

变温环境下 SLD 恒流源的驱动稳定性研究

杨明伟, 汪磊, 杨远洪, 吴长莘

(北京航空航天大学 惯性技术国防科技重点实验室, 北京 100191)

摘要: 超辐射发光二极管(SLD)光源在变温(-45~70℃)环境下的工作稳定性直接影响光纤陀螺的性能,因此,变温(-45~70℃)情况下其恒流源的驱动稳定性就成为系统设计与优化的关键问题之一。根据恒流模式工作原理,建立了等效电路模型,并得到了表征变温环境恒流源稳定性的数学解析式,根据该式给出了变温环境恒流模式设计的设计依据;利用该解析式还对几种不同情况下恒流源的变温稳定性进行了理论分析与计算;最后给出了验证实验,实验结果与理论计算结果相一致。因此,利用该式可以实现对 SLD 恒流源性能的有效评估,这对于变温环境下 SLD 光源驱动设计具有重要指导意义。

关键词: 恒流源; SLD; 光纤陀螺

中图分类号: TN312.8 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)11-3024-05

Stability of constant current source for SLD in variable temperature environment

Yang Mingwei, Wang Lei, Yang Yuanhong, Wu Changxin

(National Key Laboratory of Inertial Technology, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: The stability of superluminescent diode (SLD) characteristics in the temperature of -45~70℃ directly affects the performance of fiber optic gyroscope, therefore, the stability of the constant current mode in the temperature of -45~70℃ has become one of the key issues of system design and optimization. In this paper, the circuit model was presented and the analytic form of the temperature stability of constant-current source was given, and some design rules were also presented according to the formula. Meanwhile, using the analytical formula, the theoretical analysis and calculation of the temperature stability of the constant current source under several different conditions were done, consistent with theoretical calculations and experimental results. The performance of SLD constant current source can be effectively assessed with this formula, and it is of important guiding significance for the SLD driver design.

Key words: constant current source; SLD; IFOG

收稿日期: 2013-03-23; 修订日期: 2013-04-26

基金项目: 北航青年教师预研项目(YWF-13-B03-031)

作者简介: 杨明伟(1979), 男, 讲师, 硕士生导师, 主要从事激光技术及光纤传感技术方面的研究。Email: yangmingwei@buaa.edu.cn

0 引言

超辐射发光二极管(SLD)具有相干长度短、输出功率高和光束发散角小等优点,这些性质对于降低光纤陀螺的光子噪声等具有重要作用,使其成为中低精度光纤陀螺普遍采用的光源。而 SLD 光源的稳定度对光纤陀螺精度有很大影响^[1-2],因此,研究有效的 SLD 光源驱动技术是光纤陀螺工程化中的关键任务之一。

目前,已经报道的驱动与控制方法包括^[3-6]:模拟的“恒流+温控”方案、数字的“恒流+温控”方案、直接模拟光控方案、直接数字光控方案、“光控+温控”方案。在这些方案中,由于“恒流+温控”方案结构简单,容易实现,所以在中低精度光纤陀螺系统中得到广泛应用。由于光纤陀螺的工作温度往往是变温状态下(一般为-45~70℃),而 SLD 光源变温环境的工作稳定性直接影响光纤陀螺的性能,因此,变温环境下恒流源的稳定性就成为系统设计与优化的关键技术之一。尽管关于 SLD 光源恒流技术的原理、设计、实验等已有诸多报道^[7-9],但已有文献中尚未见对变温情况下恒流源工作稳定性这一问题深入研究并作出定量分析的报道。

文中从 SLD 恒流模式工作原理为切入点,首先分析了其闭环稳定性,然后依据工作原理推导并得出了表征恒流模式变温稳定性的解析式,根据该式给出了恒流模式变温下设计的设计依据;进而对设定电压与取样电阻在变温情况下的变化所产生的影响进行了定量分析,利用该解析式,对几种不同情况下恒流模式的变温稳定性进行了理论计算;最后,给出了相应的验证实验,结果表明,理论计算结果与实验结果相一致。

1 恒流源工作原理及闭环稳定性分析

图 1 是典型的 SLD 恒流模式电路原理图。

通过电压设定模块(Voltage source)、比较控制和 OCL 功率放大电路组成了基本放大电路,把与 SLD 串联的取样电阻的两端电压作为反馈信号通过仪表放大器(Instrumentation Amplifier) U2 放大后反馈回输入端,实现了闭环负反馈控制。

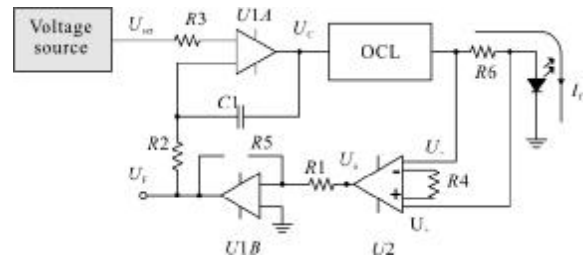


图 1 恒流模式原理图

Fig.1 Schematic of constant current source

由于环路稳定性是设计的基础,因此这里首先对恒流模式的闭环稳定性进行分析。恒流模式实质上是一个采用电流串联负反馈的压控电流源,因此上述电路的等效反馈放大电路原理框图如图 2 所示。

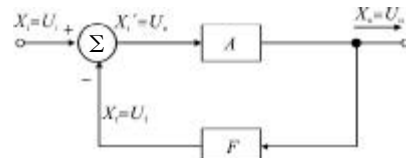


图 2 反馈放大电路原理框图

Fig.2 Schematic of amplified feedback circuit

反馈放大电路主要由基本放大电路及反馈网络组成,基本放大电路的输出端有取样网络,对输出信号 I_o 进行取样,反馈至基本放大电路的输入端。基本放大电路输入端有相加网络,用于输入信号 U_i 与反馈信号 U_f 的比较,将比较结果 U_o 作为基本放大电路的输入信号。基本放大电路的放大倍数为 A ,反馈系数为 F ,负反馈放大电路的放大倍数(又称闭环放大倍数)为 A_f 。根据反馈放大电路的基本原理可得下式:

$$A_f = \frac{A}{1+AF} \tag{1}$$

由于引入深度负反馈,即 $1+AF \gg 1$, $A_f = 1/F$,放大倍数仅仅取决于反馈网络,与基本放大电路无关。在反馈网络中,存在增益与温度密切相关的运算放大器 U_1 和仪表放大器 U_2 。由于实际中选择的运放开环增益一般在 120~140 dB,因此尽管其增益会随温度变化,不过这种增益变化对闭环系统影响非常小, U_1 的影响可忽略不计。这里只考虑仪表放大器 U_2 的增益 K_i 变化带来的影响。根据电流串联负反馈的工作原理,可以得到下式:

$$A_f = \frac{1}{F} = \frac{1}{K_i R_6} \tag{2}$$

假设取样电阻的温度系数为 α , 仪表放大器的增益温度系数为 γ , 对上式求微分, 得:

$$dA = - \left(\frac{1}{K_1 R_6^2} dR_6 + \frac{1}{R_6 K_1^2} dK_1 \right) = - \left(\frac{\alpha T + \gamma T}{R_6 K_1} \right) \quad (3)$$

根据公式(3), 可以得到以下结论: 闭环增益稳定性与取样电阻、仪表放大器的特性相关; 取样电阻和仪表放大器的增益越大, 闭环增益稳定性越好; 同时, 取样电阻温度系数和仪表放大器增益温度系数越小, 闭环增益稳定性也越好。

2 变温环境恒流模式的稳定性分析

2.1 表征变温环境恒流模式稳定性的解析式

根据虚短虚断分析原则, 可以对图 1 所示电路进行计算, 得到输入与输出的关系。在 $R_2=R_3, R_4$ 开路的条件下, 流过 SLD 的输出电流 I 与电压设定模块产生的输入电压 U_{SET} 的关系为:

$$I = \frac{U_{SET} R_1}{K_1 R_5 R_6} \quad (4)$$

式中: R_6 为取样电阻, R_1 和 R_5 为反馈网络电阻。

在理想情况下, 由公式 4 可知, 对于电阻 R_1, R_5, R_6 , 假设它们的阻值是定值, 同时仪表放大器增益不变, 那么输出电流 I 与控制电压 U_{SET} 满足良好的线性关系, 同时输出电流将稳定输出。但在实际情况下电阻的温度系数、电压设定模块的温度系数等都将影响输出电流的稳定性。这里对关系式(4)进行全微分, 可以得到影响输出电流稳定性的因素如式:

$$\frac{dI}{I} = \frac{1}{I} \left[\frac{R_1}{K_1 R_5 R_6} dU_{SET} - \frac{R_1 U_{SET}}{R_5 R_6 K_1} dR_5 - \frac{R_1 U_{SET}}{R_5 R_6 K_1} dR_6 + \frac{U_{SET}}{R_5 R_6 K_1} dR_1 - \frac{U_{SET}}{R_5 R_6 K_1^2} dK_1 \right] \quad (5)$$

上式中, 第一项, $A_1 = R_1 / R_5 R_6$ 表示电压设定模块产生的设定电压不稳定引起的影响; 第二项 $A_2 = R_1 U_{SET} / R_5^2 R_6$ 和第四项 $A_4 = U_{SET} / R_5 R_6$ 表示由反馈网络电阻温度系数引起的影响; 第三项 $A_3 = U_{SET} R_1 / R_5 R_6^2$ 表示由取样电阻温度系数引起的影响; 第五项 $A_5 = U_{SET} / R_5 R_6 K_1^2$ 表示由仪表放大器增益温度系数引起的影响。

由于反馈网络的电阻阻值为同一数量级, 当选择温度特性接近的同一批次器件时, 根据公式(5)可知, 由反馈网络电阻的温度系数引起的影响相互抵

消, 可以忽略。因此得到公式(6):

$$\begin{aligned} dI &= \frac{R_1}{R_5 R_6 K_1} dU_{SET} - \frac{R_1 U_{SET}}{R_5 R_6 K_1} dR_6 - \frac{U_{SET}}{R_5 R_6 K_1^2} dK_1 \approx \\ & \frac{1}{R_6 K_1} dU_{SET} - \frac{U_{SET}}{R_6 K_1} dR_6 - \frac{U_{SET}}{R_5 R_6 K_1^2} dK_1 = \\ & \frac{1}{R_6} dU_{SET} - \frac{U_{SET}}{R_6^2} dR_6 - \frac{U_{SET}}{R_5 R_6} dK_1 \end{aligned} \quad (6)$$

这里假设取样电阻的温度系数为 a , 变温环境下温度变化为 T , 自身发热导致温度变化为 T_r , 则取样电阻变化为 $\alpha(T+T_r)R_6$; 电压设定模块产生的输入电压 U_{SET} 的温度系数为 β , 则变温下设定值 U_{SET} 变化为 $\beta T U_{SET}$; 仪表放大器的增益温度系数为 γ , 则变温下其增益 K_1 变为 $\gamma T K_1$; 综上, 则公式(6)变为:

$$\begin{aligned} dI &= \frac{1}{R_6} dU_{SET} - \frac{U_{SET}}{R_6^2} dR_6 - \frac{U_{SET}}{R_5 R_6} dK_1 = \\ & \frac{U_{SET} \beta T - U_{SET} \alpha (T + T_r) - U_{SET} \gamma T}{R_6} = \\ & \frac{U_{SET} T}{R_6^2} (\beta - \alpha - \gamma) \end{aligned} \quad (7)$$

综上, 得到表征变温环境恒流模式稳定性的解析式(7), 根据该式可以得出如下结论:

(1) 由于反馈网络的电阻阻值为同一数量级, 当选择温度特性接近的同一批次器件时, 由反馈网络电阻的温度系数引起的相互抵消, 可以忽略;

(2) 影响变温环境恒流稳定性的主要因素是电压设定模块产生的输入电压、取样电阻和仪表放大器增益变化;

(3) 电压设定模块产生的输入电压和取样电阻及仪表放大器增益变化具有相同变化方向的温度系数时, 可以提高恒流稳定性。同时需要选择低温漂系数也可以提高恒流稳定性, 当然这需要权衡性价比;

(4) 取样电阻还需要考虑自热问题, 在选择阻值时, 要平衡闭环稳定性与发热的关系。

2.2 变温环境恒流稳定性的理论计算

根据以上解析式和相应结论, 着重对电压设定模块产生的设定电压、取样电阻和仪表放大器的变温变化所产生的影响进行定量分析与计算, 其中各器件的计算参数有: 取样电阻 R_6 的阻值为 10Ω 。反馈网络中电阻 R_1 和 R_5 的阻值为 $20 k\Omega$, $U_{SET} = 1V$, $K_1 = 1$ 。

电压设定模块产生设定电压通常有两种方式, 一种是数模转换器(DAC)产生设定电压, 另一种是

采用分压电阻直接分压。对于前一种情况,只需要考虑 DAC 输出的变温变化,而对后一种情况,还需要考虑分压后电路带来的负载效应。

2.2.1 DAC 产生设定电压

对于这种情况,根据实际选用 DAC 器件的芯片资料可知,固定设定值时,其变温环境(-45℃~70℃)输出变化大约在 3 mV,因此其温度系数为正, βT 约为 0.003。取样电阻为 3210 封装(1W)的金属膜电阻,其温漂系数一般为 $\pm 100 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$ ($1 \text{ ppm}=10^{-6}$)。由于采用的都是正温度系数的电阻,如果不考虑自身发热,其 $\alpha T=0.0115$,电阻变化大约为 0.0357 Ω 。对于仪表放大器,增益为 1 时,其增益温度系数一般为 10 $\text{ppm}/^\circ\text{C}$,则其 $\gamma T=0.00115$ 。由 $\beta T=+0.003$, $\alpha T=0.0115$, $\gamma T=0.00115$,于是有温漂系数 $\beta T-\alpha T-\gamma T=-0.00965$,其说明电流变化是随温度升高而减少。根据公式(7),则可计算电流变化为 0.965 mA(而且是减小),再根据设定电流 100 mA,由此得出变温下恒流变化大约为 0.965%左右。

2.2.2 电阻分压

对于这种情况,变化要更复杂一些,不但要考虑基准电压的变化,而且需要考虑分压电阻的影响。

首先考虑基准电压的变化,对于工业级应用,基准电压芯片可以选择 MAX873,对于 MAX873,其温漂系数理论值是 7 $\text{ppm}/^\circ\text{C}$ ($1 \text{ ppm}=10^{-6}$),变温下(-45~70℃)电压大约变化 2~3 mV,这与单独对芯片输出实测的结果基本一致。再考虑分压电阻的变化,由于分压电阻均为 1 金属膜电阻,温漂系数一般为 $\pm 100 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$ 。考虑到所用的都是正温度系数,根据简单的分压计算得到变温下设定电压变化最大为 1.2 mV, $\beta T=-0.0012$,注意这里是负温度系数;同样,取样电阻为 3210 封装(1W)的金属膜电阻,其温漂系数一般为 $\pm 100 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$ 。笔者采用的都是正温度系数的电阻,如果不考虑自身发热,其 $\alpha T=0.0115$;对于仪表放大器,增益为 1 时,其增益温度系数一般为 10 $\text{ppm}/^\circ\text{C}$,则其 $\gamma T=0.00115$ 。由 $\beta T=-0.0012$, $\alpha T=0.0115$, $\gamma T=0.00115$,则得到温漂系数 $\beta T-\alpha T-\gamma T=-0.01385$,说明电流变化随温度升高而减少。

据公式(7)可计算电流变化为 1.385 mA,再根据设定电流 100 mA,由此得出变温下恒流变化大约为 1.385%。与第一种情况相比,由于设定电压和取样

电阻及仪表放大器增益变化具有不同变化方向的温度系数,这导致电流变化增大,其稳定性变差。

2.2.3 考虑取样电阻自热的情况

上述两种情况均假设取样电阻自身发热为零,而在实际当中这是不能忽略的。

光源实际工作时,取样电阻在 100 mA,环境温度 70℃时,再考虑电路板本身发热,可以假设温度平衡时取样电阻温升为 20℃,则取样电阻变温变化系数 $\alpha T=0.0135$ 。在第一种 DAC 情况下,根据公式(7)可计算变温电流变化为 1.165 mA。在第二种电阻分压情况下,根据公式(7)可计算变温电流变化为 1.585 mA。表明,在高稳定性设计中取样电阻的自热是必须考虑的因素,而这往往是设计者忽略的因素。

3 变温环境恒流模式稳定性的测试实验

在前面理论分析的基础上,进行了变温环境下恒流模式稳定性的测试实验。首先对取样电阻在变温下的变化情况进行了测试,然后对实际 SLD 恒流模式的稳定性进行了测试。

3.1 取样电阻温漂系数测试

采用六位半数字万用表,在变温环境下(-45~70℃)单独对大小为 10 Ω 的取样电阻的阻值进行测量。结果如图 3 所示。由图 3 可得,变温情况下 $\Delta \Omega=0.011 \Omega$,计算其温漂系数大约为 92 $\text{ppm}/^\circ\text{C}$ 。这与厂家提供的数

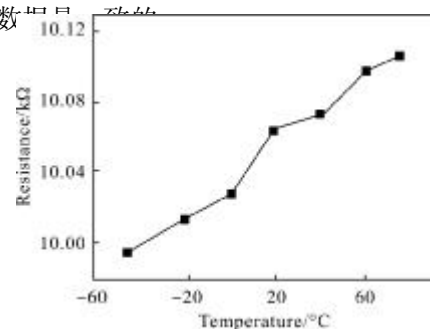


图 3 取样电阻的电阻变化

Fig.3 Change of sampling resistance

3.2 恒流模式稳定性测试实验

由前述工作原理的恒流源为 SLD 提供电流驱动,其中电压设定模块采用电阻分压方式。采用六位半数字万用表测试取样电阻两端电压。由于变温情况下取样电阻变化已知,因而就可以得到变温环境

恒流源电流的变化情况。

根据上述思路,测试得到变温情况下电流的变化曲线如图 4 所示。从图 4 可以得到,电流变化大约为 1.6 mA,这与理论预期的 1.585 mA 接近一致。实验结果表明利用解析公式(7)可以有效评估所 SLD 恒流源的稳定性

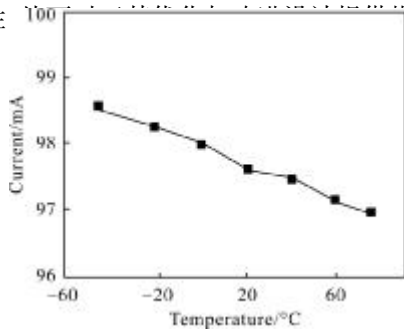


图 4 变温情况下恒流源电流的变化

Fig.4 Current change of constant current source in variable temperature environment

4 结 论

针对变温环境下 SLD 恒流模式稳定性问题,开展了较为深入的理论与实验研究,得到了表征变温环境恒流源稳定性的解析式,并得到如下结论:由于反馈网络的电阻阻值为同一数量级,当选择温度特性接近的同一批次器件时,由反馈网络电阻的温度系数引起的影响相互抵消,可以忽略;影响变温环境恒流稳定性的主要因素是电压设定模块产生的输入电压、取样电阻和仪表放大器增益变化;设定电压和取样电阻及仪表放大器增益变化具有相同变化方向的温度系数时,可以提高恒流稳定性。选择低温漂系数也可以提高恒流稳定性,当然这需要权衡性价比;取样电阻需要考虑自热问题,在选择阻值时,要平衡闭环稳定性与发热的关系;利用该解析式可以有效评估变温情况下所设计恒流源的稳定性。这对于中低精度光纤陀螺的 SLD 光源电路设计以及性能优化具有重要

的实用价值。

同时,文中得到的结果不但适用于 SLD 恒流源系统的设计,同样也适用于半导体激光器、LED 等恒流源系统的设计。

参考文献:

- [1] Zhang Chen, Yi Xiaosu, Yang Yanming, et al. Effects of degree of polarization of SLD on the performance of fiber optic gyroscope [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(3): 509-514. (in Chinese)
- [2] Xiao bin, Yi Xiaosu, Zhang Chunxi. Parameters modeling of super-luminescent diode and its compensation technology [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(2): 352-354. (in Chinese)
- [3] Li Qingdong, Lu Jun, Liu Jun. Study on control method for SLD of fiber optic gyroscope[J]. *Optical Instruments*, 2011, 33(4): 52-55. (in Chinese)
- [4] Li Guanghua, Liu Jun, Yin Jianling, et al. Design of driving circuit for multicenter SLD light source test system [J]. *Transducer and Microsystem Technology*, 2011, 30(4): 90-92. (in Chinese)
- [5] Li Jun, Liu Jun, Yin Jianling, et al. Design of miniature and digital controlling system of SLD based on SoC single chip microcomputer [J]. *Optical Instruments*, 2010, 31(4): 65-69. (in Chinese)
- [6] Gong Zhaotao, Shu Xiaowu, Mou Xudong, et al. All digital control system on the light source SLD of FOG [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2005, 26(7): 689-691. (in Chinese)
- [7] Pei Yapeng, Yang Jun. Design and experiment research of driving circuit for SLD source [J]. *Optical Instruments*, 2005, 27(6): 58-60. (in Chinese)
- [8] Liu Jie, Li Taihe, Liu Jun, et al. Design and realization of FOG source's driving circuit with low power dissipation [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2005, 34(3): 364-367. (in Chinese)
- [9] Zhang Xi, Wang Yan, Zhang Chunxi. Driving technology of the light source of FOG [J]. *Journal of Beijing University of*