

PCB 高频辐射干扰预估方法对比研究

张宇环¹, 戎 融¹, 赵 阳^{1,2}, 颜 伟¹, 朱志毅¹, 刘 勇¹

(1. 南京师范大学 电气与自动化工程学院, 江苏 南京 210042;

2. 东南大学 毫米波国家重点实验室, 江苏 南京 210096)

[摘要] 针对高频电路辐射干扰近场测试预估方法较多, 目前没有统一的测试方法和要求, 据此对比研究了基于电流驱动模型辐射预估方法和基于射频电流参数测量的辐射预估方法, 并给出了相应的理论分析和实验数据. 其结果表明: 两种方法的预估结果与电波暗室测量结果吻合较好, 但在不同频段两种方法的估计精度不同, 为进一步改进辐射电磁干扰预估方法提供了依据.

[关键词] 电磁干扰, 高频电路, 机理诊断, 特性预估

[中图分类号] TM15 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1672-4292(2011) 01-0001-04

Comparison of Prediction Methods Applied in High Frequency Radiated EMI for PCB

Zhang Yuhuan¹, Rong Rong¹, Zhao Yang^{1,2}, Yan Wei¹, Zhu Zhiyi¹, Liu Yong¹

(1. School of Electrical and Automation Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210042, China;

2. State Key Laboratory of Millimeter Waves Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: In view of many kinds of near field test and estimate methods in radiated interference of the high-frequency circuit existing, there is no unification test method and request at present. We have a comparative study on the estimate methods in radiated interference based on the current actuation model and radio-frequency current parameter survey and also given the corresponding theoretical analysis and experimental result. The experimental result shows that the test results of the two kinds of estimate method are in agreement with the result of test in anechoic chamber. The effective reference is provided for the later high frequency radiated interference's estimation and the diagnosis work.

Key words: electromagnetic interference (EMI), HF circuit, diagnosis mechanism, performance estimation

目前, 分析和测量辐射电磁干扰噪声的方法主要是近场测试和远场测试. 近场测试是利用近场探头进行测试^[1]; 远场测试主要是开阔场测试方法以及 10 m 和 3 m 电波暗室测试方法. 电波暗室测试方法能够很好地测得辐射源远场特性并判定噪声是否超标. 但是由于电波暗室配置成本较高、场地较大等原因, 近场测试在高频辐射干扰预估与诊断工作中得到了广泛的应用. 国内外专家学者都进行了广泛的研究^[2-4], 并取得了较好的进展.

本文主要研究 PCB 高频辐射干扰噪声预估方法^[5-7], 并把不同方法进行了对比, 得出不同预估方法的优劣, 从而为提高高频辐射噪声预估精度提供了一定的参考依据.

1 PCB 辐射预估方法分析

1.1 辐射机理分析

辐射干扰包括共模辐射和差模辐射. 根据共模辐射原理和差模辐射原理及天线理论, 可将共模辐射单元描述为电偶极子辐射模型, 而将差模辐射单元描述为磁偶极子辐射模型. 假定共模辐射模型为一由电压源驱动的短(小于 1/4 波长)直偶极子天线并取最大辐射场强方向, 则远场中的共模辐射场强可表示为:

收稿日期: 2010-12-10.

基金项目: 江苏省自然科学基金(BK2008429)、毫米波国家重点实验室开放基金(K201106)、南京师范大学研究生优秀论文培育计划(2010ss0018).

通讯联系人: 赵 阳, 教授, 博士生导师, 研究方向: 电磁兼容. E-mail: zhaoyang@njnu.edu.cn

$$E_{CM} = 12.6 \times 10^{-7} (f L I_{CM}) \left(\frac{1}{r} \right), \quad (1)$$

式中, f 是信号频率; L 为辐射电路导线长度; I_{CM} 是电路中的共模电流; r 为测试距离. 假定差模辐射模型为一小环路电流并考虑接地板全反射, 且取最大辐射场强方向, 则远场中的差模辐射场强可表示为:

$$E_{DM} = 2.63 \times 10^{-14} (f^2 A I_{DM}) \left(\frac{1}{r} \right), \quad (2)$$

式中, f 是信号频率; A 为电路环路面积; I_{DM} 是电路中的差模电流; r 为测试距离. 由于产生相同辐射场强时共模电流仅为差模电流的千分之一, 所以共模电流产生的共模辐射在辐射干扰中常占主导地位. 因此, 进行辐射预估方法研究侧重于电路的共模辐射情况.

1.2 电流驱动模型辐射预估方法

信号电流产生的磁场包围在电路板周围, 并且在回路平面上产生一个电压降. 这一电压降导致产生了共模电流, 从而驱动电路板上的各种部件和电缆. 该辐射机理称为电流驱动原理. 电路板的电流驱动模型原理如图 1 所示.

其中, V_{CM} 由差模信号电流 I_{DM} 引起, V_{CM} 又引出一个 V_{DM} 电缆和电流 I_{DM} . 当只有一根电缆连接在板子上时, 最大辐射场^[8]是由电缆和板子之间的电流驱动电压引起的.

$$|E_{cable-to-board}| = 0.365 \frac{100V_{ret}}{\sqrt{100^2 + \frac{1}{(\omega C_B)^2}}}, \quad (3)$$

式中, C_B 是板子的绝对电容; V_{ret} 是板子的总电位差即每根信号线上压差之和. 需要指出的是, 在进行实验时, 频谱仪只能显示信号的电压频谱, 为得到电流值, 需要对测得的电压进行转换. 转换公式为:

$$dB\mu A = dB\mu V - dB\Omega + cableloss, \quad (4)$$

式中, $dB\Omega$ 是转移阻抗, $cable loss$ 是线缆损耗, 可忽略不计.

1.3 基于射频电流参数测量的辐射场快速分析方法

根据电磁场理论, 已知辐射源表面的电流分布, 则可通过对其积分得出辐射场大小. 然而, 对于高频电路而言, 随着频率增加, 线缆上的电流不再均匀一致. 设将导线均匀分成 n 小段, 并采用射频电流探头测量每小段中的共模电流, 分别为 $I_1, I_2 \cdots I_n$, 如图 2 所示. 而由式 (1) 可知带电线缆在开阔试验场中的等效辐射场场强.

$$|E_c| \approx \frac{2\pi f L (I_1 + I_2 + \cdots + I_n)}{3 \sqrt{r^2 + (H - 0.8)^2}} \times 10^{-7} V/m, \quad (5)$$

式中, L 为每小段等效天线长度; r 是开阔试验场标准测试距离; H 是测试天线高度; F 是计算开阔场测试环境下的修正因子.

由式 (5) 可知, 当 n 越大, 共模辐射场的估计越精确. 考虑辐射干扰最坏情况(即各段电流相位相同), 则只需将 n 段线缆上共模电流产生的共模辐射场进行叠加即可估计可能的总辐射场最大值. 将电流探头直接卡在电路线缆上面, 即可得到由线缆中共模电流感应产生的电压, 如图 3 所示. 需要指出的是, 频谱仪只能显示信号的电压或功率频谱, 为得到共模辐射场, 需对测得的电压频谱进行转换. 由式 (5) 可得电路辐射干扰快速预估公式:

$$|E_c| = 20 \lg \frac{\sum_{i=1}^n |V_i| \cdot L f}{\sqrt{Z_T}} + |F_{GP}| - 29.59, \quad (6)$$

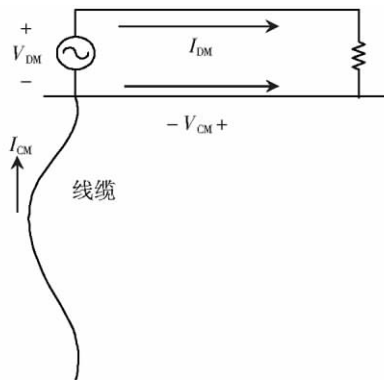


图 1 电流驱动共模电流原理图

Fig.1 Simple configuration illustrating current-driven common-mode radiation

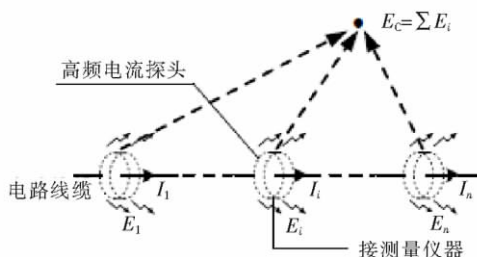


图 2 利用电流探头对电路线缆(分为 n 等分)上的共模电流产生的辐射场进行预估示意图

Fig.2 Simple illustrate using RF current probe measure HF radiated EMI

式中, $|E_c|$ 为高频电路辐射场场强 $/(\text{dB}\mu\text{V}/\text{m})$; $|V_i|$ 为采用电流探头对第 i 段电路线缆测得的电压值 $/\text{V}$; f 为信号频率 $/\text{MHz}$; L 为每小段等效天线长度; Z_T 为匹配阻抗 $(50\ \Omega)$, $|F_{\text{CP}}|$ 为地板反射因数(这里取最大值 $6\ \text{dB}$)。

2 实验系统设计

如图 3, 实验中频谱分析仪采用固纬 INSTEK GSP - 827, 测量频率可达 $2.7\ \text{GHz}$; 高频电流探头采用 A. H. System 的 BCP - 512 宽带电流探头, 测量频率可达 $1\ \text{GHz}$, 满足辐射场频率范围。

为了验证实验方法的正确性, 分别采用近场测试方法和电波暗室测试方法对被测电路进行测试并加以对比分析。其中, 电波暗室采用 ETS-Lindgren 公司的 $3\ \text{m}$ 法标准电波暗室。

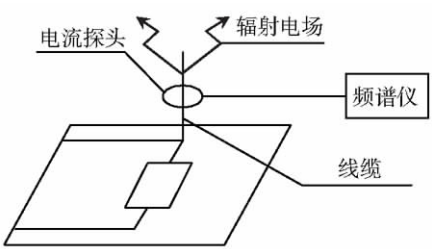


图 3 辐射实验系统结构图
Fig.3 Topology of radiation test system

3 实验结果分析与对比

3.1 电流模型测量实验与预估

为了验证 PCB 辐射干扰预估方法的有效性, 制作了与文献 [3] 相同的电路作为被测电路。电路由 $10\ \text{MHz}$ 晶振、阻值为 $50\ \Omega$ 的电阻、7805 芯片和输出电压为 $9\ \text{V}$ 的干电池组成。电路为双层板, 其中第一层单独走信号线, 第二层为接地层, 在 $50\ \Omega$ 负载后接一根线缆。利用频谱分析仪测得的共模电流如图 4 所示。由共模电流测量结果和式 (3) 可得被测电路最大辐射场强。需要说明的是: 电路中用的是 $10\ \text{MHz}$ 晶振, 所以实验时只关心晶振倍频的辐射场强, 如图 5 所示。被测电路辐射场强估值在 $100\sim 200\ \text{MHz}$ 之间和 $275\sim 350\ \text{MHz}$ 之间较大; 在 $250\ \text{MHz}$ 辐射场强预估值与电波暗室测量结果数值稍有差异, 但趋势一致; $250\ \text{MHz}$ 之后两者吻合较好。

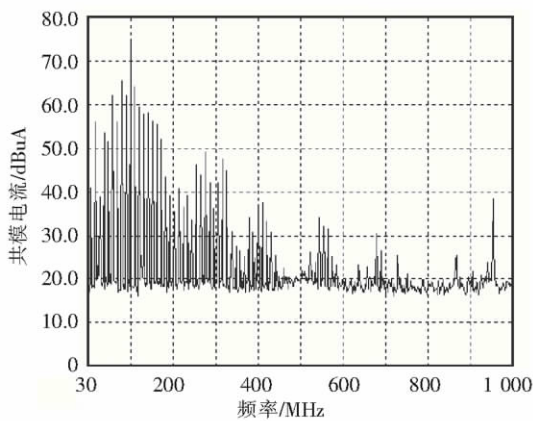


图 4 电流探头测得的共模电流
Fig.4 Common-mode current tested by current probe

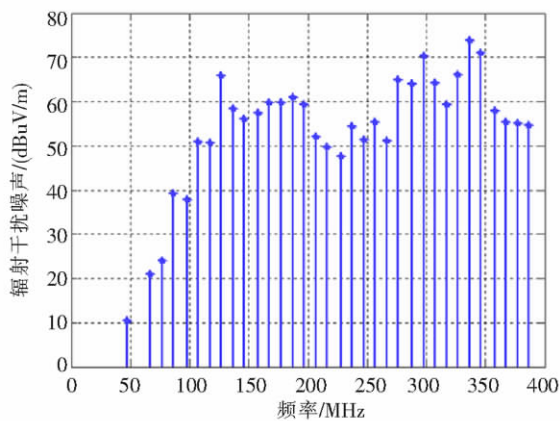


图 5 电流模型法预估辐射场强仿真图
Fig.5 Simulation diagram of current-driven common-mode radiation

3.2 射频电流测量实验与预估

将被测线缆分成 5 段, 用电流探头测量测得共模辐射电流如图 4 所示。根据共模电流测量结果按式 (6) 计算可得仿真结果如图 6 所示。辐射场强在 $250\ \text{MHz}$ 前一直呈上升趋势, 辐射场强预估值与电波暗室测量结果吻合较好, 在 $250\sim 400\ \text{MHz}$ 之间先上升后下降呈倒 V 字型趋势, 辐射场强预估值与电波暗室测量结果数值稍有差异, 但趋势相同。

将两种方法的仿真结果与电波暗室测量结果如图 7 所示进行对比, 可知两种预估方法的结果与电波暗室测量结果基本一致。但是从数值上看在 $30\sim 300\ \text{MHz}$ 之间, 射频电流参数法预估结果更为准确。尤其是在 $146\ \text{MHz}$ 的时候: 电流模型法测得的场强估计值为 $59\ \text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$, 射频电流参数法测得的场强估计值为 $73\ \text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$, 电波暗室测得的最大场强值为 $77\ \text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$; 在 $250\ \text{MHz}$ 以后电流模型法预估结果更为准确。尤其是在 $300\ \text{MHz}$ 的时候: 电流模型法测得的场强估计值为 $71\ \text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$, 射频电流参数法测得的场强估计值为 $81\ \text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$, 电波暗室测得的最大场强值为 $62\ \text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$ 。

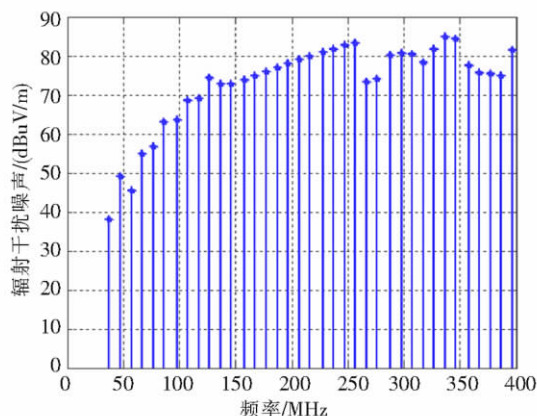


图 6 射频电流参数法预估辐射场强仿真图

Fig.6 Simulation diagram of RF current probe measure HF radiation

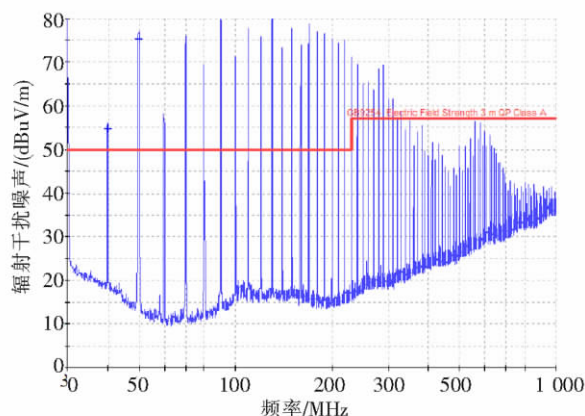


图 7 电波暗室测量结果

Fig.7 Measuring results tested by anechoic chamber

4 结论

本文研究了两种高频辐射干扰快速预估方法,并分别采用这两种方法对同一 PCB 板的辐射电磁干扰进行预估,将估计结果与 3m 电波暗室的测量结果进行对比。结果表明:两种预估方法对辐射噪声都能够较为有效地进行估计,证明了方法的可行性,为以后高频辐射干扰的预估和诊断工作提供了一定的参考。

[参考文献](References)

- [1] 冯利民, 钱照明. 基于近场探头的电力电子系统 EMC 故障诊断[J]. 电力电子技术, 2007, 41(6): 13-16.
Feng Limin, Qian Zhaoming. EMC trouble diagnosing techniques in power electronic system based on near field probes[J]. Power Electronics, 2007, 41(6): 13-16. (in Chinese)
- [2] 赵阳, 罗永超, 颜伟, 等. 高频电路辐射干扰快速分析与预估方法[J]. 电波科学学报, 2010, 25(3): 465-471.
Zhao Yang, Luo Yongchao, Yan Wei, et al. Fast analysis and estimation approach applied in radiated EMI for high-frequency[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2010, 25(3): 465-471. (in Chinese)
- [3] 赵阳, 颜伟, 赵波, 等. 电路辐射电磁干扰机理快速诊断与特性估计研究[J]. 电工技术学报, 2010, 25(10): 6-13.
Zhao Yang, Yan Wei, Zhao Bo, et al. EMI radiated noise diagnosis and estimation for HF circuits[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(10): 6-13. (in Chinese)
- [4] 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 Electromagn Compat, 2005, 47(4): 899-907.
- [5] Leone M. Design expression for the trace-to-edge common-mode inductance of a printed circuit board[J]. IEEE Trans Electromagn Compat, 2001, 43(4): 667-671.
- [6] Leferink F B J. Reduction of printed circuit board radiated emission[C] // Proc IEEE Int Symp Electromagn Compat. Austin: TX, 1997: 431-438.
- [7] Shim H, Fu Y, Hubing T H. Radiated emissions from populated printed circuit boards due to power bus noise[C] // Proc IEEE Int Symp Electromagn Compat. Santa Clara: CA, 2004, 2: 396-400.
- [8] 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.
- [9] 赵阳, 陈昊, 尹海平, 等. 电力电子中的传导性 EMI 噪声源测量与分析[J]. 南京师范大学学报: 工程技术版, 2007, 7(2): 1-5.
Zhao Yang, Chen Hao, Yin Haiping, et al. Measurement and analysis of EMI noise sources of power electronic equipments[J]. Journal of Nanjing Normal University: Engineering and Technology Edition, 2007, 7(2): 1-5. (in Chinese)

[责任编辑: 刘 健]