

# 四频激光陀螺性能与室温的相关性研究

王国臣 杨建强

(国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

**摘要** 室温条件下温度对四频激光陀螺零漂的影响非常复杂, 为尝试定性找出温度影响陀螺零漂的机理, 对室温下陀螺零漂、表面温度、两路信号的光强差及光强和、两臂放电电流差以及和频进行实时监控测试, 通过分析计算各个参数与温度的相关系数, 得出以下结论: 四频激光陀螺各个参数与温度的相关系数随陀螺运行时间的长短而不同, 并且陀螺各参数与温度相关系数的逐次偏差也较大, 陀螺室温下的温度补偿对四频激光陀螺性能的改善十分有限; 室温下和频与温度具有较好的线性关系, 但线性比例系数是变化的。

**关键词** 四频激光陀螺; 零漂; 光强和差; 放电电流差; 和频

**中图分类号** U666.1      **文献标识码** A      **doi:** 10.3788/AOS20092904.1058

## Correlation of Differential Laser Gyro's Performance and Room Temperature

Wang Guochen Yang Jianqiang

(College of Photoelectric Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha Hunan 410073, China)

**Abstract** The infection of the room temperature to the differential laser gyro's null shift is very complex. In order to finding out the infection mechanism, surface temperature, gyro's null shift, laser intensity difference and sum between the two signals, current difference between the two arms discharge and the sum frequency are tested at the same time. Through analyzing and calculating the correlation coefficient between temperature and other parameters, it is found that the correlation between the gyro's parameters and surface temperature is different along with testing time. It's also different between different experiments, so the effect of temperature compensation is limited. The sum frequency is proportional linearly to the temperature, but the linearly proportional coefficient is different along with testing time and different experiments.

**Key words** differential laser gyro; null shift; laser intensity difference and sum; current difference of discharge; sum frequency

## 1 引 言

激光陀螺具有耐冲击振动能力强、动态范围大、比例因子的线性度和稳定度好、安装轴的方向稳定度好等一系列优点, 是中等精度惯性导航的理想器件。国防科大研制的四频激光陀螺采用光学方案进行偏频, 陀螺没有活动的机械部件, 原理上先进, 动态性能良好, 已广泛应用于实际<sup>[1]</sup>。

激光陀螺的温度特性在一定程度上制约了激光陀螺精度的进一步提高, 有关激光陀螺零漂的温度补偿和温度控制一直是改善这一问题的两种方

式<sup>[2~5]</sup>。四频激光陀螺零漂受温度的影响较大, 温度补偿的实际效果不是很理想, 在室温条件下通过温度补偿的方法来改善其性能的效果更是十分有限。由于温度对陀螺零漂的影响非常复杂, 很难从理论上给出准确的解析表达式, 因此本文尝试通过对四频激光陀螺零漂、表面温度、两路信号的光强差及光强和、两臂放电电流差以及和频的实时监控测试, 通过相关性分析, 尝试定性找出温度影响陀螺零漂的机理, 得到一些定性或半定性的结论, 为进一步提高陀螺性能给出一些有意义的参考<sup>[6~9]</sup>。

**收稿日期:** 2008-04-23; **收到修改稿日期:** 2008-10-16

**作者简介:** 王国臣(1980-), 男, 博士研究生, 主要从事激光陀螺及其导航应用等方面的研究。

E-mail: wangguochen0912@sina.com

## 2 温度对四频激光陀螺性能影响的理论分析

### 2.1 温度对陀螺零漂的影响

零漂是激光陀螺精度最直接、最难以控制的问题,种类繁多,主要有朗缪尔流动零漂、磁场引起的零漂、多模耦合效应的零漂、非激活介质的流动效应和电泳引起的零漂、锁区不稳定和逆顺不相等带来的零漂等。大部分都是通过激活介质的反常色散效应而引起的<sup>[10]</sup>。

温度是自然界中的基本物理量,温度的变化会影响到 Faraday 旋光材料 Verdet 常数、陀螺环路的热变形、水晶片的形变、以及其他一些零漂因素,陀螺的性能就会随之变化。特别是室温条件,温度波动范围较小,很多影响效果体现不明显,因此室温下温度对陀螺性能的影响就更为复杂和难以控制。

### 2.2 陀螺和频与温度的关系

一般认为四频激光陀螺的和频与温度在一定的条件下有十分良好的线性关系,这是因为四频激光陀螺 Faraday 效应产生的偏频量为<sup>[10]</sup>

$$v_F = (c/\pi\langle L \rangle)VB_l \quad (1)$$

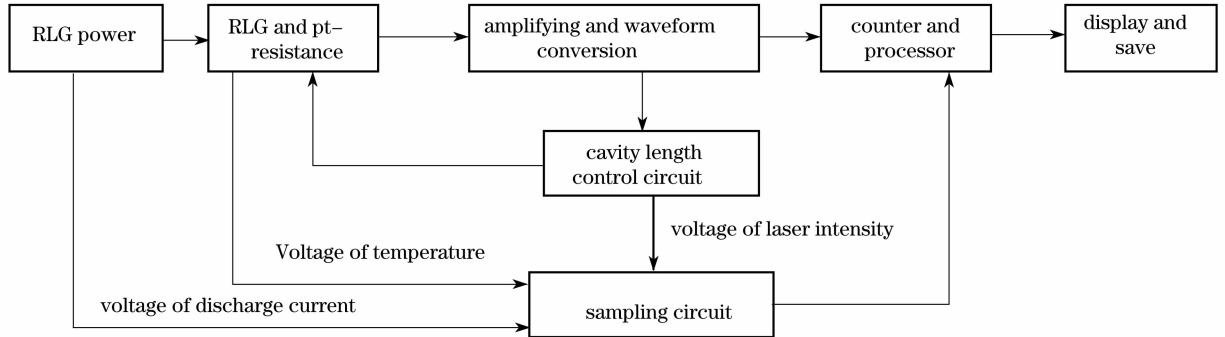


图 1 四频激光陀螺工作及监控电路功能框图

Fig. 1 RLG circuit and monitor circuit for Gyro

### 3.1 前放与整形电路的设计与实现

激光陀螺的前置放大及整形电路要尽量小型化及低功耗,因此采用具有超低偏置电流和偏移电压、低噪声的高速 FET 运放对陀螺信号进行放大;波形转换采用电压比较器来完成。

### 3.2 稳频电路的设计与实现

稳频电路采用数字化稳频电路,采用高精度的 A/D 转换芯片来完成模数转换,采用单片机内部的 D/A 输出控制量对陀螺的光路进行控制;内部采用 PID 算法来完成控制运算。

### 3.3 测温与电压采集电路的设计与实现

测温传感器采用铂电阻对陀螺表面进行测温,测

其中 $\langle L \rangle$ 为光程, $V$ 为所用旋光材料的 Verdet 常数, $B$ 为光传播方向的磁感应强度, $l$ 为旋光材料的厚度。四频激光陀螺的法拉第室的磁场一般由钕铁硼、钕钴等永磁体提供,其磁感应强度  $B$  的大小随温度  $T$  的变化而改变,两者之间近似呈线性关系<sup>[11,12]</sup>

$$B(T) = [1 + K_B(T - T_0)]B_0 \quad (2)$$

其中  $T_0$  为初始温度,  $B_0$  为初始磁感应强度,  $K_B$  为材料的温度系数。根据以上两个式子以及四频陀螺和频与法拉第偏频的关系,即可得出从和频到温度的估算解析表达式

$$T_{SO} = \frac{v_{SO} - v_{SO0}}{K_B * v_{SO0}} + T_0 \quad (3)$$

其中  $v_{SO} = v_L + v_R = 2v_F$  为陀螺和频,  $v_{SO0}$  为初始温度  $T_0$  时的和频。

## 3 测试电路的设计与实现

测试电路主要包括陀螺的工作电路、温度监控电路、陀螺电源放电电流监控电路以及计数和运算处理电路,各部分电路及其功能简介如下,电路总体功能框图如图 1 所示。

温电路由高精度、低温漂的精密电阻构成测温电桥,测温精度优于  $0.05\text{ }^\circ\text{C}$ ;电压采集电路由多路模拟开关和高精度 A/D 构成,由 FPGA 控制其对陀螺的温度电压、光强电压和放电电流取样电压进行采集。

### 3.4 计数与运算处理电路的设计与实现

计数与运算处理电路采用 DSP 和 FPGA 来完成,主要是对陀螺输出方波进行计数、读入陀螺表面的温度电压值、光强电压值和放电电流电压值,进行预处理并将结果上传给上位机,由上位机显示并保存数据。

### 3.5 陀螺电源电路

这部分电路采用现有的陀螺电源电路,未有改变。

## 4 陀螺测试与数据分析

### 4.1 陀螺的测试

实验中在四频激光陀螺的法拉第室表面、水晶片表面以及放电毛细管表面各贴有一个铂电阻,实际计算中采用这三个点的温度平均值作为温度值。从3月15号到3月18号对激光陀螺进行了三组长时间的测试,两次测试间隔在6 h以上,从而保证每次测试均在陀螺冷态情况下启动,每组测试时间为64400 s以上。

表1 温度与四频激光陀螺性能参数的相关系数表

Table 1 Correlation coefficient between temperature and gyro's parameters

	031516. dat		031617. dat		031718. dat	
Beginning and ending time for counting/s	1-14400	14401-64400	1-14400	14401-64400	1-14400	14401-64400
Null shift and temperature	$6.9243 \times 10^{-1}$	$2.0862 \times 10^{-1}$	$7.4168 \times 10^{-1}$	$2.3500 \times 10^{-2}$	$4.3809 \times 10^{-1}$	$4.5263 \times 10^{-1}$
Sum frequency and temperature	$9.9697 \times 10^{-1}$	$9.6151 \times 10^{-1}$	$9.7979 \times 10^{-1}$	$9.9964 \times 10^{-1}$	$9.7900 \times 10^{-1}$	$9.8370 \times 10^{-1}$
Current difference of discharge and temperature	$7.5509 \times 10^{-1}$	$1.9301 \times 10^{-1}$	$6.7578 \times 10^{-1}$	$2.1782 \times 10^{-1}$	$3.8441 \times 10^{-1}$	$1.7162 \times 10^{-1}$
Laser intensity difference and temperature	$5.2464 \times 10^{-1}$	$6.2212 \times 10^{-1}$	$2.7633 \times 10^{-1}$	$1.8618 \times 10^{-1}$	$4.6995 \times 10^{-2}$	$2.9348 \times 10^{-2}$
Laser intensity sum and temperature	$1.2724 \times 10^{-2}$	$7.3956 \times 10^{-4}$	$3.1370 \times 10^{-2}$	$1.5068 \times 10^{-2}$	$5.6029 \times 10^{-3}$	$8.3528 \times 10^{-4}$

### 4.3 数据分析

从表1中的相关系数可以得出一些室温条件下四频激光陀螺与温度的定性结论:

(1) 零漂与温度在初始测试的4小时内相关性较强,陀螺稳定后相关性有所下降,但各次测试的相关系数有较大的差别;因此若采用温度补偿的方法来提高陀螺精度是较困难的;

(2) 和频与温度在测试过程中相关系数一直接近于1,可见二者室温下必然有很强的线性相关性,能否用和频计算温度还要考虑线性比例系数的逐次重复性;4.4中将讨论这个问题;

(3) 两臂放电电流差与陀螺表面温度的相关性在初始测试的4 h内较强,陀螺稳定后相关性下降,但各次测试的相关系数有较大的差别;

(4) 两路信号光强和与温度的相关性各次差异非常大,具体原因有待进一步研究;

(5) 两路信号光强差与温度的相关性非常小,室温条件下可以认为在现有稳频精度下光强差与温度是没有相关性的。

### 4.4 和频对温度的计算

从理论分析到实际计算,都得出和频与温度有较强的线性相关关系,为验证其是否就为理论分析

### 4.2 相关系数的计算

根据概率论的数学知识,两个随机变量  $X, Y$  的相关系数表达式为<sup>[13]</sup>

$$\rho_{xy} = \frac{\text{Cov}(X, Y)}{\sqrt{D(X)} \sqrt{D(Y)}} \quad (4)$$

其中  $\text{Cov}(X, Y)$  为随机变量  $X, Y$  的协方差,  $D(X)$ 、 $D(Y)$  分别为随机变量  $X, Y$  的方差。根据此公式计算各次测试结果中陀螺各项参数与温度的相关系数,其中陀螺稳定之前的初始4小时计算一次,陀螺稳定后到结束测试计算一次,其结果如表1所示。

得出的关系,采用一元线性回归模型,对三次测试的温度数据和和频数据进行数据拟合,计算出温度系数,具体结果如表2所示。

表2 根据和频和温度计算出的磁材料的温度系数  $K_B$   
Table 2 Temperature coefficient of magnetism material  $K_B$  counted by temp and sum frequency

	Temperature coefficient of magnetism material $K_B$	
Beginning and ending time for counting /s	1-14400	14401-64400
031516. dat	-0.0007699	-0.0009028
031617. dat	-0.0006569	-0.0007364
031718. dat	-0.0006482	-0.0006862

从表2中可以看出,计算出的磁材料的温度系数  $K_B$  各次不相同,同一次测试的前后两段计算出的系数也不相同。因此即使室温下陀螺的零漂可以通过温度来补偿,对四频陀螺的温度补偿也不能简单地把和频与温度看作是固定的线性系数即磁材料的温度系数  $K_B$  来补偿,如果那样补偿将得出不正确的结论,甚至可能得出错误的结果。

## 5 结 论

通过对室温下陀螺零漂、表面温度、两路信号的光强差及光强和、两臂放电电流差以及和频的实时

监控测试,分析计算各个参数与温度的相关系数,得出四频陀螺各个参数与温度之间的一些定性的结论,从相关性上解释了四频激光陀螺在室温条件下温度补偿为何对提高陀螺的性能有限的原因,同时给出了陀螺其他性能参数与温度的相关关系,为进一步改善陀螺性能给出一些有参考价值的分析结果,实验中发现和频与温度的线性比例系数并非完全是固定的磁材料的温度系数  $K_B$  而是变化的,认为比例系数就是  $K_B$  是个很大的误区<sup>[14,15]</sup>。

由于四频激光陀螺现在的误差因素还很多、很复杂,温度尤其是室温的影响现在还不是主要的误差因素,因此才会出现零漂等陀螺的性能参数与温度的关系线性性、逐次重复性都不好;待四频激光陀螺改进结构、工艺使其他误差因素的重要性下降后,可以预料那时陀螺的性能与温度将会有很强的相关性,温补也将会非常有非常好的效果。

### 参 考 文 献

- Rao Guyin. Research on error compensation of inertial navigation system with IMU rotating based on four-mode differential laser gyroscopes [D]. Changsha: Graduate School of National University of Defense Technology, 2007  
饶谷音. 四频差动激光陀螺旋转式惯性导航系统误差补偿研究[D]长沙:国防科技大学研究生院 2007
- Zhang Pengfei, Long Xingwu. Primary research on temperature compensation of mechanically RLG's bias [J]. *Laser Journal*, 2005, 26(5): 83~84  
张鹏飞, 龙兴武. 二频机抖激光陀螺温度漂移补偿的初步研究[J]. 激光杂志, 2005, 26(5): 83~84
- Zhang Pengfei, Long Xingwu. Research on temperature compensating model of mechanically dithered. RLG's bias within certain temperature limits [J]. *Laser. J.*, 2006, 27(2): 44~45  
张鹏飞, 龙兴武. 二频机抖激光陀螺小范围温度漂移补偿模型的研究[J]. 激光杂志, 2006, 27(2): 44~45
- Zhang Pengfei, Long Xingwu. Analysis on temperature characteristic of mechanically dithered RLG's bias with a method of stepwise regression [J]. *Optical Technique*, 2006, 32(5): 738~740  
张鹏飞, 龙兴武. 二频机抖激光陀螺零偏的温度特性的逐步回归分析[J]. 光学技术, 2006, 32(5): 738~740
- Zhang Pengfei, Long Xingwu. Research on temperature compensation model of inertial sensor in mechanically dithered RLG's SIND [J]. *J. Astronautics*, 2006, 27(3): 522~526  
张鹏飞, 龙兴武. 机抖激光陀螺捷联系统中惯性器件的温度补偿的研究[J]. 宇航学报, 2006, 27(3): 522~526
- Robert A. Chechile, Agop H. Cherberrtchian, Sampson spry. III *et al.*. Temperature compensated mount for supporting a ring laser gyro [P]. US: 4893509, 1990, 2
- Bernard. G. Fidric. "Ring laser gyro frame design resistant to thermal gradient effects [P]. US: 4867567, 1989, 9
- Theodor A. Toth. Mirror transducer assembly with selected thermal compensation [P]. US: 4915492, 1990, 4
- J. D. Coccoti S. Helfant, RLG evaluation complementary modeling and testing [J]. *IEEE. Ine.*, 1979, 1: 14~21
- Gao Bolong, Li Shutang. *Ring Laser Gyroscopes* [M]. Changsha: National University of Defense Technology Press, 1984  
高伯龙, 李树棠编. 激光陀螺 [M] 长沙: 国防科技大学出版社, 1984
- Electrical Engineers Handbook the second edition editorial board electrical engineers handbook [M]. Beijing: China Machine Press, 2000  
《电气工程师手册》第二版编辑委员会编. 电气工程师手册 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2000
- Rui Jingkan. *Practical manual electrical materials* [M] Beijing: China Electric Power Press, 2003  
芮静康. 实用电工材料手册 [M] 北京: 中国电力出版社, 2003
- Sheng Zhou, Xie Shiqian, Pan Chengyi. *Probability and statistics* [M] Beijing: Higher Education Press, 1989  
盛骤, 谢式千, 潘承毅. 概率论与数理统计 [M] 北京: 高等教育出版社, 1989
- Wu Guoyong, Gu Qitai. Research on the relation of frequency sum to temperature in the four frequency RLG [J]. *Optical Technique*, 2002, 28(6): 508~509, 512  
吴国勇, 顾启泰. 四频激光陀螺和频与温度关系研究 [J]. 光学技术, 2002, 28(6): 508~509, 512
- Zhao Xiaoning, Li Xianluo, Lei Baoquan. Temperature compensation for ring laser gyro [J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2004, 12(3): 55~57  
赵小宁, 李县洛, 雷宝权. 激光陀螺零偏温度补偿研究 [J]. 中国惯性技术学报, 2004, 12(3): 55~57