

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2018.06.02

基于激光多普勒原理的高温振动测量技术研究

杨正玺, 常洪振, 都佳逊, 王鹏辉, 肖健

(北京强度环境研究所, 北京 100076)

摘 要: 为解决表面对激光反射强度极低的试件在持续高温环境下振动响应测量不准确的问题, 本文提出了基于激光多普勒原理的高温振动测量技术。从激光反射信号增强、时域响应数据后处理、激光测振仪热防护三个方面进行研究, 并通过试验验证了此方法的科学性和可靠性。

关键词: 高温; 激光测振; 振动测量

中图分类号: TB936

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795(2018)06-0006-05

Research on High Temperature Vibration Measurement Technology Based on Laser Doppler Principle

YANG Zhengxi, CHANG Hongzhen, DU Jiaxun, WANG Penhui, XIAO Jian

(Beijing Institute of Structure and Environment Engineering, Beijing 100076, China)

Abstract: In order to solve the problem of inaccurate measurement of vibration response of specimens with very low laser reflective intensity under continuous high temperature environment, a high temperature vibration measurement technique based on laser Doppler principle is proposed. This paper studies the method from the aspects of the enhancement of laser reflection signal, the post-processing of time-domain response data and the thermal protection of laser vibrometer, and verifies its scientificity and reliability by experiments.

Key words: high temperature; laser vibrometer; vibration measurement

0 引言

随着飞行器速度的不断提高, 飞行器所处的环境更加复杂和恶劣。为应对恶劣的气动环境、热环境及噪声环境等各种极端载荷环境, 飞行器的防护结构不断改进和提升, 由陶瓷、金属以及各种复合材料构成具有较复杂结构形式的防护系统^[1]。地面试验是验证热防护系统分析方法和改进设计的重要依据, 同时也是验证热防护应用可行性、指导热防护材料工艺优化与改进提高的重要手段^[2-3]。武器装备在热振、热模态、热噪声等地面试验中, 表面持续处于超高温环境^[4], 目前已有试件表面温度近千度, 高温持续时间数千秒的情况。未来发展的装备项目, 温度将更高, 这样恶劣的温度环境为试验中振动参数的测量带来困难。

高温环境振动测试主要有耐高温加速度传感器测量和非接触式激光测量两种方式。耐高温传感器的承受温度有一定限制, 目前耐高温加速度传感器连续工作的耐热温度最高为 650 ℃, 更高温度的响应测量只能采用非接触式激光测振仪, 但表面对激光反射强度极低的试件, 在持续高温环境下进行振动响应测量还

需解决激光反射信号增强、时域响应数据后处理、激光测振仪热防护等问题。

1 激光反射信号增强方法

1.1 原理介绍

激光测振仪主要利用激光多普勒效应, 其原理如图 1 所示, 激光器发射一束单色激光至振动的被测物体上, 当被测物体向着接收器移动时, 物体反射回的波被压缩, 波长缩短, 频率升高; 反之, 当被测物体背着接收器移动时, 反射回的波长将变长, 频率会降低。这种振动引起的频率的变化叫做多普勒频移, 该频移量与物体的运动速度成正比, 测出多普勒频移 f_D , 即可以计算出物体的运动速度^[5]。频移 f_D 与速度 v 的关系为

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

试验件表面的光洁程度、颜色、入射角度等都会影响激光反射率。高速飞行器热防护结构表面多为黑色复合材料, 本身会对激光产生一定的吸收, 当处于近千度的高温试验环境时, 复合材料发生烧蚀, 表面光洁度变差, 加剧了激光的散射, 导致激光信号的反

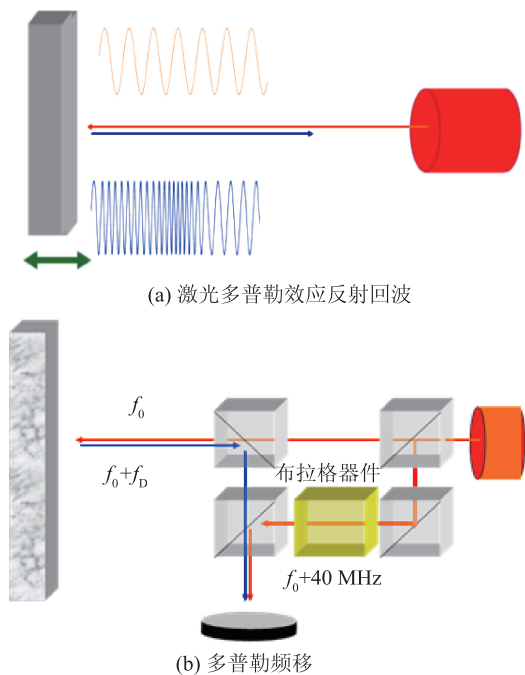


图 1 激光多普勒效应原理图

射率极低，严重影响了测量的信噪比，不能满足试验要求。

本研究中利用透镜回归反射原理来制备反光涂层，涂抹于试件表面以增强激光反射信号^[6]。如图 2 所示，按照光学折射与反射原理制成一定形状的透镜结构(玻璃微珠)，这种透镜结构具有将照射到其上的入射光按原入射方向大部分返回的功能，可提高自身能见度。该方法已被大量应用于道路安全设施和各种防护装备，如反光交通标志、反光道路标线、反光车身标识、故障车警告标志等。对于高温环境，反光涂层采用耐高温胶粘接耐高温玻璃微珠的方法制备。

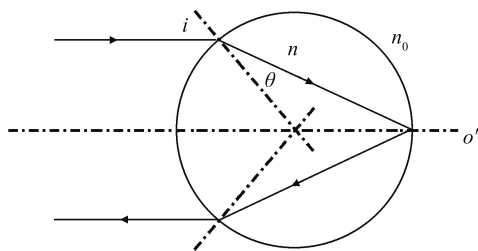


图 2 玻璃微珠结构的回归反射原理

1.2 方法验证

选取与热防护结构表面材料相同的小板来进行验证试验。采用耐高温胶粘接耐高温玻璃微珠的方法制备反光涂层，将不同制备工艺的涂层涂抹在小板材料表面以便进行效果对比，图 3 为小板材料示意图。试

验现场如图 4 所示，按照如图 5 所示的试验温度曲线进行加热，同时用激光测振仪分别记录试件静止状态下，材料本身处和反光涂层处的信号干扰情况以反映激光反光效果。若反光效果很好，则信号应为量级很小的噪声信号；若反光效果差造成很大干扰，则信号会出现量级很大的跳变。

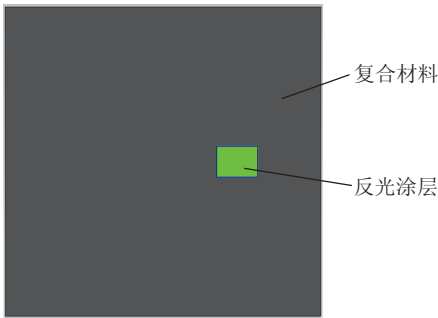


图 3 小板材料示意图

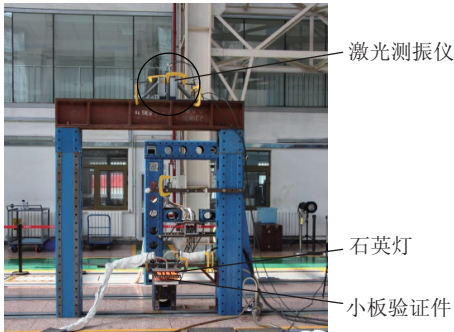


图 4 反光效果验证试验现场

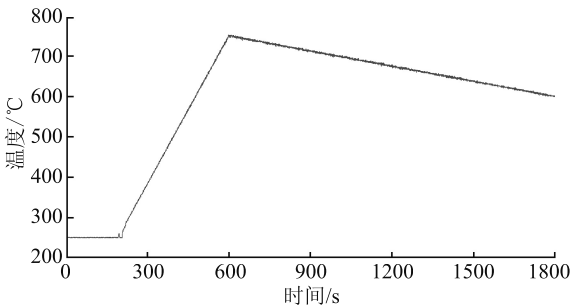


图 5 加热温度曲线

图 6 为复合材料表面的测量信号，图 7 为反光涂层处的测量信号。可以看到，复合材料本身对激光反射效果很差，整个时域信号基本都是量级很大的跳变信号，影响测量的信噪比，不能满足试验要求；反光涂层处整个时域历程只是偶尔出现信号跳变，量级也

很小,不会对实际振动测量产生干扰,可明显改善激光反光效果。

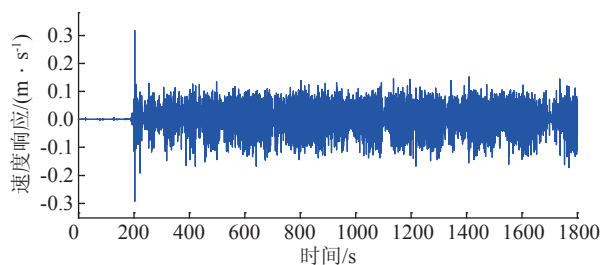


图6 复合材料表面测量信号

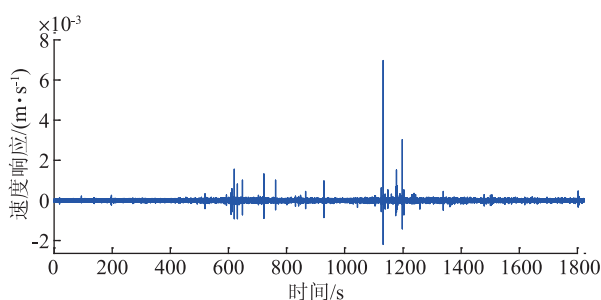


图7 反光涂层处测量信号

1.3 涂层外观和微观变化情况

图8为常温、验证试验后反光涂层外观和在显微镜下微观状态的变化情况。可以看出,常温状态下微观玻璃微珠为饱满圆珠状,回归反射效果最优;经过加热验证试验后,绝大多数玻璃微珠仍为圆珠状,少量玻璃微珠出现了析晶变为非透明的乳白色,对回归反射效果产生一定损失。因此,耐高温反光涂层微观状态变化与测量信号效果是对应的。

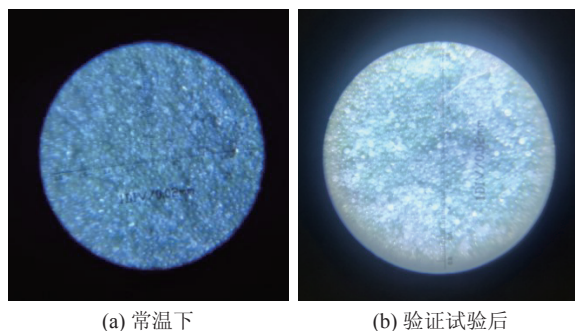


图8 光涂层微观状态

2 信号后处理方法

多普勒激光测振直接测得速度信号,一般试验中

更关心加速度响应参数的时域幅值和频域峰值对应的频率,特别是一阶频率情况。对原始速度信号滤波后采用时域微分的后处理方法,可以得到加速度时域信号。在此基础上,若将所关心时段的时域信号处理为功率谱密度,可得到该时段频域峰值对应频率,特别是一阶频率;若对全程时域响应数据进行时频分析,可得到在整个热振动试验中试件一阶频率的变化情况,从而为试验评价提供直接有效的数据支撑。

正式试验前,对速度信号后处理准确性进行验证。图9为速度响应处理准确性验证试验,在振动试验刚性工装上同一位置布置加速度传感器,直接测得加速度值,同时布置激光测振点,测得速度值。图10为加速度计直接测得的加速度响应图,图11为激光测振仪测得速度响应微分后得到的加速度响应图。图12为放大某一时间段的时域对比。可以看到两种方法得到的加速度响应曲线在时域基本吻合,图13为30~90 s这一时间段,利用速度微分方法和加速度计实测得到的加速度响应的频域功率谱密度曲线对比,可以看到在能量分布较多的1000 Hz以内频段,两曲线基本吻合,特别是峰值完全重合,在能量分布较少的高于1000 Hz频段,两曲线峰值所在频率一致,幅值有所差异,因此在全频域内都可以满足获取准确峰值对应频率的要求。综上,多普勒激光测振仪直接测得速度响应信号,采用时间微分获得加速度参数的方法满足试验要求。

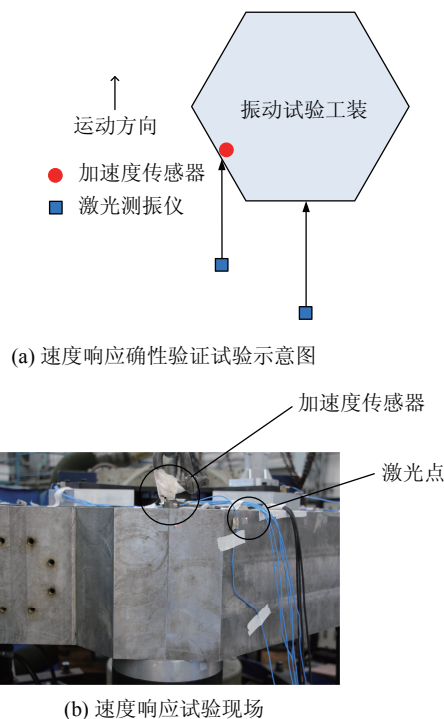


图9 速度响应处理方法准确性验证试验示意图及现场

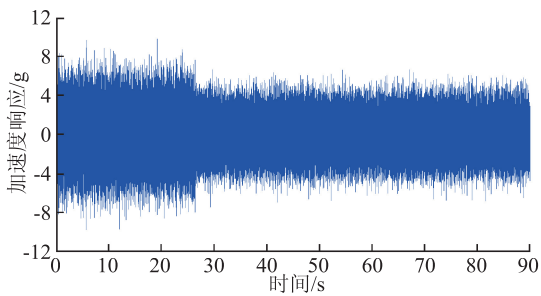


图 10 加速度传感器直接测得加速度响应

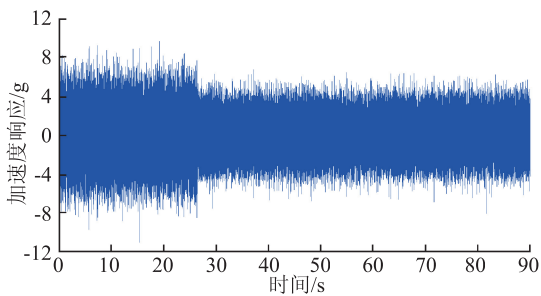


图 11 激光测振仪测得速度响应微分后得到加速度响应

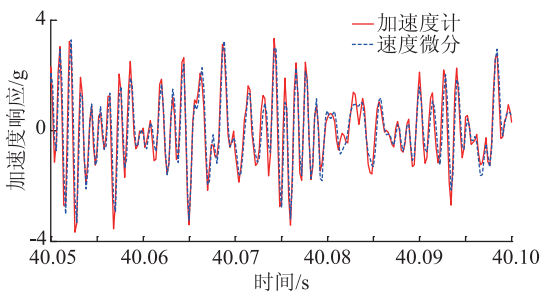


图 12 速度微分方法和加速度计实测得到的加速度响应(时域)局部放大对比

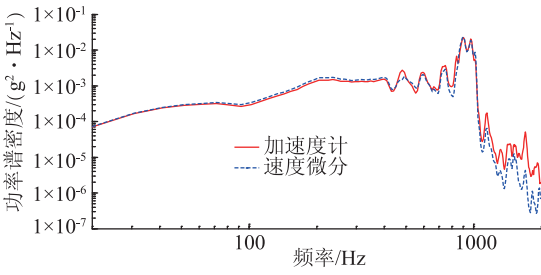


图 13 速度微分方法和加速度计实测得到的加速度响应(频域)对比

3 激光测振仪热防护箱设计

高速飞行器热振动试验通常在低氧氮气舱中进行，由于加热分区多、加热功率非常大，氮气舱内的空气温度可达 80 ℃ 以上，而激光测振仪内部存在较多的精

密光学元器件，其使用温度不得超过 40 ℃，因此必须对激光测振仪进行有效的热防护。

激光测振仪光学头热防护箱构造如图 14 所示，其外侧安装有导热率较低的 FR4 环氧隔热板(耐受温度不低于 300 ℃)以降低热空气向内部传导速率，同时保证内部氮气供应以降低防护箱内部温度。

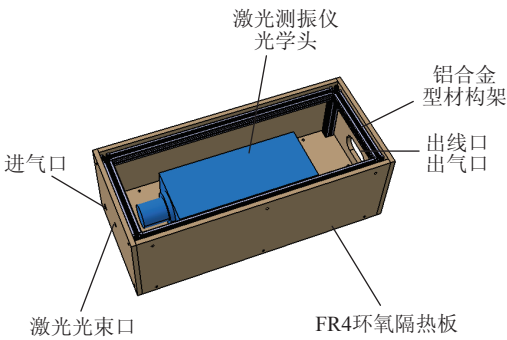


图 14 激光测振仪光学头热防护箱

4 正式试验测量效果

图 15 为正式试验中激光测振仪安装示意图，图 16 为试验中激光测振仪直接测得的全程某测点的速度响应信号。从测量结果看，使用反光涂层后，测得的振动响应信号质量良好，基本没有出现信号跳变现象，原始数据满足试验测量的要求。在此基础上，对所需时间段上的速度响应按前述时域微分方式处理，可得到加速度信号，图 17 为对试验全程某测点进行速度响应后处理得到的加速度响应，可以得到所关心时间段上加速度响应的时域幅值。图 18 为 800 ~ 900 s 时间段，两测点加速度响应功率谱密度，可获得试件整体一阶频率，可以看到频域上峰值对应的频率。图 19 为对全程较大响应处时域信号进行时频分析后试件一阶频率附近的结果，可以为试验评价提供直接有效的数据支撑。

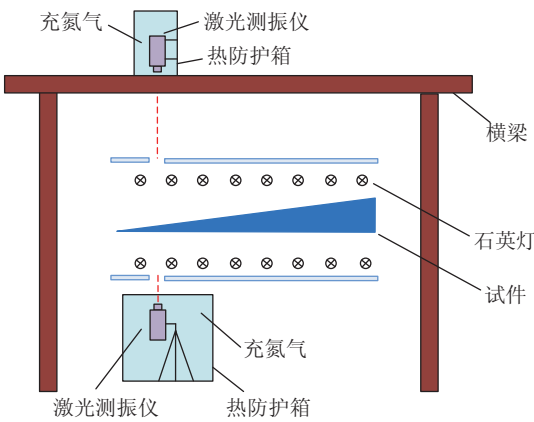


图 15 正式试验激光测振仪安装示意图

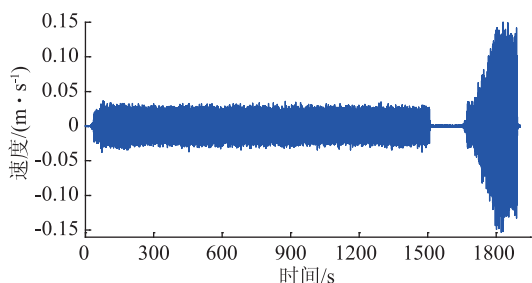


图 16 正式试验某测点直接测得速度响应

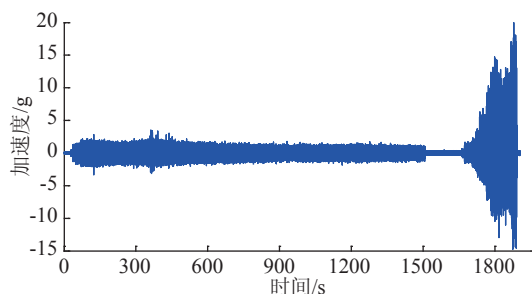


图 17 正式试验某测点通过速度响应后处理得到加速度响应

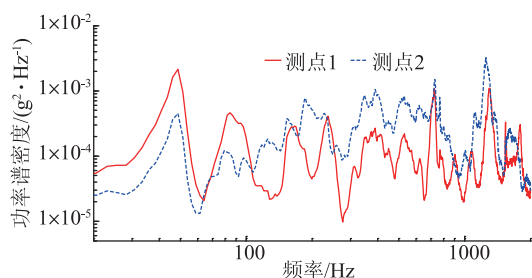
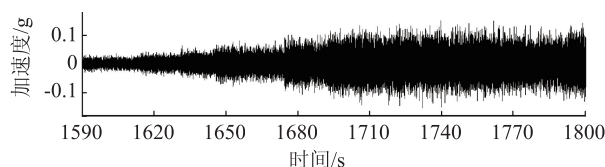
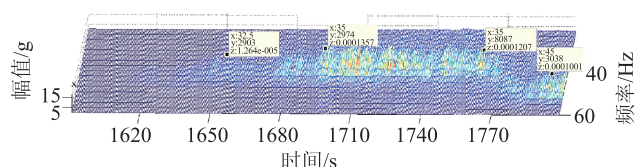


图 18 正式试验两测点 800 ~ 900 s 时段加速度响应功率谱密度



(a) 时间历程图



(b) 频谱瀑布图

图 19 正式试验某测点 1590 ~ 1800 s 时段时频分析结果

5 结论

本文提出基于激光多普勒原理的高温振动测量方法,以解决表面对激光反射强度极低的试件在持续高温环境下振动响应测量不准确的问题。阐述了此方法的原理,并从激光反射信号增强、时域响应数据后处理、激光测振仪热防护三个方面进行分析,通过实际试验证明了此方法的科学性和可靠性。未来武器装备飞行速度将进一步提高,研制试验中表面温度随之提高,为适应试验需求,后续将从反光涂层选材及制备工艺方面进一步研究,以适应更高温度试件表面激光反射率增强的需要,并提高反光涂层的制备效率,以缩短试验准备的周期;目前对于响应数据后处理仅是跟踪其一阶频率在试验中的变化情况,过程中若出现一阶频率附近频率数增加的情况则无法解释其原因,未来将对工作模态分析等方面展开深入研究,进一步挖掘响应数据更大的应用价值。

参考文献

- [1] 张晓蕾. 陶瓷基防隔热结构高温环境振动特性实验研究及模型修正[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
- [2] 张正平, 王宇宏, 朱曦全. 动力学综合环境试验技术现状和发展[J]. 装备环境工程, 2006, 3(4): 7-11.
- [3] 张治君, 成竹, 王琦, 等. 热振联合环境试验技术研究[J]. 实验力学, 2013, 28(4): 529-535.
- [4] 赵保平, 严超, 孟祥男, 等. 大型热环境试验技术的最新进展[J]. 装备环境工程, 2016, 13(5): 1-9.
- [5] 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.
- [6] 张鹏, 田春林, 丁蕴丰, 等. 适用于高温环境的激光合作目标反射性能测量[J]. 激光与光电子学进展, 2016(3): 109-113.

收稿日期: 2018-07-12; 修回日期: 2018-09-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(11172046)

作者简介

杨正玺(1991-), 男, 工程师, 2016年毕业于中国科学院大学, 获工学硕士学位; 之后工作于北京强度环境研究所。主要研究方向为结构动力学试验技术。

