

文章编号: 2096-1618(2016)06-0565-04

位于闪电通道附近带孔缝的金属箱体耦合效应的仿真研究

丁洁, 刘昆, 张顺

(成都信息工程大学电子工程学院, 四川 成都 610225)

摘要:针对位于闪电附近的带有一个孔缝的金属箱体的屏蔽效能开展研究。首先,依据山东人工触发闪电实验(SHATLE 基地进行的人工触发闪电得到的距离闪电通道78 m处的磁场结果,验证仿真磁场的有效性。之后,通过建立仿真模型进行仿真与分析仿真数据得到距离闪电通道78 m处金属箱体的耦合效应。结果表明,闪电通道相对于金属箱体的位置对金属箱体内部的磁通密度的大小有很大的影响,依据仿真分析,为了电磁屏蔽与散热等目的,孔缝位于金属箱体顶部将会是较好的选择。

关键词:磁屏蔽;雷电防护;电磁分析

中图分类号:TM153⁺.1

文献标志码:A

0 引言

电磁屏蔽是抑制电磁干扰的重要方法。金属外壳经常用来保护敏感设备免受外部电磁干扰和内部电磁干扰的泄漏造成的损害。除低频磁场外,一个完全封闭的金属箱体对电磁场的屏蔽效能是很高的。然而,在屏蔽罩上有很多用于通风和散热的孔缝。金属外壳上的孔缝是内外区域耦合的主要途径^[1]。因此,很多的工作都集中于研究孔缝的屏蔽效能。目前,已有大量的数值方法^[2],分析方法^[3],实验技术^[4]用于研究该问题。

闪电能够从雷暴云向地面或者在不同雷暴云体之间传送几库伦到几百库伦的电荷,传输的电流则会高达几千安培到几百千安培,且上升沿陡度很大。闪电通道附近会产生强大的瞬态电磁场,对附近的电子设备造成巨大的电磁影响。根据美国 AD 报告[AD-722675]^[5]。当磁场强度达到0.07 Gs时,没有屏蔽措施的运行中的计算机会出现误动作,当雷电电磁脉冲强度达到2.4 Gs时,将造成计算机永久性损坏。

关于金属箱体耦合效应的研究工作已经做了很多。Cai et al.^[6]讨论了入射波集中在高频情况下孔缝的耦合效应。Kiang et al.^[7]主要研究在远场的金属箱体被平面波照射时孔缝的耦合效应。但对于雷电通道附近的区域,回击的主要能量集中于低频。Blaj et

al.^[8]已经测试在复合结构中的薄金属层对雷电引起的主要磁场的屏蔽,还给出不同金属对雷电电磁脉冲的屏蔽效能。指出薄金属层在低频磁场的屏蔽效能是有限的。静态场和感应场是闪电通道附近场的主要组成部分,特点是完全不同于远场的主要部分辐射场。对于位于远场的金属箱体,不管源的分布特性是怎样的,入射波都可以被看作平面波,但是在近场区域是不正确的。因为入射波的波前与源的分布密切相关。另外,根据偶极子方法^[9]给出的云地闪电电磁场表达式,远场可以被视为横向电磁波(TEM),而近场可以近似的被视为横向磁波(TM)。综上所述,近场的特点完全不同于远场。因此,位于闪电通道附近的金属箱体的耦合效应将在文中做出讨论。

根据 Moini et al. 提出的天线理论^[14],利用 CST 工作室建立起闪电回击仿真模型。由经典的引雷实验获得的闪电通道基底电流作为回击模型的源。通过仿真计算得到距闪电通道78 m处的磁感应强度随时间的变化率,将其与实验数据相比较,结果吻合的很好。同时也讨论了闪电通道附近的金属箱体,当孔缝位于箱体不同侧面时的耦合效应。

1 实验和仿真模型

自2005年,山东滨州连续开展人工触发闪电实验。电流由频率在0.9 Hz到1.5 MHz的皮尔森线圈测量获得,一个电流分流有5 mΩ的恒定电阻,其频率覆盖范围为0~3.2 MHz^[10]。如图1所示,磁天线有两部分:低频磁天线和信号处理模块,其工作频率在

收稿日期:2016-05-23

基金项目:国家重点基础研究和资助项目(2014CB441405);国家自然科学基金资助项目(41305005);江苏气象观测与信息处理重点实验室研究基金资助项目(KDXS1406);四川省教育厅研究基金资助项目(16CZ0022)

3 ~ 330 kHz,实验设备放置于距离法拉第笼78 m处。实验的具体细节可在 Jiang et al.^[11], Sun et al.^[12] 和 Lu et al.^[13] 中查到。

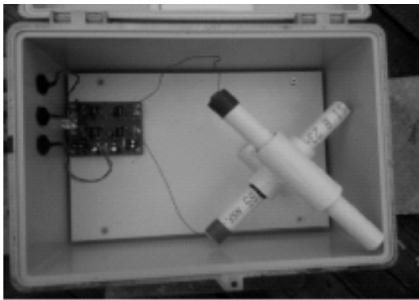
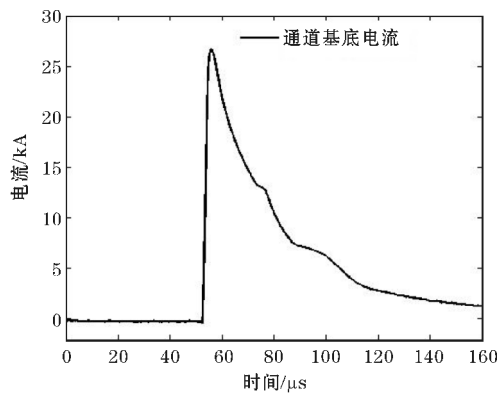
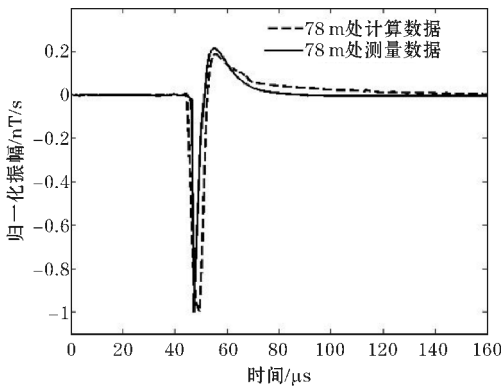


图 1 低频磁天线

2015 年夏天,实验成功获得通道基底电流和磁场数据,如图 2 所示。其中图 2(a)表示的是通道基底电流,图 2(b)是实验测量得到的距离闪电通道78 m处的磁感应强度和仿真得到的磁感应强度的归一化幅值的匹配结果。



(a) 通道基底电流



(b) 磁感应强度

图 2 2015 年夏天由实验得到的通道基底电流和磁感应强度

如图 2(b),仿真所得结果与实验测量结果吻合的很好。由于仿真时的闪电通道是垂直的传导通道,与实际中弯曲的闪电通道是有区别的,所以仿真所得的幅值与实验所得结果不是完全匹配的,但是整体吻合

度较好。因此,可以用该仿真模型计算闪电通道附近金属箱体内部耦合的磁感应强度。

2 含有一个圆孔的金属箱体的耦合效应

根据相关文献,很多文章中使用双指数脉冲波形模拟闪电电流^[8],文中同样使用双指数表达式描述闪电通道基底电流^[8]:

$$i(t) = I_0(e^{-\frac{t}{\alpha}} - e^{-\frac{t}{\beta}})$$

其中 $I_0 = 31.881 \text{ kA}$, $\alpha = 37.075 \text{ } \mu\text{s}$, $\beta = 1.545 \text{ } \mu\text{s}$ 。一个完全封闭的厚度为1 mm 铝制箱体已经具有很好的屏蔽效果。^[8]文中铝制箱体的厚度为2 mm,导电性为 $\sigma = 3.54 \times 10^7 \text{ s/m}$,相对磁导率为 $\mu_r = 1$ 。因此,箱体内部的磁感应强度可以认为是全部通过圆形孔缝耦合进入(圆形孔缝的直径为0.02 m),箱体的尺寸为600 mm×600 mm×600 mm。如图 3、图 4 所示。图 4 所示为圆形孔缝位于箱体不同侧面的情况。

根据 Moini et al^[14] 提出的天线理论建立起闪电回击模型。在电导率为 $\sigma = 0.02 \text{ S/m}$ 的土壤上建立垂直于地面的竖直导电通道作为闪电回击通道,通道的电阻率设置为 $\rho = 0.07 \text{ } \Omega/\text{m}$,为找到沿着天线的电流的分布,获得传播速度为 $1.3 \times 10^8 \text{ m/s}$ 的电流波,周围环境介质设置为 $\varepsilon = 5.3 \varepsilon_0$ 。^[14]文中,通道的相对介电常数设置为 $\varepsilon = 5.3$,土壤的电导率为 $\sigma = 0.02 \text{ S/m}$ 。箱体被放置在距离闪电通道78 m的位置上,将源加载于闪电通道底部。

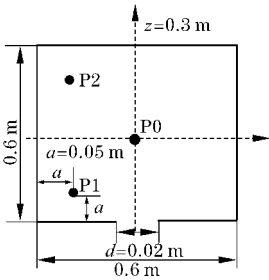
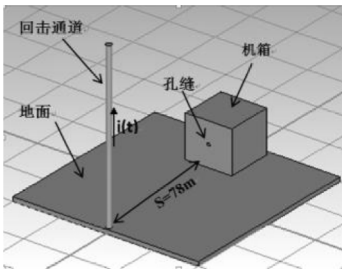
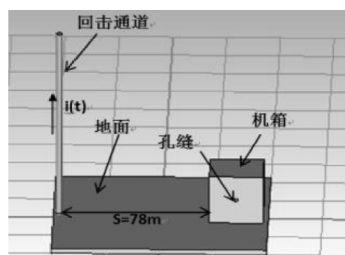


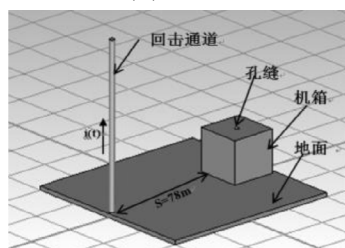
图 3 箱体中 3 个样本点 P0,P1,P2



(a) 模型 A

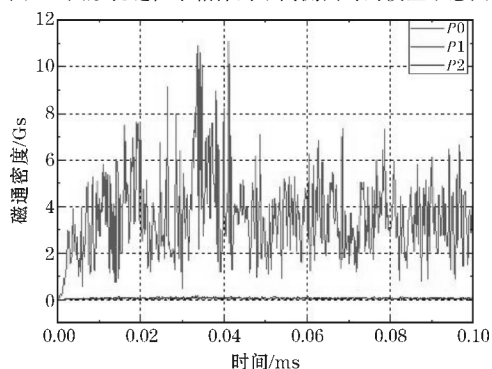


(b) 模型 B

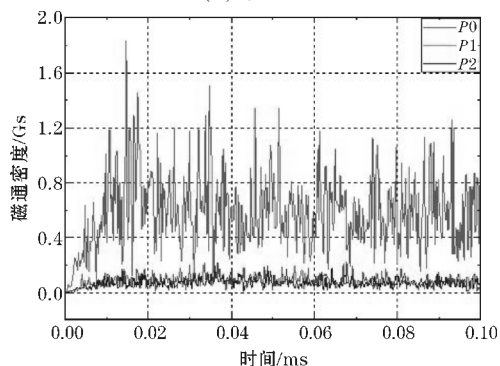


(c) 模型 C

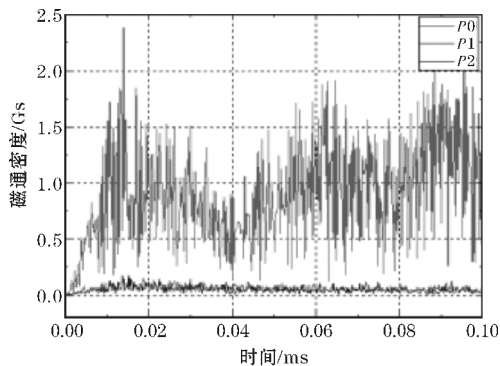
图4 圆形孔缝位于箱体的不同侧面时的模型示意图



(a) 模型 A



(b) 模型 B



(c) 模型 C

图5 P0,P1 和 P2 点的磁通密度

由于箱体结构的对称性,在处理数据时只取 P0, P1, P2 3 点所对应的磁感应强度数据进行分析。其中 P0 点是箱体的中心点,箱体的边长为600 mm。

如图4所示,孔缝位于箱体不同侧面的3种情况。如图5所示,模型ABC在P0点的磁感应强度都超过0.07Gs。模型A的中心点P0点的磁感应强度的峰值达到11.2Gs。另外两个模型的中心点的磁感应强度分别达到了1.83Gs和2.39Gs。因此,无论孔缝在箱体的哪个侧面,磁感应强度的耦合都将严重威胁箱体内的集成电路。另外,P1、P2点对应的磁感应强度总是远远小于P0点对应的磁感应强度。

3 结论

当金属箱体放置于闪电通道附近时,模型A所示的情况对箱体内电子电路造成的损害最大。当箱体放置于距离闪电通道78m处,即使箱体上只有一个孔缝,箱体中心通过孔缝耦合的磁感应强度会对箱体内的集成电路造成永久性的毁坏。综上所述,为闪电通道附近工作的箱体设计适当的孔缝是很重要的。另外,因为闪电发生的位置是很难预测的,当孔缝位于箱体顶部,敏感的电子电路放置于箱体的4个角落的位置将会是较好的选择。

致谢:感谢成都信息工程大学研究基金(J201401, CRF201505)对本文的资助

参考文献:

- [1] 焦重庆,齐磊. 平面波照射下开孔矩形箱体的电磁耦合与屏蔽效能研究[J]. 物理学报,2012, 13:148-153.
- [2] Ma Kuang-Ping, Min Li, James L Drewniak, et al. Comparison of FDTD algorithms for subcellular modeling of slots in Shielding Enclosures [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 1997, 39(2): 147-155.
- [3] Jiao ChonGqinG. Shielding effectiveness improvement of metallic waveGuide tube by using wall losses [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2012, 54(3): 696-699.
- [4] Robinson MP, TM Benson, C Christopoulos, et al. Analytical formulation for the shielding effectiveness of enclosures with apertures[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 1998, 40(3): 240-248.
- [5] Wang Jianguo, Huang Ling, Dong Wansheng, et al. Magnetic Field Distributions in High Voltage Test Hall When Impulse Voltage Generator Discharges[J]. IEEE International Symposium on E-

- lectromagnetic Compatibility, Istanbul, Turkey, 2003, (1):501–504.
- [6] Cai Junfeng, Yi Jianzheng, Xuan Zhaolong, et al. Study on coupling fields of cavity with slot by LOD-FDTD numerical method[J]. 2013 IEEE International Conference on Microwave Technology & Computational Electromagnetics (ICMTCE), 2013:349–352.
- [7] Kiang Jean-Fu. Wave penetration through slits on stacked thick plates[J]. IEEE, Microwave Theory and Techniques, 1998, 46(7):889–893.
- [8] Blaj, MA, FJK Buesink, et al. Using Thin Metal layers on composite structures for shielding the electromagnetic pulse caused by nearby lightning, Proc. Of the 10th Int[M]. York:Symposium on Electromagnetic Compatibility, 2011:440–444.
- [9] Master MJ, MA Uman. Transient electric and magnetic fields associated with establishing a finite electrostatic dipole[M]. American Journal of Physics. 1983.
- [10] Qie X, R Jiang, C Wang. Simultaneously measured current, luminosity, and electric field pulses in a rocket-triggered lightning flash[J]. J. Geophys. Res., 2011, 116.
- [11] Jiang, R, X Qie, et al. Characteristics of M-component in rocket-triggered lightning and a discussion on its mechanism[J]. Radio Science, 2013, 48:597–606.
- [12] Sun, Z, X Qie, et al. Characteristics of a rocket-triggered lightning flash with large stroke number and the associated leader propagation[J]. J. Geophys. Res. Atmos, 2014, 119(13):388–399.
- [13] Lu Gaopeng, Rubin Jiang, Xiushu Qie, et al. Burst of intracloud current pulses during the initial continuous current in a rocket-triggered lightning flash[J]. Geophysical Research Letters, 2014, 41:1002.
- [14] Moini Rouzbeh, Behzad Kordi, Gholmreza Z, et al. A new lightning return stroke model based on antenna theory[J]. Journal of Geophysical Research, 2000, 105(24):29693–29702.

Simulation Research on Coupling of Metal Cavity Near the Lightning Channel

DING Jie, LIU Kun, ZHANG Shun

(College of Electronic Engineering, Chengdu University of Information and Technology, Chengdu 610225, China)

Abstract: Since the thin metal layers results in limited shielding effectiveness against the dominant magnetic field generated by a lightning pulse, research on the shielding effectiveness of metal cavity with slot placed near a lightning channel is of great significance. In this paper, the magnetic fields measured at 78 m distance from the classical rocket-triggered lightning flash during the SHandong Artificially Triggering Lightning Experiment (SHATLE) were compared with simulated magnetic fields, acquiring good agreement. The coupling effects of metal cavity with a slot placed at a distance of 78 m from the lightning channel are then simulated and analyzed based on the simulation model. According to the simulation results, the location of lightning channel relative to the cavity has a great impact on the magnetic flux density inside the cavity. For the electromagnetic shielding and cooling, the slot located at the top side of the cavity has better performance.

Key words: magnetic shielding; lightning protection; electromagnetic analysis