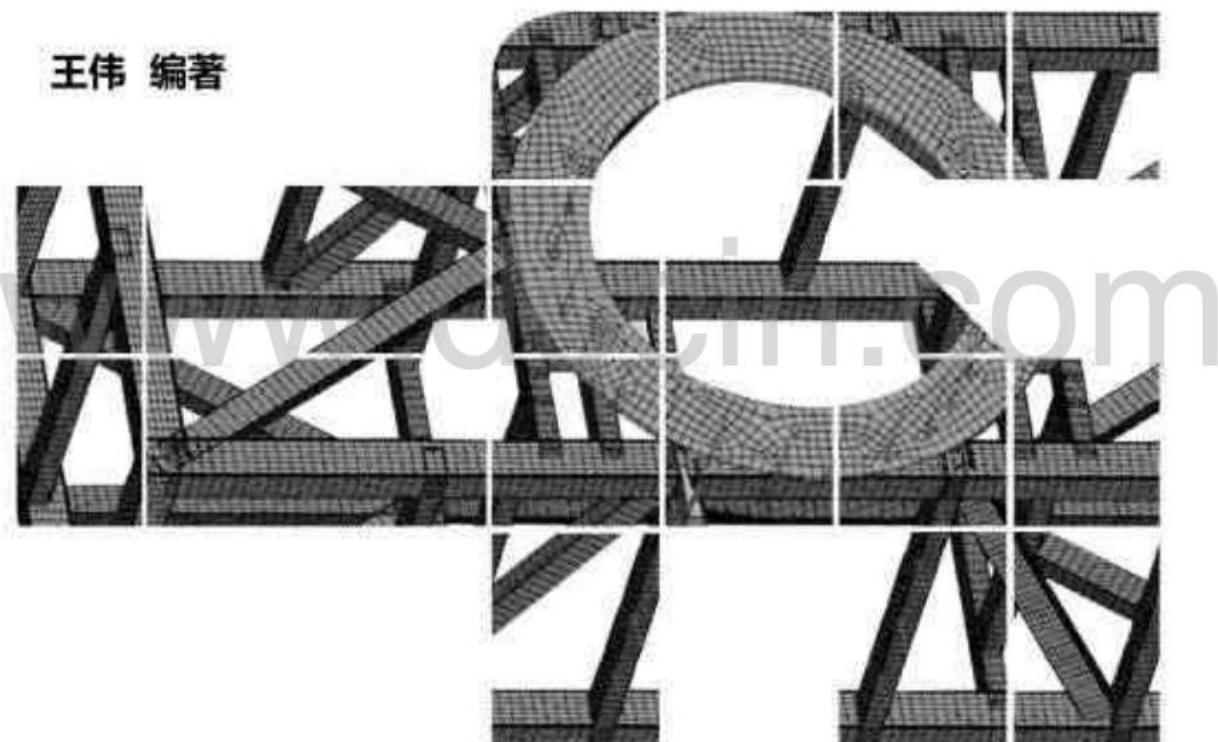


CAX工程应用丛书

ANSYS 14.0

土木工程有限元分析 从入门到精通

王伟 编著



清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书以有限元分析方法为基础，通过丰富的工程应用实例，详细介绍 ANSYS14.0 在土木工程领域中的应用。本书包括基础篇、进阶篇、应用实例篇共三篇 18 章。通过图形用户界面和命令流方式对不同的工程应用问题进行详细地讲解；其中，基础篇内容包括有限元法概述、ANSYS 系列软件简介、ANSYS 图形界面介绍、ANSYS 文件系统以及 ANSYS 基础操作介绍等；进阶篇对 ANSYS 的 APDL 技术、ANSYS14.0 建模、网格划分、加载及求解、后处理、土木工程常用单元进行了详细讲解。应用实例篇包括简单排架结构实例分析、钢筋混凝土实例分析、常见建筑结构体系实例分析、基础工程实例分析、边坡问题实例分析、隧道及地下工程实例分析、桥梁工程实例分析、大坝工程实例分析以及大跨度空间结构实例分析等内容。本书光盘包括所有的实例有限元模型及计算结果，方便读者查阅和参考。

本书适合应用 ANSYS 解决土木工程相关问题的初学者和期望提高工程应用能力的读者，可供高等院校学生、科研院所研究人员和土木工程领域的工程技术人员使用。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签，无标签者不得销售。

版权所有，侵权必究。侵权举报电话：010-62782989 13701121933

图书在版编目 (CIP) 数据

ANSYS 14.0 土木工程有限元分析从入门到精通 / 王伟编著. — 北京 : 清华大学出版社, 2013
(CAX 工程应用丛书)
ISBN 978-7-302-32146-0

I. ①A… II. ①王… III. ①土木工程—有限元分析—应用程序 IV. ①TU-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 083121 号

责任编辑：王金柱

封面设计：王翔

责任校对：闫秀华

责任印制：

出版发行：清华大学出版社

网 址：<http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址：北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编：100084

社 总 机：010-62770175 邮 购：010-62786544

投稿与读者服务：010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈：010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者：

经 销：全国新华书店

开 本：190mm×260mm 印 张：33.75 字 数：858 千字
(附光盘 1 张)

版 次：2013 年 6 月第 1 版 印 次：2013 年 6 月第 1 次印刷

印 数：1~3 000 册

定 价：78.00 元

产品编号：051218-01

随着计算机科学与应用技术的发展，有限元理论日益完善，随之涌现了一大批比较成熟的通用和专业的有限元计算商业软件。ANSYS 作为最著名的通用和有效的商用有限元软件之一，集结构、传热、流体、电磁、碰撞爆破分析于一体，具有强大的前后处理及计算分析能力，能够进行多场耦合，结构-热、流体-结构、电-磁等场的耦合处理求解。

自 1996 年落户中国以来，ANSYS 以其强大的功能、可靠的质量、良好的市场，得到了中国 CAE 界的广泛认可和青睐，被应用于土木工程、机械制造、汽车工业、水利工程、航空航天、石油化工、生物医学等，为各行业设计研究做出了重要贡献。

本书以 ANSYS 14.0 作为软件平台，介绍了 ANSYS 在土木工程应用中的相关理论基础、基本思路、操作步骤和应用技巧，并结合工程应用实例讲述了 ANSYS 具体工程应用方法。全书共 18 章。

第 1 章 概述，主要讲解有限元法的发展历程和基本概念，以及有限元法的派生方法，并对 ANSYS 系列软件进行了简单介绍。

第 2 章 初识 ANSYS 14.0，主要对 ANSYS 14.0 的图形界面、ANSYS 14.0 的文件系统以及 ANSYS 14.0 分析问题的基本过程进行了介绍。

第 3 章 APDL 技术应用，主要讲解 ANSYS 14.0 程序化设计语言（APDL）相关知识与重点语句的使用方法。

第 4 章 ANSYS 14.0 建模，主要讲解 ANSYS 14.0 多种建模方法，包括自底向上建模、自顶向下建模、直接建立有限元模型以及 CAD 几何模型的导入。

第 5 章 ANSYS 14.0 网格划分，主要讲解 ANSYS 单元属性的设置、网格的控制、网格划分举例介绍，并讲解了映射网格划分、扫掠网格划分、拉伸网格等高级网格划分方法。

第 6 章 加载及求解，主要讲解荷载与加载方式的种类、施加约束与外荷载的方法、求解过程控制、荷载步的设置与求解操作。

第 7 章 后处理，主要讲解通用后处理器的操作，包括结果读取、图形显示、结果列表、结果查看器、基于单元表的结果处理以及基于路径的结果处理等，时间历程后处理器定义变量、变量运算、查看变量等相关操作。

第 8 章 土木工程中常用单元，主要对土木工程中几种常用单元 LINK、BEAM、PIPE、SOLID、PLANE、SHELL、COMBIN、MESH 以及接触单元进行详细介绍。

第 9 章 单元生死，主要对单元生死的原理、单元生死的使用过程进行了讲解。

第 10 章 简单排架结构实例分析，对三角形屋架受力分析、钢结构排架的平面外失稳模拟、钢结构排架受力分析、塔式起重机的受力及模态进行了应用实例分析。

第 11 章 钢筋混凝土实例分析，本章对大体积混凝土热分析问题、钢筋混凝土梁、钢筋混凝土板、钢筋混凝土开裂、预应力钢筋混凝土、钢筋混凝土结构大楼浇筑施工模拟进行了应用实例分析。

第 12 章 常见建筑结构体系实例分析，对钢筋混凝土框架结构、钢结构梁板体系、框架-剪力墙结构进行了应用实例分析。

第 13 章 基础工程实例分析，对土木工程中常见的基础形式进行了实例分析，

包括单柱式桥墩全桩基础、考虑接触单元桩基、房屋刚性独立基础、房屋筏形基础等实例。

第 14 章 边坡问题实例分析，对饱和度影响边坡稳定问题、挡土墙支护问题进行了应用实例分析。

第 15 章 隧道及地下工程实例分析，对地铁站台的地震响应分析、暗挖隧道的结构受力分析、明挖矩形截面隧道结构受力分析、山体隧道开挖等问题进行了应用实例分析。

第 16 章 桥梁工程实例分析，对钢桁架桥、大跨度悬索桥、斜拉桥等常见桥梁结构进行了应用实例分析。

第 17 章 大坝工程实例分析，对大坝静力分析、重力坝地震动力响应分析进行了应用实例分析。

第 18 章 大跨度空间结构实例分析，对膜结构、单索结构、索网结构、空间刚架结构、空间单层网壳、空间双层网壳等结构形式进行了应用实例分析。

本书适合于应用 ANSYS 解决土木工程相关问题的初学者和期望提高工程应用能力的读者，所举实例具有典型性和新颖性。本书配送光盘，包括所有实例的 db 文件、计算结果文件，读者在学习过程中可直接导入使用以减少建立几何模型的繁琐操作，能使读者轻松快捷地掌握 ANSYS 14.0 的操作技巧和应用方法。

由于编者水平有限、时间仓促，书中错误与缺点在所难免，敬请广大读者批评指正，也欢迎广大同行共同交流探讨。

本书由王伟编著，何嘉扬、张杨、周文华、丁学英、吕广宪、孙万泉、黄利、王清、唐明明、黄利、张小勇、吴永福、郑明辉、刘力、陈磊、李秀峰参与了本书部分章节的编写，在此一并表示感谢。

读者在学习过程中遇到与本书有关的问题，可以发邮件到编者邮箱 comshu@126.com，编者会尽快给予解答。

编者

2013.3

目 录

第一篇 基础篇

第 1 章 概述.....	错误！未定义书签。3
1.1 有限单元法（FEM）概述.....	错误！未定义书签。3
1.1.1 有限单元法的发展	错误！未定义书签。3
1.1.2 有限单元法的基本概念.....	错误！未定义书签。4
1.1.3 派生方法	错误！未定义书签。4
1.2 ANSYS 系列软件简介.....	错误！未定义书签。4
1.2.1 ANSYS 14.0 功能特点	错误！未定义书签。4
1.2.2 ANSYS 软件提供的分析类型	错误！未定义书签。5
1.2.3 ANSYS 单位选择问题	错误！未定义书签。6
1.3 本章小结	错误！未定义书签。6

第 2 章 初识 ANSYS 14.0	错误！未定义书签。7
---------------------------	------------

2.1 图形界面.....	错误！未定义书签。7
2.1.1 启动界面	错误！未定义书签。7
2.1.2 图形用户界面（GUI）	错误！未定义书签。8
2.2 ANSYS 14.0 文件系统.....	错误！未定义书签。9
2.2.1 文件类型	错误！未定义书签。9
2.2.2 ANSYS 文件兼容性	错误！未定义书签。10
2.3 ANSYS 14.0 分析问题的基本过程.....	错误！未定义书签。12
2.3.1 基本流程介绍.....	错误！未定义书签。12
2.3.2 应用 ANSYS 14.0 分析简单实例	错误！未定义书签。12
2.4 本章小结	错误！未定义书签。18

第二篇 进阶篇

第 3 章 APDL 技术应用	错误！未定义书签。21
-----------------------	-------------

3.1 APDL 简介.....	错误！未定义书签。21
3.2 定义参数.....	错误！未定义书签。22
3.2.1 变量命名规则.....	错误！未定义书签。22

3.2.2 参数定义方法.....	错误！未定义书签。23
3.3 数组参数.....	错误！未定义书签。26
3.3.1 数组类型.....	错误！未定义书签。27
3.3.2 定义数组.....	错误！未定义书签。27
3.3.3 数组操作.....	错误！未定义书签。30
3.3.4 数组操作命令.....	错误！未定义书签。32
3.4 宏.....	错误！未定义书签。33
3.4.1 宏的命名.....	错误！未定义书签。34
3.4.2 宏的生成.....	错误！未定义书签。35
3.4.3 宏库文件.....	错误！未定义书签。36
3.4.4 宏和宏库文件的运行操作.....	错误！未定义书签。37
3.4.5 分支.....	错误！未定义书签。38
3.4.6 循环.....	错误！未定义书签。38
3.4.7 控制函数一览.....	错误！未定义书签。39
3.5 本章小结.....	错误！未定义书签。41
 第 4 章 ANSYS 14.0 建模	错误！未定义书签。42
4.1 自底向上建模.....	错误！未定义书签。42
4.1.1 模型尺寸及相关参数	错误！未定义书签。42
4.1.2 建模过程	错误！未定义书签。43
4.1.3 本节常用命令流.....	错误！未定义书签。45
4.2 自顶向下建模.....	错误！未定义书签。46
4.2.1 相关参数	错误！未定义书签。46
4.2.2 建模过程	错误！未定义书签。46
4.2.3 常用命令流.....	错误！未定义书签。48
4.2.4 布尔运算常用命令	错误！未定义书签。48
4.3 直接建立有限元模型	错误！未定义书签。50
4.3.1 节点的生成.....	错误！未定义书签。50
4.3.2 单元的生成.....	错误！未定义书签。51
4.3.3 直接生成有限元模型相关命令	错误！未定义书签。52
4.4 快速建模命令	错误！未定义书签。52
4.4.1 复制命令	错误！未定义书签。53
4.4.2 镜像命令	错误！未定义书签。53
4.4.3 对象选择与删除	错误！未定义书签。54
4.5 CAD 几何模型导入.....	错误！未定义书签。55
4.6 本章小结	错误！未定义书签。56

第 5 章 ANSYS 14.0 网格划分	错误！未定义书签。 58
5.1 网格划分介绍	错误！未定义书签。 58
5.1.1 单元属性介绍	错误！未定义书签。 58
5.1.2 为实体模型指定属性	错误！未定义书签。 59
5.1.3 ANSYS 网格划分方法	错误！未定义书签。 59
5.2 单元属性设置	错误！未定义书签。 59
5.2.1 单元类型 (TYPE)	错误！未定义书签。 59
5.2.2 实常数 (REAL)	错误！未定义书签。 60
5.2.3 材料特性 (MAT)	错误！未定义书签。 61
5.2.4 截面特性设置 (SECTION)	错误！未定义书签。 61
5.2.5 单元属性常用命令	错误！未定义书签。 62
5.3 网格控制	错误！未定义书签。 63
5.3.1 智能网格划分	错误！未定义书签。 63
5.3.2 全局单元尺寸控制	错误！未定义书签。 64
5.3.3 默认单元尺寸控制	错误！未定义书签。 65
5.3.4 关键点尺寸控制	错误！未定义书签。 65
5.3.5 线尺寸控制	错误！未定义书签。 66
5.3.6 面尺寸控制	错误！未定义书签。 67
5.3.7 网格控制命令	错误！未定义书签。 67
5.4 网格划分举例	错误！未定义书签。 70
5.4.1 导入几何模型	错误！未定义书签。 70
5.4.2 定义单元属性	错误！未定义书签。 70
5.4.3 网格的控制	错误！未定义书签。 70
5.4.4 进行 Smart Mesh	错误！未定义书签。 71
5.4.5 网格的清除	错误！未定义书签。 72
5.4.6 网格的局部细化	错误！未定义书签。 73
5.5 映射网格划分 (Mapped)	错误！未定义书签。 74
5.5.1 面映射网格划分	错误！未定义书签。 74
5.5.2 体映射网格划分	错误！未定义书签。 75
5.6 扫掠网格划分 (Sweep)	错误！未定义书签。 76
5.6.1 体扫掠	错误！未定义书签。 76
5.6.2 体扫掠基本步骤与条件	错误！未定义书签。 76
5.7 拉伸网格	错误！未定义书签。 78
5.8 本章小结	错误！未定义书签。 80
第 6 章 加载及求解	错误！未定义书签。 81
6.1 荷载与加载方式种类	错误！未定义书签。 81

6.1.1	荷载种类	错误！未定义书签。81
6.1.2	荷载步和子步	错误！未定义书签。82
6.1.3	加载方式类型及特点	错误！未定义书签。82
6.2	施加约束	错误！未定义书签。83
6.2.1	在关键点（或节点）上加载位移约束	错误！未定义书签。83
6.2.2	在线（或面）上加载位移约束	错误！未定义书签。84
6.2.3	耦合约束	错误！未定义书签。85
6.2.4	施加约束常用命令	错误！未定义书签。85
6.3	施加外荷载	错误！未定义书签。86
6.3.1	集中荷载	错误！未定义书签。86
6.3.2	分布荷载	错误！未定义书签。87
6.3.3	施加体积荷载	错误！未定义书签。88
6.3.4	施加惯性力荷载	错误！未定义书签。91
6.3.5	轴对称荷载	错误！未定义书签。91
6.3.6	耦合荷载	错误！未定义书签。92
6.3.7	预应力荷载	错误！未定义书签。92
6.3.8	由表型数组定义荷载	错误！未定义书签。92
6.3.9	荷载显示与控制	错误！未定义书签。96
6.3.10	施加荷载常用命令	错误！未定义书签。96
6.4	求解过程控制	错误！未定义书签。97
6.4.1	分析类型设置	错误！未定义书签。98
6.4.2	分析基本选项设置	错误！未定义书签。98
6.5	荷载步设置与求解操作	错误！未定义书签。99
6.5.1	荷载步文件的建立法	错误！未定义书签。99
6.5.2	荷载步文件法求解	错误！未定义书签。100
6.5.3	荷载步文件的查看、修改或删除	错误！未定义书签。100
6.6	本章小结	错误！未定义书签。100
	第 7 章 后处理	错误！未定义书签。101
7.1	一般（通用）后处理	错误！未定义书签。101
7.1.1	读入结果文件	错误！未定义书签。101
7.1.2	分析结果绘图显示	错误！未定义书签。103
7.1.3	分析结果列表显示	错误！未定义书签。111
7.1.4	结果运算处理	错误！未定义书签。115
7.1.5	荷载工况	错误！未定义书签。118
7.2	时间历程后处理	错误！未定义书签。121
7.2.1	时间历程后处理窗口介绍	错误！未定义书签。121
7.2.2	定义变量	错误！未定义书签。123

7.2.3 变量运算	错误！未定义书签。 126
7.2.4 变量与数组.....	错误！未定义书签。 127
7.2.5 变量显示	错误！未定义书签。 128
7.3 本章小结	错误！未定义书签。 130
第 8 章 土木工程中常用单元	15
8.1 单元类型简介	15
8.1.1 常用单元分类.....	15
8.1.2 单元的选择.....	15
8.2 杆单元 (LINK180)	16
8.2.1 LINK180 单元描述.....	16
8.2.2 LINK180 单元输入.....	16
8.2.3 输出数据	17
8.2.4 LINK180 的假定和限制	18
8.3 梁单元 (BEAM188)	18
8.3.1 BEAM188 单元描述.....	18
8.3.2 BEAM188 单元输入.....	19
8.3.3 单元输出	20
8.4 管单元 (PIPE16)	20
8.4.1 PIPE16 单元描述.....	20
8.4.2 PIPE16 输入摘要.....	21
8.4.3 单元输出	23
8.5 实体单元 (SOLID)	23
8.5.1 SOLID65 单元描述.....	24
8.5.2 SOLID65 输入数据.....	24
8.5.3 SOLID65 应力输出项.....	26
8.5.4 SOLID185 单元描述.....	27
8.5.5 SOLID185 输入数据.....	28
8.5.6 SOLID185 应力输出项.....	29
8.6 平面单元 (PLANE182)	30
8.6.1 PLANE182 单元说明	30
8.6.2 PLANE182 单元输入.....	30
8.6.3 单元应力输出项	31
8.7 板壳单元 (SHELL181)	31
8.7.1 SHELL181 单元说明	31
8.7.2 SHELL181 单元输入	32
8.8 弹簧-阻尼器单元 (COMBIN14)	32
8.8.1 单元说明	32

8.8.2 COMBIN14 单元输入.....	32
8.8.3 COMBIN14 输出.....	33
8.8.4 COMBIN14 假设与限制.....	34
8.9 网格划分单元 (MESH200)	34
8.9.1 单元描述	34
8.9.2 单元输入	35
8.10 接触单元及目标单元.....	35
8.10.1 常用接触单元组	35
8.10.2 CONTA173 单元.....	35
8.10.3 TARGET170.....	38
8.11 本章小结	38

第 9 章 单元生死..... 错误！未定义书签。156

9.1 单元生死原理.....	错误！未定义书签。156
9.1.1 单元生死原理.....	错误！未定义书签。156
9.1.2 单元生死应用范围	错误！未定义书签。157
9.2 单元生死使用过程	错误！未定义书签。158
9.2.1 建模	错误！未定义书签。158
9.2.2 加载并求解.....	错误！未定义书签。158
9.2.3 使用生死单元功能要注意的地方.....	错误！未定义书签。161
9.2.4 单元生死应用实例	错误！未定义书签。162
9.3 本章小结	错误！未定义书签。170

第三篇 应用实例篇

第 10 章 简单排架结构实例分析..... 错误！未定义书签。173

10.1 三角形屋架受力分析	错误！未定义书签。173
10.1.1 问题描述.....	错误！未定义书签。173
10.1.2 前处理	错误！未定义书签。174
10.1.3 加载及求解.....	错误！未定义书签。177
10.1.4 后处理	错误！未定义书签。178
10.2 钢结构排架平面外失稳模拟	错误！未定义书签。181
10.2.1 问题描述.....	错误！未定义书签。181
10.2.2 前处理	错误！未定义书签。182
10.2.3 求解及分析	错误！未定义书签。186
10.2.4 后处理及结果分析	错误！未定义书签。188
10.3 钢结构排架受力分析	错误！未定义书签。190
10.3.1 问题简述.....	错误！未定义书签。190

10.3.2 前处理	错误！未定义书签。191
10.3.3 加载及求解.....	错误！未定义书签。197
10.3.4 后处理	错误！未定义书签。200
10.4 塔式起重机受力及模态分析	错误！未定义书签。202
10.4.1 问题简述.....	错误！未定义书签。202
10.4.2 前处理	错误！未定义书签。202
10.4.3 加载及求解.....	错误！未定义书签。212
10.4.4 模态分析.....	错误！未定义书签。214
10.5 本章小结	错误！未定义书签。217
 第 11 章 钢筋混凝土实例分析.....	错误！未定义书签。218
11.1 大体积混凝土热分析问题	错误！未定义书签。218
11.1.1 问题描述.....	错误！未定义书签。218
11.1.2 热分析阶段前处理	错误！未定义书签。219
11.1.3 热分析求解.....	错误！未定义书签。224
11.1.4 结构分析前处理	错误！未定义书签。226
11.1.5 结构应力求解.....	错误！未定义书签。228
11.1.6 后处理及结果分析	错误！未定义书签。228
11.1.7 关于大体积混凝土	错误！未定义书签。230
11.2 钢筋混凝土梁	错误！未定义书签。231
11.2.1 问题描述.....	错误！未定义书签。231
11.2.2 前处理	错误！未定义书签。232
11.2.3 加载及求解.....	错误！未定义书签。237
11.2.4 一般后处理.....	错误！未定义书签。239
11.2.5 时间历程后处理	错误！未定义书签。240
11.3 钢筋混凝土板	错误！未定义书签。242
11.3.1 问题简述.....	错误！未定义书签。242
11.3.2 前处理	错误！未定义书签。242
11.3.3 加载及求解.....	错误！未定义书签。246
11.3.4 后处理	错误！未定义书签。248
11.4 钢筋混凝土开裂	错误！未定义书签。251
11.4.1 相关知识简介	错误！未定义书签。251
11.4.2 问题描述.....	错误！未定义书签。252
11.4.3 前处理	错误！未定义书签。253
11.4.4 加载和求解.....	错误！未定义书签。256
11.4.5 计算结果分析	错误！未定义书签。258
11.5 预应力钢筋混凝土	错误！未定义书签。259
11.5.1 问题描述.....	错误！未定义书签。260

11.5.2 前处理	错误！未定义书签。260
11.5.3 加载及求解.....	错误！未定义书签。265
11.5.4 后处理	错误！未定义书签。266
11.6 钢筋混凝土结构大楼浇筑施工模拟	错误！未定义书签。268
11.6.1 问题简述.....	错误！未定义书签。268
11.6.2 前处理	错误！未定义书签。268
11.6.3 求解项设置.....	错误！未定义书签。274
11.6.4 施工过程模拟.....	错误！未定义书签。274
11.6.5 后处理	错误！未定义书签。279
11.7 本章小结	错误！未定义书签。281
 第 12 章 常见建筑结构体系实例分析	错误！未定义书签。283
12.1 钢筋混凝土框架结构简单分析	错误！未定义书签。283
12.1.1 问题简述.....	错误！未定义书签。283
12.1.2 前处理	错误！未定义书签。284
12.1.3 求解	错误！未定义书签。289
12.1.4 后处理	错误！未定义书签。290
12.2 钢结构梁板体系地震响应分析	错误！未定义书签。291
12.2.1 问题简述.....	错误！未定义书签。291
12.2.2 前处理	错误！未定义书签。292
12.2.3 求解及结果.....	错误！未定义书签。296
12.2.4 查看计算结果.....	错误！未定义书签。300
12.3 框架-剪力墙结构实例分析	错误！未定义书签。301
12.3.1 框架剪力墙结构简介.....	错误！未定义书签。302
12.3.2 问题描述.....	错误！未定义书签。302
12.3.3 单元及材料参数设定.....	错误！未定义书签。303
12.3.4 建立模型.....	错误！未定义书签。304
12.3.5 施加荷载及静力分析.....	错误！未定义书签。310
12.3.6 模态分析.....	错误！未定义书签。312
12.3.7 特征值屈曲分析	错误！未定义书签。313
12.4 本章小结	错误！未定义书签。316
 第 13 章 基础工程实例分析	错误！未定义书签。317
13.1 单柱式桥墩全桩基础	错误！未定义书签。317
13.1.1 问题简述.....	错误！未定义书签。317
13.1.2 前处理	错误！未定义书签。318
13.1.3 加载与求解.....	错误！未定义书签。321

13.1.4 一般后处理.....	错误！未定义书签。322
13.2 考虑接触单元桩基分析	错误！未定义书签。324
13.2.1 问题简述.....	错误！未定义书签。324
13.2.2 单元及材料属性设定.....	错误！未定义书签。324
13.2.3 建模	错误！未定义书签。325
13.2.4 加载及求解.....	错误！未定义书签。331
13.2.5 后处理	错误！未定义书签。333
13.3 房屋刚性独立基础.....	错误！未定义书签。335
13.3.1 独立基础.....	错误！未定义书签。335
13.3.2 问题简述.....	错误！未定义书签。335
13.3.3 前处理	错误！未定义书签。336
13.3.4 加载及求解.....	错误！未定义书签。339
13.3.5 后处理	错误！未定义书签。340
13.4 房屋筏形基础.....	错误！未定义书签。343
13.4.1 问题简述.....	错误！未定义书签。343
13.4.2 前处理	错误！未定义书签。344
13.4.3 恒载加载及求解.....	错误！未定义书签。347
13.4.4 后处理	错误！未定义书签。348
13.4.5 计算活荷载影响.....	错误！未定义书签。350
13.4.6 后处理	错误！未定义书签。351
13.5 本章小结	错误！未定义书签。352
 第 14 章 边坡问题实例分析.....	错误！未定义书签。353
14.1 饱和度影响边坡稳定问题	错误！未定义书签。353
14.1.1 边坡稳定问题.....	错误！未定义书签。353
14.1.2 问题简述.....	错误！未定义书签。354
14.1.3 前处理	错误！未定义书签。354
14.1.4 加载及求解.....	错误！未定义书签。359
14.1.5 后处理	错误！未定义书签。363
14.2 挡土墙支护.....	错误！未定义书签。367
14.2.1 挡土墙简介.....	错误！未定义书签。368
14.2.2 问题简述.....	错误！未定义书签。369
14.2.3 单元及材料定义.....	错误！未定义书签。369
14.2.4 建模	错误！未定义书签。370
14.2.5 加载及求解.....	错误！未定义书签。375
14.2.6 后处理	错误！未定义书签。376
14.3 本章小结	错误！未定义书签。378

第 15 章 隧道及地下工程实例分析.....	错误！未定义书签。379
15.1 地铁站台地震响应分析	错误！未定义书签。379
15.1.1 相关知识.....	错误！未定义书签。379
15.1.2 问题简述.....	错误！未定义书签。380
15.1.3 前处理	错误！未定义书签。381
15.1.4 加载及求解.....	错误！未定义书签。386
15.1.5 一般后处理.....	错误！未定义书签。388
15.1.6 时间历程后处理	错误！未定义书签。390
15.2 暗挖隧道结构受力分析	错误！未定义书签。392
15.2.1 关于暗挖法.....	错误！未定义书签。392
15.2.2 问题简述.....	错误！未定义书签。392
15.2.3 前处理	错误！未定义书签。393
15.2.4 加载及求解.....	错误！未定义书签。396
15.2.5 去除受拉弹簧单元再分析	错误！未定义书签。400
15.3 明挖矩形截面隧道结构受力分析	错误！未定义书签。403
15.3.1 关于明挖法.....	错误！未定义书签。403
15.3.2 问题简述.....	错误！未定义书签。403
15.3.3 前处理	错误！未定义书签。404
15.3.4 加载及求解.....	错误！未定义书签。407
15.3.5 查看结果并二次求解.....	错误！未定义书签。408
15.3.6 后处理	错误！未定义书签。409
15.4 山体隧道开挖	错误！未定义书签。412
15.4.1 隧道开挖问题	错误！未定义书签。412
15.4.2 问题简述.....	错误！未定义书签。412
15.4.3 前处理	错误！未定义书签。413
15.4.4 求解选项及边界条件设置	错误！未定义书签。418
15.4.5 基于单元生死的开挖过程求解	错误！未定义书签。420
15.4.6 后处理	错误！未定义书签。424
15.5 本章小结	错误！未定义书签。427
第 16 章 桥梁工程实例分析.....	错误！未定义书签。428
16.1 钢桁架桥	错误！未定义书签。428
16.1.1 问题简述.....	错误！未定义书签。429
16.1.2 前处理	错误！未定义书签。429
16.1.3 加载及求解.....	错误！未定义书签。433
16.1.4 一般后处理	错误！未定义书签。435
16.2 大跨度悬索桥	错误！未定义书签。437

16.2.1 悬索桥背景简介	错误！未定义书签。437
16.2.2 问题简述.....	错误！未定义书签。438
16.2.3 单元及材料参数.....	错误！未定义书签。439
16.2.4 建模	错误！未定义书签。440
16.2.5 找形分析.....	错误！未定义书签。444
16.2.6 施工过程模拟.....	错误！未定义书签。446
16.2.7 悬索桥全结构静力分析.....	错误！未定义书签。449
16.2.8 悬索桥地震动力响应.....	错误！未定义书签。450
16.3 斜拉桥动力响应综合分析	错误！未定义书签。452
16.3.1 斜拉桥背景知识	错误！未定义书签。452
16.3.2 问题简述.....	错误！未定义书签。453
16.3.3 单元及材料参数.....	错误！未定义书签。454
16.3.4 建模过程.....	错误！未定义书签。456
16.3.5 施加约束并初步求解.....	错误！未定义书签。459
16.3.6 模态分析.....	错误！未定义书签。460
16.3.7 地震动力响应分析	错误！未定义书签。463
16.3.8 正常使用下动力响应.....	错误！未定义书签。464
16.4 本章小结	错误！未定义书签。468
第 17 章 大坝工程实例分析.....	错误！未定义书签。469
17.1 大坝分类与特点	错误！未定义书签。469
17.1.1 混凝土坝.....	错误！未定义书签。469
17.1.2 土石坝	错误！未定义书签。470
17.2 大坝静力分析	错误！未定义书签。470
17.2.1 问题简述.....	错误！未定义书签。470
17.2.2 前处理	错误！未定义书签。471
17.2.3 静力加载及求解	错误！未定义书签。472
17.2.4 后处理	错误！未定义书签。473
17.3 重力坝地震动力响应分析	错误！未定义书签。473
17.3.1 重力坝简介.....	错误！未定义书签。473
17.3.2 问题简述.....	错误！未定义书签。474
17.3.3 前处理	错误！未定义书签。474
17.3.4 静力加载及求解	错误！未定义书签。478
17.3.5 一般后处理.....	错误！未定义书签。479
17.3.6 地震动力响应分析	错误！未定义书签。481
17.4 本章小结	错误！未定义书签。483

第 18 章 大跨度空间结构实例分析	40
18.1 膜结构	40
18.1.1 相关知识简介	40
18.1.2 问题简述	41
18.1.3 前处理	42
18.1.4 施加约束及荷载	43
18.1.5 找形分析	44
18.1.6 关于膜结构	46
18.2 单索结构	46
18.2.1 问题简述	47
18.2.2 单索问题的求解	47
18.3 索网结构	50
18.3.1 问题简述	50
18.3.2 索网找形与分析	51
18.4 空间刚架结构	55
18.4.1 问题简述	55
18.4.2 前处理	56
18.4.3 加载及求解	59
18.4.4 后处理	60
18.5 空间单层网壳	61
18.5.1 问题简述	61
18.5.2 参数设置	62
18.5.3 建模	62
18.5.4 特征屈曲分析	64
18.5.5 非线性分析	67
18.6 空间双层网壳	71
18.6.1 问题简述	71
18.6.2 单元及材料定义	72
18.6.3 建模	73
18.6.4 施加约束和荷载	75
18.6.5 一般后处理结果分析	76
18.7 本章小结	77
参考文献	78

第8章 土木工程中常用单元



导言

在 ANSYS 单元手册中，ANSYS 单元库有 200 多种单元类型，其中许多单元具有好几种可选择特性来胜任不同的功能。

经过新老交替，ANSYS 14.0 已淘汰了许多老单元。一些用处较广的老单元，在 GUI 添加单元时已无列表显示，但是输入命令或者在添加单元时进行手动输入编号均有效。本章仅就土木工程分析中最常用的单元进行单元介绍。对于不常用的单元则不进行太多叙述。



学习目标

- ★ 了解 ANSYS 14.0 的单元类型系统
- ★ 掌握常用单元的特征
- ★ 学会针对不同问题选择合适单元

8.1 单元类型简介

ANSYS 中提供的单元十分丰富，用户应根据不同的使用需要选择不同的单元。接下来将具体介绍单元的分类情况，以及选择单元的基本原则。

8.1.1 常用单元分类

土木工程中最常用的是结构单元，结构单元根据其特性进行分类，可以分为杆单元、梁单元、管单元、平面实体单元、空间实体单元、壳单元、弹簧单元、质量单元、接触单元、矩阵单元、表面效应单元、黏弹实体单元、超弹实体单元、耦合场单元、界面单元、显式动力分析单元。

8.1.2 单元的选择

选择单元应注意以下原则。

- (1) 在结构分析中，结构的应力状态决定单元类型的选择。
- (2) 选择维数最低的单元去获得预期的结果（尽量做到能选择点就不选择线，能选择线

就不选择平面，能选择平面就不选择壳，能选择壳就不选择三维实体）。

(3) 对于复杂结构，应当考虑建立两个或者更多的不同复杂程度的模型。可以建立简单模型，结构承载状态或采用不同分析选项作实验性探讨。

8.2 杆单元 (LIN180)

ANSYS 14.0 的 GUI 单元库中，LINK 单元只有 LINK180 和 LINK11 两种。在土木工程中一般使用 LINK180。

8.2.1 LINK180 单元描述

LINK180 单元是有着广泛工程应用的杆单元，如图 8-1 所示。它可以用来模拟桁架、缆索、连杆、弹簧等等。这种三维杆单元是杆轴方向的拉压单元，每个节点具有三个自由度：沿节点坐标系 X、Y、Z 方向的平动。

就像铰接结构一样，本单元不承受弯矩。

本单元具有塑性、蠕变、旋转、大变形、大应变等功能。

默认情况下，无论进行何种分析，当使用命令 NLGEOM,ON 时，LINK180 单元的应力刚化效应开关打开。同时本单元还具有弹性、各向同性塑性硬化、动力塑性硬化、Hill（各向异性塑性）、Chaboche（非线性塑性硬化）以及蠕变等性能。



图 8-1 LINK180 几何特性

8.2.2 LINK180 单元输入

在 LINK180 里输入摘要。

- 单元名称：LINK180。
- 节点：I, J。
- 自由度：UX, UY, UZ。
- 实常数：AREA, ADDMAS。
- 材料特性：EX (弹模)，(PRXY or NUXY)，ALPX (热膨胀系数)，DENS (密度)，GXY，DAMP (对于阻尼域的矩阵乘数 K)。
- 面荷载：无。
- 体荷载：温度-- T (I), T (J)。

- 特殊特性：塑性、粘弹性、粘塑性、蠕变、应力刚化（仅当 NLGEOM,ON 时）、大变形、大应变、初始应力输入、单元生死。支持下列用 TB 命令相关的数据表种类:BISO, MISO, NLISO, BKIN, MKIN, KINH, CHABOCHE, HILL, RATE, CREEP, PRONY, SHIFT, CAST 及 USER。

注意：材料类型的详细情况见 ANSYS .Inc. Theory Reference。

- KEYOPT (2)：仅当 NLGEOM,ON 被激活时使用。
- 0：执行不可压缩性；轴向拉伸功能通过截面积依比例决定（默认值）。假定截面为刚性。
- KEYOPT (10)。
 - 0：无用户子程序提供初始应力。
 - 1：通过用户子程序 USTRESS 读入初始应力。

8.2.3 输出数据

LIN180 的应力输出如图 8-2 所示。

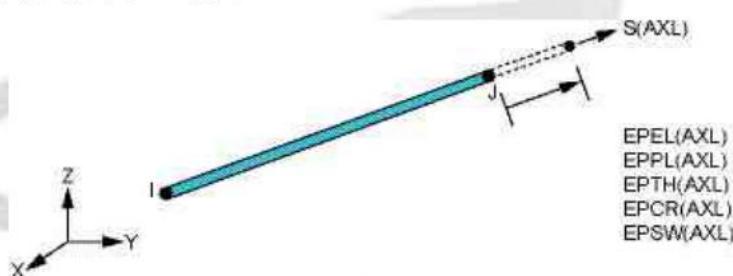


图 8-2 LINK180 应力输出

附加的单元输出，如表 8-1 所示。

表 8-1 LINK180 单元输出信息表

名称	定义	O	R
EL	单元号	Y	Y
NODES	单元节点号 (I and J)	Y	Y
MAT	单元材料号	Y	Y
VOLU:	单元体积	-	Y
XC, YC, ZC	输出结果的位置	Y	3
AREA	截面积	Y	Y
FORCE	单元坐标系中力的项	Y	Y
STRESS	轴向应力	Y	Y
EPEL	轴向弹性应变	Y	Y
TEMP	温度 T (I), T (J)	Y	Y
EPTH	轴向热应变	Y	Y
EPPL	轴向塑性应变	1	1
PWRK	塑性功	1	1
EPCR	轴向蠕应变	2	2

CWRK	蠕变功	2	2
------	-----	---	---

注：O 表示该项存在于 Jobname.OUT 文件；R 表示该项存在于结果文件。Y 表示该项总是可用的，而减号 “-” 表示该项不可用。

8.2.4 LINK180 的假定和限制

杆单元假定为一直杆，轴向荷载作用在末端，自杆的一端至另一端均为同一属性。杆长应大于零，即节点 I 和 J 不重合。面积也必须比零要大。假定温度沿杆长线性变化。位移函数暗含在杆上具有相同的应力。

8.3 梁单元 (BEAM188)

BEAM188 适用于分析细长的梁。该元素是基于 Timoshenko 梁理论的，具有扭切变形效果。

8.3.1 BEAM188 单元描述

BEAM188 是二节点的三维线性梁，如图 8-3 所示。BEAM188 在每个节点上有 6 或 7 个自由度，自由度数目的变化是由 KEYOPT (1) 来控制的。

当 KEYOPT (1) = 0 时（默认），每节点有 6 个自由度。分别是沿 x,y,z 的位移及绕其的转动。

当 KEYOPT (1) = 1 时，会添加第 7 个自由度（翘曲量）。

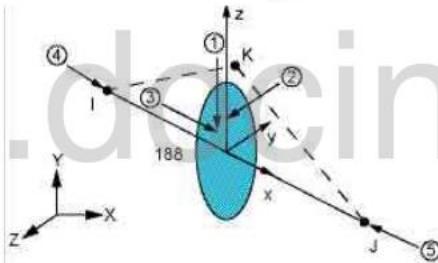


图 8-3 BEAM188 单元几何特性

此元素能很好的应用于线性分析，大偏转，大应力的非线性（分析）。

BEAM188 包含应力刚度，在默认情况下，在某些分析中由 NLGEOM 来打开。在进行弯曲 (flexural)，侧向弯曲 (lateral)，和扭转稳定性 (torsional stability) 分析时，应力刚度应该是被打开的。

BEAM188 能够采用 SECTYPE, SECDATA, SECOFFSET, SECWRITE 和 SECREAD 来定义任何截面 (形状)。弹性 (elasticity), 蠕变 (creep) 和塑性 (plasticity) 模型都是允许的（不考虑次截面形状）。

8.3.2 BEAM188 单元输入

Beam188 由整体坐标系的节点 i 和 j 定义。节点 K 是定义单元方向的所选方式。

Beam188 可以在没有方向节点的情况下被定义。在这种情况下，单元的 x 轴方向为 i 节点指向 j 节点。对于两节点的情况，默认的 Y 轴方向按平行 X-Y 平面自动计算。对于单元平行与 Z 轴的情况（或者斜度在 0.01% 以内），单元的 Y 轴的方向平行与整体坐标的 y 轴。用第三个节点的选项，用户可以定义单元的 X 轴方向。如果两者都定义了，那么第三节点的选项优先考虑。第三个节点 (K)，如果采用的话，将和 i、j 节点一起定义包含单元 x 轴和 z 轴的平面。如果该单元采用大变形分析，需要注意这个第三号节点紧紧在定义初始单元方向的时候有效。

梁单元是一维空间线单元。横截面资料用 sectype 和 seadata 命令独立的提供，参见 ANSYS Structural Analysis Guide 的 Beam Analysis and Cross Sections。截面与单元用截面 ID 号 (SECNUM) 来关联，截面号是独立的单元属性。除了等截面，还可以用 sectype 命令中的锥形选项来定义锥形截面（参考 DefiningaTaperedBeam）。示意图如图 8-4 所示。

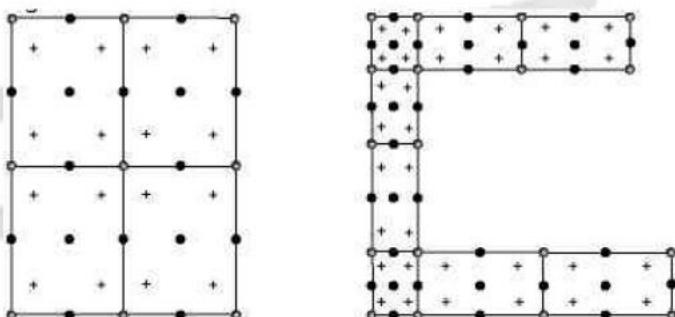


图 8-4 梁单元截面特性

单元基于铁木辛哥梁理论，这个理论是一阶剪切变形理论；横向剪切应力在横截面是不变的，也就是说变形后横截面保持平面不发生扭曲。Beam188 是一阶铁木辛哥梁单元，沿着长度用了一个积分点，用默认的 KEYOPT(3) 设置。因此，在 i 和 j 节点要求 SMISC 数值的时候，中间数值在两端节点均输出。当 KEYOPT(1) 设置为 2，两个积分点作为延长的线性变量被运用。

Beam188/beam189 单元可以用在细长或者短粗的梁。由于一阶剪切变形的限制，只有适度的“粗”梁可以分析。梁的长细比 (GAL2/EI) 可以用来判定单元的适用性，这里：G 为剪切模量；A 为截面积；L 为长度；EI 为抗弯刚度。

需要注意的是这个比例的计算需要用一些全局距离尺寸，不是基于独立的单元尺度。

- 单元名称：LINK180
- 节点：I, J, K
- 自由度：UX, UY, UZ, ROTX, ROTY, ROTZ
- 材料属性：EX, (PRXY or NUXY), ALPX, DENS, GXY, GYZ, GXZ, DAMP
- 表面力：压力（用负数表示作用方向相反）
- 体力：温度 T(0,0), T(1,0), T(0,1) at each end node

- 特殊特征: Plasticity 为塑性; Viscoelasticity 为粘弹性; Viscoplasticity 为粘弹性; Creep 为蠕变; Stress stiffening 为应力刚化; Large deflection 为大挠曲; Large strain 为大应变; Initial stress import 为初始应力引入; Birth and death (requires KEYOPT(11)= 1) 为单元的生死; Automatic selection of element technology 为自动选择单元技术。
- 支持下列用 TB 命令相关的数据表种类: BISO,MISO, NLISO, BKIN, MKIN, KINH, CHABOCHE, HILL, RATE, CREEP, PRONY,SHIFT, CAST and USER。

8.3.3 单元输出

梁单元输出属性如表 8-2 所示。

表 8-2 BEAM188 应力输出

Name	Definition	O	R
EL	单元号	Y	Y
NODES	单元节点号	Y	Y
MAT	材料号	Y	Y
C.G.:X, Y, Z	重心	Y	Y
AREA	截面积	1	Y
SF:Y, Z	截面剪力	1	Y
SE:Y, Z	截面剪应变	1	Y
S:XX, XZ, XY	截面点应力	2	Y
E:XX, XZ, XY	截面应变	2	Y
MX	扭矩	Y	Y
KX	扭应变	Y	Y
KY, KZ	曲率	Y	Y
EX	轴向应变	Y	Y
FX	轴向力	Y	Y
MY, MZ	弯矩	Y	Y
BM	双向力矩	3	3
BK	双曲率	3	3

8.4 管单元 (PIPE16)

该单元基于三维梁单元 (BEAM4)，包含了根据对称性和标准管几何尺寸进行的简化。

8.4.1 PIPE16 单元描述

PIPE16 是一种单轴单元，具有拉压、扭转和弯曲性能。该单元在两个结点有 6 个自由度：沿节点 X,Y,Z 方向的平移和绕结点 X,Y,Z 轴的旋转。几何特性如图 8-5 所示。

该单元的 X 轴为从 I 结点到 J 结点的方向。当单元由 2 个结点组成时，单元的 Y 轴被自动设成平行于整体坐标系的 X-Y 面。在单元平行于 Z 轴的情况下（或在 0.01% 坡度范围内），

该单元的 Y 轴是与整体坐标系的 Y 轴平行的。用户若想人为控制单元 X 轴的方向，需定义第 3 个节点。如果使用了第 3 节点 (K)，则 K 和 I、J 一起定义了包括单元 X 轴和 Y 轴的平面。绕管圆周的输入与输出位置定义为：若沿单元 Y 轴为 0；类似的，沿 Z 轴为 90°。

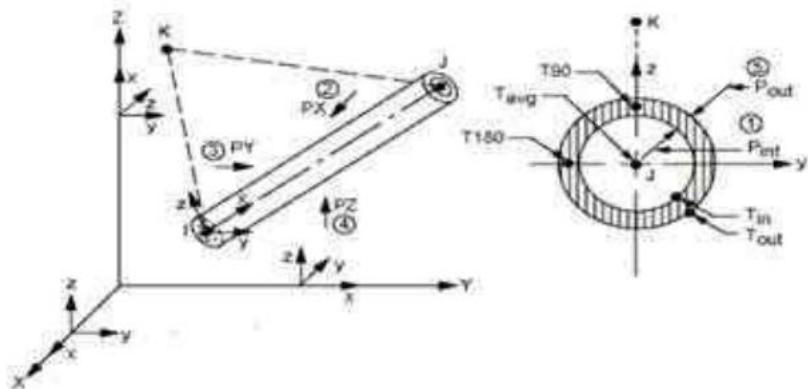


图 8-5 PIPE16 几何特性

应力增量系数 (SIF) 影响弯曲应力。若 KEYOPT (2) = 0，则应力增量系数在 I (SIFI) 节点和 J (SIFJ) 节点末端输入；若 KEYOPT (2) = 1,2,或 3，则软件按照 T 形接头自行计算并确定。当 SIF 的值小于 1.0 时取 1.0。挠曲系数 (FLEX) 被分为截面的转动惯量，从而生成一个计算弯曲刚度所需的修正转动惯量。FLEX 的默认值为 1.0，但也可以输入任何正数。

单元的质量可由管壁材料，外部绝缘体和内部流体计算得到。绝缘体和流体决定了单元的质量矩阵。允许侵蚀厚度用来计算应力。确定的管壁其质量是常数，不用考虑其计算值。非零的绝缘体面积是常数，不用考虑其计算值（由管壁外直径和长度获得）。非零的刚度也是常数，不考虑管的轴向刚度。

单元荷载的分布见 Node and Element Loads。压力将作为单元表面的面荷载输入，单元表面由 PIPE16 的循环数字表示。内部压力与外部压力以正数输入。把由风荷载或拉力荷载（管的单位长度上）产生的横向压力 (P_X, P_Y, P_Z) 定义在世界坐标的笛卡尔方向，正的横向压力作用在坐标的正向，可用常规的组成或规则的满布荷载 (KEYOPT (5))。逐渐变小的压力可不考虑。只考虑单元受的恒压。

温度将作为单元节点的主要荷载输入。温度由管壁厚坡度和直径坡度决定 (KEYOPT(1))。I (TOUT (I) or TAVG (I)) 节点的初始温度默认值为 TUNIF。如果初温以后的温度没有确定，则默认值为初温。如果已输入了 I 节点的所有温度，而 J 节点未知，则 J 节点的默认值为对应的 I 节点的值。对于别的输入模式，未知温度的默认值为 TUNIF。

KEYOPT (4) 用于确定单元类型便于输出标志和后处理操作。

KEYOPT (7) 用于计算一个不对称的，可逆的，有阻尼的矩阵（经常用于旋转动力分析）。旋转频率以确定常数 SPIN（弧度/次数，取单元 X 轴的正向为正）输入。

8.4.2 PIPE16 输入摘要

- 单元名称：PIPE16。
- 节点：I, J, K (K 节点的正向已选定)。

- 自由度: UX, UY, UZ, ROTX, ROTY, ROTZ。
- 常量: OD, TKWALL, SIFI, SIFJ, FLEX, DENSFL, DENSIN, TKIN, TKCORR, AREAIN, MWALL, STIFF, SPIN。
- 材料特性: EX, ALPX, PRXY or NUXY, DENS, GXY, DAMP。
- 面荷载: 压力为 1-PINT, 2-PX, 3-PY, 4-PZ, 5-POUT
- 体荷载: 温度为 TOUT (I), TIN (I), TOUT (J), TIN (J) 如果 KEYOPT (1) = 0, 或 TAVG (I), T90 (I), T180 (I), TAVG (J), T90 (J), T180 (J) 如果 KEYOPT (1) = 1。
- 特殊性质: 应力硬化, 过大偏差, 起始与终止。
- KEYOPT (1)
 - 0: 用温度描述的沿壁厚方向的梯度。
 - 1: 用温度描述的直径梯度。
- KEYOPT (2)
 - 1: 用温度描述的直径梯度。
- KEYOPT (3)
 - 0: SIFI 和 SIFJ 的应力强度系数
 - 1: T型连接计算中 I 节点的应力强度系数
 - 2: T型连接计算中 J 节点的应力强度系数
 - 3: T型连接计算中两端节点的应力强度系数
- KEYOPT (4) 单元核对计算输出与后处理。
 - 0: 直管
 - 1: 阀型管
 - 2: 变径管
 - 3: 法兰管
 - 4: 膨胀连接
 - 5: 斜接弯曲
 - 6: T型分支
- KEYOPT (5) 用 PX, PY 与 PZ 代表横向压力。
 - 0: 只有法线分布的荷载
 - 1: 使用满布荷载 (法线与剪切方向组成)
- KEYOPT (6)
 - 0: 不打印输出结构单元的力或力矩
 - 2: 打印结构单元在该单元的坐标系中的力或力矩
- KEYOPT (7)
 - 0: 无阻尼的回转矩阵
 - 1: 计算回转的阻尼矩阵。常量 SPIN 必须比零大。DENSFL 和 DENSIN 必须为零。

8.4.3 单元输出

与单元相关的两种结论输出形式如下：

- (1) 移置节点包括在所有的节点方案中。
- (2) 附加单元的输出如表 8-3 所示。

表 8-3 单元输出

名称	定义	O	R
EL	单元数量	Y	Y
NODES	节点 - I, J	Y	Y
MAT	材料数量	Y	Y
VOLU:	体积	--	Y
XC, YC, ZC	数值结论位置	Y	6
CORAL	允许侵蚀厚度	1	1
TEMP	TOUT(I), TIN(I), TOUT(J), TIN(J)	2	2
TEMP	TAVG(I), T90(I), T180(I), TAVG(J), T90(J), T180(J)	3	3
PRES	PINT, PX, PY, PZ, POUT	Y	Y
SFACTI, SFACTJ	节点 I 与节点 J 的应力增强系数	Y	Y
STH	沿管壁厚度方向的最大热量梯度所引起的应力	Y	Y
SPR2	环向压应力的计算编码	--	Y
SMI, SMJ	节点 I 与节点 J 瞬时应力的计算编码	--	Y
SDIR	径向（轴向）应力	--	Y
SBEND	外表面的最大弯曲应力	--	Y
ST	由扭转引起的外表面剪应力	--	Y
SSF	由剪切力引起的剪应力	--	Y
S (1MX, 3MN, INTMX, EQVMX)	最大主应力, 最小主应力, 最大应力集度, 最大等效应力 (都作用在外表面)	Y	Y
S (AXL, RAD, H, XH)	轴向, 径向, 环向和剪切应力	4	4
S (1, 3, INT, EQV)	最大主应力, 最小主应力, 应力集度, 等效应力	4	4
EPEL (AXL, RAD, H, XH)	轴向, 景象, 环向与剪切应变	4	4
EPTH (AXL, RAD, H)	轴向, 径向, 与环向热应变	4	4
MFOR (X, Y, Z)	节点 I 与节点 J 上力的组成 (在单元坐标系中)	5	Y
MMOM (X, Y, Z)	节点 I 与节点 J 上力矩的组成 (在单元坐标系中)	5	Y

8.5 实体单元 (SOLID)

土木工程中常用的实体单元有 SOLID65 钢筋混凝土单元, 以及 SOLID185 三维八节点结

构单元。

8.5.1 SOLID65 单元描述

SOLID65 单元用于含钢筋或不含钢筋的三维实体模型，该实体模型可具有拉裂与压碎的性能。在混凝土的应用方面，如用单元的实体性能来模拟混凝土，而用加筋性能来模拟钢筋的作用。当然该单元也可用于其他方面，如加筋复合材料（如玻璃纤维）及地质材料（如岩石）。该单元具有 8 个节点，每个节点有三个自由度，即 X,Y,Z 三个方向的线位移；还可对三个方向的含筋情况进行定义。

本单元与 SOLID45 单元（三维结构实体单元）的相似，只是增加了描述开裂与压碎的性能。本单元最重要的方面在于其对材料非线性的处理。其可模拟混凝土的开裂（三个正交方向）、压碎、塑性变形及徐变，还可模拟钢筋的拉伸、压缩、塑性变形及蠕变，但不能模拟钢筋的剪切性能。

8.5.2 SOLID65 输入数据

关于单元几何图形、节点位置、单元坐标系如图 8-6 所示。单元性质为八节点各向同性材料，单元包括一种实体材料和三种钢筋材料，用命令 MAT 输入对混凝土材料的定义，而有关钢筋的细则需在实常数中定义，包括材料号、体积率、方向角（THETA, PHI），钢筋的方向角可通过命令/Eshape 以图示方式校验。

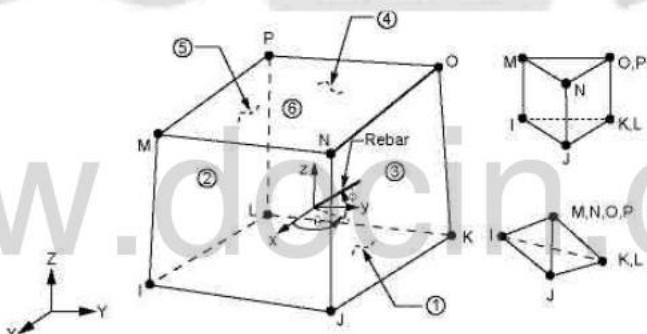


图 8-6 SOLID65 单元几何特性

体积率是指钢筋的体积与整个单元体积的比，钢筋的方向通过单元坐标系中的两个角度（度制）来定义。当钢筋的材料号为 0 或等于单元的材料号时则不考虑它的作用。

另外，有关混凝土的材料定义，如剪切传递系数，拉应力，压应力都应在数据表中给出，详细描述可参见 ANSYS 帮助文件的表 65.1 (Table 65.1)。通常剪力传递系数为 0~1.0，0 表示平滑的裂缝（完全丧失剪力传递作用），1 表示粗糙的裂缝（几乎没有失去剪力传递作用）。这就有利于对裂缝开裂与闭合进行描述。

有关单元荷载的描述见“节点单元荷载”（ANSYS 帮助中专有一节）。压力作为面荷载作用在单元表面如“SOLID65 的几何模型图”中带圈数字所示。主力作用在单元内。温度和影响（Fluences）可在节点上作为单元体荷载输入。节点 I 的温度 T(I) 默认为 TUNIF，如其他节点温度没有被指定，则它们默认为 T(I)。对于其他的输入模型未指定温度时默认值都为

TUNIF。对影响(Fluence)的设定除用0取代TUNIF外与温度的设定是相同的。

命令TREF和BETAD分别用来设定整体的基准温度和阻尼值。用MAT命令指定与单元相关的基准温度值(MP,REFT)或阻尼值(MP,DAMP)，但不能对钢筋的材料号进行以上定义。

KEYOPT(1)用于设定是否考虑大变形，KEYOPT(5)和KEYOPT(6)则提供是多种单元输出选项。

KEYOPT(7)为与是否考虑应力松弛相关的项，当KEYOPT=1时表示考虑，目的是加速裂缝即将开裂时计算的收敛(在混凝土材料数据表的第9个系数中的输入值即为拉伸应力松弛的折减系数)。应力松弛并不能反应因次生裂缝的产生而引起的应力应变关系的变化。松弛系数在裂缝处为零，因此，相应的开裂面上的刚度也是零。

在几何非线性分析时可用SOLCONTROL,,INCP命令设定考虑抗压刚度的影响。抗压刚度的影响在线性屈曲分析中会被自动考虑。

SOLD65单元输入总结如下。

- 节点：I,J,K,L,M,N,O,P。
- 自由度：UX,UY,UZ。
- 实常数：MAT1, VR1, THETA1, PHI1, MAT2, VR2, THETA2, PHI2, MAT3, VR3, THETA3, PHI3 (MATn是材料号，VRn是体积率，而THETAn和PHIn是方向角，代表了三种钢筋材料)。
- 材料性质：EX, ALPX, PRXY or NUXY, DENS (用于混凝土) EX, ALPX, DENS (用于每种钢筋)，还可通过MAT命令设定阻尼与基准温度。
- 表面荷载(压力)：面1(J-I-L-K)，面2(I-J-N-M)，面3(J-K-O-N)，面4(K-L-P-O)，面5(L-I-M-P)，面6(M-N-O-P)。
- 体荷载(温度)：T(I), T(J), T(K), T(L), T(M), T(N), T(O), T(P)。
- 影响(Fluences)：FL(I), FL(J), FL(K), FL(L), FL(M), FL(N), FL(O), FL(P)。
- 特性：Plasticity(塑性)，Creep(蠕变\徐变)，Cracking(开裂)，Crushing(压碎)，Large deflection(大变形)，Large strain(大应变)，Stress stiffening(应力强化)，Birth and death(单元生死)，Adaptive descent。
- KEYOPT(1)大变形控制。
 - 0: 考虑大变形。
 - 1: 不考虑。
- KEYOPT(5)混凝土线性解的输出控制。
 - 0: 只打印质心的线性解。
 - 1: 给出每个积分点的解。
 - 2: 输出节点应力。
- KEYOPT(6)混凝土非线性解输出控制。
 - 0: 只打印质心的线性解。
 - 3: 同时还给出积分点的解。

- KEYOPT (7) 开裂后应力松弛考虑选项。
 - 0: 不考虑拉伸应力松弛。
 - 1: 考虑应力松弛, 有助于计算收敛。

8.5.3 SOLID65 应力输出项

SOLID65 单元输出示意如图 8-7 所示。

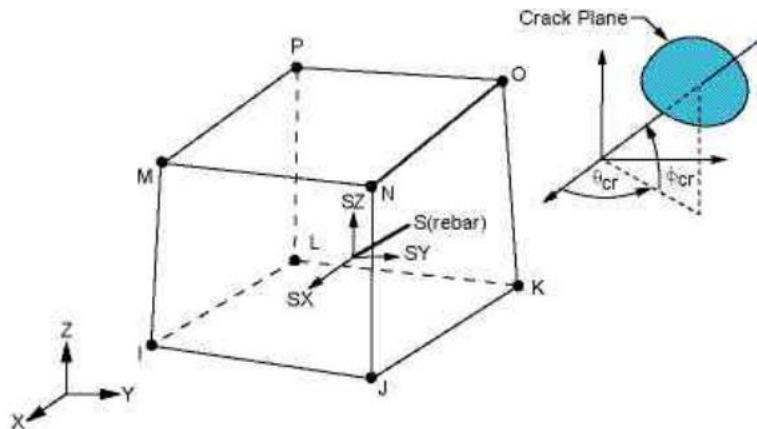


图 8-7 单元输出示意

与单元相关的解答输出项有以下两方面:

- (1) 所有节点的节点位移;
- (2) 其他输出项如表 8-4 所示。

表 8-4 附加单元输出

名称	定义	O	R
EL	单元号	Y	Y
NODES	节点: I, J, K, L, M, N, O, P	Y	Y
MAT	材料号	Y	Y
NREINF	钢筋数量	Y	-
VOLU:	体积	Y	Y
PRES	压力作用面 P1 由节点 J, I, L, K 围成; P2 由 I, J, N, M 围成; P3 由 J, K, O, N 围成; P4 由 K, L, P, O 围成; P5 由 L, I, M, P 围成; P6 由 M, N, O, P 围成	Y	Y
TEMP	作用在各节点上的温度 T(I), T(J), T(K), T(L), T(M), T(N), T(O), T(P)	Y	Y
FLUEN	作用在各节点上的影响 FL(I), FL(J), FL(K), FL(L), FL(M), FL(N), FL(O), FL(P)	Y	Y
XC, YC, ZC	Location where results are reported	Y	6
S:X, Y, Z, XY, YZ, XZ	应力	1	1
S:1, 2, 3	主应力	1	1
S:INT	应力强度	1	1

S:EQV	等效应力	<u>1</u>	<u>1</u>
EPEL:X, Y, Z, XY, YZ, XZ	弹性应变	<u>1</u>	<u>1</u>

(续表)

名称	定义	O	R
EPEL:1, 2, 3	弹性主应变	<u>1</u>	-
EPEL:EQV	等效弹性应变[7]	<u>1</u>	<u>1</u>
EPTH:X, Y, Z, XY, YZ, XZ	平均热应变	<u>1</u>	<u>1</u>
EPTH:EQV	等效热应变[7]	<u>1</u>	<u>1</u>
EPPL:X, Y, Z, XY, YZ, XZ	塑性应变均值	<u>4</u>	<u>4</u>
EPPL:EQV	等效塑性应变[7]	<u>4</u>	<u>4</u>
EPCR:X, Y, Z, XY, YZ, XZ	蠕变均值	<u>4</u>	<u>4</u>
EPCR:EQV	等效蠕变[7]	<u>4</u>	<u>4</u>
NL:EPEQ	等效塑性应变均值	<u>4</u>	<u>4</u>
NL:SRAT	试验应力与屈服应力的比值	<u>4</u>	<u>4</u>
NL:SEPL	应力应变曲线上的平均等效应力（混凝土的）	<u>4</u>	<u>4</u>
NL:HPRES	静水压力	-	<u>4</u>
THETCR, PHICR	裂缝的方向角 THETA 和 PHI	<u>1</u>	<u>1</u>
STATUS	单元状态	2	2
IRF	钢筋号	<u>3</u>	-
MAT	材料号	<u>3</u>	-
VR	体积率	<u>3</u>	-
THETA	X-Y 平面内的方向角	<u>3</u>	-
PHI	X-Y 平面外的方向角	<u>3</u>	-
EPEL	单轴弹性应变	<u>3</u>	-
S	单轴弹性应力	<u>3</u>	-
EPEL	单轴弹性应变均值	<u>5</u>	<u>5</u>
EPPL	单轴塑性应变均值	<u>5</u>	<u>5</u>
SEPL	应力应变曲线上的平均等效应力（钢筋的）	<u>5</u>	<u>5</u>
EPCR	单轴蠕变均值（钢筋）		

8.5.4 SOLID185 单元描述

Solid185 单元用于构造三维固体结构，单元通过 8 个节点来定义，每个节点有 3 个沿着 xyz 方向平移的自由度。单元具有超弹性，应力钢化，蠕变，大变形和大应变能力。还可采用混合模式模拟几乎不可压缩弹塑材料和完全不可压缩超弹性材料，单元几何特性如图 8-8 所示。

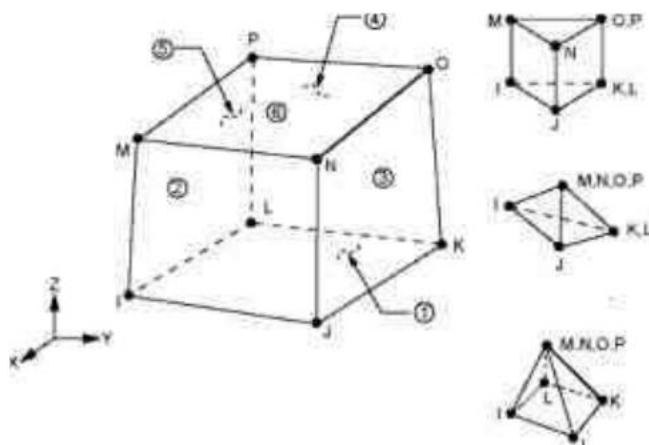


图 8-8 SOLID185 几何特性

8.5.5 SOLID185 输入数据

SOLID185 单元输入摘要。

- 节点: I, J, K, L, M, N, O, P。
- 节点自由度: UX, UY, UZ。
- 实常数: 如果 KEYOPT (2) = 0, 没有实常数。如果 KEYOPT (2) = 1, HGSTF-沙漏刚度缩减因子 (默认为 1.0, 任何正数都是合法的, 如果设为 0.0, 则自动取 1.0)。
- 材料参数 EX, EY, EZ, (PRXY, PRYZ, PRXZ or NUXY, NUYZ, NUXZ), ALPX, ALPY, ALPZ (或者 CTEX, CTEY, CTEZ 或 THSX, THSY, THSZ), DENS, GXY, GYZ, GXZ, DAMP。
- 表面荷载: 压力 s——表面 1 (J-I-L-K), 表面 2 (I-J-N-M), 表面 3 (J-K-O-N), 表面 4 (K-L-P-O), 表面 5 (L-I-M-P), 表面 6 (M-N-O-P)。
- 体荷载: 温度——T (I), T (J), T (K), T (L), T (M), T (N), T (O), T (P)。
- 特殊功能: 塑性, 超弹性, 粘弹性, 粘塑性, 蠕变应力强化, 大变形, 大应变, 初始应力导入, 自动单元选择技术, 单元生死。
- 支持用 TB 命令下列的下列类型的表格: ANEL, BISO, MISO, NLISO, BKIN, MKIN, KINH, CHABOCHE, HILL, RATE, CREEP, HYPER, PRONY, SHIFT, CAST, SMA, and USER。
- KEYOPT (2) 单元技术。
 - 0: 使用 B 方法全积分。
 - 1: 带沙漏控制的一致缩减积分。
 - 2: 增强应变公式。
 - 3: 简单增强应变公式。
- KEYOPT (6) 单元公式。
 - 0: 使用纯位移模式 (默认)。
 - 1: 使用混合模式。

- KEYOPT (10) 用户定义初始应力。
 - 0: 没有用户子程序提供初始应力 (默认)。
 - 1: 通过用户子程序读取初始应力。

8.5.6 SOLID185 应力输出项

SOLID185 应力输出项如表 8-5 所示。

表 8-5 SOLID185 单元输出

名称	定义	O	R
EL	单元号	-	Y
NODES	节点-I, J, K, L, M, N, O, P	-	Y
MAT	材料号	-	Y
VOLU:	体积	-	Y
XC, YC, ZC	结果输出的位置	Y	<u>3</u>
PRES	压力 P1 在节点 nodes J, I, L, K; P2 在 I, J, N, M; P3 在 J, K, O, N; P4 在 K, L, P, O; P5 at L, I, M, P; P6 在 M, N, O, P	-	Y
TEMP	温度 T (I), T (J), T (K), T (L), T (M), T (N), T (O), T (P)	-	Y
S:X, Y, Z, XY, YZ, XZ	应力	Y	Y
S:1, 2, 3	主应力	-	Y
S:INT	应力强度	-	Y
S:EQV	等效应力	-	Y
EPEL:X, Y, Z, XY, YZ, XZ	弹性应变	Y	Y
EPEL:1, 2, 3	主弹性应变	-	Y
EPEL:EQV	等效弹性应变[6]	-	Y
EPTH:X, Y, Z, XY, YZ, XZ	热应变	2	2
EPTH:EQV	等效应变[6]	2	2
EPPL:X, Y, Z, XY, YZ, XZ	塑性应变[7]	1	1
EPPL:EQV	等效塑性应变[6]	1	1
EPCR:X, Y, Z, XY, YZ, XZ	蠕变应变	1	1
EPCR:EQV	等效蠕变应变[6]	1	1
EPTO:X, Y, Z, XY, YZ, XZ	总机械应变 (EPEL + EPPL + EPCR)	Y	-
EPTO:EQV	总等效机械应变 (EPEL + EPPL + EPCR)	Y	-
NL:EPEQ	累积等效塑性应变	1	1
NL:CREQ	累积等效蠕变应变	1	1
NL:SRAT	塑性屈服 (1 = 已经屈服, 0 = 没有屈服)	1	1
NL:HPRES	静水压力	1	1
SEND:ELASTIC, PLASTIC, CREEP	应变能密度	-	1
LOCI:X, Y, Z	积分点坐标	-	4
SVAR:1, 2, ..., N	静态变量	-	5

8.6 平面单元 (PLANE182)

PLANE182 用于二维实体结构建模。本单元既可用作平面单元（平面应力、平面应变或广义平面应变），也可作为轴对称单元。

8.6.1 PLANE182 单元说明

本单元有 4 个节点，每个节点 2 个自由度：节点 x 和 y 方向的平移。本单元具有塑性、超弹性、应力刚度、大变形和大应变能力。并具有力-位移混合公式的能力，可以模拟接近不可压缩的弹塑性材料和完全不可压缩超弹性材料的变形，几何特性如图 8-9 所示。

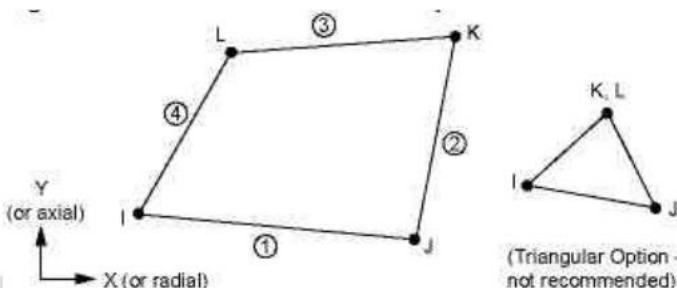


图 8-9 PLANE182 几何特性

8.6.2 PLANE182 单元输入

PLANE182 输入汇总。

- 节点: I, J, K, L
- 自由度: UX, UY
- 实常数: THK 厚度 (仅用于 KEYOPT(3)=3) HGSTF - 沙漏刚度比例因子 (仅用于 KEYOPT(1)=1)；默认为 1.0 (如果输入 0.0, 使用默认值)。
- 材料性能: EX,EY,EZ,PRXY,PRYZ,PRXZ,ALPX,ALPY,ALPZ, DENS,GXY,GYZ,GXZ, DAMP。
- 面荷载: 压力-边 1(J-I), 边 2(K-J), 边 3(L-K), 边 4(I-L)。
- 体荷载: 温度-T(I),T(J),T(K),T(L)。
- 求解特性: 塑性、超弹性、粘弹性、粘塑性、蠕变、应力刚度、大变形、大应变、初应力输入、单元技术自动选择、生死单元。
- KEYOPT(1): 单元技术, 使用 B-bar 方法的全积分。
 - 1: 由沙漏控制的均匀减缩积分。
 - 2: 增强的应变公式。
 - 3: 简化的增强应变公式。
- KEYOPT(3)-单元特性
 - 0: 平面应力。

- 1: 轴对称。
- 2: 平面应变 (Z 向应变为 0.0)。
- 3: 有厚度输入的平面应力。
- 5: 广义平面应变。
- KEYOPT(6): 单元公式。
 - 0: 纯位移公式 (默认)。
 - 1: 使用位移/力 (U/P) 混合公式 (对平面应力无效)。
- KEYOPT(10): 用户定义初始应力。
 - 0: 不使用子程序提供初始应力 (默认)。
 - 1: 由 USTRESS 子程序读入初始应力。

8.6.3 单元应力输出项

PLANE182 具体输出项与 SOLID185 类似, 详情参见单元手册。

8.7 板壳单元 (SHELL181)

SHELL181 为板壳单元, 适用于薄到中等厚度的壳结构。

8.7.1 SHELL181 单元说明

SHELL181 单元有 4 个节点, 每个节点有 6 个自由度, 分别为沿节点 X, Y, Z 方向的平动及绕节点 X, Y, Z 轴的转动。退化的三角形选项用于网格生成的过渡单元。SHELL181 单元具有应力刚化及大变形功能。该单元有强大的非线性功能, 并有截面数据定义, 分析, 可视化等功能, 还能定义复合材料多层壳。几何特性如图 8-10 所示。

SHELL181 壳单元的截面定义了垂直于壳 X-Y 平面的形状。通过截面命令可以定义 Z 方向连续层, 每层的厚度, 材料, 铺层角及积分点数都可以不同。

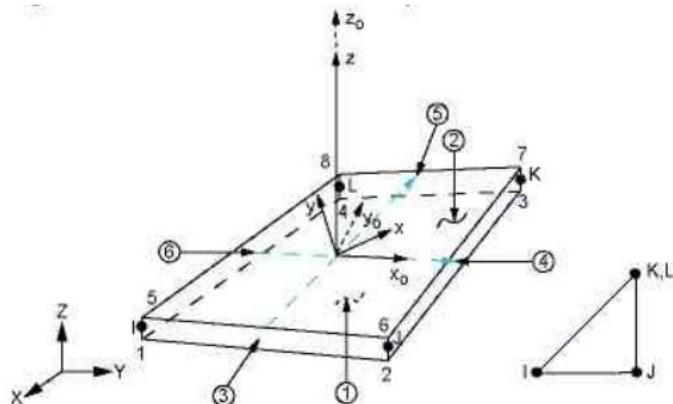


图 8-10 SHELL181 几何特性

8.7.2 SHELL181 单元输入

- 单元: SHELL181。
- 节点: I, J, K, L。
- 自由度: KEYOPT (1) = 0 时为 UX, UY, UZ, ROTX, ROTY, ROTZ ; KEYOPT (1) = 1 时为 UX, UY, UZ。
- 材料特性: EX, EY, EZ, PRXY, PRYZ, PRXZ, (or NUXY, NUYZ, NUXZ), ALPX, ALPY, ALPZ (or CTEX, CTEY, CTEZ or THSX, THSY, THSZ), DENS, GXY, GYZ, GXZ, ALPD。
- 特殊特性: 生死单元、弹性、单元技术自动选择、超弹性、初始状态、大变形、大应变、线性扰动、非线性稳定、塑性、应力刚度、自定义材料、粘塑性、蠕变、截面定义。

8.8 弹簧-阻尼器单元 (COMBIN14)

COMBIN14 为弹簧-阻尼器单元。弹簧-阻尼器没有质量，质量可以通过其他合适的质量单元添加。弹簧或阻尼特性可以在单元里去除。

8.8.1 单元说明

COMBIN14 具有一维, 二维或三维应用中的轴向或扭转的性能。轴向的弹簧-阻尼器选项是一维的拉伸或压缩单元。它的每个节点具有 3 个自由度: x,y,z 的轴向移动, 不能考虑弯曲或扭转。扭转的弹簧-阻尼器选项是一个纯扭转单元。它的每个节点具有 3 个自由度的 X,Y,Z 旋转, 不能考虑弯曲或轴向力。几何特性如图 8-11 所示。

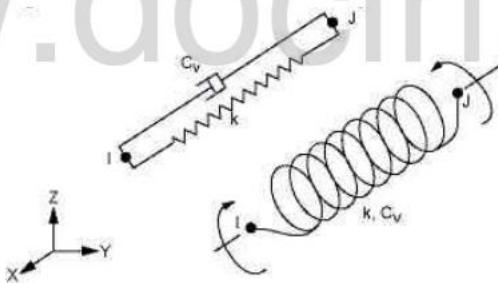


图 8-11 弹簧-阻尼器单元 COMBIN14

8.8.2 COMBIN14 单元输入

COMBIN14 输入概要如下。

- 节点: I,J。
- 自由度: KEYOPT(3)=0 时为 UX, UY, UZ; KEYOPT(3)=1 时为 ROTX, ROTY, ROTZ; KEYOPT(3)=2 时 UX, UY。

- 实常数: K—弹簧常数, CV1—阻尼系数, CV2—阻尼系数 (KEYOPT(1)须置成 1)。
- 材料属性: DAMP。
- 表面荷载: None。
- 体荷载: None。
- 特殊特性: 非线性 (假如 CV2 不是 0), 应力刚化, 大变形, 单元生死。
- KEYOPT(1): 求解类型。
 - 0: 线性解 (默认)。
 - 1: 非线性解 (需要, 假如 CV2 不为 0)。
- KEYOPT(2): 维时的自由度选择。
 - 0: 使用 KEYOPT (3) 选项。
 - 1: 一维轴向弹簧-阻尼器 (UX 自由度)。
 - 2: 一维轴向弹簧-阻尼器 (UY 自由度)。
 - 3: 一维轴向弹簧-阻尼器 (UZ 自由度)。
 - 4: 一维扭转弹簧-阻尼器 (ROTX 自由度)。
 - 5: 一维扭转弹簧-阻尼器 (ROTY 自由度)。
 - 6: 一维扭转弹簧-阻尼器 (ROTZ 自由度)。
 - 7: 压力自由度单元。
 - 8: 温度自由度单元。
- KEYOPT (3): 二维和三维时的自由度选择。
 - 0: 三维轴向弹簧-阻尼器。
 - 1: 三维扭转弹簧-阻尼器。
 - 2: 二维轴向弹簧-阻尼器 (二维单元必须位于 X-Y 面内)。

8.8.3 COMBIN14 输出

COMBIN14 单元的应力输出如图 8-12 所示。

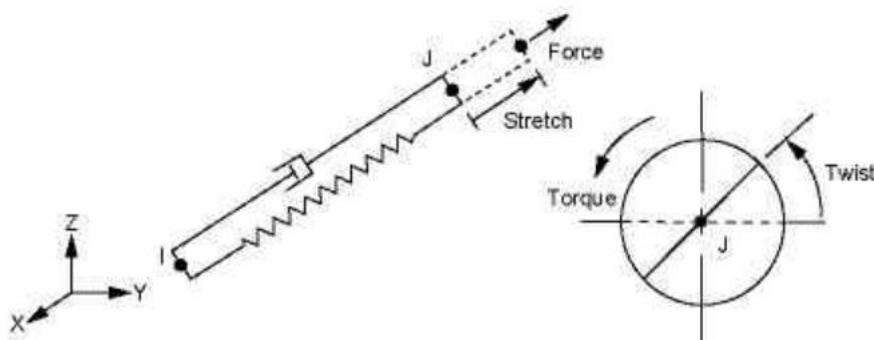


图 8-12 COMBIN14 应力输出

与单元相关的求解输出有两种形式:

- (1) 节点位移包括在所有节点解中。
- (2) 其他的单元输出如表 8-6 所示。

表 8-6 COMBIN14 单元输出

Name	Definition	O	R
EL	单元号	Y	Y
NODES	节点-I, J	Y	Y
XC, YC, ZC	输出结果的位置	Y	1
FORC 或 TORQ	弹簧力或弯矩	Y	Y
STRETCH 或 TWIST	弹簧的升长或弹簧的扭曲(弧度)	Y	Y
RATE	弹簧常数	Y	Y
VELOCITY	速度	-	Y
DAMPING FORCE 或 TORQUE	阻尼力或弯矩	Y	Y

8.8.4 COMBIN14 假设与限制

假如 KEYOPT(2)为 0，弹簧-阻尼器的长度必须不是 0，亦即，节点 I 和 J 不应该重合，因为节点位置决定了弹簧的方向。

轴向弹簧刚度只沿弹簧长度方向起作用。扭转弹簧刚度则作用于环绕其长度的方向。在弹簧单元中只允许存在单一方向的应力。

在热分析中，温度或压力自由度具有与位移相比拟的作用，只有 KEYOPT(2)=0 选项支持应力刚化或大变形。并且，假如 KEYOPT(3)=1 (扭转) 用于大变形，所有坐标将不能被更新。

弹簧或阻尼特性可以分别用 K 或 CV 置 0 来去除，假如 CV2 不是 0，单元是非线性的，需要迭代 (KEYOPT(1)=1)。

8.9 网格划分单元 (MESH200)

MESH200 单元是仅用来划分网格的单元，它对计算结果毫无影响。这个单元能被用于以下几种类型的操作中。

- 多步骤的网格划分，例如单元的扩展要求从低级的单元生成高级的单元。
- 二维或三维空间中有或没有中间节点的线的网格划分。
- 三维空间中有或没有中间节点的三角形、四边形、四面体或六面体单元组成的面或体的网格划分。
- 当单元分析的物理参数没有指定时用作单元的临时存储。

8.9.1 单元描述

MESH200 单元可以与任意其他单元一起使用。当不再需要它时，可以将其删除（清除）或保留，它的存在不会影响计算结果。

利用操作 EMODIF 可以将 MESH200 单元转换成其他单元类型。

8.9.2 单元输入

该单元比较特殊，单元可以由2~20个节点组成，它不具有自由度、材料特性、实常数或荷载。

- 节点。

- I,J: 如果KEYOPT(1)=0, 为两个节点的2-D线单元。
- I,J,K: 如果KEYOPT(1)=1, 为三个节点的2-D线单元。
- I,J,: 如果KEYOPT(1)=2, 为两个节点的3-D线单元。
- I,J,K: 如果KEYOPT(1)=3, 为三个节点的3-D线单元。
- I,J,K: 如果KEYOPT(1)=4, 为三个节点的三角形单元。
- I,J,K,L,M,N: 如果KEYOPT(1)=5, 为6个节点的三角形单元。
- I,J,K,L: 如果KEYOPT(1)=6, 为4个节点的四边形单元。
- I,J,K,L,M,N,O,P: 如果KEYOPT(1)=7, 为8个节点的四边形单元。
- I,J,K,L: 如果KEYOPT(1)=8, 为4个节点的四面体单元。
- I,J,K,L,M,N,O,P,Q,R: 如果KEYOPT(1)=9, 为10个节点的四面体单元。
- I,J,K,L,M,N,O,P: 如果KEYOPT(1)=10, 为8个节点的六面体单元。
- I,J,K,L,M,N,O,P,Q,R,S,T,U,V,W,X,Y,Z,A,B: 如果KEYOPT(1)=11, 为20个节点的六面体单元。

该单元没有数据输出。

8.10 接触单元及目标单元

接触单元与目标单元是成对出现的，根据不同的接触要求，可以选用不同的组合方式。

8.10.1 常用接触单元组

如表8-7所示，给出了常用的组合与相应的接触功能。

表8-7 接触单元对

接触方式	Node-to-Node	Node-to-Surface	Surface-to-Surface	Line-to-Line	Line-to-Surface
接触单元	178	175	171,172	173, 174	176
目标单元	--	169,170	169	170	170

8.10.2 CONTA173单元

1. 单元描述

CONTA173用于表示三维“目标”面(TARGE170)和本单元所定义的变形面之间的接触和滑移状态。该单元每个节点有三个自由度：沿节点坐标系x、y、z方向的平动。本单元可

用于三维结构、热—结构耦合接触分析。几何特性如图 8-13 所示。

本单元位于无中间节点的三维实体或壳单元 (SOLID5、SOLID45、SOLID46、SOLID64、SOLID65、SOLID69、SOLID70、SOLID185、HYPER58、HYPER86、VISCO107、SHELL28、SHELL41、SHELL43、SHELL57、SHELL63、SHELL143、SHELL157、SHELL181 与 MATRIX50) 表面，并与其依附的实体或壳单元面有相同的几何特性。当单元表面穿透指定目标表面上的目标单元 (TARGE170) 时，接触状态开始。本单元允许处理库仑和剪应力摩擦状态。

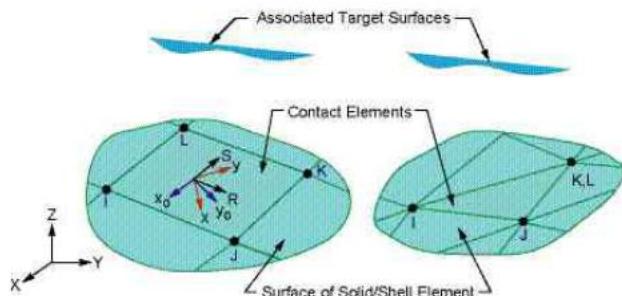


图 8-13 CONTA173 单元几何特性

2. 单元主要输入项

CONTA173 输入摘要如下。

- 节点：I,J,K,L。
- 自由度。
 - UX,UY,UZ(KEYOPT(1)=0)。
 - UX,UY,UZ,TEMP(KEYOPT(1)=1)。
 - TEMP(KEYOPT(1)=2)。
 - UX,UY,UZ,TEMP,VOLT(KEYOPT(1)=3)。
 - TEMP,VOLT(KEYOPT(1)=4)。
 - UX,UY,UZ,VOLT(KEYOPT(1)=5)。
 - VOLT(KEYOPT(1)=6)。
- 实常数：R1,R2,FKN,FTOL,ICONT,PINB,PMAX,PMIN,TAUMAX,CNOF,FKOP,FKT,COHE,TCC,FHTG,SBCT,RDVF,FWGT,ECC,FHEG,FACT,DC,SLTO,Blank,TOLS。

3. 单元输出项

CONTA173 单元输出项如表 8-8 所示。

表 8-8 CONTA173 单元输出项

名称	定义	O	R
EL	单元号	Y	Y
NODES	节点—I, J, K, L	Y	Y
XC, YC, ZC	结果输出点位置	Y	5
TEMP	输入温度 T(I), T(J), T(K), T(L)	Y	Y
VOLU	面积	Y	Y

(续表)

名称	定义	O	R
NPT	积分点号码	Y	-
ITRGET	目标面号码	Y	-
ISOLID	基地实体或壳的编号	Y	-
CONT:STAT	当前接触状态	1	1
OLDST	旧的接触状态	1	1
ISEG	当前目标面编号	Y	Y
OLDSEG	旧的目标编号	Y	-
CONT:PENE	当前的穿透	Y	Y
CONT:GAP	当前缝隙	Y	Y
NGAP	初始缝隙	Y	-
OGAP	旧的缝隙	Y	-
IGAP	初始缝隙	Y	-
CONT:PRES	法向接触压力	Y	Y
TAUR/TAUS	切线接触压力	Y	Y
KN	当前法向接触刚度	Y	Y
KT	当前切向接触刚度	Y	Y
MU	摩擦系数	Y	-
TASS/TASR	在 S 和 R 方向上的总滑动（代数之和）	3	3
AASS/AASR	在 S 和 R 方向上的总滑动（绝对值之和）	3	3
TOLN	穿透容限	Y	Y
CONT:SFRIC	摩擦应力平方根	Y	Y
CONT:STORAL	总应力平方根	Y	Y
CONT:SLIDE	总滑动平方根	Y	Y
DBA	穿透变化	Y	Y
CNXF	单元接触力 X 分量	-	Y
CNFY	单元接触力 Y 分量	-	Y
CNFZ	单元接触力 Z 分量	-	Y
CONV	对流系数	Y	Y
RAC	辐射系数	Y	Y
TCC	导热系数	Y	Y
TEMPS	接触点温度	Y	Y
TEMPT	目标面温度	Y	Y
FXCV	对流产生的热流量	Y	Y
FXRD	辐射产生的热流量	Y	Y
FXCD	导热产生的热流量	Y	Y
FDDIS	耗散摩擦能	Y	Y
FLUX	接触面上总热流量	Y	Y
FXNP	热量输入	-	Y
CNFH	接触单元热流	-	Y
CNOS	每一个子步中接触状态总的号码	Y	Y

8.10.3 TARGE170

1. 单元描述

TARGE170 与各种相关接触单元 (CONTA173 和 CONTA174) 联用, 表示三维“目标”表面。接触单元覆盖于变形体边界的实体单元上, 并可能与 TARGE170 定义的目标表面接触。目标表面离散为一系列目标单元 (TARGE170), 并通过共享实常数号与相关接触表面配对。在目标单元上可以施加平动或旋转位移, 也可施加力和力矩。几何特性如图 8-14 所示。

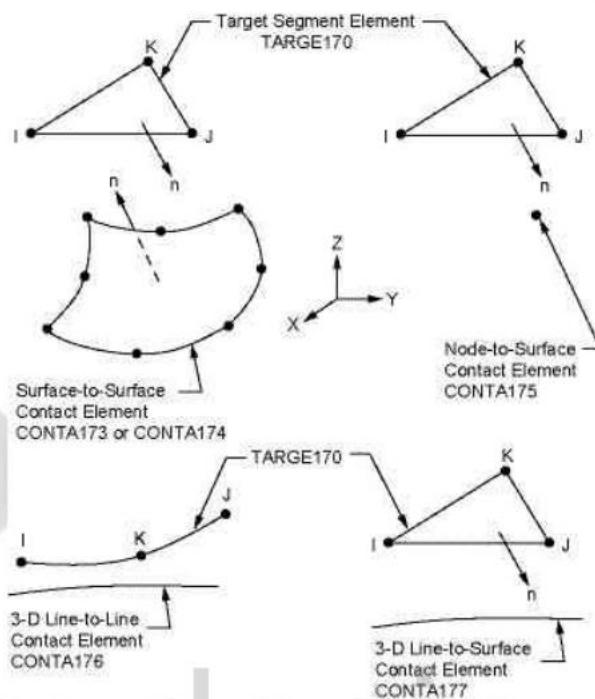


图 8-14 TARGE170 单元几何特性

对于刚性目标, 这些单元可方便地模拟复杂的目标形状; 对于柔性目标, 这些单元覆盖于变形体边界的实体单元上。

2. 其他单元特性

目标单元一般对照接触单元成对出现, 在使用中可以参考 CONTA173 的输出项特性。

8.11 本章小结

本章介绍了土木工程中的常用单元, 对于一般的土木工程问题, 学会使用这些单元基本上就可以解决大部分问题。

LINK180 单元是有着广泛工程应用的杆单元, 可以用来模拟桁架、缆索、连杆、弹簧等等。

BEAM188 是一个二节点的三维线性梁, 能很好的应用于线性分析, 大偏转, 大应力的非

线性分析。

PIPE16 是一种单轴单元，具有拉压、扭转和弯曲性能。

土木工程中常用的实体单元有 SOLID65 钢筋混凝土单元，SOLID65 单元用于含钢筋或不含钢筋的三维实体模型。该实体模型可具有拉裂与压碎的性能。在混凝土的应用方面，如用单元的实体性能来模拟混凝土，而用加筋性能来模拟钢筋的作用。

SOLID185 三维八节点结构单元。该单元具有超弹性，应力钢化，蠕变，大变形和大应变能力。

PLANE182 用于二维实体结构建模。

SHELL181 单元具有应力刚化及大变形功能。该单元有强大的非线性功能，并有截面数据定义，分析，可视化等功能，还能定义复合材料多层壳。

对于 COMBIN14 单元，轴向的弹簧-阻尼器选项是一维的拉伸或压缩单元，不能考虑弯曲或扭转。扭转的弹簧-阻尼器选项是纯扭转单元，不能考虑拉伸或压缩。

MESH200 单元是仅用来划分网格的单元，对计算结果毫无影响。

接触单元覆盖于变形体边界的实体单元上，与目标表面接触。目标表面离散为一系列目标单元，并通过共享实常数号与相关接触表面配对。在目标单元上可以施加平动或旋转位移，也可施加力和力矩。

对于一些有特殊需要的具体问题，用户可参见 ANSYS 单元手册了解详情。



第 18 章 大跨度空间结构实例分析



导言

大跨度空间结构是国家建筑科学技术发展水平的重要标志之一。世界各国对空间结构的研究和发展都极为重视，例如国际性的博览会、奥运会等，各国都以新型的空间结构来展示本国的建筑科学技术水平，空间结构已经成为衡量一个国家建筑技术水平高低的标志之一。

在这一章里将对大跨度空间结构中比较常用的膜结构、索网结构、以及网壳结构进行实例分析，这其中涉及到复杂建模以及找形分析等问题，希望用户能借助本章实例掌握方法，达到举一反三的效果。



学习目标

- ★ 掌握复杂空间结构体系的建模方法
- ★ 掌握应用 ANSYS 14.0 的膜结构找形分析方法
- ★ 掌握应用 ANSYS 14.0 的索网结构找形分析方法
- ★ 掌握应用 ANSYS 14.0 的各空间结构的非线性分析方法

18.1 膜结构

膜结构是 20 世纪中叶发展起来的一种新型大跨度空间结构形式。它通过施加预应力，使结构具有一定的刚度以承受各种荷载作用，其设计思路和设计步骤与传统结构相比都有很大的不同。索膜结构用高强度柔性薄膜材料经受其他材料的拉压作用而形成的稳定曲面，能承受一定外荷载的空间结构形式。其造型自由、轻巧、柔美，充满力量感，阻燃、制作简易、安装快捷、节能、易于使用、安全等优点，因而使它在世界各地受到广泛应用。

18.1.1 相关知识简介

常见的膜结构按结构可分为：骨格式膜结构、张拉式膜结构、充气式膜结构。膜结构按支承条件分类为：柔性支承结构体系、刚性支承结构体系、混合支承结构体系，其形式如图 18-1 所示。

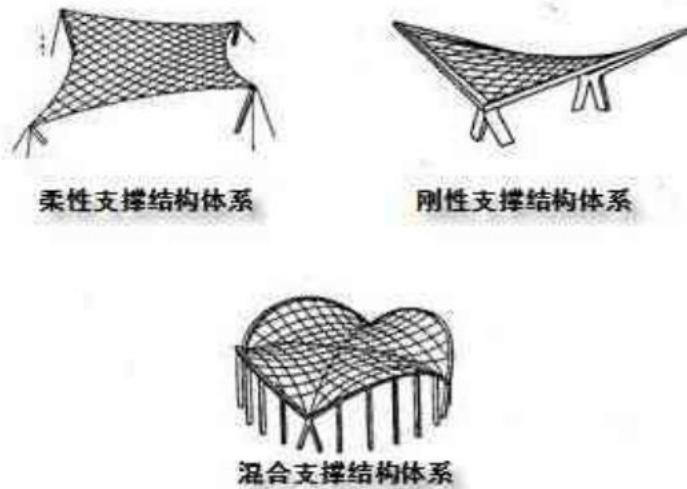


图 18-1 按支撑条件分类

膜结构分析主要过程有：找形分析，承载分析和裁减分析。而在索膜结构设计中，找形分析是最至关重要的一一个步骤，其目的是确定结构的初始几何形状及应力分布状态。

用 ANSYS 进行膜结构找形分析，先建立平面形状模型，设定很小的弹性模量，利用几何边界条件和给定的应力条件明确的平衡曲面，称为第一次找形。然后将支座固定，进行模型修正，直到膜面应力趋于相等或满足一定的误差位置，得到近似的最小曲面，此为第二次找形。

18.1.2 问题简述

某一悬链面，顶圆半径 $a=2.5m$ ，底圆半径 $b=27.5m$ ，高 $h=7.7224m$ ，膜材料弹性模量为 $6000kN/m^2$ ，泊松比为 0.38，膜厚为 1mm。膜顶预应力为 $18kN/m$ 。其结构示意图如图 18-2 所示。

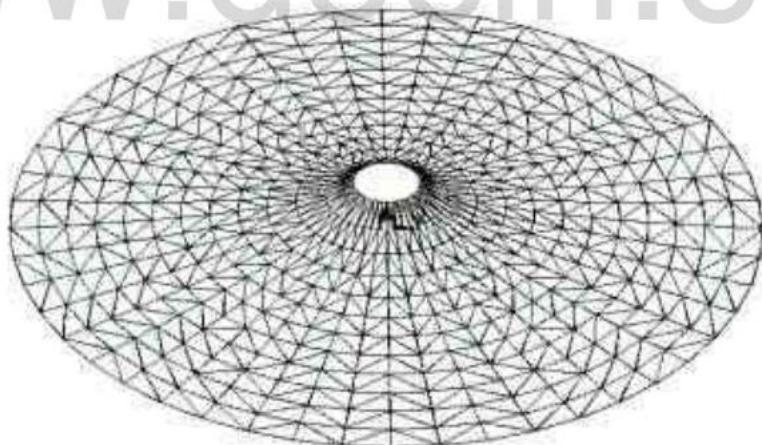


图 18-2 膜结构示意图

18.1.3 前处理

1. 运行 ANSYS 14.0

设置工作名为 Membrane，单击 RUN 进入 GUI，单击 Preferences 选择 Structural。

2. 定义单元类型

本例中膜结构选用 SHELL181 单元。通过路径：Main Menu>Preprocessor>Element Type>Add/ Edit/ Delete，单击 Add 添加单元 SHELL181 为 1 号单元。

3. 定义材料属性

通过路径：Main Menu>Preprocessor>Material Props>Material Models，弹出 Define Material Model Behavior 对话框。选择对话框右半栏 Material Models Available>Structural>Linear>Elastic>Isotropic 选项，双击后在对话框输入数值，EX：6e3；PRXY：0.38。

通过路径 Material Models Available>Structural>Thermal Expansion Coef>Isotropic，设置线膨胀系数为 10。选择 Material Models Available>Structural>Density，输入密度值为 7800，单击 OK 按钮完成定义。

4. 定义单元截面特性

定义膜的厚度。通过路径 Main Menu>Preprocessor>Sections>Shell>Lay-up>Add/Edit，弹出 Create and Modify Shell Sections 对话框，在其中设置 Thickness 为 1e-3，材料 ID 为 1，单击 OK 按钮完成设置。

5. 建立模型

先通过路径 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Areas>Circle>Partial Annulus，在如图 18-3 所示对话框中输入 Rad1=2.5，Rad2=27.5，Theta2=90。生成 1/4 圆，如图 18-4 所示。



图 18-3 绘制扇形面

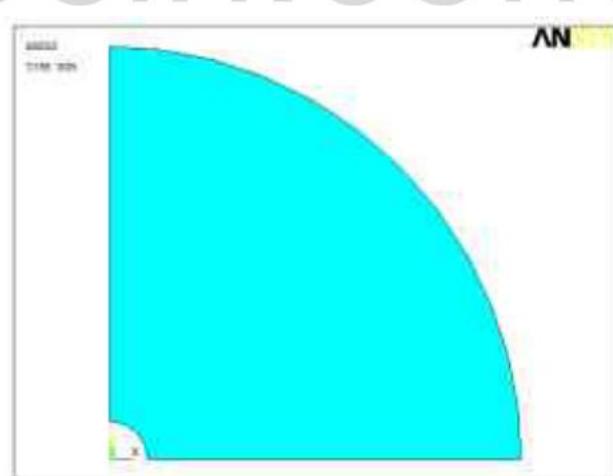


图 18-4 1/4 模型

6. 划分单元

通过路径 Main Menu>Preprocessor>Meshing>Mesh Attributes>All Areas，为当前的面赋予属性。MAT 选择 1，TYPE 选择 1。通过路径 Utility Menu>Select>Entities，将拾取对象类别设为 Lines，By Length/Rad，选择 Length，输入长度值为 25，单击 OK 按钮完成当前所有径向直线的拾取。

通过路径 Main Menu>Preprocessor>Meshing>Size Cntrls>ManualSize>Lines>All Lines，为当前选取的所有直线划分单元尺寸，NDIV 设为 12，表示每条线划分为 12 份。

再次进入 Utility Menu>Select>Entities，选择反选 invert，单击 OK 按钮。划分为 16 份。进入 Main Menu>Preprocessor>Mesher Opt，MSHKEY 选择 Mapped。

设置完毕，通过路径 Main Menu>Preprocessor>Meshing>Mesh>Areas>Mapped>3 or 4 sided 完成网格划分。

7. 对称生成全模型

现在通过对称命令生成全部模型。路径：Main Menu>Preprocessor>Modeling>Reflect>Areas。弹出对话框后单击 Pick all 拾取全部面，在新弹出的对话框中，设置对称轴为 X，单击 OK 按钮完成 1/2 模型，如图 18-5 所示。用同样的方式，将对称轴设为 Y，完成全模型的生成，如图 18-6 所示。

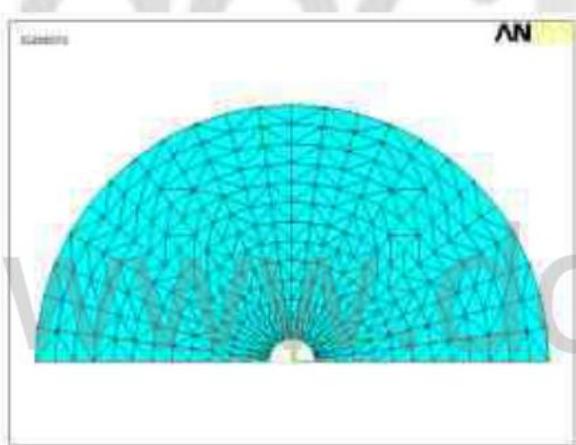


图 18-5 1/2 模型

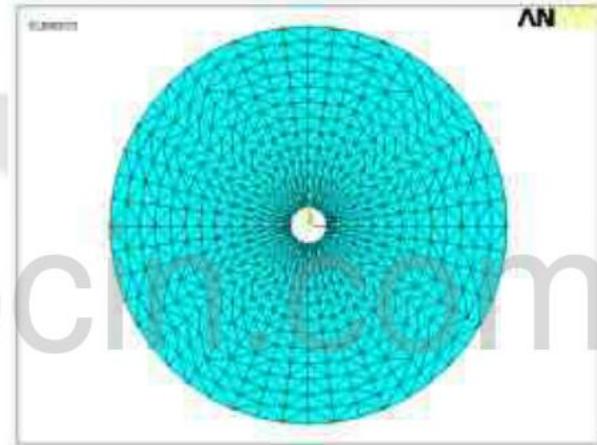


图 18-6 全模型

此时交界部位出现重叠直线及关键点元素，通过路径 Main Menu>Preprocessor>Numbering Ctrls>Merge Items，Label 选择 ALL，合并所有重叠元素。

18.1.4 施加约束及荷载

1. 施加约束

约束底圆周边。通过路径 Utility Menu>Select>Entities，将拾取对象类别设为 Lines，By Length/Rad，选择 Radius，值为 27.5。当前所选对象即为底圆圆周。通过路径 Main Menu>Solution>Define Loads>Apply>Structural>Displacement>On Lines，Pick all，拾取底圆圆

周，单击 OK 按钮，添加约束 UX,UY,UZ。

约束顶圆周边并施加位移。通过路径 Utility Menu>Select>Entities，将拾取对象类别设为 Lines, By Length/Rad, 选择 Radius, 值为 2.5。当前所选对象即为底圆圆周。通过路径 Main Menu>Solution>Define Loads>Apply>Structural>Displacement>On Lines, Pick all, 拾取顶圆圆周，单击 OK 按钮，添加约束 UX,UY，单击 Apply 按钮；再选择 UZ，在 Value 中填入 7.7224。

2. 施加温度荷载，模拟预应力

通过路径 Main Menu>Solution>Define Loads>Apply>Structural>Temperature>On Areas，单击 Pick all，添加温度-0.186。

18.1.5 找形分析

1. 第一次找形分析

进入求解模块，通过路径 GUI: Main Menu>Solution>Analysis Type>New Analysis，选择 Static 将分析类型设置为静力分析。

打开路径 Main Menu>Solution>Analysis Type>Sol'n Controls，在 Basic 选项卡中，Analysis Options 栏中，选择打开大变形 Large Displacement Static。Number Of Substep 设为 25。

在 Write Items To Results File 中选择 All Solution Items，数据输出频率 Frequency 选择 Write Every Step，如图 18-7 所示。

设置完毕，通过路径 Main Menu>Solution>Solve>Current LS，开始求解。

求解完毕，在一般后处理中读入求解后的数据，路径 Main Menu>General Postproc>Read Results>Last Set。此时可得到位移拉伸后的膜结构图，如图 18-8 所示。

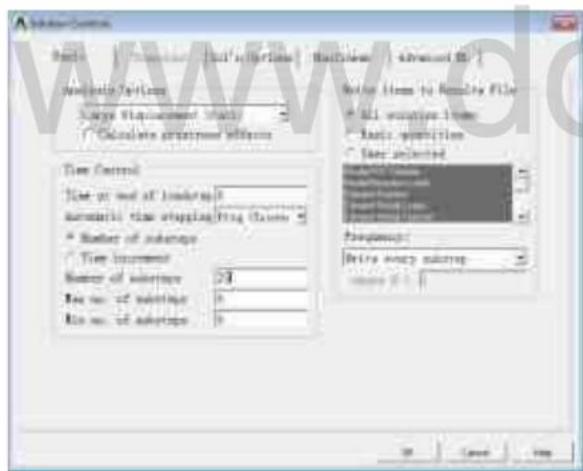


图 18-7 设置求解控制选项



图 18-8 拉伸后的膜

此时由于网格和节点发生位移，需要修正坐标位置。

路径：Main Menu>Preprocessor>Loads>Load Step Opts>Other>Updt Node Coord。

第一次找形完成如图 18-9 所示。第一主应力分布范围为 9655.83~11651.4，范围较大。

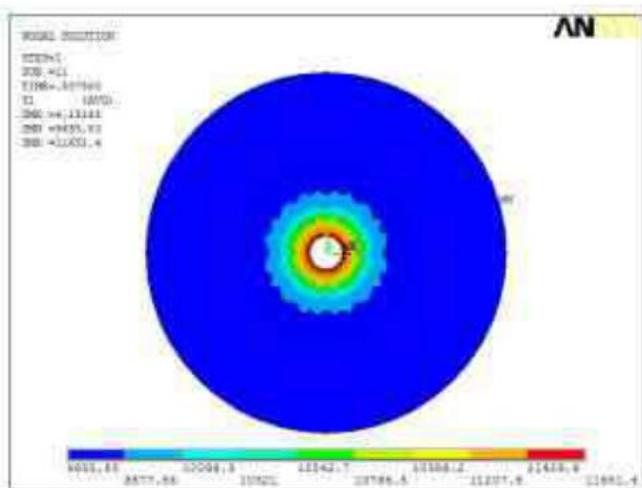


图 18-9 第一次找形后

2. 第二次找形分析

修改约束条件，将提升到位的顶圆边界固定，进行第二次找形分析。

进入求解模块，通过路径 GUI: Main Menu>Solution>Analysis Type>New Analysis，选择 Static 将分析类型设置为静力分析。

通过路径 Utility Menu>Select>Entities，将拾取对象类别设为 Lines, By Length/Rad，选择 Radius，值为 2.5。当前所选对象即为底圆圆周。

通过路径 Main Menu>Solution>Define Loads>Apply>Structural>Displacement>On Lines, Pick all，拾取顶圆圆周，单击 OK 按钮，添加约束 UX,UY,UZ，单击 Apply 按钮。设置完毕，通过路径 Main Menu>Solution>Solve>Current LS，开始求解。

求解完毕，再一次修正坐标位置：Main Menu>Preprocessor>Loads>Load Step Opts>Other>Updt Node Coord。此时得到的应力分布为 9509.62~9704.74，如图 18-10 所示，分布的相当均匀。变形如图 18-11 所示，为 0.95378m。

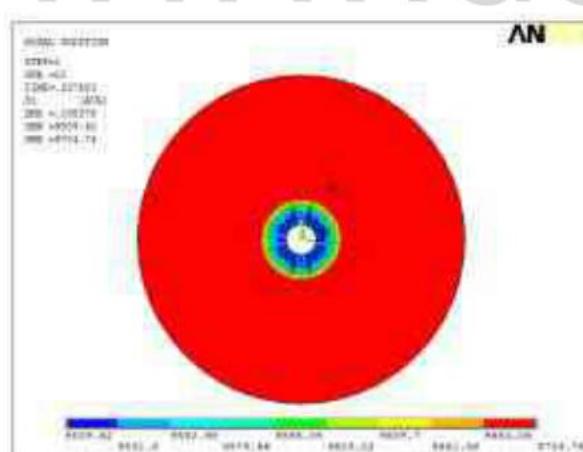


图 18-10 第一主应力

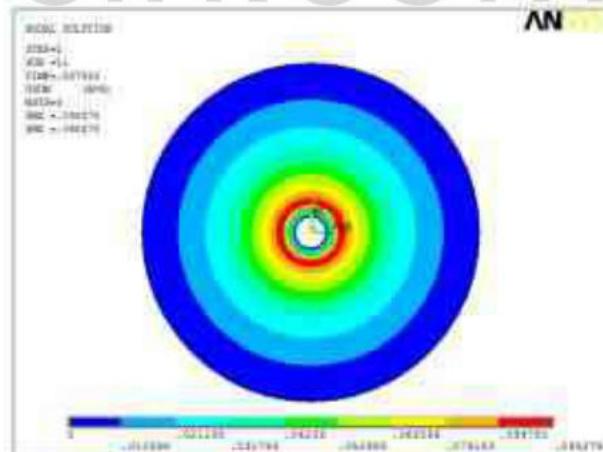


图 18-11 变形云图

通过 APDL 编写循环语句，完成多次计算，以进一步修正模型，APDL 如下：

```
*DO, I, 1, 20
```

```
! 循环开始语句，循环 20 次
```

```

/SOLU          !进入求解模块
SOLVE         !开始求解
FINISH        !退出求解模块
/POST1         !进入一般后处理
SET, LAST    !读入最后一步运算结果
PLDISP,      !绘制变形图
FINISH
/POST1
SET, LAST
PLDISP,
FINISH
*ENDDO        !结束循环
FINISH

```

最终结果，第一主应力云图如图 18-12 所示，变形云图如图 18-13 所示。

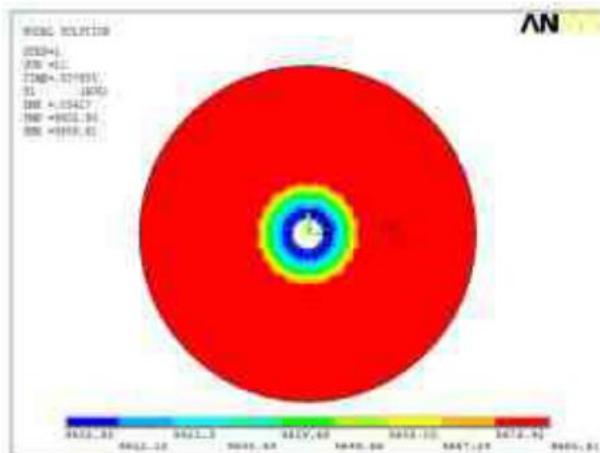


图 18-12 第一主应力云图

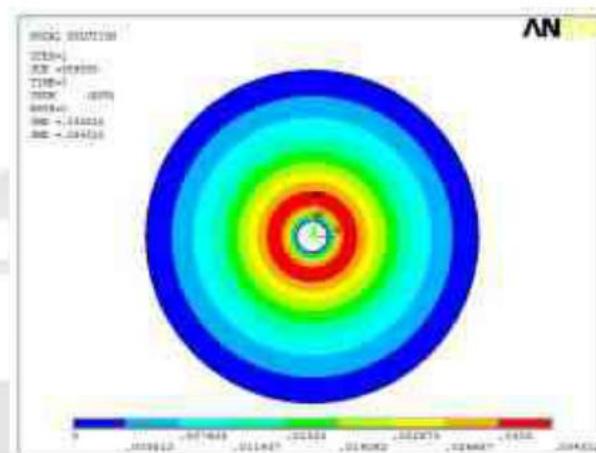


图 18-13 变形云图

经过多次迭代之后，结果更为精确，最终得到应力分布为 9602.93~9685.61，变形误差为 0.034312。

18.1.6 关于膜结构

随着建筑空间观念的日益深化以及科学手段的不断提高，“回归自然”、“沐浴自然之温馨”已是现代建筑环境学发展的主流。室内外的视线越来越模糊，出现了许多亦内亦外、相互渗透的不定空间，如大厅装饰、天井、四季厅、动植物园、公园广场、观景台、舞台、体育场馆、体育看台、文化娱乐场所等。由于膜材的光透性，白天阳光可以透过膜材形成漫射光，使膜覆盖空间内达到和室外几乎一样的自然效果，能创造出与自然环境相媲美的空间形式。

18.2 单索结构

由柔性受拉索及其边缘构件所形成的承重结构。索的材料可以采用钢丝束、钢丝绳、钢绞线、链条、圆钢以及其他受拉性能良好的线材。悬索结构能充分利用高强材料的抗拉性能，可

以做到跨度大，悬索结构自重小、材料省、易施工。

悬索结构在静荷载作用下的分析，首先要确定在初始荷载作用下整个结构的初始状态，然后计算在荷载增量、温度变化和索支点位移所引起的整个结构的内力和变形。悬索结构的初始状态是指在初始荷载（包括自重和预应力）作用下的平衡位置，可通过索的各点坐标和索内拉力的水平分量确定。初始状态一般需要经过多次试算选定。悬索结构当跨度较大而又较柔时宜考虑风振效应，进行动态分析。

18.2.1 问题简述

某单索的截面积为 $7.016E-4m^2$ ，弹性模量为 $78.9GPa$ ， $L=120m$ ， $q=65N/m$ ， $H=20m$ ， $Q=1000N$ ，集中作用于跨中。

ANSYS 求解单悬索问题，通常有两种方式：直接迭代分析和找形分析法。

本例通过 ANSYS 14.0 的 APDL 方式进行求解直接迭代法分析。

18.2.2 单索问题的求解

1. 创建几何模型和有限元模型

本例采用 LINK180 单元，在索弦线上创建几何模型，设置实际的材料参数和特性。

APDL:

```

FINISH
/CLEAR
/FILNAME,CABLE           !文件名
/PREP7                   !进入前处理
ET,1,LINK180              !
R,1,7.016E-4,6.5          !实常数依次为：编号 1，截面积，线密度
MP,EX,1,7.89E10           !弹性模量
MP,PRXY,1,0.3              !泊松比
K,1                       !开始建模
K,2,120,-20                !生成点
L,1,2                     !
LESIZE,ALL,,,60,           !生成线
LMESH,ALL                  !控制网格划分份数
ALLSEL                    !划分线
D,1,ALL                   !
D,2,ALL                   !约束两个端点
D,ALL,UX                  !
NODE1=NELEM (30,1)         !约束所有节点 x 方向
NODE2=NELEM (30,2)         !提取中间单元的节点号
ACEL,,10                  !施加重力加速度

```

生成模型如图 18-14 所示。

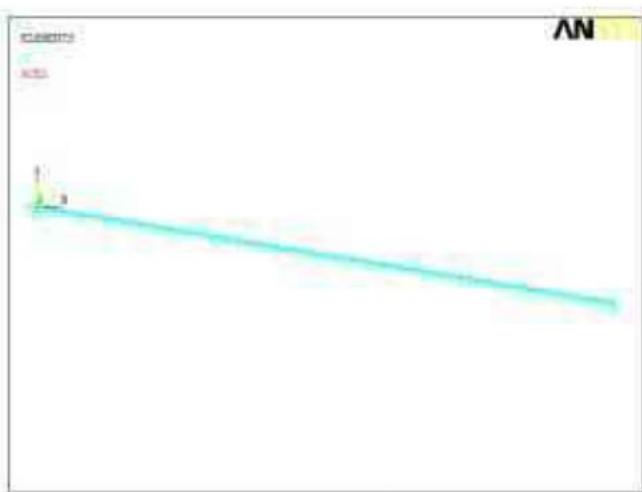


图 18-14 有限元模型

2. 求解并更新

求解并不断更新有限元模型：施加重力荷载后开始求解，更新有限元模型，不断改变索的几何形状，求解后判断收敛条件，如果不满足则继续求解；满足收敛条件即退出循环。

```

PASS1=1                                ! 定义循环引导变量
*DOWHILE,PASS1                         ! 条件循环
/SOLU                                     ! 进入求解模块
ANTYPE,0                                  ! 定义分析类型为静力分析
NLGEOM,ON                                 ! 打开大变形
SSTIF,ON                                 ! 打开应力刚度选项
NSUBST,20                                ! 设置分析子步数
OUTRES,ALL,ALL                           ! 结果输出项及频率
SOLVE
FINISH
/POST1
SET, LAST, LAST                          ! 进入一般后处理
*GET, NFOR,ELEM,30,SMISC,1             ! 读入最后一步分析数据
COSREF=(NX(NODE2)-NX(NODE1))/DISTND(NODE1,NODE2)
!
NFOR=NFOR*ABS(COSREF)                   ! 计算余弦
ERR1=ABS(NFOR-9000)/9000                ! 计算跨中单元水平张力
FINISH                                    ! 计算当前索水平张力误差
/PREP7                                    ! 进入前处理，更新有限元模型
*IF,ERR1,LT,0.05,THEN                  ! 如果误差小于 5%
UPGEOM,0.1,LAST,LAST,Cable,RST        ! 模型更新系数采用 0.1
*ELSE                                     ! 否则
UPGEOM,1,LAST,LAST,Cable,RST          ! 模型更新系数采用 1
*ENDIF                                    ! 结束条件语句
*IF,ERR1,LT,0.001,EXIT                 ! 如果误差小于 0.1%退出循环
*ENDDO

```

以上过程结束，获得自重荷载下索的初始内力如图 18-15 所示，几何状态参数如图 18-16

所示。

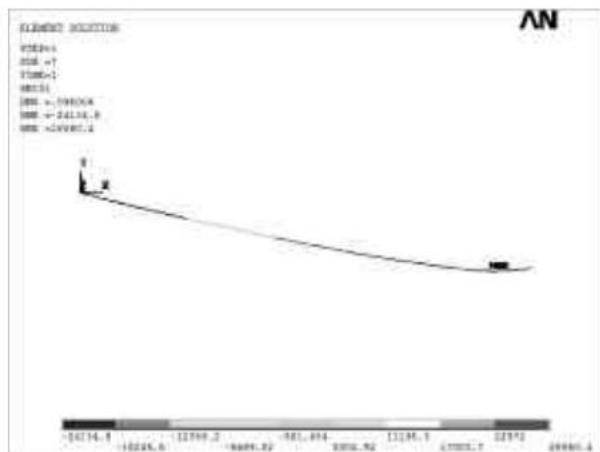


图 18-15 自重下的索力云图

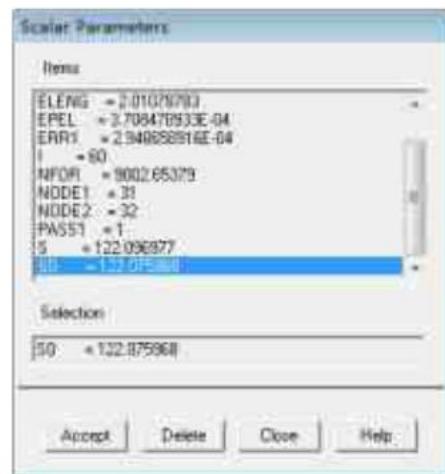


图 18-16 参数信息

由此可知，索的最大下垂值为 0.095006m。最大索力为 28860.4N。由此得到索长为 122.076m。

```

APDL:
/POST1
SET, LAST, LAST
PLESOL, SMISC, 1
ETABLE, EPELT, LEPEL, 1
S=0
DS=0
*DO, I, 1, 60
  *GET, ELENG, ELEM, I, LENG
  *GET, EPEL, ELEM, I, ETAB, EPELT
  S=S+ELENG
  DS=DS+ELENG*EPEL
*ENDDO
S0=S-DS

```

3. 施加外荷载求解

在获得初始状态后，可以施加其他外荷载进行工作状态分析。

```

APDL:
/SOLU
NLGEOM, ON
NSUBST, 20
OUTRES, ALL, ALL
F, NODE1, FY, -10000
SOLVE
FINISH

```

求解结束，得到变形如图 18-17 所示。索力云图如图 18-18 所示。

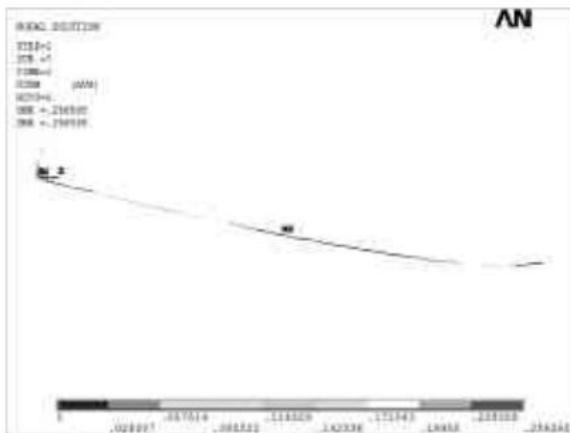


图 18-17 加载后的变形

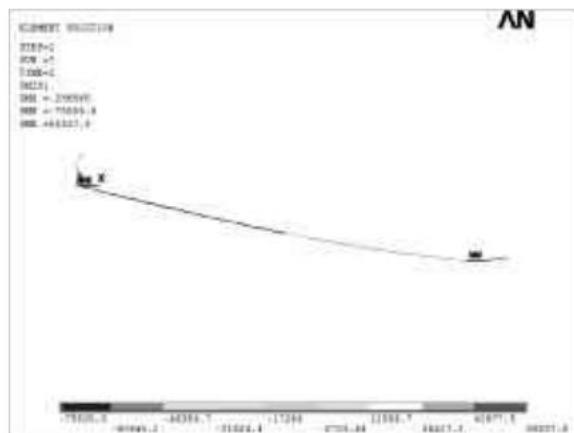


图 18-18 索力云图

18.3 索网结构

空间索网结构是由若干互相连接的索段组成，通过在索段上施加预定拉力，使整个索网具有一定的刚度，从而形成所需要的空间结构形式。这种结构具有成型跨度大、结构重量轻的优点，并且结构形式多样，布置灵活，特别是当其与桁架结构配合组成展开结构，能够实现很大的收缩展开比。

索网结构与单悬索不同，一般再设计索网结构时，会给出预定应力状态和几何边界，要求确定初始形状。索网结构可按离散的计算模型进行分析；对于索间距较小的正交索网结构，也可按连续的计算模型，即假设为一个没有剪切刚度的各向异性薄膜进行分析。悬索结构具有几何非线性的性质，即在各阶段荷载作用下，无论是内力或变形均与荷载呈非线性关系。当采用离散方法分析悬索结构时会得出非线性代数方程组。采用连续方法分析时则得出非线性微分方程。对于双曲抛物面正交索网也可采用能量原理进行分析。

现就一个由两片索网组成的屋盖结构的找形分析，给出索网结构的建模及找形分析方法。

18.3.1 问题简述

某索网屋盖结构，由两片索网拼接而成。如图 18-19 所示为索网侧视图，图 18-20 所示为索网的等倾视图。

索网上缘支撑在位于屋盖中轴线的抛物线刚性拱上，下缘锚固在椭圆线刚性边梁上。设所有索的截面相等，为 0.00222m^2 ，索的预应力为 100kN ，通过 APDL 方式对其进行找形分析。

找形分析的基本原理是减小弹性刚度的影响，利用结构的应力刚度求得满足边界条件的平衡曲面。因此在找形分析时应采用较小的弹性模量，且不施加外力和自重。

找形完毕后，恢复材料的真实弹性模量和初始应变，并施加外荷载进行一般的求解。

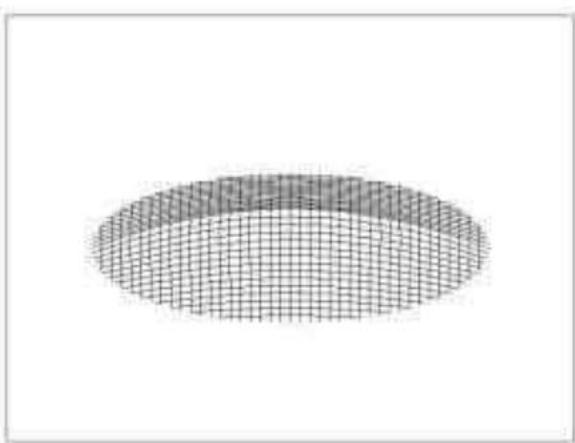


图 18-19 索网侧视图



图 18-20 索网的等倾视图

18.3.2 索网找形与分析

1. 定义参数

为了参数调用方便，编写程序时容易分清思路，现对本例中经常调用的参数进行定义。

NETNX=40	!X 方向最大索网段数量
NETNY=30	!Y 方向最大索网段数量
NETSIZ=2.2	!单个索网网格尺寸
F=10	!最大提升高度
A=0.00222	!索的截面积
T0=1E5	!预应力

以下 APDL 中用这些定义好的参数名进行编程。

2. 定义单元属性及材料参数

ET,1,LINK180	!定义单元类型
R,1,A	!定义截面
MP,EX,1,T0/A	!弹性模量
XA=NETNX*NETSIZ/2	!基准点坐标
XB=NETNY*NETSIZ/2	!

3. 利用循环语句创建几何模型

先生成平行于 Y 轴的索。生成结果如图 18-21 所示。

```

APDL:
*DO, I, 1, NETNX-1
  XI=I*NETSIZ-XA
  YI=SQRT (1-XI*XI/XA/XA) *XB
  K,2*I-1,XI,-YI
  K,2*I,XI,YI
  L,2*I-1,2*I
*ENDDO

```

!开始循环
 $\text{!以相对于基准点的位置建立各关键点坐标}$
 !生成各关键点
 !生成索直线

再生成平行于 X 轴方向的索。注意先提取目前最大的关键点号，以使新生成的点的点号接在现有的点的后边，保持连续。

```

APDL:
*GET,KPMAX,KP,,COUNT           !读取最大关键点号
*DO,I,1,NETNY-1
  YI=I*NETSIZ-XB
  XI=SQRT(1-YI*YI/XB/XB)*XA
  K,KPMAX+2*I-1,-XI,YI
  K,KPMAX+2*I,XI,YI
  L,KPMAX+2*I-1,KPMAX+2*I      !生成索直线
*ENDDO

```

生成索网直线图，如图 18-22 所示。

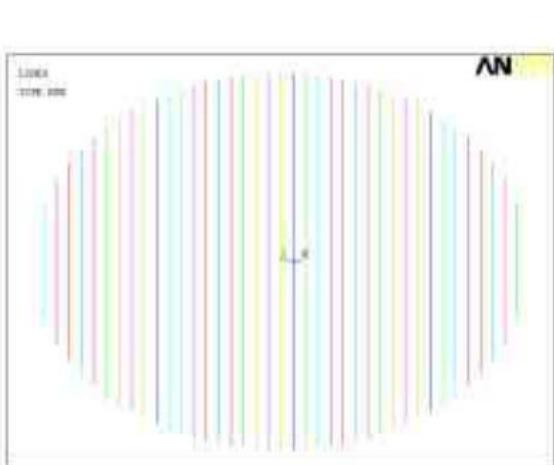


图 18-21 横向索直线

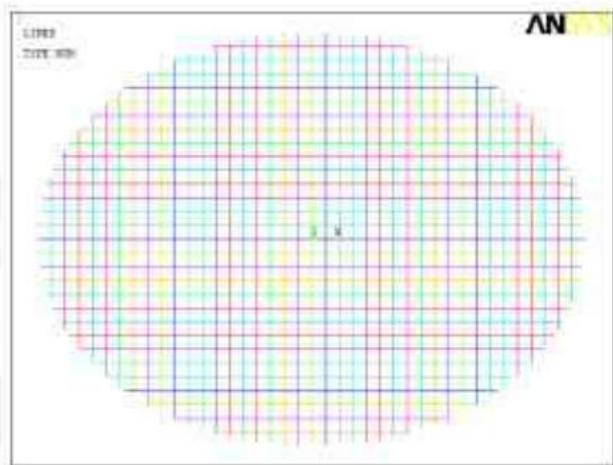


图 18-22 索网直线

4. 对几何模型进行处理

目前生成的纵横索网直接是分离的，完全没有关系。要经过搭接处理将其搭接成网，并对其施加约束和位移条件，才算完成几何模型的建模。

本例中的提升约束为抛物线形式，抛物线方程表达式： $Y=-4*F/L/L*X*X+F$ ，表示模型正中最高点提升 10m，沿 X 轴向两个方向依次递减，端点处 $X=0.5L$ ，刚好 $Y=0$ 。F 为预设参数， $F=10m$ 。

```

APDL:
NUMMRG,ALL                      !合并重复元素
CM,KPCM,KP                        !建立关键点集合
LOVLAP,ALL                         !将线搭接
CMSEL,S,KPCM                       !选择关键点集
DK,ALL,ALL                         !约束所有关键点的所有自由度
ALLSEL,ALL                         !拾取所有实体
L0=NETNX*NETSIZ                   !开始提升约束
*DO,I,1,NETNX/2                    !定义 L0 的值
  XI=(I-1)*NETSIZ                 !

```

```

DY=-4*F*XI*XI/L0/L0+F           !
DK,KP (XI,0,0),UX,,,UY          !提升高度的抛物线方程
DK,KP (XI,0,0),UZ,DY            !约束点的平动自由度
DK,KP (-XI,0,0),UX,,,UY         !约束 z 向自由度，并沿 Y 向提升高度
DK,KP (-XI,0,0),UZ,DY
*ENDDO

```

得到搭接好的几何模型，如图 18-23 所示。

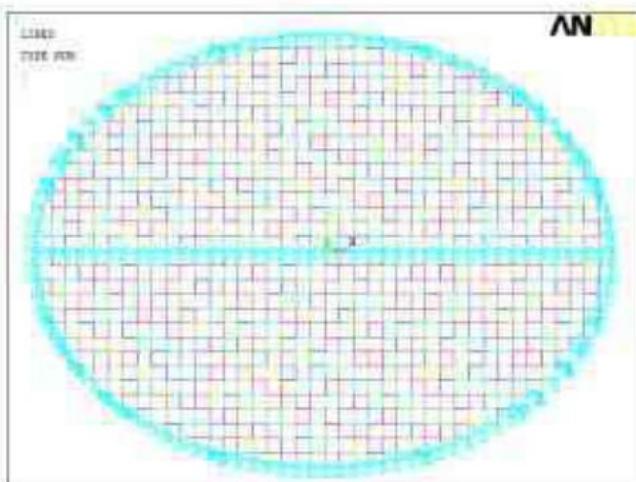


图 18-23 完成直线搭接并施加约束后

5. 生成有限元模型，求解并更新模型

通过网格划分，将几何模型转化为有限元模型。求解完毕后，对经过提升的模型进行更新，得到最初的找形结果，如图 18-24 所示。

```

APDL:
LESIZE,ALL,,,1                  !设置所有直线的网格划分份数为 1
LATT,1,1,1                        !赋予材料属性
LMESH,ALL                          !划分网格
/SOLU
ANTYPE,0                           !定义分析类型
NLGEOM,ON                          !打开大变形
SSTIF,ON                           !应力刚化
NSUBST,10                          !
SOLVE                             !开始静力求解
FINISH                            !进入前处理
/PREP7                            !更新模型
UPGEOM,1,LAST,LAST,Cable net,RST

```

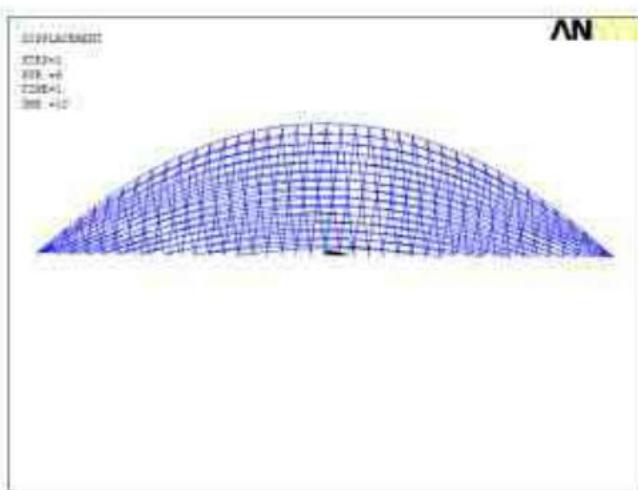


图 18-24 经过提升的索网立面图

6. 第二次找形

第一次提升成形后，将各约束锁定为 0，进行第二次找形分析。循环求解并不断的更新模型，以获得较为均匀的索力，更新次数越多，索力越均匀，但网格畸变也越大。因此可根据精度要求适当设置循环次数。

```

APDL:
*DO, I, 1, NETNX/2                                !通过循环语句选取关键点并约束
XI= (I-1) *NETSIZ
DK,KP (XI,0,0),UZ
DK,KP (-XI,0,0),UZ
*ENDDO
*DO, I, 1, 5                                       !循环求解以提高精度
FINISH
/SOLU
SOLVE
FINISH
/POST1
SET, LAST
PLDISP,                                              !进入求解模块
FINISH                                              !求解
/PREP7                                               !退出求解模块
UPGEOM, 1, LAST, LAST, Cable net, RST           !进入后处理读入数据
*ENDDO                                              !绘图
                                                !退出后处理
                                                !进入前处理
                                                !更新模型
                                                !结束循环

```

找形结束。

7. 恢复材料真实参数

找形结束后，恢复材料特性的真值，并求解获得初始状态参数。

```

APDL:
MP,EX,1,1.9E11                                     !重新定义材料弹模
R,1,A

```

```

/SOLU          !求解
SOLVE         !
FINISH        !
/POST1         !进入一般后处理
SET,1, LAST   !读入数据
PLESOL,SMISC,1 !绘制单元求解结果
/ESHAPE,1.0    !显示单元形状
PLESOL, F,X, 0,1.0 !绘制索力
PLESOL, F,Y, 0,1.0 !
PLESOL, F,Z, 0,1.0 !

```

获得初状态如图 18-25 所示。之后可以根据需要施加外荷载进行分析。

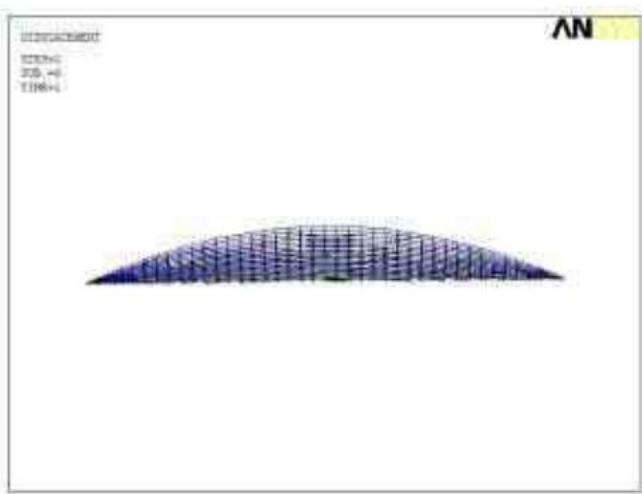


图 18-25 找形结果

18.4 空间刚架结构

刚架相对于桁架而言的，作为桁架的组成杆件与杆件之间的结点，只承受或拉或压的力，没有弯矩；而刚架是有弯矩的，这是它们之间最为典型的差别。

空间刚架属于杆系结构，多采用梁单元模拟。

18.4.1 问题简述

有一六角星形刚架穹顶模型，比例为 1:10。模型尺寸：最大跨度为 8.66m，最大顶高为 0.826m。构件为矩形截面梁，尺寸为 75mm×110mm。

其几何模型俯视图如图 18-26 所示，侧视图如图 18-27 所示。

模型荷载 1500N，竖直向下作用于穹顶尖端。

现对其进行受力分析。

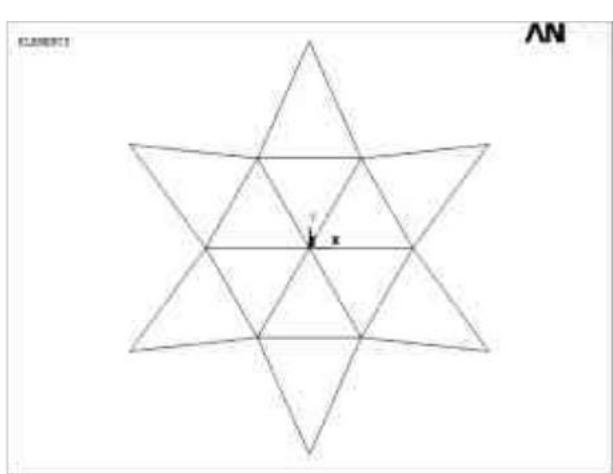


图 18-26 几何模型俯视图

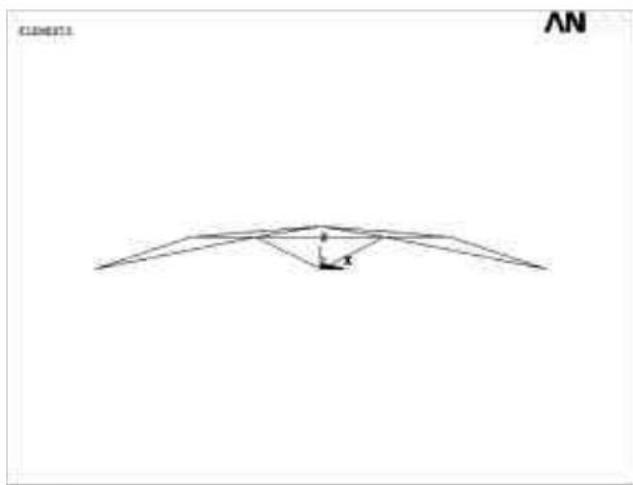


图 18-27 几何模型侧视图

18.4.2 前处理

1. 运行 ANSYS 14.0

设置工作名为 Rigid frame，单击 RUN 进入 GUI，单击 Preferences 选择 Structural。

2. 定义单元类型

本例中结构构件选用 BEAM188 单元。通过路径：Main Menu>Preprocessor>Element Type>Add/ Edit/ Delete，单击 Add 添加单元 BEAM188 为 1 号单元。单击 OK 按钮完成定义，并退出单元添加对话框。

3. 定义材料属性

通过路径：Main Menu>Preprocessor>Material Props>Material Models，弹出 Define Material Model Behavior 对话框。选择对话框右半栏 Material Models Available>Structural>Linear>Elastic>Isotropic 选项，双击后在对话框输入数值，EX: 3030; PRXY: 0.38。

选择 Material Models Available>Structural>Density，输入密度值为 2500，单击 OK 按钮完成定义。

4. 定义单元截面特性

定义梁截面特性。通过路径 Main Menu>Preprocessor>Sections>Beam>Common Sections 弹出 BeamTool 对话框，选择截面形式为矩形，材料 ID 为 1，B=75 和 H=110，单击 OK 按钮完成设置。

5. 建立几何模型

先通过路径 Utility Menu>WorkPlane>Change Active CS to>Global Cylindrical，将当前坐标系换成柱坐标系。在当前坐标系下，点的三个坐标参数：X=半径长度；Y=由 X 轴出发，逆时针方向的转角；Z=Z 轴方向（高度）。

生成关键点。通过路径 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Keypoints>In Active CS，生成关键点 1，坐标：5000,30,0。

通过复制方式生成屋架脚点的 6 个关键点，路径：Main Menu>Preprocessor>Modeling>Copy>Keypoints，ITIME=6，起始关键点号均输入 1，只复制一个点，此时 DY 代表角度增量，角度增量值输入 60。单击 OK 按钮完成点的生成。此时的点编号到 6。

生成第二圈点的起始关键点 K7。通过路径 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Keypoints>In Active CS，生成关键点 7，坐标：2500,0,621.6。同样复制 ITIME=6，DY=60。生成屋顶点 K13，坐标 0,0,821.6。生成后的各点俯视图如图 18-28 所示，侧立面如图 18-29 所示。

完成后通过路径 Utility Menu>WorkPlane>Change Active CS to>Global Cartesian 返回笛卡尔坐标系。

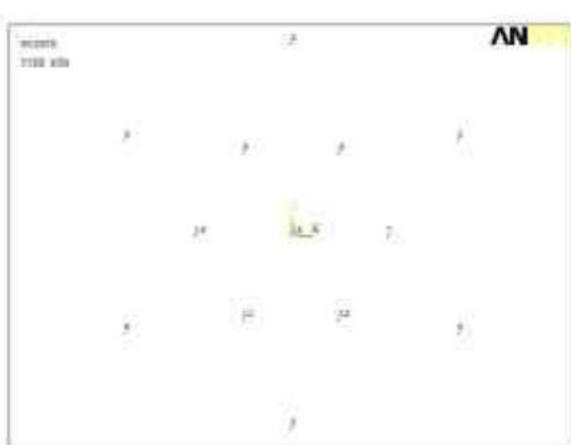


图 18-28 关键点俯视图

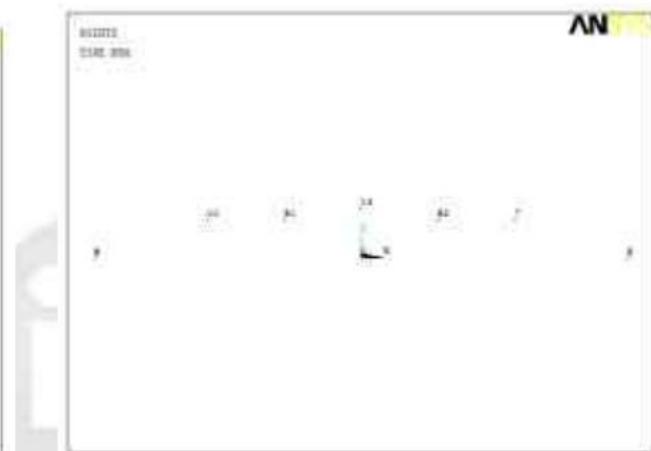


图 18-29 关键点侧面视图

生成直线。按照模型形状依次连接对应的点，路径：Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Lines>Lines>In Active Coord。

此处也可以通过 APDL 循环命令来进行简便操作。生成直线循环语句详见本阶段命令流。

生成刚架的俯视图如图 18-30 所示，立面图如图 18-31 所示。

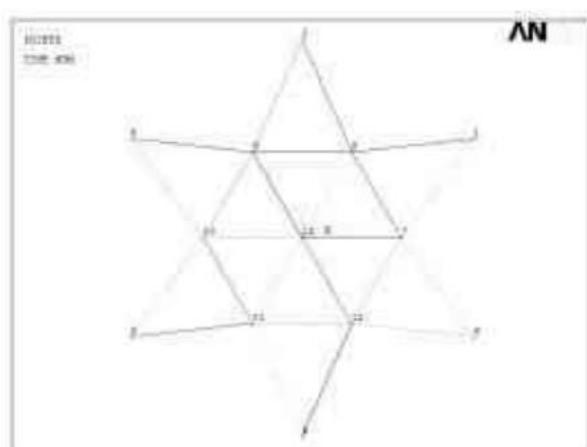


图 18-30 刚架俯视图

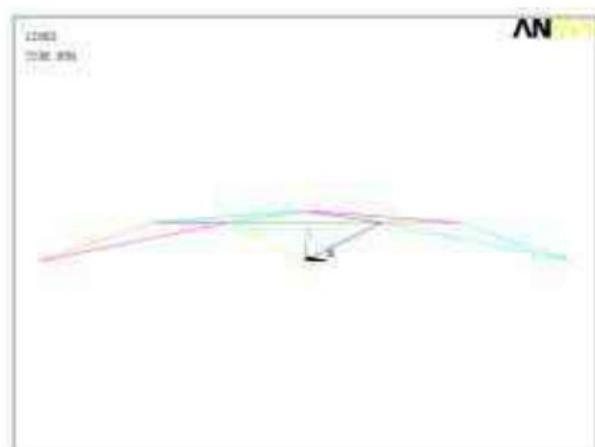


图 18-31 刚架立面视图

6. 划分网格

几何模型建立后，通过划分网格生成有限元模型。通过路径 Main Menu>Preprocessor>Meshing>Mesh Attributes>All Lines 为所有直线设置属性，本例只要一种属性，在属性设置对话框中将所有可选下拉框选为 1。通过路径 Main Menu>Preprocessor>Meshing>Size Cntrls>ManualSize>Lines>All Lines 为所有直线指定划分份数，本例划分网格为 1 份。

完成设置，通过路径 Main Menu>Preprocessor>Meshing>Mesh>Lines 划分网格。

7. 施加约束

通过路径 Main Menu>Preprocessor>Loads>Define Loads>Apply>Structural>Displacement>On Key points，选取屋架模型脚点 6 个点，为全部自由度施加约束，选择 All DOF，Value=0。

完成约束后的有限元模型如图 18-32 所示。

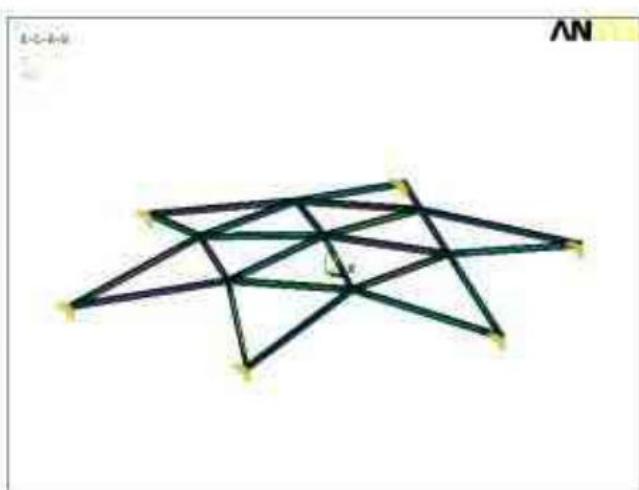


图 18-32 完整的有限元模型

本阶段命令流如下：

```

/CLEAR                                         !
/FILNAME,Rigid frame                         !文件名
/PREP7                                         !
ET,1,BEAM188                                    !进入前处理
SECTYPE, 1, BEAM, RECT, , 0                      !定义单元类型
SECOFFSET, CENT                                !定义截面特性
SECDATA, 75,110,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0      !截面参数
MP,EX,1,3030                                     !定义材料属性
MP,PRXY,1,0.38                                   !开始建模
CSYS,1                                         !进入柱面坐标系
K,1,5000,30                                     !生成关键点
KGEN,6,1,1,,,60                                 !
K,7,2500,,621.6                                !
KGEN,6,7,7,,,60                                 !
K,13,,,821.6                                    !
CSYS,0                                         !返回笛卡尔坐标系
*DO,I,1,5                                       !循环生成外环直线

```

```

L,I,I+6 !
L,I,I+7 !
*ENDDO
L,6,7
L,6,12
*DO,I,7,11 !循环生成内环直线
L,I,I+1
*ENDDO
L,12,7
*DO,I,7,12 !循环生成顶端 6 条直线
L,I,13
*ENDDO
LATT,1,1,1 !结束循环
LESIZE,ALL,,,1 !划分网格
LMESH,ALL !赋予单元属性
KSEL,S,LOC,Z,0 !设置划分份数
DK,ALL,ALL !开始划分网格
KSEL,ALL !选择脚点
FINISH !约束脚点

```

18.4.3 加载及求解

1. 设置分析选项

进入求解模块，通过路径 Main Menu>Solution>Analysis Type>New Analysis，设置分析类型为 Static。

通过路径 Main Menu>Preprocessor>Loads>Analysis Type>Sol'n Controls，在 Basic 选项卡中，将 Analysis Options 下拉框选为 large Displacement Static。在 Time Control 选项中，选择 Number of substeps，在输入框中输入 200。

右侧的输出项设置选择 All Solution Items，输出频率选择 Write every substep。在 Advanced NL 选项卡中，勾选弧长法 active arc-length method 并将其激活。单击 OK 按钮完成所有设置。

2. 施加外荷载并求解

通过路径 Main Menu>Solution>Define Loads>Apply>Structural>Force/Moment>On Keypoints，拾取顶端关键点 13，对其施加载荷，FY 值为 -1500。

通过路径 Main Menu>Solution>Solve>Current LS 开始求解。

命令流如下：

```

/SOLU          !进入求解模块
ANTYPE,0      !分析类型为静力
NLGEOM,ON     !打开大变形分析
OUTERES,ALL,ALL !输出设置
NSUBST,200    !荷载子步数
FK,13,FZ,-1500 !施加载荷
ARCLEN,1      !激活弧长法
SOLVE         !开始求解

```

FINISH

18.4.4 后处理

求解完毕后，进入一般后处理查看结果。通过路径 Main Menu>General Postproc>Plot Results>Contour Plot>Nodal Solu 查看 Z 向变形，如图 18-33 所示。穹顶顶端下沉 3.48mm，斜支部分基本没有下沉。

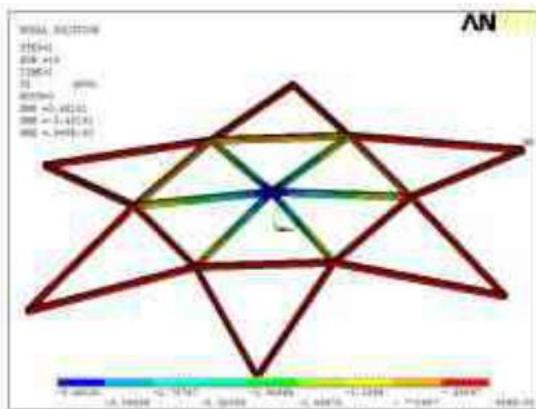


图 18-33 下沉变形图

通过编辑单元表，查看轴力及弯矩图。

命令如下：

/POST1	!进入一般后处理
/ESHAPE,1	!打开单元形状显示
PLNSOL, U,Z, 0,1.0	!绘制 Z 向变形
ETABLE,FI,SMISC,1	!定义轴力单元表
ETABLE,FJ,SMISC,7	!绘制轴力图
PLLS,FI,FJ,0.2	!定义弯矩单元表
ETABLE,MI,SMISC,6	!
ETABLE,MJ,SMISC,12	!
PLLS,MI,MJ,-0.2	!绘制弯矩图

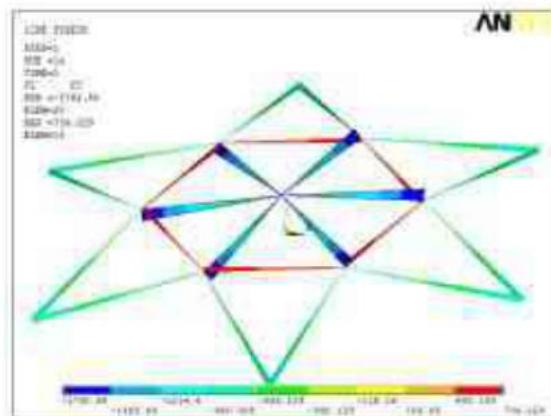


图 18-34 轴力分布图

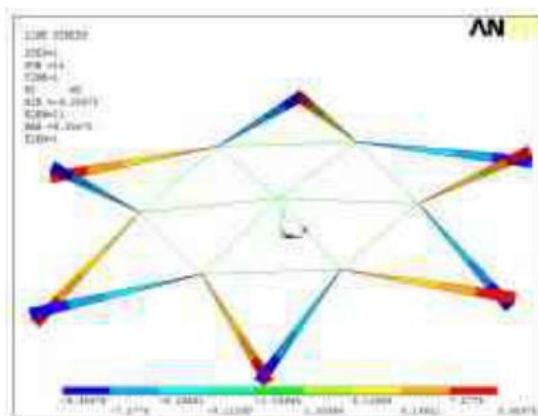


图 18-35 弯矩分布图

得到结果，轴力分布图如图18-34所示，弯矩分布图如图18-35所示。

由轴力图和弯矩图可见，穹顶主要受压，最大压力为1762.58N，最大受拉力为704.229N。内环各梁杆受力严重。而外环各支撑部分主要受弯矩作用。

18.5 空间单层网壳

网壳结构常见型式有圆柱面网壳、圆球网壳和双曲抛物面网壳。

(1) 圆柱面网壳：外形呈圆柱形曲面的网状结构，兼有杆系和壳体结构的受力特点，只在单方向上有曲率，常覆盖矩形平面的建筑。单层网壳按排列方式有4种：单向斜杆正交正放网格、交叉斜杆正交正放网格、联方网格、三向网格。双层网格可参照平板网架的型式布置不同的网格。壳体高度与波长之比一般在1/6~1/8之间。双层网壳的厚度宜取波长的1/20~1/30。

(2) 圆球网壳：用于覆盖较大跨度的屋盖，常见网格形式有：肋型、施威德肋型、联方网格、短程线型、三向网格。通过对壳面的切割，圆球网壳可以用于多边形、矩形和三角形平面建筑的屋盖。

(3) 双曲抛物面网壳：将一直线的两端沿两根在空间倾斜的固定导线（直线或曲线）上平行移动而构成。单层网壳常用直梁作杆件，双层网壳采用直线桁架，两向正交而成双曲抛物面网壳。这种网壳大都用于不对称建筑平面，建筑新颖轻巧。

18.5.1 问题简述

网壳结构主要应对使用阶段的外荷载（包括竖向和水平向）进行内力和位移计算，对单层网壳通常要进行稳定性计算，并据此进行杆件设计。此外，对地震、温度变化、支座沉降及施工安装荷载，应根据具体情况进行内力、位移计算。

本例分析圆球网壳模型，由钢管构件组成，如图18-36所示。

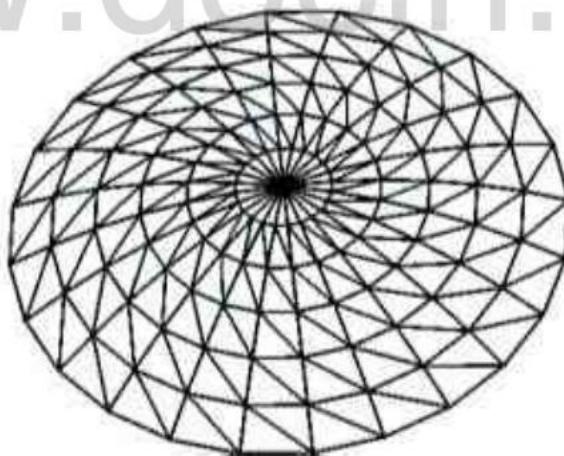


图18-36 网壳几何图

材料弹性模量为210GPa，泊松比为0.3，剪切模量为80GPa。

环杆与径杆采用空心圆钢管，内径为90mm，外径为92.5mm，斜杆截面内径为80mm，外径为83mm。复杂建模过程通过APDL命令流方式完成。

18.5.2 参数设置

1. 运行 ANSYS 14.0

设置工作名为 Reticulated Shell，单击 RUN 进入 GUI，单击 Preferences 选择 Structural。

2. 定义单元类型

本例中结构选用 BEAM188 单元。通过路径：Main Menu>Preprocessor>Element Type>Add/Edit/ Delete，单击 Add 添加单元 BEAM188 为 1 号单元。

3. 定义材料属性

通过路径：Main Menu>Preprocessor>Material Props>Material Models，弹出 Define Material Model Behavior 对话框。

选择对话框右半栏 Material Models Available>Structural>Linear>Elastic>Orthotropic 选项，进行正交各项异性参数设置。双击后在对话框输入数值，EX: 210E9; PRXY: 0.3; GXY: 80E9。单击 OK 按钮完成设置。

4. 定义单元截面特性

本例需要两种不同的截面形式。环杆与径杆采用同一种截面，而斜杆截面与之不同。通过路径 Main Menu>Preprocessor>Sections>Beam>Common Sections，弹出 Beam Tool 对话框，定义截面 ID 为 1，选择截面形状为空心圆管， $R_i=0.09$, $R_o=0.0925$, $N=36$ ，单击 Apply 按钮完成设置。定义截面 ID 为 2，选择空心圆管截面， $R_i=0.08$, $R_o=0.083$, $N=36$ 。单击 OK 按钮完成截面的定义。

本阶段命令流如下：

```

FINISH
/CLEAR
/FILNAME, RETICULATED SHELL           ! 文件名
/PREP7                                  ! 进入前处理
ET, 1, BEAM188                          ! 定义单元为 BEAM188
MP, EX, 1, 2.1E11                        ! 材料弹模
MP, PRXY, 1, 0.3                         ! 泊松比
MP, GXY, 1, 8E10                          ! 剪切模量
SECTYPE, 1, BEAM, CTUBE,, 0               ! 定义环杆与径杆的界面
SECDATA, 0.09, 0.0925, 36                 !
SECTYPE, 2, BEAM, CTUBE,, 0               ! 斜杆截面
SECDATA, 0.08, 0.083, 36

```

18.5.3 建模

根据模型特点，本例直接采用节点——单元建模，建模主要使用 APDL 语句。

生成节点

首先进入球坐标系建立节点：

```
GUI: Utility Menu>WorkPlane>Change Active CS to>Global Spherical.
```

建立节点：

```
GUI: Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Nodes>In Active CS
APDL:
CSYS,2                                         !进入球坐标系
FI=5                                           !自定义参数
R=50                                          !
THETA=15                                       !
*DO,I,1,6                                     !生成节点
*DO,J,1,24,1
N,24*(I-1)+J,R,(J-1)*THETA,(I-1)*FI+60
*ENDDO
*ENDDO
N,2000,100,0,90                                !导向节点
```

生成节点如图 18-37 所示。连接节点生成单元：

```
GUI : Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Elements>Auto Numbered>Thru
Nodes.
!环杆和径杆
TYPE,1                                         !设定单元类型为 1 号单元
MAT,1                                           !材料类型为 1 号
SECNUM,1                                         !截面类型为 1 号
*DO,I,1,6                                     !循环语句生成环杆
*DO,J,1,23,1
E,24*(I-1)+J,24*(I-1)+J+1,2000
*ENDDO
E,I*24,I*24-23,2000
*ENDDO
*DO,I,1,5                                     !循环语句生成径杆
*DO,J,1,24,1
E,24*(I-1)+J,24*(I-1)+J+24,2000
*ENDDO
*ENDDO
N,1000,50,0,90
*DO,I,121,144,1
E,I,1000,2000
*ENDDO
/PNUM,NODE,1                                   !显示节点号
EPLOT                                            !绘制单元
!斜杆
TYPE,1                                         !斜杆单元为 1 号
MAT,1                                           !材料为 1 号
SECNUM,2                                         !截面类型为 2 号
```

```

*DO,I,1,5                                ! 开始生成斜杆单元
*DO,J,1,23,1
E,24*(I-1)+J,24*(I-1)+J+25,2000      !
*ENDDO
E,I*24,I*24+1,2000                      !
*ENDDO
NUMMRG,ALL                                 ! 重复单元和点号处理
NUMCMP,ALL
FINISH

```

生成有限元模型细部图，如图 18-38 所示。

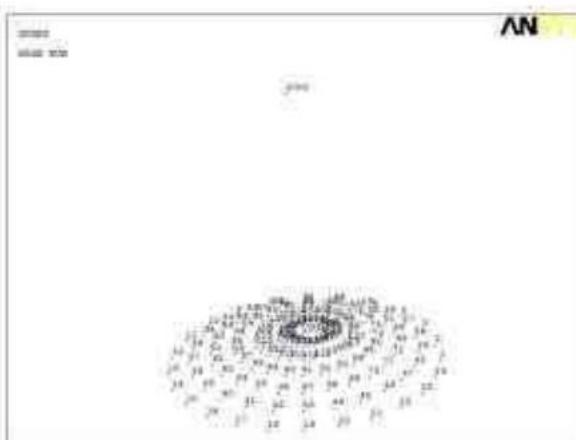


图 18-37 生成所有节点

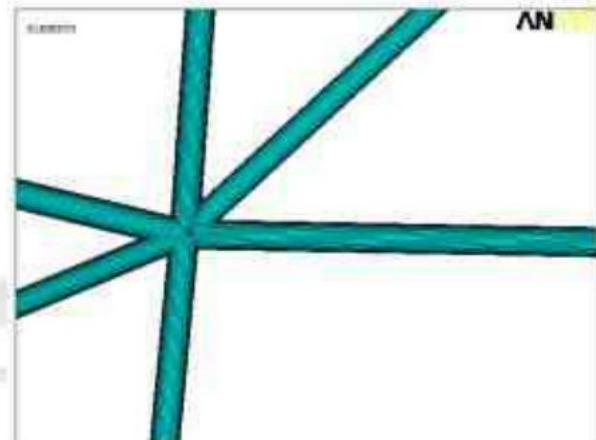


图 18-38 模型局部放大图

模型整体立面如图 18-39 所示，俯视图如图 18-40 所示。建立完模型后先进行结构的特征屈曲分析。



图 18-39 模型立面图

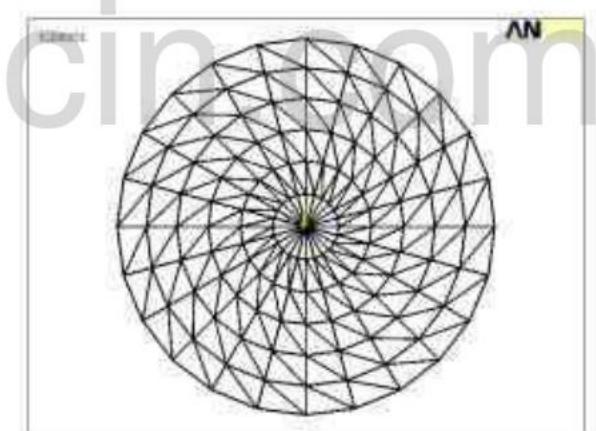


图 18-40 模型俯视图

18.5.4 特征屈曲分析

1. 施加约束

进入求解模块，先通过路径 Utility Menu>WorkPlane>Change Active CS to>Global Spherical

将坐标系调为球坐标。拾取网壳最边缘一圈点将其所有平动自由度约束。

通过路径 Utility Menu>Select>Entities，将选取对象设为 Nodes，选取方式为 By Location, Zcoordinate，输入坐标值 60，单击 OK 按钮完成。

再通过路径 Main Menu>Solution>Define Loads>Apply>Structural>Displacement>On Nodes，单击 Pick all，对所有当前节点施加约束。自由度选择 UX,UY,UZ，Value=0。约束情况如图 18-41 所示。

2. 对节点施加微小扰动力

通过路径 Utility Menu>Select>Entities，将选取对象设为 Nodes，选择 From Full，单击 Apply 按钮；再将选取方式设为 By Location, Zcoordinate，输入坐标值为 60，下边勾选 Unselected，单击 OK 按钮，完成节点选取。

此时选择了除最外圈以外的所有节点。通过路径 Main Menu>Solution>Define Loads>Apply> Structural>Force/Moment>On Nodes，Pick all，施加 FZ=-1。施加完扰动力的模型如图 18-42 所示。

通过路径 Utility Menu>Select>Everything 选择所有实体，之后开始求解：Main Menu>Solution>Solve>Current LS。

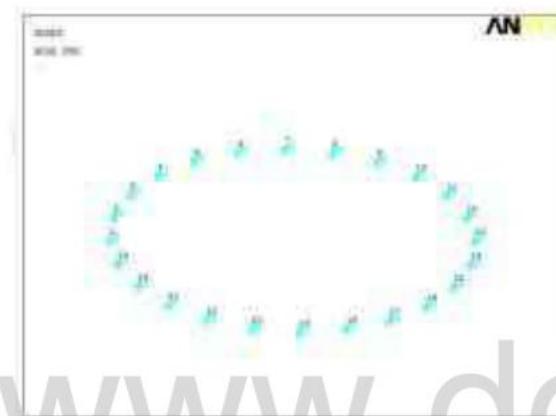


图 18-41 约束周边

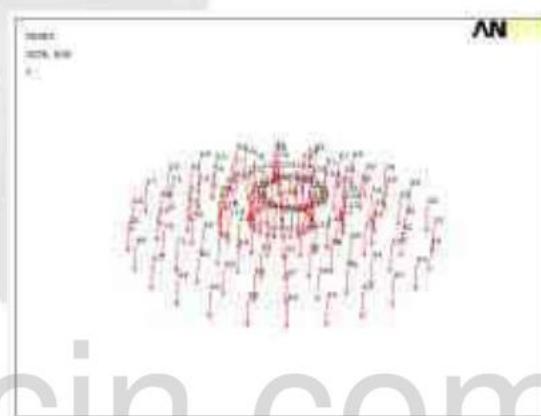


图 18-42 对网壳施加微小扰动力

约束和荷载总图如图 18-43 所示。分析后的变形趋势如图 18-44 所示。此时变形值极小，为 0.277E-5m。

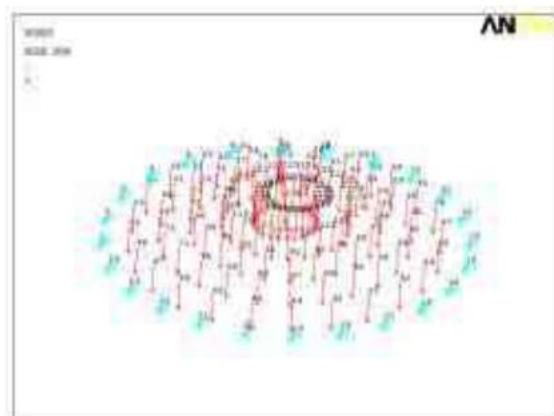


图 18-43 约束和荷载总图

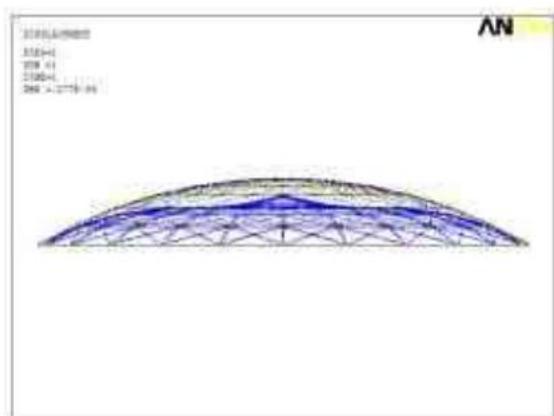


图 18-44 微小扰动下的变形趋势图

求解后得到网壳的初始状态。现在进行特征值屈曲分析。进入求解模块，通过路径 Main Menu>Solution>Analysis Type>New Analysis 设置分析类型为 Eigen buckling。

通过路径 Main Menu>Solution>Analysis Type>Analysis Options 设置求解项，Nmode=3，即设置提前的模态为前3阶。通过路径 Main Menu>Solution>Load Step Opts>ExpansionPass>Single Expand>Expand Modes，将扩展模态数同样设置为3。

设置完毕后进行求解：Main Menu>Solution>Solve>Current LS。

3. 屈曲分析结果

通过路径 Main Menu>General Postproc>Results Summary，得到分析结果的数据集。如图 18-45 所示。

通过路径 Main Menu>General Postproc>Read Results>First Set 提前第一组数据，再通过 Main Menu>General Postproc>Plot Results>Deformed Shape 得到第一阶模态的变形图，如图 18-46 所示。

SET	TIME-FREQ	LOAD STEP	ELEMENT	CUMULATIVE
1	16.000	1	1	1
2	32.000	1	2	2
3	128.000	1	3	3

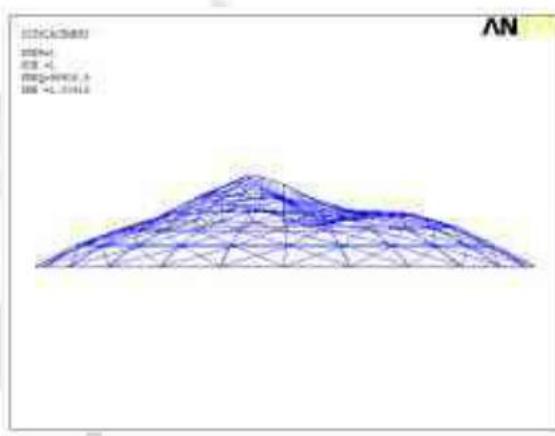


图 18-45 数据信息列表

图 18-46 第一阶模态

通过路径 Main Menu>General Postproc>Read Results>Next Set，调入下一组数据，再通过 Main Menu>General Postproc>Plot Results>Deformed Shape 得到第二阶模态的变形图，如图 18-47 所示。

用同样的方法可得到第三阶模态的变形图，如图 18-48 所示。

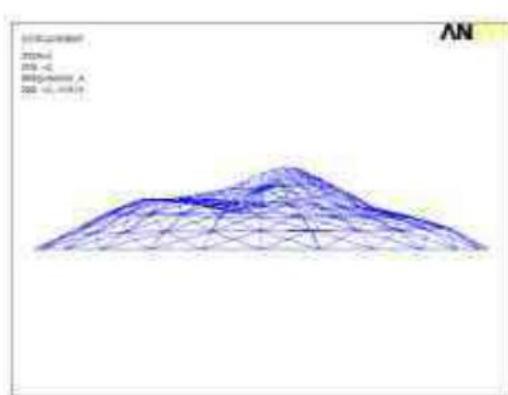


图 18-47 第二阶模态

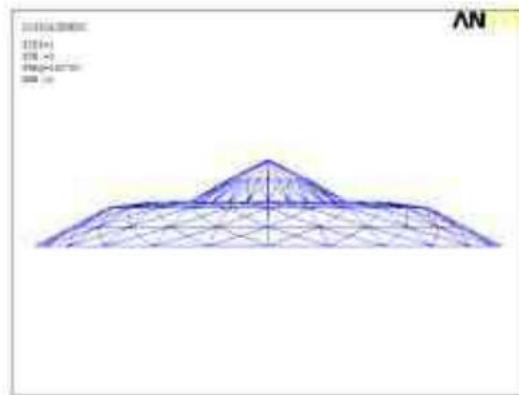


图 18-48 第三阶模态

分析结束。特征屈曲分析部分的命令流如下：

/SOLU	!进入求解模块
CSYS,2	!设置当前坐标为球坐标系
NSEL,S,LOC,Z,60	!选择外圈节点
NPLOT	!绘制当前选择的节点
D,ALL,UX	!约束当前节点的自由度
D,ALL,UY	!
D,ALL,UZ	!
ALLSEL	!
EPLOT	!绘制单元
NSEL,U,LOC,Z,60	!不选择外圈节点
NPLOT	!
F,ALL,FZ,-1	!施加微小扰动力
ALLSEL	!
SOLVE	!求解
FINISH	!
/SOLU	!
ANTYPE,BUCKLE	!特征值屈曲分析
BUCOPT,SUBSP,3	!分析模态阶数
MXPAND,3	!扩展阶数
SOLVE	!求解
FINISH	!
/POST1	!进入一般后处理
SET,LIST	!读入数据列表
SET,FIRST	!读入第一组数据
PLDISP,0	!绘制变形图,下同
SET,NEXT	
PLDISP,0	
SET,NEXT	
PLDISP,0	
FINISH	

18.5.5 非线性分析

用同样的模型，对其进行非线性分析。为了避免出错，且便于整理，建议用户在实际工作中进行完全独立的分析。本例删除模型的扰动力，进行重新分析。

1. 保存数据

单击 SAVE_DB 保存数据。

2. 删除旧的荷载条件

通过路径：Main Menu>Solution>Define Loads>Delete>All Load Data>All Forces>On All Nodes。删除所有外荷载数据。重新进入分析模块进行非线性分析。

3. 求解微小扰动下的初始状态

(1) 设置求解项

通过路径 Main Menu>Solution>Analysis Type>New Analysis，设置求解类型为 Static；通过路径 Main Menu>Preprocessor>Loads>Analysis Type>Analysis Options，勾选 NLGEOM，将大变形分析激活。

(2) 施加初始扰动

对节点施加微小的侧向扰动力。通过路径 Main Menu>Solution>Define Loads>Apply>Structural>Force/ Moment>On Nodes，在 Apply F/M on nodes 对话框的 min, max, inc 栏下输入节点号 145，单击 OK 按钮。在弹出的对话框内的 Lab 选项中选择 FY，在 VALUE 填入 -1000，单击 OK 按钮完成侧向干扰力的施加。

(3) 开始初状态求解

完成以上设置，通过路径 Main Menu>Solution>Solve>Current LS 开始求解。

4. 施加外荷载并求解

初始状态求解结束后，进入求解模块重新设置求解项。通过路径 Main Menu>Solution>Analysis Type>Sol'n Controls，在 Basic 选项卡中，设置分析子步数为 200 步；在 Basic 选项卡右侧的结果输出设置中，选择输出数据为 All solution items，输出频率为 Write every substep。在 Advanced NL 选项卡中，激活弧长法。

施加外荷载。通过路径 Utility Menu>Select>Entities，将选取对象设为 Nodes，选择 From Full，单击 Apply 按钮；再将选取方式选为 By Location, Zcoordinate，输入坐标值为 60，下边勾选 Unselected，单击 OK 按钮，完成节点想选取。此时选择了除最外圈以外的所有节点。通过路径 Main Menu>Solution>Define Loads>Apply>Structural>Force/Moment>On Nodes, Pick all，施加外荷载 FZ= -50000。

完成以上设置，通过路径 Main Menu>Solution>Solve>Current LS 开始求解。

5. 一般后处理

求解结束后，进入一般后处理查看分析结果。

通过路径 Main Menu>General Postproc>Plot Results>Deformed Shape 查看变形图，如图 18-49 所示。

通过路径 Main Menu>General Postproc>Plot Results>Contour Plot>Nodal Solu 查看 Z 向变形，如图 18-50 所示。

通过 Main Menu>General Postproc>Element Table>Define Table 定义单元列表，单击 Add，在 Lab 文本框填入 FI, By sequence num，在下一栏填入 SMISC, 1，单击 OK 按钮完成第一个轴力单元列表的定义。再添加第二个单元列表，在 Lab 文本框填入 FJ, By sequence num, SMISC, 7；添加弯矩单元列表，Lab=MI, By sequence num，下一栏填入 SMISC, 6; Lab= MJ, By sequence num，下一栏填入 SMISC, 12，完成定义。

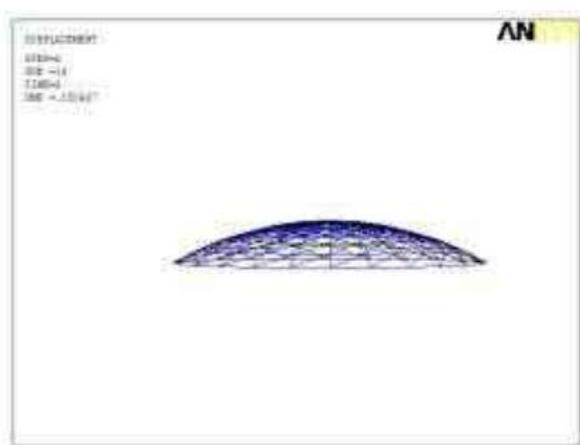


图 18-49 变形图

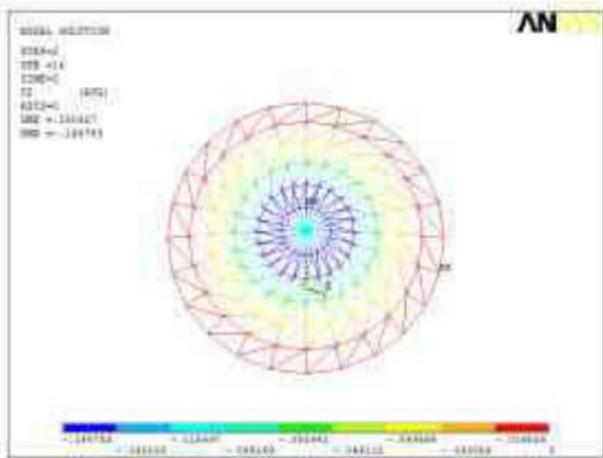


图 18-50 Z 向变形云图

通过路径 Main Menu>General Postproc>Plot Results>Contour Plot>Line Elec Res, LabI 选择 FI, LabJ 选择 FJ, 考虑模型网线的密度, 将 Fact 填入 0.5, 单击 OK 按钮完成设置, 此时得到网壳各杆轴力图, 如图 18-51 所示。

用同样的方式, LabI 选择 MI, LabJ 选择 MJ, 则可得到弯矩图, 如图 18-52 所示。

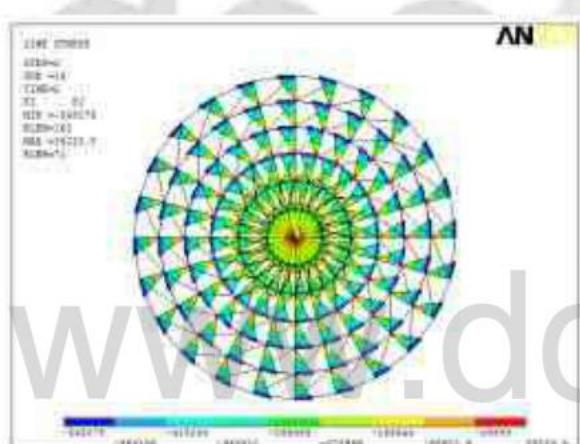


图 18-51 轴力图

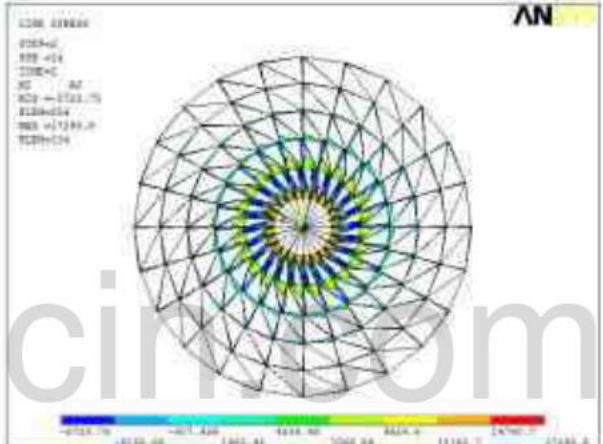


图 18-52 弯矩图

6. 时间历程后处理

打开路径 Main Menu>TimeHist Postpro, 得到窗口如图 18-53 所示。

单击左上的绿色十字, 添加变量。以添加顶点为例, 单击绿十字 ADD DATA 按钮, 打开添加时间历程变量对话框, 如图 18-54 所示, 依次选择 Nodal Solution>DOF Solution>Z-Comonent of displacement, 单击 OK 按钮, 完成添加。在这个窗口中可以进行坐标图中变量的切换选择等很多操作。

用户通过路径 Main Menu>TimeHist Postpro>Define Variables 可以对需要的数据进行单独变量添加, 如图 18-55 所示。本例中添加网壳上不同高度沿同一坡向的一系列节点: N145, N121, N97, N73; 通过路径 Main Menu>TimeHist Postpro>Math Operations>Multiply 继续添加荷载数据。



图 18-53 时间历程变量查看窗口

通过路径 Main Menu>TimeHist Postpro>Graph Variables，填入相应的变量号（一次最多 10 个），即可在同一坐标图中显示多个变量。用户同样可在图 18-53 所示窗口拉选多个变量进行绘图。

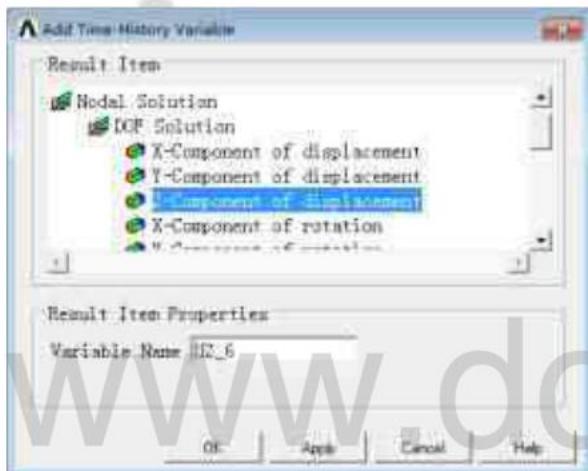


图 18-54 添加时间历程变量窗口

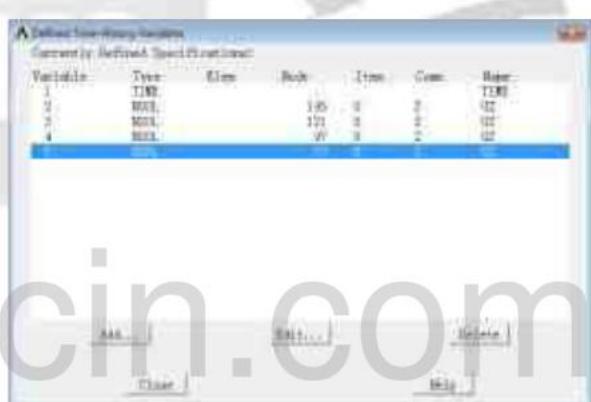


图 18-55 定义变量对话框

变量定义完毕，通过路径 Utility Menu>PlotCtrls>Style>Graphs>Modify Axes，设置曲线图的 X 轴，Y 轴。

用户可根据需要，自行选择所需要绘制的坐标曲线图。

时间历程后处理部分结果展示：设置 TIME 为 X 轴，LOAD 为 Y 轴，得到如图 18-56 所示的荷载时间曲线。设置 LOAD 为 X 轴，变量 2 为 Y 轴，得到顶点 N145 与荷载 LOAD 的相对曲线，如图 18-57 所示。

荷载随时间的变化是线性的。而顶点的位移随着荷载或时间的变化则是非线性的，随着荷载的增大或时间的延长，其曲线斜率的绝对值变小，即变形速度减慢。

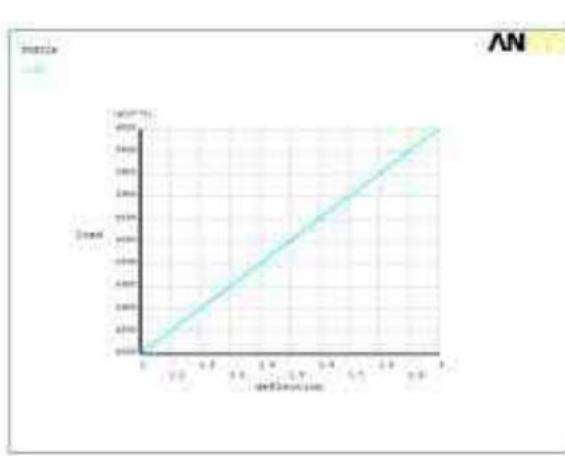


图 18-56 荷载时间曲线

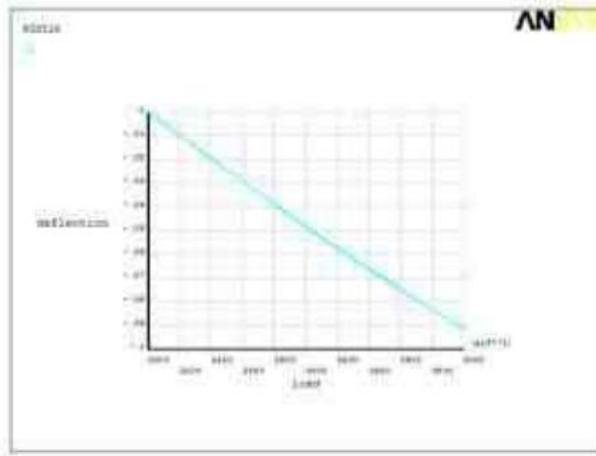


图 18-57 荷载-顶点变形曲线

设置 LOAD 为 X 轴, 变量 2, 3, 4, 5 为 Y 轴, 得到各变量取值点与荷载 LOAD 的相对曲线, 如图 18-58 所示。

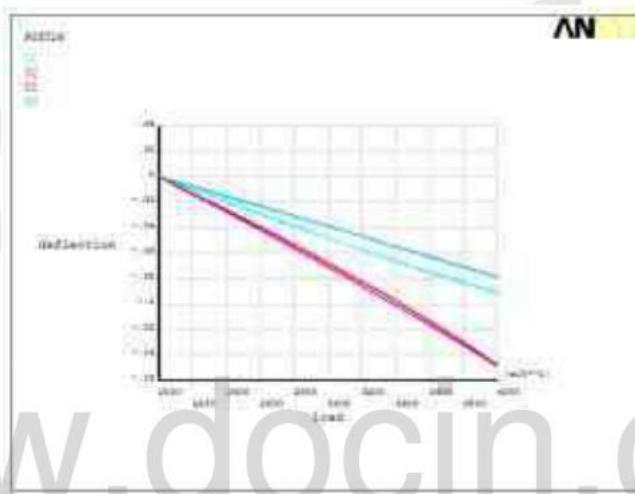


图 18-58 各点变形对比

由图 18-58 可见, 离顶端越近的点变形越明显, 顶端最大位移为 0.09m。

18.6 空间双层网壳

网壳的受力性能好, 刚度大, 自重小, 用钢量省, 是适用于中、大跨度建筑屋盖的一种较好的结构型式。从构造上网壳分为单层与双层两大类。本节分析双层网壳。

18.6.1 问题简述

一个大跨度网壳结构, 跨度 40m, 采用内外双层网壳, 内层网壳高 24m, 外层高 25m。其立面图如图 18-59 所示。

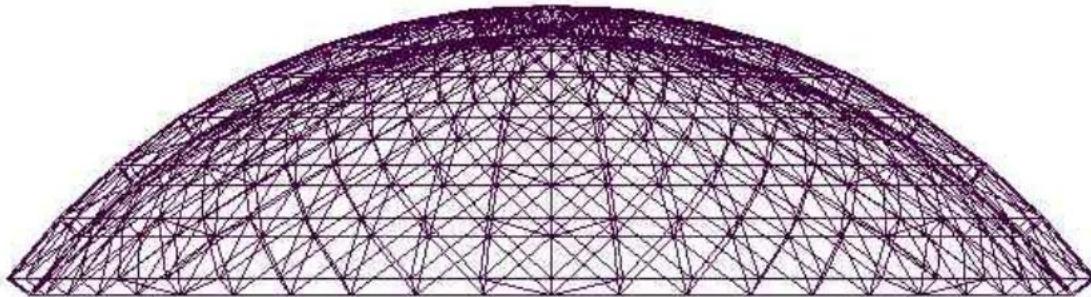


图 18-59 双层网壳立面图

一般来说，单层网壳宜采用空间梁系有限元法进行计算，而双层网壳宜采用空间杆系有限元法进行计算。网壳结构的外荷载可按静力等效的原则将节点所辖区域内的荷载集中作用在该节点上。分析双层网壳时可假定节点为铰接，杆件只承受轴向力。

本例采用 LIKN180 单元进行计算。

18.6.2 单元及材料定义

1. 运行 ANSYS 14.0

设置工作名为 Reticulated Shell，单击 RUN 进入 GUI，单击 Preferences 选择 Structural。

2. 定义单元类型

本例中结构选用 LINK180 单元。通过路径：Main Menu>Preprocessor>Element Type>Add/Edit/ Delete，单击 Add 添加单元 LINK180 为 1 号单元。

3. 定义实常数

通过路径 Main Menu>Preprocessor>Real Constants>Add/Edit/Delete，为三种不同截面尺寸的钢管定义三种实常数。R1=0.0019625，R2=0.001256，R3=0.0007065。

4. 定义材料属性

通过路径：Main Menu>Preprocessor>Material Props>Material Models，弹出 Define Material Model Behavior 对话框。选择对话框右半栏 Material Models Available>Structural>Linear>Elastic>Orthotropic 选项，进行正交各项异性参数设置。双击后在对话框输入数值，EX: 210E9; PRXY: 0.3，单击 OK 按钮完成设置。

在 Material Models Available>Structural>Density 中设定材料密度为 7800，命令流如下：

```

APDL:
ET,1,LINK180           ! 定义单元类型
R,1,0.0019625          ! 定义主要经纬杆截面积
R,2,0.001256            ! 定义斜杆截面积
R,3,0.0007065          ! 定义内外层网壳连接杆截面积
MP,EX,1,2.1E11          ! 弹性模量
MP,PRXY,1,0.3            ! 泊松比
MP,DENS,1,7800          ! 密度

```

18.6.3 建模

由于模型是球面网壳，因此，先进入球坐标系，进行节点的生成。路径：Utility Menu>WorkPlane>Change Active CS to>Global Cylindrical。

复杂建模过程使用 APDL 循环语句进行建模：

```

APDL:
theta=7.5                                     ! 定义球坐标参数
fi=6.64125
r1=25
r2=24
CSYS,2                                         ! 进入球坐标系
!外层网壳建模
*DO,I,1,8                                      ! 网壳外层节点
*DO,J,1,48,1
N,48*(I-1)+J,R1,(J-1)*THETA,(I-1)*FI+36.87
*ENDDO
*ENDDO
MAT,1                                           ! 定义外层主杆材料参数
REAL,1
*DO,I,1,8                                      ! 外层网壳纬向杆连接
*DO,J,1,47,1
E,48*(I-1)+J,48*(I-1)+J+1
*ENDDO
E,I*48,I*48-47
*ENDDO
* DO,I,1,7                                      ! 外层径向杆连接
*DO,J,1,48,1
E,48*(I-1)+J,48*(I-1)+J+48
*ENDDO
*ENDDO
N,769,25,0,90
*DO,I,337,384,1                                ! 外层顶点，与临近纬圈相连
E,I,769
*ENDDO
MAT,1                                           ! 外层斜杆参数
REAL,2
*DO,I,1,7                                      ! 外层斜杆
*DO,J,1,47,1
E,48*(I-1)+J, 48*(I-1)+J+49
*ENDDO
E,I*48,I*48+1
*ENDDO
!内层网壳生成
*DO,I,9,16                                     ! 网壳内层节点
*DO,J,1,48,1
N,48*(I-1)+J,R2,(J-1)*THETA,(I-9)*FI+36.87

```

```

*ENDDO
*ENDDO
MAT, 1                                ! 内层网壳纬向杆参数
REAL, 1
*DO, I, 9, 16                           ! 内层网壳纬向杆连接
*DO, J, 1, 47, 1
E, 48*(I-1)+J, 48*(I-1)+J+1
*ENDDO
E, I*48, I*48-47
*ENDDO
*DO, I, 9, 15, 1                         ! 内层径向杆连接
*DO, J, 1, 48, 1
E, 48*(I-1)+J, 48*(I-1)+J+48
*ENDDO
*ENDDO
N, 770, 24, 0, 90                        ! 内层顶点，与临近纬圈相连
*DO, I, 721, 768, 1
E, I, 770
*ENDDO
MAT, 1                                ! 内层斜杆材料参数
REAL, 2
*DO, I, 9, 15                           ! 内层斜杆
*DO, J, 1, 47, 1
E, 48*(I-1)+J, 48*(I-1)+J+49
*ENDDO
E, I*48, I*48+1
*ENDDO
MAT, 1
REAL, 3
! 内外层对接
*DO, I, 1, 8                            ! 内外层对应节点相连
*DO, J, 1, 48, 1
E, 48*(I-1)+J, 48*(I-1)+J+384
*ENDDO
*ENDDO
*DO, I, 337, 384, 1                     ! 外层最上层节点和中心点与内层中心点相连
E, I, 770
*ENDDO
E, 769, 770
*DO, I, 337, 383                         ! 内外层最上圈对应杆件交叉相连
E, I, I+385
*ENDDO
E, 384, 721
*DO, I, 385, 673, 48                     ! 0° 对应杆交叉相连
E, I, I-383
E, I, I-337
*ENDDO
*DO, I, 397, 421, 12                     ! 90° , 180° , 270° 对应杆交叉相连

```

```

*DO, J, 1, 7
E, I+(J-1)*48, I+(J-1)*48-385
E, I+(J-1)*48, I+(J-1)*48-383
*ENDDO
*ENDDO
*DO, I, 391, 427, 12           ! 45°, 135°, 225°, 315°
*DO, J, 1, 7
E, I+(J-1)*48, I+(J-1)*48-385
E, I+(J-1)*48, I+(J-1)*48-383
*ENDDO
*ENDDO
*DO, I, 433, 475, 6           ! 米字型位置加斜杆
*DO, J, 1, 6
E, I+(J-1)*48, I+(J-1)*48-432
*ENDDO
! 完成建模
*ENDDO
NUMMRG, ALL                   ! 合并重复单元
NUMCMP, ALL                    ! 压缩编号
FINISH

```

建模得到的节点如图 18-60 所示，有限元模型如图 18-61 所示。



图 18-60 节点分布图

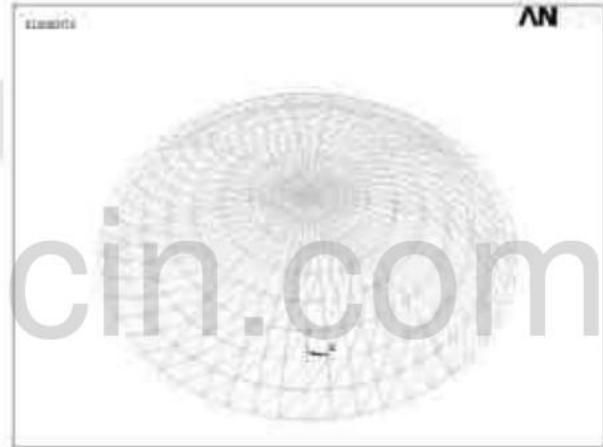


图 18-61 有限元模型图

18.6.4 施加约束和荷载

1. 施加约束

进入求解模块，先通过路径 Utility Menu>WorkPlane>Change Active CS to>Global Spherical 将坐标系调为球坐标。

拾取外层网壳最边缘一圈点，通过路径 Utility Menu>Select>Entities 将选取对象设为 Nodes，选取方式为 By Num/pick，单击 OK 按钮，弹出拾取节点对话框，在输入框上方勾选 MIN,MAX,INC，依次输入 1,48,1，单击 OK 按钮完成节点拾取。再通过路径 Main Menu>

Solution>Define Loads>Apply>Structural>Displacement>On Nodes, 单击 Pick all, 对所有当前节点施加约束。需要施加约束的自由度选择 UX,UY,UZ, Value=0。

2. 对节点施加荷载

通过路径 Utility Menu>Select>Everything 拾取所有实体。通过路径 Main Menu>Solution>Define Loads>Apply>Structural>Force/Moment>On Nodes, Pick all 对所有节点施加扰动力 FY=-1。

通过路径 Main Menu>Solution>Define Loads>Apply>Structural>Inertia>Gravity>Global, 对模型施加重力, ACELY 填入 9.8。

通过路径 Utility Menu>Select>Everything 再次选择所有实体, 之后开始求解: Main Menu>Solution>Solve>Current LS。

18.6.5 一般后处理结果分析

对双层网壳进行一般后处理分析, 步骤与 18.5 的单层网壳相同, 在此简述之。

通过路径 Main Menu>General Postproc>Plot Results>Contour Plot>Nodal Solu 查看 Z 向变形, 侧立面如图 18-62 所示, 俯视图如图 18-63 所示。

通过 Main Menu>General Postproc>Element Table>Define Table 定义单元列表, 单击 Add, Lab 填入 FI, By sequence num, 下一栏填入 SMISC, 1, 单击 OK 按钮完成第一个轴力单元列表的定义。

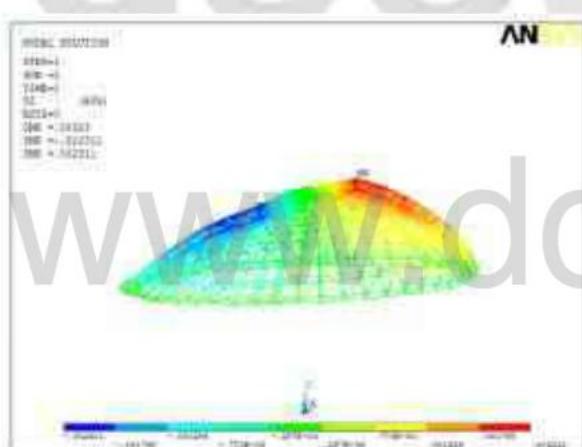


图 18-62 网壳变形侧立面

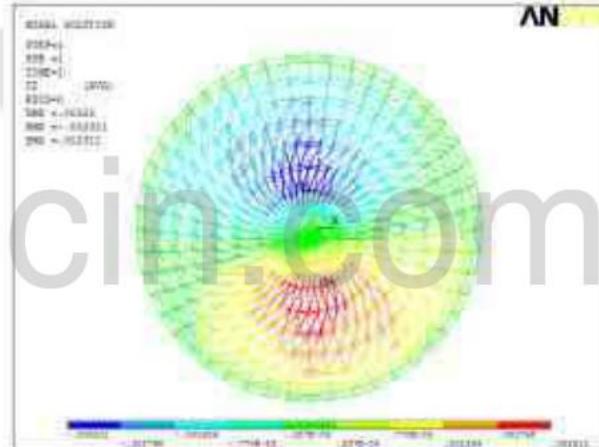


图 18-63 网壳变形俯视图

再添加第二个单元列表, Lab 填入 FJ, By sequence num, SMISC, 7; 通过路径 Main Menu>General Postproc>Plot Results>Contour Plot>Line Elec Res, 在 LabI 中选择 FI, 在 LabJ 中选择 FJ, 考虑模型网线的密度, 将 Fact 填入 0.5, 单击 OK 按钮完成设置, 此时得到网壳各杆轴力图, 如图 18-64 所示。

通过路径 Main Menu>General Postproc>List Results>Reaction Solu 可以得到支反力信息。

通过路径 Utility Menu>PlotCtrls>Symbols, 勾选不同的选项可以绘制出包括支反力在内的多种图像信息, 如图 18-65 所示。

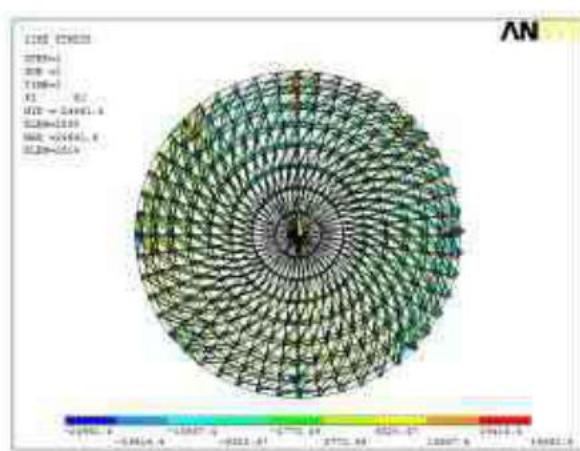


图 18-64 轴力图

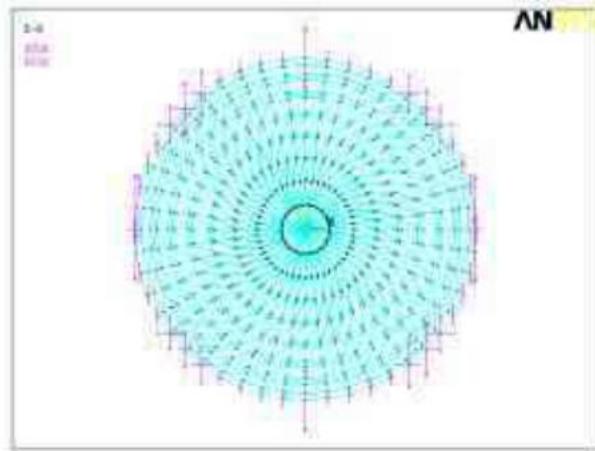


图 18-65 显示支反力

需要注意的是，LINK 单元因为没有弯曲刚度，不能进行特征值屈曲失稳的计算。而对于双层网壳，往往也不需要进行此类计算。

18.7 本章小结

本章针对大跨度空间结构体系进行了仿真实例分析。

随着科技水平的提高，我国空间结构理论分析近年来得到了长足的发展，计算方法由连续化分析到离散化分析，由近似计算到精确分析，由等效静力分析到直接动力分析，由线性分析到非线性分析。研究方法向理论、试验与大量计算机分析相结合的方向发展。

对于膜结构和索网结构，找形分析很重要。

近年来，建筑膜结构得到了迅猛的发展。膜结构大部分由钢材和索构成，另外与结构相结合的膜材也逐渐走向功能化、智能化。膜材具有造型轻巧自由、美观；透光、节能、环保，优良的阻燃性能；防污自洁性能；安全、寿命长等优点。基于这些优点，建筑膜材脱颖而出，膜结构被称为“21世纪的建筑”。

网壳的受力性能好，刚度大，自重小，用钢量省，是适用于中、大跨度建筑屋盖的一种较好的结构型式。缺点是曲面外形增加了屋盖表面积和建筑空间，构造处理、支承结构和施工制作均较复杂。网壳从构造上分为单层与双层两大类。

单层网壳的跨度不宜超过 40m。网壳结构的外荷载可按静力等效的原则将节点所辖区域内的荷载集中作用在该节点上。

分析双层网壳时可假定节点为铰接，杆件只承受轴向力；分析单层网壳时假定节点为刚接，杆件除承受轴向力外，还承受弯矩、剪力等。

参考文献

- [1] 王富职, 张朝晖. ANSYS10.0 有限元分析理论与工程应用 2006
- [2] 沈祖炎, 陈扬骥, 陈以一编著. 钢结构基本原理[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000.8
- [3] 王城泉, 邹昀, 郭翔. 型钢混凝土柱的数值模拟分析[期刊论文]-山西建筑 2011 (29)
- [4] 莫家兴. 基于 ANSYS 的钢筋混凝土框架异型节点破坏机理模拟分析[期刊论文]-安徽建筑 2010 (5)
- [5] 王斌, 张伟军. 型钢高强高性能混凝土梁的抗剪性能分析[期刊论文]-西安工业大学学报 2010 (6)
- [6] 陆培毅, 刘畅, 顾晓鲁. 深基坑支护结构支撑系统简化空间分析方法的研究[J]. 岩土工程学报, 2002, 24 (4)
- [7] 王彦宏, 薛建阳, 赵鸿铁等. 用 ANSYS 程序进行型钢混凝土偏压柱的有限元分析[期刊论文]-哈尔滨工业大学学报 2003, 35 (z1)
- [8] 薛建阳, 赵鸿铁, 杨勇等. 型钢混凝土柱粘结滑移性能及 ANSYS 数值模拟方法研究[期刊论文]-建筑钢结构进展 2006, 8 (5)
- [9] 王妙芳, 郭子雄. 型钢混凝土柱的 ANSYS 数值模拟技术[期刊论文]-华侨大学学报(自然科学版) 2009 (2)
- [10] 秦艳. 考虑粘结滑移的型钢混凝土柱有限元分析[期刊论文]-山西建筑 2009 (21)
- [11] 刘建军, 叶柏龙, 雷雨. 型钢混凝土(SRC) 深梁数值模拟分析[期刊论文]-四川建筑 2009 (2)
- [12] 姚海, 崔小朝, 禹海燕等. 用 ANSYS 软件对锚杆-锚固剂-岩体有限元数值模拟[期刊论文]-矿业快报 2008 (5)
- [13] 徐礼华, 池寅, 李荣渝等. 钢纤维混凝土深梁非线性有限元分析在 ANSYS 中的实现[期刊论文]-岩土力学 2008 (9)
- [14] 卫星, 强士中. 利用 ANSYS 实现斜拉桥非线性分析[期刊论文] -四川建筑科学研究 2003 (04)
- [15] 陈颜, 高明大. 基于 ANSYS 平台的斜拉桥成桥索力优化方法[期刊论文]-铁道学报 2006,28 (04)
- [16] 国家人民防空办公室. 地下工程防水技术规范 GB50108-2001[行业规范]-中国计划出版社 2001
- [17] 中国工程建设标准化协会组织. 钢结构设计规范 GB50017-2003[行业规范]-中国建筑工业出版社 2006
- [18] 中国建筑工业出版社. 网壳结构技术规程 JGJ 61-2003[行业规程]-中国建筑工业出版社 2006

