

复杂医疗电子设备辐射干扰技术研究

孙红艳¹, 赵阳², 周敏³

(1. 南京师范大学泰州学院, 江苏 泰州 225300)

(2. 南京师范大学电气与自动化工程学院, 江苏 南京 210042)

(3. 南京师范大学中北学院, 江苏 南京 210023)

[摘要] 随着医疗器械行业电磁兼容标准 YY0505-2012 的发布实施, 其电磁兼容问题迫切需要解决. 针对复杂医疗电子设备产生的辐射 EMI 噪声, 本文建立两种辐射噪声理论模型, 即芯片晶振时钟信号引起的辐射噪声模型以及 PCB 板软线路板 (FPC) 引起的辐射噪声模型, 并提出相应噪声抑制方法. 实验结果表明, 采用文中方法, 某型医疗微波治疗仪、医疗尿量监测仪能够通过医疗器械行业电磁兼容标准 YY0505-2012 标准测试, 噪声抑制效果可达 10 dB μ V/m 以上, 从而验证了文中方法的有效性.

[关键词] 电磁兼容, 辐射电磁干扰, 医疗电子, 噪声抑制

[中图分类号] TM15 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1672-1292(2015)03-0024-06

Research Radiated Interference Technology of Complex Medical Electronic Equipment

Sun Hongyan¹, Zhao Yang², Zhou Min³

(1. Taizhou College, Nanjing Normal University, Taizhou 225300, China)

(2. School of Electrical and Automation Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210042, China)

(3. Zhongbei College, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

Abstract: With the implementation of the YY0505-2012 standard of electromagnetic compatibility for medical devices industry, the issue of electromagnetic compatibility needs to be solved urgently. In order to analyze radiation EMI noise produced by complex medical electronic equipment, two theoretical models are proposed, including clock signal of chip crystal, flexible Printed Circuit (FPC) board. Furthermore, noise reduction methods are designed on the basis of the above radiated noise. The experiment results show that a microwave laser and urine monitor can pass the YY0505-2012 standard for medical devices industry by employing the suggested approaches of paper and that its noise decreased over 10 dB μ V/m, so the validity of the approaches is verified.

Key words: electromagnetic compatibility, radiated electromagnetic interference, medical electronics, noise suppression

随着医疗器械行业电磁兼容标准 YY0505-2012 的强制实施, 医疗电子设备电磁兼容问题迫切需要解决. 医疗电子设备主要以主控制 PCB 电路板为核心, 包括供电模块、A/D 采样模块、显示模块等诸多复杂 PCB 电路板, 整体系统产生的辐射电磁干扰噪声机理复杂, 且形式多样.

鉴于此, 在前期工作基础上, 本文建立两种辐射噪声模型, 即芯片晶振时钟信号引起的辐射噪声模型以及 PCB 板软线路板 (FPC) 引起的辐射噪声模型, 并提出相应噪声抑制方法. 最后, 针对医疗盆地粉碎机、医疗止血带和医疗尿量监测仪, 进行了辐射 EMI 问题的案例分析, 采用德国罗德施瓦茨 R&S 生产制造的 3 m 法标准电波暗室进行了辐射结果验证, 测试结果有效验证了本文辐射噪声抑制方法及辐射模型的有效性, 对解决实际医疗电子设备电磁兼容辐射问题具有重要意义.

收稿日期: 2015-04-10.

基金项目: 南京师范大学泰州学院院级项目 (Z201209)、毫米波国家重点实验室开放基金 (K201309)、江苏省科技厅产学研联合创新资金 (BY2012004).

通讯联系人: 赵阳, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向: 电磁兼容技术应用、电磁场理论与应用、电磁参数建模及特征提取、新能源并网逆变系统的电磁兼容技术. E-mail: zhaoyang2@njnu.edu.cn

1 医疗设备PCB板辐射噪声生成机理分析

1.1 芯片晶振时钟信号引起的辐射噪声分析

医疗设备内部功能模块较多,且复杂.通常情况下,PCB电路中主控芯片会在一定频率的无源晶振驱动下工作,从而以多种形式产生辐射EMI噪声.实际电路中,晶振匹配的驱动电容具有一定的滤波效果,其对外产生的辐射噪声大大减小.然而主控芯片很可能通过信号端(如CLK)将晶振产生一定频率的高频振荡信号传输给其他功能芯片,该高频数字信号很可能通过PCB板未较好控制的布线以及信号环路等对外产生更大的辐射噪声,如图1所示.

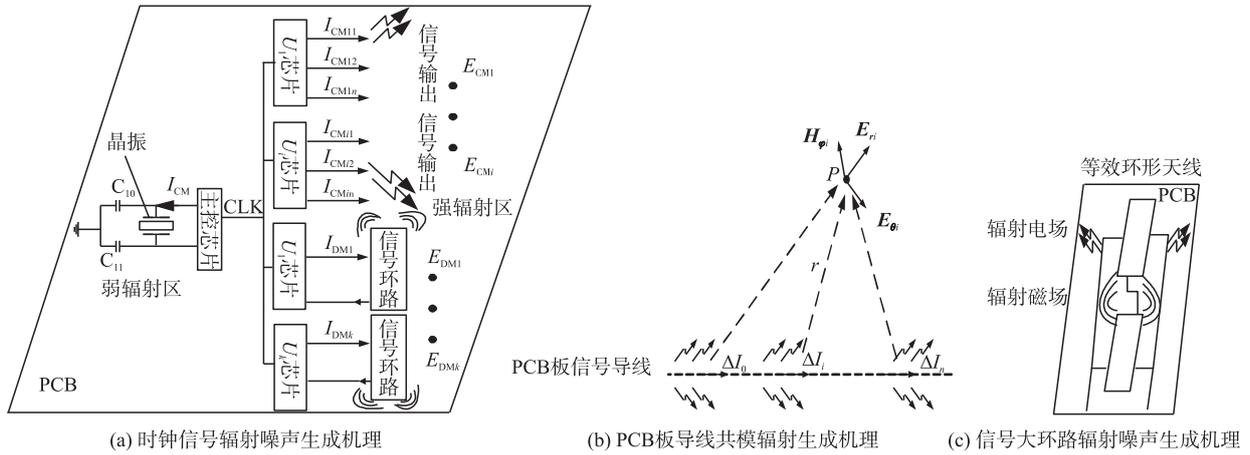


图1 晶振时钟信号引起的辐射噪声模型

Fig.1 Model of radiated noise caused by crystal clock signal

由 Maxwell 方程及电磁场辐射理论可知, $U_1 \sim U_i$ 芯片对外产生的辐射噪声是由共模噪声电流流经 PCB 板较长信号导线引起的,等效为共模辐射; $U_1 \sim U_k$ 芯片对外产生的辐射噪声是由差模噪声电流流经未较好控制的信号大环路引起的,等效为差模辐射.

对于高频电路而言,随着频率的增加,PCB 板导线中电流不再均匀一致.如图1(b)所示,不失一般性,将长为 l 的 PCB 板导线分为无穷小段导线,并假设每一段导线中的电流为 $\Delta I_i (i=1, 2, \dots)$. 电流元 ΔI_i 可以等效为电偶极子,其在空间任意点 P 处产生的场强分量为 H_{ϕ_i} 、 E_{r_i} 和 E_{θ_i} ,根据天线原理,长为 l 的 PCB 板导线在空间 P 点产生的场强可以表示为无穷小导线产生的场强之和,即:

$$\begin{cases} H_{\phi} = \sum_{i=0}^{\infty} \Delta I_i \frac{j\beta l}{4\pi r} e^{-j\beta r} \left[1 + \frac{1}{j\beta r} \right] \sin(\theta\varphi) \\ E_r = \sum_{i=0}^{\infty} \Delta I_i \frac{j\omega\mu_0 l}{2\pi r} e^{-j\beta r} \left[\frac{1}{j\beta} + \frac{1}{(j\beta r)^2} \right] \cos(\theta r) \\ E_{\theta} = \sum_{i=0}^{\infty} \Delta I_i \frac{j\omega\mu_0 l}{4\pi r} e^{-j\beta r} \left[1 + \frac{1}{j\beta} + \frac{1}{(j\beta r)^2} \right] \sin(\theta\theta) \end{cases} \quad (1)$$

如图1(a)所示,假设 $U_1 \sim U_i$ 芯片对外产生的总辐射场强大小为 $E_{CM1} \sim E_{CMi}$,即晶振时钟信号引起的共模辐射场强大小为

$$E_{CM} = \sum_{n=0}^i E_{CMn} \quad (2)$$

如图1(c)所示,对于射频识别系统,在PCB中,常常会出现因信号大环路引起的差模辐射噪声,根据麦克斯韦方程组及磁偶极子差模辐射理论,可得差模辐射场强大小为

$$\begin{cases} H_\theta = \frac{IdSk^3}{4\pi} \left[-\frac{1}{kr} - \frac{1}{j(kr)^2} + \frac{1}{(kr)^3} \right] \sin\theta e^{-jkr} \\ H_r = \frac{IdSk^3}{2\pi} \left[-\frac{1}{j(kr)^2} + \frac{1}{(kr)^3} \right] \cos\theta e^{-jkr} \\ E_\varphi = \frac{IdSk^4}{4\pi\epsilon_0\omega} \left[\frac{1}{kr} + \frac{1}{j(kr)^2} \right] \sin\theta e^{-jkr} \end{cases} \quad (3)$$

如图1(a)所示,假设 $U_1 \sim U_k$ 芯片对外产生的总辐射场强大小为 $E_{DM1} \sim E_{DMk}$, 即晶振时钟信号引起的差模辐射场强大小为

$$E_{DM} = \sum_{n=0}^k E_{DMn} \quad (4)$$

因此,晶振时钟信号引起的辐射总噪声大小为

$$E = E_{CM} + E_{DM} \quad (5)$$

1.2 软性电路板(FPC)引起的辐射噪声分析

医疗设备内部PCB板较多,通常需要软性电路板(Flexible Printed Circuit, FPC)来连接主控制核心板与显示控制板. FPC具有介电常数较低,允许电信号快速传输的特性,导致FPC对外产生较强的辐射干扰.

由图2(a)可知, FPC是非均匀数据传输线,图中 z 是传输线的长度变化量,本文将该传输线看成由无数无穷小间距的均匀传输线段级联构成,取任意每段均匀传输线段长度为 Δz .

由基尔霍夫电压、电流定律可知

$$\begin{cases} U(z,t) - U(z+\Delta z,t) = (L(z)\frac{\partial I(z,t)}{\partial t} + R(z)I(z,t))\Delta z \\ I(z,t) - I(z+\Delta z,t) = (G(z)\frac{\partial U(z,t)}{\partial t} + G(z)U(z,t))\Delta z \end{cases} \quad (6)$$

对上式方程两边求偏导数,即

$$\begin{cases} -\frac{\partial U(z,t)}{\partial z} = R(z)I(z,t) + L(z)\frac{\partial I(z,t)}{\partial t} \\ -\frac{\partial I(z,t)}{\partial z} = G(z)U(z,t) + C(z)\frac{\partial U(z,t)}{\partial t} \end{cases} \quad (7)$$

由上述每段传输线电报方程可知,其电路模型如图2(b)所示.

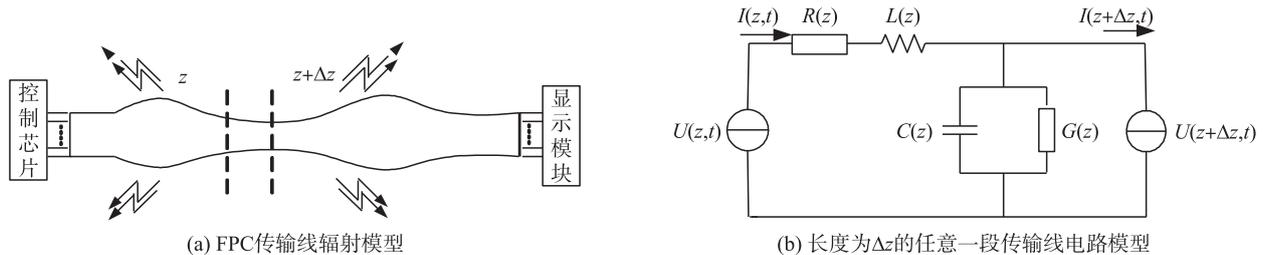


图2 FPC信号传输线简化模型

Fig.2 Simplified model of FPC signal transmission line

上式分别对时间 t 和长度 z 求偏导数,且考虑传输线无损耗,即

$$\begin{cases} -\frac{\partial^2 U(z,t)}{\partial z \partial t} = L(z)\frac{\partial^2 I(z,t)}{\partial t^2} \\ -\frac{\partial^2 I(z,t)}{\partial z^2} = C(z)\frac{\partial^2 U(z,t)}{\partial t \partial z} \end{cases} \quad (8)$$

由上式可得

$$\begin{cases} U(z,t) = \sqrt{\frac{L(z)}{C(z)}} \cos(kz - \omega t) \\ I(z,t) = \cos(kz - \omega t) \end{cases} \quad (9)$$

式中,考虑 $k = \omega \sqrt{L(z)C(z)}$ 的色散关系; $Z(z) = \sqrt{L(z)/C(z)}$, $Z(z)$ 为传输线的特性阻抗.

将传输线电流带入小偶极子的远场近似式,可得其辐射电场矢量^[10]

$$E(r) = \frac{j\beta I(z)\Delta z e^{-j\beta r(z)}}{4\pi r(z)}, \quad (10)$$

式中, $r(z)$ 为辐射测试点与辐射源的距离.

2 实验结果与分析

2.1 实验 1:某型医疗盆地粉碎机的辐射 EMI 整改案例分析

(1)问题提出

如图 3 所示为某公司生产的医疗微波激光仪,采用江苏省电气装备电磁兼容工程实验室 3 m 法电波暗室、德国罗德施瓦茨(R&S)公司的 EMI 接收机 ESL3 进行测试,如图 4(a)所示. 根据 YY0505-2012 标准发现,该微波激光仪辐射 EMI 严重超标.

(2)解决方法

根据测试结果分析可得,该设备辐射 EMI 噪声超标的主要原因:电路芯片时钟信号辐射干扰.

电路芯片时钟信号管脚是以一定频率噪声信号向外发射,表现在测试结果上就是一系列的倍频辐射干扰超标频点. 对照图 4(a)知,33.18 MHz,44.24 MHz 呈现倍频超标现象,因此,需要对电路芯片时钟信号管脚进行滤波处理,降低辐射噪声. 本文采用高频滤波电容对地并联以抑制时钟信号对外产生辐射干扰. 考虑到该设备主控芯片单片机是在主频为 11.0592 MHz 晶振驱动下工作,本文采取在晶振起振电容两端分别并联 18 pF 贴片电容,整改后效果见图 4(b),具体整改措施如图 5 所示.

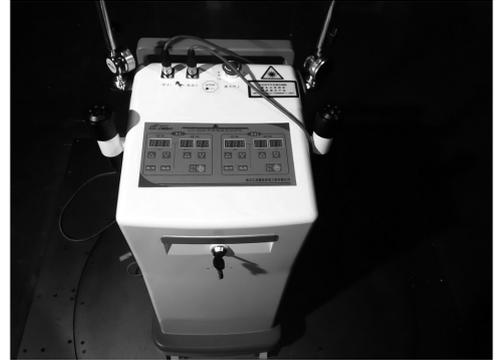


图 3 医疗盆地粉碎机
Fig.3 Medical basin grinder

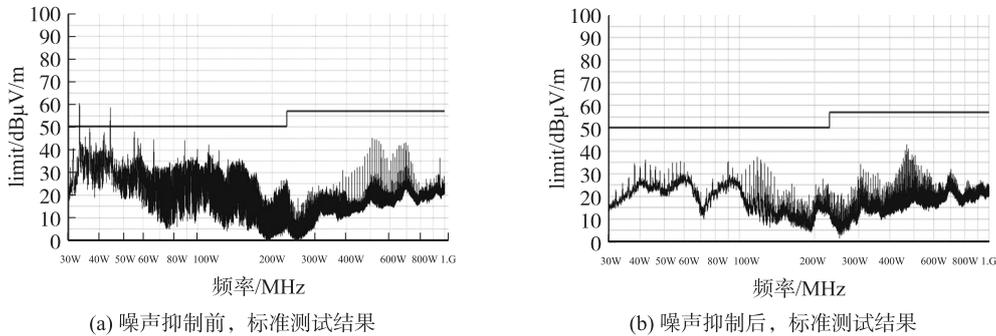


图 4 微波激光仪辐射 EMI 标准测试结果

Fig.4 EMI standard test results of microwave laser radiation

(3)结果对比

根据图 4(b)所示,采用高频滤波电容对地并联以抑制时钟信号产生辐射干扰,效果明显,在 33.18 MHz,44.24 MHz 频点,辐射噪声降幅分别为 6.68 dB μ V/m,16.68 dB μ V/m,如表 1 所示.

表 1 噪声抑制前后,盆地粉碎机辐射噪声对比

Table 1 Noise suppression before and after,contrast of basin crusher radiated noise

频点/MHz	抑制前/(dB μ V/m)	超标/(dB μ V/m)	抑制后/(dB μ V/m)	安全裕量/(dB μ V/m)
33.18	50.01	10.01	23.33	16.67
44.24	48.87	8.87	32.21	7.79

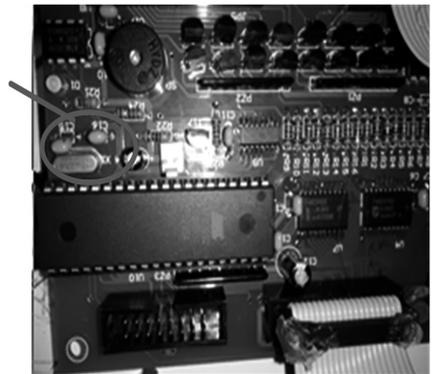


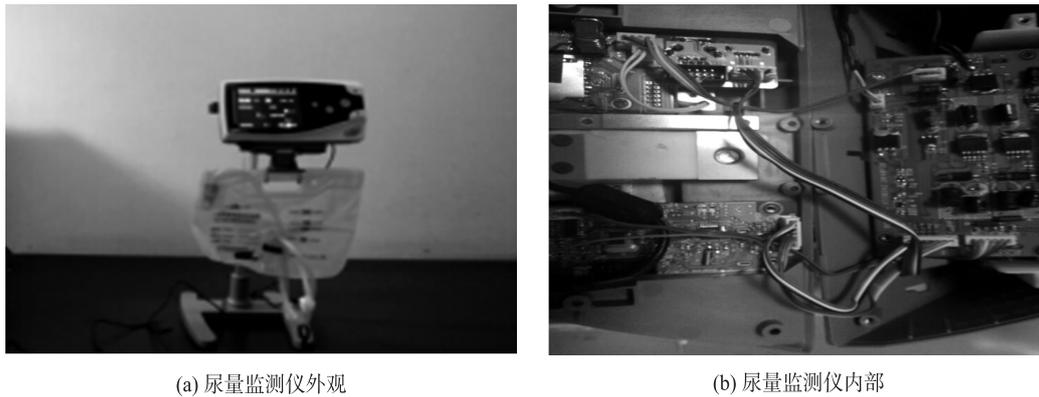
图 5 针对晶振时钟信号管脚整改措施
Fig.5 Corrective measures for crystal clock signal pins

2.2 实验 2:某型医疗尿量监测仪的辐射 EMI 整改案例分析

(1)问题提出

如图 6 所示为某公司生产的医疗尿量监测仪,采用江苏省电气装

备电磁兼容工程实验室3 m法电波暗室、德国罗德施瓦茨(R&S)公司的EMI接收机ESL3进行测试,测试结果如图7(a)所示. 根据YY0505-2012标准发现,该尿量监测仪辐射EMI严重超标.



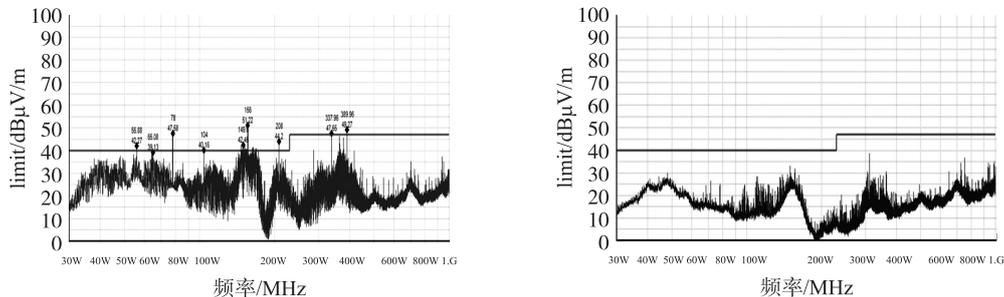
(a) 尿量监测仪外观

(b) 尿量监测仪内部

图6 尿量监测仪
Fig.6 Urine tester

(2)解决方法

如图2所示,排线是PCB板控制芯片向显示器传输信号数据,PCB电路在高频信号工作情况下,数据传输线将会产生大量的高频辐射噪声. 对照图7(a),测试结果显示在60 MHz~400 MHz的高频段辐射干扰噪声严重超标,与数据传输线产生的高频段噪声相吻合. 因此,需要对数据传输线进行辐射干扰机理分析以及采取相应的整改措施. 由式(6)可知数据传输线上传输的信号频率、线缆长度以及测试距离不可人为改变,故只可改变线缆上的电流来控制共模辐射噪声. 数据传输线对外产生辐射干扰机理可以等效为共模噪声源 U_{CM} , 共模噪声源内阻抗 Z_{CM} 以及负载阻抗 R . 其产生的辐射场强与噪声电流呈正比,即 $E_{CM} \propto I_{CM}$. 所以,对数据传输线加一个铁氧体磁环,增大阻抗,从而达到降低噪声电流 I_{CM} , 最终降低辐射场强 E_{CM} 的目的,整改后测试结果见图7(b),整改措施如图8所示.



(a) 噪声抑制前, 尿量监测仪标准测试结果

(b) 噪声抑制后, 尿量监测仪标准测试结果

图7 尿量监测仪辐射EMI标准测试结果

Fig.7 EMI standard test results of urine tester

(3)结果对比

整改后测试结果如图7(b)所示,在466.96 MHz,479.24 MHz,52 840 MHz,552.96 MHz,576.32 MHz频点,辐射噪声降幅分别为11.47 dB μ V/m,16.09 dB μ V/m,11.28 dB μ V/m,5.72 dB μ V/m,4.12 dB μ V/m,如表2所示.

表2 噪声抑制前后,尿量监测仪辐射噪声对比

Table 2 Noise suppression around, urine analyzer radiated noise contrast detection

频点/ MHz	抑制前/ (dB μ V/m)	超标/ (dB μ V/m)	抑制后/ (dB μ V/m)	安全裕量/ (dB μ V/m)
55.88	42.27	4.47	40.00	7.00
78.00	47.58	7.89	38.80	8.20
156.00	51.22	11.17	46.89	0.11
208.00	44.20	5.62	46.90	0.10
389.96	48.27	2.90	45.78	1.22



图8 针对排线的整改措施

Fig.8 Corrective measures for ribbon cable

3 结语

本文提出两种辐射噪声抑制方法,即在晶振管脚对地串联贴片磁珠及屏蔽排线,并建立相应辐射噪声模型,能够有效地应用于高频信号PCB电路辐射EMI噪声抑制。同时,采用高频优化滤波电容多级并联结构和屏蔽材料可有效地降低辐射电磁干扰噪声。标准实验结果表明,采用噪声抑制方案后,医疗电子产品可大幅降低辐射EMI噪声,从而为辐射噪声分析与抑制提供理论依据。

[参考文献](References)

- [1] 方哲,郁滨,岳云天. 串行传输线同步信号辐射发射模型研究[J]. 仪器仪表学报,2013(10):2 373-2 380.
Fang Zhe, Yu Bin, Yue Yuntian. Study on electromagnetic radiation emission model of serial transmission line synchronization signal[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013(10): 2 373-2 380. (in Chinese)
- [2] 高攸纲. 论高频屏蔽体的波阻抗及屏蔽效能[J]. 邮电设计技术,2003(5):20-23.
Gao Yougang. High frequency shielding body's wave impedance and shielding efficiency[J]. Designing Techniques of Posts and Telecommunications, 2003(5): 20-23. (in Chinese)
- [3] 李冉,曾笑. 低频多芯屏蔽线屏蔽特性测量方法初探[J]. 测绘通报,2014(S1):70-73.
Li Ran, Zeng Xiao. Test method of shielded character for low frequency multi-core shielded cables[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2014(S1): 70-73. (in Chinese)
- [4] Vahrenholt V, Brüns H, Singer H. Fast EMC analysis of systems consisting of PCBs and metallic antenna structures by a hybridization of PEEC and MoM[J]. Electromagnetic Compatibility, IEEE Transactions on, 2010, 52(4): 962 - 973.
- [5] 赵阳,颜伟,赵波,等. 电路辐射干扰机理诊断与特性估计方法研究[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).
- [6] 颜伟,赵阳,王恩荣,等. 射频识别系统电磁辐射干扰特征快速分析与抑制[J]. 中国电机工程学报,2012,32(9):161-166.
Yan Wei, Zhao Yang, Wang Enrong, et al. Analysis and suppression on radiated EMI noise for radio frequency identification system[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(9): 161-166. (in Chinese)
- [7] 赵波,封志明. PCB辐射电磁干扰快速建模方法及实验研究[J]. 电子质量,2012(3):84-86.
Zhao Bo, Feng Zhiming. Study on the fast modeling and experiment of PCB radiated EMI[J]. Electronics Quality, 2012(3): 84-86. (in Chinese)
- [8] 冯利民,钱照明. 数字电路PCB板辐射EMI的研究[J]. 电力电子技术,2007,41(12):2-4.
Feng Limin, Qian Zhaoming. Study on the radiation interference of the digital PCB[J]. Power Electronics, 2007, 41(12): 2-4. (in Chinese)
- [9] 李玉山,李丽平. 信号完整性分析[M]. 北京:电子工业出版社,2010.
Li Yushan, Li Liping. Signal Integrity Analysis[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2010. (in Chinese)
- [10] 王一平,郭宏福. 电磁波:传输、辐射、传播[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,2006.
Wang Yiping, Guo Hongfu. Electromagnetic Waves: Transmission, Radiation, Propagation [M]. Xi'an: Xidian University Press, 2006. (in Chinese)

[责任编辑:陈 庆]