

电磁脉冲模拟器技术回顾

陈炜峰¹, 陆静霞¹, 蒋全兴²

(1. 南京农业大学工学院, 江苏 南京 210031; 2. 东南大学电磁兼容研究室, 江苏 南京 210096)

摘要: 介绍了核电磁脉冲的波形、模拟器的类型及国内外典型的模拟器, 简要叙述了电磁脉冲模拟器的相关技术及其研究现状, 得出快前沿脉冲模拟器将成为模拟器技术研究的热点, 模拟器的波形质量、稳定性等有待进一步提高。

关键词: 电磁脉冲; 电磁脉冲模拟器; 转换开关; 脉冲测量

中图分类号: TM832.1

文献标志码: A

文章编号: 1001-1609(2008)02-0149-04

Review of Electromagnetic Pulse Simulator Technology

CHEN Wei-feng¹, LU Jing-xia¹, JIANG Quan-xing²

(1. College of Engineering, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210031, China;

2. EMC Lab, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: The wave form of nuclear electromagnetic pulse (NEMP) and the different types of simulators are introduced. Technologies about electromagnetic pulse simulator and its current researches are discussed. It is argued that the research of EMP simulators with fast rise edge will become a hot point, and the wave form quality and stability of EMP simulator will be further improved.

Key words: electromagnetic pulse(EMP); EMP simulator; conversion switch; pulse measurement

0 引言

电磁脉冲(EMP)是一种瞬变电磁现象, 一般具有陡峭的前沿, 较窄的宽度, 较宽的频带。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。自 20 世纪 70 年代以来, 随着核技术和电磁武器的发展, 有关电磁脉冲的干扰破坏效应、生物效应及工程防护的理论和工程技术, 一直是世界各大国研究的热点之一, 其中电磁脉冲模拟技术得到了极大的关注。笔者主要介绍核电磁脉冲模拟器及其相关技术。

1 电磁脉冲波形及典型模拟器

核电磁脉冲(NEMP)是在核爆炸时, 由于伽马光子与空气介质分子的相互作用而产生的电磁辐射^[1]。高空核爆炸电磁脉冲(HEMP)辐射场时域波形包括早期、中期和晚期 3 个部分^[2]。通常所谓的电磁脉冲是指其早期部分。

1.1 电磁脉冲的波形

高空核爆电磁脉冲场强可以表述为: $E(t) = E_0 k$

($e^{-t/\tau_1} - e^{-t/\tau_2}$)。电磁脉冲的波形表述有多种不同标准, 目前, 较有影响的标准是美国国防部制定的军用标准和国际电工委员会制定的 HEMP 标准等。

1986 年颁布的美军标 MIL-STD-461C, 规定脉冲上升时间 t_r 5 ns, 脉宽 t_d 30 ns, 下降时间 t_f 550 ns。1993 年将 461C 修正为 461D, 将其参数规定改为: 波形前沿小于等于 10 ns, 后沿大于 75 ns。1999 年再次修正发布了采用 IEC 61000-2-9 中定义的 HEMP 早期波形, 见图 1, 并将上升时间改为 (1.8 ~ 2.8) ns, 半峰宽改为 (23 ± 5) ns。IEC 61000-2-9 内容是早期、中期和晚期 HEMP 波形的许多定义和辐射参数, 这是一项国际性的民用标准, 是国际电工委员会于 1996 颁布的, 且其引用也越来越广泛。

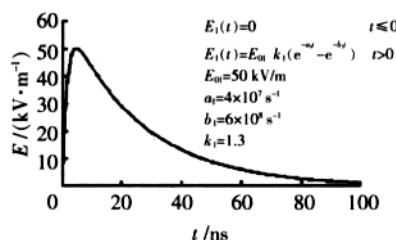


图 1 MIL-STD-461E 规定的波形

1.2 电磁脉冲模拟器的类型

核电磁脉冲模拟器按结构形式分为有界波模拟

收稿日期: 2007-08-05; 修回日期: 2007-12-13

作者简介: 陈炜峰(1964-), 男, 博士, 副教授, 从事机电系统电磁兼容性结构设计及测试技术、电磁脉冲模拟技术研究。

器和辐射波模拟器。按电场强度分为威胁量级和亚威胁量级两类模拟器^[3, 4]。按所需模拟的电磁脉冲环境,分为^[5]:源区外电磁脉冲环境模拟器、地面附近核爆炸源区内电磁脉冲环境模拟器、空中核爆炸源区内电磁脉冲环境模拟器、高空核爆炸源区内系统电磁脉冲模拟器。较为典型的有^[5, 6]:有界波模拟器、偶极子模拟器、静态模拟器、混合型模拟器、定向辐射模拟器等。

1.3 国内外典型模拟器

20世纪60年代以来,世界各国建造了许多核电磁脉冲模拟器。

美国至今已建成大小几十种EMP模拟器,并且已经系列化。较为典型的有以下几种^[4, 7]:

ALECS模拟器建成于1967年,是世界上第一台有界波模拟器(用于导弹试验),装设在新墨西哥州柯兰特空军基地。工作空间高12.5m,长13.7m,宽25m,过渡段(转换段)长50m,阻抗110 Ω ,峰值场强100kV/m,用以模拟高空核爆炸时的电磁脉冲环境。所用电源为2.2MV的范德拉夫发生器,工作峰值电压1MV,上升时间3~4ns,衰落时间250ns,工作频率6炮/小时。

ATLAS(又名Trestle)模拟器建成于1980年,是迄今为止世界上规模最大的有界波模拟器(用以对不同型号的导弹、飞机进行全尺寸模拟试验的木质结构试验台,耗资6000万美元)。它由两台ATLAS及ATLAS的脉冲发生器组成,电压分别为4MV及10MV,用以产生场强分别为100kV/m和50kV/m的水平场和垂直场;传输线为板形,两板距离105m,板宽34m,长410m。

HEMP有界波模拟器设在亚利桑那州华丘卡堡防卫通信局,有两个各长20m,转换段连接线高15m,宽24m的工作空间;脉冲电源为10级LC发生器,输出电压(50~400)kV可调,在400kV时峰值场强为26kV/m,上升时间3ns,衰落时间300ns。

TEMPS模拟器是集辐射型与静电场型于一体的混合型模拟器,安装在马里兰州哈里·戴蒙德实验室,模拟器总长9.4m,辐射天线为305m长的圆柱体;脉冲电源为两个35级马克思(Marx)发生器,充电电压100kV,充电时间40s,输出电压高于6MV,上升时间10ns,下降时间300ns。

OWL模拟器由美国核武器局研制,是用金属爆炸丝来模拟电磁环境的。它的脉冲功率系统采用马克思发生器,向水介质的脉冲传输线充电,水开关产生一个(50~100)ns的输出脉冲,充电电压为(4~6)MV,功率水平为 10^{12} W,该脉冲作用在真空中的爆炸丝上,形成等离子体,放射低能X射线。此外,1988年美国还建成了EMPRESS电偶极子模拟器(用于舰艇试验的海上模拟器)。

俄罗斯也于20世纪60年代初开始进行核电磁脉冲模拟器的研制^[8]。早期建成的SEMP-M5和SEMP-10模拟器,以传输线作为场形成装置。接着采用两级陡(峰)化技术将SEMP-M5改造成前沿时间小于3.8ns的SEMP-M5M;又通过加大马克思发生器的输出电压(7.2MV),发展了试验空间为50m \times 50m \times 80m,前沿时间为8ns的HVCPG-12/30模拟器。此后,还发展了前沿时间小于0.5ns的横电磁波室(transverse electromagnetic cell, TEM cell)型脉冲模拟器,电感储能与爆炸丝技术相结合的GIPV模拟器。在内电磁脉冲(internal EMP, IEMP)和系统电磁脉冲(system-generated EMP, SGEMP)模拟方面,典型模拟器有TORNADO和Moski等。

法国的SIEM-2,荷兰的EMIS,英国的PETS,德国的DIESES,瑞典的SAPIENA等欧洲国家的有界波模拟器都已建成30年以上,均为垂直极化类型的大中型模拟器,主要用于飞机等大型武器装备的试验,指标一般是前沿约8~10ns,脉冲持续时间200~500ns^[6]。

我国核电磁脉冲模拟器的研究起步略晚。早期代表性的模拟器主要有^[9, 10]:DM-140及DM-1200有界波模拟器、MDF-600可移动式辐射波模拟器、可移动式“V”型辐射模拟器、“春雷号”有界波模拟器等,主要用于军事目的。近年来这方面的研究有升温趋势,各种用途的中小型模拟器相继诞生,在脉冲源、场照射装置及计算分析等技术方面都得到了较快的发展^[11-19]。

2 模拟器脉冲源与脉冲测量技术

模拟器系统主要由脉冲源、电磁场形成装置(场照射器)及相关测量系统等部分组成。电磁场形成装置是用以在试件周围空间形成脉冲电磁场的金属结构物,它规定了用来激励电磁场的空间电流的流动方向和电流分布,它有各种几何形状,如倒立于地面上的圆锥体(单锥),悬置的双锥偶极子、平行板、圆环、扇面,横电磁波室、吉赫横电磁波室等。

2.1 脉冲源

模拟器脉冲源一般由初级能源、中间储能装置、能量转换及传输系统组成。

初级能源为小功率的能量输入设备,其能源主要来自电网。常用的初级能源有:直流高压串级发生器;美国物理学家R J范德格拉夫1931年发明的范德格拉夫起电机(Van de Graaff generator),又称范德格拉夫加速器;德国欧文·马克思(Erwin Marx)教授于1923年发明的马克思发生器;美籍克罗地亚科学家尼古拉·特斯拉于1891年发明的特斯拉(Tesla)变压器;20世纪60~70年代发明的脉冲磁流体发电机;澳大利亚国立大学于20世纪70年

代发明的单极发电机; 1978年美国发明的补偿式脉冲发电机(compulsator, CPA); 苏联大电流研究所于20世纪80年代初期发明的直线型脉冲变压器(Linear transformer); LC发生器, 等。

中间储能设备有以电容器和马克斯发生器为主的电场储能; 以常温或超导电感线圈为例的磁场储能; 以各类具有转动惯量的脉冲发电机为主的机械储能, 等。电感储能与电容储能相比, 电感储能密度大, 为前者的(100~1000)倍, 从而使得电感储能装置体积小, 成本低。补偿脉冲发电机和单极发电机比较适合于电阻和电容负载^[20]。

能量转换系统主要包括各种大容量闭合开关和各种波形调节技术设备, 其中, 开关技术具有特殊重要的地位。开关不仅要能传输大功率, 而且要求具有低电感和低的损耗。通常使用的开关有气体火花开关、油开关、水开关等^[21-27]。

2.2 脉冲测量技术

电磁脉冲测量包括脉冲电场、脉冲磁场、脉冲电压及脉冲电流的测量。由于电磁脉冲信号是上升时间仅几个纳秒、持续时间几十纳秒至几毫秒的极高强度的瞬态信号, 因而要求测量系统具有与之相适应的频率响应范围和较强的抗干扰能力。

测量脉冲高电压的常用方法是分压器测量系统、微积分测量系统及光电测量系统等。脉冲强电流的测量常用分流器和数字示波器所组成的系统, 也常用罗戈夫斯基线圈(Rogowski coil)作为换能装置。此外, 也可用光电测量系统。

脉冲电场测量中, 传感器一般采用偶极子天线。根据传感器工作在频响特性的转折频率以下还是以上, 将电场传感器分为D传感器和E传感器。磁场传感器的基本形式是磁偶极子(电小的环路)。与脉冲电场传感器类似, 脉冲磁场传感器分为B(H)传感器和B传感器两类^[4]。

为了提高测量系统的抗干扰能力, 光纤传输技术被广泛采用, 光电测量系统得到广泛的关注^[21-27]; 为了改善系统的响应性能和提高测量精度, 多种补偿技术被创造和很好的应用^[28-32]。

3 模拟技术的研究现状与展望

随着对HEMP的深入认识和标准逐步修订, 目前的研究热点一方面是新的EMP环境模拟, 研制快前沿电磁脉冲(fast rise EMP, FREMP)模拟器, 指标一般为前沿小于1 ns、脉冲持续时间为几十 ns^[33]。另一方面就是高空核电磁脉冲指标修正, 改进HEMP模拟器前沿指标为2~5 ns、脉冲持续时间约百 ns^[34]。

随着计算技术的发展, 为了克服研制的盲目性, 人们在计算仿真方面做出了不懈的努力。如, 文[35]

用矩量法对模拟器高频段的频谱进行了分析; 文[36, 37]用空间时域技术研究了瞬变场在模拟器内的分布; 文[11, 38]用3维FDTD方法对模拟器的场形成进行了模拟计算, 并分析了受试设备对场波形的影响, 等。

研究表明^[3], 脉冲上升沿越陡、脉宽越宽的波形标准, 其频谱高频分量越大、能量越高, 威胁性也越大。因此, 研制快前沿模拟器, 将成为模拟技术的方向。

与此同时, 脉冲测量技术面临着极其严峻的挑战。目前, 光电测量技术正方兴未艾, 波形重构技术也已成为研究的热点^[39-41]。

4 结语

随着军用HEMP标准的改变和民用标准的产生、现代电磁武器技术的快速发展, 各国对EMC的日益重视, 关于EMP效应及其应用研究正向更多的领域扩展, 如电缆耦合效应的研究、屏蔽效能研究、电力系统敏感度研究、生物效应研究等。随着计算技术及相关脉冲功率技术的发展, 电磁脉冲模拟技术必将得到快速发展。

就目前而言, 脉冲模拟器的波形质量、触发稳定性等有待进一步提高。

参考文献:

- [1] ANSI C63.14, 1992. American National Standard Dictionary for Technologies of Electromagnetic Compatibility (EMC), Electromagnetic pulse (EMP), and Electromagnetic Discharge (ESD) [S]. 1992.
- [2] IANOSI M, NICOARA B I C, RADASKY W A. Modeling of an EMP Conducted Environment [J]. IEEE Trans. on EMC, 1996, 38 (3): 400-413.
- [3] 谢彦召, 王赞基, 王群书, 等. 高空核爆电磁脉冲波形标准及特征分析[J]. 强激光与粒子束, 2003, 15(8): 781-787.
- [4] 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.
- [5] BAUM C E. EMP Simulators for Various Types of EMP Environments: An Interim Categorization [J]. IEEE Trans. on EMC. 1978, 26(1): 35-53.
- [6] BAUM C E. From the Electromagnetic Pulse to High-power Electromagnetics [J]. Proceedings of the IEEE. 1992, 80(6): 789-817
- [7] 李丁九, 陈首攀. 核电磁脉冲模拟与脉冲功率技术 [J]. 电工电能新技术, 1983(2): 11-17.
- [8] VYVOLONIN A E, NESKORODOV G F. EMP Simulators-scientific Investigations and Long-term Development [C]// In: IEEE International Pulsed Power Conference (Albuquerque, NM, USA). New York, USA: IEEE, 1993 (1): 163-165.
- [9] 彭新贵. 核电磁脉冲模拟器的发展状况 [J]. 中国航天, 1990 (11): 44-47.
- [10] 孙蓓云, 周晏, 郑振兴, 等. 有界波EMP模拟器脉冲高压源[J]. 强激光与粒子束, 2000, 12(4): 505-508.
- [11] 陈彬. FDTD法及其在电磁脉冲模拟设备、耦合规律研究中

- 的应用[D]. 南京: 解放军理工大学工程兵工程学院, 2003.
- [12] 范丽思, 刘丽珍, 张希军, 等. 纳秒级电磁脉冲模拟器的研制[J]. 军械工程学院学报, 2004, 16(6): 58-61.
- [13] 杨欣, 闫哲, 杨智博. 电磁脉冲模拟器的研制[J]. 自动化技术与应用, 2006, 25(3): 52-53.
- [14] 陈炜峰, 蒋全兴. 电磁脉冲模拟器用纳秒脉冲源的研制[J]. 高压电器, 2006, 42(5): 331-334.
- [15] 侯民胜, 王书平. 核电磁脉冲模拟装置[J]. 高电压技术, 2002, 28(1): 37-38.
- [16] 潘晓东, 魏光辉, 任新智. 金属线栅代替金属板对有界波模拟器电磁特性的影响[C]// 中国物理学会静电专业委员会第十三届学术年会. 中国 河北 石家庄, 2006: 33-36.
- [17] 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): 87-90.
- [18] 孙蓓云, 谢彦召, 相辉, 等. 50 kV, 1 ns 前沿高压脉冲源的研制[J]. 核电子学与探测技术, 2007, 27(2): 118-120.
- [19] 汤俊萍, 董勤晓, 薄海旺, 等. 300kV/3ns 脉冲电压源的研制[J]. 强激光与粒子束, 2007, 19(6): 153-156.
- [20] 刘锡三. 高功率脉冲技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005.
- [21] 王欣, 邓君, 唐丹, 等. 高压脉冲电流光电测试系统设计及其标定[J]. 仪器仪表学报, 2004(S1): 398-401.
- [22] 朱四桃, 朱柏承, 樊亚军, 等. 超宽谱电磁脉冲辐射场测量系统[J]. 强激光与粒子束, 2006, 18(2): 87-90.
- [23] KOIN K, HIROSHI S, FUMITOSHI N. Development of a High Voltage Sensor Using a Piezoelectric Transducer and a Strain Gage[J]. IEEE Trans. on Instrument and Measurement, 1988, 31(4): 564-568.
- [24] 郭小明, 苏进喜, 罗承沐. 纳秒级脉冲电压的电光测量[J]. 清华大学学报, 1997, 37(4): 65-67.
- [25] 邓向阳, 李泽仁, 田建华, 等. 测量脉冲大电流的四光路光学电流传感器技术[J]. 强激光与粒子束, 2005, 17(9): 1303-1306.
- [26] 祝敏, 贺亦成, 刘顺坤, 等. 有源光纤 EMP 测量系统及对 EMP 模拟器空间场测量[J]. 核电子学与探测技术, 2001, 21(5): 82-84.
- [27] 李炎新, 石立华, 高成, 等. 用宽带模拟量光纤传输系统测量脉冲电磁场[J]. 高电压技术, 2006, 32(2): 39-41.
- [28] 陈炜峰, 蒋全兴. 电阻分压器性能与高压纳秒双指数脉冲的测量[J]. 东南大学学报, 2006, 36(3): 374-379.
- [29] 陈炜峰, 蒋全兴. 一种电阻脉冲分压器的研制[J]. 高电压技术, 2006, 32(7): 76-78.
- [30] 高景明, 刘永贵, 杨建华. 一种电容补偿型高压电容分压器的设计[J]. 高电压技术, 2007, 33(6): 81-84.
- [31] 余存议, 袁梅珍, 张文元, 等. 高压强流陡脉冲测量技术的研究[J]. 西安交通大学学报, 1995, 29(10): 1-6.
- [32] 祝敏, 贺亦成, 郑振兴, 等. 新型偶极电场探测器及对空间电场的测量[J]. 传感器技术, 2000, 19(4): 49-51.
- [33] GILMAN C, LAM S K, NAFF J T, et al. Design and Performance of the FEMP-2000: a Fast Risetime, 2 MV EMP Pulse [C]// In: 12th IEEE International Pulsed Power Conference (Monterey, CA, USA). Piscataway, NJ, USA: 1999(2): 1437-1440.
- [34] SCHILLING H, SCHLUTER J, PETERS M, et al. High Voltage Generator with Fast Risetime for EMP Simulation[C]// In: Tenth IEEE International Pulsed Power Conference (Albuquerque, NM, USA). New York, USA: IEEE, 1995(2): 1359-1364.
- [35] HOOK M S. Numerical Analysis of a Transmission Line EMP Simulator[J]. IEEE Trans. on Electromagn. Compat. 1975(17): 85-92.
- [36] BARDET C, DAFIF O, JECKO B. Time-domain Analysis of a Large EMP Simulator[J]. IEEE Trans. Electromagn. Compat. 1987(29): 40-48.
- [37] KLAASEN J J. An Efficient Method for the Performance Analysis of Bounded-wave Nuclear EMP Simulator [J]. IEEE Trans. on Electromagn. Compat. 1993, 35(3): 329-338.
- [38] AHMED S, SHARMA D, CHATURVEDI S. Modeling of an EMP Simulator Using a 3-D FDTD Code [J]. IEEE Trans. Plasma Sci. 2003, 31(2): 207-215.
- [39] 潘洋, 严萍, 袁伟群. 纳秒脉冲电容分压器测量系统分析及波形重建[J]. 高电压技术, 2005, 31(2): 54-56
- [40] LAGNESE J, MEKNIGHT R H. Calculation of Confidence Intervals for High-voltage Impulse Reconstruction [J]. IEEE Trans. on Instrument and Measurement, 1988, 37(3): 201-206.
- [41] 韩英杰, 孙广生, 严萍, 等. 纳秒脉冲电压的波形重建[J]. 强激光与粒子束, 2004, 16(4): 514-516.