

文章编号 1005-0388(2006)03-0342-05

共模环路闭合与开路的天线模型 及其计算分析

宋海峰 陈志雨

(中国科学院电子学研究所, hf-song@sohu.com, 北京 100080)

摘要 应用矩量法计算了折线电天线、方形环天线和加载电容方形环天线的电流分布, 计算结果表明: 当加载电容的方形环天线所加载的电容很大或很小时, 其电流分布分别与闭合环天线和开路折线电天线的电流分布相吻合; 并在此基础上进一步计算和分析了不同频率下环路闭合与开路的天线辐射场, 研究结果对分析电磁兼容共模辐射问题有一定的参考价值。

关键词 矩量法, 共模辐射, 方形环天线, 折线电天线, 加载天线

中图分类号 TN820.1 **文献标识码** A

Model and numeracatial analysis of common-mode close circuit and open circuit loop antenna

SONG Hai-feng CHEN Zhi-yu

(Institute of electronics, Chinese Academy Of Sciences, hf-song@sohu.com, Beijing 100080, China)

Abstract The current distribution of a folded antenna, a quadrate loop antenna and a loop antenna with load capacitance is analyzed by using MoM. It is shown from the simulation results that when the capacitance is very large or small, the current distribution of load antenna is same as that of quadrate loop antenna and folded antenna. Finally, the radiation fields of short circuit and open circuit loop antenna operated at different frequencies is provided.

Key words MoM, common-mode radiation, folded antenna, quadrate loop antenna, loaded antenna

1 引言

随着电子技术的迅速发展, 现代的电子设备已广泛地应用于人类生活的各个领域。电子设备的广泛应用和发展, 必然导致它们在其周围空间产生的电磁场电平的不断增加。也就是说, 电子设备不可避免地在电磁环境(EME)中工作。因此, 必须解决电子设备在电磁环境中的适应能力, 即: 理想的电子设备或系统应该既不辐射任何不希望的能量(EMI), 又应该不受任何不希望有的能量的影响(EMS)。电磁兼容性(EMC)就是一门在此背景下

形成的关于抗电磁干扰(EMI)影响的学科。而在 EMC 问题中, 共模辐射的存在已经成为众多电子设备不能通过电磁兼容检测的重要障碍, 并且制约着高频高速电子设备的发展, 因此国内外许多在电磁兼容领域研究的学者都把研究方向放在了如何降低或消除电路中存在的共模辐射问题上。

在众多共模辐射问题中, 人们对环路闭合与开路共模辐射场的认识一直比较模糊。在一般教科书中, 常常强调避免环路闭合以防止磁场耦合, 但是对环路闭合与开路的共模辐射场特征、电场和磁场各分量之间的关系以及与频率之间的关系都没有定量

的描述,而且求解这两种情况下的电流分布并没有统一的算法。目前,国内外对这类问题的研究不多,模型也不够通用。作者对这类问题进行了建模,把三种与机箱相关的共模辐射问题分别简化为加载电容的方形环天线,方形环天线和折线电天线,并应用了矩量法对其共模辐射特性进行了细致的计算和分析,得出了一些有意义的结果。

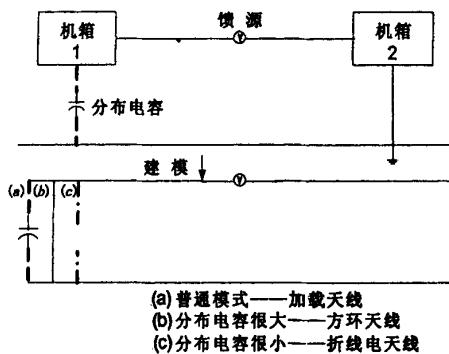


图1 系统建模图

2 系统建模

对三种与机箱相关的共模辐射问题进行了建模,第一种是当导线连接的两个机箱一个接地,一个悬浮(但距离地面足够近)时,模型为加载电容的方形环天线,如图1(a)所示;第二种是当导线连接的两个机箱都接地的时候,模型为方形环天线,如图1(b)所示;第三种是当导线连接的两个机箱一个接地,一个悬浮(但距离地面足够远)时,模型为折线电天线,如图1(c)所示。假设它们都具有相同共模辐射电压V。作者应用矩量法求出了这三种天线的电流分布、输入阻抗的频率特性及辐射场的分布,一定程度上解决了一直困扰人们的对共模电流的辐射特性认识比较模糊的问题,对工程实践具有一定的指导意义。

3 矩量方程的建立及加载天线的计算

设三种天线的半径都为 $a=3\text{mm}$,对方形环天线,剖分N段,而其它两种天线都剖分 $N-1$ 段。折线电天线的开口位置与加载天线的电容加载位置都如图1所示的左边宽的中点处,并且所占用的空间都为一个剖分段 Δl_n 。这三种天线都是以左边宽的中点处作为坐标的原点。

按照文献[1]中所述的方法进行剖分。由文献[1]可知,根据伽略金(Galerkin)法选用脉冲基函数及相同的权函数,可得到阻抗矩阵元素的计算公式为:

万万数据

$$Z_{mn} = j\omega\mu I_n \cdot \Delta l_m \Psi(m, n) + \frac{1}{j\omega} [\Psi^+(m, n) - \Psi^-(m, n) - \Psi^-(m, n) + \Psi^+(m, n)] \quad (1)$$

其中 $\Psi(m, n) = \frac{1}{4\pi\Delta l_n} \int_{-n}^n \frac{\exp(-jkR_{mn})}{R_{mn}} dz$, m 及 n 点分别为场点及源点的标号。 R_{mn} 为场点到源点的距离。拐角点的处理,这里近似地视其为直线。当场点 m 处于端点或拐点处时,积分值应取为在相同条件下其它点积分值的一半。其中 R_{mn} 的处理及 Z_{mn} 的计算,文献[1]中已经给出,在此不再详述。

对于加载天线,可把其看作一种多端口网络结构,在一个端口馈电,在其它端口以导纳元件加载。文中的加载天线可看作是一个二端口网络结构。

$$\text{输入导纳为: } Y_{in} = y_{kk} - \frac{y_{kN}y_{Nk}}{y_{NN} + Y_L} \quad (2)$$

$$\text{输入阻抗为: } Z_{in} = z_{kk} - \frac{z_{kN}z_{Nk}}{z_{NN} + Z_L} \quad (3)$$

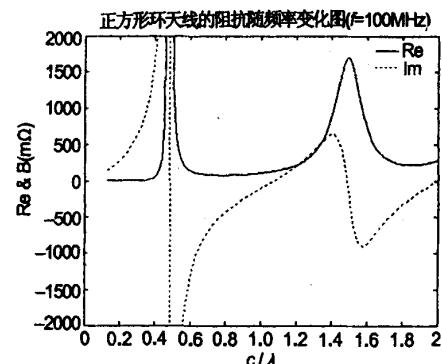
其中(2)和(3)式的选取是有条件的:如果所有端口短路易于分析则选(2)式;如果所有端口开路易于分析则选(3)式。在本问题中,所有端口短路易于分析,因此选用(2)式,并通过它求出加载点处的电压的计算公式为:

$$V_N = \frac{-y_{Nk}}{y_{NN} + Y_L} V_k$$

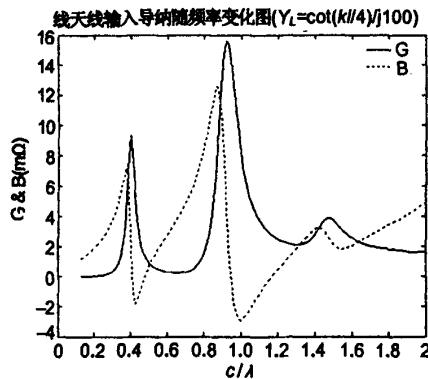
其中 $V_k = V_0$ 则 $I = Y \cdot V$ 其中: $Y = Z^{-1}$ 是同文献[1]中所求的广义导纳矩阵。而在 V 中相当于有两个馈源 V_k 和 V_N 。

4 计算方法的验证

应用上述方法计算文献[2]中的正方形环天线的输入阻抗,如图2(a)所示,以及文献[1]中的加载电容的线天线的输入导纳,如图2(b)所示。所得结



(a) 正方形环天线的输入阻抗



(b) 加载线天线的输入导纳
图 2 文中计算结果与文献结果比较图

果与两文献中所给结果相吻合。

5 三种天线算法的统一

下面应用上述方法来计算这三种模型天线的电流分布。

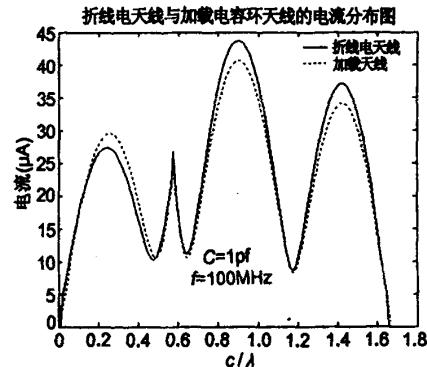
在图 3 的(a)和(b)中, 实线分别代表应用矩量法求出的折线电天线及方形环天线的电流分布, 而虚线代表应用矩量法结合加载电容法求出的加载天线的电流分布, 其中(a)、(b)分别对应于加载电容量很小和很大两种情况。从图 3(a)中可以看出: 对于加载电容的环天线, 当电容很小的时候, 其电流分布与折线电天线的电流分布基本相同。而理论上, 加载电容环天线当加载电容很小的时候相当于断路, 即相当于折线电天线。所以图中显示的结果与理论分析是一致的, 说明应用此算法可把折线电天线与加载电容环天线统一起来。而从图 3(b)中也可以看出: 对于加载电容的环天线, 当电容很大的时候, 其电流分布与方形环天线的电流分布基本相同, 这与理论分析也是一致的。因此应用此算法也可以把环天线与加载电容环天线统一起来。

综上所述, 对于折线电天线及方形环天线来说, 都可以用加载电容的环天线来模拟, 区别只在于所加载电容的大小。即: 可通过加载天线把折线电天线及环天线的算法统一起来。

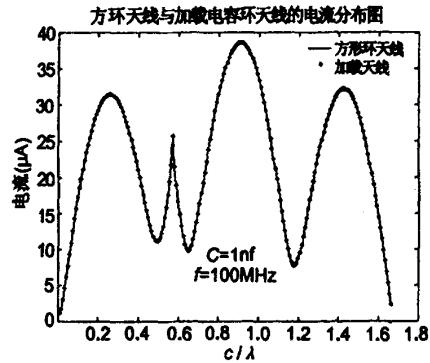
6 环路与开路对共模辐射的影响

由上面的分析可知, 对于加载电容的环天线, 可根据电容的大小, 分别用折线电天线和环天线来模拟。所以下面只分析环天线和折线电天线的辐射场, 其结论同样适用于加载电容的环天线。

等电压激励时回路闭合或开路时天线的辐射场
万方数据



(a) 折线电天线与加载天线的电流分布比较图

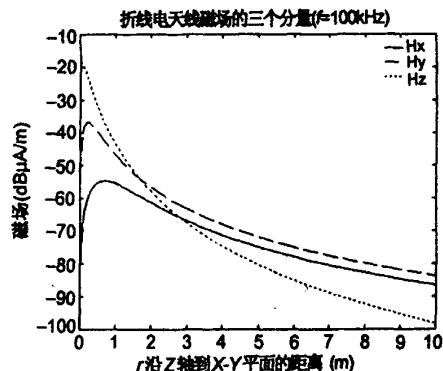


(b) 方环天线与加载天线的电流分布比较图
图 3 三种天线的电流分布比较图

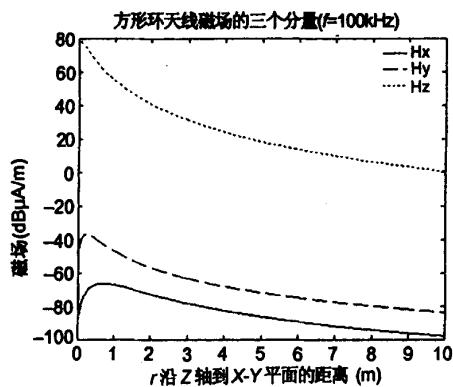
计算结果对比如下:

6.1 处于低频的时候 ($f = 100\text{kHz}$)

如图 4(a)和图 4(b)所示, 在低频时两种天线的磁场分布确有显著的不同。即: 在环路闭合的情况下, 磁场以沿 z 轴方向的磁场为主, 其它两个方向上的磁场很小可忽略不计。而在开路的情况下, 磁场的三个分量大小差别不大, 且沿 x 轴和 y 轴的两个分量与环路闭合时的情况相比较变化不大。所以,



(a) 低频时, 折线电天线的磁场分布



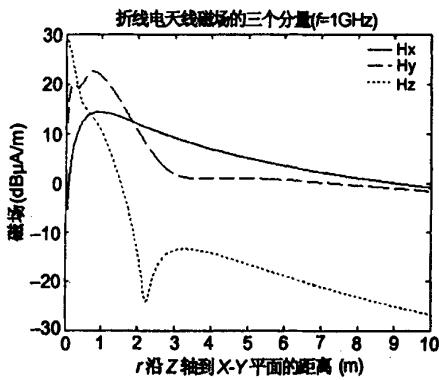
(b) 低频时,方形环天线的磁场分布

图4 低频时,两种天线的磁场分布比较图

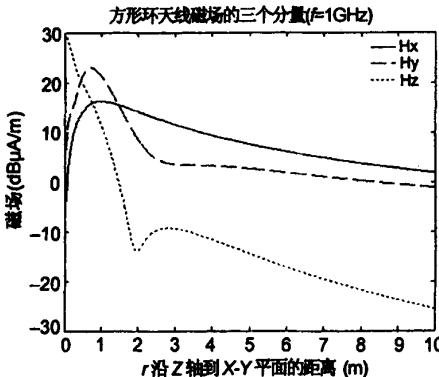
可以得出结论,在低频情况下,环路闭合与开路对共模辐射的影响主要区别在沿z轴方向的磁场分量的大小。

6.2 处于高频的时候($f=1\text{GHz}$)

如图5(a)和图5(b)所示,在高频时两种天线的磁场分布基本相同,无明显差别。则可得出结论:在高频的情况下,环路闭合与开路对共模辐射的磁场



(a) 高频时,折线电天线的磁场分布



(b) 高频时,方形环天线的磁场分布

图5 高频时,两种天线的磁场分布比较图

场影响基本相同。

计算结果还显示出:不论处在何种频率下,这两种天线的电场分布都基本相同。(由于篇幅有限,两种天线的电场分布图没有列出)。

7 结论

对电磁兼容问题当中经常遇到的环路闭合与开路对共模辐射场的影响进行了建模,并采用矩量法分析了这三种模型的电流分布、输入阻抗特性及其场的分布,得到了对处理 EMC 设计中经常遇到的共模辐射问题具有一定借鉴及指导意义的两个结论:其一,对于折线电天线及环天线来说,都可以用加载电容的环天线来模拟,区别只在于所加载电容的大小。因此,可通过加载天线把折线电天线及环天线的算法统一起来;其二,在低频情况下,环路闭合与开路对共模辐射场的影响主要区别在于沿z轴方向的磁场分量的大小,而电场及磁场的其它两个方向基本相同。在处于其它频率的情况下,环路闭合与开路对共模辐射场的影响基本相同。

参考文献

- [1] R F Harrington 著,王尔杰,肖良勇等译. 计算电磁场的矩量法[M]. 北京:国防工业出版社,1981,73~141.
- [2] 康行健等. 天线原理与设计[M]. 北京:国防工业出版社,1996,53~54.
- [3] 魏文元等. 天线原理[M]. 北京:国防工业出版社,1985.
- [4] [美] C A 巴拉尼斯著,于志远,关秉田等译. 天线理论——分析与设计[M]. 北京:电子工业出版社,1988,312~349.
- [5] S A Schelkunoff and H T Friis. Antennas, Theory and Practice[J]. New York: Wiley, 1952, 370~401.
- [6] L T Tsai. A numerical solution for the near and far fields of an annular ring of magnetic current[J]. IEEE Trans. Antennas Propagat, Sept. 1972, 5(20): 569~576.
- [7] J E Lindsay, Jr. A circular loop antenna with non-uniform current distribution[J]. IRE Trans. Antennas and Propagat, July 1960, 4(8): 438~441.
- [8] 万继响,张玉,梁昌洪. 任意导体与线天线连接问题的MoM分析[J]. 电波科学学报, 2003, 18(5): 523~527.
- J X Wan, Y Zhang, C H Liang. Method of moment analysis of connect between wire antennas and arbitrary shape conductors[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2003, 18(5): 523~527.

- [9] 褚国桢. 中波天线输入阻抗计算机分析[J]. 电波科学学报, 2002, 17(2): 197~203.
G Z Chu. Analysis of input impedance of medium wave antenna with computer[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2002, 17(2): 197~203.
- [10] 杨娟, 张玉, 梁昌洪. 线天线输入阻抗的变分原理结合 FDTD 求解[J]. 电波科学学报, 2003, 18(1): 48~52.
J Yang, Y Zhang, C H Liang. Simulating antenna input impedance by applying variational principles in FDTD [J]. Chinese Journal of Radio Science, 2003, 18(1): 48~52.
- [11] 宫德明. 天线的计算机辅助设计[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1988, 95~98.
- [12] Newman and D M Pozar. Electromagnetic modeling of composite wire and surface geometries [J]. IEEE Trans. Antenna and Propagat, 1978, 26 (6) : 784~789.
- [13] D M Pozar and E H Newman. Analysis of a monopole mounted near an edge or a vertex[J]. IEEE Trans. Antennas and Propagat, 1982, 30 (3) : 401~408.



宋海峰 (1977—), 男, 吉林人, 中国科学院电子学研究所硕士研究生, 主要从事电磁兼容、天线等方面的研究。



陈志雨 (1945—), 男, 广州人, 中国科学院电子学研究所研究员, 长期从事电磁场理论、电波传播及电磁兼容等方面的研究。Email: zychen@mail. ie. ac. cn

(上接第 341 页)

- [12] Gang Zhao and Q H Liu. The 3-D multidomain pseudospectral time-domain method for wideband Simulation[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2003, 13(5): 184~186.
- [13] B Yang and J S Hesthaven. Multidomain pseudospectral computation of Maxwell's equation in 3-D general curvilinear coordinates [J]. Appl. Numer. Math., 2000, 33: 281~289.
- [14] G, Zhao and Q H Liu. The 3-D multidomain pseudospectral time-domain algorithm for inhomogenous conductive media[J]. IEEE Trans Antennas Propagat., 2004, 52(3): 742~749.
- [15] Tobin A Driscoll and Bengt Fornberg. A block pseudospectral method for Maxwell's Equations[J]. Journal of computational physics, 1998, 140: 47~65.
- [16] Tobin A. Driscoll and Bengt Fornberg. Block pseudospectral methods for Maxwell's equation II: two-dimensional, discontinuous-coefficient case [J]. SIAM J. sci. comput., 1999, 21(3): 1146~1167.



姜永金 (1977—), 男, 山西人, 国防科技大学电子科学与工程学院博士生, 主要从事电磁场数值计算、微波、毫米波天线的设计与分析。



陈忠宽 (1979—), 男, 广西人, 国防科技大学电子科学与工程学院博士研究生, 主要从事电磁场数值计算和电磁优化问题研究。



毛钧杰 (1943—), 男, 湖南人, 国防科技大学电子科学与工程学院博士生导师, 电子学会高级会员。主要从事毫米波多模复合制导理论研究、天线设计、天波传播的计算及微波教学工作。

如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深，让许多工程师望而却步，然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上，我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识，借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训(www.edatop.com)专注于微波射频和天线设计人才的培养，推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程，化繁为简，直观易学，可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛，让天线设计不再难…



HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书，课程从基础讲起，内容由浅入深，理论介绍和实际操作讲解相结合，全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程，可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计，让天线设计不再难…

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程，由经验丰富的专家授课，旨在帮助您从零开始，全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程，边操作边讲解，直观易学；购买套装同时赠送 3 个月在线答疑，帮您解答学习中遇到的问题，让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>



13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程，培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合，全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作，同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习，可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试…

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



关于易迪拓培训:

易迪拓培训(www.edatop.com)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立,一直致力于专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养;后于 2006 年整合合并微波 EDA 网(www.mweda.com),现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地,成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 **ADS**、**HFSS** 等专业软件使用培训课程,广受客户好评;并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书,帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司,以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年, 10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养, 更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果, 又能免除您舟车劳顿的辛苦, 学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲, 结合实际工程案例, 直观、实用、易学

联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>