

Application of Laser Vibration Instrument in Vibration Test Teaching

Shuyong Liu¹, Yongbao Liu¹, Jinfang Lu², Kai Chai^{3*}, Pan Su¹

¹College of Power Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan Hubei

²College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha Hunan

³College of Naval Architecture and Ocean, Naval University of Engineering, Wuhan Hubei

Email: lsydh@sina.com, *chaikai0805@163.com

Received: Oct. 3rd, 2019; accepted: Oct. 17th, 2019; published: Oct. 24th, 2019

Abstract

The application of a novel laser vibration tester in vibration monitoring experimental teaching is discussed. Firstly, the main characteristics and use occasions of the instrument are analyzed. Secondly, the experimental bench and experimental steps are designed. Thirdly, the different parameters under the condition of the test results are compared. Then, the time domain curve and the frequency domain characteristic curve of the vibrating body are obtained. Finally, the factors affecting the test results and the precautions are discussed, which lays a foundation for the application of laser vibration tester in engineering practice.

Keywords

Laser Vibration Instrument, Vibration Monitoring, Experimental Teaching

激光振动测试仪在振动测试教学中的应用

刘树勇¹, 刘永葆¹, 卢锦芳², 柴凯^{3*}, 苏攀¹

¹海军工程大学, 动力工程学院, 湖北 武汉

²湖南大学, 土木工程学院, 湖南 长沙

³海军工程大学, 舰船与海洋学院, 湖北 武汉

Email: lsydh@sina.com, *chaikai0805@163.com

收稿日期: 2019年10月3日; 录用日期: 2019年10月17日; 发布日期: 2019年10月24日

*通讯作者。

摘要

探讨了新型激光振动测试仪在振动监测实验教学中的应用,分析了仪器的工作原理和基本结构,给出了仪器的主要特点和使用场合,设计了实验台架和实验步骤,并比较了不同设置参数条件下的测试效果,得到了振动体的时域曲线和频域特征曲线;最后讨论了影响测试结果的因素以及注意事项,为激光振动测试仪在工程实际中的应用奠定基础。

关键词

激光振动测试仪, 振动监测, 实验教学

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

在机械设备振动测试过程中,通常采用振动加速度传感器测量设备的振动。通过对振动信号进行时域分析和频域分析,提取设备的时频特征,了解设备的运行状态和实现机械设备故障的精密诊断。文献[1][2]通过振动加速度传感器测试对齿轮进行了故障诊断,文献[3]研究了柴油机的振动加速度测试问题,并应用盲源分离技术识别振动信号产生的原因;文献[4][5]利用振动加速度信号对轴承进行故障诊断,取得了良好的效果。在扭转振动测试中,则需要采用应变式传感器进行测试,并通过应变大小来确定扭转振动的严重程度。文献[6]应用应变传感器测试了轴系的扭转振动。

然而在一些重要的振动测试过程中,传统的测试方法不能够满足基本测试要求。例如高温物体的振动如排气管的振动;高速旋转部分的振动,如汽轮机叶片的振动;高速旋转轴的振动;切割机高速旋转刀片的振动等。由于高温高速条件下,传统传感器已经不能可靠安装和正常工作,因而迫切需要新的振动测试仪器和测试方法来满足工程实际提出的新要求。激光振动测试仪[7][8]是一种非接触式测试仪,它能够满足苛刻条件下的振动测试,例如实现对高温设备表面、高速运转部件和轻薄结构(无附加质量的影响)的振动测试,不失为一种有效的振动测试方法。但一直以来,大多实验局限在以振动加速度为主要内容,忽略了对激光振动测试的教学研究。本文探讨了 PDV100 激光测振仪器在实验教学中的应用。

2. 仪器工作原理和基本结构

2.1. 激光工作原理

激光(Laser)是 Light Amplification by the Stimulated Emission of Radiation 首字母的简称。研究表明,当原子受到轰击时,如果入射光子能量满足一定要求,则使原子基态处于激发态。此时电子从低能级跃迁到高能级,如图 1(a)所示。激发态的原子不稳定,电子将跃迁到低能级,并释放一定频率的光子,如图 1(b)所示。如果能够持续激发原子,则能够得到某一频率的光子。

采用一组镜面如图 2 所示,其中 A 为 100%反射的镜面, B 为 95%反射的镜面。其曲率和距离尺寸满足激光产生的稳定性条件时,两个镜面形成一个共振腔。限制在轴向上运动的光子引起链式反应,不断地激发基态原子使其处于激发态,并不断地产生新的光子,这个过程周而复始,使得腔内的能量处于稳定状态。根据设计要求,将一部分光子导引出来,形成可以用于满足各种工程需要的激光。

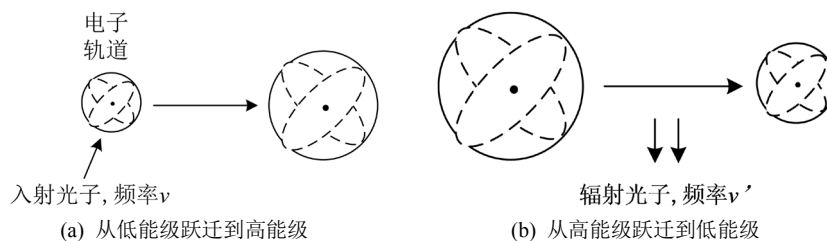


Figure 1. Electron transition in different energy level
图 1. 电子的能级跃迁

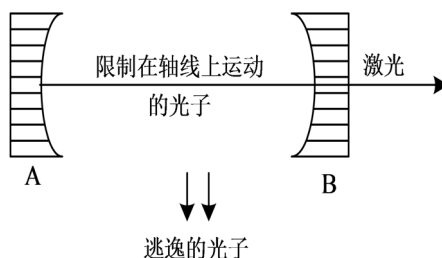


Figure 2. Resonant cavity of laser derivation
图 2. 产生激光的共振腔

理论研究表明，当共振腔的长度，即两个镜面之间的距离 d 为半波长的整数倍时，腔内产生共振。 $d = m \frac{\lambda}{2}, m \in Z$ ，因此，激光的频率为： $\nu = \frac{mc}{2d}$ 。 c 为光速。因此，理论上可以得到不同频率的激光，其大小是 $\frac{c}{2d}$ 的整数倍。如果光源发射的激光具有相同的相位，则形成相干光。激光的相干性与频率数成反比，而其相干性大小用相干波长来度量。当激光为多模态时，相干波长变短。相干性是激光测振时需要关注一个重要问题。便携式振动测试仪 PDV100 采用了氦氖混合气体反射管产生激光，其相干波长约为 30 cm。同时，激光系统输出功率处于第 I 级，即绝对安全级，不会对测试人员造成伤害。

2.2. 基于多普勒效应的激光测振

便携式振动测试仪 PDV100 利用 Doppler 效应进行测振。当声源 S 以一定速度运动时，声信号的传播频率将发生改变。如图 3 所示。当声源 S 以 U 的速度运动时，频率 f 会变成 $f + f_D$ 。

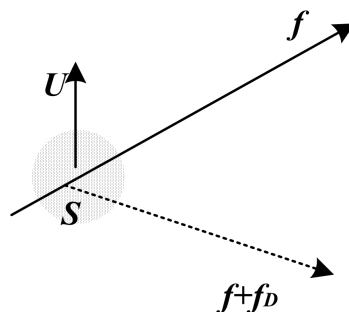


Figure 3. Doppler phenomenon of acoustic source
图 3. 多普勒现象

当频率 f 的激光作用在振动物体上时，假设振动速度 $v(t) = v_0 \sin \omega t$ ，因此，反射回的激光的频率会变成 $f + f_D$ 。如图 4 所示。

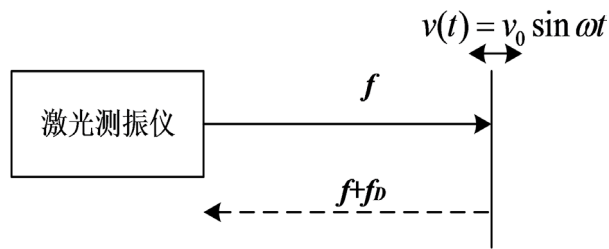


Figure 4. Doppler effect of vibration
图 4. 振动引起的 Doppler 效应

因此，只要测得 Doppler 频率 f_D ，就可以得到物体的振动速度。然而，由于激光的频率非常高，传统的方法无法对信号解调得到 Doppler 频率 f_D 。因此，需要采用光学拍频(Beating)技术，将两束光叠加在一起，从而实现信号的调制。如图所示，频率为 f 的信号和频率为 $f + f_D$ 的信号调制成 $2f + f_D$ 的信号，其中包络信号的频率为 f_D 。如图 5 所示。因此，通过解调可以得到信号频率 f_D 。

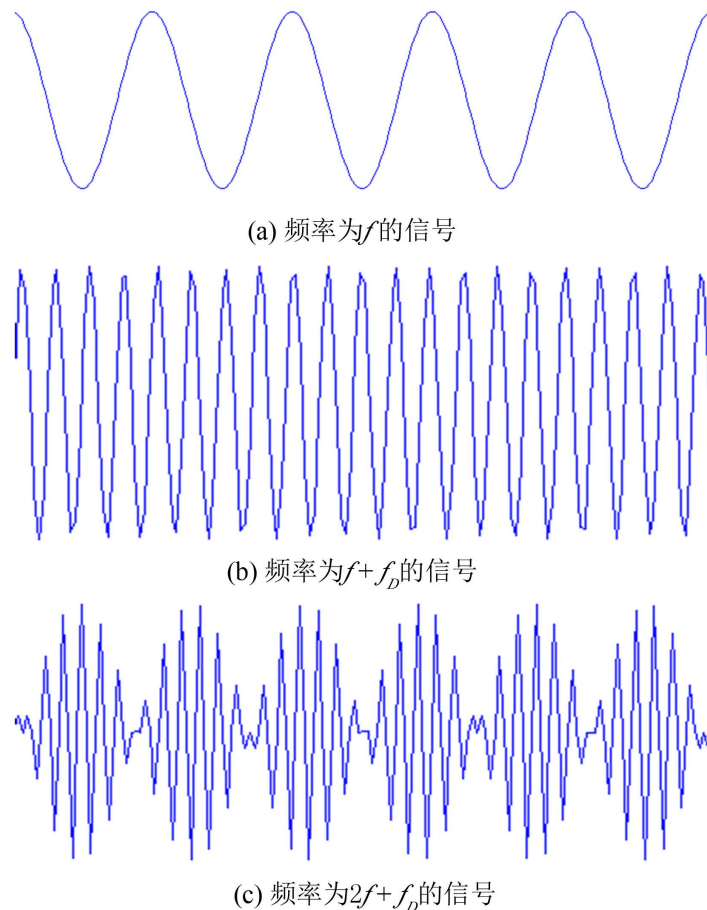


Figure 5. Process of signal modulation
图 5. 信号的调制过程

实际应用的光路图如图 6 所示。其中 f_R 为转盘的转频，对光学传感器采集到的信号进行信号处理后，就可以得到频率 $f_R + f_D$ ， $f_R - f_D$ 的分量，如图 7 所示，即可以得到 Doppler 频率 f_D ，进一步可以得到振动速度大小。

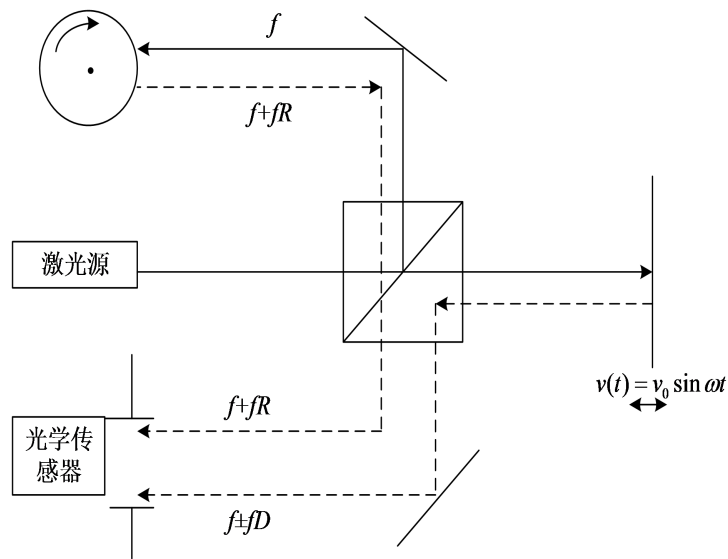


Figure 6. Diagram of laser signal of modulation
图 6. 信号调制处理光路图

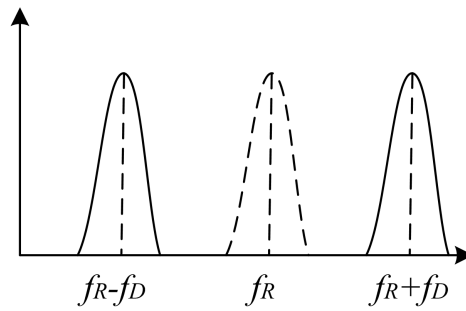


Figure 7. Demodulation to extract Doppler frequency
图 7. 解调得到的多普勒频率

3. 试验台架

实验的仪器如表 1 所示。主要包括激光振动测试仪、信号发生器、功率放大器、激振器、信号采集调理模块等。便携式激光测振仪 PDV100 的结构如图 8 所示。

Table 1. Experimental equipment
表 1. 实验设备列表

仪器名称	型号	数量
激光振动测试仪	PDV100	1
信号发生器	NTI	1
激振器	LDS	1
功率放大器	LAB300	1
测试振动管路		1
信号采集调理模块	VB-E-220	1



Figure 8. Laser vibration test instrument
图 8. 激光振动测试仪

该测试设备的主要特点是：结构紧凑，工作性能稳定；激光输出功率处于安全范围；调整和使用方法简洁方便，可以用电池供电，便于现场检测使用；测试精度高。软件界面友好，容易操作。通常用来测试旋转部件和非旋转部件的振动。如图 9 所示。特别适用于：高温(hot)、轻薄结构(light)、高速旋转(rotate)、大冲击振动(impact)设备的振动测试。

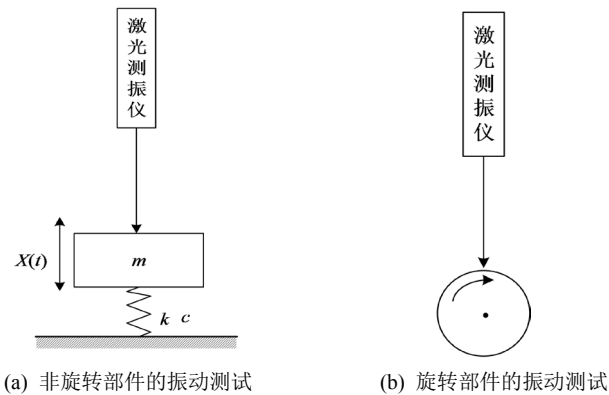


Figure 9. The application of the PDV100
图 9. 便携式激光测振仪 PDV100 应用场合示意图

本文所测试的对象为薄壁 PVC 材料管路。通过图 10 实验测试，了解其在不同频率下的振动传播特征。



Figure 10. The auxillary instruments in the experiment
图 10. 测试所用辅助仪器

实验台如图 11 所示。激振器安装在管路的一端，另一端固定在支架上。通过不同的频率，可以测试出在不同测点的振动响应，从而了解振动的传播情况。



Figure 11. The rig of the pipe vibration
图 11. 管道振动测试实验装置

激光振动仪的参数设置如表 2 所示，管路的参数如表 3 所示。

Table 2. Laser vibrometer parameter setup

表 2. 仪器参数设置列表

名称	符号	数值	单位
振动速度范围	VELO	100	mm/s
低通滤波器截止频率	LP	1	kHz
高通滤波器	HP	No	No
采样频率	f_s	48	kHz
采集时间长度	t	300	ms
频率分析线数	NI	6400	
测试频率带宽	f_w	20	kHz

Table 3. Parameter of pipeline system

表 3. 管路参数列表

名称	符号	数值	单位
长度	L	1000	mm
外部直径	D	71	mm
管壁厚	H	3	mm
测点 1(距激振点的距离)	P1	100	mm
测点 2	P2	300	mm
测点 3	P3	500	mm
测点 4	P4	700	mm

4. 实验步骤

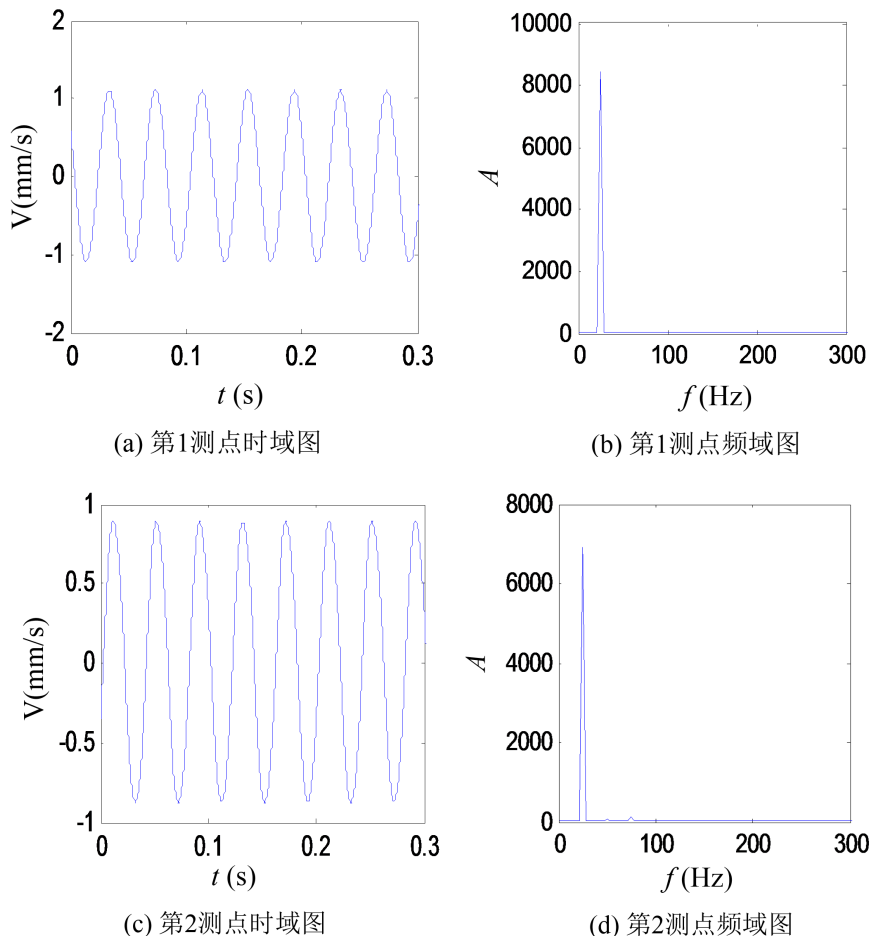
实验过程中，仪器操作的具体步骤如下：

a) 将激光测试仪安装在三脚支架上，连接仪器和调理模块，通过数据线将调理模块与电脑连接；检查检定证书在有效期内；

- b) 接通仪器电源，打开测试软件；
- c) 调整激光挡板，并将激光聚焦在被测物体表面的反光带上；
- d) 设置仪器的参数，主要包括滤波器的设置(低通滤波和高通滤波两种)和测试量程(20 mm/s, 100 mm/s, 500 mm/s)；
- e) 调整激光测试仪和被测对象之间的距离，根据显示屏上信号区的尺度判断距离选择是否合适，距离合适则信号区的尺度大；
- f) 调整信号发生器的频率，驱动振动台工作；调整功率放大器，改变得振动台的振动幅值；
- g) 通过振动测试软件，观察时域波形和频域波形；调整采样频率和采样时间，再次观察振动信号曲线，采集数据并保存。

5. 实验结果

在 25 Hz 的激励频率下，第 1~5 测点的振动响应曲线如图 12 所示；振动速度最大幅值分别为：1.1087 m/s, 0.8945 m/s, 0.6328 m/s, 0.3756 m/s, 0.0966m/s，这说明该频率的振动沿着管路迅速衰减，衰减曲线如图 12(f)所示。如果将激振器的位置看作是管道泄漏点产生的振动，则表明管路当距离泄漏点一定距离时，管路的振动将衰减为零，因此检测点的位置需要通过振动测试来确定。如果将激振器的位置看作是无损检测的导波发射点，则表明该管路对 25 Hz 频率导波具有很大的衰减效果，需要采取调整频率的方法来改善导波检测距离。



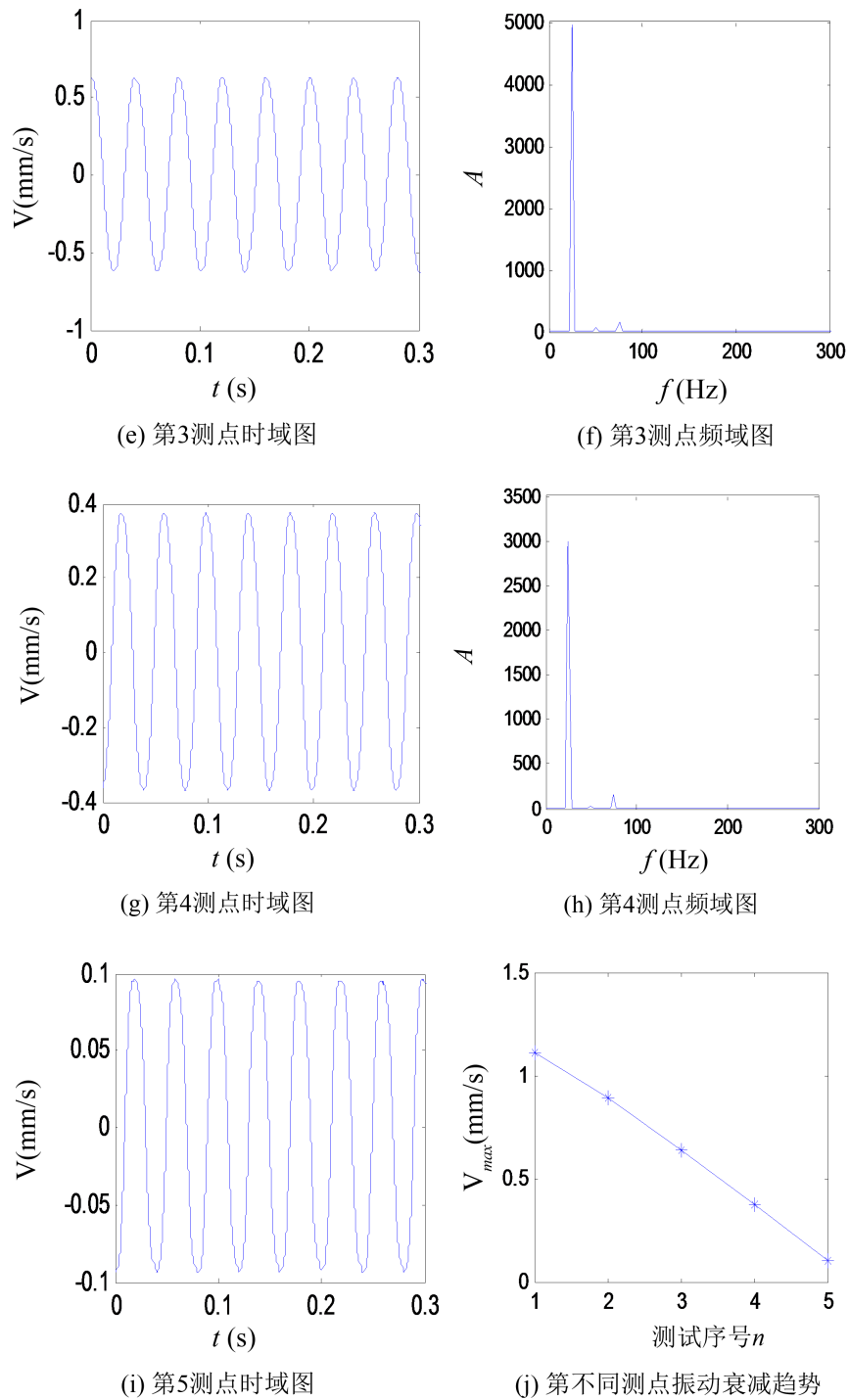


Figure 12. Vibration response analysis

图 12. 振动响应分析

测试过程注意事项：测试距离应该为共振腔长度的整数倍；根据 PDV100 的技术规格书，最佳距离为： $dis = 96\text{mm} + (k.l)\text{mm}$, $k = 0, 1, 2, \dots$ ； l 为共振腔的长度， $l = 138\text{mm}$ 。因此，最佳距离为 96, 234, 372, 510 (mm)…。同时，反光带的光滑性影响也很明显，采用光滑白色反光带时，测试效果好，而采用黑色反光带时，有明显的噪声干扰，如图 13 所示。

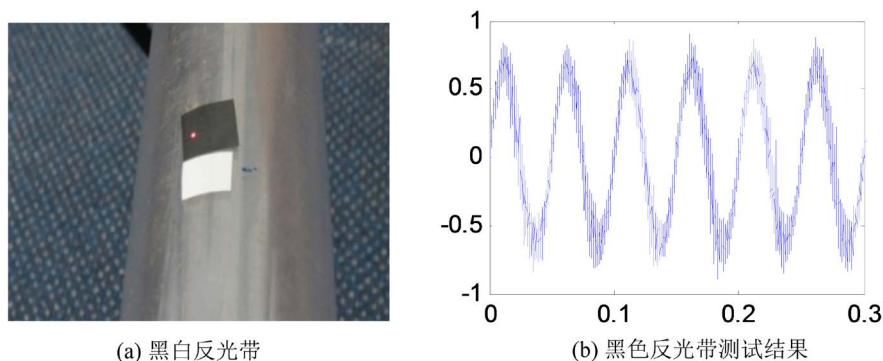


Figure 13. Influence of reflective tape
图 13. 不同反光带的影响

6. 结语

本文系统分析了便携式激光振动测试仪的工作原理，设备结构特征。由于激光测试仪是非接触式测试设备，因而特别适应于传统测试方法不能有效工作的场合，如高温、高速运转以及不便于传感器安装等情况。在使用过程中，通过硬件参数设置，可以使其处于满足不同测试要求。信号分析软件界面友好，能够分析数据的时域和频域特征。为了验证该仪器的有效性，设计了薄壁管道振动测试实验，给出了实验步骤、实验测试数据图形和分析了测试的影响因素。为工程测试专业的学生在工程实际应用奠定了良好的基础。

基金项目

国家自然科学基金(51579253, 51679245)。

参考文献

- [1] 肖涵, 吕勇, 王涛. 齿轮振动信号的去趋势波动分析及其在故障分类中的应用[J]. 振动工程学报, 2015(2): 331-336.
- [2] 孙福兆. 机械传动设备齿轮箱振动频率过高检测方法[J]. 计算机测量与控制, 2014(1): 66-84.
- [3] 韩春杨, 姚国凤, 赵建. 柴油机振动信号盲分离组合算法[J]. 振动与冲击, 2014(6): 44-52.
- [4] 孙斌, 梁超, 尚达. 基于递归复杂网络的滚动轴承故障诊断[J]. 振动、测试与诊断, 2015(3): 578-584.
- [5] 马宏伟, 王增强, 陶美华. 轴承振动信号特征提取及故障诊断研究[J]. 煤矿机械, 2014, 35(7): 278-280.
- [6] 周国强, 甘少炜, 雷伟, 等. 应变测量在轴系扭转振动测试中的应用[J]. 船海工程, 2014(2): 165-172.
- [7] 桑波, 赵宏, 谭玉山. 激光多普勒扭转振动测试技术的研究[J]. 中国激光, 2003, 30(8): 743-746.
- [8] 骆德渊, 任雅萍. 双频激光多普勒扭转振动测试仪的研究[J]. 激光与红外, 1999(1): 19-20.