

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2023.01.003

基于 PSD 的汽轮机转子轴振动传感器

赵继兴^{1,2}, 李晨¹, 马少华¹, 雷英俊¹, 李瑞君¹

(1. 合肥工业大学 仪器科学与光电工程学院, 安徽 合肥 230009; 2. 华能巢湖发电有限责任公司, 安徽 合肥 238015)

摘要:针对汽轮机转子轴振动的测量需求,文章研制一款基于位置敏感器件(position sensitive detector, PSD)的振动传感器。建立传感器的灵敏度模型,根据模型得出传感器的最优结构参数,并设计低噪声的信号处理电路;通过实验对该传感器进行标定和测试,并与商用电涡流传感器进行对比测试。结果表明:振动传感器的灵敏度为 0.33 V/mm,测量范围为 2 mm,振幅分辨率为 4 μm ,频率响应范围为 10~325 Hz,重复实验标准差优于 3 μm ;与商用电涡流传感器的测量结果具有良好一致性,可用于汽轮机转子轴振动的检测。

关键词:振动测量;位置敏感器件(PSD);激光三角法;汽轮机转子轴振动

中图分类号:TH825 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-5060(2023)01-0015-06

A sensor for steam turbine rotor shaft vibration measurement based on PSD

ZHAO Jixing^{1,2}, LI Chen¹, MA Shaohua¹, LEI Yingjun¹, LI Ruijun¹

(1. School of Instrument Science and Opto-electronics Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. Huaneng Chaohu Power Plant Co., Ltd., Hefei 238015, China)

Abstract: In response to the measurement requirements of the rotor shaft vibration of the steam turbine, a vibration sensor based on position sensitive detector(PSD) is designed. The sensitivity model of the sensor is established, the optimal structural parameters of the sensor are obtained according to the model, and a low-noise signal processing circuit is designed. The sensor is calibrated and tested through experiments, and the results show that the sensitivity is 0.33 V/mm, the measurement range is 2 mm, the amplitude resolution is 4 μm , the frequency response range is 10-325 Hz, and the standard deviation of repeated experiments is better than 3 μm . Additionally, it is compared with the commercial eddy current sensor, and the measurement results of the two are consistent. Therefore, the vibration sensor in this study can be used to detect the vibration of the rotor shaft of the steam turbine.

Key words: vibration measurement; position sensitive detector(PSD); laser triangulation; steam turbine rotor shaft vibration

火电和核电在全部电能中占比达 80%,汽轮机是火电和核电发电设备的核心,是现代化国家的重要动力机械设备^[1]。而汽轮机转子轴的振动情况直接反映汽轮机的工作状况,一台机组正常运行时,其振动值应在允许的范围内,一旦转子轴的振动值超出这个范围或振动变得不稳定,都说明汽轮机出现了一定程度的故障^[2]。因此,检测

汽轮机转子轴的振动情况是汽轮机故障诊断的主要方法^[3]。

振动测量主要通过接触式和非接触式 2 种方式实现。接触式振动传感器需固定在被测振动物体上,传感器本身的重量会对振动测量产生影响,且汽轮机转子轴也无法安装额外的设备,因此该类型振动传感器不适用于测量汽轮机转子轴的

收稿日期:2021-04-13;修回日期:2021-05-14

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51675157)

作者简介:赵继兴(1989—),男,山东济南人,合肥工业大学硕士生,华能巢湖发电有限责任公司工程师;

李瑞君(1976—),男,安徽合肥人,博士,合肥工业大学教授,博士生导师,通信作者,E-mail:rj-li@hfut.edu.cn.

振动^[4]。

近年来,在非接触振动检测技术研究方面,国内外的研究机构取得了一些进展。光学传感技术具有精度高、抗干扰的特点,被广泛应用于振动的非接触检测。文献[5]介绍了一种基于光纤布拉格光栅(fiber Bragg grating, FBG)的非接触式振动传感器,将永磁体固定在膜片上,膜片连接 FBG,当被测磁性振动体与永磁体之间的距离发生改变时,会拉扯 FBG,引起 FBG 的输出信号发生变化实现振动检测;该振动传感器的振幅测量范围 2 mm、线性度 4.11%,具有灵敏度高、线性度好的特点;但只适用于磁性转轴,且对不同磁性材料敏感度不同。文献[6]提出一种光纤反射式振动传感器,通过发射光纤发出光束到转轴表面,接收光纤收集反射光实现转轴振动检测;其分辨率为 10 μm ,频率响应范围 0~650 Hz;但对解调设备要求高,且成本较高。文献[7]设计了基于激光多普勒原理的高精度三维激光扫描测振系统,该系统的分辨率为 0.1 m/s,测量范围 0~3.3 m,具有测量距离范围广,可实现三维振动测量的优点;但结构复杂,测量精度较低。文献[8]介绍了基于蓝光 DVD 光学读取头的非接触式探头,其分辨率优于 1 nm,对阶高为 2 μm 的标准器件重复测量的标准差为 21 nm,具有分辨率高的优点;但其测量范围小,不能满足现场测量要求。除了光学非接触传感技术之外,基于电磁感应原理的非接触传感技术也得到了研究人员的关注。文献[9]研制了一种基于电涡流原理的测量系统,在 0~2 mm 量程范围内电涡流传感器位移测量系统的线性度 0.75%,具有灵敏度高、线性度好等优点;但该种传感器对被测材料有严格要求,且易受电磁干扰。以上检测方法各有所长,但难以兼顾结构尺寸、测量精度和成本,不适用于在工业现场广泛应用。

本文提出一种使用位置敏感器件(position sensitive detector, PSD)作为探测器和基于激光三角原理的汽轮机转子轴振动传感器,该传感器具有精度高、成本低、适应性强等特点,为汽轮机转子轴振动测量提供了一种新方法。

1 原理和建模

系统采用直射式激光三角法,其工作原理如图 1 所示。当一束激光以一定的角度照射到汽轮机转轴表面时,光线在转轴表面发生反射,通过成像透镜,在 PSD 感光面上成像。当转子轴表面振

动时,PSD 感光面的成像点也随之变化,根据物像之间的关系,可得到转子轴的振动位移值^[10]。由于入射光、反射光和探测器延长线构成几何三角形,这种方法被称为激光三角测量法。

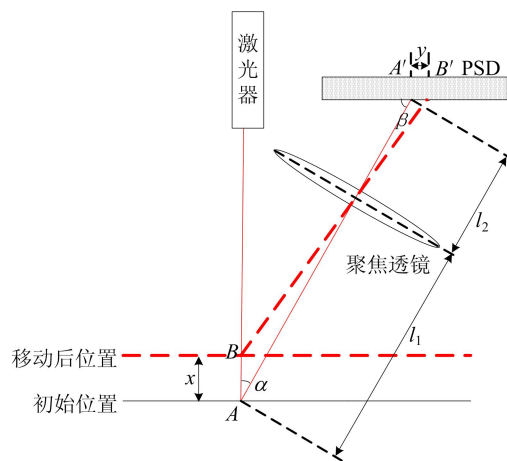


图 1 直射式激光三角法光路图

图 1 中:A 点为被测物的初始位置,当被测物表面发生振动时,被测物从 A 点移动到 B 点,PSD 光敏面上的像点从 A' 移动到 B';x 为被测表面实际偏移量;y 为成像偏移量;l₁、l₂ 分别为透镜的物距和像距;alpha 为被测面法线与成像光轴夹角,定义为工作角;beta 为 PSD 光敏面与成像光轴夹角。由三角几何关系可得:

$$x = \frac{y l_1 \sin \beta}{l_2 \sin \alpha - y \sin(\alpha + \beta)} \quad (1)$$

只要得到 PSD 光敏面像点的移动距离 y,被测物体实际偏移量 x 就可被求出。对(1)式变换求导,可得直射式激光三角测量系统的灵敏度为:

$$S = \frac{dy}{dx} = \frac{l_1 l_2 \sin \alpha \sin \beta}{[l_1 \sin \beta + x \sin(\alpha + \beta)]^2} \quad (2)$$

根据 Scheimpflug 条件^[11]可得:

$$l_1 \tan \alpha = l_2 \tan \beta \quad (3)$$

满足(3)式,无论被测物体如何移动距离,激光光斑都可以通过接收透镜在光敏元件上形成清晰的物像。根据高斯成像原理,即

$$\frac{1}{l_1} + \frac{1}{l_2} = \frac{1}{f} \quad (4)$$

(2)式可以改写为:

$$S = \frac{f l_1^2 \sin \alpha \tan \alpha \sqrt{f^2 + [(l_1 - f) \tan \alpha]^2}}{[l_1 (l_1 - f) \tan \alpha + x l_1 \sin \alpha]^2} \quad (5)$$

由(5)式可知,传感器灵敏度 S 与工作角 alpha、透镜物距 l₁、透镜焦距 f、被测物体实际位移 x 有关。在测量范围最远处,灵敏度 S 取最小值。

2 结构优化和电路设计

2.1 结构优化

选定的 PSD 感光面尺寸为 9 mm×9 mm,传感器设计测量范围±1.5 mm,考虑光斑落在 PSD 光敏面距中心 90%的范围内会有较好的线性,因此,最小灵敏度 S_{\min} 取值宜为 2.0~2.5 之间。下面将分别讨论各参数对 S_{\min} 的影响,以确定最优结构参数。

(1) 工作角 $\alpha=20^\circ$ 时,给定不同的透镜焦距 f 值,最小灵敏度 S_{\min} 随透镜物距 l_1 变化的关系如图 2 所示。

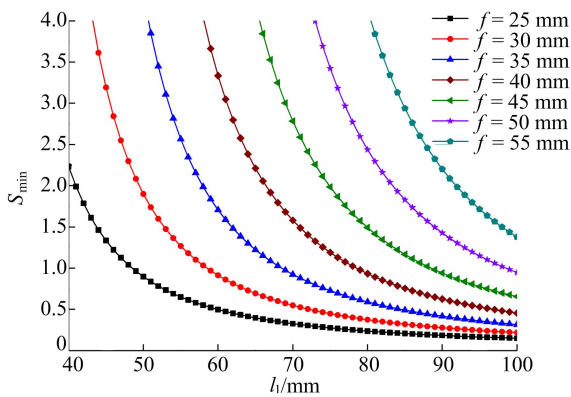


图 2 工作角 $\alpha=20^\circ$ 时 S_{\min} 随 l_1 变化的曲线

从图 2 可以看出,焦距 f 在 25~40 mm、工作距在 40~55 mm 时,最小灵敏度在 2.0~3.0 之间。

但在此区间,光敏面入射角 β 较小,在 $0^\circ\sim 12.5^\circ$ 之间,成像不理想,因此不予考虑。

(2) 工作角 $\alpha=30^\circ$ 时,给定不同的透镜焦距 f 值,最小灵敏度 S_{\min} 随透镜物距 l_1 变化的关系如图 3 所示。

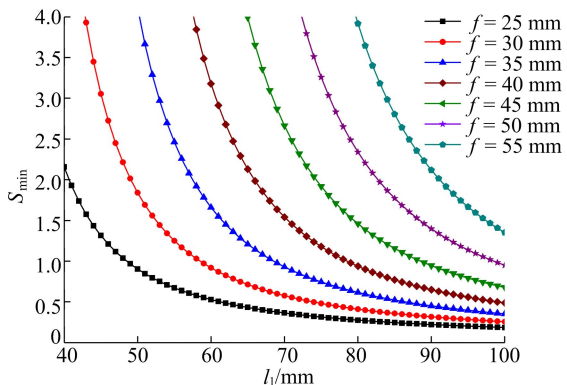


图 3 工作角 $\alpha=30^\circ$ 时 S_{\min} 随 l_1 变化的曲线

从图 3 可以看出,焦距 f 在 30~45 mm、工作距在 45~60 mm 时,最小灵敏度在 2.0~3.0 之间。光敏面入射角 β 在 $16^\circ\sim 20^\circ$ 之间,成像条件较为理想。

在图 3 中选取最小灵敏度满足 2.0~2.5 区间的数组,见表 1 所列。

表 1 工作角 $\alpha=30^\circ$ 时的参数对比

数组	焦距/mm	物距/mm	$\beta/^\circ$	S_{\min}
1	25	40	19.1	2.156
2	30	45	16.1	3.054
3	30	46	17.2	2.725
4	35	54	17.3	2.698
5	35	55	18.2	2.463
6	40	62	17.7	2.678

(3) 工作角 $\alpha=40^\circ$ 时,给定不同的透镜焦距 f 值,最小灵敏度 S_{\min} 随透镜物距 l_1 变化的关系如图 4 所示。

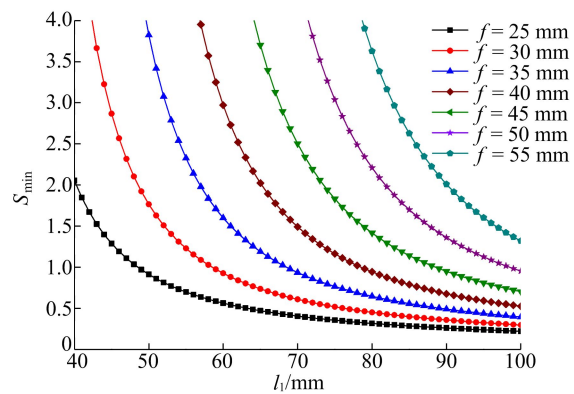


图 4 工作角 $\alpha=40^\circ$ 时 S_{\min} 随 l_1 变化的曲线

从图 4 可以看出,焦距 f 在 30~50 mm、物距在 45~70 mm 时,最小灵敏度在 2.0~3.0 之间。光敏面入射角 β 在 $22^\circ\sim 26^\circ$ 之间,成像条件最佳。

在图 4 中选取最小灵敏度满足 2.0~2.5 区间的数组,见表 2 所列。

表 2 工作角 $\alpha=40^\circ$ 时的参数对比

数组	焦距/mm	物距/mm	$\beta/^\circ$	S_{\min}
1	30	46	24.2	2.568
2	30	47	25.4	2.318
3	35	54	24.4	2.540
4	35	55	25.4	2.327
5	40	63	25.7	2.334

综合考虑系统的灵敏度和体积问题,最终确

定合适的各项参数为： $\alpha = 30^\circ, \beta = 18.29^\circ, l_1 = 55 \text{ mm}, f = 35 \text{ mm}, l_2 = 96 \text{ mm}, x = 1.5 \text{ mm}$ 。代入(5)式计算得 $S_{\min} = 2.463$ ，即被测表面移动 1 mm，反射光斑在 PSD 光敏面产生 2.463 mm 的位移。

2.2 电路设计

二维 PSD 结构示意图如图 5 所示。当光照射到 PSD 光敏面上时，4 个电极分别输出 4 路光电流，电流大小与光斑位置相关。

图 5 中：Y 方向输出电流为 I_1, I_2 ；X 方向输出电流为 I_3, I_4 。

二维 PSD 结构位置与输出信号之间的关系式如下：

$$X = \frac{(I_2 + I_3) - (I_1 + I_4)}{I_1 + I_2 + I_3 + I_4} \frac{L}{2} \quad (6)$$

$$Y = \frac{(I_2 + I_4) - (I_1 + I_3)}{I_1 + I_2 + I_3 + I_4} \frac{L}{2} \quad (7)$$

其中： L 为 PSD 有效感光面的长度； I_1, I_2, I_3, I_4 分别为 PSD 的 4 个电极的光电流输出。

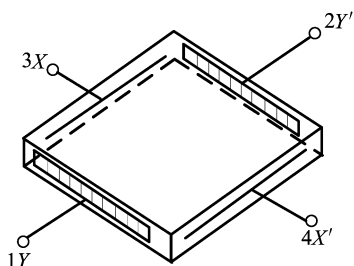


图 5 二维 PSD 结构示意图

转子轴振动传感器测量电路框图如图 6 所示。PSD 输出 4 路电流，将该 4 路电流信号转换成电压信号后经过低通滤波处理，截止频率为 2 kHz。AD7076 转换器将滤波后的电压信号转换为数字量后被单片机读取，在单片机内进行数据处理后将位移值发送给计算机，计算机显示测量位移值。

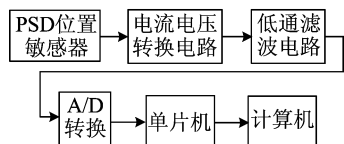


图 6 转子轴振动传感器测量电路框图

3 标定及测试

加工完成的转子轴振动传感器如图 7 所示，通过实验对其进行标定和测试。

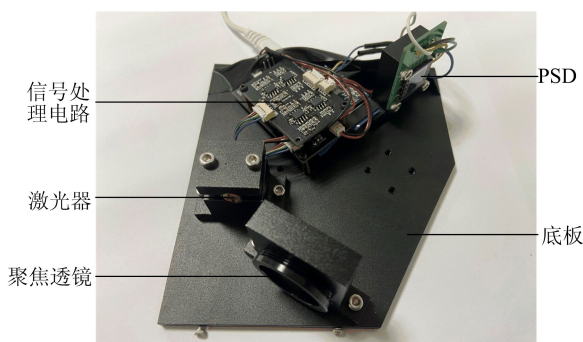


图 7 转子轴振动传感器实物图

3.1 标定

采用振动比较法对转子轴振动传感器进行标定，在标定实验中以迈克尔逊干涉仪作为参考基准(即精度优于 10 nm，重复定位标准偏差为 7 nm)^[12]。

标定实验装置示意图如图 8 所示。

在一维线性位移平台上固定一个双面反射镜，调整位移台，以 100 μm 为步进单位调整位移台，记录干涉仪和传感器的输出，重复 10 次，由实验可知，传感器在 0~2 mm 范围内线性度较好。以输入位移为横坐标，10 次重复实验传感器的输出电压均值为纵坐标，测量结果如图 9 所示。

从图 9 可以看出，转子轴振动传感器的灵敏度为 0.33 V/mm。

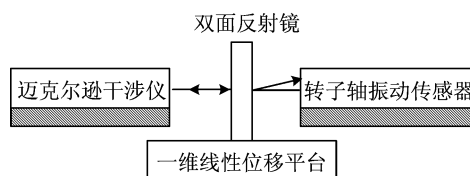


图 8 转子轴振动传感器标定实验装置示意图

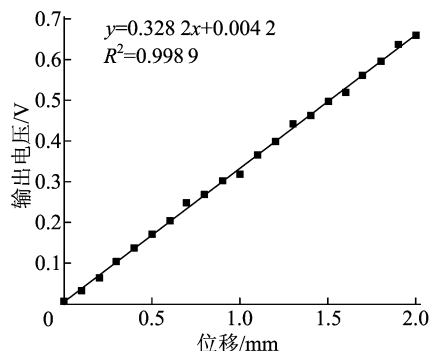


图 9 灵敏度测试结果

3.2 分辨率

传感器分辨率是指其可辨别的最小振幅值。

微纳米振动台作为激振源^[13],信号发生器输出频率为 2 Hz 和一定幅值的方波电压信号,经功率放大器后用于微纳米振动台,使振动台产生不同幅值的振动,实验装置示意图如图 10 所示。

通过调节微纳米振动台的振幅,转子轴振动传感器可辨别的最小振幅值如图 11 所示。

从图 11 可以看出,转子轴振动传感器的分辨率为 4 μm。

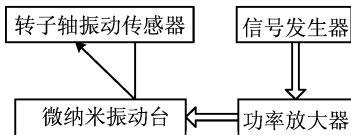


图 10 转子轴振动传感器分辨力实验装置示意图

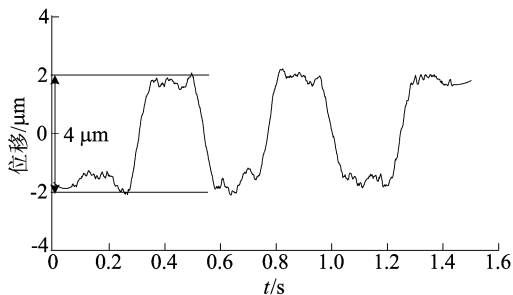


图 11 分辨率测试结果

3.3 频率响应

频率响应范围是指传感器能够准确检测振动的频率范围超出响应范围,测量误差将显著增大。以远东测振公司生产的商用 JX-3C 型振动校准仪作为激振源,频率响应范围实验装置如图 12 所示。该系统失真度低于 3%,有 6 个特定频率供选择,且由于激振系统输出功率的限制,其频率越高,所允许输出的最大振幅值越小。

选定 6 个振动频率值,记录传感器的输出振幅。以激励振幅为横坐标,传感器输出振幅为纵坐标,测量结果如图 13 所示。

从图 13 可以看出,在 10~325 Hz 范围内,转子轴振动传感器的输出线性良好,因此其频率响应范围为 10~325 Hz。

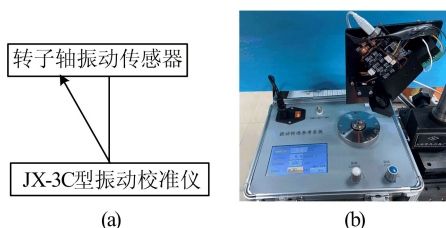


图 12 频率响应范围实验装置

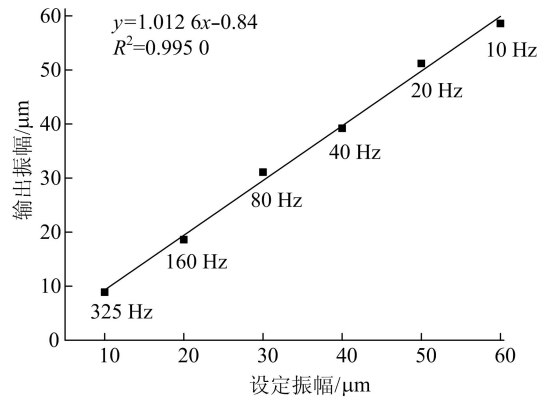


图 13 频率响应范围

3.4 重复性

使用图 12 实验装置对转子轴振动传感器进行重复性测试,以 0.2 mm 为间隔,在 0~2 mm 范围内依次改变激振峰峰值,记录传感器输出信号,重复实验 10 次。以激振峰峰值为横坐标,激振峰峰值与传感器输出振幅的偏差值为纵坐标,测量结果如图 14 所示。

从图 14 可以看出,10 次测量的标准差均优于 3 μm。

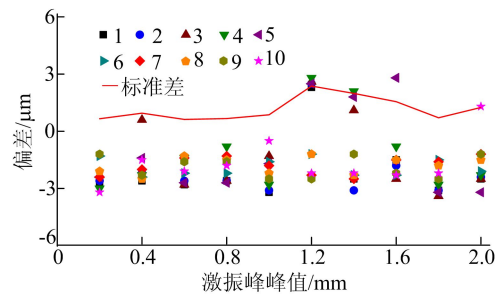


图 14 重复性测量结果

3.5 应用

以华能巢湖发电有限责任公司的汽轮机组为例,进行现场实际测量。该汽轮机组安装了德国 epro 公司电涡流式振动探头(型号 PR6423/003-031),用于检测汽轮机转子轴振动,其灵敏度为 8 V/mm,测量范围为 ±1 mm。将本文传感器与电涡流探头测量同一处转轴振动,实测结果如图 15 所示。

从图 15 可以看出,2 个传感器的时域波形趋势一致。

使用频谱分析方法对图 15 所示的时域数据进行快速傅里叶变换(fast Fourier transform, FFT)处理^[14],得到的频谱图如图 16 所示。

由图 16 可知,汽轮机转子轴整体运行良好,

存在底噪抬起现象,表明汽轮机轴瓦间有磨损可能,这为下一步设备检修提供了故障分析依据。

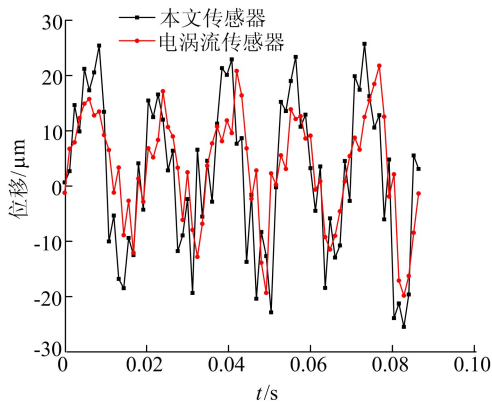


图 15 2 个传感器的时域对比

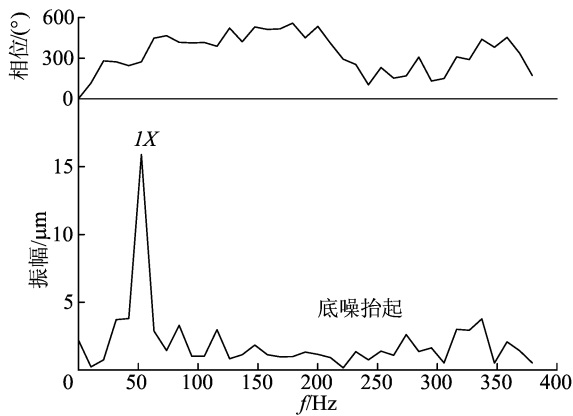


图 16 FFT 频谱图

4 结 论

本文研制了一款基于 PSD 的汽轮机转子轴振动传感器,其灵敏度为 0.33 V/mm ,测量范围为 2 mm ,分辨率为 $4 \mu\text{m}$,频率响应范围为 $10 \sim 325 \text{ Hz}$,10 次重复实验标准差优于 $3 \mu\text{m}$ 。该传感器具有精度高、响应速度快、成本低廉、适应性强等特点,可以用于工业现场的汽轮机转子轴振动的检测和故障分析。

[参 考 文 献]

- [1] 沈士一,庄贺庆,康松,等. 汽轮机原理[M]. 北京:水利电力出版社,1992:1-2.
- [2] 杨建刚. 旋转机械振动分析与工程应用[M]. 北京:中国电力出版社,2007:1-2.
- [3] 周训强. 旋转机械轴心轨迹的提纯、特征提取与自动识别研究[D]. 重庆:重庆大学,2010.
- [4] ADAMS M. Rotating machinery vibration: from analysis to troubleshooting[M]. [S. l.]:CRC Press,2000:155-156.
- [5] LI T, TAN Y, ZHOU Z, et al. Study on the non-contact FBG vibration sensor and its application[J]. Photonic Sensors,2015,5(2):128-136.
- [6] KISHORE P, DINAKAR D, SHANKAR M, et al. Non-contact vibration sensor using bifurcated bundle fiber for real time monitoring of diesel engine[J]. International Journal of Optoelectronic Engineering,2012,2(1):4-9.
- [7] MIYASHITA T, FUJINO Y. Development of 3D vibration measurement system using laser doppler vibrometers[C]// Health Monitoring and Smart Nondestructive Evaluation of Structural and Biological Systems V. [S. l.]: International Society for Optics and Photonics,2006:649-656.
- [8] 程琳,李丹东,周斌,等. 基于蓝光 DVD 光学读取头的非接触式探头[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版),2017,40(5):606-609.
- [9] 荣锋,韩信,郭翠娟. 基于电涡流传感器的微位移测量系统的设计[J]. 仪表技术与传感器,2020(9):12-18.
- [10] 王晓嘉,高隼,王磊. 激光三角法综述[J]. 仪器仪表学报,2004,25(4):601-609.
- [11] 邹振书,李喜增,张景和,等. 非接触测量激光光学探头[J]. 光学精密工程,1997,5(3):83-89.
- [12] LI R, FAN K, HUANG Q, et al. A long-stroke 3D contact scanning probe for micro/nano coordinate measuring machine[J]. Precision Engineering,2016,43:220-229.
- [13] LI R, LEI Y, ZHANG L, et al. High-precision and low-cost vibration generator for low-frequency calibration system [J]. Measurement Science and Technology, 2018, 29(3):034008.
- [14] 程林,谢峰. 一种基于振动的汽车主减总成在线故障诊断系统[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版),2011,34(8):1138-1141.

(责任编辑 胡亚敏)