



计算机建筑应用系列

# ANSYS 13.0 土木工程应用十日通

罗永会 黄书珍 等编著

中国建筑工业出版社



(含光盘)

计算机建筑应用系列

# ANSYS 13.0 土木工程应用十日通

罗永会 黄书珍 等编著

中国建筑工业出版社

## 图书在版编目 (CIP) 数据

ANSYS 13.0 土木工程应用十日通/罗永会, 黄书珍  
等编著. —北京: 中国建筑工业出版社, 2011. 10  
计算机建筑应用系列  
ISBN 978-7-112-13437-3

I. ①A… II. ①罗…②黄… III. ①土木工程-有限  
元分析-应用程序, ANSYS 13.0 IV. ①TU

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 153146 号

本书以 ANSYS 的最新版本 ANSYS 13.0 为依据, 对 ANSYS 土木工程有限元分析的基本思路、操作步骤、应用技巧进行了详细介绍, 并结合典型工程应用实例详细讲述了 ANSYS 的具体工程应用方法。

书中尽量避开了繁琐的理论描述, 从实际应用出发, 结合作者使用该软件的经验, 实例部分采用 GUI 方式一步一步地对操作过程和步骤进行了解。为了帮助用户熟悉 ANSYS 的相关操作命令, 在每个实例的后面列出了分析过程的命令流文件。

本书前 7 章为操作基础, 详细介绍了 ANSYS 分析全流程的基本步骤和方法: 第 1 章 ANSYS 13.0 入门; 第 2 章 ANSYS 13.0 图形用户界面; 第 3 章几何建模; 第 4 章划分网格; 第 5 章施加载荷; 第 6 章求解; 第 7 章后处理。后 9 章为专题实例, 按不同的分析专题讲解了各种分析专题的参数设置方法与技巧: 第 8 章结构静力学分析; 第 9 章模态分析; 第 10 章谐响应分析; 第 11 章瞬态动力学分析; 第 12 章谱分析; 第 13 章非线性分析; 第 14 章结构屈曲分析; 第 15 章接触问题分析; 第 16 章结构优化。

本书适用于 ANSYS 软件的初中级用户, 以及有初步使用经验的建筑工程技术人员; 本书可作为理工院校建筑相关专业的高年级本科生、研究生及教师学习 ANSYS 软件的培训教材, 也可作为从事建筑结构分析相关行业的工程技术人员使用 ANSYS 软件的参考书。

\* \* \*

责任编辑: 郭 栋 张 磊  
责任设计: 张 虹  
责任校对: 陈晶晶 王雪竹

计算机建筑应用系列  
ANSYS 13.0 土木工程应用十日通  
罗永会 黄书珍 等编著

\*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京西郊百万庄)  
各地新华书店、建筑书店经销  
霸州市顺浩图文科技发展有限公司制版  
北京市书林印刷有限公司印刷

\*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 35 $\frac{3}{4}$  字数: 890 千字  
2011 年 12 月第一版 2011 年 12 月第一次印刷

定价: 88.00 元 (含光盘)

ISBN 978-7-112-13437-3

(21207)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

# 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，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作出了巨大贡献。

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 and 体会，以 ANSYS 的最新版本 ANSYS 13.0 为依据，编写了这本书。

本书前 7 章为操作基础，详细介绍了 ANSYS 分析全流程的基本步骤和方法：第 1 章 ANSYS 13.0 入门；第 2 章 ANSYS 13.0 图形用户界面；第 3 章几何建模；第 4 章划分网格；第 5 章施加载荷；第 6 章求解；第 7 章后处理。后 9 章为专题实例，按不同的分析专题讲解了各种分析专题的参数设置方法与技巧：第 8 章结构静力学分析；第 9 章模态分析；第 10 章谐响应分析；第 11 章瞬态动力学分析；第 12 章谱分析；第 13 章非线性分析；第 14 章结构屈曲分析；第 15 章接触问题分析；第 16 章结构优化。

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。

本书由石家庄铁道大学的罗永会和黄书珍两位老师主编。参与本书编写工作还有康士廷、左昉、许洪、刘昌丽、贾若琴、熊慧、王敏、周冰、董伟、闫军、武燕京、李瑞、王兵学、袁涛、王渊峰、李世强、王培合、周广芬、王义发、李鹏、陈丽芹、孟清华、李广荣、郑长松、王佩楷、王文平、路纯红、王艳池、王玉秋、赖永标、王玮、王宏、张日晶、许洪、张俊生、阳平华等。

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、博士生及教师学习 ANSYS 软件的教材，也可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，缺点和错误难免，恳请专家和广大读者批评指正。

# 目 录

<b>第 1 章 ANSYS 13.0 入门</b> .....	1
1.1 有限单元法简介 .....	1
1.1.1 有限单元法的基本思想 .....	1
1.1.2 有限单元法的基本概念 .....	2
1.2 有限元法的分析过程 .....	5
1.3 ANSYS 简介 .....	6
1.3.1 ANSYS 发展过程 .....	6
1.3.2 ANSYS 使用环境 .....	7
1.3.3 ANSYS 软件的功能 .....	7
1.4 ANSYS 13.0 的安装与启动 .....	12
1.4.1 系统要求 .....	12
1.4.2 设置运行参数 .....	13
1.4.3 启动与退出 .....	15
1.5 ANSYS 文件系统 .....	17
1.5.1 文件类型 .....	17
1.5.2 文件管理 .....	18
1.6 ANSYS 分析过程 .....	21
1.6.1 建立模型 .....	22
1.6.2 加载并求解 .....	22
1.6.3 后处理 .....	22
1.7 本章小结 .....	23
<b>第 2 章 ANSYS 13.0 图形用户界面</b> .....	24
2.1 ANSYS 13.0 图形用户界面的组成 .....	24
2.2 启动图形用户界面 .....	25
2.3 对话框及其组件 .....	26
2.3.1 文本框 .....	26
2.3.2 单选列表 .....	26
2.3.3 双列选择列表 .....	27
2.3.4 标签对话框 .....	27
2.3.5 选取框 .....	27
2.4 通用菜单 .....	28
2.4.1 文件菜单 .....	29
2.4.2 选取菜单 .....	31
2.4.3 列表菜单 .....	33
2.4.4 绘图菜单 .....	37

2.4.5	绘图控制菜单 .....	38
2.4.6	工作平面菜单 .....	45
2.4.7	参量菜单 .....	47
2.4.8	宏菜单 .....	49
2.4.9	菜单控制菜单 .....	50
2.4.10	帮助菜单 .....	51
2.5	输入窗口 .....	52
2.6	主菜单 .....	53
2.6.1	优选项 .....	54
2.6.2	预处理器 .....	54
2.6.3	求解器 .....	59
2.6.4	通用后处理器 .....	62
2.6.5	时间历程后处理器 .....	65
2.6.6	拓扑优化器 .....	66
2.6.7	优化器 .....	67
2.6.8	概率设计和辐射选项 .....	67
2.6.9	运行时间估计量 .....	67
2.6.10	记录编辑器 .....	68
2.7	输出窗口 .....	69
2.8	工具条 .....	70
2.9	图形窗口 .....	70
2.9.1	图形显示 .....	71
2.9.2	多窗口绘图 .....	72
2.9.3	增强图形显示 .....	75
2.10	个性化界面 .....	76
2.10.1	改变字体和颜色 .....	76
2.10.2	改变 GUI 的启动菜单显示 .....	77
2.10.3	改变菜单链接和对话框 .....	77
2.11	ANSYS 中常用操作 .....	77
2.11.1	拾取操作 .....	77
2.11.2	显示操作 .....	79
2.12	分析步骤示例——工字钢悬臂梁静力分析 .....	81
2.12.1	分析问题 .....	81
2.12.2	建立有限元模型 .....	81
2.12.3	施加载荷 .....	86
2.12.4	进行求解 .....	88
2.12.5	后处理 .....	88
2.13	本章小结 .....	90
<b>第 3 章</b>	<b>几何建模 .....</b>	<b>91</b>
3.1	坐标系简介 .....	91
3.1.1	总体和局部坐标系 .....	92
3.1.2	显示坐标系 .....	94

3.1.3	节点坐标系 .....	94
3.1.4	单元坐标系 .....	96
3.1.5	结果坐标系 .....	96
3.2	工作平面的使用 .....	96
3.2.1	定义一个新的工作平面 .....	97
3.2.2	控制工作平面的显示和样式 .....	98
3.2.3	移动工作平面 .....	98
3.2.4	旋转工作平面 .....	98
3.2.5	还原一个已定义的工作平面 .....	98
3.2.6	工作平面的高级用途 .....	99
3.3	布尔操作 .....	101
3.3.1	布尔运算的设置 .....	101
3.3.2	布尔运算之后的图元编号 .....	102
3.3.3	交运算 .....	102
3.3.4	两两相交 .....	103
3.3.5	相加 .....	104
3.3.6	相减 .....	104
3.3.7	利用工作平面做减运算 .....	106
3.3.8	搭接 .....	106
3.3.9	分割 .....	107
3.3.10	粘接(或合并) .....	107
3.4	编辑几何模型 .....	107
3.4.1	按照样本生成图元 .....	108
3.4.2	由对称映像生成图元 .....	109
3.4.3	将样本图元转换坐标系 .....	109
3.4.4	实体模型图元的缩放 .....	110
3.5	自底向上创建几何模型 .....	111
3.5.1	关键点 .....	111
3.5.2	硬点 .....	113
3.5.3	线 .....	114
3.5.4	面 .....	116
3.5.5	体 .....	117
3.6	实例——托架的实体建模 .....	119
3.6.1	分析实例描述 .....	119
3.6.2	建立模型 .....	119
3.6.3	命令流方式 .....	124
3.7	自顶向下创建几何模型(体素) .....	126
3.7.1	创建面体素 .....	126
3.7.2	创建实体体素 .....	127
3.8	实例——支座的实体建模 .....	128
3.8.1	GUI方式 .....	129
3.8.2	命令流方式 .....	136

3.9	从 IGES 文件中将几何模型导入到 ANSYS .....	138
3.10	本章小结 .....	139
<b>第 4 章</b>	<b>划分网格 .....</b>	<b>140</b>
4.1	有限元网格概论 .....	140
4.2	设定单元属性 .....	141
4.2.1	生成单元属性表 .....	141
4.2.2	在划分网格前分配单元属性 .....	142
4.3	网格划分的控制 .....	144
4.3.1	ANSYS 网格划分工具 (MeshTool) .....	144
4.3.2	单元形状 .....	145
4.3.3	选择自由或映射网格划分 .....	145
4.3.4	控制单元边中节点的位置 .....	146
4.3.5	划分自由网格时的单元尺寸控制 (SmartSizing) .....	146
4.3.6	映射网格划分中单元的默认尺寸 .....	147
4.3.7	局部网格划分控制 .....	147
4.3.8	内部网格划分控制 .....	149
4.3.9	生成过渡棱锥单元 .....	151
4.3.10	将退化的四面体单元转化为非退化的形式 .....	152
4.3.11	执行层网格划分 .....	152
4.4	自由网格划分和映射网格划分控制 .....	153
4.4.1	自由网格划分 .....	153
4.4.2	映射网格划分 .....	154
4.5	给实体模型划分有限元网格 .....	159
4.5.1	用 xMESH 命令生成网格 .....	159
4.5.2	生成带方向节点的梁单元网格 .....	160
4.5.3	在分界线或者分界面处生成单位厚度的界面单元 .....	161
4.6	实例——托架的网格划分 .....	162
4.6.1	GUI 方式 .....	162
4.6.2	命令流方式 .....	165
4.7	延伸和扫略生成有限元模型 .....	167
4.7.1	延伸 (Extrude) 生成网格 .....	167
4.7.2	扫略 (VSWEEP) 生成网格 .....	169
4.8	修正有限元模型 .....	172
4.8.1	局部细化网格 .....	172
4.8.2	移动和复制节点和单元 .....	175
4.8.3	控制面、线和单元的法向 .....	176
4.8.4	修改单元属性 .....	177
4.9	直接通过节点和单元生成有限元模型 .....	178
4.9.1	节点 .....	178
4.9.2	单元 .....	180
4.10	编号控制 .....	182



4.10.1	合并重复项 .....	182
4.10.2	编号压缩 .....	183
4.10.3	设定起始编号 .....	184
4.10.4	编号偏差 .....	185
4.11	实例——支座的网格划分 .....	185
4.11.1	GUI方式 .....	185
4.11.2	命令流方式 .....	191
4.12	本章小结 .....	193
<b>第5章</b>	<b>施加载荷</b> .....	<b>194</b>
5.1	载荷概论 .....	194
5.1.1	什么是载荷 .....	194
5.1.2	载荷步、子步和平衡迭代 .....	195
5.1.3	时间参数 .....	196
5.1.4	阶跃载荷与坡道载荷 .....	197
5.2	施加载荷 .....	197
5.2.1	实体模型载荷与有限单元载荷 .....	198
5.2.2	施加载荷 .....	198
5.2.3	轴对称载荷与反作用力 .....	204
5.2.4	利用表格来施加载荷 .....	204
5.2.5	利用函数来施加载荷和边界条件 .....	207
5.3	设定载荷步选项 .....	209
5.3.1	通用选项 .....	209
5.3.2	动力学分析选项 .....	213
5.3.3	非线性选项 .....	214
5.3.4	输出控制 .....	214
5.3.5	Biot-Savart 选项 .....	215
5.3.6	谱分析选项 .....	216
5.3.7	创建多载荷步文件 .....	216
5.4	实例——托架的载荷和约束施加 .....	217
5.4.1	GUI方式 .....	218
5.4.2	命令流方式 .....	219
5.5	本章小结 .....	220
<b>第6章</b>	<b>求解</b> .....	<b>221</b>
6.1	求解概论 .....	221
6.1.1	使用直接求解法 .....	222
6.1.2	使用稀疏矩阵直接解法求解器 .....	222
6.1.3	使用雅克比共轭梯度法求解器 .....	223
6.1.4	使用不完全分解共轭梯度法求解器 .....	223
6.1.5	使用预条件共轭梯度法求解器 .....	223
6.1.6	使用自动迭代解法选项 .....	224
6.1.7	获得解答 .....	225
6.2	利用特定的求解控制器来指定求解类型 .....	225

6.2.1	使用 Abridged Solution 菜单选项 .....	225
6.2.2	使用求解控制对话框 .....	226
6.3	多载荷步求解 .....	227
6.3.1	多重求解法 .....	227
6.3.2	使用载荷步文件法 .....	228
6.3.3	使用数组参数法 (矩阵参数法) .....	229
6.4	重新启动分析 .....	230
6.4.1	重新启动一个分析 .....	231
6.4.2	多载荷步文件的重启动分析 .....	234
6.5	预测求解时间和估计文件大小 .....	236
6.5.1	估计运算时间 .....	236
6.5.2	估计文件的大小 .....	237
6.5.3	估计内存需求 .....	237
6.6	实例——托架模型求解 .....	237
6.7	本章小结 .....	238
<b>第 7 章</b>	<b>后处理</b> .....	<b>239</b>
7.1	后处理概述 .....	239
7.1.1	什么是后处理 .....	239
7.1.2	结果文件 .....	240
7.1.3	后处理可用的数据类型 .....	240
7.2	通用后处理器 (POST1) .....	241
7.2.1	将数据结果读入数据库 .....	241
7.2.2	图像显示结果 .....	248
7.2.3	列表显示结果 .....	255
7.2.4	表面操作 .....	262
7.2.5	映射结果到某一路径上 .....	266
7.2.6	将结果旋转 to 不同坐标系中显示 .....	272
7.3	时间历程后处理 (POST26) .....	274
7.3.1	定义和储存 POST26 变量 .....	274
7.3.2	检查变量 .....	276
7.3.3	POST26 后处理器的其他功能 .....	279
7.4	实例——托架计算结果后处理 .....	280
7.4.1	GUI 方式 .....	280
7.4.2	命令流方式 .....	282
7.5	本章小结 .....	282
<b>第 8 章</b>	<b>结构静力学分析</b> .....	<b>283</b>
8.1	结构静力学概论 .....	283
8.2	结构静力学分析的基本步骤 .....	283
8.2.1	建立模型 .....	284
8.2.2	设置求解控制选项 .....	284
8.2.3	设置其他求解选项 .....	287

8.2.4	施加载荷 .....	292
8.2.5	求解 .....	294
8.2.6	检查结果 .....	295
8.3	实例——悬臂梁的横向剪切应力分析 .....	296
8.3.1	问题的描述 .....	296
8.3.2	GUI 路径模式 .....	297
8.3.3	命令流模式 .....	309
8.4	本章小结 .....	312
<b>第9章</b>	<b>模态分析</b> .....	<b>313</b>
9.1	模态分析概论 .....	313
9.2	模态分析的基本步骤 .....	313
9.2.1	建模 .....	314
9.2.2	加载及求解 .....	314
9.2.3	扩展模态 .....	317
9.2.4	观察结果和后处理 .....	319
9.3	实例——钢桁架桥模态分析 .....	319
9.3.1	问题描述 .....	319
9.3.2	GUI 操作方法 .....	320
9.3.3	命令流实现 .....	337
9.4	本章小结 .....	340
<b>第10章</b>	<b>谐响应分析</b> .....	<b>341</b>
10.1	谐响应分析概论 .....	341
10.1.1	完全法 (Full Method) .....	342
10.1.2	减缩方法 (Reduced Method) .....	342
10.1.3	模态叠加法 (Mode Superposition Method) .....	343
10.1.4	3 种方法的共同局限性 .....	343
10.2	谐响应分析的基本步骤 .....	343
10.2.1	建立模型 (前处理) .....	343
10.2.2	加载和求解 .....	344
10.2.3	观察模型 (后处理) .....	350
10.3	实例——简支梁的谐响应分析 .....	351
10.3.1	分析问题 .....	352
10.3.2	建立模型 .....	352
10.3.3	查看结果 .....	365
10.3.4	命令流模式 .....	367
10.4	本章小结 .....	369
<b>第11章</b>	<b>瞬态动力学分析</b> .....	<b>370</b>
11.1	瞬态动力学概论 .....	370
11.1.1	完全法 (Full Method) .....	371
11.1.2	模态叠加法 (Mode Superposition Method) .....	371
11.1.3	减缩法 (Reduced Method) .....	371

11.2 瞬态动力学的基本步骤	372
11.2.1 前处理(建模和分网)	372
11.2.2 建立初始条件	372
11.2.3 设定求解控制器	373
11.2.4 设定其他求解选项	375
11.2.5 施加载荷	376
11.2.6 设定多载荷步	376
11.2.7 瞬态求解	378
11.2.8 后处理	378
11.3 实例——隧道结构受力实例分析	380
11.3.1 ANSYS 隧道结构受力分析步骤	380
11.3.2 实例描述	384
11.3.3 GUI 操作方法	385
11.3.4 命令流实现	407
11.4 本章小结	412
<b>第 12 章 谱分析</b>	<b>413</b>
12.1 谱分析概论	413
12.1.1 响应谱	413
12.1.2 动力设计分析方法(DDAM)	413
12.1.3 功率谱密度(PSD)	414
12.2 谱分析的基本步骤	414
12.2.1 前处理	414
12.2.2 模态分析	415
12.2.3 谱分析	415
12.2.4 扩展模态	418
12.2.5 合并模态	419
12.2.6 后处理	421
12.3 实例——三层框架结构地震响应分析	422
12.3.1 问题描述	422
12.3.2 GUI 操作方法	423
12.3.3 命令流实现	435
12.4 本章小结	438
<b>第 13 章 非线性分析</b>	<b>439</b>
13.1 非线性分析概论	439
13.1.1 非线性行为的原因	440
13.1.2 非线性分析的基本信息	440
13.1.3 几何非线性	442
13.1.4 材料非线性	444
13.1.5 其他非线性问题	447
13.2 非线性分析的基本步骤	448
13.2.1 前处理(建模和分网)	448
13.2.2 设置求解控制器	448

13.2.3	设定其他求解选项	450
13.2.4	加载	452
13.2.5	求解	452
13.2.6	后处理	452
13.3	实例——螺栓的蠕变分析	454
13.3.1	问题描述	454
13.3.2	GUI 路径模式	455
13.3.3	命令流	462
13.4	本章小结	463
<b>第 14 章</b>	<b>结构屈曲分析</b>	<b>464</b>
14.1	结构屈曲概论	464
14.2	结构屈曲分析的基本步骤	464
14.2.1	前处理	465
14.2.2	获得静力解	465
14.2.3	获得特征值屈曲解	465
14.2.4	扩展解	467
14.2.5	后处理（观察结果）	469
14.3	实例——框架结构的屈曲分析	469
14.3.1	问题描述	469
14.3.2	GUI 模式	470
14.3.3	命令流	484
14.4	本章小结	488
<b>第 15 章</b>	<b>接触问题分析</b>	<b>489</b>
15.1	接触问题概论	489
15.1.1	一般分类	489
15.1.2	接触单元	489
15.2	接触分析的步骤	491
15.2.1	建立模型并划分网格	491
15.2.2	识别接触对	491
15.2.3	定义刚性目标面	491
15.2.4	定义柔性体的接触面	493
15.2.5	设置实常数和单元关键点	495
15.2.6	控制刚性目标的运动	496
15.2.7	给变形体单元施加必要的边界条件	496
15.2.8	定义求解和载荷步选项	497
15.2.9	求解	498
15.2.10	检查结果	498
15.3	实例——陶瓷套管的接触分析	499
15.3.1	问题描述	499
15.3.2	GUI 方式	500
15.3.3	命令流方式	516
15.4	本章小结	524

---

第 16 章 结构优化 .....	525
16.1 结构优化设计概论 .....	525
16.2 优化设计的基本步骤 .....	527
16.2.1 生成分析文件 .....	528
16.2.2 建立优化过程中的参数 .....	531
16.2.3 进入 OPT 处理器, 指定分析文件 .....	532
16.2.4 指定优化变量 .....	532
16.2.5 选择优化工具或优化方法 .....	532
16.2.6 指定优化循环控制方式 .....	533
16.2.7 进行优化分析 .....	535
16.2.8 查看设计序列结果 .....	535
16.3 实例——框架结构的优化设计 .....	536
16.3.1 问题描述 .....	536
16.3.2 GUI 方式 .....	537
16.3.3 命令流方式 .....	552
16.4 本章小结 .....	558

# 第 1 章 ANSYS 13.0 入门

## 内容提要

本章简要介绍有限元分析方法的有关理论知识，并由此引申出有限元分析软件 ANSYS 的最新版本 13.0。讲述了 ANSYS 的功能模块与新增功能，以及 ANSYS 的启动、配置与程序结构。

## 本章重点

- 有限单元法简介
- ANSYS 简介
- ANSYS 分析过程

## 1.1 有限单元法简介

有限单元法是随着电子计算机的发展而迅速发展起来的一种现代计算方法是 20 世纪 50 年代首先在连续力学领域——飞机结构静、动态特性分析中应用的一种有效的数值分析方法，随后很快就广泛地用于求解热传导、电磁场、流体力学等连续性问题。

比如用有限单元法对长圆柱体进行的变形和应力分析，采用八节点四边开等参单元把长圆柱划分成网格，这些网格称为单元。网格间相互连接的交点称为节点，网格与网格的交界线称为边界。显然，节点数是有限的，单元数目也是有限的，所以称为“有限单元”。这就是“有限元”一词的由来。

### 1.1.1 有限单元法的基本思想

有限单元法分析计算的思路和做法可归纳如下：

#### 1. 物体离散化

将某个工程结构离散为由各种联结单元组成的计算模型，这一步称作单元剖分。离散后单元与单元之间利用单元的节点相互连接起来。单元节点的设置、性质、数目等应视问题的性质，描述变形形态要根据需要和计算精度而定（一般情况，单元划分越细则描述变形情况越精确，即越接近实际变形，但计算量越大）。所以有限元法中分析的结构已不是原有的物体或结构物，而是同样的材料由众多单元以一定方式连接成的离散物体。这样，用有限元分析计算所获得的结果只是近似的。如果划分单元数目非常多而又合理，则所获

得的结果就与实际情况符合。

## 2. 单元特性分析

(1) 选择未知量模式 在有限单元法中,选择节点位移作为基本未知量时称为位移法;选择节点力作为基本未知量时称为力法;取一部分节点力和一部分节点位移作为基本未知量时称为混合法。位移法易于实现计算自动化,所以在有限单元法中位移法应用范围最广。

当采用位移法时,物体或结构物离散化之后,就可把单元中的一些物理量如位移、应变和应力等由节点位移表示。这时可以对单元中位移的分布采用一些能逼近原函数的近似函数予以描述。通常,有限元法中将位移表示为坐标变量的简单函数,这种函数称为位移模式或位移函数,如  $y = \sum_i^n a_i \varphi_i$ , 其中  $a_i$  是待定系数,  $\varphi_i$  是与坐标有关的某种函数。

(2) 分析单元的力学性质 根据单元的材料性质、形状、尺寸、节点数目、位置及其含义等,找出单元节点力和节点位移的关系式,这是单元分析中的关键一步。此时需要应用弹性力学中的几何方程和物理方程来建立力和位移的方程式,从而导出单元刚度矩阵,这是有限元法的基本步骤之一。

(3) 计算等效节点力 物体离散化后,假定力是通过节点从一个单元传递到另一个单元。但是,对于实际的连续体,力是从单元的公共边界传递到另一个单元中去的。因而,这种作用在单元边界上的表面力、体积力或集中力都需要等效地移到节点上去,也就是用等效的节点力来替代所有作用在单元上的力。

## 3. 单元组集

利用结构力的平衡条件和边界条件把各个单元按原来的结构重新连接起来,形成整体的有限元方程

$$Kq=f$$

式中  $K$ ——整体结构的刚度矩阵;

$q$ ——节点位移列阵;

$f$ ——载荷列阵。

## 4. 求解未知节点位移

求解有限元方程式(上式)得出位移。这里,可以根据方程组的具体特点来选择合适的计算方法。

通过上述分析,可以看出,有限单元法的基本思想是“一分一合”,分是为了进行单元分析;合则是为了对整体结构进行综合分析。

### 1.1.2 有限单元法的基本概念

#### 1. 有限元分析

有限元分析是利用数学近似的方法对真实物理系统(几何和载荷工况)进行模拟。利



用简单而又相互作用的元素，即单元，就可以用有限数量未知量去逼近无限未知量的真实系统。

结构分析的有限元方法是由一批学术界和工业界的研究者在 20 世纪 50 年代到 60 年代创立的。

有限元分析理论已有 100 多年的历史，现已成为悬索桥和蒸汽锅炉进行手算评核的基础。

## 2. 有限元模型

有限元模型如图 1-1 所示：图中左边的是真实的结构，右边是对应的有限元模型，有限元模型可以看做是真实结构的一种分格，即把真实结构看作是由一个个小的分块部分构成的或者在真实结构上画线，通过这些线真实结构被分离成一个个的部分。

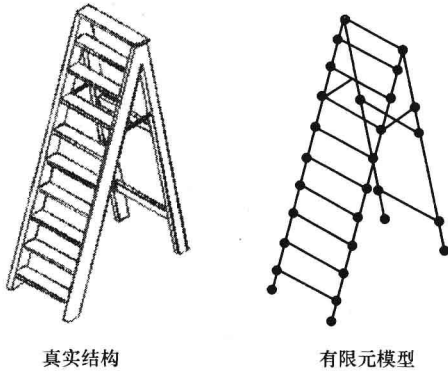


图 1-1 有限元模型

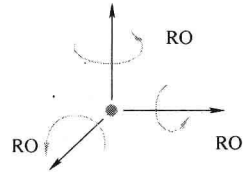


图 1-2 结构自由度 DOFs

## 3. 自由度

自由度 (DOFs) 用于描述一个物理场的响应特性。如图 1-2 所示。不同的物理场需要描述的自由度不同，如表 1-1 所示。

学科方向与自由度

表 1-1

学科方向	自由度	学科方向	自由度
结构	位移	流体	压力
热	温度	磁	磁位
电	电位		

## 4. 节点和单元

节点和单元如图 1-3 所示：

每个单元的特性是通过一些线性方程式来描述的。作为一个整体，单元形成了整体结构的数学模型。

整体结构的数学模型的规模与结构的大小有关，尽管图 1-1 中梯子的有限元模型低于 100 个方程（即“自由度”），然而在今天一个小的 ANSYS 分析就可能有 5000 个未知量，