

文章编号: 1001-4322(1999)06-0751-04

用平行板天线测量有界波 电磁脉冲模拟器地面场

祝 敏, 孙培云, 郑振兴, 焦 杰, 谢彦召

(西北核技术研究所, 西安 69 信箱 16 分箱, 710024)

摘 要: 提出一种有界波电磁脉冲(EMP)模拟器地面场的测量方法。它具有简便、无源、不受输入电压限制、频带宽的特点。特别适用于比较复杂的电磁环境中电场的测试, 可实现信号大幅度传输, 能有效地提高测试系统的信噪比。

关键词: 电磁脉冲; 平行板天线; 有界波电磁脉冲模拟器; 信噪比

中图分类号: O441.5

文献标识码: A

大型有界波电磁脉冲模拟器是模拟高空核爆产生的电磁脉冲装置。它产生的 NEMP 具有场强大、前沿陡的特点, 对这种场的测试, 要求测试系统必须具有很高的动态范围和很宽的频带。尽管对这种场的测量方法有多种, 例如鞭天线加射随器、网拍天线加差分放大器, 但由于大多数都是有源探测器, 输入范围有限, 在强脉冲电磁干扰环境下, 被测信号往往淹没于干扰之中, 难以分辨, 因此测量大场强的 NEMP 有一定的难度。我们针对有界波模拟器结构的特点, 设计了一种简便的新型探测器, 它不需外加复杂电路, 结构简单、无源、输入范围大、频带较宽, 很好地完成了电磁脉冲模拟器地面场的测试任务。

1 测量原理

电磁脉冲模拟器的照射器由前过渡段、工作空间、后过渡段组成, 其工作空间位于上下两个相互平行的金属导波板之间。根据平行板电容器原理, 我们将直径为 60cm 的另一块金属测试板(即平行板天线)平行地放置在两导波板之间, 于是该板与上、下两导波板分别构成两个相串联的平行板电容器, 上部电容器极板之间为空气介质, 下部测试板与极板之间填充具有一定

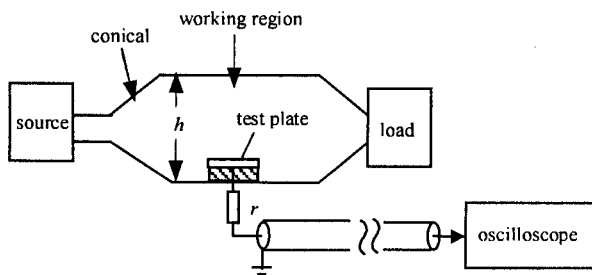


Fig. 1 Test diagram
图 1 测试方框图

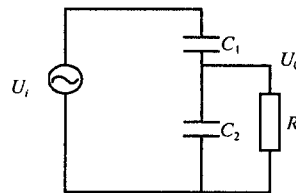


Fig. 2 Equivalent circuit of test
图 2 测试等效电路图

• 国防科技基础研究基金资助课题
1999 年 5 月 20 日收到原稿, 1999 年 9 月 28 日收到修改稿。
祝 敏, 女, 1968 年 4 月出生, 工程师

介电常数的介质,构成一种新型的平行板传感器,如图 1 所示。其等效电路如图 2 所示。

模拟器中所产生的 NEMP 波形一般为双指数波,所以等效源可写成

$$U_i = A(e^{-\alpha} - e^{-\beta t})^{[1]}, \quad \alpha = 0.69/\tau_d, \quad \beta = 2.2/\tau_r$$

式中, τ_d 为脉冲半宽度; τ_r 为上升前沿; A 为幅度常数。由等效电路可得

$$\frac{U_0}{R} + C_2 \frac{dU_0}{dt} = C_1 \frac{d(U_i - U_0)}{dt}$$

$$\begin{aligned} \text{解方程得} \quad U_0 &= e^{-\int \kappa(C_1+C_2)dt} \left[\int \frac{C_1 A}{C_1 + C_2} (\beta e^{-\beta t} - \alpha e^{-\alpha t}) \cdot e^{\int \kappa(C_1+C_2)dt} dt + c \right] \\ &= \frac{\beta R C_1 A}{1 - \beta R(C_1 + C_2)} e^{-\beta t} - \frac{\alpha R C_1 A}{1 - \alpha R(C_1 + C_2)} e^{-\alpha t} + c e^{-\int \kappa(C_1+C_2)dt} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{边界条件} \quad U_0(t_0) &= 0, \quad \frac{\beta R C_1 A}{1 - \beta R(C_1 + C_2)} - \frac{\alpha R C_1 A}{1 - \alpha R(C_1 + C_2)} + c = 0 \\ c &= \frac{\alpha R C_1 A}{1 - \alpha R(C_1 + C_2)} - \frac{\beta R C_1 A}{1 - \beta R(C_1 + C_2)} \end{aligned}$$

对于 NEMP, 一般 $\beta \gg \alpha$ 。

① 当 $\alpha R(C_1 + C_2) \gg 1, \beta R(C_1 + C_2) \gg 1$,

$$U_0 = \frac{C_1 A}{C_1 + C_2} (e^{-\alpha} - e^{-\beta t}) = \frac{C_1}{C_1 + C_2} U_i$$

即当 R 与 $(C_1 + C_2)$ 的乘积足够大时, 测试波形与源波形成正比。

② 当 $\alpha R(C_1 + C_2) < 1, \beta R(C_1 + C_2) \gg 1$, 即 $R(C_1 + C_2) < 1/\alpha, R(C_1 + C_2) \gg 1/\beta$ 时

$$\begin{aligned} U_0 &= -\frac{C_1 A}{C_1 + C_2} e^{-\beta t} - \frac{\alpha R C_1 A}{1 - \alpha R(C_1 + C_2)} e^{-\alpha t} + \left[\frac{C_1 A}{C_1 + C_2} + \frac{\alpha R C_1 A}{1 - \alpha R(C_1 + C_2)} \right] e^{-\int \kappa(C_1+C_2)dt} \\ &= \frac{C_1 A}{C_1 + C_2} (e^{-\alpha} - e^{-\beta t}) - \left[\frac{C_1 A}{C_1 + C_2} + \frac{\alpha R C_1 A}{1 - \alpha R(C_1 + C_2)} \right] [e^{-\alpha} - e^{-\int \kappa(C_1+C_2)dt}] \end{aligned}$$

从式中可以看出, U_0 为源波形减去极性相反的另一双指数波, 在某一时刻 $t > 3R(C_1 + C_2)$ 时, $e^{-\beta t} \rightarrow 0, e^{-\int \kappa(C_1+C_2)dt} \rightarrow 0, U_0 \rightarrow -\frac{\alpha R C_1 A}{1 - \alpha R(C_1 + C_2)} e^{-\alpha t}$, 测试波形极性倒向, 出现微分现象。这是因为 R 与 $(C_1 + C_2)$ 的乘积不足够大所致, 但可以通过一换算关系还原。基于上述分析, 我们采用两种方法对场进行了测试。

高阻反射法: 其测试原理如图 1 所示, r 为 50Ω 电阻, 等于传输电缆的特性阻抗, 终端接滤波器高阻。等效电路如图 2 所示, R 为高阻, 其条件满足①。由于长电缆终端接高阻, 电阻不匹配, 出现波形反射, 反射波到达前端, 被始端的匹配电阻 50Ω 电阻所吸收。由此可测得比较理想的模拟器地面场波形, 其换算关系为

$$U_i = \frac{C_1 + C_2}{C_1} U_0, \quad E = \frac{C_1 + C_2}{h C_1} U_0$$

h 为两极板之间距离; E 为两极板之间的电场强度。

低阻终端匹配法: 其条件满足②, 测试原理如图 1 所示, r 为 530Ω 分压电阻, 电缆终端接 50Ω 匹配电阻, 等效电路如图 2 所示, R 为 580Ω 。由 $\frac{U_0}{R} + C_2 \frac{dU_0}{dt} = C_1 \frac{d(U_i - U_0)}{dt}$, 两边积分可得: $U_i = \frac{1}{RC_1} \int U_0(t) dt + (1 + \frac{C_2}{C_1}) U_0(t)$ 。设 $K_1 = \frac{1}{RC_1}, K_2 = 1 + \frac{C_2}{C_1}, E = \frac{U_i}{h}$, 有

$$E = \frac{K_1}{h} \int U_0(t) dt + \frac{K_2}{h} U_0(t) \tag{1}$$

从式(1)看出电场强度是由实测电压积分和实测电压分别与一常数乘积的和组成,所以可通过一简单程序还原而得出实际的场强。

2 测试结果

在标准 1.5m×1m×1m 模拟器中对平板天线进行了标定,实验中所用的平板天线是半径 $R=30\text{cm}$ 、厚度 $d=0.2\text{cm}$ 的圆板(表面是铜导体,下面是具有一定介电常数的绝缘体),模拟器的高度 $h=100\text{m}$,所以根据平行板电容器的计算公式,代入这些参数可求得: $C_1 = \epsilon_0 \frac{S}{h-d} = 2.5\text{pF}$ 。由于测试板与下极板之间的距离以及板间介质的介电常数不能精确给出,所以不能用公式精确地计算出 C_2 的值,因此用电感电容测试仪直接测量 C_2 的电容值(低阻终端匹配法测得的 C_2 电容值为 2.8nF;高阻反射法测量的 C_2 电容值应是天线电容值加上电缆的电容值为 3.8nF)。实验中用另一种常用类型探测器对场进行监测,场的监测波形如图 3 所示,高阻反射法测量的波形如图 4 所示,低阻终端匹配法测量的波形如图 5 所示,还原后的波形如图 6 所示。两种方法测量的场的各参数与监测场的各参数比较见表 1。

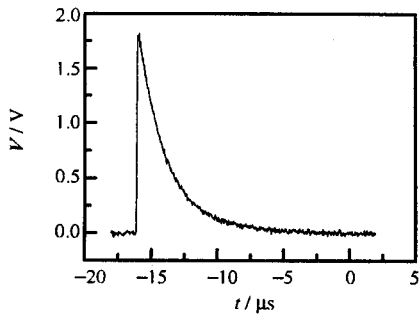


Fig. 3 Test voltage waveform with general device

图 3 射随器测量波形

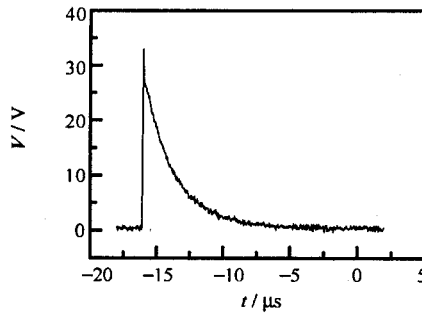


Fig. 4 Test voltage waveform of end high resistance

图 4 高阻反射法测量波形

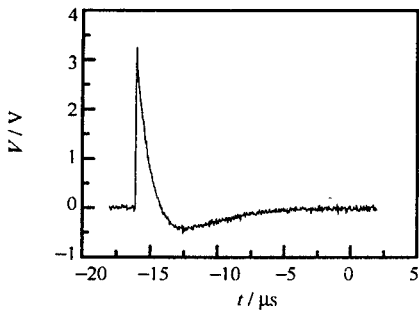


Fig. 5 Test voltage waveform of end match

图 5 低阻终端匹配法测量波形

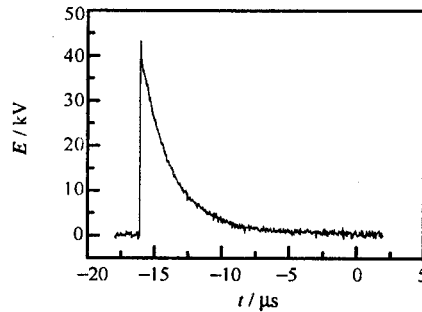


Fig. 6 Revivified electric field waveform of end match

图 6 低阻终端匹配法测量还原后波形

表 1 参数比较
Table 1 Parameter compare

emitter follower			end high resistance			end match		
amplitude	risetime	half-width	amplitude	risetime	half-width	amplitude	risetime	half-width
$/\text{kV} \cdot \text{m}^{-1}$	$/\text{ns}$	$/\mu\text{s}$	$/\text{kV} \cdot \text{m}^{-1}$	$/\text{ns}$	$/\mu\text{s}$	$/\text{kV} \cdot \text{m}^{-1}$	$/\text{ns}$	$/\mu\text{s}$
40	62	1.61	43.51	61.9	1.62	40.05	64.69	1.62
50	65.38	1.536	50.55	62	1.63	48.85	66.68	1.58
60	52.8	1.64	62.2	62.2	1.628	61.669	63.3	1.53

3 结 论

从表 1 中可以看出,两种方法测量的场波形的半高宽、前沿、场强幅值与常用探测器测量值一致,误差不大于 10%,说明这种测量方法是可靠的。理论分析与实验结果相吻合。

该测试方法具有简便,无需外加电源;通过调整两极板之间的距离和极板之间的介质可以改变分压比,提高信号幅度,实现大幅度信号传输提高信噪比;动态范围大,频率响应范围宽等特点,极适合于强电磁环境中的电场测量。这是其它有源探测器所无法比的。

参 考 文 献

- 1 Bardet C, Dafif O, and Jecko B. Time-domain analysis of a large EMP simulator. *IEE transactions on electromagnetic compatibility*, 1987, EMC29(1)
- 2 张仁豫等. 高电压实验技术. 北京:清华大学出版实社, 1982. 154~189

MEASURING THE GROUND ELECTRIC FIELD OF EMP SIMULATOR WITH PARALLEL PLATE ANTENNA

ZHU Min, SUN Pei-yun, ZHENG Zhen-xing, JIAO Jie, XIE Yan-zhao

Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an, 710024

ABSTRACT: A convenient method of measuring the ground electric field of EMP simulator has been proposed and developed. The device for the method has simple structure. It is passive, even not limited by voltage and has wide bandwidth. The method can be applied in measuring electric field of complicated electromagnetic environment. It can transmit high amplitude signal, so signal-to-noise ratio of the device is improved.

KEY WORDS: electromagnetic pulse; signal-to-noise ratio; parallel plate antenna; bounded wave electromagnetic pulse simulator