

高分辨率迈克尔逊光纤应变传感器

毕卫红

(燕山大学光电子工程系, 河北秦皇岛 066004)

摘要: 运用迈克尔逊干涉结构, 采用氦氖激光、单模光纤、光纤耦合器等器件构成光纤应变传感器, 利用除法器消除光源幅度干扰, 提高系统的分辨率。本文采用在光纤端面镀反射膜的方法提高抗干扰能力; 输入、输出在同一侧便于使用; 实验结果表明所设计的传感器是正确和可行的。

关键词: 光纤; 应变; 传感器

中图分类号: TN 253 文献标识码: A

1 引言

光纤传感器是下个世纪最有希望广泛应用的传感器之一^[1]。在光纤传感器中, 干涉式精度最高, 干涉式光纤传感器按其结构分有迈克尔逊(Michelson)、马赫增德尔(MachZehnder)、和法布里-珀罗(Fabry-Perot)型^[2]。其中迈克尔逊型由于制做简单而被广泛应用。近年来国内外已有一些方案得到实现, 如 Valis, Tomas 等发表的题为“Passive quadrature demodulated localized-Michelson fiber-optic strain sensor embedded in composite materials”^[3]等。本文通过理论和实验证明, 利用常规单模光纤镀膜方法可提高系统的分辨率, 采用辅助电源以便灵活调整工作点, 利用除法器消除光源幅度噪声。

2 设计原理

2.1 光纤应变传感结构

传统的光学 Michelson 干涉仪的结构如图 1(a)^[4]。光纤 Michelson 干涉仪的结构示意图如图 1(b)所示, 当光源发出的光经 2×2 耦合器后, 分成幅度相等的两束光进入 Michelson 干涉仪的信号臂和参考臂, 由于构成两个光路的光纤材质相同, 但长度不同, 它们的长度差为传感头的长度;

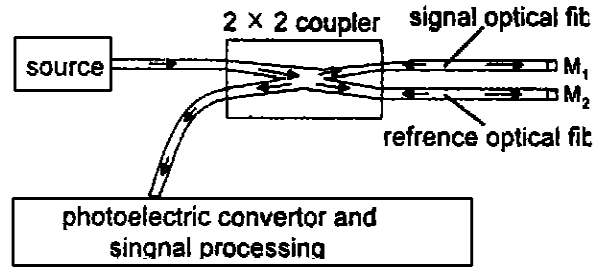
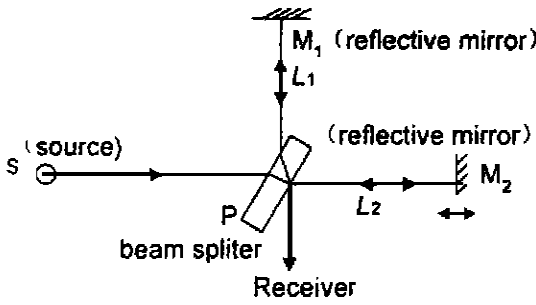
在两光纤的尾端端面镀有反射镜。当在两臂中的光行至反射镜时将发生反射, 两反射光反向传输再经 2×2 耦合器后被光电探测器接收而变为电信号。由于两束反射光来自同一光源, 有相同的频率、偏振方向和初相位, 但由于所经过的路径不同而存在光程差, 所以当它们相遇时发生干涉。设入射光强为 I_0 , 两光路的长度分别为 L_1 和 L_2 , 光纤端面反射镜的反射比分别为 $r_1 = r_2 = r$, 光纤的折射率为 n , 光纤耦合器的分光比为 1, 由光学理论得干涉光的光强为

$$I = 2I_0R(1 + \cos \frac{2n\pi}{\lambda}(L_2 - L_1)) \\ = 2I_0R(1 + \cos\varphi) \quad (1)$$

式中 $R = r^2$, $\varphi = 4\pi(L_1 - L_2) / \lambda$ 。由式(1)可以看出干涉光的光强是两束光的相位差 φ 的函数, 而由图 1(b)得 $L_1 - L_2 = 2L$, 则相位差 φ 与光纤传感头光纤长度 L 之间的关系为

$$\varphi = \frac{2\pi}{\lambda}n(2L) = \frac{4n\pi}{\lambda}L \quad (2)$$

式中 λ 为光波的波长。由式(1)、(2)可知, 干涉光光强是两束光相位差的函数, 而相位差与光纤传感头的长度成正比。当光纤传感头的长度变化时, 相位差 φ 随之变化, 反射光的光强也随之变化。因此, 光纤应变传感器的设计是使被测的应变转换为光纤传感头长度 L 的变化, 通过测反射光强的变化进而测出被测应变的变化。



a) optical interferometric construction

b) optical fiber interferometric construction

Fig. 1 Michelson interferometer

2.2 光纤长度、应变与光波相位的关系

当光纤受纵向(或横向)的机械力作用时, 光纤的长度、芯径、纤芯折射率都将发生变化, 所以光纤中光波相位的变化是光纤的长度、芯径、纤芯折射率等的多元函数。下面讨论光纤长度变化、应变与光波相位变化的关系。

光波通过长度为 L 的光纤后的相位延迟为:

$$\varphi = \frac{2\pi n}{\lambda} L = \beta L \quad (3)$$

式中 $\beta = 2\pi n/\lambda$ 为光波在光纤中的传播常数。

根据弹性力学^{5,6]}证得, 对于单模光纤, 由泊松效应引起的相位变化约占总量变化的 1‰左右, 可以忽略不计(证明过程本文略); 由应变效应和光弹效应产生的光纤中光波的相位延迟可表示为

$$\Delta\varphi = \beta\Delta L + L\Delta\beta = \beta L \left(\frac{\Delta L}{L}\right) + L \left(\frac{\partial\beta}{\partial n}\right) \Delta n + L \left(\frac{\partial\beta}{\partial a}\right) \Delta a = \frac{2\pi n k L}{\lambda} \left(\frac{\Delta L}{L}\right) \quad (4)$$

式中 $k = 1 - (1/2)n^2(1 - \mu)p_{12} - \mu p_{11}$ 为光纤应变系数, μ 为横向变形系数(泊松比), p_{12}, p_{11} 为光弹系数。对于单模硅光纤(光纤直径为 $5\mu\text{m}$), $\mu = 0.17, p_{12} = 0.274, p_{11} = 0.126$, 当光源的波长为 $0.6328\mu\text{m}$ 时, k 为 0.7912 。由式(4)可知, 相位差的变化规律与光纤长度的变化成正比。由于信号光与参考光的光程差为两光纤长度差 L 的 2 倍, 设 L 的初始长度为 L_0 , 由式(2)与(4)得

$$\varphi = \varphi_0 + \Delta\varphi = \frac{4n\pi}{\lambda} L_0 + \frac{4n\pi k L_0}{\lambda} \left(\frac{\Delta L}{L_0}\right) \quad (5)$$

2.3 光纤干涉仪中反射光强与光纤干涉仪长度的变化规律

将式(5)代入式(1)得

$$I = 2I_0R \left[1 + \cos \frac{4n\pi L_0}{\lambda} \cos \frac{4n\pi k L_0}{\lambda} \left(\frac{\Delta L}{L_0}\right) - \sin \left(\frac{4n\pi L_0}{\lambda}\right) \sin \frac{4n\pi k L_0}{\lambda} \left(\frac{\Delta L}{L_0}\right) \right] \quad (6)$$

令 $L_0 = (\lambda/8n)(2m + 1)$, ($m = 0, 1, 2, \dots$), 式(6)可近似等效为

$$I_R = 2I_0R \left(1 \pm \sin \frac{4n\pi k L_0}{\lambda} \left(\frac{\Delta L}{L_0}\right) \right) \quad (7)$$

由式(7)可见, 除常量外, 干涉信号中包含有光纤长度变化分量。令 $I_d = 2I_0R, I_s = \pm 2I_0R \frac{4n\pi k L_0}{\lambda} \left(\frac{\Delta L}{L_0}\right)$, 则 $I_R = I_d + I_s$ 。去掉直流分量 I_d , 再经光电转换后得

$$u_s = kI_s = U_a \sin \frac{4n\pi k L_0}{\lambda} \left(\frac{\Delta L}{L_0}\right) \quad (8)$$

对式(8)进行反正弦变换即可得到应变为 $\Delta L/L = k \sin^{-1}(u_s)$, 得到被测量。

当 $(4nk\Delta L/\lambda)$ 远小于 $\pi/2$ 时, 式(8)可近似为

$$u_s = U_a \frac{4n\pi k L_0}{\lambda} \left(\frac{\Delta L}{L_0}\right) \quad (9)$$

由式(9)可见, 在小应变条件下, 经光电转换后的电信号与光纤长度的应变成线性关系。电信号的变化规律与应变的变化规律相同。式(9)是式(8)的特殊情况。

3 实验电路设计与实验结果

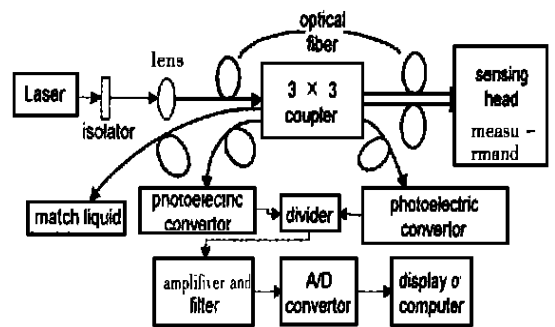


Fig. 2 Optical fiber strain sensor construction

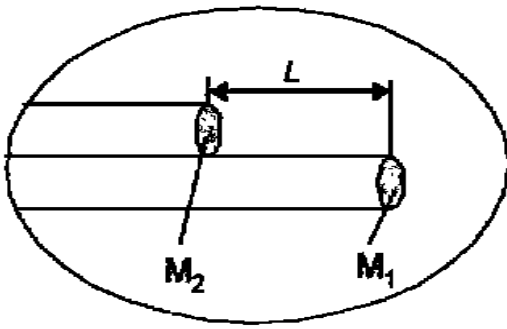


Fig. 3 Optical fiber sensing head

根据上述原理所设计的光纤应变传感器的实验系统及传感头如图 2、图 3 所示。其中激光光源采用波长为 $0.6328\mu\text{m}$ 、功率幅度噪声仅为 0.1% 的 He-Ne 激光器; 传感头用环氧树脂胶粘在压电陶瓷表面上如图 4 所示; 光纤采用芯径为 $5\mu\text{m}$ 的单模光纤; 压电陶瓷为空心圆柱体, 内径为 36mm , 外径为 40mm , 高为 40mm , 采用交直流串联供电, 直流用于调整工作点, 以保证传感器工作在正交状态; 光纤传感器头长为 3cm 左右, 静态长受直流电源 U_0 的电压值控制, 它的动态长 L 受交流电源 U_s 的调制; 由压电材料理论知: 压电陶瓷驱动电压 u 与径向半径 a 变化规律为 $\Delta a = k_1 u + k_2 u^2$, k_1, k_2 为比例系数, 由于 k_1 远大于 k_2 , 所以压电陶瓷驱动电压 u 与径向半径 a 变化可近似表示为

$$\Delta a = k_1 u \quad (10)$$

由式 (10) 可得: 压电陶瓷径向伸缩与其驱动电压变化规律相同。又因为压电陶瓷的周长与半径 a 线性成比例, 即 $l = 2\pi a$, 所以, 周长的变化与驱动电压的关系为:

$$\Delta l = 2\pi\Delta a = 2\pi k_1 u = k_3 u \quad (11)$$

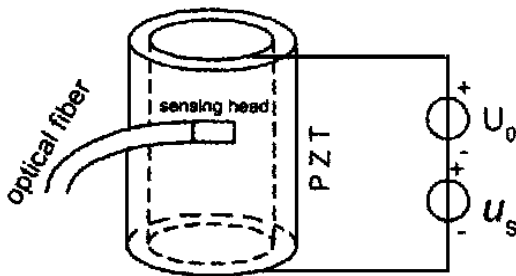


Fig. 4 Sensor head and measurand

式中 $k_3 = 2\pi k_1$ 。式 (11) 说明压电陶瓷径向周长的变化与驱动电压成正比。由于光纤传感头是粘在压电陶瓷表面上, 则光纤长度的变化与压电陶瓷表面成同步变化, 若压电陶瓷的驱动电压为正

弦电压, 且有效值为 U_a , 角频率为 ω , 则光纤 F-P 腔长度变化可近似表示为

$$\Delta L = L_a \sin \omega t \quad (12)$$

也就是说当被测表面变化规律为正弦时, 光纤的长度按正弦规律变化。

图 2 所示系统的工作原理为: 从高稳定 He-Ne 激光器射出单频光束, 通过小型 10X 透镜、高隔离度 ($> 60\text{dB}$) 的单模光纤耦合器后输出三束光, 其中一束光进入幅度参考光纤, 经光电转换后送入除法器作为幅度参考信号; 另两束光分别进入信号光纤和参考光纤。当这两束光传至反射镜 M_1 和反射镜 M_2 时光被反射形成信号光和参考光, 两束光耦遇后发生干涉, 干涉光返回到光电管中, 经光电变换后送入除法器, 除法器输出信号再经放大滤波以及微机处理, 最后在示波器的荧光屏上可观察到干涉光强及应变的变化规律。除法器作用是涉除光源幅度干扰。

根据上述原理, 对图 2 和图 4 所组成的结构进行实验, 实验表明当压电陶瓷的驱动电压小于 120V 时, 输出波形与压电陶瓷驱动电压变化规律相同, 如图 5 所示; 当压电陶瓷驱动电压大于 120V 时, 传感器输出电压在原峰值处出现凹陷, 凹陷的幅度随压电陶瓷驱动电压的增加而增加, 如图 6 所示。其中图 5 为压电陶瓷的驱动电压 $U_a = 60\text{V}$ 时的传感器的输出信号, 图 6 为压电陶瓷上的驱动电压 $U_a = 140\text{V}$ 时的传感器的输出信号。

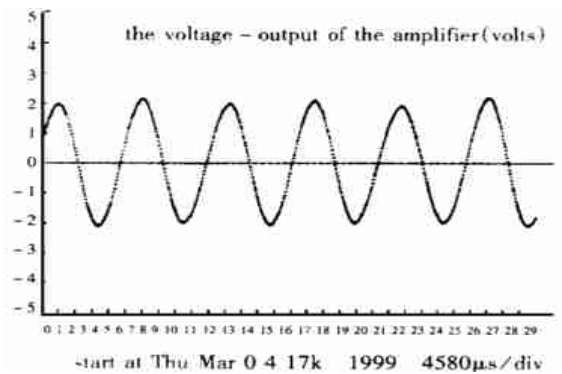


Fig. 5 Output voltage of sensor 1 ($U_a = 60\text{V}$)

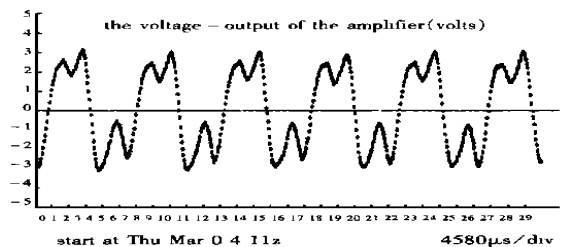


Fig. 6 Output voltage of sensor 3 ($U_a = 140\text{V}$)

4 系统的分辨率

由压电陶瓷的压电特性得驱动电压与传感头长度变化的关系如表 1 所示。

Table 1

u	20	40	60	80	100	120	140
ΔL	4.02E-09	8.9E-09	1.46E-08	2.12E-08	2.86E-08	3.69E-08	4.6E-08

由图 5 得系统的最小分辨率为

$$S = \frac{\Delta L_{\min}}{L_0} = \frac{\Delta L}{(2^{12} \div 5) \times 2] L_0} = \frac{1.46 \times 10^{-8} \times 10^6}{1638 \times 3 \times 10^{-2}} = 2.96 \times 10^{-4} \mu\epsilon$$

仪构成光纤应变传感器是可行的, 本文所设计的传感器当 PZT 上的交流驱动电压小于 120V 时应变测量为线性; 它的量程为 $10\mu\epsilon$, 分辨率优于 $0.001\mu\epsilon$; 这种传感器具有结构简单、易于调整和精度高的优点, 可用于钢筋、桥梁及各种载体的应力应变的测量。与电阻应变片传感器相比具有灵敏度高, 抗潮湿及可长期置放的优点。

5 结 束 语

由实验结果可证明利用光纤 Michelson 干涉

参考文献:

- 1] 于荣金. 光子学与光子技术 [J]. 燕山大学学报. 1998, 22(1): 18-22.
- 2] Wang G Z, Wang A B, Murphy K A, et al. Two-mode Fabry-Perot optical fiber sensors for strain and temperature measurement [J]. Electronics Letter, 1991, 27(20): 1843-1845.
- 3] Valis, Tomas, et al. Passive-quadrature demodulated localized-Michelson fiber-optic strain sensor embedded in composite materials [J]. Journal of Lightwave Technology. 1991, 19(4): 535-54.
- 4] 张志鹏. 光纤传感器原理 [M]. 北京: 中国计量出版社, 1991. 130-153.
- 5] Ghatay A, Thyagarajan K. Optical Electronic. (1) [M]: Cambridge University, 1989. 502-527.
- 6] 张行主编. 高等弹性理论 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1994.

Michelson optical fiber strain sensor

BI Wei-Hong

(Photoelectronic Engineering Department, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

Abstract: The Michelson interferometer is used for fiber-optical strain sensor, which is consisted of He-Ne laser, single-Mode optical fiber and optical fiber coupler. The divider is used to eliminate the attitude fluctuation from the laser and to get high resolution. The growing mirror on the end of optical fiber is used to increase the ability in anti-disturbance. The input and output signals are on the same side, which make the sensor easily applied.

Key words: optical fiber; strain; sensor

作者简介: 毕卫红(1960-), 女, 河北卢龙县人。副教授, 燕山大学光电子系教师。1982 年获东北重型机械学院无线电专业学士学位, 1988 年获燕山大学电路与系统学科硕士学位, 1997 年开始在在职攻读哈尔滨工业大学博士学位。主要研究方向为光纤传感技术的研究和电子电路 CAP。近几年完成省部级项目 4 项, 已发表文章 40 余篇。