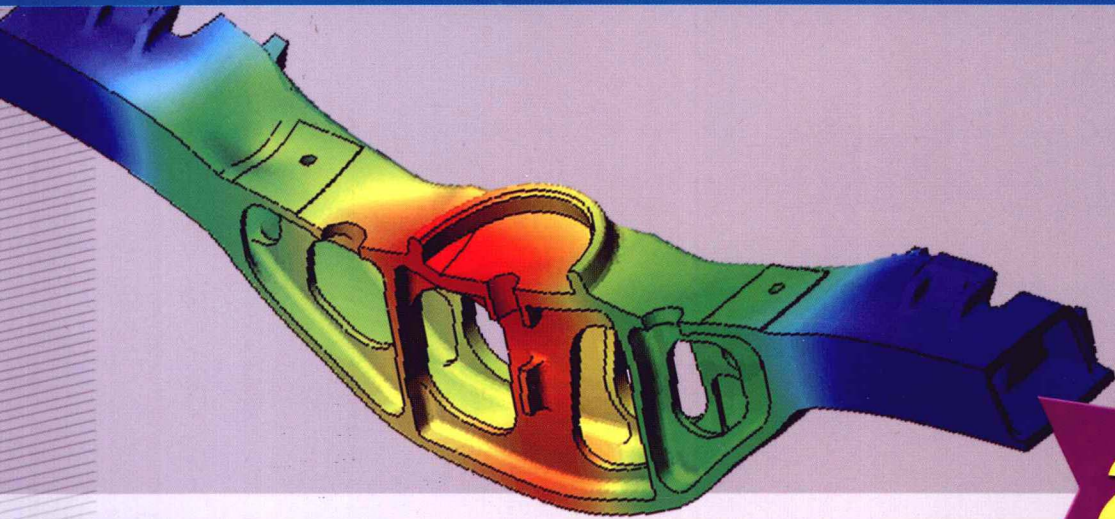




SolidWorks® 公司原版系列培训教程  
CSWP 全球专业认证考试培训教程

配有实例、练习素



2013版

# SolidWorks® Simulation 高级教程

(美) DS SolidWorks®公司 著  
陈超祥 胡其登 主编  
杭州新迪数字工程系统有限公司 编译



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS

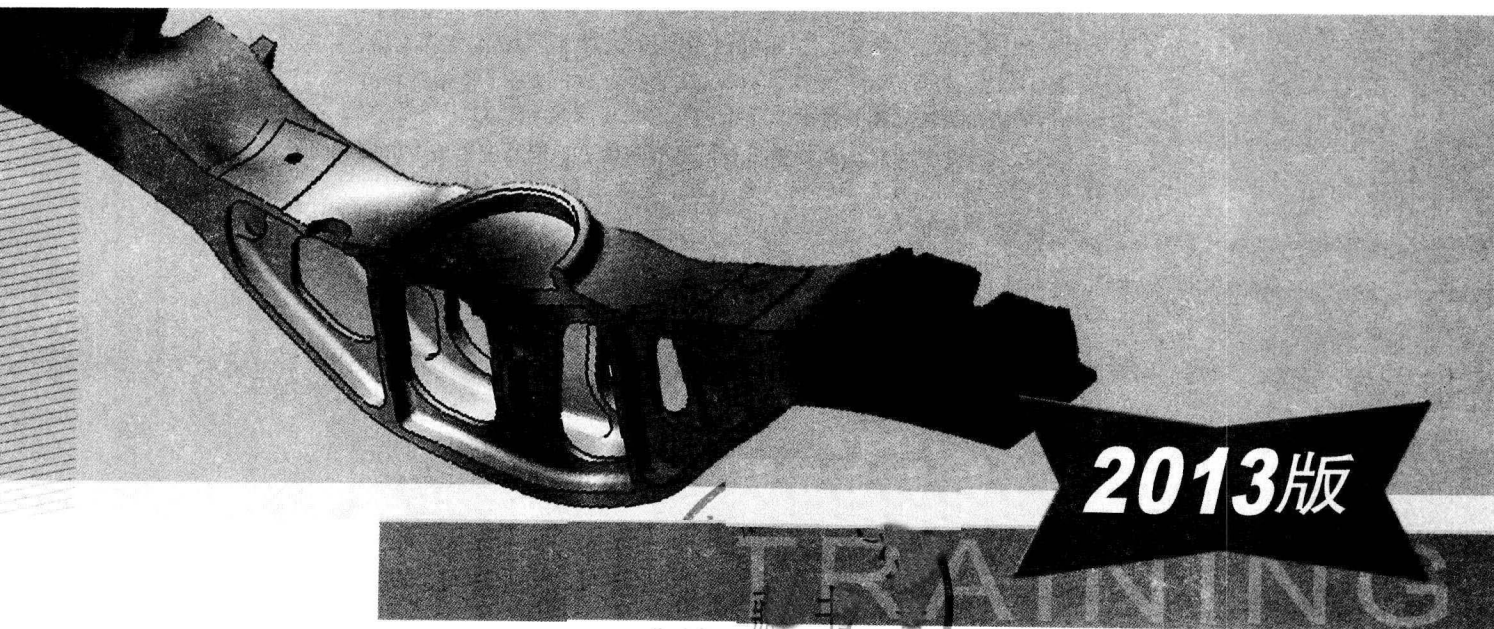
SolidWorks®公司  
独家授权

与新版软件同步推出





SolidWorks® 公司原版系列培训  
CSWP 全球专业认证考试培训



# SolidWorks® Simulation 高级教程

(美) DS SolidWorks®公司 著  
陈超祥 胡其登 主编  
杭州新迪数字工程系统有限公司 编译



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS

《SolidWorks® Simulation 高级教程》(2013 版)是根据 DS SolidWorks® 公司发布的《SolidWorks® Simulation 2013;SolidWorks® Simulation Professional》编译而成的,着重介绍了使用 Simulation 软件对 SolidWorks 模型进行有限元分析的进阶方法和相关技术。

本套教程在保留了原版教程精华和风格的基础上,按照中国读者的阅读习惯进行编译,配套教学资料齐全,适于企业工程设计人员和大专院校、职业技术学院相关专业学生使用。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

SolidWorks® Simulation 高级教程:2013 版/(美) DS SolidWorks® 公司著;陈超祥,胡其登主编;杭州新迪数字工程系统有限公司编译.—2 版.—北京:机械工业出版社,2013.4

SolidWorks® 公司原版系列培训教程  
CSWP 全球专业认证考试培训教程  
ISBN 978-7-111-41886-3

I. ①S… II. ①美…②陈…③胡…④杭… III. ①计算机辅助设计-应用软件-技术培训-教材 IV. ①TP391.72

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 054211 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:郎峰 责任编辑:郎峰 版式设计:霍永明

责任校对:刘雅娜 常天培 封面设计:饶薇 责任印制:杨曦

北京中兴印刷有限公司印刷

2013 年 5 月第 3 版第 1 次印刷

210mm×285mm·10.25 印张·307 千字

0 001—4 000 册

标准书号:ISBN 978-7-111-41886-3

ISBN 978-7-89433-851-8 (光盘)

定价:38.00 元 (含 1CD)

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

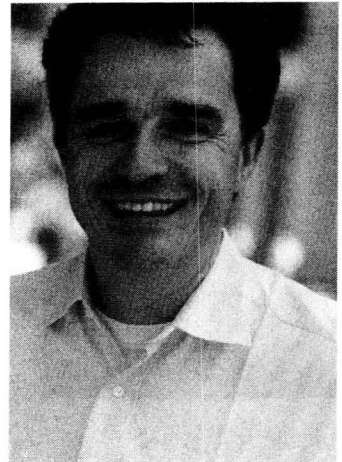
社服务中心:(010)88361066 教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售一部:(010)68326294 机工官网:<http://www.cmpbook.com>

销售二部:(010)88379649 机工官博:<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线:(010)88379203 封面无防伪标均为盗版

# 序



尊敬的中国地区 SolidWorks 用户：

DS SolidWorks® 公司很高兴为您提供这套最新的 DS SolidWorks® 公司中文原版系列培训教程。我们对中国市场有着长期的承诺，自从 1996 年以来，我们就一直保持与北美地区同步发布 SolidWorks 3D 设计软件的每一个中文版本。

我们感觉到 DS SolidWorks® 公司与中国地区用户之间有着一种特殊的关系，因此也有着一份特殊的责任。这种关系是基于我们共同的价值观——创造性、创新性、卓越的技术，以及世界级的竞争能力。这些价值观一部分是由公司的共同创始人之一李向荣（Tommy Li）所建立的。李向荣是一位华裔工程师，他在定义并实施我们公司的关键性突破技术以及在指导我们的组织开发方面起到了很大的作用。

作为一家软件公司，DS SolidWorks® 致力于带给用户世界一流水平的 3D 解决方案（包括设计、分析、产品数据管理、文档出版与发布），以帮助设计师和工程师开发出更好的产品。我们很荣幸地看到中国用户的数量在不断增长，大量杰出的工程师每天使用我们的软件来开发高质量、有竞争力的产品。

目前，中国正在经历一个迅猛发展的时期，从制造服务型经济转向创新驱动型经济。为了继续取得成功，中国需要最佳的软件工具。

SolidWorks 2013 是我们最新版本的软件，它在产品设计过程自动化及改进产品质量方面又提高了一步，该版本提供了许多新的功能和更多提高生产率的工具，可帮助机械设计师和工程师开发出更好的产品。

现在，我们提供了这套中文原版培训教程，体现出我们对中国用户长期持续的承诺。这套教程可以有效地帮助您把 SolidWorks 2013 软件在驱动设计创新和工程技术应用方面的强大威力全部释放出来。

我们为 SolidWorks 能够帮助提升中国的产品设计和开发水平而感到自豪。现在您拥有了最好的软件工具以及配套教程，我们期待看到您用这些工具开发出创新的产品。

此致

敬礼！

SICOT Bertrand  
DS SolidWorks® 公司首席执行官  
2013 年 1 月



SolidWorks 陈超祥 先生 现任 SolidWorks® 公司亚太地区技术总监

陈超祥先生早年毕业于香港理工学院机械工程系，后获英国华威克大学制造信息工程硕士及香港理工大学工业及系统工程博士学位。多年来，陈超祥先生致力于机械设计和 CAD 技术应用的研究，曾发表技术文章 20 余篇，拥有多个国际专业组织的专业资格，是中国机械工程学会机械设计分会委员。陈超祥先生曾参与欧洲航天局“猎犬 2 号”火星探险项目，是取样器 4 位发明者之一，拥有美国发明专利（US Patent 6, 837, 312）。

## 前言

DS SolidWorks® 公司是一家专业从事三维机械设计、工程分析、产品数据管理软件研发和销售的国际性公司。SolidWorks 软件以其优异的性能、易用性和创新性，极大地提高了机械设计工程师的设计效率和质量，目前已成为主流 3D CAD 软件市场的标准，在全球拥有超过 100 万的用户。DS SolidWorks® 公司的宗旨是：To help customers design better products and be more successful——让您的设计更精彩。

“DS SolidWorks® 公司原版系列培训教程”是根据 DS SolidWorks® 公司最新发布的 SolidWorks 2013 软件的配套英文版培训教程编译而成的，也是 CSWP 全球专业认证考试培训教程。本套教程是 DS SolidWorks® 公司唯一正式授权在中国大陆出版的原版培训教程，也是迄今为止出版的最为完整的 SolidWorks® 公司原版系列培训教程。

本套教程详细介绍了 SolidWorks 2013 软件和 Simulation 软件的功能，以及使用该软件进行三维产品设计、工程分析的方法、思路、技巧和步骤。值得一提的是，SolidWorks 2013 不仅在功能上进行了 200 多项改进，更加突出的是它在技术上的巨大进步与创新，从而可以更好地满足工程师的设计需求，带给新、老用户更大的实惠！

《SolidWorks® Simulation 高级教程》（2013 版）是根据 DS SolidWorks® 公司发布的《SolidWorks® Simulation 2013: SolidWorks® Simulation Professional》编译而成的，着重介绍了使用 Simulation 软件对 SolidWorks 模型进行有限元分析的进阶方法和相关技术。

本套教程在保留了原版教程精华和风格的基础上，按照中国读者的阅读习惯进行编译，使其变得直观、通俗，让初学者易上手，让高手的设计效率和质量更上一层楼！



SolidWorks 胡其登 先生 现任 SolidWorks® 公司大中国地区技术经理

胡其登先生毕业于北京航空航天大学飞机制造工程系，获“计算机辅助设计与制造（CAD/CAM）”专业工学硕士学位。长期从事 CAD/CAM 技术的产品开发与应用、技术培训与支持等工作，以及 PDM/PLM 技术的实施指导与企业咨询服务。具有 20 多年的行业经历，经验丰富，先后发表技术文章 10 余篇。

本套教程由 DS SolidWorks® 公司亚太地区技术总监陈超祥先生和大中国地区技术经理胡其登先生共同担任主编，由杭州新迪数字工程系统有限公司彭维、周瑜负责审校。承担编译、校对和录入工作的有王经纬、邱小平、满小云等杭州新迪数字工程系统有限公司的技术人员。杭州新迪数字工程系统有限公司是 DS SolidWorks® 公司的密切合作伙伴，拥有一支完整的软件研发队伍和技术支持队伍，长期承担着 SolidWorks 核心软件研发、客户技术支持、培训教程编译等方面的工作。在此，对参与本书编译工作人员的辛勤工作表示诚挚的感谢。

由于时间仓促，书中难免存在着疏漏和不足，恳请读者和专家批评指正。

陈超祥 胡其登

2013 年 1 月

# 本书使用说明

## 关于本书

本培训课程是 Simulation 基础教程的扩展，我们假设学习本课程的读者已经了解了 Simulation 基础教程中介绍的概念。

本课程的目的是教会读者如何使用 Simulation Professional 软件，以分析 SolidWorks 中的零件和装配体在屈曲、疲劳及不同热力载荷下的静态结构属性。本课程还覆盖了频率分析、优化及跌落测试(基于时间的碰撞分析)。

本书集中了最基础的技术以及 Simulation 2013 的核心内容。阅读本书只是一个辅助手段，它不能替代系统文档和在线帮助。在掌握了基本的基础技术之后，读者可以通过在线帮助来了解一些不经常使用的命令选项。

## 前提条件

读者在学习本书前，应该具备如下经验：

- 机械设计经验。
- 使用 Windows 操作系统的经验。
- 已经学习了 Simulation 在线指导教程，可以通过单击菜单【帮助】/【SolidWorks Simulation】/【指导教程】学习这个教程。
- 已经学习了《SolidWorks® Simulation 基础教程》(2012 版)。

## 本书编写原则

本书是基于过程或任务的方法而设计的培训教程，并不专注于介绍单项特征和软件功能。本书强调的是，完成一项特定任务所应遵循的过程和步骤。通过对每一个应用实例的学习，读者将学会为了完成一项特定的设计任务应采取的方法，以及所需要的命令、选项和菜单。

## 关于“知识卡片”

除了每章的研究实例和练习外，本书还提供了可供读者参考的“知识卡片”。这些“知识卡片”提供了软件使用工具的简单介绍和操作方法，可供读者随时查阅。

## 本书使用方法

本书的目的是希望读者在有 Simulation 使用经验的教师指导下，在培训课中进行学习。希望通过教师现场演示本书所提供的实例，学生跟着练习的这种交互式的学习方法，使读者掌握软件的功能。




本书提供了许多练习供读者实践，使读者可以在练习过程中学习课程中演示的内容。

## 关于配套光盘

本书的配套光盘中收录了课程中所需要的各种文件，包括：课堂实例和练习题。Lesson 文件夹包括了所有在课堂演示中用到的实例文件，Exercise 文件夹包括了所有练习中需要的参考文件。

## 本书的格式约定

本书使用以下的格式约定：

约 定	含 义
【载荷/约束】/【力】	表示 Simulation 软件命令和选项。例如：“【载荷/约束】/【力】”，表示鼠标右键单击位于 Simulation 管理器树目录中的【载荷/约束】图标并从弹出的菜单中选择【力】
 提示	要点提示
 技巧	软件使用技巧
 注意	软件使用时应注意的问题
操作步骤 步骤 1 步骤 2 步骤 3	表示课程中实例设计过程的各个步骤

## 关于色彩的问题

Simulation 2013 原版英文教程是采用彩色印刷的，而我们出版的中文教程则采用黑白印刷，所以本书对原版英文教程中出现的颜色信息做了一定的调整，尽可能地方便读者理解书中的内容。

## Windows® 7

本书所用的屏幕图片是 SolidWorks 2013 和 Simulation 2013 运行在 Windows® 7 时制作的。



# 目 录

序	
前言	
本书使用说明	
<b>绪论</b> .....	1
0.1 SolidWorks Simulation 概述 .....	1
0.2 SolidWorks Simulation Professional 的使用限制 .....	1
<b>第 1 章 零件的频率分析</b> .....	2
1.1 模式分析基础 .....	2
1.1.1 材料属性 .....	3
1.1.2 频率与模式形态 .....	3
1.1.3 基本频率 .....	3
1.2 实例分析:音叉 .....	4
1.3 关键步骤 .....	4
1.4 带支撑的频率分析 .....	4
1.4.1 综合结果 .....	5
1.4.2 频率分析的位移结果 .....	6
1.5 不带支撑的频率分析 .....	7
1.5.1 刚体模式 .....	7
1.5.2 基础频率 .....	8
1.5.3 载荷的影响 .....	8
1.6 带有载荷的频率分析 .....	8
1.7 总结 .....	9
练习 1-1 汽车悬架防水壁的频率分析 .....	10
练习 1-2 吹风机风扇的频率分析 .....	11
练习 1-3 涡轮的频率分析 .....	13
<b>第 2 章 装配体的频率分析</b> .....	16
2.1 实例分析:发动机支架 .....	16
2.2 关键步骤 .....	16
2.3 全部接合接触条件 .....	16
2.3.1 远程质量 .....	17
2.3.2 连接装配体各零件 .....	17
2.4 接合与允许穿透接触条件 .....	19
2.5 总结 .....	21
练习 颗粒分离器的频率分析 .....	21
<b>第 3 章 屈曲分析</b> .....	23
3.1 屈曲分析基础 .....	23
3.1.1 线性和非线性屈曲分析 .....	23
3.1.2 屈曲安全系数(BFS) .....	24
3.1.3 屈曲分析需要注意的事项 .....	24
3.2 实例分析:粒子分离器 .....	24
3.3 关键步骤 .....	24
3.3.1 结论 .....	26
3.3.2 计算屈曲载荷 .....	26
3.3.3 结果讨论 .....	26
3.3.4 先屈曲还是先屈服 .....	27
3.4 总结 .....	27
练习 3-1 凳子的屈曲分析 .....	27
练习 3-2 柜子的屈曲分析 .....	31
<b>第 4 章 热力分析</b> .....	35
4.1 热力分析基础 .....	35
4.1.1 热传递的机理 .....	35
4.1.2 热力分析的材料属性 .....	37
4.2 实例分析:芯片组 .....	38
4.3 关键步骤 .....	38
4.4 稳态热力分析 .....	38
4.4.1 接触热阻 .....	39
4.4.2 绝热 .....	41
4.4.3 初始温度 .....	41
4.4.4 热力分析结果 .....	41
4.4.5 热流量 .....	42
4.4.6 热流量结果 .....	43
4.5 瞬态热力分析 .....	44
4.5.1 输入对流效应 .....	45
4.5.2 瞬态数据传感器 .....	46
4.5.3 结果对比 .....	47
4.6 载荷随时间变化的瞬态热力分析 .....	47
4.6.1 时间曲线 .....	48
4.6.2 温度曲线 .....	48
4.7 使用恒温器的瞬态热力分析 .....	49
4.8 总结 .....	50
练习 杯罩的热力分析 .....	51
<b>第 5 章 带辐射的热力分析</b> .....	53
5.1 实例分析:聚光灯装配体 .....	53

5.2 关键步骤 .....	53	练习 7-1 篮圈的疲劳分析 .....	101
5.3 稳态分析 .....	54	练习 7-2 拖车挂钩的疲劳分析 .....	104
5.3.1 分析参数回顾 .....	57	<b>第 8 章 高级疲劳分析</b> .....	106
5.3.2 热流量奇异性 .....	58	8.1 实例分析: 汽车悬架 .....	106
5.4 总结 .....	59	8.2 关键步骤 .....	107
<b>第 6 章 高级热应力 2D 简化</b> .....	60	8.3 疲劳算例 .....	108
6.1 热应力分析 .....	60	8.3.1 变幅疲劳事件 .....	109
6.2 实例分析: 膨胀节装配体 .....	60	8.3.2 雨流周期记数方法 .....	109
6.3 关键步骤 .....	61	8.3.3 变载荷曲线 .....	110
6.4 热力分析 .....	61	8.3.4 雨流记数箱 .....	112
6.4.1 2D 简化 .....	61	8.3.5 随机载荷历史的噪声 .....	112
6.4.2 指定温度条件 .....	65	8.3.6 疲劳强度缩减因子 .....	112
6.4.3 热力分析中网格划分的注意事项 .....	65	8.3.7 雨流矩阵图 .....	115
6.5 热应力分析 .....	67	8.3.8 结果 .....	115
6.5.1 从 SolidWorks Flow Simulation 中输入 温度及压力 .....	68	8.4 总结 .....	116
6.5.2 零应变时的参考温度 .....	68	<b>第 9 章 跌落测试分析</b> .....	117
6.6 3D 模型 .....	72	9.1 跌落测试分析简介 .....	117
6.7 总结 .....	73	9.2 实例分析: 照相机 .....	117
练习 6-1 芯片测试装置 .....	74	9.3 关键步骤 .....	117
练习 6-2 储气罐的热应力分析 .....	79	9.4 硬地板跌落测试 .....	118
练习 6-3 热电冷却器的热应力分析 .....	82	9.4.1 跌落测试参数 .....	118
<b>第 7 章 疲劳分析</b> .....	85	9.4.2 动态分析 .....	120
7.1 疲劳的概念 .....	85	9.4.3 设置冲击后的求解时间 .....	121
7.1.1 疲劳所导致的破坏阶段 .....	85	9.4.4 测试结果 .....	121
7.1.2 高、低疲劳周期 .....	85	9.4.5 线性求解与非线性求解 .....	122
7.2 基于应力-寿命(S-N)的疲劳 .....	86	9.5 弹性地板跌落测试 .....	124
7.3 实例分析: 压力容器 .....	87	9.6 弹塑性材料模型 .....	126
7.4 关键步骤 .....	87	9.6.1 弹塑性材料模型参数 .....	126
7.5 热力算例 .....	88	9.6.2 弹塑性材料模型对比结果 .....	127
7.6 热应力算例 .....	88	9.6.3 讨论 .....	128
7.7 静态压力(Static Pressure)算例 .....	89	9.7 接触条件下的跌落测试(选做) .....	128
7.8 疲劳术语 .....	91	9.8 总结 .....	129
7.9 疲劳算例 .....	92	练习 夹子的跌落测试 .....	129
7.9.1 从材料弹性模量派生 .....	94	<b>第 10 章 优化分析</b> .....	132
7.9.2 恒定振幅事件交互 .....	94	10.1 优化分析的概念 .....	132
7.9.3 交替应力的计算 .....	95	10.2 实例分析: 压榨机壳体 .....	132
7.9.4 平均应力纠正 .....	95	10.3 关键步骤 .....	133
7.9.5 疲劳强度缩减因子 .....	96	10.4 静应力分析和频率分析 .....	133
7.9.6 损坏因子图解 .....	96	10.5 优化分析方法 .....	134
7.9.7 损坏结果讨论 .....	97	10.6 设计算例 .....	134
7.10 静载疲劳算例(选做) .....	98	10.6.1 优化目标 .....	135
7.10.1 疲劳分析中的静载 .....	98	10.6.2 设计变量 .....	136
7.10.2 查找周期峰值 .....	99	10.6.3 定义约束 .....	137
7.11 总结 .....	100	10.6.4 约束的公差 .....	138

10.6.5 约束定义的过程 .....	138	11.2.1 应力强度 .....	147
10.6.6 后处理优化结果 .....	139	11.2.2 膜片应力和弯曲应力（应力线性分布） .....	147
10.6.7 局部趋向图表 .....	142	11.2.3 基本应力强度限制 .....	147
10.7 总结 .....	142	11.3 压力容器分析方法 .....	148
练习 10-1 悬臂支架的优化分析 .....	142	11.3.1 载荷工况的组合 .....	148
练习 10-2 散热器的优化分析 .....	144	11.3.2 总体膜片主应力强度 .....	149
<b>第 11 章 压力容器分析 .....</b>	<b>146</b>	11.4 进孔接头法兰和端盖 .....	150
11.1 实例分析：压力容器 .....	146	11.5 总结 .....	153
11.2 关键步骤 .....	146		

# 绪 论

## 0.1 SolidWorks Simulation 概述

SolidWorks Simulation 是一种基于有限元分析(即 FEA 数值)技术的设计分析软件,是 SRAC 公司开发的工程分析软件产品之一。SRAC 公司是 SolidWorks 公司的子公司,成立于 1982 年,SRAC 公司是有限元分析带入到桌面计算的先驱。1995 年,SRAC 公司开始与 SolidWorks 公司合作开发了 COSMOSWorks 软件,从而进入了工程界主流有限元分析软件的市场,该软件也成为了 SolidWorks 公司的金牌产品之一,同时它作为嵌入式分析与 SolidWorks 无缝集成,迅速成为顶级销售产品。整合了 SolidWorks CAD 软件的 COSMOSWorks 软件在商业上取得的成功,并于 2001 年获得了 Dassault Systemes (SolidWorks 母公司)的认可。2003 年,SRAC 公司与 SolidWorks 公司合并。COSMOSWorks 推出的 2009 版被重命名为 SolidWorks Simulation。

SolidWorks 是一款基于参数化实体特征的 CAD 系统。和许多最初在 UNIX 环境中开发,后来才向 Windows 系统开放的 CAD 系统不同, SolidWorks 与 SolidWorks Simulation 从一开始就是专为 Windows 操作系统开发的,所以相互整合是完全可行的。

SolidWorks Simulation 有不同的程序包或应用软件以适应不同用户的需要。除了 SolidWorks SimulationXpress 程序包是 SolidWorks 的集成部分之外,其他所有的 SolidWorks Simulation 软件程序包都是插件式的。不同程序包的主要功能如下:

- SolidWorks SimulationXpress: 能对带有简单载荷和支撑的零件进行静应力分析。
- SolidWorks Simulation: 能对零件和装配体进行静应力分析。
- SolidWorks Simulation Professional: 能进行零件和装配体的静应力、热传导、扭曲、频率、跌落测试、优化和疲劳分析。
- SolidWorks Simulation Premium: 具有 SolidWorks Simulation Professional 所有功能,外加非线性功能和动力学分析。

本书通过一系列综合了有限元分析基础的课程来介绍 SolidWorks Simulation Professional。读者在学习这些内容之前必须具备一定的有限元法基础,并了解 SolidWorks Simulation 课程的内容。建议读者按照课程的顺序学习,并注意前面课程提到的解释和步骤在后面章节不会再重复。

学习每一个后续的章节必须熟悉前面章节讨论过的软件功能和有限元知识,后面章节的内容都要使用到前面章节的技巧和经验。

## 0.2 SolidWorks Simulation Professional 的使用限制

任何 FEA 软件都有其优缺点, SolidWorks Simulation Professional 有如下假设:

- 材料是线性的。
- 小变形。
- 静态载荷。

这些假设是设计环境中 FEA 软件的基本假设,大部分 FEA 项目在这些假设前提下都会成功进行。这些假设的详细讨论请参考《SolidWorks® Simulation 基础教程》(2012 版)。

对于非线性材料、非线性几何体或者动态分析,可以用 SolidWorks Simulation Premium 软件来分析。SolidWorks Simulation Professional 的一些模块也能分析一些动态和非线性问题。

# 第 1 章 零件的频率分析

## 学习目标



- 无论有无支撑,都能够进行频率分析
- 理解刚体模式
- 讨论频率分析的支撑作用
- 在有预应力的条件下进行频率分析
- 使用设计情形来指导设计算例的灵敏度(选做)

## 1.1 模式分析基础

物体的每种结构都有它固有的振动频率,称之为共振频率。这样的频率都和特定形式的振动联系在一起。

当某一结构的共振频率被激活时,将表现出一种振动的形态,称之为振动模式。

回顾结构静力分析中,节点位移是主要的未知量。 $[K]d = F$  中, $[K]$ 为刚度矩阵, $d$ 为节点位移的未知量,而 $F$ 为节点载荷的已知量。

在动力学分析中,增加阻尼矩阵 $[C]$ 和质量矩阵 $[M]$ ,则有

$$[M]''d + [C]'d + [K]d = F(t)$$

上式为典型的有阻尼的交迫振动方程。当缺少阻尼及外力时,该方程简化为 $[M]''d + [K]d = 0$ (自由振动方程)。

注意,在有运动的情况下,该方程与惯性以及任意时刻的弹力都是相关的。在没有运动的情况下(例如,没有导致运动的初始扰动),该方程仍然表达了结构质量属性及其刚度之间的重要关系。在进行一系列推导之后(这并不是本段的主题,但可以在有关振动的入门教材中找到),结构属性可归类为:

- 1) 固有频率:结构趋向于振荡的频率(在受到激励的情况下)。通常这些值对应共振频率。
- 2) 固有(自然)振动模式:特定的固有频率对应唯一的振动形式。



**注意** 现实中的结构都有无数的固有频率及模式。模式的最大数量受制于自由度的数量。

实际上,在共振中,弹性刚度减去惯性刚度后,结果是结构刚度的大小。在共振中,控制振幅加大的唯一因素就是阻尼。如果阻尼比较低(事实上,在大多情况下阻尼值都比较低),则振幅加大会带来灾难性的后果。



**提示** 建议在完成包括本章在内的两章频率分析的课程之后,重复使用一些以前的模型,并对它们进行频率分析。

例如,图 1-1 显示了带孔无支撑平板模型振动时的自然模式(形态),已在《SolidWorks® Simulation 基础教程》(2012 版)的第 1 章中进行讲解。每个模式对应着一个特定的固有频率。

当了解一个对称模型的频率分析时,要注意该振动模式是否对称。这也解释了对称的边界条件为什么不能应用到模式分析中。观察得到,振动的模式阶数越高,振动的形式就越复杂。



注意，对两个零件和装配体都能够进行频率分析。如果对装配体进行分析，则要求所有的零件都是结合在一起的，不允许出现不接触或有缝隙的情况。如果装配体的零件有干涉，比如需要做收缩匹配分析，就必须在执行频率分析之前去除干涉部分。这部分内容将在“第2章 装配体的频率分析”中进一步说明，如图1-2所示。

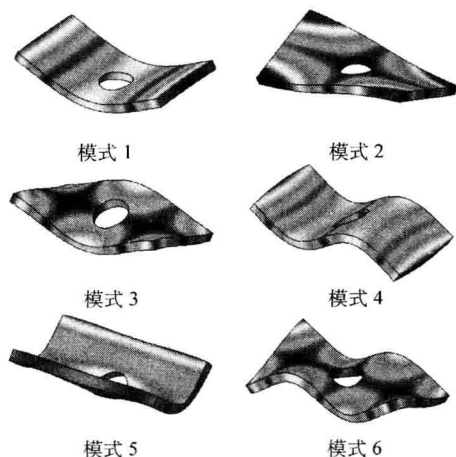


图 1-1 带孔无支撑平板的几种模式

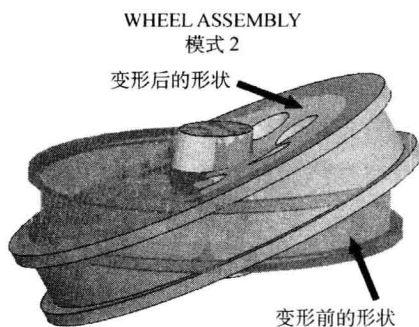


图 1-2 车轮变形前后的形状对比

### 1.1.1 材料属性

频率分析中需要以下的材料属性：

- 1) 弹性模量(也称为杨氏模量)。
- 2) 泊松比。
- 3) 质量密度。



有一点非常重要：为了模拟惯性刚度，频率分析中模型特定的材料属性必须包括材料的密度(并非指重力)。

### 1.1.2 频率与模式形态

现实中几乎每种结构体都有无数的固有频率及相应的振动模式，然而在动态载荷结构的反应中，只是最基础的几个模式是重要的。在这少数的几个最低模式中，其振幅一般较大，而高阶频率所对应的模式中，振幅都较小。

频率分析就是计算这些共振频率及它们对应的振动模式。计算共振频率及它们对应的振动模式就是频率分析的所有内容，这也说明了频率分析的重要性。

### 1.1.3 基本频率

基本频率即最低的共振频率。自然频率的值与结构体在特定模式下所需的能量级别成正比例。因此，基本频率下结构体振动所需的能量相比其他所有更高的自然频率而言是最小的。



频率分析并不计算位移和应力，在本章的后面还会强调这一点。

大多数的情况下，产品设计都需要规避共振。在已知产品将面临什么样的激励频率后，我们总是以这样的方式来设计产品，即保证产品的固有频率不与激励频率相吻合。

为了使结构的固有频率在危险范围以外，可以改变产品的几何结构、材料、避振特性或在适当的地方添加质量单元。这些作用的影响可以通过模式分析来验证。

机械体系一般要避免机械共振的发生，然而共振并不总是一件“坏”事。事实上，有许多装置专

门设计为在共振模式下工作。一些较为常见的例子是：音乐器材、夯土机、汽锤等。

本章将分析一个设备：音叉。它是基于共振频率设计出的设备中的一个典型代表。

## 1.2 实例分析：音叉

在本例中，将检测音叉的固有频率及对应的模式形态。这个模型介绍了刚体模式的概念，并显示了它们对应的频率。

首先，将该模型的末端进行固定，以模拟音叉手柄被人握住的效果。然后，在没有边界条件的情况下求解该模型，对比其结果会受到怎样的影响。最后，学会怎样对频率分析的结果进行合理的解释。

此外，当模型被施加载荷时，模型的刚度也会发生改变（也被称之为应力硬化或软化）。附加的刚度被视做应力刚度，会提高或降低模型整体的弹性刚度。为了便于理解，对音叉末端施加一个载荷，并观察其效果。

### 项目描述：

如图 1-3 所示的音叉模型，设计在 440Hz 的频率下能够释放出一个较低的 A 音。首先，运行一次频率分析来验证该音叉会在正确的频率下发生振动。此外，在音叉末端加载 450N 的载荷，以判断它对共振频率的影响，到底频率会变得更高还是更低？

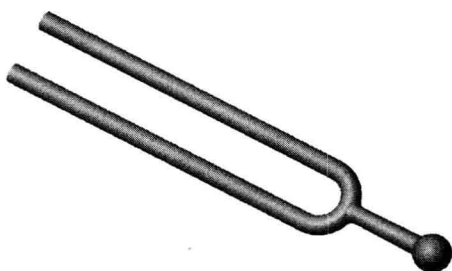


图 1-3 音叉模型

## 1.3 关键步骤

下面列出对该零件进行分析的几个关键步骤：

- 1) 添加约束。在音叉末端添加固定几何体的约束，以模拟该手柄被人手握住的效果。
- 2) 对模型划分网格。
- 3) 运行分析。
- 4) 对结果进行后处理。对初始分析的结果进行后处理，以研究各个数值的含义。
- 5) 移除固定几何体。移开约束以获得更多的振型。
- 6) 加载后的影响。在音叉上作用一个载荷，并观察添加预应力后对振动模式有何影响。

## 1.4 带支撑的频率分析

首先来进行一个频率分析，验证模型的基础频率在【固定几何体】的边界条件下是否为 440Hz（较低的 A 音）。

### 操作步骤

按照下面的步骤运行频率分析：

#### 步骤 1 打开零件

打开名为“tuning fork”的零件，仔细观察该几何体。

#### 步骤 2 创建频率算例

创建一个名为“with supports”的算例，选择【频率】作为【分析类型】。

#### 步骤 3 设置算例属性

右键单击“with supports”，选择【属性】。

在【选项】中输入“4”作为【频率数】，则将计算最初的4个基本频率。

默认的频率数为5。

解算器的选择并不重要。这里选用【自动】解算器，如图1-4所示。

#### 步骤4 检查材料属性

Chrome Stainless Steel的材料属性将自动从SolidWorks的模型中导入。

#### 步骤5 定义约束

对音叉手柄末端的球面，添加【固定几何体】的约束，如图1-5所示。

#### 步骤6 划分网格

使用【高】品质单元划分模型网格，保持默认的【单元大小】为1.475mm。

一般地，比起相同模型的应力分析而言，频率分析可以采用更粗糙的网格。然而，由于该模型尺寸很小，所以本例选用默认的单元大小划分网格。

#### 步骤7 运行分析

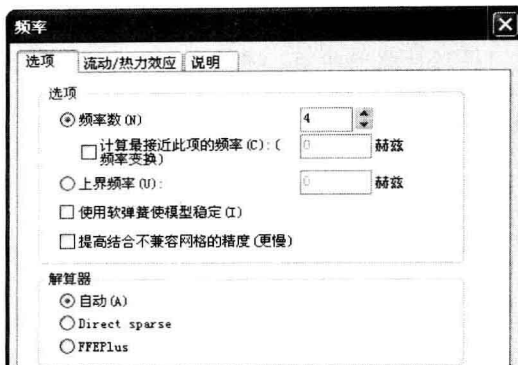


图1-4 设置算例属性

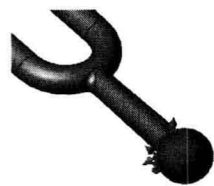


图1-5 定义固定面

### 1.4.1 综合结果

解算完毕后，SolidWorks Simulation生成了4个变形图解，对应于4个要求的频率。频率分析不提供应力和应变的结果。



频率分析并不解算真实的基于时间的问题。

#### 步骤8 列举共振频率

右键单击【结果】文件夹，选择【列举共振频率】，查看【变形】文件夹下的综合结果，如图1-6所示。

在打开的【列举模式】窗口中，显示了“with supports”这个算例中计算出来的所有4个模式的频率。注意第1阶振动模式中根本就不是预期的440Hz，如图1-7所示。

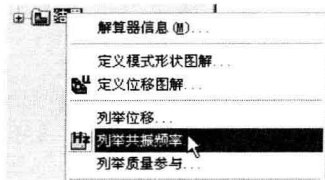


图1-6 列举共振频率

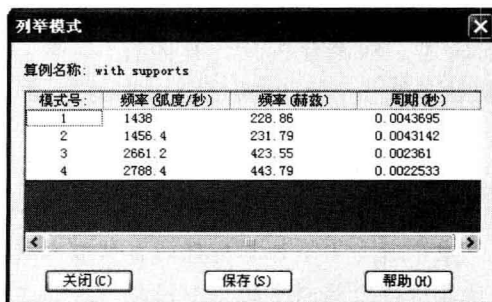


图1-7 列举模式



SolidWorks Simulation在【结果】文件夹下生成了4个变形图解。当完成一个算例后，自动生成默认图解的方法在《SolidWorks® Simulation基础教程》(2012版)的第1章中讨论。

### 步骤 9 图解显示第 1 阶振动模式

得到自然频率后，现在显示对应模式的图解。

右键单击【结果】文件夹并选择【模式形状/位移图解】。【单位】设定为“mm”。【图解步长】中选定第 1 阶振动模式形状。对应的自然频率大小也会显示在上面。单击【√】，如图 1-8 所示。

### 步骤 10 在图解中显示变形的模型

在图解【设定】中，激活选项【将模型叠加于变形形状上】，如图 1-9 所示。

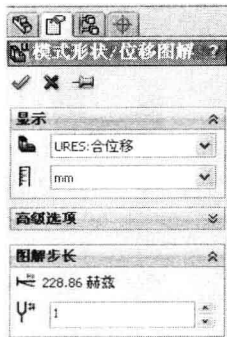


图 1-8 定义模式形状

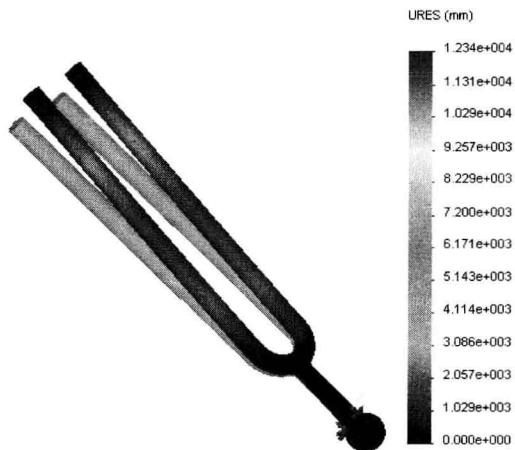


图 1-9 音叉变形前后的位置对比

【动画】显示图解并观察到，在第 1 阶的固有频率中，音叉的两个臂都沿着 XZ 基准面定向振动（两个臂的方向保持一致）。这并不是预期想得到较低 A 音的振动。因此，需要研究较高的模式。

## 1.4.2 频率分析的位移结果

图 1-9 所示的最大位移大约为  $1.234 \times 10^4 \text{ mm}$  (486in)，相比而言音叉的长度仅为 102mm (4in) (注意图解的变形比例为 1:0.000 87)。

位移结果的大小在频率分析中是没有意义的。位移结果只能在相同的振动模式中比较模型不同部位的相对位移，并只能用于相同的振动模式。有意义的位移结果需要进行动态分析，因为存在导致模型振动的时间相关的初始激励力。

如前所述，频率分析只计算固有（共振）频率及对应的振动模式（形状）。在没有促使发生有效运动的初始条件下，可以通过分析自由振动（例如没有阻尼）的运动方程来获取这些重要的结构属性。

### 步骤 11 查看其他模式形状

显示所有 4 个计算所得的自然频率对应的模式形状图解。可以使用自动生成的对应于 4 个计算所得自然频率的变形图解。

把没有变形的外形附加到变形图解上。

当已知一个图解被显示时，右键单击图解图标，并选择【动画】。观察 4 个模式的模拟结果。模拟的结果可以保存为 avi 格式，如图 1-10 所示。

通常认为第 1 阶振动模式为 440Hz 的较低 A 音，而实际上对应着第 4 阶振动模式。