



机械工程研究生规划教材

Advanced Mechanisms

Revised edition

高等机构学

修订版

张春林 赵自强 主编



配套教师课件

机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



机械



高等机构学

(修订版)

主 编 张春林 赵自强

参 编 李志香 马 超

主 审 余跃庆

机械工业出版社

本书共分十一章,第一章主要介绍机构学的发展现状与动向及高等机构学研究的主要内容;第二章介绍了高等机构学中的常用数学基础知识;第三章介绍机构的结构原理、空间机构及其开链机构自由度的计算和机构的型综合;第四章介绍了平面机构与空间机构的运动分析方法;第五章为机构综合内容,分别讲述了刚体导引机构、轨迹发生机构和函数发生机构的综合;第六章介绍了平面高副机构的基本理论和基本知识;第七章介绍了机器人机构的基本知识;第八章介绍了仿生机构的基本知识;第九~十一章为机构动力学内容,分别讲述了平面机构的平衡,含有弹性构件的连杆机构和凸轮机构的动力学,机械系统动力学。

本书可作为高等工科大学机械设计及理论学科的研究生教材,也可以作为机械类本科高年级学生的选修教材。

图书在版编目(CIP)数据

高等机构学/张春林,赵自强主编. —北京:机械工业出版社,2015.12
机械工程研究生规划教材
ISBN 978-7-111-52299-7

I. ①高… II. ①张… ②赵… III. ①机构学-研究生-教材
IV. ①TH112

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第295943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:余 焱 责任编辑:余 焱 李 超 任正一
版式设计:霍永明 责任校对:佟瑞鑫
封面设计:张 静 责任印制:常天培
唐山市润丰印务有限公司印刷

2016年10月第1版第1次印刷
184mm×260mm·14.25印张·345千字
标准书号:ISBN 978-7-111-52299-7
定价:36.00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

服务咨询热线:010-88379833

机工官网:www.cmpbook.com

读者购书热线:010-88379649

机工官博:weibo.com/cmp1952

教育服务网:www.cmpedu.com

封面无防伪标均为盗版

金书网:www.golden-book.com

前 言

高等机构学 (Advanced Kinematics and Dynamics of Mechanisms) 是在机械原理 (Theory of Machine and Mechanisms) 课程的基础上继续深入研究机构结构、机构运动分析和机构综合的课程。在研究内容方面, 从平面机构的分析与综合扩展到空间机构的分析与综合, 从转子惯性力的平衡扩展到机构惯性力的平衡, 从刚性构件扩展到弹性构件, 从单自由度机构扩展到多自由度机构, 从简单的高副机构扩展到瞬心线高副机构和共轭曲线高副机构等, 研究方法也转变为以计算机为工具, 以高等数学中的坐标变换与矩阵运算为主的解析法。

高等机构学是机械设计及理论学科研究生的主要学位课程之一。目前, 全国各高校在开设这一课程时, 由于缺少教材, 基本上是导师自选参考书, 自拟讲稿, 再辅以机构学领域的一些参考书。因此, 迫切需要编写研究生用高等机构学教材。但是, 机械设计及理论学科以及相关学科的研究生数量较少, 教材需求量不大, 研究生教材的出版十分困难。机械工业出版社对该教材的出版给予了大力支持和帮助, 作者深表感谢。

本书是根据机构学的发展现状、最新科学技术在机构学中的应用以及与机构学交叉学科的发展情况, 在原《高等机构学》讲义的基础上修订而成。

在内容的编排上, 保留了原教材的主要内容, 删减了与机械原理课程重复的内容和强调图解法的机构学几何基础, 采用了充分利用计算机的解析法代替传统的几何作图设计法, 增加了高副机构的基本理论和反映最新科技发展的机器人机构、仿生机构等内容, 突出了更高层次的机构设计及其创新设计, 并在每章后设置了习题, 供课后练习之用。由于机械设计及理论学科是研究机械共性的基础学科, 所涉及的内容十分广泛, 各高等工科大学结合自己的专业特色, 在该学科的研究方向设置上的差别非常大, 为适合不同的研究方向, 本书在内容选择上采取了宽口径的模式, 各校在使用本书时可结合各自的特色增减教学内容。

机构学的研究方法有两大类型, 即图解法和解析法。随着数学方法的普及和计算机技术的发展, 数学不断融入机构学, 促进了现代机构学的快速发展。本书在编写中, 基本以解析方法为主, 特别强调矢量法和矩阵法为主的解析方法, 没有涉及复数法、对偶数等其他方法。

参加本书编写的有: 张春林, 赵自强, 李志香, 马超。全书由张春林教授、赵自强老师统稿, 并担任主编。

本书承蒙北京工业大学余跃庆教授审阅, 并提出许多宝贵的修改意见, 作者深表感谢。

在本书的编写过程中, 一些研究生也在公式推导与录入方面做了大量工作, 这里一并表示感谢。

本书可作为高等学校机械设计及理论学科的研究生教材, 或机械类本科生高年级学生选修课教材, 还可作为机械原理教师的参考用书。

由于作者水平有限, 难免会存在遗漏欠妥之处, 竭诚欢迎读者批评指正。

张春林

目 录

前 言

第一章 绪论	1
第一节 机构学的发展现状与动向	1
第二节 高等机构学的研究内容	8
习题	9
第二章 高等机构学的数学基础	10
第一节 概述	10
第二节 矢量与其运算	11
第三节 常用坐标变换	13
第四节 常用矩阵运算	19
第五节 非线性方程组的数值解法	26
第六节 常微分方程组的数值解法	33
习题	35
第三章 机构的结构理论	36
第一节 机构的组成理论	36
第二节 机构的自由度	41
第三节 平面机构的结构分析	48
第四节 平面运动链的结构综合	51
第五节 空间运动链的型综合	57
习题	60
第四章 机构的运动分析	62
第一节 概述	62
第二节 平面机构的运动分析	62
第三节 空间机构的运动分析	65
习题	90
第五章 低副机构的运动综合	92
第一节 概述	92
第二节 平面刚体导引机构的运动综合	94
第三节 空间刚体导引机构的运动综合	102
第四节 轨迹发生机构的运动综合	109
第五节 函数发生机构的运动综合	114
习题	121
第六章 高副机构基础	122

第一节 概述	122
第二节 瞬心线及其性质	123
第三节 瞬心线机构及其应用	128
第四节 共轭曲线及其方程	130
第五节 共轭曲线机构及其应用	134
习题	135
第七章 机器人机构简介	137
第一节 概述	137
第二节 机器人机构运动学	139
第三节 机器人机构静力学	146
第四节 机器人机构动力学简介	148
习题	149
第八章 仿生机构概述	150
第一节 概述	150
第二节 仿生机构的生物运动学基础	152
第三节 仿生机构	158
习题	166
第九章 平面机构的平衡	167
第一节 概述	167
第二节 平面机构的平衡原理	167
第三节 平面机构惯性力的平衡	172
第四节 平面机构惯性力矩的平衡	179
习题	183
第十章 机构弹性动力学	184
第一节 概述	184
第二节 含有弹性构件的机构动力学分析方法	184
第三节 凸轮机构弹性动力学	187
第四节 连杆机构弹性动力学	191
第五节 简单机械系统的弹性动力学	204
习题	206
第十一章 机械系统动力学	208
第一节 单自由度机械系统动力学	208
第二节 多自由度机械系统动力学	213
习题	217
参考文献	219

第一章 绪 论

本章主要简述机构学的发展现状与动向,以及机构学的基本理论与方法在现代科学技术中的应用,讲述高等机构学研究的主要内容,明确高等机构学在机械工程专业研究生培养过程中的重要性。

第一节 机构学的发展现状与动向

高等机构学是一门研究和探讨机构设计理论与设计方法的专门学科,富有创造性和设计性,因而是机械设计及理论学科中的重要支撑课程。机械设计及理论是研究机械科学中具有共性的基础理论和设计方法的学科,原名为机械学。高等机构学与机械设计及理论的形成与发展密切相关。

古代机械在漫长的发展过程中,一直没有形成独立的设计理论与设计方法,所以其发展经历了漫长的过程。直到18世纪欧洲工业革命后,蒸汽机的应用促使了机械工业的繁荣发展,机械工业的发展又促进了机械的应用和研究的日益深入,这才逐渐形成研究机器理论的独立学科——机构学。世界各国大学中的机械工程类专业,大都开设含有机构学内容的课程。我国则把机械原理课程作为机械类本科大学生的必修课程,把高等机构学作为机械设计及理论学科硕士研究生的必修课程。随着工业生产的发展与科学技术的进步,机构学研究的内容也在不断丰富和发展。

一、机构学的发展阶段

机械的使用减轻或代替了人类的劳动,改善了人类的生活条件,促进了人类社会的进步与发展。长期以来,人们只是凭匠人的言传身教来制造机械,匠人集设计与制造为一身。但匠人的设计只是停留在头脑中的想法,并没有形成用于指导机械设计的基本理论与基本方法,也缺少描述机械的图样,所以古代机械的发展是比较缓慢的。

机构学的发展基本上经历了三个阶段。

第一阶段:17世纪的欧洲文艺复兴和18世纪初期的工业革命,导致了机械工业的空前发展。这时迫切需要用有关机器的理论来指导生产的发展,在这种形势下,德国人勒洛(Reuleaux)于1875年出版了《机械运动学》,奠定了机构学的基础。限于当时的条件,分析和设计采用了作图的方法。同期,俄国人契比切夫(chebychev)应用代数法解决了机构的近似设计问题,机构学逐渐形成了一门独立的技术基础学科,为指导机械产品的设计提供了理论与方法,促进了机械工业的大发展。

第二阶段:第二次世界大战结束后,工业生产的恢复和电子计算机的研制成功,发展和完善了机构学中的分析方法和综合方法,在机构结构理论、空间机构的分析与综合,凸轮机构动力学及弹性机构动力学等许多领域的研究都有飞跃的发展,机构的结构与分析理论、平面连杆机构的设计方法、凸轮机构的设计与分析方法、齿轮机构的啮合理论、间歇运动机构

的设计与分析方法、机械平衡、机械的动力学响应等传统机构学内容基本成熟。

第三阶段：20世纪中后期以后，计算机技术、自动控制技术和传感技术的发展，促进了工业自动化和机器人技术的快速发展与普及。高科技日新月异的发展又促使机构学内容的不断拓展。空间闭链机构、空间开链机构的理论研究基本成熟，考虑到动力学因素的机构综合取得了长足的进步。传统机构学与仿生学、生物力学、电磁学与控制理论相结合，形成相互交叉渗透的边缘学科，机构学的内涵不断扩大，同时也给机构学注入了新内容。微小机械、微型机械、生物机械、机械与电子学相结合，对高等机构学的传统理论提出了严峻的挑战。这时也迫切需要相关的机构设计理论来指导这类产品的设计。当前，机构学的发展正处于第三阶段的发展过程中。

进入21世纪以来，高等机构学的课程体系也在不断发生变化，以适应科学技术的不断发展。传统的图解方法及相关几何理论正在被新的解析方法代替，仿生机构、广义机构、高副机构、机构创新的基本理论不断充实到机构学中。

1969年，在欧洲的波兰成立了国际机器与机构理论联合会（The International Federation for Theory of Machine and Mechanisms, IFToMM），每四年举办一次国际会议，定期出版刊物《Mechanism and Machine Theory》。我国的机械传动学会于1983年正式参加了IFToMM国际学术组织后，扩大了与世界各国在机构学领域的交流，加速了与国际同类学科的课程内容的接轨，同时也保留了自己的特色。

机构学的研究内容和方法在深度上差异很大，本科生只能学习机构学的基本内容和基本方法。主要涉及平面机构的组成与结构分析、自由度的计算与机构简图的绘制，平面连杆机构的综合、运动与受力分析，平面凸轮机构的设计，齿轮机构的设计，机械平衡，机器的运转与速度波动的调节，机构组合设计，机械运动方案的选择等最基本的内容。为了培养更高级的机械工程领域中的研究人员，在学习机械原理课程的基础上，硕士研究生还要学习高等机构学，掌握空间机构的结构理论、分析与设计方法以及更深入地学习机构动力学的内容，以适应高速发展的机械科学技术的需要。

二、我国机构学的发展现状

机构学的发展主要体现在研究方法和研究内容两大领域。解析方法及计算机算法语言的结合促进了机构学研究方法的进步，航空、航天、微型机械等领域高新技术的发展促进了机构学研究内容的不断拓展。其发展现状归纳如下：

1) 由于计算机技术的发展与普及，使机构学的研究方法大大改进。先进的计算工具和丰富的数学计算方法在机构学中的成功运用，使机构学研究内容的深度与广度有了纵深发展。解析法与电算程序解决了传统图解法不能解决的许多问题。由于优化设计和求解非线性方程组方法的成熟，在连杆机构的运动分析和综合中，解析法正在代替传统的作图法；凸轮机构的设计过程中，解析法已经成功地代替了传统的作图法。由于解析法具有可编程性，用该方法得到的设计结果可以方便地在数控机床上实现加工，实现了真正的设计与制造一体化，所以机构分析与设计的数学化正在冲击传统的几何设计与分析方法。北京理工大学的刘惠林教授在数学机械化研究领域做了许多有益的工作。

2) 工业生产的机械化与自动化程度的提高，促进了凸轮机构、间歇运动机构的运动学与动力学的深入研究，分度凸轮机构的运动学研究和动力学研究取得长足进步。配合自动化

的进程，一些装夹、定位机构的研究与应用也日益广泛。

3) 随着人类社会的发展与进步，人类生活水平不断提高，与人类生活密切相关的产品，诸如录像机、照相机、洗衣机、儿童玩具、健身器材等许多产品的更新换代周期日渐缩短。这就要求提供新型机构，以完成更复杂、更巧妙的机械运动。这不仅促进了机构综合的发展，而且要求发展机构创新设计的构思方法，使得机构创新设计的内容进一步发展完善。我国台湾的机构学学者在机构创新与机构应用领域做了许多有益的工作，各类机构产品遍布全世界。各类灵巧机构的应用极大地促进了机构综合的发展。

4) 由于现代机械的发展趋势是高速化和高精度，因此对机构动力性能的要求越来越高。所以，考虑构件的弹性变形、构件质量的改变及机构惯性力等因素对机构运动的影响，促进了机构动力分析与综合的日益完善。天津大学的张策教授、北京工业大学的余跃庆教授等在机构动力学，特别是空间机构动力学的研究方面做了许多有益的工作。

5) 仿生机械在工程中，特别是在一些特殊环境中得以应用，如在浅海中可行走的钻探平台，在石油和天然气的开采中收到良好效果，所以，仿生机械的使用促进了仿生机构的研究。

6) 以机械手、机器人为代表的高科技产品的生产与应用，极大地丰富了空间机构的研究内容，使得空间机构的研究飞速发展，同时也促进了多自由度机构的深入研究。北京航空航天大学张启先院士在空间机构和机器人机构的研究领域做出了很大贡献，北京邮电大学、清华大学、哈尔滨工业大学、天津大学、北京理工大学、东北大学等高校在空间并联机构的工作空间、位姿正解与反解、运动控制以及动力学的研究领域做了许多有益的工作。

7) 航空航天技术的发展带动了可调机构与行走机构的发展。空投到月球或火星上的登陆车采用变胞机构，降落时机构的各构件折叠在一起，落地后再舒展，然后行走。变胞机构的研究开始引起机构学界的重视。

8) 21 世纪科学技术发展的一个重要特点是各种不同的学科开始交叉、渗透与融合，并形成了许多类型的边缘学科。机构学与电磁学交叉，使新型电磁机构开始涌现，合肥工业大学赵韩教授研究磁性齿轮传动，轮齿不接触的磁性齿轮传动没有振动和噪声，也没有污染。北京理工大学在机构学与生物力学的交叉内容研究中，把机构学的基本理论应用到人体运动学与动力学的研究中，并取得了良好的效果。北京科技大学翁海珊教授把遗传学的基本理论应用到机构创新设计过程中，提出了机构创新设计的新方法。目前，机构学与仿生学、生命科学、生物力学、电子学、电磁学的交叉与渗透正在向纵深发展。原子发动机、微型机械的问世，都是学科交叉的研究成果。

由于机构学在机械科学中的重要地位以及对生产实践的指导作用，许多国家都重视这一学科的发展，同时为其发展提供了良好的保障。

随着科学技术的发展，机器的含义也有所发展。传统的机器定义为：一种能完成有用机械功或者变换机械能的能代替人类劳动的机械运动装置。现代化的机器已突破上述定义。有些机器的应用不是以代替人类劳动为目的，如照相机、录像机、电动玩具等消费产品的生产动机则有很强的服务性质。还有些机器中的运动变换并非通过机械装置来实现的，而是借助电磁效应、光电效应来实现的。越来越多的机器是机械装置和电子装置互相结合的机电一体化产物。

在这里需要指出的是：本书中的机器仍指用机械手段变换机械运动且能做有用功或进行能量变换的机械装置。通过流体构件、柔韧体构件以及电磁效应也能进行运动变换，本书中不予讨论。

三、机构学的发展动向

机构学的许多理论与方法日渐成熟，如机构结构理论、低副机构综合理论、高副机构理论等机构学的经典内容均已成熟。机构学的发展促进了相关领域的科学技术的发展，科学技术的飞速发展也促进了机构学的发展，这促进了机构学不断向前发展。

1. 机构数学的研究

由于过去计算技术落后，传统机构学中的机构分析与综合基本采用几何法，而且发展得很完善和成熟。计算数学的发展和计算机的普及冲击了传统的几何法。机构学的研究方法由几何法向解析法的转换发展很快，利用图论研究机构的数综合、利用矢量法研究机构的分析与综合、利用矩阵变换进行求解、利用数值积分进行机械盈亏功的计算等大量数学方法应用于机构学，机构数学正在快速发展。利用机构学的基本理论建立机构的数学模型的问题已经基本解决，但是求解多个非线性方程组成的方程组的问题则是机构学中一个很大的问题。特别是精确求解五个以上的非线性方程组成的方程组的问题则是数学机械化研究的重要内容，机构数学的深入研究仍然是机构学领域的研究前沿。

2. 机构创新设计的理论与方法的研究

创新是一个民族进步的灵魂，创新设计是实现产品自主开发能力的重要途径。在机械产品的设计过程中，机构系统运动方案的设计最能体现出创新的价值，因此，开展机构创新设计理论与方法的研究也就成为机构学的重要内容之一。天津大学、北京理工大学、北京科技大学、上海交通大学等许多高等学校都对机构创新理论与方法进行了深入的研究。其中北京理工大学对机构的组合理论与方法进行了深入的研究，并成功地应用在机械设计中，取得了明显效果。北京科技大学利用遗传算法探讨机构的创新，也取得了阶段性成果。目前，关于机构创新理论与方法的研究还不是很成熟，许多机构学学者正在进行积极的研究和探索。

3. 机构动力学

机构动力学研究范围很宽，机构在高速运转过程中，由于外力的作用，其运动状态和工作状态会发生很大的变化。诸如弹性变形、运动副的间隙会影响其运转精度；外载荷的变化会影响原动件的运动规律；不平衡质量会引起机械振动和噪声；机构动力学一直是机构学中重点研究的内容。转子动力学中的系统稳定性和主动控制，齿轮动力学中的耦合振动、减振与降噪，含有变质量构件的机构运动方程及其求解，含有弹性构件的机构运动方程及其求解，运动副间隙对机构运动精度和工作状态的影响，机构的动力学仿真技术，机器人动力学方程的非线性和耦合性，考虑动力学因素的机器人奇异位形研究等许多问题都是机构动力学的研究热点与难点。

4. 边缘学科

科学技术的发展，促进了各不同学科的交叉、融合与渗透。涉及多学科的新兴边缘学科（也称交叉学科）不断涌现，体现了现代科学技术的发展趋势。机构学和电子学的交叉，使微小机械的研究与应用成为热点；机构学与遗传学的交叉，使遗传算法在机构创新设计中得到应用；机构学与物理学的交叉，使电磁效应在微位移机构的研究与应用中得到应用；机构

学与医学、生物力学的交叉,使机构学的基本原理在人体的结构、运动机理分析中得到应用,形成了新型的人-机研究学科,构成了生命科学中的重要组成部分。机构学与生物学的交叉,成为仿生学中的重要内容,仿生学已成为机器人行走系统设计的重要理论基础。

目前,上述各类交叉学科的研究都处于研究或发展阶段,其理论和方法仍没有系统化,有的还处于探索阶段,因此,对与机构学密切相关的边缘学科的研究完全是新内容,是机构学的新拓展。

当前,与机构学相交叉的边缘学科领域,主要体现在运动生物力学、微型机械、机电一体化、仿生机构学以及遗传算法、数学机械化等领域。

5. 广义机构

机构学中,主要涉及由刚性构件组成的机构,研究其组成原理、运动学和动力学分析与设计问题。这类传统的机构又称狭义机构。目前机构学的教学重点基本上还是集中在狭义机构学的范畴。随着机械科学技术、材料科学技术和电子科学技术的交叉发展,出现了非刚性构件组成的机构,这类机构称为广义机构。带传动、链传动中的带和链是中间挠性传动件,这类传动机构一般不在机构学中讲述,而在机械设计课程中讲述;液压传动机构中,主动件和从动件之间的运动靠流体传递,这类机构也不在机构学中讲述,而是在流体传动与控制中讲述。因此,未将这些机构列入广义机构的研究范畴。近期出现的磁致伸缩机构、电致伸缩机构、热变形机构在微位移机构中得到应用,效果很好。因此,研究具有特殊应用场合的诸如微位移机构之类的广义机构的工作原理与设计方法,是机构学领域中的新型研究课题。另外,在微型机械中,构件之间的连接不是靠运动副,而是靠弹性构件的弹性变形实现构件和机构的运动,这类机构也应包含在广义机构的研究范畴。

6. 微机构

微机构通常又称为微机械。微机械涉及多学科的交叉知识,在航空、航天和生物医学领域有广泛的应用前景。在微机械中,微传动机构和微执行机构是主要的机械运动部分,其性能对微机械的性能有重要影响。

由于尺度效应的影响,微机构的组成、运动和动力传递机理与常规机构有很大的不同。过小的运动副如何组成、过小的构件形状如何、运动副内部摩擦与间隙、机械精度问题等诸多尺度效应与物理特征都成为微机械设计的关键问题。因此,微机械的设计原理与方法的研究与探讨将是未来机构学中亟待解决的问题。

按其尺寸的大小,可把微机械分为两种。尺寸在毫米级的微机械称为微型机械(Minimachine),尺寸在纳米级的微机械称为微小机械(Micromachine)。

毫米级的微型机械,如微型机器人、微型齿轮传动装置、微电机在某些特殊领域得到应用。研究构件之间的连接方法、构件结构与材料、加工方法是微机构学中的热点。

纳米级的微小机械,涉及微电子学和纳米加工技术,其组成原理、设计方法与传统的机构学相差甚远,如原子发动机是利用原子绕原子核旋转的原理设计的。我国急需开展这类微机械的研究。

由于微机构是微机械的主要组成部分,在狭小的空间内进行运动转换、动力传递,因此,微机械应尽可能缩短运动链,多功能的组合机构是有前景的选择,如将弹性梁、铰链、弹簧组合,利用变形协调来实现机构的多自由度运动。

微机械是美国斯坦福大学于20世纪70年代初开始研究的,并且研制出直径为 $20\mu\text{m}$ 、

长度为 $150\mu\text{m}$ 的铰链连杆机构以及 $210\mu\text{m} \times 100\mu\text{m}$ 的滑块机构, 加利福尼亚大学伯克利分校制造出直径为 $50\mu\text{m}$ 的旋转关节, 贝尔实验室用硅材料制造出直径为 $125\mu\text{m}$ 、宽度为 $15\mu\text{m}$ 的齿轮。日本的筑波大学、名古屋大学、东京大学、早稻田大学等研究单位采用压电元件研究无间隙的微驱动机构及其控制技术, 先后开发出可实现直线运动、旋转运动、驱动误差在微米级的微机构。进入 21 世纪以后, 一些发达国家对微机械的研究已经由实验室走向产品, 用于医疗领域的微型机器人已经用于临床。

我国在微机械领域的研究起步较晚, 但发展很快。沈阳自动化研究所、上海交通大学、清华大学、合肥工业大学等的科研人员在微型驱动器和微型机器人领域的研究取得重要进展, 已经采用压电陶瓷研制出位移范围为 $50\mu\text{m}$ 的一维驱动器, $50\mu\text{m} \times 50\mu\text{m}$ 的二维联动驱动器, 三自由度压电陶瓷微型机器人, 其运动范围为 $50\mu\text{m} \times 50\mu\text{m} \times 50\mu\text{m}$, 精度已达到 $0.1\mu\text{m}$ 。此外, 在微型电机、微型泵、微型传感器的研究也有很大进展。

由于微机械是学科深度交叉的新领域, 涉及设计原理、力学原理、制造方法、热学、微电子学、控制理论、计算机技术等多门基础学科的微尺度理论和技术。由于微尺度理论的研究远落后于微电子技术, 因此, 微机械中的“机”已经成为微机械发展的瓶颈。目前该领域的研究主要围绕以下几个方面:

1) 研究微系统的运动规律, 基于微构件的物理特性、在载荷作用下的力学行为、物理、化学及其表面效应有关的设计理论依据与方法。

2) 基于新的物理、化学、生物原理, 通过微型化、集成化探索具有新功能的元件和系统。

3) 实现高效、精细加工的微制造技术。

4) 实现传感、测量与控制有效集成的微系统的测控技术。

机构学领域的前沿问题主要表现在以下几个方面:

1) 微构件, 如梁类、薄膜类构件的形状结构, 变形行为的力学分析及算法的评估。

2) 微构件的尺寸效应和表面对微构件力学行为的影响, 弹性变形与热变形的耦合作用。

3) 微机构的创新设计与仿真设计原理。

4) 微机构的组成原理及其运动形态的变换。

5) 微机构的运动精度研究与控制研究。

6) 微机构的动力分析及其非线性动力学仿真研究。

根据微机械的研究现状分析, 其实验测试技术应是当前的重要研究任务。

7. 变胞机构

英国伦敦大学国王学院戴建生教授最早提出变胞机构的概念, 随着航天科学中登陆外星的需要, 变胞机构在登陆车上得到成功的应用。所谓变胞机构, 是指机构的自由度或构件的运动形态可随工作要求自动变换的一种新型机构。如可折叠的火星登陆车行走机构, 为克服运动奇异现象的冗余度机器人都是变胞机构的具体应用。变胞机构的组成与结构理论是机构学面临的新问题。

8. 新型机构的研究

新机构的诞生对社会的发展有极大的促进作用。瓦特 (Watt) 机构、斯蒂芬森 (Stephenson) 机构对机构学的发展有巨大的推动作用。20 世纪中期诞生的斯图尔特 (Stewart)

六轴并联机构又成为当前机构学中研究的热点,六轴运动平台在航空航天领域及其他运动模拟系统中得到广泛应用,用其原理制作的六轴并联机床也在研制中。目前诞生的变胞机构也在航天领域中得到应用,相信在其他领域中也将会迅速普及。可见设计新机构是机构学领域中的迫切任务。

近期出现的新机构主要有:

(1) 斯图尔特六轴并联机构 1965年英国工程师斯图尔特发明了六轴并联机构,1978年澳大利亚的亨特(Hunt)教授提出了该机构可以作为并联机器人,并且发展了空间多环、多自由度机构的理论。斯图尔特六轴并联机构已经在航天模拟器、虚轴机床、微动机构等领域得到广泛应用。我国燕山大学、清华大学、哈尔滨工业大学、天津大学、北京邮电大学、北京理工大学、东北大学等的许多研究人员在该领域的研究中取得了很大进步。

(2) 柔顺机构 1986年,美国的普度大学对柔顺机构的概念做了开创性的研究工作。伪刚体模型和柔性分布法促进了柔顺机构的研究发展。柔顺机构的理论体系、物理实现方法、柔性构件大变形运动模型及柔顺机构结构的优化算法都是当前的研究重点。

(3) 冗余度机构 冗余度机构或超冗余度机构是随着机器人技术发展起来的新机构,在机器人领域具有广泛的用途。解决冗余度机构的运动逆解、设计准则、由于伪逆控制导致非保守解以及非保守解飘移的几何形态问题是当前冗余度机构研究中的热点。

(4) 受控机构 机构结构尺寸可以调节、输入运动可控制的机构常称受控机构。其研究内容除受控的连杆机构、凸轮机构、齿轮机构等许多受控机构的分析与综合之外,还要涉及控制方法。如利用控制手段调整凸轮的转速,可以使从动件实现预期的运动规律,从而避免了复杂的运动规律设计。目前受控五杆机构正在成为新的研究热点。

(5) 仿生机构 随着仿生理论的发展,机构学领域正在诞生一个新的分支——仿生机构学。模仿动物的运动机理、设计类似的机构并运用到生产实际中,正在引起机构学学术界的极大兴趣。每一种模拟自然界生物仿生的机构都是新机构,且正在各领域中发挥出独特的作用。两足步行机器人不仅能在平地上行走,而且能拐弯、上下楼梯,应用于水中的机器鱼正在成为水中探测、作战的新手段,模拟蛇蠕动机理的仿蛇机器人即将进入临床检查人体肠道、血管的疾病,也将成为新型的管道机器人。仿生的机器狗、机器猫、机器蟹也正在成为人们的新型宠物。目前,医疗领域和军事领域的仿生机构的研究是新的研究热点。

人们对新机构的研究一天也没有停止过。随着人们的创新意识和创新能力的提高,新机构还会层出不穷。有关机构学领域中的研究前沿问题很多,这里不再详细说明。

四、我国机构学研究中存在的问题

我国自从实行改革开放政策以后,加强了机构学领域的国际交流,目前已经涌现出一大批机构学学者,特别是青年学者,紧跟国际学术前沿,发表了很多有影响的学术论文,取得了一些具有国际水平的研究成果。在看到近期成就的同时,也应注意到存在的差距。主要体现在以下几个方面:

1) 机构学领域的研究经费不足,使得一些研究课题不能持久或缺少样机的试制经费和实验经费,研究过程经常半途中断。由于缺乏样机验证理论的正确性,整体上影响了机构的创新设计。

2) 当前,多学科知识的交叉与融合已经成为科学技术发展的巨大推动力。与机构学交

叉、渗透、融合的学科很多,如机构学与控制、信息、生物、材料、电子等大量看似无关的学科已经大量交叉和融合,我国缺少在这些边缘学科进行研究的机构学人员,影响了机构学在高科技领域的发展。

3) 我国在机构学领域中的科学研究过于分散,大量的重复工作在许多不同高校进行,互相之间的交流少,缺乏彼此之间的信息传递,影响了科学研究的水平。

4) 不善于总结前人的研究成果,经常出现与前人重复的研究工作。应注意在前人研究的基础上,深入研究,争取取得进一步的研究成果。

5) 在机构学领域内的标准化、模块化、系列化设计方面进展缓慢,缺乏具有自主知识产权的大型工程设计软件。

6) 机构学领域内缺乏必要的科学实验手段,不重视实验成果的重要性,影响了科研成果的推广。

7) 缺少机构创新的能力,因而出现的新颖机构少,原始创新的机构更少。因此,机构创新理论与方法的研究就显得更加必要了。

第二节 高等机构学的研究内容

高等机构学是在机械原理的基础上发展起来的,是机械原理课程内容的发展与深化。其研究内容仍然是围绕机构的组成与结构、机构的运动分析与综合以及机械系统动力学等。但在机构种类方面,已从平面低副机构扩展到空间低副机构,高副机构的基本理论远远超过机械原理内容。

高等机构学的主要内容如下:

机构的结构理论是高等机构学中的重要组成部分,也是对机构学的基础理论进行深入研究的内容,主要涉及空间闭链机构和开链机构的组成原理,机构的自由度计算,图论的基本知识,机构的型综合和数综合,该部分内容也是机构创新设计的重要途径。

机构的运动分析是研究机构工作性能的主要依据之一。求解机构运动构件的运动轨迹、位移、速度、加速度是运动分析的目的。本书中使用坐标变换原理和矩阵方程为数学工具,把平面机构和空间机构运动分析的数学方法统一起来,可节省建模时间。

低副机构的综合是机构学中的主体部分。刚体导引机构的综合、轨迹发生机构的综合、函数发生机构的综合构成了连杆机构综合的三大内容。按运动轨迹综合连杆机构是当代机构综合中发展较快的内容。仿生机构、机械手、机器人机构的综合与运动轨迹密切相关。本书中仍采用矩阵变换作数学工具,统一的工具可使运算过程更加熟练。采用数学方法进行机构综合时,其计算结果十分精确,但从机械设计的规范化可知,机构综合的尺寸必须经过公差设计等后续处理。因此,讨论综合尺寸的公差设计也列入本课程的内容。

高副机构的基本理论是现代机构学的重要内容之一。其中,瞬心线机构和共轭曲线机构是最典型的高副机构。本书对这两种机构分别进行介绍,讨论它们之间的异同点与设计方法。

仿生学促进了传统机构学的发展,研究仿生机构学已产生了巨大的效益。行走机器人、爬行机器人、柔性手腕等都是仿生机构学的研究成果。因此,本书对仿生机构也做了简单介绍。

机器人已经成为现代高科技的代表,因此,在不与其他课程重复的前提下,讨论串联机器人和并联机器人的工作原理和运动特性也是本书的内容之一。

由于现代机械的高速、高精度运转,机械平衡日益受到重视。考虑到构件弹性的机械系统动力学问题是不容忽视的。所以,本书也讨论了一些机构动力学中的基本问题。

为了深入学习机构的分析与综合方法,书中列举了机构学中的数学基础。这些基础知识为深入研究高等机构学提供了入门常识和系统的运算工具。

本书中对问题的说明与论述较少,基本上开门见山地直接涉及分析与综合方法,数学推导过程重方法,略去过程。希望在使用本书时参考所指定的教材书,这样可增加对该书内容的进一步理解与掌握。

现代机构学所涉及的新内容越来越多,本书不能全部包罗,但传统的经典机构学内容却能为深入研究机构学中的新知识奠定强有力的理论基础。

习 题

以小论文的形式(内容包括摘要、正文、参考文献),完成以下习题。

1. 综述机构学发展史。
2. 综述机构学的发展现状。
3. 综述机构创新设计的理论与方法。
4. 综述机构动力学的发展现状与展望。
5. 综述机构学与其他学科的交叉现状与展望。
6. 综述微机构的现状与应用。
7. 综述变胞机构的现状与应用。
8. 综述斯图尔特机构的应用现状及思考。
9. 综述仿生机构的发展现状与展望。
10. 综述新型机构的研究现状。
11. 综述连杆机构的研究现状与展望。

第二章 高等机构学的数学基础

几何法在机构学的发展过程中起了巨大的作用，随着计算机技术的发展与普及，解析方法在机构学的发展中逐渐成为了重要角色。数学方法、编程语言和大容量、高速度运算的计算机，促进了机构设计与分析方法的变革。本章就机构学中最常用的数学表达方法、数学运算方法进行简单介绍，主要内容有矢量及其运算、复数及其运算、坐标变换及其矩阵运算、非线性方程组的解法、常微分方程组的解法，机械运动的数学描述方法等。

第一节 概 述

随着机构学的发展和电子计算机应用的日益广泛，解析法在机构运动分析、动力分析和机构综合领域中的作用变得日益突出。解析法的根本内容是建立数学模型并求解的过程。现代机构学的内容，从头到尾都贯穿着数学。机构数学不仅引起机构学界的充分重视，数学界的专家学者也高度重视其发展动态。在机构学领域中常用到的数学内容如下：

1) 在机构结构的综合内容中，经常用到图论的基本知识和排列组合的基本概念。

2) 在机构的运动分析、受力分析、机构综合内容中，经常涉及矢量运算、矩阵运算、坐标变换等内容。或者说，矩阵变换与运算贯穿在机构学的全部过程中，因此，矩阵是机构数学中最基本、最主要的运算工具。本书将把矩阵运算作为主要的数学工具。

3) 在机构运动分析和机构综合过程中，经常遇到非线性方程组，如运动分析中机构的位移方程、机构综合过程中联立求解位移矩阵和定杆长约束方程的表达式，都是非线性方程组。因此，简便、快捷地求解非线性方程组，是机构学中必备的数学基本知识。线性方程组在机构学领域的应用也非常广泛，如速度方程、加速度方程都是线性方程组，但由于线性方程组的求解方法很成熟，所以不再介绍。

4) 在研究机构的动力学内容时，数值积分、常微分方程的数值解法也是最基本的数学工具。当然，在进行数学建模和求解过程中，还经常用到偏微分、积分、求导数、解析几何等常规数学运算，本章对此不予讨论。为了帮助学生更好地以数学运算为工具，以机构学的基本理论为依据，去研究和解决机械工程领域的设计与分析等问题，本书增设机构数学的基本知识。在高等机构学的各章内容中，将直接运用这些内容。

著名数学家笛卡儿 (R. Descartes) 在其著作《思维的法则》中曾说道：“一切问题可以化为数学问题，一切数学问题可以化为代数问题，一切代数问题可以化为方程组的求解问题”，说明了数学在工程中的重要性。

可以用来求解机构学问题的数学手段很多，本章仅选用了大部分机构学中所采用的数学工具，方便学生参阅其他参考书时节省研究数学方法的时间。

另外，由于有些数学表达式很长，书写极不方便，本章引入了简单表达方式，如用大写字母代表一个数学表达式或矩阵，希望读者逐渐适应。这也是数学中常用的表达方法。

第二节 矢量与其运算

机构学中的位置、位移、速度、加速度、角速度、角加速度、力、力矩等物理量，都可以用矢量表示。由于矢量可代表多个物理量，故本书中抽去其物理意义，通过引入相应的比例尺，把非长度的物理量转化为有向线段，再把空间的有向线段看作矢量，就产生了经常使用的几何矢量的概念。为了区别矢量和矢量的模，大写黑体字母表示矢量，对应的字母表示矢量的模。

一、两个矢量的点积

设矢量 $\mathbf{A} = (a_x \ a_y \ a_z)$, $\mathbf{B} = (b_x \ b_y \ b_z)$, 矢量 \mathbf{A} 与 \mathbf{B} 的点积为

$$\mathbf{A} \cdot \mathbf{B} = abc \cos \varphi = a_x b_x + a_y b_y + a_z b_z \quad (2-1)$$

矢量 \mathbf{A} 和 \mathbf{B} 也可以分别用矩阵表示：

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{pmatrix} = (a_x \ a_y \ a_z)^T, \quad \mathbf{B} = \begin{pmatrix} b_x \\ b_y \\ b_z \end{pmatrix} = (b_x \ b_y \ b_z)^T$$

为书写方便，有时把列阵改写为其转置矩阵表示。

由矩阵运算可知：

$$\mathbf{A}^T \mathbf{B} = \mathbf{B}^T \mathbf{A} = a_x b_x + a_y b_y + a_z b_z \quad (2-2)$$

比较式 (2-1) 和式 (2-2)，两矢量的点积可以用矩阵运算来表达：

$$\mathbf{A} \cdot \mathbf{B} = \mathbf{A}^T \mathbf{B} = \mathbf{B}^T \mathbf{A}$$

若 $\mathbf{A} = \mathbf{B}$, 则

$$\mathbf{A} \cdot \mathbf{B} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{A} = a_x^2 + a_y^2 + a_z^2$$

则

$$\mathbf{A}^T \mathbf{A} = a_x^2 + a_y^2 + a_z^2, \text{ 故有}$$

$$\mathbf{A} \cdot \mathbf{A} = \mathbf{A}^T \mathbf{A}$$

若令 $\mathbf{A} = \mathbf{A}_j - \mathbf{A}_0$, 且有

$$\mathbf{A}_j = \{a_{jx} \ a_{jy} \ a_{jz}\}, \quad \mathbf{A}_0 = \{a_{0x} \ a_{0y} \ a_{0z}\}$$

则

$$(\mathbf{A}_j - \mathbf{A}_0)^T (\mathbf{A}_j - \mathbf{A}_0) = (a_{jx} - a_{0x})^2 + (a_{jy} - a_{0y})^2 + (a_{jz} - a_{0z})^2 \quad (2-3)$$

方程 (2-3) 常在定杆长约束方程中使用。当空间的若干点 A_j 距某一点 A_0 的距离相等时， A_0 点为圆心，常称为圆心点。 A_j 点为圆周上的点，也称圆点。圆点到圆心点的距离处处相等。该方程在机构综合过程中有广泛的应用。

矢量还可表示为它的模与单位矢量的积，即

$$\mathbf{A} = a \hat{\mathbf{a}}$$

$\hat{\mathbf{a}}$ 为在矢轴上的单位矢量。

二、两个矢量的叉积

由高等数学可知，两矢量的叉积可用行列式表示。