

基于横电磁波天线的高空核电磁脉冲辐射波模拟器设计

范丽思, 潘晓东, 王 赞

(军械工程学院静电与电磁防护研究所, 石家庄 050003)

摘 要: 为解决传统核电磁脉冲模拟器存在测试空间受限的问题, 提出了基于横电磁波(TEM)喇叭天线的高空核电磁脉冲辐射波模拟器设计方案。通过数值仿真验证了 TEM 喇叭天线的辐射场波形, 指出 TEM 喇叭天线在应用于辐射式电磁脉冲模拟器时存在低频辐射能力差的问题; 通过比较 TEM 喇叭天线对 3 种典型核电磁脉冲的辐射能力, 发现辐射场的上升沿部分主要取决于激励源的上升前沿陡度, 辐射场的脉冲宽度与激励脉冲的宽度有关, 可以通过展宽激励源脉冲宽度的方法来补偿 TEM 天线低频辐射能力差的问题; 通过实验验证了利用 TEM 喇叭天线研制电磁脉冲辐射波模拟器的可行性, 但仍需要阻性加载或展宽激励脉冲等方法对 TEM 喇叭天线的低频辐射性能进行改善。

关键词: 高空核电磁脉冲(HEMP); 电磁脉冲(EMP)模拟器; TEM 天线; 双指数脉冲; 匹配负载; 辐射场

DOI: 10.3969/j.issn.1003-6520.2012.09.023

文章编号: 1003-6520(2012)09-2302-06

Design of HEMP Radiating-wave Simulator Based on TEM Horn

FAN Lisi, PAN Xiaodong, WANG Yun

(Research Institute of Electrostatic and Electromagnetic Protection, Mechanical Engineering College, Shijiazhuang 050003, China)

Abstract: A TEM horn antenna of HEMP radiating-wave simulator is presented to expand the relatively small testing zone of the traditional transmission line simulator. The radiation field waveform of the antenna is simulated. The simulation results show that TEM antenna can be used to radiate HEMP simulation radiating wave, but in low frequency band its emissive capability is poor. Compared with radiation field waveforms of three typical HEMP excitation sources, it is concluded that the rise edge of the radiation waveform is determined by the changing rate of the excitation pulse source's rise edge, and the width of the radiation waveform is determined by the width of the excitation pulse. So the impact of the low frequency radiation capability deficiency can be compensated by expanding the excitation pulse width. The idea of using TEM horn antenna for HEMP radiating-wave simulator is verified by experiments. However, this application still needs improvement in the antenna's low frequency radiation capability, by means of loading resistance and expanding the excitation pulse width etc.

Key words: high-altitude nuclear electromagnetic pulses (HEMP); electromagnetic pulse (EMP) simulator; TEM antenna; double exponential waveform; matched load; radiation field

0 引言

高空核电磁脉冲(high-altitude nuclear electromagnetic pulses, HEMP)是由高空核爆炸产生的一种瞬变电磁现象, 具有陡峭的前沿, 较宽的带宽。高空核电磁脉冲能通过各种耦合途径使电子元器件、线路和设备受到严重的干扰和破坏^[1]。由于受国际条约的限制, 核电磁脉冲现场试验已不可能, 只能依靠于模拟试验^[2-3], 故研制电磁脉冲模拟器具有十分重要的意义。传统的传输式电磁脉冲模拟器通常采用平行板^[4-5]、GTEM^[6-7]和 TEM 室等传输线作为电

磁脉冲场形成装置, 在传输线中形成与脉冲源波形一致的电磁脉冲场^[8-9]。传统的传输式电磁脉冲模拟器产生的电磁脉冲波形上升时间受传输线长度的限制, 所以大型的传输式电磁脉冲模拟器产生的电磁脉冲场波形不可能太陡, 这就限制了对大型武器装备的高空核电磁脉冲抗扰度试验研究^[10]。对于大型系统(例如飞机、导弹等), 必须建立辐射波模拟器, 用天线将电磁波辐射出来。与有界波模拟器相比, 辐射波模拟器的技术难点之一在于辐射天线的研制^[11-12]。

在辐射波模拟器天线研究方面, 目前国内外主要采用笼形结构天线^[13-17], 主要由双锥和圆柱天线组成, 具有常阻抗、宽频带和平行于双锥天线轴线的场均匀度好等特点; 但其缺点也很突出: (1)天线的辐射性能在沿圆柱角向的 2π 范围内是均匀的, 即无

基金资助项目: 国家级重点实验室基础研究项目(9140C87010108JB3401)。

Project supported by Basic Research Projects of State Key Laboratory(9140C87010108JB3401)。

方向性,使得能量利用率低;(2)体积庞大,通常为300 m长,造价昂贵;(3)有效试验区面积较小。

为了克服以上缺点,本文用横电磁波(TEM)喇叭天线来代替通用的笼形天线,横电磁波喇叭天线具有常阻抗、宽频带、方向性好、体积相对较小和有效试验区面积较大等优点^[18]。本文通过数值分析和实验验证方法分析了 TEM 喇叭天线的结构,研究高空核电磁脉冲辐射波模拟器天线的辐射场特性。

1 高空核电磁脉冲辐射波模拟器及 TEM 天线

电磁脉冲辐射波模拟器原理如图 1 所示,由 Marx 发生器、锐化装置和 TEM 天线组成。Marx 发生器提供初始脉冲;锐化装置对初始脉冲进一步陡化;最终,由 TEM 天线形成符合要求的电磁脉冲模拟场。

TEM 喇叭天线由 2 块三角形平板组成。为保证天线的特性阻抗相同,采用如图 2 所示的恒阻抗结构,单平板的张角为 α ,三角平板之间的夹角为 β 。天线的高度取为 h ,宽为 w ,长度 l 。

2 终端负载对辐射波形影响

核爆炸产生的电磁脉冲波形近似为双指数脉冲。为仿真方便,根据 MIL-STD-461F^[19],假设加载在 TEM 喇叭天线的馈源点双指数波形为

$$U(t) = U_0 k (e^{-at} - e^{-bt}) \tag{1}$$

式中, $U_0=50\text{ kV}$; $a=4.0\times10^7\text{ s}^{-1}$; $b=6.0\times10^8\text{ s}^{-1}$; $k=1.3$ 。

利用时域仿真软件 CST 建立如图 3 所示的仿真模型。由于核电磁脉冲的低频成分大约几十 MHz,为了有效地辐射低频成分,天线的长度取值大约与半波长相近,所以本文中取天线的高度 $h=6\text{ m}$,宽 $w=6\text{ m}$,长度 $l=5.2\text{ m}$,三角平板之间的夹角 $\beta=60^\circ$,单平板的张角 $\alpha=60^\circ$ 。在上、下 2 块三角形平板的顶点处建立离散端口,在端口处施加式(1)的双指数脉冲。观察距离馈源端口 5、7、10 m 位置的波形,如图 4 所示。

从图 4 可以看到,随着距离的增加,电场强度急剧减小,并且波形也发生了变化。辐射场波形与源波形相比脉冲宽度变窄了,而且有过零和拖尾现象,这说明 TEM 喇叭天线的低频辐射能力有限。从图 4 中可以看出 TEM 喇叭天线终端开路的情况下,天线终端存在较大的反射,所以辐射场波形存在振荡,振荡周期为电流在 TEM 喇叭天线馈臂上往复的时间。而且,在实际工程中,由于终端反射对脉冲源反

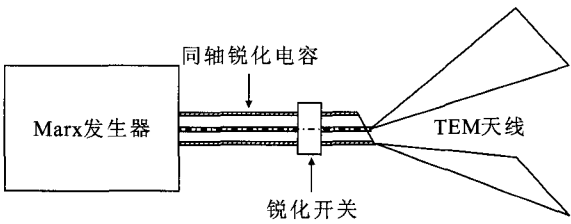


图 1 高空核电磁脉冲辐射波模拟器原理图
Fig. 1 Schematic diagram of HEMP radiating-wave simulator

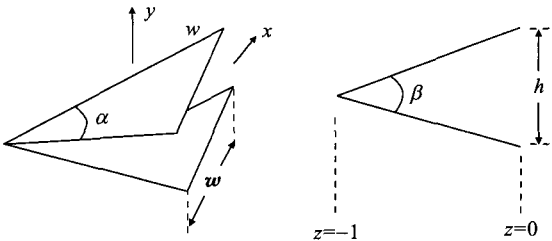


图 2 TEM 喇叭天线示意图
Fig. 2 Diagram of the TEM horn antenna

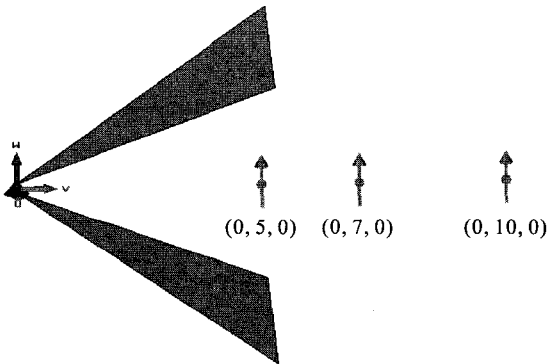


图 3 TEM 喇叭天线仿真模型
Fig. 3 Simulation model of the TEM horn antenna

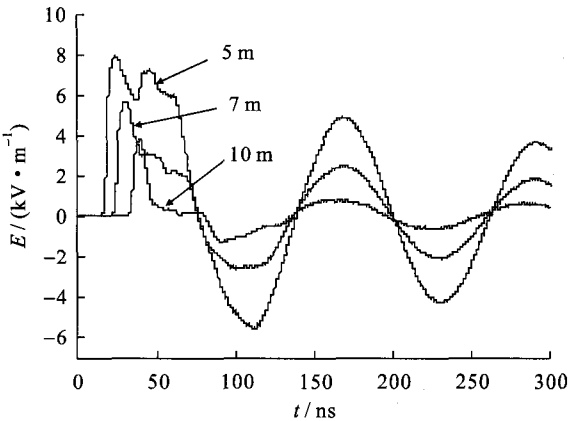


图 4 终端开路时的辐射场波形
Fig. 4 Radiation field waveform without loaded

向充电,容易造成脉冲源的损坏。

为减小 TEM 喇叭天线终端反射,在天线终端

加吸收负载,如图 5 所示。TEM 喇叭天线的宽高比为 1,天线的特性阻抗为^[20]

$$Z_0 = \frac{240\pi}{\frac{2w}{h} + 1.393 + 0.677 \ln(\frac{2w}{h} + 1.444)} \Omega = 178 \Omega.$$

(2)

所以在天线终端的 2 个顶角处加 2 个 360 Ω 的电阻并联。在端口处施加式(1)的双指数脉冲。观察距离馈源端口 5、7、10 m 位置的波形,如图 6 所示。

从图 6 中可以看出,在 TEM 喇叭天线终端加匹配电阻可以有效地减小波形振荡,改善 TEM 喇叭天线的低频辐射性能。在辐射场波形近似为双指数波,只要合适地调整输入的激励波形就可以得到满足要求的双指数辐射场波形,用此双指数辐射场波形可以模拟高空核电磁脉冲环境,以进行有关标准规定的 RS105 高空核电磁脉冲敏感度试验。

3 TEM 天线辐射特性随激励源脉冲宽度变化

从前面分析得到,辐射场波形的宽度小于激励脉冲波形的宽度,为增加辐射场脉冲宽度应,增加激励源的脉冲宽度。为了比较不同激励脉冲下的辐射场波形,选择常用的 3 种波形做比较。目前,描述 HEMP 波形较有影响的有 1976 年出版物标准^[21]、Bell 实验室标准^[22]和国际电工委员会(IEC)制定的 HEMP 标准^[23-24]等。表 1 列出了 3 种主要电磁脉冲波形标准的表达式参数,其中 t_r 是上升时间, t_p 是衰落时间。

对于图 3 所示结构的 TEM 喇叭天线加表 1 中 3 种双指数脉冲波形得到距离馈源端口 10 m 处的电场波形如图 7 所示。

对于图 5 所示结构的 TEM 喇叭天线加表 1 中 3 种双指数脉冲波形得到距离馈源端口 10 m 处的电场波形如图 8 所示。

从图 7 和图 8 中可看出,比较 3 种激励下,激励源上升时间越小,辐射场的前沿越陡,这是由于随着脉冲激励源信号前沿越陡,其所包含的高频分量更为丰富,频谱范围更宽,能够辐射出去的能量更大。所以,无论 TEM 喇叭天线终端是否开路,激励源为 IEC 61000-2-9 所对应的辐射场峰值和上升沿陡度依次大于 Bell 实验室波形和 1976 年出版物波形。

比较 3 种激励波形所对应的辐射场波形,激励源脉冲宽度越宽辐射场波形越宽。所以,在研制辐射式电磁脉冲模拟器时,应尽可能的提高激励脉冲的上升沿时间,并展宽激励脉冲的脉冲宽度,借此来补偿天线低频辐射能力不足的问题,这样就可以通

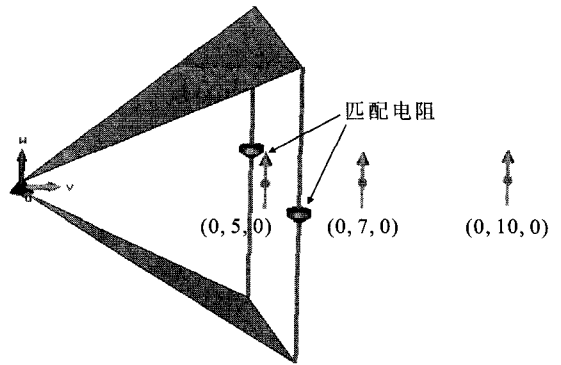


图 5 TEM 喇叭天线终端加负载的仿真模型
Fig. 5 Simulation model of the TEM horn antenna with load resistance

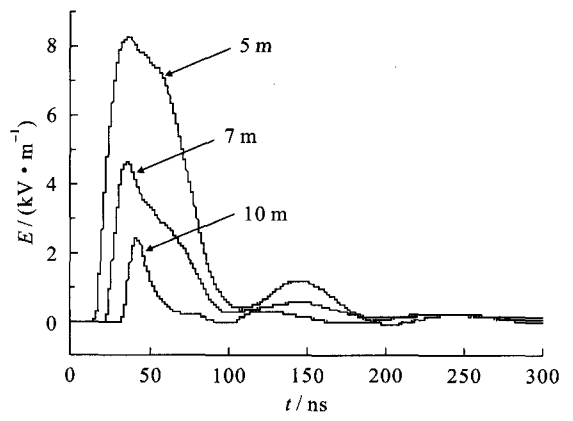


图 6 接负载时的辐射场波形
Fig. 6 Radiation field waveform with loaded resistance

表 1 几种高空核电磁脉冲波形标准的参数

Table 1 Description of several kinds of HEMP waveforms

标准	参数				
	k	a	b	t_r/ns	t_p/ns
1976 年出版物	1.04	1.5×10^6	2.6×10^8	7.8	1 465
Bell 实验室	1.05	4.0×10^6	4.76×10^8	4.1	550
IEC	1.3	4×10^7	6×10^8	2.5	55

过辐射的方式产生符合要求的双指数近似波形。但辐射式核电磁脉冲模拟器与传输式模拟器不同,产生的辐射场与激励脉冲和天线的辐射性能有关,与激励源和距离天线口径面的距离有关,因此利用辐射式核电磁脉冲模拟器只能产生近似双指数波,具体波形需要通过实际试验验证。

4 实验设计和结果分析

4.1 实验布置

实验采用 TEM 喇叭天线,整个实验方案如图 9

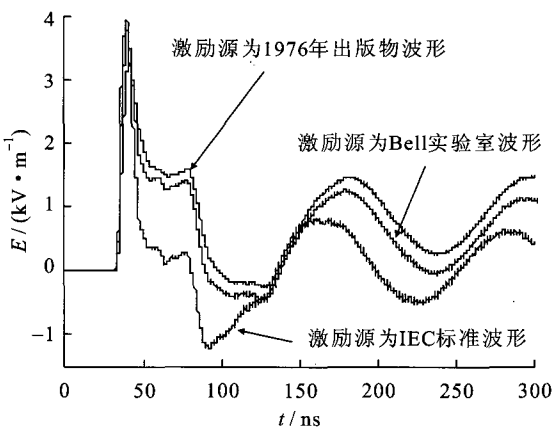


图 7 TEM 喇叭天线开路时不同激励源辐射波形
Fig. 7 Radiation field waveform with different excitation pulses TEM horn antenna end opened

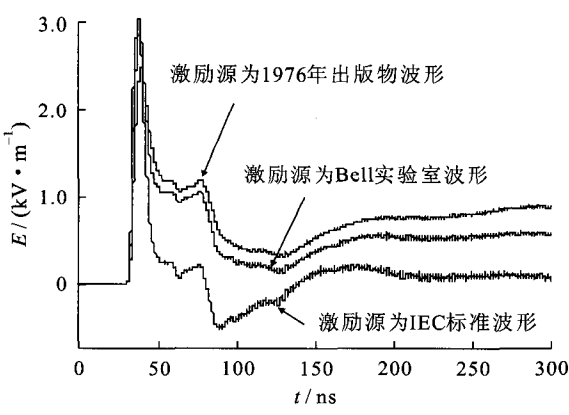


图 8 TEM 喇叭天线接匹配负载时不同激励源辐射波形
Fig. 8 Radiation field waveform excited by different excitation pulses TEM horn antenna with matched load

所示,高压电源通过充电限流电阻给电容器充电,当充电电压达到气体开关的击穿场强时气体开关自击穿,从而向 TEM 喇叭天线提供激励信号,激励脉冲经 TEM 喇叭天线辐射出去形成辐射场。试验布置如图 10 所示,由于试验条件限制,本实验所用天线参数与仿真模型不相同,辐射核电磁脉冲最关心的是天线低频辐射能力,但由缩比模型原理可知,短小天线能够达到辐射要求则长天线更能够达到要求。长天线的辐射能力有待进一步提高。天线长度取为 1.5 m,高度为 1 m,口径面宽度为 2 m。电场由光纤场强测试仪测量得到,在屏蔽室通过示波器获得电场的波形。

4.2 终端开路辐射场

受场强测试仪功能限制,暂不考虑场强值,只观察波形,得到天线口径面的波形见图 11,距离口径面 5 m 处的电场波形见图 12。可知,在天线输入端由于天线末端电流反射回来,导致波形较差。

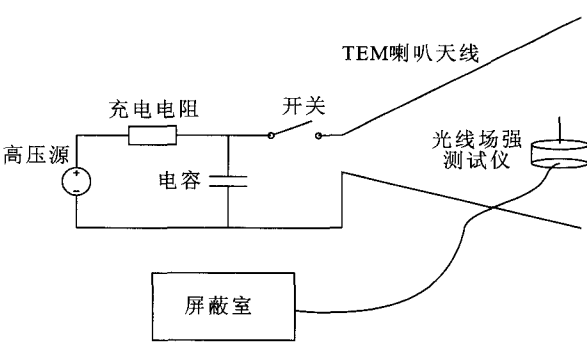


图 9 试验方案示意图
Fig. 9 Diagram of experimental scheme

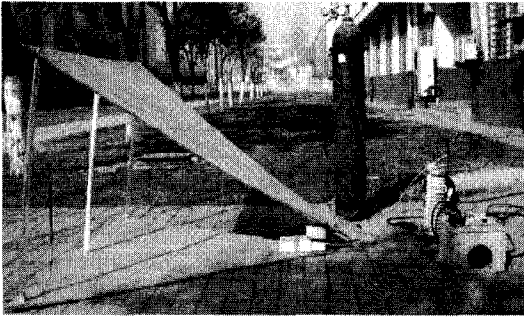


图 10 实验用 TEM 喇叭天线
Fig. 10 Photo of TEM horn antenna

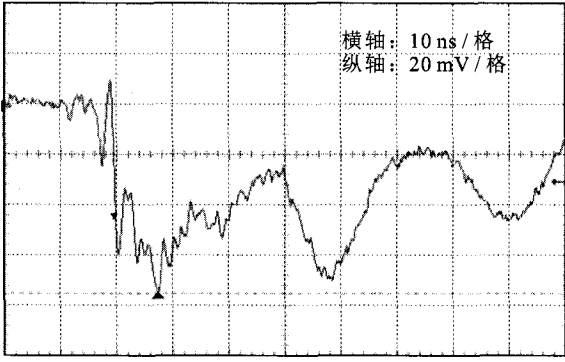


图 11 喇叭天线口径面处辐射场(终端开路)
Fig. 11 Radiation E-field waveform at TEM aperture (terminal opened)

4.3 终端接匹配负载辐射场

为减小天线终端反射,在天线末端加了两只大约为 360 Ω 的水电阻,得到天线口径面、距离口径面 5 m 远处的波形分别如图 13、14 所示。

实验结果表明,在 TEM 喇叭天线终端加吸收电阻有效地减小了波形振荡,距离口径面 5 m 处的场强近似为双指数波形,波形下降沿时间约为 1~2 ns,脉冲宽度十几 ns,波形参数基本达到美军标及其

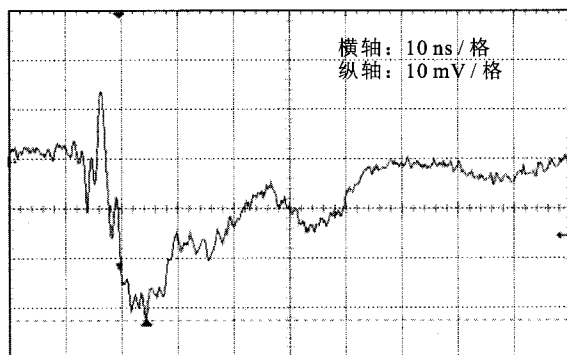


图 12 距离口径面 5 m 处辐射场(终端开路)

Fig. 12 Radiation E-field waveform at 5 m away TEM aperture (terminal opened)

他国际标准规定的高空核电磁脉冲要求。如果要进一步提高脉冲峰值场强,可以利用 Marx 发生器作为激励脉冲源,利用 TEM 喇叭天线作为场形成装置,最终可以产生辐射标准要求的高空核电磁脉冲环境,用于进行核电磁脉冲抗扰度实验。

5 结论

通过尝试将 TEM 喇叭天线用于高空核电磁脉冲辐射波模拟器,对天线进行的数值计算结果和实验结果均表明:

1) 用 TEM 喇叭天线辐射和电磁脉冲高频辐射性能较好;但由于天线的长度有限,天线末端有很大的反射,导致天线的低频辐射能力较弱,反映在波形上即波形半峰值脉宽不能够满足要求。

2) 辐射场的上升沿部分主要取决于激励源的上升前沿陡度,辐射场的脉冲宽度与激励脉冲的宽度有关,可以通过展宽激励源脉冲宽度的方法来补偿 TEM 天线低频辐射能力差的问题。

3) 高空核电磁脉冲辐射波模拟器与传输式模拟器不同,产生的辐射场与激励脉冲和天线的辐射性能有关,与激励源和距离天线口径面的距离有关,因此利用辐射式核电磁脉冲模拟器只能产生近似双指数波。

4) 在使用 TEM 喇叭天线作为辐射波模拟器的脉冲辐射天线时,需要对 TEM 喇叭天线的低频辐射性能进行改善。

参考文献 References

- [1] 侯民胜,秦海潮. 强电磁脉冲模拟技术[J]. 高电压技术, 2008, 34(2): 409-412.
HOU Minsheng, QIN Haichao. Simulation technology of intensive electromagnetic pulse[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(2): 409-412.

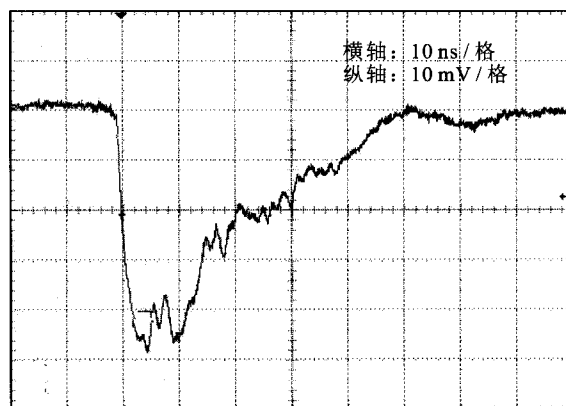


图 13 口径面处电场波形(终端接匹配负载)

Fig. 13 Radiation E-field waveform at TEM antenna aperture with matched loaded resistance

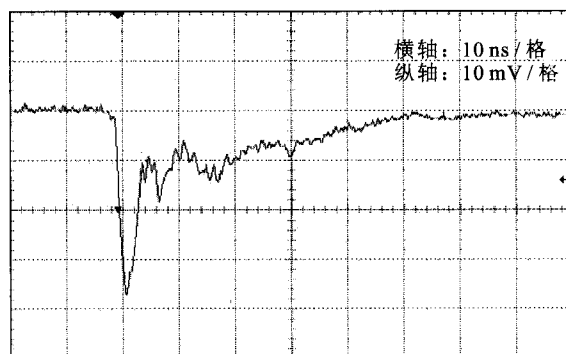


图 14 距离口径面 5 m 处电场波形(终端接匹配负载)

Fig. 14 Radiation E-field waveform at 5 m away TEM antenna aperture with matched loaded resistance

- [2] 陈伟峰, 陆静霞, 蒋全兴. 电磁脉冲模拟器技术回顾[J]. 高压电器, 2008, 44(2): 149-152.
CHEN Weifeng, LU Jingxia, JIANG Quanxing. Review of electromagnetic pulse simulator technology[J]. High Voltage Apparatus, 2008, 44(2): 149-152.
- [3] Radasky W A. Generation of high altitude electromagnetic pulse [C]//IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility. [S.l.]: IEEE, 2008: 1-5.
- [4] 范丽思, 魏光辉, 崔耀中. 采用同轴锐化技术的快沿脉冲模拟系统研制与测试[J]. 高电压技术, 2010, 36(12): 2966-2969.
FAN Lisi, WEI Guanghui, CUI Yaozhong. Design and test of HEMP simulator with fast rise time using coaxial technique[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(12): 2966-2969.
- [5] 国海广, 魏光辉, 范丽思, 等. 快沿电磁脉冲模拟器传输线宽高比对脉冲上升沿影响研究[J]. 核电子学与探测技术, 2009, 29(6): 1285-1376.
GUO Haiguang, WEI Guanghui, FAN Lisi, et al. Study on influence of ratio between wideness and height of EMP simulator transmission line with fast rise-time to rise-time of EMP[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2009, 29(6): 1285-1376.
- [6] 周启明, 孙庚晨, 罗学金, 等. 100 kV 高压 ns 陡脉冲源的研制[J]. 高电压技术, 2002, 28(6): 37-39.
ZHOU Qiming, SUN Gengchen, LUO Xuejin, et al. Develop-

- ment of a nanosecond high voltage pulse power of 100 kV and 50 Ω loading[J]. High Voltage Engineering, 2002, 28(6):37-39.
- [7] Schilling H, Schluter J, Peters M, et al. High voltage generator with fast rise time for EMP simulation[C]//10th IEEE International Pulsed Power Conference. [S. l.]: [s. n.], 1995: 1359-1364.
- [8] 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.
- [9] 黄志洵,贺 涛. 横电磁传输室和吉赫横电磁室特性阻抗的准静态分析计算[J]. 计量学报, 1994, 15(3): 167-174.
HUANG Zhixun, HE Tao. The characteristic impedance of TEM-cell and GHz TEM-cell static analysis calculation[J]. Journal of Metrology, 1994, 15(3): 167-174.
- [10] Vyvolokin A E, Neskorofov G F. EMP simulators-scientific investigations and long term development[C]//IEEE International Pulsed Power Conference. New York, USA: IEEE, 1993: 163-165.
- [11] Sun Bo, Qiu Jinghui, Zhang Chun, et al. Development of pulse radiation antennas[C]//International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology. Nanjing, China: IEEE, 2008.
- [12] Baum C E. EMP simulators for various types of EMP environments; an interim categorization[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 1978, 26(1): 35-53.
- [13] Fang J, Mani P, Nyffeler M. Near field of an impedance loaded elliptical antenna[C]//Proceedings of the 9th International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility. Zurich, Switzerland: [s. n.], 1991.
- [14] Tesche F M, Mo C, Shoup R W. Determination of the electromagnetic fields radiated from the ARES EMP simulator[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 1994, 36(4): 331-341.
- [15] Ronald F Blackburn, Clayborne D Taylor. On the electromagnetic fields from a hybrid type of EMP simulator[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 1978, 20(1): 240-247.
- [16] 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, 2007, 23(增刊1): 6-10.
MENG Fenxia, XIA Hongfu, WANG Jianguo. Theoretical and numerical studies on cage antenna of EMP radiating-wave simulator[J]. Journal of Microwaves, 2007, 23(Supplement 1): 6-10.
- [17] 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 characteristic of cage antenna of radiating wave EMP simulator[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2011, 23(6): 1597-1601.
- [18] 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.
- [19] MIL-STD-461F Requirement for the control of electromagnetic interference characteristics of subsystems and equipment[S], 2007.
- [20] 孟凡宝. 高功率超宽带电磁脉冲技术[M]. 北京:国防工业出版社, 2011.
MENG Fanbao. High power EM pulse technology[M]. Beijing, China: National Defense Industry Press, 2011.
- [21] Ricketts L W, Bridges J E, Miletta J. EMP radiation disturbance basic EMC publication[M]. New York, USA: Wiley, 1976.
- [22] MIL-STD-461C Electromagnetic emission and susceptibility requirements for the control of electromagnetic interference[S], 1986.
- [23] IEC 61000-2-9 Electromagnetic compatibility (EMC)-part 2-9: description of HEMP environment-radiated disturbance basic EMC publication[S], 1996.
- [24] IEC 61000-4-25 Electromagnetic compatibility (EMC) part 4-25: testing and measurement techniques HEMP immunity test methods for equipment and systems[S], 2001.



FAN Lisi
Ph. D.

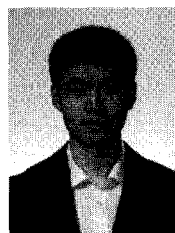
范丽思

1975—,男,博士,讲师

从事专业为电磁场与微波技术,研究方向为强电磁脉冲场模拟与防护技术

电话:(0311)87994355

E-mail:fanlisi@sina.com



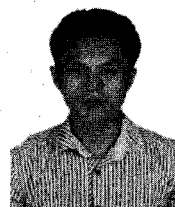
PAN Xiaodong
Ph. D. candidate

潘晓东

1980—,男,博士生,讲师

主要从事电磁兼容与防护技术方面的研究

E-mail:panxiaodong1980@sina.com



WANG Yun
Ph. D. candidate

王 赟

1985—,男,博士生

研究方向为电磁脉冲模拟技术

电话:(0311)87994376

E-mail:wangyunjunxie@163.com

作者: 范丽思, 潘晓东, 王赞
作者单位: 军械工程学院静电与电磁防护研究所, 石家庄, 050003
刊名: 高电压技术 ISTIC EI PKU
英文刊名: High Voltage Engineering
年, 卷(期): 2012, 38(9)
被引用次数: 1次

参考文献(24条)

1. 侯民胜;秦海潮 [强电磁脉冲模拟技术](#)[期刊论文]-[高电压技术](#) 2008(02)
2. 陈炜峰;陆静霞;蒋全兴 [电磁脉冲模拟器技术回顾](#)[期刊论文]-[高压 电器](#) 2008(02)
3. Radasky W A [Generation of high altitude electromagnetic pulse](#) 2008
4. 范丽思;魏光辉;崔耀中 [采用同轴锐化技术的快沿脉冲模拟系统研制与测试](#) 2010(12)
5. 国海广;魏光辉;范丽思 [快沿电磁脉冲模拟器传输线宽高频比脉冲上升沿影响研究](#) 2009(06)
6. 周启明;孙庚晨;罗学金 [100kV高压ns陡脉冲源的研制](#) 2002(06)
7. Schilling H;Schluter J;Peters M [High voltage generator with fast rise time for EMP simulation](#) 1995
8. 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](#)[期刊论文]-[测试技术学报](#) 2007(05)
9. 黄志洵;贺涛 [横电磁传输室和吉赫横电磁室特性阻抗的准静态分析计算](#) 1994(03)
10. Vyvolokin A E;Neskorodov G F [EMP simulators-scientific investigations and long term development](#) 1993
11. Sun Bo;Qiu Jinghui;Zhang Chun [Development of pulse radiation antennas](#) 2008
12. Baum C E [EMP simulators for various types of EMP environments:an interim categorization](#) 1978(01)
13. Fang J;Mani P;Nyffeler M [Near field of an impedance loaded elliptical antenna](#) 1991
14. Tesche F M;Mo C;Shoup R W [Determination of the electromagnetic fields radiated from the ARES EMP simulator](#)
[外文期刊] 1994(04)
15. Ronald F Blackburn;Clayborne D Taylor [On the electromagnetic fields from a hybrid type of EMP simulator](#)
1978(01)
16. 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](#) 2007(增刊1)
17. 朱湘琴;王建国;蔡利兵 [辐射波电磁脉冲模拟器笼形天线辐射特性的并行计算](#) 2011(06)
18. 田春明;王建国;陈雨生 [基于TEM喇叭的辐射波模拟器天线的近场特性](#) 2004(05)
19. [Requirement for the control of electromagnetic interference characteristics of subsystems and equipment](#)
2007
20. 孟凡宝 [高功率超宽带电磁脉冲技术](#) 2011
21. Ricketts L W;Brieves J E;Miletta J [EMP radiation disturbance basic EMC publication](#) 1976
22. [Electromagnetic emission and susceptibility requirements for the control of electromagnetic interference](#)
1986
23. [IEC 61000-2-9 Electromagnetic compatibility\(EMC\)-part 2-9 :description of HEMP environment-radiated disturbance basic EMC publication](#) 1996
24. [IEC 61000-4-25 Electromagnetic compatibility\(EMC\)part 4-25 :testing and measurement techniques HEMP immunity testmethods for equipment and systems](#) 2001

引证文献(1条)

1. 张丹丹. 胡建明. 崔婷. 周志强. 陈晨 [带传感器的射频识别技术在变电站电气设备状态信息采集中的应用](#)[期刊论文]-[高电压技术](#) 2013(11)

如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深, 让许多工程师望而却步, 然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上, 我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识, 借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训(www.edatop.com)专注于微波射频和天线设计人才的培养, 推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程, 化繁为简, 直观易学, 可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛, 让天线设计不再难...



HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书, 课程从基础讲起, 内容由浅入深, 理论介绍和实际操作讲解相结合, 全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程, 可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计, 让天线设计不再难...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程, 由经验丰富的专家授课, 旨在帮助您从零开始, 全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程, 边操作边讲解, 直观易学; 购买套装同时赠送 3 个月在线答疑, 帮您解答学习中遇到的问题, 让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>



13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程, 培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合, 全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作, 同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习, 可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试...

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



关于易迪拓培训：

易迪拓培训(www.edatop.com)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立，一直致力和专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养；后于 2006 年整合合并微波 EDA 网(www.mweda.com)，现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地，成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 ADS、HFSS 等专业软件使用培训课程，广受客户好评；并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书，帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司，以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

我们的课程优势：

- ※ 成立于 2004 年，10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养，更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果，又能免除您舟车劳顿的辛苦，学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲，结合实际工程案例，直观、实用、易学

联系我们：

- ※ 易迪拓培训官网：<http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网：<http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店：<http://shop36920890.taobao.com>