

## 激光多普勒测振仪对激光陀螺动态特性测试分析

张 澍, 叶宗民

(中国人民解放军 91404 部队, 河北 秦皇岛 066000)

**摘 要:** 为了研究激光陀螺动态响应的幅频特性, 提出了一种利用激光多普勒测振仪对激光陀螺幅频特性测试的方法。由于激光陀螺角振动测量属于接触式测量, 测量结果易受被测物体振动频率的影响, 因此对其幅频特性的研究具有重要意义。实验中利用压电式角振动台产生正弦激励信号, 通过比较激光陀螺和激光多普勒测振仪对角振动台角振幅的测量值, 得到激光陀螺幅频特性曲线。实验结果表明: 在角振动频率低于 300 Hz 时, 激光陀螺测量值准确; 角振动频率较高时, 由于机械结构传递特性影响将导致激光陀螺对角振动台振幅测量失真。

**关键词:** 激光多普勒; 测振; 激光陀螺; 动态特性

中图分类号: O439 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201746.0706005

## Test and analysis of dynamic characteristic of Ring Laser Gyroscope based on laser Doppler vibrometer

Zhang Shu, Ye Zongmin

(No.91404 Troop, PLA, Qinhuangdao 066000, China)

**Abstract:** A novel measurement method for the dynamic characteristic of ring laser gyroscope was proposed, based on a new laser Doppler vibrometer. The research on the dynamic characteristic of Ring Laser Gyroscope as a contacting system has important implications. A PZT angular vibration table was used to generate sine angular vibration, and the related measurement of the Ring Laser Gyroscope and the laser Doppler vibrometer were compared. The related experiments were conducted. Experimental results show that the property of transfer function of mechanism is a major factor affecting Ring Laser Gyroscope measure distortion under high frequency. The measurement of Ring Laser Gyroscope is accurate under low frequency and the amplitude frequency curve has been taken.

**Key words:** laser Doppler; vibration measurement; Ring Laser Gyroscope; dynamic characteristic

收稿日期: 2016-11-10; 修订日期: 2016-12-20

作者简介: 张澍(1990-), 男, 助理工程师, 硕士, 主要从事目标特性方面的研究。Email: nangongxidao@sina.com

## 0 引言

激光陀螺(Ring Laser Gyroscope, RLG)角分辨率和精度高、实时性好,作为重要的惯性导航器件,已广泛应用于卫星、飞机、潜艇、导弹等军用和民用方面<sup>[1]</sup>。然而,RLG 属于接触式测量,在测量过程中需要与被测物联接固定,测量结果易受振动频率变化影响,从而与角运动真实值有一定程度的偏差。因此,对 RLG 幅频特性的研究有助于提高其测量精度、拓宽其动态测量范围,具有重要意义<sup>[2]</sup>。

目前,国内对 RLG 幅频特性的研究还处于起步阶段,各科研机构还未出现成熟统一的测试方案,参考其它陀螺动态特性测试方法主要分为以下三类:阶跃法、反馈法和频率法<sup>[3-4]</sup>。其中阶跃法受经验公式和突停台限制精度较低,反馈法在测量中受多种因素影响不利于实际应用,频率法是目前应用最多的动态特性测试方法,利用频率法进行动态特性测试时需利用角振动台为陀螺提供不同频率下的角振动值,通过对比陀螺输出信号与角振动台输入的真值,即可得到陀螺的幅频特性曲线。

然而,角振动台自身回馈提供的角振幅值精度低,可信度不高,无法满足 RLG 动态性能测试需求<sup>[5]</sup>。考虑到激光多普勒测振仪具有非接触性测量和测量精度高的优点,文中采用角振动台作为激励源,利用一种新型激光多普勒测振仪(Laser Doppler Vibrometer, LDV)和 RLG 同时对角振动台进行测量,并以 LDV 测量值作为真值,对 RLG 的幅频动态响应特性进行了研究,测试结果表明,机械结构传递特性是影响 RLG 高频条件下测量失真的主要因素之一,在角振动频率低于 300 Hz 时,两传感器测量值一致性良好;随频率增加 RLG 自身振幅与角振动台振幅出现偏差。通过该实验证明利用所设计 LDV 对 RLG 进行幅频特性测试的方案切实可行。

## 1 测试原理

### 1.1 RLG 角速度测量原理

RLG 的角速度测量原理是利用运行于谐振腔内顺逆方向激光的频率差来感应陀螺的转速,以基本的双频 RLG 为例,如图 1 所示,陀螺内有两束顺、逆运行的光波并彼此干涉,在陀螺静止的状态下两束

光波无频率差;当陀螺以一定角速度运行时,这对光波产生频差  $\Delta\nu$ ,大小为:

$$\Delta\nu = \nu_{\text{CCW}} - \nu_{\text{CW}} = \frac{4A}{\lambda L} \Omega \quad (1)$$

式中:  $\nu_{\text{CCW}}$ 、 $\nu_{\text{CW}}$  分别表示陀螺内顺逆运行的激光频率;  $A$  为激光环路所围的面积;  $L$  为环路路程;  $\lambda$  为激光波长;  $\Omega$  为激光陀螺转动角速度。通过测量两束激光频差即可解算出陀螺角速度,通过对频差积分可以得到陀螺角振幅<sup>[6-8]</sup>。

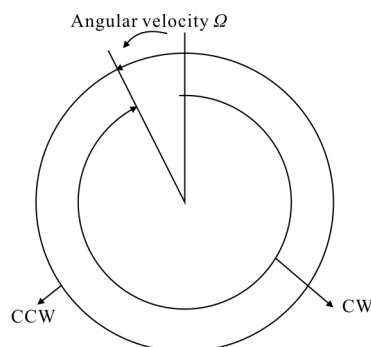


图 1 激光陀螺测量原理示意图

Fig.1 Schematic diagram of RLG measuring principle

### 1.2 激光多普勒测振仪测量原理

文中所利用的多普勒测振仪为自行设计的基于双频环形激光器的激光多普勒测振仪,具有分辨率高、动态响应宽的特点,在实验室环境下最大噪声不超过  $0.012 \mu\text{m}/\text{Hz}^{1/2}$ ,动态响应在 0~10 kHz,满足 1 000 Hz 频带内 RLG 振动特性测试要求<sup>[9]</sup>。LDV 光路如图 2 所示,由光源发出两束具有固定频差  $f_0$

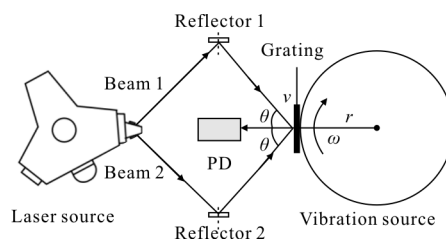


图 2 激光多普勒测振仪测量原理

Fig.2 Schematic diagram of LDV measuring principle

的激光光束 1 和 2,光束 1、2 分别经两反射镜反射入射到光栅表面,该光栅固定于角振动台边缘。光束 1、2 经光栅衍射后各自的+1 级衍射光在光栅法线方向上彼此干涉;当角振动台振动时,根据多普勒效应可知,光束 1 经光栅衍射后其+1 衍射光波频率  $f_1'$  为:

$$f_1' = f_1 \cdot (1 + \frac{v}{c} \sin \theta) \quad (2)$$

式中:  $f_1$  为光束 1 的光波频率;  $v$  为光栅运动速度;  $c$  为光速,  $\theta$  为光束与光栅法线间夹角。光束 2 的+1 衍射光频率  $f_2'$  为:

$$f_2' = f_2 \cdot (1 - \frac{v}{c} \sin \theta) \quad (3)$$

光束 1、2 的衍射光在光栅法线方向彼此干涉, 光电探测器可响应的干涉光束差频  $f_D'$  为:

$$f_D' = (f_1 - f_2) + \frac{v}{c} (f_1 + f_2) \sin \theta \quad (4)$$

光束 1 和光束 2 具有固定频差  $f_D$ , 且  $(f_1 + f_2)/c$  大小约等于  $2f/c = 2/\lambda$ , 上式可写为:

$$f_D' = f_D + \frac{2v}{\lambda} \sin \theta \quad (5)$$

通过探测器对  $f_D'$  的测量即可解算出光栅的速度和振幅, 详细测量原理与性能参考参考文献[10]。

### 1.3 RLG 动态性能测试原理

为测试 RLG 的幅频特性, 所用到的设备如图 3 所示, 包括角振动台、RLG、LDV 和扫描式激光测振仪(PSV-400)。其中, 角振动台用以提供幅度和频率可变的角振动信号; RLG 由刚性螺丝固定于角振动台上, 角振动台振动时, RLG 可直接输出角振幅值; LDV 的光栅固定于角振动台边缘处, 光栅随角振动台运动时, LDV 可输出正比于角振幅的脉冲数值; PSV 为德国 Polytec 公司生产制造的高性能扫描式激光测振仪, 搭配高灵敏度光学头 OFV-505, 动态性能响应范围为 0~40 kHz, 角度分辨率 < 0.002°, 角度稳定性 < 0.01(°)/h。调节 PSV 激光光束方向如图 3 所示, 使光束入射于 RLG 表面上, RLG 运动时 PSV 可输出振幅的电压值, 该实验中 PSV 用于辅助验证。

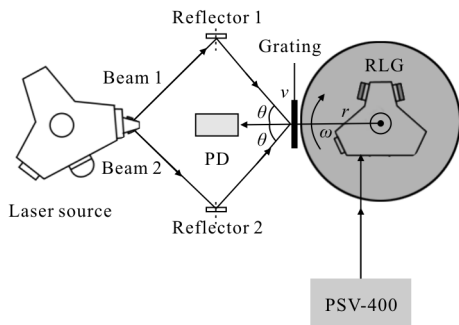


图 3 激光陀螺动态特性测量示意图

Fig.3 Measurement of the dynamic characteristic of the RLG

为实现 RLG、LDV 和 PSV 测量值的统一, 首先对 LDV、PSV 对 RLG 的比例系数进行标定。保持角振动台以 80 Hz 的频率和恒定的振幅振动, 利用采集卡对 RLG、LDV 和 PSV 的输出数据进行实时采集, 三者输出值分别用 AR、AL 和 AP 表示; RLG 对低频角运动的测量准确性较高, 可以作为角振幅的真值, 分别计算出 RLG 测量值 AR 与 LDV 测量值 AL 的比例系数 SRL, RLG 测量值与 PSV 测量值的比例系数 SRP, 对 SRL 与 SRP 分别取平均可得两比例系数分别为 2.183 2"/pulses 和 0.286 1"/V, 通过比例系数进而可计算出 LDV 和 PSV 测量的角振幅值。

## 2 实验结果与分析

首先驱动角振动台产生低频角振动, 利用 LDV 和 RLG 同时对角振动台振幅进行测量; 控制计算机, 逐渐增大角振动台振动频率, 利用 RLG 和 LDV 对角振动台角振幅进行测量并记录 LDV 和 RLG 的角振幅测量值, 分别用 AL 和 AR 表示; 每个测量点测量 6 次然后求取平均值并记录, 测量结果如图 4 所示。

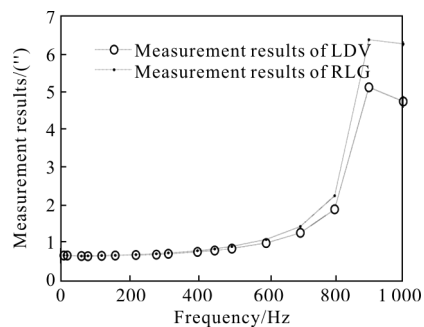


图 4 RLG 与 LDV 角振幅测量值

Fig.4 Measurement results between RLG and LDV

由图 4 可看出 RLG 和 LDV 角振幅测量值变化趋势基本一致, 说明 LDV 和 RLG 均可在该频段内对角振动响应。在角振动频率低于 300 Hz 时, 两传感器的角振幅测量值差值不超过 2%, 随着角振动频率增加, 两传感器的角振幅测量值差值逐渐增大, 初步判定该差别是由 RLG 与角振动台之间联接的刚性螺丝机械机构传递特性引起。

为排除其他因素影响, 进一步验证该推测, 利用 PSV 同时对 RLG 进行测量, 重复上述实验步骤, 测

量结果如图 5 所示。

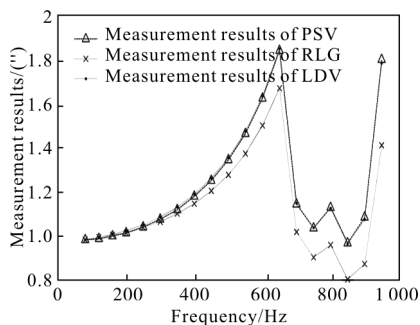


图 5 RLG、LDV 和 PSV 角振幅测量值

Fig.5 Measurement results of RLG, LDV and PSV

由图 5 可以看出 PSV、LDV 和 RLG 三者的角振幅测量值趋势基本一致，其中 PSV 和 RLG 测量值几乎完全重合，说明 RLG 在 1 000 Hz 以内角振幅测量值为其本身运动的角振幅，且测量值准确；LDV 测量值为角振动台的角振幅测量值，与 PSV、RLG 测量值稍有不同，可以验证振动传递过程中，由于机械结构的传递特性，RLG 在高频条件下一定程度上放大了角振动，且 RLG 角振幅测量值为其本身角振幅，并不等同于角振动台角振幅大小。

为进一步研究 RLG 的幅频特性，先后三次对 RLG 与 LDV 在 1 000 Hz 频率以内角振幅测量值进行了测量记录，并对比例系数 SRL 的四次测量结果绘制如图 6 所示。图 6 中三条线分别表示三次不同条件下 RLG 幅频特性曲线，测量结果显示，在角振动频率低于 300 Hz 时，比例系数 SRL 的变化不超过 2%；在角振动台振动频率低于 800 Hz 时，比例系数 SRL 的变化不超过 20%；在角振动台振动频率为 1 000 Hz 时，比例系数 SRL 的变化约为 30%。

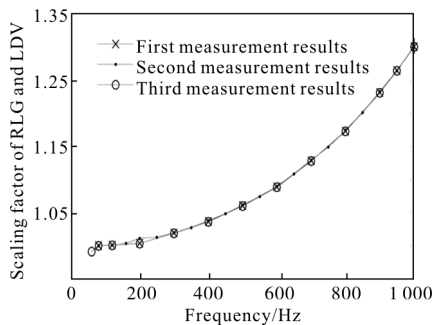


图 6 RLG 动态特性曲线

Fig.6 Dynamic characteristic curve of RLG

### 3 结 论

目前，国内对 RLG 幅频特性的测试主要集中在 500 Hz 以内，对 RLG 高频段幅频特性鲜有研究，文中利用所设计的新型 LDV 对 RLG 在 1 000 Hz 内的幅频特性进行了测试，拓宽了激光陀螺动态特性研究的范围，且在实验中参考 PSV 测量值，可以确定 LDV 测量值准确有效且精度较高。实验结果表明：机械结构传递特性是影响 RLG 在高频条件下测量失真的主要因素之一；随振动频率增加，由于机械传递特性导致振动台和 RLG 体实际的振动角度不同，在角振动频率低于 300 Hz 时，RLG 测量值与真实值差值在 2% 内，在角振动频率低于 800 Hz 时，RLG 测量值与真实值差值在 20% 内；三次测量结果表明：RLG 测量值与角振动台真实值比例系数曲线重合性良好，说明机械结构传递特性具有良好的稳定性和规律性；实验结果表明，利用文中所设计的 LDV 对 RLG 幅频特性的研究方案切实可行。

### 参考文献：

[1] Zeng Qinghua, Liu Jianye, Lai Jizhou, et al. Newest developments of ring laser gyro [J]. *Journal of Transducer Technology*, 2004, 11(23): 0001-0004. (in Chinese)  
曾庆化, 刘建业, 赖际舟, 等. 环形激光陀螺的最新发展 [J]. *传感器技术*, 2004, 11(23): 0001-0004.

[2] Cheng Yaoqiang, Xu Demin, Wan Yanhui, et al. Research on the dynamic characterteristics of laser gyroscope (part one) [J]. *Piezoelectrics and Acoustooptics*, 2014, 34(2): 1274-1279. (in Chinese)  
程耀强, 徐德民, 万彦辉, 等. 激光陀螺动态特性研究(一) [J]. *压电与声光*, 2014, 34(2): 1274-1279.

[3] Jiang Qing'an, Wu Wenqi. Temperature adaptability of digital control circuit and dynamic characteristic study for hemispherical resonator gyro [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2003.  
姜庆安, 吴文启. 半球谐振陀螺数字控制电路温度适应性及陀螺动态特性研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2003.

[4] Zhao Xiaoning, Han Zonghu, Li Xianluo, et al. Improving mechanically dithered RLG vibration performance [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(7): 0731003. (in Chinese)  
赵小宁, 韩宗虎, 李县洛, 等. 提高机械抖动激光陀螺抗振

- 性能[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(7): 0731003.
- [5] Jiang Ming. Optical testing of dynamic characteristic of vibrating wheel micromechanical gyroscope [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, 16(2): 295–299. (in Chinese)  
蒋明. 振动轮式微机械陀螺动态特性光学测试方法研究[J]. 光学精密工程, 2008, 16(2): 295–299.
- [6] Wang Zhiguo, Long Xingwu, Wang Fei. Overview of four-mode differential laser gyros [J]. *Laser and Optoelectronics Progress*, 2014, 49(2): 040005. (in Chinese)  
汪之国, 龙兴武, 王飞. 四频差动激光陀螺综述[J]. 激光与光电子进展, 2014, 49(2): 040005.
- [7] Huang Yun, Huang Haile, Liu Jianping, et al. Development on a high precision null-indicator by using two-beam interference [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(9): 2498–2502. (in Chinese)  
黄云, 黄海乐, 刘贱平, 等. 高精度双光束干涉指零仪的研制[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(9): 2498–2502.
- [8] Jin Xun. Null-indicator in high precision angular measurements with a RLG [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2009. (in Chinese)  
金洵. 高精度激光陀螺测角仪测控系统的研制 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2009.
- [9] Feng Qingqi, Liu Gang, Zhou Mingxi, et al. Land-based facilities vibration monitoring system based on laser Doppler effect [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(7): 2008–2012. (in Chinese)  
冯庆奇, 刘刚, 周明熙, 等. 基于激光多普勒效应的地面设备振动监测系统[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(7): 2008–2012.
- [10] Zhang Shu, Li Yu, Lu Guangfeng. Research of laser Doppler vibrometer based on dual-frequency ring laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(3): 0312003. (in Chinese)  
张澍, 李玉, 卢广锋. 基于双频环形激光器的激光多普勒测振系统研究[J]. 光学学报, 2016, 36(3): 0312003.