

doi:10.3788/gzxb20164506.0606004

白光干涉型光纤加速度计的误差分析

王明超¹, 王学锋^{1,2}, 王钊^{1,2}, 唐才杰^{1,2}, 黄建业¹

(1 北京航天控制仪器研究所, 北京 100854)

(2 北京市光纤传感系统工程技术研究中心, 北京 100094)

摘 要:针对所研制的一种能够测量加速度直流信号的光纤加速度计,建立了影响该加速度计测量准确度的光学原理误差、交叉灵敏度误差以及温度引起的误差模型,并对该模型进行了仿真和实验分析.结果表明:随着信噪比增加以及光谱采样间隔减小,解调算法的测量误差水平降低,测量准确度可达到 $4.5 \times 10^{-5} \text{ g}$;在 1 倍重力加速度下交叉灵敏度误差为 1.8 mg;当环境温度 20℃ 时,温度每升高(降低) 1℃,会使标度因数增加(减小)0.79‰.

关键词: 光纤光学; 光纤加速度计; 白光干涉; 误差分析; 交叉灵敏度; 标度因数

中图分类号: U666.1; TN253

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2016)06-0606004-7

Error Analysis of a Fiber Optic Accelerometer Based on White Light Interference

WANG Ming-chao¹, WANG Xue-feng^{1,2}, WANG Zhao^{1,2}, TANG Cai-jie^{1,2}, HUANG Jian-ye¹

(1 Beijing Aerospace Control Device Institute, Beijing 100854, China)

(2 Research Center of Optical Fiber Sensing Systems and Engineering Technology of Beijing, Beijing 100094, China)

Abstract: The model of the optical principle error, the cross sensitivity error and the error induced by temperature were built. These errors have affected the measurement precision of a fiber optic accelerometer which can be used to measure the direct current signal of acceleration. With a purpose of obtaining the exact data, the simulation and experiment were conducted. Results show that, the measurement errors of interrogation algorithm decrease with the signal-to-noise ratio increasing and the spectrum sampling interval shortening, and the measurement accuracy is 4.5×10^{-5} ; under the effect of one time gravitational acceleration, the cross sensitivity error is 1.8 mg; the scale factor will increase (decrease) 0.79‰ when the temperature rises (drops) 1℃.

Key words: Fiber optics; Fiber optic accelerometer; White light interference; Error analysis; Cross sensitivity; Scale factor

OCIS Codes: 060.2370; 060.2310; 120.0280; 070.4790; 280.4788

0 引言

光纤加速度计主要基于光学检测原理,具有抗电磁干扰好、电绝缘性好、动态范围宽、准确度高、可在恶劣环境下使用等优点.光纤加速度计按工作原理可分为波长调制型、光强调制型和相位调制型.相位调制型光纤加速度计以光纤中光的相位变化来表征被测加速度,被测量的微小波动可引起光相位的明显变化^[1],其

在三类加速度计中具有最高的标度因数,可达 556 rad/g^[2].其信号解调方法多采用相位生成载波(Phase Generation Carrier, PGC)技术^[3],包括信号调制和解调两部分.调制手段主要有两种,一种是用压电陶瓷管(Piezoelectric Tube, PZT)实现相位载波调制,可以实现零光程差,有利于降低由光源频率随机漂移造成干涉仪输出的相位噪声,但这种方式使得相位调制的光纤加速度计结构复杂、尺寸增大,不利于实现全

基金项目:十二五预研项目(No. 617010207)资助

第一作者:王明超(1988-),男,硕士研究生,主要研究方向为新型惯性仪表及光纤传感技术. Email: Accmeter_go@163.com

导师(通讯作者):王学锋(1974-),男,研究员,博导,主要研究方向为光电技术. Email: xuefeng_wang@sina.cn

收稿日期:2015-12-02;录用日期:2016-03-04

<http://www.photon.ac.cn>

光纤化和多维应用^[4];另一种是直接调制光源,该方式虽然简化了加速度计的结构,但光源受到载波信号调制后输出光功率不稳定,且调制后对干涉信号的解调方法复杂,实现难度高^[5-6].且采用PGC技术光纤加速度计只可用于测量加速度的交流信号^[4-6],无法测量加速度的直流信号.

相比于PGC技术,白光干涉测量技术无需对信号进行调制,且解调方法更为简单,已被用于应变、位移、压力测量等领域^[7-9].白光干涉型光纤传感器结构简单,便于复用,在实现绝对测量的同时,具有动态测量范围大,不受光源功率波动影响等优点.在光谱域白光干涉测量技术中,一般利用Fabry-Perot(F-P)干涉仪产生干涉信号,再根据干涉信号光谱解调出F-P干涉腔腔长,每个腔长值代表一个被测量.有两种方法可以获得F-P干涉仪输出的白光干涉光谱,一种方法就是采用宽带光源输入F-P干涉仪,利用光谱分析仪测量输出光谱^[8];另一种方法就是采用波长扫描窄带光源输入F-P干涉仪,利用光电二极管探测输出光谱,经波长校准获得白光干涉光谱^[10].目前,已有多种方法用于从白光干涉光谱中解调出F-P干涉腔腔长,包括傅里叶变换法^[8]、主频法^[11]、峰峰值法^[12]、谱峰追踪测量法^[13]等.

文献[14]利用光谱域白光干涉测量技术和谱峰追踪算法,研制了一种能够测量加速度直流信号的光纤加速度计.本文针对所研制的加速度计,建立了影响该加速度计测量准确度的光学原理误差、交叉灵敏度误差以及温度引起的误差模型,并进行了理论仿真和实验.

1 光学测量原理

白光干涉型光纤加速度计利用F-P干涉仪敏感加速度的变化,干涉仪由光纤端面 and 反射镜组成.采用白光干涉测量技术获得干涉光谱,运用谱峰追踪测量法实现干涉腔长的解调,再根据标度因数,实现加速度的测量.

测量原理如图1,宽谱光源发出的光信号经过3 dB耦合器进入加速度计探头内的F-P干涉腔,光纤端面

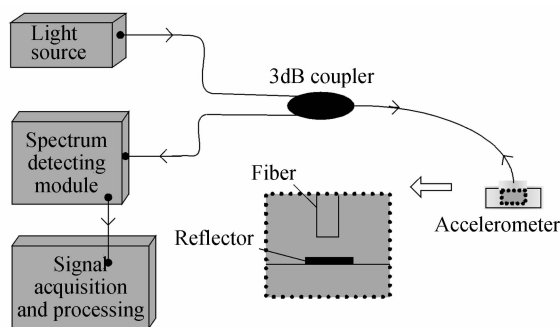


图1 F-P光纤加速度计原理

Fig. 1 Schematic of F-P fiber optic accelerometer

与反射镜面在后向传输光中发生双光束干涉;干涉信号经过耦合器进入光谱检测模块,当输入加速度变化时,会引起光纤端面与反射镜之间腔长的变化,干涉光谱谱峰级次就会发生变化,由体光栅在空间上将干涉信号展开,并由光电探测器阵列转化为电压信号,A/D转换器把模拟信号转换为数字信号,最后经过信号采集与处理电路运用谱峰追踪算法解调出腔长的绝对值,再除以标度因数算出加速度值.

当干涉信号的光程差与光源信号的波长满足

$$2nd = m\lambda_m \quad (m=0, \pm 1, \pm 2, \dots) \quad (1)$$

即光程差等于波长的整数倍时,干涉光谱有极大值点.式(1)中 n 为光纤端面与反射镜之间空气的折射率, d 为干涉腔腔长, λ_m 为光波长.

由式(1)可得

$$m = 2nd\lambda_m^{-1} \quad (m=0, \pm 1, \pm 2, \dots) \quad (2)$$

对干涉级次 m 和峰值波长 λ_m 的倒数进行线性拟合,令其斜率除以2,即可算出一个腔长的拟合值 nd' .

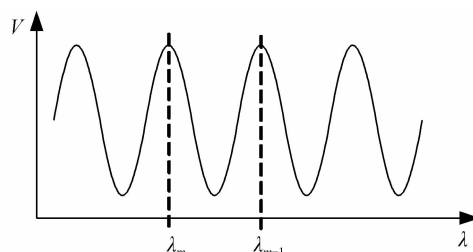


图2 干涉信号示意图

Fig. 2 Schematic of interference signal

图2为干涉信号的光谱示意图, V 表示不同波长的光强转化的电压值,干涉光谱中一个特定干涉级次 m 的谱峰对应的波长 λ_m ,和光学腔长 nd 之间的关系为

$$4\pi nd/\lambda_m + \varphi_0 = 2m\pi \quad (3)$$

式中 φ_0 为初相位,来自光反射时的相移和反射光耦合进光纤时产生的相位变化.

$$nd = \frac{(2m\pi - \varphi_0)\lambda_m}{4\pi} = \frac{k_m}{2}\lambda_m \quad (4)$$

$$k_m = \frac{(2m\pi - \varphi_0)}{2\pi} = m - \frac{\varphi_0}{2\pi} \quad (5)$$

对给定的干涉级次 m , k_m 为常量.

根据腔长拟合值 nd' ,计算出其中一个谱峰对应的常量 k_m 的粗略值 k'_m ,然后用事先标定的 k_m 代替 k'_m ,从而更加精确地计算出光学腔长.

$$k'_m = 2nd'/\lambda_m \quad (6)$$

对于干涉级次 m 一定的谱峰, k_m 是常量;干涉级次 m 增加(或减少)1时,干涉谱峰对应的常量 k_m 相应地增加(或减少)1.通过标定光纤加速度计获得干涉级次为 m_0 的谱峰波长对应的常量 k_{m_0} ;在测量过程中,由式(7)计算出精确的 k_m 值为

$$k_m = k_{m_0} + \text{Integer}(k'_m - k_{m_0}) \quad (7)$$

或

$$k_m = k_{m0} + \text{INT}(k'_m - k_{m0} + 0.5) \quad (8)$$

函数 $\text{Integer}(x)$ 表示取同 x 最接近的整数,函数 $\text{INT}(x)$ 表示取小于等于 x 的最大整数.

再将精确的 k_m 值带入式(4)即可获得 F-P 干涉仪的光学腔长的精确值 nd'' . 再由式(9)算出待测加速度值.

$$a = (nd'' - nd_0) / K_1 \quad (9)$$

式中 K_1 为光纤加速度计的标度因数 (nm/g), 表示单位输入加速度所引起的腔长变化, nd_0 是输入为零时的腔长值. 腔长的变化量除以标度因数即为输入加速度值. 白光干涉型的光纤加速度计可以测量腔长的静态绝对值, 所以可以测量加速度计的直流信号; 而基于 PGC 技术的加速度计只能测量动态值, 无法测量加速度的直流量.

2 误差分析

白光干涉型光纤加速度计输出误差主要包括: 光学测量原理引起的误差, 交叉灵敏度误差, 以及温度变化引起的误差. 其中光学测量原理误差大小直接影响了加速度计的分辨率, 交叉灵敏度误差值是限制多轴应用的主要参量, 温度变化则会影响到光纤加速度计的标度因数.

2.1 光学测量引起的误差

谱峰波长 λ_m 是根据采集到的余弦干涉信号峰值求出, 干涉信号可表示为

$$i = i_1 + i_2 + 2\sqrt{i_1 i_2} \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} 2nd\right) + n(t) \quad (10)$$

式中, i_1, i_2 分别为两干涉信号强度, $n(t)$ 为光纤加速度计测量过程中存在的噪声, 主要包括: 加速度计探头的机械结构噪声, 光源的强度和相位噪声, 以及信号解调电路引入的散粒噪声、电路热噪声和 $1/f$ 噪声. 噪声的强弱水平会直接影响到谱峰波长和腔长测量的准确度.

为了测试噪声水平对加速度计测量准确度的影响, 利用 LabVIEW 软件对插入一组随机白噪声的余弦干涉信号进行仿真, 取光学腔长 nd 为 6×10^3 nm, 波长 λ 范围为 1 525 nm 到 1 565 nm, 余弦信号峰值强度为 0.69, 光谱采样间隔为 1.7×10^{-2} nm. 取余弦干涉信号峰值强度与白噪声信号的标准偏差之比为信噪比, 通过改变噪声标准偏差得到了在不同信噪比下谱峰波长 λ_m , 每个信噪比下对 100 组相同级次谱峰波长求标准偏差, 所得结果如图 3.

实验测得光纤加速度计的信噪比为 300, 其中噪声水平是无干涉信号输入情况下, 连续 100 次采集光谱固定位置强度的标准偏差. 由图 3 可知, 谱峰波长测量的误差标准偏差随着信噪比的增加而减小且信噪比为 300 时, 误差值为 2.2×10^{-3} nm.

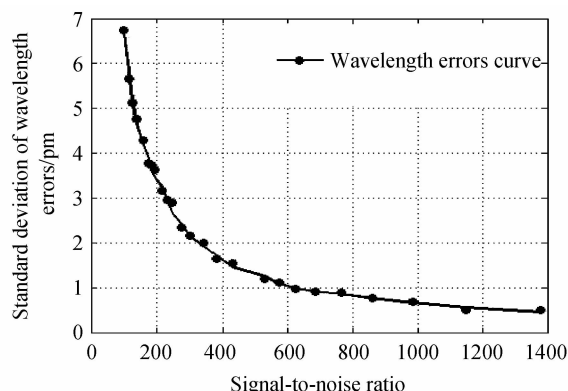


图 3 不同信噪比下波长误差的仿真结果
Fig. 3 Simulation results of wavelength errors under different signal-to-noise ratio

另外, 对于余弦型的干涉光谱, 为了有效地判别峰值点的位置, 需要在半峰值以上至少有 3 个光谱采样点, 加上半峰值点两个, 一个半峰全宽需要 5 个以上的光谱采样点, 且不同的光谱采样点数 (采样间隔) 也会影响到测量准确度. 光谱采样间隔越小, 干涉光谱半峰值以上的采样点数越多, 峰值点位置的判别越准确, 测量误差水平随之降低. 在信噪比为 300 的情况下, 改变光谱采样间隔, 每种采样间隔下对 100 组相同级次谱峰波长求标准偏差, 仿真结果如图 4.

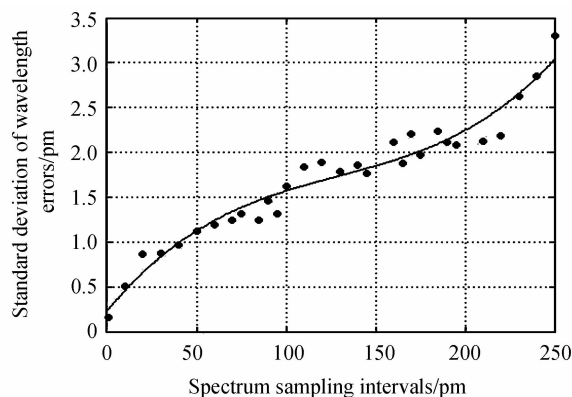


图 4 不同光谱采样间隔下波长误差的仿真结果
Fig. 4 Simulation results of wavelength errors under different spectrum sampling intervals

如图 4, 随着光谱采样间隔的增加, 峰值波长误差整体水平增加较为明显, 实验中所用光谱检测模块的采样间隔为 0.17 nm, 误差值为 2.2×10^{-3} nm, 当采样间隔减小到 0.05 nm 时可将误差水平降低到 1.1×10^{-3} nm, 光学原理引入的测量误差也同时减小一半.

由式(3)可得光学腔长的相对测量误差可以表示为^[13]

$$\left| \frac{\Delta nd}{nd} \right| \cong \left| \frac{\Delta \lambda_m}{\lambda_m} \right| \quad (11)$$

式中, Δnd 是光学腔长的测量误差, $\Delta \lambda_m$ 为谱峰波长 λ_m 的测量误差. 光学腔长的相对测量准确度取决于谱峰波长 λ_m 的测量准确度.

文中光纤加速度计的光学腔长 nd 约为 6×10^5 nm, 波长为 1 526 nm 时, 谱峰波长的测量误差 $\Delta\lambda_m$ 为 2.2×10^{-3} nm, 由式(11)可得腔长测量误差 Δnd 为 0.87 nm.

由式(9)可得加速度测量误差为

$$\Delta a = \Delta nd / K_1 \quad (12)$$

光纤加速度计的标度因数 K_1 为 17 665.9 nm/g, 腔长误差除以标度因数可得光学测量原理引入的加速度测量误差为 4.9×10^{-5} g.

为了测试光学测量原理误差, 将两个平头光纤端面通过法兰连接在一起组成 F-P 干涉腔, 将此干涉腔作为加速度计进行测量, 避免引入交叉灵敏度误差, 此时干涉腔长始终保持不变, 等效为无加速度输入, 腔长的波动即为光学原理引入的误差, 连续采集 10 min 加速度计输出值, 采样频率 18 Hz, 所得数据如图 5.

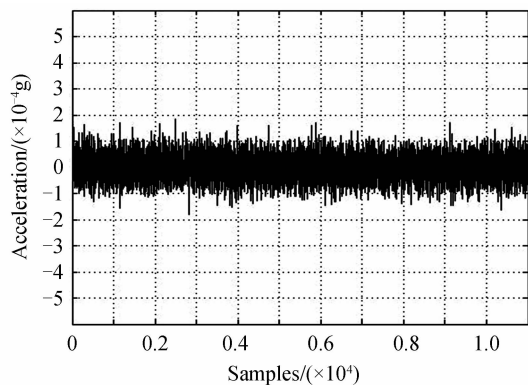


图 5 光学原理误差测试数据

Fig. 5 Data of optical principle errors

据统计, 输出加速度的标准差为 4.5×10^{-5} g, 与仿真结果相符合.

2.2 交叉灵敏度误差

如图 6, 白光干涉型光纤加速度计探头中的 F-P 干涉仪由光纤端面和反射镜组成, 反射镜固定在一个表面刻有镂空结构的弹性膜片上, 由中间有圆形通孔的压板固定. 如图 7, 加速度引起的腔长变化主要是膜片的形变引起的.

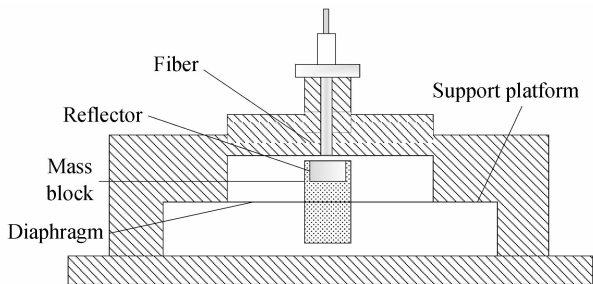


图 6 加速度计截面

Fig. 6 Section figure of accelerometer

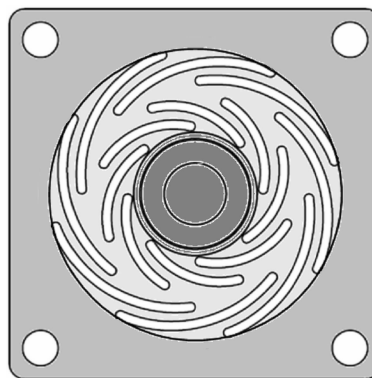


图 7 安装压板的弹性膜片

Fig. 7 Elastic diaphragm with plate

理想情况下, 弹性膜片与水平轴夹角为零, 在垂直于输入轴方向的加速度不会引起加速度计的输出, 即交叉灵敏度为零, 如图 8(a); 但在实际研制中, 由于弹性膜片的加工与安装存在一定误差, 会导致膜片的倾斜, 使得交叉轴方向的输入量也会引起加速度计的输出, 造成了交叉灵敏度误差. 如图 8(b), 在竖直方向上输入加速度为 a_m , 膜片与竖直方向夹角为 θ , 与膜片垂直方向的分量为 $a_{m1} = a_m \sin \theta$, a_{m1} 即为交叉灵敏误差值; 将其按顺时针方向转过 180° 便可得到图 8(c) 状态, 此时 $a_{m2} = a_m \sin \theta$, 但输入轴方向改变了 180° , a_{m1} 会使干涉腔长减小 Δnd_1 , a_{m2} 会使干涉腔长增大 $\Delta nd_2 = \Delta nd_1$, 测得加速度值产生相同变化量.

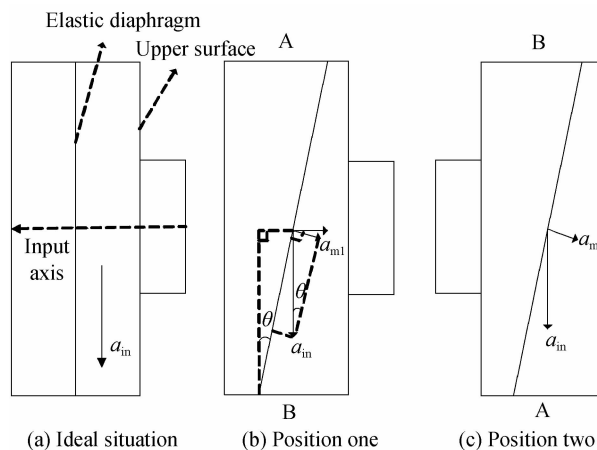


图 8 加速度计交叉灵敏度

Fig. 8 Schematic of accelerometer cross sensitivity

为了测试光纤加速度计的交叉灵敏度误差, 使用广州五所环境仪器有限公司制造的加速度计自动测试系统(带温控分度头)进行零位输出测试. 将温度设定为 20° , 按图 8(b) 状态将加速度计安装到分度头上, 连续测量 1h 输出取平均, 测得腔长 nd_1 ($nd_0 - \Delta nd_1$) 为 549 977.1 nm, 顺时针旋转 180° 测得腔长 nd_2 ($nd_0 + \Delta nd_1$) 为 550 040.2 nm, 实验中输入加速度为 1 倍重力加速度, 所以当 $a_m = g$ 时, 引起的交叉灵敏度误差为

$$\frac{nd_2 - nd_1}{2K_1} = 1.8 \times 10^{-3} g \quad (13)$$

输入加速度 a_m 引起的交叉灵敏度误差为

$$\varepsilon = 0.0018 a_m \quad (14)$$

如图 6,弹性膜片四周安装在一个支撑平台上,实验中所用结构采用普通机械加工手段,加工准确度 $\pm 25 \mu\text{m}$,加工误差引起的膜片单边最大倾斜高度为 $50 \mu\text{m}$,膜片的直径为 20 mm , $\tan\theta = 50 \mu\text{m}/20 \text{ mm} = 0.0025$,此时夹角 $\theta = 0.14^\circ$, $a_m = g$ 时, $a_{m1} = 2.4 \times 10^{-3} g$,即交叉灵敏度误差为 2.4 mg ,与实验结果基本一致。

通过使用精密加工手段可将加工准确度控制在 $\pm 2 \mu\text{m}$,夹角 θ 控制在 0.0114° 内,1 倍重力加速度下,交叉灵敏误差误差不超过 0.2 mg 。

2.3 温度引起的误差

如图 9,弹性膜片结构近似为 E 形膜片结构,作用于 E 形圆膜片中心处的轴向集中力 F 与膜片最大法向位移的关系为^[15]

$$W_{\max} = \frac{3F(1-\mu^2)R_2^2}{4\pi EH^3} [1-\gamma^2 + 2B \ln\gamma] \quad (15)$$

$$B = \frac{-2\gamma^2 \ln\gamma}{1-\gamma^2} \quad (16)$$

$$\gamma = \frac{R_1}{R_2} \quad (17)$$

式中 E , μ 分别为材料的弹性模量、泊松比; H 为圆平膜片的厚度; R_1 和 R_2 分别为中心质量块与弹性膜片的半径。

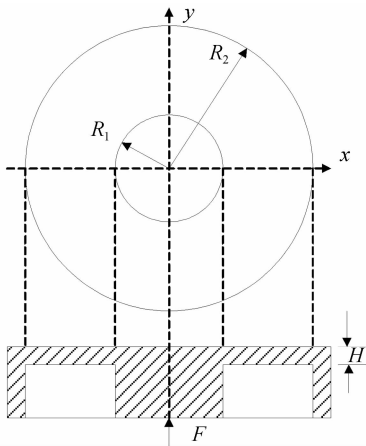


图 9 E 形膜片结构示意图

Fig. 9 Schematic of E shape elastic diaphragm

当输入加速度为 a 时, $F = ma$, m 为质量块的质量, a 为待测加速度值,由于膜片表面加工有弧形镂空结构,会对膜片的刚度产生影响,从而影响加速度计的标度因数。所以引入一个结构因子 Q ,它与镂空结构的形状、分布有关。

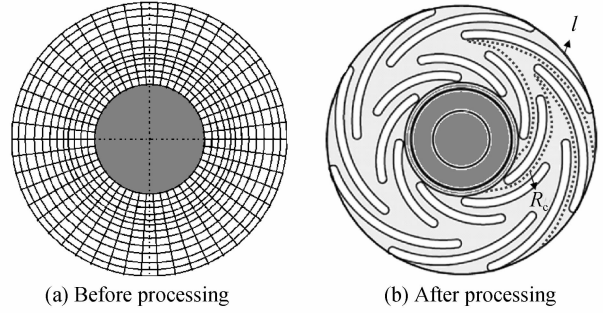


图 10 膜片悬臂梁等效模型示意图

Fig. 10 Schematic of elastic diaphragm cantilever model

如图 10(a)无镂空的 E 形膜片可等效为无限多悬臂梁支撑结构,镂空后的膜片可等效为 8 根曲线悬臂梁支撑结构如图 10(b),而梁的挠度一般与其长度的三次方成正比^[16]。参考悬臂梁结构特点, Q 可近似表达为

$$Q = (1+\mu) \frac{R_c^3}{R_s^3} \left(\frac{8l}{L}\right)^{-1} \quad (18)$$

式中, R_c 为曲悬臂梁长度, l 为每个曲悬臂梁与边界连接的弧长; R_s , L 分别为无镂空膜片悬臂梁长度和周长。 $(1+\mu)$ 表示悬臂间约束条件对膜片应力状态的影响, $(8l/L)^{-1}$ 表示膜片周边固支边界条件改变对标度因数的影响。

所以光纤加速度计的标度因数可表示为

$$K_1 = \frac{W_{\max}}{a} = \frac{3Qm(1-\mu^2)R_2^2}{4\pi EH^3} [1-\gamma^2 + 2B \ln\gamma] \quad (19)$$

本文中质量块和弹性膜片均选用同种不锈钢材料, E 取为 193 GPa , $\mu = 0.31$,质量块重约 2 g , $R_1 = 4 \text{ mm}$, $R_2 = 10 \text{ mm}$, H 取为 0.1 mm 。根据弹性膜片实际尺寸可估算出 (R_c/R_s) 约为 5 , $(8l/L)$ 约为 $1/2$,计算可得 $K_1 = 15818 \text{ nm/g}$,与常温下光纤加速度计的标度因数 17665 nm/g 基本一致。

式(19)中 m , μ 不随温度变化,令 γ 对温度 T 求微分,可得

$$\frac{d\gamma}{dT} = \frac{R_1}{R_2} \left(\frac{1}{R_1} \frac{dR_1}{dT} - \frac{1}{R_2} \frac{dR_2}{dT} \right) \quad (20)$$

由于质量块和弹性膜片均采用同种材料,其热膨胀系数 α 相同,所以

$$\begin{cases} \frac{1}{R_1} \frac{dR_1}{dT} = \frac{1}{R_2} \frac{dR_2}{dT} = \alpha \\ \frac{d\gamma}{dT} = 0 \end{cases} \quad (21)$$

γ , B 不随温度变化。同理 (R_c/R_s) , $(R_2/H)^2$ 也不随温度变化,边界条件关系 $(8l/L)$ 也不变,所以 Q 不随温度变化,式(19)中只有 E 和 H 受温度影响,分别令 E 和 H 对温度求微分可得^[17]

$$\frac{dE}{dT} = \eta E = -m\alpha E \quad (22)$$

$$\frac{dH}{dT} = H\alpha \quad (23)$$

式中, η 是杨氏模量的温度系数, m 为常量. 工程中常用钢、奥氏体钢、铁镍合金、铁、铝和铜合金等的 m (平均值) 为 24.66, 标准差为 0.76^[17].

文中所用不锈钢的杨氏模量 E 在常温下为 193 GPa, $H=0.1$ mm, $\alpha=17.3 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$, 杨氏模量 E 每度减小 83.5 MPa, 引起标度因数 K_1 增加 0.43%; 厚度 H 每度增加 1.73 nm, 引起标度因数减小了 0.017%, 所以 H 随温度的变化量相对于 E 可以忽略.

所以式(19)可简化为

$$K_1 = Y/E \quad (24)$$

式中

$$Y = \frac{3Qm(1-\mu^2)R_2^2}{4\pi H^3} [1-\gamma^2 + 2B\ln\gamma] \quad (25)$$

且 Y 不随温度变化.

总之, 标度因数随温度的变化主要是杨氏模量随温度变化引起的. 根据固体物理微观理论, 当温度升高时, 材料内部原子的热运动加剧, 结合力减弱, 从而导致材料的弹性模量随温度的升高而降低^[15]. 由式(24)可得标度因数随温度的升高应呈上升趋势.

为了测试温度变化对白光干涉型光纤加速度计标度因数的影响, 使用广州五所环境仪器有限公司制造的加速度计自动测试系统进行温度特性测试. 具体测试步骤如下: 将加速度计安装于温控转台上, 通过温控箱将温度分别控制在 -40 、 -20 、 0 、 $+20$ 、 $+40$ 、 $+60$ 共六个温度点上, 在环境达到各预期温度值并保温 1 h 后, 分别使加速度计输入 $\pm 1g$, 测量加速度计输出 E_{1g} 与 E_{-1g} . 利用式(26)分别计算加速度计在各温度点下的标度因数^[18]为

$$K_1 = \frac{E_{1g} - E_{-1g}}{2} \quad (26)$$

共进行三次相同测试, 取其平均 (每个温度点测得标度因数误差不超过 1%), 所得数据如图 11.

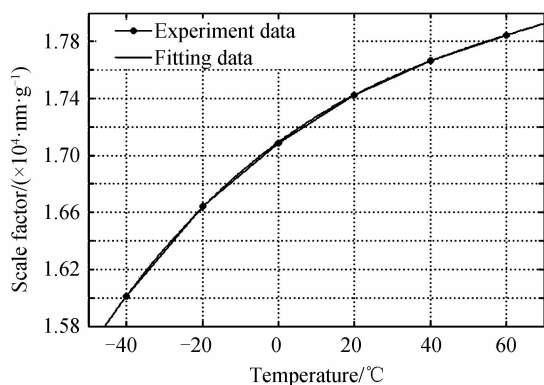


图 11 标度因数随温度变化曲线

Fig. 11 Scale factor curve with temperature changing

从图中可以看出标度因数随着温度的升高而升高, 与理论推导结论相一致. 将测得数据进行三次拟合可得标度因数与温度的关系为

$$K_1 = p_1 T^3 + p_2 T^2 + p_3 T + p_4 \quad (27)$$

式中, $p_1 = 0.00075122$, $p_2 = -0.15991$, $p_3 = 19.419$, $p_4 = 17092$. 可得

$$\frac{dK_1}{dT} = 3p_1 T^2 + 2p_2 T + p_3 \quad (28)$$

在测试温度 20°C 时, 温度每升高 (降低) 1°C 会使标度因数增加 (减小) 13.92 nm/g, 相对变化了 0.79%. 标度因数增加 13.92 nm/g, 会使交叉灵敏度误差降低 0.78%, 光学测量原理误差降低 0.79%. 可见白光干涉型光纤加速度计在常温环境下由温度引起的误差较小.

3 结论

针对所研制的一种能够测量加速度直流信号的光纤加速度计, 介绍了其具体的解调算法, 建立了影响该加速度计测量准确度的光学原理误差、交叉灵敏度误差以及温度引起的误差模型. 结果表明白光干涉型光纤加速度计的测量准确度可达 $4.5 \times 10^{-5} g$, 通过提高干涉光谱信噪比或减小光谱采样间隔可以减小误差; 实验测得在 1 倍重力加速度环境下, 交叉灵敏度误差为 18 mg, 通过高准确度加工手段可以减小到 0.2 mg; 通过温度实验数据拟合出标度因数与温度的关系式, 计算结果表明在测试温度 20°C 时, 温度每升高 (降低) 1°C 会使标度因数增加 (降低) 0.79%. 本文为提高惯性仪表用光纤加速度计的性能提供了重要参考, 对于光学测量原理的改进方法与光纤加速度的降噪技术有待进行更深入地研究.

参考文献

- [1] 廖延彪, 黎敏, 张敏, 等. 光纤传感技术与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2009: 144.
- [2] YANG Chang, ZHOU Hong-pu, ZHANG Min, et al. A new fiber-optic flexible reed accelerometer [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2013, **24**(2): 210-214.
杨昌, 周宏朴, 张敏, 等. 新型簧片式光纤加速度传感器研究[J]. *光电子·激光*, 2013, **24**(2): 210-214.
- [3] ZHANG Yi, JIA Bo, XU Hai-yan, et al. Synchronous carrier extracting method based demodulation scheme for fiber optic sensor using phase generated carrier [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(10): 1532.
张毅, 贾波, 许海燕, 等. 基于同步载波提取的光纤传感器相位生成载波解调方法[J]. *光子学报*, 2011, **40**(10): 1532.
- [4] LIN Qiao, CHEN Liu-hua, LI Shu, et al. Fiber optic accelerometer based on fiber-mirror interference cavity [J]. *Optics Precision Engineering*, 2011, **19**(6): 1180-1184.
林巧, 陈柳华, 李书, 等. 基于光纤-镜面干涉腔的光纤加速度计[J]. *光学精密工程*, 2011, **19**(6): 1180-1184.
- [5] WANG Dai-hua, JIA Ping-gang. Fiber optic extrinsic Fabry-Perot accelerometer using laser emission frequency modulated phase generated carrier demodulation scheme [J]. *Optical Engineering*, 2013, **52**(5): 0550040.

- [6] WANG Zhao-gang, ZHANG Wen-tao, HAN Jing, *et al.* Diaphragm-based fiber optic Fabry-Perot accelerometer with high consistency [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2014, **32**(24): 4810-4815.
- [7] YUAN Li-bo, DONG Yong-tao. Loop topology based white light interferometric fiber optic sensor network for application of perimeter security[J]. *Photonic Sensors*, 2011, **1**(3): 260-267.
- [8] WANG Zhen, JIANG Yi, DING Wen-hui, *et al.* A white-light interferometry for the measurement of high-finesse fiber optic EFPI sensors[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2014, **26**(21): 2138-2141.
- [9] TOTSU K, HAGA Y, ESASHI M. Ultra-miniature fiber-optic pressure sensor using white light interferometry[J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2005, **15**(1): 71-75.
- [10] HAN Ming, ZHANG Yan, SHEN Fa-bin, *et al.* Signal processing algorithm for white-light optical fiber extrinsic Fabry - Perot interferometric sensors[J]. *Optics Letters*, 2004, **29**(15): 1736-1738.
- [11] LIU T, Fernando G F. A frequency division multiplexed low finesse fiber optic Fabry-Perot sensor system for strain and displacement measurements [J] *Review Scientific of Instruments*, 2000, **71**(3): 1275-1278.
- [12] HUANG Ying, WEI Tao, ZHOU Zhi, *et al.* An extrinsic Fabry-Perot interferometer-based large strain sensor with high resolution [J]. *Measurement Science Technology*, 2010, **21**(10): 105308.
- [13] QI Bing, PICKRELL G R, XU Jun-cheng, *et al.* Novel data processing techniques for dispersive white light interferometer [J]. *Optical Engineering*, 2003, **42**(11): 3165.
- [14] WANG Xue-feng, WANG Ming-chao, TANG Cai-jie, *et al.* Fiber optic accelerometer based on external-cavity Fabry-Perot interferometer [J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2015, **23**(6): 801-804.
王学锋, 王明超, 唐才杰, 等. 一种基于外腔式法布里-珀罗干涉仪的光纤加速度计[J]. *中国惯性技术学报*, 2015, **23**(6): 801-804.
- [15] 樊尚春. 传感器技术及应用[M]. 2版. 北京:北京航空航天大学出版社, 2010:79-94.
- [16] 单祖辉. 材料力学(I) [M]. 2版. 北京:高等教育出版社, 2004: 351.
- [17] LIU Tong, LIU Min-shan. Theoretical analysis of the relationship between elastic constant of metals and temperatures [J]. *Material for Mechanical Engineering*, 2014, **38**(3): 85-89.
刘彤, 刘敏珊. 金属材料弹性常量与温度关系的理论解析 [J]. *机械工程材料*, 2014, **38**(3): 85-89.
- [18] GJB1037A-2004. 单轴摆式伺服线加速度计试验方法[S]. 北京: 国防科技技术委员会, 2004: 7-9.