

改进天平性能的光纤白光干涉高精度测控方法

熊显名¹,冯程成^{1,2},苑立波²

(1.桂林电子科技大学 光电信息处理重点实验室,广西 桂林,541004;2.桂林电子科技大学 光子学研究中心,广西 桂林,541004)

摘要:针对目前市面上机械天平及电子天平所存在的精度低、抗电磁干扰能力差和性能不稳定的问题,基于光纤迈克尔逊白光干涉仪结构,设计了一种用于提高天平称量性能的高精度测控方法。该方法利用光纤白光干涉绝对测量的特点,通过光程调制的方式来判断天平是否平衡。实验结果表明:改进的光纤天平相比于传统天平具有更稳定的性能和更高的测量精度,并可通过提高该天平臂长实现更高的精度要求。

关键词:白光干涉;光纤天平;光程调制

中图分类号:TH711 **文献标识码:**A **文章编号:**1002-5561(2019)03-0005-03

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2019.03.002

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



High precision measurement and control method of optical fiber white light interference for improving balance performance

XIONG Xianming¹, FENG Chengcheng^{1,2}, YUAN Libo²

(1. Key Laboratory of Photoelectric Information Processing, Guilin University of Electronic Science and Technology, Guilin Guangxi 541004, China; 2. Photonics Research Center, Guilin University of Electronic Science and Technology, Guilin Guangxi 541004, China)

Abstract: Aiming at the problems of low precision, poor anti-electromagnetic interference ability and unstable performance of mechanical balance and electronic balance on the market at present. In this paper, a high precision measurement and control method based on the fiber Michelson white light interferometer structure for improving weighing performance of the balance is described. Thanks to the absolute measurement feature in optical fiber white light interference, the state of the balance can be easily judged by using the optical path modulation. Experimental results show that the optical fiber balance based on the proposed method can provide better stability and higher measurement accuracy than the traditional balance. Moreover, by increasing the length of the balance arm, a higher measurement accuracy can be achieved.

Key words: white light interference; optical fiber balance; optical path modulation

0 引言

光纤传感技术以其成本低、精度高和抗电磁干扰等突出特点在计量检测、生物医学和工业生产等领域被广泛应用。光纤白光干涉技术作为光纤传感技术多领域交叉应用中较为代表性的一个分支,其区别于传统高相干光干涉技术的突出优点在于能够实现物理量的绝对测量^[1],被广泛应用于压力^[2-4]、应变^[5,6]、温度^[7]

和折射率^[8]测量的研究中。对于市面上机械天平及电子天平所存在的精度低、抗电磁干扰能力差和性能不稳定等问题,本文基于光纤白光干涉原理提出一种天平的改进方法。

1 光纤白光干涉测量原理

光纤迈克尔逊白光干涉的测量原理如图1所示。传输光纤与传感装置相连,传感装置采用光源为LED的扫描迈克尔逊低相干光反射仪(OLCR)来实现^[9]信号的解调。OLCR的光程差可以通过扫描棱镜-自聚焦透镜系统进行调节,当调节扫描棱镜到某一位置时,OLCR和传感装置的光程差相同,则在探测端得到白光干涉条纹。该系统满足光程匹配条件:

$$X_j + nL_0 = \Delta X \quad (1)$$

收稿日期:2018-10-18。

作者简介:熊显名(1964-),男,学士、研究员、硕士导师,主要研究方向为光电信息处理、光纤传感器。1985-2000年在原化工部曙光橡胶工业研究所从事激光无损探伤工作;1993年获国家发明奖四等奖;2014年和2017年分别获广西自然科学二等奖;公开发表技术文献70余篇,其中,EI收录30余篇,SCI收录10余篇。



其中, nL_0 为该光路系统固有光程差。该光程差由 3 部分组成: $n(L_{11}-L_{12})$ 是 OLCR 中不包括扫描棱镜与自聚焦透镜距离的光程差, 在恒温环境中该光程差可视为常数; $n(L_{21}-L_{22})$ 为传输光纤两臂的光程差, 该值应控制在厘米量级; $n(L_{31}-L_{32})$ 是传感装置的固有光程差, 与传感装置内部两臂光纤长度差相关, 该光程差应尽量小, 以减少环境温度的影响。 X_j 是 OLCR 中扫描棱镜-自聚焦透镜间的光程, 该值随着扫描棱镜的移动而改变; ΔX 是传感装置中由待测物理量引起的光程变化。当把 OLCR 中扫描棱镜-自聚焦透镜距离调节至探测端得到白光干涉中央主极大条纹时, 系统初始化完成; 当待测物理量作用于传感装置, ΔX 随之发生相应的变化, 此时需改变 X_j 的值以满足式(1)的光程匹配条件。因此, OLCR 中扫描棱镜-自聚焦透镜间光程的变化量 ΔX_j 与传感装置中的光程差 ΔX 相关, 且满足关系:

$$\Delta X_j = \Delta X \quad (2)$$

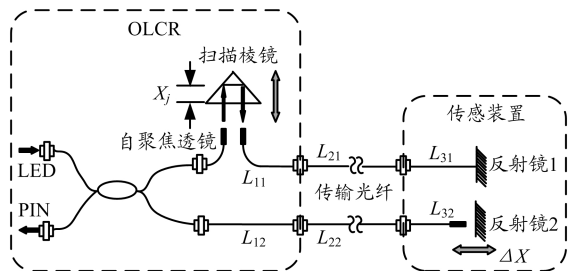


图1 光纤迈克尔逊白光干涉测量原理

2 光纤天平

目前, 广泛使用的天平主要分为机械天平和电子天平 2 种。对于机械天平而言, 其指针偏转是判断天平是否平衡的重要依据, 无论是校准还是称量, 仅仅依靠人眼对刻度的识别终究会存在误差; 而电子天平的应用虽然解决了刻度读取问题, 但是对于如此精密的计量仪器, 其内部传感器和电路在工作过程中, 温度、仪器随工作时间而产生某些参数的变化和电磁干扰等环境因素都会对电子天平的计量准确性产生影响^[10]。针对这些问题, 本文设计一种用于改进天平的光纤白光干涉高精度测控方法, 采用如图 2 所示的光纤天平结构改进方案并进行实验测试。在该结构中, 平面反

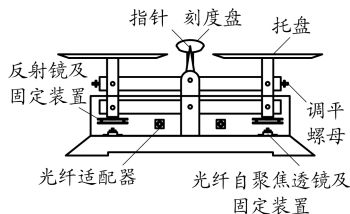


图2 光纤天平结构

射镜及其固定装置位于天平托盘架底部并随托盘位移, 光纤自聚焦透镜及其固定装置被固定在天平底座上面且正对平面反射镜。通过调节天平两端的平面反射镜及光纤自聚焦透镜固定装置, 保证由光纤自聚焦透镜出射的宽谱光垂直入射到平面反射镜上并且能够原路返回。当光路校准完成后, 利用封装壳将该类光学元件进行密封保护, 避免外界环境及人为触碰对天平的内部光路产生影响。天平内部光路通过位于封装壳上的光纤适配器与外界光路进行连接。

该光纤天平的 2 个横梁与竖杆构成一个平行四边形结构, 且整体采用相同的材料。这种结构设计不仅消除了温度变化对光程造成的影响, 而且能够使天平两端的平面反射镜时刻处于水平状态, 保证在一定范围内由光纤自聚焦透镜出射的光线能够原路返回。

光纤天平指针偏转角度 θ 和光程差 $\Delta X'$ 关系如图 3 所示, 其对应关系式如下:

$$\tan \theta = \frac{\Delta X'}{a} \quad (3)$$

由于角度 θ 较小, 根据式(3)可以近似表示为:

$$\theta \approx \frac{\Delta X'}{a} \quad (4)$$

其中, a 为该光纤天平的力臂长 ($a=65\text{mm}$)。本文所使用的 LED 光源中心波长为 1310nm , 光谱宽度为 35nm , 通过相关计算可得到该光源的相干长度为 $49\mu\text{m}$ 。由于所使用的扫描棱镜-自聚焦透镜系统的扫描精度为 $10\mu\text{m}$, 因此, 扫描系统无法绝对锁定出现白光干涉中央主极大条纹的位置, 使光纤天平平衡时仍可能存在 $2\Delta X'=\pm 10\mu\text{m}$ 的光程差, 代入式(4)中可以得到光纤天平的倾斜分辨角 $\theta=7.7\times 10^{-5}\text{rad}$ 。

本文通过进一步仿真计算得到在扫描棱镜-自聚焦透镜系统的扫描精度为 $10\mu\text{m}$ 的前提下, 光纤天平力臂与该系统可分辨的最小天平倾斜角的关系如图 4 所示。可以看出, 随着光纤天平力臂长度的增加, 该系统可分辨的最小天平倾斜角呈递减趋势。因此, 通过优化扫描棱镜-自聚焦透镜系统的扫描精度和增加光纤天平的力臂长度均可使天平的测量精度得到提高。

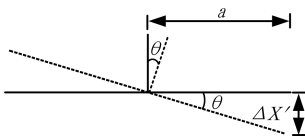


图3 光纤天平指针偏转角度 θ 和光程差 $\Delta X'$ 的关系

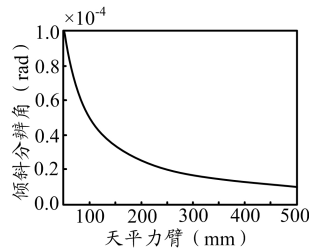


图4 光纤天平力臂与倾斜分辨角的关系

3 实验测试结果

本文在确保天平两臂相等的前提下对该光纤天平进行调平^[1],具体操作步骤为:①将该光纤天平置于防震、无风且温度恒定的环境下,并将外界光路连接至光纤天平,如图5所示;②将光纤天平两端的平衡螺母调节至天平指针指向分度盘中线,将扫描棱镜位置调节至探测端后得到白光干涉中央主极大条纹,并锁定该位置为光纤天平的平衡点。

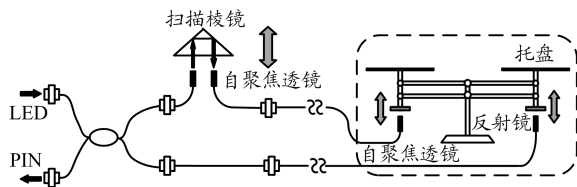


图5 基于光纤白光干涉的光纤天平称量系统

当光纤天平调平完毕后,我们采用不同重量且精度为 0.001g 的标准砝码对该光纤天平的称量性能进行了实验测试。具体测试方法为:首先,将标准砝码置于光纤天平右托盘中心位置,左托盘逐步加载洗净晾干的 40~80 目纯石英砂至探测端重新出现白光干涉中央主极大条纹;然后,使用精度为 0.001g 的标准电子秤对托盘中纯石英砂的重量进行称量。该光纤天平的称量偏差检定结果如表 1 所示。由表 1 可见,在 0~200g 的称量范围内该光纤天平的最大称量偏差 $\leq 0.005\text{g}$, 测量精度为 0.001g; 相比于普通机械托盘天平,光纤天平的测量精度有显著提升。

表 1 光纤天平称量偏差检定结果(单位为 g)

标称值	第一次 测量值	第二次 测量值	第三次 测量值	第四次 测量值	第五次 测量值	最大 偏差
0	0	0	0	0	0	0
1	0.995	1.003	1.001	0.998	1.004	0.005
5	4.996	4.998	5.003	5.000	5.002	0.004
10	9.998	10.002	10.003	9.998	10.001	0.003
25	24.996	25.003	25.001	24.997	25.004	0.004
50	49.996	50.005	50.001	49.997	50.002	0.005
80	79.997	80.002	79.998	80.001	80.003	0.003
100	99.997	100.002	99.998	100.005	100.002	0.005
150	149.998	150.004	149.997	150.002	150.004	0.004
200	199.998	199.997	200.002	200.000	200.003	0.003

4 结束语

本文基于光纤迈克尔逊白光干涉原理提出了一种天平的改进方案,设计出了一种测量精度高、抗干扰能力强和性能稳定的光纤天平,并针对该天平进行了具体的实验测试。实验结果表明:本文提出的天平改进方法是可行且有效的。在天平力臂长度为 65mm 的情况下,光纤天平的倾斜分辨角 $\theta=7.7\times10^{-5}\text{rad}$,远高于理想状态下的人眼角分辨率 $U=3.3\times10^{-4}\text{rad}$;光纤天平在 0~200g 称量范围内的最大称量偏差 $\leq 0.005\text{g}$,测量精度达到 0.001g,且由仿真计算可知,通过光路扫描系统优化及提高光纤天平臂长均可使测量达到更高的精度要求。

参考文献:

- [1] 苑立波, 杨军. 光纤白光干涉原理与应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2016: 399-401.
- [2] BOHEIM G. Fiber-linked interferometric pressure sensor [J]. Review of Scientific Instruments, 1987, 58: 361-364.
- [3] VELLUET M T, GRAINDORGE P, ARDITTY H J. Fiber optic pressure sensor using weight-light interferometry [C]// Cambridge Symposium on Fiber Optics and Integrated Optoelectronics, March 21-23, 1987, Cambridge, MA, United States. Bellingham: SPIE, 1987: 78-83.
- [4] TROUCHET D, LALOUX B, GRAINDORGE P. Prototype industrial multi-parameter FO sensor using white light interferometry [C]// Proceedings of the 6th International Conference on Optical Fiber Sensors, September 18-20, 1989, Paris, France. Paris: OFS, 1989: 227-233.
- [5] GUSMEROLI V, VAVASSORI P, MARTINELLI M. A coherence-multiplexed quasi-distributed polarimetric sensor suitable for structural monitoring[C]// Proceedings of the 6th International Conference on Optical Fiber Sensors, September 18-20, 1989, Paris, France. Paris: OFS, 1989: 513-518.
- [6] KOTROTSIOS G, PARRIAUX. White light interferometry for distributed sensing on dual mode fibers monitoring [C]// Proceedings of the 6th International Conference on Optical Fiber Sensors, September 18-20, 1989, Paris, France. Paris: OFS, 1989: 568-574.
- [7] KERSEY A D, DANDRIDGE A. Dual-wavelength approach to interferometric sensing[C]// Fourth International Symposium on Optical and Optoelectronic Applied Sciences and Engineering, October 12-14, 1987, The Hague, Netherlands. Bellingham: SPIE, 1987: 176-181.
- [8] KIM S H, LEE S H, LIM J I, et al. Absolute refractive index measurement method over a broad wavelength region based on white-light interferometry[J]. Applied Optics, 2010, 49(5): 910-914.
- [9] YUAN L B. Push-pull fiber optic inclinometer based on a Mach-Zehnder optical low-coherence reflectometer [J]. Review of Scientific Instruments, 2004, 75(6): 2013-2015.
- [10] 滕召胜, 郁文贤, 夏胜平. 电子分析天平温漂与时漂的自动补偿[J]. 国防科技大学学报, 2000(3): 6-10.
- [11] 杨惠敏. 机械天平计量性能误差调试技巧 [J]. 工业计量, 2010, 20(4): 64.