

雷电流作用下铁件剩磁量的规律分析

柴健¹ 孙京²

(1. 湖北省防雷中心 武汉 430074; 2. 中国气象局武汉暴雨研究所 武汉 430205)

摘要:剩磁法是一种雷灾鉴定中判定是否发生雷击事故的方法,但标准中只给出判定的参考剩磁数据,其数据通用性有待斟酌。为了探究铁件剩磁量的规律,通过模拟雷电流的发生,选取一定的试样进行冲击测试后测量剩磁,得出了影响剩磁的主要因素有铁件材质、尺寸、所在位置、测量位置、雷电流大小、冲击条件、次数等,并得出 0.5~1.5 mT 区间的的数据同样可以作为判定依据。而当冲击次数为 5 次以后,由于铁件的剩磁累积效应,铁件的剩磁量逐步达到饱和。得到的结论为雷灾鉴定工作提供了一定的理论基础。

关键词:雷灾灾害; 剩磁; 雷电流; 模拟; 铁件

中图分类号: TM835.4 TN307 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 620.1010

Regularities analysis of the recidual magnetic of the iron casting under the lightning current

Chai Jian¹ Sun Jing²

(1. Hubei Lightning Protection Center, Wuhan 430074, China; 2. Hubei Key Laboratory for Heavy Rain Monitoring and Warning Research, Institute of Heavy Rain, China Meteorological Administration, Wuhan 430205, China)

Abstract: Recidual magnetic method is an important method in lightning calamity investigation which can determine whether lightning accident occurred, but the standard only provided the reference data of the recidual magnetic, the generality of the data must be considered again. In order to explore the regularity of the recidual magnetic of the iron casting, it chose some samples to make impulse test by simulating the occurrence of the lightning current, then measured the recidual magnetic and showed that the main factors which influence the recidual magnetic include the material, the size, the position of the iron casting, the position of the measurement, the amplitude of the lightning current, the impact condition, and the impact times. The results show that the data from 0.5mT to 1.5mT can also be the basis. And because of the cumulative effect by the iron casting, the recidual magnetic tends to be saturated after 5 times of the impact. It also provides a theoretical basis for lightning calamity investigation.

Keywords: lightning calamity; recidual magnetic; lightning current; simulate; iron casting

1 引言

自然界中的雷电流在极短的时间内高压放电,产生强大的电流,电流峰值通常为数万安培,放电的同时产生强烈的电磁辐射^[1]。如果不采取保护措施,大电流一旦通过建筑物内的导线将引发电器损坏、短路甚至发生爆炸火灾事故。常规雷电灾害的鉴定需要寻找证物,如雷击点、雷击痕迹、熔痕、雷电流通路^[2]。但雷电感应造成的损失往往不易发现证据,目前常采用剩磁法、金相法来判定事故现场是否发生了雷击。金相法主要对试样进行镶嵌、打磨、抛光、侵蚀等步骤,通过观察试样的金相组织来判定是

否发生了火灾雷击事故^[3]。剩磁法则相对于金相法简便的多,也可现场进行测量。由于电流的磁效应作用,在铁磁体上会永久保留一部分剩磁。因此当导线发生短路或雷击事故后,通过测量导线周围的杂散铁件上的剩磁来判断是否发生了雷击事故^[4]。

由于铁磁体的磁性规律比较复杂,对剩磁法进行定量的模拟研究很有必要。在雷灾鉴定中也通常依赖于标准规定的参考判定数据。科学家们对雷电灾害事故鉴定方法做了详细的说明^[5-9],并提出如何运用剩磁法来判定是否发生雷击事故的方法。朱宣儒等人^[10]对影响剩磁的主要因素进行了说明,列举了电流幅值、距离、磁导率等都是

收稿日期:2016-04

影响剩磁的重要因素,但具体有多少影响,有何规律未做研究。文献中还对几个雷灾事故现场进行了剩磁测试,得出了一些运用剩磁法的注意事项。但所给出的都是定性的经验结论,没有定量的数据支撑。

因此在对雷击灾害鉴定时,剩磁法的测量是一个重要的参考因素,而目前相关技术规范(GB 16840.2-1997 电气火灾原因技术鉴定方法与 QX/T 103-2009 中剩磁法的数据判定都是根据现场测量的经验数据得到的,没有具体的实验室数据作为判定依据。即使数据是实验室内得出来的,也未对实验的条件、方法、手段进行说明,判定数据的通用性有待证实。徐真等人^[11]运用剩磁法来监测雷电流的幅值,通过对改进的磁钢棒进行冲击测试,来测定磁钢棒的剩磁校正曲线,提高了单次雷电流的测量精度。研究的重点在于运用磁钢棒测量雷电流的幅值,而不是通过磁钢棒的剩磁量来判定是否发生雷击事故。国内也有诸多学者对雷电冲击及剩磁量做过相应的研究^[12-15]。因此在实验室条件下通过模拟雷电的发生,精确测量铁件剩磁量,为雷灾鉴定中剩磁量的数据判定区间给出相应的依据变得尤为重要。

通过采用冲击电流发生器、冲击电压发生器来模拟雷电的发生,改变充电电压大小、冲击次数、铁件所处位置、测量位置等对铁件的剩磁数据进行了测量比较,得出了剩磁数据的主要影响因素及数据判定范围,为雷灾鉴定工作提供了一定的理论依据。

2 试验方法及结果分析

选取同一批次生产的大、中、小号铁制夹子以及同一批次生产的图钉若干。采用上海亨通磁电科技有限公司生产的 HT-20A 型数字特斯拉计(测量范围为 0~200 mT,分辨率为 0.01 mT)对所有夹子及图钉进行剩磁测试,逐个挑选磁感应强度 < 0.5 mT 的样品作为试验备选。分别采用上海冠图防雷科技有限公司生产的 GIC150 8/20 μ s 冲击电流发生器(可输出 8/20 μ s 5~150 kA 兼容 10/350 μ s 2.5~50 kA,分辨率为 0.01 kA)及 GIV10 1.2/50 μ s 冲击电压发生器(可输出 1.2/50 μ s 1~10 kV,分辨率为 0.01 kV)进行短路测试,高低压两端用铜导线进行连接。将每一种类的试样分别固定于铜导线上及放置在铜导线附近 10 cm。设置冲击电流及冲击电压发生器各个充电电压等级(1~10 kV 每 1 kV 递增)进行冲击,冲击后待试样冷却,对其进行剩磁测试,记录数据结果。

2.1 冲击电压作用下剩磁测试结果

选取小号铁制夹子各 30 个。分为 10 组,每组取 3 个,置于铜导线上。测试前剩磁测试结果均为小于 0.5 mT。测试方法为将探针在样品表面各个位置各个方向搜索测量,记录稳定的最大值。用 GIV10 1.2/50 μ s 冲击电压发生器冲击 10 组不同充电电压等级的脉冲过电压后待样品冷却测试其剩磁。如表 1 所示为不同充电电压等级下处于雷电通道上的小号铁夹剩磁测试结果。

表 1 不同充电电压等级下处于雷电通道上的

| 冲击电压/kV | 小号铁夹剩磁测试结果 (mT) | | | |
|---------|-----------------|------|------|------|
| | 1号 | 2号 | 3号 | 平均值 |
| 1 | 0.21 | 0.33 | 0.22 | 0.25 |
| 2 | 0.23 | 0.18 | 0.27 | 0.23 |
| 3 | 0.41 | 0.29 | 0.36 | 0.35 |
| 4 | 0.19 | 0.37 | 0.25 | 0.27 |
| 5 | 0.37 | 0.44 | 0.34 | 0.38 |
| 6 | 0.46 | 0.38 | 0.31 | 0.38 |
| 7 | 0.38 | 0.26 | 0.17 | 0.27 |
| 8 | 0.27 | 0.17 | 0.29 | 0.24 |
| 9 | 0.19 | 0.45 | 0.36 | 0.33 |
| 10 | 0.23 | 0.34 | 0.37 | 0.31 |

由表 1 可知,在冲击电压作用下,铁件所呈现的剩磁很小,基本与冲击前的剩磁相近。平均值均在 0.5 mT 以下。这是因为冲击设备的内阻很高,达到 500 Ω ,因此在过电压作用下,通过导线的瞬时电流很小。根据长直导线通

以电流后在参考点处产生的磁场强度计算公式: $H = \frac{I}{2\pi a}$

(当 $I \gg a$ 时)其中 I 为导线中流过的电流, a 为参考点与长直导线的垂直距离, l 为长直导线的长度。磁场强度与电流大小成正比,因此其产生的磁场强度很小,并不能将附近的铁件完全磁化。随着冲击电压等级的升高,剩磁数据平均值在 0.23~0.38 mT 区间上下波动,均未超过 0.5 mT,说明冲击电压的高低对剩磁测试结果并没有太大的影响。因此在雷灾调查时如设备被过电压所损坏,用剩磁测试的方法并不能做出正确的判定。

2.2 冲击电流作用下剩磁测试结果

选取大、中、小号铁制夹子各 60 个,图钉 60 个。分为 10 组,每组取同一种类样品各 6 个,分别置于铜导线上 3 个及附近 10 cm 处 3 个。测试前剩磁测试结果均为小于 0.5 mT。用 GIC150 8/20 μ s 冲击电流发生器冲击 10 组不同充电电压等级下的脉冲电流后待样品冷却测试其剩磁。表 2~5 为不同充电电压等级下处于雷电通道上的各个样品剩磁测试结果。表 6 为 1 kV 充电电压下处于雷电通道上的小号铁夹各个位置的剩磁测试结果。如图 1 所示为不同种类样品处于雷电通道上的剩磁测试结果平均值对比,如图 2 所示为不同种类样品处于雷电通道附近的剩磁测试结果平均值对比,如图 3 所示为 1 kV 充电电压下 8/20 μ s 冲击电流波形。

2.2.1 测试位置、所处位置、铁件材料尺寸对结果的影响

由图 1、2 可知,在相同冲击条件下处于雷电通道上的剩磁要比处于雷电通道附近的剩磁大,且各个充电电压等级下剩磁结果变化起伏较大,在 2~10 mT 区间内变化,呈现极大值与极小值交替的周期变化。相对而言,处于雷电通道附近的剩磁结果就趋于稳定,

表2 不同冲击电压等级下处于雷电通道上的小号铁夹的剩磁测试结果 (mT)

| 冲击电压/kV | 1号 | 2号 | 3号 | 平均值 |
|---------|------|------|-------|------|
| 1 | 6.09 | 7.04 | 6.54 | 6.56 |
| 2 | 7.60 | 7.67 | 7.63 | 7.63 |
| 3 | 4.74 | 3.57 | 4.67 | 4.33 |
| 4 | 1.96 | 1.16 | 1.34 | 1.49 |
| 5 | 5.38 | 3.65 | 4.52 | 4.52 |
| 6 | 6.67 | 6.16 | 6.39 | 6.41 |
| 7 | 6.37 | 8.45 | 7.41 | 7.41 |
| 8 | 9.56 | 8.67 | 8.87 | 9.03 |
| 9 | 9.13 | 9.76 | 10.45 | 9.78 |
| 10 | 8.50 | 8.53 | 8.31 | 8.45 |

表5 不同充电电压等级下处于雷电通道上的图钉的剩磁测试结果 (mT)

| 冲击电压/kV | 1号 | 2号 | 3号 | 平均值 |
|---------|------|------|------|------|
| 1 | 1.03 | 0.99 | 1.04 | 1.02 |
| 2 | 1.24 | 1.18 | 1.33 | 1.25 |
| 3 | 1.53 | 1.64 | 1.68 | 1.62 |
| 4 | 1.34 | 1.19 | 1.13 | 1.22 |
| 5 | 1.68 | 1.70 | 1.74 | 1.71 |
| 6 | 2.03 | 2.21 | 2.16 | 2.13 |
| 7 | 2.11 | 2.13 | 2.38 | 2.21 |
| 8 | 2.23 | 2.26 | 2.33 | 2.27 |
| 9 | 2.41 | 2.46 | 2.48 | 2.45 |
| 10 | 2.37 | 2.38 | 2.37 | 2.37 |

表3 不同充电电压等级下处于雷电通道上的中号铁夹的剩磁测试结果 (mT)

| 冲击电压/kV | 1号 | 2号 | 3号 | 平均值 |
|---------|------|------|------|------|
| 1 | 4.16 | 4.33 | 5.07 | 4.52 |
| 2 | 5.82 | 6.07 | 6.23 | 6.04 |
| 3 | 8.66 | 8.43 | 7.94 | 8.34 |
| 4 | 7.37 | 7.86 | 7.42 | 7.55 |
| 5 | 6.38 | 6.26 | 6.41 | 6.35 |
| 6 | 5.62 | 5.33 | 5.26 | 5.40 |
| 7 | 2.63 | 2.03 | 2.69 | 2.45 |
| 8 | 4.52 | 5.23 | 5.68 | 5.14 |
| 9 | 6.82 | 6.93 | 7.13 | 6.96 |
| 10 | 8.74 | 9.06 | 9.24 | 9.01 |

表6 1 kV 充电电压下处于雷电通道上的小号铁夹各个位置的剩磁测试结果 (mT)

| 位置 | 1号 | 2号 | 3号 | 平均值 |
|----|------|------|------|------|
| 边缘 | 6.09 | 7.04 | 6.54 | 6.56 |
| 中心 | 2.38 | 3.16 | 2.57 | 2.70 |

表4 不同充电电压等级下处于雷电通道上的大号铁夹的剩磁测试结果 (mT)

| 冲击电压/kV | 1号 | 2号 | 3号 | 平均值 |
|---------|------|-------|------|------|
| 1 | 2.16 | 2.35 | 2.90 | 2.47 |
| 2 | 4.19 | 3.38 | 4.24 | 3.94 |
| 3 | 6.35 | 5.72 | 5.29 | 5.79 |
| 4 | 9.85 | 10.06 | 8.47 | 9.46 |
| 5 | 5.84 | 6.03 | 6.14 | 6.00 |
| 6 | 5.23 | 5.46 | 5.57 | 5.42 |
| 7 | 4.45 | 3.64 | 3.16 | 3.75 |
| 8 | 2.41 | 3.37 | 2.23 | 2.67 |
| 9 | 5.67 | 4.27 | 4.68 | 4.87 |
| 10 | 9.45 | 7.01 | 8.52 | 8.33 |

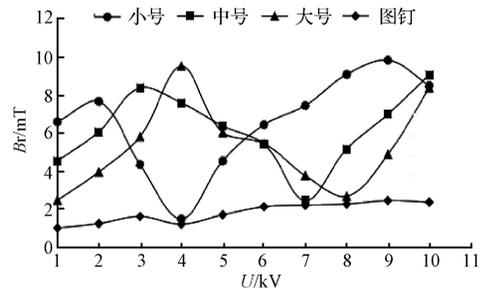


图1 不同种类样品处于雷电通道上的剩磁测试结果平均值对比

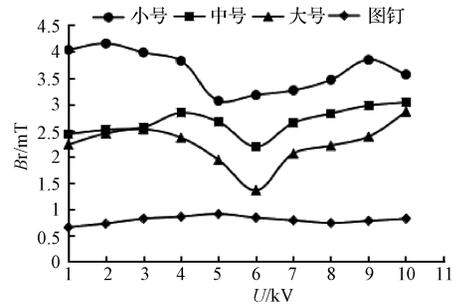


图2 不同种类样品处于雷电通道附近的剩磁测试结果平均值对比

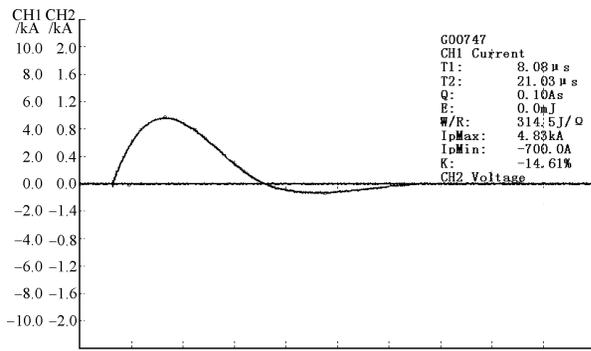


图3 1 kV 充电电压下 8/20 μ s 冲击电流波形

剩磁数据基本在 1~2 mT 之间变化。处于雷电通道上的铁夹剩磁集中在 5 mT 附近,起伏较大,处于雷电通道上的图钉剩磁集中在 1.5 mT。而处于雷电通道附近的铁夹剩磁集中在 3 mT 附近,起伏较小,处于雷电通道附近的图钉剩磁集中在 0.8 mT。这是因为处于雷电通道上的铁件相当于和主雷电通道并联,雷电流在经过主通道时,铁件处于主通道产生的磁场中,相对于附近 10 cm 处的铁件,产生的磁感应强度要略大。根据毕奥-萨伐尔定律,长直导线在其附近空间内某点磁场强度大小与电流大小成正比,与垂直距离成反比。因此,处于雷电通道上的铁件剩磁要比附近的铁件大。

由表 6 可知,铁夹的边缘位置较中心位置剩磁要大,边缘平均值为 6.56 mT,中心位置只有 2.70 mT。这是因为磁力线总是集中在铁磁质物体的边缘,尖端处。这一区域的磁畴排列分布较明显,因而剩磁也就越大。

而根据图 2 的结果可知,尺寸越大的铁件,其剩磁越小。小号铁件剩磁在 3~4.2 mT 之间,中号铁件剩磁在 2~3 mT 之间,大号铁件剩磁在 1.3~2.8 mT 之间。这可能是由于尺寸小,磁畴排列相对集中,从宏观上体现为剩磁数据偏大。由于铁夹属于同一批次生产的,材料属性趋于一致,固认为其磁导率接近一致。而图钉与铁夹的金属成分不同,因而磁导率相差较大,因此不能与铁夹比较剩磁数据。

2.2.2 充电电压大小对结果的影响

由表 2~5 可知,随着充电电压等级的升高,铁夹的剩磁呈现高低起伏的趋势。处于雷电通道上的小号铁夹在 1~10 kV 充电电压等级下,剩磁数据在 1.49~9.78 mT 之间变化。处于雷电通道上的中号铁夹在 1~10 kV 充电电压等级下,剩磁数据在 2.45~9.01 mT 之间变化。处于雷电通道上的大号铁夹在 1~10 kV 充电电压等级下,剩磁数据在 2.47~9.46 mT 之间变化。而图钉由于磁导率较低,所呈现的剩磁较小,因而随着充电电压等级的升高,变化趋势并不明显。处于雷电通道上的图钉在 1~10 kV 充电电压等级下,剩磁数据在 1.02~2.45 mT 之间变化。剩磁之所以呈现高低起伏的趋势,是因为铁磁质具有磁滞的特性,刚开始随着电流的增加,其剩磁逐渐增大。

由图 3 可以看出,由于冲击电流的反峰值达到 14.61%,反向电流的变化使得铁件被反向磁化而被部分消磁,因此会出现一个剩磁的极小值。小号、中号、大号尺寸铁夹分别在 4 kV、7 kV、8 kV 的充电电压等级下出现了剩磁极小值。当继续增加电流时,铁件会趋于磁饱和,剩磁增加缓慢。因此会出现一个剩磁的极大值。小号、中号、大号尺寸铁夹分别在 9 kV、10 kV、10 kV 的充电电压等级下出现了剩磁极大值。

2.2.3 多次冲击电流作用下剩磁测试结果

选取小号铁夹 30 只,分为 10 组,每组 3 个置于铜导线上。测试前剩磁测试结果均为小于 0.5 mT。用 GIC150 8/20 μ s 冲击电流发生器连续冲击 10 组,每组的充电电压均为 1 kV,待样品冷却测试其剩磁,取每组 3 个数据的平均值。如图 4 所示为冲击次数与剩磁数据的关系示意。

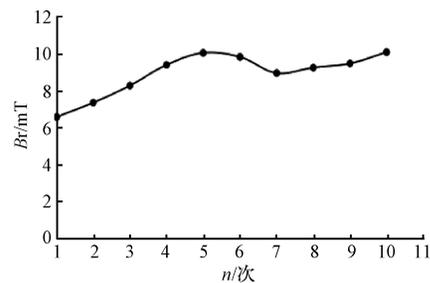


图4 冲击次数与剩磁数据的关系

由图 4 曲线可知,前 5 次冲击,剩磁数据逐渐增大,当冲击次数在 5 次以后,剩磁数据趋于稳定,在 9~10 mT 左右。说明铁件具有剩磁累积效应,前几次冲击并没有达到最大的剩磁量。当逐渐增加冲击次数,磁化逐渐达到饱和,再增加冲击次数已无法再明显增加剩磁量。

2.2.4 剩磁数据的判定

根据 QXT 103-2009 雷电灾害调查技术规范中对雷电灾害剩磁法的数据判定,雷电通道的杂散铁件、钉类、钢筋、金属管道的剩磁数据均在 1.5~10 mT 之间。而根据上文的试验数据,图钉的剩磁数据在 0.5~2 mT,与规范中的推荐数据不相符。这可能是由于图钉的磁导率较小,因而所测出的剩磁数据较小。因此规范中参考的 1.5~10 mT 的数据判定区间不能适用于所有的杂散铁件、钉类等。而当设备因雷击过电压损坏,且设备内阻较高时,通过剩磁测试的方法并不能得出正确的判定。这对雷灾调查方法提出了一个新的难点。

3 结论

本文模拟雷电冲击条件下,对铁件的剩磁数据进行了测试,得出了影响剩磁数据变化的主要因素有:

1) 在同一次雷击过程中,铁件材料、尺寸、所处位置、测试位置不同均会导致剩磁结果不同。相同磁导率的铁件,尺寸越大,其剩磁越小。剩磁数据的大小与铁件所处

雷电通道的位置成反比,离雷电通道越近,剩磁越大。在铁件的尖端及边缘处,测试的剩磁数据较其他位置大。

2)不同冲击条件下,同一材质的铁件剩磁数据也不同。在冲击电流作用下,随冲击电流的增大,剩磁测试数据呈现高低起伏的趋势,这是由于铁件的磁滞特性及冲击电流反峰值的存在而导致的现象。而在高阻抗回路中产生的过电压,附近试样上无法表现出剩磁判定数据。

3)随着冲击次数的增加,剩磁量呈增长趋势,当冲击次数达到5次以后,铁件剩磁量趋于饱和,不再随冲击次数的增加而明显增加。这也说明了铁件具有剩磁累积效应。

同时为雷电灾害调查技术规范中对剩磁法数据的判定提供了一定的数据参考。例如规范中对剩磁数据的判定还有待斟酌,图钉在0.5~2 mT区间的剩磁数据同样能够判断发生了雷击。因此规范中参考的1.5~10 mT数据判定区间不能适用于所有的杂散铁件、钉类等。而当设备因雷击过电压损坏,且设备内阻较高时,通过剩磁测试的方法并不能得出正确的判定。

参考文献

- [1] 邹相国. 雷电电磁场空间分布的研究与计算[D]. 武汉: 华中科技大学, 2006.
- [2] 朱宣儒, 林情, 邓一晓. 雷灾鉴定的常用技术及分析方法[J]. 现代建筑电气, 2015, 4(6): 49.
- [3] GB 16840.2-1997. 电气火灾原因技术鉴定方法 第2部分 剩磁法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2005.
- [4] QX/T 103-2009. 雷电灾害调查技术规范[S]. 北京: 气象出版社, 2009.
- [5] 刘国臻, 龚家军. 雷电灾害事故鉴定方法及其应用初探[J]. 湖北气象, 2006, 25(2): 36-38.
- [6] 阳宏声, 林为东, 杨召绪, 等. 浅谈雷灾调查鉴定方法[J]. 气象研究与应用, 2012, 33(2): 119-120.
- [7] 高安生, 杨荣建, 李勇进. 雷击灾害事故调查鉴定规范化方法探析[J]. 广西气象, 2006, 27(增刊 2): 10-11, 19.
- [8] 胡靖彪, 刘士, 朱峰. 浅谈雷击灾害现场勘察[J]. 吉林气象, 2005(4): 31, 42.
- [9] 李兆华. “剩磁法”雷电灾害定量检测鉴定技术的研究和应用[J]. 中国雷电与防护: 网络版, 2005(3): 1-5.
- [10] 朱宣儒, 缪世宁. 剩磁法在雷灾鉴定中的应用[J]. 建筑电气, 2010(4): 38-40.
- [11] 徐真, 傅正财. 剩磁法在雷电流幅值监测中的应用研究[J]. 电气技术, 2011(4): 6-9.
- [12] 吴斌, 李强光, 刘秀成, 等. 基于磁特性曲线的杆件拉力测量及影响因素研究[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(3): 560-567.
- [13] 傅洁, 殷华宇, 陈娟, 等. 基于巴克豪森效应的钢轨应力检测系统设计[J]. 电子测量与仪器学报, 2013, 27(5): 403-408.
- [14] 汪柯, 汪晓东. ESD模型参数识别的差分进化方法[J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(7): 1606-1612.
- [15] 王浩, 陈亚洲, 万浩江, 等. 雷电电磁脉冲对双绞线耦合的仿真研究[J]. 国外电子测量技术, 2015, 34(1): 40-43.

作者简介

柴健, 1986年出生, 毕业于南京信息工程大学获硕士学位, 现任湖北省防雷中心工程师, 主要研究方向为雷电防护。

E-mail: haimencj@126.com

孙京, 1986年出生, 毕业于南京信息工程大学获硕士学位, 现任中国气象局武汉暴雨研究所工程师, 主要研究方向为雷电防护与暴雨机理。

E-mail: 496014988@qq.com