

DOI: 10.13382/j.jemi.B1902491

基于光纤传感的输电线路悬垂绝缘子 风偏角监测研究*

周 湛 张志坤 赵振刚 冯 婷 李 川 李英娜

(昆明理工大学 信息工程与自动化学院 昆明 650500)

摘 要:由风偏引起的输电线路故障在电网运行中占有很大的比例,为了实时监测输电线路绝缘悬垂绝缘子串风偏角的变化,通过研究悬垂绝缘子风偏的荷载模型,应用光纤传感技术,搭建悬垂绝缘子风偏角在线检测系统,实现了云南电网昭通地区某110 kV 杆塔悬垂绝缘子串风偏角的在线监测。由监测数据可得,悬垂绝缘子串风偏角的变化与理论计算模型的变化趋势相符,变化范围大致在 $-4^{\circ} \sim +4^{\circ}$ 。结果表明,该光纤传感的风偏角在线检测方法在实际运用过程中准确可靠,为输电线路安全运行提供了一定程度的参考。

关键词:输电线路;光纤监测;悬垂绝缘子风偏角;光纤传感网;光纤光栅倾角传感器

中图分类号: TN209; TM754 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.5020

Monitoring of wind deflection angle of suspension insulator string for power lines based on optical fiber sensing

Zhou Zhan Zhang Zhikun Zhao Zhengang Feng Ting Li Chuan Li Yingna

(Faculty of Information Engineering and Automation, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China)

Abstract: Transmission line faults caused by wind deviation account for a large proportion in power grid operation. In order to monitor the change of the yaw angle of the insulated suspension insulators in real time, the fiber-optic sensing technology is applied by studying the load model of the overhang insulator wind bias. The on-line detection system for the wind deflector of the suspended insulator was built, and the online monitoring of the skew angle of the 110 kV pole suspension insulator in the Zhaotong area of Yunnan Power Grid was realized. According to the monitoring data, the change of the yaw angle of the suspended insulator string is consistent with the trend of the theoretical calculation model, and the variation range is roughly between -4° and $+4^{\circ}$. The results show that the on-line detection method of wind-sounding angle of optical fiber sensing is accurate and reliable in practical application, which provides a certain reference for the safe operation of transmission lines.

Keywords: power line; fiber optic monitoring; swing angle of suspension insulator string; fiber optic sensor network; fiber grating tilt sensor

0 引言

我国部分高海拔山区,风力较大,输电线路在运行过程中,经常会发生由风偏引起的输电线路故障,并且此类地区地形险要、交通不便、运维人员数量少,故障一旦发生,解决问题难度较大,成本较高^[1-3]。现阶段对风偏角的监测主要采用的是有源监测类的电子式传感器监测方法,易受到输电线路周围电磁干扰,测量结果不精准^[4-6]。

而光纤光栅传感器不受电磁干扰,并且还具有测量范围广、精度高、实时性强、集传感与传输于一体、长期运行更加稳定可靠等优点,符合恶劣环境下的风偏角监测的要求,理论上可用于风偏角的在线检测^[7-9]。

1 发展现状

目前,输电线路绝缘子风偏角监测的研究主要有唐子峰等^[10]采用刚体直杆模型的分析方法,分别研究了水

收稿日期: 2019-08-19 Received Date: 2019-08-19

* 基金项目: 国家自然科学基金(51567013)、国家自然科学基金(51667011)资助项目

平档距、垂直档距、风速、风向、风压、地形以及加重锤等主要因素对绝缘子串风偏特性的影响程度。研究结果表明,水平档距与绝缘子串风偏角呈正相关,垂直档距与绝缘子串风偏角呈负相关;在风速一定的情况下,风向的主要影响区间在垂直于线路约 $\pm 60^\circ$ 区间内。黄仁谋等^[11]和 Ma 等^[12]研究了台风风雨载荷作用下,输电线路绝缘子串的风偏特性,结果表明,在强台风天气下,考虑雨载荷后,绝缘子串的风偏角会明显增大,在极值大暴雨条件下,这种放大作用将会达到 13.3%,雨载荷对电气间隙放大效应可达到 14.8%。文献[13-16]通过计算悬垂绝缘子串风偏角和绝缘子串底部至杆塔的最小空气间隙距离,提出了基于最小空气间隙距离的风偏灾害预警方法,通过 4 种不同的数学模型对风偏角进行预测,搭建了风偏灾害预测预警系统平台,实现了电力微气象风偏灾害监测预警系统。2016 年华北电力大学张永谦^[17]基于 GPRS 和 GSM 通信,提出一种用于监测高压输电线路电流、电压、温度等状态的在线监测系统。2015 年浙江大学楼文娟等^[18]考虑了输电线路的气动阻尼效应,采用谐波叠加法构建线路各点脉动风速场,并模拟作用于输电线路,对连续多跨输电线路在瞬态风场作用下的风偏问题进行了研究,结果表明,输电线路气动阻尼对风偏动态响应有较大的影响。

通过对现阶段研究现状的分析,当前对风偏角检测的研究主要还停留在理论研究和建模分析阶段,并未结合现场实际情况进行实时监测。针对国内输电线路悬垂绝缘子风偏角在线监测的研究薄弱的问题。实际考察输电线路现场状况,建立输电线路杆塔悬垂绝缘子风偏角的刚体直棒模型,并选取位于风偏影响较大地区的输电线路杆塔悬垂绝缘子作为监测点,在输电线路杆塔上安装悬垂绝缘子双轴风偏角传感器,搭建光纤通信网络,实现对风偏角的实时监测。

2 输电线路悬垂绝缘子风偏角载荷模型

为了便于工程设计与测量,在研究过程中,将悬垂绝缘子看作是受均匀分布荷载作用的刚体直棒,并建立输电线路杆塔悬垂绝缘子风偏角的刚体直棒模型。通常把在风荷载的作用下,悬垂绝缘子偏离的角度称为悬垂绝缘子风偏角。图 1 所示为输电线路杆塔悬垂绝缘子风偏角的载荷模型。

图 1 中, ϕ 为悬垂绝缘子风偏角; λ 为绝缘子长度; P_j 为绝缘子串风荷载; P_d 为导线作用于绝缘子串的风荷载; G_j 为绝缘子自重; G_d 为导线自重。

通过静力学平衡的方法对悬垂绝缘子的风偏角展开计算。式(1)为点 A 的力矩平衡方程式。

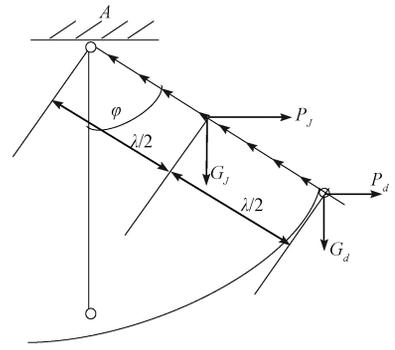


图 1 绝缘子风偏角模型

Fig.1 Wind deflection Angle model of insulator

$$\sum M_A = 0 \quad (1)$$

$$\frac{G_j \lambda}{2} \sin \phi + G_d \sin \phi - \frac{P_j \lambda}{2} \cos \phi - P_d \cos \phi = 0 \quad (2)$$

整理可得:

$$\phi = \arctan \frac{\frac{1}{2} P_j + P_d}{\frac{1}{2} G_j + G_d} = \arctan \frac{\frac{1}{2} P_j + p l_h}{\frac{1}{2} G_j + q l_v} \quad (3)$$

式中, p 为输电线路单位长度风荷载; q 为输电线路单位长度自重; l_h 为水平档距; l_v 为垂直档距。

其中 l_h 与 l_v 的计算公式如下:

$$l_h = \frac{1}{2} (l_1 + l_2) \quad (4)$$

$$l_v = \frac{1}{2} \left(\frac{l_1}{\cos \phi_1} + \frac{l_2}{\cos \phi_2} \right) + \frac{\sigma_0}{g_v} \left(\pm \frac{h_1}{l_1} \pm \frac{h_2}{l_2} \right) \quad (5)$$

式中: l_1 、 l_2 为杆塔两侧档距; h_1 、 h_2 为杆塔两侧档距内的高差(当测试杆塔高于相邻杆塔时, h 为正值,反之则为负值); σ_0 为导线应力; g_v 为导线垂直比载。

将式(4)、(5)代入式(3)整理可得:

$$\phi = \arctan \frac{\frac{1}{2} P_j + \frac{1}{2} (l_1 + l_2) \cdot p}{\frac{1}{2} G_j + q \left[\frac{1}{2} \left(\frac{l_1}{\cos \phi_1} + \frac{l_2}{\cos \phi_2} \right) + \frac{\sigma_0}{g_v} \left(\pm \frac{h_1}{l_1} \pm \frac{h_2}{l_2} \right) \right]} \quad (6)$$

式中: ϕ_1 、 ϕ_2 为杆塔两侧高差角。

3 光纤光栅传感器的调试

悬垂绝缘子风偏角传感器主体为光纤光栅倾角传感器,为保证传感器测量准确性,在安装使用之前,首先要对光纤传感器进行标定。本文所使用的光纤传感器的主要技术指标如表 1 所示。

表1 传感器的主要技术指标

Table 1 Main technical specifications of sensors

传感器类型	测量范围	测量误差
倾角传感器	±10°	±0.05°

解调仪是一种将光信号转换成电信号的一种仪器,解调仪的性能决定了光纤光栅传感器的准确性,本文采用的解调仪参数如表2所示。

表2 光纤光栅解调仪基本参数

Table 2 Basic parameters of fiber grating demodulation instrument

采集频率	工作环境	波长范围	精度	分辨率
4.5 Hz	-30~65 °C	1 510~1 590 nm	±2 pm	1 pm

光纤光栅倾角传感器实验室标定过程如图2所示。将风偏角传感器,光纤光栅解调仪,计算机,按图2所示相连接,将大理石精密隔震台调至水平状态,选取不同角度的标准角度量块(-45°~45°)置于隔震台上,将倾角传感器放置于角度量块上,记录不同角度值对应的波长值,多次重复测试,以保证测量准确性。

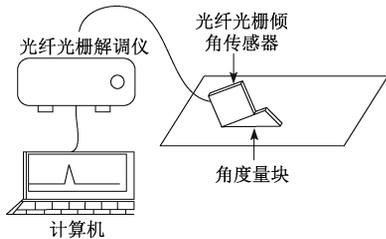


图2 传感器标定系统示意图

Fig.2 Schematic diagram of sensor calibration system

图3所示是光纤光栅倾角传感器实际波长差 $\Delta\lambda_{B1} - \Delta\lambda_{B2}$ 曲线。

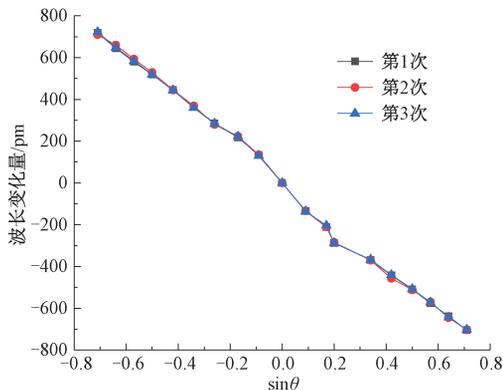


图3 光纤光栅倾角传感器实际测波长差曲线

Fig.3 Actual measured wavelength difference curve of fiber grating inclination sensor

将所测数据取平均值,再对与倾角的正弦值与波长变化量的平均值做线性拟合,线性拟合图如图4所示。由图4可知,波长的变化量与倾角的正弦值成线性关系,拟合直线的表达式为:

$$\Delta\lambda_{B1} - \Delta\lambda_{B2} = -1\,032.477 \sin\theta - 0.734 \text{ (pm)} \quad (7)$$

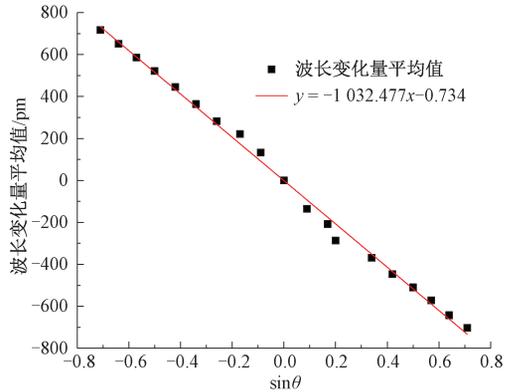


图4 实际测量平均值与拟合直线关系

Fig.4 Relationship between actual measured average value and fitted straight line

对数据分析可得,传感器的灵敏度为15.401 pm/⟨°⟩,式(8)为传感器线性度表达式。

$$\xi_L = \frac{\Delta\lambda_{\max}}{\lambda_{FS}} \quad (8)$$

式中: ξ_L 为线性度; λ_{FS} 为波长最大变化量; $\Delta\lambda_{\max}$ 为拟合最大误差。

使用图4中传感器实际测量所得数据,通过式(8)计算得到传感器线性度为2.98%。

回程误差表示在同种情况下,正反行程的最大差值的绝对值,计算公式如下:

$$e_r = \frac{\Delta_{\max}}{y_{FS}} \times 100\% \quad (9)$$

式中: e_r 为回程误差; Δ_{\max} 为正反行程最大差值的绝对值。

通过对实验测量得到的三组正、反行程数据进行计算,可得 $\Delta_{\max} = 16 \text{ pm}$, $y_{FS} = 1\,420 \text{ pm}$,回程误差 $e_r = 1.13\%$ 。

将传感器放入恒温恒湿箱,在-20~60 °C均匀调节温度变化,每10 °C取值一次,最终得到传感器两个光栅的中心波长随温度变化的曲线,如图5所示。

通过多次测试,光栅中心波长的变化与温湿度的变化是同步的。

经温度补偿后,角度 θ 与光纤光栅传感器波长的关系式为:

$$\theta = \frac{(W_a - W_{a0}) - (W_b - W_{b0})}{K} \quad (10)$$

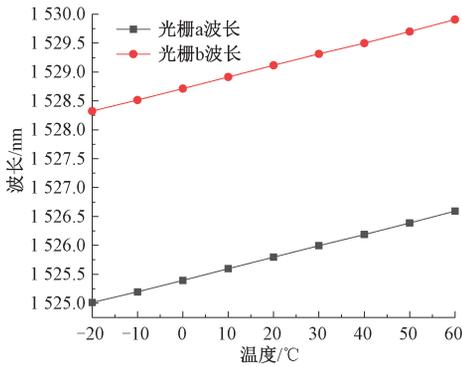


图 5 倾角传感器两个光栅的波长随温度变化曲线

Fig.5 Change curve chart of wave length of two tilt sensor gratings with temperature

式中: W_a 为光栅 a 波长; W_{a0} 为光栅 a 初始波长; W_b 为光栅 b 波长; W_{b0} 为光栅 b 初始波长; K 为灵敏度。

由图 6 可知,温度补偿后,角度误差在 0.05° 范围内,较好的实现了温度补偿。

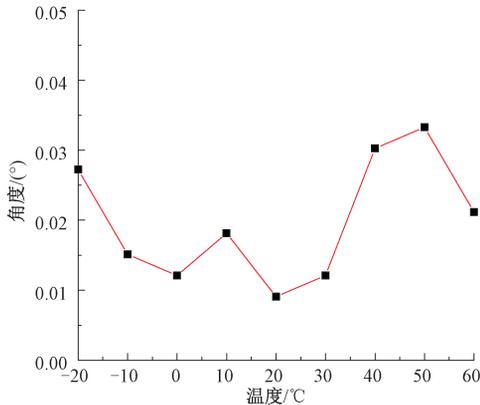


图 6 温度补偿后的角度值

Fig.6 Angle value after temperature compensation

4 光纤光栅传感器的安装

为验证悬垂绝缘子风偏角传感器的可行性,选取云南电网昭通地区某 110 kV 输电线路进行现场实际安装测试,现场示意图如图 7 所示。

输电线路绝缘子风偏角在线监测系统主要由位于输电塔上的风偏角传感器、光纤接续盒、和位于变电站内的解调仪、工控机等通过 OPGW 光缆连接组成,整体结构如图 8 所示。

由于原 OPGW 光缆只连接至 75# 直线塔,现从 75# 直线塔上的光纤接续盒中接引出一条新的 OPGW 光缆至 76# 直线塔上,连接安装在 76# 直线塔上的风偏角传感器的一端,风偏角传感器的另一端连接至原 OPGW 光缆

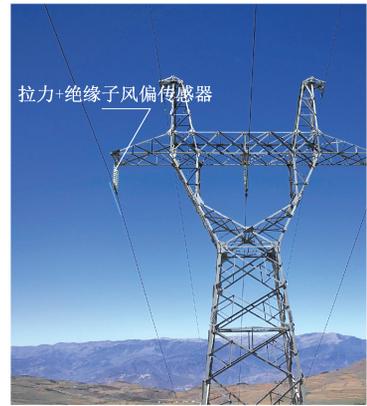


图 7 光网络现场示意图

Fig.7 Schematic diagram of optical network

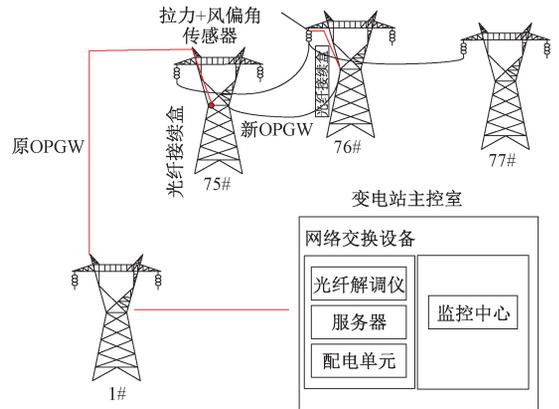


图 8 输电线路绝缘子风偏角监测系统整体结构

Fig.8 Structure diagram of transmission line tower tilt monitoring system

上,连接如图 9 所示。

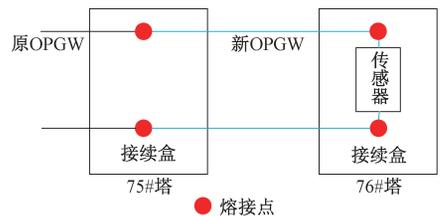


图 9 悬垂绝缘子风偏角传感器光路连接

Fig.9 Optical connection diagram of suspension insulator wind deflection sensor

为完整测量悬垂绝缘子串不同维度的偏转状态,悬垂绝缘子风偏角传感器由两个光纤光栅倾角传感器组成,分别测量各自维度的角度,实现对悬垂绝缘子串顺向和横向风偏角的实时监测。

两个传感器通过一种抱箍式的夹具,组合安装在悬垂绝缘子顶部,并通过调整固定件将倾角传感器调节至

零点状态,安装示意图如图 10 所示。

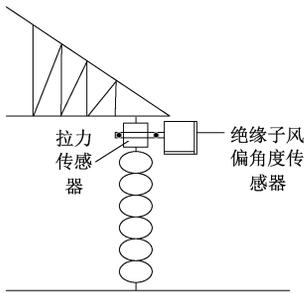


图 10 绝缘子风偏角传感器安装示意图

Fig.10 Installation diagram of insulator wind deflection sensor

悬垂绝缘子上的风偏角传感器通过架设的 OPGW 光缆,经解调仪连接至变电站内的监控中心。现场施工图如图 11 所示。



图 11 绝缘子风偏角传感器现场施工图

Fig.11 Field construction drawing of insulator wind deflection sensor

5 分析与结果

通过对输电线路悬垂绝缘子风偏角的实时监测,收集整理输电线路在线监测数据。

图 12 所示为悬垂绝缘子风偏角传感器在某段时间内,监测得到的数据拟合而成的绝缘子风偏角变化曲线,由图 12 可知,悬垂绝缘子的风偏角的变化范围在 $-4^{\circ} \sim +4^{\circ}$,正负代表角度变化的方向。图 13 所示为杆塔上安装的光纤光栅风速传感器监测的风速变化曲线,从图 13 可知,风速在持续的稳定风和瞬时阵风之间随机变化,没有规律可循,不具有可预测性。风速最大为 10 m/s ,小于 30 m/s 的最大设计风速。同时从图 12 和 13 可以看出,对风偏角影响较大的因素是风速值。

图 14 所示为某段时间内,杆塔上风速传感器的测量值和风偏角传感器测量值拟合而成的风偏角随风速变化的关系图。从图中可以看出,由于倾角传感器精度不够,

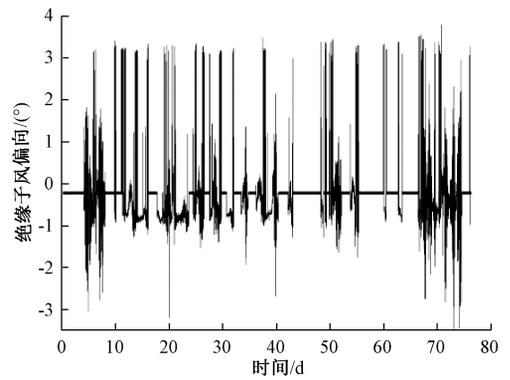


图 12 悬垂绝缘子风偏角变化曲线

Fig.12 Curve of wind deflection change of suspension insulator

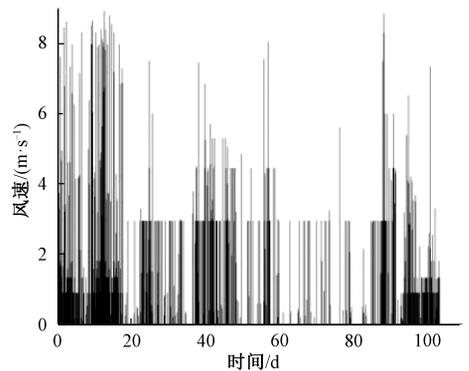


图 13 输电线路风速变化曲线

Fig.13 Wind speed variation curve of transmission line

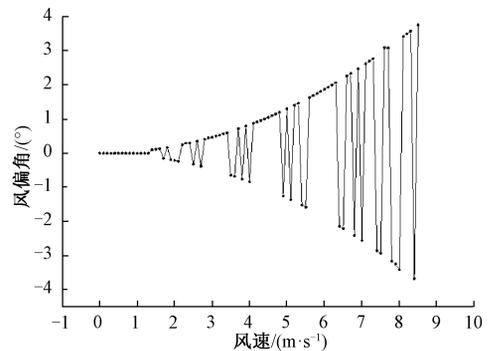


图 14 风偏角—风速监测数据曲线

Fig.14 Wind deflection Angle—curve of wind speed monitoring data

风速小于 1 m/s 时,所测得角度值没有发生变化。当风速大于 1 m/s 后,随着风速变大,风偏角随之增加。当风速位于最大设计风速之内时,所监测到的风偏角大小与风速大小成正比关系,且变化斜率增加。

当风速小于 20 m/s 时,利用刚体直棒模型风偏角公式(式(3))绘制出的风偏角与风速变化的曲线如图 15

所示,通过与图 14 做对比,可得,实际检测到的悬垂绝缘子串风偏角的数据和模型的理论计算值相符。

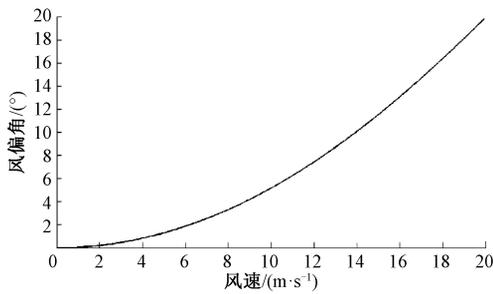


图 15 刚体直棒模型风偏角大小与风速变化关系曲线

Fig.15 Relation curve of wind deflection Angle and wind speed in rigid straight rod model

6 结 论

此次研究的基于光纤传感的输电线路绝缘子风偏角在线检测系统,解决了杆塔悬垂绝缘子串风偏角在线监测的难题。通过对悬垂绝缘子风偏角实际监测数据的整理分析,当风速在 30 m/s 范围以内时,悬垂绝缘子的风偏角大致在 $-4^{\circ} \sim +4^{\circ}$ 变化,风速越大,所监测到的风偏角越大,风偏角与风速变化的关系与刚体直棒模型风偏角公式计算结果相符。说明该悬垂绝缘子风偏角传感器监测数据准确。结果表明,该方法可用于监测杆塔的绝缘子风偏角变化情况,监测数据能为输电线路的安全运行作参考。

参考文献

[1] 胡钊,徐则诚,金哲,等.基于灰色关联模型的输电线路舞动预警方法[J].电力自动化设备,2018,38(2):117-122.
HU P, XU Z CH, JIN ZH, et al. Precaution method for transmission line galloping based on grey relational model[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38 (2): 117-122.

[2] 汪峰,王宇,周蕊,等.架空输电线路大跨越导线微风振动试验[J].重庆大学学报,2018,41(1):42-50.
WANG F, WANG Y, ZHOU R, et al. Experiments on aeolian vibration of large span overhead transmission lines [J]. Journal of Chongqing University, 2018,41 (1):42-50.

[3] 焦重庆,汪贝,李昱蓉,等.用于半波长输电线路的精细化传输线模型[J].高电压技术,2018,44(1):3-13.
JIAO CH Q, WANG B, LI Y R, et al. Refined transmission line model for half-wavelength transmission lines [J]. High Voltage Engineering, 2018, 44 (1): 3-13.

[4] 王黎明,高亚云,卢明,等.特高压输电线路新型防舞技术计算[J].高电压技术,2017,43(8):2541-2550.
WANG L M, GAO Y Y, LU M, et al. Calculation on a new anti-galloping technique for UHV transmission lines [J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(8): 2541-2550.

[5] 马洒洒,王彬,李川,等.基于 FBG 应变传感器的隧道安全实时监测算法研究[J].仪器仪表学报,2017,38(2):304-311.
MA S S, WANG B, LI CH, et al. Research on real-time monitoring algorithm for tunnel safety status based on fiber Bragg grating strain sensors [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(2): 304-311.

[6] 楼文娟,罗罡,杨晓辉,等.输电线路动态风偏响应特性及频域计算方法[J].高电压技术,2017,43(5):1493-1499.
LOU W J, LOU G, YANG X H, et al. Response characteristics and frequency-domain calculation method of dynamic wind-induced deflection of transmission lines [J]. High Voltage Engineering, 2017, 43 (5):1493-1499.

[7] 黄俊,段刘蕊,景霞,等.带温度补偿的分布式光纤温度传感系统设计[J].光学技术,2017,43(2):176-179.
HUANG J, DUAN L R, JING X, et al. Design of distributed optical fiber temperature sensor system with temperature compensation [J]. Optical Technique, 2017, 43(2): 176-179.

[8] 刘素杰,张金权,万江飞,等.基于光纤振动安全预警系统的振源识别算法研究[J].光学技术,2016,42(1):89-96.
LIU S J, ZHANG J Q, WAN J F, et al. The research of recognition algorithm of vibration source based on the optical fiber vibration safety warning system [J]. Optical Technique, 2016, 42(1): 89-96.

[9] 陈天英.基于光纤传感技术输电线路在线监测的研究[D].保定:华北电力大学,2015.
CHEN T Y. Research on transmission line online monitoring based on optical fiber sensing technology [D]. Baoding:North China Electric Power University, 2015.

[10] 唐子峰,廖志雄,袁翔.刚体直杆模型计算风偏角的影响因素分析[J].电磁避雷器,2018(3):208-212.
TANG Z F, LIAO ZH X, YUAN X. Analysis of influence factors on computing wind deflection angle with rigid body straight rod model [J]. Insulators and Surge Arresters, 2018(3):208-212.

[11] 黄仁谋,安利强,张荣伦,等.台风风雨载荷作用下输电线路绝缘子串风偏特性[J].电力科学与技术学报,2018,33(2):89-95.
HUANG R M, AN L Q, ZHANG R L, et al. Windage characteristic analysis of transmission lines under

- typhoon-rain loads [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2018, 33(2): 89-95.
- [12] MA G M, LI Y B, MAO N Q, et al. A Fiber Bragg grating-based dynamic tension detection system for overhead transmission line galloping [J]. Sensors, 2018, 18(2):365.
- [13] 李震宇,武国亮,王志利,等.电力微气象风偏灾害监测预警技术及系统实现[J].电力系统保护与控制, 2017,45(1):125-131.
LI ZH Y, WU G L, WANG ZH L, et al. Windage yaw disaster monitoring and early warning technology based on power micrometeorological and system implementation [J]. Power System Protection and Control, 2017, 45 (1): 125-131.
- [14] GAO ZH L, WANG D T, CAI X C. Research and development of on-line monitoring system for HV overhead transmission lines [C]. International Conference on Applied Science and Engineering Innovation (ASEI), 2015.
- [15] JIAN M J, ZHANG G CH, ZHANG D Q, et al. Analysis of uneven settlement and restoration measures for one 220kV transmission tower [C]. 2nd International Forum on Electrical Engineering and Automation (IFEAA), 2015.
- [16] 朱赛伟.特高压绝缘子串在风荷载作用下力学特性的研究[D].北京:中国电力科学研究院,2017.
ZHU S W. Research on mechanical properties of UHV insulator strings under wind loads [J]. Beijing: China Electric Power Research Institute, 2017.
- [17] 张永谦.高压输电线路运行状态在线监测系统的研究与应用[D].保定:华北电力大学,2016.
ZHANG Y Q. Research and application of online monitoring system of running state of high voltage

transmission line [D]. Baoding: North China Electric Power University, 2016.

- [18] 楼文娟,杨悦,吕中宾,等.考虑气动阻尼效应的输电线路风偏动态分析方法[J].振动与冲击, 2015, 34(6):24-29.
LOU W J, YANG Y, LV ZH B, et al. Windage yaw dynamic analysis methods for transmission lines considering aerodynamic damping effect [J]. Journal of Vibration and Shock, 2015, 34(6):24-29.

作者简介



周湛, 2014年于上海电力大学获得学士学位,现为昆明理工大学硕士研究生,主要从事光纤传感器、检测技术、信息处理等方面的研究。

E-mail: 494711249@qq.com

Zhou Zhan received his B. Sc degree from ShangHai University of Electric Power in 2014. Now he is a M. Sc. candidate at Kunming University of Science and Technology. His main research interests include measuring technology of fiber bragg grating instrument, and information detection and processing.



张志坤(通信作者),分别在2001年、2005年在昆明理工大学获学士学位、硕士学位,现为昆明理工大学工程师,主要研究方向为管理信息系统、信息处理、传感器信息处理。

E-mail: red_mars141@126.com

Zhang Zhikun (Corresponding author) received his B. Sc. and M. Sc. degrees both from Kuming University of Science and Technology in 2001 and 2005, respectively. Now he is an engineer at Kuming University of Science and Technology. His main research interests include management information system, information processing, sensor information processing.