# 基于双频环形激光器的激光多普勒测振系统研究

张澍1李玉2卢广锋2

<sup>1</sup>中国人民解放军91404部队,河北秦皇岛066000 <sup>2</sup>国防科学技术大学光电科学与工程学院,湖南长沙410073

**摘要**为进一步提高激光多普勒测振仪(LDV)的测量分辨率,实现物体表面微小振动的测量,设计了一种以双频环 形激光器作为光源的LDV,介绍了该系统的光源及光路结构,推导了测振原理,并通过实验验证了该系统的可行性 和准确性。在该系统中,利用四频差动激光陀螺频差稳定和谱线窄的优点,将四频差动激光陀螺改进为双频环形 激光器,产生两束具有一定夹角和固定频差的线偏振光,结合光栅技术可实现对物体表面横向微小振动的测量。 与其他LDV相比,该系统光路简单且分辨率较高,在实验室环境下振幅分辨率最大噪声不超过0.012 μm·Hz<sup>1/2</sup>。 关键词 测量;激光多普勒;测振;双频环形激光器;光栅 中图分类号 0439 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS201636.0312003

# Research of Laser Doppler Vibrometer Based on Dual-Frequency Ring Laser

Zhang Shu<sup>1</sup> Li Yu<sup>2</sup> Lu Guangfeng<sup>2</sup>

<sup>1</sup>No. 91404 Troop, People's Liberation Army, Qinhuangdao, Hebei 066000, China <sup>2</sup>College of Optic–Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China

**Abstract** In order to improve the resolution of the laser Doppler vibrometer (LDV) and measure surface microvibration, an LDV equipped with a dual-frequency ring laser is proposed. The source and optical path structure of the system are introduced, and the measurement principle is derived. The dual-frequency ring laser, modified by a multioscillator ring laser gyroscope with stable frequency difference and narrow linewidth, can emit two beams in two directions and the two beams show a certain angle and have a fixed frequency difference. Combined with the grating technology, the surface transverse microvibration measurement can be realized. Compared with other LDV, the system has simple optical path and high resolution, and the maximum noise of amplitude resolution is lower than 0.012  $\mu$ m  $\cdot$  Hz<sup>1/2</sup> in the laboratory experiment.

**Key words** measurement; laser Doppler; vibration measurement; dual-frequency ring laser; gratings **OCIS codes** 120.7280; 280.3340; 140.3560; 050.1965

1引言

自1983年南安普敦大学光振研究所发明激光多普勒测振仪(LDV)以来,LDV因其具有非接触测量、测量 精度高和响应频带宽等优势而广泛应用于航天、农业、医疗等领域<sup>[1-3]</sup>。目前世界著名的LDV生产厂商如德 国的Polytec公司制造的产品及其相关软硬件设备集成度较高,具有便携和易于测量等优点。国内对LDV的 研究起步较晚,其中天津大学、国防科学技术大学、北京航空航天大学和燕山大学等率先在理论方面开展研 究并取得了一些成果<sup>[4-6]</sup>。

收稿日期: 2015-09-16; 收到修改稿日期: 2015-11-02

**作者简介**: 张 澍(1990—),男,硕士研究生,助理工程师,主要从事目标特性方面的研究。E-mail: nangongxidao@sina.com **导师简介**: 卢广锋(1981—),男,硕士,副研究员,主要从事光学工程方面的研究。

E-mail: NudtLuohui@gmail.com(通信联系人)

#### 光学学报

LDV 是利用激光多普勒效应实现对目标物体速度的检测从而解算出物体的振幅。在LDV 实际应用测量过程中,一般LDV 利用物体表面散射光作为信号光,由此产生的散斑噪声将会导致测量分辨率不高,无法 实现对微小振动的测量;另一方面,一般LDV 采用单光束激光器作为光源,需要在光路中使用分光器和移频 器来实现振动测量,会导致整个光路系统复杂,光能利用率不高,且测量误差增大。针对以上问题,本文提 出了一种基于双频环形激光器的LDV,可实现对物体表面微小振动的测量。

## 2 LDV光路结构和测量原理

为解决光路复杂问题,有效集成光学元器件,设计的LDV利用双频环形激光器作为光源,如图1所示。





Fig.1 Schematic diagram of dual-frequency ring laser

所用光源由国防科学技术大学激光陀螺所四频差动激光陀螺改进而来,光源波长λ为632.8 nm,激光在 腔内同时以顺时针(CW)和逆时针(CCW)方向运行<sup>[7]</sup>。腔内的水晶片有旋光效应,CW和CCW线偏振光多次通 过水晶片后振动方向发生旋转,最终将以左旋圆偏振光(LCP)和右旋圆偏振光(RCP)稳定存在于激光器内。 由于水晶片对 LCP和RCP呈现不同的折射率,因此LCP和RCP经过水晶片后在腔内光程发生改变,在稳态 情况下 LCP和RCP产生稳定频差,典型的频差为300 MHz。法拉第室可对光波频率进行调制,使LCP和RCP 各自再分裂为两束具有固定频差的圆偏振光,频差一般在1 MHz以下。通过调节腔长控制器,在增大LCP增 益的同时使 RCP的增益低于阈值,从而达到光源内只存在两束LCP的目的。在激光器开口处粘贴两个1/4 波片,出射的两束LCP经1/4波片反射后转化为与偏振方向相同的线偏振光。该双频环形激光器出射的光 束1和光束2的频差f<sub>0</sub>约为317 kHz,频差的稳定性约为10 Hz/h,中心波长λ为632.8 nm,每束出射光的光功 率约为1.9 μW<sup>[8-9]</sup>。

LDV系统光路图如图2所示。





如图2所示,光源以一定角度发射出光束1和光束2,反射镜用于改变两个出射光束的方向,通过调节反 射镜位置和方向来控制入射光的入射角度。为提高测量分辨率,将一闪耀光栅胶接于被测物边缘。所用的 光栅为美国 Thorlabs 公司生产制造 GH-13-12V 全息光栅,光栅表面为正弦曲面,可保证光路具有良好的对称性,光栅尺寸为12.7 mm×12.7 mm×6 mm,刻线为1200 l/mm。调节光栅使其表面平行于被测物边缘切面,调节反射镜位置使两束入射光以角度θ入射,且两束入射光的+1级衍射光在光栅法线方向彼此重合干涉。 根据光栅公式

$$d \cdot \sin \theta = \lambda , \tag{1}$$

可计算出θ=49.4°,式中d为光栅常数,其值为1/1200 mm,λ为中心波长,其值为632.8 nm。

图 2 中激励源为压电式角振动台,可提供频率和振幅可调的微小角振动,Polytec公司生产的扫描式测振仪(PSV-400)可作为振幅校准装置。假设在 t 时刻激励源产生的角位移 D 为

$$D = A\sin(\Omega t), \qquad (2)$$

(3)

式中A为激励源角振幅, $\Omega$ 为圆频率,对D微分可得激励源角速度 $\omega$ 为

$$\boldsymbol{\omega} = A \boldsymbol{\cdot} \boldsymbol{\Omega} \cos(\boldsymbol{\Omega} t) \; .$$

激励源半径为r,此时激励源边缘处光栅速度v为

$$\mathbf{r} = \mathbf{r} \cdot \boldsymbol{\omega} = \mathbf{r} \cdot A \cdot \Omega \cos(\Omega t) = B \cdot \Omega \cos(\Omega t) , \qquad (4)$$

式中B为光栅振动幅值。根据多普勒原理,光束1的光波频率fi经光栅衍射后其+1级衍射光频率fi为

$$f_1' = f_1 \cdot \left( 1 + \frac{v}{c} \cdot \sin \theta \right), \tag{5}$$

同理,光束2的+1级衍射光频率 f2为

$$f_2' = f_2 \cdot \left(1 - \frac{v}{c} \cdot \sin \theta\right). \tag{6}$$

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 ƒ 为

$$f_{\rm D}^{'} = (f_1 - f_2) + \frac{v}{c} \cdot (f_1 + f_2) \cdot \sin \theta .$$
(7)

光束1和光束2频差f应值固定,约为317kHz,且(f1+f2)/c≈2f/c=2/λ,因此(7)式可写为

$$f_{\rm D}^{'} = f_{\rm D} + \frac{2v}{\lambda} \cdot \sin\theta .$$
(8)

将(4)式代入(8)式可得到多普勒频率 fs 与振幅 B 的关系:

$$f_{\rm D}' = f_{\rm D} + \frac{2B}{\lambda} \cdot \sin\theta \cdot \Omega \cos(\Omega t) .$$
<sup>(9)</sup>

在电子线路中利用脉冲计数法和脉冲细分技术可解算出与振幅值B成正比的脉冲数N,即

$$N \propto \frac{2B}{\lambda} \cdot \sin \theta \cdot \Omega = k \cdot B . \tag{10}$$

将 PSV-400 光束聚焦于光栅侧面, PSV 可提供光栅运动最大速度的准确值, 根据

$$v = B \cdot \Omega = B \cdot 2\pi f , \qquad (11)$$

可计算出光栅振幅准确值,从而对LDV的比例系数k进行标定。

为实现对 k 值的标定,保持激励源以 80 Hz 频率振动,利用采集卡同时对 LDV 和 PSV 输出值进行采集, PSV 输出速度值为 v<sub>i</sub>,单位为µm/s,LDV 输出脉冲数为 N<sub>i</sub>。采集卡输出间隔为 0.1 s,在 10 min 内共采集到约 6000 组数据。根据(11)式将 PSV 输出速度值转换为振幅值 B<sub>i</sub>,单位为µm,计算每组 N<sub>i</sub>和 B<sub>i</sub>的比值,可得到每 组的比例系数 k<sub>i</sub>,最后将所有 k<sub>i</sub>求平均即可得到 2.4 /µm。

#### 3 实验结果与分析

为检测 LDV 的最小分辨率,对其功率谱密度(PSD)进行测量计算。在地下实验室中,保持激励源静止, 在 T时间内记录 LDV 的振幅输出值 B<sub>i</sub>,对 B<sub>i</sub>(t)进行傅里叶变换可得到频域振幅值为

$$B_i(\nu) = \int_{-\infty}^{\infty} B_i(t) \exp(i2\pi\nu t) dt , \qquad (12)$$

根据 PSD 定义可得 LDV 的功率谱密度 P(v)为

光 学 学 报
$$P(\nu) = \lim_{T \to \infty} \sqrt{\frac{\left|B_i(\nu)\right|^2}{2T}},$$
(13)

式中*P*(ν)单位为μm·Hz<sup>1/2</sup>。利用 Matlab 绘制 LDV 功率谱密度曲线,如图 3 所示。其中,LDV 测量到的最大底 噪声在各个频谱段内的分布如表 1 所示。



Fig.3 Power spectral density curve of LDV 表1 LDV 功率谱密度在各个频段的底噪声

Table 1 Background noise distribution of power spectral density of LDV

Frequency range /Hz	1~10	10~100	100~200	>200
Background noise /( $\mu m \cdot Hz^{1/2}$ )	0.005	0.012	0.0003	0.0001

从表1可以看出LDV的底噪声主要集中在100 Hz以下,在10~100 Hz内的底噪声较大,最大值为 0.012 μm·Hz<sup>1/2</sup>;在100~200 Hz内的底噪声较小,该频段底噪声的最大值为 0.0003 μm·Hz<sup>1/2</sup>;在 200 Hz以上 的底噪声最大不超过 0.0001 μm·Hz<sup>1/2</sup>。分析认为10~100 Hz内的底噪声较大,主要可能由外部环境随机振 动引起光栅运动造成。

为研究 LDV 的测量精度和系统稳定性,对 LDV 振幅测量值的标准差进行测量标定。保持激励源以 80 Hz 频率稳定振动,记录 LDV 和 PSV 的测量值并统一为振幅值,利用 Matlab 绘制 LDV 和 PSV 振幅测量值, 结果如图 4 所示。



图4 LDV与PSV振幅测量值

Fig.4 Measured amplitude of LDV and PSV

根据标准差公式

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (x_i - \bar{x})^2}{n-1}},$$
(14)

对 LDV 和 PSV 标准差进行计算,最终可得 LDV 标准差为 0.0008 µm, PSV 标准差为 0.0023 µm, 所设计 LDV 系 统的测量稳定性优于 PSV 系统。

为研究 LDV 幅值线性度,使激励源以 80 Hz 固定频率振动,逐渐增大激励源输入电压,使激励源振幅逐渐增大,对每个电压值下的 LDV 和 PSV 测量值取平均值,结果如表 2 所示。

表2 LDV 与 PSV 角振幅测量结果 Table 2 Angular amplitude results of LDV and PSV				
0.01	0.1039	0.1041		
0.02	0.1994	0.1996		
0.03	0.2953	0.2953		
0.05	0.4856	0.4855		
0.1	0.9620	0.9604		
0.15	1.4495	1.4465		
0.2	1.9284	1.9249		
0.25	2.4058	2.4010		
0.3	2.8889	2.8829		
0.35	3.3789	3.3720		

光

学

学

报

利用 Matlab 对 PSV 与 LDV 的振幅测量值进行拟合, 拟合结果如图 5 和表 3 所示。拟合结果表明 LDV 幅 值线性良好, 达到预期目的。



## 4 结 论

设计了一种基于双频环形激光器的多普勒测振系统,详细阐述了所设计LDV的光路结构和测振原理。 为优化传统LDV的光路结构,提高振动测量的分辨率,利用改进的激光陀螺作为LDV光源,与光栅技术结 合,实现LDV对物体表面微小横向振动的测量。在此基础上,利用德国PSV成品对所设计LDV的性能进行 了检验,实验结果表明,所设计LDV的振幅分辨率较高,在实验室环境下最大噪声不超过 0.012 μm·Hz<sup>1/2</sup>;系 统稳定性能好,标准差为0.0008 μm;幅值线性度良好,可实现 10 μm内的振动测量。经检验,所设计LDV性 能良好,为物体微小振动测量提供了新的研究方向。

#### 参考文献

1 Huang Zhen, Liu Bin, Dong Quanlin. Research on the torsional vibration measurement based on laser Doppler technique[J]. Acta Optica Sinica, 2006, 26(3): 389-392.

黄 震,刘 彬,董全林.基于激光多普勒技术扭振测量的研究[J].光学学报,2006,26(3):389-392.

2 Liu Jiekun, Ma Xiushui, Ma Xie, et al.. Review of laser Doppler vibrometer[J]. Laser Journal, 2014, 35(12): 1-5.

刘杰坤,马修水,马 勰,等.激光多普勒测振仪研究综述[J].激光杂志,2014,35(12):1-5.

- 3 Zhou Jian, Wei Guo, Long Xingwu, *et al.*. Research on direction discrimination and low-speed measurement for laser Doppler velocimeter [J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(3): 632-637.
- 周 健,魏 国,龙兴武,等.激光多普勒测速仪方向辨别及低速测量的研究[J].红外与激光工程,2012,41(3):632-637.
- 4 Shang J, He Y, Liu D, *et al.*. Laser Doppler vibrometer for real-time speech-signal acquirement[J]. Chinese Optics Letters, 2009, 8(8): 732-733.
- 5 Yuan Shuyun, Liu Shouxian, Wang Detian, *et al.*. Displacement mode analysis method for data processing of photonic Doppler velocimetry [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(3): 030602.

袁树云,刘寿先,王德田,等.光纤多普.勒测速仪位移模式数据处理新方法[J].激光与光电子学进展,2014,51(3):030602.

6 Fan Zhe, Zhang Chunxi, Ou Pan, *et al.*. Research on beam pointing angle for three-beam Doppler vehicle lidar[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(2): 0214001.

范 哲,张春熹,欧 攀,等.车载三波束多普勒激光雷达波束配置研究[J].中国激光,2014,41(2):0214001.

7 Yu Wendong, Lü Wancheng, Chen Linfeng, et al.. Study on separate LCP from RCP based on multioscillator ring laser gyroscope with optical signal processing[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(8): 0814001.

于文东,吕晚成,陈林峰,等.四频差动激光陀螺左右旋模式光学解调分离方法研究[J].光学学报,2013,33(8):0814001.

- 8 Wang Z, Long X, Wang F. Quantum limit in low-loss ring laser gyros[J]. Chinese Optics Letters, 2012, 10(6): 061404.
- 9 Wang Zhiguo, Long Xingwu, Wang Fei. Overview of four-mode differential laser gyros[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 49 (4): 040005.

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, 2012, 49(4): 040005.

栏目编辑: 何卓铭