

“十一五” 国家科技支撑计划项目课题资助

起重机械 虚拟仿真计算与分析

QIZHONG JIXIE XUNI FANGZHEN JISUAN YU FENXI

丁克勤 乔松 寿比南 编著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

“十一五” 国家科技支撑计划项目课题资助

起重机械虚拟仿真 计算与分析

丁克勤 乔 松 寿比南 编 著

机械工业出版社

虚拟仿真技术是随着计算机的兴起而发展起来的一种针对产品设计和测试评估的新技术。起重机械虚拟仿真是以起重机械的动力学、运动学模型为核心,以其他相关模型为补充,利用多领域建模工具和仿真技术,对起重机械运行状态进行仿真计算与分析,以了解起重机械运行的动力学特性。本书上篇简单介绍了虚拟仿真技术的形成、发展、应用范围以及虚拟仿真技术的动力学理论基础;中篇系统介绍了用于起重机械结构强度分析的有限元基本理论、常用的有限元单元以及其在动力学分析中的应用和动力学方程的求解方法;下篇系统介绍了虚拟仿真技术在不同类型起重机械结构分析中的应用实例,包括门式双梁、L型门式、双梁桥式、门座式等4类起重机械虚拟仿真建模、虚拟仿真计算以及结构强度计算等。

本书可供从事起重机械设计、分析、检测等工作的科技人员阅读,也可供机械设计及自动化、工程机械、固体力学、土木工程、物流机械等专业的高年级学生、研究生、教学、科研人员和有关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

起重机械虚拟仿真计算与分析/丁克勤,乔松,寿比南编著. —北京:机械工业出版社,2010.8

“十一五”国家科技支撑计划项目课题资助

ISBN 978-7-111-31291-8

I. ①起… II. ①丁…②乔…③寿… III. ①起重机械-计算机仿真-研究 IV. ①TH21-39

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第132728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:张俊红 责任编辑:朱林

版式设计:霍永明 责任校对:任秀丽

封面设计:王伟光 责任印制:杨 晔

北京蓝海印刷有限公司印刷

2010年10月第1版第1次印刷

184mm×260mm·20.75印张·515千字

0001—3500册

标准书号:ISBN 978-7-111-31291-8

定价:50.00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

社服务中心:(010)88361066

门户网:<http://www.cmpbook.com>

销售一部:(010)68326294

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售二部:(010)88379649

封面无防伪标均为盗版

读者服务部:(010)68993821

前 言

随着我国起重机械工业技术水平的快速提高,起重机械的创新设计已经成为各企业提升竞争能力的最主要手段和途径。与此相关,传统的起重机械金属结构安全可靠校核方法、整机工作运行稳定性等评价方法在实际运用中的局限性日趋明显。因此,有必要研究提出新的起重机械性能评价方法,为起重机械安全运行制定新的标准,为起重机械创新设计提供新的理论依据。

随着起重机械的使用范围越来越广,工况也越来越复杂,作为一种大型、复杂的机械系统,起重机械在运行过程中,主要机构、结构、零件间的相互作用对运行状态安全性产生很大影响,并且主要构件承受着强烈的冲击。长期以来,传统起重机械的评价、校核方法多采用静态方法,将动态问题简化为静态问题处理,利用动态系数来考虑这种动态响应,根据同类产品的相关资料和经验公式进行计算。虽然这样可以使问题简化,提高计算效率,但是不能准确反映起重机械的实际工况和动态性能,尤其是运行中突发工况对起重机械运行状态的影响。

20 世纪 50 年代以来,计算机技术的迅速发展已经为工程设计、分析和优化技术带来了全面的变革,虚拟仿真技术是随着计算机兴起而发展起来的一种针对产品设计和测试评估的新技术,已经广泛应用于机械设计领域内。运用虚拟仿真技术可以从外观、功能和行为上仿真真实产品,对全部系统进行研究和评估,或对设计的某一方面特性进行仿真测试。在起重机械分析评价中引入虚拟仿真技术,可以实现对起重机械各个机构在各种工况下随载荷变化的运行状态和随时间变化过程的仿真模拟。

采用虚拟仿真技术,与实际形式试验相比,虚拟仿真更快、更节约成本、更具有灵活性。起重机械虚拟仿真是以起重机械的动力学、运动学模型为核心,以其他相关模型为补充,利用多领域建模工具和仿真技术,在协同仿真环境支持下设计虚拟仿真原型系统,通过起重机械虚拟仿真动力学仿真、分析、评估实际起重机械的运行状态。

本书旨在将虚拟仿真技术引入到起重机械的设计与分析、评价中,立足于实际问题的应用,在起重机械领域内推广应用数字化分析技术,通过对数字化模型的虚拟试验来模拟物理试验,通过全新的设计理念,缩短制造周期,减少制造成本,提高分析能力。本书上篇由第 1 章和第 2 章组成,简单介绍了虚拟仿真技术的形成、发展、应用范围以及虚拟仿真技术的动力学理论基础;中篇由第 3~6 章组成,系统介绍了用于起重机械结构强度分析的有限元基本理论、常用的有限元单元以及其在动力学分析中的应用和动力学方程的求解方法;下篇由第 7~10 章组成,系统介绍了虚拟仿真技术在不同类型起重机械结构分析中的应用实例,包括门式双梁、L 型门式双梁桥式、门座式等 4 类起重机械虚拟仿真建模、虚拟仿真计算以及结构强度计算等。

本书由丁克勤、乔松、寿比南编写。希望本书能为从事起重机械设计、分析、检验等工作的工程技术人员提供有益参考,本书可用于起重机械设计、分析等相关课程的教材,也可作为相关软件的培训和自学教材以及高等院校研究生、本科生的教材。

本书主要内容来源于“十一五”国家科技支撑计划项目课题“大型机电类特种设备安全保障关键技术研究及工程示范”(编号:2006BAK02B04)子课题“大型起重机械运行状态虚拟仿真与动力学评价方法研究”的研究成果。感谢参与子课题研究的国家质量监督检验检疫总局特种设备安全监察局周亮工程师,中国特种设备检测研究院孙亮博士、葛森工程师、吴彦高级工程师、张雪涛助理工程师,江苏省特种设备安全监督检验研究院钱夏夷院长、强天鹏副院长、张一辉高工、黄凯博士,南京特种设备安全监督检验研究院陈则来院长、吕嘉宾副院长、倪大进工程师、李泉工程师、吴祥生工程师、陈新建工程师,东南大学靳慧教授,北京工业大学隋允康教授以及我的研究生方铭杰、胡晓光等人员的大力支持!感谢给予“十一五”国家科技支撑计划项目课题资助的相关单位!感谢课题管理人员沈功田研究员、陶雪荣研究员、吴占稳博士等的大力支持!

本书出版还得到中国科学院力学研究所吴永礼研究员和机械工业出版社张俊红编辑的帮助,吴永礼研究员提供了宝贵的资料并对本书进行了校核,张俊红编辑对本书出版提出了有益的建议,在此一并表示深切的谢意。

由于作者水平有限,书中难免有错误和不妥之处,恳请读者批评指正。

作者 丁克勤

2010年10月10日

于中国特种设备检测研究院

目 录

前言

上篇 虚拟仿真技术基本理论	1
---------------------	---

第1章 绪论	1
--------------	---

1.1 虚拟仿真技术的形成和发展	1
------------------------	---

1.2 虚拟仿真技术的应用范围	2
-----------------------	---

1.2.1 虚拟仿真技术在现代高端机械领域内的应用	2
---------------------------------	---

1.2.2 虚拟仿真技术在国内的应用及前景	3
-----------------------------	---

1.3 虚拟仿真软件简介	4
--------------------	---

第2章 动力学理论基础知识	7
---------------------	---

2.1 坐标系	7
---------------	---

2.1.1 坐标系概述	7
-------------------	---

2.1.2 确定不同坐标系位置和方向的方法	8
-----------------------------	---

2.2 质点运动	9
----------------	---

2.2.1 质点运动的描述	9
---------------------	---

2.2.2 点合成运动概念	10
---------------------	----

2.2.3 点的速度合成定理	11
----------------------	----

2.2.4 点的加速度合成定理	12
-----------------------	----

2.3 刚体运动	17
----------------	----

2.3.1 刚体的平面运动与分解	17
------------------------	----

2.3.2 平面图形内各点的速度和加速度	18
----------------------------	----

2.3.3 刚体的合成运动	23
---------------------	----

2.4 广义坐标和自由度	28
--------------------	----

2.4.1 约束及其分类	28
--------------------	----

2.4.2 广义坐标	30
------------------	----

2.4.3 广义坐标变分	30
--------------------	----

2.4.4 自由度	31
-----------------	----

2.5 多体动力学理论	31
-------------------	----

2.5.1 多体动力学研究对象及基本概念	32
----------------------------	----

2.5.2 多刚体系统动力学	33
----------------------	----

2.5.3 多柔体系统动力学	36
----------------------	----

2.5.4 多体动力学求解	39
---------------------	----

2.6 虚拟仿真软件中机械系统的运动分析	44
----------------------------	----

2.6.1 机械系统运动分析基础	44
------------------------	----

2.6.2 机械系统运动学分析及求解	46
--------------------------	----

2.6.3 机械系统动力学分析及求解	47
2.6.4 机械系统静力学及线性化分析求解	49
2.7 ADAMS 求解器算法	49
2.7.1 微分代数方程的求解算法	49
2.7.2 坐标减缩的微分方程算法	50
2.8 ADAMS/View 介绍及基本功能	51
2.8.1 界面介绍	52
2.8.2 基本操作	54
2.8.3 视图窗口设置	60
2.8.4 显示方式设置	62
2.8.5 操作环境与信息管理	66
中篇 有限元理论及方法	69
第3章 有限元法的力学基础	69
3.1 弹性力学的基本方程和边界条件	69
3.2 弹性力学的变分原理	73
3.2.1 应变能和应变余能	73
3.2.2 虚位移原理和最小势能原理	73
3.2.3 虚应力原理和最小余能原理	75
3.2.4 Hellinger – Reissner 变分原理	76
3.2.5 胡海昌 – 鹭津久一郎变分原理	79
3.2.6 参数变分原理	81
3.3 变分原理的应用实例	87
3.4 里茨法和伽辽金法	91
第4章 有限元法	98
4.1 协调模型——位移元	99
4.2 平衡模型 I	107
4.3 平衡模型 II	108
4.4 杂交应力模型	109
4.5 杂交位移模型	112
4.6 混合模型	113
第5章 常用的有限元单元	115
5.1 三角形单元族	115
5.2 等参数单元	119
5.3 奇异性单元	123
5.4 板壳单元	126
5.4.1 三角形薄板单元和薄壳单元	127
5.4.2 厚板单元和厚壳单元	134
第6章 弹性动力学问题的有限元方法	142
6.1 弹性系统的动力学方程	142

6.1.1 达朗贝尔原理和动力学方程	142
6.1.2 哈密顿原理和动力学方程	143
6.1.3 质量矩阵	143
6.1.4 阻尼矩阵	144
6.2 弹性结构的自由振动特性	145
6.2.1 特征值问题的一些特性	146
6.2.2 矩阵特征值问题的求解方法	149
6.3 弹性系统的动力响应	156
6.3.1 中心差分法	157
6.3.2 威尔逊 (Wilson- θ) 法	158
6.3.3 纽马克 (Newmark) 法	159
6.3.4 模态叠加法	160
下篇 应用实例	162
第7章 300t 门式双梁起重机虚拟仿真与分析	162
7.1 300t 门式双梁起重机基本情况介绍	162
7.2 300t 门式双梁起重机运行状态虚拟仿真分析	163
7.2.1 300t 门式双梁起重机虚拟样机建模过程	163
7.2.2 300t 门式双梁起重机所受载荷情况和工况	168
7.2.3 300t 门式双梁起重机虚拟仿真试验分析结果	169
7.3 300t 门式双梁起重机典型金属结构的有限元分析	179
7.3.1 起重机有限元模型建模过程	179
7.3.2 起重机有限元分析计算过程	189
第8章 L 型门式起重机虚拟仿真与分析	204
8.1 L 型门式起重机基本参数与三维建模	204
8.2 L 型门式起重机运行状态虚拟仿真分析	207
8.2.1 L 型门式起重机虚拟样机建模	207
8.2.2 L 型门式起重机受载情况与虚拟仿真分析	208
8.2.3 L 型门式起重机虚拟仿真分析结果	209
8.3 L 型门式双梁起重机典型金属结构的有限元分析	224
第9章 双梁桥式起重机虚拟仿真与分析	238
9.1 双梁桥式起重机虚拟样机建模	238
9.2 双梁桥式起重机虚拟仿真计算结果	242
第10章 40t 门座式起重机典型金属结构分析	254
10.1 40t 门座式起重机结构分析和有限元建模	254
10.2 40t 门座式起重机结构件载荷和工况的确定	265
10.3 40t 门座式起重机有限元计算结果	267
附录 ADAMS 软件基本操作	281
附录 A ADAMS/View 实体建模与虚拟仿真计算	281
A.1 建模工具与基本形状建模	281

A. 2	复杂形体几何建模	283
A. 3	修改几何形体与构件特征	284
A. 4	约束机构与施加载荷	288
A. 5	虚拟仿真分析过程与调试	294
附录 B	ADAMS/Solver 求解器基本理论	297
B. 1	ADAMS/Solver 的建模语句	298
B. 2	ADAMS/Solver 的函数表达式	302
B. 3	ADAMS/Solver 的命令语句与仿真控制	304
附录 C	虚拟仿真计算后处理的使用方法	307
C. 1	后处理程序及基本后处理操作	307
C. 2	仿真结果曲线绘制	311
C. 3	输出仿真结果动画	313
C. 4	仿真结果曲线的编辑和运算	316
C. 5	设置和编辑曲线图的图面内容	318
参考文献		322

上篇 虚拟仿真技术基本理论

第1章 绪 论

1.1 虚拟仿真技术的形成和发展

在传统机械设计制造领域,进行新产品的设计开发时,一般先进行概念设计和方案论证,然后进行产品设计、绘制图样,依据图样生产“原型机”,即物理样机。通过对物理样机的性能测试来发现新产品的设计缺陷,通过与期望设计功能加以比较,来修正产品的某些结构、机构等,使得物理样机的性能逐渐达到设计期望的性能。

因此一个新产品的成熟往往经过若干个设计实验周期:物理样机—制造—实验—物理样机。但这种设计方法存在以下不足:

1) 设计成本高,周期长:物理样机的生产制造需要大量经费、材料和时间,且需要多次反复,尤其对于结构复杂的系统,设计周期无法缩短,对市场灵活反应的敏感度降低。

2) 在某些情况下,物理样机的实验很危险或不允许,如压力容器的爆炸实验、大型机械设备地震环境下安全性试验等。

3) 由于在设计计算中采用落后的计算方法,计算速度慢、精度低,很难进行多种方案的分析对比。因此需要一种全新的设计方法,适应新的市场环境要求。

4) 传统方法设计不具有前瞻性,有些产品故障会出现在投入使用的若干年后,物理样机测试不能体现这一点。

随着计算机技术的发展,人们将计算机技术推广运用到机械新产品的设计、制造领域,以此作为主要的技术手段,处理各种数字信息与图形信息,辅助完成产品设计、分析模拟和评价等。虚拟仿真技术就是计算机在机械制造领域内运用发展的结果,是一种新型计算机辅助工程技术。

虚拟仿真技术是一门综合学科的技术,在机械领域内的应用起源于对多体系统动力学的研究,其核心是机械系统动力学、运动学和控制理论,结合三维计算机图像技术和基于图形的用户界面技术,在数字环境下实现机械产品外观、功能和行为上真实再现及可视化操作等。即在虚拟环境下建立数字模型,并赋予该模型实际物理属性、动力学初始条件、边界条件等,以在虚拟环境下模拟运行机械产品和再现产品性能,这种数字模型被称为虚拟样机。简单地说,虚拟仿真技术就是用虚拟样机代替物理样机的技术。应用虚拟仿真技术,可以使产品的设计者、使用者和制造者在产品研制的早期,在虚拟环境中直观形象地对虚拟的产品原型进行设计优化、性能测试、制造仿真和使用仿真,这对启迪设计创新、提高设计质量、

减少设计错误、加快产品开发周期都具有重要意义。

虚拟样机中所谓“虚拟”是相对实际的物理样机而言，体现了样机的数字化。虚拟样机是指通过虚拟现实技术、计算机仿真技术和计算机辅助设计（CAD）技术相结合，建立一个物理样机的数学原型。虚拟样机数学模型可以使设计人员访问一个物理模型所有关于机械、物理、外观和性能的有关信息，可以用于测试产品的外形和行为，也可以进行一系列的研究。

虚拟仿真技术于20世纪90年代初开始发展，在产品的设计过程中的应用变得越来越广泛而深刻，由原先的局部应用（单领域、单点）逐步扩展到系统应用（多领域、全使用寿命周期）。其研究和应用迅速得到了许多研究机构及软件供应商的重视，随着对机械系统的多体动力学分析和计算机仿真技术研究的深入，已解决了自动化建模和求解问题的基础理论问题，并于80年代形成了一系列商业化软件，至90年代，机械系统动力学分析与仿真技术已能更成熟地应用于工业界。目前，国外虚拟仿真相关技术的软件化过程已经完成，较有影响的有美国机械动力公司（Mechanical Dynamics Inc, MDI）的ADAMS，CADSI的DADS，德国航天局的SIMPACK，其他还有Working Model、FLOW3D、IDEAS、Phoenix、ANSYS、Pamcrash等。虚拟仿真技术研究的前沿表现在以下几个方面：

- 1) 柔性多体动力学的建模理论；
- 2) 接触碰撞建模、仿真问题；
- 3) 多领域集成化仿真与控制；
- 4) 多体系统参数识别问题；
- 5) 多目标协同优化；
- 6) 硬件在环问题和多体系统的人在回路问题仿真分析；
- 7) 多体系统的概率分析问题；
- 8) DAE方程的数值算法问题。

1.2 虚拟仿真技术的应用范围

1.2.1 虚拟仿真技术在现代高端机械领域内的应用

虚拟仿真技术在一些高端机械的设计、开发、生产等领域已得到了广泛应用，应用领域从汽车制造业、工程机械、航空航天业、造船业、机械电子工业、国防工业、通用机械到人机工程学、生物力学、医学及工程咨询等多方面。所涉及产品从庞大的卡车到照相机的快门，从上天的火箭到轮船的锚链。在各领域，针对各种产品，虚拟样机的运用都为用户节约了开支和时间，并提供了满意的设计方案。

美国波音公司的波音777飞机是世界上首家以无纸方式研发并制造的飞机。1990年10月29日，美国波音公司正式启动波音777飞机研制计划，采用基于数字化虚拟仿真技术的设计与制造方式，4年半之后，于1994年6月12日直接进行了第1架波音777飞机的首次试飞。波音777飞机的研制采用了全数字化的无纸设计技术，整机外形、结构件和整机飞机系统100%采用三维数字化定义，100%应用数字化预装配，整个设计制造过程无需模型和样机，一次试飞成功，首次实现了整机数字化设计、数字化制造和数字化协调。对比以往的

飞机研制,波音777飞机成本降低了25%,出错返工率减少了75%,制造周期缩短了50%。波音777飞机的研制成为现代产品开发新技术应用的里程碑。

各大著名汽车公司也将虚拟仿真技术引入到新产品的开发设计中,并作为新产品的更新换代、产业结构升级、提高核心竞争力的重要手段。美国通用动力公司于1997年建成了第1个全数字化机车虚拟样机,并且进行了产品的设计、分析、制造及夹具、模具工装设计和可维修性设计,覆盖设计、整车仿真设计等全部流程。美国福特汽车公司在某个新车型的开发中引入虚拟仿真技术,其新车型开发周期从36个月降低到12~18个月,开发后期设计修改率减少50%,原型车制造和试验成本减少50%,投资收益提高50%。并由于实验周期缩短,市场机动灵活性强,额外盈利达到其成本的数倍。虚拟仿真技术的运用使得各大汽车生产制造商获得了巨大的经济收益。

Caterpillar 公司是世界上最大的拖拉机、装载机和工程机械制造商之一。在新产品的设计开发中面临着和各大汽车公司同样的难题,物理样机的制造消耗太高、生产周期难以压缩等造成的巨大研发成本,所以为了提高竞争力,必须大幅度削减产品的设计和制造成本。Caterpillar 公司采用了虚拟仿真技术,从根本上改进了设计和试验步骤,实现了快速虚拟试验多种设计方案,从而使其产品成本降低,性能却更加优越。同样,作为生产工程机械的著名厂商 JohnDeere 公司,为了解决工程机械在高速行驶时的蛇行现象及在重载下的自激振动问题,用传统的数值求解方法实现精确建模很复杂,难以综合考虑所有因素的影响,求解精度也得不到保证。公司的工程师通过虚拟仿真技术建立了虚拟样机,由模拟运行虚拟样机,精确求解了自激振动,提出了改进方案,并且在虚拟样机上得到了验证,进而大大提高了产品的高速行驶性能与重载作业性能。

虚拟仿真技术在高端机械生产制造领域内的巨大优越性也引起美国政府的重视。美国政府批准快速发展和推广虚拟仿真技术的计划,拨给高级研究计划局(ARPA)和国防部的预算超过10亿美元;美国 Sikorsky 和波音公司在开发军队最新最大的航空项目——Commanche 时,大规模使用了虚拟仿真技术,Sikorsky 估计使用 CVP 技术可使 Commanche 的单位开销降低;Chrysler 公司与 IBM 公司合作开发的虚拟制造环境用于其新型车的研制,在样本生产之前发现其定位系统的控制及其他许多设计缺陷,缩短了研制周期;芬兰 VTT 电子公司正在从事消费类电子产品的 VP 研究,已开发了手机的虚拟样机。

1.2.2 虚拟仿真技术在国内的应用及前景

目前,虚拟仿真技术已在我国得到了应用与推广,主要在汽车、航天航空、武器制造、机械工程等。但从我国目前的情况来看,虚拟仿真技术主要在汽车制造业和武器装备制造业中应用较为广泛,且只停留在初步应用阶段。国有汽车企业的虚拟仿真应用开始较早,但是发展缓慢,人才流失比较多,有的单位虚拟仿真技术应用二十几年来还停留在基本分析阶段,未能开发出行业专用的虚拟仿真软件。民营或者国内股份企业因为没有现成的产品可以生产,开始是仿造,现在有的企业已经拥有自己的设计能力,但虚拟仿真技术只是运用于产品局部的设计,对于产品整体的虚拟仿真技术还有待于提高。

在其他行业应用较少,主要在专业研究机构 and 高校研究机构中应用。一些大学和科研院所对虚拟仿真技术的研究主要是对虚拟样机概念和结构的研究,对虚拟样机要求的相关技术如数据库技术、CAD/CAM(计算机辅助制造)技术、网络技术、分布交互仿真技术等已有

一定的基础,但整体上与国外相比还有很大差距,属于起步阶段。可见我国对于虚拟仿真技术的应用领域和技术水平还很低,但是却有很大的提升空间。

应该指出,每一项新技术的出现都为传统工业的进步提供了一个契机,也为落后者提供了追赶的捷径。虽然我国的制造业水平与发达国家的水平相比尚有差距,但虚拟仿真技术及其虚拟样机的应用将会加快追赶速度。比如,国外产品的高设计质量部分源于多年的设计经验,借助于在虚拟模型上的模拟,国内的设计师和分析师们会很快总结经验,及时用到新产品的设计及老产品的升级换代中。为了加快追赶的脚步,我们不能照搬国外技术的发展道路,要有自己的核心技术理念,在工程实际中,边运用边发展,及时发现技术创新点、突破口,以加快研发进程。

结合我国的特殊情况,这项技术应优先应用于以下几个方面:

1) 重点机械投资项目,这种项目投资太大,任何系统设计方面的失误都会带来巨大的经济损失。运用虚拟仿真技术不仅可以避免损失,而且适合多方案比较,从而找到满意的优化方案,并且也为虚拟仿真技术的发展创新提供了实践环境。

2) 样机引进项目。不能仅仅将仿制停留在零件照抄水平上,缺乏样机系统水平的理解。技术人员应对引进样机进行深入研究,追踪样机的设计思想,进行子系统的模拟来指导其设计。

3) 国民经济的骨干行业。像汽车工业、工程机械行业、军事工业及石油化工行业等,这些行业的应用会对国民经济带来可观的经济效益。

1.3 虚拟仿真软件简介

虚拟仿真相关技术的软件化过程已经基本实现,目前有许多家公司在这个领域上竞争。软件产品具有较大影响的公司包括研发 ADAMS 软件的 MSC. Software 公司、研发 DASA 软件的美 国 CADSI (Computer Aided Design Software Inc., 计算机辅助设计软件公司), 1998 年后, CADSI 与比利时 LMS International 公司合并, CADSI 易名为 LMS - CADSI, 以及研发 SIMPACK 软件的德国航天局等。其中 MSC. Software 公司的 ADAMS (Automatic Dynamic Analysis of Mechanical Systems, 机械系统动力学自动分析) 虚拟仿真分析软件, 是世界上目前使用范围最广、最负盛名的机械系统仿真分析软件。本书将介绍 ADAMS 的用户界面和基本操作技能来说明机械系统虚拟样机建立及仿真分析的过程。

ADAMS 软件, 原由美国机械动力学公司 (Mechanical Dynamics Inc.) 开发, 目前已被美国 MSC. Software 公司收购, 并成为 MSC/ ADAMS 软件, 该软件被广泛认为是最著名的虚拟仿真分析软件。它使用交互式图形环境和零件库、约束库、力库, 创建完全参数化的机械系统动力学模型, 利用拉格朗日第一类方程建立系统最大量坐标动力学微分—代数方程, 求解器算法稳定, 对刚性问题十分有效, 可以对虚拟机械系统进行静力学、运动学和动力学分析, 后处理程序可输出位移、速度、加速度和反作用力曲线以及动画仿真。ADAMS 软件的仿真可用于预测机械系统的性能、运动范围、碰撞检测、峰值载荷以及计算有限元的输入载荷等。目前, ADAMS 软件已在汽车、飞机、铁路、工程机械、一般机械、航天机械等领域得到了广泛应用, 已经被全世界各行各业的大多数制造商采用。根据 1999 年机械系统动态仿真分析软件国际市场份额的统计资料, ADAMS 软件占据了销售总额近 8000 万美元的

51% 份额。ADAMS 软件一方面是虚拟样机分析的应用软件, 用户可以运用该软件非常方便地对虚拟机械系统进行静力学、运动学和动力学分析, 另一方面, 它又是虚拟样机分析开发工具, 其开放性的程序结构和多种接口可以成为特殊行业用户进行特殊类型虚拟样机分析的二次开发工具平台。

ADAMS 软件主要由基本模块、扩展模块、接口模块、专业领域模块及工具箱 5 类模块组成, 见表 1-1。用户不仅可以采用通用模块对一般的机械系统进行仿真, 而且可以采用专用模块针对特定工业应用领域的问题进行快速有效的建模与仿真分析。利用 ADAMS 软件, 设计人员可以快速、方便地创建完全参数化的机械系统几何模型。模型既可以在 ADAMS 软件中直接建造, 也可以通过接口模块从其他 CAD 软件中导入的几何模型, 然后在几何模型上添加力、力矩和运动激励, 最后执行一组与实际情况十分接近的运动仿真测试, 所得的测试结果就是机械系统工作过程中的实际运动情况。因此, 利用 ADAMS 软件可以迅速分析和比较多种参数方案, 直至获得最优的工作性能。

表 1-1 ADAMS 模块

基本模块	用户界面模块	ADAMS/View
	求解器模块	ADAMS/Solver
	后处理模块	ADAMS/PostProcessor
扩展模块	液压系统模块	ADAMS/Hydraulics
	振动分析模块	ADAMS/Vibration
	线性化分析模块	ADAMS/Linear
	高速动画模块	ADAMS/Animation
	试验设计与分析模块	ADAMS/Insight
	耐久性分析模块	ADAMS/Durability
	数字化装配回放模块	ADAMS/DMU Replay
接口模块	柔性分析模块	ADAMS/Flex
	控制模块	ADAMS/Controls
	图形接口模块	ADAMS/Exchange
	CATIA 专业接口模块	CAT/ADAMS
	Pro/E 接口模块	Mechanical/Pro
专业领域模块	轿车模块	ADAMS/Car
	悬架设计软件包	Suspension Design
	概念化悬架模块	CSM
	驾驶员模块	ADAMS/Driver
	动力传动系统模块	ADAMS/Driveline
	轮胎模块	ADAMS/Tire
	柔性环轮胎模块	FTire Module
	柔性体生成器模块	ADAMS/FBG
	经验动力学模型	EDM
	发动机设计模块	ADAMS/Engine

(续)

专业领域模块	配气机构模块	ADAMS/Engine Valvetrain
	正时链模块	ADAMS/Engine Chain
	附件驱动模块	Accessory Drive Module
	铁路车辆模块	ADAMS/Rail
	福特汽车公司专用汽车模块	ADAMS/Pre (现改名为 Chassis)
工具箱	软件开发工具包	ADAMS/SDK
	虚拟试验工具箱	Virtual Test Lab
	虚拟试验模态分析工具箱	Virtual Experiment Modal Analysis
	钢板弹簧工具箱	Leafspring Toolkit
	飞机起落架工具箱	ADAMS/Landing Gear
	履带/轮胎式车辆工具箱	Tracked/Wheeled Vehicle
	齿轮传动工具箱	ADAMS/Gear Tool

第2章 动力学理论知识

虚拟仿真软件就是动力学理论软件化的结果,要想掌握虚拟仿真软件,就要有很好的动力学理论基础。本章先由经典力学入手,通过分析经典力学中的自由质点的运动描述、运动合成与分解、刚体的平面运动和复合运动,再引申到分析力学,初步介绍多体动力学的起源、发展,最后给出动力学软件的求解器算法。

2.1 坐标系

2.1.1 坐标系概述

物体运动分析主要为了找出物体在空间位形几何性质的变化规律,需要设定坐标系作为参照,通过坐标值描述不同时刻物体的空间位形。一般用于分析物体运动的坐标系广泛采用直角坐标系。直角坐标系由1个原点和3个相互垂直的单位坐标矢量组成,常用的笛卡儿坐标系就是一个采用右手规则的直角坐标系。运动学和动力学的所有矢量均可以用沿3个单位坐标矢量的分量来表示,如图2-1所示,矢量 r 定义了点 P 在 $Oxyz$ 坐标系中的位置, r_x 、 r_y 和 r_z 分别为矢量 r 的坐标分量。

物体运动的描述是相对的,因此讨论任何一个物体在空间的位置和运动情况都必须选择一个参照物,坐标系为固结在参照物上的参考系。一般分析物体运动时,可以选大地作为参照物,物体所有时刻位形均可以有具体坐标值确定。有时进行多个物体组成系统的运动分析,为了简化分析过程,也可以选相对于参照物运动的坐标系。虚拟仿真软件中,分析多个物体组成的系统运动过程,经常使用3种坐标系,如图2-2所示。

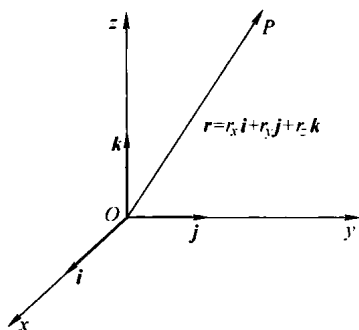


图 2-1 坐标系

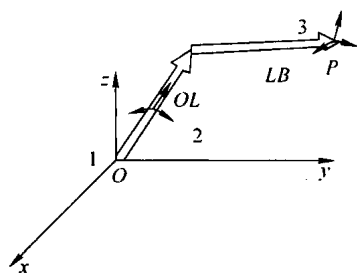


图 2-2 坐标系的不同层次

1—地面坐标系 2—构件机架坐标系 3—标架坐标系

1) 地面坐标系。地面坐标系又称为静坐标系(简称静系),是将地面视为参照物,固定在地面上的坐标系。相对地面不动的坐标系都可以称为地面坐标系。地面坐标系相对地球质心坐标系,绕相对地球质心坐标系不动的地轴匀速转动(以不变的角速度转动)。对于地

面附近的速度不很大的物体，地面坐标系可以认为是惯性系。

2) 构件机架坐标系。构件机架实际上是一个坐标系，用于描述构件机架的运动状态。该坐标系固定在构件上随构件运动，经典力学中称之为动坐标系（简称动系）。每个构件都有一个构件机架坐标系，可以通过确定构件机架坐标系在地面坐标系的位置和方向，来确定一个构件的位置和方向。在虚拟仿真软件中，构件机架坐标系是构造各种不同构件的参照坐标系。

3) 标架坐标系。标架坐标系又称为标架，虚拟仿真软件中为了简化建模和分析在构件上设立的辅助坐标系，有两种类型的标架坐标系：固定标架和浮动标架。

固定标架固定在构件上，并随构件运动。可以通过固定标记在构件机架坐标系的位置和方向，确定固定标记坐标的位置和方向。固定标架可以用来定义构件的形状、质心位置、作用力和反作用力的作用点、构件之间的连接位置等。

浮动标架相对于构件运动，在机械系统的运动分析过程中，有些力和约束需要使用浮动标架来定位。

2.1.2 确定不同坐标系位置和方法

确定任何一个物体在地面坐标系的位置和方向，或者确定标架在构件坐标系机架（动系）的位置和方向，有3种方法：欧拉角法、3点法、 $x-z$ 点法。

为方便起见，我们将需要定位的坐标系称为“定位坐标系”，把基准坐标系称为“基础坐标系”。

(1) 欧拉角法

运用欧拉角法定位需要以下数据：

1) 定位坐标系的原点在基础坐标系中的笛卡儿坐标值，以确定定位坐标系原点的位置。

2) 定位坐标系相对于基础坐标系的旋转轴、旋转角度和旋转顺序，以此确定定位坐标系的方向。

在实际应用中，往往先约定旋转轴和旋转顺序。以常用的3-1-3旋转法则为例，其中数字1、2、3分别代表基础坐标的 x 、 y 、 z 轴，3-1-3表示旋转顺序，即定位坐标系先绕基础坐标系的 z 轴旋转，然后绕基础坐标系的 x 轴旋转，最后再绕基础坐标系的 z 轴旋转。根据不同的组合方法，可以有24种不同的旋转方式。

(2) 3点法

运用3点法定位需要以下数据：

1) 不在同一直线上的 A 、 B 、 C 三点在定位坐标系的笛卡儿坐标值。

2) A 、 B 、 C 三点在基础坐标系的笛卡儿坐标值。

(3) $x-z$ 点法

$x-z$ 点法又称为方向余弦法，运用该方法确定定位坐标系的位置和方向，需要提供以下相对于基础坐标系数据：

1) 定位坐标系的原点 Q 在基础坐标系中的笛卡儿坐标值。

2) 定位坐标系 z 轴上一点的笛卡儿坐标值，或定位坐标系 x 轴上一点的笛卡儿坐标值。

3) 定位坐标系 $x-z$ 面上一点的笛卡儿坐标值，该点同原点 Q ，以及以上确定的坐标轴