

压电驱动与控制技术的发展与应用*

吴博达 鄂世举 杨志刚 程光明

(吉林大学机械学院 长春 130025)

摘要: 压电驱动器是利用压电体逆效应形成机械驱动或控制的一类装置。由于压电体具有反应快、精度高和抗干扰等优点, 因而由其所构造的驱动与控制装置结构简单、反应敏捷, 受到国内外科学家的广泛关注。目前已被开发出的压电驱动与控制装置主要有超声波电动机、精密驱动器等, 并在国防、生物医学、光电子等诸多领域获得成功应用。介绍国内外压电驱动与控制技术领域的研究现状及实际应用情况, 给出一些具有代表性的机构实例, 同时对相关性能做出评价。

关键词: 压电驱动器 压电效应 发展 应用

中图分类号: TN384

0 前言

压电驱动器是利用压电体逆效应形成机械驱动或控制能力的一类装置, 压电驱动与控制技术研究是超声学与压电学在机械领域的延伸与发展^[1]。自 20 世纪 80 年代初日本学者首先开发成功超声波电动机以来, 压电驱动与控制技术获得了迅猛发展, 现已形成了专门的研究领域, 成为近年国内外热门的研究领域之一。

压电驱动器将变形(或振动)直接作用于从动件实现机械驱动或机械控制, 而非传统驱动器那样需要先形成旋转再经转换形成为目标动力或运动, 因而一般具有结构简单、可控性好、适应性强的特点。比如作为精密驱动机构时^[2], 压电体的微小变形直接被用作为运动驱动, 其位移精度可达到纳米级, 是其他传统机械结构无法实现的; 作为流体驱动机构时, 可由一个压电片与一个腔体形成流体泵^[3]或伺服阀^[4], 无需另加电动机等动力源进行转换。由于压电体可以根据需要做成中空、扁平、细长等结构, 因而压电驱动器的结构多样、适应性强。压电驱动器还具有便于轻小化的特点, 因而通常也被用作构造微小机械, 比如利用压电惯性冲击构造的管道机器人^[5]可以在细小管道中运动, 实现管道中的检测与维修等任务。压电驱动与控制技术已经形成了相对完整的体系, 并由研究开发逐步走向了实际 应 用 。 目 前 由

日本新生工业会社研制的行波型超声波电动机^[6]、日本东京大学樋口俊郎教授开发的惯性冲击型精密定位器^[7]和日本德岛大学小西克信开发的单向阀式压电泵^[8]等已经作为产品走向了市场, 显示了这一领域的光明前景。

压电体逆效应在不同参数下表现为不同的机械份效应, 这些机械力效应的存在是压电驱动器构成的基础。比如当压电体进行频率较高而振幅较大的振动变形时, 其能量可以转换为对从动件的驱动, 形成超声波电动机; 当频率较高而纵向振动占主要成分时, 压电体表面形成悬浮力作用, 可以用来构造超声波输送或超声波减摩机构; 当频率较低而变形较大时, 其能量直接作用于流体可形成压电泵或压电伺服阀等。压电驱动器在换能方式上属于一个机电耦合过程, 因而其研究涉及电子学、机械学与材料学等多个学科, 属于多学科交叉的研究领域; 同时由于换能方式特殊、适应性强, 因而主要被用作实现机械领域过去不能实现或实现不好的诸多功能, 从而可以产生更多新方式、新机构。理论上讲如果能够通过合适的结构充分生成并转换能量, 压电体逆效应可以用来构造任意的机械能力, 从而形成能够适应机械驱动或机械控制要求的一类新型驱动或控制机构。

目前世界上对压电驱动与控制技术的研究以日本最为先进, 已经掌握了世界上大多数的压电驱动器发明专利技术。1992 年以后, 日本文部省与日本工业振兴会开始逐步投入资金加大压电驱动器技术的研究^[1], 对东京大学、山形大学和东京工业大学等单位支持的项目年均为 11 项, 年均投资额达到 2 000 余万日元。并已在压电驱动器的开发种类与性

* 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。20030704 收到初稿, 20030825 收到修改稿

能上取得了明显成绩,近几年获得的专利也有明显增加。除大学以外,日本一些知名的大企业也在进行研究,如松下电工、索尼公司和新生工业公司等都在投入大量资金进行实用性研究。美国、德国和法国也不甘落后,正加速追赶日本。MIT(麻省理工学院)的航空、航天系空间工程研究中心和电子工程、计算机系的人工智能中心都在研制自己的压电驱动器。美国有关的研究报告预计:在不久的将来,压电驱动器可能部分取代其他传统装置而成为满足机械领域特定要求的一类新型驱动器。

自 20 世纪 80 年代以来,我国陆续开始了压电驱动与控制技术的研究,20 世纪 90 年代以后有了较大进展,目前的研究主要是在政府资金支持下进行的^[9]。1986 年以来由国家自然科学基金支持的压电超声波电动机研究项目有 30 多项,同时也批准了少数压电精密定位、压电多自由度电动机等项目,这构成了国内压电驱动与控制技术研究的主体。另外,天津、江苏、浙江和陕西等省市也投入了地方基金开展相应研究^[10~14]。由于距实用还有相当一段距离,目前尚未见有企业投资研究的报道。

目前对逆压电效应的研究已相当深入,压电能对各种参数下所具有的力学或机械效应也逐渐被人们所认识,压电学与压电材料的发展则使压电能的生成与转换更为容易且结构简单,这些为压电驱动与控制技术发展奠定了良好的理论与技术基础,高新技术领域对新功能、新方式的不断需求则为压电驱动与控制技术提供了广阔的发展空间。

介绍了压电驱动与控制技术的发展、研究现状与应用状况,希望借此加深我国科学界对这一领域的认识,加强我国在这一领域的研究与应用,促进我国参与国际研究竞争,力争在短时间内赶上或超过先进国家的水平。

1 压电驱动与控制技术基础

压电驱动与控制技术的基础包括压电材料、换能方式、压电器件与制作工艺等几个方面问题。

具有压电效应和逆压电效应的一类晶体称之为压电材料(或压电体),所谓压电效应是指对这类晶体施加机械力而在晶体表面出现电荷的现象,逆压电效应则是指对这类晶体施加电场而出现的机械变形现象。在机械领域中压电效应主要应用于对机械量的测量,是压电传感器的形成基础;逆压电效应则主要应用于机械驱动与机械控制能力的构成,是

压电驱动器的形成基础。

目前已知的压电材料有几十种。早期发现的压电材料主要为石英和电气石等一些单晶材料,以后发现罗息盐等类铁电体以及一些生物体^[15]也具有压电性,钛酸钡陶瓷与 $P_bZrO_3-P_bTiO_3$ (PZT)类固熔体压电陶瓷的发现则促进了压电材料的发展,它不但使压电性能有了大幅度提高,而且使人类可以通过制造工艺与材料成分的改进,获得适度的压电性,应用价值有了大幅提高。

压电驱动器所使用的材料主要为二元系的 PZT($P_bZrO_3+P_bTiO_3$)与三元系的 PCM(PZT+ P_bMgNbO_3)陶瓷材料^[16]。这类压电材料在电场作用下振动变形较大,与通常的陶瓷具有相类似的力学性能,其本身硬而脆,可承受较大的压力或通过自身变形提供较大的拉力,但抗冲击与承拉能力很弱。压电陶瓷的化学性质稳定,在潮湿与轻度酸碱环境下基本不腐蚀。理论上讲压电陶瓷可由加工获得任意形状,也可以由多个叠加组合获得更为优良的压电性能。

压电体逆效应的利用可以有静态与动态两种方式,静态方式是指直接利用压电体的静变形构造驱动功能,无需另外的能量转换装置,主要用于变形要求较小而精度要求较高的场合,比如精密位移驱动器、压电伺服阀等,由于压电体的静变形通常很小,无法直接使用,一般需要加以放大。静变形的放大可以有叠加、单晶片或双晶片结构等;动态方式是指利用压电体的振动功能,将压电体作为振子或振子的激励源使用,主要用于能量较大而需要持续转换场合,比如超声波电动机和超声波轴承等。这类机构的核心器件是压电振子,工作中主要依靠共振实现能量的转换。压电振子可以设计为多种尺寸与结构,反过来说压电体作为一个振动的连续体结构,其振动将具有多种形态,其形态之间存在着相互影响或耦合作用。这种振动的状态及其耦合作用决定着压电振子的换能效率,所以研究压电振子及其行为是重要的。

压电驱动器采用的位移或振动放大方法通常是上述几种方法的结合,这有利于更大限度地取得放大位移。但一般地说,当位移较大时,它的产生的力就比较小,对外界的约束力也比较敏感,一旦有外力作用时,变形即急剧减小。

压电体就其应变形式而言,可分为伸缩型和弯曲型两大类;而每类又可再分成刚性和谐振性两种。如从驱动电压的施加形式来看,又可分为随动、开关和交变三种。按器件的构造形式,压电陶瓷器件可分为如表 1 所示的几种类型。

表 1 几种陶瓷器件及特性(按结构形式)

结构形式	多层	双晶片	虹形	钹形	弹珠形
尺寸 l/mm	$5 \times 5 \times 12.7$ (长 \times 宽 \times 厚)	$12.7 \times 10 \times 0.6$ (长 \times 宽 \times 厚)	面宽 12.7, 厚 0.5	面宽 12.7, 厚 1.7	面宽 12.7, 厚 1.7
驱动电压 U/V	100	100	450	100	100
位移 $s/\mu\text{m}$	10	35	20	40	20
接触面积 s/mm^2	25	1	1	3	1
驱动力 F/N	900	0.5~1	1~3	15	3
最大位移位置	均等	顶部最大	中心最大	中心最大	中心最大
负载下的稳定性	非常高	非常低	低	高	低
响应时间 $t/\mu\text{s}$	1~5	100	100	5~50	5~50
制备方法	浇注成形并在 1 200 °C 下共烧	粘接陶瓷元件在 薄金属片上	在 950 °C 下还原 陶瓷元件	粘接陶瓷元件在 金属帽上	粘接陶瓷元件在 金属帽上
费用	高	低	中等	低	中等

目前常用的压电器件是多层(压电叠堆)及双晶片型。德国的 PI 公司和日本的 TOKIN 公司已形成系列,国内亦有产品。通过使用发现,由于材料和制作工艺的限制,国内的产品在性能上较之以上两家的产品有较大差距,目前国内从事压电驱动的科研单位大多要从国外购买产品(主要是压电叠堆),国外对此类产品的出口限制、价格及时间等因素严重制约了压电驱动技术在我国的研究与应用。

2 压电驱动器的种类及应用

利用逆压电效应能够形成的驱动或控制装置可谓种类繁多,表 2 给出了国内外近年开发或已经应用的几类装置,可以看出在大部分工业与民用领域获得了开发与应用。以性能与使用特点划分,目前已被开发的压电驱动器大致有如下几类。

表 2 压电驱动器的应用领域

机械行业	机床的精密进给机构; 刀具的磨损调整装置; 动态振荡器; 制动器、锁紧装置及夹具的快速调整; 挤压机喷嘴及铸造导流板的控制; 微流量泵; 电液伺服阀
精密器具	微机械手; 隧道显微镜; 印刷机的驱动机构; 视频跟踪系统; 精密开关阀; 超声波电动机; 振动传输装置; 快速喷油嘴(柴油机); 深层蚀刻装置; 开关及接线装置; 主动空气轴承
光学	激光测量系统及激光调制器; 干涉及全息测量; 光导纤维的定位; 自适应光学系统; 反射镜跟踪装置与光束偏转系统; X 射线光刻与微型光刻; 自动聚焦系统
生物医药	生物材料微型操作器; 盲文操作器; 计量设备; 微型喷嘴; 冲击发生器; 肾结石破碎治疗机; 器官超声波扫描器

2.1 压电型精密驱动器

精密驱动器是现代制造业与自动化装备的重要器件之一,在精密加工与控制领域如光学加工、航空航天以及导弹装备等方面有着广泛需求。传统

的精密驱动主要为单自由度的机械式结构,一般精度可达微米级,还无法满足超高精密驱动的需求。而压电体变形精度高、反应速度快,以现有常用的 PZT 类压电叠堆为例,一般使用情况下变形分辨率(单步位移)即可小于 10 nm,频响可达 50 kHz,因而被开发用作纳米级的精密驱动,取得了良好效果,成为近年精密驱动装置的主要构造方式之一。

压电精密驱动装置的主要结构之一是压电型精密工作台,这类工作台一般采用柔性铰链代替传统的导轨进行无摩擦、无间隙的支撑,特点是结构紧凑、体积小、无颤振与爬行,分辨率高,容易实现 0.01 μm 级的超精密定位。同时不产生噪声和发热,适于多种工作环境。

20 世纪 60 年代初,美国国家标准局最先采用杠杆原理与柔性铰链结合的整体式结构制造了压电驱动型微调工作台^[17],其中压电元件的微量位移(2.25 $\mu\text{m}/1\ 000\ \text{V}$)经过两级杠杆放大产生 38 μm 的位移量。施加 1 500 V 的电压时,微动台可移动 50 μm ,位移分辨率为 0.001 μm 。该工作台被成功的应用于航天技术中。

在某些场合既需要较大的行程同时需要高精度。压电驱动器的位移量比较小,一般在几微米到几十微米。为解决这一矛盾,目前有两种方案。其一是采用粗精结合的方法来实现,即采用两个工作台,粗工作台完成高速大行程运动,而由微动工作台实现精密进给。如日本日立制作所研制的 $x-y-\theta 3$ 自由度微动工作台^[17],其粗动台行程为 250 mm \times 250 mm,最高速度为 100 mm/s,位移分辨率为 0.5 μm 。3 自由度的微动工作台固定在粗动台上, x, y 行程为 $\pm 8\ \mu\text{m}$,定位精度为 $\pm 0.05\ \mu\text{m}$,角度范围为 1.6° ,分辨率为 0.001° 。再如中国科学院长春光学精密机械研究所研制的精密工作台,也

分为粗动与精动两部分,其粗动部分的定位精度为 $1\ \mu\text{m}$,精动部分以压电叠堆作为驱动元件,使最终定位精度达到 $0.05\ \mu\text{m}$,大大提高了系统的精度。

实现大行程精密驱动的另一方法是采用步进式驱动,由几个压电体动作的配合完成相应的功能。美国 BI 公司研制成有三个压电元件组成的尺蠖机构^[17]。其分辨率达 $0.02\ \mu\text{m}$,行程大于 $25\ \text{mm}$,移动速度为 $0.01\sim 0.50\ \text{mm/s}$ 。

在机械加工过程中,采用压电型精密驱动器对机床的坐标轴及刀具进行补偿,可使加工精度大大提高。美国 3L 实验室成功地研制出分辨率为 $0.001\ \mu\text{m}$ 、微调范围为 $3.2\ \mu\text{m}$ 的精密车削微量进给装置。日本机械技术研究所的冈崎佑一教授研制出分辨率为 $0.001\ \mu\text{m}$ 、位移范围为 $7\ \mu\text{m}$ 、重复定位精度为 $0.025\ \mu\text{m}$ 的超精密车削压电驱动机构。在国内,早在 1986 年国防科技大学便研制出行程为 $20\ \mu\text{m}$ 、分辨率为 $0.1\ \mu\text{m}$ 、重复精度为 $\pm 0.1\ \mu\text{m}$ 的车床补偿机构。哈尔滨工业大学研制了用于车削微量进给机构的驱动器,该驱动器的进给范围为 $7.8\ \mu\text{m}$,进给分辨率为 $0.01\ \mu\text{m}$,重复定位精度为 $0.1\ \mu\text{m}$ 。东南大学等单位利用压电体构造车床微量进给机构,也取得了较大进展。大连理工大学、原航空航天部 303 所和哈尔滨工业大学分别研制出压电陶瓷和电致陶瓷驱动精密磨床微量进给装置,用于精密磨削,获得了良好效果^[17]。

广东工学院研制了仿生型步进式直线驱动器^[18],该驱动器的步距为 $0.1\sim 16\ \mu\text{m}$,步距误差小于 $0.05\ \mu\text{m}$,行程为 $5\sim 1\ 000\ \text{mm}$,最大输出力为 $3\ 500\ \text{N}$,最快速度为 $40\ \text{step/s}$ 。同济大学根据“尺蠖式”进给原理,研制了“双脚步推式”压电驱动器^[19],实现了在大范围内高分辨力(开环时高于 $0.1\ \mu\text{m}$),能连续平稳进给的微进给功能(最大行程为 $100\ \text{mm}$)。

清华大学利用平行四连杆机构原理,采用柔性铰链与电致伸缩驱动器结合的方式,研制了具有 x 、 y 两个自由度的微动工作台^[20]。该工作台的技术指标为:行程范围 $0\sim 10\ \mu\text{m}$,定位精度不大于 $\pm 0.03\ \mu\text{m}$ 。清华大学的另一种二维工作台采用压电超声微电动机驱动,获得了 $12\ \text{nm}$ 的位移分辨率和 $10\ \text{N}$ 的驱动力,角分辨率为 0.01° ,行程不受限制。该工作台成功地用作为激光谐振腔腔膜的微调整,效果好。

扫描隧道显微镜(STM)是一种非常重要的分析设备,其基本原理是离子隧道效应,它能够以原子尺度来观察固体材料表面的实空间三维构造。把金属探针固定在一个互相垂直的三维微调致动器上,

由致动器驱动探针对样品进行扫描。STM 的实用性被广泛关注,欧美各国及日本竞相研制,其中具有微动功能的微调致动器是最为关键的部件,目前大多采用压电体来完成。国内复旦大学、西安交通大学、清华大学、重庆大学应用物理所、中国科学院物理所、中国科学院科仪厂和天津大学也开展了研制工作。东南大学所研制的扫描驱动器包括 z 扫描驱动器和 xy 扫描驱动器(扫描平台)。 z 扫描驱动器采用管状 PZT 制成, xy 扫描驱动器由压电叠堆(PMN)构成,驱动电压范围为 $0\sim 300\ \text{V}$,平台的扫描范围为 $100\ \mu\text{m}\times 100\ \mu\text{m}$ 。

吉林大学目前正在开展步进式与惯性冲击式压电精密驱动器的研制工作,已取得了初步成果,近期内有望形成产品推向市场。

2.2 压电型运动机构

压电型运动机构的优点是体积小、结构灵活,便于在特殊工况下工作,它与压电型精密驱动器的区别是一般受力小,行程大,反应灵敏,移动迅速。

日本在压电型运动机构方面的研究最为活跃而富有代表性。日本筑波大学、名古屋大学、东京大学、早稻田大学及富士通研究所等单位 20 年前即已开始研究无间隙直接运动机构,目标是用于细胞解剖、集成电路制造和精密装配,并考虑用作人体内的微型机器人或微型运动机构。

日本生产技术研究所研制了两种压电运动器,一种为仿人步态直线位移式,由前足、后足及躯体组成。通过三部分的分时动作,模拟人的行走姿态完成步距循环。同时研制了转角位移式运动器,由上、下回转环形板、回转轴、回转力发生体(压电叠堆)及两组压紧用压电叠堆组成。回转环形板与回转轴的中心线重合,其驱动原理与直线位移式相似。

日本 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体作为驱动元件。该运动器主要由本体、配重及压电元件组成,利用惯性冲击方式形成运动。工作中使用一定频率与幅值的锯齿波电压作用于压电元件(压电叠堆)使其产生单向冲击力(变形),由其反作用力即可形成运动。

德国 Karlsruhe 大学研制了几种用于机器人单元的压电运动器^[21],采用了压电叠堆作为驱动元件,其中三个压电驱动元件呈三角形分布,当一个叠堆被施加正向电压而另外两个被施加负向电压时,机器人便形成运动,运动的步长可通过调节正、负电压的差值得到,运动的形态可为直线或旋转。该运动器的最大速度为 $0.9\ \text{mm/s}$,最大步长为 $36\ \mu\text{m}$,最小步长为 $0.142\ \mu\text{m}$;另一种“蜘蛛—I”型

定位机器人单元采用了双压电晶片作为驱动元件, 可实现 3 自由度的运动, 其最大线性速度为 2 cm/min, 旋转速度为 1 r/min, 驱动电压为 $-20\sim+20$ V, 运动精度为 175 nm; “蜘蛛—II”型定位机器人单元则是一个全功能微操作机器人, 它有 6 条压电腿(由双压电晶片构成), 其手指亦由压电晶片构成, 压电晶片的弯曲范围为 $-260\sim+260$ μm , 分辨率为 4 nm, 驱动电压为 $-60\sim+60$ V; “PROHAM”机器人单元由三个压电管驱动, 可实现前、后、侧向及翻转 4 自由度的运动, 最大速度为数毫米每秒, 运动精度为 10 nm 以内。

美国加利福尼亚大学研制了用于微飞行昆虫的振翅压电驱动器^[22]。该驱动器以压电双晶片为动力元件, 质量为 15 mg, 驱动电压为 200 V, 机械传动效率高达 95% 以上。驱动器的振翅频率可达 150 Hz。在此频率下, 其刚度为 $230 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$, 功率为 7 mW。

意大利的 Catania 大学研制了三种原型的 PLIF(压电微小智能蚤), 分别为 PLIFI、PLIFII 及 PLIFIII^[23]。这三种原型的驱动原理基本相同, 即采用了压电双晶片型的压电腿, 其步距为 36 μm , 最大速度为 18 cm/s。

在国内, 天津大学研制了一种压电型三维微位移操作器, 其微位移最大值可达 15 μm , 分辨率为 0.1 μm 。上海大学亦在此方面进行了研究, 研制了两种铰链夹持器: 剪刀型及双层铰链夹持器。剪刀型夹持器在施加 100 V 电压时, 夹持器的张合量为 245 μm , 双层铰链型夹持器为 101 μm 。夹持器可以夹持 6~12 g 的重物。广东工业大学研制了一种压电型 3 自由度微机器人(MR—2 型), 其主要技术参数为: 驱动范围: $50 \mu\text{m} \times 50 \mu\text{m} \times 250 \mu\text{m}$; 重复精度: 0.03 μm (x、y 轴), 0.1 μm (z 轴); 驱动力: 0.74 N(x、y 轴), 0.2 N(z 轴); 系统带宽: 400 Hz(x、y 轴), 80 Hz(z 轴); 体积 $55 \text{ mm} \times 80 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 。上海交通大学研制了利用压电元件驱动的管道微机器人。其中的驱动器采用压电双晶片作为驱动足。该驱动器可在 $\phi 20 \text{ mm}$ 微管道中运动^[24~27]。

2.3 流体驱动与控制机构

将压电体逆效应直接作用于流体即可形成流体驱动与控制机构, 它包括压电泵、压电阀与压电伺服阀和压电风扇等。

日本名古屋大学利用 PZT 双晶片型压电体, 研制了一种响应频率较高、流量较大的高速开关阀^[28]。该阀通过控制一块双晶片的变形来关闭或打开不同的喷嘴以驱动锥阀运动。阀的响应频率可达 200 Hz, 在 20 MPa 系统压力时输出流量达 9.24 L/min。

日本的横土真一等利用两组压电叠堆推动锥阀阀芯, 构成了二位三通数字阀。对一个叠堆施加 100 V 电压时, 在无负载状态下, 可产生 15 μm 位移, 推动力为 850 N。在 0~100 V 电压驱动下, 阀的开关时间不超过 70 μs , 可跟踪 2 kHz 的方波信号。日本东京工业大学研制了用压电元件驱动的超高速电液伺服阀, 该伺服阀的频宽达 5 kHz, 使电液伺服系统的频响性能有了大幅提高^[29]。

压电泵是利用压电振子作为换能器的流体传输装置。同传统泵相比, 压电泵的特点是结构简单、体积小、重量轻、耗能低、无噪声和无电磁干扰, 可通过电压或频率控制输出流量等, 具有广泛的应用前景。目前已出现多种形式与结构的压电泵。有关压电泵的发展情况在参考文献[30]中有详细介绍, 这里不再赘述。

吉林大学目前正在开展压电驱动型电液伺服阀、开关阀以及压电泵的研制工作, 已研制出数台样机, 目前正处于测试和改进阶段。

2.4 超声波电动机

超声波电动机是以高功率超声振动取代电磁方式构造的电动机, 目前主要采用振动耦合型和表面波型两种方法进行能量转换。日本和美国在这方面的研究较为先进, 所开发出的超声波电动机已在照相机、复印机等装置中获得了应用。

美国 Allied Signal Aerospace, Kansas City Division 与 Missouri-Rolla 大学联合研制了直径为 8 mm 的行波电动机^[31, 32]。Allied Signal Aerospace 目前正着手于电动机的集成化生产研究。超声波电动机在美国的应用非常活跃, 从事应用研究的机构主要有 JPL、NASA 和 MIT 等。目前, 超声波电动机被应用于诸多领域, 包括用于直接驱动操作器、火星登陆机器人手臂关节驱动、宇宙飞船舱壁检测、微阀药物注射装置及飞行导弹表面控制等。

在我国, 各种类型的超声波电动机正在开发研制之中。上海交通大学研制了直径为 5 mm 压电微电动机(其输出力矩为 101 $\mu\text{N} \cdot \text{m}$, 转速可在 40~500 r/min 内调整), 清华大学、南京航空航天大学、东南大学和哈尔滨工业大学等单位也先后进行了相关的研究工作。

2.5 压电型减振与降噪技术

压电型减振与降噪技术是一种新型的减振与降噪新方法, 它有主动型与被动型两种。主动型也称智能型, 它是在振动或噪声源部位分别安装两个压电元件, 其中一个作为测量振动或噪声情况的传感器使用, 另一个作为控制振动或噪声的驱动器使用, 工作中先通过传感器测定振动或噪声信号, 然

后将信号分析、处理转变为控制信号施加给驱动器,生成与振动或噪声源幅值相等而相位相反的振动或二次声,使其与原振动或噪声叠加而相互抵消,达到消减或弱化的目的。这种技术由于具有自识别、自调整功能且效果良好,已获得科学界广泛关注。

被动型压电减振与降噪技术是利用正压电效应以改变系统阻尼实现消减振动与噪声目的的一种方法。它是在振动或噪声源部位位置入压电元件,当系统振动或有噪声出现时,压电元件随之变形而自身产生电荷(电场),将这个电荷接入合适的电路中使其消耗,从而消耗了振动与噪声能量,达到了消减振动与噪声目的。这种方法结构简单但对环境适应型较差,有关的研究正在进行中。

3 压电驱动器需要解决的几个问题

(1) 驱动器用材料及新工艺。压电器件及其应用的发展,在很大程度上取决于压电材料的性能。为了改进压电陶瓷的微观结构,提高材料的性能,近几年,许多国家都在积极开展高技术陶瓷(日本称之为精细陶瓷)及其粉体制备工艺的研究和生产。高技术陶瓷是继金属和塑料之后的第三代新材料,已成为许多高技术发展中不可缺少的基础材料,广泛应用于微电子、新能源、汽车、宇航工业以及海洋、生物工程和机器人等高新技术领域。目前,驱动器用陶瓷材料及制备工艺的研究取得了较大进展^[26]。

(2) 大行程高精度的压电驱动器。对许多实际精密驱动场合,需要几个毫米以上的大行程位移,且要求高的位移精度。为此,必须研制出复合型的压电驱动器,使之可方便地与微机、测位传感器、电源等闭环,以实现精密驱动的自动调控。

(3) 压电驱动器控制电源、控制系统及控制方法的研究。压电驱动器元件在较高电场的作用下将产生严重的非线性、迟滞和蠕变,从而大大降低它的定位精度,这对构造精密驱动是十分有害的。目前主要从三个方面对此加以解决。在控制方式上,可采用开环及闭环控制;在驱动方式上,可采用电压驱动或电荷驱动;在控制算法上,除了PID控制外,还出现了许多新的算法;也可针对压电驱动器容性负载的特点,设计专门的驱动电源。

4 结论

由以上的介绍可见,压电陶瓷材料由于具有优良的驱动性能而被较早作为位移驱动器使用。随着

压电陶瓷材料及其相关技术的发展,压电陶瓷已成功地应用于诸多领域。我国对压电材料及驱动器的研究较后进且缺乏联系,撰写此文,希望各研究单位加强合作,以促进我国在这个领域的发展。

参 考 文 献

- 1 日本工业技术振兴协会固体アクチエータ研究部会. 精密制御用ニューアクチエータ便覧, 东京: フジテクノシステム, 1998
- 2 柳荣一, 御手洗礼治. 超音波高精位置決のミステム. 自动化技术, 1995, 24(12): 76~81
- 3 樽崎哲二. 公开特许公报. 三铃エリ-社, 昭 57-137671
- 4 横田真一, 平本建太郎. 积层 PZT 素子を用いた超高速电气液压サ-ボ弁. 日本机械学会论文集 B 篇, 1997, 57(533): 182~187
- 5 青岛伸一. 压电振动式管内移动ロボット. 日本设计工学. 1997, 32(5): 5~9
- 6 古谷克司. 谷株式会社新生工业. 超音波モータカタログ, 1997
- 7 樋口俊郎, 渡边正浩, 工藤谦一. 压电素子の急速变形を利用した超精密位置決め机构. 精密工学会志, 1998, 54(11): 2 107~2 114
- 8 小西克信, 芳春敏夫. 压电素子を动力源とするポンプ开发. 日本机械学会论文集 C 篇, 1997, 59(533): 182~187
- 9 国家自然科学基金委员会. 国家自然科学基金项目汇编, 1989~2002
- 10 孙国武, 程存弟. 一种纵扭复合换能器型超声波电动机的原理及实验研究. 应用声学, 1997, 15(4): 16~18
- 11 金龙, 朱美玲, 赵淳生. 国外超声波电动机的发展与应用. 振动、测试与诊断, 1996, 16(1): 1~7
- 12 夏长亮, 史婷娜, 陈永校. 环形超声波电动机定子振动固有频率. 微特电机, 1995, 4: 6~9
- 13 毛卫宁, 钱进. 复合型超声波电动机的数值研究. 压电与声光, 1996, 18(1): 36~38
- 14 贺思源, 陈维山, 陈在礼. 基于定子齿三维运动的新型超声波电动机. 压电与声光, 1997, 19(6): 394~397
- 15 任露泉, 陈德兴, 胡建国. 土壤动物减粘脱土规律初步分析. 农业工程学报, 1990, 6(1): 15~20
- 16 电子陶瓷情报网. 压电陶瓷应用. 济南: 山东大学出版社, 1985
- 17 蔡鹤皋, 孙立宁, 安辉. 压电/电致伸缩位移器与应用. 高技术通讯, 1994, 6: 37~40
- 18 杨宜民. 仿生型步进式直线驱动器的研究. 机器人, 1994, 16(1): 37~39
- 19 刘泳, 万德安. 双脚步进式微型进给机构的研制. 中国机械工程, 1999, 10(8): 856~858

- 20 吴鹰飞, 李勇, 周兆英, 等. 蠕动式 x - y - θ 微动工作台的设计. 中国机械工程, 2000, 12(3): 263~265
- 21 Rembold U, Fatikow S. Autonomous microrobots. Journal of Intelligent and Robotic Systems. 1997, 19: 375~391
- 22 Fearing R S, Chiang K H, Dickinson M H, et al. Transimission for a micromechanical flying insect. In: IEEE2000 International Conference on Robotics&Automation, 2000: 1 509~1 516
- 23 Muscato G. Soft computing techniques for the control of walking robots. Computing&Control Engineering Journal, 1998, 8: 193~200
- 24 王刚. 一种三维微位移操作器. 机械设计, 2000, 5(5): 35~39
- 25 陈建宇, 孙麟治. 压电元件驱动的微小夹持器的研制. 光学精密工程, 1997, 5(4): 41~48
- 26 张传中. 压电陶瓷的新应用及新工艺. 压电与声光, 2000, 22(2): 90~94
- 27 马建旭, 马培荪, 罗俊章, 等. 管道微机器人中压电执行器的研究. 压电与声光, 1999, 21(2): 108~118
- 28 Dogan A, Uchino K, Newnham R E. Com-posite piezoelectric transducer with truncated conicalendcaps "Cymbal". IEEE Trans Ultras Ferrofreq Contr, 1997, 44(3): 597~605
- 29 李少军, 李艳, 夏毅敏, 等. 压电执行器及其在高响应控制阀上的应用. 液压与气动, 1999(3): 20~21
- 30 阚君武, 杨志刚, 程光明. 压电泵的现状与发展. 光学精密工程, 2002, 10(6): 620~625
- 31 楮祥诚, 陈维山, 陈在礼, 等. 超声波电动机在美国发展. 压电与声光, 1999, 10(1): 37~40
- 32 Hagood N W, McFarland A J. Modeling of a piezoelectric rotary ultrasonic motor. IEEE Transactrions on Ultrasonics, Ferro-electrics and Frequency Control, 1995, 42(2): 210~231
- 33 李尚平, 徐永利, 苏建华, 等. 驱动器用陶瓷材料发展与展望. 压电与声光, 1999, 21(6): 483~487

DEVELOPMENT AND APPLICATION OF PIEZOELECTRIC ACTUATION AND CONTROL

*Wu Boda E Shiju Yang Zhigang
Cheng Guangming
(Jilin University)*

Abstract: The piezoelectric actuator is a kind of device which gets the mechanical actuating or controlling ability by use of inverse piezoelectric effect of the piezoelectric material. The device, actuated and controlled by the piezoelectric material, gets the simple structure, prompt reaction and the wide concern of the scientists, just because of the advantages of the piezoelectric material, such as rapid reaction, high precision, the ability against interfering. At present, the developed devices with piezoelectric actuation and control are mainly ultrasonic motor and precise actuator etc, widely and successfully used in the national defence, the biomedicine, the photoelectron and so on many fields. The research actuality and application in this fields are introduced. Some representative device examples are given here. And there are some evaluations about the relational performance.

Key words: Piezoelectric actuator
Piezoelectric effect
Development
Application

作者简介: 吴博达, 男, 1950年出生, 吉林大学校长, 教授, 博士生导师, 《机械工程学报》编委。多年从事机械振动理论与压电驱动技术的研究, 先后承担相关研究项目十余项, 获国家教委一等奖1项, 部级二、三等奖4项, 发表相关论文100余篇, 其中18篇论文被SCI及EI检索, 著书1本。先后主持及参加了国家自然科学基金项目5项、教育部博士点基金1项、国家教委优秀青年教师基金1项、国家教委留学归国人员基金1项, 主持及参加了国家863高科技发展项目2项。