

# 微型管道机器人钹形压电复合驱动器的结构设计及优化

郭彤 李江雄 柯映林

浙江大学,杭州,310027

**摘要:**提出一种基于惯性驱动的微型管道机器人钹形压电复合驱动器,为解决由提高抗疲劳破坏而采用较厚金属膜片所带来的性能影响问题,对钹形压电复合片的金属片进行了有限元分析并提出径向刻槽的结构优化,使其环向应力得以释放,从而大大提高了机器人驱动器的变形特性及能量转化率,使机器人的运行速度提高 56%,具有较高的速度特性及负载能力。

**关键词:**管道机器人;压电驱动器;钹形;有限元;优化

**中图分类号:** TB552

**文章编号:** 1004—132X(2005)18—1610—03

## Design and Optimization of PZT Cymbal Actuators for In-pipe Micro-robots

Guo Tong Li Jiangxiong Ke Yinglin

Zhejiang University, Hangzhou, 310027

**Abstract:** A kind of piezoelectric cymbal actuators for in-pipe micro-robots were presented, which could move in pipe with 10mm diameters based on the inertia-driving principle. In order to resolve the problem of bending fatigue causing breaks in cymbal end caps and to improve properties further, structural optimization of the piezoelectric cymbal actuators was performed. Through theoretical analysis in collaboration with experiments, the structural optimization of slotting in the cymbal end caps released the tangential stresses and improved moving properties. Under the same working conditions, the speed of the optimized robot can be 56% higher than that of the original one.

**Key Words:** in-pipe micro-robot; piezoelectric actuator; cymbal; FEA; optimization

### 0 引言

随着微机电系统(MEMS)、微机械人的研究日趋活跃,应用于检测的微小管道机器人成为关注的焦点之一。对此,日本、美国等国家已经做了大量的研究工作,研制了多重驱动方式的微型管

内机器人<sup>[1~4]</sup>。然而,国内微型管内移动机器人的研究目前还处于刚刚起步阶段<sup>[5,6]</sup>。对于驱动元件,压电陶瓷(PZT)材料、电磁元件、形状记忆合金(SMA)以及超磁致伸缩材料(GMM)等都有应用,而压电陶瓷元件则由于其体积小、结构简单、质量轻、位移分辨率及频响高、易于控制等优点,成为驱动器的研究热点,而且针对各种不同的应用,产生了多种不同结构的压电驱动器。压电叠堆驱动器具有很高的频响特性和极大的输出

收稿日期:2004-11-04

基金项目:国家 863 高技术研究发展计划资助项目(2001AA423130)

- [5] Fussell B K, Jerard R B, Richards N, et al. NC Machining Feedrate Optimization Using On-line Model Tuning and Adaptive Control. The 2002 NSF Design, Service and Manufacturing Grantees and Research Conference, San Juan, Puerto Rico, 2002
- [6] 乔咏梅. 数控加工仿真的力学环境及切削参数优化研究:[博士学位论文]. 西安:西北工业大学,1996
- [7] Tlustý J. Handbook of High Speed Machining Technology. New York: Chapman and Hall, 1985
- [8] Kline W A, DeVor R E, Lindberg J R. The Prediction of Cutting Forces in End Milling with Application to Cornering Cuts. International Journal of Ma-

chine Tool Design and Research, 1982, 22(1): 7~22

- [9] Altintas Y, Lee P. A General Mechanics and Dynamics Model for Helical End Mills. Annals of the CIRP, 1996, 45(1): 59~64

(编辑 马尧发)

**作者简介:**彭涛,男,1970年生。北京航空航天大学机械工程及自动化学院博士研究生。研究方向为 CAD/CAM/CAE、先进制造技术等。出版专著 3 部,发表论文 4 篇。雷毅,男,1963年生。北京航空航天大学机械工程及自动化学院教授、博士研究生导师。周丹,女,1962年生。北京航空制造工程研究所研究员。

力,但由于输出变形较小,影响了应用范围,针对这种情况,各种通过辅助结构来放大变形的复合式压电驱动器应运而生,如双叠片驱动器、RAINBOW and THUNDER 驱动器<sup>[7]</sup>、ring-morph 驱动器<sup>[8]</sup>及钹形驱动器<sup>[9]</sup>等。

本文提出并研制出一种基于惯性冲击原理管道机器人钹形压电复合驱动器,该管道机器人驱动器采用  $\phi 8\text{mm}$  钹形金属膜片及压电陶瓷片组合制成,结构简单紧凑、制作成本低廉、可控性好,可在  $\phi 10\text{mm}$  的管道中可控运行。通过有限元分析对钹形压电复合驱动器进行了理论结构优化,并通过实物加工及实验验证了优化后的驱动器具有更好的工作性能。

## 1 基于钹形压电元件的微型管道机器人驱动器的设计

### 1.1 钹形压电复合驱动器

钹形压电复合驱动器由多片钹形压电复合片结构串联而成。钹形压电复合片则由两片钹形金属膜片及一片压电膜片经特种双组分导电胶粘合而成,见图 1。压电膜片以  $d_{31}$  模式产生变形,即给压电膜片上下电极沿轴向施加电压时,压电膜片产生径向的伸缩变形。这种径向的变形通过钹形金属膜片放大便产生了压电复合片的轴向伸缩变形,当通过结构串联多个压电复合片时,系统则会产生更大的轴向变形以适应驱动要求。

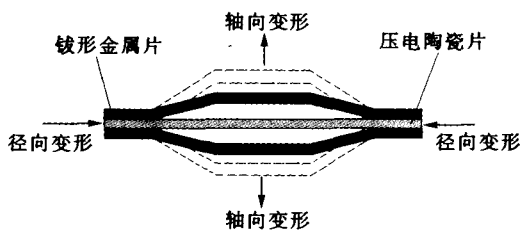


图 1 钹形压电复合片及其结构串联

### 1.2 微型管道机器人驱动器结构设计

微型管道机器人驱动器主要由压电复合驱动器、惯性质量块及弹性支撑爪组成,如图 2 所示。驱动器系统靠弹性支撑爪的作用支撑于管道内壁,其他部件不与管道接触。整个驱动器系统以惯性冲击的方式运动,当给驱动器系统施加一定波形的电压时,驱动器带动惯性质量块产生伸长变形,而惯性力不足以克服弹性支撑爪与管壁的摩擦力,支撑爪不与管壁产生相对运动;当给驱动器系统施加另一波形电压时,使得驱动器产生快速收缩变形,由于惯性质量块惯性力的作用,克服弹性支撑爪与管壁的摩擦力,使支撑爪相对管壁移动。不同的驱动电压波形产生不同的驱动力,

通过实验,发现在具有相同电压幅值的情况下,大占空比的方波具有较好的驱动效率。

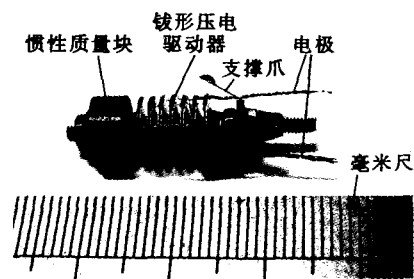


图 2 微型管道机器人钹形压电复合驱动器实物

## 2 钹形压电复合驱动器的结构优化

钹形压电复合驱动器在作为管道机器人驱动器的工作过程中,由于作高频及长时间的振动,钹形金属膜片的顶端连接处容易产生疲劳断裂。为了延长驱动器的工作寿命,需采用较厚的金属膜片以提高其抗疲劳特性,但较厚的金属膜片则势必影响钹形压电复合片的变形量,影响工作性能。通过有限元分析发现,在钹形压电复合片产生变形的时候,钹形金属膜片会产生环向应力,而这种环向应力会影响复合片的能量转换,使得驱动器机械能输出大为减小。

为了减小甚至消除这种环向应力,我们提出沿钹形金属膜片径向开槽的方法,如图 3 所示。为了验证开槽对钹形压电复合片性能的改善,进行了理论建模<sup>[10]</sup>并根据表 1 所示几何参数、材料

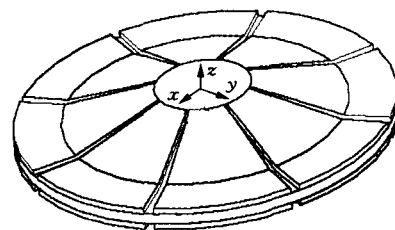


图 3 无槽及有槽钹形压电复合片结构示意图

表 1 槽钹形压电复合换能器材料物理参数及几何参数

参数	PZT5A 压电片	金属膜片
密度 $\rho(\text{kg}/\text{m}^3)$	7700	8330
压电常数 $d_{31}(\text{m}/\text{V})$	$1.71 \times 10^{-10}$	—
泊松比 $\nu$	0.31	0.35
杨氏模量 $E(\text{GPa})$	61	118
复合片半径 $a(\text{mm})$	4.0	4.0
厚度 $t(\text{mm})$	0.2	0.1
凹坑底半径 $a_1(\text{mm})$	—	3.0
凹坑顶半径 $a_2(\text{mm})$	—	1.0
膜片凹坑深 $h(\text{mm})$	—	0.1~1.0

物理参数进行了机电耦合场有限元分析。由理论模型及有限元分析结果发现开槽后的金属膜片的环向应力梯度大大减小。根据材料学广义的扩散

原理,开槽使得应力场梯度降低,使被动部件体系能量减小,也减小了复合片输出机械能量的损失,从而其轴向变形随着槽数量的提高而增大,其振动基频随槽数量的提高而降低,轴向输出力在槽数为 24 时产生最大值,如图 4 所示。通过实物实验对 8 槽钹形压电复合片施加 0.1Hz 模拟静态激励信号以及阶跃激励信号,并采用涡流传感器进行响应检测,结果与理论分析一致。

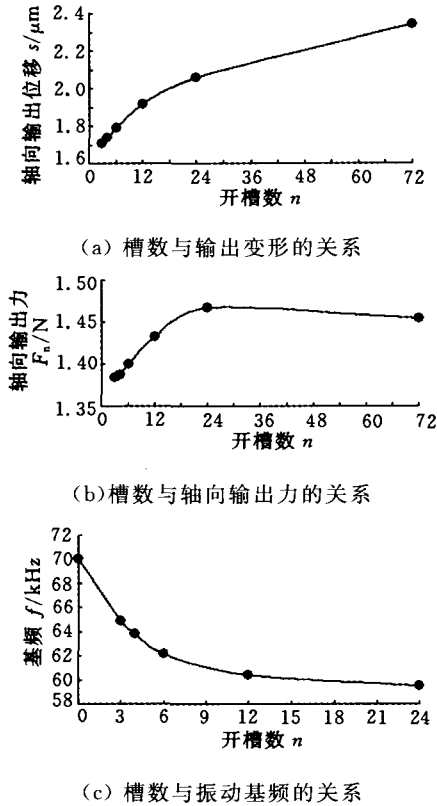


图 4 开槽数量对槽钹形压电复合片力学性能的影响

根据优化结果并考虑到加工工艺,设计制作了一种 8 槽钹形压电复合片,并为了与图 2 所示驱动器进行性能比较,集成组装了 7 片组槽钹式微型管道机器人驱动器系统。该槽钹式驱动系统与原始无槽驱动系统具有相同的质量(4g),在相同的 φ10mm 管道中运行,并经过测量两种驱动系统与管壁的摩擦系数同为 0.5N。实验采用 80% 占空比方波激励电压波形,电压幅值为 ±140V,驱动频率为 389Hz,实验测试该频率无槽钹形驱动器运行最快。实验分别在不同管道安置角度的情况下,对槽钹式驱动系统及无槽钹式驱动系统进行管道运行测试。结果显示槽钹式微型管道机器人驱动器系统具有更为良好的运行特性,如图 5 所示。

无槽钹式及槽钹式管道机器人驱动器由于均采用相同的压电膜片作为动力源,因而可以看作一组电容性元件,并具有相同的电容。对于驱动器激励电压信号的选择,由于考虑到压电膜片存

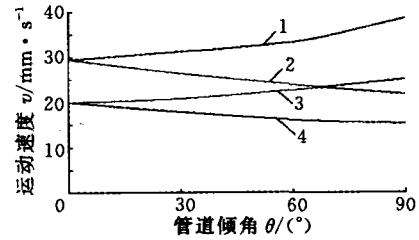


图 5 无槽钹式与槽钹式微型管道机器人驱动器管道运行性能比较

在迟滞特性,电压信号波形采用正负对称峰值方波,即采用  $-U/2 \sim U/2$  电压波形代替  $0 \sim U$  电压波形,这样可以消除由单峰值波形造成的压电膜片迟滞变形损失。

因此,一周期压电膜片充电电能可表示为

$$W = \frac{1}{2}C\left(\frac{U}{2}\right)^2 + \frac{1}{2}C\left(-\frac{U}{2}\right)^2 = \frac{1}{4}CU^2 \quad (1)$$

$$C = nC_0 \quad (2)$$

式中,  $n$  为压电膜片的数量;  $C_0$  为压电膜片的电容量;  $U$  为施加的电压。

因此,驱动器系统输入的电功率为

$$P_e = \frac{1}{4}f_d CU^2 \quad (3)$$

式中,  $f_d$  为激励信号频率。

根据机器人管道中爬行角度,其有效输出机械功率可表示为

$$P_m = [G\sin\theta + \mu(N + G\cos\theta)]v \quad (4)$$

式中,  $G$  为管道机器人自重;  $\theta$  为管道角度;  $N$  为支撑爪对管道内壁的正压力;  $\mu$  为管道内壁的摩擦系数;  $v$  为机器人的爬行速度。

因此,管道机器人的运行效率可表示为

$$\eta = \frac{P_m}{P_e} \quad (5)$$

由于无槽钹式驱动器与有槽钹式驱动器具有相同的电容特性及驱动频率,其运行效率比为

$$\xi = \frac{\eta_{new}}{\eta_{old}} = \frac{v_{new}}{v_{old}} = 1.56 \quad (6)$$

式中,下标 new 和下标 old 分别表示有槽钹式和无槽钹式。

### 3 结论

钹形压电复合驱动器作为一种微型管道机器人驱动器,具有输出位移大、驱动能力强、结构紧凑、制造简单等优点。为了进一步提高钹形压电复合驱动器的驱动能力,通过理论分析,提出采用径向开槽的方法,对钹形压电复合片进行结构优化,并经过实验验证,采用槽钹形压电复合片可以有效提高驱动器的变形位移、驱动力及有效降低

(下转第 1621 页)

(2)对神经网络数据预处理方法进行了研究,提出了基于对数变换的神经网络数据预处理算法,经过多次训练测试表明,该方法比以往正负1归一化、均值归一化数据预处理方法训练速度快,最大相对误差小,最小相对误差也小,试验还表明,该数据预处理方法能缩短神经网络训练时间,提高训练精度,便于知识获取。

(3)就铜打钢样本获取进行了实验研究,对铜钨、银钨打硬质合金,铜钨、银钨打钢,石墨打钢,也可用同样的实验方法获取样本,运用工艺模型训练建立相应加工工艺选择模型参数库,实际应用时,根据加工要求调用对应的加工工艺选择模型参数库即可。

(4)所提出的基于对数变换神经网络参数预处理方法同样适用于各类神经网络的其他工程应用场合的输入输入数据的预处理。

(5)使用的建模方法也适用于其他电加工方法和电加工机床,只要实验获取相应机床相应的加工方法的样本数据,对模型稍作修正,即可建立对应的电加工工艺选择模型。

#### 参考文献:

- [1] Tarng Y S. Detemination of Optimal Cutting Parameters in Wire Electrical Discharge Machining. *Int. J. Mach. Tools Manufact*, 1995, 35(12): 1693~1701
- [2] Anand S, Baton R. Multi-objective Optimization of Electro-discharge Machining Process. *Microtech*, 1990, 6(2): 33~36
- [3] Spedding T A, Wang Z Q. Parametric Optimization and Surface Characterization of Wire Electrical Discharge Machining Process. *Precision Engineering*, 1997, 20(1): 5~15
- [4] Lin J L, Wang K S, Yan B H, et al. Optimization of the Electrical Discharge Machining Process Based on the Taguchi Method with Fuzzy Logics. *Journal of Materials Processing Technology*, 2000, 102(1): 48~55
- [5] 楼乐明,李明辉,彭颖红. 利用神经网络建立电火花加工工艺模型. *中国机械工程*, 2001, 12(4): 408~410

(编辑 马尧发)

作者简介:彭泽军,男,1975年生。中国工程物理研究院机械制造工艺研究所603室工程师。主要研究方向为先进制造技术、电火花加工过程建模及工艺参数控制。发表论文6篇。王宝瑞,男,1961年生。中国工程物理研究院机械制造工艺研究所副所长、研究员。陈 辉,男,1971年生。中国工程物理研究院机械制造工艺研究所603室主任、高级工程师。

(上接第1612页)

驱动器的工作频率,使得微型管道机器人运行效率提高56%。

#### 参考文献:

- [1] Wakimoto S, Nakajima J, Takata M, et al. A Micro Snake-like Robot for Small Pipe Inspection. *International Symposium on Micromechatronics and Human Science*, Nagoya, Japan, 2003
- [2] Mangan E, Kingsley D, Quinn R, et al. Development of a Peristaltic Endoscope. *The International Conference on Robotics & Automation*, Washington DC, 2002
- [3] Lee Y, Kim B, Lee M, et al. Locomotive Mechanism Design and Fabrication of Biomimetic Micro Robot Using Shape Memory Alloy. *The International Conference on Robotics & Automation*, Barcelona, Spain, 2004
- [4] Idogaki T, Kanayama H, Ohya N, et al. Characteristics of Piezoelectric Locomotive Mechanism for an In-pipe Micro Inspection Machine. *The 6th International Symposium on Micro Machine and Human Science*, Nagoya, Japan, 1995
- [5] 程良伦,杨宜民. 一种新型管内微机器人的研究. *机器人*, 1999, 21(1): 444~449
- [6] 孙麟治,孙萍,秦新捷,等. 细小管道爬行的微机器人. *光学精密工程*, 1998, 6(5): 249~255
- [7] Wise S. Displacement Properties of RAINBOW and THUNDER Piezoelectric Actuators. *Sensors and Actuators A*, 1998, 69(1): 33~38
- [8] Dong S, Du X, Bouchilloux P, et al. Piezoelectric Ring-morph Actuators for Valve Application. *Journal of Electroceramics*, 2002, 8(4): 155~161
- [9] Dogan A, Uchino K, Newnham R. Composite Piezoelectric Transducer with Truncated Conical Endcaps "Cymbal". *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 1997, 44(3): 597~605
- [10] Ke Y, Guo T, Li J. A New-style, Slotted-cymbal Transducer with Large Displacement and High Energy Transmission. *IEEE Transaction on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2004, 51(9): 1171~1177

(编辑 马尧发)

作者简介:郭 彤,男,1973年生。浙江大学现代制造工程研究所博士研究生、工程师。研究方向为微型管道机器人技术。发表论文7篇。李江雄,男,1969年生。浙江大学现代制造工程研究所副教授。柯映林,男,1963年生。浙江大学现代制造工程研究所教授。