

ANSYS ANSYS 7.0 应用指导系列丛书

ANSYS 7.0

分析实例 与工程应用

邢静忠 王永岗 陈晓霞 等编著



机械工业出版社
China Machine Press

ANSYS 7.0 应用指导系列丛书

ANSYS 7.0 分析实例与工程应用

邢静忠 王永岗 陈晓霞 等编著



机械工业出版社

本书以命令行方式通过大量教学实例和工程应用实例,介绍了建立模型、求解和结果后处理的全过程,内容覆盖杆系、梁系、板壳和实体结构的静力分析和动力学分析。以实例讲解为主线,辅助以理论分析和计算结果比较评价,使读者在学习 ANSYS 命令行操作的同时,不断提高评价计算结果的能力和理论修养,全书算例注重问题的力学模型分析和结果分析。

本书最大的特点是,用命令行方式结合实例讲解常用命令和求解过程,所选择的 64 个教学算例覆盖了常见工程结构分析领域。从知识层次上覆盖了从理论力学、材料力学、结构力学直到弹性力学范畴。较多的例题不仅可以帮助读者学习和熟练 ANSYS 软件的使用,还可以帮助读者理解有限元的基本思想,积累实际操作经验,不断提高分析处理问题的能力。书末的结构单元参考和常用命令速查也是结构分析必备的工具箱。

本书适合大学本科二年级以上的学生和研究生使用,也可以供从事结构分析和设计的其他人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

ANSYS 7.0 分析实例与工程应用/邢静忠等编著. —北京:机械工业出版社, 2004.1

(ANSYS 7.0 应用指导系列丛书)

ISBN 7-111-13746-9

I. A… II. 邢… III. 有限元分析—应用程序, ANSYS 7.0 IV. 0241.82

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2003) 第 122526 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑:吴宏伟 版式设计:郭新义

三河市宏达印刷有限公司印刷·新华书店北京发行所发行

2004 年 5 月第 1 版第 1 次印刷

787mm×1092mm 1/16·41.25 印张·921 千字

0001-4000 册

定价:56.00 元

凡购本图书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

本社购书热线电话:(010) 68993821、88379646

封面无防伪标均为盗版

前 言

随着计算机技术的日益普及,计算机工具在提高社会生产力方面发挥了越来越重要的作用,特别是CAD/CAE/CAM在工业界的日益成熟和普及,极大地提高了工业设计和生产效率,越来越多的人逐渐熟悉这些强有力的工具,同时对这些技术给工业界的推动作用逐渐认可。越来越多从事着从设计到生产各个环节的工程人员和在校学生逐步成为这一新技术的主要用户群体。

有限元分析技术已经发展成为计算机辅助分析CAE的核心。用CAE方法可以减少或避免物理测试过程,通过计算机模拟最恶劣载荷和工况下零件或结构的工作情况,准确地计算其应力应变,使产品在设计阶段就能够对其数学模型的各项性能进行评估,及早发现设计上存在的问题,从而大大缩短设计开发周期。

特别是采用有限元分析技术及其优化技术,能够改进结构设计参数,使其在满足强度和刚度的情况下具有最合理的结构。在应用于新产品开发和老产品改造方面,能够提供对其强度、应力分布状况的分析,利用优化设计方法对其进行形状和结构优化设计,从而在设计上提供技术支持和理论指导。

作为目前国内最为流行的ANSYS软件,在工程计算、教学实践和科学研究方面已经积累了大量的应用实例。特别是在校学生越来越普及了对ANSYS软件的了解和应用,不少学校购买了ANSYS软件,并开展了一系列学习和推广ANSYS应用的热潮,互联网上的ANSYS讨论园地也日益火爆。

在这样一个红红火火的ANSYS流行时期,本书可以让初学者快速、全面地掌握ANSYS的使用要领,完成最一般的工程结构分析。本书以ANSYS高级分析为主要内容,结合实例讲解ANSYS的操作命令和分析过程,是为初学者提供的、能够快速提高ANSYS分析计算能力的实用教程。

本书采用ANSYS命令行方式,从最经典的力学问题入手,采用理论分析和ANSYS计算相结合,重点分析模型简化,对计算结果进行分析和比较,使读者在对问题有一个大致的把握后,开始建模计算,并对计算结果的正确性和准确性作出准确判断。

学会ANSYS软件的使用并不难,得到和计算模型一致的计算结果也不太难,最困难的是:得到和实际模型一致的结果,并能分析出计算结果和实际情况的差异。解决这个困难的方法只有一条,就是大量分析算例积累起来的实际计算经验。本书的算例就是帮助读者在静力分析和动力分析方面,对杆、梁、板壳和实体结构模型及各类结构分析单元特性开始技术积累和丰富经验的过程。相信读者在读完本书,并结合所附光盘算例的演练后,一定会变成一位ANSYS分析高手。不仅在软件操作方面,更多的是在结果评价和模型理论分析方面成为一个经验丰富的专家。

本书在编写过程中得到了仿真互动网站上的许多有限元爱好者的帮助和支持。同时我也非常感谢我的同事和我的家人对本人工作的支持和理解。本书的部分资料来源于ANSYS验证算例和参考文献,特向他们表示感谢。

同时也感谢机械工业出版社北京时代金科科技有限公司对作者的信任和责任编辑为本书的出版所付出的辛勤工作!

全书由邢静忠、王永岗和陈晓霞主编,朱爱红、宋曦、黄达文、杨静宁、马维俊、宋慧芳、杨丽敏、白金泽等参与了部分编写工作。

鉴于时间仓促和作者认识的局限,书中错误在所难免,欢迎读者批评指正。

读者如需书中的源程序,请到以下网站下载:

<http://www.cmpbook.com/download/13746.zip>

或<http://hsingjzh.welan.com>

编者

目 录

前 言

第1篇 教学实例篇

第1章 简单拉压杆结构	1
1.1 铰接杆在外力作用下的变形	2
1.2 人字形屋架的静力分析	6
1.3 超静定拉压杆的反力计算	10
1.4 平行杆件与刚性梁连接的热应力问题	13
1.5 端部有间隙的杆的热膨胀	17
第2章 梁的弯曲问题	21
2.1 等截面简单超静定梁的平面弯曲分析	21
2.2 工字形截面外伸梁的平面弯曲	29
2.3 矩形截面梁的纵横弯曲分析	35
2.4 悬臂梁的双向弯曲	45
2.5 圆形截面悬臂杆的弯扭组合变形	61
2.6 悬臂等强度梁的弯曲	65
2.7 弹性地基半无限长梁在端部力和力偶作用下的变形	75
2.8 偏心受压杆的大变形分析	79
第3章 杆系稳定性计算	85
3.1 利用梁单元计算压杆稳定性	85
3.2 利用实体单元计算压杆稳定性	89
3.3 悬臂压杆的过曲屈分析	94
3.4 平面钢架的平面外失稳	103
第4章 实体模型应力分析	115
4.1 均布荷载作用下深梁的变形和应力	115
4.2 一对集中力作用下的圆环	128
4.3 用实体单元分析变截面杆的拉伸	140
4.4 用二维实体单元分析等截面悬臂梁的平面弯曲	148
4.5 变截面悬臂梁在端部集中力作用下的平面静力分析	155
4.6 纯弯曲悬臂曲梁的二维静力分析	164



4.7	端部集中力作用的悬臂圆环曲梁平面弯曲的三维分析	173
4.8	均匀拉力作用下含圆孔板的孔边应力集中	189
4.9	两端固定的厚壁管道在自重作用下的变形和应力	205
第5章	膜和薄壳问题	214
5.1	含椭圆孔的椭圆薄膜在外部张力作用下的静力分析	214
5.2	圆形薄膜大变形静力分析	224
5.3	柱形容器在内压作用下的静力分析	230
5.4	圆柱形薄壳在均匀内压作用下的静力分析	234
第6章	板的弯曲和壳体计算	239
6.1	简支和固支圆板的在不同荷载作用下的弯曲	239
6.2	悬臂长板的大挠度弯曲	250
6.3	用壳体单元分析受均布荷载作用的固支圆板大挠度弯曲	262
6.4	利用拉伸操作建立膨胀弯管模型	267
6.5	两端简支开口柱壳在自重作用下的静力分析	276
6.6	圆筒在一对横向集中力作用下的变形	282
6.7	两边简支开口柱壳在集中力作用下的大变形曲屈	291
第7章	简单振动系统	300
7.1	单自由度弹簧质量系统的频率计算	300
7.2	悬索自由振动的频率	304
7.3	用弹簧单元连接的圆盘的扭转振动	310
7.4	圆杆连接圆盘的扭转振动	314
7.5	钻杆的扭转自由振动	318
第8章	梁的振动分析	325
8.1	简支梁的自振频率计算	325
8.2	自由—自由梁的纵向自由振动	335
8.3	有轴向压力作用的简支梁的自由振动	339
8.4	用壳体单元计算悬臂等强度梁的自由振动	345
8.5	矩形截面薄壁悬臂梁的自由振动	351
第9章	膜板和实体振动	358
9.1	圆形张紧薄膜的自由振动	358
9.2	薄膜二维非轴对称自由振动分析	364
9.3	薄膜三维非轴对称振动分析	370
9.4	悬臂长板的自由振动频率	378
9.5	悬臂宽板的模态分析	382

9.6	固支圆板的自由振动	388
9.7	用实体单元分析圆环的振动	392
9.8	机翼模型的振动分析	397
第10章	平面建模分析和三维实体建模	405
10.1	带三个圆孔的平面支座分析	405
10.2	角支座应力分析	410
10.3	立体斜支座的实体建模	416
10.4	四分之一车轮的实体建模	422
10.5	轴承支座的实体建模	425
第11章	最优化设计	434
11.1	概述	434
11.2	最优化问题框架	435
11.3	ANSYS优化设计流程	436
11.4	变截面悬臂梁的外形形状优化	436
11.5	平面刚架的优化设计	447
第12章	层合板和断裂力学	454
12.1	四边简支方形层合板在均布外载作用下的变形	454
12.2	均布拉力作用下含裂纹板的应力强度因子计算	466

第2篇 工程应用篇

第13章	用APDL实现空间网壳结构参数化建模	485
13.1	K系列球面网壳结构的特点和建模	485
13.1.1	K系列球面网壳的特点	485
13.1.2	几何描述	486
13.1.3	杆件连接关系	486
13.2	参数化设计语言APDL介绍	486
13.2.1	参数和表达式	487
13.2.2	ANSYS中的基本指令	487
13.2.3	分支和循环	488
13.3	用户界面设计语言UIDL介绍	490
13.3.1	单行参数输入	490
13.3.2	多行参数输入	490
13.4	网壳建模程序设计	491
13.4.1	模型建立的步骤	491
13.4.2	节点坐标计算	491



13.4.3	单元连接	493
13.4.4	变量说明	494
13.4.5	节点坐标计算公式	494
13.4.6	主框图说明	495
13.4.7	单元连接关系定义	495
13.4.8	源程序	496
13.5	程序使用说明	499
13.5.1	加载程序	499
13.5.2	界面说明	499
13.5.3	注意事项	501
13.6	应用举例	501
13.6.1	基本参数	501
13.6.2	输入数据并生成模型	501
13.6.3	输入单元参数和荷载后开始计算	502
13.6.4	选择结果输出方式	502
第14章	塔式起重机静动力分析	503
14.1	塔式起重机基本概念	503
14.2	塔式起重机拓扑模型	503
14.3	塔机模型受力分析	505
14.3.1	部件受力特征分析	506
14.3.2	截面参数定义	506
14.3.3	自重荷载和配重	506
14.3.4	选用合适的分析模型。	506
14.3.5	固定塔身底部的4个节点	507
14.4	塔机建模程序设计	507
14.4.1	塔身节点计算和单元连接	507
14.4.2	塔顶建模	508
14.4.3	塔臂建模	508
14.4.4	平衡臂和斜拉索建模	509
14.5	塔机静力分析	510
14.6	塔机模态分析	516
14.7	塔机静动力分析程序	519
第15章	长柱形天然气罐在内压作用下的静力分析	536
15.1	概述	536
15.2	建立模型	536
15.3	利用轴对称壳单元SHELL51计算	537

15.3.1	单元基本性质和约定	537
15.3.2	求解过程	539
15.3.3	源程序	542
15.3.4	计算结果	544
15.3.5	筒体部分理论解	546
15.3.6	结果讨论	546
15.4	利用8节点2D实体单元PLANE82单元计算	550
15.4.1	建立模型	551
15.4.2	计算过程	551
15.4.3	计算结果及讨论	558
15.4.4	源程序	559
15.5	用20节点3D实体单元solid95计算1/4模型	560
15.5.1	建立1/4三维模型	560
15.5.2	计算步骤	561
15.5.3	计算结果分析	567
15.5.4	与弹性力学解答的对比	570
15.5.5	计算程序	571
附 录		
附录A	常用结构单元参考	573
附录B	结构分析命令速查	606
参考文献		647

第1篇 教学实例篇

第1章 简单拉压杆结构

杆系结构是指结构由许多细长杆件构成的系统，杆件的弯曲刚度较小，或者弯曲产生的应力和轴力相比较小，每个杆件的主要变形是轴向拉伸和压缩变形。对于这一类问题，有限元模型可以利用杆单元模型（LINK）来处理。在ANSYS中，二维杆单元是LINK1，三维杆单元是LINK8。它们的单元两端的节点位移分别有2个和3个线位移。对于许多杆系空间结构需要利用LINK8单元求解，计算结果除了节点位移外，我们最关心的是各个杆件的内力和应力。

在ANSYS中，杆件的内力无法直接得到，需要利用定义单元表（ETABLE）的方法获得。求解每个有限元问题的基本过程是一样的：首先建立模型并施加力和位移边界条件，然后就可以求解了。在求解之后得到节点位移，其余的力学量需要通过适当的定义或者运算才可以得到。

杆系结构的计算主要得到桁架结构的变形、内力和反力。对于复杂的杆系结构，目前还没有简便的建模方法，通常还是需要利用节点和单元的定义指令N(Node)和E(Element)来定义。这种建立模型的方式叫做单元直接建模，它的主要优点是直观。对于边界条件：荷载由命令F(Force)来定义，位移约束由命令D(Displacement)来定义。

当计算模型建立好，位移边界条件定义妥当，荷载施加完毕后，就可以发出求解命令SOLVE通知系统开始求解。系统对每一个单元计算刚度矩阵后，叠加生成总体刚度矩阵，生成节点荷载向量，通过引入位移边界条件修正总体刚度矩阵和荷载向量后，开始求解位移方程而得到各个节点的位移值。再次调用单元刚度矩阵计算各个单元的内力、各个位移约束处的反力等。

得到这些计算结果后，进入后处理模块Post1可以显示结果和观察变形、应力分布等情况。变形图通常用PLDISP(PLot DISPlacement)来显示。节点上的计算结果，如内力和应力，可以用PLNSOL(Plot Node SOLution)来完成。不同类型的单元具有不同的内力和应力约定，单元内的计算结果通过PLESOL(Plot Element SOLution)命令来实现。

以上是结构静力分析的大体过程。一般的动态分析主要是模态分析，就是通过对刚度矩阵和质量矩阵的迭代计算，得到结构的前几阶振动频率和振型。下面列出的是进行这些分析要用到的最基本的命令。

1. 最基本命令

- (1) 建立模型 (/Prep7模块命令)。

通过节点的坐标位置定义节点: N, NODE, X, Y, Z, THXY, THYZ, THZX; 在 (X,Y,Z) 坐标位置定义第NODE号节点, 节点坐标系方向为THXY, THYZ和THZX。

通过节点连接关系定义单元: E, I, J, K, L, M, N, O, P: 过节点I~P定义单元。

(2) 定义边界条件 (/Solu模块命令)。

定义节点上的位移约束: D, NODE, Lab, VALUE, VALUE2, NEND, NINC, Lab2, Lab3, Lab4, Lab5, Lab6, 对节点NODE施加位移约束。

定义作用在节点上的外力: F, NODE, Lab, VALUE, VALUE2, NEND, NINC, 给节点NODE施加节点力。

(3) 求解方程 (/Solu模块命令)。

开始求解计算: SOLVE。

(4) 查看结果 (/post1模块命令)。

显示结构变形图: PLDISP,2。

显示节点结果: PLNSOL, Item, Comp。

2. 杆单元特性

杆单元只承受轴向力, 单元的内力主要是轴力。除此之外, 还有轴向应力和轴向应变, 杆单元的两端的节点只有线位移自由度。对于二维杆单元LINK1, 每个单元的两端有两个节点, 每个节点有两个线位移。对于三维杆单元LINK8, 每个单元也有两个节点, 但每个节点有3个线位移自由度。

单元输入的几何参数只有杆件的截面面积A, 材料参数有弹性模量EX, 热膨胀系数ALPX, 密度DENS和阻尼DAMP。杆件单元的定义通过用E指令定义两个端点的节点编号即可, 当前单元的单元类型使用当前默认值, 该默认值可以通过指令TYPE来改变。当前单元的材料参数使用当前的默认值, 该默认值可以通过指令MAT来改变。当前单元的实常数使用当前的默认值, 该默认值可以通过指令REAL来改变。

1.1 铰接杆在外力作用下的变形

在两个相距 $a=10\text{m}$ 的刚性面之间, 有两根等截面杆铰结在2号点, 杆件与水平面的夹角 $\theta=30^\circ$, 在铰链处有一向下的集中力 $F=1000\text{N}$, 杆件材料的弹性模量 $E=210\text{GPa}$, $A=10\text{cm}^2$ (如图1.1所示), 试利用二维杆单元LINK1确定两根杆件内力和集中力位置处的位移。杆件变形很小, 可以按照小变形理论计算。

1. 理论解

这是一个静定结构, 两根杆的内力可以很容易地用理论力学知识求解出来。考虑杆件变形时, 杆件伸长量和节点位移之间的关系也不复杂。由于结构几何形状和受力是左右对称的, 结构的变形特征也是对称的, 杆件伸长量与节点位移的关系就更加简单了。

根据2号节点处的平衡关系, 很容易得到两个拉杆的拉力都等于 1000N , 由于杆件的截面积等于 1000mm^2 , 所以杆件内的拉应力等于 1MPa 。

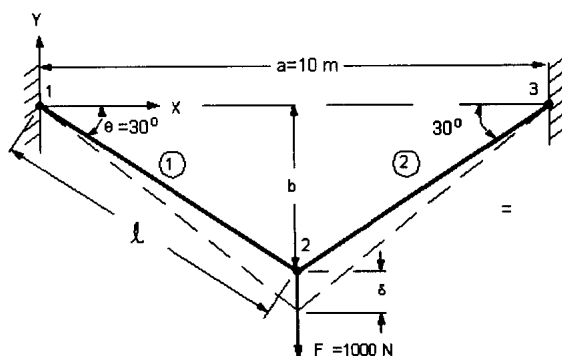


图1.1 两杆桁架结构模型图

杆件的实际长度为 $l=5\text{m}/\cos 30^\circ$ ，根据虎克定律：

$$\Delta l = \frac{Nl}{EA} = \frac{1000 \times 5000 / \cos 30^\circ}{210 \times 10^3 \times 1000} \text{ mm} = 0.02749 \text{ mm}$$

根据2号节点处的位移和杆件伸长量的关系，竖向位移应该是伸长量的2倍，所以，竖向位移的理论值应该是0.05498 mm。

2. ANSYS求解

该结构包含两根杆件，所以可以划分为两个单元。在左侧的刚性墙壁上设置节点1，中间两根杆件连接点设节点2，右侧刚性墙壁上的固定点设为节点3。它们的编号和坐标位置如图1.1所示，即1 (0,0)，2 ($a/2, -b$)，3 ($a,0$)。1号节点和3号节点固定，2号节点上有集中力作用。

使用节点定义命令N (Node) 可以完成对这些节点的定义。用命令ET (Element Type) 声明该系统使用二维杆单元LINK1，用实常数定义命令R (Real constant) 定义杆件的横截面积，用材料参数定义命令MP (Material Property) 定义材料的弹性模量。用位移约束命令D (Displacement) 固定节点，用F (Force) 施加节点力。用Solve命令开始求解，得到节点位移结果后，可以用PLDISP (Plot DISplacement) 绘制结构变形图，或者PRDISP列表显示节点位移结果。用定义单元表命令ETABLE (Element TABLE)，可以提取杆件轴向应力。这些命令构成了下面的主要求解步骤。

(1) 设置工程选项，定义几何参数，定义变量。

(2) 定义节点。

进入前处理模块，用定义节点的命令N定义，在1 (0,0)，2 ($a/2, -b$)，3 ($a,0$) 位置的3个节点。

(3) 定义单元。

用单元类型定义命令ET定义第1类单元为二维杆单元LINK1。用单元定义命令E (Element) 定义单元1与节点1和节点2连接，单元2与节点2和节点3连接。

(4) 位移约束和荷载定义。

用位移约束命令D固定1号节点和3号节点，用F (Force) 在2号节点施加沿着-Y轴方向

的集中力。在ANSYS环境下定义的结构模型如图1.2所示。

(5) 求解节点位移。

进入求解模块，用指令Solve开始求解，获得节点位移结果。

(6) 用单元表提取杆件轴力。

用PLDISP绘制变形后的结构示意图(如图1.3所示)。用“*GET”命令提取2号节点的竖向位移，用ETABLE定义轴力单元表，并提取左边杆件的轴力。

(7) 将计算结果保存到结果文件。

下面给出了这些步骤的源程序，感叹号后面是当前行的注释。

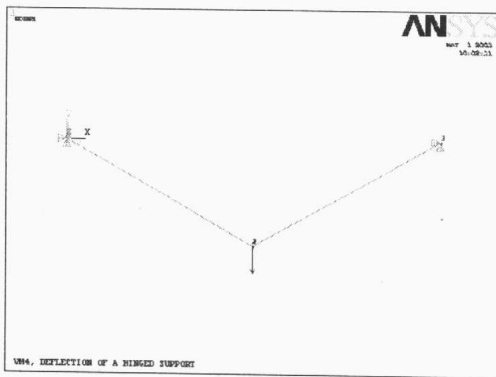


图1.2 建立的两杆桁架结构模型图

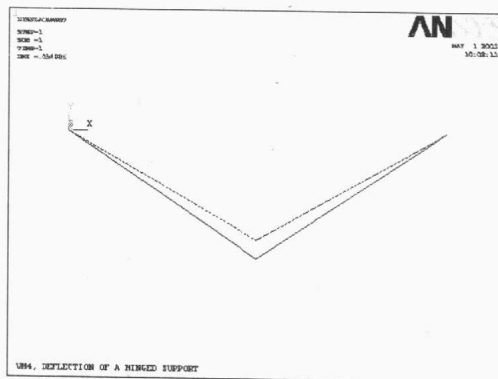


图1.3 两杆桁架在集中力作用下的变形图

3. ANSYS程序

```

FINISH
/CLEAR,NOSTART          ! 清除已有的数据
! (1) 设置工程的选项, 定义几何参数
/FileName, EX1.1         ! 定义工程文件名称
/TITLE, EX1.1, DEFLECTION OF A HINGED SUPPORT
*AFUN, DEG               ! 将三角函数的默认单位由弧度改为角度
THETA=30                 ! 定义变量Theta为杆件与水平面的夹角30°
A=10000                  ! 定义变量A为节点3的水平x坐标10000mm
B=A/2*TAN(THETA)         ! 节点2的铅直y坐标
! (2) 进入前处理模块, 定义节点
/PREP7                  ! 加载前处理模块
N,1                     ! 在坐标原点(0,0,0)定义第1号节点
N,2,A/2,-B              ! 在 (A/2,-B) 定义第2号节点
N,3,A                   ! 在 (A,0) 定义第3号节点
! (3) 在前处理模块中, 定义单元类型、材料参数和各个单元
ET,1,LINK1              ! 定义第1类单元为二维杆单元LINK1
R,1,1000                ! 定义第1类实常数, 杆件截面面积A=1000mm^2
MP,EX,1,210E3           ! 定义第1类材料的弹性模量EX=210000N/mm^2
E,1,2                   ! 通过节点1,2定义单元1
    
```

```

E,2,3          ! 通过节点2,3定义单元2
! (4) 在前处理模块中,定义位移约束
D,1,ALL,,,3,2  ! 约束1号节点的所有位移自由度,按增量2循环到3号节点来约束3号节点
F,2,FY,-1000   ! 在2号节点上施加沿着-Y方向大小为1000N的集中力
OUTPR,,1       ! 输出第1个荷载步的基本计算结果
FINISH         ! 退出前处理模块PREP7
! (5) 进入求解模块,开始求解
/SOLU          ! 加载求解模块
SOLVE          ! 开始静力分析的求解
FINISH         ! 退出求解模块SOLU
! (6) 进入后处理模块,显示节点位移和杆件内力
/POST1         ! 加载后处理模块
PLDISP,2       ! 显示结构变形图,参数“2”表示用虚线绘制出原来结构的轮廓
MID_NODE = NODE (A/2,-B,0) ! 寻找距离位置(A/2,-B,0)最近的节点,存入MID_NODE
*GET,DISP,NODE,MID_NODE,U,Y ! 提取节点MID_NODE上的位移UY
LEFT_EL = ENEARN (MID_NODE) ! 寻找距离节点MID_NODE最近的单元,存入LEFT_EL
ETABLE,STRS,LS,1 ! 用轴向应力SAXL的编号“LS,1”定义单元表STRS
*GET,STRSS,ELEM,LEFT_EL,ETAB,STRS ! 从单元表STRS中提取LEFT_EL单元的应力结果,存入变量STRSS
! (7) 声明数组,提取计算结果,并比较计算误差
*DIM,LABEL,CHAR,2 ! 定义2个元素的字符型数组LABEL
*DIM,VALUE,,2,3 ! 定义2*3的数值型数组VALUE
LABEL(1) = 'STRS_MPa','DEF_mm' ! 给字符型数组的第1个元素赋值
*VFILL,VALUE(1,1),DATA,1,-0.05498 ! 给其他数值型数组中的元素赋理论值
*VFILL,VALUE(1,2),DATA,STRSS,DISP
*VFILL,VALUE(1,3),DATA,ABS(STRSS /1 ),ABS( DISP /0.05498 )
/OUT,EX1_1,out ! 将输出内容重定向到文件EX1_1.out
/COM          ! 以注释形式输出内容
/COM,----- EX1.1 RESULTS COMPARISON -----
/COM,
/COM,      | TARGET | ANSYS | RATIO
/COM,
*VWRITE,LABEL(1),VALUE(1,1),VALUE(1,2),VALUE(1,3)
(1X,A8,' ',F10.3,' ',F10.3,' ',F5.3)
/COM,-----
/OUT          ! 结束数据重定向,关闭输出文件
FINISH        ! 退出后处理模块
*LIST,EX1_1,out ! 列表显示文件EX1_1.out的内容

```

4. 结果分析

经过计算,ANSYS在计算结果文件EX1_1.txt中给出了节点位移计算结果-0.055mm,杆件轴力1MPa,和前面的理论解完全一致。

1.2 人字形屋架的静力分析

跨度8m的人字形屋架，左边端点是固定铰链支座，右端是滑动铰链支座。在上面的3个节点上作用有3个向下集中力 $P=1\text{kN}$ ，结构的几何尺寸和边界条件如图1.4所示，试利用二维杆单元LINK1分析该屋架在3个集中力作用下的变形和内力。

1. 理论解

在小变形假设下，两个支座间不会出现水平反力。整个结构和荷载左右对称，所以结构的内力也是左右对称的。只分析左面一半即可知道整个结构的受力了。整个结构是一个静定结构，所以各个杆件的内力可以利用理论力学中的节点法，或者截面法求解出来。依据整个结构的平衡，可以得到左右两个支座的竖向反力为 1.5kN 。

按照图1.5中的节点编号，根据1号和5号单元在1号节点处的平衡，可以确定出1号单元的内力是 $N_1=3\text{kN}$ ，5号单元的内力是 $N_5=1.5\sqrt{5}\text{kN}$ 。从3号节点的平衡可以知道，9号单元的内力为0。

取左面一半结构，对节点7列出力矩平衡方程：

$$\sum M_7(F)=0, (-1.5)\times 4 + 1\times 2 + N_2\times 2 = 0$$

可以求出2号单元的内力为 $N_2=2\text{kN}$ 。再根据2号节点处的平衡方程：

$$\sum X=0, N_2 - N_1 + \frac{N_8}{\sqrt{2}} = 0$$

$$\sum Y=0, N_7 + \frac{N_8}{\sqrt{2}} = 0$$

可以解出： $N_8=\sqrt{2}\text{kN}$ ， $N_7=-1\text{kN}$

再由6号节点的平衡方程：

$$\sum X=0, N_6\times \frac{2}{\sqrt{5}} - N_5\times \frac{2}{\sqrt{5}} = 0$$

可以解出： $N_6=1.5\sqrt{5}\text{kN}$

至此，得到所有杆件的内力为：

$$N_1=N_4=3\text{kN}, N_2=N_3=2\text{kN}, N_5=N_{13}=1.5\sqrt{5}\text{kN}, N_6=N_{12}=1.5\sqrt{5}\text{kN},$$

$$N_7=N_{11}=-1\text{kN}, N_8=N_{10}=\sqrt{2}\text{kN}, N_9=0.$$

如果需要计算结构在荷载作用下的变形，就必须使用材料力学的知识，且求解过程比较复杂。

2. ANSYS求解

首先将这个结构在杆件相交的地方设置节点，节点之间用单元相连接（如图1.5所示）。利用节点定义命令N定义7个节点，用单元定义命令E定义13个单元；用荷载定义命令F在模型的6，7，8节点上施加集中荷载，用位移约束命令D定义1号节点两个位移全部被约束，5号节点的竖向位移被约束。利用下面提供的程序可以完成对该结构的变形和内力计算。

如图1.6所示给出的是使用ANSYS程序的步骤(1)到(3)生成好的有限元模型;在第(4)步用D命令定义位移约束, F命令定义荷载后, 用SOLVE求解得到各个节点的位移。第(5)步进入一般后处理模块, 用PLDISP图形显示结构变形图(如图1.7所示)。在第(6)步用ETABLE定义单元表, 以提取单元的计算结果——轴力、轴向应力和轴向应变。再用PRETAB命令列表显示单元表内容的同时, 图1.8所示是用PLETAB命令以色度图方式表示的杆件轴力分布情况。

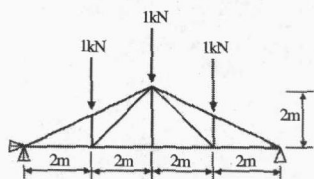


图1.4 人字形屋架计算模型示意图

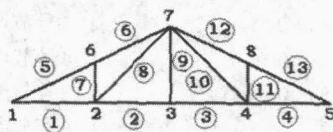


图1.5 人字形屋架的单元划分图

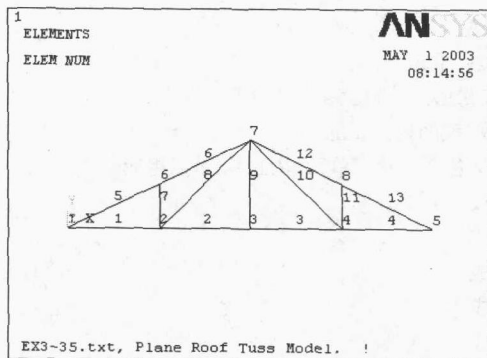


图1.6 人字形屋架的结构模型图

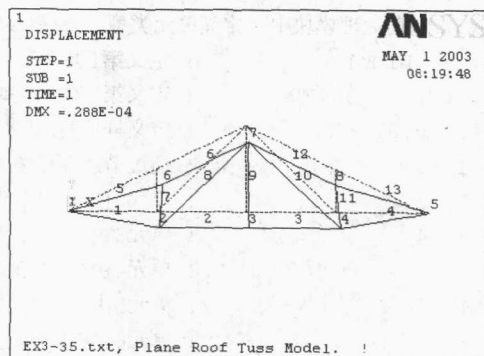


图1.7 屋架在屋面荷载作用下的变形

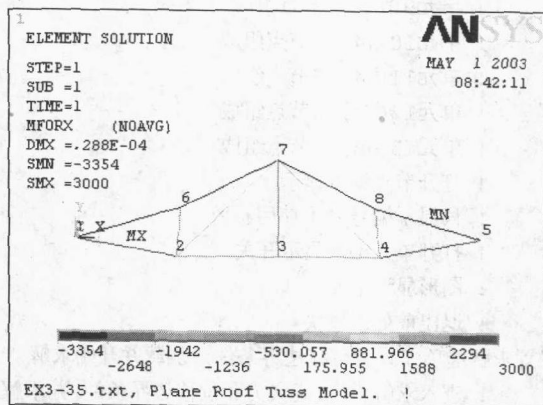


图1.8 屋架杆件的轴力等高线色度图

3. ANSYS程序

FINISH

! 退出以前的模块