

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2017.08.031

水平分支对方框带射线型接地体冲击特性的影响

肖磊石¹, 黄佳瑞², 李 谦¹, 杨 潇², 饶章权¹, 周文俊²

(1. 广东电网有限责任公司电力科学研究院, 广州 510080; 2. 武汉大学电气工程学院, 武汉 430072)

摘要: 接地电阻是衡量接地体性能的重要指标。为降低方框带射线型接地体冲击接地电阻,文中采用模拟试验方法,在双层土壤环境下,研究水平分支对不同接地体冲击特性与散流分布的影响。结果表明:对于单根水平接地体,分支呈120°三段式结构的改型接地体的降阻效果最优;相较于简单方框带射线型接地体,添加水平分支,且分支呈120°的三段式结构可减小电感效应,使其分支端部的流散电流增大,火花放电更为强烈,使得平均降阻百分比可达10%。增加水平分支有利于降低接地体冲击接地电阻,需根据具体接地体尺寸改进。
关键词: 冲击接地电阻; 火花效应; 模拟试验; 屏蔽效应; 降阻

Influence of Horizontal Branch on Impulse Characteristics of Box Grounding Device with Radiation

XIAO Leishi¹, HUANG Jiarui², LI Qian¹, YANG Xiao², RAO Zhangquan¹, ZHOU Wenjun²

(1. Electric Power Research Institute of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510080, China; 2. School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: The grounding resistance is an important index to judge the performance of grounding devices. In order to reduce the impulse grounding resistance of box grounding device with radiation, the simulation experiment of different grounding devices is applied in the condition of two-layer soil, the influence of horizontal branch on impulse characteristics and dispersion distribution of different grounding bodies is studied. The results show that, in case of single horizontal grounding device, when the branch is 120° and three sections structure, the resistance reducing effect of the modified grounding body is the best. Compared with the normal box grounding device, three sections structure with a horizontal branch and branch be 120° can reduce the inductance, the discharge current of the end of the branch is increased, the discharge of the spark is more intense, so that the average percentage of resistance reducing is up to 10%. Adding the horizontal branch is effective method to reduce the impulse grounding resistance.

Key words: impulse grounding resistance; inductance effect; simulation experiment; shielding effect; resistance reducing

0 引言

雷电冲击电流在接地装置及周围土壤中的流散是复杂的电磁暂态过程, 伴随有土壤火花效应、电感效应等现象^[1-3]。杆塔地网的良好接地性能是提高输电线路耐雷水平, 保障线路安全稳定运行的重要前提^[4]。工程上采用的降阻方法大多针对工频接地电阻, 例如加大接地体的尺寸、引外接地、增设垂直接地体或深井接地、使用降阻剂、局部更换接地

体周围土壤等^[5-8]。

但由于冲击过程特殊性, 这些方法并未有效降低接地体的冲击接地电阻^[9]。为此研究人员通过仿真计算和试验来获取接地装置冲击响应, 从而得到更准确的冲击接地电阻评估方法与降阻措施^[10-12]。但仿真计算的有效性和准确性仍需验证, 目前试验研究应用最为广泛与可信, 主要分为真型试验和模拟试验^[13-16]。真型试验最接近实际情况, 但接地装置本体尺寸较大, 不便于改变接地装置结构和土壤电阻率等, 致使真型试验的实施比较困难。模拟试验

是将真型接地装置按比例缩小成模型,与实际情况一样埋于土壤或砂等介质中,施加雷电冲击电流,通过测量电流和电压波形来研究接地装置的冲击特性。模拟试验的物理过程与实际接地装置的物理过程是一样的,且模拟试验场地和设备可长期使用,能方便地改变接地装置的拓扑结构与土壤电阻率,是接地冲击特性研究的主要手段。

基于模拟试验方法,文[13-14]研究了“针刺”和短导体对接地体冲击特性的影响,提出了合理优化措施;文[15]比较了几种接地体冲击特性,提出低土壤电阻率地区接地体选取建议;文[16]在冻土地区进行了降低接地电阻的模拟试验;文[17]对接地模块的降阻特性进行试验分析和仿真计算;文[18]对几种接地模块进行模拟试验,得出了冲击电流下接地模块的降阻规律。调整接地体尺寸与结构,是目前应用最为广泛且持久的降阻方法。其中增加水平分支的施工难度最小,可以较便捷在现场应用,但还缺少针对的研究成果来指导现场。为此文中通过模拟试验方法,研究不同水平分支对单根水平接地体的影响,以此为基础,对方框带射线型接地体进行改造,获取最优的改造方案。

1 试验方法

1.1 试验场地与土壤情况

试验场地为中国电力科学研究院特高压交流试验基地的接地实验室,实验室内布置有直径8 m的半球形模拟槽,槽内填充土壤并埋设接地体,槽壁用作回流极。试验原理图见图1,试验电源为60 kV/10 kA冲击电流发生器,经调波电阻和调波电感后,将电流注入接地体;电流经槽内土壤散流,由槽壁回流至冲击电流发生器低压端。试验使用弱阻尼电阻分压器测量注入点电压,其分压比为115.7:1;Pearson线圈用于采集回流极电流波形,灵敏度为0.01 V/A。将Pearson线圈经绝缘固定在回流线上,回流波形即为注入接地装置的电流波形。以半球形金属壳作为回流极模拟无穷远处大地,使用分压器测量注入点电位时,分压器的参考点选择为半球形金属壳。由于半球形模拟槽的尺寸较小,金属外壳并不能完全代表无穷远处的零电位面,零电位面的移近,会使测量结果偏小,但满足工程应用要求^[9]。

单一介质、均匀的土壤情况较为少见,大部分土壤情况都可归纳为两层或多层土壤模型,为此笔者在模拟槽内布置双层土壤用于试验。由于冲击电流发生器的额定电压相对较低,其最高充电电压为60 kV,为减小放电回路阻抗,以产生更大幅值的电

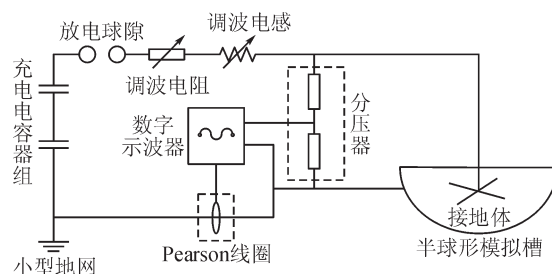


图1 模拟试验原理图

Fig. 1 Experiment diagram

流,同时兼顾水平双层土壤模型,半球形模拟槽中下层媒质为电阻率较低红色黏土,上层媒质为0.25 m厚的细湿沙。电气性能试验试品槽,用于测量土壤电阻率见图2。试验时取某一层土壤样品,填充在试品槽中并压实,保证土壤与内、外电极接触良好。将可调压的50 V交流电源施加在内电极与外电极之间,采用万用表测量回路电流以及内电极与外电极之间的电压,从而得到试品槽的电阻,进而求取土壤样品的电阻率。多点取样测量,求得各层土壤的平均土壤电阻率。试验时所测土壤情况为:上层土壤 $\rho_1=770 \Omega \cdot \text{m}$,上层土壤厚度0.25 m;下层土壤 $\rho_2=28 \Omega \cdot \text{m}$ 。为防止细沙水分挥发,保证土壤电阻率维持在稳定范围,阶段试验完成后用塑料薄膜盖住模拟槽。

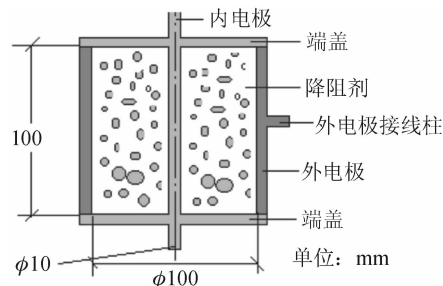


图2 土壤电气性能试验试品槽

Fig. 2 Soil electrical performance test tank

1.2 试验电极情况

实际铁塔的方框带射线接地体中,方框边长一般为8~15 m,射线长度0~60 m^[20]。当模拟槽的半径大于接地装置模型对角线的两倍时,金属模拟槽壁基本不会影响模型的电流场分布,即模拟试验电极尺寸不应超过模拟槽直径的1/4倍^[20]。考虑模拟槽直径限制,设置水平接地体试验模拟比 $n=30:1$,方框带射线型接地体试验模拟比 $n=50:1$ 。单根水平接地体改造见图3,方框带射线型接地体改造见图4。采用直径0.8 mm的细铁丝制作接地体,埋深0.016 m,换算后的埋深分别为0.48、0.8 m,试验时对水平接地体一端或方框4个端点注流。

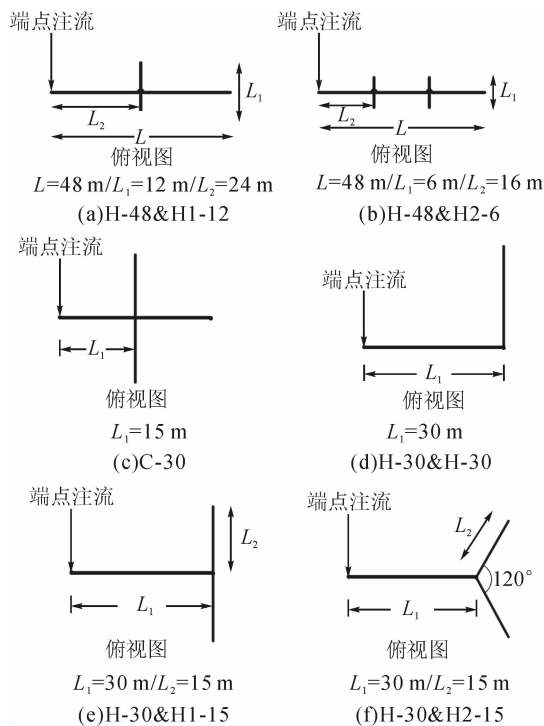


图3 水平接地体改型措施

Fig. 3 Restructuration of horizontal grounding device

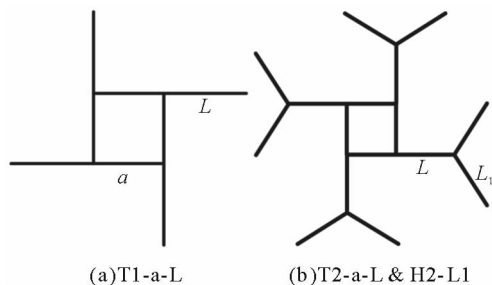


图4 方框带射线型接地体改型措施

Fig. 4 Restructuration of box grounding device

2 水平接地体改型效果

针对长度60 m的单根水平接地体H-60,研究不同水平分支的影响,从减弱电感效应和增强火花效应的角度来改进水平接地体H-60。要减小大尺寸水平接地体电感效应,可在接地体总长度相等的前提下,将水平接地体拆分为多个长度相对短小的接地体的组合型式,以降低水平接地体的本体电感。水平射线上的流散电流分布呈现出较强的端部效应,从而致使其端部出现强烈的火花放电。可在接地体端部增加一定水平分支,增强其火花放电通道,从而降低冲击接地电阻。但上述改型还存在一定的屏蔽效应,会增大接地体冲击接地电阻,具体降阻效果还需模拟试验来考察。

水平接地体改型位置以及角度的影响曲线见图5,试验时注入各接地体的冲击电流的波前时间

都在0.3~0.4 μs 之间,经换算后为9~12 μs 。相较而言,改型接地体H-30&H2-15降阻效果最好,而接地体C-30的降阻效果最差。与未改型前相比,接地体H-30&H2-15在相同峰值冲击电流作用下的冲击接地电阻的相对减小量最高可达到22%,降阻效果主要表现在峰值范围10~90 kA的冲击电流作用下。采用分支呈120°三段式结构进行改型后,相当于出现2个终端导体段,端部效应致使2个终端导体段的流散电流较大。通过改型后,相当于增加了一个火花放电的通道,有利于增大接地体的等效半径,因此这一改型具有较好的降阻效果。同时,夹角为120°的分支之间距离相等,因此这一结构可显著减小分支导体之间屏蔽效应对流散电流的影响。

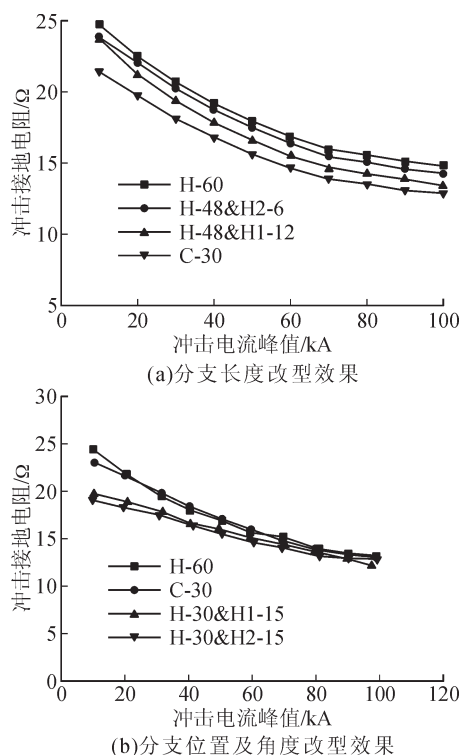


图5 水平接地体改型前后的冲击特性曲线

Fig. 5 Impulse characteristics of horizontal grounding device before and after restructuring

3 方框带射线型接地体改型效果

根据单根水平接地体改型的降阻效果,对T2-12-44、T2-12-36、T2-12-28等不同方框带射线型接地体进行结构改型。每一接地体水平射线采用2种改型方案,改型前后射线总长不变,参数见表1,其他尺寸与前相同。试验时注入各接地体的冲击电流的波前时间都在0.3~0.4 μs 之间,经换算后为15~20 μs 。

3.1 改型前后冲击特性的比较

各接地体冲击特性曲线见图6,比较可知:①改型前不同射线长度的接地体,其冲击接地电阻随射

表1 改型尺寸

Table 1 Restructuration size

改型前	改造后	真型电极尺寸/m
T2-12-44	T2-12-28&H2-8	$L_1=28/L_2=8$
	T2-12-20&H2-12	$L_1=20/L_2=12$
T2-12-36	T2-12-20&H2-8	$L_1=20/L_2=8$
	T2-12-12&H2-12	$L_1=12/L_2=12$
T2-12-28	T2-12-20&H2-4	$L_2=20/L_2=4$
	T2-12-12&H2-8	$L_1=12/L_2=8$

线长度增大明显减小,说明加大接地体尺寸可降低接地电阻。但现有文献已说明射线长度存在有效长度,当射线长度增加到一定程度后,其降阻效果大打折扣;②改型后,大多数接地体冲击接地电阻降低,少数接地体基本维持不变,降阻效果是由火花效应与屏蔽效应共同作用。针对不同射线长度的接地体选取不同的改型方案,T2-12-44改型为T2-12-20&H2-12;T2-12-36改型为T2-12-12&H2-12;T2-12-28改型为T2-12-20&H2-4。

3.2 改型后的散流分布

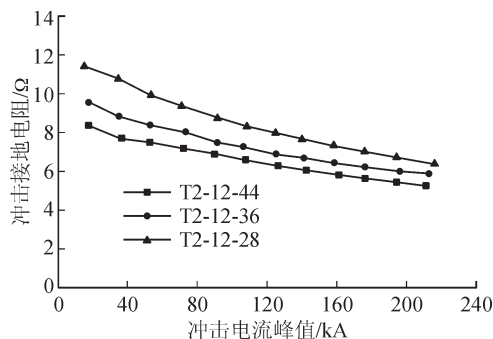
针对3种接地体T2-12-44、T2-12-36、T2-12-28以及T2-12-44的改型接地体T2-12-20&H2-12,文中测量了其水平射线上的纵向电流。线圈布置方式见图7,接地体T2-12-36、T2-12-28水平射线上的布置方式与T2-12-44相同,只是线圈个数减小为4个和3个,3种接地体的线圈间距分别为0.22、0.225、0.23 cm。接地体T2-12-20&H2-12上的线圈间距见图7,导体段3由3段导体构成,长度分别为6、8、8 cm。

根据纵向电流测量结果,可推导每一导体段的流散电流,见表2。比较接地体T2-12-44及其改型接地体T2-12-20&H2-12上的流散电流可知,由于端部效应,改型后的第4段导体上流散的电流显著增大,该导体段附近的火花放电加强,因此冲击接地电阻明显减小。接地体T2-12-36射线上的流散电流分布原本比较均匀,对其进行改型后端部效应将加强火花放电,改型后冲击接地电阻有一定的减小,但电极T2-12-28的射线相对较短,受中部方框屏蔽效应的影响,其改型前端部效应就已经非常突出,因此改型后的降阻效果并没有T2-12-44、T2-12-36的效果明显。

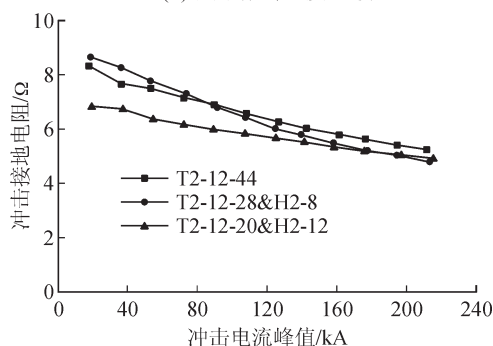
4 结论

文中通过不同接地体模拟试验,研究水平分支对不同接地体冲击特性的影响,取得如下结论:

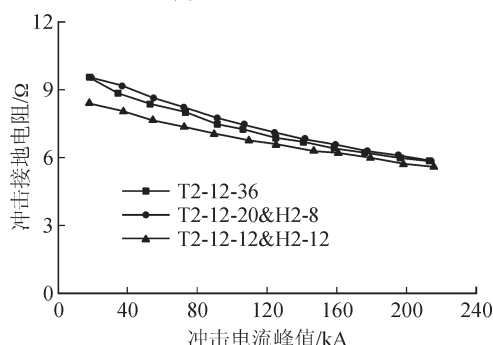
1)由于火花效应与屏蔽效应的影响,对于单根水平接地体,分支呈120°三段式结构的降阻效果



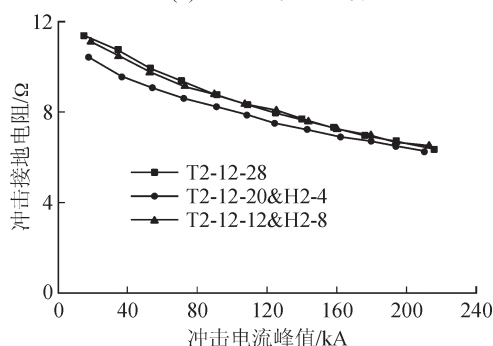
(a)不同射线长度比较



(b)T2-9-33改型比较



(c)T2-9-27改型比较



(d)T2-9-21改型比较

图6 方框射线型接地体改型前后冲击特性曲线的比较

Fig. 6 Impulse characteristics of box grounding device before and after restructuring

最优;

2)与简单的方框带射线型接地体相比,在射线末端添加水平分支,且使分支呈120°的三段式结构不仅可减小电感效应,而且其分支端部上流散的电流增大,火花放电更为强烈,有利于降低装置的冲击接地电阻,平均降阻百分比可达10%。

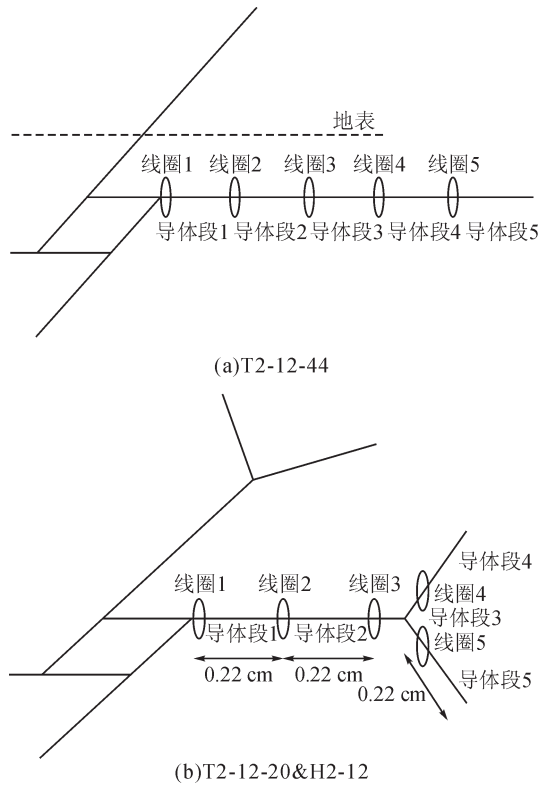


图 7 线圈布置图

Fig. 7 Arrangement of current sensor

表 2 散流分布数据

Table 2 Data of the flow distribution

导体	T2-12-44		T2-12-20&H2-12	
	电流/A	比重/%	电流/A	比重/%
1	5.5	23.91	5.0	23.81
2	4.9	21.30	4.0	19.05
3	2.9	12.74	2.3	11.11
4	3.7	15.94	4.7	22.22
5	5.7	24.64	5.0	23.81

导体	T2-12-36		T2-12-28	
	电流/A	比重/%	电流/A	比重/%
1	7.7	26.44	4.3	39.39
2	6.7	22.99	2.0	18.18
3	6.7	22.99	5.0	45.46
4	8.0	27.59	—	—
5	—	—	—	—

参考文献:

[1] 邓长征, 周文俊, 魏绍东, 等. 电感效应与火花效应对接地体及其周围土壤雷电冲击特性的影响分析[J]. 高电压技术, 2015, 41(1): 56-62.

DENG Changzheng, ZHOU Wenjun, WEI Shaocong, et al. Influence analysis of inductance effect and spark effect on lightning impulse characteristics of grounding conductors and its ambient soil[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(1): 56-62.

[2] 司马文霞, 李晓丽, 袁 涛, 等. 不同结构土壤中接地网冲击特性的测量与分析[J]. 高电压技术, 2008, 34(7): 1342-1346.

SIMA Wenxia, LI Xiaoli, YUAN Tao, et al. Measurement and analysis of impulse characteristics of grounding grids in different soil structures[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(7): 1342-1346.

[3] 张 波, 余绍峰, 孔维政, 等. 接地装置雷电冲击特性的大电流试验分析[J]. 高电压技术, 2011, 37(3): 548-554.

ZHANG Bo, YU Shaofeng, KONG Weizheng, et al. Experimental analysis on impulse characteristics of grounding devices under high lightning current[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(3): 548-554.

[4] 韩学民, 夏长征, 喻剑辉, 等. 杆塔接地体冲击电位分布特性的模拟试验[J]. 高电压技术, 2011, 37(10): 2464-2470.

HAN Xuemin, XIA Changzheng, YU Jianhui, et al. Simulation experiment on potential distribution for grounding electrode of transmission tower under impulse current[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(10): 2464-2470.

[5] 邓长征, 杨迎建, 童雪芳, 等. 接地装置冲击特性研究分析[J]. 高电压技术, 2012, 38(9): 2447-2454.

DENG Changzheng, YANG Yingjian, TONG Xuefang, et al. Impulse characteristic analysis of grounding devices[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(9): 2447-2454.

[6] BELLASCHI P L, ARMINGTON R E, SNOWDEN A E. Impulse and 60-cycle characteristics of driven grounds - II[J]. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, 1942, 61(6): 349-363.

[7] 唐世宇, 莫文强, 周艳玲. 高土壤电阻率地区变电站接地处理[J]. 高电压技术, 2006, 32(3): 121-122.

TANG Shiyu, MO Wenqiang, ZHOU Yanling. Grounding treatment in substation in high soil resistivity area[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(3): 121-122.

[8] 姚天中, 王巨丰. 基于回填土物理改良地网降阻技术-换土法接地电阻计算分析[J]. 广西电力, 2007(3): 81-82.

YAO Tianzhong, WANG Jufeng. Grounding resistance calculation of soil-exchanging method based on resistance reduction technology of backfilled soil[J]. Guangxi Dianli, 2007(3): 81-82.

[9] MOUSA A M. The soil ionization gradient associated with discharge of high currents in concentrated electrodes[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1994, 9(3): 1669-1677.

[10] LIEW A C, DARVENIZA M. Dynamic model of impulse characteristics of concentrated earths[J]. Proceedings of the Institution of Electrical Engineers, 1974, 121(2): 123-135.

[11] 邓长征, 杨迎建, 董晓辉, 等. 接地装置冲击大电流试验系统的研制及杆塔接地冲击特性测试[J]. 高电压技术, 2013, 39(6): 1527-1535.

- DENG Changzheng, YANG Yingjian, DONG Xiaohui, et al. Development of impulse high current testing system of grounding devices and testing of Tower grounding impulse characteristics[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(6): 1527-1535.
- [12] GERI A. Behaviour of grounding systems excited by high impulse currents: the model and its validation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1999, 14(3): 1008-1017.
- [13] 司马文霞, 雷超平, 袁涛, 等. 改善冲击散流时地中电场分布的接地降阻试验[J]. 高电压技术, 2011, 37(9): 2294-2301.
- SIMA Wenxia, LEI Chaoping, YUAN Tao, et al. Experimental study on grounding resistance reduction based on improved grounding electric field distribution induced by the diffuser of impulse current[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(9): 2294-2301.
- [14] 袁涛, 唐妍, 司马文霞, 等. 短导体对水平接地极冲击特性的影响[J]. 电工技术学报, 2015, 30(1): 177-185.
- YUAN Tao, TANG Yan, SIMA Wenxia, et al. Simulation analysis of the impact characteristic of grounding electrode based on the current shielding effect[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(1): 177-185.
- [15] 邓长征, 周文俊, 杨迎建, 等. 杆塔接地冲击特性的模拟试验研究[J]. 高电压技术, 2014, 40(9): 2917-2922.
- DENG Changzheng, ZHOU Wenjun, YANG Yingjian, et al. Simulation test study of grounding impulse characteristics of transmission line tower[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(9): 2917-2922.
- [16] 张宝平, 何金良, 康鹏, 等. 冻土冲击特性的试验研究[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(16): 143-147.
- ZHANG Baoping, HE Jinliang, KANG Peng, et al. Experimental study on impulse characteristics of frozen soil [J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(16): 143-147.
- [17] 曾嵘, 周佩朋, 王森, 等. 接地模块降阻特性的现场实验与仿真建模[J]. 高电压技术, 2010, 36(9): 2112-2119.
- ZENG Rong, ZHOU Peipeng, WANG Sen, et al. Field test on the reducing resistance natural of grounding module and building of its simulation model[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(9): 2112-2119.
- [18] 吴昊, 陈名铭, 张敏, 等. 接地模块冲击特性的试验研究[J]. 电瓷避雷器, 2013(3): 110-115.
- WU Hao, CHEN Mingming, ZHANG Min, et al. Experimental study on impact characteristics of grounding module [J]. Insulators and Surge Arresters, 2013(3): 110-115.
- [19] 何金良, 曾嵘. 电力系统接地技术[M]. 北京: 科学出版社, 2007: 163-164.
- HE Jinliang, ZENG Rong. Grounding technology of power system[M]. Beijing: Science Press, 2007: 163-164.
- [20] 何金良, 陈先禄. 输电线路杆塔接地装置冲击特性的模拟原理[J]. 清华大学学报(自然科学版), 1994, 34(4): 38-43.
- HE Jinliang, CHEN Xianlu. The simulation theory of impulse characteristics of transmission line Tower grounding device[J]. Journal of Tsinghua University(Natural Science Edition), 1994, 34(4): 38-43.
- 肖磊石(1987—), 男, 工学硕士, 工程师, 主要从事电力系统过电压与接地技术研究。