

冲击对萨奈克光纤干涉仪性能的影响

王晓章, 蒋军彪, 李毅, 李睿, 张辉, 李晓, 龙鹏翼, 唐峰

西安现代控制技术研究所, 陕西 西安 710065

摘要 基于胡克定律和弹光效应,建立了冲击机械应力作用下萨奈克光纤环非互易性相位误差产生的数学模型,讨论了黏结剂的杨氏模量对萨奈克光纤环的影响,通过仿真和实验验证了光纤黏结剂杨氏模量的大小对萨奈克光纤干涉仪误差的影响。结果表明黏结剂杨氏模量越大,系统性能越稳定。

关键词 光纤光学; 萨奈克效应; 干涉仪; 弹光效应; 冲击

中图分类号 O436 **文献标识码** A

doi: 10.3788/CJL201744.0706003

Effect of Shock on Sagnac Fiber Interferometer Performance

Wang Xiaozhang, Jiang Junbiao, Li Yi, Li Rui, Zhang Hui,

Li Xiao, Long Pengyi, Tang Feng

Xi'an Modern Control Technology Research Institute, Xi'an, Shaanxi 710065, China

Abstract The mathematical model of the nonreciprocity phase error generation of Sagnac fiber coil under the shock mechanical stress is established based on Hooke's law and the elastic-optic effect theory. The influence of Young's modulus of adhesive on the Sagnac fiber coil is discussed. The influence of Young's modulus of the fiber adhesive on the Sagnac fiber interferometer error is verified by simulation and experiment. The results show that the higher the Young's modulus of the adhesive is, the more stable the system is.

Key words fiber optics; Sagnac effect; interferometer; elasto-optical effect; shock

OCIS codes 060.2310; 120.5790; 060.2370; 060.4370

1 引言

萨奈克光纤干涉仪是基于萨奈克效应发展起来的一种光纤传感器,具有良好的互易性,可用来测量光纤中的非互易现象,而且具有体积小、质量轻、结构灵活和抗干扰能力强等特点。为了提高灵敏度,光纤干涉仪多采用长光纤绕制成的多匝光纤环,如用于测量角速度的光纤陀螺^[1]、测量敏感振动的光纤水听器^[2]和测量电流强度的光纤互感器^[3]等。在传感器的使用过程中,力学环境的影响是不可避免的。萨奈克光纤干涉仪受力学环境的影响,光纤受力时产生的弹光效应使传播中的光相位发生变化,进而影响测量精度。为保证光纤环在力学环境中的可靠性,通常通过涂黏结剂加以固定,黏结剂的力学性能成为萨奈克光纤干涉仪应用于工程中时需关注的关键问题之一,因此研究黏结剂与光纤环的力学特性对提高光纤干涉仪性能具有重要意义。近年来,在光纤环振动性能方面的研究已取得一定成果^[4-6],而关于冲击性能的研究较少。本文基于胡克定律和弹光效应建立了光纤环在冲击机械应力作用下非互易性相位误差产生的数学模型,模型中考虑了黏结剂的材料特性,并通过仿真和实验验证了该模型的正确性。

2 理论分析

2.1 弹光效应

国军标中对电子产品环境可靠性的考核方面,冲击实验是关键的力学实验之一,其通常采用如矩形、半

收稿日期: 2017-02-07; 收到修改稿日期: 2017-03-22

作者简介: 王晓章(1982—),男,博士,高级工程师,主要从事光纤传感方面的研究。E-mail: xiaozhang_wang@aliyun.com

正弦和后峰锯齿等波形,以模拟不同的应用环境。以半正弦脉冲为例,波形函数可表示为^[7]

$$F(t) = \begin{cases} F_0 \sin\left(\frac{\pi}{\tau}t\right), & 0 \leq t \leq \tau, \\ 0, & t > \tau \end{cases}, \quad (1)$$

式中 F_0 为冲击波形幅度, τ 为脉冲持续时间, t 为时间。光纤干涉仪的敏感核心是光纤环,若在机械应力的作用下改变光纤环内部压力,会影响干涉仪测量精度,因此,为了确保光纤线圈具有良好的紧固性,绕制光纤环时需要通过涂黏结剂来对光纤加以固定。目前多采用紫外环氧胶固化光纤,固化后光纤环中每匝光纤牢固地黏结在一起,提高了光纤环的抗振特性。固化后的黏结剂是一种橡胶,其杨氏模量与光纤的杨氏模量相比差异较大,因此当外部机械应力通过粘接剂传递给光纤时,两者之间的相互作用可视为黏性小阻尼系统^[7]。黏结剂可视为各向同性介质,应力通过黏结剂传递给光纤,根据胡克定律,黏结剂的刚性传递矩阵可表示为

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} 1 & -\mu_g/E_g & -\mu_g/E_g \\ -\mu_g/E_g & 1 & -\mu_g/E_g \\ -\mu_g/E_g & -\mu_g/E_g & 1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中 E_g 为黏结剂的杨氏模量, μ_g 为黏结剂的泊松比。根据黏性小阻尼系统理论,机械应力通过黏结剂传递给光纤,力传递关系可表示为

$$\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{KHF}, \quad (3)$$

式中 \mathbf{F} 为外部机械应力; $\boldsymbol{\sigma}$ 为光纤所受到的应力; $\mathbf{K} = \exp(-\alpha t) \cos(\omega_d t + \varphi)$, 其中 α 为与阻尼相关的衰减系数, ω_d 为黏结剂的固有频率, φ 为与阻尼相关的相位。

根据弹光效应,光纤环中的光纤受到应力作用后会产生形变,进而导致折射率发生变化。通常认为传感光纤为各向同性介质,形变分量与应力分量的关系服从广义胡克定律。忽略光纤环在冲击过程中的剪切应力,仅考虑正应力的影响。

光纤中某一段微元的应力坐标如图 1 所示,光纤所受应力与应变之间的关系可表示为^[8]

$$\begin{bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \epsilon_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/E_f & -\mu_f/E_f & -\mu_f/E_f \\ -\mu_f/E_f & 1/E_f & -\mu_f/E_f \\ -\mu_f/E_f & -\mu_f/E_f & 1/E_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \end{bmatrix}, \quad (4)$$

式中 $\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z$ 为 3 个正交方向的线应变变量, $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ 为 3 个正交方向的正应力, E_f 为光纤的弹性模量, μ_f 为光纤的泊松比。

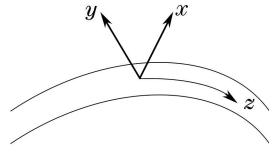


图 1 光纤应力坐标示意图

Fig. 1 Coordinate diagram of optical fiber stress

根据弹光效应,机械应力引起的应变会使光纤折射率 n 发生变化,可表示为^[8]

$$\begin{bmatrix} \Delta n_x \\ \Delta n_y \\ \Delta n_z \end{bmatrix} = -\frac{n^3}{2} \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{12} \\ p_{12} & p_{11} & p_{12} \\ p_{12} & p_{12} & p_{11} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \epsilon_z \end{bmatrix}, \quad (5)$$

式中 $\Delta n_x, \Delta n_y, \Delta n_z$ 为光纤折射率在 x, y, z 方向的变化量, p_{ij} 为光纤材料弹光系数 ($i, j = 1, 2$)。假设 $\mathbf{F} = [F_x, F_y, F_z]$, 则由(2)~(5)式可计算得到光纤因应力引起的折射率变化量为

$$\Delta n_x = \frac{-kn^3}{2E_f E_g} \{ p_{11} [(1 + 2\mu_f \mu_g) F_x + (\mu_f \mu_g - \mu_g - \mu_f)(F_y + F_z)] + p_{12} [(1 + 2\mu_f \mu_g)(F_y + F_z) + (\mu_f \mu_g - \mu_g - \mu_f)(2F_x + F_y + F_z)] \}, \quad (6)$$

$$\Delta n_y = \frac{-kn^3}{2E_f E_g} \{ p_{11} [(1 + 2\mu_i \mu_g) F_y + (\mu_i \mu_g - \mu_g - \mu_f)(F_x + F_z)] + p_{12} [(1 + 2\mu_i \mu_g)(F_x + F_z) + (\mu_i \mu_g - \mu_g - \mu_f)(2F_y + F_x + F_z)] \}, \quad (7)$$

$$\Delta n_z = \frac{-kn^3}{2E_f E_g} \{ p_{11} [(1 + 2\mu_i \mu_g) F_z + (\mu_i \mu_g - \mu_g - \mu_f)(F_y + F_x)] + p_{12} [(1 + 2\mu_i \mu_g)(F_y + F_x) + (\mu_i \mu_g - \mu_g - \mu_f)(2F_z + F_y + F_x)] \}, \quad (8)$$

式中 k 为波矢。

2.2 相位误差

波长为 λ 的光束经过长度为 L 、折射率为 n 的光纤后,产生的相移 $\varphi = (2\pi/\lambda)nL$ 。在力学环境中,通常认为波长为恒定值,光纤的折射率和长度受外力作用而发生变化^[9-11]。假设光纤 x 轴为慢轴,在外应力作用下,长度为 Δl 的光纤微元长度的变化量为 ΔL ,折射率变化量为 Δn ,则受外力而产生的相位差可表示为

$$\Delta\varphi = \left(\frac{2\pi}{\lambda}n\right)\Delta L + \left(\frac{2\pi}{\lambda}\Delta l\right)\Delta n_x, \quad (9)$$

其中

$$\Delta L = \frac{k}{E_f E_g} [(1 + 2\mu_i \mu_g) F_z + (\mu_i \mu_g - \mu_g - \mu_f)(F_x + F_y)]. \quad (10)$$

将(6)、(10)式代入(9)式中,可得到改进后的相位误差为

$$\begin{aligned} \Delta\varphi = & \frac{2\pi kn}{\lambda E_f E_g} [(1 + 2\mu_i \mu_g) F_z + (\mu_i \mu_g - \mu_g - \mu_f)(F_x + F_y)] + \\ & \frac{\pi kn^3 \Delta l}{\lambda E_f E_g} \{ p_{11} [(1 + 2\mu_i \mu_g) F_z + (\mu_i \mu_g - \mu_g - \mu_f)(F_y + F_x)] + \\ & p_{12} [(1 + 2\mu_i \mu_g)(F_y + F_x) + (\mu_i \mu_g - \mu_g - \mu_f)(2F_z + F_y + F_x)] \}. \end{aligned} \quad (11)$$

外部机械冲击方向一般为光纤环的轴向以及与其平行的两个垂直的方向,以下仅以轴向冲击为例,该情况下光纤环所受到的应力仅为横向应力,即 $F_z = 0$ 。

3 仿真计算

3.1 冲击过程仿真

仿真计算中,机械冲击波形函数选用典型的半正弦脉冲,干涉仪工作波长为 1550 nm,光纤长度为1000 m,光纤环直径为 120 mm,光纤的杨氏模量为 7×10^{10} Pa,光纤材料的泊松比为 0.17。黏结剂的杨氏模量为 100 MPa,泊松比为 0.49^[8]。分析机械冲击或爆炸冲击对萨奈克光纤干涉仪的影响,假设冲击波形为半正弦波,脉冲时间为 11 ms,冲击力为 60 g,在 $t=0$ 时刻冲击开始,机械冲击作用下相位误差的仿真结果如图 2 所示。由图 2 可见,输入冲击波形的持续时间越长,相位误差到达峰值的时间越短,这是由于在模型建立过程中可将黏结剂看作黏性小阻尼系统。图 2 的局部放大图如图 3 所示,由图 3 可以看出,光纤环受到冲击后,在黏结剂的作用下,输出误差存在小幅振荡并逐渐衰减,振荡持续时间与光纤黏结剂的能量衰减系数有关。

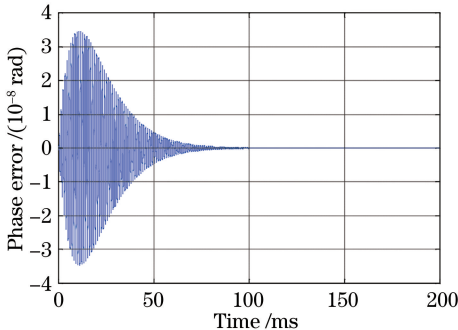


图 2 机械冲击作用下相位误差的仿真结果

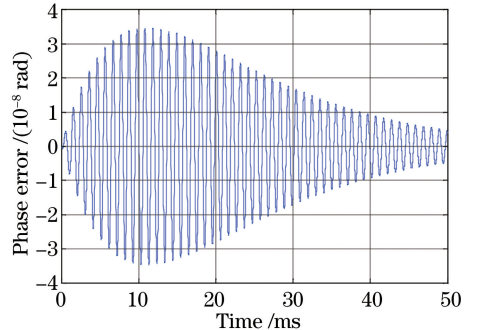


图 3 图 2 的局部放大结果

Fig. 2 Simulation results of phase error under mechanical shock

Fig. 3 Local amplification result of Fig. 2

为分析冲击过程对光纤萨奈克干涉仪测量相位误差的影响,对冲击量级和冲击持续时间分别进行分析。首先,假设冲击量级分别为 60,150,300 g,冲击持续时间均为 11 ms,得到不同冲击量级对应的相位误差如图 4 所示。由图 4 可以看出,冲击量级越大,相位误差越大,而振荡持续时间的变化不明显。

对冲击过程的持续时间进行分析,假设冲击量级均为 60 g,持续时间分别为 3,7,11 ms,得到不同冲击持续时间对应的相位误差如图 5 所示。由图 5 可以看出,冲击过程持续时间与干涉仪输出振荡持续时间呈正相关,且持续时间越短相位误差越大。

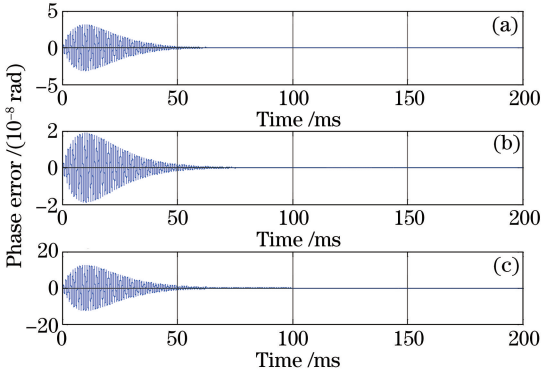


图 4 不同冲击量级对应的相位误差。
(a) 60 g; (b) 150 g; (c) 300 g

Fig. 4 Phase errors under different shock magnitudes.

(a) 60 g; (b) 150 g; (c) 300 g

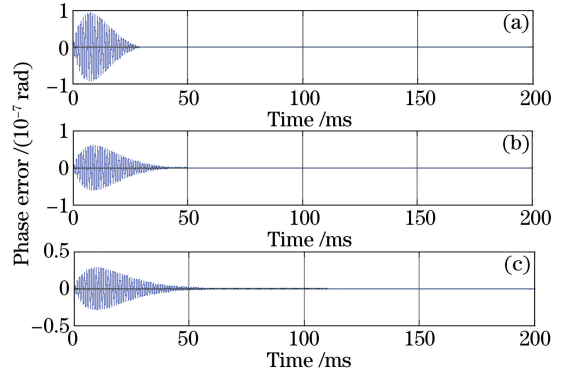


图 5 不同冲击持续时间对应的相位误差。
(a) 3 ms; (b) 7 ms; (c) 11 ms

Fig. 5 Phase errors under different shock durations.

(a) 3 ms; (b) 7 ms; (c) 11 ms

分别对冲击量级和冲击持续时间进行仿真计算,仿真结果表明冲击量级对相位误差的影响较大,对冲击后稳定时间的影响较小;冲击过程持续时间与冲击后稳定时间成反比,同时对引起的相位误差的影响较大,主要表现为相同冲击量级下冲击时间越短,引起的相位误差越大。出现上述现象的原因是相同量级的冲击下,时间越短,单位时间内对光纤环冲击的能量越大,则相位误差越大,这一仿真结果与大量工程实验的结果一致。

3.2 黏结剂杨氏模量对性能的影响

计算中,首先假设外界机械应力输入为恒定值。图 6 为黏结剂的杨氏模量对相位误差的影响。由图 6 可见,黏结剂的杨氏模量在 1~100 MPa 之间,随着取值的增大,光纤干涉仪测量相位误差迅速减小。

若将萨奈克光纤干涉仪用于测量角速率,则输出的角速率误差为

$$\Delta\Omega = \frac{\lambda c}{2\pi LD} \Delta\varphi, \quad (12)$$

式中 λ 为工作波长, c 为光速, L 为光纤长度, D 为光纤环直径, $\Delta\varphi$ 为(11)式计算得到的相位误差。图 7 为黏结剂的杨氏模量对角速率误差的影响,由图 7 可见,在恒定外力的作用下,角速率的输出误差随着黏结剂

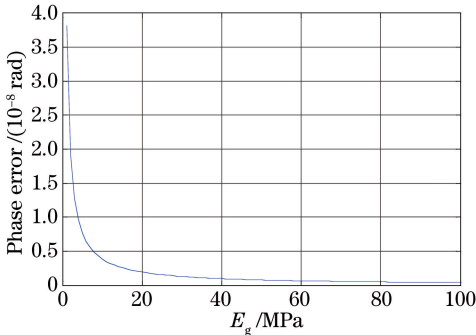


图 6 黏结剂的杨氏模量对相位误差的影响

Fig. 6 Influence of Young's modulus of adhesive on phase error

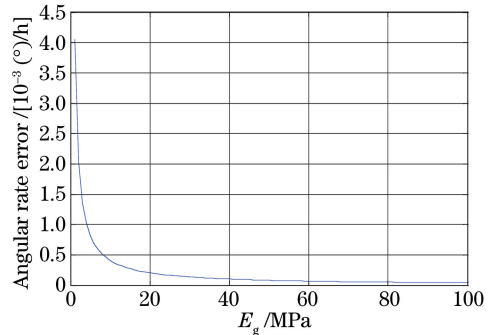


图 7 黏结剂的杨氏模量对角速率误差的影响

Fig. 7 Influence of Young's modulus of adhesive on angular rate error

杨氏模量的增大而减小,为满足定位定向高精度测量需求,黏结剂的杨氏模量应选择在 20 MPa 以上。

为分析黏结剂杨氏模量的影响,取黏结剂的杨氏模量值分别为 5,30,100 MPa,计算得到不同黏结剂对应的相位误差如图 8 所示。由图 8 可见,杨氏模量越大,相位误差幅度越小。

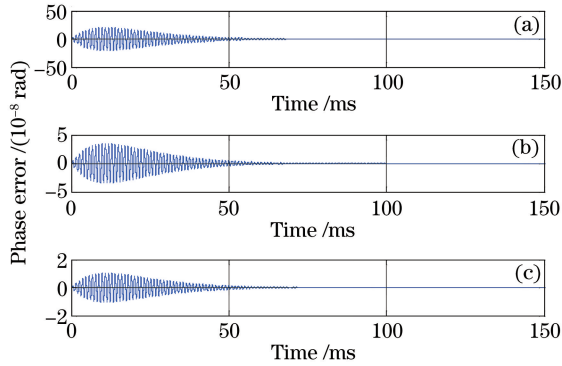


图 8 不同黏结剂的杨氏模量对应的相位误差。(a) $E_g=5$ MPa;(b) $E_g=30$ MPa;(c) $E_g=100$ MPa

Fig. 8 Phase errors corresponding to different Young's modulus of adhesive. (a) $E_g=5$ MPa;
(b) $E_g=30$ MPa; (c) $E_g=100$ MPa

以上仿真结果表明,黏结剂的杨氏模量越大,力学环境下光纤环性能越好。由于每匝光纤之间的缝隙由黏结剂填充,黏结剂固化后光纤牢固黏结在一起,因此当外部机械应力在光纤和黏结剂之间传递时,两者之间的相互作用近似构成粘性小阻尼系统。根据理论分析,相位误差与光纤石英材料和黏结剂的杨氏模量的乘积成反比,光纤石英材料的杨氏模量较大,黏结剂的杨氏模量相对较小。若能提高黏结剂的杨氏模量,则可减小相位误差,因此,为提高萨奈克干涉仪光纤环的力学性能,需尽可能提高黏结剂的杨氏模量。

4 实 验

冲击量级和持续时间对光纤环的影响在大量工程实验中已得到验证,因此不再进行重复实验,仅通过实验验证不同杨氏模量的黏结剂对光纤环的影响。为验证仿真结果,选用 AB 组份接近且杨氏模量分别为 5, 30,100 MPa 的黏结剂,分别绕制 3 个光纤环。所有光纤环采用同样的绕制工艺,光纤环长度均为 1000 m、直径均为 120 mm。实验中机械应力输入由冲击实验台完成,为了避免冲击台自身的误差,所有待测光纤环在同一冲击台上同时完成实验验证。采用光纤陀螺实验验证光纤环冲击性能,光纤环接入光纤陀螺光路系统,根据光纤陀螺工作原理,萨奈克光纤干涉仪静态时对当地地球自转的角速度分量敏感,因此实验中以冲击过程中地球自转角速度分量的漂移量为考核指标,得到冲击过程中的相位误差,采集系统带宽为 200 kHz,由于产生的数据量较大,对系统内信号进行 1 ms 平滑,数据输出频率为 1 kHz。

实验中冲击波形为半正弦波,脉冲宽度为 11 ms,冲击幅值为 60 g。采用杨氏模量为 5,30,100 MPa 的

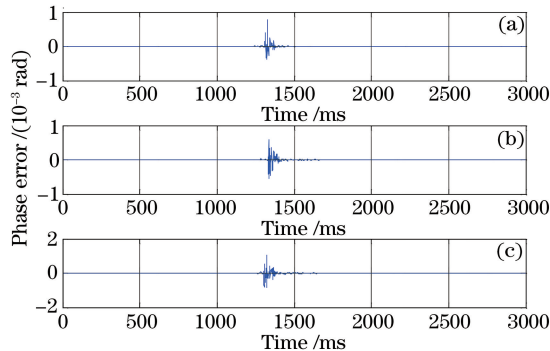


图 9 杨氏模量为 5 MPa 的黏结剂绕制的 3 个光纤环的实验数据。(a) 光纤环 1;(b) 光纤环 2;(c) 光纤环 3

Fig. 9 Experimental results of three fiber coils looped by adhesive with Young's modulus of 5 MPa.

(a) Fiber coil 1; (b) fiber coil 2; (c) fiber coil 3

黏结剂绕制的 3 个光纤环的实验结果如图 9~11 所示。对比实验结果可以看出,当外部机械冲击作用到光纤环时,光纤干涉仪的输出出现振荡,5 MPa 黏结剂对应的 3 个光纤环的振荡持续时间分别为 140,180,190 ms,30 MPa 黏结剂对应的 3 个光纤环的振荡持续时间分别为 81,76,90 ms,100 MPa 黏结剂对应的 3 个光纤环的振荡持续时间分别为 62,35,20 ms。

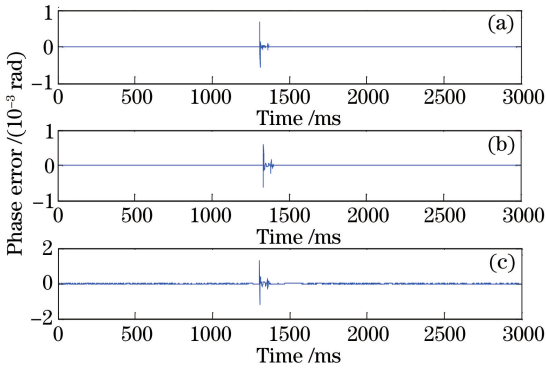


图 10 杨氏模量为 30 MPa 的黏结剂绕制的 3 个光纤环的实验数据。(a)光纤环 1;(b)光纤环 2;(c)光纤环 3
Fig. 10 Experimental results of three fiber coils looped by adhesive with Young's modulus of 30 MPa.
(a) Fiber coil 1; (b) fiber coil 2; (c) fiber coil 3

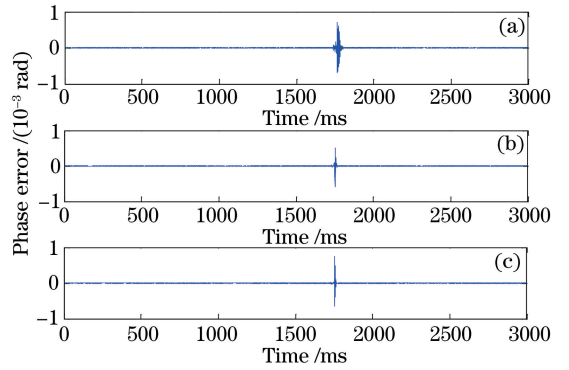


图 11 杨氏模量为 100 MPa 的黏结剂绕制的 3 个光纤环实验数据。(a)光纤环 1;(b)光纤环 2;(c)光纤环 3
Fig. 11 Experimental results of three fiber coils looped by adhesive with Young's modulus of 100 MPa.
(a) Fiber coil 1; (b) fiber coil 2; (c) fiber coil 3

由于实验数据中不可避免地存在冲击实验台振动误差,直接测量无法剔除实验台的影响,因此,基于(12)式,由相位误差计算出角速率误差后再进行积分运算,得到冲击实验整个过程的角度偏差,采用该计算可以将实验台振动的影响降低,计算结果如表 1 所示。对比实验数据可以看出,在相同的外部应力作用下,黏结剂杨氏模量越大则系统输出误差越小,实验结果与之前的仿真结果相符合。

表 1 9 个光纤环冲击实验的角度偏差

Table 1 Angle deviations of nine fiber coils in impact test

Number	Young's modulus of adhesive /MPa	Integral angular deviation /($^{\circ}$)
Fiber coil 1	5	0.0237
Fiber coil 2	5	0.0145
Fiber coil 3	5	0.0190
Fiber coil 4	30	0.0026
Fiber coil 5	30	0.0031
Fiber coil 6	30	0.0052
Fiber coil 7	100	0.0011
Fiber coil 8	100	0.0004
Fiber coil 9	100	0.0003

5 结 论

基于弹光效应理论建立了光纤环在冲击机械应力作用下相位误差产生的数学模型,首次在模型中引入了对黏结剂杨氏模量的讨论。仿真计算了光纤黏结剂杨氏模量对萨奈克光纤干涉仪误差的影响,并通过实验验证了理论模型的正确性,理论与实验结果的吻合度较好。通过比较理论与实验结果,得到黏结剂杨氏模量越大则系统性能越稳定的结论。

参 考 文 献

[1] Yang Jigang, Bi Congzhi, Sun Guofei. Thermal stress calculation and experiment investigation of fiber optical sensor coil spool[J]. Navigation Positioning & Timing, 2016, 3(3): 65-73.
杨纪刚, 毕聪志, 孙国飞. 光纤传感环骨架热应力仿真计算与实验研究[J]. 导航定位与授时, 2016, 3(3): 65-73.

- [2] Gao Kan, Wu Bingyan, Zhang Guilin, *et al.* An optical fiber hydrophone used to detect noise in transformer[J]. Chinese J Lasers, 2016, 43(12): 1210003.
高 侃, 吴昺炎, 张桂林, 等. 一种用于变压器内部噪声测量的光纤水听器[J]. 中国激光, 2016, 43(12): 1210003.
- [3] Li Chuansheng, Zhang Chaoyang, Sun Haijiang, *et al.* Effect of polarization crosstalk of polarization-maintaining delay optical fiber coil on the fiber-optic current sensor[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(11): 1105008.
李传生, 张朝阳, 孙海江, 等. 保偏延迟光纤环偏振语音对光纤电流互感器的影响[J]. 中国激光, 2014, 41(11): 1105008.
- [4] Wu Changxin, Yang Mingwei, Yang Yuanhong, *et al.* Effect of fiber bend on interferometric fiber optical gyroscope performance[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(3): 0306005.
吴长莘, 杨明伟, 杨远洪, 等. 光纤弯曲对干涉式光纤陀螺性能的影响[J]. 光学学报, 2014, 34(3): 0306005.
- [5] Pan Xiong, Zhang Chunsheng, Wang Xichen, *et al.* Vibration error suppression technology for fiber optic gyroscope based on partial demodulation and advanced feedback[J]. Journal of Vibration and Shock, 2015, 34(15): 60-65.
潘 雄, 张春生, 王熙辰, 等. 基于部分解调提前反馈的光纤陀螺振动误差抑制技术[J]. 振动与冲击, 2015, 34(15): 60-65.
- [6] Shu Jiantao, Li Xuyou, Wu Lei, *et al.* Vibration error restrain technology for high-precision fiber optic gyroscope[J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(11): 2201-2206.
舒建涛, 李绪友, 吴 磊, 等. 高精度光纤陀螺振动误差抑制技术[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(11): 2201-2206.
- [7] Ji Xin. Adaptive design of vibration environment for electronic equipments[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2012.
季 馨. 电子设备振动环境适应性设计[M]. 北京: 电子工业出版社, 2012.
- [8] Zhang Y, Gao Z. Fiber optic gyroscope vibration error due to fiber tail length asymmetry based on elastic-optic effect [J]. Optical Engineering, 2012, 51(12): 124403.
- [9] Yu Qiang, Zhang Chen, He Zhou, *et al.* Influence of coating adhesive on thermal stress interference birefringence of optical fiber coil[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(2): 0205007.
于 强, 张 琛, 何 周, 等. 固胶对光纤线圈热应力干扰双折射的影响[J]. 中国激光, 2011, 38(2): 0205007.
- [10] Jin Can, Li Zhihong, Xu Jiancai, *et al.* Establishment and applications of evaluation system for vibration performance of FOG coils[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2013, 32(3): 81-84.
金 灿, 李志宏, 徐建才, 等. 光纤陀螺环振动性能评价体系的建立与应用[J]. 传感器与微系统, 2013, 32(3): 81-84.
- [11] Chen Jun, Wang Wei, Li Jing, *et al.* Effect caused by potted adhesive on FOG performance[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2012, 20(6): 709-714.
陈 军, 王 巍, 李 晶, 等. 光纤线圈固化对光纤陀螺性能的影响[J]. 中国惯性技术学报, 2012, 20(6): 709-714.