



ANSYS工程应用系列丛书

三维书屋工作室

胡仁喜 康士廷 等编著

ANSYS

14.5

视频操作 ■ 源文件 ■ 最终效果

土木工程有限元分析从入门到精通



全面完整
深入浅出的知识体系
理论阐述
循序渐进的分析讲解
实用典型的实例引导



本书包含各书目分别由ANSYS工程应用领域的专家和学者执笔编写，书中融入了他们多年研究的经验和体会，为了便于读者快速掌握ANSYS工程开发技巧，书中引用大量的工程案例。

机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

ANSYS 14.5 土木工程有限元分析

从入门到精通

三维书屋工作室

胡仁喜 康士廷 等编著



机械工业出版社

本书首先介绍了 ANSYS 软件及应用 ANSYS 进行有限元分析的例子, 随后介绍了 APDL 语言及土木工程中常用单元, 最后以具体的工程实例深入浅出地介绍了 ANSYS 在桥梁工程、边坡工程、水利工程、隧道工程及房屋建筑工程中的应用。每个实例都先用 GUI 方式一步一步地教读者如何操作, 让读者轻松地学会, 随后提供详细的命令流。全书分为 9 章, 分别为有限元软件 ANSYS 简介、ANSYS 14.5 图形用户界面、建立实体模型、APDL 及土木工程中常用单元简介、ANSYS 桥梁工程应用实例分析、ANSYS 边坡工程应用实例分析、ANSYS 水利工程应用实例分析、ANSYS 隧道工程应用实例分析、ANSYS 房屋建筑工程应用实例分析。

本书可作为理工院校土木、力学和隧道等专业的本科生、研究生及教师学习 ANSYS 软件的教材, 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使用 ANSYS 的参考用书。

图书在版编目 (CIP) 数据

ANSYS 14.5 土木工程有限元分析从入门到精通/胡仁喜等编著.

—2 版. —北京: 机械工业出版社, 2013. 10

ISBN 978-7-111-43984-4

I. ①A… II. ①胡… III. ①土木工程—有限元分析—应用程序—高等学校—教材 IV. ①TU-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 214643 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 曲彩云 责任编辑: 曲彩云

责任印制: 杨 曦

北京中兴印刷有限公司印刷

2013 年 9 月第 2 版第 1 次印刷

184mm × 260mm · 28.75 印张 · 708 千字

0 001—3 000 册

标准书号: ISBN 978-7-111-43984-4

ISBN 978-7-89405-097-7 (光盘)

定价: 69.00 元 (含 1DVD)

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

策划编辑: (010)88379782

电话服务

网络服务

社服务中心: (010)88361066 教材网: <http://www.cmpedu.com>

销售一部: (010)68326294 机工官网: <http://www.cmpbook.com>

销售二部: (010)88379649 机工官博: <http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线: (010)88379203 封面无防伪标均为盗版

前 言

随着计算力学、计算数学、工程管理学特别是信息技术飞速发展,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、航空航天等诸多领域。

有限元法作为在工程分析领域应用较为广泛的一种计算方法,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。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,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、美国核安全局及近 20 多个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,它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、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做出了巨大贡献。

为了帮助读者迅速了解并掌握 ANSYS 软件在土木工程中的应用技术,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 14.5 为依据,编写了这本书。

本书首先介绍了 ANSYS 软件及应用 ANSYS 进行有限元分析的例子,随后介绍了 APDL 语言及土木工程中常用单元,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,让读者轻松地学会,随后提供详细的命令流。全书分为 9 章,分别为有限元软件 ANSYS 简介、ANSYS 14.5 图形用户界面、建立实体模型、APDL 及土木工程中常用单元简介、ANSYS 桥梁工程应用实例分析、ANSYS 边坡工程应用实例分析、ANSYS 水利工程应用实例分析、ANSYS 隧道工程应用实例分析、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。

本书由三维书屋工作室策划,胡仁喜和康士廷主要编写。参加编写的还有李鹏、周冰、董伟、李瑞、王敏、张俊生、王玮、孟培、王艳池、阳平华、袁涛、闫聪聪、王培合、路纯红、王义发、王玉秋、杨雪静、刘昌丽、张日晶、卢园、万金环、王渊峰、王兵学等。

本书可作为理工科院校土木、力学和隧道等专业的本科生、研究生及教师学习 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使用 ANSYS 的参考用书。

由于时间仓促,加之编者水平有限,书中缺点和错误在所难免,恳请专家和广大读者登录网站 www.sjzsanweishuwu.com 或联系 win760520@126.com 批评指正。

编 者

目 录

前言

第1章 有限元软件 ANSYS 简介

1.1	有限元常用术语	2
1.2	有限元法的分析过程	2
1.3	ANSYS 简介	4
1.3.1	ANSYS 发展过程	4
1.3.2	ANSYS 使用环境	5
1.3.3	ANSYS 软件的功能	5
1.4	ANSYS 14.5 的安装与启动	9
1.4.1	系统要求	9
1.4.2	设置运行参数	10
1.4.3	启动与退出	12
1.5	ANSYS 14.5 的界面	14
1.6	ANSYS 文件系统	15
1.6.1	文件类型	15
1.6.2	文件管理	16
1.7	ANSYS 分析过程	19
1.7.1	建立模型	20
1.7.2	加载求解	22
1.7.3	查看计算结果	26
1.8	实例入门——托架受力分析	26
1.8.1	分析实例描述	26
1.8.2	建立模型	27
1.8.3	网格划分	32
1.8.4	加载求解	36
1.8.5	查看计算结果	37
2	ANSYS 14.5 图形用户界面	40
2.1	ANSYS 14.5 图形用户界面的组成	41
2.2	启动图形用户界面	42
2.3	对话框及其组件	42
2.3.1	文本框	42
2.3.2	单选列表	43
2.3.3	双列选择列表	43
2.3.4	标签对话框	44
2.3.5	选取框	44
2.4	通用菜单	45
2.4.1	文件菜单	46

2.4.2	选取菜单	47
2.4.3	列表菜单	50
2.4.4	绘图菜单	54
2.4.5	绘图控制菜单	54
2.4.6	工作平面菜单	61
2.4.7	参量菜单	63
2.4.8	宏菜单	67
2.4.9	菜单控制菜单	68
2.4.10	帮助菜单	68
2.5	输入窗口	70
2.6	主菜单	71
2.6.1	优选项	72
2.6.2	预处理器	72
2.6.3	求解器	76
2.6.4	通用后处理器	79
2.6.5	时间历程后处理器	83
2.6.6	概率设计和辐射选项	84
2.6.7	记录编辑器	84
2.7	输出窗口	85
2.8	工具条	86
2.9	图形窗口	86
2.9.1	图形显示	87
2.9.2	多窗口绘图	88
2.9.3	增强图形显示	91
2.10	个性化界面	92
2.10.1	改变字体和颜色	92
2.10.2	改变 GUI 的启动菜单显示	92
2.10.3	改变菜单链接和对话框	93
第 3 章	建立实体模型	94
3.1	几何模型的输入	95
3.1.1	输入 IGES 单一实体	95
3.1.2	输入 SAT 单一实体	97
3.1.3	输入 SAT 实体集合	99
3.1.4	输入 Parasolid 单一实体	102
3.1.5	输入 Parasolid 实体集合	104
3.2	对输入模型修改	105
3.3	自主建模	109
3.3.1	自上而下建模	109
3.3.2	自下而上建模	118

第4章 APDL 及土木工程中常用单元简介	129
4.1 APDL 简介	130
4.1.1 APDL 概述	130
4.1.2 参数定义	130
4.1.3 流程控制	131
4.1.4 宏	132
4.1.5 函数和表达式	134
4.1.6 APDL 应用实例	134
4.2 土木工程常用 ANSYS 单元	137
4.2.1 杆 (Link) 单元	138
4.2.2 弹簧 (COMBIN) 单元	142
4.2.3 梁 (Beam) 单元	144
4.2.4 平面 (Plane) 单元	151
4.2.5 壳 (Shell) 单元	155
4.2.6 质量 (MASS21) 单元	158
4.2.7 实体 (SOLID) 单元	159
第5章 ANSYS 桥梁工程应用实例分析	162
5.1 引言	163
5.2 典型桥梁分析模拟过程	163
5.2.1 创建物理环境	163
5.2.2 建模、指定特性、分网	168
5.2.3 施加边界条件和荷载	169
5.2.4 求解	171
5.2.5 后处理 (查看计算结果)	177
5.3 钢桁架桥静力受力分析	180
5.3.1 问题描述	180
5.3.2 GUI 操作方法	181
5.3.3 命令流实现	196
5.4 钢桁架桥模态分析	199
5.4.1 问题描述	199
5.4.2 GUI 操作方法	199
5.4.3 命令流实现	204
第6章 ANSYS 边坡工程应用实例分析	208
6.1 边坡工程概述	209
6.1.1 边坡工程	209
6.1.2 边坡变形破坏基本原理	209
6.1.3 影响边坡稳定性的因素	210
6.1.4 边坡稳定性的分析方法	210
6.2 ANSYS 边坡稳定性分析步骤	212

6.2.1	创建物理环境	212
6.2.2	建立模型和划分网格	214
6.2.3	施加约束和荷载	214
6.2.4	求解	215
6.2.5	后处理	215
6.2.6	补充说明	215
6.3	ANSYS 边坡稳定性实例分析	215
6.3.1	实例描述	215
6.3.2	GUI 操作方法	216
6.3.3	计算结果分析	245
6.3.4	命令流实现	245
第 7 章	ANSYS 水利工程应用实例分析	254
7.1	水利工程概述	255
7.2	ANSYS 重力坝抗震性能分析步骤	255
7.2.1	创建物理环境	256
7.2.2	建立模型和划分网格	258
7.2.3	施加约束和荷载	258
7.2.4	求解	259
7.2.5	后处理	261
7.3	ANSYS 重力坝抗震性能实例分析	261
7.3.1	实例介绍	261
7.3.2	GUI 操作方法	262
7.3.3	命令流实现	289
第 8 章	ANSYS 隧道工程应用实例分析	294
8.1	隧道工程相关概念	295
8.1.1	隧道工程设计模型	295
8.1.2	隧道结构的数值计算方法	298
8.1.3	隧道荷载	298
8.2	隧道施工过程 ANSYS 模拟的实现	299
8.2.1	单元生死	299
8.2.2	DP 材料模型	303
8.3	ANSYS 隧道结构受力实例分析	306
8.3.1	ANSYS 隧道结构受力分析步骤	306
8.3.2	实例描述	311
8.3.3	GUI 操作方法	311
8.3.4	命令流实现	333
8.4	ANSYS 隧道开挖模拟实例分析	338
8.4.1	实例描述	338
8.4.2	ANSYS 模拟施工步骤	338

8.4.3	GUI 操作方法	339
8.4.4	命令流实现	394
第 9 章	ANSYS 房屋建筑工程应用实例分析	403
9.1	引言	404
9.2	建筑结构分析模拟过程	405
9.2.1	创建物理环境	405
9.2.2	建模、指定特性、分网	409
9.2.3	施加边界条件和荷载	410
9.2.4	求解	411
9.2.5	后处理（查看计算结果）	419
9.3	三层框架结构地震响应分析	421
9.3.1	问题描述	421
9.3.2	GUI 操作方法	422
9.3.3	命令流实现	434
9.4	框架结构模拟建模	437
9.4.1	问题描述	437
9.4.2	GUI 操作方法	437
9.4.3	命令流实现	446

第 1 章

有限元软件 ANSYS 简介

本章先简单介绍有限元方法，随后介绍了 ANSYS 的功能、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。

学 习 要 点

- 有限元法
- ANSYS 功能
- ANSYS 启动
- ANSYS 分析过程

1.1 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成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. 节点力和节点荷载

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荷载称为节点荷载。外荷载包括集中力和分布力等。在不同的学科中, 荷载的含义也不尽相同。在电磁场分析中, 荷载是指结构受的电场和磁场作用。在温度场分析中, 所受荷载则指的是温度。

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。错误的边界条件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的分析结果和较高的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场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。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确定。

(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作出一定的假设,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,应当注意以下几个方面:

1) 多项式项数应等于单元的自由度数。

2) 多项式阶次应包含常数项和线性项。

3) 单元自由度应等于单元节点独立位移的个数。

位移矩阵为:

$$\{f\} = [N]\{\delta\}^e \quad (1-1)$$

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

(3) 分析单元的力学特性。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, $\{\varepsilon\}$ 是单元应变, $[B]$ 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, $[D]$ 是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, $[k]^e$ 是单元刚度矩阵。

$$[k]^e = \iiint [B]^T [D] [B] dx dy dz \quad (1-5)$$

(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荷载阵列——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:

$$[K]\{\delta\} = [F] \quad (1-7)$$

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从图 1-1 中可以看出。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,却大大增加了计算机运行时间。而在实际工程应用中,只要所得的解能够满足工程的实际需要就可以,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平衡点。



图 1-1 有限元程序图

1.3 ANSYS 简介

1.3.1 ANSYS 发展过程

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，且只能在大型计算机上使用，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 功能大大增强了；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以后，ANSYS 程序建立了交互式操作菜单环境，使得 ANSYS 程序得到了很大的改善，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，可以使用户大大节约了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入到 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，可以直接快速生成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量保证体系，ANSYS 公司于 1995 年在设计分析软件类中第一个通过了 ISO9001 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 20 个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。

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 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，这就保证了所有的 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、CADDs、IGES、SAT 和 Parasolid。

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。该软件功能强大与其含有众多模块分不开。

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，利用这个模块可以方便地构造自己想要的有限元模型；分析求解模块指对已经建立好的模型在一定的荷载和边界条件下进行有限元计算，求解平衡微分方程，它包括结构分析（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;后处理模块指对计算结果进行处理,将结果以图表、曲线形式显示或输出。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 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通过键盘输入。命令一经执行,该命令就会在 LOG 文件中列出,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 文件可以略作修改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 种模块进行介绍。

1. 前处理模块(PREP7)

(1) 参数定义: ANSYS 程序在进行建模过程中,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、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,可以使用任何一种单位制,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 等 6 个实参数,而 BEAM4 梁单元有 AREA、IZZ、IYY、TKZ、TKY、THETA、SHEARZ、SHEARY、SPIN、ISTRN、IXX 和 ADDMAS 等 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。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,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。

无论采用哪一种方法来建模,均能使用布尔运算(如相加、相减、相交、分割、粘接和重叠等)来组合数据,从而构造出想要的模型。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的功能,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。从使用角度分,ANSYS 程序网格划分可分为智能划分和人工选择划分。从网格划分功能来分,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；映像网格划分允许将几何模型分解成简单几个部分，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，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，直至误差低于定义的值或达到定义的求解次数。

2. 求解模块 (SOLUTION)

前处理阶段完成建模以后，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，可以定义分析类型、设置分析选项、施加边界条件与荷载和设置荷载步选项，然后进行有限元求解。

(1) 定义分析类型：可以根据所施加荷载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：

1) 结构静力分析：用来求解外荷载引起的位移、应力。静力分析很适合求解惯性和阻尼对结构影响不显著的问题。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。

2) 结构动力分析：用来求解随时间变化的荷载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荷载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振动响应分析。

3) 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荷载不成比例变化。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。

4) 热分析：ANSYS 程序可以处理热传递的传导、对流和辐射。热传递的 3 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熔解过程

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。

5) 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。

6) 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荷载的响应。这种分析可进行 4 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、传声器等部件及其他电子设备的结构动态性能分析。

7) 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，分析类型可以是瞬态或稳态，可进行传热或绝热、压缩或不可压缩等问题研究。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。主要用于超声速喷管中的流场、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。

8) 声场分析: ANSYS 中的声场分析主要用来研究含有流体的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。如可以用来确定传声器和扬声器的频率响应、研究音乐大厅的声场分布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) 施加边界条件与荷载: ANSYS 具有 4 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、荷载与边界条件, 这些都统称为荷载。有限元分析的主要目的就是计算系统对荷载的响应, 因此, 荷载是求解的重要组成部分。ANSYS 程序, 荷载分为 6 类: DOF (自由度) 约束、力、表面分布荷载、体积荷载、惯性荷载和耦合场荷载。

(4) 设置荷载步选项: 主要设置时间、荷载步、荷载子步、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。

荷载步指可求得解的荷载配置, 依据荷载变化方式可以将整个荷载时间历程划分成多个荷载步即 Load Step, 每个荷载步代表荷载发生一次突变或一次渐变阶段。如结构分析中, 可将风荷载施加于第一个荷载步, 第二个荷载步时间重力等。

荷载子步指一个荷载步中增加的步长, 子步也叫时间步, 代表一段时间。在子步荷载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。

求解过程含有大量的中间时间点上的结果数据, 包括基本解 (基本自由度解) 和各种导出解 (如应力、应变、力等)。但相对来说, 往往仅仅关心部分结果数据, 在求解时只需控制输出这些结果数据到结果文件中就足够了。此外, 如果将所有的结果数据计算出来并写进结果文件, 则这样不但需要大量硬盘存储空间, 而且需要大量计算与读写时间, 大大影响计算速度, 甚至可能出现硬盘容量不足而终止求解的现象。

3. 后处理模块 (POST1 和 POST2)

当完成计算以后, 可以通过后处理模块查看结果。ANSYS 软件的后处理模块包含两个部分: 通用后处理模块 (POST1) 和时间历程后处理模块 (POST2)。通过界面, 可以轻松获得求解过程的计算结果并对其进行显示。这些结果可能包括位移、温度、应变、速度及热流等, 输出形式可以有图形显示和数据列表两种。

(1) 通用后处理模块 (POST1): 用于分析处理整个模型在某个荷载步的某个子步或者某个结果序列, 或者某特定时间或频率下的结果, 例如结构静力求解中荷载 2 的最后一个子步的应力, 或者瞬态动力分析求解中时间等于 5s 时的位移、速度与加速度等。可以获得等值线显示、变形形状以及检查和解释分析结果和列表。此外, 该模块还提供了许多其他功能: 误差估计, 荷载状况组合, 结果数据的计算和路径操作等。

(2) 时间历程后处理模块 (POST2): 用于分析处理指定时间范围内模型指定节点上的某结果项随时间或频率的变化情况, 如瞬态动力分析中结构某节点上的位移、速度和加速度从 0~10s 之间的变化规律。此外, 该模块还具有许多其他功能: 曲线的代数运算之间的加、减、乘、除运算来产生新的曲线; 取绝对值、平方根、对数、指数以及求最