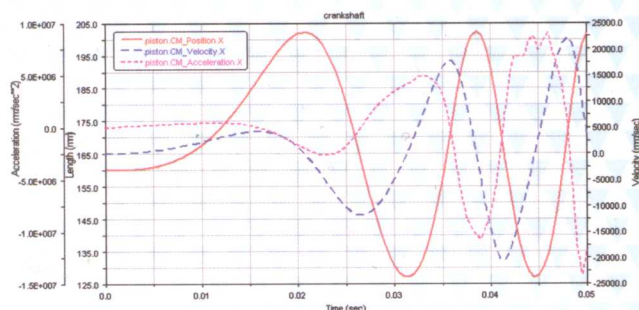
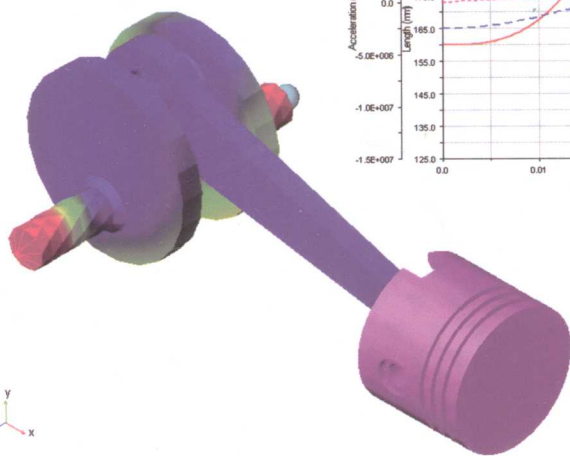


普通高等教育机电类规划教材

ADAMS2007 机构设计与分析范例

陈文华 贺青川 张旦闻 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



普通高等教育机电类规划教材

ADAMS2007 机构设计与分析范例

主 编	陈文华	贺青川	张旦闻
参 编	王建平	葛述卿	孙 娟
	余炳辉	赵秀婷	武秋红
主 审	赵文礼		



机械工业出版社

本书是根据 ADAMS 软件的特点,以编者在学习、工作中使用 ADAMS 积累的经验,精心组织编写的。全书共 8 章,介绍了 ADAMS 软件使用的基础知识,并结合 ANSYS 和 MATLAB 软件,以基础知识加实例的方式讲述了利用 ADAMS 进行连杆机构、凸轮机构、蜗杆传动机构、锥齿轮传动机构、万向节传动机构的建模、仿真分析和优化设计的全过程。

本书努力做到简化理论、突出重点、力求实用,所举实例综合性和通用性强,建模方法新颖,可作为使用 ADAMS 用户的技术手册。

本书适合机械设计类专业的本科生做课程设计和毕业设计、研究生做课题学习使用,也可供理工科非机电类本科生及工程技术人员学习使用。

图书在版编目(CIP)数据

ADAMS2007 机构设计与分析范例/陈文华,贺青川,张
旦闻主编. —北京:机械工业出版社,2009.6
普通高等教育机电类规划教材
ISBN 978-7-111-27407-0

I. A… II. ①陈…②贺…③张… III. 机械制造—计算
机仿真—应用软件, ADAMS—高等学校—教材 IV. TH164

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 091645 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:蔡开颖 责任编辑:蔡开颖 章承林

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 8 月第 1 版第 1 次印刷

184mm×260mm · 13.5 印张·332 千字

标准书号:ISBN 978-7-111-27407-0

定价:28.00 元

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)88379713

封面无防伪标均为盗版

前言

1. 编写背景

随着以计算机应用技术为基础的虚拟样机技术(Virtual Prototype Technology, VPT)在机械工程领域的应用推广, MSC. ADAMS(Automatic Dynamic Analysis of Mechanical System)已成为当前机械工程领域的研究、设计人员在实践中应用 VPT 技术最有效的平台之一。因此,越来越多的人开始学习应用 ADAMS。但一方面,由于 ADAMS 进入我国时间不长,目前国内关于 ADAMS 应用方面的中文技术资料不多,在一定程度上限制了 VPT 技术在我国的应用推广;另一方面,从所了解到的机械设计类专业的本科生、研究生做课题和工程技术人员在利用 ADAMS 解决实际问题过程中遇到的各种操作困难来看,目前市场上的相关书籍还不能满足实际应用的需求。为此,我们针对国内机械设计类专业的本科生、研究生,根据使用 ADAMS 积累的经验,整理编写了此书,作为相关人员的自学和参考资料。

2. 本书特色

1) 本书是根据作者在学习、工作中使用 ADAMS 积累的经验,针对机械设计类专业的本科生、研究生遇到的困难,精选实例编写的。

2) 本书具有系统的知识体系。首先采用基本命令使用方法和实例相结合的方式分模块介绍 ADAMS;然后再以典型机械设计实例说明 ADAMS 的操作过程,便于不同层次的读者学习掌握。

3) 本书结合当前应用最广的有限元软件 ANSYS 和计算编程软件 MATLAB,以实例说明了 ANSYS 和 MATLAB 在利用 ADAMS 建模过程中的应用,开拓了读者的建模思路和方法,解决了利用 ADAMS 在创建一些特殊模型时的困难。

3. 本书导读

1) 第 1 章绪论概述了 VPT 技术、介绍了 ADAMS2007 软件及各子模块的特点。

2) 第 2 章概述了机械系统的组成及分析理论基础,并结合 ADAMS 软件简要说明了 VPT 技术的理论依据。

3) 第 3 章结合实例讲述了利用 ADAMS/View 建立虚拟机械系统模型的工具及命令的使用方法及操作技巧。

4) 第 4 章结合实例讲述了利用 ADAMS/View 对虚拟样机进行仿真分析的基本方法和技巧。

5) 第 5 章详细介绍了 ADAMS/View 函数的使用方法、虚拟样机的参数化操作过程和设计研究(Design Study)、试验设计(Design of Experiments, DOE)和优化分析(Optimization)的操作流程和技巧。

6) 第 6 章以简要明了的语言概述了 ADAMS/Insight 操作流程,并对相关的优化方法进行了简要的说明。

7) 第 7 章介绍了 ADAMS/PostProcessor 的使用方法和技巧,并结合实例说明了主要选项的操作过程。

8) 第8章通过ADAMS应用举例综述了第1~7章的内容:

8.1节详细讲解了应用顺序方法对样机进行参数化建模的全过程,并利用ADAMS和ANSYS的无缝连接进行有限元载荷的相互传递,对机械系统中关键构件进行了柔性分析、结构分析和模态分析以及相关建模数据的使用方法。

8.2节详细讲解了应用逆序方法对样机进行参数化建模的全过程,并以简明扼要的语言讲解了应用ADAMS/Insight对机械系统进行优化分析的全过程。

8.3节结合MATLAB在机构设计分析中的应用,讲述了凸轮轮廓曲线的设计、凸轮机构的建模与分析。

8.4节详细讲解了由蜗杆传动、锥齿轮传动和万向节传动组成的空间混合轮系建模与分析。

4. 技术支持

为便于互相交流学习,读者可发电子邮件到 tech_exchange@sina.com 与我们联系。

本书由浙江理工大学陈文华、贺青川和洛阳理工学院张旦闻任主编,第1、3章由洛阳理工学院孙娟和余炳辉编写;第2、7章由洛阳理工学院王建平编写;第4、5章由洛阳理工学院葛述卿编写;第6章和附录由浙江理工大学贺青川编写;第8章由浙江理工大学陈文华、贺青川、武秋红和洛阳理工学院的张旦闻、赵秀婷编写。杭州电子科技大学赵文礼教授任主审。由于编者水平有限,错误之处在所难免,恳请读者批评指正。

编 者

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 虚拟样机技术概述	1
1.2 ADAMS 软件概述	2
1.3 ADAMS 软件模块简介	2
第 2 章 机械系统组成及分析理论基础	4
2.1 机械系统的组成	4
2.2 机械系统的自由度	5
2.3 机械系统坐标系	6
2.4 机械系统分析理论基础	7
第 3 章 ADAMS/View 虚拟样机的建模	10
3.1 ADAMS 建模基本流程	10
3.2 ADAMS/View 程序启用和实例练习	11
3.2.1 ADAMS/View 程序启用	11
3.2.2 实例练习	12
3.3 ADAMS/View 界面设置	13
3.3.1 ADAMS/View 界面组成	13
3.3.2 ADAMS/View 环境下鼠标的使用方法	13
3.3.3 视图控制	14
3.3.4 视图视角	15
3.3.5 视图布局	15
3.3.6 背景颜色设置	16
3.3.7 坐标窗口启用	16
3.3.8 模型对象图标设置	17
3.3.9 模型渲染设置	17
3.3.10 模型显示设置	18
3.3.11 保存和还原设置	18
3.4 ADAMS/View 建模环境设置	19
3.4.1 坐标系设置	19
3.4.2 单位设置	19
3.4.3 重力加速度设置	20

3.4.4	工作栅格设置	20
3.4.5	实例练习	21
3.5	ADAMS/View 虚拟样机几何建模	22
3.5.1	几何建模基础知识	22
3.5.2	基本几何元素的创建	22
3.5.3	简单几何实体的创建	26
3.5.4	柔性几何实体的创建	30
3.5.5	几何实体的布尔操作	32
3.5.6	几何实体的尺寸修改	33
3.5.7	几何实体的细节修饰	35
3.5.8	构件物理特性的修改	35
3.5.9	实例练习	38
3.6	ADAMS/View 虚拟样机运动副	39
3.6.1	常用运动副的创建	39
3.6.2	实例练习	41
3.6.3	齿轮副的创建	42
3.6.4	关联副的创建	43
3.6.5	凸轮副的创建	44
3.6.6	基本运动约束的创建	44
3.6.7	运动副特性的修改	46
3.7	ADAMS/View 虚拟样机驱动	47
3.7.1	运动的类型和定义	47
3.7.2	相对运动连接约束	48
3.7.3	实例练习	48
3.7.4	点运动约束	49
3.8	ADAMS/View 虚拟样机载荷	49
3.8.1	作用力和力矩	50
3.8.2	柔性连接力	51
3.8.3	碰撞接触力	57
3.9	ADAMS/View 虚拟样机编辑	58
3.9.1	数据库浏览器	58
3.9.2	表格编辑器	59
3.9.3	对象的编辑操作	60
3.9.4	样机的管理	61
3.10	ADAMS/View 建模数据	62
3.10.1	建模数据的分类	62
3.10.2	样条数据的应用与创建	63
3.10.3	数组单元的应用与创建	63
3.10.4	矩阵单元的应用与创建	64

3.10.5 曲线单元的应用与创建	65
3.11 实例	65
第4章 ADAMS/View 虚拟样机仿真分析	72
4.1 ADAMS/View 仿真输出设置	72
4.2 ADAMS/View 传感器设置	74
4.3 ADAMS/View 仿真分析工具	75
4.4 ADAMS/View 仿真回放工具	77
4.5 ADAMS/View 求解参数设置	79
4.6 实例	79
第5章 ADAMS/View 虚拟样机的优化分析	84
5.1 ADAMS/View 函数	84
5.1.1 ADAMS/View 函数表达式语法	84
5.1.2 ADAMS/View 设计过程函数	86
5.1.3 ADAMS/View 运行过程函数	87
5.1.4 ADAMS/View 函数创建过程	88
5.2 设计变量的创建	90
5.3 虚拟样机的参数化	91
5.3.1 表达式的应用	91
5.3.2 构件位置的参数化	91
5.3.3 设计点的参数化	93
5.4 约束函数的创建	94
5.5 目标函数的创建	94
5.6 仿真剧本的创建	95
5.7 虚拟样机优化分析设置	95
5.7.1 设计研究分析	95
5.7.2 试验设计分析	96
5.7.3 优化设计分析	97
5.8 求解器 (Optimizer) 设置	98
5.9 图形显示 (Display) 设置	99
5.10 文件输出 (Output) 设置	100
5.11 检查参数化分析结果	100
5.11.1 保存和删除参数化分析结果	100
5.11.2 绘制参数化分析结果曲线	101
5.11.3 创建分析结果数据表格	101
5.11.4 更新设计变量	102

第 6 章 ADAMS/Insight 使用方法简介	103
6.1 ADAMS/Insight 的调用	103
6.2 ADAMS/Insight 快捷工具	104
6.3 ADAMS/Insight 参数设置	105
6.4 ADAMS/Insight 响应设置	108
6.5 ADAMS/Insight 优化方法的选择与简介	109
6.6 分析因数矩阵创建	112
6.7 分析参数矩阵创建	112
6.8 ADAMS/Insight 优化分析及结果查询	113
第 7 章 ADAMS/PostProcessor 应用简介	115
7.1 ADAMS/PostProcessor 的启用和退出	115
7.2 ADAMS/PostProcessor 主工具栏	116
7.3 曲线的绘制、编辑与运算处理	117
7.3.1 曲线的绘制	117
7.3.2 曲线的编辑	120
7.3.3 曲线的运算处理	123
7.4 动画编辑	125
7.4.1 动画类型	125
7.4.2 动画载入	125
7.4.3 动画播放	125
7.5 信号处理	127
7.5.1 曲线数据滤波	127
7.5.2 傅里叶变换(FFT)	128
7.5.3 伯德(Bode)图创建	130
7.6 分析结果输出	131
7.7 ADAMS/View 数据文件的输入和输出	132
7.7.1 输入和输出文件类型	132
7.7.2 ADAMS/View 模型数据文件的输入和输出	133
7.7.3 ADAMS/View 命令文件的输入和输出	133
7.7.4 ADAMS/Solver 语句文件的输入和输出	133
7.7.5 ADAMS/Solver 分析文件的输入和输出	134
7.7.6 实验数据的输入	134
7.7.7 有限元载荷的输出	135
7.8 实例	136
第 8 章 ADAMS/View 虚拟样机分析实例	138
8.1 曲柄滑块机构建模与分析	138

8.2 冲压机构建模与分析	160
8.3 凸轮机构设计、建模与分析	178
8.4 空间混合轮系建模与分析	186
附录	192
附录 A ADAMS 常用快捷命令	192
附录 B ADAMS 设计过程函数	192
附录 C ADAMS 运行过程函数	199
附录 D 柔性连杆创建程序(ANSYS)	202
附录 E 凸轮轮廓曲线计算程序(MATLAB)	204
参考文献	206

第1章 绪 论

虚拟样机技术(Virtual Prototype Technology, VPT)是随着当代科学的飞速发展,在设计领域发展起来的一门涉及多门学科的新技术。它将最优化原理和相应的计算技术利用计算机应用于工程设计领域,以提高产品设计质量、缩短设计周期、降低设计成本为主要目的。

1.1 虚拟样机技术概述

虚拟样机技术主要是指在产品的设计开发过程中,将分散的零部件设计和分析技术糅合在一起,在计算机上创建出产品的整体虚拟模型,并针对该产品在投入使用后的各种工况进行仿真分析,从而预测产品的整体性能、改进产品设计质量、提高产品性能的一种新技术,涉及多体系统动力学、计算方法与软件工程等学科。它利用软件建立机械系统的三维实体模型和力学模型,分析和评估系统的性能,从而为物理样机的设计和制造提供参数依据。虚拟样机技术在设计的初级阶段(概念设计阶段)就可以对整个系统进行完整的分析,可以观察并试验分析组成构件的相互运动情况;使用系统仿真软件在各种虚拟环境中真实地模拟系统的运动,可以在计算机上方便地修改设计缺陷,仿真试验不同的设计方案,对整个系统进行不断改进,分析和比较多种参数方案,帮助工程师取得最佳的工作性能,从而减少昂贵的实体样品制造和试验次数,提高了产品质量,大大地缩短了产品开发周期,减少了开发费用。

虚拟样机技术源于对多体系统动力学的研究。工程中的对象是由大量零部件构成的系统,对它们进行设计优化与分析时可以分为两大类:一类称为结构分析,另一类称为机构分析。复杂系统的力学模型通常为多体系统,即多个物体通过运动副连接的系统。对于复杂机械系统有三种情况:

- 1) 静力学分析,在系统受到静载荷时,确定系统的平衡位置以及运动副的静反力。
- 2) 运动学分析,不考虑系统运动起因的情况下分析各构件位置、姿态、速度和加速度的变化关系。
- 3) 动力学分析,讨论载荷与系统运动关系,其又分为两种:①正向动力学分析问题,即已知外力求系统运动的问题,其归结为求非线性微分方程的积分;②逆向动力学分析问题,即已知系统的运动来求解运动副的动反力。

20世纪60年代,经典刚体力学、分析力学与计算机相结合的多体系统动力学在社会生产实际需要的推动下产生了。多体系统动力学的诞生直接带动了相关行业的发展,其主要完成了以下任务:

- 1) 建立复杂机械系统运动学和动力学的数学模型,借助计算机自动进行程式化的处理,开发并实现这个数学模型的软件系统。
- 2) 开发和实现有效处理数学模型的计算方法与数值分析方法,自动求解运动学和动力问题。
- 3) 实现有效数据后处理,采用图表、动画等方法处理分析结果。

目前工程中常用的多体系统动力学分析方法主要有以拉格朗日第一类方程和第二类方程为代表的分析力学方法、以牛顿-欧拉方程为代表的矢量学法、图论法和变分法等。

1.2 ADAMS 软件概述

美国 MSC 公司的机械系统动力仿真分析软件 ADAMS 是集成建模、求解, 可视化技术一体的运动仿真软件, 是当前世界上使用范围最广、最负盛名的机械系统动力学仿真分析平台。随着虚拟样机技术在机械工程领域的应用和发展, ADAMS 已成功应用于航空航天、汽车工程、铁路车辆、工业机械、工程机械等领域, 它有以下特点:

- 1) 利用交互式图形环境和零件库、约束库、力库来创建机械系统的三维参数化模型。
- 2) 分析类型包括运动学、静态学和准静态学分析, 以及线性和非线性动力学分析(包括刚体和柔性体分析)。
- 3) 具有先进的数值分析技术和强有力的解算器, 使求解快速、准确。
- 4) 具有组装、分析和动态显示不同模型或同一个模型在某一个过程变化的能力, 提供多种“样品仿真”方案。
- 5) 具有一个强大的函数库, 供用户使用。
- 6) 具有开放式结构, 允许用户集成自己的子程序。
- 7) 自动输出位移、速度、加速度和反作用力特性等曲线, 仿真结果显示为动画和曲线图。
- 8) 可预测机械系统的性能、运动范围、碰撞、峰值截荷, 以及有限元载荷的输入和输出。
- 9) 支持大多数 CAD、FEA 软件和控制设计软件包(MATLAB、EASY5)之间的双向交流。

综上所述, 虚拟样机技术的核心是多体系统运动学与动力学建模理论及其技术在计算机上的实现。计算机可视化技术及动画技术的发展为这项技术提供了友好的用户界面。CAD/FEA 等技术的发展为虚拟样机技术的应用提供了技术环境。目前, 虚拟样机技术已成为一项相对独立的产业技术, 它改变了传统的设计思想, 对制造业发展提供了新的方向。

1.3 ADAMS 软件模块简介

ADAMS 软件包括 5 个最基本的模块: ADAMS/View(基本环境)、ADAMS/Solver(求解器)、ADAMS/PostProcessor(后处理)、ADAMS/Insight(优化设计模块)和 ADAMS/Flex(柔性分析模块); 另外还有一些特殊场合应用的专业模块: ADAMS/Car(轿车模块)、ADAMS/Driverline(驾驶模块)、ADAMS/Chassis(轿车底盘模块)。本书重点在于介绍应用 ADAMS 对机构进行设计和优化分析, 因此 ADAMS/View、ADAMS/PostProcessor 和 ADAMS/Insight 是本书讲解的重点, 另外适当介绍一些相关模块和软件在利用 ADAMS 建模过程中的使用, 如 ANSYS、MATLAB 等。

1. ADAMS/View

ADAMS/View 采用了 Windows 风格的操作界面, 它提供了一个直接面向用户的基本操作对话环境和虚拟样机分析的前处理功能, 其中包括样机的各种建模工具、样机模型数据的输

人与编辑、与求解器和后处理等程序的自动连接、虚拟样机分析参数的设置、各种数据的输入和输出、同其他应用程序的接口等。ADAMS/View 还提供一些设计过程函数和运动过程函数,以方便用户建模使用,详细说明见附录 B 和附录 C。除此之外,ADAMS/View 还具有自己的编程语言,支持命令行输入命令和 C 语言。

2. ADAMS/Solver

ADAMS/Solver 是求解机械系统运动学和动力学问题的程序。在 ADAMS 中完成建模后,单击仿真开始工具,ADAMS/View 程序可自动地调用 ADAMS/Solver 模块,求解样机模型的静力学、运动学或动力学等一系列问题,完成仿真分析以后再自动地返回 ADAMS/View 操作界面。因此,用户只需熟悉 ADAMS/View 的操作过程,即可完成建模和整个分析过程。

3. ADAMS/PostProcessor

ADAMS/PostProcessor 模块具有强大的后处理功能,它可以回放仿真结果、绘制各种分析曲线,还可以对仿真分析曲线进行一些数学和统计计算,输入实验数据,绘制试验曲线并同仿真结果进行比较,进行各种编辑等。

4. ADAMS/Insight

ADAMS/Insight 是基于最优化分析理论和网页技术的产品开发设计分析模块。应用 ADAMS/Insight,设计者可以将优化设计理论和产品设计过程有机地结合起来,提出最佳的设计方案,并保证试验分析结果具有足够的工程精度,然后通过网络使企业不同部门的人员(设计工程师、试验工程师、计划销售人员)都可以共享分析成果,更好地了解产品性能,加速决策进程,最大限度地减少决策的风险。

第2章 机械系统组成及分析理论基础

2.1 机械系统的组成

1. 实际机械系统组成

机械系统是机器和机构的总称,它由许多零件和构件组成。零件是组成机器的最小单元,多个零件刚性地连接在一起组成一个刚性系统,机器运动时,作为一个整体运动。构件是由若干零件组成的一个刚性系统,是机械运动的最小单元。

机构是由两个以上具有相对运动的构件系统组成的。机构的作用在于传递运动或改变运动的形式。机器是由若干机构组成的系统。在机构中,每一个构件都以一定的方式与其他构件相互连接。相互连接的两构件既保持直接接触,又能产生一定相对运动,把两构件直接接触又能产生一定相对运动的连接称为运动副。根据机械系统组成的运动形式,在本书中将零件和构件统称为构件,将机构和机器统称为机械系统或样机,而机械系统或样机是由若干个构件通过不同的运动副相互连接组成的。

对复杂机械系统进行运动学与动力学分析之前,需建立它的多体系统力学模型,其中主要包括4个要素:

(1) 物体 多体系统中的构件定义为物体。多体系统力学模型中物体的定义并不一定与具体工程对象的零部件一一对应。它的定义与研究的目的有关。在运动学分析中,通常将其运动状态特别重要的零部件定义为物体。例如曲柄滑块机构,尽管它由曲柄、连杆、滑块与机架4部件组成,但如果需要分析的是曲柄与滑块的运动关系,则可定义一个由三个物体的多体系统作为该实际系统的力学模型。它们分别为曲柄、滑块与机架。在动力学分析中物体的惯量特性是影响系统的重要参数,对于那些惯量比较小,且可忽略不计的零件,可不作物体定义;但对整个系统,如果滑块的质量比较小,可以定义含曲柄、连杆与机架的多体系统模型。对于静止不动的零部件,如机架,通常可定义为系统运动的参考系。

对于低速运动的实际工程对象,其零部件的弹性变形并不影响其大范围的运动状态。在这种情况下,可把系统中的物体作为刚体假定,相应的多体系统称为多刚体系统。由于大型、轻质机械系统的出现,高速运行的工况将使系统动力学响应越来越复杂,这些现象是由于零部件的大范围运动与构件的弹性变形耦合而引起的。在分析这类系统的动力学时,物体必须作为柔性体假定,这类力学模型称为柔性多体系统。如果上述系统中部分物体仍可作为刚体假定,则构成的力学模型为刚-柔混合多体系统,它是多体系统中最一般的模型。

(2) 铰 在多体系统中将物体间的运动约束定义为铰。实际工程对象中机构的运动副是铰的物理背景,然而铰的定义具有更广泛的意义。

(3) 外力(偶) 多体系统外的物体对系统中的物体的作用力定义为外力(偶)。重力是典型的外力。在外力的定义中需要注意的是:对于刚体,力偶的作用与作用点无关;对于柔性体,力偶的作用与作用点有关,因为力的作用位置直接影响柔性体的弹性变形。此外,如

果在实际的工程对象中外力作用的零部件没有作物体的定义,则在多体系统的力学模型中应定义外力作用在等效的点上。

(4) 力元 在多体系统中物体间的相互作用定义为力元。在实际工程中,零部件间的相互联系一种是通过运动副连接,另一种通过力相互作用。两者的本质差异为前者限制了相连物体的相对运动的自由度,后者却没有这种限制。

2. ADAMS 中机械系统组成

ADAMS 将多刚体系统分成 4 个组成部分:构件(Part)、约束(Constraint)、作用力(Force)、自定义的代数微分方程(User Defined Algebraic and Differential Equation),其定义如下:

(1) 构件 构件是指任何刚体或集总(中)质量或柔性体(不包括梁和衬套)等,在 ADAMS 中刚性梁是一个构件,而柔性梁是多个构件的集合,ADAMS 为每一个构件列出 6 个一阶动力学方程(将力和加速度相联系)和 6 个一阶运动学方程(将位置与速度相联系)。

(2) 约束 约束是系统对一个或多个构件的运动限制。ADAMS 为每个约束建立一个或多个代数约束方程(方程的数目与其限制的自由度数相同)。ADAMS 提供了多种约束,包括时变约束、时不变约束、完整约束、非完整约束以及高副约束、低副约束,用户也可通过子程序来定义约束。

(3) 作用力 作用力包括体积力(重力、电磁力等)和接触力(体积力以外的各种外力)。ADAMS 利用已定义的构件和约束自动定义作用力和反作用力以及惯性力等。对每个作用力分量,ADAMS 在动力学方程中加入一个作用变量,并添加定义力的代数方程。

ADAMS 提供许多力的特性,包括力、力矩、作用力和反作用力、集中力、分布力、线性力、非线性力等,这些力可以是任何状态变量(如位移、速度、加速度、力、时间等)的函数。

(4) 自定义的代数微分方程 对于一些特殊要求,ADAMS 允许用户直接加入所需的代数微分方程。

2.2 机械系统的自由度

机械系统的自由度表示机械系统中各构件相对于地面机架所具有的独立运动数量,与构成机械的构件数量、运动副的类型和数量、原动机的类型和数量,以及其他约束条件有关。机械系统的自由度 F 可以用下式计算:

$$F = 6n - \sum_{i=1}^m p_i - \sum_{j=1}^X q_j - \sum R_k$$

式中 n ——活动构件总数;

p_i 、 m ——第 i 个运动副的约束条件数、运动副总数;

q_j 、 X ——第 j 个原动机的驱动约束条件数、原动机总数;

R_k ——其他的约束条件数。

机械系统的自由度 F 和原动机的数量与机械系统的运动特性有如下的密切关系:

1) 当 $F \leq 0$, 且 $\sum q_j = 0$ 时,机械系统蜕变为刚性系统,构件之间没有相对运动。

2) 当 $F < 0$, 且 $\sum q_j > 0$ 时,表示在一个刚性机械系统中设置有原动机,此时原动机将

无法运动, 或者机械系统将在薄弱处遭到破坏。

3) 当 $F=0$, 且 $\sum q_j > 0$ 时, 机械系统具有确定的运动。

4) 当 $F > 0$ 时, 机械系统没有确定的相对运动, 此时机械系统在阻力约束条件下, 按牛顿定律, 向阻力最小的方向运动。

2.3 机械系统坐标系

1. 参考系

计算一个系统及其构件的速度和加速度时, 需要指定参考系。在机械系统的运动分析过程中, 有两种类型的参考系: 地面参考系和构件参考系。地面参考系是一个单独的牛顿惯性参考系, 它固定在一个“绝对静止”的空间中。通过地面参考系建立机械系统的“绝对静止”参考系, 则属于地面上的任何一点的速度和加速度均为零。对于大多数问题, 可以将地球视为牛顿惯性参考系。每一个刚性体都有一个参考系, 该参考系称为构件参考系, 刚性体上的各点相对于该构件的参考系是静止的。

2. 坐标系

机械系统的坐标系采用直角坐标系, 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。矢量 R 定义了点 P 在 $OXYZ$ 坐标系中的位置, R_x 、 R_y 、 R_z 分别为矢量 R 的坐标分量。

坐标系可以固定在一个参考机架上, 也可以相对于参考机架而运动。合理地设置坐标系可以简化机械系统的运动分析。在机械系统运动分析过程中, 经常使用的 3 种坐标系与 ADAMS 中定义的 3 种坐标系统相对应, 说明如下:

(1) 地面坐标系 (Ground Coordinate System) 固定于地面 (Ground Part), 即系统的绝对坐标系。ADAMS 中所有的构件都相对于地面坐标确定其位置和方向。

(2) 局部参考坐标系 (Local Part Reference Frame, LPRF) 每个构件有一个局部参考坐标系 LPRF, 其位置和方位相对于地面坐标系定义, 随部件一起运动。

(3) 标记 (Marker) 标记是各构件拥有的各自内部的坐标系统, 分两类: 固定标记 (Fixed Marker) 和浮动标记 (Floating Marker)。固定标记固结于构件上并与构件一起运动, 其位置和方向是相对于 LPRF 定义的, 不随时间变化, 可用于定义构件的图形边界、质心、作用力和约束; 浮动标记相对于构件运动, ADAMS 中有一些力和约束需要使用浮动标记。

3. 设置不同坐标系位置和方向的方法 (欧拉法、3 点法、X-Z 点法)

(1) 欧拉法 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或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 不在同一直线上的3点A、B、C在定位坐标系的笛卡儿坐标值或A、B、C 3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。定位坐标系的原点O在基础坐标系中的笛卡儿坐标值；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；定位坐标系X-Z面上一点的笛卡儿坐标值，该点同原点O，以上确定的坐标轴点不应在同一直线上。

2.4 机械系统分析理论基础

1. ADAMS 多刚体动力学方程

ADAMS 中机械系统分析理论的核心是多体系统动力学。多体系统动力学是由多刚体系统动力学与多柔体系统动力学组成的。多刚体系统动力学的研究对象是由任意有限个刚体组成的系统，刚体之间以某种形式约束连接，这些约束可以是理想完整约束、非完整约束、定常约束或非定常约束。研究这些系统的动力学需要建立非线性运动方程、能量表达式、运动学表达式以及其他一些相关量的公式。多柔体系统动力学的研究对象是由大量刚体和柔体组成的系统。

ADAMS 根据机械系统模型，自动建立系统的拉格朗日运动方程，对每个刚体，列出6个广义坐标带乘子的拉格朗日方程及相应的约束方程：

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial K}{\partial \dot{q}_j} \right) - \frac{\partial K}{\partial q_j} + \sum_{i=1}^n \frac{\partial \Psi_i}{\partial q_j} \lambda_i = F_j \quad (2-1)$$

$$\Psi_i = 0 \quad (i = 1, 2, \dots, m) \quad (2-2)$$

式中 K ——系统动能表达式；

q_j ——描述系统的广义坐标；

Ψ_i ——系统的约束方程；

F_j ——在广义坐标方向的广义力；

λ_i —— $m \times 1$ 的拉格朗日乘子矩阵。

式(2-1)和式(2-2)可写成如下形式：

$$\begin{pmatrix} F \\ \Psi \end{pmatrix} = O \quad (2-3)$$

式中 O ——零矩阵。

$$\begin{aligned} F &= f(\ddot{q}, \dot{q}, q, \lambda, t) \\ \Psi &= f(\ddot{q}, \dot{q}, t) \end{aligned} \quad (2-4)$$

将其动能定义为

$$K = \frac{1}{2} \dot{\mathbf{r}}^T m \dot{\mathbf{r}} + \frac{1}{2} \dot{\mathbf{u}}^T I \dot{\mathbf{u}} \quad (2-5)$$

代入上式，合并成简洁的矩阵形式为

$$M \ddot{\mathbf{x}} + \Psi_x^T \lambda = \mathbf{Q}^* \quad (2-6)$$

式中

$$\ddot{\mathbf{x}} = (\ddot{x}_1, \ddot{x}_2, \dots, \ddot{x}_n)^T$$

$$\Psi_x = (\Psi_{x1}, \Psi_{x2}, \dots, \Psi_{xn})^T$$