

ANSYS

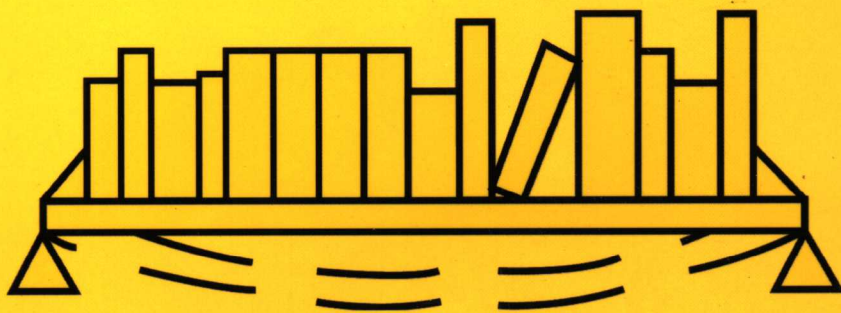


内附多媒体
光盘

有限元分析实用教程

强锋科技

李黎明 编著



清华大学出版社

ANSYS 有限元分析实用教程

李黎明 编著

清华大学出版社

北 京

前 言

1. ANSYS 简介

ANSYS 公司成立于 1970 年，目前是世界计算机辅助工程（CAE）行业中最大的公司之一。ANSYS 公司一直致力于分析设计软件的开发、维护和售后服务，不断吸取当今世界最新的计算方法和计算机技术，领导着有限元软件的发展趋势。本书以 ANSYS 公司最新推出的 ANSYS 8.1 为基础，详细介绍了 ANSYS 软件在有限元分析中的强大功能。

ANSYS 8.1 软件有多种分析能力，包括简单线性静态分析和复杂非线性动态分析。它可用以求结构、流体、电力、电磁场及碰撞等问题的解。它包含了预处理、解题程序以及后处理和优化等模块，将有限元分析、计算机图形学和优化技术相结合，已成为解决现代工程学问题必不可少的有力工具。

2. 本书的特点和优势

本书针对初学者，由浅入深地介绍了 ANSYS 的各项功能。和其他书籍相比，本书有如下优点：

(1) 开篇先给读者一个简单实例，让读者快速入门，掌握 ANSYS 软件的使用流程和方法，而不是罗列各种新增功能、界面介绍等内容。

(2) 全书争取做到一个知识点对应一个实例，而不是单纯地罗列知识点。在讲解实例的时候，不是空洞地讲解如何操作，而是给读者一个具体的场景，如介绍“位移约束”的时候，以矩形梁为对象，配合实例进行讲解。

(3) ANSYS 的功能十分强大，如果每个知识点都配有实例，那么本书内容将会十分庞大，定价也会偏高。因此，本书只对典型知识进行讲解，对于与其类似的知识，则一笔带过。

(4) 考虑到学习的连贯性，对实例的设计十分讲究，对于一些相关联的知识点，通过一个大例子贯穿整个章节，让读者能够享受到实例操作的乐趣。

(5) 对每个知识点都详细讲解，在讲解如何使用之前，首先告诉读者这个知识点的作用、在什么场合下使用以及需要注意什么问题等，让读者不仅知其然，而且知其所以然。

(6) 为了读者操作方便，本书配以光盘，让读者可以从中直接读取现成的例子进行相应的分析；对于一些典型的实例分析（如线性静力分析、模态分析、稳态热力学分析等），专门录制了操作动画附于光盘中，力图使读者以最直接的方式快速掌握 ANSYS 软件。

(7) 在每一章的结尾，还附了一部分练习题，对本章的知识点作一个系统的回顾，通过每章后面的操作练习，读者可以亲自动手测验一下自己对知识的掌握程度。

3. 本书内容

全书共分为 12 章，可分为四个部分。第 1 章对 ANSYS 8.1 的基本功能、界面环境等作了简单的介绍，并详细介绍了一个简单有限元分析实例，使读者尽快地熟悉 ANSYS 的基本操作过程；第 2 章~第 7 章分别对 ANSYS 有限元分析的各个过程深入细致地进行了讨论，包括建模、网格划分、施加载荷、求解、通用后处理和时间历程后处理，结合实例以操作为出发点，又不单纯地局限于操作；第 8 章重点阐述了 ANSYS 的参数化设计语言 APDL，在参数和数组的基础上介绍了宏的使用，并讲述了用宏建立交互式界面的一些方法；第 9 章~第 12 章介绍了 ANSYS 的一些高级操作，使读者对 ANSYS 软件在几个学科领域的应用有系统的了解，每章都配有几个实例分析，分别按交互式操作和命令流两种方式进行阐述。

4. 学习建议

书中所有例子均以 Windows 2000 为操作平台，菜单和命令直接用英文进行表示，附有光盘一张，其中可以找到书中提到的大部分例子。在讲述操作的过程中，对于经常遇到和需要注意的问题还进行了适当的说明，建议读者在学习过程中适当配合上机实践，相信会达到更好的学习效果。

流程是最重要的。本书没有追究一些知识的细节，而是告诉读者使用 ANSYS 进行有限元分析的流程，读者能够在理解流程的基础上，自己研究细节，进而达到融会贯通的效果。

学习本教程的时候不要一步一步跟着做，可先打开软件通看几遍，在脑海中操作一次，然后不看教程默做一遍。如果哪步忘了，也不要去看这一步，再通看一遍，默做。总之，保证整个过程是一气呵成的。这样有助于对命令的整体认识。否则，可以说做了白做，很快就忘记了。教程的惟一目的，不是让你学会做什么，而是学会命令是怎么用的。学完一个，立即可以举一反三，效果最好。读者可以在学完后不久就忘了那个教程是做了什么东西，但必定记住那几条命令是怎么用的，并且还可以触类旁通。

本书内容丰富，结构紧凑，覆盖知识面广泛，由于编写时间较为仓促，书中难免会有疏漏和不足之处，恳请广大读者提出宝贵意见。

编者

2004 年 10 月

目 录

第 1 章 ANSYS 8.1 简介	1
1.1 ANSYS 8.1 软件介绍	1
1.1.1 ANSYS 的发展	1
1.1.2 ANSYS 功能简介	1
1.1.3 ANSYS 8.1 的新特性	3
1.2 安装和启动 ANSYS 8.1	3
1.2.1 安装 ANSYS 8.1	3
1.2.2 启动	6
1.3 ANSYS 8.1 常用图形界面	7
1.3.1 应用菜单	8
1.3.2 工具条	8
1.3.3 输入窗口	8
1.3.4 主菜单	9
1.3.5 图形窗口	9
1.3.6 视图工具栏	9
1.3.7 输出窗口	9
1.4 第一个有限元分析实战	10
1.4.1 有限元法的基本架构	10
1.4.2 提出问题	11
1.4.3 定义参数	12
1.4.4 创建几何模型	17
1.4.5 划分网格	19
1.4.6 加载数据	21
1.4.7 求解	21
1.4.8 结果分析	23
1.5 ANSYS 8.1 程序结构分析	25
1.5.1 ANSYS 8.1 架构	25
1.5.2 ANSYS 8.1 文件格式	27
1.6 小结	28
1.7 习题	28

第 2 章 建立有限元模型	30
2.1 坐标系与工作平面	30
2.1.1 全局坐标系和局部坐标系	30
2.1.2 显示坐标系	34
2.1.3 节点坐标系	35
2.1.4 单元坐标系	36
2.1.5 结果坐标系	37
2.1.6 工作平面	37
2.2 节点定义	40
2.2.1 生成节点	41
2.2.2 节点填充及复制	42
2.2.3 查看节点	43
2.2.4 删除节点	45
2.2.5 移动节点	46
2.3 单元定义	47
2.3.1 定义单元类型	47
2.3.2 定义实常数	49
2.3.3 定义材料特性	50
2.3.4 生成单元	50
2.4 小结	53
2.5 习题	53
第 3 章 实体模型的建立	55
3.1 实体模型概述	55
3.2 自底向上建模	56
3.2.1 定义关键点	57
3.2.2 选择、查看和删除关键点	59
3.2.3 定义线	61
3.2.4 选择、查看和删除线	64
3.2.5 定义面	65
3.2.6 选择、查看和删除面	66
3.2.7 定义体	67
3.2.8 选择、查看和删除体	68
3.3 自顶向下建模	69
3.3.1 建立矩形面原始对象	69
3.3.2 建立圆或环形面原始对象	70
3.3.3 建立正多边形面原始对象	71
3.3.4 建立长方体原始对象	72

3.3.5	建立柱体原始对象	73
3.3.6	建立多棱柱原始对象	75
3.3.7	建立球体或部分球体原始对象	75
3.3.8	建立锥体或圆台原始对象	76
3.3.9	建立环体或部分环体原始对象	77
3.4	布尔运算	77
3.4.1	布尔运算的基础设置	77
3.4.2	交运算	79
3.4.3	加运算	82
3.4.4	减运算	82
3.4.5	工作平面减运算	87
3.4.6	搭接	87
3.4.7	分割	88
3.4.8	粘接（或合并）	89
3.5	编辑图元	90
3.5.1	移动图元	91
3.5.2	复制图元	91
3.5.3	镜像图元	92
3.5.4	缩放图元	93
3.5.5	将图元转换坐标系	93
3.6	运用组件和部件	94
3.6.1	组件和部件的操作	94
3.6.2	通过组件和部件选择实体	96
3.7	小结	96
3.8	习题	97
第 4 章	网格划分	98
4.1	网格划分的过程	98
4.1.1	定义单元类型	98
4.1.2	定义实常数	101
4.1.3	定义材料参数	104
4.2	网格划分控制	108
4.2.1	网格划分工具	109
4.2.2	Smartsize 网格划分控制	111
4.2.3	尺寸控制	113
4.2.4	单元形状控制	116
4.2.5	网格划分器选择	116
4.3	实体模型网格划分	121

4.3.1	关键点网格划分	121
4.3.2	线网格划分	122
4.3.3	面网格划分	122
4.3.4	体网格划分	123
4.3.5	网格修改	126
4.4	网格检查	128
4.4.1	设置形状检查选项	128
4.4.2	设置形状限制参数	129
4.4.3	确定网格质量	130
4.5	自适应网格	131
4.6	小结	135
4.7	习题	135
第 5 章	加载与求解	137
5.1	载荷和载荷步	137
5.1.1	载荷分类	137
5.1.2	载荷步、子步和平衡迭代	138
5.1.3	载荷的显示	138
5.1.4	载荷步选项	139
5.2	位移约束	140
5.2.1	约束操作	141
5.2.2	对称和反对称约束	143
5.2.3	耦合自由度	144
5.2.4	约束方程	146
5.3	集中载荷	146
5.3.1	施加力和力矩	147
5.3.2	重复设置力和力矩	147
5.3.3	缩放力和力矩	148
5.3.4	转换力和力矩	148
5.4	表面载荷	149
5.4.1	基本操作	149
5.4.2	梁单元上的压力载荷	150
5.4.3	指定斜率	152
5.4.4	函数加载	153
5.4.5	表面效应单元	156
5.5	体载荷	156
5.5.1	施加体载荷	156
5.5.2	惯性载荷	157

5.6 特殊载荷.....	157
5.6.1 耦合场载荷.....	158
5.6.2 轴对称载荷.....	158
5.7 求解.....	159
5.7.1 选择合适的求解器.....	159
5.7.2 求解多步载荷.....	160
5.7.3 中断和重新启动.....	162
5.8 计运行时间和文件大小.....	163
5.9 小结.....	165
5.10 习题.....	165
第 6 章 通用后处理器.....	167
6.1 后处理器概述.....	167
6.1.1 读取结果数据.....	167
6.1.2 数据替换与追加.....	170
6.1.3 选择结果数据.....	170
6.1.4 输出控制.....	171
6.2 图形显示.....	172
6.2.1 绘制变形图.....	172
6.2.2 绘制等值线图.....	174
6.2.3 绘制矢量图.....	176
6.2.4 绘制粒子轨迹图.....	178
6.2.5 绘制破裂图和压碎图.....	179
6.3 单元表.....	180
6.3.1 定义单元表.....	180
6.3.2 单元表的操作.....	182
6.3.3 显示单元表.....	182
6.4 使用路径.....	184
6.4.1 定义路径.....	184
6.4.2 观察沿路径结果.....	186
6.4.3 进行沿路径数学运算.....	189
6.5 载荷工况.....	189
6.5.1 定义载荷工况.....	190
6.5.2 载荷工况的读写.....	190
6.5.3 载荷工况数学运算.....	191
6.6 小结.....	192
6.7 习题.....	192

第 7 章	时间历程后处理器	193
7.1	定义和存储变量	193
7.1.1	变量定义	193
7.1.2	变量存储	195
7.1.3	变量的导入	197
7.2	变量的操作	197
7.2.1	数学运算	197
7.2.2	变量与数组相互赋值	198
7.2.3	数据平滑	200
7.2.4	生成响应频谱	202
7.3	查看变量	202
7.3.1	图形显示	202
7.3.2	列表显示	205
7.4	动画技术	207
7.4.1	直接生成动画	207
7.4.2	通过动画帧显示动画	208
7.4.3	动画播放	210
7.5	小结	210
7.6	习题	211
第 8 章	ANSYS 参数化设计语言 (APDL)	212
8.1	APDL 简介	212
8.2	使用参数	213
8.2.1	标量参数	213
8.2.2	数组参数	216
8.2.3	数组参数的定义	216
8.2.4	数组参数的赋值	217
8.2.5	数组的图形显示	222
8.2.6	参数表达式	224
8.2.7	数学函数	225
8.3	使用工具条	226
8.3.1	工具条基本操作	226
8.3.2	嵌套按钮	228
8.4	APDL 宏语言	229
8.4.1	宏的创建	230
8.4.2	宏的运行	232
8.4.3	APDL 程序控制	233
8.4.4	设置用户交互界面	237

8.5	小结.....	241
8.6	习题.....	242
第 9 章	结构静力分析.....	243
9.1	结构分析概述.....	243
9.2	结构线性静力分析.....	244
9.2.1	线性静力分析基础.....	244
9.2.2	线性静力分析实例.....	244
9.3	结构非线性分析.....	252
9.3.1	几何非线性分析.....	253
9.3.2	几何非线性分析实例.....	254
9.3.3	材料非线性分析.....	258
9.3.4	材料非线性分析实例.....	259
9.4	小结.....	264
9.5	习题.....	264
第 10 章	ANSYS 8.1 动态分析.....	266
10.1	模态分析.....	266
10.1.1	模态分析简介.....	266
10.1.2	模态分析步骤.....	267
10.1.3	模态分析实例.....	270
10.2	瞬态动态分析.....	278
10.2.1	瞬态动力分析简介.....	278
10.2.2	瞬态动力分析步骤.....	278
10.2.3	瞬态动力分析实例.....	281
10.3	谐波响应分析.....	288
10.3.1	谐波响应分析简介.....	288
10.3.2	谐波响应分析步骤.....	288
10.3.3	谐波响应分析实例.....	290
10.4	小结.....	295
10.5	习题.....	295
第 11 章	ANSYS 8.1 热力学分析.....	297
11.1	热分析的基础知识.....	297
11.1.1	符号与单位.....	297
11.1.2	传热学经典理论回顾.....	298
11.1.3	热传递的方式.....	298
11.2	稳态热分析.....	300
11.2.1	稳态传热的定义.....	300

11.2.2	热分析的单元	300
11.2.3	ANSYS 稳态热分析的基本过程	300
11.2.4	稳态热分析实例	303
11.3	瞬态热分析	309
11.3.1	瞬态传热分析的定义	309
11.3.2	瞬态热分析中的单元及命令	309
11.3.3	ANSYS 瞬态热分析的主要步骤	310
11.3.4	瞬态热分析实例	312
11.4	小结	320
11.5	习题	320
第 12 章	优化设计	322
12.1	优化设计基本概念	322
12.2	优化设计的步骤	324
12.2.1	生成分析文件	324
12.2.2	建立优化参数	328
12.2.3	指定分析文件	328
12.2.4	声明优化变量	328
12.2.5	选择优化工具和方法	331
12.2.6	指定优化循环控制方式	332
12.2.7	进行优化分析	333
12.2.8	查看优化结果	334
12.3	基本优化方法和工具	336
12.3.1	单步运行法	336
12.3.2	随机搜索法	337
12.3.3	乘子评估法	337
12.3.4	等步长搜索法	337
12.3.5	最优梯度法	337
12.3.6	零阶方法	338
12.3.7	一阶方法	339
12.4	优化设计实例	339
12.4.1	问题描述	339
12.4.2	GUI 操作步骤	340
12.4.3	命令流方式	348
12.5	小结	351
12.6	习题	351
附录	353

第 1 章 ANSYS 8.1 简介

1.1 ANSYS 8.1 软件介绍

ANSYS 是一种应用广泛的通用有限元工程分析软件。功能完备的预处理器和后处理器（又称预处理模块和后处理模块）使 ANSYS 易学易用，强大的图形处理能力以及得心应手的实用工具使得使用者轻松愉快，奇特的多平台解决方案使用户物尽其用，且具有多种平台支持（Windows NT、LINUX、UNIX）和异种异构网络浮动能力，各种硬件平台数据库兼容，使其功能一致，界面统一。目前，ANSYS 已经广泛应用于核工业、铁道、石油化工、航空航天、机械制造、能源、汽车交通、国防、军工、电子、土木工程、造船、生物医学、轻工、地矿、水利、日用家电等工业及科学研究。

ANSYS 软件含有多种分析能力，包括简单线性静态分析和复杂非线性动态分析。用来求结构、流体、电力、电磁场及碰撞等问题的解答。它包含了预处理、解题程序以及后处理和优化等模块，将有限元分析、计算机图形学和优化技术相结合，已成为解决现代工程学问题必不可少的有力工具。

1.1.1 ANSYS 的发展

ANSYS 公司是由美国匹兹堡大学力学系教授、有限元法的权威、著名的力学专家 John Swanson 博士于 1970 年创建而发展起来的，其总部位于美国宾夕法尼亚州的匹兹堡市，目前是世界 CAE 行业最大的公司之一。

ANSYS 软件的最初版本与今天的版本相比有很大的不同，最初版本仅仅提供了热分析及线性结构分析功能，而且是一个批处理程序，只能在大型计算机上使用。20 世纪 70 年代初加入了非线性、子结构等功能；20 世纪 70 年代末，图形技术和交互操作方式应用到了 ANSYS 中，使得 ANSYS 的使用进入了一个全新的阶段。

经过 30 多年的发展，如今的 ANSYS 软件更加趋于完善，功能更加强大，使用也更加方便。最新版本 ANSYS 8.1 的推出增加了一些如模态综合法、非线性诊断技术（专家系统）以及多物理场功能等，性能上有了很大的改进了提高。

1.1.2 ANSYS 功能简介

ANSYS 是一个通用的有限元分析软件，它具有多种多样的分析能力，从简单的线性静

态分析到复杂的非线性动态分析。而且, ANSYS 还具有产品的优化设计、估计分析等附加功能。

ANSYS 软件能够提供的分析类型如下:

1. 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、大应变及接触问题的分析。

2. 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。ANSYS 可进行结构动态分析的类型包括包括瞬时动力分析、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

结构非线性问题包括分析材料非线性、几何非线性和单元非线性三种。ANSYS 程序可以求解静态和瞬态的非线性问题。

4. 结构屈曲分析

屈曲分析是用来确定结构失稳的载荷大小与在特定的载荷下结构是否失稳的问题。ANSYS 中的稳定性分析主要分为线性分析和非线性分析两种。

5. 热力学分析

ANSYS 可处理热传递的 3 种基本类型: 传导、对流和辐射。热传递的 3 种基本类型均可进行稳态和瞬态、线性和非线性分析。热分析还可以进行模拟材料的固化和熔解过程的分析, 以及模拟热与结构应力之间的耦合问题的分析。

6. 电磁场分析

主要用于电磁场问题的分析, 如电感、电容、磁能量密度、涡流、电场分布、磁力线分布、力、运动效应、电路和能量损失等。

7. 声场分析

声场分析主要用来研究主流体(气体、液体等)介质中声音的传播问题, 以及在流体介质中固态结构的动态响应特性。

8. 压电分析

压电分析主要可以进行静态分析、模态分析、瞬态分析和谐波响应分析等, 可用来研究压电材料结构在随时间变化的电流和机械载荷响应特性。主要适用于谐振器、振荡器以及其他电子材料的结构动态分析。

9. 流体动态分析

ANSYS 中的流体单元能进行流体动态分析, 分析类型可以为瞬态或稳态。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、流率和温度分析的图形显示。

1.1.3 ANSYS 8.1 的新特性

ANSYS 8.1 继承了以前各版本的基本功能，并在此基础上作了进一步的加强。ANSYS 8.1 主要新增功能有：

1. 新的视图工具栏

新版本界面中增加了全新的视图工具栏，可以方便地对模型进行放大、缩小、平移等操作。此工具栏固定于操作界面右侧，无需用户再从应用菜单调用。关于此工具栏的操作方法，将在以后的章节里详细介绍。

2. 视图窗口增加右键菜单

新版本中开始在视图窗口中设置右键菜单，主要功能是调节视图窗口显示模式，配合视图工具栏使用，使用户能够快速地与实现图形交互。

3. 新单元与新材料

新版本增加了几种新的单元，如 BEAM188/189、SHELL181、SHELL208 等，同时还增加了新材料——形状记忆合金，使 ANSYS 能够更加精确地模拟航空航天、医学等领域的问题。

4. 新的并行求解器

新版本应用了新的并行式求解器：分布式 PCG 和分布式 JCG，使得运算超大规模的非线性问题，速度更快，稳定性更高。

5. 截面和表面结果后处理功能

新版本增加了新的后处理功能，可以输出截面或者球面上的合力和平均应力；可以输出密封体积上的净电荷；可以输出通过截面的磁能量、热流量等。

此外，ANSYS 8.1 的新增功能还有：新增模态综合法、新的接触算法——拉格朗日乘子法、新的接触方式——边装配接触方式、非线性诊断技术（专家系统）、低频电磁场循环对称分析、E-B 耦合场粒子轨迹、新压电/压阻直接耦合单元和新的多物理场求解器等。

说明：有条件的读者可以访问 ANSYS 的官方网站，了解 ANSYS 软件发展的最新动态。网址是 <http://www.ansys.com>（英文）、<http://www.ansys.com.cn>（中文）。

1.2 安装和启动 ANSYS 8.1

1.2.1 安装 ANSYS 8.1

1. 准备安装

说明：本书所有例子的操作环境为 Windows 2000 系统，使用最新版本的 ANSYS 8.1。

用户在安装 ANSYS 8.1 之前，需要先注册 License Sever 信息。步骤如下：

(1) 选择要作为 License Sever 的计算机。

(2) 安装 ANSYS FLEXlm Licensing。

(3) 在开始菜单的程序中找到【ANSLIC_ADMIN Utility】程序，出现如图 1.1 所示的对话框，在其中选择第一项【Register license server information】，单击【OK】按钮。

(4) 接着会弹出注册信息对话框。在其中填写相应的信息后，单击【OK】按钮，生成 LICSEVER.inf 文件。

(5) 将得到的 LICSEVER.inf 文件送到 ANSYS 销售商，从而会得到 License keys。

(6) 再次运行【ANSLIC_ADMIN Utility】程序，在如图 1.1 所示的对话框中选择【License server administration】项，单击【OK】按钮。

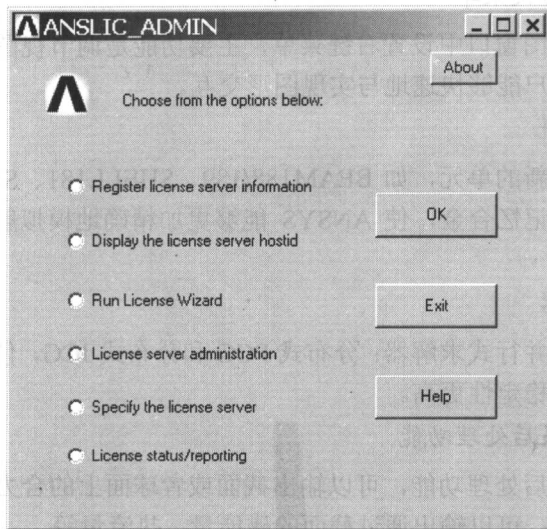


图 1.1 【ANSLIC_ADMIN】对话框

(7) 弹出如图 1.2 所示的【License server administration】对话框，选择【Install/update the license】项，单击【OK】按钮。

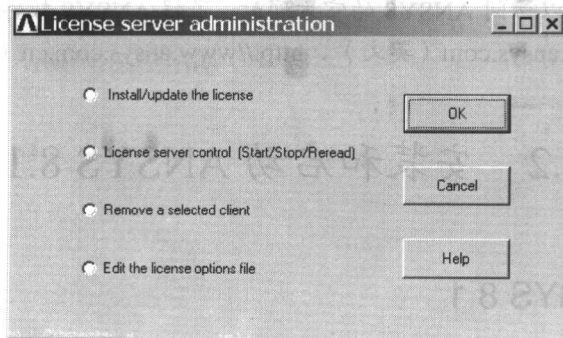


图 1.2 【License server administration】对话框