

系统电磁脉冲效应摸底试验初探

李子森, 郭艳辉, 周成龙

(中国兵器工业新技术推广研究所 电磁兼容室, 北京 100089)

摘要: 目的 研究武器装备系统的电磁脉冲效应。方法 采用系统理论计算和部件摸底试验相结合的方法,以某装备的信息处理模块为测试对象,开展电磁脉冲近场辐照和电流注入试验,通过改变场强、注入电流等试验条件,探讨电磁脉冲对该模块的电磁效应。结果 得出了工作状态下该模块的电磁脉冲干扰效应试验数据,该模块在310 V/m的辐照场强或电缆耦合电流为4.3~6.4 A时会出现敏感状态,多次测试时百分之百敏感阈值略高。结论 对部件开展近场辐照和电流注入的电磁脉冲摸底试验方法可行,为进一步研究系统装备电子部件的电子脉冲效应提供了借鉴。

关键词: 电磁脉冲效应; 信号处理模块; 摸底试验; 近场辐照; 电流注入

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2015.01.009

中图分类号: TJ05; TM937 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2015)01-0039-06

Discussion about the System Electromagnetic Pulse Effect Diagnostic Test

LI Zi-sen, GUO Yan-hui, ZHOU Cheng-long

(EMC Lab of Advanced Technology Generalization Institute of China Ordnance Industries, Beijing 100089, China)

ABSTRACT: **Objective** To study the electromagnetic pulse effect of armament systems. **Methods** A method combining system theory calculation and components diagnostic test was used, and the electromagnetic pulse near field irradiation test and current injection test were carried out with the signal processing module of an equipment as the test object. By changing the test parameters such as field strength and injection current, the electromagnetic effect of electromagnetic pulse on the module was discussed. **Results** The test data on the electromagnetic pulse interference effect of the module were obtained under working conditions. The module would be sensitive when the irradiation field strength was 310 V/m or the cable coupling current was 4.3 A to 6.4 A, and multiple tests indicated that the completely sensitive threshold value would be a little higher. **Conclusion** Experiments proved that it was feasible to use the near field irradiation test and current injection test to develop electromagnetic pulse diagnostic test for the components, which is valuable for further study in electromagnetic pulse effect of more system modules.

KEY WORDS: electromagnetic pulse effect; signal processing module; diagnostic test; near field irradiation; current injection

收稿日期: 2014-10-23; 修订日期: 2014-11-24

Received: 2014-10-23; Revised: 2014-11-24

作者简介: 李子森(1968—),男,山西人,硕士,研究员级高级工程师,主要研究方向为电磁兼容测试、电磁脉冲防护及电磁环境效应。

Biography: LI Zi-sen (1968—), Male, from Shanxi, Master, Professor level senior engineer, Research focus: EMC test, electromagnetic pulse protection, and electromagnetic environment effects.

系统由若干分系统或设备构成,为了检查系统的防护能力、评价防护设计的效果,应开展系统电磁脉冲效应试验。系统的电磁脉冲效应可以采用理论模拟、电磁脉冲场模拟器辐照、脉冲电流注入和近场辐照等手段进行研究。理论模拟虽然能给出特定条件下设备的电磁脉冲耦合规律,如文献[1]—[5]研究了设备在强电磁脉冲作用下的失效机理,从宏观的热效应、浪涌效应或微观的电子元器件失效分析了其耦合作用,给出了元器件级阈值,但系统部件的电磁效应阈值与计算结果有所不同。美国等发达国家也认为仅靠理论分析无法给出大型复杂系统电磁脉冲耦合的准确数据,并认为大型电磁脉冲模拟试验仍是获得耦合数据和检验加固性能的唯一有效技术手段,但是大型辐射波模拟器试验成本高,试验难度大。另外一种有前景的试验技术是脉冲电流注入和近场辐照方法,该方法不要太大的花费,其中注入方法已写入测试标准。

文中主要采用理论计算和摸底试验相结合的方法,通过建模理论计算获得某装备处理模块所处的场强及耦合电流参数,并以此为输入激励,对该模块开展近场辐照和电流注入试验研究。

1 理论计算

高空核电磁脉冲 HEMP^[6]的时域特性可表达为: $E(t)=E_0k(e^{-\alpha t}-e^{-\beta t})$ 。其中,参数的典型值为: $\alpha=4.0 \times 10^7/s$, $\beta=6.0 \times 10^8/s$, $k=1.3$, $E_0=50 \text{ kV/m}$ 。波形上升沿 t_r 约2.5 ns,脉宽23 ns。 k 是修正系数, E_0 是辐照场强。时域波形如图1所示,HEMP电磁脉冲的频谱主要集中在低频端,对于脉冲前沿上升时间(10%~90%)为 t_r 的脉冲,其带宽可按 $BW=0.35 \frac{1}{t_r}$ ^[7]计算,约为140 MHz,可见频率基本在200 MHz以内。以该波形为输入激励,分别计算模块所处的场强及模块上的线缆感应的电流强度。

1.1 辐照场强计算

以某武器装备为原型,设置模型材料及单位,进行结构建模。设置端口和边界条件,采用平面波入射方式,激励源选择HEMP,在被测信号处理模块所在位置预设场监视器^[8],通过参数扫描获得该位置的场强大小。主要边界参数如下:选择激励源HEMP波形,装备置于无损耗自由空间,结构尺寸为装备实际尺寸导入,频率设置在100~200 MHz,采取六面体

剖分网格设置。由于要模拟电磁脉冲冲击过后的一段时间内耦合情况,仿真最大时长选择5000 ns,将探针作为计算结果输出观察典型位置的耦合情况。计算结果如图1所示。计算结果显示,某武器装备在HEMP照射下,装备内模块感应的场强幅值的量级为100~1000 V/m。

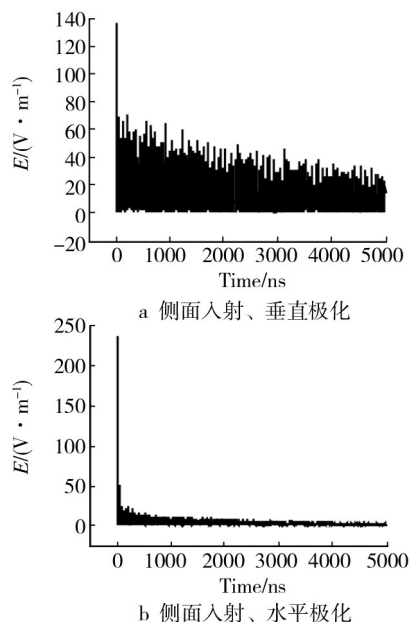


图1 仿真计算结果

Fig.1 Simulation calculation results

1.2 线缆感应的电流强度计算

对于位于有耗地面上的电源线在复杂电磁环境中感应电流的计算,可以利用积分方程法建立基本数学模型,并使用矩量法(Method of Moments, MoM)数值求解,以电源线的建模为例,如图2所示。有限长度传输线为理想导体细圆柱,长度为 L ,半径为 a ,距离地面高度为 h ,沿 x 轴放置。平面波入射方向由波矢量 $\vec{k}$ 决定, $\vec{k}$ 与 z 轴构成入射面。入射面和大地交线与波矢量的夹角为入射俯仰角 Ψ ,与 x 轴形成的夹角为方位角 φ 。电场矢量与入射面的夹角为 ν 。大地电参数由 ϵ_r , μ_r , σ 表征,空气电参数为 ϵ_0 , μ_0 。

若 $a \ll \lambda$, λ 为对应电磁波波长,在频率不是非常高的情况下,此假设基本都可以满足细线近似。通过计算线上感应电流密度分布,求解感应电流产生的散射电场,并利用边界条件建立积分方程,未知量为线上感应电流强度 $I(x')$,利用矩量法(Method of Moments, MoM)求解方程,最终得到细线上感应电流分布。如图3所示,边界参数如下:线缆线长2 m,

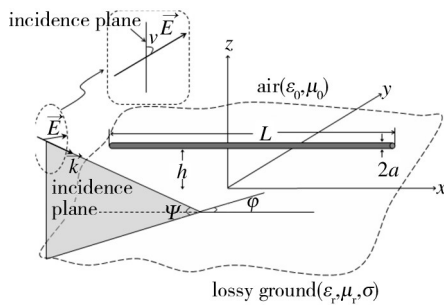


图2 有耗地面有限长度传输线在平面波入射下感应电流计算
Fig.2 Calculation of induced current of transmission line with limited length under lossy ground under plane wave incidence

线缆半径为1.0 cm,线缆敷高为2.5 cm,大地介电常数 $\epsilon_r=5.0$,磁导率 $\mu_r=1.0$,电导率 $\sigma=0.01$ S/m,终端负载为匹配负载150 Ω ,入射角 $\psi=90^\circ$,线缆半径为1.0 cm,终端负载开路。HEMP激励下,线中点处的时域电流波形如图3所示。

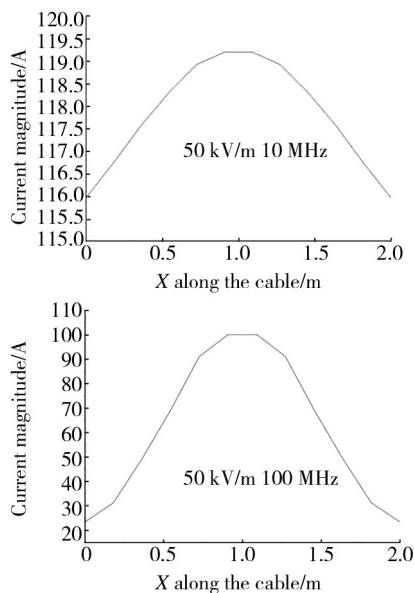


图3 线缆在50 kV/m辐照下感应的电流强度
Fig.3 Current intensity of transmission line under irradiation of 50 kv/m

可以看出,从线缆感应的电流强度为20~120 A。

下面的测试设备将模拟该强度的场强或感应电流来进行测试。电磁脉冲发生器如图4所示,主要由直流高压源、开关模块、匹配负载组成。直流高压源是电磁脉冲发生器的能源,用于给储能元件脉冲电容器充电,与开关和匹配负载形成放电回路^[9]。

如果开展注入试验,其负载为在一定范围内呈

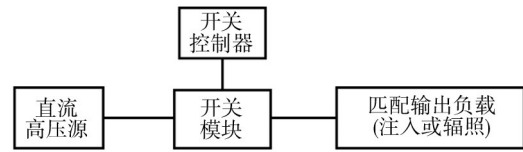


图4 电磁脉冲发生器原理框图
Fig.4 Principle block diagram of HEMP generator

阻性的水电阻。时域波形如图5所示。开展辐照试验,其匹配负载是夹角为 β 的V形板天线,它既是模拟器的辐射天线,又是放电回路的负载。距模拟装置天线口面的0.6 m处,可产生脉冲场强最高为7 kV/m,主要模拟高空核爆源区外空间的辐射场环境。有界波模拟器模拟的电磁脉冲场为垂直方向,与高空电磁脉冲场有一定差异,可做效应试验前的摸底测试,以及小尺寸试验件效应试验。

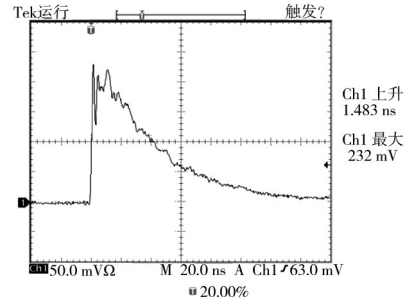


图5 电磁脉冲发生器输出时域波形
Fig.5 Time domain waveform of HEMP generator

2 信号处理模块电磁脉冲试验

2.1 近场辐照试验

被测设备EUT选自某装备上信息处理的模块,它分为两部分:控制电路和数据传输电路。模块正常上电后,数据传输端口发送RS422工作信号。辐照试验采取单部件试验,未连接任何互连设备,只对模块加电,监测信号模块的RS422总线。

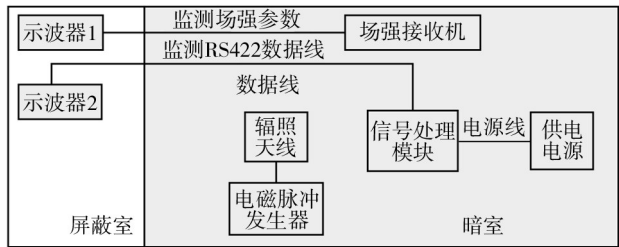
试验时,将如图6所示的模块置于有界波电磁脉冲模拟器工作空间^[10],从低到高调节模拟器工作空间场强,观察被测件的敏感状态及示波器测试结果。考虑入射角度、极化方向以及屏蔽整改措施,在6种测试配置条件下开展测试,见表1。

测试时设定脉冲源的输出电压,固定输出测试5次,记录场强接收机的读数,取平均值作为近场辐照场强,同时观察监测终端的状态,然后逐步提高脉冲源输出,记录下刚出现敏感状态及百分之百敏感状

表 1 辐照测试配置

Table 1 Irradiation test configuration

测试配置	辐照干扰方式	监视终端
1	平放,模块接口与天线口面成 90°	RS422 通讯线
2	平放,模块接口正对天线口面	
3	竖放,模块接口与天线口面成 90°	
4	竖放,模块接口正对天线口面	
5	平放,模块接口与天线口面成 90°,模块及线缆加屏蔽	
6	平放,模块接口与天线口面成 90°,线缆加屏蔽	



其中:
示波器1监测辐照场强
示波器2监测信号处理模块的数据线波形判断输出数据线是否敏感

图 6 信号处理模块 近场辐照试验连接

Fig.6 The near field irradiation test connection diagram for the signal processing module

态时相应的数据。具体见表 2。

表 2 不同测试配置下近场辐照敏感度结果比较

Table 2 Comparison of radiation sensitivity results under different test configuration

测试配置		开始出现敏感		百分百敏感	
		脉冲源输出/kV	辐照场强/V·m ⁻¹	脉冲源输出/kV	辐照场强/V·m ⁻¹
模块平放	模块接口与天线口面成 90 度	1.6	318	2.2	336
	模块接口正对天线口面	1.4	316	1.9	330
模块竖放	模块接口与天线口面成 90 度	1.3	305	1.8	327
	模块接口正对天线口面	1.4	316	1.7	324
模块平放,接口与 天线口面成 90 度	模块及线缆加屏蔽	15	4066	18	4784
	线缆加屏蔽	10	2743	11	3015

表 3 电流注入测试配置

Table 3 Configuration of the pulse current injection test

测试配置	注入干扰方式	监视终端
1	电源正线,单根线注入,无屏蔽	RS422 通讯线
2	电源正线,单根线注入,有屏蔽	
3	电源正/负线,两根线同时注入,无屏蔽	敏感状态
4	电源正/负线,两根线同时注入,有屏蔽	

备阻抗、布线阻抗一定的情况下,脉冲源输出与干扰电流成一定的正比关系。具体见表 4。

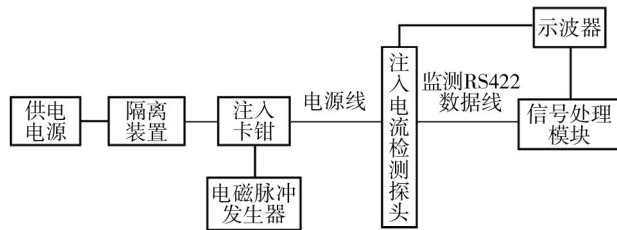
辐照试验与注入试验的结果表明,在工作状态

2.2 电流注入试验

注入试验时,对模块加电,用示波器监测模块接口的 RS422 总线,如图 7 所示。注入试验是对模块电源线进行的,测试考虑了电源高位线、电源高位及回路,以及整改,分别在 4 种条件下开展了测试,具体见表 3。

测试时设定脉冲源的输出电压,固定输出测试 5 次,记录检测探头的读数,取平均值作为线缆感应的干扰电流。同时观察监测终端的状态,然后逐步提高脉冲源输出,记录下刚出现敏感状态及百分百敏感状态时相应的数据。干扰电流与脉冲源的输出电压、测试设备阻抗和布线阻抗均有关系。在测试设

下,随着施加电场强度的增加,模块会出现“复位”形式的失效。这些失效状态是瞬态的,可以自动恢复正常工作,为保护装备的信号处理模块,没有进行更



其中:示波器监测数据线的波形,判断输出数据线是否敏感

图7 信号处理模块电源线电流注入试验连接

Fig.7 The pulse current injection test connection diagram for the signal processing module

大强度的破坏性试验。

3 试验结果分析

1) 信号处理模块在辐照试验和电流注入试验过程中都发生了敏感。这说明两者试验具有一定的替代性,尽管两者并不完全等效,至少电流注入试验可以引起与辐射相近的敏感现象,敏感现象表现为复位。在1.68 s时间内,模块接口无输出数据。敏感时的辐照场强并不高或注入电流强度均不大,天线

表4 注入试验不同测试配置的结果比较

Table 4 Comparison of pulse current injection results under different test configuration

测试配置		出现敏感状态		百分百敏感	
		脉冲源输出/kV	干扰电流/A	脉冲源输出/kV	干扰电流/A
电源正线,单根 线注入	无屏蔽	0.9	4.3	1	4.7
	有屏蔽	4	94.7	4.7	112.8
电源正/负线,两 根线同时注入	无屏蔽	/	/	0.7	6.4
	有屏蔽	2.6	62.8	2.7	67.8

输入脉冲幅度1.3~1.4 kV(相当于辐射场强约为310 V/m),而电流注入4.3 A(单线)或6.4 A(双线)电源线,就会出现敏感。

2) 电磁脉冲敏感的门限和敏感概率。根据试验数据可知,信号处理模块在天线输入脉冲幅度为1.4 kV或电源线输入4.3~6.4 A脉冲电流时,出现了敏感,并且该数值为初次敏感门限值,此时的敏感概率较低。随着输入电压或注入电流增大,敏感的概率也在提高。如输入电压达到2.2 kV以上时,辐照的敏感概率达到100%,这种敏感趋势是很明显的。在试验过程中也会出现敏感现象的断续性,即敏感门限的间断现象。一般认为,这与计算机内部软件的程序运行有关^[11-14],通过同一状态试验次数的增加,可以部分消除这种不确定性。如果这种现象超过了输入电压提高的因素,则需要找到软件运行与敏感性的规律。

3) 模块及接口线缆屏蔽防护对敏感性的影响。对模块及线缆加防护铜网布屏蔽,能有效提高模块抗电磁脉冲的敏感门限。屏蔽分为模块及接口线缆全屏蔽和接口线缆屏蔽,由于模块壳体只有部分屏蔽,接口线只是一般的双绞线,加上防护铜网布屏蔽后,敏感门限值得到较大提高。模块平放测试数据如下:未屏蔽时,敏感门限对应的天线输入脉冲电压为1.4 kV;接口线缆屏蔽后,门限对应的天线输入脉冲电压幅度为10 kV;模块和接口屏蔽后,敏感

门限对应的电压为15 kV。假定天线输入脉冲电压与所激励的电场近似成线性关系,接口线缆屏蔽后,其屏蔽效能为 $SE=17$ dB,完全屏蔽的屏蔽效能为 $SE=20.6$ dB。这说明屏蔽效果是明显的,而且接口线缆的屏蔽作用要优于对模块本身的屏蔽效果。

4) 电流注入量与布线阻抗有关。电源线的电流注入试验,电源线本身是一个回路,或电源线与相应分布参数形成一个回路。由于回路中的负载不同,使得注入电流也不同。

一般注入电流检测卡钳检测到的是卡钳内所有电流总和,由于单纯电源线的负载阻抗较大,注入电流达到数安或数十安时,就会敏感。当注入到屏蔽线时,由于屏蔽层回路阻抗很小,在同样注入脉冲电压时,注入电流会很大。例如当注入电压为0.9 kV时,纯布线的注入电流为4.35 A,有屏蔽层注入电流为22.19 A,注入电流增大5倍。

4 结语

模型计算为电磁脉冲试验提供了理论依据,针对某模块开展的近场辐照和电流注入摸底试验表明,电磁脉冲(上升时间2.5 ns,脉冲宽度23 ns)可使信号处理模块出现复位故障。在复位期间计算机接口无输出信号,该故障属于可靠性的严重故障,下一步须对故障机理进行分析。此外,电流注入试验对

设备电气接口之间的互连电缆上注入干扰很有效。近场辐照的方法,更适用于设备外壳屏蔽、孔缝较多的情况。从试验结果来看,处理模块出现敏感状态和百分之百敏感时,电流注入的输出电压均低于近场辐照时的输出电压。这说明产生同样的敏感状态,脉冲电流注入比近场辐照注入的干扰效率要高些。

电磁脉冲效应随机性很强,各种处理模块的功能组成也不完全相同^[6]。文中对某一部件进行试验研究,试验结果并不能代表所有处理模块的电磁脉冲效应能力。试验表明,该试验方法可行、试验系统可靠,为进一步研究系统装备电子部件的电子脉冲效应提供了借鉴。

参考文献:

- [1] LIBOR P, LUBOS S. High Power Microwave Effects on Computer Networks[C]// York, UK: Proc of the 10th Int. Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC Europe 2011), 2011: 26—30.
- [2] MATS G B. Member, IEEE, Susceptibility of Electronic Systems to High-power Microwaves: Summary of Test Experience[C]// IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2004, 46(3): 396—397.
- [3] RICHARD H, ANDREW L. HPEM and HEMP Susceptibility Assessments of Computer Equipment[C]// 17th International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility, 2006: 168—171.
- [4] DANIEL N, MICHAEL C. Susceptibility of Some Electronic Equipment to HPEM Threats[C]// IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2004, 46(3): 385—388.
- [5] RICHARD H, NIGEL J C, DAVID H. Trends in EM Susceptibility of IT Equipment[C]// IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2004, 46(3): 390—395.
- [6] 李名杰, 刘进. 电子装备面临的强电磁脉冲环境分析[J]. 装备环境工程, 2012, 9(2): 69—73.
LI Ming-jie, LIU Jin. Environmental Analysis of High Power EMP on Electronic Equipment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2012, 9(2): 69—73.
- [7] 周壁华, 陈彬, 石立华. 电磁脉冲及其工程防护[M]. 北京: 国防工业出版社, 2003: 197—211.
ZHOU Bi-hua, CHEN Bin, SHI Li-hua. EMP and EMP Protection[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2003: 197—211.
- [8] 孙荣平, 成本茂, 郭龙. 复杂电磁环境下机载电子设备的电磁兼容仿真研究[J]. 装备环境工程, 2012, 9(2): 57—60.
SUN Rong-ping, CHENG Ben-mao, GUO Long. Study on EMC Simulation of Airborne Avionics under Complex Electromagnetic Environment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2012, 9(2): 57—60.
- [9] 陆峰, 陈彬, 万海军, 等. 小型脉冲电场屏蔽效能测试设备[J]. 高电压技术, 2006, 32(8): 49—51.
LU Feng, CHEN Bin, WAN Hai-jun, et al. Portable Electric Field Shielding Effectiveness Measurement Device[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(8): 49—51.
- [10] 李小伟, 孙凤杰. 系统级电磁脉冲模拟源辐照试验方法[J]. 信息与电子工程, 2012, 10(5): 551—553.
LI Xiao-wei, SUN Feng-jie. System Level Test Method on Electromagnetic Pulse Simulators[J]. Information and Electronic Engineering, 2012, 10(5): 551—553.
- [11] 张春侠, 路静, 周春梅. 飞控计算机电磁脉冲效应试验研究[J]. 核电子学与探测技术, 2012, 32(6): 715—716.
ZHANG Chun-xia, LU Jing, ZHOU Chun-mei. Experimental Study of EMP Effect on Computer of Aircraft[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2012, 32(6): 715—716.
- [12] 周星, 王书平, 魏光辉. 电磁脉冲对数字电路的辐照效应研究[J]. 高电压技术, 2006, 32(10): 46—49.
ZHOU Xing, WANG Shu-ping, WEI Guang-hui. Study on Radiation Effects of EMP on Digital Circuits[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(10): 46—49.
- [13] 侯民胜, 刘尚合, 王书平. 单片机系统在核电磁脉冲辐照下的效应研究[J]. 强激光与粒子束, 2001, 13(5): 521—524.
HOU Min-sheng, LIU Shang-he, WANG Shu-ping. Study on Irradiation Effects of Nucleus Electromagnetic Pulse on Single Chip Computer System[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2001, 13(5): 521—524.
- [14] 陈栋, 许黎明, 李红刚. 电磁脉冲对计算机设备的易感性问题研究[J]. 装备环境工程, 2009, 6(5): 25—27.
CHEN Dong, XU Li-ming, LI Hong-gang. Research on Susceptibility of Computer Equipment under Electromagnetic Pulse Threat[J]. Equipment Environmental Engineering, 2009, 6(5): 25—27.
- [15] 陈伟华, 张厚, 杨宇军. 强电磁脉冲环境下计算机设备的防护[J]. 装备环境工程, 2007, 4(1): 71—74.
CHEN Wei-hua, ZHANG Hou, YANG Yu-jun. Protection of Computer Equipment in Strong Electromagnetic Pulse[J]. Equipment Environmental Engineering, 2007, 4(1): 71—74.
- [16] 常悦, 高聪杰, 陈志文, 等. 电火工品电磁脉冲危害检测及评估方法研究[J]. 火箭与制导学报, 2007, 27(5): 183—185.
CHANG Yue, GAO Cong-jie, CHEN Zhi-wen, et al. Research on the Measurement and Evaluation Method of EED' Electromagnetism Impulse Harm[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2007, 27(5): 183—185.