

高等学校研究生教材

高等机构学

主编 张春林
主审 余跃庆



北京理工大学出版社

BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

高等计算机教育系列教材

高等计算机学

第二版

清华大学出版社

高等学校研究生教材

高等机构学

主 编 张春林
主 审 余跃庆

 北京理工大学出版社
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

内 容 摘 要

本书共分十一章,第一章主要介绍机构学的发展现状、动向及高等机构学研究的主要内容;第二章介绍了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;第九章、第十章、第十一章为机构动力学内容,分别讲述了含有弹性构件的连杆机构和凸轮机构的动力学,机构的平衡及机械系统动力学。

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。

版权专有 侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

高等机构学 / 张春林主编. —北京:北京理工大学出版社,
2005.3

高等学校研究生教材

ISBN 7-5640-0449-5

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

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 012197 号

出版发行 / 北京理工大学出版社

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 / 100081

电 话 / (010)68914775(办公室) 68944990(发行部)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

电子邮箱 / chiefedit@bitpress.com.cn

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 北京圣瑞伦印刷厂

开 本 / 787 毫米 × 1092 毫米 1/16

印 张 / 12.5

字 数 / 298 千字

版 次 / 2005 年 3 月第 1 版 2005 年 3 月第 1 次印刷

印 数 / 1-2000 册

责任校对 / 陈玉梅

定 价 / 20.00 元

责任印制 / 王 军

图书出现印装质量问题,本社负责调换

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,不但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。北京理工大学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。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,各高等工科学术学校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,各校在使用本教材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,特别强调向量法和矩阵法为主的解析方法,没有涉及到复数法、对偶数等其他方法。

参加本书编写的有:张春林(第一章,第二章,第三章,第四章,第六章,第九章,第十章),王晓力(第五章),付铁(第七章),苏伟(第八章),张晓玲(第十一章)。全书由张春林教授统稿,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,刘惠林老师在教材内容、体系、方法等许多方面给予了悉心指导,黄祖德老师绘制了大量图形,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。本教材是作者在原高等机构学讲义的基础上修订而成，难免带有讲义性质，加之作者水平有限，会存在误漏欠妥之处，竭诚欢迎读者批评指正。

张春林
2005年1月

目 录

第一章 绪论	(1)
§ 1-1 机构学的发展现状与动向	(1)
§ 1-2 高等机构学的研究内容	(8)
第二章 高等机构学的数学基础	(10)
§ 2-1 概述	(10)
§ 2-2 矢量与其运算	(11)
§ 2-3 常用坐标变换	(13)
§ 2-4 常用矩阵运算	(19)
§ 2-5 非线性方程组的数值解法	(26)
§ 2-6 常微分方程组的数值解法	(33)
第三章 机构的结构理论	(36)
§ 3-1 机构的组成理论	(36)
§ 3-2 机构的自由度	(41)
§ 3-3 平面机构的结构分析	(47)
§ 3-4 平面运动链的结构综合	(50)
§ 3-5 空间运动链的型综合	(56)
第四章 机构的运动分析	(60)
§ 4-1 概述	(60)
§ 4-2 平面机构的运动分析	(60)
§ 4-3 空间机构的运动分析	(63)
第五章 低副机构的运动综合	(73)
§ 5-1 概述	(73)
§ 5-2 平面刚体导引机构的运动综合	(75)
§ 5-3 空间刚体导引机构的运动综合	(83)
§ 5-4 轨迹发生机构的运动综合	(90)
§ 5-5 函数发生机构的运动综合	(95)
第六章 高副机构基础	(103)
§ 6-1 概述	(103)
§ 6-2 瞬心线及其性质	(104)
§ 6-3 瞬心线机构及其应用	(109)

§ 6-4	共轭曲线及其方程·····	(111)
§ 6-5	共轭曲线机构及其应用·····	(115)
第七章	机器人机构简介·····	(117)
§ 7-1	概述·····	(117)
§ 7-2	机器人机构运动学·····	(120)
§ 7-3	机器人机构静力学·····	(126)
§ 7-4	机器人机构动力学简介·····	(127)
第八章	仿生机构概述·····	(129)
§ 8-1	概述·····	(129)
§ 8-2	仿生机构的生物运动学基础·····	(131)
§ 8-3	仿生机构·····	(137)
第九章	平面机构的平衡·····	(146)
§ 9-1	概述·····	(146)
§ 9-2	平面机构的平衡原理·····	(147)
§ 9-3	平面机构惯性力的平衡·····	(151)
§ 9-4	平面机构惯性力矩的平衡·····	(155)
第十章	机构弹性动力学·····	(160)
§ 10-1	概述·····	(160)
§ 10-2	含有弹性构件的机构动力学分析方法·····	(160)
§ 10-3	凸轮机构弹性动力学·····	(163)
§ 10-4	连杆机构弹性动力学·····	(167)
§ 10-5	简单机械系统的弹性动力学·····	(180)
第十一章	机械系统动力学·····	(183)
§ 11-1	单自由度机械系统动力学·····	(183)
§ 11-2	多自由度机械系统动力学·····	(188)
参考文献	·····	(193)

第一章 绪 论

简述机构学的发展现状与动向,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。

§ 1-1 机构学的发展现状与动向

高等机构学是研究和探讨机构设计理论与设计方法的专门科学,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,原名为机械学学科。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,蒸汽机的应用繁荣了机械工业,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。但长期以来,人们只是凭匠人的身传言教来制造机械,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,基本上经历了三个飞跃阶段。

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,分析和设计的方法采用了作图的方法。在同期,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,随着计算机技术,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。日新月异的高科技的发展又促使机构学内容的飞速发展。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,简称:IFTToMM),每4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IFTToMM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研究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,主要涉及到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、运动分析与受力分析,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、微型机械以及各领域等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成功的运用,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。由于解析法的可编程性,且能通过各种接口与数控机床直接相连,实现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作了许多有益的工作。

(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,一些装卡、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,人类生活水平的提高,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与完善。我国台湾的机构学学者在机构创新与机构应用领域作了许多有益的工作,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走向高速化和高精度,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,促使了机构的动力分析与综合日益完善。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作了许多有益的工作。

(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作了许多有益的工作。

(7) 航空航天技术的发展带动了可调机构与走行机构的发展。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,然后走行。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,导致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音,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,同时为机构学的发展提供了良好的保障。

随着科学技术的发展,机器的含义也有发展。传统的机器定义为:机器是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。现代化的机器含义已突破上述定义。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,而是借助电磁效应、光电效应来实现。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,这导致了机构学不断向前发展。

1. 机构数学的研究

由于过去计算手段的落后,传统机构学中的机构分析与综合方法基本采用几何法,而且发展的很完善和成熟。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手段进入机构学,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5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微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、台湾成功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,但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求解;含有弹性构件的机构运动方程及求解;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。涉及到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,导致微小机械的研究与应用热点;机构学与遗传学的交叉,导致了用遗传算法进行机构创新设计;机构学与物理学的交叉,导致了利用电磁效应的微位移机构的研究与应用;机构学与医学、生物力学的交叉,导致了利用机构学的基本原理分析人体的结构、运动机理,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走行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领域、微型机械领域、机电一体化领域、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,称这类机构为广义机构。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授,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,不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. 微型机构

微型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应用前景。在微型机械中,微传动机构和微执行机构是主要的机械运动部分,其性能对微型机械的性能有重要影响。

由于尺度效应的影响,微型机构的组成、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,机械精度问题等许多尺度效应与物理特征都成为微型机械设计的关键问题。因此,微型机械的设计原理与设计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,可把微型机械分为两种。尺寸在毫米级的微机械称为微型机械(Mini-machine),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、微型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。

纳米级的微型机械,涉及到微电子学和纳米加工技术,其机械的组成原理、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,如把弹性梁、铰链、弹簧组合,利用变形协调来实现机构的多自由度运动。

微型机械是美国斯坦福大学于20世纪70年代年初开始研究的,并且研制出直径 $20\ \mu\text{m}$,长度 $150\ \mu\text{m}$ 的铰链连杆机构, $210\ \mu\text{m} \times 100\ \mu\text{m}$ 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、合肥工业大学等科技人员在微型驱动器和微型机器人领域取得重要进展。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 $50\ \mu\text{m} \times 50\ \mu\text{m} \times 50\ \mu\text{m}$,精度已达到 $0.1\ \mu\text{m}$ 。此外,在微电机、微型泵、微型传感器的研究也有很大进展。

由于微型机械是学科深度交叉的新领域,涉及到设计原理、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远落后于微电子技术的研究,因此,微型机械中的“机”已经成为微型机械发展的瓶颈。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。

在机构学领域的前沿问题主要表现在以下几个方面:

(1) 微型构件,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) 微型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偶合作用。

(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) 微型机构的运动精度研究与控制研究。

(6) 微型机构的动力分析及其非线性动力学仿真研究。

根据微型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球的需要,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可随工作要求自动变换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。Watt 机构、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 Stewart 六轴并联机构又成为当前机构学中研究热点,六轴运动平台在航空航天领域及其他运动模拟系统得到广泛应用,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

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) Stewart 六轴并联机构。1965 年英国工程师 Stewart 发明了六轴并联机构,1978 年澳大利亚的 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。Stewart 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作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。当前,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中研究热点。

(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,还要涉及到控制方法,例如,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,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,且正在各种领域中发挥出独特的作用。两足步行机器人不仅能在平地行走、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。

(6) 微机构。微机构是伴随微制造技术、精细制造技术、新材料技术而快速发展的一种崭新机构。在医疗领域起到了极大的作用。微小、精密的运动特征以及极小的尺寸特征,使得微机构的工作原理与传统机构有很大的区别。目前已经问世的微机构主要是一些只有转动运动的机构、曲柄摇杆机构、曲柄滑块机构等简单的机构。对微机构的运动机理、运动特性、动力特性、材料力学特性的研究还处于起步阶段。

(7) 变胞机构。变胞机构是随着航天技术的发展而提出的一种新机构,其设计方法还不成熟。但是已经引起很多学者的注意。

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、我国机构学研究中的存在问题

自从我国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) 机构学领域内的研究经费不足,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,研究成果经常半途中断。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,如机构学与控制学科、信息学科、生物学科、材料学科、电子学科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,注意机构创新理论与创新方法的研究就显得更加必要。

§ 1-2 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内容。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要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。走行机器人、爬行机器人、柔性手腕等都是仿生机构学的研究成果。因此,本书对仿生机构也作了简单介绍。

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教材的内容之一。

由于现代机械的高速、高精度运转,机械平衡日益受到重视。考虑到构件的弹性以及机械系统动力学是不容忽视的问题。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,基本上开门见山的直接涉及到分析与综合方法,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科书,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,本书中不能将其全部包罗,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。