

融合关键概念的深入讲解与实际案例的完整分析于一体，  
操作更便捷，学习更快速！

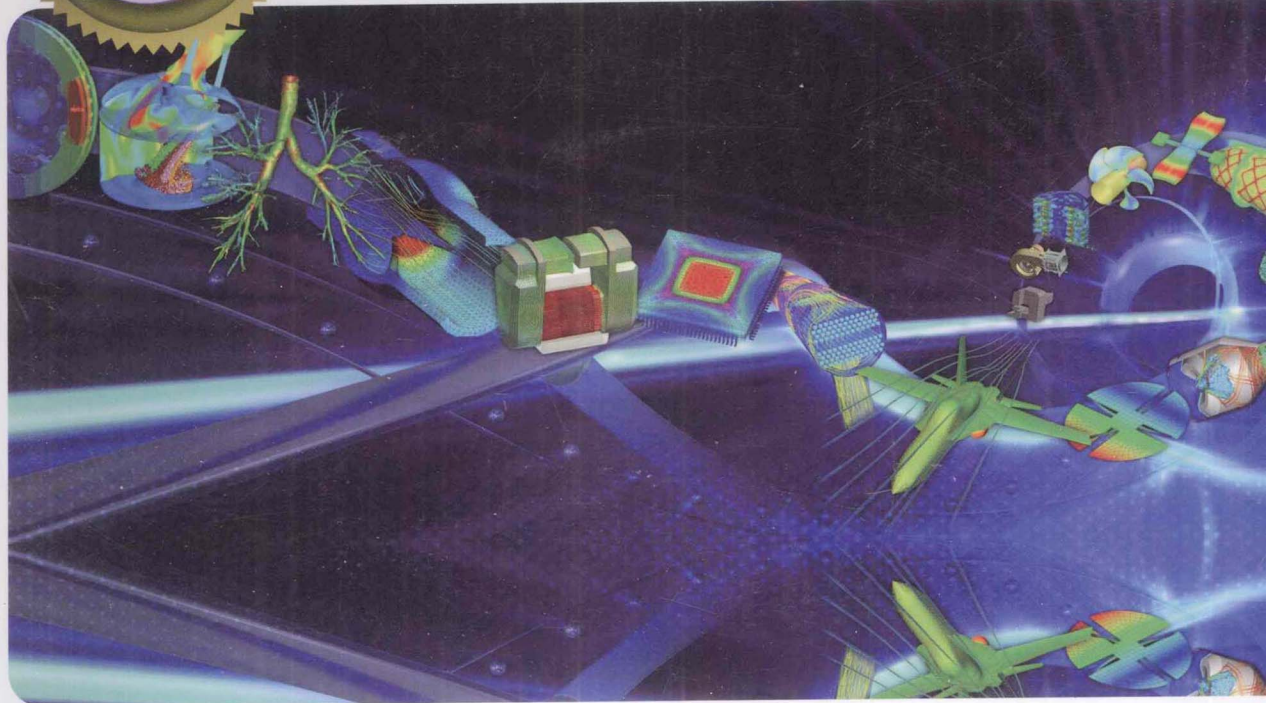


总容量达**4.36GB**

**23**个实例视频教学，总时长**385**分钟

全部实例的素材APDL源码、命令流文件

超值赠送**10**个典型工程应用实例源文件，**10**段视频教学录像，总时长达**288**分钟



# ANSYS 14

## 热力学/电磁学/耦合场分析

- ▶ 系统掌握有限元分析全流程，几何建模—划分网格—施加荷载—求解—后处理，环环相扣，一气呵成。
- ▶ 精选**17**个案例，融会贯通热、电磁及耦合场分析工程应用方法。

# 自学手册

胡仁喜 张秀辉 编著

 人民邮电出版社  
POSTS & TELECOM PRESS



# ANSYS 14

热力学/电磁学/耦合场分析

## 自学手册

胡仁喜 张秀辉 编著

人民邮电出版社

## 图书在版编目 (C I P) 数据

ANSYS 14热力学/电磁学/耦合场分析自学手册 / 胡仁喜, 张秀辉编著. — 北京: 人民邮电出版社, 2013.9  
(CAD/CAM/CAE 自学手册)  
ISBN 978-7-115-31065-1

I. ①A… II. ①胡… ②张… III. ①热力学—有限元分析—应用软件—手册②电磁学—有限元分析—应用软件—手册③耦合—有限元分析—应用软件—手册 IV. ①0414.1-39②0441-39

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第032025号

## 内 容 提 要

本书以 ANSYS14 为平台, 对 ANSYS 热力学分析、电磁学分析和耦合场分析的基本思路、操作步骤、应用技巧进行了介绍, 并结合工程应用实例讲述了 ANSYS 具体工程应用方法。

本书首先介绍了 ANSYS 软件及应用 ANSYS 进行有限元分析的例子, 随后介绍了热力学分析、电磁学分析及多物理耦合场分析, 最后以具体的工程实例深入浅出地介绍了这些技术的应用。本书中所举实例具有典型性、新颖性, 并且每个实例都先用 GUI 方式一步一步教读者如何操作, 让读者轻松地学会, 随后提供详细的命令流。

本书适合 ANSYS 的热力学、电磁学和耦合场分析的初学者和期望提高工程应用能力的读者, 也可以作为大学本科学生与研究生进行有限元分析的参考教材。本书附赠光盘的内容包括全书所有实例的程序文件和实例操作过程录屏讲解 AVI 文件。

- 
- ◆ 编 著 胡仁喜 张秀辉  
责任编辑 俞 彬  
责任印制 程彦红 杨林杰
  - ◆ 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>  
北京隆昌伟业印刷有限公司印刷
  - ◆ 开本: 787×1092 1/16  
印张: 36.75  
字数: 802 千字  
印数: 1-3 000 册
- 

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

# 前 言

有限元法作为目前工程应用较为广泛的一种数值计算方法,以其独有的计算优势得到了广泛的发展和应⤿,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。随着计算机技术的飞速发展,各种工程软件也得以广泛应用。ANSYS 软件以它的热力学、电磁学及多物理耦合场分析功能而成为 CAE 软件的应用主流,在热力、电磁及耦合场分析工程应用中得到了较为广泛的应用。

本书以 ANSYS14 为平台,对 ANSYS 热力学分析、电磁学分析和耦合场分析的基本思路、操作步骤、应用技巧进行了介绍,并结合工程应用实例讲述了 ANSYS 具体工程应用方法。

本书首先介绍了 ANSYS 软件及应用 ANSYS 进行有限元分析的例子,随后介绍了热力学分析、电磁学分析及多物理耦合场分析,最后以具体的工程实例深入浅出地介绍了这些技术的应用。本书中每个实例都先用 GUI 方式一步一步教读者如何操作,让读者轻松地学会,随后提供详细的命令流。全书分为 10 章。第 1 章介绍了 ANSYS 的概述及程序结构;第 2 章介绍了 ANSYS 的基本功能,包括图形界面、菜单栏及主菜单等;第 3 章介绍了几何建模,可以通过从其他 CAD 类软件导入或直接自主建模;第 4 章介绍了 ANSYS 的求解分析,并结合一个实例介绍 ANSYS 求解的过程;第 5 章介绍了热力学分析基础及热力学的分类;第 6 章通过几个实例详细介绍了热力学分析的步骤;第 7 章介绍了电磁学分析基础,首先是电磁学概论,然后是电磁学分析的分类;第 8 章为电磁学分析的实例部分;第 9 章介绍了 ANSYS 多物理耦合场分析的基础;第 10 章介绍了多物理耦合场分析的实例操作步骤。

理论与实践的结合是本书的最大特点之一,具有很强的可读性和实用性。

本书适合 ANSYS 的热力、电磁和耦合场分析的初学者和希望提高工程应用能力的读者,书中所举实例具有典型性、新颖性。本书配送光盘的内容包括全书所有实例的程序文件和实例操作过程录屏讲解 AVI 文件,读者可以轻松快捷地掌握 ANSYS14 进行热力、电磁及耦合场分析的操作技巧和工程应用方法。

本书由中国人民解放军军械工程学院的胡仁喜和北京理工大学的张秀辉编著。王玮、左昉、卢园、杨雪静、李志尊、刘昌丽、王义发、王玉秋、王艳池、王培合、孟培、闫聪聪、王佩楷、张日晶、王敏、康士廷等人也参加了部分编写工作。由于时间仓促、作者水平有限,书中错误、纰漏之处在所难免,欢迎广大读者、业内人士登录网站 [www.sjzsanweishuwu.com](http://www.sjzsanweishuwu.com) 或发邮件到 [win760520@126.com](mailto:win760520@126.com) 批评指正。

编 者

2013 年 3 月

# 目录

## 第1章 ANSYS 概述.....1

- 1.1 ANSYS 家族概述.....2
  - 1.1.1 CAE 的发展历程.....3
  - 1.1.2 CAE 的优越性.....4
- 1.2 有限元法简介.....5
  - 1.2.1 有限元法的基本思想.....5
  - 1.2.2 有限元法的特点.....6
- 1.3 ANSYS 简介.....7
  - 1.3.1 ANSYS 的发展.....7
  - 1.3.2 ANSYS 的功能.....7
- 1.4 ANSYS 14.0 的启动及运行.....9
  - 1.4.1 ANSYS 14.0 的启动.....9
  - 1.4.2 ANSYS 14.0 运行环境配置.....10
- 1.5 程序结构.....11
  - 1.5.1 处理器.....11
  - 1.5.2 文件格式.....12
  - 1.5.3 输入方式.....12
  - 1.5.4 输出文件类型.....12

## 第2章 ANSYS 基本功能.....14

- 2.1 ANSYS 14.0 图形用户界面的组成.....15
- 2.2 启动图形用户界面.....16
- 2.3 对话框及其组件.....17
  - 2.3.1 文本框.....17
  - 2.3.2 单选列表.....18
  - 2.3.3 双列选择列表.....18

- 2.3.4 标签对话框.....19
- 2.3.5 选取框.....19
- 2.4 菜单栏.....20
  - 2.4.1 文件菜单.....21
  - 2.4.2 选取菜单.....23
  - 2.4.3 列表菜单.....25
  - 2.4.4 绘图菜单.....29
  - 2.4.5 绘图控制菜单.....30
  - 2.4.6 工作平面菜单.....37
  - 2.4.7 参量菜单.....39
  - 2.4.8 宏菜单.....41
  - 2.4.9 菜单控制菜单.....43
  - 2.4.10 帮助菜单.....43
- 2.5 输入窗口.....45
- 2.6 主菜单.....45
  - 2.6.1 优选项.....46
  - 2.6.2 预处理器.....47
  - 2.6.3 求解器.....52
  - 2.6.4 通用后处理器.....55
  - 2.6.5 时间历程后处理器.....58
  - 2.6.6 拓扑优化器.....60
  - 2.6.7 优化器.....61
  - 2.6.8 概率设计和辐射选项.....61
  - 2.6.9 运行时间估计量.....62
  - 2.6.10 记录编辑器.....62
- 2.7 输出窗口.....63
- 2.8 工具条.....64
- 2.9 图形窗口.....64
  - 2.9.1 图形显示.....65
  - 2.9.2 多窗口绘图.....67
  - 2.9.3 增强图形显示.....70
- 2.10 个性化界面.....71
  - 2.10.1 改变字体和颜色.....71





2.10.2 改变 GUI 的启动菜单显示 ..... 71  
 2.10.3 改变菜单链接和对话框 ..... 72

**第 3 章 几何建模** ..... 73


3.1 几何模型的输入 ..... 74  
 3.1.1 输入 IGES 单一实体 ..... 74  
 3.1.2 输入 SAT 单一实体 ..... 77  
 3.1.3 输入 SAT 实体集合 ..... 79  
 3.1.4 输入 Parasolid 单一实体 ..... 83  
 3.1.5 输入 Parasolid 实体集合 ..... 86  
 3.2 对输入模型修改 ..... 89  
 3.3 自主建模 ..... 92  
 3.3.1 自顶向下建模实例 ..... 92  
 3.3.2 自底向上建模实例 ..... 101

**第 4 章 求解分析** ..... 111

4.1 分析问题 ..... 112  
 4.1.1 问题描述 ..... 112  
 4.1.2 确定问题的范围 ..... 113  
 4.2 建立有限元模型 ..... 115  
 4.2.1 创建实体模型 ..... 115  
 4.2.2 对实体模型进行网格划分 ..... 123  
 4.3 施加载荷 ..... 124  
 4.4 进行求解 ..... 128  
 4.4.1 求解器的类别 ..... 128  
 4.4.2 求解检查 ..... 128  
 4.4.3 求解的实施 ..... 129  
 4.4.4 求解会碰到的问题 ..... 130  
 4.5 后处理 ..... 130  
 4.6 分析步骤示例——工字钢悬臂梁 ..... 134  
 4.6.1 分析问题 ..... 134  
 4.6.2 建立有限元模型 ..... 134

4.6.3 施加载荷 ..... 139  
 4.6.4 进行求解 ..... 140  
 4.6.5 后处理 ..... 141  
 4.6.6 命令流 ..... 143

**第 5 章 热力学分析基础** ..... 145

5.1 热力学分析概论 ..... 146  
 5.1.1 热分析的特点 ..... 146  
 5.1.2 ANSYS 中热分析单元简介 ..... 147  
 5.1.3 热分析的基本过程 ..... 150  
 5.2 热分析的分类 ..... 152  
 5.2.1 稳态热分析 ..... 152  
 5.2.2 瞬态热分析概述 ..... 153  
 5.2.3 非线性分析综述 ..... 158  
 5.2.4 热辐射基本理论及在 ANSYS 中的  
 处理方法 ..... 169  
 5.2.5 相变基本术语 ..... 181

**第 6 章 热力学分析实例** ..... 186

6.1 稳态热分析的实例——换热管的  
 热分析 ..... 187  
 6.1.1 问题描述 ..... 187  
 6.1.2 GUI 分析过程 ..... 187  
 6.1.3 命令流方式 ..... 198  
 6.2 瞬态热分析实例——钢球淬火过程  
 温度分析 ..... 207  
 6.2.1 问题描述 ..... 207  
 6.2.2 GUI 分析过程 ..... 207  
 6.2.3 命令流方式 ..... 218  
 6.3 热应力分析实例——换热管的  
 热应力分析 ..... 223  
 6.3.1 问题描述 ..... 223

6.3.2	GUI 分析过程	223
6.3.3	命令流方式	229
6.4	热辐射分析实例——立方体坯料 空冷过程分析	229
6.4.1	问题描述	229
6.4.2	GUI 操作步骤	230
6.4.3	APDL 命令流程序	235
6.5	相变分析实例——某焊接件两焊缝 在顺序焊接过程中的分析	235
6.5.1	问题描述	235
6.5.2	GUI 操作步骤	236
6.5.3	APDL 命令流程序	246
6.6	摩擦生热分析实例——两物体相对 转动过程中的摩擦生热分析	246
6.6.1	问题描述	246
6.6.2	GUI 操作步骤	247
6.6.3	APDL 命令流程序	254

## 第 7 章 电磁学分析基础 255

7.1	电磁分析概论	256
7.1.1	ANSYS 电磁场分析对象	256
7.1.2	电磁场单元概述	257
7.1.3	电磁宏	258
7.1.4	远场单元及远场单元的使用	266
7.2	电磁学分析的分类	268
7.2.1	二维静态磁场分析	268
7.2.2	二维谐波磁场分析	272
7.2.3	二维瞬态磁场分析	276
7.2.4	三维静态磁场标量法分析	279
7.2.5	三维静态磁场棱边单元法分析	285
7.2.6	三维谐波磁场棱边单元法分析	289
7.2.7	三维瞬态磁场棱边单元法分析	294

7.2.8	三维静态、谐波和瞬态节点法分析	299
7.2.9	稳态电流传导分析	305
7.2.10	静电场分析	310
7.2.11	电路分析	316
7.2.12	高频电磁场分析	322

## 第 8 章 电磁学分析实例 330

8.1	二维静态磁场分析实例—— 二维螺线管制动器内静态磁场分析	331
8.1.1	问题描述	331
8.1.2	GUI 操作方法	332
8.1.3	命令流实现	345
8.2	二维谐波磁场分析实例—— 二维非线性谐波分析	347
8.2.1	问题描述	348
8.2.2	GUI 操作方法	348
8.2.3	命令流实现	357
8.3	二维瞬态磁场分析实例—— 带缝导体瞬态分析	359
8.3.1	问题描述	359
8.3.2	GUI 操作方法	360
8.3.3	命令流实现	374
8.4	三维静态磁场分析实例—— 棱边元法计算电机沟槽中的 静态磁场分布	380
8.4.1	问题描述	380
8.4.2	GUI 操作方法	381
8.4.3	命令流实现	391
8.5	三维谐波与瞬态磁场分析实例—— 棱边元法计算电机沟槽中的谐波与 瞬态磁场分布	391
8.5.1	问题描述	391





8.5.2 GUI 操作方法 ..... 392

8.5.3 命令流实现 ..... 403

8.6 静电场分析实例——电容计算 ..... 403

8.6.1 问题描述 ..... 403

8.6.2 GUI 操作方法 ..... 404

8.6.3 命令流实现 ..... 414

8.7 电路分析实例——瞬态电路分析 ..... 414

8.7.1 问题描述 ..... 415

8.7.2 GUI 操作方法 ..... 415

8.7.3 命令流实现 ..... 426

8.8 高频电磁场分析实例——腔体  
高频模态分析 ..... 426

8.8.1 问题描述 ..... 426

8.8.2 GUI 操作方法 ..... 427

8.8.3 命令流实现 ..... 435

**第 9 章 耦合场分析概述** ..... 436

9.1 耦合场分析的定义 ..... 437

9.2 耦合场分析的类型 ..... 437

9.2.1 直接方法 ..... 437

9.2.2 载荷传递分析 ..... 437

9.2.3 直接方法和载荷传递 ..... 438

9.2.4 其他分析方法 ..... 441

9.3 耦合场分析的单位制 ..... 441

9.4 直接耦合场分析 ..... 447

9.4.1 集总电单元 ..... 447

9.4.2 热—电分析 ..... 448

9.4.3 压电分析 ..... 449

9.4.4 电弹分析 ..... 450

9.4.5 压阻分析 ..... 451

9.4.6 结构—热分析 ..... 453

9.4.7 结构—热—电分析 ..... 455



9.4.8 磁—结构分析 ..... 456

9.4.9 电子机械分析 ..... 456

9.5 其他耦合场分析方法 ..... 462

9.5.1 MFS 单代码耦合分析 ..... 462

9.5.2 MFX 多代码耦合分析 ..... 469

9.5.3 载荷传递耦合物理分析 ..... 478

9.5.4 耦合物理电路分析 ..... 487

**第 10 章 耦合场分析实例** ..... 491



10.1 热结构耦合分析实例——  
某扁挤压筒耦合分析 ..... 492

10.1.1 问题描述 ..... 492

10.1.2 问题分析 ..... 492

10.1.3 GUI 操作步骤 ..... 493

10.1.4 APDL 命令流程序 ..... 502

10.2 热电耦合分析实例——发电机  
耦合分析 ..... 507

10.2.1 前处理 ..... 508

10.2.2 求解 ..... 517

10.2.3 后处理 ..... 518

10.2.4 命令流 ..... 520

10.3 压电耦合分析实例——压电晶片  
耦合分析 ..... 524

10.3.1 前处理 ..... 525

10.3.2 驱动模拟求解 ..... 533

10.3.3 驱动模拟后处理 ..... 533

10.3.4 感应模拟求解 ..... 534

10.3.5 感应模拟后处理 ..... 537

10.3.6 命令流 ..... 540

10.4 载荷传递耦合物理场实例分析——  
流—固耦合分析实例 ..... 540

10.4.1 创建整个区域模型 ..... 542

10.4.2 创建流体物理环境 ..... 549





10.4.3	创建结构物理环境.....	554	10.5.1	前处理 .....	565
10.4.4	流-固耦合求解.....	558	10.5.2	求解 .....	573
10.4.5	后处理.....	562	10.5.3	后处理 .....	576
10.4.6	命令流.....	564	10.5.4	命令流 .....	578
10.5	耦合物理电路模拟实例分析—— 机电-电路耦合分析实例 .....	564			

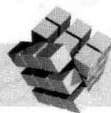






# 1.1

## ANSYS 家族概述



传统的产品设计流程往往都是首先由客户提出产品相关的规格及要求，然后由设计人员进行概念设计，接着由工业设计人员对产品进行外观设计及功能规划，之后再由工程人员对产品进行详细设计。设计方案确定以后，便进行开模等投产前置工作。由图 1-1 所示可以发现，各项产品测试皆在设计流程后期方能进行。因此，一旦发生问题，除了必须付出设计成本，而且相关前置作业也需改动，而且发现问题越晚，重新设计所付出的成本将会越高；若影响交货期或产品形象，损失更是难以估计。为了避免此情形的发生，预期评估产品的特质便成为设计人员的重要课题。

计算力学、计算数学、工程管理学特别是信息技术的飞速发展极大地推动了相关产业和学科研究的进步。有限元、有限体积及差分等方法与计算机技术相结合，诞生了新兴的跨专业和跨行业的学科。CAE（Computer Aided Engineering）作为一种新兴的数值模拟分析技术，越来越受到工程技术人员的重视。在产品开发过程中引入 CAE 技术后，在产品尚未批量生产之前，不仅能协助工程人员做产品设计，更可以在争取订单时，作为一种强有力的工具协助营销人员及管理阶层与客户沟通；在批量生产阶段，可以协助工程技术人员在重新更改时；找出问题发生的起点；在批量生产以后，相关分析结果还可以成为下次设计的重要依据。图 1-2 所示为引入 CAE 后产品设计流程图。

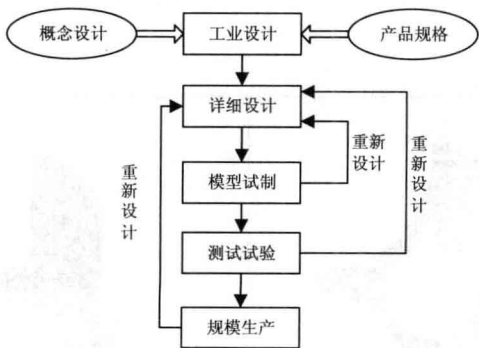


图 1-1 传统产品设计流程图

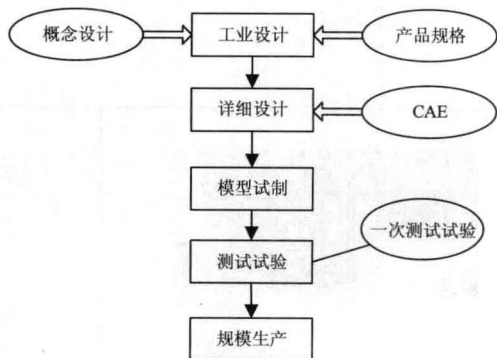


图 1-2 引入 CAE 后产品设计流程图

以电子产品为例，80%的电子产品都来自于高速撞击，研究人员往往耗费大量的时间和成本，针对产品做相关的质量试验，最常见的如落下与冲击试验。这些不仅耗费了大量的研发时间和成

本,而且试验本身也存在很多缺陷,表现在:

- (1) 试验发生的历程很短,很难观察试验过程的现象;
- (2) 测试条件难以控制,试验的重复性很差;
- (3) 试验时很难测量产品内部特性和观察内部现象;
- (4) 一般只能得到试验结果,而无法观察试验原因。

引入 CAE 后,可以在产品开模之前,透过相应软件对电子产品模拟自由落下试验 (Free Drop Test)、模拟冲击试验 (Shock Test) 以及应力应变分析、振动仿真、温度分布分析等求得设计的最佳解,进而为一次试验甚至无试验可使产品通过测试规范提供了可能。

### 1.1.1 CAE 的发展历程

CAE 的理论来源于 20 世纪 40 年代数学家 Courant 第一次尝试用定义在三角区域上的分片连续函数的最小位能原理来求解 t.Venant 扭转问题,但由于当时计算机水平的限制,CAE 并没有取得长足的发展。直到 20 世纪 60 年代,随着计算机的广泛应用和发展,有限元技术才依靠数值计算方法迅速发展起来。而真正的 CAE 软件则诞生于 70 年代初期。20 世纪 70 年代至 80 年代是 CAE 技术蓬勃发展的时期,其功能和算法也得到了进一步的扩充和完善。到了 80 年代中期,逐步形成了商品化的通用和专用 CAE 软件。到了 80 年代后期,国际上已经有了 NASTRAN、ANSYS、ABAQUS、DYN-3D、MARC 等国际知名的 CAE 软件。值得说明的是,近 20 年来是 CAE 软件商品化的迅速发展阶段。CAE 开发商为了满足市场需求和适应计算机软硬件的迅速发展,在大力推销产品的同时,对软件的内部结构和部分软件模块,特别是数据管理和图形处理,进行了重大的改造,这使得目前市场上知名的 CAE 软件在功能、性能、可靠性等方面都得到了极大的发展和提高。到目前为止,CAE 的发展经历了不到 50 年的时间,可以分成以下几个阶段。

第一阶段 (1950—1960 年) 有限元程序发展理论与算法发展阶段。

有限单元法作为 CAE 的核心,是 CAE 中应用最广泛、最成熟的方法。现代有限单元法的第一个成功尝试是在 1956 年,Turner、Clough 等人在分析飞机结构时,将钢架位移法推广应用于弹性力学平面问题,第一次给出了用三角形单元求解平面应力问题的正确答案。1960 年,Clough 进一步处理了平面弹性问题,并第一次提出了“有限单元法”,使人们认识到它的功效。这个时期的特点是人们主要致力于有限元基本理论与算法的研究,在有限元单元库的发展方面进行了大量的工作。

第二阶段 (1960—1970 年) 商业 CAE 软件开发阶段。

这个阶段在市场需求下,人们开始致力于大型商用 CAE 软件与开发,其代表是世界三大 CAE 公司的相继成立。1963 年 MSC 公司成立,开发称之为 SADSAM (Structural Analysis by Digital Simulation of Analog Methods) 结构分析软件。1965 年参与美国国家航空及宇航局 NASA 发起的计算结构分析方法研究,其程序 SADSAM 更名为 MSC/Nastran。



1967年SDRC (Structural Dynamics Research Corporation) 公司成立, 并于1968年发布世界上第一个动力学测试及模态分析软件包, 1971年推出商用有限元分析软件 Supertab (后并入 I-DEAS)。

1970年SASI (Swanson Analysis System, Inc) 公司成立, 后来重组后改为称 ANSYS 公司, 开发了 ANSYS 软件。

这些程序在可用性、可靠性和计算效率上已经基本成熟, 为大量的商业 CAE 软件系统的开发提供了坚实的基础。

第三阶段 (1970—1980年) 商业 CAE 软件完善与优化发展阶段。

20世纪70年代至80年代是 CAE 技术的蓬勃发展时期, 这期间许多 CAE 软件公司相继成立。如致力于发展用于高级工程分析通用有限元程序的 MARC 公司; 致力于机械系统仿真软件开发的 MDI 公司; 针对大结构、流固耦合、热及噪声分析的 CASR 公司, 致力于结构、流体及流固耦合分析的 ADIND 公司, 等等。

在这个时期, 有限元分析技术在结构分析和场分析领域获得了很大的成功。从力学模型开始拓展到各类物理场 (如温度场、电磁场、声波场等) 的分析, 从线性分析向非线性分析 (如材料为非线性、几何大变形导致的非线性、接触行为引起的边界条件非线性等) 发展, 从单一场的分析向几个场的耦合分析发展。出现了许多著名的分析软件如 Nastran、I-DEAS、ANSYS、IDINA、SAP 系列 DYNA3D、ABAQUS 等。软件的开发主要集中在计算精度、速度及硬件平台的匹配, 使用者多数为专家且集中在航空、航天、军事等几个领域。这些程序就结构和技术而言, 基本上都是采用结构化软件设计方法, 采用 FORTRAN 语言开发的结构化软件, 其数据管理技术尚存在一定的缺陷, 它们的运行环境仅限于当时的大型计算机和高档工作站。

第四阶段 (1970—1980年) CAD/CAE/CAM 集成和智能 CAE 阶段。

进入20世纪90年代以来, CAE 开发商为满足市场需求和适应计算机硬、软件技术的迅速发展, 对软件的功能、性能, 特别是用户界面和前后处理能力进行了大幅扩充, 对软件的内部结构和部分模块, 特别是数据管理和图形处理部分, 进行了重大改造, 从而使得它们既可以实现与 CAD、CAM 软件的无缝连接, 而且操作更加人性化。这些软件还可以在超级并行机、分布式微机群以及大、中、小、微各类计算机和各种操作系统平台上运行。从而 CAE 软件在功能、性能、可用性和可靠性以及对运行环境的适应性方面基本满足了用户的需要。

## 1.1.2 CAE 的优越性

CAE 作为一种综合应用计算力学、计算数学、信息科学等相关科学和技术的综合工程技术, 是支持工程技术人员进行创新研究和创新设计的重要工具和手段。它对教学、科研、设计、生产、管理、决策等部门都有很大的应用价值, 为此世界各国均投入了相当多的资金和人力进行研究。其重要性具体体现在以下几个方面。

(1) 从广义上讲, CAE 本身就可以看作一种基本试验。计算机计算弹体的侵彻与炸药爆炸过

程以及各种非线性波的相互作用等问题,实际上是求解含有很多线性与非线性的偏微分方程、积分方程以及代数方程等的耦合方程组。利用解析方法求解爆炸力学问题是非常困难的,一般只能考虑一些很简单的问题。利用试验方法费用昂贵,还只能表征初始状态和最终状态,中间过程无法得知,因而也无法帮助研究人员了解问题的实质。而数值模拟在某种意义上比理论与试验对问题的认识更为深刻、更为细致,不仅可以了解问题的结果,而且可随时连续动态地、重复地显示事物的发展,了解其整体与局部的细致过程。

(2) CAE 可以直观地显示目前还不易观测到的、说不清楚的一些现象,容易为人理解和分析;还可以显示任何试验都无法看到的发生在结构内部的一些物理现象。如弹体在不均匀介质侵彻过程中的受力和偏转;爆炸波在介质中的传播过程和地下结构的破坏过程。同时,数值模拟可以替代一些危险、昂贵的甚至是难于实施的试验,如反应堆的爆炸事故,核爆炸的过程与效应等。

(3) CAE 促进了试验的发展,对试验方案的科学制定、试验过程中测点的最佳位置、仪表量程等的确定提供更可靠的理论指导。侵彻、爆炸试验,费用是极其昂贵的,并且存在一定的危险,因此数值模拟不但有很大的经济效益,而且可以加速理论、试验研究的进程。

(4) 一次投资,长期受益。虽然数值模拟大型软件系统的研制需要花费相当多的经费和人力资源,但和试验相比,数值模拟软件是可以进行拷贝移植、重复利用,并可进行适当修改而满足不同情况的需求。据相关统计数据显示,应用 CAE 技术后,开发期的费用占开发成本的比例,从 80%~90% 下降到 8%~12%。

总之,CAE 已经与理论分析、试验研究成为科学技术探索研究的三个相互依存、不可缺少的手段。正如美国著名数学家拉克斯(P. Lax)所说:“科学计算是关系到国家安全、经济发展和科技进步的关键性环节,是事关国家命脉的大事。”

# 1.2

## 有限元法简介



### 1.2.1 有限元法的基本思想

在工程或物理问题的数学模型(基本变量、基本方程、求解域和边界条件等)确定以后,有限元法作为对其进行分析的数值计算方法的基本思想可简单概括为如下 3 点。

(1) 将一个表示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结点相互联结为一个组合体,如图 1-3 所示。

(2) 用每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解的未知场变量。而每个

单元内的近似函数由未知场函数（或其导数）在单元各个节点上的数值和与其对应的插值函数来表达。由于在联结相邻单元的节点上，场函数具有相同的数值，因而将它们作为数值求解的基本未知量。这样一来，求解原待求场函数的无穷多自由度问题转换为求解场函数节点值的有限自由度问题。

(3) 通过和原问题数学模型（例如基本方程、边界条件等）等效的变分原理或加权余量法，建立求解基本未知量（场函数节点值）的代数方程组或常微分方程组。此方程组成为有限元求解方程，并表示成规范化的矩阵形式，接着用相应的数值方法求解该方程，从而得到原问题的解答。

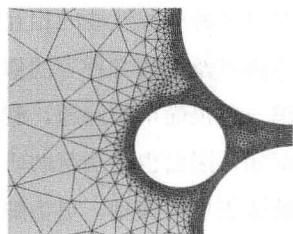


图 1-3 组合体

## 1.2.2 有限元法的特点

(1) 对于复杂几何构形的适应性：由于单元在空间上可以是一维、二维或三维的，而且每一种单元可以有不同形状，同时各种单元可以采用不同的连接方式，所以，工程实际中遇到的非常复杂的结构或构造都可以离散为由单元组合体表示的有限元模型。图 1-4 所示为一个三维实体的单元划分模型。

(2) 对于各种物理问题的适用性：由于用单元内近似函数分片地表示全求解域的未知场函数，并未限制场函数所满足的方程形式，也未限制各个单元所对应的方程必须有相同的形式，因此它适用于各种物理问题，例如线弹性问题、弹塑性问题、粘弹性问题、动力问题、屈曲问题、流体力学问题、热传导问题、声学问题、电磁场问题等，而且还可以用于各种物理现象相互耦合的问题。图 1-5 所示为一个热应力问题。



图 1-4 三维实体的单元划分模型

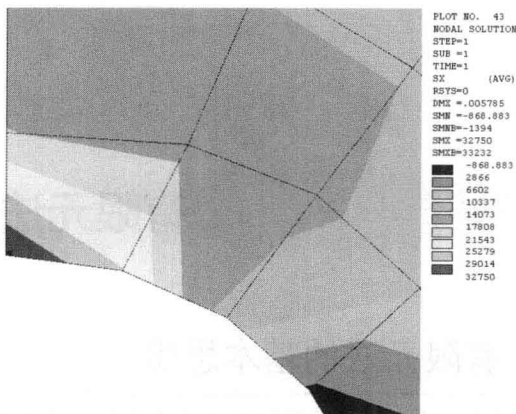


图 1-5 热应力问题

(3) 建立于严格理论基础上的可靠性：因为用于建立有限元方程的变分原理或加权余量法在数学上已证明是微分方程和边界条件的等效积分形式，所以只要原问题的数学模型是正确的，同时用来求解有限元方程的数值算法是稳定可靠的，则随着单元数目的增加（即单元尺寸的缩小）

或者是随着单元自由度数的增加（即插值函数阶次的提高），有限元解的近似程度不断地被改进。如果单元是满足收敛准则的，则近似解最后收敛于原数学模型的精确解。

4. 适合计算机实现的高效性：由于有限元分析的各个步骤可以表达成规范化的矩阵形式，最后导致求解方程可以统一为标准的矩阵代数问题，特别适合计算机的编程和执行。随着计算机硬件技术的高速发展以及新的数值算法的不断出现，大型复杂问题的有限元分析已成为工程技术领域的常规工作。

# 1.3

## ANSYS 简介



ANSYS 软件是融合结构、热、流体、电磁、声学于一体的大型通用有限元分析软件，可广泛用于核工业、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、日用家电等一般工业及科学研究。该软件可在大多数计算机及操作系统中运行，从 PC 到工作站直到巨型计算机，ANSYS 文件在其所有的产品系列和工作平台上均兼容。ANSYS 多物理耦合场的功能，允许在同一模型上进行各式各样的耦合计算成本，如：热—结构耦合、磁—结构耦合以及电—磁—流体—热耦合，在 PC 上生成的模型同样可运行于巨型机上，这样就确保了 ANSYS 对多领域多变工程问题的求解。

### 1.3.1 ANSYS 的发展

ANSYS 能与多数 CAD 软件结合使用，实现数据共享和交换，如 AutoCAD、I-DEAS、Pro/Engineer、NASTRAN、Alogor 等，是现代产品设计中的高级 CAD 工具之一。

ANSYS 软件提供了一个不断改进的功能清单，具体包括：结构高度非线性分析、电磁分析、计算流体力学分析、设计优化、接触分析、自适应网格划分、大应变/有限转动功能以及利用 ANSYS 参数设计语言 (APDL) 的扩展宏命令功能。基于 Motif 的菜单系统使用户能够通过对话框、下拉式菜单和子菜单进行数据输入和功能选择，为用户使用 ANSYS 提供“导航”。

### 1.3.2 ANSYS 的功能

#### 1. 结构分析

- 静力分析——用于静态载荷。可以考虑结构的线性及非线性行为，例如：大变形、大应变、应力刚化、接触、塑性、超弹性及蠕变等。





● 模态分析——计算线性结构的自振频率及振形，谱分析是模态分析的扩展，用于计算由随机振动引起的结构应力和应变（也叫做响应谱或 PSD）。

● 谐响应分析——确定线性结构对随时间按正弦曲线变化的载荷的响应。

● 瞬态动力学分析——确定结构对随时间任意变化的载荷的响应。可以考虑与静力分析相同的结构非线性行为。

● 特征屈曲分析——用于计算线性屈曲载荷并确定屈曲模态形状（结合瞬态动力学分析可以实现非线性屈曲分析）。

● 专项分析——断裂分析、复合材料分析、疲劳分析。

专项分析用于模拟非常大的变形，惯性力占支配地位，并考虑所有的非线性行为。它的显式方程求解冲击、碰撞、快速成型等问题，是目前求解这类问题最有效的方法。

## 2. ANSYS 热力学分析

热力学分析一般不是单独的，其后往往进行结构分析，计算由于热膨胀或收缩不均匀引起的应力。热分析包括以下类型。

● 相变（熔化及凝固）——金属合金在温度变化时的相变，如铁合金中马氏体与奥氏体的转变。

● 内热源（例如电阻发热等）——存在热源问题，如加热炉中对试件进行加热。

● 热传导——热传递的一种方式，当相接触的两物体存在温度差时发生。

● 热对流——热传递的一种方式，当存在流体、气体和温度差时发生。

● 热辐射——热传递的一种方式，只要存在温度差时就会发生，可以在真空中进行。

## 3. ANSYS 电磁分析

电磁分析中考虑的物理量是磁通量密度、磁场密度、磁力、磁力矩、阻抗、电感、涡流、耗能及磁通量泄漏等。磁场可由电流、永磁体、外加磁场等产生。磁场分析包括以下类型。

● 静磁场分析——计算直流电（DC）或永磁体产生的磁场。

● 交变磁场分析——计算由于交流电（AC）产生的磁场。

● 瞬态磁场分析——计算随时间随机变化的电流或外界引起的磁场。

● 电场分析——用于计算电阻或电容系统的电场。典型的物理量有电流密度、电荷密度、电场及电阻热等。

● 高频电磁场分析——用于微波及 RF 无源组件，波导、雷达系统、同轴连接器等。

## 4. ANSYS 流体分析

流体分析主要用于确定流体的流动及热行为。流体分析包括以下类型。

● CFD（Coupling Fluid Dynamic，耦合流体动力）——ANSYS/FLOTRAN 提供强大的计算流体动力学分析功能，包括不可压缩或可压缩流体、层流及湍流以及多组分流等。

● 声学分析——考虑流体介质与周围固体的相互作用，进行声波传递或水下结构的动力学分析等。

● 容器内流体分析——考虑容器内的非流动流体的影响。可以确定由于晃动引起的静力压力。