

文章编号: 1672-2892(2012)05-0551-04

系统级电磁脉冲模拟源辐照试验方法

李小伟, 孙凤杰

(中国工程物理研究院 电子工程研究所, 四川 绵阳 621900)

摘 要: 对全系统进行了抗电磁脉冲分析, 分别阐述了系统各耦合环节辐照试验技术和全系统考核验证试验技术。针对高空核爆产生的高空电磁脉冲对地面电子学系统产生的耦合效应情况, 分析在系统内部和外部产生感应电流和感应电压的过程; 在不同的屏蔽条件下, 全系统不同部分将面临不同的耦合效应, 采用不同的实验测试方法。重点分析了高空电磁脉冲对电子学系统的作用, 在系统内部和外部产生感应电流和感应电压的过程; 阐述了不同模拟试验对应的具体对象, 并对不同模拟试验方法进行了介绍。

关键词: 全系统; 电磁脉冲; 耦合环节; 考核验证

中图分类号: TN911.7

文献标识码: A

System level test method on electromagnetic pulse simulators

LI Xiao-wei, SUN Feng-jie

(Institute of Electronic Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621900, China)

Abstract: This paper analyzes Electromagnetic Pulse(EMP) effects on the whole system, expatiates on the testing techniques of each coupling point and the experimentation validation techniques of the whole system. High altitude Electromagnetic Pulse(HEMP) produced by nuclear explosion is a big threat to electronic systems on the ground. Some of them are exposed to the field directly, some are in a shield, and others are exposed partly. Therefore, HEMP field should be analyzed firstly before analyzing the HEMP effects on an electronics system. The HEMP effects and the generation processes of the voltage and current induced inside and outside the system are analyzed in detail; different simulation tests and the special objects corresponding to them are introduced.

Key words: the whole system; High altitude Electromagnetic Pulse; coupling point; experimentation validation

评价电子学系统的抗高空电磁脉冲能力, 需要对全系统进行高空电磁脉冲环境试验考核; 提高电子系统抗高空电磁脉冲能力, 即对电子学系统进行抗高空电磁脉冲加固, 需要从系统各耦合环节进行试验考核, 并进行电子学系统整体考核试验分析。

高空核爆产生的高空电磁脉冲对地面电子学系统有很大的威胁, 有些系统直接暴露在场环境下, 有些系统在屏蔽体内, 有些系统一部分直接暴露, 一部分在屏蔽体内。因此, 分析一套电子学系统高空电磁脉冲效应情况, 应首先分析各部分面临的高空电磁脉冲环境。系统的屏蔽情况有多种, 对于一般屏蔽腔体, 首先考虑腔体的屏蔽系数, 针对高空电磁脉冲主要考虑 100 kHz~500 MHz 的屏蔽系数^[1]。

1 电子学系统高空电磁脉冲效应分析

在系统中, 屏蔽体上由于通风、散热等原因或多或少存在一些孔缝, 这些孔缝有大有小, 形状也各种各样, 如何分析孔缝对腔体内系统的影响? 首先是电磁脉冲正面衍射进腔体, 这种情况主要是因为孔缝面对电磁脉冲传播方向过大; 其次分析电磁脉冲在腔体表面产生的表面电流被孔缝切割情况, 孔缝切割表面感生电流越多, 对腔体辐射越强。

电子学系统各组件及组件之间存在缆线,各缆线的屏蔽情况对电磁脉冲响应情况影响很大,需要讨论如何评价1根缆线的屏蔽情况,线缆所处的场环境及线缆在场中的摆放情况对线缆上感应的电压、电流影响很大。与缆线相连的是接口模块及电源模块,不同的接口模块对应不同的接口协议,接口模块一般含有抗干扰设计,不同模块的抗干扰能力及原理都不相同,因此在分析电子学系统抗高空电磁脉冲能力中,其接口模块分析必为重点;电源模块也有不同的设计原理及加工工艺,其抗干扰能力差异很大,由于电源模块受到干扰,对整个电路影响很大,因此,电源模块在一定程度上采取了防护措施,但其防护效果如何还需要效应试验检验。

电子学系统各组件间通信信号的特征分析,主要有信号工作电压即幅度、传输信号工作频率和传输信号占空比。高电压幅度能一定程度上提高抗干扰能力,其负面影响带来高功耗;传输信号脉宽接近或小于耦合干扰半高宽,其影响尤为明显;传输信号占空比对系统抗干扰能力影响很大,这与耦合干扰的正负向及接口模块功能有关。

高空电磁脉冲对电子学系统的作用,在系统内部和外部产生感应电流和感应电压的过程如下:

a) 高空电磁脉冲在电子学系统金属外壳表面形成的表面电荷和表面电压,可以对其内部系统产生影响。其影响程度主要取决于电子系统外壳金属种类、厚度和形状;

b) 通过起天线作用的传输线(如电缆、构架和电线等)传导系统的内部感应电流;

c) 高空电磁脉冲通过外壳的窗口缝隙,穿透到系统内部,直接与系统发生作用。

通常电缆是核电磁脉冲引起电子系统损伤的主要环节。对于屏蔽良好的电缆,核电磁脉冲可以在电缆的屏蔽层上感应电流和电压。如果电缆的屏蔽层接地,这种感应电流和电压可以沿屏蔽罩流入大地。无论接地与否,感应电流和电压都可以通过电容耦合和电感耦合在电缆上产生电流。但屏蔽不良的电缆,例如编织的屏蔽层,由于有许多小孔,电场和磁场可以通过小孔穿透到屏蔽层内部,直接在电缆芯线上感应很大的电流和电压。

2 电子学系统整体辐照试验技术

2.1 实验技术的基本考虑

电子学系统在面临高空电磁脉冲时,高空电磁脉冲的高频部分对屏蔽腔体的孔缝及通信端口影响严重;高空电磁脉冲的低频部分,对线缆及系统供电部分影响较大。为了对全系统进行抗电磁脉冲分析,分两个方面进行试验技术研究:一是系统各耦合环节电磁脉冲辐照试验技术研究;二是全系统考核试验验证技术研究。

a) 系统各耦合环节电磁脉冲辐照试验技术研究

在对全系统状态全面了解的基础上,分析对电磁脉冲耦合敏感的各耦合环节、关键通道。各耦合环节与关键通道主要有:电子学系统各组件间连接电缆(含信号线和电源线);各组件上的接口模块、核心电路、电源模块、信号滤波模块、电源滤波模块、腔体孔缝耦合、天线耦合、波导通道耦合等。各个环节与通道可以通过单独的试验进行研究,也可以多个相关的部分连接起来进行整体试验,监测各关键点的耦合情况进行试验研究。

b) 全系统电磁脉冲考核试验验证技术研究

这里的全系统指的是与高空电磁脉冲耦合直接相关的电子学系统。对该系统进行整体电磁脉冲考核验证试验需要解决以下几个问题:

第1,系统发送信号实时监测;第2,系统接收信号实时监测;第3,辐射波模拟器场强需要达到威胁级。满足了以上条件则可以通过多种状态、多次试验进行考核验证试验。前面2条可以通过产品方和测试方共同努力来解决,若第3条不能满足,即辐射波模拟器场强不够强,只能达到响应级水平,解决考核验证问题的方法如下:通过多种状态、多次试验,得到辐射波模拟场下各耦合环节、系统各关键通道的感应电流、感应电压的峰值及波形,按照实测结果换算到考核指标环境下对应的耦合电流、耦合电压峰值数据,利用电流注入试验进行效应试验并分析结果,最终完成考核试验验证。

电磁脉冲辐照试验技术研究从电磁脉冲模拟源的不同,可以分为以下3种试验技术。

2.2 有界波模拟器电磁脉冲效应摸底试验技术

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。受模拟器的工作场区限制,只能做辐射波模拟器效应试验前联试及小尺寸试验件效应试验、小尺寸腔体屏蔽系数测量以及短试验电缆耦合系数测试等电磁脉冲效应试验^[2-4]。试验状态示意图见图1。

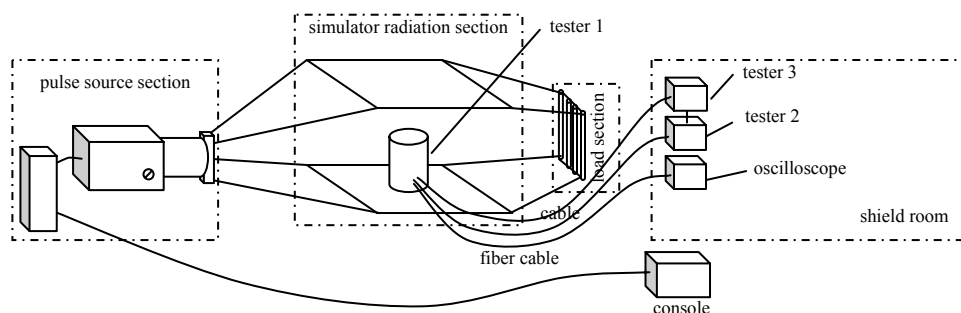


Fig.1 Sketch map of bounded wave simulator experiment
图 1 有界波模拟器试验摆放示意图

2.3 辐射波模拟器电磁脉冲效应试验验证技术

辐射波电磁脉冲模拟器可以进行系统级验证试验，目前试验用电磁脉冲辐射模拟器采用某部 DMF-1000 水平极化辐射波模拟器。EMP 模拟器由高压脉冲源、辐射天线和控制系统 3 部分组成。辐射天线由双锥天线和双锥天线两边的笼形圆柱水平振子天线组成。EMP 的高频部分由双锥天线辐射产生，低频部分由圆柱形水平振子长天线提供。Marx 发生器和主开关位于双锥天线的顶部。天线的两边分别充正、负高电压。当正、负电压差达到某一额定值时，主开关自击穿导通。导通瞬间，天线两边各形成一个与充电电压极性相反的阶跃脉冲电压波并沿天线传播，由此而形成的天线瞬态电流，在天线周围产生 1 个向外辐射的 EMP 场，其电场极化方向近似平行于地面。其结构如图 2 所示。DMF-1000 水平极化辐射波模拟器笼形水平振子天线的总长度 200 m，天线中心的高度约为 13 m，天线笼的最大直径为 3 m。

该模拟器在离天线中心与轴线垂直方向 30 m 远、离地面高度 3 m 处场强约 10 kV/m，在 20 m 远，离地面高度 3 m 处场强约 15 kV/m。波形前沿约 5 ns，脉冲宽度约 20 ns^[5-6]。试验状态示意图见图 2。

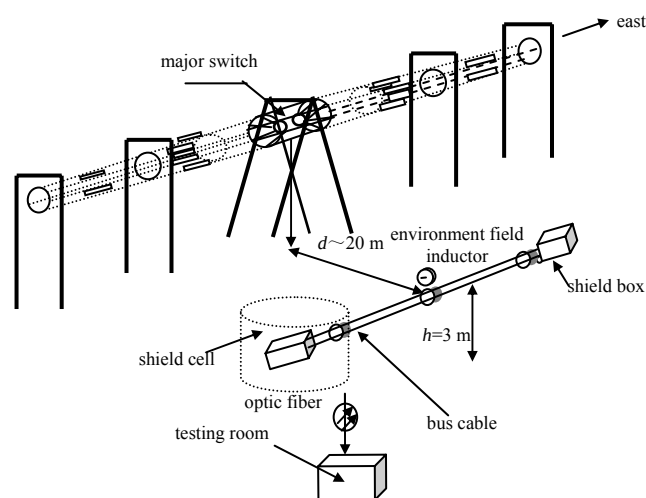


Fig.2 Diagram of radiated wave simulator experiment
图 2 试验现场布局示意图

2.4 电流注入法试验分析技术

电流注入法适用范围很广，可以用来做线缆的芯线耦合效应试验，器件及电路模块的阈值测定，以及电磁脉冲辐射波效应试验的补充。主要的注入方法有以下 3 种。

a) 信号合成法

数值电路及电路模块瞬时干扰注入法实验电路如图 3 所示。信号源为方波，干扰源可以为方波、双指数波；信号合成器是为了减少 2 个源之间发生相互影响及保证合成信号稳定；测量仪器分别对图中各点进行电压电流监测。所有电路共地。

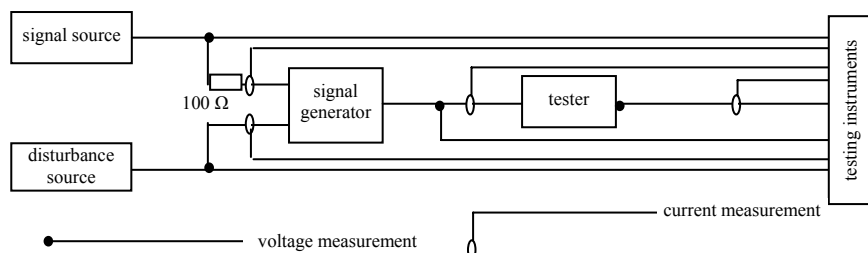


Fig.3 Diagram of current injection method for instantaneous disturbance to semiconductor discrete devices
图 3 半导体分立器件瞬时干扰注入法连线图

b) 局部耦合法

简单地讲，就是利用线圈辐射电磁脉冲的原理，对线圈注入电流，使线圈中心产生电磁脉冲场，对通过线圈

中心的线缆耦合感应电流、感应电压, 试验原理见图 4, 图中干扰源对线圈输入电流, 在线圈内产生脉冲电磁场, 穿过线圈的电缆将受到局部耦合。这种试验方法优点是试验电路不被破坏, 可以多点同时注入等量耦合电流。一些多传输线的接口模块采用这种实验方法, 可以同时多条传输线进行等量干扰, 耦合电流比较接近电磁脉冲效应的实际情况。

c) 三平行注入法

三平行实验装置适合于多种电缆的耦合效应研究。电缆始端的所有芯线均与屏蔽层(外皮)短路, 电缆末端的屏蔽层接屏蔽箱, 选不同层的几种芯线, 在芯线与外皮间依次接不同的电阻负载, 用高阻探头测量电阻上的电压(简称芯电压)。芯电压测量系统的光发射机置于屏蔽箱内, 信号由光缆传输, 经光接收机转换后送入示波器记录。皮电流由 Rogowski 线圈探测, 直接由电缆送入示波器记录^[7-8], 见图 5。采用光纤系统的好处是将干扰信号与芯电压信号在时间上分开。

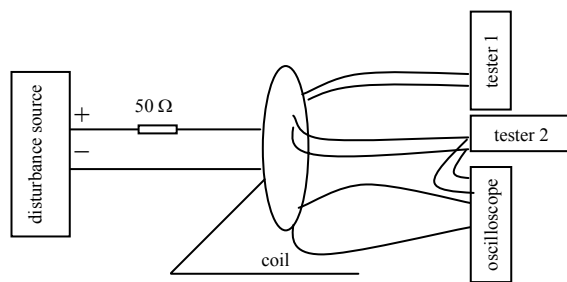


Fig.4 Diagram of local area coupling with coil
图 4 利用线圈局部耦合法框图

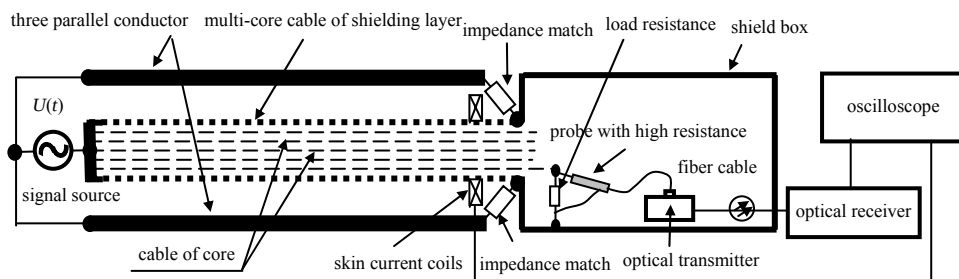


Fig.5 Scheme of EMP coupling test by injecting method of current for multi-core cable
图 5 多芯电缆屏蔽效能测量示意图

3 结论

电子学系统抗高空电磁脉冲辐照试验研究是从系统本身出发, 通过对其结构分析及摸底试验, 找出各耦合环节, 根据各耦合环节及试验条件选择相应的试验方法进行研究。电流注入法试验比较灵活, 适合对系统进行效应试验分析。而辐射波模拟器试验成本高, 试验难度大, 适合做系统考核验证试验。

致谢: 感谢邓建红、许献国、周开明等同志在该研究过程中给予的大力支持。

参考文献:

- [1] Norman J Rudie. Principles and Techniques of Radiation Hardening[M]. 3rd ed. California:Western Periodicals Company, 1986.
- [2] 祝敏,刘顺坤,周辉,等. 电磁脉冲对电缆的耦合效应实验研究[J]. 强激光与粒子束, 2001,13(6):761-765.
- [3] 高成. 地面核爆炸电磁脉冲屏蔽效能及其测量技术研究[D]. 南京:解放军理工大学, 2002.
- [4] 周开明,王艳,谢泽元,等. 一种宽频带小型化光纤电场测量系统的研制[J]. 信息与电子工程, 2010,8(1):30-32.
- [5] 周启明,罗学金,许献国,等. 近地九芯电缆高空电磁脉冲耦合模拟试验[J]. 强激光与粒子束, 2004,16(1):63-67.
- [6] 邓建红,周启明,赵刚,等. 近地面 1553B 通信系统 HEMP 效应试验[J]. 信息与电子工程, 2010,8(3):318-323.
- [7] 周启明,杨蓉,黄聪顺. 九芯电缆 EMP 耦合的电流注入法实验[J]. 信息与电子工程, 2004,2(1):49-53.
- [8] Vance E F. Coupling to shielded cables[M]. Beijing:People's posts and telecommunications press, 1988.

作者简介:



李小伟(1975-), 男, 江西省九江市人, 本科, 工程师, 研究方向为电磁脉冲耦合效应测试及验证评估.email:radylxw@163.com.

孙凤杰(1979-), 女, 黑龙江省佳木斯市人, 硕士, 助理研究员, 研究方向为电磁脉冲耦合。