

ANSYS原厂策划 万水精心出品

ANSYS高级仿真技术系列

ANSYS®



万水ANSYS技术丛书

ANSYS Workbench 结构工程高级应用

刘笑天 编著

DVD
随书附赠光盘



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

万水 ANSYS 技术丛书

ANSYS Workbench 结构工程高级应用

刘笑天 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书以 ANSYS Workbench 15.0 Mechanical 模块为基础,对自学时所需的相关知识和经验技巧进行了全面深入的讲解。

本书前 3 章讲解软件的基本操作流程和基本设置与使用方法;第 4~8 章讲解深入学习时需要了解的基础理论知识;第 9~24 章的案例以笔者参与设计的真实产品为基础,详细讲解各主要模块的用法,并在每个案例中穿插多个实用技巧和使用经验;第 25~31 章主要介绍根据计算性能和预算要求选配适合进行有限元分析的高性能计算机的内容。

本书光盘包括全部案例的计算设置源文件和两百余个牌号金属材料的线弹性物理属性汇总表两部分内容。

本书可作为高等院校理工类研究生学习 ANSYS Workbench 15.0 Mechanical 模块的教材,还可供从事静置设备结构分析设计的工程技术人员自学参考。

图书在版编目(CIP)数据

ANSYS Workbench结构工程高级应用 / 刘笑天编著

— 北京:中国水利水电出版社,2015.1

(万水ANSYS技术丛书)

ISBN 978-7-5170-2718-8

I. ①A... ①机械工程—有限元分析—应用软件 IV9-②TH-39

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第286395号

策划编辑:杨元弘

责任编辑:张玉玲

封面设计:李 佳

书 名	万水 ANSYS 技术丛书 ANSYS Workbench 结构工程高级应用
作 者	刘笑天 编著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路 1 号 D 座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: mchannel@263.net (万水) sales@waterpub.com.cn
经 售	电话: (010) 68367658 (发行部)、82562819 (万水) 北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	北京万水电子信息有限公司
印 刷	三河市铭浩彩色印装有限公司
规 格	184mm×260mm 16 开本 30.25 印张 750 千字
版 次	2015 年 4 月第 1 版 2015 年 4 月第 1 次印刷
印 数	0001—4000 册
定 价	78.00 元(赠 1DVD)

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

序

我国正处于从中国制造到中国创造的转型期，经济环境充满挑战。由于 80% 的成本在产品研发阶段确定，如何在产品研发阶段提高产品附加值成为制造企业关注的焦点。

在当今世界，不借助数字建模来优化和测试产品，新产品的的设计将无从着手。因此越来越多的企业认识到工程仿真的重要性，并在不断加强应用水平。工程仿真已在航空、汽车、能源、电子、医疗保健、建筑和消费品等行业得到广泛应用。大量研究及工程案例证实，使用工程仿真技术已经成为不可阻挡的趋势。

工程仿真是一件复杂的工作，工程师不但要有工程实践经验，同时要对多种不同的工业软件了解掌握。与发达国家相比，我国仿真应用成熟度还有较大差距。仿真人才缺乏是制约行业发展的重要原因，这也意味着有技能、有经验的仿真工程师在未来将具有广阔的职业前景。

ANSYS 作为世界领先的工程仿真软件供应商，为全球各行业提供能完全集成多物理场仿真软件工具的通用平台。对有意从事仿真行业的读者来说，选择业内领先、应用广泛、前景广阔、覆盖面广的 ANSYS 产品作为仿真工具，无疑将成为您职业发展的重要助力。

为满足读者的仿真学习需求，ANSYS 与中国水利水电出版社合作，联合国内多个领域仿真行业实战专家，出版了本系列丛书，包括 ANSYS 核心产品系列、ANSYS 工程行业应用系列和 ANSYS 高级仿真技术系列，读者可以根据自己的需求选择阅读。

作为工程仿真软件行业的领导者，我们坚信，培养用户走向成功，是仿真驱动产品设计、设计创新驱动行业进步的关键。



ANSYS 大中华区总经理

2015 年 4 月

前 言

自 ANSYS 7.0 开始, ANSYS 公司推出了 Workbench 平台。该平台是用 ANSYS 求解实际问题的新一代仿真平台, 它给 ANSYS 的求解提供了强大的功能和更好的用户界面。ANSYS Workbench 整合了世界所有主流研发技术及数据, 保持多学科技术核心多样化的同时建立统一的研发环境。

北京时间 2013 年 12 月 4 日, ANSYS (NASDAQ: ANSS) 宣布推出其业界领先的工程仿真解决方案——ANSYS 15.0, 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。

ANSYS 15.0 在结构领域有重要的进展, 创新性地开发了全新的求解器, 使计算性能大大提高, 如子空间特征值求解器, 可以加速计算结构分析中的特征模态和特征频率至 2.5 倍; 用户只要指定螺纹属性和圆柱面, 就能用接触来进行螺纹建模。不需要复杂的几何模型, 可以将多个有限元模型装配在一起, 同时保留各个模型的设置细节。

ANSYS 一直致力于提供业界领先的前处理功能, 它可以自动地完成前处理方面的工作, 同时针对一些特别的应用也保留了手动灵活控制前处理的功能。这些都得益于 ANSYS 完善的网格生成技术, 这些技术确保用户可以从容地完成各种复杂工程应用的前处理。

ANSYS 15.0 在前处理自动化和稳健性方面做了很多改进, 能帮助客户高效地执行仿真计算, 遵循最佳实践, 从而大幅提升工程设计决策的速度。ANSYS 15.0 提供的增强功能为分部件网格并行生成引擎, 可大幅缩短大型装配体的网格生成时间, 最佳可到原网格划分时间的二十七分之一。即使存在多个体或者是多个几何扫略方向的复杂情况, ANSYS 15.0 也能自动创建此类网格。

本书前 3 章以最简单的形式介绍静力学分析、模态分析、热分析模块的基本操作过程, 让读者在第一时间了解常用模块的操作流程。

第 1 章 电梯框架静力学分析案例: 介绍对商用电梯模型加载自重荷载, 分析其静态变形的案例。由于是第一个案例, 在分析前介绍了一些软件初始设置的技巧。

第 2 章 CPU 散热器热分析案例: 对一个 CPU 散热器模型加载热流荷载及对流膜传热系数边界条件后求解其温度分布的案例。

第 3 章 框架模态分析案例: 分析一个金属框架的阵型和模态频率, 其中插入了宏命令的使用技巧和一些后处理技巧。

掌握有限元技术的过程是孤独而痛苦的, 需要有外部助力, 可以借助象棋中的路数: “仙人指路”。

第 4~8 章, 在简单介绍上述 3 个案例的基本操作后系统介绍基础理论知识。

接着以真实产品工程案例为背景详细介绍 Mechanical 模块的各主要功能和在产品过程中遇到的各种问题和解决方案, 在每个案例中穿插多个软件使用技巧与笔者的实践经验。

第 9 章 冷却塔设计优化案例: 通过静力分析模块和模态分析模块对核电厂用冷却塔框架模型进行静力分析和预应力模态分析计算, 以获得结构在承受龙卷风极端工况下的响应, 通过对结果的评判发现了冷却塔结构的薄弱点, 并进行有针对性的结构加强和进一步数值分析验

证,实现了用最小的结构增重代价获得明显的加强效果;介绍静水压力载荷的施加方法、使用探针功能提取支座反力的功能和根据数值模拟结果改进结构的思路等技巧。

第 10 章 空调响应谱分析案例:以某出口空调的框架模型为例进行响应谱分析,以简单计算结构的抗震性能;介绍适合观察模型内部情况的切片功能、选择被遮挡位置表面、选择过滤器的使用和方便实现数值模拟标准化、流水线化分析的创建分析模板的方法等技巧。

第 11 章 核电空调随机振动分析案例:对某核电站用空调的框架模型加载中国军用环境实验标准中振动试验标准所规定的功率谱密度来演示 ANSYS Workbench 15.0 机械设计模块中随机振动分析模块的基本操作过程;介绍导入模型的另一种方法、抑制部分不需要参与计算的零件的方法和提取单个零件变形值的方法、压缩项目文件以利于数据传递等技巧。

第 12 章 风机桥架谐响应分析案例:以某大型轴流风机桥架为模型介绍谐响应的操作;介绍插入质量点的设置和与 Solidworks 软件配合计算质量点惯性矩的技巧,并插入使用弱弹簧和模态分析功能检查模型尺寸与连接正确性的方法。

第 13 章 网格无关解案例:有限元结果一般是存在离散误差的,本案例以一个 L 形模型进行简单静力学分析,介绍通过 5 种细化网格和一种定义结果收敛值来获得应力的网格无关解的方法;介绍人体大脑的基本情况和如何让大脑更高效地工作的有关知识。

第 14 章 发动机叶片周期扩展分析案例:以英国劳斯莱斯公司斯贝航空发动机 1 级压气机叶片模型为例进行静态力学分析,以简单介绍 ANSYS Workbench 15.0 静力学分析模块的操作和使用;介绍对旋转对称部件进行简化分析时使用圆周期扩展功能的操作方法和两种生成高分辨率截图的技巧。

第 15 章 性能试验台子模型技术案例:以一个在建的风洞试验台模型的局部为例介绍子模型功能的操作并对比了完整模型和子模型的计算时间和求解结果。

第 16 章 设计助手案例:介绍使用设计助手功能进行多工况结果叠加的操作技巧和 DM 模块生成点焊接触、添加随公式函数变化载荷的技巧。

第 17 章 等强度梁优化设计分析案例:使用 Solidworks 软件建立三维“等强度”梁模型,直接导入静力学分析模块和优化设计模块,对模型进行参数化优化设计,以获取在承受规定载荷作用下实现最小结构重量及最小变形量的尺寸方案;介绍网格质量评定的方法和为了获取高质量网格而切分模型的几个基本思路。

第 18 章 等强度梁形状优化分析案例:以等强度梁模型为例介绍 Workbench 15.0 平台中形状优化模块的使用方法;介绍在 Solidworks 软件中对模型进行分割操作的具体做法、加载倾斜方向载荷的方法和切片功能的使用等技巧。

第 19 章 压力容器静力学分析案例:介绍压力行业专有的理论基础知识并结合某压力容器产品模型介绍静力学分析下应力线性化评定的过程;介绍两种提取模型任意断面结果平均值的技巧和设置材料物理属性的方法及切片功能的使用。

第 20 章 压力容器弹塑性分析案例:介绍基于 ASME VIII-2《压力容器建造另一种规则》中用于防止局部失效分析时采用的“真实”应力—应变关系弹塑性材料非线性直接法的一种简化应用;介绍施加单值函数正弦规律变化的位移载荷等技巧。

第 21 章 钢结构立柱线性屈曲分析案例:对某系列产品的钢结构立柱模型进行线性屈曲分析,以计算受压时的稳定性,确定屈曲系数;介绍输出结果动画的功能、提取单一零件结果的技巧和对模型进行压缩和隐藏的技巧等。

第 22 章 排气管道非线性屈曲分析案例：采用电厂某辅机中设备蒸汽分配管的简化模型进行基于微小扰动的非线性屈曲分析，以计算在外压作用下该结构承载力的极限值；介绍利用 FE 模块与更新结果命令提取模型变形前后重心值的技巧和利用 FE 模块查看网格质量统计图的技巧等。

第 23 章 螺纹接触分析案例：介绍 ANSYS Workbench 15.0 中采用简化的螺纹接触方法分析带螺纹部件的新功能；介绍设置环境光线效果、15.0 版中的部分新功能、3 种常见错误的解决方法、对模型等比例放大、解决求解结束后 CPU 占用率仍然过高的问题、查找某零件包含的接触等。

第 24 章 热-结构耦合分析案例：以文字模型为例建立三维模型，进行热-结构耦合分析，以简单介绍 ANSYS Workbench 15.0 的耦合分析功能。

随着用户基础理论知识与软件操作经验的不断积累和分析规模与分析内容的不断扩大与深入，现有的硬件平台也许不再能够满足要求，从而需要升级硬件或购买全新计算机。正所谓：“工欲善其事，必先利其器”。为了帮助用户更好地将软件对性能的需求与硬件条件对接，专门编写了高性能计算机硬件选择方法这部分内容（第 25~31 章）。

掌握任何一项高级技能的过程都是孤独、艰辛而痛苦的。希望读者放平心态、回归基本、坚定信念、不惧艰险、刻苦学习、不断练习、不怕失败，以在无数次失败的量变中实现成功的质变，最终达到“资之深，则取之左右逢其源”。

本书主要由哈尔滨空调股份有限公司的刘笑天编写，另外参加部分编写工作的还有孙淑明、刘珂、孙喜新、高德元、王德才、常皓封、王燕、孟庆国和章启胜等。感谢哈尔滨空调股份有限公司前空调设计部部长刘晓（高级工程师）、中国机械工程学会机械工业自动化分会培训中心曹宏博副主任（博士）、长春装甲兵技术学院张洪才（教授）给予的指导和支 持，感谢中国仿真互动网（www.simwe.com）和广大网友。

由于作者水平有限，书中疏漏甚至错误之处在所难免，恳请广大读者批评指正，邮箱：371968291@qq.com。

作 者

2015 年 2 月

目 录

前言

第1章 电梯框架静力学分析案例	1	5.4.2 弹性比功	82
1.1 案例介绍	1	5.4.3 弹性的不完整性	83
1.2 分析流程	1	5.4.4 弹性滞后和循环韧性	84
第2章 CPU散热器热分析案例	21	5.4.5 塑性变形	84
2.1 案例介绍	21	5.5 强度理论	91
2.2 分析流程	21	第6章 传热学、流体力学及热应力计算	
第3章 框架模态分析案例	37	理论基础	93
3.1 案例介绍	37	6.1 对流传热	94
3.2 分析流程	37	6.2 导热传热	95
第4章 有限元单元法概述	50	6.3 辐射传热	96
4.1 常用数值解法	50	6.4 传热问题的有限元分析式	96
4.2 有限元法的起源和发展	51	6.4.1 热应力的计算	98
4.3 有限元法的用途	51	6.4.2 热应力问题的有限元分析列式	98
4.4 有限元法的优势	53	第7章 动力学分析基础知识	99
4.5 数值分析的发展与用途	54	7.1 动力学问题的产生	99
4.6 有限元分析的实现	55	7.2 振动的分类	100
4.6.1 分析模型的组成	56	7.2.1 特殊的“地面共振”现象	101
4.6.2 单元及其特征	58	7.2.2 振动对人体的影响	102
4.6.3 刚度矩阵的性质	60	7.3 结构特征值的提取	102
4.6.4 边界条件的处理与支座反力的计算	61	7.3.1 问题的产生	102
4.6.5 单元节点编号与存储带宽	61	7.3.2 特征值求解器的比较	103
4.6.6 误差处理及控制	62	7.3.3 频率输出	104
4.6.7 线弹性力学的变分原理	72	7.4 模态叠加法	104
4.7 有限元程序的结构及特点	75	7.4.1 基本概念	104
4.7.1 自动与半自动网格生成方法的		7.4.2 适用范围	105
综合分类	77	7.5 阻尼	105
4.7.2 网格自适应细分与后验误差估计	78	7.5.1 引言	105
第5章 材料力学理论基础	80	7.5.2 定义阻尼	106
5.1 概述	80	7.5.3 阻尼的选择	106
5.2 变形体	80	7.6 稳态动力学分析	107
5.3 弹性力学的基本假设	80	7.6.1 稳态动力学分析简介	107
5.4 金属材料的力学性能	81	7.6.2 反应谱分析的基本理论与方法	108
5.4.1 弹性模量的概念与性质	82	7.6.3 随机振动及其特性	117

7.7 瞬态动力学分析	119	第 12 章 风机桥架谐响应分析案例	189
7.7.1 瞬态动力学分析的预备工作	120	12.1 案例介绍	189
7.7.2 瞬态动力学分析的关键技术细节	120	12.2 分析流程	189
7.8 屈曲分析	122	第 13 章 网格无关解案例	203
7.8.1 结构稳定性概述	122	13.1 案例介绍	203
7.8.2 物理现象	122	13.2 分析流程	203
7.8.3 力学描述	124	第 14 章 发动机叶片周期扩展分析案例	217
7.8.4 失稳的分类	124	14.1 案例介绍	217
第 8 章 接触问题	126	14.2 分析流程	217
8.1 接触行为	126	第 15 章 性能试验台子模型技术案例	234
8.2 接触算法	127	15.1 案例介绍	234
8.2.1 增广拉格朗日法	129	15.2 分析流程	234
8.2.2 纯罚函数法	129	第 16 章 设计助手案例	247
8.2.3 多点约束法	129	16.1 案例介绍	247
8.2.4 纯拉格朗日法	130	16.2 分析流程	247
8.3 迭代计算的收敛性控制	130	第 17 章 等强度梁优化设计分析案例	263
8.4 接触摩擦	132	17.1 案例介绍	263
8.5 接触刚度	132	17.2 分析流程	263
8.6 接触容差	134	第 18 章 等强度梁形状优化分析案例	284
8.7 Pinball 区域	135	18.1 案例介绍	284
8.8 其他常用的接触方式及设置	137	18.2 分析流程	284
8.8.1 刚—柔接触	137	第 19 章 压力容器静力学分析案例	294
8.8.2 螺栓预紧连接	137	19.1 案例介绍	294
8.8.3 点焊结构分析	138	19.2 分析流程	294
8.8.4 接触裁剪功能	139	第 20 章 压力容器弹塑性分析案例	317
8.8.5 对称与非对称接触	139	20.1 案例介绍	317
8.8.6 接触分析中可插入的命令	140	20.2 分析流程	317
8.9 接触时间步控制	140	第 21 章 钢结构立柱线性屈曲分析案例	333
8.10 接触热分析	141	21.1 案例介绍	333
8.11 接触分析后处理	142	21.2 分析流程	333
第 9 章 冷却塔设计优化案例	144	第 22 章 排气管道非线性屈曲分析案例	345
9.1 案例介绍	144	22.1 案例介绍	345
9.2 分析流程	144	22.2 分析流程	345
第 10 章 空调响应谱分析案例	160	第 23 章 螺纹接触分析案例	361
10.1 案例介绍	160	23.1 案例介绍	361
10.2 分析流程	160	23.2 分析流程	361
第 11 章 核电空调随机振动分析案例	175	第 24 章 热—结构耦合分析案例	375
11.1 案例介绍	175	24.1 案例介绍	375
11.2 分析流程	175	24.2 分析流程	375

第 25 章 内存	392	27.8 XEON 处理器的命名体系和产品线	419
25.1 内存容量	392	第 28 章 主板	421
25.2 运行频率与通道数	393	28.1 单路主板	422
25.3 ECC 功能	394	28.2 双路主板	424
25.3.1 ECC 纠错算法	395	28.3 四路主板	424
25.3.2 ECC 内存认识误区	395	第 29 章 GPU 及 XEON Phi	426
25.4 品牌	396	29.1 GPU 通用计算	427
第 26 章 硬盘	397	29.2 多核计算的发展	428
26.1 固态硬盘简介	397	29.3 CPU 多核并行	428
26.2 固态硬盘的性能优点	398	29.4 CPU+GPU 异构并行	429
26.3 墨菲法则	398	29.5 GPU 渲染流水线	429
26.4 固态硬盘的缺点	399	29.6 Nvidia GPU 简介	430
26.5 新固态硬盘的基本设置	400	29.7 CUDA 开发	430
26.6 固态硬盘读写性能高的原因	401	29.8 图形显卡概览	431
26.7 影响固态硬盘性能的主要方面	402	29.9 CUDA 程序优化概述	432
第 27 章 处理器	404	第 30 章 笔者亲自测试的数据	433
27.1 摩尔定律	405	30.1 内存的专项测试数据	434
27.2 CPU 散热器的选择	406	30.2 硬盘的专项测试数据	436
27.3 CPU 的制造	407	30.3 CPU 的专项测试数据	439
27.4 14 款处理器的性能测试成绩	409	30.4 三款计算机 Solidworks 性能专项 测试数据	440
27.5 CPU 品牌选择	411	第 31 章 HP 公司 Z820 工作站的测试结果	443
27.5.1 浮点运算能力	411	附录 金属材料线弹性物理属性汇总表	445
27.5.2 内存性能	411	参考文献	471
27.6 许可证对核心数量的限制	415		
27.7 超线程技术	417		

电梯框架静力学分析案例

1.1 案例介绍

本案例对一个商用电梯的钢结构框架进行静力学分析，以简单介绍 ANSYS Workbench 15.0 静力学分析模块的操作和使用。作为第一个案例，还简单介绍了一些软件初始设置的经验与技巧。

1.2 分析流程

如果你患有密集恐惧症，也许细密的网格线会让你很难受；如果你患有色盲或色弱，彩色的结果云图你也许会看不清；如果你对未知领域的知识不知道如何学习，请先学习掌握未知领域知识的学习方法，再考虑是否开始学习有限元；如果你克服不了自学时的艰苦与寂寞，请放弃有限元。

有限元分析的求解规模往往较大，由于 32 位操作系统所支持的最大内存容量约为 4GB，当分析规模稍大时（如采用三维实体单元进行线性静力学分析，超过 10 万网格），很可能出现因内存容量不足而严重影响求解效率（如采用直接求解器，当求解规模大到超过某一极限值时，求解时间可能忽然增加数倍或十几倍）或者无法满足求解时必需的内存容量而软件自动退出的情况。

从软件层面考虑，64 位操作系统所支持的内存容量几乎可以满足各种规模有限元分析的需求；从硬件层面上讲，主流的 Intel 公司与 AMD 公司的 CPU 均支持 64 位技术。

因此笔者强烈建议用户安装 64 位操作系统及 64 位版的 ANSYS Workbench 15.0 软件。16.0 版仅支持 64 位系统。

如在第 25 章中所介绍的，有限元分析时，计算机的内存容量是决定能否求解或者能求解多大规模的必要性条件，而所有其他的硬件性能（如内存速度、硬盘速度、显卡速度、CPU 浮点运算能力、CPU 前端总线带宽、硬盘容量、主板的扩展性等）都是充分性条件一样，保证计算机有足够的空闲内存容量用于求解是第一位的。

ANSYS Workbench 15.0 软件的安装需要采用管理员身份登录操作系统，并顺序安装。软件安装难度不高，并且不同版本间的安装步骤几乎一致。15.0 的安装步骤较 12.1 等老版本略显简化，较为容易出现问题的是许可证的加载。一般而言只需安装主程序和许可证程序，而无需安装适合于多机联网并行求解所用的 MPI 程序等，即主安装界面中左边的第一项和第四项。

笔者第一次安装 ANSYS 12.1 的时候花费了 3 天时间，安装了不下 5 次才成功；现在安装 ANSYS 15.0，在采用了固态硬盘的计算机上只用了半小时。

在不同的求解规模下，15.0 的求解时间比 14.5 平均快约 10%，因新版的 ANSYS Workbench 融入了最新的软件技术与算法，整体上在执行同等计算规模时对硬件的需求较老版本更低，且多核心并行效率更高，故选择高版本的软件在一定程度上是“帮助”用户实现了性能升级。

不同版本软件间的操作大体相当，选择教材时，12.1、13.0、14.0、14.5、15.0 都可以满足大部分情况。新版教材主要对新功能和新思想进行介绍。在本书中，笔者花费大量心血，以自己实际使用 ANSYS Workbench 15.0 软件的经验和学习有限元技术的方法为特色进行重点讲解。不仅仅如市面上绝大多数教程一样对 ANSYS Workbench 15.0 软件的使用方法进行介绍，更在书中遍置笔者的实践经验、技巧和个人领悟，而这才是本书的真正内涵所在。

注意：由于本书包含的信息量极大，并且介绍的很多知识是在不同产品或不同应用下通用的，建议用户全面阅读全部内容后逐条选择最适合用户实际需求的信息进行重点了解。

有限元软件诞生后，第一个实现的功能是静力学分析，也是计算结构力学分析领域中最基础的应用方向。有限元软件，最初用来对飞机结构进行数值模拟仿真。就 CAE (Computer Aided Engineering, 计算机辅助工程) 程序而言，对线性静力学分析，在技术层面上早已不是难题。可能存在的问题通常限于对大型问题的方便建模和有效求解。

在静力学分析中，不考虑结构的惯性和阻尼效应，其用于荷载恒定或变化速率不明显，以至于可以认为是静态加载状态时的模拟。

开始第一个分析案例前，先对 ANSYS Workbench 15.0 软件进行基本设置。有很多种方式可以打开 ANSYS Workbench 15.0，最常用的方式是单击“开始”→Workbench 15.0，如图 1-1 所示。也可以使用单击“开始”→“所有程序”→ANSYS 15.0→Workbench 15.0 的方式。

在打开过程中，会弹出如图 1-2 所示的界面。此界面从 Workbench 13.0 以后就几乎未被更改，其左下角显示当前内部插件的开启过程，右上角显示软件版本号为 15.0。

稍等约半分钟后软件打开。第一次打开软件时会弹出欢迎界面，如图 1-3 所示。其中会提示一些软件基本信息和操作方法。建议熟练后关闭此对话框，以减少操作步骤。单击左下角的 Show Getting Started Message at Startup 按钮，再单击 OK 按钮。

注意：ANSYS Workbench 15.0 及其他版本的 ANSYS 软件经常会出现许可证丢失的问题，一般关闭软件重新打开即可。

打开设置菜单。单击菜单栏中的 Tools (工具) →Options (设置)，如图 1-4 所示。

设置背景色。单击左上角的 Appearance (外观)。背景色主要根据个人习惯设置。为了方便查看，笔者将案例中的背景色设置成纯白色；ANSYS Logo (ANSYS 商标) 设置成 Black (黑色)；Text Color (文字颜色) 设置成蓝色。纯白色的背景也有利于生成计算报告图时的截图和打印，如图 1-5 所示。



图 1-1 打开软件

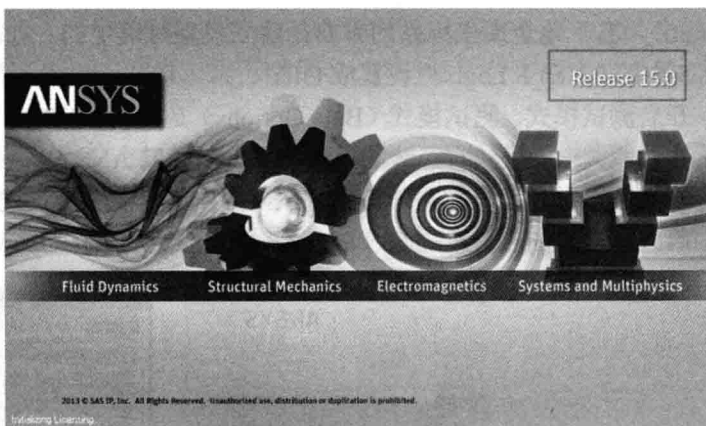


图 1-2 程序开启界面

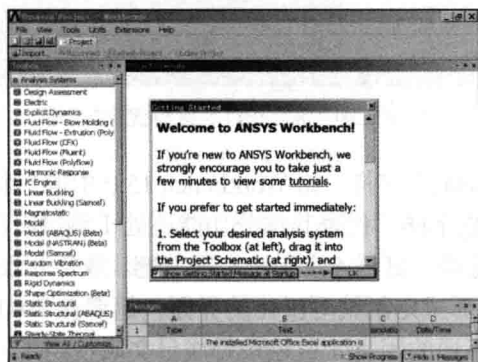


图 1-3 欢迎界面

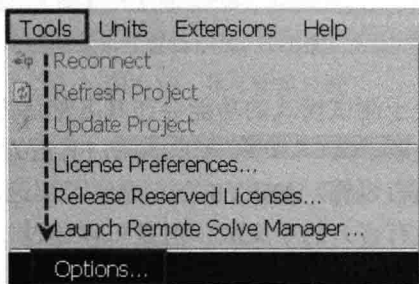


图 1-4 软件设置

图 1-6 所示为笔者习惯的背景色设置。在 Background Style (背景风格) 下方单击右侧的下拉列表按钮, 单击 Diagonal Gradient (梯度对角线); Background Color (背景色) 设置为淡淡的青色, 如图 1-6 所示。

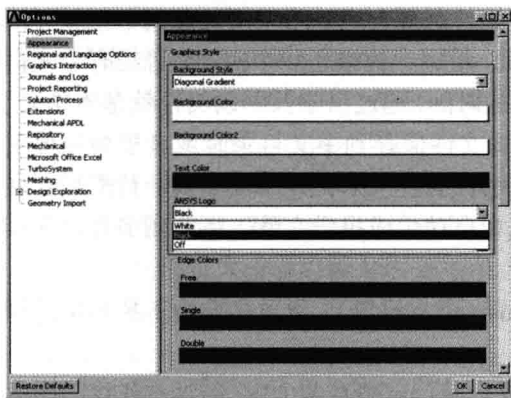


图 1-5 图形背景设置

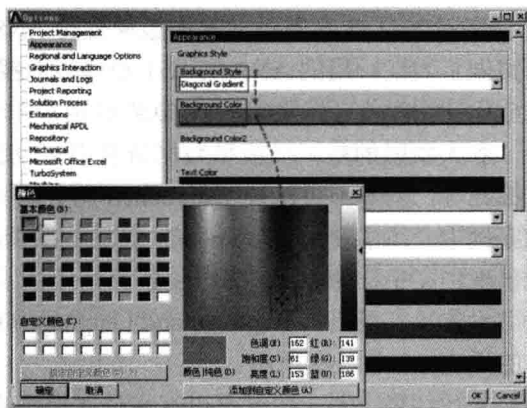


图 1-6 设置习惯

图 1-7 所示为使用图 1-6 设置的实际背景色的效果。模型为第 14 章发动机叶片周期扩展分析案例中采用的子模型。模型下方横向的标尺实时显示了当前视角下的尺寸 (如图中的

900mm)。右下角全局坐标系的方向是建立模型时确定的。如果需要隐藏 ANSYS Logo, 可将图 1-5 中的 ANSYS Logo 栏设置成 Off。

开启测试模式。测试模式 (Beta Options) 是调用 ANSYS Workbench 平台中尚未完全成熟的软件功能, 一般供较有经验的用户使用, 以帮助 ANSYS 公司测试并改进新功能。当测试功能足够成熟稳定后, 会在最新版本的 ANSYS 软件中成为正式功能。

单击左上角的 Appearance (外观), 单击右边的 BetaOptions (测试模式), 如图 1-8 所示。

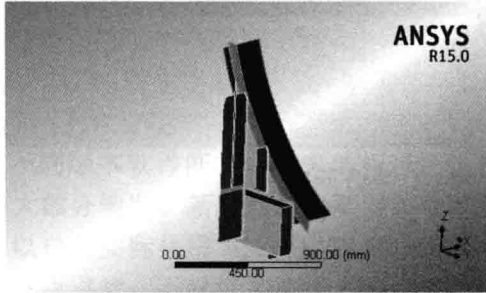


图 1-7 习惯设置效果

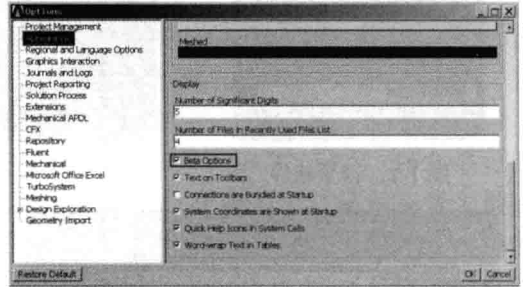


图 1-8 开启测试模式

处于测试模式的功能会在其名称后方添加“(Beta)”字样。如 Workbench 15.0 中的形状优化模块 **Shape Optimization (Beta)**, 其后方就出现了该字样, 代表其部分功能还处于测试阶段。

语言设置。ANSYS 官方提供了英语、法语、德语、日语 4 个版本。很遗憾, 软件出品 44 年来没有官方的中文版, 但是可以通过二次开发的形式定制编写汉化的界面。笔者在 2011 年 7 月初学 ANSYS Workbench 12.1 时, 一直受语言不通的困扰, 曾经设置成日文版使用了三个月, 以期在片假字中获得些许对中文的亲切感。

无论如何, 在绝大多数用户无法使用中文界面的情况下, 使用英文原版更有利于深入学习与交流。虽然在初学阶段可能会被语言问题严重困扰, 但是随着经验的增加与操作的熟练, 使用英文版会成为习惯。并且常用的英文词汇不超过 2000 个, 用多了就记住了。还可以通过记忆词汇的位置和对应图标的方式帮助记忆。

笔者 2011 年 7 月第一次接触神奇的 ANSYS 软件是源自当时哈尔滨工业大学某教授给我公司做了为期一周的 ANSYS 12.1 经典版面授培训。培训中他举了一个例子, 曾经有个来自巴基斯坦的留学生, 学习 ANSYS 软件时用了一个月的时间, 通过自学其帮助文件就基本学会了。

令人欣慰的是, 当模型数据带有中文或将计算文件保存到中文目录时或者模块中使用中文标题等, 基本都可以被 Workbench 完全识别。例外的是, 在第 14 章发动机叶片周期扩展分析案例中介绍了使用 Workbench 自动截图功能或者自动生成报告文件, 将截图另存时保存目录出现中文字样会报错。

设置语言可单击 Regional and Language Options (语言设置), 再单击右边下拉菜单选择合适的语言, 如图 1-9 所示。

并行计算设置。数值模拟常常是大规模的科学计算, 一般依靠 CPU 的浮点计算能力进行偏微分方程的求解, 硬件上往往使用多核心并行计算的方式提高整体性能。一部分用户反馈, 虽然使用了具有多核心 CPU 的计算机, 但是 ANSYS Workbench 运行过程中仍然只使用了一个核心。如采用 4 核心 8 线程的 CPU, 在默认开启超线程技术的情况下求解某项目, 在系统

的任务管理器中查看 CPU 占用率，一直维持在 13%左右的水平上，或在主板 BIOS 中关闭超线程技术后 CPU 占用率一直维持在 25%左右。这可能是在 ANSYS 软件中未开启多核心并行计算功能的原因。

单击 Solution Process (求解核心数)→Default Execution Mode (默认模式)，其默认为 Serial (串行)，下拉选择 Parallel (并行)，如图 1-10 所示。这是使软件调用多核心计算的简单方法。当使用多台计算机组成的集群时，ANSYS 一般使用基于 MPI 的并行通信方案。

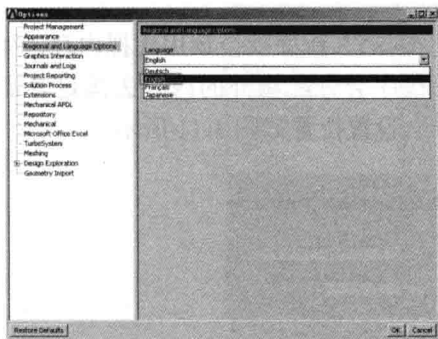


图 1-9 软件语言

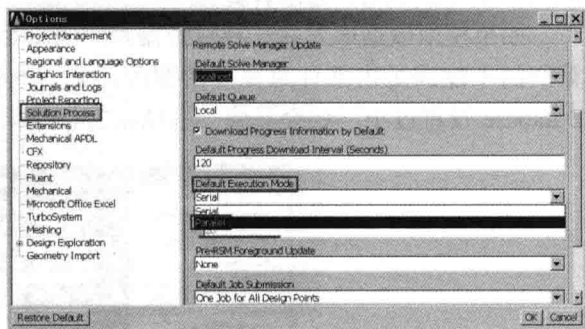


图 1-10 并行计算设置

虽然已经在此处开启了并行计算，但是软件默认的可并行核心数仅是 2。对于绝大多数用户使用的物理核心数量大于两个的计算机，单纯用此法仍无法完全发挥 CPU 性能，需要手工设置核心数量。

单击 Mechanical APDL (机械设计 APDL)，在右边的 Processors (核心数量) 下方输入实际的物理核心数量，此处暂时为 20。此处设置的核心数如果超过了计算机实际的物理核心数，求解时软件会发出警告，但不影响计算。

注意：软件实际可调用的最大核心数量受到计算机物理核心数量与软件许可证中对核心数量限制的限制 (一般为 8 个物理核心)，两者取较小值。

现在，几乎全部的多核心 CPU 都使用超线程技术，以增强部分应用下的执行效率。笔者做了其他条件相同的情况下，是否开启 CPU 的超线程技术，求解时间的测试。结论是采用直接求解器进行分析，关闭超线程技术后，会较默认开启时，在 CPU 长时间满负荷运行的求解时节约 10%左右的计算时间。关闭超线程技术需要在计算机开机的硬件自动检测阶段进入 BIOS 中设置。其设置方法随不同的主板 BIOS 而略有差异，请用户自行参考主板说明书。

在刚刚升级到 15.0 版本时，笔者也做了一个同样的分析项目，不同网格数量下，14.5 版与 15.0 版求解时间的对比测试。结论是 15.0 大约比 14.5 快 10%。所以追求新版本是有利的。

当分析规模较大或者可能分析规模不大，但是求解所需的内存容量超过计算机实际的内存容量时，需要的磁盘空间可能会很大，需要设置一个较大的工作空间，否则软件会报错而自动退出计算。

单击 Mechanical APDL，将 Database Memory (数据库空间) 从默认值 512MB 调小，最小为 32MB，此处设置成 64MB，并将 Workspace Memory (演算空间) 的容量从默认值 1024MB 调大至 102400MB。

计算机通过内存条得到物理内存。ANSYS 运行时除了需要物理内存空间外，还需要一定

的工作空间。求解规模较大时，ANSYS 程序实际需要的内存空间经常大于真实的内存，额外的内存即为虚拟内存（通过使用计算机的一部分硬盘空间来代替物理内存。由于硬盘的读写速度约为内存的百分之一，当程序不得不调用虚拟内存时，其整体性能受到严重影响，以至于可能的求解时间是内存空闲容量较多时的数十倍）。被用来作为虚拟内存的硬盘空间又称为交换空间。工作空间分为两部分：数据库空间（Database Memory）和演算空间（Workspace Memory）。数据库空间与几何建模、设置的边界及载荷等数据有关；演算空间则用来进行所有内部的计算，如单元矩阵的形成、布尔计算等。

如果模型数据库太大，导致数据库空间不足时，ANSYS 程序就会调用虚拟内存；如果演算空间不能满足内部计算需要的空间，则 ANSYS 程序会分配额外的内存去满足其需要。Database 设置过小，还会导致读取结果文件时间过长。设置位置如图 1-11 所示。

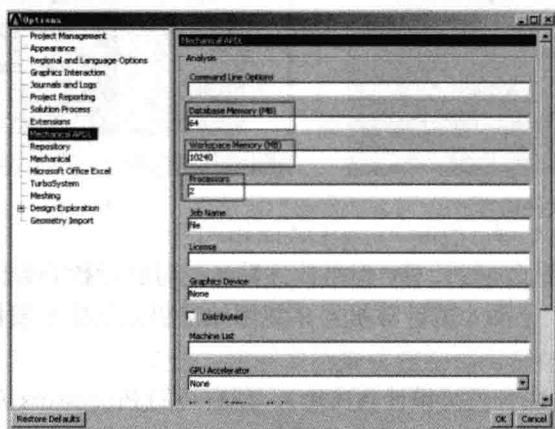


图 1-11 并行核心数

模型接口设置。要具有与其他软件之间的模型接口功能，需要相应的许可证支持。本书中所有案例采用的模型均使用三维机械设计软件 Solidworks 建立，并导入 ANSYS Workbench 15.0 平台计算。Workbench 平台使用的模型内核基于 Parasolid(X-T)平台。虽然 Workbench 15.0 可以识别几乎全部建模软件建立的模型，但是当模型保存为*.X-T 格式时具有最好的识别精度与速度。建议使用其他软件建立分析模型的用户，尽量将模型另存为此格式。如果遇到部分特征不识别等错误时，也可以尝试*.igs 或*.spt 等其他中间格式文件导入。

学习优化设计模块的预备知识。虽然使用中间格式可以提高物理模型的识别精度与速度，但是如果模型需要使用 Workbench 优化设计模块进行模型特征数据识别时，建议仍使用建模软件默认的格式导入。

注意：不是所有的模型特征数据都能被识别。默认情况下，只有当模型特征数据的前方包含 DS 字样时才可以被识别。如果模型是使用 Workbench 平台自带的 DM 模块建立的，则特征数据的首字母默认为 DS，可全部被识别。

由于 Solidworks、UG、Pro/e 等三维机械设计软件在建模能力与操作易用性方面均远超 ANSYS 自带的 DM 模块或 SCDM 模块，因此笔者放弃了使用 DM 模块建立物理模型的方式，而将 DM 模块仅用于模型导入、合并模型和建立点焊之用。当然，SCDM 模块修改与修复模型的能力是非常强大的。

进行优化设计分析时，需要将模型的尺寸等特征数据被 Workbench 识别，并依照一定的优化算法迭代计算，找到最优解。而默认的其他软件（除 DM 模块外）建立的模型，由于特征数据的标题与 Workbench 的默认值 DS 不同，往往无法被识别。

单击 Geometry Import（模型导入），在右边的 Filtering Prefixes and Suffixes（首字母与下标过滤）文本框中将默认的 DS 字样删除。这样 Workbench 可将模型的全部特征参数识别，如图 1-12 所示。

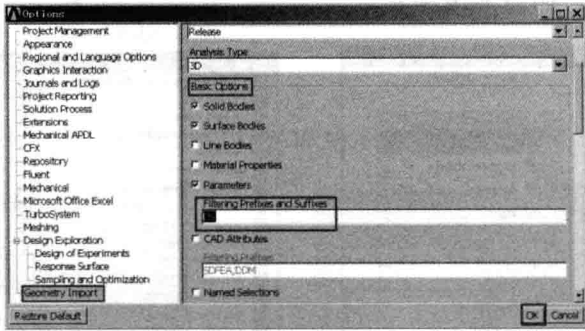


图 1-12 模型接口

如果需要进行参数化的特征数量较少，而模型特征数量极大，建议用户在设置如尺寸等参数的时候将其修改成方便识别的名称。在大量的尺寸参数中找到需要进行参数化的特征，可以将其修改成如图 1-13 所示的形式。

举个例子，将 Solidworks 软件中默认的尺寸特征“D4@草图 2”修改为“D4 需要参数化的@草图 2”，尺寸数据为 70，单位为 mm。

将模型导入一个分析模块后单击 Geometry 下方相应的模型零件，即可在 Details of 1-1（模型 1-1 的详细信息）下的 CAD Parameters（CAD 参数化）下方找到刚刚修改的“D4 需要参数化的@草图 2”，尺寸数据仍为 70，单位为 mm。已经被选择的参数化数据的前方也会出现蓝色的 P（Parameters，参数化）字样。再次单击它会删除选择，如图 1-14 所示。

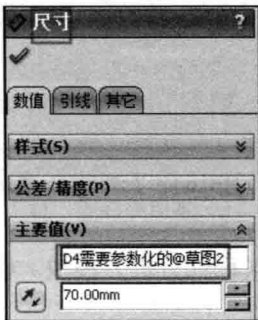


图 1-13 参数化首字母

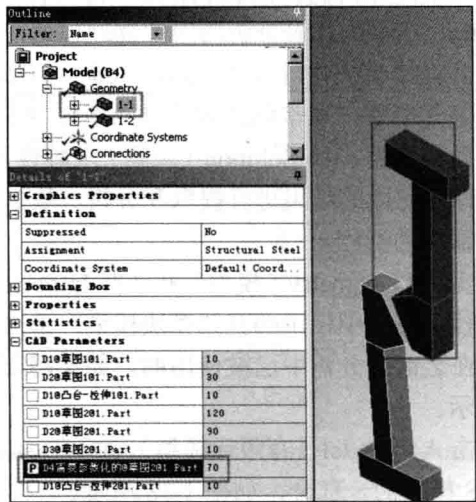


图 1-14 参数被识别