

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2018.07.039

网络通信端口的电磁脉冲防护研究

王 良, 宋政湘, 要文波, 肖 佳

(西安交通大学, 西安 710049)

摘要: 电磁脉冲能通过天线、线缆、孔洞缝隙等途径,耦合非常高的能量进入电子设备,造成严重威胁。文中针对以太网数据通信端口的电磁脉冲防护问题,在介绍了传输线理论的基础上使用软件分别对平行双导线和双绞线进行了电磁仿真,设计了电磁脉冲防护模块,并通过实验验证了其良好的电磁脉冲防护性能。

关键词: 网络通信端口; 电磁脉冲; 防护

Research on Electromagnetic Pulse Protection for Network Communication Port

WANG Liang, SONG Zhengxiang, YAO Wengbo, XIAO Jia

(Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Electromagnetic pulses can bring high coupling energy into electronic equipment by antennas, cables, gaps, and so on, causing serious threat. To protect the Ethernet data communication port, this paper uses the software to do electromagnetic simulation for parallel double wire and twisted pair respectively based on the theory of transmission line. The electromagnetic pulse protection module is designed and its good performance is verified by experiment.

Key words: network communication port; electromagnetic pulse; protection

0 引言

随着目前信息化和电子化程度的不断增大,电磁脉冲(electromagnetic pulse, EMP)对电子设备的破坏作用所造成的影响也越来越大,这就对电磁脉冲防护技术的可靠性提出了更高的要求。在电磁脉冲的作用下,所有依赖于集成电路的设备都可以被立即破坏或者其功能受到严重的损毁。一些研究表明,电磁脉冲对目标的破坏速度十分迅速,受影响的计算机甚至没有机会来记录发生了什么。事实上,电磁脉冲是数据中心最大的威胁之一。据发达国家的保守估计,由于雷电电磁脉冲导致的计算机网络失效或损坏,平均每年约占全部故障的70%^[1]。在这样的背景下,有关电磁脉冲干扰损伤效应的实验、机理、工程防护技术的研究就成为了世界范围内的研究热点^[2-11]。

随着传统高压电器逐渐向智能高压电器发展以及电磁环境变得日益复杂,电磁脉冲对智能高压

电器产品的威胁也越来越大,因此研究能够对抗多种电磁脉冲的防护技术对提高智能高压电器的可靠性,保证其安全运行具有重要意义。

在电气电子系统中,电缆或导线用于连接不同的系统,并实现电子设备之间能量与信息的有效传输。随着数字设备和集成电路的广泛使用,由于电子设备或系统对雷电、开关操作、核爆炸等引起的瞬态电磁场特别敏感,所以空间电磁场通过电缆的电磁耦合作用产生的电磁干扰就受到了广泛关注^[12-16]。网线作为综合工程布线中最常用的一种传输介质,其在智能高压电器领域也应用十分广泛,是智能高压电器产品中重要的通信端口。当它受到电磁脉冲的辐照时,将会对与之相连的元件、设备产生干扰甚至损伤。因此,为了保护网络的正常、安全通信,进而确保智能高压电器的可靠运行,需要在网络通信端口进行电磁脉冲防护。

1 电磁脉冲及其耦合效应分析

1.1 典型电磁脉冲

电磁脉冲是一种瞬态现象,从时域波形看,一

般具有陡峭的前沿,宽度较窄;从频域看,则覆盖了较宽的频带。

目前的电磁环境往往是多种电磁能量共同作用的复合环境,既有自然电磁干扰源,如静电、雷电等,又有强烈的人为干扰源,如各种新型电磁武器。各类复杂的电磁脉冲场构成了高技术条件下的电磁环境,下面将分别介绍静电放电电磁脉冲、雷电电磁脉冲和高空核爆电磁脉冲。

1)静电放电电磁脉冲。静电放电(ESD)是指带电体周围的场强超过周围介质的绝缘击穿场强时,因介质产生电离而使带电体上的静电荷部分或全部消失的现象。在静电放电过程中会产生上升时间极快、持续时间极短的初始大电流脉冲,并产生强烈的电磁辐射形成静电放电电磁脉冲(ESD EMP),它的电磁能量往往会引起电子系统中敏感部件的损坏,从而造成事故。

2)雷电电磁脉冲。自然界中的雷电现象也是一种强大的脉冲放电现象,一次闪电平均含有上万个脉冲放电过程,电流脉冲平均幅值为几万安培,持续时间几十到几百微秒,闪电通道大约有几百米至几公里长。雷云与大地之间的导体所产生的静电感应效应和雷电流辐射的电磁场所产生的电磁感应效应是产生雷电电磁脉冲的两种主要方式。

3)高空核爆电磁脉冲。高空核爆电磁脉冲通常指核弹在 100 km 以上高空区域爆炸时产生的电磁脉冲。核爆炸释放出极强的 γ 射线,由康普顿效应产生径向往外运动的高速康普顿电子流。为了平衡康普顿电流,在电场的作用下,出现与康普顿电流相抗衡的回电流,即欧姆电流。康普顿电流和欧姆电流激励出向外辐射的高能电磁脉冲,形成高空核爆电磁脉冲。

1.2 电磁脉冲耦合途径

由于电子设备往往处在壳体内部,电磁脉冲对其主要的影响途径有两个:一是电磁脉冲通过孔缝耦合进入屏蔽体内部,形成次级电磁脉冲,耦合后的次级电磁脉冲比外面的电磁脉冲小得多,其直接作用于电子设备的干扰较小;二是电磁脉冲作用于设备或系统间的连接电缆,在电缆上耦合出较大的感应电压和电流,此感应电压和电流通过接口电路对设备形成干扰或损伤,即场线耦合干扰。

当较强的电磁脉冲作用在通信电缆上时,将在网线上产生电压、电流,产生的电压和电流将会通过 RJ45(Registered Jack 45)接口进入网卡电路,形成干扰。当外界电磁脉冲较大的时候,该耦合电压将会有较高的峰值,并且会在外界电磁脉冲消失后才

逐渐衰减。由于该感应电压的峰值较大,且在衰减过程中电压和电流振荡剧烈,很可能改变传输线上的正常电位变化,干扰传输线上的正常数据传输,使数据传输出现错误,造成通信失败。若外界电磁脉冲的强度很高,耦合电压和电流的峰值也会非常高,当这个耦合电压沿传输线到达网卡时,有可能击穿网卡滤波电路中的电容,造成网卡电路的接口永久性损坏。

1.3 传输线理论

在实际工程中,研究传输线受外场的耦合干扰时主要采用 Taylor 方法和 Agrawal 方法^[17-19],其中 Agrawal 方法使用更为广泛。在均匀平面波的激励下,单导体传输线的模型见图 1,导体传输线方程的 Agrawal 模型见式(1)。

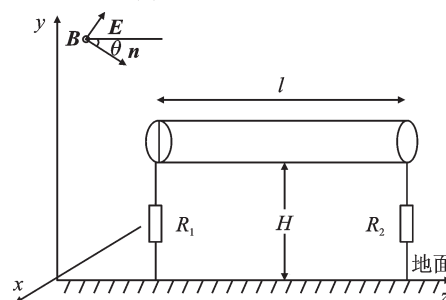


图 1 平面波激励下单导体传输线

Fig. 1 Single conductor transmission line under plane wave

$$\begin{cases} \frac{\partial u^s(z,t)}{\partial z} + L \frac{\partial i(z,t)}{\partial t} = e(z,t) \\ \frac{\partial i(z,t)}{\partial z} + C \frac{\partial u^s(z,t)}{\partial t} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中: $e(z,t) = e_z^i(y,z,t)$ 是由入射电磁场引起的分布电压源; $u^s(z,t)$ 为线上散射电压; $i(z,t)$ 为线上电流; L 和 C 是分布电参数,线上总电压是散射电压和入射电压之和

$$u(z,t) = u^s(z,t) + u^i(z,t) \quad (2)$$

$$u^i(z,t) = -\int_0^y e_z^i(y,z,t) dy \quad (3)$$

求解式(1)得

$$\begin{cases} u^s(0,t) = Z_C i(0,t) + u^s(l,t-T) - Z_C i(l,t-T) + 2E^{s-}(0,t) \\ u^s(l,t) = -Z_C i(l,t) + u^s(0,t-T) - Z_C i(0,t-T) + 2E^{s+}(l,t) \end{cases} \quad (4)$$

式(4)中: Z_C 为特征阻抗; E^{s-} 为分布源的后向电压波; E^{s+} 为分布源的前向电压波;且

$$\begin{cases} E^{s+}(z,t) = \frac{1}{2} \int_0^z e(\zeta, t - \frac{z-\zeta}{v}) d\zeta \\ E^{s-}(z,t) = \frac{1}{2} \int_l^z e(\zeta, t + \frac{z-\zeta}{v}) d\zeta \end{cases} \quad (5)$$

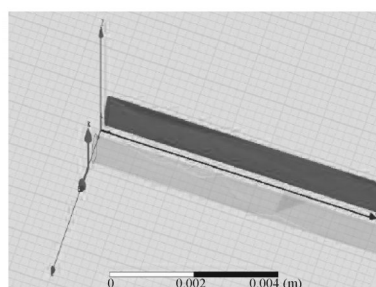
式(4)表明,左端的散射电压包括左端电流的贡

献、左端后向分布源的贡献、右端散射电压的贡献和右端电流的贡献;右端的散射电压包括右端电流的贡献、右端前向分布源的贡献、左端散射电压的贡献和左端电流的贡献。求得电缆两端的散射电压后,还要再加上由入射场引起的激励源,则电缆两端的总电压为

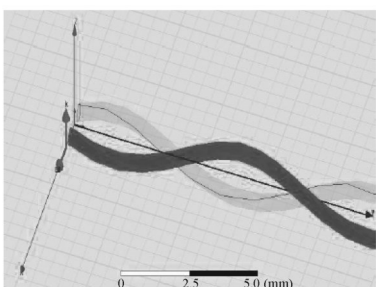
$$\begin{cases} u(0,t) = u^s(0,t) + u^i(0,t) \\ u(l,t) = u^s(l,t) + u^i(l,t) \end{cases} \quad (6)$$

1.4 电磁脉冲对传输线的耦合仿真

为了达到对照试验的目的,建立了平行双导线和双绞线的对比仿真,通过对比传输线类型来得出两种传输线各自的特性。建立模型过程中,对于平行双导线,设定导线中心间距为1 mm,导线自身半径为0.2 mm,导线长度为1 m,导线的材料选取为铜,外部空间材料选取为真空。对于双绞线,其他参数与平行双导线一致,绞距设置为10 mm,即在1 m长的双绞线中,具有100个绞距周期。对于入射波,该实验采取平面波入射,通过观察传输线终端的响应来分析实验结果;仿真采取的边界条件为辐射边界条件,利用HFSS软件对平行双导线和双绞线进行建模仿真见图2。



(a) 平行双导线



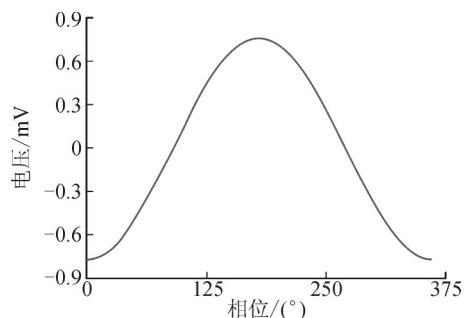
(b) 双绞线

图2 HFSS软件对传输线建模

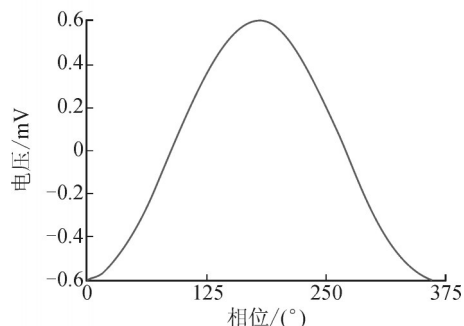
Fig. 2 Transmission line model in HFSS software

如图2所示,在图2(a)中建立平行双导线模型,导线横截面位于 xoz 平面内,沿 y 方向的长度为1 m。在图2(b)中建立双绞线模型,导线的横截面为半径为0.2 mm的圆面,位于 xoz 平面内,沿 y 方向的长度也为1 m。

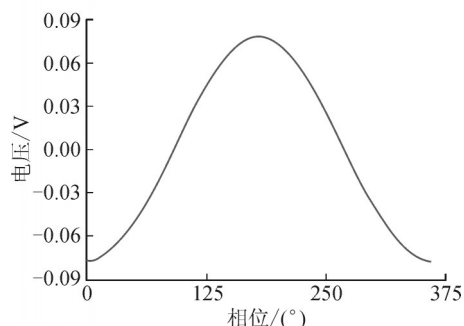
通过改变入射波场强的大小,先后采用 $E=(1,0,0)$ V/m 和 $E=(100,0,0)$ V/m 分别对平行双导线和双绞线进行电磁仿真,其结果见图3。



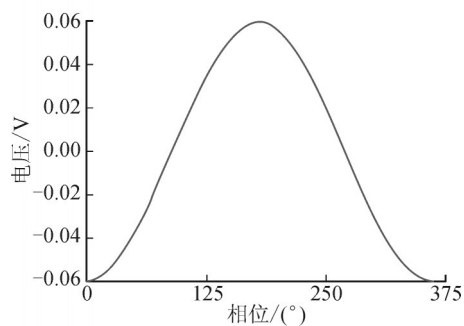
(a) 平行双导线在场强1 V/m下的响应



(b) 双绞线在场强1 V/m下的响应



(c) 平行双导线在场强100 V/m下的响应



(d) 双绞线在场强100 V/m下的响应

图3 两种传输线在不同场强下的响应特性

Fig. 3 Response characteristics of two transmission lines under different field intensities

利用积分公式分别计算平行双导线和双绞线在电场强度分别为 $E=(1,0,0)$ V/m, $E=(100,0,0)$ V/m, $E=(50\,000,0,0)$ V/m 和 $E=(100\,000,0,0)$ V/m 激励下的终端响应电压差的幅值,结果见表1。

表1 不同场强下两种传输线的终端响应
Table 1 Terminal responses of two transmission lines
under different field intensities

场强/ ($V \cdot m^{-1}$)	平行双导线终端的电压	双绞线终端的电压
	差幅值/V	差幅值/V
1	0.000 64	0.000 59
100	0.064 00	0.059 00
50 000	32.060 00	29.740 00
100 000	64.120 00	59.490 00

根据表1中数据可以看出,与平行双导线相比,双绞线具有更好的抑制耦合电压的作用。同时也可以看出,当较强的电磁脉冲入射时,双绞线终端的电压差幅值已经超过了网络通信端口的安全工作电压,因此需要在网络通信端口设置电磁脉冲防护模块来保护设备的安全运行。

2 防护模块设计与测试

2.1 防护模块设计

低通滤波器可以允许低频信号通过而对高频信号产生较大的抑制衰减,因此,通过在网络通信端口加装低通滤波器,可以对高频电磁脉冲进行有效的抑制,而不影响低频有用信号的传输。网络通信设备之间是利用RJ45网线接口来进行连接的,其网线插头由八芯双绞线构成,在实际使用中,通常只使用1和2、3和6这两对双绞线,一对双绞线用于发送数据,另一对用于接收数据,因此需要设计两个相同的滤波器分别供给两对双绞线使用。

由于电磁脉冲的能量很大,单独使用滤波器往往效果不明显,因此在电磁脉冲防护中,滤波器常与浪涌保护器一起使用,常用的保护元件有气体放电管、压敏电阻和瞬态抑制二极管(TVS)等。

气体放电管内充有一定浓度的惰性气体,当管两端电压超过击穿电压时,管内气体电离,接近短路状态,进而转移掉大部分的瞬态能量。气体放电

管具有很高的绝缘电阻和很小的寄生电容,不会对设备的正常工作产生有害影响,但其对浪涌电压的响应速度较低,所以常位于多级保护电路中的第一级或者前两级。

压敏电阻具有很强的通流能力且响应速度为纳秒级,保护过程中压敏电阻将主要的脉冲能量吸收并转化成热能,常用在电源线路浪涌抑制装置的前级保护电路中。

TVS是一种二极管形式的高效能电路保护器件,作为一种常用的限幅器件,它是电压钳位型的,可以吸收高达数千瓦的浪涌能量。在反向应用条件下,当TVS受到一个高能量的大脉冲冲击时,其工作阻抗能以 10^{-12} s量级的速度快速降至极低的导通值,使得大电流能够通过,并且把电压抑制在预定水平,从而有效保护后续电路中的精密电子元件。但作为半导体器件,结电容成为它不能忽视的参数,且结电容随着通流能力、工作频率和温度的上升有明显的增大。

为了使防护模块能够应对各种类型的电磁脉冲,最终根据防护模块的实际性能需要以及滤波器的特点,选择三阶T型巴特沃斯低通滤波器。对于瞬态保护器件的选择,在对抗众多不同类型的电磁脉冲时,单一的保护器件很难有效地完成抑制电压和能量的任务,所以只有将各种类型的保护器件有效组合,合理地利用它们的优点,才能更好地完成保护任务。

最终防护模块的电路原理图见图4。一级保护电路使用气体放电管,主要泄放大能量的电磁脉冲,对一些前沿较快的脉冲,气体放电管也可以在响应后泄放一部分的能量。二、三级保护电路采用TVS和二极串联的结构,并将二极管以正向和反向分别接入电路,从而在降低滤波模块受TVS结电容影响的同时,使得快上升前沿的电磁脉冲得到泄放,保证防护模块输出端脉冲抑制的可靠性。

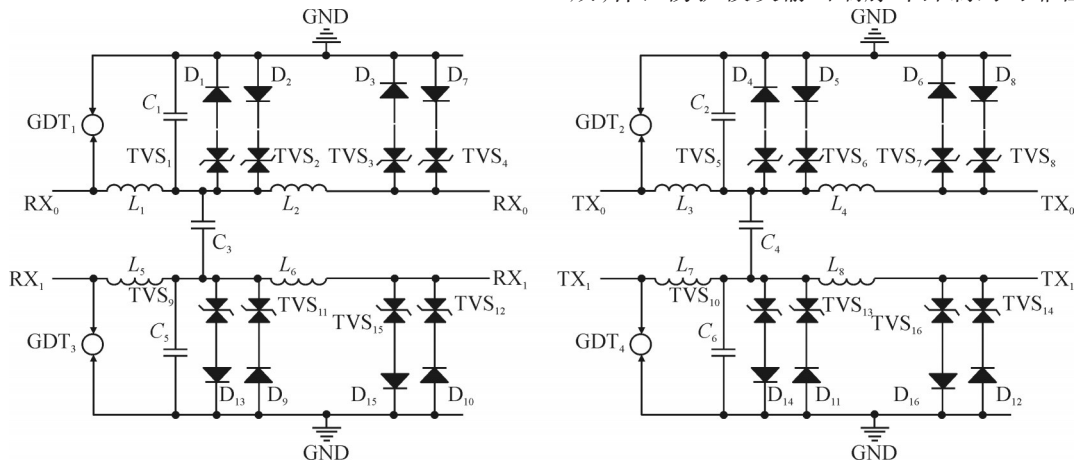


图4 防护电路图

Fig. 4 Protection circuit diagram

2.2 防护模块测试与分析

在现代电子设计中,对设计对象进行电快速瞬变脉冲群(electrical fast transient/burst,EFT/B)抗扰度试验,是验证电子设备抗高频传导干扰的重要手段。因此,利用EFT实验对防护模块进行测试,得到的输入和输出电压峰值见表2,当脉冲频率为5 kHz,一簇脉冲的持续时间为15 ms,脉冲电压峰值为5 000 V时,输出的电压波形见图5。图5中:①为输入电压峰值;②为输出电压峰值。

表2 防护模块EFT实验测试结果

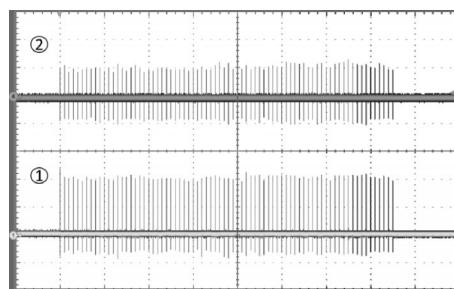
Table 2 Test results of the protection module in the EFT experiment

脉冲频率/一簇 持续时间	脉冲电 压峰值/V	一簇脉冲中输 入电压峰值/V	一簇脉冲中输 出电压峰值/V
5 kHz/15 ms	1 000	800	128
	2 000	1 260	160
	3 000	1 440	190
	4 000	1 680	205
	5 000	1 920	220
	1 000	840	112
100 kHz/750 μ s	2 000	1 200	144
	3 000	1 560	200
	4 000	1 800	250
	5 000	1 900	240
	1 000	850	92
	2 000	1 200	136
1 MHz/75 μ s	3 000	1 500	192
	4 000	1 720	208
	5 000	1 850	230

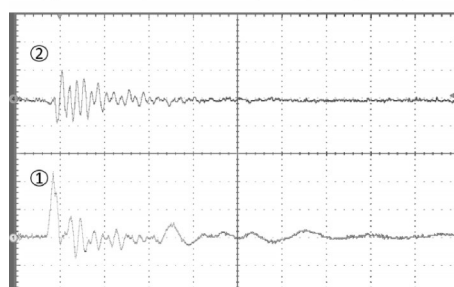
根据表2中数据可以看出,气体放电管在首级对大功率电磁脉冲有很好的抑制效果,峰值为5 000 V的不同频率的脉冲电压在输入端均被限制在1 900 V左右,通过滤波模块和二、三级保护电路后,电磁脉冲被进一步抑制,在输出端电压峰值仅有230 V左右,证明了防护模块对电磁脉冲有良好的抑制效果。通过进一步调整电路参数,防护模块就可以实现将电磁脉冲电压限制在网络通信端口的安全工作电压之内,从而保证网络的安全通信。

3 结语

文中在运用软件仿真分析了电磁脉冲和线缆的耦合效应的基础上,设计了网络通信端口的电磁脉冲防护模块,通过EFT实验验证了防护模块承受大能量电磁脉冲以及快速响应的能力,证实了该模块具有良好的电磁脉冲防护性能。



(a) 5 000 V (5 kHz/15 ms) EFT实验输出波形



(b) 5 000 V (5 kHz/15 ms) EFT实验局部输出波形

图5 防护模块EFT实验测试波形

Fig. 5 Test waveforms of the protection module in the EFT experiment

参考文献:

- [1] 吕文红. 电磁兼容原理及应用教程[M]. 北京:清华大学出版社,2008.
LYU Wenhong. Electromagnetic compatibility principle and application course[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2008.
- [2] BAUM C E. From the electromagnetic pulse to the high-power electromagnetics[J]. Proceedings of the IEEE, 1992, 80 (6):789-817.
- [3] 郑 笛,王璐静,任凯奇. 强电磁脉冲对计算机电缆的注入毁伤效应研究[J]. 无线电工程,2016,46(8):79-82.
ZHENG Jun, WANG Lujing, REN Kaiqi. Study on damage effect of high electromagnetic pulse injecting computer cable interfaces[J]. Radio Engineering, 2016, 46(8): 79-82.
- [4] 王立蒙. 电磁脉冲弹对典型电子器件的毁伤机理[D]. 太原:中北大学,2016.
WANG Limeng. Damage mechanism of electromagnetic pulse bomb on typical electronic devices[D]. Taiyuan: North University of China, 2016.
- [5] 杨 阳. PIN二极管在快上升沿电磁脉冲下的毁伤机理研究[D]. 西安:西安电子科技大学,2011.
YANG Yang. Research on the damage mechanism of the PIN diode under EMP with fast rise time[D]. Xi'an: Xidian University, 2011.
- [6] 卢新科. 电磁脉冲的耦合及防护[D]. 西安:西安电子科技大学,2009.

- LU Xinke. EMP coupling and EMP protection[D]. Xi'an: Xidian University, 2009.
- [7] 舒志强. 核电脉冲耦合及防护研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2009.
- SHU Zhiqiang. Analysis of NEMP aperture coupling and protection[D]. Xi'an: Xidian University, 2009.
- [8] 李刚, 毕军建, 刘尚合, 等. 超宽谱电磁脉冲对无线电引信的耦合及防护加固[J]. 强激光与粒子束, 2006, 18(8): 1332-1336.
- LI Gang, BI Junjian, LIU Shanghe, et al. Coupling mechanism between radio fuzes and ultra band spectra electromagnetic pulse and enhancement of radio fuzes[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2006, 18(8): 1332-1336.
- [9] 颜克文, 阮成礼, 梁源, 等. 通信设备天线端口电磁脉冲防护技术研究[J]. 舰船电子工程, 2012, 32(8): 61-63.
- YAN Kewen, RUAN Chengli, LIANG Yuan, et al. Research on electromagnetic pulse protection technology for antenna port of communication equipment[J]. Ship Electronic Engineering, 2012, 32(8): 61-63.
- [10] 余绍斌. 核电脉冲及其工程防护[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2008.
- YU Shaobin. NEMP and NEMP protection[D]. Xi'an: Xidian University, 2008.
- [11] 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 Weihua, ZHANG Hou, YANG Yujun. Protection of computer equipment in strong electromagnetic pulse[J]. Equipment Environmental Engineering, 2007, 4(1): 71-74.
- [12] 衣斌. 空间电磁脉冲作用下屏蔽电缆的耦合规律研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2008.
- YI Bin. Research on the law of electromagnetic pulse coupling to the shield cable[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2008.
- [13] 丁昱. 核电脉冲线缆耦合效应研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2009.
- DING Yu. Research on effect of cable coupling of NEMP[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2009.
- [14] 梁志强. 电磁脉冲的传导防护研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2010.
- LIANG Zhiqiang. Study of conduct protection against electromagnetic pulse[D]. Xi'an: Xidian University, 2010.
- [15] 刘伟. 典型电子系统电磁脉冲效应及防护实验研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2015.
- LIU Wei. Experimental research on electromagnetic pulse effect and protection of the typical electronic systems[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2015.
- [16] 詹铁坚. 电磁脉冲滤波器设计技术[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2010.
- ZHAN Tiejian. Electromagnetic pulse filter design technology[D]. Xi'an: Xidian University, 2010.
- [17] 张琦, 周颖慧, 邵志学, 等. 电缆EMP耦合SPICE模型仿真分析方法[J]. 安全与电磁兼容, 2013(1): 65-67.
- ZHANG Qi, ZHOU Yinghui, SHAO Zhixue, et al. Study on the evaluation method for EMP coupling to the cable[J]. Safety & EMC, 2013(1): 65-67.
- [18] TESCHE F M, IANOS M V, KARLSSON T. EMC analysis methods and computation models[M]. New York: John Wiley & Sons Press, 1996.
- [19] 谢彦召, 王赞基, 王群书. 地面附近架空线缆HEMP响应计算的Agrawal和Taylor模型比较[J]. 强激光与粒子束, 2005, 17(4): 575-580.
- XIE Yanzhao, WANG Zanji, WANG Qunshu. Comparison of agrawal and taylor models for response calculations of aboveground cable excited by HEMP[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2005, 17(4): 575-580.
- 王良(1994—), 男, 硕士研究生, 主要从事电磁脉冲防护方面的研究。
- 宋政湘(1970—), 男, 教授, 主要从事电器智能化理论与技术、电器计算机辅助设计与仿真、数字电路故障诊断、电磁兼容等方面的研究。