



机械系统多体动力学 分析、控制与仿真

韩清凯 罗 忠 编著



科学出版社

www.sciencep.com

机械系统多体动力学 分析、控制与仿真

韩清凯 罗 忠 编著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书以机器人机械臂为代表,论述了多刚体和刚柔混合机械系统的运动学和动力学及其控制的分析理论、分析方法和仿真;以典型平面三自由度机器人系统为例,对多体系统的运动学、速度与微运动、速度和加速度,以及多刚体系统动力学方程的建立、求解和计算等进行了详细分析;针对多刚体系统的控制方法,介绍了PID控制的基本思想、机械臂手爪的位置控制和基于反馈控制策略的主从机械臂同步控制等;结合多刚体系统和刚柔混合机械系统的DAE分析与仿真,介绍了基于ADAMS的机械臂动力学可视化仿真方法;最后,讨论了多柔体系统的动力学分析与仿真方法。书中附有必要的计算程序和仿真流程。

本书可供机械系统动力学和机器人学等专业的科技人员参考,也可供相关专业的教师、研究生及高年级本科生阅读。

图书在版编目(CIP)数据

机械系统多体动力学分析、控制与仿真 / 韩清凯, 罗忠编著. —北京: 科学出版社, 2010

ISBN 978-7-03-027317-8

I. ①机… II. ①韩…②罗… III. ①机械工程-系统动力学-分析②机械工程-系统动力学-控制③机械工程-系统动力学-仿真 IV. ①TH13

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第072920号

责任编辑: 汤 枫 王志欣 / 责任校对: 宋玲玲

责任印制: 赵 博 / 封面设计: 耕者设计工作室

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

陈海印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2010年5月第 一 版 开本: B5 (720×1000)

2010年5月第一次印刷 印张: 12 1/4

印数: 1—2 500 字数: 234 000

定价: 42.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

航空、航天、车辆、机器人、精密机械等领域中的大量机械系统可被视为由若干个刚体和柔体组成的多刚体或者刚柔混合多体系统。多体系统是由多个彼此之间存在相对运动的物体构成的系统。多体系统动力学主要研究系统中物体的运动规律及其受力环境,具有十分广泛的应用领域。例如,机器人的位置控制需要多体系统运动学提供系统状态演化规律,机器人的力控制需要多体系统动力学提供可靠的受力特性求解。

人们在多体系统的运动学和动力学方面开展了大量的卓有成效的研究工作,取得了许多重要的成果,并应用于工程实际。随着科学技术的快速发展,多体系统越来越复杂,其理论研究和工程实际都对现有多体系统的理论分析方法提出了越来越高的要求。特别是多柔体系统动力学行为的理论与分析,需要不断地进行深入研究。

本书共分为9章。第1章为绪论,介绍了研究目的和意义以及目前国内外在多体系统动力学及其控制方法领域的相关研究情况;第2章介绍了多刚体系统的运动学分析方法;第3章介绍了多刚体系统的动力学分析方法;第4章以平面三自由度机械臂为例介绍了机械臂运动学和动力学分析实例;第5章介绍了多刚体系统的控制方法,包括PID控制、机械臂手爪的位置控制、基于反馈控制策略的主从机械臂同步控制等;第6章介绍了多刚体系统复杂运动的控制方法,对二连杆机构的单周期运动、多周期运动、拟周期运动及混沌运动等不同特征的运动进行了讨论;第7章介绍了摩擦对多刚体系统复杂运动控制的影响,对摩擦的特性和机理进行了分析;第8章对复杂机械系统进行了多刚体运动学和动力学仿真分析,基于ADAMS对三自由度机械臂进行动力学可视化仿真,并以复杂机械系统为例进行详细分析说明;第9章对多柔体系统动力学分析与仿真进行了介绍。

本书得到了教育部科学技术研究重点项目(编号:108037)、机器人学国家重点实验室开放基金项目(编号:RL0200808)、国家自然科学基金项目(编号:50775028、10402008、50535010)、教育部新世纪优秀人才支持计划,以及“985”工程科技创新平台建设项目等多个项目的支持。本书由韩清凯教授、罗忠博士共同编著完成。此外,作者所在课题组李兴修、姜丹、赵雪彦等也参加了部分内容的编写和整理,课题组其他成员也对本书的出版给予了大力支持,在此表示感谢。在撰写

过程中还得到了许多同行的大力帮助,特别对项目组学术带头人、中国科学院院士闻邦椿教授表示衷心感谢。

由于作者水平有限,书中难免存在不妥之处,敬请广大读者批评指正。

作者
2010年2月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 目的和意义	1
1.2 机械系统多体动力学研究现状	2
1.3 机械系统多体动力学的主要研究内容	4
1.4 本书主要内容	5
参考文献.....	6
第 2 章 多刚体系统的运动学分析	8
2.1 多刚体系统的运动描述方法	8
2.1.1 机构空间坐标的齐次变换	8
2.1.2 机构参数的 D-H 定义方法及机构杆系的坐标变换	10
2.2 机械臂的正运动学.....	12
2.3 机械臂运动分析的逆问题.....	14
2.3.1 机械臂逆运动分析的解析方法	14
2.3.2 机械臂逆运动分析的数值方法	16
2.4 模块化三自由度串联机器人的运动学分析.....	17
2.4.1 模块化三自由度串联机器人的 D-H 参数定义	18
2.4.2 三自由度模块化机器人正运动学分析	19
2.4.3 模块化机器人的运动学逆问题分析	21
2.5 多体系统的速度与微运动分析.....	25
2.5.1 机器人的雅可比矩阵	25
2.5.2 雅可比矩阵在静力学中的应用	27
参考文献	28
第 3 章 多刚体系统的动力学分析	30
3.1 刚体运动的速度描述方法.....	30
3.2 机械臂的速度与各关节速度的关系.....	31
3.2.1 雅可比矩阵的描述	31
3.2.2 雅可比矩阵的求解	32
3.3 机械臂的速度和加速度分析.....	35
3.3.1 速度分析.....	35
3.3.2 加速度分析	37
3.3.3 机械臂的路径描述与运动轨迹规划	39

3.4	机械结构的动力学方程: 牛顿-欧拉动力学方程	42
3.5	多刚体系统的动力学方程: 拉格朗日动力学方程	45
	参考文献	46
第4章	机械臂运动学和动力学分析实例	48
4.1	平面三自由度机械臂动力学分析	48
4.1.1	三自由度模块化机器人正向运动学分析	48
4.1.2	三自由度模块化机器人逆向运动学分析	51
4.1.3	机械臂机构系统的静力学分析	53
4.1.4	模块化三自由度机械臂的动力学分析	54
4.1.5	机器人动力学模型的物理特征	63
4.2	点焊机器人动力学分析	64
4.2.1	点焊机器人机构运动学分析	64
4.2.2	确定杆系的惯性参数	68
4.2.3	机器人动力学方程的建立及其求解	71
4.2.4	动力学计算	71
	参考文献	74
第5章	多刚体系统的控制方法	75
5.1	PID控制的基本思想	75
5.2	机械手的位置控制	82
5.2.1	利用逆运动学和关节力矩的控制方法	82
5.2.2	基于静力学关系式的控制方法	83
5.3	机械手的动态控制	84
5.4	基于反馈控制策略的主从机械臂同步控制	85
5.4.1	主从机械臂同步控制的动力学方程	85
5.4.2	主从式平面三自由度机械臂的动力学方程	87
5.4.3	机械臂同步控制的仿真分析	89
	参考文献	96
第6章	多刚体系统复杂运动的控制方法	97
6.1	二连杆机构控制系统模型的建立	97
6.1.1	OPCL控制器模型和稳定性分析	97
6.1.2	二连杆机构的动力学模型	98
6.2	二连杆机构不同运动形式的仿真	100
6.2.1	仿真条件及仿真步骤	100
6.2.2	单周期运动	101
6.2.3	多周期运动	102
6.2.4	拟周期运动	102

6.2.5 混沌运动	105
6.3 非线性参数估计	107
参考文献	108
第7章 摩擦对多刚体系统复杂运动控制的影响	109
7.1 考虑摩擦和 OPCL 控制的多刚体系统建模	109
7.2 Stribeck 摩擦模型	111
7.3 运动对黏性摩擦系数的分岔	112
7.4 不同运动模式的定性定量比较	113
7.4.1 单周期运动	114
7.4.2 多周期运动	115
7.4.3 拟周期运动	117
7.4.4 混沌运动	119
7.5 考虑静摩擦力和库仑摩擦力对 OPCL 的影响	121
7.5.1 拟周期运动	122
7.5.2 混沌运动	123
参考文献	126
第8章 多刚体系统的 ADAMS 分析与仿真	127
8.1 多刚体系统动力学的微分代数方程分析	127
8.1.1 运动学方程的建立	127
8.1.2 动力学方程的建立	128
8.1.3 正向、逆向动力学分析及静平衡分析	130
8.2 三自由度机械臂的动力学仿真与分析	131
8.2.1 三自由度机械臂动力学仿真分析研究内容和方法	132
8.2.2 基于 ADAMS 的三自由度机械臂建模	133
8.2.3 三自由度机械臂动力学仿真	136
8.3 复杂机械系统的刚体运动学和动力学仿真分析实例	138
8.3.1 导入锻造操作机模型并建立刚性构件	140
8.3.2 添加约束	142
8.3.3 施加载荷	145
8.3.4 计算求解与结果后处理	145
参考文献	151
第9章 多柔体系统动力学分析与仿真	152
9.1 多柔体系统动力学基础	152
9.1.1 坐标系和基本参量	152
9.1.2 多柔体系统的载荷处理方法	153
9.1.3 多柔体系统的动能和势能	155

9.2 多柔体系统的动力学方程	156
9.2.1 弹性变形的广义坐标离散化	157
9.2.2 柔性体的动能	158
9.2.3 柔性体弹性变形引起的广义力	159
9.2.4 广义主动力	160
9.2.5 自由柔性体的动力学控制方程	162
9.2.6 多柔体系统平面运动的动力学控制方程	167
9.2.7 多柔体系统空间运动的动力学控制方程	169
9.3 柔性机械臂系统的刚柔耦合实例	170
9.3.1 刚柔耦合动力学原理	170
9.3.2 刚柔耦合动力学仿真方法	171
9.3.3 刚柔耦合动力学仿真步骤	172
9.3.4 仿真结果	176
参考文献	177
附录 机构的惯性参数计算	179

第 1 章 绪 论

1.1 目的和意义

机械工业是当前国民经济中的支柱产业,机械科学的理论与工程技术的进步,对机械工业以及相关行业的发展,起着重要的支撑和推动作用。

机械一般符合下面三个特征:它是物体的组合,即便力加到其各个部分也难以使其变形;它必须实现相互的、单一的、规定的运动;它把施加的能量转化为最有用的形式或转化为有效的机械功。因此,在很大程度上,机械是利用力学原理而组成的各种装置,机械工程的理论基础是力学。

随着科学技术的发展,特别是在微电子技术、计算机技术的带动下,机械和电子有机结合,机电一体化得到迅速发展。机械工程在不断深化和发展的基础上,与系统论、信息论、电子学、计算机科学、人工智能等多个学科进行交叉与融合,呈现出全新的局面。例如,机器人技术应用已经十分广泛。所谓机器人,其实质就是可编程的、能执行操作作业或移动动作的自动控制机械系统^[1, 2]。

对于以机器人为代表的现代机械,机械动力学的有关理论与方法占有重要的地位。由于自动调节和控制装置已经成为机械不可缺少的组成部分,机械动力学也相应地扩展到包括不同特性的动力机构和控制调节装置在内的整个机械系统,控制理论也已深入到机械动力学的研究领域之中。各种模拟理论和方法以及运动和动力参数的测试方法,日益成为机械动力学研究的重要手段。

以机器人为代表的机械系统,在进行机械动力学分析时,其主要目的是在已知外力作用下如何确定其真实运动规律、如何正确分析机械运动过程中各构件之间的相互作用、如何进行机械振动分析、如何进行构件和机构的平衡以及如何进行机构分析和综合等。由此可见,多体动力学的理论与方法起着十分重要的作用。

当前,多体动力学也是一般力学研究中最活跃的领域之一,甚至有些专家和学者认为,多体系统是对一般机械系统和机电系统的高度概括和总结。多体动力学主要是研究多刚体和多柔体系统的运动学和动力学特性。以机器人的机械臂为代表的机械系统,进行多体动力学分析是其重要的研究内容,也是进行合理设计和正确使用的基础。

机械臂是大多数机器人机械系统的重要组成部分。机械臂是典型的多体系统,在工业领域的应用最为广泛。传统的机械臂一般是由机座、腰部、大臂、小臂、

腕部和手部构成。最常见的是大臂与小臂以串联方式连接,即串联机械臂。可以认为,一个串联机械臂就是由关节将刚性连杆连接在一起的连杆机构。基于制造和控制操作相对简单等方面考虑,机械臂通常只包括旋转或移动的关节^[3~5]。串联机械臂的发展是从遥控机械手开始的,遥控机械手是能够在人类不能到达的工作环境中工作的主从式机械手^[6~8]。它一般具有六个自由度,能使所夹持的物体保持任意位置和姿态,具有较大的活动空间和灵活性。现在大多数工业机器人还是具有六个自由度,即具有六个转动关节,并且它们末端的三个关节轴线垂直相交,这三个关节就形成了一个球形的腕部,它们能达到所需要的位姿。当然,串联机械臂一般较笨重,它所承载的负荷与其自身重量之比甚至为1/10。

与传统的刚性机械臂相比,柔性机械臂具有可实现高速操作的能力、较高的负载自重比、较低的能耗、较低的生产成本以及具有更大的工作空间等优点。但是由于柔性机械臂容易产生不能忽略的弹性变形,因此柔性机械臂是一个非常复杂的动力学系统,其动力学方程具有高度非线性、强耦合以及时变等特点^[9~14]。

因此,针对以机械臂为代表的机械系统,分析其多体运动学和动力学问题,如其各个杆件的位移、速度和加速度及其运动轨迹,系统及各个子系统或元件的固有频率与振型,系统在某些激励下响应,机床或机器人系统的误差补偿,刚弹耦合动力学与控制等,进而寻求并获得最理想的运动学和动力学参数,使机械系统处在较理想的状态下工作,是十分重要的。

1.2 机械系统多体动力学研究现状

多体系统动力学问题是机械工程领域中的重要问题,同时也是一个具有挑战性的问题,具有重大的学术价值和工程实践意义。多体系统动力学是综合了刚体力学、分析力学、计算力学等多个力学学科的内容,在机械工程以及其他多个工程领域的应用实践中逐步发展起来的。18世纪50年代欧拉提出了3个欧拉角,并导出了著名的运动学和动力学方程,奠定了点转动的理论基础。其后150年间人们只找到了3种特定情形下的第4个代数首次积分。20世纪初,Husson和Burgatti证明再无其他可积情形,不存在一般可积情形。此后研究方向转向工程技术的应用。

20世纪50年代以来,科学技术和工业生产的发展,促使人们不得不面对多刚体系统。例如,人造卫星的太阳帆板、航天飞机的机械臂、制造技术中的机器人、高速空间机构等。这类系统是刚体组合,但古典刚体力学无法解决这类系统的分析计算问题。首先是用什么数学工具描述多个物体之间的拓扑结构,以解决多体之间不同组合的多样性问题;其次是采用哪种动力学方程以解决多个刚体以及多个动坐标耦合的问题。电子计算机的快速发展为解决上述问题提供了可能,但随之

而来的是采用什么样的程序和软件体系以及合理的运动学和动力学参数才能完成快速、高效、准确的计算。进一步,从实践得知,太阳帆板、航天飞机机械臂并非刚体,甚至某些高速精密机器人用多刚体模型描述也有较大误差,合理的方案是将这些构件考虑为柔性体。柔性体应用若干阶模态予以描述,模态的合理选择是关键,即使做必要的近似处理,也会使系统自由度大大增加,同时促使精确的动力学分析与近似的材料力学计算相互融合。随之而来的动力学方程复杂化和计算程序计算量扩大等问题也有待研究解决。柔性体的大范围运动与高速小范围振动之间的刚柔耦合问题又是一个关键。在此情况下,动坐标系的选取问题、动力学反解的多值性问题都有待解决。应用领域的重要性和解决问题的艰巨性,使得多柔体系统动力学成为当前最具有挑战性的前沿课题。目前人们已经把多体系统界定为刚性和柔性机械系统。

国外在 20 世纪 60 年代,航天工程与机械工程领域的学者就已经各自独立地对多刚体系统动力学开展了研究。航天飞行器一般呈树状开环结构,在空间环境失重状态下运动。而机械系统通常是带闭环结构,做二维或三维运动。后来,由于这两个领域具有共同的理论基础,逐渐开始应用统一的多体系统动力学加以研究。例如,Roberson、Wittenburg、Schielhen、Kane、Huston 等促进了多体系统理论和方法的完善,并进一步推动了其在工程实际中的应用。当前,根据 Roberson/Wittenburg 方法、Kane/Huston 方法、Newton/Euler 方法以及变分方法等,已经发展了数十种商业化分析软件。近年来,国内在多体动力学理论研究和实际应用两个方面也都取得了显著进步,并形成了自己的特色。

多体动力学研究的主要对象是多刚体系统,无论从建模理论、计算方法还是软件工程等都发展得相当完善^[15~17]。目前,多刚体系统的构型越来越复杂,规模越来越大。随着多体系统的部分构件采用轻质柔性材料,系统的运动速度加快,运行精度的要求越来越高,系统的动力学性态越来越复杂。有些情况下,部件作刚体假设的多刚体系统动力学已无法解释系统复杂的动力学性态,因此,当前多体系统动力学的研究对象已经由多刚体系统拓展到多柔体系统。由于空间技术和机器人技术的发展,多柔体系统的研究受到了很大的关注。

多柔体系统动力学相对来说是一门新兴的交叉学科,它是刚体力学、分析力学、弹性力学、矩阵理论、图论、计算数学和自动控制理论等多学科相结合的产物。近 20 多年来,国内外的学者在多柔体系统的建模理论、计算方法及实验研究等方面做了大量的工作^[18]。柔性机械臂是一个强耦合、强非线性的时变结构,相对于刚性机械臂来说具有高效、低耗、灵活方便及具有更大的工作空间等优点。对机器人柔性臂的研究主要包括动力学模型的研究以及柔性机械臂控制策略的研究。柔性机械臂还可应用到其他领域,例如,可将对该系统的分析理论和方法应用于各种结构的控制,如飞机机翼、转轴、工程结构中板梁等的振动控制。

1.3 机械系统多体动力学的主要研究内容

多体系统动力学的研究内容可分为建模和数值仿真两个方面,此外还包括模型实验、测试与验证等。

1) 机械系统多体动力学建模方法

在对复杂机械系统进行运动学与动力学分析前,需建立其多体系统力学模型。多体系统动力学建模是指根据实际工程问题的需要,将实际系统抽象成由刚体、柔性体组成的多体系统,对系统中各种物理量间的关系进行分析和描述,然后利用相关的数学力学理论和方法建立系统的动力学方程^[19]。这种抽象实质上是对系统进行如下4个要素的定义。

(1) 物体。多体系统中的构件定义为物体。多体系统动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。例如,在运动学分析中,通常将对共运动性态特别关心的零部件定义为物体。

(2) 铰。在多体系统中将物体间的运动约束定义为铰或关节。实际工程对象中机构的运动副就是铰。在多体系统力学模型中,物体与铰的定义是相关的。

(3) 外力(偶)。多体系统外的物体对系统中物体的作用定义为外力(偶)。重力是系统典型的外力。在外力的定义中,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。因为它不仅对其大范围的运动有影响,而且对其弹性变形也有影响。此外,如果在实际的工程对象中,受外力作用的零部件没有作物体的定义,那么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。在实际的工程对象中,零部件间的相互联系一种是通过运动副,另一种通过力的相互作用。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。在实际的工程对象中,力元的作用是通过器件实现的。实际工程中零部件的相互作用也可借助于运动副来实现。如转动铰上的卷簧、阻尼与电动机等。此时将运动副定义为铰,物体间的相互作用定义为力元。

在工程实际中,机械系统多体动力学模型的建立以能揭示系统运动学与动力学性态的最简模型为最优。

2) 机械系统多体动力学数值算法

由于通常情况下多体系统动力学方程为非线性常微分方程组或非线性微分-代数方程组,目前用解析方法研究上述问题还存在很大的困难,数值仿真计算是研究这些问题的重要手段之一^[20~24]。

数值算法方面主要的研究问题包括常微分方程的刚性问题、微分-代数方程的数值解法问题、多体系统非线性动力学行为的数值分析方法等。对于微分-代数方

程的数值算法,目前有以下3种:①将微分-代数方程转化为常微分方程(方程的个数等于系统独立的广义坐标数),该方法称为缩并法;②利用 Baumgarte 稳定化方法,由微分-代数方程得到常微分方程(方程的个数与系统的广义坐标数相等),该方法称为增广法;③利用多体系统动力学方程的特点,直接构造微分-代数方程的数值差分格式。

(1) 拉格朗日方程数值算法。多体系统拉格朗日方程的数值计算,是了解系统动力学特性的重要手段。根据系统结构特性和方程的具体形式,给出有效的计算方法,是多体系统动力学方程数值算法研究的重要内容。主要包括:多体哈密顿系统的辛算法、多体系统拉格朗日方程的隐式算法和多体系统非线性动力学特性的数值计算方法等。

哈密顿系统动力学是力学研究的重要基础。按照现代数学和分析力学的观点,哈密顿力学系统是辛流形上的动力学系统,其结构和对称性约化在运动稳定性及数值算法研究中起着重要的作用。哈密顿力学系统的解可由单参数的辛变换给出,即哈密顿系统是一个单参数辛群。

多体系统动力学方程隐式算法是建立在系统建模研究和显式算法研究基础上的,其计算量远远大于显式算法。但隐式算法在数值计算的稳定性和计算精度上明显高于显式算法,也是解决常微分方程刚性问题的有效方法。

(2) 几何积分方法。几何积分方法是能够保持系统重要定性性质,且误差足够小的算法^[25]。针对多体系统动力学方程(微分方程、微分-代数方程),当需要预知微分系统的一些定性信息并希望数值离散时能保持这些定性性质特征时,可以利用定性知识反映其几何特性,如 Lie 对称性、守恒量、辛结构等^[26, 27]。

从目前研究状况可知,从拉格朗日体系向哈密顿体系的过渡,其意义在于从传统的欧几里得的几何形态进入到辛几何的形态之中,使对偶的混合变量方法进入到应用力学领域^[28~33]。辛几何法在多体系统中的应用目前主要集中在多刚体系统^[34~36],在一定程度上解决了约束多刚体系统动力学数值计算稳定性问题。

1.4 · 本书主要内容

本书主要介绍了如下内容:多体系统的运动表示;多体系统运动学分析方法;多体系统速度与微运动、速度和加速度,以及多刚体系统的动力学方程的建立、求解和计算方法;主要以典型平面三自由度机械臂为例,进行了多体系统运动学和动力学分析的举例。介绍了多刚体系统的控制方法,包括机械臂末端执行器的位置控制和基于反馈控制策略的主从机械臂同步控制等。还介绍了基于 ADAMS 的机械系统多体动力学的可视化仿真方法,给出了多自由度机械臂、操作机等复杂机械系统的多刚体运动学和动力学仿真分析实例。最后还讨论了多柔体系统的动力

学分析与仿真方法。本书是关于机械臂多体系统的基础研究,为后续深入研究奠定了良好的理论基础,同时也为下一步的实验验证提供理论参考和依据。

随着机械系统多体动力学建模方法与数值计算方法的日趋完善,人们已经开始研究机械系统的动力学特性与动力学控制等各个方面。在实际工程中,如何确定机械-控制系统的参数,保证其运动按照预定的方式精确进行,以及如何保证系统的运动稳定性、系统参数变化对其运动特性的影响规律等,已经成为人们更为关心的研究课题,有待于人们进行更加细致而深入的工作。

参 考 文 献

- [1] 谢存禧,张铁. 机器人技术及其应用. 北京:机械工业出版社,2005
- [2] 张福学. 机器人技术及其应用. 北京:电子工业出版社,2000
- [3] 蔡鹤皋. 机器人技术的发展与在制造业中的应用. 机械制造与自动化,2004,33(1):6-11
- [4] 吴洪涛,熊有伦. 机械工程中的多体系统动力学问题. 中国机械工程,2000,11(6):608-612
- [5] 刘国栋. 我国的机器人研究和发展. 江南学院学报,2001,16(4):36-37
- [6] 霍伟. 机器人动力学与控制. 北京:高等教育出版社,2004
- [7] 徐元昌. 工业机器人. 北京:中国轻工业出版社,1999
- [8] 熊有伦. 机器人技术基础. 武汉:华中科技大学出版社,1996
- [9] Likins P W. Finite element appendage equations for Hybrid coordinate dynamic analysis. International Journal of Solids & Structures,1972:709-731
- [10] 于清,洪嘉振. 柔性多体系统动力学的若干热点问题. 力学进展,1999,29(2):145-154
- [11] 洪嘉振. 计算多体系统动力学. 北京:高等教育出版社,1999
- [12] Meirovitch L. Hybrid state question of motion for flexible bodies in terms of quasi-coordinates. Journal of Guidance, Control and Dynamics, 1991:1008-1013
- [13] Yoshikawa T. Manipulability of robotics mechanisms. Journal of Robotics Research, 1985, 4(2):3-9
- [14] Agrawal O P, Saigal S. Dynamic analysis of multibody systems using tangent coordinates. Computers and Structures,1989, 31(3):132-150
- [15] 黄永安,尹周平,邓子辰,等. 多体动力学的几何积分方法研究进展. 力学进展,2009, 39(1):44-57
- [16] Shabana A A. Flexible multibody dynamics;Review of past and recent developments. Multibody System Dynamics, 1997, 1: 189-222
- [17] Schiehlen W. Multibody system dynamics;Roots and perspectives. Multibody System Dynamics, 1997, 1: 149-188
- [18] 刘铸永,洪嘉振. 柔性多体系统动力学研究现状与展望. 计算力学学报,2008,25(4):411-416
- [19] 袁兆鼎. 刚性常微分方程初值问题的数值解法. 北京:科学出版社,1987
- [20] 王琪,陆启韶. 多体系统 Lagrange 方程数值算法的研究进展. 力学进展,2001,31(1):9-17
- [21] Kurdila A J, Narcowich F J. Sufficient condition for penalty formulation methods in analytical dynamics. Computational Mechanics, 1993, 12: 81-96
- [22] Wauer J, Buhrlé P. Dynamics of a flexible slider-crank mechanism driven by a non-ideal source of energy. Nonlinear Dynamics, 1997, 13: 221-242
- [23] Chen C L, Yan H T. Chaos in the imbalance response of a flexible rotor supported by oil film bearings with nonlinear suspension. Nonlinear Dynamics, 1998, 16: 71-90

- [24] 王琪,陆启韶,黄克累. 树形多体系统非线性动力学数值分析. 固体力学学报,1999,20(4):363-367
- [25] 张素英,邓子辰. 非线性动力学系统的几何积分理论及应用. 西安:西北工业大学出版社,2005
- [26] 梅凤翔. 约束力学系统的对称性与守恒量. 北京:北京理工大学出版社,2004
- [27] 冯康,秦孟兆. 哈密顿系统的辛几何算法. 杭州:浙江科学技术出版社,2003
- [28] Chen S, Tortorelli D A. An energy-conserving and filtering method for stiff nonlinear multibody dynamics. *Multibody System Dynamics*, 2003, 10(4): 341-362
- [29] 钟万勰. 应用力学对偶体系. 北京:科学出版社,2002
- [30] 钟万勰. 弹性力学求解新体系. 大连:大连理工大学出版社,1995
- [31] 钟万勰. 应用力学的辛数学方法. 北京:高等教育出版社,2006
- [32] Yao W A, Li X C. Symplectic duality system on plane magnetoelastic solids. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2006, 27(2): 195-205
- [33] 王琪,黄克累,陆启韶. 树形多体 Hamilton 系统辛算法. 计算物理,1997,14(1): 35-39
- [34] 吴永,杜思义,胡继云. 约束多体系统动力学方程的辛算法. 重庆大学学报,2004,27(6): 102-105
- [35] 吴洪涛,于洪方,刘又午. 多刚体系统动力学的正则方程与辛算法. 南京航空航天大学学报,1996, 28(1): 45-52
- [36] Buss S R. Accurate and efficient simulation of rigidbody rotations. *Journal of Computational Physics*, 2000, 164(2): 377-406

第 2 章 多刚体系统的运动学分析

多刚体系统的运动学分析是将机构的空间位移量解析表示为时间的函数,如机器人关节变量空间和机器人末端执行器位置和姿态之间的关系。涉及机器人相对于固定参考坐标系运动几何学关系的分析研究。机器人运动学问题可归纳如下:①已知杆件几何参数和关节角矢量,求机器人末端执行器相对于参考坐标系的位置和姿态;②已知机器人杆件的几何参数,给定机器人末端执行器相对于参考坐标系的期望位置和姿态,机器人末端能否到达这个位置,也就是机器人的逆问题^[1~7]。本章首先介绍以机械臂机构为代表的多体系统的运动描述方法,再进行机械臂的运动学分析,作为后续章节中多体系统的运动学和动力学基本原理、多体系统的控制及其仿真分析的基础。

2.1 多刚体系统的运动描述方法

2.1.1 机构空间坐标的齐次变换

本章以机械臂(manipulator)为例说明多体系统的运动描述方法。这里首先说明机械臂的结构以及处理其运动时所需的物理量。典型的机械臂是由多个连杆(link)通过关节(joint)结合起来的结构,固定在基座(based)上,前端装有适应作业的末端执行器(end-effector),作业对象的抓取则利用所需的末端执行器来完成。

末端执行器的位置(position)是指工作空间的几何位置。除了明确末端执行器的位置之外,还要明确末端执行器的姿态(posture),即末端执行器从什么方向到达该点,包括转动角、俯仰角、偏转角,分别对应转动(roll)、俯仰(pitch)、偏转(yaw)三种运动。连杆机构常采用的关节有回转关节(revolute joint)和棱柱形移动关节(prismatic joint),表示关节位置的变量称为关节变量(joint valuable)。研究末端执行器的位置和姿态与关节变量之间的关系称为运动学(kinematics)。

由于机械臂的运动主要由连杆机构来决定,所以大多数场合仅分析去掉驱动装置后杆系的几何关系。建立某一个坐标系 $\{S_A\}$,空间任一点 P 的位置可用如下矢量表示:

$${}^A\mathbf{p} = [x_p, y_p, z_p]^T \quad (2.1)$$

式中,左上角的 A 表示对应的参考坐标系。

空间中的任一点在不同的参考坐标系中的坐标值不同,或者一点在某参考坐