

## 采用光纤光栅传感器的输电线路铁塔应力监测方法

黄新波<sup>1</sup>, 廖明进<sup>1</sup>, 徐冠华<sup>2</sup>, 朱永灿<sup>3</sup>, 赵 隆<sup>1</sup>

(1. 西安工程大学 电子信息学院, 陕西 西安 710048; 2. 西安工程大学 机电工程学院, 陕西 西安 710048;

3. 西安电子科技大学 机电工程学院, 陕西 西安 710071)

**摘要:** 为防止输电塔塔体倾斜、变形, 甚至出现倒塔等事故, 提出了一种采用光纤光栅传感器的铁塔应力监测方法, 首先利用 ANSYS 软件建立铁塔有限元模型, 分析铁塔易故障点, 在此基础上设计光纤光栅传感器, 实时采集易故障点的应力信息, 通过光纤复合架空地线(OPGW)将信息传送到变电站内的光纤光栅波长解调仪进行解调, 然后监测主机对数据进行处理并通过光纤/局域网上传, 最终利用监控中心的专家软件对铁塔应力进行整体分析, 当铁塔外部载荷过大时提前预警。该方法已在 110 kV 实验线路安装试运行, 监测数据显示, 在持续风载荷作用下, 可对铁塔的应力进行精确的监测, 应力变化与风载变化基本相符。

**关键词:** 输电铁塔; 光纤光栅传感器; 应力; 解调; 监测; 模型

**中图分类号:** TM 72; TM 75

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.16081/j.issn.1006-6047.2016.04.011

## 0 引言

在我国超高压和特高压运行线路的建设过程中, 输电线路不可避免地经过软土质地区、重覆冰区、大风区等特殊地带, 在恶劣自然环境和外界条件作用下, 容易造成铁塔基础倾斜、开裂及铁塔变形, 甚至导致塔基沉降、铁塔倾倒。因此对输电线路铁塔进行在线监测具有重要意义<sup>[1]</sup>。

现有的铁塔在线监测方法, 主要有基于倾角传感器的铁塔倾斜监测<sup>[2]</sup>和基于卫星技术的铁塔形变监测<sup>[3]</sup>等, 它们能够很好地代替传统的人工巡检、机器人巡线, 但是其只能间接反映铁塔整体受力及负荷平衡状态的参数, 无法获取到铁塔的受力值并进行进一步分析<sup>[4-5]</sup>。此外, 现有的测量方法主要以电类传感器为主, 需要额外提供电源, 而且极易受到恶劣环境的干扰。

鉴于现有输电线路铁塔监测的各种问题, 基于光纤光栅传感技术, 本文提出一种铁塔应力在线监测方法。该方法采用光纤光栅传感器, 当受到覆冰、风载、地基沉降等各种外界因素和人为破坏等影响时, 铁塔所受应力发生改变, 通过分析光纤光栅传感器采集到的监测点受力示值确定输电线路铁塔运行工况。由于光纤光栅本身的特性, 该系统可长期在高温、高湿和恶劣电磁环境下可靠运行<sup>[6-8]</sup>。

收稿日期: 2015-04-08; 修回日期: 2016-02-22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51177115); 教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-11-1043); 陕西省重点科技创新团队计划(2014KCT-16); 西安工程大学研究生创新基金资助项目(CX2015027)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51177115), New Century Talent Supporting Project by Education Ministry(NCET-11-1043), Key Technology Innovation Team Project of Shaanxi Province(2014KCT-16) and Graduate Innovation Fund of Xi'an Polytechnic University(CX2015027)

## 1 铁塔易故障点分析

在输电线路铁塔应力在线监测系统中, 因为铁塔结构比较复杂, 所以确定传感器测点的安装位置、数量尤为关键, 既要能够充分反映所需要的监测信息, 又要尽可能减少其他工况对监测产生的影响。借助 ANSYS 软件, 在特定工况下对铁塔进行力学分析, 确定铁塔受力变形的薄弱部位及对地基沉降信息敏感的区域, 可为传感器的安装方案提供理论依据。

利用 ANSYS 软件建立铁塔有限元模型<sup>[9-10]</sup>, 输电塔各杆件均为角钢, 主材为 Q345 钢, 其他辅助材均为 Q235 钢。考虑到输电铁塔具有较强的几何非线性, 故各杆件均采用 Beam188 梁单元进行模拟, 导、地线均采用 LINK10 杆单元进行模拟。作用在导线上的覆冰载荷以节点力的形式施加, 铁塔承受的风速以面载荷的形式施加, 考虑脉动风的影响, 本节只考虑 90° 风速的瞬时情况。结合有关文献<sup>[11]</sup>对铁塔应力的分析, 针对多种不利工况进行力学分析, 其结果如表 1 所示。

表 1 不利工况下铁塔的易损杆件及其应力  
Table 1 Flimsy components and corresponding stresses for different harmful conditions

不利工况	易损杆件 单元号	轴向 应力/MPa
覆冰厚度 20 mm	1004、1596	19.30
风速 30 m/s	119	175.32
覆冰厚度 20 mm、风速 30 m/s、 1 条塔腿沉降	119	249.00
覆冰厚度 20 mm、风速 30 m/s、 2 条塔腿沉降	119	331.21
覆冰厚度 20 mm、风速 30 m/s	119	173.02

提取覆冰厚度 20 mm 时铁塔的轴向应力变形和覆冰厚度 20 mm、风速 30 m/s、1 条塔腿发生沉降时的轴向应力变形, 分别如图 1 和图 2 所示, 图中, STEP

表示步长, SUB 表示子步, TIME 表示时间, SMIS31 (NOAVG) 表示轴向应力, DMX 表示最大位移, SMN 表示轴向应力最小值, SMX 表示轴向应力最大值。

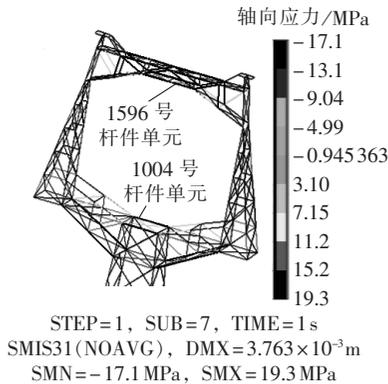


图1 铁塔的轴向应力

Fig.1 Axial stress of tower

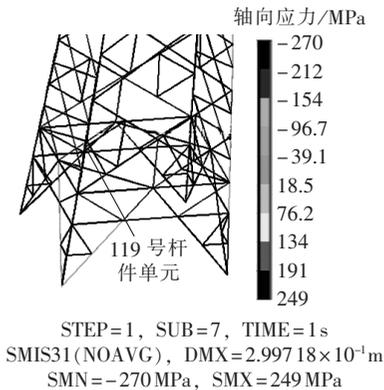


图2 塔基部分的轴向应力

Fig.2 Axial stress of tower footing

由图1可知,在导线覆冰厚度为20mm的工况下,铁塔承受的最大轴向应力为19.3MPa,1004和1596号杆件单元处最容易引起铁塔受损。由图2可知,在导线覆冰厚度20mm、铁塔承30m/s风载荷且1条塔腿发生沉降的工况下,塔腿119号杆件单元处受力最大,承受的最大轴向应力为249MPa,则此处最容易发生损坏。当导线发生脱冰时,有限元模型分析结果显示铁塔承受的最大轴向应力为5.21MPa,易故障点与前述相同。结合以上分析可知:将传感器安装在铁塔塔头和塔腿应力变化最大的位置,最能直接反映铁塔运行工况。

## 2 铁塔应力在线监测系统

### 2.1 监测系统的构成

基于光纤光栅传感器的输电线路铁塔在线监测系统由光纤光栅应变传感器、光纤光栅波长解调仪、监测主机、监控中心构成,结构如图3所示。光纤光栅应变传感器安装在输电线路铁塔上,测量固定点处的应力值;通过光纤将光纤光栅应变传感器与光纤光栅波长解调仪连接起来,实现两者之间的光信

号传输;光纤光栅波长解调仪实时解调光纤布喇格光栅FBG(Fiber Bragg Grating)的反射中心波长,当铁塔应力发生变化时,光纤光栅应变传感器感应到应力发生变化,光纤光栅波长解调仪将解调出1组不同的信号,由波长的变化量可得到光纤光栅应变传感器上的应力变化;将变化量输入到监测主机进行数据处理,得到各监测点的应力值;监测主机通过光纤/局域网将数据发送到监控中心,监控中心的专家软件通过各监测点的应力值对铁塔进行分析,从而实现了对铁塔应力的监测。

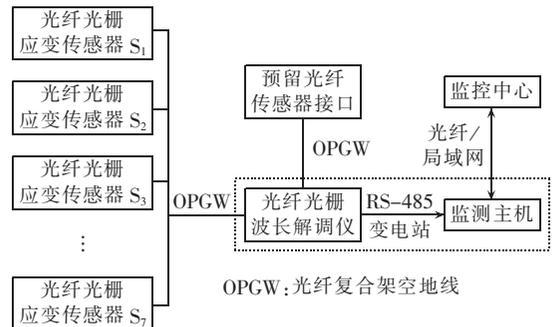


图3 系统架构

Fig.3 System architecture

### 2.2 光纤光栅应变传感器

光纤光栅应变传感器的基本原理是将被测参数的变化转换为光信号参数的变化。当光纤光栅的温度和应变发生变化时,光栅的周期和折射率随之发生变化,从而引起反射光波长的变化,通过测量反射光波长的变化,即可得到温度和应变的变化量。光纤光栅反射光波长 $\lambda_B$ 与温度和应变的关系为:

$$\Delta\lambda_B/\lambda_B = (\alpha_0 + \beta_0)\Delta T + (1 - P_e)\Delta\varepsilon \quad (1)$$

其中, $\Delta\lambda_B$ 为光栅反射光波长的变化; $\alpha_0$ 为光纤的热膨胀系数; $\beta_0$ 为光纤材料的热光系数; $P_e$ 为光纤材料的弹光系数; $\Delta T$ 为温度变化; $\Delta\varepsilon$ 为应变变化。由式(1)可以看出,光纤光栅在应用中,同时对温度和应变敏感。为了能够精确测量外界物理量,需要采用其他方法对温度、应变的影响进行分离<sup>[12-13]</sup>。

光纤光栅应变传感器主要由弹性基体、光纤光栅应变片组成。根据铁塔的特殊结构,采用一种工形封装<sup>[14-16]</sup>。在弹性基体的两端均具有金具安装孔,方便现场传感器的安装;在基体的中心位置开有细槽,光纤光栅平行粘附在细槽中。当基体发生弹性形变时,光纤光栅随之形变。经研究表明,采用钛合金作为弹性基体时,其波长和应变的相关系数可达到0.999<sup>[17]</sup>。因此,采用钛合金片封装光纤光栅应变片具有良好的应变传感性能。

在现场安装过程中,因为光纤光栅应变传感器的受力不均匀,所以存在偏载情况。偏载情况会造成粘贴应变片部位应变不同,为研究其影响,利用ANSYS软件对光纤光栅应变传感器在不均匀受力的情况下进行应变分析,得到粘贴光纤光栅应变片

处的轴向应变图,如图 4 所示(图中,EPELY 表示  $y$  方向弹性应变,RSYS=0 表示结果文件采用迪卡尔极坐标系统)。由图可知,弹性体形结构设计使得受力均匀,避免了光纤光栅应变片在粘贴过程中受力不均的情况。

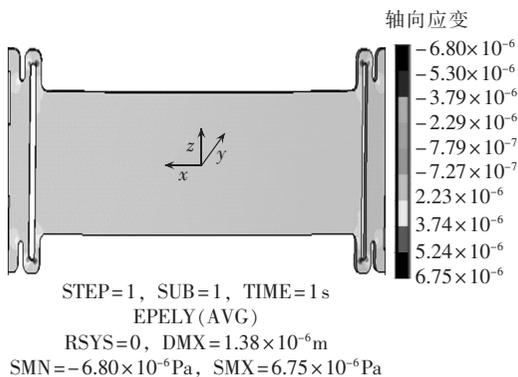


图 4 粘贴应变片处的轴向应变

Fig.4 Axial strain of glued FBG patch

### 2.3 温度补偿

光纤光栅应变传感器  $S_1$  安装在塔材主应力方向上,参考光纤光栅  $S_2$  作为温度补偿片布置在垂直于主应力方向的位置上,与  $S_1$  成  $90^\circ$ ,如图 5 所示。在  $S_2$  方向上无外界载荷作用,因此  $S_2$  只受到温度的影响。这样在  $S_1$  的波长变化量中减去  $S_2$  的波长变化量,即得到应变单独作用下的波长变化量,从而达到温度补偿的目的,即:

$$\varepsilon = \frac{\Delta\lambda_1 - \Delta\lambda_2}{K_\varepsilon} \quad (2)$$

其中, $\varepsilon$  为轴向应变; $\Delta\lambda_1$  为  $S_1$  的波长变化量; $\Delta\lambda_2$  为  $S_2$  的波长变化量; $K_\varepsilon$  为 FBG 的应变灵敏系数。

当考虑到铁塔的泊松效应时,这种温度补偿方法在一定程度上可以提高应变测量灵敏度<sup>[18]</sup>:

$$\varepsilon = (\Delta\lambda_1 - \Delta\lambda_2) / [K_\varepsilon(1 - \gamma)] \quad (3)$$

其中, $\gamma$  为铁塔的泊松比。

### 2.4 监测主机

监测主机主要实现光纤光栅波长解调仪输出应变波长信息的接入,对数据进行预处理,根据铁塔的弹性模量计算各监测点的应力值,并通过 SD 卡对历史数据进行存储,最终利用光纤/局域网将数据传输到后台监控中心。监测主机具有数据封装难度大、对稳定性要求高的特点,因此采用基于 STM32F407 及嵌入式 UC/OS 的设计方案,在完成各种功能的前提下,提高系统稳定性,并降低功耗<sup>[19]</sup>。

监测主机硬件框图如图 6 所示。主控制器采用 STM32F407,其具有丰富的片上外设,主频可达

168 MHz,充分满足数据处理的需求。整个系统包括 100 Mbit/s 以太网模块、RS-485 模块、SD 卡数据存储模块、电源模块等部分。其中实时时钟(RTC)在上电时采用 3.3 V 供电,断电后由法拉电容供电,具有蓄电量大、使用时间长、充放电电路简单等优点,可保证在装置断电的情况下 RTC 长时间正常工作;以太网模块负责数据的实时转发,具有数据传输速度快、稳定性高等特点;电可擦可编程只读存储器(EEPROM)实现装置的基本信息存储。光纤光栅波长解调仪根据现场需要选择 TCP/IP 或 RS-485 通道与主机进行数据通信;监测主机根据光纤光栅波长解调仪的输出信息进行数据预处理,同时采用基于文件系统的 SD 卡对数据存储,以备历史数据的查询。

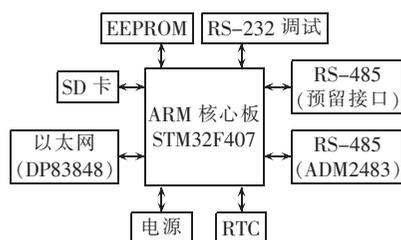


图 6 主机系统框图

Fig.6 Block diagram of host system

监测主机具有数据封装难度大、信息量多、稳定性要求高等特点,通过 UC/OS-III 操作系统的移植,提高了控制的可操纵性与可靠性,同时具有丰富的片上外设和输入/输出,方便系统升级。由于光纤光栅波长解调仪的功耗很大,因此系统采用可控式电源供电,监测主机通过下发命令打开和关闭光纤光栅波长解调仪电源;为了进一步降低功耗,主机在正常情况下处于休眠状态,RTC 中断时主动苏醒,读取配置信息后向光纤光栅波长解调仪发送激活命令,当收到光纤光栅波长解调仪的激活响应后,完成心跳交互、数据获取等过程,然后关闭光纤光栅波长解调仪电源令其进入休眠模式,其程序流程见图 7。

## 3 试验及分析

### 3.1 光纤光栅应变传感器的标定

在实际测量时,光纤光栅应变传感器需根据不同的被测对象选用合适的基体来标定应变灵敏系数,这样才能真实反映被测基体的应变。试验中,将封装好的光纤光栅应变传感器(中心波长为 1539.976 nm)固定在一块角钢上,角钢一端固定,另一端悬挂拉力传感器,通过在拉力传感器下面挂接绝缘子串,使角钢发生应变,已知拉力与应变的关系为:

$$\varepsilon = FL / (W_z E) \quad (4)$$

其中, $\varepsilon$  为应变; $F$  为拉力; $L$  为角钢的长度; $W_z$  为弯曲截面系数; $E$  为弹性模量。

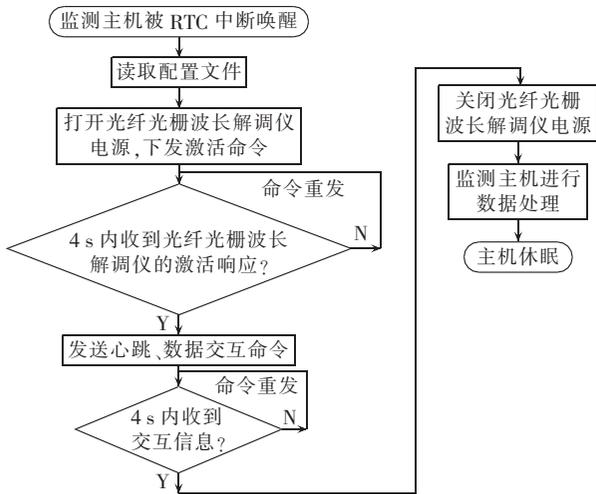


图 7 程序流程图

Fig.7 Flowchart of program

通过光纤光栅波长解调仪实时读取反射波长值,得到光纤光栅应变传感器的应变灵敏度标定曲线,如图 8 所示。用 MATLAB 拟合直线的斜率为  $1.2381 \times 10^6$ ,由式(1)可得光纤光栅应变传感器的应变灵敏度为 0.804,反射波长和应变的相关系数达 99.8% 以上,波长漂移量和应变呈现良好的线性关系。

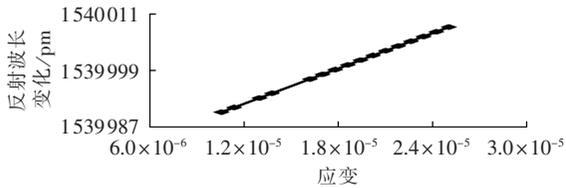


图 8 传感器应变灵敏度标定曲线

Fig.8 Calibrated strain sensitivity curve of sensor

### 3.2 试验分析

该方法已在西安工程大学电力系统状态监测平台(110 kV 实验线路)进行了安装试运行,获得了较理想的结果,其部分运行数据见图 9。为了将数据与传感器等高度的现场环境风速进行对比分析,图 9 中也显示了环境风速变化。由图 9 可见,2015-03-16 凌晨铁塔应力突然增大,1596 号杆件单元处应力

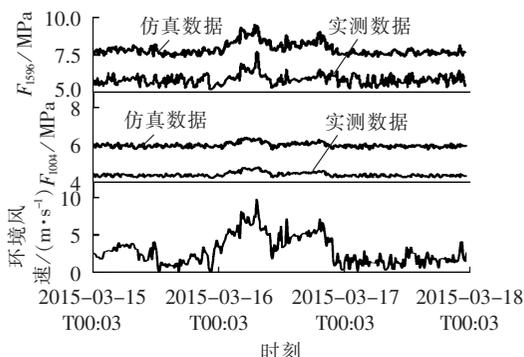


图 9 铁塔应力变化及环境风速变化

Fig.9 Tower stress variation and environmental wind speed variation

$F_{1596}$  可达到 7.8 MPa,此时环境风速持续在 4 m/s 以上,1596 号杆件单元的应力变化曲线与风载基本相符;1004 号杆件单元处应力  $F_{1004}$  最大为 4.7 MPa,随风载变化略有增加。对比铁塔应力的仿真数据和实测数据,可以看出两者趋势相同,其误差在工程允许范围内,满足实际需求。由试验数据分析可见,本文方法能够很好地反映出外界条件对铁塔的影响,为输电线路状态检修、灾害预防提供了一种有效手段。

## 4 结论

a. 本文提出了一种基于光纤光栅应变传感器的铁塔应力监测方法,通过测量光纤光栅中心波长的变化反映铁塔应力的变化,在监测点附近无需电源,解决了系统野外供电困难的问题。

b. 该方法采用光纤光栅应变传感器,可长期应用于高温、高湿等恶劣环境,且抗干扰能力强。利用现有 OPGW 中的光缆进行信号传输,简化信道,使得系统结构简单,可靠性高。

c. 试验数据表明,光纤光栅应变传感器的线性度可达 99.8%,灵敏度为 0.804,监测系统运行稳定,可以满足实际测量需求。

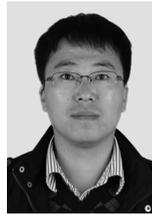
## 参考文献:

- [1] 黄新波. 输电线路在线监测与故障诊断[M]. 北京:中国电力出版社,2014.
- [2] 范寒柏,谢汉华. 铁塔倾斜实时监测系统设计与应用[J]. 电力系统通信,2011,32(225):57-60.
- [3] 刘艳,胡毅,王力农,等. 高分辨率 SAR 卫星监测特高压输电铁塔形变[J]. 高电压技术,2009,35(9):2076-2079.
- [4] KONG W, WU L. UHV KZ185 crossing tower stress analysis[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014(680):410-413.
- [5] MA D F, CAI H S, ZHANG L B. Stress monitoring research in dancing condition of transmission tower based on FBG sensors[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 448:2249-2253.
- [6] 吴晓文,舒乃秋,李洪涛,等. 基于光纤光栅的气体绝缘开关母线温度在线监测系统[J]. 电力自动化设备,2013,33(4):155-158.
- [7] 栗鸣,徐拥军. 光纤光栅传感技术用于架空输电线路状态监测[J]. 电力系统通信,2012,33(241):59-63.
- [8] 兰玉文,刘波,罗建花. 光纤光栅三维应力传感器的设计与实现[J]. 光子学报,2009,38(3):656-658.

LAN Yuwen, LIU Bo, LUO Jianhua. 3-dimensional strain sensor

- in fiber bragg grating [J]. Acta Photonica Sinica, 2009, 38(3): 656-658.
- [9] CAO M L, QIU X J. Stress and stability analysis of a cooling tower by ANSYS[J]. Advanced Materials Research, 2014(919): 222-225.
- [10] WANG J, LIU Z X, WU Z Q, et al. Research on on-line monitoring of transmission tower stress[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014(668): 948-952.
- [11] 毛峰. 基于有限元方法的不同覆冰状态输电塔线体系力学特性研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2011.  
MAO Feng. Study on mechanical properties of transmission tower-line system in different iced conditions by FEM [D]. Chongqing: Chongqing University, 2011.
- [12] 罗健斌, 郝艳捧, 叶青, 等. 利用光纤光栅传感器测量输电线路覆冰荷载试验[J]. 高电压技术, 2014, 40(2): 406-408.  
LUO Jianbin, HAO Yanpeng, YE Qing, et al. Measurement for icing load of transmission lines using fiber bragg grating sensor[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(2): 406-408.
- [13] 蒋建. 输电线路覆冰监测光纤光栅拉力和倾角传感器[D]. 北京: 华北电力大学, 2011.  
JIANG Jian. Development of FBG tension and tilt sensors applied to ice monitoring of overhead transmission lines [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2011.
- [14] 李宏男, 任亮. 结构健康监测光纤光栅传感技术[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008: 1-38, 59-193.
- [15] 杨清, 魏亚楠, 赵渊, 等. 强风雨荷载冲击下的输电线路可靠性建模方法[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(2): 133-136.  
YANG Qing, WEI Yanan, ZHAO Yuan, et al. Reliability model of transmission lines under impact of strong wind and rain[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(2): 133-136.
- [16] 田石柱, 张国庆, 王大鹏. 表面式光纤布拉格光栅传感器应变传递机理的研究[J]. 中国激光, 2014, 41(8): 1-6.  
TIAN Shizhu, ZHANG Guoqing, WANG Dapeng. Study on strain transfer mechanism of surface fiber bragg grating sensor [J]. Chinese Laser, 2014, 41(8): 1-6.
- [17] 于秀娟, 余有龙, 张敏, 等. 钛合金片封装光纤光栅传感器的应变和温度传感特性研究 [J]. 光电子·激光, 2006, 17(5): 564-566.  
YU Xiujuan, YU Youlong, ZHANG Min, et al. Strain and temperature sensing characteristics of FBG packaged by the titanium alloyslice[J]. Journal of Optoelectronics·Laser, 2006, 17(5): 564-566.
- [18] 杨富尧, 李现兵, 陈新, 等. 输电铁塔用角钢的应用及低温服役性能研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(1): 117-122.  
YANG Fuyao, LI Xianbing, CHEN Xin, et al. Study on low temperature service capabilities and application of power transmission tower steel[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(1): 117-122.
- [19] 李鹏, 黄新波, 赵隆, 等. 智能输电线路状态监测代理的研究与设计[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(16): 153-161.  
LI Peng, HUANG Xinbo, ZHAO Long, et al. Research and design of transmission line condition monitoring agent [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(16): 153-161.

#### 作者简介:



黄新波

黄新波(1975—), 男, 山东海阳人, 教授, 博士后, 从事智能电网输变电设备在线监测理论与关键技术的研究 (E-mail: huangxb1975@163.com);

廖明进(1989—), 男, 陕西商洛人, 硕士研究生, 从事智能电网输变电设备在线监测理论与关键技术的研究 (E-mail: 602500073@qq.com);

徐冠华(1990—), 男, 山东临沂人, 硕士研究生, 从事智能电网输变电设备在线监测理论与关键技术的研究 (E-mail: 1633939903@qq.com);

朱永灿(1986—), 男, 河南濮阳人, 博士研究生, 研究方向为输电线路在线监测与故障诊断 (E-mail: 286844943@qq.com);

赵隆(1987—), 男, 新疆石河子人, 博士研究生, 研究方向为输电线路在线监测与故障诊断 (E-mail: 122810588@qq.com)。

## Stress monitoring method applying FBG sensor for transmission line towers

HUANG Xinbo<sup>1</sup>, LIAO Mingjin<sup>1</sup>, XU Guanhua<sup>2</sup>, ZHU Yongcan<sup>3</sup>, ZHAO Long<sup>1</sup>

(1. College of Electronics and Information, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China;

2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China;

3. College of Mechanical and Electrical Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China)

**Abstract:** A stress monitoring method applying FBG(Fiber Bragg Grating) sensor is proposed for the transmission line tower to prevent its incline, deformation and fall. ANSYS software is used to build a finite element model of transmission line tower and its flimsy points are analyzed, base on which, FBG sensor is designed to acquire in real time the stress information of flimsy points and OPGW is adopted to transfer the stress information to an optical fiber grating demodulator installed in substation for demodulating. The stress data are then processed by the monitoring host and uploaded to the monitoring center through Fiber/LAN, where they are comprehensively analyzed by the expert software and the warning is issued before the external tower load is too large. The proposed method is applied in an 110 kV line and the experimental monitoring data show that, the tower stress change can be precisely monitored and the tower stress variation is basically corresponding to the wind load variation.

**Key words:** electric towers; FBG sensor; stress; demodulating; monitoring; models