

文章编号: 1001-4322(2006)06-0972-05

脉冲电场屏蔽效能测试系统及测试方法*

李炎新^{1,2}, 陈 彬¹, 石立华¹, 高 成¹, 万海军¹, 周璧华¹

(1. 解放军理工大学 工程兵工程学院, 南京 210007; 2. 东南大学 信息安全研究中心, 南京 210096)

摘 要: 自主研制了一套小型脉冲电场屏蔽效能测试系统, 该系统由脉冲电场发射设备和脉冲电场测试设备构成。脉冲电场发射设备的天线口面前 60 cm 处可产生峰值达 7.5 kV/m 的脉冲电场, 测试设备的动态测试范围达 97 dB。系统采用光纤测量设备, 在测量工作中能有效抑制强电磁场干扰。采用 Matlab 编写自动测量及数据处理程序, 实现了数据采集与处理自动化。实验测量了金属桥架、控制柜、屏蔽帐篷、导电水泥混凝土房的脉冲电场屏蔽效能, 其脉冲电场峰值衰减量分别为 52, 64, 66, 30 dB。实验表明可用脉冲电场的峰值衰减量来评估屏蔽体的脉冲电场屏蔽效能。

关键词: 脉冲电场; 电磁屏蔽效能; 测量系统; 衰减

中图分类号: TM153; TM835 **文献标识码:** A

脉冲电磁场对电子通信系统的干扰破坏日益受到重视^[1-4], 各种电磁防护屏蔽体得到了广泛应用。国内外测试屏蔽体的屏蔽效能主要采用连续波的分频段测试方法, 我国国标规定的 3 个测试频段为 100 Hz~20 MHz, 300 MHz~1 GHz, 1.7~12.4 GHz^[5]。屏蔽效能测量的特点是测试结果与测试方法密切相关, 不同的方法测得的结果会有较大的差异^[6], 仅用若干个频点的连续波测试结果来评估屏蔽体的脉冲电场屏蔽效能是不全面的。材料的屏蔽效能测试可用窗口法、同轴传输线法, 也可用理论计算^[7]来实现。一个屏蔽体的屏蔽效能不仅与材料有关, 还与其结构的形状、孔缝有关^[8], 用理论计算其屏蔽效能比较困难。文献^[9]报道了脉冲磁场屏蔽效能测试设备和方法。为测量建筑结构、电磁屏蔽室等屏蔽体对脉冲电场的屏蔽效能, 本文报道了一套自主研制的小型化、便于携带的屏蔽体脉冲电场屏蔽效能测试系统, 并介绍了测试方法, 分析了测量结果。

1 脉冲电场屏蔽效能测试系统

1.1 系统结构组成

该系统由脉冲电场发射设备和脉冲电场测量设备组成。

脉冲电场发射设备主要包括高压直流电源, 由脉冲电容与高压放电开关组成的脉冲形成装置, 以及由 V 形加载天线与水负载组成的电场照射器 3 大部分, 如图 1 所示。其中 V 形加载天线是由上下 2 块三角形金属板组成的。发射设备的工作原理如图 2 所示, K 是充电开关, C 是无感脉冲电容, L 是放电回路分布电感, G 是高压放电开关^[10-11], r 是放电回路分布电阻, R 是水负载。高压直流电源对 C 充电至 30 kV, 然后 C 通过 G 激励电场照射器, 电场照射器产生脉冲电场, 在天线口面前 60 cm 处电场峰值可达 7.5 kV/m。整个系统采用紧凑结构, 既能缩小体积便于工程应用, 又能减小放电回路中的分布电感, 减小辐射脉冲电场的上升时间。

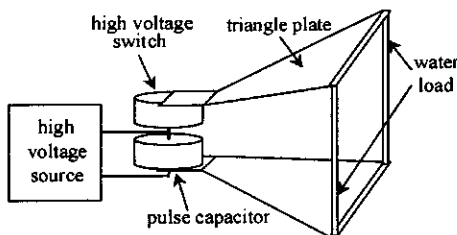


Fig. 1 Structure of pulse electric field emission device

图 1 脉冲电场发射设备的结构

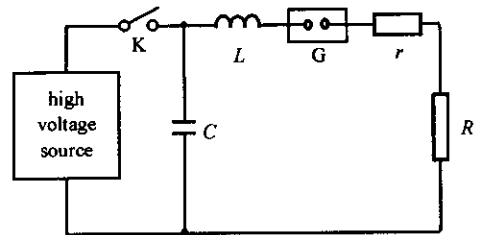


Fig. 2 Principle of pulse electric field emission device

图 2 脉冲电场发射设备的工作原理

由脉冲电场发射设备产生的脉冲电场频带宽, 峰值场强高, 对脉冲电场测量设备有很高的要求。本系统采用单极子电小天线^[12]、光发射机、光纤、光接收机、数字示波器和笔记本电脑组成脉冲电场测量设备, 如图 3 右边虚框中所示。脉冲电场由单极子天线感应, 转换成电压信号后输入到光发射机中; 光发射机将电压信号转换

* 收稿日期: 2005-09-09; 修订日期: 2006-02-23

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(50237040); 国家自然科学基金面上资助项目(60471013)

作者简介: 李炎新(1973—), 男, 讲师, 东南大学博士生, 主要从事电磁兼容、信号与信息处理研究; liyanxin733@sohu.com。

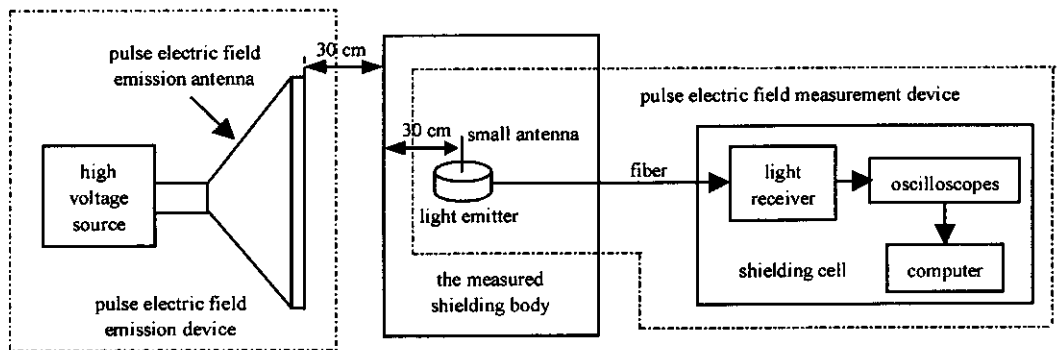


Fig. 3 Diagram of pulse electric field shielding effectiveness measurement

图 3 脉冲电场屏蔽效能测试示意图

成光强度信号并由光纤进行传输；光接收机接收由光纤传来的光强度信号，并将其还原成电压信号。整个过程是“电场-电压-光-电压”转换与传输的过程。光接收机、数字示波器和笔记本电脑放在金属屏蔽柜或屏蔽室中。由于在屏蔽体中测到的场强和在自由空间中测到的场强相差几个数量级，因此该装置采用两个灵敏度不同结构相同的光发射机。高灵敏度的光发射机用于测量屏蔽体中的脉冲电场，灵敏度达 0.1 V/m ；低灵敏度的光发射机用于测量无屏蔽体时的脉冲电场。根据脉冲电场发射设备能产生的最强电场与电场测量设备的最高灵敏度，可以算出系统的脉冲电场屏蔽效能测量动态范围，为 97 dB 。

由于采用光纤取代电缆传输电场信号，该测量系统具有极高的抗电磁场干扰的能力。最后信号被高速数字示波器采集、传送到笔记本计算机，由 Matlab 语言编写的程序进行处理，直接计算出屏蔽效能和频域屏蔽曲线，自动化程度非常高^[13]。

1.2 脉冲电场发射设备辐射的波形

采用电小天线为 5 cm 长的脉冲电场测量设备测试脉冲电场发射设备辐射的电场，结果见图 4(a)和(b)。加在照射器上的电压波形经水阻分压器分压后示于图 4(c)和(d)。测到的电压波形与电场波形一致，上升时间(10%到 90%)均小于 3.3 ns ，下降时间(90%到 10%)均大于 $5 \mu\text{s}$ 。

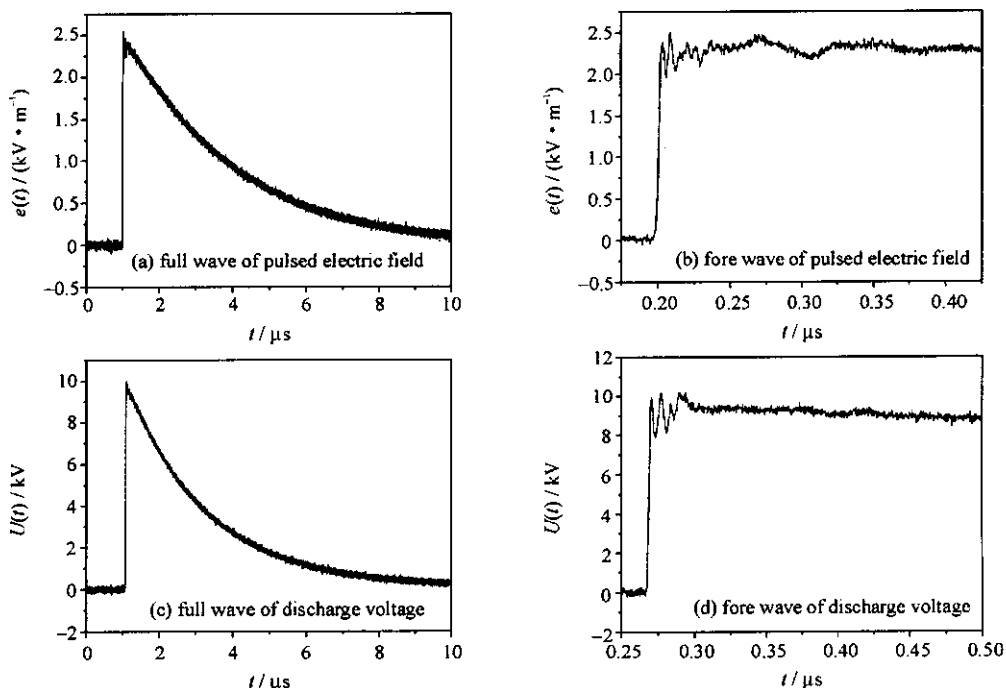


Fig. 4 Measurement example for electric field

图 4 电场测量实例

2 屏蔽体脉冲电场屏蔽效能测试

2.1 脉冲电场屏蔽效能测试方法

屏蔽体的脉冲电场屏蔽效能的测试方法是：首先将低灵敏度的光发射机置于电场照射器轴线上距天线口

面 60 cm 处,测出无屏蔽体时在自由空间中的电场信号 $e_1(t)$;然后,将电场照射器置于屏蔽体外,天线口面距屏蔽体墙壁中心 30 cm,把高灵敏度的光发射机置于屏蔽体内,距墙壁中心 30 cm,如图 3 所示,位置与自由空间中的相同,并保持脉冲电场发射设备放电电压不变,测出屏蔽体内的电场信号 $e_2(t)$ 。由于脉冲电场穿过屏蔽体后波形发生很大的改变,因此屏蔽体的屏蔽特性表示为

$$A(f) = 20\lg | E_1(f)/E_2(f) | \tag{1}$$

式中: $E_1(f)$ 为无屏蔽体时测到的脉冲电场的频谱; $E_2(f)$ 为在屏蔽体内相同距离上测到的脉冲电场的频谱。

因为频域屏蔽特性曲线在工程应用上不太方便,故本文用脉冲电场的峰值衰减来评估屏蔽体的屏蔽效能:

$$A_m = 20\lg \frac{\max(e_1(t))}{\max(e_2(t))} \tag{2}$$

$\max(\cdot)$ 表示取最大值,即取脉冲电场的峰值。

2.2 几种屏蔽体的脉冲电场屏蔽效能测试分析

对金属桥架、控制柜、屏蔽帐篷和导电水泥混凝土房的脉冲电场屏蔽效能各进行 3 次重复测试,重复测试的波形是一致的,只是数值有微小的偏差。测试平均数据见表 1,波形如图 5 至图 8 所示,其中图(a)是在屏蔽体中测到的脉冲电场时域波形,图(b)是屏蔽体的频域屏蔽特性曲线。从表 1 和图 4 至图 8 的比较分析中可以看出,脉冲电场的峰值衰减量与频域特性曲线中频和高频部分衰减接近,比低频部分衰减小。又由于脉冲电场对电子通信设备的干扰和破坏需要一定的能量,其峰值小,能量相应也小。因此,在工程实践中可用脉冲电场的峰值衰减量来评估屏蔽体对脉冲电场的衰减性能,该方法简单可行。

表 1 几种屏蔽体脉冲电场屏蔽效能测试数据

Table 1 Measurement data of several shielding bodies

shielding body	radiated pulse electric field peak value/(kV · m ⁻¹)	pulse electric field peak value in body/(V · m ⁻¹)	attenuation of pulse electric field peak value/dB	pulse electric field graph in body and attenuation graph in frequency domain
metal bridge rack	7.5	18.5	52	Fig. 5
metal control ark	7.5	4.44	64	Fig. 6
shielding tent	7.5	3.70	66	Fig. 7
electric cement concrete	7.5	228	30	Fig. 8

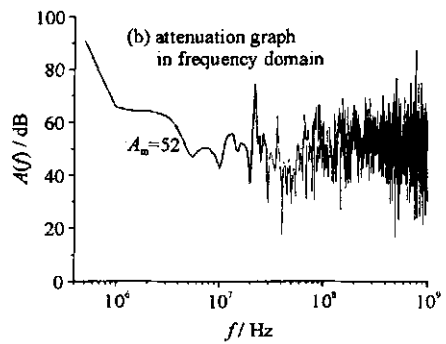
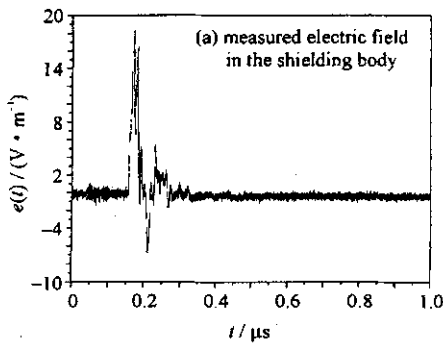


Fig. 5 Metal bridge rack

图 5 金属桥架

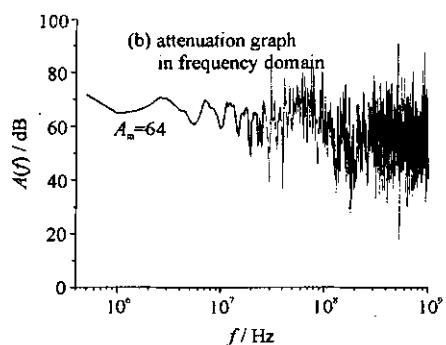
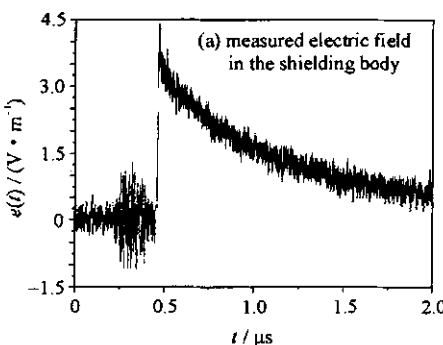


Fig. 6 Metal control ark

图 6 金属控制柜

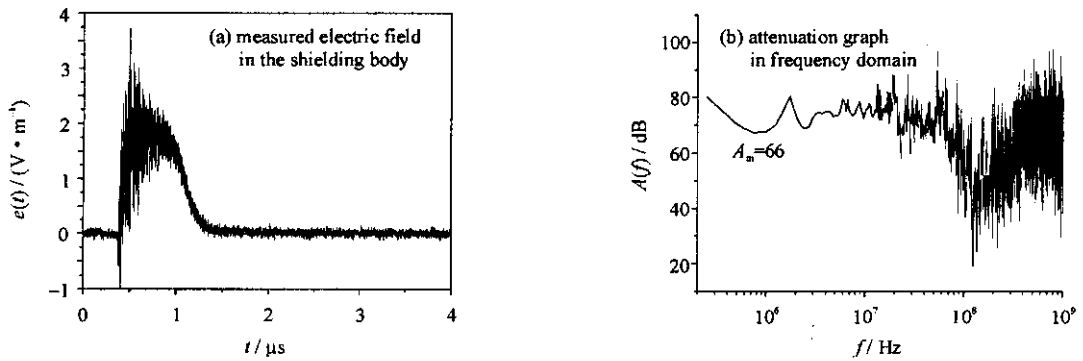


Fig. 7 Shielding tent

图7 屏蔽帐篷

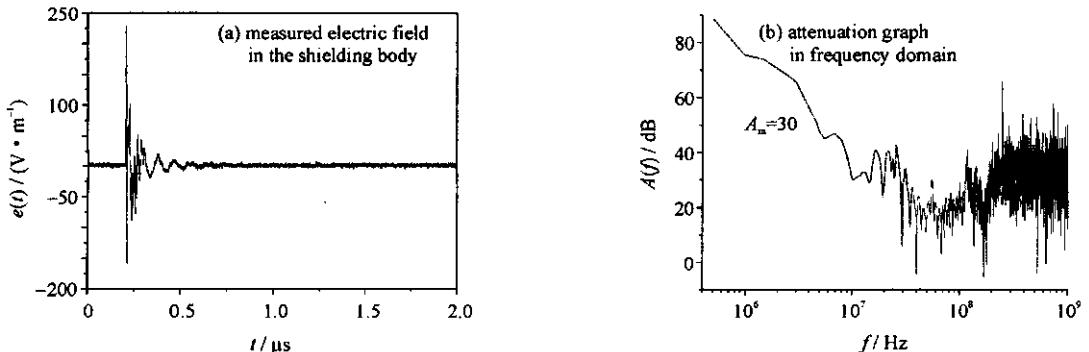


Fig. 8 Electric cement concrete

图8 导电水泥混凝土

3 结论

本文研制的脉冲电场屏蔽效能测试系统具有体积小、携带方便、抗电磁干扰能力强、可自动化测量以及动态测量范围大等优点。对各种屏蔽体的测试表明,用脉冲电场的峰值衰减量来评估其屏蔽性能,在工程应用上简单可行。

参考文献:

- [1] 陈亚洲, 魏光辉, 刘尚合. 强电磁场对某型无线电引信安全性的影响[J]. 强激光与粒子束, 2005, 17(7): 1047-1050. (Chen Y Z, Wei G H, Liu X H. Effect of lightning electromagnetic environment on radio fuze. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, 17(7): 1047-1050)
- [2] 余稳, 蔡新华, 黄文华, 等. 电磁脉冲对半导体器件的电流模式破坏[J]. 强激光与粒子束, 1999, 13(3): 355-358. (Yu W, Cai X H, Huang W H, et al. The current-mode destroy of semiconductor devices by electromagnetic pulse. *High Power Laser and Particle Beams*, 1999, 13(3): 355-358)
- [3] 周怀安, 杜正伟, 龚克. 双极型晶体管在强电磁脉冲作用下的瞬态响应[J]. 强激光与粒子束, 2005, 17(12): 1861-1864. (Zhou H A, Du Z W, Gong K. Transient response of bipolar junction transistor under intense electromagnetic pulse. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, 17(12): 1861-1864)
- [4] Tesche F M. Comparison of the transmission line and scattering models for computing the HEMP response of overhead cables[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 1992, 34(2): 93-99.
- [5] 高性能屏蔽室屏蔽效能测试方法[S]. GB12190-90. (Measurement methods for shielding effectiveness of high performance shielding room. GB12190-90)
- [6] 陈淑凤, 马蔚宇, 马晓庆. 电磁兼容试验技术[M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2001. (Chen S F, Ma W Y, Ma X Q. Electromagnetic compatibility experiment technology. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications Press, 2001)
- [7] 王艳, 马弘舸, 曹学军, 等. 墙体对微波脉冲的衰减特性[J]. 强激光与粒子束, 2005, 17(8): 1277-1280. (Wang Y, Ma H G, Cao X J, et al. Attenuation characteristics of microwave pulse penetrating walls. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, 17(8): 1277-1280)
- [8] 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): 1553-1556. (Yang L X, Ge D B, Wei B. Analysis on coupling effects of EMP into lapped joints in conducting screens. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, 17(10): 1553-1556)
- [9] 高成, 陈彬, 万海军, 等. 小型脉冲磁场屏蔽效能测量设备[J]. 高电压技术, 2002, 28(6): 27-29. (Gao C, Chen B, Wan H J, et al. Portable magnetic shielding effectiveness measurement device. *High Voltage Engineering*, 2002, 28(6): 27-29)

- [10] 何孟兵, 李劲, 姚宗干. 高功率脉冲放电间隙开关综述[J]. 高电压技术, 2000, **26**(4): 33-35. (He M B, Li J, Yao Z G. A review of the high power pulse switches. *High Voltage Engineering*, 2000, **26**(4): 33-35)
- [11] 罗敏, 常安碧, 曹绍云, 等. 高功率大电荷量重复频率气体开关实验研究[J]. 强激光与粒子束, 2003, **15**(4): 412-416. (Luo M, Chang A B, Cao S Y, et al. Experimental research of high-power and large-charge-transfer repetitive spark gap switch. *High Power Laser and Particle Beams*, 2003, **15**(4): 412-416)
- [12] 周璧华, 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. (Zhou B H, Chen B, Shi L H. EMP and its engineering defense. Beijing: National Defense Industry Press, 2001)
- [13] 李炎新, 高成, 陈彬, 等. 用 Matlab 实现高速数据采集自动化[J]. 测控技术, 2002, **21**(11): 9-13. (Li Y X, Gao C, Chen B, et al. Realize high speed data acquisition automation using matlab. *Measurement & Control Technology*, 2002, **21**(11): 9-13)

Pulse electric field shielding effectiveness measurement system

LI Yan-xin^{1,2}, CHEN Bin¹, SHI Li-hua¹, GAO Cheng¹, WAN Hai-jun¹, ZHOU Bi-hua¹

(1. *Engineering Institute of Engineering Corps, PLA University of Science and Technology, Nanjing 210007, China;*
2. *Research Center of Information Security, Southeast University, Nanjing 210096, China*)

Abstract: A simple measurement system for the shielding effectiveness is developed, and a method for measuring pulse electric field shielding effectiveness of shielding body is presented. The system is made up of pulse electric field radiation device and its receiver. The rising time of the pulse electric field radiated by the device is less than 3.3 ns, the falling time more than 5 μ s, and the peak value more than 7.5 kV/m at 60 cm in front of the antenna. Optic fiber device is used in the system for electronic field measurement, and the powerful EMI is restrained. The measurement program is written in Matlab language for automation and signal processing. The system has 97 dB dynamic range and is portable. Experimental results show that the attenuation of the maximum electric field value can reflect pulse electric field shielding effectiveness.

Key words: Pulse electric field; Electromagnetic field shielding effectiveness; Measurement system; Attenuation