

# 电流驱动共模模型对辐射噪声预估及校准研究

陈向阳<sup>1</sup>, 陈 旻<sup>2</sup>, 刘 勇<sup>2</sup>, 夏 欢<sup>2</sup>

(1. 江苏省产品质量监督检验研究院, 江苏 南京 210007)  
(2. 南京师范大学电气与自动化工程学院, 江苏 南京 210042)

[摘要] 开阔场测试、电波暗室测试和近场测量是目前用于测量辐射电磁噪声的主要手段,但是考虑到成本原因,对辐射噪声的预估往往采用近场测量. 美国克莱姆森大学的 Hubing 教授提出的电流驱动共模模型可以对辐射噪声进行预估. 如加之方差的拟合校准,可以对数据进行补偿. 结果证明了以上方法可以为进一步改进辐射电磁干扰预估方法提供借鉴.

[关键词] 电磁干扰, 电流驱动共模模型, 方差拟合

[中图分类号] TM15 [文献标志码] A [文章编号] 1672-1292(2013)03-0023-04

## Prediction and Calibration With Current-Driven CM Model Study of Radiated Electromagnetic Inference Noise

Chen Xiangyang<sup>1</sup>, Chen Yang<sup>2</sup>, Liu Yong<sup>2</sup>, Xia Huan<sup>2</sup>

(1. Institute of Product Quality Supervision and Inspection in Jiangsu Province, Nanjing 210007, China)  
(2. School of Electrical and Automation Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210042, China)

**Abstract:** OTA test, 3-m chamber measurement and near field test are all made useful to prediction research on radiated electromagnetic inference noise. Because of high cost, near field test maybe adopted to estimate the radiation noise. Hubing from Clemson University put forward a simple configuration illustrating current-driven common-mode radiation. This paper makes use of variance to compensate the data. The result shows that current-driven common-mode radiation algorithm and variance are avail to high frequency radiated interference's estimation and the diagnosis work.

**Key words:** electromagnetic interference(EMI), current-driven common-mode model, variance fitting

开阔场测试、电波暗室测试和近场测量是目前用于测量辐射电磁噪声的主要手段,如图 1 所示. 开阔场测试方法对环境要求很高,实现起来有很大的难度. 电波暗室虽然能够判断被测试的设备的辐射值超标与否,但是无法预计出被测设备辐射产生机理. 近场测试作为低成本预估噪声的首选方法,国内外学者对此进行了相关研究: Aouine 通过分析近场区域辐射磁场分量获取电路辐射干扰噪声,建立了电流环路模

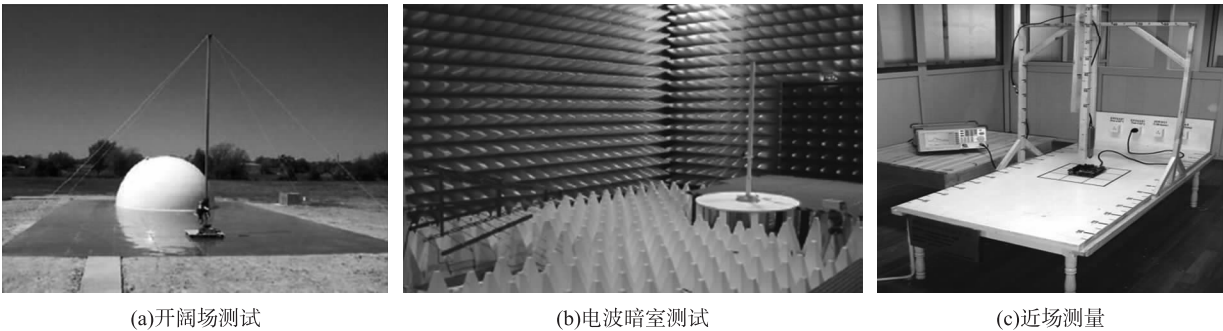


图 1 辐射电磁噪声测量方法  
Fig. 1 Radiated noise measurement

型<sup>[1]</sup>;Thomas 提出一种用于分析辐射干扰噪声等效偶极子模型<sup>[2]</sup>. 但是所需的算法都较为复杂,且不针对实际的电子电路.

本文研究了近场测试方法中电流驱动辐射模型的预估方法,并对预估结果进行校准,提高了电流驱动辐射模型预估精度,从而为近场辐射 EMI 预估提供借鉴.

1 电流驱动下的共模模型提取

电流驱动共模电磁噪声模型由美国克莱姆森大学(Clemson University)电气与计算机工程学院的 Hubing 教授提出<sup>[3-6]</sup>. PCB 板的宽度有限,因此,一部分由信号电流产生的磁场包围在电路板周围,且在回路平面上存在一个电压降. 这一压降将会引起共模电流,影响电路板上的各种部件和电缆.

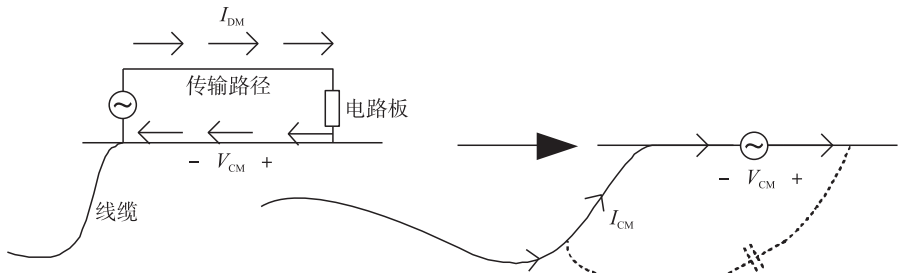


图 2 电流驱动共模辐射机理模型

Fig.2 Simple configuration illustrating current-driven common-mode radiation

图 2 描述了线缆到电路板的电流驱动共模辐射机理.  $V_{CM}$  由差模信号电流  $I_{DM}$  引起,该  $V_{CM}$  又在电缆和右半个电路板之间产生了共模噪声电流  $I_{CM}$ .

估算该共模噪声电流  $I_{CM}$  对外呈现出的电感  $L_p$  为:

$$L_p=\left(\frac{4}{\pi^2}\right)\frac{\mu_0l_th_t}{dist_1+dist_2}, \tag{1}$$

其中,  $h_t$  是信号线到返回面的高度,  $dist_1$  和  $dist_2$  是两个从信号线的中心到板子边缘的最短距离,每个信号线  $i$  的电位差为  $V_{ret}$ :

$$V_{ret,i}=\omega L_{p,i}I_{DM,i}. \tag{2}$$

式(2)表明,与电路板层有关的阻抗与信号频率成正比. 这一关系在传输线路电小尺寸时有意义. 但是当传输线路不是电小尺寸时该电压将达到最大值. 这个最大值发生在负载的  $1/4$  波长. 因此,式(2)修改为:

$$V_{ret,i}=\begin{cases} \omega L_{p,i}I_{DM,i}, & \omega\leqslant\frac{\pi c}{2l_t\sqrt{\epsilon_r}} \\ \frac{\pi cL_{p,i}I_{DM,i}}{2l_t\sqrt{\epsilon_r}}, & \omega>\frac{\pi c}{2l_t\sqrt{\epsilon_r}} \end{cases}, \tag{3}$$

其中,  $c$  是自由空间的传播速度.

各个设备的电流默认为三角波形,如图 3 所示.

信号线上的电流频谱计算为:

$$I_{DM(n)}=\frac{2I_{p1}}{t_1}\frac{\sin^2(n\pi t_1/T)}{(n\pi t_1/T)^2}-(-1)^n\frac{2I_{p2}}{t_2}\frac{\sin^2(n\pi t_2/T)}{(n\pi t_2/T)^2}. \tag{4}$$

板子上的总电位差为每根信号线上压差之和:

$$V_{ret}=\sqrt{\sum V_{ret,i}^2}. \tag{5}$$

当只有一根电缆连接在板子上时,在距离 3 m 处的最大辐射场是由电缆和电路板之间的电流驱动电压引起的:

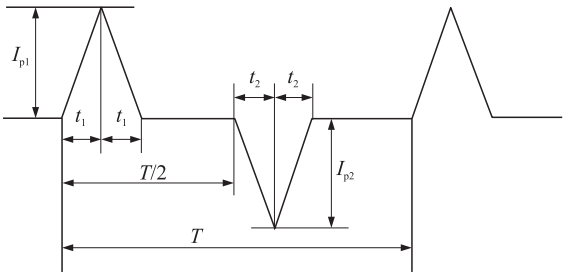


图 3 信号电流波形

Fig.3 Current wave form on signal traces

$$|E_{\text{cable-to-board}}| = 0.365 \frac{100V_{\text{ret}}}{\sqrt{100^2 + 1/(\omega C_B)^2}}. \quad (6)$$

$C_B$  是式(6)中的板子的绝对电容.

清楚了 Hubing 提出的模型后,就可以利用电路进行预估和校准了.

## 2 预估与校准

利用电流驱动共模模型进行预估,将 10 MHz 晶振作为电压信号  $V_{\text{CM}}$ ,回路电阻为  $50 \Omega$ ,辐射线缆长度分别为 1 cm. 采用江苏省电气装备电磁兼容工程实验室的 3m 法电波暗室作为辐射电磁干扰噪声标准测试环境及德国罗德施瓦茨公司电磁干扰接收机 ESL-20,测试结果如图 3(a)所示. 采用台湾固纬频谱仪作为近场信号接收设备,最高测量频率可达 2.7 GHz,同时采用安捷伦公司的射频电压探头,测试结果如图 3(b)所示,为了和暗室的结果有清晰的对比,整理后的结果如图 3(c)所示.

如图 4 所示,采用 3m 法电波暗室的标准测试结果与采用 Hubing 电流驱动共模模型在趋势上是相近的,说明存在预估的意义. 但是为了提高预估结果的精度,需要对上述模型及公示(6)进一步修正.

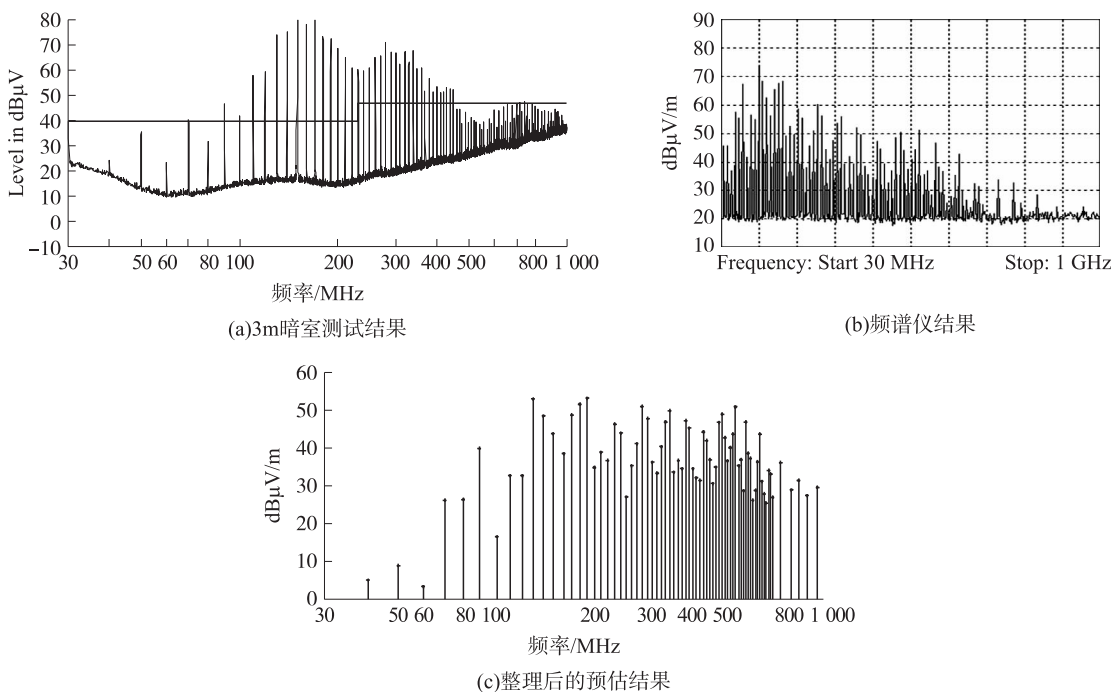


图4 辐射 EMI 测试结果

Fig.4 RE test result

在多项式模型校准方法中,需要对该模型的计算误差进行补偿,常用方法主要有方差法<sup>[7-8]</sup>. 传统意义上的方差是用来反映一组数据偏离平均数的程度. 本文借助方差多项式的函数,利用下式进行计算,就可以将每个 Hubing 电流驱动共模模型测量出的数据相对于 3m 法电波暗室标准测试的结果补偿.

$$S = \frac{1}{n-1} \sum (x_i - \bar{x})^2, \quad (7)$$

式中,  $n$  表示这组误差数据的数量;  $x_i$  为多项式校准模型计算值与 3m 暗室标准检测结果各频点对应的误差值;  $\bar{x}$  为这组数据的平均值. 据此修正方法,可以将公式(6)修正成下面的公式:

$$|E_{\text{cable-to-board}}| = 0.365 \frac{100V_{\text{ret}}}{\sqrt{100^2 + 1/(\omega C_B)^2}} + S. \quad (8)$$

通过公式(8)的计算后,对比结果如图 5 所示. 实线均为 3 m 暗室标准检测结果,图 5(a)的虚线为校准前的结果,图 5(b)的虚线为校准后的结果.

不难看出,校准前的数据,虽然只有 8 组的预估结果与 3m 暗室结果误差在  $\pm 10\%$ ,但是整体的趋势是符合的,特别是一些在 3m 暗室中幅值很高的频点在电流驱动共模模型的预估下也很高,为预估提供了大体

方向上判断的依据. 经过方差法的校准后,不单单趋势吻合,准确度也得到了较大提升,误差在 $\pm 10\%$  的数据增加到 26 组,准确度提高了 3 倍多. 证明了校准的有效性.

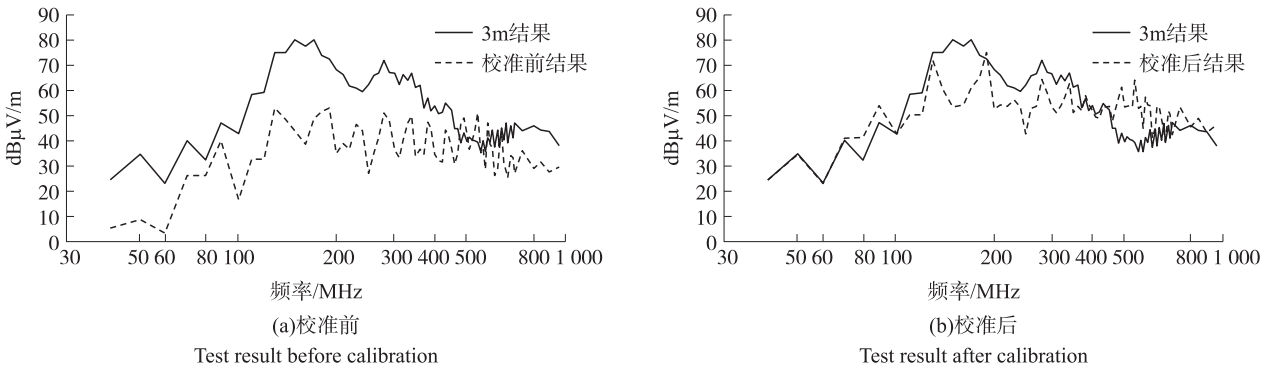


图 5 校准前后结果  
Fig. 5 Test result before and after calibration

3 结论

本文借助 Hubing 提出的电流驱动共模模型,研究了近场测试方法中辐射噪声的预估方法. 针对此模型的预估结果,在趋势上可以表明一定的噪声辐射问题,并借助方差法对其进行校准,提高了电流驱动共模模型的预估精度. 由此看来,Hubing 提出的电流驱动共模模型对于辐射电磁干扰的预估是有一定借鉴意义的.

[ 参考文献 ] (References)

[ 1 ] Aouine O, Labarre C, Costa F. Measurement and modeling of the magnetic near field radiated by a Buck chopper[ J ]. Electromagnetic Compatibility, IEEE Transactions on, 2008, 50( 2 ) : 445-449.

[ 2 ] Xin Tong, Thomas D W P, Nothofer A, et al. Modeling electromagnetic emissions from printed circuit boards in closed environments using equivalent dipoles[ J ]. Electromagnetic Compatibility, IEEE Transactions on, 2010, 52( 2 ) : 462-470.

[ 3 ] Shim H, Hubing T. A closed-form expression for estimating radiated emissions from the power planes in a populated printed circuit board[ J ]. IEEE Trans Electromagn Compat, 2006, 48( 1 ) : 74-81.

[ 4 ] Fu Yan, Hubing T H. Analysis of radiated emissions from a printed circuit board using expert system algorithms[ J ]. IEEE Transaction on Electromagnetic Compatibility, 2007, 49( 1 ) : 68-75.

[ 5 ] Shim H, Hubing T. Model for estimating radiated emissions from a printed circuit board with attached cables due to voltage-driven sources[ J ]. IEEE Trans EMC, 2005, 47( 4 ) : 899-907.

[ 6 ] Shim H, Fu Y, Hubing T H. Radiated emissions from populated printed circuit boards due to power bus noise[ C ]//Proc IEEE Int Symp EMC, Santa Clara: 2004: 396-400.

[ 7 ] 孙红艳, 刘勇, 颜伟, 等. 辐射电磁干扰近场测试校准算法研究[ J ]. 南京师范大学学报: 工程技术版, 2011, 11( 3 ) : 6-9. Sun Hongyan, Liu Yong, Yan Wei, et al. The research on radiated electromagnetic interference near field test calibration algorithm[ J ]. Journal of Nanjing Normal University: Engineering and Technology Edition, 2011, 11( 3 ) : 6-9. ( in Chinese )

[ 8 ] 刘健, 杨文宇, 赵高长. 基于蒙特卡罗分析的配电网架规划方法比较[ J ]. 中国电机工程学报, 2006, 26( 10 ) : 73-78. Liu Jian, Yang Wenyu, Zhao Gaochang. Comparison of expansion planning algorithms for distribution networks based on monte-carlo simulation[ J ]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26( 10 ) : 73-78. ( in Chinese )

[ 责任编辑: 刘 健 ]