微型机械与纳米机械学研究

Research on Micro Machine and Nano Mechanics

温诗铸

(清华大学 北京 100084)

【摘要】 本文从微型机械的产生背景和发展现状出发,总结出微型机械研制中对于纳米机械学的各学科分支的要求和特点,进而提出它们在今后的研究方向。

【Abstract】 In this article, based on the origin background and current development situation of micro machine, the requirements and characteristics of subject branches in nano mechanics concerning research and manufacture of micro machines are summarized. The research directions in the future are proposed as well.

关键词: 微型机械 纳米机械学

Key words: micro machine nano mechanics

1 前言

90年代初出现的纳米科学技术被认为是面向21世纪的新科技,它是在原子、分子尺度上研究自然界各种现象的行为和规律,进而实现由人类按需要排布原子,制造出性能独特的产品。纳米科技的发展派生出一系列的新兴学科,纳米机械学就是其中一个重要的分支,它的产生也是现代机械科学发展的必然结果。

随着现代科学技术的发展,人们不断追求尺度微小化的机械装置,以适应生物、环境控制、医学、航天航空、数字通讯、传感技术、灵巧武器等领域日益增长的要求。另一方面,20世纪60年代以来,微电子技术渗透到机械工程各个领域,机电一体化为机械装置在系统结构和性能方面都带来了革命化的变化,也大大地促进了机械装置微小化的发展。80年代中后期兴起的微型机械或称微型机电系统(micro electro-mechanical system, MEMS)的研究集中地反映了这一发展趋势。同时,作为研究微型机械工作原理和设计理论与方法的纳米机械学(nano mechanics)或称微机械学(micro mechanics)因而得到迅速发展并成为机械科学技术中的前沿领域。

2 微型机械的发展

为了满足现代科技发展的需要,80年代开始的机械装置小型化过程中先后研制出两类机械,即小型机械(miniature

machine)和微型机械(micro machine)。通常认为小型机械是传统机械简单地缩小,它在工作原理、结构材料和设计理论等方面大体上可以沿袭传统机械学。而微型机械则是在一种崭新的设计思想指导下,随着整个纳米科技发展而来的原理和构造特殊的机械装置。表1简略地说明了这两类机械的差异^[1]。

表1 小型机械与微型机械

	小型机械	微型机械
尺度	从100 μm 至100mm	从1 μm 至1mm
材料	金属、高分子聚合物、陶瓷	硅、金属薄膜、高分子聚合物、陶瓷
构造	三维立体	多层的二维平面、三维立体
驱动	小型电机、压电晶体、SMA薄膜	静电电机、压电晶体、SMA薄膜、微驱动器
加工方法	超精密加工、电火花加工、激光加工、湿式腐蚀、离子束加工	腐蚀、表面显微加工

近年来,也有学者提出按照尺度将微小机械分为三类,即1mm至100mm为小型机械;10 μm 至1mm为微型机械;而10nm至10 μm 为超微型机械(submicro machine)。

微机械学的发展经历了两个阶段。最初,人们按照传统机械学的原理和方法开发小型机械。然而,在研制过程中发现,随着机械结构尺寸的不断缩小,构件可受到的外载荷和体积力变得次要,而构件间的摩擦力和其它表面力成为影响机械性能的主要因素,因此,微型机械的力学系统特征与传统机械不同。此外,材

料小型化以后的物理性质及其对环境变化的响应也将有很大变化。所有这些都使人们认识到传统机械学对于小型化机械设计已不适应,而必须从新的构思出发,借助于纳米科技开发出与传统机械的结构、材料、功能和原理不同的机械装置,这样,微机械学的发展进入了第二阶段,即建立纳米机械学研究的阶段。

微机构研究最初是由美国斯坦福大学于1970年开始的。1987年美国投入大量经费资助微型机械开发,随后日本和西欧各国也相继将微型机械研究列为重要发展领域,促进了微型机械得到迅速发展。例如,斯坦福大学研制出直径20 μm ,长度150 μm 的铰链连杆机构,210 μm ×100 μm 的滑块机构,转子直径200 μm 的静电电机和流量为20ml/min的液体泵。加州大学伯克利分校试制出直径60 μm 的静电电机,直径为50 μm 的旋转关节,以及齿轮驱动的滑块和灵敏弹簧。美国贝尔实验室也开发出直径400 μm 的齿轮机构。麻省理工学院研究出三自由度闭环平面机构操作器,可望应用于低力矩的精密定位。美国Dwkan公司设计了一种AL5010小型装配机器人,用来完成光纤引线线的复杂操作。通过调整该系统中的压电驱动微调装置,可使光纤与器件之间达到最佳的耦合功率位置,保证在粘接过程中始终校准,并能够自动补偿因粘接产生的误差。

日本东京大学、早稻田大学、名古屋

大学等在 80 年代初期采用压电元件研制无间隙的微驱动机构及其控制技术,并开发出多种压电陶瓷驱动的微机构。这些微驱动机构可以实现直线运动或旋转运动,驱动精度达到微米级以上,可望用来研制细胞解剖、集成电路生产,以及进入人体内的微型机器人。日本在 90 年代初启动的微型机械研究计划大力推动下,在微型机电系统和微型机器人研究中取得重要进展。例如,东京大学研制成功 1cm^3 大小的爬坡微型机械装置。早稻田大学开发出用形状记忆合金制作的微型机器人,他们研制的薄层 TiNi 合金是一种可以双向、全圆活动的可逆形状记忆合金,非常适合于制作微型动作器。通过控制若干个微型动作器可以实现机器人多自由度运动。名古屋大学还研制出不需要电缆的管道移动爬行人形机器人,通过管道外的电磁线圈产生的磁场来控制其运动。这种机器人可以应用于微小直径管道内的检测,以及生物医学中人体器官等小空间内的操作。他们制成的较大型的可逆运动机器人外形直径为 21mm ,而较小型的单向运动机器人外形直径仅为 6mm 。

纳米机械学和微型机电系统的发展对于国际和航天技术有着重要意义,因此受到世界各国的广泛重视。据文献报告^[2],美国 Draper 实验室在 1991 年研制成一种惯性测量装置的样机,其尺寸为 $2\text{cm} \times 2\text{cm} \times 0.5\text{cm}$,重量为 5g ,而陀螺漂移误差为 10deg/h 或更低。美国宇航局已开始实施一项低费用的“发现号”微型卫星计划,并于 1993 年提出了纳米卫星(nanosatellite)的概念,它代表了人造卫星设计构思和运行系统的一种新模式。同时,还对卫星小型化进程规划出三个层次:即小型卫星,能用小型运载火箭发射的常规设计的航天器,质量范围约为 $10\text{kg} \sim 100\text{kg}$;微型卫星,在所有的系统中全部采用微型机电系统的设计和制造技术,质量在 $0.1\text{kg} \sim 10\text{kg}$ 范围;纳米卫星,它是一种分布式的体系结构,例如以硅或其它半导体材料为基片的集成微型仪器实现卫星的各种功能和控制,并将尺度缩至最小的航天器,其质量可以小于 0.1kg 。

微型机械的发展与纳米加工和测控技术的不断完善密切相关。纳米加工技术包括超精密切削加工、化学腐蚀、能量束(光束、电子束、离子束)加工以及扫描隧道显微镜加工等。近来,德国卡尔鲁斯

核研究中心的微型机械研究所开发成功一种名为 LIGA 工艺的新式微细加工方法,它是 X 射线深层刻蚀、电铸成型和塑料模铸的组合,目前已用来制造静电电机、硅齿轮和传感器中的膜片。LIGA 工艺与大规模集成电路制作技术相结合,可以制作成各种具有广泛用途的微型结构。

近年来,在微型机械研究中出现一个新的趋势,即发展机电组合的系统,被称为微型机械电子学。利用大规模集成电路的微细加工技术,将执行机构、驱动器、传感器、控制器等集成在一个多晶硅片上,它既可以将传统的无源机构变为有源机构,而且可以制成一个完整的机电一体化的微机电系统,整个系统的尺寸有可能缩小到几毫米至几百毫米范围。目前,国外已着手研究采用类似于制造芯片的光刻工艺在硅材料上刻蚀微机械构件,如阀门、齿轮、弹簧、杠杆和悬臂、滚动轴承等。所不同的是集成电路大多是二维图形,而微机械构件属于三维刻蚀。

微型机械和微型机器人具有广阔的应用前景,它的出现无疑将深刻影响国民经济和国防工业各个部门的未来发展。1991 年 3 月美国国家关键技术委员会向总统提交的报告指出:“微米级和纳米级技术的发展已使人们能开发出一类新的显微级尺寸的器件。这些器件能在诸如环境控制、医学等不同的领域工作。它们的低成本及比现有器件高的灵敏度可能使许多领域会有突破”^[2]。美国国家科学基金委员会调查报告还列举了它们在生物血管中和眼科手术中诊断和治疗、微细检测与修补,以及通讯、工业、农业、航空航天、军事等方面 25 个有重大应用前景的领域^[3]。

3 纳米机械学的范畴与组成

在微机械研究中,随着纳米加工、材料处理和微测控技术等的不断发展,人们已制造出各种微型机械零件、微型电机与微能源、驱动器、传感器等器件,并利用这些器件组合而成的微型机器人。然而,将各种器件有效地组合成具有一定功能的机械系统就需要发展纳米机械学研究。

通常机械工程包含机械学和机械制造学两大学科,它们分别对应于机械系

统从构思到实现所经历的设计和制造两个阶段。纳米机械学的任务就是以微型机械及其系统的设计为目标,研究各组成单元的工作原理、特性和设计理论与方法;通过创造性思维过程,规划出符合社会、生产和科学技术发展所需要的微型机电系统的组成结构;并对系统进行功能综合和定量描述其性能。

如上所述,微型机械不是传统机械单纯地在尺度上微小型化,而通常是指可以成批制作的集合微机构、微驱动器、微能源以及微传感器和控制电路、信号处理装置等于一体的微型机电系统。因而它远远超出了传统机械的概念和范畴,而是基于现代科学技术,并作为整个纳米科技重要组成部分和用一种崭新的思维方式与技术路线指导下的产物。由于微型机械在尺度、构造、材料、制造方法和工作原理等方面都与传统机械截然不同,因而作为微型机械设计基础的纳米机械学在学科基础、研究内容和研究方法等方面也与传统机械学不同。纳米机械学具有独特的学科系统而构成一门新兴学科。

相对于传统机械而言,微型机械具有体系小、重量轻、能耗低、集成度高和智能化程度高等一系列特点。因此,纳米机械学的研究内容不仅与微电子学密切相关,而且还广泛涉及到现代光学、气动力学、流体力学、热学、声学、磁学、自动控制、仿生学、材料科学以及表面物理与化学等领域,所以纳米机械学又是一门多学科的综合技术。

根据微型机械的特点和发展情况,现阶段纳米机械学研究主要包括:研究机械中运动变换和动力传递,以及机械系统在运动过程中动态特性的微机构学;研究适用于制造微型构件而性能独特的材料及其在环境影响下的变形响应和失效规律的微结构材料力学;以及从原子、分子尺度出发,研究相互运动接触界面上的作用、变化与损伤机理和对策的纳米摩擦学或微摩擦学。此外,还有将微机械学应用于研究特定机械系统的如微型机器人学等。应当指出,随着微型机械的发展,纳米机械学将会不断扩充其研究内容而出现更多的学科分支。

4 纳米机械学研究的特点与展望

根据微型机电系统的研究现状和发

展趋势,以下将从微型机电系统的特征出发,分别讨论微机构学、微机构材料力学、纳米摩擦学三个学科领域存在的关键问题和由此而提出的研究方向。

4.1 微机械学(含微机构动力学)

微机构是微型机电系统的主要组成单元,要求在微小空间内有着能量传递、运动转换和调节控制等功能,以实现规定的动作和精确度。

微机构设计通常有以下主要特点:

(1)微型机械研制的难点之一是通常不可能从外部连续地获取较大的能量,因而要求微型机械实现有源驱动,即微能量装载于各种活动的微型装置中,并提供原动力。微能量主要有薄膜光电池和单体微电池,目前薄膜光电池的厚度已经达到微米量级,人们正在研究具有高功率密度和高储能密度的单体微电池。

微型机械的动力可以来源于微电机或者微驱动器,由它们提供旋转运动或直线运动。

到目前为止,人们已经设计了五类微电机,即静电机、超声电机、电磁电机、谐振电机和生物电机。其中,静电机应用较多,其运动方式可以是同步式、摇摆式或摇摆步进式。由于微电机切割磁力线的能量极微弱,故依靠静电力驱动,即依靠电极上分布电荷产生的吸力和斥力驱动。通过转换静止电极和运动电极上的电荷,可以使转子连续运动,转速可达 15000 rpm,甚至更高。微机械的驱动器大多采用压电元件,例如压电陶瓷实现步进式运动,其移动步长可以调节,驱动精度可达微米级或者更高。

在微型机电系统中也有采用微涡轮机作为原动力,通过封闭在系统内的微量压缩流体驱动,它应用于能量损耗极少的场合。

(2)由于受到空间尺寸和驱动能量的限制,微型机械系统应尽可能缩短运动链和减少机件数量,尽可能将能量传递、运动转换和执行调节等机构统一成一体,有时甚至还包容传感器、测控电路等附属装置。为此,微机构通常设计成具有多种功能的组合机构。

为了适应机构的微小型化,有时将膜片、弹性梁、铰链、弹簧等相结合,利用它们的变形来实现机构的多自由度运动。

(3)全部由机械机构组成的微型机械几乎不存在,通常是机械与电子技术

组合而成的机电一体化系统。近来国际上兴起的微机械电子学研究就是应用集成电路制作技术,将各种器件集成在一块多晶硅片上组成功能完整的系统。这样,不仅尺寸减少,而且具有惯性小、热容量低,容易获得高灵敏度和高响应性的特点。此外,硅材料通常无内部缺陷,而且机械性能和抗蠕变与抗疲劳能力良好。

(4)在微机构设计中,尺寸效应是不可忽略的因素。对于微机构各微小构件,制造误差与构件尺寸之比相对增大,导致微机构的运动特性受制造误差的影响很大。再加上弹性变形的影响,使得运动精确度成为微机构研究的关键问题。

机构学是对各类机构进行运动和动力分析与综合的学科。针对微机电系统的特点,微机构学今后的主要研究方向可归纳如下:

(1)微机械电子系统组成原理与综合研究:以微型化和低能耗为目标的多自由度微机构开发研究;多功能微组合机构研究;微机构与微电子或微光器件等的集成系统的合理组成原理及设计准则研究。

(2)微机械系统的动力学研究:高效、长寿命微动力装置开发与性能研究;微机构及其组合系统的动力学分析;微机械系统弹性动力学与多柔体系统动力学研究。

(3)微机械系统精确度研究:考虑制造误差、构性弹性、运动副间隙以及摩擦、冲击等影响的运动精度分析与控制研究。

4.2. 微结构材料力学

用于制造微构件的材料既要保证微机械性能要求,又必须满足纳米加工方法所需条件。微结构材料及其力学性能研究具有以下特点:

(1)传统机械常用的材料是经过熔炼、压延、切削加工等成形过程,而微机械构件大多用气相、液相或固相方法等不同的制造过程,因此,它们的物理性能与整体材料不同,而且材料性能随着构件结构和制造方法与工艺参数变化很大^[4]。

微型机械所用材料应根据构件的功能和制造方法来选择。例如,对于致动功能材料有:水晶、氧化锡、PZT 等电致伸缩材料、钛镍合金形状记忆材料、镍铁合金等永磁材料、凝胶等受热相变材料。对于用作构件的材料,若采用半导体微细

加工时,可采用单晶硅、多晶硅、氧化硅等硅材料,陶瓷和聚酰亚胺等非金属材料,以及铝、钨、钼、铬、金等金属材料。对于 LIGA 加工方法,主要采用镍、铜、金等金属材料和塑料。超精密切削加工则以各种金属作为构件材料。

(2)当构件缩小到一定的尺寸范围时将出现尺寸效应,即材料性能和构件的力学行为将发生很大变化。

尺寸效应的影响反映在许多方面。构件尺寸减小,材料内部缺陷减少,因而材料的机械强度显著增加。微构件的弹性模量、抗拉强度、断裂韧性、疲劳强度以及残余应力等均与大构件的不同,而且有些表征材料性能的物理量需要重新定义。

尺寸效应对于微构件的受力情况也有很大影响。凡与尺寸高次方成比例的力如惯性力、电磁力等的作用相对减弱,而与尺寸低次方成比例的粘性力、表面张力、静电力、摩擦力等的作用显著增强。此外,由于表面积与体积之比相对增加,因而热传导和化学反应速度也相应增加。

由上可知,微结构材料及其力学分析是微机械设计的重要组成部分之一,其关键问题有:

(1)微结构材料及其物理性能研究:适用于微构件制造的各种功能材料、结构材料的开发与应用研究;微材料的物理性能、本构关系及其与制造工艺的相关性研究;微材料物理性能的测定技术及表征方法。

(2)微机械结构的力学分析与失效研究:微结构材料的力学性能测定、失效分析及设计准则研究;微结构如膜片、梁、杆、弹簧等变形场和应力场分析计算;在特定环境下微机械系统动力学研究。

4.3. 纳米摩擦学

微机械系统设计对摩擦学研究提出了许多特殊的要求,主要有:

(1)微机械设计对于摩擦特性的要求各不相同。对于作为运动阻力的摩擦,由于微机械的能量很小,因而应尽可能地降低摩擦能耗,甚至实现零摩擦。另一方面,微机械往往利用摩擦作为牵引或驱动力,此时则要求摩擦力具有稳定的数值而且可以适时控制。

(2)最大限度地降低磨损是保证微机械功能和寿命的关键。例如计算机中大容量高密度磁盘与磁头间隙小于

50nm,要求软磁盘每滑动10km~100km的磨损量小于一个原子层,而对硬磁盘要求磨损率为零^[5]。

(3)经超精密加工的微机械,摩擦副间隙常处于纳米量级,必须采用以分子膜为基础的薄膜润滑技术以达到减摩耐磨目的。此种纳米量级的润滑薄膜性质不同于通常的粘性流体膜和吸附边界膜,它是一种特殊的润滑状态。

纳米摩擦学主要研究内容包括纳米膜润滑和微摩擦磨损机理及其控制,现阶段的重点研究领域可归纳如下:^[6]

(1)微摩擦磨损特性与机理研究;滑动磨损中界面分子层的粘着损伤与材料转移规律;微摩擦过程的粘滑行为及其抑制研究;材料摩擦的各向异性行为与

零摩擦研究。

(2)纳米量级薄膜润滑状态研究:自组装、可控有序分子膜的成膜机制及其润滑性能研究;纳米量级润滑膜的流变特性与壁面效应、时间效应研究;薄膜润滑状态转化与失效准则。

(3)薄膜材料摩擦学与表面分子工程研究:表面薄膜材料的微摩擦磨损性能与应用研究,包括软膜材料(金膜、钢膜等)和硬膜材料(类金刚石膜、Ni-P非晶膜、非晶碳膜等);表面分子工程即通过优化表面层分子结构以控制摩擦磨损性能的研究。

此外,微型机电系统中带电摩擦副的损伤与防护,以及超净装置的微密封技术也将是有待于研究的问题。

5 参考文献

- 1 生田幸士·マイクロマシン开发的课题。机械设计。1990,35(15),29-31
- 2 丁衡高·微米/纳米技术—面向21世纪的军民两用技术。仪器仪表学报。1995,16(1),1-7
- 3 蔡鹤皋,孙立宁,安辉,张涛·微型机械和微机器人的发展状况。仪器仪表学报。1995,16(1),38-41
- 4 宫崎修·マイクロマシン开发ヒマイクロ材料学。金属,1993,3,2-3
- 5 R. Kaneko·Microtribology·JSME International Journal, Series C, 1994, 37(1),1-6
- 6 温诗铸·纳米摩擦学研究现状和展望·仪器仪表学报,1995,16(1),32-37

纳米材料的研究现状和发展趋势

Research Situation and Future of Nano-meter Sized Materials

张立德

(中国科学院固体物理研究所 合肥 230031)

【摘要】 本文详细阐述了纳米材料研究的现状和发展趋势,讨论了纳米材料不同研究阶段的内涵、特点和取得的成果;分析了纳米材料发展的几个热点领域,对纳米材料发展的趋势进行了展望。

【Abstract】 The research situation and future of nano-meter sized materials are reviewed in this paper. The contents, features and progress at different research period are introduced together with the analysis and evaluation of the research hot-spots and future.

关键词: 纳米材料 综述 热点领域 展望

Key words: Nano-meter sized materials Review Hot-spot and future

1996年,有关纳米材料科学的国际会议和洲际会议召开了二十多次,其中比较大的国际会议有五次,它们分别是国际第三届纳米材料学术会议(1996年7月,夏威夷)、国际第四届纳米科技会议(1996年9月,北京),国际纳米材料学术会议(1996年5月,罗马),欧洲纳米材料会议(1996年10月,柏林),国际纳米科技会议(1996年10月,慕尼黑)。有关纳米材料科技的学术论文,每年以20%速度增加,仅在国际上几种著名的学术刊物(影响因子超过3.0)上发表的有关纳米材料的重要学术论文几乎每期都有相当数量,有关纳米材料的专利,1996年比90年代初期增加近两倍。纳米材料研究发展速度之快,对各个领域影响之深,出乎人们意料之外。特别是纳

米材料的应用研究已影响到许多领域,逐渐渗透到传统工业和高科技企业。美国自1994年11月到1995年11月连续召开两次大型的纳米材料商业化会议,由政府牵头,科学家、企业家和商业家参加,共同商讨纳米材料的应用和开发。欧洲共同体科学基金会资助欧洲纳米材料应用会议每年一次。日本纳米材料的应用研究已渗透各个领域,并有纳米材料的商品出售。面对这种形势,如何在“八五”研究的基础上布署“九五”纳米材料的研究是关系到我国纳米材料研究能不能在国际上占有一席之地,能不能对我国高科技企业及国民经济产生重要影响的大问题,我们必须重新思考纳米材料研究的布局,把握好研究方向,明确基础研究和应用研究的目标。为了解决好这

一问题,必须对国际纳米材料研究的态势、特点、动向和发展趋势作认真的分析。

1 纳米材料研究的现状、特点和发展趋势

1.1 纳米材料研究的三个阶段

自70年代纳米颗粒材料问世以来,80年代中期在实验室合成了纳米块体材料,至今已有20多年的历史,但真正成为材料科学和凝聚态物理研究的前沿热点是在80年代中期以后。从研究的内涵和特点大致可划分为三个阶段:第一阶段(1990年以前)主要是在实验室探索用各种手段制备各种材料的纳米颗粒粉体,合成块体(包括薄膜),研究评价表