

文章编号 1004-924X(2003)06-0567-05

抗振型移相干涉仪中 PZT 移相器的改进

吴 栋^{1,2}, 朱日宏¹, 陈 磊¹, 何 勇¹, 王 青¹, 高志山¹

(1. 南京理工大学 电光学院, 江苏 南京 210094;

2. 解放军镇江船艇学院 教研部, 江苏 镇江 212003)

摘要:结合移相式干涉仪主动抗振技术,提出对普通 PZT 光学移相器进行机械结构的优化,改善其机械响应性能并保证有足够的位移量。作为机电反馈式干涉仪抗振系统的核心部件,改进后的 PZT 构件用于干涉仪的移相驱动,同时又用作光学相位调制器和振动补偿器。经移相干涉仪的在线测量,PZT 移相器达到了 1 000 Hz(振动幅度为 $\sqrt{2}$) 以上的时间响应速度并获得了 6 μm 左右的位移量,满足了干涉抗振系统的需要。

关键词:移相干涉术;主动抗振;PZT 移相器;时间响应;位移

中图分类号:TH744.3 文献标识码:A

Improvement of PZT phase shifter in vibration-resistant phase-shifting interferometer

WU Dong^{1,2}, ZHU Ri-hong¹, CHEN Lei¹, HE Yong¹, WANG Qing¹, GAO Zhi-shan¹

(1. School of Photoelectric Technology, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China;

2. Zhenjiang Watercraft Institute of PLA, Zhenjiang 212003, China)

Abstract: The structure of an ordinary piezoelectric transducer (PZT) used as an optical phase-shifter is optimized using the active vibration-resistance techniques for phase-shifting interferometer to improve its mechanical properties with adequate micro-displacement. As the kernel part of a mechano-electronic feedback system of the vibration-resistant interferometer, the optimized PZT works as an optical phase-modulator and a vibration-compensated controller at the same time. On-line testing shows the new structure of PZT phase shifter has gained a time response above 1 000 Hz at amplitude of $\sqrt{2}$, and a displacement of about 6 μm .

Key words: phase-shifting interferometry; active vibration resistance; PZT phase shifter; time response; displacement

1 引 言

移相干涉术广泛用于光学表面面形和光学系统成像质量的检测,它主要测量从被测件返回的

测试光波和从参考面返回的参考光波之间的波前相位关系。在干涉仪中,由 PZT 移相器按照一定的时序改变参考光波波前的相位,得到多帧相移恒定的干涉图,通过适当的相位解包算法对干涉图进行分析就可以得到被测波面畸变的等高线

收稿日期:2003-04-12;修订日期:2003-10-26.

基金项目:国防军工计量“十五”重点项目资助(No. 60803134)

图,从而实现高精度的光干涉测量。然而,当测量过程中存在振动干扰时,干涉系统很难保证每帧干涉图采集的准确性,这给测量带来了比较大的误差,干扰严重时甚至无法拍摄到清晰的干涉条纹。特别是在测量较大的光学系统时,如口径很大的天文望远镜的测试^[1],由于不可能将干涉仪和被测件放在同一个光学平台上,必须考虑消除环境振动的影响,通常的方法是进行振动的主动补偿。除了可以采用同步移相术^[2]、共光路散射板干涉术^[3]、声光与电光光学相位调制与振动补偿^[1-4]等抗振技术外,目前代价小、易于实现的方案是机电反馈式主动抗振技术^[5-6]。在这种技术中,由 PZT 移相器进行机械式高频光学相位调制,用光电传感器测出振动所引起的光波波前相位的变化,再由 PZT 移相器对光波波前进行实时校正,从而得到稳定的干涉图样;在振动补偿的同时,系统还能进行移相测量。在这种抗振型干涉系统中,PZT 器件除了要实现低速的移相测量,还要进行机械式高频光学相位调制和振动补偿,而传统的干涉仪 PZT 移相器的结构一般不考虑在高速动作场合的应用。结合移相干涉仪的抗振技术,提出对传统 PZT 移相器进行改造以适应机电反馈式抗振型移相干涉仪的需要,并对改造后的 PZT 器件进行了性能测试。

2 机电反馈式抗振型移相干涉仪的结构

图 1 是机电反馈式抗振型干涉仪的结构原理图。在干涉仪中 PZT 构件既用作光学移相器,又是光学相位调制器和振动补偿器。图中直流电平(DC-Level)设置 PZT 移相器的工作点,调制振荡器(OSC)提供 PZT 的位相调制信号,对参考光波的波前相位进行机械调制。当系统受到外界振动的影响时,干涉条纹抖动,光电传感器(PD)将这种变化传递给 FBSG 模块。FBSG 是反馈信号发生器,由光电转换电路、A/D、数字信号处理器(DSP)、D/A 等功能模块组成。它用于处理光电传感器接收到的光强信号,得到测试光波波前相位变动的情况,并通过一定的算法产生一个与振动大小和方向有关的反馈补偿信号。这个反馈补偿信号输出到 PZT 控制器内,控制 PZT 移相器

作机械微位移,从而可以将波前稳定在预先设定的相位值上,这样在现场中就可以得到稳定的干涉图样。将相位设定在不同的数值上就可以得到一系列移相干涉图。

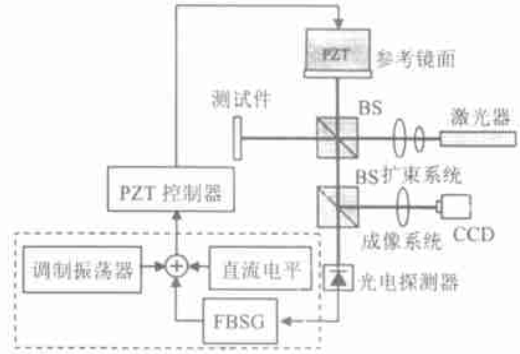


图 1 抗振型移相干涉仪实验装置
Fig. 1 Layout of vibration-resistant phase-shifting interferometer

3 移相器的机械设计

在上面的干涉系统中,为了减少信号处理时低频噪声的影响以及获得比较高的反馈响应速度,要求 PZT 机械构件具备较高的时间响应速度,而传统的 PZT 移相器是用普通弹簧将 PZT 元件与参考镜连接起来,整个构件一般只有 50 Hz 左右的时间响应速度,仅能满足低速的移相测量需要,因此有必要改进传统的 PZT 移相器。

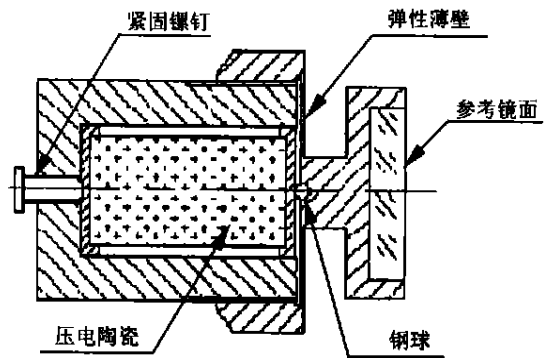


图 2 PZT 移相器的结构
Fig. 2 Structure of PZT phase shifter

图 2 给出了改进后的 PZT 构件的机械结构。图中采用 PZT 压电陶瓷堆作为致动元件,将圆柱形的 PZT 元件放入中空的金属壳体内,通过紧固螺钉和弹性薄壁对 PZT 两端施加预压力。在进

行光学测试之前,调整 PZT 移相器的空间方位,使得参考镜面与参考光束的光轴垂直,调整完成后保持方位不变。在控制电压的作用下 PZT 产生轴向伸长或收缩,这引起弹性薄壁的形变,从而推动参考镜面作轴向的微位移,达到改变光程差(波前相位)的目的。当 PZT 致动元件的驱动力与弹性薄壁形变产生的材料应力达到平衡时就能获得某种确定的微位移,微位移的范围一般在几个到十几个 μm ,整个构件的机械响应速度取决于 PZT 自身的特性、PZT 受到的预压力、弹性薄壁的物理性质、以及参考镜面及其附件惯性的大小。一般来说,PZT 所受的机械压力与它的伸长量成反比,因此为了获得合适的位移量,对 PZT 所施加的压力不宜太大。图 3 是 PZT 压电陶瓷堆的伸长量与所受压力之间的关系曲线。弹性薄壁的材料应选取弹性较大的金属材料,对于薄壁的厚度可通过实验确定,以获得较快的响应速度。实际制作过程中,在不影响参考镜面形质量的前提下参考镜及其附件应尽可能做到轻小、紧固,避免大的惯性以及动作时出现松动而影响时间响应速度的情况。

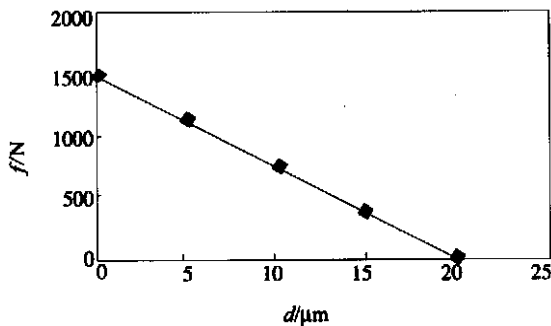


图3 PZT 的伸长量与所受阻力之间的关系

Fig. 3 Resistance on PZT versus elongation of PZT

4 移相器的性能测试

4.1 电压-位移曲线

由于采取了给 PZT 施加预压力的设计,使得 PZT 的伸长量(工作长度)与自由状态下相比有所减少,为了判断 PZT 的伸长量是否满足干涉系统移相的要求,可以采用如图 1 所示光路进行测量。系统置于光学平台上(不考虑振动的影响),将干涉条纹调得密一些(引入一定的空间载频)并

且平行于 Y 轴方向,沿 X 方向对干涉图进行采样,由 FFT 变换可得采样信号的频率和相位特性,移相 N 步,每步 PZT 增加的电压量相等,每移相一步采集一幅干涉图,利用 N 幅干涉图的相位特性可得到 PZT 的电压与位移(伸长量)之间的关系。实验中数据的采集与处理由南京理工大学光电智能工程研究中心研制的 PSI 软件实现。图 4 是测试结果。图中横坐标是给 PZT 所加的电压(范围从 110 ~ 200 V),纵坐标是 PZT 的位移量,PZT 有滞回特性,随着电压的增加,曲线呈下凹状态。利用干涉仪可以对移相器的非线性进行自校正,具体方法见文献[7-8]。图中显示 PZT 构件的位移量约为 $3 \mu\text{m}$,如果控制电压从 0 V 变化到 200 V,位移量可以在 $6 \mu\text{m}$ 左右,这已能满足移相测量的实际需要。

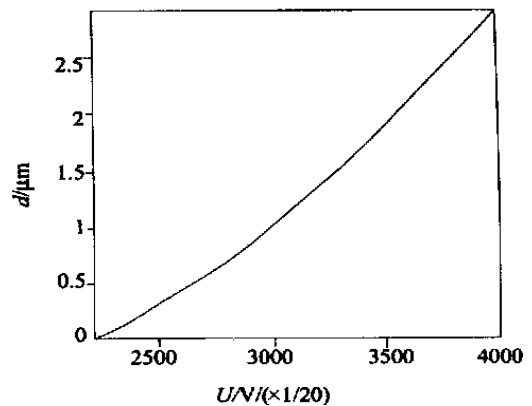


图4 PZT 伸长量与所加电压之间的曲线

Fig. 4 Displacement measured as a function of control voltage on PZT

4.2 频率-位移曲线

除了能提供足够的位移量,PZT 构件还应该具有较高的机械响应速度,以满足光学位相调制和振动补偿的需要。一般地,PZT 构件的机械响应滞后于所加的时变电压信号,这里测试 PZT 构件的位移量与时变电压信号频率之间的关系。仍然采用图 1 所示干涉光路,在干涉场中放置一个光电二极管测量干涉光强,将干涉条纹调整到合适的宽度,使得光电管在干涉场中近似为一测量点。

图 5 是示波器采集的电信号,其中第 1 通道显示的是加在 PZT 上的时变电压信号,它控制 PZT 构件作轴向的周期性位移,位移幅度约为 $\lambda/2$;第 2 通道为光电管输出的放大后的光电转换信号。在时变控制电压(三角波)的转折点,光

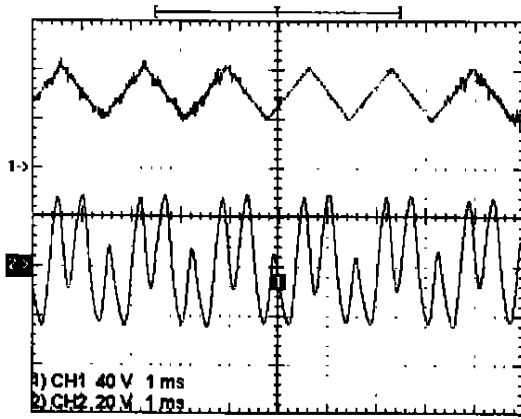


图 5 示波器所显示的 PZT 控制电压与光电管输出信号
 Fig. 5 Traces of the control voltage on PZT and signals on the photodiode

电管输出的正弦信号波形也会出现转折,根据转折点的位置和转折点之间正弦信号的幅值与周期数可以判断 PZT 构件产生的位移和时间响应滞后情况。根据不同频率下的 PZT 的位移,可以得到 PZT 构件的归一化位移量与所加时变电压信号频率之间的关系,如图 6 所示。从图中可以看出 PZT 构件的机械响应截止频率大约为 1 000 Hz(振动幅度为 $\lambda/2$),对于机电反馈式抗振型移相干涉仪,这样的响应速度基本能满足要求。

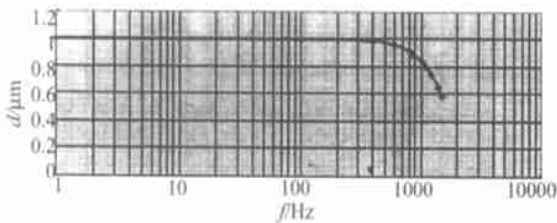


图 6 归一化的 PZT 伸长量与 PZT 控制电压频率之间的关系
 Fig. 6 Plot of normalized displacement of PZT versus frequency of control voltage on PZT

参考文献:

[1] ZHAO C Y, JAMES H B. Vibration-compensated interferometer for surface metrology[J]. *Appl Opt*, 2001, 40 (34) : 6215-6222.
 [2] KOPIOPOULOS C L. Simultaneous phase shift interferometer[J]. *SPIE*, 1991, 1513 :119-127.
 [3] NORTH-MORRIS M B, van DELDEN J, JAMES C W. Phase-shifting birefringent scatter plate interferometer[J]. *Appl Opt*, 2002, 41(4) :668-677.
 [4] COLE G C, JAMES H B, LEE R D. Vibration stabilization of a phase shifting interferometer for large optics[J]. *SPIE*, 1997, 3134 :438-446.
 [5] FRESCHI A A, FREILICH J. Adjustable phase control in stabilized interferometry[J]. *Opt Lett*, 1995, 20(6) : 635-

5 应用与结论

将设计好的 PZT 构件作为移相干涉仪的抗振元件和移相元件,建立图 1 所示抗振干涉系统。给 PZT 加上梯波电压对光波波前相位进行机械调制(如图 7),从电压的最小值沿斜线上升到最

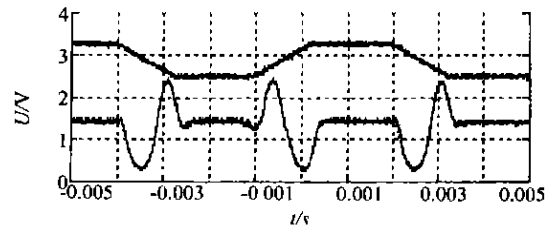


图 7 光学相位调制信号与光电管输出电压的波形
 Fig. 7 Control signal of optical phase modulation and the voltage output of photodiode

大值的时间约为 1 ms,最大电压与最小电压的差值设定为刚好可以使 PZT 产生 $\lambda/2$ 的位移,这样光电管在最大电压与最小电压转换时间内可以输出一个完整周期的正弦信号波形。从图中可以看出在电压上升(或下降)的 1 ms 时间内,光电管输出波形与预期基本相符。通过上述性能测试数据和实际应用效果,说明改进后的 PZT 构件能够进行 1 000 Hz 的机械式光学相位调制,同时也能满足抗振的要求。为了进一步提高 PZT 移相器的时间响应速度,还需要更深入的研究。

637.

- [6] WU D, CHEN J B, CHEN L, *et al.* Vibration-resistance technology of phase-shifting interferometer[J]. *SPIE*, 2002, 4927: 385-389.
- [7] 朱日宏,王青,陈磊,等. 移相干涉技术中移相器的自校正方法[J]. 光学学报, 1998, 18(7): 932-937.
ZHU R H, WANG Q, CHEN L, *et al.* A self-correcting method of phase shifter in phase shifting interferometry[J]. *Acta Optica Sinica*, 1998, 18(7): 932-937. (in Chinese)
- [8] 于瀛洁,韦春龙,陈明仪. 移相式数字波面干涉仪中的几个问题[J]. 光学精密工程, 2001, 9(6): 584-587.
YU YJ, WEI CHL, CHEN M Y. Technical problems in digital phase-stepping flatness interferometers[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2001, 9(6): 584-587 (in Chinese)

作者简介:吴 栋 (1971-),男,江苏靖江人,解放军镇江船艇学院讲师,南京理工大学电光学院博士研究生,主要研究方向为光干涉测量。电话:025-4315427, E-mail: wudong1000@yahoo.com.cn

《光 机 电 信 息》杂志 2004 年参加展览会计划

2004 年 1 月 28—30 日	日本	2004 FIBER OPTICS EXPO (FOE2004)
2004 年 2 月 18 日 - 20 日	深圳	2004 年第十二届中国国际电子元器件及光电产品展览会
2004 年 3 月 23—28 日	美国	O F C
2004 年 4 月 14 日 - 16 日	杭州	中国光学学会 2004 年研讨会
2004 年 4 月 27 日 - 30 日	北京	第九届中国国际激光及光电子产品展览会
2004 年 6 月 24 日 - 26 日	大连	2004 东北国际激光、大屏幕显示及光电产品技术展览会
2004 年 9 月 6 日 - 9 日	深圳	光 博 会
2004 年 10 月 11 日 - 17 日	深圳	中国深圳高新技术成果交易会
2004 年 11 月 6 日—9 日	武汉	IOIT 第三届国际光电子信息博览会
2004 年 12 月 10 日—12 日	广州	华南国际光电展
2004 年 12 月 27 日—29 日	上海	2004 上海国际激光及光电子产品展览会

《光机电信息》与相关展览会开展合作,全面报道展览会信息,并在展会中大量派发当期杂志,为相关厂商提供了解技术及市场信息之机会。