

高重频电磁脉冲模拟器控制系统电磁防护研究

马丽华¹, 冯德仁¹, 李小龙¹, 何山红¹, 车文荃², 熊 瑛²

(1. 安徽工业大学电气信息学院, 安徽马鞍山 243032;

2. 南理工光电学院通信工程系弹道国防科技重点实验室, 江苏南京 210094)

摘要:高重频电磁脉冲模拟器是高功率辐射源, 运行过程中会产生很强烈的电磁干扰. 为抑制这种干扰, 提出了一种 DSP 控制系统软硬件电磁防护方案, 采用平行板有界波模拟器系统验证该方案的可行性. 实验结果表明, 采用硬件屏蔽和软件加固技术的 DSP 控制系统可以良好运行在 EMP 模拟器场区附近, 具有较强的抗干扰能力.

关键词:高重频 EMP 模拟器; 数字信号处理器; 硬件屏蔽; 软件加固

中图分类号: TN973.2 **文献标识码:** A doi:10.3969/j.issn.0253-2778.2014.04.011

引用格式: Ma Lihua, Feng Deren, Li Xiaolong, et al. Study of electromagnetic protection based on high repetition rate EMP simulator control system[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2014, 44(4):333-338.

马丽华, 冯德仁, 李小龙, 等. 高重频电磁脉冲模拟器控制系统电磁防护研究[J]. 中国科学技术大学学报, 2014, 44(4):333-338.

Study of electromagnetic protection based on high repetition rate EMP simulator control system

MA Lihua¹, FENG Deren¹, LI Xiaolong¹, HE Shan hong¹,
CHE Wenxuan², XIONG Ying²

(1. Institute of Electrical and Information Anhui University of Technology, Maanshan 243032, China;

(2. National Defense Key Lab of ballistics, School of Electronic and Optical Engineering,

Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: High repetition rate EMP simulator is a high-power radiation source, but it produces a very strong electromagnetic interference (EMI) while in operation. To combat this interference, an electromagnetic protection scheme based on DSP control, combining hardware protection with software reinforcement, was proposed. A bounded-wave simulator system was used to prove the feasibility of the scheme. The experimental results show that the DSP system using hardware shield and software reinforcement technology can work well near the EMP simulator, and that it is feasible and has strong anti-jamming capacity.

Key words: high repetition rate EMP simulator; DSP; hardware shield; software reinforcement

收稿日期: 2013-05-31; 修回日期: 2013-10-08

基金项目: 国防科技重点实验室专项基金资助.

作者简介: 马丽华, 女, 1987年生, 硕士生. 研究方向: 功率变换技术. E-mail: mlh19871212@163.com

通讯作者: 冯德仁, 博士/副教授. E-mail: drfeng@ustc.edu.cn

0 引言

高重频电磁脉冲(EMP)模拟器是模拟高空核爆炸电磁脉冲(HEMP)辐射环境、雷击环境以及工业配电中的各种快速瞬变的操作过电压(如切空线压、合闸过电压等)电磁环境的装置,广泛应用于电子设备、分系统 EMP 辐射敏感度测试以及屏蔽室电磁脉冲屏蔽效能测试等^[1-4].

高重频 EMP 模拟器作为高能辐射源,其工作时也会干扰自身底层驱动设备,造成功能紊乱,影响其正常运行.尤其是采用 DSP 作为控制系统时,更容易与 EMP 噪声形成高频交互耦合和累积效应,影响 DSP 正常运行,严重时甚至会损坏 DSP 控制系统等重要部件,造成严重的经济损失,因此必须对高重频 EMP 模拟器 DSP 控制系统进行有效的防护加固.

对于电子设备的防护加固技术,目前主要措施有硬件防护和软件加固两方面,硬件防护采用电磁屏蔽手段,可以有效地抑制电磁脉冲传导干扰和空间辐射干扰,是电磁防护的主要手段^[5-6];软件加固对于非周期性的强干扰具有良好的抑制作用,是数字系统设计中常用的电磁防护手段^[7-8].本文基于此,提出了一种针对高重频 EMP 模拟器 DSP 控制系统的电磁防护方案,实验结果表明,该方案能较好地抑制 EMP 干扰,保障 DSP 安全稳定地运行.

1 电磁脉冲源 DSP 控制系统硬件屏蔽

高重频 EMP 模拟器主要由高重频 EMP 源和平行板型有界波场辐射器组成,如图 1 所示.EMP 输出幅值为 50 kV、功率 2.5 MW、前沿小于 20 ns、重复频率 10 kHz、宽度 10 μ s.高重频 EMP 源由 5 路单脉冲源并联叠加组成,采用数字信号处理器(DSP)作为 EMP 模拟器控制系统,可独立输出单 EMP 或以时间关联向负载输出高重频 EMP 群,后

者以多脉冲源等间距延时方式实现 EMP 的高重频输出.

EMP 是一种瞬变电磁现象,具有较宽的频谱,主要以辐射场的形式对被测设备或周围设备产生耦合干扰^[9-11],应采用具有较高磁导率的金属材料进行屏蔽.综合考虑常用屏蔽材料(如铁、铜、铝等)的成本、结构特性与屏蔽性能^[5-6],模拟器 DSP 控制系统采用如图 2 所示的金属屏蔽盒来抑制 EMP 干扰.盒体由 1 mm 左右的喷塑钢板制成,为可拆卸顶盖的安装方式.同时屏蔽盒上前后侧面均开有电源线、采样和触发信号输出等接口,这些接口均采用金属封闭式转接头连接方式,既可防止电磁泄漏,又方便安装维护.尽管如此,DSP 控制系统屏蔽盒依然存在微小缝隙,会造成一定的电磁泄漏^[11-13],因此本文对屏蔽盒进行了定量和定性分析.

1.1 DSP 屏蔽盒效能分析

无限大钢板对电磁波的屏蔽效能可以用下式表示:

$$SE = K + A + B.$$

式中, K 为反射损耗(主要为远场区电磁场反射损耗系数 K_p), A 为吸收损耗, B 为多重反射损耗,其表达式为^[5-6]

$$A = 0.131d \sqrt{f\mu_r\sigma_r};$$

$$K_p = 168 - 20 \lg \left[\sqrt{\frac{\mu_r f}{\sigma_r}} \right];$$

$$B = 20 \lg \left[1 - \left(\frac{Z_m - Z_w}{Z_m + Z_w} \right)^2 \right].$$

$$10^{-0.1A} (\cos 0.23A - j \sin 0.23A).$$

式中, d/mm 为屏蔽材料的厚度; f/Hz 为电磁波频率; μ_r 为屏蔽体的相对铜的磁导率; σ_r 为屏蔽体的相对铜的电导率, Z_m/Ω 表示屏蔽体的电磁波阻抗; Z_w/Ω 表示空气的电磁波阻抗.

钢板在 $f \approx 1 \text{ MHz}$ 时, $\mu_r \approx 500$, $\sigma_r \approx 0.1$, 因此可以得出吸收损耗为

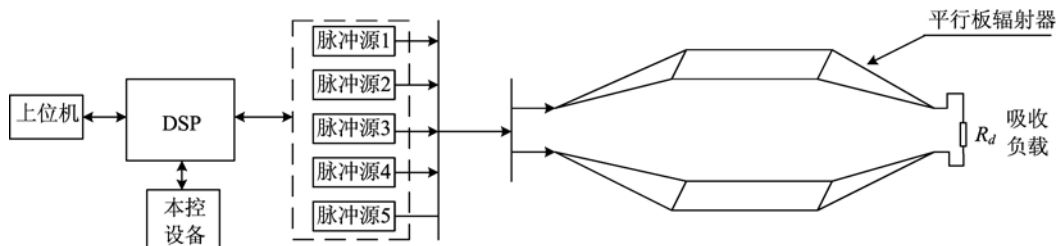


图 1 高重频 EMP 模拟器等效原理图

Fig. 1 Schematics of the high repetition rate EMP simulator



图 2 DSP 屏蔽盒

Fig. 2 Shielding box of DSP control system

$A = 926.34 \text{ dB}$.

由式上可以看出, 1 MHz 以上的电磁波穿过钢板, 其能量将衰减将近 1 000 dB 甚至更多. 远场区反射损耗 $K_p \approx 71 \text{ dB}$, 在 $A > 10 \text{ dB}$ 时, 其多重反射损耗 B 可以忽略, 由此可以得出无限大钢板, 其屏蔽效能为

$$SE_1 = 926.34 + 71 = 997.34 \text{ dB}.$$

由此可见, 对于 1 MHz 以上的电磁波, 理想的 DSP 控制系统屏蔽盒(无缝隙), 其屏蔽效能将高达 1 000 dB. 然而, 实际情况并非如此, 屏蔽盒因实际安装和连接线需求, 不可避免地留有大量的缝隙, 这些缝隙在高频环境下构成了接收天线, 造成了严重的电磁泄漏, 大大降低了 DSP 控制系统屏蔽盒的屏蔽效能.

1.2 缝隙屏蔽效能分析及改进

DSP 控制系统屏蔽盒的缝隙主要存在于盒体的侧面以及端盖部位. 盒体的侧面由于实际需求不可避免地留有电源线、控制线及采样信号线等接口, 这些接口的存在破坏了屏蔽盒的完整性, 虽采用了金属转接头, 但仍留有微量的微小缝隙; 此外, 为便于安装 DSP 控制板, 盒体采用了可拆卸顶盖式结构, 由于机械工艺等问题, 顶盖与盒体间不可能完全吻合, 这也在一定程度上造成了顶盖与箱体连接处存在微小缝隙, 为缝隙的主要存在处. 这些缝隙的屏蔽效能为^[5-6]

$$SE_2 = A_f + R_f = 27.3 \frac{t}{g} + 20 \lg \frac{|(1+k)^2|}{|4k|} \text{ (dB)}.$$

式中, A_f/dB 为缝隙传输损耗, R_f/dB 为缝隙处的

反射损耗, t/cm 为金属板厚度或缝隙深度, g/cm 为缝隙长度, k 为缝隙处波阻抗与空间入射波阻抗之比, 入射波为平面波场时, $k = j6.69 \times 10^{-5} fg$, f/MHz 为频率; 入射波为低阻抗磁场时, $k = g/\pi r$, r/cm 为控制系统屏蔽盒距 EMP 辐射源的距离.

高重频 EMP 模拟器输出 EMP 频率高达几百 MHz, 波长 $\lambda \leq 6 \text{ m}$ (50 MHz), 而控制系统距离 EMP 场辐射器距离为 2~3 m, 显然远大于 $\lambda/2\pi = 0.95 \text{ m}$, 缝隙处于远场区, 入射波为平面波, 取 $k = j6.67 \times 10^{-5} fg$, 由此可得缝隙处屏蔽效能近似为

$$SE_2 \approx 27.3 \frac{t}{g} + 20 \lg \frac{10^5}{4 \times 6.69 fg} \text{ (dB)}.$$

由上式可见, 影响屏蔽盒屏蔽性能的主要因素就是缝隙的屏蔽效能, 增加缝隙深度或减小缝隙长度均有利于增加缝隙屏蔽性能, 因此, 对于 DSP 控制系统屏蔽盒, 采取如下措施:

(I) 对于连接线接口处的缝隙, 采用加装导电橡胶垫或者在连接缝隙涂抹导电涂料以保证屏蔽盒的完整性, 减小连接接口处的缝隙长度, 提高屏蔽效能, 导电橡胶垫的安装示意如图 3 所示.

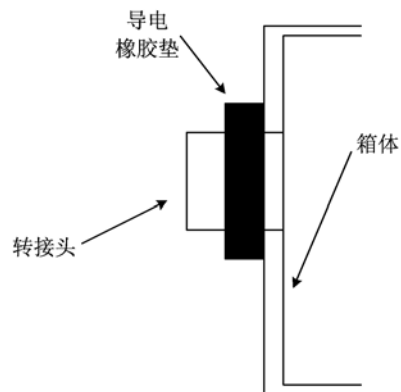


图 3 导电橡胶安装示意图

Fig. 3 Installation schematic diagram of the conductive rubber

(II) 顶盖与箱体之间连接处可以加装导电橡胶垫, 以尽量减小此处缝隙长度. 此外, 还可以采取如图 4 所示的结构方式来增加缝隙深度, 提高屏蔽效能.

2 软件加固

DSP 控制系统屏蔽盒经过加装导电橡胶垫和涂抹导电涂料后, 极大地提高了屏蔽盒的屏蔽效能, 然而由于屏蔽盒对低频抑制能力的不足, 仍然会有低频分量耦合进入屏蔽盒内, 干扰 DSP 系统的正常

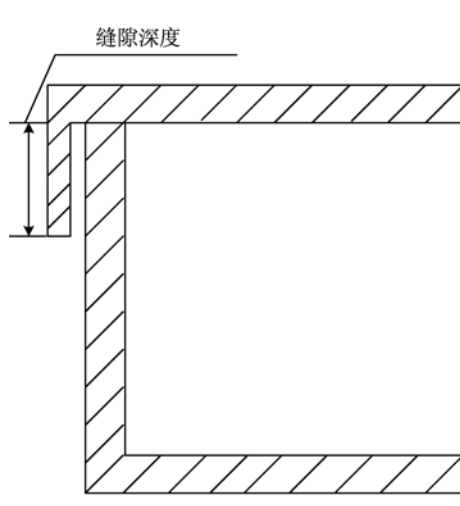


图 4 屏蔽盒顶盖连接处缝隙深度示意图

Fig. 4 Installation schematic diagram for gap depth of the shielding box top cover connecting

运行,因此在硬件抗干扰基础上,使用了软件加固技术,加入了抗干扰程序,以保证控制系统在受到干扰死机等情况下,可以自动恢复干扰前工作状态。

DSP 通常采用开启看门狗的措施来抑制受干扰时的程序执行错误、死机等现象。DSP 重启后,系统功能恢复初始状态,工程操作人员需重新设计系统工作状态,造成操作的繁琐性,因此在传统看门狗抗干扰措施上进行了改进。

DSP 看门狗模块具有独立的使能端和硬件计数器,在计数器溢出前通过“喂狗”指令复位看门狗计数器以阻止看门狗复位内核或产生中断信号^[14-16]。通过 TI 公司数据手册,可以方便地查阅到系统寄存器 SCSR 中 WDENINT 位所决定的看门狗是输出复位内核信号还是输出中断信号,软件抗干扰程序设计思路如图 5 所示。

在看门狗中断服务子程序中调用如下陷阱:

```
save_system_information(); ①
EALLOW;
SysCtrlRegs.WDCR=0x000D; ②
EDIS;
```

该程序的作用是首先将系统中重要的状态信息(如脉冲输出信息、脉冲间隔信息、电压调节信息、异常中断标志位等)保存到外部 ROM 中(程序①),然后调用程序②复位内核。

控制系统在 DSP 重新启动后,首先完成系统各外设的初始化,然后从外部 ROM 中读入异常中断标志位,判断前一次系统复位是正常复位还是异常

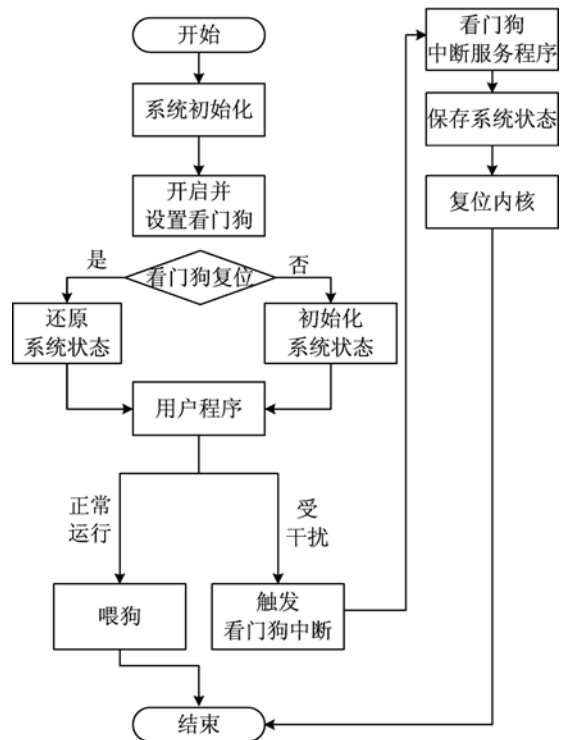


图 5 软件陷阱

Fig. 5 Software trap

复位。若为异常复位,则继续从 ROM 中读入已保存的前一次系统工作相关变量值赋给相应的变量,复原前一次系统运行状态;若为正常复位,则清零这些已保存的变量值,等待工程操作人员进行新一轮的工作状态设定,开始新的运行状态。

DSP 支持多个外设中断,而用户程序只使用其中的一个或几个。若 DSP 运行时受到干扰,运行了用户没有用到的中断时,就会出现死机现象,因此对于未使用的中断,依然在其 ISR 中调用上面的软件陷阱。程序正常运行时,CPU 不会运行未开启的 ISR,当 DSP 受到干扰,意外开启这些中断后,CPU 立即运行这些 ISR,及时复位与还原系统。

DSP 软件加固技术对于非周期性干扰表现出良好的抗干扰能力,但对于周期性的强干扰,其抗干扰能力尚有不足。目前周期性的强干扰主要还是采取硬件屏蔽及改变电路结构来实现抗干扰能力,对于如何用软件加固技术达到较为理想的抗干扰效果仍需进一步研究。

3 实验结果

控制系统屏蔽盒安装完成以后,进行了一系列两脉冲输出实验,图 6 为模拟器输出 EMP 时域波

形图,重复频率为 10 kHz,幅值为 25 kV. 图 7 是在 DSP 控制系统板附近测量到的 EMP 干扰信号的频谱图. 由图 7 可以看出,未屏蔽时,EMP 干扰信号频谱分量高达 400 MHz、幅值较高,且实验过程中出现较高频率的 DSP 重启恢复现象,说明未屏蔽时,DSP 受到较强的 EMP 干扰. 采用电磁屏蔽盒后(为考察缝隙对电磁屏蔽的影响,此时屏蔽盒开有约为 15 mm×5 mm 的缝隙),测量到如图 8 所示 EMP 辐射频谱图. 由图 8 可以看出,加装屏蔽盒后,EMP 干扰中 200 MHz 以上的高频分量基本被抑制,200 MHz 以下的低频分量依然充斥着屏蔽盒内,其分量幅值较未屏蔽时有所降低,说明屏蔽盒抑制了 EMP 干扰,但由于缝隙的存在造成了一定的电磁泄漏,降低了屏蔽效能. 为进一步考察缝隙对电磁屏蔽的影响,将盒体缝隙变为 25 mm×5 mm,测得此时 EMP

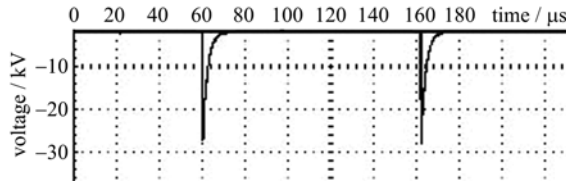


图 6 EMP 模拟器输出脉冲波形图

Fig. 6 The output waveform of EMP simulator

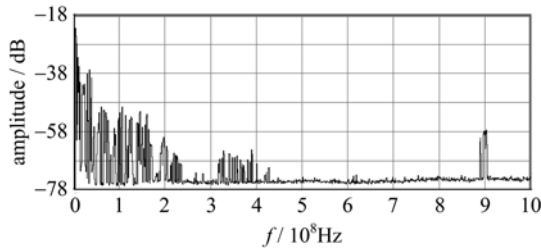


图 7 DSP 控制板附近电磁环境(屏蔽前)

Fig. 7 The electromagnetic environment of the DSP control-plate nearby (before shielding)

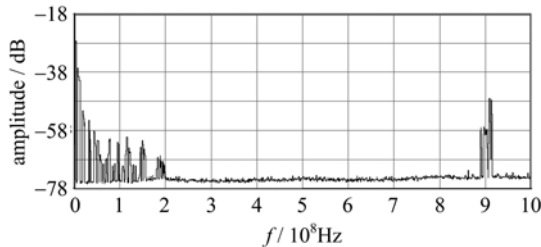


图 8 DSP 控制板附近电磁环境

(缝隙—15 mm×5 mm)

Fig. 8 The electromagnetic environment of the DSP control-plate nearby (gap—15 mm×5 mm)

辐射如图 9 所示. 由图 9 可见,随着缝隙的增长,屏蔽效能随之降低,电磁泄漏愈加严重.

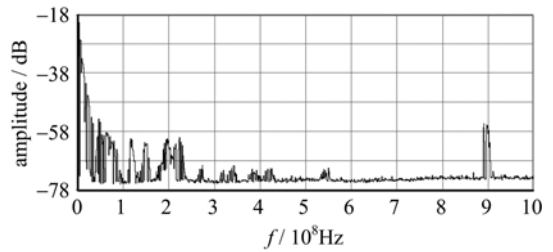


图 9 DSP 控制板附近电磁环境

(缝隙—25 mm×5 mm)

Fig. 9 The electromagnetic environment of the DSP control-plate nearby (gap—25 mm×5 mm)

在对缝隙处理后,测得 EMP 辐射如图 10 所示. 此时 EMP 干扰信号中 50 MHz 以上的高频分量几乎被完全抑制,50 MHz 以下的低频分量也有很大部分被抑制,电磁屏蔽效果优良,且实验过程中,DSP 未出现任何程序乱飞或死机现象. 对比图 7~10,采用屏蔽盒后,EMP 干扰主要集中在 50 MHz 以下的频段,屏蔽盒对 50 MHz 以上高频段 EMP 干扰具有较好的屏蔽效果.

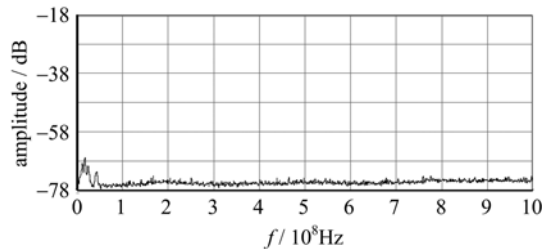


图 10 DSP 控制板附近电磁环境

(缝隙处理后)

Fig. 10 The electromagnetic environment of the DSP control-plate nearby (after gap handling)

4 结论

采用硬件屏蔽措施,较好地抑制了 EMP 模拟器运行过程中对 DSP 控制系统产生的高频辐射干扰,提高了控制系统抗干扰能力. 为进一步提高系统稳定性和适应性,采用了基于看门狗的软件加固技术,较好地抑制了非周期性的低频干扰. 整个实验过程中,采用软硬件电磁防护方案的 DSP 控制系统工作稳定,未受到较大干扰,模拟器输出高重频 EMP 稳定可靠,在解决高重频 EMP 模拟器的电磁防护问题方面提供借鉴.

参考文献(References)

- [1] Ma Guoming, Li Chengrong, Quan Jiangtao, et al. Measurement of VFTO on transformer entrance with transformer bushing sensor[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(33): 122-128.
马国明, 李成榕, 全江涛, 等. 采用套管传感器测量变压器线端快速暂态过电压的方法[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(33): 122-128.
- [2] YU Hongyan, LU Binxian. The Influence of the distributed trapped charge on VFTO[C]// 2010 5th International Conference on Critical Infrastructure. Beijing: IEEE Press, 2010: 1-4.
- [3] Rakov V A, Uman M A, Hoffman G. R, et al. Bursts of pulses in lightning electromagnetic radiation: Observations and implications for lightning test standards[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 1996, 38(2): 156-164.
- [4] Li Baozhong, He Jinliang, Zhou Hui, et al. Electromagnetic interference of transmission line in HEMP environment[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(11): 2 753-2 758.
李宝忠, 何金良, 周辉, 等. 核电脉冲环境中输电线的电磁干扰[J]. 高电压技术[J]. 2009, 35(11): 2 753-2 758.
- [5] 郭银景, 吕文红, 唐富华, 等. 电磁兼容原理及应用教程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
- [6] 白同云, 吕晓德. 电磁兼容设计[M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2001.
- [7] Zhang Wenliang, Wu Weining, Wu Xia. Study on the anti-interference technique for the software in the power measuring and controlling system [J]. High Voltage Engineering, 1999, 25(3): 21-23.
张文亮, 吴维宁, 吴峡. 电力测控系统软件抗干扰技术的研究[J]. 高电压技术, 1999, 25(3): 21-23.
- [8] Sun Jinfeng, Han Qing, Wu Shuhui. Software-based anti-interference measures of the single-chip microcomputer system[J]. Techniques of Automation and Applications, 2009, 28(7): 109-111.
- [9] Xie Yanzhao, Wang Zanji, Wang Qunshu, et al. High altitude nuclear electromagnetic pulse waveform standards: A review[J]. High Power Laser Particle Beams, 2003, 15(8): 781-787.
谢彦召, 王赞基, 王群书, 等. 高空核爆电磁脉冲波形标准及特征分析[J]. 强激光与粒子束, 2003, 15(8): 781-787.
- [10] Zhou Bihua, He Wei, Guo Jianming, et al. Standardization of LEMP electric field instrument[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2011, 26(6): 1 034-1 039.
周璧华, 何伟, 郭建明, 等. 雷电电磁脉冲电场仪的标定研究[J]. 电波科学学报, 2011, 26(6): 1 034-1 039.
- [11] Yang Linxia, Ge Debiao, Wei Bing. Analysis on coupling effects of EMP into lapped joints in conducting screens[J]. 2005, 17(10): 1 553-1 556.
杨凌霄, 葛德彪, 魏兵. 电磁脉冲对金属板搭接缝隙耦合效应分析[J]. 强激光与粒子束, 2005, 17(10): 1 553-1 556.
- [12] Xu Liang. Analysis of influence of slot on shielding effectiveness[J]. 2008, 6(3): 176-179.
徐亮. 缝隙对屏蔽效能的影响分析[J]. 信息与电子工程, 2008, 6(3): 176-179.
- [13] Zhou Chao, Peng Weidong, He Jian, et al. Influence of apertures in the avionics cabin on electromagnetic shielding effectiveness [J]. Science Technology and Engineering, 2012, 12(24): 160-165.
周超, 彭卫东, 何健, 等. 孔缝对航空器电子设备舱屏蔽效能的影响 [J]. 科学技术与工程, 2012, 12(24): 160-165.
- [14] Texas Instruments. TMS320x281x DSP System Control and Interrupts Reference Guide[Z]. 2009
- [15] 孙丽明. TMS320F2812 原理及其 C 语言程序开发[M]. 北京: 清华大学出版社, 2008.
- [16] 苏奎峰. TMS320F2812 原理与开发[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005.