



·高功率微波技术·

# 水平极化有界波电磁脉冲模拟器仿真与实验研究

金晗冰, 寇科男, 戴弃君, 李 昆, 刘 冬, 高 昕, 贾文静

(北京京航计算通讯研究所, 北京 100074)

**摘 要:** 结合传统有界波模拟器和辐射波模拟器的特点, 采用新型双锥-线栅型平板天线结构, 设计了一台水平极化有界波电磁脉冲模拟器。通过电磁仿真和实验测试, 对模拟器的辐射特性和场均匀性进行了研究。仿真结果和实测结果基本一致。结果表明, 模拟器能产生包含地面反射的水平极化电磁脉冲环境, 波形满足上升沿  $(2.5 \pm 0.5)$  ns、半高宽  $(23 \pm 5)$  ns 的高空电磁脉冲标准要求。模拟器使用灵活机动, 能在不小于  $5 \text{ m} \times 3 \text{ m} \times 2 \text{ m}$  工作空间内产生峰值场强不小于  $50 \text{ kV/m}$  的 6 dB 均匀场, 也能在降低测试场强时提供更大的工作空间。

**关键词:** 高空电磁脉冲; 电磁脉冲模拟器; 水平极化; 有界波

中图分类号: TN788

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202234.220094

## Simulation and experiment study on a horizontally polarized bounded-wave electromagnetic pulse simulator

Jin Hanbing, Kou Ke'nan, Dai Qijun, Li Kun, Liu Dong, Gao Xin, Jia Wenjing

(Beijing Jinghang Computing and Communication Research Institute, Beijing 100074, China)

**Abstract:** EMP simulators are used to test and harden electronic systems in an intense electromagnetic pulse. A horizontally polarized bounded-wave EMP simulator is designed based on a bicone-plate antenna structure, which combines the strengths of traditional bounded-wave simulators and radiating-wave simulators. Simulation and experiments are conducted to study the characteristics and the distribution of the radiation field. The results show that the simulator can generate horizontally polarized electromagnetic pulse and the waveform is double-exponential with a rise time of  $(2.5 \pm 0.5)$  ns and a pulse width of  $(23 \pm 5)$  ns. The simulator has a working volume of  $5 \text{ m} \times 3 \text{ m} \times 2 \text{ m}$  in which the electric field is no less than  $50 \text{ kV/m}$  within a 6 dB tolerance. Moreover, the simulator is flexible to increase the working volume while decreasing the field intensity.

**Key words:** high-altitude electromagnetic pulse, electromagnetic pulse simulator, horizontal polarization, bounded wave

高空电磁脉冲(HEMP)是一种瞬态强电磁波,其峰值场强高达数  $10^4 \text{ V/m}$ ,频段覆盖直流到几百 MHz,作用半径达数百 km,能造成大范围的电子系统干扰甚至毁伤<sup>[1-3]</sup>。随着现代电子技术向集成化、信息化方向的发展,电子系统对电磁脉冲的敏感性和易损性越来越高,这也对系统抗电磁脉冲能力提出了更高的要求。电磁脉冲实验是识别系统的薄弱环节、研究防护措施以及验证系统防护性能的主要技术手段<sup>[4]</sup>。电磁脉冲模拟器是模拟产生高空电磁脉冲环境的装置,是开展电子系统效应实验和加固研究的基础实验平台。20世纪60年代以来,世界各国建造了许多不同类型、不同规模的电磁脉冲模拟器,按照结构形式主要分为有界波模拟器和辐射波模拟器<sup>[5-6]</sup>。多数现有的有界波模拟器为垂直极化类型,天线采用平板传输线形式,能够模拟自由空间的电磁脉冲环境,具有空间均匀性好、场强高等优点,但实验空间有限<sup>[7-8]</sup>。辐射波模拟器通常采用双锥-笼形天线,能够产生水平极化电磁脉冲,具有常阻抗、宽频带等优点,但其辐射效率低、体积大、造价高昂<sup>[9-10]</sup>。目前国内外这两类模拟器技术发展已日臻成熟,应用也较为广泛,但它们多为固定式,难以针对不便移动或固定设施开展实验。文献[11]提出了一种新型双锥-平板天线形式的水平极化有界波模拟器,在产生水平极化波的同时改善了辐射波形和效率。国内,朱湘琴<sup>[12-14]</sup>

\* 收稿日期:2022-03-31; 修订日期:2022-09-05

基金项目:国防基础科研项目

联系方式:金晗冰, jinhanb@foxmail.com。

通信作者:寇科男, isc304@163.com。

等对这种新型模拟器的天线设计和辐射特性进行了仿真研究,吴伟<sup>[15]</sup>等搭建了9.5 m高样机,对模拟器内场分布特性进行了初步实验研究。但国内目前尚未见该类型模拟器应用的报道。本文基于双锥-线栅型平板天线结构,设计了一台机动式水平极化有界波模拟器。首先介绍模拟器的基本设计原理,利用电磁仿真对模拟器的辐射场分布规律进行分析。在此基础上,设计并开展外场实验,测量模拟器内部不同测点位置的辐射场波形,对模拟器工作性能和辐射特性进行研究。实验中,在模拟器不同架设高度下分别进行测量,讨论了不同架高下模拟器能提供的测试场强和工作空间,并与仿真结果进行对比,验证了模拟器使用的灵活性。

## 1 模拟器设计

水平极化有界波电磁脉冲模拟器主要由脉冲源、天线、接地负载以及控制系统等组成,如图1所示。脉冲源吊装在空中,天线从脉冲源两侧的双锥结构分别向地面延伸,逐渐过渡为三角形平板结构,末端经过吸收负载接地。脉冲源吊高可调,天线采用多根线缆设计代替整块金属板,长度可调。模拟器整体具备灵活性和机动性,能够调节架设尺寸,能够机动到需要的场地开展实验。

### 1.1 脉冲源设计

设计模拟器的辐射场波形符合IEC 61000-2-9规定的HEMP标准要求,即电场峰值不低于50 kV/m,电场波形为上升沿(2.5±0.5) ns、半高宽(23±5) ns的双指数波形<sup>[16]</sup>。因此脉冲源的输出电压前沿应小于2 ns。脉冲源输出电压峰值 $V_0$ 由辐射场峰值场强 $E(r, \theta)$ 和工作空间决定。

$$E(r, \theta) = \frac{60V_0}{rZ_c \sin \theta} \quad (1)$$

上式由双锥天线的辐射特性推导得出,如图2所示。式中: $r$ 为双锥顶端到测点之间的距离; $\theta$ 为双锥轴线和 $r$ 之间的夹角; $Z_c$ 为双锥特征阻抗<sup>[17]</sup>。



Fig. 1 Photo of the EMP simulator  
图1 电磁脉冲模拟器实物照片

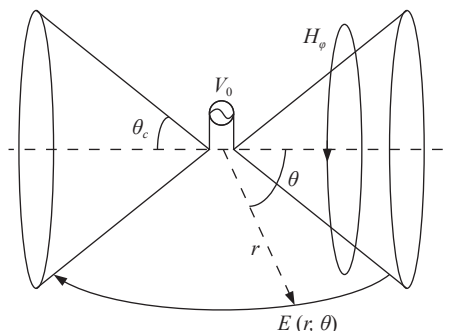


Fig. 2 Radiation field of the biconical antenna  
图2 双锥天线的辐射场

脉冲源设计采用一级脉冲压缩技术实现ns级高压输出,设计最高工作电压为700 kV,脉冲前沿 $\leq 2$  ns,脉冲半高宽 $\geq 28$  ns。脉冲源整系统主要由Marx发生器、峰化电容和输出开关三部分组成,等效电路如图3所示<sup>[17]</sup>。图中, $C_m$ 、 $L_m$ 分别为Marx发生器的串联电容、串联电感, $S_1$ 为Marx开关, $C_p$ 为峰化电容, $L_p$ 为峰化回路电感, $S_2$ 为输出开关。

一级脉冲压缩回路的基本工作原理:由Marx发生器向峰化电容谐振充电,当峰化电容的充电电流达到峰值时,输出开关发生自击穿,峰化回路导通向负载放电,在负载上产生双指数脉冲。脉冲上升沿 $t_r$ 主要由峰化回路电感决定,脉冲半宽 $t_w$ 主要由Marx发生器的串联电容决定<sup>[17]</sup>,即

$$t_r \approx 2.2 \frac{L_p}{R} \quad (2)$$

$$t_w \approx 0.7RC_m \quad (3)$$

根据模拟器对脉冲源技术指标的要求,脉冲源主要部件的参数设计为: $C_m=330$  pF,  $L_m=1.8$   $\mu$ H,  $C_p=90$  pF,

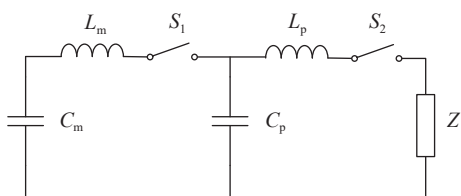


Fig. 3 Equivalent circuit of the high voltage pulse generator  
图3 脉冲源等效电路

$L_p < 100$  nH, 天线负载阻抗为  $120 \Omega$ 。Marx 发生器的级数设计为 7 级, 采用正、负双向充电方式, 最高充电电压  $\pm 50$  kV, 标称输出电压 700 kV。峰化电容设计为同轴圆锥状结构以降低电感。输出开关为高气压、小间隙的自击穿开关, 结构与天线双锥结构一体化设计, 保证输出脉冲的无畸变传输。

## 1.2 天线设计

双锥结构天线具有常阻抗特性, 用于承担脉冲高频分量的辐射。双锥结构的阻抗由其半锥角  $\theta_c$  决定<sup>[18]</sup>

$$Z_c \approx 60 \ln \left( \cot \frac{\theta_c}{2} \right) \quad (4)$$

脉冲源负载阻抗设计为  $120 \Omega$ , 计算得双锥的半锥角约为  $40^\circ$ 。双锥末端直径设计为 3 m, 以保证脉冲上升沿和峰值不受天线阻抗不连续的影响。

天线在双锥末端转换成三角形极板, 极板天线的特性阻抗  $Z_l$  与极板宽度  $w$  和两极板间距  $l$  之比有关<sup>[19]</sup>

$$Z_l = \begin{cases} 120 \ln(4l/w + 0.5w/l), & w/l < 0.5 \\ 240\pi/[2w/l + 1.393 + 0.667 \ln(2w/l + 1.44)], & w/l \geq 0.5 \end{cases} \quad (5)$$

极板间  $w/l$  是恒定值, 因此其阻抗保持不变, 能够保证脉冲半宽的辐射。为防止结构不连续造成电磁波反射, 双锥转平板中心截面处线栅沿着双锥的母线方向自然延伸, 其它线栅按照渐开线形式向两侧延伸, 经过吸收负载后接地。分布式吸收负载的总阻值为  $120 \Omega$ , 与双锥特性阻抗匹配。

## 2 实验设置

在空旷场地搭建模拟器系统, 测量模拟器的辐射场波形和空间分布情况。实验布局如图 4 所示, 采用高度 13 m、跨度 23 m 的钢制专用吊具架设模拟器。吊具支腿位于两侧天线极板的外侧以避免干扰内部辐射场, 脉冲源由绝缘吊带悬吊在吊具横梁下方, 到横梁的距离大于 5 m。分析可知, 吊具对模拟器内部场的电场峰值、上升沿和半高宽基本没有影响。控制计算机通过光纤通讯远程控制模拟器, 调节脉冲源充放电、充放气、触发等动作。脉冲电场测量系统采用光纤传输技术, 电场探头放置于模拟器内, 将感应到的脉冲电场信号转换成光信号, 经由光纤远距离传输至光接收机进行光电转换, 由示波器记录辐射场时域波形。控制计算机、光接收机和示波器等放置于屏蔽舱内, 避免测控设备受电磁干扰。

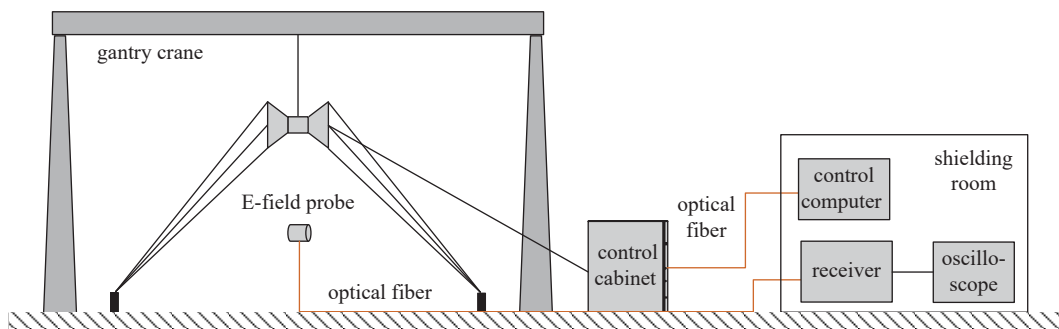


Fig. 4 Schematic diagram of the EMP simulator test layout

图 4 EMP 模拟器实验布局图

实验坐标系设置如图 5 所示。坐标系以双锥中心在地面的投影点为原点,  $x$  轴平行于双锥中轴线,  $z$  轴垂直于地面向上。实验中布置 1 个固定点探头和若干个自由点探头, 测量水平极化电场分量, 即  $E_x$  电场分量。固定点探头位于双锥中心正下方 1.2 m 处, 作为参考场用于表征模拟器工作状态, 并与其他探头进行对比测量, 用于消除脉冲源放电不稳定性造成的场强变化影响。开展实验的同时, 采用电磁仿真软件 CST 对模拟器进行建模仿真, 辅助实验设计和规律分析。

## 3 仿真结果与分析

### 3.1 脉冲源设计

基于 CST 建立模拟器双锥-线栅型平板天线模型, 计算模型中模拟器架高  $h=8$  m, 地面上两极板间的距离  $w=19$  m, 大地电导率  $\sigma=0.01$  S/m、相对介电常数  $\epsilon_r=10$ 。仿真激励源采用与标准电磁脉冲波形一致的脉冲电压, 从双锥中心施加激励。在馈源正下方即  $z$  轴上, 每隔 1 m 设置一个电场监测点, 研究辐射波形特征和变化规律。计算得

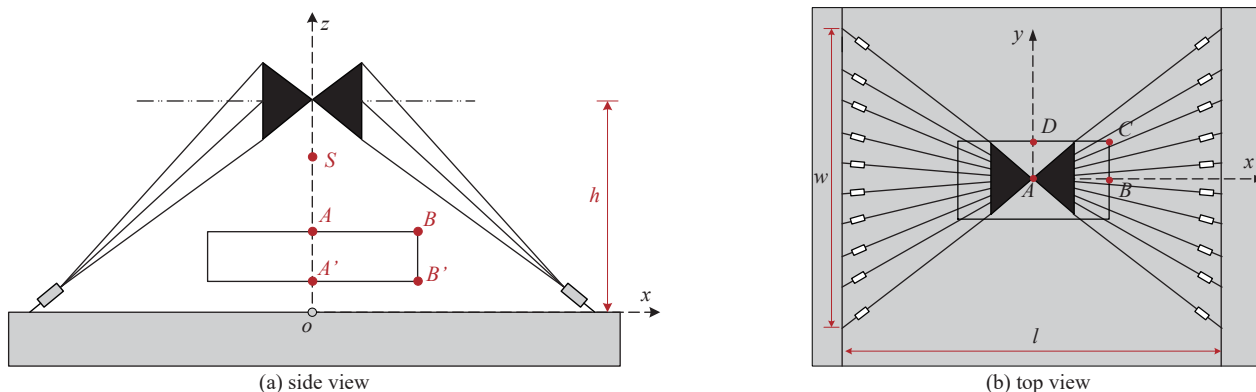


Fig. 5 Experimental coordinate system and measurement points

图 5 实验坐标系与测点设置

到测点  $(0, 0, 1)$ 、 $(0, 0, 3)$  和  $(0, 0, 5)$  的水平电场波形如图 6 所示。为便于分析,对波形进行了起点时间对齐和场强归一化处理,并给出激励源波形作为比较。测点  $(0, 0, 3)$  和  $(0, 0, 5)$  的波形在 13 ns 左右存在一个小的正脉冲畸变,分析是天线在双锥转平板处不连续导致的反射。测点  $(0, 0, 1)$ 、 $(0, 0, 3)$  和  $(0, 0, 5)$  电场波形分别在 6.8 ns、20 ns 和 33.5 ns 左右出现一个明显的陡降,时间差与电磁波从测点出发传向地面并反射回来的时间一致,因此该负反射是地面反射作用的结果。随着测点距离地面越近,地面负反射到达时间越早,波形半高宽逐渐减小。在地面附近,电场波形还没有达到预期峰值就会受到地面的抵消作用,将导致电场峰值变低、前沿变快。

图 7 给出了不同测点水平极化电场波形的峰值场强和半高宽随测点高度的变化。可以看出,随着测点距馈源越近,峰值场强越高,进一步数据分析可知峰值场强与距馈源的距离成反比,这与公式(1)双锥天线的辐射特性一致。由于地面负反射的作用,波形半高宽随着测点高度增加而增大。当测点高度大于 4 m 时,地面反射到达时间大于半高宽,波形半高宽不再受地面作用的影响而变化。

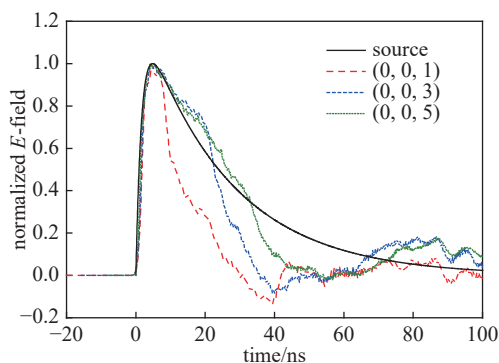


Fig. 6 Simulated  $E$ -field in time domain at different position

图 6 归一化电场时域波形仿真结果

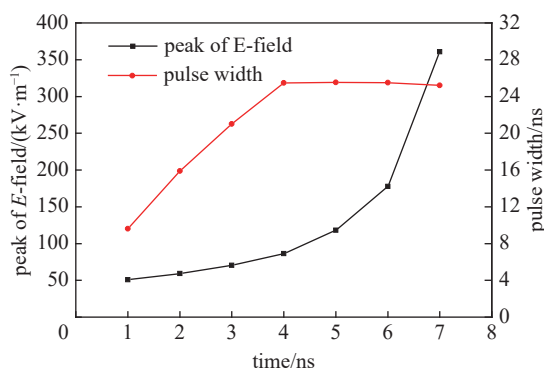


Fig. 7 Simulated peak and pulse width of  $E$ -field variation with the height

图 7 电场峰值和半高宽随测点高度的变化

### 3.2 场均匀性

电磁脉冲辐照实验要求模拟器工作空间的场均匀性为  $0\sim 6$  dB,即工作空间内的峰值场强均达到规定的测试场强  $E^*$ ,且不大于  $2E^*$ 。利用仿真对模拟器辐射场空间分布进行分析,假设模拟器架高 15 m,仿真得到水平极化电场峰值场强的空间分布如图 8 所示。图 8(a)为  $y=0$  垂直面上的场强分布,图 8(b)为  $z=2$  m 水平面上的场强分布。可以看出,模拟器产生的辐射场主要集中在天线极板间,相比与传统的双锥-笼形水平极化模拟器有更好的方向性和均匀性。电磁波从馈源中心向外传播,距离馈源中心越远场强越低,因此模拟器内部能找到不同等级的测试场强和不同大小的工作空间。图 8(a)中,距地高 11.5 m、10.5 m 和 6 m 以下的空间,峰值场强分别小于 100、80 和 40 kV/m。图 8(b)中  $z=2$  m 的水平面上,在  $22\text{ m}\times 18$  m 区域内电场峰值不低于 20 kV/m。因此,从  $z=2$  m 的水平面向上选取工作空间,最高可向上 4 m 至  $z=6$  m 处的区域,该区域内峰值场强不低于 20 kV/m,且场均匀性小于 6 dB。同样方法能够确定  $20\sim 50$  kV/m 不同测试场强等级下的工作空间区域,但测试场强越高,工作空间越小。



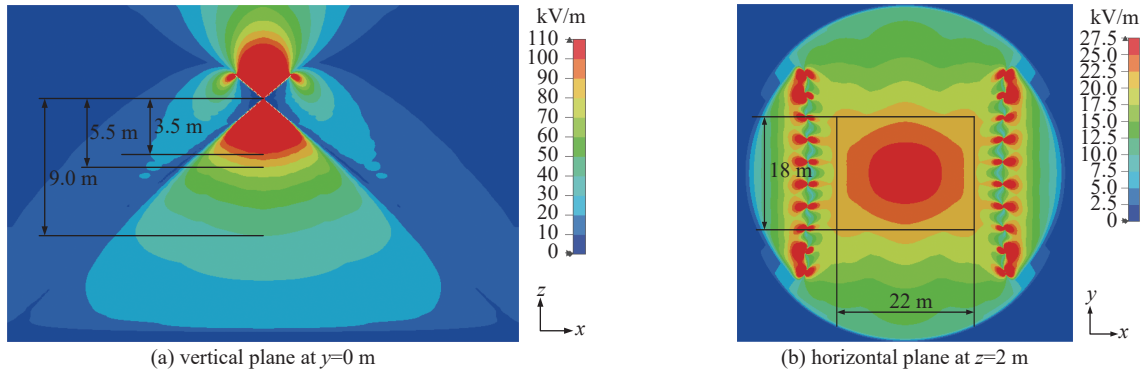


Fig. 8 Spatial distribution of peak  $E$ -field

图 8 电场峰值场强的空间分布

## 4 实验结果与分析

### 4.1 辐射场波形

模拟器架设高度 6.5 m, 脉冲源输出电压 350 kV, 测点 (0, 0, 1)、(0, 0, 3)、(0, 0, 5.3) 测得水平极化电场时域波形如图 9 所示。参考场测点 (0, 0, 5.3) 的波形符合双指数脉冲, 上升沿约 2.4 ns, 半高宽约 21.6 ns, 波形满足 HEMP 标准波形要求。三个测点电场峰值分别为 28 kV/m、44 kV/m 和 164 kV/m, 场强与距馈源的距离成反比, 电场波形分别在脉冲起点 7 ns、19 ns 和 35 ns 后受到地面负反射的作用, 实测规律与仿真结果吻合。

脉冲源输出电压由 280 kV 逐步增加至 700 kV, 测得参考场上升沿和电场峰值变化分别如图 10、图 11 所示, 图中数据为 3 次重复实验的平均值。由于输出开关气压变化和气体放电的随机性等因素的影响, 辐射场波形随着实验条件的不同而稍有变化, 但波形上升沿始终在  $(2.5 \pm 0.5)$  ns 范围内, 能够满足 HEMP 波形要求。模拟器辐射场强度随脉冲源输出电压线性变化, 在输出电压为 280~700 kV 范围内工作稳定。

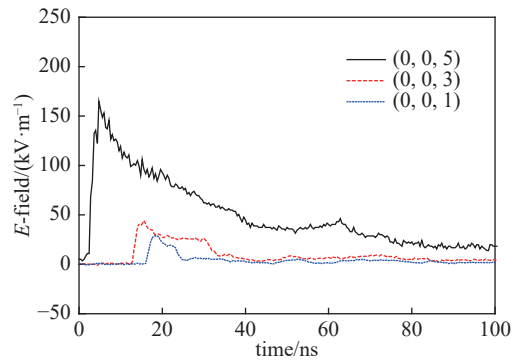


Fig. 9 Measured  $E$ -field in time domain at different position

图 9 电场时域波形实测结果

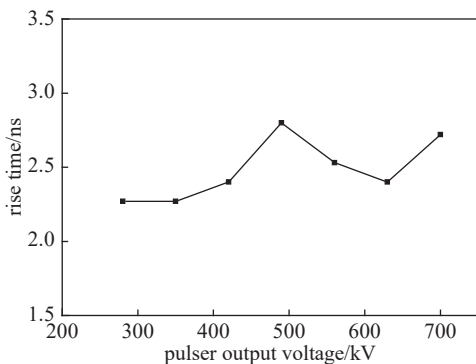


Fig. 10 Measured rise time of  $E$ -field variation with pulser output voltage

图 10 电场上升沿随脉冲源输出电压的变化

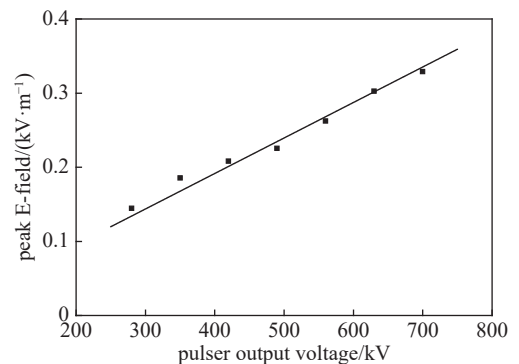


Fig. 11 Measured peak  $E$ -field variation with pulser output voltage

图 11 电场峰值随脉冲源输出电压的变化

### 4.2 场均匀性

本次实验分别将模拟器架高 6.5 m 和 8 m, 测量近地面工作空间的场均匀性。电场测点的选取方法如图 5 所示, 考虑到模拟器在  $x$  轴和  $y$  轴方向的对称性, 选取工作空间的 1/4 区域  $ABCD-A'B'C'D'$  进行测量。实验中测点距地高度均不低于 1 m, 避免地面反射影响峰值场强。

模拟器架高 6.5 m 时, 工作空间选取为 5 m $\times$ 3 m $\times$ 2 m, 对应测点坐标为  $A(0, 0, 3)$ 、 $C'(2.5, 1.5, 1)$ 。为便于比较,

所有数据均按比例换算为脉冲源充电电压 700 kV 的结果。测得 8 个测点的水平电场峰值场强见表 1, 同时给出仿真结果作为比较。测得  $A$  点峰值场强最高为 94.8 kV/m,  $C'$  点峰值场强最低为 51.8 kV/m, 所有测点场强均高于 50 kV/m。  $A$  点峰值场强约为  $C'$  点的 1.8 倍, 满足场均匀性不大于 6 dB 要求。实测峰值场强与仿真结果接近, 但不同测点间实测结果与仿真结果的偏差存在波动。这主要是由于野外场地地面不平整带来的电场探头位置偏移, 以及测量时的零点漂移等实验误差所导致的。  $A$  点和  $C'$  点电场波形如图 12 所示, 实测波形的上升沿和半高宽等波形特征与仿真结果符合得很好。

模拟器架高 8 m 时, 工作空间选取为  $6\text{ m}\times 5\text{ m}\times 2\text{ m}$ , 对应测点坐标为  $A(0, 0, 3.5)$ 、 $C'(3, 2.5, 1.5)$ 。测得 8 个测点的峰值场强见表 2, 同时给出仿真结果作为比较。测得  $A$  点峰值场强最高为 74.3 kV/m,  $C'$  点峰值场强最低为 42.9 kV/m, 所有测点场强均高于 40 kV/m。  $A$  点峰值场强约为  $C'$  点的 1.7 倍, 满足场均匀性不大于 6 dB 要求。  $A$  点和  $C'$  点电场波形如图 13 所示, 实验结果与仿真结果相符。

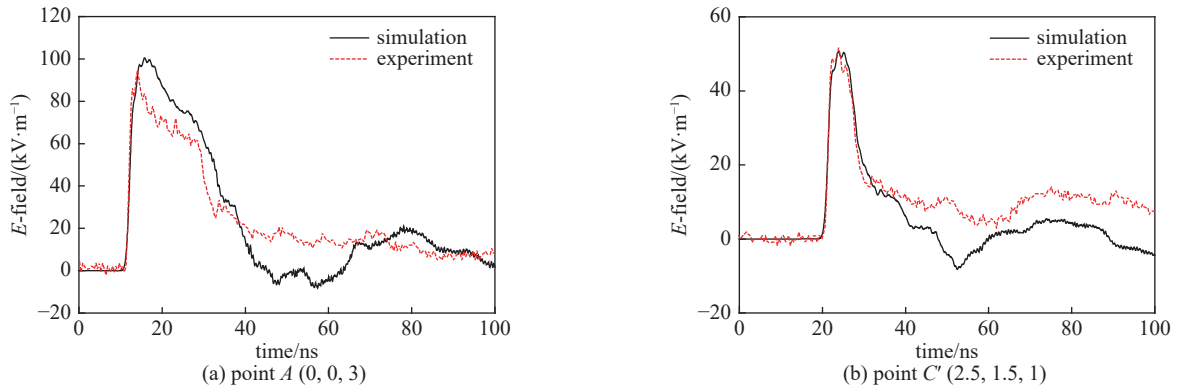


Fig. 12 Measured  $E$ -field in the working volume of  $5\text{ m}\times 3\text{ m}\times 2\text{ m}$

图 12  $5\text{ m}\times 3\text{ m}\times 2\text{ m}$  工作空间内的电场波形

实验结果表明了模拟器应用的灵活性和仿真的准确性。受专用吊具的高度限制, 本次实验没有将模拟器进一步架高, 对于更大范围的工作空间, 能够通过仿真有效评估模拟器的辐射场特性。实际开展电磁脉冲实验时, 将根据被试系统特点, 首先借助仿真进行实验方案设计, 确定合适的架设高度和工作空间范围。

## 5 结论

本文设计了一台水平极化有界波电磁脉冲模拟器, 其脉冲源采用一级脉冲压缩技术, 实现最高输出电压高于 700 kV, 其天线采用双锥-线栅型平板结构, 提高辐射效率。实测模拟器产生的水平极化电场, 电场波形为上升沿  $(2.5\pm 0.5)\text{ ns}$ 、半高宽  $(23\pm 5)\text{ ns}$  的双指数波形, 符合 IEC 61000-2-9 规定的电磁脉冲波形要求。通过仿真和实验研究了模拟器内部的

场分布均匀性, 仿真结果与实验结果相近。结果表明, 模拟器内部满足峰值场强不小于 50 kV/m、场均匀性不大于 6 dB 的工作空间不小于  $5\text{ m}\times 3\text{ m}\times 2\text{ m}$ , 可用于设备威胁级辐照实验; 模拟器能够进一步架高, 降低测试场强换取更大的工作空间, 测试场强为 20 kV/m 时可用于大型系统响应级辐照实验。模拟器具备良好的灵活性和机动性, 可以根据需要机动到不同场地, 针对不移动的系统开展实验, 具有广泛的应用前景。

表 1  $5\text{ m}\times 3\text{ m}\times 2\text{ m}$  工作空间内不同测点的峰值场强

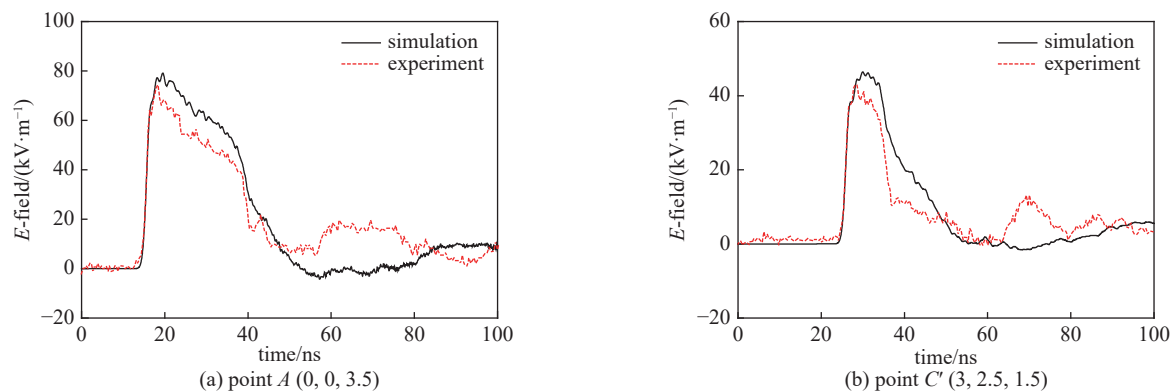
Table 1 Peak  $E$ -field in the working volume of  $5\text{ m}\times 3\text{ m}\times 2\text{ m}$

point location / m	peak $E$ -field/(kV·m <sup>-1</sup> )	
	experiment	simulation
$A(0, 0, 3)$	94.8	100.4
$B(2.5, 0, 3)$	70.5	71.9
$C(2.5, 1.5, 3)$	65	65.7
$D(0, 1.5, 3)$	89.9	92
$A'(0, 0, 1)$	64.2	63.8
$B'(2.5, 0, 1)$	55.8	52.3
$C'(2.5, 1.5, 1)$	51.8	50.6
$D'(0, 1.5, 1)$	54.1	61.3

表 2  $6\text{ m}\times 5\text{ m}\times 2\text{ m}$  工作空间内不同测点的峰值场强

Table 2 Peak  $E$ -field in the working volume of  $6\text{ m}\times 5\text{ m}\times 2\text{ m}$

point location / m	peak $E$ -field/(kV·m <sup>-1</sup> )	
	experiment	simulation
$A(0, 0, 3.5)$	74.3	79.1
$B(3, 0, 3.5)$	62.5	67.1
$C(3, 2.5, 3.5)$	55.9	60.4
$D(0, 2.5, 3.5)$	63.5	68.9
$A'(0, 0, 1.5)$	55.1	54.2
$B'(3, 0, 1.5)$	48.9	49.5
$C'(3, 2.5, 1.5)$	42.9	46.4
$D'(0, 2.5, 1.5)$	45.1	50.4

Fig. 13 Measured  $E$ -field in the working volume of  $6\text{ m}\times 5\text{ m}\times 2\text{ m}$ 图 13  $6\text{ m}\times 5\text{ m}\times 2\text{ m}$  工作空间内的电场波形

## 参考文献:

- [1] Martin A R, Bond A. Nuclear pulse propulsion: a historical review of an advanced propulsion concept[J]. *Journal of the British Interplanetary Society*, 1979, 32: 283-310.
- [2] Giri D V, Tesche F M. Classification of intentional electromagnetic environments (IEME)[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2004, 46(3): 322-328.
- [3] 寇科男, 金哈冰, 吴海燕, 等. 指挥通信车强电磁脉冲效应仿真分析[J]. *无线电工程*, 2020, 50(6): 479-483. (Kou Kenan, Jin Hanbing, Wu Haiyan, et al. Simulation of electromagnetic pulse effects on command vehicle[J]. *Radio Engineering*, 2020, 50(6): 479-483)
- [4] 周壁华, 石立华, 王建宝, 等. 电磁脉冲及其工程防护[M]. 2版. 北京: 国防工业出版社, 2019. (Zhou Bihua, Shi Lihua, Wang Jianbao, et al. *Electromagnetic pulse and its engineering protection*[M]. 2nd ed. Beijing: National Defense Industry Press, 2019)
- [5] Baum C E. EMP simulators for various types of nuclear EMP environments: an interim categorization[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1978, 26(1): 35-53.
- [6] Baum C E. Review of hybrid and equivalent-electric-dipole EMP simulators[R]. *Sensor and Simulation Notes* 277, 1982.
- [7] 李云伟, 王泽忠, 卢斌先, 等. 电磁脉冲模拟器仿真与实验研究[J]. *高电压技术*, 2007, 33(1): 128-131. (Li Yunwei, Wang Zezhong, Lu Binxian, et al. Simulation and experimental study of electromagnetic pulse simulator[J]. *High Voltage Engineering*, 2007, 33(1): 128-131)
- [8] 周开明, 李铮迪, 邓建红. 大动态高精度有界波电磁脉冲模拟器设计[J]. *强激光与粒子束*, 2020, 32: 063004. (Zhou Kaiming, Li Zhengdi, Deng Jianhong. Design of a high-precision and widely tunable bounded-wave electromagnetic pulse simulator[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2020, 32: 063004)
- [9] 孟粉霞, 夏洪富, 王建国. 电磁脉冲辐射波模拟器笼形天线的理论和数值研究[J]. *微波学报*, 2001, 23(s1): 6-10. (Meng Fenxia, Xia Hongfu, Wang Jianguo. Theoretical and numerical studies on cage antenna of EMP radiating-wave simulator[J]. *Journal of Microwaves*, 2001, 23(s1): 6-10)
- [10] Blackburn R F, Taylor C D. On the electromagnetic fields from a hybrid type of EMP simulator[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 1978, 20(1): 240-247.
- [11] Bailey V, Carboni V, Eichenberger C, et al. A 6-MV pulser to drive horizontally polarized EMP simulators[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2010, 38(10): 2554-2558.
- [12] 朱湘琴, 吴伟, 王海洋. 大型水平极化电磁脉冲有界波模拟器的辐射场分布特性分析[J]. *现代应用物理*, 2020, 11: 040502. (Zhu Xiangqin, Wu Wei, Wang Haiyang. Characteristics of radiation electric field distribution in large EMP bounded wave simulator with horizontal polarization[J]. *Modern Applied Physics*, 2020, 11: 040502)
- [13] 肖晶, 吴刚, 王海洋, 等. 两种不同线栅结构的水平极化辐射波模拟器[J]. *强激光与粒子束*, 2021, 33: 033004. (Xiao Jing, Wu Gang, Wang Haiyang, et al. Horizontally polarized radiation-wave simulator with two different wire grating structures[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2021, 33: 033004)
- [14] 肖晶, 吴刚, 谢霖桑, 等. 线栅参数对双锥-平面线栅水平极化辐射波模拟器的影响[J]. *兵工学报*, 2021, 42(8): 1708-1715. (Xiao Jing, Wu Gang, Xie Linshan, et al. Influence of wire grating on horizontally polarized radiated-wave simulator with biconical-wire grating structure[J]. *Acta Armamentarii*, 2021, 42(8): 1708-1715)
- [15] 吴伟, 王海洋, 吴刚, 等. 9.5 m高水平极化有界波电磁脉冲模拟器内场分布特性的初步实验研究[J]. *强激光与粒子束*, 2021, 33: 043005. (Wu Wei, Wang Haiyang, Wu Gang, et al. Preliminary experimental investigation of field distribution characteristics in horizontally polarized bounded-wave EMP simulator with 9.5 m in height[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2021, 33: 043005)
- [16] IEC 61000-2-9, Electromagnetic compatibility (EMC)—part 2: environment—section 9: description of HEMP environment-radiated disturbance[S].
- [17] 刘锡三. 高功率脉冲技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005. (Liu Xisan. *High pulsed power technology*[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2005)
- [18] Nagasawa K, Matsuzuka I. Radiation field consideration of biconical horn antenna with different flare angles[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1988, 36(9): 1306-1310.
- [19] 杜雷鸣, 谢彦召, 王绍飞. 平行板传输线特性阻抗仿真计算及解析修正[J]. *强激光与粒子束*, 2015, 27: 083201. (Du Leiming, Xie Yanzhao, Wang Shaofei. Simulation computation and analytic modification of characteristic impedance of parallel-plate transmission line[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2015, 27: 083201)