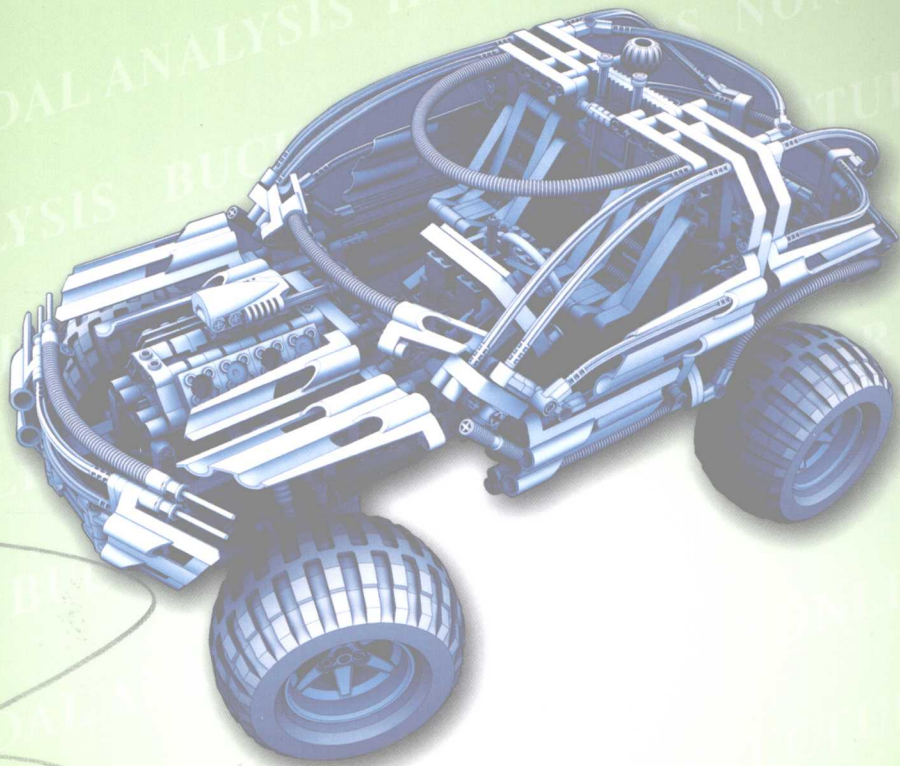


万水

ANSYS技术丛书



尚晓江 邱峰 赵海峰 等编著

ANSYS

结构有限元

高级分析方法与范例应用

(第二版)



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

0241.82/31=2

2008

万水 ANSYS 技术丛书

要 點 容 內

ANSYS 结构有限元高级分析方法 与范例应用 (第二版)

尚晓江 邱峰 赵海峰 等编著

图 书 在 版 编 目 (CIP) 数 据

ANSYS 结构有限元高级分析方法与范例应用 / 尚晓江等编著. — 2 版. — 北京: 中国水利水电出版社, 2008

(万水 ANSYS 技术丛书)

ISBN 978-7-208-42532-7

I. A... II. 尚... III. 有限元分析—应用—范例. ANSYS IV. O241.82

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 025637 号

ANSYS 结构有限元高级分析方法与范例应用 (第二版) 尚晓江 邱峰 赵海峰 等编著 中国水利水电出版社 (北京市三里河路 6 号 100044) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: mchance1@163.net (万水) sales@waterpub.com.cn	全 书 出 版 社
北京八水 北京印刷 787mm×1 2008 年 2 0001—400 58.00 元	套 册 印 张 次 数 印 数 定

中国水利水电出版社

内 容 提 要

本书将结构有限元分析的基本力学概念与 ANSYS 实践紧密结合,系统全面地介绍了 ANSYS 结构分析的方法及其背景原理,在内容的选择上照顾到科研以及工程计算两方面读者的实际需要,涉及各类结构形式的分析案例。书中所有例题都给出了具体分析过程,同时借助力学概念对计算结果进行了分析和评价。本书还对动力学、非线性、结构稳定性等问题进行了专题讲解。通过本书的学习,可使读者迅速地提高 ANSYS 的操作水平,从而具备在相关专业领域中应用 ANSYS 进行高级结构分析的能力。

本书适合作为土木、机械、航空、力学等相关专业研究生或高年级本科生学习结构数值分析及 ANSYS 软件应用课程的学习参考书。对从事各类结构分析的工程技术人员,也具有一定的参考价值。

本书部分实例的建模文件可直接到中国水利水电出版社网站 (<http://www.waterpub.com.cn/softdown>) 免费下载。

图书在版编目 (CIP) 数据

ANSYS 结构有限元高级分析方法与范例应用 / 尚晓江等
编著. —2 版. —北京: 中国水利水电出版社, 2008
(万水 ANSYS 技术丛书)
ISBN 978-7-5084-5532-7

I. A… II. 尚… III. 有限元分析—应用程序, ANSYS
IV. O241.82

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 055637 号

书 名	ANSYS 结构有限元高级分析方法与范例应用 (第二版)
作 者	尚晓江 邱 峰 赵海峰 等编著
出 版 发 行	中国水利水电出版社 (北京市三里河路 6 号 100044) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: mchannel@263.net (万水) sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 63202266 (总机)、68331835 (营销中心)、82562819 (万水)
经 售	全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	北京万水电子信息有限公司
印 刷	北京诚顺达印刷有限公司
规 格	787mm×1092mm 16 开本 31.25 印张 735 千字
版 次	2008 年 5 月第 1 版 2008 年 5 月第 1 次印刷
印 数	0001—4000 册
定 价	58.00 元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换
版权所有·侵权必究

第二版前言

本书第一版出版以来，得到科研以及工程计算领域广大读者的认可。一些高校在有限元课程中已将本书用作 ANSYS 教学的辅助教材。很多读者在阅读了第一版之后，对本书提出了很多有价值的改进意见。有鉴于此，对原书进行了系统修订，具体包括以下方面：

(1) 适当增加了 ANSYS 相关理论背景的介绍，介绍这部分内容时并不追求理论体系的完整性，而是集中力量有针对性地讲解与 ANSYS 分析技术直接相关的内容。

(2) 结合软件更新了部分内容，例如，在 ANSYS 目前最新版本中已经不再有 PLANE2 单元，本次修订时对这类问题进行了适当的增删。增加了关于 ANSYS 产品的统一启动界面和 ANSYS Workbench 仿真环境方面的一些简单内容。

(3) 结合基本的力学概念，对书中例题的计算结果作了必要的分析和评价，有助于读者对相关问题有更深入的了解。例如，读者曾询问关于结构屈曲分析结果的意义等问题，因此本次修订对结构稳定性分析例题的计算结果进行了解释和说明。

(4) 对程序操作方面的知识点多采用列表形式，以增加相关内容的系统性和条理性，使相关的章节更具可读性。

(5) 重新设计了一些新的例题，例如，动力学专题部分的例题基本上都是重新设计的，这些例题的共同特点是结构形式不复杂，但是通过这些简单问题容易讲清楚动力学的基本概念。在梁分析中也针对各类梁单元列举了例题。

(6) 删去了前一版过于简单的一些例题，适当增加了例题的总体复杂程度，每一章都有简单的问题和相对综合一些的问题。

(7) 适当增加了一些软件操作技巧等方面的介绍。对于使用程序过程中可能出现的常见问题，在正文中以“注意”强调一些相关的要点。

(8) 更正了第一版中的一些文字录入错误。

本次修订在总体上保持了前一版中理论与实践紧密结合、操作过程详细、分析例题丰富等特点，并在组织内容的过程中同时照顾到科研以及工程计算两方面读者的需要。本书在结构上分为三篇，第 1 篇主要介绍相关背景原理以及各类 ANSYS 结构单元的使用方法，第 2 篇介绍 ANSYS 结构分析方面的一些专题性的内容，第 3 篇提供了一些有代表性的综合性分析例题。本书附录中收录了一些常用结构单元的形函数以及 ANSYS 结构分析命令等。

本次改版修订工作主要由尚晓江、邱峰、赵海峰等完成，本次修订工作是集体智慧的结果，第一版的部分原作者参与了相关章节的改写和文字校对工作，他们是李文颖、王化锋、魏久安、苏建宇、潘冠群、张永刚、刘金兴、卢靖、蒋迪、李德聪、袁志达、陈小亮、杨海波、杨伟、石伟兴、聂慧萍、张炯曦、史雪松、张永芳、宋谦、王惠平。参与修订和为本版提供工程算例资料的还有梁兴、王海彦、刘永刚、徐建华、石彬彬、鲁小星等。此外，还要感谢中国水利水电出版社编辑人员为本书出版而付出的辛勤劳动。

由于时间仓促和编者水平的局限，书中不当和错误之处在所难免，欢迎读者朋友批评指正。作者联系方式：shj_cas@sina.com。

编者
2008 年 2 月

第一版前言

目前,很多高校的理工科专业(土木、机械、航空、力学等)都将有限单元法作为必修的专业课。但在学习有限元课程之后,还必须熟练地掌握相关的有限元分析软件才能将有限元基本理论有效应用到工程问题的分析中。

作为著名的通用有限元分析软件,ANSYS 因其强大的功能而受到越来越多的结构分析及其他相关专业科研与工程计算人员的青睐,可以说,ANSYS 是架设于有限元理论和实际工程结构计算问题之间的桥梁。

本书将结构有限元分析的基本力学概念与 ANSYS 实践紧密结合,通过大量生动的原创性分析实例,向读者系统全面地介绍 ANSYS 结构分析的方法,尽量照顾到科研以及工程计算两方面读者的需要。本书在内容组织上分为三篇:

第 1 篇: ANSYS 有限元分析基础

内容包括桁架结构、梁系结构、弹性平面问题、轴对称问题、空间问题、板壳结构等各种弹性结构的有限元静力分析问题,本篇列举了 7 个典型的工程实例。

第 2 篇: ANSYS 高级结构分析

内容包括结构非线性分析、结构的动力分析、结构的稳定性分析、结构最优化设计以及子结构技术的应用等 5 个结构分析高级专题,本篇列举了 11 个典型的工程实例。

第 3 篇: 工程范例精选

内容包括三个精选的很有代表性的工程结构综合分析范例:海洋钢导管架石油平台结构、框架剪力墙高层建筑结构以及施威德勒型球面网壳结构的 ANSYS 分析。每个问题均进行了一系列的相关分析,帮助读者将 ANSYS 结构分析方法融会贯通。

建议读者在学习有限元课程时把 ANSYS 作为一个数值仿真的实验室,通过大量的同步上机实践(用本书的例题即可),亲身体会结构有限元分析的计算机实现过程。我们认为只要基本概念清楚,基本操作熟练,就不难结合自身的专业背景和本书介绍的基本操作方法由浅入深地进行一些有特色的专业问题的分析。相信通过本书的学习,读者定能迅速地提高自身的 ANSYS 操作水平以及利用有限元技术进行结构分析的功底,从而具备在相关专业领域中从事高级结构分析的能力。

本书适合作为土木、机械、航空、力学等相关专业研究生或高年级本科生学习结构数值分析及 ANSYS 软件应用课程的主要学习参考书。对从事结构分析的工程技术人员也是很有价值的参考资料。

本书由中科院力学所尚晓江、邱峰、赵海峰、李文颖等负责编写。参加编写和录入工作的还有魏久安、苏建宇、张骥、潘冠群、谢季佳、左树春、冯丽萍、刘金兴、卢靖、蒋迪、李德聪、袁志达、张自兵、王艺、王化锋、陈小亮、杨海波、宋谦、杨伟、石伟兴、聂慧萍、史雪松、张永芳、王惠平等。同济大学结构工程专业研究生宋谦向作者提供了关于空间结构分析的资料,中科院力学所的邓守春博士、ANSYS-China 北京办事处龙丽平博士等在本书编写过程中帮助作者解决了一些具体的技术问题,一并在此表示感谢。此外,还要感谢中国水利水电

出版社编辑人员为本书出版而付出的辛勤劳动。

由于时间仓促和编写者认识水平的局限，书中不当和错误之处在所难免，欢迎读者朋友批评指正。作者联系方式：shj_cas@sina.com，zhf@lnm.imech.ac.cn。

编 者

2005年7月

目 录

第二版前言

第一版前言

第 1 篇 ANSYS 结构有限元分析基础

第 1 章 ANSYS 有限元分析基础	2
1.1 ANSYS 程序的理论背景和分析功能综述	2
1.1.1 ANSYS 程序的理论背景	2
1.1.2 结构有限元分析的基本过程与问题	4
1.1.3 ANSYS 程序结构分析能力概述	11
1.2 ANSYS 程序的基本使用入门 (一)	14
1.2.1 使用 ANSYS 分析问题的一般流程	14
1.2.2 ANSYS 的界面布局、程序架构及两种操作方式	19
1.2.3 最常用的 ANSYS 界面操作	23
1.3 ANSYS 程序的基本使用入门 (二)	32
1.3.1 直接法建立有限元模型	32
1.3.2 由几何模型到有限元网格——间接建模法	38
1.3.3 加载、多工况静力分析及后处理初步	45
1.4 APDL 语言及参数化分析	53
1.5 ANSYS 常见问题及操作技巧	61
1.5.1 与前后处理相关的问题	61
1.5.2 与加载相关的问题	63
1.5.3 获取函数、定制工具条及 ANSYS 的暂停	65
第 2 章 桁架杆系有限元分析及 ANSYS 实例	69
2.1 桁架杆系有限元分析的概念	69
2.2 可用于桁架分析的 ANSYS 单元	72
2.2.1 Link1 单元特性简介	72
2.2.2 LINK8 单元特性简介	73
2.2.3 LINK10 单元特性简介	74
2.3 分析实例: 平板网架结构的静力分析	77
第 3 章 梁系结构分析方法及 ANSYS 实例	87
3.1 梁系结构有限元分析提要	87
3.2 ANSYS 中的梁单元概述	88
3.2.1 BEAM3 单元特性介绍	88
3.2.2 BEAM4 单元特性介绍	90

3.2.3	BEAM188 和 BEAM189 梁单元特性简介.....	92
3.3	分析实例: ANSYS 各类梁单元的综合应用.....	95
3.3.1	刚铰混合结构的内力图.....	95
3.3.2	三向交叉梁系的计算.....	103
3.3.3	施工防护结构中的承重桁架分析.....	108
第 4 章	弹性平面问题的有限元分析及 ANSYS 算例.....	133
4.1	弹性平面问题有限元分析的基本方法.....	133
4.2	ANSYS 提供的平面问题单元.....	135
4.3	分析实例: 独立重力坝的静力分析.....	138
第 5 章	轴对称问题的有限元分析及 ANSYS 算例.....	153
5.1	ANSYS 轴对称问题分析提要.....	153
5.2	分析实例: 厚球壳的轴对称分析.....	154
第 6 章	三维实体结构的 ANSYS 分析及算例.....	166
6.1	三维实体结构 ANSYS 有限元分析提要.....	166
6.2	分析实例: 网架焊接空心球节点的受力分析.....	167
第 7 章	板壳结构的 ANSYS 分析及算例.....	190
7.1	板壳结构 ANSYS 有限元分析提要.....	190
7.2	分析实例: 圆柱壳屋面结构的静力分析.....	192
7.3	分析实例: 板梁结构中梁截面的偏置.....	200

第 2 篇 ANSYS 结构分析专题

第 8 章	ANSYS 结构动力分析专题.....	210
8.1	ANSYS 结构动力分析概述.....	210
8.1.1	模态分析及其 ANSYS 实现过程.....	210
8.1.2	谐响应分析.....	214
8.1.3	瞬态动力学分析.....	219
8.1.4	谱分析.....	225
8.2	ANSYS 模态分析例题: 几何刚度对梁自振特性的影响.....	228
8.3	谐响应分析例题: 不同激励模式谐振响应的比较.....	234
8.4	瞬态分析的例题: 移动载荷作用下的吊车梁.....	244
8.5	谱分析例题: 悬臂结构地震响应谱分析.....	250
第 9 章	ANSYS 结构非线性分析专题.....	255
9.1	ANSYS 结构非线性分析概述.....	255
9.1.1	结构非线性问题的几种类型.....	255
9.1.2	非线性问题的一般分析方法.....	258
9.1.3	ANSYS 结构非线性分析的过程与选项.....	261
9.2	接触问题的分析方法.....	267
9.2.1	接触问题概述.....	267
9.2.2	ANSYS 的接触分析功能.....	267

9.2.3	ANSYS 接触分析流程及接触向导的使用.....	268
9.3	几何非线性例题：油罐底效应的简化分析.....	270
9.3.1	问题描述.....	270
9.3.2	ANSYS 分析全过程.....	270
9.3.3	ANSYS 分析命令流.....	277
9.4	材料非线性例题：钢筋混凝土梁的分析.....	278
9.5	接触分析例题：插销拨拉过程的接触分析.....	299
第 10 章	结构的稳定性分析及 ANSYS 范例.....	314
10.1	ANSYS 结构稳定性分析的基本概念.....	314
10.2	工字梁的特征值屈曲分析.....	315
10.2.1	建立分析模型.....	315
10.2.2	特征值屈曲分析与结果显示.....	321
10.3	工字梁的非线性屈曲分析.....	324
第 11 章	ANSYS 结构最优化设计.....	330
11.1	优化设计问题的数学表述与 ANSYS 优化设计流程.....	330
11.2	分析实例：平板网架结构的优化设计.....	332
第 12 章	子结构技术简介.....	349
12.1	子结构分析的概念.....	349
12.2	ANSYS 子结构分析的步骤.....	350
12.2.1	生成部分.....	351
12.2.2	使用部分.....	353
12.2.3	扩展部分.....	355
12.3	子结构分析例题：空腹梁.....	355
12.3.1	问题描述.....	355
12.3.2	分析过程.....	356

第 3 篇 工程范例精选

第 13 章	框架—剪力墙结构的分析.....	368
13.1	分析对象简介.....	368
13.2	框架—剪力墙结构的模型建立.....	369
13.2.1	结构建模的总体规划.....	369
13.2.2	几何模型的建立.....	370
13.2.3	划分网格.....	373
13.3	重力载荷和风载荷作用下的结构响应.....	381
13.3.1	计算重力载荷作用下的结构响应.....	381
13.3.2	风载荷作用下的结构响应.....	383
13.4	结构模态分析.....	388
13.5	地震作用下结构的弹性时程分析.....	390
13.5.1	计算地震作用瞬态解.....	390

13.5.2	观察地震作用结构响应.....	391
第 14 章	海洋石油平台结构的动力分析.....	396
14.1	海洋平台结构简介.....	396
14.2	平台结构的模型建立.....	398
14.2.1	结构建模的总体规划.....	398
14.2.2	几何模型的建立.....	399
14.2.3	划分网格.....	402
14.3	海洋平台结构的模态分析.....	411
14.3.1	计算模态解.....	411
14.3.2	结果观察与分析.....	412
14.4	海洋平台谐响应分析.....	414
14.5	冰载荷作用下海洋平台结构响应.....	418
14.5.1	获得瞬态分析解.....	419
14.5.2	观察结果.....	421
14.6	波浪载荷作用下海洋平台随机振动分析.....	423
14.6.1	ANSYS 随机振动分析简介.....	423
14.6.2	波浪载荷简介.....	426
14.6.3	获得谱解.....	426
14.6.4	合并模态.....	429
14.6.5	计算响应的功率谱密度.....	429
第 15 章	大跨空间结构的建模与分析.....	433
15.1	大跨空间结构的 ANSYS 建模与分析概述.....	433
15.2	施威德勒型球面网壳的建模过程详解.....	435
15.3	网壳结构的固有振动特性分析.....	440
15.4	特征值屈曲分析.....	442
15.5	考虑初始缺陷的非线性屈曲分析.....	446
附录 A	ANSYS 的程序模块、启动器以及几何建模专题.....	452
A.1	ANSYS 11.0 的主要产品模块.....	452
A.2	ANSYS 产品启动器.....	453
A.3	ANSYS 经典环境建模操作专题.....	455
附录 B	部分结构单元的形函数.....	466
B.1	一维单元.....	466
B.2	二维单元.....	466
B.3	三维单元.....	467
附录 C	ANSYS 结构分析常用命令参考.....	469

第 1 篇 ANSYS 结构有限元分析基础

本篇学习导引

有限单元法是一种起源于结构矩阵分析的多物理场数值计算方法，目前已经成为工程领域中不可或缺的计算机辅助分析方法，很多高校的理工科专业也将有限单元法列为必修的专业课程。作为著名的有限元分析软件，ANSYS 搭起了有限元理论和工程数值计算之间的桥梁。读者在学习了有限单元法的基本理论框架之后，还需要学习至少一种商用分析程序的使用。借助分析程序处理一些实际的工程问题，在实践中加深对相关原理的理解和认知，可以说是学习有限元技术的一条有效途径。

本篇结合结构有限元分析的基本思想和 ANSYS 程序的使用，对结构数值分析的理论背景以及各种 ANSYS 结构单元的使用方法进行了系统的讲解。在相关操作的介绍中，列举了有代表性的分析实例。本篇在相关原理的介绍部分，并不追求理论体系的完整性，而是集中力量有针对性地讲解与 ANSYS 分析技术直接相关的内容；在操作实例的讲解部分，涉及到桁架结构、梁柱结构、平面应力和平面应变问题、轴对称问题、三维问题、板壳结构等各种结构类型，取材广泛，照顾到科研以及工程计算两方面读者的实际需要。

本篇列举的分析例题都有详细的 ANSYS 操作过程，同时对一些程序使用中的要点问题进行了有针对性的强调，以黑体字的“注意”引出。读者在学习有限元课程时，不妨用本篇的例题进行同步的上机实践练习，通过 ANSYS 这个数值仿真的实验室来亲身体会结构有限元分析的计算机实现过程。相信通过对本篇的学习，读者可以较快地掌握 ANSYS 结构分析的基本操作过程，了解常用 ANSYS 结构分析单元的使用方法和要点，同时加深对有限元分析基本原理的理解和认识。

第 1 章 ANSYS 有限元分析基础

📖 本章导读

有限元分析软件的作用在于，它架设起了有限元方法与工程问题数值计算之间的桥梁。但是这类软件不同于一般的应用软件，它对使用者的知识水平也提出了更高的要求。有限元软件的使用者不仅需要熟悉程序的分析功能、掌握基本的软件操作，而且应当具备必要的理论基础和行业背景知识，能够对计算过程中的各种参数作出正确的设置，并对程序的计算结果作出正确的判断和评价。

本章将围绕 ANSYS 计算程序的理论背景、分析功能和基本的操作流程进行有侧重点的讲解，同时将有针对性地解释一些初学过程中较常见的疑问，旨在帮助读者打好 ANSYS 软件的操作基础，掌握 ANSYS 程序分析过程的主要环节和操作要领。此外，本章内容主要针对 ANSYS 的经典分析环境，与 ANSYS Workbench 分析环境有关的问题，本书附录中做了一点简单介绍，读者可以参考相关的内容。

本章包括如下一些主题：

- ◇ ANSYS 程序的理论背景和分析功能综述
- ◇ ANSYS 基本使用入门（一）
- ◇ ANSYS 基本使用入门（二）
- ◇ APDL 语言及参数化建模方法
- ◇ ANSYS 常见问题及操作技巧

1.1 ANSYS 程序的理论背景和分析功能综述

1.1.1 ANSYS 程序的理论背景

ANSYS 的理论基础是起源于结构矩阵分析的有限单元法（Finite Element Method）。有限单元法是一种多物理场数值计算方法，它是结构工程师和应用数学研究人员共同智慧的结晶。1956 年，Turner 和 Clough 等人首次将刚架分析的矩阵位移法应用于飞机结构的分析中。之后的 1960 年，Clough 将这种处理问题的思路推广到求解弹性力学的平面应力问题，给出了三角形单元求解弹性平面应力问题的正确解答，并且首次提出“有限单元法”的名称。之后，应用数学家和力学家们则通过研究找到有限元方法的数学基础——变分原理，进而将这一方法推广应用于求解各种数学物理问题，如热传导、流体力学以及电磁场问题等。

在工程实践中，很多问题的解决都与求解微分方程有关。例如：材料力学中经典梁的弯曲问题可以归结为求解以挠度为未知函数的常微分方程的问题，弹性体的变形问题可归结为求解以位移为未知场变量的偏微分方程的问题，等等。我们知道，由于各种原因，这些问题中可以通过解析方法解决的仅仅是很少的一部分，大量实际问题需要借助数值方法来求解。但是，

连续的求解域是由无限多个微元体组成的，这与数值求解实现发生矛盾。有限元方法通过将连续体离散化的办法来解决这一矛盾，基本思路是：把具有无限自由度的连续体，离散化为许多具有有限未知量的小块区域的集合体，使问题简化为适合于数值求解的结构型问题。

有限元方法的基本实现过程可以概括为如下一些环节。

1. 创建求解域的几何模型

创建几何模型通常是花费时间较多的步骤，该步骤的目的是创建一个与求解域形状大致相同的几何模型。可以通过 CAD 软件完成之后导入有限元分析软件中，也可以直接使用 ANSYS 等有限元软件的前处理（建模）程序来创建。

2. 几何模型离散化（MESHING）

几何模型离散化是最为关键的一步。这一步将连续的求解域离散化为网格状的分块区域的集合体，因此离散化过程又被形象地称为网格化（MESHING）。

网格化后每一个小格所包围的区域称为一个单元（ELEMENT），有限个单元组成的网格被称为有限元模型（FINITE ELEMENT MODEL）。相邻的单元彼此之间只是在一些特定的点处连接在一起，这些点称为节点（NODE）。每个节点处的未知的场变量被称为自由度（DEGREE OF FREEDOM），是有限元方程求解的基本未知量。不同学科类型的单元，其节点具有不同的自由度。对于热分析，节点自由度为温度。对于结构分析，自由度为节点所具有的各种位移自由度，如平移自由度或转动自由度等。对其他物理场的分析也都有相应的场变量作为节点自由度。

注意：对于一维问题中线段划分为多个小段的过程，也习惯地称为 MESHING。尽管不像二维或三维问题那样形成网格状的单元组合体，但这些划分后的线段仍被称为网格。在 ANSYS 或其他程序中，MESHING 实际上代表的是一个过程，即借助于几何模型形成有限单元组合体的过程。

3. 单元分片（或分段）插值

单元分片插值与计算结果精度直接相关。按照数值计算分块近似的思想，选择一个相对简单的函数来近似地描述单元内部未知场变量的分布规律。单元内部场变量的插值，可以选用线性函数，也可通过二次以上的函数。

在图 1-1 中，求解域是一维的，被分成若干个线单元。每一个单元均采用线性函数对场变量 $u(x)$ 在单元的内部进行插值。

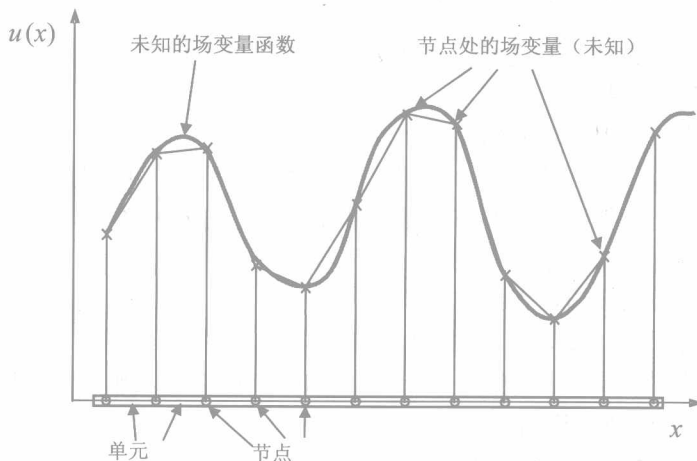


图 1-1 单元内场变量的分段插值

4. 建立离散系统的有限元方程

这一步包括单元分析和总体分析。通过单元分析建立单元特性方程, 根据相邻单元公共节点处场变量的连续性条件将单元特性关系集合为离散系统的有限元方程。集合的过程要注意节点的编号顺序。离散系统的有限元方程是奇异的线性代数方程组。

5. 边界条件的引入及求解代数方程组

向离散系统有限元方程组中引入边界节点处的定解条件(边界条件), 求解线性代数方程组, 得到未知的场变量在节点处的数值。

6. 计算导出物理量并进行可视化处理

通过计算得到节点处的场变量值及单元内部的插值模式, 得到场变量在单元内部的分布, 并通过基本解导出其他物理量。利用可视化的后处理程序, 绘制各种变量的等值线图、路径分布图等。ANSYS 中包含专门的结果后处理器 POST1 和 POST26, 可用来进行各种物理量的分布图形显示、变形过程动画显示以及绘制变量之间的曲线关系图等实用的操作。这些后处理程序可以直观地展现物理量在求解域中的分布, 帮助分析人员对结果快速地做出评价。

由上述介绍可知, 有限元方法具有以下特点:

- 思路直接, 易于掌握。
- 能适应复杂的几何形状及复杂边界条件。
- 理解可以建立在不同层次上, 可以通过直观的力学概念, 也可以建立在严格的理论基础之上。
- 适用范围广泛, 可应用于几乎各种物理场问题的求解。
- 基本求解过程采用矩阵形式表达, 适合计算机编程处理。

正是因为这些特点, 有限元方法在经历了几十年的研究和发后, 逐步成为解决各学科数值计算问题的一种普遍性方法, 广泛地应用于结构、流体、电磁、热传导、声场等多学科的稳态分析、瞬态分析、特征值分析以及与之相关的耦合场问题和非线性问题的分析中。有限元方法已经成为工程设计中不可或缺的一种重要分析技术, 其计算结果被作为各类工程结构设计和工业产品性能评估的重要参考依据。

1.1.2 结构有限元分析的基本过程与问题

结构分析是有限元方法最初的也是最重要的应用领域。用有限单元法解决结构问题的基本过程可以概括为如下一些环节:

- 结构离散化为有限个单元的组合物体。
- 进行单元分析, 得到其节点力和节点位移之间的关系(单元刚度方程)。
- 进行结构分析, 得到结构的节点力和节点位移之间的关系(结构刚度方程)。
- 引入约束条件, 排除系统的刚体平移和转动。
- 求解线性代数方程组, 得到节点位移。
- 由位移解可以进一步导出其他感兴趣的量, 如应变、应力等。

下面简要讨论与上述过程相关的一些具体问题, 其中涉及到的基本概念和原理是学习 ANSYS 结构分析的必要理论基础。

1. 建立结构有限元模型的两种思路

求解域的离散化是有限元分析过程中最关键也是难度最大的环节。对结构分析而言, 就

是将结构系统离散为一系列计算单元的组合物。根据问题的特点,这一过程可以采用如下两种完全不同的方式。

(1) 自然离散的杆件系统。

如图 1-2 所示的框架和空间网格结构都属于杆件结构系统,这类体系由于其本身存在自然的节点连接关系,因此是一种自然离散系统。这类结构系统多见于各类建筑结构、大跨空间钢结构、工业塔架等结构体系中。

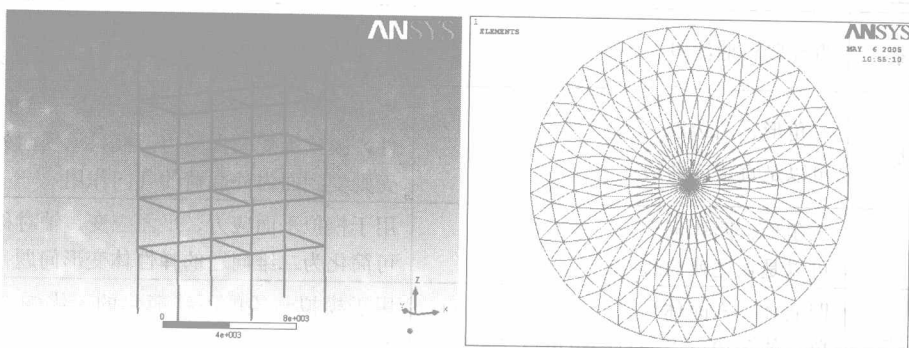


图 1-2 自然离散的杆件结构系统

对于规模不大的自然离散系统,在 ANSYS 等程序中建模时可采用直接创建节点并通过节点建立单元的方式(本章后面将具体介绍),这种建模方式称为直接法。

(2) 需要人工离散的连续体。

对于各种不同形状的实体结构来说,需要经过人工离散的网格化(MESHING)过程,才能形成分析所需的有限单元模型。当前,包括 ANSYS 在内的有限元软件都提供了功能强大的网格划分工具。

图 1-3 所示是一些实体结构经网格划分后得到的离散化有限元模型,左图为轴承底座的分析模型,右图为机械连接部件的有限元模型。这种借助于几何模型网格化的建模方式称为间接法。

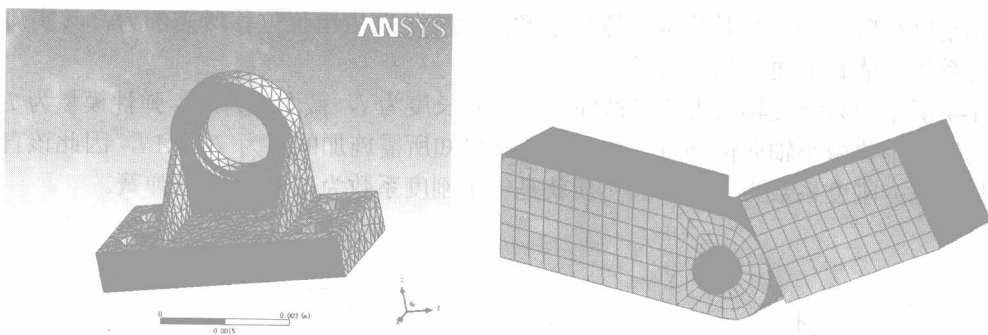


图 1-3 实体结构离散化的例子

2. 结构分析的单元类型

单元是组成有限元分析模型的基本元件。各种工程结构中的杆、梁、索、板、壳、膜以及三维块体等都可离散化为有限个单元的组合物,即有限元分析模型。组成结构模型的单元可

以各式各样,但是各种单元又有其作为结构分析单元的共性。随着有限元方法的不断发展,结构分析的单元类型日渐丰富,每一类的单元都有很多不同的算法,可用于模拟处于各种不同形态以及不同工作状态下的结构构件。

与结构分析相关的单元包括表 1-1 列举的一些类型。

表 1-1 结构分析单元的类型

单元类型	单元形状	单元应用场合
梁、杆、索	直线段、曲线段	用于模拟二维尺度远远小于第三维的结构构件,如梁、桁架杆、拉索、一般弹簧、阻尼器等
板、壳、膜	三角形、四边形 可以是直边或曲边	用于模拟二维尺度远远大于第三维的结构构件,膜只承受面内的力,板只承受面外的力,壳则受到面内外载荷的共同作用
面单元	三角形、四边形 可以是直边或曲边	用于模拟平面应力、平面应变、轴对称断面等可简化为二维问题的弹性体变形问题
三维体单元	四面体、六面体 单元的各边可以是直线也可以是曲线	用于模拟一般的不能简化的三维弹性体变形问题
连接单元	线状的单元	用于模拟两点之间的特殊连接,如各种非线性性的弹簧、阻尼器等

注:表中的梁、板类型的单元常被称为结构单元,而平面单元、体单元则被称为实体单元。

3. 单元分析及单元刚度矩阵

单元分析是有限元分析的重要一环,也是结构整体分析的基础。单元分析的目标在于得到单元节点力与节点位移之间的关系方程——单元刚度方程,此方程的系数矩阵就是单元刚度矩阵。单元刚度矩阵通过预先假设的形函数插值得到场变量,考虑物理方程并通过虚功原理来推导(具体过程可以参考第 4 章平面单元一节)。单元刚度矩阵是一个奇异矩阵。在单元分析时,单元上的各种作用力也需要同时按照虚功等效原则移置到单元的各节点上,形成等效节点载荷向量。

单元刚度矩阵由刚度系数构成。刚度系数或刚度是发生单位位移所需的力,其实质为弹簧的刚度系数。请看下面的几个例子。

图 1-4 所示为只承受轴向力的等截面直杆。其长度为 l , 截面积为 A , 弹性模量为 E 。直杆的右端发生单位微小轴向位移时,由材料力学可知所需施加的力为 $F=EA/l$,因此该直杆的轴向抗拉(压)刚度系数为 EA/l ,其实质就是一个刚度系数为 EA/l 的轴向弹簧。

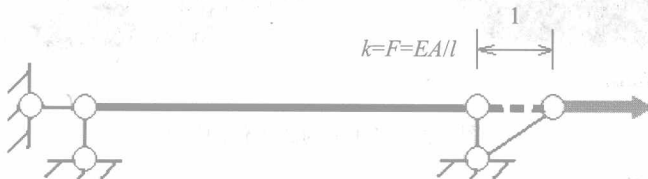


图 1-4 杆的刚度系数

图 1-5 所示为一等截面的直梁，跨度为 l ，材料弹性模量为 E ，截面惯性矩为 I ，梁左端固定，右端受到竖向支撑的约束。现在如果强迫梁的右端发生单位微小支座位移时，竖向支杆中的约束反力为 $F = 3EI/l^3$ ，因此此梁的右端抗侧向变形刚度为 $3EI/l^3$ 。

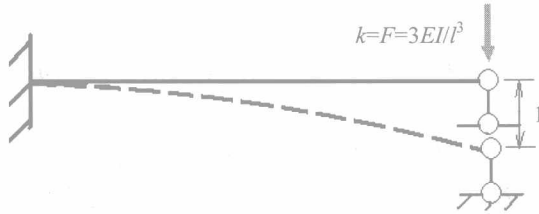


图 1-5 梁端的抗侧移刚度

图 1-6 中，等截面梁的参数与图 1-5 相同。如强迫梁的左端发生单位微小的转角时，需要施加的力矩为 $M = 3EI/l$ ，因此该梁左端的平面内转动刚度为 $3EI/l$ 。

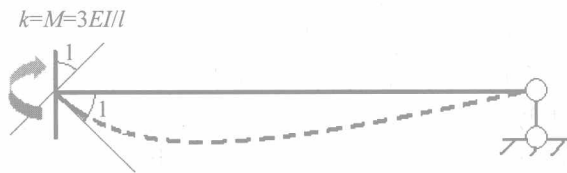


图 1-6 梁端的抗转动刚度

4. 结构单元的场变量与形函数

有限单元法以节点自由度，即场变量在节点处的数值，作为基本求解未知量。场变量是所分析的物理问题的基本未知量。对于结构分析而言，场变量可以是位移、应力等，因此结构分析实质上为位移场或应力场的分析。以位移场变量作为基本场变量构造出的单元称为位移元，位移元是结构分析中应用最为普遍的单元。得到节点自由度解（对求解结构问题的位移元来说就是节点的位移）后，单元内部各点的场变量数值（如位移）可通过节点自由度插值得到。由节点解到单元解所用的插值函数称作形函数。形函数决定了场变量在单元内部的分布模式。

以弹性力学的三角形线性平面单元为例（如图 1-7 所示），其形函数如下：

$$N_i(x, y) = \frac{1}{2A}(a_i + b_i x + c_i y) \quad (i = 1, 2, 3)$$

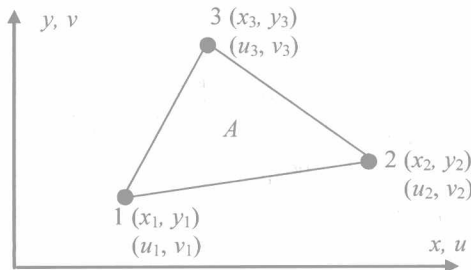


图 1-7 弹性平面问题的三角形单元