

基于全光纤 Mach-Zehnder 干涉的应变传感测量

陆华丽, 王 鸣, 戴霞娟, 郭文华

(南京师范大学 物理科学与技术学院, 江苏 南京 210046)

[摘要] 研究了全光纤 Mach-Zehnder 干涉实验系统, 并将其用于微应变的测量. 介绍了全光纤 M-Z 干涉仪测应变系统的基本结构和原理, 讨论了应变量的计算方法. 通过实验, 测量了不同应变情况下的几组信号, 并对数据分析处理, 解调出包含在干涉信号中的应变信息. 实验装置简单, 易操作. 实验结果表明, 全光纤 Mach-Zehnder 干涉仪与电传感器实验仪相比较, 具有更高的频率响应和测量灵敏度.

[关键词] 光学测量, 全光纤 Mach-Zehnder 干涉仪, 微应变传感

[中图分类号] TN 253 [文献标识码] A [文章编号] 1672-1292(2010)01-0085-04

Measurement of Strain Sensing Based on All-Fiber Mach-Zehnder Interferometer

Lu Hualij Wang Ming Dai Xiajuan Guo Wenhua

(School of Physical Science and Technology, Nanjing Normal University, Nanjing 210046, China)

Abstract An all-fiber Mach-Zehnder interference system was researched and used to measure the micro-strain. The basic structure and theory of Mach-Zehnder interference measurement system were introduced, and the signal processing technique was discussed. Several groups of the interference signals under different strain conditions were measured through the experiment, and the data were analyzed and processed, and the strain information was demodulated out of the interference signals. The experiment device is uncomplicated and easy to operate. The result of the experiment proved that compared with the sensor experiment device, all-fiber Mach-Zehnder interferometer has higher frequency response and sensitivity.

Key words optical measurement; all-fiber Mach-Zehnder interferometer; strain sensor

近年来, 激光干涉传感器测量位移、速度的技术得到了很大发展. 以自由空间作干涉光路的一般干涉仪, 由于其体积大, 空气易受环境温度、声波及振动的影响, 使干涉测量不稳定、准确度低, 同时调整也较困难, 限制了它在一般场合下的实用性. 由于光纤具有抗电磁干扰、耐腐蚀、电绝缘性好、防爆、体积小、重量轻、可绕性好等特点, 而备受关注. 用光纤代替自由空间作干涉光路有两个突出的优点: 一是减少了干涉仪的长臂安装和校准的固有困难, 并可使干涉仪小型化; 二是可以用加长光纤的方法使干涉光路对环境参数的响应灵敏度增加. 这种全光纤干涉仪结构更适用于现场测量, 更接近实用化^[1, 2].

光纤 Mach-Zehnder 干涉仪 (MZI) 通过被测能量场的作用, 使光纤内传播的光波相位发生变化, 再用干涉测量技术把相位变化转换为光强变化, 从而检测出待测的物理量. 它具有体积小、重量轻、结构紧凑、灵敏度高等特点, 被广泛应用于光纤传感和光纤通信领域^[3-5].

本文采用全光纤的 M-Z 干涉仪来测量振动物体的微应变, 并用传感器实验仪作参考, 对此进行了比较分析.

1 系统理论及构成

1.1 光纤 M-Z 干涉仪

光纤 Mach-Zehnder 干涉仪一般都是由单模光纤、耦合器以及光源和光电探测器组成, 结构如图 1 所示.

光从 DFB 激光器出射后, 通过耦合器分为两束, 一束作为参考光, 另一束作为信号光, 两路光各自经两光纤臂传播后, 在另一耦合器发生干涉, 并输出到光电探测器, 最后可连接示波器, 观测干涉信号波形.

系统输出干涉信号光强可表示为:

$$I = I_1^2 + I_2^2 + 2I_1I_2 \cos(\Delta\varphi). \tag{1}$$

式中, I_1 , I_2 分别为两路光纤中光信号的振幅, $\Delta\varphi$ 为相位的变化量, 因此可以通过判断相位的变化来对外界物理量进行测量.

当外界物理量 (如压力、应变、位移等) 作用到传感光纤上时, 由于光纤的几何长度和折射率发生变化将导致相位的变化^[6]:

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} [n\Delta L + L\Delta n]. \tag{2}$$

式中, λ 为光源波长, L 为 M-Z 干涉仪两臂长度差, n 为光纤折射率.

1.2 光纤 M-Z 干涉仪测应变原理

全光纤 M-Z 干涉仪测应变系统结构如图 2 所示. 光路传播原理与 M-Z 干涉仪一致, 所不同的是将传感臂光纤一段紧紧粘贴在悬臂梁的弹性钢板表面. 梁的一端固定, 另一端连接激振线圈. 当接通电源后, 钢板的一端可以上下振动, 传感臂光纤也随之发生微小形变, 从而改变它的折射率. 因此, 当光经过传感臂光纤时, 折射率的变化使相位差发生变化, 进而干涉光光强发生变化. 最终, 两路光进入耦合器干涉, 产生干涉信号条纹显示在示波器上.

图 3 是模拟的干涉信号波形与钢板位移波形. 对于一般的干涉仪而言, 一个干涉条纹对应着半个光波波长 (即: $\lambda/2$) 的位移. 因此, 可以通过计算一个周期条纹数得到钢板运动的位移:

$$\Delta s = N \cdot \lambda/2n_{\text{eff}} \tag{3}$$

由上式可推导出要求的应变信息的计算公式^[7]:

$$\varepsilon_z = \frac{N \lambda}{2n_{\text{eff}}L_1}. \tag{4}$$

式中, $\lambda = 1\,550\text{ nm}$ 是初始光波波长, $n_{\text{eff}} = 1.49$ 是光纤折射率, L_1 是有应变的光纤的长度.

2 实验

2.1 实验装置

实验系统主要器件有 DFB 激光器、两个 2×2 耦合器 (50: 50 3 dB)、光电探测器、普通单模光纤跳线、双踪示波器以及传感器实验箱等.

实验中, 传感器实验箱上安放了悬臂梁装置, 接通电源工作时可以将钢板的振动位移量转变成钢板的变形和应变, 然后通过电阻应变片和应变电桥, 输出正比于被测位移的电量. 本实验中使用的传感器实验箱, 经标定, 线性拟合后可以得到输出电量与位移量的关系表达式为:

$$u = 32 \times (\delta + 10) - 320. \tag{5}$$

式中, u 为输出电压幅度 mV , δ 为钢板自由端的位移量 mm . 由此, 可以通过电压计算得到钢板自由端的

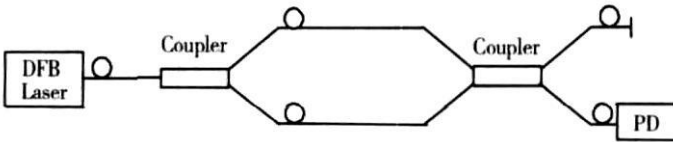


图 1 光纤 M-Z 干涉仪结构示意图

Fig.1 All-fiber M-Z interferometer

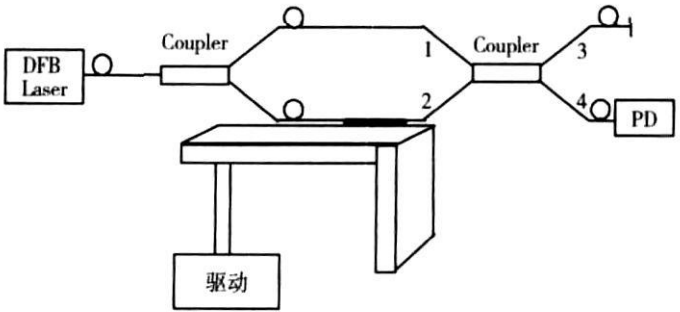


图 2 全光纤 M-Z 干涉仪测应变实验装置

Fig.2 Experimental set-up of strain sensor

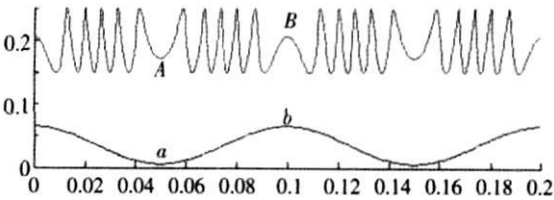


图 3 模拟的干涉信号

Fig.3 Simulation of interference signal

位移.

根据式 (5) 得到位移, 可以通过以下的应变 -位移关系式计算出应变^[7]:

$$\varepsilon_z = \frac{3(l-b)h}{2a^3} \delta. \tag{6}$$

如图 4所示, 式 (6) 中, ε_z 对应的是在 $b = 30\text{mm}$ 处的电阻应变片测量得到的应变, $h = 0.6\text{mm}$ 是梁的厚度, 固定端到振动点的距离 $a = 160\text{mm}$, 钢板总长 $l = 170\text{mm}$, δ 为钢板自由端振动时的最大位移量.

实验中, 双踪示波器的一路用来显示传感器实验仪输出的电压信号, 而干涉信号经过光电探测器转换为电信号后, 也会通过示波器的另一路来同时输出. 因此, 最终可以将两路信号都转换成应变变量, 进行比较分析.

2.2 实验结果与分析

将干涉仪传感臂的一段光纤紧紧粘贴在钢板上, 长度 $L_1 = 30\text{mm}$. 调节实验仪面板上的频率旋钮, 改变钢板的振动频率, 进行多次实验, 输出信号波形如图 5

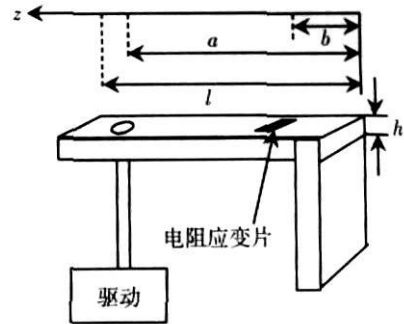
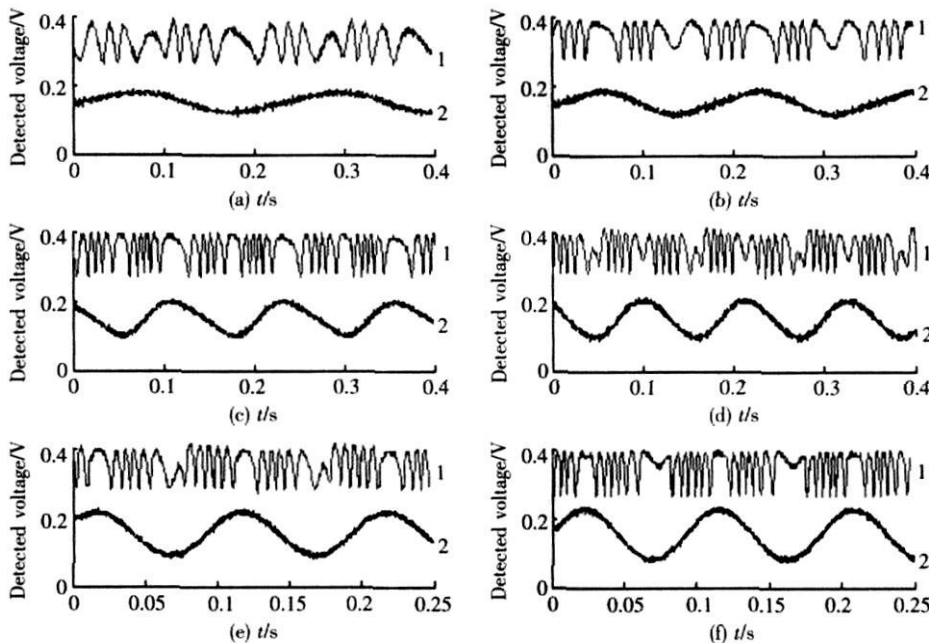


图 4 器件结构尺寸

Fig.4 Size of devices



振动频率分别为:(a) 5 Hz, (b) 7 Hz, (c) 9 Hz, (d) 10 Hz, (e) 11 Hz, (f) 12 Hz

图 5 参考传感器与 M-Z 干涉仪传感器的输出信号

Fig.5 Signals from both reference and M-Z strain sensor with frequency

图 5 中, 1 为光干涉信号, 2 为传感仪输出电信号. 从图 5 可以看出, 随着频率的改变, 钢板振动的频率与幅度均在变化, 应变变量也在变化. 实验中取了 6 组数据, 频率分别为 5 7 9 10 11 12 Hz 对应波形 2 的峰峰值分别为 60 64 80 88 100 112 mV. 根据式 (5) 换算后得到钢板的振动幅度为 875 1 062. 5 1 250 1 375 1 562. 5 1 750 μm . 而波形 1, 干涉光输出信号条纹数也在逐渐增多, 观察后可以数到一个周期内的个数分别约为 3 3. 5 4 4. 5 5 5. 5 个. 综合 (4)、(6) 两式, 可以得到振幅-应变关系图, 如图 6 所示, 两条曲线分别对应着两种不同的传感器. 可以明显看到, 光纤传感器与参考传感器吻合度较好.

分析误差产生的原因, 主要有以下几点: 一是器件尺寸 (包括 l , a , b 等长度) 的测量需要更精确, 以便两种传感器获得更准确的应变信息; 二是条纹数的判断计算比较简单、粗糙, 应该选择一种较好的计数方法; 三是胡克定律对微小的形变较为适用, 而对于实验中高应变时可能并不完全符合.

当在频率较高, 振幅较小, 即应变微小的情况下, 两种传感器的响应如图 7 所示. 图 7 中, 振动频率分别为 25 和 30 Hz 传感器实验仪由于应变微小, 输出的电压信号小, 噪声干扰大, 已经基本无法检测出微应变.

但此时光干涉信号依然明显,可以数到条纹分别为 1 个和 0.5 个,说明光纤传感器具有更好的测量灵敏度.

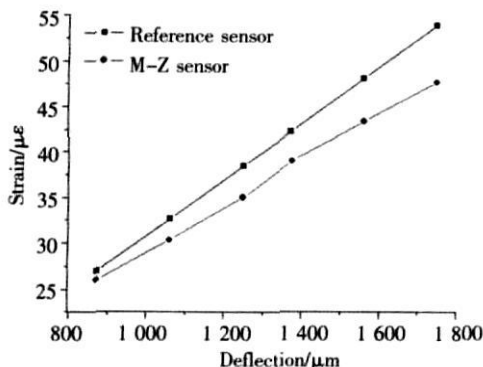


图 6 振幅-应变关系图

Fig.6 Deflection-strain responses of both reference and M-Z strain sensor

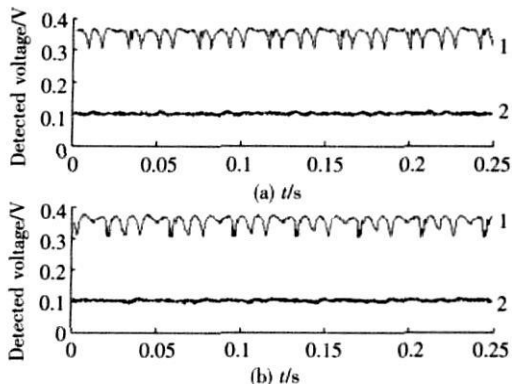


图 7 频率分别为(a) 25 Hz, (b) 30 Hz 时传感器的信号

Fig.7 Interference signals with frequency(a) 25 Hz,(b) 30 Hz

由于实验仪器的限制,频率无法加至更高,因此对该方法在音频、射频波段的适用性未能进行讨论,有待以后进一步研究.

3 结语

介绍了一种利用光纤干涉现象来测量低频动态应变的方法,结合理论分析和仿真模拟,进行了实验论证.通过对实验结果中干涉波形条纹数的分析与计算,就可以得到所要求的应变信息.此外,本文还将干涉仪测量到的应变与传感器实验仪测量到的参考应变值进行比较.实验结果显示,干涉仪的测量值与传感器实验仪的参考值吻合较好,并且具有更高的频率响应和测量灵敏度.因此,在光纤传感领域具有很好的应用前景.

[参考文献] (References)

- [1] 孙圣和,王延云,徐颖. 光纤测量与传感技术[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2001.
Sun Shenghe Wang Yanyun Xu Ying Fiber Measurement and Sensor Technology [M]. Harbin: Harbin Industry of Technology Press, 2001. (in Chinese)
- [2] 王泽锋,罗洪,胡永明. 干涉型光纤传感器信号检测技术的研究[J]. 应用光学, 2007, 28(1): 86-90
Wang Zefeng Luo Hong Hu Yongming Signal detection technique for fiber-optic interferometric sensors[J]. Applied Optics, 2007, 28(1): 86-90 (in Chinese)
- [3] 黄勇林,冯德军,许兆文,等. 基于全光纤马赫-曾德尔干涉仪的电压传感研究[J]. 传感技术学报, 2001, 14(4): 344-348
Huang Yonglin Feng Dejun Xu Zhaowen, et al. Study on voltage sensing base on all-fiber Mach-Zehnder interferometer[J]. Transduction Technology, 2001, 14(4): 344-348 (in Chinese)
- [4] Song Minqiang Yin Shizhuo Ruffin Paul B. Fiber Bragg grating strain sensor demodulation with quadrature sampling of a Mach-Zehnder interferometer [J]. Appl Opt, 2000, 39(7): 1106-1111.
- [5] 裴雅鹏,孙佳星,施清平,等. 数字式光纤 Mach-Zehnder 干涉传感实验系统[J]. 应用科技, 2005, 32(6): 19-21.
Pei Yaping Sun Jiaxing Shi Qingping et al. Experimental system of digital fiber optic Mach-Zehnder interferometric sensor [J]. Applied Science and Technology, 2005, 32(6): 19-21 (in Chinese)
- [6] 孙文浩. 光纤压力传感器的理论与实验研究[J]. 应用激光联刊, 1989, 8(6): 315-318
Sun Wenhao A theoretical and experimental study on fiber-optic pressure sensor[J]. Optoelectronics Laser, 1989, 8(6): 315-318 (in Chinese)
- [7] Maha Suleiman, Han Cheng Seat, Thierry Bosch. Interrogation of fiber bragg grating dynamic strain sensors by self mixing interferometry[J]. IEEE Sensors Journal, 2008, 8(7): 1317-1323.

[责任编辑: 严海琳]