

文章编号: 0258-7025(2010)04-1053-05

# 基于偏振耦合理论的光纤陀螺环温度性能研究

李绪友 张琛\* 何周于强

(哈尔滨工程大学自动化学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要** 为研究中、高精度光纤陀螺用保偏光纤环的温度性能,从制造工艺及受环境温度影响的角度分析了影响光纤环性能的主要因素。利用耦合波概念定性讨论了光纤环中光波信号的偏振耦合特性,指出了影响光纤陀螺性能的主要偏振误差。根据光纤环中感应双折射的变化和温度瞬态效应机理,建立了温度实验系统。实验结果表明,在变温影响下,光纤环中光信号偏振态的变化十分显著,且与整个光纤环的具体温度分布有关。而且,该实验系统还可以作为光纤环的温度性能评价系统用来筛选出性能优秀的光纤环。

**关键词** 光纤光学; 光纤陀螺; 光纤环; 偏振耦合; 温度漂移

**中图分类号** U666.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20103704.1053

## Temperature Performance Research of Fiber Coil in Fiber Optic Gyroscope Based on Polarization Coupling Theory

Li Xuyou Zhang Chen He Zhou Yu Qiang

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

**Abstract** In order to study the temperature performance of polarization maintaining fiber coil which is used in middling or high precision fiber optic gyroscope (FOG), the main reasons affecting the performance of fiber coil are analyzed from the viewpoint of the manufacturing process and the temperature changes of external environment. The light wave signal's polarization cross-coupling of the interferometer is qualitative analyzed by using coupled wave idea, and the major polarization errors which affect the performance of FOG are pointed out. According to the transient state of temperature effects of fiber coil, the temperature test system is established to study the signal polarization's changes in fiber coil. Experimental results show that the polarization state of the optical signals is affected by temperature in fiber coil, and also is concerned with temperature distribute of the whole fiber coil. In addition, this system can be used as the performance evaluation system to filter fiber coils with outstanding performance.

**Key words** fiber optics; fiber optic gyroscope; fiber coil; polarization cross-coupling; temperature drift

### 1 引言

中、高精度光纤陀螺工程化过程中遇到的一个严重问题就是其光路系统,尤其是传感光纤环的温度敏感性问题<sup>[1~3]</sup>。作为光纤陀螺的传感核心元件,光纤环是影响其精度的重要因素。但在实际中,因光纤环所采用的保偏光纤的性能缺陷<sup>[4]</sup>、绕环技术不理想<sup>[5]</sup>、涂胶不均匀<sup>[6]</sup>等因素使光纤环在具体应用中会受到温度、振动、噪声等因素引起的环境干扰,产生附加相位漂移误差,妨碍 Sagnac 相位差的

精确检测。曾有多位研究者利用 Shupe 的理论<sup>[7]</sup>,研究了温度梯度对光纤环中热致非互易相移的影响,并取得了不错的成果<sup>[8~10]</sup>,对陀螺短期精度的提高具有重要指导意义,但在工程应用中(如在舰船领域)光纤陀螺的长期温度漂移却一直存在,且难于控制。为此,本文变换思路,从受热应力影响及光信号偏振态变化的角度研究光纤陀螺光纤环的温度性能,给出初步的合理解释,并由此提出一种光纤环温度性能检测方案。

收稿日期: 2009-04-09; 收到修改稿日期: 2009-07-02

基金项目: 国家自然科学基金(60604019)资助项目。

作者简介: 李绪友(1964—),男,博士,教授,主要从事光纤陀螺及光纤陀螺捷联惯性导航系统方面的研究。

E-mail: lixuyou@yahoo.com.cn

\* 通信联系人。E-mail: hrbeu\_zhangchen@126.com

## 2 引起光纤环中偏振耦合的主要因素

### 2.1 保偏光纤环中产生偏振耦合的原因

光纤环由保偏光纤绕制而成。为说明光纤环中光波的偏振耦合,首先简单介绍保偏光纤的偏振保持原理。以光纤陀螺常用的应力诱导型保偏光纤为例(如图1所示),在高温下拉制成光纤后,由于包层热膨胀系数低于两个应力区(图中黑色部分),冷却后两个应力区处于拉应力状态,通过反作用使纤芯区产生各向异性应力:沿  $x$  轴为拉应力  $T_x^+$ ,沿  $y$  轴为压应力  $T_y^-$ 。

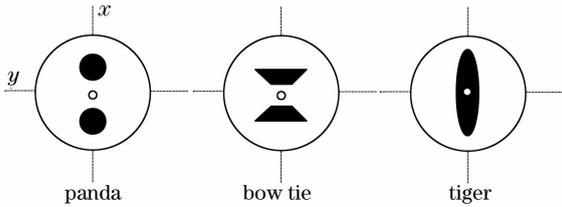


图1 3种应力诱导型保偏光纤

Fig. 1 Three kinds of stress inducing polarization maintaining fiber

由于光弹效应,纤芯在  $x$  轴和  $y$  轴间存在着折射率差,可以由

$$\delta n_x = -\frac{n^3}{2}(C_1 - 2\nu C_2) \frac{T_x^+}{E} - \frac{n^3}{2}(C_1 - \nu C_2 - \nu C_1) \frac{T_y^-}{E}, \quad (1)$$

$$\delta n_y = -\frac{n^3}{2}(C_1 - 2\nu C_2) \frac{T_y^-}{E} - \frac{n^3}{2}(C_1 - \nu C_2 - \nu C_1) \frac{T_x^+}{E} \quad (2)$$

导出<sup>[11]</sup>。于是有

$$\Delta n = \delta n_y - \delta n_x = -\frac{n^3}{2}(C_2 - C_1)(1 + \nu) \left( \frac{T_x^+}{E} - \frac{T_y^-}{E} \right), \quad (3)$$

式中  $E$  为石英的弹性模量;  $C_1$  和  $C_2$  为石英的弹光系数;  $\nu$  为石英的泊松比。(3)式说明了光纤中产生的本征双折射。由于这种双折射的存在,当一束线偏振光沿其中一个双折射轴耦合进光纤时,将能在光纤中保持住这种偏振态。但在实际中(尤其在绕制成光纤环以后),除上述理想的应力双折射外,还存在着多种其他的应力双折射作用。如果任何一个双折射的本征偏振模式与光纤本身的本征偏振模式不一致,必定会引起光纤中光信号两本征偏振模式之间的耦合。耦合强度的大小取决于干扰双折射的大小和方向。当干扰双折射的本征偏振模式与光纤的本征偏振模式正交时,发生的偏振耦合最为严重。

### 2.2 引起偏振耦合的主要因素

从光纤本身来讲,如果应力区关于中心不对称<sup>[12]</sup>,或纤芯与涂覆层不同心<sup>[13]</sup>等都会产生一定的干扰应力双折射。光纤给定后,干扰应力双折射主要是由施加的外力产生的。在光纤环绕制过程中,光纤的弯曲<sup>[14]</sup>、扭转<sup>[15]</sup>、纽结<sup>[16]</sup>以及张力控制不均匀<sup>[13]</sup>等,都会产生各种干扰双折射,导致光纤的保偏性能产生波动甚至光纤环总体性能下降。此外,为确保在振动环境下光纤环具有良好的坚固性,在绕环过程中,往往要在光纤表面涂上胶黏剂,固化后使光纤线圈每匝光纤之间固结在一起<sup>[17]</sup>。胶黏剂固化后形成一种橡胶,它的特性受温度影响很大。限于工艺水平,光纤环上的胶黏剂分布往往不够均匀,其中还可能产生小气泡。由于固胶膨胀系数与光纤不匹配,在温度变化时,胶黏剂对光纤施加的热应力很不平衡,干扰双折射效应十分明显,其积累效应甚至可以使偏振耦合增大几个数量级。而且,由于光纤各个部分热膨胀系数不一致,上述多种应力双折射也均受到温度引起的热胀冷缩的影响。一般情况下,光纤中多种干扰应力双折射同时存在,在变温的作用下,光纤中传播的偏振光偏振态变化非常复杂。

## 3 耦合导致的光纤陀螺偏振误差的讨论

如图2所示,其中偏振器的偏振抑制是有限的,经偏振器后的输入并不是理想的唯一模式偏振光,而是存在着正交模式残余。光纤环中某一点存在干扰双折射时,由于两束反方向传输的光波在同一位置不同时刻经历了不同的双折射,导致了光纤陀螺的非互易偏振误差。

在图2中,输入振幅  $E$  在输入端被偏振器滤波,

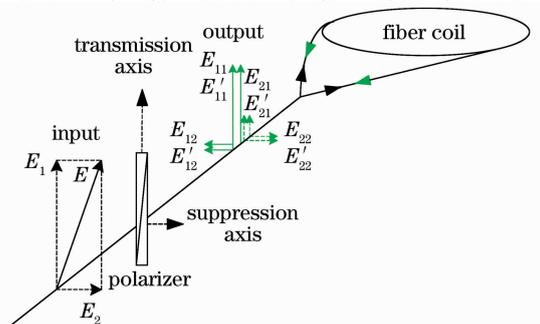


图2 光纤环干涉仪输入/输出端的偏振耦合

Fig. 2 Polarization coupling of the interferometer input/output terminal

其平行分量  $E_1$  通过, 而其正交分量  $E_2$  被衰减。主波分量  $E_1$  被分成两束, 在环形干涉仪中沿相反方向传播后, 在输出端分别产生两种波: 偏振器的传输态, 振幅分量为  $E_{11}$  和  $E'_{11}$ ; 偏振器的正交态, 振幅分量为  $E_{12}$  和  $E'_{12}$ 。由于互易性, 与输入端  $E_1$  的偏振态相同的两个主波分量  $E_{11}$  和  $E'_{11}$  在输出端同相干涉(静止时), 具有相同的模 ( $|E_{11}| = |E'_{11}|$ )。 $E_1$  耦合进正交模式中的两个二阶分量  $E_{12}$  和  $E'_{12}$  也具有相同的模 ( $|E_{12}| = |E'_{12}|$ ), 但由于两波沿相反方向与主波分量没有遵循完全相同的光路传播, 它们之间存

在着一个寄生的相位差  $\Delta\phi_{12}$ 。同样, 输入端的正交分量  $E_2$  产生两个具有相同正交偏振态的振幅分量  $E_{22}$  和  $E'_{22}$ , 以及两个重新耦合回传输态的分量  $E_{21}$  和  $E'_{21}$ 。两个分量  $E_{22}$  和  $E'_{22}$  因为被偏振器衰减过两次, 可以忽略。而两个二阶分量  $E_{21}$  和  $E'_{21}$  也具有相同的模, 也发生干涉, 并产生一个寄生的相位差  $\Delta\phi_{21}$ 。

这两个寄生偶 ( $E_{12}, E'_{12}$ ) 和 ( $E_{21}, E'_{21}$ ) 的特性很不同。第一个寄生偶 ( $E_{12}, E'_{12}$ ) 与主波偶 ( $E_{11}, E'_{11}$ ) 的偏振态正交, 它们的强度只是简单地相加。由于主信号为

$$I_{11} = (E_{11} + E'_{11})^* \cdot (E_{11} + E'_{11}) = [E_{11} + E_{11} \exp(i\phi_s)]^* \cdot [E_{11} + E_{11} \exp(i\phi_s)] = 2|E_{11}|^2(1 + \cos \phi_s), \quad (4)$$

式中  $\phi_s$  为 Sagnac 相移。寄生信号为

$$I_{12} = (\epsilon E_{12} + \epsilon E'_{12})^* \cdot (\epsilon E_{12} + \epsilon E'_{12}) = \epsilon^2 \{E_{12} + E_{12} \exp[i(\phi_s + \Delta\phi_{12})]\}^* \cdot \{E_{12} + E_{12} \exp[i(\phi_s + \Delta\phi_{12})]\} = 2\epsilon^2 |E_{12}|^2 [1 + \cos(\phi_s + \Delta\phi_{12})], \quad (5)$$

式中  $\epsilon$  为偏振器的振幅消光比系数。总的信号中产生一个相位误差  $\phi_e$ 。

$$I = I_{11} + I_{12} = 2(|E_{11}|^2 + \epsilon^2 |E_{12}|^2) + 2\sqrt{|E_{11}|^4 + \epsilon^4 |E_{12}|^4 + 2\epsilon^2 |E_{11}|^2 \cdot |E_{12}|^2 \cos(\Delta\phi_{12})} \cdot \cos(\phi_s + \phi_e), \quad (6)$$

式中

$$|\phi_e| = \arctan \left[ \frac{\epsilon^2 |E_{12}|^2 \sin(\Delta\phi_{12})}{|E_{11}|^2 + \epsilon^2 |E_{12}|^2 \cos(\Delta\phi_{12})} \right] \approx \frac{\epsilon^2 |E_{12}|^2 \sin(\Delta\phi_{12})}{|E_{11}|^2} < \frac{\epsilon^2 |E_{12}|^2}{|E_{11}|^2}, \quad (7)$$

而第二个寄生偶 ( $E_{21}, E'_{21}$ ) 和 ( $E_{11}, E'_{11}$ ) 的偏振态相同, ( $E_{11} + E_{21}$ ) 和 ( $E'_{11} + E'_{21}$ ) 之间的干涉代替了  $E_{11}$  和  $E'_{11}$  之间的干涉。总的干涉信号为

$$I_{11} = (E_{11} + E'_{11} + \epsilon E_{21} + \epsilon E'_{12})^* \cdot (E_{11} + E'_{11} + \epsilon E_{21} + \epsilon E'_{12}) = \{E_{11} + E_{11} \exp(i\phi_s) + \epsilon E_{21} \exp(i\phi_0) + \epsilon E_{12} \exp[i(\phi_s + \phi_0 + \Delta\phi_{21})]\}^* \cdot \{E_{11} + E_{11} \exp(i\phi_s) + \epsilon E_{21} \exp(i\phi_0) + \epsilon E_{12} \exp[i(\phi_s + \phi_0 + \Delta\phi_{21})]\} \approx 2|E_{11}|^2 + 2\sqrt{|E_{11}|^2 + \epsilon |E_{11}| |E_{21}| [\cos(\phi_0 + \Delta\phi_{21}) + \cos \phi_0 + \sin(\phi_0 + \Delta\phi_{21}) - \sin \phi_0]} \cdot \cos(\phi_s + \phi_e), \quad (8)$$

式中

$$|\phi_e| \approx \arctan \left\{ \frac{\epsilon |E_{11}| |E_{21}| [\sin(\phi_0 + \Delta\phi_{12}) - \sin \phi_0]}{|E_{11}|^2 + \epsilon |E_{11}| |E_{21}| [\cos(\phi_0 + \Delta\phi_{12}) + \cos \phi_0]} \right\} < \frac{\epsilon |E_{21}|}{|E_{11}|}. \quad (9)$$

这一步推导利用了  $|E_{21}| \ll |E_{11}|$ ,  $|E_{21}|/|E_{22}| = |E_{12}|/|E_{11}|$  以及  $|E_{11}|^2/|E_1|^2 = 1/2$ 。由于  $1 \gg \epsilon \gg \epsilon^2$ , 在光纤陀螺中后一种偏振误差一般都大于前一种。由(7), (9)式, 光纤陀螺的偏振误差与光信号偏振耦合的大小是紧密相关的。

## 4 光纤环偏振耦合的温度测试

### 4.1 测试系统及原理

根据第 2 节的分析, 因为光纤环受力分布不均

匀以及热膨胀系数不匹配等因素的影响, 在温度变化时, 热胀冷缩作用下, 光纤中的干扰应力双折射发生变化, 当任何一种应力双折射与光纤本征双折射不一致时, 将导致光纤中光信号的偏振态发生改变。为观察到这种改变, 根据光纤陀螺的光路结构设计了测试系统。可认为温度变化时, 光纤环中信号偏振态变化越小, 说明受温度影响的干扰双折射越小, 光纤环温度性能越好。

如图 3 所示, 其中待测光纤环置于金属支架中, 并整体放入温箱。宽谱光源发出的光信号经耦合器

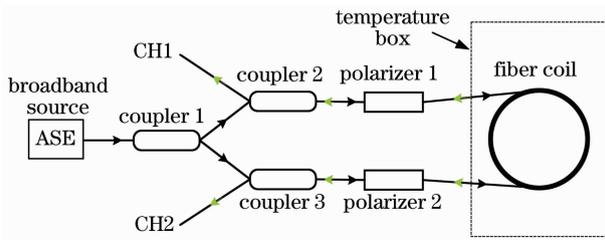


图3 光纤环温度测试系统

Fig. 3 Temperature test system of fiber coil

1 分光后分别通过偏振器 1 和偏振器 2, 得到两束较纯净的线偏振光, 这两束光分别以相反方向进入置于温箱中的光纤环。由于温箱对光纤环施加的大幅度阶跃温度激励, 沿光纤环产生的干扰应力双折射发生很大变化, 导致光波信号的偏振耦合发生变化, 光信号呈变化的椭圆偏振态。信号通过光纤环后经光路另一端的偏振器时, 椭圆偏振态被滤波, 经耦合器 2 及耦合器 3 后, 偏振态特征值在测试端 CH1, CH2 被光功率计测量。特征值变化越小, 说明经光纤环后信号的偏振态变化越小。本系统采用温度放大的方法, 对模拟研究光纤陀螺的长期温度漂移具有重要意义。

#### 4.2 测试结果

典型的测试结果如图 4 所示。光纤环中光信号受到的影响随温箱内温度的变化略有延迟。当施加大幅度阶跃温度激励时(温箱内的温度由  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  急剧升至  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), 由于干扰应力双折射的剧烈变化, 光纤环中偏振态的特征值随温度有一个较大的上扬趋势, 当温度值稳定在  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$  后, 偏振态的变化又开始缓慢回归, 并最终趋于稳定。

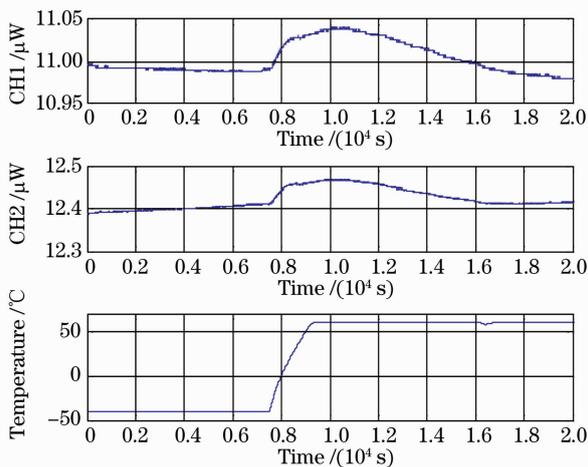


图4 光纤环输出随阶跃温度的变化曲线

Fig. 4 Output curve of fiber coil with step temperature

一般来讲, 光纤环与金属支架接触的部分最先感受到外界温度的升高, 并由接触部分逐渐向远处

低温部分扩散, 这一温度梯度的存在导致了光纤两侧存在着一个温度差, 此时, 光纤两侧受到的热应力是不同的, 所以对纤芯的作用力不能抵消, 于是产生了额外的应力双折射, 若此双折射与光纤本征双折射不一致, 则会对光信号的偏振耦合产生一定干扰。热量传导均匀后, 由热梯度导致的大部分对纤芯的不平衡应力被抵消, 光信号的偏振态又开始逐渐恢复。因此, 光信号的偏振耦合是与光纤环整体的温度分布有关的。

以同一温度激励下, 不同光纤环偏振态变化的最大峰值(归一化后)和回归时间为指标, 此系统还可以用来筛选出性能优秀的光纤环。

## 5 结 论

光信号的偏振耦合与光纤环的具体温度分布有关。对大多数光纤环来说, 本文建立的温度实验系统测试的结果比直接测量光纤环的消光比效果更明显可靠。而且该实验系统还可以用来评价光纤环的性能。上述实验结果也说明, 受温度梯度影响的 Shupe 误差与热应力引起的非互易相移误差在动态环境下是很难区分的。而改进光纤环性能, 则要从选择保偏光纤、控制绕环张力、扭转以及涂胶的均匀度和适量用胶等方面进行努力。

## 参 考 文 献

- Zhang Guicai, Yang Qingsheng. Study on temperature characteristics of interferometric fiber-optic gyro [J]. *Optoelectronic Technology & Information*, 2001, **14**(1): 17~22  
张桂才, 杨清生. 干涉式光纤陀螺的温度特性研究[J]. *光电子技术与信息*, 2001, **14**(1): 17~22
- Jia Ming, Chao Daihong, Zhang Chunxi. Thermal analysis and design for fiber optic gyroscope [J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2008, **16**(6): 725~729  
贾明, 晁代宏, 张春熹. 光纤陀螺的热分析与热设计方法[J]. *中国惯性技术学报*, 2008, **16**(6): 725~729
- Wang Xinlong, Ma Shan. Nonlinearity of temperature and scale factor modeling and compensating of FOG [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2009, **35**(1): 28~31  
王新龙, 马 闪. 光纤陀螺温度与标度因数非线性建模与补偿[J]. *北京航空航天大学学报*, 2009, **35**(1): 28~31
- 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  
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
- 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  
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

- 6 Meng Zhaokui, Shao Hongfeng, Xu Hongjie *et al.*. Effect caused by coating adhesive on polarization-maintaining fiber coil [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2006, **32**(5):958~961  
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
- 7 D. M. Shupe. Thermally induced nonreciprocity in the fiber-optic interferometer [J]. *Appl. Opt.*, 1980, **19**(5):654~655
- 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  
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
- 9 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  
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
- 10 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  
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
- 11 H. C. Lefèvre. *The Fiber-Optic Gyroscope* [M]. Artech House, 1993. 252~257
- 12 K. Okamoto, Y. Sasaki, N. Shibata. Mode coupling effects in stress-applied single polarization fibers [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1982, **QE-18**(11):1890~1899
- 13 S. C. Rashleigh, M. J. Marrone. Polarization holding in elliptical-core birefringent fibers [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1982, **QE-18**(10):1515~1523
- 14 P. B. Ruffin, C. C. Sung. Temperature effect on the performance of polarization-maintaining fibers [J]. *Opt. Eng.*, 1993, **32**(3):476~480
- 15 Yutaka Sasaki. Polarization-maintaining optical fibers used for a laser diode redundancy system in a submarine optical repeater [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1984, **2**(6):816~823
- 16 R. Ulrich, S. C. Rashleigh. Polarization coupling in kinked single-mode fibers [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1982, **QE-18**(12):2032~2039
- 17 Yang Xuwei, Du Xinzhen, Lin Heng *et al.*. Thermal-stress effect of package optical fiber coil adhesive on optical fiber [J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2003, **11**(6):94~97  
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