

机构与机器人 动力学研究

余跃庆 等 著



科学出版社

机构与机器人动力学研究

余跃庆 等著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书围绕现代机构及机器人动力学研究问题,以精选的 100 篇学术论文为主体,反映了机构及机器人动力学领域的研究成果和进展,主要包括:高速机构动力平衡、弹性机构动力学分析与综合、柔顺机构建模及动力学特性、冗余度柔性机器人动力学与控制、柔性机器人协调操作系统动力学分析与规划、柔性并联机器人动力学特性及其改善、欠驱动机器人动力学与控制共七章。其中,前三章主要讨论机构动力学,后四章则围绕机器人动力学展开,内容涉及机构及机器人动力学分析与综合的主要理论和方法。

本书可供从事机构及机器人动力学研究的本科生、研究生、教师及相关工程技术人员学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

机构与机器人动力学研究 / 余跃庆等著. —北京: 科学出版社, 2015.12
ISBN 978-7-03-046532-0

I. ①机… II. ①余… III. ①机器人—结构动力学—研究 IV. ①TP242
中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 285461 号

责任编辑: 毛莹 朱晓颖 张丽花 / 责任校对: 桂伟利 郭瑞芝

责任印制: 徐晓晨 / 封面设计: 迷底书装

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>

北京京华虎彩印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015 年 12 月第 一 版 开本: 889×1194 1/16

2015 年 12 月第一次印刷 印张: 51 1/2

字数: 1 559 000

定价: 298.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

机械科学与工程是一门古老的学科，在人类发展的历史上，尤其是在以蒸汽机和内燃机为代表的工业革命中起到了巨大作用，今天，以计算机、微电子及生物技术等为代表的新技术革命浪潮，为这门古老学科带来了新的生机，它还将在人类的科技进步和社会发展中扮演重要角色。然而，无论如何发展，机械系统的核心都是决定其结构、运动及动力特性的机构，因此，研究各种机构的组成以及运动和动力分析与综合理论及方法的机构学就成为机械科学中一门主要基础和前沿学科，特别是在机械产品的创新中具有不可替代的地位和作用。

机器人是现代社会中的高科技产物，它是集机械学、电子学、控制理论、信息学、传感技术等多个学科于一体的交叉学科，在社会进步和工业发展中发挥着越来越重要的作用，不断吸引着广大学者的热情关注。从主体结构上讲，机器人是机械和控制两大部分的组合体，其控制部分起着指挥和灵魂作用，而其本体则是机械装置，最终是由它来完成机器人的动作，实现机器人的功能的，因此，机械的性能是影响和决定机器人整体工作品质的重要因素。这些机械装置的核心还是机构，串联机器人的机械结构就是开链机构，并联机器人的机械结构则是闭链机构，所以，机器人机构学成为机器人学和机构学研究领域的重要分支。本书将一般机构与机器人机构放到一起讨论，主要研究两者之间共性的机构学问题。

机构的结构学、运动学和动力学是机构学的三大组成部分，目前国内外在机构及机器人领域的研究大多集中在结构学及运动学方面，主要表现为内容多、成果多、创新多，因而引起的关注也多，而动力学方面则相对较少，从内容到成果再到创新都较少，所以得到的关注也就少。然而，从机构学的学科发展来讲，这是不平衡的。结构学、运动学是机构学的基础和前提，而动力学则是在此基础上的综合与提高，三方面应该平衡发展。结构学及运动学研究解决的是机构及机器人的功能问题，是能不能的问题；而动力学研究解决的是其性能问题，是好不好的问题。机械科学发展到现在，机械产品的功能问题大多已经解决，而性能问题则远未完成，而且永无止境。从一个完整机械产品的角度讲，在解决了功能这一基本要求之后，其性能如何是该产品是否具有竞争力的决定因素，国内产品的弱势往往就在于此。实际产品的性能高低与动力学关系更加紧密，尤其在以高速、精密、低耗等为代表的现代机械中，其动态性能是十分重要的指标，在考虑变形、间隙、误差等因素的现代机构及机器人中，如弹性机构、柔性机器人、柔顺机构等，其动力学问题更加突出，此时已没有单纯的机构运动学问题，而是反映其真实运动和受力特性的机构动力学问题。因此，研究和解决动力学问题是提高和改善现代机构和机器人工作性能和品质的关键，这一点应该引起机构学者的充分重视。

现代机构及机器人的动力学问题与一般机械动力学、机械振动、转子动力学、机床动力学等有较大差别，主要体现为机构整体的宏观大范围高速运动与构件局部的微观小范围高频振动这两方面的高度非线性耦合，而非单一（高维非线性）运动，有关的理论和方法还不够成熟，很难直接应用现有软件进行分析和设计，因此，研究难度较大，必须从深入探讨机构及机器人内在本质特征入手，建立起能够反映其动力学特性的理论和方法。

机构及机器人动力学研究包括分析和综合（设计）两方面，分析方面大多是基于分析力学的基本原理和方法展开的，机构学本身的创新不很明显，而综合（设计）则能体现机构学的特色和创新，但目前此方面研究还远远不够，在理论和方法上都有较大发展空间。另外，动力学与控制学具有天然的联系，这使机构学研究更加广泛和深入，开展机构动力学研究是机械系统向智能化发展的必经之路。因此，现代机构及机器人的动力学研究是十分必要且具有重要意义的，还有很多内容等待人们去研究和探索，应该认识到，只有从结构学、运动学和动力学三方面同时入手，才能全面改善和

提高现代机构及机器人的功能和性能。

高速、精密、轻质、智能化等是现代机械的重要标志和发展趋势，由此引发的机构动力平衡、弹性机构学、柔顺机构学，以及具有冗余和欠驱动特性的串联、并联及协调操作形式的柔性机器人动力学与控制，成为机构及机器人动力学研究领域的前沿课题和研究方向，他们的共同特征主要集中在机构及机器人的惯性作用和柔性变形这两个明显的动力学特性指标上，本书就是围绕这一研究主线来阐述其研究和发展过程的。

追溯机械工程近三百年的发展历史，机械运转速度的不断提高是最为突出的特征，它是推动机构动力学发展的首要因素。随着机器速度的提高，构件的惯性作用明显增加，其作用已远远超过机械的外载，由此产生的振动、噪声等问题严重影响机器的工作性能和使用寿命。因此，如何减少或降低这种惯性作用就成为高速机械必须解决的重要问题，机构动力平衡就是为解决这一问题而开展的研究，它是机构学，特别是机构动力学研究领域的重要前沿课题之一。

机器转速的提高不仅带来惯性的增加，同时也使得机械构件不能再保持其刚性特征，因而产生了一定变形，另外，现代机械设计的轻型化要求也使得人们开始采用弹性或柔性构件来进行机械设计，因此，考虑构件变形特征的弹性机构学就应运而生，将人们从传统刚性机构学的研究提升到柔性机构学的新高度。

传统机械系统或机构都是由刚性构件靠运动副连接而成的，这在高速、精密、微型等高性能的要求下就暴露出一些不可避免的问题，如由运动副带来的间隙、摩擦、磨损及润滑，由机械结构决定的加工、安装、误差等，这些问题使得机器的精度降低、寿命减少、成本增加，因而，其工作性能不能满足现代科技发展对机械装备的要求，柔顺机构（Compliant Mechanisms）的出现则从机构设计这一角度为根本解决这些问题提供了新的、更彻底的方法，它在降低成本和提高性能这两大方面比传统刚性机构具有明显优势，给机械科学和工程带来了革命性的冲击和变化，是现代机构学中一个新的分支。

与机构学的发展历程相似，对于高速工作的机器人，其关节柔性（或弹性）变形已经不可忽略，同时，随着机械产品设计轻型化的发展，机器人杆件（连杆）的柔性变形也更加明显，因此，机器人构件（关节和连杆）的柔性变形成为影响机器人性能的重要因素，不能忽略。另一方面，与传统刚性机器人相比，这种具有柔性部件的柔性机器人还有很多优点，如驱动器小、能量消耗低、操作速度快、结构紧密、有较高的载荷质量比等，柔性机器人的这些特性，引起了广大学者的密切关注。因此，由传统刚性部件组成的机器人已经不能满足现代社会的要求，与之相应的机器人分析方法和设计技术也面临严峻挑战，柔性机器人就成为机器人领域的研究新方向。

冗余度机器人由于具有更多的自由度，因而具有灵活、多变的特性，常用于解决如避障、奇异等刚性机器人的运动学问题，同时也可以用来解决柔性机器人的柔性变形和弹性振动等动力学问题，因此，将柔性机器人与冗余度机器人有机结合起来，就构成了冗余度柔性机器人这一研究新课题。

单个串联机器人，即使是冗余度机器人，由于其刚度较小，因此在减小柔性变形和弹性振动以及提高机器人性能方面都有一定局限性，如果采取多个柔性机器人协调操作的方式，可从本质上改善这种状况。另一方面，多机器人的协调操作系统中也存在并且必须要考虑其构件中的柔性变形问题，因此，开展柔性机器人协调操作系统的研究也成为机器人领域的一个新方向。

解决串联机器人刚度低的另一个有效方法是采用并联机构的原理构成并联机器人，而并联机器人的一个重要特征就是运转速度高，要实现高精度，其关节及杆件中的柔性变形也同串联机器人一样不可忽略，因此，柔性并联机器人动力学也成为机器人及机构动力学领域的另一个新的研究方向。

在高速、精密、轻质的现代机器人设计中，为了有效减轻机器人的重量，除了采用较轻的柔性构件外，更有效的方法是直接减少驱动电机的数量，使某些关节成为欠驱动的自由关节（或被动关节），因此，研究既有柔性构件又有自由关节的欠驱动柔性机器人就自然发展成为一个重要的交叉新方向。

以上这些研究方向，都是围绕机构及机器人的惯性作用和柔性变形这两个动力学指标展开的，

从不同角度研究了现代机构及机器人的动力学问题,用不同方法逐步改善和提高了机构及机器人的性能,这是在机构及机器人动力学的研究过程中,随着新问题的不断出现和研究的不断深入而逐渐自然形成的,充分体现了学术研究和创新过程,本书就沿着这个思路和发展过程循序渐进地阐述机构与机器人动力学研究的主要内容。

本书的主要研究思路和方法是,按照从动力学分析到综合的研究及发展顺序展开,以认识和改善高速及柔性机构及机器人动力学特性为主线,从机构学角度充分利用构件的惯性及柔性等机械特性,同时与控制方法相结合,从机构及机器人的内部结构和外部控制两方面入手,综合改善和提高机构和机器人的整体动力学性能和工作品质,因此,形成了较为独特的学术思想和比较完整的研究体系,构成了机构及机器人动力学专题。尽管如此,本书并不能涵盖机构及机器人动力学领域的全部内容和研究方向,而只是其中的一部分。

本书作者长期在机构与机器人动力学领域进行了系统和深入的研究,取得了一系列成果,在国内外产生了一定影响。本书总结了作者 1985~2015 年这 30 年间的研究成果,从国内外发表的 300 多篇论文中精选出了 100 篇具有代表性的论文,按照研究过程的时间先后顺序和研究问题的不断深入依次给出,包括机构及机器人动力学分析与综合的主要理论和方法,各部分之间密切相关、互为依托,从不同方面研究了机构及机器人动力学的核心问题,形成了一套比较完整的理论和方法,具有一定特色和学术价值。

本书在表面形式上像是一本论文选集,而在实际内容上却是一本独辟蹊径的学术专著,但又与目前出版的众多专著大不相同,目的是以最原始的方式直接反映出研究成果的最初形式,使读者能更好地学习和体会其研究思路、方法和过程,具有学术参考价值。同时,本书与出版的一般论文集也有所不同,它不是所有论文的简单罗列,而是按照不同专题精选有代表性论文,分章节组织在一起,每章前都有引言,首先概述问题的提出,国内外发展状况及存在问题,然后重点阐述本章研究的思路和特色,接着简述本章内容安排和各篇论文的主要内容,最后是对后续研究工作及发展趋势的一些思考。因此,通过阅读本书,读者能够比较系统地了解 and 掌握本书作者的研究思路和方法体系,可以达到阅读专著的效果。

为了让读者直接了解研究成果的原始状态,本书中的论文基本都是按照当时发表的形式给出的,虽然现在看来其中可能存在一些问题,有些图表及曲线的质量也不太高,但在本书编辑时除了个别文字以外基本没有修改,这样真实地体现了当时的研究状况,因为在实际研究过程中总会出现各种各样的问题。另外,每篇论文后面都给出了该文的原始出版信息,既便于读者查找,同时也能从侧面表现出该研究成果在国内外不同级别的专业期刊及学术会议中的影响和水平。论文既有中文论文也有英文论文,并没有完全分开,而是按内容的相关性交叉排列的,其中,英文论文约占 1/3,直接提供原文,没有翻译,这可能更有利于读者直接了解研究内容的原始描述,这对于相关专业的研究人员来说应该是有一定帮助的。另外,由于每篇论文都要保证其独立性、系统性和完整性,因此,一些密切相关的文章中可能存在一些重复之处,如在基本原理、方程及实验条件等方面,但这些都为了引出各篇文章的主要研究内容而做的必要衔接和铺垫,而在具体研究结果等主要内容上则会显示出各自特点和明显差异。

本书前两章内容是作者在攻读硕士及博士研究生期间,在北京工业大学白师贤教授指导下完成的论文,这些论文本应该是与导师联合发表的,但在发表时导师却将自己的名字划去了,这充分表现出白先生不图名利、甘于奉献的崇高境界和高尚品格,但作为学生,虽然有些论文在致谢中进行了说明,但总感到这是无法弥补的终生遗憾和愧疚之情。本书出版之际,正值白老师九十华诞,学生谨向导师长期的精心培育和悉心指导表示最真诚的谢意和深深的歉意,恭祝老师健康长寿,幸福快乐!

本书后五章内容是作者与合作的博士后以及指导的博士和硕士研究生共同完成的论文,作者主要起到启发引导和总体规划的作用,具体研究工作和论文写作都是由学生及合作者完成的,这里,向与本人合作过的博士后、博士及硕士研究生,如宋轶民、蔡胜利、张绪平、窦建武、张成新、刘

迎春、陈炜、杜兆才、刘庆波、王雯静、刘善增、田浩、杨继运、钟正虎、毛立军、岳瑛、王瑞茂、梁浩、林晶、蒋斌、苏祥、陈知泰、马春荣、方道星、周刚、张学涛、王华伟、成立峰、张志丹、冯忠磊、任志全、刘一宏、李茜、徐齐平、周鹏、张雨、梁浩及朱舜昆等表示衷心的感谢。此外，在本书的排版及校对过程中得到了吕强及毛冬冬等研究生的帮助，在此一并表示感谢。

作者自 1978 年开始一直在北京工业大学学习和工作，至今已有 38 年，我从一个本科大学生成长为一名高校教师和科研工作者，在人才培养、科学研究和学科建设方面做了一些工作，得到学校各级领导、老师和同事的支持和帮助，尤其是前 5~20 年，他们在我最需要帮助的起步和成长阶段所给予我的热情鼓励和精心培养，让我终生难忘。本书中介绍的研究成果都是在北京工业大学完成的，本书的出版正是对此工作的一个总结，以此表示对母校的一片深情和谢意。

另外，在本书出版的时候，作者还要感谢多年来在我学习和工作中给予我热情支持和大力帮助的前辈和同行，如：张启先院士、唐锡宽教授、曹唯庆教授、梁崇高教授、邹慧君教授、谢存禧教授、黄真教授、杨挺力教授、张策教授、申永胜教授、张春林教授、翁海珊教授、廖启征教授、高峰教授、张宪民教授、王德伦教授、蓝兆辉教授、谢进教授等，在此一并表示最真挚的谢意。

本书所涉及的研究工作得到了国家自然科学基金、博士点基金、留学回国人员基金、教育部优秀年轻教师基金、北京市自然科学基金、北京市教委科技发展计划、北京市科技新星计划、北京市拔尖创新人才计划、北京市重点学科建设、北京市学术创新团队建设等项目的大力支持，在此一并表示衷心的感谢。

在本书出版过程中，得到科学出版社毛莹编辑的热情帮助，在此表示感谢。

由于作者水平和时间有限，书中不可避免会有疏漏和不足之处，敬请有关专家、学者和读者批评指正。

余跃庆

2015 年 9 月

于北京工业大学

目 录

第 1 章 高速机构动力平衡	1
引言	1
1.1 空间机构	4
§1 Complete Shaking Force and Shaking Moment Balancing of the RSCR Spatial Mechanism	4
§2 Research on Complete Shaking Force and Shaking Moment Balancing of Spatial Linkages	11
§3 Complete Shaking Force and Shaking Moment Balancing of Spatial Irregular Force Transmission Mechanisms Using Additional Links	28
§4 Optimum Shaking Force and Shaking Moment Balancing of the RSS'R Spatial Linkage	38
1.2 弹性机构	46
§5 Dynamic Response to Mass Reduction in Flexible Mechanisms	46
§6 On the Contribution of Kineto-Elastodynamic Inertia to Dynamic Behaviour of Flexible Mechanisms	53
§7 弹性机构动力平衡的有效新方法	60
§8 附加扭簧进行机构弹性动力平衡的理论和实验研究	66
§9 Active Balancing of a Flexible Linkage with Redundant Drives	72
§10 Analytical and Experimental Study on the Dynamic Balancing of Flexible Mechanisms	81
第 2 章 弹性机构动力学分析与综合	91
引言	91
2.1 特性分析	93
§11 连杆机构运动弹性动力分析的一种高效新方法	93
§12 弹性空间机构动态响应分析的理论与实验研究	99
§13 New Investigation on Critical Running Speeds of a High-Speed Elastic Space Mechanism	104
§14 The Effect of Link Form on the Dynamic Response of Flexible Mechanisms	117
§15 The Effect of Cross-Sectional Parameters on the Dynamics of Elastic Mechanisms	124
§16 弹性连杆机构参量振动频率特性分析	134
2.2 最优设计	140
§17 Optimum Design of the RSS'R Flexible Space Mechanism via Multiplier Techniques	140
§18 Active Design of a Flexible Space Mechanism with Optimal Characteristics	146
第 3 章 柔顺机构建模及动力学特性	155
引言	155
3.1 伪刚体模型	158
§19 Dynamic Modeling of Compliant Mechanisms Based on the Pseudo-Rigid-Body Model	158
§20 New Approach to the Dynamic Modeling of Compliant Mechanisms	170

§21	A Pseudo-Rigid-Body 2R Model of Flexural Beam in Compliant Mechanisms	184
§22	复合载荷作用下柔顺机构的 PR 伪刚体新模型	202
§23	A Novel Model of Large Deflection Beams with Combined end Loads in Compliant Mechanisms	209
§24	基于 2R 伪刚体模型的柔顺机构动力学建模及特性分析	225
§25	柔顺机构 PR 伪刚体动力学建模与特性分析	236
3.2	动力学特性	242
§26	柔顺机构柔顺关节的动应力分析	242
§27	Analysis of Frequency Characteristics of Compliant Mechanisms	249
§28	椭圆形柔性铰链的频率特性分析	257
§29	含柔性铰链柔顺机构的驱动性能分析	261
§30	基于有限元法的柔顺机构动力学分析	267
§31	近似柔顺常力机构的研制及其实验研究	276
§32	柔顺关节并联机器人设计与实验	281
§33	并联机器人开槽薄壁柔顺关节设计与实验	287
§34	柔顺关节并联机器人动力学建模与控制研究	296
第 4 章	冗余度柔性机器人动力学与控制	304
	引言	304
4.1	建模与分析	306
§35	Flexile Rotor Beam Element for the Manipulators with Joint and Link Flexibility	306
§36	A New Spatial Rotor Beam Element for Modeling Spatial Manipulators with Joint and Link Flexibility	317
§37	空间柔性机器人建模的一种新方法	330
§38	基于 ADAMS 及 ANSYS 的柔性机器人动力学仿真系统	336
§39	多杆柔性机器人杆与关节耦合效应及优化设计	342
§40	具有柔性关节和柔性杆的空间机器人频率特性	349
4.2	规划与控制	354
§41	优化初始位形减轻具有柔性杆和关节的冗余度机器人振动变形	354
§42	两冗余度柔性机器人最优规划	359
§43	提高冗余度柔性机器人载荷质量比的有效新方法	364
§44	Motion Control of Flexible Robot Manipulators via Optimizing Redundant Configurations	370
§45	提高柔性冗余度机器人动态特性的最小变形能法	378
§46	基于可控性和全局性的空间柔性机器人驱动力矩自运动规划策略	383
§47	Optimization of Structural Parameters for Spatial Flexible Redundant Manipulators with Maximum Ratio of Load to Mass	389
§48	Active Control of Elastodynamic Response of Flexible Redundant Robot Manipulators	398
§49	柔性冗余度机器人残余振动主动控制	405
§50	基于机敏材料的冗余度柔性机器人弹性动力响应最优控制	412
§51	基于模糊 PID 融合的柔性机械臂振动压电主动控制研究	418
第 5 章	柔性机器人协调操作系统动力学分析与规划	426
	引言	426

5.1 建模仿真	428
§52 两柔性机器人协调操作开环单自由度刚性负载的动力学建模与仿真	428
§53 基于目标运动规划的柔性机器人协调操作闭链刚性负载的动力学模型	436
§54 柔性机器人的协调操作及其逆动力学控制算法	443
§55 A Novel Method for Dynamic Modeling of Two Flexible Manipulators Grasping a Flexible Payload	450
§56 基于模态的柔性机器人协调操作系统的动力学分析	457
§57 具有关节柔性和臂柔性的机器人操作受限物体的动力学建模	462
§58 Dynamic Analysis of Planar Cooperative Manipulators with Link Flexibility	467
§59 Dynamic Modelling for Cooperation System of Flexible Robots Manipulating a Constrained Object	479
5.2 特性分析	491
§60 柔性机器人协调操作的力可操作性研究	491
§61 柔性臂机器人协调操作的承载能力	498
§62 机器人协调操作刚性负载效率的研究	504
§63 柔性机器人协调操作系统动力特性分析	510
§64 Elastic Deformation Degree Index and Elastic Distortional Strain Energy Index of Flexible Robot	517
5.3 运动及动力规划	524
§65 两 4R 冗余度柔性机器人协调操作的运动规划	524
§66 冗余度柔性协调操作机器人的动力规划	531
§67 柔性机器人协调操作的冗余驱动	540
§68 机械臂协调操作动力性能的改进	546
§69 柔性机器人协调操作系统运动补偿规划法	550
§70 柔性机器人协调操作的无内力载荷分配	556
第 6 章 柔性并联机器人动力学特性及其改善	561
引言	561
6.1 建模与仿真	563
§71 弹性平面并联机器人的 KED 分析	563
§72 空间弹性并联机器人 KED 建模	567
§73 Dynamic Modeling and Inverse Dynamic Analysis of Flexible Parallel Robots	572
§74 基于 Virtual Lab 的柔性并联机器人仿真平台	585
§75 3-RRR 并联柔性机器人的动力学分析	591
§76 Dynamic Modeling and Analysis of a 3-RRS Parallel Manipulator with Flexible Links	597
6.2 特性分析与改善	607
§77 弹性并联机器人输入运动规划	607
§78 冗余驱动消减弹性并联机器人振动的研究	612
§79 Analysis of the Dynamic Stress of Planar Flexible-Links Parallel Robots	616
§80 柔性机器人的动态应力计算及疲劳特性分析	627
§81 柔性并联机器人频率特征分析	633
§82 含弹性杆件的并联机器人刚度分析	640
§83 柔性并联机器人动力学特性的灵敏度分析	646

§84	动平台惯性参数对柔性并联机构动力学特性的影响及优化设计	655
§85	3-RRS 柔性并联机器人的振动特性分析	664
§86	高速柔性平面 3-RRR 并联机器人实验系统开发	671
§87	An Experimental Study on the Dynamics of a 3-RRR Flexible Parallel Robot	677
第 7 章 欠驱动机器人动力学与控制		688
引言		688
§88	基于模糊控制的 2R 欠驱动机器人位置控制	691
§89	2R 平面欠驱动机器人轨迹控制研究	700
§90	A New Fuzzy Method for the Motion Control of Underactuated Robots Based on Genetic Algorithm	709
§91	Motion Planning and Trajectory Tracking of Underactuated Three-link Robots	720
§92	Obstacle Avoidance of a Class of Underactuated Robot Manipulators: GA Based Approach	731
§93	欠驱动机器人最优运动轨迹生成与跟踪控制	742
§94	水平运动的三自由度欠驱动机器人位置控制研究	751
§95	含有一个自由关节的机械臂轨迹跟踪实验	761
§96	欠驱动机械臂多轴耦合控制轨迹跟踪实验	767
§97	平面 4 自由度欠驱动机器人的位置和姿态控制	774
§98	欠驱动柔性机器人的动力学建模与耦合特性	785
§99	欠驱动柔性机器人的振动可控性分析	796
§100	2R 欠驱动平面柔性机械臂的位置控制策略与试验研究	806

第 1 章 高速机构动力平衡

引 言

机器在运转过程中,除了受到外载作用外,还受到各部件本身的惯性作用,这种惯性作用随着机器转速的提高而迅速增加,在现代高速机械系统中,其作用已远远超过了外载。这种随机构运转而周期性变化的强惯性作用是产生机器振动、噪声和疲劳等现象的主要原因,大大影响了机构的运动和动力性能,尤其是在现代高速、精密机械中,克服这种不利的惯性作用就成为必须解决的重要问题。机构动力平衡就是为解决这一问题而开展的研究,它是机构学领域,特别是机构动力学重要的前沿课题之一。

机构动力平衡是以减小机构惯性造成的机械振动为目的的机构动力学综合。平衡的对象有震动力、震动力矩、输入扭矩和运动副反力等反映机构惯性作用的动力特性指标。机构的震动力(Shaking Force,也称摆动力)是指机构由于惯性作用而传给机架的合力,而震动力矩(Shaking Moment,也称摆动力矩)则是指机构由于惯性作用而传给机架的合力矩。这两项指标十分重要,它们直接反映机构惯性在机架上的作用,是造成机座振动的主要原因。因此,在机构动力平衡研究中,大部分工作都是围绕着机构震动力和震动力矩的平衡展开的。输入扭矩(Input Torque)是指机构输入轴上用于克服惯性作用的平衡力矩。显然,它与震动力矩相关,同时,又直接影响机构转速的均匀性。运动副反力(Bearing Reaction Force)的平衡与否影响着机构的噪声和寿命,反映机构各运动副元件间的相互作用状况,而所有接地副反力的总效应即构成机构的震动力和震动力矩。因此,运动副反力的平衡与震动力、震动力矩及输入扭矩的平衡都是密切相关的。以上这些动力平衡指标从不同角度反映了机构的惯性作用,相互之间又都有紧密联系,机构的动力平衡特性正是由这些指标决定的。因此,它们的平衡问题是机构动力学综合的重要专题之一。

机构动力平衡可以分为完全平衡和部分平衡两个方面。所谓完全平衡(Complete Balancing)是指从理论上能通过某种方式使某个特性指标所反映的机构惯性作用完全消失的平衡,这当然是最理想的效果。但是,为达到这一目的所采取的措施往往会对其他指标产生不利影响,并且在实际中这种平衡有时很难精确实现。另一方面,有些指标,如各运动副反力是不能达到完全平衡的,或者是从综合效果考虑不需要达到完全平衡的。这种情况下,一般采取机构的部分平衡(Partial Balancing)方式。现代科技的发展,特别是计算机和最优化技术的应用为实现机构最优动力平衡提供了有利条件,使得此方面得到较快发展。当然,从整个机构动力平衡发展状况来看,完全平衡领域取得的成果较多,已形成系统的理论和方法,而部分平衡的成果和方法则相对较少。

机构动力平衡研究开始较早,已有上百年的历史,而真正在连杆机构的平衡方面取得实质性进展是从 20 世纪 70 年代初,由美国学者 Berkof 博士开始的,到 80 年代末期已经取得了重大成就,无论是完全平衡还是部分平衡都已得到了比较完善的解决,机构平衡的大部分成果都集中在此范围内,主要是沿着 Berkof 博士的思路发展的,将平面机构的平衡原理和方法不断完善,并推广到空间机构,其中,以陈宁新为代表的中国学者在空间机构震动力完全平衡方面作出了重要贡献。随后,人们在多项动力指标的综合平衡、机构动力性能的综合改善等方面进行了新的探索。

机构震动力矩的平衡,尤其是完全平衡,是以震动力平衡为条件的。因此,震动力平衡的方法,如配重法、附加机构法等,也在震动力矩的平衡中得到应用。但仅靠配重法却不能完全平衡机构的震动力矩,还需要用附加其他形式的惯性构件来抵消原机构的惯性力矩。加对齿轮和附加杆组方法

有效地解决了这一问题,使一般平面机构的震动力和震动力矩得到了完全平衡。但空间机构远比平面机构复杂得多,平面机构的平衡方法,尤其是震动力矩的完全平衡,在空间机构上不能应用,必须用新的思路去寻找新的途径,这是机构动力平衡中最难解决的问题,本章重点介绍在这方面所取得的研究进展。

机构速度的提高不仅引出了刚性机构的动力平衡问题,而且也带来了弹性及柔性机构的动力平衡问题,使得机构动力平衡的研究向纵深方向发展。最初,人们沿用刚性机构平衡的思路进行弹性机构的动力平衡,即用增加配重或直接减少构件重量的方法解决弹性机构的平衡,从表面上看似乎平衡效果非常明显,但事实上,这有悖于人们设计弹性机构的初衷,因为为了实现轻量化,弹性机构都是以最小重量为设计目标的。首先,弹性机构的总重量是不能增加的,用增加配重的方法来平衡显然破坏了这一基本要求。其次,弹性机构中的构件重量也是不能再减少的,或者反过来说,如果其构件重量还可以降低,那么这样的机构就还不能称为真正达到轻量化要求的弹性机构。因此,上述平衡工作还基本上属于刚性机构平衡的范畴。造成这一现象的主要原因就是对弹性机构的动力学特性不够了解,对其平衡的本质问题没有认清。本章给出了专门针对弹性及柔性机构特点而提出的主动平衡思想,为有效解决弹性和柔性机构动力平衡的问题开辟了新的途径。

由于在各篇论文的综述部分都会针对具体问题深入讨论其发展历史、主要成果以及存在问题等,并在文后列出详细的参考文献,使读者能够对整个领域有一个比较全面的了解,因此,为避免重复,本节只是粗略地给出了机构动力平衡问题的一个总体概述,目的是引出本章的研究内容和重点所在,并没有深入具体问题,所以也就没有给出参考文献。后面各章的引言部分也做了同样处理,不再逐个说明。

本章内容主要分为两个部分,共由 10 篇论文组成。

1.1 节空间机构,主要讨论刚性空间机构震动力和震动力矩的完全平衡及最优平衡问题,由 4 篇论文构成。其中,文 1 是空间机构震动力矩完全平衡方面取得的最初成果,以 RSCR 机构为例,首次提出了用附加杆组方法来分步解决空间机构震动力矩完全平衡难题的新思路。文 2 则基于这一思路归纳出了一般空间机构震动力矩完全平衡的相对平衡原理和方法,并给出了多个空间机构完全平衡实例。文 3 又将这一理论扩展到具有不规则力传递特性的特殊空间机构中。至此,大多数空间机构震动力和震动力矩的完全平衡问题基本得到解决。文 4 则在此基础上讨论了空间机构震动力和震动力矩的最优综合平衡问题,使得空间机构动力平衡的研究内容更加全面。这些研究及成果促进了空间机构动力平衡研究的发展。

1.2 节弹性机构,主要研究了弹性及柔性机构的动力平衡问题,由 6 篇论文构成。其中,文 5 首先探讨了机构质量改变对弹性机构的震动力、震动力矩、输入扭矩及运动副反力等惯性指标,以及动应力、动能及变形成等动力学特性指标的影响,文 6 则继续深入讨论了弹性惯性力在弹性机构动力学特性中的作用,这些研究为后面提出适合于弹性机构动力平衡的新方法提供了理论依据。文 7 提出了用附加扭簧实现弹性机构动力平衡的方法,有效地解决了弹性机构震动力、震动力矩、输入扭矩和运动副反力的最优平衡问题,文 8 则进一步用实验研究结果验证了这种平衡方法的有效性。文 9 提出了用冗余驱动方法解决柔性机构动力平衡的新思路,文 10 则从理论和实验研究的角度进一步提高了弹性机构动力平衡研究水平。这些工作将弹性及柔性机构动力平衡的研究提升到了一个新的阶段。

机构动力平衡研究虽然取得很大进展,但它仍是机构学领域的一个重要研究课题,还有一些问题没有解决。例如,震动力和震动力矩虽然是机构动力平衡中最主要的两项指标,但为达到此目标所付出的代价太大,尤其是完全平衡时,机构或机器上需附加的配重及杆组等过多,这在很大程度上增加了机构的重量,使得机器变得十分笨重,这自然要增加机器运转所需的输入动力,其运行费用和能耗也必将随之加大,因此,在机构完全平衡的理论发展到一定阶段之后,不应该再单纯追求理想的完全平衡效果和更高的理论研究水平,而是应该更多地从实际工程应用的角度出发,找到更加合理的平衡新方法和手段,使机器在运转过程中更加符合其工作要求。

其次，震动力和震动力矩平衡以后，对机构的输入扭矩和运动副反力等动力学指标及性能产生了很大的副作用，因此，应该把震动力、震动力矩、输入扭矩和运动副反力等多个反映机构动力学性能的指标同时纳入机构动力平衡的目标之中，使得机构各项动力学指标达到最优综合平衡。

另外，弹性或柔性机构的动力平衡问题本身就是一个非线性动力学问题，它与刚性机构的平衡有本质区别，因此，如果沿用刚性机构平衡的思路和方法，不会取得很好的效果，应该与控制理论和方法等密切结合，这样有可能达到理想的平衡效果。

更进一步，从广义上讲，机构动力平衡属于机构动力学综合的范畴，因此，完全可以将机构动力平衡融入机构综合或设计过程中，在开展机构动力学综合或设计开始时，就将机构的动力平衡指标直接纳入设计目标或约束之中，一次性完成设计，这样设计出的机构已经满足了动力平衡方面的要求，不需要再对该机构施加平衡措施，也就不会出现增加重量、费用及能耗等问题。所以，不能再走先设计后平衡的老路，应该取消或淡化机构动力平衡专题，将其融入设计过程中，直接完成机构整体动力性能最优设计，这应该是机构动力学平衡及综合或设计的发展方向。

1.1 空间机构

§ 1 Complete Shaking Force and Shaking Moment Balancing of the RSCR Spatial Mechanism

Yu Yueqing

Section of the Theory of Machines and Mechanisms, Beijing Polytechnic University, Beijing 100022, China

Abstract: *The complete shaking force and shaking moment balancing of spatial linkages which has not been accomplished until now is studied for the first time in this paper. The shaking force and shaking moment of RSCR mechanism is completely balanced by adding balancing dyads and counterweights. The complete balancing equations are given. This balancing method can also be extended to many other spatial linkages. As an example, the complete balancing of the planar 4R mechanism is shown in the paper.*

1. Introduction

The shaking force and shaking moment balancing of linkages is an important subject in dynamic balancing of mechanisms, it has an event of theoretical and practical significance. The research on this aspect has been carried on for many years, and large amount of rich fruits have been reaped. Since Prof. Berkof put forward "the Method of Linear Independent Vector"^[1], which laid the theoretical foundation of the full shaking force balancing of linkages by the method of mass redistribution, Lowen, Tepper, Walker, Elliot, Bagci and Chen etc. have made brilliant contribution^[2-7], which made the shaking force balancing of (planar and spatial) linkages perfectly solved. But no great progress on the full shaking moment balancing has been made. As is known, the full shaking force balancing is the necessary condition of the full shaking moment balancing of linkages. When the shaking force balancing is achieved, the shaking moment will increase eventually, and it can not be fully balanced by the method of mass redistribution. The difficulty and complexity of the full shaking moment balancing are showed clearly. Therefore, there are only some special planar mechanisms of which shaking moment are fully balanced by other methods, e.g., addition of gears^[8], balancing idler loops^[9], but no general and common balancing method has been found. For spatial mechanisms, there is no paper presented up to now. This difficulty is studied for the first time in this paper, and it is succeeded. The shaking force and shaking moment of the RSCR spatial mechanism are completely balanced by adding balancing dyads and counterweights. From that, we can find a general method of complete balancing for some kind of spatial linkages. Easy for illustration, the complete balancing of planar 4R mechanism is showed as an example firstly.

2. Complete balancing of planar 4R mechanism

The planar 4R mechanism is showed as Fig.1, the dot line expresses the additional balancing dyads, the m^* expresses the counterweight.

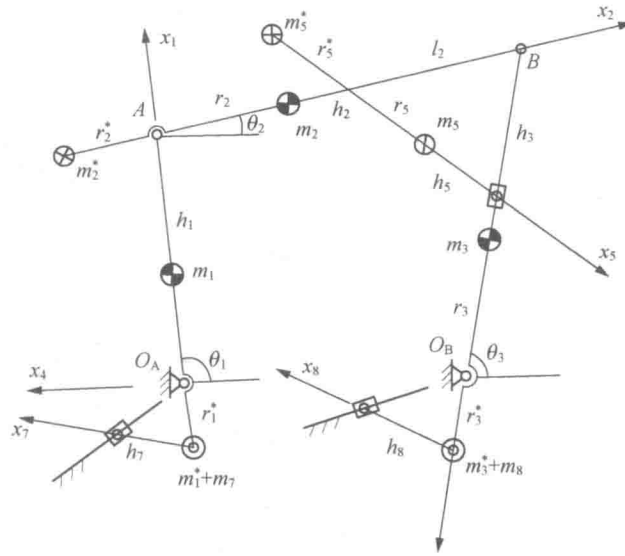


Fig.1

2.1 Shaking force balancing

According to the stationary of the total mass center of the mechanism, we get the shaking force balancing equations as follows:

$$m_5^* \cdot r_5^* = m_5 \cdot r_5 \tag{1}$$

$$m_2^* \cdot r_2^* = m_2 \cdot r_2 + (m_5 + m_5^*)(h_2 - l_2) \tag{2}$$

$$(m_7 + m_1^*) \cdot r_1^* = m_1 \cdot r_1 + (m_2 + m_2^* + m_5 + m_5^*)h_1 \tag{3}$$

$$(m_8 + m_3^*) \cdot r_3^* = m_3 \cdot r_3 \tag{4}$$

2.2 Shaking moment balancing

The shaking moment of the mechanism respect to point $O_A(\bar{M}_{OA})$ can be expressed as:

$$\bar{M}_{OA} = -\bar{H}_{OA}$$

Where, \bar{H}_{OA} is the moment of momentum of the mechanism, and

$$\bar{H}_{OA} = \sum_{i=1}^n m_i \cdot \bar{r}_i \times \dot{\bar{r}}_i + \sum_{i=1}^n \bar{H}'_i$$

When the shaking force is fully balanced, i.e., the total center of the mechanism is stationary, so according to the principle of moment of momentum, we can obtain

$$\bar{H}_{OA} = \sum_{i=1}^n (\bar{H}'_i + \bar{H}''_i) = \sum_{i=1}^n \bar{H}_i$$

Here, \bar{H}''_i is similar to \bar{H}'_i , also an angular momentum. Therefore, the \bar{H}_{OA} is an angular momentum too, it is only relative to the rotation of all links of the mechanism, but not to the translation of mass center. If we can make some links rotate conversely to the original links of the mechanism, the shaking moment (angular momentum) can be fully balanced. From Fig. 1, we can see that links 5, 7 and 8 rotate conversely to the links 2, 1 and 3 respect to links 3, 4 and 4, respectively. Full shaking moment balancing equations can be obtained as follows

$$-M_{OA} = \dot{H}_{OA} = A\ddot{\theta}_1 + B\ddot{\theta}_2 + C\ddot{\theta}_3$$

Here,

$$A = m_1(k_1^2 + r_1^2) + m_1^*(k_1^{*2} + r_1^{*2}) + (m_2 + m_2^* + m_5 + m_5^*)h_1^2 - m_7(k_7^2 - r_7^{*2})$$

$$B = m_2(k_2^2 + r_2^2) + m_2^*(k_2^{*2} + r_2^{*2}) + (m_5 + m_5^*)(h_2 - l_2)^2 - m_5(k_5^2 + r_5^2) - m_5^*(k_5^{*2} + r_5^{*2})$$

$$C = 2m_5(k_5^2 + r_5^2) + 2m_5^*(k_5^{*2} + r_5^{*2}) + m_3(k_3^2 + r_3^2) + m_3^*(k_3^{*2} + r_3^{*2}) - m_8(k_8^2 - r_8^{*2})$$

M_{O_A} equals zero, obviously when A , B and C are all vanish. So we can get the full shaking moment balancing equations as follows

$$m_7(k_7^2 - r_1^{*2}) - m_1^*(k_1^{*2} + r_1^{*2}) - (m_2^* + m_5^*)h_1^2 = m_1(k_1^2 + r_1^2) + (m_2 + m_5)h_1^2 \tag{5}$$

$$m_5^*(k_5^{*2} + r_5^{*2}) - m_2^*(k_2^{*2} + r_2^{*2}) - m_5^*(h_2 - l_2)^2 = m_2(k_2^2 + r_2^2) + m_5(h_2 - l_2)^2 - m_5(k_5^2 + r_5^2) \tag{6}$$

$$m_8(k_8^2 - r_3^{*2}) - 2m_5^*(k_5^{*2} + r_5^{*2}) - m_3^*(k_3^{*2} + r_3^{*2}) = 2m_5(k_5^2 + r_5^2) + m_3(k_3^2 + r_3^2) \tag{7}$$

Now, the Eqs. (1)~(7) are the shaking force and shaking moment balancing conditions of the planar 4R mechanism. The solutions of these equations can be found easily.

3. Complete balancing of the RSCR mechanism

The RSCR mechanism is shown as the solid lines in Fig. 2. The dot lines express the additional dyads. Pair P is a prism pair which can move along the \bar{Z}_z on the link 3 and rotate following the link 3. Owing to

$$l_5 = l_2, r_7 = r_1^*, r_8 = r_3^*$$

the moment of momentum of links 1, 2 and 3 can be balanced by links 7, 5 and 8, respectively. The m_i^* are counterweights which can balance the shaking force. Therefore, the complete balancing equations may be obtained.

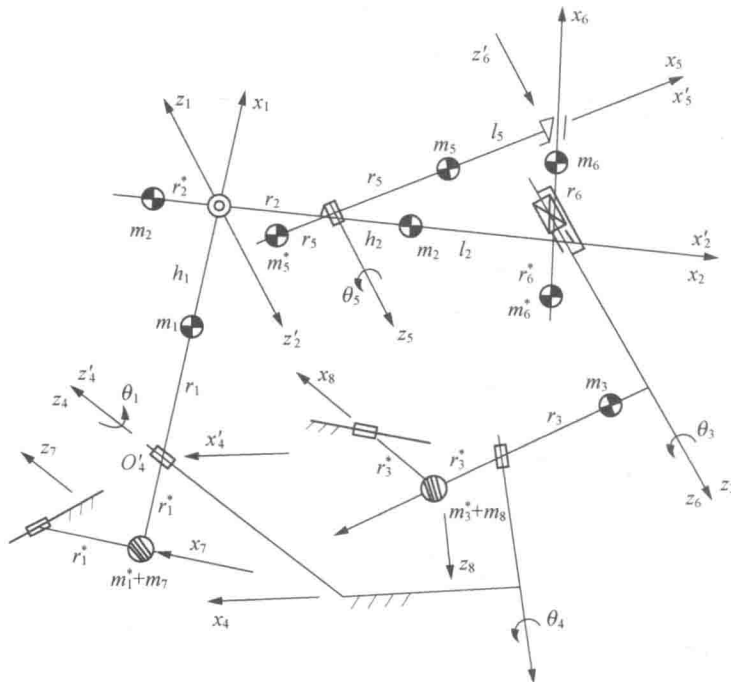


Fig.2

3.1 Shaking force balancing

According to the stationary of the total mass center of the mechanism, the shaking force balancing