

走廊紧张地区110 kV输电复合材料火箭塔电气性能研究

吴 雄^{1,2,3}, 朱 晔^{1,2}, 冯 炳^{4,5}, 李攀峰^{4,5}

(1. 南瑞集团有限公司, 江苏 南京 211106; 2. 国网电力科学研究院武汉南瑞有限责任公司, 湖北 武汉 430074; 3. 湖北省电力新材料工程技术研究中心, 湖北 武汉 430074; 4. 绍兴大明电力设计院有限公司, 浙江 绍兴 312000; 5. 国网绍兴市供电公司, 浙江 绍兴 312000)

摘 要:为了缓解土地紧张地区土地供应紧张与输电线路征地间的矛盾,本文开发了一种全新结构型式的复合材料绝缘杆塔,其外形像一枚火箭,导线从绝缘的复合材料火箭塔内部穿过,最大程度地压缩线路走廊,并对110 kV复合材料火箭塔的电气性能进行系统研究。结果表明:110 kV复合材料火箭塔的干雷电冲击电压为979 kV,湿操作冲击电压为576 kV,1 min湿工频耐受闪络电压平均值为282 kV,在盐密度为0.20 mg/cm²、灰密度为1.00 mg/cm²的污秽度下,工频污秽闪络电压为106.2 kV;相比传统110 kV悬式复合绝缘子铁塔,110 kV复合材料火箭塔的雷电冲击电压值提升了78%,湿操作冲击电压值提升了34%,1 min湿工频耐受闪络电压值提升了22.6%,污秽闪络电压值相当,且大幅压缩了线路走廊,其最小线路走廊宽度为1.8 m,远低于110 kV铁塔5.5~7.5 m的走廊宽度。

关键词:火箭塔;复合材料;走廊紧张;电气性能

中图分类号:TM215;TM753 DOI:10.16790/j.cnki.1009-9239.im.2023.03.007

Research on electrical performance of 110 kV composite rocket tower in tight corridor area

WU Xiong^{1,2,3}, ZHU Ye^{1,2}, FENG Bing^{4,5}, LI Panfeng^{4,5}

(1. NARI Group Co., Ltd., Nanjing 210003, China; 2. WuHan NARI Limited Liability Company of State Grid Electric Power Research Institute, Wuhan 430074, China; 3. Hubei Engineering Technology Research Center of New Materials for Electric Power, Wuhan 430074, China; 4. Shaoxing Daming Power Design Institute Co., Ltd., Shaoxing 312000, China; 5. State Grid Shaoxing Power Supply Company, Shaoxing 312000, China)

Abstract: In order to relieve the conflict between tight land supply and land acquisition for transmission lines in tight land supply area, we developed a new structural type of composite material insulated tower, which looked like a rocket, and the wires passed through the insulated composite material rocket tower to compress the line corridor to the greatest extent. Besides, the electrical performance of the 110 kV composite rocket tower was systematically studied. The results indicate that the dry lightning impulse voltage of the 110 kV composite rocket tower is 979 kV, the impulse voltage under wet condition is 576 kV, the average value of 1 min wet power frequency flashover voltage is 282 kV, and the power frequency pollution flashover voltage at 0.20 mg/cm² of salt density and 1.00 mg/cm² of gray density is 106.2 kV. Compared with the traditional 110 kV suspension composite insulator iron tower, the lightning impulse voltage value of 110 kV composite rocket tower increases by 78%, the impulse voltage value under wet condition increases by 34%, the 1 min withstand wet power frequency flashover voltage increases by 22.6%, and the pollution flashover voltage value is equivalent. In addition, the line corridor is greatly compressed, and the minimum line corridor width is 1.8 m, which is much smaller than the corridor width value (5.5–7.5 m) of 110 kV iron tower.

Key words: rocket tower; composite material; tight corridor; electrical performance

0 引言

复合材料具有质量轻、强度高、耐腐蚀、设计多样性、加工成型方便、电绝缘性优良等优点,采用复合材料可以节约大量的钢材,大幅降低杆塔的运输

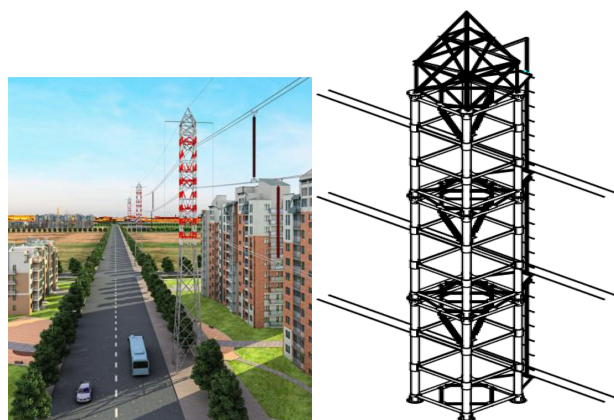
基金项目:国网浙江省电力有限公司集体企业项目(浙电经研规[2018]316号)

和组装成本^[1-4]。另外,利用复合材料优良的电绝缘性能,可以减少绝缘子串和导线与塔体间的空气间距,从而减少三相导线间距,使杆塔更紧凑,压缩线路走廊,提高线路输电能力,同时缩小塔头尺寸,减少走廊宽度,节约土地资源^[5-7],在经济及社会效益等方面都具有重要意义。

国外复合材料杆塔的制造与应用主要集中在

北美和欧洲地区,其中研究开发和应用最为成熟的是美国,Ebert Composites 公司、Powertrusion Composites 公司、Shakespear 公司、North Pacific 公司和 CTC 公司等制品厂家都开发了自己的复合材料杆塔产品,并申请专利和得到了比较广泛的应用^[1-2,8-10]。我国于 2006 年开始对复合材料杆塔技术进行研究,研究了 GFRP 复合材料杆塔用树脂材料及构件^[11],开发了复合材料直杆塔、桁架塔、门型塔等不同塔型^[12-13],总结了复合材料杆塔的设计方法^[14],并积极推进 10~220 kV 不同塔型复合材料杆塔试点工程建设,完成了《国家电网公司输电杆塔用纤维复合材料技术条件(试行)》、《国家电网公司 10~220 kV 复合材料杆塔设计要求(试行)》技术规范,实现了复合材料杆塔技术的国产化。

针对线路走廊紧张地区,本公司开发了一种全新结构型式的复合材料绝缘杆塔^[15],其外形像一枚火箭(如图 1 所示),采用 3 段模块化绝缘塔身组合而成,每段绝缘塔身中间挂一相导线,因此得名“火箭塔”。其中绝缘塔身中间自上而下依次悬挂一相导线,金属地线支架顶端悬挂地线,绝缘塔身采取模块化设计;每段模块化塔身中间设置有一组 V 型串挂点,并留有一个矩形塔窗,可挂一相导线或跳线;绝缘塔身两端设置标准化的套管式金属法兰,方便模块化塔身之间、模块化塔身与金属塔身之间以及模块化塔身和地线支架相连接;金属地线支架通过绝缘塔身右侧的金属爬梯和底部金属塔身相连,并承担地线引下线的引流功能(如图 1(b)所示)。相比传统的酒杯型塔、猫头型塔以及单边布置的 E 型塔,火箭塔的走廊宽度显著减小,其最小线路走廊宽度接近复合材料火箭塔的根本开,约为 1.8 m,而



(a)110 kV 复合材料火箭塔 (b)线路模拟图

图 1 110 kV 复合材料火箭塔示意图及线路模拟图

Fig.1 Schematic diagram of 110 kV composite rocket tower and circuit simulation diagram

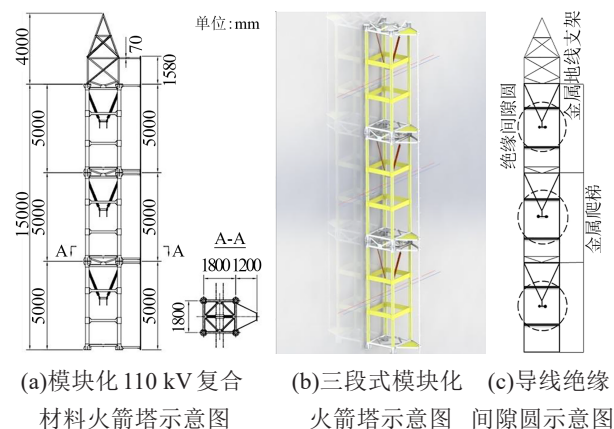
110 kV 传统的金属杆塔,其线路走廊宽度一般为 5.5~7.5 m;其次,复合材料火箭塔型结构呈完全对称布置,消除了不对称荷载引起的弯矩作用,优化了塔材指标。研究成果可推广应用于走廊受限地区的输电线路,缓解土地紧张地区线路走廊征地和土地供应紧张之间的矛盾。

针对新型复合材料火箭塔的技术特点,本文重点研究了该火箭头的电气性能,评估复合材料火箭塔的电气安全性,为其工程应用提供技术支撑。

1 复合材料火箭塔的设计与制备

1.1 110 kV 复合材料火箭塔头结构设计

复合材料火箭塔头高 19 m,包含 15 m 复合材料塔身和 4 m 金属地线支架,塔身包含 3 段标准结构模块,每段标准模块长度为 5 m,根开为 1.8 m,如图 2(a)所示;模块化复合材料塔身两端通过环向金属框架构件及法兰盘相互连接,如图 2(b)所示,导线穿过的杆塔窗口附近包含两段环向复合材料横梁,加强塔身强度;导线与地线支架相连的地下引线距离不小于 1 700 mm,由于导线为双分裂导线,两导线挂点间距离为 200 mm,所以导线的安全绝缘间隙圆的设计半径为 1 900 mm(如图 2(c)所示),保证了任何一相导线到地下引线的距离均不小于 1 700 mm,且在导线的绝缘安全间隙圆内塔身全部为绝缘复合材料,保证导线对地的安全间隙。



(a)模块化 110 kV 复合 (b)三段式模块化 (c)导线绝缘
材料火箭塔示意图 火箭塔示意图 间隙圆示意图

图 2 110 kV 复合材料火箭塔的结构设计示意图

Fig.2 Structural design diagram of 110 kV composite rocket tower

复合材料火箭塔输电线路防雷设计采取的是单地线保护方式,地线位于火箭塔地线支架顶部,其通过金属地线支架与其下端复合材料塔身侧的地下引线相连。根据架空输电线设计规程要求,防雷地线与输电导线的防雷保护角不能大于 10° ,而火箭塔因为地线和导线自上而下垂直排列,地线与

下导线的防雷保护角均为 0° ,单根地线就可以满足防雷保护设计相关要求。

1.2 110 kV 复合材料塔头试品制备

复合材料火箭塔头的尺寸按照图2(a)的尺寸研制,模块化塔身的4个主杆采用的是小角度缠绕工艺成型的纤维增强复合材料圆管,其长度为5 000 mm,直径为200 mm,壁厚为10 mm;塔窗上的绝缘横梁是截面尺寸为40 mm×120 mm的复合材料,通过真空灌注工艺将纤维布、树脂与4根复合材料主杆一体成型;复合材料主杆塔两端的金属框架构件采用胶粘工艺与金属法兰固定;侧面的顺线方向悬空引下线采用梯形结构的金属框架与塔身金属节点处相连接,此处的地下引线与金属爬梯共用。

2 复合材料火箭塔试验内容与试验方法

2.1 试验内容及样品布置

交流110 kV复合材料火箭塔电气试验内容包括干雷电冲击电压试验、湿操作冲击电压试验、湿工频电压试验和人工污秽试验。110 kV复合材料火箭塔电气真型试验在中国电力科学研究院武汉特高压交流试验基地开展,试品布置如图3所示,雷电冲击、湿操作冲击及湿工频电压试验将被测火箭塔头吊起,模拟的金属导线水平悬挂于塔窗内的V型串下端,且平行于火箭塔主杆左右侧面,金属爬梯和上下金属法兰相连且接地处理,其中湿操作冲击及湿工频电压试验过程中位于试品右上位置的淋浴装置会持续给被测试品喷淋雨水,以模拟人工降雨环境(如图3(b)所示);污秽闪络试验将塔头被放置在环境气候实验室内,模拟相应运行环境的污秽度及湿度(如图3(c)所示)。

2.2 试验条件

110 kV复合材料火箭塔冲击电压试验采用标称电压为7 500 kV的冲击电压发生器装置,产生250~2 500 μs 波前操作冲击电压和1.2/50 μs 的标准雷电冲击电压,测量电压峰值的总不确定度在3%以内,试验门型塔尺寸为70 m×70 m,配有两套行车系统,可吊装、布置大型杆塔试品;110 kV复合材料火箭塔湿工频耐压试验采用YDTCW-6000 kVA/3×500 kV试验变压器开展;110 kV复合材料火箭塔人工污秽试验在武汉特高压基地国家电网环境气候实验室开展,实验室净空高为25 m,直径为20 m,可以模拟高海拔、覆冰等特殊气候环境。

2.3 试验方法

(1)冲击电压试验方法:根据试验程序,复合材料火箭塔头间隙50%放电电压试验采用升降法,电压级差的幅度约为预期电压峰值的3%~5%,操作冲击加压次数为40次,雷电冲击为20次,并对试验



(a)雷电冲击试验样品布置 (b)湿操作冲击及湿工频耐受试验样品布置



(c)污秽闪络试验样品布置

图3 电气试验样品布置图

Fig.3 Layout of electrical test samples

结果依据标准进行气象修正。

(2)模拟淋雨工频电压试验方法:模拟淋雨湿试验程序参照IEC 60383-2-1993中湿试验程序进行,其中水平和垂直雨量在1.0~2.0 mm/min内,试验前预淋15 min,试验过程中淋雨不间断。淋雨中施加工频电压至放电值,发生放电即可停止试验并记录电压值。

(3)人工污秽试验方法^[6,16]:试品表面染污全部通过定量刷涂法完成,即根据试品表面积、试验盐密、灰密,通过精密数字天平定量称取可溶盐和惰性污秽物质,混合一定量的纯净水后,以刷涂的方式使试品表面完成染污。测定程序采用GB/T 4585—2004《交流系统用高压绝缘子人工污秽试验》中对“50%耐受电压”测定的规定,即在满足规定试验条件下,在某一基准污秽度下经受至少10次“有效的”试验。

3 结果与讨论

3.1 雷电冲击试验

雷电冲击试验现场的大气条件为干温23.6℃,湿温17.2℃,气压102.5 kPa,试验结果如表1所示。

由表1可知,110 kV复合材料火箭塔50%标准雷电冲击电压(U_{50})平均值为979 kV,闪络路径为绝缘子横担拉杆下端均压环到地线引下线间的空气击穿,如图4所示,因为导线穿过火箭塔的塔窗内,塔窗四周均为绝缘复合材料,导线到地线引线的金属爬梯的距离最小,约为2 100 mm,而绝缘子拉杆高压端的均压环和地下引线的金属爬梯之间的距离小于2 100 mm,因而此处会最先被击穿。根据《10~1 000 kV交流棒形悬式复合绝缘子采购标准 第2部分:专用技术规范》要求,传统110 kV复合绝缘子金属横担塔的50%雷电冲击闪络电压平均值为550 kV,相比110 kV传统绝缘子金属横担塔,复合材料火箭塔的50%干雷电冲击闪络电压提高了78%,杆塔的耐雷水平显著提高。

表1 标准雷电冲击电压试验结果

Tab.1 Standard lightning impulse voltage test results

试品状态	U_{50}/kV	放电路径	导线-爬梯距离/cm
干燥	979	拉杆下端均压环-爬梯	210



图4 雷电冲击电压试验闪络路径图

Fig.4 Flashover path diagram of lightning impulse voltage test

3.2 湿操作冲击电压试验

湿操作冲击电压试验现场的大气条件为干温21.2℃,湿温16.4℃,气压102.5 kPa,雨水电导率112 $\mu\text{S}/\text{cm}$,试验结果如表2所示。由表2可知,110 kV复合材料火箭塔50%标准湿态操作冲击电压(U_{50})平均值为576 kV,闪络路径为导线-塔窗复合材料下横梁-横梁沿面水膜-主材沿面水膜-接地法兰,如图5(a)所示,首先导线和塔窗下端复合材料横梁间空气发生击穿,因为其空气间隙距离最小仅为81 cm,击穿后电流沿着塔窗复合材料横梁表面的水膜向左走,再沿着复合材料主管外表面水膜向下,直至主杆管下端法兰,发生贯穿闪络;在绝缘横梁上多次发生的湿操作击穿闪络点都位于横梁

上表面,且散发的闪络点沿着横梁上表面向主杆方向分布排列,闪络烧蚀点面积尺寸均小于5 mm×5 mm(如图5(b)所示)。传统110 kV复合绝缘子金属横担塔的50%湿态操作冲击闪络电压平均值为430 kV^[16-17],对比发现复合材料火箭塔的50%湿态操作冲击闪络电压提高了34%。

表2 湿标准操作冲击电压试验结果

Tab.2 Wet standard operation impulse voltage test results

试品状态	U_{50}/kV	放电路径	导线到复合杆塔塔窗下横梁距离/cm
淋雨	576	导线-塔窗复合材料下横梁-横梁沿面水膜-主材沿面水膜-法兰抱箍	81

(a)试品湿操作试验
闪络路径图 (b)塔窗上绝缘横梁的
击穿闪络点

图5 湿操作冲击试验结果

Fig.5 Wet operation impact test results

3.3 湿工频耐受闪络电压试验

湿工频耐受闪络电压试验条件:雨水电导率为112 $\mu\text{S}/\text{cm}$,干温23.2℃、湿温17.0℃,气压为102.8 kPa,试验结果如表3所示。由表3可知,110 kV复合材料火箭塔1 min湿工频耐受电压平均值为282 kV,闪络路径为挂线金具-绝缘子串表面-绝缘子上端金属挂点处,如图6所示,贯穿通道发生在绝缘子串沿面水膜。根据110 kV交流棒型悬式复合绝缘子专用技术规范要求^[7],110 kV复合绝缘子棒的1 min湿态耐受电压值为230 kV。对比可见,复合材料火箭塔的1 min湿态耐受电压值提高了22.6%。

表3 湿工频耐受电压试验结果

Tab.3 Wet power frequency withstand voltage test results

序号	试品状态	耐受电压/kV	放电路径
1	淋雨	346	挂线金具-绝缘子
2		261	串表面-绝缘子上
3		239	端金属挂点处
平均值		282	

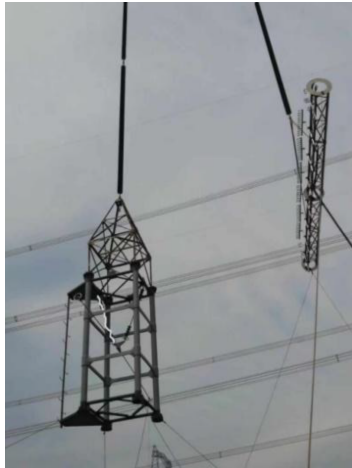


图6 湿工频耐受电压试验闪络路径图

Fig.6 Flashover path diagram of wet power frequency withstand voltage test



图7 人工污秽试验闪络路径图

Fig.7 Flashover path diagram of artificial pollution test

3.4 人工污秽试验

表4为110 kV复合材料火箭塔人工污秽闪络电压试验结果。由表4可知,110 kV复合材料火箭塔人工污秽闪络试验电压(U_{50})平均值为106.2 kV,闪络路径为挂线金具-绝缘子串表面-绝缘子上端金属挂点处,贯穿通道发生在绝缘子串表面上表面的污秽表面层,如图7所示。测试项目配置的污秽组成中盐密度(SDD)为0.20 mg/cm²,灰密度(NSDD)为1.00 mg/cm²,盐密灰密之比为1:5,按污秽程度分级,为三级污秽,属于重度污秽。在三级污秽度下,常规110 kV复合绝缘子串的污秽闪络电压值约为105 kV^[16,18-19],相比之下,复合材料火箭塔的污秽闪络电压稍微高于常规110 kV复合绝缘子串。虽然复合材料火箭塔悬挂导线的两根V串绝缘子的长度都远大于110 kV复合绝缘子串,其结构高度达到1 950 mm,而110 kV复合绝缘子串的结构高度仅为1 340 mm,但是其绝缘爬电距离和110 kV复合绝缘子串的相当,都为3 150 mm左右。为了控制V串成本,火箭塔的V串绝缘子横担仅在复合材料芯棒两端压接硅橡胶伞裙,而芯棒中间段包覆硅橡胶保护。污秽闪络电压主要取决于绝缘子串的爬电距离,由于复合材料火箭塔的绝缘子串和常规110 kV绝缘子串的爬电距离相当,其污秽闪络电压也比较接近。

表4 人工污秽闪络电压试验结果

Tab.4 Artificial pollution flashover voltage test results

试品 状态	SDD /(mg/cm ²)	NSDD /(mg/cm ²)	U_{50} /kV	放电路径
污秽	0.20	1.00	106.2	挂线金具-绝缘子串表面- 绝缘子上端金属挂点处

4 结论

(1)新型110 kV复合材料火箭塔的电气性能优于常规复合绝缘子铁塔,其干雷电冲击电压为979 kV,相比110 kV复合绝缘子铁塔提升了78%;其湿操作冲击电压为576 kV,相比110 kV复合绝缘子铁塔提升了34%;其湿工频闪络电压平均值为282 kV,相比110 kV复合绝缘子铁塔提升了22.6%;在盐密度为0.20 mg/cm²、灰密度为1.00 mg/cm²的重污秽工况下,火箭塔的人工污秽闪络试验电压为106.2 kV,略高于相同污秽度下110 kV复合绝缘子铁塔的污秽闪络电压值。

(2)110 kV复合材料火箭塔的线路走廊极小,基本等于复合材料火箭塔的根本开值,因此其最小线路走廊宽度约为1.8 m,而110 kV复合绝缘子串铁塔的最小走廊宽度在5.5~7.5 m,相比较下,其可大幅压缩线路走廊宽度,减少征地面积及青赔费用。

参考文献:

- [1] UOZUMI T, KITO A. Carbon fibre-reinforced plastic truss structures for satellite using braiding/resin transfer moulding process [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part L: Journal of Materials: Design and Applications, 2007, 221(2): 93-101.
- [2] PARASHAR A, MERTINY P. Adhesively bonded composite tubular joints: Review[J]. International Journal of Adhesion & Adhesives, 2012, 38(4): 58-68.
- [3] 陈建胜,张正晓,邢照亮,等. 10kV分段式复合材料电杆设计及性能研究[J]. 绝缘材料, 2020, 53(8): 102-108.
- [4] 唐波,迟兴江,姚磊. 新型绝缘输电杆塔的发展及展望[J]. 电力学报, 2010, 25(4): 325-327, 335.
- [5] 吴雄,蔡炜,李健,等. 玻纤增强复合材料及其复合绝缘横担覆冰特性研究[J]. 绝缘材料, 2021, 54(12): 107-114.
- [6] 胡毅,刘庭,刘凯,等. 110kV输电线路复合材料杆塔特性试验研究[J]. 高电压技术, 2011, 37(4): 801-808.

- [7] 柯锐,何昌林,梅端,等. 高温水环境对复合材料绝缘横担性能的影响研究[J]. 绝缘材料,2021,54(10):100-104.
- [8] 熊淦辉,刘江钊,林锋,等. 电力输送用复合材料杆塔发展现状[J]. 绝缘材料,2013,46(4):82-85.
- [9] 胡良全. 电力行业用复合材料的发展[J]. 玻璃钢/复合材料,2012(3): 91-93.
- [10] 曹宁. 110kV输电线路复合材料杆塔的应用研究[D]. 广州:华南理工大学,2012.
- [11] 易伟,袁金. 全GFRP输电塔头用环氧BMC绝缘紧固件制备与性能[J]. 绝缘材料,2021,54(7):47-52.
- [12] 黄汉良,张子超,林锋. 我国输配电线路复合材料杆塔的应用现状[J]. 玻璃钢/复合材料,2014(3):66-70.
- [13] 王小丽. 复合绝缘横担在220kV架空输电线路中的应用[J]. 电气应用,2013(1):2177-2180.
- [14] 柳欢欢,刘明慧,于鑫. 复合材料输电杆塔设计方法讨论[J]. 玻璃钢/复合材料,2013(6):48-52.
- [15] 朱晔,冯炳,李攀峰. 紧凑型110kV输电复合材料火箭塔的力学性能研究[J]. 复合材料科学与工程,2022(6):96-104.
- [16] 郭真萍,王力农,方雅琪,等. 利用疏水涂层提高复合材料杆塔防污性能的研究[J]. 绝缘材料,2016,49(1):34-39.
- [17] 国家电网公司科技部. 10kV~1000kV交流棒形悬式复合绝缘子采购标准 第2部分:专用技术规范:Q/GDW 13253.2—2019[S]. 北京:中国电力出版社, 2019.
- [18] 谭字翔. 110kV复合绝缘子的污秽闪络特性研究[J]. 电气开关, 2012(5):55-58.
- [19] 蒋兴良,陈爱军,张志劲,等. 盐密和灰密对110kV复合绝缘子闪络电压的影响[J]. 中国电机工程学报,2006,25(9):150-154.

收稿日期:2022-01-12 修回日期:2022-03-07

作者简介:吴雄(1982-),男(汉族),湖北黄梅人,教授级高级工程师,博士,主要从事电力新材料及绝缘高分子材料技术的研究。