

## 提高机械抖动激光陀螺抗振性能

赵小宁, 韩宗虎, 李县洛, 陈林峰, 郭 昕, 叶 萍, 雷建军

(西安飞行自动控制研究所, 陕西 西安 710065)

**摘 要:** 通过提升谐振腔抗光路变形能力, 可以有效提高机械抖动激光陀螺的抗振动性能。对机械抖动激光陀螺振动中光路扭偏的产生机理进行了理论计算与仿真分析, 分析结果表明, 抖动切向惯性力和振动冲击惯性力是引起振动中光路扭偏的主要原因。通过振动中光路扭偏对振动性能影响的理论分析指出, 减小振动附加上去的朗缪尔零偏, 提高陀螺抗振性能的两大有效措施是减小工作电流和提高光路抗失谐能力。通过物理试验验证了振动中光路扭偏机理仿真分析的正确性。不同工作电流的振动对比试验表明, 降低工作电流可显著提高陀螺的振动性能, 这对于机抖激光陀螺振动特性的提升具有重要指导意义和工程实用价值。

**关键词:** 机械抖动激光陀螺; 光路扭偏; 朗缪尔零偏

**中图分类号:** TN248.2 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0731003

## Improving mechanically dithered RLG vibration performance

Zhao Xiaoning, Han Zonghu, Li Xianluo, Chen Linfeng, Guo Xin, Ye Ping, Lei Jianjun

(Xi'an Flight Automatic Control Research Institute, Xi'an 710065, China)

**Abstract:** Reducing the deviation of light path in cavity can improve mechanically dithered RLG vibration performance. The mechanism of the deviation of light path in the cavity of mechanically dithered RLG was analyzed and simulated. According to the results, the main reasons of light path deviation were dithered tangential inertial force and vibration impact inertial force. Meanwhile, the deviation of light path in cavity of RLG could change the RLG bias produced by Langmuir flow. The two main effective means of reducing Langmuir flow bias produced by vibration and improving gyro vibration performance were decreasing working current and improving stability of light path in cavity. The mechanism of mechanically dithered RLG light path deviation was validated by test. Compared with vibration test results of different working current, the vibration performance of RLG is improved obviously by reducing working current. The means of improving vibration performance by decreasing working current and increasing stability of light path is put forward, which is useful to improve vibration performance of mechanically dithered RLG and reform for the further development of RLG.

**Key words:** mechanically dithered RLG; light path deviation; Langmuir flow bias

收稿日期: 2015-11-14; 修订日期: 2015-12-15

基金项目: 国防重点预研项目(51309010202)

作者简介: 赵小宁(1978-), 男, 高级工程师, 从事激光陀螺技术方面的研究。Email: xnzha0369@126.com

## 0 引言

激光陀螺具有启动时间短、可靠性高、寿命长、动态范围宽、线性度好、数字输出等诸多优点,已成为捷联惯导系统的理想惯性元件,已大量成功地应用于航空、航天、航海以及地面定位与定向等领域<sup>[1-3]</sup>。但是,许多应用场合尤其是军事领域,环境十分恶劣,而机抖激光陀螺存在活动的机械部件,活动的机械部件运动,加上外界振动使得谐振腔相关活动部件随着振动,引起谐振腔光路变形,严重影响了抖动激光陀螺的抗振性能并制约了抖动激光陀螺的应用场合。因此,研究影响机械抖动激光陀螺振动特性的深层机理,寻找有效提升陀螺振动性能的措施与办法是非常必要的。

文中对振动中光路扭偏影响机抖激光陀螺振动性能的物理机理进行了理论分析,提出了提升陀螺抗振性能的方法。通过理论分析、数值仿真和试验验证指出,通过减小工作电流,提高光路抗失谐能力两大途径,可有效改善机抖激光陀螺的振动性能,这为机械抖动激光陀螺的抗振设计提供了重要参考。

## 1 光路扭偏对陀螺振动性能影响的理论分析

激光陀螺抗振能力一般用陀螺振动中与振动前零偏变化量的大小来衡量,变化量越小说明陀螺的抗振能力越强<sup>[4]</sup>。

### 1.1 机抖陀螺振动中光路扭偏的产生机理

机械抖动激光陀螺是通过中心处的抖动偏频机构将激光传感器和底部壳体相固连,偏频机构通过正弦抖动使激光陀螺大部分时间工作在锁区之外。机抖激光陀螺正弦抖动过程中抖动角位移  $\theta$  随时间的变化关系为<sup>[5]</sup>:

$$\theta = \theta_0 \cdot \sin(2\pi f_d t) \quad (1)$$

式中: $\theta_0$  为机抖激光陀螺的抖动角振幅; $f_d$  为机抖激光陀螺的抖动频率。

角速度随时间的变化关系为:

$$\omega = \dot{\theta} = 2\pi f_d \cdot \theta_0 \cdot \cos(2\pi f_d t) \quad (2)$$

角加速度随时间的变化关系为:

$$\beta = \ddot{\theta} = -(2\pi f_d)^2 \cdot \theta_0 \cdot \sin(2\pi f_d t) \quad (3)$$

稳频组件处的切向加速度为:

$$a_t = R \cdot \beta = -R \cdot (2\pi f_d)^2 \cdot \theta_0 \cdot \sin(2\pi f_d t) \quad (4)$$

式中: $R$  为稳频组件离抖动轮中心轴的距离。

稳频组件处的法向加速度为:

$$a_n = R \cdot \omega^2 = R \cdot (2\pi f_d \cdot \theta_0 \cdot \cos(2\pi f_d t))^2 = \frac{R}{2} \cdot (2\pi f_d \cdot \theta_0)^2 \cdot [(1 + \cos(4\pi f_d t))] \quad (5)$$

则稳频组件处的最大切向速度为:

$$a_{t_{\max}} = R \cdot (2\pi f_d)^2 \cdot \theta_0 \quad (6)$$

稳频组件处的最大法向加速度为:

$$a_{n_{\max}} = R \cdot (2\pi f_d \cdot \theta_0)^2 \quad (7)$$

若取抖动频率  $f_d = 450 \text{ Hz}$ , 抖动角振幅  $\theta_0 = 2' = 5.818 \times 10^{-4} \text{ rad}$ , 抖动轮中心轴至稳频镜的距离  $R = 50 \text{ mm} = 50 \times 10^{-3} \text{ m}$ , 则稳频镜处最大切向速度为:  $a_{t_{\max}} = R \cdot (2\pi f_d)^2 \cdot \theta_0 = 232.547 \text{ m/s}^2 = 23.729g$ , 稳频镜处最大法向加速度为:  $a_{n_{\max}} = R \cdot (2\pi f_d \cdot \theta_0)^2 = 0.135 \text{ m/s}^2 = 0.014g$ 。可见,稳频球面镜将主要受到一个惯性切向力的作用,其作用力表示式为:

$$F_t = -m \cdot a_t = m \cdot R \cdot (2\pi f_d)^2 \cdot \theta_0 \cdot \sin(2\pi f_d t) \quad (8)$$

因此,稳频球面镜将主要受到一个与偏频机构同频的正弦惯性切向力的作用,该惯性力作用在稳频球面镜的质心上,稳频镜膜面将产生扭摆运动,导致光束来回偏离光阑的中心轴,结果使光束通过光阑的衍射损耗出现了一个 2 倍抖动频率的周期性变化,光阑处的衍射损耗可以表示为:

$$\delta_{\text{衍射}} = \delta_{\text{衍射}0} + \delta_{\text{衍射}1} \cdot \sin(2\pi \cdot 2f_d \cdot t) \quad (9)$$

而环形激光陀螺的输出光功率直接和增损比相关,其输出光功率为<sup>[6]</sup>:

$$P = \frac{1}{2} A I_s T \left[ \left( \frac{G_0}{a_0 + \delta_{\text{衍射}}} \right)^2 - 1 \right] \quad (10)$$

式中: $A$  为谐振腔内光束的有效横截面积; $I_s$  为饱和光强,其值可从激光器手册查出,  $300 \text{ mW/mm}^2$ ;  $T$  为输出镜透射率; $a_0$  为除光阑衍射损耗外的谐振腔损耗。

由上式可知,当增益等其他指标基本不变时,若仅衍射损耗按正弦规律变化,则激光陀螺输出光功率也会表现出一个正弦波动。当取增益  $G_0 = 600 \times 10^{-6}$ ,  $a_0 = 300 \times 10^{-6}$ ,  $A = 0.385 \text{ mm}^2$ ,  $T = 100 \times 10^{-6}$ ,  $\delta_{\text{衍射}0} = 30 \times 10^{-6}$ ,  $\delta_{\text{衍射}1} = 20 \times 10^{-6}$ ,  $f_d = 450 \text{ Hz}$ , 则激光陀螺直流光强输出  $P(\mu\text{W})$  的仿真结果如图 1 所示。

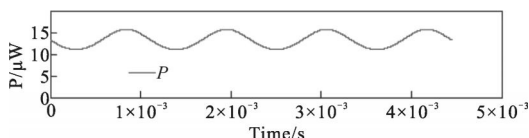


图 1 未加振动时机抖激光陀螺直流光强的仿真曲线

Fig.1 Simulation curve of light intensity of mechanically dithered RLG without random vibration

由图 1 仿真结果可见，机械抖动导致光路扭偏，进而使激光陀螺直流光强输出产生了一个周期性变化，即直流光强受到了一个 2 倍抖动频率的交流调制。

若激光陀螺顺逆光的光强相等即  $P_1=P_2=P_0$ ，拍频的频差为  $\Delta\nu$ ，则理想合光位置对应的拍频信号的幅值为：

$$I=P_1+P_2+2\sqrt{P_1\cdot P_2}\cdot\cos(2\pi\cdot\Delta\nu\cdot t)=2P_0[1+\cos(2\pi\cdot\Delta\nu\cdot t)] \quad (11)$$

对直流光强在有交流调制的情况下，利用公式 (11)对拍频信号进行了数值仿真计算，拍频幅值  $I$  和直流光强幅值  $P$  的仿真结果如图 2 所示。

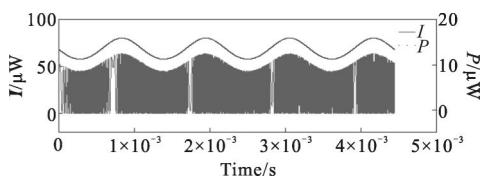


图 2 未加振动时机抖激光陀螺拍频、光强信号的仿真曲线

Fig.2 Simulation curve of beat frequency and intensity of output signal of mechanically dithered RLG without random vibration

图 2 仿真结果显示：若直流光强信号受到周期性的调制，则拍频信号  $\sin/\cos$  的一边也会产生与直流光强变化同频率的单边调制现象。

将上述条件下拍频信号与抖动角振幅信号画在一张图上，拍频幅值  $I$  和抖动角振幅  $\theta$  的仿真结果如图 3 所示。

由以上各图可见，由于机械抖动的惯性切向力

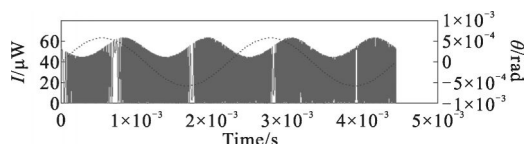


图 3 未加振动时机抖激光陀螺拍频、抖动角振幅的仿真曲线

Fig.3 Simulation curve of beat frequency output signal and dither angular amplitude of mechanically dithered RLG without random vibration

作用，直流光强与拍频信号将受到一个周期性的正弦调制，调制包络的频率为 2 倍抖动频率。

若对抖动激光陀螺施加随机振动激励，与振动图谱最大能级段对应频率的振动惯性力也会明显地作用在稳频球面镜上致使光路扭偏。针对国内某型激光陀螺及其振动图谱（其最大能级谱线对应的频率在 60 Hz 附近），对振动环境下抖动激光陀螺的拍频信号进行了数值仿真，仿真结果如图 4 所示。

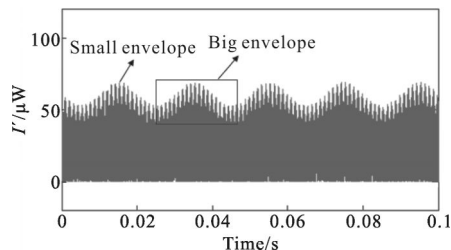


图 4 施加振动时机抖激光陀螺拍频信号的仿真曲线

Fig.4 Simulation curve of beat frequency output signal of mechanically dithered RLG with random vibration

由图 4 可见，由于振动的施加，抖动激光陀螺拍频信号除将受到 2 倍抖动频率的抖动调制（小包络）外，还受到了 60 Hz 的振动调制（大包络），使振动中相对振动前陀螺信号总的调制深度增加。

综上所述，振动前只有机械抖动的抖动惯性力作用于球面镜，而振动中除抖动惯性力外，因振动激励的施加会新增一个振动冲击惯性力作用于球面镜，从而加剧陀螺光路的扭偏，进而加深了振动中激光陀螺输出信号幅值的调制深度。振动中相对振动前调制深度变大的多少，间接反映了振动冲击惯性力附加光路扭偏的大小。

### 1.2 振动中光路扭偏影响陀螺振动性能的理论分析

考虑流速场、增益场后的朗缪尔流效应引起频差的漂移项为<sup>[7]</sup>：

$$\Delta\nu_L=-\frac{k}{\pi}\cdot\frac{A'}{G_0}\left\{\left[1-\frac{8.5\cdot\Delta\omega_0^2}{a^2}\right]\cdot(\beta_1\cdot i_1-\beta_2\cdot i_2)-1.7\left(\frac{z_0\cdot l\cdot\phi^2}{a^2}\right)\cdot(\beta_1\cdot i_1+\beta_2\cdot i_2)\right\} \quad (12)$$

式中： $\beta_j=0.15\cdot l\cdot a_j$  其中  $j=1,2$ ； $l$  为放电长度； $a_j$  为放电管半径； $i_j$  为放电电流； $A'$  为比例因子修正项； $G_0$  为单程增益； $k$  为波数； $\phi$  为光束轴线相对放电毛细孔轴线的倾斜角； $\Delta\omega_0^2=R_0^2+\phi^2\left(z_0^2+\frac{l^2}{12}\right)$ ， $\Delta\omega_0$  代表高斯光束在放电管中相对管中心轴的平均偏移量。

当激光传感器左右结构与放电电流完全对称, 即  $\beta_1=\beta_2=\beta_0, i_1=i_2=i_0$ , 则公式(12)变为:

$$\Delta v_L = \frac{k}{\pi} \cdot \frac{A}{G_0} \left[ 1.7 \left( \frac{z_0 \cdot l \cdot \phi^2}{a^2} \right) \cdot (\beta_1 + \beta_2) \cdot i_0 \right] + \frac{k}{\pi} \cdot \frac{A}{G_0} \left[ 3.4 \left( \frac{z_0 \cdot l \cdot \phi^2}{a^2} \right) \cdot \beta_0 \cdot i_0 \right] \quad (13)$$

由公式(13)可见, 光束倾斜角  $\phi$  越大, 朗缪尔流效应产生的频差就越大。

考虑比例因子修正项、激活介质朗流、非激活介质流动、差分损耗在内的通用频差方程为:

$$\Delta v = (1+A') \cdot \Delta \Omega_0 + \Delta v_L + \Delta v_L' - \left( \frac{\rho - \tau}{\beta - \theta} \right) (\gamma_2 - \gamma_1) \quad (14)$$

式中:  $\Delta v_L$  为激活介质朗缪尔流效应引起的频差;  $\Delta v_L'$  为非激活介质流动产生的频差; 等号右边第 1 项为外界转动引起的频差; 第 4 项为差分损耗引起的频差。

从公式(14)可见, 朗缪尔流是产生频率偏移的一个重要原因。综合以上可见, 光束倾斜角  $\phi$  越大, 朗缪尔流效应产生的频差就越大, 由此引起的朗缪尔流零偏就越大。

振动会加剧对光路的扭偏, 增大的扭偏因朗流效应会产生附加的零偏。而振动前未施加振动激励, 所以不会产生因振动附加的朗流零偏。这将直接导致陀螺振动中与振动前零偏的变化量增大, 即直接导致陀螺振动性能变差, 甚至导致陀螺振动性能超标。

### 1.3 提高振动特性的途径分析

由公式(13)可见, 减小振动中因光路扭偏附加产生的朗流零偏, 提高陀螺抗振性能的有效措施为:

- (1) 适当减小工作电流  $i_0$ ;
- (2) 提高振动中光路的抗失谐特性, 减小光路扭偏的倾斜角  $\phi$ 。

提高激光陀螺光路的抗失谐特性可通过增强光路的抗失谐设计(如增强稳频反射镜筋厚, 增大稳频反射镜曲率半径, 反射镜曲率左右对称设计与对称选配等)和抗失谐工艺(如抗失谐调腔等)措施来实现。

## 2 试验验证

### 2.1 工作电流对振动性能影响的试验验证

为了验证上述理论分析的正确性, 对国内某型机抖激光陀螺在同一试验条件下, 仅改变陀螺的工作电流, 进行了物理随机振动的对比试验, 陀螺振动性能的试验结果如图 5 所示。

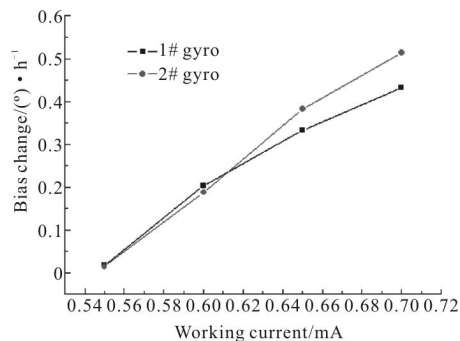


图 5 不同工作电流下机械抖动激光陀螺振动试验结果

Fig. 5 Vibration result of mechanically dithered RLG based on different working current

从图 5 可以看出, 随着工作电流的减小, 振动中与振动前零偏变化的绝对值明显减小, 且振动结果随电流的变化近似成线性关系, 这和理论分析的结果一致。

可见, 为了提高陀螺的振动特性, 可通过适当减小工作电流的途径来实现。此外, 适当减小陀螺工作电流除可提高陀螺抗振性能外, 还可带来其他许多好处, 如可降低激光传感器的功耗, 降低朗流导致的零偏漂移, 减轻放电等离子体对反射膜层的轰击, 降低阴极被溅射的风险, 有利于陀螺寿命的延长等。

### 2.2 陀螺输出信号受到调制的试验验证

#### 2.2.1 未施加随机振动, 拍频信号受到抖动调制的试验验证

在施加随机振动前, 抖动激光陀螺正常通电工作时, 拍频信号在安捷伦示波器上显示的实测波形如图 6 所示。

从图 6 可见, 实际测试陀螺输出的拍频信号受到了一个 2 倍抖动频率的正弦调制(注: 2 次过锁间隔为一个抖动周期), 且拍频信号只有一边受到明显

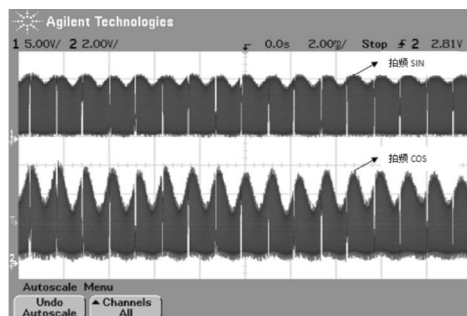


图 6 机抖激光陀螺在未施加振动时的拍频输出

Fig. 6 Beat frequency output of mechanically dithered RLG without random vibration

的正弦调制,这与上述仿真计算结果完全一致。

### 2.2.2 施加随机振动中,拍频信号受到抖动调制与振动调制的试验验证

在施加随机振动中,抖动激光陀螺正常通电工作时,拍频信号在安捷伦示波器上显示的实测波形如图 7 所示。

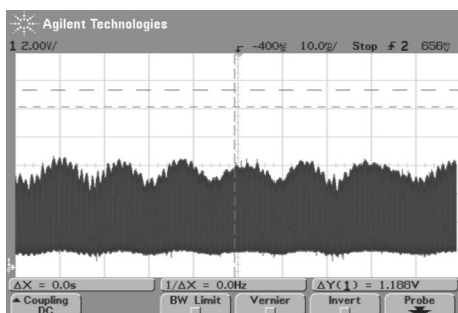


图 7 机抖激光陀螺在施加振动时的拍频输出

Fig.7 Beat frequency output of mechanically dithered laser gyro with random vibration

从图 7 可见,振动导致陀螺拍频输出信号出现了 60 Hz 左右的大包络调制,使总的调制深度增加,这与上述仿真结果一致。一旦光路扭偏加剧,将导致振动中对应的朗流零偏增大,进而使陀螺振动中与振动前零偏变化量增大,即陀螺振动性能变差。

为减小振动导致光路扭偏的加剧,提高陀螺的抗振性能,可采用的主要措施有:抗失谐调腔,提高光路的稳定性,减小振动条件下的光路扭偏;调节光路,使光路通过光轴,增大光路扭偏的裕度,减小振动条件下光路扭偏产生的朗流零偏;适当增厚稳频镜筋厚,增大反射镜的抗弯刚度等措施来保证反射镜在振动过程中产生较小的光路扭偏,进而提高陀螺的抗振性能。

## 3 结 论

振动中的光路扭偏会对激光陀螺的振动性能产生较大的影响。文中对光路扭偏对激光陀螺振动性能影响的机理进行了研究,通过研究指出减小振动中光路扭偏导致振动性能变差的两种措施。并通过物理试验验证,证实了减小陀螺工作

电流可显著提升陀螺的振动性能,这对于机抖激光陀螺振动特性的提升具有重要指导意义和工程实用价值。

### 参 考 文 献:

- [1] Chow W W, Gea-Banaclache J, Pedrotti L M, et al. The ring laser gyro[J]. *Reviews of Modern Physics*, 1985, 57(3): 61-104.
- [2] Loukianov D, Rodloff R, Sorg H, et al. Optical gyros and their applications [R]. The Research and Technology Organization (RTO) of NATO, Canada Communication Group, 1999.
- [3] Han Lu, Jing Zhanrong, Duan Zhemin. Arbitrary or irectionation two position alignment mode of strapdown inertial navigation system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(5): 715-720. (in Chinese)  
韩璐, 景占荣, 段哲民. 采用激光陀螺/GPS 的导弹组合定姿系统[J]. *红外与激光工程*, 2011, 40(5): 715-720.
- [4] Zhao Xiaoning, Han Zonghu, Guo Xin, et al. Influence of mechanically dithered RLG vibration performance caused by elliptical coning motion effect[J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2015, 23(2): 258-261. (in Chinese)  
赵小宁, 韩宗虎, 郭昕, 等. 椭圆圆锥动效应对机械抖动激光陀螺振动性能的影响[J]. *中国惯性技术学报*, 2015, 23(2): 258-261.
- [5] Wan Shunping, Li Feng, Wang Xiaofei, et al. Effect of mechanical dither on the laser frequency stabilization unit of dithered ring laser gyro[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(4): 728-731. (in Chinese)  
万顺平, 李峰, 王小飞, 等. 机械抖动对机抖激光陀螺稳频装置的影响[J]. *红外与激光工程*, 2008, 37(4): 728-731.
- [6] Zhou Bingkun, Gao Yizhi, Chen Tirong, et al. Laser principles [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2009: 169-174.(in Chinese)  
周炳琨, 高以智, 陈倜嵘, 等. 激光原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2009: 169-174.
- [7] Jiang Yanan. Ring Laser Gyro [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1985: 94-104.(in Chinese)  
姜亚南. 环形激光陀螺[M]. 北京: 清华大学出版社, 1985: 94-104.