

ESD 脉冲辐射电磁场瞬态仿真与分析

万 毅¹, 张瀚文², 颜 伟³, 王 壮³

(1.江苏省医疗器械检验所, 江苏 南京 210019)

(2.南京市中华中学, 江苏 南京 210019)

(3.南京师范大学电气与自动化工程学院, 江苏 南京 210042)

[摘要] 现今电子电路的结构越来越复杂,大量的无源器件集成在 PCB 各个模块上,这些元器件极易收到来自外界的 EMS 干扰信号的干扰,通常情况人们将目光集中于中低频段信号通过传导耦合串扰直接进入设备,而忽略了 EMS 干扰的高频特性会在近场范围内通过空间磁场施加在模块上. 本文通过模拟静电放电(ESD)脉冲电磁辐射场,分析其近场对 PCB 板级电路上的复杂无源模块产生的辐射干扰,并且对无源模块周围受到影响产生的场进行仿真并且得出时域上的信号强度分布.

[关键词] 静电放电,辐射干扰,电磁兼容

[中图分类号] TM461; TN03 [文献标志码] A [文章编号] 1672-1292(2017)04-0007-07

Transient Simulation and Analysis of Electrostatic Discharge Pulse Electromagnetic Field

Wan Yi¹, Zhang Hanwen², Yan Wei³, Wang Zhuang³

(1.Jiangsu Institute of Medical Device Testing, Nanjing 210019, China)

(2.Nanjing Zhonghua High School, Nanjing 210019, China)

(3.School of Electrical and Automation Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210042, China)

Abstract: The structure of electronic circuits is becoming more and more complex and a large number of passive devices which are easy to receive interference from outside the EMS interference signal are integrated in each module of PCB. In general, people focus their attentions on the low-frequency and middle-frequency signal directly into the device through the conduction coupling crosstalk, but ignore the high frequency characteristic of the EMS interference that apply to the module by the space magnetic field in the near field. In this paper, by simulating the electrostatic discharge (ESD) pulsed electromagnetic field, the radiation interference caused by the complex passive modules on the PCB board circuit in the near field is analyzed. And the field generated by the surroundings of the passive module is simulated and the signal intensity distribution in the time domain is derived.

Key words: electrostatic discharge, radiation interference, electromagnetic compatibility

随着电气电子产品的工艺和技术的不断发展,电气电子产品朝着便携式、智能化和数字化方向发展,开关器件的工作频率越来越高,大量电子噪声以电磁场的形式在空间传播,引起了严重的电气电子产品之间的电磁兼容问题,污染了周围的电磁环境,甚至严重影响了其他产品的正常工作. 一般从干扰的源头处理,将源对外的辐射“掐断”,来限制环境中电磁场的形成,或限制辐射噪声的传播通路,将源产生的电磁场限制在有限空间中,但对于无法控制的辐射源,在电磁抗干扰测试中会引起辐射噪声,且未对其噪声产生的机理、整改措施作有效的总结研究. 本文着重分析了静电放电(electrostatic discharge, ESD)高频信号的辐射近场效应,建立了 LTCC 无源器件电磁场模型,并加以验证^[1-3].

1 高频脉冲辐射机理分析

假设一维坐标的 x' 处有一等效天线长度为 l ,而测试点位于 x 处,辐射噪声频率测得为 f ,则辐射天线

收稿日期:2017-03-08.

基金项目:江苏省教育厅高校科研成果产业化推进项目(JHB2011-20).

通讯联系人:万毅,工程师,研究方向:电磁兼容检测. E-mail:108478632@qq.com

与测试点之间的距离可表示为 $r = |\mathbf{R} - \mathbf{n} \cdot \mathbf{x}'|$, 其中 \mathbf{n} 为 \mathbf{R} 所指向的方向, \mathbf{R} 为原点到测试点的矢量距离. 电磁辐射噪声波长可以由公式 $\lambda = c/f$ 确定, 且有 $\lambda \gg l$ 和 $r \gg l^{[4-5]}$. 辐射体中的电流密度为 \mathbf{J} 是时间 t 和测试点位置 \mathbf{x} 的函数, 则矢量电磁场为

$$\mathbf{A}(\mathbf{x}, t) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int \frac{\mathbf{J}(\mathbf{x}', t-r/c)}{r} dV'. \quad (1)$$

式中, 电流密度 $\mathbf{J}(\mathbf{x}', t) = \mathbf{J}(\mathbf{x}') e^{-j\omega t}$ 可表示为

$$\mathbf{J}(\mathbf{x}, t) = \mathbf{J}(\mathbf{x}') e^{-j\omega t}. \quad (2)$$

将式(2)代入到式(1)中可得到

$$\mathbf{A}(\mathbf{x}, t) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int \frac{\mathbf{J}(\mathbf{x}') e^{j(kr-\omega t)}}{r} dV'. \quad (3)$$

式中, k 为波数, 同时将式(3)中的非积分变量分离出来, 有

$$\mathbf{A}(\mathbf{x}, t) = \mathbf{A}(\mathbf{x}) e^{-j\omega t}. \quad (4)$$

可化简为

$$\mathbf{A}(\mathbf{x}) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int \frac{\mathbf{J}(\mathbf{x}') e^{jkr}}{r} dV'. \quad (5)$$

即

$$\mathbf{A}(\mathbf{x}) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int \frac{\mathbf{J}(\mathbf{x}') e^{jk(\mathbf{R}-\mathbf{n} \cdot \mathbf{x}')}}{\mathbf{R}-\mathbf{n} \cdot \mathbf{x}'} dV'. \quad (6)$$

记 R 为 \mathbf{R} 的长度. 将 A 对小参数 $\frac{x'}{R}$ 和 $\frac{x'}{\lambda}$ 展开. 在计算远场时, 仅保留 $\frac{1}{R}$ 的最低次项, 忽略分母中 $\mathbf{n} \cdot \mathbf{x}'$ 项, 保留指数函数中的 $\mathbf{n} \cdot \mathbf{x}'$ 项, 且

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}. \quad (7)$$

此时把式(6)的相因子对 $k\mathbf{n} \cdot \mathbf{x}'$ 展开得到

$$\mathbf{A}(\mathbf{x}) = \frac{\mu_0 e^{jkR}}{4\pi R} \int \mathbf{J}(\mathbf{x}') (1 - jk\mathbf{n} \cdot \mathbf{x}' + \dots) dV'. \quad (8)$$

式中, 第一项为电偶极子辐射第二项为磁偶极子辐射.

根据不同的电磁波传播特性分别考虑电偶极子的辐射电场和辐射磁场, 且由麦克斯韦方程组和波动方程得到唯一确定的电磁场表达式. 电场用矢量电位和矢量磁位表示^[6-8],

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}) = -j\omega\mathbf{A}(\mathbf{r}) - j \frac{\nabla \cdot \nabla \cdot \mathbf{A}(\mathbf{r})}{\omega\mu_0\epsilon_0} - \frac{\nabla \times \mathbf{F}(\mathbf{r})}{\epsilon}. \quad (9)$$

磁场的表示为

$$\mathbf{H}(\mathbf{r}) = -j\omega\mathbf{F}(\mathbf{r}) - j \frac{\nabla \cdot \nabla \cdot \mathbf{F}(\mathbf{r})}{\omega\mu\epsilon} + \frac{\nabla \times \mathbf{A}(\mathbf{r})}{\mu_0}. \quad (10)$$

其中 $\mathbf{F}(\mathbf{r}) = \frac{\epsilon_0 e^{jkR}}{4\pi R} \int \mathbf{M}(\mathbf{x}') (1 - jk\mathbf{n} \cdot \mathbf{x}' + \dots) dV'$ 是矢量电位, 由于 ESD 脉冲电磁场是由电偶极子发射的, 故式(9)中忽略第三项, 式(10)中忽略前两项得电偶极子辐射电磁场公式

$$\begin{cases} \mathbf{H}_r = 0, \\ \mathbf{H}_\theta = 0, \\ \mathbf{H}_\varphi = \frac{k^2 I_0 l \sin \theta}{4\pi} \left[\frac{j}{kR} + \frac{1}{(kR)^2} \right] e^{-jkR}. \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} E_\varphi = 0, \\ E_r = \frac{2k^3 I_0 l \cos \theta}{4\pi\epsilon_0} \left[\frac{1}{(kR)^2} - \frac{j}{(kR)^3} \right] e^{-jkR}, \\ E_\theta = \frac{2k^3 I_0 l \sin \theta}{4\pi\epsilon_0} \left[\frac{j}{kR} + \frac{1}{(kR)^2} - \frac{j}{(kR)^3} \right] e^{-jkR}. \end{cases} \quad (12)$$

2 ESD 脉冲电磁场模型

2.1 ESD 电流模型

电工委员会(IEC)制定的标准 IEC61000-4-2 中规定了 ESD 电流波形是典型的短持续时间的双峰波形,且以人体-金属模型作为 ESD 的主要实验模型. 图 1 显示静电放电的标准电流波形,因 IEC 没有给出电流解析表达式^[9-11],故本文采用基于脉冲函数的表达式

$$i(t) = 213(1 - e^{-\frac{t}{0.62}})^8 \cdot e^{-\frac{t}{1.1}} + 121(1 - e^{-\frac{t}{55}}) e^{-\frac{t}{26}}. \quad (13)$$

2.2 ESD 脉冲电磁场辐射建模

对 ESD 电磁场进行分析需要适合的物理模型,常用如图 2 所示的电偶极子模型描述辐射电磁场空间分布. 模型主要模拟实际静电回路中可能有的长电流通路,此时 ESD 火花可简化成位于无限大导电接地平板上电性小的时变线性偶极子. 考虑到电极上会积累电荷,在研究电磁脉冲辐射规律时,本文采用电偶极子辐射 ESD 电流进行数值仿真. 放电导体表面电阻率很低,电弧无法积累电荷,其近场电荷影响可忽略. 此时非接触放电时的放电尖端与导体表面很接近,可以认为 $z'=0, R_1=R_2=R$. 在此基础上可以得到距离放电中心 R 处 A 的电场和磁场表达式^[12-13].

$$H(z, r, \varphi, t) = e_\varphi \frac{\Delta l}{2\pi} \frac{r}{R} \left(\frac{i(t-R/c)}{R^2} + \frac{1}{cR} \frac{\partial i(t-R/c)}{\partial t} \right), \quad (14)$$

$$\begin{aligned} E(z, r, \varphi, t) = e_r \frac{\Delta l}{2\pi\epsilon_0} \frac{rz}{R^2} & \left(\frac{3 \int_0^t (t' - R/c) dt' - 3 \int_0^\infty i(t') dt'}{R^3} - i + \frac{3i(t - R/c)}{cR^2} + \frac{1}{c^2 R} \frac{\partial i(t - R/c)}{\partial t} \right) + \\ e_z \frac{\Delta l}{2\pi\epsilon_0} & \left(\left(\frac{3z^2}{R^2} - 1 \right) \left(\frac{\int_0^t i(t' - R/c) dt' - \int_0^\infty i(t) dt}{R^3} + \frac{i(t - R/c)}{cR^2} \right) - \frac{r^2}{c^2 R^3} \frac{\partial i(t - R/c)}{\partial t} \right). \end{aligned} \quad (15)$$

式中, z, r, φ 是 3 个坐标轴, e_φ, e_r, e_z 是单位向量 Δl 是电弧长度, ϵ_0 是真空介电常数, R 是测试点到电偶极子中心的距离 $R = \sqrt{r^2 + z^2}$, t 为时间, t' 是积分变量. 将式(13)代入式(14)、(15)可得到电场与磁场关于时间 t 的函数表达式.

2.3 无源器件在 ESD 辐射场下的干扰建模

本文使用图 3 所示的试验装置,静电发生器的放电头在 GTEM 小室外作为脉冲源, GTEM 小室作为传输线,用来产生 ESD 的脉冲辐射场. 静电放电发生器采用典型人体-金属模型其电路等效如图 4 所示. 其中 K_1 和 K_2 为充电放电开关,打开和关断的时间都极短, U 为外接高压电压源, R_{ch} 为充电电阻, C_s 为储能电容, R_d 为放电电阻,实验中 R_d 为 50Ω . GTEM 的 50Ω 上的采样电

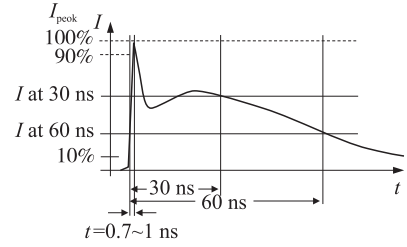


图 1 静电放电标准电流波形

Fig. 1 Electrostatic discharge of standard current waveform

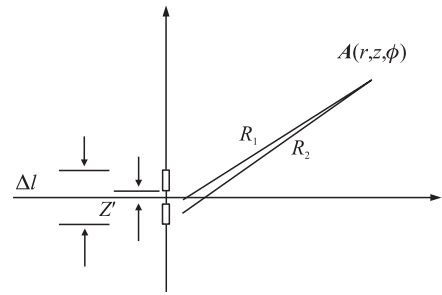


图 2 电偶极子模型

Fig. 2 Electric dipole model

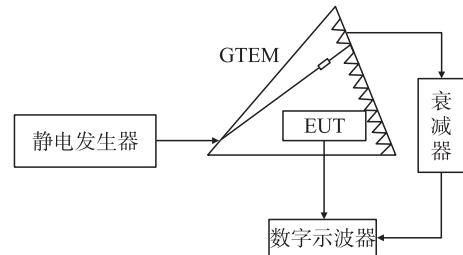


图 3 静电放电脉冲辐射实验模型

Fig. 3 Experimental model of electrostatic discharge pulse radiation

压作为参考电压由示波器转换为辐射场场强作为 EUT 的激励源. 并由此可以计算出释放到芯板上的电压值

$$U = \frac{R}{R_d + R} V_h. \quad (16)$$

通过示波器可测得当静电发生器设定 U 为 4 kV 时 EUT 处激励场的强度 E , 如图 5 所示.

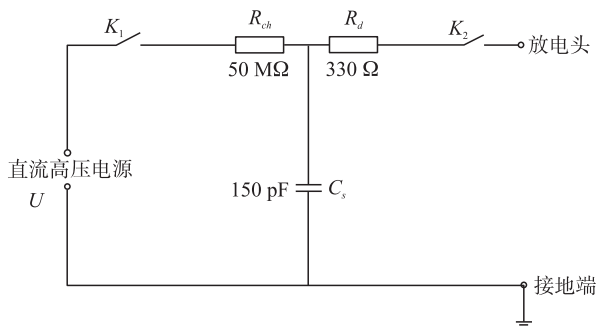
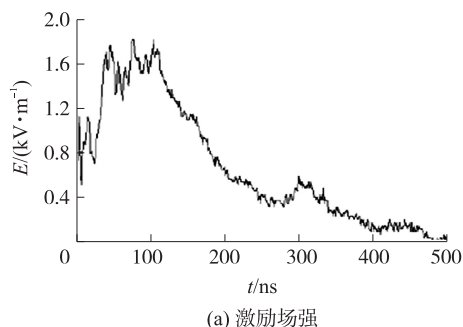


图 4 静电放电发生器内部等效电路图

Fig. 4 Internal equivalent circuit diagram of electrostatic discharge generator



(a) 激励场强

图 5 静电发生器设置 4 kV 时 EUT 处的电场强度

Fig. 5 The electrostatic generator sets the electric field strength at the EUT at 4 kV

以上介绍的测量装置测出 GTEM 室内的 ESD 的脉冲辐射场时域波形. 下面从软件仿真的角度分析复杂多层无源器件受到静电脉冲电磁场作用激发的场的情况.

3 复杂无源器件静电脉冲电磁场仿真

3.1 有限元仿真算法

图 6 是二维静电场电位分布模型, 在区域 D 中电位满足二维拉普拉斯方程, 区域边界 G 上满足第一类边界条件, 则区域所对应的泛能量表达式为^[14-15]

$$W = \frac{1}{2} \int_D \left[\left(\frac{\partial V}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial y} \right)^2 \right] dS. \quad (17)$$

可推导出 $\varepsilon W = \frac{1}{2} \varepsilon \int_D e dS$ 为区域 D 中能量的实际总和.

如图 7 所示, 在有限元法分析中, 先将区域分割成 n 个三角形网格(网格的个数是有限的), 每一个网格为一个单元. 区域中的各个网格的连接点为节点, 假设共有 m 个节点, 节点上的电位是未知的待求量, e 是每个小网格中的电能. 图 8 是仿真处理流程^[15-21].

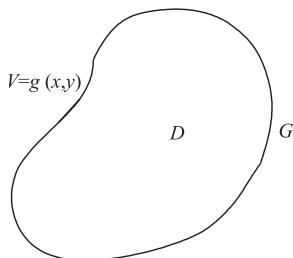


图 6 静电场区域 D 满足第一类边界条件

Fig. 6 The electrostatic field region D satisfies the first class boundary condition

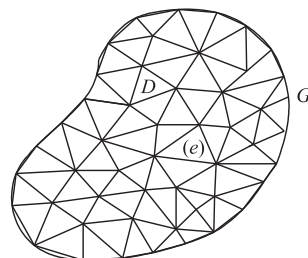


图 7 有限元网格划分及小网格电能 e

Fig. 7 Finite element meshing and small grid power e

3.2 仿真结果分析

ESD 电流源选取为放电电压为 4 kV 的电流, 电流方向平行于 Z 轴, 仿真时主要的计算空间在辐射边界以内. 将受测时的 LTCC 滤波器视为观测点, 并且无源滤波器距离放电点的距离为 60 cm. 观察该点电磁场在时域上的强度, 其结果由 HFSS 导入 Matlab 优化运算, 如图 9~14 所示.

从电磁场公式计算可知, 在平面波中电场主要是存在于平行 z 坐标轴的方向, 而磁场主要存在于平行

x 轴的方向上,而平面波的传播方向为 y 轴。 E_z 的幅度很大,最大接近 550 V/m,故在近场区,ESD 也会造成器件、设备的损坏和误动。类似地,磁场在 H_x 上的分量也很大,峰值达到了 0.02 A/m。虽然不会对设备造成实质性的损坏,但有可能会敏感芯片的功能紊乱。在近场区无论是电场分量还是磁场分量,其场强峰值均出现在 10 ns 以内,10 ns 以后场强减小,且均先出现波峰再出现波谷,波形与 ESD 波形吻合。通过对图 12~14 和图 9~11 的分析,可以看出在 3 m 处的电场与磁场均比 60 cm 处减小很多,其中磁场 H_x 已经降低到峰值只有 0.002 附近,在远区场主要有电流微分项产生的电磁场已经很弱了,可见 ESD 脉冲辐射是近场危害。

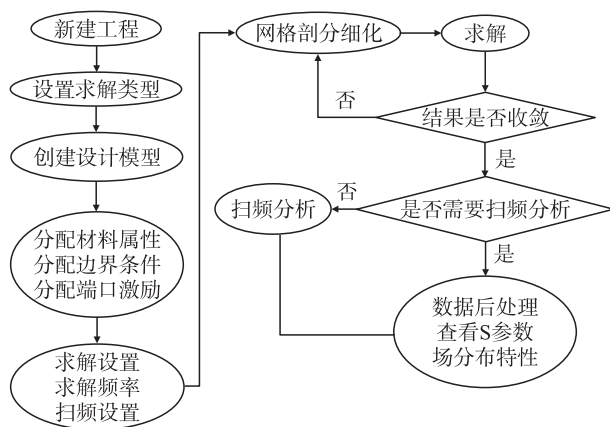


图 8 HFSS 仿真设计流程图

Fig. 8 Simulation design flow chart of HFSS

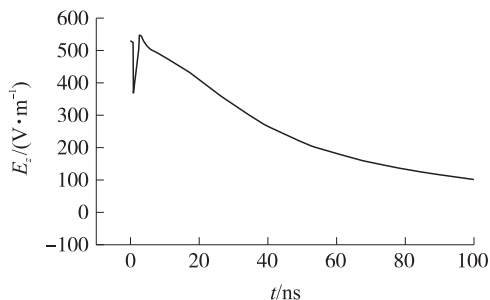

 图 9 近场处电场 z 方向

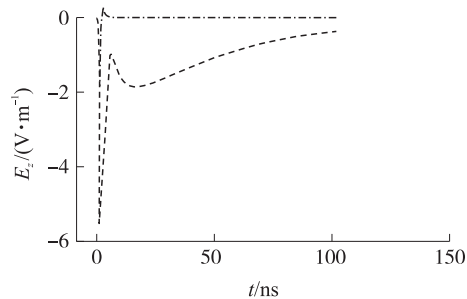
 Fig. 9 The electric field z direction in the near field


图 10 电流项和电流微分项产生的电场强度

Fig. 10 Electric field intensity produced by an electric current term and a current differential term

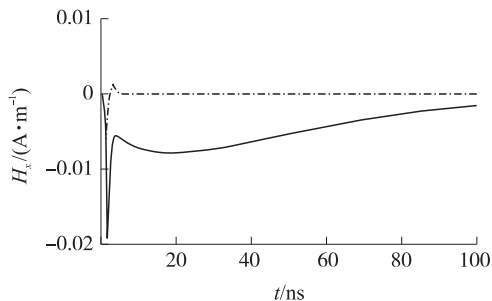

 图 11 近场处磁场 x 方向电流与电流微分项产生的磁场

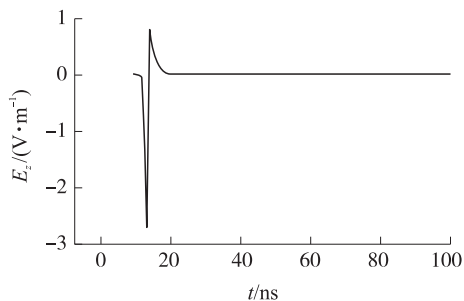
 Fig. 11 A magnetic field produced by a magnetic field, x direction, current, and current differential in the near field

 图 12 远场处电场 z 方向

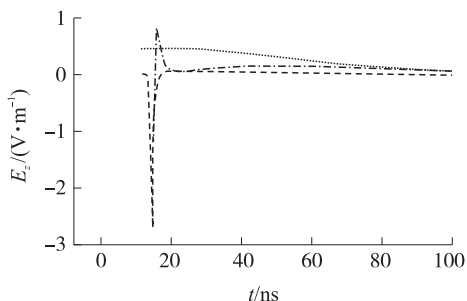
 Fig. 12 The electric field z direction in the far field


图 13 远场 3 m 处各分量对电场的贡献度

Fig. 13 The contribution of each component to the electric field at 3 m

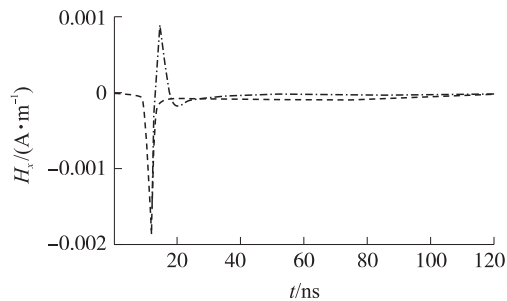

 图 14 远场 3 m 处磁场 x 方向

 Fig. 14 Far field 3 m magnetic field x direction

4 结语

本文利用数值计算方法——有限元方法,通过 MATLAB 编程和 HFSS 软件建模仿真,研究了静电放电的辐射特性,以及在不同位置辐射场强的分布情况,计算分析表明:

(1) 仿真结果显示近场电场主要是电极上积累电荷产生的,而远场主要是电流微分项产生的. 在近场磁场中主要是由电流项起主导作用,而远场区中也是由电流微分项起主要作用.

(2) ESD 辐射场峰值随放电电压等级的增大而增大.

(3) 由于 ESD 放电电流峰值随放电电压等级增大而增大,且电流上升时间变长,同时总体电流微分项也在变大,故在产生相同场强时,电压等级高时能够比电压等级低时有更远的距离.

[参考文献] (References)

- [1] 颜伟,赵阳,王恩荣,等. 复杂电子系统辐射 EMI 噪声机理分析与抑制[J]. 中国电机工程学报,2013,33(15):173-180.
YAN W,ZHAO Y,WANG E R,et al. Noise mechanism analysis and suppression for radiated electromagnetic interference noise[J]. Proceedings of the CSEE,2013,33(15):173-180.(in Chinese)
- [2] 赵阳,颜伟,赵波,等. 电路辐射干扰机理诊断与特性估计方法研究[J]. 电工技术学报,2010,25(10):6-13.
ZHAO Y,YAN W,ZHAO B,et al. Investigation on radiated EMI noise diagnosis and estimation for HF circuits[J]. Transactions of China electrotechnical society,2010,25(10):6-13.(in Chinese)
- [3] 颜伟,赵阳,王恩荣,等. 射频识别系统电磁辐射干扰特征快速分析与抑制[J]. 中国电机工程学报,2012,32(9):161-166.
YAN W,ZHAO Y,WANG E R,et al. Analysis suppression on radiated EMI noise for radio frequency identification systems[J]. Proceedings of the CSEE,2012,32(9):161-166.(in Chinese)
- [4] 赵阳,罗永超,颜伟,等. 高频电路辐射干扰快速分析与预估方法[J]. 电波科学学报,2010,25(3):466-471.
ZHAO Y,LUO Y C,YAN W,et al. Fast analysis and estimation approach applied in radiated EMI for high frequency circuit[J]. Chinese journal of radio science,2010,25(3):466-471.(in Chinese)
- [5] 赵阳,董颖华,陆婉泉,等. 可再生能源系统电磁兼容关键技术研究[J]. 南京师范大学学报(工程技术版),2010,10(3):1-6.
ZHAO Y,DONG Y H,LU X Q,et al. Technology of EMC research in renewable energy systems[J]. Journal of Nanjing normal university(engineering and technology),2010,10(3):1-6.(in Chinese)
- [6] 冯利民,钱照明. 数字电路 PCB 板辐射 EMI 的研究[J]. 电力电子技术,2007,41(12):2-4.
FENG L M,QIAN Z M.Study on the radiation interference of the digital PCB[J]. Power electronics,2007,41(12):2-4.(in Chinese)
- [7] YUAN Z Y,LI T,LI C,et al. New mathematical descriptions of ESD current waveform based on the polynomial of pulse function[J]. IEEE transactions on electromagnetic compatibility,2006,48(3):589-591.
- [8] WAIT J R,HILL D A. Impedance of an electric dipole located in a cylindrical cavity in a dissipative medium[J]. Applied physics,1976,11(4):351-356.
- [9] 毕增军,盛松林,范丽思,等. 静电放电火花产生的电磁场特征分析[J]. 计算物理,2004,21(1):86-90.
BI Z J,SHENG S L,FAN L S,et al. Characteristic analysis of electromagnetic fields generated by electrostatic discharge spark[J]. Chinese journal of computational physics,2004,21(1):86-90.(in Chinese)
- [10] 周星,魏光辉,张希军. ESD 辐射场的计算及对传输线的耦合研究[J]. 高电压技术,2008,34(4):670-673.
ZHOU Y,WEI G H,ZHANG X J.Calculation of ESD radiation fields and coupling of ESD EMP to a transmission line[J]. High voltage engineering,2008,34(4):670-673.(in Chinese)
- [11] 杜娟,邱晓晖,赵阳,等. 基于 LabVIEW 的数据采集与信号处理系统的设计[J]. 南京师范大学学报(工程技术版),2010,10(3):7-10.
DU J,QIU X H,ZHAO Y,et al. Data Acquisition and Signal Processing System Based on LabVIEW[J]. Journal of Nanjing normal university(engineering and technology),2010,10(3):7-10.(in Chinese)
- [12] 赵阳,董颖华,陆婉泉,等. 大功率开关磁阻电机 EMI 噪声综合分析与处理[J]. 中国电机工程学报,2011,31(21):135-141.

- ZHAO Y, DONG Y H, LU X Q, et al. EMI noise analysis and process for large-power switched reluctance motor [J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(21): 135–141. (in Chinese)
- [13] CANIGGIA S, MARADEI F. Circuit and numerical modeling of electrostatic discharge generators [J]. IEEE transactions on industry applications, 2015, 42(6): 1350–1357.
- [14] ANGELI M, CARDELLI E. Numerical modeling of electromagnetic fields generated by electrostatic discharges [J]. IEEE transactions on magnetics, 1997, 33(2): 2199–2202.
- [15] 刘尚合, 谭伟. 静电防护研究与进展 [J]. 物理, 2000, 29(5): 304–307.
LIU S H, TAN W. Advance in electrostatic protection [J]. Physics, 2000, 29(5): 304–307. (in Chinese)
- [16] HUANG J S, DENG Q B, LIU F, et al. The test of electromagnetic field radiated by electrostatic discharge (ESD) from the real charged human body in the office [C]//Asia-Pacific Conference on Environmental Electromagnetics, Hangzhou, 2000. 412–416.
- [17] 梁昌洪, 谢拥军, 官伯然. 简明微波 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
LIANG C H, XIE Y J, GUAN B. Concise microwave [M]. Beijing: Higher Education Press, 2006. (in Chinese)
- [18] KAMI Y, SATO R. Transient response of a transmission line excited by an electromagnetic pulse [J]. IEEE transactions on electromagnetic compatibility, 1988, 30(4): 457–462.
- [19] GOLDBERG M. Stability criteria for finite difference approximations to parabolic systems [J]. Applied numerical mathematics, 2000, 33(1): 509–515.
- [20] 王长清, 祝西里. 电磁场计算中的时域有限差分法 [M]. 北京: 北京大学出版社, 1994.
WANG C Q, ZHU X L. Time domain finite difference method in electromagnetic field calculation [M]. Beijing: Peking University Press, 2014. (in Chinese)
- [21] 谢处方. 电磁场与电磁波 [M]. 4 版. 北京: 高等教育出版社, 2009.
XIE C F, RAO K J. Field and wave electromagnetics [M]. 4th ed. Beijing: Higher Education Press, 2009. (in Chinese)

[责任编辑: 陈 庆]