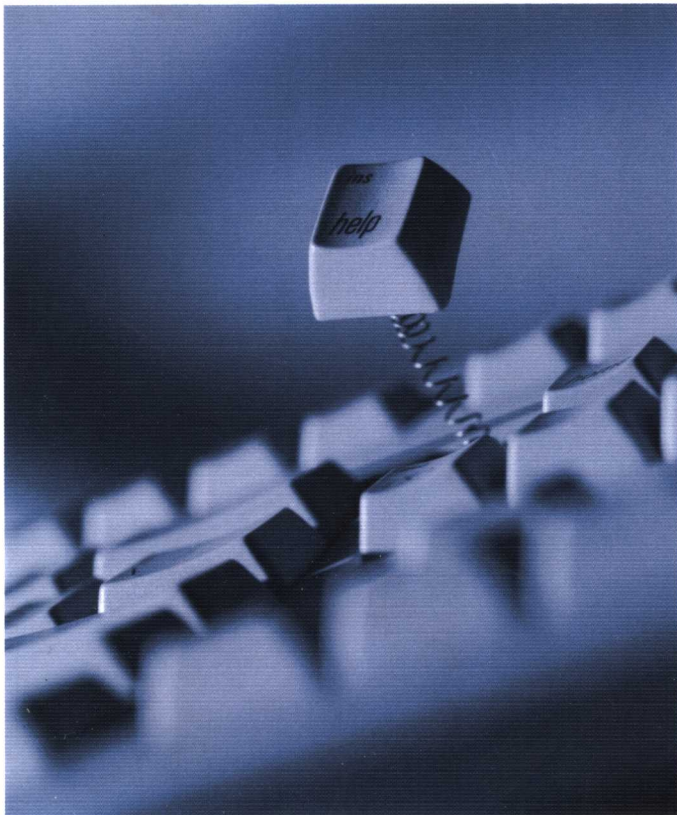


万水
ANSYS 技术丛书

ANSYS 9.0

经典产品高级分析技术与实例详解



博弈创作室 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

万水 ANSYS 技术丛书

ANSYS 9.0 经典产品 高级分析与实例详解

博弈创作室 编著

中国水利水电出版社

内 容 提 要

在 ANSYS 9.0 经典产品的分析技术中,除结构、热、流体、电磁和耦合场的主要分析技术之外,还有工程分析时经常需要的五大高级分析技术,即 APDL、Optimization、PDS、Element Birth and Death 和 Submodeling,它们是 ANSYS 经典产品最为突出的高级功能,是 ANSYS 进行工程分析时经常使用的重要辅助性分析技术,也是 ANSYS 使用人员认为必不可少的高级技术。

首先是基于参数化有限元分析 (APDL) 技术,它是实现有限元分析过程,包括建模、求解和后处理的参数化、自动化和批处理化的快速自动分析技术,实现对工程应用的分析过程和界面系统的二次开发。第二是基于有限元的优化分析技术,包括目标优化 (极小或极大) 设计 (Design Optimization)、拓扑形状优化 (Topological Optimization) 和基于抽样试验和响应面的变分设计技术 (Variational Technology)。第三是基于有限元的概率设计分析技术 (PDS),当设计输入参数是不确定的并服从某种概率分布的函数时,研究其对设计的可靠性、安全性和质量的影响方式、程度和灵敏度等。第四是单元生死 (Element Birth and Death) 技术,即单元技术,通过杀死或激活材料模拟施工桥梁、建筑等组装与拆卸过程和焊接、材料失效等问题。第五是子模型 (Submodeling) 技术,在总体模型分析之后,切出局部模型进行详细模型的细化分析,从而得到局部模型的高精度结果。

本书主要适合于掌握基本操作的初级用户和 ANSYS 的高级用户,是一本学习 ANSYS 高级技术的专用资料,也是灵活掌握 ANSYS 学科专题分析技术的辅助资料,帮助读者进一步丰富有限元分析的手段和综合应用能力。

另外,该书非常适合作为 ANSYS 教材,它翔实地介绍了技术原理、菜单系统、操作过程和分析方法,并通过实例进行实践与练习,完全遵循软件教学与实践的方法来进行内容的编排和组织。

图书在版编目 (CIP) 数据

ANSYS 9.0 经典产品高级分析技术与实例详解 / 博弈创作室编著. —北京: 中国水利水电出版社, 2005

(万水 ANSYS 技术丛书)

ISBN 7-5084-3288-6

I. A… II. 博… III. 有限元分析—应用程序, ANSYS 9.0 IV. 0241.82

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 109261 号

书 名	ANSYS 9.0 经典产品高级分析技术与实例详解
作 者	博弈创作室 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	北京市天竺颖华印刷厂
规 格	787mm×1092mm 16 开本 28.5 印张 695 千字
版 次	2005 年 10 月第 1 版 2005 年 10 月第 1 次印刷
印 数	0001—5000 册
定 价	48.00 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

序

最近几年，国内外各制造业高度注重并投入大量的人力、物力和财力推动企业的信息化技术及其应用，对于全世界的 IT 业来说这是一个令人振奋的态势。可以预见，在未来几年、几十年乃至更长的时间，制造业信息化是制造业的必然发展，其中涉及设计、分析、试验、制造等各个环节和全部流程的再造和技术革命，最终实现产品设计与定义、产品虚拟仿真与试验、产品的虚拟制造与数控加工等，实现产品全寿命周期的管理。在国内外，已经出现 PDM、ERP、PLM 等产品数据定义、制造、全寿命管理的系统，同时集成 CAD、CAE、CAPP 和 CAM 四大系统，满足不同企业、不同层次的信息化发展需求。

目前，国内 CAD 技术经过几年的发展和推广应用，在制造业中已经取得成功，这些 CAD 软件包括 UG、Pro/E、CARTIA、SolidWorks、SolidEdge 等。CAE 数值仿真分析和设计优化技术几乎与 CAD 技术同步得到推广，但由于种种原因使其不能达到 CAD 的普及程度。其中，最主要的原因有：首先，CAE 本身对仿真基础理论和原理知识具有一定的要求，要求使用人员必须经过结构、流体、热、电磁等相关专业知识的学习，同时还必须了解产品的设计流程、运行工况和设计规范与实验测试等一系列知识和实践；第二，在国内企业中，产品设计经常不是新产品的全新开发和研制，而是基于原有产品的改进或类推，或者就是引进国外现有的成熟产品。对于新产品的研发，国内普遍投入不足，结果是设计几乎等同于按规范人工计算、CAD 软件的产品绘图、产品试制、试验和投产等系列过程，CAE 软件在产品的设计过程中仅仅充当产品设计的验算评估工具，CAE 分析人员为设计人员做辅助性工作。在国外，产品仿真分析人员是研制的主力之一，研制开发工作（包括 CAE 分析）普遍交与具有高水平的专业人士进行。很显然国内现状的表现与此很不相符，是一个很不合理的业务主导关系。无论现状如何，制造业是国家的基础支柱产业之一，制造业信息化是制造业的发展趋势、出路和挑战，CAE 终将能成为产品研制的重要工具和手段进而得到更广泛的应用。最终，新产品研制首先是提出新产品设计概念和设计方案，而后需要进行虚拟产品定义和虚拟产品的仿真分析与测试，需要大量的 CAE 仿真分析人员开展仿真分析工作，CAE 仿真分析人员终将成为各制造业产品研制的中坚力量。

ANSYS 软件作为世界著名的美国 ANSYS 公司最具盛名的 CAE 软件产品，自从引进国内之后，由于其具有结构、热、流体、电磁和耦合场分析功能，并且功能体系完整强大，得到非常成功地应用和推广，应用于航空航天、军工、能源动力、船舶、车辆、通用机械等各个行业，用户群非常巨大。

ANSYS 软件产品与其他 CAE 产品一样，具有知识原理要求高、比较依赖于个人使用经验和工程问题的复杂性等，必须经过正规学习才能确保 CAE 产品的正确使用，然后经过大量实践，不断提高和积累经验，最终达到灵活运用的程度。由于各种原因，学习 ANSYS 的机会和实践对于每个人来说非常有限，也很难获得系统而全面的 ANSYS 培训机会。为使广大工程人员系统地掌握 ANSYS 软件，我们特此撰写本套丛书，吸收最新 ANSYS 9.0 的功能，总结 ANSYS 的基本规律、操作方法和各种处理技巧，力求全面性和系统性，由

浅入深，由理论到实践，逐步介绍 ANSYS 的基本功能和高级功能，并介绍运用 ANSYS 解决工程实际问题的方法和技巧。丛书包括以下六个分册：

- 《ANSYS 9.0 经典产品基础教程与实例详解》：主要介绍 ANSYS 9.0 软件系统、操作方法、基本建模、网格划分、载荷、求解、后处理等分析过程的相关知识和操作方法，同时介绍各种高级操作功能。配有系统的实践练习题，详细具体，并进行技术点评，便于抓住其中的关键技术和技巧。
- 《ANSYS 9.0 经典产品高级分析技术与实例详解》：主要介绍 ANSYS 9.0 软件 APDL 参数化有限元分析技术、有限元优化技术、随机（可靠性或概率）有限元技术、单元生死技术（模拟施工过程、焊接等）、子模型技术。这些技术是 ANSYS 最为突出的高级功能，是 ANSYS 除结构、热、流体、电磁和耦合场之外的重要辅助性分析技术，应用非常普遍。
- 《ANSYS 9.0 WorkBench 产品技术与实例详解》：主要介绍 ANSYS 9.0 WorkBench 的 CAD 接口、DesignModeler 几何建模工具、DesignSimulation 仿真分析工具、DesignExplorer 以及 VT 两种优化设计工具。该系列产品的特点是 CAD 与 CAE 协同仿真，将 ANSYS 高性能分析技术与流行的 CAD 软件参数化几何模型相结合，达到与 CAD 双向共享参数化几何模型，并基于参数化分析进行优化设计。该产品技术先进，非常适合设计人员和初级 CAE 人员进行基本的仿真分析工作，具有易学易用、工程化、高效快捷等突出优点，特别适合于各企业 CAE 分析的普及化需要。
- 《ANSYS 9.0 工程结构、热及耦合分析技术与实例详解》：主要针对机械结构类行业的 CAE 应用问题，详细介绍 ANSYS 9.0 的各种结构线性与非线性、静力与动力、传热以及结构与热的共生耦合技术。
- 《ANSYS 9.0 工程流体及耦合分析技术与实例详解》：主要针对流体应用行业的 CAE 应用问题，详细介绍 ANSYS 9.0 的 Flotran、CFX、Flotran 与结构和热共生耦合，以及 CFX 与结构、热和电磁的共生耦合技术。
- 《ANSYS 9.0 工程电磁及耦合分析技术与实例详解》：主要针对电磁应用行业的 CAE 应用问题，详细介绍 ANSYS 9.0 的高频电磁、低频电磁，以及高低频与结构、热和流体的共生耦合技术。

本套 ANSYS 9.0 丛书从选题、制订内容计划和撰写完成耗费编者们的巨大心血，汇聚编著者们多年大量的 ANSYS 使用经验，结合 ANSYS 9.0 的最新技术，经过长时间的编写过程，终于呈现给广大读者，深感欣慰。同时，由于编者知识和经验的局限性，不足之处在所难免，敬请各位读者批评指正。

最后，特此感谢读者的信赖和关怀，希望大家共同提高 ANSYS 的应用水平，在工作中取得更大的成就和发展。

编者

2005 年 5 月

前 言

作为 ANSYS 系列丛书之一, ANSYS 的高级分析技术是不可缺少的部分, 对于读者来说, 高级技术也是工程分析经常需要使用的分析技术。

首先, **APDL 即参数化设计语言**。APDL 提供一种逐行解释性的编程语言工具, 包括 APDL 菜单系统、变量、数组与表参数的用法、数据文件的读写、数据库信息的访问、数学表达式、矢量与矩阵运算、内部函数、流程控制、宏与宏库以及定制用户图形界面。基于 APDL 可以实现参数化有限元建模、参数化加载、参数化求解和参数化结果分析与处理, 实现 ANSYS 有限元分析全过程的参数化批处理。特别适合于开发标准分析过程的模块化、参数化和自动化, 可以很好地用于实现参数化有限元分析、分析批处理、专用分析系统的二次开发以及设计优化等, 提高工作效率。APDL 技术一直被认为是成为一名 ANSYS 高级用户的重要标志, 也是广大 ANSYS 用户的追求和至高目标。

第二, **基于有限元的优化分析技术**。ANSYS 的优化分析技术主要包括三种, 分别是基于参数化设计 (APDL) 的设计优化技术、拓扑 (几何形状) 优化技术和变分设计技术 (ANSYS 9.0 新技术)。设计优化技术基于 APDL 参数化分析过程, 即建模、求解和后处理过程, 通过程序优化算法, 对其中的输入设计参数 (如几何尺寸、材料性能、载荷大小与位置等) 进行优化调整, 在满足设计条件 (如应力不超过屈服强度, 变形小于指定数值等) 下使设计目标达到极小值 (如重量最小、应力方差最小化等)。拓扑优化技术是基于所选坯料优化搜索零部件的最优形状, 即确定去除坯料的哪部分材料, 留下哪部分材料。变分设计技术是一个非常有效、全新且流行的现代设计技术, 通过变分分析技术快速分析确定整个设计空间的响应面 (Response Surface), 采用 “what-if-study” 方法, 分析人员就可以针对输入变量的设计空间选择大量的抽样点进行分析, 从中找到最满意的设计方案。

第三, **基于有限元的概率设计分析技术**。在 ANSYS 有限元分析的过程中, 将分析问题的某些输入参数描述成服从于某种概率密度分布的不确定性变量, 并经过大量的采样点计算统计分析出系统响应参数的分布特性、影响关系和影响程度等。PDS 主要解决三种问题: ①不确定的输入参数导致有限元结果不确定程度有多大? 响应参数的置信度有多高? 响应参数包括 ANSYS 计算的所有结果项, 如温度、应力、位移等; ②设计产品满足设计要求的概率有多大? 工作失效的概率有多大? ③在所有不确定性的输入参数中哪个参数的不确定性对于响应参数的影响程度最大? 或者说对于目标产品最容易引起其工作失效? 响应参数对输入参数变化的灵敏度有多大?

第四, **单元生死技术**。单元生死技术是通过杀死或者激活单元的处理, 模拟材料 (即通过选定部分单元) 的添加和删除, 模拟实际工程中的开挖、结构安装和拆除 (如建筑物施工过程、桥梁安装过程等)、浇注、焊接等工程问题。

第五, **子模型技术**。子模型技术是在原有模型和分析结果的基础上, 通过模型切割截

取局部区域模型，并重新划分更精细的网格，施加该局部区域模型实际承受的外载荷和边界条件，并把原有模型在切割边界上的位移作为位移强制载荷施加局部模型的边界上，重新进行分析求解，从而获取局部区域模型上更精确的结果。主要用于总体分析之后对局部系统进行深入的细化分析，得到更精确局部分析结果，常见用于应力区域分析、连接区域分析等。

这五大高级分析技术的成稿耗费作者们大量的心血和精力，力求深入研究，并编著成深入浅出，便于学习和掌握的教材，供广大读者参考使用。但是，由于各种原因，难免存在不足和错误之处，如果读者发现请及时反映，便于迅速更新和改正。

本书由博弈创作室组织编写，其中的编写人员如下：周鹏、王昊、周桂红、唐克军、唐自励、夏爱国、夏阳、夏钱志、周选中、陈少云、黄海、董卓、陈果、杨烁、马宇、陈妍、邵磊、奚淑珍、史册、刘昊、李晶晶、董磊、张怡平、邵淑芳、丁玲、方平、何丹、贾军、李京、李移、邵明爱、陈元杰，在此一并表示感谢。

编者

2005年5月

目 录

序
前言

第一篇 参数化 (APDL) 有限元分析技术

第 1 章	APDL 参数化语言概论	1
第 2 章	参数与参数菜单系统	2
2.1	参数概念与类型	2
2.2	参数的命名规则	2
2.3	参数化操作环境介绍	3
第 3 章	变量参数及其用法	5
3.1	变量的定义与赋值	5
3.1.1	利用命令*SET 进行变量定义与赋值	5
3.1.2	利用赋值号“=”进行变量定义与赋值	5
3.1.3	利用变量定义菜单或命令输入窗口进行变量定义与赋值	6
3.1.4	在启动时利用驱动命令进行变量定义与赋值	6
3.2	删除变量	7
3.3	数值型变量值的替换	8
3.4	字符参数的用法	8
3.4.1	字符参数的常见用法	8
3.4.2	强制字符参数执行替换	9
3.4.3	抑制发生字符参数替换	9
3.4.4	使用字符参数的限制	10
3.5	数字或字符参数的动态替换	10
3.6	列表显示变量参数	10
3.7	存储与恢复变量	11
第 4 章	数组参数及其用法	13
4.1	数组参数类型与概念	13
4.2	定义数组参数	14
4.3	赋值数组参数	15
4.3.1	利用*SET 命令或“=”给单个或多个数组元素赋值	15
4.3.2	利用*VEDIT 命令或按其等价菜单方式编辑数组	16

4.3.3	利用*VFILL 命令或其等价菜单方式填充数组向量	17
4.4	列表显示数组参数	18
4.5	曲线图形显示数组参数列矢量	19
4.6	删除数组参数	21
4.7	存储与恢复数组参数	21
第 5 章	表参数及其用法	22
5.1	表参数的概念、定义、删除与赋值	22
5.2	曲线图形显示表参数的列矢量	24
5.3	表插值及表载荷应用实例	24
第 6 章	参数与数据文件的写出与读入	34
6.1	使用*VWRITE 写出数据文件	34
6.2	使用*VREAD 命令读取数据文件填充数组	37
6.3	使用*TREAD 命令读取数据文件并填充 TABLE 类型数组	37
第 7 章	访问 ANSYS 数据库数据	41
7.1	提取数据库数据并赋值给变量	41
7.1.1	*GET 提取命令	41
7.1.2	与*GET 等价的内嵌提取函数	43
7.1.3	对象信息查询函数	47
7.1.4	系统信息查询函数/INQUIRE	50
7.1.5	获取_STATUS 和_RETURN 参数值	51
7.2	批量提取数据库数据并赋值给数组	53
第 8 章	数学表达式	57
第 9 章	使用函数编辑器与加载器	58
9.1	使用函数编辑器	58
9.2	使用函数加载器	64
9.3	使用函数边界条件加载及其应用实例	65
9.3.1	使用函数边界条件加载	65
9.3.2	使用函数边界条件加载应用实例	65
第 10 章	矢量与矩阵运算	74
10.1	矢量与矩阵运算设置	74
10.2	矢量运算	77
10.2.1	矢量间运算 (*VOPER 命令)	77
10.2.2	矢量函数 (*VFUN 命令)	79
10.2.3	矢量-变量运算 (*VSCFUN 命令)	82
10.2.4	矢量插值运算 (*VITRP 命令)	82
10.3	矩阵运算	83
10.3.1	矩阵间运算 (*MOPER 命令)	83

10.3.2	复制或转置数组矩阵 (*MFUN 命令)	85
10.3.3	计算傅利叶级数 (*MFOURI 命令)	86
第 11 章	内部函数	88
第 12 章	流程控制	90
12.1	*GO 无条件分支	90
12.2	*IF-*IFELSE-*ELSE-*ENDIF 条件分支	90
12.3	*DO-*ENDDO 循环	93
12.4	*DOWHILE 循环	96
12.5	*REPEAT 重复一个命令	96
12.6	流程控制命令快速参考	97
第 13 章	宏文件与宏库	100
13.1	APDL 宏及其功能	100
13.2	宏文件命名规则	101
13.3	宏搜索路径	102
13.4	创建宏文件的方法	102
13.4.1	使用*CREATE 创建宏文件	103
13.4.2	使用*CFWRITE 创建宏文件	105
13.4.3	使用/TEE 创建宏文件	106
13.4.4	使用菜单 Utility Menu>Macro>Create Macro 创建宏文件	107
13.4.5	用文本编辑器创建宏文件	108
13.5	宏的局部变量	109
13.5.1	宏命令行的输入变量	109
13.5.2	宏内部使用的局部变量	111
13.6	运行宏	111
13.7	宏嵌套: 在宏内调用其他宏	113
13.8	使用宏库文件与运行宏库中的宏	114
13.9	在宏中使用组和组件	115
13.10	加密宏文件	116
13.10.1	准备加密宏	116
13.10.2	生成加密宏	117
13.10.3	运行加密宏	118
第 14 章	定制用户化图形交互界面	119
14.1	单参数输入对话框	119
14.2	多参数输入对话框	120
14.3	调用 ANSYS 程序已有的对话框	122
14.4	宏中实现拾取操作	123
14.5	程序运行进度对话框	123

14.6	宏运行的消息机制	125
14.7	定制工具条与缩写	127
14.7.1	定制用户化工具条按钮	128
14.7.2	存储与恢复工具条按钮	129
14.7.3	嵌套工具条缩写	131
第 15 章	基于 APDL 的常规应用及其实例	132
15.1	ANSYS 程序的启动参数与启动文件	132
15.2	驱动可执行文件	133
15.3	利用工具条按钮调用宏	134
15.4	读入和写出数据文件并实现多载荷步瞬态动力学求解实例	135
15.5	参数化建模: 创建标准零件/模型的通用宏	138
15.6	参数化建模: 连续变厚度板壳模型	144
15.7	施加随坐标变化的压力载荷	146
15.8	施加表载荷进行载荷插值求解	149
第 16 章	基于 APDL 的专用分析程序二次开发实例	153

第二篇 优化设计与变分有限元技术

第 17 章	设计优化技术	166
17.1	优化设计基本概念	166
17.2	设计优化的基本过程	167
17.2.1	创建分析文件	168
17.2.2	执行优化过程	171
17.2.3	查看设计序列结果	180
17.2.4	验证最优或者选择的可行性优化设计序列	183
17.3	常见设计优化实例	184
17.3.1	数学问题的极小值	184
17.3.2	桁架轻型化优化设计	189
第 18 章	拓扑优化技术	203
18.1	拓扑优化基本概念	203
18.2	拓扑优化分析基本过程	203
18.2.1	定义结构问题	204
18.2.2	选择单元类型	204
18.2.3	指定优化和不优化的区域	204
18.2.4	定义并控制载荷工况或频率提取	204
18.2.5	定义并控制优化过程	206
18.2.6	查看拓扑优化结果	215

18.3	拓扑优化实例	217
18.3.1	拱桥概念设计实例及点评	217
18.3.2	两层平面框架的刚度（频率）优化实例及点评	227
第 19 章	DesignXplorer VT 变分优化技术	236
19.1	变分优化技术的基本概念	236
19.2	DesignXplorer VT 的启动与菜单系统	237
19.3	DesignXplorer VT 变分优化技术	238
19.3.1	DesignXplorer VT 支持的输入参数	238
19.3.2	支持变分优化技术的单元类型	238
19.3.3	变分优化技术的限制条件	239
19.3.4	变分优化技术的结果在结果浏览器	240
19.4	DesignXplorer VT 优化分析的基本过程	240
19.4.1	执行 ANSYS 标准求解过程	240
19.4.2	定义变分优化技术的输入变量	241
19.4.3	定义变分优化技术的输出变量	247
19.4.4	执行变分优化求解	249
19.4.5	执行变分优化结果处理与优化设计	250
19.4.6	检查变分优化状态和清除变分优化数据库	264
19.5	DesignXplorer VT 变分技术实例	264
19.5.1	菜单建模分析过程	265
19.5.2	命令流建模分析过程	277

第三篇 基于有限元的概率设计技术

第 20 章	基于有限元的概率设计技术详解	281
20.1	基于有限元的概率设计（PDS）简介	281
20.2	PDS 的基本概念与过程数据流	282
20.3	PDS 中的参数分布函数及其选用	286
20.3.1	高斯（正态）分布（GAUSS）	286
20.3.2	截断高斯分布（TGAU）	286
20.3.3	对数正态分布	287
20.3.4	三角分布（TRIA）	288
20.3.5	均匀分布（UNIF）	288
20.3.6	指数分布	289
20.3.7	Beta 分布（BETA）	289
20.3.8	伽玛分布（GAMM）	290
20.3.9	威布尔分布（WEIB）	290

20.4	概率设计方法—蒙特卡罗模拟技术	291
20.4.1	蒙特卡罗模拟技术概述	291
20.4.2	直接抽样	292
20.4.3	拉丁超立方抽样	292
20.4.4	用户定义抽样	293
20.5	概率设计方法—响应面法	294
20.5.1	响应面法概述	294
20.5.2	中心合成设计抽样	295
20.5.3	Box-Behnken 矩阵抽样	297
20.5.4	用户定义抽样	297
第 21 章	基于有限元的概率设计的基本过程	298
21.1	PDS 基本过程概述	298
21.2	创建分析文件	298
21.2.1	分析文件及其生成方法	298
21.2.2	以雪载梁实例说明分析文件生成方法与内容	299
21.3	初始化概率设计分析及其参数	304
21.4	进入 PDS 并指定分析文件	304
21.5	定义概率设计模型	305
21.5.1	定义随机输入参数	305
21.5.2	绘制随机输入参数的分布函数图	306
21.5.3	查询随机输入参数分布函数的相关数值	307
21.5.4	计算随机输入参数的相关系数	307
21.5.5	定义随机输入参数之间的相关性系数	308
21.5.6	指定随机输出参数	309
21.6	选择概率设计方法	310
21.6.1	使用 PDS 向导自动选择最合适的概率设计方法	310
21.6.2	使用蒙特卡罗模拟方法进行概率设计	312
21.6.3	使用响应面方法进行概率设计	314
21.7	执行概率设计分析循环计算	315
21.7.1	运行序列求解	315
21.7.2	运行 PDS 并行分析	316
21.8	拟合和使用响应表面	316
21.8.1	关于响应表面序列	317
21.8.2	拟合响应表面	317
21.8.3	绘制响应表面	319
21.8.4	输出响应表面	320
21.8.5	根据响应表面生成蒙特卡罗样本	322

21.8.6	雪载梁 PDS 分析及其响应面分析命令流	323
21.9	概率设计结果后处理	324
21.9.1	统计分析: 样本历史	324
21.9.2	统计分析: 直方图	326
21.9.3	统计分析: 累积分布函数	327
21.9.4	统计分析: 输出概率	329
21.9.5	统计分析: 列出逆概率	330
21.9.6	趋势分析: 灵敏度	331
21.9.7	趋势分析: 散点图	333
21.9.8	趋势分析: 相关矩阵	336
21.9.9	生成报告	337
21.10	概率设计数据库操作	340
21.10.1	存储概率设计数据库	340
21.10.2	重启动一个概率设计	341
21.10.3	清除概率设计数据库	341
21.10.4	检查概率设计数据库状态	342
第 22 章	概率设计分析的实例与点评	343
22.1	三根杆桁架系统的直接抽样 MCS 概率分析实例与点评	343
22.1.1	PDS 交互分析过程	343
22.1.2	PDS 命令流分析过程	348
22.2	承受横向集中力板的 LHS 抽样 MCS 概率设计实例与点评	349
22.2.1	PDS 交互分析过程	350
22.2.2	命令流分析过程	362

第四篇 单元生死技术 (Element Birth and Death)

第 23 章	单元生死技术综述	364
第 24 章	单元生死分析基本过程	365
24.1	单元生死技术的建模	365
24.2	生死单元的加载和求解	366
24.2.1	进行第一个载荷步求解	366
24.2.2	单元生死的后继载荷步求解	368
24.3	查看求解结果及利用结果控制单元生死	369
24.3.1	通用求解结果处理	369
24.3.2	利用结果控制单元生死	369
24.3.3	制作生死过程动画	370
第 25 章	基坑开挖单元生死分析实例	371

第五篇 子模型技术 (Submodeling)

第 26 章	子模型技术综述	393
第 27 章	实体—实体子模型分析基本过程	395
27.1	第一步：采用相对稀疏网格进行总体模型分析	395
27.2	创建相对精细网格的子模型并存储模型数据库	396
27.3	写出子模型切割边界节点文件	397
27.4	保留依据总体模型结果插值子模型切割边界与体载荷定义文件	398
27.5	进行子模型分析求解，读入切割边界位移定义并施加子模型载荷	400
27.6	验证切割边界是否远离应力集中区域	402
第 28 章	板壳—实体子模型分析基本过程	403
第 29 章	子模型分析实例及点评	406
29.1	实体—实体子模型分析实例及点评	406
29.1.1	菜单操作分析过程	406
29.1.2	命令流分析过程	413
29.2	板壳—实体子模型分析实例及点评	419
29.2.1	菜单操作分析过程	419
29.2.2	命令流分析过程	425
附录 A	APDL 命令	429
附录 B	APDL 通道命令	431
附录 C	优化设计命令	439

第一篇 参数化 (APDL) 有限元分析技术

第 1 章 APDL 参数化语言概论

APDL 是 ANSYS Parametric Design Language 的缩写, 即 ANSYS 参数化设计语言, 它是一种类似 FORTRAN 的解释性语言, 提供一般程序语言的功能, 如参数、宏、标量、向量及矩阵运算、分支、循环、重复以及访问 ANSYS 有限元数据库等, 另外还提供简单界面定制功能, 实现参数交互输入、消息机制、界面驱动和运行应用程序等。

利用 APDL 的程序语言与宏技术组织管理 ANSYS 的有限元分析命令, 就可以实现参数化建模、施加参数化载荷与求解以及参数化后处理结果的显示, 从而实现参数化有限元分析的全过程, 这是 ANSYS 批处理分析的最高技术。在参数化的分析过程中可以简单地修改其中的参数达到反复分析各种尺寸、不同载荷大小的多种设计方案或者实现序列性产品, 极大地提高分析效率, 减少分析成本。同时, 以 APDL 为基础, 用户可以开发专用有限元分析程序, 或者编写经常重复使用的功能小程序, 如特殊载荷施加宏、按规范进行强度或刚度校核宏等。

另外, APDL 也是 ANSYS 设计优化的基础, 只有创建了参数化的分析流程才能对其中的设计参数执行优化改进, 达到最优化设计目标。

总之, APDL 扩展了传统有限元分析范围之外的能力, 提供了建立标准化零件库、序列化分析、设计修改、设计优化以及更高级的数据分析处理能力, 包括灵敏度研究等。

第 2 章 参数与参数菜单系统

2.1 参数概念与类型

参数是指 APDL 中的变量与数组。变量参数有两种类型：数值型和字符型；数组参数有三种类型：数值型、字符型和表，其中表是一种特殊的数值型数组，允许自动进行线性插值。

在 APDL 中任何参数都不需要单独声明参数的类型。数值型参数，无论整型还是实型都按照双精度数进行存储，被使用但未赋值的参数程序将其默认为一个接近 0 的极小值（大约为 2^{-100} ）。字符型参数存储字符串，赋值方法是将字符串括在一对单引号中（字符串最大长度不超过 8 个字符）。

与其他编程语言完全类似，参数可以作为任何命令的值域或在交互界面的输入框中替代各种具体的数值和字符串。当前面的参数值发生改变，重新执行带参数的操作或命令就会执行新参数值的处理。例如，将 1 赋给参数 kpx，将 10 赋给参数 kpy，将 -5 赋给参数 kpz，然后执行命令 K,1,kpx,kpy,kpz，相当于定义坐标为 (1,10,-5) 的关键点 1，定义关键点 1 的完整命令流如下：

```
kpx=1
kpy=10
kpz=-5
/prep7
k,1,kpx,kpy,kpz
```

如果修改上述命令流中 kpx,kpy,kpz 的赋值大小，后边定义的关键点 1 的位置则相应改变，这就是参数化定义模型的思想。

2.2 参数的命名规则

参数名称必须遵循以下规则：

1. 必须以字母开头，长度不超过 32 个字符。
2. 只能包含字母、数值和下划线。
3. 一般不能以下划线开头，以下划线开头的参数为系统隐含参数（在 ANSYS 系统中不显示，只有编写代码的人员自己知道），只能用于 GUI 和宏中。
4. 以下划线（_）结尾命名的参数可以用 *STATUS 命令成组列表显示，也可以成组利用 *DEL 进行删除。
5. 不能使用宏专用的局部参数名：ARG1~ARG9 和 AR10~AR99。
6. 不能使用 *ABBR 命令定义的缩写。