



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



2009版

SolidWorks® Simulation 基础教程

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

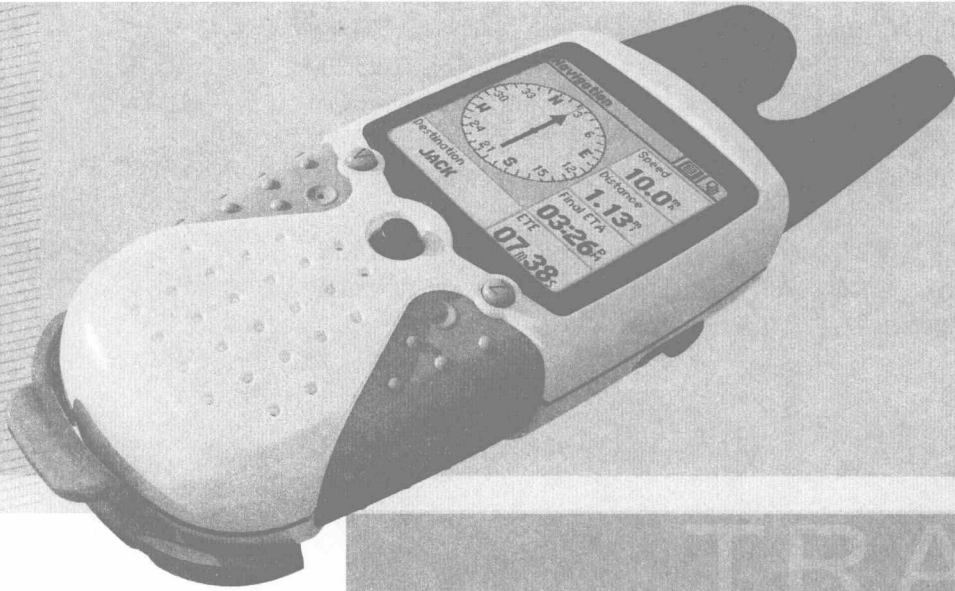


机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

配有实例、练习



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



2009版

SolidWorks® Simulation 基础教程

(美) SolidWorks®公司 著

叶修梓 陈超祥 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 基础教程》(2009 版)是根据 SolidWorks®公司发布的《SolidWorks® Simulation 2009 Training Manuals: SolidWorks Simulation》编译而成的,是使用 Simulation 软件对 SolidWorks 模型进行有限元分析的入门培训教程。与以前的培训教程相比,本书详细介绍了 Simulation 软件全新的界面及操作流程,重点介绍了网络的兼容特性,深入讲解了对混合网格模型的处理及分析,并通过更多的实例加强对软件各个参数的理解。

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,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师生使用。

图书在版编目(CIP)数据

SolidWorks® Simulation 基础教程: 2009 版/(美)SolidWorks®公司著;杭州新迪数字工程系统有限公司编译. —北京:机械工业出版社, 2009. 6
(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 978-7-111-26837-6

I. S… II. ①S…②杭… III. 计算机辅助设计—应用软件, Solid-Works—技术培训—教材 IV. TP391. 72

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 058731 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:徐彤郎峰 责任编辑:马晋

责任校对:李婷 责任印制:李妍

北京铭成印刷有限公司印刷

2009 年 6 月第 1 版第 1 次印刷

210mm × 285mm · 19.5 印张 · 579 千字

0001—4000 册

标准书号: ISBN 978-7-111-26837-6

ISBN 978-7-89451-069-3(光盘)

定价: 55.00 元(含 1CD)

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

销售服务热线电话:(010)68326294

购书热线电话:(010)88379639 88379641 88379643

编辑热线电话:(010)88379083

封面无防伪标均为盗版



序

尊敬的中國SolidWorks用戶：

SolidWorks®公司很高興為您提供這套最新的SolidWorks®公司中文原版系列培訓教程。我們對中國市場有着長期的承諾，自從1996年以來，我們就一直保持與北美地區同步發布SolidWorks3D設計軟件的每一個中文版本。

我們感覺到SolidWorks®公司與中國用戶之間有着一種特殊的關係，因此也有着一份特殊的責任。這種關係是基於我們共同的價值觀——創造性、創新性、卓越的技术，以及世界級的競爭能力。這些價值觀一部分是由公司的共同創始人之一李向榮（Tommy Li）所建立的。李向榮是一位華裔工程師，他在定義並實施我們公司的關鍵性突破技術以及在指導我們的組織開發方面起到了很大的作用。

作為一家軟件公司，SolidWorks®致力於帶給用戶世界一流水平的3D CAD工具（包括設計、分析、產品數據管理），以幫助設計師和工程師開發出更好的產品。我們很榮幸地看到中國用戶的數量在不斷增長，大量傑出的工程師每天使用我們的軟件來開發高質量、有競爭力的產品。

目前，中國正在經歷一個迅猛發展的時期，從製造服務型經濟轉向创新驱动型經濟。為了繼續取得成功，中國需要最佳的軟件工具。

SolidWorks2009是我們最新版本的軟件，它在產品設計過程自動化及改進產品質量方面又提高了一步，該版本提供了許多新的功能和更多提高生產效率的工具，可幫助機械設計師和工程師開發出更好的產品。

現在，我們提供了這套中文原版培訓教程，體現出我們對中國用戶長期持續的承諾。這些教程可以有效地幫助您把SolidWorks2009軟件在驅動設計創新和工程技術應用方面的強大威力全部釋放出來。

我們為SolidWorks能夠幫助提升中國的產品設計和開發水平而感到自豪。現在您擁有了最好的軟件工具以及配套教程，我們期待看到您用這些工具開發出創新的產品。

此致
敬禮！

Jeff Ray
SolidWorks®公司首席執行官
2009年3月



陈超祥 先生
SolidWorks®公司亚太地区技术总监



叶修梓 博士
SolidWorks®公司首席科学家
中国研发中心负责人

前言

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50万的用户。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SolidWorks®公司最新发布的SolidWorks2009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®系列培训教程，共计13种，其中“Enterprise PDM系列教程”是第一次在中国出版发行。

本套教程详细介绍了SolidWorks2009软件，SolidWorks Enterprise PDM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，SolidWorks2009不仅在功能上进行了250多项改进，更加突出的是它在技术上的巨大进步与创新。推出的SpeedPak技术加强了对大型装配体的处理能力，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！

SolidWorks2009版软件对部分产品进行了更名，以前的

COSMOS软件更名为Simulation软件，COSMOSMotion更名为SolidWorks Motion，这些软件功能都将在本套教程中详细阐述。

《SolidWorks®Simulation基础教程》(2009版)是根据SolidWorks®公司发布的《SolidWorks®Simulation 2009 Training Manuals: SolidWorks Simulation》编译而成的，是使用Simulation软件对SolidWorks®模型进行有限元分析的入门培训教程。本书提供了基本的有限元求解方法，并对有限元的相关理论知识进行了讲解。

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SolidWorks®公司首席科学家叶修梓先生和亚太地区技术总监陈超祥先生担任主编，由杭州新迪数字工程系统有限公司彭维、曹光明负责审校。承担编译、校对和录入工作的是杭州新迪数字工程系统有限公司的技术人员，他们是李浩然、翁海平、周瑜、吴鹏、邱小平、刘红政、林华等。杭州新迪数字工程系统有限公司是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。

机械工业出版社技能教育分社的社长、编辑和SolidWorks®公司大中国区技术经理胡其登等为本套教程的出版提出了很好的建议和意见，付出了大量的劳动，在此一并表达深深的谢意！

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。

本书编译者的联系方式是：yexz@newdimchina.com，pengw@newdimchina.com。

叶修梓 陈超祥

2009年3月

本书使用说明

关于本书

本书的目的是教会读者如何使用 Simulation 软件以分析 SolidWorks 中的零件和装配件的静态结构行为。

本书集中于最基础的技术以及掌握 Simulation 2009 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，可以通过点击菜单【帮助】/【在线指导教程】学习这个教程。

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应遵循的过程和步骤。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。

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。

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 Training&Support，然后单击 Training，选择 Training Files，这时你就会看到专门用于下载练习文件的链接。这些练习文件都是可以自解压的文件包。

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，右键单击【载荷/约束】并选择【力】，表示鼠标右键单击位于 Simulation 管理器树目录中的【载荷/约束】图标并从弹出菜单中选择【力】
	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

关于色彩的问题

Simulation 2009 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® XP

本书所用的屏幕图片是 SolidWorks 2009 和 Simulation 2009 运行在 Windows® XP 时制作的。如果读者使用不同版本的 Windows，菜单和窗口的外观会有所不同，但这些并不影响软件的使用。

目 录

序
前言

本书使用说明

绪论 有限元简介 1

- 0.1 SolidWorks Simulation 概述 1
- 0.2 有限元分析概述 1
- 0.3 建立数学模型 2
- 0.4 建立有限元模型 3
- 0.5 求解有限元模型 3
- 0.6 结果分析 3
- 0.7 FEA 中的误差 4
- 0.8 有限单元 4
 - 0.8.1 SolidWorks Simulation 中的单元类型 4
 - 0.8.2 在实体和壳单元中选择 6
 - 0.8.3 实体及壳单元中的草稿品质与高品质 7
- 0.9 自由度 7
- 0.10 FEA 计算 7
- 0.11 FEA 结果解释 7
- 0.12 测量单位 8
- 0.13 SolidWorks Simulation 的使用限制 9
- 0.14 总结 10

第 1 章 分析流程 11

- 1.1 模型分析的关键步骤 11
- 1.2 实例分析：平板 11
- 1.3 SolidWorks Simulation 的界面 12
- 1.4 SolidWorks Simulation 选项 14
- 1.5 预处理 16
 - 1.5.1 新建算例 16
 - 1.5.2 夹具 18
 - 1.5.3 外部载荷 20
 - 1.5.4 符号的大小及颜色 21
 - 1.5.5 预处理总结 21
- 1.6 划分网格 22
 - 1.6.1 网格大小 23
 - 1.6.2 公差 23

- 1.6.3 网格质量 23
- 1.7 后处理 25
 - 1.7.1 结果图解 25
 - 1.7.2 编辑图解 25
 - 1.7.3 波节应力与单元应力 26
 - 1.7.4 显示向量图解选项 26
 - 1.7.5 修改结果图解 26
 - 1.7.6 其他图解 28
- 1.8 多个算例 32
 - 1.8.1 创建新的算例 32
 - 1.8.2 复制参数 33
 - 1.8.3 检查收敛与精度 34
 - 1.8.4 结果总结 35
 - 1.8.5 与解析解比较 35
- 1.9 报告 36
- 1.10 总结 37
- 1.11 提问 37
- 练习 1-1 支架 38
- 练习 1-2 压缩弹簧刚度 45

第 2 章 网格控制，应力集中，边界条件 48

- 2.1 网格控制 48
- 2.2 实例分析：L 形支架 48
- 2.3 不带圆角的支架分析 49
 - 2.3.1 运行所有算例 50
 - 2.3.2 局部网格精细化分析 51
 - 2.3.3 网格控制 51
 - 2.3.4 比率 52
 - 2.3.5 结果比较 54
 - 2.3.6 应力奇异性 55
- 2.4 带圆角的支架分析 55
 - 2.4.1 压缩配置 55
 - 2.4.2 自动过渡 56
- 2.5 实例分析：焊接支架 58

2.6 理解边界条件的影响	59	练习 4-2 链扣(第二部分)	109
2.7 总结	60	第 5 章 带接头的装配体分析	112
2.8 提问	60	5.1 连接零部件	112
练习 2-1 C 形支架	60	5.2 接头	112
练习 2-2 骨形扳手	66	5.3 实例分析: 手钳	113
练习 2-3 基座支架	70	5.3.1 项目描述	113
第 3 章 带接触的装配体分析	77	5.3.2 关键步骤	114
3.1 接触缝隙分析	77	5.3.3 销钉接头	115
3.2 实例分析: 虎钳	77	5.3.4 弹簧接头	117
3.3 使用全局接触的虎钳分析	78	5.3.5 销钉/螺栓力	120
3.3.1 为装配体指定材料	78	5.4 总结	121
3.3.2 全局接触	79	练习 5-1 升降架装配体	121
3.3.3 观察装配体结果	82	练习 5-2 带有基座的分析(选做)	127
3.3.4 手柄接触	83	练习 5-3 吸振器	127
3.3.5 所需的力	83	练习 5-4 点焊——实体网格	130
3.4 使用局部接触的虎钳分析	83	第 6 章 兼容/不兼容网格	136
3.4.1 部件接触选项	84	6.1 兼容/不兼容网格划分: 接合接触	136
3.4.2 局部接触选项	84	6.2 实例分析: 转子	136
3.4.3 无穿透局部接触条件	86	6.2.1 项目描述	136
3.4.4 接触应力	88	6.2.2 兼容网格	137
3.5 总结	88	6.2.3 不兼容网格	138
3.6 提问	88	6.3 兼容/不兼容网格划分: 无穿透接触 (选做)	140
练习 双环装配体	88	6.4 总结	143
第 4 章 对称和自平衡装配体	92	第 7 章 网格细化后的装配体分析	144
4.1 冷缩配合零件	92	7.1 装配体中的网格控制	144
4.2 实例分析: 冷缩配合	92	7.2 实例分析: 万向节	144
4.2.1 项目描述	92	7.3 项目描述	144
4.2.2 对称	92	7.4 第一部分: 使用草稿品质的粗糙网格进行 分析	145
4.2.3 关键步骤	93	7.4.1 远程载荷	146
4.2.4 特征消隐	93	7.4.2 螺栓的紧密配合	148
4.2.5 刚体模式	94	7.4.3 螺栓预载	148
4.2.6 冷缩配合接触条件	95	7.4.4 局部相触面组	151
4.2.7 在局部坐标系中图解显示结果	96	7.4.5 旋转和轴向刚度	154
4.2.8 定义圆柱坐标系	96	7.4.6 知识库	155
4.2.9 保存所有图解	98	7.5 第二部分: 使用高品质网格进行分析	157
4.2.10 “什么错”特征	98	7.5.1 在薄壁特征上需要的实体单元数量	158
4.3 带软弹簧的分析	99	7.5.2 高宽比例图解	158
4.3.1 软弹簧	99	7.5.3 雅可比	159
4.3.2 惯性卸除	99	7.6 总结	162
4.4 总结	100		
练习 4-1 链扣(第一部分)	100		

7.7 提问	162		
练习 螺栓接头	163		
第 8 章 薄件分析	166		
8.1 薄件	166		
8.2 实例分析: 带轮	166		
8.3 第一部分: 采用实体单元划分网格	167		
8.4 第二部分: 细化实体网格	170		
8.5 实体与壳单元的比较	170		
8.6 第三部分: 壳单元——中面曲面	171		
8.6.1 细与粗壳的比较	172		
8.6.2 壳网格颜色	173		
8.6.3 更改网格方向	174		
8.6.4 壳单元对齐	175		
8.6.5 自动重新对齐壳曲面	175		
8.6.6 应用对称约束	178		
8.6.7 变形结果	179		
8.7 结果比较	180		
8.8 实例分析: 搁栅吊件	180		
8.9 总结	185		
8.10 提问	185		
练习 8-1 支架	186		
练习 8-2 使用外侧/内侧表面的壳网格	189		
练习 8-3 点焊——壳网格	191		
第 9 章 混合网格——壳体和实体	193		
9.1 混合网格	193		
9.1.1 接合壳体和实体网格	194		
9.1.2 混合网格支持的分析类型	194		
9.2 实例分析: 压力容器	194		
9.2.1 项目描述	194		
9.2.2 分析装配体	194		
9.2.3 模型准备	195		
9.2.4 定义抽壳厚度	196		
9.2.5 材料	197		
9.2.6 体积模量和切变模量	198		
9.2.7 连接有间隙实体	199		
9.2.8 失败诊断	202		
9.2.9 小特征网格划分	205		
9.3 总结	208		
9.4 提问	208		
练习 混合网格分析	208		
		第 10 章 混合网格——实体、梁和壳单元	214
		10.1 混合划分网格	214
		10.2 实例讨论: 颗粒分离器	214
		10.2.1 项目描述	214
		10.2.2 单元选择	214
		10.2.3 梁单元	214
		10.2.4 关键步骤	215
		10.2.5 横梁结点: 位置	217
		10.2.6 横梁结点类型	217
		10.2.7 连接及断开的结点	218
		10.2.8 横截面的第一方向及第二方向	222
		10.2.9 弯矩和剪力图表	223
		10.3 总结	224
		练习 10-1 传送架	224
		练习 10-2 柜子	231
		第 11 章 设计情形	238
		11.1 设计情形简述	238
		11.2 实例分析: 悬架	238
		11.2.1 项目描述	238
		11.2.2 关键步骤	238
		11.3 第一部分: 多载荷情形	238
		11.3.1 弹簧接头类型	239
		11.3.2 设计情形应用	240
		11.3.3 设计情形结果	243
		11.3.4 设计情形小结	245
		11.3.5 设计情形图表	245
		11.4 第二部分: 几何修改	246
		11.5 总结	249
		练习 矩形平台	249
		第 12 章 热应力分析	254
		12.1 热应力分析简述	254
		12.2 实例分析: 双层金属带	254
		12.2.1 项目描述	254
		12.2.2 材料属性	255
		12.2.3 输入温度	259
		12.2.4 平均应力	260
		12.2.5 提问	263

12.3 在局部坐标系中检查结果(选做)	264	13.5 h-单元与 p-单元总结	278
12.4 保存变形后的模型	264	13.6 总结	279
12.5 总结	265	第 14 章 大位移分析	280
第 13 章 自适应网格	266	14.1 小位移与大位移分析的比较	280
13.1 自适应网格简述	266	14.2 实例分析: 夹钳	280
13.2 实例分析: 悬臂支架	266	14.3 第一部分: 小位移线性分析	281
13.2.1 项目描述	267	14.3.1 结果讨论	282
13.2.2 几何体准备	267	14.3.2 小位移及大位移分析中的 接触结果	282
13.3 h-自适应算例	269	14.4 第二部分: 大位移非线性分析	282
13.3.1 h-自适应选项	269	14.4.1 永久变形	284
13.3.2 h-自适应图解	271	14.4.2 SolidWorks Simulation Premium	284
13.3.3 收敛图表	271	14.5 总结	284
13.3.4 回顾 h-自适应求解	272	14.6 提问	284
13.3.5 应变能误差并非应力误差	274	附录	285
13.4 p-自适应算例	275	附录 A 网格划分、解算器	285
13.4.1 p-自适应求解方法	275	附录 B 用户帮助	294
13.4.2 h-单元与 p-单元	276		
13.4.3 方法比较	278		

绪论 有限元简介

0.1 SolidWorks Simulation 概述

SolidWorks Simulation 是一款基于有限元(即 FEA 数值)技术的设计分析软件,是 SRAC 开发的工程分析软件产品之一。SRAC 是 SolidWorks 公司的子公司,成立于 1982 年,是将有限元分析带入微型电脑的先驱。1995 年,SRAC 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,成为了 SolidWorks 公司的金牌产品之一。同时它作为嵌入式分析软件与 SolidWorks 无缝集成,迅速成为顶级销售产品。整合了 SolidWorks CAD 软件的 COSMOSWorks 软件在商业上取得了成功,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 是一款基于特征的参数化 CAD 系统软件。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,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态分析。
- SolidWorks Simulation: 能对零件和装配体进行静力分析。
- SolidWorks Simulation Professional: 能进行零件和装配体的静态、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 的所有功能,外加非线性功能和动力学分析。

在本书中,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单元法基础,并了解 SolidWorks Simulation 课程的内容。建议读者按照课程的顺序学习,并同时要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。

在开始本课程之前,让我们再深入了解有限元分析以及它的工作原理,这样便可以建立起关于 SolidWorks Simulation 的基本技能。

0.2 有限元分析概述

在数学术语中,FEA 也称之为有限单元法,是一种求解关于场问题的一系列偏微分方程的数值方法。这种类型的问题涉及许多工程学科,如机械设计、声学、电磁学、岩土力学、流体动力学等。在机械工程中,有限元分析被广泛地应用在结构、振动和传热问题上。

FEA 不是唯一的数值分析工具,在工程领域还有其他的数值方法,如有限差分法、边界元法和有限体积法。然而由于 FEA 的多功能性和高数值性能,它占据了绝大多数工程分析的软件市场,而其他

方法则被归入小规模应用。使用 FEA，通过不同方法理想化几何体，能够分析任何形状模型，并得到预期的精度。当使用现代的商业软件，例如 SolidWorks Simulation 时，FEA 理论、数值问题公式和求解方法对用户是完全透明的。

作为一个强有力的工程分析工具，FEA 可以解决从简单到复杂的各种问题。一方面，设计工程师使用 FEA 在产品研发过程中分析设计改进，由于时间和可用的产品数据的限制，需要对所分析的模型作许多简化。另一方面，专家们使用 FEA 来解决一些非常深奥的问题，如车辆碰撞动力学、金属成形和生物结构分析。

不管项目多复杂或是应用领域多广，无论是结构、热传导或是声学分析，所有 FEA 的第一步总是相同的，都是从几何模型开始。在本课程中，即为 SolidWorks 的零件和装配件。我们给这些模型分配材料属性，定义载荷和约束，再使用数值近似方法，将模型离散化以便分析。

离散化过程也就是网格划分过程，即将几何体分割成相对小且形状简单的实体，这些实体称为有限单元。单元称为“有限”的，是为了强调这样一个事实：它们不是无限的小，而是与整个模型的尺寸相比之下适度的小。

当使用有限单元工作时，FEA 求解器将把单个单元的简单解综合成对整个模型的近似解来得到期望的结果（如变形或应力）。

因此，应用 FEA 软件分析问题时，有以下三个基本步骤：

- 1) 预处理：定义分析类型（静态、热传导、频率等），添加材料属性，施加载荷和约束，网格划分。
- 2) 求解：计算所需结果。
- 3) 后处理：分析结果。

在应用 SolidWorks Simulation 时，也遵循以上三个步骤。

通过对 FEA 方法的了解，列出下列步骤：

- 1) 建立数学模型。
- 2) 建立有限元模型。
- 3) 求解有限元模型。
- 4) 结果分析。

0.3 建立数学模型

SolidWorks Simulation 对来自 SolidWorks 的零件和装配件的几何模型进行分析。该几何模型必须能用正确的、适度小的有限单元进行网格划分。对于小的概念，并不是指它的单元尺寸，而是通过网格中单元的数量来表示。这种对网格的要求有着极其重要的含义。必须确保 CAD 几何模型的网格划分，并且确保产生的网格能得到我们感兴趣的数据，如位移、应力、温度分布等。

通常情况下，需要修改 CAD 几何模型以满足网格划分的要求。这种修改可以采取特征消隐、理想化或清除的方法，详述如下：

1. **特征消隐** 特征消隐指合并或消除在分析中认为不重要的几何特征，如外圆角、圆边、标志等。
2. **理想化** 理想化是更具有积极意义的工作，它可能会偏离 CAD 几何模型原型，如将一个薄壁模型用一平面来代替。
3. **清除** 清除有时是必须的，因为可划分网格的几何模型必须满足比实体建模更高的要求。可以使用 CAD 质量控制工具来检查问题所在。例如，在 CAD 模型中，细长面或多重实体会造成网格划分的困难甚至无法划分网格。

我们并不只是为了达到网格划分这个单一目的。通常情况下，对能够进行正确网格划分的模型采取简化，是为了避免由于网格过多而导致分析过程太慢。修改几何模型是为了简化网格从而缩短计算时间。成功的网格划分不仅依赖于几何模型的质量，而且依赖于对 FEA 软件分网技术的娴熟使用。

准备好能够划分网格、但尚未划分网格的模型后，就来确定材料属性、载荷、支撑和约束，并确定分析类型。

以上过程完成了数学模型的创建。注意创建数学模型不是 FEA 特有的。FEA 到目前为止还没真正开始。建立数学模型的流程如图 0-1 所示。

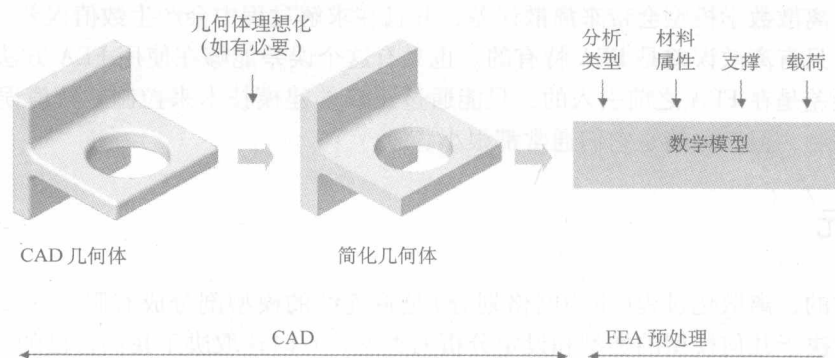


图 0-1 建立数学模型的流程

0.4 建立有限元模型

通过离散化过程，将数学模型剖分成有限单元，这一过程称为网格划分。离散化在视觉上即是几何模型划分成网格。然而，载荷和支撑在网格完成后也需要离散化，离散化的载荷和支撑将施加到有限单元网格的节点上。建立有限元模型的流程如图 0-2 所示。

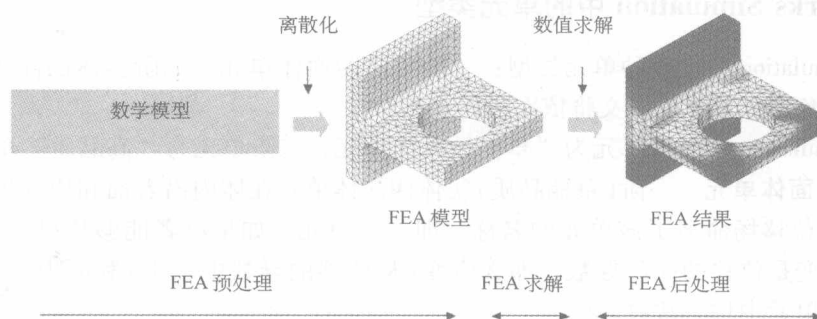


图 0-2 建立有限元模型的流程

0.5 求解有限元模型

创建了有限元模型后，我们使用 SolidWorks Simulation 的求解器来计算出一些感兴趣的数据。

0.6 结果分析

总的说来，结果分析是最困难的一步。有限元分析提供了非常详细的数据，这些数据可以用各种格式表达。对结果的正确解释需要我们熟悉理解各种假设、简化约定以及前面三步（建立数学模型、建立有限元模型、求解有限元模型）产生的误差。

0.7 FEA 中的误差

创建数学模型和离散化成有限元模型会产生不可避免的误差。形成数学模型会导致建模误差，也称为理想化误差。离散数学模型会带来离散误差，并且在求解过程中会产生数值误差。

这三种误差，只有离散误差是 FEA 特有的。也只有这个误差能够在使用 FEA 方法时被控制。影响数学模型的建模误差是在 FEA 之前引入的，只能通过正确的建模技术来控制。数值误差是在计算过程中积累的，难于控制，但幸运的是它们通常都很小。

0.8 有限单元

正如我们说过的，离散化过程(也叫网格划分)是将连续的模型剖分成有限单元。这个过程中所创建的单元的类型取决于几何模型的类型和设定分析的类型，有时这取决于我们自己的偏好。

SolidWorks Simulation 用四面体实体单元划分实体几何体，而用三角形壳单元划分几何面。为什么要局限于四面体和三角形呢？这是因为只有使用这些形状，才能对几乎任何几何实体或面进行可靠的网格划分。其他形状的单元，如六面体(块状)，在目前的网格划分技术水平下不能创建可靠的网格。这种局限性不是 SolidWorks Simulation 网格划分特有的，可靠的块单元自动网格划分目前还没有发明出来。

在进行下一步之前，需要澄清一个重要的术语。我们在 CAD 术语中所称的实体几何体，在 FEA 中称为实体体积。实体单元是用来划分这些实体体积的。“实体”这个词有许多含义，它在 CAD 术语中作为“实体几何体”，而在 FEA 术语中作为“实体单元”。

0.8.1 SolidWorks Simulation 中的单元类型

SolidWorks Simulation 中有四种单元类型：一阶实体四面体单元、二阶实体四面体单元、一阶三角形壳单元和二阶三角形壳单元，下文将依次描述这些单元。

SolidWorks Simulation 称一阶单元为“草稿品质”单元，二阶单元为“高品质”单元。

1. 一阶实体四面体单元 一阶(草稿品质)实体四面体单元在体内沿着面和边缘模拟一阶(线性)位移场。一阶(线性)位移场命名了该单元的名称，即一阶单元。如果读者能够从材料力学中回忆起应变是位移的一阶导数，那么应变(从位移的导数中求出)和应力在一阶实体四面体单元中均为常数。

每个一阶实体四面体单元都有 4 个节点，分别对应四面体的 4 个角点。每个节点有 3 个自由度，意味着节点位移可完全由 3 个位移分量来表示。关于自由度的详细阐述将在稍后讲解。变形前后的一阶实体四面体单元如图 0-3 所示。

一阶单元的边是直线，面是平面。在单元加载变形后，这些边和面必须仍保持直线和平面。

由一阶单元组成的网格，其模拟出的真实复杂的位移和应力场是有严重局限性的；并且，直线和平面不能正确地模拟曲面形几何模型。

图 0-4 显示了一个使用一阶实体四面体单元构成的肘形几何体，显然用直线和平面模拟曲面形的几何模型是失败的。

为了示范，我们使用了很大的(与模型尺寸相比较而言)单元来划分网格，这样的网格对任何分析来说都是不够精细的。

2. 二阶实体四面体单元 二阶(高品质)实体四面体单元模拟了二阶(抛物线形)位移场以及相应的一阶应力场(注意抛物线形函数的导数是线性函数)。二阶位移场命名了该单元的名称：二阶单元。

每个二阶实体四面体单元有 10 个节点(4 个角点和 6 个中间节点)，并且每个节点有 3 个自由度。

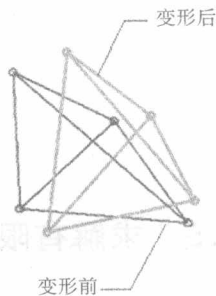


图 0-3 变形前后的一阶实体四面体单元

当单元因加载而变形时，如果单元需要模拟曲线型几何模型，则二阶单元的边和面就可以是曲线形。变形前后的二阶实体四面体单元如图 0-5 所示。

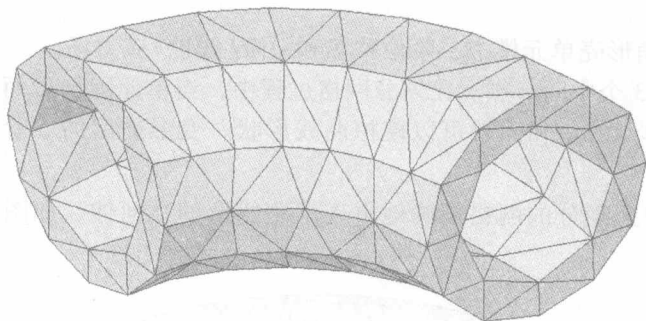


图 0-4 一阶实体四面体单元网格划分结果

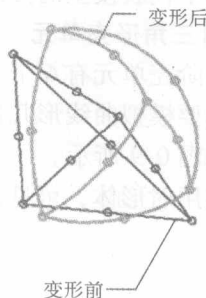


图 0-5 变形前后的二阶实体四面体单元

因此，图 0-6 显示同样的肘形几何体，这些单元能够很好地模拟其曲线形状。

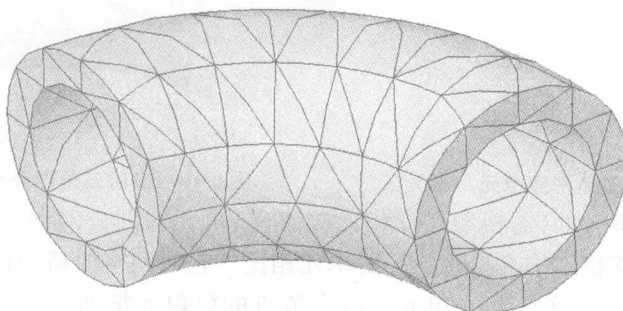


图 0-6 二阶实体四面体单元网格划分结果

为了示范，我们使用很大的(与模型尺寸相比较而言)单元来划分网格。对于分析来说，即使是二阶单元，这些网格也是不够精细的，尽管与一阶单元相比，它对网格的精细程度要求较低。

为了获得精确的应力结果，建议大家在沿壁厚方向使用两层的二阶单元。

由于二阶实体四面体单元具有较好的绘图能力和模拟二阶位移场的能力，在大多数情况下 SolidWorks Simulation 采用它进行分析，即使它比一阶单元需要更多的计算量。

3. 一阶三角形壳单元 类似于一阶实体单元，一阶三角形壳单元沿其面和边模拟线性位移场，以及常数应变和应力。当单元变形时，一阶壳单元的直边仍保持为直线。

每个一阶壳单元有 3 个节点(分布在角点上)，并且每个节点有 6 个自由度，这意味着它的位移可完全由 3 个平移分量和 3 个转动分量描述。变形前后的一阶三角形壳单元如图 0-7 所示。

如果用中面代表肘形几何体，并将该面用一阶壳单元进行网格划分，注意到曲面形几何体仍然不够精确。

这个结果类似于之前用一阶单元模拟曲面形几何体的不精确的结果，如图 0-8 所示。

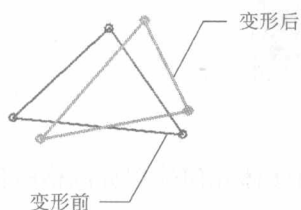


图 0-7 变形前后的一阶三角形壳单元

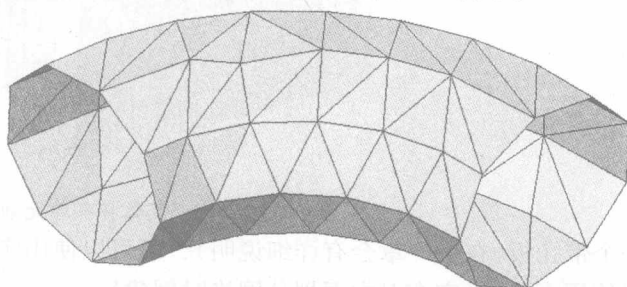


图 0-8 一阶三角形壳单元网格划分结果