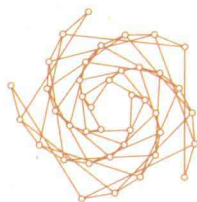


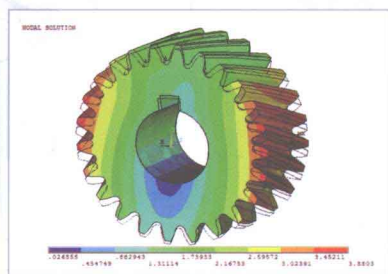
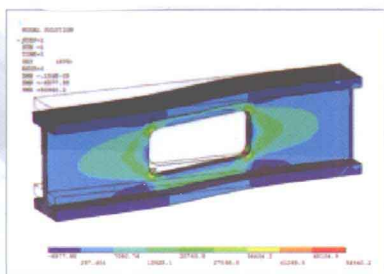
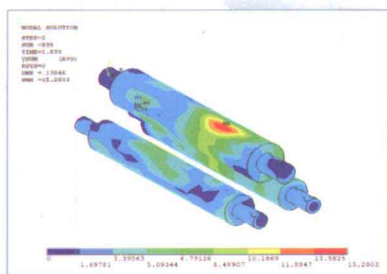


工程软件应用精解



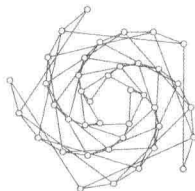
ANSYS 14.0 超级学习手册

张建伟 白海波 李昕 编著





工程软件应用精解



ANSYS 14.0 超级学习手册

张建伟 白海波 李昕 编著

人民邮电出版社
北京

图书在版编目 (C I P) 数据

ANSYS 14.0 超级学习手册 / 张建伟, 白海波, 李昕
编著. — 北京: 人民邮电出版社, 2013.4
ISBN 978-7-115-30776-7

I. ①A… II. ①张… ②白… ③李… III. ①有限元
分析—应用程序—手册 IV. ①0241.82-62

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第005062号

内 容 提 要

本书采用 GUI 界面操作与 APDL 命令相互对照的方式, 从基础知识、专题技术、工程应用 3 个层面, 详细地讲述了大型通用有限元软件 ANSYS 14.0 的使用方法与使用技巧。基础知识部分为读者讲解了有限元法的基础知识, 使用 ANSYS 进行有限元分析的基本流程与方法, 使用 ANSYS 进行建模、网格划分、边界条件定义、求解、后处理等知识。专题技术部分根据作者工程应用的实际经验, 为读者介绍了大量高级应用知识, 包括使用 ANSYS 进行结构静力学分析、模态分析、谐响应分析、瞬态动力学分析、谱分析、稳态热分析、瞬态热分析、相变问题分析、电磁场分析、多物理场耦合分析、几何非线性与材料非线性分析、接触分析、生死单元技术、子结构技术、复合材料分析等应用。工程实例部分, 为读者介绍了经典的机械工程和土木工程综合应用实例。

本书内容安排根据循序渐进、深入浅出的原则, 工程实例丰富、讲解详尽, 适合土木工程、机械工程、自动化、力学、电子工程等多个专业的高年级本科生、研究生及工程技术人员参考使用, 也可以作为 ANSYS 软件的参考教材, 尤其适合 CAE 行业中想提高自身竞争力的读者阅读。

ANSYS 14.0 超级学习手册

-
- ◆ 编 著 张建伟 白海波 李昕
责任编辑 王峰松
 - ◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市崇文区夕照寺街 14 号
邮编 100061 电子邮件 315@ptpress.com.cn
网址 <http://www.ptpress.com.cn>
三河市海波印务有限公司印刷
 - ◆ 开本: 787×1092 1/16
印张: 35.75
字数: 861 千字 2013 年 4 月第 1 版
印数: 1-3 000 册 2013 年 4 月河北第 1 次印刷

ISBN 978-7-115-30776-7

定价: 79.00 元 (附光盘)

读者服务热线: (010)67132692 · 印装质量热线: (010)67129223

反盗版热线: (010)67171154

广告经营许可证: 京崇工商广字第 0021 号

前 言

ANSYS 软件是融结构、流体、电场、磁场、声场分析于一体的大型通用有限元分析软件，由世界上著名的有限元分析软件公司——美国 ANSYS 公司开发，它能与多数 CAD 软件接口实现数据的共享和交换，是现代产品设计中的高级 CAE 工具之一。

ANSYS 软件不断吸收当今世界最新的计算方法与计算机技术，引领世界有限元技术发展的潮流，凭借其强大的功能、可靠的质量，赢得了全球工业界的广泛赞誉，尤其得到各行业 CAE 用户的认可，在航空航天、铁路运输、石油化工、机械制造、能源、汽车、电子、土木工程、船舶、生物医学、轻工、矿产、水利等领域得到了广泛的应用，为各领域的科学研究与工程应用的发展提供了巨大的推动力。

本书在内容的安排上根据循序渐进、深入浅出的原则，适合不同基础的读者。全书共分为基础知识、专题技术和工程应用 3 个部分，共 18 章，具体内容如下。

第 1~7 章为基础知识部分，介绍有限元分析的基本方法，以及 ANSYS 有限元分析软件的前后处理、求解等方面的内容。

第 1 章：绪论。本章介绍了有限元法的发展历程及有限元法的基本概念、ANSYS 的基本操作，同时介绍了有限元分析的基本流程，最后通过一个入门案例帮助读者快速了解 ANSYS 分析的基本过程。

第 2 章：高级应用基石——APDL。本章介绍 APDL 参数编程的基本概念。

第 3 章：模型的建立。本章介绍 ANSYS 建模的方法，包括实体模型建立法及直接建立有限元模型法两种。本章还给出了常用建模命令，帮助读者尽快掌握 ANSYS 建模方法。

第 4 章：划分网格。建立完成的实体模型，必须经过划分网格才能进行求解计算。本章介绍了定义单元属性的方法、设置网格划分控制、网格的修改、高级网格划分技术等内容，帮助读者掌握网格划分的方法。

第 5 章：加载与求解。本章以工程实际中的情况为模型详细介绍了如何根据结构施加边界条件与载荷，同时介绍了如何在 ANSYS 中进行求解设置，并对模型进行求解。

第 6 章：后处理。后处理是指求解完成后查看并分析结果的过程。本章详细介绍了通用后处理器与时间历程后处理器的设置方法，同时介绍了高级后处理技术，帮助读者掌握 ANSYS 的后处理方法。

第 7 章：高级分析基础。本章介绍了 ANSYS 的量纲、坐标系的使用，常用的分析单元、材料模型的设置等内容。这些都是 ANSYS 在分析中必不可少的内容。

第 8~16 章为专题技术部分，介绍 ANSYS 热点应用领域，帮助读者使用 ANSYS 处理工作或学习中可能遇到的工程分析问题。

第 8 章：结构静力学分析。本章首先介绍了静力学分析的基本概念及方法，然后通过几个具体的分析案例，帮助读者掌握 ANSYS 进行静力学分析的基本方法。

第 9 章：结构动力学分析。本章介绍了结构动力学分析中常用的分析内容，包括模态分析、谐响应分析、瞬态动力学分析、谱分析等内容，并通过案例帮助读者掌握结构动力学分析的基本

操作方法。

第 10 章：热分析。本章首先介绍了热分析的基本概念及方法，并通过具体的分析案例，帮助读者掌握 ANSYS 进行稳态热分析、瞬态热分析、相变分析等基本方法。

第 11 章：电磁场分析。本章给出了电场分析、磁场分析的基本方法，同时辅以案例详细地介绍电磁场分析的操作方法。

第 12 章：多物理场耦合分析。实际工程中的物理环境包含了热、电、磁、流体等多种因素的影响，因此本章通过两个案例来介绍多物理场耦合分析的方法，帮助读者掌握耦合场分析的技能。

第 13 章：非线性分析。本章给出了几何非线性、材料非线性、接触问题等非线性分析问题，帮助读者掌握如何采用 ANSYS 进行非线性分析。

第 14 章：生死单元。本章介绍了生死单元的基本概念，单元生死技术的使用方法等内容，并通过一个焊接过程的模拟分析详细介绍了 ANSYS 的生死单元技术。

第 15 章：子结构技术。子结构就是将一组单元用矩阵凝聚为一个单元的过程。本章介绍了子结构技术的应用场合及分析步骤，并通过案例详细介绍了 ANSYS 子结构技术的应用方法。

第 16 章：复合材料分析。ANSYS 提供了一种特殊单元——层单元来模拟复合材料。本章通过一个复合材料的算例详细介绍了复合材料的分析方法。

第 17~18 章为工程应用部分，限于篇幅，本部分选取了 ANSYS 在机械工程及土木工程等方面的综合应用作为全书的结束，帮助读者掌握采用 ANSYS 进行工程案例的分析。

第 17 章：机械工程应用综合案例。本章的机械工程实例为读者介绍解决非线性分析、大变形问题、接触问题、运动仿真、模态分析、施加预紧力、复杂结构建模等方法。

第 18 章：土木工程应用综合案例。本章的土木工程实例为读者介绍解决地震载荷分析、DP 材料、施工过程模拟、门式刚架、大型钢结构命令流建模、生死单元、模态分析等方法。

本书结构合理、叙述详细、算例丰富，既适合包括广大科研工作者、工程师和在校学生等在内的不同层次的读者自学使用，也可以作为大中专院校相关专业的教学参考书。

本书由张建伟、白海波、李昕编著，其中第 1~4 章、第 9~10 章、第 17 章由张建伟编写，第 5~8 章、第 18 章由白海波编写，第 11~16 章由李昕编写。另外，凌桂龙、高飞、唐家鹏、丁金滨、张樱枝、孔玲军、黄志新、刘成柱、史洁玉、乔建军、孙国强、温正、代晶、贺碧蛟、石良臣、柯维娜等人为本书的编写也提供了大量的帮助，在此一并表示感谢。

虽然作者在本书的编写过程中力求叙述准确、完善，但由于水平有限，书中欠妥之处在所难免，希望读者和同仁能够及时指出，共同促进本书质量的提高。

读者在学习过程中遇到与本书有关的问题，可以发邮件到邮箱 book_hai@126.com，或者访问博客 <http://blog.sina.com.cn/tecbook>，编者会尽快给予解答。

编者

2012 年 11 月

目 录

第 1 章 绪论	1	第 3 章 模型的建立	26
1.1 有限元法概述	1	3.1 实体模型的建立	26
1.1.1 有限元法的发展	1	3.1.1 概述	26
1.1.2 有限元法的基本概念	2	3.1.2 自底向上法	27
1.2 ANSYS 14.0 简介	3	3.1.3 自顶向下法	32
1.2.1 ANSYS 14.0 的启动与退出	3	3.1.4 外部程序导入模型	35
1.2.2 ANSYS 14.0 操作界面	3	3.2 直接建立有限元模型	38
1.2.3 ANSYS 14.0 文件管理	5	3.2.1 节点的生成	38
1.2.4 ANSYS 14.0 有限元分析 流程	8	3.2.2 单元的生成	40
1.2.5 ANSYS 有限元分析实例 入门	9	3.3 常用建模命令汇总	44
1.3 本章小结	14	3.4 本章小结	45
第 2 章 高级应用的基石——APDL	16	第 4 章 划分网格	46
2.1 APDL 的参数	16	4.1 定义单元属性	46
2.1.1 参数的概念与类型	16	4.2 设置网格划分控制	49
2.1.2 参数命名规则	17	4.2.1 智能网格划分	49
2.1.3 参数的定义与赋值操作	17	4.2.2 全局单元尺寸控制	50
2.1.4 参数的删除操作	17	4.2.3 默认单元尺寸控制	51
2.1.5 数组参数	17	4.2.4 关键点尺寸控制	52
2.2 APDL 的流程控制	19	4.2.5 线尺寸控制	52
2.2.1 *GO 分支语句	19	4.2.6 面尺寸控制	53
2.2.2 *IF 分支语句	19	4.2.7 单元尺寸定义命令的优先 顺序	54
2.2.3 *DO 循环语句	20	4.2.8 完成划分	54
2.2.4 *DOWHILE 循环语句	20	4.3 网格的修改	55
2.2.5 *REPEAT 循环语句	20	4.3.1 清除网格	55
2.3 宏文件	21	4.3.2 网格的局部细化	56
2.3.1 创建宏文件	21	4.3.3 层状网格划分	58
2.3.2 调用宏文件	22	4.4 高级网格划分技术	58
2.4 运算符、函数与函数编辑器	23	4.4.1 单元选择	59
2.5 本章小结	25	4.4.2 映射网格	60
		4.4.3 扫掠网格	64

4.4.4 拉伸网格.....	66	6.3.1 载荷工况.....	125
4.5 划分网格命令汇总.....	68	6.3.2 旋转结果到不同的坐标系..	126
4.6 本章小结.....	70	6.3.3 使用*GET 命令.....	127
第5章 加载与求解.....	71	6.4 本章小结.....	133
5.1 载荷与载荷步.....	71	第7章 高级分析基础.....	134
5.1.1 载荷的种类.....	71	7.1 ANSYS 的量纲.....	134
5.1.2 载荷步.....	72	7.1.1 概述.....	134
5.2 加载方式.....	73	7.1.2 量纲换算方法.....	135
5.2.1 实体模型加载的特点.....	73	7.1.3 量纲选用原则.....	136
5.2.2 有限元模型加载的特点.....	73	7.2 ANSYS 的坐标系.....	136
5.3 施加载荷.....	73	7.2.1 坐标系分类.....	136
5.3.1 自由度约束.....	73	7.2.2 全局坐标系与局部坐标系..	139
5.3.2 集中载荷.....	75	7.2.3 显示坐标系.....	141
5.3.3 面载荷.....	76	7.2.4 节点坐标系与单元坐标系..	141
5.3.4 体载荷.....	78	7.2.5 结果坐标系.....	142
5.3.5 惯性载荷.....	81	7.2.6 工作平面.....	142
5.3.6 耦合场载荷.....	81	7.3 常用单元.....	145
5.3.7 轴对称载荷与反作用力.....	81	7.3.1 结构单元.....	145
5.3.8 初应力载荷.....	82	7.3.2 热单元.....	180
5.3.9 由表型数组定义载荷.....	82	7.3.3 电磁单元.....	182
5.3.10 多步加载.....	86	7.3.4 耦合场单元.....	185
5.4 钢轨模型的加载.....	87	7.3.5 流体单元.....	186
5.5 耦合与约束方程.....	89	7.3.6 LS-DYNA 单元.....	187
5.5.1 耦合.....	89	7.4 材料模型.....	188
5.5.2 约束方程.....	91	7.5 本章小结.....	189
5.6 求解.....	93	第8章 结构静力学分析.....	191
5.7 求解命令汇总.....	96	8.1 概述.....	191
5.8 本章小结.....	97	8.1.1 静力学分析的基本概念.....	191
第6章 后处理.....	99	8.1.2 结构静力学分析的方法.....	191
6.1 通用后处理器.....	99	8.2 开孔平板静力分析.....	194
6.1.1 结果文件.....	99	8.2.1 问题描述.....	194
6.1.2 结果输出.....	102	8.2.2 设置分析环境.....	194
6.1.3 结果处理.....	116	8.2.3 定义单元与材料属性.....	196
6.1.4 结果查看器.....	119	8.2.4 建立模型.....	197
6.2 时间历程后处理器.....	120	8.2.5 划分网格.....	200
6.2.1 时间历程变量浏览器.....	120	8.2.6 施加边界条件.....	201
6.2.2 定义变量.....	122	8.2.7 求解.....	204
6.2.3 显示变量.....	124	8.2.8 显示变形图.....	205
6.3 高级后处理技术.....	125	8.2.9 显示结果云图.....	205

8.2.10	查看矢量图	207	9.4	瞬态动力学分析	273
8.2.11	查看约束节点反力	208	9.4.1	瞬态动力学问题求解方法	274
8.2.12	查询危险点坐标	209	9.4.2	凸轮从动件瞬态动力学分析	274
8.3	起重机桁架结构静力分析	210	9.5	谱分析	288
8.3.1	问题描述	210	9.5.1	谱分析应用	288
8.3.2	设置分析环境	211	9.5.2	板梁结构地震响应谱分析	288
8.3.3	定义单元与材料属性	212	9.6	本章小结	311
8.3.4	建立有限元模型	214	第 10 章	热分析	313
8.3.5	施加边界条件	218	10.1	基础知识	313
8.3.6	求解	220	10.1.1	符号与单位	313
8.3.7	显示变形图	220	10.1.2	传热学经典理论回顾	314
8.3.8	显示结果云图	221	10.1.3	热传递的方式	314
8.3.9	查看矢量图	221	10.1.4	线性与非线性	315
8.3.10	查看支座反力	222	10.1.5	边界条件、初始条件	315
8.3.11	查看轴力	223	10.1.6	热分析误差估计	316
8.3.12	查询 E 点的挠度	223	10.2	稳态热分析	316
8.4	压力容器结构静力分析	224	10.2.1	稳态热分析基本过程	316
8.4.1	问题描述	224	10.2.2	密闭容器稳态热分析	319
8.4.2	设置分析环境	225	10.3	瞬态热分析	328
8.4.3	定义单元与材料参数	225	10.3.1	瞬态热分析主要步骤	328
8.4.4	建立几何模型	226	10.3.2	水箱中高温金属块瞬态热分析	331
8.4.5	划分网格	229	10.4	相变问题	347
8.4.6	施加边界条件	230	10.4.1	概述	347
8.4.7	求解	234	10.4.2	钢铸件的相变问题分析	348
8.4.8	显示变形图	235	10.5	本章小结	360
8.4.9	查看结果云图	235	第 11 章	电磁场分析	361
8.4.10	查看矢量图	237	11.1	概述	361
8.4.11	查看约束节点反力	238	11.1.1	磁场分析	361
8.4.12	连接处的应力分析	238	11.1.2	电场分析	363
8.5	本章小结	239	11.2	实例分析	363
第 9 章	结构动力学分析	241	11.2.1	电机转子沟槽磁场分析	363
9.1	概述	241	11.2.2	屏蔽带状传输线静电场分析	371
9.1.1	结构动力学基础知识	241	11.3	本章小结	380
9.1.2	结构动力学问题的分类	242	第 12 章	多物理场耦合分析	381
9.2	模态分析	243	12.1	概述	381
9.2.1	模态提取方法	243			
9.2.2	斜齿圆柱齿轮的模态分析	244			
9.3	谐响应分析	257			
9.3.1	谐响应分析的方法	258			
9.3.2	预应力弦的谐响应分析	258			

12.1.1 顺序耦合分析·····	381	15.2.1 问题描述·····	460
12.1.2 直接耦合分析·····	382	15.2.2 分析求解·····	460
12.2 实例分析·····	382	15.3 本章小结·····	473
12.2.1 金属导流管耦合场分析·····	382	第 16 章 复合材料分析·····	475
12.2.2 双层金属簧片耦合场 分析·····	391	16.1 概述·····	475
12.3 本章小结·····	397	16.1.1 复合材料模型单元·····	475
第 13 章 非线性分析·····	398	16.1.2 复合材料层叠结构·····	476
13.1 概述·····	398	16.1.3 定义失效准则·····	477
13.1.1 基础知识·····	399	16.1.4 复合材料分析的注意 事项·····	478
13.1.2 非线性问题的分类·····	399	16.2 复合材料梁的分析·····	478
13.1.3 注意事项·····	400	16.2.1 问题描述·····	478
13.2 几何非线性问题·····	401	16.2.2 分析求解·····	478
13.2.1 低强度圆盘大应变分析·····	401	16.3 本章小结·····	487
13.2.2 圆柱壳屈曲分析·····	412	第 17 章 机械工程应用综合实例·····	488
13.3 材料非线性问题·····	422	17.1 卷板机工作过程模拟·····	488
13.3.1 材料非线性问题的分类·····	422	17.1.1 实例背景·····	488
13.3.2 厚壁圆筒非线性分析·····	422	17.1.2 分析过程·····	489
13.4 接触问题·····	427	17.2 机翼的振动模态分析·····	510
13.4.1 概述·····	427	17.2.1 实例背景·····	510
13.4.2 金属柱体接触分析·····	428	17.2.2 分析过程·····	511
13.5 本章小结·····	438	17.3 螺栓连接件仿真分析·····	517
第 14 章 生死单元·····	440	17.3.1 实例背景·····	517
14.1 概述·····	440	17.3.2 分析过程·····	518
14.1.1 生死单元的基本概念·····	440	17.4 本章小结·····	540
14.1.2 单元生死技术的使用·····	441	第 18 章 土木工程应用综合实例·····	541
14.2 焊接过程模拟·····	442	18.1 隧道开挖模拟·····	541
14.2.1 问题描述·····	442	18.1.1 实例背景·····	541
14.2.2 分析求解·····	443	18.1.2 分析过程·····	543
14.3 本章小结·····	452	18.2 门式刚架结构分析·····	551
第 15 章 子结构技术·····	454	18.2.1 实例背景·····	551
15.1 概述·····	454	18.2.2 分析过程·····	552
15.1.1 子结构技术的应用场合·····	454	18.3 本章小结·····	562
15.1.2 子结构分析步骤·····	454	参考文献·····	564
15.2 异形梁的子结构技术应用·····	460		

第 1 章 绪 论

有限元法 (FEA, Finite Element Analysis) 的基本概念是用较简单的问题代替复杂问题后再求解。它将求解域看成是由许多称为有限元的小的互连子域组成, 对每一单元假定一个合适的 (较简单的) 近似解, 然后推导求解这个域总的满足条件 (如结构的平衡条件), 从而得到问题的解。这个解不是准确解, 而是近似解, 因为实际问题被较简单的问题所代替。由于大多数实际问题难以得到准确解, 而有限元不仅计算精度高, 而且能适应各种复杂形状, 因而成为行之有效的工程分析手段。

学习目标

- 了解有限元法的历史
- 了解有限元法的分析思想
- 初步了解 ANSYS 14.0
- 学习一个入门示例, 体会有限元分析的基本思路

1.1 有限元法概述

随着现代科学技术的发展, 人们正在不断建造更为快速的交通工具、更大规模的建筑物、更大跨度的桥梁、更大功率的发电机组和更为精密的机械设备。这一切都要求工程师在设计阶段就能精确地预测出产品和工程的技术性能, 需要对结构的静、动力强度以及温度场、流场、电磁场和渗流等技术参数进行分析计算。

例如, 分析计算高层建筑和大跨度桥梁在地震时所受到的影响, 看看是否会发生破坏性事故; 分析计算核反应堆的温度场, 确定传热和冷却系统是否合理; 分析涡轮机叶片内的流体动力学参数, 以提高其运转效率。如果把这些都归结为求解物理问题的控制偏微分方程式往往是不可能的。

近年来在计算机技术和数值分析方法支持下发展起来的有限元分析方法则为解决这些复杂的工程分析计算问题提供了有效的途径。

1.1.1 有限元法的发展

有限元法是一种高效能、常用的计算方法。有限元法在早期是以变分原理为基础发展起来的, 所以它广泛地应用于以拉普拉斯方程和泊松方程所描述的各类物理场中 (这类场与泛函的极值问题有着紧密的联系)。自从 1969 年以来, 某些学者在流体力学中应用加权余数法中的迦辽金法 (Galerkin) 或最小二乘法等同样获得了有限元方程, 因而有限元法可应用于以任何微分方程所描述的各类物理场中, 而不再要求这类物理场和泛函的极值问题有所联系。

20 世纪 50 年代, 飞机设计师们发现无法用传统的力学方法分析飞机的应力、应变等问题。波音公司的一个技术小组, 首先将连续体的机翼离散为三角形板块的集合来进行应力分析, 经过一番波折后获得成功。同一时期, 大型电子计算机投入了解算大型代数方程组的工作, 这为实现有限元

技术准备好了物质条件。1960年前后,美国的 R.W.Clough 教授及中国的冯康教授分别独立地在论文中提出了“有限单元”这样的名词。此后,这样的叫法被大家接受,有限元技术从此正式诞生。

1990年10月美国波音公司开始在计算机上对新型客机 B-777 进行“无纸设计”,仅用了三年半时间,于1994年4月第一架 B-777 就试飞成功,这是制造技术史上划时代的成就,其中在结构设计和评判中就大量采用有限元分析这一手段。

在有限元分析的发展初期,由于其基本思想和原理的“简单”和“朴素”,以致于许多学术权威都对其学术价值有所鄙视,国际著名刊物 *Journal of Applied Mechanics* 许多年来都拒绝刊登有关于有限元分析的文章。然而现在,有限元分析已经成为数值计算的主流,不但国际上存在如 ANSYS 等数种通用有限元分析软件,而且涉及到有限元分析的杂志也有几十种之多。

有限元的应用范围也是相当广泛。它涉及到工程结构、传热、流体运动、电磁等连续介质的力学分析中,并在气象、地球物理、医学等领域得到应用和发展。电子计算机的出现和发展使有限元法在许多实际问题中的应用变为现实,并具有广阔的前景。

国际上早在20世纪50年代末、60年代初就投入大量的人力和物力开发具有强大功能的有限元分析程序。其中最为著名的是由美国国家宇航局(NASA)在1965年委托美国计算科学公司和贝尔航空系统公司开发的 NASTRAN 有限元分析系统。该系统发展至今已有几十个版本,是目前世界上规模最大、功能最强的有限元分析系统。从那时到现在,世界各地的研究机构 and 大学也发展了一批规模较小但使用灵活、价格较低的专用或通用有限元分析软件,主要有德国的 ASKA、英国的 PAFEC、法国的 SYSTUS、美国的 ABQUS、ADINA、ANSYS、BERSAFE、BOSOR、COSMOS、ELAS、MARC 和 STARDYNE 等公司的产品。

1.1.2 有限元法的基本概念

有限元法,也叫有限元法,它的基本思想是将一个结构或连续体的求解域离散为若干个子域(单元),并通过它们边界上的节点相互联结成为组合体。

有限元法用每一个单元内所假设的近似函数来分片地表示全求解域内待求的未知场变量,而每个单元内的近似函数由未知函数或及其导数在单元各个节点上的数值和与其对应的插值函数来表示。由于在联结相邻单元的节点上,场函数应具有相同的数值,因而将它们用作数值求解的基本未知量。这样一来,求解原来待求场函数的无穷自由度问题转换为求解场函数节点值的有限自由度问题。

有限元法又是通过和原问题数学模型(基本方程、边界条件)等效的变分原理或加权余量法,建立求解基本未知量(场函数的节点值)的代数方程组或微分方程组。此方程组称为有限元求解方程,并表示成规范的矩阵形式。接着用数值方法求解此方程,从而得到问题的解答。

结构离散(有限元建模)的内容有网格划分——把结构按一定规则分割成有限单元,边界处理——把作用于结构边界上约束和载荷处理为节点约束和节点载荷。其中要求:离散结构必须与原始结构保形——单元的几何特性。一个单元内的物理特性必须相同——单元的物理特性。

单元与节点中单元即原始结构离散后,满足一定几何特性和物理特性的最小结构域。节点即单元与单元间的连接点。节点力即单元与单元间通过节点的相互作用力。节点载荷即作用于节点上的外载。

插值函数(或位移函数)是用以表示单元内物理量变化(如位移或位移场)的近似函数。由于该近似函数常由单元节点物理量值插值构成,故称为插值函数,如单元内物理量为位移,则该函数称为位移函数。

选择位移函数的一般原则是:位移函数在单元节点的值应等于节点位移(即单元内部是连续的);所选位移函数必须保证有限元的解收敛于真实解。要注意的是为了便于微积分运算,位移函数一般采用多项式形式,在单元内选取适当阶次的多项式可得到与真实解接近的近似解。

1.2 ANSYS 14.0 简介

ANSYS 软件是融结构、流体、电场、磁场、声场分析于一体的大型通用有限元分析软件。由世界上最大的有限元分析软件公司之一的美国 ANSYS 开发，它能与多数 CAD 软件接口，实现数据的共享和交换，是现代产品设计中的高级 CAE 工具之一。

1.2.1 ANSYS 14.0 的启动与退出

启动 Mechanical APDL Product Launcher 14.0，显示如图 1-1 所示的启动画面，稍后即可弹出如图 1-2 所示的菜单窗口。

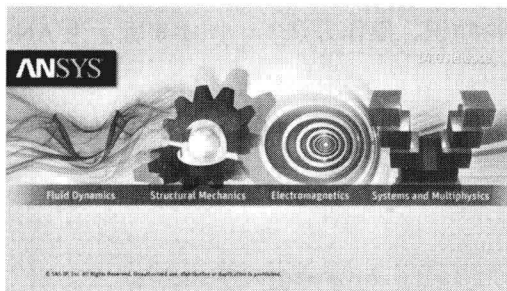


图 1-1 ANSYS 14.0 启动画面

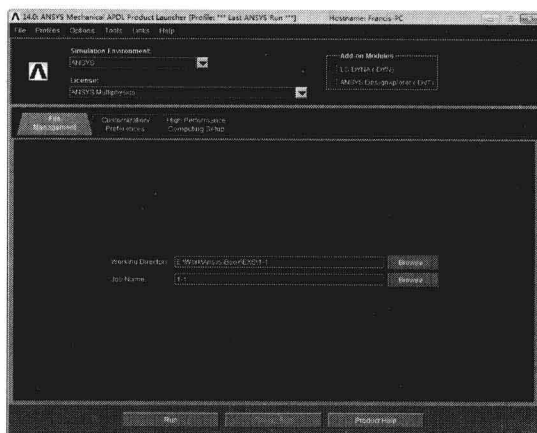


图 1-2 Mechanical APDL Product Launcher 14.0 窗口

Mechanical APDL Product Launcher 14.0 窗口方便用户管理自己的项目。在 Working Directory 中可以输入工作目录，Job Name 中可以输入用户定义的项目名称。

1.2.2 ANSYS 14.0 操作界面

单击 Mechanical APDL Product Launcher 14.0 窗口，选择 Run 按钮，即可进入 ANSYS 14.0 的 GUI 界面，如图 1-3 所示。与 GUI 操作界面同时打开的，还有如图 1-4 所示的 ANSYS 14.0 Output Window。

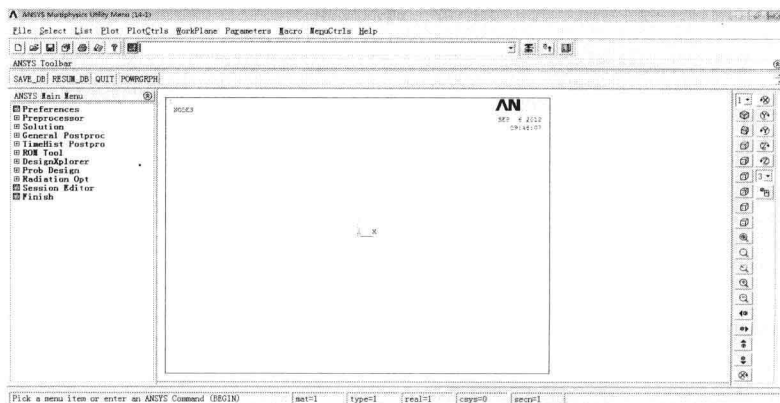


图 1-3 ANSYS 14.0 GUI 操作界面

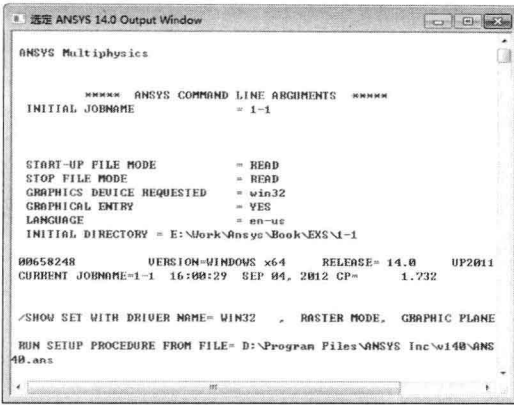


图 1-4 ANSYS 14.0 Output Window

ANSYS 14.0 Output Window 窗口显示了 ANSYS 项目的信息，例如定义单元、材料参数，分析过程的各种警告与错误提示，*GET 命令提取的数据等均可以在该窗口中查看到。

ANSYS 14.0 GUI 界面主菜单 (ANSYS Main Menu) 如图 1-5 所示，定义单元、建立模型、求解、后处理等命令都可以在这里找到。

图 1-6 所示为 GUI 界面的工作区，建立的模型、分析完成后的结果、求解过程的监视等都将发生在这里。

图 1-7 所示为 ANSYS 14.0 GUI 操作界面的通用菜单 (Utility Menu)。

通用菜单中包含了文件管理、项目选择、工作区显示的控制、参数的定义、工作平面、帮助等功能。通用菜单中的功能在下文的介绍中将经常遇到，在此不多赘述。

这里希望读者能够多加注意的是 ANSYS 的帮助功能。ANSYS 的帮助系统功能十分强大，进入帮助系统后，用户可能找到有关 ANSYS 的任何理论知识、操作方法等。图 1-8 所示为 ANSYS 14.0 帮助系统。

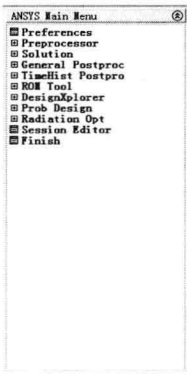


图 1-5 主菜单

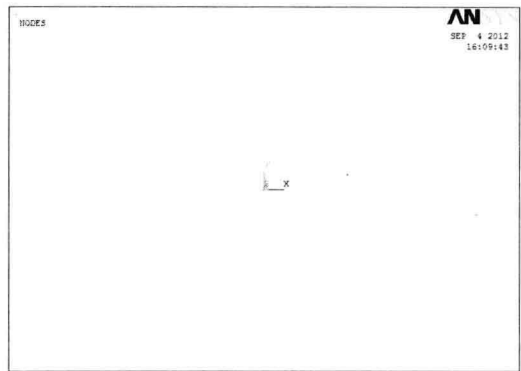


图 1-6 工作区

File Select List Plot PlotCtrls WorkPlane Parameters Macro MenuCtrls Help

图 1-7 通用菜单



图 1-8 ANSYS 14.0 帮助系统

图 1-9 所示为 ANSYS 命令输入框，此输入框中可以输入 APDL 命令，用户可以利用这些命令进行操作。



图 1-9 命令输入框

1.2.3 ANSYS 14.0 文件管理

ANSYS 软件广泛应用文件来存储和恢复数据，特别是在求解分析时。这些文件被命名为 filename.ext，这里 filename 为默认的作业名，ext 是一个唯一的由二到 4 个字符组成的值，表明文件的内容。作业名是进入 ANSYS 程序后用户指定的文件名（执行/FILNAME 命令或在 GUI 界面中单击 Utility Menu> Files> Change Jobname）。如果没有给文件起名，默认值为 FILE（或 file）。

文件名（文件名和扩展名）在某些系统中可能是小写，例如，如果文件名是“bolt”，在一个 ANSYS 问题分析结束时可能得到如下文件。

- ◆ bolt.db: 数据库文件。
- ◆ bolt.emat: 单元矩阵文件。
- ◆ bolt.err: 错误和警告消息文件。
- ◆ bolt.log: 命令输入历史文件。
- ◆ bolt.rst: 结果文件。

在 ANSYS 运行结束前产生，然后又在某一时刻被删除的文件称为临时文件。在运行结束后仍然存在的文件叫永久性文件。

贯穿 ANSYS 文档组，输出文件（Jobname.OUT）是常提到的文件之一。如果运行于 UNIX 系统，仅想把输出送到屏幕，从启动器中选择 Interactive，出现 Selected Product 对话框时，选择 Screen only，输出“文件”将是 ANSYS 输出窗口。如果选择 Screen and file，那么在当前的工作目录中，将会产生一个名叫 Jobname.OUT 的真实文件。

ANSYS 将不会立即把输出输出到输出窗口中。输入/输出缓冲器首先必须被添满或刷新。错误和警告将刷新输入/输出缓冲器。用户也可以发出某些命令（如/OUTPUT, NLIST, or KLIST）来使输入/输出缓冲器强行刷新。

根据文件如何被使用，程序相应地用文本格式（ACSII 码）或二进制格式写入文件。例如：ERR 和 LOG 文件是文本文件，而 DB、EMAT 和 RST 文件是二进制文件。通常，需要进行读（及编辑）的文件是用文本格式写入的，其他文件是用二进制格式写入的。

二进制文件可以是外部文件或内部文件。外部二进制文件能在不同计算机之间相互传送；内部二进制文件仅在写该文件的机器上调用，不能传送。在默认的情况下，所有 ANSYS 保存的二进制文件都是外部文件类型，可通过下列两种方法之一来把它改为内部文件类型：

- ◆ 使用/FTYPE 命令。
- ◆ Utility Menu> FILE> ANSYS FILE Options。

不能将数据库文件（Jobname.DB）或结果文件（Jobname.Rxx）改为内部文件。

下面是使用二进制文件的一些技巧。

如果不打算在不同计算机系统间传送文件，把所有的二进制文件指明为内部文件可节省 CPU 的运行时间。因为一些系统写外部类型的二进制文件要比写内部类型的二进制文件花费更多的时间。

当通过 FTP（文件传输协议）传输文件时，在传输前必须设置 BINARY 选项。

即使数据仅从文件中读取，大多数 ANSYS 二进制文件也必须使写许可可用。然而，数据库文件 (file.DB) 和结果文件 (file.RST, file.RTH etc.) 只能为只读形式。当保存一个只读文件 file.DB 时，已有的只读文件将被存为 file.DBB。但是，不能再次保存只读文件 file.DB，因为它将试图覆盖 file.DBB，这一点 ANSYS 不允许。

高级版本的 ANSYS 二进制文件不兼容低版本二进制文件。例如：不能将 ANSYS 14.0 产生的二进制文件在 ANSYS 13.0 或更低版本上运行。如果这样做的话，可能引起严重的操作问题，向上兼容的文件见表 1-1。

表 1-1 二进制文件的兼容性

标识符	类型	兼容性	内 容
BDB	Binary	-	最优设计的数据库文件 (OPKEEP)
BFIN	Text	-	由 BF 命令写入的体积力插值文件 (BFINT)
BRFL	Binary	-	最优设计的 FLOTRAN 结果文件 (OPKEEP)
BRMG	Binary	-	最优设计的磁场结果文件 (OPKEEP)
BRST	Binary	-	最优设计的结构分析结果文件 (OPKEEP)
BRTH	Binary	-	最优设计的温度结果文件 (OPKEEP)
CBDO	Text	-	由 D 命令写入的自由度插值文件 (CBDOF)
CDB	Text	Y	文本格式数据库文件 (CDWRITE)
CMAP	Text	-	彩色映像文件
CMD	Text	Y	由 *CFWRITE 写入的命令文件
DB	Binary	Y	数据库文件 (SAVE, /EXIT)
DBE	Binary	-	批处理模式中因 VMESH 失败产生的数据库文件
DBG	Text	-	FLOTRAN “调试”文件 (包括求解信息)
DSUB	Binary	Y	使用结束的超单元 DOF 求解文件
ELEM	Text	Y	单元定义文件 (EWRITE)
EMAT	Binary	Y	单元矩阵文件
ERR	Text	-	错误及警告信息文件
ESAV	Binary	Y	单元数据存储文件 (注: ANSYS 非线性分析产生的 ESAV 文件可能向上不兼容)
FATG	Text	-	疲劳数据文件 (FTWRITE)
FULL	Binary	-	组集的整体刚度矩阵和质量矩阵文件
GRPH	Text	Y	中性图形文件
IGES	Text	Y	由 ANSYS 实体模型产生的 IGES 文件 (IGES)
LGW	Text	Y	数据库命令记录文件 (LGWRITE)
Lnn	Binary	Y	载荷工况文件 (LCWRITE)
LOG	Text	Y	命令输入历程文件
LOOP	Text	-	优化循环文件
MCOM	Text	Y	谱分析中的模式组合命令文件 (MCOMB)
MODE	Binary	Y	模态矩阵文件 (模态和屈曲分析)
MP	Text	Y	材料特性定义文件 (MPWRITE)
NODE	Text	Y	节点定义文件 (NWRITE)

续表

标识符	类型	兼容性	内 容
OPO	Text	-	最终优化循环的 ANSYS 输出文件
OPT	Text	-	优化的数据文件
OSAV	Binary	-	最终优化循环的 ESAV 文件副本
OUT	Text	-	ANSYS 输出文件
PARM	Text	Y	参数定义文件 (PARSAVE)
PFL	Text	-	FLOTRAN 打印输出文件
PSD	Binary	-	PSD 文件 (模态协方差矩阵等)
RDF	Text	-	FLOTRAN 的残留文件 (FLDATA, OUTP)
RDSP	Binary	-	约化位移文件
REDM	Binary	-	约化结构矩阵文件
RFL	Binary	Y	FLOTRAN 结果文件
RFRQ	Binary	-	约化复合位移文件
RMG	Binary	Y	磁场分析的结果文件
RST	Binary	Y	结构和耦合场分析的结果文件
RSW	Text	-	FLOTRAN “管壁” 结果文件
RTH	Binary	Y	温度场分析的结果文件
RUN	Text	-	FLOTRAN 运行的数据文件
SELD	Binary	Y	生成结束的超单元载荷矢量数据文件
Snn	Text	Y	载荷步文件 (nn 为载荷步号) (LSWRITE)
SORD	Text	-	使用结束的超单元名及编号文件
STAT	Text	-	ANSYS 批处理运行状态文件
SUB	Binary	Y	在传输阶段产生的超单元矩阵文件
TB	Text	Y	超弹性材料常数文件 (*MOONEY)
TRI	Binary	-	三角化刚度矩阵文件
USUB	Binary	Y	为子结构扩展传递而输入的重新命名 DSUB 文件
XBC	Text	-	FLOTRAN 边界条件数据文件
XGM	Text	-	FLOTRAN 几何形状数据文件
XIC	Text	-	FLOTRAN 初始条件数据文件

在许多场合, ANSYS 程序需要读取自己的文件。这个文件可能是 ANSYS 命令的文本文件或者 ANSYS 数据的二进制文件。

用/INPUT 命令 (GUI 界面的 Utility Mneu > Files > Read input from 命令) 读读取包含 ANSYS 命令的文本文件。如: 可以读取前面 ANSYS 对话的命令记录文件 (Jobname.LOG), 例如, 用下面的命令, ANSYS 程序从当前目录中读 MATERIAL.INP 文件:

```
/INPUT,MATERIAL,INP
```

表 1-2 列出了常用的读取文件命令及 GUI 界面操作方法。

表 1-2 读取文件命令与 GUI 路径

命 令	GUI 菜单路径	用 途
*USE	Utility Menu> Macro> Execute Data Block	读取宏
PARRES	Utility Menu> Parameters> Restore parameters	读取参数文件 (Jobname.PARM)
EREAD	MainMenu> Preprocessor> Creat> elements> Read Elem File	读取单元文件 (Jobname.ELEM)
NREAD	MainMenu> Preprocessor> Creat> Nodes> Read Node File	读取节点文件 (Jobname.NODE)
MPREAD	MainMenu>Preprocessor>Loads>Other>Change Mat Props> Read from File	读取材料特性文件 (Jobname.MP)
	MainMenu> Preprocessor> Material Props> Read from File	
	MainMenu> Solution> Other> Change MatProps> Read from File	

表 1-3 列出来读取二进制文件的命令及 GUI 界面操作。

表 1-3 读取二进制文件

命 令	GUI 菜单路径	用 途
RESUME	Utility Menu> File> Resume from Utility Menu> File> Resume jobname.DB	读取数据库文件 ((Jobname.DB)
SET	Utility Menu> List> Results> Load Step Summary	读取结果文件 (Jobname.RST, Jobname.RTH, Jobname.RMG, Jobname.RFL)
OPRESU	Main Menu> Design Opt> Resume	读取优化数据文件 (Jobname.OPT)

1.2.4 ANSYS 14.0 有限元分析流程

ANSYS 有限元软件包是一个多用途的有限元法计算机设计程序，可以用来求解结构、流体、电力、电磁场及碰撞等问题。因此它可应用于以下工业领域：航空航天、汽车工业、生物医学、桥梁、建筑、电子产品、重型机械、微机电系统、运动器械等。

软件主要包括 3 个部分：前处理模块、分析计算模块和后处理模块。

(1) 前处理模块提供了一个强大的实体建模及网格划分工具，用户可以方便地构造有限元模型；

(2) 分析计算模块包括结构分析（可进行线性分析、非线性分析和高度非线性分析）、流体动力学分析、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；

(3) 后处理模块可将计算结果以彩色等值线显示、梯度显示、矢量显示、粒子流迹显示、立体切片显示、透明及半透明显示（可看到结构内部）等图形方式显示出来，也可将计算结果以图表、曲线形式显示或输出。

与 ANSYS 软件架构对应的是，典型的 ANSYS 有限元分析流程分为如下 3 个阶段。

(1) 建立有限元模型（前处理器，Preprocessor）

- ◆ 创建几何模型（导入或在 ANSYS 中建立）。
- ◆ 定义单元、材料属性。
- ◆ 划分网格。

(2) 加载与求解（求解器，Solution Processor）

- ◆ 施加载荷与其他边界条件。
- ◆ 求解。

(3) 查看与处理结果（后处理器，Post Processor）