

# 输电线路绝缘子串偏角的光纤监测研究

沈 龙<sup>1</sup>, 冯 婷<sup>2</sup>, 梁仕斌<sup>3</sup>, 李 川<sup>2</sup>, 昌 明<sup>4</sup>, 赵振刚<sup>2</sup>

(1. 云南电网有限责任公司昭通供电局, 云南 昭通 657000; 2. 昆明理工大学信息工程与自动化学院, 云南 昆明 650500;  
3. 云南电力试验研究院(集团)有限公司, 云南 昆明 650217; 4. 昆明能讯科技有限责任公司, 云南 昆明 650217)

**摘 要:**输电线路绝缘子串风偏之后使得绝缘子串下端带电结构、输电导线距离杆塔较近, 当距离小于最小空气间隙时, 将造成放电跳闸。绝缘子的风偏严重影响和威胁着电网系统的安全运行, 也将造成巨大的经济损失。根据输电线路绝缘子串的风偏原因及结果, 设计并研制出一种基于光纤 Bragg 光栅的倾角传感器, 重锤与等强度悬臂梁相连接, 等强度悬臂梁中间部位两侧分别粘贴一个光纤 Bragg 光栅。将研制的倾角传感器进行封装并确保密封完好, 并通过抱箍式夹具组合的方式与光纤 Bragg 光栅称重传感器共同安装于绝缘子串的顶部。对云南电网某 110 kV 输电线路 30# 杆塔的绝缘子串进行风偏监测并与风速数据结合进行分析, 得到风偏角随风速变化的特点, 为输电线路的安全运行提供了参考。

**关 键 词:**输电线路; 光纤 Bragg 光栅; 倾角传感器; 绝缘子风偏

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2020.05.010 中图分类号:TM85 文章编号:1673-9140(2020)05-0075-07

## Research on the optical fiber monitoring for windage angle of transmission line insulator string

SHEN Long<sup>1</sup>, FENG Ting<sup>2</sup>, LIANG Shibing<sup>3</sup>, LI Chuan<sup>2</sup>, CHANG Ming<sup>4</sup>, ZHAO Zhengang<sup>2</sup>

(1. Zhaotong Power Supply Bureau, Yunnan Power Grid Co., Ltd., Kunming 657000, China; 2. College of Information Engineering and Automation, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China; 3. Yunnan Electric Test & Research Institute Group Co., Ltd., Kunming 650217, China; 4. Kunming Enersun Technology Co., Ltd., Kunming 650217, China)

**Abstract:** The transmission conductor and charged structure at the bottom of insulator string tend to be close to the transmission tower due to the effect of wind deviation. The discharge and trip-out may occur once the distance between them is less than the minimum air gap value. Therefore, the wind deviation of insulator string threaten the safe operation of power grid seriously and may lead to an enormous economic loss. Under the circumstance, this paper designs and develops a fiber Bragg grating (FBG) tilt sensor. In this sensor, the gravity hammer is fastened on the free end of equal strength cantilever beam which have one FGB pasted on the central symmetrical lines of both sides. The developed inclination sensor is packaged and then installed on the top of the insulator string together with the fiber Bragg grating load cell by the pattern of hoop clamp combination. The insulator string on 30# Tower of an 110 kV

收稿日期:2019-08-10; 修回日期:2019-09-02

基金项目:国家自然科学基金(51667011)

通信作者:赵振刚(1981-),男,博士,副教授,主要从事微光机电系统、光纤光栅传感技术研究;E-mail:zhaozhenganghit@126.com

transmission line in the Yunnan Power Grid is monitored by the installed device. By combinatory analyzing the monitoring data and wind data, the variation characteristics of windage angle with wind speed are obtained. The non-electric measuring of fiber Bragg grating tilt sensor provides a reference for safe operation of power transmission line.

**Key words:** transmission line; fiber Bragg grating; tilt sensor; insulator windage angle

因自然环境恶劣导致输电线路发生的问题中,因悬垂绝缘子串发生风偏引起放电跳闸的故障较为棘手<sup>[1-3]</sup>,1999~2003年的5年间,据统计得出,中国国家电网公司在大于110 kV的输电线路由风偏引起的放电故障达260多起,其中500 kV输电线路由风偏放电故障多达33起<sup>[4-5]</sup>。输电线路因风偏导致的击穿放电会产生线路跳闸,此时不易合闸成功,会直接导致停电及电损等故障,不仅会产生巨大的经济损失,更会严重影响和威胁电网系统的安全稳定运行。因此,为保障输电线路安全稳定运行,需要着重对输电线路进行长期的风偏监测,以此来保障输电线路的稳定,减少故障引起的经济损失。

光纤传感技术在多个领域的快速发展,促进了光纤光栅传感器的应用,目前常用于检测输电线路的运行状态。绝缘子串的风偏角采用了光纤倾角传感器进行测量,该光纤 Bragg 光栅与传统的倾角传感器相比较,具备抗电磁干扰、无源检测、无零漂、耐高温、体积微小、精度高等优势<sup>[6]</sup>。近几年来使用光纤 Bragg 光栅倾角传感技术进行测量的方式日趋成熟,文献[7]针对光纤 Bragg 光栅倾角传感器提出了悬挂式结构,将2根光纤光栅以对称的方式设在固定端与摆锤之间;后来文献[8]在不改变文献[7]中结构的情况下将4根光纤光栅在一个圆周上等距分布,然后将其张拉在一个摆锤上,这种结构在提高了灵敏度的同时还具备温度补偿功能;文献[9]采用遗传算法对混合威布尔分布参数拟合精度和计算速度更优于基于GA的混合威布尔分布模型;文献[10]建立基于多维云模型的输电线路故障率预测模型对输电线路故障率进行准确预测;文献[11]借助模糊综合评价法提取了关键灾害影响指标,对风速和风向指标进行修正;文献[12]设计了以电流导数为判据的故障发生时刻范围确定方法;文献[13]将深度学习理论运用于输电线路故障类型识别。

该文针对倾角传感器研究了一种温度自补型的光纤 Bragg 光栅倾角传感器,用于检测输电线路绝

缘子串风偏角的大小,从理论上阐述传感器基本的工作原理,介绍传感器布设方法与位置,并通过检测到的数据分析风偏角的状态。

## 1 绝缘子串风偏角的研究

### 1.1 光纤光栅倾角传感器的使用原理

该文研究了一种由等强度悬臂梁、重锤、光纤 Bragg 光栅、传输光纤以及限位螺杆等结构组成的具有温度自补、测量输电线路悬垂绝缘子串风偏角功能的传感器,结构如图1所示。

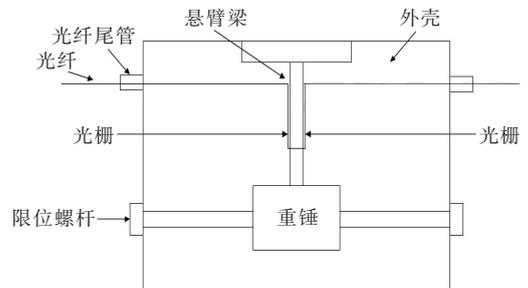


图1 光纤 Bragg 光栅倾角传感器结构

Figure 1 The structure diagram of fiber Bragg grating tilt sensor

该传感器采用了工程中常用的等强度悬臂梁,在受到力的作用时,因梁身强度处处相等,所以与力作用点处任意距离的截面应力大小都相等。当加载一个力  $F$  在等强度悬臂梁上时,可以根据等强度悬臂梁的受力特征情况,以及材料力学原理得到等强度悬臂梁应变与力  $F$  之间的关系:<sup>[14]</sup>

$$\epsilon = \frac{6FL}{EBh^2} \quad (1)$$

式中  $\epsilon$  为梁的应变; $L$  为梁的长度; $E$  为梁的弹性模量; $B$  为梁底部宽度; $h$  为等强度悬臂梁的厚度。

如图1所示,在光纤 Bragg 光栅倾角传感器中,封装结构上固定着等强度悬臂梁的一端,重锤悬挂在另外一端的自由端,在梁的中间部分梁对称粘贴上光纤光栅,并通过尾管引出光纤。重锤两端装有限位螺杆不仅可保持初始状态下的传感器处于零点的位置,同时还可避免因倾角过大导致传感器损坏。

当光纤 Bragg 光栅倾角传感器倾斜角度为  $\theta$  时,原本垂直向下的等强度悬臂梁状态发生改变,会随之产生夹角。重锤也会产生方向垂直于等强度悬臂梁的重力分量,并使悬臂梁产生弯矩<sup>[15]</sup>,其受力如图 2 所示。

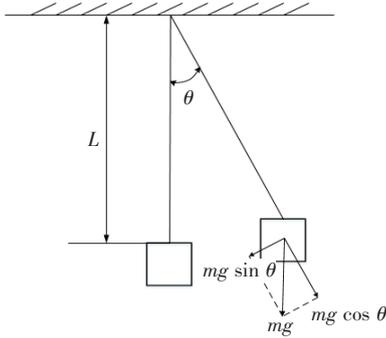


图 2 倾角传感器受力

Figure 2 Force diagram of tilt sensor

当重锤倾斜角为  $\theta$  时,在垂直于梁的方向上会存在一个重力分量,即

$$F = mg \sin \theta \quad (2)$$

将悬臂梁的受力式(2)代入应变式(1)中可得到等强度悬臂梁应变:

$$\epsilon = \frac{6Lmg}{EBh^2} \sin \theta \quad (3)$$

光纤 Bragg 光栅是根据光纤材料所存在的光敏特性,会在纤芯内部会形成一种空间的相位光栅,相当于在纤芯内部安置了一个透射和反射滤波器,对波长进行调制选择,如图 3 所示。

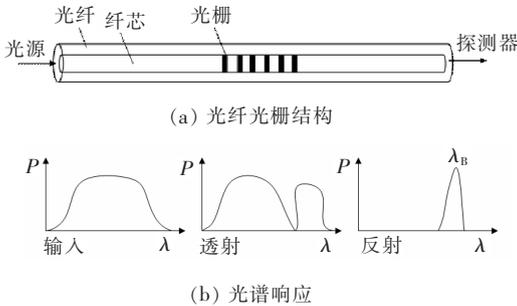


图 3 光纤光栅结构与光谱响应

Figure 3 Schematic diagram of fiber grating structure and spectral response

由图 3 可以看出,由光源向纤芯内发射出的光在经过光栅时会有一部分光无法通过被反射回来,另一部分光会透过光栅继续传播。光的反射波长会随着外界环境的变化发生相应的改变,通过对反射回来光进行解调可以得到相应外界环境的变化值,

进而得到所需的物理量,这种光纤传感器属于波长调制型<sup>[16]</sup>。当光在光纤 Bragg 光栅中传输时,反射回来的光中心波长满足:

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}} \Lambda \quad (4)$$

式中  $\lambda_B$  为反射波中心波长; $n_{\text{eff}}$  为纤芯的有效折射率; $\Lambda$  为光栅周期。如式(4)所示,当有效折射率  $n_{\text{eff}}$  及光栅的周期  $\Lambda$  发生变化时将会导致中心波长  $\lambda_B$  产生变化,而应变和温度是可以导致有效折射率和周期变化的最直接的物理量<sup>[17]</sup>。当应变与温度发生改变时,光纤 Bragg 光栅的中心波长变化为<sup>[18]</sup>

$$\frac{\Delta \lambda_B}{\lambda_B} = (\xi + \alpha) \Delta T + (1 - P_e) \Delta \epsilon \quad (5)$$

式中  $\xi$  为热光系数; $\alpha$  为热膨胀系数; $P_e$  为有效弹光系数,令  $K_T = (\xi + \alpha) \lambda_B$ ,  $K_s = (1 - P_e) \lambda_B$ , 即

$$\Delta \lambda_B = K_T \Delta T + K_s \Delta \epsilon \quad (6)$$

该文研究的采用双光栅设计结构的光纤 Bragg 光栅倾角传感器,当温度发生变化时,会同时影响 2 个光栅的参数变化作为温度补偿。在悬臂梁发生弯曲时,2 个光栅其中一个在拉伸状态下产生应变,另一面的光栅在压缩状态下产生应变。此时悬臂梁所受应变的大小可以通过对 2 个光栅的波长进行数学处理反映出来。当倾角变化为  $\theta$  时,处于拉伸状态的光纤光栅满足:

$$\Delta \lambda_{B1} = \lambda_{B1} - \lambda_{01} = K_{\epsilon 1} \Delta \epsilon \quad (7)$$

式中  $\Delta \lambda_{B1}$  为拉伸状态下的位移量对应的光栅的中心波长; $\lambda_{B1}$  为拉伸光栅的中心波长; $\lambda_{01}$  为拉伸光栅的初始中心波长; $K_{\epsilon 1}$  为拉伸光栅的应变灵敏度系数; $\Delta \epsilon$  为应变。

处于压缩状态的光纤光栅,与拉伸状态光栅对称的贴在悬臂梁的两侧,由于两光栅的距离很近,所以两光栅所在的温度环境应该是一致的。由等强度悬臂梁固有特性可知,处于压缩和拉伸状态下的两光栅,其应变大小相等方向相反,同理处于压缩状态的光纤光栅满足:

$$\Delta \lambda_{B2} = \lambda_{B2} - \lambda_{02} = K_{\epsilon 2} (-\Delta \epsilon) \quad (8)$$

式中  $\Delta \lambda_{B2}$  为压缩状态下位移量对应的光栅的中心波长; $\lambda_{B2}$  为压缩光栅的中心波长; $\lambda_{02}$  为压缩光栅的初始中心波长; $K_{\epsilon 2}$  为压缩光栅自身的应变灵敏度系数; $\Delta \epsilon$  为应变。

式(7)减去式(8)可得

$$\Delta \lambda_B = \Delta \lambda_{B1} - \Delta \lambda_{B2} = (K_{\epsilon 1} + K_{\epsilon 2}) \Delta \epsilon \quad (9)$$

由式(9)中可得出波长变化量与应变量成正比,式(9)代入式(3)得

$$\Delta\lambda_B = \frac{6Lmg(K_{\epsilon_1} + K_{\epsilon_2})}{EBh^2} \sin\theta \quad (10)$$

令  $A = \frac{6Lmg(K_{\epsilon_1} + K_{\epsilon_2})}{EBh^2}$ ,  $A$  代表与光栅的

温变、应变以及等强度悬臂梁尺寸有关的角度灵敏度系数。由式(10)得出,波长的变化量正比于倾角的正弦值,故倾角的数值可通过监测光纤 Bragg 光栅的波长变化量得到。

## 1.2 光纤 Bragg 光栅倾角传感器标定实验

为了保障设计研制过程中传感器的性能稳定并测量准确,需要按照一定的规则对仪器进行校准测试。内容包括对倾角传感器重要的性能参数进行研究测试,主要包括灵敏度、线性度、迟滞性的测试等,该实验还使用标准模具角度量块进行了校准。搭建的实验平台由以下构成:大理石隔振台、FBG 角度传感器、角度量块以及解调系统等。进行测试实验时首先将大理石精密隔振平台放置水平保持稳定状态,并将 FBG 倾角传感器放置在上面,将 FBG 倾角传感器的传输光纤连接在解调仪的相应端口进行解调,并将数据传输至与解调仪相连的上位机中进行汇总处理。

实验过程选用多个标准角度量块测量 FBG 倾角传感器在  $-45^\circ \sim +45^\circ$  角度范围内的变化情况,为防止随机误差进行 3 次重复测试。

将光纤光栅倾角传感器放置在大理石隔振台上并每次改变  $5^\circ$  的倾角,同时对应与该角度下相应的中心波长值,最终使倾角传感器从  $-45^\circ$  变化到  $+45^\circ$ 。使用 Origin 软件对 3 次测试的结果进行拟合,得到波长值与正弦值的关系曲线,如图 4 所示。

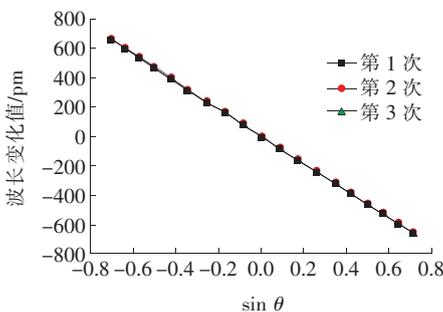


图 4 光纤 Bragg 倾角传感器实际测量值曲线

Figure 4 Measuring result curve of fiber Bragg tilt sensor

将测量得到的 3 次数据计算平均值,其平均值结果如表 1 所示,并利用电脑端 Origin 软件将波长变化量的均值与倾角的正弦值进行线性拟合,实验数据的线性拟合结果如图 5 所示。

表 1 测量数据平均值

Table 1 Average measurement value		
$\theta/(^\circ)$	$\sin\theta$	$\Delta\lambda_{B1} - \Delta\lambda_{B2}$ 平均值/pm
-45	-0.71	668
-40	-0.64	602
-35	-0.57	537
-30	-0.50	473
-25	-0.42	396
-20	-0.34	315
-15	-0.26	234
-10	-0.17	172
-5	-0.09	85
0	0.00	0
5	0.09	-84
10	0.17	-158
15	0.2	-237
20	0.34	-319
25	0.42	-390
30	0.50	-460
35	0.57	-522
40	0.64	-593
45	0.71	-653

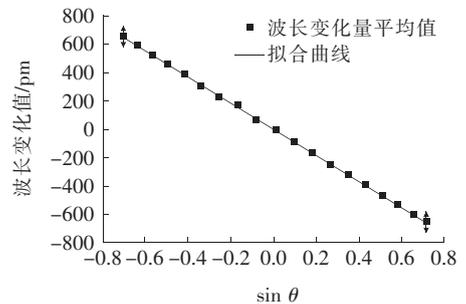


图 5 平均值与正弦值拟合曲线

Figure 5 Fitting relationship between average value and sinusoidal value

从图 5 可得,测的数据拟合关系与理论分析一致,从而得知光栅中心波长的变化量和倾角的正弦值呈现出线性关系。其拟合直线的表达式:

$$\Delta\lambda_B = -928.221\sin\theta + 3.456 \quad (11)$$

式中 线性系数  $R^2$  为 0.999 85。

衡量传感器的特性指标包括:线性度、灵敏度、回程误差。由测量数据与拟合直线的关系得知,传感器的满量程为 1 319 pm,其中最大偏差为-13.865 pm,且传感器的线性度为 1.05%。由拟合直线表达式可以得到,光纤光栅倾角传感器的灵敏度是 12.74 pm/(°)。并且由于光纤解调仪可以识别的最小波长为 1pm,所以得到该倾角传感器能够分辨的最小角度是 0.078°。根据测量数据可以得到传感器的回程误差为 1.7%。

## 2 绝缘子串偏角检测结果分析

### 2.1 FBG 倾角传感器的安装

使用抱箍式夹具将光纤 Bragg 光栅倾角传感器与光纤 Bragg 光栅称重传感器组合起来并安装于绝缘子串的顶部,光纤 Bragg 光栅倾角传感器用于测量悬垂绝缘子串的风偏角。称重传感器与倾斜角传感器组合为一体结构,其结构如图 6 所示:①固定螺丝,②光纤 Bragg 光栅倾角传感器,③、④分别为倾角传感器的操作板,⑤沉头螺丝,⑥、⑦分别是抱箍半圆环,⑧拉力传感器,⑨是金属软管。

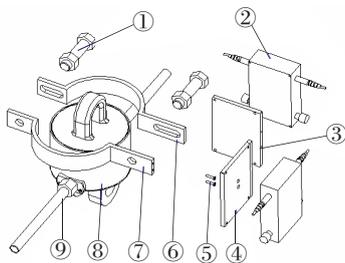


图 6 光纤光栅倾角传感器与称重传感器的组装

Figure 6 Assembly diagram of fiber grating tilt sensor and weighing sensor

FBG 倾角传感器内部有重锤,在运输和安装过程中会对传感器造成影响,该文设计的 2 个限位螺杆,大大提高了传感器的精度和安全性,即在安装运输过程中,使内部重锤保持零点状态,避免引起光栅传感器的损坏;在测量过程中,悬臂梁偏移过大会导致传感器损坏,可通过调整限位螺杆的量程来防止破坏。

由于安装角度不同会导致传感器的波长变化,因此为保证倾角传感器为零点状态需要用安装板来协助安装<sup>[19]</sup>。每一个倾角传感器能够测量相应一个维度的角度,将测量得到的光纤光栅倾角传感器的波长变化值代入上述得出的计算公式中,可以计算出悬垂绝缘子串风偏角的大小,风偏角的大小是保证线路安全运行的重要参考数据之一<sup>[20]</sup>。

### 2.2 倾角传感器的倾角数据监测分析

为保障输电线路安全平稳的运行需要对其状态进行评估,因此在输电线路的杆塔上分别布设了测量导线温、湿度的温度传感器和用于检测导线拉力及振动的称重传感器和振动传感器等,并对各类传感器数据进行长期分析,进而了解输电塔线的运行状态,各类传感器构建了光纤光栅的传感器网络<sup>[21]</sup>。实验只选用了风偏角的数据监测值,用于研究悬垂绝缘子风偏角的相关问题。根据光纤 Bragg 光栅传感器监测得到的绝缘子风偏角变化如图 7 所示,一段时间内风速与风偏角变化曲线如图 8 所示。

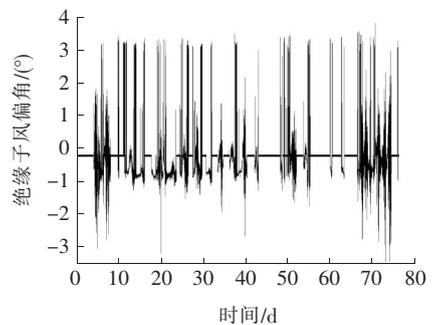


图 7 绝缘子风偏角变化趋势

Figure 7 Variation trend of insulator windage angle

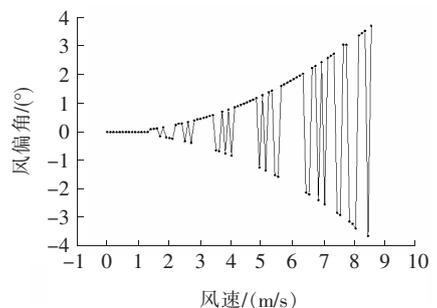


图 8 风偏角—风速监测数据曲线

Figure 8 Windage angle-wind speed monitoring curve

由图 7 可知,悬挂在塔杆上的绝缘子串角度大致在  $-4^{\circ} \sim +4^{\circ}$  之间变化,导致负值的原因是风向

引起双光栅之间的波长位移差值等于正数,在代入公式中计算得到的角度值是负值。图8所示为某一段时间内不同风速导致风偏角的变化,可以看出在风速小于某一数值时,风偏角为 $0^\circ$ 没有发生变化。此时的风速虽然可以被风速传感器捕捉到,但是由于光纤光栅倾角传感器的精度限制,不能检测到风速小于 $1\text{m/s}$ 时引起的角度变化。随着风速的增大,其相对应的风偏角产生了变化,即风速增加使得风偏角增大。

在这个风偏角随风速变化的曲线图中,可以看到虽然此段时间内监测到的绝缘子风偏角远小于最大允许偏角大小,但随着风速增大会导致风偏角逐渐增大,且曲线斜率呈现增大的趋势,通过对绝缘子串状态的长期观测,对于了解输电线路运行状态,保障输电线路的安全平稳运行有着重要意义。

### 3 结语

该文根据倾角传感器的基本原理设计并且研制出了一种温度补偿型的光纤 Bragg 光栅倾角传感器,能够较为准确地检测悬垂绝缘子串风偏角的大小。相比传统传感器,其抗电磁干扰、可远距离传输、耐高温等优势为输电线路长期的绝缘子风偏监测提供了技术支持。在检测过程中,选取了一段时间内风偏角与风速变化曲线,发现由于风速增大会导致风偏角逐渐增大,并且曲线斜率也呈现着增大趋势,因此为了解运行状态,通过长时间监测悬垂绝缘子串的风偏角,为输电线路安全运行提供参考。

#### 参考文献:

- [1] 赵文元, 杨保东. 输电线路风偏故障的预防和抑制[J]. 电力学报, 2004, 19(1):59-61.  
ZHAO Wenyuan, YANG Baodong. Defending and controlling wind lean of transmission line[J]. Journal of Electric Power, 2004, 19(1):59-61.
- [2] 黄欢, 谭思, 曾华荣, 等. 基于实时应力的输电线路覆冰故障率模型[J]. 电力科学与技术学报, 2017, 32(3):145-152.  
HUANG Huan, TAN Si, ZENG Huarong, et al. Icing failure rate model of transmission line based on real-time stress[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2017, 32(3):145-152.
- [3] 韩中合, 李秋菊, 苑一鸣, 等. 基于相关向量机的短期风速预测模型[J]. 电力科学与技术学报, 2017, 32(3):38-42.  
HAN Zhonghe, LI Qiuju, YUAN Yiming, et al. RVM based short-term wind speed prediction model. [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2017, 32(3):38-42.
- [4] 胡毅. 500 kV 输电线路风偏跳闸的分析研究[J]. 高压技术, 2004, 30(8):9-10.  
HU Yi. Study on trip caused by windage yaw of 500 kV transmission line[J]. High Voltage Engineering, 2004, 30(8):9-10.
- [5] 郑佳艳. 动态风作用下悬垂绝缘子串风偏计算研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2006.
- [6] 章易坤, 郭永兴, 李公法. 一种增敏结构的 FBG 倾角传感器研究[J]. 光电子·激光, 2016, 27(3):253-258.  
ZHANG Yikun, GUO Yongxing, LI Gongfa. Research of FBG tilt sensor with enhanced sensitivity structure [J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2016, 27(3):253-258.
- [7] Ferdinand P. Optical fiber Bragg grating inclinometry for smart civil engineering and public works[C]//Fourteenth International Conference on Optical Fiber Sensors, Venice, Italy, 2000.
- [8] Ni K, Dong X Y, Jin Y X, et al. Temperature-independent fiber bragg grating tilt sensor[C]//2010 Symposium on Photonics and Optoelectronics, Chengdu, China; IEEE, 2010:1-3.
- [9] 李莉, 熊炜, 赵艺杰, 等. 基于模糊遗传算法的输电线路故障混合威布尔分布模型[J]. 电力科学与技术学报, 2018, 33(1):60-66.  
LI Li, XIONG Wei, ZHAO Yijie, et al. Mixed weibull distribution model of transmission line fault based on fuzzy genetic algorithm [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2018, 33(1):60-66.
- [10] 黄欢, 雷加智, 曾华荣, 等. 极端外部环境下输电线路的综合风险评估方法[J]. 电力科学与技术学报, 2019, 34(2):119-127.

- HUANG Huan, LEI Jiazhi, ZENG Huarong, et al. Integrated risk assessment system of transmission line under extreme external environment [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2019, 34(2): 119-127.
- [11] 谷凯凯, 陈凯, 顾然, 等. 基于 FCE 和 SVM 融合的线路典型冰风灾害算法分析[J]. 中国电力, 2020, 53(6): 56-63.
- GU Kaikai, CHEN Kai, GU Ran, et al. An algorithm for analyzing typical transmission line icing and wind disasters based on integration of fuzzy comprehensive evaluation and support vector machine [J]. Electric Power, 2020, 53(6): 56-63.
- [12] 孙广, 王阳, 薛枫, 等. 特高压直流输电线路改进双端行波故障定位方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(14): 113-120.
- SUN Guang, WANG Yang, XUE Feng, et al. Research on an improved double-terminal traveling wave fault location method for UHVDC project [J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(14): 113-120.
- [13] 饶超平, 肖博文, 严星, 等. 基于 Seq2Seq 技术的输电线路故障类型识别方法[J]. 智慧电力, 2020, 48(5): 99-105+110.
- AO Chaoping, XIAO Bowen, YAN Xing, et al. Fault type recognition method of transmission line based on Seq2seq technology [J]. Smart Power, 2020, 48(5): 99-105+110.
- [14] 刘鸿文. 高等材料力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1985.
- [15] 杨洪磊, 梁仕斌, 李川, 等. 基于 FBG 的电力杆塔倾角传感器研究[J]. 传感器与微系统, 2013, 32(11): 21-24.
- YANG Honglei, LIANG Shibin, LI Chuan, et al. Research of electric power tower tilt angle sensor based on FBG [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2013, 32(11): 21-24.
- [16] 马国明. 基于光纤光栅传感器的架空输电线路覆冰在线监测系统研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2011.
- [17] 李川. 光纤传感器技术[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [18] Ma G M, Jiang J, Mu R D, et al. High sensitive FBG sensor for equivalent salt deposit density measurement [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2015, 27(2): 177-180.
- [19] 陈西圆. 关于传感器非线性的评价[J]. 传感器与微系统, 1993, 12(3): 15-18.
- CHEN Xiyuan. On evaluation of nonlinearity of sensor [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 1993, 12(3): 15-18.
- [20] 翟国栋. 误差理论与数据处理[M]. 北京: 科学出版社, 2016.
- [21] 杨洪磊. 线路覆冰光纤光栅在线监测系统的研究[M]. 昆明: 昆明理工大学, 2014.