

全反射棱镜式激光陀螺稳频特性研究

马家君^{1,2} 蒋军彪²

¹西安电子科技大学物理与光电工程学院, 陕西 西安 710071

²西安北方捷瑞光电科技有限公司, 陕西 西安 710111

摘要 针对全反射棱镜式激光陀螺在跳模前后性能下降的现象,系统地研究了全反射棱镜式激光陀螺稳频特性。在对小抖动调制下光强调谐特性和稳频伺服部件理论分析的基础上,建立了全反射棱镜式激光陀螺稳频系统数学模型。给出了稳频精度与加热器电压和环境温升的一般关系及最佳跳模门限的理论计算公式。分析结果表明,环境温升速率的增大和加热器电压的降低会导致稳频性能下降,最佳跳模门限随环境温度的升高而增大,在全温范围内固定跳模门限会导致跳模后稳频性能衰减。采用变增益II型系统稳频与最佳跳模门限设置,可以有效消除在跳模前后陀螺性能下降的现象,陀螺精度相应提高了40%以上。此分析结果为提高全反射棱镜式激光陀螺的性能提供了重要参考。

关键词 激光光学; 棱镜式激光陀螺; 稳频; 跳模; 功率调谐曲线

中图分类号 TN248

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0102002

Research on the Frequency Stabilization Properties of Total Reflection Prism Laser Gyros

Ma Jiajun^{1,2} Jiang Junbiao²

¹School of Physics and Optoelectronic Engineering, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China

²North JIERUI Opto-Electronics Technology Ltd, Xi'an, Shaanxi 710111, China

Abstract For the performance degradation of total reflection prism laser gyros in the front and rear of reset jump, the properties of frequency stabilization of total reflection prism laser gyros are studied systematically. Based on the theory of power tuning characteristic in the small jitter modulation and the serving element of frequency stabilization, a mathematic model of the frequency stabilization system in the total reflection prism laser gyros is proposed. The frequency stabilization accuracy is derived as a function of the heater voltage and rate of temperature, and the theoretical calculation formula of best reset jump threshold is given. The results show that the increase of temperature rate and the reduction of heater voltage can lead to degradation of frequency stabilization accuracy, and the best reset jump threshold increases with the environment temperature increasing, in the fixed and varied temperature environments, the fixed reset jump threshold can result in decreasing accuracy of frequency stabilization after reset jump. Using variable gain II type frequency stabilization system and setting best reset jump threshold, the performance degradation of the front and rear of reset jump can be eliminated effectively, and the gyros accuracy can be improved by over 40%. The analytic study provides an important reference for improving the performance of total reflection prism laser gyros.

Key words laser optics; prism laser gyros; frequency stabilization; reset jump; power tuning curve

OCIS codes 140.3370; 140.3425; 140.3570; 140.3560

收稿日期: 2014-06-23; 收到修改稿日期: 2014-07-15

基金项目: 国际科技合作专项项目(2012DFR70370)

作者简介: 马家君(1985—),男,博士研究生,主要从事激光与光电子技术等方面的研究。E-mail: majiajun_@126.com

导师简介: 蒋军彪(1962—),男,高级工程师,博士生导师,主要从事惯性技术方面的研究。E-mail: jjbiaotz@163.com

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

1 引 言

全反射棱镜式激光陀螺(TRPLG)采用棱镜的全反射特性构成闭合光路,由于棱镜能达到很高的反射率,能够制造出高 Q 值低背向散射的高精度激光陀螺^[1-4]。将棱镜应用于激光陀螺最早由 Aonekob 和 Cokonob 提出。1995年,俄罗斯研制的腔长为450 mm的TRPLG通过了飞行实验,并应用到TU-204和IL-96-300飞机上的捷联式惯性导航系统中。理论研究表明,TRPLG存在零偏误差、比例因子误差和闭锁效应3种主要的误差因素^[5-10]。每种误差因素都与激光振荡频率密切相关,激光振荡频率的不稳定性是影响激光陀螺性能的关键因素^[11]。压电陶瓷驱动的稳频控制系统是目前反射镜式激光陀螺应用最为广泛的稳频方式。谢元平^[12]对这种稳频控制方式做了系统研究,给出了稳频开环和闭合传递函数,指出了提高稳频精度的途径。由于棱镜的应力双折射效应,压电陶瓷驱动的稳频控制系统不适用于TRPLG。TRPLG采用加热器作为稳频系统的伺服部件,通过加热器调节谐振腔光路通道的折射率来实现激光振荡频率的稳定。当加热器的调节超出其最大范围时,稳频控制系统通过跳模来保证陀螺性能。刘健宁^[13]采用有限元分析方法对TRPLG的稳频伺服部件进行了热分析,但对以调节光路折射率进行稳频的系统特性研究尤其是对跳模过程的研究尚不多见。

在陀螺测试中发现,TRPLG性能在跳模前后存在不同程度的下降,对陀螺测量精度产生了一定的影响。针对这一问题,分析了小抖动调制下的光强调谐特性和稳频控制系统各部分的传递函数,建立了TRPLG稳频系统理论模型。从稳频过程和跳模过程两方面对TRPLG稳频特性进行了分析研究。给出了环境温升和加热器电压与TRPLG稳频精度的函数关系,并分析了不同温度下的最佳跳模门限值。在此基础上,将变增益II型系统纳入TRPLG稳频控制方案,分析对比了变增益II型系统与原有稳频系统的稳频性能。在定温和变温环境下,分别采用变增益II型系统与原有稳频系统对TRPLG进行了实验测定。实验结果表明,变增益II型系统消除了跳模前后TRPLG性能下降的现象,有效提高了TRPLG的精度。这些研究结果为TRPLG研制和生产提供了重要的理论依据。

2 理论模型

TRPLG结构如图1所示。其核心部件是全反射棱镜式谐振腔,在棱镜式谐振腔中,4个全反射棱镜通过光胶固定在标号为1的微晶玻璃体上,标号为2的2个反射棱镜称其为第一类棱镜,标号为3的2个反射棱镜称其为第二类棱镜。在第一类棱镜真空密封通道中充入氦氖混合增益气体,通过高频激励为谐振腔提供增益。而位于增益介质对面的腔体通道内充入干燥空气并与加热器连接,通过加热器调节该通道空气密度来实现谐振腔频率的稳定。

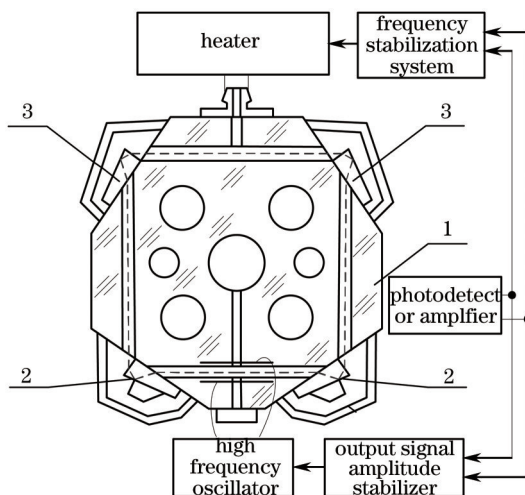


图1 TRPLG结构

Fig.1 Structure of TRPLG

在TRPLG全反射棱镜式谐振腔中,总光程 $\langle L \rangle$ 由增益介质通道光程 $\langle L_1 \rangle$ 、稳频调节通道光程 $\langle L_2 \rangle$ 、左右通道光程 $\langle L_A \rangle$ 和4个棱镜中的光程 $\langle L_0 \rangle$ 组成,在增益介质通道,氦氖气体压强为 $P_0 = 340 \text{ Pa}$,可以近似为真

空,左右通道被抽成真空,总光程可以表示为

$$\langle L \rangle = \langle L_1 \rangle + n_A L_2 + L_A + n_Q L_Q, \quad (1)$$

式中 $n_A = 1 + \alpha/(2\varepsilon_0)n$ 为稳频调节通道空气折射率^[14], α 为空气平均极化率, ε_0 为真空电容率, n 为空气分子数密度。 $n_Q = n_{Q0} + K_Q T$ 为棱镜折射率^[15], n_{Q0} 为常温下棱镜折射率, K_Q 为拟合系数, T 为棱镜温度。根据激光振荡条件,谐振腔中第 q 个纵模对应的频率为 $\nu_q = qc/\langle L \rangle$, 其中, c 为真空光速。在谐振腔中,激光振荡纵模频率难以直接检测,通常依据功率调谐曲线进行稳频。为了避免在频率中心位置处的模竞争,TRPLG 采用双同位素氦氖混合气体作为增益介质。双同位素净增益系数可表示为^[15]

$$\alpha(x, h) = G_0 \left[F \frac{Z_i(x, h)}{Z_i(0, \eta)} + \tilde{F} \frac{\tilde{Z}_i(\tilde{x}, \tilde{h})}{\tilde{Z}_i(0, \tilde{\eta})} \right] - g, \quad (2)$$

式中 $\tilde{F} = \sqrt{1.1}(1 - F)$, $\tilde{h} = \sqrt{1.1}h$, $\tilde{x} = \sqrt{1.1}(x - \tilde{x}_0)$, F 为同位素中 Ne^{20} 所占的比例, h 为均匀展宽和非均匀展宽之比, $\xi = (u - u_0)/ku$ 为频率参量, u_0 为 Ne^{20} 线型函数的中心频率, ku 为 Ne^{20} 多普勒展宽频率, Z_i 为等离子体色散函数的虚部, G_0 为单程峰值增益, g 为单程损耗。在准稳态条件下,平均光强为 $I_0(x) = Ga/(b + Gq)$, 代入 Lamb 系数,可得功率调谐曲线为

$$I_q(\xi) = \frac{\left[F \frac{Z_i(\xi, \eta)}{Z_i(0, \eta)} + \tilde{F} \frac{\tilde{Z}_i(\xi, \tilde{\eta})}{\tilde{Z}_i(0, \tilde{\eta})} \right] - \frac{\gamma}{G_0}}{\Gamma^{-1} \left[\frac{G_0 C}{Z_i(0)} b_j + \frac{G_0 \tilde{F}}{\tilde{Z}_i(0)} \tilde{b}_j \right] + G_0 \left[\frac{F}{Z_i(0)} \Re Z_i + \frac{\tilde{F}}{\tilde{Z}_i(0)} \Re \tilde{Z}_i \right]}, \quad (3)$$

式中 $b_j = Z_i(x_j) - hZ_r^\xi(x_j)$, $\tilde{b}_j = \tilde{Z}_i(\tilde{x}_j) - \tilde{h}\tilde{Z}_r^\xi(\tilde{x}_j)$, $\Gamma = (22P_0 + 10)/(57P_0 + 10)$ 为辐射捕获修正量, $\Re = \eta^2/(\eta^2 + \xi^2)$ 为洛伦兹函数, $\tilde{\Re} = \sqrt{1.1}\Re$ 。将(1)式代入(3)式,得 TRPLG 在多纵模工作条件下的总光强为

$$I = \sum_{q=1}^{\infty} I_q[(qc/\langle L \rangle - \nu_0)/ku]. \quad (4)$$

TRPLG 采用小抖动稳频,通过数值计算,得到 TRPLG 功率调谐曲线及其变化率,如图 2 所示。

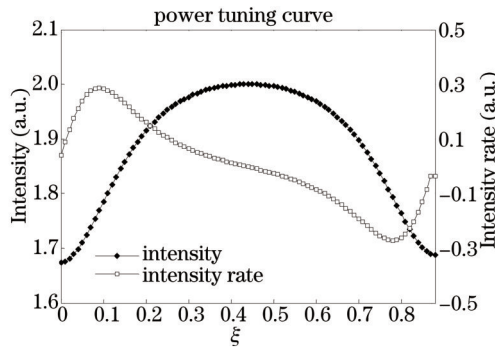


图 2 TRPLG 功率调谐曲线

Fig.2 Power tuning curve of TRPLG

为了说明在小抖动调制下谐振腔光学程长的改变与稳频误差之间的关系,忽略激光振荡的自饱和和效应、互饱和效应和辐射捕获效应,在单纵模工作及多普勒极限条件下,在激光增益中心点附近,陀螺输出光强可以近似为

$$I = I_0 \exp \left[- \left(\frac{\nu - \nu_0}{ku} \right)^2 \right]. \quad (5)$$

对(5)式两端微分,得

$$\Delta I = -2I \frac{\nu - \nu_0}{ku} \frac{d\nu}{ku} \approx -2I_0 \frac{\Delta \nu}{ku} \frac{d\nu}{ku}, \quad (6)$$

式中 $d\nu$ 表示由于小抖动调制产生的激光频率波动,再根据 $Du = -uD\langle L \rangle/\langle L \rangle$ 得

$$\Delta I = K_1 \Delta \langle L \rangle, \quad (7)$$

式中 $K_1 = 2I_0 \frac{1}{ku} \frac{dv}{ku} \frac{v_0}{\langle L \rangle}$ 。

TRPLG采用加热器作为稳频伺服部件,在加热器内部通过压电陶瓷膜片的振动对激光振荡频率产生小抖动调制,从光强中解调的调制信号相位及幅度对谐振腔工作频率进行控制,加热器结构图如图3所示。

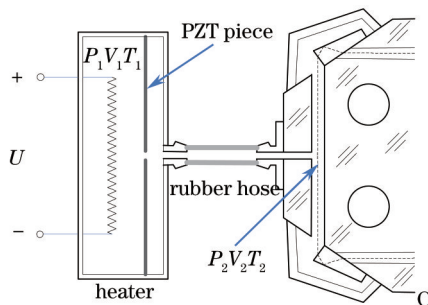


图3 加热器模型

Fig.3 Heater model

设电热丝两端的电压为 U , 电热丝电阻为 r , 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_1 , 单位时间内电热丝产生的热量为 U^2/r , 则根据热力学理论有

$$MC \frac{dT_1}{dt} + HAT_1 = \frac{U^2}{r} \quad (8)$$

对(8)式两端微分,得加热器温度增量的微分方程为

$$T_w \frac{d\Delta T_1}{dt} + \Delta T_1 = \frac{2U\Delta U}{HAr} \quad (9)$$

式中 $T_w = \frac{MC}{HA}$ 为加热器时间常数。加热器和稳频通道内的空气可以近似为理想气体,设加热器内部压强为 P_1 , 体积为 V_1 , 总分子数为 N_1 。稳频调节通道内部压强为 P_2 , 体积为 V_2 , 总分子数为 N_2 。根据理想气体状态方程得

$$P_1 V_1 = \frac{N_1 R T_1}{N_A} \quad (10a)$$

$$P_2 V_2 = \frac{N_2 R T_2}{N_A} \quad (10b)$$

式中 R 为理想气体常数, N_A 为阿伏伽德罗常数。(10a)式与(10b)式相加得

$$PV = \frac{R}{N_A} (N_1 T_1 + N_2 T_2) \quad (11)$$

式中 $P = P_1 = P_2$, V 为加热器与稳频调节通道总体积。将(10b)式代入(11)式并对方程两端微分,得加热器温度的变化量与稳频通道空气分子数密度的变化量之间的关系为

$$\Delta n_2 = \frac{N_1}{V} \frac{\Delta T_1}{T_2} \quad (12)$$

由(9)式和(12)式,结合空气折射率与稳频通道分子数密度的关系,得稳频通道光学程长的变化量与加热器电压变化量之间的传递函数为

$$H(s) = \frac{\Delta \langle L \rangle (s)}{\Delta U (s)} = \frac{K_2 U}{T_w s + 1} \quad (13)$$

式中 $K_2 = \frac{1}{HAr} \frac{\alpha}{\epsilon_0} \frac{N_1 L_2}{V T_2}$ 。TRPLG采用积分控制器对系统进行校正,控制器对应的传递函数为 $G_{c1}(s) = 1/(T_i s)$,

由以上分析可得,TRPLG稳频控制系统开环传递函数为

$$G_1(s)H(s) = K_1 G_{c1}(s)H(s) = \frac{K}{s(T_w s + 1)} \quad (14)$$

开环增益为

$$K = \frac{K_1 K_2 u}{T_i} = 2I_0 \frac{1}{ku} \frac{dv}{ku} \frac{v_0}{\langle L \rangle} \frac{1}{HAr} \frac{\alpha}{\varepsilon_0} \frac{N_1 L_c U}{V T_2 T_i} \quad (15)$$

以上分析建立 TRPLG 稳频控制系统的理论模型,在理论模型的基础上需进一步对稳频特性进行分析与讨论。

3 性能分析与讨论

3.1 稳频过程性能分析

由稳频控制系统的理论模型可知,TRPLG 稳频控制系统为 I 型系统,根据控制理论, I 型系统在单位斜坡输入信号下的稳态误差为 $e_{ss}(\infty) = 1/K$,由线性叠加原理,并根据在温升速率为 K_3 时,环境温度的增量与稳频相敏误差的关系 $\Delta e = K_3 K_Q L_Q K_1 \Delta T$,得 TRPLG 稳频系统的稳态误差为

$$e_{ss}(\infty) = \frac{K_3 K_Q L_Q K_1}{K} = \frac{\varepsilon_0 HAr V T_2 T_i K_3 K_Q L_Q}{\alpha N_1 L_2 U} \quad (16)$$

由(16)式可得,稳频系统稳态误差 $e_{ss}(\infty)$ 随环境温升速率 K_3 的增大而增大,随加热器电压 U 降低而增大。在 TRPLG 稳频过程中,初始温升速率较大,稳频精度差,随着稳频控制器的调节,加热器电压逐渐降低,稳态误差也随之增大,从而导致在跳模前 TRPLG 性能下降。

根据控制理论, II 型控制系统在单位斜坡输入信号下不存在稳态误差,要消除在跳模前 TRPLG 性能下降的现象,可以将现有 I 型稳频控制系统校正成 II 型系统,并针对原有稳频控制系统开环增益随加热器电压下降而降低的特点,根据闭环控制过程中加热器电压的大小,实时调整环路增益,以确保闭环幅频特性的谐振峰值不变,实现变增益 II 型系统稳频,从而减小在环境温升变化条件下的稳态误差,提高系统稳频精度。从 I 型稳频控制系统校正成为 II 型系统,只需在原有校正器通道上再增加一比例积分环节,校正后的 II 型系统的开环传递的函数为

$$G_2(s)H(s) = \frac{K_4(T_3 s + 1)}{s^2(T_w s + 1)} \quad (17)$$

为保证 II 型系统的稳定性,选择闭环幅频特性的谐振峰值 $M_p = 1.4$,根据最佳频比可得中频宽 $h = (M_p + 1)/(M_p - 1)$, $T_3 = hT_w$, $K_4 = (h + 1)/(2h^2 T_w^2)$ 。通过实验测定得 $T_w = 0.4$ s, $K = 0.02/U$,因此, $T_3 = 2.4$ s, $K_4 = 0.6076$,校正器传递函数为 $G_{c2}(s) = 0.6076U(2.4s + 1)/(0.02s)$ 。当 $U = 1$ V 时,校正后的开环系统对数频率曲线和校正前的开环对数频率特性曲线分别如图 4(a)和(b)所示。

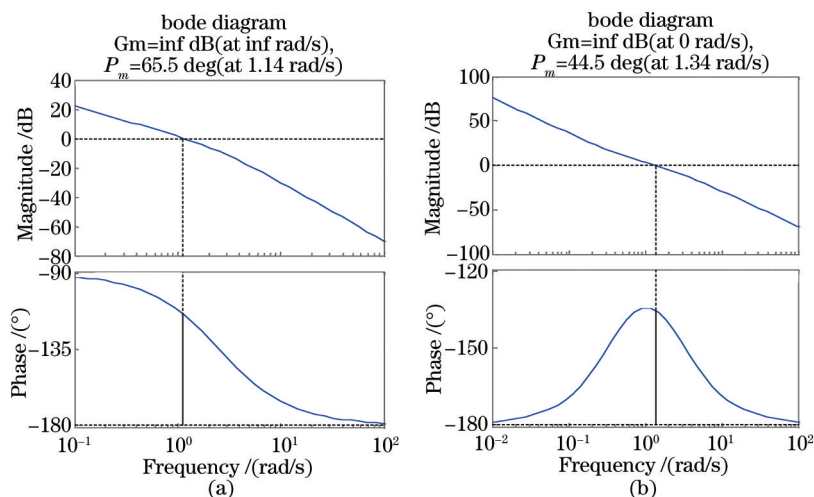


图 4 开环对数频率特性曲线。(a) 校正前频率特性曲线;(b) 校正后频率特性曲线

Fig.4 Open-loop logarithmic frequency characteristic curves. (a) Before the calibration frequency characteristic curves; (b) after the calibration frequency characteristic curves

从图 4 可以看出,校正后的 II 型系统有足够的相位裕度,保证了系统的稳定性。在低频段具有较高的增益,提高了系统稳态精度。另外,由(16)式可知,在 TRPLG 结构设计上,可以通过增加电热丝的长度,减小加

热器体积的方式来提高开环增益并减小加热器的调节时间。

3.2 跳模过程性能分析

在 TRPLG 稳频过程中,当加热器电压的调节到达最大范围时,稳频控制系统通过在加热器上施加阶跃输入电压使谐振腔由一个纵模过度到另一纵模上。在跳模过程中,加热器内部温度发生剧烈变化,由于加热器与谐振腔基座连接,加热器温度的变化将导致谐振腔有较大的温升速率,从而导致跳模后稳频精度下降,另一方面,如果跳模门限设置不当,跳模结束后,稳频控制系统存在动态过程,也会导致 TRPLG 性能下降。TRPLG 的跳模过程可以用微分方程表示为

$$T_w \frac{d\langle L_c \rangle}{dt} + \langle L_c \rangle = K_2 [U_0 + \Delta U \varepsilon(t)]^2, \quad (18)$$

式中 U_0 为跳模前加热器电压, ΔU 为跳模门限, $\varepsilon(t)$ 为单位阶跃函数,在初始条件为 $\langle L_c \rangle_{t=0} = K_2 U_0^2$ 下通过求解跳模过程微分方程,得调节通道光学程长随时间的变化关系为

$$\langle L_c \rangle = K_2 [(U_0 + \Delta U)^2 - (2U_0 \Delta U + \Delta U^2) e^{-t/T_w}]. \quad (19)$$

跳模过程要求在短时间内激光工作模态从一个纵模准确地跳到另一个纵模上,因此,跳模门限应满足

$$\langle L_c \rangle_{t=\infty} - \langle L_c \rangle_{t=0} = K_2 (2U_0 \Delta U + \Delta U^2) = \pm \lambda. \quad (20)$$

由此可得最佳跳模门限的理论计算公式为

$$\Delta u = -U_0 + \sqrt{U_0^2 \pm \frac{\lambda}{K_2}} = -U_0 + \sqrt{U_0^2 \pm \frac{2\varepsilon_0 \lambda H A r V T_2}{\alpha N_1 L_c}}, \quad (21)$$

式中“+”对应加热器升温复位,“-”对应加热器降温复位。当 $t = 3T_w$ 时, $\langle L_c \rangle_{t=\infty} - \langle L_c \rangle_{t=0} = 0.98\lambda$, 可以认为跳模结束,因此最佳跳模时间为 $t = 3T_w$ 。由(21)式可知,最佳跳模门限与环境温度有关,并随环境温度的增加而增加。原有稳频系统采用固定跳模门限设置,必然导致在跳模结束后存在稳频控制动态过程,从而影响陀螺稳频精度,使跳模结束后陀螺性能下降。若根据环境温度设定最佳跳模门限能在一定程度上消除跳模结束后陀螺性能下降的现象。应当指出对于不同程长的 TRPLG,最佳跳模门限存在差异。

3.3 实验结果分析

为了进一步验证理论分析的正确性,分别采用原有稳频控制系统和变增益 II 型系统对 TRPLG 在定温和变温环境下进行性能测试,并在变增益 II 型系统控制过程中根据环境温度设置最佳跳模门限值,测试结果如图 5 所示。

图 5(a)为采用原有稳频控制系统在定温环境下的测试数据,从测试数据中可以看出,在跳模前后陀螺输出脉冲波动大,对陀螺性能造成了一定程度的影响。图 5(b)为采用变增益 II 型系统在定温环境下的测试数据,与原有稳频控制系统相比,变增益 II 型系统消除了跳模前后陀螺性能下降的现象。图 5(c)和(d)分别为采用原有稳频控制系统和变增益 II 型系统在升温环境下的测试数据,图 5(e)和(f)分别为采用原有稳频控制系统和变增益 II 型系统在降温环境下的测试数据,变增益 II 型系统抑制了陀螺脉冲的漂移并减小陀螺输出脉冲的波动。表 1 对比了原有稳频控制系统和变增益 II 型系统在不同温度下的陀螺精度。

以上测试结果表明,变增益 II 型系统有效消除了跳模前后性能变差的现象,陀螺性能相应提高了 40% 以上。

表 1 原有稳频系统和变增益 II 型稳频系统测试精度比较

Table 1 Comparison of gyros accuracy under original frequency stabilization and variable gain II type frequency stabilization

Temperature /°C	Original frequency stabilization		Variable gain II type frequency stabilization	
	Gyros accuracy /(/h)	Random walk /(/h ^{1/2})	Gyros accuracy /(/h)	Random walk /(/h ^{1/2})
-40	1.13%	0.38%	0.64%	0.18%
+25	1.06%	0.35%	0.52%	0.14%
+70	1.11%	0.37%	0.59%	0.17%
-40~+70	1.47%	0.49%	0.74%	0.21%
+70~-40	1.51%	0.50%	0.73%	0.20%

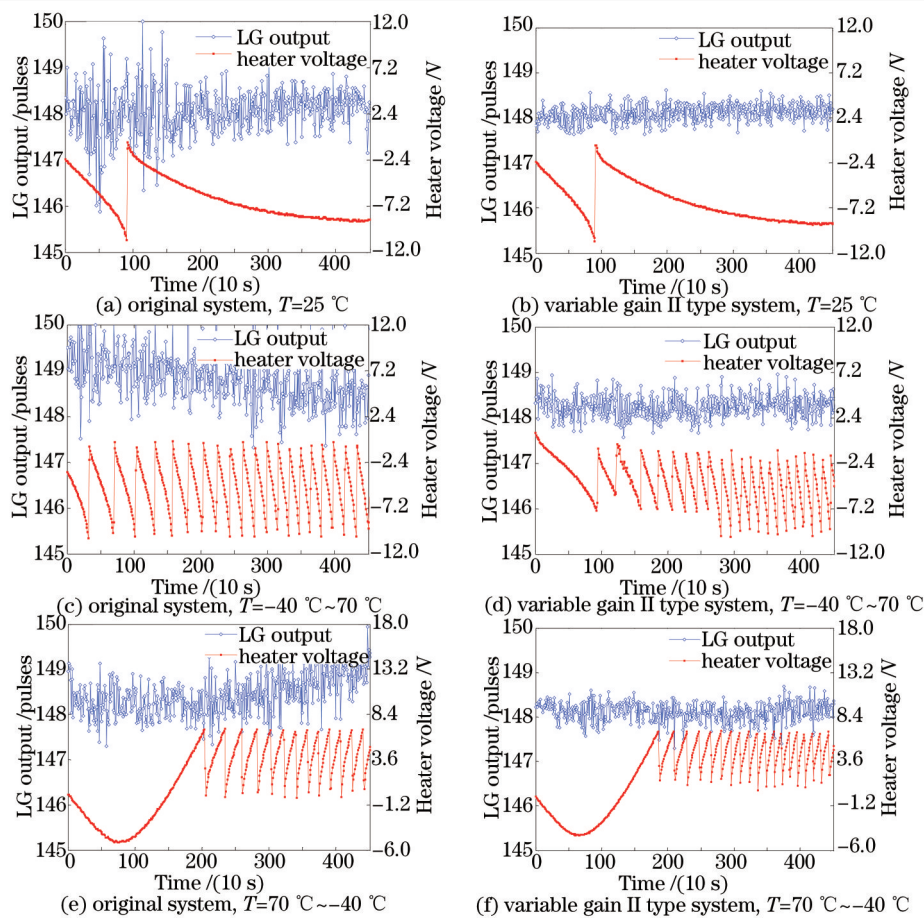


图5 不同温度下TRPLG分别采用原有稳频系统和变增益II型稳频系统的测试结果

Fig.5 Test results of TRPLG at different temperatures under original frequency stabilization and variable gain II type frequency stabilization

4 结 论

针对TRPLG在跳模前后性能下降的现象建立了稳频控制系统理论模型,对稳频过程和跳模过程进行了性能分析。结果表明,TRPLG稳频控制系统为I型系统,稳频精度随环境温升速率的减小而提高,随加热器电压的降低而下降;最佳跳模门限与环境温度有关,跳模门限设置不当,会导致跳模后稳频精度下降。以上研究结果从理论上解释了TRPLG在跳模前后性能下降的原因。在此基础上,提出了变增益II型稳频系统,通过最佳跳模门限设置,消除了跳模前后陀螺性能下降的现象。实验结果表明,使用变增益II型稳频系统,可以将陀螺精度在原有基础上提高40%以上。

参 考 文 献

- 1 Y V Bakin, G N Ziouzev, M B Lioudomirski. Laser Gyros with Total Reflection Prisms[M]. Moscow: Moscow Bauman State Technical University, 2003. 1-34.
- 2 Yao Chengkang, Zeng Xiaodong, Cao Changqing. Intensity properties of output light in prism laser gyro with mechanical dither bias [J]. Acta Phys Sin, 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 Ma Jiajun, Jiang Junbiao, Liu Jianning. Frequency stabilization technique of total reflection prism laser gyros with double longitudinal modes[J]. Chinese J 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.
- 4 Liu Jianning, Jiang Junbiao, Shi Shunxiang. Analysis of total reflection prism ring laser's output characteristic and gyroscope's accuracy[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(1): 0102002.

- 刘健宁, 蒋军彪, 石顺祥. 全反射棱镜式环形激光器和光输出及陀螺精度特性分析[J]. 中国激光, 2013, 40(1): 0102002.
- 5 Liu Jianning, Jiang Junbiao, Lian Tianhong, *et al.*. Analysis of total reflection prism ring laser's cavity stress and gyroscope's characteristics[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(11): 0102003.
- 刘健宁, 蒋军彪, 连天虹, 等. 谐振腔应力对全反射棱镜式激光陀螺输出光强分布特性影响[J]. 中国激光, 2013, 40(11): 0102003.
- 6 Weng W Chow, Jarel B Hambenne, Thomas J. Multioscillator laser gyros[J]. Quantum Electronics, 1980, 16(9): 918-936.
- 7 Willis E Lamb, Jr. Theory of an optical maser[J]. Phys Rev, 1964, 134(6A): 1429-1450.
- 8 Leonel N Menegozzi, Willis E Lamb, Jr. Theory of a ring laser[J]. Phys Rev, 1973, 8(4): 2103-2125.
- 9 Frederick Aronowitz. Theory of a traveling-wave optical maser[J]. Phys Rev, 1965, 139(3A): 635-646.
- 10 Gao Bolong, Li Shutang. Ring Laser Gyro[M]. Changsha: National University of Defense Technology Press, 1984. 50-52.
- 高伯龙, 李树棠. 激光陀螺[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 1984. 50-52.
- 11 Fan Zhenfang, Luo Hui, Lu Guangfeng, *et al.*. Research and discussion on the lock-in threshold variation of ring laser gyro[J]. Acta Phys Sin, 2012, 61(18): 184204.
- 樊振方, 罗 晖, 卢广锋, 等. 激光陀螺变锁区现象的研究与讨论[J]. 物理学报, 2012, 61(18): 184204.
- 12 Xie Yuanping. Investigation of Phase-Demodulation and Frequency Stabilization techniques in Mechanically Dithered ring Laser Gyroscopes[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2000.
- 谢元平. 机械抖动激光陀螺鉴相解调与稳频技术的研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2000.
- 13 Liu Jianning. Analysis on Frequency Stabilization System of Laser Gyro with Total Reflection Prisms[D]. Xi'an: Xidian University, 2010.
- 刘健宁. 全反射棱镜式激光陀螺稳频技术研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2010.
- 14 Lu Danyong, Liu Changjiang, Zhou Huijun, *et al.*. Using Mach-Zehnder interferometer to quantitatively measure the refractive index of air and its theoretical discussion[J]. Physics Experimentation, 2007, 26(12): 40-43.
- 卢丹勇, 刘长江, 周惠君, 等. 用 M-Z 干涉仪对空气折射率的定量测量与理论探讨[J]. 物理实验, 2007, 26(12): 40-43.
- 15 Zhao Shuang, Wu Fuquan. The study on dispersive equation and thermal refractive index coefficient of quartz crystal[J]. Acta Photonica Sinica, 2006, 35(8): 1183-1186.
- 赵 爽, 吴福全. 石英晶体的色散方程及折射率温度系数[J]. 光子学报, 2006, 35(8): 1183-1186.

栏目编辑: 张 雁