

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2023.02.07

1 550 nm 全光纤激光多普勒测振系统研制

丁宇洁, 刘格格, 刘科

(中国工程物理研究院 计量测试中心, 四川 绵阳 621900)

摘要: 针对目前国内激光测振系统价格昂贵、使用不便的问题, 采用 1 550 nm 波段成熟的窄线宽光源和光纤元器件研制了一套低成本的全光纤激光测振系统原理样机。此原理样机光路部分采用马赫-泽德干涉仪结构, 搭建了外差式激光干涉光路, 参考光被 40 MHz 的声光调制器调制, 与测量光在光电探测器表面发生干涉, 产生原始的激光多普勒信号; 信号解调部分采用相位解调法对原始激光多普勒信号进行解调, 得到振动目标的运动特性, 包括位移、速度和加速度信息。采用本单位的振动标准装置对其性能进行了测试, 实验结果表明: 在 10 ~ 2 000 Hz 的中低频振动范围内, 1 550 nm 全光纤激光多普勒测振系统峰值位移、速度和加速度的测量误差在 -0.6% ~ 0.7% 内。该系统在中低频段具有较高的测量准确度, 且成本相对较低、操作便捷, 具有技术借鉴价值。

关键词: 振动计量; 全光纤激光测振; 相位解调

中图分类号: TB936; TH825 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-5795(2023)02-0057-07

Development of 1 550 nm all-fiber laser Doppler vibration measurement system

DING Yujie, LIU Gege, LIU Ke

(Metrology and Testing Center, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

Abstract: Research has been conducted on the issue of high price and inconvenience in use of laser vibration measurement system. A low-cost prototype of all-fiber laser vibration measurement system is developed by using 1 550 nm mature narrow linewidth light source and optical fiber components. In the optical path part, a heterodyne laser interferometer is built using Mach-Zehnder interferometer structure, the reference light is modulated by a 40 MHz acousto-optic modulator and interferes with the measurement light on the photodetector surface to produce the original laser Doppler signal. In the signal demodulation part, the phase demodulation method is used to demodulate the original laser Doppler signal to obtain the motion characteristics of the vibration target, including the displacement, velocity and acceleration information. The performance of this prototype is tested with the vibration standard device in our center, and the experimental results show that, the measurement errors of peak displacement, velocity and acceleration of this 1 550 nm all-fiber laser vibration measurement system are within the range of -0.6% ~ 0.7%, in the medium to low vibration frequency range of 10 ~ 2 000 Hz. This system has both high measurement accuracy in medium to low vibration frequency range, and relatively low cost, convenient operation, which has technical reference value.

Key words: vibration metrology; all-fiber laser vibration measurement; phase demodulation

收稿日期: 2023-03-16; 修回日期: 2023-04-10

基金论文: 国家装备技术基础项目(211ZW22003)

引用格式: 丁宇洁, 刘格格, 刘科. 1 550 nm 全光纤激光多普勒测振系统研制[J]. 计测技术, 2023, 43(2): 57-63.

Citation: DING Y J, LIU G G, LIU K. Development of 1 550 nm all-fiber laser Doppler vibration measurement system[J]. Metrology & Measurement Technology, 2023, 43(2):57-63.



0 引言

振动广泛存在于日常生活及工业生产过程中。随着技术的发展,精密加工、微机电系统、生物医疗、航空航天、装备制造等领域均对振动测量提出了越来越多的需求^[1-6]。传统的振动测量手段将振动传感器贴于被测物体表面进行接触式测量,可能会影响物体本身的振动状态,而且测量准确度低、动态范围小、易受电磁干扰影响,不能满足特定场合下的测量需求。而激光测振技术以光的多普勒效应为基础,将一束激光打在被测物体表面进行非接触式测量,具有准确度高、动态范围大等优势,成为一种极具应用前景的技术。

自1962年有关激光多普勒测量技术的第1篇论文发表以来,激光测振技术得到了各国科研人员的重视^[7-9],并逐渐发展成一种标准方法^[10],用于振动与冲击传感器的绝对校准。以德国Polytec公司^[11-15]为代表的国外厂商也发布了一系列的激光测振仪产品,使激光测振技术真正应用于科研、工业的各个相关领域。国内高校和科研院所也对激光测振技术开展了大量研究。全光纤测振系统^[16-18]便于集成、调节简单,近些年获得了快速发展。但目前国内研制的激光测振系统在噪声抑制、测量准确性和使用便利性方面与国外有一定差距,针对此问题,本文采用通信波段成熟的光纤元器件,搭建了一套全光纤式激光多普勒测振系统原理样机,并利用本单位的振动标准装置对该原理样机的应用性能开展测试。

1 全光纤激光多普勒测振系统介绍

激光干涉测量系统所使用的光源应具有单色性好、波长稳定的特点^[19],常用的光源包括633 nm的氦氖激光和通信波段的窄线宽激光。由于氦氖激光是气体激光,不利于用光纤进行集成,而随着技术的发展,通信波段1 550 nm的窄线宽光纤激光的线宽可达10 kHz以下,波长稳定性可达数十pm,技术成熟且成本低廉,已被广泛应用于各种相干探测系统中。因此,本系统采用通信波段1 550 nm窄线宽激光光源和该波段的保偏光纤元器件搭建。系统光路采用马赫-泽德干涉仪结构,原理如图1所示,实物如图2所示。

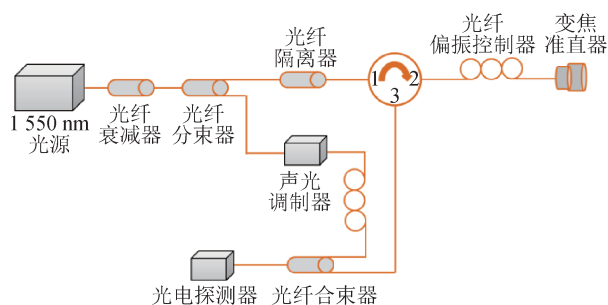


图1 全光纤激光测振系统光路结构

Fig.1 Optical path structure of all-fiber laser vibration measurement system

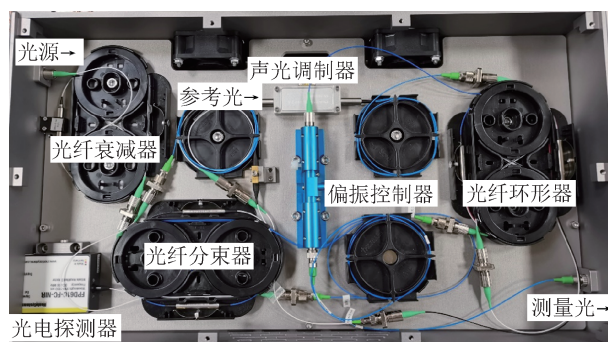


图2 全光纤激光测振系统原理样机实物图

Fig.2 Prototype of all-fiber laser vibration measurement system

光源发出的激光经光纤衰减器和分束器后被分为测量光和参考光。测量光经光纤隔离器后进入光纤环形器端口1并从端口2出射,经光纤偏振控制器后变为圆偏振光,再经变焦准直器后发射出去照射到运动物体表面,后向反射的测量光再次被变焦准直器收集,最终从光纤环形器的端口3出射;参考光经声光调制器调制,其频率产生固定的40 MHz频移;最终,测量光和参考光经光纤合束器后同时进入光电探测器,在光电探测器表面发生干涉,产生原始的激光多普勒信号。

假设测量光的幅值为 E_{01} ,频率为 f_{s1} ,参考光的幅值为 E_{02} ,频率为 f_{s2} ,根据光外差探测理论,光电探测器输出的电信号 U 可表示为

$$U \propto \frac{1}{2}(E_{01}^2 + E_{02}^2) + E_{01}E_{02} \cos[2\pi(f_{s2} - f_{s1})t + \varphi] \quad (1)$$

式中: φ 为信号的初相位; t 为时间。从式(1)可以看出:信号包含与光强成正比的直流分量和频率等于两束光频率差的交流分量。对于激光多普勒测振系统来说,有用的是交流分量,直流分量可以通过电容隔去。

根据光的多普勒效应，测量光被运动物体表面反射后，频率会发生变化，频移量为 f_D ；参考光被调制后频率也会发生变化，频移量为 f_B 。光电探测器输出的交流分量的频率 f_c 为

$$f_c = f_{s2} - f_{s1} = f_B - f_D \quad (2)$$

式(2)中， f_B 已知，因此只要得到信号的频率，就可以计算出测量光的多普勒频移量 f_D 。根据光的多普勒效应理论，当测量光垂直照射运动物体表面时，其多普勒频移量与物体运动速度 v 成正比，即

$$f_D = \frac{2v}{\lambda} \quad (3)$$

式中： λ 为光的波长。根据式(3)即可计算得到物体的运动速度信息。

综上，对目标运动参数解调的关键在于求解光电探测器输出交流信号的瞬时频率。又因为瞬时频率等于相位的微分，通过求解信号相位的方法也可以得到目标的运动参数，包括位移、速度和加速度信息。

2 目标运动参数数字解调方法

常用的激光多普勒信号数字解调方法有两种：条纹计数法和相位解调法^[20-21]。传统条纹计数法的位移分辨力为 $\lambda/2$ ，精度在微米量级，而相位解调法的精度可以突破波长的限制，达到纳米量级。因此，相位解调法得到了越来越多的应用。本文采用的相位解调算法如图3所示。

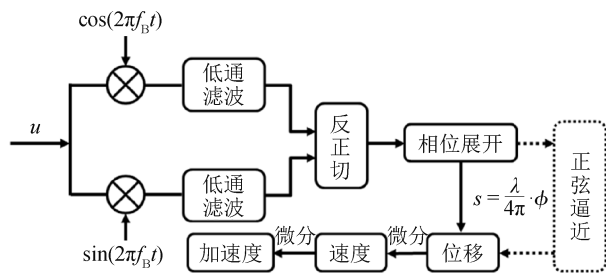


图3 相位解调算法框图

Fig.3 Block diagram of phase demodulation algorithm

根据式(1)和式(2)，光电探测器输出的原始激光多普勒信号 u 可表示为

$$u = u_m \cdot \cos(2\pi f_B t - 2\pi f_D t) \quad (4)$$

式中： u_m 为信号的幅值。可以看出原始激光多普勒信号的相位由两部分组成，一部分与声光调制

器的频率有关，一部分与物体运动引起的光频移量有关。

利用声光调制器的驱动频率作为载波生成两路正交信号，即 $\sin(2\pi f_B t)$ 和 $\cos(2\pi f_B t)$ ，分别与原始的激光多普勒信号相乘，得到的两路信号 u_1 和 u_2 分别为

$$\begin{cases} u_1 = u_m \cdot \cos(2\pi f_B t - 2\pi f_D t) \cdot \sin(2\pi f_B t) \\ \quad = \frac{u_m}{2} \cdot \sin(2\pi(2f_B - f_D)t) + \frac{u_m}{2} \cdot \sin(2\pi f_D t) \\ u_2 = u_m \cdot \cos(2\pi f_B t - 2\pi f_D t) \cdot \cos(2\pi f_B t) \\ \quad = \frac{u_m}{2} \cdot \cos(2\pi(2f_B - f_D)t) + \frac{u_m}{2} \cdot \cos(2\pi f_D t) \end{cases} \quad (5)$$

在测振系统中，总是有 $f_B > f_D$ ，因此从式(5)中可以看出， u_1 和 u_2 包含一个高频分量和一个低频分量，可以通过低通滤波器将高频分量滤掉，保留低频分量，得到低频分量 u_{1L} 和 u_{2L} 分别为

$$\begin{cases} u_{1L} = \frac{u_m}{2} \cdot \sin(2\pi f_D t) \\ u_{2L} = \frac{u_m}{2} \cdot \cos(2\pi f_D t) \end{cases} \quad (6)$$

由式(6)可以看出，两个低频分量正交且频率等于物体运动引起的多普勒频移量。因此可以通过反正切并相位展开^[22]的方法得到信号的瞬时相位 ϕ ，即

$$\phi = \arctan \frac{u_{1L}}{u_{2L}} + k\pi, (k = 0, \pm 1 \dots) \quad (7)$$

又因为信号瞬时相位等于信号角频率对时间的积分，结合式(3)，则有

$$\phi = \int_0^t 2\pi f_D \cdot dt = \int_0^t \frac{4\pi v}{\lambda} \cdot dt = \frac{4\pi}{\lambda} \int_0^t v \cdot dt \quad (8)$$

速度对时间的积分等于物体的位移 s ，因此有

$$s = \frac{\lambda}{4\pi} \cdot \phi \quad (9)$$

进而通过一次微分和二次微分，即可得到物体的速度 v 和加速度 a 。另外，对于做正弦运动的振动台振动参数的测量，可以通过正弦逼近法对相位进行正弦拟合实现。

3 全光纤激光测振系统性能测试

为了考核全光纤激光测振系统的中低频振动测量性能，采用本单位的振动标准装置对其进行测试。振动标准装置主要由振动台及其控制系统、标准振动传感器、标准激光测振仪和配套设备组

成,如图4所示。振动台可产生频率1~10 000 Hz的正弦振动,标准振动传感器和标准激光测振仪对振动参数进行测量。振动标准装置由两部分组成:1套低频振动装置和1套高频振动装置。低频振动装置由低频振动台产生正弦振动,并由配套的标准振动传感器测量得到振动过程中的位移、速度和加速度参数;高频振动装置由高频振动台产生正弦振动,并由配套的商用Polytec激光测振仪测量得到振动过程中的位移、速度和加速度参数。将原理样机的测量结果与标准振动传感器和标准激光测振仪的测量结果进行比较,计算其测量误差。

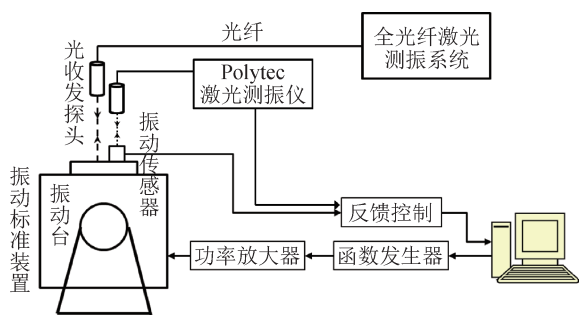


图4 全光纤激光测振系统原理样机性能测试系统

Fig.4 Performance test system for prototype of all-fiber laser vibration measurement system

按照图4所示框图搭建原理样机性能测试系统,将原理样机的光收发探头固定于振动标准装置振动台的正上方,调整其倾角使其发出的测量光垂直照射振动台面,反射后原路返回的测量光被光收发探头接收。开启振动台,使其依次产生频率为10~2 kHz的正弦振动,同时全光纤激光测振系统对振动台的振动特性进行测量,得到振动位移、速度和加速度信息。与振动标准装置提供的振动位移、速度和加速度标准值比较,即可得到原理样机的测量误差。对于200 Hz及以下频率的振动,标准值由配套的标准振动传感器提供,对于200 Hz以上频率的振动,标准值由配套的激光测振仪提供。

以振动台产生10 Hz和2 kHz的标准振动为例,全光纤激光测振系统采集得到的原始激光多普勒信号如图5和图6所示。原始激光多普勒信号的频率以40 MHz为中心不断变化,在时域上表现为疏密呈周期变化。经过中心频率为40 MHz的带通滤波器后,曲线变得光滑,减小了噪声干扰。根据

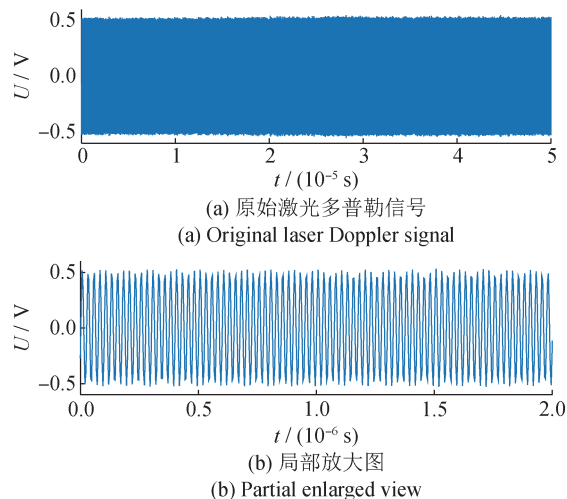


图5 采集的原始激光多普勒信号(振动频率10 Hz)

Fig.5 Original laser Doppler signal collected by the prototype (Vibration frequency 10 Hz)

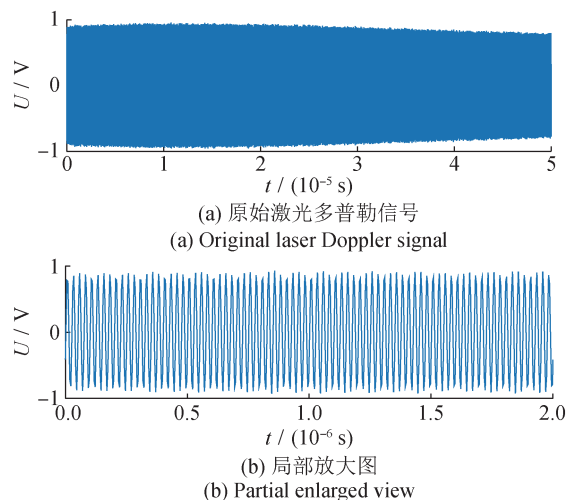


图6 采集的原始激光多普勒信号(振动频率2 kHz)

Fig.6 Original laser Doppler signal collected by the prototype (Vibration frequency 2 kHz)

图5和图6可知,原理样机在10~2 kHz振动频率范围内可以顺利收集到返回的测量光,并产生高信噪比的原始激光多普勒信号。

采用图3所示算法对信号进行解调,得到的振动位移、速度和加速度曲线如图7和图8所示,可以看出采用相位解调算法能够顺利地由原始激光多普勒信号中计算得到目标的振动特性。

以振动标准装置提供的振动参数(包括峰值位移 s_{peak} 、峰值速度 v_{peak} 、峰值加速度 a_{peak})为标准值,计算原理样机的测量误差。表1列出了10~2 kHz振动频率范围内振动参数的标准值和原

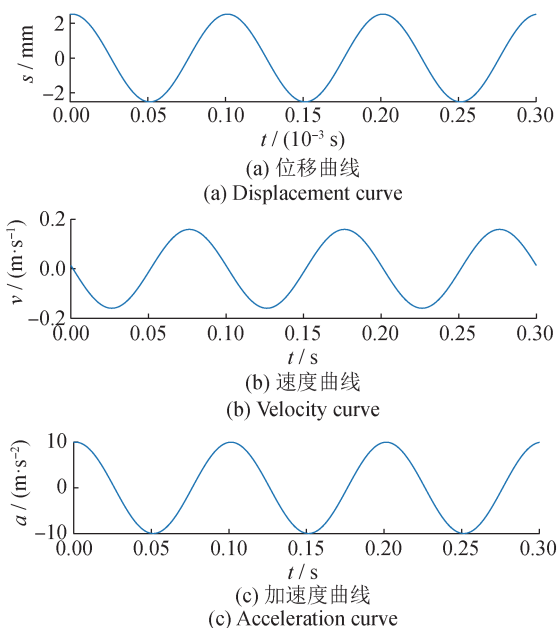


图7 解调位移、速度和加速度曲线(振动频率 10 Hz)

Fig.7 Demodulated displacement, velocity and acceleration curve (Vibration frequency 10 Hz)

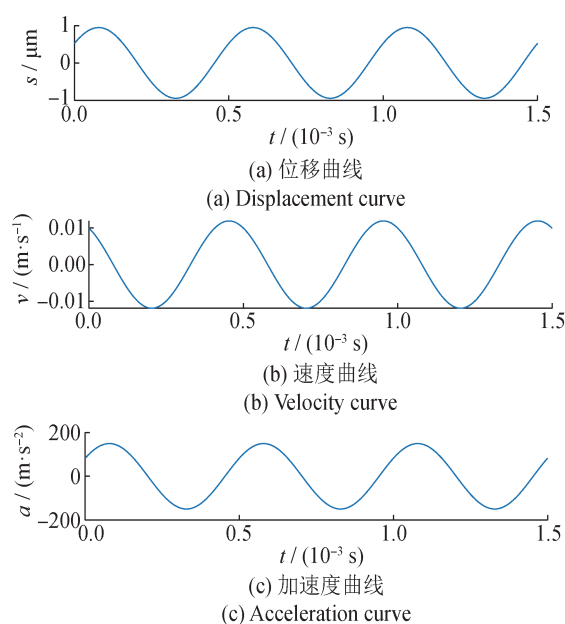


图8 解调位移、速度和加速度曲线(振动频率 2 kHz)

Fig.8 Demodulated displacement, velocity and acceleration curve (vibration frequency 2 kHz)

理样机的测量值，以及原理样机测量结果的相对误差。根据表1中的数据可以看出，同样加速度下振动频率越高，振动台的峰值位移和速度越小。在这一系列振动中，振动台的峰值位移低至 0.94 μm ，峰值速度低至 7.798 mm/s，而原理样机对于微振动均可实现准确测量。

以振动的峰值加速度为例，原理样机在不同频率处的测量误差曲线如图9所示。从图9中可以看出，原理样机在 10 Hz ~ 2 kHz 的振动频率范围内，加速度的测量误差在 -0.6% ~ 0.7% 范围内，从而验证了全光纤激光测振系统原理样机在中低频振动测量中的准确性。

表1 原理样机振动参数测量结果

Tab.1 Vibration parameter measurement results of prototype

振动频率/Hz	$s_{\text{peak}} / \mu\text{m}$			$v_{\text{peak}} / (\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$			$a_{\text{peak}} / (\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$		
	标准值	测量值	相对误差/%	标准值	测量值	相对误差/%	标准值	测量值	相对误差/%
10	2 533.0	2 530.0	-0.12	159.2	159.0	-0.13	9.999 9	9.988 8	-0.11
20	633.5	630.9	-0.41	79.58	79.28	-0.38	10.003 8	9.962 8	-0.41
40	157.4	157.9	0.32	39.55	39.69	0.35	9.939 8	9.974 9	0.35
80	39.58	39.72	0.35	19.89	19.97	0.40	10.000 4	10.036 3	0.36
100	25.33	25.29	-0.16	15.92	15.89	-0.19	9.999 9	9.983 3	-0.17
125	16.21	16.25	0.25	12.73	12.76	0.24	9.999 1	10.022 1	0.23
160	9.895	9.841	-0.55	9.947	9.894	-0.53	10.000 4	9.946	-0.54
200	6.205	6.226	0.34	7.798	7.824	0.33	9.799 1	9.832 1	0.34
500	10.115 8	10.181 3	0.65	31.78	31.99	0.66	99.839	100.486	0.65
1 000	2.529 4	2.527 6	-0.07	15.89	15.88	-0.06	99.857	99.785	-0.07
2 000	0.943 7	0.946 9	0.34	11.86	11.90	0.34	149.03	149.51	0.32

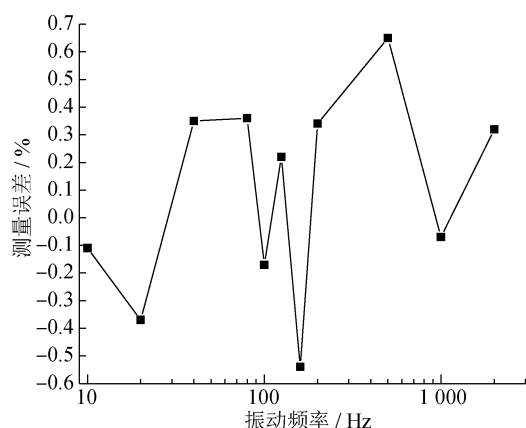


图9 原理样机测量误差曲线

Fig.9 Measurement error curve of prototype

4 结论

采用 1 550 nm 通信波段成熟的光纤元器件搭建了一套结构简单、成本低、使用方便的全光纤激光测振系统,该系统的光路部分采用外差式马赫-泽德干涉仪结构,解调部分采用相位解调算法对运动目标的振动参数进行解调,得到振动位移、速度和加速度信息。利用振动标准装置对 1 550 nm 全光纤激光多普勒测振系统的实际性能进行了测试,实验结果表明在 10 Hz ~ 2 kHz 的中低频低 g 值振动范围内,该系统的测量误差在 $-0.6\% \sim 0.7\%$ 范围内,具有较高的测量准确性。另外,对于大于 2 kHz 的高频亚微米微振动,该套测振系统也具备测试能力。通过对算法进行针对性修改优化,该套系统还可应用于高冲击加速度测量。

参考文献

[1] 廖江江, 罗海清, 宋耀东, 等. 激光多普勒测振仪在汽车零部件模态分析中的应用[J]. 机械工程师, 2018(5): 121-123.
LIAO J J, LUO H Q, SONG Y D, et al. Application of laser Doppler vibrometer in modal analysis of Auto parts [J]. Mechanical Engineer, 2018(5): 121-123. (in Chinese)

[2] 张涛, 冷长林, 钟莹, 等. 基于激光差动多普勒效应的机电系统动态测试技术[J]. 光学学报, 2007, 27(1): 63-67.
ZHANG T, LENG C L, ZHONG Y, et al. MEMS dynamic testing technique based on differential laser Doppler effect [J]. Acta Optica Sinica, 2007, 27(1): 63-67. (in Chinese)

[3] WLEZIEN R W, MIU D K, KIBENS V. Characterization of rotating flexible disks using a laser Doppler vibrometer [J]. Optical Engineering, 1984, 23(4): 436-442.

[4] JR K R W, MERCHANT S N, POON B B, et al. A normative study of tympanic membrane motion in humans using a laser Doppler vibrometer (LDV) [J]. Hear res, 2004, 187(1): 85-104.

[5] 孙浩琳, 吴娅辉, 朱振宇. 某航空发动机整体叶盘耦合振动特性分析[J]. 计测技术, 2015, 35(5): 28-30, 51.
SUN H L, WU Y H, ZHU Z Y. Coupling vibration characteristics analysis of holistic bladed disk [J]. Metrology & Measurement Technology, 2015, 35(5): 28-30, 51. (in Chinese)

[6] 张琦, 王洪斌, 姜睿. 基于激光多普勒测振的叶片振动特性试验[J]. 航空发动机, 2022, 48(1): 76-82.
ZHANG Q, WANG H B, JIANG R. Experiment on blade vibration characteristics based on laser Doppler vibration measurement [J]. Aeroengine, 2022, 48(1): 76-82. (in Chinese)

[7] 刘杰坤, 马修水. 激光多普勒测振仪研究综述[J]. 激光杂志, 2014, 35(12): 1-5.
LIU J K, MA X S. Review of laser Doppler vibrometer [J]. Laser Journal, 2014, 35(12): 1-5. (in Chinese)

[8] 段小艳, 张大治. 一种基于光子多普勒原理的高温振动测量方法探究[J]. 计测技术, 2019, 39(3): 46-50.
DUAN X Y, ZHANG D Z. Research on high temperature vibration measurement method base on photonic Doppler principle [J]. Metrology & Measurement Technology, 2019, 39(3): 46-50. (in Chinese)

[9] 赵锦春. 激光测振在振动计量中的发展概况及作用[J]. 计量与测试技术, 2011, 38(6): 11-13.
ZHAO J C. Vibration development situation and function of laser measurement in vibration measurement [J]. Metrology & Measurement Technique, 2011, 38(6): 11-13. (in Chinese)

[10] 国家质量监督检验检疫总局. 振动与冲击传感器校准方法 第 11 部分 激光干涉法振动绝对校准: GB/T 20485.11-2006[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
State Administration for Market Regulation. Methods for the calibration of vibration and shock transducers-Part 11: Primary vibration calibration by laser interferometry: GB/T 20485.11-2006[S]. Beijing: Standards Press of China,

2006. (in Chinese)
- [11] BAUER M, RITTER F, SIEGMUND G. High-precision laser vibrometers based on digital Doppler signal processing[C]// Fifth International Conference on Vibration Measurements by Laser Techniques: Advances and Applications: Volume 4827, International Society for Optics and Photonics, 2002: 50–61.
- [12] DRABENSTEDT A. Quantification of displacement and velocity noise in vibrometer measurements on transversely moving or rotating surfaces[C]// Optical Measurement Systems for Industrial Inspection V: Volume 6616. International Society for Optics and Photonics, 2007.
- [13] SIEGMUND G. Sources of measurement error in laser Doppler vibrometers and proposal for unified specifications [C]// Eighth International Conference on Vibration Measurements by Laser Techniques: Advances and Applications: Volume 7098. International Society for Optics and Photonics, 2008.
- [14] DRABENSTEDT A, SAUER J, REMBE C. Remote-sensing vibrometry at 1550nm wavelength [C]// AIP Conference Proceedings: Volume 1457. AIP, 2012: 113–121.
- [15] DRABENSTEDT A. Diversity combining in laser Doppler vibrometry for improved signal reliability[C]// AIP Conference Proceedings: Volume 1600. American Institute of Physics, 2014: 263–273.
- [16] ZHOU P W, TU C, LI Y, et al. Development of a variable and broad speed range all-fiber laser vibration measurement technology [J]. Optical Fiber Technology, 2018, 45: 188–194.
- [17] 郝东杰. 全光纤激光多普勒信号相位解调技术研究 [D]. 西安: 西安工业大学, 2018.
HAO D J. Research on phase demodulation technique for all fiber laser Doppler signal [D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2018. (in Chinese)
- [18] 吴世松. 中远程光纤激光多普勒微振动检测技术研究 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2020.
WU S S. Research on remote fiber laser Doppler micro-vibration detection [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2020. (in Chinese)
- [19] 李成强, 王挺峰, 张合勇, 等. 激光光源线宽对外差探测性能的影响 [J]. 物理学报, 2016, 65 (8): 170–177.
LI C Q, WANG T F, ZHANG H Y, et al. Effect of laser linewidth on the performance of heterodyne detection [J]. Acta Physica Sinica, 2016, 65 (8): 170–177. (in Chinese)
- [20] 晏春回. 激光相干测振信号处理技术研究 [D]. 长春: 中国科学院大学 (中国科学院长春光学精密机械与物理研究所), 2019.
YAN C H. Research on signal processing technology of laser coherent vibration measurement [D]. Changchun: University of Chinese Academy of Sciences (Changchun Institute of Optics, Precision Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences), 2019. (in Chinese)
- [21] 李昕聪, 刘俊岩, 张启元. 融合自适应滤波和归一化 PGC-Artan 的激光干涉测振信号解调算法研究 [J]. 电子测量技术, 2022, 45 (13): 115–122.
LI X C, LIU J Y, ZHANG Q Y. Research on laser interferometric signal demodulation algorithm integrating adaptive filtering and normalized PGC-Artan [J]. Electronic Measurement Technology, 2022, 45 (13): 115–122. (in Chinese)
- [22] CHANG T Y, LANG J P, SUN W, et al. Phase compensation scheme for fiber-optic interferometric vibration demodulation [J]. IEEE Sensors Journal, 2017, 17 (22): 7448–7454.

(本文编辑: 刘圣晨)



第一作者: 丁宇洁 (1990—), 男, 工程师, 主要研究方向为光学计量与测试技术。近 5 年负责装备技术基础项目 2 项, 作为主要参加人参加的技术基础项目 2 项, 参与军民融合项目 1 项。