

# 光纤陀螺用光源全温度工作交越失真研究\*

宫兆涛 舒晓武 牟旭东 刘 承

(浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 杭州 310027)

**摘 要** 为提高光纤陀螺准确度、实现工程化应用, 分析了 SLD 光源内部的热结构, 建立了全数字光源控制系统. 测试结果表明: 在变温环境下 ( $-15^{\circ}\text{C} \sim 55^{\circ}\text{C}$ ), 抑制了光源的“交越失真”现象, 实现了光源平均波长波动 0.014%, 光功率波动 0.4% 的控制准确度. 采用抑制交越失真控制的光源的 FOG 在全温度范围内的零偏稳定性从  $2.14^{\circ}/\text{h}$  提高到  $0.21^{\circ}/\text{h}$ .

**关键词** 光纤陀螺; 白光光源; 超辐射发光管; 半导体制冷器

**中图分类号** V241.5 **文献标识码** A

## 0 引言

光纤陀螺 (FOG) 全温度范围的稳定工作, 是其工程化应用的关键因素之一. SLD 光源是 FOG 的理想光源<sup>[1,2]</sup>, 在恒电流驱动情况下, 平均波长受工作温度影响约为 400 ppm/K, 因此, 保持 SLD 光源热稳定是光源宽温度范围稳定工作的必要条件. 本文分析了 SLD 光源内部热结构, 建立了全数字光源控制系统. 测试结果表明, 该系统抑制了光源的“交越失真”现象, 使光纤陀螺在全温度范围内的零偏稳定性从  $2.14^{\circ}/\text{h}$  提高到  $0.21^{\circ}/\text{h}$ .

## 1 “交越失真”现象

将 SLD 光源置于  $-15^{\circ}\text{C} \sim 55^{\circ}\text{C}$  连续升温的温箱中, 连续测试光功率和平均波长的变化, 控制方案采用传统的“恒流源+温控”模拟方案. 当温箱温度到达  $20^{\circ}\text{C}$  左右, 管芯温度出现波动, 光波长和光功率均发生突跳. 图 1 和 2 是平均波长和光功率的突跳情况, 突跳量为 0.22%, 光功率突跳量为 10.3%, 这种情况称之为“交越失真”现象.

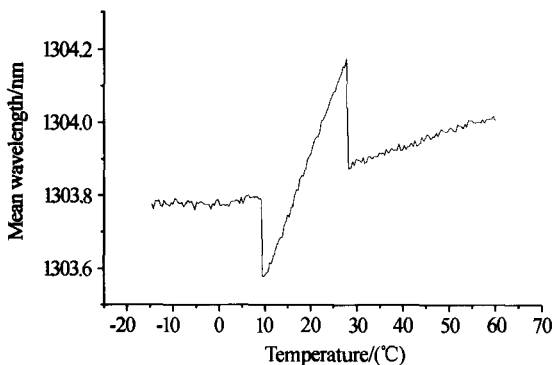


图 1 SLD 光源温度交越失真的平均波长  
Fig. 1 Temperature fluctuating of SLD's mean wavelength

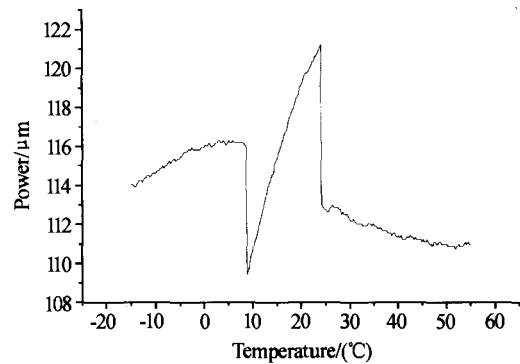


图 2 SLD 光源温度交越失真的输出光功率  
Fig. 2 Temperature fluctuating of SLD's power

由于 FOG 应用环境的不同, 温度的突变、渐变梯度各不相同, 并且随着使用时间增长, 光源相应光学特性也会发生缓变, 因此对光源的温度控制准确度、灵活性要求非常高. 针对光源光功率和波长的缓慢变化, 现有的 FOG 调制解调算法可以进行补偿或者其他处理, 而光源交越失真造成的突跳很难预测和补偿, 和被测角速度变化难以区分, 容易产生错误的输出, 影响导航系统准确度.

## 2 理论分析

针对“交越失真”现象, 本文将深入分析 SLD 光源内部的热结构. SLD 光源组件装配结构如图 3, SLD 光源的管芯键合在高导热系数的热沉 (Heatsink) 上, 热敏电阻 (Thermistor) 紧贴在热沉上, 传感温度信息, 通过外部控制电路调节半导体珀

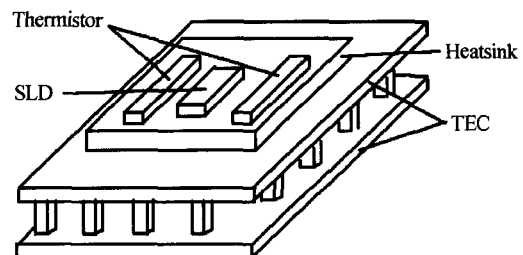


图 3 SLD 的装配结构  
Fig. 3 Assemble structure of SLD

\* 国家 863 计划重点资助项目  
Tel: 0571-87952767 Email: laogmiao@zju.edu.cn  
收稿日期: 2004-09-30

尔帖制冷器(TEC)工作来调节热沉温度,进而使管芯温度保持恒定.

当管芯处于一个热平衡时,它的吸热量与放热量应该相等. 吸热量是外界环境传入的热量加上管芯自身的发热量,放热量是管芯通过热沉向半导体制冷器冷端释放的热量<sup>[3]</sup>.

关于半导体珀尔帖制冷器的工作原理<sup>[4]</sup>这里不再赘述,重点分析制冷效率和制热效率问题. 制冷系数

$$\epsilon = \frac{Q_c}{N} = \frac{\alpha_{PN}IT_c - 0.5I^2R - K\Delta T}{I^2R + \alpha_{PN}I\Delta T} \quad (1)$$

式中  $\alpha_{PN}$  是珀尔帖系数,  $I$  为回路中的直流电流,  $T_c$  是半导体制冷器冷端温度,  $R$  为材料的电阻,  $\Delta T$  是制冷器冷热结点的温度差,  $R_1$  为热阻. 供热系数

$$\psi = \frac{Q_c + N}{N} = 1 + \epsilon \quad (2)$$

可以看出,热端释放的热量比消耗的电功率大;消耗同样电功率时热端的产热量比冷端的产冷量大.

当冷端温度  $T_c$  为 298K(25℃)时,半导体制冷效率  $\epsilon$  仿真曲线如图 4 中曲线 A. 当热端温度  $T_h$  为 298K(25℃)时,半导体产热效率  $\psi$  仿真曲线如图 4 中曲线 B. 由于半导体制冷器的制冷系数  $\epsilon$  和制热系数  $\psi$  不同,当热端的产热量和冷端的产冷量相同时,所需的驱动电流  $I_{heat}$  和  $I_{cool}$  也应不同.

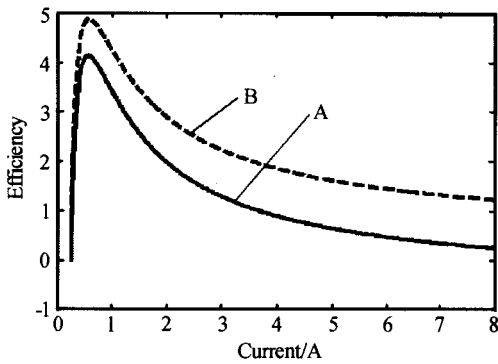


图 4 半导体制冷器制冷效率和产热效率仿真曲线  
Fig.4 Emulation curve of thermal efficiency and cool efficiency

当用传统的模拟方法控制 SLD 光源时,半导体制冷器工作在制冷状态和制热状态时致冷器驱动电流的计算方法是相同的,因此会使两种状态下的控温效果产生差别. 当半导体制冷器工作状态变化时,如从制冷状态跳跃到制热状态时,或者从制热跳跃到制冷状态,都会导致 SLD 光源内部温度跳变,光源的平均波长和光谱宽度都会发生跳变.

由于 SLD 光源组件内的管芯本身是一个热源,释放的热量  $Q_{SLD} = I_{SLD} * V_{SLD} - P$ ,其中  $I_{SLD}$  为驱动电流,  $V_{SLD}$  是管芯两端电压,  $P$  为光功率. 对光源组件进行温度控制中,组件内的温敏电阻被精确控制

在 25℃,当环境温度在 25℃时,半导体制冷器仍工作在制冷状态,因此,交越失真大多发生在 20℃左右.

### 3 全数字温控技术

本文采用“数字恒流源+数字温度控制”方法来抑制“交越失真”现象. 设计原理是:光源的温敏传感信号通过高速、高准确度的数字采样,CPU 实现灵活的驱动控制算法,得出数字控制量,高速 D/A 将数字控制量进行模拟转换,进而实现灵活的 SLD 光源驱动 PID 闭环控制<sup>[5]</sup>.

图 5 是全数字控制系统的硬件图,包括采样模块、控制模块和反馈模块三部分. 采样模块通过多通道高准确度高速 A/D,采集了 SLD 光源模块的特征参量,包括温敏电阻反映的内部温度 (Temperature of TH)、半导体 PN 结的结压 (Voltage of SLD)、光功率 (Power)、驱动电流 (SLD Current)、制冷电流 (TEC Current).

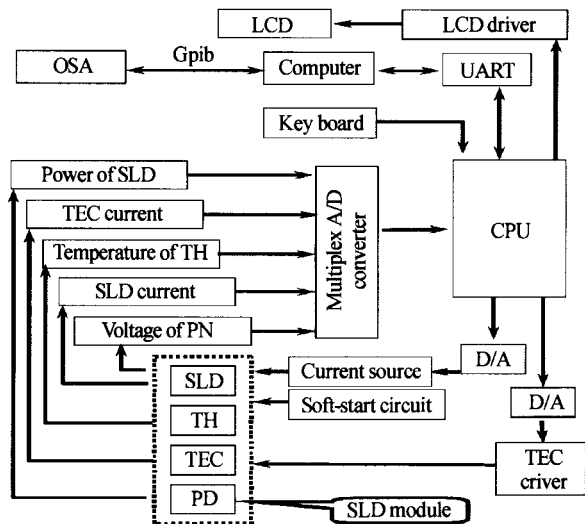


图 5 全数字控制系统硬件图  
Fig.5 Hardware design of all digital control system

系统采用智能 PID 积分分离控制算法,具有稳态误差小、动态性能好、控制准确度高等特点. 控制基本思路是:当被控量与设定值偏差较大时,取消积分作用,以免由于积分作用使系统稳定性降低,超调量增大;当被控量接近给定值时,引入积分控制,以便消除静差,提高控制准确度. 结合本控制系统的特殊应用场合,由于半导体制冷器的制冷系数  $\epsilon$  和制热系数  $\psi$  不同,所以当半导体制冷器处在制冷状态和制热状态时应该采用不同的控制参数,来计算半导体制冷器驱动电流. 设计了改进积分分离的 PID 控制算法,该控制算法的原理框图如图 6. 根据半导体制冷器不同工作状态,CPU 选用相应的两组控制参数.

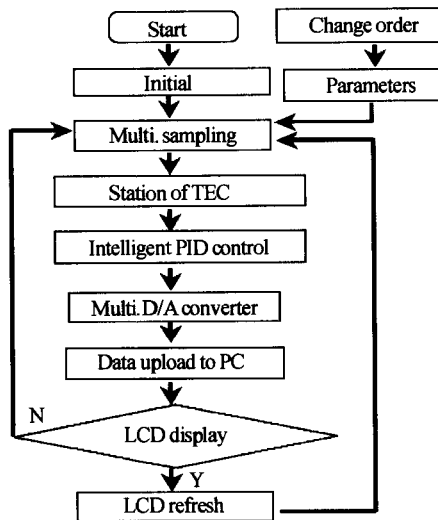


图 6 主控程序流程图  
Fig. 6 Flow diagram of main program

### 4 实验结果

通过大量的实验摸索和工程化实践,改进数字 PID 控制方法和控制参数,  $-15^{\circ}\text{C} \sim 55^{\circ}\text{C}$  温度范围内,光源控制结果具有很好的重复性和一致性,均能很好地抑制“交越失真”现象. 如图 7、8 光谱仪 (OSA) 采样实验数据,平均波长波动 0.014%、光功率波动 0.42% 的控制准确度,相比模拟控制波长 0.22%、光功率 10.3% 控制准确度,提高了一个数量级. 光源温度交越失真的抑制,为 FOG 全温度稳

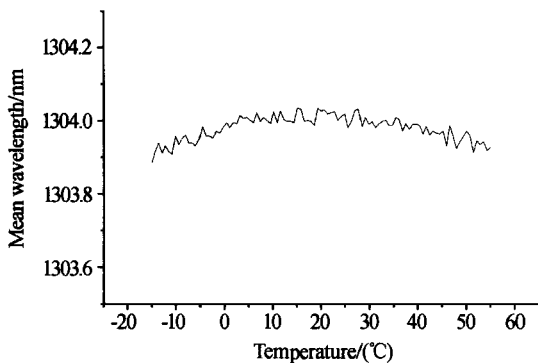


图 7 数字控制的平均波长稳定度  
Fig. 7 Mean wavelength stability of digital control

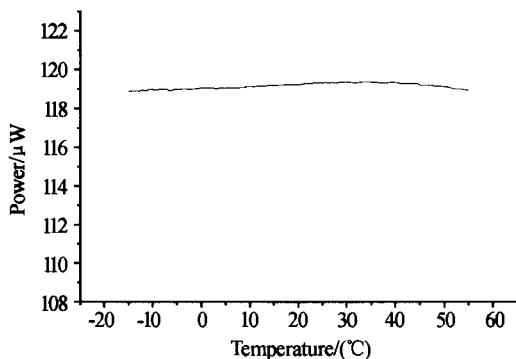


图 8 数字控制的光功率稳定度  
Fig. 8 Power stability of digital control

定工作提供了良好的基础.

在光纤陀螺工程应用试验中,将光源放在  $-15^{\circ}\text{C} \sim 55^{\circ}\text{C}$  连续升温的温箱内,其他光学系统和处理电路恒温置于隔震地基上,用两种控制方法分别进行陀螺测试,图 9 的光源发生温度交越失真, FOG 零偏稳定性测试结果为:  $2.14^{\circ}/\text{h}$ ,陀螺输出中跳跃部分直接影响 FOG 的刻度因子,对于惯性导航系统而言,惯性导航系统易误认为是角速度的变化,产生误动作. 图 10 采用数控方法高精度控制,抑制交越失真, FOG 的零偏稳定性为  $0.21^{\circ}/\text{h}$ , FOG 的性能明显提高.

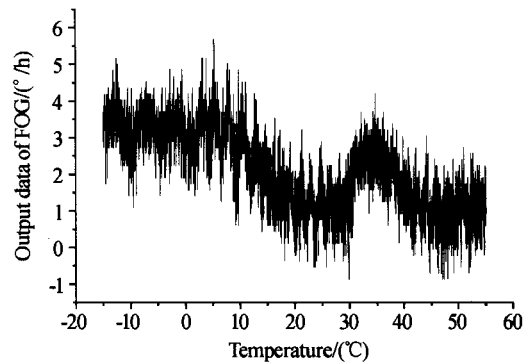


图 9 光源交越失真时 FOG 输出数据  
Fig. 9 Output of FOG with instable SLD

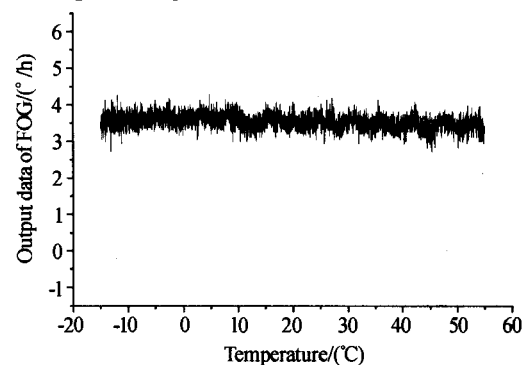


图 10 光源稳定控制时 FOG 输出数据  
Fig. 10 Output of FOG with stable control of SLD

### 5 结论

光纤陀螺全温度范围稳定工作,是其工程化应用的关键因素之一,陀螺采用的光源 SLD 的全温度稳定工作是其中的核心问题. 光源模块采用半导体制冷器控制温度,由于半导体制冷器制冷和制热效率不一致,因此,模拟温控的制冷器工作的冷热交替阶段容易发生“交越失真”现象,光源管芯的温度波动,光源光学特性变化,导致 FOG 输出跳变. 系统采用智能 PID 积分分离数字控制算法,控制方法灵活高效,抑制光源温度交越失真,取得了  $-15^{\circ}\text{C} \sim 55^{\circ}\text{C}$  温度范围内光源平均波长波动 0.014%,光功率波动 0.4% 的控制准确度,采用抑制交越失真控制的光源的 FOG

在全温度范围内的零偏稳定性从  $2.14^{\circ}/\text{h}$  提高到  $0.21^{\circ}/\text{h}$ .

#### 参考文献

- 1 Lefever H. *The Fiber-Optic Gyroscope*. Boston: Artech House, 1993. 68~72
- 2 马东阁, 石家纬.  $1.3 \mu\text{m}$  InGaAsP/InP 涂层结构超辐射发光二极管输出特性的理论和实验. *光子学报*, 1995, **24**(1): 36~42  
Ma D G, Shi J W. *Acta Photonica Sinica*, 1995, **24**(1): 36~42
- 3 杨世铭, 陶文铨. *传热学* (第三版). 北京: 高等教育出版社, 1998. 20~36
- 4 徐扬禾. *制冷系统及其原理*. 北京: 航空工业出版社, 1993. 76~84  
Xu Y H. *Refrigeration System and Theory*. Beijing: Aviation Industry Press, 1993. 76~84
- 5 刘金琨. *先进 PID 控制及其 MATLAB 仿真*. 北京: 电子工业出版社, 2003. 49~63  
Liu J K. *Advanced PID control and Simulation*. Beijing: Publishing House of Electronic industry Press, 2003. 49~63

## Analysis on the Temperature Fluctuating of FOG's Source

Gong Zhaotao, Shu Xiaowu, Mou Xudong, Liu Cheng

State Key Laboratory of Modern Optical Instruments, Zhejiang University, Hangzhou 310027

Received date: 2004-09-30

**Abstract** For the purpose of improving precision and practicability of Fiber Optic Gyroscope, the thermal fabrication of SLD module was analyzed and a detailed description of the all-digital control system had been carried out. The testing result indicated that in a temperature range of  $-15^{\circ}\text{C}$  to  $55^{\circ}\text{C}$ , it restrained the temperature fluctuating of SLD. This technology yielded a much better stability of SLD's wavelength 0.014% and output power 0.4%, which conduced to a much better performance of FOG.

**Keywords** Fiber optic gyroscope; White light source; Super-luminescent; Thermoelectric cooler



**Gong Zhaotao** was born in Qingdao, China, in 1976. He received the B. S. degree in 1999 from Zhejiang University, where he is currently working toward the Ph. D. degree. His current research interests are mainly in fiber sensor and their related opt electronic devices.