

A Three-Dimensional Vibration Measuring System Based on LabVIEW and Laser Doppler Vibrometer

Kang Chen, Gang Ye, Shizhao Chen, Yunfeng Song, Shenfeng Zhang

The Ningbo Sunny Advanced Instrument CO. LTD., Ningbo Zhejiang
Email: kchen@sunnyoptical.com

Received: Aug. 7th, 2015; accepted: Aug. 23rd, 2015; published: Aug. 28th, 2015

Copyright © 2015 by authors 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

Abstract

The equipment can measure the vibrator's three-dimensional vibration information, which has been developed based on the LabVIEW software development tools and Laser Doppler Vibrometer (LDV). It mainly includes hardware system that contains five LDVs, data acquisition system and software system. In the experiment, the hardware system and data acquisition system get the five channel vibration data which are used for converting to the three-dimensional vibration information (the time-domain data of X axis, Y axis and Z axis) by software system. With these data, we can also get the power spectrum, cross-power spectrum and so on. The equipment can accurately measure the vibration data in a non-contact way, which can be used to analyze the state of the vibrator.

Keywords

LabVIEW, LDV, Vibrate, Frequency

基于LabVIEW和激光测振仪的三维振动测量系统

陈康, 叶岗, 陈士钊, 宋云峰, 张深逢

宁波舜宇智能测量仪器有限公司, 浙江 宁波

Email: kchen@sunnyoptical.com

收稿日期: 2015年8月7日; 录用日期: 2015年8月23日; 发布日期: 2015年8月28日

摘要

基于LabVIEW软件开发工具和激光多普勒测振仪, 开发了一套能够测量物体三维振动信息的系统。该系统主要由五台单维激光测振仪组成的硬件系统、数据采集卡以及软件系统组成。软件系统利用硬件系统和数据采集系统提取的五路振动数据, 通过算法最终转化成物体空间三维振动信息(X、Y和Z三个方向的时域信息), 对时域信息进行分析, 最终可以得到物体振动的频谱信息、自功率谱、互功率谱等。该系统采用非接触的方式, 可以准确测量出物体在空间中的三维振动信息, 通过这些信息, 可以准确判断物体的振动状态。

关键词

LabVIEW, 激光多普勒测振仪, 振动, 频率

1. 引言

振动, 与人类的生产生活息息相关, 直接影响生活的品质和生产的质量。比如: 空调在工作时外机的振动直接影响噪音的大小, 车辆行驶时的振动直接影响驾驶性能与乘坐的舒适度, 旋转机械的振动直接反映设备运转的状态, 机械加工设备的振动直接影响到加工的精度与有效性, 等等[1] [2]。随着技术的发展, 特别是人们对生产生活的要求越来越高以及设备朝着大型化、高速化的发展, 振动带来的问题越来越突出。为解决这些问题, 对振动的测试方法和信号的分析技术提出了更高的要求, 比如测量精度高、灵敏度高和测量范围宽等等。现在的振动测量方法主要有机械法、电测法和光学法三种。但是, 机械法测试时, 由测试装置会给工件加上一定的负荷, 直接影响测试结果, 只适用于低频大振幅的振动测量; 电测法的灵敏度高、频率范围宽, 但易受到电磁场的干扰; 光学法的测量精度高, 测量范围广, 采用非接触的方式, 在精密测量、传感器以及测振仪的标定中得到广泛的应用[3]-[6]。

针对以上的问题和各测量方法的优缺点, 本文提出了一套三维振动测量系统, 其采用激光干涉原理和激光多普勒原理的光学法制作的系统, 不仅测量精度和灵敏度高, 而且能够测量被测物的空间三维振动信息。本文阐述了该系统的硬件和软件部分, 对该系统的原理进行了详细的描述。

2. 系统

三维振动测量系统框架如图 1 所示: 它由硬件系统、数据采集板卡和软件系统组成。硬件系统由 5 台单维的激光多普勒测振仪(Laser Doppler Vibrometer, 简称 LDV)构成, 其作用是提取被测物体的振动信息, 并转化为电信号; 数据采集板卡采集 LDV 输出的电信号, 并将其传输到软件系统中; 软件系统得到振动数据, 进行实时处理和分析, 得到各振动指标和曲线图, 充分分析物体的振动状态。

2.1. 硬件系统

如图 1 所示, 硬件系统由 5 台相同的单维 LDV (型号为 LV-S01, 舜宇智能测量仪器有限公司)组成, 每台 LDV 独立运行, 都包含光学头和控制箱两部分。

光学头的工作原理如图 2 所示: 光学头内的 He-Ne 激光器发出的偏振光(设频率为 F_0)由分光镜分成

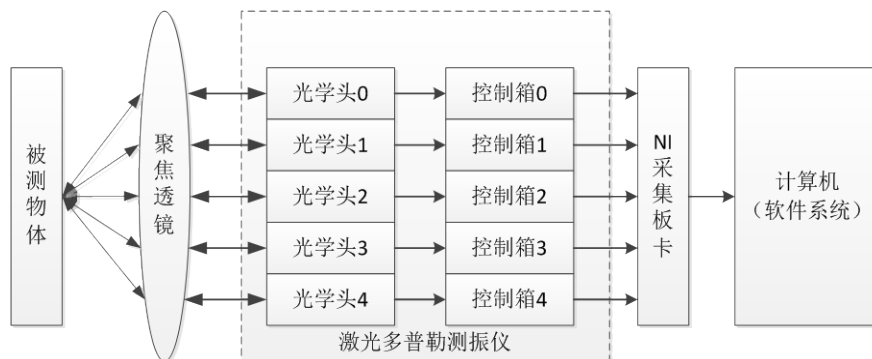


Figure 1. The system frame of the three-dimensional vibration measuring equipment

图 1. 三维振动测量系统框架图

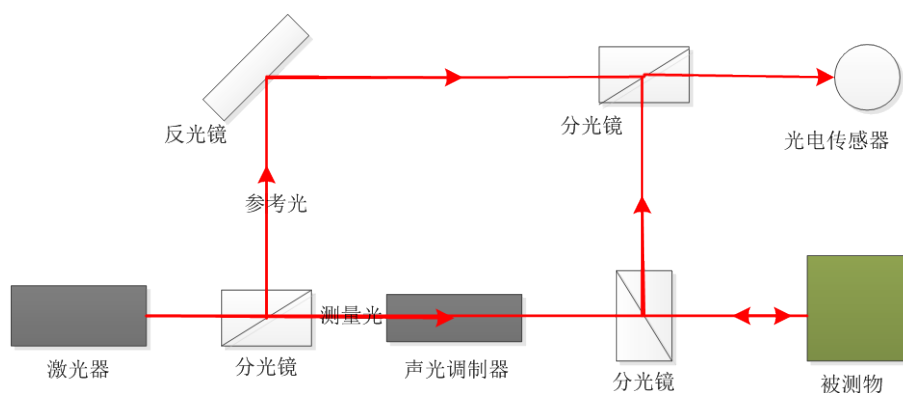


Figure 2. The working principle of the optical components

图 2. 光学头工作原理图

两路，一路作为测量，一路用于参考。测量光通过声光调制器后具有一定频移(F)，再被聚焦到被测物体表面，物体振动引起多普勒频移($f=2v/\lambda$)。系统收集反射光并与参考光汇聚在传感器上，这样两束光在传感器表面产生干涉，干涉信号的频率为 $F+f$ ，携带了被测物体的振动信息。控制箱中的信号处理单元剥离出频移信号，并将其转换为速度、位移等振动信号，经过信号调理板卡，最终将被测物体的振动信息以电信号的方式输出。

五台单维 LDV 的光学头按照图 3 示意的空间位置摆放，并且五束激光通过聚焦透镜聚焦在被测物的测试点上。光学头 3 和光学头 4 到光学头 0 的距离相等，三者所在的直线定义为空间 X 轴方向，则光学头 3 和 4 发出的激光经过聚焦透镜后与光学头 0 发出的激光的夹角相等，记为 $\theta_{43-44}/2$ 。同理，光学头 1 和光学头 2 到光学头 0 的距离相等，三者所在的直线定义为空间 Y 轴方向，则光学头 1 和 2 发出的激光经过聚焦透镜后与光学头 0 发出的激光的夹角相等，记为 $\theta_{41-42}/2$ 。同时，在机械结构上保证五个光学头发出的激光与 Z 轴平行。实物如图 4 所示，包含光学头柜和控制箱柜，五个光学头按照要求安装在光学头柜中，五个控制箱摆放在控制箱柜里。

测试前，由公式(1)和公式(2) [7]可以计算得出光学头 1 和光学头 2 发出的两束激光的夹角 θ_{41-42} 以及光学头 3 和光学头 4 发出的两束激光的夹角 θ_{43-44} 的大小。其中，五台单维 LDV 各自测得的振动信息(以速度为例)分别记为 V_{40} 、 V_{41} 、 V_{42} 、 V_{43} 和 V_{44} 。

$$\theta_{41-42} = 2 \arccos \left(\frac{v_{41} + v_{42}}{v_{40}} \right) \quad (1)$$

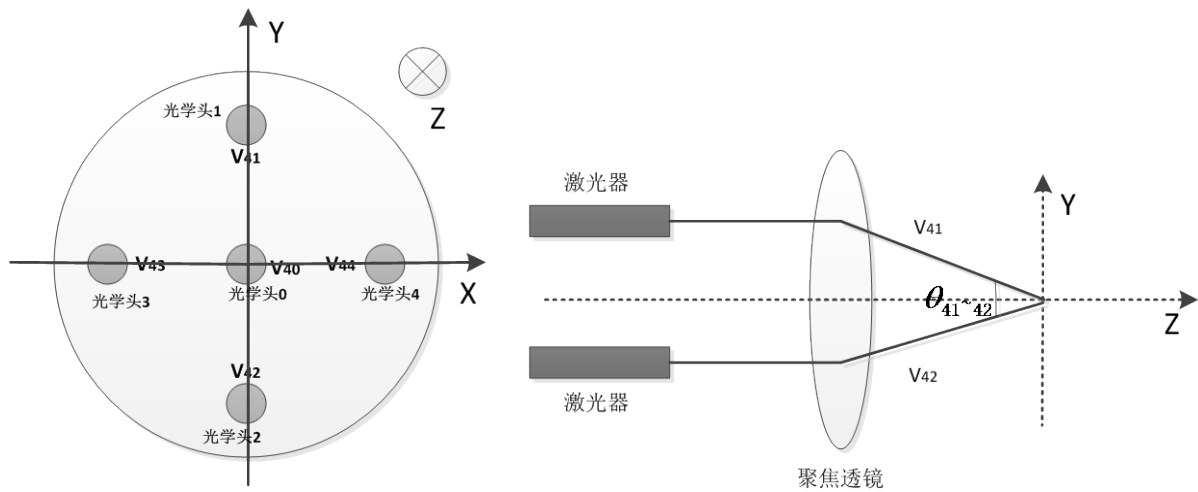


Figure 3. The spatial locations of the five laser beam
图 3. 五束激光空间位置图

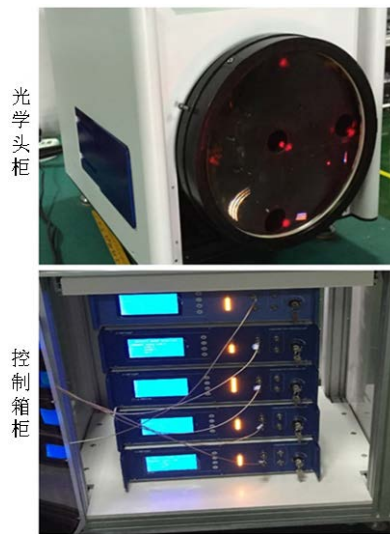


Figure 4. The hardware picture
图 4. 硬件实物图

$$\theta_{43-44} = 2 \arccos \left(\frac{v_{43} + v_{44}}{v_{40}} \right) \quad (2)$$

测试时，根据由上述两公式得到的 θ_{41-42} 和 θ_{43-44} 和五台单维 LDV 测得的振动数据(以速度为例)，由公式(3)、公式(4)和公式(5) [7]可以得到被测点的空间三维振动信息 v_x 、 v_y 和 v_z ：

$$v_x = \frac{v_{44} - v_{43}}{2 \sin(\theta_{43-44}/2)} \quad (3)$$

$$v_y = \frac{v_{42} - v_{41}}{2 \sin(\theta_{41-42}/2)} \quad (4)$$

$$v_z = v_{40} \quad (5)$$

由上所述可知，五个光学头的位置必须按照图 3 所示的空间位置摆放，并且在机械结构上按照要求

固定。若光学头 3、光学头 4 和光学头 0 (或者光学头 1、光学头 2 和光学头 0)不在同一直线上, 或者光学头 3 和光学头 4 到光学头 0 的距离不相等, 直接影响 θ_{43-44} 和 θ_{41-42} 的大小, 从而影响测量数据的准确性。

2.2. 数据采集卡

数据采集卡选用 NI 公司的 USB-6366 数据采集, 如图 5 所示, 其包含 8 个分辨率为 16 位的模拟输入通道, 最高采样率达到 2 MS/s, 测量范围为 $-10\text{ V}\sim+10\text{ V}$, 并且提供 OEM、BNC 和 mass 接线端三种硬件接口。

2.3. 软件系统

振动测量软件是一款采用图形化编程语言——LabVIEW 编写[8]的集数据采集和数据分析一体的多功能软件, 包含数据采集, 数据转化, 信号处理、数据分析和测试结果显示、结果保存等功能模块。数据采集模块主要实现对采集板卡的采集设置、开始采集、停止采集等控制; 数据转化模块主要是将五路 LDV 输出的信号通过算法转化为物体空间三维的振动信号(X\Y\Z 三分量振动信号); 信号处理模块主要包含滤波(高通、低通、带通和带阻)和加窗(矩形窗、汉宁窗和平顶窗等)功能; 数据分析模块主要包含自功率、互功率、小波分析和功率谱密度等分析功能; 结果显示模块主要可以将测试结果以时域、频域、瀑布图、三维模拟显示、伯德图以及极坐标等方式显示出来; 数据保存模块可以将测试结果的原始数据、显示波形保存在指定的路径下。软件的主界面如图 6 所示:

软件的流程见图 7 所示: 在硬件连接正确的前提下, 启动软件, 首先需要对采集参数进行设置, 比如采样率、采样数和标定值等, 设置结束后, 点击运行按钮, 程序自动进行采集、信号转化、数据分析和显示等功能, 如果需要对信号进行处理, 还可以设置滤波器和加窗等操作; 如果需要将测试结果保存下来, 则可以点击“保存数据”按钮, 程序自动将当前的测试数据保存在 TDMS 格式文件中, 或者以 UFF 格式文件输出测试结果。

3. 试验

利用该系统测试振动台(型号为 JX-3B, 北京测振仪器厂)的振动信息, 调整振动台的位置, 利用工装使振动台的实际振动方向与各空间平面(坐标系与五束光的空间坐标系一致)成 45° 夹角, 并且五束激光汇聚在振动轴的一点上, 保证被测物体在 X\Y\Z 三个方向上的分量都最大。通过设置振动台的振动频率和幅值参数, 测试系统能够得到振动台不同振动参数下的空间振动信息。如下面两图所示: 图 8 和图 9 分别是测试系统(采样率为 4096 Hz, 采样数为 2048)在振动台的振动频率为 160 Hz、振幅为 35 mm/s 条件下测得的时域波形和频谱波形, 此时 X\Y\Z 三个方向上的分量理论值为 20.21 mm/s (实际振动方向与 X\Y\Z 三个方向的夹角为 $\arccos\sqrt{3}/3$), 即有效值为 14.29 mm/s。由两图可以看出, X\Y\Z 三个方向上的振动信号(速度)为正弦波, 而且基本无杂波。若信号中带有干扰信号, 可以利用滤波器将干扰信号剔除。



Figure 5. The picture of the USB-6366 product
图 5. USB-6366 产品图

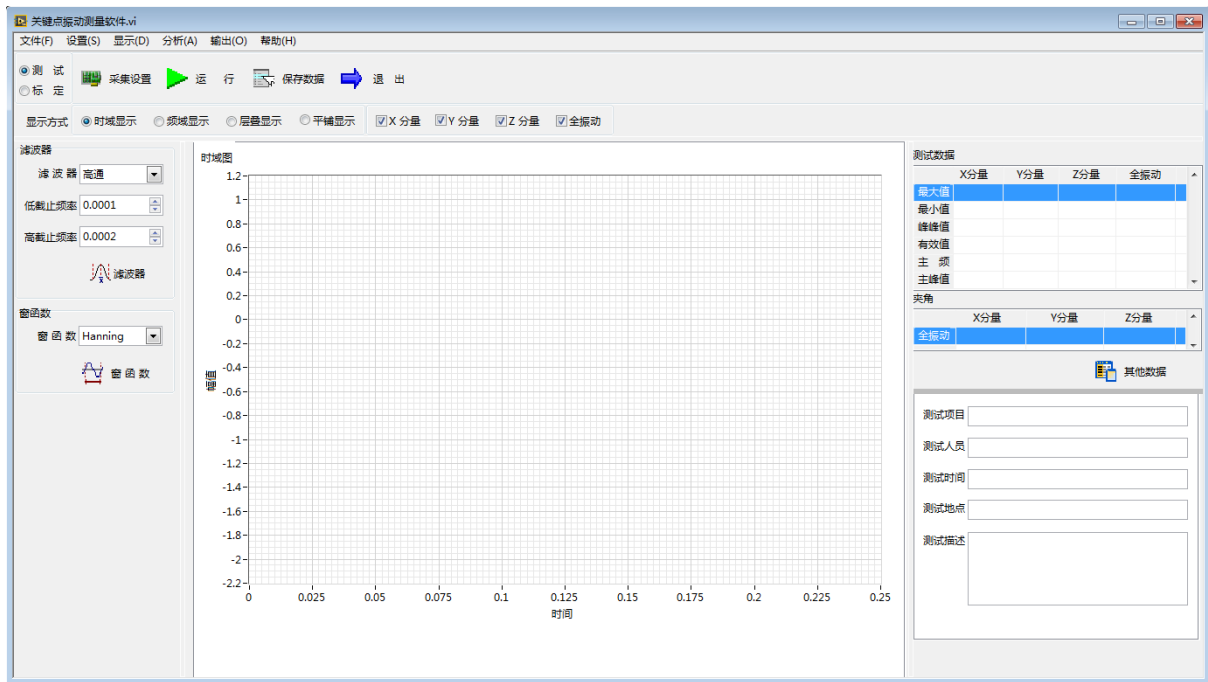


Figure 6. The main interface of the software

图 6. 软件主界面

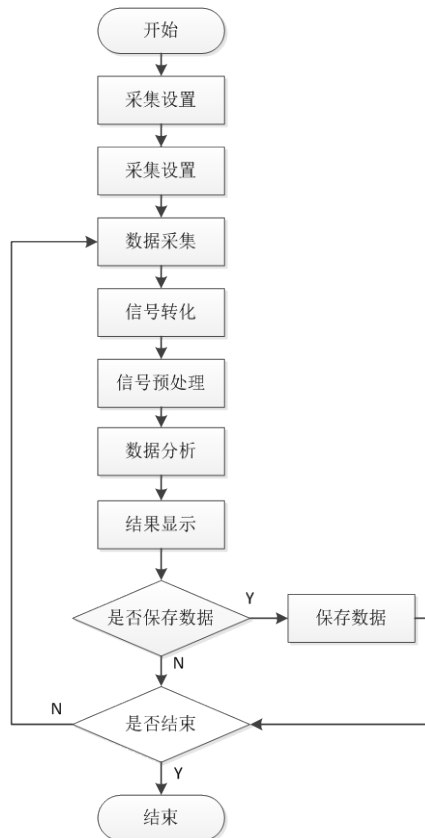


Figure 7. The flow chart of software

图 7. 软件流程图

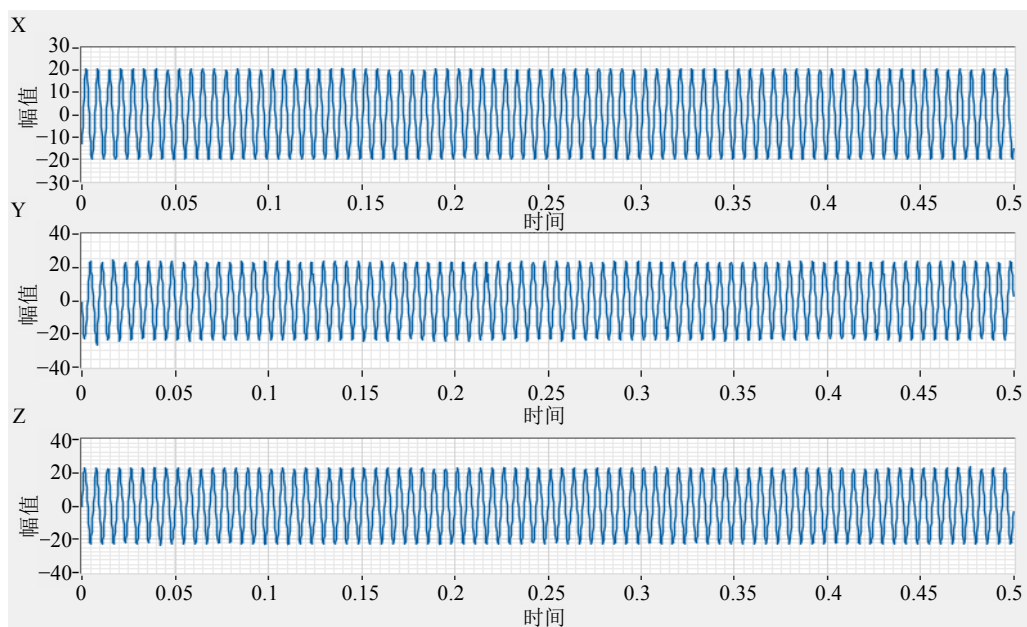


Figure 8. The time domain graph

图 8. 时域图形

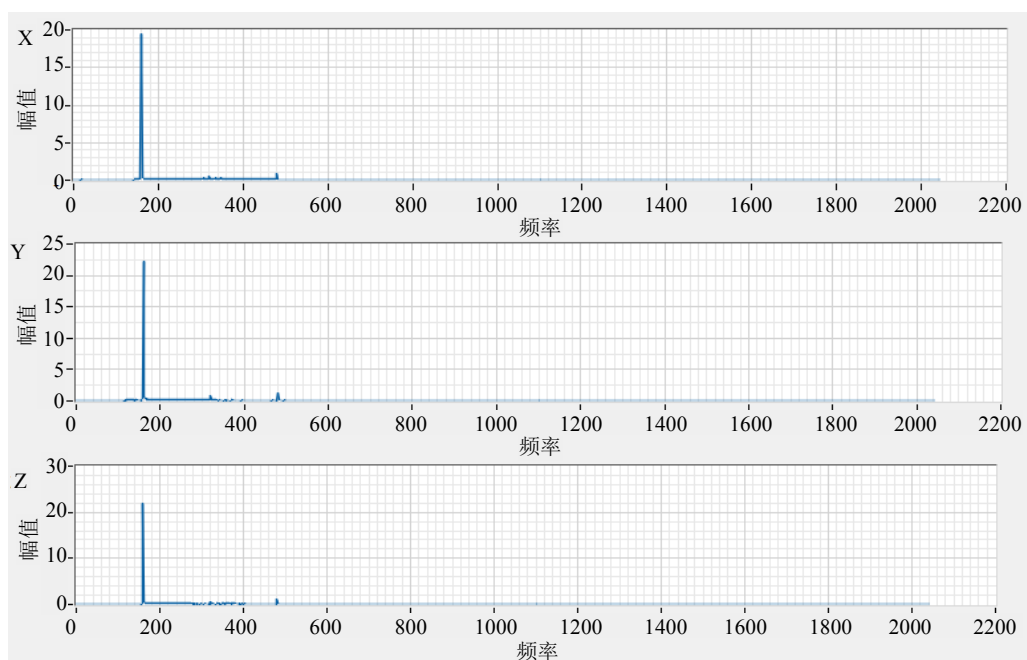


Figure 9. Frequency domain graph

图 9. 频域图形

从测试软件中可以直接读出各方向振动指标值，例如幅值、峰峰值、主频、主频幅值等等。表 1 为实测值和理论值得比较表格，以幅值(速度，单位为 mm/s)和主频(单位为 Hz)为例。从表格中可以看出，主频的误差比较小，幅值的误差都在 5%以内。通过分析，影响幅值大小的因素主要有以下几点：1) 振动台的输出误差在 10%左右；2) 系统本身具有误差；3) 环境等不确定因数给测量带来的误差等等。所以，从表格中可以看出，该系统测得的数据比较准确。

Table 1. The compared table of the measured value and theoretical value

表 1. 实测值与理论值比较表

	理论幅值	理论频率	实测幅值	实测频率	幅值误差	频率误差
X 方向	14.29	160	14.25	160.03	-0.28%	0.02%
Y 方向	14.29	160	14.76	160.05	3.29%	0.03%
Z 方向	14.29	160	14.62	160.01	2.31%	0.01%

注: 误差 = (实测值-理论值) ÷ 理论值

4. 结论

本文基于 LabVIEW 和激光测振仪, 利用激光干涉原理和激光多普勒原理, 制作了一套三维振动测量系统, 该系统能够测量物体的空间三维振动信息, 包括时域和频域信息、频谱信息、自功率谱、互功率谱等等, 并能自动保存测试结果, 为后续的模式分析和故障诊断提供数据。该系统具有测量准确、测量范围宽、采用非接触的方式进行测量等优点, 具有较好的应用前景与价值。

基金项目

跨尺度三维光电振动测量仪的开发和应用, 国家重大仪器专项, 2013YQ470765。

参考文献 (References)

- [1] 纪国宜, 赵淳生 (2010) 振动测试和分析技术综述. *机械制造自动化*, **3**, 1-5.
- [2] 江东 (2011) 基于磁悬浮效应的振动测试系统. 哈尔滨理工大学, 哈尔滨.
- [3] 孙立明 (2004) 振动测试技术. 郑州大学出版社, 郑州, 3-17.
- [4] Rembe, C., Kowarsch, R. and Ochs, W. (2014) Optical three-dimensional vibrometer microscope with picometer-resolution in x, y, and z. *Optical Engineering*, **53**, 1-6.
- [5] 张莲莲 (2013) 激光测振方法在振动试验中的应用. *科技传播*, **12**, 113-114.
- [6] 何正嘉, 陈进, 王太永, 褚福磊 (2010) 机械故障诊断理论及应用. 高等教育出版社, 北京, 1-9.
- [7] 叶岗 (2014) 一种多维激光测振仪及其测量方法. 中国专利: 201410425812.0, M2014.
- [8] 陈树学, 刘萱 (2014) LabVIEW 宝典. 电子工业出版社, 北京, 1-2.