

固胶对光纤线圈热应力干扰双折射的影响

于强 张琛* 何周 李绪友

(哈尔滨工程大学自动化学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要 根据光纤线圈受热应力的实际影响,推导出线圈中因排线引起的光纤挤压应力双折射,并提出利用有限元瞬态热分析的方法研究固胶处理对线圈中热应力干扰双折射的影响。通过对固胶处理前后线圈中典型光纤受热应力的影响的数值模拟计算得出,固胶处理后的光纤线圈存在着一个与胶粘剂参数有关的温度区域,在此区域内线圈受到的应力干扰双折射最小,且温度敏感性降至最低。通过对 1000 m 保偏光纤线圈的实际测试表明,这一温度区域的消光比指标高于低温段 1.5 dB,证明了模型的有效性。提出了固胶材料温度特性与环境温度的匹配性概念。

关键词 光学器件;光纤陀螺;有限元法;光纤线圈;温度;应力干扰双折射

中图分类号 U666.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0205007

Influence of Coating Adhesive on Thermal Stress Interference Birefringence of Optical Fiber Coil

Yu Qiang Zhang Chen He Zhou Li Xuyou

(Automation College, Harbin Engineering University, Harbin, Heilongjiang 150001, China)

Abstract Based on the actual influence of optical fiber coil received the thermal stress, optical fiber's crushing stress birefringence in fiber coil is deduced, and the method is proposed, making use of the finite element transient state thermal analysis, to study thermal stress interference birefringence of fiber coil influenced by coating adhesive. Via the simulation computation to the thermal stress disturbance birefringence of typical fiber, the paper concluded that after coating adhesive processing, the fiber coil has a temperature segment that relates to the adhesive parameter, and the thermal stress disturbance birefringence in this segment is smallest, even the sensitivity of temperature change drops to the lowest. Through an actual test to 1000 m polarization maintaining fiber coil, it is indicated that the extinction ratio in this segment is 1.5 dB higher than low temperature section. The match of adhesive material's temperature characteristic for environment of fiber optic gyroscope is proposed.

Key words optical devices; fiber optic gyroscope; finite element method; fiber coil; temperature; stress disturbance birefringence

OCIS codes 060.2340; 060.2370; 060.2420; 120.6780; 120.6810

1 引言

光纤陀螺作为一种新型角速率传感器,具有体积小、重量轻、精度高、寿命长等特点,代表着高精度陀螺仪的发展方向^[1]。光纤线圈是光纤陀螺的测量元件和传感核心,其温度稳定性和抗干扰能力在很大程度上决定着光纤陀螺的实用性能,并成为当前

制约高精度光纤陀螺发展的“瓶颈”技术。1980年, D. M. Shupe^[2]揭示了温度对光纤环形干涉仪的影响,在理论上,与光纤线圈中点距离相等的两段光纤有一样的温度变化时,产生的温度误差将被抵消。为此,1983年, N. J. Frigo^[3]提出了四极对称光纤线圈绕线方式,成为目前工程中最普遍应用的绕线

收稿日期: 2010-06-07; **收到修改稿日期**: 2010-09-14

基金项目: 国家自然科学基金(60604019)资助课题。

作者简介: 于强(1977—),男,博士研究生,讲师,主要从事光纤陀螺及惯性导航系统相关技术方面的研究。

E-mail: yuqiang@hrbeu.edu.cn

导师简介: 李绪友(1964—),男,教授,博士生导师,主要从事光纤陀螺、光纤陀螺捷联惯导系统等方面的研究。

E-mail: lixuyou@yahoo.com.cn

* **通信联系人**。E-mail: hrbeu_zhangchen@126.com

方式和光纤线圈温度问题的主要解决方案。然而,以对称绕法实现的光纤线圈的温度性能也并不完全理想,由于所采用保偏光纤的性能缺陷^[4]、绕线工艺问题^[5~8]以及线圈固胶不均匀^[9,10]等因素使光纤线圈在实际应用中受到的温度干扰要复杂得多。而由此引起的光纤中的非线性效应^[11],以及进一步引起的光纤中的偏振问题^[12],对光纤陀螺影响强烈。尤其在固胶处理后,光纤线圈的温度特性往往会发生很大的变化^[13]。为此,本文从光纤线圈受热应力影响的角度出发,分析线圈中光纤挤压引起的应力干扰双折射,利用有限元法瞬态热分析法研究固胶对光纤线圈温度性能的影响,并进行实验测试,指出线圈温度干扰的控制方式。

2 排线引起的光纤应力干扰双折射

光纤线圈中光纤的摆放结构一般如图 1 所示,每根光纤会承受水平方向与相邻光纤之间的横向压力 f_h 和垂直方向相邻光纤导致的纵向压力 f_v 的作用。当线圈中的温度发生变化时,由于热应力的影响, f_h 和 f_v 会同样发生改变^[14]。

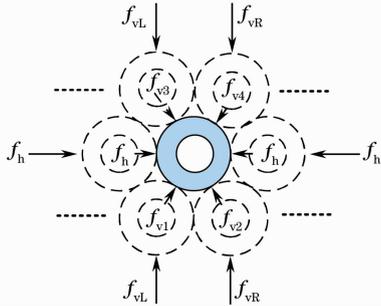


图 1 典型光纤排列及受力示意图

Fig. 1 Arrangement and force diagram of fibers in interference fiber optic gyroscope

由水平方向横向压力 f_h 与纵向压力 f_v 构成的挤压对光纤形成的双折射 $\Delta\beta_{h-v}$ 为

$$\Delta\beta_{h-v} = \left[\frac{2}{\pi r E} k_0 n^3 (p_{11} - p_{12}) (1 + \nu) f_h \right] + \left[\frac{h}{2} (f_{v1} + f_{v2}) \left(\tan \frac{\gamma}{2} - 1 \right) \right], \quad (1)$$

式中 k_0 为光纤在真空中的传播常数, r 为光纤的外半径, n 为光纤的平均折射率, E 为光纤的杨氏模量, p_{11} , p_{12} 为光弹系数, ν 为泊松比, γ 为纵向压力分解到中心受压光纤的夹角。

由于绕线过程中,保偏光纤的应力轴并不能保持同一方向,而是近似随机的,所以排线引起的光纤间的挤压是一种应力干扰双折射。

3 固胶对线圈应力干扰双折射影响的模拟计算

3.1 光纤线圈的局部建模

相对于涂覆层的热力学参数,石英光纤的包层、应力区、纤芯部分的热力学参数近似相同,而且包层占了大部分石英光纤截面面积,纤芯和高掺杂石英棒距石英表面相对较远,因此都可以按纯石英的热力学参数计算^[15]。根据弹性力学原理,光纤线圈为轴对称结构,在其周围的环境温度变化一致时,可以在对光纤线圈进行温度场和热应力分析时按照平面问题去分析。根据实际光纤排列建立的线圈局部几何模型如图 2 所示。

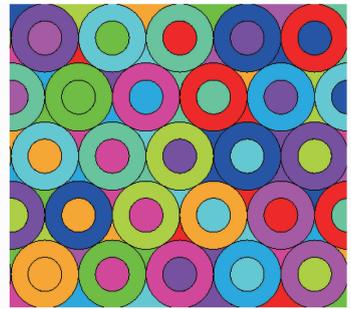


图 2 光纤线圈局部截面

Fig. 2 Partial cross-section of fiber coil

未做固胶处理时,各根光纤之间的导热介质是空气,分析时忽略空气的流动。仿真计算中所参考的材料参数如下。1)石英光纤:半径为 $62.5 \mu\text{m}$,密度为 2203 kg/m^3 ,比热为 $703 \text{ J/(kg} \cdot \text{}^\circ\text{C)}$,弹性模量为 $7.6 \times 10^{10} \text{ Pa}$,泊松比为 0.186,线膨胀系数为 $0.55 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$,热导率为 $1.38 \text{ W/(m} \cdot \text{}^\circ\text{C)}$;2)涂覆层:半径为 $125 \mu\text{m}$,密度为 1190 kg/m^3 ,泊松比为 0.4,比热为 $1400 \text{ J/(kg} \cdot \text{}^\circ\text{C)}$,热导率为 $0.21 \text{ W/(m} \cdot \text{}^\circ\text{C)}$;3)光纤间的空气:比热为 $1005 \text{ J/(kg} \cdot \text{}^\circ\text{C)}$ 。还有部分材料参数是随温度变化的,如表 1,2 所示。

表 1 光纤涂覆层材料参数

Table 1 Parameters of cladding material for optical fiber

Temperature / $^\circ\text{C}$	Elastic	Thermal
	modulus / (10^9 Pa)	expansion / (10^{-4} K^{-1})
-40	1.82	0.5
-20	1.66	0.5
0	1.622	0.5
20	1.585	7
40	1.259	1.2
60	0.794	1.5

表 2 光纤线圈中的导热空气参数

Table 2 Parameters of air in the coil

Temperature / °C	Density / (kg/m ³)	Thermal conduct / [W/(m · °C)]
-40	1.450	0.0209
-20	1.336	0.0225
0	1.237	0.0241
20	1.153	0.0257
40	1.080	0.0273
60	1.015	0.0289

假设只存在外界温度变化对材料应变的影响,而材料应变不会反过来影响温度,两者之间无耦合情况。并定义室温(20 °C)为光纤线圈干扰应力的参考温度,设局部模型的边界没有位移。分格后,模型中典型光纤及其接触受力部分如图 3 所示。

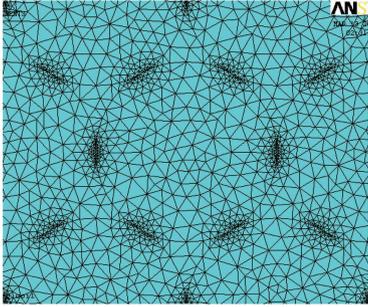


图 3 光纤线圈有限元分格典型部分

Fig. 3 Typical part of fiber coil's finite element model

3.2 有限元瞬态热分析

一般来说,军用光纤陀螺系统要求在-40 °C~60 °C的温度范围保持性能的稳定。以此为参考,利用有限元法对光纤线圈固胶处理前后其典型光纤受到应力作用和双折射的变化情况进行热瞬态热分析。利用 ANSYS 软件,在固胶处理前,设初始温度为-40 °C,在线圈截面上施加均匀温度载荷,使线圈在一定时间内升温至 60 °C,则升温前后的应力场如图 4 所示。图中应力主要集中在各光纤的接触部分,不同的是,-40 °C时,各部分材料均收缩,石英光纤所受到的实际上是拉应力,而加热到 60 °C时,材料受热膨胀,石英光纤受到的则主要是相互排斥的压应力。根据保偏光纤纤芯双折射表达式

$$\Delta n = \frac{n^3}{2E}(1+\nu)(p_{11} - p_{12})(\sigma_x - \sigma_y), \quad (2)$$

式中光纤的弹光系数 $p_{11}=0.27$, $p_{12}=0.121$ 。

升温过程中,设石英光纤中心的双折射为纤芯的标称双折射,根据仿真结果及(2)式,双折射的变化如图 5 所示。

石英光纤中心的双折射从-40 °C的 $-8.50171 \times$

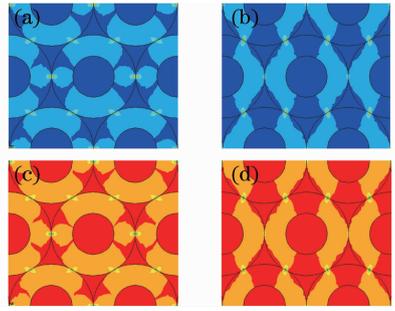


图 4 固胶前线圈截面的应力分布。(a)-40 °C, x 方向, (b)-40 °C, y 方向, (c)60 °C, x 方向, (d)60 °C, y 方向
Fig. 4 Stress distribution of the fiber coil's cross-section before curing process at (a) -40 °C, x direction, (b) -40 °C, y direction, (c) 60 °C, x direction, (d) 60 °C, y direction

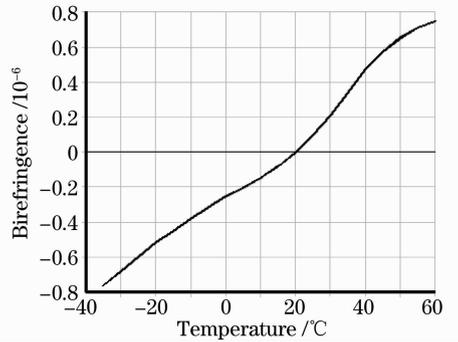


图 5 固胶前线圈中典型光纤的双折射变化

Fig. 5 Birefringence change of a typical fiber's cross-section before curing process

10^{-7} 上升到 60 °C 时的 7.46357×10^{-7} , 近似于线性的变化,因此,温度对光纤应力干扰双折射的影响也基本上呈简单的正比关系。

固胶处理以后,胶粘剂代替空气作为导热媒质并与光纤有接触作用力,胶粘剂计算参数为密度 970 kg/m^3 ; 比热 $1600 \text{ J/(kg} \cdot \text{°C)}$; 泊松比 0.49947; 热导率 $0.21 \text{ W/(m} \cdot \text{°C)}$ 。变温参数如表 3 所示。

表 3 光纤线圈胶粘剂材料参数

Table 3 Parameters of adhesive material in fiber coil

Temperature / °C	Elastic modulus / (10 ⁶ Pa)	Thermal expansion / (10 ⁻⁴ K ⁻¹)
-40	85	1.5
-20	22	2
0	6	2.3
20	1	2.3
40	1	2.3
60	1	2.3

以相同的加载和参考进行计算。光纤线圈升温前后其截面上典型光纤附近的应力场分布如图 6 所

示。各根光纤的接触部分仍然是应力最集中的地方,但和未固胶处理时相比,各根光纤缝隙间的胶粘剂起到了应力缓冲作用,在 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 均布温度下,光纤间接触点的拉应力在很大程度上被减弱了,同时因为胶粘剂的收缩,在整个光纤涂覆层上产生不均匀的拉应力。在 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 均布温度下,胶粘剂和涂覆层的线膨胀系数已在同一数量级上,二者接触的地方产生的应力很小。

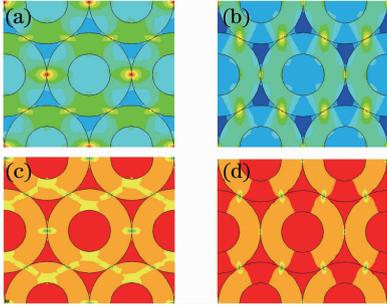


图6 固胶后线圈截面的应力分布。(a) $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$, x 方向, (b) $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$, y 方向,(c) $60\text{ }^{\circ}\text{C}$, x 方向,(d) $60\text{ }^{\circ}\text{C}$, y 方向

Fig. 6 Birefringence change of a typical fiber's cross-section after curing process at (a) $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$, x direction, (b) $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$, y direction, (c) $60\text{ }^{\circ}\text{C}$, x direction, (d) $60\text{ }^{\circ}\text{C}$, y direction

同样考察升温过程中,光纤中心的双折射的变化情况如图7所示。

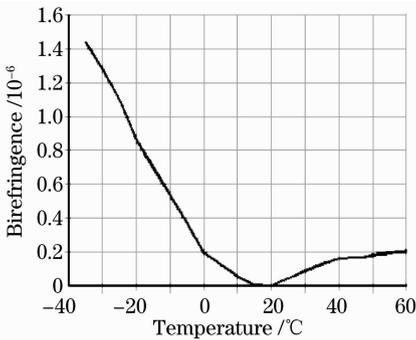


图7 固胶后线圈中典型光纤的双折射变化

Fig. 7 Birefringence change of a typical fiber's cross-section after curing process

线圈均布温度在 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,石英光纤中心的应力干扰双折射达到 1.59082×10^{-6} 。此时,相对于胶粘剂而言,光纤涂覆层低温时线膨胀系数较低,收缩变形较小,受到胶粘剂的拉应力较大,而这一应力在涂覆层正交方向上的作用是不平衡的。同时也说明此种绕线排列的光纤线圈具有一定的缺陷,不能在设计上就消除胶粘剂参数不匹配时带来的应力干扰双折射影响。温度继续升高时,双折射随温度减小的趋势慢慢变缓,升到 $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右时,石英光纤中

心的应力干扰双折射为零,线圈中3种材料间的应力作用达到平衡。在 $15\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内,胶粘剂与光纤之间参数有比较好的匹配,应力干扰双折射不大于 2×10^{-7} 。

光纤线圈在固胶处理以后,由于胶粘剂与光纤材料参数的不完全匹配,光纤线圈存在着固定的温度区域,在此温度段(约 $5\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 30\text{ }^{\circ}\text{C}$)工作,光纤受到的应力干扰双折射很小(小于 2×10^{-7}),且温度变化灵敏性最低,所以固胶处理在一定程度上改善了某一温度段的光纤线圈的抗干扰性能。但同样因为胶粘剂的存在,偏离参考温度较大的低温段($-40\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 0\text{ }^{\circ}\text{C}$)线圈会受到较大的应力干扰双折射的影响。

4 实验测试及分析

为验证3节的分析结果,利用高低温试验箱对固胶处理前后的1000 m保偏光纤线圈进行了消光比测试。此时线圈置于高低温试验箱中,宽谱光源连接光纤偏振器置于试验箱之外(实验室温度 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$,比较稳定),并通过试验箱的边孔为光纤线圈输入高消光比的线偏振光,而光纤线圈的另一端尾纤从边孔输出,接消光比测试仪,并通过计算机串口采集数据。试验箱内的温度从 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 逐渐阶梯式升温至 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$,采样时间为每秒150个点。如图8所示,固胶处理前光纤线圈的保偏性能受温度影响较小,在低温阶段虽然消光比性能也有所下降,但很不明显;而固胶处理后的光纤线圈的整体保偏性能呈现出一定程度的下降,其最佳保偏性能恰出现在室温($20\text{ }^{\circ}\text{C}$)左右,这与数值模拟分析的结果基本相符合。这种结果的产生是由于胶粘剂的热力学参数随

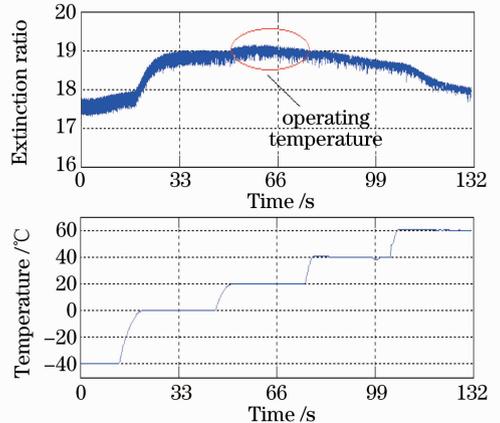


图8 固胶前后光纤线圈消光比随温度的变化
Fig. 8 Extinction ratio changes before and after curing process

温度的非线性变化所导致的,并与实际的线圈涂胶及固化工艺有关。

由此,在要求光纤陀螺于全温度范围工作的场合,以不同环境温度对线圈性能的不同影响的研究结果为指导,在光纤陀螺的输出中引入分段补偿机制,可进一步提高陀螺的稳定性。而对于一般工作场合(环境温度变化较小),因为光纤线圈的固化胶根据其热力学参数的不同可以分为许多种,针对其线膨胀系数、弹性模量、泊松比等参数进行具体设计和筛选,并进行一定温度条件下线圈固化胶与光纤之间参数的匹配设计,则可实现线圈的温度性能与工作环境相匹配的效果。

5 结 论

针对固胶处理对光纤陀螺线圈温度特性的影响,推导了线圈中因排线导致的光纤挤压应力双折射,建立了光纤陀螺线圈的局部截面模型,利用有限元瞬态热分析的方法研究了固胶处理对光纤线圈温度特性的影响。分析表明,固胶处理后的光纤线圈存在一段受温度干扰影响最小,且温度灵敏性最低的理想温度工作段。通过对 1000 m 保偏光纤线圈的实际测试表明,这一区域的消光比指标高于低温段 1.5 dB。因此,可以通过将线圈环境温度控制在工作温度段,或者采用与环境温度具有匹配热参数胶粘剂的方式改善光纤线圈的温度性能。

参 考 文 献

- 1 N. Barhour, G. Schmidt. Inertial sensor technology trends[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2001, **1**(4): 332~339
- 2 D. M. Shupe. Thermally induced nonreciprocity in the fiber-optic interferometer[J]. *Appl. Opt.*, 1980, **19**(5): 654~655
- 3 N. J. Frigo. Compensation of linear sources of non-reciprocity in sagnac interferometers[C]. *SPIE*, 1983, **412**: 268~271
- 4 Ning Tigang, Qin Xi, Pei Li *et al.*. A novel way to measure the temperature characteristic of polarization-maintaining fiber[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(8): 1078~1080
- 5 宁提纲,秦曦,裴丽等. 新型保偏光纤温度特性的测试方法[J]. *中国激光*, 2006, **33**(8): 1078~1080
- 6 Zhao Yong, Liu Jun, Zhang Chunxi *et al.*. Fiber optic gyroscope sensing coils and their winding method [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2002, **23**(5): 312~314

- 7 赵勇,刘军,张春熹等. 光纤陀螺传感线圈及绕法[J]. *半导体光电*, 2002, **23**(5): 312~314
- 8 Li Maochun, Liu Tiegeng, Jiang Junfeng *et al.*. Transient characteristic testing of fiber optic gyro fiber coil based on temperature excitation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(3): 435~441
- 9 李茂春,刘铁根,江俊峰等. 基于温度激励的光纤陀螺光纤环瞬态特性检测[J]. *光学学报*, 2008, **28**(3): 435~441
- 10 Li Yan, Xu Hongjie, Zhang Chunxi. Study on the thermal-induced nonreciprocity of sensing coil of FOG [J]. *Optical Technique*, 2006, **32**(5): 770~772
- 11 李艳,徐宏杰,张春熹. 光纤陀螺光纤环的热致非互异性研究[J]. *光学技术*, 2006, **32**(5): 770~772
- 12 Dai Xuhan, Yang Guoguang, Liu Cheng. The shupe effect in fiber optic coil and its compensation method[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2001, **30**(12): 1470~1473
- 13 戴旭涵,杨国光,刘承. 光纤环中的 Shupe 效应及其补偿方法研究[J]. *光子学报*, 2001, **30**(12): 1470~1473
- 14 Meng Zhaokui, Shao Hongfeng, Xu Hongjie *et al.*. Effect caused by coating adhesive on polarization-maintaining fiber coil[J]. *J. Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2006, **32**(5): 958~961
- 15 孟照魁,邵洪峰,徐宏杰等. 固胶对保偏光纤环的影响[J]. *北京航空航天大学学报*, 2006, **32**(5): 958~961
- 16 Yang Xuewei, Du Xinzhen, Lin Heng *et al.*. Thermal-stress effect of package optical fiber coil adhesive on optical fiber[J]. *J. Chinese Inertial Technology*, 2003, **11**(6): 94~97
- 17 杨学围,杜新政,林恒等. 封装光纤线圈的胶粘剂对光纤产生的热应力影响[J]. *中国惯性技术学报*, 2003, **11**(6): 94~97
- 18 Liu Yu, Sun Yanbin, Lu Yongle *et al.*. Study of ANFIS modeling algorithm for eliminating the fiber optic gyro nonlinear error[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(s2): 27~29
- 19 刘宇,孙燕斌,路永乐等. 消除光纤陀螺非线性误差的自适应模糊神经网络系统建模算法[J]. *中国激光*, 2009, **36**(s2): 27~29
- 20 Zhang Xulin, Zhou Kejiang. Polarization-fluctuation in resonator of resonator fiber-optic gyro [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(8): 2083~2088
- 21 张旭琳,周柯江. 谐振式光纤陀螺环形谐振腔的偏振问题[J]. *中国激光*, 2009, **36**(8): 2083~2088
- 22 Li Xuyou, Zhang Chen, He Zhou *et al.*. Temperature performance research of fiber coil in fiber optic gyroscope based on polarization coupling theory [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(4): 1053~1057
- 23 李绪友,张琛,何周等. 基于偏振耦合理论的光纤陀螺环温度性能研究[J]. *中国激光*, 2010, **37**(4): 1053~1057
- 24 Wang Lihui. Research on Key Technology of Depolarized Fiber Optic Gyroscope[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2009. 44~45
- 25 王立辉. 消偏型光纤陀螺仪关键技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2009. 44~45
- 26 D. Wong. Effect of fiber coating on temperature sensitivity in polarimetric sensors[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1992, **10**(6): 842~846