光纤光源温度动态特性分析及控制

马迎建 简红清 石 多

(北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100083) (中国机械装备研究院, 北京 100089)

摘 要: 根据半导体热电致冷器(TEC)工作的基本原理,分析了光纤光源模块的温度动态特性,建立了与之对应的数学模型. 对光源模块进行了实际实验测试,采用多点频率的工作电流驱动 TEC 模块,通过光源模块内部的热敏元件采样光源管芯温度的动态数据,用最小二乘法进行数据拟合,得到了与数学模型十分接近的结果,因此可以确定数学模型中的待定参数. 采用 MAX1978 单片 TEC 控制器,根据温度动态特性数学模型设计了最优的比例积分微分(PID)补偿网络,实现了光纤光源的温度控制系统,得出了 TEC 温度控制系统对光源有良好的控制精度和稳定性.

关 键 词: 光纤光源; 温度控制; 热电致冷器; 比例积分微分补偿网络

中图分类号: TN 253

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2006)03-0324-04

Temperature dynamic characteristics analysis and control of optic-fiber light source

Ma Yingjian Jian Hongqing

(School of Instrument Science and Opto-electronics Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Shi Duo

(China Academy of Machinery Equipment R&D, Beijing 100089, China)

Abstract: According to the basic theory of the thermo-electric cooler(TEC), the temperature dynamic characteristics of the optic-fiber light source module was analyzed, and mathematics model was established corresponds to its. In the actual experimental test to light source module, the TEC module was driven by multi-point frequency of working current, and dynamic data of light source core's temperature was sampled with sensing component, and the dynamic data was calculated and fit with least-squares method, then the result was close to mathematics model, so the parameters of the mathematical model were determined. MAX1978 single-chip temperature controllers for Peltier thermoelectric cooler module was used, and the best proportional-integral-differential(PID) compensating network based on temperature dynamic characteristics mathematical model was designed, then the temperature control system of the optic-fiber light source was achieved, the result shows that TEC temperature control system can control the light source precisely and steadily.

Key words: optic-fiber light source; temperature control; thermo-electric cooler; proportional-integral-differential compensating network

随着光纤通信和光纤传感技术的迅速发展,光纤技术被广泛应用于军事和民用领域,其中光纤陀螺就是非常重要的方面. 光纤陀螺采用的是超辐射发光二极管(SLD)光源,光纤陀螺的精度受 SLD 光源的稳定性影响很大,要求 SLD 光源具有很高的光功率和光谱稳定性,SLD 光源的稳定性又主要受到环境温度的影响[1~3]. 因而,分析光纤陀螺光源温度动态特性,建立其温度响应的数

收稿日期: 2005-03-29

作者简介: 马迎建(1952-),男,北京人,高级工程师, myjeeps@163.com.

学模型,研究高精度光源温度控制系统,对光纤陀螺技术的发展以及其它光电技术的发展有着重要的意义.

1　温度动态特性分析及建模

1.1　TEC 工作原理

光纤光源组件由超辐射发光管管芯、半导体热电致冷器(TEC)、负温度系数(NTC)热敏电阻及尾纤组成,如图 1 所示. TEC 工作原理[4] 是以珀尔帖效应为基础,当电流流过 TEC 时,热量由 TEC 的一侧传送到另一侧,表现为其一端致冷,另一端加热;如果电流的方向反向,则致冷与加热的两端也会反转,即原来加热的一端变为冷,原来致冷的一端变为加热. 热敏电阻是由电阻温度系数大的半导体材料制成的电阻元件,电阻温度系数为负值,在高精度温度控制时,温度变化很小,热敏电阻工作在线性区. 温度控制系统通过对热敏电阻的监测,自动调节驱动 TEC 的电流大小和方向,对光源模块加热或致冷,实现对光源管芯温度控制.

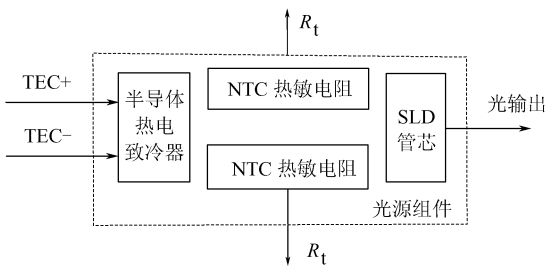


图 1　光源组件结构框图

1.2　数学模型建立

在控制过程中,TEC 模块存在珀尔帖效应、傅里叶效应和焦耳效应等影响管芯温度的物理效应,管芯温度与驱动电流的关系可用一阶惯性环节来表示;光源模块管芯温度的变化最终导致热敏电阻的阻值变化,但是热敏电阻存在响应延时,也可以用一阶惯性环节来表示. 因而,根据光源温度动态特性这一物理过程,可以建立热敏电阻输出的温度信号对温控电流响应的数学模型:

$$G(s)=\frac{V_R(s)}{I_T(s)}=\frac{k}{(s+p_1)(s+p_2)} \qquad (1)$$

式中,$V_R(s)$为热敏电阻上的采样电压,V;$I_T(s)$为 TEC 驱动电流,A;k 取决于 TEC 的珀尔帖系数、热敏电阻温度系数和外接电路等因素,在高精度温控条件下,可以认为是常数,VHz^2/A. 光纤光源温度动态特性响应模型主要由 2 个极点来表示,第 1 个极点 p_1 是由系统热容热阻等参数引起的主极点,Hz;第 2 个极点 p_2 由热敏电阻传感器的响应延时所引起的次极点,Hz.

1.3　模型参数确立

通过实验证明模型的可靠性,并针对实际光源给出模型的待定参数. 光纤光源温度动态特性实验原理如图 2 所示. 本研究采用信息产业部电子 44 所的中心波长为 1 300 nm 的 8 脚碟形 SLD 光源,具有高输出功率、宽光谱、短时间相干性、长空间相干性和低强度噪声等优点.

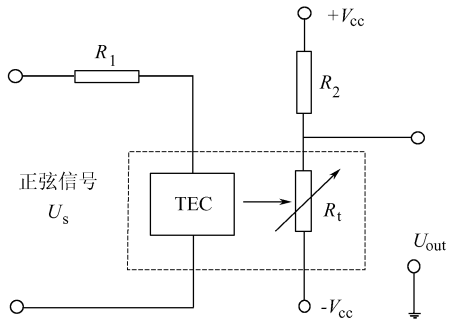


图 2　实验原理图

在光源的 TEC+和 TEC−之间加一个电压激励信号 $U_s=U_0\sin ft$,由于 TEC 的电阻很小,一般为 2 ~ 3 Ω,而外加电阻 R_1 足够大,因而输入信号可以看成是电流信号,$I=I_0\sin ft$,其中 $I_0=\frac{U_0}{R_1}$. 保持输入电压的幅度不变,使通过 TEC 的电流频率在 1 ~ 1×10^4 mHz 之间变化. 由于 TEC 上有电流通过,TEC 改变光源内部温度,最终导致热敏电阻的阻值发生变化. 假设在 25℃ 的条件下,有 $R_t=R_2$,则此时的电压输出 $U_{out}=0$,因而热敏电阻阻值的变化可转换为输出电压的变化,计算推导如下:

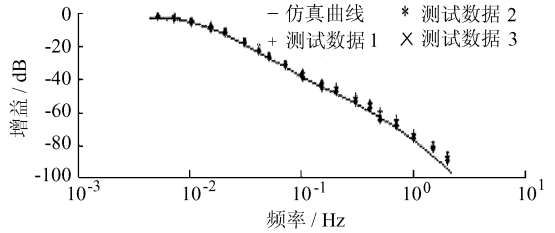
$$\Delta U_{out}=\frac{R_t}{R_t+R_2}\cdot 2V_{cc}-V_{cc}=\frac{R_t-R_2}{R_t+R_2}\cdot V_{cc}\approx\frac{\Delta R}{2R_2}\cdot V_{cc} \qquad (2)$$

式中,$\Delta R=R_t-R_2\ll R_2$. 在 1 ~ 1×10^4 mHz 之间进行 N 个频率点测试,通过精确测试仪器测量在 N 个采样频率点处通过 R_t 的交流信号 U_{out} 的幅度和它与激励信号 U_s 的相位延时.

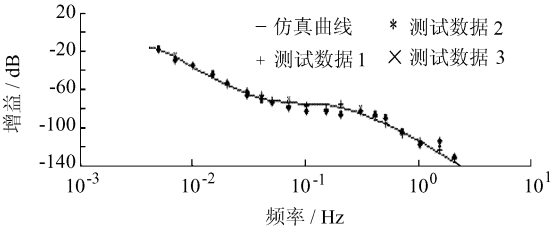
通过对 3 只标准的 SLD 光源做多次重复性实验,利用实验测量数据绘制幅频和相频特性曲线,并通过最小二乘法拟合,计算出模型待定参数:$k=7.896$,$p_1=0.02$,$p_2=1$,3 只标准光源的实际测量数据绘制的幅频和相频曲线与模型 bode 图见图 3.

从图 3 中可看出,以模型为基础的拟合曲线

与 N 点采样频率测试数据非常接近,从而证明对光源温度动态特性分析及实验方法是可行的.



a 幅频特性曲线



b 相频特性曲线

图 3 3 只标准光源的实际测试数据和模型仿真曲线

2 TEC 温度控制电路

2.1 TEC 温度控制原理

典型的 TEC 温度控制[5~7]由 3 部分组成:误差放大器、比例积分微分(PID)补偿网络和输出功率驱动器. 误差放大器部分提供设定点温度电压与温度敏感器敏感到的负载器件实际温度之间的误差量,并放大;PID 补偿网络用来补偿光源的温度响应延时,使光源有最优的控制,是 TEC 温度控制最关键的一部分;输出功率驱动器用于驱动 TEC,一般采用脉宽调制(PWM)方式,场效应管工作在饱和状态,而不是线性区域,只有当需要向负载供电时才导通,由 4 个场效应管构成 H 桥结构,可以让电流以不同方向流过负载,从而实现致冷和加热. 由于场效应管只有在导通的时候才有电流,因而 PWM 方法可以有效地降低热量的损耗,工作效率高达 80% ~90%.

MAX1978 是 MAXIM 公司研制用于半导体热电致冷器模块的最小、最安全、最精确的完全单片温度控制器.

通过一个斩波自稳零仪表放大器和一个高精度的积分放大器,组成一个 PID 控制网络;仪表放大器与外部 NTC 热敏电阻连接;MOSFET 驱动器实现 PWM 输出. 单片 MAX1978 实现 TEC 温度控制原理如图 4 所示.

2.2 PID 补偿网络设计

根据前面分析计算得出实际光源温度动态响应数学模型,选择 TEC 温度控制 PID 补偿网络参数,研究符合要求的光源温度控制系统. PID 补偿网络结构如图 5 所示.

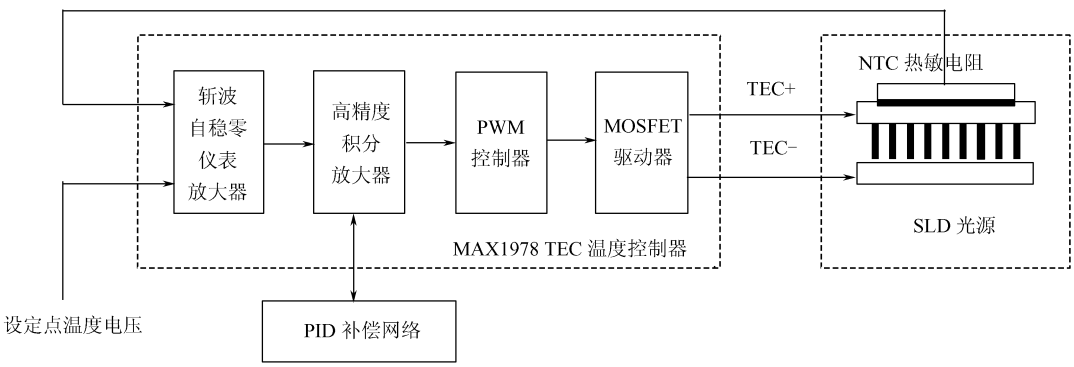


图 4 TEC 温度控制原理

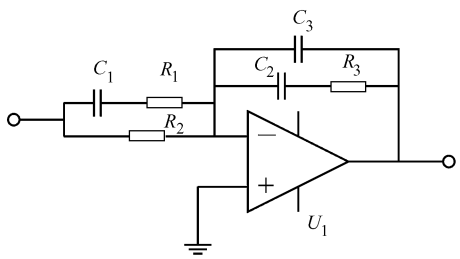


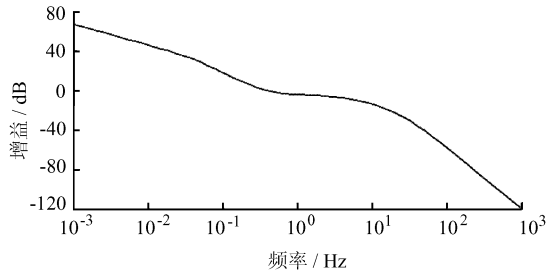
图 5 PID 补偿网络

PID 补偿网络的传递函数如下:

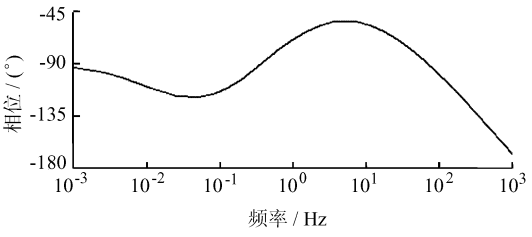
$$F(s)=\frac{k(s+z_1)(s+z_2)}{s(s+p_1)(s+p_2)} \tag{3}$$

通过计算,确定 R_1,R_2,R_3 和 C_1,C_2,C_3 的值,其中 $z_1=1/(C_2\times R_3)=1$ 是为了使相位延时不超过 135°,$z_2=1/(C_1\times R_2)=5$ 是为消除第 2 个极点,使系统有比较好的相角裕度,$p_1=1/(C_1\times R_1)=100$,$p_2=1/(C_3\times R_3)=200$,$k=10$.

因而,由 $G(s)$ 和 $F(s)$ 可以得出光源 TEC 温度控制系统开环传递函数,绘制其 bode 图如图 6 所示.



a　幅频特性曲线



b　相频特性曲线

图 6　TEC 温度控制系统的 bode 图

从图 6 中可以看出:系统在截止频率处的相位延时最小,即系统的相角裕度最小.

3　结　论

以光源内部 TEC 的热产生和传导过程为依据,建立了温度动态特性数学模型,采用了最小二乘法对测试数据拟合,得出了模型曲线参数,模型的 bode 图与 *N* 频率点实验测试数据描绘的幅频和相频曲线十分接近. 证明了所建立的数学模型符合光源模块物理特性,同时说明了 *N* 频率点测试方法对实际光源模块可以给出具体的模型参数. 在此基础上,设计最优的 PID 补偿网络,为实际的 TEC 控制系统提供了理论指导,提供了一种解决此类问题的方法. 但必须强调的是,针对不同类型的光源,由于光源内部工艺结构有一定的差异,数学模型参数有所变化,PID 补偿网络的参数也不一样.

参考文献 (**References**)

[1] Lefever H. The fiber-optic gyroscope[M]. USA: Artech House, 1993

[2] 尹世刚,舒晓武,宫兆涛,等. 光纤陀螺用 SLD 光源的光功率稳定性研究[J]. 光学仪器,2003,25(4):20 ~ 25
Yin Shigang, Shu Xiaowu, Gong Zhaotao, *et al*. Study on stability of output power of SLD used for FOG[J]. Optical Instruments, 2003,25(4):20 ~ 25(in Chinese)

[3] 张　▮,王　妍,张春熹,等. 光纤陀螺光源驱动技术[J]. 北京航空航天大学学报,2002,28(3):298 ~ 300
Zhang Xi, Wang Yan, Zhang Chunxi, *et al*. Driving technology of the light source of FOG[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2002, 28(3): 298 ~ 300(in Chinese)

[4] 卢希红,李茂德,潘葆炯. 半导体制冷器温度场的数值分析[J]. 能源研究与信息,2001,17(1):18 ~ 21
Lu Xihong, Li Maode, Pan Baojiong. Numerical study on the temperature field in a semiconductor refrigeration device[J]. Energy Research and Information, 2001, 17(1): 18 ~ 21(in Chinese)

[5] 刘繁明,赵亚凤. 一种新型的基于 TEC 的精密温控器设计[J]. 中国惯性技术学报,2004,12(6):61 ~ 64
Liu Fanming, Zhao Yafeng. Design of a new TEC-based accurate incubator[J]. Chinese Journal of Inertia Technology, 2004, 12(6):61 ~ 64(in Chinese)

[6] 覃喜庆,曾详鸿,董　静,等. 基于 ADN8830 的高性能 TEC 控制电路[J]. 光学与光电技术,2004,2(1):20 ~ 22
Qin Xiqing, Zeng Xianghong, Dong Jing, *et al*. A high performance TEC controller circuit based on ADN8830[J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2004, 2(1): 20 ~ 22(in Chinese)

[7] 张　华,龚义建. 一种微型高精度 PWM 温度控制器的设计[J]. 光学与光电技术,2004,2(2):29 ~ 31
Zhang Hua, Gong Yijian. Design for high precision miniature PWM temperature controller[J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2004, 2(2): 29 ~ 31(in Chinese)