

环境及其效应

雷电电磁脉冲对便携计算机终端的损伤分析

鲍永波, 田杨萌, 王彩霞, 王宏伟

(北京信息科技大学, 北京 100192)

摘要: 目的 使用电磁仿真软件 XFDTD, 研究雷电电磁脉冲(LEMP)对便携计算机的电磁危害。方法 给出腔体内部采样点处的电场时域波形图和截面的电场分布图, 计算腔体内不同位置处的屏蔽效能和瞬时坡印廷矢量的大小, 分析雷电电磁脉冲与腔体正面孔阵和侧面孔洞的耦合以及孔洞的互耦合。结果 雷电电磁脉冲会与入射正面和侧面上的小孔发生不同程度的耦合。雷电电磁脉冲对腔体内部的电磁危害很小, 电磁能量主要被限制在开孔附近, 腔体中心处受到的影响最小。开孔面积越大, 耦合进的电磁能量越多。相邻孔洞之间的互耦合效应使得腔体的屏蔽性变差。结论 雷电电磁脉冲对便携计算机的危害一般很小。

关键词: 雷电电磁脉冲; 电磁危害; 孔阵; 屏蔽效能; 互耦合

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2017.12.016

中图分类号: TJ07

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2017)12-0083-05

Damage Analysis of Lightning Electromagnetic Pulse to Portable Computer Terminal

BAO Yong-bo, TIAN Yang-meng, WANG Cai-xia, WANG Hongwei
(Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100192, China)

ABSTRACT: Objective To study electromagnetic hazards of lightning electromagnetic pulse (LEMP) on portable computers with electromagnetic simulation software XFDTD. **Methods** The time domain waveform of electric field at sampling point and the sectional view of electric-field distribution inside the cavity were given. The shielding effectiveness and the instantaneous Poynting vector in different positions in the cavity were calculated. The coupling of the lightning electromagnetic pulse with the front aperture array and the side hole of the cavity and the mutual coupling of holes were analyzed. **Results** The electromagnetic pulse of lightning caused coupling of different degrees to the small holes on the front and sides. Lightning electromagnetic pulse had little electromagnetic harm to inside part of the cavity. The electromagnetic energy was mainly confined to the neighboring of the open hole. The center of the cavity was affected least. The larger the aperture area was; the more electromagnetic energy was coupled. The mutual coupling effect between adjacent holes led to poor shielding effectiveness of the cavity. **Conclusion** Lightning electromagnetic pulses commonly do little harm to portable computers.

KEY WORDS: lightning electromagnetic pulse, electromagnetic hazard, aperture array, shielding effectiveness, mutual coupling

随着信息时代的到来, 微电子设备正朝着高频率、高速率、高集成度、高安装密度、低功耗、小型化的方向发展的同时, 也带来了电磁敏感性高、绝缘

强度差的弱点, 使之对电磁脉冲的干扰与毁伤效应越来越敏感, 由雷电电磁脉冲(LEMP)带来的危害也越来越受到人们的关注^[1]。

收稿日期: 2017-08-02; 修订日期: 2017-09-02

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(No. 41375012); 北京市自然科学基金项目(No. KZ201411232037)

作者简介: 鲍永波(1993—), 男, 河南人, 硕士研究生, 主要研究方向为电磁兼容。

通讯作者: 王彩霞(1963—), 女, 北京人, 博士, 教授, 主要研究方向为雷电物理和雷暴电学。

LEMP 对微电子设备的毁伤作用主要通过两个途径:一是通过电线、电缆的耦合作用在终端产生过电压、过电流,从而毁伤设备,国内外对此做了大量的研究^[2];另一方面直接通过屏蔽腔体的孔缝耦合进入微电子设备内部,国内关于 LEMP 与微电子设备的孔缝耦合研究相对较少。

文中以基于时域有限差分法(FDTD)的电磁仿真软件 XFDTD 和高处理速度的计算机为工具,依据一款便携计算机外壳为模型,建立了合适的开孔腔体几何模型。以一次人工引雷获得的雷电电磁场近场 30 m 处的电场时域波形为激励源,模拟了雷电电磁脉冲与开孔腔体的近场耦合情况,分析比较了腔体内不同位置处的电磁环境,得出了雷电电磁脉冲与腔体的不同孔洞和孔阵的耦合规律,为研究 LEMP 对便携计算机终端的损伤提供了有意义的参考。

1 雷电电磁脉冲波形及频谱

在防雷过程中,主要关心的是雷云对大地的放电,也就是地闪。地闪发生时,在雷电流通道周围会产生强烈的电磁场,其中先导-回击过程产生的电磁场为最强。

根据人工引发雷电和自然雷电的观测结果,在距闪电通道几十到几百米范围,地闪先导回击电场变化波形呈不对称“V”形结构^[3-4]。图 1 为山东滨州 2009 年 8 月 5 日 14:39:16 的一次人工引雷获得的近场 30 m 处电场时域波形^[5]中的一部分。该波形反映的是直窜先导到继后回击这一过程中,空间电场强度的变化量。

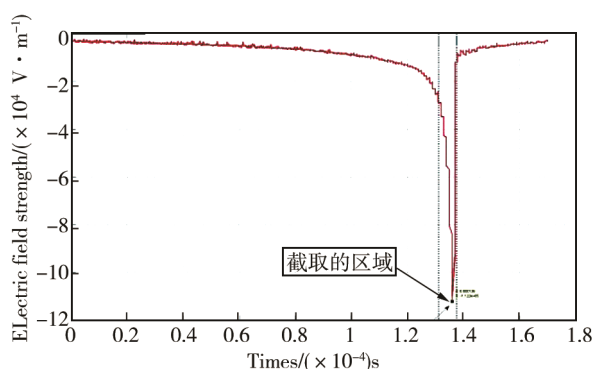


图 1 一次先导与回击过程的电场波形

文中将利用 XFDTD 软件,研究雷电电磁场与便携计算机的耦合。由于微电子设备尺寸较小,需要在空间中划分很小的网格,允许的最大时间步长很小,计算量会随着仿真的时域长度的增加而增加,能仿真的时域长度有限,因此在导入激励源波形时需要对其进行截取。根据信号与系统的理论,波形中的尖峰部分所含的高频成分相对丰富,激励源的幅值越大,产

生的响应也越大,而电磁波在与腔体小孔耦合时,高频的电磁波波长更接近孔的尺寸,更容易耦合进腔体,对腔体的电磁危害也越大。因此,考虑到以上因素,截取了图 1 中波形的尖峰部分,截取后的幅值为原波形的 75%,时间为 5.7 μ s。该部分能大体反映出雷电电磁脉冲带来的主要电磁危害。

图 2 为将负电场变为正值后进行截取,随后导入 XFDTD 的激励源波形图,图 3 为对截取的时域电场波形进行快速傅里叶变换获得的频谱图。从图 2 和图 3 可知,雷电电磁脉冲所含的频率成分大多分布在 1 MHz 以下。

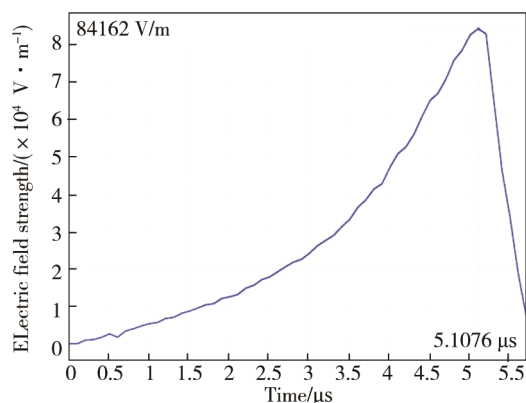


图 2 激励源时域波形

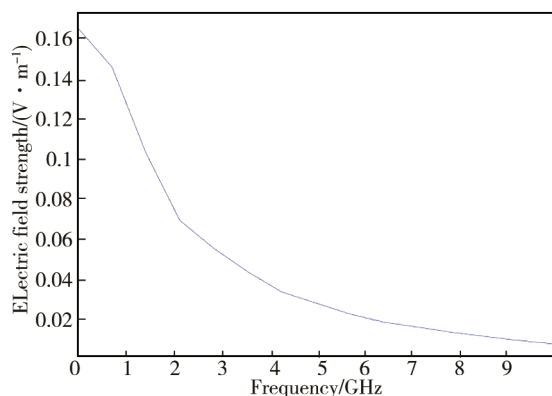


图 3 激励源频谱

2 便携计算机的建模与仿真介绍

XFDTD 是一款三维全波分析电磁学仿真软件,具有计算功能强、可视化以及建模方便等优点,能够实现对复杂物体的几何建模和电磁环境的时域分析。

依照一款 DELL 笔记本电脑的外形,在软件中建立了宽 25 cm,长 35 cm,厚 2 cm ($\Delta x=250$ mm, $\Delta y=350$ mm, $\Delta z=20$ mm)的空心腔体,几何模型与坐标方向如图 4 所示,腔体上各部分的开孔情况如图 5 所示。将笔记本外壳的合金材料近似为理想导体。如果将腔体厚度选为 1 mm 需要更细的网格划分,而考虑到计算量,能够接受

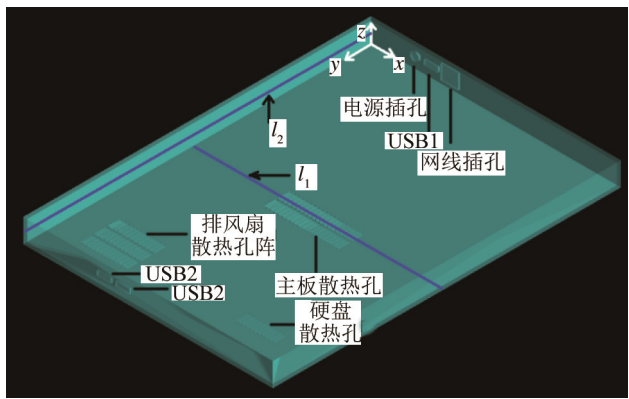


图 4 便携计算机模型

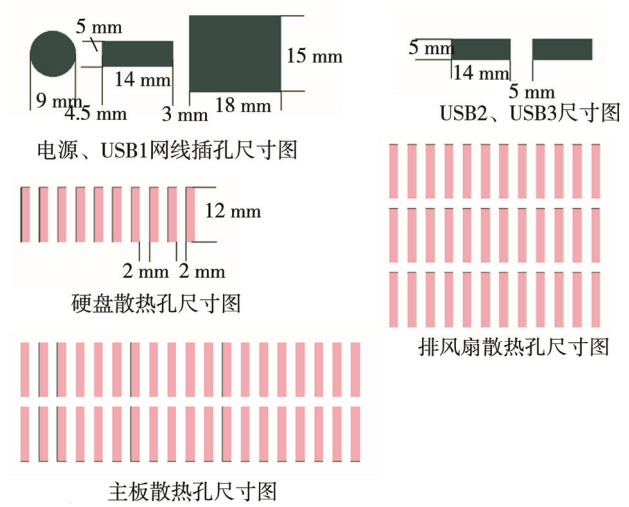


图 5 腔体上的小孔的外形及尺寸

的最小网格为 $\Delta x=\Delta y=\Delta z=1\text{ mm}$ 均匀网格。在该网格划分下能够精确计算的腔体厚度至少为 2 mm ，因此将壁厚选为 2 mm 。边界条件选择吸收边界。

由于便携计算机尺寸相对雷电通道很小,因此选择平面波作激励源并导入上文中截取后的电场波形,来模拟距雷击位置 30 m 处受到的雷电电磁危害。LEMP 的入射方向为正 z 轴方向,极化方向沿 x 轴方向。

在对仿真结果的观察方面,如图 4 所示,分别对过直线 l_1 与 xoz 面平行的截面 1 以及过直线 l_2 与 xoy 面平行的截面 2 上的电场进行了观察。其中截面 2 过腔体的中心,在截面 2 上又选取了若干采样点来观察腔体中不同位置处耦合电场的时域变化情况。采样点的位置分布以及名称如图 6 所示。

3 仿真结果分析

文中主要对雷电电磁脉冲作用下,腔体内不同点处屏蔽效能^[7] (SE)的计算来研究腔体对 LEMP 的屏蔽。对最大瞬时坡印廷矢量^[8] $\boldsymbol{S}$ 进行了计算,并和表 1 中的数据^[9]进行了对比,来研究电磁脉冲的毁伤效应,并对腔体中的截面电场进行了观察。

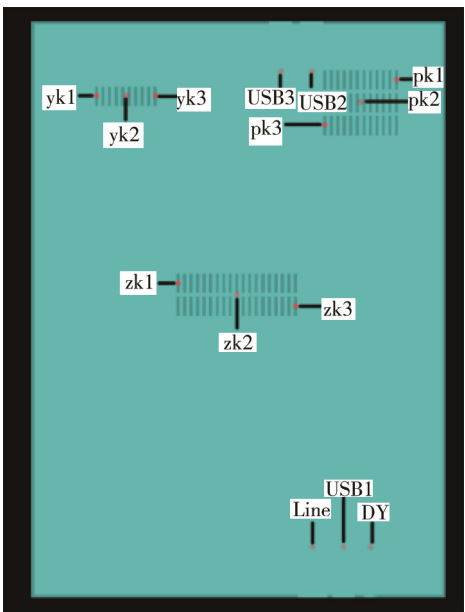


图 6 采样点的位置及名称

$$SE = 20 \lg \left(\frac{E_i}{E_o} \right)$$
(1)

$$S = \frac{1}{\eta} |E_o|^2$$
(2)

式中: E_i 为入射雷电电磁脉冲的场强峰值, $E_i=84162\text{ V/m}$; E_o 为采样点的场强峰值; SE 越大,屏蔽性越好; η 为真空波阻抗, $\eta=377\text{ }\Omega$; 坡印廷矢量 $\boldsymbol{S}$ 也叫功率密度。

表 1 电磁脉冲对电子设备的毁伤能力		
作用机理	功率密度/(W · m ⁻²)	杀伤效果
干扰	0.001~10	对雷达、通信、导航等电子设备形成干扰
削弱	10~10 ⁴	通信、雷达导航、敌我识别和计算机网络的微波器件性能下降或失效,小型计算机芯片失效
破坏	10 ⁴ ~10 ⁶	目标内产生感应电流;如果电流过大,将烧毁电路中的器件,任何工作频段的电子系统都失效
摧毁	10 ⁶ ~10 ⁹	强场作用,瞬间引爆炸弹、导弹,瞬间摧毁目标

3.1 LEMP 与入射正面孔阵的耦合

LEMP 入射的正面分布有三种孔阵,其附近的采样点有硬盘(yk1, yk2, yk3)、主板(zk1, zk2, zk3)、排风扇(pk1, pk2, pk3),如图 6 所示。获得的耦合电场波形如图 7 所示。

从图 7 中可以计算出不同采样点处的屏蔽效能和最大瞬时坡印廷矢量 $\boldsymbol{S}$,见表 2。对激励源达到最大值时截面 1 的电场观察如图 8 所示。

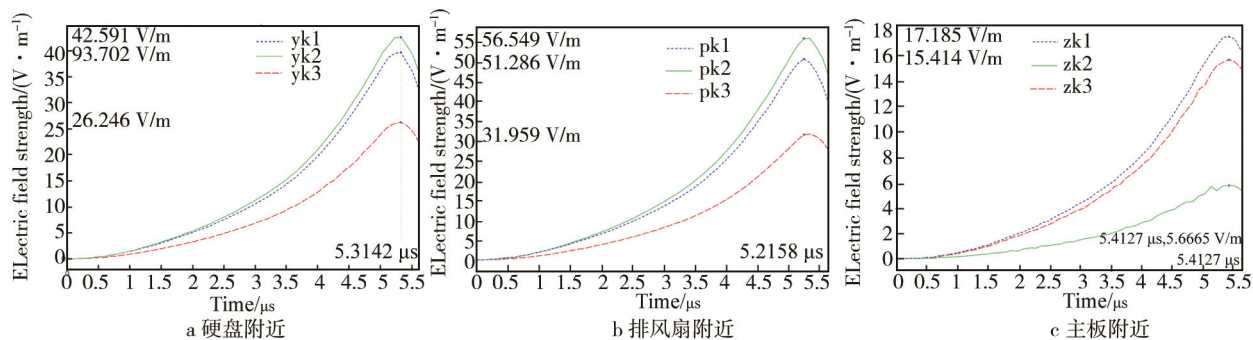


图7 耦合的电场时域波形

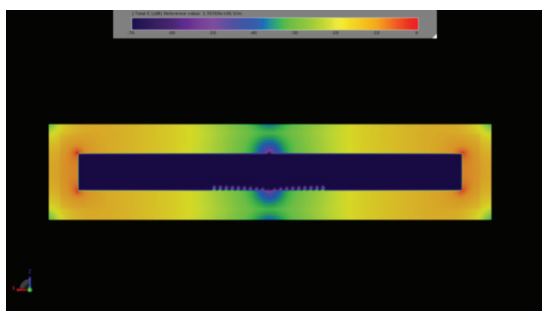


图8 截面1的电场分布

表2 孔阵附近采样点电磁环境

采样点	耦合场强峰值/ ($V \cdot m^{-1}$)	屏蔽系数 SE/dB	瞬时坡印廷矢量 $S/(W \cdot m^{-2})$
yk1	39.702	66.5261	4.181 031
yk2	42.591	65.916	4.811 653
yk3	26.246	70.1211	1.827 195
pk1	51.286	64.3024	6.976 801
pk2	56.549	63.4538	8.482 2
pk3	31.959	68.4105	2.709 225
zk1	17.185	73.7993	0.783 353
zk2	5.6665	83.436	0.085 17
zk3	15.414	74.744	0.630 216

通过表2可以发现,每个孔阵附近的采样点耦合的电场强度最多只会对电子设备构成干扰。在这些采样点中,位于腔体中心处的主板孔阵附近采样点受到的电磁干扰最小。如图8所示,对截面1的电场观测,可以看出,LEMP的影响区域主要被局限在孔阵附近,影响深度从中间到两边逐渐增加,但是影响深度都很小。

以上的研究表明,腔体内孔阵附近采样点位置受到LEMP的电磁危害都很小,对电子设备的影响很小。腔体中心位置耦合的场强比腔体其他位置的弱。

3.2 LEMP与入射侧面孔洞的耦合

腔体面上的3个USB插孔和电源插孔以及网线插孔均位于腔体的侧面,与雷电电磁脉冲平面波的入射方向平行。开孔尺寸与各个孔的间隔如图5所示,

采样点位置如图6所示。在侧面开孔的中心轴线上距离开孔4 cm的位置分别设有采样点USB1, USB2, USB3, line, DY。还对激励源达到最大值时截面2的电场分布进行了观察,并且对孔洞附近采样点的电磁环境进行了计算,结果见图9—11和表3。

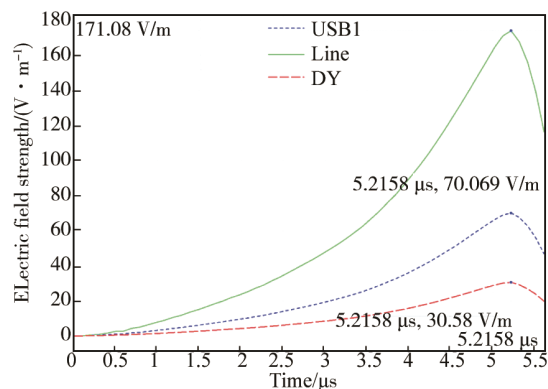


图9 USB1, line和DY处的电场强度

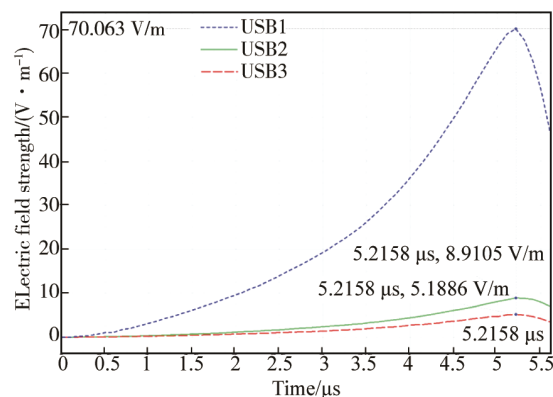


图10 三个USB采样点的电场强度对比

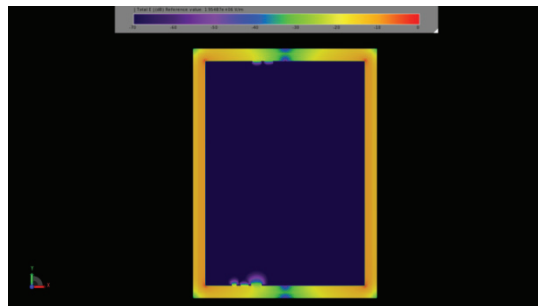


图11 截面2的电场分布

表 3 孔洞附近采样点电磁环境

采样点	耦合场强峰值/ (V·m ⁻¹)	屏蔽系数 SE/dB	瞬时坡印廷矢量 S/(W·m ⁻²)
USB1	70.069	61.5918	13.022 98
USB2	8.9105	79.504 28	0.210 602
USB3	5.1886	84.201 32	0.071 41
DY	30.58	68.793 57	2.480 468
line	174.08	53.687 34	80.381 56

从图 9 可以看出，对于相邻的三个孔洞，面积最大的网线插孔对应采样点场强最强，对电子设备的影响达到了削弱量级，但是不会引起电子器件的损坏；面积较小的电源插孔和 USB1 对应的采样点场强较弱。在图 11 中也能够看出，网线插口受到 LEMP 的影响深度比其他两个孔要深，也比 USB2 和 USB3 的要深，但是也都局限于开孔附近。

三个 USB 插孔面积虽然相同，但图 10 中 USB2 和 USB3 两个插孔处对应采样点场强都比 USB1 的小很多。说明 USB1 与距离较近、面积较大的网线插孔和电源插孔的互耦合效应^[10]比 USB2 和 USB3 的互耦合效应强。因此在采样点 USB1 处的场强要强于 USB2 和 USB3 处的场强。

由以上分析可知：侧面上的孔洞面积越大，耦合的电场强度越大；孔洞之间的距离越近、相邻的孔洞面积越大，其互耦合效应也越明显。

4 结论

从以上的研究可以得出如下结论。

1) LEMP 会与便携计算机正面和侧面的孔发生不同程度的耦合，不过电磁脉冲能量被限制在开孔附

近，耦合到腔体内部的电磁能量很小，对腔体内的电磁危害很小，至多只会对电子器件与芯片的工作造成干扰而不会引起腔体内部电子器件的损坏。

2) 腔体中心处受到的电磁危害最小，适合放置一些重要电子器件。

3) 由于距离较近的孔洞之间会发生互耦合，导致屏蔽性变差，因此开孔的间隔应该尽量大一些。

参考文献：

[1] 王胜华. 电子信息系统防雷综述[J]. 硅谷, 2011(19): 43-44.

[2] 曹晓斌, 易志兴, 陈奎, 等. 高速铁路馈线电缆雷电过电压及防护措施[J]. 高电压技术, 2016, 42(2): 619-626.

[3] SONODA T, MORII H, SEKIOKA S. Observation of Lightning Overvoltage in a 500 kV Switching Station[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 32(4): 1828-1834.

[4] 张其林, 刘明远, 杨璟, 等. 近距离地闪电场变化及对通道电荷密度分布的响应[J]. 气象学报, 2012, 70(4): 847-854.

[5] 王彩霞, 杨虹, 田杨萌, 等. 一次人工触发闪电中的脉冲特征分析[J]. 北京信息科技大学学报(自然科学版), 2012, 27(1): 81-87.

[6] 董智超, 王勇亮. 基于 XFDTD 电磁环境仿真中的雷达天线建模[J]. 科技信息, 2014(15): 74-75.

[7] 焦重庆, 牛帅. 开孔矩形腔体的近场电磁屏蔽效能研究[J]. 物理学报, 2013, 62(11): 224-232.

[8] 谢处方, 饶克谨. 电磁场与电磁波[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006: 196.

[9] 王立蒙. 电磁脉冲弹对典型电子器件的毁伤机理[D]. 太原: 中北大学, 2016.

[10] 范颖鹏, 杜正伟, 龚克. 不同形状孔阵屏蔽效应的分析[J]. 强激光与粒子束, 2004, 16(11): 1441-1444.