

雷电电磁脉冲对双绞线耦合的仿真研究*

王浩 陈亚洲 万浩江 王晓嘉
(机械工程学院静电与电磁防护研究所 石家庄 050003)

摘要: 为得到雷电电磁脉冲对双绞线的耦合规律,基于软件 CST 仿真研究了双绞线长度、电场极化方向、终端负载对线缆终端响应电压的影响。结果表明,随着线缆长度的增加,双绞线受测端负载感应电压波形脉宽会增大,但感应电压幅值变化规律受辐射场波形频谱分布的影响;线缆受测端负载感应电压幅值随着线缆与电场方向的夹角的增大而变小,当电场与线缆垂直时,感应电压为0;随着终端负载阻值的增加,双绞线受测端负载感应电压也逐步增大,且增大趋势减缓。

关键词: 雷电电磁脉冲;感应电压;终端负载

中图分类号: TN8 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.4030

Research on coupling between lightning electromagnetic field and twisted pair

Wang Hao Chen Yazhou Wan Haojiang Wang Xiaojia

(Institute of Electrostatic and Electromagnetic Protection, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China)

Abstract: In order to investigate the induced voltage of the load terminated between unshielded twisted pair (UTP) coupled with lightning electromagnetic pulse (LEMP), we set up simulation modal by using electromagnetic software CST with different length, angle of electric field to cable and terminal load. The results show that, pulse width of UTP's terminal load induced voltage increases with cable length becomes large, but the amplitude of induced voltage is mainly impacted by frequency spectrum of radiation waveform; with the angle between cable and electric field direction increasing, induced voltage decreases, when it comes to verticality, induced voltage almost become 0; with the termination increasing, induced voltage is gradually increased, but trend to slowly.

Keywords: LEMP; induced voltage; terminal load

1 引言

雷电是自然界中发生频率较高的一种大规模静电放电现象,同时是一种典型的天然强电磁危害源,发生闪击时,闪电回击通道中的电压可高达几百万 V,电流可高达几十万 A,会在闪电通道周围产生强大的电磁辐射效应,对电子电气设备构成了严重的威胁^[1-2]。雷电造成的灾害可以分为两大类;一类是由于雷电的直接效应造成的;另一类是由于二次雷击效应或者说感应雷造成的,也叫雷电的间接效应。而线缆是电子设备 LEMP 耦合的主要途径,目前对雷电电磁场与线缆的耦合研究主要集中于架空输电线和通信线缆以及埋地线缆的长距离耦合或者是雷击近点线缆的感应过电压^[3-7],而对于短线缆的雷电电磁脉冲远场耦合效应的研究还比较少。

双绞线具有低损耗、低成本及良好的抗干扰能力,在工程上具有广泛应用,具有很高的研究价值^[8-11]。

利用电磁仿真软件 CST 建立了雷电电磁脉冲对双绞线辐照耦合的仿真模型,并通过改变线缆长度、电场极化方向、终端负载等条件,得到了双绞线终端负载响应规律。

2 FIT 算法

有限积分技术(finite integration technique, FIT)是由 T. Weiland 教授于 1976~1977 年间首先提出的。该数值方法提供了一种通用的空间离散化方案,可用于解决各种电磁场问题,从静态场计算到时域和频域的高频应用。麦克斯韦方程组有微分和积分 2 种 FIT 从以下方程出发^[12]:

收稿日期:2014-11

* 基金项目:国家自然科学基金(51377171)资助项目

$$\oint_c E dl = - \int_s \frac{\partial B}{\partial t} ds \quad (1)$$

$$\oint_c H dl = \int_s (J + \frac{\partial D}{\partial t}) ds \quad (2)$$

$$\oint_s B ds = 0 \quad (3)$$

$$\oint_s D ds = \rho \quad (4)$$

通过采用常用的数值积分方法和 FIT 特有的空间离散方法, 可以将式(1)表示为矩阵形式:

$$R_c = -b^\circ \quad (5)$$

$$R_b = D_e^\circ + D_e + j \quad (6)$$

式中: R_c 和 R_b 是四带宽的稀疏矩阵, R_s 是对角矩阵, 其对象元是介电常数, R_e 是平均电导率。 b 、 e 、 j 分别为:

$$b = (B_{x1}, B_{x2}, \dots, B_{xN}, B_{y1}, \dots, B_{yN}) \quad (7)$$

$$e = (E_{x1}, E_{x2}, \dots, E_{xN}, E_{y1}, \dots, E_{yN}) \quad (8)$$

$$j = (J_{dx1} + \rho_{ux1}) \quad (9)$$

3 仿真模型的建立

CST 电缆工作室是一套分析在大型复杂系统中线缆线束的仿真软件, 可以用时域和频域 2 种算法分析线缆线束的传输特性和串扰特性。

CST 电缆工作室的线缆库中存在 4 种基本线型, 分别为单线、排线、双(多)绞线与屏蔽线, 可以根据实际情况定义线缆模型。确定线缆分布后, CST 电缆工作室会基于传输线理论, 根据定义线缆束模型自动生成等效电路 SPICE 模型。同时, CST 电缆工作室可以利用 CST 微波工作室

的 3D 全波仿真求解器来计算线束周围的电磁环境。而后 CST 电缆工作室会协同 CST 设计工作室工作, 在电缆生成的等效电路的终端连接负载器件, 而 CST 设计工作室内置强大的网络仿真器可对整个系统进行仿真, 包括线缆线束及其终端负载。这种混合算法可以非常方便的计算外界电磁场耦合到线缆上的感应信号, 同时也可以非常方便的计算线缆对外界空间的辐射场。将利用 CST 软件进行雷电电磁脉冲对常见的双绞线短线缆的辐照效应研究。

利用 CST 电缆工作室在空间设置一理想大地, 即 PEC 平面, 在平面上方水平放置长度为 5 m 的非屏蔽双绞线, 双绞线内芯横截面积为 1.5 mm², 绝缘层直径为 3 mm, 定义线缆远离电场的一端为受测端, 距地面 200 mm, 且做接地处理, 双绞线上端为非受测端, 双绞线两端分别连接 50 Ω 电阻, 外加激励源选择为由雷击浪涌发生器模拟产生的 1.2/50 μs 雷电电磁脉冲及理想的 1.2/50 μs 雷电电磁脉冲, 对比研究实验数据与仿真数据中出现差异的原因, 传播方向如图 1 所示, 图 2 所示为雷电电磁脉冲时域波形。

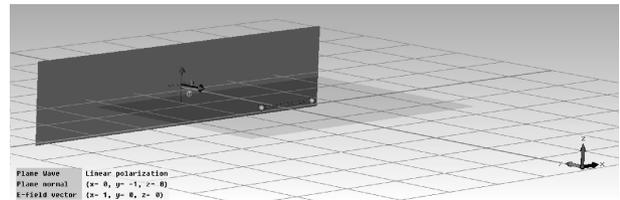
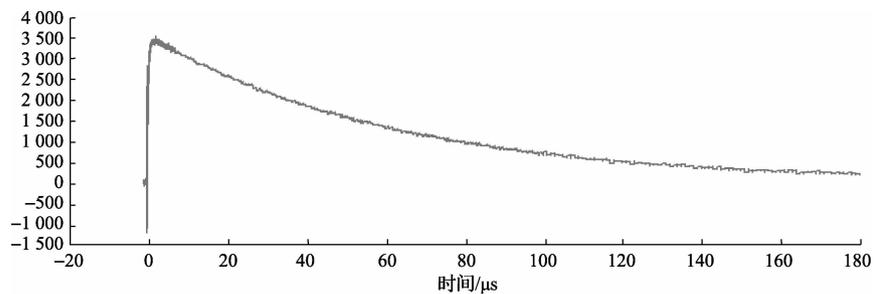
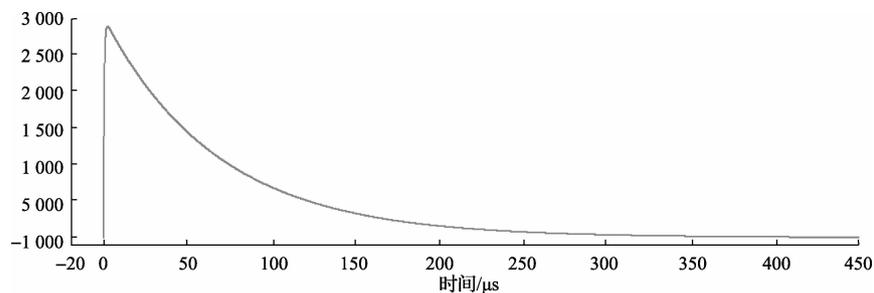


图 1 CST 软件建立的双绞线仿真模型



(a)雷击浪涌模拟器模拟1.2/50 μs脉冲



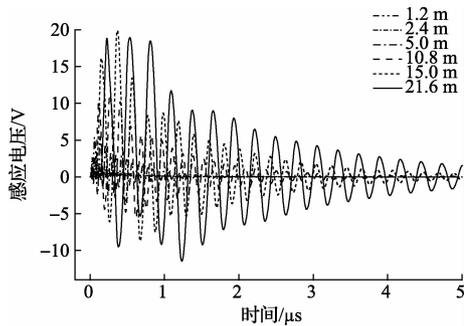
(b)理想1.2/50 μs脉冲波形

图 2 1.2/50 μs 雷电电磁脉冲波形

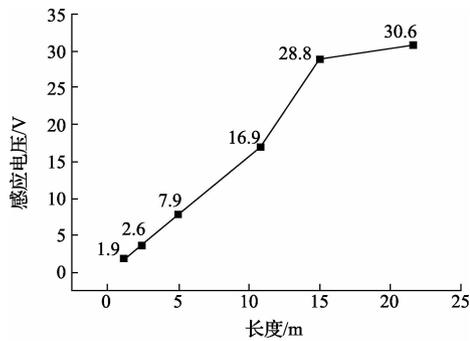
4 仿真结果及分析

4.1 线缆长度对感应电压的影响

仿真设置:分别选取 1.2 m、2.4 m、5.0 m、10.8 m、15.0 m、21.6 m 双绞线为受试对象,当受试线缆受到理想 1.2/50 μs 雷电电磁脉冲场辐照时,双绞线受测端负载感应电压如图 3 所示,图 4 所示当受试线缆受到由雷击浪涌发生器模拟产生的 1.2/50 μs 雷电电磁脉冲场辐照时,线缆受测端负载感应电压。



(a)不同长度线缆受测端感应电压波形

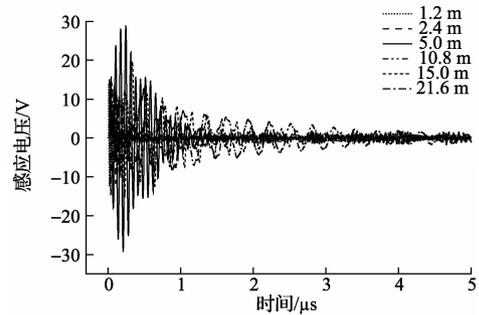


(b)受测端负载感应电压峰-峰值

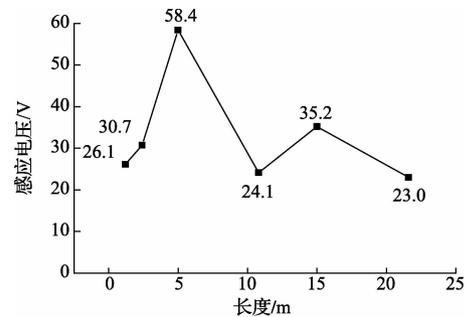
图3 理想 1.2/50 μs 雷电电磁脉冲场辐照不同长度线缆受测端负载感应电压

仿真结果发现,1.2/50 μs 雷电电磁脉冲辐照条件下,双绞线感应电压波形为衰减振荡波形,随着双绞线线缆长度的增加,波形脉宽逐步增大,这是因为双绞线耦合信号在线缆两端来回传播,形成衰减振荡,而随着线缆长度的增加耦合信号传播一周时间越长,导致感应电压波形脉宽增大。

同时根据仿真结果可以发现线缆受测端负载感应电压波形幅值变化规律与雷电电磁脉冲波形有明显关系,当双绞线受到理想 1.2/50 μs 雷电电磁脉冲辐照时,线缆受



(a)不同长度线缆受测端感应电压波形



(b)受测端负载感应电压峰-峰值

图4 模拟 1.2/50 μs 雷电电磁脉冲场辐照不同长度线缆受测端负载感应电压

测端负载感应电压峰-峰值随着长度的增加而增大(图 3(b)),而当双绞线受到雷击浪涌发生器模拟产生的 1.2/50 μs 雷电电磁脉冲辐照时,线缆受测端负载感应电压幅值呈波浪形变化,如图 4(b)所示。为区别 2 种波形之间的差异,分别对 2 种波形做傅里叶变换,如图 5 所示。通过傅里叶变换可以发现,由雷击浪涌发生器模拟产生的 1.2/50 μs 雷电电磁脉冲的高频成分远远多于理想 1.2/50 μs 雷电电磁脉冲,即当辐照波形的频谱分布以低频成分为主时,此时辐照波波长 $\lambda \gg$ 线缆长度 L ,线缆感应电压随着长度的增加而增大,而辐照波形的频谱分布含有较多的高频分量时,辐照波形的波长 λ 变小,这种条件下双绞线受测端负载感应电压随着线缆长度的增加,其幅值呈波浪形变化。

4.2 电场极化方向对感应电压的影响

仿真设置:选定 5 m 双绞线为受试对象,外加激励源选用由雷击浪涌发生器模拟产生的 1.2/50 μs 雷电电磁脉冲,双绞线两端分别连接 50 Ω 负载,将激励源电场方向与线缆方向的夹角 γ 分别设置为 0°、15°、30°、45°、60°、75°、90°,观测受测端负载感应电压,如图 6 所示。

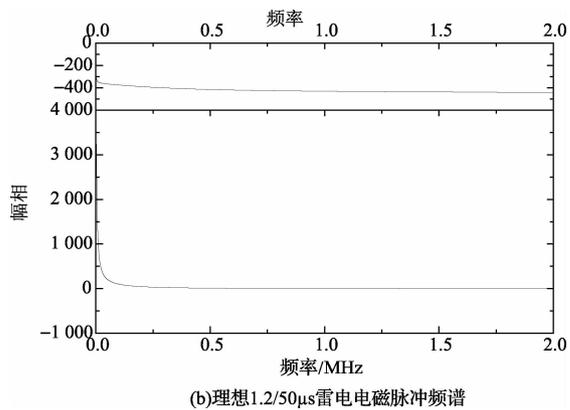
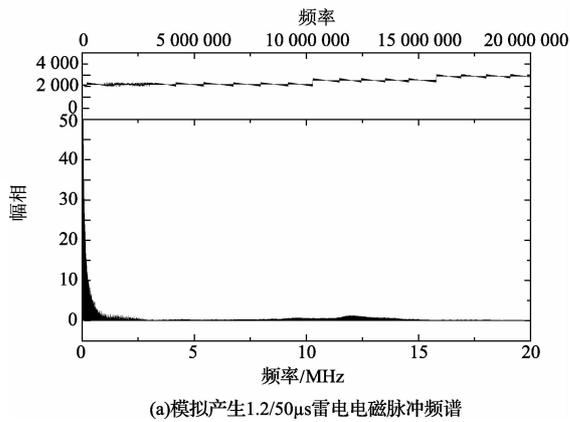


图5 1.2/50 μs 雷电电磁脉冲频谱

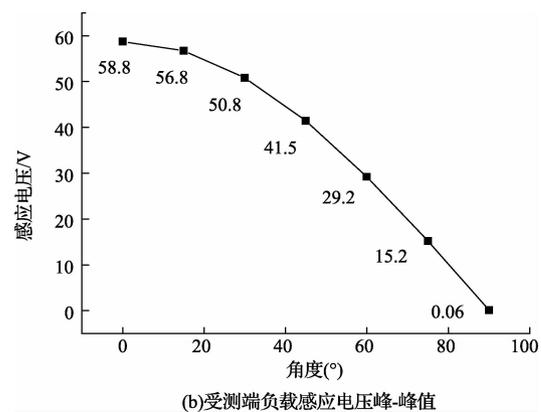
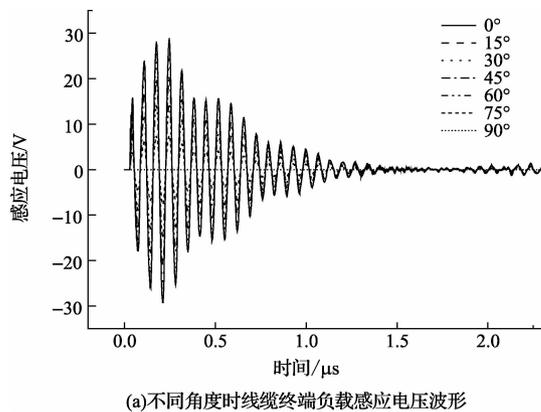


图6 不同角度时线缆终端负载感应电压

观察图6可以发现随着线缆方向与电场方向夹角的增大,双绞线受测端负载感应电压波形基本未发生变化,但其幅值却逐步降低,当线缆方向与电场方向夹角为90°时,受测端负载感应电压降至最低,近似为0。这是因为随着线缆方向与电场方向夹角的变大,作用到线缆上的电场分量逐步减小,线缆驱动电压变小,从而导致终端负载感应电压逐步降低。

分析认为线缆在电场中的感应电压大小为 $U = El \cos\gamma$,当 E 、 l 为定值时,感应电压 U 与 $\cos\gamma$ 呈线性关系,因此受测端负载感应电压随着 γ 的增大而随之变小,现绘制 $U-\cos\gamma$ 曲线图,如图7所示,图中可以发现感应电压峰-峰值与 $\cos\gamma$ 基本呈线性关系,因此可以从另一个侧面验证了仿真模型的正确性。

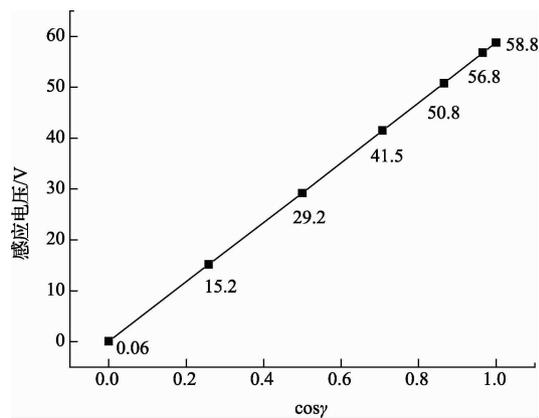


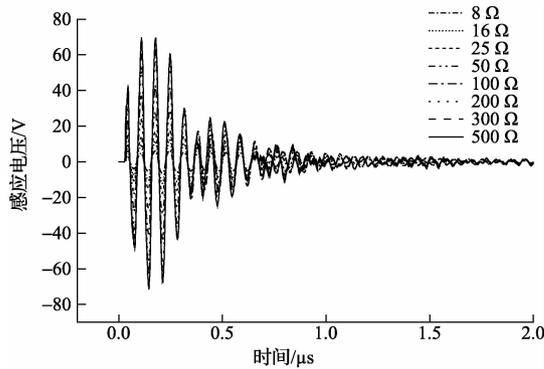
图7 线缆 $U-\cos\gamma$ 曲线

4.3 终端负载对感应电压的影响

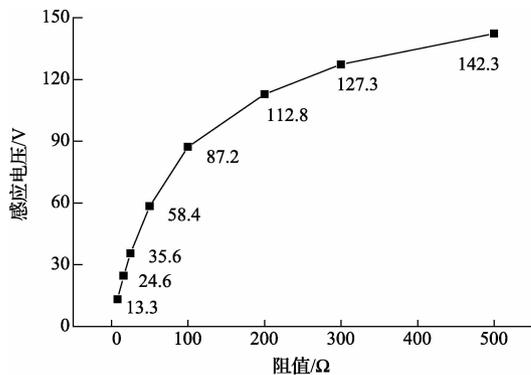
实验设置:以5 m长双绞线为受试对象,外加激励源选用由雷击浪涌发生器模拟产生的1.2/50 μs雷电电磁脉冲,电场方向与双绞线方向一致,线缆非受测端连接50 Ω负载,受测负载分别设置为8 Ω、16 Ω、25 Ω、50 Ω、100 Ω、200 Ω、300 Ω、500 Ω,仿真得到受测端负载感应电压如图8所示。

由仿真结果可知,随着终端负载阻值的增加,双绞线受测端负载感应电压波形未发生明显变化,但其幅值却随着阻值的增加而增大,且增大趋势减缓,这是因为随着负载阻值的增大,消耗在端接负载上的能量会逐渐减小,所以能量能以较小的损耗在电路中传播。

当双绞线受到雷电电磁脉冲辐照时,平行于线缆的电场能量将耦合到线缆的2根单线,产生感应电流,感应电流在线缆两端来回反射传播,形成衰减振荡。同时等效形成沿线分布的电压源,其中线缆两根导线间的差模电压,对于双绞线端口处负载可以等效为带有一内阻 r 的电压源 U 。根据分压原理,受测端负载 R_1 的感应电压 $U_1 = R_1 U / (R_1 + r)$,将仿真数据通过 *origin* 软件进行曲线拟合,如图9所示,得到 $U = 168 \text{ V}$, $R_1 = 94 \text{ Ω}$,即 $U_1 = 168R_1 / (R_1 + 94)$ 。



(a)不同阻值时线缆终端负载感应电压波形



(b)线缆终端负载感应电压峰值

图8 不同阻值时线缆受测端负载感应电压

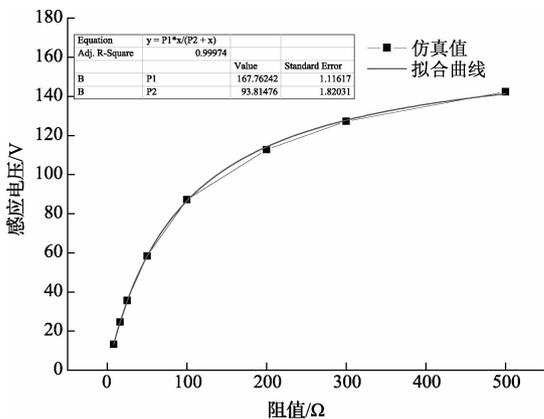


图9 线缆终端负载感应电压及拟合曲线

5 结论

本文基于 CST 软件建立了雷电电磁脉冲对双绞线耦合的仿真模型。在仿真模型的基础上通过改变双绞线长度、电场极化方向以及线缆终端负载等条件,得到不同条件下线缆终端负载感应电压的变化规律,主要结论:

1)随着线缆长度的增加,双绞线受测端负载感应电压波形脉宽会增大,但感应电压幅值变化规律受辐射场波形频谱分布的影响;

2)线缆受测端负载感应电压幅值随着线缆与电场方向的夹角的增大而变小,当电场与线缆垂直时,感应电压

最小,几乎为 0;

3)随着终端负载阻值的增加,双绞线受测端负载感应电压也逐步增大,且增大趋势减缓。

参考文献

- [1] 林锥,王立德,周洁琼,等. 电力噪声作用下光伏电站监控系统可靠性研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2013, 27(12):1170-1176.
- [2] 汪永军,陈之涛,孙永良,等. 雷达终端系统可靠性提升[J]. 国外电子测量技术, 2012, 31(3):72-74.
- [3] 于晖,董万胜,陈绍东,等. 埋地电缆雷电感应过电压观测和分析[J]. 强激光与粒子束, 2010, 22(10):2373-2377.
- [4] 任合明,周璧华. 地闪电磁脉冲对近地电缆外导体的耦合研究[J]. 电波科学学报, 2006, 21(5):750-755.
- [5] 余占清,曾嵘,王绍安,等. 配电网雷电感应过电压仿真计算分析[J]. 高电压技术, 2013, 39(2):415-422.
- [6] 杜林,戴斌,司马文霞,等. 架空输电线路雷电过电压识别[J]. 高电压技术, 2010, 36(3):590-597.
- [7] 杨春山,程柏林. 雷电电磁脉冲对线缆的耦合效应研究[J]. 空军雷达学院学报, 2005, 19(2):1-5.
- [8] 黄家平,王明皓,臧家左. 屏蔽双绞线的干扰耦合特性研究[J]. 电子测量技术, 2009, 32(11):1-3.
- [9] 赵乾,钱建平,郭恩全,等. 双绞线电磁干扰防护研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2010, 24(3):279-282.
- [10] 黄宇皓,易学勤,刘其凤,等. 双绞线在 EMP 下的终端响应分析[J]. 装备环境工程, 2011, 8(6):91-95.
- [11] ARMENTA R B, SARRIS C D. Efficient evaluation of the terminal response of a twisted-wire pair excited by a plane-wave electromagnetic field[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2007, 49(3):698-707.
- [12] 胡友强,戴欣. 基于电容耦合的非接触电能传输系统模型研究[J]. 仪器仪表学报, 2010, 31(9):2133-2139.

作者简介

王浩,1990 年出生,硕士生,主要研究方向为雷电电磁防护技术与测试。

E-mail: wang_hao2013@sina.com

陈亚洲,1975 年出生,教授,主要研究方向为强电磁场环境模拟与防护。

E-mail: chen_yazhou@sina.com

万浩江,1983 年出生,博士,讲师,主要研究方向为雷电防护理论与技术。

E-mail: hbwhj1983@163.com

王晓嘉,1987 年出生,博士生,主要研究方向为雷电电磁场计算与建模。

E-mail: wangxiaojia0@sina.com