文章编号: 1008-1542(2005)03-0173-04

用于纳秒级脉冲电场测试的加载天线研究

刘尚合[1], 徐晓英[1,2], 管　琼[2], 易　胜[1]

(1. 军械工程学院静电与电磁防护研究所, 河北石家庄　050003; 2. 武汉理工大学静电技术研究所, 湖北武汉　430063)

摘　要: 针对宽频带、大动态、高灵敏度的脉冲电场测试技术始终是电磁脉冲测试研究领域的 1 个难点, 在国家自然科学基金资助下, 研制成功了 V 型加载偶极子天线测试系统, 并通过传输函数、方向图实验、计量标定和测试实验验证表明: 该测试系统具有宽频带、快响应、小失真的特点, 能够满足小于 1 ns 的静电放电辐射场的测试要求。

关键词: ESD; 纳秒; 脉冲电场; 加载天线; 测试

中图分类号: O441　　文献标识码: A

Research on loaded antenna for nanosecond pulsed E-fields measurement

LIU Shang-he[1], XU Xiao-ying[1,2], GU AN Qiong[2], YI Sheng[1]

(1. Institute of Electrostatic and Electromagnetic Protection, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang Hebei 050003, China; 2. Institute of Electrostatic Technology, Wuhan University of Technology, Wuhan Hubei 430063, China;)

Abstract: Pulsed E-field test with wide band, large dynamic range and high sensitivity remains a difficulty in area of electromagnetic pulse test. Our project team, supported by National Natural Science Foundation, has successfully developed the resistance-load V-dipole traveling broadband antenna test and measurement system. Based on the experimental verifications in terms of transmit function, polar diagram and measurement calibration, the system, which is of reasonable structure, broadband, quick response, and little distortion, is shown to be capable of measuring electrostatic discharge radiation field less than 1ns.

Key words: ESD; nanosecond; pulsed electric field; loaded antenna; test and measurement

静电放电电磁脉冲具有小于 1 ns 的上升沿和很短的持续时间, 其辐射场的频带宽度可以从 0 到几个 GHz, 是电子设备的一个主要近场危害源。静电放电过程中所产生的电磁场比较复杂, 影响因素很多, 例如: 环境温湿度、起电放电体的材料性能和形状等。其重复性很差, 理论建模和计算存在一定困难, 多采用实验手段对其进行研究。从 20 世纪 80 年代中期开始, 人们逐渐认识到静电放电产生的脉冲电磁场的危害性[1], 并对其开展测试研究至今, 其重点主要是场信号传感变换。天线是最常用的电磁场传感器, 根据静电放电辐射场的特点对天线的性能应有如下要求: 体积小; 抗干扰能力强; 有 1 GHz 至几个 GHz 的带宽; 动态范围大; 既能测弱场又能测强场; 其方向图在测量方向上不能有零点。大量研究工作表明 L 型天线和 V 型天线比传统的偶极子天线在敏感度、带宽、保真度等方面有更好的脉冲接收特性[2]。对它们来说唯一的限制是天

收稿日期: 2005-06-20; 责任编辑: 陈书欣
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60471024); 国家自然科学基金重点资助项目(50237040)
作者简介: 刘尚合(1937-), 男, 山西闻喜人, 教授, 中国工程院院士, 主要从事防电磁危害理论与技术方面的研究。

线的终端反射。为解决这一问题, 笔者根据 Wu-King 加载原理[3,4], 采用加载电阻的方法研制了介质加载 V 型偶极子行波天线, 对天线加载方法, 加载电阻的参数、特性进行了理论计算和实验研究。研制成功了能够测试小于 1 ns 的 ESD EMP 场 V 型加载天线测试系统, 并利用该系统对静电放电辐射场进行了测试。

1 加载天线研制

1.1 天线设计与参数的实验研究

天线加载是指在天线的适当位置插入某种元件或者某些适合的网络, 改变天线上的电流分布, 优化天线特性参数与频率的关系, 以扩展天线的工作带宽。经实验研究, 改变极子两臂间的夹角所得到的 V 型天线将会进一步增加带宽, 使输出幅度变大, 灵敏度大大提高, 而且没有牺牲波形保真度(即没有降低带宽) [5]。根据 Wu-King 加载原理, V 型天线电阻加载曲线和 TEM 喇叭天线的加载基本相似, 均为锥型分布。参照 GTEM 室特性, 笔者制作了 2 种天线臂形式的天线进行对比研究, 一种为线状臂 V 型天线, 尺寸分别为 5, 10, 15, 20 cm(分别命名为 L5, L10, L15, L20) ; 另一种为片状臂 V 型天线, 尺寸分别为 5, 10, 15, 20 cm(分别命名为 B5, B10, B15, B20) 。本研究采用集中加载方式[6], 使用了如图 1 所示的天线形式, 即用 1 根倾斜架设的行波单导线天线, 与地面镜像构成一 V 型天线。利用矢量磁位 A, 可以求出天线远处及其方向函数的空间表示式, 再利用求导求极值, 可以得出在沿天线方向辐射强度最大时, 对应于一定的 l/λ(l/λ为天线臂长度与波长之比)所要求的最佳张角 θ[7]。例如, 当 $l/\lambda \approx 6$ 时, 可以求得 $\theta \approx 15°$。当 l/λ较大时, 工作波长改变后, 最大辐射方向 θ 变化不大。

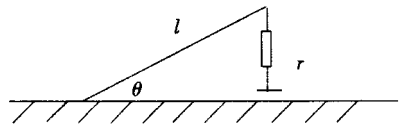


图 1 V 型偶极子天线示意图

Fig. 1 V-dipole antenna sketch

Wu-King 加载原理针对的是理想的偶极子天线, 而笔者采用的是 V 型偶极子形式。形式的改变会使其特性阻抗发生变化, 因而笔者采用 AV3618 微波一体化矢量网络分析仪, 利用可变电阻连接在天线的终端, 调节天线终端负载 Rz, 观测天线的驻波比, 利用驻波比来评定天线的反射特性。通过对比不同加载条件下驻波比的平坦度和驻波比的大小来确定最佳加载阻值, 使天线实现匹配。图 2 就是 5 种天线的驻波比图。利用这种分析方法, 笔者最终确定了 8 种天线的最佳加载阻值, 见表 1。

表 1 天线的加载阻值

Tab. 1 Resistance of the antennas

天线编号	L5	B5	L10	B10	L15	B15	L20	B20
加载阻值/Ω	140	120	300	150	270	100	300	300

比较这几种天线在加载条件下的驻波比的平坦度和大小, 选定天线 B5, B10, L5, L15, L20 作为后续的研究对象。从图 2 可以看出在 2 GHz 范围内, 片状臂天线的驻波比比线状臂天线的驻波比要平坦, 且比值也较小。在片状臂天线中, B5 天线比 B10 天线的驻波比平坦。在线状臂天线中, 天线 L20 的驻波比起伏最大, 因而它的带宽性能较差; 虽然天线 L5 的驻波比比较平坦, 但是它总体的值较大; L15 的驻波比也较差。所以天线 B5 较其他几种天线宽带性能要优越一些, 天线 L15 和 B10 次之。

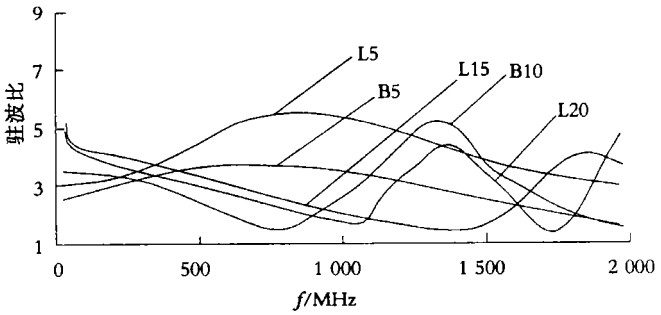


图 2 5 种天线的驻波比

Fig. 2 Traveling ratio of the five antennas

1.2 传输函数与方向图研究

天线的特性主要由天线的传输函数和方向图来考察, 传输函数可以全面地反映天线的频带宽度。天线传输函数的测量方法采用的是频域法。天线传输函数的标定使用 GTEM 室(1 GHz 以下) 和微波暗室(1 GHz 以上) , 使用的主要仪器是: HP8362A 微波合成源, HP437B 功率计, 发射天线为大华 DH610 天线, 标准天线为德国产 ETS3115 天线, 5 种不同规格的天线传输函数特征值见表 2。

从表 2 可以看出天线 L5, L15, L20 在 1 GHz 以内的传输函数的最大值与最小值的差值很大, 超过 20 dBμV/m。也就是说, 它们对不同频率的电磁脉冲响应相差了 10 多倍, 因而它们的宽带特性就差一些。相

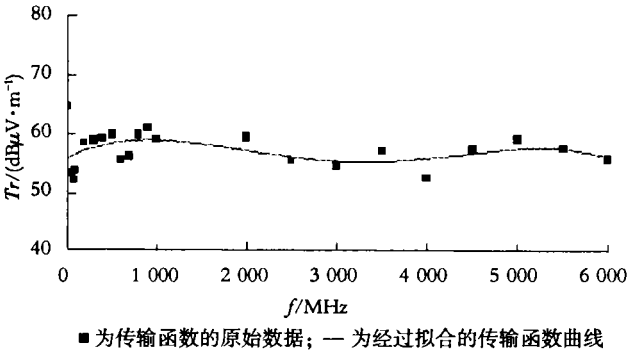
比较而言,天线 B5 和 B10 的传输函数对不同频率的电磁脉冲响应要均匀得多,这说明采用片状天线臂可以有效改善天线的传输特性。图 3 为天线 B5 的传输函数曲线和方向图,经实验研究和计量标定可知天线 B5 的带宽可以达到 100 MHz~ 6 GHz(± 5dB)。

用于时域瞬变场测量的天线探头,要求在测量过程中,其方向图在测量区域内不能有零点,否则,

表 2　天线传输函数的特征数据

Tab. 2　Characteristic of autenna transfer function

天线	传输函数 $T(\omega)/(\mathrm{dB\mu V \cdot m^{-1}})$		
	min	max	max - min
L5	46.0	79.3	23.3
B5	52.2	64.9	12.7
B10	43.7	60.3	16.6
L15	39.1	67.5	27.6
L20	39.1	65.7	26.8



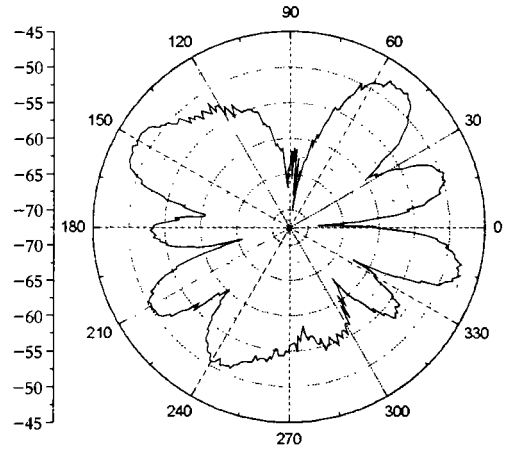


图 3　天线 B5 的传输函数曲线和方向图

Fig. 3　Transfer function and the direction pattern of the B5 antennas

会导致信号失真或不完整,所以天线的方向特性是一个十分重要的参数。天线方向图的测量方法采用的是频域法——点频测量。所用测试仪器主要为 HP85301B 天线测试系统、HP8530A 微波接收机、HP83621A 本振源、扫频源 (20 MHz~ 20 GHz) 以及功率放大器。经测试可知,5 个天线的方向图中均不存在零点。实验表明上述几种结构的天线在方向特性上基本满足时域瞬变场测量的要求。

2　用于静电放电辐射场的测试实验

依据国际电工委员会标准 IEC61000-4-2 的要求,笔者对研制的 V 型偶极子加载天线 B5 和 B10 进行了 ESD 辐射场测试实验。ESD 源为 NSG435 型 ESD 模拟器,采用人体-金属模型接触放电方式,模拟器最高电压为+8 kV,放电对象为水平耦合板。脉冲天线置于放电板的水平面前方 3 m 处,之间的地面铺以铁氧体,再覆以尖劈。使用的数字示波器是美国 HP 公司生产的 HP54710D(带宽 1 GHz,采样速率为 6 GHz)。图 4 是在放电电压为+8 kV 时所测 ESD 辐射场波形。

由图 4 可知其电场波形为单周期振荡波

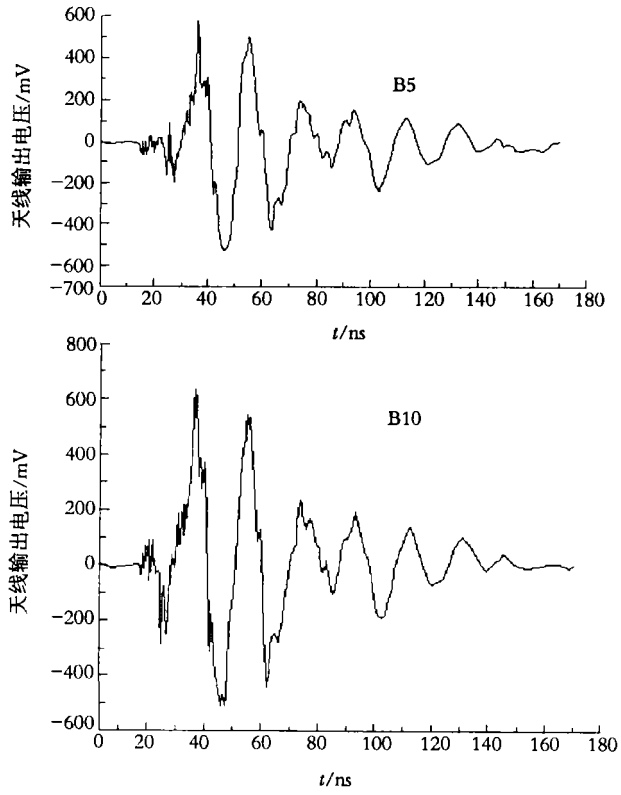


图 4　B5, B10 天线测得的静电辐射场波形

Fig. 4　Wareform of ESD radiation field measured by B5 and B10

形, 与电流波形的一阶导数波形相似, 这与有关静电放电辐射场的理论分析一致[8]。测试实验表明, 天线 B5 和 B10 可以有效地测量静电放电辐射场。

3 结束语

长期以来, 宽带脉冲电场的测试手段一直是制约电磁防护技术发展的难题。宽带天线作为测量系统中不可缺少的组成部分, 它的性能直接影响到系统的整体效果[9, 10]。研制的 V 型加载天线脉冲电场测试系统, 具有频带宽、失真小、对被测场扰动小的特点。其频率响应带宽可达到 20 MHz 到 6 GHz, 能够测试脉冲前沿小于 1 ns 的瞬态电场。尽管该天线的灵敏度有待提高, 不能测试低频电磁脉冲场, 但在宽带脉冲电磁场测试技术处于探索阶段的今天, 其仍不失为测试工作提供了一个重要的手段, 对电磁防护的定量评价、理论计算的实验验证等都会有很大的帮助。

参考文献:

[1] 刘尚合, 武占成. 静电放电与危害防护[M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2004.
[2] 王 瑾. 静电放电辐射场测量研究[D]. 石家庄: 军械工程学院, 1999.
[3] SHEN H M, KING R W P, WU T T. New sensors for measuring very short electromagnetic pulses[J]. IEEE Trans: On Antennas and Propagation, 1990, 38(1): 838-846.
[4] WU T T, KING R W P. The cylindrical antenna with non-refecting resistive loading[J]. IEEE Trans. On Antennas and Propagation, 1965, 3(2): 369-373.
[5] 易 胜. 静电放电辐射场测试技术研究[D]. 石家庄: 军械工程学院, 2001.
[6] 周朝栋, 王远坤, 周良明. 线天线理论与工程[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1988.
[7] 巴拉尼斯 C A. 天线理论——分析与设计[M]. 于志远, 关秉田, 江贤祚译. 北京: 电子工业出版社, 1988.
[8] 盛松林. 静电放电电磁场时空分布理论模型及测试技术研究[D]. 石家庄: 军械工程学院博士论文, 2003.
[9] ESSELLE K P, STUCHLY S S. An electrically large antenna for transient electromagnetic field measurements[J]. IEEE Trans: On Instrumentation and Measurement, 1991, 40(2): 460-464.
[10] MARIA A S, DAVID T G. Active magnetic field sensor for measurements of transits[J]. IEEE Trans: On EMC, 1991, 33(4): 275-279.

向本期载文的有关审稿专家致谢

本期《河北科技大学学报》共发表论文 23 篇。这些论文的发表, 是与有关专家的认真审读、细查资料、推敲分析、中肯评价分不开的。他们的评价(有的给予了充分肯定, 有的给出了修改意见, 有的指出了问题的存在, 有的阐述了否定的原因)使作者和编者都受益匪浅。对此, 本编辑部特向这些专家表示敬意, 对他们的辛勤劳动表示感谢。

本期载文的审稿专家名单如下(按姓名的汉语拼音顺序排序):

崔洪斌 冉 仁 段惠敏 郭彦平 郭子成 哈 婧 韩景元 李景印
李荣平 李秀华 李友善 林原斌 罗青枝 潘雪增 庞志锋 仇计清
桑晓明 沈宗旋 孙景志 索秀云 王 蕾 王培光 王幸之 徐 鸿
许克明 杨文玲 赵地顺 赵 冉

本刊编辑部