DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2026.04.011

500 kV避雷器上节泄漏电流测试研究

刘晓飞， 王 涛， 贾晓瑜， 李建鹏， 胡伟涛， 张宝全， 赵智龙
（国网河北省电力有限公司超高压分公司，石家庄 050000）

摘要： 文中主要对不拆线试验测试500 kV电压等级避雷器直流泄漏电流超标问题进行研究。针对多节避雷器上节$0.75U_{1mA}$下泄漏电流超标问题，采用Ansys Maxwell仿真和现场测试开展系统分析。提出解决该问题的现场测试方案，并得出该方案可有效降低电离电流对测试结果的影响，提高泄漏电流测试准确性的结论。现场测试结论与仿真结果一致。

关键词： 避雷器；$0.75U_{1mA}$；电离电流；有限元；试验误差

Research on Leakage Current Test of Upper Section of 500 kV Arrester

LIU Xiaofei, WANG Tao, JIA Xiaoyu, LI Jianpeng, HU Weitao, ZHANG Baoquan, ZHAO Zhilong
(State Grid Hebei Extra Voltage Company, Shijiazhuang 050000, China)

Abstract: In this paper the issue of excessive DC leakage current of 500 kV lightning arrester is studied under the non-disconnection test. As for the issue of excessive leakage current at $0.75U_{1mA}$ in the first section of multiple lightning arresters, a system analysis is conducted by using Ansys Maxwell simulation and on-site testing. An on-site testing plan to address this issue is proposed and it is concluded that this plan can effectively reduce the influence of ionization current on testing results and improve the accuracy of leakage current testing. The on-site test results are consistent with the simulation results.

Key words: arrester; $0.75U_{1mA}$; ionization current; finite element; test error

0 引言

电网的安全可靠运行对国家经济社会发展具有重要意义。避雷器主要采用了具有非线性伏安特性的氧化锌电阻片，是电力系统防止过电压的重要设备。为了保证避雷器的安全运行，目前避雷器的检测手段主要有停电例行试验和带电测试。停电例行试验主要通过测量直流1 mA泄漏电流下的参考电压U_{1mA}和$0.75U_{1mA}$直流电压下的泄漏电流来判断避雷器是否存在老化或受潮，因此准确测量直流1 mA泄漏电流下的参考电压U_{1mA}和$0.75U_{1mA}$直流电压下的泄漏电流极其重要[1-5]。

影响氧化锌避雷器$0.75U_{1mA}$直流电压下的泄漏电流测量准确度的因素较多。包括避雷器表面水膜或污秽引起的表面泄漏电流、高压试验引线对地、避雷器法兰对地杂散电流等。对于电压等级较高的避雷器来说，由于均压环的存在，避雷器不拆线测试泄漏电流时均压环对避雷器上节的下法兰放电，产生电离电流，对避雷器上节1 mA泄漏电流下的直流电压U_{1mA}和$0.75U_{1mA}$下的泄漏电流测试结果影响很大，必须通过各种措施排除干扰。220 kV避雷器接高压引线处安装均压环可减少避雷器高压端对地的杂散电流，但不适用于不拆线且带均压环的避雷器。拆除500 kV避雷器高压引线、低压端串联微安表、对均压环与上节下法兰之间的电离电流进行低压屏蔽的测试，该方法需拆除一次引线，工作量大。用热缩套、纯棉织物、绝缘纸等进行包裹500 kV避雷器上节下法兰可达到屏蔽空间电离电流的作用，但这种方法在法兰加高压时可能会在包裹上积蓄少量的感应电荷，进而影响到泄漏电流

收稿日期：2025-09-23； **修回日期：**2025-12-07
基金项目：国网河北省电力有限公司科技项目(kj2022-036)。
Project Supported by Science and Technology Project of State Grid Hebei Electric Power Co., Ltd.(kj2022-036).

测试的准确性。在避雷器上节安装截流伞并测出其与均压环之间的电离电流，并在总泄漏电流中将这部分电流减去，可以较准确地测出泄漏电流，但是截流伞根据避雷器尺寸定制，安装不便，且敞开式结构不能完全屏蔽电离电流。拆除均压环效果最好，但是需要采用高空作业车和吊车配合，工作量大、危险点多，易因操作不当造成避雷器损坏[6-9]。

500 kV电压等级避雷器多为多节(3节及以上)结构，其上节$0.75U_{1mA}$下的泄漏电流存在的问题。文中提出了高压屏蔽法并做出结构简单、通用性强、拆装方面的高压屏蔽装置，通过Ansys Maxwell仿真分析了高压屏蔽法前后电场分布及屏蔽电离电流的机理，在变电站现场进行了实测验证，确定该方法的有效性[10-13]。

1　泄漏电流偏差分析及高压屏蔽法原理

1.1　500 kV避雷器上节泄漏电流常规不拆线测试方法

常规测试原理图见图1，直流高压发生器产生负高压加到避雷器上节下法兰处，直流高压发生器顶部A_1电流表流过的电流为I_1；流过电流表A_1外壳即流过试验线屏蔽层的总电流为I_3；通过避雷器上节下法兰流过第2节和第3节的泄漏电流为I_2；流过避雷器上节的泄漏电流为I_4；避雷器本体对均压环的空气电离电流为I_5；屏蔽线对周围空间的电离电流为I_6；按照常规不拆线测试500 kV避雷器泄漏电流的方法，避雷器上节泄漏电流测试结果为I_7，则I_7为电流表A_1与A_2读数的差[14-15]。

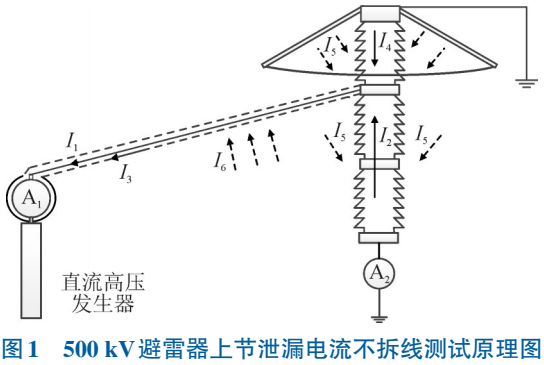


图1　500 kV避雷器上节泄漏电流不拆线测试原理图

Fig. 1　Test schematic diagram of leakage current on upper section of 500 kV arrester without disconnection

则A_1表的读数为$I_1=I_2+I_4+I_5$，A_2表的读数为I_2，测量电流见式(1)。从式(1)可以看出，避雷器本体与均压环之间空气的电离电流I_5为造成测量偏差的原因。

$$I_7=I_1-I_2=I_4+I_5 \tag{1}$$

1.2　电离电流测试

设计电离电流测试方案，见图2。用绝缘螺栓和绝缘垫片将均压环与避雷器固定，使均压环与避雷器上节上法兰之间保持机械联系的同时实现电气隔离。

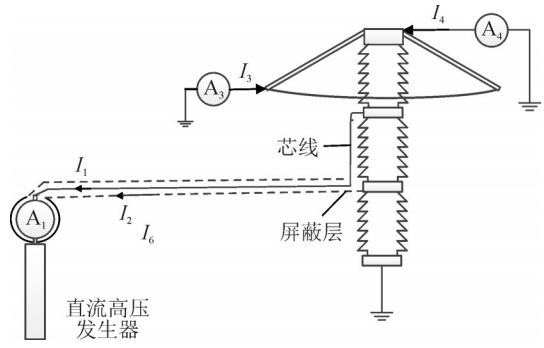


图2　电离电流测试方案

Fig. 2　Ionization current test scheme

将测试导线拉直后屏蔽层接避雷器第2节下法兰，芯线平行于避雷器第2节瓷套向上延伸接避雷器上节下法兰，增大试验线与均压环的距离，避免测试时试验线对该法兰放电。

均压环接电流表A_3后接地，模拟试验条件下均压环接地环境，同时电流表A_3测试避雷器本体与均压环之间空气的电离电流，电流表A_4可准确测试避雷器上节泄漏电流。

按照上述电离电流测试方案进行现场测试，测试结果见表1。由表1可知电离电流A_3与泄漏电流A_4的和与常规测试的电流近似相等；A_4泄漏电流与出厂值偏差很小，验证了试验方案的可行性，通过实测确定了电离电流的存在并测出了其实际数值大小[16-17]。

表1　电离电流试验数据

Table 1　Ionization current test data

位置	电流/μA		
	A相上节	B相上节	C相上节
A_3	28	28	29
A_4	32	33	29
A_3+A_4	60	61	51
常规测试值	59	59	60
偏差/%	1.69	3.39	1.67

1.3　高压屏蔽法测量原理

常规的高压屏蔽是在绝缘子上缠绕铜线，使该处绝缘子与法兰等电位，从而流过绝缘子表面的泄漏电流经铜线流过屏蔽层，但是无法屏蔽电离电流。文中提出采用高压屏蔽法屏蔽避雷器上节下法兰与均压环之间的空气电离电流，测试原理图见图3。在法兰外面包覆一层绝缘垫，绝缘垫外面包覆一层锡纸。测试上节泄漏电流时将试验线的屏蔽层与最外层锡纸相连，芯线与法兰相连接。测试过程中锡纸在法兰最外侧，与均压环之间存在电离电流I_5，I_5通过锡纸屏蔽层流过导线屏蔽层，流过电

流表 A_1 的外壳；锡纸与法兰之间等电位，无电离电流流过。若避雷器需要屏蔽表面泄漏电流时可在绝缘子上缠绕铜线并与屏蔽线的屏蔽层相连。

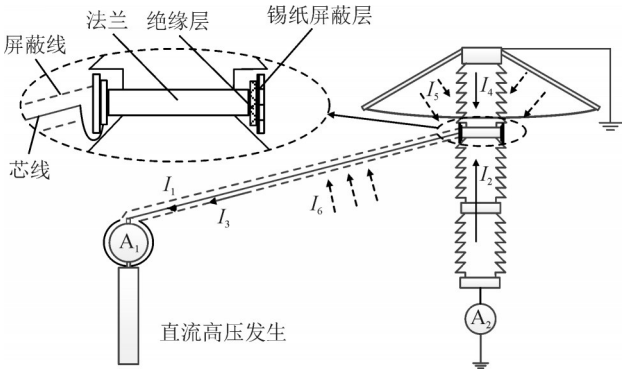


图3 高压屏蔽法测量原理接线图

Fig. 3 Principle wiring diagram of improved high voltage shielding method

避雷器上节下法兰与均压环之间空气电离电流对测试结果影响大，屏蔽了这部分电离电流后，可获得较为准确的避雷器上节泄漏电流测试数据。

2 仿真分析

可以通过式(2)、(3)分别计算法兰对均压环之间电离电流密度和电离电流值，可知法兰对均压环的离子电流密度及总电离电流均随法兰外部电场强度和风速的增大而增大。因此法兰与均压环之间的电离电流与法兰表面电场强度有密切关系，有必要对避雷器试验时周围空间电场分布进行研究。

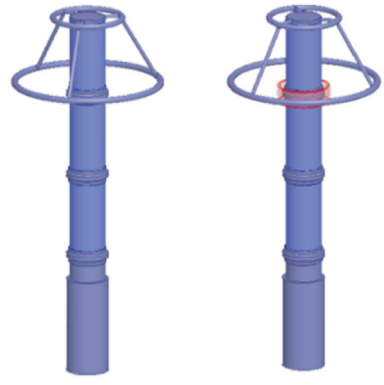
$$J=\rho(KE+v) \tag{2}$$

$$I=\iint J\mathrm{d}S \tag{3}$$

式(2)、(3)中：J 为离子电离电流密度；K 为离子迁移率；v 为风速；E 为均压环与法兰之间某一位置电场强度；ρ 为电荷密度；I 为电离电流总值；S 为屏蔽装置与均压环之间的截面[18-22]。

2.1 避雷器仿真模型

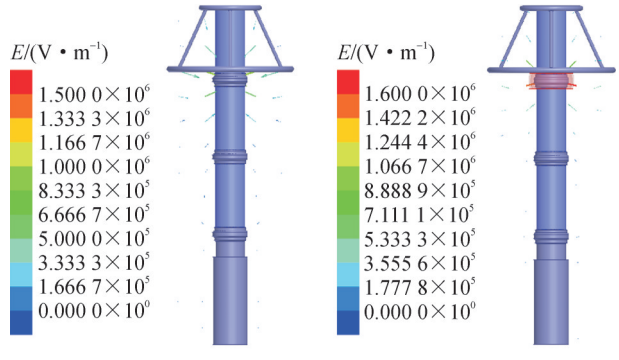
以电压等级为500 kV、型号为Y20-420/1106的3节避雷器为例，分别建立常规直流泄漏电流试验以及加装屏蔽装置后的避雷器实验模型。将模型进行优化，连接螺栓与法兰的连接做平滑处理视为轴对称；将避雷器最外层瓷套作为圆柱面处理，见图4(a)、(b)。屏蔽装置、均压环、法兰及支撑座材质均设置为理想导体，绝缘部分材质设置为陶瓷，相对介电常数为5.7。屏蔽装置中绝缘层为厚度3 mm，外直径560 mm，高度600 mm的圆环；锡纸屏蔽层为厚度1 mm，外直径562 mm，高度600 mm的圆环。常规试验时法兰处施加−180 kV直流试验电压；加装屏蔽装置后，法兰及屏蔽装置处均施加−180 kV电压；避雷器下节下法兰处以及支撑座电压设置为0电位。远边界设置为避雷器高度的3倍，求解类型为静电场。电场矢量图及电场强度分布图见图5、6[23-25]。



(a) 常规 (b) 加装屏蔽装置

图4 避雷器Ansys Maxwell模型

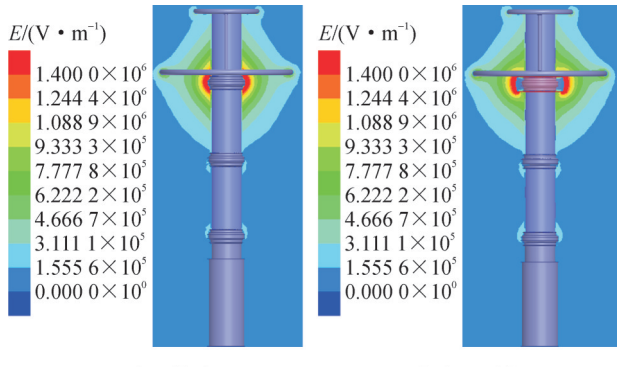
Fig. 4 Ansys Maxwell model of arrester



(a) 常规接线 (b) 加装屏蔽装置

图5 直流泄漏电流试验电场矢量分布图

Fig. 5 Electric field vector distribution of DC leakage current test



(a) 常规接线 (b) 加装屏蔽装置

图6 直流泄漏电流试验电场强度分布图

Fig. 6 Field strength distribution of DC leakage current test

2.2 仿真结果及分析

常规及加装屏蔽装置后直流泄漏电流试验电场矢量分布图见图5(a)、(b)。在法兰与均压环之间分布指向法兰的电场，空气中游离的离子在电场作

用下在均压环与法兰之间定向移动，产生离子电流与泄漏电流叠加流过屏蔽线线芯，使测试产生偏差。安装屏蔽装置后，避雷器均压环与屏蔽装置的空间分布指向屏蔽装置的电场，空间的离子会发生定向移动至屏蔽装置，在均压环与屏蔽装置之间形成电离电流，流过屏蔽线的屏蔽层，从而将电离电流屏蔽。

常规及加装屏蔽装置后直流泄漏电流试验电场强度分布图见图6(a)、(b)。常规试验时避雷器上节下法兰表面电场强度较大，最大值为2 656 kV/m。因建模时对法兰连接螺栓及法兰的连接面做平滑处理，实际测试时其不平滑的尖角、边缘导致表面电场强度比仿真结果更大，当电场强度超过空气的击穿电场强度3 000 kV/m，法兰与均压环之间的空气电离加剧，电离电流迅速增加。避雷器上节外层瓷套表面电场强度从下向上快速减小，避雷器第2节外层瓷套表面电场强度从上向下快速减小，所以避雷器第1、2节外瓷套与均压环之间的电离电流较小。避雷器第3节外瓷套及法兰电场强度非常小，对测试结果基本无影响。即避雷器本体与均压环之间的电离电流分为两部分，一是避雷器上节下法兰与均压环之间的电离电流，二是避雷器第2、3节外瓷套与均压环之间的电离电流。由式(2)、(3)可知表面电场强度为电离电流大小最重要影响因素。避雷器上节下法兰表面电场强度远大于避雷器第2、3节外瓷套表面电场强度，因此避雷器上节下法兰与均压环之间的电离电流为测试偏差的主要原因。

加装屏蔽装置后避雷器上节下法兰电场强度分布俯视图见图7，由于屏蔽装置与法兰电位相同，法兰表面电场强度为0，由于法兰被包裹，法兰表面风速为0。由式(3)、(4)得，屏蔽装置与法兰之间的电离电流为0，从而将避雷器上节下法兰表面电离电流完全屏蔽，提高避雷器上节泄漏电流测试准确性。

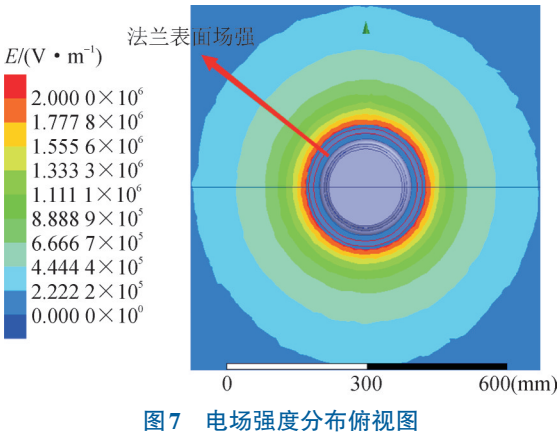


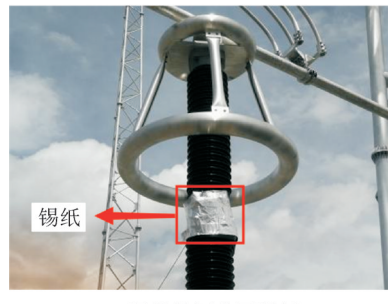
图7　电场强度分布俯视图

Fig. 7　Top view of field strength distribution

3　高压屏蔽法现场测试

在某新投运变电站测试9支型号为Y20-420/1106的500 kV避雷器，该试验屏蔽装置安装示意图见图8。常规接线及高压屏蔽法下避雷器上节$0.75U_{1mA}$下的泄漏电流数据见表2-4。表中的初值为避雷器出厂测试值，初值差为(测试值−初值)/初值。

(a) 屏蔽装置内部绝缘层



(b) 屏蔽装置外层锡纸

图8　屏蔽装置安装示意图

Fig. 8　Installation diagram of shielding device

表2　高压屏蔽法测试500 kV避雷器上节$0.75U_{1mA}$下的泄漏电流数据

Table 2　Test the leakage current data under $0.75U_{1mA}$ of the upper section of 500 kV arrester with high-voltage shielding method

编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9
测试值/μA	32	30	29	32	32	29	32	33	29
初值/μA	30	29	28	31	30	28	30	31	28
初值差/%	6.67	3.45	3.57	3.23	6.67	3.57	6.67	6.45	3.57
要求值/μA					≤50				

常规试验方法下三相避雷器的上节$0.75U_{1mA}$下的泄漏电流初值差在76.67%~114.29%之间，均超规程(国家电网公司《输变电设备状态检修试验规程》)不大于30%的要求；泄漏电流在53~63 μA之间均超规程≤50 μA要求。

采用改进高压屏蔽测试方法后三相避雷器的上节$0.75U_{1mA}$下的泄漏电流值下降幅度在21~34 μA之间，占高压屏蔽测试值的65.63%~117.24%，降幅明显；且初值差降为3.23%~6.67%，远小于规程不超过30%的要求。

表3 常规法测试500 kV避雷器上节0.75U_{1mA}下的泄漏电流数据

Table 3 Test the leakage current data under 0.75U_{1mA} of the upper section of 500 kV arrester with conventional method

编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9
测试值/μA	57	58	60	55	53	59	57	61	63
初值/μA	30	29	28	31	30	28	30	31	28
初值差/%	90.00	100.00	114.29	77.42	76.67	110.71	90.00	96.77	125.00
要求值/μA					≤50				

表4 新旧方法测试500 kV避雷器上节0.75U_{1mA}下的泄漏电流数据对比

Table 4 Comparison of leakage current data between new and old methods for testing the upper section of 500 kV arrester under 0.75U_{1mA}

编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9
常规法测试值/μA	57	58	60	55	53	59	57	61	63
高压屏蔽测试值/μA	32	30	29	32	32	29	32	33	29
差值/μA	25	28	31	23	21	30	25	28	34
差值占比/%	78.13	93.33	106.90	71.88	65.63	103.45	78.13	84.85	117.24

采用改进高压屏蔽测试方法，可以有效降低避雷器上节泄漏电流测试时法兰与均压环之间的电离电流，提高测试数据准确性。

4 结语

文中通过仿真和试验，验证均压环与避雷器之间的电离电流叠加到测量系统引入测试误差是多节避雷器上节0.75U_{1mA}下的泄漏电流超标的主要原因。针对该问题开展系统研究，提出采用高压屏蔽法减少测试误差，提升测试准确性。所得结论如下：

常规试验方法测得多节避雷器上节0.75U_{1mA}下的泄漏电流由两部分组成，一部分为避雷器上节实际泄漏电流，另一部分为避雷器、均压环两者之间的电离电流。降低避雷器上节下法兰与均压环之间的电离电流是解决上述问题的关键。

通过在法兰表面包覆绝缘垫和屏蔽层的方法可有效降低避雷器上节下法兰表面电场强度和电离电流，提升500 kV避雷器上节泄漏电流测试准确性。

参考文献：

[1] 马御棠，曹 俊，屈 路，等. 考虑脉冲电流波形影响的避雷器氧化锌电阻片温升及破坏特性研究[J]. 电力科学与技术学报，2025，40(5)：306-314.
MA Yutang，CAO Jun，QU Lu，et al.Temperature rise and failure characteristics of zinc oxide resistor for arrester considering pulse current waveform[J]. Journal of Electric Power Science and Technology，2025，40(5)：306-314.

[2] 冯守信，毛惠卿，胡元潮，等. 雷击临近建筑物土壤散流引发配电线路雷电过电压及防护[J]. 电瓷避雷器，2023(1)：99-105.
FENG Shouxin，MAO Huiqing，HU Yuanchao，et al.Lightning overvoltage and protection of distribution lines caused by lightning striking soil dissipation near buildings[J]. Insulators and Surge Arresters，2023(1)：99-105.

[3] 马御棠，束洪春，钱国超，等.基于频域介电谱曲线分解的氧化锌避雷器老化状态评估[J]. 电工技术学报，2024，39(3)：901-913.
MA Yutang，SHU Hongchun，QIAN Guochao，et al. Method for evaluating the aging state of ZnO arrester based on curve decomposition of frequency domain dielectric spectrum[J]. Transactions of China Electrotechnical Society，2024，39(3)：901-913.

[4] 乔新涵，张志劲，蒋正龙，等.10 kV复合避雷器组合绝缘子雷电冲击污闪特性及模型[J]. 电工技术学报，2024，39(21)：6932-6940.
QIAO Xinhan，ZHANG Zhijin，JIANG Zhenglong，et al. Lightning impulse pollution flashover characteristics and model of 10 kV composite arrester combined insulator[J]. Transactions of China Electrotechnical Society，2024，39(21)：6932-6940.

[5] 姜楠楠，王文浩，蔺家骏，等.基于泄漏电流三相不平衡度的避雷器在线监测优化方案[J]. 浙江电力，2024，43(5)：116-124.
JIANG Nannan，WANG Wenhao，LIN Jiajun，et al.An optimal online monitoring scheme for lightening arresters based on the threephase imbalance of leakage current[J]. Zhejiang Electric Power，2024，43(5)：116-124.

[6] 王理丽，康 钧，王生富，等. 直流电压下油纸绝缘针板缺陷局部放电演化规律[J]. 高压电器，2023，59(2)：153-161.
WANG Lili，KANG Jun，WANG Shengfu，et al. Evolution of partial discharge by needle-plate defect in oil-pressboard insulation under DC voltage[J]. High Voltage Apparatus，2023，59(2)：153-161.

[7] 何 龙，朱咏明，马金财，等.避雷器通流容量对220 kV线路断线谐振过电压影响分析[J]. 变压器，2024，61(7)：47-51.
HE Long，ZHU Yongming，MA Jincai，et al.Analysis of influence of arrester current carrying capacity on resonant overvoltage of 220 kV transformer[J]. Transformer，2024，61(7)：47-51.

[8] 李春锋，方春华，侯轩达，等.基于k-means高频局放10 kV避雷器快速带电检测方法[J]. 电测与仪表，2024，61(7)：191-196.
LI Chunfeng，FANG Chunhua，HOU Xuanda，et al.Research on rapid live detection method of high frequency partial discharge 10 kV arrester based on k-means[J]. Electrical Measurement & Instrumentation，2024，61(7)：191-196.

[9] 赵冀宁，刘晓飞，付炜平，等. 220 kV氧化锌避雷器不拆一次引线试验分析[J]. 河北电力技术，2023，42(1)：80-83.
ZHAO Jining，LIU Xiaofei，FU Weiping，et al. Test and analysis of 220 kV MOA arrester without removing primary lead wire[J]. Hebei Electric Power，2023，42(1)：80-83.

[10] 张耘溢，马　磊，刘　焱，等. 基于IGBT串联脉冲功率法的氧化锌避雷器电流均衡性现场测试技术[J]. 电瓷避雷器，2022(5)：79-85.
ZHANG Yunyi，MA Lei，LIU Yan，et al.Field test technique of zinc oxide arrester current balance based on IGBT series pulse power method[J]. Insulators and Surge Arresters，2022(5)：79-85.

[11] 张天翊，梁志坚，朱　瑞. 光伏变电站用氧化锌避雷器多物理场耦合分析[J]. 中国电力，2022，55(9)：79-87.
ZHANG Tianyi，LIANG Zhijian，ZHU Rui.A coupling analysis of multiphysical field for ZnO surge arrester installed in photovoltaic substation[J]. Electric Power，2022，55(9)：79-87.

[12] 胡　京，张敦晶，周龙武，等. 考虑雷击过电压分布特性的特高压直流线路避雷器装设策略研究[J]. 电瓷避雷器，2022(4)：177-184.
HU Jing，ZHANG Dunjing，ZHOU Longwu，et al. Lightning surge arrester installation strategy of UHVDC transmission line considering lightning overvoltage distribution characteristics[J]. Insulators and Surge Arresters，2022(4)：177-184.

[13] 冯智慧，张广洲，吴　健，等. 超高压交流变电站金具电晕特性与选型研究[J]. 智慧电力，2022，50(8)：82-88.
FENG Zhihui，ZHANG Guangzhou，WU Jian，et al.Corona characteristics and type selection of EHV AC substation fittings[J]. Smart Power，2022，50(8)：82-88.

[14] 张国豪，李　化，黄子钦，等. 交直流电压比例对金属化膜击穿特性的影响研究[J]. 电力电容器与无功补偿，2023，44(2)：55-60.
ZHANG Guohao，LI Hua，HUANG Ziqin，et al. Study on the effect of AC/DC voltage ratio on breakdown characteristics of metallized film[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation，2023，44(2)：55-60.

[15] 何　敏，唐　亮，王　钢，等. 基于参数分离的大功率电抗器分布电容测试方法研究[J]. 电力电容器与无功补偿，2021，42(6)：57-60.
HE Min，TANG Liang，WANG Gang，et al.Study on test method of distributed capacitance of high power reactor based on parameters separation[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation，2021，42(6)：57-60.

[16] 姚聪伟，李　盈，庞小峰，等. 500 kV断路器均压电容器10 kV介损异常现象的研究与探讨[J]. 电力电容器与无功补偿，2021，42(6)：101-109.
YAO Congwei，LI Ying，PANG Xiaofeng，et al. Study and discussion on abnormal phenomenon of 10 kV dielectric loss of grading capacitor for 500 kV circuit breaker[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation，2021，42(6)：101-109.

[17] 王生富，苟廷韬，邓　辉，等. 2 400 kV高海拔直流电压发生器电场校验及均压环结构优化[J]. 电力电容器与无功补偿，2021，42(6)：203-210.
WANG Shengfu，GOU Tingtao，DENG Hui，et al. Electric field intensity check and grading ring structure optimization of 2 400 kV high altitude DC voltage generator[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation，2021，42(6)：203-210.

[18] 李　谦，江宇栋，赵晓凤，等. 连续雷击引发无间隙金属氧化物避雷器热崩溃的仿真分析[J]. 电瓷避雷器，2022(5)：73-78.
LI Qian，JIANG Yudong，ZHAO Xiaofeng，et al. Simulation analysis of non-gap metal oxide surge arresters thermal breakdown caused by continuous lightning strikes[J]. Insulators and Surge Arresters，2022(5)：73-78.

[19] 张园园，黄　娜，余胜康，等. 220 kV氧化锌避雷器缺陷的热特性分析[J]. 武汉大学学报(工学版)，2023，56(5)：599-605.
ZHANG Yuanyuan，HUANG Na，YU Shengkang，et al.Thermal characteristics analysis of defects of 220 kV Zinc oxide lightning arrester[J]. Engineering Journal of Wuhan University，2023，56(5)：599-605.

[20] 郑中原，刘桂华，姜　玲，等. 采用周期边界条件计算高压交流输电线路附近的空间电场[J]. 高压电器，2023，59(1)：58-63.
ZHENG Zhongyuan，LIU Guihua，JIANG Ling，et al.Calculating the spatial electric field beneath a high voltage AC transmission line by using the periodic boundary condition[J]. High Voltage Apparatus，2023，59(1)：58-63.

[21] 卢文浩，肖　翔，韦晓星，等. 氧化锌避雷器阀片局部U_{1mA}大小与缺陷程度关系的研究[J]. 电瓷避雷器，2022(6)：147-151.
LU Wenhao，XIAO Xiang，WEI Xiaoxing，et al. Relationship between size of U_{1mA} value and defect degree of ZnO arrester valve [J]. Insulators and Surge Arresters，2022(6)：147-151.

[22] 陆德鹏，韩　冬，黄　靖，等. 基于Ansys的柱上开关温度场仿真分析[J]. 高压电器，2022，58(12)：49-54.
LU Depeng，HAN Dong，HUANG Jing，et al. Temperature field simulation analysis of pole switchgear based on Ansys[J]. High Voltage Apparatus，2022，58(12)：49-54.

[23] 普子恒，陈志刚，史星涛，等. 考虑合成电场影响的换流站直流场巡检机器人路径优化[J]. 高压电器，2023，59(5)：178-184.
PU Ziheng，CHEN Zhigang，SHI Xingtao，et al. Path optimization of DC field patrol inspection robot in converter station considering the influence of synthetic electric field[J]. High Voltage Apparatus，2023，59(5)：178-184.

[24] 韩晓东，陈晓东，李　杨，等. 电热耦合场分析在±800 kV穿墙套管电场分布计算应用[J]. 高压电器，2023，59(5)：35-42.
HAN Xiaodong，CHEN Xiaodong，LI Yang，et al. Application of electrothermal coupling field analysis to electric field distribution calculation of ±800 kV wall bushing[J]. High Voltage Apparatus，2023，59(5)：35-42.

[25] 尹肇琦，谢鹏康，王博闻，等. 冲击电流下氧化锌避雷器多物理场有限元分析[J]. 电瓷避雷器，2023(1)：216-222.
YIN Zhaoqi，XIE Pengkang，WANG Bowen，et al.Multi-physical field finite element analysis of ZnO arrester under impulse current [J]. Insulators and Surge Arresters，2023(1)：216-222.

刘晓飞(1984—)，男，硕士研究生，高级工程师，主要从事超特高压设备电气试验工作(E-mail：891028893@qq.com)。

贾晓瑜(1992—)，女，硕士研究生，高级工程师，主要从事超特高压设备电气试验工作(通信作者)(E-mail：891028893@qq.com)。