

基于激光多普勒效应的地面设备振动监测系统

冯庆奇, 刘 刚, 周明熙, 冯 超

(中国人民解放军 63600 部队, 甘肃 酒泉 732750)

摘 要: 对常见的几种振动监测方法进行了比较, 阐述了激光多普勒技术用于振动监测的基本原理, 设计了并研发了用于发射场小型地面设备振动监测的激光多普勒测振仪。以高精度 PDV100 型测振仪为对比, 并模拟小型地面设备低频、中频、高频的振动特性, 重点测量了其频率、振幅两个特征参数。实验结果表明, 自研测振仪对振动频率测量值的相对误差能够控制在 0.4% 以内, 对振幅的测量能够达到 $1\ \mu\text{m}$ 量级, 满足发射场小型地面设备振动监测的需求。

关键词: 激光多普勒; 发射场; 地面设备; PDV100; 振动监测

中图分类号: TN249 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)07-2008-06

Land-based facilities vibration monitoring system based on laser Doppler effect

Feng Qingqi, Liu Gang, Zhou Mingxi, Feng Chao

(PLA 63600 Troop, Jiuquan 732750, China)

Abstract: Several vibration monitoring methods were compared. The basic principle of laser Doppler vibration monitoring was elaborated. A new kind of laser Doppler vibration monitoring system(LDVMS) that used for the small-size land-based facilities of launch site was designed. High precision PDV100-type LDVMS was used in the experiment. The electrodynamic loudspeaker, which was selected to simulate the frequency character of the small-size land-based facilities of launch site, its amplitude and vibration frequency were investigated as two important characteristic parameters. The analysis of experiment results show that the relative error of the vibration frequency is less than 0.4%, the amplitude can reach $1\ \mu\text{m}$ order of magnitude. The character of the designed LDVMS satisfies the need of launch site.

Key words: laser Doppler; launch site; land-based facilities; PDV100; vibration monitoring

收稿日期: 2014-11-26; 修订日期: 2014-12-15

基金项目: 63600 部队科研预备金项目

作者简介: 冯庆奇(1984-), 男, 硕士, 主要从事自动控制、光电检测等方面的研究。Email: fengtsingtsi@163.com

0 引言

随着航天任务、武器任务的不断开展,以及在任务过程中对地面设备认知的逐步深入,科研人员发现对地面设备在工作过程中的状态监测显得越来越重要。地面设备的振动信号是设备状态信息的载体,它蕴含了丰富的地面设备正常工作或存在故障的信息。部分地面设备在工作过程中产生有害振动,直接威胁设备自身的工作性能,给航天发射场所承担各类任务的圆满完成带来很大安全隐患。

以振动监测技术为基础,对工作中的地面设备进行监测,若发现设备的振动状态与平时工作时相差较大,为提高设备运行可靠性,可进行安全隐患排查、检修检测等工作^[1]。这对于预防和减少恶性事故的发生、消除故障隐患、保障人身和设备安全,及发射场所承担的各项试验任务具有重要意义;同时,采用该技术,若能够提前发现地面设备的故障隐患,在设备出大故障之前进行预知维修,则能够节省大量的设备维修费用,取得显著的经济效益。目前,发射场对部分机电设备、大型地面设备在特殊时段内的振动监测尚缺乏有效技术手段,迫切的需要一种新技术、新手段对地面设备的振动状态进行实时监测。

1 几种振动监测方法的比较

1.1 有线测量技术

采用有线测量的方式对需要监测的设备进行无人值守振动数据采集,是目前较为常见的一种方法。但采用该技术硬件成本非常高,每次测试实测数据较少,同时对需要测量的设备进行人工布线、安装大量传感器等工作,耗时耗力。此外,每次火箭的发射都会对设备都有一定程度的损害,有线测量装置维护保养难度大、成本高。

1.2 超声波监测技术

超声波振动监测技术,用其进行地面设备远程振动监测属于非接触式振动测量,但从原理上来讲,超声波的传播速度为声速,较远距离测量时,实时性较差;此外,超声波的波长为厘米或者毫米量级,用于测量厘米级或毫米级的振动时误差较大。发射场在采取该技术时,未能取得预期效果。

1.3 激光多普勒振动监测技术

激光多普勒振动监测技术是一种明显优于以上两种振动监测手段的方法,该技术能够对各类地面设备进行远程非接触式无损振动监测,具有与被测设备无接触、频率监测范围广、测量精度高、动态响应快、方向灵敏度高等优点^[2],主要体现在:采用该技术,根据所选用的激光器,可以从比较近到比较远的距离对被测目标进行振动监测;理论上,该技术对被测目标振动频率的监测范围能达到0~50 kHz之间,测量误差能够控制在0.5%以内,对振动幅度的测量能够达到0.1 μm 量级^[3],可以满足发射场地面设备振动状态监测的需求;由于激光束聚焦在很小的区域内,因此采用激光多普勒技术可以对小目标的振动状态进行监测;工作过程中,被测振动信息以光速进行传播,采用性能较好的信号处理系统,可以对振动状态实时测量;如果在光路中加入频移装置,就可以方便地辨别振动的方向、进行多维测量,具有良好的方向灵敏度。

2 激光多普勒振动监测的基本原理

2.1 基本原理

激光多普勒技术是一种利用运动粒子散射光的多普勒频移来获得速度、振动等信息的激光技术。将一束光入射到振动的待测物体表面,根据多普勒效应可知,散射光的频率相对于入射光发生一个频移,该频移就是多普勒频率。

图1为多普勒效应的分析模型,其中信号光是入射光经运动粒子散射,沿原方向返回的散射光。光源S发出频率为 f_0 的一束光 W_1 ,入射到运动粒子P上,光检测器D接收运动粒子P点的散射光,其中光

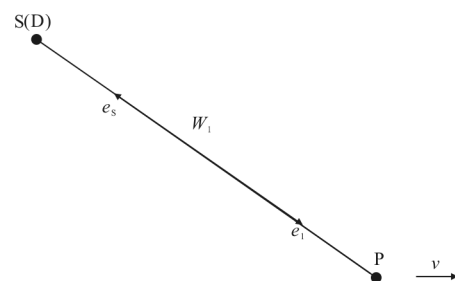


图1 光源、运动粒子和光检测器的相对位置

Fig.1 Relative position of light source, moving particle and photodetector

源 S 和光检测器 D 固定不动,且位置重合。图中 v 表示运动粒子 P 的速度矢量, e_1 代表光束 W_1 方向上的单位矢量,而 e_s 表示由运动粒子 P 到光检测器 D 方向上的单位矢量。

散射光多普勒频率为 $f_D = \frac{v(e_1 - e_s)}{\lambda}$, 其中 λ 为光源 S 点发出的激光的波长。模型中,由于信号光的方向与入射光的方向恰好相反,即 $e_s = -e_1$ 。因此多普勒频率为:

$$f_D = \frac{v(e_1 - e_s)}{\lambda} = 2 \frac{ve_1}{\lambda} \quad (1)$$

因此,通过对散射信号的多普勒频率进行测量,就可以根据公式(1)计算出运动粒子 P 的运动速度,从而进一步分析得到待测振动物体的频率、幅度等相关特性^[4-8],这就是激光多普勒测振的基本原理。

2.2 多普勒频率的获得

假定包含被测信息的信号光束与用于外差的参考光束的光场为轴对称分布,同方向到达且偏振方向相同,则时刻 t 两束光光场的电场分布分别为:

$$\begin{aligned} e_S(r,t) &= E_S(r) \cos(2\pi f_S t + \varphi_S) \\ e_R(r,t) &= E_R(r) \cos(2\pi f_R t + \varphi_R) \end{aligned} \quad (2)$$

式中: E_S 、 E_R 分别表示为两光束在探测器光敏面上电场的振幅; f_S 、 f_R 分别为两光束的频率; φ_S 、 φ_R 分别为初相位; r 为光场中考察点到光源的距离。

检测器的输出电流正比于总光场的平方,则:

$$i(t) = B[E_S(r) \cos(2\pi f_S t + \varphi_S) + E_R(r) \cos(2\pi f_R t + \varphi_R)]^2 \quad (3)$$

式中: B 是与光电检测器量子效率有关的常数。考虑到检测器响应带宽的限制,不能响应光学频率,因此将公式(3)的展开式中光学频率项略去,得:

$$\begin{aligned} i(t) &= B \frac{1}{2} (E_S^2(r) + E_R^2(r)) + E_S(r)E_R(r) \cdot \\ &\cos[(2\pi(f_S - f_R)t + (\varphi_S - \varphi_R))] \end{aligned} \quad (4)$$

由公式(4)可知,检测器的输出中包含一个正比于总光强的直流项 $\frac{1}{2}(E_S^2(r) + E_R^2(r))$ 和一个频率为两束光频率差的信号电流 $E_S(r)E_R(r) \cos[(2\pi(f_S - f_R)t + (\varphi_S - \varphi_R))]$ 。

经过高通滤波器隔直后,就可测定两束光的频率差,即为多普勒频率,其表达式^[4]为:

$$f_D = 2v/\lambda \quad (5)$$

式中: f_D 为多普勒频率; v 为物体振动的速度; λ 为

激光波长。

2.3 振动特征量的解算

振动有三个特征量,即位移、速度和加速度。对于采用何种参数作为评判振动安全的标准,目前国内外的研究结果各不相同,如瑞典的评判标准综合考虑了振动速度、频率、位移和加速度等多项指标,美国矿务局、德国和芬兰的判据引入振动速度和频率两个指标。通常认为:低频($f < 10$ Hz)时,振动体的振动强度与振幅成正比;中频($f \approx 10 \sim 1000$ Hz)时,振动体的振动强度与速度成正比;高频($f > 10000$ Hz)时,振动体的振动强度与加速度成正比^[1]。

发射场地面设备振动以低中频振动为主,对于振动体的理想振动,其位移和速度可以表示为:

$$s(t) = A \sin 2\pi f t \quad (6)$$

$$V(t) = ds/dt = 2\pi f A \cos 2\pi f t \quad (7)$$

式中: A 为振动体的振幅; f 为振动体的频率。显然,当 $\cos = 1$ 时,存在振动速度最大值:

$$v_{\max} = 2\pi f A \quad (8)$$

结合公式(5)可知,最大多普勒频率为:

$$f_{D\max} = 4\pi f A / \lambda \quad (9)$$

由公式(9)可知,只需要将所得的拍频信号通过信号处理系统,得到最大多普勒频率 $f_{D\max}$,就可以测量出振动体的振幅:

$$A = \lambda f_{D\max} / 4\pi f \quad (10)$$

由于在振动过程中,振动体不停地做加速减速运动,振动体的振动方向在相反的两个方向上不停地进行转换。转换的两个临界点对应着这一段时间内的最大振幅,即振动位移最大时,振动速度为 0。令物体振动速度第一次为零的时刻为 t_1 ,第二次为零的时刻为 t_2 ,第三次为零的时刻为 t_3, \dots ,第 i 次为零的时刻为 t_i ,则第 i 个时间段内物体振动的周期为:

$$T_i = t_{i+2} - t_i \quad (11)$$

由此可求出物体第 i 个时间段内的频率:

$$f_i = 1/T_i = 1/(t_{i+2} - t_i) \quad (12)$$

3 自研测振仪的设计与实现

基于参考光束型测量模式设计了激光多普勒振动测量系统,该系统在信号接收距离上不受光电接收系统中透镜焦距的限制,具有极高的传感灵敏度,可以测量波长数量级的位移,其结构如图 2 所示。

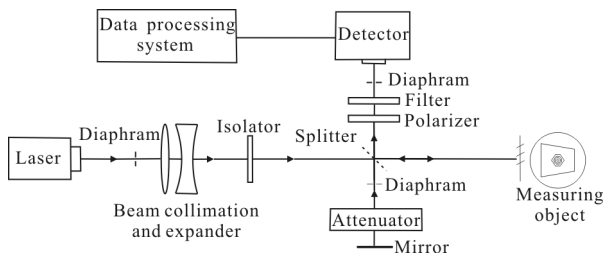


图 2 自研参考光束型激光多普勒测振仪的硬件结构示意图

Fig.2 Schematic hard structure of designed reference-LDVMS

激光器是测振系统的核心部件,其性能决定了测振系统的监测距离、频率范围、测量精度等技术指标。远距离测量时,选用的激光器应具有功率大、谱线带宽极窄、超低噪声等特性;近距离测量时,可选用普通激光器。

图 2 所设计的测振系统中选用厦门奥尔特公司生产的,型号为 Action532Q-50 的单纵模绿光固体激光器,其功率约为 50 mW,波长为 532 nm。它发出的一束激光通过准直扩束透镜组合后经过光隔离器。准直扩束透镜组合的作用是调整激光束腰的位置,光隔离器的作用是避免背向散射光耦合进入激光器。光阑的作用是减小背景光噪声,其通光孔径最大为 10 mm。光束通过分束器后形成强度相等的两束,即参考光束和信号光束。参考光束经过全反镜后直接由光电探测器接收,信号光束入射到待测设备表面上,膜片反射回的光与参考光束在探测器上拍频后转化为电流信号输出。多普勒信号的处理^[5]可在工程计算机上实现,文中基于 LabVIEW 软件平台设计并实现了激光多普勒振动测量软件系统。

4 实验结果及分析

选用德国 POLYTEC 公司生产的高精度 PDV100 型测振仪进行实测对比,该型测振仪频率测量范围为 0~22 kHz,频率测量精度为 0.2%,有效测量距离为 0.1~30 m。

选用天津真美电声器材有限公司所生产的扬声器模拟待测振动源,该扬声器性能指标为:额定功率 17.5 W、阻抗 4 Ω、有效频率范围 1 Hz~20 kHz、频率响应曲线平坦。待测振动源由 RIGOL 公司生产的 DG2041A 函数发生器驱动,测振系统距离待测振动源约 80cm 的距离,对比实验实物图如图 3 所示。自研测振仪的软件系统界面如图 4 所示。

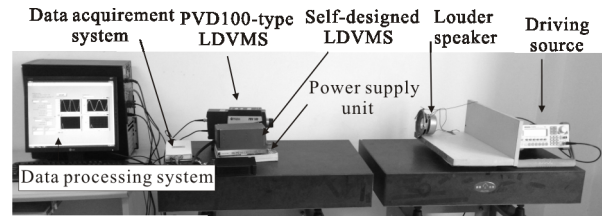


图 3 对比实验实物平台

Fig.3 Object structure of experiment

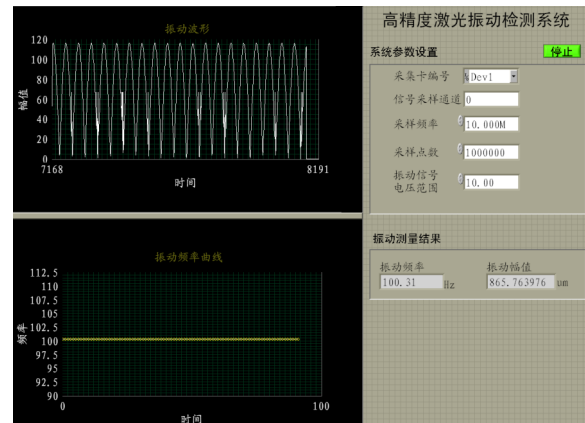


图 4 自研测振仪软件系统界面

Fig.4 Software system interface of the designed LDVMS

表 1~3 给出了正弦驱动信号峰值电压为 5 V、10 V 和 20 V 时的测量结果,其中驱动信号频率分别设置为 1 Hz、10 Hz、100 Hz、500 Hz、1 000 Hz 和 2 000 Hz。

表 1 驱动峰值电压为 5 V 时的测量结果

Tab.1 Vibration measured value of 5 V peak voltage

Number	Drive frequency	Frequency/Hz		Amplitude/μm	
		Measured frequency of PDV100	Measured frequency of designed LDVMS	Measured amplitude of PDV100	Measured amplitude of designed LDVMS
1	1	1.000 3	1.002 7	395.8982	395.4237
2	10	10.010 0	10.031 0	277.2824	276.701 3
3	100	100.050 0	100.310 0	224.3428	224.882 5
4	500	499.550 0	501.552 0	4.3819	4.388 5
5	1 000	1 000.000 0	1003.1000	1.9476	1.942 9
6	2 000	1 999.800 0	2001.4300	0.7160	0.715 2

根据表 1~3 中两种测振仪所得测量数据计算可以得到:以 PDV100 型测振仪为基准,自研测振仪频率测量值的相对误差不超过 0.4%,幅值测量值相对误差不超过 0.35%。自研测振仪和 PDV100 型测振仪

对模拟振动源的振幅的监测均能够达到 $1 \mu\text{m}$ 的量级;随着驱动频率的增大,自研测振仪与 PDV100 型测振仪测量的振幅都呈衰减趋势,这主要是因为模拟振动源的振动速度增大了;自研测振仪与 PDV100 型测振仪测试数据相比对一致性好;自研测振仪的频率测试范围为 $1 \text{ Hz} \sim 2 \text{ kHz}$,覆盖了低频、中频、高频振动范围,满足发射场小型地面设备振动测量需求。

表 2 驱动峰值电压为 10 V 时的测量结果

Tab2 Vibration measured value of 10 V peak voltage

Number	Drive frequency	Frequency/Hz		Amplitude/ μm	
		Measured frequency of PDV100	Measured frequency of designed LDVMS	Measured amplitude of PDV100	Measured amplitude of designed LDVMS
1	1	1.000 3	1.002 7	713.389 7	711.681 7
2	10	10.010 0	10.031 0	578.197 0	576.582 5
3	100	100.050 0	100.310 0	445.505 2	445.861 9
4	500	499.550 0	501.552 0	8.718 9	8.702 4
5	1 000	1 000.000 0	1003.1000	3.835 1	3.825 2
6	2 000	1 999.800 0	2001.4300	1.349 3	1.351 2

表 3 驱动峰值电压为 20 V 时的测量结果

Tab3 Vibration measured value of 20 V peak voltage

Number	Drive frequency	Frequency/Hz		Amplitude/ μm	
		Measured frequency of PDV100	Measured frequency of designed LDVMS	Measured amplitude of PDV100	Measured amplitude of designed LDVMS
1	1	1.000 3	1.002 7	1490.0027	1493.5873
2	10	10.010 0	10.031 0	1180.8303	1181.6574
3	100	100.050 0	100.310 0	864.2922	865.7640
4	500	499.550 0	501.552 0	18.3092	18.2545
5	1 000	1 000.000 0	1003.1000	8.0102	7.9886
	2 000	1 999.800 0	2001.4300	3.0351	3.0409

从测试的结果可知,自研的测速仪本身还存在一定的测量误差,这主要包括原理公式近似、高斯光束干涉、激光线宽、探测器孔径及信号处理算法等因素^[9-10]。其中原理公式近似是指原理公式中略去了高次项,相对误差约为量级 10^{-6} ;高斯光束干涉是指高斯光束形成的干涉条纹有一定程度的弯曲,从而引入测量误差,相对误差约为 10^{-5} 量级;激光线宽是指激

光束谱线的宽度也会引入一定的测量误差,相对误差约为 10^{-6} 量级;探测器孔径是指探测器孔径的大小导致返回光束与入射光存在一定的夹角,从而引入测量误差,相对误差约为 10^{-4} 量级;信号处理算法是指频率分辨率引入的测量误差,相对误差约为 10^{-4} 量级。

5 结束语

该文设计并研发了用于发射场小型地面设备振动监测的激光多普勒振动监测系统,并与德国 POLYTEC 公司生产的 PDV100 型测振仪进行对比,模拟小型地面设备的振动情况进行了实验验证。实验结果表明,所设计的激光多普勒振动监测系统具有非接触、频率监测范围广、测量精度高的优点,具备对小型地面设备进行近距离振动监测的能力。研究结果为后续激光多普勒远距离振动监测、大振动冲击条件下振动监测等工作打下了一定的基础。

参考文献:

- [1] Ma Hongzong. Motor condition monitoring and fault diagnose [M]. Beijing: Press of Machinery Industry, 2007. (in Chinese)
- [2] Shen Xiong. Technique and its Application of Laser Doppler [M]. Beijing: Press of Tsinghua University, 2004. (in Chinese)
- [3] Lewin A C. Compact laser vibrometer for industrial and medical applications[C]//SPIE, 1998, 3411: 61-67.
- [4] Zhou Jian, Long Xingwu. Research on laser Doppler velocimeter for vehicle self-contained inertial navigation system[J]. *Optics & Laser Technology*, 2010, 42(3): 477-483.
- [5] Zhou Jian, Long Xingwu. Signal processing of laser Doppler self-velocimeter [J]. *Optics & Laser Technology*, 2010, 42(6): 1038-1043.
- [6] Liu Changqing, Nie Xiaoming, Fu Yangying, et al. Laser Doppler velocimeter based on the dual-longitudinal-mode He-Ne laser[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(4): 921-924. (in Chinese)
- [7] Zhou Jian, Yao Baoju, Long Xingwu. Research on transit broadening of laser Doppler signal [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(5): 826-829. (in Chinese)
- [8] Zhou Jian, Wei Guo, Long Xingwu. Research on direction discrimination and low-speed measurement for laser Doppler velocimeter [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(3): 632-638. (in Chinese)
- [9] Zhou Jian, Feng Qingqi, Ma Shuguang, et al. Error analysis of reference-beam Laser Doppler Velocimeter [J]. *High Power Laser and Particle Beam*, 2010, 22(11): 2581-2587
- [10] Zhou Jian, Long Xingwu. Estimation of parameters of laser Doppler velocimeter and their Cramer-Rao lower bounds [J]. *Applied Optics*, 2011, 50(23): 4594-4603.