

ANSYS工程应用系列丛书

# ANSYS

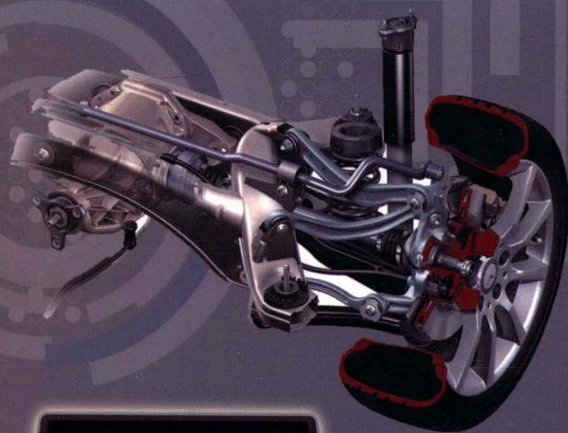
## 15.0 机械与结构有限元分析

### 从入门到精通

视频操作 ■ 源文件 ■ 最终效果

三维书屋工作室

吕建国 胡仁喜 康士廷 等编著



全面完整的知识体系  
深入浅出的理论阐述  
循序渐进的分析讲解  
实用典型的实例引导

本书包含各书目分别由ANSYS工程应用领域的专家和学者执笔编写。书中融入了他们多年研究的经验和体会，为了便于读者快速掌握ANSYS工程开发技巧，书中引用大量的工程案例。



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS

# ANSYS 15.0 机械与结构有限元分析

## 从入门到精通

三维书屋工作室

吕建国 胡仁喜 康士廷 等编著



机械工业出版社

本书以最新版本的 ANSYS15.0 为依据,对 ANSYS 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 在机械与结构工程中的应用方法。书中尽量避开了烦琐的理论叙述,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进行了讲解。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。

全书分为 10 章:第 1 章为绪论;第 2 章介绍 ANSYS15.0 图形用户界面;第 3 章介绍建立实体模型;第 4 章介绍 ANSYS 分析基本步骤;第 5 章介绍静力分析;第 6 章介绍非线性分析;第 7 章介绍动力学分析;第 8 章介绍热分析;第 9 章介绍参数化与自适应网格划分;第 10 章介绍子模型和单元的生与死。

本书适用于 ANSYS 软件的初中级用户,以及有初步使用经验的技术人员;本书可作为理工院校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,也可作为从事结构分析相关行业的工程技术人员使用 ANSYS 软件的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

ANSYS 15.0 机械与结构有限元分析从入门到精通/吕建国等编著.—3 版.

—北京:机械工业出版社,2015.3

ISBN 978-7-111-50977-6

I. ①A… II. ①吕… III. ①机械设计—有限元分析—应用软件  
IV. ①TH122-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 170869 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑:曲彩云 责任印制:康朝琦

北京中兴印刷有限公司印刷

2015 年 9 月第 3 版第 1 次印刷

184mm×260mm·27 印张·669 千字

0001—3000 册

标准书号:ISBN 978-7-111-50977-6

ISBN 978-7-89405-707-5(光盘)

定价:78.00 元(CD)

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

服务咨询热线:010-88361066

机工官网:www.cmpbook.com

读者购书热线:010-68326294

机工官博:weibo.com/cmp1952

010-88379203

金书网:www.golden-book.com

封面无防伪标均为盗版

教育服务网:www.cmpedu.com

# 前 言

现代工业的典型特征是大量使用计算机,无论是在产品的开发、设计,还是分析、制造过程中,计算机的应用都极大地提高了效率和质量。计算机辅助工程(CAE)就是其中必不可少的一个环节,它是计算机技术和现代工程方法的完美结合。

有限单元法作为数值计算方法中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。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 公司研制的大型通用有限元分析(FEA)软件,能够进行包括结构、热、声、流体以及电磁场等学科的研究,在核工业、铁道、石油化工、航空航天、机械制造、能源、交通、国防军工、电子、土木工程、造船、生物医药、轻工、地矿、水利、日用家电等领域有着广泛的应用。ANSYS 软件功能强大,操作简单方便,现在它已成为国际最流行的有限元分析软件,在历年 FEA 评比中都名列第一。目前,中国 100 多所理工院校采用 ANSYS 软件进行有限元分析或者作为标准教学软件。

本书以最新版本的 ANSYS15.0 为依据,对 ANSYS 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 在机械与结构工程中的应用方法。

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进行了讲解。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。

全书分为 10 章:第 1 章为绪论;第 2 章介绍 ANSYS15.0 图形用户界面;第 3 章介绍建立实体模型;第 4 章介绍 ANSYS 分析基本步骤;第 5 章介绍静力分析;第 6 章介绍非线性分析;第 7 章介绍动力学分析;第 8 章介绍热分析;第 9 章介绍参数化与自适应网格划分;第 10 章介绍子模型和单元的生与死。

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。

本书由三维书屋工作室总策划,由昆明理工大学城市学院吕建国以及胡仁喜和康士廷主要编写。李鹏、周冰、董伟、李瑞、王敏、刘昌丽、张俊生、王玮、孟培、王艳池、阳平华、袁涛、闫聪聪、王培合、路纯红、王义发、王玉秋、杨雪静、张日晶、卢园、王渊峰、王兵学、孙立明、甘勤涛、李兵、徐声杰、张琪、李亚莉等参加了部分章节的编写。由于时间仓促,加之编者的水平有限,不足之处在所难免,恳请专家和广大读者不吝赐教,登录 [www.sjzswsw.com](http://www.sjzswsw.com) 或联系 [win760520@126.com](mailto:win760520@126.com) 批评指正。

编 者

# 目 录

前言

|        |                           |    |
|--------|---------------------------|----|
| 第 1 章  | 绪论 .....                  | 1  |
| 1.1    | 有限单元法简介 .....             | 2  |
| 1.1.1  | 有限单元法的基本思想 .....          | 2  |
| 1.1.2  | 有限单元法的基本概型 .....          | 3  |
| 1.1.3  | 有限单元法的分析步骤 .....          | 5  |
| 1.2    | ANSYS 简介 .....            | 5  |
| 1.2.1  | ANSYS 的发展 .....           | 5  |
| 1.2.2  | ANSYS 的功能 .....           | 6  |
| 1.3    | ANSYS15.0 的启动和配置 .....    | 7  |
| 1.3.1  | ANSYS 15.0 的启动 .....      | 7  |
| 1.3.2  | ANSYS 15.0 运行环境配置 .....   | 8  |
| 1.4    | ANSYS 程序结构 .....          | 9  |
| 1.4.1  | 处理器 .....                 | 9  |
| 1.4.2  | 文件格式 .....                | 10 |
| 1.4.3  | 输入方式 .....                | 10 |
| 1.4.4  | 输出文件类型 .....              | 10 |
| 第 2 章  | ANSYS15.0 图形用户界面 .....    | 12 |
| 2.1    | ANSYS15.0 图形用户界面的组成 ..... | 13 |
| 2.2    | 启动图形用户界面 .....            | 14 |
| 2.3    | 对话框及其组件 .....             | 15 |
| 2.3.1  | 文本框 .....                 | 15 |
| 2.3.2  | 单选列表 .....                | 16 |
| 2.3.3  | 双列选择列表 .....              | 16 |
| 2.3.4  | 标签对话框 .....               | 16 |
| 2.3.5  | 选取框 .....                 | 16 |
| 2.4    | 通用菜单 .....                | 17 |
| 2.4.1  | 文件菜单 .....                | 18 |
| 2.4.2  | 选取菜单 .....                | 20 |
| 2.4.3  | 列表菜单 .....                | 22 |
| 2.4.4  | 绘图菜单 .....                | 26 |
| 2.4.5  | 绘图控制菜单 .....              | 27 |
| 2.4.6  | 工作平面菜单 .....              | 33 |
| 2.4.7  | 参量菜单 .....                | 35 |
| 2.4.8  | 宏菜单 .....                 | 38 |
| 2.4.9  | 菜单控制菜单 .....              | 40 |
| 2.4.10 | 帮助菜单 .....                | 40 |

|        |                         |     |
|--------|-------------------------|-----|
| 2.5    | 输入窗口 .....              | 42  |
| 2.6    | 主菜单 .....               | 42  |
| 2.6.1  | 优选项 .....               | 43  |
| 2.6.2  | 预处理器 .....              | 43  |
| 2.6.3  | 求解器 .....               | 48  |
| 2.6.4  | 通用后处理器 .....            | 51  |
| 2.6.5  | 时间历程后处理器 .....          | 54  |
| 2.6.6  | 记录编辑器 .....             | 56  |
| 2.7    | 输出窗口 .....              | 56  |
| 2.8    | 工具条 .....               | 57  |
| 2.9    | 图形窗口 .....              | 58  |
| 2.9.1  | 图形显示 .....              | 58  |
| 2.9.2  | 多窗口绘图 .....             | 60  |
| 2.9.3  | 增强图形显示 .....            | 62  |
| 2.10   | 个性化界面 .....             | 63  |
| 2.10.1 | 改变字体和颜色 .....           | 63  |
| 2.10.2 | 改变 GUI 的启动菜单显示 .....    | 64  |
| 2.10.3 | 改变菜单链接和对话框 .....        | 64  |
| 第 3 章  | 建立实体模型 .....            | 65  |
| 3.1    | 实例导航——几何模型的输入 .....     | 66  |
| 3.1.1  | 输入 IGES 单一实体 .....      | 66  |
| 3.1.2  | 输入 SAT 单一实体 .....       | 68  |
| 3.1.3  | 输入 SAT 实体集合 .....       | 71  |
| 3.1.4  | 输入 Parasolid 单一实体 ..... | 75  |
| 3.1.5  | 输入 Parasolid 实体集合 ..... | 77  |
| 3.2    | 实例导航——对输入模型修改 .....     | 79  |
| 3.3    | 实例导航——自主建模 .....        | 82  |
| 3.3.1  | 自顶向下建模实例 .....          | 82  |
| 3.3.2  | 自底向上建模实例 .....          | 93  |
| 第 4 章  | ANSYS 分析基本步骤 .....      | 105 |
| 4.1    | 分析问题 .....              | 106 |
| 4.1.1  | 问题描述 .....              | 106 |
| 4.1.2  | 确定问题的范围 .....           | 107 |
| 4.2    | 建立有限元模型 .....           | 109 |
| 4.2.1  | 创建实体模型 .....            | 109 |
| 4.2.2  | 对实体模型进行网格划分 .....       | 117 |
| 4.3    | 施加载荷 .....              | 119 |
| 4.4    | 进行求解 .....              | 122 |
| 4.4.1  | 求解器的类别 .....            | 122 |

|       |                           |     |
|-------|---------------------------|-----|
| 4.4.2 | 求解检查 .....                | 122 |
| 4.4.3 | 求解的实施 .....               | 123 |
| 4.4.4 | 求解会碰到的问题 .....            | 124 |
| 4.5   | 后处理 .....                 | 124 |
| 4.6   | 分析步骤示例——悬臂梁 .....         | 128 |
| 4.6.1 | 分析问题 .....                | 128 |
| 4.6.2 | 建立有限元模型 .....             | 128 |
| 4.6.3 | 施加载荷 .....                | 133 |
| 4.6.4 | 进行求解 .....                | 134 |
| 4.6.5 | 后处理 .....                 | 135 |
| 4.6.6 | 命令流 .....                 | 137 |
| 第 5 章 | 静力分析 .....                | 139 |
| 5.1   | 静力分析介绍 .....              | 140 |
| 5.1.1 | 结构静力分析简介 .....            | 140 |
| 5.1.2 | 静力分析的类型 .....             | 141 |
| 5.1.3 | 静力分析基本步骤 .....            | 141 |
| 5.2   | 平面问题静力分析实例——平面齿轮 .....    | 141 |
| 5.2.1 | 分析问题 .....                | 142 |
| 5.2.2 | 建立模型 .....                | 142 |
| 5.2.3 | 定义边界条件并求解 .....           | 155 |
| 5.2.4 | 查看结果 .....                | 158 |
| 5.2.5 | 命令流方式 .....               | 162 |
| 5.3   | 轴对称结构静力分析实例——旋转外轮 .....   | 162 |
| 5.3.1 | 分析问题 .....                | 163 |
| 5.3.2 | 建立模型 .....                | 163 |
| 5.3.3 | 定义边界条件并求解 .....           | 172 |
| 5.3.4 | 查看结果 .....                | 174 |
| 5.3.5 | 命令流方式 .....               | 178 |
| 5.4   | 周期对称结构的静力分析实例——标准齿轮 ..... | 178 |
| 5.4.1 | 分析问题 .....                | 179 |
| 5.4.2 | 建立模型 .....                | 179 |
| 5.4.3 | 定义边界条件并求解 .....           | 188 |
| 5.4.4 | 查看结果 .....                | 190 |
| 5.4.5 | 命令流方式 .....               | 196 |
| 5.5   | 任意三维结构的静力分析实例——联轴器 .....  | 196 |
| 5.5.1 | 分析问题 .....                | 196 |
| 5.5.2 | 建立模型 .....                | 197 |
| 5.5.3 | 定义边界条件并求解 .....           | 201 |
| 5.5.4 | 查看结果 .....                | 204 |

|       |                        |     |
|-------|------------------------|-----|
| 5.5.5 | 命令流方式 .....            | 209 |
| 第 6 章 | 非线性分析 .....            | 210 |
| 6.1   | 非线性分析介绍 .....          | 211 |
| 6.1.1 | 非线性分析简介 .....          | 211 |
| 6.1.2 | 非线性分析的类型 .....         | 211 |
| 6.1.3 | 非线性分析基本步骤 .....        | 212 |
| 6.2   | 几何非线性分析实例——薄圆盘 .....   | 213 |
| 6.2.1 | 分析问题 .....             | 214 |
| 6.2.2 | 建立模型 .....             | 214 |
| 6.2.3 | 定义边界条件并求解 .....        | 219 |
| 6.2.4 | 查看结果 .....             | 222 |
| 6.2.5 | 命令流方式 .....            | 227 |
| 6.3   | 材料非线性分析实例——铆钉 .....    | 227 |
| 6.3.1 | 分析问题 .....             | 227 |
| 6.3.2 | 建立模型 .....             | 228 |
| 6.3.3 | 定义边界条件并求解 .....        | 234 |
| 6.3.4 | 查看结果 .....             | 236 |
| 6.3.5 | 命令流方式 .....            | 240 |
| 6.4   | 状态非线性分析实例——齿轮啮合 .....  | 240 |
| 6.4.1 | 分析问题 .....             | 241 |
| 6.4.2 | 建立模型 .....             | 241 |
| 6.4.3 | 定义边界条件并求解 .....        | 251 |
| 6.4.4 | 查看结果 .....             | 254 |
| 6.4.5 | 命令流方式 .....            | 256 |
| 6.5   | 非线性蠕变分析实例——螺栓蠕变 .....  | 257 |
| 6.5.1 | 问题描述 .....             | 257 |
| 6.5.2 | 建立模型 .....             | 257 |
| 6.5.3 | 设置分析并求解 .....          | 260 |
| 6.5.4 | 查看结果 .....             | 263 |
| 6.5.5 | 命令流方式 .....            | 265 |
| 第 7 章 | 动力学分析 .....            | 266 |
| 7.1   | 动力分析介绍 .....           | 267 |
| 7.1.1 | 动力分析简介 .....           | 267 |
| 7.1.2 | 动力分析的类型 .....          | 267 |
| 7.1.3 | 动力分析基本步骤 .....         | 268 |
| 7.2   | 结构模态分析实例——齿轮结构 .....   | 273 |
| 7.2.1 | 分析问题 .....             | 274 |
| 7.2.2 | 建立模型 .....             | 274 |
| 7.2.3 | 进行模态设置、定义边界条件并求解 ..... | 281 |

|       |                            |     |
|-------|----------------------------|-----|
| 7.2.4 | 查看结果 .....                 | 285 |
| 7.2.5 | 命令流方式 .....                | 288 |
| 7.3   | 谐响应分析实例——吉它弦 .....         | 288 |
| 7.3.1 | 分析问题 .....                 | 289 |
| 7.3.2 | 建立模型 .....                 | 290 |
| 7.3.3 | 查看结果 .....                 | 302 |
| 7.3.4 | 命令流方式 .....                | 303 |
| 7.4   | 瞬态动力学分析实例——振动系统 .....      | 304 |
| 7.4.1 | 分析问题 .....                 | 304 |
| 7.4.2 | 建立模型 .....                 | 305 |
| 7.4.3 | 进行瞬态动力分析设置、定义边界条件并求解 ..... | 310 |
| 7.4.4 | 查看结果 .....                 | 314 |
| 7.4.5 | 命令流方式 .....                | 317 |
| 7.5   | 响应谱分析实例——平板结构 .....        | 317 |
| 7.5.1 | 分析问题 .....                 | 317 |
| 7.5.2 | 建立模型 .....                 | 318 |
| 7.5.3 | 定义边界条件并求解 .....            | 325 |
| 7.5.4 | 查看结果 .....                 | 333 |
| 7.5.5 | 命令流方式 .....                | 340 |
| 第 8 章 | 热分析 .....                  | 341 |
| 8.1   | 热分析介绍 .....                | 342 |
| 8.1.1 | 热分析的类型 .....               | 342 |
| 8.1.2 | 热分析的基本过程 .....             | 342 |
| 8.2   | 稳态热分析实例——换热管 .....         | 343 |
| 8.2.1 | 分析问题 .....                 | 343 |
| 8.2.2 | 建立模型 .....                 | 344 |
| 8.2.3 | 定义边界条件并求解 .....            | 352 |
| 8.2.4 | 查看结果 .....                 | 353 |
| 8.2.5 | 命令流方式 .....                | 354 |
| 8.3   | 瞬态热分析实例——钢球淬火 .....        | 354 |
| 8.3.1 | 分析问题 .....                 | 354 |
| 8.3.2 | 建立模型 .....                 | 355 |
| 8.3.3 | 定义边界条件并求解 .....            | 358 |
| 8.3.4 | 查看结果 .....                 | 361 |
| 8.3.5 | 命令流方式 .....                | 365 |
| 8.4   | 热电耦合分析实例——热电发电机 .....      | 365 |
| 8.4.1 | 分析问题 .....                 | 365 |
| 8.4.2 | 建立模型 .....                 | 366 |
| 8.4.3 | 定义边界条件并求解 .....            | 371 |

|        |                       |     |
|--------|-----------------------|-----|
| 8.4.4  | 查看结果 .....            | 377 |
| 8.4.5  | 命令流方式 .....           | 379 |
| 第9章    | 参数化与自适应网格划分 .....     | 380 |
| 9.1    | 参数化设计语言 .....         | 381 |
| 9.1.1  | 参数化设计语言介绍 .....       | 381 |
| 9.1.2  | 参数化设计语言的功能 .....      | 381 |
| 9.2    | 参数化设计语言实例——悬臂梁 .....  | 383 |
| 9.2.1  | 分析问题 .....            | 383 |
| 9.2.2  | 建立模型 .....            | 384 |
| 9.2.3  | 定义边界条件并求解 .....       | 387 |
| 9.2.4  | 命令流 .....             | 389 |
| 9.3    | 自适应网格划分 .....         | 390 |
| 9.3.1  | 自适应网格的条件 .....        | 391 |
| 9.3.2  | 自适应网格过程 .....         | 391 |
| 9.4    | 自适应网格划分实例——平板受热 ..... | 393 |
| 9.4.1  | 问题描述 .....            | 393 |
| 9.4.2  | 建立模型 .....            | 393 |
| 9.4.3  | 定义边界条件并求解 .....       | 397 |
| 9.4.4  | 查看结果 .....            | 399 |
| 9.4.5  | 命令流 .....             | 400 |
| 第10章   | 子模型和单元的生与死 .....      | 402 |
| 10.1   | 子模型 .....             | 403 |
| 10.1.1 | 子模型介绍 .....           | 403 |
| 10.1.2 | 子模型方法 .....           | 403 |
| 10.1.3 | 子模型过程 .....           | 404 |
| 10.2   | 单元的生和死 .....          | 407 |
| 10.2.1 | 单元的生和死介绍 .....        | 408 |
| 10.2.2 | 单元的生和死方法 .....        | 408 |
| 10.2.3 | 单元的生和死步骤 .....        | 409 |
| 10.3   | 单元的生和死实例——等截面杆 .....  | 410 |
| 10.3.1 | 分析问题 .....            | 410 |
| 10.3.2 | 建立模型 .....            | 411 |
| 10.3.3 | 命令流方式 .....           | 420 |

# 第 1 章

## 绪论

本章简要介绍有限元分析方法的有关理论基础知识,并由此引申出有限元分析软件 ANSYS 的最新版本 15.0。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。

### 学 习 要 点

- 有限单元法简介
- ANSYS 简介
- ANSYS 15.0 的启动和配置
- ANSYS 程序结构

## 1.1 有限单元法简介

### 1.1.1 有限单元法的基本思想

#### 1. 物体离散化

将某个工程结构离散为由各种连接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  $y = \sum_i^n a_i \phi_i$ ，其中  $a_i$  是待定系数， $\phi_i$  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型

#### 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,就可以用有限数量的未知量去逼近无限未知量的真实系统。

#### 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,即把真实结构看做是由一个个小的分块部分构成的或者在真实结构上划线,通过这些线真实结构被分离成一个个的部分。

#### 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,见表 1-1。

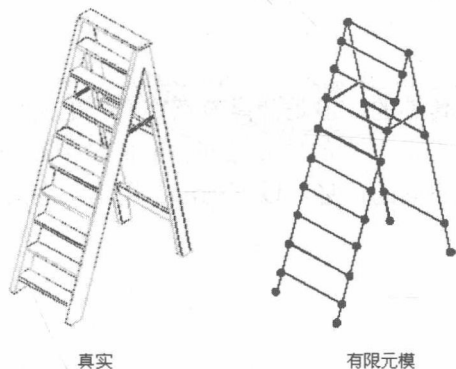


图 1-1 有限元模型

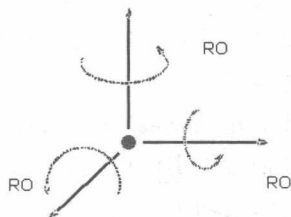


图 1-2 结构自由度 DOFs

表 1-1 学科方向与自由度

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

#### 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，矩阵可能有 25 000 000 个刚度系数。

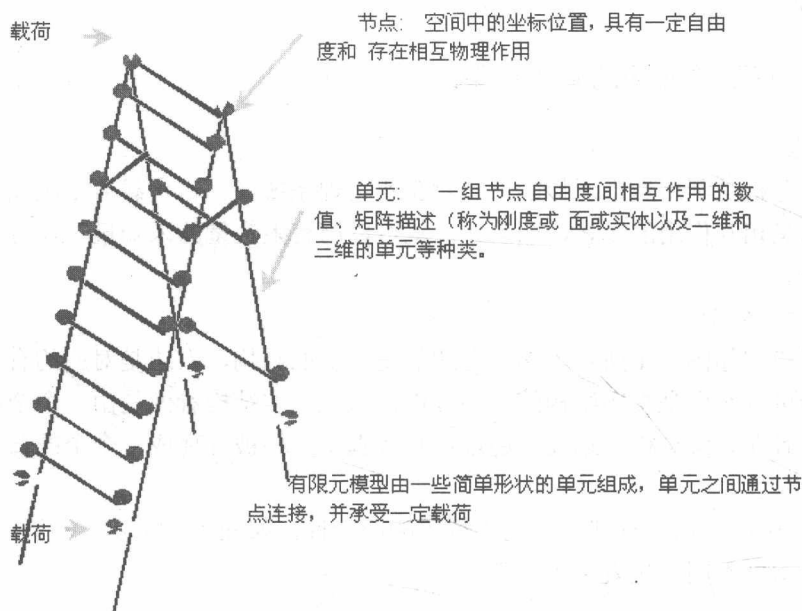


图 1-3 节点和单元

单元之间的信息是通过单元之间的公共节点传递的，但是分离节点重叠的单元和 B 之间没有信息传递（需进行节点合并处理），具有公共节点的单元之间存在信息传递，单元传递的内容是节点自由度，不同单元之间传递不同的信息。以下列出常用单元之间传递的自由度信息：

三维杆单元（铰接）UX, UY, UZ。

二维或轴对称实体单元 UX, UY。

三维实体结构单元 UX, UY, UZ。

三维梁单元 UX, UY, UZ, ROTX, ROTY, ROTZ。

三维四边形壳单元 UX, UY, UZ; ROTX, ROTY, ROTZ。

三维实体热单元 TEMP。

## 5. 单元形函数

FEA（有限单元法）仅仅求解节点处的 DOF 值。单元形函数是一种数学函数，规定了从节点 DOF 值到单元内所有点处 DOF 值的计算方法。因此，单元形函数提供一种描述单元内部结果的“形状”。单元形函数描述的是给定单元的一种假定的特性。单元形函数与真实工作特性吻合得好坏程度直接影响求解精度。

DOF 值可以精确或不太精确地等于在节点处的真实解,但单元内的平均值与实际情况吻合得很好。这些平均意义上的典型解是从单元 DOFs 推导出来的(如结构应力,热梯度)。如果单元形函数不能精确描述单元内部的 DOFs,就不能很好地得到导出数据,因为这些导出数据是通过单元形函数推导出来的。

当选择了某种单元类型时,也就十分确定地选择并接受该种单元类型所假定的单元形函数。在选定单元类型并随之确定了单元形函数的情况下,必须确保分析时有足够数量的单元和节点来精确描述所要求解的问题。

### 1.1.3 有限单元法的分析步骤

有限元分析是物理现象(几何及载荷工况)的模拟,是对真实情况的数值近似。通过对分析对象划分网格,求解有限个数值来近似模拟真实环境的无限个未知量。

ANSYS 分析过程中包含 3 个主要的步骤:

#### 1. 创建有限元模型

- (1) 创建或读入几何模型。
- (2) 定义材料属性。
- (3) 划分网格(节点及单元)。

#### 2. 施加载荷并求解

- (1) 施加载荷及载荷选项、设定约束条件。
- (2) 求解。

#### 3. 查看结果

- (1) 查看分析结果。
- (2) 检验结果(分析是否正确)。

## 1.2

ANSYS 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 多物理场耦合的功能,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计算机上,这样就确保了 ANSYS 对多领域多变工程问题的求解。

### 1.2.1 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”。

## 1.2.2 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 热分析

热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。

◆ 流体动力学耦合分析——在考虑流体约束质量的动力响应基础上，在结构动力学分析中使用流体耦合单元。

### 5. ANSYS 耦合场分析

耦合场分析主要考虑两个或多个物理场之间的相互作用。如果两个物理场之间相互影响，单独求解一个物理场是不可能得到正确结果的，因此需要一个能够将两个物理场组合到一起求解的分析软件。例如：在压电力分析中，需要同时求解电压分布（电场分析）和应变（结构分析）。

## 1.3 ANSYS15.0 的启动和配置

### 1.3.1 ANSYS 15.0 的启动

用交互式方式启动 ANSYS: 选择“开始”>“所有程序”>“ANSYS 15.0”>“Mechanical APDL 15.0”即可启动。界面如图 1-4 所示，或者选择“开始”>“程序”>“ANSYS 15.0”>“Mechanical APDL Product Launcher 15.0”进入运行环境设置，如图 1-5 所示，设置完成之后单击“Run”按钮，也可以启动 ANSYS 15.0。



图 1-4 启动 ANSYS 用户界面