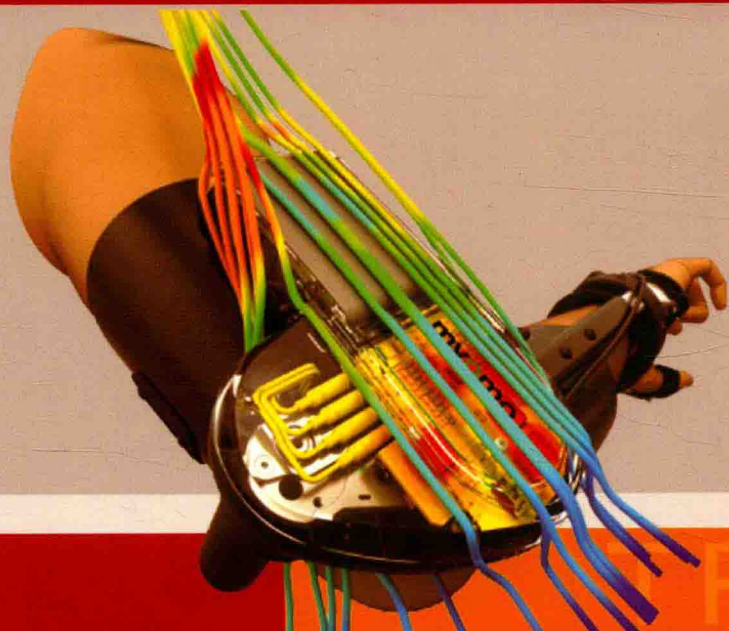


DS SOLIDWORKS

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



2017版

# SOLIDWORKS® Simulation Premium 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



SOLIDWORKS®公司  
官方授权

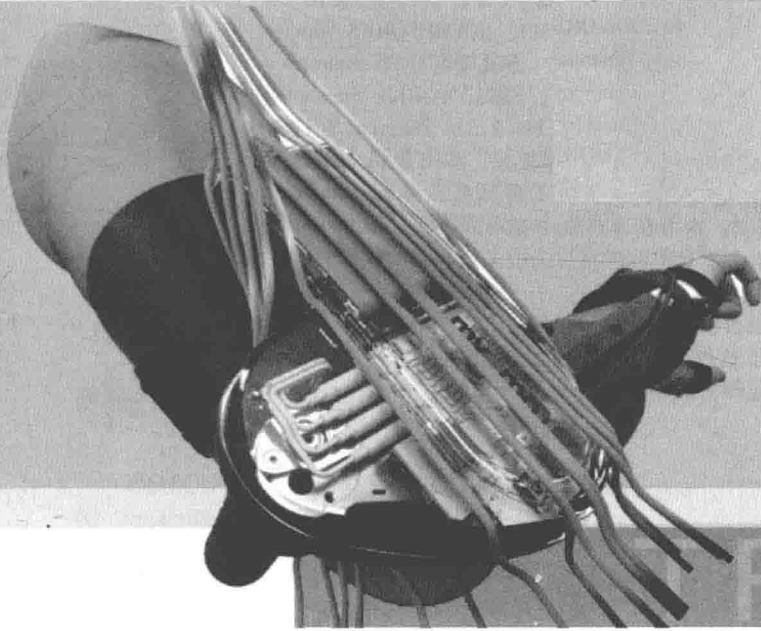
与新版软件同步推出

机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS

练习文件 免费下载  
详见“本书使用说明”

DS SOLIDWORKS

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



2017版

# SOLIDWORKS® Simulation Premium 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 Premium 教程》(2017 版)是根据 DS SOLIDWORKS®公司发布的《SOLIDWORKS® 2017: SOLIDWORKS Simulation Premium—Dynamics》《SOLIDWORKS® 2017: SOLIDWORKS Simulation Premium—Nonlinear》《SOLIDWORKS® 2017: SOLIDWORKS Simulation Premium—Composites》编译而成的,是使用 Simulation Premium 软件对 SOLIDWORKS 模型进行有限元分析的高级培训教程。本书提供了动态分析和非线性分析的有限元求解方法,是机械工程师有效掌握 Simulation Premium 应用技术的进阶资料。本书在介绍软件使用方法的同时,对相关理论知识也进行了讲解。本书配有实例素材及练习文件,方便读者学习使用,详见“本书使用说明”。

本书在保留了英文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,适合企业工程设计人员和高等院校、职业技术学校相关专业师生使用。

## 图书在版编目 (CIP) 数据

SOLIDWORKS® Simulation Premium 教程: 2017 版/  
[美] DS SOLIDWORKS®公司著; 陈超祥, 胡其登主编.  
—3 版. —北京: 机械工业出版社, 2017. 7.

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 - 57313 - 5

I. ①S… II. ①美…②陈…③胡… III. ①机械设  
计 - 计算机辅助设计 - 应用软件 - 教材 IV. ①TH122

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 144691 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: 宋亚东 责任编辑: 宋亚东

封面设计: 路恩中 责任校对: 李锦莉 任秀丽

责任印制: 常天培

北京京丰印刷厂印刷

2017 年 7 月第 3 版·第 1 次印刷

210mm × 285mm · 15.5 印张 · 447 千字

0 001—3 000 册

标准书号: ISBN 978 - 7 - 111 - 57313 - 5

定价: 59.80 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

电话服务

服务咨询热线: 010-88361066

读者购书热线: 010-68326294

010-88379203

封面防伪标均为盗版

网络服务

机工官网: [www.cmpbook.com](http://www.cmpbook.com)

机工官博: [weibo.com/cmp1952](http://weibo.com/cmp1952)

金书网: [www.golden-book.com](http://www.golden-book.com)

教育服务网: [www.cmpedu.com](http://www.cmpedu.com)

## 序



尊敬的中国 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®公司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 2017 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。这些教程可以有效地帮助您把 SOLIDWORKS 2017 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！

Gian Paolo Bassi  
DS SOLIDWORKS®公司首席执行官  
2017 年 1 月



陈超祥 先生 现任 DS SOLIDWORKS®公司亚太区资深技术总监

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 325 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）。

“SOLIDWORKS®公司原版系列培训教程”是根据 DS SOLIDWORKS®公司最新发布的 SOLIDWORKS 2017 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境内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 2017 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 2017 软件不仅在功能上进行了 600 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 Premium 教程》（2017 版）是根据 DS SOLIDWORKS®公司发布的《SOLIDWORKS® 2017: SOLIDWORKS Simulation Premium——Dynamics》《SOLIDWORKS® 2017: SOLIDWORKS Simulation Premium——Nonlinear》《SOLIDWORKS® 2017: SOLIDWORKS Simulation Premium——Composites》编译而成的，是使用 Simulation Premium 软件对 SOLIDWORKS 模型进行有限元



胡其登 先生 现任 DS SOLIDWORKS®公司大中国区技术总监

胡其登先生毕业于北京航空航天大学，先后获得“计算机辅助设计与制造（CAD/CAM）”专业工学学士、工学硕士学位。毕业后一直从事 3D CAD/CAM/PDM/PLM 技术的研究与实践、软件开发、企业技术培训与支持、制造业企业信息化的深化应用与推广等工作，经验丰富，先后发表技术文章 20 余篇。在引进并消化吸收新技术的同时，注重理论与企业实际相结合。在给数以百计的企业进行技术交流、方案推介和顾问咨询等工作的过程中，在如何将 3D 技术成功应用到中国制造业的问题上，形成了自己的独到见解，总结出了推广企业信息化与数字化的最佳实践方法，帮助众多企业从 2D 平滑地过渡到了 3D，并为企业推荐和引进了 PDM/PLM 管理平台。作为系统实施的专家与顾问，在帮助企业成功打造为 3D 数字化企业的实践中，丰富了自身理论与实践的知识体系。

胡其登先生作为中国最早使用 SOLIDWORKS 软件的工程师，酷爱 3D 技术，先后为 SOLIDWORKS 社群培训培养了数以百计的工程师。目前负责 SOLIDWORKS 解决方案在大中国区全渠道的技术培训、支持、实施、服务及推广等全面技术工作。

分析的高级培训教程，提供了动态分析和非线性分析的有限元求解方法，并且在介绍软件使用方法的同时，对相关理论知识也进行了讲解。

本套教程在保留了英文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！

本套教程由 DS SOLIDWORKS®公司亚太区资深技术总监陈超祥先生和大中国区技术总监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副总经理陈志杨负责审校。承担编译、校对和录入工作的有叶伟、张曦、单少南、刘红政、周忠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，对参与本书编译的工作人员表示诚挚的感谢。

由于时间仓促，书中难免存在不足之处，恳请广大读者批评指正。

陈超祥 胡其登  
2017 年 1 月

# 本书使用说明

## 关于本书

本书的目的是让读者学习如何使用 SOLIDWORKS 软件的多种高级功能，着重介绍了使用 SOLIDWORKS 软件进行高级设计的技巧和相关技术。

SOLIDWORKS 2017 是一个功能强大的机械设计软件，而书中篇幅有限，不可能覆盖软件的每一个细节和各个方面，所以只重点给读者讲解应用 SOLIDWORKS 2017 进行工作所必需的基本技能和主要概念。本书作为在线帮助系统的一个有益的补充，不可能完全替代软件自带的在线帮助系统。读者在对 SOLIDWORKS 2017 软件的基本使用技能有了较好的了解之后，就能够参考在线帮助系统获得其他常用命令的信息，进而提高应用水平。

## 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《SOLIDWORKS® Simulation 基础教程（2016 版）》《SOLIDWORKS® Simulation 高级教程（2016 版）》。
- 掌握有限元分析的基本概念。

## 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。通过一个个应用实例来演示这些过程和步骤，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。

## 知识卡片

除了每章的研究实例和练习外，书中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。

## 使用方法

本书的目的是希望读者在有 SOLIDWORKS 软件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。

读者可以使用练习题来理解和练习书中讲解的或教师演示的内容。本书设计的练习题代表了典型的设计和建模情况，读者完全能够在课堂上完成。应该注意到，学生的学习进度是不同的，因此，书中所列出的练习题比一般读者能在课堂上完成的要多，这确保了学习能力强的读者也有练习可做。

## 标准、名词术语及单位

SOLIDWORKS 软件支持多种标准，如中国国家标准（GB）、美国国家标准（ANSI）、国际标准（ISO）、德国国家标准（DIN）和日本国家标准（JIS）。本书中的例子和练习基本上采用了中国国家标准（除个别为体现软件多样性的选项外）。为与软件保持一致，本书中一些名词术语和计量单位未与中国国家标准保持一致，请读者使用时注意。

## 练习文件

读者可以从网络平台下载本教程的练习文件，具体方法是：扫描封底的“机械工人之家”微信公众号，关注后输入“2017SP”即可获取下载地址。



机械工人之家

## Windows® 7

本书所用的截屏图片是 SOLIDWORKS 2017 运行在 Windows® 7 时制作的。

## 格式约定

本书使用以下的格式约定：

约 定	含 义	约 定	含 义
【插入】/【凸台】	表示 SOLIDWORKS 软件命令和选项。 例如【插入】/【凸台】表示从下拉菜单【插入】中选择【凸台】命令	 注意	软件使用时应注意的问题
 提示	要点提示	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
 技巧	软件使用技巧		

## 色彩问题

SOLIDWORKS 2017 英文原版教程是采用彩色印刷的，而我们出版的中文教程采用黑白印刷，所以本书对英文原版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。



## 更多 SOLIDWORKS 培训资源

my.solidworks.com 提供更多的 SOLIDWORKS 内容和服务，用户可以在任何时间、任何地点，使用任何设备查看。用户也可以访问 [my.solidworks.com/training](http://my.solidworks.com/training)，按照自己的计划和节奏来学习，以提高 SOLIDWORKS 技能。

## 用户组网络

SOLIDWORKS 用户组网络 (SWUGN) 有很多功能。通过访问 [swugn.org](http://swugn.org)，用户可以参加当地的会议，了解 SOLIDWORKS 相关工程技术主题的演讲以及更多的 SOLIDWORKS 产品，或者与其他用户通过网络进行交流。

# 目 录

序	
前言	
本书使用说明	
<b>第 1 章 一根弯管的振动</b> .....	1
1.1 项目描述 .....	1
1.2 静态分析 .....	1
1.3 频率分析 .....	3
1.4 动态分析 (缓慢作用力) .....	4
1.5 动态分析 (快速作用力) .....	9
<b>第 2 章 基于标准 MILS-STD-810G 的瞬态振动分析</b> .....	11
2.1 项目描述 .....	11
2.1.1 质量参与因子 .....	14
2.1.2 阻尼 .....	17
2.1.3 粘性阻尼 .....	17
2.1.4 时间步长 .....	19
2.2 带远程质量的模型 .....	25
<b>第 3 章 支架的谐波分析</b> .....	30
3.1 项目描述 .....	30
3.1.1 谐波分析基础 .....	30
3.1.2 单自由度振荡器 .....	30
3.2 一个支架的谐波分析 .....	31
<b>第 4 章 响应波谱分析</b> .....	38
4.1 响应波谱分析 .....	38
4.1.1 响应波谱 .....	38
4.1.2 响应波谱分析过程 .....	39
4.2 项目描述 .....	39
4.2.1 响应波谱输入 .....	41
4.2.2 模态组合方法 .....	42
<b>第 5 章 基于 MIL-STD-810G 的随机振动分析</b> .....	44
5.1 项目描述 .....	44
5.2 分布质量 .....	47
5.3 随机振动分析 .....	49
5.4 功率谱密度函数 .....	51
5.5 加速度 PSD 的总体水平 .....	52
5.6 分贝 .....	53
5.7 随机算例属性 .....	54
5.8 高级选项 .....	55
5.9 RMS 结果 .....	55
5.10 PSD 结果 .....	57
5.11 高阶结果 .....	58
练习 5-1 电子设备外壳的随机振动分析 .....	60
练习 5-2 电路板的疲劳评估 .....	66
<b>第 6 章 随机振动疲劳</b> .....	70
6.1 项目描述 .....	70
6.1.1 随机振动疲劳的概念 .....	71
6.1.2 材料属性和 S-N 曲线 .....	71
6.1.3 随机振动疲劳选项 .....	73
6.2 总结 .....	75
<b>第 7 章 电子设备外壳的非线性动态分析</b> .....	76
7.1 项目描述 .....	76
7.2 线性动态分析 .....	76
7.3 非线性动态分析 .....	77
7.3.1 线性与非线性动态分析对比 .....	77
7.3.2 瑞利阻尼 .....	78
7.3.3 时间积分方法 .....	79
7.3.4 迭代方法 .....	80
7.3.5 讨论 .....	81
7.4 总结 .....	82
<b>第 8 章 大型位移分析</b> .....	83
8.1 实例分析: 软管夹 .....	83
8.2 线性静应力分析 .....	84
8.2.1 辅助边界条件 .....	85
8.2.2 解算器 .....	86
8.2.3 几何线性分析: 局限性 .....	87
8.3 非线性静应力分析 .....	88
8.3.1 时间曲线 (加载函数) .....	88
8.3.2 固定增量 .....	89

8.3.3 大型位移选项：非线性分析	89	练习 11-1 使用非线性材料对横梁进行 应力分析	143
8.3.4 分析失败：大载荷步长过大	90	练习 11-2 油井管连接	147
8.3.5 固定时间增量的不足	92	<b>第 12 章 硬化规律</b>	149
8.4 线性静应力分析（大型位移）	94	12.1 概述	149
8.5 总结	95	12.2 实例分析：曲柄	149
8.6 提问	96	12.3 各向同性硬化	149
<b>第 9 章 增量控制技术</b>	97	12.4 运动硬化	153
9.1 概述	97	12.5 讨论	154
9.1.1 力控制	97	12.6 总结	155
9.1.2 位移控制	97	12.7 提问	155
9.2 实例分析：蹦床	98	<b>第 13 章 弹性体分析</b>	156
9.3 非线性分析：力控制	101	13.1 实例分析：橡胶管	156
9.3.1 平面薄膜的初始不稳定性	103	13.2 两常数 Mooney-Rivlin (1 材料曲线)	156
9.3.2 重新开始	105	13.3 两常数 Mooney-Rivlin (2 材料曲线)	160
9.3.3 分析进度对话框	105	13.4 两常数 Mooney-Rivlin (3 材料曲线)	161
9.3.4 薄膜分析结果	106	13.5 六常数 Mooney-Rivlin (3 材料曲线)	163
9.4 非线性分析：位移控制	107	13.6 总结	164
9.4.1 位移控制方法：位移约束	107	13.7 提问	164
9.4.2 单自由度控制局限	108	<b>第 14 章 非线性接触分析</b>	165
9.4.3 在位移控制方法中的加载 模式	108	14.1 实例分析：橡胶管	165
9.5 总结	111	14.2 装配的不稳定性	170
9.6 提问	111	14.3 静应力分析的有效性和局限	173
<b>第 10 章 非线性静应力屈曲分析</b>	112	14.4 总结	173
10.1 实例分析：柱形壳体	112	14.5 提问	173
10.2 线性屈曲分析	112	练习 14-1 减速器	174
10.3 线性静应力分析	115	练习 14-2 橡胶密封圈	174
10.4 非线性静应力屈曲分析	116	<b>第 15 章 金属成形</b>	176
10.4.1 非线性对称屈曲	116	15.1 折弯	176
10.4.2 非线性非对称屈曲	121	15.2 实例分析：薄板折弯	176
10.5 总结	124	15.3 平面应变	177
10.6 提问	124	15.4 大型应变选项	183
练习 10-1 架子的非线性分析	125	15.5 收敛问题	184
练习 10-2 遥控器按钮的非线性分析	130	15.6 自动步进问题	184
<b>第 11 章 塑性变形</b>	133	15.7 讨论	187
11.1 概述	133	15.8 小型应变与大型应变公式的比较	188
11.2 实例分析：纸夹	133	15.9 总结	189
11.3 线弹性	134	15.10 提问	190
11.4 非线性：von Mises	135	练习 大型应变接触仿真：折边	190
11.5 非线性：Tresca	140	<b>第 16 章 复合材料仿真</b>	191
11.6 讨论	141	16.1 复合材料	191
11.7 应力精度（选修）	141	16.2 复合材料铺层	191
11.8 网格切片	142	16.3 复合材料层压板	192
11.9 总结	143		
11.10 提问	143		

16.4 SOLIDWORKS 仿真进阶：复合材料 .....	192	练习 有效的材料属性 .....	206
16.5 实例分析：滑板 .....	193	附录 .....	213
16.5.1 项目描述 .....	193	附录 A 非线性结构分析 .....	213
16.5.2 铺层属性 .....	194	附录 B 几何非线性分析 .....	215
16.6 复合材料选项 .....	196	附录 C 材料模型和本构关系 .....	216
16.7 复合材料方向 .....	196	附录 D 非线性 FEA 的数值方法 .....	229
16.8 偏移 .....	197	附录 E 接触分析 .....	231
16.9 复合材料后处理 .....	200		
16.10 总结 .....	205		

# 第 1 章 一根弯管的振动

## 学习目标



- 理解静态和动态方法的区别，并学会选用算例
- 定义并完成一个基础的动力学瞬态分析
- 理解模态分析方法的基础

## 1.1 项目描述

本章将分析研究一根弯管受到 450N 的瞬态载荷时的动态响应，如图 1-1 所示。在运行动态分析之前，首先将运行一次静态算例，以验证静态应力是低于材料屈服强度的。然后逐渐增加载荷，研究在不同情况下的结果。如果载荷加载得足够慢，则静态算例的结果能够很好地体现模型的性能，然而，如果载荷加载得非常突然，则静态算例的结果会显著不同。

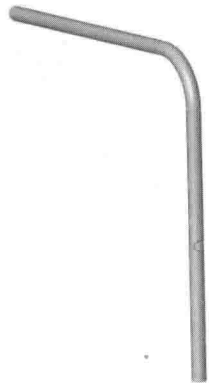


图 1-1 弯管

## 1.2 静态分析

下面将使用线性静态分析求解该问题，假定载荷加载得十分缓慢，所有惯性和阻力效应都可以忽略。

### 操作步骤

#### 步骤 1 打开零件

打开文件夹 Lesson01\Case Study 下的文件“pipe”。查看这个模型，发现在模型的竖直部分有一个橙色的小圆面，创建这个曲面是为了在此位置加载横向载荷。

#### 步骤 2 定义静态算例

创建一个名为“Static”的【静应力分析】算例。

#### 步骤 3 排除实体

在零件目录下，对三个实体选择【不包括在分析中】，如图 1-2 所示。

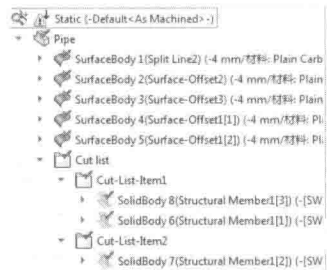


图 1-2 排除实体

### 步骤 4 定义壳体

对五个曲面进行【编辑定义】，指定【厚】壳的类型，并在【抽壳厚度】中输入数值 4mm。壳体的材料与 SOLIDWORKS 模型保持一致，验证应用的材料为【普通碳钢】，并查看材料的属性。

### 步骤 5 定义力

在弯管的橙色表面定义一个 450N 的【力】，【选定的方向】选择 Right 基准面，如图 1-3 所示。

### 步骤 6 定义约束

对弯管底部外边界应用一个【固定几何体】夹具，如图 1-4 所示。



图 1-3 定义力

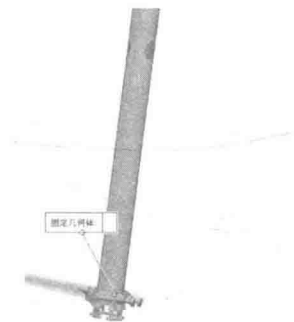


图 1-4 定义约束

Static 算例到此已经设定完毕，请再次检查确定力是从 X 方向作用于面上的，算例中的所有特征都已正确设定。

### 步骤 7 划分网格

采用默认设置生成【高】品质的网格，使用【标准网格】进行划分。

### 步骤 8 运行算例

### 步骤 9 应力结果

图解显示模型中的 von Mises 应力，如图 1-5 所示。

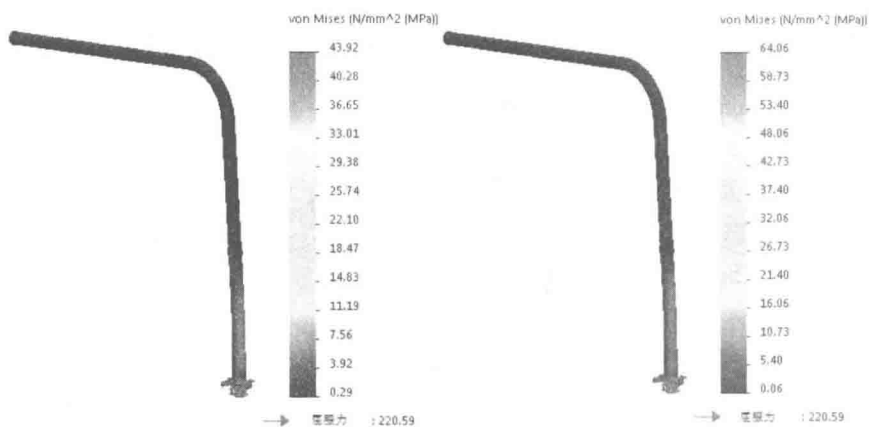


图 1-5 应力结果

注意，模型中的最大应力远远小于普通碳钢的屈服强度。

#### 步骤10 位移结果

图解显示位移结果，可以看出相对于模型尺寸而言，位移是小的，如图1-6所示。

弯管顶部的最大位移为1.84mm。

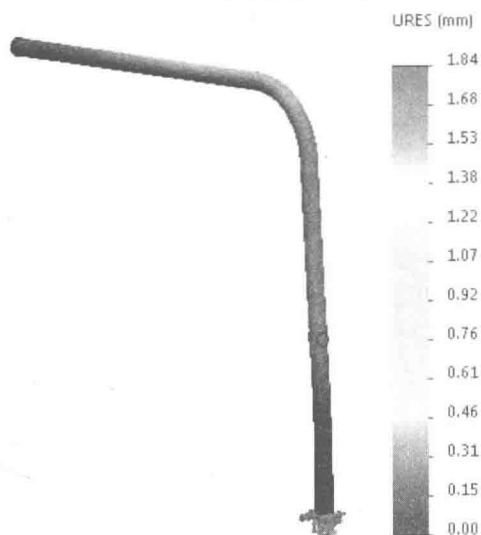


图1-6 位移结果

### 1.3 频率分析

一般而言，在尝试动态分析之前，强烈推荐用户先运行一次频率分析。自然频率和振动模式在结构特征中是非常重要的，它们可以提供一些预见性的信息，例如一个结构件如何发生摆动，以及载荷是否会激发某些重要的模式。

在本章后面将看到，线性动态分析将使用模态分析的方法进行求解，由于这种方法需要用到结构的自然频率和模式，因此在进行实际的线性动态分析之前需要先进行频率分析。

#### 步骤11 运行频率分析

创建一个【频率】算例。将之前算例中的壳体定义，夹具和网格拖入到此算例中。运行该算例，以获取这个模型的前五个自然频率，如图1-7所示。

模式号	频率(弧度/秒)	频率(赫兹)	周期(秒)
1	154.84	24.644	0.040578
2	165.5	26.341	0.037964
3	448.71	71.414	0.014003
4	453.87	72.236	0.013843
5	2039.5	324.59	0.0030808

图1-7 获取自然频率

注意到自然频率的最大周期大约为0.04s。用图解表示这些频率对应的变形情况，并将它们与未变形的模型进行比较，如图1-8所示。

对这些频率的模态进行动画演示，以理解它们的变形特性。

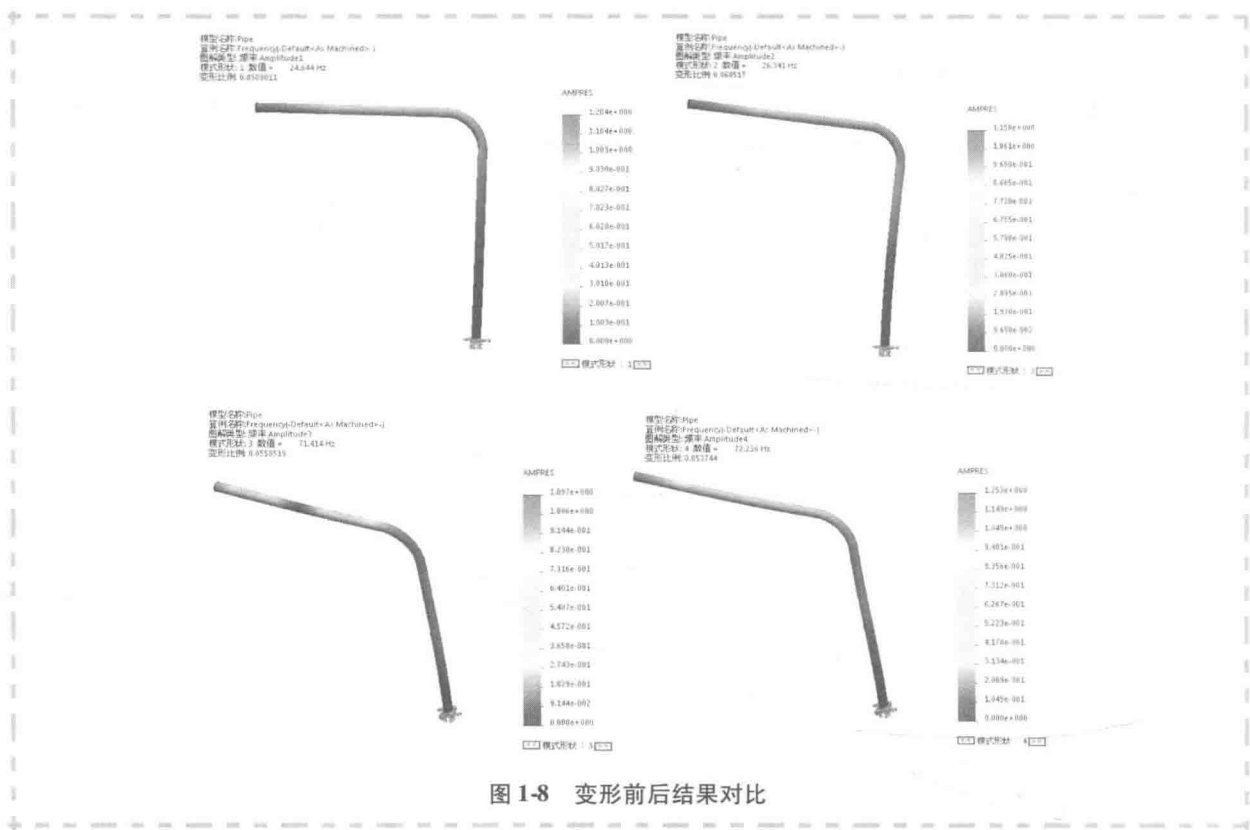


图 1-8 变形前后结果对比

**讨论** 位移的大小并不代表振动结构的真实位移。在频率分析中，如果结构件在给定模式下发生振动，位移大小可以用于确定结构上特定位置相对于其他位置的位移。注意，第二个和第四个频率模式显示了 X 方向上的变形。

在静态算例中，假定力不随时间发生变化。在接下来的算例中将考虑几种情况，即力随着不同的速率发生变化。

下面将介绍两种加载工况：在第一个工况中，载荷在 0.5s 内由 0 缓慢上升至 450N；在第二个工况中，载荷在 0.05s 内由 0 快速上升至 450N，如图 1-9 所示。

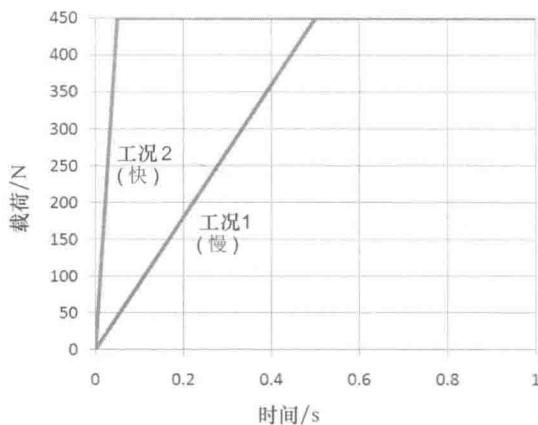


图 1-9 两种载荷的加载方式

## 1.4 动态分析（缓慢作用力）

本部分将分析在缓慢加载力的作用下弯管结构的瞬态响应。

注意，本章不会在这个动态求解分析中加载阻尼。阻尼的问题将在第 2 章讨论。



运动的结构矩阵方程式表达如下

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{F(t)\}$$

式中,  $[M]$ 、 $[C]$  和  $[K]$  分别代表质量、阻尼和刚度矩阵,  $\{\ddot{u}\}$ 、 $\{\dot{u}\}$ 、 $\{u\}$  和  $\{F(t)\}$  分别代表节点加速度、速度、位移和与时间相关的力。当这个有限元模型由大量自由度数量  $n$  (有限元网格节点处的位移未知) 表示时, 上面的矩阵具有很大规模, 问题的求解可能需要占用相当多的计算资源和时间。

在这个线性动态分析工况中 (具有线性弹性材料的小位移分析模型), 上面的复杂问题可以使用模态分析方法来进行求解。通过使用这种方法, 可以使耦合了  $n$  个运动方程组的复杂系统简化为  $m$  个独立的 (解耦的) 运动方程, 它们具有以下形式

$$\ddot{x}_1 + \lambda_1 \dot{x}_1 + \Delta_1^2 x_1 = r_1(t)$$

式中,  $\lambda_1$  和  $\Delta_1^2$  为特定的常数,  $m$  代表使用频率分析计算得到的内在的自然模式数量, 上面的方程式对应着模式 1 (注意其下标为 1)。对  $m$  个解耦的方程组进行求解速度会快很多, 而且复杂程度也大大降低, 它们的组合也提供了最初有限元模型的位移解。

模态分析需要自然频率和振动模式。为了继续进行线性动态分析, 必须首先完成频率分析。

### 步骤 12 对缓慢加载的实例 (实例 1) 生成一个线性动态算例

生成一个名为 “Slow force” 的算例。【类型】选择【线性动力】, 并单击【模态时间历史】, 如图 1-10 所示。

### 步骤 13 生成壳体、约束及网格

从之前的算例中拖入壳体定义夹具、力和网格。

### 步骤 14 定义力

在【随时间变化】选项组中选择【曲线】并单击【编辑】按钮, 如图 1-11 所示。



图 1-10 定义算例



图 1-11 编辑曲线

在【曲线信息】中, 输入【名称】为 “Slow”, 并按照表 1-1 中的数值输入数据。