

基于医疗设备的辐射 EMI 噪声诊断与抑制技术研究

宋百通, 赵 阳, 夏 欢, 孙逊之, 杨博婷

(南京师范大学电气与自动化工程学院, 江苏 南京 210042)

[摘要] 复杂电子系统产生的电磁干扰噪声包括传导 EMI 噪声和辐射 EMI 噪声, 辐射 EMI 噪声是以空间电磁场形式影响其他电子设备的. 针对复杂电子系统产生的辐射 EMI 噪声, 分别建立了两种辐射噪声理论模型及其等效电路, 包括基于 PCB 电路数据传输线引起的辐射噪声模型分析和基于电路芯片时钟信号引脚引起的辐射噪声模型分析. 并针对上述辐射噪声提出了相应的噪声抑制方法. 实验结果表明, 采用文中方法, 某型医疗盆地粉碎机辐射 EMI 噪声抑制效果可达 $10 \text{ dB}\mu\text{V}/\text{m}$, 从而验证了方法的有效性.

[关键词] 复杂电子系统, 辐射 EMI 噪声, 噪声理论模型, 噪声抑制

[中图分类号] TM15 [文献标志码] A [文章编号] 1672-1292(2014)04-0001-005

The Technology of Diagnosis and Inhibition Research on Radiated EMI Noise Based on Medical Equipment

Song Baitong, Zhao Yang, Xia Huan, Sun Xunzhi, Yang Boting

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

Abstract: Electromagnetic interference (EMI) generated by complex electronics systems includes conducted EMI noise and radiated EMI noise. The operation of other electronic equipment was influenced by radiated EMI noise through space electromagnetic field. In order to analyze radiated EMI noise generated by complex electronics systems, two theoretical models and equivalent circuits are proposed, including model analysis of radiation noise based on data transmission lines of PCB circuit and the clock signal pin of circuit chip. Furthermore, noise suppression methods are designed based on the above radiated noises. The experiment results show that the noise of a certain type of medical basin crusher decreases $10 \text{ dB}\mu\text{V}/\text{m}$ by employing the suggested approaches of the paper, so the validity of the approaches is verified.

Key words: complex electronics systems, radiated EMI noise, noise theoretical models, noise suppression

目前高速数字 PCB 电路产生辐射噪声的形式多种多样, 不再局限于传统的电源入口芯片以及晶振等常规辐射源向外产生辐射. 由于 PCB 电路自身产生辐射形式的复杂性, 仅仅对传统的电源转换芯片以及晶振进行滤波, 已不能达到大幅降低辐射噪声的目的.

鉴于此, 本文通过分析 PCB 电路产生辐射的机理, 建立两种辐射噪声理论模型及其等效电路, 即从 PCB 电路数据传输线与电路芯片时钟信号引脚两个方面分别建立了独立的辐射 EMI 噪声干扰模型, 并针对上述两种辐射 EMI 噪声分别设计了噪声抑制方案. 本文针对医疗盆地粉碎机进行了辐射 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干扰模型及抑制方法的有效性.

1 辐射 EMI 噪声分析

1.1 辐射 EMI 噪声模型分析

在电磁干扰噪声分析中, 辐射电磁干扰包括共模辐射和差模辐射. 共模辐射主要是由非良好接地或接

收稿日期: 2014-08-16.

基金项目: 江苏省自然科学基金 (BK2011789)、江苏省教育厅高校科研成果产业化推进项目 (JHB2011-20)、江苏省普通高校研究生科研创新计划项目 (CXZZ12_0404、CXLX12_0411).

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

地点反射电位引起的等效短直天线辐射效应,差模辐射主要是由未较好控制的大信号环路引起的等效电流环天线辐射效应.辐射模型如图1所示.

在PCB电路高频信号情况下,图1(a)中信号地的电位不为零,驱动电流返回路径通过线缆与PCB之间的杂散电容且很难确定线缆中的电流确定的返回路径,继而产生共模辐射噪声,此为电偶极子共模辐射模型.图1(b)中的差模辐射模型是由于电流流过没有很好控制的大信号环路引起的,电路的大环路走线等效为环状天线,此为磁偶极子差模辐射模型.

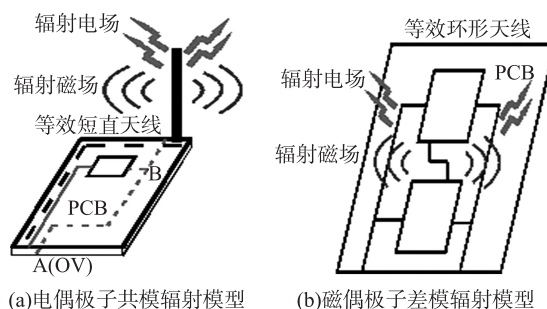


图1 辐射模型

Fig. 1 Radiation model

1.2 基于电路芯片时钟信号管脚引起的辐射噪声分析

PCB电路在射频信号工作情况下产生辐射干扰噪声. U1芯片产生的高频噪声信号通过时钟信号管脚CLK以差模噪声电流的形式耦合至U2芯片,如图2所示.差模噪声电流经过信号电流大环路后将产生严重的差模辐射干扰,从而导致电子设备辐射EMI噪声超过标准限值.

为了有效抑制辐射干扰噪声,需要研究磁偶极子在远场产生的辐射场特性.由Maxwell方程可知,设取最大辐射场强方向,其空间辐射场强大小如式(1)所示:

$$E_{DM} = 2.632 \times 10^{-14} \frac{f^2 A I_{DM}}{r} \quad (1)$$

式中, E_{DM} 为差模辐射噪声, f 为信号频率, A 为信号环路面积, I_{DM} 为差模电流, r 为测试距离. 由式(1)不难发现, E_{DM} 与 f 的平方、 A 以及 I_{DM} 成正比, 与 r 成反比. 对于实际功能电路而言, 信号工作频率、信号环路面积以及测试距离等是由电路设计时根据功能需要所选定的. 故只能通过减小差模电流以抑制差模辐射噪声.

1.3 基于PCB电路数据传输线引起的辐射噪声分析

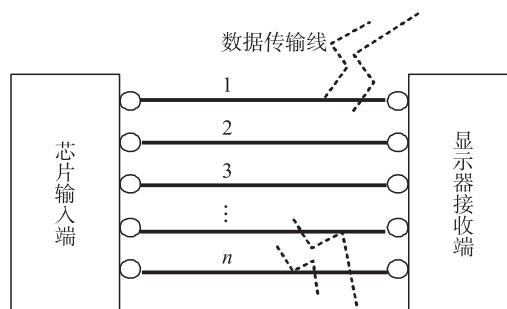
高速数字PCB电路结构复杂,产生辐射噪声的形式多样.其中,显示器控制芯片与显示器之间的数据传输线也是产生辐射噪声的重要因素.如图3(a)所示,数据传输线时刻向显示器传输信号数据,所以数据传输线对外辐射噪声等效为线缆对外产生的共模辐射噪声.根据其工作原理可以得出如图3(b)的等效干扰模型电路.设取最大辐射场强方向,其空间辐射场强大小如式(2)所示:

$$E_{CM} = 1.256 \times 10^{-6} \frac{Idl f}{r} \quad (2)$$

式中, dl 为线缆长/m; f 为频率/Hz; I 为电流/A; r 为线缆到接收天线的距离/m. 由于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.



(a)数据传输线实物图



(b)等效干扰模型

图3 数据传输线辐射干扰

Fig. 3 The radiated interference of data transmission lines

2 实验与结果分析

图 4 所示为某公司生产的医疗盆地粉碎机,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 5 所示.根据 GB 9254 Class B 标准发现,该盆地粉碎机辐射 EMI 严重超标.

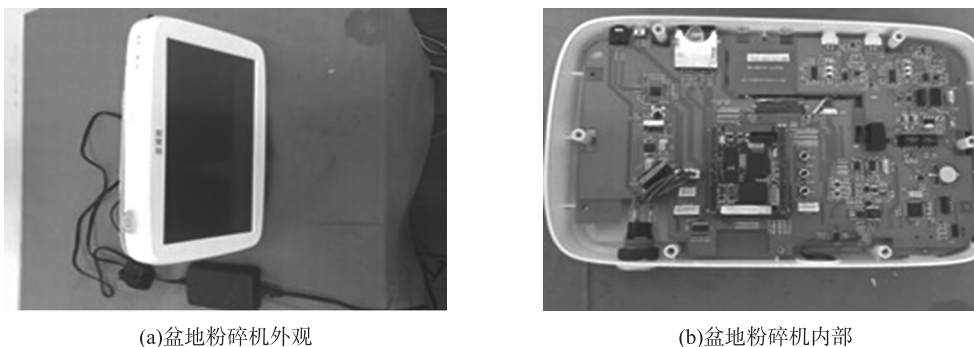


图 4 医疗盆地粉碎机

Fig.4 Medical basin crusher

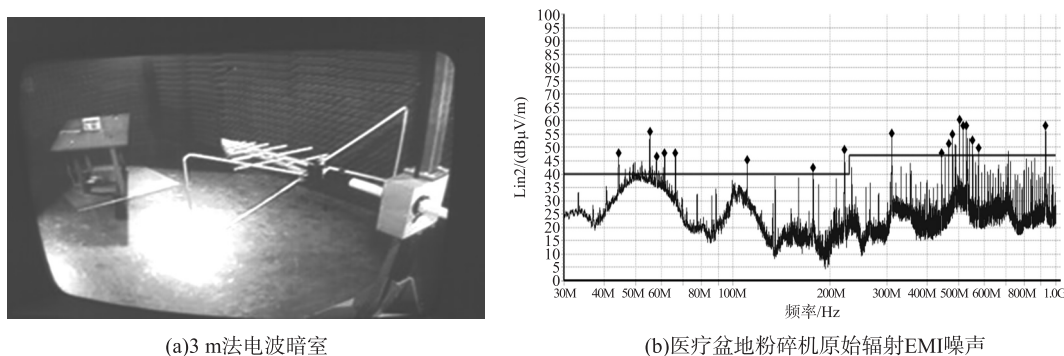


图 5 医疗盆地粉碎机标准测试

Fig.5 The standard tests of medical basin crusher

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包含电路芯片时钟信号管脚和数据传输线引起的辐射干扰.

(1) 电路芯片时钟信号管脚干扰机理分析及整改措施

电路芯片时钟信号管脚是以一定频率噪声信号向外发射辐射干扰,表现在测试结果上即为一系列的倍频辐射干扰超标频点.对照图 5 可知,44.24、177.32、221.68、310.32、442.36 MHz 等均呈现倍频关系.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进行多级并联以抑制等效环路天线对外辐射干扰.首先设计 EMI 滤波器模型以及加载位置,考虑到多级并联的高频滤波电容可以减小差模辐射电流,EMI 滤波器的作用是逐步降低由 U1 芯片通过时钟信号 CLK 传输至 U2 芯片的辐射噪声以及减小由 U2 芯片流向信号环路的差模辐射电流,达到降低差模辐射场强的目的.

基于上述 EMI 滤波器的模型,实际整改方案在 U1 芯片时钟信号管脚 CLK 的输出端以及 U2 芯片时钟信号管脚 CLK 的输入端同时并联 30pF 电容,并在 U2 芯片与信号环路之间分别并联 100、10、43 pF 电容进行多级滤波,整改方案如图 6 所示.整改后测试结果如图 7 所示,对比图 5,在 44.24、177.32、221.68、310.32、442.36 MHz 频点,辐射噪声降幅分别为 9.14、5.5、14.31、6.77、3.79 dBμV/m,如表 1 所示.

(2) 数据传输线干扰机理分析及整改措施

如图 3 所示,数据传输线由 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 5,测试结果显示医疗盆地粉碎机在 450 MHz ~ 600 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(2)可知,数据传输线上传的信号频率、线缆长

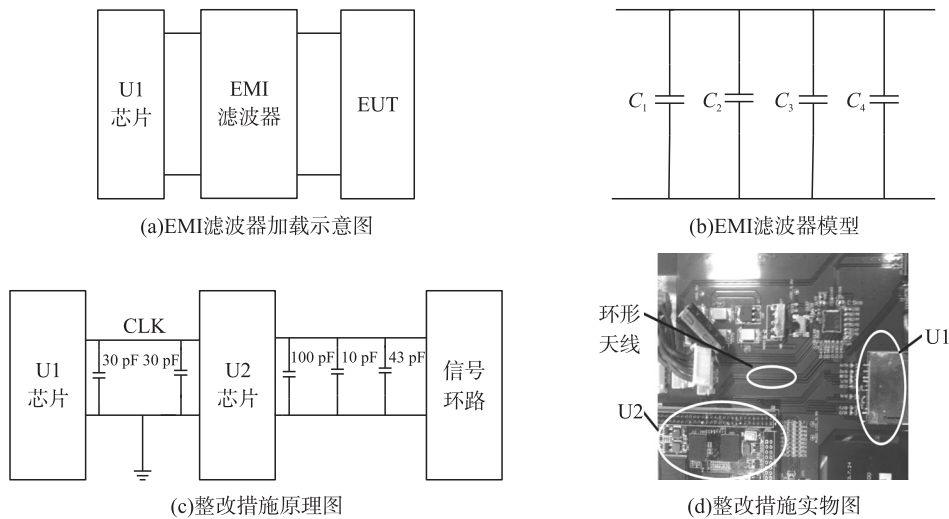


图 6 针对芯片时钟信号管脚整改措施

Fig. 6 The corrective actions of chip clock signal pin

度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.如图 8(a),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 $E_{cm} \propto I_{cm}$.因此,对数据传输线加一层屏蔽材料(铜箔),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.整改措施如图 8(b)所示.整改后测试结果如图 9 所示,对比图 5,在 466.96、479.24、528.40、552.96、576.32 MHz 频点,辐射噪声降幅分别为 11.47、16.09、11.28、5.72、4.12 dB μ V/m,如表 2 所示.

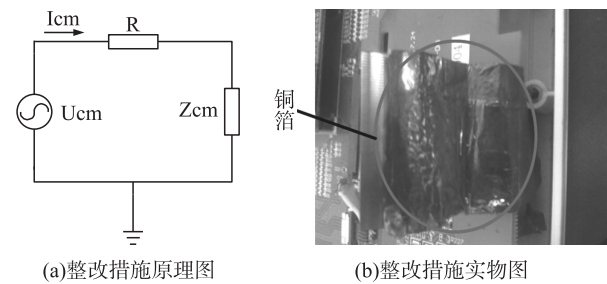


图 8 针对数据传输线的整改措施

Fig. 8 The corrective actions of data transmission line

表 1 时钟信号管脚整改前后辐射 EMI 噪声对比

Table 1 The radiation EMI noise contrast for the rectification of clock signal pin

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
44.24	48.02	8.02	38.88	1.12
177.32	42.33	2.33	36.83	3.17
221.68	49.31	9.31	35.00	5.00
310.32	55.31	8.31	48.54	1.54
442.36	47.81	0.81	44.02	2.98

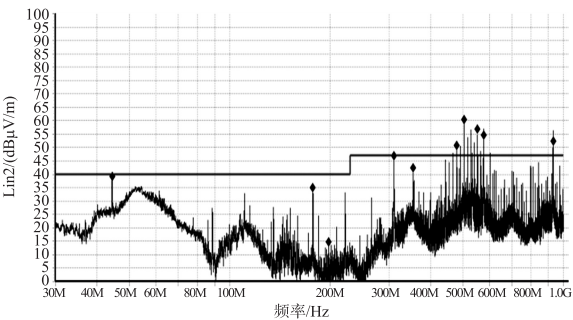


图 7 时钟信号管脚整改后,医疗盆地粉碎机标准测试结果

Fig. 7 After the rectification of clock signal pin, the standard test results medical basin mill

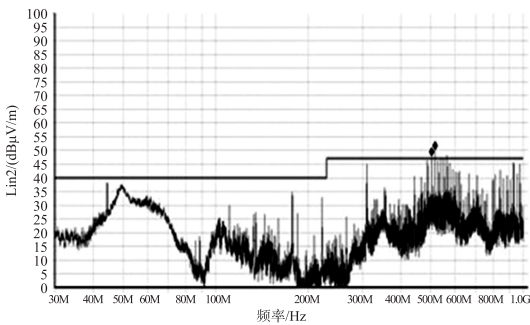


图 9 数据传输线整改后,医疗盆地粉碎机标准测试结果

Fig. 9 After the rectification of data transmission line, the standard test results of medical basin crusher

表 2 数据传输线整改前后辐射 EMI 噪声对比

Table 2 The radiation EMI noise contrast for the rectification of data transmission line

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
466.96	51.47	4.47	40.00	7.00
479.24	54.89	7.89	38.80	8.20
528.40	58.17	11.17	46.89	0.11
552.96	52.62	5.62	46.90	0.10
576.32	49.90	2.90	45.78	1.22

3 结语

本文提出的两种辐射噪声理论模型及其等效电路,即基于 PCB 电路数据传输线引起的辐射噪声模型分析和基于电路芯片时钟信号管脚引起的辐射噪声模型分析,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] 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 Yang, Dong Yinghua, Lu Wanquan, 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)
- [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 Yang, Yan Wei, Zhao Bo, 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]. 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)
- [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 Yang, Luo Yongchao, Yan Wei, 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] Yang Z, Wei Y, Yongchao L, et al. Analysis and suppression for radiated EMI noises generated by radio frequency identification(RFID) based-systems[C]//2010 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology(ICMMT). Chengdu:IEEE,2010:1 461-1 467.
- [6] Wei Y, Yang Z, Yongchao L, 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] 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,2008,41(12):2-4.
Feng Limin, Qian Zhaoming. Research on radiation EMI for PCBs of digital circuit[J]. Power Electronics,2008,41(12):2-4. (in Chinese)

[责任编辑:严海琳]