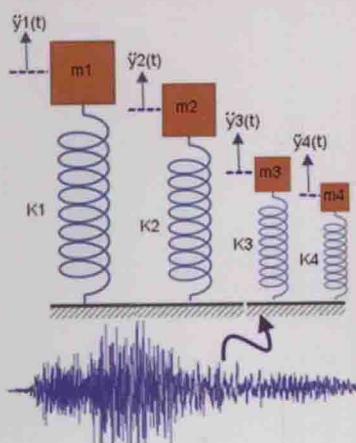




SOLIDWORKS® 公司原版系列培训教程
CSWP 全球专业认证考试培训教程



2015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



典型实例
练习素材

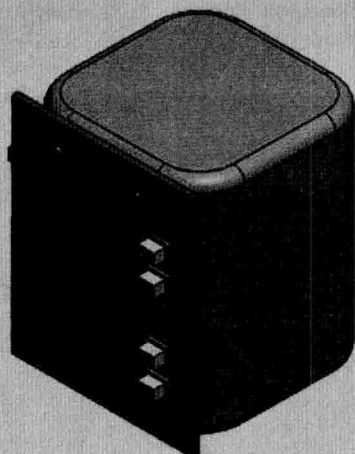
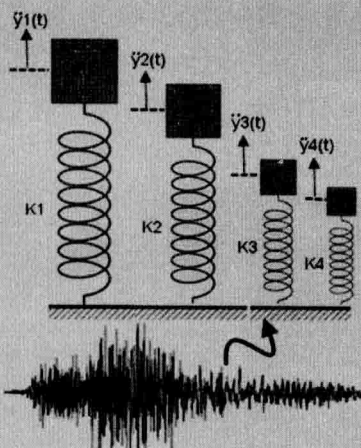
机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

SOLIDWORKS 公司
独家授权

与新版软件同步推出



SOLIDWORKS® 公司原版系列:
CSWP 全球专业认证考试培训教材



2015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® Simulation Premium 教程》(2015 版)是根据 DS SOLIDWORKS®公司发布的《SOLIDWORKS® 2015: SOLIDWORKS Simulation Premium—Dynamics》和《SOLIDWORKS® 2015: SOLIDWORKS Simulation Premium—Nonlinear》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。本书配有光盘,内含实例素材及练习文件,方便读者学习使用。

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: 2015 版/
[美] DS SOLIDWORKS®公司著; 陈超祥, 胡其登主编.
—2 版. —北京: 机械工业出版社, 2015. 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 - 50702 - 4

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 (2015) 第 144037 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 责任印制: 康朝琦
北京京丰印刷厂印刷
2015 年 9 月第 2 版·第 1 次印刷
210mm × 285mm · 13.75 印张 · 405 千字
0 001—3 500 册
标准书号: ISBN 978 - 7 - 111 - 50702 - 4
ISBN 978 - 7 - 89045 - 816 - 4 (光盘)
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

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

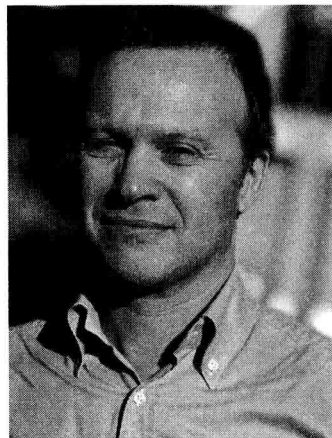
010-88379203

金书网: www.golden-book.com

封面防伪标均为盗版

教育服务网: www.cmpedu.com

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。这些价值观中有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 2015 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 2015 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 能够有助于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更具创新性的产品。

此致

敬礼！

Gian Paolo Bassi
DS SOLIDWORKS®公司首席执行官
2015 年 1 月



SOLIDWORKS 陈超祥 先生 现任 DS 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 2015 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 2015 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 2015 不仅在功能上进行了 300 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》（2015 版）是根据 DS SOLIDWORKS®公司发布的《SOLIDWORKS® 2015: SOLIDWORKS Simulation Premium—Dynamics》和《SOLIDWORKS® 2015: SOLIDWORKS Simulation Premium—Nonlinear》编译而成的，是使用 Simulation Premium 软件对 SOLIDWORKS 模型进



SOLIDWORKS 胡其登 先生 现任 DS SOLIDWORKS®公司大中国地区技术总监

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。胡其登先生长期从事 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。

行有限元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®公司亚太地区技术总监陈超祥先生和大中国地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总经理彭维、技术经理邱小平负责审校。承担编译、校对和录入工作的有满小云、杜象浩、童志强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

2015 年 1 月

丛书使用说明

关于本丛书

本丛书的目的是让读者学习如何使用 SOLIDWORKS 机械设计自动化软件来建立零件和装配体的参数化模型，同时介绍如何利用这些零件和装配体来建立相应的工程图。

SOLIDWORKS 2015 是一个功能强大的机械设计软件，而书中章节有限，不可能覆盖软件的每一个细节和各个方面。所以将重点给读者讲解应用 SOLIDWORKS 2015 进行工作所必需的基本技术和主要概念。本丛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。在读者对 SOLIDWORKS 2015 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。
- 掌握 SOLIDWORKS Simulation 软件的基础知识，并完成 Simulation 基础教程中的练习。
- 掌握有限元分析的基本概念。
- 已经学习了 Simulation 在线指导教程，可以通过帮助菜单命令在线学习。
- 使用 Windows 操作系统的经验。

编写原则

本丛书是基于过程或任务的方法而设计的培训教程，并不是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遵循的过程和步骤。通过对每一个应用实例的学习来演示这些过程和步骤，读者将学会为完成一项特定设计任务所采取的方法，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

本丛书的目的是希望读者在有 SOLIDWORKS 使用经验的教师指导下，在培训课中进行学习，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应用和练习书中讲解的或教师演示的内容。本丛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，学生的学习速度是不同的，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，这确保了学习最快的读者也有练习可做。

标准及名词术语

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）。本丛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，书中一些名词术语未与国家标准对应，如“形位公差”指“几何公差”，“剖面视图”指“剖视图”等，请读者使用时注意。

配套光盘

书中的配套光盘中收录了课程中所需要的各种文件，包括操作视频、课堂实例和练习题。课堂实例和练习题文件按照章节进行编排。每章的文件放在相应章节的子文件夹下，例如，第6章的文件位于光盘的“Lesson06”文件夹中。每章中的“Case Study”子文件夹包含了教师在课堂上演示的实例，“Exercises”子文件夹包含了做练习题所需要的参考文件。

读者也可以从 SOLIDWORKS 官方网站下载本教程的整套练习文件，网址是 www.SOLIDWORKS.com，进入后单击 Support，然后单击 Training，在 TRAINING FILES 下单击 SOLIDWORKS，这时将会看到一个专门用于下载练习文件的链接，这些练习文件都是有标记并且可以自解压的文件包。

模板的使用

如果光盘中包含一个名为“Training Templates”（模板及图框）的文件夹，则表明该文件夹收录了读者在以后的练习中将会使用到的模板或者样块文件，请读者事先对这些文件进行如下操作：

- 将文件扩展名为“prt-dot”的模板文件复制到：

“系统安装目录\ProgramData\SOLIDWORKS\SOLIDWORKS 2015\templates”文件夹下。

- 将文件扩展名为“sld-drt”的标准图框文件复制到：

“系统安装目录\ProgramData\SOLIDWORKS\SOLIDWORKS 2015\lang\chinese-simplified\sheetformat”文件夹下。




- 将字体文件“simfang1.ttf”复制到 Windows 系统的“Fonts”文件夹下。

Windows® 7

书中所用的截屏图片是 SOLIDWORKS 2015 运行在 Windows® 7 时制作的。

格式约定

书中使用以下的格式约定：

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
	要点提示
	软件使用技巧
	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

色彩问题

SOLIDWORKS® 2015 英文原版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，所以本丛书对英文原版教程中出现的颜色信息作了一定的调整，以便尽可能地方便读者理解书中的内容。

目 录

序

前言

本书使用说明

第 1 章 一根弯管的振动	1	5.6 分贝	53
1.1 项目描述	1	5.7 随机算例属性	54
1.2 静态分析	1	5.8 高级选项	55
1.3 频率分析	3	5.9 RMS 结果	55
1.4 动态分析 (缓慢作用力)	4	5.10 PSD 结果	57
1.5 动态分析 (快速作用力)	9	5.11 高阶结果	58
第 2 章 基于标准 MILS-STD-810G 的 瞬态振动分析	11	练习 5-1 电子设备外壳的随机振动 分析	60
2.1 项目描述	11	练习 5-2 电路板的疲劳评估	66
2.1.1 质量参与因子	14	第 6 章 随机振动疲劳	70
2.1.2 阻尼	17	6.1 项目描述	70
2.1.3 粘性阻尼	17	6.1.1 随机振动疲劳的概念	71
2.1.4 时间步长	19	6.1.2 材料属性和 S-N 曲线	71
2.2 带远程质量的模型	25	6.1.3 随机振动疲劳选项	74
第 3 章 支架的谐波分析	30	6.2 总结	75
3.1 项目描述	30	第 7 章 电子设备外壳的非线性动态 分析	76
3.1.1 谐波分析基础	30	7.1 项目描述	76
3.1.2 单自由度振荡器	30	7.2 线性动态分析	76
3.2 一个支架的谐波分析	31	7.3 非线性动态分析	77
第 4 章 响应波谱分析	38	7.3.1 线性与非线性动态分析对比	77
4.1 响应波谱分析	38	7.3.2 瑞利阻尼	78
4.1.1 响应波谱	38	7.3.3 时间积分方法	79
4.1.2 响应波谱分析过程	39	7.3.4 迭代方法	80
4.2 项目描述	39	7.3.5 讨论	81
4.2.1 响应波谱输入	41	7.4 总结	82
4.2.2 模式组合方法	42	第 8 章 大型位移分析	83
第 5 章 基于 MIL-STD-810G 的随机 振动分析	44	8.1 实例分析: 软管夹	83
5.1 项目描述	44	8.2 线性静应力分析	84
5.2 分布质量	47	8.2.1 辅助边界条件	85
5.3 随机振动分析	49	8.2.2 解算器	86
5.4 功率谱密度函数	51	8.2.3 几何线性分析: 局限性	87
5.5 加速度 PSD 的总体水平	52	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	第 12 章 硬化规律	144
8.3.4 分析失败：大载荷步长过大	90	12.1 概述	144
8.3.5 固定时间增量的不足	92	12.2 实例分析：曲柄	144
8.4 线性静应力分析（大型位移）	94	12.3 各向同性硬化	144
8.5 总结	95	12.4 运动硬化	148
8.6 提问	96	12.5 讨论	149
第 9 章 增量控制技术	97	12.6 总结	150
9.1 概述	97	12.7 提问	150
9.1.1 力控制	97	第 13 章 弹性体分析	151
9.1.2 位移控制	97	13.1 实例分析：橡胶管	151
9.2 实例分析：蹦床	98	13.2 两常数 Mooney-Rivlin（1 材料曲线）	151
9.3 非线性分析：力控制	101	13.3 两常数 Mooney-Rivlin（2 材料曲线）	155
9.3.1 平面薄膜的初始不稳定性	103	13.4 两常数 Mooney-Rivlin（3 材料曲线）	156
9.3.2 重新开始	105	13.5 六常数 Mooney-Rivlin（3 材料曲线）	158
9.3.3 分析进度对话框	105	13.6 总结	159
9.3.4 薄膜分析结果	106	13.7 提问	159
9.4 非线性分析：位移控制	107	第 14 章 非线性接触分析	160
9.4.1 位移控制方法：位移约束	107	14.1 实例分析：橡胶管	160
9.4.2 单自由度控制局限	108	14.2 装配的不稳定性	165
9.4.3 在位移控制方法中的加载模式	108	14.3 静应力分析的有效性和局限	168
9.5 总结	111	14.4 总结	168
9.6 提问	111	14.5 提问	168
第 10 章 非线性静应力屈曲分析	112	练习 14-1 减速器	169
10.1 实例分析：柱形壳体	112	练习 14-2 橡胶密封圈	169
10.2 线性屈曲分析	112	第 15 章 金属成形	171
10.3 线性静应力分析	115	15.1 折弯	171
10.4 非线性静应力屈曲分析	116	15.2 实例分析：薄板折弯	171
10.4.1 非线性对称屈曲	116	15.3 平面应变	172
10.4.2 非线性非对称屈曲	121	15.4 大型应变选项	178
10.5 总结	124	15.5 收敛问题	179
10.6 提问	124	15.6 自动步进问题	179
练习 架子的非线性分析	125	15.7 讨论	182
第 11 章 塑性变形	130	15.8 小型应变与大型应变公式的比较	183
11.1 概述	130	15.9 总结	184
11.2 实例分析：纸夹	130	15.10 提问	185
11.3 线弹性	131	练习 大型应变接触仿真：折边	185
11.4 非线性：von Mises	132	附录	186
11.5 非线性：Tresca	137	附录 A 非线性结构分析	186
11.6 讨论	138	附录 B 几何非线性分析	188
11.7 总结	138	附录 C 材料模型和本构关系	189
11.8 提问	139	附录 D 非线性 FEA 的数值方法	202
练习 11-1 使用非线性弹性材料对横梁进行应力分析	139	附录 E 接触分析	204
练习 11-2 油井管连接	142		

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。

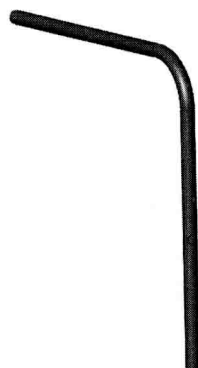


图 1-1 弯管

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。

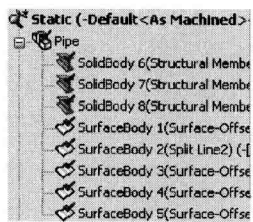


图 1-2 排除实体

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。

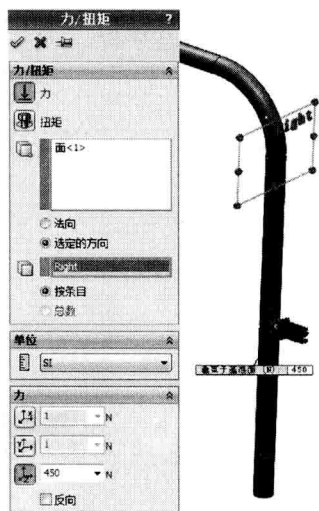


图 1-3 定义力



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。

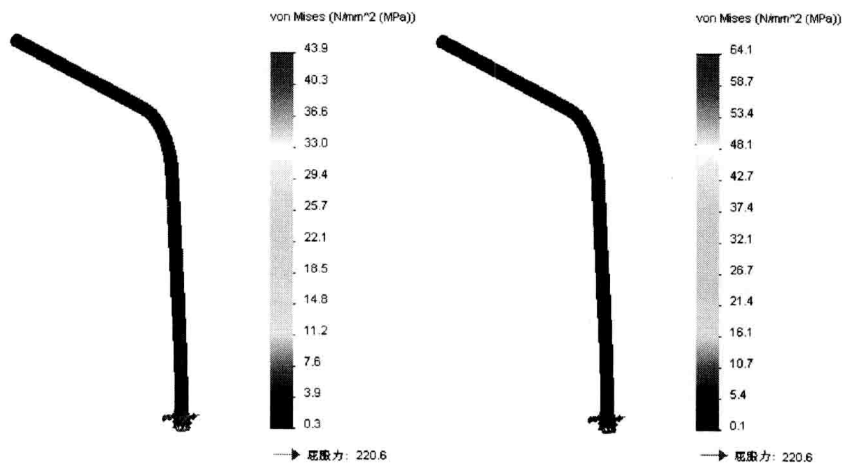


图 1-5 应力结果

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。

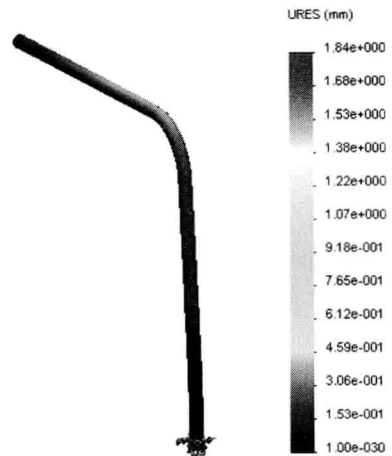


图 1-6 位移结果

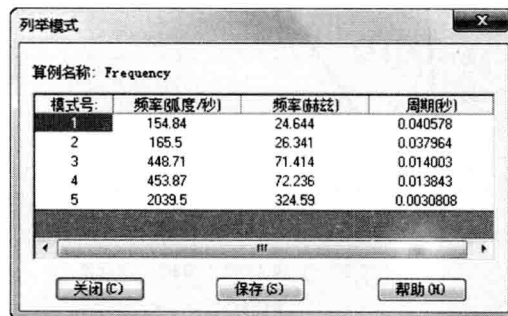
1.3 频率分析

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。

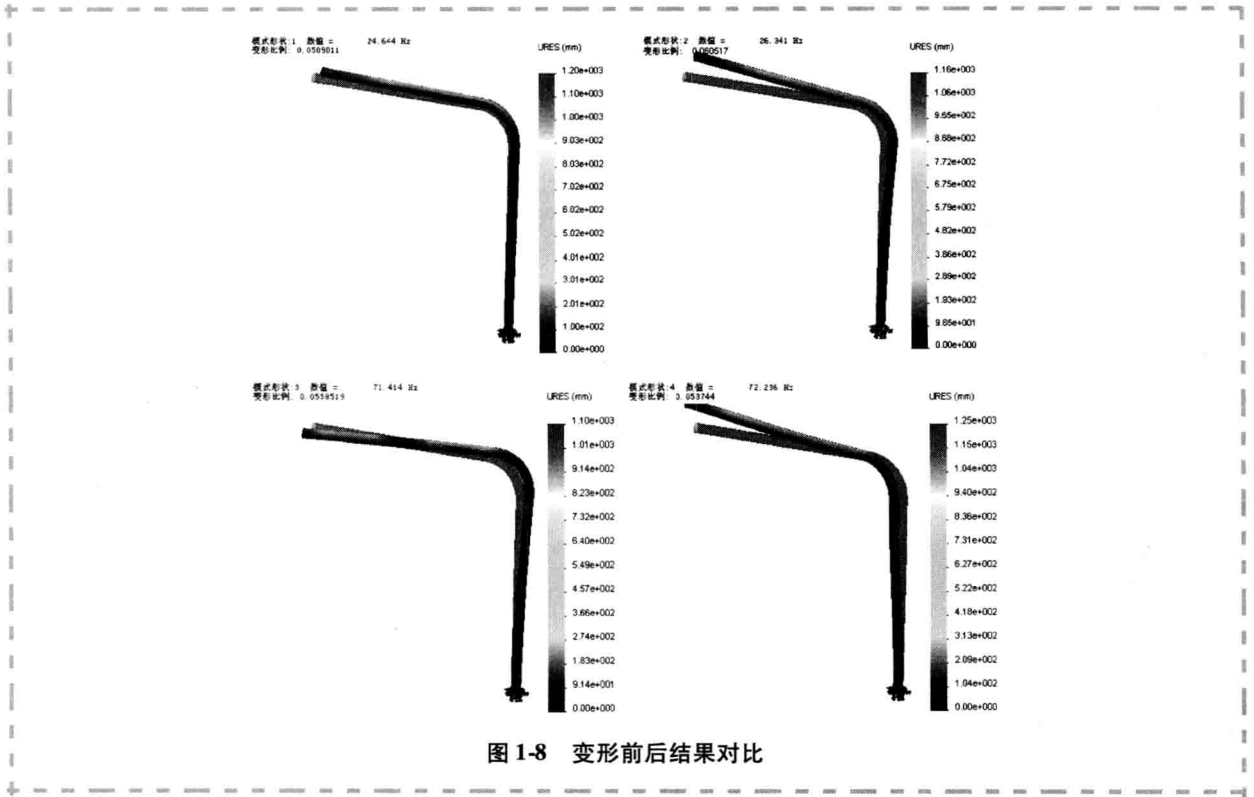


模式号	频率(弧度/秒)	频率(赫兹)	周期(秒)
1	154.84	24.644	0.040578
2	165.5	26.341	0.037964
3	448.71	71.414	0.014003
4	453.87	72.236	0.013843
5	2039.5	324.59	0.0030808

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。



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。

在这个静态算例中，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情况的实例：在第一个加载的实例中，载荷在 0.5s 内由 0 缓慢上升至 450N。在第二个加载的实例中，载荷在 0.05s 内由 0 快速上升至 450N，如图 1-9 所示。

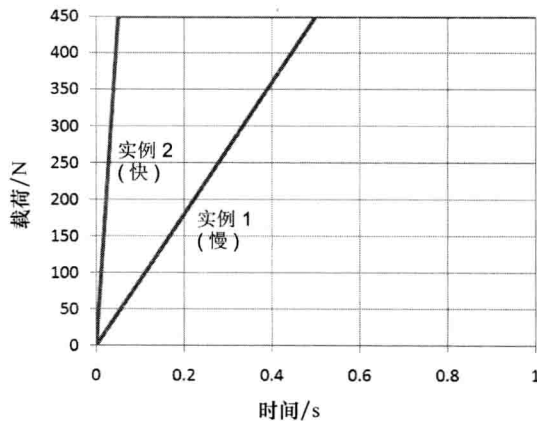


图 1-9 两种载荷的加载方式

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方法中加载阻尼。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的实例中 (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, λ_1 和 Δ_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。

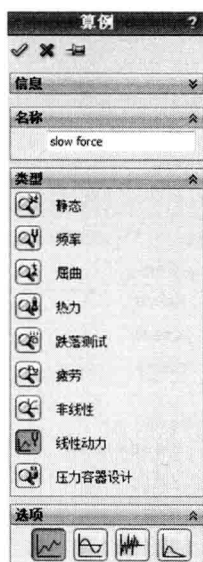


图 1-10 定义算例



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。

表 1-1 输入数值表

X	Y
0	0
0.5	1
1	1

栏目 X 显示的是时间（按秒计），栏目 Y 显示的是乘法因子，它将作用于输入在【力】值中的力，如图 1-12 所示。

在【时间曲线】对话框中单击【确定】，然后单击【力】PropertyManager 中的【确定】。

步骤 15 设置算例属性

右键单击算例“Slow force”并选择【属性】，在【频率选项】选项卡中，输入【频率数】为 5，如图 1-13 所示。



必须强调，这里只使用了 5 个频率数来表示这个模型的动态特性，在接下来的章节中用户将认识到，这样低的频率值是不够的。

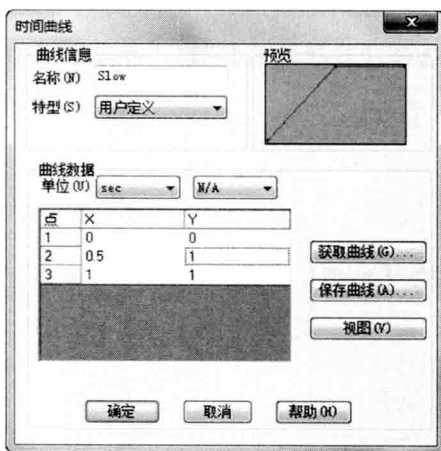


图 1-12 定义时间曲线



图 1-13 定义频率选项

单击【动态选项】选项卡，设置【开始时间】为 0s，【结束时间】为 1s。

为了输入一个【时间增量】，需要使用关于最高频率时间周期的信息。回顾前面的频率算例，计算过 5 个频率，而第五个频率的时间周期为 0.003s。选择时间增量为用于分析的频率模式下最小时间周期的 1/10 左右，因此，输入【时间增量】为 0.0003s，如图 1-14 所示。



提示 第 2 章将详细介绍关于时间增量的计算。

单击【确定】。注意，增量的数量可以通过总时间除以时间增量来计算。在这个实例中，拥有 3334 个增量（大约等于 $1/0.0003$ ）。

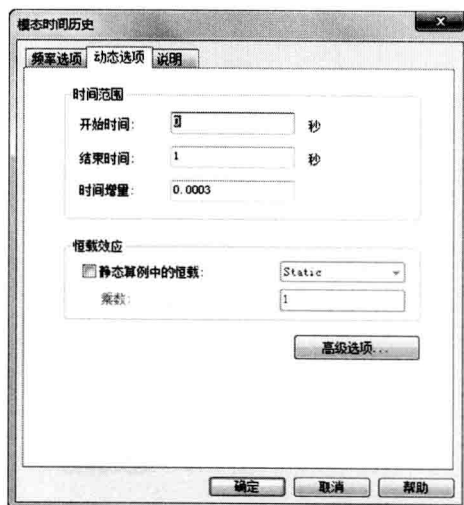


图 1-14 定义动态选项

步骤 16 结果选项

在算例中, 右键单击【结果选项】并选择【编辑/定义】。在【保存结果】选项组中, 选择【对于所指定的解算步骤】。在【数量】选项组中, 勾选【位移和速度】及【应力和反作用力】复选框, 选中【绝对】。在【解算步骤-组 1】选项组, 输入下列数据: 在【步骤号】的【开始】中输入 1, 在【步骤号】的【结束】中输入 3500, 【增量】中输入 10, 如图 1-15 所示。单击【确定】。



在【结束】中输入的步骤数量必须等于或大于在分析中真实时间的步骤数量。

步骤 17 运行这个算例

本次运算大约需要几分钟时间。

步骤 18 对缓慢加载的实例（实例 1）查看其位移结果

对最后保存的时间步（334）定义【URES: 合位移】图解。注意, 默认情况下选择最后一个步骤, 对应的时间显示为 0.9993s, 如图 1-16 所示。

加载周期末尾的最大位移为 1.81mm, 几乎和算例“Static”中得到的最大位移相同。原因是加载的力作用很缓慢, 这也是线性静态分析最基本的假设之一。

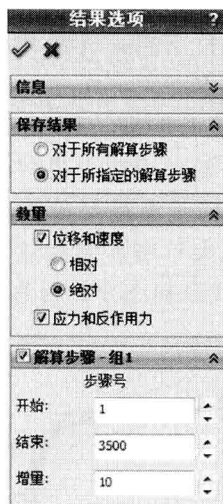


图 1-15 定义结果选项

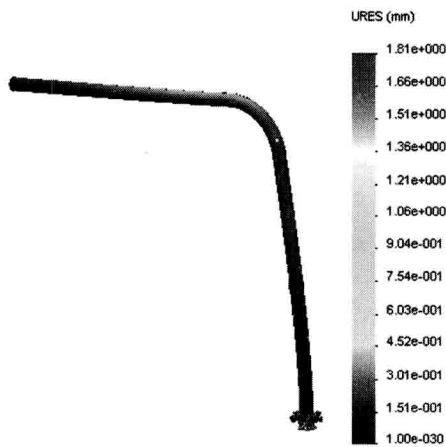


图 1-16 位移结果



用户可以对所有保存的时间步骤获取位移图解。

步骤 19 生成末端位移图表

右键单击【结果】文件夹并选择【瞬态传感器图表】。【X 轴】保持为【时间】，【Y 轴】选择瞬态传感器 Tip displacement, 单击【确定】，生成一个响应图表, 如图 1-17 所示。

可以看到, 一旦完成载荷加载, 弯管将发生持续振荡。在现实生活中, 这样的振荡会因为阻尼的影响而随时间消失。因为本算例没有阻尼, 所以振荡将没有衰减地一直持续下去。

步骤 20 结构的最大位移

步骤 18 中生成的图解提供了给定时间步的位移值, 之后生成的图表显示了振荡结果, 它是关于所选位置的时间相关函数。然而, 在所有保存的时间步中, 定位整个模型的最大值也是很重要的。