

一种新型驱动器

王静怡¹, 袁进浩¹, 朱孔军¹, 季宏丽¹, 陈海荣²

(1. 南京航空航天大学 机械结构力学及控制国家重点实验室, 江苏 南京 210016;

2. 中国电力科学研究院 新能源发电研究所, 江苏 南京 210000)

摘要:介绍了一种新型压电驱动器含金属芯压电陶瓷纤维(MPF), 推导了 MPF 的驱动电压与位移关系, 运用 ABAQUS 软件对 MPF 进行了有限元仿真, 并将 MPF 在不同驱动电压下的位移进行了理论值和仿真值的对比, 验证了所推导公式中响应位移和驱动电压关系的正确性。通过实验测试了 MPF 的迟滞特性, 并设计了迟滞逆模型开环控制、迟滞逆模型结合比例、积分和微分(PID)的两种控制方法对 MPF 进行了迟滞补偿控制。实验表明, 复合控制的效果较好, MPF 迟滞得到了很好补偿, 使输入和输出呈线性, 实现了高于 10 nm 的高精度定位。复合控制的实验结果也进一步验证了 MPF 位移公式的正确性。

关键词:金属芯压电陶瓷纤维(MPF); 驱动电压; 位移; 线性

中图分类号: TP202+.2

文献标识码: A

A New Type of Piezoelectric Actuator

WANG Jingyi¹, QIU Jinhao¹, ZHU Kongjun¹, JI Hongli¹, CHEN Hairong²

(1. State Key Lab. of Mechanics and Control of Mechanical Structures, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China; 2. China Electronic Power Research Institute New Energy Research Institute, Nanjing 210000, China)

Abstract: A new type of piezoelectric metal core piezoelectric fiber(MPF) actuator is introduced. The relationship between voltage and displacement is deducted and finite element simulation is used to analysis MPF. Comparative study gives the difference of the displacement between the theory results and the simulation results under different driving voltage, and verifies the relationship between driving voltage and displacement in the formula. The MPF hysteresis is also test, and two methods are designed to compensate hysteresis control, the inverse hysteresis model of open loop control and the combination of PID. Test shows that the composite control is better with good compensation of the MPF hysteresis, and linear input and output. High-precision positioning is realized by higher than the 10 nm. The experimental results of composite control further verify the correctness of the MPF displacement formula.

Key words: MPF; drive voltage; displacement; linear

0 引言

压电驱动器具有位移分辨率高, 响应速度快, 产生的推力大, 不受磁场干扰, 能耗低, 无磨损及无需润滑等优点。传统压电功能器件形状多为块状或片状, 体积较大, 不利于和基体结构集成, 当作为功能元件埋入基体结构时, 对结构的机械强度和可靠性有很大影响, 且难以应用于弯曲的平面中。为能将体积细小的压电陶瓷纤维单独作为传感器和驱动器使用, 原日本东北大学袁进浩教授等先后采用挤压法和溶胶-凝胶法, 在世界上首次成功制作了直径仅为 $\varnothing 150 \mu\text{m}$ 的金属芯压电陶瓷纤维(MPF)。中心是一根直径 $\varnothing 50 \mu\text{m}$ 的细金属芯(Pt), 中间层是压

电陶瓷, 最外层是喷镀在压电陶瓷表面一层薄金属层。日本产业技术综合研究所的 Hiroshi Sato 和 Yoshiro Shimojo 等分别利用挤压法和水热法制备了 MPF; 并将 MPF 埋入复合材料悬臂梁中用作传感器, 测量了悬臂梁的弯曲振动; 又用作驱动器抑制了梁的振动^[1-3]。Hiroshi Sato 等还利用实验方法测出了 MPF 的杨氏模量、纵向位移和断裂强度^[4]。法国里昂国家应用科学院的 Abdelwahed Hajjaji 等研究了 MPF 的半径比、密度、极化电场强度及剩余极化率对其机电性能的影响^[5]。边义祥等建立了 MPF 的静态与动态本构方程, 并研究了 MPF 的驱动和传感性能^[6]。对 MPF 驱动性能的测试主要是

收稿日期: 2012-11-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(90923029); 长江学者和创新团队发展计划资助项目(IRT0968); 江苏省自然科学基金资助项目(BK2009020); 江苏高校优势学科建设工程基金资助项目; 江苏省普通高校研究生科研创新计划基金资助项目(CXZZ11_0194)

作者简介: 王静怡(1987-), 女, 安徽人, 硕士生, 主要从事测试技术及压电驱动的研究。

理论分析、仿真计算及粘贴于其他结构后的驱动性能测试,对单独的单根 MPF 作为驱动器的驱动特性未有研究。因此,需要测试单根 MPF 在不借助其他结构时的驱动特性。

1 新型驱动器 MPF 的驱动性能

1.1 MPF 的压电方程

压电效应是指电介质在机械力的作用下发生电极变化,电极化的大小与应力成正比,电极化的方向随应力方向的变化而变化,当压电陶瓷用作驱动器时,应用的是电介质在外电场作用下发生应变,应变的大小与电场的大小成正比,即是逆压电效应,应变方向与电场方向有关,由文献[7]可知,电解质在外电场作用下应变与电场的关系为

$$s = ME^2 + dE \quad (1)$$

式中: s 为应变; M 为电磁伸缩系数; E 为电场; d 为压电常数。

针对这种新型驱动器 MPF 的压电方程,图 1 为新型驱动 MPF 的几何形状及圆柱坐标系。金属芯位于纤维的中心位置,半径为 R_m ;压电陶瓷的外部半径为 R_c ;MPF 的长度为 L 。由于 MPF 是圆柱形状,为研究方便,采用柱坐标系。压电方程的直角坐标系和圆柱坐标系的对应关系为 1 对应 z ,2 对应 θ ,3 对应 r 。

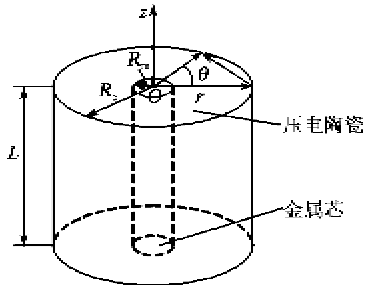


图 1 MPF 的几何形状及圆柱坐标系

MPF 作为驱动器时,一般一端固定,一端自由,其在直径方向可自由伸缩。由于 MPF 的直径一般为长度的几十分之一,因此圆周方向的应力很小,基本可忽略。其圆周方向的应力也可忽略,在电极上外加电压后,其应力和电场的边界条件可分别表示为

$$T_r = T_\theta = T_\phi = T_z = 0 \quad (2)$$

$$E_\theta = E_z = 0 \quad (3)$$

所加电场方向和极化方向相反时,压电陶瓷产生伸长变形在第一类压电方程中,由于 E_r 、电位移取负值,压电陶瓷部分的应变和电位移分别表示为

$$S_r^T = s_{11}^E T_r^T - d_{31} E_r \quad (4)$$

$$-D_\theta^T = d_{31} T_r^T - \epsilon_{33}^T E_r \quad (5)$$

式中: s_{ij} 为应变; T_{ij} 为应力; D_i 为电位移; E_i 为电场强度; s_{ij}^E 为弹性柔顺系数; d_{ij} 为压电常数; ϵ_{ij}^T 为介电常数。

金属芯的应力-应变关系为

$$S_r^m = s_{11}^m T_r^m \quad (6)$$

1.2 MPF 位移公式推导

由于金属芯和陶瓷部分结合紧密,可认为受电场激励或外力作用时,金属芯和陶瓷部分沿轴向的应变相同,设为 S ,当外加电压为 V ,则由式(4)可得陶瓷部分的应力为

$$T_r^T = \frac{S}{s_{11}^E} + \frac{1}{s_{11}^E} d_{31} E_r \quad (7)$$

式中:“+”号表示电场强度方向与极化方向相反,“—”号表示电场强度与极化方向相同,而在本研究中,假设电场强度方向和极化方向相反,陶瓷部分由于是圆柱形状,其电场强度为

$$E_r = \frac{V}{r \ln(R_c/R_m)} \quad (8)$$

代入式(7),得到陶瓷部分的应力为

$$T_r^T = \frac{S}{s_{11}^E} + \frac{1}{s_{11}^E} \frac{d_{31} V}{r \ln(R_c/R_m)} \quad (9)$$

由式(6)得到金属芯部分的应力为

$$T_r^m = \frac{S}{s_{11}^m} \quad (10)$$

则整个 MPF 的所受外加合力为

$$F = \int_0^{2\pi} \int_{R_m}^{R_c} \left(\frac{S}{s_{11}^E} + \frac{1}{s_{11}^E} \frac{d_{31} V}{r \ln(R_c/R_m)} \right) r dr d\theta + \int_0^{2\pi} \int_0^{R_m} \frac{S}{s_{11}^m} r dr d\theta \quad (11)$$

在不借助其他结构只对 MPF 施加电压时,其外加合力为 0,求得应变为

$$S = \frac{2s_m d_{31} (R_m - R_c) V}{(s_m R_c^2 - s_m R_m^2 + s_{11}^E R_m^2) \ln(R_c/R_m)} \quad (12)$$

由此,得到 MPF 自由端的位移

$$\delta = LS = \frac{2s_m d_{31} (R_m - R_c) L V}{(s_m R_c^2 - s_m R_m^2 + s_{11}^E R_m^2) \ln(R_c/R_m)} \quad (13)$$

由式(13)可看出,一端是被固定的约束端,一端是自由端的 MPF,自由端位移和其长度 L 、所加电压 V 成正比。由式(13)还可看出,同一根 MPF,其自由端的位移仅与加载电压有关。

2 有限元仿真

仿真 MPF 的外层采用的是 PNN-PZT 材料,内

层则是用铂金为金属芯的材料,具体的性能参数如表 1 所示。

表 1 MPF 材料性能

材料	密度/(g/cm ³)	$s_{11}^E/(10^{-12}\text{m}^2/\text{N})$
PNN-PZT	8.0	20.6
Pt	19.6	
材料	$d_{31}/(\text{pC}/\text{N})$	$s_{zz}/(10^{-12}\text{m}^2/\text{N})$
PNN-PZT	150	
Pt		5.95

MPF 的外径压电陶瓷的直径为 $\varnothing 400\ \mu\text{m}$, 内径铂金的直径为 $\varnothing 50\ \mu\text{m}$, 长度为 2 cm, 采用一组驱动电压值 V 为 10 V、20 V、30 V、40 V、50 V、60 V、70 V、80 V、90 V、100 V, 把 L 、 R_m 、 R_c 及表 1 中材料参数值都代入式(13)中得出一组对应驱动电压的自由端位移的理论值。为了验证对于式(13)理论计算的结果, 用 ABAQUS 有限元软件对 MPF 进行了建模仿真, 经过部件、特性功能、装配、分析步、相互作用、载荷、网格划分、分析作业、后处理等步骤后得出仿真结果图。对 MPF 进行建模的图形如图 2 所示。对所建模型进行有限元仿真分析, 得出了 MPF 自由端的位移-电压关系。并把结果和理论计算的结果作了比较, 如图 3 所示, 结果表明理论值和有限元分析值基本吻合。从仿真结果也可看出自由端部的位移与所加驱动电压成正比。

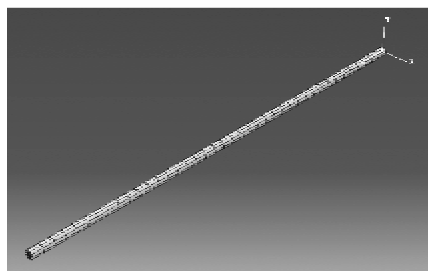


图 2 MPF 仿真建模图

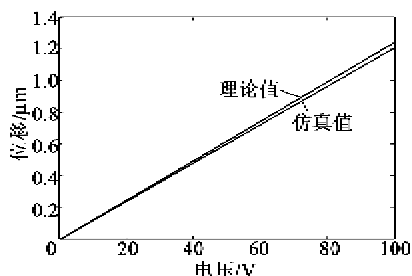


图 3 外加不同电压时自由端端部位移值

3 实验结果及其分析

3.1 MPF 电压-位移的关系

MPF 的最大位移量与其直径、长度相关, 本文中使用的 MPF 外径为 $\varnothing 400\ \mu\text{m}$, 内径为 $\varnothing 50\ \mu\text{m}$,

长度为 2 cm。利用不同幅值、频率为 1 Hz 的正弦信号电压激励 MPF, 测得不同幅值电压信号对应的最大位移值, 作出 MPF 电压-位移曲线。实验测试系统如图 4 所示。

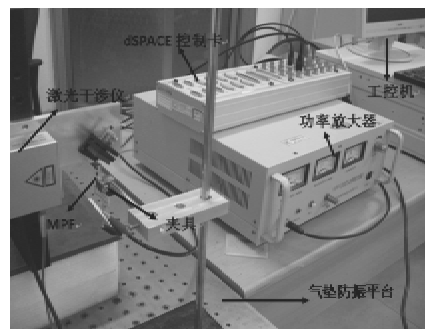


图 4 MPF 实验测试系统

MPF 的正弦激励信号幅值为 10 V、20 V、30 V、40 V、50 V、60 V、70 V、80 V、90 V、100 V, 通过实验所测的对应的最大位移量为 $0.082\ 5\ \mu\text{m}$ 、 $0.175\ 1\ \mu\text{m}$ 、 $0.269\ 9\ \mu\text{m}$ 、 $0.378\ 7\ \mu\text{m}$ 、 $0.464\ 1\ \mu\text{m}$ 、 $0.591\ 9\ \mu\text{m}$ 、 $0.710\ 3\ \mu\text{m}$ 、 $0.834\ 8\ \mu\text{m}$ 、 $0.984\ 0\ \mu\text{m}$ 、 $1.163\ 0\ \mu\text{m}$ 。通过 MATLAB 进行曲线拟合, 得到的电压-位移曲线, 如图 5 所示。MPF 的电压-位移曲线并不是一条线性的直线, 而是类似二次曲线。虽然从压电公式计算及用 ABAQUS 软件仿真出来的结果都可看出, MPF 的位移和所加电压应成正比。但实验结果表明, MPF 也具有压电材料所固有的迟滞特性。这将影响其在精密驱动领域的应用, 故对 MPF 进行了单独的迟滞曲线的测试, 并对迟滞采用了几种不同的补偿控制方法, 提高了控制精度。

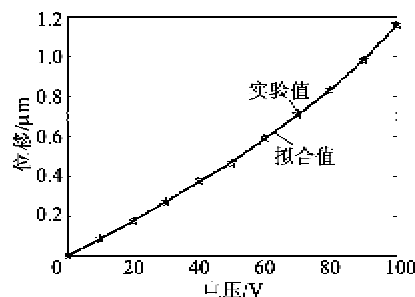


图 5 MPF 电压-位移曲线

3.2 MPF 迟滞特性

由于 MPF 的外层是由压电陶瓷材料做成, 具有迟滞特性。目前迟滞特性已成为影响压电驱动器定位精度提高的主要原因, 为消除迟滞特性对 MPF 定位精度的影响, 本文作者对 MPF 的迟滞特性作了测试与分析。MPF 迟滞测试所用的实验测试系统如图 4 所示, 测试结果如图 6 所示。MPF 迟滞特

性测试的驱动信号为 1 Hz 的变幅值正弦信号。由图 6 可知,MPF 存在明显的迟滞特性。在精密驱动控制系统中,这种迟滞特性已成为降低压电驱动器的位移输出控制精度的主要因素。为能消除迟滞特性对 MPF 定位精度的影响,一般采用模型控制法来消除迟滞对 MPF 定位精度的不良影响。

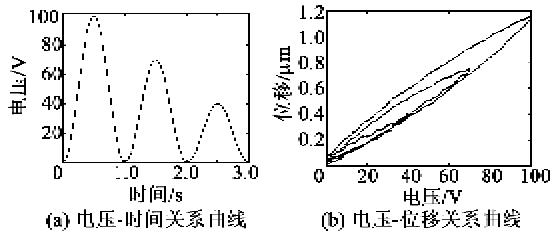


图6 MPF迟滞特性测试

3.3 MPF迟滞补偿控制

为补偿新型驱动器 MPF 的迟滞,提高定位精度,设计了两种迟滞补偿控制方案。MPF 参考位移信号为频率 1 Hz,最大位移为 $1.089 \mu\text{m}$ 的变幅值正弦信号,如图 7 所示。位移跟踪误差=参考位移-实际位移,相对跟踪误差=(参考位移-实际位移)/最大参考位移,在无任何补偿的情况下,MPF 的最大位移跟踪误差值为 $0.132 \mu\text{m}$ (见图 8),最大相对跟踪误差为 12.12%。

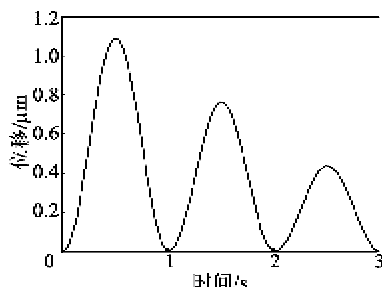


图7 MPF参考位移

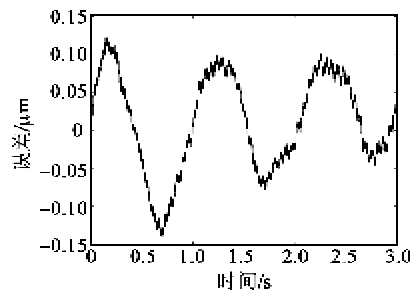


图8 无任何补偿时 MPF 位移跟踪误差

可见这种新型驱动器 MPF 虽然由于结构细小,响应快,可方便地埋入到复合材料中,可用于结构健康监测、振动控制等方面,但由图 8 可看出,由于迟滞特性,若不采用控制措施直接把 MPF 用于驱动会有很大的误差。因此必须采用一些补偿控制法来提高这种新型驱动器 MPF 的定位精度和驱动性能。

由于 MPF 不仅具有跟踪位移误差还具有迟滞特性,故对其设计实验进行补偿控制。以 MPF 为实验对象,设计了两种不同的控制实验:

- 1) 利用迟滞模型的逆模型作为前馈,进行开环控制。
- 2) 将逆模型前馈和 PID 反馈结合,进行闭环复合控制。

实验中使用的迟滞逆模型均为改进型 Maxwell 模型^[3],此模型能描述非对称的压电迟滞特性,且模型参数识别简便,适合编程运用于实时控制。实验中所使用的模型单元个数为 24,模型参数如表 2 所示。MPF 的控制补偿实验系统与测试系统相同。其中 $k_{u1,i}$ 、 $k_{d1,i}$ 、 $f_{u1,i}$ 、 $f_{d1,i}$ 分别为第 i 个单元的上升段的弹簧弹性系数、下降段的弹簧弹性系数、上升段的摩擦力、下降段的摩擦力。

表2 MPF迟滞逆模型参数

单元号	$k_{u1,i}$	$k_{d1,i}$	$f_{u1,i}$	$f_{d1,i}$	$k_{u2,i}$	$k_{d2,i}$	$f_{u2,i}$	$f_{d2,i}$
1	1.331 0	0.013 3	0.013 3	0	0.000 9	0.090 0	1	0
2	0.015 0	0.000 3	0.000 3	0	-0.028 7	-1.43 5	1	0
3	-0.794 5	-0.023 8	-0.023 8	0	0.021 7	0.722 5	1	0
4	0.116 5	0.005 8	0.005 8	0	0.020 0	0.400 5	1	0
5	0.454 0	0.034 1	0.034 1	0	-0.007 5	-0.100 0	1	0
6	-0.331 9	-0.033 2	-0.033 2	0	0.012 3	0.122 9	1	0
7	0.321 1	0.053 3	0.053 3	0	-0.026 4	-0.158 2	1	0
8	-0.011 9	-0.002 8	-0.002 8	0	0.086 0	0.367 6	1	0
9	0.003 7	0.001 1	0.001 1	0	-0.041 1	-0.137 0	1	0
10	0.014 2	0.005 2	0.005 2	0	0.052 6	0.143 3	1	0
11	0.304 5	0.131 8	0.131 8	0	-0.000 1	-0.000 2	1	0

(续表)

单元号	$k_{v1,i}$	$k_{v2,i}$	$f_{v1,i}$	$f_{v2,i}$	$k_{d1,i}$	$k_{d2,i}$	$f_{d1,i}$	$f_{d2,i}$
12	-0.133 9	-0.066 9	-0.066 9	0	-0.031 6	-0.063 2	1	0
13	0.018 9	0.010 7	0.010 7	0	0.164 2	0.289 6	1	0
14	0.101 5	0.064 2	0.064 2	0	-0.102 2	-0.161 2	1	0
15	-0.115 9	-0.081 1	-0.081 1	0	0.069 5	0.099 2	1	0
16	0.314 4	0.240 8	0.240 8	0	0.045 2	0.059 0	1	0
17	-0.165 7	-0.138 0	-0.138 0	0	-0.020 3	-0.024 4	1	0
18	0.160 9	0.144 8	0.144 8	0	0.202 6	0.225 1	1	0
19	0.090 0	0.083 2	0.083 2	0	-0.291 2	-0.314 8	1	0
20	-0.193 5	-0.183 8	-0.183 8	0	0.278 0	0.292 7	1	0
21	0.247 5	0.240 1	0.240 1	0	0.429 4	0.442 6	1	0
22	0.440 0	0.431 2	0.431 2	0	0.093 5	0.095 4	1	0
23	0.040 0	0.039 6	0.039 6	0	0.036 6	0.037 0	1	0
24	0.030 0	0.030 0	0.030 0	0	0.036 7	0.036 7	1	0

3.3.1 MPF 的开环控制

MPF 前馈开环迟滞补偿控制原理如图 9 所示。采用迟滞模型的逆模型,进行开环控制。MPF 前馈开环迟滞补偿实验结果如图 10 所示。

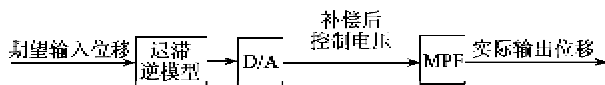


图 9 MPF 前馈开环迟滞补偿控制原理图

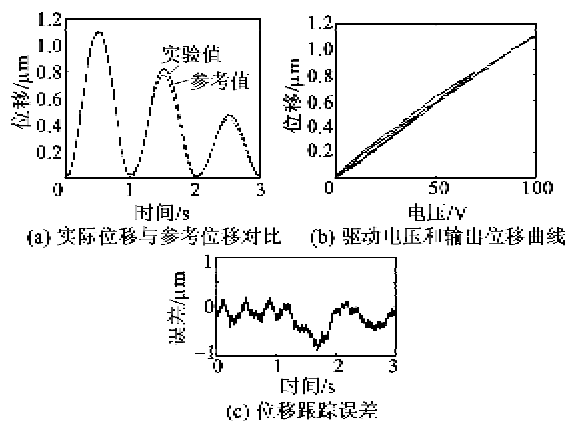


图 10 MPF 前馈开环迟滞补偿实验结果

由图 10(b)可见,经迟滞模型逆模型前馈补偿后,MPF 的驱动电压和输出位移之间的迟滞被消除了很多,特别是主环的迟滞已基本被消除。最大位移跟踪误差小于 $0.084 \mu\text{m}$ (见图 10(c)),最大相对跟踪误差小于 7.77% ,与无补偿相比定位精度得到了提高。

由于采用的迟滞模型是以迟滞主环(即幅值最大的正弦)信号即图 10(a)中 1 s 前的信号)来确定模型参数,模型中没有关于次环的参数,补偿次环主

要是通过模型主次环的类相似性。所以在进入次环阶段时(即 1 s 后),位移跟踪误差逐渐增大,最大位移跟踪误差出现在次环最大位移处(如图 10(c))。此外,由于 MPF 位移量很小,易受外界环境影响,导致 MPF 次环的补偿效果较差。但是明显的通过逆模型进行开环控制消除了一些跟踪误差,提高了定位精度,输入输出也基本上呈线关系。

3.3.2 MPF 复合闭环控制

迟滞逆模型前馈开环控制虽然能一定程度上补偿压 MPF 的迟滞特性,但开环控制系统的稳定性本身较低。加上外界环境的干扰和迟滞模型只用主环确定模型参数的原因,导致位移跟踪误差波动较大。由于 PID 反馈控制能较好的抵抗外界干扰。因此,作者将前馈迟滞逆模型和 PID 反馈结合进行了闭环复合控制,复合控制原理图如图 11 所示。PID 控制参数为 $K_p=0, K_i=500, K_d=0$ 。

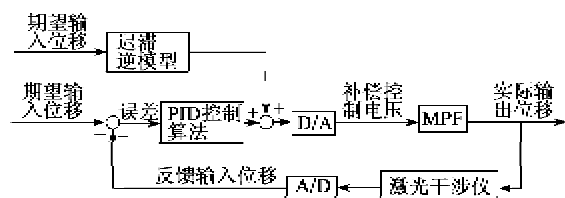


图 11 MPF 复合控制原理图

复合控制下,MPF 的驱动电压和输出位移间的关系呈好的线性,迟滞特性被消除(见图 12(b)),位移跟踪误差稳定,最大位移跟踪误差小于 $0.01 \mu\text{m}$ (见图 12(c)),最大相对跟踪误差小于 0.94% 。与单独的 PID 相比,定位精度进一步提高了,高于 10 nm 。

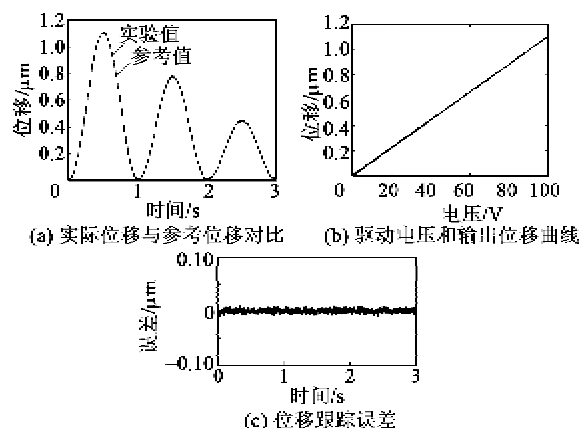


图12 MPF复合控制实验结果

由于复合控制是采用逆模型结合PID的闭环复合控制,该控制算法不仅包含了MPF的迟滞特性,还具有PID闭环控制系统特性,比开环控制更稳定,能有效削减外界环境的影响,所以这种复合控制法使定位精度得到进一步提升。最终在复合控制下MPF定位精度高于10 nm (0.94%),在大行程位移中,迟滞特性的影响较明显,故在进行大行程精密驱动时,为提高定位精度,进行逆模型和PID的复合控制是必要的。从实验结果还可看出,经迟滞补偿后MPF的输出位移和驱动电压呈好的线性,从而也证明了理论推导公式和仿真结果的正确性。

4 结束语

为深入研究一种新型驱动器MPF的驱动特性、定位精度,本文采用理论计算和有限元分析法研究了MPF驱动器的位移与驱动电压的关系。从推导公式和仿真结果分析都得出,MPF自由端的端部位移与所加驱动电压成正比。通过实验测试系统测试了MPF在一系列驱动电压下对应的最大位移值,从实验结果得出,电压和位移并不成正比,而类似二次曲线的关系,这说明了MPF也具有压电材料固有的迟滞特性。进而专门设计了实验测试了MPF的迟滞特性,针对迟滞特性影响驱动器MPF的定位精度,设计了两种不同的控制方法对这种新型驱动器进行了补偿控制,从实验结果可得出,经迟

滞补偿控制后输出位移和驱动电压呈很好的线性正比关系,证明了推导公式的正确性。通过实验结果也得出了采用逆模型和PID控制结合的闭环控制方法效果较好,使MPF的定位精度达到了高于10 nm (0.94%),这种高精度定位精度使MPF可用在需要高精度精密驱动控制系统中,这也是MPF优于其他驱动器的地方。

参考文献:

- [1] HIROSHI S, YOSHIRO S, TADASHI S. Fabrication and vibration suppression behavior of metal core-piezoelectric fibers in CFRP composite[A]. In: Proceedings of Transducing Materials and Devices 2003 Conference [C]//Bellingham, WA, USA: Spie-int Soc Optical Engineering, 2003: 80-87.
- [2] HIROSHI S, YOSHIRO S, TADASHI S. Development of metal core- assisted piezoelectric complex fibers and application to the smart board[J]. Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers (A), 2003, 69(684): 1305-1310.
- [3] YOSHIRO S, HIROSHI S, KIYOSHI T. Smart system using new piezoelectric fiber with metal core[J]. Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering, 2007, 1(6): 728-733.
- [4] HIROSHI S, MASARU N. Mechanical properties of metal-core piezoelectric fiber[A]. In: Proceedings of Smart Structures and Materials 2005 Conference[C]//Bellingham, WA, USA: Spie-int Soc Optical Engineering, 2005: 623-629.
- [5] ABDELOWAHED H, ABDELMJID B, GAEL S, et al. Synthesis and characterization of 0.65Pb($\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3}$)O₃-0.35PbTiO₃ fibers with Pt core[J]. Materials Research Bulletin, 2008, 43(3): 493-501.
- [6] 边义祥. 含金属芯压电纤维的驱动和传感特性研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2009.
- [7] 李庆祥,王东升,李玉和. 现代精密仪器设计[M]. 北京:清华大学出版社,2004.
- [8] 裘进浩,陈海荣,陈远晟,等. 压电驱动器的非对称迟滞模型[J]. 纳米技术与精密工程,2012,10(3):189-197.