

文章编号: 1001-4322(2003)06-0587-04

# 静电放电火花产生的电磁场数值模型\*

毕增军, 盛松林, 孙 驰, 刘尚合

( 军械工程学院 静电与电磁防护研究所, 河北 石家庄 050003)

摘 要: 静电放电火花产生的电磁脉冲会对电子系统的正常工作造成严重的干扰,甚至造成系统的损伤。利用时域有限差分法建立了静电放电火花产生的电磁场的数值模型,模型中充分考虑了放电电极上的静电荷对场的影响。把由此模型计算的电磁场值与由解析方法得到的场值进行了比较,结果吻合良好,因此可以用此模型来研究静电放电火花产生的电磁场与电子系统的能量耦合问题。

关键词: 静电放电; 数值模型; 时域有限差分法; 电磁场; 能量耦合

中图分类号: O441

文献标识码: A

静电放电(ESD)是一高电位、强电场、瞬时大电流的过程,它产生的注入电流会对电火工品、电子器件和设备及其它一些静电敏感系统造成危害<sup>[1]</sup>。近年来随着静电测试技术、测量仪器及测试手段的迅速发展,人们逐渐认识到在静电放电过程中产生的上升时间极快、持续时间极短的初始大电流脉冲会产生强烈的电磁辐射,形成静电放电电磁脉冲(ESD EMP),它的电磁能量往往会引起电子系统中敏感部位的损坏、翻转,使某些装置中的电火工品误爆,造成事故<sup>[2]</sup>。因此,研究 ESD EMP 与电子设备、电路和器件的能量耦合机理,对探索切实有效的电磁防护措施十分必要。

对于电磁场与复杂形状物体的电磁散射和耦合问题,一般采用数值方法来研究。时域有限差分法(FDTD)是求解电磁问题的一种数值技术,它最早是由 Yee 在 1966 年提出的<sup>[3]</sup>。采用 FDTD 方法建立静电放电火花产生的电磁场的数值模型,可以得到空间中任意点的电磁场数值解,从而可以进一步研究 ESD 场与电子系统的能量耦合机理。

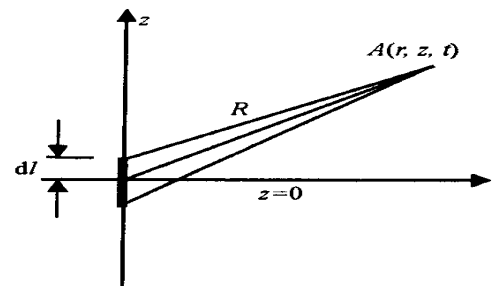


Fig. 1 Electric dipole model

图 1 电偶极子模型

## 1 数值模型的建立

在一个无限大良导电地板上进行非接触式静电放电(空气放电)所产生的放电火花,可以看作是一电小、时变线性的电偶极子,在放电通道内电流均匀分布。Wilson 推导了电偶极子的解析表达式<sup>[4]</sup>,考虑了接地板的镜像作用,如图 1 所示,对于放电火花长度为 dl,放电电流为 i(t)的静电放电火花在空间 A(r, z, t)处的电磁场表达式为

$$\vec{E}(r, z, t) = \frac{-}{a_r} \frac{dl}{2} \frac{rz}{0} \frac{1}{R^2} \left[ \frac{3}{R^3} \int_0^t i(t - R/c) dt + \frac{3i(t - R/c)}{cR^2} + \frac{1}{c^2 R} \frac{\partial i(t - R/c)}{\partial t} \right] + \frac{-}{a_z} \frac{dl}{2} \left\{ \left[ \frac{3z^2}{R^2} - 1 \right] \left[ \frac{1}{R^3} \int_0^t i(t - R/c) dt + \frac{i(t - R/c)}{cR^2} \right] + \left[ \frac{z^2}{R^2} - 1 \right] \frac{1}{c^2 R} \frac{\partial i(t - R/c)}{\partial t} \right\} \quad (1)$$

$$\vec{H}(r, z, t) = \frac{-}{a_r} \frac{dl}{2} \frac{r}{R} \left[ \frac{i(t - R/c)}{R^2} + \frac{1}{cR} \frac{\partial i(t - R/c)}{\partial t} \right] \quad (2)$$

在 P. W. Wilson 的模型中,忽略了电荷项  $Q(t) = \int_0^t i(t - R/c) dt$  对 ESD 产生的电场的作用。实际上,放电开始时放电电极上会积聚大量的初始电荷,这些电荷会在空间中产生静电场。在放电过程中,这些电荷逐渐被泄放,直到放电过程结束才泄放完,其时间变化规律决定于放电电流。因此,在接下来的数值模型中充分考虑了电荷项对电场的影响。

\* 收稿日期:2002-11-27; 修订日期:2003-01-14

基金项目:国家自然科学基金重点资助课题(50237040, 50077024)

作者简介:毕增军(1976-),男,博士研究生,主要从事兵器防电磁危害理论与技术的研究。

FD TD 法直接将有限差分式代替麦克斯韦时域场旋度方程式(3)和(4)中的微分式,得到关于场分量的有限差分式,用具有相同电参量的空间网格去模拟被研究体,选取合适的场初值和计算空间的边界条件,可以得到包括时间变量的麦克斯韦方程的四维数值解。

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\mu \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} \quad (3)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (4)$$

式中,  $\mu$ ,  $\sigma$ ,  $\epsilon$  分别为媒质中的磁导率、电导率和介电常数。

在图 2 所示的 FD TD 网格中,静电放电火花以电偶极子源的形式放在其中一个节点上。由麦克斯韦方程式(4)中的电流密度  $\mathbf{J} = \nabla \times \mathbf{D} - \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$  与电偶极子电荷系统的电偶极距  $\mathbf{p}$  的关系:  $\mathbf{J} dV = d\mathbf{p}/dt$ , 可推得  $\mathbf{J} = (d\mathbf{p}/dt) / V$ , 式中  $d\mathbf{p}/dt = i(t) d\mathbf{l}$ ,  $V$  为一个网格的体积。对于平行于  $z$  轴的电偶极子,仅考虑式(4)的  $z$  分量,令其所在节点为  $E_z(i, j, k + 1/2)$ , 则其按 FD TD 方式差分离散为

$$\begin{aligned} E_z^{n+1}(i, j, k + \frac{1}{2}) &= E_z^n(i, j, k + \frac{1}{2}) - \frac{t}{0 \ x \ y \ z} [i(t) dl]^{n+1/2} + \\ &\frac{t}{0 \ x} [H_y^{n+1/2}(i + \frac{1}{2}, j, k + \frac{1}{2}) - H_y^{n+1/2}(i - \frac{1}{2}, j, k + \frac{1}{2})] - \\ &\frac{t}{0 \ y} [H_x^{n+1/2}(i, j + \frac{1}{2}, k + \frac{1}{2}) - H_x^{n+1/2}(i, j - \frac{1}{2}, k + \frac{1}{2})] \end{aligned} \quad (5)$$

除了电偶极子所在网格节点外的其它各网格节点仍用无源空间的 FD TD 计算公式。

ESD 数值模型的计算区域采用的是 Mur 吸收边界条件<sup>[5]</sup>,对截断边界上与棱相临的一列节点上采用一阶近似条件,其它节点采用二阶近似条件。空间步长在  $x, y, z$  方向上均为 0.05m,满足减小数值色散的要求,时间步长取  $t = \Delta x / 2c$ ,为 0.083ns,满足 Courant 稳定性条件<sup>[6]</sup>,即  $c \Delta t \leq [\Delta x^{-2} + \Delta y^{-2} + \Delta z^{-2}]^{-1/2}$ ,空间网格数取 100 × 100 × 100 个,计算时间步数取 1 000。

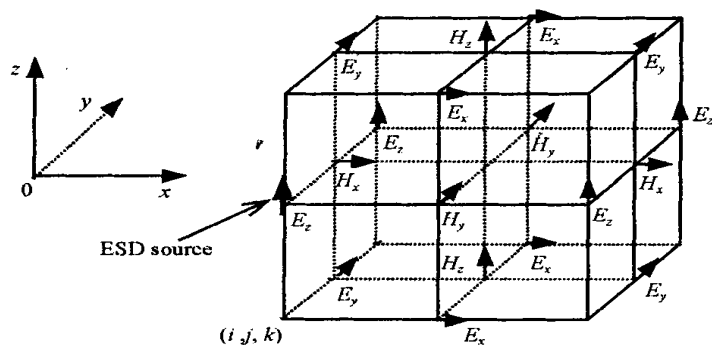


Fig. 2 Setup sketch map of electric dipole source in FDTD grid  
图 2 电偶极子源在 FDTD 网格中的设置示意图

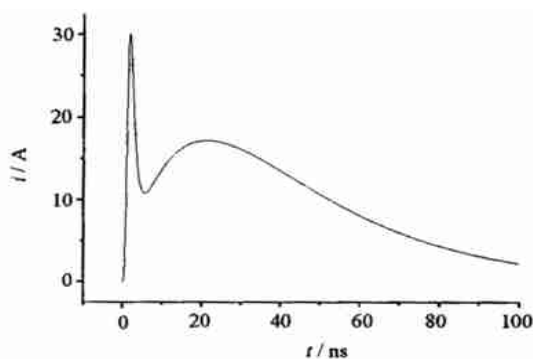


Fig. 3 ESD current waveform obtained by pulse function  
图 3 脉冲函数 ESD 电流波形

## 2 数值模型的应用

在用此数值模型来计算 ESD 火花产生的电磁场中,所采用的 ESD 电流为 IEC61000-4-2 标准中的人体-金属模型电流波形<sup>[7]</sup>,所规定的特征参数为:第一脉冲前沿上升时间为 0.7 ~ 1ns,峰值为 3.75A/kV;30ns 处为 2A/kV;60ns 处为 1A/kV。例如对于 8kV 放电,脉冲峰值为 30A,30ns 和 60ns 时的幅度分别为 16A 和 8A。标准未给出其它时刻的电流幅度参考值,也没有其它相关的解析表达式。因此本文采用了式(6)所示的一种基于脉冲函数的 ESD 电流表达式<sup>[8]</sup>,在 8kV 放电时其电流波形如图 3 所示。

$$i(t) = I_0(1 - e^{-t/\tau_1})^p e^{-t/\tau_2} + I_1(1 - e^{-t/\tau_3})^q e^{-t/\tau_4} \quad (6)$$

这种电流波形满足标准中规定的 ESD 电流的各种参数要求,而且具有很多优良特性,譬如波形的峰值、前后沿的时间及其导数几乎都可以通过相关参数独立调整。

图 4 是采用数值模型计算的 8kV 放电(对应的放电火花长度  $d_l$  约为 1.5mm)时空间中距放电点 0.33m 处的近区场点(3, 3, 5)和 3.2m 处的远区场点(40, 40, 30)的电磁场(这里所说的近区和远区是采样场点相对于

放电点的距离而言的,并非是与电磁波波长对应的近区、远区概念),并把它与考虑初始电荷后的解析方法计算的结果进行了比较(因  $y$  方向的电磁场波形与  $x$  方向的一致,故图中只给出了  $x$  方向电磁场)。

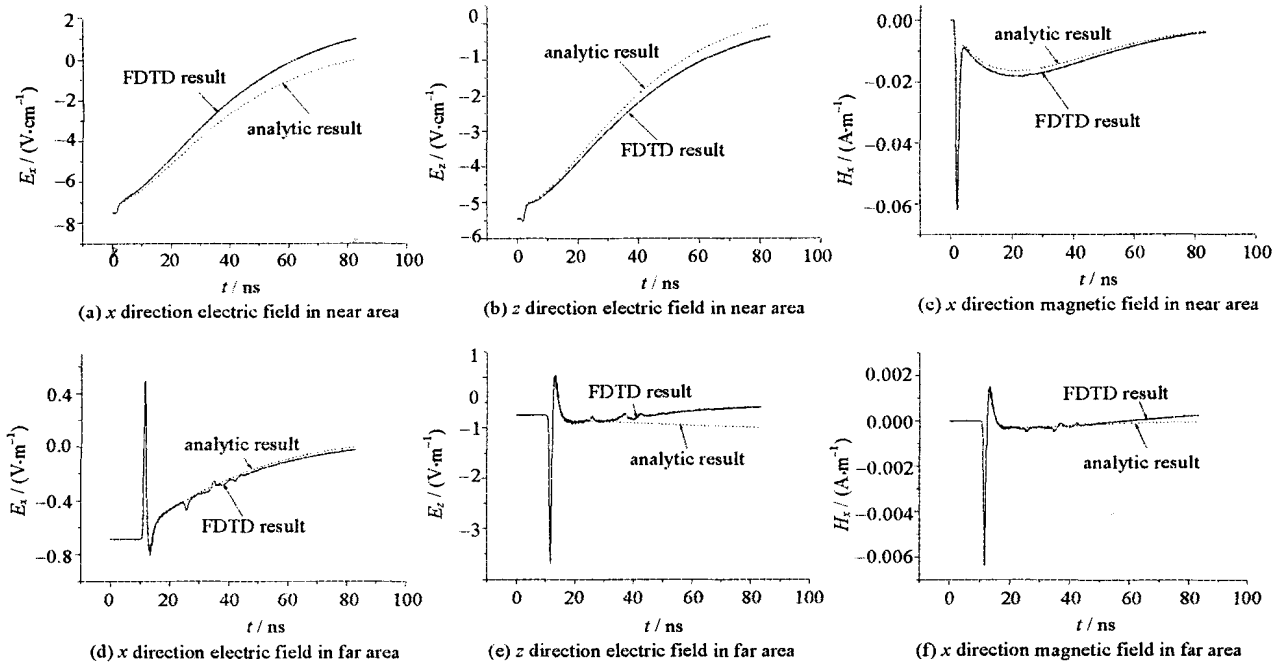


Fig. 4 Result of numerical calculation

图4 数值计算结果

从图4中可以看出在快放电时间段内(对应图3中ESD电流第一个波峰)由数值方法计算的电磁场同解析解吻合很好,而在慢放电时间段(对应图3中ESD电流第二个波峰后端)不是十分吻合,这是由于截断边界对电磁场没有完全吸收,边界反射的少许电磁场在慢放电时间段内返回并与入射场叠加而致。另外,由图4(a)和(b)可见,在近区有很强的静电感应场(由负向缓变上升曲线表示),且远大于瞬变场分量(叠加在波形前端的瞬变曲线部分),而图4(d)和(e)中的远区静电场相对于瞬变场分量较弱,这与实验测量得到的结果也比较一致<sup>[9]</sup>,可见用此数值模型来分析ESD火花产生的电磁场是可行的,而且还可以用它来分析ESD场与电子系统的电磁耦合问题。

### 3 结论

对ESD产生的电磁场与电子设备、电路和器件的耦合机理的研究,采用解析方法分析会比较困难,因此对于这样的问题一般采用数值方法来解决。本文利用FDTD方法建立了一个静电放电火花产生的电磁场的数值模型,充分考虑了放电电极上静电荷对电场的影响,由此模型计算的电磁场与解析方法得到的结果吻合良好,说明所建立的数值模型是正确的。对于在模型应用中,在ESD电流慢放电时间段内截断边界出现对电磁场的少量反射问题,可以通过增大计算区域空间来解决,但这样会增加网格数目,从而对计算机的内存和速度要求很高。另一个可行的解决方法就是采用能够对电磁场吸收更好的截断边界条件,因此以后将在这方面作进一步的研究。

### 参考文献:

- [1] 刘尚合,魏光辉,刘直承,等. 静电理论与防护[M]. 北京:兵器工业出版社,1999. (Liu S H, Wei GH, Liu Z C, et al. Electrostatic Theories and its Protection[M]. Beijing: Weapons Industry Press, 1999)
- [2] 陈砚桥,刘尚合,武占成,等. 静电放电电磁脉冲的实验研究[J]. 强激光与粒子束,1999,11(3):359-362. (Chen Y Q, Liu S H, Wu Z C, et al. Experimental Study on EMP Fields Radiated by ESD. High Power Laser and Particle Beams, 1999, 11(3): 359-362)
- [3] Yee K S. Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media[J]. IEEE Trans AP, 1966, 14(4): 302-307.
- [4] Wilson P F, Ma M T. Fields radiated by electrostatic discharges[J]. IEEE Trans on EMC, 1991, 33(1): 17.
- [5] Mur G. Absorbing boundary conditions for the finite-difference approximation of the time-domain electromagnetic field equations[J]. IEEE Electr

- magn Compat* , 1981 , **23** (4) : 377 - 382.
- [6] Kunz K S , Luebbers R J. The Finite Difference Time Domain Method for Electromagnetics[M]. Florida :CRC Press , 1993.
- [7] IEC 61000-4-2. Electromagnetic compatibility (EMC)-Part 4 - 2 : Testing and measurement techniques - Electrostatic discharge immunity test[S]. Geneva : International Electrotechnical Commission , 2002.
- [8] 盛松林, 毕增军, 刘尚合. 一个新的 IEC61000-4-2 标准 ESD 电流解析表达式[J]. 强激光与粒子束, 2003, **15**(5) :464—466. (Sheng S L , Bi Z J , Liu S H. A new analytical expression of standard current waveform in IEC61000-4-2. *High Power Laser and Particle Beams*. **15**(4) :464—466)
- [9] 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, 2003. (Sheng S L. The Study of Theoretical Space-time Distribution Model and Measurement Technology of Electromagnetic Fields Generated by Electrostatic Discharge. Shijiazhuang: Ordnance Engineering College , 2003)

## A numerical model of electromagnetic fields generated by electrostatic discharge spark

BI Zeng-jun , SHENG Song-lin , SUN Chi , LIU Shang-he  
( *Electrostatic and Electromagnetic Protection Research Institute ,  
Ordnance Engineering College , Shijiazhuang 050003 , China* )

**Abstract :** Electromagnetic pulse (EMP) generated by electrostatic discharge (ESD) spark can severely interfere in normal operation of the electronic systems and even damage them. In this paper , a numerical model of electromagnetic fields generated by ESD spark is presented using Finite-Difference Time-Domain (FDTD) method , in which the influence of electrostatic charge on the electrode over the electric field is taken into account. Electromagnetic fields calculated by this model are compared with those by the analytic method and they make a good agreement with each other. Therefore , this model can be applied to study energy coupling problems between electromagnetic fields generated by ESD spark and electronic systems.

**Key words :** ESD ; Numerical model ; FDTD ; Electromagnetic fields ; Energy coupling