

光纤陀螺启动过程标度因数误差研究

王夏霄¹ 魏良勇^{1*} 王翔¹ 李传生²

¹北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院, 北京 100191

²中国计量科学研究院, 北京 100029

摘要 在现代化战争武器和惯性导航系统中,要求光纤陀螺(FOG)快速启动。研究了温度对 FOG 启动过程中标度因数误差的影响。FOG 的启动时间与超辐射发光二极管(SLD)的输出性能密切相关。研究了 SLD 输出波长对 FOG 标度因数误差的影响,对理论结果进行了仿真分析和实验验证。结果表明,由温度变化引起的 SLD 输出波长变化严重影响 FOG 启动过程中的标度因数误差;温度变化越大,FOG 启动过程的标度因数误差越大;在-20, 50, 70 °C 时的最大标度因数误差分别可达 0.048, 0.0144, 0.025, 启动时间分别为 6, 7, 11 s。

关键词 光纤光学; 光纤陀螺; 快速启动; 标度因数误差

中图分类号 TN929 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP53.120602

Scale Factor Error During Startup Process of Fiber Optic Gyro

Wang Xi Xiaoxiao¹ Wei Liangyong¹ Wang Xiang¹ Li Chuansheng²

¹School of Instrumentation Science and Opto-Electronics Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China

²National Institute of Metrology of China, Beijing 100029, China

Abstract In modern war weapons and inertial navigation systems, the fiber optic gyro (FOG) is required to start quickly. The effect of temperature on the scale factor error in the process of FOG startup is studied. The FOG startup time is closely related to the output performance of a superluminescent diode (SLD). The effect of the SLD output wavelength on the FOG scale factor error is studied, and the theoretical results are analyzed in simulation and verified experimentally. The results show that the change of SLD output wavelength caused by the temperature change seriously affect the scale factor error in the process of FOG startup. The larger the temperature change is, the larger the scale factor error in the process of FOG startup is. The maximum scale factor error is up to 0.048, 0.0144, 0.025 when the temperature is -20, 50, 70 °C, and the startup time is up to 6, 7, 11 s respectively.

Key words fiber optics; fiber optic gyro; quick startup; scale factor error

OCIS codes 060.2800; 060.2330; 060.2370

1 引言

光纤陀螺(FOG)是一种基于 Sagnac 效应的光学角速率传感器^[1],具有寿命长、体积小、重量轻、功耗低、测量范围大、精度高等特点^[2],广泛应用于导弹制导、飞机导航、卫星导航等领域。随着现代化武器和惯性导航对传感器快速反应的要求日益提高,光纤陀螺的快速启动显得尤为重要^[3]。光纤陀螺的快速启动要求启动过程中的标度因数相对稳定,而陀螺采用的超辐射发光二极管(SLD)的输出特性受外界温度影响较大^[4-5],直接影响陀螺启动过程中标度因数的稳定性。

直接对陀螺进行温度补偿的方法应用广泛,但是这种方法未达到 FOG 快速启动的要求。受外界温度的影响,FOG 启动过程中的标度因数稳定性未达到规定要求。如何减小外界温度对 FOG 快速启动的影响成为 FOG 发展过程中面临的难题之一。SLD 随温度变化的输出特性包括光源输出波长、偏振度等^[6-7]。通

收稿日期: 2016-08-15; **收到修改稿日期:** 2016-08-23; **网络出版日期:** 2016-11-18

基金项目: 国家重大科学仪器设备开发专项(2013YQ050791)

作者简介: 王夏霄(1977—),男,博士,高级工程师,主要从事光纤陀螺及光纤电流传感技术方面的研究。

E-mail: wangxi Xiaoxiao@buaa.edu.cn

* **通信联系人.** E-mail: 792471976@qq.com

过理论研究发现,光源的输出波长是 FOG 标度因数的重要组成部分^[8]。因此,SLD 输出波长的不稳定性不容忽视。研究 SLD 输出波长在 FOG 启动过程中引起的标度因数误差,对于缩短陀螺启动时间具有重要意义,为陀螺启动过程中标度因数的补偿提供了理论基础。

2 标度因数误差的理论分析

光纤陀螺旋转时产生的 Sagnac 相移 ϕ_s 可表示为^[9]

$$\phi_s = 2\pi LD\Omega/(\lambda c) = K_{SF}\Omega, \quad (1)$$

式中 L 为光纤长度; D 为光纤环直径; λ 为光源波长; c 为真空中的光速; Ω 为光纤陀螺旋转的角速率; K_{SF} 为光纤陀螺的标度因数, $K_{SF}=2\pi LD/(\lambda c)$ 。从(1)式可以得出,光纤陀螺固有的标度因数与光纤长度、光纤环直径以及光源波长有关。不同温度下, L 、 D 对光纤陀螺标度因数具有一定的影响;温度不变时, L 、 D 对标度因数的影响固定不变,因此可以通过温度补偿减小 L 、 D 对标度因数的影响。光纤陀螺采用 SLD 光源,其波长随温度的典型漂移^[10]为 $4 \times 10^{-9} \text{ }^\circ\text{C}$ 。在高(低)温下,光源启动过程中光源管芯温度变化较大,产生的波长漂移量较大,从而引起较大的标度因数误差。因此,高(低)温下光源波长成为影响标度因数的主要因素。

2.1 光源波长与温度的关系

当 SLD 外加连续的驱动电流时,内部的热效应会引起 SLD 有源区温度升高,导致 SLD 输出波长出现红移,SLD 输出波长随温度的升高呈线性增加,变化量约为 $0.5 \text{ nm}/^\circ\text{C}$,图 1 为稳态下光源平均输出波长随温度的变化曲线。

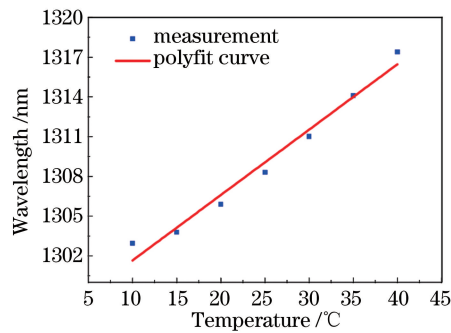


图 1 稳态下光源平均输出波长随温度的变化

Fig. 1 Relationship between average output wavelength of light source and temperature

SLD 发光芯片利用热沉安装在热电制冷器(TEC)上,比例-积分-微分(PID)温控电路通过热敏电阻获取热沉的温度,产生制冷电流,从而保持热沉和管芯温度的稳定。热沉吸收的热量包括 SLD 管芯发光时释放的热量、TEC 热端向热沉辐射的热量以及空气对流传递的热量。制冷量由 TEC 提供,根据 TEC 的传热模型,制冷量为帕尔帖效应产生的吸热量除去热端通过半导体材料的热传导传输到 TEC 冷端的热量和制冷电流在制冷器中产生的焦耳热。

SLD 的温度控制电路(ATC)采用 PID 控制方法,代入温控电路的制冷电流时间函数,得到热沉温度在指定温度工作点附近的变化规律方程为^[11]

$$\frac{dT^2(t)}{dt} + 2\gamma \frac{dT(t)}{dt} + \omega^2 T(t) = 0, \quad (3)$$

式中 t 为时间; $T(t)$ 为热沉温度; γ 为衰减系数, $\gamma=1.5$; ω 为固有振动频率, $\omega=5.5 \text{ Hz}$ 。 $T(t)$ 为二阶微分方程(3)式的解,初始条件为 $dT(t)/dt|_{t=0}=0$, $T(0)=25+T'$,热敏电阻传输温度信号存在滞后效应,因此 T' 为 TEC 制冷器未工作前由热效应产生的初始温度偏置量。二阶微分方程的解为

$$T(t) = \exp(-\gamma t) [c_1 \cos(\omega' t) + c_2 \sin(\omega' t)] + 25, \quad (4)$$

式中 $\omega' = \sqrt{\omega^2 - \gamma^2}$, $c_1 = T'$, $c_2 = -\gamma/\omega' c_1$ 。

SLD 管芯温度与热沉温度近似相等,SLD 启动时,TEC 制冷器开始工作,光源管芯的温度变化模型与(4)式相符,结合 SLD 的输出波长与管芯温度的关系,可以得到 SLD 启动时管芯温度以及输出波长随时间

的变化,仿真结果如图 2 所示。由图 2 可知,SLD 启动时的振荡时间约为 3 s,平均输出波长与温度变化的趋势大体相同。

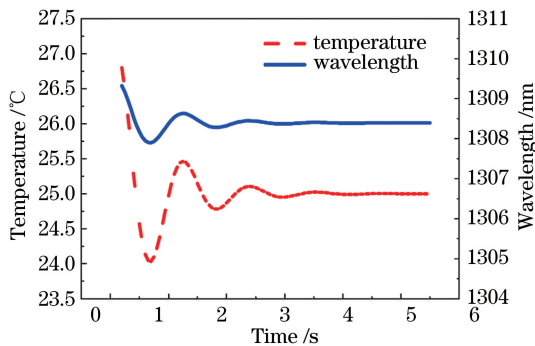


图 2 SLD 启动时温度、输出波长随时间的变化

Fig. 2 Variations in temperature and output wavelength with time in the process of SLD startup

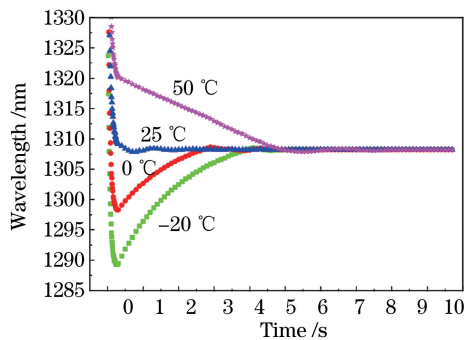


图 3 不同温度下 SLD 启动时输出波长漂移曲线

Fig. 3 Output wavelength drift curves when SLD starts at different temperatures

在上述理论基础上,Wang 等^[11]测试了中心波长为 1310 nm 时 SLD 的启动特性,并得到了 SLD 启动时不同温度下的输出波长漂移曲线,如图 3 所示。

由于 SLD 的输出波长由管芯温度决定,因此环境温度与常温偏差量越大,波长的漂移量越大,最大漂移量可达 0.018,光源波长漂移导致陀螺产生严重的标度因数误差^[13],SLD 启动过程中的波长漂移严重影响了光纤陀螺的启动时间。

2.2 光源波长引起的标度因数误差

光纤陀螺标度因数 $K_{SF} = 2\pi LD / (\lambda c)$ 。根据上述分析,综合可能对标度因数误差产生影响的所有可能因素,在高(低)温下,光源波长的漂移对标度因数产生很大的影响。因此,理论上光纤陀螺的标度因数可表示为 $K_{SF} = K / \lambda$,其中 $K = 2\pi LD / c$ 。根据理论公式以及 SLD 启动过程中不同初始温度下的波长漂移曲线,拟合得到光源波长与光纤陀螺标度因数误差的关系曲线,如图 4 所示。

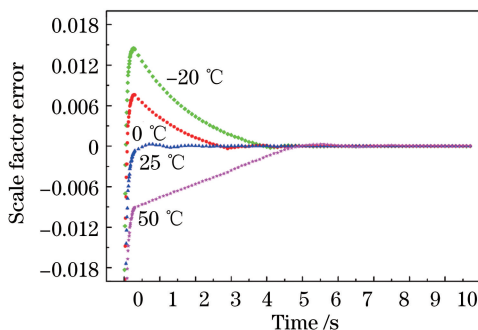


图 4 SLD 启动时光源波长与标度因数误差的关系

Fig. 4 Relationship between wavelength of light source and scale factor error when SLD starts

从图 4 中可以得出,不同温度下,SLD 启动时由 SLD 的输出波长变化引起的标度因数误差大于 0.014,并且温度越高或越低,FOG 的标度因数误差越大,严重影响了光纤陀螺启动时的工作性能。

3 实验验证

利用图 5 所示的实验方案测试光纤陀螺启动过程的标度因数。通过现场可编程门阵列(FPGA)控制模数转换器(AD7938)进行光源温度的采集,光纤陀螺的输出通过 FPGA 采集。采集得到的光源温度和陀螺的输出数据通过串口发送到上位机(PC),通过计算即可得到 FOG 标度因数的变化曲线。

由于光纤陀螺的数字信号处理电路需要一定的上电时间,为了准确测得光纤陀螺启动过程中光源温度与陀螺标度因数的变化曲线,实验中采取光源驱动板与信号处理电路单独供电的方式,并且选择使用光纤陀

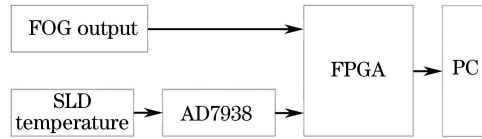
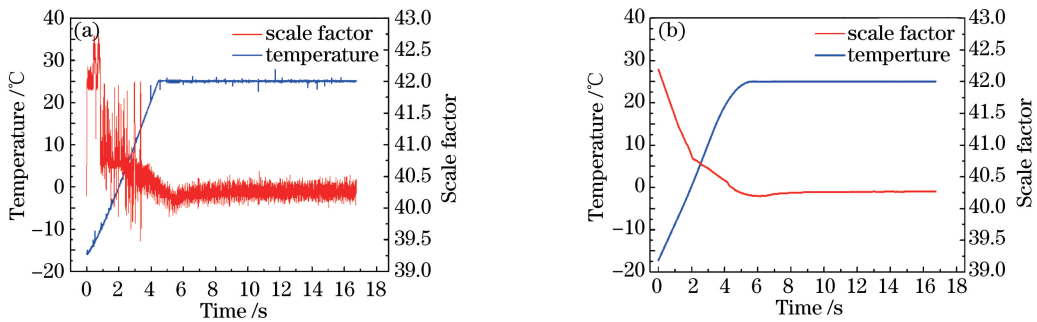
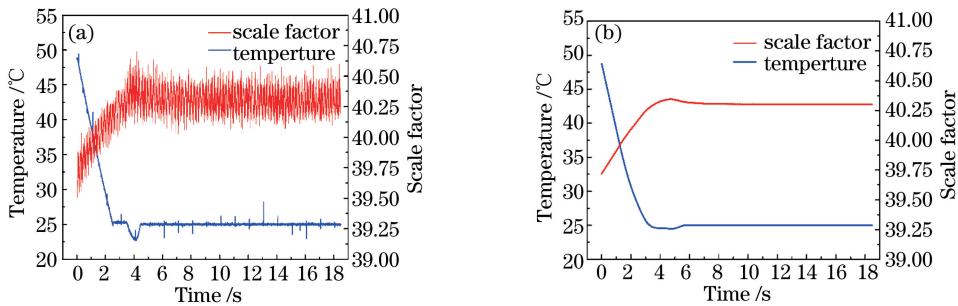


图 5 测试光纤陀螺标度因数的实验方案

Fig. 5 Experimental scheme of testing scale factor of FOG

螺的主板优先供电。

对光纤陀螺进行温度实验时,将测试系统置于带转台的温箱中,设定转台转速为 $10^\circ/\text{h}$,设定温箱温度分别为 $-20, 50, 70^\circ\text{C}$,并保温 2 h。分别测量光源管芯温度与 FOG 的标度温度误差,实验结果如图 6(a)、7(a)、8(a)所示。由于转台的不稳定性,输出数据中产生噪声。为了方便分析实验数据,对原始数据进行拟合,去除噪声后的拟合曲线如图 6(b)、7(b)、8(b)所示。从图 6~8 可以看出,当温箱温度为 $-20, 50, 70^\circ\text{C}$ 时,光纤陀螺启动过程中的标度因数稳定时间分别约为 7, 7, 11 s,严重影响了陀螺启动过程中的工作性能。

图 6 当温箱温度为 -20°C 时光源管芯温度与 FOG 的标度因数随时间的变化。(a)原始数据; (b)拟合曲线Fig. 6 Variations in temperature of light source tube core and scale factor of FOG with time when the temperature of incubator is -20°C . (a) Original data; (b) fitting curves图 7 当温箱温度为 50°C 时光源管芯温度与 FOG 的标度因数随时间的变化。(a)原始数据; (b)拟合曲线Fig. 7 Variations in temperature of light source tube core and scale factor of FOG with time when the temperature of incubator is 50°C . (a) Original data; (b) fitting curves

4 分析与讨论

不同温度下,陀螺启动过程中的标度因数误差变化的理论仿真与实验结果如图 4、9 所示。从图中可以看出,不同温度下标度因数误差的变化趋势完全相同;趋于稳定的标度因数存在一定的偏差(图 9)是由于未对不同温度下光纤长度和光纤环直径引起的标度因数误差进行补偿。因此,以 SLD 输出波长为媒介进行温度的标度因数补偿^[15]可实现光纤陀螺的快速启动。表 1 对比了理论仿真与实验结果,从表中可以看出,陀螺启动过程中最大的标度因数误差在理论分析范围之内,光纤陀螺启动时间的实验结果也在理论分析范围之内。由上述分析可得,实验结果符合理论分析,证实了光源波长对光学陀螺启动过程中标度因数误差的影响,为下一步建立补偿模型提供了理论和数据支持。

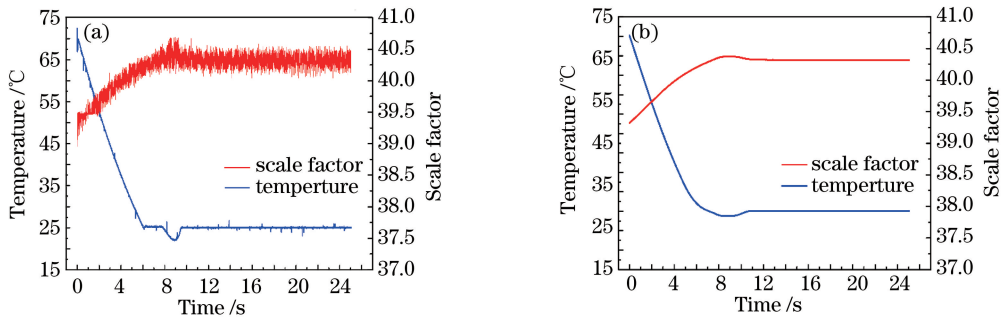


图 8 当温箱温度为 70 °C 时光源管芯温度与 FOG 的标度因数随时间的变化。(a)原始数据；(b)拟合曲线
Fig. 8 Variations in temperature of light source tube core and scale factor of FOG with time when the temperature of incubator is 70 °C. (a) Original data; (b) fitting curves

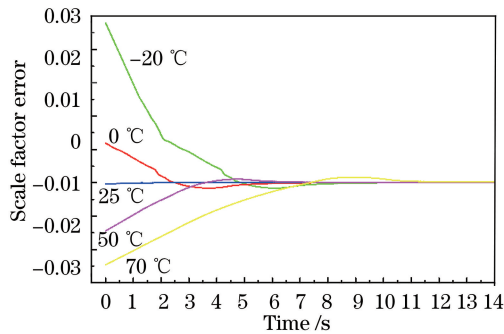


图 9 不同温度下的标度因素误差

Fig. 9 Scale factor error at different temperatures

表 1 不同温度下的理论仿真和实验结果

Table 1 Results of theoretical simulation and experiment at different temperatures

Temperature /°C	Theoretical simulation		Experiment	
	Maximum scale factor error	Starting time /s	Maximum scale factor error	Starting time /s
-20	>14000	5	48000	7
25	> 6000	1	7600	1
50	>14000	6	14400	7
70	>14000	10	25000	11

5 结 论

研究了 SLD 的输出波长对光纤陀螺启动过程中标度因数的影响,并通过理论仿真和实验进行验证。研究表明,SLD 启动时[尤其在高温(低温)环境下启动时],SLD 的输出波长漂移量较大,引起光纤陀螺产生较大的标度因数误差,并且温度越高(低)标度因数误差越大。因此,可通过采集 SLD 温度并以 SLD 输出波长为媒介进行温度的标度因数补偿,以实现光纤陀螺的快速启动。

参 考 文 献

- Zhang Guicai. The principles and technologies of fiber-optic gyroscope[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2008.
张桂才. 光纤陀螺原理与技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008.
- Jin J, Wang X Q, Lin S, *et al*. Effect of radiation-induced mean wavelength shift in optical fibers on the scale factor of an interferometric fiber optic gyroscope at a wavelength of 1300 nm[J]. Chin Phys B, 2012, 21(9): 094220.
- Li Cuihua, Wang Wei, Zhang Junjie. FOG quick start-up at low temperature[J]. Journal of Chinese Inertial Technology,

- 2007, 15(2): 237-240.
- 李翠华, 王 巍, 张俊杰. 光纤陀螺低温快速启动技术[J]. 中国惯性技术学报, 2007, 15(2): 237-240.
- 4 Li Yan, Sun Yanfeng, Wang Xu, *et al.* Er-doped superfluorescent fibre source with enhanced mean-wavelength stability incorporating a fiber filter[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(1): 244-248.
- 5 Shen Jun, Miao Lingjuan, Wu Junwei, *et al.* Application and compensation for startup phase of FOG based on RBF neural network[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(1): 119-124.
- 沈 军, 缪玲娟, 吴军伟, 等. 基于 RBF 神经网络的光纤陀螺启动补偿及应用[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(1): 119-124.
- 6 Gao Yangyang, Zhou Weining, Wang Xiaoxiao, *et al.* Research on characteristic of SLD start-up used in FOG and its effect [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2015, 36(6): 875-879.
- 高洋洋, 周卫宁, 王夏霄, 等. 光纤陀螺用 SLD 启动特性及影响研究[J]. 半导体光电, 2015, 36(6): 875-879.
- 7 Gao Yangyang, Zhou Weining, Lei Lili, *et al.* Research on polarization characteristic of SLD start-up used in fiber optic gyroscope and its effect[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(11): 112302.
- 高洋洋, 周卫宁, 雷莉莉, 等. 光纤陀螺用超辐射发光二极管启动偏振特性及其影响研究[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(11): 112302.
- 8 Zhang Weixu. *Fiber optic gyro and its application*[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2008.
- 张维叙. 光纤陀螺及其应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008.
- 9 Lefevre H. *The fiber-optic gyroscope*[M]. Boston: Artech House, 1993.
- 10 Shidlovski V R, Semenov A T, Lipin M E, *et al.* Temperature dependence of 820-nm SLED performance parameters[J]. *SPIE*, 1999, 3860: 495-500.
- 11 Wang Xiaoxiao, Zhang Yuning, Wei Liangyong, *et al.* Research on the start-up wavelength drift mechanism of light source used in FOG[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 43(5): 3201-3206.
- 王夏霄, 张宇宁, 魏良勇, 等. 光纤陀螺光源启动波长漂移机理研究[J]. 红外与激光工程, 2016, 43(5): 3201-3206.
- 12 Cao Hui, Yang Yifeng, Liu Shangbo, *et al.* Temperature control system for SLD optical source of FOCS[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(3): 920-926.
- 曹 辉, 杨一凤, 刘尚波, 等. 用于光纤电流传感器 SLD 光源的温度控制系统[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(3): 920-926.
- 13 Gao Yangyang, Wang Xiaoxiao, Zhou Weining, *et al.* Start-up model of superluminescent light emitting diodes used in fiber optic gyroscope[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2015, 36(9): 1076-1081.
- 高洋洋, 王夏霄, 周卫宁, 等. 光纤陀螺用超辐射发光二极管启动模型研究[J]. 发光学报, 2015, 36(9): 1076-1081.
- 14 Li Jing, Wang Wei, Wang Xuefeng, *et al.* Scale factor of photonic crystal fiber-optic gyroscope[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(12): 4082-4087.
- 李 晶, 王 巍, 王学锋, 等. 光子晶体光纤陀螺标度因数特性研究[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(12): 4082-4087.
- 15 Zhang Yonggang, Li Shuting, Gao Zhongxing, *et al.* Evaluation of thermal drift error performance of fiber optic gyroscope[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(12): 122803.
- 张勇刚, 李淑婷, 郜中星, 等. 光纤陀螺热漂移误差性能评价[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(12): 122803.