

激光与光电子学进展

FBG 三维拉力传感器变电站高压套管测试

谢凯^{1,2}, 谭滔^{1,2}, 司学振¹, 吕中宾¹, 任鹏亮¹, 刘祥和², 段超², 田野², 柴全², 高菲³, 张建中^{2*}¹国家电网河南省电力公司电力科学研究院, 河南 郑州 450002;²哈尔滨工程大学纤维集成教育部重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001;³中国船舶工业系统工程研究院, 北京 100094

摘要 采用一种光纤布拉格光栅三维拉力传感器对变电站高压套管的安装方式进行了测试,并对套管端部受力状态进行了长达 1500 h 的长时间监测。通过测量不同安装方式下套管端部的受力,优化了引下线方式和金具安装类型;对套管端部受力进行长时间监测,得到套管端部存在三维拉力和温度引起的热应力的结果,并在三维力中得到可能为风载荷加载在跨线上引起变电站结构晃动的低频信号频率为 0.18 Hz 和 0.22 Hz。基于光纤布拉格光栅三维拉力传感器,初步实现了对变电站的健康监测,推动智能电网的发展。

关键词 光纤光学; 光纤布拉格光栅; 三维拉力传感器; 高压变电站; 高压套管; 健康监测

中图分类号 O439

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.0906002

High-Voltage Bushing Test of FBG Three-Dimensional Tension Sensor in Substation

Xie Kai^{1,2}, Tan Tao^{1,2}, Si Xuezhen¹, Lü Zhongbin¹, Ren Pengliang¹, Liu Xianghe²,
Duan Chao², Tian Ye², Chai Quan², Gao Fei³, Zhang Jianzhong^{2*}¹Henan Electric Power Corporation Electric Power Research Institute, State Grid, Zhengzhou, Henan 450002, China;²Key Laboratory of In-Fiber Integrated Optics, Ministry of Education, Harbin Engineering University, Harbin, Heilongjiang 150001, China;³Systems Engineering Research Institute of China State Shipbuilding Cooperation, Beijing 100094, China

Abstract Three-dimensional (3D) tension sensor based on fiber Bragg grating (FBG) is used to test the installation state of high-voltage bushing in substations, and the stress state of the bushing end is continuously monitored for 1500 h. By measuring the stress at the end of the bushing under different kinds of installation, the arrangement of the down line and fittings installation type are optimized. By monitoring the stress at the end of the bushing for a long time, the 3D tension and the thermal stress due to temperature changing at the end of the bushing are measured. Low-frequency signals (0.18 and 0.22 Hz) are obtained from the 3D tension, which are due to substation shaking resulting from the wind load on the cross line. The health monitoring of the substation is preliminarily realized by the 3D tension sensor based on FBG, which can further facilitate the development of the smart grid.

Key words fiber optics; fiber Bragg grating; three-dimensional tension sensor; high voltage substation; high voltage bushing; health monitoring

OCIS codes 060.2370; 060.2300; 060.3735; 060.2430; 060.2310

收稿日期: 2020-07-30; 修回日期: 2020-09-03; 录用日期: 2020-09-20

*E-mail: zhangjianzhong@hrbeu.edu.cn

1 引言

变电站是指电力系统中电压和电流进行变换,接受电能及分配电能的场所。特高压变压器、高压套管、避雷器是整个变电站输电系统中不可或缺的重要组成设备。电能通过一系列传输线缆和接线端子与这些设备连接,实现电能的转换^[1]。在室外的风、雨、振动等环境作用下,变电站的线缆会发生晃动,使得线缆与变压设备之间的接线端子受力复杂,易发生变形或者与变压设备之间接触不良^[2-3],导致变电站事故发生。

目前,对于变电站变压设备的监测,主要集中在局部放电、绝缘性^[4-6]等方向,而线缆与变压设备连接质量的不良也会导致变电站事故的发生,因此对接线端子进行研究,反映线缆与变压设备的连接状况也是尤为必要的。近年来,已有科研工作者对接线端的电气性能^[7-8]、材料和安装^[9-10]在连接中的作用进行研究。2016年,国家电网在十八项反措中明确要求引流线(包含金具)对套管接线柱的作用力不能大于套管和接线端子的弯曲负荷耐受值。因此保护套管安全、优化线缆与变压设备间的连接方式,是变电站安全运行的重要内容。2017年开始,河南电力公司对风载荷下接线端子连接金具系统^[11-12]和接线端子处的引下线连接方式^[13]进行仿真优化,并设计应变片拉力传感器对接线端子的受力进行了测量^[14-15]。但所设计的应变片三维拉力传感器需要 24 个应变片进行三维力解调,解调复杂,且应变片传感器难以在变压器高压、强电磁环境中长时间稳定实时在线测量。

光纤传感器具有体积小、耐电磁环境干扰、稳定性高、可复用等优点,可代替应变片传感器运用于各个领域^[16-24]。本文采用光纤光栅拉力传感器对高压套管安装方式和长时间状态进行了测试。基

于光纤布拉格光栅(FBG)传感器,设计了具有高压套管端部接线端子的三维拉力测量传感器,采用 8 个光栅,实现三维拉力的解调;将传感器安装在套管端部,实现对套管与引下线安装方式的测试,优化引下线的安装方式和金具的安装类型,得到最佳的安装方式;并将传感器安装在端部进行长时间的监测,实现对变电站套管三维拉力的实时监控和预警,并测量得到三维力中的低频信号,推测风载荷对变电站套管系统整体的作用产生了此低频信号。结果显示,光纤光栅三维拉力传感器能够实现对套管的实时在线监测,促进了光纤传感器在电网系统的发展,推动输电系统智能化监控的发展,保障变电站的安全运行。

2 光纤光栅三维拉力传感器

光纤布拉格光栅是在纤芯部位具有周期性折射率分布结构的光纤。当宽带光进入光栅光纤时,波长满足布拉格条件的光将被反射^[25],而其他波将继续传播。光纤光栅布拉格波长的表达式为

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda, \quad (1)$$

式中: λ_B 为布拉格波长; n_{eff} 为有效折射率; Λ 为光栅的空间周期。

基于光纤光栅制作拉力传感器,并将其安装在变电站主变套管端部的接线端子处进行测试。图 1(a)为每个传感器上光纤光栅的位置和类型,传感器上有 5 个光纤光栅应变传感器和 3 个光纤光栅温度传感器,光栅 1 和 3 进行 X 方向力的解调,光栅 2 和 4 进行 Y 方向力的解调,光栅 2 和 5 进行 Z 方向力的解调。温度传感器 T1 对光栅 1 进行温度补偿,温度传感器 T2 对光栅 2、3 和 5 进行温度补偿,温度传感器 T3 对光栅 4 进行温度补偿。图 1(b)为设计封装完成的安装在主变套管上的三维拉力传感器,图 1(c)为传感器的温度灵敏度和应变灵敏度。

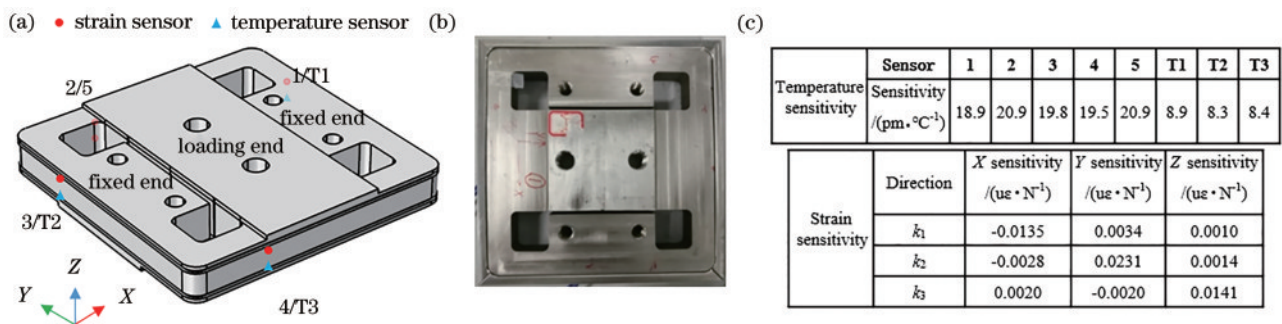


图 1 三维(3D)拉力传感器。(a)传感器布置;(b)传感器封装;(c)传感器参数
Fig. 1 3D tension sensor. (a) Sensor arrangement; (b) sensor package; (c) sensor parameters

对标定得到的传感器灵敏度矩阵进行光纤光栅三维拉力传感器三维力解调,解调公式为

$$\begin{cases} s_1 = \epsilon_1 - \epsilon_3 \\ s_2 = \epsilon_2 - \epsilon_4 \\ s_3 = \epsilon_2 - \epsilon_5 \end{cases}, \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} F_X \\ F_Y \\ F_Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{1x} & k_{1y} & k_{1z} \\ k_{2x} & k_{2y} & k_{2z} \\ k_{3x} & k_{3y} & k_{3z} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \\ s_3 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式中: $\epsilon_i (i=1, 2, 3, \dots, 5)$ 为经过温度补偿后各应变光栅测量的应变值,通过(2)式,运算得到沿 X、Y、Z 方向三维力的应变 s_1 、 s_2 、 s_3 。将灵敏度 k_{ix} 、 k_{iy} 、 $k_{iz} (i=1, 2, 3)$ 代入(3)式中,可求得三维承载力 F_X 、 F_Y 和 F_Z 。

3 套管安装方式测试

基于已封装的光纤光栅三维拉力传感器,对主要套管的安装方式进行优化研究。套管在不同的安装方式下受到的初始力不一样,选择产生较小作用力的安装方式能有效避免故障的发生。将三维拉力传感器安装在变电站内使用,变电站环境如图 2(a) 所示,变电站主要由跨线、引下线、主变套管、避雷器、电容式电压互感器(CVT)和相关的塔支架组成。跨线连接输电线和下端变压设备。下线起到连接跨线和主变套管、避雷器、CVT 的功能,不同的跨线下线安装方式会影响主变套管受到的作用力大小。选择合适的安装方式,使得主变套管受到的作用力最小,能够最大保持设备的有效寿命。

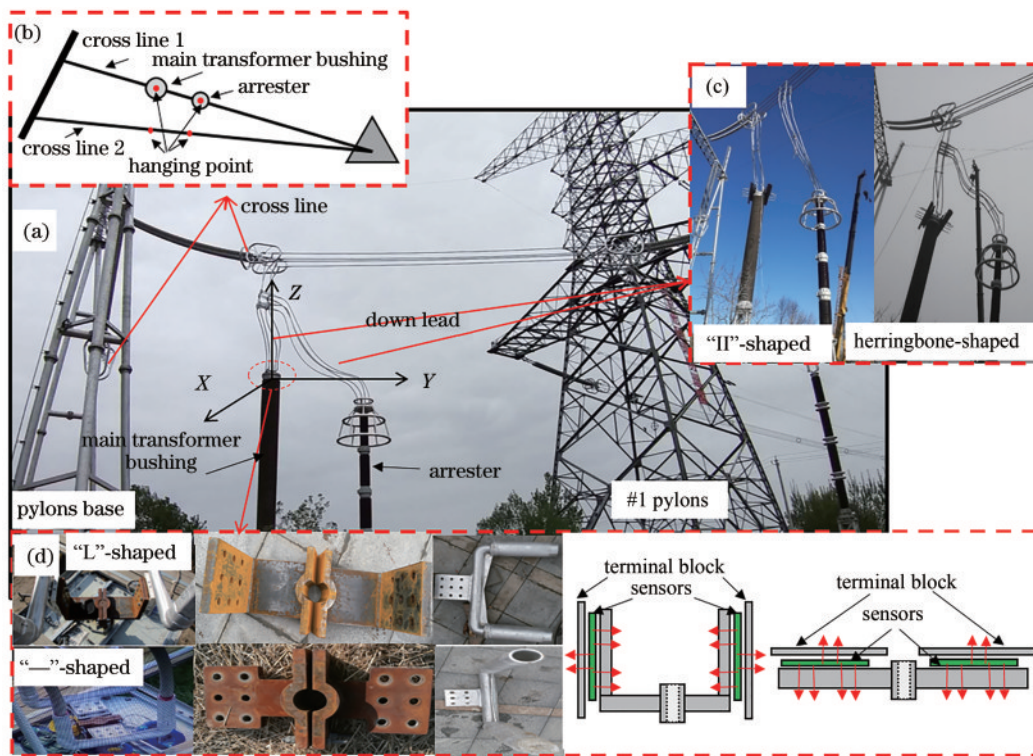


图 2 三维拉力测试环境。(a)变电站测试环境;(b)跨线;(c)下线;(d)金具

Fig. 2 3D tension testing environment. (a) Substation test environment; (b) cross line; (c) down lead; (d) fittings

变电站中跨线安装方式有两种,如图 2(b) 所示。避雷器和主变套管的引下线可以安装在跨线 1 或者跨线 2 上。跨线 1 和跨线 2 在塔基横梁上的位置不同,跨线 1 连接上 #1 塔后位于主变套管正上方,跨线 2 连接上 #1 塔后位于主变套管斜上方。因此使用不同的跨线连接方案后引下线对主变套管的作用力是不同的。

变电站内连接跨线和主变套管端部的下线也

有两种连接方法,即“Ⅱ”字形和“人”字形连接,如图 2(c) 所示。“Ⅱ”字形引下线是指主变套管和避雷器分别通过引下线与跨线连接,相互独立;“人”字形下线是指主变套管与跨线连接,避雷器下线连接到主变套管的下线上,呈人字形。不同的下线连接方式对主变套管端部的作用力也不一样。

引下线与主变套管端部通过金具结构进行连接,可进行连接的金具种类有两种:“一”字形和“羊

角”形(“L”形),如图 2(d)所示。一字形金具和羊角形金具有相对应的接线板,以供连接,传感器安装在金具和接线板之间,固定端与金具连接,加载端与接线板连接。

将两个传感器安装在主变套管端部,在不同的跨线、下线和金具安装方式下对主变套管端部受到的作用力进行测量,按照力的方向对两个传感器得到的三维力数据进行合成,得到的主变套管端部三维拉力如表 1 所示。

表 1 主变套管端部在各工况下的三维拉力

Table 1 3D tensile force at the end of main transformer bushing under various working conditions

| Cross line | Down lead | Fittings | F_x/N | F_y/N | F_z/N |
|------------|--------------------|--------------|-----------|----------|----------|
| 1 | “ II ”-shaped | “—”-shaped | 4623.28 | -1956.12 | -182.53 |
| | | “ L ”-shaped | 12116.36 | 15559.12 | 16076.32 |
| | Herringbone-shaped | “—”-shaped | 7522.47 | -3963.84 | 502.27 |
| | | “ L ”-shaped | -5135.44 | 3510.38 | -225.59 |
| 2 | “ II ”-shaped | “—”-shaped | -4974.02 | -2213.34 | -1293.57 |
| | | “ L ”-shaped | -12658.57 | 14102.99 | -6716.51 |
| | Herringbone-shaped | “—”-shaped | | | |
| | | “ L ”-shaped | -16715.04 | 13168.63 | -6187.98 |

从表 1 可知,主变套管端部受到 Z 方向的作用力相对 X、Y 方向的作用力较小,因此主要对比 X、Y 方向的作用力。在所有的安装方式中,在跨线 1、II 字形引下线和一字形金具安装方式下,主变套管端部受到的作用力最小。因此跨线 1、II 字形引下线和一字形金具安装方式为主变套管最优的安装方式,这与 2017 年吕中宾对高压变电站引下线及连接金具系统力学特性分析的结论一致^[13]。在跨线 2 的安装方式下,主变套管端部受到的力普遍要大于跨线 1 的安装方式,这与河南安阳变电站在跨线 2 安装条件下发生的套管倒塌事件吻合。因此在实际变电站内选择跨线 1、II 字形引下线和一字形金具安装方式,保证主变套管受到较小的作用力,提高主变套管的使用寿命,这对保障变电站安全具有重要意义。

4 主变套管长时间监测三维拉力分析

采用跨线 1、人字形下线和一字型金具安装方式,将光纤光栅三维拉力传感器安装在主变套管上进行长时间监测,监测时间长达 1500 h。在长时间监测过程中,采用 MOI-SI155 光纤光栅解调仪进行解调,采样频率为 100 Hz,采用 Labview 软件将解调的波长信号代入(2)、(3)式中运算,得到实时的三维拉力,并进行实时处理显示。对光纤光栅三维拉力传感器的数据进行长时间信号分析,传感器解调得到的三维力信号如图 3 所示。

图 3(a)为长时间三维力 F_x 、 F_y 和 F_z 的监测结果,在三维力中 F_x 长时间出现诸多峰谷, F_y 和 F_z 峰

谷较少。图 3(b)为长时间监测温度 T_1 、 T_2 和 T_3 的结果,长时间的温度与市区气象温度(日高温 T_H 、日低温 T_L)基本一致;在温度数据中出现的一系列峰对应的时间为日间时间,谷区域为夜间时间。对长时间温度分别进行相减处理,得到长时间监测过程中的温度变化(T_{12} 、 T_{13} 、 T_{23}),如图 3(c)所示,温度差值中夜间为差值平稳区域,日间为峰谷区域。在三维力中, F_x 平稳变化区域对应夜间温度平稳区域,如①区域,展开如图(d)所示。 F_x 波动中出现的峰谷位置对应于日间,如②区域,展开如图(e)所示。长时间中 F_x 常出现长时间缓慢变化,如③区域,展开如图(f)所示。长时间中 F_x 常出现短时间变化幅度范围变大现象,如④区域,展开如图(g)所示。

图 3(d)为夜间监测数据,图 3(e)为日间监测数据, T_{12} 为对 F_x 进行温度补偿的传感器 1 和 2 的温度差值。在夜间,温度变化平稳,三维力也基本不变,在日间温度差值较大,三维力变化也较大,且三维力变化时间与温度差值变化时间相同,说明日间三维力变化与温度差值变化相关。

三维力的缓慢变化与温度变化相关,可能原因有两种:一种是三维力解调中温度补偿出现的误差,另一种是接线端子和下线因温度变化产生的热应力。对日间夜间温度补偿前后的三维力作差值,结果如图 4 所示。

在夜间,温度补偿前后的三维力差值基本是平稳的,说明温度平稳时,温度传感器对三维力的温度补偿是准确的,因此在夜间时,温度传感器能够准确对三维力进行温度补偿。日间 F_x 稍有波动,且波动幅度仅有 400 N,基本稳定。因此温度补偿不

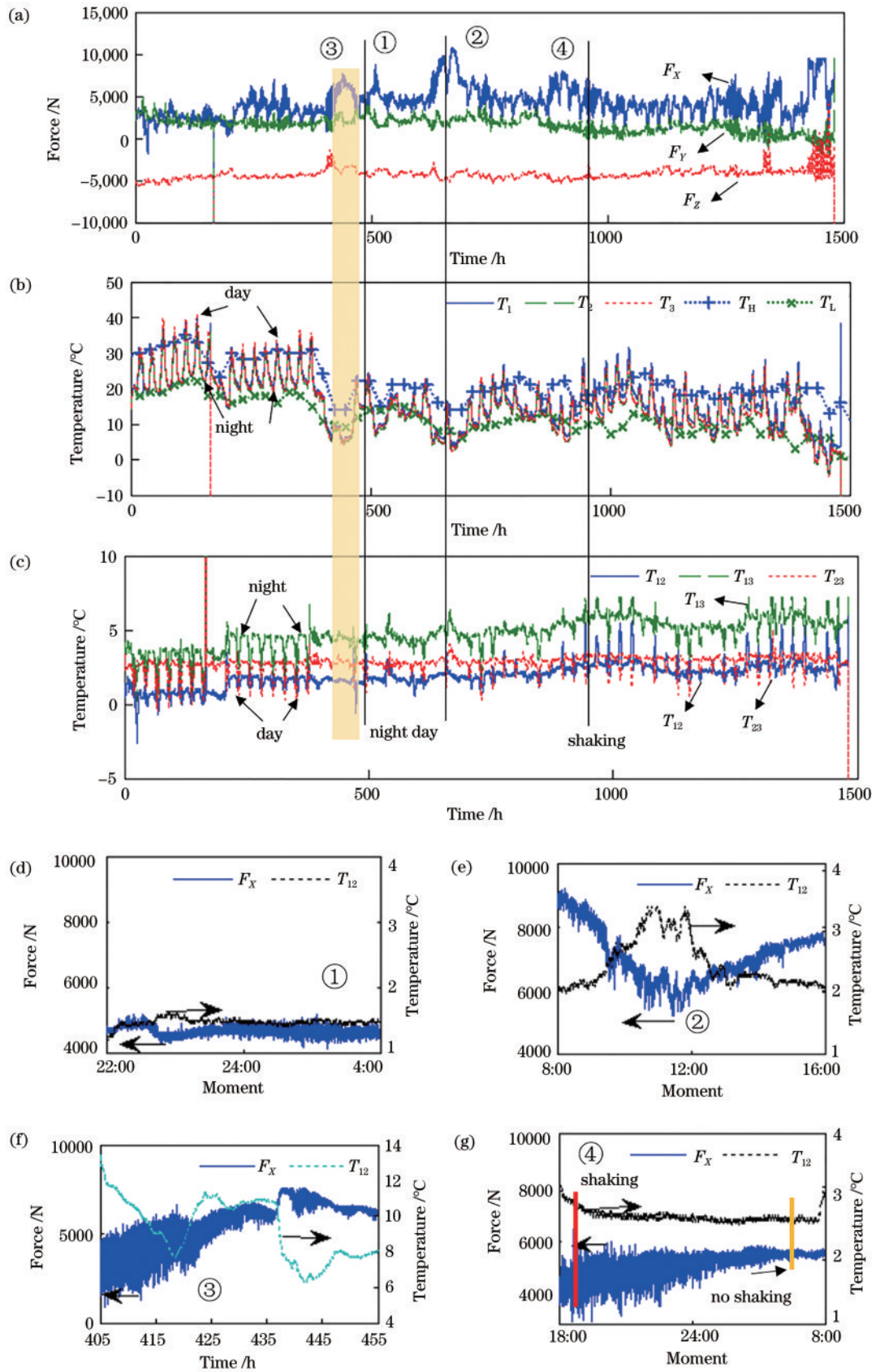


图 3 三维拉力监测。(a) 三维拉力;(b) 温度;(c) 温度差值;(d) 夜间 F_x ;(e) 日间 F_x ;(f) F_x 长时间变化;(g) 夜间 F_x 抖动
 Fig. 3 3D tension monitoring. (a) 3D tension; (b) temperature; (c) temperature difference; (d) F_x at night; (e) F_x at daytime; (f) F_x change at long-time; (g) F_x shaking at night

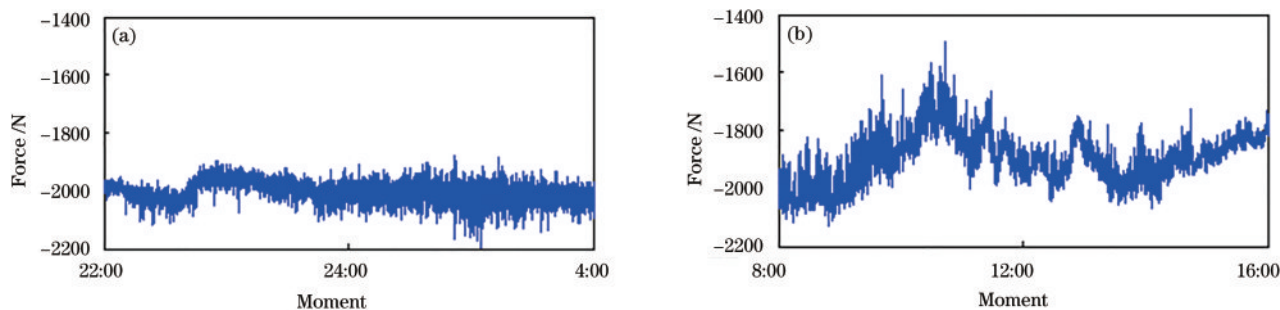


图 4 温度补偿前后的 F_x 差值。(a) 夜间;(b) 日间

Fig. 4 Difference of F_x before and after temperature compensation. (a) Night time; (b) daytime

是引起三维力波动的原因,三维力的波动是因为传感器测量与套管连接部件因温度变化产生的热应力。因此三维力中包含实际测量的三维力和温度导致的热应力。

在 F_x 在接近 60 h 的长时间变化过程中,温度传感器的 T_1 、 T_2 基本一致,无较大的差值,如图 3(f) 所示,而 F_x 缓慢变化,说明此过程无明显的热应力,此过程中传感器测量的力仅为套管端部受到的外界拉力。

取长时间信号中温度平稳区域的三维力,得到长时间套管端部收到的外界拉力,如图 5 所示。长时间中套管受到外界拉力变化幅度也较大,实际监测中对拉力进行监测,避免套管端部受到较大的拉力而发生事故。

三维力还存在短时间的抖动。如图 6(a) 所示,提取夜间的抖动信号进行分析,避免日间热应力的

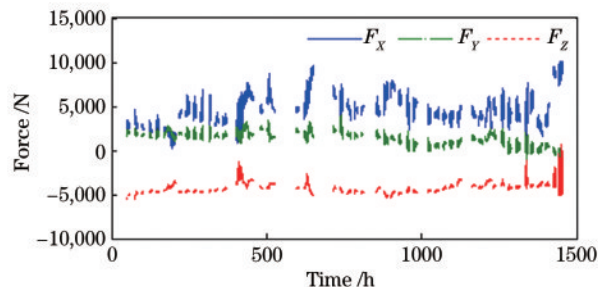


图 5 三维拉力长时间监测

影响。在夜间 19:00 抖动较大,7:00 附近抖动几乎没有。提取抖动和不抖动区域 1 min 数据进行傅里叶变换(FFT)处理,结果如图 6(b) 所示。在频域中,抖动区域有明显的低频信号(频率为 0.18 Hz 和 0.22 Hz),未抖动区域没有明显的频率信息。因此抖动是低频信号引起的。

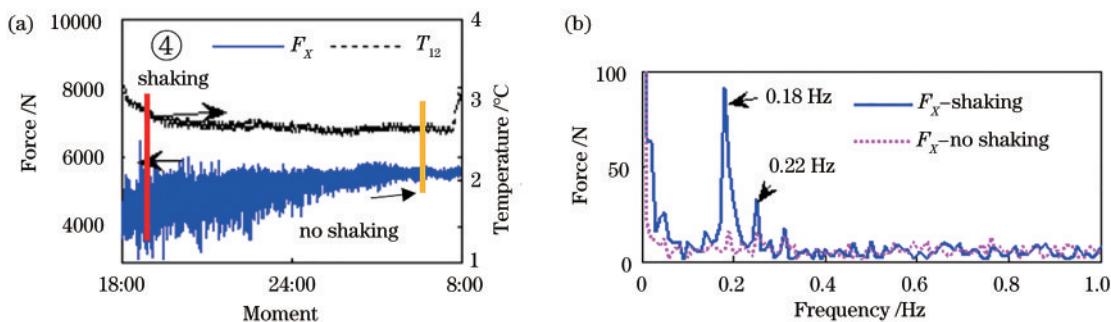


图 6 三维力抖动。(a) 夜间抖动;(b) 抖动和不抖动区域频域

Fig. 6 3D force shaking. (a) Shanking at night; (b) frequency domain of area with shaking and no shaking

三维力的抖动可能是风载荷引起塔结构晃动导致的,测量得到的低频信号的频率 0.18 Hz 和 0.22 Hz 可能为塔的固有频率。对长时间的三维力信号进行 FFT 处理,得到实时 FFT 变换结果,如图 7 所示。

在实时频谱中,频率为 0~1 Hz 时信号较强。此频率范围内,在 X、Y 方向上,明显的两个频率在

长时间内持续出现,两个频率分别为 0.18 Hz 和 0.22 Hz。在 Z 方向频谱中,未得到无明显的与 0.18 Hz 和 0.22 Hz 相关的频率信号,变电站内跨线受风载荷影响,在 X、Y 方向易发生舞动,在 Z 方向难以发生舞动。因此推测 0.18 Hz 和 0.22 Hz 为跨线舞动导致变电站结构晃动的频率。

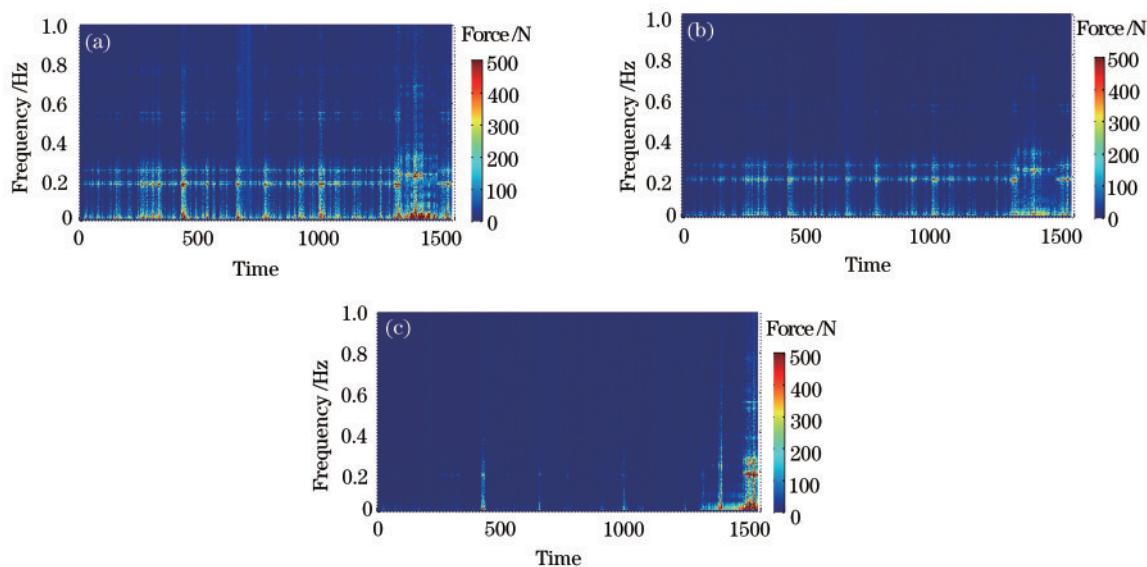


图 7 传感器频域信号。(a) X 方向;(b) Y 方向;(c) Z 方向

Fig. 7 Sensor frequency domain signal. (a) X direction; (b) Y direction; (c) Z direction

5 结 论

利用设计的光纤光栅三维拉力传感器,对变电站主变套管和避雷器与下线的连接方式进行了测试,得到了在跨线 1 下采用 II 字形引下线和一字型金具安装方式下套管端部受到的作用力最小的结果。通过传感器对套管端部进行长达 1500 h 的实时监测,得到套管端部主要受到两个力的作用:结构的拉力和由于外界环境温度变化产生的热应力。同时在三维力中还存在低频信号,低频信号频率为 0.18 Hz 和 0.22 Hz,此低频信号可能与风载荷相关。

在光纤光栅三维拉力对套管进行长期监测过程中,由于温度产生的热应力对套管端部的影响较大,在接下来的研究中,应该关注结构的热应力对变电站结构健康的影响,着力解决在温度变化较大情况下光纤传感器的温度补偿已出现的补偿误差问题,促进光纤传感器在变电站复杂环境下的运用。

参 考 文 献

- [1] Zhang X Z. Study on the mechanical performance of down line and terminals of ultra-high voltage bushings [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2018: 1-8.
张习卓. 特高压主变套管设备引下线及接线端子力学性能研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2018: 1-8.
- [2] Peng Q. Main transformer 500 kV high-voltage

bushing explosion analysis of Guohua Taishan power plant[J]. Shenhua Science and Technology, 2009, 7(4): 62-65.

彭桥. 国华台电 500 kV 主变高压套管爆炸分析[J]. 神华科技, 2009, 7(4): 62-65.

- [3] Kong Y, Wen Z, Zhao G P, et al. Analyses on the problems of air-terminal deformation of bushings about our domestic 1000 kV project[J]. Engineering and Technological Research, 2019(6): 117-119.
孔焱, 闻政, 赵光平, 等. 百万伏项目主变套管端子变形问题分析[J]. 工程技术研究, 2019(6): 117-119.
- [4] Sikorski W, Siodla K, Moranda H, et al. Location of partial discharge sources in power transformers based on advanced auscultatory technique[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2012, 19(6): 1948-1956.
- [5] Stone G C. Partial discharge diagnostics and electrical equipment insulation condition assessment [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2005, 12(5): 891-904.
- [6] Xu C S, Sun Z Q, Zhang G J. On-line and on-site PD monitoring and diagnosis of power transformer [C]// 2012 IEEE International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis, September 23-27, 2012, Bali, Indonesia. New York: IEEE Press, 2012: 293-296.
- [7] Sun Q, Huang Z J, Han S Z, et al. Analysis on an insulation accident of 800 kV high voltage bush[J]. Power System and Clean Energy, 2010, 26(3):

- 12-15.
孙强, 黄宗君, 韩绍周, 等. 一起 800 kV 高压套管绝缘故障的原因分析[J]. 电网与清洁能源, 2010, 26(3): 12-15.
- [8] Du Z B, Nie D X, Zhang L X, et al. Insulation evaluation of high voltage bushing based on frequency domain spectroscopy analysis [J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(11): 6-11.
杜振波, 聂德鑫, 张连星, 等. 基于频域介电谱分析的高压套管绝缘状态评估[J]. 高压电器, 2013, 49(11): 6-11.
- [9] Bellorini S, Salvetti M, Bettinali F, et al. Seismic qualification of transformer high voltage bushings [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1998, 13(4): 1208-1213.
- [10] Wu W. A type of terminal: CN202977769U [P]. 2013-06-05.
吴文. 新型接线端子: CN202977769U [P]. 2013-06-05.
- [11] Yu K W, Liang X Y, Tang H Z, et al. Stress analysis of bushing studs in high-voltage side of UHV transformer under two different connection modes [J]. Sichuan Electric Power Technology, 2017, 40(3): 44-47.
余开伟, 梁向阳, 汤会增, 等. 两种接线金具型式下的特高压变压器高压侧套管接线柱受力分析[J]. 四川电力技术, 2017, 40(3): 44-47.
- [12] Qiu N, Liu Z L, He Y J, et al. Force simulation and test of ultra high voltage transformer bushing terminal in wind load [J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(32): 181-187.
邱宁, 刘振林, 何勇军, 等. 风荷载作用下特高压变压器套管接线柱结构受力仿真与试验[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(32): 181-187.
- [13] Lü Z B, Xie K, Zhang X Z, et al. Analysis on static mechanical characteristics of down lead transmission lines and connecting fittings in ultra high voltage substation [J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(9): 30-37.
吕中宾, 谢凯, 张习卓, 等. 特高压变电站引下线及连接金具系统力学特性分析[J]. 高压电器, 2017, 53(9): 30-37.
- [14] Qian S L, Lü Z B, Kou X S, et al. Three-dimensional force sensor of a transformer high-tension bushing tip style of calligraphy gold utensil: CN206074164U [P]. 2017-04-05.
钱诗林, 吕中宾, 寇晓适, 等. 变压器高压套管端部一字型金具三维拉力传感器: CN206074164U [P]. 2017-04-05.
- [15] Zhang J G, Qian S L, Xie K, et al. Three-dimensional force sensor of transformer high-tension bushing tip goat's horn type gold utensil: CN206114168U [P]. 2017-04-19.
张劲光, 钱诗林, 谢凯, 等. 变压器高压套管端部羊角型金具三维拉力传感器: CN206114168U [P]. 2017-04-19.
- [16] Zhu Q R, Xu C, Yang G B. Experimental research on damage detecting in composite materials with FBG sensors under low frequency cycling [J]. International Journal of Fatigue, 2017, 101: 61-66.
- [17] Wen B R, Tian X L, Jiang Z H, et al. Monitoring blade loads for a floating wind turbine in wave basin model tests using fiber Bragg grating sensors: a feasibility study [J]. Marine Structures, 2020, 71: 102729.
- [18] Kim J M, Kim C M, Choi S Y, et al. Enhanced strain measurement range of an FBG sensor embedded in seven-wire steel strands [J]. Sensors, 2017, 17(7): 1654.
- [19] Chen J, Guo Y X, Zhu F D, et al. Fiber Bragg grating inclination sensor for transmission tower [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(8): 080602.
陈剑, 郭永兴, 朱方东, 等. 用于输电铁塔的光纤布拉格光栅倾斜传感器 [J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(8): 080602.
- [20] Chen J, Guo Y X, Zhang L P. A glass-fiber packaged fiber Bragg grating strain sensor [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(9): 090601.
陈剑, 郭永兴, 张礼朋. 一种玻璃纤维封装的光纤布拉格光栅应变传感器 [J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(9): 090601.
- [21] Wang Y H, Zhang M Y, Ma J X, et al. Measurements of penetration characteristics of jacked piles in clayey soil based on fiber Bragg gratings [J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(7): 0706004.
王永洪, 张明义, 马加骁, 等. 光纤布拉格光栅用于黏质土中静压沉桩贯入特性的测量研究 [J]. 光学学报, 2020, 40(7): 0706004.
- [22] Jiang L, Zhang X Z, Wang J, et al. Real-time online detection of cutter wear based on fiber Bragg grating array [J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(12): 1206003.
蒋磊, 张学智, 王进, 等. 基于光纤布拉格光栅阵列的刀头磨损实时在线检测 [J]. 光学学报, 2019, 39(12): 1206003.
- [23] Wei L, Yu L L, Jiang D Z, et al. Fiber Bragg grating accelerometer based on diaphragm and diamond structure [J]. Chinese Journal of Lasers,

2019, 46(9): 0910003.

魏莉, 余玲玲, 姜达州, 等. 基于膜片与菱形结构的光纤布拉格光栅加速度传感器[J]. 中国激光, 2019, 46(9): 0910003.

- [24] Chen Y, Chen Y W, Liu Z Q, et al. A gear fault detection method based on a fiber Bragg grating sensor[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(3):

0304007.

陈勇, 陈亚武, 刘志强, 等. 基于光纤布拉格光栅传感的齿轮故障检测方法[J]. 中国激光, 2020, 47(3): 0304007.

- [25] Hill K O, Meltz G. Fiber Bragg grating technology fundamentals and overview [J]. Journal of Lightwave Technology, 1997, 15(8): 1263-1276.