

医疗电子设备的传导 EMI 噪声机理分析与处理

王 壮, 杨 雄, 赵 阳, 马宝萍, 李世锦

(南京师范大学电气与自动化工程学院, 江苏 南京 210042)

[摘要] 本文针对医疗电子设备的电磁兼容问题, 分析了其传导 EMI 噪声的生成机理, 包括瞬态电流、接地不良、串扰和电容耦合 4 种情况. 本文还根据 4 种传导 EMI 噪声生成机理提出了相应的噪声处理方法, 包括电源去耦、设计滤波器、采用铁氧体磁环、屏蔽等, 并通过两个工程实例验证了其有效性与实用性.

[关键词] 医疗电子设备, 传导噪声机理, 传导噪声抑制

[中图分类号] TM461; TN03 [文献标志码] A [文章编号] 1672-1292(2017)02-0013-06

Analysis and Treatment of Conductive EMI Noise in Medical Electronic Equipment

Wang Zhuang, Yang Xiong, Zhao Yang, Ma Baoping, Li Shijin

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

Abstract: In this paper, according to the EMC problem of medical electronic equipment, the generation mechanism of the conducted EMI noise is analyzed, which includes four kinds of situations, such as transient current, bad grounding, crosstalk and capacity coupling. This paper also puts forward the corresponding noise suppression scheme according to the formation mechanism of the conduction of EMI noise, including power decoupling, filter design, the ferrite core and shielding, and its validity and practicability are verified by two engineering examples.

Key words: medical electronic equipment, conduction noise mechanism, conduction noise suppression

从 2014 年起中国实施 YY0505-2012 标准, 强制要求医疗电子设备通过电磁兼容标准检测. 三年来, 大量的医疗电子设备未能通过其中的传导 EMI 噪声检测, 需进一步处理其传导 EMI 噪声, 以改进其电磁兼容性. 整改传导噪声超标的医疗电子设备, 首要的难点在于分析其传导噪声的产生机理, 其次是在噪声诊断结果的基础, 采取有效的噪声抑制措施. 目前, 针对传导 EMI 噪声的建模及机理分析有一定研究成果, 如 Henry W O 和军平等^[1-5]搭建了开关电源的共模传导噪声模型和差模传导噪声模型, 建立了传导 EMI 噪声传播通道的高频模型, 颜伟、赵阳等建立了复杂电子系统的传导 EMI 噪声机理模型, 并提出相应的噪声抑制方法^[6-9]. 虽然前人的研究具有一定参考价值, 但医疗电子设备有其特殊性, 其功率、电压等级都相对其他大型电气设备要小, 精密程度也高, 因此, 关于医疗电子设备的传导 EMI 噪声生成机理有待进一步研究. 本文将研究医疗电子设备中瞬态电源电流、接地不良、串扰及电容耦合等因素引起传导 EMI 噪声的机理, 并提出医疗电子设备传导 EMI 噪声的处理方法, 为工程应用中采取传导 EMI 噪声抑制措施提供参考.

1 传导 EMI 噪声机理分析

1.1 瞬态电源电流引起的传导 EMI 噪声

数字电路中包含各种数字芯片(integrated circuit, IC), 每个 IC 都集成了大量的逻辑电路. 当 IC 切换时, 将产生两种不同的电源瞬态电流. 图 1(a)是互补金属氧化物半导体(complementary metal oxide semiconductor, CMOS)逻辑门开关时产生的瞬态电流. 当逻辑门由低到高切换时, 瞬态电流 I_0 需给负载电容 C_0 充电, 此电流仅出现于输出连接的逻辑门中. 而在逻辑门由高到低和由低到高的转换中, 通过开关回路的一部分, 两个

收稿日期: 2017-03-08.

基金项目: 江苏省教育厅高校科研成果产业化推进项目(JHB2011-20).

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

晶体管部分导通,在电源的两端将产生一个低阻抗,从而产生瞬态电流 I_d . IC 产生的总瞬态电流如图 1(b) 所示,总瞬态电流大小为 I_L 和 I_d 的总和. 当数字 IC 切换时,会产生瞬态电源电流,经过地与直流电源负极形成回路,在直流电源线上引起差模传导 EMI 噪声.

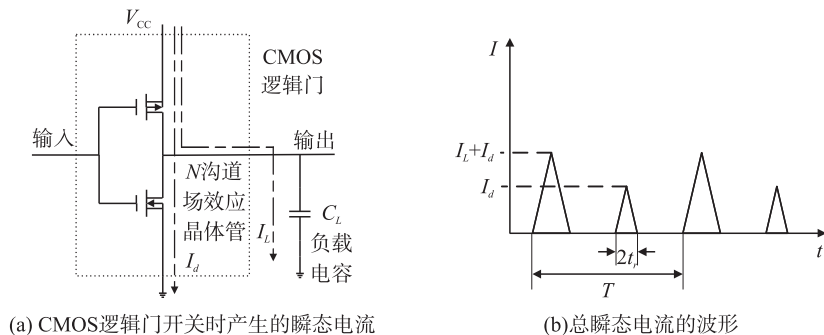


图 1 瞬态电源电流引起传导 EMI 噪声

Fig. 1 Transient power supply current causes conduction EMI noise

1.2 接地不良引起的传导 EMI 噪声

被测设备的接地系统接地不良是引起传导 EMI 噪声的重要原因. 接地阻抗不为零,导致接地电流引起接地噪声电压,产生传导 EMI 噪声. 当接地阻抗过大时,会引起过多的传导 EMI 噪声. 如图 2(a) 所示, I_{CM} 为接地噪声电流,等效于电流源, Z_{CM} 为接地阻抗,同时也是噪声源内阻抗, Z_{load} 为设备火线对地或零线对地之间的负载阻抗,负载阻抗两端的电压 U_{load} 即设备 L-G 和 N-G 上的传导 EMI 噪声,为共模传导 EMI 噪声. U_{load} 的表达式为^[8]

$$U_{load} = I_{CM} \frac{Z_{load} Z_{CM}}{Z_{load} + Z_{CM}}. \quad (1)$$

由式(1)可知,接地阻抗 Z_{CM} 越大,则引起的传导 EMI 噪声越大.

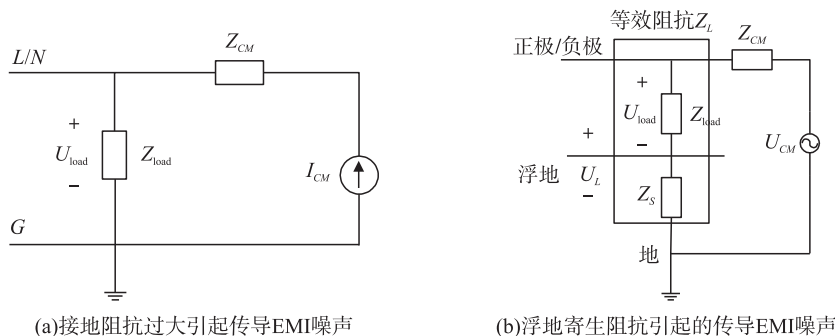


图 2 接地不良引起传导 EMI 噪声

Fig. 2 The bad ground causes the conducted EMI noise

另外,当接地阻抗一定,即共模传导 EMI 噪声源内阻抗一定时,电源线对地之间的负载阻抗也一定时,浮地与真正的地之间的寄生阻抗也会引起传导 EMI 噪声. 设 U_{CM} 为 EUT 的共模传导 EMI 噪声源,其噪声源内阻抗为 Z_{CM} ,设备火线对地和零线对地之间的阻抗等效为线路上的负载阻抗 Z_{load} ,负载阻抗上的噪声电压 U_{load} 即为火线对地和零线对地的传导 EMI 噪声. 由于接地不良,浮地与真正的地之间存在寄生电容和寄生电感. 如图 2(b) 所示, Z_S 为包含了寄生电容和寄生电感组成的寄生阻抗,与线路负载阻抗串联形成新的等效负载阻抗 Z_L ,其上的传导 EMI 噪声为 U_L ,二者之差 ΔU 即为因接地不良引起的共模传导 EMI 噪声,

$$\Delta U = U_L - U_{load} = \frac{Z_{load} + Z_S}{Z_{CM} + Z_{load} + Z_S} U_{CM} - \frac{Z_{load}}{Z_{CM} + Z_{load}} U_{CM}. \quad (2)$$

1.3 串扰引起的传导 EMI 噪声

医疗电子设备中一些搭载高频时变信号的线缆上含有大量的传导 EMI 噪声,通过串扰的方式使得其他线缆上也感应出传导 EMI 噪声. 尤其是通讯系统的数字控制线中,搭载着来自 PCB 数字器件上的高频数字信号,在其周围产生射频电磁场,将数字控制线中的高频 EMI 噪声耦合感应至其周围的线缆上,造成串扰,在被干扰的线缆上引起传导 EMI 噪声.

根据法拉第感应定律,串扰引起的传导 EMI 噪声等效于电感耦合。如图 3 所示,假设线缆 1 为医疗电子设备系统内部载有传导 EMI 噪声的线缆,线缆 2 为设备火线或零线, V_1 为线缆 1 上的传导 EMI 噪声, R_1 为线缆 1 与地之间的电阻, V_N 为线缆 2 上因串扰引起的传导 EMI 噪声, R_2 为线缆 2 与地之间的电阻。假设线缆 2 是静止的闭合环路,环路面积为常数,线缆 1 在线缆 2 中产生磁通量,其磁通密度随时间正弦变化, M 为线缆 1 和线缆 2 两个电路之间的互感,则线缆 2 上的感应传导 EMI 噪声电压为

$$V_N = j\omega M I_1 = M \frac{di_1}{dt}. \quad (3)$$

式中, ω 为角频率。

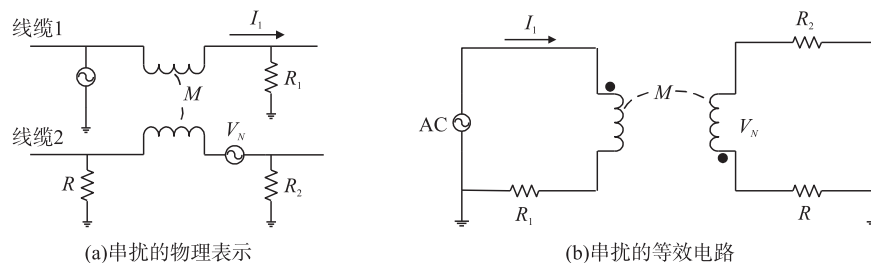


图 3 串扰引起的传导 EMI 噪声

Fig. 3 Crosstalk induced EMI noise

1.4 电容耦合引起的传导 EMI 噪声

医疗电子设备的传导 EMI 噪声测试频段为高频情况,要考虑寄生电容的影响,而线缆间通过电容耦合也会引起传导 EMI 噪声。如图 4 所示,假设线缆 1 为医疗电子设备系统内部载有传导 EMI 噪声的线缆,线缆 2 为设备火线或零线。线缆 1 上的传导 EMI 噪声通过电压源 V_1 表示, C_{1G} 是线缆 1 与地之间的电容, C_{12} 是线缆间的寄生电容, C_{2G} 是线缆 2 与地之间的电容, R 为电路 2 与地之间的电阻, V_N 是线缆 2 上通过电容耦合引起的传导 EMI 噪声。根据等效电路图可求得因电容耦合在线缆 2 上引起的与地之间的传导 EMI 噪声电压 V_N ,计算方法为

$$V_N = \frac{j\omega \left[\frac{C_{12}}{C_{12} + C_{2G}} \right] V_1}{j\omega + \frac{1}{R(C_{12} + C_{2G})}}. \quad (4)$$

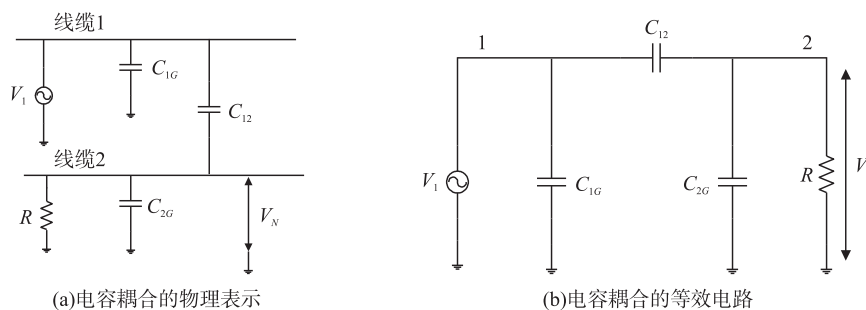


图 4 电容耦合引起的传导 EMI 噪声

Fig. 4 Capacitive coupling induced EMI noise

2 医疗电子设备的传导 EMI 噪声处理方法

根据第 1 节中的分析,IC 的高速切换引起的瞬态电源电流经地流通至直流电源回路中,从而引起传导 EMI 噪声。若通过电源去耦将这些瞬态电流在流出 IC 管脚后返回至 VCC 管脚,则可有效抑制瞬态电源电流引起的传导 EMI 噪声。

由式(1)和式(2)可知,接地不良会引起过量的传导 EMI 噪声,因此,在设计接地系统时,须加强接地,将接地阻抗减到最小,同时减小浮地与真正的地之间的寄生阻抗。如果设备制造商出于成本考虑,不愿意重新设计 PCB 电路,还可以通过共模扼流圈与电容组合成滤波器来抑制接地不良引起的共模传导 EMI 噪声。

由式(3)可知,串扰引起的传导 EMI 噪声与线缆间的互感 M 和噪声源线缆上的噪声电流 I_1 成正比,因此,可以通过减小互感 M 和噪声电流 I_1 抑制传导 EMI 噪声. M 由几何形状和线缆间的媒介磁特性决定,采用双绞线可有效减小耦合. 在系统线缆上卡磁环、在线缆两端对地并电容可减小噪声电流.

由式(4)可知,电容耦合引起的传导 EMI 噪声与线缆间的互电容及噪声源线缆上的噪声电压成正比. 因此,可通过增加线缆间距、屏蔽线缆的方式减小电容耦合

3 传导 EMI 噪声机理分析与处理方法的应用实例

3.1 高压电位治疗仪的传导 EMI 噪声处理

以某高压电位治疗仪为例,分析其传导 EMI 噪声. 如图 5 是该款设备的传导 EMI 噪声测试结果. 根据 GB 9254 ClassB 标准发现,该高压电位治疗仪在 23.99 MHz、27.38 MHz 的频点处出现超标,分别超标 2 dB μ V、1.27 dB μ V,在 150 kHz 至 200 kHz 的频段接近标准临界值,未通过标准,需进行电磁兼容性能改进.

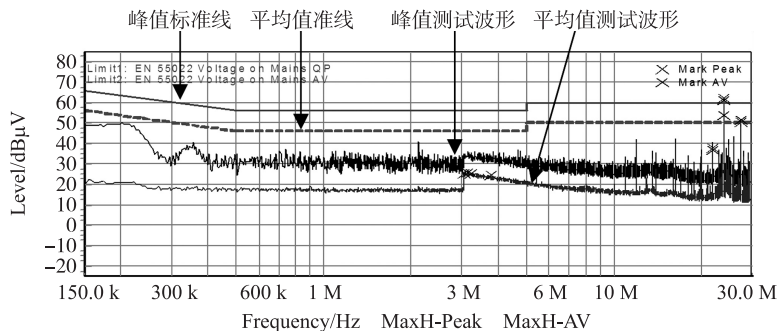


图 5 高压电位治疗仪的传导 EMI 噪声(抑制前)

Fig. 5 Conduction EMI noise of high voltage potential therapeutic apparatus(before inhibition)

据文中的传导噪声机理分析方法分析高压电位治疗仪的传导 EMI 噪声可知,高压电位治疗仪的数字控制线与电源线之间存在串扰耦合和电容耦合问题,因此在数字控制线上加铁氧体磁环磁环,如图 6(a)所示. 此外,时钟电路的工作频率为 12 MHz,超标频点恰好是其倍频. 故在数字芯片的电源与地之间并联电容进行电源去耦,如图 6(b)所示. 对高压电位治疗仪采取上述措施后的测试结果如图 7 所示,最终通过了传导 EMI 噪声测试. 表 1 是高压电位治疗仪采取传导 EMI 噪声抑制措施前后的测试对比.

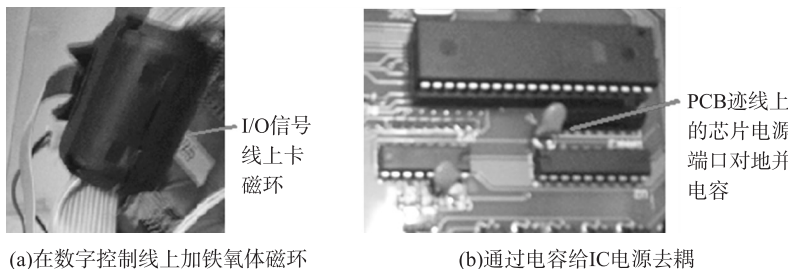


图 6 高压电位治疗仪的传导 EMI 噪声处理方案

Fig. 6 Conductive EMI noise processing scheme of high voltage potential therapeutic apparatus

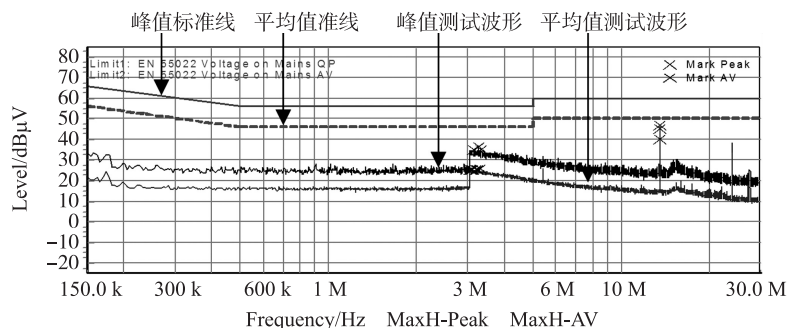


图 7 高压电位治疗仪的传导 EMI 噪声(抑制后)

Fig. 7 Conduction EMI noise of high voltage potential therapeutic apparatus(after inhibition)

表 1 高压电位治疗仪采取抑制措施前后的传导 EMI 噪声对比

Table 1 Contrast of conducted EMI noise before and after the suppression

抑制前			抑制后		
频点/MHz	实测值/dBμV	超标/dBμV	频点/MHz	实测值/dBμV	裕量/dBμV
23.99	62.00	2.00	13.56	46.82	13.18
27.38	61.27	1.27	23.99	38.45	21.55

3.2 超声波雾化器的传导 EMI 噪声处理

为了更充分地将本文提出的医疗电子设备传导 EMI 噪声机理分析方法和抑制方法应用于实际工程,本文还分析处理了一款超声波雾化器的传导 EMI 噪声.图 8 是超声波雾化器抑制前的传导 EMI 噪声测试结果,可见,在 1.7 MHz 及其倍频的频点处超标严重,在低频段也有超标现象,未通过测试.根据本文的传导 EMI 噪声机理分析方法发现,超声波雾化器的 PCB 板材质不好,存在接地不良的问题,且超声波的工作频率为 1.7 MHz.因此,在设备的传输线路上安装共模电感和电容组成的 EMI 滤波器抑制共模传导 EMI 噪声.滤波器的实物及其结构与参数如图 9 所示.

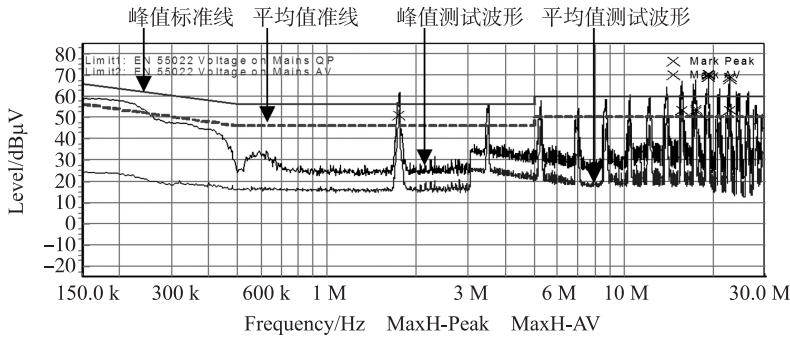


图 8 超声波雾化器的传导 EMI 噪声(抑制前)

Fig. 8 The conducted EMI noise of ultrasonic atomizer(before inhibition)

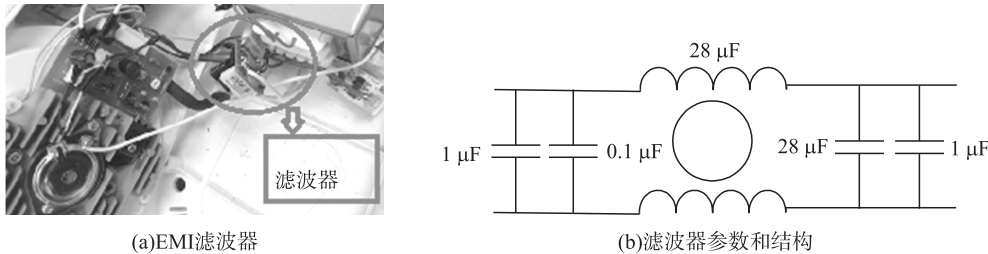


图 9 超声波雾化器的传导 EMI 噪声处理方案

Fig. 9 The conducted EMI noise processing scheme of ultrasonic atomizer

图 10 是对超声波雾化器采取上述措施后的测试结果,可见通过了传导 EMI 噪声测试.表 2 是超声波雾化器采取传导 EMI 噪声抑制措施前后的测试对比.

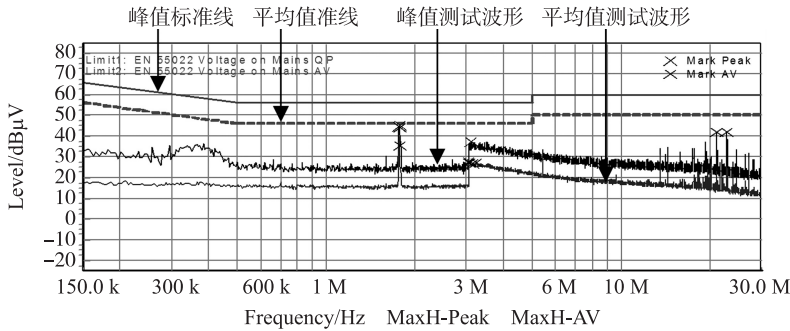


图 10 超声波雾化器的传导 EMI 噪声(抑制后)

Fig. 10 The conducted EMI noise of ultrasonic atomizer(inhibition)

表 2 超声波雾化器采取抑制措施前后的传导 EMI 噪声对比

Table 2 Take the ultrasonic atomizer EMI suppression measures before and after the noise contrast

抑制前			抑制后		
频点/MHz	实测值/dBμV	超标/dBμV	频点/MHz	实测值/dBμV	裕量/dBμV
1.74	60.14	13.14	1.74	32.31	13.69
3.49	50.36	3.36	3.52	25.43	20.57

4 结语

本文研究了医疗电子设备传导 EMI 噪声的生成机理,深入分析了医疗电子设备中瞬态电源电流、接地不良、串扰、电容耦合四种因素引起传导 EMI 噪声的机理模型,并根据机理模型,探讨了抑制传导 EMI 噪声的具体方法,包括电源去耦、串联铁氧体磁珠、加载 EMI 滤波器、卡夹扣磁环。最后综合应用文中方法对两款医疗电子设备的传导 EMI 噪声超标问题进行整改,最终两款产品都通过了 YY0505-2012 标准,验证了本文方法的有效性与实用性,具有一定参考价值。

[参考文献] (References)

[1] STOCKMAN G J, LEMEY S, ROGIER H, et al. Full-wave modeling of interacting multiport devices with arbitrary relative positions and orientations for efficient EMI assessment [J]. IEEE transactions on electromagnetic compatibility, 2016, 58(4) : 1 322-1 330.

[2] HENRY W O. Electromagnetic compatibility engineering[J]. Wiley & Sons, 2009, 1(2) : 273-278.

[3] 和军平, 陈为, 姜建国. 开关电源共模传导干扰模型的研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(8) : 50-55.
HE J P, CHEN W, JIANG J G. Model and analysis on common-mode conducted EMI of a switched mode power supply[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(8) : 50-55. (in Chinese)

[4] WONGPRASERT N, SYMANS M D. Application of a genetic algorithm for optimal damper distribution within the nonlinear seismic benchmark building[J]. Journal of engineering mechanics, 2004, 130(4) : 401-406.

[5] 和军平, 姜建国, 陈为. 离线式 PWM 变换器电磁干扰传播通道模型的研究[J]. 电工技术学报, 2004, 19(4) : 56-60.
HE J P, JIANG J G, CHEN W. Study of the model of the EMI coupling paths of an off-line PWM converter[J]. Transactions of China electrotechnical society, 2004, 19(4) : 56-60. (in Chinese)

[6] STAHL J, KUEBRICH D, DUERBAUM T. Modification and characterization of a standard LISN for effective EMI noise separation[C] // ICEAA, Sydney, 2010. IEEE, 2010 : 39-42.

[7] GONG X, JOSIFOVIĆ I, FERREIRA J A. Modeling and reduction of conducted EMI of inverters with SiC JFETs on insulated metal substrate[J]. IEEE transactions on power electronics, 2012, 28(7) : 3 138-3 146.

[8] 颜伟, 赵阳, 王恩荣, 等. 复杂电子系统传导 EMI 噪声机理分析与处理[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(30) : 156-162.
YANG W, ZHAO Y, WANG E R, et al. Investigation and reduction on conducted electromagnetic interference noise mechanism for complex power electronics systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(30) : 156-162. (in Chinese)

[9] STOCKMAN G J, LEMEY S, ROGIER H, et al. Full-wave modeling of interacting multiport devices with arbitrary relative positions and orientations for efficient EMI assessment[J]. IEEE transactions on electromagnetic compatibility, 2016, 58(4) : 1 322-1 330.

[责任编辑: 陈 庆]