

基于敏感 Fabry-Perot 腔光纤角位移传感器的原理与设计

吕 涛¹ 刘德森¹ 刘志麟² 郎贤礼¹ 蒋小平¹ 朱少丽¹

(1 西南师范大学光电技术研究所, 重庆 400715)

(2 广州敏通光电科技有限公司, 广州 510150)

摘 要 提出了一种全角度并且可以连续测量微小角位移(秒级)的新型光纤角位移传感器. 利用微小光学谐振腔的基本理论, 主要是基于光学法布里-珀罗(Fabry-Perot)腔的基本原理研究特定光波下光强度的变化与角位移的线性变化关系, 利用光纤技术、敏感技术融合微机械技术研发而成. 适合于一些特定领域中对角位移的精确测量.

关键词 光纤传感器; 法布里-珀罗(Fabry-Perot)腔; 角位移

中图分类号 TP212 **文献标识码** A

0 引言

角位移传感器在自动控制、精密仪器仪表、国防军事等领域得到了广泛应用. 而现有的角位移传感器采用的原理方法通常有: 电学方法^[1]、光栅方法^[2]、旋转编码器方法^[3]、光纤方法^[4,5]、光学方法^[6]等. 这些传感器受测量精度、分辨率、体积、可操作性等诸多因素的限制, 不能连续且大范围地对角位移进行高精度、高分辨率地检测.

以光波干涉原理为基础的光学干涉测量技术是把光波的相位关系或频率关系以及它们随时间的变化关系以光强度的空间分布或光强度随时间变化的形式检测出来, 具有很高的灵敏度和精度. 将光学干涉技术与光纤传感技术结合起来形成的光纤干涉仪按结构可分为迈克尔逊(Michelson)、马赫-曾德尔(Mach-Zehnder)、赛格纳克(Sagnac)、法布里-珀罗(Fabry-Perot)腔等几种类型. Fabry-Perot 腔(简称 F-P 腔)光纤传感器由于结构简单、容易实现而受到广泛的应用. 它不仅具有传统光纤传感器的可靠性好、抗电磁干扰、抗腐蚀等优点而且具有测量精度高、分辨率高、动态范围大、线性度好等优良特征. F-P 腔光纤应变传感器的基本原理就是使被测应变转换为 F-P 腔腔长 L 的变化, 而反射光强与 F-P 腔腔长 L 有一定的函数关系, 通过测量反射光强的变化进而测出被测应变. 本文就是利用微小光学谐振腔的基本理论, 主要是基于光学 F-P 腔的基本原理研究特定光波下光强度的变化与角位移的线性变化关系, 利用光纤技术、敏感技术、微机械技术研制而成的一种可连续测量、全角度、高精度的光纤角位移

传感器.

1 测量原理

通常的传感器不易同时实现测量的大量程和高精度, 本文提出的新型光纤角位移传感器却实现了这一目标. 设计的基本思想是先通过精密微机械加工技术实现角位移与线位移的线性正比例变换(mm 级), 再通过线位移衰减器使得线位移(mm 级)转化为能被 F-P 腔检测的微腔长变化(nm 级). 这种传感器的设计是使被测的应变(角位移)转换为 F-P 腔腔长 L 的变化, 通过检测反射光强的变化进而测出被测应变(角位移). 角位移线性转换为线位移原理结构如图 1. 传感器内旋转体边缘线平面轨迹为阿基米德螺旋线, 为了提高对角位移量测量的分辨率, 理论上螺旋线初始半径 R_0 越大越好, 但是半径太大则制作出的传感器体积大, 可操作性变差. 如果 R_0 太小则角位移的分辨率过小且加工困难. 权衡多种因素考虑不妨选取 $R_0 = 50$ mm, 根据极坐标下的阿基米德螺旋线公式 $\gamma = a\theta$, a 为常数, γ 为极径, θ 为极角, 可知 γ 与 θ 成严格的正比例关系也即随 θ 的变

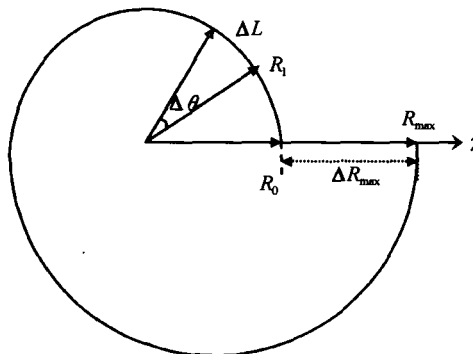


图 1 用阿基米德螺旋线实现角位移与线位移转化
Fig. 1 Angular displacement transmitted into linear displacement with Archimedean screw

大 γ 成线性变大,螺线从第二个周期开始选取. 旋转一周时

$$R_{\max} = 4\pi \times (50/2\pi) = 100 \text{ mm}$$

极径最大的变化值为

$$\Delta R_{\max} = 100 - 50 = 50 \text{ mm}$$

依据此理论可认为 γ 线性增大率为

$$\Delta R_{\max}/360^\circ \approx 0.14 \text{ mm/deg}$$

由接触力学理论可知,如果两固体表面在无变形时精确地或者相当接近地“贴合”在一起,此时称接触是协调的,否则为非协调的. 利用性能优良的线位移衰减器的耦合接口即可把 ΔR “贴合”地转化为欲衰减的初始线位移.

线位移衰减器设计的基本原理是基于图2的串联弹簧组,考虑到各个弹簧之间耦合特性,此弹簧组由四个不同倔强系数 k_1, k_2, k_3, k_4 的弹簧组成.



图2 不同的弹簧串联
Fig. 2 Different springs in series

在外力 F 作用下整个弹簧组形变为 Δs , 即

$$\Delta s = \Delta x_1 + \Delta x_2 + \Delta x_3 + \Delta x_4$$

$\Delta x_1, \Delta x_2, \Delta x_3, \Delta x_4$ 分别为倔强系数为 k_1, k_2, k_3, k_4 弹簧的形变量. 当 $k_1 : k_2 : k_3 : k_4 = 1 : 8 : 11 : 80$ 时 $\Delta x_4 = \frac{20}{100} \Delta s$, 可实现线位移的衰减. 为了减少外界振动的影响和实现线位移 mm 级到 nm 级的转换要求,可采用依据上述原理而制作的线位移衰减器来实现这一目标,本文使用的线位移衰减器采用 3~5 级的多级耦合衰减可实现 10000 : 1 的线位移的衰减,这就能成功实现 mm 级到 nm 级的转换. 本传感器对此线位移衰减器性能指标要求很高.

光学 F-P 腔干涉仪原理图如图 3.

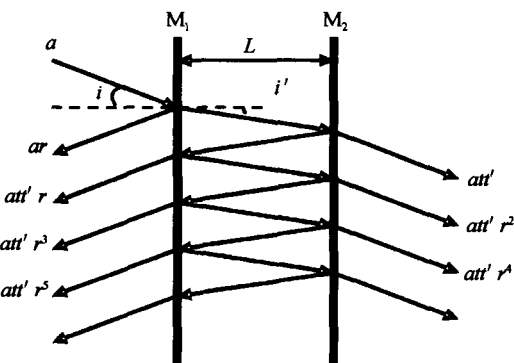


图3 F-P干涉仪示意图
Fig. 3 Schematics of Fabry-Perot Interferometer

F-P 干涉仪由两块相互平行的反射镜 M_1, M_2 构成,腔长为 L ,入射光振幅为 a, n_0 为腔内介质折

射率,第一、二个面的振幅透射系数为 t, t', i 为入射角,振幅反射系数为 r ,相邻反射光束相位差为 φ ,由多光束干涉理论^[7]可得反射干涉光强为

$$I_R = \frac{2I_0 r^2 (1 - \cos \varphi)}{1 + r^4 - 2r^2 \cos \varphi} = \frac{2I_0 R (1 - \cos \varphi)}{1 + R^2 - 2R \cos \varphi} \quad (1)$$

式中 I_0 为输入光强且 $I_0 = a^2, R = r^2$ 为反射率

$$\varphi = \frac{4\pi n_0 L \cos i'}{\lambda} \quad (2)$$

λ 为入射光波长. 由式(1)、(2)可见 I_R 与 F-P 腔长 L 成近似的余弦函数关系.

近似为双光束干涉时反射光强为

$$I_R = 2RI_0(1 - \cos \varphi) \quad (3)$$

图4中“ A ”表示多光束干涉,“ B ”表示双光束干涉, $I_0 = 1 \text{ mW}$. 从图中可看出端面反射率不能太大,鉴于对被测应变分辨率和输出干涉信号的强度、信噪比、条纹可见度的要求通常选择一个最佳反射率^[8],低反射率条件下,用双光束干涉近似代替 F-P 干涉仪多光束干涉,实际值与理论值误差很小^[9].

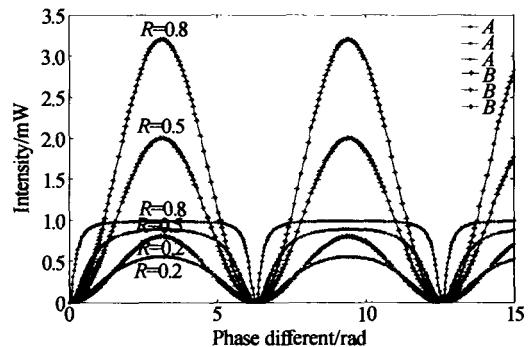


图4 不同反射率下多光束干涉与双光束干涉比较
Fig. 4 Comparison of multi beams and double beams reflect interference with different reflectivity

本项目 F-P 腔构成基于上述 F-P 腔干涉仪基本原理,用单模光纤镀膜端面代替 M_1 ,可移动活塞镀膜端面代替 M_2 ,敏感传感头 F-P 腔结构如图 5.

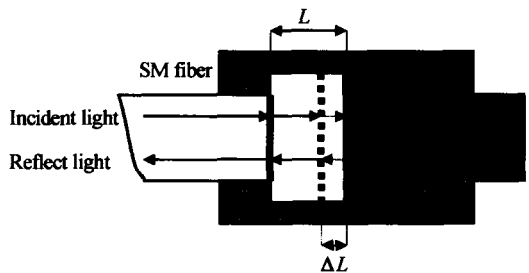


图5 角位移传感器的传感头中敏感 F-P 腔结构简图
Fig. 5 Configuration of F-P cavity in sensing head of angular displacement sensor

2 传感器结构设计

传感器结构如图 6,从 DFB 激光器发出的单频光束,通过隔离器、高隔离度的单模光纤耦合器后输出两束光,其中一束进入折射率匹配液中被吸收掉,

不再返回系统;另一束光由单模光纤进入传感器的 F-P 腔,当入射光传至光纤镀膜端面时,一部分光被反射,另一部分光进入 F-P 腔,又有部分光被反射形成信号光,这部分信号光透过光纤端面,由于信号光与从反射端面反射回的光波来自同一光源,因此形成干涉光. 反射光强度 I_R 随 F-P 腔长 L 而变化,而 L 的变化由经线位移衰减器衰减后的线位移来控制,从而使得输出光强 I_R 与角位移 θ 成一定函数关系. 干涉反射光强 I_R 经过 PIN 光电二极管、放大和滤波、A/D 转换电路和计算机后输出对应数值.

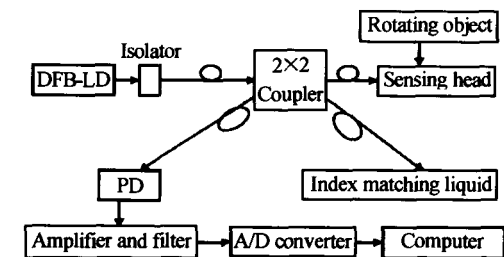


图6 高精度光纤角位移传感器结构图

Fig. 6 Configuration of high precision optical fiber angular displacement sensor

3 实验设计

实验系统如图 7,为了测量的稳定性和精确性,光源为半导体 DFB 激光器,波长为 1310 nm,功率为 1 mW. 传感器通过接口与旋转物体精密连接,光纤采用芯径为 5 μm 的单模光纤用步进电机作为旋转载体源.

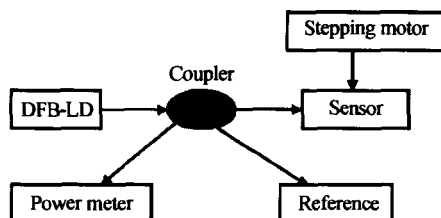


图7 实验原理图

Fig. 7 Schematics of principle experiment

图 8 为用千分表测量得到的角位移与线性位移转化图.

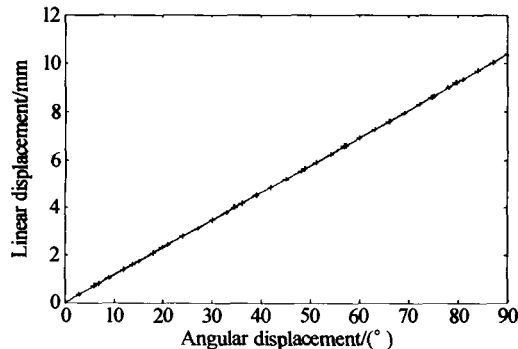


图8 角位移转化为线位移关系图

Fig. 8 Schematics of angular displacement transmitted into linear displacement

图 9 为 180°角位移量与输出光强的函数关系

图,经 Matlab 软件处理拟合后线性很好. 出现的少量台阶跳跃点为图 1 加工出的实验螺盘边缘面非理想阿基米德螺线面而导致输出光强有跳跃现象,这与图 8 所示角位移与线位移转化非理想化而有少量的跳跃点相一致.

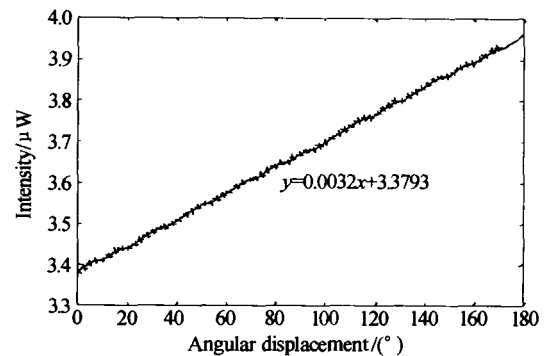


图9 角位移与输出光强的关系图

Fig. 9 Schematics of relation between output beam intensity and angular displacement

4 结论

本角位移传感器利用阿基米德螺线实现角位移与线位移的线性转化和敏感 F-P 腔对微腔长变化的敏感特性,基于光纤技术、敏感技术、微机械技术研制而成的可连续测量的高精度、高灵敏度的光纤角位移传感器. 在传感器中角位移与线性位移转化的阿基米德螺盘并没有线性位移的周期性“阶梯”跳跃,通过“凸轮”形式完成周期性的旋转,误差部分通过软件进行修正. 本传感器可适用于对角位移进行高精度大范围测量的特殊领域. 改进后的传感器测量量程为 360°,精度可达到 ± 8 s.

参考文献

- Barker M J, Colough M S. A two-dimensional capacitive position transducer with rotation output. *Rev Sci Instrum*, 1997, **68**(8): 3238~3240
- 耿振亚,张连骥,陈丽洁. 光栅在角位移传感器中的应用. *传感器技术*, 2001, **20**(5): 44~52
Geng Z Y, Zhang L Y, Chen L J. *Journal of Transducer Technology*, 2001, **20**(5): 44~52
- 常春,胡瑜,董彬. 光电旋转编码器的研究与应用. *仪表技术与传感器*, 2001, (12): 34~35
Chang C, Hu Y, Dong B. *Instrument Technology and Sensor*, 2001, (12): 34~35
- Chi Wu. Fiber optic angular displacement sensor. *Rev Sci Instrum*, 1995, **66**(6): 3672~3675
- 陈安健. 光纤角位移传感器的设计与应用. *传感器技术*, 2000, **19**(5): 19~21
Chen A J. *Journal of Transducer Technology*, 2000, **19**(5): 19~21
- 浦昭邦,陶卫,张球. 角度测量的光学方法. *光学技术*, 2002, **28**(2): 168~171

- Pu Z B, Tao W, Zhang Z. *Optical Technique*, 2002, **28** (2):168~171
- 7 章志鸣,沈元华,陈惠芬. 光学. 北京:高等教育出版社, 2000
- Zhang Z M, Shen Y H, Chen H F. *Optics*. Beijing: Higher Education Press, 2000
- 8 王勇,廖延彪,田芊. 波长扫描法布里-珀罗干涉仪的优化设计. *光学学报*, 1999, **19**(10):1361~1367
- Wang Y, Liao Y B, Tian Q. *Acta Optica Sinica*, 1999, **19** (10):1361~1367
- 9 毕卫红. 光纤 Fabry-Perot 干涉仪在传感应用中的数学模型. *光子学报*, 1999, **28**(8):744~747
- Bi W H. *Acta Photonica Sinica*, 1999, **28**(8):744~747

Principle and Design of Optical Fiber Angular Displacement Sensor Based on Sensitive Fabry-Perot Cavity

Lü Tao¹, Liu Desen¹, Liu Zhilin², Lang Xianli¹, Jiang Xiaoping¹, Zhu Shaoli¹

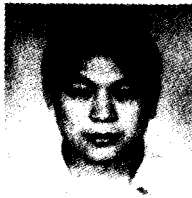
¹ Institute of Optoelectronics Technology, Southwest China Normal University, Chongqing 400715

² Guangzhou Mintong Optoelectronics Tech. co., LTD, Guangzhou 510150

Received date: 2004-06-10

Abstract A novel optical fiber angular displacement which can be used to measure micro angular displacement (second level) and all angle continuously is introduced. Basing on the principle of micro resonance cavity, especially on optical Fabry-Perot cavity, the linear relation between beam intensity and angular displacement with special beam has been researched. By using of optical fiber technology, sensing technology and micro mechanical technology, the sensor used in some special circumstance is produced for measuring angular displacement accurately.

Keywords Optical fiber sensor; Fabry-Perot cavity; Angular displacement



Lü Tao was born in November 1977, in Henan Province. He graduated from physics department of Henan Normal University in 1999 and is studying for master of science now. His interest is in optical fiber sensor and micro-optics.