

文章编号:1000-582X(2008)05-0486-04

导线连接箱体内电路上耦合干扰电流分析

俞集辉¹, 都进学^{1,2}, 李旭¹

(1. 重庆大学 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆 400030;

2. 重庆科技学院 电子信息工程学院, 重庆 400050)

摘要:应用时域有限差分(finite difference time domain, FDTD)法对电磁干扰脉冲作用下, 导线连接屏蔽箱体内电路上的耦合干扰电流进行了建模和仿真模拟。结果表明, 当有导线穿过屏蔽箱体时, 箱体内电路上的耦合干扰电流会显著增强, 连接导线的长度、电磁干扰脉冲的入射角度对箱体内电路上的干扰电流都有影响。并提出了一种用开口金属环抑制这种干扰电流的方法。

关键词:时域有限差分法; 屏蔽箱体; 电磁兼容

中图分类号: TM154

文献标志码: A

Coupling current on circuits inside a shielding box penetrated by a wire with an aperture

YU Ji-hui¹, DU Jin-xue^{1,2}, LI Xu¹

(1. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400030, P. R. China;

2. College of Electric and Information Engineering, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing 400050, P. R. China)

Abstract: The finite difference time domain method was used to simulate an electromagnetic induced current on the circuits inside a shielding box penetrated by a wire with an aperture. Results show that a penetrative wire can increase the induced current on circuits greatly. The wire's length and incident angle of the electromagnetic wave have significant effects on electromagnetic interference in the box. We also proposed a method to suppress the interference current using a metal ferrule.

Key words: finite difference time domain method; shielding box; electromagnetic compatibility

电磁场对电子设备进行干扰主要通过 2 条途径: 一是通过屏蔽机箱上的孔、缝直接进入电子设备, 因为在箱体上一般都不可避免地开有孔缝或是孔阵, 用作电源线的连接、通风、或其它用途。Allen Taflove^[1]首先提出了一种用于计算复杂箱体电磁脉冲孔缝耦合问题的 MOM/FDTD 的混合算法。Marcello D'Amore^[2]和 Stavros V. G^[3]分别运用时域有限差分(finite difference time domain, FDTD)

法分析了干扰电磁波在箱体内的分布, 计算了箱体的屏蔽效能, 并进行了相关的实验研究。W. P. Carpes, Jr. 等人^[4]运用 FEM 法对处于开口箱体内导线上的耦合干扰电压进行了研究。国内在这方面也进行了较为深入的研究^[5]。二是电磁干扰把电磁能量耦合在屏蔽系统与外界相连接的电源线、信号线上, 形成共模干扰电流流入设备^[6]。S. A. Saario 等人提出了用铁氧体器件对导线上干扰电流进行抑

收稿日期: 2008-01-02

基金项目: 重庆市自然科学基金重点资助项目(CSTC2006BA6015)

作者简介: 俞集辉(1944-), 男, 重庆大学教授, 博士生导师, 主要从事电磁兼容电磁场理论研究, (Tel) 023-65112230; (E-mail) yujihui@cqu.edu.cn.

欢迎访问重庆大学期刊网 <http://qks.cqu.edu.cn>

制的方法,并用 FDTD 法进行了仿真研究^[7]。Hyun Ho Park 等人用 FDTD 法分析了一种褶皱型孔缝对共模干扰电流的抑制作用^[8]。Hakan Bağci 等人用 TDIE-FDTD-MNA 混合算法研究了干扰电流通过同轴电缆在箱体上的耦合电磁场分布情况^[9]。

笔者应用时域有限差分法对电磁脉冲作用下,导线连接屏蔽箱体内部电路上耦合干扰电流进行了建模和仿真,分析了贯通导线的长度、电磁脉冲的入射角度对箱体内部电路上耦合干扰电流的影响。

1 模型的建立

建立的导线穿过开口屏蔽箱体并与其内部电路相连接的简化物理模型如图 1 所示,箱体长 30 cm,宽 30 cm,高 15 cm,厚度为 0.2 cm,正方形贯通开口的边长为 2 cm,位于箱体 x 与 z 平面的中部。屏蔽箱体内部的电路用一半径为 0.2 cm,长 20 cm 的导线代替,距离机箱底 2.5 cm,两端所接电阻 $R_1 = R_2 = 50 \Omega$,贯通导线的半径为 0.4 cm,其箱体内部水平段的长度为 14 cm,垂直段的长度为 5 cm,暴露于箱体外部的长度为 L 。入射干扰电场 E_i 与贯通导线的夹角为 θ 。

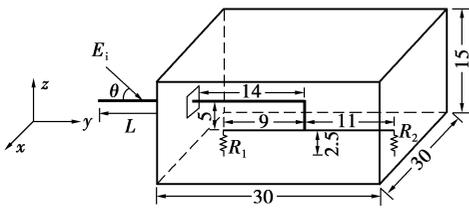


图 1 简化物理模型图(单位:cm)

2 算法理论

在各向同性、均匀、无耗媒质构成的无源空间中,Maxwell 方程的 2 个旋度方程为^[10]

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\mu \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} - \mathbf{J}_m, \tag{1}$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \epsilon \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} + \mathbf{J}, \tag{2}$$

其中: \mathbf{E} 为电场强度; \mathbf{H} 为磁场强度; \mathbf{J} 为电流密度; \mathbf{J}_m 为磁流密度。

时域有限差分法把空间的电场和磁场按 Yee 氏网格形式分布,把依赖时间变量的麦克斯韦方程组,用二阶精度中心差分近似的有限差分方程组代替,给定相应电磁问题的初始值,就可以用 FDTD 方法逐步推进地求得以后各个时刻空间电磁场的分布。式(3)给出了 x 方向电场的时域有限差分方程。

$$E_x^{n+1}\left(i+\frac{1}{2},j,k\right) = \frac{1-\frac{\sigma(m)\Delta t}{2\epsilon(m)}}{1+\frac{\sigma(m)\Delta t}{2\epsilon(m)}} \times$$

$$E_x^n\left(i+\frac{1}{2},j,k\right) + \frac{\frac{\Delta t}{\epsilon(m)}}{1+\frac{\sigma(m)\Delta t}{2\epsilon(m)}} \times \left[\frac{H_z^{n+\frac{1}{2}}\left(i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2},k\right) - H_z^{n+\frac{1}{2}}\left(i+\frac{1}{2},j-\frac{1}{2},k\right)}{\Delta y} - \frac{H_y^{n+\frac{1}{2}}\left(i+\frac{1}{2},j,k+\frac{1}{2}\right) - H_y^{n+\frac{1}{2}}\left(i+\frac{1}{2},j,k-\frac{1}{2}\right)}{\Delta z} \right], \tag{3}$$

式中: $m=(i+1/2,j,k)$; ϵ 为介电常数, F/m; i,j 和 k 均为整数,分别表示 x,y 和 z 坐标方向的网格标号; Δt 表示时间步长; n 表示时间步长个数; $\Delta x,\Delta y$ 和 Δz 分别表示 x,y 和 z 方向的空间网格步长。

在用 FDTD 法处理导线终端所接阻性负载时,为了方便处理,可以利用关系 $R=l/\sigma A$,恰当地选择材料参数,在电阻所处的位置插入一段有耗导体替代电阻^[10]。其中, σ 是体电阻的电导率; l 是体电阻的长度; A 是体电阻的横截面积。文中 $R=50 \Omega$, $A=4 \times 10^{-6} \pi$, $l=2.5 \times 10^{-2}$ m,所以用于替代电阻的有耗电导体的电导率 $\sigma=39.8$ S。

3 数值仿真结果与分析

在用 FDTD 方法对物理模型进行仿真的过程中,截断边界的实现用的是完全匹配层技术^[11],外界的干扰电磁场设置为高斯脉冲其表达式为:

$$E_i(t) = E_0 \left(-\frac{4\pi(t-t_0)^2}{\tau^2} \right),$$

其中 $E_0=10$ kV。空间的网格步长为 $\Delta x = \Delta y = \Delta z = 0.2$ cm,时间步长 $\Delta t=4.815$ ps, $\tau=32\Delta t$, $t_0=3\Delta t$ 。

3.1 连接导线及其长短对耦合干扰电流的影响

当 $\theta=0^\circ$ 时(干扰电场与连接导线平行)对没有连接导线,及连接导线暴露在箱体外的长度分别为 $L=10$ cm 和 $L=20$ cm 时屏蔽箱内电阻 R_2 上的电流用 FDTD 方法进行了计算,其时域及频域波形分别如图 2、3 所示。

从图 2 中可以看到,当屏蔽箱体没有贯通导线时,箱体内部电路上耦合出的是一种振荡形式的干扰电流,其峰值比较小(<4 mA)。当有贯通导线时,箱体内部电路上耦合出的干扰电流的峰值大幅度增加,在 $L=10$ cm 时可达 130 mA,在 $L=20$ cm 时可达 170 mA。这是因为,当箱体的开口尺寸比较小时,箱体的屏蔽效能较高,所以此时电路上的耦合干扰电流较小。而当箱体有导线贯通时,外界的电磁干扰可把电磁能量耦合在处于箱体外部的贯通导线上,并通过贯通导线带入箱体内部,所以当有导线穿过屏蔽箱体时,耦合进箱体内部的干扰电磁能量将大幅增加,箱体内部电路上耦合电流也会显著增强。

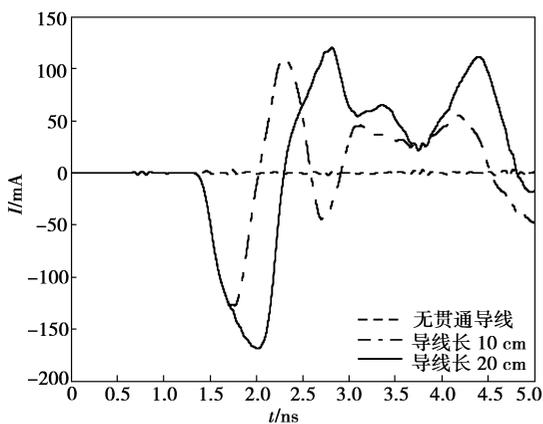


图2 有无贯通导线时耦合电流的时域图

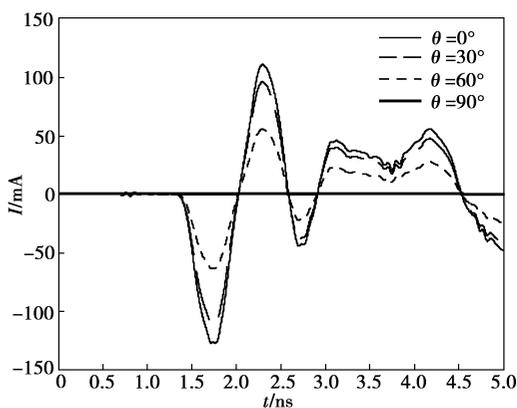


图4 不同角度下耦合电流的时域图

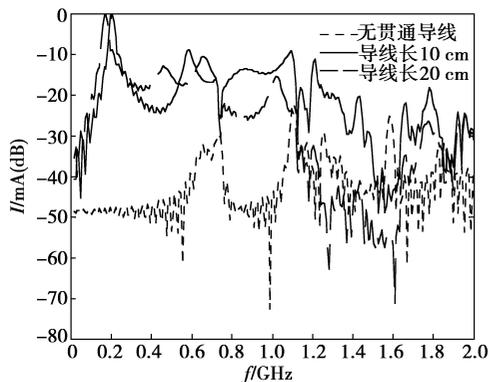


图3 耦合电流的频域图

长的贯通导线能从外部干扰中获得更多的电磁能量,并在与其连接的电路上耦合出更大的干扰电流。

从图3中可以看到:1)在没有贯通导线,只有贯通开口时,干扰电磁场的频率分量在 $f < 0.8$ GHz时都比较小(< 30 dB),这是因为此时开口相对于电磁干扰的波长来说比较小,箱体具有较高的屏蔽效能。2)当有贯通导线时,箱体内电磁干扰的频率分量在 $f < 1$ GHz的频段内显著增加,而高频段分量区别较小。这是由于当频率较高($f > 1.5$ GHz)后,导线的辐射能力大为增强。3)长为 $L = 20$ cm和 $L = 10$ cm的贯通导线相比,电磁干扰更容易把 $f < 0.8$ GHz的频率分量通过前者耦合进箱体内。所以可知,低频干扰电磁场以及干扰电磁场的低频分量更容易经导线把干扰能量耦合进箱体内,从而对箱体内电路造成更严重的干扰。

3.2 电磁脉冲入射角度对耦合干扰电流的影响

当 $L = 10$ cm,分别对 θ 为 0° 、 30° 、 60° 、 90° 时屏蔽箱内电阻 R_2 上的电流进行了计算,如图4所示。这里取 $\tau = 32\Delta t$ 。

从图4中可以看到,当 $\theta = 0^\circ$ 时,干扰电流的峰值可达130 mA;当 $\theta = 30^\circ$ 时,干扰电流的峰值可达110 mA;当 $\theta = 60^\circ$ 时,干扰电流的峰值只有65 mA;而当 $\theta = 90^\circ$,电路上的干扰电流几乎为0。这说明箱体内电路上的耦合干扰电流与干扰电磁波的入射

角度有关,当干扰电场 E_i 的方向与贯通导线平行时($\theta = 0^\circ$),干扰电流最大,当 E_i 的方向与贯通导线垂直时($\theta = 90^\circ$),干扰电流最小。

3.3 开口金属环对耦合干扰电流的抑制

大幅度恶化的电磁环境与越来越苛刻的电路抗干扰工作环境要求,使得电子设备抗干扰性能的研究、设计成为急需解决的难题。R. F. Harrington^[12]和Eng Swee Siah等人^[13]都对探索新的抗电磁干扰加固途径进行了研究。S. A. Saario^[7]和Hyun Ho Park^[8]分别研究了铁氧体器件和褶皱型孔缝对共模干扰电流的抑制作用。笔者提出了一种用开口金属环抑制导线贯通屏蔽箱体内电路上耦合干扰电流的简便方法并对其抑制效果进行了仿真研究。

金属环的外边长为3 cm,内孔洞边长为1.2 cm,环厚度为 t ,其截面图如图5(a)。让金属环贴紧箱体开口并让贯通导线通过环的中心。当 t 为1、2 cm时其抑制截面图如图5(b)(c)所示。 $L = 10$ cm, $\theta = 0^\circ$ 时,对 t 为1、2 cm时的干扰电流进行了计算,为便于比较给出了没有金属环时的干扰电流。其时域和频域图如图6、7所示。

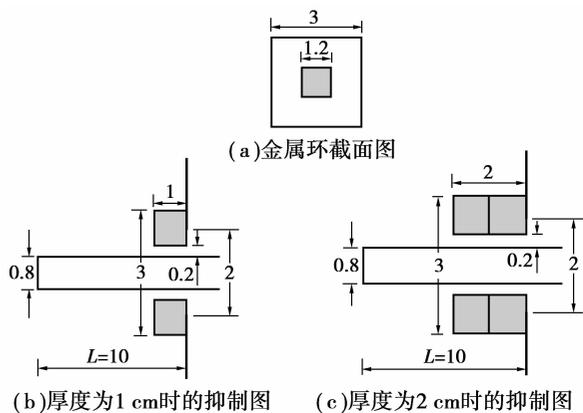


图5 金属环用作抑制干扰电流的截面图(单位:cm)

从图6中可以看到,当没有抑制金属环时,电路上干扰电流的峰值为130 mA。当有金属环时,干扰电流大幅度下降,当 $t = 1$ cm时干扰电流的峰值下

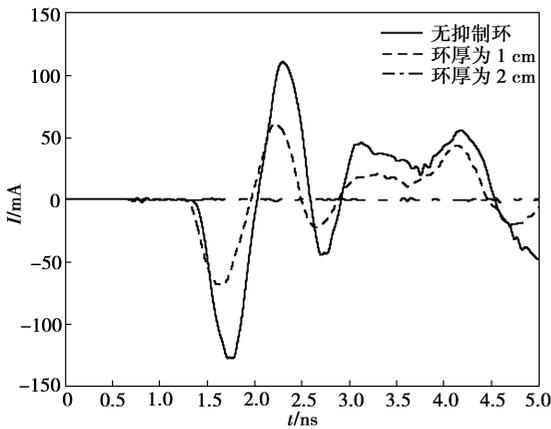


图6 干扰电流的时域图

降为 70 mA,当 $t=2$ cm 时干扰电流的峰值只有 2 mA.说明用开口金属环对干扰电流能起到比较好的抑制作用,开口金属环越厚其抑制效果越好。

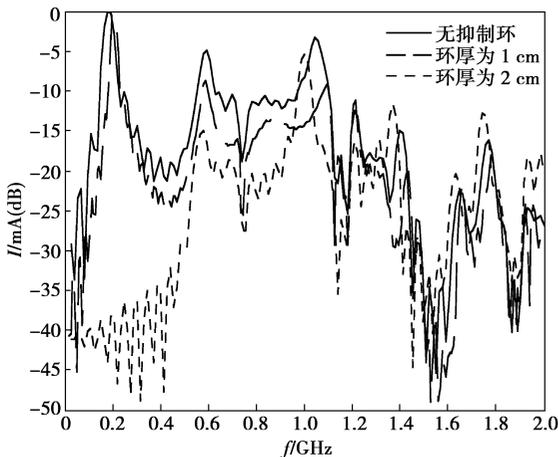


图7 干扰电流的频域图

从图7中可以看到,开口金属环对 $f < 1$ GHz 的干扰电流具有较好的抑制作用,对 $f > 1.5$ GHz 的干扰几乎没有抑制作用。金属环越厚,其低频抑制效果就越好。对于 $t=1$ cm 的开口金属环,在 0~2 GHz 内的几个主要谐振频率为 178、590 MHz 和 1.04 GHz, $t=2$ cm 时的主要谐振频率为 576 MHz、1.01 和 1.38 GHz,在谐振频率附近金属环抑制干扰电流的效果较差。

4 结论

应用时域有限差分法对电磁脉冲作用下,导线贯通屏蔽箱体内电路上的耦合干扰电流进行了建模和仿真。结果表明:

1) 当有导线贯通屏蔽机箱时,箱体内电路上的干扰电流显著增强,并随着贯通导线暴露于机箱外部长度的增加而增加。干扰电磁场的低频分量更容易经导线把干扰能量耦合进箱体内。

2) 箱体内电路上的干扰电流与干扰电磁波的人

射方向有关。当其电场的方向与贯通导线平行时干扰电流最大,与贯通导线垂直时干扰电流最小。

3) 让贯通导线穿过开口金属环可以有效地抑制干扰电流,金属环越厚,其抑制效果越好。

参考文献:

- [1] TAFLOVE A. A hybrid moment method/finite-difference time-domain approach to electromagnetic coupling and aperture penetration into complex geometries [J]. IEEE Trans on Antennas and Propagat, 1982, 30(4): 617-627.
- [2] MARCELLO D A, MARIA S S. Theoretical and experimental characterization of the EMP interaction with composite metallic enclosures [J]. IEEE Trans on Electromagn Compat, 2000, 42(1): 152-163.
- [3] STAVROS V G, CRAIG R B. HIRF penetration through apertures: FDTD versus measurements [J]. IEEE Trans on Electromagn Compat, 2001, 43(3): 282-294.
- [4] CARPES W P. Analysis of the coupling of an incident wave with a wire inside a cavity using a FEM in frequency and time domains [J]. IEEE Trans on Electromagn Compat, 2002, 44(3): 470-475.
- [5] 陈修桥, 胡以华. 计算机机箱的电磁脉冲耦合模拟仿真 [J]. 系统仿真学报, 2004, 16(12): 2786-2788. CHEN XIU-QIAO, HU YI-HUA. Simulation of electromagnetic pulse coupling with computer box [J]. Journal of System Simulation, 2004, 16(12): 2786-2788.
- [6] HOCKANSON D M, DREWNIAK J L, HUBBING T H. FDTD modeling of common-mode radiation from cables [J]. IEEE Trans on Electromagn Compat, 1996, 38(3): 376-387.
- [7] SAARIO S A, THIEL D V. Analysis of ferrite beads for RF isolation on straight wire conductors [J]. Electron Lett, 1997, 33(16): 1359-1360.
- [8] HYUN H P, J W L. Common-mode current on a wire through a corrugated aperture [J]. ETRI Journal, 2002, 24(6): 429-434.
- [9] HAKAN B. A fast hybrid TDIE-FDTD-MNA scheme for analyzing cable-induced transient coupling into shielding enclosures [J]. In Proc IEEE Int Symp Electromagn Compat, 2005, 3(3): 828-833.
- [10] 王秉中. 计算电磁学 [M]. 北京: 科学出版社, 2002: 161-162.
- [11] BERENGER J P. A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves [J]. Comput Phys, 1994, 114(2): 185-200.
- [12] HARRINGTON R F. Resonant behavior of a small aperture backed by a conducting body [J]. IEEE Trans on Antennas and Propagat, 1982, 30(3): 205-212.
- [13] ENG S S, KUBILAY S. Coupling studies and shielding techniques for electromagnetic penetration through apertures on complex cavities and vehicular platforms [J]. IEEE Trans on Electromagn Compat, 2003, 45(2): 245-256.

(编辑 李胜春)