

文章编号: 1001- 4322(1999)03- 0359- 04

# 静电放电电磁脉冲的实验研究\*

陈砚桥, 刘尚合, 武占成, 谭志良

(军械工程学院静电技术研究所, 石家庄 050003)

**摘 要:** 利用单极子天线对静电放电产生的电磁脉冲进行了实验研究。测量表明, 静电放电电磁脉冲辐射场为脉冲持续时间百纳秒的窄脉冲, 但在距离放电源几米以内, 其场强很大, 典型值可达千伏每米量级, 其频谱主要分布在几十到几百兆赫, 典型的频谱上限值可以达到几个吉赫。

**关键词:** 静电放电; 电磁脉冲; 频谱

**中图分类号:** O 441 TL 91 **文献标识码:** A

静电放电 (Electrostatic Discharge, ESD) 可分为接触式放电和非接触式放电, 也就是电流注入放电和空气击穿放电两种方式。以往人们关注的 ESD 危害主要是注入电流的作用, 在理论建模和实验研究方面已做了大量的工作, 并取得了一些重要的研究成果<sup>[1~4]</sup>。为了测试电子产品的 ESD 敏感度, 人们已投入了相当的精力去研究 ESD 电流波形, 并建立了相应的标准, 如国际电工委员会标准 IEC 61000-4-2 等等。研究者们特别感兴趣的是由于带电量、接近速度和电极类型 (人体、转运工具、工作平台等) 的不同而引起的电流幅值及其上升时间的变化, 然而对非接触式静电放电即空气放电产生的电磁脉冲辐射场却认识不多<sup>[5~6]</sup>。人体-金属模型放电电流<sup>[5]</sup>对时间的变化率很大, 而辐射场的幅值主要取决于电流及电流对时间的导数; 脉宽小于 1ns 的窄脉冲具有极宽的频谱, 其上限频率可达吉赫。这就是说 ESD 电磁脉冲具有较高的幅值和极宽的频谱, 它是复杂多变的电磁环境效应中的主要近场危害源之一<sup>[7]</sup>。

## 1 静电放电模型

静电放电是指带电体周围的场强超过周围介质的绝缘击穿场强时, 由于介质电离而使带电体上的电荷部分或全部消失的现象, 这是一个复杂多变的过程。因此, 人们对实际中各种可能产生危害的静电放电的静电源进行了深入的研究, 根据其主要特点建立了相应的静电放电模型, 如人体-金属模型、家具模型、带电器件模型、机器模型及场感应模型等等。我们选取具有快上升前沿的人体-金属模型和具有较大电流的家具模型作为典型代表来对其电磁脉冲辐射场进行研究。

### 1.1 静电放电的人体-金属模型

人体是产生静电危害最主要的静电源之一, 人体-金属模型用来模拟带电人体通过手持的小金属物件, 如螺丝刀, 钥匙等, 对其它物体产生放电时的情形, 其基本电路模型为单 RC 结构, 放电参数  $R$  和  $C$  分别取 330 $\Omega$  和 150pF, 典型的放电电流波形如图 1 所示, 它具有亚纳秒的上升前沿, 半高脉宽为 30ns, 其峰值从充电电压为 2kV 时的 9A 到 15kV 时的 70A。

\* 国防科技基础研究资助课题

1998 年 1 月 12 日收到原稿, 1999 年 3 月 15 日收到修改稿。

陈砚桥, 男, 1963 年 10 月出生, 在读博士, 讲师

### 1.2 静电放电的家具模型

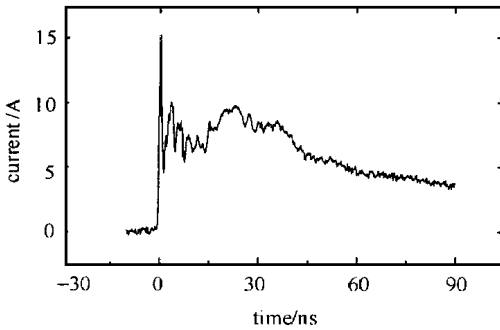


Fig 1 Current waveform of human-metal model

图 1 IEC61000-4-2 中人体-金属模型放电电流波形

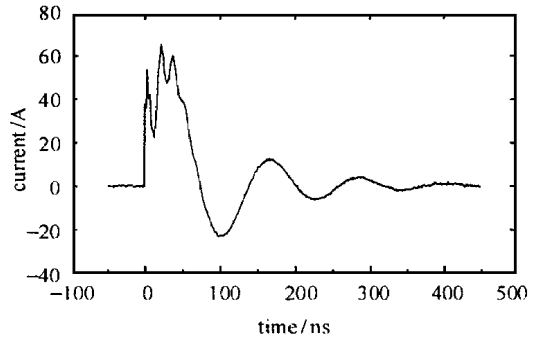


Fig 2 Current waveform of furniture model

图 2 家具模型的放电电流波

家具静电放电指的是在计算机机房或实验室内那些易于移动的家具,如椅子、小的仪器搬运车等,由于摩擦或感应带电后对其它仪器设备产生的放电过程,其电路模型也为单 RC 结构,通常取  $R = 15\Omega$ ,  $C = 100\text{pF}$ 。其典型的放电电流波形如图 2 所示。

### 2 静电放电电磁脉冲的测试设备和实验条件

静电放电电磁脉冲的测试是在模拟自由空间中进行的,主要仪器放置在屏蔽室里。静电放电模拟器采用瑞士 Schaffner 公司的 NSG 435 以及日本 NoiseKen 公司的 ESS- 200A X,其接触式放电最高电压分别为 8、15kV,非接触式放电最高电压为 15、30kV。放电通过标准的模拟器放电网络和放电电极来进行,测试天线采用中国船舶工业总公司电磁兼容中心研制的单极子小天线,经实验标定,其工作上限频率可达 1GHz,信号波形记录采用美国 Tektronix 公司的 TDS 680B 示波器(带宽 1GHz,采样速率  $5 \times 10^{-4}\text{T/s}$ )。测试时的环境温度为 18 ,相对湿度为 27%,天线距放电点距离为 18cm,其放置方向与放电通道方向平行。

### 3 静电放电电磁脉冲的测试结果

#### 3.1 接触放电时的辐射场

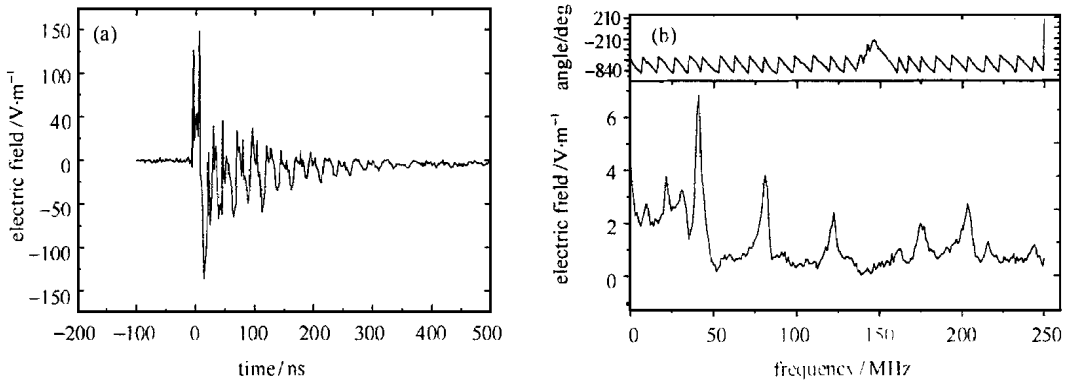


Fig 3 The radiated fields (a) and spectrum (b) of human contact discharge with 2kV

图 3 人体带电 2kV 接触放电时辐射场波形(a)及其频谱(b)

图 3 为采用人体-金属模型时 NSG435 对地放电的辐射场波形及其频谱,模拟人体带电

2kV, 接触放电方式。由图 3(a) 可以看出, 其辐射场波形为典型的衰减振铃信号, 振荡持续时间约 500ns, 峰值场强为 150V/m, 由图 3(b) 可看出, 频谱包含了 0~ 250MHz 的频率分量, 中心频率在 40MHz 左右。图 4 为采用家具模型时 N SG435 对地放电的辐射场波形及其频谱。实验中模拟家具带电 2kV, 接触放电方式。可以看出, 家具模型接触放电的辐射场也为衰减振铃波形, 但其振荡频率明显较小, 其峰值场强为 1.8kV/m, 频谱大部分分布在 100MHz 以下, 中心频率约 10MHz。

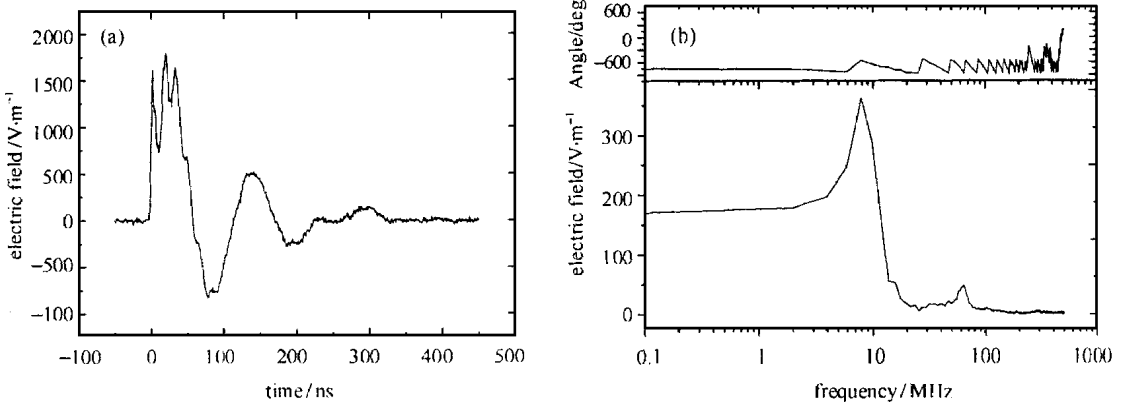


Fig 4 The radiated fields (a) and spectrum (b) of furniture contact discharge with 2kV

图 4 家具带电 2kV 接触放电时辐射场波形(a)及其频谱(b)

### 3.2 空气放电时的辐射场

图 5 为采用人体-金属模型时 N SG435 对地放电的辐射场波形(a)及其频谱(b), 模拟人体带电 2kV, 空气放电方式。人体-金属模型的空气放电辐射场波形与接触放电很相似, 都为衰减的振铃信号波形, 其正峰值场强为 200V/m, 频谱分布在 0~ 130MHz, 中心频率约 28MHz, 且有几个倍频辐射场存在。

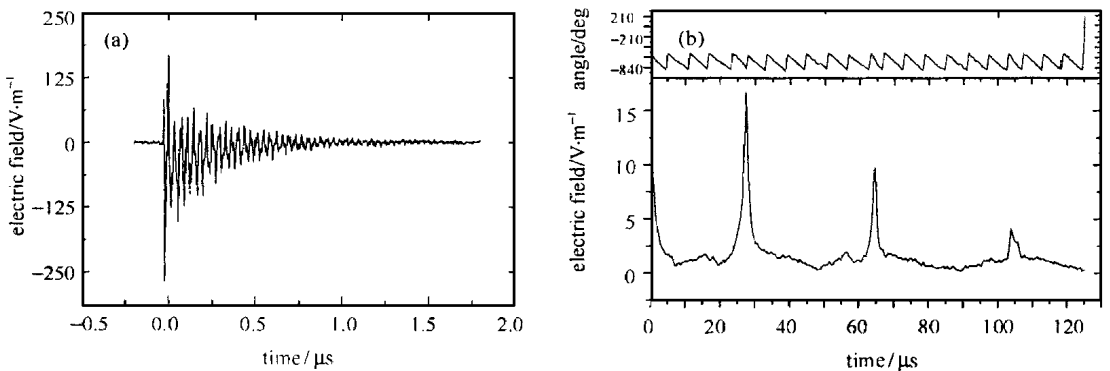


Fig 5 The radiated fields and spectrum of human air discharge with 2kV

图 5 人体带电 2kV 空气放电时辐射场波形及其频谱

图 6 为采用家具模型时 N SG435 对地放电的辐射场波形及其频谱, 实验中模拟家具带电 2kV 空气放电方式。可以看出, 家具模型在空气放电时的辐射场波形与接触放电也很相似, 但后续的振荡明显减弱, 其峰值场强可达 2.3kV/m, 频谱主要分量分布在 20MHz 以下, 中心频率在 5MHz。

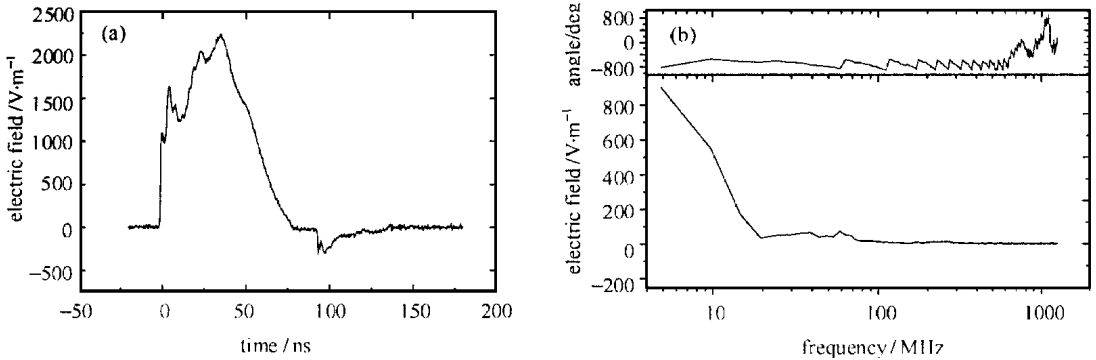


Fig 6 The radiated fields (a) and spectrum (b) of furniture air discharge with 2kV

图 6 家具带电 2kV 放电时辐射场波形(a)及其频谱(b)

## 4 结 论

人体和家具 ESD 电磁脉冲辐射场是持续时间很短的窄脉冲,其脉冲宽度约为百纳秒量级,其频谱主要分布在几十到几百兆赫,典型的频谱上限可以达到几个吉赫,与国外结论<sup>[4-6]</sup>一致。在相同的放电电压情况下,ESD 接触放电与空气放电时的辐射场波形和频谱基本一致,但当采用的放电模型不同时,ESD 辐射场波形和频谱有很大区别,主要原因是在相同的放电电压下家具模型的放电电流较大,所以其辐射电磁脉冲电场幅度就较高,而人体-金属模型的前沿较陡,脉宽较窄,所以其辐射中心频率较高。

电子元器件的电磁脉冲干扰损伤阈值为 kV/m 的量级, MOS 器件的损伤阈值更低;电爆装置 (EEDs) 等在电磁脉冲的作用下发生瞎火或早炸的阈值也在千伏每米的量级。因此,对近距离危害而言,静电放电产生的辐射场可以同高空核电磁脉冲 (HEMP)、雷电电磁脉冲 (LEMP) 等相提并论,也是复杂多变的电磁环境中主要的电磁脉冲危害源之一。

## 参考文献

- 1 Pommerenke D. *Journal of Electrostatics*, 1995, **37**: 31~ 54
- 2 Pommerenke D. *Journal of Electrostatics*, 1996, **38**: 33~ 51
- 3 Tabata Y, Tomota H. *Journal of Electrostatics*, 1990, **24**: 155~ 166
- 4 Honda M. *IEEE Trans Electron agnetic compatibility*, 1990, **32**: 641~ 645
- 5 Reinald P. *Handbook of Electromagnetic Compatibility*. San Diego: Academic Press Inc, 1995
- 6 Wilson P F, Ma M T. *IEEE Trans Electron agnetic compatibility*, 1991, **33**(1): 10~ 18
- 7 M L-STD-464 March, 1997

## EXPERIMENTAL STUDY ON EMP FIELDS RADIATED BY ESD

CHEN Yan-qiao, LI Shang-he, WU Zhan-cheng, TAN Zhi-liang

*Electrostatics Applied Institute, The Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003*

**ABSTRACT:** Electric fields radiated by ESD are studied experimentally with a monopole antenna. Experiments showed that fields radiated by ESD are narrow pulses in time domain, and the fields can reach several kilovolts per meter when the discharge occurred at a few centimeters from the unit under test. The frequency range of the fields is several tens megahertz to several hundreds megahertz.

**KEY WORDS:** electric field; ESD; monopole antenna