

机械工程前沿论丛

现代机构学进展

第1卷

邹慧君 高峰 主编



高等教育出版社

TH111
74

2007

机械工程前沿论丛

现代机构学进展

第1卷

邹慧君 高峰 主编

主要作者(按文章先后顺序)

邹慧君 杨廷力 黄真

高峰 郭为忠 张宪民

戴建生 李泽湘 王知行

曹巨江 颜鸿森

高等教育出版社

内容简介

机构学又称机构和机器科学(简称机械原理),是机械设计及理论学科的重要分支,是机械工程设计、制造、运行、维修的重要基础。本书介绍了近20年来国内外机构学的发展,内容涵盖拓扑机构学、基于约束螺旋理论的并联机构自由度分析、并联机构设计与应用、混合驱动机构、柔顺机构分析与设计、变胞原理和变胞机构、并联机构综合的微分几何方法、平面机构的分析与综合、凸轮机构的分析与综合、基元式机构创新设计、机构系统设计及机电一体化系统概念设计等。全书共有十三章,分别由中国(大陆、香港、台湾)和英国的11位著名华人机构学专家撰写,具有较大的参考价值。

该书适用于机械工程学科的研究生教学,对从事机械产品创新设计的科研工作者及工程技术人员亦有重大参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

现代机构学进展. 第1卷 / 邹慧君, 高峰主编. —北京: 高等教育出版社, 2007. 4

ISBN 978 - 7 - 04 - 020431 - 5

I. 现… II. ①邹…②高… III. 机构学 - 进展 IV. TH112

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 018604 号

策划编辑 刘占伟 责任编辑 刘占伟 封面设计 刘晓翔
责任绘图 朱 静 版式设计 刘晓翔 责任校对 王 超
责任印制 毛斯璐

出版发行	高等教育出版社	购书热线	010 - 58581118
社 址	北京市西城区德外大街 4 号	免费咨询	800 - 810 - 0598
邮政编码	100011	网 址	http://www.hep.edu.cn
总 机	010 - 58581000		http://www.hep.com.cn
		网上订购	http://www.landaco.com
经 销	蓝色畅想图书发行有限公司		http://www.landaco.com.cn
印 刷	北京嘉实印刷有限公司	畅想教育	http://www.widedu.com
开 本	787×1092 1/16	版 次	2007 年 4 月第 1 版
印 张	37.75	印 次	2007 年 4 月第 1 次印刷
字 数	650 000	定 价	62.00 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

物料号 20431-00

序

在人类文明和社会发展的进程中,制造业始终是创造社会物质财富的主要源泉。在当今世界经济全球化的趋势下,各国的综合国力和竞争能力在很大程度上体现于制造业和先进制造技术。在制造技术中,产品的设计能力占有十分重要的位置。机械产品的核心是机构,因此现代机构学理论的研究是机械结构及其系统的基础,是现代机械产品发明创造的源泉,是提高国家制造业水平和国际竞争能力的关键。由于机构设计决定了产品的创新性,因此,现代机构学的研究对提高我国机械学的学术水平和机械产品的国际竞争能力有着十分重要的意义。

《现代机构学进展》一书聘请了中国(大陆、香港、台湾)和英国等多名华人机构学者参加撰写。他们从机构学发展史和研究现状的角度,在不同的研究方向上较系统地介绍了各位学者的研究成果。该书的出版是他们集体智慧和辛勤劳动的结晶,它对揭示现代机械的机构组成原理,总结新机构创造与应用方法,建立满足特定性能的现代机构分析与设计理论有着十分重要的意义,将为我国现代机械的设计、创新和发明提供较系统的基础理论和有效、实用的方法。

国家自然科学基金委员会工程与材料科学部将现代机构学研究作为制造领域重点的基础研究方向,并持续支持了我国现代机构学的研究。许多机构学者获得了国家自然科学基金的资助,产生了不少创新的理论和重要的应用成果,对我国机构学发展和自主产权的产品创新设计起到了积极的推动作用。《现代机构学进展》一书的出版也体现了这一点。

我相信《现代机构学进展》的编写和出版会对我国机械科学领域的研究人员、机械产品设计与工程技术人员、研究生和大学生有重要的参考价值,对推动我国现代机构学研究、提升我国现代机械装备和产品的自主创新能力将起到积极的作用。

国家自然科学基金委员会工程与材料科学部

机械与制造科学处

雷源忠

2006年6月于北京

前言

机构学又称机构和机器科学(简称机械原理,英文缩写为 MMS),是机械设计及理论学科的重要分支,是机械工程设计、制造、运行、维修的重要基础。

大家知道,18 世纪下半叶,由于资本主义兴起,在英国产生了世界第一次工业革命。推动了用机械化生产代替手工生产的过程,大大促进了纺织机械、缝纫机械、农业机械、蒸汽机、内燃机等各类机械的产生和应用。同时,也促进了机械工程学科的形成和发展。机构学在原来机械力学的基础上发展成为一门独立的学科。通过对机构的结构学、运动学和动力学系统、深入的研究,形成了早期机构学独立的体系和独特的研究内容。机构学对于上述各类机械的结构完善和性能提高,发挥了不可替代的作用。

传统的机构学将机构的概念局限于具有确定运动的刚性构件系统,而且将机构的运动副视为没有间隙的。构件为刚性、运动副中无间隙的假定,使研究机构的运动学和动力学时大为简化,有利于建立一套适合当时发展水平的学科体系。

机械化生产可以看作对人类双手巧妙的延伸,其实机械化主要依靠各种机构来加以实现。

随着科学技术的飞速发展,当今世界又在经历一场新的产业革命。计算机技术在机械产品上广泛采用,计算机已逐步作为信息处理和控制手段,使机构和机器的概念发生深刻的变化。

20 世纪 70 年代,日本科学家首先提出了机械电子学(mechatronics)新概念。他们认为:“机电一体化仍是在机械的主功能、动力功能、信息功能和控制功能上引进微电子技术,并将机械装置与电子装置用相关软件有机结合而构成的系统。”与此同时,美国机械工程师协会(简称 ASME)则认为:“它是由计算机信息网络协调与控制的,用于完成包括机械力、运动和能量流等多动力学任务的机械和(或)机电部件相互联系的系统。”由此可见,现代机械的主要特征是计算机协调和控制,这是“现代机械”与“传统机械”的区别所在。“现代机械”概念的形成是机构学发展的一个新的里程碑,也是现代机构学形成的重要标志。

机构学的现代化,使机构的概念有别于传统机构的概念,同时也使机构学内容在传统机构学基础上发展成现代机构学。从目前的情况来看,现代机构学主要体现在:

一是机构的广义化,即将构件和运动副广义化,把弹性构件、挠性构件、微小构件等概念引入机构之中;并对运动副广义化,除原有的运动副外还引入柔性铰链;同时,还对机构的组成广义化,把机构系统与驱动元件集成和融合起来,构成一种与传统机构不同的“有源”机构,扩展了机构的内涵。

二是机构的可控性,利用驱动元件的可控特性,使广义机构的输入按一定规律变化,相应地可以获得可控的机构输出运动,从而扩展了机构的应用范围。机构可控性的例子很多,如机器人机构、微机电系统、可编程机构、可控机构、混合驱动机构等。

三是将机构系统设计引入机构学的研究内容。这是机器概念设计的需要、机械产品创新设计的需要。机器概念设计的核心是确定机械运动方案,也就是机械系统方案的设计。通过机构系统设计理论、方法的研究,使机构学与产品创新设计紧密相连,同时可以大大巩固机构学在机械工程中的地位。

四是在机构分析和综合中采用了现代数学工具和计算机辅助设计技术,使机构分析和综合方法得到深入、广泛的发展,成为机构设计科学。由于机构分析和综合方法的深化,使一些复杂的工程设计问题得到解决,从而使机构学应用更为广泛。

机构学是机械工程的基础理论,具有很大的实用价值。目前一些工业发达的国家都十分重视机构学研究,应用机构学的理论和方法开发出不少具有自主知识产权的机械产品,增强了产品的市场竞争力。

现代机构学的形成和发展,对于建设创新型的机械工业将会发挥十分重要的作用。将会有利于推动我国从制造大国走向制造强国。机械产品性能的提高离不开机构学,机械产品发明专利的取得离不开机构学,机械产品规避国外专利同样离不开机构学。

全国机构学专业委员会自1982年成立以来已有24年。在全国机构学专业委员会组织和领导下,先后举办了十五届机构学学术研讨会,同时也推动了中国机构学的研究和发展。由于我国机构学专家、教授的努力,使中国机构学研究在较短时间内达到国际先进水平,成为少数几个定期、独立的开展机构学学术交流活动的国家之一。现在全国机构学专业委员会又多次提出中国机构学必须实现现代化、国际化和实用化。因此,我们希望本书的出版将会有利于这一目标的实现。

现代机构学的发展层出不穷,为了把握现代机构学发展的脉搏,为了掌握现代机构学进展的趋势,为了深入了解现代机构学前沿研究的基本内容,为了更好地完善现代机构学的理论和方法,我们组织海内外华人机构学专家、教授撰写了《现代机构学进展》一书,并根据学科发展情况准备延续出版。本书可作为广大从事机械工程设计、制造、运行、维修的科技人员,高等院校进行机械工程学习、研究、教学的本科生、研究生、教师,以及广大从事机械工程领导和管理人员的教材和参考书。

《现代机构学进展》第1卷,共十三章,包括第一章中国机构学20年主要研究成果和发展展望(由上海交通大学邹慧君教授编著),第二章现代机构拓扑结构学(由金陵石化公司杨廷力高工编著),第三章少自由度并联机器人机构学(由燕山大学黄真教授编著),第四章并联机构设计与应用(由上海交通大学高峰教授编著),第五章混合输入机构(由上海交通大学郭为忠副教授等编著),第六章柔顺机构的分析与设计(由华南理工大学张宪民教授编著),第七章变胞原理和变胞机构的发展(由英国伦敦大学戴建生教授编著),第八章并联机构综合的微分几何方法(由香港科技大学李泽湘教授等编著),第九章平面连杆机构的分析与综合(由哈尔滨工业大学王知行教授等编著),第十章现代凸轮机构分析与综合(由陕西科技大学曹巨江教授等编著),第十一章基元式机构创新设计(由台湾成功大学颜鸿森教授编著),第十二章机构系统设计(由上海交通大学邹慧君教授编著),第十三章机电一体化系统方案设计(由上海交通大学邹慧君教授编著)。

全书由邹慧君、高峰负责策划、主编和统稿。

本书编写方式采取滚动(连续、多卷)方式,这是一种新的尝试,在内容和编排上如有不妥当之处,欢迎广大读者不吝指正,并提出宝贵意见,使《现代机构学进展》在第2卷编写时考虑采纳。

邹慧君 高 峰

于上海交通大学 机械与动力工程学院

2006年6月

目 录

第一章 中国机构学 20 年主要研究成果和发展展望	3
1.1 引言	3
1.2 机械学的内涵及其在科技发展中的作用	3
1.2.1 机械学的内涵	3
1.2.2 机构学的发展	4
1.2.3 机构学是机械工程创新设计的基础	5
1.3 中国机构学 20 年主要研究成果	5
1.3.1 概述	5
1.3.2 连杆机构的分析与综合理论和方法研究逐步深入,成果显著	6
1.3.3 凸轮机构理论和应用研究初见成效	7
1.3.4 机构系统设计和机械产品概念设计成为机构学新的分支	8
1.3.5 深入开展机器人理论与技术研究,研究成果瞩目	9
1.3.6 可控机构分析和综合的研究日益深化	10
1.3.7 广泛深入地开展机构动力学研究	11
1.3.8 机构学的发展大大推动了机械原理课程的改革	12
1.4 机构学发展展望	13
1.4.1 现代机构类型综合和机构设计的新理论新方法研究	13
1.4.2 机构创新设计理论和方法的研究	13
1.4.3 机构系统概念设计理论、方法及计算机辅助实现的研究	14
1.4.4 微机构和微动机构的理论和应用研究	14

1.4.5 仿生机构的研究和应用	15
1.4.6 操作机器人机构和步行机机构的研究和开发	15
1.4.7 机构和机械系统动力学研究	15
1.4.8 传统的典型机构的设计理论和方法研究仍需深入	16
1.5 结论	16
参考文献	17

第二章 现代机构拓扑结构学

2.1 概述	25
2.1.1 现代机械系统	25
2.1.2 现代机构学	26
2.2 串联机构拓扑综合	27
2.2.1 串联机构的拓扑结构	27
2.2.2 机构的方位特征矩阵	30
2.2.3 串联机构方位特征方程	34
2.2.4 串联机构的拓扑综合	42
2.3 单回路机构的拓扑综合	45
2.3.1 单回路机构的过约束性及其分类	45
2.3.2 单回路机构的拓扑结构特征	46
2.3.3 单回路机构的拓扑综合	49
2.3.4 过约束回路的拓扑类型	49
2.4 并联机构的拓扑结构特征	51
2.4.1 并联机构的结构组成	51
2.4.2 并联机构方位特征方程	53
2.4.3 机构活动度	58
2.4.4 机构耦合度	66
2.4.5 基本运动链与变拓扑机构	69
2.4.6 活动度类型与拓扑控制解耦性	72
2.5 并联机构拓扑设计方法及其应用	75
2.5.1 拓扑设计方法	75

2.5.2	2T-2R 并联机构拓扑设计	77
2.6	小结	85
	参考文献	87
第三章	少自由度并联机器人机构学	93
3.1	机构的自由度分析	94
3.1.1	引言	94
3.1.2	关于螺旋理论	96
3.1.3	传统的 Grübler-Kutzbach 公式	98
3.1.4	修正的 Grübler-Kutzbach 公式	99
3.1.5	计算自由度的几条规则	101
3.1.6	实例分析	101
3.1.7	机构实现确定运动的条件	107
3.2	对称少自由度并联机构的“约束螺旋综合理论”和型综合	109
3.2.1	对称并联机构的综合原理	111
3.2.2	四自由度和五自由度机构的综合	113
3.3	少自由度并联机构的无限多的螺旋运动	118
3.3.1	末端运动螺旋系的所有轴线在空间的分布	120
3.3.2	主螺旋的节距	120
	参考文献	124
第四章	并联机构设计与应用	129
4.1	概述	129
4.2	并联机构研究现状	129
4.2.1	并联机构构型	129
4.2.2	并联机构性能评价指标	130
4.2.3	并联机构设计方法	132
4.2.4	并联机器人标定	133

4.2.5	并联机构的应用	135
4.3	并联机构的构型	145
4.3.1	运动副类型	145
4.3.2	运动支链类型	147
4.3.3	机器人末端运动基	151
4.3.4	机器人末端运动单元	152
4.3.5	运动单元的运算	153
4.3.6	G_F 集和机器人末端运动特征分类	154
4.3.7	基于运动基与 G_F 集的并联机构的构型	155
4.4	并联机器人性能评价指标	163
4.4.1	Jacobian 矩阵	164
4.4.2	机器人工作空间	164
4.4.3	机器人奇异位形	165
4.4.4	系统的解耦、各向同性和极值求解的数学基础	165
4.4.5	速度各向同性和速度极值指标	169
4.4.6	承载各向同性和承载能力极值指标	170
4.4.7	变形刚度各向同性和变形刚度极值指标	171
4.4.8	误差各向同性和误差极值指标	173
4.5	空间模型与并联机构设计	174
4.5.1	平面二自由度并联机器人的空间模型	174
4.5.2	平面三自由度并联机器人的空间模型	177
4.5.3	空间三自由度 DELTA 并联机器人的空间模型	179
4.5.4	并联结构六维力与力矩传感器设计	181
	参考文献	194

第五章 混合输入机构 201

5.1	可控机构的分类、应用及发展概况	202
5.1.1	精确实现给定运动的研究概况与可控机构的分类	202
5.1.2	可调机构	203
5.1.3	变转速输入机构	206

5.1.4	混合输入机构	206
5.2	混合输入机构的构型设计问题	210
5.2.1	混合驱动的特征	210
5.2.2	二自由度机构构型	210
5.2.3	平面连杆机构的结构学	212
5.3	混合输入机构的运动学问题	213
5.3.1	混合输入机构的可动性	213
5.3.2	混合输入机构的工作空间	217
5.3.3	混合输入机构的奇异性	218
5.3.4	混合输入机构的轨迹特性	221
5.3.5	混合输入机构的参数偏差影响与补偿	222
5.3.6	混合输入机构的运动学设计	223
5.4	混合输入机构的动力学问题	226
5.4.1	混合输入机构的动力学建模	226
5.4.2	混合输入机构的动平衡	229
5.4.3	混合输入机构的动力学综合	229
5.5	混合输入机构的运动规划问题	229
5.5.1	混合输入机构的逆运动学	230
5.5.2	混合输入机构的运动规划	230
5.6	混合输入机构的控制问题	231
5.6.1	混合输入机构的控制策略和控制方法	231
5.6.2	混合输入机构的控制系统设计	232
5.7	混合输入机构的实验研究与应用	234
5.7.1	混合输入机构的实验研究	234
5.7.2	混合输入机构的应用研究	236
5.8	混合输入机构的研究展望	238
	参考文献	239

第六章 柔顺机构的分析与设计 251

6.1	引言	251
6.2	柔顺机构分析的伪刚体模型法	252

6.2.1	梁的线弹性变形理论	252
6.2.2	梁的大变形分析	254
6.2.3	梁大变形分析的伪刚体模型	259
6.2.4	其他柔性铰链的特征参数确定	265
6.2.5	伪刚体模型法的应用实例	267
6.3	柔顺机构的拓扑优化设计方法	269
6.3.1	机构拓扑优化设计的基础结构法	269
6.3.2	均匀化方法	272
6.4	结束语	275
	参考文献	275

第七章 变胞原理和变胞机构的发展 279

7.1	引言	279
7.2	变胞机构的发展	280
7.3	变胞原理和变胞特性	281
7.4	变胞机构构态及演变的数学描述	283
7.5	变胞机构的类型	285
7.6	六面体抽象而出的空间变胞机构	286
7.7	空间变胞机构的构态变化	289
7.8	变胞灵巧手和手指运动平面	292
7.9	变胞机构的发展和应用	293
7.10	结论	294
	参考文献	294

第八章 并联机构综合的微分几何方法 299

8.1	引言	299
8.1.1	机构和机械系统科学的背景介绍	299
8.1.2	工业自动化操作机构设计的历史和发展现状	300

8.1.3 并联机构设计的文献综述	300
8.1.4 并联操作机构的微分几何综合法的产生背景	301
8.2 约束刚体运动的几何建模	302
8.2.1 特殊欧氏群 $SE(3)$ 及其 Lie 子群	303
8.2.2 $SE(3)$ 的子流形和商空间	308
8.3 串联机构运动学综合	313
8.3.1 Lie 子群运动链	315
8.3.2 子流形运动链	317
8.4 并联机构综合	322
8.4.1 串联式子流形并联机构运动链综合	325
8.4.2 闭环式子流形并联机构运动链综合	330
8.5 结论	333
参考文献	334

第九章 平面连杆机构的分析与综合 341

9.1 概述	341
9.2 平面连杆机构综合进展	344
9.2.1 平面四杆机构综合进展	344
9.2.2 平面多杆机构综合进展	346
9.3 几种典型的平面连杆机构综合方法简介	347
9.3.1 平面连杆机构尺度综合的精确点法	347
9.3.2 平面连杆机构尺度综合的优化法	351
9.3.3 平面连杆机构尺度综合的近似法	351
9.4 平面连杆机构研究展望	368
参考文献	368

第十章 现代凸轮机构分析与综合 377

10.1 凸轮机构发展概况、分类和应用	377
10.1.1 凸轮机构的发展概况	377

10.1.2	凸轮机构的分类	378
10.1.3	凸轮机构的应用	382
10.2	凸轮机构的运动规律	382
10.2.1	凸轮机构运动规律的概述	382
10.2.2	运动参数的量纲为一化	384
10.2.3	运动规律的特性值	385
10.2.4	简谐梯形运动规律	386
10.2.5	多项式运动规律	387
10.3	平面凸轮机构的运动学分析	387
10.3.1	复极矢量和平面啮合原理	388
10.3.2	基本平面凸轮机构的轮廓及其压力角、曲率半径的计算	392
10.4	空间凸轮机构的运动学分析	395
10.4.1	空间凸轮机构凸轮轮廓曲面的通用计算方法	395
10.4.2	空间凸轮机构凸轮轮廓曲面压力角与曲率分析	400
10.5	现代凸轮机构设计	405
10.5.1	几何尺寸及轮廓曲线的设计	405
10.5.2	凸轮机构的 CAD/CAM	409
10.5.3	凸轮机构的优化设计	411
10.5.4	凸轮机构的反求设计	414
	参考文献	421

第十一章 基元式机构创新设计 425

11.1	引言	425
11.2	设计方法	426
11.2.1	基本概念	426
11.2.2	几何限制	427
11.2.3	基本单元	432
11.2.4	创新设计方法	434
11.3	拓扑结构表示	435
11.3.1	接头码	436

11.3.2	图画表示法	437
11.3.3	矩阵表示法	439
11.4	结构分析	441
11.5	结构综合	446
11.5.1	综合步骤	446
11.5.2	综合模式	451
11.6	挠性传动机构	453
11.6.1	基本概念	453
11.6.2	结构分析	456
11.6.3	结构综合	458
11.7	差速机构	463
11.7.1	结构分析	463
11.7.2	结构综合	464
11.7.3	讨论	473
	参考文献	474

第十二章 机构系统设计 475

12.1	引言	475
12.2	机构系统设计的框架和过程	476
12.3	机械产品工作机理及其求解	477
12.3.1	机器的工作机理	477
12.3.2	机器工作机理的基本特征和分类	480
12.3.3	机器工作机理分析和求解方法	482
12.4	工艺动作过程—执行动作—执行机构的功能求解模型	484
12.5	工艺动作过程的构思和分解	486
12.5.1	工艺动作过程的构思	486
12.5.2	工艺动作过程的分解	487
12.5.3	动作组合的创新	490
12.6	执行机构选型和机构知识建模	493
12.6.1	机构的分类原则和方法	494

12.6.2	动作的描述和机构属性表达方式分析	496
12.6.3	机构知识库结构模型	498
12.6.4	计算机编码原则	499
12.6.5	知识存储	502
12.7	机构系统的组成原理	505
12.7.1	基于知识驱动的机构自动化选型与机构系统组成过程	505
12.7.2	机构串联组合方案生成的计算机流程	512
12.7.3	机构系统运动方案自动化设计方法	515
12.7.4	机构系统计算机辅助方案设计实例	517
12.8	机构系统的评价方法	521
12.8.1	分层二阶模糊综合评价模型	522
12.8.2	构造评价指标体系	525
12.8.3	计算机辅助的多算子分层指标二阶模糊综合评价系统	528
12.9	结束语	530
	参考文献	530

第十三章 机电一体化系统方案设计 539

13.1	概述	539
13.1.1	机电一体化系统的形成和发展	539
13.1.2	机电一体化系统的定义	540
13.1.3	机电一体化系统的研究状况	540
13.1.4	机电一体化系统的组成	542
13.1.5	机电一体化系统组成的新认识	543
13.2	机电一体化系统应用和特点	544
13.2.1	机电一体化系统的应用	544
13.2.2	机电一体化产品的主要特点	545
13.3	机电一体化系统方案设计过程模型及数学描述	546
13.3.1	机电一体化系统设计过程模型的建立	546
13.3.2	机电一体化系统设计过程的数学描述	547
13.4	广义执行机构子系统的类型和设计	550