

用于光纤电流传感器 SLD 光源的温度控制系统

曹 辉^{1,2}, 杨一凤¹, 刘尚波¹, 徐金涛¹, 赵 卫¹

- (1. 中国科学院西安光学精密机械研究所 瞬态光学与光子技术国家重点实验室, 陕西 西安 710119;
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 为减小高压电网中光纤电流传感器超辐射发光二极管(super luminescent diode, SLD)光源温度特性对测量准确度的影响, 提出了一种模拟温度控制系统对光源温度进行恒温控制。根据设计要求, 介绍了各重要环节的设计过程。分析了通过搭建合适的温度采集电桥, 可以得到与温度近似成线性关系的输出差分信号。在频域上建立了系统的数学模型, 计算了系统的传递函数, 得到了比例-积分-微分(proportional-integral-derivative, PID)控制器各参数对时域上输出的影响。在实验室中搭建了用于光纤电流传感器 SLD 光源的温控系统, 对温控系统进行了定温与温度循环实验, 实验结果表明: 该控制系统可以实现对温度的实时控制, 使光纤电流传感器测量准确度满足 0.2 级工业要求。

关键词: 光纤电流传感器; 超辐射发光二极管光源; 实时温度控制; 传递函数; PID 控制器
中图分类号: TN21 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)03-0920-07

Temperature control system for SLD optical source of FOCS

Cao Hui^{1,2}, Yang Yifeng¹, Liu Shangbo¹, Xu Jintao¹, Zhao Wei¹

- (1. State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: To lower the influence of optical source temperature property on the precision of fiber optic current sensor(FOCS) in high voltage grid, an analog temperature control system was proposed to control the optical source working temperature. According to the designed goal, design process of each key section was introduced. A proper temperature signal bridge was analyzed which could obtain a linear relationship between the output differential voltage and temperature. The mathematical model of the system was established in the frequency domain; the transfer function of the system was calculated; and the parameters of proportional-integral-derivative (PID) controller were analyzed in the time domain. A temperature controller used for FOCS super luminescent diode (SLD) optical source was designed, which was verified by fixed temperature test and temperature cycle test. The results show that by means of the real time temperature control, the accuracy of FOCS is up to 0.2 level which reaches industry requirements.

Key words: fiber optic current sensor(FOCS); super luminescent diode(SLD) optical source; real time temperature control; transfer function; PID controller

收稿日期: 2013-07-09; 修订日期: 2013-08-23

作者简介: 曹辉(1989-), 男, 硕士生, 主要从事光电测量技术及其在电力系统中的应用。Email: caohui@opt.cn

导师简介: 徐金涛(1979-), 男, 副研究员, 硕士, 主要从事光纤电流互感器的研制及其在智能电网中的应用研究。

Email: xujintao@opt.ac.cn

0 引言

随着电力系统中电网电压等级的不断提高、容量不断增大以及智能电网的信息化、数字化、自动化、互动化的要求,基于 Faraday 效应测量电流的光纤电流传感器(fiber optic current sensor, FOCS)以其绝缘性好、测量范围大、动态响应性能好、与现代数字控制和保护系统兼容等优点成为了传统电流传感器的替代品^[1-5]。

光纤电流传感器是通过受 Faraday 效应作用的两束偏振光的干涉并检测其相位差的变化来测量电流,其工作原理如图 1 所示。光源发出的光经过耦合

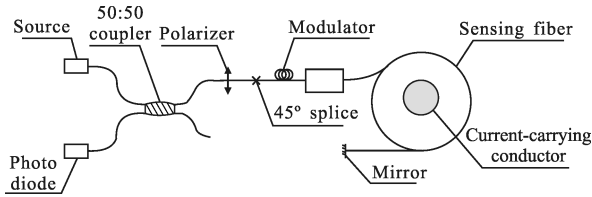


图 1 反射式光纤电流传感器

Fig.1 In-line Sagnac interferometer current sensor

器后有光纤偏振器起偏,形成线偏振光。线偏振光以 45° 注入保偏光纤,被平均注入保偏光纤的 X 轴和 Y 轴传输。当这两束正交模式的光经过 $\lambda/4$ 波片后,分别转变为左旋和右旋的圆偏振光,进入传感光纤。由于待测电流会在其周围产生感应磁场,根据偏振光束的法拉第磁场效应,这两束圆偏振光以不同的速度传输。经过光纤端面的镜面反射后,传播方向变反,同时两束圆偏振光的偏振模式互换,即左旋光变为右旋光,右旋光变为左旋光。由于传播方向与旋向都发生变化,反向传输的两束圆偏振光依然保持其原来的速度。这两束光再次通过 $\lambda/4$ 波片后,恢复为线偏振光,并在偏振器处发生干涉。最后,携带相位信息的光由耦合器耦合进探测器。由于发生干涉的两束光在光路的传输过程中,分别都通过了保偏光纤的 X 轴和 Y 轴与传感光纤的左旋和右旋模式,因此返回探测器的光只携带了由法拉第效应产生的非互易相位差。其表达式为:

$$I_{\text{out}}=I_{\text{in}}\left(\frac{1}{2}+\frac{1}{2}\cos(4VNI)\right) \quad (1)$$

式中: V 为 Verdet 常数; I 为待测电流; N 为传感光纤的线圈匝数。由公式(1)可以看出,通过检测探测器

的光强信息就可以解调出待测电流的大小,从而达到测量电流的目的。根据光纤陀螺的应用原理,通常在 45° 熔接点后加入相位调制器,使两束线偏振光之间产生一个固定的相位差,来提高传感器的电流敏感性,并且实现正负电流的测量。

目前,光纤电流传感器普遍采用半导体超辐射发光二极管(super luminescent diode, SLD)作光源,它具有输出光功率高、相干长度短、光谱宽等特点,能够显著降低偏振交叉耦合引起的相干误差,提高系统的信噪比。但是,SLD光源是对温度敏感的器件,光纤电流传感器的测量结果与光源输出光功率和光波长有关^[6-8],因此测量的电流值将随温度的变化产生漂移。科研人员采用了大量技术手段克服传感器的温度敏感性^[9-10],但光源的传统温度控制系统在高压复杂环境下的温度稳定性却并不理想^[11-13],因此需要设计更为可靠的温控系统。为保证光纤电流传感器在高压环境下测量的实时性和准确性,提高运行可靠性,文中采用模拟器件电路驱动半导体制冷器(thermo electric cooler, TEC)对 SLD 光源进行温度控制。该电路利用比例-积分-微分(proportion-integral-derivative, PID)补偿网络对温度进行模拟线性控制,纹波小,避免了开关噪声问题;响应速度快,实现了对温度的实时控制。在室温范围 $15^\circ\text{C}\sim 30^\circ\text{C}$ 内对光源进行 25°C 的恒温控制,控制精度可以达到 $\pm 0.03^\circ\text{C}$,满足实际的应用需要。

1 系统设计

为实现对光纤电流传感器 SLD 光源的温度控制,采用的系统方案如图 2 所示。

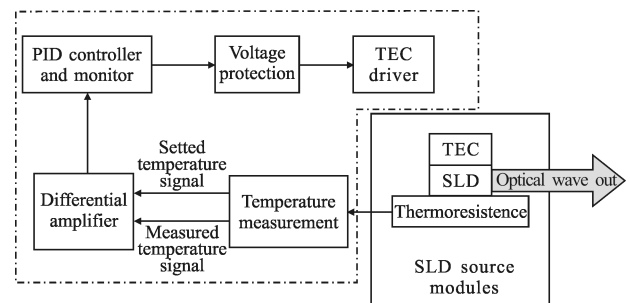


图 2 温控系统整体设计方案图

Fig.2 Schematic of temperature controller

系统采用的 SLD 光源模块包含 SLD 光源、半导体热制冷器 TEC 和负温度系数(negative temperature

coefficient, NTC)热敏电阻, TEC 和 NTC 热敏电阻附着在 SLD 光源两侧, 分别实现对 SLD 光源模块温度的控制和测量^[14]。系统通过温度电桥将光源模块的实时温度转化为电压信号, 这个实时测量的温度电压信号与设定的温度电压信号由差分电路得到温度误差信号, 然后经过 PID 补偿网络和 TEC 的驱动电路就可以驱动 TEC, 准确地对 SLD 光源进行温度控制。为了保证系统对温度控制的精度, 必须满足以下两点要求:

(1) 电路的噪声不能淹没能分辨的最小温度误差信号, 并且采用的运算放大器的输入失调电压必须小于最小温度误差信号;

(2) TEC 的驱动电路不能存在交越失真, 否则,

在 PID 补偿网络中就会放大电路中的噪声, 从而影响到温度控制系统的精度。

同时, 在全温范围 $-40 \sim 60 \text{ }^\circ\text{C}$ 内, 为了保证 TEC 的正常工作, 采用了稳压电路, 使温度误差信号维持在一定范围内, 避免损坏 TEC。

2 系统各环节的设计及实现

2.1 温度信号采集系统

选用的 SLD 光源模块集成有 NTC 热敏电阻, 其阻值随着温度的升高而减小。温控电路设计如图 3 所示。通过标定, 热敏电阻在全温范围 $-40 \sim 60 \text{ }^\circ\text{C}$ 的阻值范围是 $252.96 \sim 2.64 \text{ k}\Omega$, 因此可以通过对热敏电阻搭建电桥的方法将温度转换为电信号, 如图 3(a)所

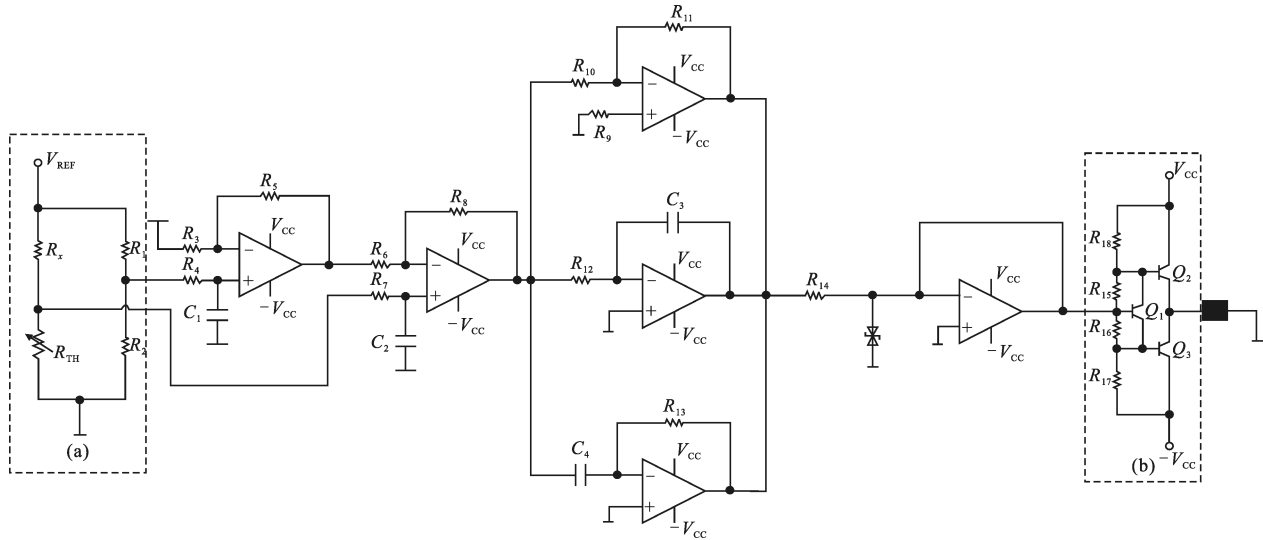


图 3 温控电路设计

Fig.3 Circuit design of temperature control system

示。电桥两路电压信号的差值 ΔU 为:

$$\Delta U = \frac{V_{REF}}{R_1 + R_2} \cdot R_2 - \frac{V_{REF}}{R_x + R_{TH}} \cdot R_{TH} = V_{REF} \cdot \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} - \frac{1}{R_x / R_{TH} + 1} \right) \quad (2)$$

式中: R_{TH} 为热敏电阻阻值。很明显, ΔU 对应 R_{TH} 非线性变化, 电桥电路引入了非线性误差, 不利于温度的高精度控制。为了实现对温度的高精度线性控制, 应尽量使获得的差分电压信号随温度变化呈线性关系。虽然电桥的差分电压与热敏电阻阻值的变化是非线性的, 但由于热敏电阻的阻值随温度的变化也是非线性的, 因此, 当选取合适的 R_x 后仍可以得到在温度变化范围内接近线性的变化的差分电压信

号。首先确定热敏电阻在特定温度下的阻值: 在最低温度 $-40 \text{ }^\circ\text{C}$ 时的阻值 $R_{T1} = 252.96 \text{ k}\Omega$, 最高温度 $60 \text{ }^\circ\text{C}$ 时的阻值 $R_{T3} = 2.64 \text{ k}\Omega$, 在中间温度 $10 \text{ }^\circ\text{C}$ 时的阻值 $R_{T2} = 20.82 \text{ k}\Omega$ 。根据公式^[15]:

$$R_x = \frac{R_{T1}R_{T2} + R_{T2}R_{T3} - 2R_{T1}R_{T3}}{R_{T1} + R_{T3} - 2R_{T2}} \quad (3)$$

可以得到 $R_x = 18.63 \text{ k}\Omega$ 。因为要对 SLD 光源进行 $25 \text{ }^\circ\text{C}$ 的温度控制, 因此取 R_2 的阻值为热敏电阻在 $25 \text{ }^\circ\text{C}$ 时的阻值 $10.35 \text{ k}\Omega$, 并且令 $R_1 = R_x = 18.63 \text{ k}\Omega$, 这样温度电压与参考电压在 $25 \text{ }^\circ\text{C}$ 时的温度相等, 输出温度误差信号为零。对标定的热敏电阻阻值做拉格朗日插值运算, 可以得到热敏电阻与温度的关系表达式, 再利用公式(2), 做出温度与输出差分电压的

关系图。如图 4 所示,输出差分电压与温度的变化在-20~60 °C 范围内近似呈线性关系。

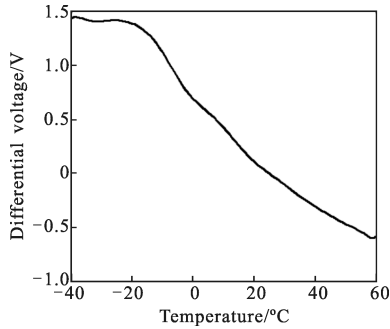


图 4 输出差分电压与温度关系曲线

Fig.4 Curve of relationship between differential voltage and temperature

2.2 模拟 PID 补偿网络

PID 控制电路是最早发展起来的控制策略之一,由于算法简单、鲁棒性好和可靠性高,被广泛应用于过程控制和运动控制中,尤其适用于可建立精确数学模型的确定性控制系统。文中采用模拟电路搭建的 PID 补偿网络,其数学表达式为:

$$Y(t)=K_p x(t)+\frac{1}{T_1} \int_0^t x(t) dt+T_2 \frac{dx(t)}{dt} \quad (4)$$

式中: K_p 为比例放大系数 $K_p=R_{11}/R_{10}$; T_1 为积分时间常数 $T_1=1/(R_{12}C_3)$; T_2 为微分时间常数 $T_2=1/(R_{13}C_4)$ 。且 PID 的传递函数表达式为 $G_1(s)=K_p+1/(T_1 \cdot s)+T_2 \cdot s$, 通过调节 R_{10} 、 R_{11} 、 R_{12} 、 R_{13} 的值就可以在短时间内实现温度的恒温控制。

2.3 稳压电路设计

由于在 PID 补偿网络中包含比例放大电路,因此为了避免将温度误差信号放大过多而损坏 TEC,必须要对 PID 控制电路的输出信号进行限幅,使 TEC 处于正常工作状态。文中采用两个稳压二极管组成双向稳压管,实现对正负电压信号的限幅。在稳压管钳制点位处加入一个运放组成电压跟随器,提供一个高输入阻抗,减小后级电路对稳压电路的分流作用。

2.4 TEC 驱动电路设计

根据前端输出电压信号来驱动 TEC 的工作,因此需要甲乙类推挽电路来控制经过 TEC 两端的电流方向。当输入信号为正时,NPN 型三极管 Q_2 导通,电流从 $+V_{CC}$ 经过 TEC 流入接地端,TEC 加热使温度升高;当输入信号为负时,PNP 型三极管 Q_3 导通,电

流从接地端经过 TEC 流入 $-V_{CC}$,TEC 制冷使温度降低。在这个电路中,最关键的就是消除由于三极管引起的交越失真问题。经过大量的实验论证,最终选用如图 3(b)所示的电路设计。流入 Q_1 的基极电流远小于流过 R_{15} 、 R_{16} 的电流,由图可求出 $V_{CE1}=V_{BE1}(R_{15}+R_{16})/R_{16}$,由于制造工艺差异, Q_2 和 Q_3 之间的导通电压随器件的不同会有差异,因此需要首先在实验中确定这个电压值。利用 Q_1 管的 V_{BE1} 基本为一固定值,通过调节 R_{15} 、 R_{16} 来控制 Q_2 和 Q_3 之间的偏压,使之处于微导通状态,消除交越失真。

3 系统的数学模型分析及 PID 的参数调节

首先在 s 域建立系统的数学模型,在系统的工作过程中,TEC 温度与驱动电流的关系可以用一阶惯性环节来表示 $F_1(s)=k_1/(s+\tau_1)$;而热敏电阻输出的电压变化与温度的关系存在响应延迟,也可以用一阶惯性环节来表示 $F_2(s)=k_2/(s+\tau_2)$ ^[6]。其中 k_1 、 k_2 、 τ_1 、 τ_2 为固定值,与选用的 TEC 帕尔帖系数、热敏电阻温度系数有关。总的系统的数学模型如图 5 所示,图中 U_{set} 为设定的温度电压信号,为一定值; K_1 为差分放大倍数; T 为光源的温度,当系统达到稳定后,为一恒定值。

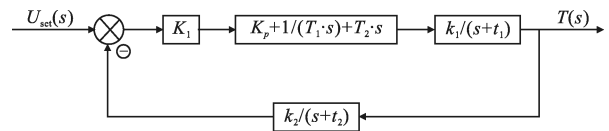


图 5 温控系统的数学模型

Fig.5 Mathematical model of the system

因此系统的传递函数为:

$$H(s)=\frac{K_1(K_p+1/(T_1s)+T_2s)(k_1/(s+\tau_1))}{1+K_1(K_p+1/(T_1s)+T_2s)\frac{k_1 \cdot k_2}{(s+\tau_1)(s+\tau_2)}} \quad (5)$$

当输入一个阶跃电压,输出电压在 s 域可以表示为:

$$T(s)=H(s) \cdot U_{set}(s)=\frac{K_1(K_p+1/(T_1s)+T_2s)(k_1/(s+\tau_1))}{1+K_1(K_p+1/(T_1s)+T_2s)\frac{k_1 \cdot k_2}{(s+\tau_1)(s+\tau_2)}} \quad (6)$$

在 Matlab 中对上式进行拉普拉斯反变换就可以得到输出电压在时域上的表示形式。通过实验测量数据绘制幅频和相频特性曲线,并通过最小二乘法拟合,可以得到 TEC 和热敏电阻的特性参数 k_1 、 k_2 、 τ_1 、 τ_2 分别为 1.7、3、0.06、1.5^[17]。对比不同控制参数

下的输出曲线,如图 6 所示。

图中, P 为比例系数, I 为积分系数, D 为微分系数。由图(a)可以看到,只有比例环节时,当比例系数增大时,系统会出现振荡,并且比例系数越大,振荡越厉害。在图(b)中引入了积分环节,可以清晰看到振荡消失,并且超调量减小。图(c)反映了改变积分系数对系统的影响,在一定程度上会影响系统稳定的时间。图(d)加入了微分环节,在控制过程中,微分对系统的稳定效果并不明显,完全可以用比例-积分控制代替。

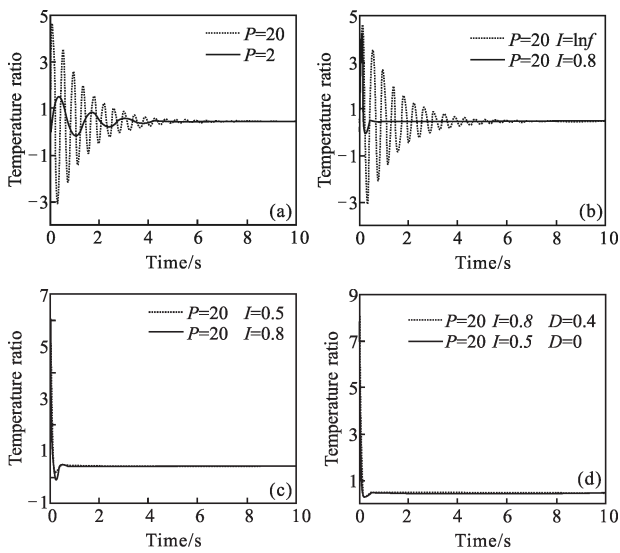


图 6 PID 各参数对输出电压的影响

Fig.6 Influence of parameters of PID on output voltage

4 实验结果及结论

根据光纤电流传感器的误差分配要求及 SLD 的性能指标,光源的温度控制系统必须满足以下技术要求:

(1) 温度控制范围为 $-40\sim 60\text{ }^{\circ}\text{C}$; (2) 温度波动范围为 $-0.1\sim 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$; (3) TEC 最大工作电流 1 A,最大工作电压 3.5 V。

通过测定,温度在变化 $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,热敏电阻阻值变化 $0.0352\text{ k}\Omega$ 。由公式(2),温度信号的差分电压为 1.95 mV 。为此,选用 OP97 系列的运算放大器,其失调电压 $50\text{ }\mu\text{V}$,失调电流 100 pA ,共模抑制比 120 dB ,工作范围 $-40\sim 85\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。考虑到 TEC 最大工作电流 1 A,选择两个稳压管 BZT52C2V0S 组成双向稳压二极管,其正向压降 0.9 V ,钳制电压 $V_z=2.0\text{ V}$,可以将

TEC 钳制在正常工作范围内。为降低电源的噪声影响,在电源输入端加入滤波电容,进行降噪处理。根据以上原理,调试各电路参数,在不同温度环境下测试系统控制性能,测试结果如图 7 所示。

在室温下,由于温差比较小,因此系统稳定的时间快,并且稳定效果比较好,温度变化范围小于 $0.05\text{ }^{\circ}\text{C}$,如图 7(a)所示。测试温控电路在低温 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和高温 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下的控制性能,得到的稳定曲线如图 7(b)、(c)所示。实验结果表明,系统在全温范围内的稳定时间在 7 s 以内,保证了温度控制的实时性,并且控制精度达到了使用要求。

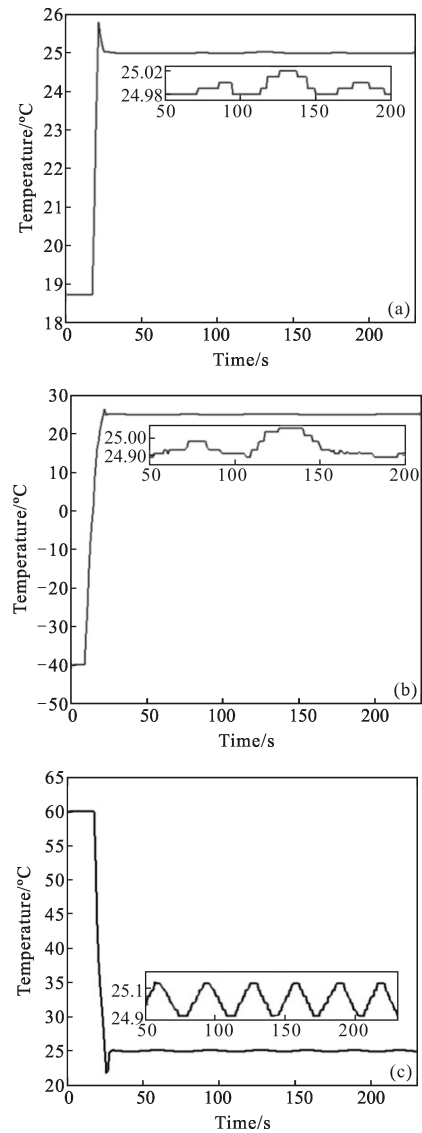


图 7 不同温度环境下的测试结果

Fig.7 Test results in different environmental temperatures

将已标定的光纤电流传感器的光源放入爱斯佩

克 SET-Z-021UP 型高低温箱, 设定光源在 -40°C ~ 60°C 范围内, 在不同温度及温度梯度下对比有无温控系统时的测量结果。输入电流 120 A, 在 25°C 、 -40°C 、 60°C 温度结点上各保持 20 min, 电流相对误差比和温度随时间变化曲线如图 8、9 所示。

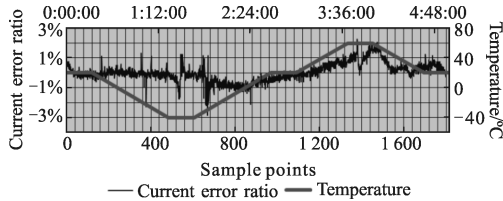


图 8 无光源温控系统时的测量结果

Fig.8 Test results of FOCS without temperature control system for source

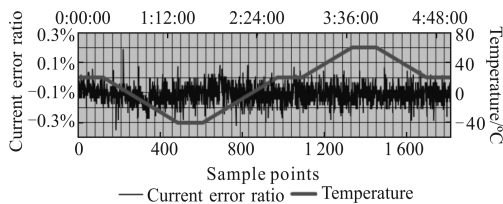


图 9 有光源温控系统时的测量结果

Fig.9 Test results of FOCS with temperature control system for source

可见, 无光源温控系统的 FOCS 电流相对误差比随温度变化明显, 最大误差比能够达到 $\pm 3\%$, 并且在 5 h 后测量结果误差量明显增大, 表明光源长时间运行后效能变差。而有光源温控系统的 FOCS 电流相对误差比随温度变化不明显, 整体的误差比在 $\pm 0.2\%$ 范围内, 可以满足国标 GB/T20840.8-2007 电流传感器的 0.2 级精度要求。

5 结论

采用模拟电路搭建温度控制系统, 通过设置合适的 R_x 电阻值, 得到了温度采集电桥输出电压与温度的线性关系; 建立系统的数学模型并分析控制曲线, 得到控制电路中不同参数对系统输出的仿真影响。在实验中, 对温控电路进行调试, 并测试在室温 18°C 、低温 -40°C 和高温 60°C 时的温度稳定性能。室温范围内, 温度控制在 25°C , 波动范围为 $-0.03\sim 0.03^{\circ}\text{C}$; 在高低温控制中, 温度的控制精度为 $-0.1\sim 0.1^{\circ}\text{C}$, 满足性能要求。文中使用的模拟温控系统, 具有响应速度快, 纹波噪声小等特点, 并且在高压、变温环境下连续运行 5 h 后依然保持较高的控制精度, 保证了光

纤电流传感器长时间工作的稳定性。

参考文献:

- [1] Zhang Jian, Ji Hongquan, Yuan Zhenhai, et al. Optical current transducer and its application [J]. *High Voltage Engineering*, 2007, 33(5): 32-36. (in Chinese)
张建, 及洪泉, 远振海, 等. 光学电流互感器及其应用评述 [J]. 高电压技术, 2007, 33(5): 32-36.
- [2] Wang Jiaying, Guo Zhizhong, Zhang Guoqing, et al. Experimental investigation on optical current transducer's long-term operation stability [J]. *Power System Technology*, 2012, 36(6): 37-41. (in Chinese)
王佳颖, 郭志忠, 张国庆, 等. 光学电流互感器长期运行稳定性的试验研究 [J]. 电网技术, 2012, 36(6): 37-41.
- [3] Silva Ricardo M, Martins Hugo, Nascimento Ivo, et al. Optical current sensors for high power systems: a review [J]. *Applied Sciences*, 2012, 2(3): 602-628.
- [4] Blake J, Tantaswadi P, Carvalho R T. In-line Sagnac interferometer current sensor [J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1996, 11(1): 116-121.
- [5] Di Rongguang, Liu Shibing. Research status quo and development of optical current transducer [J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2006, 26(8): 98-100. (in Chinese)
邸荣光, 刘仕兵. 光电式电流互感器技术的研究现状与发展 [J]. 电力自动化设备, 2006, 26(8): 98-100.
- [6] Short S X, Tselikov A A, Blake J N, et al. Imperfect quarter-waveplate compensation in Sagnac interferometer-type current sensors [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1998, 16(7): 1212-1219.
- [7] Hu Yang, Zhang Yajun, Yu Jinquan. Design of temperature control circuit for laser diode [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(5): 839-842. (in Chinese)
胡杨, 张亚军, 于锦泉. 用于半导体激光器的温控电路设计 [J]. 红外与激光工程, 2010, 39(5): 839-842.
- [8] Teng Lin, Liu Wanshun, Li Guicun, et al. Optical current transducer and its application in protective relaying [J]. *Power System Technology*, 2002, 26(1): 31-42. (in Chinese)
滕林, 刘万顺, 李贵存, 等. 光学电流传感器及其在继电保护中的应用 [J]. 电网技术, 2002, 26(1): 31-42.
- [9] Mu Jie, Wang Jia, Zhao Wei, et al. Vibration and temperature insensitive fiber-optic current transducer [J]. *High Voltage Engineering*, 2010, 36(4): 980-986. (in Chinese)
穆杰, 王嘉, 赵卫, 等. 消除振动敏感性温度漂移的光纤电流互感器 [J]. 高电压技术, 2010, 36(4): 980-986.

- [10] Lou Fengwei, Zheng Shengxuan, Wang Haiming. A new type optical fiber current transformer [J]. *Optical Technique*, 2006, 32(5): 782-784. (in Chinese)
娄凤伟, 郑绳植, 王海明. 一种新型光纤电流互感器[J]. 光学技术, 2006, 32(5): 782-784.
- [11] Yu Wenbin, Yang Yihan, Guo Zhizhong, et al. Influence of optical path structure and parameter on operating stability of optical current transformer [J]. *Power System Technology*, 2008, 32(20): 68-72. (in Chinese)
于文斌, 杨以涵, 郭志忠, 等. 光路结构参数对光学电流互感器运行稳定性的影响[J]. 电网技术, 2008, 32(20): 68-72.
- [12] Cui Chunyan, Hu Xinning, Zhao Shangwu, et al. Design of driving circuit for fiber-optic sensor light source [J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2007, 26(9): 98-100. (in Chinese)
崔春艳, 胡新宁, 赵尚武, 等. 一种光纤传感器光源驱动电路的设计[J]. 传感器与微系统, 2007, 26(9): 98-100.
- [13] Zuo Ruiqin. Reserch on techniques of compensation for temperature drift error in fiber optic gyroscope [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2006.
- [14] Zhang Yinan, Tan Yidong, Zhang Shulian. Temperature control system for frequency stabilization of total internal cavity microchip laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(1): 101-106. (in Chinese)
张亦男, 谈宜东, 张书练. 用于全内腔微片激光器稳频的温度控制系统[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(1): 101-106.
- [15] Analog Devices Inc: ADN8830 preliminary technical data[EB/OL]. Norwood, Massachusetts: Analog Devices Inc, 2012 [2012-7-11]. <http://www.analog.com>.
- [16] Ma Yingjian, Jian Hongqing, Shi Duo. Temperature dynamic characteristics analysis and control of optic-fiber light source [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2006, 32(3): 324-327. (in Chinese)
马迎建, 简红清, 石多. 光纤光源温度动态特性分析及控制[J]. 北京航空航天大学学报, 2006, 32(3): 324-327.
- [17] Li Xuyou, Hao Jinhui, Huang Ping, et al. New method of automatically controlling temperature of optical fiber source for gyroscope [J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2010, 18(5): 612-615. (in Chinese)
李绪友, 郝金会, 黄平, 等. 光纤陀螺用光纤光源的新型自动温度控制[J]. 中国惯性技术学报, 2010, 18(5): 612-615.