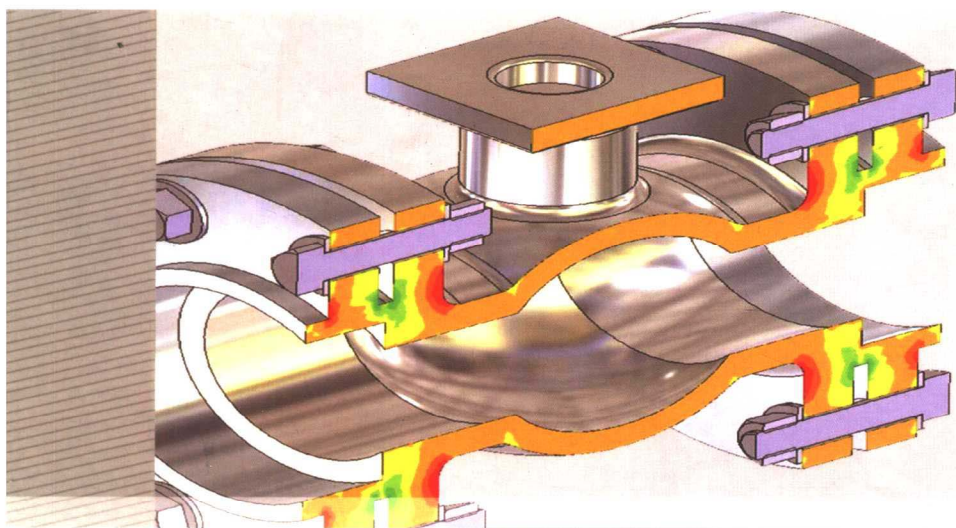




SolidWorks® 公司原版系列培训教程
CSWP 全球专业认证考试培训教程



2007 版

COSMOS 基础教程： COSMOSWorks Designer

(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

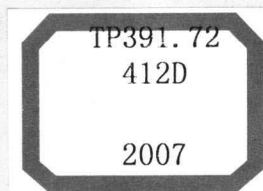
配有教案、实例、练习



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



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



COSMOS 基础教程: COSMOSWorks Designer



(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

彭 维 陈 博 刘红政 审校

《COSMOS 基础教程: COSMOSWorks Designer》(2007 版)是根据 SolidWorks 公司发布的《COSMOS 2007 Training Manuals: COSMOSWorks Designer》编译而成的,是使用 COSMOSWorks 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,是机械工程师快速有效地掌握 COSMOSWorks 应用技术的必备资料。本书在介绍软件的使用方法的同时,对有限元分析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,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

COSMOS 基础教程: COSMOSWorks Designer/美国 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,
2007. 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 978-7-111-21169-3

I. C... II. ①美... ②杭... III. 有限元法—技术培训—
教材 IV. 0241. 82

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 036996 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 责任编辑:郎 峰 版式设计:张世琴

责任校对:刘志文 责任印制:李 妍

北京铭成印刷有限公司印刷

2007 年 4 月第 1 版第 1 次印刷

210mm × 285mm · 12.75 印张 · 380 千字

0001—3000 册

标准书号: ISBN 978-7-111-21169-3

ISBN 978-7-89482-152-2(光盘)

定价: 43.00 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

尊敬的大中国区 SolidWorks 用户:



➤ SolidWorks 公司首席执行官
John McEleney 先生

SolidWorks 2007 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效率的工具,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 2007 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

SolidWorks 公司很高兴为您提供这套最新的 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 SolidWorks 公司与大中国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。

作为一个软件公司, SolidWorks 致力于带给用户世界一流水平的 3D CAD 工具(包括设计、分析、产品数据管理),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。

敬礼!

John McEleney

SolidWorks 公司首席执行官

2006 年 8 月 24 日

前言



叶修梓 博士



公司首席科学家
中国研发中心负责人



陈超祥 先生



公司大中国地区技术总监

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 SolidWorks 2007 软件和 COSMOS 2007 软件的配套英文版培训教程编译而成，也是 CSWP 全球专业认证考试培训教程。本套教程是 SolidWorks 公司惟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 11 种，其中“COSMOS 系列”、“产品数据管理”、“管道与布线”、“高级曲面”都是第一次奉献给中国读者。

本套教程详细介绍了 SolidWorks 2007 软件和 COSMOS 2007 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 2007 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。推出的智能特征技术 SWIFT，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！

智能特征技术 SWIFT 是 SolidWorks 2007 最重要的新增功能，目前包含了 FeatureXpert（特征专家）、MateXpert（配合专家）、SketchXpert（草图专家）和 DimXpert（尺寸专家）四个专家级智能系统。这些新功能和新技术，都将在本套教程中得以详细阐述。

《COSMOS 基础教程: COSMOS Designer》(2007 版)根据 SolidWorks 公司发布的《COSMOS 2007 Training Manuals: COSMOSWorks Designer》编译而成,是使用 COSMOSWorks 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,是机械工程师快速有效地掌握 COSMOSWorks 应用技术的必备资料。

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大中国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常务副总经理彭维和陈博负责审校。

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,他们是刘红政、王经纬、高崇辉、罗爱斌、周瑜、李遥、姚倩等。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。

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@sindyware.com, pengw@sindyware.com。

叶修梓 陈超祥

2007 年 1 月

本书使用说明

关于本书

本书目的是教会读者如何使用 COSMOSWorks Designer 软件来分析 SolidWorks 中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 COSMOSWorks 2007 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 COSMOSWorks 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 COSMOSWorks 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，通过这种交互式的学习方法，使读者掌握软件的功能。

本书通过一系列综合了有限元分析基础课程来介绍 COSMOSWorks Designer。我们推荐大家按课程的顺序进行学习，在课程进行中，一些在前文中出现过的解释和步骤在后面不再重复。章末的练习提供应用和练习那些在课程的讲稿和示例中未涉及的材料。

每个后续的课程均假设读者已经熟悉了前文所讨论过的软件功能和有限元背景知识。每一课都是建立在前面课程所积累的技术和经验之上。

请注意，由于软件包的升级，某些章节中的结果可能会有微小的差异。

关于配套光盘

本书附带的光盘中包括了本课程所使用的各种文件。这些文件根据课程编写排列。Lesson 文件夹包括了所有在课程中用到的文件。

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
【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
 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

COSMOSWorks 2007 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 2007 和 COSMOSWorks 2007 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，但这些不同并不影响软件的使用。

目 录

序
前言
本书使用说明

绪论	1
0.1 COSMOSWorks 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	3
0.8 有限单元	4
0.8.1 COSMOSWorks 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和 高品质	6
0.9 自由度	7
0.10 FEA 计算	7
0.11 FEA 结果解释	7
0.12 单位制	8
0.13 COSMOSWorks Designer 的使用限制	8
0.13.1 线性材料	9
0.13.2 小变形	9
0.13.3 静态载荷	10
0.14 总结	10
第 1 章 带孔矩形板的静态分析	11
1.1 项目描述	11
1.2 COSMOSWorks 选项	12
1.3 预处理	14
1.3.1 新建算例	14
1.3.2 指定材料属性	15
1.3.3 约束类型	17
1.3.4 约束符号的大小及颜色	18
1.3.5 力选项	19
1.3.6 预处理总结	20
1.4 划分网格	20

1.4.1 网格大小	21
1.4.2 公差	22
1.5 后处理	22
1.5.1 图解	22
1.5.2 波节应力与单元应力	23
1.6 多个算例	29
1.6.1 检查收敛与精度	30
1.6.2 结果总结	30
1.6.3 与解析解比较	31
1.7 总结	32
练习 零件的静态分析	32
第 2 章 L 形支架的静态分析	37
2.1 项目描述	37
2.2 对不带倒角支架的分析	37
2.2.1 局部网格精细化分析	40
2.2.2 网格控制	41
2.2.3 结果讨论	44
2.2.4 应力奇异性	44
2.3 带圆角支架的分析	45
2.3.1 自动过渡	45
2.3.2 结论	47
2.4 总结	47
练习 C 形支架的静态分析	47
第 3 章 手用虎钳的接触/缝隙分析	52
3.1 项目描述	52
3.2 使用全局接触的手用虎钳	52
3.2.1 为装配体指定材料	53
3.2.2 销钉接头	53
3.2.3 全局接触选项	54
3.2.4 观察装配体结果	57
3.2.5 所需的力	57
3.3 使用局部接触的手用虎钳	58

3.3.1 接触选项的层次	58	6.3.6 变形图解	98
3.3.2 局部接触选项	59	6.4 使用曲面的壳网格	98
3.3.3 无穿透的局部接触条件	60	6.4.1 细壳与粗壳的比较	99
3.3.4 接触应力	61	6.4.2 应用对称约束	101
3.4 总结	61	6.4.3 实体与壳单元的比较	102
练习 Bone Wrench 的静态分析	62	6.5 壳单元与实体单元建模的比较	102
第4章 机轮装置的冷缩配合分析	65	6.6 精细化实体网格	103
4.1 项目描述	65	6.7 结果比较	103
4.1.1 对称	65	6.8 总结	104
4.1.2 特征消除	66	第7章 接头、特定支撑及接触	105
4.2 冷缩配合分析	66	7.1 接头	105
4.2.1 刚体模式	67	7.2 项目描述: 铰链、虚拟壁及弹性支撑	106
4.2.2 冷缩配合接触条件	67	7.2.1 虚拟壁	107
4.2.3 在局部坐标系中图解显示结果	68	7.2.2 铰链约束	108
4.2.4 定义圆柱坐标系	68	7.2.3 轴承载荷	109
4.2.5 保存所有图解	69	7.3 带有 base 的分析(可选)	111
4.2.6 “什么错”特征	70	7.4 项目描述: 使用螺栓接头	112
4.3 带软弹簧的分析	70	7.4.1 螺栓头和螺母接触面	114
4.3.1 软弹簧选项	70	7.4.2 螺栓紧密配合及直径	114
4.3.2 惯性去除选项	70	7.4.3 螺栓预载	114
4.4 总结	71	7.5 项目描述: 吸振器应力分析	117
练习 两环装配体的接触分析	72	7.6 计算压缩弹簧的刚度	117
第5章 differential 装配体的静态分析	74	7.7 分析吸振器装置	118
5.1 项目描述	74	7.7.1 弹簧接头类型	119
5.2 局部接触条件	74	7.7.2 弹簧接头选项	119
5.2.1 远程载荷	75	7.7.3 大位移警告	120
5.2.2 缝隙(间隙)选项	80	7.8 项目描述: 使用点焊	120
5.2.3 旋转和轴向刚度	81	7.8.1 定义点焊	121
5.3 使用高品质网格的分析(可选)	82	7.8.2 点焊——应力集中	123
5.4 总结	86	7.8.3 获取合力扭矩	124
练习 利用选定面对支架进行壳分析	86	7.9 点焊——壳网格(可选)	125
第6章 滑轮的壳体分析	90	7.10 总结	126
6.1 项目描述	90	第8章 混合网格划分——压缩机分析	128
6.2 模型准备	90	8.1 混合网格	128
6.3 使用中面的壳网格	91	8.2 混合网格: 单实体零件	129
6.3.1 概述	91	8.3 混合网格: 多实体零件	130
6.3.2 壳网格的颜色	92	8.4 兼容/不兼容网格划分	131
6.3.3 壳单元对齐	94	8.4.1 兼容网格	132
6.3.4 自动重新对齐壳曲面	95	8.4.2 不兼容网格	133
6.3.5 对称约束	96	8.4.3 壳和混合网格: 兼容和不兼容网格划分	133
		8.5 混合网格: 压缩机分析	134

8.6 总结	137	11.2 双金属带的变形分析	159
第9章 使用设计情形分析汽车悬架	138	11.3 在局部坐标系中检查结果(可选)	167
9.1 项目描述	138	11.4 保存变形后的模型	168
9.2 悬架设计: 多载荷情形	138	11.5 总结	168
9.2.1 设计情形	140	第12章 横梁单元——传送架的静态分析 ...	169
9.2.2 设计情形结果	142	12.1 项目描述	169
9.3 悬架设计: 几何修改	145	12.1.1 横梁单元	169
9.4 总结	148	12.1.2 横梁接合位置	170
第10章 固定支架的静态分析	149	12.1.3 横梁接合类型	171
10.1 项目描述	149	12.1.4 截面的第一及第二方向	174
10.1.1 几何体准备	149	12.2 总结	175
10.1.2 自适应求解网格类型	151	第13章 夹钳的大位移分析	176
10.2 h-自适应求解方法	151	13.1 项目描述	176
10.2.1 h-自适应选项	152	13.2 小位移线性分析	177
10.2.2 h-自适应求解的总结	154	13.3 大位移非线性分析	178
10.3 p-自适应求解方法	154	13.3.1 小位移及大位移分析中的接触结果	178
10.3.1 p-自适应选项	154	13.3.2 永久变形	179
10.3.2 应用 p-自适应方法求解	155	13.3.3 COSMOSWorks Advanced Professional ...	180
10.4 h-自适应与 p-自适应	157	13.4 总结	180
10.5 总结	158	附录	181
第11章 双金属带的热应力分析	159	附录 A 网格划分、解算器	181
11.1 项目描述	159	附录 B 用户帮助	189

绪 论

0.1 COSMOSWorks 概述

COSMOSWorks 是一种基于有限元分析技术(即 FEA 数值技术)的设计分析软件,是 SRAC 公司工程分析软件产品之一。SRAC 公司成立于 1982 年,是将有限元分析带入到桌面计算的先驱。1995 年,SRAC 公司与 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,同时它作为公司的插入式分析软件,迅速成为顶级销量产品。2001 年,综合了 SolidWorks CAD 软件的 COSMOSWorks 软件由于在商业上取得的成功而获得了 Dassault Systemes(SolidWorks 的母公司)的认可。2003 年,SRAC 公司与 SolidWorks 公司合并。

SolidWorks 是一个基于参数化实体特征的 CAD 系统。和许多最初是在 UNIX 环境下开发,后来才向 Windows 系统开放的 CAD 系统不同, SolidWorks 从一开始,就是专为 Windows 操作系统开发的。COSMOSWorks 也是如此。那么作为 Windows 操作系统下的两个应用程序,它们之间的充分集成是可能的。

COSMOSWorks 有不同的软件包和应用程序,以适合不同用户的需求。

COSMOSXpress 包是 SolidWorks 的内置部分,其他所有的 COSMOSWorks 包都是插件式的。不同包的主要功能如下:

- COSMOSXpress: 对一些具有简单载荷和支撑类型的零件的静态分析。
- COSMOSWorks Designer: 对零件或装配件的静态分析。
- COSMOSWorks Professional: 对零件或装配件的静态、热传导、扭曲、频率、掉落测试、优化及疲劳分析。
- COSMOSWorks Advanced Professional: COSMOSWorks Professional 的所有功能加上非线性和高级动力学分析,还可以在 GeoSTAR 中进行。

在开始课程之前,让我们详细了解一下什么是有限元分析以及它是如何工作的,以便为掌握 COSMOSWorks 技术打下基础。

0.2 有限元分析概述

在数学术语中,FEA 也称为有限单元法,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到许多工程学科,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 不是惟一的数值分析工具,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的应用。使用 FEA,通过不同方法理想化几何体,我们能够分析任何形状模型,并得到预期的精度。使用现代的商业软件时(例如 COSMOSWorks),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。

不管项目多复杂或应用领域多广泛,无论是结构、热传导或声学分析,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,即是从 SolidWorks 的零件和装配件开始。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,即将几何体剖分成相对小且形状简单的实体,这些实体称为有限单元。将单元称为“有限”的,是为了强调单元不是无限的小,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)。

应用 FEA 软件分析问题,有 3 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:计算结果。
- 3) 后处理:分析结果。

在应用 COSMOSWorks 时,我们也遵循以上 3 个步骤。

通过对 FEA 方法的了解,我们列出下列步骤:

- 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

COSMOSWorks 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。这个小的概念,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。这对网格的要求有着极其重要的含义。我们必须确保 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、理想化或删除等方法。

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。我们可以使用 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。

我们并不只是为了网格划分这个单一目的。通常情况下为了避免由于网格过多而导致分析过程太慢,可对能够进行正确网格划分的模型采取简化。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 软件分网技术娴熟的使用。

准备好能够划分网格、但尚未划分网格的模型后,再来确定材料属性、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。数学模型建立的流程如图 0-1 所示。

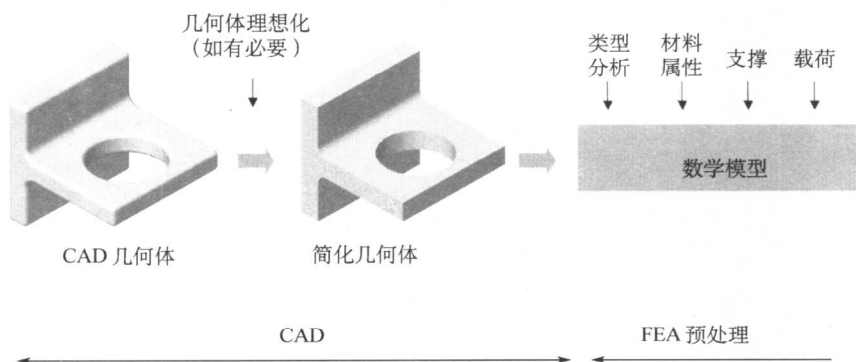


图 0-1 数学模型建立的流程

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。有限元模型建立的流程如图 0-2 所示。

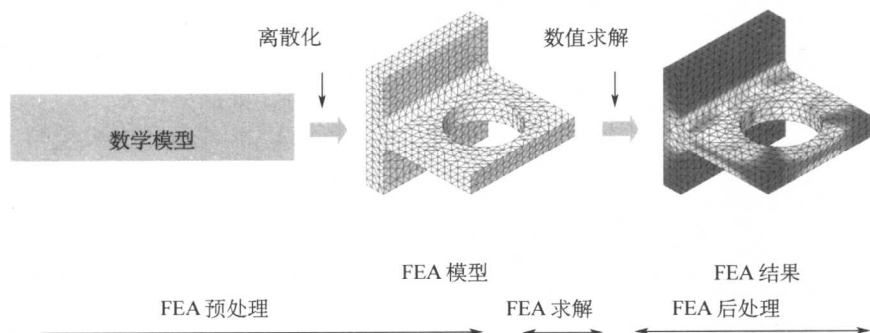


图 0-2 有限元模型建立的流程

0.5 求解有限元模型

创建了有限单元模型后，我们使用 COSMOSWorks 的求解器来得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 3 步产生的误差(建立数学模型、建立有限元模型、求解有限元模型)。

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，并且求解过程会产生数值误差。

以上 3 种误差，只有离散化误差是 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。求解误差是在计算过程中积累的,难于控制,但它们通常都很小。

4

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,有时也取决于分析者的偏好。

COSMOSWorks 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。为什么我们要局限于四面体和三角形形状呢?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 COSMOSWorks 网格划分独有的,可靠的块单元自动网格划分目前还没有发明出来。

在下一步开始之前,需要澄清一个重要的术语。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 术语中时作为“实体几何体”,而在 FEA 术语中作为“实体单元”。

0.8.1 COSMOSWorks 中的单元类型

COSMOSWorks 中有 4 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,下面我们将依次描述这些单元。

COSMOSWorks 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)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。如果读者能够回忆起材料力学中应变是位移的一阶导数,那么,应变(从位移的导数中求出)和应力在一阶四面体单元中均为常数。

每个一阶四面体单元有 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。

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,如图 0-3 所示。

由一阶单元组成的网格模拟出的真实复杂的位移和应力场,是有严重的局限性的,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。

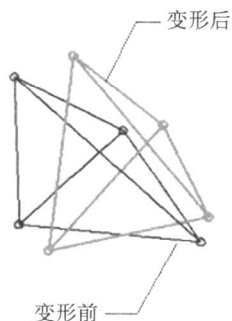


图 0-3 一阶实体四面体单元网格变形前后的形状

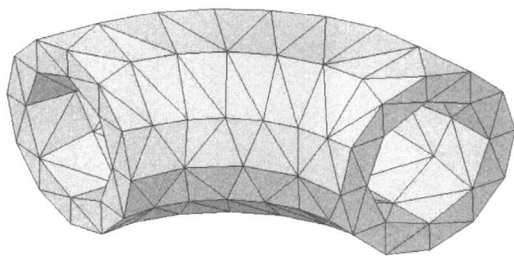


图 0-4 一阶实体四面体单元划分的效果

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不够精细。

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。

每个二阶四面体单元有十个节点(4个角点和6个中间节点),并且每个节点有3个自由度。

当单元因加载而变形时,如果单元需要模拟曲线形几何模型,则二阶单元的边和面就可以是曲线形状,如图0-5所示。

因此,图0-6显示了与图0-4同样的肘形几何体,这些单元能够很好地模拟其曲线形状。

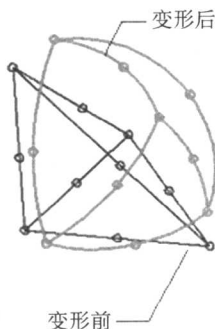


图0-5 二阶实体四面体单元网格
变形前后的结果

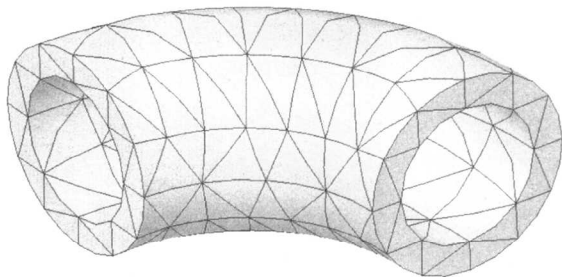


图0-6 二阶实体四面体单元划分的结果

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。对于分析来说,即使是二阶单元,这些网格也不够精细,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。

由于二阶四面体单元具有较好的绘图能力和模拟二阶位移场能力,即使它比一阶单元需要更多的计算量,在大多数情况下,COSMOSWorks还是采用它进行分析。

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和常数应变及应力。当单元变形时,一阶壳单元的直边仍保持为直线。

每个一阶的壳单元有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,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的用一阶单元模拟曲面形几何体的不精确的结果。

与一阶实体单元相似,这些壳单元对于真实的分析来说太大了。在图0-8中,不同的颜色用来表示单元的顶面(棕色)和底面(绿色)。方向和颜色是任意的,可以通过“反向”加以改变。在任何情况下,它们都不代表模型的方向或几何体。

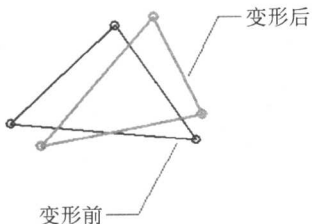


图0-7 一阶三角形壳单元网格
变形前后的结果

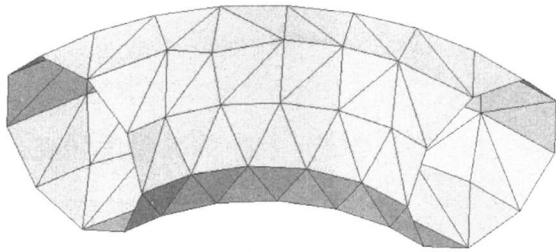


图0-8 一阶三角形壳单元划分的结果

4. 二阶三角形壳单元 二阶(高品质)三角形壳单元模拟二阶位移场和一阶(线性)应力场。

每个二阶壳单元有6个节点:3个角点和3个中间节点。在划分网格过程中,当单元因加载而变形时,如果需要模拟曲线形几何模型,二阶壳单元的边和面就可以模拟曲线形状,如图0-9所示。

再次应用肘形体,可见这个使用二阶壳单元划分的网格精确地重现了曲线形的几何体,如图0-10所示。

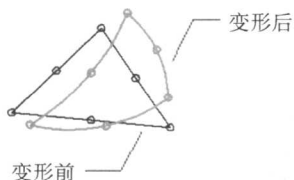


图0-9 二阶三角形壳单元网格
变形前后的结果

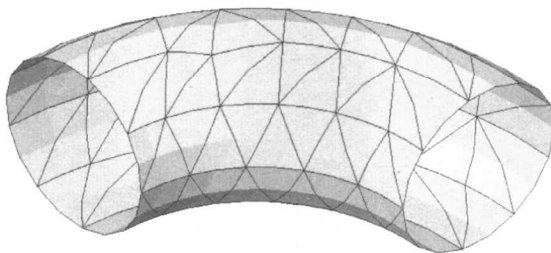


图0-10 二阶三角形壳单元划分的结果

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。对于分析来说,即使是二阶单元,这些网格也不够精细,尽管与一阶单元相比,它对网格的精细程度要求较低。

5. 横梁单元 相对于一阶实体和壳单元,两个节点的梁单元把两个面外挠度模拟为三次函数,并把轴向平移和扭转模拟为线性。两节点梁单元的形状在初始时为平直的,但可以假定形状在变形发生后为一个三次方函数。

两节点的梁单元在每个端节点处都有6个自由度:3个平移自由度和3个旋转自由度。

两节点梁单元的网格映射机制与一阶实体和壳单元中的方法是相同的。横梁单元网格变形前后的结果如图0-11所示。

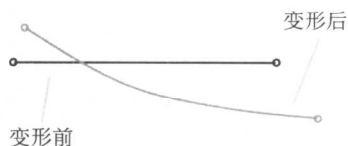


图0-11 横梁单元网格变形
前后的结果

0.8.2 在实体和壳单元中选择

某些类型的形状既可以使用实体单元也可以使用壳单元,如前文所讨论的肘体。选择单元类型可以是四面体实体或三角形壳,这取决于分析的目的。然而,通常情况下,几何体的天然形状决定了所使用的单元类型。比如,一些铸件只能用实体网格划分,而一张金属板材最好使用壳单元,如图0-12所示。

一个带孔板,既可以使用实体单元(它在对实体几何体划分网格时创建),也可以使用壳单元(它在对中面划分网格时创建)。

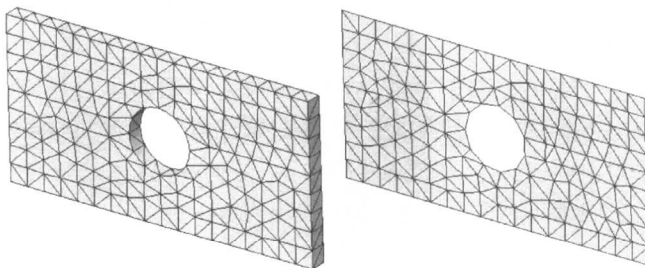


图0-12 实体单元与壳单元

0.8.3 实体及壳单元中的草稿品质和高品质

一阶单元,无论实体或壳,仅在对特定目标作初步分析时使用,如证实载荷或约束的方向,或计算反作用力。

对于准备用来作最后计算的算例(比如已经用草稿品质的单元验证了设置的正确性),以及在应力分布非常重要的地方(特别是在全厚度方向)应该采用高品质的单元。