

瞳面干涉激光多普勒测振

鹿彤彤^{1,2,3}, 陆彦婷^{1,2*}, 杜福嘉^{1,2}, 李常伟^{1,2}, 李顺^{1,2}, 张思炯^{1,2,3}¹中国科学院国家天文台南京天文光学技术研究所, 江苏 南京 210042;²中国科学院天文光学技术重点实验室, 江苏 南京 210042;³中国科学院大学天文与空间科学学院, 北京 100049

摘要 提出并实现了一套基于瞳面干涉和小波变换的零差激光测振系统,提高了多普勒信号的质量和信号处理精度。该系统将瞳面干涉技术引入到激光多普勒测振中,克服了像面干涉测振光路中复杂振动引起的探测光斑相对探测器偏移的现象,抑制了漂移引起的多普勒信号被调制的现象。在振动信息提取环节,采用小波脊提取算法提取信号瞬时频率,进而解算得到振动速度。将标准振动台作为振动源,磁电式速度传感器作为测量参考,通过测速与测振实验对系统性能进行验证。实验表明,所设计的系统对振动物体速度的测量与磁电式速度传感器具有一致性,对不同简谐振动参数的测量相对误差均在 1.5% 以内。

关键词 测量; 激光多普勒测振; 瞳面干涉; 小波变换; 振动分析

中图分类号 TH741

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.1512005

Laser Doppler Vibrometry Based on Pupil-Plane Interferometry

Lu Tongtong^{1,2,3}, LuYanting^{1,2*}, Du Fujia^{1,2}, Li Changwei^{1,2}, Li Shun^{1,2}, Zhang Sijiong^{1,2,3}¹National Astronomical Observatories/Nanjing Institute of Astronomical Optics & Technology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210042, Jiangsu, China;²Key Laboratory of Astronomical Optics & Technology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210042, Jiangsu, China;³School of Astronomy and Space Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract To improve the quality of Doppler signal and signal processing accuracy, a set of homodyne laser vibration measurement system based on pupil-plane interferometry and wavelet transform is proposed and implemented. In this system, pupil-plane interferometry is introduced into the laser Doppler vibrometry, which overcomes the phenomenon that the detection spot drifts relative to the detector caused by the complex vibration of the measured object in optical path for vibration measurement based on image-plane interferometry, and suppresses the modulation of Doppler signal caused by this kind of drift. In the session of vibration information extraction, the instantaneous frequency of signal is extracted by wavelet ridge extraction algorithm, and then the vibration velocity is calculated. With a standard shaker as the vibration source and a magnetolectric velocity sensor as the reference, the performance of the designed system is verified through the experiments of measuring the velocity and the vibration. Experimental results show that the measurement of the velocity of a vibrating object by the designed system is consistent with the magnetolectric velocity sensor, and the relative errors of different simple harmonic vibration parameters measured by the designed system are all within 1.5%.

Key words measurement; laser Doppler vibrometry; pupil-plane interferometry; wavelet transform; vibration analysis

1 引言

激光多普勒测振利用激光多普勒效应和光干涉技术对振动物体的速度进行测量,具有精度高、灵敏度

高、非接触性和非破坏性的特点,在机械监测^[1-2]、模态与振动分析^[3-4]、计量校准^[5]和生物医学^[6]等领域中均有广泛应用。

光学干涉系统和信号处理模块是激光多普勒测振

收稿日期: 2022-01-21; 修回日期: 2022-02-28; 录用日期: 2022-03-07

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(11873069)、中国科学院天文台站设备更新及重大仪器设备运行专项

通信作者: *ytlu@niaot.ac.cn

的核心。在常见的干涉测振光路中,振动物体表面反射的测量光束与参考光束在光电探测器表面上叠加,将与物体振动速度成正比的多普勒频移转化为相应的电信号。这种结构测量的是物体沿光轴方向的振动^[7],但在实际工程应用中,物体的振动是复杂的,当被测物体存在其他方向的振动时,测量光斑相对光电探测器存在漂移,使得振动信号被光斑偏移引入的干涉总能量的改变所调制。特别是,在信号的低调制幅值区域内,这种调制使得信号的信噪比严重下降,进而无法准确获取测量方向上的振动信息。在多普勒信号处理环节,常用的多普勒频率测量方法包括计数法和傅里叶变换法,这两种方法分别属于时域方法和频域方法。计数法^[8-9]通过对固定时间内信号的周期数进行计数或者计算信号固定周期个数所经历的时间得到多普勒频率,虽然简单,但是抗噪性能差、测频精度低。傅里叶变换方法^[10-12]通过分析多普勒信号的频谱提取多普勒频率,具有很好的抗噪声性能,但是仍有测频精度低的缺点。近年来,研究人员不断对基于傅里叶变换的多普勒频率提取方法进行改进。例如:Zhang等^[10]提出利用选带傅里叶变换(Zoom-FFT)对傅里叶变换方法估计的多普勒频率进行局部细化,并使用比值校正对细化谱进行校正,进一步提高了频率估计的准确性,但测频精度仍完全依赖于采样点数;Fu等^[11]提出了利用基于窗口傅里叶脊的信号处理算法提取振动信息,利用窗口傅里叶变换将一维时间信号映射到二维时频平面上,每时刻选取能量最高点对应的频率作为信号的瞬时频率。在基于窗口傅里叶脊的方法中,窗口尺寸固定,进而频域分辨率固定,当被测物体振动的峰值速度发生剧烈变化时,无法实现全频段内多普勒频率的准确测量。小波变换作为一种新的时频分析工具,在信号瞬时频率提取^[13]方面有着独特的优势。Aller等^[14]在电机无传感器速度测量中,利用小波脊方法和窗口傅里叶脊方法对定子电流信号的瞬时频

率进行了提取,验证了小波脊方法在瞬时频率提取方面的优越性。赵新才等^[15]利用小波变换对全光纤位移干涉信号进行速度提取,将小波脊提取瞬时频率方法引入到激光干涉测速中。在多普勒信号处理领域中,小波变换多被用于信号去噪^[16]和特征提取^[17],较少被应用于提取多普勒信号的瞬时频率。

针对复杂振动引起的探测光斑漂移问题和多普勒频率的准确提取问题,本文设计了一套瞳面干涉激光多普勒测振系统。在测振光路方面,通过将瞳面共轭至光电探测器的光敏面上来抑制非测量方向振动所引起的探测光斑漂移。在信号处理环节,采用时频窗口自适应的小波变换对探测信号进行时频分析,利用小波脊提取算法提取信号的瞬时频率。以标准振动平台的振动为测量对象,磁电式速度传感器作为测量参考,通过实验对所设计的测振系统进行测试。实验结果表明,所设计的测振系统测速性能与磁电式速度传感器基本一致,对振动速度、频率和振幅的测量相对误差均在 1.5% 之内。

2 系统结构

鉴于零差干涉光路结构所需光电器件较少,本文设计了一套基于零差干涉的激光多普勒测振系统,以研究基于瞳面干涉的激光多普勒测振和小波脊瞬时速度提取的多普勒频率提取。整体系统结构如图 1 所示,包括零差干涉光路、信号调理电路和瞬时速度提取模块三部分。干涉光路将振动物体引起的激光多普勒频移转化为携带频移信息的电流信号,振动速度的快慢变化对应电信号频率的快慢变化。信号调理电路将干涉光路中光电探测器输出的电流信号转化为电压信号,滤除干扰频段和低频噪声后将信号放大。瞬时速度提取模块采集信号调理电路的输出信号,通过小波脊提取算法进行信号瞬时频率测量,并转化为物体的振动速度。

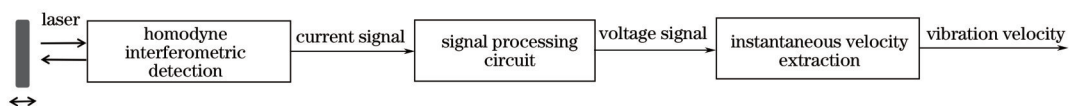


图 1 激光多普勒测振系统总体结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of general structure of laser Doppler vibrometer

2.1 瞳面干涉测振光路

基于瞳面干涉的零差干涉测振光路结构如图 2 所示。光路由激光器、透镜、分光棱镜、参考平面镜和光电探测器组成。激光器发出的激光经透镜 L1 和 L2 组成的倒置望远镜结构扩束,减少高斯光束的影响^[18],被分光棱镜分为测量光束和参考光束,测量光束被物体振动面反射,参考光束被参考平面镜反射,两光束由分光棱镜合束后经透镜 L3 收光,通过透镜 L4 将透镜 L3 的瞳面成像至光电探测器的光敏面上。瞳面干涉光路结构与大视场范围内收集运动物体发出荧光的光学系统^[19-20]类似。测量光束被被测物体反射后发散角变

大,物体产生振动后测量光束的发散角随物体振动变化。由于成像透镜 L4 使得透镜 L3 的瞳面和光电探测器光敏面处于光学共轭关系,故只要入射到 L3 瞳面的光总能量不随物体振动变化,光电探测器光敏面上的光总能量也几乎不会随物体振动变化。因此,瞳面干涉测振方法可以大幅减小被测物体振动过程中倾斜引起的测量光斑偏移,进而抑制非测量方向上振动引起的多普勒信号被调制现象。

在所设计的系统中,激光器选用 JDSU 公司的 1107P He-Ne 激光器,波长为 632.8 nm,功率为 8 mW,平均功率漂移在 2.5% 以内,且激光不稳定对测振的

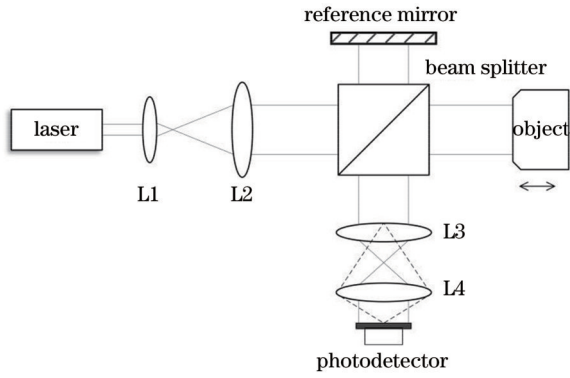


图 2 瞳面干涉测振光路示意图

Fig. 2 Schematic diagram of optical path for vibration measurement based on pupil-plane interferometry

影响可以忽略。光电探测器选择 Thorlabs 公司的 SM05PD2A 光电二极管。图 3 是当选用频率为 128 Hz 的音叉为振动源时,经典的像面干涉测振光路和所设计的瞳面干涉测振光路中光电探测器输出信号的对比图。音叉在振动时叉臂实际在进行倾斜振动,像面干涉光路的测量信号被倾斜分量引起的来回漂移的光斑所调制,在信号的低幅值区域中,信噪比严重下降,如图 3(a)所示。瞳面干涉测振光路信号如图 3(b)所示,可见引入瞳面干涉技术后,测量光斑漂移在光电探测器上引起的信号调制明显减弱,信号被调制区域处的信噪比得到了改善。

2.2 信号调理电路

信号调理电路由三部分组成,分别是跨阻放大器、电压跟随器和滤波放大器。跨阻放大器的作用是电流-电压转换。由于被测物体表面的反射率通常不高,光电探测器输出的电流一般为纳安级微弱信号,易受到噪声干扰,因此本文设计了高输入阻抗运放的跨阻放大电路,选择 1 MΩ 低温漂、高阻值精密反馈电阻将微弱的电流信号转换为毫伏级电压信号,并通过反馈电容对电路进行相位补偿,以保证电路系统的稳定性^[21]。电压跟随器作为缓冲级,起到阻抗匹配的作用,为后续滤波放大器的稳定工作提供保证。在滤波放大电路中,结合环境噪声和被测振动的频谱特性,选择截止频率为 1 kHz 的高通滤波器滤除信号中的低频噪声,再使用放大倍数为 10 的运算放大器对信号进行二

级放大。先滤波再放大的策略可避免因噪声被放大而导致的放大器进入非线性区情况的发生。

2.3 基于小波变换的瞬时速度提取

通过多普勒信号提取振动物体的瞬时速度分为信号采集、小波脊提取和速度转换三步。首先,利用数字示波器对信号调理电路输出的信号进行采集,采样率可以根据被测物体振动速度变化范围进行调整。然后,在个人计算机(PC)端利用基于小波脊提取的算法计算信号的瞬时频率。最后,根据多普勒效应原理,由信号瞬时频率解算物体的瞬时速度。

小波脊提取是振动物体瞬时速度提取的核心步骤。对多普勒信号 $x(t)$ 进行连续小波变换,小波系数的表达式为

$$W_x(a, b) = \langle x(t), \psi_{a,b}(t) \rangle, \quad (1)$$

式中: $\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{a} \psi[(t-b)/a]$ 为由尺度参数 a 和时间平移参数 b 控制形状的小波基函数,其中 $\psi(t)$ 为小波母函数,本文使用常用的 Morlet 小波作为小波母函数; $x(t)$ 为多普勒信号; t 为时间; $\langle \cdot \rangle$ 表示内积。

多普勒信号经连续小波变换得到各个时间和尺度下的小波系数 $W_x(a, b)$,其时间轴 b 、小波尺度轴 a 和小波系数模值 $|W_x(a, b)|$ 构成小波量图,小波量图上局部极大值连成的曲线即为小波脊线^[13],求每一时刻的 $|W_x(a, b)|$ 极大值点并将对应的尺度换算为相应的频率即可得到信号的瞬时频率。

根据激光多普勒效应原理,多普勒频移和振动物体的运动速度间存在的关系为

$$\Delta f = \frac{2v}{\lambda}, \quad (2)$$

式中: Δf 是激光的多普勒频移; v 是与激光入射方向一致的振动物体的运动速度; λ 是激光的波长。根据式(2),可由多普勒信号的瞬时频率解算出被测物体的振动速度,进而解算出被测物体的振动信息。

下面以图 3(b)所示的音叉振动信号为例说明基于小波变换的瞬时速度提取过程。图 4(a)为对图 3(b)所示的音叉振动信号进行小波变换得到的小波量图。图 4(b)为通过小波脊提取获得的瞬时频率。图 4(c)为利用多普勒效应原理解算得到的速度曲线。

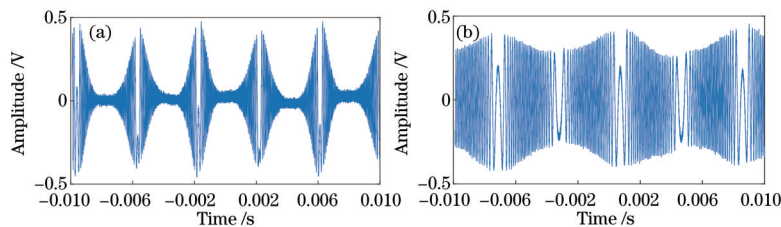


图 3 音叉振动的多普勒信号对比。(a)像面干涉测振光路;(b)瞳面干涉测振光路

Fig. 3 Comparison of Doppler signals of tuning fork vibration. (a) Optical path for vibration measurement based on image-plane interferometry; (b) optical path for vibration measurement based on pupil-plane interferometry

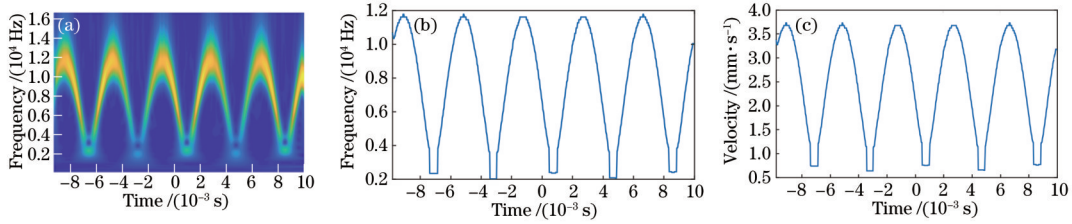


图 4 图 3(b) 中信号的瞬时速度提取。(a) 小波量图; (b) 小波脊提取图; (c) 速度曲线图

Fig. 4 Instantaneous velocity extraction for signal in Fig. 3(b). (a) Wavelet time-frequency energy diagram; (b) wavelet ridge extraction diagram; (c) velocity curve diagram

3 实验与结果分析

3.1 实验设置

为验证系统的工作性能,使用苏州苏试试验集团股份有限公司标准振动平台 DC-600-6 作为振动源、远东测振(北京)系统工程技术有限公司 CD-21-T 型磁电式速度传感器[灵敏度 $200 \text{ mV}/(\text{cm}\cdot\text{s}^{-1})$,精度为 2%]作为参照速度传感器,分别进行测速和测振实验。振动平台的运动稳定性和速度计的测量稳定性会影响测量结果的比较,经测试,振动平台的输出不稳定性在 1% 以下,速度计的测量不稳定性在 0.5% 左右,因此振动平台和速度计不稳定性带来的影响可以忽略。

瞳面干涉测振系统的实验装置如图 5 所示。标准振动平台通过加速度传感器对振动台进行反馈控制,可通过软件设置振动频率、位移、速度和加速度等相关参数,并获取平台振动的实时反馈。为便于实验:调整振动台使其保持水平振动;采用螺钉固定磁电式速度传感器,并将电缆固定在振动台表面以避免引起壳体应变;光路的组成除激光器、透镜 L1 与 L2 组成的扩束器、分光棱镜、参考平面镜,以及实现瞳面干涉的透镜 L3 和 L4 外,光路中增加了改变光束方向的反射镜,以更好地利用空间。调整光路使测量光束垂直射向振动平台图示位置,光电二极管连接偏置模块供电,输出与信号调理电路相接,用数字示波器采集信号调理电路的输出以供后续多普勒信号分析使用,同时示波器可以实时监测信号变化情况,方便进行光路的调试。

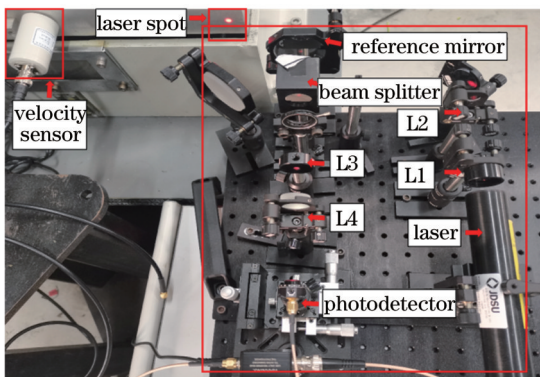


图 5 瞳面干涉测振系统实验装置

Fig. 5 Experimental setup of vibration measurement system based on pupil-plane interferometry

3.2 测速性能验证

激光多普勒测振系统的本质是测量物体运动的速度,因此先测量振动台随机振动时的速度来测试所设计的系统对速度的测量精度。振动台选择随机实验选项,设置加速度范围为 $0\sim 9.8 \text{ m/s}^2$,设置频率范围为 $40\sim 160 \text{ Hz}$,令振动台在此条件下随机振动。通过数字示波器同时采集速度传感器和激光多普勒测振系统信号调理电路的输出,将信号调理电路输出电信号经瞬时速度提取算法处理后与速度传感器输出进行对比,两个仪器测量速度曲线对比如图 6 所示。由于零差干涉测量只能探测速度的模量,无法获取方向信息,因此将速度传感器的输出取绝对值后与所设计的仪器得到的结果进行比较。可以发现,所设计的仪器对速度的跟踪情况与速度传感器基本一致。

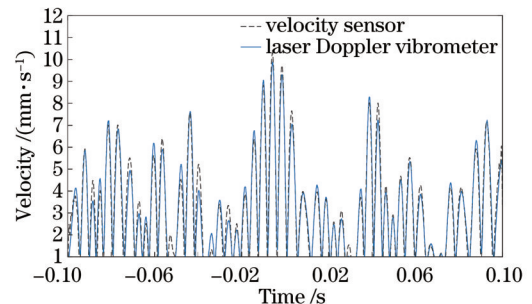


图 6 随机振动实验中两种仪器的速度测量曲线

Fig. 6 Velocity measurement curves of two instruments in random vibration experiment

为进一步对比两种测量方式的结果,采用基于 Bland-Altman 分析的方法^[22]评价两个仪器测量结果的一致性。每一时刻实验得到的测振系统的测量速度记作 x_i ,速度计的测量速度记作 y_i ,在测振系统和速度计同时测量的 0.2 s 数据(采样率为 5×10^5)中,每 30 点抽取 1 个数据,取其中前 1000 个数据进行评价。计算两个仪器测量速度的差值($d_i = x_i - y_i$)和均值 [$m_i = (x_i + y_i)/2$],并统计这 1000 个数据点的差值的平均值 \bar{d} 和标准差 s_d 。两种仪器的测量差值与测量均值的分布情况如图 7 所示,靠近纵坐标 0 处的实线表示平均值 \bar{d} 的位置,上下两条虚线表示一致性界限 ($\bar{d} \pm 2s_d$) 的位置。如图 7 所示,两个仪器测量偏差的均值 \bar{d} 接近 0,表明两个仪器的平均系统误差的差异很小。经统计,两个仪器的测量偏差中有超过 95% 的点包含在

一致性界限之内,进而可以认为所设计的测振系统的测量结果和速度计的测量结果具有一致性。从图 7 中可以发现,偏差分布范围约占本实验速度测量范围的 10%,这是因为实验环境中地面传来的振动较强,且所设计的测振系统未放置在隔振良好的平台上,环境振动会造成所设计的系统中参考光束产生轻微振动,进而会使得所设计的系统的测量结果中包含轻微的环境振动所引起的振动信号。

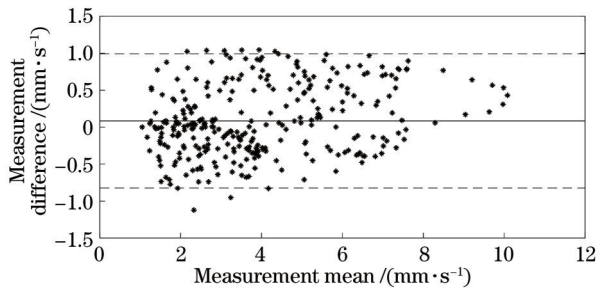


图 7 测量差值与测量均值的分布图

Fig. 7 Distribution of measurement difference and measurement mean

3.3 测振性能验证

振动物体的振幅与振动频率是评定物体振动状态

表 1 恒定位移情况下的振动参数测量结果

Table 1 Measurement results of vibration parameters under constant displacement

Frequency /Hz	Peak velocity			Vibration frequency		Vibration amplitude	
	Theoretical value / (m·ms ⁻¹)	Measured value / (m·ms ⁻¹)	Relative error /%	Measured value /Hz	Relative error /%	Measured value /μm	Relative error /%
40	3.77	3.74	-0.79	39.90	-0.25	14.92	-0.53
60	5.66	5.61	-0.88	59.92	-0.13	14.90	-0.67
80	7.54	7.53	-0.13	80.02	0.02	14.98	-0.13
100	9.42	9.37	-0.53	100.10	0.10	14.90	-0.67
120	11.31	11.33	0.18	120.05	0.04	15.02	0.13
140	13.20	13.26	0.45	140.00	0	15.07	0.47
160	15.08	15.01	-0.46	159.95	-0.03	14.94	-0.40
180	16.96	16.71	-1.47	179.88	-0.07	14.78	-1.47
200	18.85	18.66	-1.02	180.00	0	14.85	-1.00

根据式(3),在振动位移设置恒定情况下,改变振动台振动频率,其峰值速度与振动频率应成正比关系。根据表 1 中所求振动频率和峰值速度,可以拟合得到如图 8 所示的直线,拟合直线斜率为 0.093,相较理论斜率(0.094)存在 1.06% 的相对误差。经计算,该组数据的样本相关系数^[23]为 0.9998,表明虽然测量结果存在一定误差,但是系统所测峰值速度与振动频率存在良好的线性关系。

为验证测振系统对复杂振动的测量准确性,进一步利用振动台的扫频实验功能产生振动频率随时间变化的复杂振动,并使用所设计的测振系统对其进行测量。在实验中,设置振动台在 70~200 Hz 频率范围内

的重要参数,本节通过多组振动实验对系统的测振性能进行测试。

首先,选择振动台的简谐振动实验选项,分别进行固定振动振幅(设置理论位移为 30 μm,即理论振幅为 15 μm)、改变多个振动频率和固定振动频率(设置理论频率为 50 Hz)、改变多个振动振幅的两组测振实验。为减小振动台的运动不稳定性对测量的影响,实验中取 0.2 s 采集时间内峰值速度的平均值作为峰值速度测量结果。振动频率可以通过对速度信号进行傅里叶变换后取频谱能量最大值对应的频率得到。简谐振动中物体的振动速度可以表示为

$$v = 2\pi fA, \quad (3)$$

式中: f 为振动频率; A 为振动幅值,将多普勒频移公式代入式(3)中可得到振动幅值,即

$$A = \frac{\lambda \Delta f}{4\pi f}. \quad (4)$$

表 1 列出了固定振动幅值、不同振动频率下振动峰值速度、频率和幅值的测量结果。表 2 列出了固定振动频率、不同振动幅值下振动峰值速度、频率和幅值的测量结果。如表 1 和表 2 所示,所设计的系统对振动频率的测量相对误差在 0.25% 以内,对振动速度和振幅的测量相对误差均在 1.50% 以内。

以对数方式[频率随时间变化的函数关系为 $f(t) = 70 \times 1.33^t$]扫频,再次使用小波脊方法通过测振系统测量的振动速度提取振动频率,并与振动台理论振动频率进行比较。图 9 分别给出了测振系统测量速度经小波脊方法提取的振动频率随时间变化的曲线,该曲线经多项式拟合后所得的曲线和振动台理论振动频率随时间变化的曲线。可以看出,测量振动频率围绕理论振动频率曲线波动,测量振动频率拟合曲线与理论曲线较为吻合。为量化瞬时频率的测量精度,采用瞬时频率在整个时间历程内的归一化均方根误差作为精度指标(IA)^[24],经计算测量振动频率相对理论振动频率的 IA 值为 0.01,表明所设计的系统对对数扫频信号

表 2 恒定频率情况下的振动参数测量结果
Table 2 Measurement results of vibration parameters at constant frequency

Displacement / μm	Peak velocity			Vibration frequency		Vibration amplitude	
	Theoretical value / $(\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$	Measured value / $(\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$	Relative error / %	Measured value / Hz	Relative error / %	Measured value / μm	Relative error / %
10	1.57	1.58	0.64	49.92	-0.16	5.04	0.80
20	3.14	3.15	0.32	49.90	0.20	10.05	0.50
30	4.71	4.75	0.85	50.02	0.04	15.11	0.73
40	6.28	6.26	-0.32	49.92	-0.16	19.96	-0.20
50	7.85	7.81	-0.51	50.10	0.20	24.81	-0.76
60	9.42	9.43	0.11	50.05	0.10	29.99	-0.03
70	10.99	10.89	-0.91	50.00	0	34.66	-0.97
80	12.57	12.44	-1.03	49.92	-0.16	39.66	-0.85
90	14.14	14.10	-0.28	50.02	0.04	44.86	-0.31
100	15.71	15.63	-0.51	50.00	0	49.75	-0.50

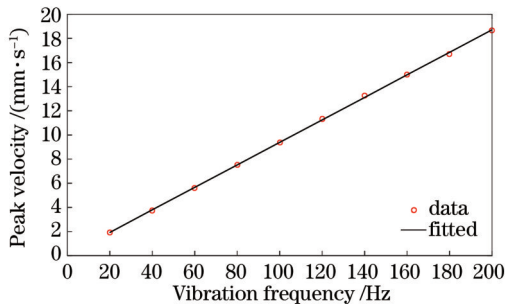


图 8 振动频率和峰值速度的线性拟合结果

Fig. 8 Linear fitting results of vibration frequency and peak velocity

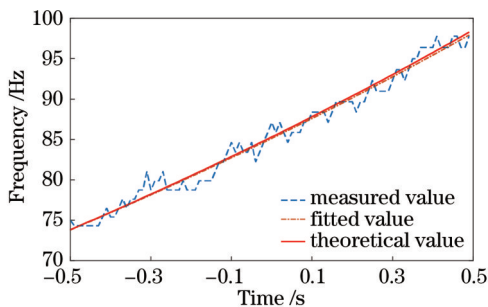


图 9 复杂振动频率测量结果

Fig. 9 Measurement results of complex vibration frequency

的测量具有很好的准确性。

与测速实验一样,本实验中激光多普勒测振系统仍受到环境振动的干扰。在此情况下,所设计的系统对振动参数的测量相对误差均在 1.5% 之内,且振动峰值速度与振动频率存在良好的线性关系,系统在复杂振动的测量中同样具有很好的准确性,实验表明所设计的系统适用于振动测量。

4 结 论

设计并实现了一套零差激光测振系统。该系统将

瞳面干涉技术引入激光多普勒测振中,以抑制物体复杂振动引起的测量光斑漂移对多普勒信号的干扰。利用小波变换时间-频率窗口随频率改变的特点,采用小波脊提取算法提取多普勒信号的瞬时频率,有效提高了对振动信息的测量精度和测量效率。测速和测振实验结果表明,所设计的系统可用于振动测量中,且具备振动测量应用所需的准确性。

实验发现,外界振动会导致所设计的系统中参考光束产生振动,使测量结果中包含环境振动引起的振动信号,下一步工作中将加强所设计的系统的隔振处理,进一步改善测量精度。目前,所设计的系统的信号采集环节通过示波器进行,信号处理在 PC 上进行,存在实时性差、系统不够紧凑的缺点,未来工作中将进一步通过现场可编程门阵列实现信号的采集和处理,令仪器的实时性更好,且更加小型便携。

参 考 文 献

- [1] 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.
Huang Z, Liu B, Dong Q L. Research on the torsional vibration measurement based on laser Doppler technique [J]. Acta Optica Sinica, 2006, 26(3): 389-392.
- [2] 邱松, 任元, 刘通, 等. 基于涡旋光多普勒效应的旋转柱体转速探测[J]. 光学学报, 2020, 40(20): 2026001.
Qiu S, Ren Y, Liu T, et al. Detection of rotational cylinder speed using Doppler effect of optical vortex [J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(20): 2026001.
- [3] Martarelli M, Ewins D J. Continuous scanning laser Doppler vibrometry and speckle noise occurrence [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2006, 20(8): 2277-2289.
- [4] 张澍, 叶宗民. 激光多普勒测振仪对激光陀螺动态特性测试分析[J]. 红外与激光工程, 2017, 46(7): 0706005.
Zhang S, Ye Z M. Test and analysis of dynamic characteristic of Ring Laser Gyroscope based on laser

- Doppler vibrometer[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(7): 0706005.
- [5] D'Emilia G, Gaspari A, Mazzoleni F, et al. Metrological characterization of MEMS accelerometers by LDV[J]. *Journal of Physics*, 2020, 1589(1): 012011.
- [6] Castagna M, Levilly S, Paul-Gilloteaux P, et al. An LDV based method to quantify the error of PC-MRI derived wall shear stress measurement[J]. *Scientific Reports*, 2021, 11: 4112.
- [7] Castellini P, Martarelli M, Tomasini E P. Laser Doppler Vibrometry: development of advanced solutions answering to technology's needs[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2006, 20(6): 1265-1285.
- [8] Bauer M, Ritter F, Siegmund G. High-precision laser vibrometers based on digital Doppler signal processing[J]. *Proceedings of SPIE*, 2002, 4827: 50-61.
- [9] 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.
- Zhang S, Li Y, Lu G F. Research of laser Doppler vibrometer based on dual-frequency ring laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(3): 0312003.
- [10] Zhang D, Zhao H B, Yang J K. A high precision signal processing method for laser Doppler velocimeter[J]. *Optik*, 2019, 186: 155-164.
- [11] Fu Y, Guo M, Phua P B. Multipoint laser Doppler vibrometry with single detector: principles, implementations, and signal analyses[J]. *Applied Optics*, 2011, 50(10): 1280-1288.
- [12] 陈鸿凯, 王挺峰, 吴世松, 等. 激光多普勒振动信号的时频分析[J]. *中国光学*, 2020, 13(5): 1014-1022.
- Chen H K, Wang T F, Wu S S, et al. Time-frequency analysis of laser Doppler radar vibration signals[J]. *Chinese Optics*, 2020, 13(5): 1014-1022.
- [13] Delprat N, Escudie B, Guillemain P, et al. Asymptotic wavelet and Gabor analysis: extraction of instantaneous frequencies[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 1992, 38(2): 644-664.
- [14] Aller J M, Habetler T G, Harley R G, et al. Sensorless speed measurement of AC machines using analytic wavelet transform[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2002, 38(5): 1344-1350.
- [15] 赵新才, 吴云峰, 方亮, 等. 激光干涉测速中的小波快速算法研究[J]. *激光技术*, 2012, 36(5): 649-652.
- Zhao X C, Wu Y F, Fang L, et al. Research of wavelet fast algorithm in laser velocity interferometry[J]. *Laser Technology*, 2012, 36(5): 649-652.
- [16] 刘俊, 姚予木, 李培楠, 等. 激光测高卫星全波形回波数据的参数优化小波降噪[J]. *中国激光*, 2021, 48(23): 2310001.
- Liu J, Yao Y M, Li P N, et al. Parameter optimization wavelet denoising algorithm for full-waveforms data of laser altimetry satellite[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(23): 2310001.
- [17] 田丰, 李莹, 王静. 基于多尺度小波变换融合的视网膜血管分割[J]. *光学学报*, 2021, 41(4): 0410001.
- Tian F, Li Y, Wang J. Retinal blood vessel segmentation based on multi-scale wavelet transform fusion[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(4): 0410001.
- [18] 席崇宾, 黄荣, 周健, 等. 基于液体透镜的激光多普勒信号品质因子增强技术[J]. *中国激光*, 2021, 48(7): 0704003.
- Xi C B, Huang R, Zhou J, et al. Quality factor enhancement technology of laser Doppler signal based on liquid lens[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(7): 0704003.
- [19] Feist J, Zhang S. Optical probe and apparatus: GB2484482A[P]. 2012-04-18.
- [20] Li S, Zhang S J, Li C W. Understanding optical systems through theory and case studies[M]. Bellingham: SPIE, 2017.
- [21] (美) Jerald Graeme. 光电二极管及其放大电路设计[M]. 赖康生, 许祖茂, 王晓旭, 译. 北京: 科学出版社, 2012.
- Graeme J. Photodiode amplifiers: OP AMP solutions [M]. Lai K S, Xu Z M, Wang X X, Transl. Beijing: Science Press, 2012.
- [22] Astrua M, Ichim D, Pennecci F, et al. Statistical techniques for assessing the agreement between two instruments[J]. *Metrologia*, 2007, 44(5): 385-392.
- [23] 金林, 李研. 几种相关系数辨析及其在 R 语言中的实现[J]. *统计与信息论坛*, 2019, 34(4): 3-11.
- Jin L, Li Y. Discrimination of several correlation coefficients and their implementation in R software[J]. *Statistics & Information Forum*, 2019, 34(4): 3-11.
- [24] 刘景良, 任伟新, 王超, 等. 基于最大坡度法提取非平稳信号小波脊线和瞬时频率[J]. *工程力学*, 2018, 35(2): 30-37, 46.
- Liu J L, Ren W X, Wang C, et al. Wavelet ridge and instantaneous frequency extraction based on maximum gradient method[J]. *Engineering Mechanics*, 2018, 35(2): 30-37, 46.