

技术报告

基于端面反射的高频光纤振动传感系统研究*

祁耀斌¹, 刘路杰^{1,2}, 高雪清^{1**}, 王汉熙³

(1. 武汉理工大学光纤传感技术国家工程实验室, 湖北 武汉 430070; 2. 武汉理工大学信息工程学院, 湖北 武汉 430070;
3. 武汉理工大学数字制造湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430070)

摘要: 光学测量方法是高频振动检测领域新的研究方向。该论文研发了由光纤振动检测传感器、光纤振动信号检测单元等系统组成的一个振动检测系统,使用端面反射的基本原理。振动信号经过光纤振动传感器转化为光信号,再经过检测单元转化为电信号,最终得到测量频率。实验测得该系统的频率响应范围是2~33 kHz,测量误差小于0.21%。该系统的光纤振动传感器是强度调制型光纤传感器,避免了波长解调,相对于其他光学测量系统具有测量带宽广、测量频率高、振动传感器设计简洁等优点。

关键词: 高频振动; 系统检测; 强度调制; 光纤传感器; 端面反射

中图分类号: P732

文献标志码: A

文章编号: 1672-5174(2020)11-112-07

DOI: 10.16441/j.cnki.hdxh.20170263

引用格式: 祁耀斌, 刘路杰, 高雪清, 等. 基于端面反射的高频光纤振动传感系统研究[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2020, 50(11): 112-118.

QI Yao-Bin, LIU Lu-Jie, GAO Xue-Qing, et al. The high frequency vibration detection system based on facet reflection by using optical fiber sensing[J]. Periodical of Ocean University of China, 2020, 50(11): 112-118.

近几年来随着新材料、新结构技术的不断发展,其力学性能中的振动性能测试受到了广泛关注和高度重视^[1]。振动测量在科学研究的各领域有着不可忽视的作用,是工程领域中一个重要的研究课题。振动目标的多样性使得振动频率的测量需要更广泛的带宽,包含低频到高频的所有频带^[2],并且高频测量是振动频率研究的重要发展方向。振动高频段(2 kHz以上)主要应用在石化机泵的状态监测和故障诊断^[3]、光纤听水器^[4]、高速旋转的机械设备的故障诊断^[5]、航空航天发动机的振动检测^[6]等尖端科学研究领域。高频振动检测研究是尖端前沿科技安全发展的重要保证之一。

振动测试技术经过一百年的发展经历了机械式、电气式、光学式三个测量阶段^[7]。现阶段使用比较多的是电气式振动测量方法,电气式方法已经有着比较高的检测精度,是目前一种比较普遍的测试方法,但是在高频领域电磁干扰强,电气式测试方法容易受到干扰,基于安全性考虑无法用于尖端科研领域;而早期使用的机械式振动检测技术精度和广度都已经不满足现代测试技术的要求,目前已经很少有使用。光学式测量技术具有抗电磁干扰、测量精度高、测量带宽广等优

点成为了振动频率测量领域新的发展方向。

传统的光学测量方法一般采用光纤光栅传感技术。在光纤光栅振动检测系统领域,光纤光栅传感技术的一种典型应用模式^[8-10]是通过将光纤光栅粘贴在振子悬臂梁上,在振子处于振动的状况下,光纤光栅受到应力的作用,反射光波长发生相应改变,通过对光栅反射波长进行解调,检测出振动参数。由于这种模式需要对波长进行解调,从而限制了检测系统的检测频率带宽。另一种典型的模式^[11]是通过解调调制光强的变化来检测振动的频率,该方法可以有效的避免波长解调的缺点,具有测量带宽比较广的优点,其典型应用场景如下:将光纤光栅传感器作为振子悬挂在悬臂梁的两端,当物体振动时光纤光栅振子受到振动物体的带动作同频振动,反射波长也会随着光纤振子的振动而改变,当上下两个反射波长进行合适的选择后,其可以达到最佳干扰状态,形成稳定周期性变化的干扰光,系统检测到的光强也会随着相干光的变化而周期性变化,通过解调光强从而解调出振动信号。Mach-Zehnder(M-Z)干涉法^[12-13]对高频振动的测量有着比较好的效果。测量频率比较高,能对10 kHz以下的频率进

* 基金项目: 国家科技支撑计划项目(2014BAG07B00)资助

Supported by the national Key Technology R&D Program (2014BAG07B00)

收稿日期: 2019-04-09; 修订日期: 2019-08-13

作者简介: 祁耀斌(1966-), 男, 研究员。E-mail: qiyaobin@whut.edu.cn

** 通讯作者: E-mail: gaosueqing@whut.edu.cn

行响应^[14],在 10 kHz 开始下降,在超高频振动测量场景下,其使用受到了限制。光纤光栅在振动测量领域应用很广泛,但是在高频、超高频场景其应用受到了限制,原因是光纤光栅的力学弹性模量相对较小,当其在高频振动的作用下其弹性形变量会比较大,从而无法很好的反馈出物体高频振动的情况,出现失真,在超高频领域更为变得更为恶劣。更重要的是使用光纤光栅传感器作为振子,需要粘贴在传感器上,其会劣化光纤光栅在高频振动下的响应性能,长期处于高频振动的作用下,可能会出现胶水松动、不牢的隐患,这将进一步劣化其振动响应能力。

振动检测系统使用光栅作为传感器的目前的测量频率基本都在 10 kHz 以下,且光纤光栅传感系统在高频领域检测存在上述问题。鉴于光学测量法的优点,本系统仍采用光学测量方法,但系统选用强度调制型光纤传感器,从而规避了光栅作为传感器的存在的上述问题。成功设计出一种新型高频光纤振动检测系统,对物体的振动频率进行测量。

1 高频光纤振动检测系统

光纤振动传感器和光纤振动传感信号检测单元等部分组成了本高频光纤振动检测系统,如图 1 所示。其传感原理如下:通过振动台电机的振动,将振动信号传递给振动传感器,由于振动台振动产生的周期性位移使得入射光纤端面与传感器端面间的距离会产生周期性的改变,而这种距离的改变,会使得反射回光纤的

反射光的光强出现强弱变化,这种周期性的反射光强的强弱变化可以反馈出物体的振动频率。本系统中使用 3 dB 耦合器将入射光纤和反射光纤耦合在一根光纤中。光信号在经过调制反射回光电转换处理模块后转变为电信号的强弱变化,通过计算和换算这种周期性强弱变化,可以得出物体的振动频率数据。

1.1 光纤振动传感信号检测单元

光纤振动传感信号检测单元示意图如图 2 所示,经过调制的光信号首先经过光电转换电路转化成电信号,由于信号比较微弱需要经过较大倍数的二级放大电路,调制光信号中混叠有较强的噪声干扰,再经过两级放大电路放大后调制信号中的噪声信号被相应的放大,造成信噪比的降低。因此,本系统使用了两级滤波电路来对系统检测频率范围类的信号进行选择滤波,第一级放大电路的滤波电路采用了低频滤波电路;第二级放大电路的滤波电路采用了高频滤波电路,当经过一级放大电路后信号中主要是低频噪声干扰较多,当再经过一级放大电路后,信号中的高频噪声对信号的影响也显著增加,通过上述滤波电路选择后非测量频率范围类的噪声信号能够有效的被滤去,使得测量范围内的系统信噪比提升,经过上述方法处理后检测系统的测量范围为 2~33 kHz。经过上述处理后的信号信噪比好,可用于后续电路处理,再经过 AD 采样和方波整波模块施密特触发器的处理后,调制信号变为可以被单片机所识别的方波信号,经过单片机上检测和算法转换可以得出物体的振动频率,再通过单板机控制液晶显示器将被检测的数值显示,系统还带有串口通信模块可供检测信号送往其他检测模块作深入处理。

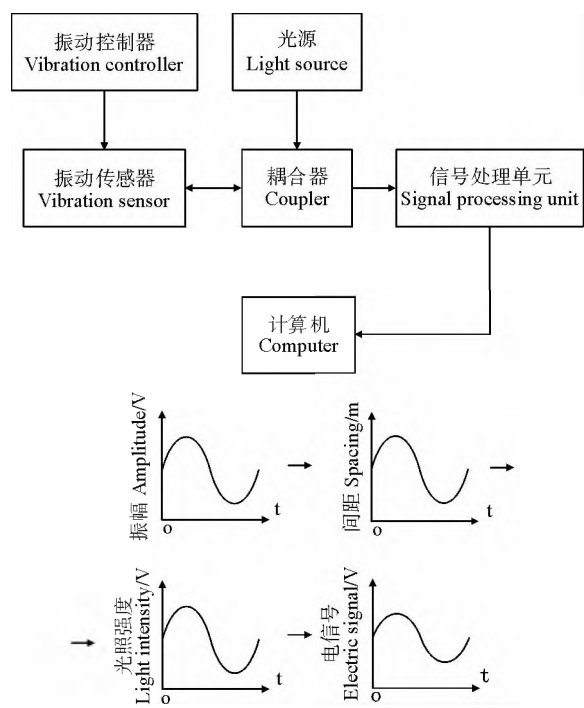


图 1 高频光纤振动检测系统框图
Fig.1 The process of the detection system

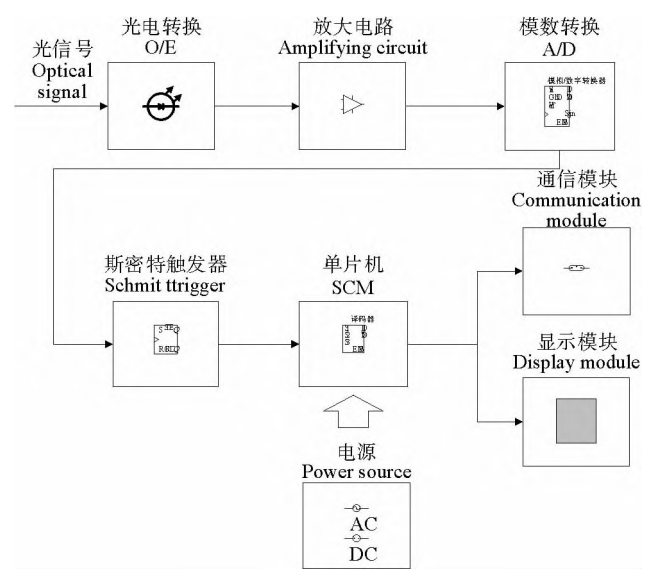


图 2 光纤振动传感信号检测单元示意图
Fig.2 The schematic figure of the detection unit

1.2 端面反射解调法原理

本系统运用端面反射的原理,通过端面反射光光强的周期变化,进行频率检测。在本高频光纤振动传感检测系统中,当光信号通过入射光纤入射到传感器振子端面时,会在传感器端面和光纤输出端面会产生回波,为其菲涅耳反射。反射回来的光波会发生多光束干涉效应,造成光强的相干增强或相干相消,形成稳定的加强区和减弱区,而且这些区域的光强变化是随光纤端面和传感器振子端面间距的变化而变化。因此可以通过对光纤端面与传感器振子端面间距变化控制反射光光强的改变,通过这种方法实现了对振动信号到光强信号的转换。

光信号通过光纤传递到传感器振子端面且光纤端面与传感器振子端面的距离很小时,在不考虑各种损耗(光在空气中反复反射的耗散和其他各种原因造成的耗散)的情况下,依据光的干涉基本原理,反射光的光强 $I_{(t)}$ 可表示为:

$$I_{(t)} = \frac{F \sin^2(\frac{1}{2}\delta)}{1 + F \sin^2(\frac{1}{2}\delta)} I_0; \quad (1)$$

$$F = \frac{4R}{(1-R)^2}; \quad (2)$$

$$\delta = \frac{4\pi n d \cos i}{\lambda}. \quad (3)$$

式中: I_0 为输入光强; R 为光强反射率; n 为空气介质的折射率; i 为光信号从光纤传输到间隙中的折射角; d 为光纤端面与晶体表面间距。当光纤端面与传感器振子表面间距作周期性变化时,反射光强也将随之作周期性变化,受到同幅度的调制作用^[15]。

1.3 光纤振动传感器

振动传感器如图3所示。振动传感器外壳为铝制金属材料,铝制材料质量比较小并且不会受到磁力的影响,从而干扰内部磁铁振子的振动;振子的核心部分采用悬臂梁结构,其是使用铜片加工而成。加工使用的材料为牌号 H68 的黄铜,该黄铜合金成分主要由铜(67%~70%)和锌(23%~30%)构成,铜片的一般参考弹性模量值为 $(0.90 \sim 0.97) \times 105 \text{ MPa}$ 。本传感器也考虑过使用其他材料,比如铝制材料和钢制材料,但都没有铜制材料的效果好,因为在高频检测领域,铜制材料的弹性模量比较适中,介于上述两种材料之间,在测量频率范围内能够比较好的响应振动的形变,因此选用铜片作为本系统的核心传感材料。磁铁振子上下两边吸附在铜制悬臂梁臂上下,上方的磁铁块与光纤传感器对齐,以获得最大的反射面,下方的磁铁块对称吸附在下面,以保证传感器的对称结构。调整上方磁铁块与光纤入射端面的间距使得其比较小,以获得较

好的反射效果。传感器顶端的光纤通过光纤适配器与下面的振子相连,当传感器开始振动,带动悬臂梁振动,悬臂梁的振动带动磁铁振子振动,磁铁振子开始作周期性的位移,使得磁铁振子与光纤端面的间距发生周期性改变,从而影响反射回光的光强发生周期性改变,通过解调光强的周期性变化从而测试出物体的振动频率。

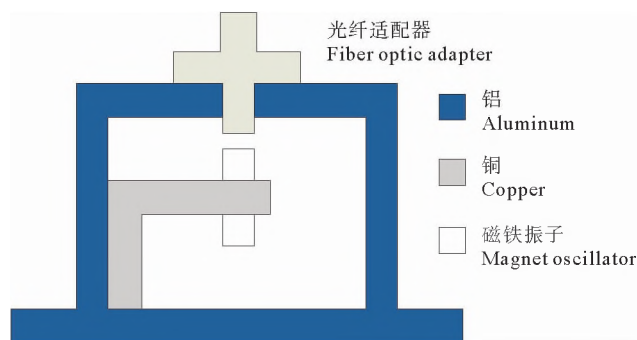


图3 光纤振动传感器结构示意图

Fig.3 Schematic figure of the optical fiber vibration sensor

2 实验结果与分析

实验测试实物连接图如图4(a)所示,光纤振动传感器实物图为图4(b)所示。实验装置连接如下:光纤振子通过胶与振动台顶部牢牢粘合,通过光纤将振动传感器和振动频率检测单元相互连接起来。给与振动台的函数信号发生器以一定频率的高频信号,使得振动台工作起来,调整振子与光纤端面的距离,使得这个距离合适,在示波器上能够观察到信噪比较好的波形。按照实验的测试频率范围,选取边界值、中值等不同频率的测试值,给与函数信号发生器以不同频率驱动,观察检测系统在各频段信号下的检测情况,记录和采集下示波器上面的波形。

2.1 原结果分析

实验从 2 kHz 开始测量,测试到 33 kHz 以内的各主要频段。表1为实验测试的部分数据,选取了 18 个频段。在选取的 18 个测量频段中其测量误差均在 0.21% 以下,与其他振动测量方法比较,本系统检测方法在精度和广度上有较高提升,在达到了比较好的效果。下面将选取三个典型值将其波形进行说明。图5(a)为检测系统在 2 kHz 信号的驱动下的波形图,通过示波器采集的图经,过软件还原后可以看出,其频率为 2 kHz,其中可以看出一些高频毛刺,混叠有高频噪声,低频噪声的干扰影响较小,信噪比好。图5(b)为检测系统在 20 kHz 信号的驱动下的波形图,从图中可以看出波形的信噪比、幅度都有明显的下降,这是因为当检测频率在逐步提高后,一是因为振子的振动幅度是下降,从而导致反射光强的改变幅度下降,从而导致检测信号的幅度下降;二是因为整个检测系统的放大系

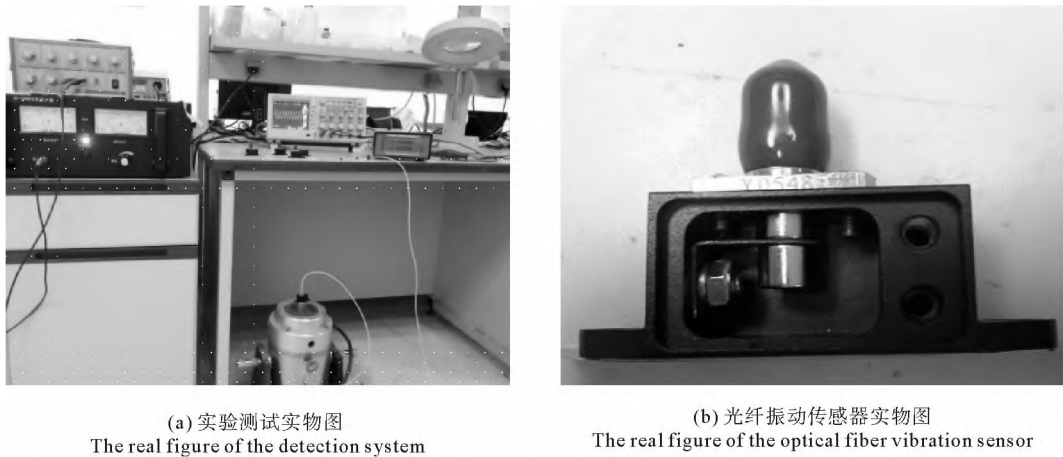


图 4 光纤振动传感检测系统与传感器实物图

Fig.4 The real figure of the optical fiber vibration detection system and sensor

数对于检测频率来说不是恒定值,越往高频放大能力是有所下降的,基于上述两点,在 20 kHz 时波形的幅度大为下降,信号的高频噪声和低频噪声干扰也明显增加,但是还是有着相对不错的信噪比可以计算出检测频率为 20 kHz。图 5(c)为检测系统在 33 kHz 信号的驱动下的波形图,当进一步增大检测频率到 33 kHz 后,系统的振动幅度和放大系数进一步减少。信号的信噪比进一步劣化,从图中可以看出振幅只有 100 mV

左右,在此场景下系统可以识别出检测波形为 33 kHz。继续增加系统的检测频率到大于 33 kHz ,发现检测系统已经无法识别出检测信号了,观察到系统的信噪比很差和信号的振动幅度也很小,系统已经不具备检测能力,这是由于系统的电路设计和传感器的设计导致的,在超过 33 kHz 的场景下,过小的放大系数和过小的振幅使得调制信号被噪声信号所完全干扰,使得系统对于大于 33 kHz 的信号无法进行解调。

表 1 实验测得频率及相对误差表

Table 1 The measurement frequency of the experiment and the relative error

	频率 Frequency/Hz								
	2 000	4 000	6 000	8 000	10 000	12 000	14 000	16 000	18 000
实测频率									
Measurement frequency/Hz	1 998	3 994	6 006	7 989	10 011	12 013	13 988	16 022	17 981
相对误差 Relative error/%	0.10	0.15	0.10	0.14	0.11	0.11	0.16	0.14	0.11

	频率 Frequency/Hz								
	20 000	22 000	24 000	26 000	28 000	30 000	31 000	32 000	33 000
实测频率									
Measurement frequency/Hz	20 023	22 030	23 977	25 969	28 961	29 956	30 941	31 936	32 930
相对误差 Relative error/%	0.12	0.14	0.14	0.12	0.14	0.15	0.19	0.20	0.21

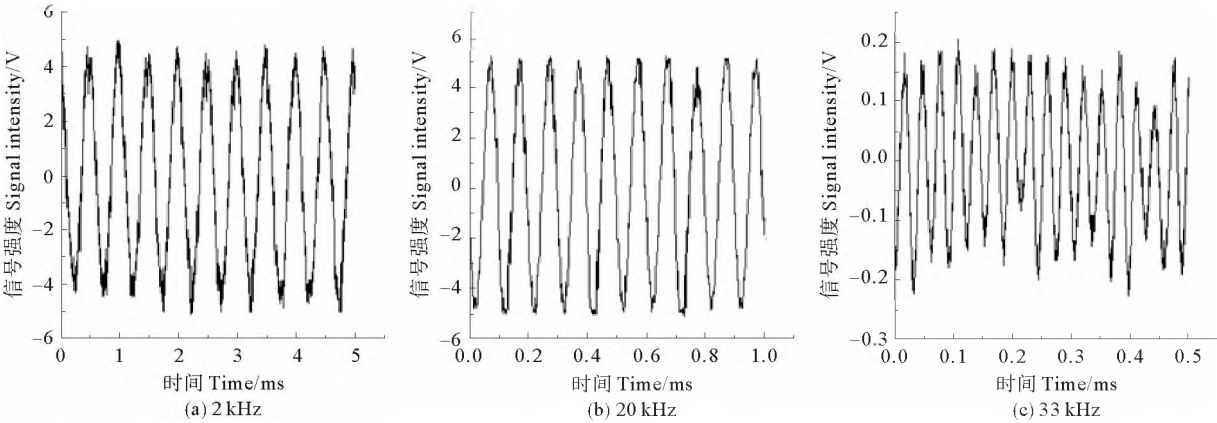


图 5 不同频率下示波器接收到的波形

Fig.5 The figure of the oscilloscope in different frequency

2.2 matlab 处理后结果分析

本检测系统为了克服噪声的干扰对系统进行了两次滤波处理,得到了可以被系统所检测的信号,但是观察信号还是存在一些低频、高频噪声,这是由于本系统的检测原理是检测振子与光纤端面的微小距离改变带来的光强改变来检测出物体的振动频率,因而需要很大的放大倍数。当处于高频振动时,系统为了能够识别出物体的微弱振动,需要对振动信号进行一万倍的放大,从而使检测系统很容易被外界环境因素带来的波动和外界物体的微小的振动影响,给调制信号中带来很大的噪声干扰。因此需要尽量减少环境因素的干扰给检测装置带上屏蔽装置,来进一步隔离周围环境中干扰源造成的影响,并且对数据进行 matlab 滤波处理以得到更好的滤波效果。

图 6 为系统检测后选取的几个典型频率数据输入到 matlab 处理后的波形图和对应的频谱图。从图 6 中的处理后的波形可以看出,高频噪声得到了有效的滤除,滤波处理后系统信噪比进一步提,更容易被识别,能够准确的在 matlab 滤波后的波形中识别出测频率分别为 2、20 和 33 kHz;从个体来看,图 6(b)、图 6(c)在测量带宽中较高的频段 20 和 33 kHz 经过 matlab 滤波处理后波形变的圆滑,基本上没有噪声干扰,是振动台所造成的单一振动源的振动信号。图 6(a)在测量带宽中较低的频段 2 kHz 中波形也相应的变得圆滑,高频

噪声得到了明显的抑制,但是在波峰和波谷存在一定程度的凹陷,经过多次实验后这种现象仍然存在,因而排除其是其他偶然因素所造成的影响。通过对检测系统和实验设备的分析,存在上述现象的原因是测量振动信号中混入了传感器内部其他部位的同频率但相位滞后或者超前的振动信号。干扰信号与原来振动信号叠加造成了振动信号的相干增强或减弱,从而导致了 2 kHz 的振动试验中出现了该现象。在 2 kHz 的振动测试试验中这个现象比较明显,继续增大振动频率后这一现象消失。其原因是当频率升高后传感器整体的振幅比较小,干扰端面振动的同频率相位滞后振动源振幅减小,并且干扰源到光端端面的距离比传感器远,影响本身就弱。这一现象可以用于测量振动的方向或者振动源的位置等问题,可以作为一个研究方向。振动检测很容易受到环境因素的干扰,本系统通过在电路上进行滤波和数据上进行滤波,两部分滤波后可以得到较高的信噪比的信号,使得检测系统在复杂环境中的检测能力得到提升,能够较广的测量出物体的振动频率。

本系统通过上述方法和实验,完成了对高频振动信号的测量,其检测带宽较广,为 2~33 kHz。并且同时还具有检测精度高,检测抗干扰能力强和测量最高频率高等优点,能够基本满足对高频振动的测量,综上所述本系统能够对高频振动信号进行准确检测。

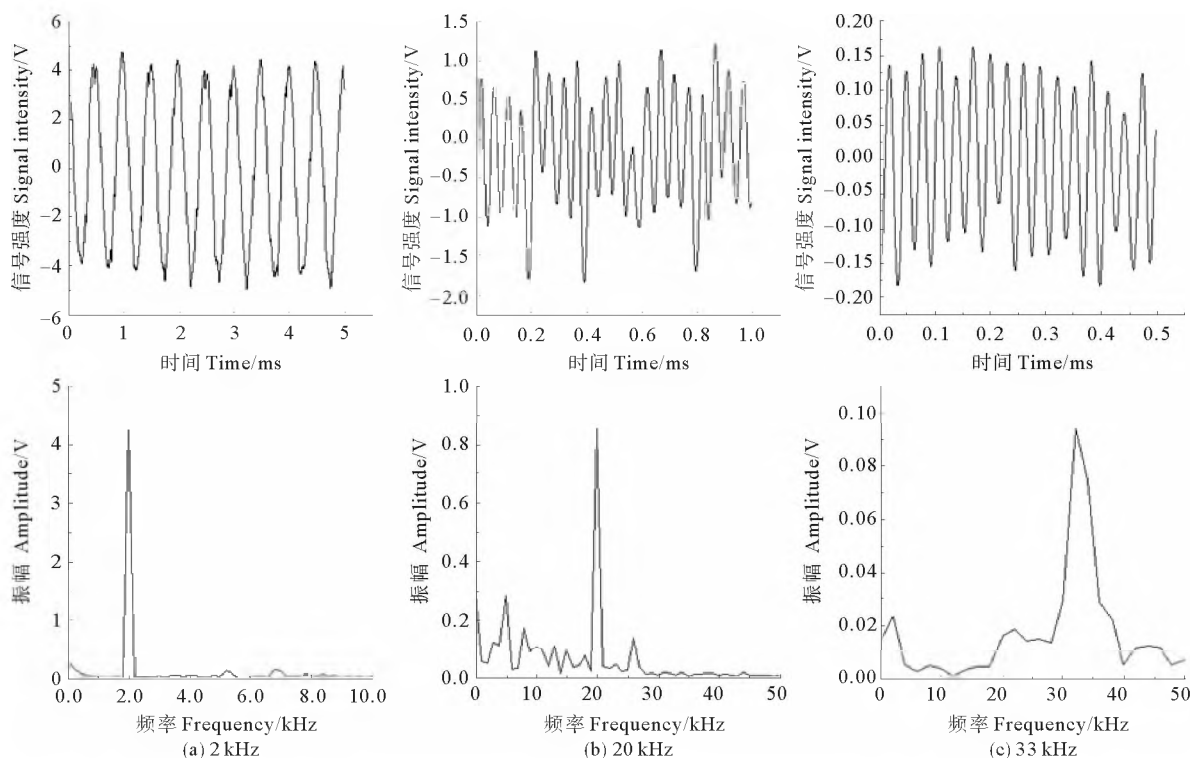


图 6 不同频率下 matlab 处理后的波形图和频谱图

Fig.6 The wave figures and the spectrogram after the process of the matlab

3 结语

本文设计了一种高频光纤振动传感系统,其使用的原理是端面反射。通过光学方法对高频振动进行检测,实现了对 2~33 kHz 高频振动信号的测量,取得了比较好的测量结果,振动频率误差低于 0.21%。本系统具有如下优点:

- (1)和其他振动频率测量方法相比,本系统具有测量带宽广、测量频率高等优点。
- (2)本系统使用光纤直接作为传感器件,没有使用光栅,从而避免了检测系统容易受到温度、形变和应力等因素的影响。且相对于使用光栅器件,结构更为简洁。
- (3)本系统具有抗环境因素干扰能力强的优点,对于复杂环境下温度、电磁干扰等因素的影响有着较好的抵抗能力,可适应工业使用中的复杂环境,具有较大的实用价值。

本传感器在实际应用环节可进一步优化,根据使用环境、测量精度和干扰源的分析,可对电路和滤波算法进行特定的优化;也可以在传感器设计中采用更先进的工业设计,使得传感器各部分的干扰降到最低;还可以进一步优化电路设计将电路的噪声干扰降低。通过上述方法,可以使得本系统得到进一步优化,从而使得本系统的检测频率和精度得到进一步提升,取得更广的带宽与更准确的精度。

参考文献:

- [1] 马宾, 徐健, 隋青美. 耦合型高频光纤振动传感器实验研究[J]. 光学学报, 2009, 29(5): 1177-1182.
Ma Bin, Xu Jian, Sui Qingmei. Experimental study on coupling high-frequency fiber-optic vibration sensor[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(5): 1117-1182.
- [2] 郭玄标. 单频激光干涉测振关键技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
Guo Xuanbiao. Research on Key Technology of Homodyne Laser Interference Vibration Measurement[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015.
- [3] 曹靳. 中高频振动复合光纤传感器及其在机泵群安全监测中的应用[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2014.
Cao jin. High Frequency Optical Fiber Sensor and its Application in Safty Monitoring of Pump Group[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2014.
- [4] 于新艳. 光纤光栅水听器研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2014.
Yu Xinyan. Research on Fiber Bragg Grating Hydrophone[D]. Shenyang: Northeastern University, 2014.
- [5] 任红磊, 邵新慧. 加速度计高频振动校准中的相关技术问题[J]. 计测技术, 2010, 30(4): 33-35.
Ren Honglei, Shao Xinhui. Technical problems of accelerator in high frequency vibration calibration[J]. Metrology & Measurement Technology, 2010, 30(4): 33-35.
- [6] 段发阶, 张玉贵, 欧阳涛, 等. 航空发动机旋转叶片振动监测系统研究[J]. 光学与光电技术, 2008, 6(1): 48-51.
Duan Fajie, Zhang Yugui, Ouyang Tao, et al. Research on rotating blade vibration monitoring system for aero engine[J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2008, 6(1): 48-51.
- [7] Aszkler C. Acceleration, Shock and Vibration Sensors[M]. [s.l.]: Sensor Technology Handbook, 2005: 137-159.
- [8] 袁磊. 基于光纤光栅传感的机械振动检测与实验[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2011.
Yuan Lei. Study on Mechanical Vibration and Experiment Based on Fiber Bragg Grating Sensors[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2011.
- [9] Nellen Ph M, Mauron P, Frank A, et al. Reliability of fiber Bragg grating based sensors for downhole application[J]. Engineering Structures, 2005, 27: 1828-1834.
- [10] Kirikera G, Balogun O, Krishnaswamy S. Fiber Bragg Gratings and Two Wave Mixing Spectral Demodulator System for Impact Detection and Localization[C]. [s.l.]: Proceedings of the 4th European Workshop on Structural Health Monitoring, 2008: 840-846.
- [11] 孙华, 刘波, 周海滨, 等. 一种基于等强度梁的光纤光栅高频振动传感器[J]. 传感技术学报, 2009, 22(9): 1270-1275.
Sun Hua, Liu Bo, Zhou Haibin, et al. A novel FBG high frequency vibration sensor based on Equi-intensity cantilever beam[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2009, 22(9): 1270-1275.
- [12] Zhou Y, Jin S, Qu Z. Study on the distributed optical fiber sensing technology for pipeline leakage protection[J]. Journal of Optoelectronics Laser, 2005, 16(8): 935-938.
- [13] Luo G, Zhang C, Li L, et al. Distributed Fiber Optic Perturbation Locating Sensor Based on Dual-Mach-Zehnder Interferometer [C]. [s.l.]: SPIE, 2008: 66220. doi: 10.1117/12.790814.
- [14] 王为, 林玉池, 朱萍玉, 等. FBG 用于高频振动检测的实验研究[J]. 光纤与电缆及其应用技术, 2005(5): 35-37.
Wang Wei, Lin Yuchi, Zhu Pingyu, et al. High frequency vibration measurement with FBG sensor[J]. Optical Fiber & Electric Cable and Their Applications, 2005(5): 35-37.
- [15] 满江伟, 张天浩, 贾峰, 等. 反射型光纤信号干涉调制器[J]. 南开大学学报(自然科学报), 2006, 39(4): 66-69.
Man Jiangwei, Zhang Tianhao, Jia Feng, et al. A reflection interference modulator for signal in fiber[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Nankaiensis(Natural Science Edition), 2006, 39(4): 66-69.

The High Frequency Vibration Detection System Based on Facet Reflection by Using Optical Fiber Sensing

QI Yao-Bin¹, LIU Lu-Jie^{1,2}, GAO Xue-Qing¹, WANG Han-Xi³

(1. National Engineering Laboratory for Fiber Optic Sensing Technology, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China; 2. School of Information Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China; 3. Digital Manufacture Key Laboratory of Hubei Province, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract: The optical measurement technique became the new development direction in the field of high frequency vibration measurement. In this paper, a high frequency vibration detection system of optical fiber sensing has been designed the detection system is composed of the optical fiber vibration sensor and the detection unit of optical fiber vibration signal, based on facet reflection principle. The vibration signal is converted into light signal through the optical fiber vibration sensor, and then converted into electrical signal by the detection unit. In this way, the vibration signal is detected. The sensor is reflective intensity modulation fiber-optic sensor, which avoids demodulating the reflecting wavelength. Comparing to other FBG sensors, the sensor structure is simple. In the experiment, the measurement range is from 2 kHz to 33 kHz, and the frequency measurement error is below 0.2%. Comparing with other optical methods of vibration measurement, the detection system has a wider bandwidth, higher response frequency and simple design of the sensor.

Key words: high frequency vibration; system detection; intensity modulate; optical-fiber sensor; facet reflection

责任编辑 朱宝象