

光纤法布里-珀罗干涉式应变的测量

毕卫红 郑绳檀

(秦皇岛燕山大学光电子工程系 066004)

摘 要 本文采用在一段单模光纤两端镀膜的方法构成不对称光纤法布里-珀罗干涉腔, 导出此干涉腔反射光的数学模型, 给出干涉腔与光纤连接构成干涉式光纤应变传感器的一般理论和测量方法. 文中传感器采用低反射率的法布里-珀罗腔以改善光纤应变传感器的线性. 输入、输出在同一侧便于使用; 与电阻应变传感器相比精度高、适用范围广.

关键词 光纤; 应变; 传感器

0 引言

灵巧机构应变传感器是未来航天飞行器以及民用建筑、桥梁等大型工程结构的重要发展方向¹. 其主要应用是在结构材料内埋置传感器, 实时监测和调整工程结构的载荷及工作状态. 光纤传感器是最有希望实现灵巧结构的传感器. 它具有体积小、易弯曲、抗电磁干扰等优点, 具有很大的研究、开发和应用价值. 在光纤传感器中, 干涉式精度最高, 干涉式光纤应变传感器按其结构分有迈克耳孙、马赫-曾德、赛格纳克和法布里-珀罗(F-P)型. 其中前二种由于信号光纤和参考光纤不在同一通道中, 使传感器的调试较为困难; 赛格纳克干涉仪一般只适用于非互易量, 例如角速度的测量; 非本征 F-P 型光纤传感器的空气腔易受环境干扰. 而本征 F-P 型光纤传感器是由全光纤构成, 不但环境影响很小, 而且传感头体积小, 它仅由一根光纤实现被测量的测量, 结构简单. 近年来国内外已有一些方案得到实现, 如椭圆芯光纤双模干涉法布里-珀罗应变与温度传感器²、本征法布里-珀罗干涉压力传感器³等. 但这些结构都比较复杂, 不易调试. 本文通过理论和实验证明, 利用常规单模光纤, 摒弃双模或双波长干涉结构而采用本征 F-P 干涉结构可实现应变的测量, 其特点是结构简单、易于调试与使用.

1 设计原理

1.1 不对称光纤 F-P 干涉腔的反射光的数学模型

不对称光纤 F-P 干涉腔是在一段光纤的两个端面镀上不同反射率的反射膜形成干涉腔^{4,5}. 入射光射入干涉腔后的反射与折射的示意图如图 1 所示, 图中反射面 M_1 的介质 1 侧反射比为 r'_1 ,

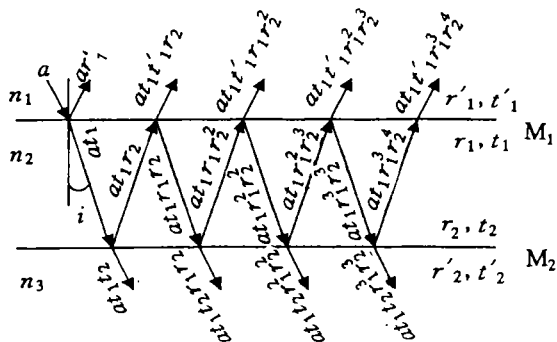


图 1 光射入 F-P 腔后的折射与反射

Fig. 1 The reflection and refraction of the incident light
介质 2 侧反射比为 r_1 ; 反射面 M_2 的介质 2 侧反射比为 r_2 , 介质 3 侧反射比为 r'_2 ; 由介质 1 到介质 2 的透射比为 t_1 , 由介质 2 到介质 1 的透射比为 t'_1 , 由介质 2 到介质 3 的透射比为 t_2 . 由图 1 可知, 反射光(或透射光)中任何两束光的光程差

Δ 或相位差 φ 是相同的, 设入射光的振幅为 a , 频率为 ω ; 第一次反射光的初相为 φ_1 , 则反射光合成振幅的复数形式为

$$A = ar_1' e^{j(\omega t + \varphi_1)} + at_1 t_1' r_2 e^{j(\omega t + \varphi_1 + \varphi)} + at_1 t_1' r_1 r_2^2 e^{j(\omega t + \varphi_1 + 2\varphi)} + at_1 t_1' r_1^2 r_2^3 e^{j(\omega t + \varphi_1 + 3\varphi)} + \dots \quad (1)$$

则 F-P 干涉腔的反射光的光强为

$$I = A \times A^* = a^2 r_1'^2 + \frac{a^2 (t_1 t_1' r_2)^2 - 2a^2 t_1 t_1' r_1' r_1 r_2^2 + 2a^2 t_1 t_1' r_1' r_2 \cos \varphi}{1 + (r_1 r_2)^2 - 2r_1 r_2 \cos \varphi} \quad (2)$$

由于 $r_1' = -r_1$, $t_1 t_1' = 1 - r_1^2 \approx 1$, 取 $r_1 = t_1 t_1' r_2 = r$, $r_1 r_2 \ll 1$, 则 F-P 腔的光干涉可近似的看作两束等幅光的干涉, 光的强度为

$$I = 2a^2 r^2 (1 + \cos \varphi) = 2I_0 R (1 + \cos \varphi) \quad (3)$$

式中 $I_0 = a^2$, $R = r^2$. 由式(3)可以看出干涉光的光强为两束光的相位差 φ 的函数. 相位差 φ 与光程差 Δ 及光纤 F-P 腔长度 L 的关系为

$$\varphi = 2\pi \Delta / \lambda = 2\pi (2nL) / \lambda = 4n\pi L / \lambda = \beta L \quad (4)$$

式中 λ 为光波的波长, n 为 F-P 腔光纤的折射率, L 为光纤 F-P 腔的长度. $\beta = 4\pi n / \lambda$ 为光波在光纤中的传播常数.

由式(3)、(4)可知, 干涉光光强是两束光相位差的函数, 而相位差与光纤 F-P 腔的长度成正比. 当光纤 F-P 腔的长度变化时, 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 F-P 腔长度 L 的变化, 通过测量反射光光强的变化进而测出被测量——应变.

1.2 光纤长度、应变与光波相位的关系

由于光纤应变传感器的设计是使被测的应变转换为光纤 F-P 腔长度 L 的变化. 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.

当光纤受到应变作用发生变化时, 由式(4)得光纤中光波的相位变化为

$$\begin{aligned} \Delta \varphi &= \beta \Delta L + L \Delta \beta \\ &= \beta L (\Delta L / L) + L (\partial \beta / \partial n) \Delta n \\ &\quad + L (\partial \beta / \partial a) \Delta a \end{aligned} \quad (5)$$

式中 a 为光纤芯的半径, 第一项表示由光纤长度变化引起的相位延迟(应变效应); 第二项表示折射率变化引起的相位延迟(光弹效应); 第三项则表示光纤的半径改变所产生的相位延迟(泊松效

应).

根据弹性力学^{6,7}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

$$\begin{aligned} \Delta \varphi &= (2\pi n / \lambda) \{ 1 - 2^{-1} [(1 - \gamma) p_{12} - \gamma p_{11}] \} \Delta L \\ &= (2\pi n k / \lambda) \Delta L = (2\pi n k L / \lambda) (\Delta L / L) \end{aligned} \quad (6)$$

式中 μ 称为横向变形系数(泊松比), p_{12} 、 p_{11} 为光弹系数, $k = 1 - (1/2) [(1 - \gamma) p_{12} - \gamma p_{11}]$ 为光纤应变系数. 对于单模光纤(光纤直径为 $5 \mu\text{m}$), $\gamma = 0.17$, $p_{12} = 0.274$, $p_{11} = 0.126$, 当光源的波长为 $0.6328 \mu\text{m}$ 时, k 为 0.7912 . 由式(6)可知, 相位差的变化规律与光纤长度的应变成正比.

本文所设计的光纤应变传感头结构如图 2 所示. 设 F-P 干涉腔长度初始长度为 L_0 , 由式(4)与(6)得

$$\begin{aligned} \varphi &= \varphi_0 + \Delta \varphi = (4n\pi / \lambda) (L_0 + k \Delta L) \\ &= 4n\pi L_0 / \lambda + (4n\pi k L_0 / \lambda) (\Delta L / L_0) \end{aligned} \quad (7)$$

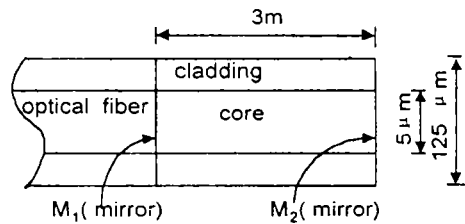


图 2 光纤传感头结构
Fig. 2 The sensing head

1.3 光纤 F-P 干涉腔反射光强与其长度变化的关系

将式(7)代入式(3)得

$$I = 2I_0 R [1 + \cos (4n\pi L_0 / \lambda) \cos (4n\pi k L_0 / \lambda) (\Delta L / L_0) - \sin (4n\pi L_0 / \lambda) \sin (4n\pi k L_0 / \lambda) (\Delta L / L_0)] \quad (8)$$

当 $L_0 = (\lambda / 8n) (2m + 1)$, ($m = 0, 1, 2, 3, \dots$), $(4n\pi k \Delta L / \lambda)$ 远小于 1 时, 式(8)可近似等效为

$$I = 2I_0 R [1 - (4n\pi k L_0 / \lambda) (\Delta L / L_0)] \quad (9)$$

由式(9)可见, 除常量外, 干涉信号中包含有光纤长度变化(应变)分量, 经光电转换及信号处理后, 可得到应变的大小.

2 实验电路设计与实验结果

实验系统如图 3 所示, 其中光源采用波长为 $0.6328 \mu\text{m}$ 、功率波动噪音仅为 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

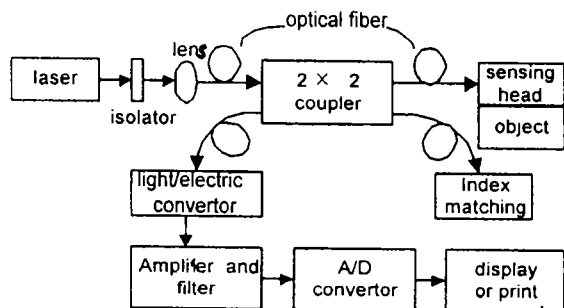


图3 光纤应变传感系统

Fig.3 The optical fiber sensor construction

如图4所示;光纤采用芯径为 $5\mu\text{m}$ 的单模光纤;

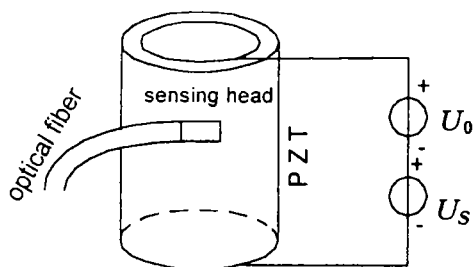


图4 传感头与被测面

Fig.4 Sensing head and measured surface

压电陶瓷为圆柱体,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F-P干涉腔反射膜的反射率分别为 $r_1=10\%$ 、 $r_2=12\%$,腔长为 3cm 左右,静态腔长受直流电源 U_0 的电压值控制,它的动态腔长 L 受交流电源 u_s 的调制;由压电材料理论知:压电陶瓷驱动电压与径向变化规律为

$$\Delta a = k_1 u + k_2 u^2 \approx k_1 u \quad (10)$$

式中 k_1 、 k_2 为比例系数,且 k_1 远大于 k_2 .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 l 与半径 a 的关系为 $l=2\pi a$,所以周长的变化与驱动电压的关系为

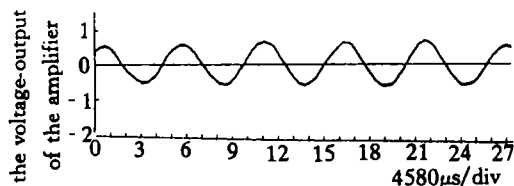
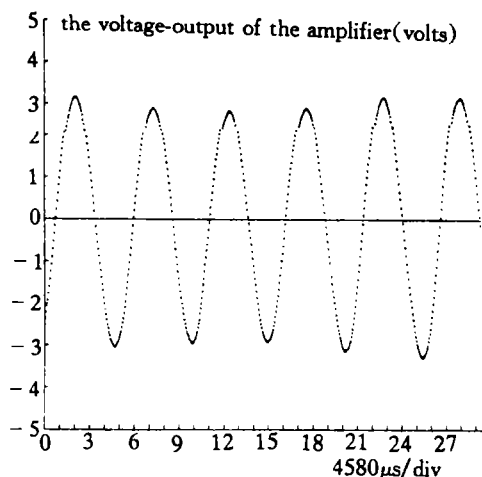
$$\Delta l = 2\pi \Delta a \approx 2\pi k_1 u = k_3 u \quad (11)$$

式中 $k_3=2\pi k_1$,式(11)说明压电陶瓷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变化同步,若压电陶瓷的交流驱动电压为正弦电压,即 $u_s = \sqrt{2} U_s \sin \omega_a t$,则光纤F-P腔长度变化可近似表示为

$$\Delta L = L_s \sin \omega_a t \quad (12)$$

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.

整个系统的工作原理为:从高稳定He-Ne激光器出单频光束,通过反向隔离器、小型10X透镜、高隔离度($>60\text{dB}$)的单模光纤耦合器后输出两束光,其中一束光进入折射率匹配液中被吸收掉,不再返回系统;另一束光由传导光纤射向光纤F-P腔,当入射光传至入射镜 M_1 时,一部分光被反射形成参考光;另一部分光透过反射面进入F-P腔,传至反射镜 M_2 ,又有一部分光被反射形成信号光,由于参考光与信号光来自同一光源,具有相同的频率和偏振方向,相遇后发生干涉,干涉光再经光纤耦合器传至光电管中,通过光电变换、放大滤波以及信号处理,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.实验中传感器的输出电压如图5,图6,图7所示.它们分

图5 光纤应变传感器的实验结果1($U_s=50\text{V}$)Fig.5 Output voltage of sensor ($U_s=50\text{V}$)图6 光纤应变传感器的实验结果2($U_s=100\text{V}$)Fig.6 Output voltage of sensor ($U_s=100\text{V}$)

别对应压电陶瓷驱动电压为 50V 、 100V 、 150V 时的传感器输出.其中图5和图6表示传感器工作在微变线性区($\Delta L < \lambda/8$),输出电压随PZT驱动电压(也是光纤长度的增加)而增加;当PZT上电压继续升高,使光纤的长度大于 $\lambda/8$ 时,输出电压

的峰值处出现失真,进而出现凹陷,凹陷的幅度随压电陶瓷驱动电压的继续增加而增加,如图 7 所

示. 虽然图 5~图 7 中每个曲线的各个峰值不完全相同,这是由于光纤传感头的粘接有一定的弹性所致,可由信号处理中的算法进行补偿. 综上所述,实验结果与理论分析相吻合.

3 结束语

由实验结果可证明利用光纤 F-P 构成光纤应变传感器是可行的,本文所设计的传感器当压电陶瓷上的交流驱动电压小于 120V 时应变测量为线性;系统量程为 $100\mu\epsilon$,分辨率为 $0.01\mu\epsilon$;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.

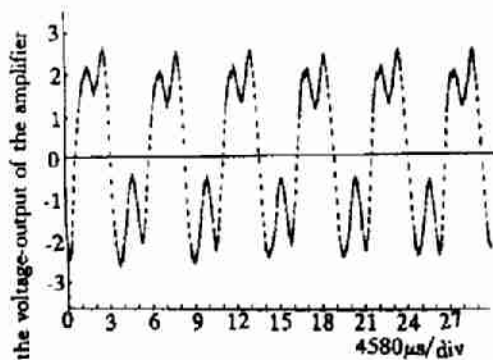


图 7 光纤应变传感器的实验结果 3 ($U_a = 150V$)

Fig. 7 Output voltage of sensor ($U_a = 150V$)

参考文献

- 1 于荣金. 光子学与光子技术. 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. Electronics Letter, 1991, 27(20): 1843~1845
- 3 Kao T W, Tayler H F. High-Sensitivity Intrinsic Fiber-Optic Fabry-Perot Pressure Sensor. Optics Letter, 1996, 21(8): 15~19
- 4 母国光. 光学. 北京: 人民教育出版社. 1979: 250~253
- 5 Bi Weihong, Qiang Xifu, Zheng Shengxuan. The Detecting System for the Reflectance of the Mirror Grown on Optical Fiber Ends. Journal of Transduction Technology, 1998, 11(4): 56~60
- 6 Ghatay A, Thyagarajan K. Optical Electronics. (1); Cambridge University Press, 1989: 502~527
- 7 柯斯克 A, 罗伯逊 G 著, 王登山等译. 光弹性应力分析. 上海科学技术出版社, 1984: 260~270

THE OPTICAL FIBER F-P INTERFEROMETRIC STRAIN MEASUREMENT

Bi Weighoing, Zheng Shengxuan
Qinhuangdao Yanshan University 066004
Received date: 1999-03-09

Abstract In this paper, the intrinsic F-P cavity is used for fiber-optical sensor to measure the strain. The general formulas of the fiber-optical F-P cave and fiber-optic longitudinal stress-strain effect are derived. The general theory and measurement method of strain is presented. The low fineness F-P cave is used to ameliorate the linear of optical fiber strain sensor; The input and output signals are on the same side, which make the sensor easy application actually. The result of experiment agree with the theory.

Keywords Fiber optical; Strain; Sensor

Bi Weihong was born in Qinhuangdao, China, on June 28, 1960. She received the B. S., M. S. degrees in electrical engineering from Yanshan University, China, in 1982 and 1988, respectively. She has been engaged in the research work on optical fiber sensor and signal processing.

