

功能材料驱动的微执行器及其关键技术*

贾振元 王福吉 郭东明

(大连理工大学机械工程学院 大连 116024)

摘要：以新型功能材料为驱动元件的微执行器是精密加工、超精密加工和微机械发展的关键技术之一，对其驱动元件、结构设计、加工制造和精密测控等方面的研究具有重要的科学意义和实用价值。分析了国内外研究热点和具有代表性的压电、形状记忆合金和磁致伸缩材料等功能材料的优异性能及其微执行器的驱动原理和结构特点，阐述了功能材料驱动的微执行器技术的发展趋势，指出了功能材料驱动微执行器技术发展的关键技术。

关键词：新型功能材料 微执行器 驱动技术

中图分类号：TG156

0 前言

精密加工和超精密加工是先进制造领域的重要方向之一，它的发展是其他尖端技术的基础，是推动整个科技向更高层次发展的重要手段，也是现阶段必须突破的关键技术。我国从“九五”规划开始，已将其列为关键技术之一。精密、超精密加工技术是包括精密微加工、精密测量和精密控制的一门综合学科，而精密微驱动技术即微执行器技术是实现的关键。与此同时，近年来微机械技术得到了广泛重视和发展，目前微机械技术研究主要涉及：微机构的设计、选材、加工及装配技术的研究。微执行器、微传感器和微控制器的研制。微机械系统技术(运动的控制、能量的供给及传输等)的研究。

微细几何量、机械量的测试技术的研究等诸方面。其中微执行器既可构成微机械的动力部分，亦可成为微机械的操作或执行机构。所以说，微执行器是微机械技术研究的核心内容，是超精密加工技术发展的关键技术基础。国内外的著名大学和实验室都将有关微执行器的设计、加工制造技术及测控技术等研究作为超精密加工技术和微机械技术研究的一个重要方向和突破口。

微执行器作为一种换能器，将光、电、热及磁等多种形式的能量转换成为机械能输出。因此，它有多种不同的工作原理和结构形式。若从能量转换形式分类，有静电驱动、电磁驱动、压电驱动、形状记忆合金驱动、磁致伸缩驱动、光驱动、凝胶驱动、热驱动以及超导驱动等形式。目前以压电、形

状记忆合金和磁致伸缩三种新型功能材料为驱动元件的微执行器技术得到了广泛关注。

作为 21 世纪人类文明的重要支柱，功能材料是通信、电子、能源、交通、空间科学、现代技术和人类生活发展的基础，在信息时代起到基础和核心作用，是现代国防的坚强后盾。功能材料有两类：一类是对外界(或内部)的刺激强度(如应力、应变、热、光、电、磁、化学和辐射等)具有感知的材料，通称感知材料，用它可做成各种传感器；另一类是对外界环境条件(或内部状态)发生变化作出响应或驱动的材料，这种材料可以做成各种执行(或驱动器)。其中以压电、形状记忆合金和磁致伸缩为代表的三种新型功能材料既具备感知功能，又具备响应功能，且具有易于智能化、集成化和微型化的特点，成为近年来功能材料方面研究的热点。随着对以上三种功能材料进一步的深入研究，结构和物理性能优异的功能材料将逐步实现商品化。新型功能材料技术的不断成熟为微执行器技术的研究开辟了新的研究思路和应用领域，解决了微执行器结构复杂、难集成化和智能化的问题。基于新型功能材料为驱动元件的微执行器已在现代精密加工、航空、航天飞行器、医学、建筑和工程及机器人等领域得到应用。微执行器在超精密加工中的广泛应用将推动超精密加工技术朝着高精度、智能化和数字化方向发展，最终使之成为现代制造业的主导^[1~4]。

1 新型功能材料的性能

功能材料是指通过光、电、磁、力、热、化学和生物化学等作用后，具有特定功能的新材料。其定义及内涵是十分广泛的，涉及的材料从金属、无机到有机，结构层次从宏观(如大型工程结构件)至微观(如纳米组装材料)。功能材料的重要性体现在

* 纪念《机械工程学报》创刊 50 周年——“机械工程技术的历史、进展与展望”主题征文。国家自然科学基金(50275021)和教育部分校博士点专项基金(2000014109)资助项目。20030621 收到初稿，20030725 收到修改稿

两个方面：一方面，由于功能材料是多学科交叉的一门学科，与物理、化学、力学、电子学、人工智能、信息技术、材料合成及加工、生物技术及仿生学、生命科学、控制论等诸多前沿科学及高技术领域紧密相关，一旦有所突破将推动或带动许多方面的巨大技术进步；另一方面，功能材料与结构有着巨大的潜在应用前景，例如材料的智能化、集成一体化更容易实现结构微型化；由于能在线“感觉”，并可通过预警、自适应调整及自修复等方式，预报以至消除危害性“病兆”，从而极大地提高关键工程结构件的安全性和可靠性，避免灾害性事故的发生。正是由于功能材料智能化与结构的重要性，因而引起了各工业发达国家的重视。预计在 21 世纪功能材料将引导材料科学的发展方向，其应用和发展将使人类文明进入更高的阶段。

功能材料的种类多种多样：主要有功能金属材料、功能无机非金属材料、功能高分子材料、功能晶体材料、功能复合材料、功能梯度材料和具有特殊结构的功能材料等。其性能更是涉及广泛，主要包括电、磁、声、热、光、力、化学和生物学等方面的物理性能和力学性能，通过功能材料的这些特殊性实现能量和信号的转换、吸收、存储、发射、传输、传感、控制和处理，然后广泛应用于机械制造、机器人、航空航天、建筑、日常生活、医学和生物工程等领域中，达到改善物体结构性能、实现遥感遥测、精密操作、微进给等功能。其中具有大功密度、大应变、高机电耦合系数、响应速度快、控制精度高及易于集成化、智能化、微型化等性能的功能材料最能适应现代微执行器技术发展的要求和特点，在国内外得到广泛的重视。目前微执行器领域研究的热点主要集中在以形状记忆合金、压电和磁致伸缩材料这三种材料为驱动元件的驱动原理和方法、结构优化设计、精密控制和高频响应等方面，并取得了一定的成果^[5]。

2 国外对功能材料驱动微执行器技术的研究

1959 年就有科学家提出了微型机械的设想。1962 年制成第一个硅微压力传感器。由于微执行器是比较复杂、难度大的微形器件，其研究进展比较缓慢。20 世纪 70 年代开始进行具体的微执行器的研究，直到 1987 年可以说是微执行器发展史上的一个里程碑，加州大学克利实验室首次制作出了直径 100 μm 和 60 μm 的微马达，在国际上引起了高度重视。随后各国学者先后利用各种功能材料

研制出具有不同功能的，适用于不同环境的微执行器，如微阀、微泵、微开关、微扬声器、微谐振器和微电动机等。

随着现代精密加工技术的发展，为了适应微型化、集成化的要求，研制一种具有低电压、大输出力、大输出位移的微执行器显得如此重要。形状记忆合金材料以其功密度大(约为 10^3 W/kg)、可恢复应变大(约为 8%)、变形回复应力大(约为 500 MPa)、驱动电压低(几伏)、力学性能优良、无毒、耐磨、耐腐蚀以及良好的生物相容性等显著优点成为这种微执行器的主要驱动元件。形状记忆合金材料驱动微执行器技术经历了比利时的 Reynaerts 等研制的 TiNi 合金丝驱动的医用固体药剂注射系统^[6]、德国 IMT 的 Kohl 等研制 TiNi 薄板驱动用于激光切割加工的微钳^[7]，到美国 TiNi 合金公司 Johnson 等研制的 SMA 薄膜驱动微气阀过程。这种微气阀的原理结构如图 1 所示^[8]。该微阀由上下座组成。上座为 SMA 薄膜驱动组件，俯视有一孤立的 Si 岛，Si 岛与四周 Si 框间靠 TiNi 薄膜连接，内部需通入控制气体；下座为实际流体控制部件，有实际流体控制通道和聚酰亚胺气动膜。如对上座的 TiNi 薄膜通电加热，由于 TiNi 膜中的 M 逆相变而收缩，则会将 Si 岛拉起回复至与上 Si 框平齐，从而使上座的控制气体的阀口打开，上座内气压由于控制气体的正常流入和流出而气压立即下降，此时下座的聚酰亚胺膜因此而凸起，即下座实际流体的阀口打开(如图 1a)。反之，如对上座的 TiNi 膜断电冷却，则由于上座 Si 岛自身重力的作用，正好下落封住控制气体的阀座入口，使上座内气压升高，此时下座的聚酰亚胺膜恢复平直，下座实际流体阀口因此而关闭(如图 1b)。

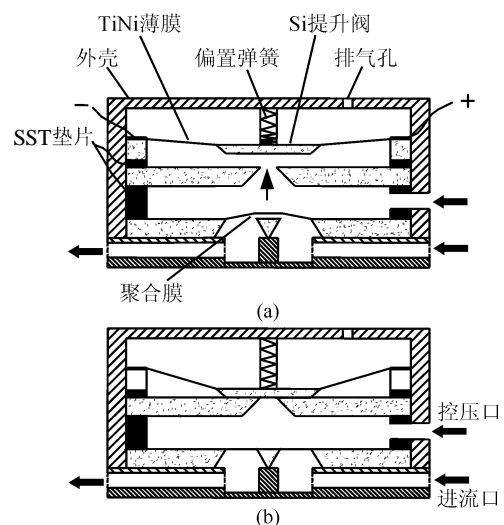


图 1 SMA 薄膜微气阀工作原理图

当今现代精密加工技术已发展到微米、纳米级精度，因此具有高精度、快响应速度、大动态范围和驱动力、高位移分辨率和控制精度的微执行器技术已经成为其发展的必然趋势。压电材料最大的特点是微米、纳米量级的位移或运动提供了新手段和新途径，并具有线性好、控制方便、位移分辨率高、频率响应好、不发热及无噪声等优点，所以，压电微执行器已成为一种理想的微位移驱动装置。日本是最早进行压电微执行器技术研究的国家之一。其中 DENSO 公司研制的用于工业管道自动化检测的微型机器人使用了压电元件作为执行器^[9]，这是世界上最早将压电微执行器用于机器人上，并取得了很好的效果。随后德国 Karlsruhe 大学用压电驱动器作为驱动单元研制成功的定位机器人^[10]，可实现 3 自由度的运动，其最大线性速度为 0.02 m/min，旋转速度为 1 r/min，驱动电压为 -20~+20 V，运动精度为 175 nm。最近美国加利福尼亚大学结合仿生学原理，研制了用于微飞行昆虫的振翅压电微执行器，如图 2 所示^[11]。该执行器为压电双晶片型，质量为 15 mg，驱动电压为 200 V，机械传动效率高达 95%，执行器的振动频率可达 150 Hz。驱动器的最大速度为 0.9 mm/s，最大步长为 36 μm ，最小步长 0.142 μm 。美国 Allied Signal Acrospace, Kansas City Diviswion 与 Missouri-Rolla 大学联合研制了直径为 8 mm 的行波马达^[12]，并在着手于马达的集成化生产的研究。这一技术将压电微执行器技术的研究推向了一个新的起点和方向，其应用前景将更加广阔。

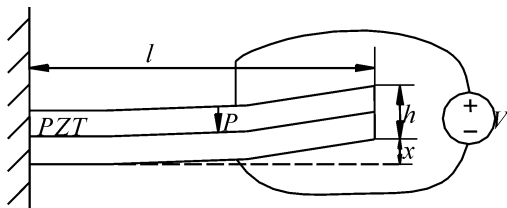


图 2 振翅压电执行器

现代精密加工技术已经发展成为一门多学科交叉的综合学科。针对复杂曲面、狭小几何空间、化学腐蚀严重、材质硬脆的零部件的特种精密加工则要求微执行器部件具有无缆驱动、控制精度高和响应速度快的特点，以保证对复杂零件的深腔精密加工。以 Terfenol-D 为代表的稀土超磁致伸缩材料作为一种新型高效磁(电)-机械(声)转换材料，性能远优于压电陶瓷等其他材料。以这种材料为驱动元件的电-机转换技术，在大应变、强力和高功率密度及高精度、快速响应和高可靠性等方面是任何传统技术无法比拟的，可以很好地解决压电微执行器冲

击大和高电压驱动易造成短路等问题，并以其独特的驱动方式使无缆驱动成为可能，它的出现立即引起了高技术领域的关注。国外用稀土超磁致伸缩材料已研制出声纳和超声换能器，以及精密定位、马达、泵、阀、燃料注入、主动减振和制动等方面的执行器件，可用于有关海洋、地质、航空航天、运输、加工制造、医学、计算机、机器人、仪器、电子及民品等技术领域。

超磁致伸缩材料最初是以体状形式应用于微执行器中，其中以 Urai 设计的新型超磁致伸缩伺服阀最具代表性，如图 3 所示。这种伺服阀结构紧凑、精度高、响应速度比电液伺服阀快，其最大输出流量达 2 L/min，响应可达 650 Hz。以后还出现了日本茨城大学的江田弘和 Toshiba 公司的 T. Kobayashi 采用超磁致伸缩材料作为驱动元件，设计了装备在大型光学金刚石车床上的微进给装置及其测控系统。系统中采用温度控制器，使冷却线圈的水温度控制在 0.01 以内。采用此微进给装置的金刚石车床加工玻璃等硬脆材料的尺寸精度和表面粗糙度可控制在几个纳米以内；美国 ETREMA PRODUCTS 公司也利用超磁致伸缩材料研制出超精密车床的微进给机构，并取得良好的效果。由于精密加工微型化的发展，体状材料已经不能适应其发展要求，超磁致伸缩薄膜材料在这种背景下得到重视并被应用于微执行器中。图 4 是德国的 E. Quandt 等利用超磁致伸缩薄膜作为驱动元件，设计的一种悬臂梁式磁致伸缩微阀门^[13]。图 4a 和 b 分别为阀门关闭和开启时的示意图，图 4c 为阀的 A 向截面图。当阀门关闭时，通道口与镀有磁致伸缩薄膜的基片紧紧相接，液体在连通的上下两个腔体中同时存在但不能外流。当有外加磁场时，磁致伸缩薄膜发生形变从而使基片产生弯曲，这时通道口与基片相分离，液体便从上腔经过出口流出，经研究表明：当外磁场强度为 30 mT 时阀门产生最大开口量。

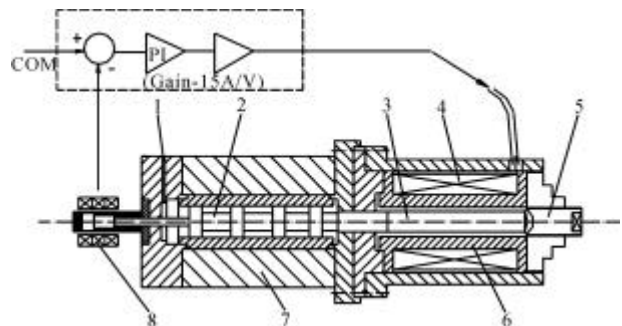


图 3 超磁致伸缩直动式伺服阀

1. 预偏压压力油口
2. 阀芯
3. 磁致伸缩棒
4. 线圈
5. 调节螺钉
6. 骨架
7. 阀体
8. 位移传感器

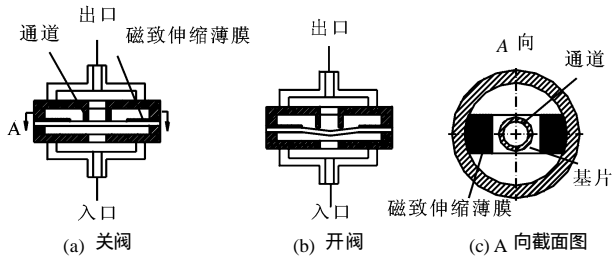


图 4 悬臂梁式磁致伸缩微阀门

日本的荒井贤一等人采用超磁致伸缩薄膜元件设计了非接触式驱动微型行走机械,如图 5 所示^[14]。他们在厚为 $7.5\ \mu\text{m}$ 的聚酰亚胺基片的上、下表面各镀一层分别具有正、负磁致伸缩效应的超磁致伸缩薄膜,薄膜的厚度为 $1\ \mu\text{m}$ 。基片两端是倾斜的腿,用来支撑和行走。它的工作原理是,利用外加磁场与行走机械共振,以大幅度地提高机构的行走速度。此微行走机械可向前或向后运动。当外加磁场为 $3.98 \times 10^4\ \text{A/m}$,激励频率为 $70\ \text{Hz}$ 时,其向前行走的速度能达到 $65\ \text{mm/s}$ 。

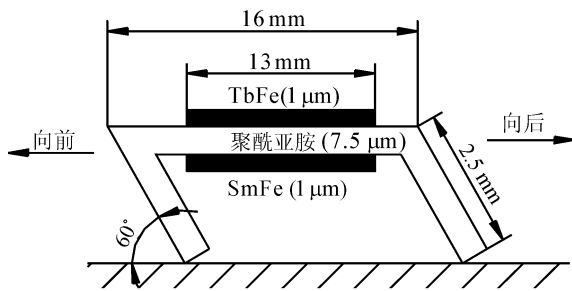


图 5 微型行走机构

3 国内对功能材料驱动微执行器技术的研究

我国在功能材料方面的研究起步比较晚,导致相关微执行器技术发展相对落后。但随着近年来国际学术交流活动的开展,我国的功能材料驱动微执行器技术研究进步很快,在结合先进制造技术基础上,研制出各种性能优异的功能材料,为微执行器技术的研究提供可靠的基本保证。目前我国研制的微执行器的驱动元件也主要集中在形状记忆合金、压电、磁致伸缩及高分子凝胶材料等几种新型功能材料上。下面对近年来我国微执行器技术研究予以简述。

上海交通大学信息存储研究中心对形状记忆合金驱动微执行器技术的研究比较深入,他们利用具有大的相变回复应力 TiNi 形状记忆合金薄膜(SMA)和反偏置力 Si 衬底膜的复合膜作为驱动元件,研制了 TiNi/Si 复合膜微型泵,结构如图 6 所示^[15]。其

工作原理是利用 TiNi 薄膜通电加热产生大的相变回复应力,而断电冷却时利用 Si 基底膜良好的弹性产生偏置力,从而实现了一定位移量的双向运动,如对这种 TiNi/Si 驱动膜通以一定频率的交变电流,微执行器便可产生垂直的往复运动,使流体不断地泵入再泵出,该泵最大流量达 $340\ \mu\text{l/min}$ 。

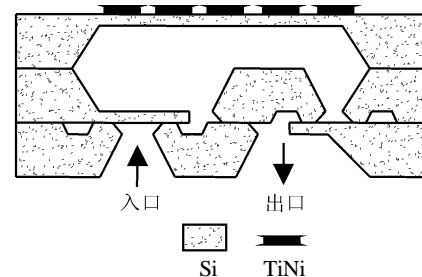


图 6 TiNi/Si 复合膜驱动的微泵

我国在压电材料及其微执行器技术方面的研究成果显著,其中一些研究成果已经达到国际先进水平。已取得的研究成果主要有中国科学院长春光学精密机械研究所压电叠堆作为驱动元件,研制了用于精密工作台上的压电陶瓷微位移执行器。该执行器用在两个方面:一是对工作台的微动台进行驱动,目的是为了解决工作台定位的准确性;另一个是对导轨直线进行误差补偿。天津大学利用压电陶瓷作为微位移执行器,研制的微进给工作台,其位移最大可达 $15\ \mu\text{m}$,分辨率为 $0.1\ \mu\text{m}$ 。同济大学根据“尺蠖式”进给原理,研制了“双脚步推式”压电执行器,利用该执行器研制了在大范围具有高分辨率、能连续平稳进给的微型进给机构。上海交通大学研制了多种用于驱动管道机器人的压电执行器,如弹性足式压电驱动器等。上海大学研制了以压电叠堆作为驱动元件的微小夹持器。这些压电微执行器大多在实际中得到应用,并收到很好的效果^[16]。

国内近年来在复杂曲面、狭小几何空间零件超精密加工技术方面取得了一定的成果,此项技术进一步发展的关键在于如何提高其超精密定位精度和加工质量。超磁致伸缩微执行器的无缆驱动、响应速度快、响应频率和控制精度高等特点,使其在超精密加工领域具有广阔的应用前景。国内浙江大学利用超磁致伸缩材料开发研制了活塞异型销孔的制造系统^[17]。哈尔滨工业大学利用超磁致伸缩棒研制的超磁致伸缩微位移执行器的位移分辨率达到 $0.5\ \text{nm}$,位移范围达到 $40\ \mu\text{m}$ ^[18]。大连理工大学利用磁场和位移自感知的原理,实现对其研制的超磁致伸缩微位移执行器的闭环控制,提高了微位移的定位精度,减小了迟滞和非线性,如图 7 所示^[19-22]。

在此前研究基础上,国内已经开始探索性的将超磁致伸缩微位移执行器应用到实际的超精密加工定位系统中,以达到提高精密加工的定位精度,为超磁致伸缩微执行器的实际推广利用奠定一定的基础。

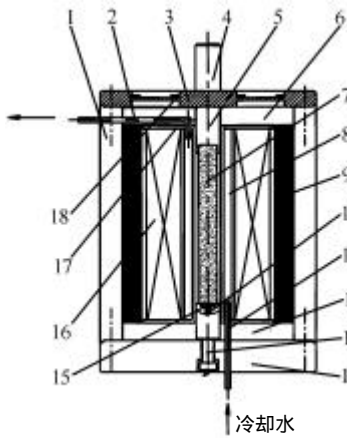


图 7 位移与磁场自感知型超磁致伸缩微位移执行器

1. 外套 2. 出水管 3. 弹性变形体 4. 位移输出轴 5. 上导向块
6. 上导磁体 7. 超磁致伸缩棒 8. 冷却水箱 9. 永久磁铁
10. 下导向块 11. 出水管 12. 下导磁体 13. 预紧螺钉
14. 底盖 15. 霍尔传感器 16. 线圈
17. 线圈骨架 18. 电阻应变片

4 功能材料驱动微执行器技术的发展趋势

微执行器技术的发展刚刚经历了十几年,在功能材料和微加工技术不断发展的同时开发研制了一批具有适用于众多领域的微执行器,显示了巨大生命力,在国防、航天、机器人、工业控制、医疗、通信、光学、生物工程、农业和家庭服务等领域有着潜在的巨大应用前景。当前利用形状记忆合金、压电和磁致伸缩等功能材料研制的微执行器驱动控制的机器人、精密加工机床、微泵、微阀、微谐振器和微开关等设备已开始在高技术发展中发挥其巨大作用。

微米、纳米级精密定位精度已成为现代精密加工和微机器人发展的关键技术,现代精密定位技术已经发展成一门交叉科学,和它相关的每一项技术的发展都会促使精密定位技术的发展。随着微电子学、材料学和信息学等的不断发展,精密定位技术具备了更好的发展基础。由于其巨大的应用前景和经济效益以及政府、企业的重视,精密定位技术的发展必将有更大的飞跃。新原理、新功能和结构体系的精密定位系统将不断出现,并可嵌入大的机械设备,提高自动化和智能水平。

微执行器技术作为精密定位的最关键技术,也

必将有一个大的发展。作为微执行器技术的主要驱动部件,采用磁控溅射、物理沉积、LIGA 加工工艺以及 SCREAM 工艺等多种工艺相结合的加工方法,加上多种多样的加工手段制作出具有微结构、易于与电路集成、适合各种要求的材料特性和表面特性的功能材料是其发展的重要方向。微执行器设计方面正向着进行微结构和工艺设计的同时实现器件和系统的特性分析和评价的设计系统的实现方向发展,并引入虚拟现实技术。总之,微执行器技术发展的总趋势是小型化、集成化、多功能化、智能化和系统化。

我国在微型执行器技术发展的优先领域是材料科学、环境监测、航空航天、工业与国防和生物学等领域,利用我国功能材料原料丰富的矿产资源,建设好几个有世界先进水平的功能材料研究开发基地,同时亦重视微执行器设计和加工方面的微观尺度上的新物理现象和新效应的研究,加速我国微执行器的研究与开发,迎接 21 世纪技术与产业革命的挑战。

5 功能材料驱动微执行器技术发展的关键技术

微执行器技术是一个新兴的、多学科交叉的高科技领域,面临许多课题,涉及许多关键技术。

在微型化方面,当一个系统的特征尺寸达到微米级和纳米级时,将会产生许多新的科学问题。如表面力学、表面物理效应、摩擦学、微磁学和微电子学等。微执行器在驱动材料、尺度效应、结构设计和制造方法等方面,都要运用新理论、新方法、新技术。其材料的微细结构、物理特性、尺度效应、制备方法,执行器微观结构设计、制造的研究是微执行器领域的重要研究内容。在集成化方面,利用现代光电子集成技术,采用新的加工、设计方法,制备具有光、电子及机械集成功能的材料成为执行器技术发展的关键。在智能化方面,研究微观电子、光、声、力及热等学科信息采集、处理、反馈、接收及转换技术也是微执行器技术发展必经之路。

功能材料驱动微执行器技术领域的前沿关键技术有如下几方面。

(1) 功能材料特种加工技术。

功能材料驱动微执行器系统主要有功能材料驱动元件、机械结构和控制三部分组成,功能材料结构性能是微执行器技术的基础。功能材料的关键技术主要是以现代材料科学发展的前沿技术为基础,根据光、电、热、磁、化学、高分子学和仿生学等

原理,结合现代特种加工技术等先进技术制造具有感知、信息传输、对环境变化作出响应及执行功能、且反应灵敏、外部刺激条件消除后能迅速回复到原始状态的功能材料。

(2) 微系统设计和加工技术。

功能材料驱动微执行器是一个典型的微型机械系统,微系统设计技术决定了整个微执行器技术发展的主流,研究内容主要包括微结构设计数据库、有限元和边界分析、CAD/CAM 仿真和拟实技术、微系统建模和微型化理论等方面的基础研究。如力的尺寸效应、微结构表面效应、微观摩擦机理、热传导、误差效应和微构件材料性能等。微执行器其他部件的微细加工技术也是其进一步发展过程中不可或缺的内容,其主要包括硅的 X 射线光刻、电镀的 LIGA 和利用紫外线的准 LIGA 加工技术;微细结构的微电火加工、能束加工、立体光刻成形加工和多种加工相结合;微系统的集成技术;微细加工新工艺探索等。

(3) 功能材料驱动微执行器的组装和封装技术。

由于功能材料驱动微执行器多用于精密定位、恶劣环境和狭小空间,要保证其工作的精确性和可靠性,则要求确保微执行器精密部件的紧凑、封闭装配。因此要进行粘接材料的粘接、硅玻璃静电封接、硅硅键合技术和自对准组装技术,具有三维可动部件的封装技术、真空封装技术等新封装技术的探索。微小器件的组装和封装技术已经成为现代机械领域的研究热门课题之一。

(4) 功能材料驱动执行器测试与控制技术。

精密测试与控制技术是其提高功能材料微执行器技术智能化、集成化和数字化控制水平的基本保证,其发展必将推动微执行器自动化技术的发展。研究内容主要有结构材料特性测试技术,微小力学、电学等物理量的测量技术,微型器件和微型系统性能表征和测试技术,微型系统动态特性测试技术,微型器件和微型系统可靠性的测量与评价技术等。

6 结 论

精密和超精密加工技术作为国际竞争中取得成功的关键技术,担负着支持最新科学发现和发明的重要使命,而其发展的关键是精密定位技术。功能材料驱动微执行器以其功能密度大、响应速度快、效应频率和控制精度高以及易于微型化、集成化及智能化的特点成为精密定位技术发展的关键。以形状记忆合金、压电和磁致伸缩等功能材料驱动元件,

根据其各自性能特点,研制的具有不同性能的微泵、微阀、微谐振器、微电动机、微小机器人等装置已在航天、航空、信息、电子、能源、交通及医疗卫生等领域得到应用。因此,在深入我国在功能材料驱动微执行器优势领域研究的基础上,应加强国际间合作与交流,探索和开拓功能材料驱动微执行器技术研究的新领域和新方向,促进我国超精密加工技术的发展,以保证在国际竞争中占有一席之地。

参 考 文 献

- 1 孙家鼎,曾周末,杨明. 国外微型机械及微执行器的研究. 光学精密工程, 1995, 3(3): 8~13
- 2 陈永辉,高名园,陈永红. 我国执行器的现状及发展趋势. 电力建设, 2001, 22(11): 46~51
- 3 孙立红. 未来的传感器和执行器. 微电子学和计算机, 1994, 11(4): 52~56
- 4 胡颂虞. 几种稀土功能材料的现状和展望. 上海有色金属, 1998, 19(2): 58~63
- 5 马如璋,蒋民华,徐祖雄. 功能材料科学. 北京:冶金工业出版社, 1999
- 6 Reynaerts D, Peris J, Brussel H V. An implantable drug delivery system based on shape memory alloy micro actuation. Sensors and Actuation, 1997, A61(1-3): 455~462
- 7 Kohl M, Just E, Pfleging W, et al. SMA microgripper with integrated antagonism. Sensors and Actuators, 2000, 83(1~3): 208~213
- 8 Johnson A D, Shahoian E J. Recent progress in thin film shape memory microactuators. In: IEEE Proc. of MEMS (MEMS'95), Orlando (USA), 1995, 216~220
- 9 古谷克司. 1991 年度日本精密工学会春季大会学术讲演会讲演论文集. 大阪, 1991
- 10 Rembold U, Fatikow S. Autonomous microrobots. Journal of Intelligent and Robotic Systems, 1997, 19(4): 375~391
- 11 Fearing R S, Chiang K H, Dickinson M H, et al. Transmission for a micromechanical flying insect. In: IEEE 2000 International Conference on Robotics&Automation, 2000: 1509~1516
- 12 Dogan A, Uchino K, Newnham R E. Composite piezoelectric transducer with truncated conical endcaps "Cymbal". In: IEEE Trans. Ultras. Ferrofreq Contr, 1997, 44(3): 597~605
- 13 Quandt E. Giant magnetostrictive thin film materials and applications. Journal of Alloys and Compounds, 1997,

258(8) : 126 ~ 132

- 14 本田崇, 荒井賢一. 磁歪薄膜を用いた微小走行機構の動作特性. 日本应用磁気学会誌, 1996, 20(2) : 537 ~ 540
- 15 徐东, 蔡炳初, 丁桂甫, 等. 新型的形状记忆合金/硅薄膜驱动微驱动. 微细加工技术, 1999(4) : 51 ~ 55
- 16 鄂世举, 吴博达, 杨志刚. 压电式微小驱动器的发展及应用. 压电与声光, 2002, 24(6) : 447 ~ 551
- 17 邬义杰, 项占琴. 新功能材料在活塞异形销孔制造中的应用. 制造技术与机床, 1997(8) : 36 ~ 38
- 18 贾宇辉, 谭久彬. 超磁致伸缩微驱动器在纳米测量中应用的研究. 压电与声光, 2000, 22(2) : 127 ~ 130
- 19 贾振元, 杨兴, 郭东明. 超磁致伸缩材料微位移执行器的设计理论及方法. 机械工程学报, 2001, 37(11) : 51 ~ 56
- 20 贾振元, 杨兴, 郭东明, 等. 超磁致伸缩微位移执行器控制方法的研究. 仪器仪表学报, 2002, 23(3) : 288 ~ 290
- 21 贾振元, 杨兴, 王福吉, 等. 具有位移感知功能的超磁致伸缩微位移执行器的研究. 应用科学学报, 2002, 20(4) : 354 ~ 359
- 22 杨兴, 贾振元, 郭东明. 超磁致伸缩执行器驱动磁场理论分析与实验研究. 大连理工大学学报, 2001, 41(5) : 578 ~ 580

FUNCTIONAL MATERIAL DRIVING MICROACTUATOR AND ITS KEY TECHNOLOGY

*Jia Zhenyuan Wang Fuji Guo Dongming
(Dalian University of Technology)*

Abstract : Microactuator droved new type functional material is one of key technologies of precision machining, ultraprecision machining and micro-machinery. Study on microactuator's drive element, structural design, precision control, machining and manufacturing, and so on, is with significance and use value. outstanding properties of piezoelectric material, shape memory alloy and magnetostriction, and driving principle and design feature of microactuator droved above materials is analyzed respectively. Development trend of microactuator technology droved functional material is expounded, and key technologies of development of microactuator droved functional material are indicated.

Key words : New type functional material Microactuator
Driving technology

作者简介: 贾振元, 男, 1963 年出生, 教授, 博士生导师。主要研究方向为精密加工与测量、功能材料应用。