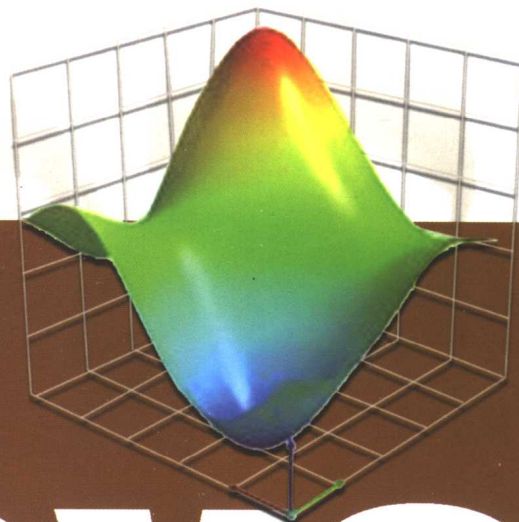




CAD/教学基地
CAM/CAE



ANSYS 11.0

赖永标 胡仁喜 黄书珍 编著
飞思数码产品研发中心 监制

土木工程有限元分析 典型范例



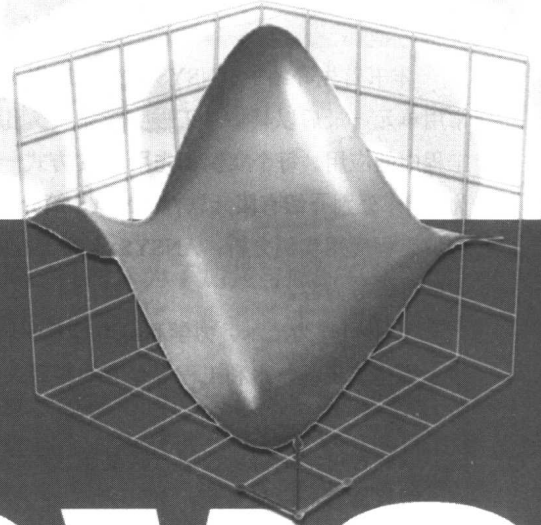
电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

CD-ROM
书中实例视频教程及实例的命令流文件



CAD/教学基地
CAM/CAE



ANSYS

11.0

赖永标 胡仁喜 黄书珍 编著
飞思数码产品研发中心 监制

土木工程有限元分析 典型范例

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

本书首先介绍了 ANSYS 软件及应用 ANSYS 软件进行有限元分析的例子，随后介绍了 APDL 语言及土木工程中的常用单元，最后以具体的工程实例深入浅出地介绍了 ANSYS 在隧道工程、边坡工程、水利工程、桥梁工程及房屋建筑工程中的应用。每个实例都先用 GUI 方式一步一步教用户如何操作，让读者轻松掌握，随后提供详细的命令流。全书分为 7 章，分别介绍有限元软件 ANSYS 简介；APDL 及土木工程中常用单元简介；ANSYS 隧道工程应用实例分析；ANSYS 边坡工程应用实例分析；ANSYS 水利工程应用实例分析；ANSYS 桥梁工程应用实例分析；ANSYS 房屋建筑工程应用实例分析等内容。

本书可作为土木、力学和隧道等专业的本科生、研究生、博士生及教师学习 ANSYS 软件的学习教材，也可作为从事土木建筑工程、水利工程等专业的科研人员学习 ANSYS 的参考用书。

未经许可，不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有，侵权必究。

图书在版编目 (CIP) 数据

ANSYS 11.0 土木工程有限元分析典型范例 / 赖永标, 胡仁喜, 黄书珍编著. —北京: 电子工业出版社, 2007.10
(CAD/CAM/CAE 教学基地)

ISBN 978-7-121-04988-0

I. A… II. ①赖…②胡…③黄… III. 土木工程—有限元分析—应用程序, ANSYS 11.0 IV. TU

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 139090 号

责任编辑: 裴 杰

印 刷: 北京天宇星印刷厂

装 订: 三河市双峰印刷装订有限公司

出版发行: 电子工业出版社

北京海淀区万寿路 173 信箱 邮编: 100036

开 本: 850×1168 1/16 印张: 21.75 字数: 696 千字

印 次: 2007 年 10 月第 1 次印刷

印 数: 5 000 册 定价: 39.00 元 (含光盘 1 张)

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及邮购电话: (010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zlls@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线: (010) 88258888。

前 言

随着计算力学、计算数学、工程管理学特别是信息技术的飞速发展,数值模拟技术日趋成熟。数值模拟可以广泛应用到土木、机械、电子、能源、冶金、国防军工、航天航空等诸多领域,并对这些领域产生了深远的影响。

有限单元法作为一种数值计算方法,在工程分析领域中应用较为广泛,自 20 世纪中叶以来,以其独有的计算优势得到了广泛的发展和应用,已出现了不同的有限元算法,并由此产生了一批非常成熟的通用和专业有限元商业软件。随着计算机技术的飞速发展,各种工程软件也得以广泛应用。ANSYS 软件以它的多物理场耦合分析功能而成为 CAE 软件的应用主流,在工程分析应用中得到了较为广泛的应用。

ANSYS 软件是美国 ANSYS 公司开发的大型通用有限元软件,并且它是有限元分析中第一个通过 ISO9001 质量认证的计算机辅助工程(CAE)设计分析软件,同时也是美国机械工程师协会、美国核安全局及二十多种专业技术协会认证的标准分析软件。它是最为通用和有效的商用有限元软件之一,它融结构、传热学、流体、电磁、声学 and 爆破分析等于一体,具有非常强大的前/后处理和计算分析能力,能够同时模拟结构、热、流体、电磁及多种物理场间的耦合效应。目前,已经广泛应用于土木工程、机械制造、材料加工、航空航天、铁路运输、石油化工、核工业、轻工、电子、能源、汽车、生物医学,以及家用电器等各个方面,为各个领域的设计开发以及前沿课题的攻关作出了巨大贡献。

为了帮助读者迅速了解并掌握 ANSYS 软件的土木工程应用技术,作者根据长期使用 ANSYS 软件进行土木工程力学分析的经验和体会,以 ANSYS 的最新版本 ANSYS 11.0 为依据,编写了此书。

本书首先介绍了 ANSYS 软件及应用 ANSYS 软件进行有限元分析的例子,随后介绍了 APDL 语言及土木工程中的常用单元,最后以具体的工程实例深入浅出地介绍了 ANSYS 在隧道工程、边坡工程、水利工程、桥梁工程及房屋建筑工程中的应用。每个实例都先用 GUI 方式一步一步教用户如何操作,让读者轻松掌握,随后提供详细的命令流。全书分为 7 章。

- 第 1 章为有限元软件 ANSYS 简介;
- 第 2 章为 APDL 及土木工程中常用单元简介;
- 第 3 章为 ANSYS 隧道工程应用实例分析;
- 第 4 章为 ANSYS 边坡工程应用实例分析;
- 第 5 章为 ANSYS 水利工程应用实例分析;
- 第 6 章为 ANSYS 桥梁工程应用实例分析;
- 第 7 章为 ANSYS 房屋建筑工程应用实例分析。

本书附有一张多媒体光盘,光盘中除了有每一个实例 GUI 实际操作步骤的视频教程以外,还以文本文件的格式给出了每个实例的命令流文件,用户可以直接调用它们。

本书由赖永标、胡仁喜、黄书珍编著。参与本书编写工作的还有：尹航、田银君、袁清文、孙明礼、马锁柱、刘文彬、朱正国、刘开云、严晗、高保彬、张志刚、焦健、左 、许洪、刘吕丽、熊慧、王敏、周冰、董伟、李瑞、王兵学、袁涛、王渊峰、李世强、周广芬、李鹏、陈丽芹、孟清华、李广荣、郑长松、王佩楷、王文平等，在此一并感谢。

本书可作为土木、力学和隧道等专业的本科生、研究生、博士生及教师学习 ANSYS 软件的学习教材，也可从事土木建筑工程、水利工程等专业的科研人员学习使用。

由于时间仓促，加之编者水平有限，书中不妥之处在所难免，恳请专家和广大读者批评指正。联系方式：win760520@126.com

编著者
2007年9月

| | |
|--------------------------------------|----|
| 第 1 章 有限元软件 ANSYS 简介 | 1 |
| 1.1 有限元法简介..... | 2 |
| 1.1.1 有限元法概述..... | 2 |
| 1.1.2 有限元常用术语..... | 2 |
| 1.2 有限元法的分析过程..... | 3 |
| 1.3 ANSYS 简介..... | 5 |
| 1.3.1 ANSYS 发展过程..... | 5 |
| 1.3.2 ANSYS 使用环境..... | 5 |
| 1.3.3 ANSYS 软件的功能..... | 6 |
| 1.4 ANSYS 11.0 的安装与启动..... | 9 |
| 1.4.1 系统要求..... | 9 |
| 1.4.2 安装..... | 10 |
| 1.4.3 设置运行参数..... | 11 |
| 1.4.4 启动与退出..... | 13 |
| 1.5 ANSYS 11.0 的用户界面..... | 14 |
| 1.6 ANSYS 文件系统..... | 16 |
| 1.6.1 文件类型..... | 16 |
| 1.6.2 文件管理..... | 17 |
| 1.7 ANSYS 分析过程..... | 20 |
| 1.7.1 建立模型..... | 20 |
| 1.7.2 加载求解..... | 23 |
| 1.7.3 查看计算结果..... | 26 |
| 1.8 一个 ANSYS 程序的例子..... | 26 |
| 1.8.1 分析实例描述..... | 26 |
| 1.8.2 建立模型..... | 27 |
| 1.8.3 加载求解..... | 34 |
| 1.8.4 查看计算结果..... | 37 |
| 第 2 章 APDL 及土木工程中常用单元简介 | 39 |
| 2.1 APDL 简介..... | 40 |
| 2.1.1 APDL 概述..... | 40 |
| 2.1.2 参数定义..... | 40 |
| 2.1.3 流程控制..... | 41 |
| 2.1.4 宏..... | 42 |
| 2.1.5 函数和表达式..... | 44 |
| 2.1.6 APDL 应用实例..... | 44 |
| 2.2 土木工程常用 ANSYS 单元..... | 47 |

| | | |
|--------------|---------------------------|------------|
| 2.2.1 | 杆 (LINK) 单元 | 47 |
| 2.2.2 | 弹簧 (COMBIN) 单元 | 51 |
| 2.2.3 | 梁 (BEAM) 单元 | 53 |
| 2.2.4 | 平面 (PLANE) 单元 | 57 |
| 2.2.5 | 壳 (SHELL) 单元 | 60 |
| 2.2.6 | 质量 (MASS21) 单元 | 63 |
| 2.2.7 | 实体 (SOLID) 单元 | 64 |
| 第 3 章 | ANSYS 隧道工程中的应用实例分析 | 67 |
| 3.1 | 隧道工程相关概念 | 68 |
| 3.1.1 | 隧道工程设计模型 | 68 |
| 3.1.2 | 隧道结构的数值计算方法 | 70 |
| 3.1.3 | 隧道荷载 | 71 |
| 3.2 | 隧道施工过程 ANSYS 模拟的实现 | 71 |
| 3.2.1 | 单元生死 | 71 |
| 3.2.2 | DP 材料模型 | 75 |
| 3.3 | ANSYS 隧道结构受力实例分析 | 78 |
| 3.3.1 | ANSYS 隧道结构受力分析步骤 | 78 |
| 3.3.2 | 实例描述 | 82 |
| 3.3.3 | GUI 操作方法 | 83 |
| 3.4 | ANSYS 隧道开挖模拟实例分析 | 107 |
| 3.4.1 | 实例描述 | 107 |
| 3.4.2 | ANSYS 模拟施工步骤 | 108 |
| 3.4.3 | GUI 操作方法 | 108 |
| 3.4.4 | 命令流实现 | 163 |
| 第 4 章 | ANSYS 边坡工程应用实例分析 | 171 |
| 4.1 | 边坡工程概述 | 172 |
| 4.1.1 | 边坡工程 | 172 |
| 4.1.2 | 边坡变形破坏基本原理 | 172 |
| 4.1.3 | 影响边坡稳定性的因素 | 173 |
| 4.1.4 | 边坡稳定性的分析方法 | 173 |
| 4.2 | ANSYS 边坡稳定性分析步骤 | 175 |
| 4.2.1 | 创建物理环境 | 175 |
| 4.2.2 | 建立模型和划分网格 | 177 |
| 4.2.3 | 施加约束和荷载 | 177 |
| 4.2.4 | 求解 | 177 |
| 4.2.5 | 后处理 | 177 |
| 4.2.6 | 补充说明 | 178 |
| 4.3 | ANSYS 边坡稳定性实例分析 | 178 |

| | | |
|--------------|---------------------------------|------------|
| 4.3.1 | 实例描述 | 178 |
| 4.3.2 | GUI 操作方法 | 179 |
| 4.3.3 | 计算结果分析 | 206 |
| 4.3.4 | 命令流实现 | 206 |
| 第 5 章 | ANSYS 水利工程应用实例分析 | 213 |
| 5.1 | 水利工程概述 | 214 |
| 5.2 | ANSYS 重力坝抗震性能分析步骤 | 214 |
| 5.2.1 | 创建物理环境 | 215 |
| 5.2.2 | 建立模型和划分网格 | 216 |
| 5.2.3 | 施加约束和荷载 | 217 |
| 5.2.4 | 求解 | 217 |
| 5.2.5 | 后处理 | 219 |
| 5.3 | ANSYS 重力坝抗震性能实例分析 | 219 |
| 5.3.1 | 实例介绍 | 219 |
| 5.3.2 | GUI 操作方法 | 220 |
| 5.3.3 | 命令流实现 | 248 |
| 第 6 章 | ANSYS 桥梁工程应用实例分析 | 253 |
| 6.1 | 引言 | 254 |
| 6.2 | 典型桥梁分析模拟过程 | 254 |
| 6.2.1 | 创建物理环境 | 254 |
| 6.2.2 | 建模、指定特性、分网 | 259 |
| 6.2.3 | 施加边界条件和荷载 | 260 |
| 6.2.4 | 求解 | 262 |
| 6.2.5 | 后处理（查看计算结果） | 268 |
| 6.3 | 实例 1——钢桁架桥静力受力分析 | 271 |
| 6.3.1 | 问题描述 | 271 |
| 6.3.2 | GUI 操作方法 | 272 |
| 6.3.3 | 命令流实现 | 286 |
| 6.4 | 实例 2——钢桁架桥模态分析 | 289 |
| 6.4.1 | 问题描述 | 289 |
| 6.4.2 | GUI 操作方法 | 289 |
| 6.4.3 | 命令流实现 | 294 |
| 第 7 章 | ANSYS 房屋建筑工程应用实例分析 | 297 |
| 7.1 | 引言 | 298 |
| 7.2 | 建筑结构分析模拟过程 | 298 |
| 7.2.1 | 创建物理环境 | 298 |
| 7.2.2 | 建模、指定特性、分网 | 302 |

| | | |
|-------|--------------------------|-----|
| 7.2.3 | 施加边界条件和载荷 | 303 |
| 7.2.4 | 求解 | 304 |
| 7.2.5 | 后处理（查看计算结果） | 311 |
| 7.3 | 实例 1——三层框架结构地震响应分析 | 312 |
| 7.3.1 | 问题描述 | 312 |
| 7.3.2 | GUI 操作方法 | 313 |
| 7.3.3 | 命令流实现 | 325 |
| 7.4 | 实例 2——框架结构模拟建模 | 327 |
| 7.4.1 | 问题描述 | 327 |
| 7.4.2 | GUI 操作方法 | 328 |
| 7.4.3 | 命令流实现 | 335 |

有限元软件 ANSYS 简介

本章首先简单介绍有限元方法，随后介绍 ANSYS 的发展史、功能、文件系统和实现过程，最后结合一个实例给出了 ANSYS 的实现过程。

本章重点：



有限元法



ANSYS 的功能



ANSYS 的启动



ANSYS 的分析过程

1.1 有限元法简介

1.1.1 有限元法概述

“有限元法”(Finite Element Method, FEM)是求解数值方程的一种数值计算方法,也是解决工程实际问题的一种有效的计算工具。它是将弹性理论、计算数学和计算机软件有机结合的一种数值分析方法。有限元法的基本思想可以追溯到1943年, Courant 首先尝试应用在一组三角形区域上定义的分片连续函数和最小位能原理相结合,来求解 St.Venant 扭转问题。但是直到1960年,美国的克拉夫(Clough)在一篇平面问题的论文中才首次使用“有限元法”这个名词。在20世纪60年代末70年代初,有限元法在理论上基本成熟,并开始陆续出现了商业化有限元分析软件。

有限元法的出现与发展有着深刻的工程背景。20世纪40、50年代,英国、美国等国家的飞机制造业有了大幅的发展。随着飞机结构的逐渐变化,人们准确了解飞机的静态特性和动态特性的欲望越来越迫切,传统的设计分析方法已经完全不能满足设计的需要,因此工程设计人员便开始寻找一种更合适的分析方法,于是出现了有限元法的思想。Tuener 和 Clough 等人于1956年将钢架分析中的位移法推广到弹性力学平面问题,并成功用于飞机结构的分析。伴随着电子计算机技术的迅猛发展,有限元法在工程分析中也获得了最广泛的应用。半个世纪以来,许多学者开展了针对有限元法的研究,如 Oden(1972年)、Belytschko 和 Hughes (1983年)、Zienkiewicz 和 Hughes 和 Taylor (1991年)、Bathe (1996年)、Simo (1998年)、Bonet 和 Wood (1997年)、Belyschko、Liu 和 Moran (2000年)等人的著作。在国内比较有影响的专著包括清华大学王勰成教授编著的《有限单元法的基本原理和数值方法》;丁皓江和何福保等编著的《弹性和塑性力学中的有限单元法》;王焕定和吴德伦编著的《有限单元法及计算程序》;朱伯芳编著的《有限单元法原理和应用》;杨骊先编著的《弹性力学及有限元法》;王焕定和焦恩平编著的《有限单元法基础》;王勰成教授编著的《有限单元法》;王焕定和王伟编著的《有限单元法教程》;刘尔烈、焦恩平和徐振铎编著的《有限单元法及程序设计》;凌道盛和徐兴编著的《非线性有限元程序》等。国际著名的有限元法杂志有 International Journal for Numerical Methods and Engineering、International Journal of Computers and Structures、Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering、Finite Element News 等。

特别是近30年的发展,有限元的基础理论和方法已经比较成熟,已成为当今工程技术领域中应用最为广泛,成效最为显著的数值分析方法。但是面对21世纪全球在经济和科技领域的激烈竞争,基础产业(如飞机、汽车、船舶等)的产品设计和制造需要引入重大的技术创新,高新技术产业(如纳米产品、空间站和宇宙飞船等)更需要发展新的设计理论和制造方法。这一切为有限元提供了广阔的天地,同时也提出了许多新课题。

1.1.2 有限元常用术语

1. 单元

对于任何连续体,可以利用网格生成技术将其离散成若干个小的区域,其中的每一个小的区域称为一个单元。常见的单元类型有线单元、三角形单元、四边形单元、四面体单元和六面体单元几种。由于单元是组成有限元模型的基础,因此单元的类型对于有限元分析是至关重要的。工程中常用到的单元有杆(Link)单元、梁(Beam)单元、块(Block)单元、平面(Plane)单元、集中质量(Mass)单元、管(Pipe)单元、壳(Shell)单元和流体(Fluid)单元等。

2. 节点

单元和单元之间连接的点称为节点，它在将实际连续体离散成为单元群的过程中起到桥梁作用，ANSYS 程序正是通过节点信息来组集刚度矩阵进行计算的。同一种单元类型根据节点个数的不同分成不同的种类，如同为平面单元，PLANE2 单元是 6 个节点，而 PLANE42 是 4 个节点。

3. 节点力和节点载荷

节点力指的是相邻单元之间的节点间的相互作用力。而作用在节点上的外载荷称为节点载荷。外载荷包括集中力和分布力等。在不同的学科中，载荷的含义也不尽相同。在电磁场分析中，载荷指结构所受的电场和磁场作用。在温度场分析中，所受载荷则指的是温度。

4. 边界条件

边界条件指的是结构边界上所受到的外加约束。在有限元分析中，边界条件的确定是非常重要的。错误边界条件的选择往往使有限元中的刚度矩阵发生奇异，使程序无法正常运行。因此，施加正确的边界条件是获得正确分析结果和较高分析精度的重要条件。

5. 位移函数

位移函数是指用来表征单元内的位移或位移场的近似函数。正确选择位移函数将直接关系到其对应单元的计算精度和能力。位移函数要满足以下几个条件：

- (1) 在单元内部必须是连续的；
- (2) 位移函数必须含单元的刚体位移；
- (3) 相邻单元在交界处的位移是连续的。

1.2 有限元法的分析过程

有限元法的基本思想是将连续的结构离散成有限个单元，并在每一个单元中设定有限个节点，将连续体看作是只在节点处相连接的一组单元的集合体；同时选定场函数的节点值作为基本未知量，并在每一个单元中假设一近似插值函数以表示单元中场函数的分布规律；进而利用力学中的某些变分原理去建立用以求解节点未知量的有限元方程，从而将一个连续域中的无限自由度问题转化为离散域中的自由度问题。一经求解就可以利用解得的节点值和设定的插值函数确定单元上以至整个集合体上的场函数。具体来说，有限元法的分析过程可以分为如下 5 个步骤。

(1) 结构离散化。离散化就是指将所分析问题的结构分割成有限个单元体，并在单元体的指定点设置节点，使相邻单元的有关参数具有一定的连续性，形成有限元网格，即将原来的连续体离散为在节点处相连接的有限单元组合体，用它来代替原来的结构。结构离散化时，划分单元的大小和数目应当根据计算精度和计算机的容量等因素来决定。

(2) 选择位移插值函数。为了能用节点位移表示单元体的位移、应变和应力，在分析连续体问题时，必须对单元中位移的分布做出一定的假设，即假定位移是坐标的某种简单函数（插值函数或位移模式），通常采用多项式作为位移函数。选择适当的位移函数是有限元法分析中的关键，应当注意如下几个方面：

- a. 多项式的项数应等于单元的自由度数；
- b. 多项式的阶次应包含常数项和线性项；
- c. 单元自由度应等于单元节点独立位移的个数。

位移矩阵为：

$$\{f\} = [N] \{\delta\} \quad (1.1)$$

式中， $\{f\}$ 为单元内任意一点的位移， $\{\delta\}$ 为单元节点的位移， $[N]$ 为行函数。

(3) 分析单元的力学特性。

首先利用几何方程推导出用节点位移表示的单元应变：

$$\{\varepsilon\} = [B]\{\delta\}^e \quad (1.2)$$

式中， $\{\varepsilon\}$ 为单元应变， $[B]$ 为单元应变矩阵。

再由本构方程可导出用节点位移表示的单元应力：

$$\{\sigma\} = [D][B]\{\delta\}^e \quad (1.3)$$

式中， $[D]$ 为单元材料有关的弹性矩阵。

最后由变分原理可得到单元上节点力与节点位移间的关系式（即平衡方程）：

$$\{F\}^e = [k]^e \{\delta\}^e \quad (1.4)$$

式中， $[k]^e$ 为单元刚度矩阵：

$$\{k\}^e = \iiint [B]^T [D] [B] dx dy dz \quad (1.5)$$

(4) 集合所有单元的平衡方程，建立整体结构的平衡方程。即先将各个单元的刚度矩阵合成整体刚度矩阵，然后将各单元的等效节点力列阵集成总的载荷阵列——称为总刚矩阵 $[K]$ ：

$$[K] = \sum [k]^e \quad (1.6)$$

由总刚矩阵形成整个结构的平衡方程：

$$[K]\{\delta\} = [F] \quad (1.7)$$

(5) 由平衡方程求解未知节点位移和计算单元应力。

有限元求解程序的内部过程如图 1-1 中所示。

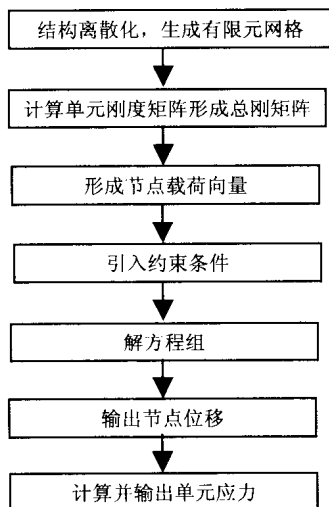


图 1-1 有限元求解程序的内部过程

因为单元可以设计成不同的几何形状，所以可以灵活地模拟和逼近复杂的求解区域。很显然，只要插值函数满足一定的要求，随着单元数目的增加，解的精度也会不断提高而最终收敛于问题的精确解。虽然从理论上讲，不断增加单元数目可以使数值分析解最终收敛于问题的精确解，但这却大大增加了计算机运行时间。而在我们实际工程应用中，只要所得的解能够满足工程的实际需要就可以了。因此，有限元法的基本策略就是在分析精度和分析时间上找到一个最佳的平衡点。

1.3 ANSYS 简介

1.3.1 ANSYS 发展过程

ANSYS 公司是由当今有限元界的权威、美国著名力学专家、美国匹兹堡大学力学系教授 John Swanson 博士于 1970 年创建发展起来的,总部设在美国宾西法尼亚州的匹兹堡,ANSYS 公司也是目前世界 CAE 行业最大的公司。John Swanson 博士敏锐地洞察到计算机模拟工程商品化的发展,创建了 ANSYS 公司。近 30 年来,ANSYS 公司一直致力于设计软件的开发、维护及售后服务,不断地吸取当今世界最新的计算方法和计算机技术,引领世界有限元的发展,并受到全球业界的推崇,拥有全球最大的用户群。目前,ANSYS 的用户已经遍布世界的众多科研机构、高校和单位。

ANSYS 软件的最初版本和今天的版本相比有相当大的区别,它只是一个批处理程序,提供热分析及线性结构分析功能,只能在大型计算机上使用,并且必须通过编写分析代码按照批处理方式执行。为了满足广大用户的需求,ANSYS 在 20 世纪 70 年代融入了非线性、子结构,以及更多的单元类型,从而使 ANSYS 功能大大增强;20 世纪 70 年代末,随着小型机和 PC 的出现,操作系统进入了图形交互方式,ANSYS 程序建立了交互式操作菜单环境,使得 ANSYS 程序法得到了很大的改善,前后处理技术进入了一个崭新的阶段。在进行分析之前,可以利用交互式图形(前处理)来验证模型的生成过程、边界条件和材料属性等;求解完成后,计算结果的图形显示(后处理)可用于检验分析过程的合理性。

如今的 ANSYS 软件更加趋于完善,功能更加强大,使用更加方便。ANSYS 提供的虚拟样机设计法,可以使用户大大减少计算时耗和物理样机;ANSYS 可与许多先进的 CAD 软件共享数据,利用 ANSYS 的数据接口,可精确地将在 CAD 系统下生成的几何数据传到 ANSYS,如 Pro/Engineer、NASTRAN、Alogor、I-DEAS 和 AUTOCAD 等,并通过必要的修补可准确地在该模型上划分网格并求解,这样可以节省用户在创建模型过程中所花费的大量时间,极大地提高了工作效率;利用 ANSYS 的参数设计语言 APDL 来扩展宏命令,可以直接生成快速有效的分析和结果处理文件等。

ANSYS 在不断融合最新计算方法和计算技术的同时,还十分重视本身的质保体系,ANSYS 公司于 1995 年在设计分析软件类中第一个通过了 ISO90001 质量体系认证,是美国机械工程协会(ASME)、美国核安全局(NQA)及近二十种专业技术协会认证的标准分析软件,现在已经通过 ISO9001 2000 质量体系认证。

在中国,ANSYS 软件经过几年的经营,用户数量迅速增长,遍及工业的各个领域,在各高校、科研院所、设计和生产单位得到越来越广泛的应用。1996 年 2 月,ANSYS 公司在北京成立了第一个驻华办事机构。随后,ANSYS 公司和中国压力容器标准化技术委员会合作,在 1996 年开发了符合中国 JB4732-95 国家标准的中国压力容器版。1997 年初,又相继成立成都办事处和上海办事处,以促进 ANSYS 软件在中国的发展。

1.3.2 ANSYS 使用环境

ANSYS 程序是一个功能强大、灵活的设计分析及优化软件包。该软件可以浮动运行于从 PC、NT 工作站、UNIX 工作站直至巨型机的各类计算机及操作系统中,数据文件在其所有的产品系列和工作平台上均兼容。其多物理场耦合的功能,允许在同一模型上进行各式各样的耦合计算,如热—结构耦合、磁—结构耦合等,在 PC 上生成的模型同样可以运行于巨型机上,这就保证了所有 ANSYS 用户的多领域多变工程问题的求解。

ANSYS 软件可与众多先进 CAD 软件共享数据接口,由 CAD 软件生成的模型文件格式有:Pro/E、

Unigraphics、CADD5、IGES、SAT 和 Parasolid 等。

1.3.3 ANSYS 软件的功能

ANSYS 软件含有多种有限元分析的能力，包括从简单线性静态分析到复杂非线性动态分析。该软件强大的功能与其含有众多模块是分不开的，其模块结构如图 1-2 所示。

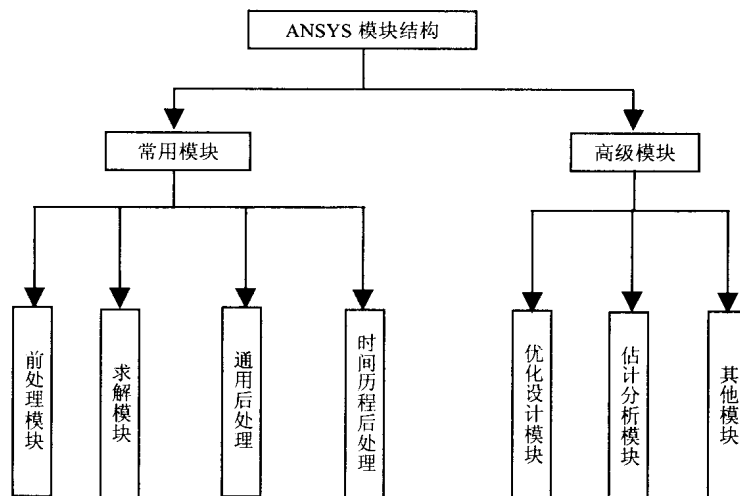


图 1-2 ANSYS 模块结构

在进行有限元分析时，ANSYS 软件主要使用 3 个部分：前处理模块（PREP7）、分析求解模块（SOLUTION）和后处理模块（POST1 和 POST2）。前处理模块提供了一个强大的实体建模及网格划分工具，利用这个模块用户可以方便地构造自己想要的有限元模型；分析求解模块是指对已经建立好的模型在一定的载荷和边界条件下进行有限元计算。求解平衡微分方程包括结构分析（可进行线性分析、非线性分析和高度非线性分析）、流体动力分析、电磁场分析、声场分析、压电分析，以及多物理场的耦合分析，可模拟多种物理介质的相互作用，具有灵敏度分析及优化分析能力；后处理模块是指对计算结果进行处理，将结果以图表、曲线的形式显示或输出。ANSYS 软件提供 100 多种单元类型，用来模拟工程中的各种结构和材料。

启动 ANSYS 软件后，从开始菜单平台（主菜单）可以进入各种处理模块。用户的指令可以通过鼠标单击菜单项选取和执行，也可以在命令输入窗口中通过键盘输入。命令一经执行，该命令就会在 .LOG 文件中列出，用户打开输出窗口可以看到 .LOG 文件的内容。如果软件运行过程中出现问题，查看 .LOG 文件中的命令及其错误提示，将有助于迅速发现并解决问题。.LOG 文件可以略做修改，将其存到一个批处理文件中，在以后进行同样工作时，由 ANSYS 自动读入并执行，这就是 ANSYS 软件的第三种命令流方式。该方式在进行某些重复工作时，可以提高工作效率。

下面对 ANSYS 软件进行有限元分析中常用的 3 种模块分别进行介绍。

1. 前处理模块（PREP7）

ANSYS 软件的前处理模块主要功能有 3 个部分：参数定义、实体建模和网格划分。

1) 参数定义

ANSYS 程序在进行建模过程中，首先要对所有被建模型中的材料进行参数定义：包括定义使用单位制、定义单元类型、定义单元实常数，以及定义材料特性等。

对于定义单位制，ANSYS 并没有指定固定的单位，除了磁场分析之外，可以使用任意一种单位制，但必须保证输入的所有数据使用同一单位制。

对于单元类型的定义,因为 ANSYS 中有 100 多种不同的单元类型,每一种单元类型又有特定的编号和单元类型名,所以对所建模型要选择合适的单元,实质上单元类型的选择就是指有限元分析中的选择位移模式,ANSYS 根据所选择单元类型来进行网格划分。

单元的实常数是根据单元类型特性来确定的。如 BEAM3 梁单元有 AREA、IZZ、HEIGHT、SHEARZ、ISTRN 和 ADDMAS 6 个实参数,而 BEAM4 梁单元有 AREA、IZZ、IYY、TKZ、TKY、THETA、SHEARZ、SHEARY、SPIN、ISTRN、IXX 和 ADDMAS 12 个实参数。

材料特性是针对每一种材料的性质参数,在一个分析中可以有多个材料特性组,相应的模型中有多种材料,ANSYS 通过独特的参考号来识别每个材料的特性组。

2) 实体建模

ANSYS 程序提供了两种实体建模方法:自顶向下和自底向上。

自顶向下进行实体建模时,用户定义一个模型的最高级图元(图元等级从高到低分别是体、面、线和点),如球、棱柱,称为基元,程序自动定义相关的面、线和关键点。用户可以利用这些高级图元直接构造几何模型。

自底向上进行实体建模时,用户从最低级的图元向上构造模型:先定义关键点,再依次定义线、面、体。

无论用户采用上面两种方法的哪一种方法来建模,用户均能使用布尔运算(如相加、相减、相交、分割、黏结和重叠等)来组合数据,从而构造出用户想要的模型。此外,ANSYS 程序还提供了拖拉、延伸、旋转、移动和复制实体模型的图元功能,以及切线构造、自动倒角生成、通过拖拉与旋转生成面、体等附加功能,可方便帮助用户建模。

3) 网格划分

ANSYS 程序提供了使用便捷、功能强大的网格划分功能。从使用角度来分,ANSYS 程序网格可划分为智能划分和人工选择划分。从网格划分功能来分,可分为 4 种网格划分方法:延伸划分、映像划分、自由划分和自适应划分。延伸网格划分可将一个二维网格延伸成一个三维网格。映像网格划分允许用户将几何模型分解成简单的几个部分,然后选择合适的单元属性和网格控制,生成映像网格。ANSYS 程序的自由划分功能非常强大,可对复杂模型直接划分,避免了用户对各个部分分别划分然后进行组装时各部分不匹配带来的麻烦。自适应网格划分是在生成了具有边界条件的实体模型以后,用户指示程序自动生成有限元网格,分析、估计网格的离散误差,然后重新定义网格大小,再次分析计算、估计网格的离散误差,直至误差低于用户定义的值或达到用户定义的求解次数。

2. 求解模块 (SOLUTION)

前处理阶段完成建模以后,用户可以用求解模块对所建模型进行力学分析和有限元求解。在该阶段,用户可以定义分析类型、设置分析选项、施加边界条件与载荷和设置载荷步选项,然后进行有限元求解。

1) 定义分析类型

可以根据所施加载荷条件和所要计算的响应来定义分析类型。例如,要计算固有频率和模态振型,就要选择模态分析。在 ANSYS 程序中可以进行的分析有:静态(或稳态)、瞬态、调谐、模态、频谱、挠度和子结构分析。

ANSYS 软件提供的分析类型有如下几种:

● 结构静力分析

用来求解外载荷引起的位移、应力和力。静力分析很适合求解惯性和阻尼对结构的影响并不显著的问题。ANSYS 程序中的静力分析不仅可以进行线性分析,而且可以进行非线性分析,如塑性、蠕变、膨胀、大变形、大应变及接触分析。

● 结构动力分析

结构动力分析用来求解随时间变化的载荷对结构或部件的影响。与静力分析不同,动力分析要考虑随时间变化的力载荷,以及它对阻尼和惯性的影响,如隧道开挖时爆炸产生的冲击力和地震产生的随机

力。ANSYS 可进行的结构动力分析类型包括：瞬态动力分析、模态分析、谐波响应分析及随机震动响应分析。

- 结构非线性分析

结构非线性分析导致结构或部件的响应随外载荷不成比例变化。ANSYS 程序可以求解静态和瞬态非线性问题，包括材料非线性、几何非线性和单元非线性三种。

- 热分析

ANSYS 程序可以处理热传递的三种基本类型：传导、对流和辐射。热传递的三种类型均可以进行稳态和瞬态、线性和非线性分析。热分析还具有可以模拟材料固化和溶解过程的相变分析能力，以及模拟热与结构应力之间的热—结构耦合分析能力。

- 电磁场分析

主要用于电磁场分析，如电感、电容、磁通量密度、涡流、电场分布、磁力线分布、力、运动效应、电路和能量损失等。此外，还可以用于螺线管、调节器、发电机、变换器、磁体、加速器、电解槽及无损检测装置等的设计和分析领域。

- 压电分析

用于分析二维或三维结构对 AC (交流)、DC (直流) 或任意随时间变化的电流或机械载荷的响应。这种分析可进行四种类型的分析：静态分析、模态分析、谐波响应分析和瞬态响应分析，适用于换热器、振荡器、麦克风等部件及其他电子设备的结构动态性能分析。

- 流体动力分析

ANSYS 程序流体动力分析可进行二维、三维流体动力场问题，分析类型可以是为瞬态或稳态，可进行传热或绝热、压缩或不可压缩等研究。分析结果可以是每个节点的压力和通过每个单元的流率，并且可以利用后处理功能产生压力、流率和温度分布的图形显示。主要用于超音速喷管中的流场、使用混合流研究估计热冲击的可能性、弯管中流体的三维流动、管路系统中热的层化和分离问题的设计和研究工作。

- 声场分析

ANSYS 中的声场分析主要用来研究含有流体介质中的声波传播或分析浸在流体中的固体结构的动态响应特性。如可以用来确定音箱话筒的频率响应、研究音乐大厅的声场分析或预测水对振动船体的阻尼效应等。

2) 设置分析选项

主要针对不同的分析类型设置它们各自的分析选项，包括通用几何非线性、求解器等一系列设置选项，以及静动力分析类型的其他专用选项。

3) 施加边界条件与载荷

ANSYS 具有四大物理场的分析功能，不同的物理场分析具有不同的自由度、载荷与边界条件，这些都统称为载荷。有限元分析的主要目的就是计算系统对载荷的响应，因此，载荷是求解的重要组成部分。ANSYS 载荷分为 6 类：DOF (自由度) 约束、力、表面分布载荷、体积载荷、惯性载荷和耦合场载荷。

4) 设置载荷步选项

主要设置时间、载荷步、载荷子步、平衡迭代和输出控制。

在所有静态和瞬态分析中，时间总是计算的跟踪参数，即以一个不变的计数器或跟踪器按照单调增加的方式记录系统经历一段时间的响应过程。

载荷步指可求得解的载荷配置，依据载荷变化方式可以将整个载荷时间历程划分成多个载荷步即 Load Step，每个载荷步代表载荷发生一次突变或一次渐变阶段。如结构分析中，可将风载荷施加于第一个载荷步，第二个载荷步时间重力等。

载荷子步指一个载荷步中增加的步长，子步也叫时间步，代表一段时间。

在子步载荷增量的条件下，程序需要进行迭代计算即 Iteration，最终求解系统在当前子步时的平衡状态，这个过程叫平衡迭代。