



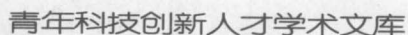
青年科技创新人才学术文库

设备结构安全分析

SHEBEI JIEGOU ANQUAN FENXI

石宪章 黄 明 张世勋 编著

 郑州大学出版社

[illegible]

设备结构安全分析

SHEBEI JIEGOU ANQUAN FENXI

石宪章 黄明 张世勋 编著



 郑州大学出版社

郑 州

图书在版编目(CIP)数据

设备结构安全分析/石宪章,黄明,张世勋编著. —郑州:郑州大学出版社,
2013.9
ISBN 978-7-5645-1552-2

I. ①设… II. ①石…②黄…③张… III. ①工程设备-结构-安全-分析
IV. ①TB4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 184488 号

郑州大学出版社出版发行

郑州市大学路 40 号

出版人:王 锋

全国新华书店经销

河南龙华印务有限公司印制

开本:787 mm×1 092 mm

印张:17.75

字数:420 千字

版次:2013 年 9 月第 1 版

邮政编码:450052

发行部电话:0371-66966070

1/16

印次:2013 年 9 月第 1 次印刷

书号:ISBN 978-7-5645-1552-2

定价:34.00 元

本书如有印装质量问题,请向本社调换



前言 PREFACE

安全涉及人类生产、生活的方方面面,是人们开展一切生产活动的前提。随着工业文明的发展进步,特别是18世纪工业革命以来,工业生产活动采用了复杂的大生产系统和机器设备系统,生产过程中涉及的环境、设备、工艺和操作的危险因素变得更加复杂、隐蔽。人类在利用先进科学技术提高生产力的同时,也面临着日趋严峻、复杂的安全问题,涉及土木、矿业、交通、机电、食品、生物、农业、医药、能源、航空等各个领域,且通常具有不可预知性。在此背景下,20世纪70年代,一门新兴的交叉学科——安全科学与工程应运而生。据不完全统计,目前我国已有75所高等院校开设安全工程本科专业。这些专业主要涉及安全技术和安全管理两个方向,其中,技术的安全是安全生产的根本,而工业设备的安全则是安全技术的基础之一,这是编者编著本书的初衷。

所谓设备结构安全分析,是指针对工业设备的力学性能能否满足使用要求所作出的分析、预测和评估,可以分为设备结构的被动安全分析和主动安全分析。被动安全分析是对已经发生或注定要发生的故障、事故的一种补救措施,而主动安全分析需要利用CAE技术在设备的设计、生产阶段开展安全性预测和评估,将故障隐患从根本上消除或改善。

随着计算机技术的诞生和发展,以及以有限元法为代表的数值理论和求解方法的发展和完善,形成了一批实用、有效的通用或专用CAE软件。其中ANSYS是技术最先进、功能最强大的CAE分析软件工具之一。本书的所有设备结构安全分析案例均以ANSYS 9.0和自主开发的CAE软件Z-MOLD为载体。全书共分10个章节,第1章概述了设备结构安全分析的发展背景和内涵;第2~4章分别介绍了有限元模型的建立、方程的处理和求解以及计算结果的后处理等知识;第5~10章则以具体的工程设备为案例,分别介绍了杆系结构分析、板壳结构分析、三维实体结构分析、传热分析、几何非线性分析和成型/结构一体化分析的基础理论和操作过程。

本书由郑州大学石宪章、黄明和张世勋编写。

本书以安全工程、土木、机械和材料等专业学生的知识为背景编写,参考和借鉴了国内外相关论著和教材。全书理论和实践相结合,力争将深奥理论简洁化、实践操作具体化。本书是针对高等工科院校安全工程专业编写的教材,也可作为土木、机械、材料等专业从事 CAE 分析学习和研究的本科生及研究生的教材或参考书籍。

由于编者水平有限,时间仓促,经验不足,不妥和疏漏在所难免,恳请读者批评指正。

编 者

2013 年 5 月



目 录

CONTENTS

第1章 设备结构安全分析概述	1
1.1 设备结构安全分析简介	1
1.2 ANSYS 基本介绍	2
1.3 ANSYS 环境简介	3
1.4 ANSYS 典型分析过程	6
1.5 ANSYS 结构分析常用单元及选择	7
1.6 ANSYS 单位制	19
第2章 有限元模型的建立	21
2.1 建模基本设置	22
2.2 定义单元类型	23
2.3 定义单元实常数	25
2.4 定义材料属性	26
2.5 几何建模基础	28
2.6 有限元建模基本操作	42
2.7 网格划分	88
第3章 加载和求解	104
3.1 载荷分类	104
3.2 DOF 约束相关操作	105
3.3 集中载荷相关操作	110
3.4 面载荷相关操作	112
3.5 体载荷相关操作	118
3.6 惯性载荷相关操作	124
3.7 施加耦合载荷	126
3.8 载荷步操作	126
3.9 求解	131

第4章 后处理	135
4.1 通用后处理器(POST1)	135
4.2 单元表	147
4.3 时间历程后处理器(POST26)	150
第5章 杆系结构分析	157
5.1 桁架	157
5.2 平面梁	169
5.3 空间梁	178
5.4 有限元分析步骤归纳	186
第6章 板壳结构分析	189
6.1 平板应力(应变)问题有限元分析	189
6.2 平板弯曲问题有限元分析	193
6.3 壳体有限单元法	196
6.4 平板静力分析实例	197
第7章 三维实体结构分析	207
7.1 三维实体结构分析基本理论	207
7.2 三维实体结构分析实例	208
第8章 传热分析	226
8.1 传热有限元方程的建立	226
8.2 单元插值	228
8.3 一阶常微分方程组的数值积分	230
8.4 传热分析实例	230
第9章 几何非线性分析	238
9.1 几何非线性类型	238
9.2 ANSYS 几何非线性分析	243
9.3 屈曲分析	246
第10章 成型/结构一体化分析	254
10.1 注塑成型 CAE 技术	254
10.2 实例分析	258
参考文献	275

第1章

设备结构安全分析概述

1.1 设备结构安全分析简介

安全学科是一门新的涉及面广的综合、交叉学科,而且随着社会的进步,安全科学技术显得越来越重要,越来越受到人们的重视,我国的国家标准已将安全科学技术列为一级学科。

在整个安全科技领域中,机械设备的安全问题非常突出,因机械故障导致的事故层出不穷、形式五花八门。据统计,全世界机械事故占事故总数的1/3左右,所占比重非常大,因此机械设备的安全问题日益受到人们的重视,相应的安全技术得以快速发展。

从安全技术作用的时效性看,它可分为三种类型,见图1.1。

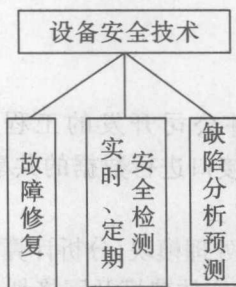


图 1.1 设备安全技术分类

(1)故障修复

故障已经产生并影响使用功能,通过更换或修复受损零配件排除故障。这是一种被动的安全保障措施,费时、费力、付出的代价也最大。

(2)安全检测

故障还未发生或已经产生但不严重,不影响其使用功能,通过专业技术设备,实时或定期进行检测,从检测到的信息分析是否存在机械故障,如果存在故障,进一步确定其产生的部位,然后采取有效措施加以排除。目前国内常用的机械安全检测方法主要有设备故障诊断和设备安全检测两种,主要包括电子和计算机技术、声音与振动测试及分析技术、测量温度技术、油液分析技术、应力与应变测试技术、无损检测技术等。

安全检测在保障设备安全方面起着非常关键的作用,随着制造技术的发展、设备的

结构越来越精密、复杂,对安全检测的依赖程度也越来越高。然而从本质上讲,这也是一种被动的安全措施,因为它只能检测到已发生的故障所表现出来的一些表象、特征,而不能检测出潜在的可能发生而未发生的故障,比如桥梁的共振问题,如何提高共振频率以减少或避免共振发生已不是安全检测所能解决的。

(3) 缺陷分析预测

应用 CAE 技术,在设备制造的设计阶段,根据设计方案,采用计算机模拟技术,分析预测设备在预期工况下存在的缺陷,为及时修改设计方案、保障设备安全提供科学合理的依据。

利用 CAE 技术探索或模拟未知的、未发生的缺陷,这种措施与前两种相比有着本质的区别。前两种都属于被动措施,是对已经发生或注定要发生的故障/事故的一种补救措施,而缺陷分析预测则属于主动防御措施,将故障隐患从根本上消除或改善。仍以桥梁共振问题为例,可以在设计阶段通过计算机模拟、计算出桥梁的共振频率,通过优化设计方案把共振频率调整到不易触发的范围,从而保障桥梁的安全。

目前这种专业 CAE 软件已经普及,在工程实践中起着非常重要的作用,其中 ANSYS 是技术最先进、功能最强大的软件工具之一,在机械、电子、建筑等领域应用广泛,特别是在结构力学分析方面优势明显。

本专业课的主要内容是采用 ANSYS 进行设备结构静力学分析以及 ANSYS 与 Z-MOLD 等 CAE 软件结合进行制品成型及其模具结构的一体化分析。

1.2 ANSYS 基本介绍

ANSYS 是由美国 ANSYS 软件公司开发的工程分析软件,它能与 Pro/Engineer, AutoCAD 等大多数 CAD 软件通过接口进行数据的共享和交换,是现代产品设计中的高级 CAE 工具之一。

ANSYS 主要包括三个部分:前处理模块,分析计算模块和后处理模块。

前处理模块提供了一个强大的实体建模及网格划分工具,用户可以方便地构造有限元模型。

分析计算模块包括结构分析、流体动力学分析、电磁场分析、声场分析、压电分析以及多物理场的耦合分析,可模拟多种物理介质的相互作用,具有灵敏度分析及优化分析能力。

后处理模块可将计算结果以彩色等值线显示、梯度显示、矢量显示、粒子流迹显示、立体切片显示、透明及半透明显示(可看到结构内部)等图形方式显示出来,也可将计算结果以图表、曲线形式显示或输出。

1.2.1 ANSYS 分析基本类型

ANSYS 分析功能主要分为以下 5 大类:

1) 结构分析—分析结构的应力、变形和稳定问题。在有限元分析中,结构是一个广

义的概念,既可以指整体结构(如发动机的机械结构),也可以指局部结构(如发动机的活塞、传动轴等零部件)。结构分析中计算得出的基本结果(节点自由度)是节点位移,其他的一些结果(如应变、应力和反力等)可通过节点位移导出。

2) 热分析—分析系统或部件的温度分布。热分析包括三种基本类型:传导、对流和辐射,每一种类型均可进行稳态和瞬态分析。热分析还可模拟材料固化和熔解过程的相变以及与结构分析结合进行热-结构耦合分析。

3) 流体分析—分析确定流体的流动状态和温度。分析类型可以为瞬态或稳态,分析结果可以是每个节点的压力或者通过每个单元的流率。

4) 电磁场分析—主要用于电磁场问题的分析,如电感、电容、磁通量密度、电场分布、磁力线分布、电路和能量损失等。

5) 耦合场分析—考虑以上两个或多个物理场之间的相互作用。

除此之外,ANSYS 还可以进行断裂、复合材料、疲劳以及 p-Method 等 4 种特殊分析。

1.2.2 ANSYS 结构分析类型

ANSYS 结构分析又可细分为以下七种类型:

1) 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,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。

2) 屈曲分析——用于计算屈曲载荷和确定屈曲模态。ANSYS 可进行线性(特征值)屈曲分析和非线性屈曲分析。

3) 模态分析——用于计算结构的固有频率和模态。

4) 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。

5) 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。

6) 谱分析——是模态分析的推广,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。

7) 显式动力分析——可用于计算高度非线性动力学问题和复杂的接触问题。

1.3 ANSYS 环境简介

启动 ANSYS 后,就可以打开如图 1.2 所示的 ANSYS 9.0 图形用户界面(GUI)。它主要由 7 个部分组成:

1) Utility Menu(实用菜单)。它包含一些在整个分析过程都可能用到的命令,比如文件操作、参数设置、图形显示控制等。

2) Standard Toolbar(标准工具条)。其放置一些常用命令的快捷按钮。

3) Input Window(命令输入窗口)。其允许用户在窗口内输入命令,并能自动提示命令所需的参数信息。

4) ANSYS Toolbar(ANSYS 工具条)。ANSYS 9.0 允许用户自定义按钮来执行一些

ANSYS 命令或者函数,这些按钮是在“ANSYS 安装驱动器:\Program Files\Ansys Inc\v90\ANSYS\apdl”目录下的“start90.ans”文件中定义的,ANSYS 启动时会自动加载该文件。

5) Main Menu(主菜单窗口)。它包括一些基本的 ANSYS 命令,以处理器(Processor)的类型来组织(前处理器,求解器等),具体的命令是否可用与当前操作所处的处理器位置有关。

6) Graphics Window(图形窗口)。其为 ANSYS 的图形显示窗口,交互式图形操作也在此窗口进行。

7) Status and Prompt Area(状态栏)。其显示当前操作的有关提示。

8)另外,ANSYS 9.0 还有一个独立的输出窗口(Output Window),显示 ANSYS 程序运行时所有的文本输出信息,比如命令的响应、注释,警告、错误以及其他的各种消息。在 ANSYS 分析操作过程中,应该随时查看 Output Windows 的信息,检验分析过程是否正确并及时调整。

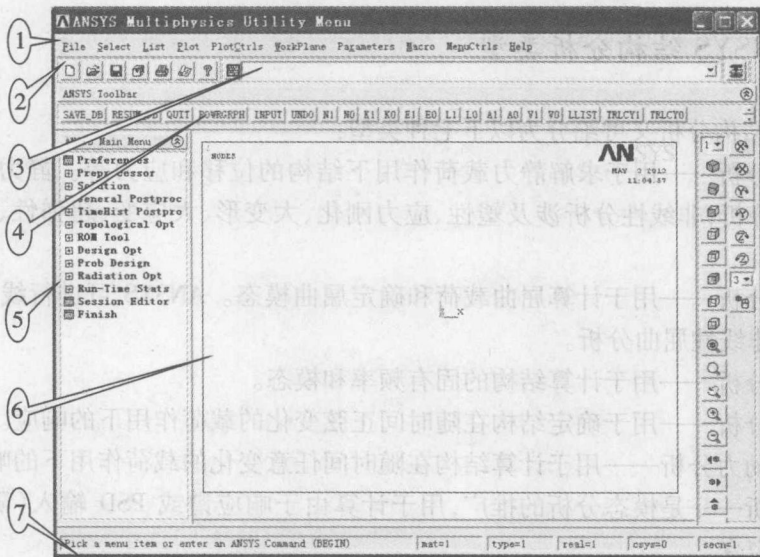


图 1.2 ANSYS9.0 主窗口

1.3.1 实用菜单

实用菜单(图 1.3)包括文件操作、选择、图形控制以及参数设置等命令和选项,共分为十项,在分析过程的任意时刻都可以执行这些命令。每一个菜单栏都包含一个下拉菜单,下拉菜单的每一项对应着不同的操作。

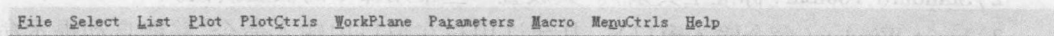


图 1.3 ANSYS 9.0 实用菜单

(1) File(文件)菜单

File 菜单包括一些与文件、数据库操作相关的命令,比如 Clear & Start New 清空当前工作数据库,Save as 将当前数据库另存为一个文件,Resume from 从文件中读取数据到当前数据库等。需要注意的是,有些文件操作命令只能在分析过程的最开始执行,如果不是在这个时候运行此命令,将会弹出对话框询问是否转到分析过程的初始时刻或者取消此命令的执行。

(2) Select(选择)菜单

Select 菜单包含选择命令,可以选择 ANSYS 支持的所有的几何类型(如点、线、面、体以及节点、单元等),不同的选择命令还可以组合起来使用,以实现丰富的选择功能。

(3) List(列表显示)、Plot(图形显示)及 PlotCtrls(图形显示控制)菜单

List 菜单提供的命令可以列出 ANSYS 当前数据库中所包含的所有数据信息(如节点坐标、载荷等),还可以列出当前系统运行的状态等基本信息。

Plot 菜单用于选择在图形窗口显示的内容,可以是几何图元(点、线、面、体)、节点、单元以及其他各种能以图形方式显示的数据。

PlotCtrls 菜单可以用来设定图形显示的形式,比如显示节点时是否同时显示节点编号等。其中 Pan Zoom Rotate 设定图形显示视角,Hard Copy 可以将 ANSYS 图形窗口显示的图形直接存为一个文件。在查看模态形状或者响应等动力分析的后处理过程中,如果借助于 Animate(动画)菜单提供的命令,可以更加直观的得到结构运动的动态过程。

(4) WorkPlane(工作平面)菜单

WorkPlane 菜单用于设定工作平面(比如显示/不显示工作平面、平移或者旋转工作平面等等),还包含关于创建、删除坐标系以及在不同坐标系间切换的命令。

其余的菜单项一般情况下很少用到,这里不予一一介绍。

1.3.2 标准工具条

标准工具条(图 1.4)包含了一些按钮以执行最常用的命令。



图 1.4 ANSYS 9.0 标准工具条

下面分别对各个按钮对应的操作做一简单介绍:

- 1) 开始一个新的分析过程。单击此按钮后,ANSYS 首先保存当前数据库,然后清除当前数据库,开始新的分析过程。
- 2) 打开 ANSYS 文件。如果是数据库(*.DB)文件,ANSYS 将其读入内存,并作为当前数据库;如果是命令流文件(*.lis),ANSYS 按照命令流的格式执行相应的命令。
- 3) 保存数据。将当前分析模型的所有数据存到文件。
- 4) 改变视角对话框。将会调出 Pan-Zoom-Rotate 对话框。

5)  抓图。打开 Image Capture 对话框。

6)  报告生成器。将会打开 ANSYS Report Generation 对话框。

7)  ANSYS 帮助。根据当前上下文提供基于 HTML 文档的帮助。

1.3.3 ANSYS 文件及工作文件名

ANSYS 在分析过程中需要读写文件,文件格式为 jobname. ext,其中 jobname 是设定的工作文件名,ext 是由 ANSYS 定义的扩展名,用于区分文件的用途和类型,默认的工作文件名是 file。ANSYS 分析中有一些特殊的文件,主要有数据库文件 jobname. db、记录文件 jobname. log、输出文件 jobname. out、错误文件 jobname. err、结果文件 jobname. rxx 及图形文件 jobname. grph。

1.4 ANSYS 典型分析过程

ANSYS 有限元法的基本思想是将问题的求解域划分为有限个单元,单元之间仅靠节点相连。单元内部点的未知量可通过对节点的未知量进行插值得到,换句话说,就是可以将求解单元内未知量的问题转化为求解节点未知量的问题,通过将各单元方程组合成总体关于节点未知量的代数方程组,代入定解条件(边界条件和初始条件)可求解节点量。

ANSYS 分析过程包含三个主要的步骤:

1) 创建有限元模型,在前置处理器(General Preprocessor,PREP7)中进行。

①创建或读入有限元模型;

②定义材料属性;

③划分网格。

2) 施加载荷并求解,在求解处理器(Solution Processor,SOLU)中进行。

①施加载荷及设定约束条件;

②求解。

3) 查看结果,在后置处理器(General Postprocessor,POST1 或 Time Domain Postprocessor,POST26)中进行。

①查看分析结果。

②检查结果是否正确。

ANSYS 构架分为两层,一是起始层(Begin Level),二是处理层(Processor Level),包括前置处理器、求解处理器、后置处理器等。这两个层的关系主要是使用命令输入时,要通过起始层进入不同的处理器,比如从起始层进入前置处理器,采用“/PREP7”命令;从前置处理器进入求解处理器,首先要采用“finish”命令退回起始层,再用/SOLU 命令进入求解处理器,但仅用/SOLU 命令也不会出错,ANSYS 会自动先执行“finish”命令。

1.5 ANSYS 结构分析常用单元及选择

ANSYS 提供了很多种单元供用户选择,其中的绝大多数,从简单的杆单元、梁单元到较为复杂的壳单元和实体单元都可用于结构分析。

1.5.1 ANSYS 结构分析常用单元

1) Mass21——质量单元(如图 1.5 所示),它是 6 自由度的点单元,X,Y,Z 三个方向的线位移以及绕 X,Y,Z 轴的旋转位移,每个自由度的质量和惯性矩分别定义。

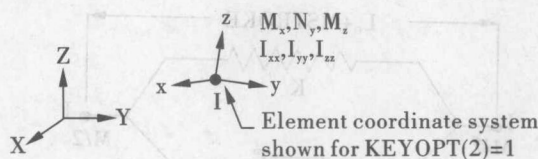


图 1.5 Mass21 单元

2) Link1——二维杆单元(如图 1.6a 所示),每个节点都有两个自由度(X、Y 方向),可用于桁架、连杆、弹簧等的受力分析。它是一个单轴拉压单元,只用于铰接结构,因此不能承受弯矩。

3) Link8——三维杆单元(如图 1.6b 所示),每个点有 3 个自由度(X、Y、Z 方向),可用作模拟构架、连杆,弹簧等。它同 Link1 一样是单轴拉压单元,不能承受弯矩。

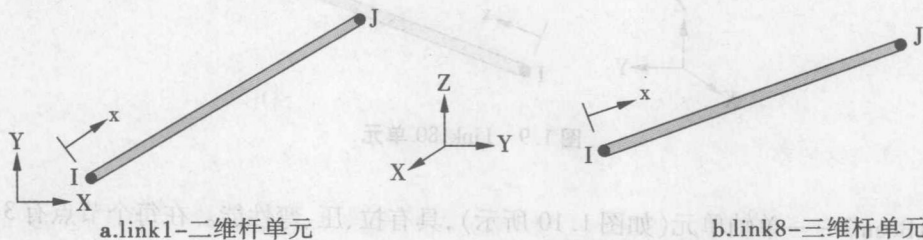


图 1.6 Link1、Link8 单元

4) Link10——三维杆单元(如图 1.7 所示),每个节点有 3 个自由度(X、Y、Z 方向),其双线性刚度矩阵特性,使其仅能承受单轴拉伸或受压。使用只受拉选项时,如果单元受压,刚度就消失,以此来模拟缆索或链条的松弛。这一特性对于将整个钢缆用一个单元来模拟钢缆静力问题非常有用,具有应力强化和大变形能力。

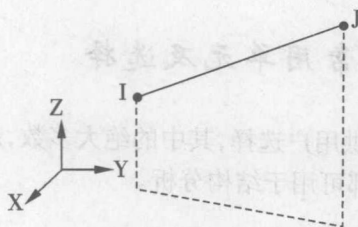


图 1.7 Link10 单元

5) Link11——三维杆单元(如图 1.8 所示),用于模拟水压圆筒以及其他经受大旋转的结构。此单元为单轴拉压单元,每个节点有 3 个自由度(X、Y、Z 方向),没有弯扭载荷。

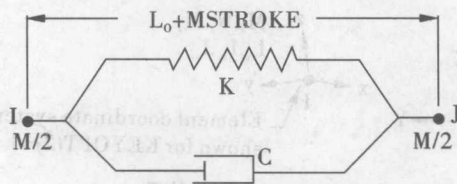


图 1.8 Link11 单元

6) Link180——三维杆单元(如图 1.9 所示),可模拟构架、连杆、弹簧等。此三维杆单元是单轴拉压单元,每个节点有 3 个自由度(X、Y、Z 方向)。作为铰接结构,不考虑弯矩;具有塑性、蠕变、旋转、大变形、大应变能力。

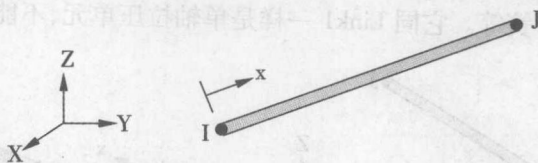


图 1.9 Link180 单元

7) Beam3——单轴单元(如图 1.10 所示),具有拉、压、弯性能。在每个节点有 3 个自由度(X、Y 方向以及绕 Z 轴的旋转)。

8) Beam4——具有拉、压、扭、弯能力的单轴单元(如图 1.11 所示)。每个节点有 6 个自由度(X、Y、Z 方向以及绕 X、Y、Z 轴的旋转)。它具有应力强化和大变形能力,在大变形(小转动)分析中提供了协调切向刚度矩阵选项。

9) Beam23——单轴单元(如图 1.12 所示),具有拉、压、扭、弯能力。每个节点有 3 个自由度(X、Y、Z 方向)。该单元具有塑性、蠕变、膨胀能力。

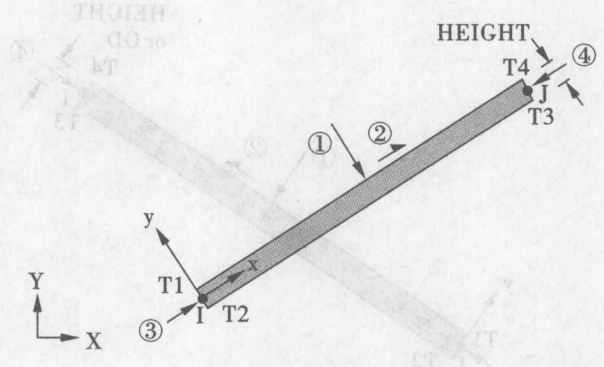


图 1.10 Beam3 单元

(If node K is omitted and $\theta=0^\circ$, the element y axis is parallel to the global X-Y plane.)

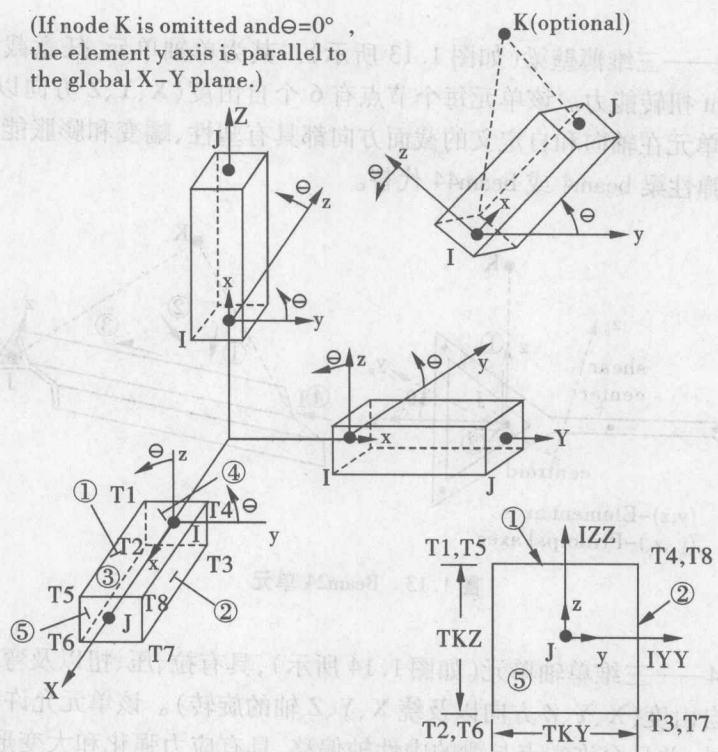


图 1.11 Beam4 单元

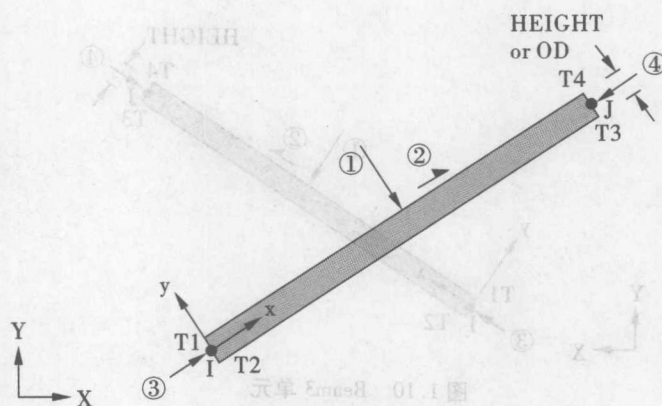


图 1.12 Beam23 单元

10) Beam24——三维薄壁梁(如图 1.13 所示)。其为单轴单元,任意截面都有拉压、弯曲和 St. Venant 扭转能力。该单元每个节点有 6 个自由度(X 、 Y 、 Z 方向以及绕 X 、 Y 、 Z 轴的旋转)。该单元在轴向和自定义的截面方向都具有塑性、蠕变和膨胀能力,若不需要这些能力,可用弹性梁 beam4 或 beam44 代替。

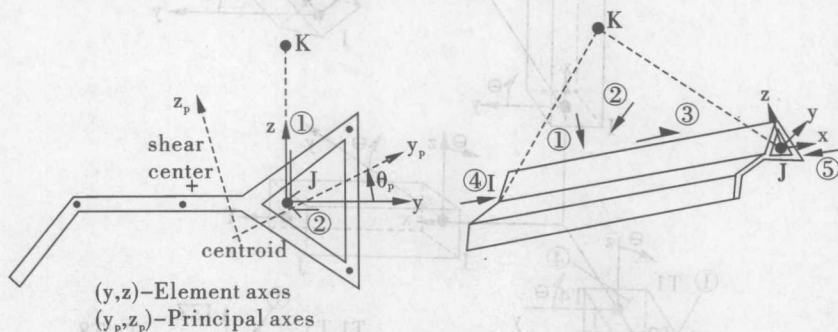


图 1.13 Beam24 单元

11) Beam44——三维单轴单元(如图 1.14 所示),具有拉、压、扭以及弯曲能力。其每个节点有 6 个自由度(X 、 Y 、 Z 方向以及绕 X 、 Y 、 Z 轴的旋转)。该单元允许每个端点具有不均匀几何特性,并且允许端点与梁的中性轴偏移,具有应力强化和大变形能力,若不需要这些特性,可采用 beam4 代替。