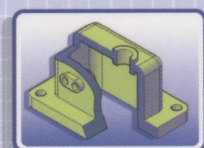
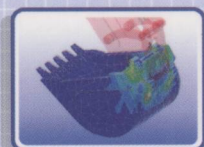
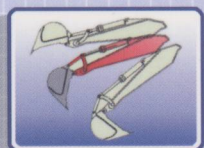


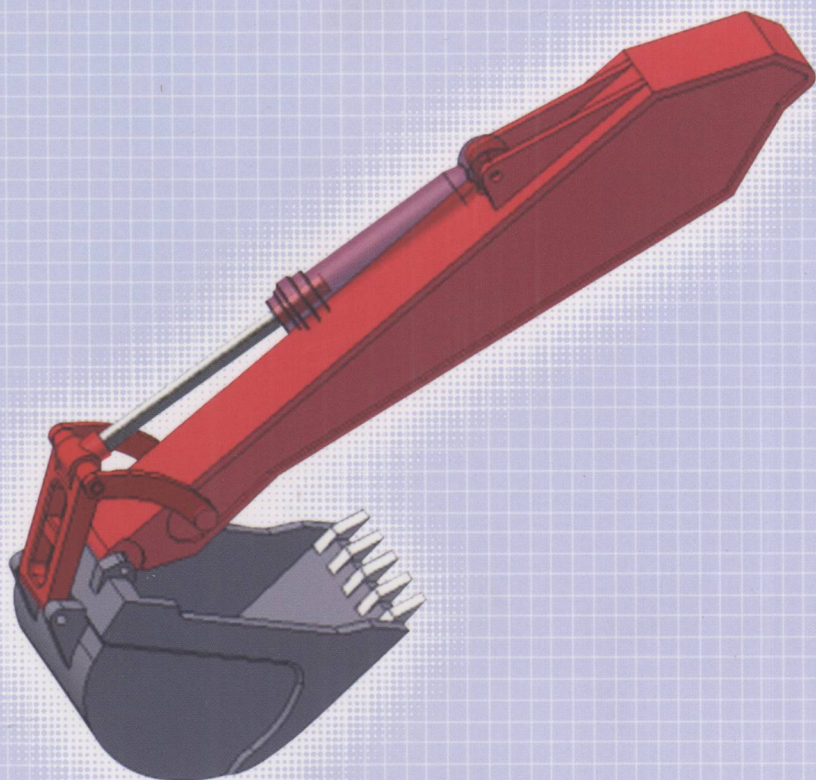
CAD/CAM/CAE 工程应用丛书

Autodesk Inventor

有限元分析和运动仿真详解



• 唐湘民 (Gary Tang) 等著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



附赠超值 **CD** 光盘
ROM

适用于Autodesk Inventor 2008/2009版本

CAD/CAM/CAE 工程应用丛书

Autodesk Inventor 有限元分析 和运动仿真详解

唐湘民 (Gary Tang) 等著



机械工业出版社

本书结构清晰、实用性强,详细讲解了 Autodesk Inventor 有限元应力分析和运动仿真的功能、原理和应用技巧。本书主要内容包括有限元结构静力分析、模态分析、运动仿真以及应用它们来校核三维设计的强度;稳定、检验模型的运动和动力功能,进而实现最佳设计。

本书所配光盘包含的应用实例是作者为解决用户常见的疑难问题而专门制作的,便于读者学习和领会。本书的内容和实例模型适用于 2008/2009 版本的 Autodesk Inventor Simulation 或 Autodesk Inventor Professional。

本书可作为工程设计单位的设计工程师,以及高等院校机械、力学、汽车、家电和日用产品等工程设计专业的师生的参考书,也可作为广大 CAD/CAE 工程人员的培训教材。

图书在版编目(CIP)数据

Autodesk Inventor 有限元分析和运动仿真详解 / 唐湘民 (Gary Tang) 等著. —北京:机械工业出版社, 2009.5

(CAD/CAM/CAE 工程应用丛书)

ISBN 978-7-111-27044-7

I. A… II. 唐… III. 机械设计: 计算机辅助设计—应用软件, Autodesk Inventor IV. TH1122

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 067999 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: 丁 诚 吴鸣飞

责任编辑: 吴鸣飞 罗子超

责任印制: 洪汉军

三河市宏达印刷有限公司印刷

2009 年 7 月第 1 版·第 1 次印刷

184mm×260mm·16.25 印张·399 千字

0001—3000 册

标准书号: ISBN 978-7-111-27044-7

ISBN 978-7-89451-094-5 (光盘)

定价: 59.00 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 68993821

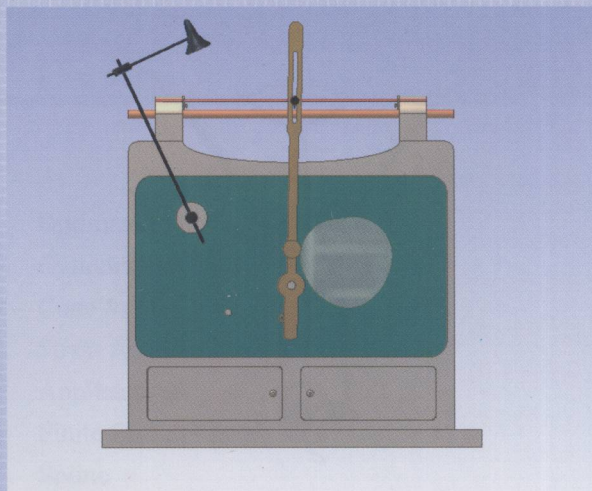
购书热线电话: (010) 88379639 88379641 88379643

编辑热线电话: (010) 88379753 88379739

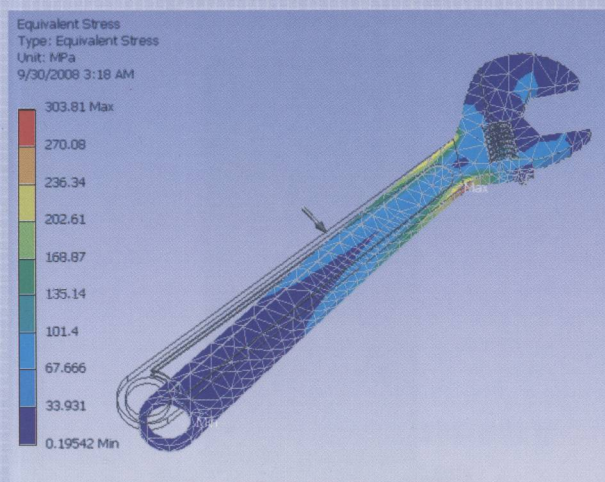
封面无防伪标均为盗版



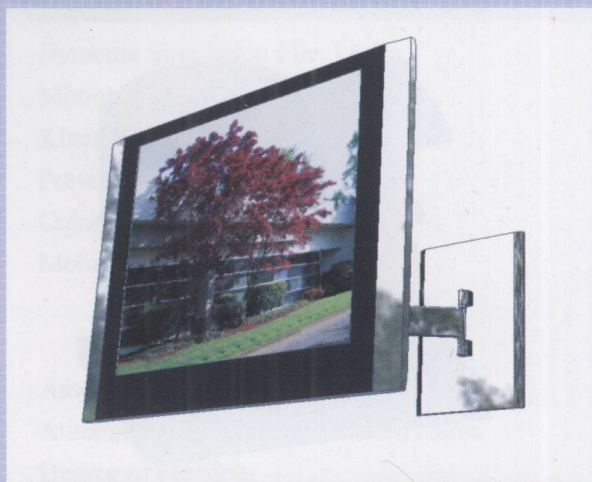
第1章 1.1节 电扇



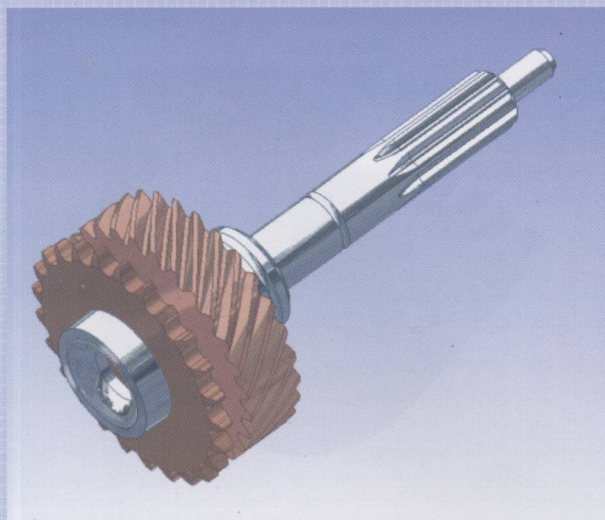
第1章 1.2节 绕线机



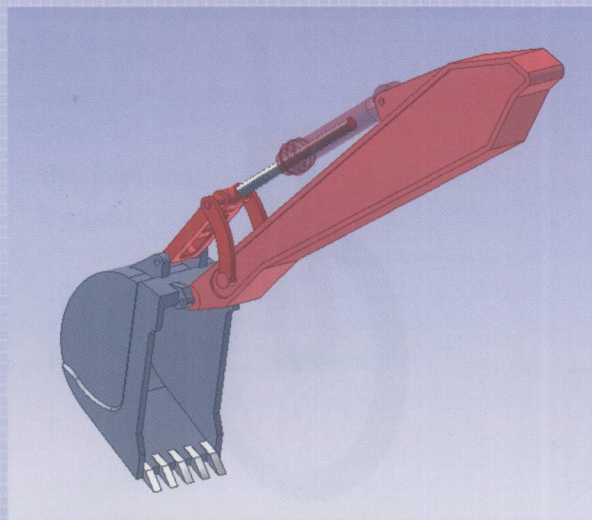
第4章 4.8节 应力分析结果



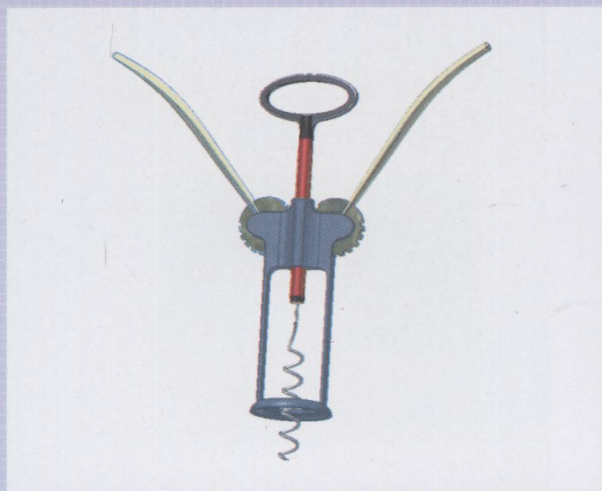
第5章 5.1节 电视面板悬挂装置



第7章 7.3节 齿轮和轴



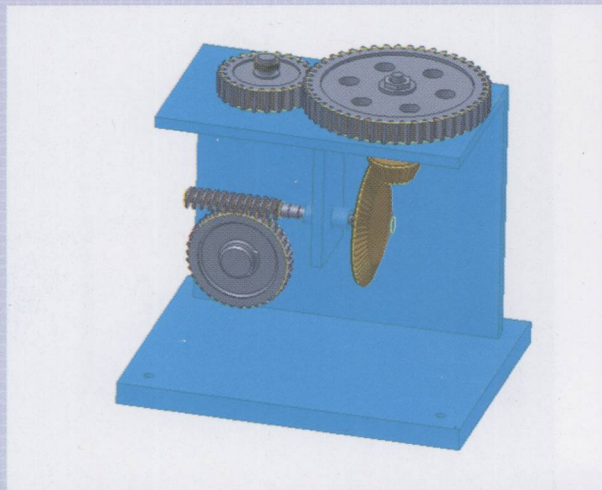
第8章 挖掘机



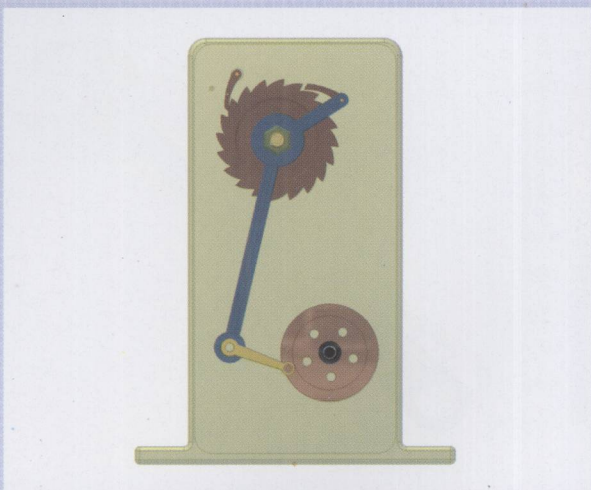
第9章 酒瓶开启器



第10章 10.2节 打气筒



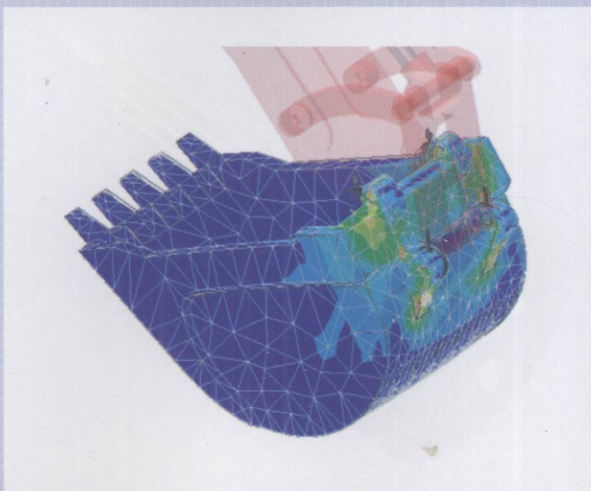
第10章 10.2节 传动系统



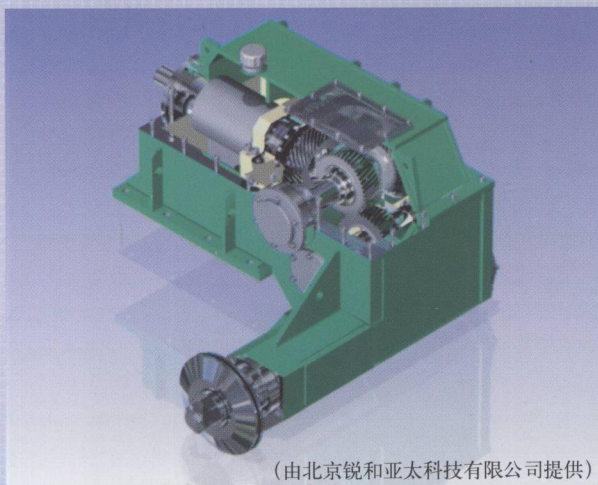
第13章 13.1节 棘轮装置



第14章 14.1节 自行车前插和车轮



第18章 18.2节 挖掘机铲斗应力分析结果



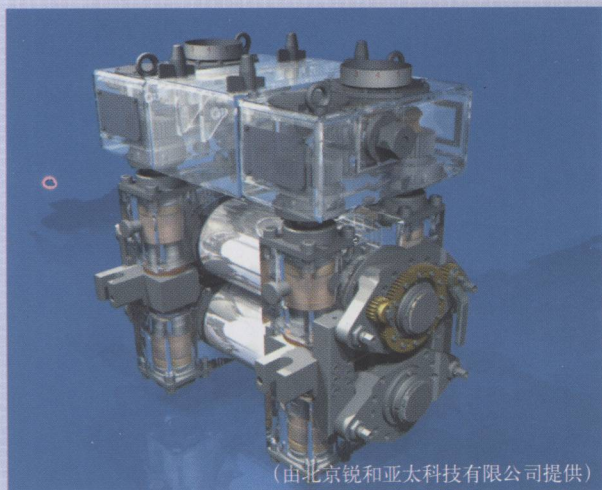
(由北京锐和亚太科技有限公司提供)

增速器



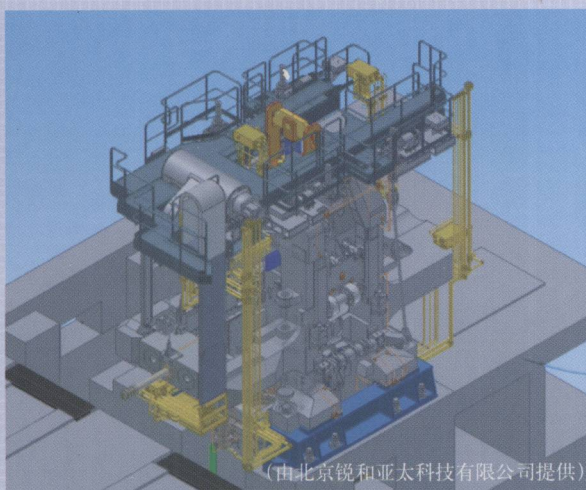
(由北京锐和亚太科技有限公司提供)

轧机辊系



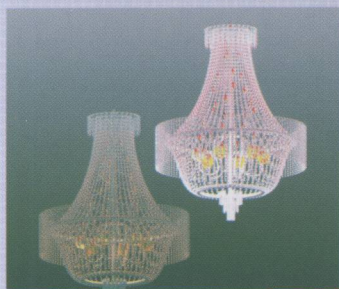
(由北京锐和亚太科技有限公司提供)

线材轧机



(由北京锐和亚太科技有限公司提供)

万能开坯机



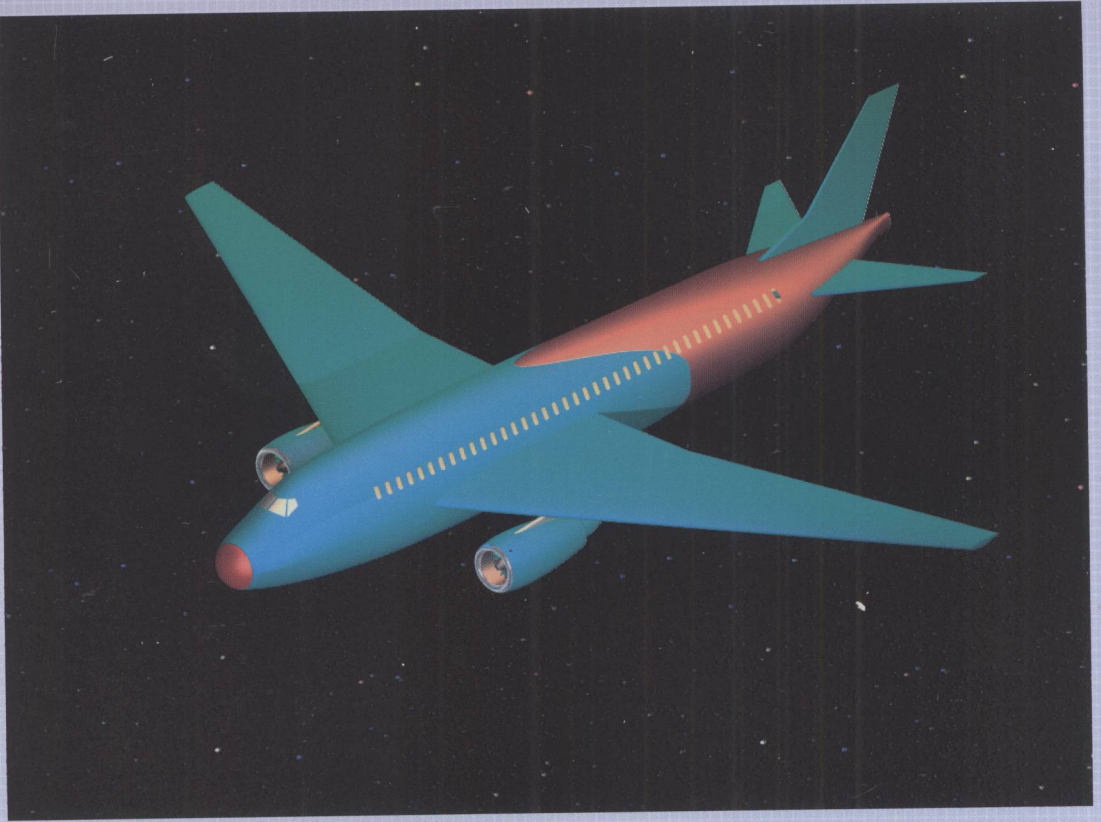
水晶吊灯



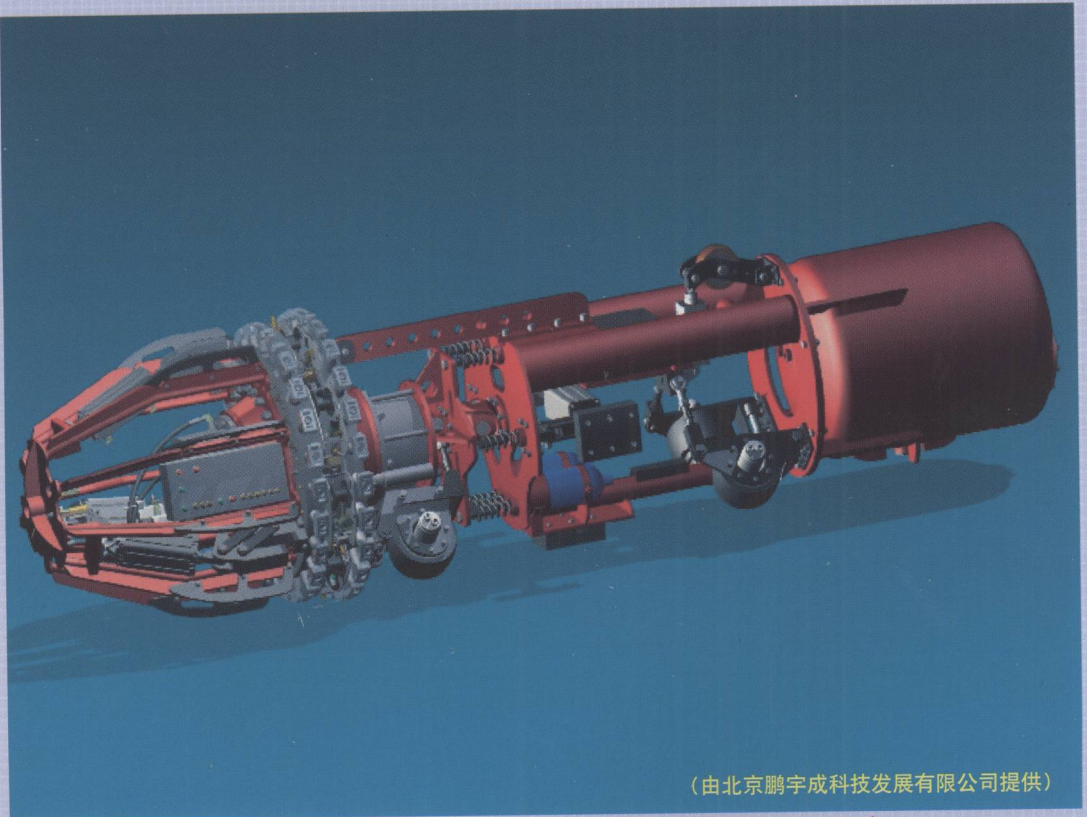
茶具



洗手池模型



飞机模型



(由北京鹏宇成科技发展有限公司提供)

自动焊机

前言



美国 Autodesk (欧特克) 公司是世界领先的二维和三维设计软件制造商。具有与 Autodesk AutoCAD 优越兼容性的 Autodesk Inventor 是目前世界上最受用户喜爱的三维设计软件之一, 广泛应用于机械制造业、汽车工业、厂矿设计、航空航天、五金工具、家电产品、化工等领域的设计。

国内外越来越多的设计人员正在从二维设计转换到三维设计上来。三维设计不仅仅是创建三维模型和产生二维工程图, 更重要的是, 它使对设计的三维模型进行渲染、动画制作、应力分析, 以及运动仿真成为可能, 从而实现制作“数字样机”的设计理念。数字样机是指在真正的产品生产出来之前就可以通过三维模型看到所要实现的设计功能, 试验在各种预计工作状况下的安全稳定性等在过去只有用实体产品才能完成的任务。这主要归功于 CAE (计算机辅助工程) 与 CAD (计算机辅助设计) 的无缝集成。Autodesk Inventor Simulation 就是将有限元应力分析 (Stress Analysis) 和运动仿真 (Dynamic Simulation) 与 Inventor 有机集成, 从而使 Inventor Simulation 具有强大的创建三维模型、设计安全和稳定的检验, 以及运动仿真功能。

目前, 关于 Inventor Simulation 的书籍和资料有联机帮助和 Autodesk 官方的快捷教程, 但还没有一本关于 Inventor Simulation 的中文或英文书籍出版。本书不是重复联机帮助或官方教程, 而是采用非常具有针对性的实例来详解用户在使用有限元应力分析和运动仿真中的常见问题、困难和疑惑。其中, 还穿插了有限元基本概念、材料强度理论、模态分析理论、运动学理论、运动仿真的机理基础等, 以帮助用户理解实例的意义。本书提供的实例涉及最常用的机械机理, 如四连杆机构、凸轮从动件、齿轮机构和棘轮机构, 使用户感到亲切且易于理解。

本书作者作为 Inventor Simulation 自第一版以来的质量技术负责人 (Tech Lead of Autodesk Inventor Professional Quality Assurance), 积累了丰富的经验、有着深刻的理解, 以及对用户大量的技术支持和问题解答的宝贵经历。

本书由 4 个主要部分组成: Inventor 和仿真简介、有限元应力分析、运动仿真和在设计中应用应力分析与运动仿真。

第 1 章对 Inventor 的三维建模作了介绍, 包括它与 AutoCAD 的兼容性。然后对应力分析和运动仿真进行了概述。

第 2~7 章是有限元应力分析部分。第 2 章介绍了有限元法的基本概念和理论, 重点讲解三维设计中应用有限元涉及的概念和理解分析结果需要的理论基础。第 3 章介绍了 Inventor 应力分析的界面和应用, 对命令和概念进行了解释, 如轴承载荷、网格划分等。第 4 章着重描述应力分析的求解和对应力分析结果的理解, 本章最后还介绍了设计中常用的强度理论。第 5 章通过实例介绍如何应用有限元分析来对设计进行优化的流程。对用户在具体应用中的常见问题在第 6 章进行介绍, 并讲解了如何解决问题和实践中的最佳方法。第 7 章详细介绍模态分析的概念和基本理论、分析结果, 及对计算结果的理解和应用。

第 8~15 章是运动仿真部分。第 8 章介绍运动仿真界面和如何运行仿真。第 9 章对运动仿真中的一些关键概念进行了较详细的介绍,包括自由度、运动链、冗余、动力学等。第 10 章详细介绍运动仿真中最重要的要素——运动连接以及创建运动连接。第 11、12 章详细讲解如何通过定义参数和输入图形器,来定义运动机理和机械连接的物理和动力性质。第 13 章详细讲解运动仿真的结果。第 14 章对用户通常难以理解的冗余的概念进行了解释。第 15 章用几个实例演示了运动仿真的强大功能和在设计中的重要作用。

第 16~18 章为应用实例,详细介绍如何将有限元应力分析和运动仿真有机地应用到设计中。对于用户通常难以理解的在运动仿真中将构件作为刚体,而在有限元分析中又将构件作为弹性变形体,同时在设计中既可以使用运动仿真又可以进行有限元分析作了详细讲解。通过对缓慢运行的挖掘机和快速转动的电风扇,来讲解如何进行模拟运动状态仿真和有限元分析,使用户认识到 CAE 对设计的重要意义,进而参考本书中学到的知识和技巧,应用到自己的设计项目中。

本书主要由唐湘民编写和创建模型;唐平、李丽娜参与了本书部分章节的编写和校核工作;乔胜普、田风雷、陈旻等提出了宝贵的修改意见,在此表示衷心感谢。

本书所附的示例文件模型均可由 Autodesk Inventor Simulation 2008 版本和 2009 版本打开和运行。读者在阅读过程中如有任何疑问,可发电子邮件至: AISbyTang@gmail.com。

作者于 美国 俄勒冈州波特兰市

目 录

前言

第 1 章	Inventor、应力分析与运动仿真仿真概述	1
1.1	Inventor 简介	1
1.1.1	用 Inventor 创建三维设计模型	2
1.1.2	Inventor 三维模型与二维工程图	4
1.1.3	Inventor 与 AutoCAD 的兼容性	5
1.1.4	Inventor 与其他 CAD 文件格式	6
1.1.5	Inventor 的数据共享	6
1.1.6	Inventor 软件包和产品系列	7
1.2	Inventor 应力分析与运动仿真简介	8
1.2.1	Inventor 应力分析	9
1.2.2	Inventor 运动仿真	11
1.3	用 CAD 建模进行有限元分析和运动仿真的设计方法	18
第 2 章	有限元分析概述	21
2.1	三维结构设计的应力分析	21
2.1.1	结构的力学问题	21
2.1.2	边值问题的数值解法	24
2.2	有限元法	25
2.2.1	离散	26
2.2.2	单元、位移和单元刚度矩阵	27
2.2.3	形函数、高阶单元和收敛	30
2.2.4	边界条件	33
2.2.5	求解域的总的刚度矩阵和代数方程求解	34
2.2.6	误差评估	34
2.2.7	对结果的理解和解释	36
2.2.8	有限元法的应用	36
第 3 章	应力分析的界面和应用	37
3.1	“应力分析”工具面板和浏览器	37
3.2	应力分析的设置	40
3.2.1	定义材料	40
3.2.2	施加载荷	40
3.2.3	施加约束	42
3.2.4	应力分析设置	42
3.2.5	求解	45

3.3	启用应力分析	45
第4章	应力分析结果	46
4.1	等效应力	47
4.2	主应力	47
4.3	变形	49
4.4	安全系数	49
4.5	固有频率和模态形状	50
4.6	其他的应力计算结果	50
4.7	对应力分析结果查看的实例——梁的有限元应力分析	51
4.7.1	等效应力	53
4.7.2	最大主应力	54
4.7.3	最小主应力	55
4.7.4	变形	55
4.7.5	安全系数	56
4.8	应力分析结果可视化显示	57
4.8.1	编辑颜色栏	57
4.8.2	动画计算结果	57
4.8.3	设置计算结果显示选项	57
4.9	使用分析得到的结果	59
4.10	进一步分析或者报告输出到 ANSYS Workbench	59
4.11	设计中常用的材料强度理论	59
4.11.1	材料的强度准则	60
4.11.2	最大切应力准则	62
4.11.3	最大畸变能密度准则	63
4.11.4	最大正应力准则	65
4.11.5	库仑-莫尔准则	66
第5章	在设计中结合应力分析的实例	68
5.1	对设计模型的初步分析	68
5.2	在零件造型环境中进行应力分析	70
5.3	在应力分析环境中修改几何尺寸	71
5.4	在应力分析环境中用收敛来取得更好的精度	73
5.5	在设计过程中进行应力分析的意义	75
第6章	常见问题的解决技巧和方法	76
6.1	应力分析中的常见问题	76
6.1.1	网格划分失败	76
6.1.2	求解失败	78
6.1.3	收敛失败	79
6.2	零件被约束不足和弱弹簧的引入	83



6.3 使用应力分析的技巧	84
6.3.1 施加力在合理的几何面积上	84
6.3.2 略去次要特征	84
6.3.3 使用“结果收敛”求得更精确的结果	86
6.3.4 Inventor 功能在应力分析中的技巧	87
第7章 模态分析	94
7.1 模态分析的类型	94
7.1.1 模态分析中不考虑预应力作用	94
7.1.2 模态分析中考虑预应力作用	95
7.2 模态分析的结果	96
7.2.1 固有频率	96
7.2.2 模态形状	96
7.3 轴和圆盘在不同条件下的模态分析实例	97
7.3.1 轴在不被约束条件下的模态分析	97
7.3.2 轴在被约束条件下的模态分析	99
7.3.3 预应力对模态参数的作用	100
7.4 振动、固有频率和模态形状的概念	101
7.4.1 一维自由度的自由振动	102
7.4.2 梁的自由振动	104
7.4.3 振动的类型	106
7.4.4 固有频率和模态形状	108
7.4.5 应用固有频率和模态形状	109
7.5 使用有限元法进行模态分析	112
第8章 运动仿真界面及运行仿真	113
8.1 运动仿真界面	113
8.1.1 “运动仿真”工具面板	113
8.1.2 运动仿真浏览器	114
8.1.3 “仿真”面板	114
8.2 运动仿真简单流程——电扇的运动仿真	115
8.3 运行仿真	116
8.3.1 “仿真”面板简介	116
8.3.2 动态零件运动	118
第9章 运动仿真的关键概念	119
第10章 运动机理中的连接	129
10.1 连接类型	129
10.1.1 标准连接	130
10.1.2 滚动连接和滑动连接	131
10.1.3 二维接触连接	132
10.1.4 力连接	132

10.2	产生连接的方法	132
10.2.1	手动插入连接	133
10.2.2	通过“继承装配约束”产生连接	147
10.2.3	自动产生基于装配约束的连接	148
10.3	连接的特性	151
10.4	产生连接的规则	151
第 11 章	机理的物理特性和力学环境	152
11.1	驱动条件——驱动齿轮传动系统	152
11.2	定义初始条件和范围边界	154
11.2.1	初始位置	154
11.2.2	初始速度——保龄球仿真的初始条件	155
11.2.3	自由度的界限	156
11.3	作用在连接自由度上的力矩或力	157
11.4	施加外力	158
第 12 章	输入图示器	160
12.1	输入图示器界面	160
12.2	定义变量的法则	162
12.2.1	用“线性”函数定义变量	163
12.2.2	用“摆线”函数定义变量	163
12.2.3	用“正弦或余弦”函数定义变量	164
12.2.4	用“样条曲线”函数定义变量	165
12.2.5	用“多项式”函数定义变量	166
12.2.6	用“公式”定义变量	167
12.3	定义一个随时间变化的复杂变量	168
12.3.1	产生一条由多扇区组成的曲线	168
12.3.2	在一个扇区由多个法则叠加定义的曲线	170
12.3.3	由多时间扇区、多法则叠加定义的驱动条件的实例	170
12.4	运动曲线的条件	172
12.5	在模拟中应用输入图示器的实例	172
12.6	变量在定义区域外的特性	175
12.6.1	常数	175
12.6.2	常数斜度	175
12.6.3	模量	176
12.6.4	周期	176
12.6.5	自由	176
第 13 章	输出图示器和仿真结果	177
13.1	输出图示器	177
13.2	同步	179

13.3	输出图示器中的输入条件或输出结果	181
13.3.1	运动变量	181
13.3.2	驱动力	182
13.3.3	关节动力	182
13.3.4	动力因素	182
13.3.5	在输出图示器中显示输入变量和仿真结果	183
第 14 章	过度约束导致的冗余及修复	187
14.1	冗余	187
14.2	冗余机理运动及计算结果的有效性	192
14.3	修复有冗余的模型	195
14.4	自动修复冗余	196
第 15 章	运动仿真在设计中应用的实例	197
15.1	使用“未知力”功能求解运动机构的静态平衡条件	197
15.1.1	运动仿真的“未知力”功能	197
15.1.2	应用“未知力”功能的实例——开启酒瓶时,开启器各部件的受力	198
15.2	基于对草图受力分析的设计——曲柄连杆滑块机构的实例	201
15.3	使用“轨迹”功能进行逆向工程设计——如何确定绕线机的凸轮轮廓	204
15.4	可运动机构在静止状态下的受力分析	211
15.4.1	可调整结构的受力状态	211
15.4.2	用运动仿真计算可运动结构在静止状态的受力	212
第 16 章	运动机理中构件的有限元分析	216
16.1	静态平衡和动态平衡	217
16.2	对运动构件的有限元应力分析	220
16.2.1	运动构件的载荷条件	220
16.2.2	在有限元求解中消除运动构件的刚体运动	220
第 17 章	运动部件的有限元应力分析	222
17.1	运动载荷——电扇在运行时各传动部件的受力	222
17.2	输出到有限元分析	224
17.2.1	选定载荷承载面	224
17.2.2	选定时间点	229
17.3	对运动零部件进行有限元分析	231
17.3.1	输入运动载荷	231
17.3.2	在默认设置下进行有限元分析——电扇叶片和轴的应力分布	232
17.3.3	应力分析在多步骤运动时的设置	233
17.4	选定载荷承载面	233
17.4.1	手动选定一个适当的面	233
17.4.2	手动选定一个载荷的多个面	233
17.4.3	使用自动选定选项来定义载荷承载面	234



17.5	输出固定零件的运动载荷	234
17.6	对运动部件有限元分析的流程	236
第 18 章	机械装置的“准”静态平衡和应力分析	237
18.1	“准”静态平衡——挖掘机在挖掘时铲斗的受力	237
18.2	零件在静态平衡下的有限元分析——铲斗的应力分布	240
附录	主要词汇中英文对照	243
参考文献		248

第1章 Inventor、应力分析与运动仿真概述



有限元应力分析和运动仿真属于 CAE (Computer Aided Engineering), 即计算机辅助工程范畴, 将它们用在设计的过程中, 只对模型进行分析, 不对模型进行修改。对于复杂的静力、动力、运动学分析, 通常是由专门的分析工程师来完成。传统的做法是设计工程师在使用三维 CAD 软件产生了模型之后, 分析工程师将该模型输入到 CAE 软件 (如 ANSYS、ABAQUS、ALGOR、ADINA、MSC-Nastran/Dytran/Marc/Adams) 来进行有限元分析和运动仿真, 基于分析和仿真的结果, 评估过度设计或不足设计等不合理或可进一步优化的地方。然后, 模型又在 CAD 软件中加以修改, 然后再回到 CAE 软件中进行再次分析。如果分析结果显示还需要进一步修改, 模型又回到 CAD 软件中修改, 如此多次迭代, 以实现设计的最优化。

将 CAE 功能集成于 CAD 软件极大地简化了这一工作流程。将应力分析和运动仿真引入 Inventor, 使之成为从创立三维模型到结构分析, 运动仿真的有机结合的工具, 用户能在同一环境下利用分析和仿真的结果对设计作出评估和修改, 从而驱动设计, 完成优化设计的全过程。分析、仿真与设计同时进行, 可以显著加快设计进度, 缩短设计周期。

在过去, 有限元应力分析和运动仿真主要由分析工程师, 或有限元分析专家来完成。而现在 CAE 与 CAD 的集成, 则使之由设计工程师在设计过程中来完成。这就要求精于创建模型的设计工程师学习、理解和应用有限元分析及运动仿真, 也要求专长于分析的分析工程师对创建模型有一定的了解。

本章首先对 Inventor 进行简要介绍, 包括创建三维模型、二维制图、与它紧密相关的 AutoCAD 的兼容性, 以及 Inventor 与其他 CAD 文件的数据转换等。然后概括介绍应力分析和运动仿真, 最后阐述从创建三维模型, 到通过对模型进行应力分析和对功能的仿真来改进设计的整个设计流程。

1.1 Inventor 简介

Inventor 自 1999 年发布第一版本以来, 已成为世界领先的三维设计软件之一。它提供了从创建三维模型、渲染、动画、模型分析、应力分析、运动仿真, 到数据转换、产生二维工程图、支持二次开发等的全面功能。本书采用的模型都是由 Inventor 创建的。在前面的彩色插页中, 三维设计模型既有大中型机械设备, 也有小型的机械装置, 还有非机械设备。(当然, 还有很多 Inventor 客户创建的超大型模型, 如高速火车、石油平台、船只、汽车、客

车、摩托车等) 这些模型的构成、渲染、制图和分析, 显示了 Inventor 强大的三维建模功能。它们的创建或由 Inventor 的基本功能完成, 或通过 Inventor 的附加特定功能的工具, 如设计加速器、标准件库、结构件生成器等便捷地实现。

1.1.1 用 Inventor 创建三维设计模型

Inventor 提供了出色的创建基于特征的参数化三维实体模型的功能, 其明晰的用户界面、直观的工作流程, 以及上下文相关帮助, 使用户学习和掌握三维建模十分容易。其强大的三维图形引擎, 使用户可以创建复杂的几何图元, 从而实现设计者的设计和创新意图, 而其采用的自适应技术的体系结构, 还提供了出色的大型复杂系统装配性能。

三维模型的主要基本单元是零件, 零件是基于草图和几何特征建立的。用户通过草图可以产生几乎任意形状的二维几何轮廓。从二维几何轮廓可以产生三维特征, 如通过在草图上的正六边形产生一个拉伸特征, 即可生成一个简单的三维实体, 形状如六角六角头螺栓。Inventor 用于草图的特征包括拉伸、旋转、扫掠、放样等。用户还可以在零件的三维实体特征上直接产生诸如圆角、孔、抽壳等基本特征。由于几何图元是基于参数的, 因此, 尺寸可由参数驱动。当通过修改参数来改变尺寸时, 几何单元或特征会基于尺寸的变更自动更新。零件设计功能也支持自适应技术。Inventor 强大的曲面功能还能创建十分复杂的曲面形状, 具有无缝结合的曲面和实体混合的造型功能。

产生的零件组合起来组成装配部件 (Assembly), 装配部件又可以作为子装配件组成更高级的装配部件。由很多零件和子装配件, 就可以产生大型的、复杂的三维装配模型。零件或子装配通过适当的装配约束来确定组合的关系。装配约束包括配合、对准角度、相切、插入、运动和过渡。设计流程由零件开始, 到产生子装配件, 总装配件, 是一种自下向上的设计方法, 即先生成各个零件、子装配部件, 然后根据装配体的要求调入各子部件, 进而完成整机的装配。设计的装配过程与生产实际中的实物组装一样, 比较直观, 便于掌握。Inventor 的装配设计也完全支持自上向下, 或自上向下与自下向上相结合的设计流程。在自上而下的设计方法中, 用户可在装配体中可以将已生成的零件调入, 也可以实行在位设计, 并利用 Inventor 的自适应技术, 直接建立新建零部件与已有零部件之间的形状、大小及位置的关系, 从而实现零部件之间位置关系的自行调整。如果修改基本零件的几何图元, 自适应零件的几何图元和位置也会随之更新。例如, 一个自适应的连接件零件的长度和位置可自动调整, 使之保持与连接件的正确关系; 一个自适应的轴的直径可自动调整到与其连接孔相配合的大小, 从而自行解决常见的空间中的几何干涉问题。在设计实践中, 设计师通常使用自上向下的设计方法来布局其装配体。

创建三维实体部件使用户可以清楚地了解零件是否合理组装在一起。在装配中, 还融入了设计视图、运动部件的位置参数等选项, 以便于设计者有更多、更灵活的选择。Inventor 也提供了装配明细数据处理功能; 可以管理产品结构中的外购件、参考件和虚拟零部件等; 可以对部件中的零件进行完整的属性编辑。

Inventor 还具有通过 “iPart” 和 “iAssembly” 功能来产生系列化不同规格的同形零件和部件。创建零件和装配部件分别在零件造型环境和装配部件环境中进行。此外, Inventor 的设计环境还有钣金造型环境、焊接设计环境、表达视图环境和工程图环境。