

ANSYS

电磁场分析 (第2版)

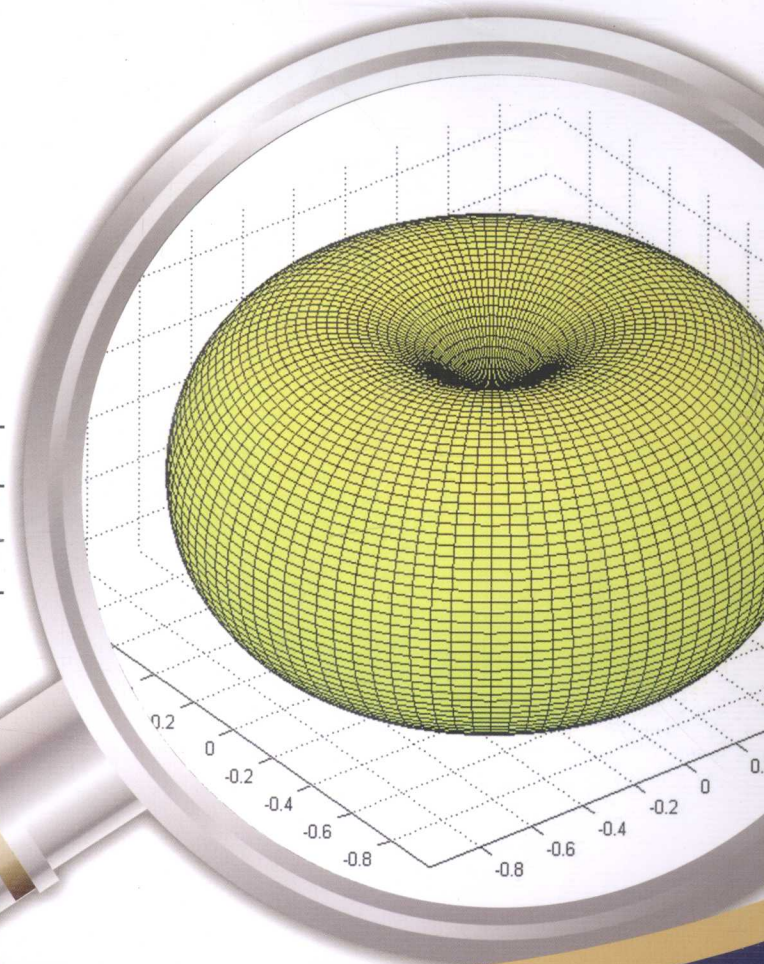
谢龙汉 李杰鸿 编著

视频教学



- ★ ANSYS——全球首选CAE分析软件
- ★ ANSYS——超强的耦合分析功能
- ★ 基础知识—典型实例—综合应用

实例视频讲解，轻松学习



中国工信出版集团



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

工程设计与分析系列

ANSYS 电磁场分析（第2版）

谢龙汉 李杰鸿 编著

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

内 容 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,可应用于众多工业领域,如航空航天、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。该软件提供了 100 种以上的单元类型,用于模拟工程中的各种结构和材料。

本书以 ANSYS 16.0 为蓝本,由浅入深、循序渐进地介绍 ANSYS 16.0 中电磁及耦合场分析知识,包括 ANSYS 概述,结构场分析,建立电磁场有限元模型,电磁场实体建模,网格化有限元模型的建立、求解和结果查看,耦合场分析,综合工程实例等知识。全书以图解的方式,通过基础知识和实例训练相结合的方式,讲解从建模到求解查看结果的基本知识和方法技巧,最后以综合实例的方式进一步向读者介绍常见电磁及耦合场分析的操作方法和操作技巧。

本书适合 ANSYS 初学者,可作为大中专院校电磁类相关专业和培训班的教材,同时对有限元仿真相关领域的专业技术人员也极有参考价值。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

ANSYS 电磁场分析 / 谢龙汉, 李杰鸿编著. —2 版. —北京: 电子工业出版社, 2015.10
(工程设计与分析系列)

ISBN 978-7-121-27119-9

I. ①A… II. ①谢… ②李… III. ①电磁场—有限元分析—应用程序 IV. ①O441.4-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 215093 号

策划编辑: 许存权

责任编辑: 许存权 特约编辑: 谢忠玉 冯彩茹

印 刷: 北京京师印务有限公司

装 订: 北京京师印务有限公司

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本: 720×1 000 1/16 印张: 22.75 字数: 582 千字

版 次: 2015 年 10 月第 1 版

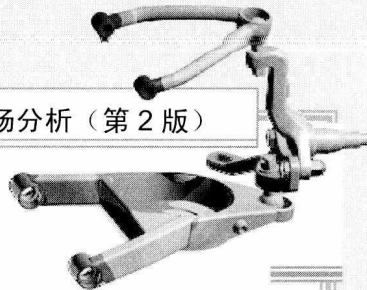
印 次: 2015 年 10 月第 1 次印刷

定 价: 59.00 元 (含 DVD 光盘 1 张)

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话: (010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线: (010) 88258888。



再版前言

“中国制造”必须向“中国创造”转变，这是社会的共识。那么，如何转变、怎么转变？其关键就是全社会广泛的自主创新。我们知道，创新的产品需要经过三个阶段：设计、分析和制造。中国经过三十年的发展，制造业得到了极大的发展，因此制造的问题基本得到了解决。设计领域在近十年来也取得了长足进步，这主要是得益于广泛普及和应用的三维设计软件，包括 CATIA、UG、Pro/E 等。创新的产品设计是自主创新的第一步，但仅仅设计还是不够的，还需要分析和优化才能获得满足要求的设计。因此，在创新设计的基础上，加入全面的设计分析和优化，是产品创新的必要和关键环节。传统的设计分析和优化大多是基于理论建模和经验分析，其主要弊端是繁琐、速度慢、且不全面，阻碍了产品创新的快速实现。随着计算机的快速发展，计算机辅助工程（Computer-Aided Engineering, CAE）提供了各种快速的分析方法，可以在三维建模的基础上，利用有限元分析技术进行全面的分析，并根据分析结果对设计进行优化，从而获得满意的设计结果。这不仅提高了设计的质量和成本，还大大缩短了产品设计的周期。

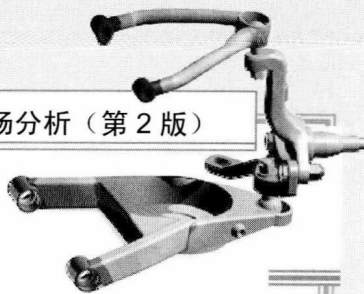
本书所涉及的基于 ANSYS 软件进行有限元分析方法，在航空航天、旋转机械、能源、石油化工、机械制造、汽车、生物技术、水处理、火灾安全、冶金、环保等领域，为全球企业解决了大量的实际问题。自 2012 年出版第 1 版以来，获得了读者的广泛欢迎，已多次重印。并且，很多读者来信介绍了他们的具体应用 ANSYS 的情况，还对我们这本书提出了很多宝贵意见和建议。在此基础上，我们根据用户的建议、结合相关企业研究使用的需求和高校的教学需求修订了第 1 版内容。第 2 版内容是在最新版本的 Ansys 16 的基础上写作的，更新了大量内容，并且也更加贴合实际应用，相信可以更好的帮助读者深入应用 ANSYS。

本书主要由谢龙汉、李杰鸿完成，参加本书编写和光盘开发的还有林伟、魏艳光、林木议、王悦阳、林伟洁、林树财、郑晓、吴苗、李翔、莫衍、朱小远、唐培培、尚涛、邓奕、张桂东、鲁力、刘文超、刘新东等，同时也非常感谢拓技工作室其他成员的帮助和支持。

由于时间仓促，书中难免有疏漏之处，请读者谅解。读者可通过电子邮件 tenlongbook@163.com 与我们交流。希望读者一如既往地支持我们，给我们提出更多的宝贵意见，让我们一起助力中国创造。

编著者

2015 年 9 月

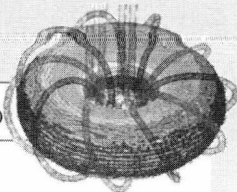


目 录

第1章 ANSYS 概述	1	1.9 怎样学习 ANSYS	24
1.1 ANSYS 概况及发展历史	1	1.10 入门引例——正方形电流环 分析	24
1.1.1 ANSYS 概况	1	1.10.1 问题描述	24
1.1.2 ANSYS 分析类型	2	1.10.2 GUI 操作	25
1.1.3 软件组成	3	1.10.3 命令流操作	38
1.1.4 ANSYS 历史介绍	4	第2章 结构场分析	40
1.2 ANSYS 16.0 系统配置要求 与安装	7	2.1 为什么先学习结构场分析	40
1.2.1 ANSYS 16.0 系统 配置要求	7	2.2 建立有限元模型	41
1.2.2 ANSYS 16.0 安装	7	2.2.1 有限元模型简介	41
1.3 有限元法简介	8	2.2.2 定义工作名称和 分析标题	41
1.3.1 有限元法分析计算的 思路和做法	8	2.2.3 定义单位	44
1.3.2 有限元分析的基本步骤	9	2.2.4 定义单元类型	44
1.3.3 有限元的发展概况	10	2.2.5 定义实常数	46
1.3.4 有限元系统基本构成	12	2.2.6 定义材料属性	48
1.4 启动 ANSYS	14	2.2.7 建立有限元模型—— 直接建模	54
1.5 ANSYS 工作界面	14	2.2.8 建立有限元模型—— 实体建模	67
1.5.1 ANSYS 输出窗口	14	2.3 划分网格	69
1.5.2 ANSYS 主窗口	15	2.3.1 网格控制	69
1.5.3 ANSYS 主菜单	15	2.3.2 网格产生	73
1.5.4 ANSYS 状态栏	16	2.4 加载负载	73
1.5.5 ANSYS 命令输入窗口	17	2.4.1 负载类型	74
1.5.6 ANSYS 图形显示窗口	17	2.4.2 施加负载	74
1.5.7 ANSYS 工具栏	17	2.5 求解	85
1.5.8 ANSYS 图像控制按钮	18	2.6 后处理器	86
1.6 ANSYS 架构	18	2.7 分析报告概述	92
1.6.1 ANSYS 架构简介	18	第3章 建立电磁场有限元模型	106
1.6.2 有关操作	20	3.1 坐标系	106
1.7 ANSYS 文件	21	3.1.1 坐标系简介	107
1.7.1 ANSYS 文件简介	21	3.1.2 总体坐标系和局部坐标系	107
1.7.2 文件操作	22		
1.8 ANSYS 与 CAD 软件接口	23		

3.2 节点操作	110	4.6.2 相交	186
3.2.1 节点的删除	110	4.6.3 相加	188
3.2.2 节点的其他生成方法	111	4.6.4 相减	188
3.2.3 节点选取	122	4.6.5 重合	191
3.3 单元操作	123	4.6.6 黏结	192
3.3.1 单元复制	123	4.7 综合实例	194
3.3.2 显示编号	124		
3.3.3 单元属性	124	第5章 网格化有限元模型的建立	200
3.4 负载定义	125	5.1 网格种类	200
3.4.1 磁场负载	125	5.2 设定单元属性	201
3.4.2 电场负载	126	5.2.1 建立单元属性表	201
3.5 求解和后处理器	134	5.2.2 赋予单元属性	201
3.5.1 电场和磁场求解	134	5.3 网格控制	202
3.5.2 后处理器	135	5.3.1 单元形状	203
3.6 综合实例	145	5.3.2 选择网格类型	204
		5.3.3 自由网格单元大小	206
第4章 电磁场实体建模	163	高级设置方法	206
4.1 实体建模简介	163	5.3.4 映射网格默认单元大小	209
4.1.1 自底向上建模	164	5.3.5 局部网格控制	214
4.1.2 自顶向下建模	164	5.3.6 内部网格控制	216
4.1.3 使用布尔操作	164	5.3.7 网格控制优先级	217
4.1.4 拖拽和旋转操作	165	5.4 自由网格和映射网格控制	217
4.1.5 移动和复制操作	165	5.4.1 面的映射网格划分	217
4.2 工作平面	165	5.4.2 体的映射网格划分	221
4.2.1 创建工作平面	166	5.5 划分实体模型	224
4.2.2 移动工作平面	166	5.5.1 产生点单元	224
4.2.3 旋转工作平面	166	5.5.2 产生线单元	224
4.3 群组命令介绍	167	5.5.3 产生面单元	225
4.4 自底向上建模	167	5.5.4 产生体单元	225
4.4.1 关键点	168	5.6 划分网格注意事项	225
4.4.2 硬点	170	5.6.1 避免尖锐角度	225
4.4.3 线	171	5.6.2 避免剧烈网格渐变	226
4.4.4 面	177	5.7 综合实例	226
4.4.5 体	178		
4.5 自顶向下建模	182	第6章 求解和结果查看	235
4.5.1 定义矩形或六面体	182	6.1 ANSYS 电磁场求解及	
4.5.2 定义环形面和柱	184	结果查看概述	236
4.6 布尔操作	186	6.2 磁场负载	236
4.6.1 布尔操作设置	186	6.2.1 永磁铁	236

6.2.2 矢量磁位·····	237	7.3.2 直接耦合法分析类型···	290
6.2.3 磁场激励·····	238	7.4 多场求解法·····	298
6.2.4 磁场标识·····	239	7.4.1 建立场模型·····	298
6.2.5 麦克斯韦面 (MXWF)·····	240	7.4.2 标识场界面条件·····	298
6.2.6 磁虚位移 (MVDI)·····	240	7.4.3 场求解·····	299
6.3 电场负载·····	248	7.5 载荷转移耦合物理场分析···	304
6.3.1 电流 (AMPS)·····	248	7.5.1 物理场环境·····	304
6.3.2 电压 (VOLT)·····	249	7.5.2 求解方法·····	304
6.3.3 电荷 (CHRG)·····	249	7.5.3 使用多物理场环境求解···	305
6.3.4 表面电荷密度 (CHRGs)·····	249	7.6 综合实例·····	305
6.3.5 无限表面标识 (INF)···	250	第 8 章 综合工程实例·····	310
6.4 求解·····	254	8.1 工程实例 1——电致 弹性分析·····	310
6.4.1 选择求解方法·····	254	8.1.1 GUI 操作·····	310
6.4.2 开始求解·····	255	8.1.2 命令流操作·····	315
6.5 查看结果·····	256	8.2 工程实例 2——二维螺线管 制动器·····	317
6.5.1 结果查看通用方法·····	256	8.2.1 GUI 操作·····	318
6.5.2 磁场力·····	264	8.2.2 命令流操作·····	325
6.5.3 查看磁场力矩·····	266	8.3 工程实例 3——屏蔽微带 传输线·····	328
6.5.4 从多导体系统中提取 电导率·····	270	8.3.1 GUI 操作·····	328
6.5.5 静电场力·····	271	8.3.2 命令流操作·····	335
6.6 综合实例·····	274	8.4 工程实例 4——带电导体球 周围电场分布·····	336
第 7 章 耦合场分析·····	284	8.4.1 GUI 操作·····	337
7.1 耦合场分析类型·····	284	8.4.2 命令流操作·····	342
7.1.1 直接耦合法·····	285	8.5 工程实例 5——二维非线性 简谐波分析·····	344
7.1.2 载荷转移法·····	285	8.6 工程实例 6——带缝导体 瞬态分析·····	351
7.1.3 ANSYS 分析类型·····	285		
7.2 多步载荷·····	287		
7.3 直接耦合法·····	290		
7.3.1 使用的单元·····	290		



第1章 ANSYS 概述

本章首先介绍 ANSYS 的发展历史及的主要特点, 然后介绍 ANSYS 的安装方法和它对系统的配置要求, ANSYS 的基本架构和工作界面等, 向读者推荐一些 ANSYS 的使用习惯和学习方法。最后通过一个入门引例, 使读者初步了解用 ANSYS 进行电磁耦合分析的步骤。



本章内容

- ANSYS 历史
- ANSYS 安装
- 有限元分析简介
- ANSYS 工作界面
- ANSYS 基本架构
- ANSYS 文件
- ANSYS 与 CAD 软件接口
- 学习 ANSYS 建议



本章案例

- 两端固定杆件受力分析
- 正方形电流环分析头

1.1 ANSYS 概况及发展历史

本节介绍 ANSYS 的基本特点和应用领域, 以及其发展历史。

1.1.1 ANSYS 概况

ANSYS 软件是融合结构、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。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。该软件提供了100种以上的单元类型，用来模拟工程中的各种结构和材料。该软件有多种不同版本，可以运行在从个人机到大型机的多种计算机设备上，如PC,SGI,HP,SUN,DEC,IBM,CRAY等。

它由世界上最大的有限元分析软件公司之一——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，如Pro/Engineer, NASTRAN, AutoCAD等。

计算机辅助工程（CAE, Computer Aided Engineering）的技术种类有很多，其中包括有限元法（FEM, Finite Element Method）、边界元法（BEM, Boundary Element Method）、有限差分法（FDM, Finite Difference Element Method）等。每一种方法各有其应用的领域，而其中有限元法应用的领域越来越广，现已应用于结构力学、结构动力学、热力学、流体力学、电路学、电磁学等。ANSYS就是一款优秀的CAE软件。

1.1.2 ANSYS 分析类型

1. 结构静力分析

结构静力学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的影响并不显著的问题。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. 结构动力学分析

结构动力学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及它对阻尼和惯性的影响。ANSYS 可进行的结构动力学分析类型包括：瞬态动力学分析、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

结构非线性导致结构或部件的响应随外载荷不成比例的变化。ANSYS 程序可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三种。

4. 动力学分析

ANSYS 程序可以分析大型三维柔体运动。当运动的积累影响起主要作用时，可使用这些功能分析复杂结构在空间中的运动特性，并确定结构中由此产生的应力、应变和变形。

5. 热分析

程序可处理热传递的三种基本类型：传导、对流和辐射。热传递的三种类型均可进行稳态和瞬态、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关分析能力，以及模拟热与结构应力之间的热——结构耦合分析能力。

6. 电磁场分析

电磁场分析主要用于电磁场问题的分析，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。还可用于螺线管、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。

7. 流体动力学分析

ANSYS 流体单元能进行流体动力学分析, 分析类型可以分为瞬态或稳态。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、流率和温度分布的图形显示。另外, 还可以使用三维表面效应单元和热一流管单元模拟结构的流体绕流并包括对流换热效应。

8. 声场分析

程序的声学功能用来研究在含有流体的介质中声波的传播, 或分析浸在流体中的固体结构的动态特性。这些功能可用来确定音响话筒的频率响应, 研究音乐大厅的声场强度分布, 或预测水对振动船体的阻尼效应。

9. 压电分析

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载荷的响应。这种分析类型可用于换热器、振荡器、谐振器、麦克风等部件及其他电子设备的结构动态性能分析。可进行四种类型的分析: 静态分析、模态分析、谐波响应分析、瞬态响应分析。

1.1.3 软件组成

软件主要包括三个部分: 前处理模块、分析计算模块和后处理模块。

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。

1. 前处理模块

ANSYS 的前处理模块主要有两部分内容: 实体建模和网格划分。

(1) 实体建模

ANSYS 程序提供了两种实体建模方法: 自顶向下与自底向上。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, 如球、棱柱, 称为基元, 程序则自动定义相关的面、线及关键点。用户利用这些高级图元直接构造几何模型, 如二维的圆和矩形及三维的块、球、锥和柱。无论使用自顶向下还是自底向上方法建模, 用户均能使用布尔运算来组合数据集, 从而“雕塑出”一个实体模型。ANSYS 程序提供了完整的布尔运算, 如相加、相减、相交、分割、黏合结和重叠。在创建复杂实体模型时, 对线、面、体、基元的布尔操作能减少相当可观的建模工作量。ANSYS 程序还提供了拖拉、延伸、旋转、移动、延伸和复制实体模型图元的功能。附加的功能还包括圆弧构造、切线构造、通过拖拉与旋转生成面和体、线与面的自动相交运算、自动倒角生成、用于网格划分的关键点的建立、移动、复制和删除。自底向上进行实体建模时, 用户从最低级的图元向上构造模型, 即用户首先定义关键点, 然后依次是相关的线、面、体。

(2) 网格划分

ANSYS 程序提供了使用便捷、高质量的对 CAD 模型进行网格划分的功能。包括四种网格划分方法: 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。映像网格划分允许用户将几何模型分解成简单的几部分,然后选择合适的单元属性和网格控制,生成映像网格。ANSYS 程序的自由网格划分器功能是十分强大的,可对复杂模型直接划分,避免了用户对各个部分分别划分然后进行组装时,各部分网格不匹配带来的麻烦。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,用户指示程序自动地生成有限元网格,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,直至误差低于用户定义的值或达到用户定义的求解次数。

2. 分析计算模块

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

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。

1.1.4 ANSYS 历史介绍

1. 早先版本

1963 年,ANSYS 的创办人 John Swanson 博士任职于美国宾州匹兹堡西屋公司的太空核子实验室。当时他的工作之一是为某个核子反应火箭作应力分析。为了工作上的需要,Swanson 博士写了一些程序来计算加载温度和压力的结构应力和变位。几年下来,建立在 Wilson 博士原有的有限元素法热传导程序上,扩充了不少三维分析的程序,包括板壳、非线性、塑性、潜变、动态全程等。此程序当时命名为 STASYS (Structural Analysis System)。

为了取代复杂的手算,Swanson 博士设想利用有限元法程序。Swanson 博士于 1969 年在临近匹兹堡的家中车库创立了他自己的公司 Swanson Analysis Systems Inc (SASI)。在这里他用打洞器在计算机输入卡上打洞写程序,并租用美国钢铁公司的大型计算机。20 世纪 70 年代结束之前,商用软件 ANSYS 宣告诞生,而西屋也成为他的第一个顾客。

1984 年,ANSYS 4.0 开始支持个人计算机。当时使用的芯片是 Intel 286,使用指令互动的模式,可以在屏幕上绘出简单的节点和元素。不过这时还没有 Motif 规格的图形界面。ANSYS 在 PC 上的第 1 版,前置处理、后置处理及求解都在不同的程序上执行。

1989 年,ANSYS 收购 Compuflo,使 ANSYS 5.0 版和 FLOTRAN 2.1A 版合并。

1996 年,ANSYS 推出 5.3 版。此版是 ANSYS 第一次支持 LS-DYNA。此时,ANSYS/LS-DYNA 仍是起步阶段。

1997~1998,ANSYS 开始向美国许多著名教授和大学实验室发送教育版,期望能在学生及学校扎根推广 ANSYS。

2001 年 12 月, ANSYS 6.0 版开始发售。此版的离散 (Sparse) 求解模块有显著的改进, 不但速度增快, 而且内存空间需求大为减小。在此版之前, ANSYS 多半建议用户使用 PCG 模块解决大型的模型。

2002 年 10 月, ANSYS 推出 7.0 版。此版的离散求解模块有更进一步的改进, 一般而言, 效率比 6.0 版提高 20%~30%。在接触分析方面亦有一些重大的改进和加强。

2. ANSYS 10.0

2005 年 7 月, ANSYS 推出 10.0 版本。此版本在性能、易用性、协同工作及耦合技术, 如流固耦合等方面有很大提高。10.0 版本是在 9.0 软件的基础上研发的, 与其有很好的兼容性。

延续了 ANSYS 一贯强大的耦合场技术, 10.0 版本为复杂的流固耦合 (FSI) 问题提供了更完善的解决方案。该版本整合了世界一流的应力分析和流体分析技术, 形成了一套完整的 FSI 解决方案。通过适合于特定场要求的网格划分, 一个单一的几何体可以应用于两种场。该版本提供了有效地解决 FSI 动力学分析的信息交换功能。目前, 市场上没有任何其他的 FSI 软件可以提供如此强大的稳健性和高度的精确性分析。另外, 该版本可以在多个机群进行并行处理解决超大模型。

为了满足日益增加的对大型复杂问题及时有效的分析需求, ANSYS 10.0 的并行求解器现今增加了对 CPU 和通信技术的选择余地。除了支持 Ethernet 和 Gigabit Ethernet, ANSYS 10.0 还支持 Myrinet 和 InfiniBand。相对于以前的架构, ANSYS 10.0 能以最低的成本满足高性能的机群计算。

本着以低成本硬件设备提供高性能解决方案的目标, ANSYS Workbench 现可支持 Windows XP 64 位机的 AMD 和 EMT64 芯片集。此项改革解决了许多用户在 Windows 操作系统下运行大型模型所面临的 2GB 内存限制的问题。另外, 它也使得 ANSYS 用户不再需要写硬盘就能完成整个求解, 从而节约求解时间。

对于用户, 这将帮助他们更加经济有效地解决大型模型问题, 如低频稳态和全瞬态电磁分析问题。ANSYS 10.0 并行求解器可以解决高于 1 亿自由度的大型电磁问题, 在 CAE 行业独树一帜。

在高频电磁领域, 10.0 版本提供了一个新的模式端口。此端口大大简化了集成电路 (IC)、射频识别 (RFID) 和射频微机电系统 (MEMS) 等多种设备分析传输线端口的建模。标准算例显示, 利用此端口建模, 可以显著缩小模型尺寸, 在保证精确的频域计算结果前提下, 节约 30%~50% 的求解时间和内存需求。

3. ANSYS 16.0

ANSYS 日前宣布推出业界领先的工程设计仿真软件最新版 ANSYS 16.0, 其独特的新功能, 为指导和优化产品设计带来了最优的方法和提供了更加综合全面的解决方案。工程仿真软件 ANSYS 16.0 在结构, 流体, 电磁, 多物理场耦合仿真、嵌入式仿真技术各方面都有重要的进展。

ANSYS 软件开发的核心目标就是提供给用户最高级和最可靠的适用于各行各业的仿真解决方案。下面的亮点展示了 ANSYS 16.0 的某些关键新技术, 可以提高用户的效率, 帮

助各大企业用户继续拓展仿真在产品开发过程中的角色。

（1）能实现电子设备的互联

电子设备连接功能的普及化、物联网发展趋势的全面化，需要对硬件和软件的可靠性提出更高的标准。最新发布的 ANSYS 16.0，提供了众多验证电子设备可靠性和性能的功能，贯穿了产品设计的整个流程，并覆盖电子行业全部供应链。在 ANSYS 16.0 中，全新推出了“ANSYS 电子设计桌面”（ANSYS Electronics Desktop）。在单个窗口高度集成化的界面中，电磁场、电路和系统分析构成了无缝的工作环境，从而确保在所有应用领域中，实现仿真的最高的生产率和最佳实践。ANSYS 16.0 中另一个重要的新功能是可以建立三维组件（3D Component）并将它们集成到更大的装配体中。使用该功能，可以很容易地构建一个无线通信系统，这对日益复杂的系统设计尤其有效。建立可以直接仿真的三维组件，并将它们存储在库文件中，这样就能够很简便地在更大的系统设计中添加这些组件，而无需再进行任何激励、边界条件和材料属性的设置，因为所有的内部细节已经包含在三维组件的原始设计之内。

（2）仿真各种类型的结构材料

减轻重量并同时提升结构性能 and 设计美感，这是每位结构工程师都会面临的挑战。薄型材料和新型材料是结构设计中经常选用的，它们也会为仿真引入一些难题。金属薄板可在提供所需性能的同时最大限度地减少材料和重量，是几乎每个行业都会采用的“传统”材料，采用 ANSYS 16.0，工程师能够加快薄型材料的建模速度，迅速定义一个完整装配体中各部件的连接方式。ANSYS 16.0 中提供了高效率的复合材料设计功能，以及实用的工具，便于更好地理解仿真结果。

（3）简化复杂流体动力学工程问题

产品变得越来越复杂，同时产品性能和可靠性要求也在不断提高，这些都促使工程师研究更为复杂的设计和物理现象。ANSYS 16.0 不仅可简化复杂几何结构的前处理 workflow，还能提速多达 40%。工程师面临多目标优化设计时，ANSYS 16.0 通过利用伴随优化技术和可实现高效率多目标设计优化，实现智能设计优化。新版 ANSYS 16.0 除了能简化复杂的设计和优化工作，还能简化复杂物理现象的仿真。对于船舶与海洋工程应用，工程师利用新版本可以仿真复杂的海洋波浪模式。旋转机械设计工程师（压缩机、水力旋转机械、蒸汽轮机、泵等）可使用傅里叶变换方法，高效率地获得固定和旋转旋转机械组件之间的相互作用结果。

（4）基于模型的系统 and 嵌入式软件开发

基于系统和嵌入式软件的创新在每个工业领域都有非常显著的增长。各大公司在该发展趋势下面临着众多挑战，尤其是如何设计研发这些复杂的系统。ANSYS 16.0 面向系统研发人员及其相应的嵌入式软件开发者提供了多项新功能。针对系统工程师，ANSYS 16.0 具备扩展建模功能，他们可以定义系统与其子系统之间复杂的操作模式。随着系统变得越来越复杂，它们的操作需要更全面的定义。系统和软件工程师可以在他们的合作项目中可以进行更好的合作，减少研发时间 and 工作量。ANSYS 16.0 增加了行为图建模方式应对此需求。在航空领域，ANSYS 16.0 针对 DO-330 的要求提供了基于模型的仿真方法，这些工具

经过 DO-178C 验证, 有最高安全要求等级。这是首个面向全新认证要求的工具。

1.2 ANSYS 16.0 系统配置要求与安装

在熟悉了 ANSYS 的基本情况的强大功能后, 本节介绍 ANSYS 16.0 的系统配置要求及其安装方法。本节介绍 ANSYS 在 Windows 下的安装方法。由于 ANSYS 安装复杂, 稍有不慎就会导致无法使用, 所以, 请读者认真阅读本小节内容, 顺利安装成功 ANSYS。

1.2.1 ANSYS 16.0 系统配置要求

在正式安装软件之前, 读者需要首先了解 ANSYS 对系统的配置要求。

平台及操作系统: Intel IA-64 bit / Windows XP 64-bit Edition Version 2003, Intel IA-32 bit/Windows XP Home or Professional (Build 2600) Version 5.1, x64 / Windows Server 2008 R2 Enterprise (64-bit), x64 / Windows HPC Server 2008-R2 (64-bit), x64 Windows Vista (64-bit)/x86 Windows Vista (32-bit), x64 Windows 7 (64-bit)/x86 Windows 7 (32-bit)/Professional and Enterprise Editions only, x64 / Windows 8 (64 bit)/Professional and Enterprise Editions only, X64 / Windows Server 2012 Standard (64/bit)

硬件要求: 至少需要 1GB 内存。磁盘剩余空间至少 19GB。

1.2.2 ANSYS 16.0 安装

插入 ANSYS 16.0 安装光盘, 出现如图 1-1 所示对话框。开始安装 ANSYS, 单击 Install ANSYS Products 按钮开始安装 ANSYS。

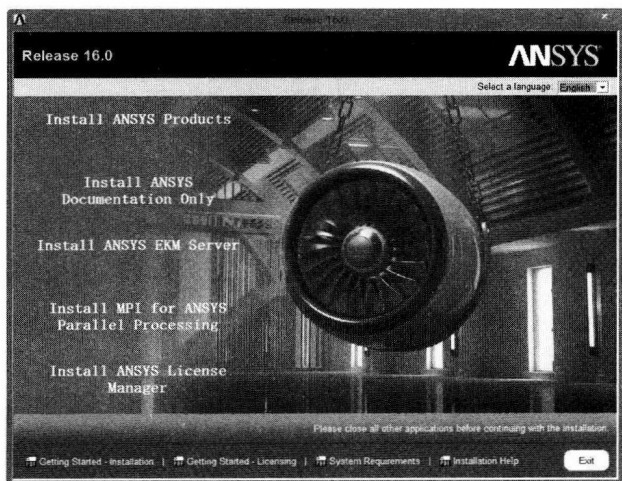


图 1-1 ANSYS 16.0 安装初始界面

之后, 选择安装目录, 如图 1-2 所示, 选择 ANSYS 的安装路径, 图中将 ANSYS 安装在 C 盘。单击 Next 按钮进行下一步安装, 选择需要的组件进行安装 (图 1-3), 然后单击 Next 按钮直到安装。

在进行 Pro/ENGINEER 的连接时勾选"Skip……"跳过连接的相关设置，在今后的再进行设置，这时那些文件位置都会变成灰色（图 1-4）。接下来其他建模软件的关联也选择“skip”。最后完成安装（图 1-5），单击 Exit 退出程序。

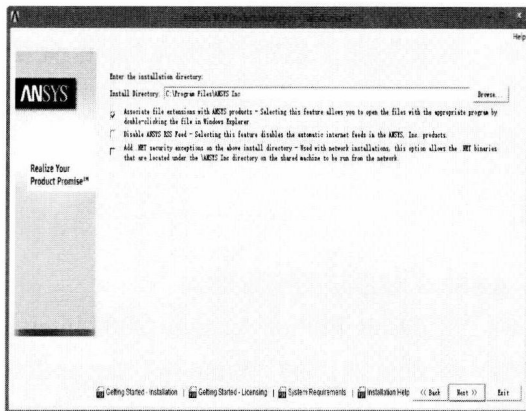


图 1-2 选择安装 ANSYS 16.0 路径

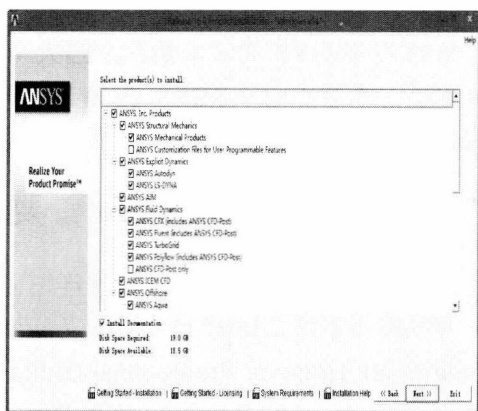


图 1-3 选择需要的组件进行安装

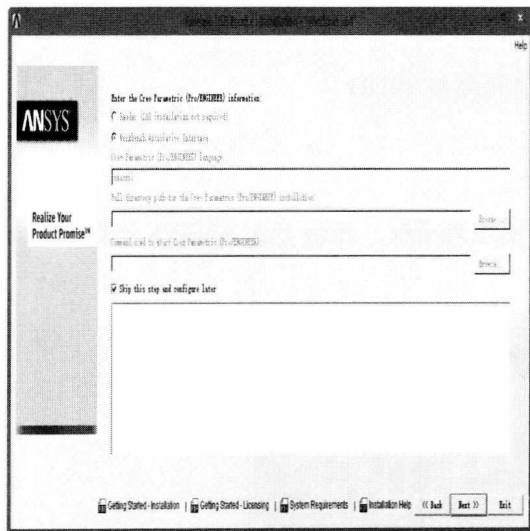


图 1-4 选择是否为 license server

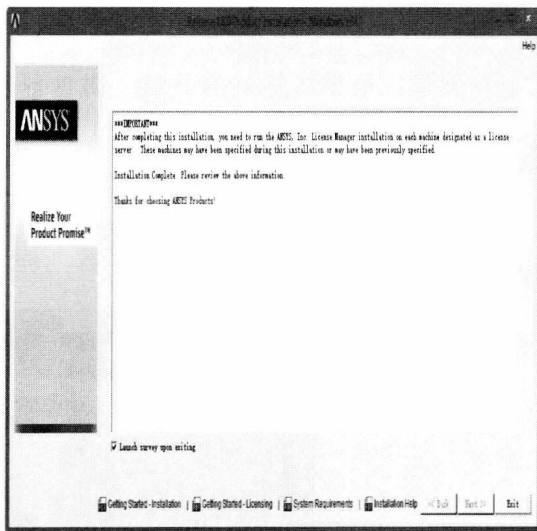


图 1-5 开始安装 license 文件

1.3 有限元法简介

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。它是 20 世纪 50 年代首先在连续体力学领域——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，随后很快广泛应用于求解热传导、电磁场、流体力学等连续性问题。

1.3.1 有限元法分析计算的思路和做法

有限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、描述变形形态的需要和计算进度而定（一般情况下，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，有限元中分析的结构已不是原有的物体或结构物，而是同新材料的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相符合。

2. 单元特性分析

选择位移模式。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，就可把单元总的一些物理量如位移、应变和应力等由节点位移来表示。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，利用有限元法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。

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。

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、体积力和集中力都需要等效的移到节点上去，也就是用等效的节点力来代替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，即

$$[\text{整体结构的刚度矩阵 } K] \times [\text{节点位移列阵 } q] = [\text{载荷列阵 } f] \quad (1.1)$$

4. 求解未知节点位移

解有限元方程式 (1.1) 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，合则为了对整体结构进行综合分析。

1.3.2 有限元分析的基本步骤

对于不同物理性质和数学模型的问题，有限元求解法的基本步骤是相同的，只是具体

公式推导和运算求解不同。有限元求解问题的基本步骤如下:

第一步问题及求解域定义。根据实际问题近似确定求解域的物理性质和几何区域。

第二步求解域离散化。将求解域近似为具有不同有限大小和形状且彼此相连的有限个单元组成的离散域,习惯上称为有限元网络划分。显然单元越小(网络越细)则离散域的近似程度越好,计算结果也越精确,但计算量及误差都将增大,因此,求解域的离散化是有限元法的核心技术之一。

第三步确定状态变量及控制方法。一个具体的物理问题通常可以用一组包含问题状态变量边界条件的微分方程表示,为适合有限元求解,通常将微分方程化为等价的泛函形式。

第四步单元推导。对单元构造一个适合的近似解,即推导有限单元的列式,其中包括选择合理的单元坐标系,建立单元试函数,以某种方法给出单元各状态变量的离散关系,从而形成单元矩阵(结构力学中称刚度阵或柔度阵)。

为保证问题求解的收敛性,单元推导有许多原则要遵循。对工程应用而言,重要的是应注意每种单元的解题性能与约束。例如,单元形状应以规则为好,畸形时不仅精度低,而且有缺秩的危险,将导致无法求解。

第五步总装求解。将单元总装形成离散域的总矩阵方程(联合方程组),反映对近似求解域的离散域的要求,即单元函数的连续性要满足一定的连续条件。总装是在相邻单元节点进行,状态变量及其导数(可能的话)连续性建立在节点处。

第六步联立方程组求解和结果解释。有限元法最终导致联立方程组。联立方程组的求解可用直接法、迭代法和随机法。求解结果是单元节点处状态变量的近似值。对于计算结果的质量,将通过与设计准则提供的允许值比较来评价并确定是否需要重复计算。

简言之,有限元分析可分成三个阶段,前处理、处理和后处理。前处理是建立有限元模型,完成单元网格划分;后处理则是采集处理分析结果,使用户能简便提取信息,了解计算结果。

1.3.3 有限元的发展概况

1943年, Courant 在论文中取定义在三角形域上的分片连续函数,利用最小势能原理研究 St.Venant 的扭转问题。

1960年, Clough 的平面弹性论文中用“有限元法”这个名称。

1970年,随着计算机和软件的发展,有限元发展起来。

实例 1-1 两端固定杆件受力分析

两端固定杆件收到轴向作用力 F_1 、 F_2 , 求固定端反作用力 R_1 、 R_2 。图 1-6(a)为所探讨的工程系统模型,图 1-6(b)为对应的有限元模型,此模型中有四个节点、三个杆件元素,外力负载及约束条件如下。

- ① 第二点受到外力 F_2 ;
- ② 第三点受到外力 F_1 ;
- ③ 第一点和第四点固定,没有位移变形。

其中, $l = 10\text{m}$, $a = b = 0.3l$, $E = 30 \times 10^6 \text{Pa}$, $F_1 = 2F_2 = 1000 \text{N}$ 。

求解步骤如下。