

偏正无关光纤干涉仪及其微位移测量应用

叶有祥^{1,2}, 周盛华², 梅海平³

(1. 上海理工大学 光电信息与计算机工程学院, 上海 200093; 2. 中国计量大学 光学与电子科技学院, 杭州 310018;

3. 中国科学院 安徽光学精密机械研究所, 合肥 230031)

摘要: 提出了一种与偏振无关的新型光纤干涉仪, 采用端面镀膜的光纤自聚焦准直器, 结合球凸透镜构成共光路光纤干涉仪, 其探测光与参考光在同一根普通单模光纤中共光路传输, 有效消除了偏振衰落影响。通过理论建模分析, 并采用高精度的压电陶瓷作为稳定信号源, 搭建了微位移测量平台, 实测了三角波驱动电压信号与对应的干涉信号。研究了不同扫描电压下, 压电陶瓷位移和驱动电压的关系。实验结果表明, 该光纤干涉仪可实现微小位移的精密测量, 在超精密机床振动、微型机械、传感等方面具有应用价值。

关键词: 微位移测量; 光纤干涉仪; 共光路干涉

中图分类号: TN 929.11

文献标志码: A

Polarization-Independent Fiber-Optic Interferometer and its Application in Micro-displacement Measurement

YE Youxiang^{1,2}, ZHOU Shenghua², MEI Haiping³

(1. School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China; 2. College of Optical and Electronic Technology, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China;

3. Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

Abstract: A novel polarization-independent fiber-optic interferometer was proposed, which was composed of a self-focusing collimator coated on the end surface and a spherical convex lens. The detection light and the reference light were arranged to propagate in the same common single-mode fiber along a common optical path, which effectively eliminates the influence of polarization fading. The micro-displacement measuring platform was built by virtue of the theoretical modeling and analysis, and a high-precision piezoelectric ceramic was adopted as a stable signal source. A real triangular wave driving voltage signal and the corresponding interference signal were measured with satisfactory results. The relationships between the displacement of piezoelectric ceramics and the driving voltage at the different scanning voltages were investigated. The experimental results show that the fiber interferometer can realize the precise measurement of small displacements. It has wide application value in the aspects of ultra-precision machine vibration measurement, micro machine, sensor and so on.

收稿日期: 2017-10-25

基金项目: 浙江省科技厅公益项目 (2017C33005)

第一作者: 叶有祥(1971-), 男, 博士研究生. 研究方向: 光电检测技术. E-mail: veyx@cjlu.edu.cn

Keywords: *micro-displacement measurement; fiber-optic interferometer; common optical path interference*

在传统的振动监测中, 加速度传感器采用接触式测量, 使用中必须附着于待测物体的表面, 因此在微振动测量等场合中无法应用。激光干涉振动测量技术使用微细的低能量激光束对振动物体实施无损的非接触测量^[1], 能有效地解决上述问题, 且测量结果精度高。然而, 传统的测振系统光路采用正交型空间迈克尔逊干涉仪形式, 由于采用空间光学结构, 光学元件的过多应用不可避免地存在结构复杂、安装调试困难、环境敏感等缺憾。

光纤干涉仪具有体积小、重量轻、成本低、灵敏度高、结构紧凑、抗电磁干扰以及非接触测量等特点, 因此具有极大的应用潜力。但对于干涉型光纤传感器而言, 要求参与干涉的光具有相同的偏振态。当采用普通的低成本单模光纤构成干涉仪时, 由于光在传输过程中偏振态发生随机变化, 使得输出干涉信号的可见度也随之变化, 特别是当两束光的偏振态正交时, 干涉信号为零。这种由偏振态变化导致的信号衰落现象^[2], 是干涉型光纤传感器走向实用化必须解决的关键问题之一。目前, 解决偏振衰落问题的方法主要有两类: 一类是在 Michelson 干涉仪两臂上加入法拉第旋转镜的方式^[3], 这能在一定程度上解决光纤干涉传感器偏振衰落现象, 但增加了系统的复杂性, 降低了稳定性, 且不利于传感器小型化、集成化; 另一类是采用全保偏光纤结构的方式, 但全保偏光路比较复杂, 且构建成本比较昂贵^[4]。

为解决上述问题, 本文提出了一种采用端面镀膜的光纤自聚焦准直器, 结合球凸透镜构成光纤干涉仪。其特殊的共光路干涉结构有效地消除了偏振衰落的影响, 具有结构简单紧凑、集成度高、稳定性好、灵敏度高特点^[5-6]。

1 测振原理及探头结构

以典型的分振幅双光束干涉光场为例, 设信号光束与参考光束的场强分别为

$$\begin{cases} E_1 = E_{10}e^{j[\omega t + \phi_s(t) + \phi_{s0}]} \\ E_2 = E_{20}e^{j[\omega t + \phi_{r0}]} \end{cases} \quad (1)$$

式中: E_{10} 为信号光光场振幅; $\phi_s(t)$ 为信号光相位调制量; ϕ_{s0} 为信号光初相位; E_{20} 为参考光光场振

幅; ϕ_{r0} 为参考光初相位; ω 为光源的圆频率。

两束光相干产生的干涉条纹的场分布为

$$E(t) = E_{10}e^{j[\phi_s(t) + \phi_{s0}]} + E_{20}e^{j\phi_{r0}}e^{j\omega t} \quad (2)$$

相应的光强分布为

$$I = I_0[1 + k \cos[\phi_s(t) + \phi_{s0} - \phi_{r0}]] \quad (3)$$

式中: I_0 为峰值光强; k 为干涉条纹可见度, 是与 E_{10} , E_{20} 和偏振态有关的比例系数, $k \leq 1$ 。若 $E_{10} = E_{20}$, 则 k 仅与偏振态有关, 其表达式可表示为^[7]

$$k = [1 - \sin^2\theta \sin^2(\Omega_{r-s}/2)]^{1/2} \quad (4)$$

式中: θ 与入射光的偏振态有关; Ω_{r-s} 由光纤干涉仪两臂的双折射特性决定。式(4)表明, 当光纤干涉仪的双折射特性发生随机变化时, 可见度随之在 0 和 1 之间变化, 从而导致了干涉信号的衰落, 即由单模光纤中光的偏振态的不稳定引起的“偏振诱导信号衰落”现象。造成这种偏振态不稳定的原因有光纤本身的内部因素, 也有外部因素。内部因素通常是指光纤截面几何形状畸变引起的波导形状双折射现象和光纤内部应力引起的应力双折射; 外部因素包括一些随机外力如弯曲、扭绞、振动等, 或者强电场、强磁场或温度经常变化的环境, 这些都会造成光纤的各向异性。

实际应用中, 由于上述情况不可避免, 因此必须设计与偏振无关的新型光纤干涉仪。本文提出的光纤干涉仪的特殊探头结构如图 1 所示, 依次由单模光纤、自聚焦透镜和球凸透镜构成, 待测平面位于球凸透镜的焦点处。其中, 自聚焦透镜的尾端镀上反射率为 $(30 \pm 5)\%$ 、透过率为 $(70 \pm 5)\%$ 的膜(以下简称“30% 反 70% 透膜”)。

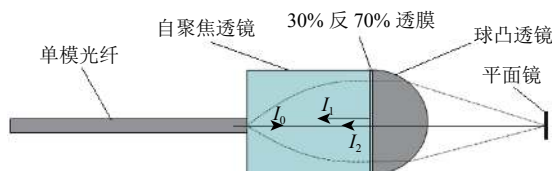


图 1 特制光纤探头示意图

Fig.1 Schematic of special fiber-optic probe

设 I_0 为从光纤端面导入的光强, 通过单模光纤进入自聚焦透镜, 经自聚焦透镜准直后成为平行光, 经 30% 反 70% 透膜作用后分成两部分: 一部分光 I_1 直接被反射回来再次进入光纤中作为参考光

路;另一部分光 I_2 透过 30% 反 70% 透膜进入球凸透镜,经球凸透镜聚焦在待测平面上,经平面镜反射后依次穿过球凸透镜与自聚焦透镜,作为信号光。 I_1 与 I_2 为同一光源发出的光,经 30% 反 70% 透膜作用实现分光,满足相干光的条件,能够产生干涉,从而完成待测信号的探测。

该结构具有两个突出的优点:a.由于信号光与参考光在同一根单模光纤中传输,外界对光纤的影响所产生的双折射效应对二者的作用完全相同,因此可有效消除偏振衰落现象;b.由于球凸透镜的存在,从待测平面反射回来的大部分光将被收集并返回自聚焦透镜中,而球凸透镜表面的反射光绝大部分通过待测平面的反射后分散出去,不能再次返回到光纤,从而最大限度地抑制了二次和多次干涉的产生。

设从光纤入射到自聚焦透镜并到达镀膜表面的光场为

$$E = E_0 e^{j(\omega t + \phi_0)} \quad (5)$$

则从 30% 反 70% 透膜反射的光场为

$$E_1 = j\Gamma E_0 e^{j(\omega t + \phi_0)} \quad (6)$$

而从待测平面反射回光纤中的光场为

$$E_2 = j(1 - \Gamma)\tau E_0 e^{j(\omega t + \phi_0 + \phi_1 + \phi_s)} \quad (7)$$

式中: E_0 为入射光场的振幅; Γ 为 30% 反 70% 透膜的振幅反射系数; τ 为透射光经球凸透镜和反射面传输后再次进入自聚焦透镜的总损耗系数; ϕ_0 为激光初始相位; ϕ_1 为激光经球凸透镜往返传输产生的固定相位差; ϕ_s 为待测平面发生位移时所产生的光相位变化; $j = e^{j\frac{\pi}{2}}$ 表示反射光束对入射光束有 $\frac{\pi}{2}$ 的相位延迟。设空气的折射率为 1,则传播常数 $\beta = \frac{2\pi}{\lambda}$,忽略固定相位差,从探测器接收到的干涉信号为 π

$$I = |E_1 + E_2|^2 = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\phi_s) \quad (8)$$

其中,

$$\phi_s = \beta \cdot (2\Delta l) \quad (9)$$

式(8)表明探测器接收到的干涉信号是两相干光束的光程差的函数,当待测平面发生 Δl 的位移变化时,将导致 ϕ_s 的相位变化,从而使干涉信号产生相应响应,完成微振动测量^[8]。

2 实验装置

实验原理如图 2 所示。激光光源从波长 1 310 nm

的半导体激光器发出,通过光环行器入射到光纤探头上(黑色箭头 a 所示)。其中一部分光在自聚焦透镜的 30% 反 70% 透膜上反射回来(蓝色箭头 b 所示),一部分光透过 30% 反 70% 透膜并经球凸透镜入射到压电陶瓷端面的全反镜上再反射回来(红色箭头 c 所示)。参照图 1 文字说明部分,这两部分光在 30% 反 70% 透膜上产生干涉,干涉信号通过光环行器到达 PIN 光电探测器,经转换输出电压信号,最后通过数据采集卡进行数据采集,并通过计算机进行处理。实验中采用哈尔滨芯明天科技有限公司生产的高精度叠堆压电陶瓷 P33 作为稳定的振动信号发生源来验证光纤干涉仪。压电陶瓷为基于逆压电效应制成的元件,其两个极化面上加交流电,压电陶瓷将产生相应的机械振动,其长度会随加在其上的电压变化而伸长或缩短,形变量控制精度可达到 nm 量级。数据采集卡和计算机处理平台采用的是美国仪器公司(National Instruments)的产品 NI PXIe-1062Q。

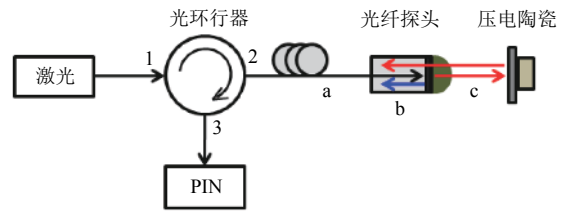


图 2 实验原理图

Fig.2 Schematic of the experimental system

在驱动电压的作用下,压电陶瓷沿光路方向产生相应的振动,干涉信号条纹将呈现余弦规律变化。压电陶瓷的振动每伸长或缩短半个波长,干涉条纹移动了一条。根据三角波信号的电压对应关系可以计算出完整干涉条纹个数所对应的电压值。因此,同时测量压电陶瓷相位调制器上所加的电压及对应的干涉条纹余弦曲线的变化,即可获得扫描电压和压电陶瓷的位移关系,从而实现对微位移的精确测量。

3 实验结果及分析

干涉信号经光电探测器转换为模拟信号,通过模/数转换器转换为数字信号,并传输到电脑中进行处理。实测三角波驱动电压信号与对应的干涉信号如图 3 所示。从图中可以看到,特制的光纤干涉仪具有良好的干涉效果,形成了稳定的干涉,得到了清晰稳定的干涉条纹。可见,由于球

凸透镜的引入, 有效地减少了二次和多次干涉的产生。

压电陶瓷在三角波驱动电压作用下会形成径向伸缩, 从而带动反射镜产生相应的位移。当只考虑压电效应, 不考虑电致伸缩效应时^[9], 随着加在压电陶瓷上的三角波电压升高时, 压电陶瓷线性伸长, 对应干涉仪的两臂之间的光程差减小; 当锯齿波电压降低时, 压电陶瓷线性缩短, 对应的干涉仪两臂之间的光程差增加, 干涉信号的强度也随着驱动电压幅值的变化作相应的变化。

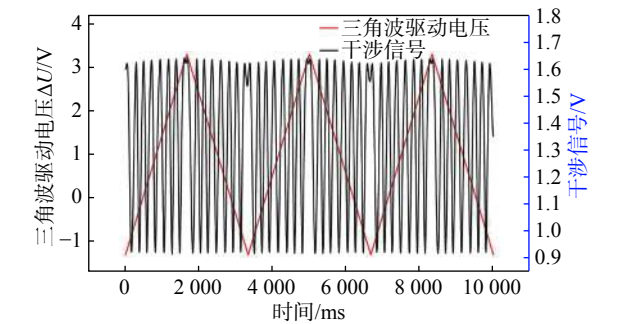


图3 实测三角波驱动电压信号与对应干涉信号
Fig.3 Measured triangular wave driving voltage signal and the corresponding interference signal

从图3可以明显看出, 随着三角波驱动电压 ΔU 的周期性变化, 干涉信号也产生相应的周期性变化。 ΔU 是三角波驱动电压的峰-峰值。当驱动电压从增加转为减小或者从减小转为增加时, 干涉条纹的移动方向也作相应改变, 从而出现正弦波相位倒相。在三角波驱动电压调制作用下, 干涉条纹呈现出余弦规律变化。由于压电陶瓷每伸长或缩短半个波长位移, 将带动反射镜在干涉仪中引入一个完整波长的位移, 此时干涉仪臂长差将会产生 2π 的相位变化, 即干涉条纹将出现或消失一个完整的正弦波。一个完整正弦波对应的电压差再乘 2π 即为压电陶瓷产生的相位幅值^[10]。

实验中扫描电压采用的是起步值为1 V、步长为0.1 V的三角波电压, 每扫描一万个点就增加一个步长, 以一万个点作为计步周期, 扫描频率为3 Hz。以下从扫描电压的3种驱动方式来研究压电陶瓷位移和驱动电压的关系。

表1为多个连续扫描周期下压电陶瓷位移 d 和驱动电压 ΔU 的关系测量数据。 d 为半个波长时对应干涉信号的一个完整的正弦波。读出该一个周期的正弦波所对应的扫描点数, 通过三角波驱动电压和扫描点数的关系可以计算产生此正弦信号

所对应的扫描电压值。

表1 ΔU 与 d 的关系
Tab.1 Relationship between ΔU and d

$\Delta U/V$	d/nm	$\Delta U/V$	d/nm
3.112 9	3 275.0	4.723 4	5 567.5
3.630 1	3 930.0	4.945 2	5 895.0
3.879 5	4 257.5	5.179 9	6 222.5
4.074 9	4 585.0	5.408 4	6 550.0
4.311 1	4 912.5	5.654 6	6 877.5
4.539 8	5 240.0		

图4为对应的扫描电压从4 V(−1.0~3.0 V)增加到8 V(−3.0~5.0 V)过程中每两个步长取一个值时, d 和 ΔU 的关系图。通过线性拟合, 获得了相关系数为0.998 8, 标准差为0.015 nm/mV的 d 和 ΔU 之间的关系曲线。

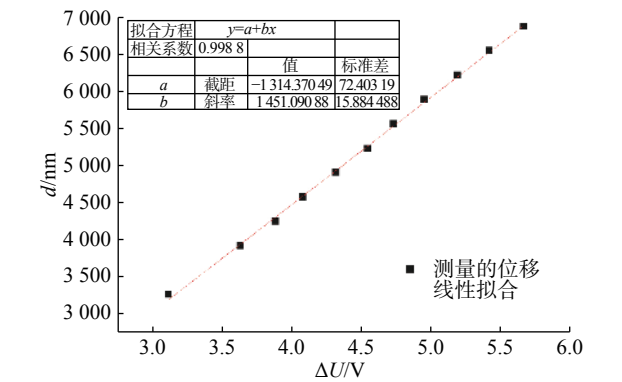


图4 多个连续扫描周期下 d 和 ΔU 的关系
Fig.4 Relationship between d and ΔU during multiple continuous scanning periods

图5和图6为扫描电压分别为5.6 V(−1.8~3.8 V)、6.8V(−2.4~4.4 V)同一个步长、单个周期内, 压电陶瓷位移和驱动电压的关系。利用Origin软件进行线性拟合, 从拟合结果可以看出, 相关系数分别为0.999 32和0.999 04, 标准差分别为0.012 nm/mV和0.014 nm/mV, 线性度非常高。通过进一步计算得知, 图5情况的位移与电压关系的平均值1 131.819 0 nm/V和表1中4 912.5与4.311 1的比值1 139.500 4 nm/V仅相差0.008 nm/V。图6情况的位移与电压关系的平均值1 199.993 0 nm/V和表1中5 895与4.945 2的比值1 192.065 0 nm/V仅相差0.007 nm/V, 误差非常小。实验结果表明, 设计的偏振无关光纤干涉仪具有良好的稳定性。

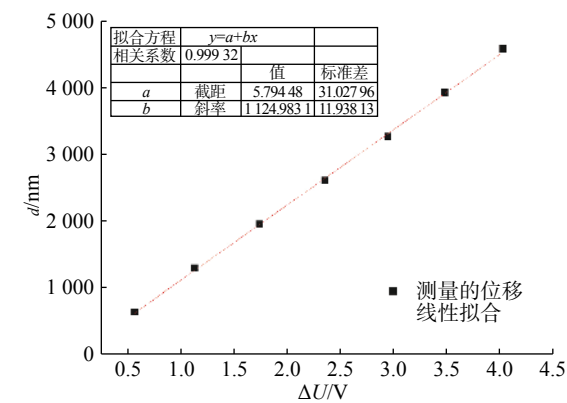


图5 扫描电压为5.6 V (−1.8~3.8 V) d 与 ΔU 的关系
Fig.5 Relationship between d and ΔU at the scanning voltage 5.6 V (−1.8~3.8 V)

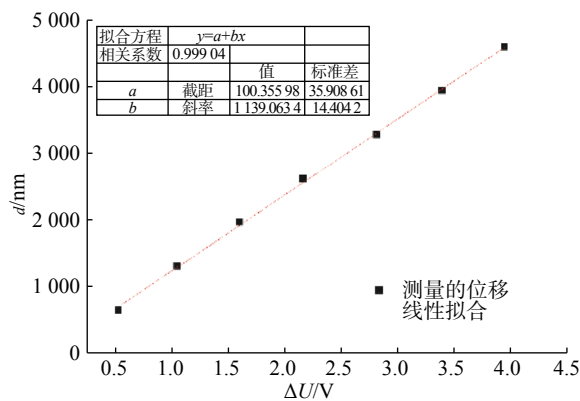


图6 扫描电压为6.8 V (−2.4~4.4 V) d 与 ΔU 的关系
Fig.6 Relationship between d and ΔU at the scanning voltage 6.8 V (−2.4~4.4 V)

本文设计的光纤干涉仪，具有比普通光纤传感器更高的测量精度。它不仅可以测量位移，还可以测量应力、应变、折射率、反射率、温度、磁场和压力等，在精密测量方面具有非常广阔的应用前景^[11-13]。

4 结 论

提出了一种基于端面镀上30%反70%透膜的光纤准直器结合球凸透镜的共光路干涉的光纤测振干涉仪。通过理论建模与分析，采用高灵敏高精度压电陶瓷作为稳定信号源，搭建了微振动测量平台，对干涉仪进行了实验验证。实验结果表明，特制的光纤探头最大限度地抑制了二次和多次干涉的影响，特殊的共光路干涉结构设计有效地消除了偏振衰落影响。该偏振无关干涉仪可用于测量微小区域的微小位移，在超精密机床振动、微型机械、传感等方面具有广阔的应用前景。

参考文献:

[1] WANG C, XU L L, ZHU J, et al. A novel integrated fiber-optic interferometer model and its application in micro-displacement measurement[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2016, 86: 125–131.

[2] 胡正良, 蒋鹏, 马丽娜, 等. 利用正交偏振切换抗偏振衰落和抑制偏振噪声[J]. 中国激光, 2016, 43(9): 0910001.

[3] LI L J, MA Q, CAO M Y, et al. High stability Michelson refractometer based on an in-fiber interferometer followed with a Faraday rotator mirror[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2016, 234: 674–679.

[4] YOON M S, KANG C J, HAN Y G. Effect of a Waist diameter of a microtapered polarization-maintaining fiber on temperature and ambient index sensitivities[J]. Journal of Lightwave Technology, 2015, 33(12): 2585–2590.

[5] XIE F, CHEN X F, ZHANG L. High stability interleaved fiber Michelson interferometer for on-line precision displacement measurements[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2009, 47(11): 1301–1306.

[6] HUANG G, HE Y, XU Z. A single-mode all-fiber QEPAS sensor[J]. Optoelectronics and Advanced Materials-Rapid Communications, 2016, 10(11/12): 844–846.

[7] KERSEY A D, MARRONE M J, DANDRIDGE A, et al. Optimization and stabilization of visibility in interferometric fiber-optic sensors using input-polarization control[J]. Journal of Lightwave Technology, 1988, 6(10): 1599–1609.

[8] JACKSON D A, DANDRIDGE A, SHEEM S K. Measurement of small phase shifts using a single-mode optical-fiber interferometer[J]. Optics Letters, 1980, 5(4): 139–141.

[9] 王虹. 电致伸缩效应及其应用[J]. 物理, 1985, 14(12): 734–737.

[10] 赵英明, 杨若夫, 杨春平, 等. 基于干涉条纹相关性测量 PZT 相移特性的方法[J]. 压电与声光, 2016, 38(3): 501–503.

[11] 姚建永, 张森, 王臻, 等. 光纤 Michelson 干涉仪系统的研究[J]. 光通信研究, 2007, 33(2): 45–48.

[12] 李毛和, 张美敦. 用光纤迈克耳孙干涉仪测量折射率[J]. 光学学报, 2000, 20(9): 1294–1296.

[13] 宋鹏, 荆振国, 李昂, 等. 基于光纤开放式法布里-珀罗干涉仪的液体折射率测量[J]. 中国激光, 2017, 44(12): 1204007.