

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2016.09.022

导线带电雾凇覆冰过程的电晕放电特性研究

李松林¹, 张 满², 杜佳潞²

(1. 中国石油川庆钻探工程有限公司井下作业公司, 成都 610051; 2. 国网重庆市电力公司检修分公司, 重庆 400044)

摘要: 输电线路带电覆冰时,水滴会在接近导线表面过程中会引发局部电晕,而冰层会促使电晕放电更加明显,从而对电网的安全运行及其经济效益产生严重影响。目前国内外针对导线在涂污、淋雨等自然条件下的电晕放电特性进行了较为深入的研究,但针对覆冰过程中的电晕动态特性研究却尚未见报端。故文中在人工气候试验室对导线进行带电雾凇覆冰,利用 Q-U 法测得覆冰过程中的电晕放电电量及放电功率的变化。试验结果表明:不同场强覆冰时的短时电晕放电量和放电功率不同,其大小随场强的增加而增加;覆冰时间的增加会使放电电量及放电功率先增加后饱和,并稍有减少;强电场下的覆冰电晕放电维持电压会逐渐增加。文中所得结论可为揭示雾凇频发地区的输电线路电晕特性研究提供理论依据。

关键词: 导线; 雾凇; 电晕放电; 带电覆冰; 动态特性

Study on the Corona Discharge Characteristics of the Conductor During Energized Rime Icing

LI Songlin¹, ZHANG Man², DU Jialu²

(1. Downhole Service Company of Chuanqing Drilling Engineering Co., Ltd., Chengdu 610051, China;
2. Maintenance Company, State Grid Chongqing Electric Power Company, Chongqing 400044, China)

Abstract: During the process of the energized icing on transmission line, partial corona discharge will be produced by the behavior of the water drops around the conductor surface, and the discharge could be more obvious after rime icing, which will threat the safe operation and economic benefits of the transmission lines. Although the corona discharge characteristics under dirty or rain conditions were studied intensively by the scholars, there is no research on dynamic characteristics during the icing process has been reported. In this paper, the authors make energization of rime icing in the artificial climate chamber, the Q-U method is applied to measure the change of corona discharge and discharge power. Results show that different surface potential leads to various short-time corona discharge or discharge power, and the quantity will be increased with the field strength. The icing time will increase the quantity of the corona discharge and discharge power first, and then it will be saturation and slightly reduced. The maintain discharge will be increased gradually under the strong electrical field. The conclusion of this paper can provide a theoretical basis for revealing the corona characteristics of the transmission line in the rime area.

Key words: conductor; rime; corona discharge; energized icing; dynamic characteristics characteristic

0 引言

中国国地形复杂且微气候环境多样,西南方地

区冬季常年爆发大规模、长时间的雾凇冰灾^[1],严重影响输电线路的安全运行,由此而引发的电晕效应等问题日益受到重视^[2-4]。为研究输电线路表面的电

收稿日期:2016-03-14; 修回日期:2016-05-11

基金项目:国家重点基础研究发展计划资助项目(973 计划 2009CB724502, 2009CB724501); 国家重点实验室资助项目(2007DA10512708101, 2007DA10512708102)。

Project Supported by National Basic Research Program of China(973 Program 2009CB724502, 2009CB724501), State Key Laboratory Project(2007DA10512708101, 2007DA10512708102)。

晕放电特性,近年来许多国家均针对积污、淋雨和紫外射线等环境下的电晕发电机行了研究^[5-7]。但绝大部分研究均忽略了实际导线往往承受着运行电压的作用,故所得结论与工程实际存在差距^[8-10];与此同时,也未深入研究导线带电覆冰过程中的电晕动态特性。由于电晕效应会直接增加输电线路的额外损耗,对国民经济造成巨大影响,因此研究输电线路覆冰的电晕特性非常重要^[6,11-12]。

雾凇属于干增长覆冰,即空气中微小水滴与温度极低的导线发生碰撞时,形成的一种类似干冰的形态^[13-14],中国南方冬季极为常见。雾凇冰树枝尖端形态会受到场强的影响而发生变化,覆冰后的导线表面极为粗糙,大大增加了输电线路电晕放电发生概率^[15-16]。文[17]中通过大量试验得到导线起晕场强公式,对导线表面的电晕放电进行了一定的概述,但并没有考虑覆冰等其他外部环境对电晕的影响因素,故其计算结果与工程实际相差甚远;文[18]中提出用Q-U法可以测量电晕放电积累量,并且计算出水滴荷电之后受到的库伦力和离子浓度,解释了强电场下导线表面的覆冰量减少原因;文[19]中研究认为电晕放电会直接影响覆冰的特性,且覆冰与电晕放电量之间具有相互影响的特点,尤其是不同形态的覆冰对电晕影响极为明显。

为研究输电线路带电雾凇覆冰过程中的电晕放电量及放电功率的动态特性,文中在低温低气压试验室内对LGJ-185/25真实导线进行了试验研究,利用Q-U法测量水滴靠近导线的电晕放电积累量,并从微观上解释了覆冰对电晕放电的影响规律,所得结论可为揭示雾凇频发地区的输电线路电晕特性研究提供理论依据。

1 试验装置、试品及试验方法

1.1 试验装置及试品

试验在内径为2.0 m,内长为3.8 m的人工气候试验室内进行,见图1。试验室内壁安装有IEC推荐制作的标准喷头,用来形成雾凇覆冰。气候室内的吹风装置既可以模拟雾凇形成的风速,又可用于使试验室内的温度及雾粒分布均匀。放电测量原理图见图2。雾凇的形成环境见表1。

电晕笼可在较低电压下获得较高的导线表面场强,根据Peek公式可知,半径为R的电晕笼内,直径为r的导线表面场强E与外施电压U的关系为

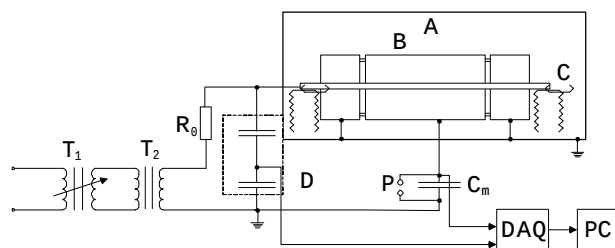
$$E = \frac{U}{r \ln(R/r)} \quad (1)$$

为研究不同表面场强对电晕放电的影响,设外施电压为22、44、66、88 kV,则导线表面对应场强分



图1 多功能人工气候试验室

Fig. 1 Multi-function artificial climate chamber



T₁—调压器;T₂—交流试验变压器;R₀—保护电阻;A—人工气候室;B—电晕笼;C—试验导线;D—分压器;C_m—测量电容;P—保护电路;DAQ—数据采集卡;PC—电脑。

图2 试验接线原理图

Fig. 2 Schematic diagram of test circuit

表1 雾凇覆冰形成条件

Table 1 Forming condition for rime icing

覆冰类型	水滴直径 d ₀ /μm	液态水含量 W/(g·m ⁻³)	气温 T _a /℃	覆冰时间 t/min
雾凇	20.0	2.5	-15.0	0.0~30.0

别为5、10、15、20 kV/cm,从而得到场强—电晕之间的一般规律。

将LGJ-185/25导线置于气候试验室中心模拟雾凇覆冰,导线参数见表2。其环境参数采用PTU200数字化温度、湿度和气压综合测量仪测量;水滴直径及液态水质量分数采用激光粒度仪进行测量,放电量采用NI-6215数据采集卡测量,采样率为250 kS/s,试验装置见图3。

表2 钢芯铝绞线基本参数

Table 2 Parameter of stranded wires

型号	2a/mm	2b/mm	2c/mm	n/股	L/m
LGJ-185/25	3.15	2.10	18.90	15.00	2.00

注:2a为单股铝线直径;2b为单股钢芯直径;2c为绞线外径;n为绞线最外层股数;L为导线长度。

1.2 试验方法

目前国内外测量单位时间内的放电量及放电功率的方法有U-I法和Q-U法。前者主要是在接地线上串联采样电阻,测量一周期内的放电脉冲幅值,之后与电晕电压相乘得到一周期内的放电量,但该方法采集的要求极高,且不适合采集长时间的放电累积量;Q-U法又称李萨如图法,在接地线上传入采

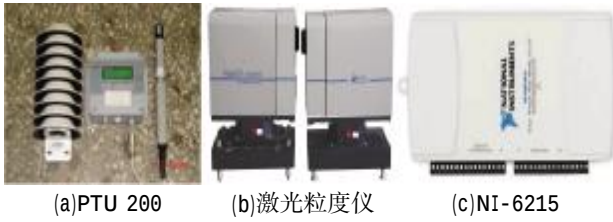


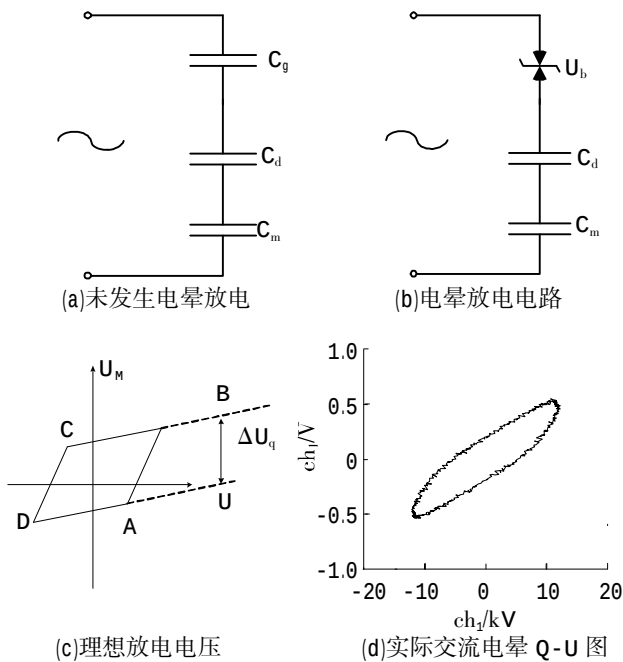
图 3 试验设备

Fig. 3 Test equipments

样电容,当导线表面发生电晕放点时,同时测量电容两端电压和电源电压,可以得到一段时间内的电晕放电总量。 $Q-U$ 法直接测量工频周期内的放电电荷量和电能积累量,对信号采集要求较低,因此文中最终选择 $Q-U$ 法。

1.3 电晕动态特性测量原理

利用 $Q-U$ 法测量施加工频电源电压 U 后放电过程一个周期的放电量 Q ,发生电晕放电之前试品侧回路见图4(a);放电之后,击穿部分的空气等效为一个击穿状态的齐纳二极管,见图4(b);理想状态下测量电容两端电压 U_M 与电源电压 U 形成一个平行四边形的闭合曲线,见图4(c),其中A点和C点分别代表了正半周和负半周的电晕起始电压;实际测量发现,由于电晕放电在起始和熄灭过程中存在过渡过程,所以试验中测得的交流电晕图,实际上类似于椭圆形,见图4(d),其中 C_m 为测量电容, C_d 为等效定值电容, U_b 为等效间隙电容 C_g 在击穿状态的端电压。

图 4 $Q-U$ 法测量原理Fig. 4 Measurement principle of corona discharge by $Q-U$ method

电晕笼和测量电容构成的这一支路在发生电晕放电时,其回路电流为

$$I = C_m \frac{dU_M}{dt} \quad (2)$$

式(2)中, U_M 为测量电容 C_m 两端电压,则放电功率为

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T U I dt = \frac{C_m}{T} \int_0^T U dU_M = \frac{1}{T} \int_0^T U dU_M \quad (3)$$

式(3)中: T 、 f 分别为工频电源电压周期与频率; U 为电源电压信号。由于采集到的 U 、 U_M 是离散数字信号,功率的计算式需要离散为

$$P = \frac{C_m}{T} \sum_{k=1}^n \frac{1}{2} (U^{k+1} + U^k) (U_M^{k+1} - U_M^k) \quad (4)$$

从而由采集的数字信号 $U(t)$ 、 $U_M(t)$ 可以得到带电覆冰过程中每一周期的电晕放电功率。文中所提的放电功率均指具体一个工频周期的放电功率。

2 试验结果及分析

2.1 带电雾凇覆冰的增长过程

以 10 kV/cm 的表面场强为例,不同时间的雾凇表面增长过程见图5。

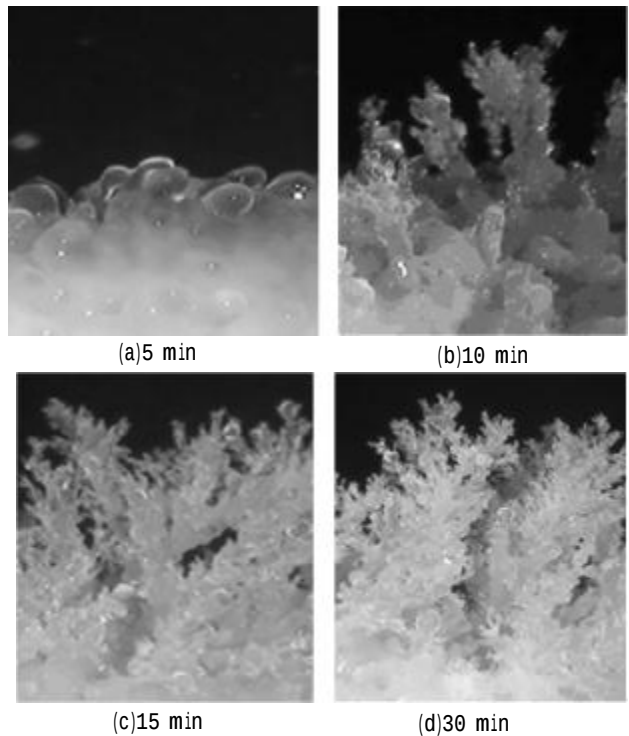


图 5 不同时刻雾凇冰树枝形态

Fig. 5 Ice-tree structure of rime in different time

带电覆冰初期,如图5(a)所示,空气中的饱和水滴与导线表面形成一层波浪状的冰层,且突出部分的密度在段时间内增大;强电场作用下,其波浪状的冰层会捕获大量水滴,从而形成冰树枝,如图5(b)所示;之后,冰树枝会继续生长,且出现分叉,冰树枝尖端更加密集,如图5(c)所示;最终冰树枝数目趋于饱和,增长速度逐渐减慢,如图5(d)所示。

2.2 雾凇覆冰过程的电晕放电

以表面场强 $E=10\text{ kV/cm}$ 为例,覆冰水电导率为 $400\text{ }\mu\text{S/cm}$,30 min 内的电晕放电量及放电功率分别见图 6(a)、(b)。

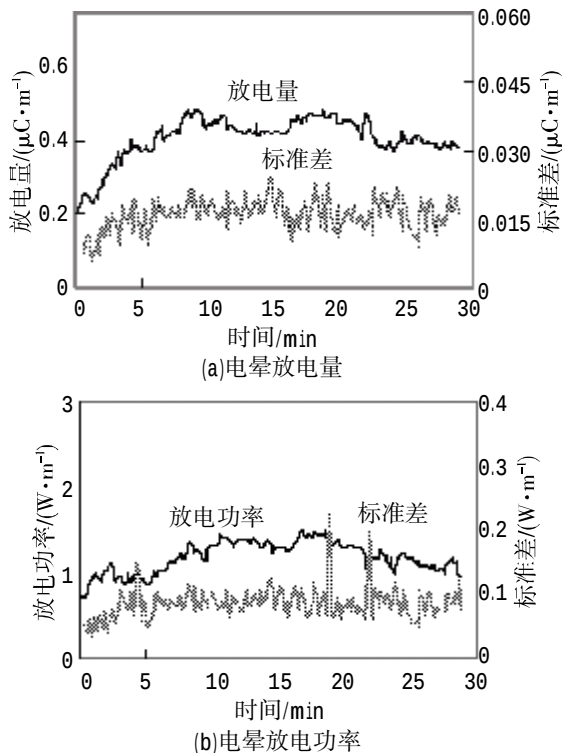


图6 覆冰过程中的放电量 and 放电功率变化趋势

Fig. 6 The trend of the corona discharge and discharge power during the icing process

由图 6 可知,随着覆冰时间的增加,利用 $Q-U$ 法测得的导线表面工频周期内的电晕放电量 and 放电功率值会出现先增加,再逐渐趋于饱和的这样一个趋势。这主要是因为放电量及放电功率会受到雾凇表面冰树枝的影响。由 2.1 节可知,覆冰开始的一段时间,由于导线表面粗糙度增加,导致其表面的电场分布畸变严重,雾凇表面的放电程度随着冰树枝的增加、变细而逐渐增强,故 0~10 min 内的放电量 and 放电功率增加较快,而 15 min 之后由于冰树枝的增长趋于缓慢,故电场畸变速度受到抑制,故 15 min 之后,其导线表面放电量 and 放电功率均出现饱和趋势。

2.3 不同场强的电晕放电特性

固定电导率为 $400\text{ }\mu\text{S/cm}$,导线表面场强分别为 5、10、15、20 kV/cm 时,雾凇覆冰过程中的电晕放电量在 30 min 的变化规律见图 7(a),放电功率在 1 800 s 的变化规律见图 7(b)。图 7 中每一个点均为时间段 5 s 的平时值。

由图 7 中可知,表面场强为 5 kV/cm 时,放电量及放电功率几乎为零,说明导线表面并没有起晕。而 10 kV/cm 后的放电量 and 放电功率随着场强的增

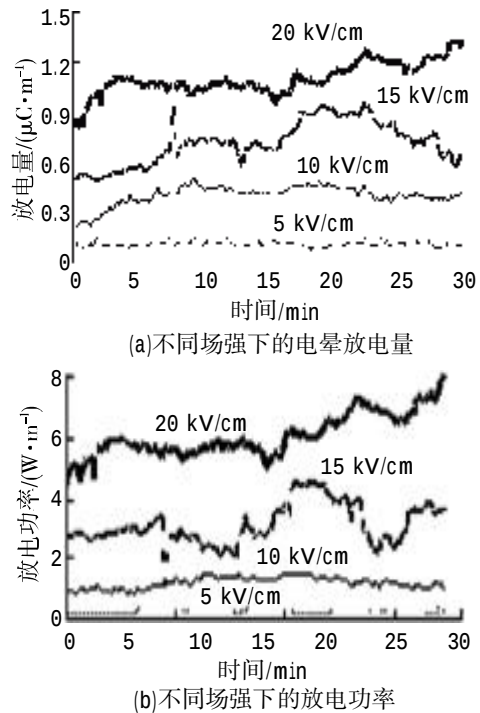


图7 不同场强下的放电量 and 放电功率

Fig. 7 The quantity of the corona discharge and discharge power under different field strength

加而急剧上升。这是由于当表面场强越高时,覆冰表面的场强很容易超过起晕场强,从而造成电晕放电现象。当场强为 5~20 kV/cm 时,其电晕放电量 and 放电功率的变化趋势均是先增加,后逐渐饱和,与 2.2 节的趋势一致,只是场强越高,电晕放电到达稳定值的时间也越长。

3 结论

1)水滴靠近带电导线过程中会引起电晕放电,利用 $Q-U$ 法可以测量一段时间内的放电积累量和放电功率。

2)带电 10 kV/cm 进行雾凇覆冰时,覆冰量会随着时间的增加而逐渐增加,同时会有大量的冰树枝出现,并且逐渐变得尖锐、密集。但是覆冰量最终逐渐趋于饱和。

3)导线表面场强越大,则覆冰过程中产生的电晕放电量 and 放电功率越大,但同时对于覆冰的阻碍作用也越大。当场强超过 10 kV/cm 后,由于场强会减小覆冰速度,故电晕功率 and 放电量增长到稳定值所需时间也越长。

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].电网技术,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]. Power System Technology, 2008, 32(9): 33-36.
- [2] 郑亚利, 俞集辉, 汪泉弟, 等. 电晕放电对超高压输电线路工频电场的影响[J]. 高电压技术, 2009, 35(4): 872-876.
- ZHENG Yali, YU Jihui, WANG Quandi, et al. Impact of corona discharge on the power frequency electric field intensity in the extra-high voltage transmission lines[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(4): 872-876.
- [3] 龙小乐, 鲍务均, 郭应龙, 等. 输电导线覆冰研究[J]. 武汉水利电力大学学报, 1996, 29(5): 102-107.
- LONG Xiaole, BAO Wujun, GUO Yinglong, et al. Study of coagulated ice on power transmission conductors[J]. Journal of Wuhan University of Hydraulic and Electric Engineering, 1996, 29(5): 102-107.
- [4] 仲海波, 季 斌, 黄小成. 500 kV 官山变电站直流融冰兼 SVC 装置的研究及应用[J]. 电力电容器与无功补偿, 2015, 36(6): 32-36.
- ZHONG Haibo, JI Bin, HUANG Xiaocheng. Research and application of DC de-icing & SVC device in 500 kV Guanshan substation transformer substation[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2015, 36(6): 32-36.
- [5] 蒋兴良, 舒立春, 孙才新. 电力系统污秽与覆冰绝缘[M]. 北京: 中国电力出版社, 2009.
- JIANG Xingliang, SHU Lichun, SUN Caixin. Contamination and icing insulation of power system[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2009.
- [6] 曾庆禹. 特高压输电线路电气和电晕特性研究[J]. 电网技术, 2007, 31(19): 1-8.
- ZENG Qingyu. Study on electric characteristic and corona performance of UHV AC transmission line[J]. Power System Technology, 2007, 31(19): 1-8.
- [7] FOFANA I, FARZANEH M. A simplified model of corona discharge development on an ice surface: Outdoor insulation applications[C]// Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena(CEIDP). [s.n.]: IEEE, 2004: 667-670.
- [8] 陆佳政, 胡建平, 方 针. 特高压直流输电大截面导线带电覆冰与融冰特性试验研究[J]. 电网技术, 2013, 37(5): 1258-1264.
- LU Jiazheng, HU Jianping, FANG Zhen. Experimental investigation on ice-coating and ice-melting of large-section current carrying conductors for UHVDC transmission project[J]. Power System Technology, 2013, 37(5): 1258-1264.
- [9] 蒋兴良. 带电导线覆冰及电场对导线覆冰的影响[J]. 高电压技术, 1999, 25(2): 58-60.
- JIANG Xingliang. Energized conductor icing and effect of electric field[J]. High Voltage Engineering, 1999, 25(2): 58-60.
- [10] JIANG X, CHEN J, SHU L, et al. Studying corona onset characteristics after rime ice accumulation on energized stranded conductors[J]. IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, 2013, 20(5): 1799-1807.
- [11] 王少华, 梅冰笑, 叶自强, 等. 紫外成像检测技术及其在电气设备电晕放电检测中的应用[J]. 高压电器, 2011, 47(11): 92-97.
- WANG Shaohua, MEI Bingxiao, YE Ziqiang, et al. Ultra-violet imaging detection technology and application in corona discharge detection of electrical equipment[J]. High Voltage Engineering, 2011, 47(11): 92-97.
- [12] REN Leijian, LIU Yunpeng, LU Jie, et al. Research on method to get corona inception electric-field intensity based on small corona cage[C]// Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC). Wuhan, China: IEEE, 2009: 1-4.
- [13] 王黎明, 李海东, 梅红伟, 等. 输电线路覆冰在线监测系统国内外研究综述[J]. 高压电器, 2013, 49(6): 48-56.
- WANG Liming, LI Haidong, MEI Hongwei, et al. Review of on-line monitoring system of ice coating on transmission lines[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(6): 48-56.
- [14] 欧阳丽莎, 黄新波, 李俊峰, 等. 1 000 kV 特高压输电线路覆冰区的研究与划分[J]. 高压电器, 2010, 46(5): 4-8.
- OUYANG Lisha, HUANG Xinbo, LI Junfeng, et al. Research and division of icing area along 1 000 kV ultra high voltage AC transmission lines[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(5): 4-8.
- [15] SARMA M P, JANISCHEWSKY J W. Electrostatic field of a system of parallel cylindrical conductors[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1969, 88(7): 1069-1079.
- [16] 周文俊, 阮江军, 邬 雄. 特高压输电线路对电视信号接收的影响研究[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(4): 83-87.
- ZHOU Wenjun, RUAN Jiangjun, WU Xiong. Television interference from very high voltage transmission lines[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(4): 83-87.
- [17] GILDAS H. Theoretical evaluation of Peek's law[J]. IEEE Trans. on Industry Applications, 1984, 20(6): 1647-1651.
- [18] 舒立春, 李 特, 蒋兴良, 等. 交流电场强度对导线雾凇覆冰特性的影响[J]. 电机工程学报, 2012, 32(19): 140-147.
- SHU Lichun, LI Te, JIANG Xingliang, et al. Influences of AC electric field strength on conductor rime icing performance[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(19): 140-147.
- [19] FALKENSTEIN Z, COOGAN J J. Micro-discharge behavior in the silent discharge of nitrogen-oxygen and water-air mixtures[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 1997, 30(5): 817-825.

李松林(1982—), 男, 硕士, 从事输电线路覆冰、石油钻探等方面的研究。

张 满(1988—), 男, 硕士, 从事输电线路覆冰、变电运维、变电检修等方面的研究。