

# 棱镜式激光陀螺稳频控制系统优化

陶渊博, 李四海

西北工业大学自动化学院, 陕西 西安 710129

**摘要** 针对棱镜式激光陀螺稳频精度较低的现象, 系统地研究了棱镜式激光陀螺稳频控制系统特性。理论分析了光强调谐曲线及稳频执行机构的特征, 建立了棱镜式激光陀螺稳频控制系统数学模型。进一步分析了系统稳态性能及动态性能, 分析结果表明, 系统在定温及慢变温作用下具有不同程度的稳态误差且调节时间过长, 从而导致稳频精度下降。优化控制器参数使二阶系统具有最佳阻尼比及快速性, 采用按温度补偿的前馈控制系统, 实现了对温度所引起的稳频误差的全补偿, 提高了系统的稳频精度。实验结果表明, 优化后的稳频控制系统比原稳频控制系统的稳频精度提高一个数量级, 陀螺精度提高 30% 以上。

**关键词** 激光光学; 棱镜式激光陀螺; 稳频精度; 温度补偿; 前馈

中图分类号 TN248

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.0601003

## Optimization of Prism Laser Gyros Frequency Stabilization Control System

Tao Yuanbo, Li Sihai

School of Automation Northwestern Polytechnical University, Xi'an, Shaanxi 710129, China

**Abstract** In view of the low frequency stabilization accuracy of prism laser gyros, the characteristics of frequency stabilization control system of prism laser gyros are systematically studied. The light intensity tuning curve and the frequency stabilizing actuator are analyzed theoretically. The mathematical model of the frequency stabilization control system of the prism laser gyros is established. The steady state performance and dynamic performance of the system are further analyzed. The analysis results show that the system has different steady-state errors and the adjustment time is too long under the influence of constant temperature and slow temperature change, which leads to the decline of the stability frequency accuracy. We optimize the controller parameters to provide optimal damping ratio and rapidity for second-order system. And the feedforward control system with temperature compensation is adopted to realize the full compensation of the frequency stability error caused by the temperature and improve the frequency stability accuracy of the system. The experimental results show that the optimized frequency stabilization control system can improve the frequency stability accuracy by one order of magnitude compared with the original frequency stabilization control system, and the gyro accuracy can be improved by more than 30%.

**Key words** laser optics; prism laser gyros; frequency stability accuracy; temperature compensation; feedforward

**OCIS codes** 140.3370; 140.3425; 140.3570; 140.3560

## 1 引 言

棱镜式激光陀螺是一种以全反射棱镜式环形激光器为核心器件的高精度角速率传感器, 完全免镀膜, 具有锁区小、可靠性高、寿命长等优点, 在航空航天领域广泛应用<sup>[1-3]</sup>。研究表明, 激光陀螺的零偏误差、标度因数误差及闭锁效应都与激光振荡频率密切相关, 激

光振荡频率的稳定性是影响激光陀螺性能的关键因素, 因此稳频研究一直是棱镜式激光陀螺的重要研究课题之一<sup>[4-7]</sup>。刘健宁等<sup>[8]</sup>采用有限元分析法模拟获得稳频控制过程中谐振腔温度梯度场分布随跳模参数的变化规律, 优化了控制参数。马家君等<sup>[9-10]</sup>针对棱镜式激光陀螺稳频过程中相敏信号易受干扰及存在盲区的现象, 研究了自适应稳频技术及双纵模稳频技术, 主

收稿日期: 2017-11-21; 收到修改稿日期: 2017-12-26

基金项目: 总装预研基金(9140A090319)

作者简介: 陶渊博(1990—), 男, 博士研究生, 主要从事激光陀螺方面的研究。E-mail: taoyuanbo1990@sina.com

导师简介: 李四海(1962—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事惯性技术方面的研究。E-mail: lisihai@nwpu.edu.cn

要研究了微弱信号检测,提高了稳频精度。从控制系统角度出发,还提出了II型三阶控制系统代替原有的I型二阶控制系统,消除了温度斜坡干扰下的稳态误差<sup>[11]</sup>。但是高阶系统超调大,调节时间长,动态性能一般。而且在变温情况下,陀螺内部温度特性并非斜坡信号,可能包含加速度甚至高阶信号,产生稳态误差,从而稳频精度降低,陀螺精度下降。

在棱镜式激光陀螺调试测试中,发现其稳频精度<sup>[12]</sup>较低、变温下性能较差的现象。针对这一问题,分析了光强调谐曲线及稳频执行机构的特性,建立了棱镜式激光陀螺稳频控制系统数学模型。依据自动控制理论,分析了系统的稳态性能及动态性能,并从参数及结构两方面对系统的性能进行了优化。优化控制器参数提高了系统的动态性能,采用按温度补偿的前馈控制系统实现了对温度所引起的稳频

误差的全补偿,提高了稳频精度,从而提高了陀螺精度。这些研究结果为棱镜式激光陀螺的研制和生产提供了重要的理论支撑。

## 2 稳频控制原理

棱镜式激光陀螺稳频控制系统如图1所示。其核心部件是棱镜式谐振腔,腔体材料是微晶玻璃,棱镜材料是熔融石英玻璃。X1通道充有按一定比例混合的He-Ne气体,工作波长为 $0.6328\ \mu\text{m}$ ,在引燃变压器和高频振荡器的作用下产生激光。X2和X4为真空通道,X3通道中充有干燥的空气,通过相连的加热器改变空气的折射率,实现谐振腔谐振频率的稳定。I、II、III、IV为棱镜,由保护罩将其密封,以保持表面清洁。光线在棱镜大斜面处发生全反射,从而保证了光束损耗最小<sup>[13-14]</sup>。

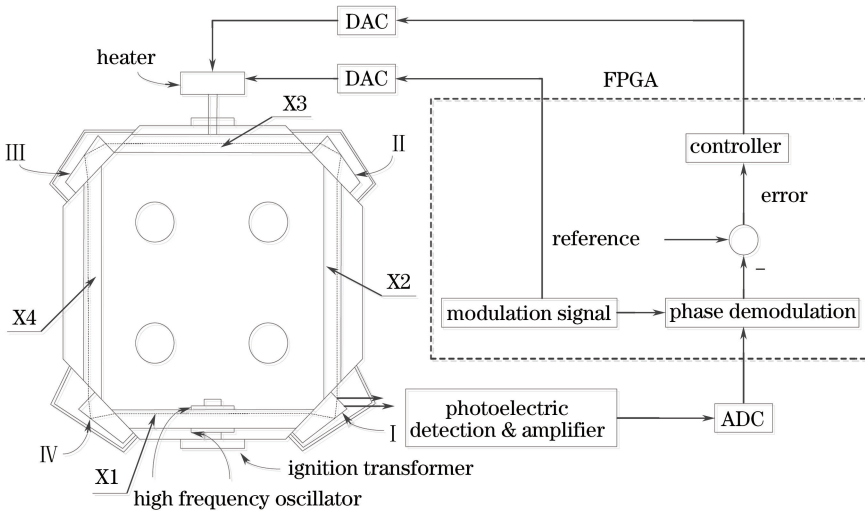


图1 棱镜式激光陀螺稳频控制系统示意图

Fig. 1 Schematic of frequency stabilization control system for prism laser gyro

棱镜式激光陀螺的总光程由X1通道的光程 $\langle L_1 \rangle$ 、X2和X4通道的光程 $\langle L_a \rangle$ 、X3通道的光程 $\langle L_3 \rangle$ 及棱镜中的光程 $\langle L_p \rangle$ 组成,总光程表达式为

$$\langle L \rangle = \langle L_1 \rangle + \langle L_a \rangle + n_a \langle L_3 \rangle + n_p \langle L_p \rangle, \quad (1)$$

式中 $n_a = 1 + (an)/(2\epsilon_0)$ 为X3通道空气折射率, $a$ 为空气平均极化率, $n$ 为空气分子数密度, $\epsilon_0$ 为真空电容率。 $n_p = n_0 + K(\lambda)T$ 为棱镜折射率, $n_0 = 1.45437$ 是与熔融石英玻璃有关的常量,对于波长为 $0.6328\ \mu\text{m}$ 的激光,熔融石英的 $K(\lambda) = 1.01 \times 10^{-5}\ \text{C}^{-1}$ , $T$ 为棱镜温度。

在激光器工作时,由于受环境温度起伏、机械振动、磁场等的影响均可引起谐振腔几何长度、工作介质折射率等的改变。在不考虑原子跃迁谱线微小变化的情况下,激光振荡频率主要由谐振腔的谐振频

率决定,即 $\nu = qc/\langle L \rangle$ ,其中 $q$ 为纵模序号, $c$ 为真空光速。在棱镜式谐振腔中,纵模频率难以直接获取,通常根据光强调谐曲线进行稳频,光强调谐曲线的斜率直接影响稳频的精度<sup>[6]</sup>。

在准稳态条件下,平均光强 $I = (\Gamma\alpha)/(\beta + \Gamma\theta)$ ,其中 $\Gamma$ 为辐射捕获修正量, $\alpha, \beta, \theta$ 为Lamb系数,代入得光强调谐曲线<sup>[6]</sup>为

$$I(\xi) = \frac{\left[ \frac{F}{Z_i(0)} Z_i(\xi) + \frac{\tilde{F}}{Z_i(0)} Z_i(\tilde{\xi}) \right] - k_0^{-1} \frac{G_m}{G_0}}{\Gamma^{-1} \left[ \frac{F}{Z_i(0)} b + \frac{\tilde{F}}{Z_i(0)} \tilde{b} \right] + \left[ \frac{F}{Z_i(0)} LZ_i + \frac{\tilde{F}}{Z_i(0)} \tilde{L}\tilde{Z}_i \right]}, \quad (2)$$

式中  $\xi = (\omega - \omega_0)/(ku)$  为  $\text{Ne}^{20}$  的频率参量,  $\tilde{\xi}$  为  $\text{Ne}^{22}$  的频率参量,  $ku$  为多普勒展宽线型函数  $1/e$  峰值点的半峰全宽,  $G_m$  为双同位素的峰值增益,  $G_0$  为单同位素的峰值增益,  $\gamma$  是单程损耗,  $k_0 = G_m/\gamma$  为增损比,  $F$  为双同位素中  $\text{Ne}^{20}$  所占的百分比,  $\tilde{F} = \sqrt{1.1}(1-F)$ ,  $b = Z_i(\xi) - \eta Z_r'(\xi)$ ,  $\tilde{b} = \tilde{Z}_i(\tilde{\xi}) - \tilde{\eta} \tilde{Z}_r'(\tilde{\xi})$ ,  $\eta$  为均匀展宽与多普勒展宽的比值,  $Z_i$  为等离子体色散函数的虚部,  $Z_r$  为等离子体色散函数的实部,  $L(\xi) = \eta^2/(\eta^2 + \xi^2)$  为洛伦兹型函数。当  $\eta = 0.2$ ,  $k_0 = 1.030$ ,  $\lambda = 0.6328 \mu\text{m}$  时, 通过数值计算, 可以得到光强及光强变化率与频率参量的关系, 如图 2 所示。

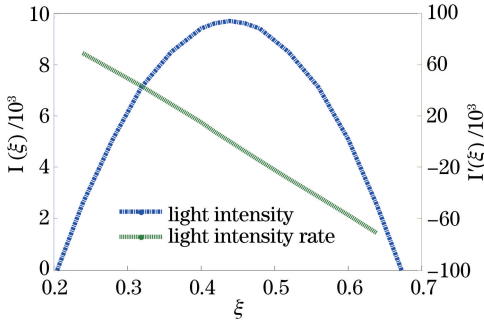


图 2 棱镜式激光陀螺光强调谐曲线

Fig. 2 Light intensity tuning curve of prism laser gyros

依据光强调谐曲线的特性, 由现场可编程门阵列(FPGA)产生频率为 266.67 Hz 的小抖动正弦调制信号, 经数模转换器(DAC)作用于加热器内部的压电陶瓷膜片, 使激光振荡频率左右微小变化, 从而频率参量  $\xi$  左右微小变化, 最终引起光强发生变化, 根据光强变化率的正负可以知道  $\xi$  的具体位置, 最终目的是控制  $\xi = 0.44$ , 从而光强达到最大, 光强变化率为 0。合光输出的拍频信号经光电探测及放大后, 通过模数转换器(ADC)后进行相敏解调, 相敏解调后的信号与参考值进行比较, 得到误差信号, 作为控制器的输入。控制器采用合适的控制率产生输出信号, 经 DAC 作用于加热器内部加热丝两端, 调整 X3 通道的空气折射率, 从而改变光程长, 达到稳频的目的。

### 3 数学模型

在小抖动正弦调制信号作用下, 为了得到光强变化与谐振腔光程长变化的传递函数, 忽略自饱和效应及互饱和效应, 在以多普勒型展宽为主的条件下, 陀螺输出光强表达式为

$$I(\xi) = I_m \exp(-\xi^2), \quad (3)$$

式中  $I_m$  为光强增益最大值,  $\xi = (\omega - \omega_0)/(ku)$ 。

对(3)式微分, 可以得到:

$$\frac{dI}{d\omega} = \frac{dI}{d\xi} \frac{d\xi}{d\omega} = -2I \frac{\omega - \omega_0}{(ku)^2}, \quad (4)$$

又  $d\omega/d\langle L \rangle = -\omega/\langle L \rangle$ , 因此:

$$\Delta I(s)/\Delta \langle L \rangle(s) = K_1, \quad (5)$$

式中  $K_1 = 2I \frac{\omega - \omega_0}{(ku)^2} \frac{\omega}{\langle L \rangle}$ 。

加热器结构如图 3 所示。

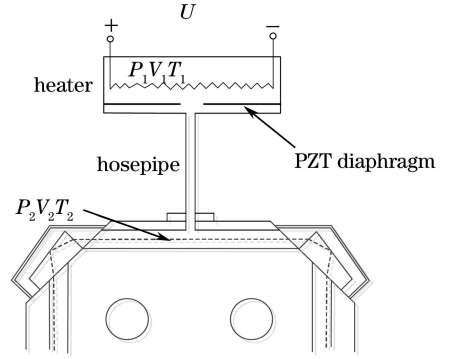


图 3 加热器结构图

Fig. 3 Structure diagram of heater

为了得到稳频通道光程长变化量与加热器电压变化量之间的传递函数, 设加热丝质量为  $M$ , 比热为  $C$ , 传热系数为  $H$ , 传热面积为  $A$ , 加热器内部气体温度为  $T$ , 加热丝两端电压为  $U$ , 加热丝电阻为  $R$ , 单位时间内加热丝产生的热量为  $Q$ , 则根据热力学定律有:

$$CM \frac{d(\Delta T)}{dt} + HA \Delta T = \Delta Q. \quad (6)$$

由于  $Q = U^2/R$ ,  $Q$  与  $U$  呈非线性关系, 可在平衡点  $(Q_0, U_0)$  附近进行线性化, 即  $\Delta Q = 2U \Delta U/R$ , 故:

$$\frac{CM}{HA} \frac{d(\Delta T)}{dt} + \Delta T = \frac{2U}{RHA} \Delta U. \quad (7)$$

令  $T_h = CM/(HA)$  为加热器时间常数, 则:

$$\frac{\Delta T(s)}{\Delta U(s)} = \frac{K_2 U}{T_h s + 1}, \quad (8)$$

式中  $K_2 = \frac{2}{RHA}$ 。

设加热器内部压强为  $P_1$ , 气体体积为  $V_1$ , 分子数为  $N_1$ , 温度为  $T_1$ 。稳频通道内部压强为  $P_2$ , 气体体积为  $V_2$ , 分子数为  $N_2$ , 温度为  $T_2$ 。根据克拉珀龙方程得  $P_1 V_1 = N_1 R T_1 / N_A$ ,  $P_2 V_2 = N_2 R T_2 / N_A$ , 其中,  $N_A$  为阿伏伽德罗常数,  $R$  为摩尔气体常量, 式中  $P = P_1 = P_2$ , 则  $V_1/V_2 = N_1 T / (N_2 T_2)$ , 加热器温度变化量与稳频通道气体分子数密度变化量关系为

$$\Delta n_2 = \frac{\Delta N_2}{V_2} = \frac{N_1}{V_1 T_2} \Delta T_1. \quad (9)$$

又空气折射率与稳频通道分子数密度的关系为  $n_a = 1 + (an_2)/(2\epsilon_0)$ , 结合(9)式, 得:

$$\Delta \langle L \rangle (s) / \Delta T (s) = K_3, \quad (10)$$

式中  $K_3 = \frac{aL_2 N_1}{2\epsilon_0 V_1 T_2}$ .

综上, 稳频通道光程长变化量与加热器电压变化量之间的传递函数为

$$\frac{\Delta \langle L \rangle (s)}{\Delta U (s)} = \frac{K_2 K_3 U}{T_h s + 1}. \quad (11)$$

相敏解调采用带通滤波器, 传递函数为  $K_4 e^{-\tau s}$ , 时间常数远小于  $T_h$ , 可忽略. 控制器采用比例积分控制器, 传递函数为  $\Delta U (s) / \Delta E (s) = K_p + K_i / s$ . 温度变化引起的光程长变化为  $K_5 T (s)$ , 小抖动信号引起的光程长变化为  $\langle L \rangle_D (s)$ . 故棱镜式激光陀螺稳频控制系统结构如图 4 所示.

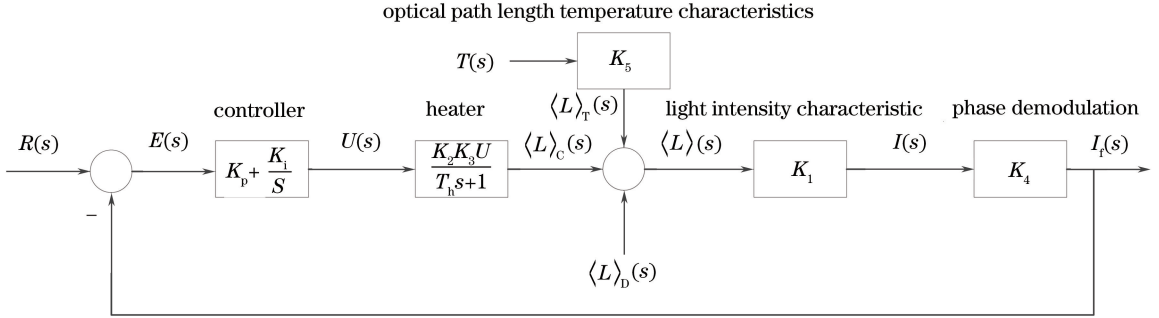


图 4 棱镜式激光陀螺稳频控制系统结构图

Fig. 4 Structure of frequency stabilization control system for prism laser gyros

系统的开环传递函数为

$$G(s) = \frac{K \left( \frac{K_p}{K_i} s + 1 \right)}{s (T_h s + 1)}, \quad (12)$$

式中开环增益  $K = K_i K_1 K_2 K_3 K_4 U$ .

控制输入作用下系统的闭环传递函数为

$$\Phi(s) = \frac{I_f(s)}{R(s)} = \frac{\frac{K}{T_h} \left( \frac{K_p}{K_i} s + 1 \right)}{s^2 + \frac{KK_p + K_i}{K_i T_h} s + \frac{K}{T_h}}. \quad (13)$$

控制输入作用下系统的误差传递函数为

$$\Phi_e(s) = \frac{E(s)}{R(s)} = \frac{s \left( s + \frac{1}{T_h} \right)}{s^2 + \frac{KK_p + K_i}{K_i T_h} s + \frac{K}{T_h}}. \quad (14)$$

温度扰动作用下系统的误差传递函数为

$$\Phi_{eT}(s) = \frac{E(s)}{T(s)} = \frac{-\frac{K_5 K_1 K_4}{T_h} s (T_h s + 1)}{s^2 + \frac{KK_p + K_i}{K_i T_h} s + \frac{K}{T_h}}. \quad (15)$$

系统的总误差为

$$E(s) = \Phi_e(s) R(s) + \Phi_{eT}(s) T(s). \quad (16)$$

以上建立了系统的数学模型, 在该模型的基础上需进一步对系统的性能进行分析与优化.

## 4 系统性能分析与优化

### 4.1 性能分析

常温下陀螺启动后, 当内部温度场达到平衡时,  $U = 2 \text{ V}$ , 实验测得,  $T_h = 0.5, K = 0.8$ . 原系统中  $K_p = 0.0001, K_i = 1/0.68$ , 故:

$$G(s) = \frac{0.8(0.000068s + 1)}{s(0.5s + 1)}, \quad (17)$$

$$\Phi(s) = \frac{I_f(s)}{R(s)} = \frac{1.6(0.000068s + 1)}{s^2 + 2.00011s + 1.6}. \quad (18)$$

由于该二阶系统闭环传递函数分母系数均大于 0, 根据劳斯稳定判据, 可知系统较稳定.

一个稳定的系统在典型外作用下经过一段时间后即进入稳态, 控制系统的稳态误差是系统控制精度的一种度量. 根据线性系统的稳定性理论, 该 I 型系统在阶跃输入  $r(t) = A \times 1(t)$  下的稳态误差为 0, 在温度斜坡输入  $T(t) = At$  下的稳态误差为  $-AK_5 / (K_i K_2 K_3 U)$ , 在温度加速度输入  $T(t) = At^2 / 2$  下的稳态误差为  $\infty$ . 而棱镜式激光陀螺启动后具有自升温特性, 定温下的温度场近似斜坡输入, 慢变温下的温度场近似由加速度输入和斜坡输入分段组成, 根据线性叠加原理, 定温下的稳态误差为  $e_{ss}(\infty) = -AK_5 / (K_i K_2 K_3 U)$ , 变温下的稳态误差为  $e_{ss}(\infty) = -AK_5 / (K_i K_2 K_3 U) + C$ , 其中  $C$  为加速度输入引起累积误差.

可以看出,定温下稳态误差与温度变化率  $A$  成正比,与加热器电压  $U$  成反比。棱镜式激光陀螺稳频过程中,纵模跳变较频繁,对应加热器电压  $U$  变化较频繁,因此稳态误差呈现由小到大周期性地变化。变温下的稳态误差由于累计误差  $C$  的引入及温度变化率  $A$  的增加变得更大,因此通常变温下的陀螺精度要低于定温下的陀螺精度。

评价一个控制系统的好坏,除稳态性能外还包括动态性能。由(18)式可以得到,该二阶系统的阻尼比  $\xi=0.791$ ,自然频率  $\omega_n=1.265$ 。其单位阶跃响应如图 5 所示,峰值时间  $t_p=4.061$  s,调节时间  $t_s=2.632$  s,超调量  $\sigma=1.732\%$ 。

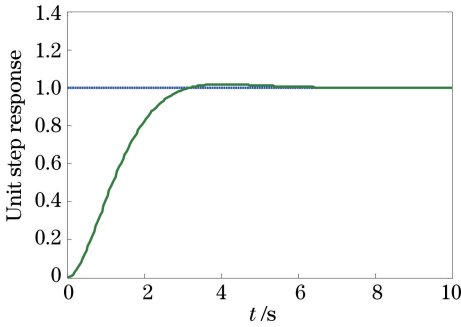


图 5 原稳频控制系统单位阶跃响应

Fig. 5 Unit step response of original frequency stabilization control system

以上分析可以得到,该系统在定温和慢变温作用下具有不同程度的稳态误差,此外动态过程的调节时间太长,从而导致稳频精度降低。因此,从稳频控制系统角度出发,若要进一步提高棱镜式激光陀螺的精度,必须改善系统性能,提高稳频精度。

4.2 控制优化

为了改善系统的动态性能,使二阶系统具有最佳阻尼比  $\xi=0.707$ ,并根据情况使二阶系统的闭环

极点尽量远离虚轴,以提高系统的快速性,  $\omega_n=4.950$ 。得  $K=12.2537, K_p=4.5956, K_i=22.5252$ 。又原系统的开环增益  $K$  随加热器电压  $U$  变化,影响系统的动态性能,因此在前向通道中增加一个比例环节  $K^*=2/U$  使系统开环增益  $K$  保持不变,其单位阶跃响应如图 6 所示,峰值时间  $t_p=0.561$  s,调节时间  $t_s=0.872$  s,超调量  $\sigma=10.93\%$ ,动态性能优于原稳频控制系统。

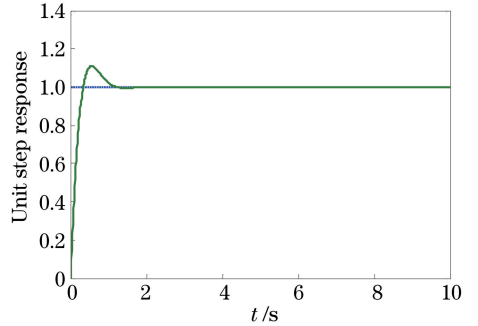


图 6 新稳频控制系统单位阶跃响应

Fig. 6 Unit step response of new frequency stabilization control system

为了消除温度干扰所引起的全部系统误差,提高稳频精度,采用按温度补偿的前馈控制系统,将干扰信号通过前馈通道引入闭环回路中,设计前馈通道传递函数  $G_T(s)$  使系统输出不受扰动影响,系统结构如图 7 所示。

温度干扰作用下的系统误差为

$$E_T(s) = \frac{K_5 K_1 K^* K_4 + G_T(s) \frac{K_2 K_3 U}{T_h s + 1} K_1 K^* K_4}{1 + \frac{K \left( \frac{K_p}{K_i} s + 1 \right)}{s(T_h s + 1)}} T(s) \tag{19}$$

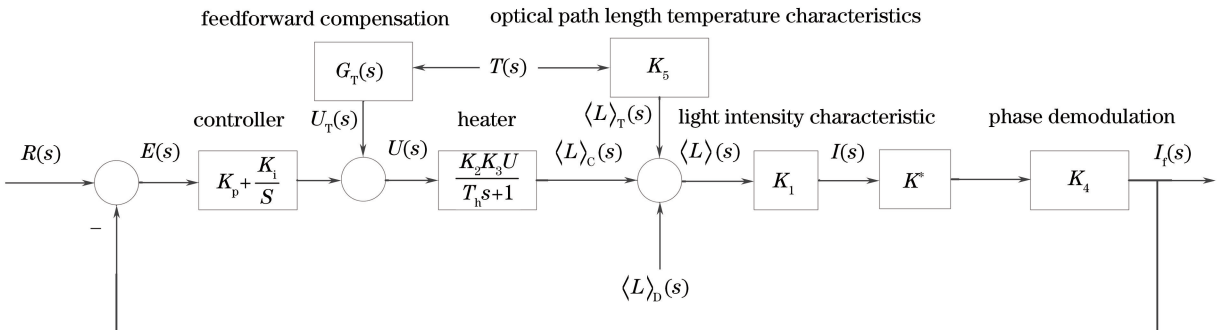


图 7 按温度补偿的前馈控制系统结构图

Fig. 7 Structure of feedforward control system based on temperature compensation

若选择  $G_T(s) = -K_5(T_h s + 1)/(K_2 K_3 U)$ , 则  $E_T(s) = 0$ , 实现了对温度误差的全补偿, 消除了定温和慢变温下的稳态误差, 提高了全部响应过程的稳频精度。

温度补偿装置中, 采用 PT100 把温度的变化转化为阻值的变化, 然后进行信号调理转变为电压信

号, 从而 FPGA 控制 ADC 对其进行采集。信号调理电路由桥式电路、运算放大器、低通滤波器组成, 如图 8 所示。经过校正后的温度关于 AD 数字量的线性表达式为  $T = 0.00292 \times V_{AD\_VALUE} + 41.2$ , 其中  $V_{AD\_VALUE}$  为温度经模数转换后的数字量。

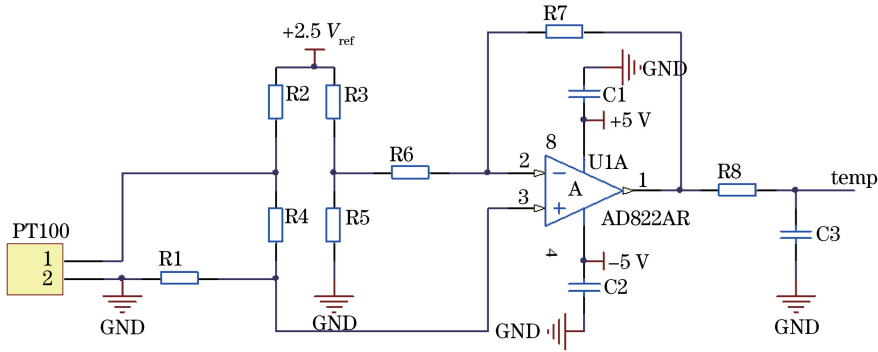


图 8 温度采集的信号调理电路

Fig. 8 Signal conditioning circuit for temperature acquisition

常温下启动陀螺, 在不加前馈补偿的前提下测试 0.5 h, 实时采集温度  $T(t)$ 、加热器电压  $U(t)$  及系统误差  $e_{ss}(t)$ , 根据控制理论可以得到温度干扰作用下的系统误差为

$$e_{ss}(t) = -[K_5 dT(t)/dt]/[K_i K_2 K_3 U(t)]. \quad (20)$$

代入  $T(t)$ 、 $U(t)$ 、 $e_{ss}(t)$  及  $K_i$ , 可以计算出  $K_5/(K_2 K_3) \approx 0.5631$ , 因此前馈通道的传递函数为

$$G_T(s) = U_T(s)/T(s) = -0.5631(0.5s + 1)/U. \quad (21)$$

FPGA 中采用的离散化形式为

$$U_T(k) = -\left\{ \frac{0.5631}{U} T(k) + \right.$$

$$\left. \frac{0.5 \times 0.5631}{U} \left[ \frac{T(k) - T(k-1)}{T_s} \right] \right\}, \quad (22)$$

式中  $T_s$  为采样周期。

### 4.3 实验结果分析

为了进一步验证理论分析及仿真的正确性, 在高、低温下分别采用原稳频控制系统和优化后的稳频控制系统对国产某 70 型棱镜式激光陀螺进行性能测试, 稳频精度以碘稳定激光器为频率标准, 采用拍频原理检测。变温过程中温度速率为  $1^\circ\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$ , 陀螺精度是在 100 s 数据测试 2 h 的基础上求标准差所得。实验装置如图 9 所示, 测试结果如表 1 所示。

表 1 原稳频控制系统和优化后的稳频控制系统测试比较

Table 1 Comparison between the original frequency stabilization control system and the optimized frequency stabilization control system

Temperature / °C	Original frequency stabilization control system		Optimized frequency stabilization control system	
	Gyros accuracy / [°/h]	Frequency stabilization accuracy	Gyros accuracy / [°/h]	Frequency stabilization accuracy
-40	0.0103	$1.4 \times 10^{-7}$	0.0071	$1.2 \times 10^{-8}$
25	0.0085	$1.1 \times 10^{-7}$	0.0057	$1.0 \times 10^{-8}$
70	0.0094	$1.2 \times 10^{-7}$	0.0065	$1.1 \times 10^{-8}$
-40-70	0.0141	$1.8 \times 10^{-7}$	0.0097	$1.5 \times 10^{-8}$
70-40	0.0134	$1.7 \times 10^{-7}$	0.0091	$1.4 \times 10^{-8}$

实验结果表明, 优化后的稳频控制系统比原稳频控制系统的稳频精度提高一个数量级, 陀螺精度提高 30% 以上。

## 5 结 论

分析了光强调谐曲线及稳频执行机构的特性,



图 9 稳频系统测试实验装置

Fig. 9 Test device of frequency stabilization system

建立了稳频控制系统的数学模型。指出了定温及慢变温下系统存在不同程度的稳态误差,导致稳频精度较低,此外控制器参数的不合理导致系统调节时间过长。针对这些问题,新稳频系统优化了控制器参数,采用按温度补偿的前馈控制系统,既提高了系统的动态性能又消除了温度所引起的稳频误差。实验结果表明,新稳频系统的稳频精度提高一个数量级,陀螺精度提高 30% 以上。此分析结果对提高棱镜式激光陀螺的性能,以及对提高其他小抖动稳频激光器的稳频精度有重要的参考意义。

参 考 文 献

[1] Bakin Y V, Ziouzev G N, Lioudomirski M B. Laser gyros with total reflection prisms [M]. Moscow: Moscow Bauman State Technical University, 2003: 1-34.

[2] Yao C K, Zeng X D, Cao C Q. Intensity properties of output light in prisms laser gyro with mechanical dither bias [J]. Acta Physica Sinica, 2012, 61(9): 094216.  
姚呈康, 曾晓东, 曹长庆. 机械抖动棱镜式激光陀螺出射光强度特性 [J]. 物理学报, 2012, 61(9): 094216.

[3] Liu J N, Jiang J B, Shi S X, et al. Analysis of total reflection prism ring laser's output characteristi and gyroscope's accuracy [J]. Chinese Journal of Lasers, 2013, 40(1): 0102002.  
刘健宁, 蒋军彪, 石顺祥, 等. 全反射棱镜式环形激光器合光输出及陀螺精度特性分析 [J]. 中国激光, 2013, 40(1): 0102002.

[4] Chow W W. The ring laser gyro [J]. Reviews of Modern Physics, 1985, 57(1): 61-104.

[5] Menegozzi L N, Lamb W E. Theory of a ring laser [J]. Physical Review A, 1973, 8(4): 2103-2125.

[6] Jiang Y N. Ring laser gyro [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1985: 214-216.  
姜亚南. 环形激光陀螺 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1985: 214-216.

[7] Zhao D Y, Shi S X, Li J L. Temperature effect of

ring laser with total reflection prisms [J]. Acta Photonica Sinica, 2006, 35(11): 1627-1631.  
赵东洋, 石顺祥, 李家立. 全反射棱镜式环形激光器的温度效应 [J]. 光子学报, 2006, 35(11): 1627-1631.

[8] Liu J N, Jiang J B, Shi S X, et al. Optimization analysis of frequency stabilization servo system of prisms laser gyro [J]. Acta Armamentarii, 2013, 34(7): 821-827.  
刘健宁, 蒋军彪, 石顺祥, 等. 棱镜式激光陀螺稳频伺服系统优化分析 [J]. 兵工学报, 2013, 34(7): 821-827.

[9] Ma J J, Jiang J B, Liu J N. Frequency stabilization technique of total reflection prism laser gyros with double longitudinal modes [J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(9): 0902011.  
马家君, 蒋军彪, 刘健宁. 全反射棱镜式激光陀螺双纵模稳频技术 [J]. 中国激光, 2014, 41(9): 0902011.

[10] Ma J J, Jiang J B, Liu J N. Adaptive frequency stabilization technique for total reflection prism laser gyros [J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(3): 0314002.  
马家君, 蒋军彪, 刘健宁. 全反射棱镜式激光陀螺自适应稳频技术 [J]. 光学学报, 2015, 35(3): 0314002.

[11] Ma J J, Jiang J B. Research on the frequency stabilization properties of total reflection prism laser gyros [J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(1): 0102002.  
马家君, 蒋军彪. 全反射棱镜式激光陀螺稳频特性研究 [J]. 中国激光, 2015, 42(1): 0102002.

[12] Luo H, Guo S J, Hu S M, et al. Research and design on high-precision frequency-stability measurement system of ring laser gyroscope [J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2005, 13(6): 86-89.  
罗晖, 郭少军, 胡绍民, 等. 激光陀螺仪频率稳定度高精度测量系统的研制 [J]. 中国惯性技术学报, 2005, 13(6): 86-89.

[13] Ma Y H, Yu W D, Quan B X, et al. Influence of path length control mirror on dynamic stability of ring laser gyro [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(6): 0601001.  
马仰华, 于文东, 权冰心, 等. 腔长控制镜对激光陀螺动态特性的影响 [J]. 中国激光, 2017, 44(6): 0601001.

[14] Liang K, Li L, Chen L F, et al. Experimental study on optimal transmittance of mirror in laser gyro [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(4): 0401003.  
梁可, 李龙, 陈林峰, 等. 激光反射镜最佳透射率实验研究 [J]. 中国激光, 2017, 44(4): 0401003.