

文章编号: 0253-2239(2006)07-1027-5

自适应压电式移相器的研究*

陈道炯 单世宝 韦光辉 高春雨

(上海理工大学机械学院, 上海 200093)

摘要: 移相器是移相干涉仪中的重要部件,压电式移相器由于分辨力高、响应快、控制容易而被大量采用。但压电陶瓷的非线性误差与位移量小,一直影响其应用范围的扩大。针对该问题,从压电式移相器机构与扩展方法入手,设计了具有放大特性的柔性铰链式移相器。采用单神经元(Proportional sum derivative, PSD)控制算法,实现微驱动定位的自适应实时控制,改善了非线性,降低了环境干扰的影响,提高了压电式移相器的性能。所设计的压电式移相器用3组压电陶瓷堆驱动,可用于 $\phi 100$ mm孔径镜片,位移行程达 $30\ \mu\text{m}$ 以上。实验验证该方法有效,控制精度达 $0.01\ \mu\text{m}$ 。

关键词: 光学测量; 压电陶瓷; 移相器; 自适应控制; 柔性铰链

中图分类号: TH741.3⁺3 文献标识码: A

Study of Adaptive Piezoelectric Phase Shifter

Chen Daojiong Shan Shibao Wei Guanghui Gao Chunyu

(College of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 20093)

Abstract: Phase shifter is the important part of the phase shifting interferometer. For its high resolution, rapid response and easy operation, the piezoelectric phase shifter is widely used. Due to the non linear error and micro-displacement, its application is limited. The structure of piezoelectric shifter and its expansion methods are studied, and the flexible hinge phase shifter with magnifying characteristics is designed. Based on single neural proportional sum derivative (PSD) algorithm, adaptive real-time control is implemented which enhances the performance of the piezoelectric phase shifter by improving the nonlinear performance and depressing the interference of environment. Three piezoelectric ceramics are used in the piezoelectric phase shifter which can be used in the $\phi 100$ mm aperture lens with $30\ \mu\text{m}$ displacement. The result verifies this method with a precision of $0.01\ \mu\text{m}$.

Key words: optical measurement; piezoelectric ceramic; phase shifter; adaptive control; flexible hinge

1 引言

移相干涉术经过近20年的发展,以其优良的测试精度广泛用于各种现代干涉仪器中。移相器是移相干涉仪中的主要部件,常用微位移执行器作为移相器件的末端执行器。压电微位移执行器具有灵敏度高、响应快、易于控制、性能稳定等特点^[1],在光干涉研究中得到了广泛应用。

由于压电陶瓷机理复杂^[2,3],存在着迟滞、蠕变和非线性的压电误差,加上受到环境温度、外力振动等因素影响,在高精度定位应用场合需要寻求智能控制方法^[3]达到自适应实时控制,以提高测量精度。

将智能控制或智能控制与其它控制相结合的控制方法应用于压电陶瓷控制,使压电陶瓷的位移精度有了很大提高,可达纳米级。神经网络(Proportional sum derivative, PID)控制^[4],由于运算量大,将多层神经网络自适应控制投入到实时在线控制尚有一定的困难。单神经元的自适应单神经元(PSD)算法兼有单神经元和自适应单神经元算法的特点,适宜移相器的控制。

2 移相器位移与干涉光束相位关系

根据光干涉原理^[5],两个波面发生干涉时,其干

* 国防科工委“十·五”重点项目(J182001C002)资助课题。

作者简介: 陈道炯(1950~),男,副教授,工学硕士,主要从事压电陶瓷微驱动器、精密测量与控制的研究。

E-mail: chendaojiong@126.com

收稿日期: 2005-06-27; 收到修改稿日期: 2005-09-30

涉条纹的光强分布 I 为

$$I(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \cos[2\pi(f_x x + f_y y) + \phi_0(x, y) + \varphi(k)], \quad (1)$$

其中 $a(x, y)$ 和 $b(x, y)$ 分别表示干涉图背景光强和调制度, $\phi_0(x, y)$ 为被测面形的参考光束与测试相干光束的相位差, f_x 及 f_y 分别为 x 和 y 方向引入的空间载频, $\varphi(k)$ 为压电式移相器的伸长量引起的相位值。

相移系统原理如图 1 所示。通过计算机控制移相器驱动镜片作平行运动, 改变参考光的光程, 从而在物光和参考光之间引入相移量。

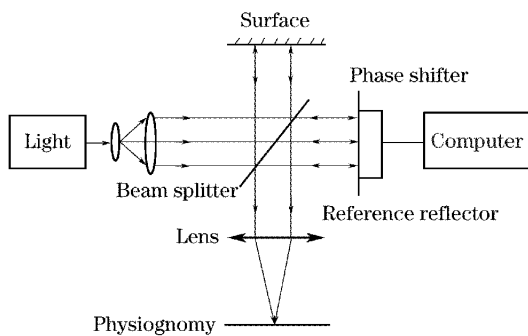


图 1 移相干涉原理图

Fig. 1 Principle of phase shifting interferometry

(1)式的复数形式为

$$I(x, y) = a(x, y) + c(x, y) \exp[2\pi j(f_x x + f_y y)] + c(x, y) \exp[-2\pi j(f_x x + f_y y)], \quad (2)$$

其中

$$c(x, y) = \frac{1}{2} b(x, y) \exp\{j[\phi_0(x, y) + \varphi(k)]\},$$

对(2)式作二维傅里叶变换, 可得频率 F 的表达式为

$$F[I(x, y)] = I'(u, v) = A(u, v) + C(u - f_x, v - f_y) + C(u + f_x, v + f_y), \quad (3)$$

式中后两项表示正、负一级旁瓣。用余弦滤波窗提取一个一级旁瓣, 并将其中心移至坐标原点, 就可以将载频滤除, 得到 $C(u, v)$, 然后作傅里叶逆变换

$$F^{-1}[C(u, v)] = c(x, y) = \frac{1}{2} b(x, y) \exp\{j[\phi_0(x, y) + \varphi(k)]\}, \quad (4)$$

于是可得到相位值 ϕ_k :

$$\phi_R(x, y) = \phi_0(x, y) + \varphi(k) = \arctan \frac{\text{Im}[c(x, y)]}{\text{Re}[c(x, y)]}. \quad (5)$$

在 k 变化时 $\varphi(k)$ 反映压电式微位移机构伸长

而引入的参考相位变化, $\phi_0(x, y)$ 反映了被测面的相位^[6]。

3 移相器机构设计

为消除传动过程中的空程和机械摩擦, 保证机构位移高分辨力与灵敏度, 要尽可能地缩短运动链和减少构件数量。本文利用弹性材料微小角变形及其自回复的特性, 设计了能量转换和执行调节等机构形成一体的柔性铰链机构, 并且利用柔性机构大变形柔性元素设计了具有位移输出放大的结构, 扩大了压电陶瓷输出的位移范围。驱动源为叠层式压电陶瓷。本文选用 30 片直径 $d=20$ mm, 厚度 $t=1$ mm 的压电陶瓷片层叠为压电陶瓷堆, 共制作了 3 组。设计的微位移机构如图 2 所示, 顶板的结构如图 3 所示。中间放置 $\phi 100$ mm 孔径参考镜片, 位移行程 $0 \sim 30 \mu\text{m}$ 。

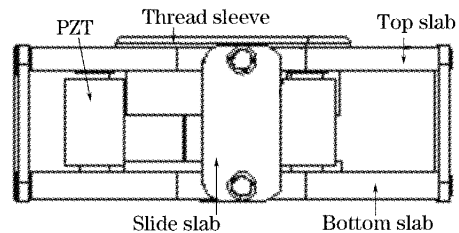


图 2 柔性铰链结构的移相器

Fig. 2 Phase shifter with flexible hinge structure

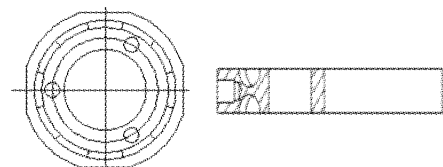


图 3 顶板结构图

Fig. 3 Roof Structure

机构运动原理如下: 在底板和螺套上装上光学透镜; 给压电陶瓷施加控制电压, 驱动三个压电陶瓷上下运动, 从而驱动具有柔性铰链的顶板运动(顶板与螺套相连接), 螺套中的光学透镜位置随着发生变化, 从而引起光波相位的变化。

因为采用了柔性铰链将压电陶瓷输出的位移放大数倍, 从而减少了叠层式压电陶瓷驱动器的体积和层数, 减小了驱动器的电容, 缩短了脉冲放电时间, 使机构的响应速度提高。

根据 J. M. Paros 对柔性铰链形状、受力和变形的定义, 建立了柔性铰链的设计计算公式^[7]。考虑所设计的结构, 柔性铰链绕 z 轴方向的转动刚度

是设计柔性铰链时最重要的参量。

由图 4 可知,正圆柔性铰链绕 z 轴方向的转角刚度可表示为:

$$\frac{\alpha_z}{M_z} = \frac{12}{EbR^2} \times \left[\frac{2s^3(6s^2 + 4s + 1)}{(4s + 1)^2(2s + 1)} + \frac{12s^4(2s + 1)}{(4s + 1)^{5/2}} \arctan(\sqrt{4s + 1}) \right], \quad (6)$$

其中 $s = R/t$, t 为厚度, R 为切割半径, α_z 为沿 z 轴的角变形, E 为材料的弹性模量, b 为宽度。

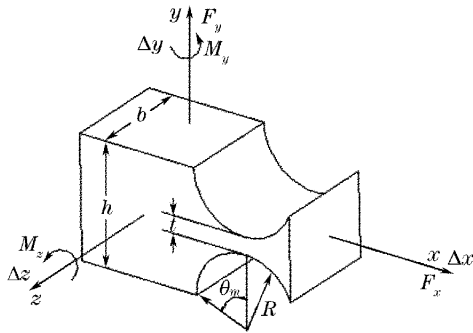


图 4 柔性铰链的几何结构、受力和变形

Fig. 4 Geometrical structure, forces and distortion of the flexible hinge

在切割半径 R 不变的情况下,减小正圆柔性铰链的最小厚度 t ,转角刚度 k_{α_z} 将急剧增大,而且 R 较小时,增大的趋势更剧烈。在最小厚度 t 不变的情况下,增大正圆柔性铰链的切割半径 R , k_{α_z} 将减小,并趋向于某一固定的值,曲线的变化趋势较缓慢,并且 t 值对转角刚度的影响比 R 值的影响显著。

柔性铰链对 Z 轴的转角刚度 k_{α_z} 与 E 和 b 成正比。因此,增大材料的弹性模量 E ,可使 k_{α} 线性增大。同样,增大柔性铰链的宽度 b ,亦可使 k_{α} 线性增大。

采用有限元分析的方法,对不同的 R, t, b 组合进行有限元分析和对比研究,结果如图 5 所示。通过分析比较不同情况下铰链的强度与形变,并考虑加工的工艺性,确定铰链宽度 b 为 30 mm,铰链共为 6 段铰链圆弧半径为 5 mm,最薄处厚度为 2 mm。

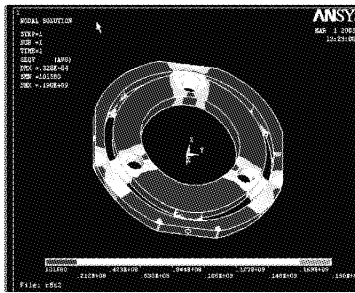


图 5 有限元分析图

Fig. 5 Analysis of the structure with finite element method

4 移相器控制器的设计

控制系统直接决定着移相器系统微位移的精度。微动平台由压电陶瓷驱动器直接驱动,由于压电陶瓷驱动器是一个非线性环节,必然影响移相器的精度。为了提高平台位移精度,同时也为了克服压电驱动的非线性与不同步性,并消除环境引起的误差,采用神经网络的单神经元 PSD 自适应方法进行实时控制^[8]。

以初始的移相器微动平台位移量(存在非线性)为输入 X ,单神经元的神经网络的自学习、自适应地修正施加在驱动电源上的电压,使位移满足移相器线性要求。图 6 为压电式移相器驱动系统的单神经元自适应 PSD 控制器的结构框图。图 6 中转换器的输入反映被控过程及控制设定的状态,如设定期望位移输出为 $X_d(n)$,则实际输出为 $X(n)$,经转换器后转换为神经元学习控制所需要的状态量 x_1, x_2, x_3 。这里

$$\begin{aligned} x_1 &= e(n), \\ x_2 &= e(n) - e(n-1), \\ x_3 &= e(n) - 2e(n-1) + e(n-2), \\ z(n) &= X_d(n) - X(n), \end{aligned}$$

$e(n)$ 为控制过程中期望输出与实际输出的误差, $z(n)$ 为性能指标或递进信号, $w_i(n)$ 是与 $x_i(n)$ 相对应的加权系数, k 为神经元的比例系数, $k > 0$ 。神经元通过关联搜索产生控制信号。

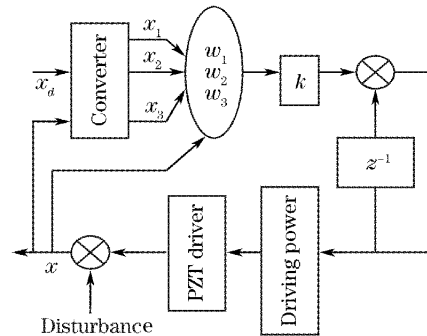


图 6 单神经元自适应单神经元微位移工作台控制框图

Fig. 6 Adaptive PSD control based on single neuron for micro-displacement work table

在工程实际应用中,人们总结出 P, S, D 三个参量在线学习修正主要与 $e(n)$ 和 $\Delta e(n)$ 有关。基于此,可将神经元自适应单神经元控制算法中的加权系数学习修正部分作一些修改,即将其中 x_1 改成 $e(n) + \Delta e(n)$ 。改写后,引入单神经元控制算法中增益 K 的修正方法,得到了实用的神经元自适应单神经元控制算法:

$$\Delta u(n) = K(n) \sum_{i=1}^3 w'_i(n) x_i(n), \quad (7)$$

$$w'_i(n) = w_i(n) / \left[\sum_{i=1}^3 |w_i(n)| \right], \quad (8)$$

$$w_1(n+1) = w_1(n) + \eta_p z(n) u(n) [e(n) + \Delta e(n)],$$

$$w_2(n+1) = w_2(n) + \eta_p z(n) u(n) [e(n) + \Delta e(n)],$$

$$w_3(n+1) = w_3(n) + \eta_d z(n) u(n) [e(n) + \Delta e(n)],$$

$\Delta u(n)$ 为控制量输出增量, 当 $\text{sign}[e(n)] = \text{sign}[e(n-1)]$ 时,

$$K(n) = K(n-1) + CK(n-1)/T_v(n-1);$$

当 $\text{sign}[e(n)] \neq \text{sign}[e(n-1)]$ 时,

$$K(n) = 0.75K(n-1),$$

$T_v(n)$ 的增量 $\Delta T_v(n)$ 的迭代算法为

$$\Delta T_v(n) = L \text{sign} [|\Delta e(n)| - T_v(n-1) |\Delta^2 e(n)|],$$

式中 $0.025 \leq C \leq 0.05, 0.05 \leq L \leq 0.1$;

$$x_1 = e(n),$$

$$x_2 = \Delta e(n) = e(n) - e(n-1),$$

$$x_3 = e(n) - 2e(n-1) + e(n-2),$$

$$z(n) = X_d(n) - X(n),$$

$X_d(n)$ 为系统实际输出, $X(n)$ 期望输出, sign 为符号函数。

加权系数初值的选择, 对控制性能的好坏有很大影响, 必须正确选择。根据经验一般在 $-0.5 \sim 0.5$ 平均分配。 K 值的选择也非常重要: K 越大, 快速性越好, 但是超调量大, 甚至系统不稳定。当被控过程时延增大时, K 必须减小, 以保证系统稳定; K 值选择过小, 会使系统的快速性变差。神经元自适应单神经元控制算法使得增益 K 具有在线学习自动调整的功能, 增强了系统的自适应能力。

为使 3 个压电陶瓷堆的伸长位移达到同步性要求, 对各输出位移差异采用以一点的数据为基准, 另两点分别电压补偿的方法进行修正, 由程序同步性进行控制, 精度达 $0.01 \mu\text{m}$ 。

5 实验测试

将移相器放在菲佐干涉仪中进行电压-位移特性曲线测试。测试系统如图 7 所示, 驱动电压 $0 \sim 460 \text{ V}$, 位移 $0 \sim 16 \mu\text{m}$ 。电压-位移关系曲线如图 8 所示, 其中曲线 1 为未加控制, 曲线 2 为已加控制。

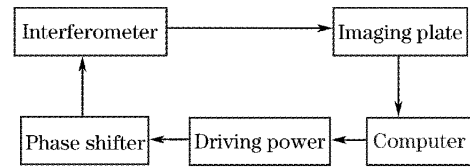


图 7 移相器特性测试系统框图

Fig. 7 Test system of phase shifter performance

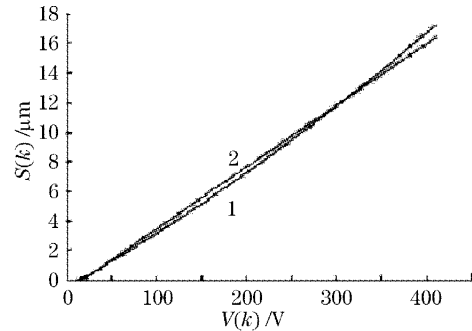


图 8 驱动电压 $V(k)$ 与伸长量 $S(k)$ 的关系曲线

Fig. 8 Relationship between drive voltage $V(k)$ and protraction $S(k)$

经控制后非线性明显改善(非线性由 5.24% 改进为 0.18%)。

从实验结果看出采用所设计的移相器及用单神经元 PSD 进行控制, 可以取得良好的控制效果。

6 结 论

本文设计了具有放大功能的柔性铰链微驱动机构, 针对压电陶瓷驱动器的迟滞、非线性和多种因素影响的不确定性, 采用单神经元 PSD 自适应控制方法进行实时控制, 构成高精度的移相器。实验验证该方法有效, 控制精度达 $0.01 \mu\text{m}$ 以上。

参 考 文 献

- Cui Yuguo, Sun Baoyuan, Dong Weijie *et al.*. Causes for hysteresis and nonlinearity of piezoelectric ceramic actuators [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2003, **11**(3): 270~275 (in Chinese)
崔玉国, 孙宝元, 董维杰 等. 压电陶瓷执行器迟滞与非线性成因分析[J]. *光学精密工程*, 2003, **11**(3): 270~275
- Zhang Tao, Sun Lining, Cai Hegao. Study on the fundamental characteristics of piezoelectric element [J]. *Optics and Precision Engineering*, 1998, **6**(5): 26~32 (in Chinese)
张涛, 孙立宁, 蔡鹤皋. 压电陶瓷基本特性研究[J]. *光学精密工程*, 1998, **6**(5): 26~32
- Sun Lining, An Hui, Cai Hegao. Study on improving the performance of electrostrictive actuators [J]. *China Mechanical Engineering*, 1994, **5**(2): 6~7 (in Chinese)
孙立宁, 安辉, 蔡鹤皋. 改善电致伸缩陶瓷微位移器性能的研究[J]. *中国机械工程*, 1994, **5**(2): 6~7
- Guo Dong, Qi Xiwei, Li Longtu. Property analysis and optimization of PZT ceramic material through an ANN method [J]. *J. Inorganic Materials*, 2004, **19**(1): 223~228 (in Chinese)

- 郭 栋, 齐西伟, 李龙土. 用神经网络对 PZT 陶瓷进行性能分析与优化[J]. *无机材料学报*, 2004, **19**(1): 223~228
- 5 Zhang Zhaokun, Yu Yingjie, Chen Mingyi. Extrapolating for interferogram with the least-squares iteration[J]. *J. Scientific Instrument*, 2001, **22**(3): 376~377 (in Chinese)
- 张兆坤, 于瀛洁, 陈明仪. 用最小二乘迭代法对干涉条纹图进行插值[J]. *仪器仪表学报*, 2001, **22**(3): 376~377
- 6 Chen Jinbang, Song Dezhen, Zhu Rihong *et al.*. High accuracy and large aperture optical standard-phase shifting digital flat interferometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 1995, **15**(4): 480~485 (in Chinese)
- 陈进榜, 宋德真, 朱日宏 等. 高精度、大口径平面波象差标准-移相式数字平面干涉仪[J]. *光学学报*, 1995, **15**(4): 480~485
- 7 Wu Yingfei, Zhou Zhaoying. Design of flexure hinges[J]. *China Mechanical Engineering*, 2002, **13**(18): 1615~1618 (in Chinese)
- 吴鹰飞, 周兆英. 柔性铰链的设计计算[J]. *中国机械工程*, 2002, **13**(18): 1615~1618
- 8 Yuan Hongxing, Wang Zhixing, He Anzhi. Algorithm study of non-linear correction of PSD [J]. *Chinese J. Scientific Instrument*, 1999, **20**(3): 271~274 (in Chinese)
- 袁红星, 王志兴, 贺安之. PSD 非线性修正的算法研究[J]. *仪器仪表学报*, 1999, **20**(3): 271~274
- 9 Zheng Kai, Yan Shaoze, Wen Shizhu *et al.*. Hysteresis compensation in piezoelectric stack actuators [J]. *J. Tsinghua Univ. (Sci. & Tech.)*, 2003, **43**(5): 628~631 (in Chinese)
- 郑 凯, 阎绍泽, 温诗铸 等. 压电叠层作动器迟滞特性模型[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2003, **43**(5): 628~631