

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2019.03.08

一种基于光子多普勒原理的高温 振动测量方法探究

段小艳, 张大治

(航空工业北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095)

摘要: 针对重大装备研制试验中面临的高温振动测量问题, 建立了一套基于光子多普勒原理的全光纤高温振动测量装置。在 $0 \sim 1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度范围内开展了振动测量性能测试, 试验结果表明该装置实现了最大振动速度 1 m/s 和最大振动加速度 378.4 m/s^2 的测量, 速度灵敏度的幅值线性度小于 0.5% , 频率响应范围为 $0 \sim 2\text{ kHz}$, 具有很好的稳定性与可靠性, 且在 $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上高温振动测量时表现出对被测面反光率要求较低的优势, 为应用于航空航天等领域的高温振动测量设备研制提高了重要参考。

关键词: 光子多普勒; 高温振动; 速度测量; 激光干涉仪

中图分类号: TB936; TB96

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795(2019)03-0046-05

Research on High Temperature Vibration Measurement Method Based on Photonic Doppler Principle

DUAN Xiaoyan, ZHANG Dazhi

(Changcheng Institute of Metrology & Measurement, Beijing 100095, China)

Abstract: Aiming at the problem of high temperature vibration measurement in the development and test of major equipment, an all fiber high temperature vibration measurement device based on photon Doppler principle is established. The vibration measurement performance was tested in the temperature range of $0 \sim 1200\text{ }^{\circ}\text{C}$. The experimental results show that the device can measure the maximum vibration speed of 1 m/s and the maximum vibration acceleration of 378.4 m/s^2 . The linearity of velocity sensitivity is less than 0.5% , and the frequency response range is $0 \sim 2\text{ kHz}$. The device has good stability and reliability. It also shows that the device has the advantage of low requirements for the reflectivity of the surface to be measured when it measures the vibration at high temperature above $800\text{ }^{\circ}\text{C}$. The method provides an important reference for the development of high temperature vibration measurement equipment applied in aerospace and other fields.

Key words: photonic Doppler; high-temperature vibration; velocity measurement; laser interferometer

0 引言

在航空发动机、高超发动机、重型燃机及燃煤燃气窑炉等重大装备研制设计试验中, 温度、压力和振动参数的准确测量至关重要。激光多普勒测量技术具有非接触、分辨力高、测速范围大、响应快等优点, 目前已被广泛应用于高准确度速度测量试验中^[1-2]。相对于常温振动测量, 高温振动测量所面临的主要问题是: 多数被测物体在高温条件下会发生表面氧化, 造成反光率急剧下降, 影响干涉信号的强度和信噪比, 甚至引起信号中断。因此, 改进激光多普勒高温测振等关键技术, 提高其环境适应性和使用可靠性, 研制高温振动传感器, 对于解决各型号装备研制试验中现场原位振动测量问题具有重要意义。20 世纪 80 年代

起, 光纤技术飞速发展, 光纤和光纤器件被引入激光测速系统中。以色列科学家 Levin 于 1996 年提出利用光纤代替离散光学器件, 通过光纤耦合器实现了两路信号干涉的新方法, 成功实现速度测量^[3]。全光纤光子多普勒测速技术由 Strand 等在 2004 年提出, 因具有结构简单、对光源相干度要求低、动态范围大等优势而倍受关注^[4-5]。目前, 德国、美国、英国等国家已有很多成熟的光纤测速仪产品, 国内的中国工程物理研究院、北京交通大学、电子科技大学、国防科技大学、复旦大学等单位也相继开展了光纤测速方面的研究^[6], 并取得了一定成果, 例如北京交通大学研制的光子多普勒测速仪可实现四点同步振动测量。光子多普勒速度测量技术已成功应用于爆破波、冲击等领域的速度测量^[7-8], 但在高温振动测量方面的研究较少。

针对此问题,本文基于光纤光子多普勒振动测量原理,建立了高温振动测量装置,并对其相关性能展开试验验证。

1 光子多普勒振动测量技术

传统的激光干涉测量仪的光学系统大多是由 He-Ne 激光器和传统的光学镜片构成,结构复杂、造价较贵、调节困难、难以小型化。全光纤激光多普勒测量技自 2000 年开始发展起来,以光纤和光纤器件代替分立光学元件,具有结构紧凑、系统稳定、抗干扰能力强、空间分辨率高、动态测量范围更大等优点,且针对低反射率表面的振动测量具有突出优势。全光纤激光多普勒速度测量技术对激光干涉测量技术的发展产生了重要影响^[9-15]。

光纤光子多普勒速度测量原理如图 1 所示。激光器发出的光从 1 端口进入环形器,环形器的 2 端口和光纤探头相连,激光经 2 端口传输至光纤探头处时,一部分光被探头的端面反射形成一次反射光,大部分光投射经过光纤探头照射至被测振动物体,发生漫反射并形成二次反射光,一次反射光和二次反射光均回到环形器,经端口 3 入射至光电探测器并发生干涉,形成的多普勒光信号经光电探测器转换为电信号后输入信号处理模块。

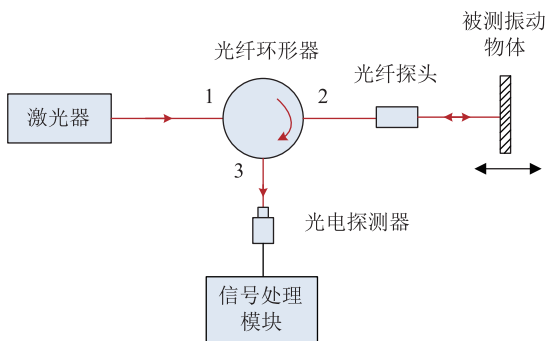


图 1 光子多普勒速度测量原理图

根据激光多普勒速度测量原理,设测量光垂直入射到振动物体表面,衍射光仍沿原路返回垂直进入探测器接收端,则探测器探测到的多普勒频移 Δf 与振动速度 v 、激光波长 λ 的关系满足

$$\Delta f = \frac{2v}{\lambda} \quad (1)$$

激光多普勒信号的频率、幅值会随时间变化,具有一定随机性,且信噪比相对较低,一般无法直接用传统的测频仪器进行测量,因此需要对其进行解调处理。常用的多普勒信号解调方法有条纹法、希尔伯特

变换法、傅里叶变换法、小波变化法等^[12],应试验中需根据信号特点选取合适的处理方法。以条纹法为例,激光多普勒信号图如图 2 所示,多普勒信号的每一个频率变化周期对应一个条纹,通过计算条纹的相邻极大值(或极小值)之间的时间间隔 $T(t)$,即可通过 $\Delta f = \frac{1}{T(t)}$ 求得多普勒频移。根据式(1)可得振动速度,将速度进行微分、积分即可获得对应的加速度和位移值。

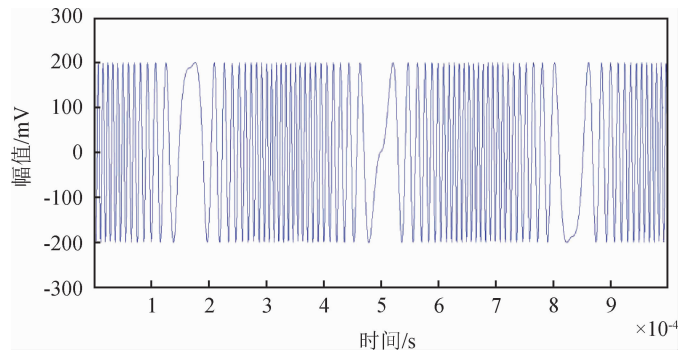


图 2 激光多普勒信号图

2 测量过程实现

基于以上测量原理建立光子多普勒振动测量装置,光纤探头子聚焦透镜反射的参考光与被测振动物体表面反射形成的测量光通过光纤环形器一同进入光电探测器,参考光与测量光的光波函数分别为 E_1 与 E_2 ,角频率分别为 ω_1 与 ω_2 ,相位分别为 φ_1 与 φ_2 ,则光电探测器探测到的合成波函数满足

$$E^2 = \frac{E_1^2 + E_2^2}{2} + E_1 \cdot E_2 \cos[(\omega_1 - \omega_2)t + (\varphi_1 - \varphi_2)] \quad (2)$$

当参考光和测量光的相位差 $\varphi_1 - \varphi_2$ 不变时,探测器探测到的多普勒信号表现为周期变化的干涉条纹,参考光与测量光之间的对应频率之差即为多普勒频移。

设光纤探头轴向与被测物体的振动方向的夹角为 θ ,参考光的光强为 I_1 ,测量光的光强为 I_2 ,根据多普勒频移与速度 $v(t)$ 之间的关系,叠加后的干涉光强 I 可表示为

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos\left[\frac{4\pi}{\lambda} v(t) \cdot t \cdot \cos\theta + (\varphi_1 - \varphi_2)\right] \quad (3)$$

光电探测器探测到的差拍频率为

$$\Delta f = \frac{\omega_1 - \omega_2}{2\pi} \cdot \cos\theta = \frac{2}{\lambda} \cdot v(t) \cdot \cos\theta \quad (4)$$

由式(3)可知, 光纤探头自身反射光强 I_1 和被测振动物体表面反射光强 I_2 不能相差过大, 否则会导致含拍频部分在总光强中的比例过小而影响拍频信号探测。因此, 测量距离不宜过大, 且应保证光纤探头轴向与被测物体的振动方向重合, 简化测量计算程序。

光纤光子多普勒速度测量装置主要由激光器、光纤探头、光纤环形器、光电探测器、数据采集处理系统等部分组成, 其实物图如图 3 所示。系统光源采用 CQF938/400 型半导体激光器, 其波长为 1553.29 nm, 线宽为 0.2096 MHz, 输出功率可达 100 mW。为保证该半导体激光器的正常功率输出, 设计了相应的驱动电路提供稳定驱动电流及温控电路对激光器进行温度控制。

本装置选用 G652 型单模光纤, 其工作波长满足 1550 nm 传输窗口性能指标, 且它在 1550 nm 波段的损耗小, 约为 0.2 ~ 0.25 dB/km。选用工作波长为 1470 ~ 1610 nm 的光纤环形器, 分光比为 1:1 的光纤耦合器。装置的数据采集系统包含普通 PIN 探测器及 NI 的 PXIE5160 型高速数据采集卡。为适应不同距离的振动测量, 并尽可能提高回光效率, 设计了可变焦光纤探头, 探头直径为 20 mm, 变焦范围为 0.3 ~ 1 m。



图 3 光子多普勒速度测量装置

试验中的被测件为合金立柱, 有两种不同尺寸, 分别为: 高 100 mm, 直径 18 mm; 高 100 mm, 直径 12 mm。测量时为了防止不锈钢件高温导热对振动台造成损害, 在被测件和台面之间通过陶瓷立柱进行转接。光纤光子多普勒速度测量系统原理图如图 4 所示, 实验装置实物图如图 5 所示。将高温合金棒固定于振动台表面, 调整光纤探头, 使其与被测合金棒的表面保持垂直, 并采用感应加热装置对合金棒的顶端进行加热, 实现所需要的局部表面高温, 温度值由辐射测温仪进行监测。测量时, 选择适当距离并调整光纤探头

焦距, 保证光信号尽可能强。

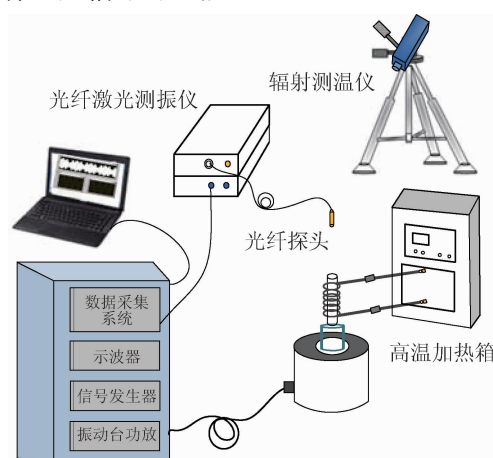


图 4 光纤光子多普勒速度测量系统原理图

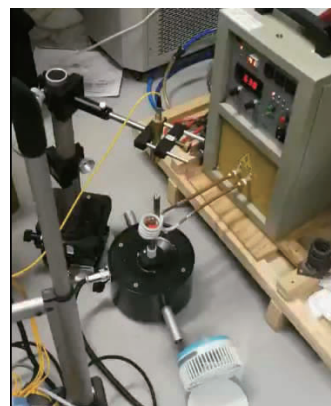


图 5 光纤光子多普勒速度测量实验装置图

为更好地对该光纤光子多普勒速度测量装置的性能进行测试, 试验中选用 PSV-400 型激光测振仪作为标准激光测量系统。PSV-400 激光测振仪是一款高性能扫描激光测速仪, 其工作原理基于差动激光多普勒技术, 与零差干涉相比, 具有可直接判别运动方向, 抑制噪声提高信号信噪比等优点。其主要技术指标为: 测量距离范围为 0.4 ~ 10 m, 最大测量速度可达 10 m/s, 最大扫描角度范围为 $\pm 20^\circ$ 。试验中, 光纤光子多普勒速度测量装置测量合金立柱的高温表面, PSV-400 扫描激光测振仪测量振动台台面, 并将二者的测量结果进行比对以证明本文提出方法的准确性。

3 试验结果及分析

试验对光纤光子多普勒速度测量装置在不同温度下的工作性能进行了测试。图 6 为 300 $^\circ\text{C}$ 时采集到的多普勒信号及速度解调结果。

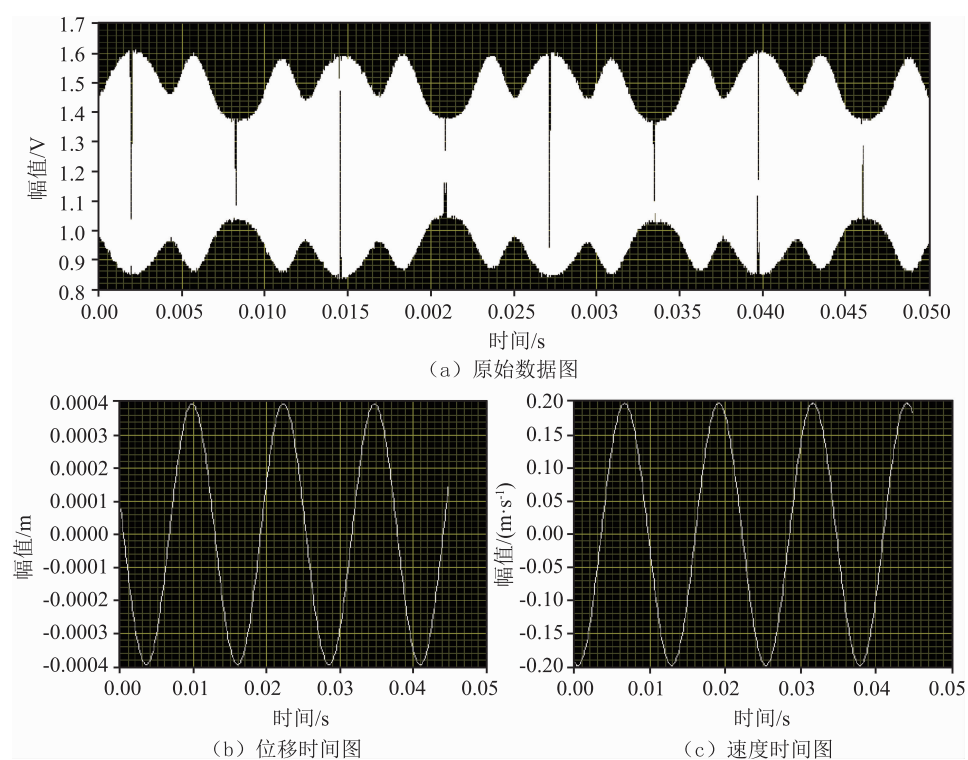


图6 300 °C时采集到的多普勒信号及速度解调结果

试验在选取了300, 600, 1200 °C三个不同的温度点进行测量, 光纤光子多普勒速度测量装置与PSV-400型扫描激光测速仪的速度幅值比对结果如图7所示。试验结果证明本文研制的光纤光子多普勒速度测量装置在0~1200 °C温度范围内实现了最大振动速度为1 m/s和最大振动加速度为378.4 m/s²的测量, 速度测量绝对偏差不高于19 mm/s, 相对偏差不高于1.95%, 通过线性拟合得到其在各温度点的速度灵敏度的幅值线性度均小于0.5%。

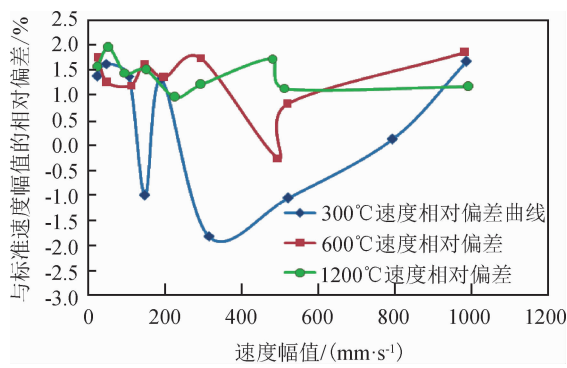


图7 光纤光子测速装置与Polytec测速仪在不同温度下的速度幅值比对结果

光纤光子多普勒测速装置在600, 1200 °C下的定加速度频响特性验证试验结果如图8所示。测试结果

表明, 在0~2 kHz频率范围内, 光纤光子多普勒测速装置和PSV-400型测速仪的绝对速度偏差不高于6.15 mm/s, 相对速度偏差不高于1.97%。

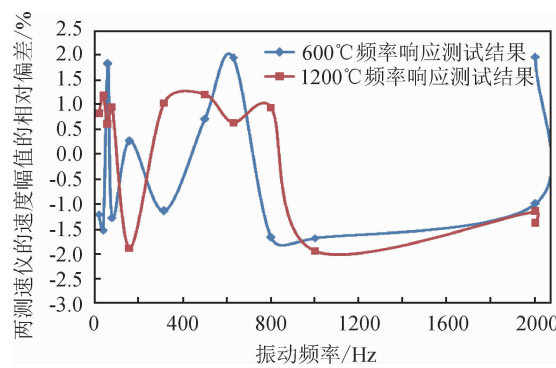


图8 不同温度下光纤光子测速装置频率响应测试结果

需要指出两点: ①在测量800 °C以上高温时, PSV-400型扫描激光测速仪会出现信号间断现象, 光纤光子多普勒测速装置会出现信号幅值降低现象, 产生这种情况的原因是在高温条件下被测合金件端面发生氧化导致反射率降低, 由普通分立光学元件组成的PSV-400型扫描激光测速仪对反射面的反光率要求明显高于光纤光子多普勒测速仪; ②由于PSV-400型扫描激光测速仪测量的是振动台台面的振动情况, 而光纤光子多普勒测速装置测量的是合金立柱端面的振动情况,

因此未来需进一步分析研究立柱的安装状态等因素对二者测量偏差的影响。

4 总结

基于光子多普勒原理建立了全光纤高温振动测量装置,并对其在 $0 \sim 1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度范围内的振动测量性能进行了测试,与 PSV-400 型高精度激光测振仪的比对结果表明:该光纤光子多普勒速度测量装置实现了最大振动速度 1 m/s 和最大振动加速度 378.4 m/s^2 的测量,速度灵敏度的幅值线性度小于 0.5% ,频率响应范围为 $0 \sim 2\text{ kHz}$,工作性能稳定,尤其是在 $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上高温振动测量时表现出对被测面反光率要求较低的优势,完成了高温振动测量方法的初步探究,为应用于航空发动机等领域的高温振动测量装置设计奠定了实验基础。针对高温振动测量中干涉信号信噪比较低,稳定性相对较差的问题,未来将重点开展光纤探头优化以及多普勒信号处理方法研究,提高信号解调精度,并在多探头同步高温振动测量方向进行相关探索。

参考文献

- [1] 吕宏诗,刘彬.激光多普勒测振技术的最新进展[J].激光技术,2005,29(2):176-179.
- [2] 于涛.光子多普勒速度测量系统的研制及其应用[D].北京:北京交通大学,2011.
- [3] Levin L, Tzach D, Shamir J. Fiber optic Velocity Interferometer with Very Short Coherence Length Light Source[J]. Review of Scientific Instruments, 1996, 67(4): 1434-1437.
- [4] Strand O T, Berzins L V, Goosman D R, et al. Velocimetry Using Heterodyne Techniques[J]. Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 2005, 5580: 593-599.
- [5] Strand O T, Berzins L V, Goosman D R, et al. Compact System for High-speed Velocimetry Using Heterodyne Techniques [J]. Review of Scientific Instruments, 2006, 77: 83-108.
- [6] 傅迎光.基于调制光源的光子多普勒测速系统[D].北京:北京交通大学,2014.
- [7] Levinson S, Satapathy S. High-Resolution Projectile Velocity and Acceleration Measurement Using Photonic Doppler Velocimetry[C]// American Institute of Physics, 2009: 585-588.
- [8] Valenzuela A R, Rodriguez G, Clarke S A, et al. Photonic Doppler Velocimetry of Laser-ablated Ultrathin Metals[J]. Review of Scientific Instruments, 2007, 78(1): 13101-13110.
- [9] 倪家伟.全光纤激光干涉测速技术研究[D].南京:南京理工大学,2011.
- [10] 许静静.多普勒光纤速度干涉仪的研究[D].北京:北京交通大学,2011.
- [11] 洪广伟,贾波.用于多点测试的全光纤速度干涉仪研究[J].中国激光,2005,32(8):1097-1100.
- [12] Weng J, Tan H, Wang X, et al. Optical-fiber Interferometer for Velocity Measurements with Picosecond Resolution[J]. Applied Physics Letters, 2006, 89(11): 111101-111104.
- [13] 毕重连,王健,项红亮,等.基于裸光纤探头的双点光子多普勒测速系统[J].光学学报,2012,32(8):100-104.
- [14] 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):1-6.
- [15] 冯其波,谢芳,张斌.光学测量技术与应用[M].北京:清华大学出版社,2008.

收稿日期:2019-05-26

基金项目:国家重大科学仪器设备开发专项(2016YFF0100600)

作者简介

段小艳(1987-),女,硕士,主要从事微纳测量和激光干涉动态测量相关研究。

