



·高功率微波技术·

## 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\*

吴 伟, 王海洋, 吴 刚, 朱湘琴, 肖 晶, 程 乐

(西北核技术研究所强脉冲辐射环境模拟与效应国家重点实验室, 西安 710024)

**摘 要:** 测量了 9.5 m 高的水平极化有界波电磁脉冲模拟器的内部场, 并根据实验测量结果分析了该模拟器内场分布特性, 包括一定区域内场均匀性的定量分析及模拟器内部有效测试空间的确定方法, 进而对最低位置为距离地面 2 m 的有效测试空间进行了预估。实验结果表明: 位于该模拟器双锥中心正下方且距离该中心 5.5~7.5 m 的测点场的峰值基本按照测点与双锥中心间距的倒数衰减, 且随着测点与双锥中心间距的增大, 因锥与极板不连续结构导致的波形变化在时间轴上滞后, 而因地面影响导致的波形变化在时间轴上提前; 在距离地面比较高的水平面上, 两极板之间场的外泄方向场的衰减比双锥中轴线方向场的衰减更慢; 该模拟器内部距离地面 2 m 的水平面上 12 m×12 m 的区域内所取测点的归一化场平均峰值约为 0.678, 归一化场平均峰值的标准偏差约为 0.068 9, 场的均匀性约为 2.039 dB。

**关键词:** 水平极化; 有界波; 模拟器; 电磁脉冲; 场分布

中图分类号: TN011; O441.3

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202133.200303

## Preliminary experimental investigation of field distribution characteristics in horizontally polarized bounded-wave EMP simulator with 9.5 m in height

Wu Wei, Wang Haiyang, Wu Gang, Zhu Xiangqin, Xiao Jing, Cheng Le

(State Key Laboratory of Intense Pulsed Radiation Simulation and Effect, Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China)

**Abstract:** The electric field in a horizontally polarized bounded-wave electromagnetic pulse(EMP) simulator with 9.5 m in height are got by experimental measurement. The study of field distribution characteristics in the simulator based on the field, including the quantity analysis of the field uniformity in some domain and the method for defining the effective testing space in the simulator, is given. The domain of an effective space with the lowest horizontal plane 2 m away from the ground is estimated. The experimental results show that, the peak-value of the electric field of the testing point right under the bicone's center with a distance of 5.5–7.5 m decreases inversely with the distance between the testing point and the bicone's center. The effect of the discontinuous configuration of the bicone and the plane on the electric field in time domain of the testing points under the center is slower as the distance increases, but the influence of the ground on the field is quicker; The field along the leakage direction of the field in the simulator decreases more slowly than those along the bicone's symmetric axis, as the testing-points located at a horizontal plane far away from the ground; The mean value of the normalized electric field in 12 m×12 m domain on the horizontal plane 1 m away from the ground in the simulator is 0.678, the corresponding standard deviation is 0.068 9, and the field uniformity is 2.039 dB.

**Key words:** horizontally polarized; bounded-wave; simulator; electromagnetic pulse; field distribution

为了进行电磁脉冲(EMP)实验, EMP 模拟器得到了广泛的研制和研究<sup>[1-4]</sup>。针对不同的效应实验要求, EMP 模拟器主要分为垂直极化模拟器<sup>[5-11]</sup>和水平极化模拟器<sup>[12-18]</sup>两类, 分别提供电场主极化分量与地面垂直及平行的 EMP 环境。其中, 水平极化模拟器又可分为水平极化辐射波模拟器<sup>[12-15]</sup>及水平极化有界波模拟器<sup>[1, 16-18]</sup>。已有的

\* 收稿日期: 2020-11-03; 修订日期: 2021-03-11

基金项目: 强脉冲辐射环境模拟与效应国家重点实验室专项经费资助项目(SKLIPIR1601Z)

作者简介: 吴 伟 (1976—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事研究方向为电磁脉冲技术及效应、抗辐射加固技术等方向的研究工作; wuwe@nint.ac.cn。

水平极化有界波模拟器中,模拟器的双锥中轴线与地面平行的快上升沿模拟器(FEMPS)<sup>[16-18]</sup>由于能提供高空EMP环境及近地面EMP环境而得到广泛的研究。其中,文献[16]根据实验给出的源电压,模拟给出了架高30 m的模拟器双锥正下方单个测点场的时域波形,文献[17]通过模拟给出了模拟器下方的地面对模拟器内辐射场的影响,文献[18]模拟给出了模拟器辐射场的结构参数及激励源参数对模拟器内辐射场分布的影响。但到目前为止,国内鲜有该类型模拟器的实验研究报告。此外,考虑到效应实验时的效应物具有一定的尺寸,即因效应实验需求,模拟器需要提供一定尺寸的有效测试空间。根据IEC-61000-4-25标准<sup>[19]</sup>,一般满足“场均匀性 $\leq 6$  dB”的测试空间为有效测试空间。但到目前为止,鲜有该类型模拟器内部场分布的实验研究报告。

本文将先给出9.5 m高的模拟器馈电装置及模拟器天线线栅的架设方式,并对该模拟器内部的场进行实验测量,进而对该模拟器内部测点场的实验值及实验得到的内部测点场的分布规律进行研究,并进行场分布均匀性的讨论,给出模拟器内部场分布特性的实验分析。

## 1 模拟器装置

### 1.1 模拟器的结构及参数

图1给出了由对称双锥及对称线栅极板构成的水平极化有界波电磁脉冲模拟器的示意图。其中,图1(a)、图1(b)分别为侧视图及末端视图;图1(c)为实际实验搭建的模拟器。实验中的模拟器双锥中轴线与地面平行,且与地面的距离(即模拟器的架高)为9.5 m;构成模拟器的双锥半角约为 $31^\circ$ ;两侧极板的最大间距约为32 m,每侧极板的最大宽度为48 m,基本满足阻抗匹配条件<sup>[16]</sup>。此外,构成每侧极板所用线栅的总根数为48根;且线栅的上端在锥底边缘均匀分布,每8根合成一束,并在距离地面高度约为15 cm的地方加上接地电阻。为与双锥的特性阻抗匹配,实验时取单侧极板的分布式电阻的总阻值为 $75 \Omega$ <sup>[20]</sup>。模拟器采用吊车借助非导电的尼龙绳进行架设,双锥中心到吊车吊臂的最短距离为9.5 m,到吊臂顶端最高处的距离为20 m。

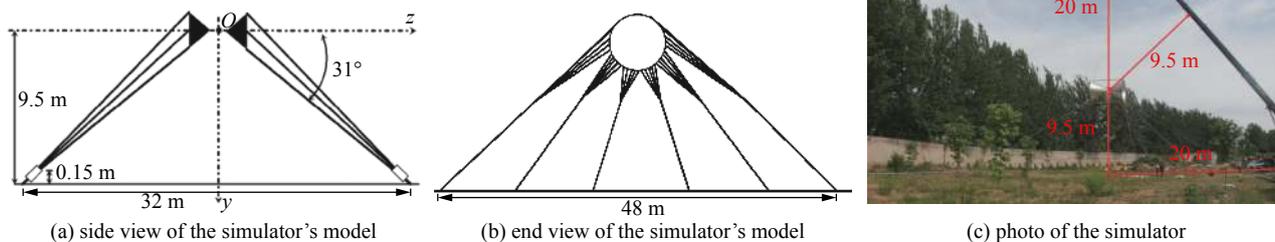


Fig. 1 EMP simulator with 9.5 m height

图1 9.5 m高的EMP模拟器

### 1.2 模拟器的脉冲源及其波形

模拟器所用的双锥的实体图如图2所示。双锥锥底半径均为1.25 m。为固定双锥,采用了玻璃钢材质的4个大杆和4个小杆。在两个锥尖采用电容直接放电的气缸脉冲源,得到的激励源输出电压约5 kV,前沿约2.5 ns,半高宽约22.7 ns,其模拟电压波形如图3所示。



Fig. 2 EMP simulator's bi-cones

图2 EMP模拟器双锥实体图

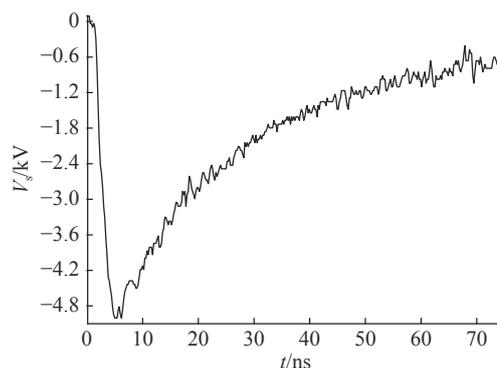


Fig. 3 EMP simulator's source voltage from experiment

图3 实验测得的EMP模拟器的激励电压波形

### 1.3 实验测量系统及探头

实验测量时,采用带宽为 0.010~500 MHz、量程为 100~1000 V/m、本底噪声 < 20 mV 的脉冲电场测量系统进行测量。测量前先对探头的灵敏度及响应进行标定。每次测量同时设置 2 个电场探头,以双锥中心正下方且距离地面 4 m 高处的测点放置一个探头,以该探头测得的场峰值为基准,并以该点场峰值为归一化因子进行实验后期的数据处理。实际测量时只测电场的主极化分量。

## 2 模拟器内部场的实验结果及分析

在模拟器内部取若干监测点,采用探头测量这些测点场的水平分量,并对这些场分量进行分析。以双锥锥尖的中心位置为坐标原点,双锥中轴线所在的轴为  $z$  轴,垂直地面向下的轴为  $y$  轴正向,构成实验中的三维笛卡尔坐标系。根据分析可知,吊车对模拟器内测点场的峰值、上升沿及半高宽没有影响,故本文后续的分析中将不考虑吊车的影响。

### 2.1 双锥中心正下方的测点场的规律分析

在双锥正下方且距离双锥中心间距  $L=5.5, 6.5$  及  $7.5$  m 的位置选择监测点  $A(0 \text{ m}, 5.5 \text{ m}, 0 \text{ m})$ ,  $B(0 \text{ m}, 6.5 \text{ m}, 0 \text{ m})$  及  $C(0 \text{ m}, 7.5 \text{ m}, 0 \text{ m})$ , 并以测点  $A$  电场  $z$  分量( $E_z$ )的峰值为归一化因子(下同),给出测量得到的 3 个测点电场  $z$  分量时域波形如图 4 所示。为了比较,图中均给出了对应的根据并行 FDTD 方法<sup>[18]</sup>模拟的结果。从图 4 可以看出:(1)实验测得的 3 个测点场的时域波形与模拟结果符合很好。根据实验得到的测点  $A, B, C$  场的归一化峰值分别为 1, 0.846, 0.745, 上升沿分别为 2.20, 2.49, 2.20 ns, 半高宽分别为 25.60, 20.60, 13.60 ns; 而根据模拟得到的对应的 3 个测点场的归一化峰值分别为 1, 0.840, 0.727, 上升沿分别为 2.49, 2.48, 2.44 ns, 半高宽分别为 24.26, 19.67, 13.34 ns。由此可知,实验测得的结果与理论模拟结果符合很好。但两者有一定的差别,一方面是由于实验模型与理论模型本身的差别所导致,如实验中没有借助于绝缘拉索固定构成 2 个极板的线栅,使得线栅存在一定的悬弧度(即不是标准的直线),而模拟时则采用对每根直线线栅所在位置进行金属标识的方式进行线栅建模,且所采用的网格尺寸为 36 mm(大于实验中线栅的实际尺寸)等;另一方面是由于实验本身的误差所导致,如实验测量时的零点漂移等。(2)随着测点与双锥中心间距的增大,因锥转极板不连续结构导致的波形变化在时间轴上滞后,而因地面影响导致的波形变化在时间轴上提前。根据预估,位于双锥中心正下方且分别距离双锥中心  $L=5.5, 6.5, 7.5$  m 的测点  $A, B, C$  分别约从 23.86, 26.91, 30.04 ns 开始接收到来自双锥转极板不连续结构的作用,分别约从 45.00, 41.67, 38.33 ns 开始接收到来自地面的反射作用。各测点场时域波形出现畸变的时间分别对应了双锥转极板不连续结构及地面对测点作用的最短光程。(3)当测点与双锥中心的间距  $L$  从 5.5 m 增加到 7.5 m 时,双锥正下方的测点场的峰值基本按照  $1/L$  的规律衰减。这一点与无限长且无地面影响的双锥天线的辐射场相似。这是由于双锥转极板的不连续结构及其下方的大地对上述测点场作用的最短光程在激励源电压达到峰值的时间之后,从而导致测点场的峰值完全由双锥辐射所决定。但从图 4 可以看出,双锥转极板的不连续结构及大地可能会影响测点场的半高宽,使得测点场的半高宽与激励源的半高宽不同。

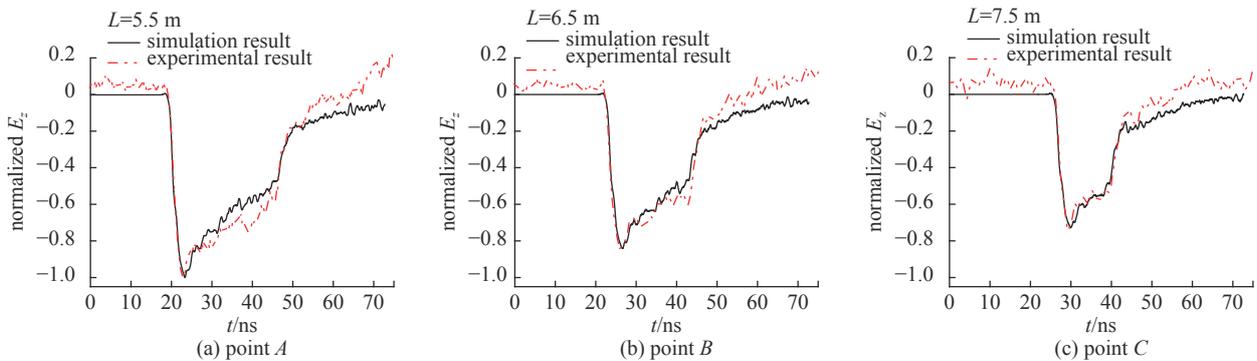


Fig. 4 Normalized  $E_z$  of some points below bi-cones' center in time-domain

图 4 位于双锥正下方的几个测点场的归一化时域波形

### 2.2 沿着 $x$ 轴或 $z$ 轴偏离水平面中心的测点

令位于双锥中心正下方且分别距离地面  $h=2, 3, 4$  m 的测点为水平面的中心,在各自的水平面上,选择沿着  $x$  轴或者  $z$  轴偏离中心的一系列测点为监测点(见图 5),得到若干测点场的归一化峰值、上升沿和半高宽如表 1 所

示。对应的距离地面 3 m 高的水平面上若干测点场的时域波形对比如图 6 所示。由表 1 可以看出：(1)在相同的水平面上，测点从中心点开始沿着  $x$  轴或者  $z$  轴偏离越多，场的峰值越小。这是由于测点偏离中心点越远，与激励源的距离增加的缘故。(2)在距离地面比较高的水平面上(如距离地面 4 m 的水平面)，从水平面中心沿着  $x$  轴及  $z$  轴偏离相同的距离取测点，前者测得的场峰值大于后者。这是由于  $x$  方向为模拟器内部场外泄的方向，当水平面距离地面越高，水平面所对应的模拟器两侧极板宽度减小，两侧极板对模拟器内传输的电磁波的约束能力减弱，使得外泄方向的场增大的缘故。(3)在距离地面 2 和 3 m 的水平面上，某些测点场的上升沿能达到  $(2.5 \pm 0.5)$  ns 技术指标，但半高宽不满足  $(23 \pm 5)$  ns 的技术指标。主要是上述测点场受地面反射影响的缘故。恰恰说明本文所研究的模拟器可以提供近地面 EMP 环境。

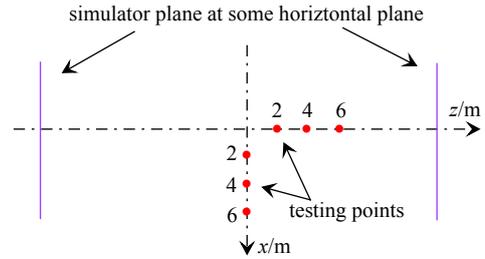


Fig. 5 Location of testing-points along  $x$ -axis or  $z$ -axis away from the center on some horizontal plane in simulator

图 5 模拟器内部某水平面上沿坐标轴偏离中心的几个测点位置

表 1 沿着  $x$  轴或者  $z$  轴偏离水平面中心的测点场归一化峰值的比较

Table 1 Comparison of peak-values of normalized  $E_z$  at points away from the center of some horizontal plane

$h/m$	point's location/m	normalized peak-value	rise-time/ns	FWHM/ns
2	(2, 7.5, 0)	0.738	2.28	13.16
2	(4, 7.5, 0)	0.719	2.20	12.87
2	(6, 7.5, 0)	0.652	2.53	10.80
2	(0, 7.5, 2)	0.724	2.20	13.40
2	(0, 7.5, 4)	0.720	2.30	12.83
2	(0, 7.5, 6)	0.600	1.80	12.07
3	(2, 6.5, 0)	0.819	2.16	19.76
3	(4, 6.5, 0)	0.738	2.29	18.60
3	(6, 6.5, 0)	0.662	2.35	18.20
3	(0, 6.5, 2)	0.792	2.44	19.24
3	(0, 6.5, 4)	0.753	2.17	18.94
3	(0, 6.5, 6)	0.609	2.75	16.60
4	(2, 5.5, 0)	0.878	2.31	25.63
4	(4, 5.5, 0)	0.834	2.83	24.29
4	(6, 5.5, 0)	0.735	2.46	22.83
4	(0, 5.5, 2)	0.801	2.37	25.09
4	(0, 5.5, 4)	0.770	2.83	24.11
4	(0, 5.5, 6)	0.624	2.51	21.66

由图 6 可以看出，在相同的水平面上，从水平面中心点开始分别沿  $x$  轴及  $z$  轴偏离相同的距离取测点进行测量，当偏离的距离越大时，测点开始接收到辐射场的时间滞后且峰值有减小的趋势。这是由于测点距离激励源越远的缘故，此时测点场的波形后延出现的振荡和畸变更明显。主要原因是偏离水平面中心的距离增大时，双锥辐射在测点场时域波形上的表现减弱，测点场接收到双锥转极板的不连续结构、两侧极板及地面的影响加强。

### 2.3 距离地面 2 m 的水平面上测点场均匀性的讨论

在距离地面  $h=2$  m 高 ( $y=7.5$  m) 的水平面上，选择一系列监测点，得到若干测点场的归一化峰值如表 2 所示。根据文献 [21] 可知场均匀性可表示为

$$\varepsilon = 20 \lg [(E_m + 1.15s)/(E_m - 1.15s)] \quad (1)$$

式中： $E_m$  为测点的归一化场平均峰值， $s$  为其标准偏差，其表达式分别为

$$E_m = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N E_z(n) \quad (2)$$

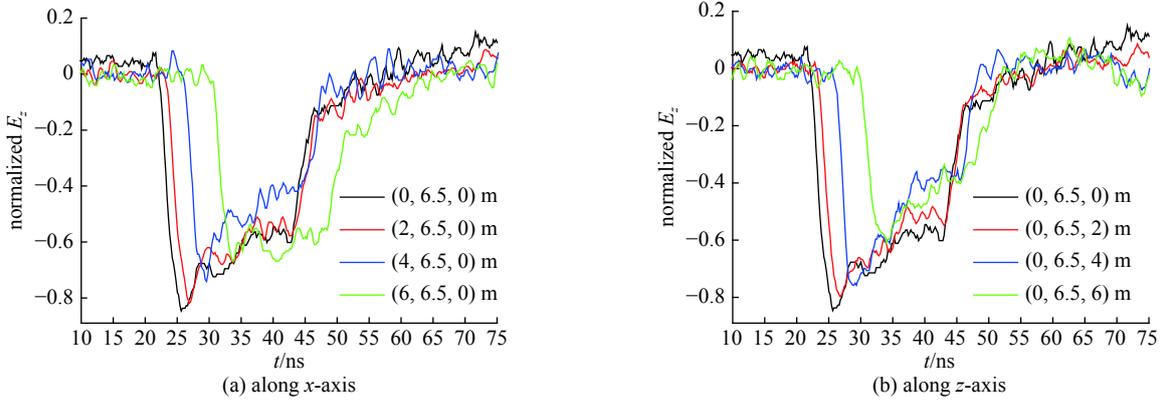

 Fig. 6 Comparison of normalized  $E_z$  of some points located away from the center of the horizontal plane with  $h = 3$  m along  $x$ -axis and  $z$ -axis

 图 6 距离地面 3 m 高的水平面上沿  $x$  轴及  $z$  轴偏离水平面中心的测点场归一化时域波形的对比

$$s = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{n=1}^N (E_z(n) - E_m)^2} \quad (3)$$

由表 2 可知,表中测点的归一化场平均峰值  $E_m$  约为 0.678,归一化场平均峰值的标准偏差  $s$  约为 0.068 9,场的均匀性为 2.039 dB。

考虑到模拟器场的对称性,由表 2 还可以看出:(1)以双锥中心正下方且距离双锥中心 7.5 m 的测点场的峰值为归一化因子,得到距离地面 2 m 高的水平面上 12 m( $x$  方向)  $\times$  12 m ( $z$  方向)区域的中心处归一化场平均峰值为 0.678,该区域归一化场平均峰值的最大值和最小值分别为 0.745 和 0.553;(2)在距离地面 2 m 的水平面上,上述 12 m  $\times$  12 m 的范围内的场满足场均匀性  $\leq 6$  dB 的要求。

#### 2.4 满足“场均匀性 $\leq 6$ dB”要求的有效测试空间的确定

根据 2.1 和 2.3 节中关于实验测量得到模拟器内部场的规律分析,模拟器内部满足“场均匀性  $\leq 6$  dB”要求的有效测试空间可以通过如下步骤确定:(1)若从距离地面一定高度的水平面向上选择有效测试空间,则该水平面上所选区域的范围尺寸决定了整个测试空间的水平区域范围。(2)与测试空间内其他高度的水平面上测点场的峰值相比,由于位于该水平面上的测试空间内的测点距离激励源最远,故测试空间内该水平面上测点场峰值的最小值为整个有效测试空间场峰值的最小值。(3)设该最小值为  $V_{\min}$ ,为使得有效测试空间满足“场均匀性  $\leq 6$  dB”要求,有效工作空间内所有测点场峰值必须  $\leq 2V_{\min}$ 。而有效工作空间内测点场峰值的最大值来源于距离双锥中心(即激励源处)最近的测点,即双锥中心正下方的测点,故场峰值  $= 2V_{\min}$  的双锥中心正下方的测点所在的位置决定了有效工作空间最大高度。(4)位于双锥中心正下方且与中心距离为  $L$  的测点场的峰值不受双锥转极板及地面的影响时,其峰值基本按照  $1/L$  的规律衰减。故可以据此确定场峰值  $= 2V_{\min}$  的位于双锥中心正下方的测点的位置,进而确定有效工作空间的最大高度。据此,可以确定从距离地面一定高度的水平面向上选择的满足“场均匀性  $\leq 6$  dB”要求的有效测试空间的尺寸范围。

若从距离地面 2 m 高的水平面向上选择工作空间,并设有效工作空间包含的水平方向区域范围为 12 m( $x$  方向)  $\times$  12 m( $z$  方向)区域,则根据表 2 可知,该有效工作空间归一化场峰值的最小值  $V_{\min} = 0.553$ ,满足“场均匀性  $\leq 6$  dB”要求的有效工作空间内归一化场峰值的最大值为  $2V_{\min} = 1.106$ 。结合 2.1 节预估可知,位于双锥中心正下方且距离双锥中心  $L \approx 4.97$  m 的测点(距离地面 4.53 m)归一化场峰值约为 1.106。故可以初步预估出最低位置为 2 m、且满足“空间内归一化场峰值  $\geq 0.553$ ”和“场均匀性  $\leq 6$  dB”要求的有效工作空间的区域范围为 12 m( $x$  方向)  $\times$  2.53 m ( $y$  方向距离地面 2 m 到 4.53 m)  $\times$  12 m( $z$  方向)区域。

### 3 结 论

本文给出了 9.5 m 高的水平极化有界波电磁脉冲模拟器的馈电装置及模拟器天线线栅的架设方式,并对实验

表 2 距离地面 2 m 的水平面上若干测点场的归一化峰值  
Table 2 Peak-values of normalized  $E_z$  at points on the horizontal plane with  $h=2$  m

point's location/m	normalized peak-value
(0, 7.5, 0)	0.745
(0, 7.5, 2)	0.724
(0, 7.5, 4)	0.720
(0, 7.5, 6)	0.600
(2, 7.5, 2)	0.722
(2, 7.5, 0)	0.738
(4, 7.5, 0)	0.719
(6, 7.5, 0)	0.652
(4, 7.5, 4)	0.609
(6, 7.5, 6)	0.553

测得的该模拟器内的测点的场进行了一系列的数值分析,给出了模拟器内部场及其分布特性,完成了该模拟器内部场分布特性的实验分析,对其他高度的同类型模拟器的工程设计具有一定的指导和借鉴意义。

#### 参考文献:

- [1] 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.
- [2] Baum C E. Review of hybrid and equivalent-electric-dipole EMP simulators[R]. *Sensor and Simulation Note 277*, 1982.
- [3] 孙凤杰, 罗学金, 李小伟, 等. 亚纳秒前沿有界波模拟器传输线设计的理论分析与实验[J]. *强激光与粒子束*, 2008, 20(5): 811-814. (Sun Fengjie, Luo Xuejin, Li Xiaowei, et al. Theoretical analysis and experimental verification on design of transmission line for subnanosecond risetime EMP simulator[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2008, 20(5): 811-814)
- [4] 田春明, 王建国, 陈雨生, 等. 基于TEM喇叭的辐射波模拟器天线的近场特性[J]. *强激光与粒子束*, 2004, 16(5): 641-644. (Tian Chunming, Wang Jianguo, Chen Yusheng, et al. Near-field characteristics of radiating-wave simulator antenna based on TEM horn[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2004, 16(5): 641-644)
- [5] Giri D V, Baum C E. Design guidelines for flat-plate conical guided-wave EMP simulators with distributed terminators[R]. *Sensor and Simulation Note 402*, 1996.
- [6] 谢彦召, 相辉, 聂鑫, 等. 不对称结构的分布式负载有界波电磁脉冲模拟器[J]. *强激光与粒子束*, 2006, 18(10): 1669-1672. (Xie Yanzhao, Xiang Hui, Nie Xin, et al. Design and construction of an asymmetrical bounded wave EMP simulator with distributed terminators[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, 18(10): 1669-1672)
- [7] 潘晓东, 魏光辉, 任新智. 有界波模拟器内部电场分布仿真研究[J]. *测试技术学报*, 2007, 21(5): 410-413. (Pan Xiaodong, Wei Guanghui, Ren Xinzhi. Simulation research on electric field distribution in bounded-wave simulator[J]. *Journal of Test and Measurement Technology*, 2007, 21(5): 410-413)
- [8] 李云伟, 王泽忠, 刘峰. 有界波电磁脉冲模拟器参数对传播模式的影响[J]. *高电压技术*, 2007, 33(5): 54-57. (Li Yunwei, Wang Zezhong, Liu Feng. Influence of parameters of boundary electromagnetic pulse simulator on transmitting mode[J]. *High Voltage Engineering*, 2007, 33(5): 54-57)
- [9] 国海广, 魏光辉, 范丽思, 等. 快沿电磁脉冲模拟器内部垂直极化场分布仿真研究[J]. *强激光与粒子束*, 2009, 21(3): 403-406. (Guo Haiguang, Wei Guanghui, Fan Lisi, et al. Simulation study on vertical field distribution of EMP simulator with fast risetime[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2009, 21(3): 403-406)
- [10] 杜立航, 高成, 陈海林, 等. 金属挡板对平行线栅有界波模拟器的影响仿真研究[J]. *强激光与粒子束*, 2018, 30: 073204. (Du Lihang, Gao Cheng, Chen Hailin, et al. Simulation study on influence of metal plate on parallel wire-grid bounded-wave simulator[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2018, 30: 073204)
- [11] 朱湘琴, 陈再高, 吴伟, 等. 离散电阻加载的大型垂直极化EMP辐射波模拟器的并行FDTD模拟[J]. *计算物理*, 2019, 36(3): 349-356. (Zhu Xiangqin, Chen Zaigao, Wu Wei, et al. Simulation of large vertically polarized EMP radiating wave simulator with discrete resistors using parallel FDTD method[J]. *Chinese Journal of Computational Physics*, 2019, 36(3): 349-356)
- [12] 谢秦川, 陈明, 李进玺, 等. 水平极化电磁脉冲模拟器空间场的数值模拟[J]. *强激光与粒子束*, 2004, 16(10): 1304-1306. (Xie Qinchuan, Chen Ming, Li Jinxi, et al. Numerical simulation of space-time distribution of field of horizontally polarized electromagnetic pulse simulators[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2004, 16(10): 1304-1306)
- [13] 朱湘琴, 王建国, 蔡利兵, 等. 辐射波电磁脉冲模拟器笼形天线辐射特性的并行计算[J]. *强激光与粒子束*, 2011, 23(6): 1597-1601. (Zhu Xiangqin, Wang Jianguo, Cai Libing, et al. Parallel computation for radiation characteristics of cage antenna of radiating-wave EMP simulator[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2011, 23(6): 1597-1601)
- [14] 朱湘琴, 吴伟, 王海洋. 大型双锥椭圆笼形天线关键参数的影响分析[J]. *电波科学学报*, 2021, 36(1): 127-135. (Zhu Xiangqin, Wu Wei, Wang Haiyang. The effect analysis of key parameters of large biconical-ellipsoid cage antenna[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2021, 36(1): 127-135)
- [15] 毛从光, 周辉. 辐射波HEMP模拟器关键参数数值分析[J]. *核电子学与探测技术*, 2009, 29(6): 1348-1352. (Mao Congguang, Zhou Hui. Key parameters analysis of hybrid HEMP simulator[J]. *Nuclear Electronics & Detection Technology*, 2009, 29(6): 1348-1352)
- [16] 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): 2254-2258.
- [17] 朱湘琴, 吴伟, 张国伟, 等. 大型水平极化电磁脉冲有界波模拟器的并行模拟分析[J]. *计算物理*, 2019, 36(6): 691-698. (Zhu Xiangqin, Wu Wei, Zhang Guowei, et al. Parallel simulation and analysis of large EMP bounded wave simulator with horizontal polarization[J]. *Chinese Journal of computational Physics*, 2019, 36(6): 691-698)
- [18] 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)
- [19] IEC61000-4-25. Testing and measurement techniques—high-altitude electromagnetic impulse HEMP simulator compendium[S].
- [20] 卢万铮. 天线理论与技术[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2004. (Lu Wanzheng. *Antenna theory and techniques*[M]. Xi'an: Xidian University Press, 2004.)
- [21] Groh C, Karst J P, Koch M, et al. TEM waveguides for EMC measurements[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 1999, 41(4): 440-445.