

The Design and Test of Fiber Grating Based Sensor for the Vibration Signals from Oil-Immersed Transformer

Benxi Pi¹, Lixin Xu², Wenzhen Li², Yi Liu¹, Zhenbo Du¹, Yang Ye³, Li Xia^{3*}

¹State Grid Electric Power Research Institute Nanrui Co., Ltd., Wuhan Hubei

²State Grid Eastern Inner Mongolia Electric Power Co., LTD, Hohhot Inner Mongolia

³Huazhong University of Science and Technology, Wuhan Hubei

Email: *xiali@hust.edu.cn

Received: Jan. 6th, 2016; accepted: Jan. 26th, 2016; published: Jan. 30th, 2016

Copyright © 2016 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

A vibration sensor based on fiber Bragg grating is proposed for the measurement of vibration signals in oil-immersed transformers. This paper firstly describes the principle structure of the sensor and the advantages of the vibration signal in the special environment of the transformer. Through the vibration simulation test, no-load and oil two kinds of sensor performance test and under oil immersion environment, the measured vibration signal dynamic range for 400 Hz, the measurement accuracy is up to 1 Hz. Finally, the temperature rise experiment is performed in the transformer insulation oil, and the vibration signal can be accurately measured from the temperature range of 40°C - 100°C.

Keywords

Fiber Grating, Transformer, Vibration Sensing, Temperature Rise

油浸式变压器光纤振动传感器的研制与测试

皮本熙¹, 徐立新², 李文震², 刘 诣¹, 杜振波¹, 叶 阳³, 夏 历^{3*}

¹国网电力科学研究院武汉南瑞有限责任公司, 湖北 武汉

²国网内蒙古东部电力有限公司, 内蒙古 呼和浩特

*通讯作者。

文章引用: 皮本熙, 徐立新, 李文震, 刘诣, 杜振波, 叶阳, 夏历. 油浸式变压器光纤振动传感器的研制与测试[J]. 传感器技术与应用, 2016, 4(1): 47-55. <http://dx.doi.org/10.12677/jsta.2016.41006>

³华中科技大学, 湖北 武汉

Email: *xiali@hust.edu.cn

收稿日期: 2016年1月6日; 录用日期: 2016年1月26日; 发布日期: 2016年1月30日

摘 要

本文研制了一种基于光纤光栅的振动传感器, 可应用于油浸式变压器中的振动信号测量。文章首先描述了此传感器的原理结构以及其在变压器的特殊环境中测量振动信号的优势。通过模拟振动实验, 进行了空载和油浸两种情况下传感器的性能测试, 在油浸环境下, 其测量振动信号的动态范围为400 Hz, 测量精度可达1 Hz。最后在变压器绝缘油中进行温升实验, 从40℃~100℃温度范围内, 都能准确测量振动信号。

关键词

光纤光栅, 变压器, 振动传感, 温升

1. 引言

随着国家经济发展, 我国电网规模不断扩大, 变压器容量也逐步提高。变压器作为电力系统中最核心的设备, 其长时间安全的运行对于整个电网的正常工作至关重要[1] [2]。因此, 对变压器状态进行实时在线监测, 及时了解其运行状况, 提早发现出现的异常或故障并进行维护和抢修, 是减少安全事故、降低经济损失的重要措施。

目前, 最典型的变压器为油浸式电力变压器, 由器身(铁芯、绕组、引线、开关), 变压器绝缘油, 油箱, 冷却装置和出线装置等组成[3]。在运输、安装和运行之后, 其铁芯和绕组的压紧程度将逐渐降低。另外, 随着运行时间的不断变长, 绕线的不断老化以及高电压下产生的漏磁现象都会使铁芯和绕组产生振动[4]。而长时间的异常振动有可能使铁芯松动或绕组变形, 一旦出现这种情况, 将大大降低抗击短路电流的能力。甚至可能会击穿铁芯造成铁芯与绕组的损坏, 严重影响变压器的绝缘能力与使用寿命。

根据国内外主流的变压器振动信号监测手段, 其需要空载变压器即离线检测, 然后利用电气方法对变压器的电荷进行测量进而判断振动是否异常[5]。显然, 这种方法非常繁琐而且也不利于经济效益。而光纤的特有性质刚好弥补了传统电气方法的缺陷, 光纤具有灵敏度高、抗电磁干扰、耐腐蚀、体积小、便于复用、易于成网等诸多特点[6], 大大降低了高压强磁环境对变压器状态在线监测的影响。光栅作为应用相当广泛的特种光纤, 已经有很多研究把光纤光栅应用在变压器的振动信号检测上。

2. 国内外研究现状

光纤光栅振动传感器的研究在国内开始于 20 世纪 90 年代初, 1996 年, 清华大学在 FBG 特性研究中就对 FBG 振动传感器提出了设计思路, 此后国内很多高校和科研单位, 从不同的角度对 FBG 振动传感器的设计提出具体的探讨和研究[7], 原理多是由悬臂梁提供弹性力, 这样的设计易产生啁啾或多峰现象致使测试不准, 灵敏度低。在国外, T.A. Berkoff 于 1996 年设计了如图 1 所示的振动传感器[8], 他把光纤光栅埋在了橡胶弹性体中, 它的固有频率达 2 KHz, 但是这种结构使光纤受到橡胶弹性体的横向压力导致反射波波峰啁啾和拓宽, 使测量精度大大降低。M.D. Todd [9]在 1998 年设计了构造如图 2 的振动传感器, 比 T.A. Berkoff 的设计有所改进, 横向力的影响降到原来的 1%, 防止了扭转和平面外的振动影

响,但是由于振动时光纤处的应变不均匀,同样会出现反射波波峰啁啾,降低了测试精度,而且灵敏度系数($0.24\sim 1.53\text{ pm/ms}^{-2}$)小,也不能满足工程中低频振动测试需要。Akira Mitab [10]在2001年设计了结构如图3的振动传感器,灵敏度系数达到 60 pm/ms 之,固有频率 49.2 Hz ,基本满足了工程的应用需求,但是该方案降低了传感器的工作范围,另外传感器工作时自由振动衰减慢,影响传感器的工作性能。

以上这些设计,因为测试灵敏度低,并不能很好的满足工程应用中低频振动测试的需要。主要原因是传感器结构不合理,如采用悬臂梁结构,因光纤光栅栅区直接粘贴在悬臂梁表面,悬臂梁振动带动光纤光栅变形时,易使光纤光栅产生啁啾或多峰现象,造成测试不准,且振动信号偏小(弱),灵敏度低;另外,没有刻意设计系统阻尼,由于系统阻尼小,造成传感器工作范围窄,上限工作频率约为无阻尼固有

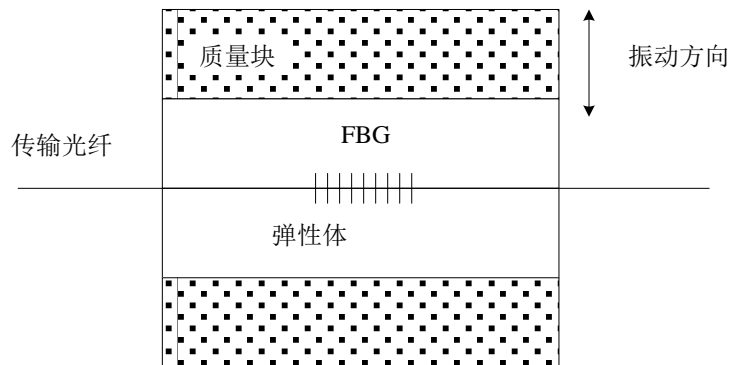


Figure 1. Elastomer FBG vibration sensor scheme put forward by T.A. Berkoff

图 1. T.A. Berkoff 提出的弹性体 FBG 振动传感器方案

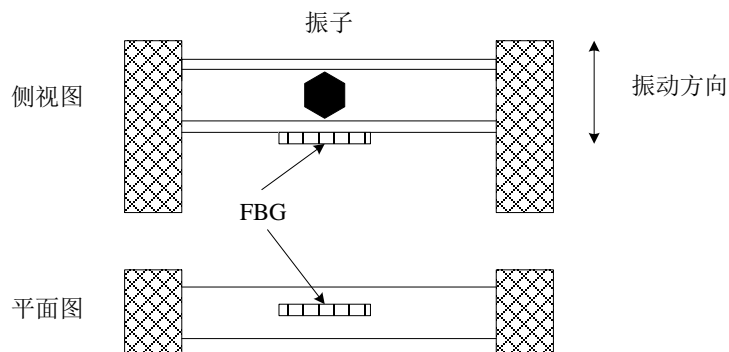


Figure 2. Elastic beam FBG vibration sensor scheme put forward by M.D. Todd

图 2. M.D. Todd 提出的弹性梁 FBG 振动传感器方案

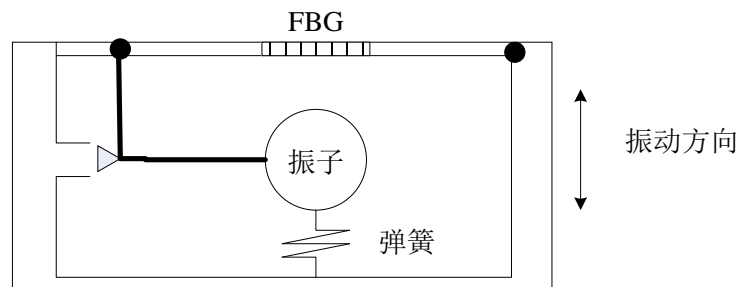


Figure 3. FBG vibration sensor scheme put forward by Akilra Mita

图 3. Akilra Mita 提出的 FBG 振动传感器方案

频率的 20%，且工作时自由振动衰减缓慢，影响传感器工作性能。

3. 适用于油浸式变压器的光纤光栅振动传感器设计

由于应用在变压器内部的光纤光栅加速度传感器容易受到变压器温度和变压器油阻尼的影响，因此，必须设计一种能够具有温度自补偿功能的光纤光栅振动传感器，且传感器必须做金属密闭封装，将振子与外界环境完全隔离，否则变压器油阻尼随温度不断变化会导致振子的振动阻力受到影响，从而使测量的结果产生误差。

根据变压器内部液体环境的特殊要求，结合常见的光纤光栅振动传感器的结构特点，本研究特别设计了一款能够在变压器绝缘油环境中使用的光纤光栅振动传感器，其内部结构如图 4 所示。

该光纤光栅振动传感器由质量-弹簧系统构成，进行振动测量时，将传感器外壳固定在待测物体上，外界振动使得传感器外壳和惯性质量块之间发生相对运动，通过 L 型悬臂梁作用在 1 号光纤光栅和 2 号光纤光栅上，使光纤光栅在其轴向受到应力的作用而产生拉伸或压缩，1 号光纤光栅和 2 号光纤光栅在拉伸和压缩中交替转换，其光纤光栅中心波长随之发生漂移。通过检测光纤光栅中心波长漂移量的大小和变化频率即可实现对振动频率的测量。

上述双光纤光栅加速度传感器，其特征在于，1 号光纤光栅和 2 号光纤光栅为全同的光栅且沿 L 型悬臂梁的上端完全对称布置，即中心波长、温度系数和应变系数均相同，则当质量块向下振动时，1 号光纤光栅被拉伸，2 号光纤光栅被压缩，其波长变化量分别为：

$$\Delta\lambda_1 = K_t \cdot \Delta T + K\varepsilon \cdot \Delta\varepsilon \quad (1)$$

$$\Delta\lambda_2 = K_t \cdot \Delta T - K\varepsilon \cdot \Delta\varepsilon \quad (2)$$

式中， $\Delta\lambda_1$ 为第一光纤光栅的波长变化量， $\Delta\lambda_2$ 第二光纤光栅的波长变化量， ΔT 为温度变化量， $\Delta\varepsilon$ 为振动引起的应变变化量。上述两式相加可获得温度的变化量，上述两式相减可获得应变的变化量：

$$\Delta T = (\Delta\lambda_1 + \Delta\lambda_2) / 2K_t \quad (3)$$

$$\Delta\varepsilon = (\Delta\lambda_1 - \Delta\lambda_2) / 2K\varepsilon \quad (4)$$

上述方法不仅实现了对振动加速度测量的温度自补偿，还可实现温度的独立测量，且具有较高的检测灵敏度。

在实现了温度自补偿功能后，该传感器必须进行金属密闭封装，以隔离变压器内部的变压器油对振子阻尼的影响，通过合理规划后，用金属铜作为传感器的封装材料，并在铜的表面镀金，通过稳定性极高的稀有金属隔离液体环境的水分，起到完全密闭的作用。

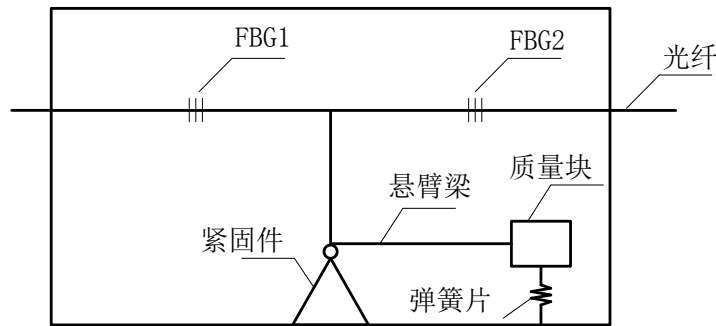


Figure 4. Structure of transformer fiber grating vibration sensor under liquid environment

图 4. 变压器液体环境光纤光栅振动传感器结构图

4. 实验结果与讨论

4.1. 空载振动测试

实验采用振动台模拟变压器振动, 在空载时, 采用上述封装好以后的光栅传感器进行振动信号测量, 振动台频率由电脑程序控制, 输出频率信号也能通过解调仪在电脑上显示。如图 5。

振动台由电脑设定频率, 其振动方向是没有规律的, 这正好符合实际变压器的振动情况, 由于控制台最高能达到 600 Hz, 故设定从 50 Hz 开始起振, 间隔 50 Hz 直到 600 Hz, 测得实验数据如表 1。

由图 6 可以看出, 此光栅传感器可以很准确的测量振动信号频率, 并且其测量范围覆盖了整个频率可调范围。

4.2. 油中振动测试

根据油缸空载实验, 此光纤光栅振动传感器可以很好的对空载时振动信号进行测量, 下面将进一步测试其在变压器绝缘油中的振动测量性能, 故在油缸中加入变压器油, 如图 7。

为了更加精确测量油缸各个方向的振动信号, 在空间三维方向上各布置一个传感器, 我们称为一号光栅(图中正前方), 二号光栅(图中左侧), 三号光栅(图中最顶上)。仍然采用间隔 50 Hz 的方法, 从 0 测到 600 Hz 得到测量结果(室温 26℃)如表 2。

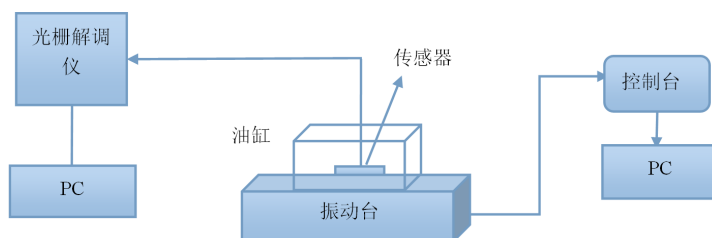


Figure 5. Vibration measurement schematic diagram

图 5. 振动测量示意图

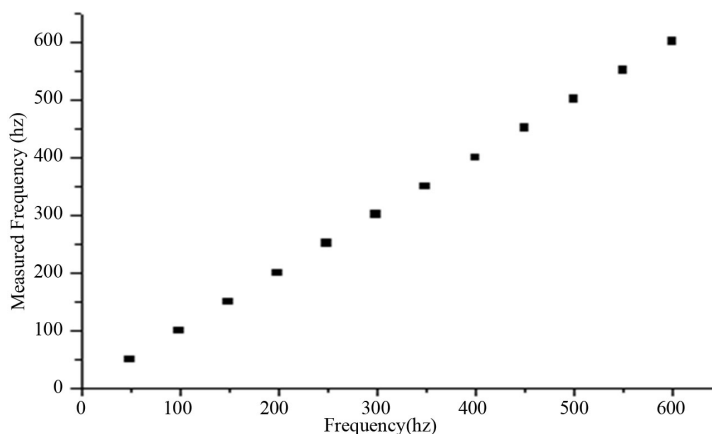


Figure 6. Vibration measurements of grating sensor

图 6. 光栅传感器振动测量结果

Table 1. Measurement results of grating sensor from 50 Hz to 600 Hz

表 1. 50 Hz 到 600 Hz 光栅传感器测量结果

设定频率(Hz)	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600
测量频率(Hz)	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600

Table 2. Vibration signal measured results in insulating oil
表 2. 绝缘油中振动信号测量结果

频率(Hz)	1号光栅(Hz)	2号光栅(Hz)	3号光栅(Hz)
50	50	50	50
100	100	100	100
150	150	150	150
200	200	200	200
250	250	250	250
300	300	300	300
350	350	350	350
400	400	400	400
450	0	0	0
500	0	0	0
550	0	0	0
600	0	0	0

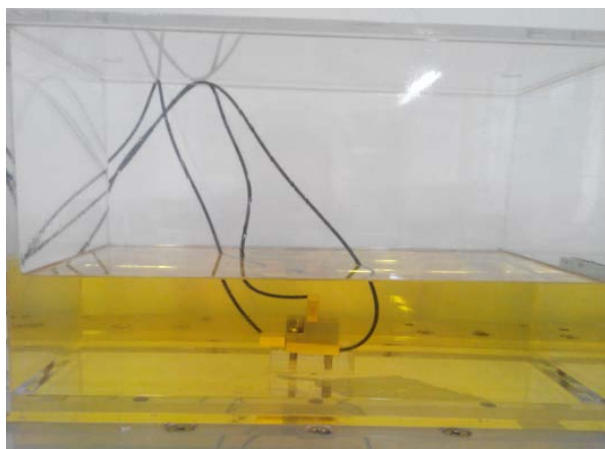


Figure 7. Vibration measurement in the insulating oil field
图 7. 绝缘油中振动测量现场图

由表 2 可以得出, 传感器仍然能够准确探测出振动信号频率, 并且不管是哪一方向上的结果, 都能够准确显示油缸振动频率, 这就排除了因振动方向的随机性导致对实验结果产生了影响。另外, 还应该注意, 在油中测量振动信号频率的范围相较于空载时, 其测量范围减小了, 这可能是由于油中比较大的粘滞阻力使得传感器感受到的振动信号较之实际信号(特别是高频)有差异, 导致其无法准确测量。图 8 展示了 3 个传感器在 200 Hz 振动过程中的时域响应。图 9 显示了 3 个传感器在 200 Hz 时经过 FFT 变换后得到的频谱图。

对于光纤传感器而言, 另外一个重要的性能指标为测量精度。上面已经提到间隔 50 Hz, 其能准确测量到, 为了更加清楚确定其在油中的测量精度, 我们拟定一个具体频率 300 Hz, 因为解调仪的最大分辨率为 1 Hz, 而振动台却有 0.1 Hz, 所以间隔调频 1 Hz, 测量 10 组数据, 得到结果如图 10。

由图 10 所示, 此光栅传感器对振动频率测量最高精度可达 1 Hz, 而且这可能由于解调仪的分辨率限

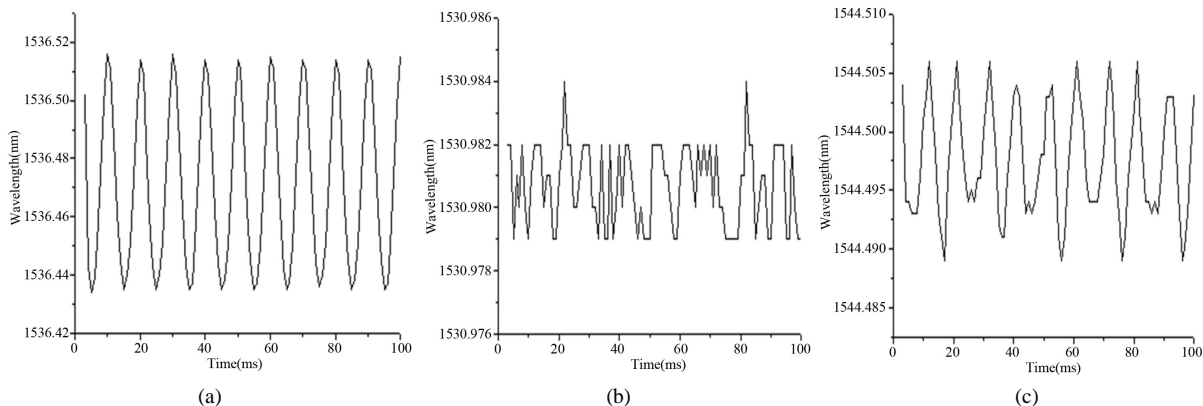


Figure 8. (a) Grating one 200 Hz time response; (b) grating two 200 Hz time response; (c) grating three 200 Hz time response
图 8. (a) 一号光栅 200 Hz 时域响应; (b) 二号光栅 200 Hz 时域响应; (c) 三号光栅 200 Hz 时域响应

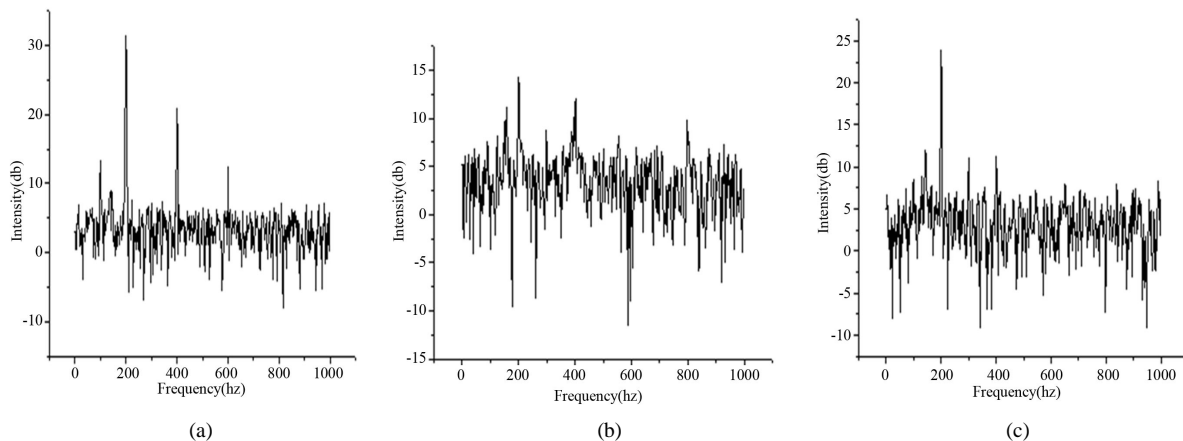


Figure 9. (a) Grating one 200 Hz frequency response; (b) grating two 200 Hz frequency response; (c) grating three 200 Hz frequency response
图 9. (a) 一号光栅 200 Hz 频谱响应; (b)二号光栅 200 Hz 频谱响应; (c) 三号光栅 200 Hz 频谱响应

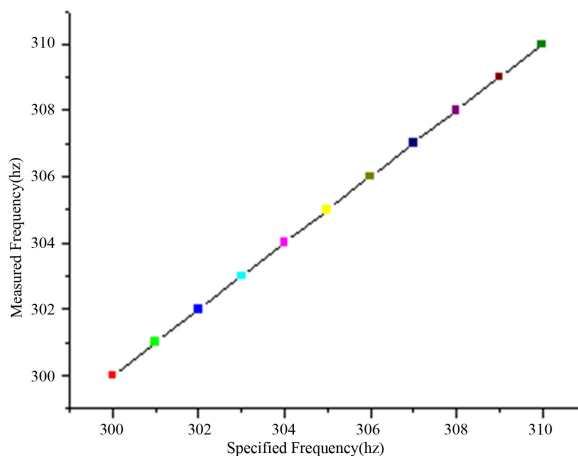


Figure 10. Measurement precision of grating sensor vibration frequency
图 10. 光栅传感器振动频率测量精度

制。不过对于变压器来说，1 Hz 的测量精度已经足够应用于变压器的振动信号测量中了。

4.3. 油中温升振动测试

在实际应用中，变压器接负载长时间运行势必导致油温上升，尽管油浸式变压器有自身降温系统，但是相对于常温下，仍然是有显著升高的。为了模拟变压器的温升，故把整个振动系统放入温控室来对它进行加热，如图 11。

在温升过程中，选取 40℃，60℃，80℃和 100℃为测量节点，每一个温度点间隔 100 Hz 对振动传感进行定性测量，如图 12。

由图 12 可以看出，此光栅振动传感器在不同温度下也能保持很好的频率测量稳定性，如同理论分析中一样，其温度自补偿机制能够很好的应对变压器油中由于负载电流引起的温度上升对传感器造成的影响，并且其在 100℃情况也能保持很好的传感性能，这已经能够满足油浸式变压器正常工作时的最高温度了。注意到，当温度逐渐上升时，传感器测量振动频率的动态范围也在变大，能够测到 500 Hz，这可能由于温度上升，变压器油的粘滞阻力减小，其对传感器的影响也变小，那么对振动源信号的测量范围就相对增大了。

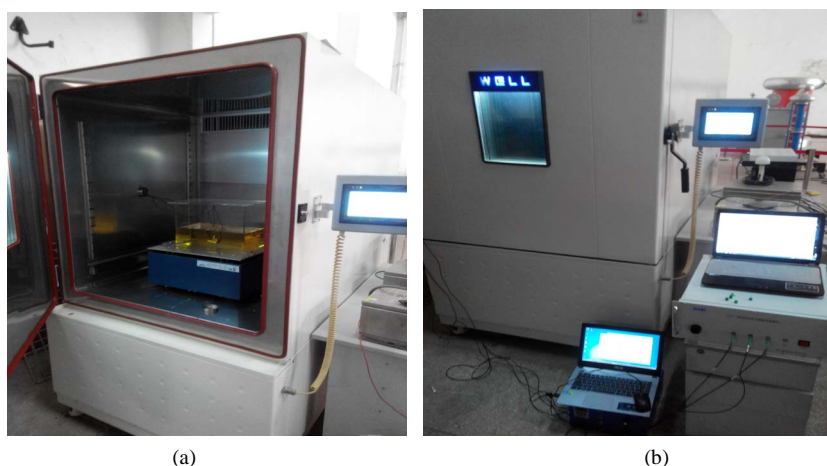


Figure 11. (a) Vibration system in the temperature control room; (b) the experiment scene
图 11. (a) 振动系统放入温控室中；(b) 实验现场图

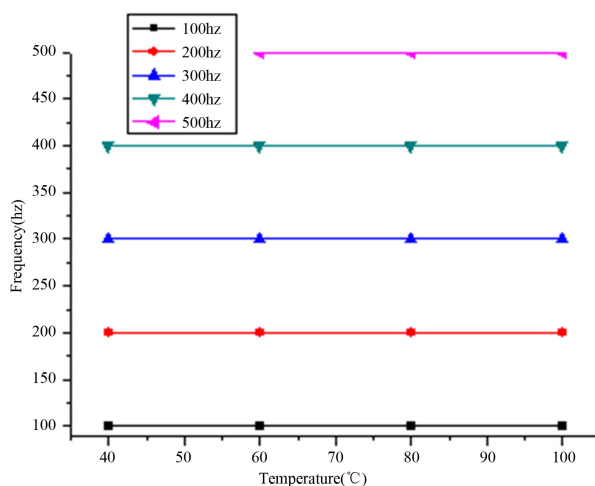


Figure 12. The frequency measurement results under different temperature
图 12. 不同温度下频率测量结果

5. 总结与展望

本文提出了一种基于光纤光栅的振动传感器应用于变压器中振动信号的测量。通过模拟振动试验测试了其在不同条件下的性能指标。在变压器绝缘油环境中，其振动频率测量的动态范围为 400 Hz，测量精度可达 1 Hz，并且振动方向的随机性不会影响测量结果。在模拟变压器温升实验中，此光栅传感器表现出了很好的温度不敏感性，在 20℃~100℃ 范围内，都能准确测量振动信号的频率值。

参考文献 (References)

- [1] 邓建钢, 王立新, 等. 内置光纤光栅油浸式变压器的研制[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(24): 160-167.
- [2] 马宏彬, 何金良, 陈青恒. 500 kV 单相电力变压器的振动与噪声波形分析[J]. 高电压技术, 2008, 34(8): 1599-1604.
- [3] 刘统玉, 王昌. 光纤测量技术在变压器状态检测中的应用研究[J]. 山东科学, 2008, 21(4): 41-51.
- [4] 田玉芳. 变压器绕组状态的振动检测法研究[D]: [硕士学位论文]. 山东: 山东大学, 2014.
- [5] 王世山, 等. 利用振动法进行变压器在线监测的应用研究[J]. 变压器, 2002, 39(s1): 73-76.
- [6] 贾振安, 王佳, 等. 光纤传感技术在气体检测方面的应用[J]. 光通信技术, 2009, 33(4): 55-58.
- [7] 孙汝蛟, 孙利民, 等. 一种新型光纤布喇格光栅振动传感器研究[J]. 光子学报, 2007, 36(1): 63-67.
- [8] Berkoff, T.A. and Kersey, A.D. (1996) Experimental Demonstration of a Fiber Bragg Grating Accelerometer. *IEEE Photonics Technology Letters*, **8**, 1677-1679.
- [9] Todd, M.D., Johnson, G.A., Althouse, B.A., *et al.* (1998) Flexural Beam-Based Fiber Bragg Grating Accelerometers. *IEEE Photonics Technology Letters*, **10**, 1605-1607.
- [10] Mita, A. and Yokoi, I. (2001) Fiber Bragg Grating Accelerometer for Buildings and Civil Infrastructures. *SPIE*, **4330**, 479-486.