

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2106665

# 石墨接地体加接地布的接地阻抗特性研究

邢 远<sup>1</sup> 胡松江<sup>1</sup> 丁卫东<sup>2</sup> 朱毅男<sup>2</sup> 张国锋<sup>1</sup> 王 森<sup>3</sup>

(1.河南四达电力设备股份有限公司 许昌 461500; 2.西安交通大学 电力设备与电气绝缘国家重点实验室 西安 710049;  
3.国网陕西省电力公司电力科学研究院 西安 710100)

**摘要:** 接地电阻是衡量电力系统稳定性的重要参数。若接地系统埋在与电极接触不良的土壤中,简单石墨接地装置在复杂土壤环境中的降阻效果一般,难以达到工程要求。在接地装置的降阻原理的基础上提出用于增大散流面积的接地布降阻方法,并设计接地装置加接地布的接地方案。首先进行了仿真分析,在模拟试验平台中进行了石墨接地装置加接地布的接地实验,重点测量了接地布位置、埋设深度和冲击电流幅值对接地布降阻效果的影响。通过模拟试验和有限元仿真的对比研究接地电阻的变化情况,总结分析了各因素对于接地阻抗的影响规律,提出利用接地布降低接地电阻的辅助散流方案,为降低接地电阻提供参考。

**关键词:** 接地电阻;石墨接地体;接地布

中图分类号: TM89 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 470.4017

## Research on ground impedance characteristics of graphite ground body plus ground cloth

Xing Yuan<sup>1</sup> Hu Songjiang<sup>1</sup> Ding Weidong<sup>2</sup> Zhu Yinan<sup>2</sup> Zhang Guofeng<sup>1</sup> Wang Sen<sup>3</sup>

(1. Henan SIDA Electric Power Equipment Co., Ltd., Xuchang 461500, China;  
2. State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;  
3. State Grid Shaanxi Electric Power Research Institute, Xi'an 710100, China)

**Abstract:** Grounding resistance is an important parameter to measure the stability of power system. If the grounding system is buried in the soil with poor contact with the electrode, the resistance reduction effect of simple graphite grounding device in complex soil environment is general, which is difficult to meet the engineering requirements. Based on the principle of reducing resistance of grounding device, puts forward a method of reducing resistance of grounding cloth to increase the area of stray current, and designs a grounding scheme of grounding device plus grounding cloth. Firstly, the simulation analysis is carried out, and the grounding experiment of graphite grounding device with grounding cloth is carried out in the simulation test platform. Several factors such as the location of grounding cloth, the depth of embedding and the amplitude of impulse current are mainly measured. Through the comparison of simulation test and simulation, the change of grounding resistance is measured, the influence law of various factors on grounding resistance is summarized and analyzed, and the auxiliary current dispersion scheme of using grounding cloth to reduce grounding resistance is proposed, which provides reference for reducing grounding resistance.

**Keywords:** grounding resistance; graphite grounding electrode; grounding cloth

## 0 引 言

接地电阻是衡量接地系统有效性和可靠性的重要技术指标,降低接地电阻是提高线路耐雷水平的有效举措<sup>[1-3]</sup>。

近年来,由于石墨的耐腐蚀性、柔性和低趋肤效应,新型石墨基柔性接地材料研发成功并得到实际应用<sup>[4-7]</sup>,然而

当前我国对新型石墨接地极冲击降阻特性研究存在几个问题:一是对新型接地装置的研究缺乏理论支撑,二是新型接地装置降阻效果缺乏有效验证,三是新型接地装置缺乏准确的仿真分析模型和数值计算方法,降阻方案的选择具有盲目性,导致降阻设计和实际效果相差较大。

对于新型石墨接地装置的研究主要包括改变接地装置

的形状,或添加短导体的方式,利用接地装置本身的“屏蔽效应”和“火花效应”来降低接地电阻,此类研究较多<sup>[8-9]</sup>。而也有学者提出增大散流面积的方式降低接地电阻,重庆大学司马文霞团队提出增大接地装置入地点面积的方法进而降低接地电阻<sup>[10]</sup>;武汉大学阮江军团队提出长效无流失型接地布的辅助散流方案,提出可以在原有接地装置的下添加布状石墨接地装置而增大散流面积,降低接地电阻,但是都没有对接地布的接地特性进行系统研究。

本文采用 Comsol 建立了石墨基柔性接地装置添加石墨基柔性接地布(简称接地布)的有限元仿真模型,分析注入电流,接地布位置和接地布深度对接地布降阻效果的影响。根据相似性原理模拟试验平台,采用控制变量的方法测量接地布在不同位置、不同电流、不同深度下的接地电阻,最终得出本文实验条件下接地布布置方式的最优方案,为接地装置添加接地布的工程设计提供参考。

### 1 接地布降阻原理及方案设计

单根水平接地体的散流示意图如图 1 所示,电流经由接地装置流入土壤,雷电流包括 0~200 kHz 多种频率成分,而电流频域宽度由波前时间影响,波前时间只有数微秒,因此雷电流波前部分主要是高频部分。

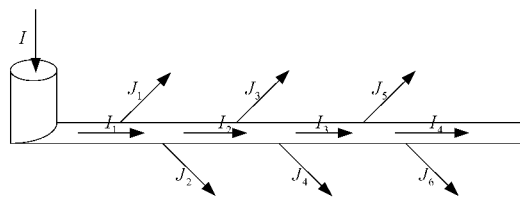


图 1 水平接地体散流示意图

研究表明,接地体的散流特性与电流频率有关,低频时表现出较强的“端部效应”,即由于接地体中间部分电流线的屏蔽效应,电流更倾向于从接地体两端流出,高频下,“端部效应”减弱,但端部仍然大于中间部分,无论何种频率下,由于屏蔽效应和端部效应的存在,接地体的散流总会有限制。接地布即为布状结构的石墨接地材料,与接地装置一起使用,放置在接地装置下部,电流经由接地体再经过接地布流入土壤,材料相同,散流面积增大,从而增大了接地体有效散流长度,降低接地电阻。由于低频和高温下,不同部分散流比例不同,考虑到屏蔽效应,所以接地布的布置位置较为重要,一般包括在接地布的端部和中部,方案设计如图 2 所示。

### 2 接地布仿真分析

在有限元仿真软件 Comsol 中建立接地布的仿真模型,使用插值函数和分段函数表示土壤的非线性,临界击穿场强采用 Mouse 学者提出的  $300 \text{ kV/m}^{11}$ ,土壤的接触电阻采用等效涂层的方法处理<sup>[12]</sup>,无穷远处边界采用截断

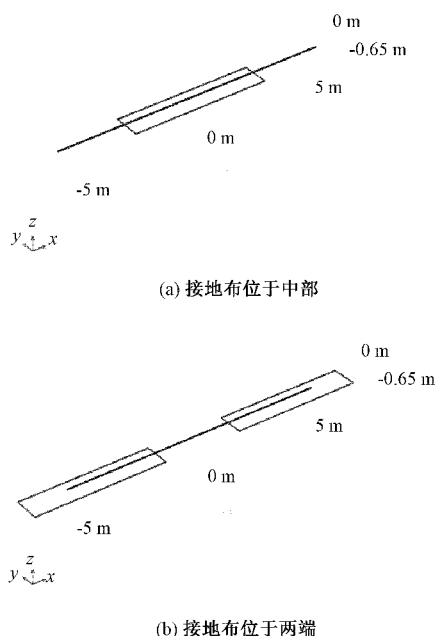
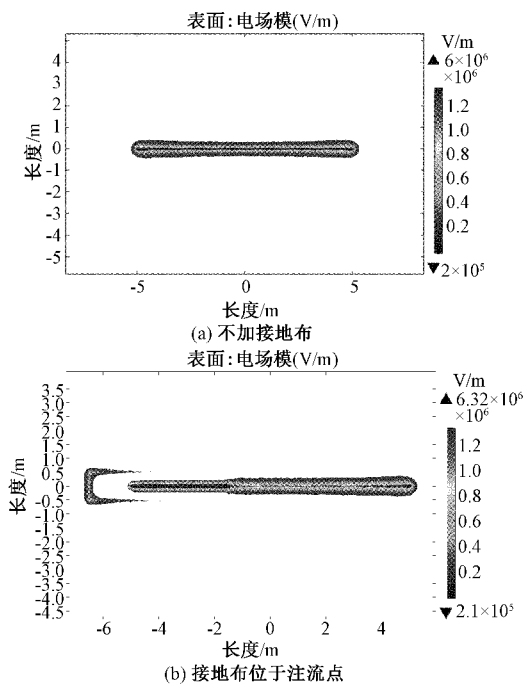


图 2 接地布方案设计示意图

法,用软件中自带的球的坐标变换搭建仿真模型,仿真冲击电流在接地体和接地布表面的分布及散流情况,掌握接地布的最佳铺设位置和铺设尺寸,采用有限元模型分析散流效果。

#### 2.1 接地布位置仿真

水平接地体的散流特性研究表明,由于“屏蔽效应”的存在使得接地体的散流呈现出“端部效应”的效果。不同接地布位置时的散流效果不同。注流点在首部,接地布位置不同时的仿真图如图 3 所示。



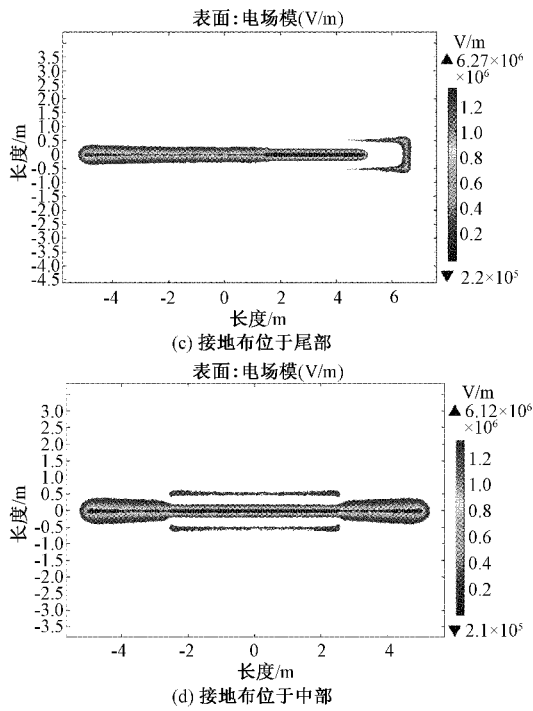


图 3 接地布位置仿真

仿真图分析可得,与未放置接地布相比,接地布存在的位置单根水平接地体的电场强度显著增大,单根水平接地体在接地布放置位置的火花区域体积减小,由于电流从接地布散入大地,接地体加接地布的总体火花区域相比之前增大,接地电阻降低。不同位置对比可知,由于水平接地体的“端部效应”的影响,接地布位于两端的作用效果更明显。接地布位于中间时,虽然可以增大中部位置的场强,但是由于屏蔽效应的存在,电流经由注流点之后仍然倾向于从端部流入大地,此时接地布效果较差。位于注流点与尾部相比较,由于水平接地体的散流注流点>尾部>中部,从场强与火花区域体积可以观察,在注流点的效果好于尾部。

2.2 冲击电流注入位置仿真

影响散流的主要因素是接地体的屏蔽效应和端部效应,文献表明,在频率场和电流场的研究中注流点的散流最多,对于不同注流位置,接地体的长度与屏蔽效应可能导致雷电流的高频段散流中末端散流要高于中部散流,在端部注流时可以看出,接地布在尾端的效果比在中部的效果更明显。所以对注流点在中部时加接地布展开研究,与端部主流对比,保证接地布的尺寸,土壤环境相同,中部注流时接地布位于端部和注流点附近时仿真图如图 4 所示。

与端部注流比较,中部注流时接地布位于端部时的散流较为对称,与端部注流相似,接地布布置位置由于散流较好,相较于不放置接地布时接地体本身火花区域变小但场强变大,接地布在中部时效果更为明显,靠近注流点时火花区域体积变小场强增大更为明显,相对于端部注流接地布在中部时场强增大明显,即注流点的接地布效果更好,由最

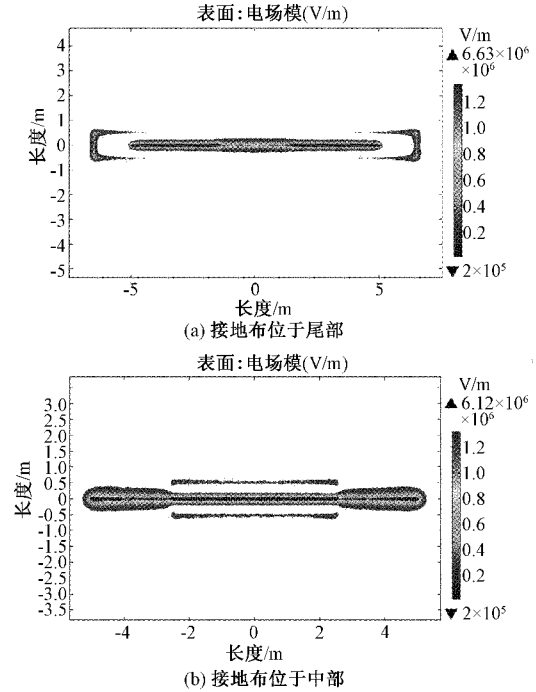


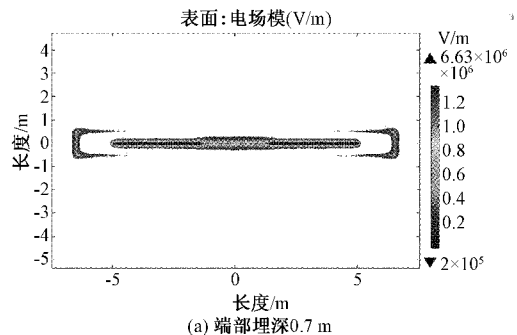
图 4 冲击电流注入位置仿真

大场强分析可知,中部注流时散流效果好于端部注流时的散流效果。

2.3 接地布深度仿真

接地布水平铺设在接地体下两者配合使用,工程中由于土壤条件不同,水平接地体与接地布之间常常会有间隙存在,接地体埋深 0.6 m,接地布一般不与接地体直接接触,即接地布埋深大于 0.6 m,从整个无限域来看,接地布的宽度可以忽略,所以首先要考虑埋设深度对水平接地体散流的影响,接地布与水平接地体的土壤击穿是否对其辅助散流有所影响,当距离较大时接地布的散流作用是否能有效发挥。其次要考虑到接地布与水平接地体之间的屏蔽效应,当两者距离为一定值时存在屏蔽效应,屏蔽效应与辅助散流哪个占据主导地位,所以对中部注流时仿真,改变埋设深度的仿真如图 5 所示。

接地布埋设在中部还是端部,研究表明埋设深度对接地体本身影响较小,仿真可见,接地布增大了布置部分的场强,但深度对其影响不同。接地布位于端部时,埋设深度增加电场模最大值增加,此时冲击电流除了经由土壤流散还



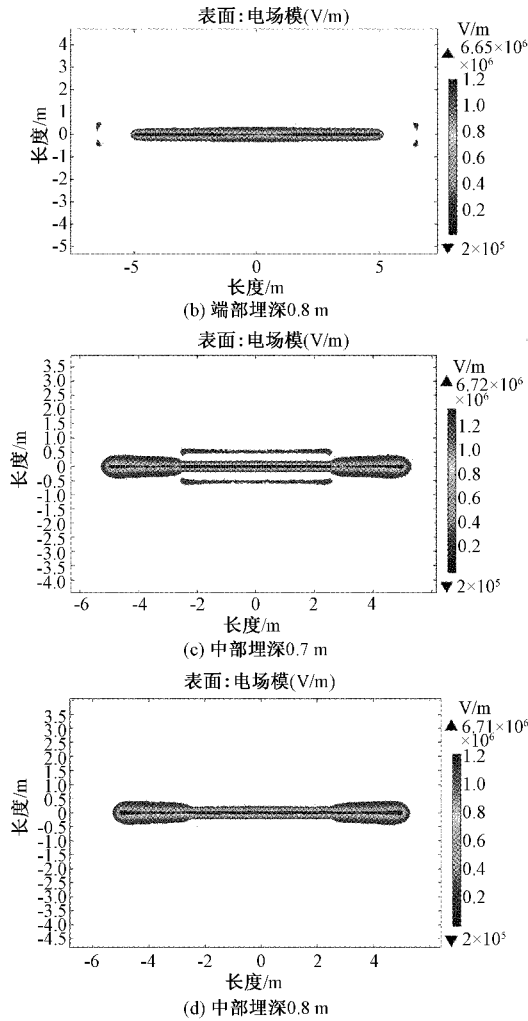


图 5 接地布深度仿真

经由接地布流入大地,冲击接地电阻下降。而接地布位于中部时,埋设深度增加,电场模最大值反而减小,此时注流点的电流较大,接地布与水平接地板本身的屏蔽效应较强,屏蔽效应导致电流更多从土壤中流散,接地布并没有有效发挥作用,所以电场模反而减小。中部与端部相比较,中部的接地布深度影响更大,因为注流点在中部时,中部的电流较大,与接地布之间的屏蔽效应更明显,所以深度决定的距离影响较大,深度与距离之间存在最优解。

### 3 接地布试验平台搭建

#### 3.1 模拟试验原理

冲击接地模拟试验是基于电磁场理论和相似性原理为基础的一种可以近似反映实际冲击接地特性的近似方法,模拟试验和真型试验存在如下比例关系:

$$\rho_1 = \rho_2; E_{c1} = E_{c2}; V_1 = V_2; I_{M1} = n^2 I_{M2};$$

$$U_{M1} = n U_{M2}; \alpha_1 = \alpha_2; R_1 = R_2/n$$

其中,  $\rho$  为土壤电阻率;  $E_c$  为临界击穿场强;  $V$  为波速;  $I_M$  为冲击电流幅值;  $U_M$  为冲击电压幅值;  $\alpha$  为冲击系数;

$R$  为冲击接地电阻;下角标 1 表示实际系统;下角标 2 表示模拟系统。

#### 3.2 冲击模拟试验平台

如图 6 所示为模拟试验平台,包括冲击电流发生器、试验容器、石墨接地装置和测量系统。

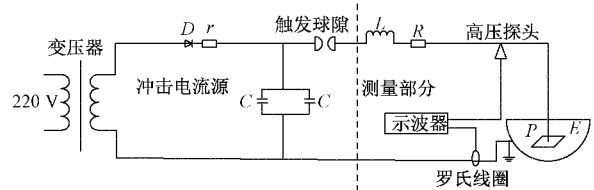


图 6 冲击模拟试验平台

图 6 中,  $D$  为高压整流硅堆;  $r$  为限流电阻;  $C$  为电容器组;  $L$  为调波电感;  $R$  为调波电阻;  $E$  为接地体;  $P$  为试验砂池。根据相似性原理推导的关系可得真型试验和模拟试验的比例可知,真型试验的冲击电流波头时间在  $1 \sim 10 \mu s$  之间,波尾时间为  $20 \sim 100 \mu s$  之间,模拟试验中的时间等比例缩小。

#### 3.3 工频试验平台

如图 7 所示为工频试验平台,冲击试验前先进性工频试验,测量接地装置加接地布的工频接地特性,探究接地布的工频降阻效果。

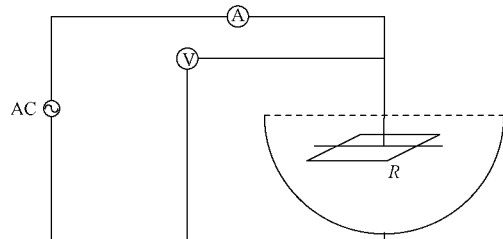


图 7 工频试验平台

用工频电源给接地装置供电,注流点在中部,注入工频电流,用万用表测量工频电流大小  $I$ ,测量接地装置与接地外壳之间的电压  $U$ ,测得的电压除以电流得到接地装置的接地电阻。

#### 3.4 土壤电阻率测量

由于试验容器为半球形砂池,采用如图 8 所示的方法测量土壤电阻率。

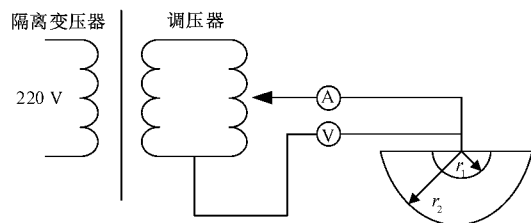


图 8 土壤电阻率测量

在砂池中心放入直径为  $0.1 \text{ m}$  的标准半球形铜球,利

用电压电流法测量其工频接地电阻  $R$ , 再利用工频接地电阻的计算公式推导出土壤电阻率, 可得:

$$\rho = \frac{\pi d U}{I} = \pi d R \quad (1)$$

式中:  $U$  为电压测量值;  $I$  为电流测量值;  $d$  为铜球直径。测量时加入隔离变压器, 消除电源中的干扰, 考虑到接触电阻的影响, 测量时保证半球与土壤的良好接触, 减少因接触不良带来的实验误差。

#### 4 接地布试验结果分析

接地布更多是与常规接地装置配合使用<sup>[13-15]</sup>, 通过接地布的辅助散流作用进而降低接地电阻, 所以对接地体散流特性展开研究, 结合接地体接地电阻的影响因素综合考虑, 主要因素包括注流点位置、冲击电流幅值、接地布位置和尺寸、埋设深度、土壤电阻率等。本节将研究不同因素对接地体接触电阻变化的影响, 通过试验定性和定量的分析接地布的降阻特性。

##### 4.1 接地布工频接地电阻测量

模拟实验中的缩比取为  $n=10$ , 对水平接地体加接地布进行测量, 为保证测量的准确性, 多次改变工频电源的输出电流, 得到不同电流下的工频接地电阻, 取平均值作为测量结果, 水平接地体加接地布的数据如表 1 所示。

表 1 接地极加接地布工频测量结果

布置方式	工频接地阻抗	工频接地电阻	下降程度/%
	模拟值/ $\Omega$	换算值/ $\Omega$	
没有接地布	261	26.1	—
首端埋深 0.65 m	216	21.6	17.2
中部埋深 0.65 m	188	18.8	27.9
尾部埋深 0.65 m	164	16.4	37.1
两端埋深 0.65 m	157	15.7	39.8
首端埋深 0.7 m	195	19.5	25.2
中部埋深 0.7 m	174	17.4	33.3
尾部埋深 0.7 m	160	16.0	38.6

通过对比发现, 接地布的加入可以有效降低工频接地电阻, 且接地布在首部即注流点时的降阻效果最好, 埋设深度影响较小, 综合来看, 接地布在首部埋设深度为 0.7 m 时降阻效果可达 39.8%, 说明在工频电流下, 接地装置添加接地布是一种有效的降阻方式。

##### 4.2 接地布冲击接地电阻测量

与研究火花刺的试验平台相似, 将接地装置换为水平接地极加接地布的型式, 土壤电阻率为  $300 \Omega \cdot \text{m}$ , 比例尺寸  $n=10$ , 接地布尺寸接地布长度为 0.5 m, 宽度为 0.1 m, 厚度为 0.002 m, 注流方式为中心注流或者端部注流, 最初埋深为 0.6 m, 在不研究深度对其影响时将接地布与水平接地极压实保证其良好接触, 不添加接地布时的冲击接地电

阻约为  $21.52 \Omega$ , 首先在不同冲击电流幅值下计算其冲击接地电阻, 测量结果如图 9 所示。

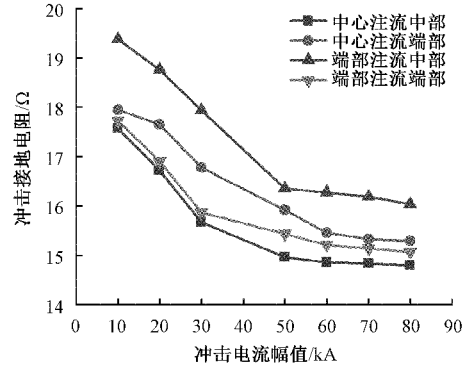


图 9 冲击电流幅值试验结果

由数据分析可知, 无论何种注流方式和接地布位于什么位置, 冲击接地电阻都随着电流幅值的增加而减小, 且在电流幅值约为 60 kA 时电阻下降达到饱和, 下降不再明显, 与不加接地布时的冲击特性相似, 即接地布并没有改变火花效应带来的冲击接地电阻降低。同种注流方式下, 接地布位于注流点的降阻效果较好, 因为注流点的电流较大, 经由接地布流散进入土壤的电流比例更多。不同注流方式下, 中心注流时接地布位于注流点相比于端部注流时接地布位于注流点效果较好, 因为端部注流时受端部效应的影响, 中部散流较弱, 电流本身流散受到影响, 中心注流时接地布位于注流点的降阻率最大可达 32%, 降阻效果明显。

对接地布的布置位置展开研究, 其余条件不变, 设水平接地板的长度为  $L$ , 接地布右侧边长距离水平接地极左端点的距离为变量  $x$ , 示意图如图 10 所示。

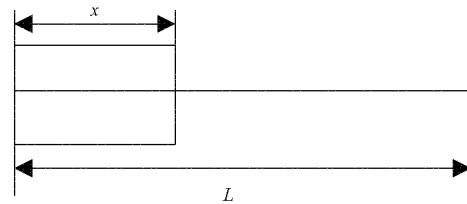


图 10 接地布间隔示意图

在不同冲击电流幅值下, 计算中心注流和端部注流时不同位置布置接地布的冲击接地电阻的大小, 试验结果如图 11 所示。

不同电流幅值下不同位置的接地布冲击接地电阻变化规律相似, 以 30 kA 为例分析, 中心注流时接地布中心点离中心注流点越近降阻效果越好, 因为注流点电流经由接地布流入土壤的比例较高, 而位于端点处电流较少, 此时冲击接地电阻下降不明显, 且整体呈现对称分布。对于端部注流来看, 冲击接地电阻随着接地布加入先减少, 而后接地布位于中部时接地电阻升高, 远离端部靠近尾部时接地电阻又开始下降, 但仍低于位于注流点的电阻, 因为端部注流时由于端部效果的存在电流大小首部 > 尾部 > 中部, 所以接

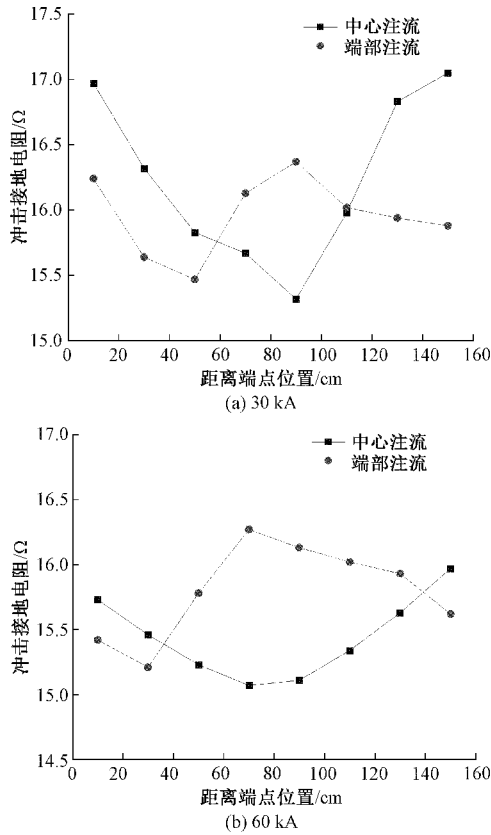


图 11 接地布布置位置试验结果

地布布置位置与此变化相对应,30 kA 时的接地布位于首部时的接地电阻与接地布位于尾部的接地电阻相差较小,可能是电流幅值较低时“火花效应”不明显,接地布的存在使得“屏蔽效应”显著。而电流为 60 kA 时的接地电阻大小首部<尾部<中部。综合来看,接地布的中心点距离电流注入点 10 cm 的范围内接地电阻最低。

接地布与接地装置埋入土壤中时由于两者之间空气间隙或者土壤颗粒的存在,两者并不能良好接触,而在无限大土壤中,接地布的宽度忽略不计,接地装置与接地布之间存在“屏蔽效应”的影响导致接地布不能良好的起到辅助散流的作用,接地体埋深为 0.6 m,以接地布与接地装置之间的间隔为变量,注流方式均为中心注流且接地布位于中部,计算冲击接地电阻与两者之间埋设间隔的关系,试验结果如图 12 所示。

试验结果分析可得,接地布本身的厚度对冲击接地电阻的影响较小,不同电流幅值下冲击接地电阻的变化规律相似,接地布与接地体间隔在 0.2~0.6 cm 之间时降阻效果较为明显,当间隔较小时接地电阻变化较小,此时由于“屏蔽效应”的影响导致接地布不能良好的发挥效果,当间隔大于一定值时随着间隔的增加冲击接地电阻基本不再发生变化,此时接地布不再承担辅助散流的效果,接地电阻与不加接地布时相差较小,从接地电阻不再发生变化的间隔来看,不同厚度的接地布对应距离不同,当间隔约为接地布

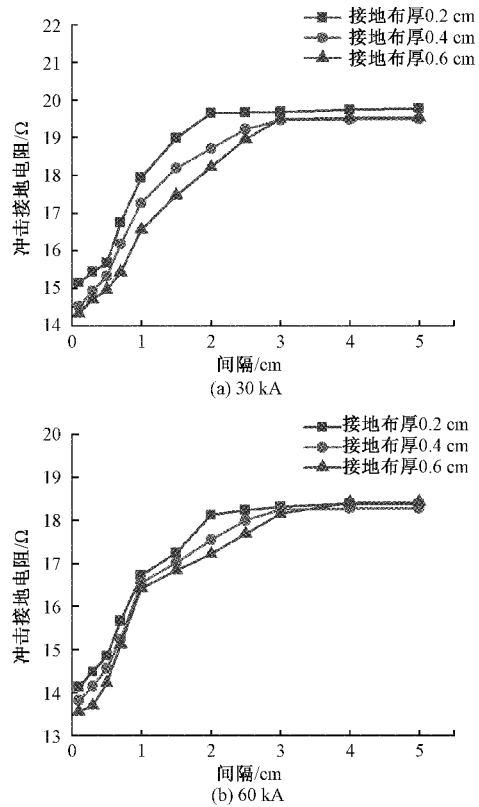


图 12 接地布与接地体间隔试验结果

厚度的 3/4 时达到电阻变化的饱和点,接地布与接地装置之间的间隔约为接地布厚度的 1~1.8 倍时降阻效果较好。

### 5 结 论

本文对石墨接地装置添加接地布的散流及降阻规律展开系统研究,首先分析了接地布的降阻原理,并根据工程应用设计了接地装置加接地布的接地方案。其次对石墨接地装置加接地布展开研究,包括工频下接地电阻测量、冲击电流下接地电阻的仿真与试验研对比验证以及不同接冲击电流幅值、不同布置位置、不同间隔下冲击接电阻的测量,得到如下结论。

1) 无论是工频下还是冲击下,石墨接地装置加接地布都可以有效降低接地电阻,工频下最大降阻率可达 37.8%,冲击下最大可达 32%,降阻效果明显。

2) 石墨接地装置加接地布的冲击降阻效果主要由注流点位置、冲击电流幅值、接地布布置位置和接地布与接地装置的间隔决定,接地布厚度本身对其影响较小,冲击电流幅值的影响与接地装置加火花刺影响相似。

3) 总体来看,火花刺位于注流点时的接地效果较好,且中心注流时的降阻效果好于端部注流时的降阻效果,接地布的中心点距离电流注入点 10 cm 的范围内为接地布布置的最优解。接地布与接地装置的距离不宜太远或太近,接地布与接地装置之间的间隔约为接地布厚度的 1~1.8 倍时降阻效果较好且间隔不超过接地布厚度的 4/5。

## 参考文献

- [1] 肖微,黄道春,阮江军,等. 石墨基柔性接地体与金属接地体冲击接地性能对比[J]. 高电压技术, 2018, 44(12):3808-3813.
- [2] 陈赛慧. 接地降阻材料雷电流冲击特性研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2016.
- [3] 张波,何金良,曾嵘. 电力系统接地技术现状及展望[J]. 高电压技术, 2015, 41(8):2569-2582.
- [4] 胡元潮,阮江军,肖微,等. 柔性石墨复合接地材料及其相关性能试验研究[J]. 高电压技术, 2016, 42(6): 1879-1889.
- [5] 张思寒,肖微,胡元潮,等. 柔性石墨接地体及其接头耐腐蚀特性[J]. 电网技术, 2017, 41(4):1357-1363.
- [6] 黄道春,陈家宏,谷山强,等. 石墨基柔性接地材料特性及其在防雷接地中的应用[J]. 高电压技术, 2018, 44(6):1766-1773.
- [7] 李景丽,李渊博,徐康,等. 基于薄壳理论的大型接地装置有限元模型[J]. 高电压技术, 2018, 44(5): 1572-1579.
- [8] 袁涛,雷超平,司马文霞,等. 提高接地极散流效率的冲击接地降阻分析[J]. 电工技术学报, 2012, 27(11): 278-284.
- [9] 李景丽,蒋建东,李丽丽. 针刺式接地装置降阻机制的仿真和试验研究[J]. 电网技术, 2013, 37(1): 211-217.
- [10] 司马文霞,李晓丽,袁涛. 考虑土壤非线性特性的接地网冲击特性分析方法[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(16):127-13.
- [11] MOUSA A M. The soil ionization gradient associated with discharge of high currents into concentrated electrodes[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1994, 9(3): 1669-1677.
- [12] TRIFUNOVIC J, KOSTIC M. Analysis of influence of imperfect contact between grounding elec surrounding soil on electrical properties of grounding loops [J]. Electrical Engineering, 2014, 96(3): 255-265.
- [13] 王伟贤,李钟慎. 10 kV 配电线路防雷改造探索[J]. 国外电子测量技术, 2019(12):107-110.
- [14] 张国锋,吕坤阳,张明磊,等. 石墨基柔性接地体动热性能优化试验研究[J]. 电子测量技术, 2020, 43(16): 17-21.
- [15] 吴育毅,彭敏放,黄欢,等. 应用恒电流暂态测量的接地网腐蚀检测方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(7):145-151.

## 作者简介

邢远,本科,工程师,主要研究方向为高电压接地技术。

E-mail:252688401@qq.com