

机械工程前沿著作系列 HEP
HEP Series in Mechanical Engineering Frontiers MEF

现代机构学理论与应用 研究进展

名誉主编: 高峰 戴建生
主编: 李瑞琴 郭为忠

Research Progress on Theory and
Application of Modern Mechanisms

高等教育出版社

机械工程前沿著作系列 HEP
HEP Series in Mechanical Engineering Frontiers MEF

现代机构学理论与应用 研究进展

Research Progress on Theory and
Application of Modern Mechanisms

名誉主编：高 峰 戴建生

主编：李瑞琴 郭为忠

XIANDAI JIGOUXUE
LILUN YU YINGYONG
YANJIU JINZHAN

高等教育出版社·北京

内容简介

现代机构学是机械工程学科的重要分支方向,是设计和开发各种现代机械装备与机电一体化产品的基础,是机械发明创造的源泉。本书是一部反映现代机构学理论与应用研究进展及学科前沿的学术著作。

全书分为四篇共 11 章。第一篇为引言篇,包括邹慧君先生的人生感怀以及莫逆之交的历史回想。第二篇为现代机构学研究的战略思考与学科前沿,其中中国机构学发展的战略思考包括中国机构学研究的认识与思考、中国机构学基础研究的机遇与挑战以及并联机器人、变胞机构学、一般机构学的研究进展与思考等;现代机构学学科前沿包括混联机构、齿轮机构、变胞机构、凸轮机构及复杂机构设计。第三篇为现代机械系统设计与创新,包括设计科学与现代机器的新思考、现代机械系统概念设计、机电一体化系统概念设计、可控机构学、滚动连杆机构、装备运行机构学。第四篇为现代机构学教育篇,包括机构与机器人学教学研究思考及创新教育。

本书适合高等院校从事机械工程设计、制造等的科研人员、教师、研究生及本科生参考,对于从事机械产品及机器人研发与生产的企业及研究院所的管理与技术人员亦有重要的参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

现代机构学理论与应用研究进展 / 李瑞琴, 郭为忠,
主编. -- 北京: 高等教育出版社, 2014. 10
ISBN 978-7-04-041092-1

I. ①现… II. ①李… ②郭 III. ①机构学—研究
IV. ①TH111

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 215408 号

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街4号
邮政编码 100120
印 刷 北京中科印刷有限公司
开 本 787mm×1092mm 1/16
印 张 30.5
字 数 580 千字
购书热线 010-58581118

咨询电话 400-810-0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.landraco.com>
<http://www.landraco.com.cn>
版 次 2014 年 10 月第 1 版
印 次 2014 年 10 月第 1 次印刷
定 价 99.00 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 41092-00

编著者 (按拼音顺序)

曹巨江	戴建生	丁希仑	杜如虚	高 峰
高 振	郭为忠	蓝兆辉	李瑞琴	李树军
梁庆华	林于一	刘辛军	卢毓莹	孟祥敦
任 升	王德伦	王国彪	吴益彰	谢存禧
颜鸿森	姚燕安	于靖军	张 丹	张武祥
邹慧君				

序 言

现代机构学是机械工程学科的重要分支之一,是设计和开发各种现代机械装备与机电一体化产品的基础,是机械发明创造的源泉。近年来,现代机构学领域快速发展,涌现出许多新技术、新成果,对装备制造业和现代机械工业的发展产生了根本性影响。

进入 21 世纪以来,中国机构学在国际学术舞台上独树一帜,成为我国机械工程领域在国际学术界享有盛誉的学科之一。在机构学发展的关键时刻,国家自然科学基金委员会于 2013 年 11 月在常州召开了“中国机构学发展中青年学者论坛”,讨论了国内外机构学的最新研究进展与前沿领域的发展趋势,分析了中国机构学在理论研究、应用研究等方面的优势及其与国外研究的差距。这一历史性的论坛对于中国机构学的理论研究、应用研究与机构学创新有着重要的推进作用。

在中国机构学的发展中,从参与和组织 1979 年美国著名机构学家 B. Roth 和 A. T. Yang 教授来访与讲座起,尤其是自 1992 年起至 2013 年长期主持中国机构学专业委员会的工作中,邹慧君老师为推动中国机构学的现代化、国际化、实用化做出了突出与无私的贡献,在机构学界享有盛誉。编者结合邹先生 80 华诞部分文章,常州会议部分特邀与专题报告以及反映现代机构学新进展的部分学术论文,组织编写了这部反映现代机构学学科发展与前沿的著作。该书从国家自然科学基金委员会、中国机构学基础研究等不同角度阐述了国内外现代机构学的最新研究成果,总结了现代机构学的优势及其与国外研究的差距,提出了现代机构学前沿领域的发展趋势,对现代机构学的研究有着重要的指导作用。

本书论述了现代机构学多个重要分支领域的新进展、新成就,包括现代机械系统概念设计、机电一体化系统概念设计、并联机构学、变胞机构学、可控机构学、滚动连杆机构、装备运行机构学等学术前沿的研究,展现了现代机构学在理论研究与应用研究方面的新思想、新概念、新技术与新方法,并同时探讨了现代机构学的教育与教改取得的进展以及所作的思考。

全书内容丰富、层次清晰、引人入胜,对科研人员和研究生了解和把握现代机构学新进展、重要分支以及创新教育都有重要的引领作用。

我衷心祝贺本书出版,相信本书将对我国现代机构学与机器人学的发展起到积极的推动作用。

林忠钦

中国工程院院士
上海交通大学常务副校长、教授

2014 年 10 月

前言

现代机构学是机械工程学科的重要分支方向,是设计和开发各种现代机械装备与机电一体化产品的基础,是机械发明创造的源泉。近年来,现代机构学领域快速发展,涌现出许多新理论、新技术、新成果,对装备制造业和现代机械工业的发展产生了根本性影响。

本书是一部反映现代机构学理论与应用研究进展及学科前沿的学术著作。本书出版适逢上海交通大学教授邹慧君先生 80 华诞,本书内容包括庆贺邹先生 80 华诞的部分文章、2013 年常州会议部分特邀与专题报告以及反映现代机构学新进展的部分学术论文,全书分为四篇共 11 章。

第一篇为引言篇,包括邹慧君先生的人生感怀及莫逆之交的历史回想。邹慧君先生是中国著名的机构学家,教书育人 60 载,桃李满天下,为推动中国机构学的现代化、国际化及实用化发挥了重要作用。

第二篇为现代机构学研究的战略思考与学科前沿,共 2 章。进入 21 世纪以来,中国机构学在国际学术舞台上独树一帜,成为我国机械工程领域在国际学术界享有盛誉的学科之一。在机构学发展的关键时刻,国家自然科学基金委员会于 2013 年 11 月在常州召开了“中国机构学发展中青年学者论坛”,讨论了国内外机构学的最新研究进展与前沿领域的发展趋势及我国的对策。这一历史性的论坛对于中国机构学的理论研究、应用研究及机构学的创新教育都有着重要的推进作用。

第 3 章为中国机构学发展的战略思考。结合常州会议部分特邀与专题报告,从国家自然科学基金委员会的角度、从中国机构学基础研究的角度等不同方面阐述了国内外现代机构学的最新研究成果,总结了机构学的优势及其与国外研究的差距,提出了现代机构学前沿领域的发展趋势。论述了并联机器人、变胞机构学、一般机构学的研究进展与思考。对现代机构学的研究有着重要的指导作用。

第 4 章体现现代机构学学科前沿的学术研究进展,分别对混联机构、齿轮机构、变胞机构、凸轮机构及复杂机构设计从学科前沿研究的角度进行了论述,对机构学的研究有着重要的引领作用。

第三篇为现代机械系统设计与创新,共 6 章,分别论述现代机构学的多个分支领域的新进展、新成就,展现了现代机构学在理论研究与应用研究方面的新思想、新

概念、新技术与新方法。

第 5 章, 设计科学与现代机器的新思考。论述了创新与设计科学的哲学内涵, 从设计的哲学高度认识广义机构与现代机器的新发展。

第 6 章, 现代机械系统概念设计。介绍了现代机械系统概念设计的基本构架、基本内涵与特点, 阐述了概念设计的过程模型和设计原理, 对多种概念设计的功能求解模型的新进展进行了论述。

第 7 章, 机电一体化系统概念设计。阐述了机电一体化系统的组成和基本特征、机电一体化系统原理方案设计方法、机电一体化系统运动方案的人机协同创新设计以及机电一体化系统方案评价方法的研究进展。

第 8 章, 可控机构学。可控机构是指机构中的某些运动参数或机构的输入运动可由微机实时控制或以人工方式进行控制, 以实现机构的柔性输出, 从而改善机构的运动特性和动力特性。本章阐述了可调机构、电子凸轮机构、变转速输入机构的研究进展、论述了混合驱动机构的设计原理及混合驱动链的识别方法, 讨论了混合驱动机构的研究进展与发展趋势。

第 9 章, 滚动连杆机构。滚动连杆机构是以滚动方式在地面上移动的新概念移动机构。本章介绍了整体闭链滚动机构的概念、滚动平面和空间连杆机构的基本形式, 以及组合式滚动连杆机构、概率滚动连杆机构和可缩放滚动连杆机构的设计理念, 讨论了滚动连杆机构的研究与应用定位。

第 10 章, 装备运行机构学。装备运行机构学是指通过抽象、等效等手段, 将装备的运行和控制转化为机构学问题, 再利用机构学知识为其提供建模、分析、仿真、评价等工具, 从而解决装备在运行和控制过程中面临的技术问题。本章介绍了装备运行机构学研究的基本问题, 通过两个具体案例说明了机构学在复杂装备运行中的作用及其对机构学研究的促进作用。

第四篇为现代机构学教育篇。研究生和本科生教育是高等院校培养机构学领域高层次人才、为创新强国战略提供人才保障的重要途径。第 11 章探讨了现代机构与机器人学的研究生教育、本科生教育规律, 教学研究取得的新进展, 以及对机构与机器人学领域的创新教育所作的思考。

本书对科研人员、研究生、本科生了解和把握现代机构学新进展、重要分支以及创新教育都有重要的引领作用。本书适合高等院校从事机械工程设计、制造等的科研人员、教师、研究生及本科生参考, 也适合从事机械产品及机器人研发与生产的企业及研究院所的管理与技术人员参考。相信本书将对我国现代机构学与机器人学的发展起到积极的推动作用。

参加本书编著的有: 邹慧君 (第 1、5 章); 戴建生 (第 2 章 2.1 节, 第 3 章 3.2 节); 颜鸿森 (第 2 章 2.2 节); 谢存禧 (第 2 章 2.3 节); 郭为忠 (第 2 章 2.4 节, 第 10

章,第11章11.2节);王国彪、刘辛军、于靖军(第3章3.1节);高峰、郭为忠、孟祥敦(第3章3.3节);丁希仑、张武祥(第3章3.4节);王德伦(第3章3.5节);张丹、高振(第4章4.1节);吴益彰、颜鸿森(第4章4.2节);李树军(第4章4.3节);曹巨江、任升(第4章4.4节);卢毓莹、杜如虚(第4章4.5节);梁庆华(第6章);李瑞琴(第7、8章,第11章11.1节);姚燕安(第9章);蓝兆辉(第11章11.3节);林于一(第11章11.4节)。

全书由李瑞琴统稿。感谢参与本书讨论与校对的研究生们。有益的讨论与建议对编著者的修改与论证有着很大的帮助。

感谢中国机构学专业委员会主任、上海交通大学高峰教授, ASME Fellow、国家千人计划专家戴建生教授对本书的大力支持。戴建生教授在本书编写过程中还提出了许多宝贵的修改意见,对本书的修改与完善起到很大作用,在此表示衷心的感谢。感谢中国工程院院士、上海交通大学常务副校长林忠钦教授对本书出版的支持与推荐,感谢上海交通大学党委书记姜斯宪先生对本书出版的支持。

在本书的编写过程中,得到了国家自然科学基金委员会、中国机械工程学会机械传动分会机构学专业委员会的大力支持,在此表示衷心的感谢。感谢国家自然科学基金项目(51275486、51275284、51175366)对本书出版的支持。感谢中北大学对本书出版的支持。感谢高等教育出版社对本书的出版的支持。

编著者

2014年10月

目 录

第一篇 引 言 篇

第 1 章 人生感怀	3
1.1 嘉中学生生活的回忆和感触	3
1.2 61 年交大生涯与感悟	5
1.3 1979 年首度打开我国机构学国际交流之门 ——记 B. Roth、A. T. Yang 两位国际著名学者来华讲学	14
第 2 章 莫逆之交的历史回想	19
2.1 中国现代机构学的倡导者与推动者	19
2.2 与大陆机构学学者交流的因缘回顾	24
2.3 老骥伏枥, 笔耕不息	35
2.4 影响我学术人生的良师益友	38

第二篇 现代机构学研究的战略思考与学科前沿

第 3 章 中国机构学发展的战略思考	51
3.1 中国机构学研究的认识与思考	51
3.2 中国机构学基础研究的机遇与挑战 ——纵观发展史, 横看欧美中, 探讨机遇点	76
3.3 并联机器人构型综合研究进展与思考	99
3.4 变胞机构学的研究进展与思考	116
3.5 一般机构学理论与应用研究的思考	135
第 4 章 现代机构学学科前沿	151
4.1 一种柔顺混联微动平台的性能建模及多目标优化	151

4.2	齿轮机构与电动机整合设计之发展概况与展望	161
4.3	面向工程应用的约束变胞机构综合与设计	180
4.4	现代凸轮机构理论及研究综述	191
4.5	复杂机构设计的立体显示	209

第三篇 现代机械系统设计与创新

第 5 章	设计科学与现代机器的新思考	223
5.1	创新与设计科学的哲学思考	223
5.2	剖析中华古机械, 启迪创新设计思想	241
5.3	广义机构的新认知	247
5.4	现代机器的新发展	255
第 6 章	现代机械系统概念设计	263
6.1	现代机械系统基本特征	263
6.2	现代机械系统概念设计的基本构架	264
6.3	概念设计的基本内涵与特点	269
6.4	概念设计的过程模型和设计原理	272
6.5	概念设计中常用的功能求解模型	277
第 7 章	机电一体化系统概念设计	285
7.1	机电一体化系统的组成和基本特征	285
7.2	机电一体化系统原理方案设计方法	289
7.3	机电一体化系统运动方案的人机协同设计	307
7.4	机电一体化系统方案评价方法研究进展	320
第 8 章	可控机构学	335
8.1	可调机构	335
8.2	电子凸轮机构	340
8.3	变输入机构	344
8.4	混合驱动机构	348
8.5	混合驱动链的识别方法	358
8.6	混合驱动机构的发展趋势	371

第 9 章 滚动连杆机构 373

9.1 引言 373

9.2 整体闭链滚动机构 374

9.3 滚动平面连杆机构 376

9.4 滚动空间连杆机构 380

9.5 组合式滚动连杆机构 394

9.6 概率滚动连杆机构 397

9.7 可缩放滚动连杆机构 399

9.8 滚动连杆机构的发展动态 402

第 10 章 装备运行机构学 405

10.1 发展背景 405

10.2 装备运行机构学的基本问题 405

10.3 案例 1: 盾构推进系统的分区问题 406

10.4 案例 2: 模块化运载装备的悬挂分组问题 415

第四篇 现代机构学教育篇

第 11 章 机构学的教学研究与思考 433

11.1 中国机构学研究生教育核心课程群的建设与思考 433

11.2 从机构学的发展看“机械原理”课程的教学和改革 445

11.3 机械原理课程双语教学的实践与思考 460

11.4 结合教学、科研、产品开发的案例讨论 465

第一篇

引言篇

第 1 章 人生感怀

1.1 嘉中学生生活的回忆和感触

1953 届嘉兴一中毕业生 (秋季班) 邹慧君

1934 年 10 月 8 日,我出生于浙江省嘉兴市香缘浜。父亲祖籍在青浦县章练塘镇。父母育有 4 男 2 女,我排行第二。后因长兄和一妹妹因病夭折,我在兄弟姐妹中成了长兄,另有两个弟弟,一个妹妹。

由于日寇入侵,浙江一带被日寇占领,嘉兴和青浦均沦为敌占区。少年时代国家时局动荡,人民生活艰苦,饱受殖民之苦,幼小心灵自发产生了“抵抗日本侵略者”的情绪。在与邻居小孩同游嘉兴苗圃 (现为嘉兴人民公园) 时,一发现日本小孩便一起“捉弄”他们,以此发泄抗日情绪。

在初中期间 (1947 年秋 — 1950 年秋),我先在嘉兴秀川中学念初一。由于秀川中学是私立中学,学费贵,第二年就转学到离家较远的县立初级中学了。随着年龄的增长,对学习的兴趣愈加浓厚,对学业追求也变得积极主动,成绩也大有长进。在初中二年级末,嘉兴解放了,我们家的生活才逐渐稳定下来。

1950 年秋,我考入当时的浙江省立嘉兴中学 (相当于省重点中学,现为嘉兴一中),并于 1953 年秋季毕业后考入上海交通大学。在交通大学毕业后留校任教至今。离开高中的母校——嘉兴一中已整整 61 年了。

回忆起 61 年前在嘉兴一中高中部 3 年的学习生活,还是感慨万千。61 年的时间并不短暂,会使我对 3 年中经历的详细情景逐渐模糊,但不少的人与事还是记忆犹新,感触颇多。在我人生的道路上,嘉兴一中的 3 年学习生活为我一生做人、做学问打下了坚实的基础。省立嘉兴中学的精神始终推动我向更高的人生目标奋斗和前进,使我在高考时以较优异的成绩考入交通大学,并在毕业后留校任教,通过不断努力成为一名学有专长的知名机械学专家。至今我还退而不休,发挥余热,承担重要的工作。

嘉兴一中已有 130 多年的光荣历史,具有良好的办学传统。老师治学严谨,学生勤奋好学,在国内中学界一直享有很高的声誉,培养出不少杰出的人才,成为国家的

栋梁和社会的精英。

1950 年我进入嘉兴一中时正值全国解放不久, 学校出现新的面貌。当时担任校长的是张印通先生, 他是一位著名的教育家, 为嘉兴一中的创建和发展作出了杰出的贡献, 至今仍给我们留下不可磨灭的印象, 特别是他为那些后来从事祖国教育事业的嘉兴一中的学生们树立了榜样。由于当时刚解放不久, 学校十分重视对学生的劳动教育, 每月定期组织我们参加近郊农村的农业劳动, 让我们参与收获苕麻的农活。要求我们将一大片成熟的高达 2~3 米的苕麻砍下来, 然后用两根小棒夹住苕麻杆用力挤压, 将茎皮剥离。皮可作为苕麻纤维的原料, 杆可以用作生火的燃料。这种农活既是一种力气活, 又是一种技术活。我们边干边学, 边学边干。劳动热情十分高涨, 虽然我们手上都起了血泡, 但收获很大。

在劳作过程中, 我们深深体会到劳动者的艰辛和辛勤劳动后苦尽甘来的喜悦心情, 无形中锻炼了我们对待学习和工作的态度, 即持之以恒、吃苦耐劳、不怕困难的奋发精神。这是在课堂上无法学到的精神。

3 年的高中学习生活, 老师们循循善诱, 严格要求, 从而引导我们进入知识的殿堂。同时, 还培养了我们广泛阅读的良好习惯。在此期间, 自学能力和动手能力都得到了较大的发展和提高, 为我后来在交通大学的学习和工作打下了良好的基础。

3 年的学习生活, 使我感受到嘉兴一中老师的优秀品格。他们都十分敬业, 至今不少老师在课堂上的身影和一举一动还深深地印在我的脑海里。例如, 物理老师胡春池先生, 他为了讲好学生难懂的简谐运动, 特意将吊挂在天花板上的电灯绕作圆周运动, 自己的脑袋跟着电灯泡一起运动, 并说此电灯在黑板上的投影运动就是简谐运动。另外为了说明惯性力, 他还形象地说: 人在河边洗脚, 为了去除脚上的水珠, 可用力甩腿, 利用水珠的惯性力甩干。他能将物理课中的难点讲得十分形象和生动, 使我受益匪浅、终生难忘。再如, 数学老师沈康身先生在课堂上注意讲透数学的基本原理, 让学生们活学活用, 使我们易于感到枯燥的数学也顿觉生动有趣。他还不时停顿几分钟, 讲几句与数学相关的有趣的话, 让我们去思考问题, 掌握数学的真谛。总之, 这些例子举不胜举。3 年的学习生活, 使我深切体会到, 嘉兴一中的老师采用了先进的教学方法, 传授了精炼的教学内容, 使学生们的学业大有长进。记得, 我们一个班 40 多人, 光是考入交通大学的就有十二三人之多, 在当年的高考中取得了引人注目的好成绩。

我们在嘉兴一中求学期间, 校址是在市中心的少年路。校区并不大, 但布局还是很紧凑、精致的。校园西面有一座小山, 树丛密布、花草丛生, 是我们读书、休息的好去处。同时, 值得一提的是校园图书馆, 它并不大, 在小土山脚下的一座平房内, 阅览室大约也只有 40 多平方米。我常光顾图书馆和阅览室, 去翻阅《科学画报》、《大众医学》等期刊, 借阅一些科幻小说。通过阅读, 我开阔了视野, 增长了知识, 养成了

广泛阅读的习惯。从此在知识的海洋中遨游,其乐无穷。

高中 3 年的学习生活对我一生有很大的影响,为我在上海交大 61 年的学习和工作打下了良好的基础。离开嘉兴一中之后,61 年中我一直没有离开过交大,通过多年的努力,我在做人、做学问方面有了很大的进步,成为国内著名的机械学专家、博士生导师、上海市首届高校教学名师;主编出版了 26 部著作和教材;发表各种学术论文 260 多篇;培养硕士生和博士生 63 名,博士后 2 名。

我深深感觉到,中学阶段的学习是十分重要的。记得在 20 世纪 80 年代,国内一家少年科技报来信,要求我给小朋友们谈谈在中学时代感受最深刻的几件事情,以激励学生。于是我就写了一篇体会寄给他们,并在报上发表了。我认为,人的一生中两种能力最重要:一是自学能力,在中学阶段学会自学将受用一生。人的一生需要不断地学习,以便充实自己,造就人生,活到老,学到老。二是动手能力,中国有句老话“心灵手巧”,其实还可以反过来说“手巧可以心灵”。中学时期的劳动课、劳作课只要组织得法,就可以起到这种作用。在动手过程中可以增长才智,提高悟性,使人更加聪明。

我们这一代人是如何参加高考的,也值得提一提。那时中学老师不会像现在的中学老师管那么多,倒是很信任我们,让我们自己去闯,在闯的过程中增长才干。当时嘉兴不设高考考场,我们各自坐上 3~4 小时的慢车去杭州应考,需自己料理吃和住,自己去了解考场的情况。这样做倒也培养了我们的自立和自理能力。现在高考时,考生受到学校、家长和社会的处处关爱,这对培养学生的自主能力有什么好处呢?61 年前中学生自己管理自己的能力还是很强的,学校食堂就是由学生会派人参与管理的,管得还是不错的。

校友会动员各个时期的校友写回忆录很有必要。130 多年的名校校友回忆录是活生生的校史,会有很大的教育意义。回忆录用生动地讲故事的方式来回忆母校发生的事例,可以回顾历史、展望未来、教育现在在校的师生,鼓励大家把学校办得更好。把这些回忆录汇集在一起,可以编写成册,也可以挂在学校的网站上进行展示。我想在校学生和离校校友都会十分欢迎的。

祝母校——嘉中越办越好!

1.2 61 年交大生涯与感悟

1958 届毕业生 邹慧君

我于 1953 年由浙江省立嘉兴中学(现为嘉兴一中)毕业考入交通大学(简称交大),如愿以偿地被录取到造船工程系船舶动力专业。经历 4 年半的学习于 1958 年 4