载荷进行线性求解,且核查收敛性。如果不满足收敛准则,重新估算非平衡载荷,修改刚度矩阵,获得新的解答。持续这种迭代过程直到问题收敛。

ANSYS程序提供了一系列命令来增强问题的收敛性,如线性搜索、自动载荷步、二分等,可被 激活来加强问题的收敛性。如果不能得到收敛,那么程序试图用一个较小的载荷增量来继续计算。

对某些非线性静态分析,如果用户仅仅使用NR方法,正切刚度矩阵可能变为奇异(或非唯一),导致严重的收敛问题。这样的情况包括结构完全崩溃或者"跳跃"到另一个稳定形状的非线性屈曲问题。对这样的情况,用户可以激活另外一种迭代方法,如弧长方法,来避免分叉点和跟踪卸载。

弧长方法导致NR平衡迭代沿一段弧收敛,从而即使当荷载-挠度曲线的倾角为零或负值时,也往往阻止发散。这种迭代方法以图形表示在**图8-4**中。

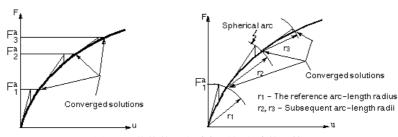


图8-4 传统的NR方法与弧长方法的比较

分线性求解被分成三个操作级别:载荷步、子步、平衡迭代。

- 顶层级别由在一定"时间"范围内用户明确定义的载荷步组成。假定载荷在载荷步内线性 地变化。见《ANSYS Basic Analysis Guide》§2。
- 在每一个载荷是步内,为了逐步加载,可以控制程序来执行多次求解(子步或时间步)。
- 在每一个子步内,程序将进行一系列的平衡迭代以获得收敛的解。

图 8-5 说明了一段用于非线性分析的典型的载荷历史。参见《ANSYS Basic Analysis Guide》 § 2。

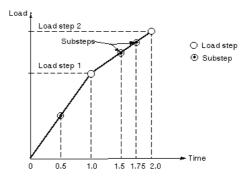


图8-5 载荷步、子步、及时间

当用户确定收敛准则时,ANSYS程序给出一系列的选择:可以将收敛检查建立在力、力矩、位移、转动或这些项目的任意组合上。另外,每一个项目可以有不同的收敛容限值。对多自由度问题,还有收敛模的选择。

当用户确定收敛准则时,记住以力(或力矩)为基础的收敛提供了收敛的绝对量度。如果需要可以位移为基础(或以转动为基础的)收敛检查,但是通常不单独使用它们。

8.1.2.1 保守行为与非保守行为一过程依赖性

如果通过外载输入系统的总能量当载荷移去时复原,我们说这个系统是保守的。如果能量被系统消耗(如由于塑性应变或滑动摩擦),我们说系统是非保守的,一个非守恒系统的例子示如图8-6。

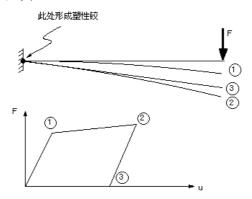


图8-6 非保守(过程相关)过程

一个保守系统的分析是与过程无关的:通常可以任何顺序和以任何数目的增量加载而不影响最终结果。相反地,一个非保守系统的分析是过程相关的;必须紧紧跟随系统的实际加载历史,才能获得精确的结果。如果对于给定的载荷范围,可以有多于一个的解是有效的(如在跳跃分析中),这样的分析也可能是过程相关的。过程相关问题通常要求缓慢加载(也就是使用许多子步)到最终的载荷值。

8.1.2.2 子步

当使用多个子步时,用户需要考虑精度和代价之间的平衡;更多的子步(也就是较小的时间步)通常导致较好的精度,但以增加运行时间为代价。ANSYS提供的自动时间步选项,用于这一目的。

自动时间分步。用户可以激活自动时间步,以便随需要调整时间步长,获得精度和代价之间的良好平衡。自动时间步激活ANSYS程序的二分特点。

二分法提供了一种对收敛失败自动矫正的方法。无论何时只要平衡迭代收敛失败,二分法将把时间步长分成两半,然后从最后收敛的子步自动重启动。如果已二分的时间步再次收敛失败,二分 法将再次分割时间步长然后重启动,持续这

一过程直到获得收敛或到达最小时间步长(由用户指定)。

8.1.2.3 载荷和位移方向

当结构经历大变形时,应该考虑到载荷将发生了什么变化。在许多情况中,无论结构如何变形,施加在系统中的载荷保持恒定的方向。而在另一些情况中,力将改变方向,随着单元方向的改变而变化。

ANSYS程序根据所施加的载荷类型,可以建模这两种情况。加速度和集中力将不管单元方向的改变,而保持它们最初的方向。表面载荷作用在变形单元表面的法向,且可被用来模拟"跟随"力。图8-7 说明了方向不变的力和跟随力。

注意——在大变形分析中,结点坐标系方向不变。因此计算出的位移,在最初的方向上输出。

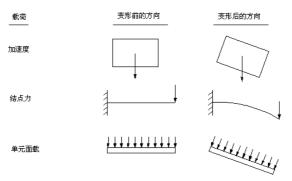


图8-7 变形前后载荷方向

8.1.2.4 非线性瞬态分析

非线性瞬态分析方法,与线性静态分析方法相似:以步进增量加载,程序在每一步中进行平衡 迭代。静态和瞬态处理的主要不同是在瞬态过程分析中要激活时间积分效应。因此,在瞬态过程分 析中,"时间"总是表示实际的时序。自动时间分步和二分特点同样也适用于瞬态过程分析。

8.2 几何非线性的应用

小变形和小应变分析, 假定位移足够小, 使所得到的刚度改变无足轻重。

相反,大应变分析考虑由单元的形状和取向改变导致的刚度改变。因为刚度受位移影响。通过发出 NLGEOM, ON (GUI: Main Menu〉Solution〉Sol'n Control: Basic 或 Main Menu〉Solution〉Unabridged Menu〉Analysis Options),来对支持大应变特性的单元激活大应变效应。在大多数实体单元(包括所有的大应变和超弹性单元),以及大部分的壳和梁单元中,大应变特性是可用的。在ANSYS/Professional 程序中大应变效应不可用。

大应变处理对一个单元经历的总旋度或应变没有理论限制。(某些ANSYS单元类型将受到总应变的实际限制,参见下面的说明)。然而,应限制应变增量以保持精度。因此,总载荷应当被分成几个较小的步。

8.2.1 应力-应变

在大应变求解中,所有应力一应变输入和结果将依据真实应力和真实(或对数)应变。对于一维结构,真实应变为 $\varepsilon = \ln(l/l_0)$ 。对于响应的小应变区,真实应变和工程应变基本上是一致的。要从小工程应变转换成对数应变,使用 $\varepsilon_{\rm in} = \ln(1+\varepsilon_{\rm eng})$ 。要从工程应力转换成真实应力,使用 $\sigma_{\rm rue} = \sigma_{\rm eng} (1+\varepsilon_{\rm eng})$ (这种应力转化仅对不可压缩塑性应力—应变数据是有效的)。

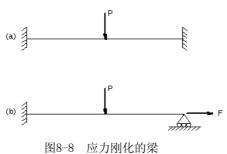
8.2.1.1 大位移小应变

在所有梁单元和大多数壳单元中,以及许多非线性单元中,可用大位移小应变特性。通过打开 NLGEO, ON (GUI: Main Menu>Solution>Sol'n Control: Basic 或 Main Menu>Solution>Unabridged Menu>Analysis Options),来激活那些支持这个特性的单元中的大位移效应。

8.2.2 应力刚化

结构的面外刚度可能严重地受那个结构中面内应力的状态的影响。面内应力和横向刚度之间的 联系,通称为应力刚化。在薄的、高应力的结构中,如缆索或薄膜中,是最明显的应力刚化的例子 。一个鼓面,当它绷紧时会产生垂向刚度,这是应力强化结构的一个普通的例子。

尽管<u>应力刚化理论假定单元的转动和应变是小的,</u>在某些结构的系统中(如在图8-8a),刚化应力仅可以通过进行大挠度分析得到。在其它的系统中(如图8-8b中),刚化应力可采用小挠度或线性理论得到。



要在第二类系统中使用应力刚化,必须在第一个载荷步中发出 PSTRESS, ON(GUI: Main Menu>Solution>Unabridged Menu>Analysis Options)。

大应变和大挠度处理,包括初始应力效应作为它们的理论的一个子集。对于大多数单元,当大变型效应被激活时[NLGEOM, ON](GUI: Main Menu> Solution>Unabridged Menu>Analysis Options),自动包括初始硬化效应。

8.2.3 旋转软化

旋转软化为动态质量效应调整(软化)旋转物体的刚度矩阵。在小位移分析中,这种调整近似于由于大的环形运动而导致几何形状改变的效应。通常它和预应力[PSTRES](GUI: Main Menu>Solution>Unabridged Menu>Analysis Options)一起使用,这种预应力由旋转物体中的离心力所产生。它不应和其它变形非线性、大挠度和大应变一起使用。旋转软化用 OMEGA 命令中的 KPSIN 域来激活 (GUI: Main Menu>Preprocessor>Loads>-Loads-Apply>-Structural-Other > Angular Velotity)。

8.3 材料非线性的模拟

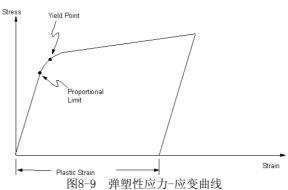
许多与材料有关的参数可以使结构刚度在分析期间改变。塑性、多线性弹性、超弹性材料的非线性应力—应变关系,可以使结构刚度在不同荷水平下(以及典型地在不同温度下)改变。蠕变、粘塑性和粘弹性可以引起与时间、率、温度和应力相关的非线性。膨胀可以引起作为温度、时间、电子流水平(或其他类似量)函数的应变。ANS程序应可以考虑上面的任一材料特性,只要应用适当的单元。

8.3.1 非线性材料

如果一种材料显示非线性,或率相关的应力—应变行为,则必须应用TB族命 [TB, TBTEMPT, TBDATA, TBPT, TBCOPY, TBLIST, TBPLOT, TBDELE] (GUI: Main Menu〉 Solution〉-Load Step Opts-Other〉 Change Mat Props〉Data Tables〉 Define /Activate),采用数据表的形式来定义非线性材料特性关系。这些命令的准确形式与所定义的非线性材料行为有关。在下面我们将论述不同的材料行为。参见《ANSYS Elements Reference》 § 2.5。

8.3.1.1 塑性

许多常用的工程材料,在应力水平低于比例极限时,应力—应变关系为线性的。超过这一极限后,应力—应变关系变成非线性,但却不一定是非弹性的。以不可恢复的应变为特征的塑性,则在应力超过屈服点后开始出现。由于屈服极限与比例极限相差很小,ANSYS程序在塑性分析中,假设这二个点相同,见图8.9。



塑性是一种非保守的(不可逆的),与路径相关的现象。换句话说,荷载施加的程序,以及什么时候发生塑性响应,影响最终求解结果。如果用户预计在分析中会出现塑性响应,则应把荷载处理成一系列的小增量荷载步或时间步,以使模型尽可能切合荷载—响应路径。最大塑性应变是在输出(Jobname. 0UT)文件的子步综合信息中打印的。

在执行了大量的平衡迭代以后,或在得到大于15%的塑性应变增量以后,缩小荷载步大小,应用自动时间步选项[AUTOTS](GUI: Main Menu>Solution> Sol'n Control:Basic Tab 或 Main Menu>Solution>Unabridged Menu> Time /Frequenc>Time and Substps)将反映塑性,如果取了太大的时间步,则程序将二分时间步,并重新求解。

其他类型的非线性行为出可与塑性同时产生。在实际上,大位移和大应变几何非线性经常伴随有塑性材料响应,如果用户预期在结构中存在大变形,则必须在分析中用**NLGEOM**命令激活这些效应(GUI:Main Menu〉Solution〉Sol'n Control:Basic Tab or Main Menu〉Solution〉Unabridged Menu〉Analysis)。对于大应变分析,材料应力——应变特性必须按真实应力和对数应变输入。

8.3.1.1 塑性材料选项

一些选项可用于描述塑性行为。用户也可以应用可编程特性在程序中结合其他特性。参见《ANSYS Guidl to User Programmable Fentures》。

1、双线性随动强化(BKIN)选项

该选项假设总应力范围等于屈服应力的二倍,以包括包辛格效应(见**图8-11**)。对于服从Von Misses屈服准则的一般小应变分析,建议用这一选项。不应该应用于大应变分析。用户可以用BKIN 和HILL选项组合来模拟各向异性随动强化塑性。应力-应变-温度数据的示例如下。**图8-10**说明了这种材料选项的典型显示[TBPLOT]。

MPTEMP, 1, 0, 500 ! Define temperatures for Young's modulus MP, EX, 1, 12E6, -8E3 ! CO and C1 terms for Young's modulus

TB, BKIN, 1, 2 ! Activate a data table TBTEMP, 0.0 ! Temperature = 0.0

TBDATA, 1, 44E3, 1. 2E6 ! Yield = 44,000; Tangent modulus = 1.2E6

TBTEMP, 500 ! Temperature = 500

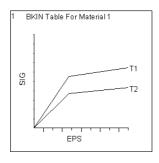
TBDATA, 1, 29, 33E3, 0, 8E6 ! Yield = 29, 330: Tangent modulus = 0, 8E6

TBLIST, BKIN, 1 ! List the data table

/XRANGE, 0, 0.01 ! X-axis of TBPLOT to extend from varepsilon=0 to 0.01

TBPLOT, BKIN, 1 ! Display the data table

上面的命令MPTEMP, MP, TB, TBTEMP, TBDATA, TBLIST, /XRANGE和TBPLOT参见《ANSYS Commands Reference》。



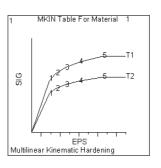
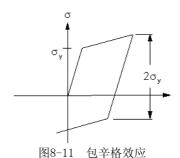


图8-10 (a) 双线性随动强化; (b) 多线性随动强化



2、多线性随动强化(MINH 和 MKIN)选项

这一选项应用Besseling模型,也称为子层或覆盖模型,以包括包率格效应。KINH要比MKIN更好,因为前者允许用户定义更多的应力-应变曲线(40:5),并且每多曲线上允许定义更多的点(20:5)。对于这二个选项,如果用户定义了多于一条应力-应变曲线(对于温度相关特性),则每条曲线应包含相同数目的点。其假设是,在不同应力-应变曲线上的相应点,代表一个特定的子层的温度相关屈服行为。这两个选项不建议用于大应变分析。图8-10也说明了典型的应力-应变曲线(MKIN)。应用KINH选项的典型应力-应变温度数据如下:

TB, KINH, 1, 2, 3 TBTEMP, 20. 0	! Activate a data table ! Temperature = 20.0
TBPT, , 0. 001, 1. 0	! Stress = 0.001, Strain = 1.0
TBPT, , 0. 1012, 1. 2	! Stress = 0.1012, Strain = 1.2
TBPT, , 0. 2013, 1. 3	! Stress = 0.2013, Strain = 1.3
TBTEMP, 40. 0	! Temperature = 40.0
TBPT, , 0. 008, 0. 9	! Stress = 0.008, Strain = 0.9
TBPT,, 0. 09088, 1. 0	! Stress = 0.09088, Strain = 1.0
TBPT, , 0. 12926, 1. 05	! Stress = 0.12926, Strain = 1.05

在上面这个例子中,一条曲线的3点定义3子层的温度相关屈服行为。

应用MKIN选项的典型应力-应变温度数据如下:

MPTEMP, 1, 0, 500 ! Define temperature-dependent EX, MP, EX, 1, 12E6, -8E3 ! as in BKIN example TB, MKIN, 1, 2 ! Activate a data table TBTEMP, , STRAIN ! Next TBDATA values are strains TBDATA, 1, 3. 67E-3, 5E-3, 7E-3, 10E-3, 15E-3 ! Strains for all temps TBTEMP, 0.0 ! Temperature = 0.0TBDATA, 1, 44E3, 50E3, 55E3, 60E3, 65E3 ! Stresses at temperature = 0.0 ! Temperature = 500 TBTEMP, 500 TBDATA, 1, 29. 33E3, 37E3, 40. 3E3, 43. 7E3, 47E3 ! Stresses at temperature = 500 /XRANGE, 0, 0, 02

TBPLOT, MKIN, 1

有关的命令MPTEMP, MP, TB, TBPT, TBTEMP, TBDATA, /XRANGE和TBPLOT,参见《ANSYS Commands Reference》。

3、非线性随动强化(CHABOCHE)选项

这一选项应用Chaboche模型,这种模型是多分量非线性随动硬化模型,允许用户迭加几种随动强化模型。见《ANSYS Theory Reference》。象BKIN和MKIN选项一样,用户可应用CHABOCHE选项来模拟单调硬化和包辛格效应。这个选项还允许用户模拟材料的棘轮和调整(Shakeclown)效应。把CHABOCHE选项与各向同性硬化模型选项BISO、MISO、NLISO组合起来,可以进一步模拟周期强化或弱化。这种模型有1+2n个常数(其中n为随动强化模型数目),用TB命令的NPTS定义。见《ANSYS Theory Reference》。用户应用 TBTEMP 和 TBDATA 命令定义材料常数。这种模型适合于大应变分析。

下面是无温度相关及一个随动强化模型的典型数据:

TB, CHABOCHE, 1 ! Activate CHABOCHE data table

TBDATA, 1, C1, C2, C3 ! Values for constants C1, C2, and C3

而下例则说明温度相关常数及2个随动强化模型(在2个温度点)的典型数据表:

TB, CHABOCHE, 1, 2, 2 ! Activate CHABOCHE data table TBTEMP, 100 ! Define first temperature

 $\label{eq:thm:constants} \textbf{TBDATA}, \textbf{1}, \textbf{C11}, \textbf{C12}, \textbf{C13}, \textbf{C14}, \textbf{C15} \qquad \textbf{! Values for constants C11}, \textbf{C12}, \textbf{C13}, \\$

! C14, and C15 at first temperature

TBTEMP, 200 ! Define second temperature

TBDATA, 1, C21, C22, C23, C24, C25 ! Values for constants C21, C22, C23, ! C24, and C25 at second temperature

有关命令 TB, TBTEMP, TBDATA 参见《ANSYS Commands Reference》。

4、多线性各向同性强化(MISO)选项

这一选项应用von Mises屈服准则以及各向同性工作强化的假定。这个选项不建议用于周期荷载或高度非比例历史荷载的小应变分析。但可应用于大应变分析。MISO选项可包括20个不同温度曲线,每条曲线可以有最多100个不同的应力-应变点。在各条曲线上,应变点可以不同。用户可以把这个选项与非线性随动强化(CHABOCHE)选项组合,以模拟周期强化或弱化。用户还可以把MISO选项与HILL选项组合来模拟各异性塑性及各向同性强化,以及与RATE选项组合用以模拟率相关粘塑性。在MKIN选项的示例中的应力-应变-温度曲线可以作为多线性各向同性强化材料的输入,如下:

MPTEMP, 1, 0, 500 ! Define temperature-dependent EX,

MP, EX, 1, 12E6, -8E3 ! as in above example TB, MISO, 1, 2, 5 ! Activate a data table TBTEMP, 0. 0 ! Temperature = 0.0

TBPT, DEFI, 3.67E-3, 29.33E3! Strain, stress at temperature = 0

TBPT, DEFI, 5E-3, 50E3 TBPT, DEFI, 7E-3, 55E3 TBPT, DEFI, 10E-3, 60E3 TBPT, DEFI, 15E-3, 65E3

TBTEMP, 500 ! Temperature = 500

TBPT, DEFI, 3. 67E-3, 29. 33E3 ! Strain, stress at temperature = 500

TBPT, DEFI, 5E-3, 37E3
TBPT, DEFI, 7E-3, 40. 3E3
TBPT, DEFI, 10E-3, 43. 7E3
TBPT, DEFI, 15E-3, 47E3
/XRANGE, 0, 0. 02
TBPLOT, MISO, 1

有关命令 MPTEMP、MP、TB、TBTEMP、TBPT、/XRANGE和TBPLOT 见《ANSYS Commands Reference》。

5、双线性各向同性强化(BISO)选项

这一选项与多线性各向同性强化MISO选项相似,只是用双线性曲线代替多线性曲线。其输入类似于双线性随动强化选项,只是现在TB命令要应用BISO标号。这一选项通常对大应变分析较佳。用户可以把这一选项与非线性随动强化(CHABOUCHE)选项组合,以定义材料的各向同性强化行为。用户也可以把这一选项与HILL选项组合来模拟各向异性塑性及各向同性强化,或与RATE选项组合以模拟率相关粘塑性。

6、非线性各向同性强化(NLISO)选项

这一选项基于 Voce 强化准则,见《ANSYS Theory Reference》。NLISO选项是MISO选项的一个变种,即指数饱和强化项扩展到线性项,见图8-12。这一选项的优点是材料行为定义为特殊函数,其中四个材料常数通过TBDATA命令来定义。用户可以通过把材料拉伸应力-应变曲线适当地试配得到材料常数。与MISO选项不同的是,不需要注意如何恰当地定义成对的材料应力-应变点。但是,这一选项仅适用于拉伸曲线与图8-12所示相同者。这一选项适用于大应变分析并且用户可以把这一选项与非线性随动强化(CHABCHE)选项组合,用于定义材料的各向同性强化行为。用户也可以把这一选项与HILL选项组合,用于模拟各向异性塑性及各向同性强化;或与RATE组合,用于模拟率相关数据表:

TB, NLISO, 1 ! Activate NLISO data table TBTEMP, 100 ! Define first temperature

TBDATA, 1, C11, C12, C13, C14 ! Values for constants C11, C12, C13,

! C14 at first temperature

TBTEMP, 200 ! Define second temperature

TBDATA, 1, C21, C22, C23, C24 ! Values for constants C21, C22, C23,

! C24 at second temperature

有关命令TB、TBTEMP、TBDATA参见《ANSYS Commands Reference》。

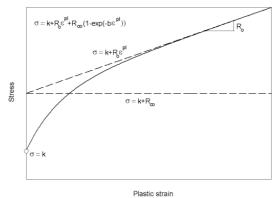


图8-12 NLIS0应力-应变曲线

7、各向异性(ANISO)选项

这一选项允许在材料x、y、z方向上有不同的双线性应力-应变行为,以及在受拉、受压、受剪时有不同的行为。这一选项适用于早些受到变形的金属(如轧制)。不推荐用于周期荷载或非比例荷历程,因为假设了工作强化。屈服应力和斜率不完全无关,见《ANSYS Theory Reference》。为了定义各向异性材料特性,应用MP命令(GUI: Main Menu〉Solution>Other>Change Mat Props)来定义弹性模量(EX、EY、EZ、NUXY、NUYZ、NUXZ)。然后,应用TB命令[TB,ANISO]和TBDATA命令定义屈服点和正切模量。参见《ANSYS Elements Reference》中的非线性应力-应变材料。

8、HILL各向异性(HILL)选项

这一选项应当与BISO、MISO或NLISO选项组合,来模拟率无关各向异性塑性(应用HILL模型)和各向同性强化。此外这一选项与BKIN组合时,用于模拟率无关各向异性塑性随动强化。上面二种情况仅适用于下列单元:LIMK180、SHELL181,PLANE182、PLANE183、SOLID185、SOLID186、SOLID187、BEAM188和BEAM189。

下面例子说明HILL选项与BISO选项的组合:

TB, HILL, 1, 2 ! Activate HILL data table for two temps.

TBTEMP, 100 ! Define first temperature as 100
TBDATA, 1, 1, 1.0402, 1.24897, 1.07895, 1, 1 ! Values for Hill constants C1 to C6
TBTEMP, 200 ! Define second temperature as 200
TBDATA, 1, 0.9, 0.94, 1.124, 0.97, 0.9, 0.9 ! Values for Hill constants C1 to C6

TB, BISO, 1, 2 ! Activate BISO data table for two temps.

TBTEMP, 100 ! Define first temperature as 100
TBDATA, 1, 461. 0, 374. 586 ! Values for BISO constants C1 and C2
TBTEMP, 200 ! Define second temperature as 200
TBDATA, 1, 461. 0, 374. 586 ! Values for BISO constants C1 and C2

9、Drucker-Prager (DP) 选项

这一选项用于颗粒状(摩擦)材料,如土、岩面、砼等,并利用圆锥面来近似Mohr-Coulomb定律

MP, EX, 1, 5000

MP, NUXY, 1, 0.27

TB, DP, 1

TBDATA, 1, 2.9, 32,0! Cohesion = 2.9 (use consistent units),

! Angle of internal friction = 32 degrees,

! Dilatancy angle = 0 degrees

有关命令MP、TB、TBDATA 见《ANSYS Commands Reference》。

8.3.1.2 多线性弹性

多线性弹性 (MELAS) 选项,用于描述保守 (路径无关) 的响应,也就是说卸载路径与加载路径相同的响应,这样对于包含这种材料的非线性分析,可以采用相对较大的荷载步。输入格式与多线性各向同性强化相似,只是TB命令现在应用MELAS标号。

8.3.1.3 用户定义材料

用户定义(USER)选项,描述用于定义材料模式的输入参数,可基于二个子程序中的任一个,这是ANSYS的用户可编程特性(见《ANSYS Guicle to User Programmable Features》)。应用那一个子程序,取决于何种单元。

在应用下列单元LINK180, SHELL181, PLANE182, PLANE183, SOLID185, SOLID186, SOLID187, BEAM188, BEAM189 时,USER选项与USERMAT子程序一起工作,用于定义任何材料模式(除不可压缩材料外)。

在应用下列单元LINK1, PLANE2, LINK8, PIPE20, BEAM23, BEAM24, PLANE42, SHELL43, SOLID45, SHELL51, PIPE60, SOLID62, SOLID65, PLANE82, SHELL91, SOLID92, SHELL93, SOLID95时, USER选项与USERPL子程序一起工作,用于定义塑性或粘塑性材料模式。

为了进入用户材料选项,选用 TB, USER 命令来定义材料号、温度数、数据点数。然后应用 TBTEMP 和 TBDATA 命令定义温度和材料常数。

下例说明用2个温度和4个数据点定义材料:

TB, USER, 1, 2, 4 ! Define material 1 as user

! material with 2

! temperatures and 4 data

! points at each
! temperature point.

! First temperature.

TBDATA, 1, 19e5, 0. 3, 1e3, 100, ! 4 material constants for

 $! \ \ first \ \ temperature.$

TBTEMP, 2.0 ! Second temperature.

TBDATA, 1, 21e5, 0. 3, 2e3, 100, ! 4 material constants for

! second temperature.

如果用户在USERMAT子程序中应用状态变量,则用户必须首先应用 TB, STATE 命令定义状态变量数。然后用TBDATA命令来初始化状态变量值,如下例:

TB, STATE, 1, , 4, ! Define material 1, which

! has 4 state variables.

TBDATA, 1, C1, C2, C3, C4, ! Initialize the 4 state variables.

有关命令 TB、TBDATA 见《ANSYS Commands Reference》。

8.3.1.4 超弹性

TBTEMP, 1.0

如果存在弹性势能函数(或应变能密度函数),它是一个应变或变形张量,它对应变分量的导数 是相应的应力分量,则这种材料叫做超弹性材料。

超弹性可用于分析橡胶类材料(elastomers),这种材料承受大应变和大位移,但体积改变极微(不可压缩)。这种分析需用到大应变理论[NLGEOM, ON]。图8-13是一个例子。

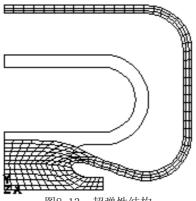


图8-13 超弹性结构

有二种单元适合于模拟超弹性材料:超弹性单元(HYPER56, HYPER58, HYPER74, HYPER158)和18X 族 单元(除LIMK和BEAM单元外,包括SHELL181,PLANE182, PLANE183, SOLID185, SOLID186,和SOLID187)。参见《ANSYS Elements Reference》的"Mixed U-P Formulations"。

在ANSYS超弹性模型中,材料响应总是假设各向同性和等温性。由于这一假设,应变能势函数按应变不变量来表示。除非明确指出,超弹性材料还假设为几乎或纯不可压缩材料。材料热膨胀也假定为各向同性的。

ANSYS在模拟不可压缩或几乎不可压缩超弹性材料时,应变能势函数有几种选项。这些选项均适用于SHELL18, PLANE182, PLANE183, SOLID185, SOLID186, SOLID187 单元。可以通过 **TB**, HYPER 命令的 *TBOPT*参数进入这些选项。

其中一个选项, Mooney-Rivhlin 选项, 也适用于 HYPER56, HYPER58, HYPER74, HYPER158 单元, 以及显式动力分析单元 PLANE162, SHELL163, SOLID164。这一选项可通过 **TB**, MOONEY 命令进入。

8.3.1.4.1 Mooney-Rivlin超弹性选项(TB, HYPER)

请注意本小节论述应用 Mooney-Rivlin 选项与单元 SHELL181, PLANE182, PLANE183, SOLID185, SOLID186, SOLID187。

如果你发应用Mooney-Rivlin选项于单元HYPER56, HYPER58, HYPER74, HYPER158, PLANE162, SHELL163, SOLID164,则参见§8.3.1.4.7。

Mooney-Rivlin选项(**TB**, HYPER,,,,, MOOMEY)是缺省项,允许用户通过**TB**命令的*NPTS*参数定义2,3,5或9个参数。例如,为了定为5参数模型,用户采用**TB**, HYPER, 1,, 5, MOONEY。

2参数Mooney-Rivlin选项,适用大约应变为100%(拉)和30%(压)的情况。与其他选项相比,较高阶的Mooney-Rivlin选项,对于较大应变的求解,可得到较好的近似。

下例是3参数Moonev-Rivlin选项的输入实例:

TB, HYPER, 1, , 3, MOONEY

TBDATA, 1, 0.163498

!Define c10

TBDATA, 2, 0.125076

!Define c01

TBDATA, 3, 0.014719

!Define c11

TBDATA, 4, 6.93063E-5

!Define incompressibility parameter

对于本选项所需要的材料常数的描述,见《ANSYS Elements Reference》。

! (as 2/K, K is the bulk modulus)

8.3.1.4.2 Ogden选项

Ogden选项(**TB**, HYPER, , , , OGDEN)允许用户通过 **TB** 命令的*NPTS*参数定义无限参数,例如,应用 **TB**, HYPER, 1, , 3, OGDEN 定义3参数模型。

与其他选项相比,<mark>Ogden选项通常对大应变水平的求解提供最好的近似。</mark>可应用的应变水平可达到700%。较高阶的参数可提供更精确的解。但是这样也可能在装配材料常数时引起数值困难,而且它要求在用户感兴趣的变形范围内要有足够的数据。

下面是2参数0gden选项的输入列表:

TB, HYPER, 1, , 2, OGDEN !Activate 2 parameter Ogden data table

TBDATA, 1, 0. 326996 !Define μ 1 TBDATA, 2, 2 !Define α 1 TBDATA, 3, -0. 250152 !Define μ 2 TBDATA, 4, -2 !Define α 2

TBDATA, 5, 6. 93063E-5 !Define incompressibility parameter

! (as 2/K, K is the bulk modulus)

!(Second incompressibility parameter d2 is zero)

对于这个选项所需要的材料常数的论述,请参见《ANSYS Elements Reference》。

8.3.1.4.3 Neo-Hookean超弹性选项

Neo-Hookean选项(TB, HYPER,,,, NEO)代表应变能势能的最简单形式,可用于应变范围20-30%。下面是Neo-Hookean选项的一个输入列表示例:

TB, HYPER, 1, , , NEO !Activate Neo-Hookean data table
TBDATA, 1, 0.577148 !Define incompressibility parameter
! (as 2/K, K is the bulk modulus)

对于这个选项所需要的材料常数的论述,请参见《ANSYS Elements Reference》。

8.3.1.4.4 多项式超弹性选项

多项式选项(TB, HYPER,,,,, POLY)允许用户通过 TB 命令的NPTS参数定义无限多个参数。例如应用 TB, HYPER, 1,, 3, POLY 定义3参数模型。

与高阶Mooney-Rivlin选项相似,本选项对高应变水平可提供较好的近似。

在*NPTS*=1时,常数 C_{01} =0,这一选项等价于Neo-Hookean选项(用户可参见§8.3.1.4.3)。在*NPTS*=1时,本选项等价于2参数Mooney-Rivlin选项。在*NPTS*=2时,来选项等价于5参数Mooney-Rivlin选项。在*NPTS*=3时,本选项等价于9参数Mooney-Rivlin选项(参见§8.3.1.4.1)。对于本选项所要求的材料常数,参见《ANSYS Elements Reference》。

8.3.1.4.5 Arruda-Boyce超弹性选项

Arruda-Boyce选项(TB, HYPER,,,,,BOYCE)可用于直到300%的应变水平。下面是本选项的一个例子:

TB, HYPER, 1, , , BOYCE !Activate Arruda-Boyce data table
TBDATA, 1, 200. 0 !Define initial shear modulus
TBDATA, 2, 5. 0 !Define limiting network stretch
TBDATA, 3, 0.001 !Define incompressibility parameter
! (as 2/K, K is the bulk modulus)

对于本选项所要求的材料常数,参见《ANSYS Elements Reference》。

8.3.1.4.6 用户定义超弹性选项

用户定义选项(TB, HYPER,,,,, USER)允许用户应用子程序USERHYPER来定义应变能势能对应变不变量的求导,参见《ANSYS Guide to User Programmable Features》。

8.3.1.4.7 Mooney-Rivlin超弹性选项(TB, MOONEY)

请注意这一选项适用于HYPER56, HYPER58, HYPER74, HYPER158, PLANE162, SHELL163, SOLID164 等单元。

如 果 要 应 用 Mooney-Rivlin 选 项 于 SHELL181, PLANE182, PLANE183, SOLID185, SOLID186, SOLID187等单元,请参见 § 8. 3. 1. 4. 1。

ANSYS的单元类型HYPER56, HYPER58, HYPER74, HYPER158, 应用直到9个Mooney-Rivlin弹性势能函数。如果和户已知2项、3项、5项或9项Mooney-Rivlin常数的值,则可以通过 TB 族命令直接输入,参见《ANSYS Theory Reference》中的Mooney-Rivlin函数。对于这些单元,用户也可以指定材料函数作为用户可编程特性,参见《ANSYS Guide to User Programmable Features》。

下面是一个示例:

MP, NUXY, 1, 0. 49999 ! NUXY should be almost equal to, but less than 0.5 TB, MOONEY, 1, 1
TBDATA, 1, 0. 163498
TBDATA, 2, 0. 125076
TBDATA, 3, -0. 0047583
TBDATA, 4, 0. 014719
TBDATA, 6, 0. 0003882
! (Constants 5, 7, 8, and 9 default to 0.0 in this example)

对于本选项所要求的材料常数,参见《ANSYS Elements Reference》。

对于任意给定的超弹性材料的Mooney-Rivlin常数,通常在公开文献中查不到。因而,用户可以用 *MOONEY 命令,从一组已知试验数据中自动生成Mooney-Rivlin常数。有时材料制造商可能提供所需的试验数据的一部分或全部,但用户可能发现还需要从试验取得更多的数据。

超弹性材料行为要比金属材料行为复杂得多。超弹性应力-应变关系,通常在拉伸、压缩和剪切变形中是显然不同的。因此,应用 *MOONEY 命令来生成一般应用的超弹性材料模式时,需要使用所有可能的三种变形模式,即拉伸、压缩和剪切。参见《ANSYS Theory Reference》中讨论的超弹性测试方法和相应的变形模式。

如果所得到的是一组不完全的数据(如只有单轴拉伸数据),程序仍然可以确定出可用的超弹性材料特性。然而,在这种情况下,模型变形特征将只限于与测试特征完全一样的。换句话说不得,测试数据将代表计算模型中所有变形模态和响应(应变)范围。

上面的劝告只是一个简单的说明。如果用户不知道某一个变形模式或应变范围,就不能准确地预测模型中具有这些变形或应变部分的行为。例如,如用户只知道单轴拉伸测试数据,就不能建立那种有很大剪切变形的模型;如只知道应变值为0%-100%之间的测试数据,就不要建立那种有150%应变的模型。如在计算完成之后用户发现所有测试数据不足以表征模型的响应,唯一的改正办法就是获取更多的测试数据。

用户可用 *MOONEY 命令来自动从实验数据中确定一组Mooney-Rivlin常数。ANSYS确定这些常数以一个数组的形式保存到数据库中。此外,程序还将这些常数以多个 TB 和 TBDATA 命令的格式把Mooney-Rivlin常数写到一个文本文件(Jobrame. TB)中。一旦形成这样的文件,用户就可以在将来的分析用于定义某些相同的Mooney-Rivlin常数。而毋需每次应用 *MOONEY 命令来生成这些常数

确定和应用Mooney-Rivlin常数

计算并应用Mooney-Rivlin常数有如下五个步骤:

第一步: 定义数组

命令: *DIM

GUI: Utility Menu>Parameters>Array Parameters>Define/Edit

用户在使用 *MOONEY 命令(GUI: Main Menu> Preprocessor>Material Props>Mooney-Rivlin>Calc Constants)之前,必须定义数组,在绝大多数情况下,需至少定义六个不同的数组(用户可以给这些数组任意合法的参数名,但为了方便我们在这里应用特定的数组名,如STRAIN、SDTRESS等,用户可以用任何喜欢的有效参数名代替之)。它们是STRAIN、STRESS,CONST,CALC,SORTSN,和SORTSS。

应变数组(STRAIN): 这是从材料试验得到的工程应变的数组,分为三列:

第一列: 单轴拉伸和/或压缩数据

第二列: equibiaxial拉伸和/或压缩数据

第三列:剪切数据(平面拉伸和/或压缩数据)

该数组的大小为 $N\times3$,其中,N等于在三列测试中数据点个数的最大值。例如,如果从单轴拉伸/压缩数据得到20个数据点,从剪切试验得到10个数据点,则N=20。即使只用了一种或两种测试,该数组的大小也必须为 $N\times3$ 。虽然以升序输入数据点是较好的,但不是必须的。

应力数组(STRESS): 这是从材料试验得到的工程应力的数组。该数组的大小也是*N*×3,应力数据点的输入顺序必须与应变数据点的输入顺序完全一致。

常数数组(CONST): Mooney-Rivlin常数数组的大小为 $M\times1$, M为所希望的常数的个数(M必须为2, 5, 9三个数之一,如用其它数,则在应用 *MOONEY 命令时,会导致错误信息)。对该数组所作的定义同时就告诉了程序需要生成多少个Mooney-Rivlin常数,*MOONEY 命令自动读取该数组的大小并确定要生成多少个常数,并将其值写入该数组中。

确定Mooney-Rivlin常数的个数

概略地说,数据点的个数(即上面的M应至少为Mooney-Rivlin常数个数的两部。常数个数越多,曲线的统计量越与真实值相接近(即拟合得更好),但曲线的形状可以会比常数个数少的曲线要差。鉴于此,用户可以按顺序尝试2项、5项、9项函数,并检查其所生成的应力-应变曲线以确定到底哪一个函数在综合曲线形状以及拟合质量两方面做得最好。

表8-1 建议的Mooney-Rivlin常数

应力-应变曲线中的点数	建议的Mooney-Rivlin涵数
无拐点(即单个曲线)	2项
一个拐点(即2根曲线)	5项
2个拐点	9项

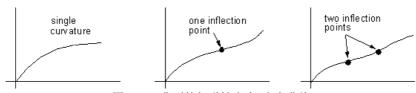


图8-14 典型的超弹性应力-应变曲线

输出应力数组 (CALC): 其大小为 $N \times 3$,N与前面的一样,该数组保存计算出来的应力值,这些应力值保存的顺序与其相应的应变保存值的顺序一致 (后者以升序排列)。

排序应变数组 (SORTSN): 其大小为 $N \times 3$, 它保存经过排序了的输入应变。

排序应变数组(SORTSN): 其大小为 $N \times 3$, 它保存经过排序了的输入应力。

例如,如果任一个类型的测试数据包含直到20个数据点,而想生成5项的Mooney-Rivlin常数,则可以应用下面的命令来决定所需要的维数(记住:用户可以代入任意有效的参数名):

```
*DIM, STRAIN, 20,3 ! Dim. array (STRAIN) for 20 input strain-data points *DIM, STRESS, 20,3 ! Dim. array (STRESS) for input stress data (20 pts.) *DIM, CONST, 5,1 ! Dim. array (CONST) for 5-term M-R constants *DIM, CALC, 20,3 ! Dim. array (CALC) for sorted calculated stresses *DIM, SORTSN, 20,3 ! Dim. array (SORTSN) for sorted input strain data *DIM, SORTSS, 20,3 ! Dim. array (SORTSS) for sorted input stress data 参见 *DIM 命令的说明。
```

第二步: 填充输入数据数组

当数组定义完成之后,就可以用 *SET 命令(GUI: Utility Menu> Parameters>Scalar Parameters)将实验数据填入STRAIN数组和STRESS数组。请再一次记住,用户可以给这些数组任意有效的参数名;在这里所采用的参数名,只是为了讨论方便。

注意--*MOONEY 命令将所有输入应力和应变都解释为工程应力和工程应变。

这些数组大小都为1/43, 其每一列各自表示一类测试数据, 顺序是:

- 第一列:单轴拉伸和/或单轴压缩;
- 第二列: 等双轴拉伸和/或等双轴压缩;
- 第三列:剪切(平面拉伸或压缩)。

注意这并不是说,变形模态及其等同存在1:1的关系。第一个变形模态--单轴拉伸--与等效双轴压缩等同,但数组第一列包含从单轴拉伸和/或单轴压缩得到的数据。类似地,第二个变形模态--等双轴拉伸--与单轴压缩等同,和/或等双轴压缩;但数组第二列包含从等双轴拉伸和/或等双轴压缩得到的数据。

	10 2 12.73	<u>一一人人们人</u> 从一一门数加口
变形模态	等效测试类型	测试数据的在数组中的位置
单轴拉伸	单轴拉伸	第一列
	等双轴压缩	第二列
等双轴拉伸	等双轴拉伸	第二列
	单轴压缩	第一列
剪切	平面拉伸	第三列
	平面压缩	第三列

表8-2 应力-应变输入数组中的数据位置

如果只作了一种或两种测试,则须将未做的测试的相应的列置空。可用图8-15来说明。

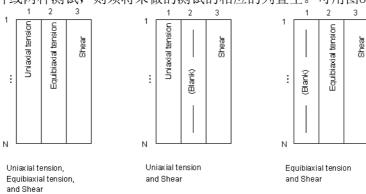


图8-15 在应力和应变输入数组中的数据位置

现在考虑一个得到了单轴拉伸和剪切测试数据时的情况。在数组中存储应变和应力的命令,可能象下面那样(当然,数组可以有任意的名字,而且在本例中用N1和N2表示的数据点数,可以是任

意整数):

```
! Uniaxial Tension Data

*SET, STRAIN(1,1), ...! First 10 strain data points

*SET, STRAIN(11,1), ...! Strain data points 11 through N1 (if N1<21)

*SET, STRESS(1,1), ...! First 10 stress data points

*SET, STRESS(11,1), ...! Stress data points 11 through N1
! Shear Data

*SET, STRAIN(1,3), ...! Strain data points 1 through N2 (if N2<11)

*SET, STRESS(1,3), ...! Stress data points 1 through N2

参见 *SET 命令的说明。
```

第三步: 计算Mooney-Rivlin常数

要自动生成Mooney-Rivlin常数,首先应执行 **TB** 命令,并使该命令的Lab-MOONEY,TBOPT=1。然后,执行 *MOONEY 命令,将已生成好的数组名填入其中(用户可以给这些数组任意有效的参数名;在这里所采用的参数名,只是为了讨论方便):

```
TB, MOONEY, MAT, NTEMP, , 1
*MOONEY, STRAIN(1, 1), STRESS(1, 1), , CONST(1), CALC(1), SORTSN(1),
SORTSS(1), Fname, Ext
```

程序自动计算出Mooney-Rivlin常数,将它们写入数据库和 CONST 数组(可以是任何有限的数组名)中,并还以 TB 和 TBDATA 命令的格式写入一个ASCII文件 Fname. Ext中(缺省是Jobname. TB)。单轴公式将用于第一列的数据,而等双轴公式将用于第二列,平面(纯剪)公式将用于第三列。

注意一在 STARIN 和 STRESS 中输入的所有试验数据,将用于确定Mooney-Rivlin 超弹性材料常数。

第四步: 估计Mooney-Rivlin常数的质量

在输出文件中(Jobname. OUT),检查 "ROOT—MEAN—SQUARE ERROR (PERCEN-TAGE)"(均方根误差)和 "COEFFICIENT OF DETERMINATION"(确定系数)两个输出信息,这两个值给出所计算出的应力-应变曲线与测试数据点相拟合的好坏程序的统计度量。以百分数表示的均方根误差(即2.5就表示2.5%应接近于零,确定系数接近于1.0(通常要大于0.99)。

另外,用户还应使用 *VEAL 和 *VPLOT 命令(GUI:Main Menu〉 Preprocessor〉Material Props〉Mooney-Rivlin〉Evaluate Const 和 Utility Menu〉Plot〉Array Parameters)来以图形的方式显示输入的和计算出的应力—应变曲线,以直观地检查计算曲线与实验数据的匹配程度。在比较这些曲线时,应比较那些代表同一变形模态的数据。也就是说,所计算的单轴拉伸曲线形状(在 *EVAL 命令中的 EVPARM=1),仅应当与单轴拉伸数据(在排序的STRAIN 和 STRESS数组第一列)比较。类似地,所计算的单轴压缩曲线形状,仅应当与单轴压缩数据比较;而所计算的剪切曲线形状,仅应当与剪切数据比较。

当用图形显示计算的应力-应变曲线时,用户可以将显示曲线扩展到那些没有实验数据的区域。这样就可以让用户对模型在超出实验数据区域以外的地方的响应有一个定性的认识。但是,应认识到当将显示曲线扩展到一个表示另一个不同的变形模态的区域时,在那个区域的显示就是没有意义的。例如,用户只能在正应变区域显示单轴拉伸曲线。总的来说,要得到一个好的结果,所作的实验数据应能代表所分析模型的所有的变形模态和响应(应变)范围。

*MOONEY 命令自动把Mooney-Rivlin常数写到 CONST 数组中。因为 *EVAL 命令从 CONST 常数 读入相同的常数,所以可以在同一个ANSYS 阶段中,在 *MOONEY 命令后,跟着用 *EVAL 命令。如已经有了Mooney-Rivlin常数(这时不必进行 *MOONEY 计算),则必须在计算曲线前,首先定义 CONST 数组的维[*DIM]并用Mooney-Rivlin常数填充该数组[*EVAL]。可以相当简单地填充这一数组,通常给 CONST 数组1×2、1×5、1×9。用户也可以在Jobname. TB文件中,添加 *DIM 和数组填充命令,以方便操作。

要检查曲线的形状,首先还必须定义[*DIM]两个表数组向量(*EVAL 命令中将这两个数组名定义为 XVAL 和 ECALC,也可以用其它名字,但可以应用任何有效的参数名)。这两个表数组的大小都是P维,此时P为用户想要在曲线中绘制的点的数目(通常应使用一个相对较大的P值,以使得所绘

制的曲线尽可能光滑)。其次,定义变形模式、定义应变的扩展范围,用 *EVAL 命令将工程应变和 计算出的工程应力数据填入数组中。最后,用 *VPLOT 命令来绘制计算出的应力-应变曲线。下面 例子说明对单轴压缩变形模式的计算曲线绘图:

- ! Dimension strain and stress arrays for the calculated curve:
- ! (Any valid parameter names can be used)
- *DIM, XVAL, TABLE, 1000
- *DIM, ECALC, TABLE, 1000
- ! Specify the mode of deformation (EVPARM), define the strain range
- ! (XMIN, XMAX), and use the M-R constants (CONST) to fill the strain (XVAL)
- ! and stress (ECALC) arrays with calculated data:
- *EVAL, 1, 2, CONST (1), XMIN, XMAX, XVAL (1), ECALC (1)
- ! Label the graph axes:
- /AXLAB, X, Engineering Strain
- /AXLAB, Y, Engineering Stress
- ! Plot the calculated uniaxial compression curve:
- *VPLOT, XVAL(1), ECALC(1)

参见 *DIM, *EVAL, /AXLAB, 和 *VPLOT 等命令的说明。

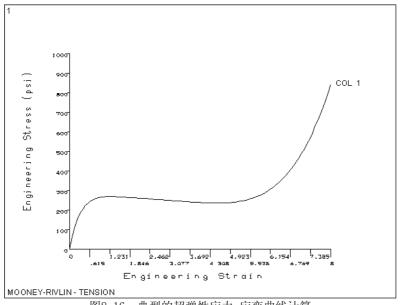


图8-16 典型的超弹性应力-应变曲线计算

第五步: 使用Mooney-Rivlin常数

如果用户对曲线拟合的统计数值和整个曲线的形状都非常满意,则可使用生成的Mooney-Rivlin材料性质作后续的分析(*MOONEY 命令将在数据库中保存了这些常数)。在将来的另外一些分 析中,如果使用同样的材料模式,则只需用/INPUT 命令读入文件"Jobname. TB",即可将常数加 载到新的数据库中。但别忘了定义材料泊松比的值[MP, NUXY,...]。用户始终要记住的一点是,应 对分析结果作仔细检查,以确定原始测试数据是否涵盖了模型的变形模式和最大应变。

含有超弹性单元的分析,有时对材料性质定义和载荷施加方式非常敏感。通常是某些Mooney-Rivlin常数会导致非常稳定的刚度矩阵而其它的常数则相反。因此,应当根据经验,并特别仔细地 选取常数。

ANSYS内部提供超弹性材料(基于用户输入的Mooney-Rivlin 常数)稳定检查的功能。这些检查 分而个级别:

在分析前进行第一次稳定检查。对6个典型的应力路径(单轴拉伸和压缩,等双轴拉伸和 压缩,平面啦伸和压缩),延伸范围0.1~10来进行检查。如果材料在这一范围不稳定, 则出现一个提示,统计在材料变得不稳定时,名义应变的临界值,列出用户输入的 Mooney-Rivlin 常数。如果材料在这一范围稳定,则不出现提示。下面的警告信息,列 出材料1变得不稳定时的名义应变,然后列出用户输入的Mooney-Rivlin 常数:

*** WARNING *** CP= 1.110 TIME= 16:59:52

Material 1 can become unstable under certain loading.

The strain (nominal) limits where the material becomes unstable are:

 UNIAXIAL TENSION
 0. 645E+00

 UNIAXIAL COMPRESSION
 -0. 565E+00

 EQUIBIAXIAL TENSION
 0. 516E+00

 EQUIBIAXIAL COMPRESSION
 -0. 220E+00

 PLANAR TENSION
 0. 585E+00

 PLANAR COMPRESSION
 -0. 369E+00

Mooney-Rivlin constants of the hyperelastic material are:

0. 170E+02, 0. 000E+00, 0. 150E+03 0. 000E+00, 0. 000E+00, 0. 000E+00 0. 000E+00, 0. 000E+00, 0. 000E+00

对于混合U-P列式的超弹性单元(HYPER56、HYPER58、HYPER74 和HYPER158),在设置 KEYOPT(8) = 1 时,也可以在ANSYS分析期间,执行稳定检查。对于每次平衡迭代,程 序检查每个高斯点的稳定情况。如未通过稳定检查,则将在ANSYS输出窗口的求解历史 阶段看到一个信息,报告该迭代上不稳定的高斯点总数。如问题通过检查,则不显示任 何信息。下面的例子说明在分析期间,ANSYS检查出3个高斯点超过材料稳定极限:

对于包含最少1个不稳定高斯点的单元,不稳定指标设置为1,并保存在结果文件中的 SMISC记录中。可以在POST1中,用这个SMISC记录作为单元的STFLAG来显示不稳定区域。参见下列单元的与不稳定指标STFLAG响应的SMISC表项: HYPER56 单元 ETABLE 和 ESOL 命令的Item and Sequence Numbers; HYPER74 单元 ETABLE 和 ESOL 命令的Item and Sequence Numbers; HYPER158 单元 ETABLE 和 ESOL 命令的Item and Sequence Numbers。

用户应当清楚,虽然材料未通过稳定检查是收敛困难的一个原因,但并不说明一旦材料进入不稳定区域解就无效。材料稳定检查只是在收敛失效时,一个帮助用户诊断问题的简单工具。

对于许多接近不可压缩材料(泊松比大于0.49),我们推荐应用混合U-P列式的超弹性单元(HYPER56、HYPER58、HYPER74 和 HYPER158)。

注意—HYPER84和HYPER86号单元主要是用于模拟可压缩的、泡沫状的弹性体,它们使用Blatz-Ko函数来描述材料特性。将这些单元的KEYOPT(2)设置为1即可选取Blatz-Ko选项,然后用MP 命令输入合适的 EX 和 NUXY 值,以定义初始的材料剪切模量。对这两种单元来说,不可压缩超弹性材料选项也是可用的,但只限于2项 Mooney-Rivlin 公式,通常应使用HYPER56、HYPER58、HYPER74、HYPER158(而不是 HYPER84 或 HYPER86)来计算所有的不可压缩超弹性材料。

用超弹性单元作分析时可能对载荷施加的快慢很敏感。在大多数情况下,应缓慢地施加载荷,以避免在收敛序列中,使单元发生过分变形。求解过程中所遇到的每一个问题,都可能是独特的,需要特殊考虑。在加载过程中的不同时间点有时会发生双态解问题,亦即两个或多个不同的几何外形都具有相同的最小势能,此时可用自动时间步长功能和二分功能[AUTOTS, ON]来尽量避免之。

8.3.1.5 蠕变

蠕变是率相关材料非线性,即在常荷载作用下,材料连续变形的特性。相反如果位移固定,反力或应力将随时间而变小,这种特性有时也称为应力松驰,见图8-17a。蠕变的三个阶段示如图8-17b中。ANSYS程序可以分析前二个阶段(初始和第二阶段)。第三阶段通常不分析,因为它意味着即将发生破坏。

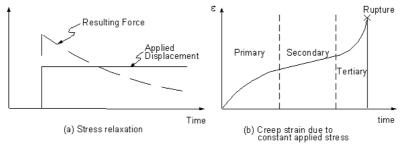


图8-17 应力松弛和蠕变

在高温应力分析中(如拉反应堆等),蠕变分析非常重要。例如,假设在拉瓜堆中施加了预荷载,以保证与相邻部件保持接触而不松开。在高温下过了一段时间后,预荷载将降低(应力松驰),可能使接触部件松开。对于一些材料如预应力砼,蠕变也可能十分重要。最重要的是要记住,蠕变是永久变形。

ANSYS使用隐式和显式积分二种方法来进行蠕变分析,均可应用于静态和瞬态分析。隐式蠕变分析方法更鲁莽、、更快、更精确,一般推荐隐式里蠕变分析。它可以操纵温度相关蠕变常数,同时模拟蠕变与等向强化弹性模型。

对于需要很小时间步的情况,显式蠕变分析就非常有用。蠕变常数不能有温度相关性,而与其他塑性材料模型的耦合只能应用选加法。

注意一蠕变分析中的"隐式"和"显式",与"显式动力分析"或"显式单元"没有任何关系。

隐式蠕变分析方法支持下列单元: PLANE42, SOLID45, PLANE82, SOLID92, SOLID95, LINK180, SHELL181, PLANE182, PLANE183, SOLID185, SOLID186, SOLID187, BEAM188 和BEAM189。

显式蠕变分析方法支持下列单元: LINK1, PLANE2, LINK8, PIPE20, BEAM23, BEAM24, PLANE42, SHELL43, SOLID45, SHELL51, PIPE60, SOLID62, SOLID65, PLANE82, SOLID92 和SOLID95。

蠕变应变率可以是应力、应变、温度、电子流水平的函数。蠕变应变率方程率已按初始蠕变、第二期蠕变和辐射引起的蠕变在ANSYS中建立。参见《ANSYS Elements Reference》中讨论,输入方法等。有一些方程需要特殊的单位。特别是,对于显式蠕变选项,蠕变方程中的温度应当基于绝对度量。

8.3.1.5.1 隐式蠕变方法

隐式蠕变方法的基本步骤包括应用 TB 命令(Lab=CREEP),通过 TBOPT 值选择蠕变方程。下例说明隐式蠕变分析方法。TBOPT=2表示将应用初始蠕变方程于模型2。温度相关性通过TBTEMP命令来指定,与此方程有关的4个常数作为TBDATA命令的参数。

TB, CREEP, 1, 1, 4, 2 TBTEMP, 100 TBDATA, 1, C1, C2, C3, C4

用户也可以应用ANSYS的可编程特性,并设置 TBOPT=100 来输入其他蠕变表达式。可以用 TB 命令(Lab=STATE)来定义状态变量数。下例是如何定义5个状态变量的例子:

TB, STATE, 1, , 5

用户可以同时模拟蠕变[**TB**, CREEP]和双线性各向同性强化塑性[**TB**, BISO],或多线性各向同性强化塑性[**TB**, MISO],或非线性各向同性强化塑性[**TB**, NLISO]。下面的例子说明为了模拟蠕变与各向同性强化塑性时需要的一些附加数据行:

TB, NLISO

TBTEMP, 100 TBDATA, 1, C1, C2, C3, C4

为了执行隐式蠕变分析,用户必须应用求解 RATE 命令(Option=ON或1)。下面的例子说明一个时间强化蠕变分析,见图8-18。

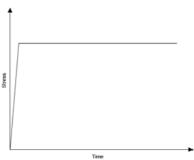


图8-18 时间强化蠕变分析

用户在第1荷载步施加机械荷载,并把 RATE 命令设为 0FF,这样绕过(忽略)蠕变应变效应。由于在这一荷值步的时间间隔将影响其后的总时间,因此这一荷载步的时间间隔要充分小。例如,用户可指定时间值为1E-8秒。第2荷载步是蠕变分析。这时应把 RATE 命令设为0N。这里机械荷载保持为常数,而材料随时间增量而发生蠕变。

/SOLU !First load step, apply mechanical loading

RATE, OFF !Creep analysis turned off

TIME, 1. 0E-8 !Time period set to a very small value

. .

SOLV !Solve this load step

!Second load step, no further mechanical load

RATE, ON !Creep analysis turned on

TIME, 100 !Time period set to desired value

. .

SOLV !Solve this load step

对于大多数材料,在早期阶段,蠕变应变率显著改变。因为这一原因,通常建议应用很小的初始时间步增量,然后应用求解命令 DELTIM 或 NSUBST 指定较大的最大增量时间步。对于隐式蠕变,用户可能需要在结果中仔细检验时间增量的影响,因为ANSYS缺省并不提供任何蠕变率的控制。用户可以应用 CRPLIM 或 CUTCONTROL, CRPLIMIT 命令中的蠕变率控制选项来总是强迫采用一个蠕变极限比率。蠕变极限比率的推荐值是1~10。该比率可以随材料而变化,以便用户可以根据自己的经验来决定一个最佳值,从而获得需要的运行和精度。对于大型分析,建议首先在一个小模型中对时间增量收敛分析进行测试。

8.3.1.5.2 显式蠕变方法

显式蠕变方法的基本步骤,包括应用 TB 命令(Lab=CREEP),选择蠕变方程(用 TBDATA 命令的参数加入适当的常数)。TBOPT为0或者为空白。下例是应用显式蠕变方法的输入。请注意,所有常数是作为 TBDATA 命令的参数加入的,而且无温度相关性。

TB, CREEP, 1

TBDATA, 1, C1, C2, C3, C4, , C6

对于显式蠕变方法,用户可以应用程序的可编程特性加入其他蠕变表达式,见《ANSYS Guide to User Programmable Fealares》。

对于高度非线性蠕变应变-时间曲线,在应用显式蠕弯方法时,必须应用小的时间步。如果时间步小于1E-6,则不计算蠕变应变。对于自动调整时间步到合适的值,可以应用蠕变时间步优化选项「AUTOTS 和 CRPLIM」。

8.3.1.6 粘塑性

粘塑性是时间相关的塑性现象,其中塑性应变的发展,与荷载率有关。其主要应用是高温金属形成过程,如轧制和深提取,这时涉及大塑性应变和大位侈小弹性应变。见**图8-19**。典型的塑性应变十分大(例如50%或更大),需要大应变理论[NLGEOM, ON]。

粘塑性适合于VISCD106、VISCO107和VISCO108单元的模拟,其材料特性应用Anand模型,见《ANSYS Elements Reference》。

粘塑性通过一组流动和发展方程,由一致塑性和蠕变定义。用约束方程来保留塑性区的体积。

率相关粘塑性 (**TB**, RATE) 选项,允许用户在材料模式中引入应变率效应,以模拟材料的时间相关响应。在ANSYS中可采用二种材料选项,即Perzyna模型和Peirce模型,见《ANSYS Theory Reference》。与ANSYS中的其他率相关材料选项如蠕变或Anand模型相反,Perzyna和Peirce模型还包括了屈服面。塑性以及应变率强化效应只在塑性屈服后才有效。用户必须把这两个模型与各向同性塑性强化选项相结合 (**TB**, BISO,或 **TB**, MISO,或**TB**, NLISO)。其用途是模拟材料的应变率强化,而不是弱化。这个选项也适用于大应变分析,并且适合于下列单元:LINK180, SHELL181, PLANE182, PLANE183, SOLID185, SOLID186, SOLID187, BEAM188,和 BEAM189。这种材料模式选项的一些典型应用是金属形成和微电机系统 (MEMS) 分析。

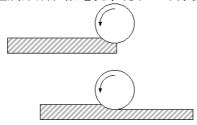


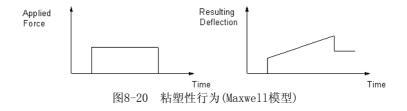
图8-19 轧钢中的粘塑性行为

下面的例子说明应用RATE选项与BISO选项结果(在2个温度点):

TB, BISO, 1 ! Activate BISO data table TBDATA, 1, C1, C2 ! Values for constants C1, TB, RATE, 1, , , PERZYNA ! Activate RATE data table TBTEMP, 1 ! Define first temperature TBDATA, 1, C1, C2 ! Values for constants C1, ! C2 TBTEMP, 2 ! Define second temperature TBDATA, 1, C1, C2 ! Values for constants C1, ! C2

8.3.1.7 粘弹性

粘弹性类似于蠕变,但在荷载移走后,部分变形可以恢复。一种常见的粘弹性材料是玻璃。有些塑性也可认为是粘弹性的。一种粘弹性响应如**图8-20**所示。



粘弹性适用于单元VISC088和VISC089。用户必须应用 TB 族命令输入材料特性。关于如何用 TB 族命令输入粘弹性材料特性,参见《ANSYS Elements Reference》中的粘弹性材料常数、《ANSYS Theory Reference》 § 4.6。

8.3.1.8 膨胀

有些材料对热流的响应是体积扩大一膨胀。为了包括膨胀效应,用户必须编写自己的膨胀子程序 USERSW,参见《ANSYS Guide to User Programmable Features》。在《ANSYS Elements Reference》中的膨胀方程讨论了如何应用 TB 族命令来输入膨胀方程的常数。膨胀还可与其他现象(如含水量)相关。ANSYS的热流膨胀的命令也可以用于类似定义,由于其他原因引起的膨胀。

8.4 在ANSYS中执行非线性分析

ANSYS应用基于问题的物理特性的自动求解控制方法,把各种非线性分析控制到合适的值。如果用户对这些设置不满意,还可以手工设置。下列命令的缺省设置已进行优化处理:

AUTOTS	PRED	MONITOR
DELTIM	NROPT	NEQIT
NSUBST	TINTP	SSTIF
CNVTOL	CUTCONTROL	KBC
LNSRCH	OPNCONTROL	EQSLV
ARCLEN	CDWRITE	LSWRITE

这些命令及其设置在以后讨论。参见《ANSYS Commands Reference》。

如果用户选择自己的设置而不是ANSYS的缺省设置,或希望用以前版本的ANSYS的输入列表,则可用/SOLU模块的SOLUTION,OFF,或在/BATCH后用/CONFIG,NLCONTROL,OFF命令。

ANSYS对下面的分析激活自动求解选项:

- 单个领域的非线性或瞬态结构以及固体力学分析,在求解自由度与UX、UY、UZ、ROTX、ROTY、ROTZ结合时:
- 单个领域的非线性或瞬态热分析,在求解自由度为TEMP时:

注意一本章后面讨论的求解控制对话框,不能对热分析做设置。用户必须应用标准的ANSYS求解命令或GUI来设置。

8.5 非线性静态分析步骤

尽管非线性分析比线性分析变得更加复杂,但处理基本相同。只是在非线形分析的适当过程中,添加了需要的非线形特性。

非线性静态分析是静态分析的一种特殊形式。如同任何静态分析,处理流程主要由三个主要步骤组成:

- 建模;
- 设置求解控制;
- 设置附加的求解控制;
- 加载;
- 求解;
- 考察结果。

8.5.1 建模

这一步对线性和非线性分析都是必需的,尽管非线性分析在这一步中可能包括特殊的单元或非线性材料性质,参考§8.9和§8.3。如果模型中包含大应变效应,应力—应变数据必须依据真实应力和真实(或对数)应变表示。参见《ANSYS Modeling and Meshing Guide》。

在ANSYS中建立了模型后,应该设置求解控制(分析类型、分析选项、荷载步等)选项,施加荷载,最后求解。非线性分析与线性分析的不同之处是,前者需要许多荷载增量,并且总是需要平衡叠代。下面讨论一般过程。参见§8.11的例子。

8.5.2 设置求解控制

设置求解控制包括定义分析类型、设置分析的常用选项和指定荷载步选项。在作非线性结构静力分析时,可以应用求解控制对话框来设置。该对话框对许多非线性静力分析提供了缺省设置。这样,用户需要的设置降低到最少。求解控制框的缺省设置,基本上与 § 8.4 所述的自动求解控制设置相同。由于求解控制对话框是非线性静力分析的推荐工具,我们在下面将祥细论述,如用户不想

用这个对话框(GUI: Main Menu>Solution>—Analysis Type—Sol'n Control),可以应用标准的ANSYS求解命令集或相应的菜单(GUI: Main Menu> Solution>Unabridged Menu>option)。求解控制对话框的概况,见《ANSYS Basic Analysis Guide》§3.11。

注意--对于非线性结构完全瞬态分析,建议应用求解控制对话框,但并不是必须如此,见 § 8.6。

8.5.2.1 求解控制对话框--如何进入

选择(GUI: Main Menu>Solution>-Analysis Type-Sol'n Control)进入求解控制对话框。下面几节将论述这个求解对话框中的内容。对于其祥细说明,可以在相应标签下,按HELP按钮进入帮助系统。

8.5.2.2 求解控制对话框--Basic标签

求解控制对话框共有五个标签,其中最基本的选项位于第一个标签上。进入对话框后,缺省的标签就是 Basic标签。

Basic标签中的内容,提供了ANSYS分析所需要的最小设置。一旦用户对Basic标签中的设置满足以后,就不必调整其他标签中的更高级的设置。在按OK按钮以后,设置才作用于ANSYS数据库,并关闭对话框。

可用Basic标签设置的选项见表8-3。按HELP可得更多的说明。

	衣	:8-3
选项	参见	《ANSYS Basic Analysis Guide》
指定分析类型[ANATYPE, NLGEOM]	•	§ 1. 2. 6. 1
	•	§ 3. 16
控制时间设置,包括:荷载步末的时间[TIME],	•	§ 2. 4
自动时间步[AUTOTS],	•	§ 2. 7. 1
一个荷载步中的子步数 [NSUBST 或 DELTIM]		
抬顶写到时局库中的解[OUTRES]	•	8 2 7 4

表8-3

在非线性分析中的一些特殊考虑如下:

- 1、在设置ANTYPE和NLGEOM时,如果要执行新的分析,选择"Large Displacement Static",但要记住并不是所有的非线性分析都产生大变形,见§8.2。如果想重启动一个已失败的非线性分析,选择"Restart Gurrent Analysis"。在第1荷载步以后(即在首次运行SOLVE命令后),用户不能改变这个设置。通常用户要作一个新的分析,而不是重启动分析。重启动分析的讨论见《ANSYS Basic Analysis Guide》。
- 2、在进行时间设置时,记住这些选项可在任何荷载步改变。参见《ANSYS Basic Analysis Guide》 § 2。高级的时间/频率选项,参见 § 8.5.2.8。非线性分析要求在一个时间步上有多个子步,以使ANSYS能够逐渐地施加荷载,并取得精确解。NSUBST 和 DELTIM 命令二者激活相同的效果(建立荷载步的开始、最小和最大时间步),但互为倒数。NSUBST 定义一个荷载步上的子步数,而DECTIM 显式地定义时间步大小。如果自动时间步[AUTOTS]关闭,则起始子步大小用于整个荷载步
- 3、**OUTRES** 控制结果文件(Jobname. RST)中的数据。缺省时,在非线性分析中把最后一个子步的结果写入此文件。结果文件只能写入1000个结果集(子步),但用户可以可用 /**CONFIG**, NRES 命令来增大这一限值,参见《ANSYS Basic Analysis Guide》。

8.5.2.3 求解控制对话框--Transient标签

这个标签的内容是瞬态分析控制,只有在Basic标签中选择了瞬态分析时这个标签才能应用, 否则显灰色。所以在这里不论述,参见§8.6。

8.5.2.4 求解控制对话框--Sol'n Options标签

这个标签设置的选项见表8-4。按本标签的HELP可得到更多的说明。

表8-4

	* *
选项	参见
指定方程求解器[EQSLV]	• 《ANSYS Structural Analysis Guide》 § 8.5.2.7.1

	•	《ANSYS Basic Analysis Guide》 § 3.2-§ 3.10
对多重启动指定参数[RESCONTROL]	•	《ANSYS Basic Analysis Guide》 § 3.16.2

8.5.2.5 求解控制对话框--Nonlinear标签

用Nonlinear标签设置的选项见**表8-5**。按HELP按钮进入帮助系统可得到更多的说明。 表8-5

选项		参见《ANSYS Structural Analysis Guide》
激活线性搜索[LNSRCH]	•	§ 8. 5. 2. 8. 5
	•	§ 8. 10. 2. 3
激活自由度求解预测[PRED]	•	§ 8. 5. 2. 8. 4
指定一个荷载步中的最大子步数	•	§ 8. 5. 2. 8. 3
[NEQIT]		
指顶是否需要包括蠕变计算[RATE]	•	§ 8. 3. 1. 5
	•	§ 8. 5. 3. 2. 1
设置收敛准则[CNVTOL]	•	§ 8. 5. 2. 8. 2
控制二分[CUTCONTROL]	•	§ 8. 5. 2. 8. 6

8.5.2.6 求解控制对话框--Advanced NL标签

用 Advanced NL 标签设置的选项见**表8-6**。按HELP按钮进入帮助系统可得到更多的说明。 表8-6

选项		参见
指定分析终止准则[NCNV]	•	《ANSYS Structural Analysis Guide》 § 8.5.2.8.3
激活和终止弧长法的控制	•	《ANSYS Structural Analysis Guide》 § 8.10.2.4
[ARCLEN, ARCTRM]	•	《ANSYS Basic Analysis Guide》 § 2

8.5.2.7 求解控制对话框--设置其他高级分析选项

8.5.2.7.1 方程求解器

ANSYS的自动求解控制在大多数情况下,激活稀疏矩阵直接求解器(EQSLV, SPARSE)。这是缺省的求解器,除了在子结构分析的生成通过外(这时用波前直接求解器)。其他选项包括直接求解器和PCG求解器。对于实体单元(如SOLID92或SOLID45),使用PCG求解器可能更快,尤其是在三维模型中

如果用户采用PCG求解器,可以考虑用MSAVE命令降低内存应用。MSAVE命令对于线性材料特性的SOLID92单元,触发模型部件的单元-元方法。为了应用这一命令,必须是小应变(NLGEOM, OFF)静力或完全瞬态分析。模型中不符合上述条件的其他部件,应用刚度矩阵的总体安装来求解。对于符合上述条件的模型部件,用 MSAVE, ON 可能可节省70%的内存,但求解时间可能增加,这与计算机的配置和CPU速度有关。

与ANSYS中的迭代求解器不同,稀疏矩阵求解器是一个健壮的求解器。虽然PCG求解器能够求解同样的矩阵方程,但在它碰到一个病态矩阵时,求解器将反复指定的迭代数目,并在收敛失败时停机。在发生这种问题时,它触发二分。在完成二分后,求解器继续求解,如果结果矩阵是良态的话。最后可以求解整个非线性荷载步。

在结构非线性分析中,选择稀疏矩阵求解器,还是选择PCG求解器,可参照下面的意见:

- 1、如果是梁、壳或者梁、壳、实体结构,选择稀疏矩阵求解器;
- 2、如果是三维结构,而且自由度数相对较大(200000个自由度或以上),选择PCG求解器;
- 3、如果问题是病态(由不良单元形状引起),或在模型的不同区域材料特性相差巨大,或者位移边界条件不足,选择稀疏矩阵求解器。

8.5.2.8 求解控制对话框--设置其他高级荷载步选项

8.5.2.8.1 自动时间步

ANSYS的自动求解控制打开自动时间步长[AUTOTS, 0N]。这一选项允许程序确定子步间载荷增量的大小和决定在求解期间是增加还是减小时间步(子步)长。

在一个时间步的求解完成后,下一个时间步长的大小基于四种因素预计:

- 在最近过去的时间步中使用的平衡迭代的数目(更多次的迭代成为时间步长减小的原因);
- 对非线性单元状态改变预测(当状态改变临近时减小时间步长);
- 塑性应变增加的大小:
- 蠕变增加的大小。

8.5.2.8.2 收敛准则

程序将连续进行平衡迭代直到满足收敛准则[CNVTOL](或者直到达到允许的平衡迭代的最大数(NEQIT)。如果缺省的收敛准则不满意,可以自己定义收敛准则。

ANSYS的自动求解控制应用力(或力矩)L2-模容限(TOLER)等于0.5%,这对于大部分情况合适。在大多数情况下,L2-模在按TOLER等于0.05%检查位移时,也用于力模的附加检查。

缺省时,程序将通过比较不平衡力的SRSS与VALUE×TOLER的值,检查力(在包括转动自由度时,还有力矩)的收敛。*VALUE*的缺省值是在所加载荷(或在施加位移时,Netwton-Raphson回复力)的SRSS,或*MINREF*(其缺省为0.001),取较大者。如果**SOLCONTRIL**,0FF,则对于力的收敛,*TOLER*的。做省值是0.001,而*MINREF*的缺省为1.0。)

用户应当几乎总是使用力收敛检查。可以添加位移(或者转动)收敛检查。对于位移,程序将收敛检查建立在当前(i)和前面(i—1)次迭代之间的位移改变(Δu)上, $\Delta u = u_i - u_{i-1}$ 。

注意一如果用户明确地定义了任何收敛准则[CNVTOL],缺省准则将失效。因此,如果用户定义了位移收敛检查,用户将不得不再定义力收敛检查(使用多个 CNVTOL 命令来定义多个收敛准则)。

使用严格的收敛准则将提高用户的结果的精度,但以多更次的平衡迭代为代价。如果用户想严格(加放松一但不推荐)用户的准则,用户应当改变TOLER一到两个数量级。一般地,用户应当继续使用VALUE的缺省值;也就是,通过调整TOLER,而不是VALUL,改变收敛准则。用户应当确保MINREF=0.001的缺省值在用户的分析范围内有意义。如果应用某一单位系统,使荷载变得十分小,可能需要指定较小的MINREF值。

在非线性分析中,不推荐把两个或多个相邻结构放在一起分析,因为收敛检查试图把这些彼此 不相连的结构联系起来,通常会产生不希望的缀余力。

在单一和多自由度系统中检查收敛

要在单自由度系统中检查收敛,用户对这一个自由度计算出不平衡力,然后对照给定的收敛准则(VALUE×TOLER)比较这个值(同样也可以对的单一自由度的位移或旋度收敛进行类似的检查)。然而,在多自由度系统中,用户也许想使用不同的比较方法。

ANSYS程序提供三种不同的矢量模用于收敛核查:

- 无限模在用户模型中的每一个自由度处重复单一自由度核查;
- L1模将收敛准则同所有自由度S的不平衡力(或力矩)的绝对值的总和相对照;
- L2模使用所有自由度S不平衡力(或力矩)的SRSS进行收敛检查。当然,对于位移收敛检查,可以执行附加的L1、L2检查。

实例

对于下面例子,如果不平衡力(在每一个自由度处单独检查)小于或等于5000×0.0005(也就是2.5),且如果位移的改变(以SRSS根检查)小于或等于10×0.001(也就是0.01),子步将认为是收敛的。

CNVTOL, F, 5000, 0.005, 0 CNVTOL, U, 10, 0.001, 2

8.5.2.8.3 平衡迭代的最大次数

ANSYS的自动求解控制把NEQIT的值,根据问题的物理特性,设置为15到26次平衡叠代。应用小时间步,可减少二次收敛叠代次数。

这个选项限制了一个子步中进行的最大平衡迭代次数(如关闭求解控制,缺省=25)。如果在这个平衡迭代次数之内不能满足收敛准则,且如果自动步长是打开的[AUTOTS],分析将尝试使用二分

法。如果二分法是不可能的,那么,分析将或者终止,或者进行下一个载荷步,依据用户在NCNV命令中发出的指示。

8.5.2.8.4 时间步长预测—纠正选项

ANSYS的自动求解控制设置PRED, ON, 如不存在梁或壳单元。如果在当前子步的步长极大地减小, PRED将关闭。对于瞬态分析, 将关闭预测选项。

对于每一个子步的第一次平衡迭代,用户可以激活与自由度求解有关的预测。这个特点将加速 收敛,且如果非线性响应是相对平滑的,它特别的有用。在包含大转动或粘弹的分析中它并不是非 常有用。在大转动分析中,预测可能引起发散,因而不推荐使用。

8.5.2.8.5 线搜索选项

ANSYS的自动求解控制,将根据需要关闭或打开线性搜索。对大多数接触问题,**LNSRCH**打开。对大多数非接触问题,**LNSRCH**关闭。

这个收敛提高工具用程序计算出的比例因子(具有0和1之间的值)乘以计算出的位移增量。因为 线搜索算法是用来对自适应下降选项[NROPT]进行的替代,如果线搜索选项是开,自适应下降不被 自动激活。不建议用户同时激活线搜索和自适应下降。

当存在强迫位移时,直到迭代中至少有一次具有一个的线搜索值运算才会收敛。ANSYS调节整个 ΔU 矢量,包括强迫位移值;否则,除了强迫自由度处以外,一个小的位移值将随处发生。直到叠代中的某一次具有1的线搜索值,ANSYS才施加全部位移值。

8.5.2.8.6 Cutback准则

为了在时间步长上,更好地控制二分和截断,应用[CRTCONTROL, Lab, VALUE, Option]。缺剩时,对于Lab=PLSLIMIT(最大塑性应变增量极限),VALUE设置为15%。该域设为这么大的值,是为避免由高主塑性引起的不需要的二分,因为用户对局部的奇异通常并不感兴趣。对于显式蠕变(Option=0), Lab=CRPLIM(蠕变增量极限),VALUE设置为10%。这对蠕变分析是一个合理的极限。对于隐式蠕变(Option=1),缺省无最大蠕变准则。但是用户可以指定蠕变率控制。对于二阶动力方程,每个周期的点数(Lab=NPOINT),缺省为VALUE=13,这样可以最小的代价取得有效精度。

8.5.3 设置附加求解选项

本节论述的选项,不出现在求解对话框中。这些选项的缺省值,一般很少需要改变。

8.5.3.1 求解控制对话框不能设置的高级分析选项

8.5.3.1.1 应力刚化效应

为了考虑屈曲、分叉行为,ANSYS在所有几何非线性分析中,包括了应力刚化。如果用户有信心放弃这种效应,则可以关闭应力刚化效应(SSTIF, 0FF)。在一些单元中,这个命令无作用,见《ANSYS Elements Reference》。

命令: SSTIF

GUI: Main Menu>Solution>Unabridged Menu>Analysis Options

8.5.3.1.2 牛顿一拉普森选项

在存在非线性时,ANSYS的自动求解控制将应用自适应下降关闭的完全牛顿一拉普森选项。但 在应用节点-节点,节点-面接触单元的有摩擦接触分析中,自适应下降功能是自动打开的,如 PIPE20、BEAM23、BEAM24、PIPE60单元。放在下面的接触单元需要自适应下降才能收敛。

命令: NROPT

GUI: Main Menu>Solution>Unabridged Menu>Analysis Options

仅在非线性分析中使用这个选项。这个选项指定在求解期间每隔多久修改一次正切矩阵。如果用户不想采用缺省值,可以指定这些值中的一个:

- 程序选择(NROPT, ANTO):程序基于用户模型中存在的非线性种类选择用这些选项中的一个。需要时牛顿一拉普森方法将自动激活自适应下降。
- 完全(NROPT, FULL);程序使用完全的牛顿一拉普森方法。在这种处理方法中,每进行一次

平衡迭代,就修改刚度矩阵一次。

如果自适应下降是打开(可选的),只要迭代保持稳定(也就是只要残余项减小,且没有负主对角线出现),程序将仅使用正切刚度阵。如果在一次迭代中探测到发散倾向,程序抛弃发散的迭代且重新开始求解,应用正切和正割刚度矩阵的加权组合。当迭代回到收敛模式时,程序将重新开始使用正切刚度矩阵。对复杂的非线性问题自适应下降通常将提高程序获得收敛的能力,但它只支持《ANSYS Element Reference》单元输入汇总表中的"Special Features"指明的单元(见《ANSYS Element Reference》表4. n. 1,其中n为单元编号)。

- 修正的(NROPT, MODI):使用修正的牛顿一拉普森方法。在这种方法中,正切刚度矩阵在每一子步中都被修正。在一个子步的平衡迭代期间矩阵不被改变。这个选项不适用于大变形分析。自适应下降不可用。
- 初始刚度(NROPT, INIT): 在每一次平衡迭代中都使用初始刚度矩阵。这一选项比完全选项 似乎较不易发散,但它经常要求更多次的迭代来得到收敛。它不适用于大变形分析。自适 应下降不可用。
- 完全与不对称矩阵(**NROPT**, UNSYM):应用完全牛顿一拉普森方法,刚度矩阵在每一次平衡迭代中都修正。此外,它生成并应用在下面任何一种情况中可以应用的不对称矩阵:
 - 如用户在运行压力产生的破坏分析,不对称的压力荷载刚度可能有助于取得收敛。可应用 SOLCONTROL, INCP 命令来包括荷载刚度。
 - 如果应用 TB, UNSYM 命令定义不对称材料模式,则需要用 NROPT, UNSYM 命令来完全 应用所定义的特性。
 - 如运行接触分析,不对称接触刚度矩阵可以完全藕合滑动和法向刚度。见 § 9.4.9.4

用户应首先试验 NROPT, FULL 命令; 然后如果收敛困难的话,再试验NROPT, UNSYM 命令。注意,应用不对称求解器需要比对称求解器更多的计算机时间。

如果在模型有多状态单元,则将在状态改变时进行叠代修正,而不管牛顿一拉普森选项设置如何。

8.5.3.2 求解控制对话框不能设置的高级荷载步选项

8.5.3.2.1 蠕变准则

如果结构表现出蠕变行为,可以指定蠕变准则用于自动时间步调整[CRPLIM, CRCR, Option](如果自动时间步长[AUTOTS]关闭,蠕变准则无效)。程序将对所有单元计算蠕变应变增量(在最近时间步中蠕变的变化 $\Delta \varepsilon_{cr}$)对弹性应变 ε_{el} 的比值。如果最大比值比判据CRCR大,程序将减小下一个时间步长;如果小,程序或许增加下一个时间步长(同样,程序将把自动时间步长建立在平衡迭代次数、即将发生的单元状态改变以及塑性应变增量的基础上。时间步长将被调整到对应这些项目中的任何一个所计算出的最小值)。对于显式蠕变(OPTION=0),如果比值 $\Delta \varepsilon_{cr} / \varepsilon_{el}$ 高于0. 25的稳定界限,且如果时间增量不能被减小,解可能发散且分析将由于错误信息而终止。这个问题可以通过使最小时间步长足够小避免[DELTIM 和 NSUBST]。对于隐式蠕变(OPTION=1),缺省无最大蠕变极限,但用户可以指项任意蠕边率控制。

命令: CRPLIM

GUI: Main Menu>Solution>Unabridged Menu>-Load Step Opts-Nonlinear>Creep Criterion

注意一如果在分析中不需要包括蠕变效应,则应用 RATE 命令及 Option=OFF, 或把时间步设置成比前一个时间步长些,但不大于1.0e-6。

8.5.3.2.2 时间步打开控制

这个选项可用于热分析(记住用户不能通过求解控制对话框来设置热分析选项,必须用ANSYS标准命令集或相应菜单来设置)。这个选项的主要应用是不稳定状态热分析,这时最终温度阶段达到稳态。在这种情况下,时间步可很快打开。其缺省值是,如果TEMP增量在三个连续子步中小于0.1(NUMSTEP=3),则时间步大小可以为"打开"(缺省值=0.1)。为了加大求解效率,时间步然后被连续打开。

命令: OPNCONTROL

GUI: Main Menu>Solution>Unabridged Menu>-Load Step Opts-Nonlinear>Open Control

8.5.3.2.3 求解监视

这个选项为监视指定节点上的指定自由度的求解值提供了方便。这个命令为用户快速观察求解收敛效率提供了可能,而不必通过冗长的输出文件来取得这些信息。例如,在一个子步上尝试次数过大,这个文件包含的信息将提供指示:要么降低初始时间步,要么增加最小的子步数,这可通过NSUBST命令来避免二分次数过多。

命令: MONITOR

GUI: Main Menu>Solution>Unabridged Menu>-Load Step Opts-Nonlinear>Monitor

8.5.3.2.4 激活和杀死选项

根据需要指定"生"、"死"选项。对选定的单元,可以"杀死"[EKILL]和"激活"[EALIVE],以模拟在结构中移走或添加材料。作为标准的"生"、"死"方法以外的另一个方法,用户可以对所选择的单元在荷载步之间改变材料特性[MPCHG]。

命令: EKILL

EALIVE

GUI: Main Menu>Solution>-Load Step Opts-Other>Kill Elements Main Menu>Solution>-Load Step Opts-Other>Activate Elem

程序通过用一个非常小的数(它由 ESTIF 命令设置)乘以它的刚度从总质量矩阵消去它的质量来"杀死"一个单元。对无活性单元的单元载荷(压力、热通量、热应变等等)同样地设置为零。用户需要在前处理中定义所有可能的单元;用户不可能在 SOLUTION 中产生新的单元。

要在用户的分析的后面阶段中"出生"的那些单元,在第一个载荷步前应当被"杀死",然后在适当的载荷步的开始被重新"激活"。当单元被重新"激活"时,它们具有零应变状态,且(如果 NLGEOM, ON)它们的几何构形(长度、面积等等)被修改来与它们现在变形后的位置相适应。参见《ANSYS Advanced Analysis Techniques Guide》。

命令: MPCHG

GUI: Main Menu>Solution>-Load Step Opts-Other>Change Mat Props> Change Mat Num

注意一应用[MPCHG]是要注意。在求解期间改变它的材料性质参考号,可能产生不希望的结果,特别是如果用户改变材料非先行特性[TB]。

8.5.3.2.5 输出控制选项

除了可以通过求解控制对话框可以设置的 OUTRES 外,用户还可以设置其他输出选项。

命令: OUTPR

ERESX

 $\hbox{\tt GUI: Main Menu} \gt \hbox{\tt Solution} \gt \hbox{\tt Unabridged Menu} \gt \hbox{\tt Load Step Opts-Output}$

Ctrls>Solu Printout

Main Menu>Solution>Unabridged Menu>-Load Step Opts-Output Ctrls>Integration Pt

打印输出选项[OUTPR]可在输出文件(Jobname. OUT)中包括所想要的任何结果数据。

结果外推[ERESX]拷贝一个单元的积分点应力和弹性应变结果到结点来替代外推,如果在单元 中存在非线性(塑性、蠕变、膨胀)的话。积分点非线性应变总是被拷贝到结点。

参见《ANSYS Basic Analysis Guide》 § 2。

8.5.4 施加荷载

在这一步把荷载施加到模型中,参见 § 2和《ANSYS Basic Analysis Guide》 § 2。记住惯性荷 载和点荷载将保持方向不变,但表面荷载在大变形分析中将跟随结构的变形而变化。用户可以定义 一维数据表(TABLE类性的数组参数)来施加复杂边界条件。参见§2.4.4.2.1。

8.5.5 求解

1、把数据库保存为一个文件。

命令: SAVE

GUI: Utility Menu>File>Save as

2、求解

命令: SOLVE

GUI: Main Menu>Solution>-Solve-Current LS

- 3、如用户定义了多个荷载步,则必须指定时间设置、荷载步选项等,然后保存和求解每个附加的荷载步。参见《ANSYS Basic Analysis Guide》。
 - 4、退出求解器

命令: FINISH

GUI: 关闭求解菜单

8.5.6 考察结果

非线性静态分析的结果,主要由位移、应力、应变以及反作用力组成。可以用通用后处理器 POST1,或者时间历程后处理器POST26,来考察这些结果。

记住用POST1一次仅可以读取一个子步,且来自那个子步的结果应当已被写入Jobname. RST。(载荷步选项命令 OUTRES 控制哪一个子步的结果被存储入Jobname. RST)。典型的POST1后处理顺序将在下面描述。

8.5.6.1 要记住的要点

- 用POST1考察结果,数据库中的模型必须与用于求解计算的模型相同。
- 结果文件(Jobname. RST) 必须是可用的。

8.5.6.2 用POST1考察结果

- 1、检查用户的输出文件(Jobname, OUT)是否在所有的子步分析都收敛。
- 如果不收敛,用户可能不想后处理结果,而是想确定为什么收敛失败。
- 如果用户的解收敛,那么继续进行后处理。
- 2、进入POST1。如果用于求解的模型现在不在数据中,发出 RESUME 命令。

命令: /POST1

GUI: Main Menu>General Postproc

3、读取需要的载荷步和子步结果,这可以依据载荷步和子步号或者时间来识别,然而不能依据时间来识别出弧长结果。

命令: SET

GUI: Main Menn>General Postproc>Read Results-Load step

同样地用户可以使用 SUBSET 或者 APPEND 命令来只对选出的部分模型读取或者合并结果数据。这些命令中的任何一个中的LIST参数列出结果文件中可用的解。用户同样地可以通过 INRES 命令限制从结果文件到基本数据被写的数据总量。另外可以用 ETABLL 命令对选出的单元存进行后处理,见《ANSYS Commands Reference》

警告:如果用户指定了一个没有结果可用的TIME值,ANSYS程序将进行线性内插来计算出那Time处的结果。认识到在非线分析中这种线性内插通常将导致某些精度损失(参看图8-21)。因此,对于非线性分析,通常用户应当在一个精确地对应于要求子步的TIME处进行后处理。

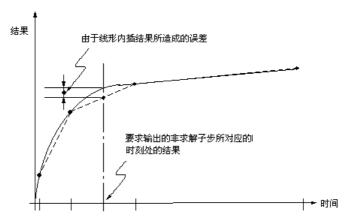


图8-21 非线性结果的线性内插可能引起某些误差

4、使用下列任意选项显示结果

1)显示已变形的形状

命令: PLDISP

GUI: Main Menu〉General Postproc〉Plot Results〉Deformed Shapes 在大变形分析中,一般优先使用真实比例显示[DSCALE,,,1]。

2)等值线显示

命令: PLNSOL 或 PLESOL

GUI: Main Menu〉General Postproc〉Plot Results〉-Contour Plot-Nodal Solu 或 Element Solu

使用这些选项来显示应力、应变或者任何其它可用项目的等值线。如果邻接的单元具有不同材料行为(可能由于塑性或多线性弹性的材料性质,由于不同的材料类型,或者由于邻近的单元的死活属性不同而产生),用户应当注意避免结果中的结点应力平均错误。

PLNSOL 和 PLESOL 命令的KUND域使用户可以在原始图形上叠加变形图。

同样地用户可以绘制单元表数据和线单元数据的等值线:

命令: PLETAB, PLLS

GUIS: Main Menu>General Postproc>Element Table>Plot Element Table
Main Menu>General Postproc>Plot Results>-Contour Plot-Line
Elem Res

使用 PLETAB 命令来绘制单元表数据的等值线,用 PLLS 命令来绘制线单元数据的等值线。

3) 列表

命令: PRNSOL(结点结果),

PRESOL(结果),

PRRSOL(反作用力数据)

PRETAB

PRITER(子步总计数据)等等。

NSORT

ESORT

GUIS: Main Menu〉General Postproc〉List Results〉Nodal Solution
Main Menu〉General Postproc〉List Results〉Element Solution
Main Menu〉General Postproc〉List Results〉Reaction Solution
使用NSORT和ESORT命令在将数据列表前对它们进行排序。

4) 其它的性能

在POST1中还可用许多其它的后处理功能(如在路径上映射结果,记录参量列表,等等),见《ANSYS Basic Analysis Guide》。对于非线性分析,载荷工况组合通常是无效的。

8.5.6.3 用POST26考察结果

用户可以使用时间—历程后处理器POST26来考察非线性结构的载荷—历程响应。使用POST26比较一个ANSYS变量对另一个变量的关系。例如,用户可以用图形表示某一结点处的位移与对应的所加载荷的关系,或者用户可以列出某一结点处的塑性应变和对应的TIME值之间的关系。典型的POST26后处理顺序可以遵循这些步骤:

- 1、根据用户的输出文件(Jobname. OUT)检查是否在所有要求的载荷步内分析都收敛。用户不应当将设计决策建立在不收敛结果的基础上。
 - 2、 如果用户的解收敛,进入POST26,如果现用户的模型不在数据库内,发出RESUME命令。命令: /POST26

GUI: Main Menu>TimeHist Postpro

3、定义在后处理期间使用的变量

命令: NSOL, ESOL, RFORCL

GUI: Main Menu>Time Hist Postproc>Define Variables

4、图形或者列表显示变量

命令: PLVAR(图形表示变量), PRVAR, EXTREM(列表变量)

GUIS: Main Menu>Time Hist Postprac>Graph Variable S Main Menu>Time Hist Postproc>List Variables Main Menu>Time Hist Postproc>List Extremes

5、其它的性能

许多其它的后处理函数可用于POST26,参考《ANSYS Basic Analysis Guide》§6。此外还可参见NLGEOM, SSTIF, NROPT, TIME, NSUBST, AUTOTS, KBC, CNVTOL, NEQIT, NCNV, PRED, OUTES和SOLU命令的说明。

8.5.7 终止正在运行的工作, 重起动

用户可以通过产生一个"abort"文件(Jobname. ABT)停止一个非线性分析,见《ANSYS Basic Analysis Guide》§3。一旦求解成功地完成,或者收敛失败发生,程序也将停止分析。

如果一个分析在终止前已成功地完成了一次或多次迭代,用户可以屡次重启动它。见《ANSYS Basic Analysis Guide》§3.16。

8.6 非线性瞬态分析步骤

许多需要进行非线性瞬态分析的任务,与非线性静力分析(参见§8.5)和线性完全瞬态分析(参见§2)相同或相似。本节论述非线瞬态分析的一些附加考虑。

请记住§8.5论述的求解控制对话框,不能应用于热分析的求解控制。只能应用标准的ANSYS命令集或菜单来进行热分析的设置。

§ 8.6.1 建模

这一步骤与非线性静力分析相同,参见§8.5。但是,如果分析中包含时间的积分效应,则必须输入质量密度[MP, DENS]。如果需要,还可以定义与材料相关的结构阻尼[MP, DAMP]。

§ 8.6.2 施加荷载和求解

- 1、指定瞬态分析类型,定义分析选项,与非线性静力分析相同:
- 新的分析或重启动[ANTYPE]

- 分析类型: 瞬态[ANTYPE]
- 应变形效应[NLGEOM]
- 大位移瞬态(如果用求解控制对话框设置分析类型)。
- 2、施加荷载,并指定荷载步选项,这与线性完全瞬态动力分析中相同。瞬态时间历程通常需要多个荷载步,其中第1荷载步典型地用于建立初始条件,见《ANSYS Basic Analysis Guide》。此外,非线性静力分析中所用的一般的非线性、生和死、输出控制等,在非线性瞬态分析中也可应用。

在非线性瞬态分析中,时间必须大于0。如何定义非0初始条件,见§5。

对于非线性瞬态分析,用户必须说明是阶梯荷载还是斜坡荷载[KBC]。见《ANSYS Basic Analysis Guide》对此的进一步论述。

命令: ALPHAD

BETAD

TIMINT

TINTP

GUI: Main Menu>Solution>-Analysis Type-Sol'n Control:Transient Tab

Main Menu>Solution>Unabridged Menu>-Load Step Opts-Time/

Frequenc > Damping

Main Menu>Solution>Unabridged Menu>-Load Step Opts-Time/

Frequenc>Time Integration

动力选项解释:

(1)阻尼--Rayleigh阻尼常数用常数质量[ALPHAD]和刚度[BETAD]矩阵乘子定义。在非线性分析中,刚度可能激烈改变--除这种情况外,不要应用 BETAD。参见§5.9.3。

(2)时间积分效应[TIMINT]。只在瞬态分析中,时间积分效应才缺省打开。对于蠕变、粘弹性、粘塑性、膨胀,应当关闭时间积分效应(也就是说明进行静力分析)。这些时间相关效应通常不包括在动力分析中,因为瞬态动力时间步,对于任何明显的长期变形来说,时间太短。

除了在运动学(刚体运动)分析中,用户应当很少需要调整瞬态积分参数[TINTP]—它对Newmark 方程提供数值阻尼,参见《ANSYS Theory Reference》。ANSYS的自动求解控制,把缺省设为一个新的时间积分方案,对于应用一阶瞬态方程。这通常用于不稳定状态热问题(θ =1)(由SOLCONTROL, ON 设置),这是反向 EULER 方案。它是无条件稳定的。对于象相变这样的高度非线性热问题,这种方案更鲁棒。振荡极限容限缺省为0.0,以使响应的一阶特征值可用于更精确地决定一个新的时间步值。

注意--如果用求解控制对话框设置注解控制,用户可在Transient标签中进入所有这些选项。

3、把各个荷载步的荷载数据写到荷载步文件中。

命令: LSWRITE

GUI: Main Menu>Solution>Write LS File

4、把数据库文件试备份到一个命令文件中。

命令: SAVE

GUI: Utility Menu>File>Save As

5、开始求解。对于多荷载步的求解参见《ANSYS Basic Analysis Guide》 § 1。

命令: LSSOLVE

GUI: Main Menu>Solution>-Solve-From LS Files

6、在求解完所有荷载步后,退出求解。

命令: FINISH

GUI: 关闭Solution菜单。

§ 8.6.3 观察结果

与非线性静力分析一样,可以用POST1来处理某一时刻的结果,其使用方法也相同。再次提醒 ,应在进行后处理之前检查计算是否收敛。

时间历程后处理程序 POST26 的应用,也与非线性静力分析中基本相同,参见§5。其他有关内容,可参见《ANSYS Basic Analysis Guide》。

8.7 非线性瞬态分析示例(输入文件列表)

下面是一个瞬态分析的输入列表:

```
! Build the Model:
/PREP7
                        ! Similar to a linear full transient model, with
                        ! these possible additions: nonlinear material
                        ! properties, nonlinear elements
FINISH
! Apply Loads and Obtain the Solution:
/SOLU
ANTYPE, TRANS
! TRNOPT, FULL by default
                        ! Establish initial conditions as in linear full
                        ! transient analysis
                        ! Initial-condition load step
LSWRITE
NLGEOM, ON
                        ! Nonlinear geometric effects (large deformations)
                        ! Stress stiffening effects
! NROPT=AUTO by default: Program will choose appropriate Newton-Raphson and
                        ! Adaptive Descent options, depending on
                        ! nonlinearities encountered
! Loads:
D, . . .
! Load Step Options:
TIME,...
                        ! TIME at end of load step
DELTIM, ...
                        ! Time step controls (starting, min, max)
AUTOTS, ON
                        ! Automatic time stepping, including bisection
! KBC=0 by default (ramped loading)
! Dynamic Options:
ALPHAD, . . .
                        ! Mass damping
                        ! TIMINT, ON by default, unless you turned it OFF for
TIMINT, ON
                        ! initial-condition load step
! Nonlinear Options:
CNVTOL,...
                         ! Convergence criteria
! NEQIT=25 by default
NCNV,,,...
                        ! Nonconvergence termination controls
                        ! Predictor ON
PRED, ON
OUTRES, ALL, ALL
                        ! Results for every substep written to database
LSWRITE
                        ! First "real" transient load step
                        ! Additional load steps, as needed
LSSOLVE, 1, 3
                        ! Initiate multiple l.s. solution
SAVE
FINISH
! Review the Results:
                        ! Time-History Postprocessor
/POST26
SOLU, 2, CNVG
                        ! Check convergence
SOLU, 3, FOCV
PRVAR, 2, 3
```

NSOL,...
! Store results (displacements, stresses, etc.) as
! variables

PLVAR,...
! Graph results vs. TIME to evaluate general quality
! of analysis, determine critical time step, etc.

FINISH
!

/POST1
! General Postprocessor

SET,...
! Read results from desired time step

PLDISP,...
! Postprocess as desired

PLNSOL,...

NSORT,...

上例用到的ANTYPE, TRNOPT, LSWRITE, NLGEOM, SSTIF, NROPT, TIME, DELTIM, AUTOTS, KBC, ALPHAD, TIMINT, CNVTOL, NEQIT, NCNV, PRED, OUTRES, LSSOLVE, SOLU等命令,参见《ANSYS Commands Reference》。

8.8 重启动

PRNSOL, ... FINISH

瞬态分析的重启动方法,与静力分析基本相同,请参见《ANSYS Basic Analysis Guide》 § 3.16。

8.9 非线性(状态改变)单元

非线性单元在状态改变时显示出刚度突然变化。例如,缆索松掉后,其刚度突然变为0。两个分离的物体接触后,他们的刚度急剧改变。类似这种情况可用非线性单元来模拟。可以通过把生、死选项赋予不同的单元(见《ANSYS ADVANCED ANALYSIS TECHNIQUES GUIDE》),或改变材料特性 [MPCHG]。下面所述的单元,只适用于ANSVS/Multiphysics,ANSYS/Mechanical,ANSYS/Structural。参见《ANSYS Elements Reference》。

- COMBIN7
- COMBIN14
- COMBIN37
- COMBIN39
- COMBIN40
- CONTAC12, CONTAC52
- CONTAC26
- CONTAC48, CONTAC49
- TARGE169, TARGE170, CONTA171, CONTA172, CONTA173, CONTA174
- LINK10
- SHELL41
- SOLID65

§ 8.9.1 单元生死

有时单元状态在"存在"和"不存在"之间变化。在这种情况下单元生死选项[[EKILL, EALIVE, ESTIF](GUI: Main Menu> Solution>-Load Step Opts-Other)可用于"杀死"或"激活"所选择的单元。参见《ANSYS Advanced Analysis Techniques Guide》§7。

8.10 非线性分析的提示和指南

8.10.1

在出现警告时,应当花时间来认真研究。这样可使用户避免许多与非线性分析有关的困难。下

面的建议对用户应当有所帮助。

8.10.1.1 熟悉程序动作和结构行为

如果用户在以前未应用过某一种非线性特性,则应当在分析大型、复杂的模型之前,首先建立一个十分简单的模型(即只包含几个单元的模型),并确保对其特性了解。

- 首先,对初步的简化模型,深入了解其结构行为。对于非线性静力分析模型,一个初步的线性静力分析,也可以揭露模型在那个区域首先经受非线性响应,在什么样的荷载水平下,这些非线性将起作用。对于非线性瞬态分析,初步的梁、质量、弹簧模型,可以用最小代价提供对结构的深入了解。初步的非线性静力、线性瞬态动力和/或模态分析,也可帮助用户在进行最终的非线性瞬态动力分析前了解结构非线性响应的各个方面的内容。
- 阅读和理解程序输出信息和警告信息。至少在对结果进行后处理前,要确保问题是收敛的。对于路径相关问题,打印出来的平衡迭代记录在帮助用户确定结果是否有效时是最重要的。

8.10.1.2 保持简洁

- 保持最终模型尽可能简单。如果可用2D平面应力、平面应变或轴对称模型来代表3D结构 ,就应该这么做。如果可通过对称或反对称面来使模型规模减小,也就应该这么做。然 而,如果荷载是反对称的,则通常不采用反对称的特点。反对称可能在大变形分析时也 应当应用。如果忽略某一非线性细节而不会影响模型关键区域的结果,那么就应这么做
- 在可能时,用静力等效荷载来模拟瞬态动力荷载。
- 考虑把模型中的线性区域作为一个子结构,以减小计算工作量。

8.10.1.3 应用足够的网格密度

- 应当认识到,在经受塑性变形的区域,要求相当的积分点密度。低阶单元提供了与高阶单元相同的积分点数目,因此在塑性分析中应用低阶单元较合算。在塑性铰区域,网格密度尤其重要。
- 在接触表面要有足够的网格密度,以使接触应力分布较光滑。
- 为了求解应力,也要有足够的网格密度。需要计算应力或应变的区域要比位移或非线性解析区域网格要密一些。
- 对于需要高阶模态时,网格密度要足够。需要的单元数目,取决于单元假定的位移形状 函数,以及模态形状本身。
- 对于瞬态动力波传播,要采用足够密的网格。如果波传播很重要,则一个波长最小要20 单元。

8.10.1.4 逐渐地施加荷载

- 对于非保守、路径相关系统,施加荷载时要用足够小的荷载增量,以保证分析接近荷载-响应曲线。
- 有时,可以采用逐渐地加载,而使保守系统的收敛行为有所改进,这样可使 Newton-Raphson 平衡迭代数最小。

8.10.2 克服收敛问题

收敛失败可能表示结构产生物理上的不稳定性,也可能仅仅是在有限模型中的某些数值问题引起的。

ANSYS程序为用户提供了一些克服数值不稳定的工具。如果用户正在模拟的系统实际上是物理不稳定的(即存在0或负刚度),则问题就棘手得多了。用户有时可用一种或多种决窍来得到这种情况下的解。下面我们来检验一些可在分析中用来尝试改进收敛的技术和方法。

8.10.2.1 用图形追踪收敛性

在执行非线性分析过程中,ANSYS在每个迭代期间根据收敛准则计算收敛模。批命令方式和交

互方式均可应用的图形求解追踪(GST)特性,在计算过程中将显示计算的收敛模以及准则。缺省时,对于交互方式,GST为0N;而对于批命令方式,GST为0FF。要打开或关闭GST,可应用:

命令: /GST

GUI: Main Menu>Solution>Output Ctrls>Grph Solu Track 典型的GST显示如**图8-22**所示。

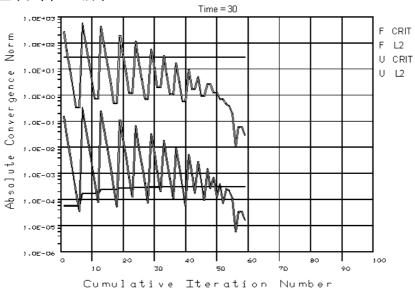


图8-22 有GST特性显示的收敛模

8.10.2.2 应用自动时间步

- 请确保应用DELTIM或NSUBST命令设置自动时间步的上限,特别是对复杂模型。这将确保精确地包括所需的模态和行为。在下述情况下,这可能非常重要:
 - 有局部动态行为的问题(如透平机叶片和毂座安装),这种情况下,系统的低频能量可能控制高频区域;
 - 对于在荷载中某些短时间斜坡荷载的问题。如果时间步尺寸允许变得太大,荷载历程的斜坡部分可能无法精确表征:
 - 对于包括连续被某一频率范围激励的结构问题(如地震问题)。
- 在模拟运动学结构(即有刚体运动)时要特别小心。下面的方法可帮助用户取得良好的解:
 - 求解时结合显著的数值阻尼(在 TINTP 命令中, 0.45〈γ〈0.1),以过滤掸高阶频率 噪声,特别是在应用较粗的时间步的情况下。在运动学分析中,不要应用α-阻尼 (质量矩阵乘子, ALPHAD 命令),因为它会使刚体运动(0频率的模态)受阻。
 - 避免强迫位移历程,因为强迫位移输入(理论上)会产生加速度无限跳跃,从而引起 Newmark时间积分算法的稳定问题。

8.10.2.3 应用线性搜索

线性搜索[LNSRCH]可以加强收敛,但可能开销很大(特别是塑性分析)。在下列情况下,可以考虑打开线性搜索:

- 当结构是力-加载(与位移控制对应);
- 在分析一个刚度会增大的薄结构(如钩鱼杆)时;
- 如果用户从程序输出信息注意到振荡收敛情况。

8.10.2.4 应用弧长法

可以应用弧长法[ARCLEV 和 ARCTRM]来得到许多物理不稳定结构的数值稳定解。在应用弧长法时,请记住:

- 弧长法仅限于比例结构加载(斜坡荷载)的静力分析:
- 程序根据第一个子步的第一次迭代的荷载(或位移)增量计算参考弧长半径,应用下面的公式:

Reference Arc – Length Radius = $\frac{\text{(Total Load or Displacement)}}{\text{NSBSTP}}$

其中 NSBSTP 是在 NSUBST 命令指定的子步数。

在选择子步数时,更多的子步将导致较长的求解时间。理想地,需要选择最少子步来达到有效的求解。

用户可能不得不对子步数先进行"猜测",然后调整,然后再分析。

- 在激活弧长法时不要用线性搜索[LNSRCH]、预测[PRED], 自适应下降[NROPT,,,ON]、自动 时间步[AUTOTS, TIME, DELTIM]或时间积分效应[TIMINT];
- 不要试图应用基于位移「CNVTOL, U]的收敛判据,要用基于力「CNVTOL, F]收敛的判据;
- 为了在应用弧长法时使求解时间最小,一个子步上的最大平衡迭代数[NEQIT]应当小于或等于15;
- 如果弧长法求解在预先设置的最大迭代数[NEQIT]上收敛失败,程序将自动二分并继续求解。直到得到收敛解,否则将一直二分下去或直到应用了最小的弧长半径(最小弧长半径用NSBSTP[NSUBST]和MINARC[ARCLEN]定义)。
- 通常不能用这个方法来得到指定荷载或位移处的解,因为在平衡激活时,其值沿弧长改变。注意在图8-4中,指定荷载 F_i^a 仅作为起点。收敛时真实荷载稍小些:
- 在非线性屈曲分析中,应用弧长法时,可能难以确定荷载或挠度的极限值(按已知的容差)。因为用户通常不得不应用试算法调整参考弧长半径(应用 NSUBST)来得到极值点的解。因此对于非线性屈曲分析,应用标准 Newton-Raphson迭代法及二分[AUTOTS],可能更为方便。
- 用户在应用弧长法时,一般应当避免应用JCG求解器[EQSLV],因为弧长法可能得到负定义
 刚度(负Pivot),这在用JCG求解器时可能会求解失败。
- 在任何荷载步开始时,用户可以自由地从Newton-Raphson迭代法切换到弧长法。然而,要 从弧长法切换到Newton-Raphson迭代法,则必须终止并重启动,在重启动的第一个荷载步 上关闭弧长法[ARCLEN, 0FF]。

在下面所述情况下, 弧长法求解终止:

- 达到 ARCTRM 或 NCNV 命令定义的限值;
- 在作用荷载上的解收敛:
- 应用放弃文件(Jobname. ABT)时。

参见《ANSYS Basic Analysis Guide》讨论终止和重启动。

- 应用荷载-挠度曲线作为评估和调整分析的指引,这样有助于达到合适的结果。在每次分析中,用图形来显示荷载-挠度曲线(应用POST26命令),通常是一个好的主意。
- 经常,不成功的弧长法分析,通过追踪可以发现弧长半径要么太大,要么太小。在分析中 追踪到沿荷载挠度曲线反向"漂移回去",是一个典型的难题,这是由太大或太小的弧长 半径引起的。研究荷载-挠度曲线可以搞清楚这一问题。然后可应用 NSUBST 和 ARCLEN 命令调整弧长半径大小和范围。
- 总弧长荷载系数(SOLU 命令中的 ALLF 项)可以为正或负。与此类似,在弧长分析中的 TIME 与总弧长荷载系数相关,也可以为正或为负。负的 ALLF 或 TIME 表示弧长特性在 相反方向上施加荷载,以便保持稳定性。负的 ALLF 或 TIME 值在各种跳跃分析中通常可 碰到。
- 在为 POST1 后处理程序[SET]把弧长结果读入到数据库时,用户应当总是用荷载步和子步数(LSTEP 和 SBSTEP)来作为合适结果的参照,或用数据集号(NSET)。不能应用 TIME 作 为参照号,因为 TIME 在弧长分析中不总是单调增加的(即一个 TIME 值可能与多个解相 对应)。此外,程序不能正确解释负的 TIME 值(这在跳跃分析中可能遇到)。
- 如果 TIME 变成负值,请记住在建立任何POST26图形前,定义一个合适的变化范围。

8.10.2.5 在模型响应中人工抑制分叉

如用户不想应用弧长法来分析一个力-加载结构在开始或通过一个奇异(0刚度)构形,有时可以应用其他技术来人工抑制模型响应中的分叉:

• 在一些情况下,<mark>可用强迫位移代替力。</mark>这个方法可用于开始一个接近于平衡位置的静力分析,或者在不稳定响应(如跳跃或后屈曲)之前控制位移。

- 另一个可用于一些初始不稳定问题的有效技术,是把静力问题当作"缓慢的动力问题"来 分析(即在试算中应用时间-积分效应,以避免在任一荷载步上解的分叉)。
- 也可以把临时人工刚度应用到不稳定的自由度上,这要应用控制单元(如 COMBIN37单元) ,或在其他单元上应用生死选项。这里的思路是为了防止从计算中得到不真实的大位移, 人为地约束系统(在荷载步之间)。在系统变形到不稳定构形时,人为刚度被移走了。

8.10.2.6 关闭过度的单元形状

ANSYS提供了"不协调"模式列式(也称为"过度的形状")用于模拟弯曲。如果一个问题是显著的大变形,则可以选择关闭"过度形状",以减少CPU/存储要求,以加强收敛。然而这样做的结果是排除了模拟任何弯曲的能力。

8.10.2.7 明智地应用生死选项

结构刚度矩阵的任何突然改变,似乎会引起收敛问题。在激活或杀死单元时,试一下把改变分 开到几个子步上。(在完成这一工作时,如有必要,应用小的时间步)。此外还要知道,在激活或杀 死单元时可能会产生奇异(如尖锐的凹角)。这种奇异也可能引起收敛问题。

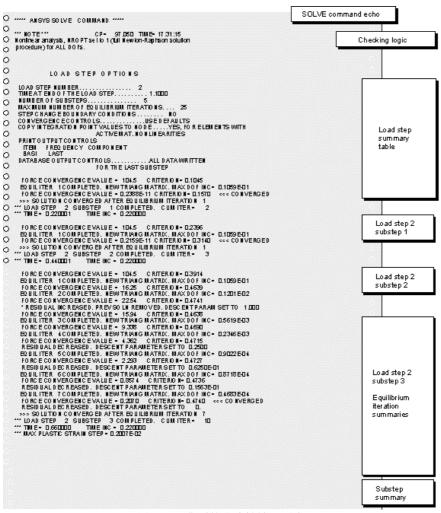


图8-23 典型的非线性输出列表

8.10.2.8 阅读程序的输出内容

请记住ANSYS程序把非线性分析当作一系列的线性近似及修正。程序的输出给这些近似和修正过程连续地反馈信息。输出可以直接输出到屏幕(收集在Jobname. OUT文件中)或输出到由[/OUTPUT]设定的其他文件中。用户可以在POST1中,应用 PRITER 命令来检查这些信息;或者在 POST26中,应用 SOLU和 PRVAR 命令来检查。在用户接受计算结果之前,要确保已经明白了分析的迭代历程。特别是,如果没有完全了解错误或警告信息的意义,不应当无视程序的任何错误或警告信息。图

8-23 是典型的非线性输出列表。

8.10.2.9 用图形显示荷载和响应历程

这个验证技术可以看作是图形与另二种技术(合理性检查和迭代历程检查)的结合。POST26 的荷载和响应历程图应当与该结构的行为相吻合。感兴趣的结果(如位移、反力、应力等)应当揭示相对光滑的响应历程。任何不光滑的情况可能表示荷步太大。

8.11 非线性(静态)分析示例(GUI方法)

本示例将对死荷载和周期点荷载作用下的弹塑性圆板进行非线性分析。在这里用户要定义一个随动强化塑性曲线、荷载步选项、一个荷载步的最大和最小子步数、描述外荷载的各荷载步。还将学会如何理解ANSYS非线性分析所写的临时文件。

ANSYS应用一个增量求解方法来得到非线性分析的解。在本例中,一个荷载步中的总荷载是按一定数目的子步来增加的。如本章前面所述,ANSYS应用 Newton-Raphson 迭代法求解每一个子步。须指定每个荷载步中的子步数;因为这个数控制一个荷载步中第1子步的初初荷载增量。ANSYS自动确定一个荷载步中各子步的荷载增量大小。可以控制荷载增量的大小(指定最大和最小子步数)。如果用户把子步数、最大和最小子步数定义为同一值,则ANSYS在荷载步的所有子步中应用常数荷载增量。

8.11.1 问题描述

本例将应用轴对称模型,应用4节点 PLANE42 单元及轴对称选项来模拟。应执行几何非线性分析。指定运动约束如下: 板中心的节点径向位移为0。板外边缘的节点径向和轴向位移为0。在荷载步1施加死荷载,在荷载步2~7施加周期点荷载。见 § 8.11.3。

在第1个荷载步指定10个子步,以保证死荷载在第1个子步上的荷载增量为总荷载(0.125 N/m²)的1/10。还可指定最大50,最小5个子步,以保证在板经受严重非线性行为时,可使荷载增量削减到总荷载的1/50。如果板经受中等程序的非线性行为,则荷载增量可增大到总荷载的1/5。对于其后的6个荷载步(周期点荷载),可以指定4个子步,最大25和最小2个子步。

在本示例分析中,用户可以监视整个求解的历程,即点荷载作用点的竖向位移,以及板的固边缘下缘节点的反力。

8.11.2 基本数据

圆板半径 1.0 m; 厚度 0.1 m。材料特性为: EX = 16911.23 Pa; PRXY = 0.3。随动强化塑性曲线如下:

Log Strain	True Stress (Pa)
0.00112	19. 0
0.00187	22.8
0.00256	25. 1
0. 00447	29. 1
0.00642	31. 7

板受到的死荷载为均布压力 0.125 N/m^2 。 周期点荷载的历程如 **图8-24**。

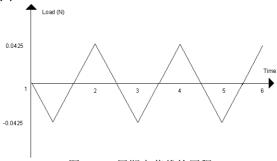


图8-24 周期点荷载的历程

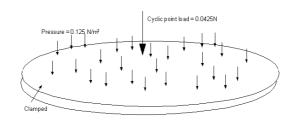


图8-25 圆板

8.11.3 问题求解

8.11.3.1 设置分析标题和作业名

- 1、选择"Utility Menu>File>Change Title"。
- 2、输入 "Cyclic loading of a fixed circular plate"。
- 3、按"OK"。
- 4、选择"Utility Menu>File>Change Jobname"。出现"Change Jobname"对话框。
- 5、输入"axplate", 并按"OK"。

8.11.3.2 定义单元类型

- 1、选择"Main Menu>Preprocessor>Element Type> Add/Edit/Delete"。
- 2、按"Add"。出现"Library of Element Types"对话框。
- 3、在左侧选 "Structural Solid"。
- 4、在右侧选 "Quad 4node 42"。
- 5、按"OK"。出现"Library of Element Types"对话框。
- 6、按"Options"。出现"PLANE42 element type options"对话框。
- 7、在下拉框选"Axisymmetric"。
- 8、按"OK"。
- 9、按"Close"。

8.11.3.3 定义材料特性

- 1、选"Main Menu>Preprocessor>Material Props>Material Models"。出现"Define Material Model Behavior"对话框。
- 2、在"Material Models Available"窗口,双击"Structural->Linear->Elastic->Isotropic"。出现一个对话框。
 - 3、输入EX="16911.23"。
 - 4、输入PRXY="0.3"。
 - 5、按"OK"。现在在左侧出现"Material Model Number 1"。

8.11.3.4 指定随动强化材料模式(KINH)

- 1、在"Material Models Available"窗口中,双击"Nonlinear->Inelastic->Kinematic Hardening->Multilinear (General)"。出现一个对话框。
 - 2、输入如下的应变/应力值"0.00112, 19.0"。
 - 3、按 "Add Point" 按钮,输入"0.00187, 22.8"。
 - 4、重复前面的步骤,输入"0.00256, 25.1; 0.00447, 29.1; 0.00642, 31.7"。
 - 5、按"OK"。
 - 6、选择"Material > Exit"退出"Define Material Model Behavior"对话框。

8.11.3.5 设置图形轴标号和显示数据表

- 1、选择"Utility Menu>PlotCtrls>Style>Graphs> Modify Axes"。出现"Axes Modifications for Graph Plots"对话框。
 - 2、在X-axis label中输入"Total Strain"。

- 3、在Y-axis label中输入"True Stress", 并按"OK"。
- 4、选择"Main Menu>Preprocessor>Material Props>Material Models"。出现"Define Material Model Behavior"对话框。
- 5、在"Material Models Defined"窗口中,双击" Material Model Number 1"和" Multilinear Kinematic (General)"。出现一个对话矿,其中包括刚才输入的数据。
- 6、按"Graph"。现在在图形窗口中显示了数据表图形。如果需要,可以修改应力/应变值,然后在按"Graph"显示,直到满意为止。最后按"OK"。
 - 7、选择"Material > Exit"离开"Define Material Model Behavior对话框。
 - 8、在工具条中按"SAVE DB"。

8.11.3.6 建立四边形

- 1、选择 "Utility Menu>Parameters〉 Scalar Parameters"。出现"Scalar Parameters"对话框。
 - 2、输入 "radius=1.0", 按 "Accept"。
 - 3、输入"thick=0.1", 按"Accept"。按"Close"。
- 4、选择"Main Menu>Preprocessor>-Modeling-Create> -Areas- Rectangle> By Dimensions"。出现"Create Rectangle by Dimensions"对话框。
 - 5、在X-coordinates中,输入"0, radius"。
 - 6、在Y-coordinates中,输入"0, thick",并按"0K"。。现在图形窗口中出现一个长方形
 - 7、选择"Utility Menu>Plot>Lines"。

8.11.3.7 设置单元尺寸

- 1、选择"Main Menu〉Preprocessor〉MeshTool"。出现"MeshTool对话框"。
- 2、按 "Size Controls>Lines>Set"。出现 "Element Size on Picked Lines" 拾取菜单。在两根竖向的线(2和4)上拾取,然后在拾取菜单中按"OK"。出现"Element Sizes on Picked Lines"对话框。
 - 3、在 "number of element divisions" 中输入8, 并按 "OK"。
- 4、重复上面的1-3步,但选择两根横向的线(1和3),在"number of element divisions"中输入40,并按"0K"。

8.11.3.8 对四边形分网

- 1、在"MeshTool"对话框中,按"Quad"和"Map",然后按"MESH"。出现"Mesh Areas" 拾取菜单。
 - 2、按"Pick All"。
 - 3、在工具条中按"SAVE_DB"。
 - 4、按"Close"。

8.11.3.9 设置分析和荷载步选项

- 1、选择"Main Menu>Solution>Unabridged Menu> Analysis Options"。出现"Static or Steady-State Analysis"兑换框。
 - 2、设置"large deformation effects"为ON,帮按"OK"。
- 3、选择"Main Menu>Solution>-Load Step Opts-Output Ctrls> DB/Results File"。出现 "Controls for Database and Results File Writing"对话框。
- 4、验证所有的项目都已选,并按 "File write frequency"为 "Every substep"。最后按"OK"。

8.11.3.10 监视位移

在这一步,要监视对称轴上的节点的位移。以及板边的反力。

1、选择"Utility Menu〉Parameters〉Scalar Parameters",出现"Scalar Parameters对话框。

- 2、输入 "ntop = node(0, thick, 0.0)", 并按 "Accept"。
- 3、输入 "nright = node(radius, 0.0, 0.0)", 按 "Accept", 然后按 "Close"。
- 4、选择"Main Menu〉Solution〉Nonlinear〉Monitor"。出现"Monitor"拾取菜单。
- 5、在ANSYS输入窗中,输入"ntop",按回车。按"OK"。出现"Monitor"对话框。
- 6、在 "Quantity to be monitored" 下拉框中选 "UY"。按 "OK"。
- 7、选择"Main Menu>Solution>Nonlinear>Monitor"。出现"Monitor"拾取菜单。
- 8、在ANSYS输入窗中输入"nright",按回车。按"OK"。出现"Monitor"对话框。
- 9、在"Variable to redefine"下拉框选择"Variable 2"。在"Quantity to be monitored"下拉框中选择"FY"。按"OK"。

8.11.3.11 施加约束

- 1、选择 "Utility Menu>Select>Entities"。出现 "Select Entities"对话框。
- 2、在前面两个框中,选"Nodes"和"By Location"。严正选择了"X coordinates",并在 Min, Max领域输入"radius"。按"OK"。
- 3、选择"Main Menu>Solution>-Loads-Apply>-Structural- Displacement> On Nodes"。出现"Apply U, ROT on Nodes"拾取菜单。
 - 4、按"Pick All"。出现"Apply U, ROT on Nodes"对话框。
 - 5、按 "All DOF", 按 "OK"。
- 6、选择 "Utility Menu>Select>Entities"。出现 "Select Entities"对话框。验证选择了 "Nodes", "By Location", "X coordinates"。在 Min, Max 域输入0, 按"OK"。这将选择位于 X=0 的所有节点。
- 7、选择"Main Menu>Solution>-Loads-Apply>-Structural- Displacement> On Nodes"。出现"Apply U, ROT on Nodes"拾取菜单。
 - 8、接"Pick All"。出现"Apply U, ROT on Nodes"对话框。
 - 9、按"UX"作为约束的自由度。按"All DOF"以使之不被选择。
 - 10、输入位移值0.0, 按"OK"。
- 11、选择"Utility Menu>Select>Entities"。出现"Select Entities"对话框。验证选择了"Nodes"和"By Location"。
 - 12、按"Y coordinates"并在 Min, Max 域输入"thick",按"OK"。
- 13、选择"Main Menu〉Solution〉-Loads-Apply〉Structural- Pressure〉On Nodes"。出现"Apply PRES on Nodes"拾取菜单。
 - 14、按 "Pick All"。出现 "Apply PRES on nodes"对话框。
 - 15、在"Load PRES value"中输入1.25。按"OK"。
 - 16、选择"Utility Menu>Select>Everything"。
 - 17、在工具条中按 "SAVE_DB"。

8.11.3.12 保存第一个荷载步

- 1、选择"Main Menu〉Solution〉-Load Step Opts-Time/Frequenc〉Time and Substps"。出现"Time and Substep Options"对话框。
- 2、输入"number of substeps" 10,"maximum number of substeps" 50,"minimum number of substeps" 6。按"OK"。
- 3、选择 "Main Menu〉Solution〉-Solve-Current LS"。检查 "/STAT" 窗口中的内容,然后按 "Close"。
 - 4、在 "Solve Current Load Step"对话框中按"OK"。
 - 5、在求解开始出现的"Information"对话框中按"OK"。
 - 6、选择"Utility Menu>Plot>Elements"。

8.11.3.13 求解后面的6个荷载步

- 1、选择 "Utility Menu>Parameters>Scalar Parameters"。出现 "Scalar Parameters" 对话框。
 - 2、输入"f = 0.0425", 按"Accept"。按"Close"。

- 3、选择"Main Menu〉Solution〉-Load Step Opts- Time/Frequenc〉Time and Substps"。出现"Time and Substep Options"对话框。
- 4、输入 "number of substeps" 4, "maximum number of substeps" 25, "Minimum number of substeps" 2。 按"OK"。
- 5、选择"Main Menu>Solution>-Loads-Apply>-Structural-Force/Moment> On Nodes"。出现"Apply F/M on Nodes"拾取菜单。
- 6、在ANSYS输入窗中输入"ntop",接回车。接"OK"。出现"Apply F/M on Nodes"对话框。
- 7、在"Direction of force/mom"选择"FY"。在"Force/moment value"中输入"-f"。接"OK"。
- 8、选择"Main Menu>Solution> -Solve-Current LS"。检查"/STAT"窗中的信息,按"Close"。
 - 9、在 "Solve Current Load Step"对话框中按"OK"。
 - 10、在求解完成后出现的对话框中按"Close"。
 - 11、重复 5-10 步,在荷载步7,输入 "Force/moment value"为 f。
 - 12、重复 5-11 步,直到所有6个子步均完成。
 - 13、在工具条中选择"SAVE_DB"。

8.11.3.14 检查监视文件

- 1、选择"Utility Menu>List>Files>Other"。出现"List File"对话框。选择"axplate.mntr"域,并按"OK"。
 - 2、检查整个求解的时间步、竖向位移、反力等。
 - 3、按"Close"。

8.11.3.15 应用一般后处理程序显示结果

- 1、选择"Main Menu>General Postproc>-Read Results -Last Set"。
- 2、选择"Main Menu>General Postproc>Plot Results> Deformed Shape"。出现"Plot Deformed Shape"对话框。
 - 3、按"Def + undef edge",按"OK"。。在图形窗口中显示变形图。
- 4、选择"Main Menu>General Postproc>Plot Results> -Contour Plot -Element Solu"。出现"Contour Element Solution Data"对话框。
- 5、在左侧选"Strain-plastic",在右侧选"Eqv plastic EPEQ"。按"OK"。在图形窗口中出现等值线图。
 - 6、选择"Utility Menu>Plot>Elements"。

8.11.3.16 定义时间-历程后处理的变量

- 1、选择 "Utility Menu>Select>Entities"。出现 "Select Entities"对话框。
- 2、验证在前面两个框中选了"Nodes"和"By Num/Pick"。按"OK"。出现"Select nodes"拾取菜单。
 - 3、在ANSYS输入窗中输入"ntop",按回车。然后按"OK"。
- 4、选择 "Utility Menu>Select>Entities"。出现 "Select Entities"对话框。在第一个下拉框选择 "Elements"。在第二个下拉框选 "Attached to"。验证选择了所有节点。然后按 "OK"。
 - 5、选择"Utility Menu>Select>Everything"。
- 6、选择"Main Menu〉TimeHist Postpro〉Define Variables"。出现"Defined Time-History Variables"对话框。按"Add...",出现"Add Time-History Variable"对话框。
 - 7、按 "Element results"。按 "OK"。出现"Define Elemental Data"拾取菜单。
 - 8、在图形窗口中拾取左上侧单元,按"OK"。出现"Define Nodal Data"拾取菜单。
- 9、拾取左上角单元的左上角节点。按"OK"。出现"Define Element Results Variable"对话框。
 - 10、验证 "reference number of the variable" 为2。

- 11、在左侧选择"Stress",在右侧选择"Y-direction SY"。按"OK"。再出现"Defined Time-History Variables"对话框和第二个变量列表(ESOL)。在对话框中应该显示单元号281,节点号 50,项目 S,元件 Y,名 SY。
 - 12、按"Add"。重复 7-10 步,变量参考号为 3。
- 13、在 "Define Element Results Variable"对话框,在左侧选择 "Strain-elastic"。在右侧选择 "Y-dir'n EPEL Y"。按 "OK"。
 - 14、按"Add"。重复 7-10 步, 变量参考号为 4。
- 15、在"Define Element Results Variable"对话框,在左侧选择"Strain-plastic",在右侧选"Y-dir'n EPPL Y",AN "OK"。
 - 16、在"Defined Time-History Variables"对话框,按"Close"。
- 17、选择"Main Menu〉TimeHist Postpro〉Math Operations〉Add"。出现"Add Time-History Variables"对话框。
- 18、输入 "reference number for result"为 5, "1st variable"为 3,而"2nd variable"为4,按"0K"。这将把弹性和塑性应变添加到边量3和4。其总和是总应变,并存为变量5。

8.11.3.17 显示时间-历程结果

- 1、选择"Main Menu〉TimeHist Postpro〉Settings〉Graph"。出现"Graph Settings"对话框。
 - 2、按 "Single variable for the X-axis variable",并输入5。按 "OK"。
- 3、选择"Utility Menu>PlotCtrls>Style>Graphs> Modify Axes"。出现"Axes Modifications for Graph Plots"对话框。
 - 4、在"X-axis label"中,输入"Total Y-Strain"。
 - 5、在"Y-axis label"中,输入"Y-Stress"。按"OK"。
- 6、选择"Main Menu〉TimeHist Postpro〉Graph Variables"。出现"Graph Time-History Variables"对话框。
 - 7、在第一个要显示的变量中输入"2",按"OK"。

8.11.3.18 退出ANSYS

- 1、从工具条中选择"QUIT"。
- 2、选择所需要的选项,最后按"OK"。

8.12 非线性(静态)分析示例(批处理方法)

用户可以用下面显示的ANSYS命令替代GUI选择进行铜柱体冲击刚性壁的非线性静态实例分析。以叹号(!)开头的条目是注释。

/BATCH, list

/title, Cyclic loading of a fixed circular plate

/filnam, axplate

/prep7

radius=1.0 ! Radius of the plate (m) thick=0.1 ! Thickness of plate (m)

et, 1, PLANE42, , , 1 mp, ex, 1, 16911. 23 mp, nuxy, 1, 0. 3 ! PLANE42 axisymmetric element

! Define a Kinematic Hardening Plasticity curve using the KINH material model tb, KINH, 1,1,5

! Define the true stress vs. total log strain curve for this material model

! using 5 points. First point defines the elastic limit

tbpt,, 0.001123514, 19.00

```
tbpt,, 0.001865643, 22.80
tbpt,, 0.002562402, 25.08
tbpt,, 0.004471788, 29.07
tbpt,, 0.006422389, 31.73
! Set the axles labels for the stress-strain curve plot
/axlab, X, Log Strain (N/m<sup>2</sup>)
/axlab, Y, True Stress (N/m<sup>2</sup>)
tbpl, KINH, 1
                                ! Plot and verify the material stress-strain curve
! Define a rectangle which is the axisymmetric cross section of the plate.
! The rectangle has a length equal to the radius of the plate and a height equal
! to the thickness of the plate
rect, , radius, , thick
! Select the left and right bounding lines of the created rectangle and set
! the line division to 8 (8 elements through the thickness of the plate)
FLST, 5, 2, 4, ORDE, 2
FITEM, 5, 2
FITEM, 5, 4
CM, _Y, LINE
LSEL, , , , P51X
!*
CM, Y1, LINE
CMSEL,,_Y
LESIZE, _Y1, , ,8,1,
CMDEL, \_Y
CMDEL, _Y1
! Select the top and bottom bounding lines of the created rectangle and set
! the line division to 40 (40 elements through the radius of the plate)
FLST, 5, 2, 4, ORDE, 2
FITEM, 5, 1
FITEM, 5, 3
CM, _Y, LINE
LSEL, , , , P51X
!*
CM, _Y1, LINE
CMSEL,,_Y
LESIZE, _Y1, , , 40, 1,
CMDEL, _Y
CMDEL, _Y1
!*
CM, _Y, AREA
                   1
ASEL, , , ,
CM, _Y1, AREA
CHKMSH, 'AREA'
CMSEL, S, _Y
amesh, all
CMDEL, _Y
CMDEL, _Y1
```

```
CMDEL, _Y2
fini
/solve
nlgeom, on! Turn on geometric nonlinearity
! Get the node numbers for the nodes located at the top
! of the axis of symmetry and at bottom right of the model
ntop = node(0, thick, 0)
nright = node(radius, 0, 0)
! Activate the monitoring of the displacement and reaction force histories
! during the analysis. This will be written out to the monitor file ratch.mntr
monitor, 1, ntop, uy
monitor, 2, nright, fy
                          ! Output all the results for all sub-steps to the
outres, all, all
                          ! results file for later postprocessing
! Select the nodes located at right end and constrain their radial (x) and
! axial (y) direction displacement to be zero.
nsel, s, loc, x, radius
d, all, all
! Select the nodes located at left end and constrain their radial (x) direction
! displacement to be zero.
nsel, s, loc, x, 0.0
d, all, ux, 0.0
! Define the load for Load Step 1.
! Select the nodes located at top surface of plate and apply a uniform pressure
! of 1.25 \text{ N/m}^2 as dead load on the plate.
nsel, s, loc, y, thick
sf, all, pres, 1.25
alls! Select all nodes
! Define the number of sub-steps (10). Also define maximum number of
! substeps (50), and the minimum number of substeps (5) for the automatic
! time stepping algorithm.
nsub, 10, 50, 5
! A load of: applied pressure (1.25) / number of sub-steps (10) = 0.125 N/m^2
! will be applied for the first sub-step.
solve
                                  ! Solve load step 1
f = 0.0425
                                  ! Define the parameter, f, used to apply
                                  ! the cyclic point load.
! Over six load steps apply a cyclic point load of magnitude f = 0.0425 units
! applied at the center of the plate over three cycles
```

```
! Start Cycle 1
nsel, s, node, , ntop
                                   ! Define load for load step 2
f, all, fy, -f
nsel, all
nsubst, 4, 25, 2
                                   ! Set the number of substeps, max and min number
                                   ! of substeps
                                   ! Solve load step 2
solve
nsel, s, node, , ntop
f, all, fy, f
                                   ! Define load for load step 3
nsel, all
nsubst, 4, 25, 2
                                   ! Set the number of substeps, max and min number
                                   ! of substeps
solve
                                   ! Solve load step 3
! Start Cycle 2
nsel, s, node, , ntop
f, all, fy, -f
                                   ! Define load for load step 4
nsel, all
nsubst, 4, 25, 2
                                   ! Set the number of substeps, max and min number
                                   ! of substeps
                                   ! Solve load step 4
solve
nsel, s, node, , ntop
                                   ! Define load for load step 5
f, all, fy, f
nsel, all
nsubst, 4, 25, 2
                                   ! Set the number of substeps, max and min number
                                   ! of substeps
solve
                                   ! Solve load step 5
! Start Cycle 3
nsel, s, node, , ntop
f, all, fy, -f
                                   ! Define load for load step 6
nsel, all
nsubst, 4, 25, 2
                                   ! Set the number of substeps, max and min number
                                   ! of substeps
                                   ! Solve load step 6
solve
nsel, s, node, , ntop
f, all, fy, f
                                   ! Define load for load step 7
nsel, all
nsubst, 4, 25, 2
                                   ! Set the number of substeps, max and min number
                                   ! of sub-steps.
solve
                                   ! Solve load step 7
save
fini
/post1
set, last
                                    ! Read in the results from the last sub-step of
                                   ! the last step.
! (final state)
pldi, 2
                                   ! Plot the deformed mesh with the undeformed
                                   ! edge only
```

```
! Plot the total accumulated equivalent
ples, nl, epeq
                                   ! plastic strains
fini
/post26
eplo
                                   ! Plot the mesh
                                   ! Select the node where the point load is attached
nsel, s, node, , ntop
esln
                                  ! Select the element attached to this node
                                   ! Get the number of this element
elem=elnext(0)
alls
                                   ! Select back everything in the model
! Define variable 2 to be Y component of stress at the node where the point
! load is applied
ESOL, 2, elem, ntop, S, Y,
! Define variable 3 to be Y component of elastic strain at the node where the
! point load is applied
ESOL, 3, elem, ntop, EPEL, Y,
! Define variable 4 to be Y component of plastic strain at the node where the
! point load is applied
ESOL, 4, elem, ntop, EPPL, Y,
! Add the elastic and plastic strains in variables 3 and 4 and store the total
! strain in variable 5.
ADD, 5, 3, 4, , , , , 1, 1, 0,
                            ! Set the axes for subsequent x-y plot to be variable 5
xvar, 5
! Define the x and y axes labels for subsequent x-y plot
/axlab, x, Total Y-Strain
/axlab, y, Y-Stress
plvar, 2
                            ! Plot the Y-stress stored in variable 2
fini
/eof
/exit, nosav
```

8.13 其它例子

《ANSYS Verification Manual》描述了另外一些非线性分析实例。下表列出了《ANSYS Verification Manual》中包括的非线性分析例子:

```
VM7 管组装的塑性压缩
VM11
     残余应力问题
VM24
     矩形梁的塑性
VM38
     受压厚壁柱体的塑性加载
     内部受压的超弹性厚柱体
VM56
VM78
     悬替梁中的横向剪切应力
VM80
     对突然施加恒力的塑性响应
VM104
     液一固相变
VM124
     蓄水池中水的排出
     流动流体的热传导
VM126
VM132
     由于蠕变辉栓的应力消除
VM133
     由于辐射感应蠕棒的运力
```

ANSYS结构分析指南

VM134	一端固定梁的塑性弯曲
VM146	钢盘混凝土梁的弯曲
VM185	铁性导体的载流
VM198	面内扭转实验的大应变
VM199	承受剪切变形的物体的粘弹性分析
VM200	粘弹性的叠层密封分析
VM218	超弹性圆板的分析
VM220	厚刚板中旋涡流损失

9 接触分析

9.1 概述

接触问题是一种高度非线性行为,需要较大的计算机资源。为了进行切实有效的计算,理解问题的物理特性和建立合理的模型是很重要的。

接触问题存在两个较大的难点:其一,在用户求解问题之前,用户不知道接触区域。随载荷、材料、边界条件和其它因素的不同,表面之间是接触还是分开,是未知的,并且还可能是突然变化的。其二,大多的接触问题需要考虑计算摩擦,有几种摩擦定律和模型可供挑选,它们都是非线性的。摩擦效应可能是混乱的,所以摩擦使问题的收敛性变得困难。

注意一如果在模型中,不考虑摩擦,且物体之间的总是保持接触,则可以应用约束方程或自由度藕合来代替接 触。约束方程仅在小应变分析(NLGEOM, off)中可用。见《ANSYS Modeling and Meshing Guide》。

除了上面两个难点外,许多接触问题还必须涉及到多物理场影响,如接触区域的热传导、电流等。

9.1.1 显式动态接触分析能力

除了本章讨论的隐式接触分析外,ANSYS还在ANSYS/LS-DYNA中提供了显式接触分析功能。显式 接触分析对于短时间接触-碰撞问题比较理想。见《ANSYS/LS-DYNA User's Guide》。

9.2 一般接触分类

接触问题分为两种基本类型: 刚体一柔体的接触,柔体一柔体的接触。在刚体一柔体的接触问题中,接触面的一个或多个被当作刚体,(与它接触的变形体相比,有大得多的刚度)。一般情况下,一种软材料和一种硬材料接触时,可以假定为刚体一柔体的接触,许多金属成形问题归为此类接触。柔体一柔体的接触是一种更普遍的类型,在这种情况下,两个接触体都是变形体(有近似的刚度)。

9.3 ANSYS接触分析功能

ANSYS支持三种接触方式:点一点,点一面,面一面接触。每种接触方式使用不同的接触单元集,并适用于某一特定类型的问题。

为了给接触问题建模,首先必须认识到模型中的哪些部分可能会相互接触。如果相互作用的其中之一是一点,模型的对应组元是一个节点。如果相互作用的其中之一是一个面,模型的对应组元是单元,如梁单元、壳单元或实体单元。有限元模型通过指定的接触单元来识别可能的接触对,接触单元是覆盖在分析模型接触面之上的一层单元,至于ANSTS使用的接触单元和使用它们的过程,下面分类详述。

	点-点			点-面			面 - 面							
	CONTAC	CONTAC	CONTA	CONTAC	CONTAC	CONTAC	CONTAC171, 172	CONTAC 173, 174						
	12	52	178	26	48	49	TARGET 169	TARGET 170						
点-点	Y	Y	Y											
点-面				Y	Y	Y								
面一面					Y	Y	Y	Y						
2-D	Y		Y	Y	Y		Y	Y						
3-D		Y	Y			Y		Y						
滑动	小	小	小	大	大	大	大	大						
曲面							Y	Y						
圆柱间隙	Y		Y											
纯Lagrange乘子			Y											
增加Lagrange乘子			Y		Y	Y	Y	Y						
接触刚度		用户定义	半自动	用户定义	用户定义	用户定义	半自动	半自动						
自动网格工具		EINTF	EINTF	None	GCGEN	GCGEN	ESURF	ESURF						
低阶	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y						
高阶				Y			Y	Y						
刚体-柔体	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y						
柔体-柔体	Y	Y	Y		Y	Y	Y	Y						
热接触					Y	Y	Y	Y						

表9-1 ANSYS接触分析功能

然后论述ANSYS接触单元。参见《ANSYS Element Reference》和《ANSYS Theory Manual》。

9.3.1 面一面的接触单元

ANSYS支持刚体—柔体和柔体—柔体的面—面的接触单元。这些单元应用"目标"面和"接触"面来形成接触对。

- 分别用TARGE169或TARGE170来模拟2D和3D目标面。
- 用CONTA171、CONTA172、CONTA173、CONTA174来模拟接触面。

为了建立一个"接触对",给目标单元和接触单元指定相同的实常的号。参见 § 9.4。

这些面-面接触单元非常适合于截面装配安装接触或嵌入接触,锻造,深提取问题。与点—面接触单元相比,面—面接触单元有许多优点:

- 支持面上的低阶和高阶单元(即角节点或有中节点的单元);
- 支持有大滑动和摩擦的大变形。计算协调刚度阵,可用不对称刚度阵选项;
- 提供为工程目的而采用的更好的接触结果,如法向压力和摩擦应力;
- 没有刚体表面形状的限制,刚体表面的光滑性不是必须的,允许有自然的或网格离散引起的表面不连续;
- 与点—面接触单元比,需要较少的接触单元,因而只需较小的磁盘空间和CPU时间,有利于可视化;
- 允许多种建模控制,例如:
 - 绑定接触:
 - 渐变初始渗透;
 - 目标面自动移动到初始接触;
 - 平移接触面(考虑梁和单元的厚度),用户定义的接触偏移;
 - 支持死活单元;
 - 支持热-机械耦合分析。

使用这些单元来做为刚性目标面,能模拟2D和3D中的直线(面)和曲线(面),通常用简单的几何形状例如圆、抛物线、球、圆锥、圆柱来模拟曲面。更复杂的刚体形状或普通可变形体,可以应用特殊的前处理技巧来建模,参§9.4。

面-面接触单元不能很好地应用于点-点或点-面接触问题,如管whip, snap-fit组装。在这种情况下,应当应用点-点或点-面接触单元。用户也可以在大多数接触区域应用面-面接触单元,而在少数角应用点-点接触单元。

下面分别讨论ANSYS不同接触分析类型的能力。

9.3.2 点—面接触单元

点—面接触单元主要用于给点—面接触行为建模,例如两根梁的相互接触(梁端或锐角节点),snap-fit配合部件的角点。

如果通过一组节点来定义接触面,生成多个单元,那么可以通过点—面接触单元来模拟面—面的接触问题。面既可以是刚性体也可以是柔性体。这类接触问题的一个典型例子是插头插到插座里

使用这类接触单元,不需要预先知道确切的接触位置,接触面之间也不需要保持一致的网格 。并且允许有大的变形和大的相对滑动,虽然这一功能也可以模拟小的滑动。

CONTACT48 和 CONTACT49单元是点一面的接触单元。这2种单元支持大滑动、大变形、以及接触部件间不同的网格。用户也可以用这2种单元来进行热-机械耦合分析,其中热在接触实体之间的传导非常重要。

应用 CONTACT26 单元用来模拟柔性点—刚性面的接触。对有不光滑刚性面的问题,不推荐采用 CONTACT26 单元,因为在这种环境下,可能导致接触的丢失。在这种情况下,CONTACT48 通过使用伪单元算法,能提供较好的建模能力(参见《ANSYS Theory Reference》§14.48),但如果目标面有些不连续,依然可能失败。

9.3.3 点一点接触单元

点一点接触单元主要用于模拟点一点的接触行为。为了使用点一点接触单元,用户需要预先知道接触位置,这类接触问题只能适用于接触面之间有较小相对滑动的情况(即使在几何非线性情况下)。其中一个例子是传统的管whip模型,其中接触点总是在管端和约束之间。)

如果两个面上的节点——对应,相对滑动又以忽略不计,两个面挠度(转动)保持小量,那么可以用点—点的接触单元来求解面—面的接触问题,过盈装配问题是一个用点—点的接触单元来模拟 面—与的接触问题的典型例子。

点一点接触单元也可以用于模拟面一面的接触问题,如果两个接触面上的节点对齐,相对滑动可忽略,而且两个面的变形(挠度和转角)很小。这些是由小面组成和几何简单的典型问题。界面配合问题就是典型的可以用点-点接触单元来模拟的面-面接触问题。

另一个点一点接触单元的应用是表面应力的特别精确分析,如透平机叶片的分析。

ANSYS的 CONTA178 (单元是大多数点-点接触问题的最好选择。它比其他单元提供了范围更广的选项和求解类型。CONTAC12 和 CONTAC52 单元保留的理由,在很大程度上是为了向前兼容。

9.4 面一面的接触分析

用户可以应用面-面接触单元来模拟刚体(-)柔)体或柔体面之间的接触。从菜单(Preprocessor>Create>Contact Pair>Contact Wizard)进入接触向导,为大多数接触问题建立接触对提供了简单的方法。接触向导将指引用户建立接触对的整个过程。每个对话框中的HELP按钮对其应用及选项作了祥细说明。

在用户未对模型的任何区域分网之前,接触向导不能应用。如果用户希望建立刚体-柔体模型,则在进入接触向导前,只应对用作柔体接触面的部分分网(不对刚体目标面分网)。如用户希望建立柔体-柔体接触模型,则应在进入接触向导前,对所有用作接触面的部件进行分网(包括目标面)

下面诸节将论述不用接触向导来建立接触面和目标面的方法。

9.4.1 应用面-面接触单元

在涉及到两个边界的接触问题中,很自然把一个边界作为"目标"面,而把另一个作为"接触"面。对刚体一柔体的接触,目标面总是刚性面,接触面总是柔性面。对柔体一柔体的接触,目标面和接触面都与变形体关联。这两个面合起来叫作"接触对"。使用TARGE169与CONTA171(或CONTA172)单元来定义2-D接触对。使用TARGE170与CONTA173(或CONTA174)单元来定义3-D接触对。程序通过相同的实常数号来识别每一个接触对。

9.4.2 接触分析的步骤

典型面一面接触分析的基本步骤如下:

- 1、建立模型并划分网格;
- 2、识别接触对:
- 3、指定接触面和目标面;
- 4、定义目标面:
- 5、定义接触面;
- 6、设置单元关键字和实常数:
- 7、定义 / 控制刚性目标面的运动(仅适用与刚体-柔体接触);
- 8、施加必须的边界条件;
- 9、定义求解选项和载荷步;
- 10、求解接触问题:
- 11、杳看结果。

9.4.3 建立模型几何实体和划分网格

在这一步,用户需要建立代表接触体的几何实体模型。与其它分析一样,需要设置单元类型、实常数、材料特性。用恰当的单元类型给接触体划分网格。参见《ANSYS Modeling and Meshing Guide》。

命令: AMESH

VMESH

GUI: Main Menu>Preprocessor>Mesh

9.4.4 识别接触对

用户必须判断模型在变形期间哪些地方可能发生接触。一旦已经判断出潜在的接触面,就应该通过目标单元和接触单元来定义它们,目标和接触单元将跟踪变形阶段的运动。构成一个接触对的目标单元和接触单元通过共享的实常号联系起来。

接触区域可以任意定义;然而为了更有效地进行计算(主要指CPU时间),用户可能想定义更小的局部化的接触区域,但要保证它足以描述所需要的所有接触行为。不同的接触对必须通过不同的实常数号来定义,即使实常数没有变化。但不限制允许的面的数目。

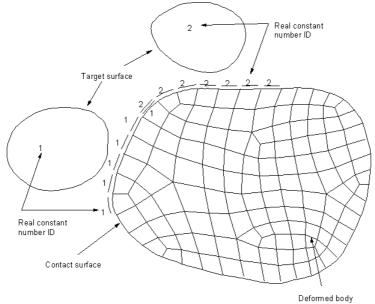


图9-1 局部接触区域

由于几何模型和潜在变形的多样性,有时候一个接触面的同一区域可能与多个目标面产生接触 关系。在这种情况下,应该定义多个接触对(使用多组覆盖接触单元)。(每个接触对有不同的实常数)

号。见图9-1。

9.4.5 指定接触面和目标面

接触单元被约束不得渗入目标面。但是,目标单元可以渗入接触面。对于刚体-柔体接触,目 标面总是刚体表面,而接触面总是柔体表面。对于柔体-柔体接触,选择那一个面作为接触面或目 标面可能会引起渗入量的不同,从而影响求解结果。这可参照下面的论述:

- 如凸面预期与一个平面或凹面接触,则平面/凹面应当指定为目标面;
- 如一个面有较密的网格,而相比较之下,另一个面网格较粗,则较密网格的面应当是接触面,而较粗网格的面则为目标面;
- 如一个面比另一个面刚,则较柔的面应当指定为接触面,而较刚的面则为目标面;
- 如果高阶单元位于一个外表面,而低阶单元位于另一个面,则前者应指定为接触面,后者则为目标面;
- 如果一个面明显地比另一个面大(如一个面包围其他面),则较大的面应指定为目标面。

上面的论述对于不对称接触是正确的。但不对称接触可能不一定满足模型需要。下面一小节祥细论述不对称接触和对称接触的差异,并简要说明需要对称接触的一些场合。

9.4.6 不对称接触与对称接触

不对称接触定义为所有的接触单元在一个面上,而所有的目标单元在另一个面上的情况。有时候也称为"单向接触"。这在模拟面-面接触时最为有效。但是,在某些环境下,不对称接触不能满足要求。在这些情况下,可以把任一个面指定为目标面和接触面。然后在接触的面之间生成二组接触对(或仅是一个接触对,如自接触情况)。这就称为对称接触,有时也称为"双向接触"。显然,对称接触不如非对称接触效率高。但是,许多分析要求应用对称接触(典型地,是为了减少渗入)。要求对称接触的情况如下:

- 接触面和目标面区分不十分清楚;
- 二个面都有十分粗糙的网格。对称接触算法强制接触约束条件比非对称接触算法更多的面

如果二个面上的网格相同并且足够密,则对称接触算法可能不会显著改变运行,而事实上可能更费CPU时间。在这种情况下,拾取一个面为目标面,而另一个面为接触面。在任何接触模型中,可以混合不同的接触对: 刚体-柔体或柔体-柔体接触对; 对称接触或非线称接触。但在一个接触对中只能有一种类型。

9.4.7 定义目标面

目标面可以是2D或3D的刚体或柔体的面。对于柔体目标面,一般应用 ESURF 命令来沿现有网格的边界生成目标单元。也可以按相同的方法来生成柔体接触面(见§9.4.8)。用户不应当应用下列刚性目标作为柔体接触面: ARC, CARC, CIRC, CYL1, CONE, SPHE 或 PILO。对于刚体目标面的情况论述如下。

在2D情况下,刚性目标面的形状可以通过一系列直线、圆弧和抛物线来描述,所有这些都可以用 TARGE169 单元来表示。另外,可以使用它们的任意组合来描述复杂的目标面。在3D情况下,目标面的形状可以通过三角面、圆柱面、圆锥面和球面来推述,所有这些都可以用 TAPGE170 单元来表示。对于一个复杂的、任意形状的目标面,可以使用底阶/高阶三角面来给它建模。

9.4.7.1 控制节点

刚性目标面可能会与"控制(pilot)节点"联系起来,它实际上是一个只有一个节点的单元, 其运动控制整个目标面的运动,因此可以把控制节点作为刚性目标的控制器。整个目标面的力/力 矩和转动/位移可以只通过控制节点来表示。控制节点可能是目标单元中的一个节点,也可能是一 个任意位置的节点。只有当需要转动或力矩载荷时,控制节点的位置才是重要的。如果用户定义了 控制节点,ANSYS程序只在控制节点上检查边界条件,而忽略其它节点上的任何约束。

注意一当前的接触向导不支持生成控制节点。用户可以在接触向导外面定义控制节点。

9.4.7.2 基本图元

用户可以使用基本几何图元,如圆、圆柱、圆锥、球,来模拟目标面(它需要实常数来定义半径)。也可以组合图元与一般的直线、抛物线、三角形和四边形来定义目标面。

9.4.7.3 单元类型和实常数

在生成目标单元之前,首先必须定义单元类型(2维的TARG169单元,或3维的TARG170单元)。 命令: ET

GUI: main menu>preprocessor>Element Type> Add/Edit/Delete

随后必须设置目标单元的实常数。

命令: Real

GUI: main menn>preprocessor>real constants

对于 TARGE169 单元和 TARGE170 单元,仅需设置实常数R1和R2(如果需要的话)。为了完全描述目标单元、单元形状、实常数,参见《ANSYS Elements Reference》中TARGE169单元和TARGE170单元的论述。

注意一只有在使用直接生成法建立目标单元时,才需要指定实常数R1、R2。另外除了直接生成法,用户也可以使用ANSYS网格划分工具生成目标单元,下面解释这两种方法。

9.4.7.4 使用直接生成法建立刚性目标单元

为了直接生成目标单元,使用下面的命令和菜单。

命令: TSHAP

GUI: main menu>preprocessor>modeling-create>Elements>
Elem Attributes

随后指定单元形状,可能的形状有:

- 直线(2D)
- 抛物线(2-D)
- 顺时针的圆弧 (2-D)
- 反时针的圆弧 (2-D)
- 圆 (2-D)
- 三角形(3-D)
- 圆柱(3-D)
- 圆锥(3-D)
- 球(3-D)
- 控制节点(2-D和3-D)

一旦用户指定目标单元形状,所有以后生成的单元都将保持这个形状,除非用户指定另外一种 形状。

注意--不能在同一个目标面上混合2D和3D目标单元。

注意一不能在同一个目标面上混合刚体目标单元和柔体目标单元。在求解期间,ANSYS对目标单元(有下层单元) 关联一个可变形状态,而对目标单元(无下层单元)关联一个刚体状态。如果删除柔体表面的下层单元的一个部分, 在求解时会出现一个错误。

用户可以用标准的ANSYS直接生成技术生成节点和单元。参见《ANSYS Modeling and Meshing Guide》 § 9。

命令: N

Е

GUI: main menu>pnoprocessor> modeling- create>nodes main menu>pnoprocessor> modeling- create>Elements

在建立单元之后,可以通过列示单元来验证单元形状。

命令: ELIST

GUI: utility menu>list>Elements>Nodes+Attributes

9.4.7.5 使用ANSYS网格划分工具生成刚性目标单元

用户也可以用标准的ANSYS网格划分功能让程序自动地生成目标单元。ANSYS程序会基于体模型生成合适的目标单元形状,而忽略 TSHAP 命令的选项。

为了生成一个控制(Pilot)节点,使用下面的命令或GUI路径:

命令: KMESH

GUI: main menu/proprocessor/meshing-mesh/keypoints

注意: KMESH 总是生成控制节点。

为了生成一个2D刚体目标单元,使用下面的命令和GUI路径。ANSYS在每条直线上生成一条单一的线,在B-样条曲线上生成抛物线线段,在每条圆弧和倒角线上生成圆弧线段,参见**图9-2**。如果所有的圆弧形成一个封闭的圆,ANSYS 生成一个单一的圆,参见**图9-3**。但是,如果围成封闭圆的弧是从外部输入(如IGES)的几何实体,则ANSYS可能无法生成一个单一的圆。

命令: LMESH

GUI: main menu>pneprocessor>mesling-mesh>lines

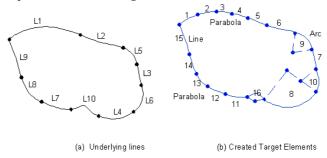


图9-2 ANSYS几何实体和相应的刚体目标单元

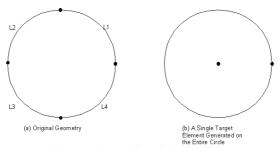


图9-3 从圆弧线段生成单一的圆

为了生成3D的目标单元,使用下面的命令或GUI路径。

命令: AMESH

GUI: main menu>preprocessor>-meshing-mesh>Areas

如果实体模型的表面部分形成了一个完整的球、圆柱或圆锥,那么ANSYS程序通过 AMESH 命令,自动生成一个基本的3D目标单元。因为生成较少的单元,从而使用户分析计算更有效率。对任意形状的表面,应该使用 AMESH 命令来生成目标单元。在这种情况下,网格形状的质量不重要。而目标单元的形状是否能较好地模拟刚性面的表面几何形状显得更重要。

在所有可能的面上,推荐使用映射网格。如果在表面边界上没有曲率,则在网格划分时,指定那条边界分为一分。例体TAREG169单元总是在一根线上按一个单元这样来分网,而忽略 LESIZE 命令的设置。缺省的单元形状是四边形。如果要用三角形目标单元,应用 MSHAPE, 1。图9-4示出任意目标面的网格布局。

下面的命令或GUI路径,将尽可能的生成一个映射网格(如果不能进行映射,它将生成自由网格)

命令: MSHKFY, 2

GUI: main menu>preprocessor>-meshling-mesh>-Ares-Target Surf

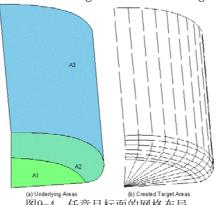


图9-4 任意目标面的网格布局

如果目标面是平面(或接近平面),用户可以选择低阶目标单元(3节点三角形或4节点四边形单) (元)。如果目标面是曲面,用户应该选择高阶目标单元(6节点三角形或8节点四边形单元)。为此在) 目标单元定义中设置KEYOPT(1)=1。

注意一低阶单元致使取得渗入和间隙时CPU的开销较小;但是,分网后的面可能不够光滑。高阶单元则在取得 渗入和间隙时CPU的开销较大:但是需要较少的单元就可以离散整个目标曲面。

注意一如果通过程序分网(RMESH、LMESH、ESURF 命令)来建立目标单元,则忽略 TSHAP 命令,而ANSYS自动选 择合适的形状代码。

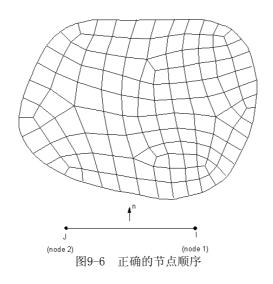
9.4.7.5.1 建模和网格划分的一些诀窍

一个目标面可能由两个或多个不连续的区域组成。用户应该尽可能地通过定义多个目标面,来 使接触区域限于局部(每个目标面有一个不同的实常数号)。刚性面上的形状不限制。不要求光滑 。但是,刚性目标面上曲面的离散足够。过粗的网格离散可能导致收敛问题。如果刚性面有一个尖 锐的凸角,求解大的滑动问题时很难获得收敛结果。为了避免这些建模问题,在实体模型上使用线 或面的倒角来使尖角光滑话,或者在曲率突变的区域使用更细的网格或使用高阶单元,见图9-5。



9.4.7.5.2 检验目标面的节点号顺序(接触方向)

目标面的节点号顺序是重要的,因为它定义了接触方向。对2D接触问题,当沿着目标线从第一 个节点移向第二个节点时,变形体的接触单元必须位于目标面的右边。见图9-6。



对3D接触问题,目标三角形单元号应使刚性面的外法线方向指向接触面。外法线通过右手法则来定义。

为了检查法线方向,显示单元坐标系。

命令: /PSYMB, ESYS, 1

GUI: Utility menu>PlotCtrls>symbols

如果单元法向不指向接触面,选择该单元,反转表面法线的方向。

命令: **ESURF**,, REVE

GUI: main menu/preprocossor/create/Elements/Surfto Surf 或重新定向单元的法向:

命令: ENORM

GUI: Main Menu>Preprocessor>Create>Move/Modify>Shell Normals

注意一在目标元素(如完整的圆、圆柱、圆锥、球)上的接触,只能在这些目标元素的外表面上出现。

9.4.8 定义柔体的接触面

为了建立柔体的接触面,对于2D接触必须使用接触单元 CONFA171 或 CONFA172 接触单元;对 于3D接触必须使用 CONTA173 或 CONTA174 接触单元。

程序通过组成柔体表面的接触单元来定义接触面。接触单元与柔体的下层单元有同样的几何特性。接触单元与柔体的下层单元必须处于同一阶次(低阶或高阶),以使在边上的节点协调。高阶接触单元可以通过消除中节点而与低阶下层单元匹配。下层单元可能是实体单元、壳单元、2D梁单元。接触面可以在壳或梁单元任何一边。下层单元也可以是超单元。但是,轴对称谐单元不能用作下层单元。

与目标面单元一样,用户必须定义接触面的单元类型,然后选择正确的实常数号(在每个接触对中,实常数号必须同与它对应的目标面的实常数号),最后生成接触单元。

9.4.8.1 单元类型

下面简单描述四种类型的接触单元。参见《ANSYS Elements Reference》。

- CONTA171: 这是2D、2个节点的低阶线单元,可位于2D实体、壳或梁单元(如 BEAM3、PLANE42 或 SHELL51)的表面。
- CONTA172: 这是2D、3节点的高阶抛物线形单元,可位于有中节点的2D实体或梁单元(如 PLANE82 或 VISCO88)的表面。
- CONTA173: 这是3D、4节点的低阶四边形单元,可位于3D实体或壳单元(如 SOLID45 或 SHELL181)的表面。可褪化成3节点的三角形单元。
- CONTA174: 这是3D、8节点的高阶四边形单元,可位于有中节点的3D实体或壳单元(如

SOLID92、SOLID95 或 SHELL93)的表面。可褪化成6节点的三角形单元。

命令: ET

GUI: main menu>preprocessor>Element type>Add/Edit/Delete

9.4.8.2 实常数和材料特性

在定义了单元类型之后,需要选择正确的实常数集。<u>一个接触对中的接触面和目标面必须有相</u>同的实常数号。每个接触对必须有不同的实常数号。

(ANSYS 使用下层单元的材料特性来计算一个合适的接触(或罚) 刚度。在下层单元有用 TB 命令定义的塑性材料特性(不论激活与否)的情况下,接触的法向刚度可能降低一个100的系数。ANSYS 自动为切向(滑动) 刚度定义一个与 MU 和法向刚度成正比的缺省值。如果下层单元是一个超单元,接触单元的材料必须与超单元形成时的原始结构单元相同。

9.4.8.3 生成接触单元

既可以通过直接生成法生成接触单元,也可以在下层单元的外表面上自动生成接触单元。推荐 采用自动生成法,这种方法更为简单和可靠。可以通过下面三个步骤,来自动生成接触单元。

1、选择节点

选择已分网的柔体表面的节点。对每一个面,检查节点排列。如果用户确定某一部分节点永远 不会接触到目标面,用户可以忽略它以便减少计算时间。然而用户必须保证设有漏掉可能会接触到 目标面的节点。

命令: NSEL

GUI: Utility Menu>Select>Entities

2、生成接触单元

命令: ESURF

GUI: Main Menu>Preprocessor>Create>Elements>Surf to Surf

如果接触单元是附在已用实体单元划分网格的面或体上,程序会自动决定接触计算所需的外法向。如果下层单元是梁或壳单元,则必须指明哪个表面(上表面或下表面)是接触面。

命令: ESURF,, TOP (或 BOTIOM)

GUI: Main Menu>Preprocessor>Create>Elements>Surf to Surf

使用 TOP(缺省)生成接触单元,它们的外法向与梁或壳单元的法向相同;使用 BOTIOM 生成接触单元,则它们的外法向与梁或壳单元的法向相反。必须确保梁上的单元或壳单元有一致的法向。如果下层单元是实体单元,则 TOP 或 BOTTOM 选项不起作用

3、检查接触单元外法向。当程序进行是否接触的检查时,接触面的外法线方向至关重要。对于3D单元,按节点顺序号以右手法则来决定单元的外法向。接面的外法向应该指向目标面。否则,在开始分析计算时,程序可能会认为有过度渗透的面,而很难找到初始解。在这些情况下,程序一般会立即停止执行。图9-8说明正确和不正确的外法向。

命令: /PSYMB, ESYS

GUI: Utility menu>plotctrls>symbols

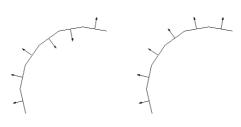


图9-8 定义接触单元的外法向

当发现单元的外法线方向不正确时,必须通过倒转所选择的不正确单元的节点号来改变它们: 命令: **ESURF**., REVE

GUI: Main Menu>Preprocessor>Create>Elements>Surf to Surf

或重新定想单元法向:

命令: ENORM

GUI: Main Menu>Preprocessor>Create>Move/Modify>Shell Normals

9.4.9 设置实常数和单元关键字

程序使用18个实常数和数个单元关键字,来控制面—面接触单元的接触。参见《ANSYS Elements Reference》中对接触单元的描述。

9.4.9.1 实常数

在18个实常数中,两个(R1和R2)用来定义目标面单元的几何形状。剩下的用来控制接触面单元

R1和R2 定义目标单元几何形状。 FKN 定义法向接触刚度因子。

FTOLN 是基于单元厚度的一个系数,用语计算允许的渗透。

ICONT定义初始靠近因子。PINB定义 "Pinball"区域。PMIN和PMAX定义初始渗透的容许范围。TAUMAR指定最大的接触摩擦。

CNOF 指定施加于接触面的正或负的偏离值。 FKOP 指定在接触打开时施加的刚度系数。

 FKT
 指定切向接触刚度。

 COHE
 制定粘聚滑动摩擦阻力。

 TCC
 指定热接触传导系数。

FHTG 指定消散能量转换成热的摩擦。 SBCT 指定 Stefan-Boltzman 常数。

RDVF 指定辐射观察系数。

FWGT 指定在接触面和目标面之间热分布的权重系数。

命令: R

GUI: main menu> preprocessor>real constant

对实常数 FKN, FTOLN, ICONT, PINB, PMAX, PMIN, FKOP 和 FKT, 用户既可以定义一个正值,也可以定义一个负值。程序将正值作为比例因子,将负值作为绝对值。程序将下层单元的厚度作为ICON, FTOLN, PINB, PMAX 和 PMIN 的参考值。例如 ICON = 0.1 表明初始间隙因子是"0.1*下层单元的厚度"。然而,ICON = -0.1 则表示真实缝隙是 0.1 单位。如果下层单元是超单元,则将接触单元的最小长度作为厚度。参见图9-9。

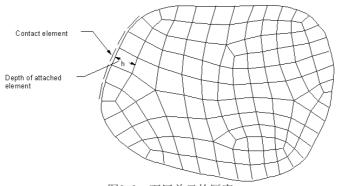


图9-9 下层单元的厚度

在模型中,如果单元尺寸变化很大,而且在实常数如 ICONT, FTOLN, PINB, PMAX, PMIN 中应用比例系数,则可能会出现问题。因为从比例系数得到的实际结果,取决于下层单元的厚度,这就可能引起大、小单元之间的重大变化。如果出现这一问题,请用绝对值代替比例系数。

TCC, FHTG, SBCT, RDVF 和 FWGT 仅用于热接触分析[KEYOPT(1)=1]。

9.4.9.2 单元关键字

每种接触单元都包括数个关键字。对大多的接触问题,缺省的关键字是合适的。而在某些情况下,可能需要改变缺省值。下面是可以控制接触行为的一些关键字:

٠,	可比而安以文述有阻。 「	空削货融门为 的	些大 链
	自由度	KEYOPT(1)	
	接触算法(罚函数+拉格郎日或罚)	KEYOPT (2)	
	存在超单元时的应力状态(仅2D)	DEYOPT(3)	
	接触点的位置(仅低阶接触单元)	KEYOPI(4)	
	CNOF自动调整	KEYOPI(5)	
	时间步控制	KEYOPT(7)	
	伪接触渗透	KEYOPI(8)	
	初始渗透或间隙的影响	KEYOPT (9)	
	法向和切向接触刚度修正方法控制	KEYOPT (10)	
	壳的厚度影响	KEYOPT (11)	
	接触面情况(粗糙、绑定等)	KEYOPT (12)	

命令: KEYOPT

GUI: main menu>preprocessor>Elemant Type>Add/Edit/Delete

9.4.9.3 选择接触算法

对面一面接触单元,程序可以使用扩增的 Lagrangian 方法或罚方法。通过单元关键字 KEYOPT(2)来指定。

扩增的 Lagrangian 方法是为了找到精确的 Lagrangian 乘子,而对罚函数修正项进行反复迭代。与罚函数的方法相比,Lagrangian 方法容易得到良态条件,对接触刚度的敏感性较小。然而,在有些分析中,扩增的 Lagrangian 方法可能需要更多的迭代,特别是在变形后网格变得太扭曲时。

使用 Lagrangian 方法的同时应使用实常数 FTOLN。FTOLN 为 Lagrangian 方法指定容许的 最大渗透。如果程序发现渗透大于此值时,即使不平衡力和位移增量已经满足了收敛准则,总的求解仍被当作不收敛处理。FTLON 的缺省值为0.1。用户可以改变这个值,但要注意,如果此值太小,可能会造成太多的迭代次数或者不收敛。

9.4.9.4 确定接触刚度

所有的接触问题都需要定义接触刚度,两个表面之间渗透量的大小取决于接触刚度。过大的接触刚度可能会引起总刚矩阵的病态,从而造成收敛困难。一般来说,应该选取足够大的接触刚度以保证接触渗透小到可以接受,但同时又应该让接触刚度足够小才不会引起总刚矩阵的病态而保证收

敛性。

ANSYS 程序根据下层柔体单元的材料特性,来估计一个缺省的接触刚度值。(用户可用实常数) FKN 来为接触刚度指定一个比例因子或指定一个绝对值。(比例因子一般在0.01和10之间;对于大变) 形问题,选1是比较好的;而对于弯曲为主的问题,通常为0.01~0.1。用户应当总是检验以使渗透 到达极小值,而又避免过多的迭代次数。)

注意--FTOLN 和 FKN 两者在一个荷载步到另一个荷载步中,可以修改。也可以在冲启动中修改。这时,必须定义KEYOPT(10)=1,2。

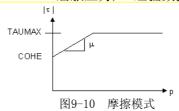
为了确定一个较好的接触刚度值,可能需要一些经验。用户可以按下面的步骤来进行尝试:

- 1、 开始时取一个较低的值。低估值要比高估值好,因为由一个较低的接触刚度导致的渗透问题,比过高的接触刚度导致的收敛性困难,要容易解决。
- 2、 对前几个子步进行计算分析, 直到最终荷载的一个比例(刚好完全建立接触)。
- 3、检查每一子步中的渗透量和平衡迭代次数。如果总体收敛困难是由过大的渗透引起的(而不是由不平衡力和位移增量引起的),那么可能低估了FKN的值,或者是将FTOLN的值取得大小。如果总体的收敛困难是由于不平衡力和位移增量达到收敛值时需要过多的迭代次数,而不是由于过大的渗透量引起的,那么FKN的值可能被高估。
- 4、 按需要调整 FKN 或 FTOLN 的值, 重新进行完整的分析。

注意一如果渗透控制变成总体平衡叠代中的主因(如果为使问题收敛到渗透容差内,比收敛到不平衡力的容差内,需要更多的叠代),用户应该增大 FTOLN 值,以允许更多的渗透,或增大 FKN。

9.4.9.5 选择摩擦类型

在基本的库仑摩擦模型中,两个接触面在开始相互滑动之前,在它们的界面上会有达到某一大小的剪应力产生。这种状态称为粘合状态(stick)。库仑摩擦模型定义了一个等效剪应力τ,在这里表面开始滑动是接触压力p的涵数(τ=μp+COHE, 其中μ是摩擦系数一MU一是作为材料特性定义, 而 COHE 是粘聚滑动阻力)。(一旦剪应力超过此值后,两个表面之间将开始相互滑动。这种状态,叫作滑动状态(Sliding)。粘合/滑动计算决定什么时候一个点从粘合状态到滑动状态,或从滑动状态变到粘合状态。摩擦系数可以是任一非负值。(程序缺省值为表面之间无摩擦。对于粗糙或绑定接触(KEYOPT(12)=1、3、5、6),程序将不管给定的 MU 值而认为摩擦阻力无限大。



对无摩擦、粗糙和绑定接触,接触单元刚度矩阵是对称的。而涉及到摩擦的接触问题产生一个不对称的刚度。在每次迭代使用不对称的求解器,比对称的求解器需要更多的计算时间。因此ANSYS程序采用对称化算法。通过采用这种算法大多的摩擦接触问题,能够使用对称系统的求解器来求解。如果摩擦应力在整个位移场内有相当大的影响,并且摩擦应力的大小高度依赖于求解过程,则对刚度阵的任何对称近似都可能导致收敛性降低。在这种情况下,选择不对称求解选项(NROPT, UNSYM)来改善收敛性。

9.4.9.6 选择检查接触与否的位置

(接触检查点位于接触单元的积分点上。)在积分点上,接触单元不渗透进入目标面。然而,目标)

面能渗透进入接触面。见图9-11。

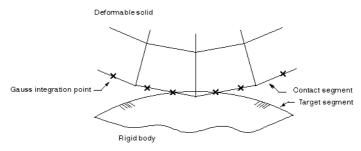


图9-11 接触检查点位于高斯积分点上

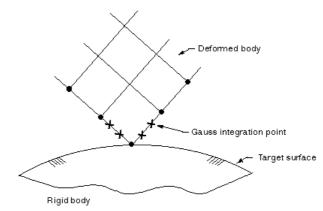


图9-12 接触检查点位于高斯节点上

(ANSYS 面一接触单元使用高斯积分点作为缺省值, 高斯积分点通常会比 Newton-Cotes/Lobatto 节点积分方案产生更精确的结果, Newton-cotes/Lobatto 用节点本身作为积分点。通过KEYOPT(4)来选择用户想使用的方法。这一选项仅适用于低阶接触(CONTAC 171 和CONTAC173)。然而,使用节点本身作为积分点仅应该用于角接触问题(看图9-12)。

然而,使用节点作为接触检查点可能会导致其它收敛性问题,例如"滑脱"(节点滑出目标面的边界),见**图9-13**。对大多数的点—面的接触问题,我们推荐使用其它的点—面的接触单元,例如CONTA26、CONTA48 和 CONTA49。见本章 § ----。

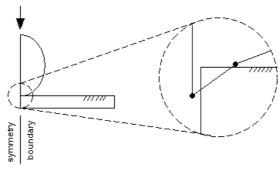


图9-13 节点滑脱

9.4.9.7 调整初始接触条件

在动态分析中,刚体运动一般不会引起问题。然而在静力分析中,当物体没有足够的约束时会产生刚体运动,有可能引起错误而终止计算。

在仅仅通过接触的出现来约束刚体运动时,必须保证在初始几何体中,接触对是接触的。换句话说,用户要建立模型以便接触对是"刚好接触"的。然而这样做,可能会遇到以下问题:

- 刚体外形常常是复杂的,很难决定第一个接触点发生在哪儿。
- 既使实体模型在初始时处于接触状态,在网格划分后由于数值舍入误差,两个面的单元网格之间也可能会产生小缝隙。

• 接触单元的积分点和目标单元之间可能有小缝隙。

同理,在目标面和接触面之间可能发生过大的初始渗透。在这种情况下,接触单元可能会高估接触力,导致不收敛或接触面之间脱开接触关系。

定义初始接触也许是建立接触分析模型时最重要的方面。因此,程序提供了几种方法来调整接触对的初始接触条件。

注意: 下面的技巧可以在开始分析时独立执行,或几个联合起来执行。它们是为了消除由于生成网格造成的数值舍入误差而引起的小缝隙或渗透,而不是为了改正网格或几何数据的错误。

1、应用实常数 CNOF 来指定一个接触面偏离。

指定正的值来使整个接触面偏向目标面。 指定负的值来使接触面离开目标面。

ANSYS 能够自动提供 CNOF 值到刚好闭合间隙或减少初始渗透。见下面的 KEYOPT(5):

- =1: 闭合间隙;
- =2:减少初始渗透;
- =3: 闭合间隙或减少初始渗透。

如果设置了 KEYOPT(5)>0 , 则 ICONT 缺省值为0。

2、使用实常数 ICONT 来指定一个小的初始接触环,初始接触环是指沿着目标面的"调整环"的深度。如果没有人为指定 ICONT 的值,程序会根据几何尺寸来给 ICONT 提供一个小值(但有意义的值),同时输出一个表示什么值被指定的警告信息。 ICONT 正值表示相对于下层单元厚度的比例因子;负值表示接触环的绝对值。任何落在"调整环"域内的接触检查点被自动移到目标面上,(参见图9-14a)。建议使用一个十分小的 ICONT 值,否则可能会发生严重不连续(看图9-14b)

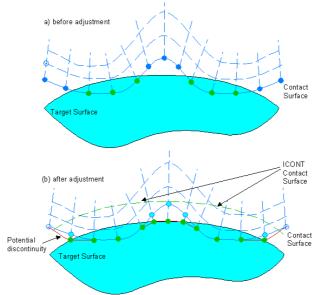


图9-14 用ICON进行接触面的调整。(a)调整前:(b)调整后

CNOF 与 ICONT 之间的差别,是前者把整个接触面移动 CNOF 的距离,而后者把所有初始分开的(例好位于调整环 ICONT 内的)接触点向目标面移动。)

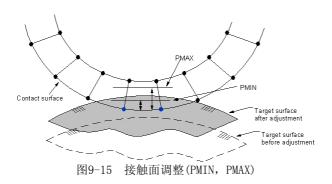
如果用户应用其他方法来建立初始未约束的自由体(如 FTOLN, PINB, PMAX 和 PMIN),从本质上移走 ICONT 的影响(把它关联一个很小的值,如1E-20),是一个好办法。但是,设置 ICONT=0,并不会关闭它。而是引起 ANSYS 用缺省值代替。对于其他约束自由体时,这种反转可能不会达到效果。

3、使用实常数 PMIN 和 PMAX 来指定初始容许的渗透范围。当指定 PMAX 或 PMIN 后,在开始分析时,程序会将目标面移到初始接触状态,见图9-15。如果初始渗透大于 PMAX,程序会调整目标面来减少渗透。接触状态的初始调节仅仅通过平移来实现。

对给定载荷或给定位移的刚性目标面,将会执行初始接触状态的初始调节。对没有指定边界条

件的目标面,也同样可以进行初始接触的调整。

当目标面上的所有节点,有给的0位移值时,使用 PMAX 和 PMIN 的初始调节将不会被执行。

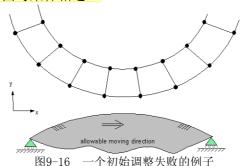


注意—ANSYS程序独立地处理目标面上节点的自由度。例如:如果用户指定自由度 UX 值为"0",那么沿着X 方向就没有初始调查。然而,在 Y 和 Z 方向仍然会激活 PMAX 和 PMIN 选项。

初始状态调整是一个迭代过程,程序最多进行20次迭代。如果目标面不能进入可接受的渗透范围(即 PMIN, PMAX 范围),程序将在原始几何实体上操作。这时程序会给出一个警告信息,用户可能需要调整用户的初始几何模型。

图9-16给出了一个初始接触调整迭代失败的例子。目标面的 UY 被约束。因此,初始接触唯一容许的调整是在 X 方向,然而,在这个问题中,刚性目标面在 X 方向的任何运动都不会引起初始接触。

对于柔体-柔体接触,这种方法不仅移动整个目标面,还同时移动与目标面相连的整个柔体 。请确保没有其他接触面或目标面与柔体相连。



4、设置KEYOPI (9)=1来调整初始渗透或间隙,见图9-17。

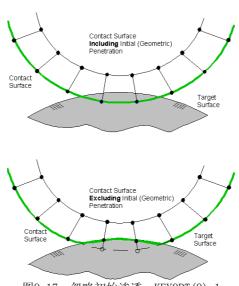


图9-17 忽略初始渗透, KEYOPT (9)=1

真正的初始接触包括两部分:

- 几何模型产生的渗透或间隙;
- 用户定义的接触面偏离(CNOF)产生的渗透或间隙;

KEYOPI (9) 提供下列功能:

- 从几何和接触面偏离,包括初始渗透,设置 KEYOPI(9)=0。这是缺省。
- 从上面两者中忽略初始渗透,设置KEYOPI(9)=1。在KEYOPI(12)=4或5时,这一 KEYOPI(9)=1,也将忽略打开间隙弹簧的初始力,这样,建立了一个初始的"完美的"接 触面一在接触截面上没有初始力的作用。
- 为了包括定义的接触面偏离(CNOF),但忽略由于几何模型引起的出事渗透,设置 KEYOPI(9)=3。在KEYOPI(12)=4或5时,这一KEYOPI(9)=3,也将忽略打开间隙弹簧的初始 力,这样,建立了一个初始的"完美的"接触面一在接触截面上没有初始力的作用。

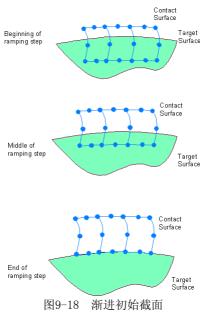
在某些情况下,例如过盈装配问题,期望有过度的渗透。如在第一个载荷步施加阶梯初始渗透,可能造成收敛困难。为了缓解收敛性困难,在第一个载荷步中设置斜坡的初始渗透来克服。见图 9-18。下面的KEYOTI (9) 设置用来提供斜坡功能:

- 设置KEYOPT (9) = 2,来斜坡设置初始渗透(CNOF+由于几何模型造成的偏离)。
- 设置KEYOPT(9)=4,来斜坡设置接触面渗透,但忽略由于几何模型造成的渗透。

对于上面两个 KEYOPT(9)设置,用户还应该设置 KBC,0,并在第一个载 步中不要给定其它任何外载荷。还要确保 "Pinball" 区域足够大一捕捉到初始截面。

用户可以相互联系来应用上面的技术。例如,用户可能希望设置十分精确的初始渗透或间隙,但有限元节点的初始坐标可能无法提供足够的精度。这时,可以:

- 应用 ICONT 来把初始打开的接触点刚好碰到目标面。
- 应用 CNOF 来指定渗透)正值)或间隙(负值)。
- 应用 KEYOPT (9)=3 来在第一个子步重新求解初始渗透,或应用 KEYOPT (9)=4 来逐步重新求解初始渗透。



在开始分析时,程序会给出每个目标面的初始接触状态的输出信息(输出窗口或输出文件中), 这个信息有助于决定每个目标面的最大渗透或最小间隙。

对于给定的目标面,如果没有发现接触,可能是目标面离接触面太远(超出了 Piaball 区域),或者是接触/目标单元已经被杀死。

9.4.9.8 决定接触状态和Pinbal1区域。

接触单元相对于其目标面的运动和位置,决定了接触单元的状态;程序检测每个接触单元,并给出一种状态:

- STAT=0 未闭合的远场接触
- STAT=1 未闭合的近场接触
- STAT=2 滑动接触
- STAT=3 粘合接触

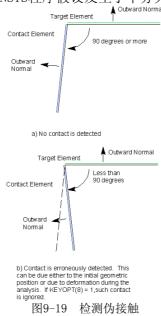
当目标面进入pinbal1区域后,接触单元就被当作未闭合的近场接触,pinbal1区域是以接触单元的积分点为中心的。使用实常数 PINB 来为pinbal1指定一个比例因子(正值),或其绝对值(负值)。做省时,程序将pinbal1区域定义为一个以"4*下层单元厚度(对于刚体-柔体接触)"或"2*下层单元厚度(对于柔体-柔体接触)"为半径的圆(对2-D问题)或球(对3-D问题)。

检查接触的计算时间依赖于pinball区域的大小,远场接触单元计算简单,且所增加的且计算时间较少。近场接触计算(对于接近接触或实际接触的接触单元)较慢并且较复杂。当单元已经接触时,计算最为复杂。

如果刚性面有好几个凸形区域,为了克服伪接触定义,设置一个合适的pinbal1区域是有用的。而对大多数问题,缺省值是合适。

9.4.9.9 在自接触问题中避免伪接触

在一些对称接触问题(包含自接触),ANSYS可能错误假设在十分接近的几何位置上的接触面和目标面之间接触。在自接触问题的角隅会发生这一问题。它可能是由单元的初始几何位置引起的,也可能在分析时通过变形而引起的。在二个面位于pinball区域内,而且它们之间夹角小于90时,会产生这一问题。在这种情况下,ANSYS程序假设发生了十分大的渗入。图9-19 说明了这种情况。



用户可以通过单元 CONTA171~CONTA174的KEOPT (8)=1,来防止ANSYS程序考虑这一问题。当应用这个 KEYOPT 时,ANSYS将忽略在如下情况下产生的"过渡渗入"接触:

- 最初检测到渗入大于接触容差(FTOLN)的20%。见图9-19a。
- 接触状态由接触突然变化,如从图9-19a变到图9-19b。

如果KEYOPT (8) 激活,ANSYS各个荷步中第一次检测到伪接触时会发出一个警告。如ANSYS在第1 荷载步中发现中这种接触,用户可看到如下的信息:

"Contact element x has too much penetration related to target element y. We assume it (may be more elements) is spurious contact."

如果ANSYS检测到归类为伪接触的突变,用户看到如下信息:

"Contact element x status changed abruptly with target element y. We assume it (may be more elements) is spurious contact."

ANSYS在一个荷载步中仅发出一次这样的信息。在该荷载步中如果还存在其他的伪接触, ANSYS并不再提醒。

注意一在应用KEYOPT(8)=1之前,请认真检查模型。ANSYS将忽略符合过过度渗入准则的真正接触。这一技术应 当仅用于在改变pinball值 PINB 不能阻止伪接触的情况。

9.4.9.10 修正法向和切向接触刚度

在分析过程中,可以修正法向和切向接触刚度。可以自动修正(由于改变单元刚度的大应变效应产生),也可以显式地修正(由用户指定 FKN 或 FKT 值)。KEYOPT(10)控制法向和切向接触刚度如何修正:

- KEYOPT(10)=0,禁止那些已经处于"关闭"状态的单元的接触刚度修正。对于从"打开" 变化到"关闭"状态的单元,将在每一个子步上修正接触刚度。
- KEYOPT(10)=1,允许已处于"关闭"状态的单元的接触刚度,在荷载步之间或在重启动期间改变。对于从"打开"变化到"关闭"状态的单元,将在每一个子步上修正接触刚度。
- KEYOPT(10)=2与 KEYOPT(10)=1相同,只是对所有单元(不论其状态)将在每一个子步上,由程序决定自动修正。

9.4.9.11 选择表面作用模式

面-面接触单元支持法向单侧接触模式及其他机械表面交互模式。通过设置 (KEYOPT (12)) 来选择下面的某种作用模式:

- KEYOPT(12)=0, 法向单侧接触, 即在接触分开时, 法向压力等于0。
- KEYOPT (12)=1,完全粗糙接触,用来模拟无滑动的,表面相当粗糙的摩擦接触问题,这种设置对应于摩擦系数无限大,因此用户定义的摩擦系的(MU)被忽略。
- KEYOPT (12)=2, "不分开的"接触,用来模拟那种一是接触就再不分开的问题(虽然对法向接触而言,允许有相对滑动)。
- KEYOPT(12)=4, "不分开的"接触, 其中接触积分点或初始在pinball区域内, 或一旦接触就总是与目标面连在一起,沿接触面的法向一以允许滑动。调整 FKOP(见下),可用"软弹簧"把这些区域联系在一起。
- KEYOPT (12)=5, 绑定接触模式, 其中接触积分点或者初始在pinball区域内, 或者一旦接触就总是与目标面连在一起, 沿接触面的法向和切向一以允许滑动。
- KEYOPT (12)=6,绑定接触模式,其中初始接触的接触积分点保持与目标面接触,而初始处于打开状态的接触积分点,在整个分析期间保持打开状态。这个选项与在初始接触的区域应用 CEINTF 类似。

对于模拟不分开或绑定接触,用户可能需要设置 FKOP 实常数。这在接触打开时,提供一个刚度系数。如果 FKOP 为正值,则真正的接触打开刚度等于 FKOP乘以接触关闭时施加的刚度。如果 FKOP 为负值,该值作为 接触打开刚度的绝对值。缺省的 FKOP 值为1。

不分开或绑定接触,在接触发生打开时,产生"pull-back"力,而且这个力可能不足以阻止分开。为了减小分开,定义一个较大的 FKOP 值。而且,在有些时候,在接触面之间的联系需要用来阻止刚体运动时,希望分开。在这些情况下,可以指定较小的 FKOP 值,以在接触面之间保持接触(这是"软弹簧"效应)。

9.4.9.12 用超单元建立接触模型

面一面的接触单元能模拟刚体(或一个线性弹性体)和另一个有微小运动的线性弹性体的接触。这些线性弹性体可用超单元来建模,这大大降低了进行接触 叠代的自由度数。记住任荷接触或目标节点都必须是超单元的主自由度。

由于超单元仅仅由一组保留的节点自由度组成,它没有用来定义接触表和目标面的几何形状。因此,必须在形成超单元之前在原始单元表面上定义接触面和目标面。来自超单元的信息,包括

节点连结和组合刚度,但是没有材料特性和应力状态(轴对称、平面应力或平面应变)。一个限制是接触单元的材料特性设置必须与形成超单元之前的原始单元的材料特性相同。

使用 KEYOPT (3) 来提供2D接触分析的信息。CONTA171、CONTA172 单元的选项如下:

- 不使用超单元(KETOPT(3)=0)。
- 轴对称(KEYOPT(3)=1)。
- 平面应变或单位厚度的平面应力(KEYOPT(3)=2)。
- 需要厚度输入的平面应力(KEYOPT(3)=3)。对这种情况,使用实常数R2来指定指定厚度。

对于3D接触分析,CONTA173,CONTA174单元的KEYOPT(3)选项忽略。ANSYS 将自动检查下层单元是否一个超单元。

9.4.9.13 考虑厚度影响

程序能够用KEYOPT (11)来考虑壳(2D和3D)、梁(2D)的厚度。对于刚体-柔体接触,ANSYS将自动移动接触面到壳/梁的底或顶面。对于柔体-柔体接触,ANSYS将自动移动与壳/梁单元相连接触面和目标面。

缺省时,程序不考虑单元厚度,用中面来表示梁和壳,而渗透距离从中面计算。当设置 KFTOPI(11)=1 时,则考虑梁或壳的厚度。从指定的底面或顶面(见§9.4.2)来计算接触距离。建模时如要考虑厚度,记住偏离可能来自接触面或目标面或两者。记住刚性目标面会向任一边移动。在一起指定接触偏离(CNOF)及 KEYOPT(11)=1时,从壳/梁的顶面和底面计算。当使用 SHELL181 时,在变形时还考虑厚度变化。

9.4.9.14 使用时间步长控制

时间步长控制是一个自动时间步长特征,这个特征预测什么时间接触单元的状态将发生变化,或者削减当前时间步。使用KEYOPT (7) 来选择下列四种行为之一来控制时间步长。KEYOPT (7) =0时不提供控制(缺省),KEYOPT (7) =3提供最多的控制:

- KEYOPT (7)=0, 无控制。时间步大小不受预测影响。当自动时间步长激活,且允许一个很小的时间步长时,这个设置对大多数情况是合适的。
- KETOPT (7)=1,如果一次迭代期间产生太大的渗透,或者接触状态突然变化,则进行时间 步长二分。
- KEYOPT (7)=2,对下一个子步预测一个合理的时间增量。
- KETOPT (7)=3,对下一个子步,预测一个最小的时间增量。

9.4.9.15 使用死活单元选项

面一面接触的接触单元和目标单元允许激活或杀死,而且也跟随其下层单元的死活状态。能够在分析的某一阶段中杀死这个单元,而在以后的阶段再重新激活它。这个特征对于模拟复杂的金属成形过程是有用的,在此过程的不同分析阶段,有多个刚性目标面需要和接触面相互作用。回弹(Springback)模拟常常需要在成形过程的后期移走刚性工具。这一选项不能用于"不分开"或绑定接触。

9.4.10 控制刚性目标面的运动(刚体-柔体接触)

刚性目标面是在其原始构形上定义的。而整个面的运动,通过pilot节点上的给定位移来定义的(如果没有定义pilot节点,则通过目标面上的不同节点来定义)。

为控制整个目标面的边界条件(和运动),在下面任何情况下,必须使用pilot节点:

- 目标面上作用着给定的外力。
- 目标面发生旋转。
- 目标面和其它单元相连(例如结构质量单元 MASS21 等)。
- 目标面的运动有平衡条件调节。

pilot节点的自由度代表着整个刚性面的运动,包括2D中的2个平移和1个转动自由度,或3D中的3个平移和3个转动自由度。用户可以在pilot节点上施加边界条件(位移、初速度)、集中载荷、转动等等。为了考虑刚体的质量,在pilot节点上定义一个质量单元。

当使用pilot节点时,记住目标面有如下一些限制:

- 每个目标面只能有一个Pilot节点。
- ANSYS忽略除了pilot外的所有节点上的边界条件。
- 只有pilot节点能与其它单元相连。
- 当定义了pilot节点后,不能使用约束方程(CE)或节点来耦合(CP)来控制目标面的自由度。如果要在刚性面上施加任意载荷或者约束,用户必须定义pilot节点,并在pilot节点上加载。如果没有使用pilot节点,则只能有刚体运动。

注意一pilot节点可以是目标单元上的一个节点,或者是任意位置的节点,但应该是接触单元上的节点。只有在施加了转角或力矩时,pilot节点的位置才重要。对于每一个pilot节点,ANSYS将自动定义一个内节点及一个内部约束方程。pilot节点的转动自由度,通过内部约束方程,与内节点的平移自由度联系起来。

缺省时,目标单元的 KEYOPT(2)=0, ANSYS 对每个目标面检查边界条件。如果下面的条件都满足,那么程序将目标面作固定处理:

- 在目标面节点上没有明确定义边界条件或给定力。
- 目标面上的节点没有和其它单元相连。
- 没有在目标面上的节点上使用约束方程或节点耦合。

在每个载荷步的末尾,程序将会放松内部设置的约束条件。

在结果文件(Jobname. RST)和数据库(Jobname. DB)中保存的约束条件可能会由于这些改变而被修改。用户应当在从启动一个分析或用交互模式重新求解之前,仔细检查当前的约束条件是否合乎要求。

如果需要,用户可以通过在目标单元定义中设置KEYOPT(2)=1,来控制目标节点的约束条件。

9.4.11 温度接触建模

可以应用面-面接触单元,结合热-结构耦合场固体单元,来模拟在接触面之间的热传导。为了激活结构自由度和热自由度,要设置KEYOPT(1)=1。支持下面的热接触特性:

- 两个接触面之间的热接触传导。
- 从一个"自由面"到周围,或在二个分开一个小间隙的面("近场"对流)之间的热对流。
- 从一个"自由面"到周围,或二个分开小间隙的面之间的热辐射("近场"辐射);
- 由摩擦消散而产生的热。
- 热流输入。

9.4.11.1 热接触行为与接触状态

每个接触对可覆盖一个或多个热接触特性。激活那个特性取决于接触状态:

- **闭合接触**:热接触传导在二个接触面间传热;
- 摩阻滑动:摩擦消散能量,在接触面和目标面上生成热;
- 近场接触: 考虑了接触面和目标面之间的热对流和热辐射;
- **自由面接触**:考虑了接触面和周围之间的热对流和热辐射。外部流仅对接触面和目标面有 贡献。

9.4.11.2 自由热表面

如果要模拟自由表面热对流、自由表面热辐射、表面施加热流值,用户可定义自由热表面。自由热表面可以是一个接触面而无相应的目标面(即无目标单元的接触对)。也可以设置目标单元类型定义的 KEYOPT (3)=1 来定义一个自由热表面。在设置这个 KEYOPT 时,自由表面辐射和对流在直到检测到接触打开之前都要考虑。这种情况下,在接触面和目标面之间无对流或辐射热传递。

9.4.11.3 目标面上的温度

对于界面热传导、近场热传导或近场辐射,需要求解接触面和目标面的温度。在目标面和<u>接触探点法线之间的交点上</u>的温度代表目标温度。Pilot节点上的温度代表整个刚性目标面上的温度(如果存在pilot节点)。



9.4.11.4 传导建模

为了考虑接触面与目标面之间的传热交换,用户需要通过一个实常数表来指定热接触传导系数 TCC。用户可以用表格输入把 TCC 定义为接触压力(压力表)、接触探点温度(温度表)、时间和接触探点(X,Y,Z表)位置的函数。为了模拟存在小间隙的二个面之间的接触传导,应用 KEYOPT (12)=4 或5来定义"绑定接触"或"不分开接触"选项。

9.4.11.5 对流建模

为了模拟对流热交换,用户必须应用 SFE 命令指定热对流系数 CONV。CONV可以是一常数(只允许均匀的)或是通过表格输入的作为温度、时间、位置的函数。对于自由面对流,用户必须通过 SFE 命令指定体积温度。也可用下列菜单:

Main Menu > Preprocessor > Loads > Apply > Convection > Uniform Main Menu > Solution > Apply > Convection > Uniform

9.4.11.6 辐射建模

为了模拟辐射热交换,用户必须指定下列之一:

- 1、通过材料特性定义热辐射系数 EMIS。
- 2、通过实常数定义 Stefan-Boltzman 常数 SBCT。如果这个值未定义,将不包括辐射效应。
- 3、偏离温度 TOFFST。如按华氏度或摄氏度来定义数据,必须用 TOFFST 命令指定一个温度偏离值。可从下列菜单。

Main Menu > Preprocessor > Loads > Analysis Options

Main Menu > Preprocessor > Material Props

- 4、辐射观察系数 RDVF,通过实常数定义,仅用于近场辐射,缺省为1。它可定义为温度、间隙距离、时间、位置的函数,用表格输入。对于远场辐射,RDVF 设置为0,并忽略用户指定的值。其他自由表面条件认识用户指定的RDFV。
- 5、环境(ambient)温度,它仅用于自由辐射,以 KVAL=2 和 CONV 为表格参数,用 SFE 命令输入(即与自由表面对流模拟中的体积温度相同)。

9.4.11.7 由于摩擦而生成热的模拟

为了模拟摩擦消散能量的热量生成,用户应当执行瞬态热-结构耦合分析。如果用户希望的话,可以应用 TIMINT, STRUC, OFF 命令关闭结构自由度上的瞬态效应。但是,必须包括热自由度上的瞬态效应。需要二个实常数:

- 1、FHTG 是摩擦消散能量转换成热(缺省为1.0)。
- 2、FWGT 是接触面和目标面之间热分布的权重系数(缺省为0.5)。

9.4.11.8 模拟外部热流

用户可以通过 SFE 命令施加接触单元上的热流。只能施加均匀热流。热流不能施加于目标单元。然而,对于近场接触,外部热流施加于接触面,并且将贡献到目标单元。

对于自由热表面,如目标单元的 KEYOPT(3)=1,则外热度流仅施加于接触的一侧。对于一个给定的接触单元,必须指定 CONV 和 HFLUX 二者之一(但不是二者)。然而,用户可以定义二个不同的接触对:一个模拟对流,一个模拟热流。

9.4.12 给变形体单元加必要的边界条件

现在可以按需要加上边界条件。施加方法与其它的分析类型相同,可参见前面的有关章节。

9.4.13 定义求解和载荷步选项

接触问题的收敛性随问题不同而不同。下面列出了一些典型的,在大多数面-面的接触分析中推荐使用的选项。参见《ANSYS Commands Reference》。

时间步长必须足够小,以得到适当的接触区。如果时间步太大,则接触力的光滑传递会被破坏。时间步的大小,是由子步数或时间步本身指定的。下述命令用于调整这些值。

命令: NSUBST

GUI: Main Menu >Preprocessor >Loads>Time/Frequenc>Freq and Substps

Main Menu >Preprocessor >Loads>Time/Frequenc>Time and Substps

Main Menu >Solution>Sol'n Control:Basic Tab

Main Menu >Solution >Unabridged Menu>Time/Frequenc >Freq and Substps

Main Menu >Solution>Unabridged Menu>Time/Frequenc >Time and Substps

命令: DELTIM

GUI: Main Menu >Preprocessor >Loads >Time/Frequenc >Time - Time Step

Main Menu >Solution >Sol'n Control:Basic Tab

Main Menu >Solution >Unabridged Menu>Time/Frequenc >Time - Time Step

注意一设置精确时间步长的可信赖的方法是打开自动时间步长。

命令: AUTOTS, ON

GUI: Main Menu >Solution >Sol'n Control:Basic Tab

Main Menu >Solution >Unabridged Menu>-Load Step Opts-Time/Frequenc

>Time - Time Step or Time and Substps

如果在迭代期间接触状态变化,可能发生不连续。为了避免收敛太慢,使用修改的刚度阵,将 牛顿一拉普森选项设置成 FULL。

命令: NROPT, FULL,, OFF

GUI: Main Menu>Solution>Analysis options

不要使用自适应下降。对面一面的问题,自适应下降通常不会有任何帮助,建议关掉它。

在摩擦滑动占主导地位时,设置不对称求解选项(NROPT, UNSYM,, OFF),以避免收敛减慢或发散。

按合理的时间步,设置合理的平衡迭代次数。这个命令的缺省为平衡迭代次数15~26,起决于问题的物理性质。

命令: NEQIT

GUI: Main Menu >Solution >Sol'n Control:Nonlinear Tab

Main Menu >Solution >Unabridged Menu>-Load Step Opts-Nonlinear>
Equilibrium Iter

因为大的时间增量会使使迭代趋向于不稳定,使用线性搜索选项来使计算稳定化。

命令: LNSRCH

GUI: Main Menu >Solution >Sol'n Control:Nonlinear Tab

Main Menu >Solution >Unabridged Menu>-Load Step Opts-Nonlinear>

Line Search

除非在大转动和动态分析中,打开时间步长预测器选项。

命令: PRED

GUI: Main Menu >Solution >Sol'n Control:Nonlinear Tab
Main Menu >Solution >Unabridged Menu>-Load Step Opts-Nonlinear>
Predictor

在接触分析中,许多不收敛问题是由于使用了太大的接触刚度引起的(实常数 FKN)。检验是否使用了合适的接触刚度。

注意一对于大多数小应变、小位移、小滑动分析,设置 NLGEOM, OFF。这种设置将加快搜索时间;但是,如果接触问题涉及大滑动,则要设置 NLGEOM, ON。

9.4.14 求解

现在可以求解接触问题。求解过程与一般的非线问题求解过程相同。记住如下几点:

- 总是检查与接触对相关的实常数集,并检查目标面的约束条件。以前"试验性运行分析" 可能改变这些设置。
- 在开始分析时,总是检查目标面的接触状态。如果检查到任何不希望的间隙(或不接触),或过度的渗透,终止分析,然后检查几何模型。
- 总是认真地检查分析结果。

按照下面的步骤来进行求解:

1、把数据库保存到一个文件。

命令: SAVE

GUI: Utility Menu>File>Save As

2、开始求解。

命令: SOLVE

GUI: Main Menu>Solution>-Solve-Current LS

如果需要, 定义多个荷载步。参见本书前面有关章节。

3、离开求解器

命令: FINISH

GUI: 关闭求解菜单。

如果重启动一个接触分析,按《ANSYS Basic Analysis Guide》所述的方法来进行。但是,要知道目标面的约束条件可能在内部设置了。在重启动分析之前要仔细检查约束条件。只可以改变实常数 FKN, FTOLN, PINB 和 FKOP,并且只能在重启动点改变,或在新的荷载步开始时改变。

9.4.15 检查结果

接触分析的结果主要包括位移、应力、应变,支反力和接触信息(接触压力、滑动等)。用户可以在一般后处理器(POST1)或时间历程后处理器(POST26)中查看结果。对于接触相关的结果,可以选择 CONT 作为输出或列表的项目。可以应用的输出元件,参见《ANSYS Elements Reference》。

记住在 POST1 中,一次只能查看一个子步的结果,并且该子步的结果必须已被写到 Jobname. RST 文件中(荷载步选项命令 OUTRES 控制那个子步的结果写到 Jobname. RST 中)。典型的 POST1 的操作步骤如下。

9.4.15.1 注意事项

- 1、为了在POST1中查看结果,数据库文件所包含的模型必须与求解时的模型相同。
- 2、必须存在结果文件Jobname. RST。

9.1.15.2 在POST1中查看结果

- 1、从输出文件 Jobname. OUT 中查看分析是否收敛。
- 如果不收敛,用户可能不想进行后处理,而更在乎查找为什么不收敛。
- 如果已经收敛,继续后处理。

2、进入POST1。如果用户的模型不在当前的数据库,使用恢复命令[RESUME]来恢复它。命令: /POST1

GUI: main menu>General postproc

3、读入所期望的载荷步和子步的结果,这可以通过载荷步和子步数,也可以通过时间来实现

命令: SET

GUI: Main Menu>General Postproc> -Read Results-load step

- 4、使用下面的任何一个选项来显示结果:
- (1)选项:显示变形形状态

命令: PLDISP

GUI: Main Menu>General Postproc>Plot Results> Deformed Shape

(2)选项:等值显示

命令: PLNSOL 或 PLESOL

GUI: main menu/general postproc/plot result/contour plot-

noded solu 或 element和solu

使用这个选项来显示应力、应变或其它项的等值线图。如果相邻的单元有不同的材料特性(例如塑性或多弹性材料特性,不同的材料类型,或不同的死活属性),则在结果显示时应避免节点应力平均所产生的错误。逻辑选择(见《ANSYS Basic Analysis Guide》)提供了避免这种错误的方法

下面示出 PLNSOL 和 PLESOL 命令的各种 CONT 选项:

CONT STAT Contact status. 3-closed and sticking,
2-closed and sliding,
1-open but near contact,
0-open and not near contact.
"PENE Contact penetration
"PRES Contact pressure
"SFRIC Contact friction stress

" STOT Contact total stress (pressure plus friction)

" SLIDE Contact sliding distance GAP Contact gap distance

" FLUX Heat flux at contact surface

注意一可以通过Main Menu〉General Postproc〉Plot Results〉 -Contour Plot-Nodal Solu 或 Element Solu 来设置这些选项。选择"CONTACT"作为Item 和 Comp 将可看到这些选项的详细列表。

对于刚体-柔体接触,或不对称柔体-柔体接触,接触单元提供真实的压力和摩擦应力。但是,对于对称柔体-柔体接触,真实的压力和摩擦应力,是从接触单元两侧的压力和摩擦应力平均得到的。

等值线有关的信息(CONT)这样一来绘制。对于2D接触分析,模型用灰色表示,所要求显示的项 将沿着接触单元存在的模型的边界以梯型面积表示出来。应用 FACT 项来缩放2D等值线。对3D接触 分析,模型将用灰色表示,而要求的项在接触单元中用二维面显示等值线。

还可以等值显示单元表的数据和线性化单元数据。

命令: PLETAB

PLLS

GUI: main menu>general postproc>Element Table>Plot Element Table
main menu>General Postproc>Plot Results>-Contour plotline Elem Res

应用 PLETAB 命令显示单元表数据,应用 PLLS 命令显示线单元数据。

(3)选项:列表显示

命令: PRNSOL (节点结果)

PRESOL (单元-单元结果)

PRRSOL (反力)

PRETAB

PRITER (子步数据汇总),等

NSORT

ESORT

GUI: Main Menu>General Postproc>List Results> Nodal Solution
Main Menu>General Postproc>List Results> Element Solution

Main Menu>General Postproc>List Results> Reaction Solution

在列表显示它们之前,可以用 NSORT 和 ESORT 来对它们进行排序。

也可以应用 CONT 标号及其参数,和 PRNSOL 和 PRESOL 命令或相应菜单来列出与接触相关的信息。

(4) 选项: 动画

可以动画显示接触结果随时间的变化:

命令: ANIME

GUI: Utility Menu>PlotCtrls>Animate> Over Time

(5) 其他功能

POST1 还有许多其他后处理功能,如把结果映射到路径上,报告质量列表等等。参见《ANSYS Basic Analysis Guide》。但应注意,在非线性分析中,荷载工况一般是不允许的。

9.4.15.3 在POST26中查看结果

用户也可以用POST26来查看一个非线性结构对加载历程的响应。应用POST26可以比较一个变量与另一个变量的变化关系。例如,可以画出某个节点位移-荷载的曲线,某个节点的塑性应变 - TIME 的关系。一个典型的 POST26 后处理过程需要分以下几个步骤。

- 1、从输出文件中(Jobname. OUT)检查是否分析已经收敛。
- 2、如求解已收敛,进入 POST26。如果模型不在当前数据库中,用 RESUME 恢复它。

命令: /POST26

GUI: Main menu>Timehist Postpro

3、定义在后处理阶段用到的变量。 SOLU 命令引起各种迭代和收敛参数读入到数据库,在后处理阶段可以应用。

命令: NSOL

ESOL

RFORCE

GUI: Main menu>Time Hist Postpro>Define Variables

4、用图形或列表显示

命令: PLVAR(图形显示变量)

PRVAR

EXTREM(列表显示变量)

GUI: Main Menu>TimeHist Postpro>Graph Variables
Main Menu>TimeHist Postpro>List Variables

Main Menu>TimeHist Postpro>List Extremes

5、其他功能

POST26 还有许多其他后处理功能。参见《ANSYS Basic Analysis Guide》§6。

9.5 点-面接触分析

我们可以使用点—面接触单元,来模拟一个表面和一个节点的接触。另外,可以通过把表面指定为一组节点,从而用点—面接触来代表面—面接触。

ANSYS程序的点—面接触单元允许下列非线性行为:

- 有大变形的面—面接触分析;
- 接触和分开;
- 库仑摩擦滑动;
- 热传递。

点-面接触是工程应用中普遍发生的现象。例如:夹具(螺栓、铆钉等)、金属成形、轧钢、动力管whip等等,工程技术人员关注由于结构之间的接触而产生的应力、变形、力和温度等的改变。

9.5.1 使用点一面的接触单元

在ANSYS程序中,点一面接触是通过跟踪一个表面(接触面)上的点相对于另一表面(目标面)上的线或面的位置来表示的。程序使用接触单元来跟踪两个面的相对位置。接触单元的形状为三角形、四面体或锥形,其底面由目标面上的节点组成,而顶点为接触面上的节点。

图9-21示出了二组接触单元,即二维接触单元CONTAC48(平面和轴对称)和三维接触单元CONTAC49。

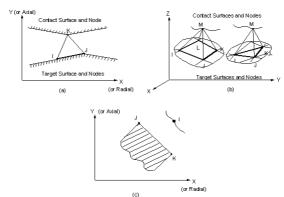


图4-9 (a) 2-D接触单元CONTAC48; (b) 3D接触单元CONTAC49; (c) 2D接触单元CONTAC26

这些接触单元是应用伪单元技术的用于检测面-面接触的有限单元。通过在两个面的节点上施加适当的力,来考虑接触和摩擦。在激活其温度自由度时,也可以用这些单元来模拟接触面之间的热传导。许多一般的有限单元不能应用。例如,许多接触单元可以占据相同空间,而且对于接触单元来说形态比没有意义。

此外,如果目标面是刚性的,而且是2D问题,则可以使用CONTA26单元来建模,这将在本节最后论述。

9.5.2 点一面接触分析的步骤

典型的点—面接触分析的基本步骤如下:

- 1、 建模和划分网格:
- 2、 识别接触对:
- 3、 生成接触单元;
- 4、 设置单元关键字和实常数;
- 5、 施加必须的边界条件;
- 6、 定义求解选项:
- 7、 求解:

8、 查看结果。

9.5.2.1 建模和划分网格

在这一步中,需要建立代表接触体几何形状的模型,设置单元类型、实常数和材料特性,用适当的单元类型划分网格。参见《ANSYS Modeling and Meshing Guide》。

命令: AMESH VMESH

GUI: Main menu>Pneprocossor>Mesh>Mapped>3 or 4 Sided Main menu>Pneprocessor>Mesh>Mapped>4 to 6 sided

应该避免使用有中节点的单元,特别是在3维问题中。因为这些单元表面节点上的"有效刚度"很不均匀。例如,对20节点 SOLID95 单元来说,角节点上有一个负刚度。然而,ANSYS 程序的点—面接触算法假定刚度均匀分布在面上的所有节点上。因此,在接触分析中使用这些单元时,可能导致收敛困难。

仅仅在使用 CONTAC48 的2维分析中,才可以在接触面上使用中节点单元,但不能在目标面上使用中节点单元。当生成 CONTAC48 接触单元的时候,目标面上的中节点将被忽略,这样将会导致在目标面上的力力传递不均匀。

9.5.2.2 识别接触对

用户必须判别在变形过程中,哪儿可能发生接触。一旦用户已判别出潜在接触面,就通过接触单元来定义它们。为了更有效地进行计算(主要指CPU时间),用户可能想要定义比较小的、局部的接触区域,但要保证用户所定义的接触区域能模拟所有必须的接触。

由于几何形状和潜在变形的多样化,可能有多个目标面与同一个接触面相互作用。在这种情况下,必须定义多个接触对。

对每个表面,用户需要建立一个包含表面节点的组元。

命令: CM

GUI: Utility>Select>Comp/Assembly>Cneate Component

如《ANSYS Modeling and Meshing Guide》所述,用户可以利用这些表面节点列表来生成在接触面之间所有可能的接触形状。如果用户能肯定某些面永远不会相互接触,那么就可以在这个表面列表中,删除这些节点。但是,通常应该适当地包括比想象的要更多一些的节点。

9.5.2.3 生成接触单元

在生成接触单元之前,首先必须定义单元类型。对点-面接触,使用CONTAC48(2维)和CONTAC49(3维)

命令: ET

GUI: Main menu>Pneprocessor>Eloment Type>Add/Edit/Relete

然后再定义接触单元的实常数。每个不同的接触面,应该有一个不同的实常数号,即便实常的值相同。因为使用不同的实常数号,程序能够较好地区分出壳的顶面和底面之间的接触,以及其他不同的接触区域。例如,在角接触中,每条边应该有它自己的实常数号,如图9-22所示。另一种典型应用是梁的双边接触,如图9-23所示。

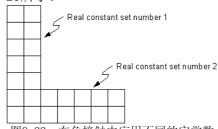


图9-22 在角接触中应用不同的实常数

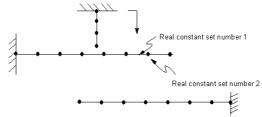


图9-23 在双边梁接触中应用不同的实常数

命令: R

RMODIF

GUI: Main menu>Pneprocessor>Real Constants

接着就是在对应的接触对之间生成接触单元。

命令: GCGEN

GUI: Main Menu>Preprocessor>Create>Elements>Node to Surf

对生成点-面的接触单元的几点提示:

- 一般来说,生成的接触单元不需超过所需要的2~3倍。使用"限制半径(RADC)"或"生成的单元数(NUMC)"选项来限制生成的接触单元数。如果生成的接触单元数超过所需的10或100倍,则会极大增加计算时间(100%或更多),同时也需要大量的硬盘空间。
- 进行接触分析时,建议在接触面上使用无中节点的单元。
- 对于梁或壳单元,需要通过"目标面"(Tlab)选项来指定单元的那一边是目标面。
- 对于卷曲的(非平面)目标面,使用CONTAC49的"基本形状"(Base shape)选项来指定单元的基本形状是三角形。这个选项能使目标单元较好地代表目标面。
- 每次在新的接触对之间生成接触单元时,都指定一个新的实常数号。即使接触单元的实常数值没有改变。

9.5.2.3.1 对称与不对称接触单元生成

用户可以选择生成对称的或反对称的接触单元。用一个简单的 GCGEN 命令定义一对接触面, 生成反对称的接触模型。在这种情况下,一个面是接触面,而另一个是目标面。另外,用户可以使 用两个 GCGEN 命令,将两个面都定义成既是目标面又是接触面。这种情况叫作对称接触模式。

例如,考虑两个面A和B。在第一个 GCGEN 命令中,将面A指定为接触面,面B指定为目标面; 而在第二个 GCGEN 命令中,将面A指定为目标面,而将面B指定为接触面。

下面是在前处理中生成接触单元的标准命令流输入列表:

NSEL, S, NODE, ... ! Select a set of nodes on contactor surface
CM, CONTACT, NODE ! Selected nodes form a component named CONTACT
NSEL, S, NODE, ... ! Select a new set of nodes, on target surface
CM, TARGET, NODE ! New selected nodes form component TARGET

NSEL, ALL

GCGEN, CONTACT, TARGET ! Generate contact elements between contactor and

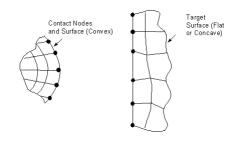
! target surfaces (asymmetric contact)

GCGEN, TARGET, CONTACT ! Note that component surfaces have been reordered-

! this 2nd GCGEN creates a symmetric contact

一般来说,对称接触模型是较好的方法,因为它不需要特别考虑哪个面是接触面,哪个面是目标面。相反,反对称接触模型在区分目标面和接触面时需要遵守以下规则:

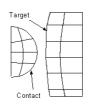
• 如一个面的接触部分是平的或凹的,而另一个面的接触部分是尖的或 凸的,则应该将平/ 凹面作为目标面:



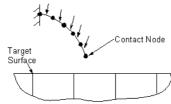
• 如两个接触面都是平的,则可以任意选择;



• 如两个接触面都凸的(但不是尖锐的),应该将两个面中较平的作为目标面;



• 如一个接触部分有尖边,而另一个没有,则有尖边的面应作为接触面。



• 如两个接触部分有尖边,或表面是波浪形(凹凸交替),则目标面的选择取决于接触后表面的形状。在这种情况下,对称接触模型较好。



9.5.2.3.2 观察接触单元

一旦用户建立了接触单元,这些单元在触面节点上用星号表示,而在目标面节点上用线(2D)或面(3D)表示。

为了在显示图形中删除这些符号,可以在建立显示前,从激活集中反选择接触单元。 命令: ESEL

GUI: Utility Menu>Select>Entities

用户可以收缩目标面上的线(或面)以便更清楚地观看。

命令: /SHRINK

GUI: Utility Menu>PlotCtrls>Style>Size and Shape

为了在图形上确定那个接触节点(星号)与那个目标面相关联,选择接触节点中的一个十分有限的子集,然后显示之。如果用户想看看起来象"真实"接触单元的某些东西,可临时改变接触单元的 TYPE 到一个几何上相容的标准单元(如 PLANE2)—仅为了便于观察。

命令: EPLOT

GUI: Utility Menu>Plot>Elements

9.5.2.3.3 初始配合问题

用户可以用下列几种不同方法,来模拟初始界面接触(如过盈配合):

- 可以用过盈配合部件,扩展之,然后逐渐收缩之—通过一系列的静力结构荷载步调整其温度—来模拟过盈配合部件实际温度历程;
- 可以生成部件已经接触的模型。也就是说,在初始未变形的几何位置上生成所有部件,以 使单元实际上彼此重迭。在这种方法中,可用应用一个荷载步来分析结构,并打开线性搜 索。对于许多界面分析,人们发现需要应用这个选项才能收敛。

命令: LNSRCH, ON

GUI: Main Menu>Preprocessor>Loads>Nonlinear>Line Search

- 可以生成部件已经接触的模型,应用弱初始值作为一般接触刚度(实常数 KN)。然后逐渐 地增加 KN 值到一个近似值(用新的 R 命令在几个荷载步上重新定义)。也可显式地定义 切线刚度,见前面的/警告7。
- 如果初始界面大于典型的目标单元的长度,则应指定实常数 PINB 使之稍大于界面。这将确保检测到这个初始渗透。

9.5.2.4 设置单元关键字和实常数

使用点-面的接触单元时,程序使用四个单元关键字和几个实常数来控制接触行为。参见《ANSYS Elements Reference》。

9.5.2.4.1 单元关键字:

CONTAC48 和 CONTAC49 使用下面的单元关键字:

- KEYOPT(1): 选择正确的自由度(包含或不包括 TEMP);
- KEYOPT(2):选择罚方法或罚+Lagrange方法;
- KEYOPT(3): 选择摩擦类型; 无摩擦、弹性库仑摩擦或刚性库仑摩擦;
- KEYOPT(7): 选择接触时间步 预测控制。

命令: KEYOPT

ET

GUI: Main Mneu>Pneporcessor>Element Type>Add/Delete

9.5.2.4.2 摩擦类型

用户需要选择一种摩擦类型。点—面接触单元支持弹性库仑摩擦和刚性库仑摩擦。弹性库仑摩擦允许存在粘合和滑动状态。粘合区被当作一个刚度为 KT 的弹性区来处理。在变形期间当接触面是粘合而不是滑动的时候,选择这种摩擦类型较好。刚性库仑摩擦仅仅允许有滑动摩,接触面不能粘合。仅仅在两个面处有持续的相对滑动时,才选择这种摩擦类型。如果运动停止或逆转,将会遇到收敛性的问题。

9.5.2.4.3 罚与罚+Lagrange方法

协调控制方法保证一个面不会渗透进入另一个面超过某一容许量。这可以通过罚方法或罚+Lagrange方法来实现。在这种方法中,在直到接触节点渗透进入目标面到指定的实常数 TOLN 之前,力加在接触节点上。

9.5.2.4.4 热—结构结触

如果两个温度不同的物体彼此接触,在它们之间将会发生热传递。用户可以联合这种点—面接触单元和热—结构耦合场单元,来模拟这种情况下的热传导(对不关心应力的分析,可用标准的热单元来给系统的固定部分建模)。其 KEYOPT 设置如表9-2所示。这些单元的热和结构自由度都应被

激活(必须为实常数 COND(接触传导率)定义一个值,以模拟接触界面之间的热量交换)。

表9-2 单元类型和热-KEYOPT设置

维数	接触单元和热-结构KEYOPT设置	耦合场实体单元和热-结构KEYOPT设置
2-D	CONTAC48; $KEYOPT(1) = 1$	PLANE13; $KEYOPT(1) = 4$
3-D	CONTAC49; $KEYOPT(1) = 1$	SOLID5; $KEYOPT(1) = 0$
		$SOLID98^{[1]}; KEYOPT(1) = 0$

[1]对于SOLID98单元,必须删除接触面上的中节点。

9.5.2.4.5 接触预测

CONTAC48 和 CONTAC49 单元对控制接触时间预测提供了三个选项:

- 无预测:当自动时间步激活,并允许小的时间步时,大多的静力分析使用此选项。如果允许一个足够小的时间步,自动时间步长二分特征将会把步长减小到必要的大小。然而,二分法并不是一种需要进行时间预测的有效方法。对在加载过程中,有不连续接触区域的那些问题,时间步 预测是必须的。
- 合理的时间步:为了保持一个合理的时间/载荷增量,需要在接触预测中选择此项。此项 在时间步长预测器正在完好运行的静态分析中,或在连续接触(滚动接触)的瞬态分析中是 有用的。如果接触点的位置随时间的变化是一个非线性函数,那么线性时间步长预测不可 能是有效的。虽然如此,通常其它的非线性特征能够保持小时间步,以使线性时间步长预 测能够提供很好的预测效果。
- 最小的时间/载荷增量预测。无论什么时候,当接触状态发生改变时,预测会取一个最小的时间/载荷增量。这个选项在碰撞和断续接触的瞬态分析中是有用的,或者用于由于线性预测不起作用而导致的第二个选项无用时。为了更有效的进行计算,仅仅对处于初始接触状态的那些接触单元使用此选项。

9.5.2.4.6 实常数

CONTAC48 和 CONTAC49 使用下面的实常数:

- KN 定义法向接触刚度;
- KT 定义粘合接触刚度;
- TOLN 定义最大的渗透容差;
- FACT 定义静摩擦与动摩擦的比值;
- TOLS 定义一个小的容差以增加目标面的长度;
- COND 定义接触传导率;
- PINB 定义pinball半径。

这些选项在下面诸节还要讨论,并参见《ANSYS Elements Reference》。

命令: R

GUI: Main menu>Preprocessor>Real Constants

9.5.2.4.7 法向刚度

必须给接触刚度 KN 提供一个值(对 KN 没有缺省值)。KN 应该足够大,以不会引起过大的渗透,但又不应该大到导致病态。对大多的接触分析,应该按下面的公式来估计 KN 值:

KN≈fEh

其中,f是控制接触协调性的因子。这个因子通常在 0.01~100 之间,通常取f=1 作为良好的开始 值。E是杨氐模量(如果接触发生在两种不同的材料间,考虑使用杨氏模量较小者)。h是特征接触"长度",这个值取决于问题几何形状。

对于3维形状,h应该等于典型的接触目标长度(也就是目标面积的平方根)或者典型的单元尺寸。对大多数柔体-柔体接触问题,通常发现处于接触状态的平均单元尺寸几乎等于目标长度。当目标长度与典型的单元尺寸相差很大时,应该使用典型的单元尺寸来作为h值。

对于2维平面应力或应变问题,如为平面应变或平面应力(无厚度输入者)问题,h=1;如为有厚度输入的平面应力问题,h=厚度。

对于2维轴对称问题, h=所期望接触发生位置处的平均接触半径。

当十分柔的结构(特别是在梁或壳的模型中), KN 的估算值应该在两个接触体上进行一个简单

的迭代分析来计算局部接触刚度,如图9-24所示。

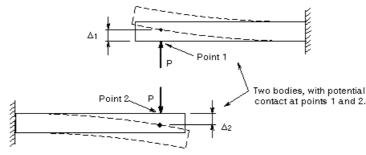


图9-24 计算十分柔的结构的接触刚度

$$KN = P/(|\Delta_1| + |\Delta_2|)$$

式中P=作用在接触位置的点载(点1和点2); $\triangle 1$, $\triangle 2$ =点1和点2的节点位移。

在计算 KN 时,使用体系的实际边界条件(就是说 KN 不是Hertz接触刚度,它考虑了整个结构的柔度)。

9.5.2.4.8 粘合刚度

弹性区的大小取决于用户使用的粘合刚度值(KT)。与法向刚度KN一样,用户可能想使用一个较大的粘合刚度,但不要大到影响收敛性,一般来说,粘合刚度KT 应该比法向刚度 KN 小 $1\sim3$ 个量级。

如果用户想模拟弹性库仑摩擦,程序将会使用到 KT 的值。程序使用KT=KN/100作为缺省值。然而与 KN 一样,如果 KT 太大,可能会招致病态。因此,在大多数情况下,KT 的缺省值可能不是对所有情况都适合。

9.5.2.4.9 渗透容差

当使用罚+Lagrange方法时(KEYOPT(2)=1),应用表面法向给定的绝对容差(TOLN),来决定是否满足渗透协调性。如果接触线两侧,接触节点在 TOLN 的范围内,则认为满足接触协调性。TOLN 的值必须为正值,单位为长度。

TOLN 值一般约为表面单元尺寸的1%。如果将 TOLN 值定得太小,可能要浪费大量的计算时间(事实上,可能永远不会收敛)。

9.5.2.4.10 静摩擦与动摩擦的比

如果 KEYOPT(3)=0,不考虑两个表面间的摩擦,因而不需要实常数 KT 和 FACT。当 KEYOPT(3)=1 或 2 时,需要输入摩擦系数 MU。它可以是温度的函数。动摩擦系数直接采用 MU,而静摩擦系数是 FACT*MU。

9.5.2.4.11 目标长度

如果两个接触面上的节点是一一对应的,或者在靠近对称边界上有接触产生时,解可能在接触节点目标面上的两个邻近单元之间来回摆动,导致求解振荡。当发生这种情况时,可能会极大地增加求解时间。为了克服这个问题,可以给实常数 TOLS 指定一个值,这将在目标面的两个邻近单元之间建立一个"缓冲区"。TOLS 值是一个特征接触长度的百分比,那就是说 TOLS=0.5 将建立一个宽度为接触长度的 0.5% 的缓冲区。

9.5.2.4.12 热传导率

对热-结构接触的问题,为了描述通过接触界面的传导率,需要定义一个接触传导率[实常数 COND,单位是热量/(时间*温度)]。通过接触界面的热传导率,通常小于接触体自身的传导率。因为从微观上说,接触表面是不光滑的,只有整个接触面的一个小百分比面积处于真正的接触中,因而导致传导率的降低。剩下的接触界面为微观的流体填充物,这些物体比实体的热传导小得多。

因此,通常不能用接触体的热传导率,来描述接触界面的热传导率。对理想热接触(在接触面上没有温度降低),将使用一个大的 CONT 值,可能为 100kA/L量级,k是接触体的传导率,A和L是接触的单元的面积和长度。通常情况下,考虑到不理想的热传导,应该给 COND 输入一个小得多的

值(可以参考一些可靠的手册来得到这些值)。对于ANSYS的应用,应当随单元网格的粗细,来上下调整 COND 值。

9.5.2.4.13 Pinball半径

实常数 PINB 指定了用于确定接触节点是接触还是将近接触的 Pinball 半径。缺省值是由程序根据目标的尺寸计算。用户可能需要指定自己的 Pinball 半径,如果模型中初始界面大于目标长度的话(否则,这个初始界面将不会检测到,因为它在 Pinball 之外)。用户也可能需要指定之,如果接触节点通过接触面的距离大于目标长度。注意应用太大的半径,会增加接触搜索时间。

9.5.2.5 加上必要的边界条件

现在可以施加所需的边界条件。参见本书前面的有关章节的内容。

值得注意的是,在分析期间如果两个物体分开,那么刚度矩阵变得奇异和不可求解(在静力分析中)。这是因为有限单元最少需要一些刚度来把所有单元联结起来,以及足够的位移约束来阻止刚体运动。如果是刚度矩阵变得奇异,程度将会给出"Pivot ratio"警告信息。但程序仍会设法求解,最终会出现一个"negative pivot"或"Dof Limit exleeded"的信息。

为了克服这个问题,采用下面的某种建议:

- 建模时,使接触体处于恰好接触的位置;
- 使用给定位移来将它移到某个位置;
- 使用弱弹簧把两个分开的物体连起来;
- 使用动态方法求解。

9.5.2.6 定义求解选项

接触问题的收敛性与特定问题有关。下面列出了一些典型的、在大多数点-面的接触分析中推荐采用的选项:

- 1、使用 KEYOPT (7) 来设置合适的时间步长。参见 § 9.5.2.4.5。
- 2、时间步长必须足够小以抓住适当的接触区域。如果时间步长太大,接触力的光滑传递将被破坏。设置精确、可信的时间步的方法是打开自动时间步长。

命令: AUTOTS, ON

GUI: Main Menu>Solution> Sol'n Control:Basic Tab
Main Menu>Solution>Unabridged Menu>-Load Step Opts-Time/
Frequenc> Time - Time Step
Main Menu>Solution>Unabridged Menu>-Load Step Opts-Time/
Frequenc> Time and Substps

3、设置一个合适的平衡迭代次数。在 SOLCONTROL, 0N 时,缺省为 $15\sim26$ 之间,取决于问题的物理特性。

命令: NEQIT

GUI: Main Menu >Solution > Sol'n Control:Nonlinear Tab Main Menu >Solution >Unabridged Menu>-Load Step Opts-Nonlinear > Equilibrium Iter

4、除在大转动分析外,打开时间步长预测。

命令: PRED

GUI: Main Menu >Solution > Sol'n Control:Nonlinear Tab Main Menu >Solution >Unabridged Menu>-Load Step Opts-Nonlinear> Predictor

5、设置Newton-Raphson选项到"FULL",同时打开自适应下降因子。

命令: NROPT, FULL, ON

GUI: Main Menu>Solution>Unabridged Menu> Analysis Options

- 6、在接触分析中,许多不收敛是由于使用了太大的接触刚度(实常数 KN)。请按本节前面的论述对接触刚度进行初始估算。如果是这样得到的接触刚度不收敛,则减少接触刚度,然重启动(此时必须显式地定义切向刚度,见下面的[警告])。
- 7、相反,如果在接触分析中发生太大渗透,则是使用了一个太小的 KN 值。在这种情况下,应当用性的 R 命令,在重启动分析中的数个荷载步上重新定义合适的接触刚度(此时必须显式地定义切向刚度,见下面的[警告])。

[警告]虽然可以改变接触刚度值(实常数 KN),但在荷载步之间不能改变其他任何实常数。如打算在一个重启动中(或在一个荷载步到另一个荷载步)改变 KN 值,则不能允许切向(或"粘合")接触刚度(实常数 KT 值)由缺省决定,因为程序在接触刚度改变时,将试图重定义切向刚度。每当在所有荷载步中改变接触刚度来保持切向刚度的协调时,用户必须显式定义切向刚度。

9.5.2.7 求解

求解过程与其它分析过程相同。按下面的步骤来求接接触问题。

1、保存数据库到一个文件。

命令: SAVE

GUI: Utility Menu>File>Save As

2、开始求解。

命令: SOLVE

GUI: Main Menu>Solution>-Solve-Current LS

- 3、如果需要,定义多个荷载步。参见本书前面有关内容。
- 4、退出求解程序

命令: FINISH

GUI: Close the Solution menu.

9.5.2.8 查看结果

接触分析的结果包括位移、应力、应变、反力、和接触信息(如接触压力、滑动等)。可以采用一般后处理器POST1,或时间历程后处理器POST26来查看结果。

接触单元的输出量包括:

- 单元的现在状态(STAT)和过去状态(OLDST):分开(没有接触);接触和粘合状态;接触滑动状态。粘合=1,滑动=2或-2,分开=3或4。
- 两个表面间的距离(GAP)。如果是正值,那么两个面是分开的(STAT=3或4);如果是负值则代表渗透量(STAT=1或2)。
- 法向力 F_n (FN)。
- 滑动力 F_s (FS)。也输出3D接触的表面(单元)坐标系上的力分量。

请记住在POST1中,一次只能处理一个子步,并且该子步的结果必须已写到 Jobname. RST 中 (荷载步选项命令 OUTRES 控制哪个荷载步的结果写到 Jobname. RST)。

9.5.2.8.1 注意事项

- 1、在 POST1 中查看结果时,数据库库必须包含与求解时相同的模型;
- 2、必须存在结果文件(Jobname. RST)。

9.5.2.8.2 在POST1中查看结果

- 1、从输出文件(Jobname. OUT)检查是否在所有荷载步上都收敛。
- 如否,用户可能不想进行结果后处理,而是想找出收敛失败的原因。
- 如是,进行后处理。

2、进入定POST1。如果模型不在当前数据库上,可用 RESUME 命令恢复之。

命令: /POST1

GUI: Main Menu>General Postproc

3、读入合适的荷载步和子步的结果。可通过荷载步和子步或时间来判别。

命令: SET

GUI: Main Menu>General Postproc>-Read Results-load step

4、应用下面所述的任何选项来显示结果。重要的是要对用户所指定的所有接触区域进行检验。是否由于没有接触说明而出现任何部件的重迭呢?在用户显示了接触区域后,认真检查重迭。如果看不见,则接触刚度也许不是太低。列出接触渗透值(GAP),以便进一步检验渗透值是否合理。

• 显示变形形状

命令: PLDISP

GUI: Main Menu>General Postproc>Plot Results> Deformed Shape

• 等值线显示

命令: PLNSOL

PLESOL

GUI: Main Menu>General Postproc>Plot Results> -Contour Plot-Nodal Solu

Main Menu>General Postproc>Plot Results> -Contour Plot-Element Solu

应用这些选项来显示应力、应变或其他项的等值线。显示接触应力分布并检验其光滑程度。跨过任何下层单元的梯度不能太严重。如果相邻单元存在不同的材料行为(如存在塑性、多线性弹性材料特性,有不同的材料类型,与杀死或激活单元邻近时,就会发生这种情况)。应该避免结果中的应力平均错误。选择逻辑(见《ANSYS Basic Analysis Guide》)提供了避免这种错误的一个方法

用户也可以显示单元表和线单元数据的等值线:

命令: PLETAB

PLLS

GUI: Main Menu>General Postproc>Element Table> Plot Element Table
 Main Menu>General Postproc>Plot Results> -Conour Plot-

Line Elem Res

应用 PLETAB 命令来显示单元表数据等值线,应用 PLLS 命令来显示线单元数据的等值线。

列表

命令: PRNSOL (节点结果)

PRESOL (单元-单元结果)

PRRSOL (反力)

PRETAB

PRITER (子步总和数据),等

NSORT

ESORT

GUI: Main Menu〉General Postproc〉List Results〉 Nodal Solution
Main Menu〉General Postproc〉List Results〉 Element Solution
Main Menu〉General Postproc〉List Results〉 Reaction Solution
在列表之前,应用 NSORT 和 ESORT 命令来排序。

• 动画显示

可以用动画显示接触结果。

命令: ANTIME

GUI: Utility Menu>PlotCtrls>Animate>Over Time

• 其他功能

在 POST1 中,还可用其他许多后处理功能,如把结果映射到路径上,报告定量列表,等等。参见《ANSYS Basic Analysis Guide》。但对于非线性分析来说,一般不能进行荷载组合。

9.5.2.8.3 用POST26进行后处理

可以应用时间历程后处理器 POST26 来查看非线性结构的时间-历程响应。应用 POST26 来比较 ANSYS 的变量。例如,可用图形显示一个节点的位移-作用荷载的曲线,也可以列出一个节点的塑性应变-TIME 曲线。典型的 POST26 后处理过程可按如下步骤来进行:

- 1、检验输出文件(Jobname. OUT)是否在所有需要的荷载步上收敛。不应该把设计建立在不收敛的结果上。
 - 2、如果解收敛,则进入POST26。如果模型不在当前数据库,可用 RESUME 命令恢复之。命令: /POST26

GUI: Main Menu>TimeHist Postpro

3、定义在后处理阶段要用的变量。**SOLU** 命令将引起不同的迭代和收敛参数被读入数据库,用户可在后处理过程中结合这些内容。

命令: NSOL, ESOL, RFORCE

GUI: Main Menu>TimeHist Postpro>Define Variables

4、变量的图形显示或列表

命令: PLVAR(图形显示变量)

PRVAR

EXTREM(列表变量)

GUI: Main Menu>TimeHist Postpro> Graph Variables
Main Menu>TimeHist Postpro> List Variables
Main Menu>TimeHist Postpro> List Extremes

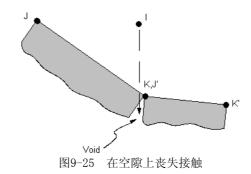
5、其他功能

在 POST26 还有其他功能,参见《ANSYS Basic Analysis Guide》§6。

9.5.2.9 使用单元CONTAC26

CONTAC26 是 ANSYS 的点-刚性面接触单元。使用 CONTAC26 时,需注意以下几点:首先,建立刚性目标面。记住:

- 这种单元是通过总体X-Y平面上的3个节点来定义的,可用于2维平面应力、平面应变和轴对称问题。参见《ANSYS Elements Reference》。
- 节点I叫作接触节点,通常连到有限元模型的表面上。
- 节点J和K组成目标面,这用来表示一个刚性面。注意传递到这个面上的荷载对反力无贡献
- 目标面的形状可以是直线、凹形圆弧或凸形圆弧(由实常数控制)。
- 当目标面的形状是凹形或不连续时,在接触面上将会有空隙。当接触节点I移进一个空隙时,就会发生丢失接触的现象。见**图9-25**。



然后,建立可变形接触面。只能使用直接生成法。

命令: E

GUI: Main Menu>Preprocessor>Create>Elements>Thru Nodes

用户还需要控制刚体目标面的运动。如果不是显式的约束,目标节点并不处理成固定。但是,目标节点可以承受刚体运动(即它们可以被推入到柔性的有限元模型)。虽然这样,目标节点从来不是柔性的有限元模型的一部分。如在这些节点之间检测到柔体运动,ANSYS 将发出警告。

其余的步骤,与前面讨论的点-点接触单元相同。

9.6 点一点的接触分析

可以应用点-点接触单元来模拟点-点接触(柔体-柔体或刚体-柔体接触)。此外,可以应用这些单元来表示两个面之间的接触,在各个面上相对的节点之间指定各自的点-点接触。这个用法需要相对二个面上的节点在几何上匹配,而且忽略二个面之间相对滑动。此外,两个面的挠度(或转角)必须保持为小量。

最常用的点-点接触单元示如图9-26。

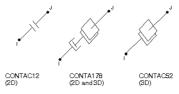


图9-26 点-点接触单元

按照CPU求解时间,上述单元是所有接触单元中最简单和开销最小的。当条件符合这些单元的应用时,它们是模拟各种接触情况的有效工具。CONTA178 单元比 CONTAC12 和 CONTAC52 单元提供了更多的特性,应用余地也更大。下面列出 CONTA178 单元可用的特性:

- 更多的接触算法,包括 Largange 法(KEYOPT(2));
- 半自动的接触刚度(实常数 FKN-FKS):
- 定义接触模的余地更大;
- 更多的接触行为(KEYOPT(10));
- 有摩阻的圆柱形间隙(KEYOPT(4)=4);
- 阻尼(实常数 CV1, CV2)

注意--CONTA178 只支持弹性Coulomb磨擦行为。对于刚性Coulomb摩擦行为,应用 CONTAC12 和 CONTAC52 单元。

点-点接触分析方法,与§9.5所述的点-面接触单元相似。下面论述典型的点-点接触分析的步骤。

§ 9.6.1 建立几何实体及分网

点-点接触单元在节点上传递力(请比较面-面接触单元通过高斯点传递压力)。这一特性限制这

种单元只能应用于低阶单元。

在模型变形时,用户必须判断那里会发生接触。可能发生接触的二个面上的节点必须对齐。一旦用户判别出潜在接触面,以及建立了足够的网格后,就可以建立接触单元了。

§ 9.6.2 生成接触单元

可以用二种方法生成点-点接触单元:

1、应用直接生成法。

命令: E

GUI: Main Menu>Preprocessor>Create>Elements>Thru Nodes

2、应用 EINTF 命令自动在重合节点或偏离节点生成接触单元。这将在下面讨论。

§ 9.6.2.1 在重合节点自动生成接触单元

如果二个实体"刚好接触",则可以应用 EINTF 命令自动生成接触单元 (Main Menu>Preprocessor>Create>Elements>At Coincident Nodes)。只有在第一个参数 (TOLER) 设置的容差内的节点才看作是重合节点。如果用户希望对节点集的一个子集检查是否重合,首先要应用 NSEL 命令选择你想检查的所有节点。

§ 9.6.2.2 在偏离的节点上自动生成接触单元

如果二个实体分开一个间隙,则可用 EINTF 命令通过指定在座标系 KCN 中的节点位置增量 (DX, DY, DZ)来建立接触单元 (Main Menu>Preprocessor> Create>Elements>Offset Nodes)。

如果设置 KPOT=1,属于所建立的接触单元上的节点旋转进入座标系 KCN。例如,**图9-27**示出了2根同心圆管(其中有间隙)之间的接触。在这个例子中,KCN 可以是在以0点为中心的柱座标,而且 DX 应设置为 \triangle (\triangle \pm TOLER)。

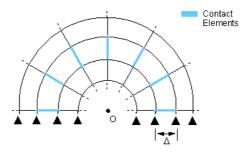


图9-27 2根同心圆管间的接触

§ 9.6.2.3 节点顺序

在确定接触法向时,节点顺序可能相当关键。用户可以用[EINTF,,,LOW]或[EINTF,,,HIGH]命令来控制节点顺序。在用 LOW 参数时,2节点单元从最低节点号到最高节点号生成。在用 HIGH 参数时,2节点单元从最高节点号到最低节点号生成。为了检查接触法线方向,应用[/PSYMB,ESVS]命令。如用户发现顺序不对,可用[EINTF,,,REVE]使之反转过来。为了确定那个面上包含节点I,应用下列的命令:

ESEL, , ENAME, , 178

NSLE, , POS, 1

ESLN

NSLE

EPLOT

§ 9.6.3 定义接触的法线方向

接触法线方向在用 CONTA178 单元进行接触分析时是最重要的问题。缺省[KEYOPT(5)=0 和 NX, NY, NZ = 0]时, ANSYS 将根据节点I和J的初始位置来计算接触法线方向, 节点J相对节点I的正向

位移(在单元座标系)使间隙打开。然而,在下述条件下,用户必须指定接触法线方向:

- 节点I和J有相同的初始座标;
- 如果模型有一个初始界面条件,其中下层单元的几何重迭;
- 如初始张开的间隙距离太小。

在上述情况下,节点I和J的顺序就很关键。正确的接触法向一般从节点I指向节点J,除非接触有初始重迭。

可以利用实常数 NX, NY, NZ(与总体座标系的方向余弦)或单元的 KEYOPT(5)来指定接触法向。下面列出 KEYOPT(5)的各种选项:

1) KEYOPT(5)=0

根据实常数 NX, NY, NZ, 或在 NX, NY, NZ 未定义时根据节点位置,来定义接触法向。对于二维接触, NZ=0。

2) KEYOPT (5)=1(2, 3)

接触法向指向这样一个方向,按节点I和J在节点座标系上的X(Y, Z)轴的平均方向余弦。节点I和J的方向余弦应当十分接近。这个选项可为 NORA 和 NORL 命令支持,这二个命令把节点座标系的X轴旋转到指向实体模型的表面法向。这些命令的菜单如下:

Main Menu>Preprocessor>Move/Modify>Rotate Node CS -

To Surf Normal>On Area

Main Menu>Preprocessor>Move/Modify>Rotate Node CS -

To Surf Normal>On Lines

Main Menu>Preprocessor>Move/Modify>Rotate Node CS -

To Surf Normal>With Area

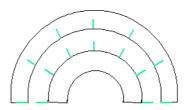


图9-28 2个同心圆管之间的接触

3) KEYOPT (5) = 4(5, 6)

接触法向指向由 ESYS 命令定义的单元座标系的X(Y,Z)。如应用这一选项,要确保由 ESYS 命令指定的单元座标系是直角坐标系。

注意--对于 CONTAC12, 可以用实常数 THETA 定义接触面的方向。对于 CONTAC52, 可以应用实常数 NX, NY, NZ。

§ 9.6.4 定义初始界面或间隙

在用 CONTA178 单元时,可以从 GAP 实常数加上节点位置(在接触法向上的节点I到J的矢量的投影)来自动计算间隙大小。这是缺省(KEYOPT (4)=0)情况。这意味着如果希望初始间隙仅由节点位置决定,则要设置KEYOPT (4)=0,以及实常数 GAP=0。

如果 KEYOPT(4)=1,则初始间隙仅根据实常数 GAP(即忽略节点位置)决定。可用负的间隙来模拟初始界面。

用户可以用 KEYOPT(9)=1 来使初始界面呈斜坡。但这一特性不被 CONTAC12 和 CONTAC52 单元支持。注意 CONTAC52 单元的实常数 GAP 与 CONTAC12 单元的实常数 INTF 相反,后者在界面上定义。而且 CONTAC12 和 CONTAC52 单元的 KEYOPT(4)也与 CONTA178 不同。

§ 9.6.5 选择接触算法

对于 CONTA178 单元,用户可选择四种不同的接触算法:

- 纯 Lagrange 乘子法:
- 接触法向的 Lagrange 乘子,摩擦方向(切向)上的罚;
- 增加的 Lagrange 方法;
- 纯罚方法。

CONTAC12 和 CONTAC52 仅提供纯罚方法,这时用户必须指定接触刚度。法向刚度 KN 应当基于接触面的刚度。然而,如选择 CONTA178 的纯罚方法或增加的 Lagrange 方法,则为接触法向和切向刚度提供了"半自动"设置。

ANSYS 提供一个缺省的法向刚度 FKN(基于弹性模量 E 及下层单元尺寸)。FKN 和 FKS 是系数。如果用户想引入 FKN 和 FKS 绝对值,应用负值。

§ 9.6.6 施加必要的边界条件

现在可象其他ANSYS分析一样,施加必要的边界条件。参见本书前面有关章节。

在应用 Lagrange 乘子法时,请小心不要过约束。所谓过约束,是指在一个节点上的约束与相同节点上自由度指定边界冲突的情况。下面**图9-29**说明了这种情况。

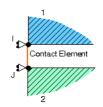


图9-29 过约束的接触问题示例

节点I和J在X方向固定。在2个实体接触,或定义了绑定接触或粗糙摩擦时,这个模型就是过约束的。如果接触状态是"粘合",也会发生过约束。在这种情况下,X方向上的约束重复,将引起过约束。

"Zero Pivot"和"Numerical Singularity"警告信息表示模型过约束。过约束可能引起收敛困难和/或不正确的结果。可以通过改变接触定义和边界条件来避免这一问题。

§ 9.6.7 定义求解选项

接触问题的收敛性强烈地取决于特定问题。下面所列的选项具有典型性,推荐应用于大多数点-点接触问题分析:

- 1、应用 KEYOPT (7) 设置合适的自动时间步,见§ 9. 5. 2. 4. 5。缺省时**SOLCONTROL** 命令关闭这一选项。
- 2、时间步必须足够小,以体现适当的接触区域。如果时间步太大,可能中断接触应力的光滑传递。设置精确时间步的一个可靠方法,是打开自动时间步功能。缺省时,SOLCONTROL 命令打开这一选项。

命令: AUTOTS, ON

GUI: Main Menu>Solution> Sol'n Control:Basic Tab

Main Menu>Solution>Unabridged Menu>-Load Step Opts-

Time/Frequenc> Time - Time Step

Main Menu>Solution>Unabridged Menu>-Load Step Opts-

Time/Frequenc> Time and Substps

3、按合理时间步数设置平衡方程数。在[SOLCONTROL,0N]时,这个命令缺省为 $15\sim26$ 次迭代(取决于问题的物理特性)。

命令: NEQIT

GUI: Main Menu >Solution > Sol'n Control:Nonlinear Tab Main Menu >Solution >Unabridged Menu>-Load Step OptsNonlinear > Equilibrium Iter

4、打开预测-修正选项,除非预期有大转角。

命令: PRED

GUI: Main Menu >Solution > Sol'n Control:Nonlinear Tab Main Menu >Solution >Unabridged Menu>-Load Step Opts-Nonlinear > Predictor

5、把 Newton-Raphson 选项设为 FULL,即自适应下降打开。

命令: NROPT, FULL, , ON

GUI: Main Menu>Solution>Unabridged Menu> Analysis Options

- 6、在涉及摩擦的分析中,对于法向和切向(滑动)运动严重耦合的问题,应用 [NROPT, UNSYM] 可能有用(而且,在摩擦系数 μ >0.2时,需要这么做)。
- 7、支持 [NLGEOM, ON], 但在分析中不修正接触法向。确保沿接触面只发生小转动(除了圆柱间隙选项外)。
- 8、在接触分析中,许多收敛失败是因为应用了太大的接触刚度(实常数 KN)。在初始估算接触 刚度时,要按照本章前面所述的建议。如果这样估算出来的值导致收敛失败,则减小接触刚度并重启动计算(用户必须显式地定义切线刚度,见下面的注解)。
- 9、相反,如在接触分析中发生过渡渗入,可能是因为应用了太小的 KN 值。在这种情况下,可以应用新的 R 命令在一个重启动分析的几个荷载步上逐渐增大接触刚度到一个合适的水平。用户必须显式地定义切线刚度,见下说明。

注意一虽然用户可以改变接触刚度值(实常数 KN),但在荷载步之间,用户不能改变任何其他实常数。因此,如果想在一个重启动(或从一个荷载步到下一个荷载步中)中改变 KN,则不能允许切线(或"粘合")接触刚度值(实常数负担KN)由缺省定义,因为程序将在其后试图重新定义切线刚度(在接触刚度改变时)。每当改变切线刚度来保持在所有荷载步切线刚度的一致值时,用户必须显式地定义切线刚度。

§ 9.6.8 求解

现在可用与任何非线性分析同样的方法求解问题。下面论述点-点接触的分析步骤:

1、把数据库保存为一个文件备份。

命令: SAVE

GUI: Utility Menu>File>Save As

2、开始求解

命令: SOLVE

GUI: Main Menu>Solution>-Solve-Current LS

- 3、如果需要,定义多个荷载步。参见§8。
- 4、离开求解处理器。

命令: FINISH

GUI: 关闭求解菜单。

§9.6.9 检查结果

对这些接触分析结果的后处理,需要应用 ETABLE 命令。参见《ANSYS Basic Analysis Guide》。

可以应用时间-历程后处理器 POST26 来检查非线性结构的荷载-历程响应。还可以应用

POST26 来对ANSYS变量进行比较。例如,可以用图形显示一个节点的位移-荷载响应,也可列出一个节点的塑性应变-相应 TIME。典型的 POST26 后处理步骤如下:

- 1、检查输出文件(Jobname. OUT)是否在所有合适的荷载步上均收敛。不应把设计建立在不收敛的结果上。
 - 2、如果收敛,进入POST26。如果模型不在当前数据库,应用 RESUME 恢复之。

命令: /POST26

GUI: Main Menu>TimeHist Postpro

3、定义后处理理阶段要用到的变更。SOLU 命令将引起各种迭代及收敛参数被读入到数据库, 在这里用户可以结合到后处理中。

命令: NSOL, ESOL, RFORCE

GUI: Main Menu>TimeHist Postpro>Define Variables

4、对变更用图形显示或列表

命令: PLVAR(图形显示)

PRVAR

EXTREM(变更列表)

GUI: Main Menu>TimeHist Postpro> Graph Variables
Main Menu>TimeHist Postpro> List Variables
Main Menu>TimeHist Postpro> List Extremes