

新型微变位致动器的发展及应用

吴一辉 王立鼎 马建旭

(中国科学院长春光学精密机械研究所, 长春 130022)

摘要 对目前新出现的几种高精度微变位致动器的性能特点进行了分析,介绍了它们在高新技术领域,特别是在微纳技术领域中的应用。

关键词: 致动器; 发展; 应用

1 引言

八十年代后期,随着大规模和超大规模集成电路的迅速发展,微机械研究的兴起,以及与之相应的进行微操作、纳米测量和纳米加工的迫切需要,使得微致动技术得到了迅猛地发展。由于微致动技术几乎左右着整个设备的发展,因而新型高性能的致动器在今天的微系统工程中占有中坚地位,它被称为“微电子系统的肌肉”^[1]。

所谓致动器(Actuator)是一种能把某种形式的能量转化成机械能输出的装置。近年来随着对材料及能量转换方式的研究不断深入,各种不同功能材料构成的致动器的种类繁多,本文仅就其中较为典型的、具有较好应用前景的、可实现高精度微变位的致动器作一些介绍。

2 压电/电致致动器

压电/电致(PZT/PMN)致动器,是七十年代末发展起来的,已被广泛应用。它结构紧凑、体积小、分辨率高、不发热且较易于控制。近十几年来引起人们的极大关注,已成功地应用于表1中的各个领域^[1]。

表1 压电/电致致动器的典型应用

光学	激光测量系统与激光调制器;干涉测量、全息测量;光导纤维的定位;自适应光学系统(反射镜阵列);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。
精密技术	微型机械手;隧道显微术;油墨与针孔印刷机的驱动机械;视频头跟踪系统(VCR);快速开关阀;电动机(超声波电机);振动转输装置;快速喷油咀(柴油机);深层蚀刻装置;开关与接线装置;主动式空气轴承。
医学与生物学	生物材料微型操作器;盲文操作器;计量设备;微型喷咀;冲击发生器;肾结石破碎治疗机;器官超声扫描器。
机械制造	工具磨损补偿调整;车床与铣床的精密进给机构;非圆工件的车、钻和磨;动态振荡器(振动试验);制动器、锁紧装置与夹紧工具和快速调整;制作薄膜和镀膜时对挤压机喷咀和铸造导流板的控制;有效的振动阻尼。

由表 1 可见,PZT/PMN 已渗透到机械、光学、医疗、半导体、生命科学等重要领域中。然而,由于 PZT 和 PMN 这两类陶瓷致动器的固有缺陷,如在结构上使用了粘结剂容易导致开裂,在功能上不能同时获得大位移和大的驱动力等。为了满足一些特殊需要,仍在不断地研制和开发新型致动器结构,探索新的功能效应并开拓新的材料。

3 新型压电/电致致动器^[2]

3.1 金属—陶瓷复合致动器

金属—陶瓷复合致动器是利用金属端头帽盖和压电陶瓷圆片之间呈现的新月形间隔产生的位移,故称为 Moonie 型复合致动器,如图 1 所示。这种致动器的基本原理是利用极化的 PZT-5A 压电陶瓷,在外电场作用下陶瓷经由 d_{33} 产生纵向位移和经由 d_{31} 产生径向运动在金属端头帽盖中变换成弯曲拉伸运动,这两种运动叠加在一起,便能在垂直于陶瓷圆片的方向上产生较大的位移。此外,采用多层陶瓷可降低驱动电压,把多个 Moonie 型复合体层叠在一起形成的复合致动器可获得更大的位移。

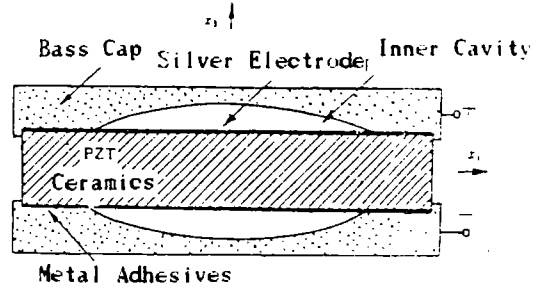


图 1 Moonie 型复合致动器结构

Fig. 1 Structure of the Moonie compound actuator

3.2 倾斜功能压电陶瓷致动器

用新近开发的倾斜功能材料(Functionally Gradient Material,简称 FGM)制作压电陶瓷致动器的主要优点:一是这种材料根本不同于原先的均质材料,从而可获得由于材料成份和组织逐渐变化而功能也相应微变化(倾斜)的非均质材料;二是由于材料内部的组成变化,使得材料内部的热膨胀系数和杨氏模量等连续变化,从而大大地降低了制作材料温度的冷却过程产生的残余应力和材料作用时产生的热应力。因此,使用 FGM 制作致动器改进了上述用粘结剂粘结单晶片和双晶片型压电致动器容易开裂、蠕变和剥离等缺陷。由于降低了材料内部应力,这对于延长致动器寿命和提高可靠性大有裨益。图 2 为 FGM 压电致动器的电压—位移特性。

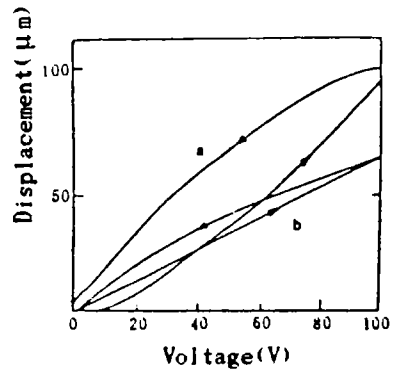


图 2 FGM 致动器的电压—位移特性

- (a)粉末压成 $40 \times 20 \times 0.6$
- (b)刮片形成 $25 \times 5 \times 0.65$

3.3 超声旋转致动器

超声旋转致动器以其快速响应和低转速下的大转矩等优点,可望用作精确定位控制器。它包括纵向多层压电致动器(LMPA)和扭转单层压电致动器(TMPA)两部分。图 3 所示为超声旋转致动器的构形。

Fig. 2 Voltage—displacement relation of FGM actuator

- (a)Moulding powder shapping $40 \times 20 \times 0.6$
- (b)Sorape slice shapping $25 \times 5 \times 0.65$

超声旋转致动器由两种模式驱动,也即动态和静态操作。前一种模式中,TMPA 起到在谐振频率 8.6kHz 下工作

的扭转变能器的作用, LMPA 则起到离合器的作用。角位移可通过外加到 LMPA 和 TMPA 的脉冲电压宽度来控制。转子可用约 10csc 的精度在宽范围内迅速旋转。后一种模式中, TMPA 充当扭转位移致动器的作用, 而 LMPA 是静止的。这种情况下角度位置可通过外加到 TMPA 上的静电电压来控制, 转子甚至可在 200V、40csc 窄范围内以约 1csc 的精度移动。

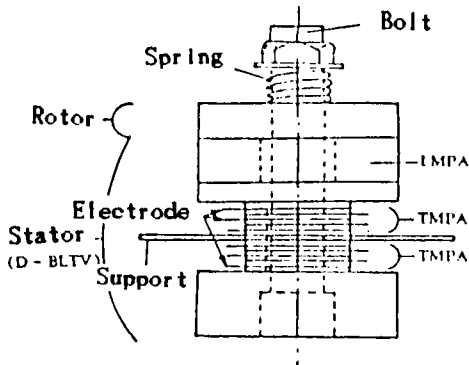


图 3 超声旋转致动器的构形

Fig. 3 Structure of the ultrasonic running actuator

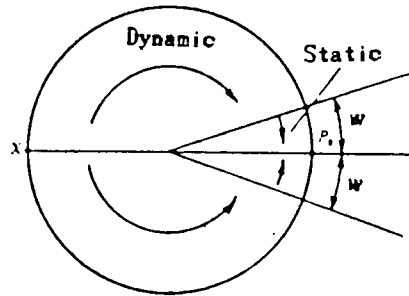


图 4 用动态和静态互补操作的精确定位

Fig. 4 Precision positioning by dynamic and static complement manipulator

图 4 示出互补用动态和静态操作的精确定位, 即怎样使转子通过动态操作旋转到 $|P_0 \pm W|$ 的位置。其次, 由静态操作调整位置到 P_0 角, 角度窗宽度 W 应当大于电动机的定位精度和小于静态操作的动态范围。应用互补性两模操作可获得 1 ± 0.5 csc 优良的定位精度。

3.4 LiNbO₃ 压电双晶片致动器

NiNbO₃ 压电双晶片致动器是利用 Ti 扩散或在略低于居里点温度热处理 LiNbO₃ 晶片获得反转层, 开发成的器件。因为压电应变常数的符号与反转畴中最初晶体的相反, 故在 LiNbO₃ 片的两面加上电压便会在反转和非反转畴中导致相反方向的应变, 从而产生大的弯曲位移。与 PZT 压电致动器所不同的是前者为 LiNbO₃ 晶片的整体结构, 只要求材料进行热处理而不需要粘接, 故它有坚固耐用、无滞后、无蠕变和适合于批量生产等优点, 现已用作光开关。

4 稀土超磁致伸缩致动器^[3]

磁致伸缩机构利用的是压电效应的电磁当量。当某些材料被置于磁场时, 便产生长度变化, 相对长度变化约 0.2%。将一根压入管内的棒在磁致行波中进行蠕动, 由此可得到线性运动, 其升程在理论上是无限的。

磁致伸缩在军事、国防和工程技术上已有着重要应用, 利用其有效转换特性构成了众多的声学器件、力学器件和电器执行器等。稀土超磁致伸缩材料, 重要的是室温下有大的磁致伸缩性。新型磁致伸缩材料 Terfenol-D 的长度变化要比诸如 Ni 等现有磁致伸缩材料或电致伸缩陶瓷 (PZT/PMN) 大约 10~30 倍, PZT/PMN 电致伸缩应变约 400 $\mu\text{m}/\text{m}$, Terfenol-D 的磁致伸缩应变可高达 1500~2000 $\mu\text{m}/\text{m}$ 。10cm 长的这种棒在 50 μs 内可伸长 0.1mm 以上。因而它可作为机械功率源以及机械传感器, 它极适于快速机械致动器。此外, Terfenol-D 可以产生大的力, 且能在高功率下高效、快速地进行精确运动; 还可以高效地将电能转换成机械能以

及将机械能转换成电能。该磁致执行机构如图 5 所示,它已经用于有源抗振系统、机床、线性电机、伺服阀、燃油喷射系统、声纳和 X 射线断层摄影、传感器等许多领域。

5 电磁致动器

5.1 磁性电动机^[4]

这种电动机是一种平移直接驱动机构,它以电磁铁原理为基础,并利用特性曲线的电子线性,从而具有精密调节的性能。驱动力可达 1000N,冲程为几毫米,带宽达千赫范围。

原则上讲,任何一种旋转式电动机的工作原理都可用来制造直线电机,只需将一个电机沿半径切开至轴处并展成一个平面即可。在实践中,性能与生产成本主要由所用的初始原理而定。交流非对称直线电动机可用于大功率车辆驱动机构(磁悬浮导轨车),步进电机原理则可用于增量式直线驱动机构。

对于精密定位驱动,利用磁激励的直流电机原理是较有效的,它不仅能够控制力与速度,而且从电能转换为机械能的效率也很高。

5.2 直流—直线电动机

直流—直线电机的作用原理,以磁场与通电导体之间的相互作用为基础。力 F 与气隙感应 B 和通过导体的电流 I 以及导体的长度 L (处于磁场内的)成正比。

$$F = B \cdot I \cdot L$$

人们一般把电动机的固定部分称为定子,而将其相对运动的部分称为转子。直流—直线电机的三个基本部件是磁铁、线圈和磁场的软磁导轨,它们可以在定子与转子中间以许多变化形式分布。因此,电动机的结构形式也相应地有多种变化。为了避免每次换向循环中某个位置对转子作用的力为零,人们在转子内安排几次换向循环,并把磁铁或线圈集成到转子中,在线圈上使转子和定子的极性相对立,这样,如果在每个极距都使电流转向,便可得到连续的推进力。图 6 所示为错位半个极距的转子上半部和下半部的结构。因为被错位换向,所以力永远不会为零。

直流—直线电动机由不同的生产厂家按标准结构供货。为了能充分利用其优点,型号的选择和驱动机构与仪器具体结构的集成是十分重要的。它的实用极限值为:

- 调节行程: 任意
- 位移分辨率: 无限

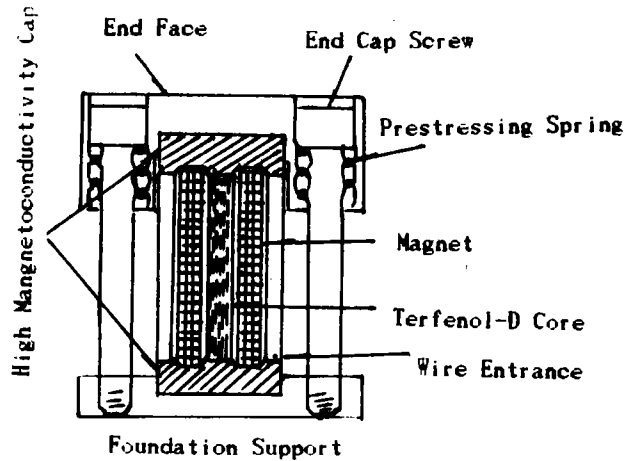


图 5 磁致执行机构

Fig. 5 Magneto-actuator

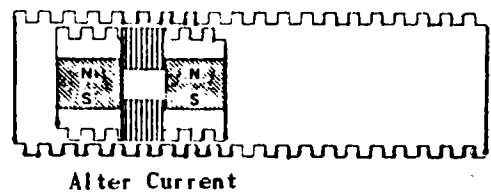


图 6 直流—直线电机的原理图

Fig. 6 Schematic drawing of the direct-current-line-motor

• 所产生的力: <1000N, 最佳低于 100N)

• 动态范围: 可至千赫

磁性电机和直流一直线电机使用中可以相互补充, 人们关心的是用哪一种传动结构能适应任务的要求, 同时体积还较小, 图 7 的曲线可作为选择的大致基准。曲线上半部力一冲程范围, 表示较小体积的磁性电机; 曲线下半部, 表示大冲程小力量的直线电机^[1]。

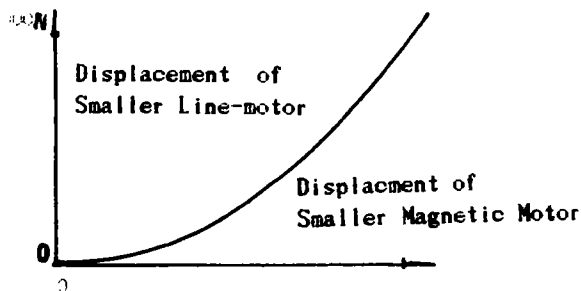


图 7 磁性电机与直流一直线电机结构尺寸的比较

Fig. 7 Size comparing of magnetic motor and direct-current-line-motor

6 ICPF 致动器^[5]

ICPF (Ionic Conducting Polymer Film)

执行元件如图 8 和图 9 所示, 是在 Nafion 117 表面镀铂处理后, 形成电极, 通电后在液体中一侧吸水, 一侧释水, 则形成弯曲位移。它具有可控性好、柔性操作、能实现微型化、频响较高 (120Hz)、驱动电压低 (1.5V) 等特点。如图 10 所示, 日前, 日本名古屋大学已成功地该驱动元件用于制造医疗管道机器人, 并准备制微泵、微小器管等。

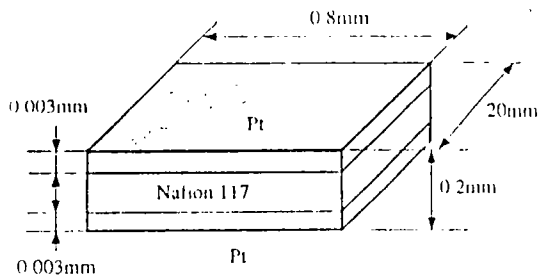


图 8 ICPF 致动器

Fig. 8 ICPF actuator

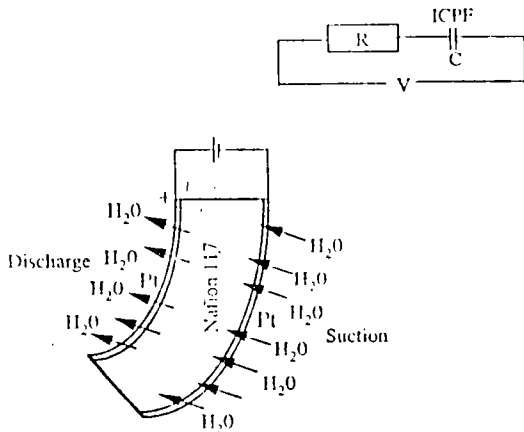


图 9 ICPF 在水中的动作原理图

Fig. 9 Moving principle of ICPF in water

7 形状记忆合金(SMA)致动器^[6]

形状记忆合金(Shape Memory Alloy)作为一种新型功能材料, 自 1960 年开始应用以来, 已有数千种项目获得专利。应用领域涉及电气、机械、运输、化学、医疗、能源、生活用品等。近来又在高精度控制领域得到了较广泛的应用。

用 SMA 作为驱动元件制成具有肩、肘、腕、手指 5 个自由度的微机器人手, 如图 11 所示, 手指和手腕靠 TiNi 合金螺旋弹簧的伸缩实现开闭和弯曲动作。各个形状记忆合金元件都是由直

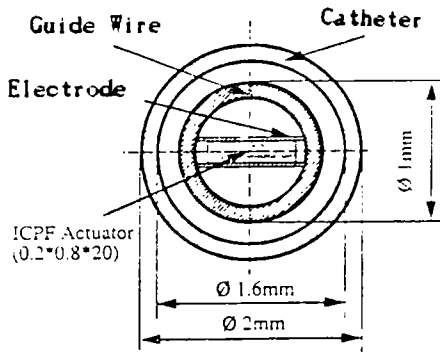


图 10 用 ICPF 制成的微型管道机器人剖面图

Fig. 10 Active micro catheter robot with ICPF actuator

接通上的脉宽可调电流加以控制,其最大特点是小型化和动作柔软,非常接近人手动作。

用 SMA 还可将内窥镜的插入部分做成具有能动弯曲的能力,如图 12 所示,SMA 做成 ζ 形式,通电加热后直径变小,可多自由度响应,竹节式部分柔软,且随记忆合金丝变化可作任意弯曲运动。

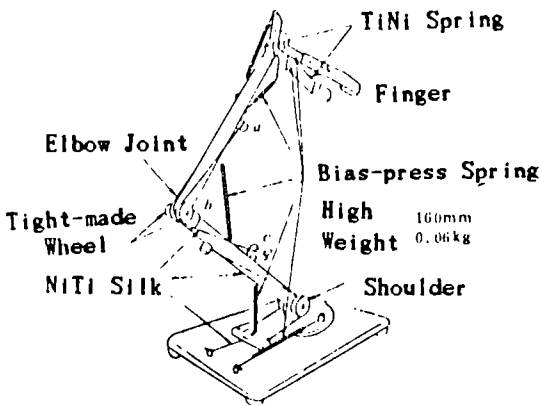


图 11 SMA 5 自由度机械手

Fig. 11 5-degree SMA manipulator

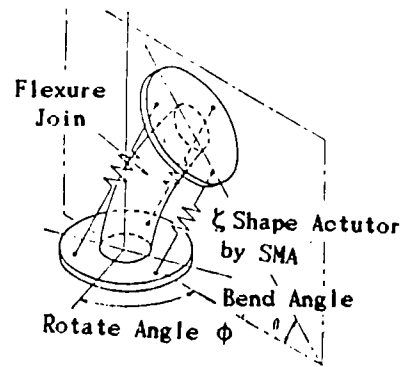


图 12 SMA 内窥镜

Fig. 12 SMA endoscope

用 SMA 制成的与前述 ICPF 管道机器人相同功用的机器人,可自由地在人难以操作的管道中爬行并实现某些操作。且 SMA 既可作为执行器又可作为传感器,可通过控制其电阻间接控制温度,控制精度在 0.5°C 左右。日本名古屋大学福田教授领导的研究小组正在研究把这种微形管道机器人,用于诸如人脑血管瘤清除这类外科手术中。目前已较成功地用于动物实验。但这种材料的最大缺点是频响较低。

8 结 束 语

许多新致动器都有一个共同的优点,这就是:它们可以直接产生直线运动,而不需要用机械辅助的方法把旋转运动转变为直线运动,因而在动态性能、精度和价格等许多方面都具有优

越性。国外对各种新型致动器的研制是极为重视的,本文所介绍的仅仅是近年来开发出的一部分。随着我国高新技术的发展,研制和使用各种高性能的致动器也显得越来越重要了。上述的 PZT、PMN 以及电磁致动器等在我国已经得到了广泛的应用,因而对其性能也有了较深入地了解,但更多的致动器还有待于我们去进一步研究、开发和应用。

参 考 文 献

- [1] 大舟译,新致动器在实践中的应用. 光机电世界,1994,16(5):11—17
- [2] 刘一声,新型致动器及其应用的开发. 压电与声光,1994,16(5):19—26
- [3] 涂承宇译,材料领域的成就推动了执行机构的设计. 新产品世界,1991
- [4] 大舟译,论直线驱动机构和致动器. 光机电世界,1994,10(6):22—29
- [5] Toshio FUKUDA, shuxiang GUO, Kazuhiro KOSUGE, Fumihito ARAI, Active Catheter System with Multi Degrees of Freedom-Mechanism and Experimental Results of Active Catheter with Multi Units and Multi D. O. F., Proceedings of 4th International Symposium on Micro Machine and Human Science (MHS'93) Nagoya, Japan, 1993,155—162
- [6] 杨杰,吴晔编著,形状记忆合金及其应用. 合肥:中国科技大学出版社,1993
- [7] Shigeru FUTAMI and Akihiro FURUTANI, Nanometer Positioning Using AC Linear Motor and Rolling Ball Guide, Bull. Japan Soc. of Prec. Engg., 1990,24 (3):184—185
- [8] M. Fablander and M. Richardson, New Material For The Rapid Conversion of Electric Energy to Mechanical Motion, 10th International Workshop on Rare-Earth Magnets and Their Applications, Kyoto, Japan, 16—17,1989

Development and Applications of New Micro-motion Actuators

Wu Yihui, Wang Liding and Ma Jianxu

*(Changchun Institute of Optics & Fine Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022)*

Abstract

The characters of several new types of micro-motion actuators is analyzed and their applications in some advanced fields, such as MEMS and Nanotechnology is introduced in this paper.

Key words: Actuators, Development, Applications

吴一辉 女,1965年生。1986年毕业于天津轻工业学院机械系,获学士学位,1991年毕业于中科院长春光机所获工学硕士学位,现助研,在读博士。主要从事精密机械传动有关理论及其计算机辅助设计、制图方面的研究工作。与同事合作,已有两项成果获中科院科技进步二等奖和中科院长春分院科技进步一等奖。1993年开始从事微定位技术特别是利用压电陶瓷进行纳米定位及微操作方面的研究工作,发表相关论文十余篇。