

机构学研究现状与发展趋势的思考*

高峰

(上海交通大学振动、冲击、噪声国家重点实验室 上海 200030)

摘要：在人类文明和社会发展的进程中，制造业始终是创造社会财富的主要来源，是衡量国家综合国力的重要指标。当今世界经济全球化，各国的综合国力和竞争能力体现于机械产品的设计能力。因为制造业的灵魂是设计，而制造和被制造机械的灵魂是机构，所以现代机构学的理论研究是制造业的基础，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。机构创新设计决定了产品的创新性。如果机构的设计有缺陷，则制造出的将会是先天不足的产品或称之为“有残疾的机械”。对产品的创新而言，机构拓扑创新设计具有原创的特征性质，是机械发明中最具有挑战性和发明性的核心内容。所以，现代机构学的研究对提高我国机械产品的自主设计、创新和国际竞争能力有着十分重要的意义。机构学研究的发展趋势应该是研究现代机构设计的新理论和新方法、实现特殊功能的机构设计理论以及应用关键技术、微操作和微尺度机械的机构学、机构与机器人动力学、新型移动与操作机器人、仿人与仿生机器人和微纳机器人等。现代机构学研究的最高任务是揭示自然和人造机械的机构组成原理，创造新机构，研究基于特定性能的机构分析与设计理论，为现代机械与机器人的设计、创新和发明提供系统的基础理论和有效实用的方法。

关键词：机构学 微机械 机器人 并联机构

中图分类号：TP24

0 前言

人类赖以生存的大千世界如此多姿多彩，不仅是因为大自然创造了千姿百态的生灵，而且是由于这些生灵中最具有智慧的人类创造了如此多的机械。从外星来观察地球，地球上存在着两种“机械”，即“自然机械”和“人造机械”。“自然机械”是经过大自然亿万年进化而创造出的动物生灵。那么，这两种“机械”是以什么原理构造而成的？它们有什么样的功能和特性？人们应如何根据性能来设计各种机械？这些都是机构学领域长期研究的基础科学问题。现代机构学研究存在以下三个基本关键问题。

(1) 机构拓扑结构设计的非数值类非线性问题的建模、求解与方案优选。内容涉及机构拓扑结构“任务空间”基本功能的数学描述，机构拓扑结构的数学描述与运算，系统的结构与功能之间内在联系与规律性的数学描述与运算，方案性能指标的数学描述与运算等。

(2) 机构运动学与动力学等参数设计的数值类非线性问题的建模、求解与方案优选。内容涉及基于工程应用的机构性能评价指标的数学描述，运动学的非线性代数方程组、动力学与控制的非线性微

分方程组的生成、求解以及解的优选。

(3) 机构结构学、运动学与动力学的统一建模，构建三者融为一体的系统理论与方法，从而为解决前两类非线性问题提供线性解法和非线性解法的理论基础。内容涉及系统性揭示机构系统的拓扑结构与运动学和动力学特征的内在联系与规律性。

现代机构学研究的最高任务是揭示自然和人造机械的机构组成原理，创造新机构，研究基于特定性能的机构分析与设计理论，为现代机械与机器人的设计、创新和发明提供系统的基础理论和有效实用的方法。

1 机构学在国民经济、社会发展中的地位 and 重要性

在人类文明和社会发展的过程中，制造业始终是创造社会财富的主要来源，是衡量国家综合国力的重要指标。当今世界经济全球化，各国的综合国力和竞争能力体现于机械产品的设计能力。因为制造业的灵魂是设计，而制造和被制造机械的灵魂是机构，所以现代机构学的理论研究是制造业的基础，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。

机械伴随甚至推动了人类社会的进步和文明的发展，提高了人类改造大自然的能力。机械延伸和

* 国家杰出青年基金(50125516)和天津市自然科学基金重点(043801811)资助项目。20050425 收到初稿，20050517 收到修改稿

加强了人类自身四肢的功能,而计算机又大大延伸和加强了人类大脑的功能。现代机械是由机械和计算机构成的一体化系统,它由机构、驱动、控制、传感与信息处理五个子系统构成,而机构系统是现代机械的骨架与执行器。

现代机构学具有如下特点。

(1) 机构是现代机械系统的基本子系统,机构学与驱动、控制、信息等学科交叉与融合,研究方法是多领域多学科综合,研究内容比传统机构学有明显的扩展。

(2) 机构的拓扑结构学、运动学与动力学实现统一建模,创建三者融为一体,且考虑到驱动与控制技术的系统理论,为创新设计提供新的方法。

(3) 机构创新设计理论与计算机技术的结合,为机构创新设计的实用软件开发提供技术基础。

(4) 基于“自然机械”原理发展和研制新机构类型,并开拓仿生机构。

机构创新设计决定了产品的创新性。如果机构的设计有缺陷,则制造出的将会是有先天不足的产品或称之为“有残疾的机械”。对产品的创新而言,机构拓扑创新设计具有原创的特征性质,是机械发明中最具有挑战性和发明性的核心内容。所以,现代机构学的研究对提高我国机械产品的自主设计、创新和国际竞争能力有着十分重要的意义。

2 机构学的研究现状

2.1 机构研究史概述

机械的研究和应用具有悠久的历史,它伴随甚至推动了人类社会和人类文明的发展。古希腊大哲学家亚里士多德(公元前 384 ~ 322 年)的著作《Problems of Machines》是现存最早的研究机械力学原理的文献。阿基米德(约公元前 287 ~ 212 年)用古典几何学方法提出了严格的杠杆原理和螺旋的运动学理论,建立了简单机械研究体系。古埃及的Heron(约公元 10 ~ 75 年)建立了五个基本的机械零件:轮与轮轴、杠杆、绞盘、楔子和螺杆。

古代中国的墨子(约公元前 480 年)在机构方面有很多惊人的成就,他制造的舟、车、飞鸢以及根据力学原理为古代车子所创造的“车辖”(即今之车闸)和为“备城门”所研制的“堑悬梁”都体现了机构的设计原理。墨子对“力”的定义,也与近代物理学上的“力”的概念完全相同。墨子说:“力,刑之所以奋也”(《墨经》,21 节)。意思是说,力是物体发生运动的原因。墨子给“力”的定义是牛顿第二定律的雏形。

意大利著名绘画大师达芬奇(1452 ~ 1519 年)的作品 The Madrid Codex 和 The Atlantic Codex 中,列出了用于机器制造的 22 种基本部件。瑞士数学家欧拉(1707 ~ 1783 年)提出了一个平面运动是一点的平动和绕该点的转动的叠加理论,奠定了机构运动学分析的基础。法国的科里奥利 1831 年提出了相对速度和相对加速度的概念,研究了机构的运动分析原理。英国的瓦特(1736 ~ 1819 年)研究了机构综合运动学,探讨连杆机构跟踪直线轨迹问题。剑桥大学教授 R. Willis 出版著作《机构原理》(Principles of Mechanisms, 1841 年),形成了机构学理论体系。

近代德国的机构学研究取得了许多重要的成就。Reuleaux 的专著《Kinematics of Machinery》阐述了机构的符号表示法和构型综合。Burmester(1840 ~ 1927 年)提出了几何方法应用于机构的位移、速度和加速度分析。Grübler(1851 ~ 1935 年)发现了连杆组的自由度判据,这标志着向机构的数综合(Number synthesis)迈出了重要一步。Burmester 和 Freudenstein 用几何方法研究了连杆机构尺寸综合,形成了系统的机构设计几何学理论。

虽然机构学研究源远流长,但从古到今,机构学领域主要研究三个核心问题,即机构的构型原理与新机构的发明创造、机构分析与设计的运动学与动力学性能评价指标、根据性能评价指标分析和设计机构。

2.2 机构的型综合

机构的创新是机械设计中永恒的主题,人们要设计出新颖、合理、有用的机构,不仅要有丰富的实践经验,而且要熟悉机构的组成原理^[1]。机构是由运动副和构件按一定的方式连接而成的。机构型综合主要研究的内容为机构需要完成的“任务空间”基本功能特性与类型的数学描述、机构的自由度计算原理、机构的运动副类型、机构的支链类型、机构的构型原理与数学描述方法。机构组成原理是机构类型研究的复杂而困难的问题^[2]。

在平面机构构型理论方面,最早采用的是俄国 Assur 提出的平面机构构型“杆组法”,后来 Freudenstein 和 Crossley 提出用“图论”理论研究平面机构拓扑综合。近年来,国内外机构型研究主要集中在多自由度多支链并联机器人构型问题上。并联机构的结构属于空间多环多自由度机构。并联机构的构型综合是一个极具挑战性的难题。到目前为止,国内外主要有四种并联机构的型综合研究方法,即基于螺旋理论的给定末端运动约束的型综合法、基于李代数的型综合法、基于给定末端运动的型综合法和列举型综合法。

黄真、L. W. Tsai、C. M. Gosselin 等^[3]基于运动螺旋、约束螺旋、反螺旋和螺旋系线性相关性等概念,提出用约束力—反螺旋理论研究并联机构的构型综合方法。该方法通过在某一个特定位置使所有支链的约束力形成的子空间叠加之后等于理想运动在该点切空间的补空间,从而使移动平台在该点附近能实现给定运动。人们使用该方法成功地设计出了多种少自由度新型并联机构,尤其是5自由度对称并联机构的新构型^[4]。由于运动螺旋和力螺旋本身都是瞬时的,只能描述物体瞬时状态下的运动和约束,所以约束综合法本质上属于瞬时范畴,必须对其得到的机构进行非瞬时性的判别^[5]。

J. M. Hervé^[6]和 J. Angeles 等^[7]较早将李群理论引入并联机构型综合,提出了基于位移子群的代数结构给运动链进行分类的方法,证明了所有六种低副所生成的运动都是位移子群,给出了六种位移子群以及子群间交集的运算法则,从而奠定了位移子群综合法的理论基础。J. M. Hervé 分析了位移子群及其对应的李代数,认为并联机构动平台的位移群是所有串连分支的位移群的交集,用位移子群综合法研究了并联机构的型综合。李泽湘等基于李群和微分几何工具建立一套较严格准确的并联机构型综合理论^[8]。

运动综合法的基本思想是并联机构动平台的运动是所有分支运动的交集。杨廷力等^[9]提出了以单开链支路为结构综合单元,先构造单开链,然后对构成并联机构每个单开链所允许的运动类型求交集,来决定动平台的自由度及其类型,从而综合所期望的并联机构。L. W. Tsai 用基于计算自由度的 Grübler-Kutzbach 公式的列举法综合了3自由度并联机构。

在机构的构型理论研究中,机构能实现的末端运动特征和末端运动约束特征的准确描述,即机构需要完成的“任务空间”基本功能特性与类型的数学描述还缺乏系统的研究,简单有效的机构构型原理与数学描述方法还有待进一步研究^[10]。

2.3 机构分析与设计性能评价指标

机构分析与设计是基于性能评价指标来实现的。机构性能评价指标应具有明确的物理意义,可以用数学方程来描述,具有可计算性,并应用可以用一个数字来表示大小,如工作空间、奇异位形、条件数、解耦性、各向同性、综合条件数、速度极值、承载极值、刚度极值和误差极值等^[11]。

由于机构性能评价指标需要借助于数学工具来描述,所以人们基于不同的数学工具提出了一些重要的、经典的机构性能分析方法,如复数矢量、一

般矢量、回转变换张量、球面三角学、四元数、欧拉角旋转坐标变换矩阵、D-H 齐次变换矩阵、绕任意轴旋转的坐标变换矩阵、对偶数和螺旋理论等。机构的性能指标一般与其速度雅可比(Jacobian)矩阵和力雅可比矩阵有关。

(1) 工作空间。机器人的工作空间是机器人操作器的工作区域,它是衡量机器人性能的重要指标。机器人工作空间的解析求解是一个比较复杂的问题,它在很大程度上依赖于机构位置解的结果,至今仍没有完善的解析方法。机器人的工作空间有三种类型,即可达工作空间(Reachable workspace)、灵巧工作空间(Dexterous workspace)、全工作空间(Global workspace)。可达工作空间是机器人末端可达位置点的集合;灵巧工作空间是在满足给定姿态范围时机器人末端可达点的集合;全工作空间是给定所有姿态时机器人末端可达点的集合。

(2) 奇异位形。奇异(或称为特殊)位形是闭环机构,尤其是并联机构研究中较复杂的问题,长期以来许多学者非常关注奇异位形的研究。奇异位形分为边界奇异、局部奇异和结构奇异三种形式。奇异位形是机构固有的性质,它对机构的工作性能有着严重的影响。当机构处于某些特定的形位时,其速度雅可比矩阵为奇异阵,即行列式数值为零或无穷大或不确定,此时机构的位形称为奇异位形。当机构处于奇异位形时,机构的输入构件失去了对输出构件的控制能力,因此在设计和应用机构时应该避开奇异位形。边界奇异位形。当速度雅可比矩阵的行列式等于零时,机构处于边界奇异位形。边界奇异位形有外边界和内边界奇异位形两种类型。局部奇异位形。当速度雅可比矩阵的行列式趋于无穷大时,机构处于局部奇异位形。局部奇异位形表示机器人末端在该位形有一个不可控的局部自由度。局部奇异位形是并联机构特有的,它不存在于串联机构中。局部奇异位形是并联机构领域重点研究的问题之一。结构奇异位形。当速度雅可比矩阵的行列式趋于零比零时机器人处于结构奇异位形。结构奇异位形也是并联机构特有的特性,只有满足特殊机构尺寸时方能产生结构奇异位形。

(3) 机构解耦和各向同性的数学描述。机构的性能指标要采用数学表达式来描述,而数学中矩阵的运算、矩阵的特性对机构的性能评价指标的描述非常重要,如矩阵系统的条件数、解耦、各向同性和极值求解等是研究机构的性能评价指标的数学基础。

矩阵的条件数。设系统的矩阵方程为 $y=Ax$,式中, A 为 $m \times n$ 系数矩阵, y 为 m 维输出矢量; x 为

n 维输入矢量。当 A 为方阵时, 其条件数为 A 和 A 的逆矩阵分别取欧式范数后的乘积。若矩阵 A 的条件数 K 较大, 则该矩阵的逆矩阵的精度较低。当 A 为非方阵时, 矩阵 A 的条件数为 A 和 A 的广义逆矩阵分别取普范数后的乘积。

系统的解耦与各向同性。由于机器人的运动和受力往往是强耦合和非线性的, 所以运动和力解耦与各向同性是分析和设计机器人要考虑的重要问题。如果机器人在某位姿是解耦或各向同性的, 则该机器人在全域上也相对有较好的性能, 因为机器人的性能在解空间中是连续渐变的。由此可见, 研究机器人解耦和各向同性具有重要的意义。如果系数矩阵 A 与其转置矩阵的乘积是对角矩阵, 则系统处于解耦的状态; 如果系统矩阵 A 与其转置矩阵的乘积是对角矩阵, 并且对角元素都相等, 则系统处于各向同性状态。

(4) 速度、承载能力、刚度、精度性能的各向同性。对于某一机构, 由于其末端的输出速度与角速度的量纲不同, 末端的承载外力和外力矩的量纲不同, 末端的线位移变形和角位移变形的量纲不同, 末端的输出线位移误差和角位移误差的量纲不同, 所以, 研究机构的速度与角速度、承载力与力矩、线位移变形和角位移变形刚度、线位移误差和角位移误差性能的各向同性必须分别讨论。利用上面的条件数, 可以获得机构的多种各向同性表达式。另外, 可以利用拉格朗日方程推导出各种性能极值指标表达式。

虽然国内外已有许多有关机构与机器人的性能评价指标的研究, 但是, 由于工程实际应用中机械设计问题的要求复杂而且是多种多样的, 所以目前机构性能评价指标研究还不全面, 还不能满足工程实际需要, 尤其是对于复杂机构和机器人机构的设计指标的研究还很缺乏。应该根据工程应用的实际需要, 借助于数学和力学等工具, 研究具有明确的物理意义、可用数学方程描述、具有可计算性和可用一个数字来表示的机构性能评价指标。

2.4 机构设计原理

机械与机器人机构的设计是机构学领域最具挑战性的问题, 人类至今乃至相当长的未来时间里仍难以完全解决该问题, 原因在于机构的设计, 尤其是复杂机构的设计是非线性、强耦合问题。

在平面机构设计方面, 在 Burmester 圆点理论基础上, 用解析的方法综合四杆机构。但是, 目前还没有有效的方法能够解决复杂多杆机构的设计问题。

在并联机器人的研究领域^[12, 13], 机器人的尺寸

设计是一项很重要的研究内容, 因为机器人机构的性能决定了机器人的操作特性。机器人机构的设计不是为了执行特定的任务而是为了满足普遍的性能指标。由于性能指标和设计参数具有多元性、耦合性和非线性, 所以并联机器人机构的设计是一个昂贵、费时、复杂和困难的过程。长期以来, 国际上许多学者非常重视探讨并联机器人的设计问题。

在机器人机构设计过程中, 机器人机构尺寸参数是一个很重要的设计因素, 因为机器人的机构尺寸参数决定了机器人工作性能的特点。为了实现机器人机构设计过程的全局最优, 研究机器人机构尺寸参数与性能之间的关系具有十分重要的理论意义和实用价值。由于机器人的机构尺寸可以在 0 与无穷之间变化, 而且机构尺寸可以用不同的量纲来度量, 因此全面研究机器人机构实际尺寸与性能之间的关系显得很困难。空间模型理论^[14]是研究机构所有尺寸参数或其无量纲化参数集合的有限空间的表示方法, 它以量纲—机构尺寸参数为坐标, 是处理尺寸参数与各种性能之间关系的一种有效的工具。它把多维无限的尺寸参数变换到有限的三维空间中, 从而使人们能够在有限的二维或三维空间中研究尺寸与性能之间的关系。当在这种以机构尺寸为坐标的图形中表示各种机构尺寸所对应的性能时, 称之为性能图谱。它是具体分析机构性能的参考图, 是优化机构尺寸的有效而简单的手段, 所以空间模型理论是解决机器人机构设计难题的有效方法之一, 它将在机器人尤其是并联机器人的计算机辅助设计领域开辟一条新的途径。

2.5 机构动力学

机构学和机器人机械学的研究主要分为结构学、运动学和动力学三大部分。现代机械向高速、精密、重载方向发展, 机构动力学问题显得特别重要, 已经成为直接影响机械产品性能的关键问题。机构及机器人动力学领域的重点研究方向主要包括: 柔性机构动力学、柔性机器人动力学、柔顺机构动力学、并联机器人动力学和含间隙机构动力学等。

(1) 柔性机构动力学。在考虑构件变形所产生的影响中, 以弹性动力分析 KED 为基础的弹性机构动力学已经发展到了一个较高的水平, 在弹性机构动力学模型建立及分析方法方面已经打下了良好基础, 弹性机构动力学设计发展较快。随着人们对构件变形研究的深入, 发现以小变形为基础的弹性机构及其 KED 分析方法对于具有大变形的柔性机构来说已经不能满足要求了, 因此, 需要在柔性机构动力学模型上进一步探讨。虽然, 目前已有一些

以多柔体系统动力学为基础的分析方法提出,但其求解过于复杂,要直接应用于柔性机构上还有一定的差距。同时,在柔性机构的动力学分析与设计方法方面还有很多工作要做,如非线性特性、振动与抑制、参数频率特性、运动稳定性和动力平衡等。柔性机构动力学的发展趋势应该是,从避免构件柔性变形的发生向充分利用构件柔性变形、综合提高机构性能的方向发展,这样才能使柔性机构动力学研究从根本上有所突破,从而设计出能满足更高要求的高性能柔性机构。

(2) 柔性机器人动力学。在弹性及柔性机构动力学发展的基础上,与之相关的柔性机器人动力学领域也得到了较大的发展,从机器人机构的角度看,其发展状况与柔性机构有相似之处。虽然人们从控制角度提出了多种方法来对构件柔性变形所带来的运动学及动力学问题从机器人外部进行了补偿,使该问题得到一定程度的解决,但对于机器人主体的柔性机构内在品质却没有得到改善,使得机器人的整体性能难以真正提高。因此,从机器人机构研究的角度出发,应在改善其机械结构和特性方面进行深入研究,充分利用机构冗余度、结构柔性等机械特性,在冗余驱动、欠驱动等方面想办法,从多部件柔性、多机器人协调操作等方面找出路,深入开展冗余度柔性机器人、欠驱动柔性机器人、柔性机器人协调操作和冗余度柔性机器人协调操作等交叉领域的研究,同时,与先进的控制方法相结合,从机器人的内部特性和外部手段两方面入手,综合提高机器人的整体动力学性能。

(3) 柔顺机构动力学。柔顺机构是在柔性机构的基础上发展起来的机构学新分支,它比只是考虑杆件变形带来影响的柔性机构研究前进了一大步,它不只是停留在如何避免杆件变形产生的负面影响,而是积极地利用杆件变形来改善和提高机构的性能。柔顺机构主要是靠机构中柔性构件的变形来实现机构的部分运动和功能。由于在结构上减少甚至没有了运动副,因此,柔顺机构从构件数目上就比传统机构要少很多,从而减少了机构重量和加工、安装的时间和费用。同时,它没有了间隙、摩擦、磨损及润滑等复杂问题,从而可以提高精度、增加可靠性、减少维护,所以,柔顺机构在降低成本和提高性能这两大方面比传统刚性及柔性机构有明显的优势。它的产生给机械科学和工程带来了革命性的冲击和变化,是现代机构和机械设备的发展新方向,尤其是在轻型、微型化领域有着广泛的应用前景,比如微机电系统(MEMS)、微执行机构,柔顺机构有着巨大的优势和潜力。

从国内外柔顺机构发展状况可以看出,几乎所有研究都是围绕着柔顺机构的结构和运动分析与设计开展的,而在柔顺机构的动力学方面却基本是空白状态。由于柔顺机构动力学分析方法本身是建立在其结构和运动学理论发展的基础上的,因此,其研究难度比结构和运动学理论要大得多。柔顺机构在高速、精密等要求下,特别是在高性能的MEMS、微机构中,动力学问题对于柔顺机构的发展就显得更加重要。因此,柔顺机构的动力学问题的研究是必要的,它对柔顺机构的理论和应用都具有重要意义。柔顺机构动力学主要包括动力学模型、方程建立和柔顺机构动力学特性分析,从动力学角度提出改进和提高柔顺机构性能的方法,提出相应的柔顺机构动力学设计与综合理论,设计高性能的柔顺机构。

(4) 并联机器人动力学。并联机器人是机器人学及机构学领域多年来的热门研究课题,目前,在并联机器人结构设计及运动学分析方面国内外都已取得大量成果,但在并联机器人动力学方面的工作却很少,只有一些初步成果。如果想要提高并联机器人的工作能力,特别是动刚度和精度,就必须从其动力学这一根本问题上下工夫。可以说,并联机器人能否在加工机床、重型及精密操作等场合得到很好的应用,最终是取决于动力学这一关键问题的解决程度。在此领域中,系统建立并联机器人动力学模型和分析方法、全面认识其动力特性、从而改善和提高其性能、最终设计出具有良好动力学品质的并联机器人,在这一系列研究课题中还有许多工作要做。同时,如能考虑并联机器人中部件的变形,与柔性机器人结合起来,还可以开发出柔性并联机器人这一新的研究方向,这对进一步提高机器人性能、扩展机器人研究领域都是具有积极作用的。

(5) 含间隙机构及机器人动力学。运动副间隙是影响机构动力学特性的重要因素之一,虽然与柔性机构动力学等一起被列为机构动力学领域的前沿课题,但其研究成果相比之下却要少得多。在含间隙机构的动力学模型、运动副分离准则、混沌特性、优化设计等方面的基础性工作还不够成熟,尚需要进行系统深入的研究。最近,考虑关节中间隙问题的机器人动力学开始引起人们的兴趣,这也是机器人机构学新的研究方向之一,而它在很大程度上依赖于含间隙机构动力学方面的基础。因此,把含间隙机构与机器人动力学作为一个专题来统一研究,对机构学和机器人学的发展都有很好的促进作用。当然,如能将构件柔性、误差等因素也纳入研究范围,与间隙问题一起考虑,则能进一步反映机械系

统真实状况,这不仅对机构学及机器人学的学科发展有重要意义,而且在机械工程中也有很好的应用价值。

2.6 微机械机构学

2.6.1 微机械机构学研究的科学内涵

1959年 Richard P. Feynman 博士在美国物理学会年会上的演讲为科技界开启了一个全新的领域,将工程科学的发展拓展到了细微领域。20世纪70年代开始发展起来的微细加工技术,为微机械机构学的发展奠定了良好的基础。特别是20世纪80年代以来微机电系统(MEMS)和纳米技术的蓬勃发展给机构学的研究注入了新的活力。对微机构及相关技术的研究也逐渐成了一个新的研究热点。所谓 MEMS 是指尺度在毫米及毫米量级以下,可以批量制作,集微型机构、微型传感器、微型驱动器以及信号处理和控制器于一体的微型系统。微机构也正是伴随着 MEMS 的发展而发展起来的,是 MEMS 的一个重要组成部分,在微执行器和微传动的研究中起着至关重要的作用^[15]。

微机构可以分为传统意义上的刚性微机构和柔顺微机构(Compliant micromechanism)。刚性微机构是在传统机构的基础上缩小其尺寸得到的。一般情况下,微机构都要求具有很高的精度,而运动副的间隙和摩擦是影响机构精度的两个主要因素。由传统铰链构成的机构都不可避免地存在着间隙或摩擦。将传统机构小型化并不能满足对微机构的设计要求。在这种情况下,一种新型的柔顺微机构受到了人们的广泛关注。这与自然界给人们的启迪有很大关系。人们不难发现自然界中的设计都是刚柔并济、浑然一体的。许多生物体就是通过自身的柔性将能量转化成为了精妙复杂的运动。例如,许多昆虫依靠柔性来拍打翅膀、跳蚤通过腿部特定的柔性将其肌肉内储存的能量迅速释放出来并产生跳跃动作等。在自然界其尺度与 MEMS 相近的生物王国中,靠柔性传递力或能量的更是占着绝对的支配作用。柔顺微机构正是在这样的背景下,以其独特的性能和广泛的应用前景已成为国内外机构学领域新的研究热点。柔顺机构是以柔性关节代替传统机构运动铰链,采用柔顺元件的弹性变形而非刚性元件的运动来传递或转换运动、力或能量的一种新型机构。和传统机构相比,它具有精度高、不需要润滑、无污染等优点,克服了传统机构装配成本高、运动副存在间隙和摩擦等缺陷。目前,在 MEMS 领域中广泛应用的微机构大多数是柔顺微机构。柔顺微型机构可分为分布柔顺型、集中柔顺型和混合柔顺型等三种主要类型。

微机械机构学涉及机械科学、力学、微电子学、材料科学、微细加工、微驱动、微传感、计算机、控制等理论与技术,是传统机构在现代技术驱动下的进一步延伸。在微观世界中机构的类型、工作原理、驱动方式和微小运动的测量等均有待深入研究。目前,利用大规模集成电路的微细加工技术可将执行机构、驱动器、传感器和控制器等集成在一个多晶硅片上,使传统的无源机构变为有源机构。由此可见微型机构的研究前景是十分广泛的,也是现代机构学重要的研究内容。由于微机构一般包含有驱动、传感和控制系统,因此,微机构学不仅涉及其力学行为,还涉及其他多种耦合效应。

2.6.2 微机械机构学的国内外研究现状

早在20世纪70年代末到80年代初,东京技术研究院(Tokyo Institute of Technology)由来自多个领域的10名杰出科学家组成了微机构学研究小组,该研究小组对微机构应包含的研究领域和研究方法进行探讨,在此之后还专门成立了微机构研究委员会。20世纪80年代以来 MEMS 技术的蓬勃发展为微机构的研究提供的强大的动力,反过来由于微柔顺机构的巨大优点又为 MEMS 产品的开发提供了有力的支持。

L.L.Howell^[16]在2001年出版的柔顺机构专著中系统介绍了在 MEMS 中常用到的双稳态机构的分析与设计方法,从理论分析和试验研究的角度,对双稳态柔顺微机构进行了进一步的研究。L.L.Howell 等还对微型柔顺离合器、热驱动器及热驱动与柔顺双稳态微机构的集成技术进行了探索。Michigan 大学 Kota 教授领导的研究小组等对微柔顺放大机构的分析与设计问题进行了研究,该机构可将输入位移放大20倍。另外,美国著名的 Sandia 国家实验室(Sandia National Laboratories)在微机构研究方面作了大量工作。

在光微机电系统(OMEMS)微机构的研究中,日本人的研究处于领先状态,在 OMEMS 中常常需要将停止状态的光学器件在短时间内移到最佳位置,并保持其在该状态稳定不受外界干扰的影响。其中的关键部件之一就是和静电驱动器集成在一起的谐振腔的长度调整微机构系统。在 OMEMS 中类似的微机构集成系统还很多,均得到了很好的应用。

另外一类典型的微机构是微夹持器,是一种由压电驱动器驱动微型柔顺夹持器,机构采用 UV-LIGA 工艺和化学刻蚀技术制作而成。该夹持器可将驱动器的输入位移放大上百倍。

在柔顺机构的设计方法方面,20世纪90年代以来,以 Midha 和 Howell 为代表的众多学者作了

大量工作，特别是 Howell 和 Midha 提出著名的伪刚体(Pseudo-rigid-body)模型法后，对微机构分析与设计方面的研究已取得了长足进展。采用这一方法，可以将柔顺机构近似等价为一个常规的刚性机构，从而可以有效地采用传统机构的分析与综合方法对柔顺机构进行分析与综合。伪刚体模型法在平面柔顺机构的运动分析与设计方面取得了良好的效果，前面介绍的微机构都是基于这种方法设计的。由于采用这种方法处理柔顺机构的设计问题时需要从一个已知的机构出发，因而，有时会给分析与设计带来一定困难。与采用伪刚体模型，沿用传统的运动分析与综合方法不同，采用拓扑优化技术只需给定设计域和指定输入输出位置，无需从一个已知的刚性机构出发，且所得的机构具有优化的力-位移输入输出关系，因而引起了人们的重视^[17,18]。

我国近年来通过对微齿轮、微泵、微电动机、微马达、微型飞机和微型陀螺等的研究，在 MEMS 领域取得了很大进展，但在微机构研究方面还刚刚起步，与美国、日本等国家的研究水平相比有相当的差距。目前，我国在微机构研究方面，总体上处于跟踪研究状态，不论是在理论研究还是应用研究方面均缺乏具有国际影响的研究成果。

2.6.3 微机械机构学的发展趋势及需要关注的问题

有人预言，在 21 世纪内纳米技术将会引发一场新的科技革命。在探索微观世界的过程中，作为执行单元的微机构必将受到高度关注。微机械机构在性能上将进一步向高性能、高可靠性方向发展，在功能上将进一步向集成化、智能化方向发展。在这一过程中如下几个方面的研究将会引起更多的关注。

(1) 微机构的表面效应和尺寸效应研究。在微机构中，由于表面积与体积之比相对增加，表面效应增强，再加上系统中构件间的间隙很小，因而微构件间的表面作用力影响较大，有时在微操作中会出现拿得起，放不下的现象。在常规机械研究中忽略的一些因素在微机械中必须考虑，另外，当构件缩小到一定的尺寸范围时将出现材料强度尺寸效应，材料性能和构件的力学行为将发生很大变化。

(2) 微机构的动态分析与设计。目前，在微机构的分析与设计中主要是根据运动学或静力学指标进行的，而当设计出的机构作为精密操作或精密定位的主体执行机构时，其动态特性的好坏就显得尤为重要。另外，由于微机构是和微驱动、传感、控制系统集成在一起的，因而，开展考虑各种耦合效应的微系统非线性动力学的研究就显得十分必要。微机构创新设计与微机构计算机辅助设计理论与方

法也应引起足够的重视。

(3) 微机构的可靠性分析与设计。作为执行机构，微机构一般承受的是循环载荷的作用，因此如何分析现有微机构的可靠性和设计具有足够疲劳寿命以完成规定的使命的微机构系统是特别需要关注的研究问题。

(4) 微机构的集成设计理论与方法。微机构与微电子、微光学器件、微驱动、微传感和控制系统等的高度集成是未来微机构重要发展趋势，相关集成理论与方法必将引起人们的高度重视。

总之，微机械机构学是机械科学技术的前沿领域之一。尚有许多具有挑战性的研究工作需要思考和面对^[19]。

2.7 变胞机构学

传统的机构学理论基于固定数目的构件，只有固定的自由度。1996 年，英国学者 J. S. Dai 和 J.R. Jones^[20,21]在对可折叠式纸盒和工艺品等机构进行结构分析和自由度研究时，形成了变胞机构的概念雏形，1998 年正式提出变胞机构(Metamorphic mechanism)的概念，对变胞机构进行了自由度分析，提出用拓扑图描述变胞机构的构态，并给出了构态转换矩阵。在这之后，国内外学者依据多体系统动力学理论与方法，对变胞机构进行了分类并对其进行了运动学与动力学研究，建立了变胞机构全构态运动学与动力学通用数学模型，在此基础上，提出了柔性变胞机构的概念；应用螺旋理论对一球变胞机构进行了自由度分析。变胞机构是可变自由度和可变构件数目的新型机构。变胞机构的提出给传统的机构学带来了生机与活力，它改变了传统机构学概念和机构设计方法。变胞机构可按不同的需求，在运动中改变构态，从而提供可变自由度的机构，使变胞机构适应不同任务，应用于不同场合。历经几年的研究与发展，变胞机构学已初步建立起一套较系统的结构学、运动学、动力学的理论与方法。变胞机构在航空航天、机器人和包装等领域具有重要的应用前景。

变胞机构学的发展趋势如下。

(1) 进一步完善变胞机构学的基础理论，重点研究构态切换时的几何条件、物理条件、系统稳定性条件、内碰撞与冲击问题和控制等问题。

(2) 研究变胞机构设计理论与方法。在综合考虑功能、使用性能、经济性的前提下，如何建立系统、完善的变胞机构设计理论与方法，对其在工程实际中的应用具有非常重要的意义。

(3) 研究柔性变胞机构分析、设计理论与方法。柔性变胞机构与刚性变胞机构有着本质的区别，它

是一类新型机构。柔性变胞机构分析、设计理论与方法的研究将成为机构学领域的前沿热点课题。

2.8 移动与操作机器人

移动机器人、操作机器人以及二者结合的移动操作机器人是机器人领域的主要研究主题之一。随着人类对自然界探索活动的深入,机器人的应用领域迅速扩大,作业内容更加复杂多样,安全、准确、快速和优化等传统问题已被赋予了新的内涵。因此,对移动与操作机器人的机构、控制以及感知与规划提出了更多样化和更高标准的需求,而且许多作业内容都要求机器人的合作行为才能完成,这些都是机器人理论与技术研究中富有挑战性的课题。

移动机器人的构型很大程度上受其工作环境的影响,用于医疗外科手术的机器人需要与人体的生理特征相匹配,用于火星探测的机器人需要与火星的地貌相匹配;移动机器人的构型还会极大程度地受到驱动器、传动方式等的影响,这些都是机器人构型的直观影响因素。在具体设计过程中,对于给定的任务可以有多种不同的设计方案,人们无法直观的进行挑选,这样就需要借助于机构分析与综合理论进行设计。

国外对可重构机器人系统已进行了大量研究,目前模块化机器人系统主要有两类:一类是动态可重构机器人系统,主要用于玩具业和非制造业。另一类是静态可重构机器人系统,主要用于工业领域,例如 Benhabib 的模块化机器人,提出了基于遥驱技术的模块机器人单元, Hui 等提出的一种模块化、可重构和可扩展的机器人系统,德国 AMTEC 公司生产的 POWERCUBE 商品模块化机器人,目的是通过单元重组满足各种生产需要。

导航与定位技术是自主式移动机器人实现智能化及完全自主的关键。目前常见的导航方式有磁导航、惯性导航、激光导航、视觉导航、陀螺仪导航和光电编码器导航等。视觉导航方式具有信号探测范围宽、获取信息完整等优点,将成为未来机器人导航的一个主要发展方向。根据机器人工作环境复杂性,以及配备传感器种类和数量的不同,定位作为移动机器人导航最基本环节,有多种方法。主要有基于惯性定位,基于陆标定位,基于全方向图像的自主定位,基于声音的定位,基于视觉伺服定位,基于活动单眼定位和基于激光雷达的定位。目前,全方位视觉和局部视觉通过传感器融合技术相结合的导航和定位方式,受到人们较多的关注。

多机器人系统体系结构的研究是解决多机器人编队问题的基础。多体系统结构理论定义系统内多机器人的相互关系和功能分配,确定系统和各机器

人之间的信息流通关系及其逻辑上的拓扑结构,给出控制多机器人协调合作的机制和计算结构。目前,对多机器人控制有多种体系结构存在,比较典型的有分层递阶式与行为响应式、集中与分散和分布式等。在研究多机器人合作问题的多种方法中,基于多自主体概念研究多机器人系统合作问题正受到人们越来越多的重视。

移动与操作机器人主要研究问题是针对重要典型应用及其共性问题,考虑能耗、作业时间和特殊性能需求等综合指标,利用数学工具,研究满足需要的新型机器人构型、建模、分析和优化设计理论;建立移动操作机器人系统精确动力学模型,研究高效求解算法、仿真计算及试验,研究移动操作机器人运动、控制特性;以非线性控制理论为基础,研究在复杂与特殊环境中移动与操作机器人的感知与定位,涉及非完整约束与完整约束协调的具有冗余自由度的移动操作机器人优轨迹规划,多移动机器人的体系结构与协调合作;研究月球与行星探测机器人,生物分子与医疗机器人等。

2.9 仿人与仿生机器人

自然界在亿万年的演化过程中孕育了各种各样的生物,每种生物都拥有神奇的特性与功能,能够在复杂多变的环境中生存下来。因此,通过研究、学习、模仿来复制和再造某些生物特性和功能,将极大的提高人对自然的适应和改造能力。根据生物系统所体现出来的各种值得模仿和利用的特征,研究其结构、功能、工作原理及控制机制等,并模仿和研制出包括仿生关节、仿生驱动等在内的各种仿生单元,是当前机器人仿生学研究的主要手段。人体结构仿生的对象是一个具有高度灵活性和结构复杂性的生物系统,人的四肢是由骨骼、肌肉、关节以及韧带组成的多关节弹性结构,这种结构确保人体能够灵活运动,完成复杂动作,对人体仿生的研究是仿生机器人领域的最高目标。海洋动物具有独特的形体结构和运动方式,通过海洋生物流体动力学研究,海洋动物仿生将有利于提高水下机器人的水下运动能力,在军事和水下资源探测等领域有着重要的意义。在空中,昆虫的飞行一直都是人类长期以来学习的对象,在军事等相关领域同样意义重大^[22,23]。

现代仿生学在机器人领域的主要研究可以归纳为结构仿生、材料仿生、功能仿生、控制仿体和群体仿生五个方面,如图所示。结构仿生是通过研究生物肌体的构造,建造类似生物体或其中一部分的机械装置,通过结构相似实现功能相近。材料仿生是从生物功能的角度考虑材料的设计与制作。功能仿生的目的

是使人造的机械具有或能够部分实现高级动物的某些功能。控制仿生含有高级神经系统仿生、低级神经系统仿生、遗传算法等。群体仿生研究在复杂环境中生物群体的“组智能”。表 1 所示为国外有代表性的仿生机器人研究成果。

我国自 20 世纪 90 年代开始仿生机器人的研究，主要以拟人机器人和机器蛇为主，相对国外而言，研究范围还相对较窄，基本以跟踪为主，整体水平与国际有一定差距。我国水下仿生机器人的研究以机器鱼为主；空中仿生机器人方面，开展了生物飞行动力学、生理学、功能形态学和运动机理等方面的研究，探索了微型飞行器的飞行原理，包括气动布局新概念、新控制方式、最大速度、允许质量和需要功率等问题，开展了扑翼仿生飞行机器人的研制。表 2 所示为国内有代表性的仿生机器人样机。总体而言，我国在仿生机器人方面的研究与国外相比尚有一定差距，理论与研制结合得不够。

2.10 微纳与极限机器人

微纳机器人包括微操作机器人与微尺度机器人。微操作机器人具有微纳米级的超高精度运动与

作业性能，在诸如分子生物试验操作、IC 芯片装配和超精密制造加工等超精密作业场所具有广泛的应用前景。微尺度机器人在尺度上涵盖了微小至微纳量级范围，与一般机器人相比具有更小的体积，以及高度集成的功能，因而在许多领域，特别是在军事上和医疗上具有巨大的潜在应用可能。生物分子机器人是一种分子尺度的生物型纳米机器人，可用于生命科学研究、临床治疗和生物制造等领域。极限机器人是指工作在人类无法进入或对人体有害，以及各种极端条件与环境下的机器人，与在结构化环境下作业的工业机器人相比，极限环境和条件的约束对机器人的机构构型、结构与控制性能等方面的研究提出了新的挑战。

尺寸从 1~100 mm 之间的机器人属于微小尺度机器人，1 mm 以下为微纳尺度机器人。近年来，采用 MEMS 技术的微型飞行器、进入狭窄空间，如人体血管的微尺度机器人展示了诱人的应用前景和军民两用的战略意义。目前，国内外微尺度机器人的研究范围主要包括微型管道机器人、无创伤微型医疗机器人和特殊作业的微型机器人。微型管道机器人

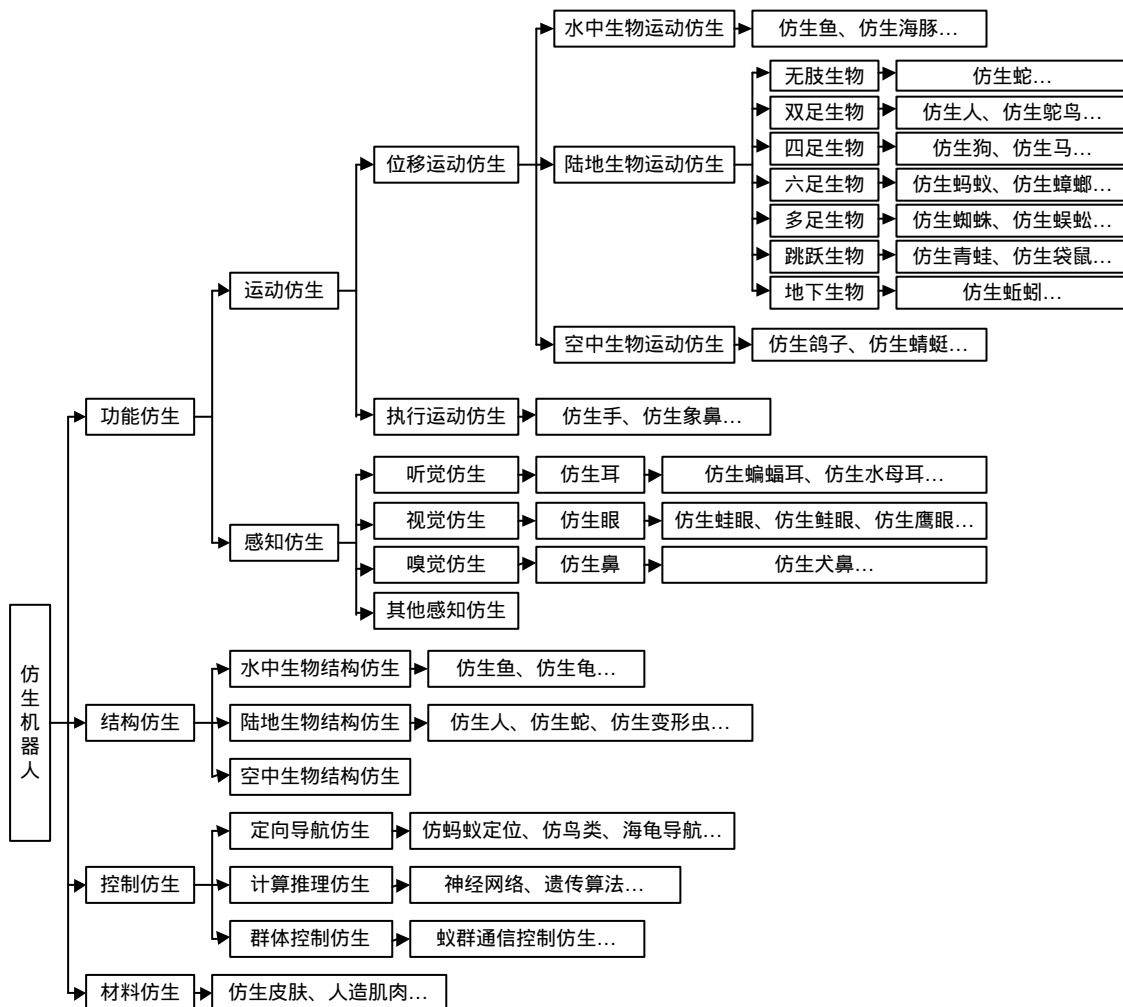


图 仿生机器人的分类

表 1 国外有代表性的仿生机器人

研究内容	研究单位	时间	主要特征	
蛇形机器人	东京大学	1972	世界上第一个蛇形机器人, 速度为 40 cm/s	
	德国国家信息技术研究中心	1999	“GMD-Snake2”, 由 6 个模块组成, 长为 90 cm, 速度 0.1 m/s	
	美国的 NASA	2000	高柔性、高冗余性, 其外形类似眼镜蛇, 长而细, 能够收缩、侧行、跳过障碍物	
陆地仿生机器人	日本本田技术研究所	1996	世界上第一台仿人步行机器人 P2, 高 1.82 m, 质量 210 kg, 能够行走、转弯、上下楼梯和跨越高 15 cm、长 15 cm 的障碍	
	拟人机器人	日本本田公司	2001	“ASIMO”, 下肢的行走为主, 上肢为辅, 腿部的运动功能相当完备。以 ZMP 理论为基础实现了真三维空间行走, 步姿可以同人类媲美
		日本索尼公司	2000	“SDR-3”, 总体尺寸 50 cm×22 cm×14 cm (高×宽×厚), 能表演展臂、劈叉、踢球、倾倒后自站立、优美舞姿等
	仿袋鼠机器人	美国卡内基梅隆大学	1999	质量 2.5 kg, 腿长 25 cm, 质量 0.75 kg, 采用 1 000N·m/kg 的单向玻璃纤维合成物作弓腿, 被动跳越时能量损失只有 20%~30%, 最高奔跑速度略高于 1 m/s
	机械青蛙	美国太空总署和加州理工大学	2001	质量约 1.3 kg, 有一条腿, 装有弹弓, 一跃达 1.8 m, 可自行前进及修正路线, 适合执行行星、彗星及小行星的探索任务
	机器螳螂	Festo&Scenic 公司	—	长 90 cm, 以机构方式精确模拟昆虫运动, 可模拟螳螂的滑行与弹跳
	机器壁虎	iRobot 公司	—	大于 180°的脚趾, 可倒着贴在垂直的墙壁上
水下仿生机器人	机器金枪鱼	美国麻省理工学院	1994	“Charlie”, 世界上第一条能游水的机器鱼, 长 1.32 m
	机器龙虾	美国 DARPA 与东北大学	—	长 45.72 cm (含触角), 利用 MEMS 技术制作触角及细毛传感器
	机器螃蟹	美国 DARPA 与 iRobot 公司	—	“精灵 2”, 长 56 cm, 有 6 条腿, 每条腿有 2 自由度, 可隐藏在海浪下面, 在水中行走, 大风浪时, 隐藏在泥沙中
空中仿生机器人	机器苍蝇黑寡妇	美国加州大学伯克利分校	2004	“黑寡妇”, 质量 100 mg, 身高不到 3 cm, 翼展 2 cm, 扇翅频率 180 次/s
	微型蝙蝠	美国加州理工大学	—	电池驱动, 质量 10 g, 身高不到 3 cm, 翼展 15 cm, 扇翅频率 20 次/s, 飞行时间 20 s
	机器昆虫	日本筑波大学	—	长 4 cm, 触角取自雄蛾活体, 以探索昆虫脑组织的反应和处理信息的奥秘

表 2 国内有代表性的仿生机器人

研究内容	研究单位	时间	主要特征	
地面仿生机器人	蛇形机器人	国防科技大学	2001	长 1.2 m, 直径 6 cm, 质量 1.8 kg, 可蜿蜒前进、后退、拐弯和加速, 最大前进速度 20 m/min, 换上“蛇皮”可在水中游动
	拟人机器人	北京理工大学	2002	具有自律性, 实现了仿人机器人独立行走和太极拳等表演
	仿人多指灵巧手	哈尔滨工业大学	2001	共 12 自由度, 有位置、温度、多维指尖力和关节力矩等 96 个传感器, 可进行战场探雷、排雷, 检修核工业设备等危险作业。
水下仿生机器人	SPC-II 机器鳗鱼	北京航空航天大学	2001	采用 SPC 结构形式和运动参数的综合试验平台。自主导航控制, 下潜定深控制, 长 2.4 m, 续航 2~4 h
	“仿生 1 号”机器金枪鱼	哈尔滨工程大学	2002	长 2.4 m, 最大直径 0.62 m, 排水量 320 kg, 负载能力 70 kg, 潜深 10 m
空中仿生机器人	扑翼微型飞行机器人	南京航空航天大学	2004	国内第一架能在空中悬浮飞行的扑翼飞行器

是在狭小的管状通道或缝隙行走进行检测, 维修等作业。近年来随着微电子机械、超磁致伸缩材料磁-机耦合等技术的发展, 使新型微驱动器的出现和应用成为现实。微驱动器的研究成果已成为微管道机器人的重要发展基础。日本名古屋大学研制成一种微型管道机器人, 可用于细小管道的检测。这种机器人可以由管道外面的电磁线圈驱动, 而无须以电缆供电。法国 Anthierens 等研制出了适用于 $\phi 16$ mm 的蠕动式机器人, 此种微型机器人的最大运动速度为 5 mm/s, 负载可达 20 N, 具有很高的运动精度, 负载大, 但运动速

度较慢且结构复杂。上海交通大学研制出了惯性冲击式管道微机器人, 采用层叠型压电驱动器驱动。

近几年来, 微型医疗机器人技术的研究与应用开发进展很快。日本制定了采用“机器人外科医生”的计划, 并正在开发能在人体血管中穿行、用于发现并杀死癌细胞的超微型机器人。法国 G. Thomann 等研制了一种用于肠窥的微型机器人。浙江大学研制出了无损伤医用微型机器人的原理样机, 该微型机器人以悬浮方式进入人体腔, 可避免对人体腔内有机组织造成损伤, 运行速度快, 速度控制方便。

作为微驱动技术和机器人技术交叉结合的产物，微操作机器人系统主要用于精确地控制微细操作。它的操作对象和微动部分的运动范围极小，不仅可以完成其他机械无法实现的精细操作，如对细胞进行融合、存储、切割等细胞分子级的自动作业，还可用于改善常规系统的性能，如精度补偿，精密力控制等。在用于处理微小物体，进行微细定位和加工操作时，微动机器人系统具有很大的优点，有广泛的应用前景。生物技术的迅猛发展已深入到基因水平，科学家们迫切需要一个有效的工具，以实现细胞、DNA 链、蛋白质，甚至是其中的一个碱基、氨基酸进行捕捉、固定、抽取和切割等操作，就像以往他们对宏观生物体所做的一样，这是微操作机器人一个重要的应用领域。而在类似微电子加工、装配与操作等超精密制造与作业领域，微操作机器人也有广阔的应用前景。

生物分子机器人是分子级别的纳米生物机器人。生物分子机器人在药品和生物材料的制造和搬运、肌肉和骨骼的再生等方面有着巨大潜在应用前景。纳米或分子级别的驱动器研究是该类机器人研制成功的基础。此外，生物分子的节能方式、自我复制能力，以及生物分子之间的信息交换机理等都是生物分子机器人应该具备的基本特征，针对这些特征的研究对于生物分子机器人的研制有着重要的意义。由于尺度效应，生物分子机器人在液体中的雷诺数很小，宏观的运动学理论已不适合指导生物分子机器人的研究，需要研究在液体中生物分子级的运动建模，学习并模拟细菌等微生物所采用的控制原理与行为决策方法，才有可能使机器人完成分子尺度范围内的任务。目前，虚拟现实技术仍然是研究生物分子机器人的主要手段，生物分子机器人的相关技术，尤其是控制、通信协作等方面的研究和试验都应该首先能在虚拟环境中得到实现和验证。对于生物分子机器人的研究目前尚处于原理性初步探索阶段。在能源和驱动器方面，美国康奈尔大学利用 ATP 酶作为分子电动机，研制出了一种可以进入人体细胞的纳米机电设备，其中生物分子组件将燃料的 ATP 转化为机械能量，转速达到了 8 r/s 。化学能和旋转式分子电动机是目前生物分子电动机的主要能源和工作方式，仍需要从生物化学的角度对分子电动机的特性进行深入研究。Adriano Cavalcanti 搭建了虚拟 3D 环境，利用多纳米机器人组成的团队进行协同工作，完成分子装配、运输的任务，对机器人的决策、控制和通信等机制进行了仿真。仿真的主要任务是验证各种设计方案。利用虚拟现实模拟和验证生物机器人的个体与群体行

为，仍是目前情况纳米或生物分子机器人系统研究的主要手段。

微纳机器人研究的主要问题是微尺度机器人的微单元及其系统集成，微尺度机器人的建模、评价与分析，微尺度机器人规模群体交互与协调作业模型及其控制，微操作机器人的精度分析与标定，微操作机器人的操作定位与作业控制，生物分子机器人的分子电动机特性和信息交换机理，生物分子机器人的运动与作用模型与虚拟仿真。

极限机器人是工作在人类无法进入或对人体有害的环境以及各种极端条件与环境下的机器人，如海底探测机器人、核电站检修机器人、隧道清扫机器人和消防机器人等。极限机器人具有重要的研究与应用价值。日本在 20 世纪 90 年代曾大力倡导用于水下和核工业与消防的极限机器人。普渡大学研究水下机器人的神经模糊自适应控制方法以及自适应系统的体系结构，以实现水下机器人的完全自主控制。由于极限机器人常常工作于有毒、辐射或者非常温常压的特殊环境下，需要对极限机器人系统进行独立研究，使其可以承受各种恶劣环境。极限机器人设计、控制、感知是未来的研究内容。从尺寸上来说，极限机器人包括尺寸巨大，如大型航天器或巨小的系统如微型机器人。极限机器人研究的主要问题在极端环境下，极限机器人的机构学理论、优化设计与控制方法；极限机器人的材料、驱动器和能源方式；极限机器人的环境自适应性等问题。

2.11 人机交互中的机器人

在人机交互中，机器人的角色从交互深度上可以分为四个层次：工具(Tool)，半机械人(Cyborg)，人类的代替品(Avatar)，人类的合作者与伙伴(Sociable partner)，人机交互方式是当前该领域的研究热点课题。

(1) 虚拟现实中的机器人技术。虚拟现实技术的一个最重要特征是它的立体沉浸感，为了达到三维效果和立体沉浸感，并构造三维用户界面，人们先后发明了立体眼镜、头盔式显示器、双目全方位监视器、墙式显示屏的自动声像虚拟环境等，它们已广泛用于不同需求、不同平台的虚拟现实系统中。在三维输入设备方面，三维鼠标、三维跟踪球、三维游戏杆已广泛应用于各种三维及网络游戏中。在大型虚拟现实系统中，目前仍广泛使用各种超声、电磁、光导介质的位置跟踪设备，以 Polhemus 器件构造的头动位置检测器、数据手套、数据衣服等是大型虚拟现实系统的主要交互设备。触觉和力反馈装置已经有大批不同价位的产品出现在市场，成为军事、医学、游戏等应用领域的新型交互设备。

力觉或触觉反馈是虚拟现实与机器人技术结合的重要体现,新一代力反馈感应技术主要有触觉感应(TouchSense)技术和动作感应(G2Force Tilt)技术。TouchSense 技术主要用在鼠标/轨迹球等产品中,而 G2Force Tilt 技术则主要用在动感游戏控制器中。美国 Kensington 公司推出的 Orbit 3D Trackball 力反馈轨迹球采用 Immersion 公司最新的 TouchSense 技术;iFeel Mouse 是罗技公司最新的一款支持振动功能的新一代动感鼠标,其外观继承了 2000 年上市的极光鼠标,并在其基础上增加了一块控制芯片和一个小电动机,因电动机的位置在鼠标的偏下部,因此主要振动源也来自于手掌根部。在非游戏的高精度触觉反馈装置中,最著名的是由 MIT 人工智能实验室 Massie 和 Salisbury 开发、美国 SensAble Technologies 公司生产的 Phantom 触觉反馈设备和 Ghost 软件开发包,在医疗、教学和科研等领域中有广泛应用。它采用链式机构,开环控制,成功地实现了 3 自由度的力反馈,该系统的特性在于惯量小,摩擦小,在自由空间的运动基本上感觉不到阻力,但是其可以反映的刚度范围很小。美国新泽西州立大学的 G. Burdea 等对以 Phantom 作为输入输出接口的前列腺肿瘤探测模拟系统进行了试验研究,其他成功的商品化力觉交互装置还有 WAM 和 Hapticmaster 等。并联机构有自重平衡较好及各向同性较好等特点,引起了不少力觉交互装置设计者的关注。由于各种交互设备常常会存在不可避免的弊端,需要从体系结构的角度提高整个虚拟现实系统的整体性能,因此各种高性能反馈装备与虚拟现实体系结构是未来的主要研究内容。

(2) 遥操作与网络操作的机器人技术。遥操作的概念始于 20 世纪 40 年代,随着机器人技术的发展,在勘探、医疗和生物工程等领域中遥操作机器人已显示出良好的应用前景。名古屋大学的水下机器人 MITI 采用遥操作的方式实现控制,斯坦福大学的 G. Niemeyer 研究了水下机器人的稳定柔性遥操作。临场感技术和时延问题是遥操作机器人中的关键问题。基于网络的遥操作机器人思想是由 K. Goldberg 于 1994 年提出的,这一构想极大的扩展了遥操作概念,使得全球网络用户都可通过 HTTP 提供的低成本且能被广泛应用的接口来访问并共享远程资源。K. Goldberg 将这一构想应用到 Mercury Project 中,装有 CCD 摄像头和气囊的工业操作机器人实施发掘工作。之后,越来越多的学者投入到基于网络的机器人技术工作中,北京航空航天大学与海军总医院进行机器人网络遥操作脑部肿瘤切除手术的系统结构。遥操作的临场感问题,网络的传

输速率、时延与数据丢失是基于网络的机器人所面临的主要问题,基于网络控制技术是未来主要的研究方向。

基于网络的机器人控制技术主要研究网络的传输速率、时延、数据丢失的形成机制与影响因素,基于网络的机器人遥操作双向控制,通过先进的控制方式实施机器人的网络控制,通过先进网络技术应用完善移动机器人的自主控制。遥操作临场感技术主要研究遥操作系统的体系结构,极端环境的三维动态重构,包括力觉、触觉等各种信息反馈技术,各种信息反馈设备,遥操作的实时性等。

(3) 人机合作与交流中的机器人技术。在人机合作中,机器人与人各自的智能与体能之间应该相辅相成,人们对人机合作的理论与实现进行了许多的研究与尝试。Murphy 指出任何一种机器人系统都会存在某种无法跨越的自动化障碍,这样就必须要人类的参与才可能完成期望的任务。MIT 的 C. Breazeal 从机器人的角度研究了社会化人机合作机器人系统的人机分工以及机器人在人类环境中的学习;美国南加州大学的 J. L. Burke 等分析了人机合作机器人技术的研究内容。具体的人机合作机器人系统有:清扫机器人(机器人负责清扫,人类负责解除障碍),导盲机器人 Roji(具有视觉的机器人对盲人进行和谐的引领)。基于脑电信号的人机合作机器人技术也暂露头角,直接以脑电信号为基础,通过脑机接口来实现控制,为脑瘫患者带来了福音,最令人振奋的是 MIT 利用猴脑操作或控制本地或异地机器人的研究成果,下一个目标是将猴脑换成人脑。目前,人机合作的方式比较单一,力度也比较小,缺乏随机性,需要研究比较通用的合作框架,才能对人机进行比较合理的分工,从而与丰富的人类工作生活行为相匹配;对于具有确定或不确定分工任务的机器人与控制系统设计也是重要的研究内容。

人机合作与交流中的机器人技术中,关键问题是生物机电一体化技术(Biomechatronics)。该技术是集生物技术、机械电子技术、信息技术等多学科领域于一体的交叉学科。近年来,微纳制造和 MEMS 等技术的发展为生物机电一体化技术的研究提供了先进的技术手段,推动了该交叉学科的发展。国际上许多著名大学和研究机构相继成立了专门的生物机电一体化研究组。2004 年 IEEE 机器人与自动化国际会议还举行了为期一天的以“Biomedical Robotics, Biomechatronics & Biorobotics”为主题的研讨,议题包括生物机电一体化装置、生物机电一体化机器人的开发及其医学应用中的工程技术和科

学问题。IEEE机器人与自动化协会还在筹划举办新的系列会议：IEEE International Conference on Biomedical Robotics and Biomechanics，生物机电一体化技术涉及广泛的基础科学理论和应用技术，包括生物信息处理与生物/机电系统接口理论与技术，生物信号检测技术与微传感技术，生物机电一体化装置，仿生机械与生物机器人技术等等。开展生物机电一体化基础理论和应用技术研究不仅是医学、工业以及武器系统开发应用需求，也体现了国际科学技术前沿。

3 结论

根据机构与机器人学的发展历史和研究现状，可以看出该领域的主要发展趋势和方向如下。

(1) 现代机构设计的新理论、新方法。主要研究内容包括机构拓扑结构“任务空间”基本功能的数学描述，机构拓扑结构设计的非数值类非线性问题的建模、求解与方案优选，机构运动学与动力学等参数设计的数值类非线性问题的建模、求解与方案优选。机构结构学、运动学与动力学应统一建模与求解，具有明确的物理意义、可用数学方程描述、具有可计算性和可用一个数字来表示的机构性能评价指标，具有重要应用背景的机构创新原理和机构的发明及其应用关键技术，机构与机器人分析与设计数字化基础。

(2) 实现特殊功能的机构设计理论以及应用关键技术。主要研究内容包括超面向重大应用背景的高加速度机构的设计原理与试验技术，超高速运转机构动态设计与平衡理论，超高精度机构的设计、标定、检测与试验原理，超大载荷对象的多维微位移、微振动控制的机构设计理论及其在重大装备制造中的应用技术。

(3) 微操作和微尺度机械的机构学。主要研究内容包括微机构的表面效应和尺寸效应，多尺度效应和跨尺度运动的机构设计理论，

微机构的动态分析与设计原理，微机构的可靠性分析与设计，微机构与微电子、微光学器件、微驱动、微传感和控制系统等高度集成多尺度、多维微操作机构的集成设计理论与方法。

(4) 机构与机器人动力学。主要研究内容包括多种形式(冗余度、冗余驱动、欠驱动、协调操作等)的柔性机器人动力学，柔顺及柔性机构动力学分析与综合，刚性及柔性并联机器人动力学分析与综合，含间隙机构及机器人动力学分析与综合。

(5) 新型移动与操作机器人。主要研究内容包括移动与操作机器人的新构型及其设计理论，并联机器人的新构型及其设计理论，步行、多臂协调、冗余机器人的构型与性能设计，模块化移动与操作机器人的优化与重构方法，在复杂与特殊环境中移动与操作机器人的感知、定位与协调技术，多移动机器人的编队运动与作业协调方法，移动与操作机器人的遥操作与虚拟现实人机交互感知技术，移动与操作机器人重点应用技术(月球与行星探测机器人、医疗操作与康复机器人、深海与深空作业机器人、用于核电站作业和监测与维修的机器人)。

(6) 仿人与仿生机器人。主要研究内容包括机器人的新型仿生驱动、关节、感知与作业单元，新型仿人与仿生机器人结构系统及其优化设计理论，机器人的生物感官与群体行为仿生理论与技术，生物-机械-电子一体化系统的基础理论，仿人与仿生机器人的环境与人机交互感知技术，仿人与仿生机器人重点应用(军用或服务仿人与仿生机器人，用于沙漠、火山等特殊环境探测的群体仿人与仿生机器人，用于海洋资源探测和开采的仿人与仿生机器人)。

(7) 微纳机器人。主要研究内容包括三维微尺度机器人的新型驱动、检测单元与系统构型，微尺度机器人的微观力学建模、性能评价与分析理论，微尺度机器人的优化设计、制造与控制方法，微纳机器人规模群体交互与作业模型及其协调控制理论，微操作机器人的精度分析、标定与检测理论；微操作机器人的新构型及其系统建模与控制；生物分子机器人的分子电动机特性和信息交换机理，生物分子机器人的运动建模理论、仿真方法与控制技术；染色体微操作、微切割和微克隆机器人。

后记

我是1991年于北京航空航天大学获得博士学位的。恩师张启先院士在我的成长过程中倾注了大量的心血，亦师亦父，使我终身难忘。回想追随先生的日日夜夜，其情景至今历历在目。先生是我国机械学领域之泰斗、桃李满天下之名师。他一生平易近人、淡泊名利，其纯朴敦厚的学者之风、笑看风云的大家之范，是我们学习的楷模。仙者已逝，然先生哺育之恩、舐犊之情自此无以回报，我等晚辈唯有勤奋工作，精进学业，继承先生之事业，方能稍慰先生之英灵。本文的撰写，是为了纪念恩师张启先院士诞辰80周年。

致谢

在撰写过程中,清华大学陈恳教授、香港科技大学李泽湘教授、英国伦敦大学国王学院戴建生教授、上海交通大学朱向阳教授、华南理工大学张宪民教授、北京工业大学余跃庆教授、北京交通大学方跃法教授、北京航空航天大学于靖军副教授、天津工业大学金国光教授等提供了部分资料和内容,在此表示衷心地感谢!

参 考 文 献

- 张启先.空间机构的分析与综合.北京:机械工业出版社,1984
- Hunt K H. Structural kinematics of in-parallel-actuated robot-arms. *Journal of Mechanisms, Transmissions, and Automation in Design*, 1983, 105 (4): 705 ~ 712
- Huang Z, Li Q C. General methodology for type Synthesis of lower-mobility symmetrical parallel manipulators and several novel manipulators. *International Journal of Robotics Research*, 2002, 21 (2): 131 ~ 146
- Li Q C, Huang Z, Hervé J M. Type synthesis of 3R2T 5-DOF parallel mechanisms using the Lie group of displacements. *IEEE Transaction on Robotics and Automation*, 2004, 20(2): 173 ~ 180
- Kong X W, Gosselin C M. Type synthesis of 3DOF spherical parallel manipulators based on screw theory. *ASME Journal of Mechanical Design*, 2004, 126(1): 83 ~ 92
- Hervé J M. Analyse structurelle des mécanismes par groupes de déplacements. *Mechanism and Machine Theory*, 1978, 13: 437 ~ 450
- Angeles J. Spatial kinematic chains, analysis, synthesis, optimization. Springer-Verlag, New York, 1982
- Murray R, Li Z X, Sastry S. A mathematical introduction to robotic manipulation. CRC Press, 1994
- 杨廷力. 机器人机构拓扑结构学. 北京:机械工业出版社, 2004
- Gao F, Li W M, Zhao X C. New kinematic structures for 2-, 3-, 4-, and 5-DOF parallel manipulator designs. *Mechanism and Machine Theory*, 2002, 37: 1 395 ~ 1 411
- 熊有伦. 机器人学. 北京:机械工业出版社, 1993
- 黄真, 孔令富, 方跃法. 并联机器人机构学理论及控制. 北京:机械工业出版社, 1997
- 张曙, Heisel U. 并联运动机床. 北京:机械工业出版社, 2003
- Gao F, Liu X J. The relationships between the shapes of the workspaces and the link lengths of 3-DOF symmetrical planar parallel manipulators. *Mechanism and Machine Theory*, 2001, 36(2): 205 ~ 220
- 王立鼎, 刘冲. 微机电系统科学与技术发展趋势. 大连理工大学学报, 2002, 40(5): 505 ~ 508
- Howell L L. *Compliant Mechanisms*. McGraw-Hill, New York, 2001
- Tsay J, Chang H A, Sung C K. Design and experiments of fully compliant bistable micromechanisms. *Mechanism and Machine Theory*, 2005(40): 17 ~ 31
- Kota S, Joo J, Li Z. Design compliant mechanisms: applications to MEMS. *Analog Integrated Circuits and Signal Processing*, 2001, 29: 7 ~ 15
- 张宪民. 柔顺机构拓扑优化技术. *机械工程学报*, 2003, 39(11): 47 ~ 51
- Dai J S, Jones J R. Mobility in metamorphic mechanism of foldable/erectable kinds. *Transaction of the ASME, Journal of Mechanical Design*, 1999, 121(3): 375 ~ 382
- Dai J S, Zhang Q X. Metamorphic mechanism and their configuration models. *Chinese Journal of Mechanical Engineering (English Edition)*, 2000, 13(3): 212 ~ 218
- 张秀丽, 郑浩峻, 陈恳, 等. 机器人仿生学研究综述. *机器人*, 2002, 24(2): 188 ~ 192
- 刘莉, 汪劲松, 陈恳, 等. THBIP-I 拟人机器人研究进展. *机器人*, 2002, 4(3): 262 ~ 267

REFLECTION ON THE CURRENT STATUS AND DEVELOPMENT STRATEGY OF MECHANISM RESEARCH

Gao Feng

(State Key Laboratory of Vibration, Shock & Noise, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030)

Abstract :In the development process of the human civilization and the society, manufacturing has always been the main source of the social wealth and an important index to evaluate the general national powers. In the time of the world economy globalization, the design capability of the mechanical products is the embodiment of the general national powers and competitive powers of nations. The heart of manufacturing is the design and the soul of manufacturing is mechanisms which are the essence of the machines being manufactured. The theoretical research of modern mechanisms is the foundation of the manufacturing industry, the headspring of invention and

creation of mechanical products, the key to improve the national manufacturing level and the international competitive powers. The innovative design of mechanisms determines the innovation of the products. The defective design will bring congenital lack of the products, which are called “malformed machines”. For the innovative design of products, the topological innovative design of mechanisms has the characteristic of original design and is the most challenging and inventing core content of mechanical invention. The research of modern mechanisms has very important signification to improve the independent design level, the innovation and the international competitive powers of our mechanical products.

The ultimate target of the investigation of the modern mechanisms is to discover the composition principles of natural and man-made machines, to invent new mechanisms, to research the analysis and design theories based on special performance indexes, to provide systematic fundamental theories and effective practical methods for the design, innovation and creation of modern machines and robots.

Key words : Mechanism Micromachine Robot

Parallel mechanism

作者简介：高峰，男，1956 年出生，教授，博士生导师。主要研究方向为并联机器人机构学及应用关键技术。

E-mail : fengg@sjtu.edu.cn