

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2017.12.024

## 输电线路覆冰与微气象参数和覆冰时间的研究

尹 晖<sup>1,2</sup>, 王晶晶<sup>1,3</sup>

(1. 武汉大学测绘学院, 武汉 430079; 2. 地球空间信息技术协同创新中心, 武汉 430079;

3. 潍坊科技学院建筑工程学院, 山东 寿光 262700)

**摘要:** 微气象对输电线路覆冰形成有着决定性的影响,而目前存在覆冰与微气象的相关性研究不全面、不深入的问题,因此研究与分析输电线路覆冰形成与微气象对防冰抗冰工作具有重大意义。针对上述问题,基于覆冰与微气象环境试验,采用控制变量法分别研究了覆冰质量增长与环境温度、风速、降水量及覆冰时间的关系,结果表明:覆冰质量增长与环境温度、风速及降水量呈类似抛物线的函数关系,同时这种关系也决定了必然存在一个最有利于形成覆冰的环境温度值、风速值及降水量;并且在相同的微气象条件下,覆冰增长速度保持恒定,与覆冰时间无关,仅与微气象参数的改变有关。

**关键词:** 覆冰模拟试验;控制变量法;覆冰质量增长;微气象;覆冰时间

### Effects of Micrometeorological Parameters and Icing Time on Icing of Transmission Line

YIN Hui<sup>1,2</sup>, WANG Jingjing<sup>1,3</sup>

(1. School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430079, China; 2. Collaborative Innovation Center for Geospatial Technology, Wuhan 430079, China; 3. School of Architectural Engineering, Weifang University of Science and Technology, Shandong Shouguang 262700, China)

**Abstract:** Micrometeorology has a decisive influence on the ice formation on transmission line. However, studies on the relation between icing on transmission line and micrometeorology are not sufficient. In this study, simulation test of icing in varying micrometeorological environment was conducted to investigate the relations of ice mass increment with environmental temperature, wind speed, amount of precipitation, and icing time by using the control variate method. Results show that the ice mass increment exhibits quasi parabolic function relations with the environmental temperature, wind speed, and amount of precipitation, respectively, which means that there must exist the most favorable environment temperature, wind speed and amount of precipitation for formation of icing. In addition, the increment speed of icing keeps constant, which is independent of icing time but only relates to variation of the micrometeorological parameters.

**Key words:** simulation test of icing; control variate method; ice mass increment; micrometeorology; icing time

### 0 引言

输电线路覆冰灾害具有持续时间长、作用面积大、影响范围广等特点,严重威胁输电线路安全运行,给国民经济带来了巨大损失<sup>[1]</sup>。自 20 世纪 50 年代以来,中国输电线路覆冰事故频繁发生,最严重的一次覆冰事故出现在 2008 年,南方地区因大范围降

雪导致线路覆冰严重,36 740 条 10 kV 及以上的电力线路、2016 座 35 kV 及以上的变电站停止运营,310321 基 10 kV 及以上的杆塔倒塌与损坏,3 330 多万户(约 1.1 亿人口)停电,黔、湘、鄂、皖、苏、陕、甘等 17 个省(直辖市、自治区)不同程度受灾,南方电网直接经济损失高达 50 亿人民币<sup>[2-3]</sup>,而停电带来的间接经济损失及社会影响更是难以估计。

微气象参数对覆冰形成起决定性的作用,因此,

收稿日期:2017-07-12; 修回日期:2017-09-23

基金项目:国家电网公司总部科技项目(SGSX0000YJJS(2014)457)。

Project Supported by China State Grid Corp Headquarters Science and Technology Project(SGSX0000YJJS(2014)457).

研究其与覆冰形成的关系是有极大意义的。而目前国内专家、学者对于覆冰与微气象参数的研究较少,且存在研究不全面、不深入的问题:文[4]只研究了覆冰质量增长量与风速的关系,未考虑与其他微气象因子的联系;文[5]通过统计贵州电网 220 kV 输电线路覆冰监测终端 A 在 2008 年 11 月 5 日至 2009 年 5 月 20 日的导线温度与微气象参数(环境温度、相对湿度与风速)信息,给出了覆冰关键影响因子的影响大小排序;文[6]基于覆冰预测模型与在线监测装置获取的实时覆冰厚度,通过改变关键影响因子建立深度分析法,比较了不同影响因子的变化对覆冰的作用大小;文[7]通过山西忻州 2007 年 2 月 1 日至 5 月 1 日监测到的 4 496 条微气象与覆冰厚度数据,建立了覆冰厚度与微气象单因子的一次函数关系,根据数据统计分析得出了模型的拟合度并进行了相应的比较。上述研究皆是针对微气象因子对覆冰的影响大小做了一定的研究,未进一步地研究覆冰形成与微气象因子的内在关系。此外,覆冰预测模型中如基于风速、降水率、温度单因子的结冰率模型等<sup>[8-10]</sup>经验模型,也是基于覆冰形成与微气象因子的内在联系与统计性特征建立起来的,因此研究覆冰形成与微气象因子的关系对覆冰预测模型的建立也具有一定的指导意义。

基于覆冰的形成机理,文中进行了覆冰与微气象试验,采用控制变量法研究了各微气象因子、覆冰时间与覆冰形成的内在关系,并在定量与定性的角度上进行了分析与验证。

## 1 覆冰的形成机理

覆冰按照形成条件与性质可分为雾凇、雨凇与混合冻结 3 大类<sup>[11-13]</sup>。大气中的水汽在过饱和时附着和升华凝结在输电线路表面,形成放射状的结晶称为雾凇覆冰,具有密度小、附着力弱、易脱落等特点。雨凇覆冰是指大气中的过冷却水滴被风力输送至输电线路表面形成的清澈光滑透明的覆冰,具有密度大、附着力强、不易脱落、易引起输电线路覆冰事故等特点,危害性较大。混合冻结又可分为两类:湿雪,雨凇与雾凇混合冻结。干雪不会附着在导线表面,而湿雪表面存在水膜,在水的表面张力作用下可牢固地附着在输电线路表面;雨凇与雾凇混合冻结通常是由空气中的过冷却水滴形成的透明与不透明交替重叠的覆冰,具有附着力强、不易脱落、危害性大等特点。

覆冰增长过程又可分为干增长与湿增长过程:①干增长过程即输电线路表面的过冷却水滴到达线

路表面时被瞬间冻结,线路表面没有覆盖水膜,此时冻结系数为 1,一般不会形成冰凌;②湿增长过程是指输电线路覆冰表面覆盖一层水膜,覆冰表面的温度维持在 0℃,会形成冰凌,覆冰的冻结系数降低,典型的湿增长过程为雨凇覆冰。

输电线路覆冰是受温度、湿度、冷暖空气对流、环流以及风等因素决定的物理现象<sup>[14-19]</sup>。当环境温度在 -10~0℃、风速在 1~13 m/s 与空气相对湿度大于 75%时,导线开始形成覆冰,其类型主要为雨凇或雾凇覆冰;若温度升高至 0℃以上则覆冰开始融化,此时天气转晴则覆冰完全融化,若温度突然降低至 0℃及以下,未完全融化的覆冰表面会再次形成覆冰,交替作用形成混合凇<sup>[20-21]</sup>。综上,覆冰形成是微气象因子综合作用的结果,其作用的实质是覆冰增长量。

目前在线监测装置获取的覆冰值  $X_i$ (覆冰质量或等值覆冰厚度)皆是基于拉力传感器或图像识别法与近似模型理论获取到的,本身存在一定的系统误差,见式(1)。

$$\hat{X}_i = X_i + \delta. \quad (1)$$

式(1)中: $\hat{X}_i$ 为覆冰值真值; $X_i$ 为覆冰值观测值; $\delta$ 为系统误差,对于某一固定的观测装置来说是一个常数。

$$X_{i+1} - X_i = \hat{X}_{i+1} - \delta - \hat{X}_i + \delta = \hat{X}_{i+1} - \hat{X}_i. \quad (2)$$

覆冰增长量是覆冰值的一阶差分,见式(2),可在一定程度上消除系统误差,因此,研究覆冰增长量与微气象的关系具有较大意义。

## 2 覆冰与微气象试验

### 2.1 试验室与测量工具

文中覆冰与微气象试验是在多因子综合环境试验室进行的,见图 1;其控制界面见图 2。试验室的最低温度可达 -40℃,风速调节范围为 0~12 m/s,空气中的过冷却水滴由淋雨系统的喷嘴喷出,可通过调节温度、风速、淋雨量等参数有效模拟输电线路覆冰过程。

试验用的测量工具包括:①温湿度计测量环境温度与空气相对湿度,温度测量范围为 -20~50℃,相对湿度的测量范围为 5%~100%RH,见图 3;②风速仪测量风速,量程为 0.3~45 m/s,见图 4;③电子天平测量输电线路覆冰质量,量程为 0.1 mg~500 g,见图 5。

### 2.2 输电导线

试验选取了 3 根  $\phi 17.5 \text{ mm} \times 500 \text{ mm}$  的钢芯铝

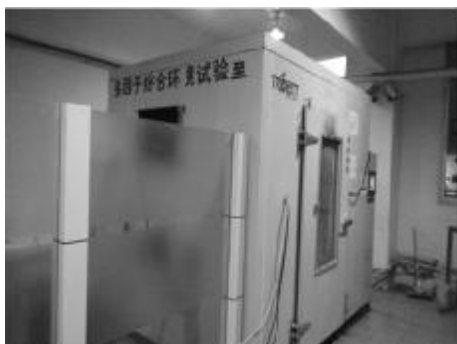


图 1 多因子综合环境试验室

Fig. 1 Multi-factor comprehensive environmental laboratory



图 2 控制界面

Fig. 2 Control interface



图 3 温湿度计

Fig. 3 Temperature and humidity meter



图 4 风速仪

Fig. 4 Anemoscope

绞线作为导线样品,见图 6。

### 2.3 试验方法与过程

在多因子综合环境试验室中,覆冰的温度由制冷系统(2台压缩冷凝机组)进行控制,液态水由喷淋



图 5 电子天平

Fig. 5 Electronic balance

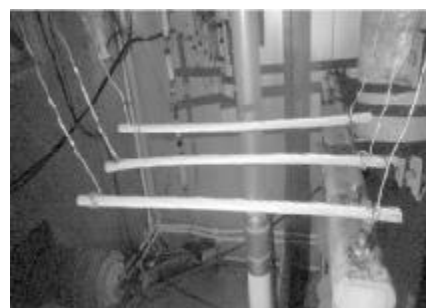


图 6 输电导线

Fig. 6 Transmission line

系统(包括 12 个喷头,圆周形均匀布置,喷淋角度可调)生成,液态水含量通过喷嘴的水流量进行调节,风速由变频风机调节。在整个覆冰试验过程中严格保持温度、风速、喷水量的稳定性。

将 3 根钢芯铝绞线悬挂于试验室内的同一水平面,保证其覆冰条件基本一致,采用控制变量法保证其他微气象因子不变的情况下,研究单微气象因子的变化对覆冰形成的影响,分别为环境温度试验、风速实验与降水量实验。覆冰时间设置为 3 h,每个固定的采样间隔时间停止喷淋系统,对覆冰导线进行称重,并减去导线净重获取覆冰质量的增量进行记录,并计算平均值,再将样品放回,重新开启喷淋系统继续覆冰。

温度试验条件设置:设定淋雨量为 180 mm/h,风速为 3 m/s 保持不变,改变环境温度分别为 -2、-4、-6、-8 °C,采样间隔为 20 min。

风速试验条件设置:设定温度为 -6 °C,淋雨量为 180 mm/h 保持不变,改变风速分别为 1、3、4.5、8 m/s,采样间隔为 30 min。

降水量试验条件设置:设定温度为 -5 °C,风速为 5 m/s 保持不变,改变淋雨量分别为 60、120、180、240 mm/h,采样间隔为 20 min。

### 3 试验结果分析

覆冰与微气象试验是在实验室的理想条件下进行的,难以模拟复杂多变的真实覆冰环境,故线路覆

冰与自然界中的真实覆冰情况有偏差,但却能在一定程度上反应微气象因子对覆冰形成的影响。

### 3.1 环境温度

覆冰时间为 20~180 min 的九组覆冰温度试验数据绘制的单位长度不同采样间隔的导线覆冰质量  $m$  与气候室温度  $T$  的关系图见图 7。从图 7 中可以看到,随着温度的降低,覆冰质量增长量的增长速度减缓,类似抛物线的增长模式,采用式(3)所示的抛物线函数拟合覆冰质量增长量,拟合系数最小为 0.99,拟合度极高。

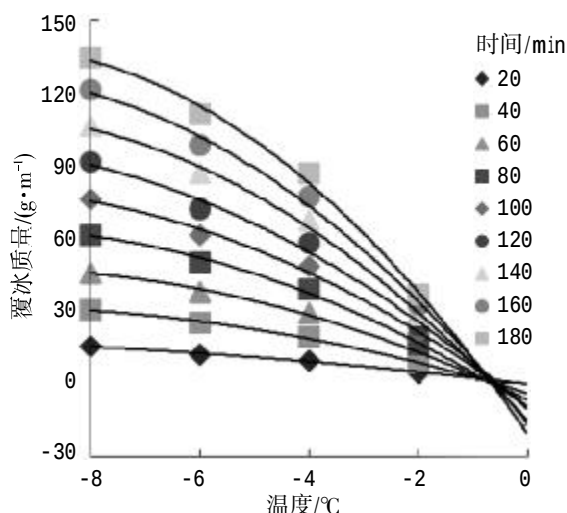


图 7 覆冰质量增长量与温度

Fig. 7 Icing quality increment and temperature

$$m = a_0 T^2 + a_1 T + a_2. \quad (3)$$

在自然覆冰过程中,当温度很低时,空气中的过冷却水滴在未碰撞到导线之前就已经凝结为冰晶,从而导致空气中的液态水含量大大的减少,因此当温度降低到某个临界值时,导线覆冰量不仅不会随着温度的降低而增加,还会随着温度的降低而减小,在温度极低的情况下甚至会出现云里面的水蒸气凝华为冰晶或者液态水滴冻结成冰晶,导致空气中的液态水含量非常小,无法在导线上形成覆冰;从定性的角度也验证了覆冰增长与温度的类似抛物线函数关系,因此必然存在一个覆冰增长速度最大的温度值(抛物线的顶点),即最有利于形成覆冰的温度值。

### 3.2 风速

覆冰时间为 30~180 min 的 4 组覆冰风速试验数据绘制的单位长度不同采样间隔的导线覆冰质量  $m$  与气候室风速  $v$  的关系图见图 8。随着风速的增大,覆冰质量增长量先增大后减小,呈类似抛物线关系,采用式(4)所示的抛物线函数进行拟合,拟合系数最小为 0.90,拟合度较高。

$$m = b_0 v^2 + b_1 v + b_2. \quad (4)$$

在自然覆冰过程中,风速值过大导致空气中的

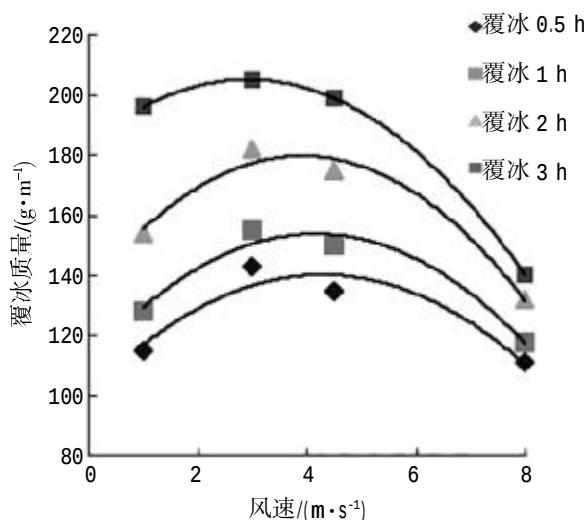


图 8 覆冰质量增长量与风速

Fig. 8 Icing quality increment and wind speed

过冷却水滴还未附着在导线表面就已被吹走,风速值过小则过冷却水滴难以到达导线表面,因此,风速值过大过小都不利于覆冰的形成,文[4]也通过覆冰试验验证了覆冰质量增长量与风速之间的类似抛物线的函数关系,并得出最有利于形成覆冰的风速为 4~5 m/s。

### 3.3 降水量

图 9 为覆冰时间为 20~180 min 的 9 组覆冰降水量试验数据绘制的单位长度不同采样间隔的导线覆冰质量  $m$  与气候室淋雨量  $P$  的关系图。随着淋雨量(降水量)的增大,覆冰质量增长速度减缓,呈类似抛物线的增长模式,采用式(5)所示的抛物线函数进行拟合,拟合系数最小为 0.97,拟合度极高。

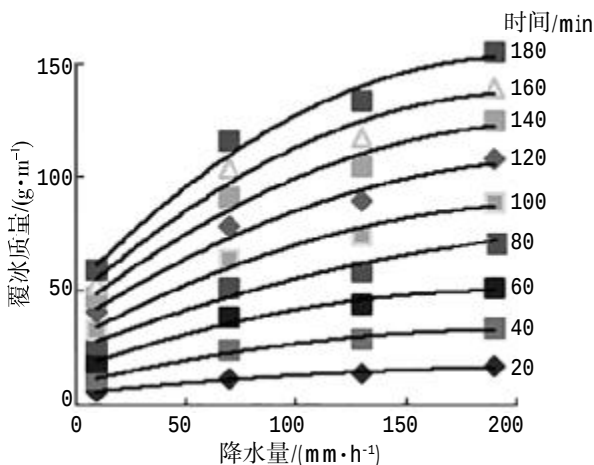


图 9 覆冰质量增长量与降水量

Fig. 9 Icing quality increment and precipitation

$$m = c_0 P^2 + c_1 P + c_2. \quad (5)$$

在自然覆冰过程中,当淋雨量较小时,空气中液态水含量较低,覆冰为干增长,此时冻结系数为 1;而随着淋雨量的增加,空气中液态水含量迅速增加,增加到一定程度后,覆冰增长由干增长转变为湿增

长,此时冻结系数随淋雨量的增加而降低,从而使得覆冰量的增速有减缓的趋势,从定性的角度也验证了覆冰形成与降水量的抛物线关系,从而证明必然存在一个最有利于覆冰增长的淋雨量。

### 3.4 覆冰时间

将覆冰与环境温度试验、覆冰与风速试验及覆冰与降水量试验数据以覆冰时间为自变量、覆冰质量为因变量进行绘图见图 10-12。图中黑色实线为线性函数(如式(6)所示)对覆冰质量与采样时间的线性拟合直线,并对拟合系数进行了标注。

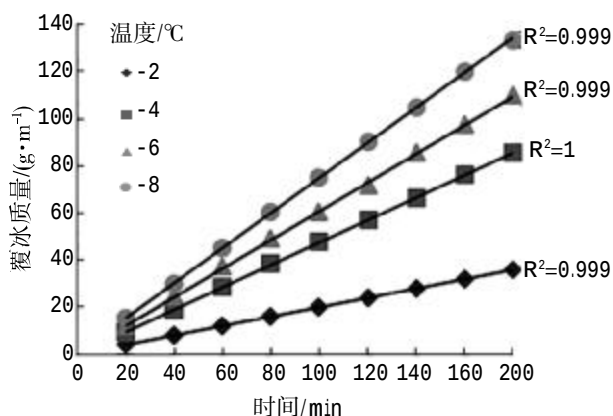


图 10 覆冰质量与采样时间(1)

Fig. 10 Icing quality and sampling time(1)

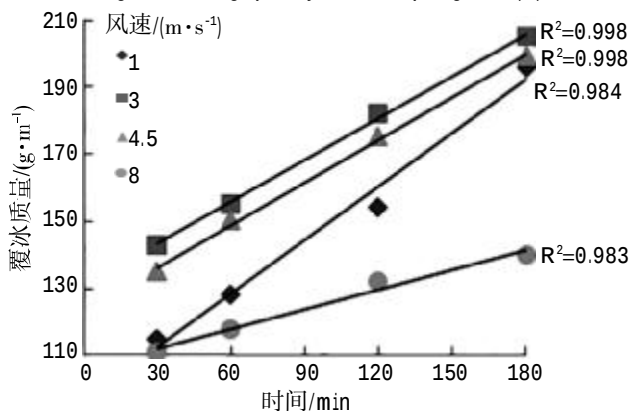


图 11 覆冰质量与采样时间的关系(2)

Fig. 11 Icing quality and sampling time(2)

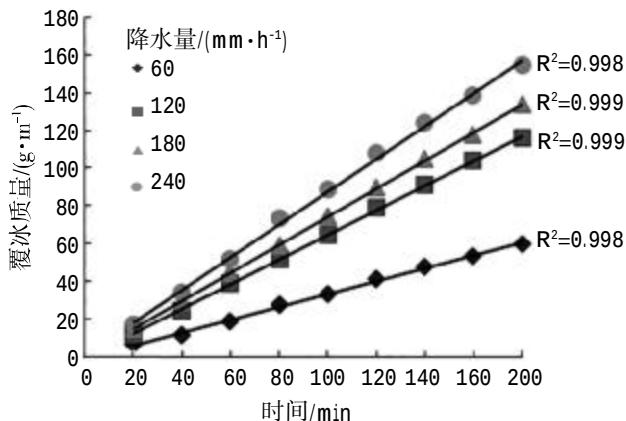


图 12 覆冰质量与采样时间(3)

Fig. 12 Icing quality and sampling time(3)

$$m = m_0 + kt. \quad (6)$$

式(6)中: $m$  为覆冰质量,  $g/m$ ;  $t$  为采样时间,  $min$ 。

从图 10-12 可以看出,在相同的微气象条件下,随着时间的增长,覆冰质量以恒定的速度线性增长,且线性拟合系数均大于 0.98,拟合度较高。即在相同的微气象条件下,单位时间覆冰质量的增长量是恒定的,不随覆冰时间而变化,仅与微气象参数的改变有关。

## 4 结语

覆冰增长是微气象因子综合作用的结果,其作用的实质是覆冰的增长量,且其在一定程度上消除了系统误差,具有较高的精度。因此,研究覆冰增长量与微气象因子的关系具有较大意义。

通过覆冰与微气象试验,采用控制变量法分别研究了覆冰质量增长与环境温度、风速、降水量及采样时间的关系,可作为覆冰预测模型研究与分析的一个参考。

输电线路覆冰增长受环境温度、风速、降水量等因素的影响,覆冰增长与环境温度、风速及降水量呈类似抛物线的函数关系,且模型拟合度极高,同时这种关系也决定了必然存在一个最有利于形成覆冰的环境温度值、风速值及降水量,为覆冰预警提供了理论基础。

在相同的微气象条件下,覆冰增长速度保持恒定,与覆冰时间无关,仅与微气象参数的改变有关。

## 参考文献:

- [1] 李庆峰,范 峥,吴 穹,等. 全国输电线路覆冰情况调研及事故分析[J]. 高电压技术,2008,32(9):33-36.  
LI Qingfeng, FAN Zheng, WU Qiong, et al. Investigation of ice-covered transmission lines and analysis on transmission line failures caused by ice-coating in China[J]. High Voltage Engineering, 2008, 32(9):33-36
- [2] 侯 慧,尹项根,游大海,等. 从 2008 年南方地区雪灾看电力系统设备缺陷[J]. 高电压技术,2009,35(3):584-590  
HOU Hui, YIN Xianggen, YOU Dahai, et al. Analysis of the defects of power equipment in the 2008 snow disaster in southern China area[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(3):584-590.
- [3] 汪秀丽. 2008 年南方雪灾反思—电力系统[J]. 水利电力科技,2008,34(2):28-35.  
WANG Xiuli. Reflection of 2008 snow disaster in southern china area-electric power system[J]. Water Conservancy and Hydropower Technology, 2008, 34(2):28-35.
- [4] 文习山,龚宇清,姚 刚,等. 导线覆冰增长规律的试验研究[J]. 高电压技术,2009,35(7):1724-1729.

- WEN Xishan, GONG Yuqing, YAO Gang, et al. Experimental study on growth law of conductor's icing[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(7):1724-1729.
- [5] 阳林, 郝艳捧, 黎卫国, 等. 输电线路覆冰与导线温度和微气象参数关联分析[J]. 高电压技术, 2010, 36(3): 775-781.
- YANG Lin, HAO Yanpeng, LI Weiguo, et al. Relationships among transmission line icing, conductor temperature and local meteorology using grey relational analysis[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(3):775-781.
- [6] 黄新波, 欧阳丽莎, 王亚娜, 等. 输电线路覆冰关键影响因素分析[J]. 高电压技术, 2011, 37(7):1677-1681.
- HUANG Xinbo, OUYANG Lisha, WANG Yana, et al. Analysis on key influence factor of transmission line icing[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(7):1677-1681.
- [7] 黄新波, 孙钦东, 张冠军, 等. 线路覆冰与局部气象因素的关系[J]. 高压电器, 2008, 44(4):289-294.
- HUANG Xinbo, SUN Qindong, ZHANG Guanjun, et al. Relation of transmission line icing and local meteorology [J]. High Voltage Apparatus, 2008, 44(4):289-294.
- [8] SAVADJIEV K, FARZANEH M. Modeling of icing and ice shedding on overhead power lines based on statistical analysis of meteorological data[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2004, 19(2):715-721.
- [9] FARZANEH M, SAVADJIEV K. Statistical analysis of field data for precipitation icing accretion on overhead power lines[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(2):1080-1087.
- [10] 许家浩, 郑伟, 黄宵宁, 等. 微气象条件下输电线路导线覆冰预测模型[J]. 中国电力, 2014, 47(2):58-62.
- XU Jiahao, ZHENG Wei, HUANG Xiaoning, et al. Prediction model of icing on transmission lines under micro meteorological conditions[J]. Electric Power, 2014, 47(2):58-62.
- [11] 钱之银, 耿翠英, 李颖. 超高压输电线路覆冰倒塔机理分析[J]. 高电压技术, 2008, 34(11):2495-2496.
- QIAN Zhiyin, GENG Cuiying, LI Ying. Mechanism analysis of the ice-covered on the ultra high voltage transmission lines[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(11):2495-2496.
- [12] 刘和云, 周迪, 付俊萍, 等. 导线雨淞覆冰预测简单模型的研究[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(4):44-47.
- LIU Heyun, ZHOU Di, FU Junping, et al. A simple model for prediction glaze loads on wires[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(4):44-47.
- [13] 刘胜春, 司徒君, 郭昊, 等. 输电线路导线覆冰模拟计算与试验研究[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(s1):246-255.
- LIU Shengchun, SI Jiajun, GUO Hao, et al. Numerical and experimental study on accreted Ice on conductor of transmission lines[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(s1): 246-255.
- [14] 吴息, 孙朋杰, 熊海星, 等. 利用常规气象资料建立的导线覆冰模型[J]. 大气科学学报, 2012, 35(3):335-341.
- WU Xi, SUN Pengjie, XIONG Haixing, et al. A conductor icing model based on parameters of conventional meteorological observations[J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2012, 35(3):335-341.
- [15] 张志劲, 黄海洲, 蒋兴良, 等. 交流输电导线覆冰增长及临界防冰电流的试验研究[J]. 高电压技术, 2012, 38(2): 469-475.
- ZHANG Zhijin, HUANG Haizhou, JIANG Xingliang, et al. Experimental research on the icing accretion and its critical anti-icing current for conductors under AC condition [J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(2):469-475.
- [16] 龙小乐, 鲍务均, 郭应龙, 等. 输电线路覆冰研究[J]. 武汉水利电力大学学报, 1996, 29(5):102-107.
- LONG Xiaoyue, BAO Wujun, GUO Yinglong, et al. Study on transmission line icing [J]. Journal of Wuhan Water Conservancy and Hydropower University, 1996, 29(5):102-107.
- [17] 王敦青, 戴栋, 郝艳捧, 等. 基于在线监测系统的输电线路覆冰数据统计与分析[J]. 高电压技术, 2012, 38(11): 3000-3002.
- WANG Xiaoqing, DAI Dong, HAO Yanpeng, et al. Statistics and analysis of transmission lines icing data based on online monitoring system[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(11):3000-3002.
- [18] 赵世华, 蒋兴良, 张志劲, 等. 环境参数对110 kV复合绝缘子覆冰增长过程的影响[J]. 高电压技术, 2012, 38(10):2575-2581.
- ZHAO Shihua, JIANG Xingliang, ZHANG Zhijin, et al. Impact of environmental parameters on the icing process of 110 kV composite insulators[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(10):2575-2581.
- [19] 王守礼. 影响电线覆冰因素的研究与分析[J]. 电网技术, 1994, 18(4):18-24.
- WANG Shouli. Research and analysis of factors affecting the ice-covered transmission lines[J]. Grid Technology, 1994, 18(4):18-24.
- [20] 陆彬, 高山, 孙逊, 等. 不同直径下导线覆冰增长特性[J]. 高电压技术, 2014, 40(2):458-464.
- LU Bin, GAO Shan, SUN Xun, et al. Icing accretion characteristics of wires with different diameters[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(2):458-464.
- [21] 张弦. 输电线路中微地形和微气象的覆冰机制及相应措施[J]. 电网技术, 2007, 31(2):87-89.
- ZHANG Xian. Mechanism and countermeasures for ice-coated transmission line in micro-terrain and microclimate region, 2007, 31(2):87-89.
- 尹晖(1962—), 女, 教授, 博士, 主要从事变形分析与预警、空间信息处理理论和方法研究。