

基于近场诊断的医疗电子设备 辐射干扰抑制技术研究

周孟夏, 杨 雄, 夏 清, 吴 玠

(南京师范大学电气与自动化工程学院, 江苏 南京 210042)

[摘要] 本文通过分析 PCB 电路辐射 EMI 噪声产生的机理, 建立了 PCB 差模辐射干扰模型和共模辐射干扰模型. 介绍了通过近场探头和频谱仪进行辐射 EMI 噪声溯源的原理和操作方法, 可大致确定辐射噪声源的位置. 提出了通过场探头大致确定辐射源后, 根据辐射发生模型, 结合辐射源的器件、线路特点制定辐射噪声抑制方案的整改思路. 本文运用以上思路针对吸痰器的辐射 EMI 问题进行整改分析, 并通过德国罗德施瓦茨(R&S)建造的 3 m 法标准电波暗室进行辐射检测, 验证了本文针对医疗设备辐射 EMI 问题提出的整改思路和整改措施的有效性.

[关键词] 辐射干扰模型, 近场诊断, 辐射噪声抑制

[中图分类号] TM461; TN03 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1672-1292(2016)02-0024-06

Radiation Interference Suppression Technology on Medical Electronic Equipment Based on Near Field Diagnosis

Zhou Mengxia, Yang Xiong, Xia Qing, Wu Jie

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

Abstract: Based on the analysis of the mechanism of EMI noise generation in PCB circuit, the PCB differential and the common mode radiation interference model are established. This paper, by using the near field probe and the frequency spectrum instruments, presents the principles and operational methods that can determine the EMI radiation noise sources and roughly their corresponding positions. After the rough position of radiation source is determined by the field probe, and the radiation source device, and the circuit characteristics with the radiation model are combined, the thread of the radiation noise suppression program is developed. This paper with above ideas proceeds with the correctional analysis as regard to sputum aspirator, and subsequent radiation test by standard 3 m anechoic chamber built by German company R&S, proves the effectiveness of the correctional plans and approaches presented in this paper.

Key words: radiation interference model, near field diagnosis, radiation noise suppression

如今医疗设备普遍采用开关电源, 高开关频率、高速数字化的 PCB 电路有更多辐射噪声源, 除了传统的电源入口芯片、晶振等辐射源还有电桥电路、MODFET 等开关器件的驱动电路等辐射源, 而各辐射源的辐射强度不一, Re 检测的结果是各辐射源迭加的效果. 如何追踪较大的辐射源仍是学术研究上的一个薄弱点. 而设备制造的滤波措施远不能满足电磁兼容检测的要求, 需对设备进行整改. 如何根据 Re 测试结果和辐射源溯源结果提出有效的辐射 EMI 噪声抑制方案, 是整改的关键. 本文通过分析 PCB 电路辐射 EMI 噪声产生的机理, 建立 PCB 差模辐射干扰模型和共模辐射干扰模型. 通过场探头确定辐射源, 根据辐射发生模型, 结合辐射源的器件、线路特点制定辐射噪声抑制方案的整改思路. 本文针对吸痰器的辐射 EMI 问题进行整改分析, 以验证整改思路和整改措施的有效性.

收稿日期: 2016-04-20.

基金项目: 毫米波国家重点实验室开放基金(K201309)、南京师范大学科技成果转化基金项目(BY2012004).

通讯联系人: 赵阳, 教授, 博士生导师, 研究方向: 电磁兼容技术与应用. E-mail: zhaoyang2@njnu.edu.cn

1 PCB辐射干扰机理分析

1.1 PCB差模辐射干扰模型

PCB差模辐射干扰主要是由信号大环路引起的,可将其等效为磁偶极子辐射.磁场由电流产生,最常见的发射源有芯片、器件管脚、PCB的布线、电源线和信号线缆.差模辐射噪声干扰模型的示意图如图1所示,由于高频数字电路、开关电源等高频器件中的电感流过高频脉动电流产生的漏磁耦合到附近的电容器,造成磁场耦合,同时电路中的节点具有高电压变化率,电流流过信号环路时,产生大量差模辐射.

根据麦克斯韦方程和天线理论,近场中磁偶极子产生的差模辐射场为:

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

其中,测试距离 $r < \lambda/2\pi$ (近场); IdS 为磁偶极子的磁矩; k 为波矢,模为波数,方向与波传播方向一致.式(1)为使用近场探头测试溯源时的差模辐射噪声干扰模型.由于在远场中,测试距离 $r > \lambda/2\pi$,波阻抗近似一个 $120\pi\Omega$ 的常数,取最大辐射场强方向,磁偶极子的辐射干扰场强为:

$$E_{DM} = 2.632 \times 10^{-14} \frac{f^2 A I_{DM}}{r}. \quad (2)$$

式中, E_{DM} 是差模噪声电场强度, A 是信号环路面积, I_{DM} 是差模电流.式(2)即 3 m 暗室、10 m 暗室测试辐射 EMI 噪声时的差模辐射干扰模型.

由式(1)、式(2)可知,差模辐射噪声与噪声电流、信号环路等效面积、频率等因素有关.而在实际整改中,工作频率是不变的,检测频率也固定在 30 MHz~1 GHz,因此,可以通过改变布线减小差分信号线间的距离以减小信号环路等效面积,采用电容电感等组成 EMI 滤波器减小信号环路中的噪声电流来抑制差模噪声辐射干扰.

1.2 PCB共模辐射干扰模型

共模辐射干扰主要是由于非良好接地或接地点点位反射电压引起的等效短直天线电偶极子辐射效应.共模辐射噪声干扰模型的示意图如图2所示,PCB电路中的开关器件驱动电路使得 PCB 线路电位高频变化,形成位移电流.高频信号的共模电流经寄生电容流入地线,形成共模辐射干扰.

类似差模辐射干扰模型,根据麦克斯韦方程和天线理论,近场情况下,电偶极子产生的共模辐射场为:

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

其中,测试距离 $r < \lambda/2\pi$ (近场); Idl 为电偶极子的电矩.式(3)即使用近场探头测试溯源时的差模辐射噪声干扰模型.同样的,由于在远场中,测试距离 $r > \lambda/2\pi$,波阻抗近似一个 $120\pi\Omega$ 的常数,取最大辐射场强方向,电偶极子的辐射干扰场强为:

$$E_{CM} = 1.256 \times 10^{-6} \frac{I_{CM} dl f}{r}. \quad (4)$$

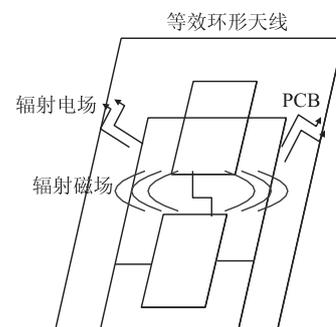


图1 辐射噪声干扰模型示意图

Fig.1 Schematic diagram of radiated noise interference model

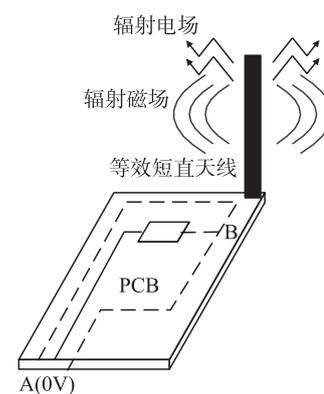


图2 共模辐射噪声干扰模型的示意图

Fig.2 Schematic diagram of the interference model of common mode radiated noise

式中, E_{CM} 是共模噪声, dl 是线缆长度, I_{CM} 是共模电流. 式(4)即 3 m 暗室、10 m 暗室测试辐射 EMI 噪声时的共模辐射干扰模型.

观察式(1)、式(2)可知, 共模辐射场与测试距离、共模电流、频率、等效短直线的长度有关. 近场时, 测试距离越近, 波阻抗越小, 辐射场强越强. 不论近场、远场, 等效长度越长, 共模辐射场强越大. 同样, 频率不可改, 测试距离不可改, 因此, 可以通过缩短信号线、尽量缩短元器件管脚以减少寄生电容、接入电容电感电容组成的 EMI 滤波器等措施抑制 PCB 共模噪声干扰.

2 PCB 辐射噪声的近场探头溯源法

医疗设备进行辐射 EMI 检测时, 不管是在 3 m 暗室还是在 10 m 暗室进行, 都是远场检测. 纵然标准的远场辐射泄露测试, 可以确定被测设备是否符合规定的 EMI 标准, 但是诊断辐射干扰源所在. 而使用近场探头和频谱仪组合进行近场 EMI 测量虽然无法确定被测设备是否通过规定标准, 没有准确的数学转换, 但可判断辐射干扰源的具体位置. 实际上, 近场探头是一个相对量的测量, 且近场辐射泄露越严重, 远场的辐射泄露也必然越严重. 近场探头有不同型号, 可以满足不同的灵敏度和分辨率要求, 因此, 使用近场探头对 PCB 辐射 EMI 噪声进行溯源十分方便、直观, 辅助整改的实用价值较高. 如图 3 所示, 是本文对吸痰器进行辐射 EMI 问题整改过程中, 使用近场探头扫描吸痰器电路板和线缆、电机、备用电池等部位, 以确定产生较强辐射干扰的干扰源. 由图可知, 探头下面的 MOSFET 的驱动电路在 60 M 左右有较强的辐射, 因此, 可以针对该 MOSTET 的驱动电路做措施. 此外, 由于 PCB 辐射主要通过焊盘构成天线发射出来, 用近场探头扫描 PCB 板的焊接面更灵敏, 如图 4 所示. 整改过程中, 通过比较措施前后探头的检测结果, 可知针对该辐射干扰源所加措施是否有效.



图3 使用场探头扫描设备, 寻找辐射感染源
Fig.3 Using field probe scanning equipment to find the source of radiation infection

3 整改案例分析

图 4 所示是某公司生产的吸痰器, 图(a)是吸痰器的外观, 图(b)是吸痰器的内部结构, 电路主要由 PCB 电路、直流电机、蓄电池三个模块构成. 图 5 所示是在未加任何措施时, 由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)公司制造的 EMI 接收机 ESL3 测试, 采用 GB9254ClassB 标准, 结果如图 5 所示, 辐射 EMI 在低频段超标严重.

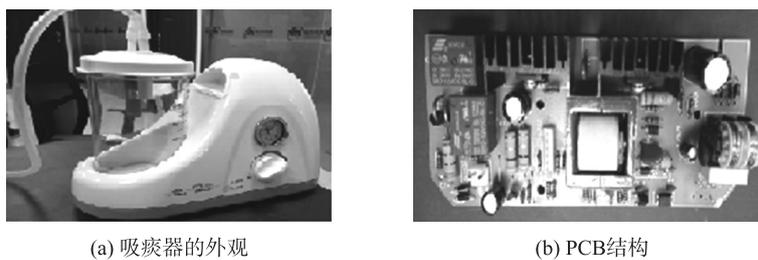


图4 吸痰器外观及内部 PCB 结构

Fig.4 Sputum suction device appearance and internal PCB structure

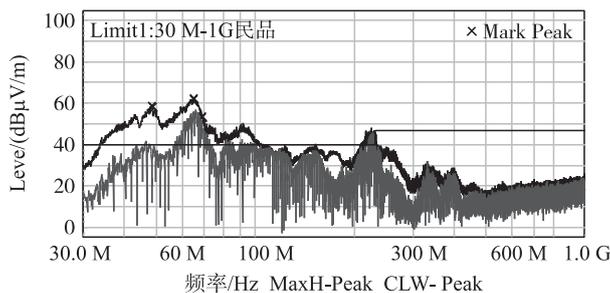


图5 吸痰器 RE 初测

Fig.5 Results of the radiation of sputum suction device

如图 5 所示是通过德国罗德施瓦茨(R&S)公司制造的近场探头和频谱分析仪进行辐射噪声源溯源,本文在整改过程中探测到电路板的辐射噪声源主要包括电源线、不可控整流桥、MOSEFT 的驱动电路、变压器的两级、继电器、直流电机以及芯片。本文根据前文建立的差模辐射噪声干扰模型和共模辐射噪声干扰模型,对各个干扰源采取了相应的抑制措施。由于设备最终要在暗室进行 Re 检测,本文针对各干扰源的抑制措施均依据远场的辐射干扰模型制定。

3.1 PCB 电源线处的整改措施

电源线可等效为短直天线电偶极子辐射效应,主要产生共模辐射干扰,由式(4)可知:

$$E_{CM} \propto l, \quad (5)$$

$$E_{CM} \propto I_{CM}. \quad (6)$$

故采取缩短电源线和减小电源线的噪声电流的方案抑制噪声。又恰巧发现该吸痰器电源线较长,约 1.6 m,因此,将电源线卷到 0.8 m。同时本文在电源入口处串联了一个 EMI 滤波器以减低噪声电流。如图 7(a)所示,选择 π 型 LC 滤波器,根据截止频率公式,可推得计算电容、电感参数的表达式:

$$L = \frac{\sqrt{L}}{\pi f_c \sqrt{C}}, \quad (7)$$

$$C = \frac{\sqrt{C}}{\pi f_c \sqrt{L}}. \quad (8)$$

其中, f_c 是截至频率。联立式(7)、式(8),截至频率根据检测超标频段取 60 MHz,可计算得到参数值,如图 7(a)所示。还在电源线上卡了磁环,等效于加入一个互感电感,增大线路阻抗 Z 。 I_{CM} 反比于线路阻抗 Z ,加滤波器和卡磁环都能增大阻抗 Z ,使得噪声电流减小,从而抑制噪声。如图 8(a)加了上述措施后,检测结果如图 6 所示,噪声得到明显抑制。

3.2 PCB 上的整改措施

(1)不可控整流桥的整改措施:不可控整流桥属于高频开关电路,产生的谐波量大,噪声通过寄生电容耦合到地和其他线路,主要属于共模干扰,由式(4),在整流桥的输入和输出两端均并联 1 nF 的电容进行滤波。由于此处的噪声频段在 60 MHz 左右,选用的电容可以大些,起初选用 10 nF 的电容,但大电容的储能延时作用,导致继电器不能正常工作,因此改选 1 nF 的电容。

(2)MOSFET 驱动电路的整改措施:MOSFET 驱动电路既有共模辐射干扰,又有差模辐射干扰,因为 MOSFET 是高频开关器件,而其驱动电路形成大信号环路。适用于 MOSFET 的驱动电路最方便可行的整改措施就是通过并联电容减小噪声电流。本文在驱动电路中的变压器两级均并联 1 nF 的电容。

(3)直流电机的整改措施:由于直流电机有电刷,以及大量绕组,电磁耦合关系多产生辐射干扰。由于电机的封闭性,不便于对电机做措施,故通过在直流电机的电源线上加 EMI 滤波器滤波,滤波器的结构及其参数如图 7(b)所示,设计原理同上。此外,对直流电机外部做接地处理,并在直流电机的电源线上卡磁环。

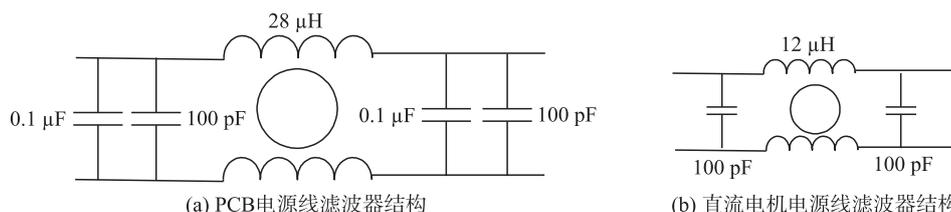


图 7 EMI 滤波器结构及其参数

Fig.7 Structure and parameters of EMI filter

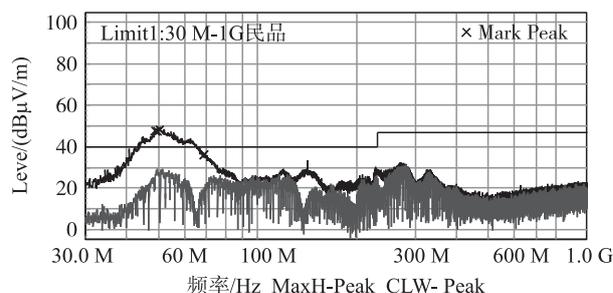


图 6 吸痰器 RE 采取措施一后的测试结果

Fig.6 The test results after taking the measures for the radiation of the sputum suction device

(4)继电器的整改措施:由于该吸痰器采用的继电器是通过电磁继电器吸合与弹开工作的,内部有铁

心以及线圈,由于电磁感应产生辐射.故在电磁继电器的线圈驱动端上对地并接 0.1 nF 的电容.

(5)芯片上的整改措施:PCB 上有集成运算放大器等芯片,连接其信号输入输出、时钟信号的线缆上均有辐射产生,本文通过在这些端口对地并联 1 nF 的贴片电容或陶瓷电容噪声进行抑制,如图 8 所示.综合上述措施,该吸痰器在江苏省电气装备电磁兼容工程实验室 3 m 法电波暗室检测和江苏省医疗器械检验所 10 m 法电波暗室检测均通过了 GB9254ClassB 标准,测试结果如图 9 所示.

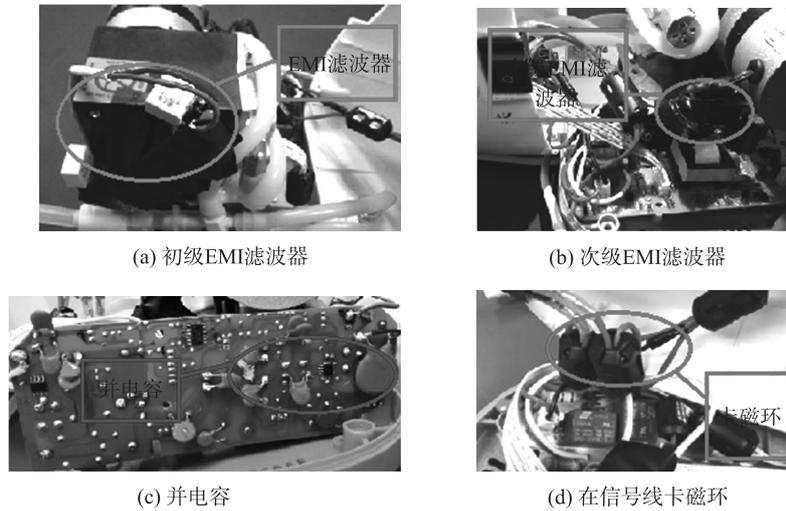


图8 措施

Fig.8 Measure

对比分析图 5 和图 9 中的测试结果,不难发现,未加措施前,主要设备主要在 45 MHz 至 70 MHz 以及 200 MHz 左右的频段超标.采取措施后,从 30 MHz 到 300 MHz 的噪声都大幅度降低下来了,且有较大的安全裕量,完全满足测试标准.通过打点,将两次检测结果中具有代表性的波峰、尖峰的具体情况整理在表 1 中,可知采取措施后,幅值最高的峰点均有超过 10 dB μ V/m 的安全裕量.

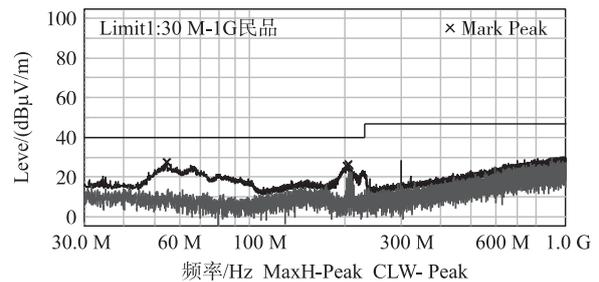


图9 整改后的最终辐射 EMI 测试结果

Fig.9 After the rectification of the final radiation EMI test results

表 1 采取措施前后的暗室检测结果对比

Table 1 Take measures before and after the comparison of test results darkroom

| 频点/MHz | 抑制前 | | 频点/MHz | 抑制后 | |
|----------|---------------------|--------------------|-----------|---------------------|---------------------|
| | 检测幅值/(dB μ V/m) | 超标量/(dB μ V/m) | | 检测幅值/(dB μ V/m) | 安全裕量/(dB μ V/m) |
| 48.381 5 | 58.59 | -15.59 | 54.589 5 | 27.57 | 12.43 |
| 48.672 5 | 58.28 | -18.28 | 54.783 5 | 27.41 | 12.59 |
| 64.968 5 | 62.39 | -22.39 | 202.466 0 | 25.57 | 14.43 |
| 65.017 0 | 62.05 | -22.05 | 202.951 0 | 25.78 | 14.22 |
| 68.800 0 | 53.05 | -13.05 | 204.842 5 | 26.18 | 13.82 |
| 68.994 0 | 53.39 | -13.39 | 204.988 0 | 26.68 | 13.32 |

4 结语

本文建立了 PCB 差模辐射干扰模型和共模辐射干扰模型,提出通过近场探头和频谱仪进行辐射 EMI 噪声溯源,找到辐射噪声干扰源,然后根据所建立的辐射干扰模型,结合干扰源的具体情况制定辐射噪声抑制方案的整改思路.以某吸痰器辐射 EMI 问题的整改作为案例进行验证分析,整改前后的检测结果很好地表明采用近场探头溯源的实用性以及所提出的辐射干扰模型和整改思路的有效性,对医疗设备的 EMI 整改具有一定参考价值.

[参考文献](References)

- [1] 颜伟,赵阳,王恩荣,等. 复杂电子系统辐射 EMI 噪声机理分析与抑制[J]. 电机工程学报,2013,33(15):173-180.
YAN W,ZHAO Y,WANG E R, et al. Noise mechanism analysis and suppression for radiated electromagnentic interference noise[J]. Proceedings of the CSEE,2013,33(15):173-180. (in Chinese)
- [2] 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 Y,YAN W,ZHAO B, et al. Investigation on radiated EMI noise diagnosis and estimation for HF circuits[J]. Transactions of China electrotechnical society,2010,25(10):6-13. (in Chinese)
- [3] 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]. 电机工程学报,2012,32(9):161-166.
YAN W,ZHAO Y,WANG E R, 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)
- [4] 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(3):466-471.
ZHAO Y,LUO Y C,YAN W, et al. Analysis and forecast method on radiated interference of the high frequency circuit[J]. Journal of radio science,2010(3):466-471. (in Chinese)
- [5] ZHAO Y,YAN W,LUO Y H, et al. Analysis and suppression for radiated EMI noises generated by radio frequency identification (RFID)based-systems[C]. Chengdu:IEEE,2010.
- [6] YAN W,ZHAO Y,LUO Y C, et al. An efficient characterization approach of radiated electromagnetic field analysis for PCBs ⊕ [J]. Procedia earth and planetary science,2009,1(1):1 587-1 592.
- [7] 宋百通,赵阳,夏欢,等. 基于医疗设备的辐射 EMI 噪声诊断与抑制技术研究[J]. 南京师范大学学报(工程技术版),2014,14(4):1-5.
SONG B T,ZHAO Y,XIA H, et al. The technology of diagnosis and inhibition research on radiated EMI noise based on medical equipment[J]. Journal of Nanjing normal university(engineering and technology edition),2014,14(4):1-5. (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,2008,41(12):2-4.
FENG L M,QIAN Z M. Research on radiation EMI for PCBs of digital circuit[J]. Power electronics,2008,41(12):2-4. (in Chinese)
- [9] 娄鑫霞,赵阳,陈雪丽,等. 基于信号完整性分析的 PCB 电路辐射噪声抑制方法[J]. 南京师范大学学报(工程技术版),2012,12(2):28-31.
LOU X X,ZHAO Y,CHEN X L, et al. Radiated EMI noise mitigation based on signal integrity applied for PCB[J]. Journal of Nanjing normal university(engineering and technology edition),2012,12(2):28-31. (in Chinese)
- [10] 赵阳,董颖华,陆婉泉,等. 可再生能源系统电磁兼容关键技术研究[J]. 南京师范大学学报(工程技术版),2010,10(3):1-6.
ZHAO Y,DONG Y H,LU W Q, et al. Technology of EMC research in renewable energy systems[J]. Journal of Nanjing normal university(engineering and technology edition),2010,10(3):1-6. (in Chinese)

[责任编辑:陈 庆]