



高空核电磁脉冲模拟器研制进展

吴刚^{1,2*}, 贾伟^{1,2}, 王海洋^{1,2}, 谢霖霖^{1,2}, 陈志强^{1,2}, 郭帆^{1,2}, 吴伟^{1,2}, 冯寒亮^{1,2}

1. 强脉冲辐射环境模拟与效应全国重点实验室, 西安 710024;

2. 西北核技术研究所, 西安 710024

*联系人, E-mail: wugang@nint.ac.cn

收稿日期: 2022-12-12; 接受日期: 2023-03-09; 网络出版日期: 2023-06-09

摘要 高空核电磁脉冲模拟器由快脉冲驱动源和大型天线组成, 可在数十米以上的较大空间内产生前沿几个纳秒、脉宽数十纳秒、峰值50 kV/m以上的瞬态电磁场环境, 在国防领域用于大型车辆、飞机、舰船等装备的防护试验. 国际上的发展趋势为获得快前沿(1–2 ns)、高场强(70–100 kV/m)、大试验空间(30–300 m). 目前单边驱动型和双边驱动型快脉冲源的运行电压分别达到3和5 MV, 结合新型天线的运用, 试验空间不小于70 m, 当前的挑战是将单边驱动型脉冲源的电压提高到10 MV以上. 国内已研制多台大型模拟器, 单边驱动型脉冲源电压指标不低于3 MV. 本文报道了西北核技术研究所等单位在紧凑化初级高压源、薄膜式高压脉冲电容器、低抖动气体开关等关键部件设计及大型天线研究设计取得的进展.

关键词 高空核电磁脉冲, 模拟器, 快脉冲驱动源, 辐射天线, 气体开关

PACS: 28.70.+y, 41.20.Jb, 51.50.+v, 84.70.+p

1 引言

由爆高30 km以上的核爆炸产生的高空核电磁脉冲(High-altitude Electromagnetic Pulse, HEMP)具有峰值场强高、覆盖范围广、耦合目标对象多的特点, 是信息化装备设施需要防范应对的一种威胁电磁环境. 其中由瞬发伽马射线与空气介质作用产生康普顿电流激励的HEMP早期(E1)环境为前沿几个纳秒、脉宽数十纳秒的瞬态电磁场, 峰值场强达20–50 kV/m的覆盖区域可达数百万平方公里, 是HEMP效应与防护研究的重点. 由输出电压数兆伏的高功率脉冲源驱动大型辐射天线, 可在数十米以上的较大试验空间内产生

HEMP模拟试验环境, 此类专门设施即称为HEMP模拟器. 相关研究从20世纪60年代起步, 到90年代初国际上先后建成数十台大型HEMP模拟器, 输出电压最高达7 MV, 天线尺度最大达400 m, 能满足大型导弹、飞机、水面舰船的全系统威胁级辐照试验需求. 在HEMP研究的基础上, 进一步衍生发展出了高功率微波(High-Power Microwave, HPM)技术、高功率电磁学(High-Power Electromagnetics)等新兴领域, 详见美国著名电磁学专家Baum^[1,2]对以上技术发展史的回顾性综述.

HEMP模拟器为试验与防护研究提供了基本条件. 模拟器的研制不仅取决于脉冲功率技术和天线设计技

引用格式: 吴刚, 贾伟, 王海洋, 等. 高空核电磁脉冲模拟器研制进展. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2023, 53: 272009

Wu G, Jia W, Wang H Y, et al. Progress in developing high-altitude electromagnetic pulse simulators (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2023, 53: 272009, doi: 10.1360/SSPMA-2022-0484

术的发展, 也与HEMP环境的理论计算和标准制定、瞬态强电磁场测量与标定等研究方向的进展紧密关联. 自20世纪90年代中期以来, 美国用于规范HEMP模拟器指标的军用标准MIL-STD-2169《HEMP环境》已经更新3次(内容不公开, 最近一次为2021年更新至D版), 从近年新建或升级HEMP模拟器的指标判断, 在朝着前沿更快(如1–2 ns)、场强更高(如从50 kV/m增加到70–100 kV/m)、试验空间更大的方向发展. 国际期刊*IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*于2013年再次出版HEMP特刊(上一次为1978年), 部分综述性文章对HEMP模拟器研制及试验技术的发展演变进行了总结回顾. 如美国学者Giles等人^[3]汇总比较世界范围内数十台可公开查询到的HEMP模拟器主要指标, 回顾了部分代表性模拟器的建设过程; Giri等人^[4]回顾了对HEMP环境上升沿的研究与行业标准的演变, 以及快前沿驱动源技术的发展; Prather等人^[5]回顾了美国空军武器实验室早期研制HEMP试验测量传感器和模拟器的主要进展, 包括基于低幅度电场测试电磁耦合传递函数的连续波辐照器等. Shi等人^[6]基于公开的期刊文献综述了国内在HEMP模拟器与试验系统、耦合分析、实验研究等方面的进展, 其中报道的HEMP模拟器主要是工作电压100 kV量级的中小型模拟器. Meng^[7]报道了基于公开的康普顿电流源物理模型计算HEMP早期环境的主要结果, 给出了峰值电场空间分布及脉冲上升沿等参数随核爆炸物理参数的变化规律.

本文将从大型模拟器研制、快脉冲驱动源和大型辐射天线研究设计等几个方面进一步介绍国内外近年的动态, 着重反映近十年来在驱动源关键部件性能优化、新型天线设计与应用等方向取得的进展.

2 大型模拟器研制动态

大型HEMP模拟器一般输出电压达到MV量级, 试验空间达数十米以上. 试验空间的峰值电场强度超过50 kV/m、波形特征一般为前沿1 ns量级、脉宽10 ns量级的双指数波, 试验空间的大小决定于脉冲源的输出幅度. 对辐射波型模拟器, 大多采用水平双锥偶极子(Horizontally Polarized Dipole, HPD)或地面镜像的垂直单锥天线(Vertically Polarized Dipole, VPD), 试验区域远离天线主体, 在距离锥点(天线馈入点) r 处的电

场峰值 E_p 为

$$E_p = 60U_0 / Zr, \quad (1)$$

其中 U_0 为脉冲源馈入天线负载的电压峰值, 天线阻抗 Z 由锥体的半锥角决定. 理论上, 增大锥角、降低阻抗有利于提高峰值场强, 或降低对驱动源电压的要求, 但也会带来有效试验空间减小、脉冲源陡化输出段电感控制难度加大的风险. 对水平极化模拟器, 兼顾场强峰值和试验空间大小后, 常选取半锥角 32° , 对应 $Z = 150 \Omega$. 如要求距离 $r = 20 \text{ m}$ 处峰值电场不低于50 kV/m, 则脉冲源馈入电压峰值需不低于2.5 MV. 对采用地面镜像单锥天线的垂直极化辐射波模拟器, 可取 $Z = 60\text{--}75 \Omega$, 脉冲源输出电压峰值达5 MV就能实现 $r = 100 \text{ m}$ 处的 E_p 超过50 kV/m.

对导波型模拟器, 试验空间位于三角锥或平行极板之间, 峰值电场 E_p 由电压和极板间距 h 决定:

$$E_p = U_0 / h. \quad (2)$$

可见, 峰值电压1.5 MV即可在高度30 m的极板区域产生50 kV/m电场, 相比辐射波型模拟器而言, 从电磁脉冲能量向辐射场的转换更为有效, 主要原因在于导波结构使电磁能量更多地集中于试验区域.

基于以上量值关系, 对部分未公开脉冲源电气参数的模拟器, 可根据峰值电场和试验空间的大小, 推断出脉冲源的电压指标, 或由后者反推前者.

国际上早期的大型HEMP模拟器, 特别是电压峰值达4–7 MV的多台典型装置, 大多由美国空军武器实验室领衔研制. 在美国空军柯特兰基地部署的大型HEMP模拟器最多时达到8台. 1990年起, 这些大型模拟器基本都被封存或移交. 近十几年来, 美国着手重建HEMP试验能力, 目前在陆军白沙导弹靶场和海军空战中心航空分部两处试验基地部署运行5台大型模拟器, 主要参数及特点列于表1, 部分关键数据源于文献[1–3, 8–11]. 仅有2台水平极化辐射波模拟器报道了最大运行电压, 分别为3和5 MV, 其余3台模拟器的电压指标估计在2–3 MV, 最大峰值场强达到70–120 kV/m, 电场前沿接近1 ns, 试验区域最大可达60–70 m, 以容纳波音747级别的大型飞机进行试验. 新建或升级的模拟器有3台, 均采用了新型天线, 以使电磁能量更集中于试验空间, 或降低对脉冲源运行电压的要求, 后文将进一步讨论. 以上几台模拟器基本能够满足大型陆空基机动装备的试验需求, 其中用于飞机试验的两台

表 1 美国目前运行的大型HEMP模拟器

Table 1 Large HEMP simulators available in USA

机构	名称	建成时间 (年)	类型	最大电压 (MV)	电场参数	试验区域	特点
陆军白沙导弹靶场(WSMR)	HPD-II	~1995	水平极化辐射波	2–3	峰值70 kV/m, 前沿2–3 ns, 半宽7–15 ns	30 m×30 m	可机动部署
	AFEMPS	2009	水平极化辐射波	3	峰值70 kV/m, 前沿1.2–1.8 ns, 半宽20–35 ns	18 m (宽)×30 m (高)	新型天线
	USA VEMPS	2010	垂直极化导波型	2–3	峰值70 kV/m	35 m×35 m×35 m	新型天线
海军空战中心 (NAWCAD)	USN-HPD	2009	水平极化辐射波	5	峰值60–120 kV/m, 前沿1.3–2.8 ns, 半宽40 ns	直径60 m	双端驱动源
	USN-VEMPS	2018	垂直极化导波型	2–3	–	70 m×70 m	新型天线

模拟器现场实物或设计图如图1所示。

当前最具挑战性的是按照新的快前沿指标要求, 研制可满足全尺寸舰船威胁级(场强20–50 kV/m)辐照试验需求的模拟器. 美国海军在20世纪80年代末建成舰船试验用第二代模拟器EMPRESS-II, 标称电压7 MV, 前沿略小于10 ns, 可在距离天线顶点200 m处产生峰值25 kV/m的脉冲电场, 该模拟器于1993年完成了一艘宙斯盾巡洋舰(总长度173 m)的全系统辐照试验后, 已被拆除^[12]. 2014年美国国防部发布信息征询, 拟针对长度约335 m、高度76 m的核动力航母建造全舰船威胁级模拟器TLS, 要求电场环境达到标准规定的快前沿指标(如2.5 ns)^[13]. 因试验对象尺寸相比“安吉奥号”巡洋舰增加近一倍, 保守估计TLS输出电压至少要达到10 MV以上, 迄今未见该模拟器研制的进展信息. 其主要的困难在于, 1–10 MV量级的高电压要求较大的绝缘距离, 典型尺度在数十厘米甚至1 m量

级, 而在天线形式和阻抗基本确定的条件下追求1–2 ns的快前沿意味着脉冲源陡化输出回路的电感要足够低、结构要尽可能紧凑(典型尺度在1 cm量级), 这种极限约束还有待物理和工程设计上的再次突破.

国内的HEMP模拟器研制技术起步相对较晚. 在20世纪八九十年代先后研制了DM-1200 (航天二院二部)、“春雷号”(西北核技术研究所)等中型垂直极化导波型模拟器, 脉冲源输出电压不超过1 MV, 电场前沿约10 ns. 2000年前后研制了响应级大型水平极化辐射波模拟器DMF-600, 后升级为DMF-1200, 运行电压最高1 MV, 距离天线20 m处的峰值电场约15 kV/m, 脉冲前沿略小于10 ns^[14]. 到2008年, 西北核技术研究所研制成功国内首台大型威胁级水平极化辐射波模拟器NEMP, 最高工作电压2.5 MV, 正常工作电压2 MV, 脉冲前沿2–3 ns, 可在60 m × 40 m试验空间内产生大于20 kV/m的脉冲电场^[15,16].

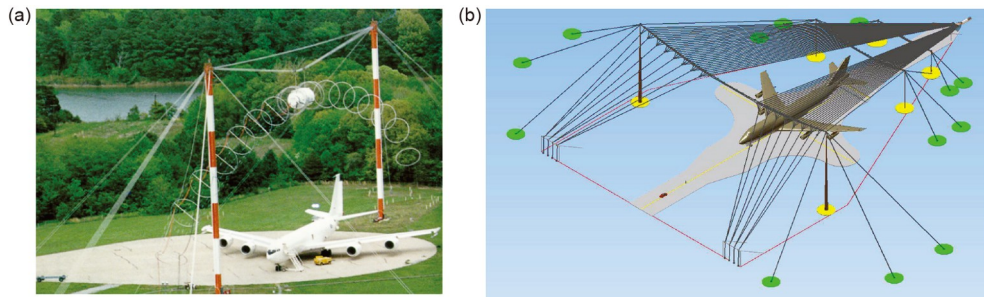


图 1 (网络版彩图)美国海军用于飞机试验的水平极化辐射波模拟器USN-HPD^[23] (a)和垂直极化导波型模拟器USN-VEMPS^[11] (b). 图片已获得使用授权

Figure 1 (Color online) HEMP simulator USN-HPD^[23] (a) and USN-VEMPS^[11] (b) operated by USA Navy for aircraft tests. Reprinted with permissions of ref. [23], Copyright©2011, IEEE, and ref. [11], Copyright©2017, IEEE.

近十年来,西北核技术研究所进一步发展了更高电压(3–4 MV)的垂直极化模拟器. 2019年报道了研制标称4 MV快前沿HEMP模拟器脉冲功率驱动源的进展情况,实测脉冲源不同部件上的电压峰值在3.2–3.7 MV,输出电压前沿约3 ns,脉冲源输出段按连接双板导波天线设计^[17]. 2022年报道了研制另一台3 MV以上快前沿HEMP模拟器驱动源的进展,实测脉冲源峰化段的电压峰值达到3.6 MV,驱动室内架设的地面镜像小型单锥天线(阻抗75 Ω),辐射电场前沿可达2 ns以下^[18]. 除脉冲源外,对大型导波天线、单极线锥天线、新型水平极化辐射波天线等也开展了大量仿真研究与工程设计.

国内其他单位报道了升级或新研制部分中小型模拟器的进展. 如傅海军等人^[14]改造了DM-1200模拟器的脉冲源,天线结构不变,电场前沿由约10 ns减小到约2.5 ns,电场峰值50 kV/m;周开明等人^[19]利用电子高压倍压器技术,设计研制了输出电压0.8–300 kV连续可调的大动态范围高压脉冲源,用于驱动高度5 m的小型导波模拟器,可实现电场强度在0.2–60 kV/m范围的连续调节;金晗冰等人^[20]报道了新研制一台中小型水平极化模拟器的实验研究进展,以标称700 kV脉冲源驱动架高6.5–8 m的水平极化天线,获得电场峰值50 kV/m以上的工作空间为5 m $\times$ 3 m $\times$ 2 m. 本文主要关注电压数MV的大型模拟器,对以上中小型模拟器不作深入讨论.

3 快脉冲驱动源研究设计进展

(1) 主要技术路线及其实现

研制输出电压幅值数兆伏、前沿1 ns量级的快脉冲驱动源是建造大型HEMP模拟器的关键. 早期研制的前沿10–20 ns的大型模拟器主要采用一级脉冲压缩技术路线,即以Marx发生器等初级高压源直接产生幅值兆伏量级、前沿数百纳秒的高压脉冲,经峰化电容、输出开关进行一次脉冲压缩,将电脉冲前沿压缩到10–20 ns后驱动天线. 自20世纪90年代以来,为获得前沿1–2 ns的快脉冲,美国Physics International公司(现为L-3通信公司脉冲科学部)发展了两级脉冲压缩技术:初级高压源的电脉冲经中间储能(简称中储)电容(Transfer Capacitor)和中储开关进行第一次压缩,以20–50 ns的脉冲前沿对峰化电容充电,再经输出开关

的又一次陡化,输出到天线上. 其中的关键难点,一是控制中储段的输出稳定性,二是通过峰化段与天线结构的一体化设计保证快前沿部分能无畸变地馈入到天线上. 为获得更高的驱动电压,对于连接对称结构双锥天线的水平极化模拟器,可采用正负两种极性的脉冲源对天线进行双端激励(又称双极加载),实现电压的倍增,这一技术路线要求正极性和负极性两台脉冲源的电脉冲能以较高的同步精度(如5–10 ns)加载到天线锥点附近的输出开关上,以实现理想的快前沿双指数波,并保证峰化电容等紧凑化绝缘部件不出现过电压损伤.

以上主要是电路层面的物理设计. 脉冲源的主要部件为初级高压源、两种脉冲高压电容、两种脉冲开关,工作模式为基本的C-L-C谐振充/放电,结构组成相比于核爆 γ 或X射线模拟器的脉冲源简化很多,如省去了水介质或真空传输线等. 除了运行电压较高外,此类脉冲源还具有储能小(1 kJ量级)、对波形特征要求高等特点.

结合具体的应用背景,脉冲源在工程设计上还有若干特定要求. 第一,紧凑和轻量化. 水平极化模拟器的脉冲源架设高度15–30 m,以模拟瞬态电磁场辐照地面装备设施并经地面反射的作用过程,要求脉冲源尽可能轻量化、紧凑化,以减轻架设系统和防风紧固部件的载荷. 针对这一要求,脉冲源一般需采用气体绝缘介质(如SF₆),金属腔体设计为铝合金材质,绝缘腔体多采用玻璃钢材质. 因典型尺寸在1 m量级,金属和绝缘腔体的壁厚、端接法兰结构等均需充分的力学核算,既满足充气兆帕量级的力学条件和密封要求,又不使重量过分增加. 第二,3–5倍的较宽工作电压范围. 这是HEMP模拟器区别于其他大型脉冲功率装置及高功率微波(如超宽带电磁脉冲)装置的一个特点. 主要原因在于大型天线下的试验空间相对较固定,而在开展HEMP试验时,一般需从10–20 kV/m的较低场强等级逐步升高到50 kV/m以上,相应地要求脉冲源电压在20%–30%至100%的较大范围内调节. 这决定了初级高压源内的直流开关、中储开关、输出开关等部件主要采用气体绝缘介质,可方便地调节气压或更换气体(如在SF₆和N₂之间切换),以实现工作电压的大范围调整. 第三,对外场露天试验环境的适用性,包括在上百米的远距离进行测试和控制、以光纤链路抗瞬态电磁场的强干扰、开关部件在高低温不同条件下的性能调控等.

国际上公开报道的兆伏级快脉冲驱动源代表性的有: (1) 美国PI公司于20世纪90年代研发的FEMPS, 最早验证了二级压缩技术路线的可行性, 输出电压1 MV, 前沿1 ns, 用于驱动阻抗 $70\ \Omega$ 的单极圆锥天线, 运行十余年后升级到电压1.5 MV^[21]; (2) 美国PI公司1998年为法国HPD型装置研制的快脉冲源FEMP-2000, 按最高运行电压2.7 MV设计建造, 在交付法国后工作电压在0.7–2.2 MV, 前沿约1 ns, 整机的控制抖动不超过8 ns, 不同发次的峰值幅度波动小于5%, 综合性能为当时最先进水平^[21,22]; (3) 美国L-3公司2009年研制标称输出6 MV的双极加载型脉冲源PS-6^[10], 总体设计如图2所示, 据报道因测试阶段出现绝缘损伤问题, 实际运行到4.8 MV, 可通过单边充电、双边充电、调控输出开关击穿电压等不同方法实现电场波形参数的多样化调节, 如在距离锥点24.5 m处产生峰值15–77 kV/m的脉冲电场, 前沿1.3–2.8 ns^[23], 已用于取代美国海军USN-HPD模拟器早期研制的标称输出5 MV的脉冲源ML-5, 是已建快脉冲驱动源中电压最高的。

国内目前已报道的主要是西北核技术研究所研制的3台电压MV量级快脉冲驱动源, 均采用了类似FEMP-2000的单边驱动、两级脉冲压缩技术路线, 关键部件上测得电压超过3 MV, 指标性能的提升依赖于各关键部件和整机结构的优化设计. 其中两台脉冲源的设计图如图3所示。

(2) 初级高压源

大多数HEMP模拟器均以并联充电、串联放电的Marx发生器作为初级高压源. 主要的电气参数有: 串联级数、单级模块最大充电电压、建立电容、建立电感、损耗电阻、等效并联电阻等. 电气与结构设计要

重点解决绝缘裕度、电感调控、寄生电容控制、均压屏蔽罩布置、不同级数之间过电压耦合等问题. 已研制的快脉冲驱动源Marx发生器均采用了分段式或完全直线型结构, 在长度1 m量级的情况下, 建立电感在1–10 μH 量级. 为了实现初级高压源和中储段的电感隔离, 以保证中储段充电后主要能量向负载端释放, 国外前期的FEMPS, FEMP-2000脉冲源都在Marx发生器中专门外接电感, 使总的建立电感达到约70 μH , 在建立电容0.5或0.6 nF条件下, 对中储段充电时间达300–400 ns^[21], 较长的电压作用时间对结构支撑部件的绝缘设计和Marx机芯的建立时延抖动控制不利. 新近研制的PS-6脉冲源使用了两台完全直线型的30级串联Marx发生器, 建立电容1.33 nF, 因采用高度集成化的并联管式电容和薄片式气体开关, 建立电感减小到4.5 μH ^[10], 对中储段的充电时间可相应缩减到约100 ns, 有利于降低机芯的建立时延抖动进而实现对正负脉冲源的同步控制。

西北核技术研究所的NEMP模拟器的Marx发生器电气参数与国外FEMP-2000脉冲源相近, 设计为32级, 最高充电电压 $\pm 50\ \text{kV}$, 建立电容0.6 nF, 建立电感约60 μH , 绝缘气体采用气压0.2 MPa的 SF_6 , 最大输出电压约2.5 MV^[15]. 标称4 MV垂直极化导波型模拟器因脉冲源置于地面, 无重量、体积上的限制, 采用了变压器油绝缘的Marx发生器, 按40级串联、建立电容1.25 nF设计, 整个机芯分7排布置, 纵向长度约3 m, 串联接入6个排间电感后, 总的建立电感约100 μH , 实际运行输出电压1–3.2 MV, 对中储段0–100%充电时间约800 ns^[24]. 用于驱动75 Ω 单锥天线的3.6 MV脉冲源放置在倒立锥体内部, 重量有限制, Marx发生器仍采用 SF_6 气体绝

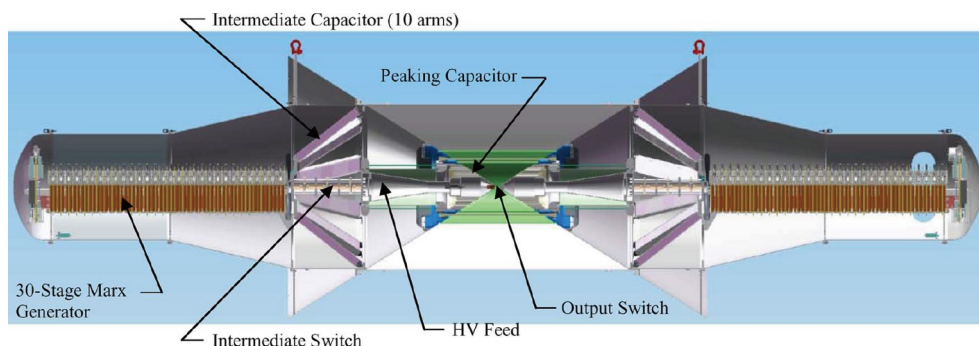


图 2 (网络版彩图)双边驱动的两级压缩快脉冲源PS-6^[10], 图片已获得使用授权

Figure 2 (Color online) Fast risetime pulser PS-6 with two stages of pulse compression on two sides [10]. Reprinted with permission of ref. [10], Copyright©2010, IEEE.

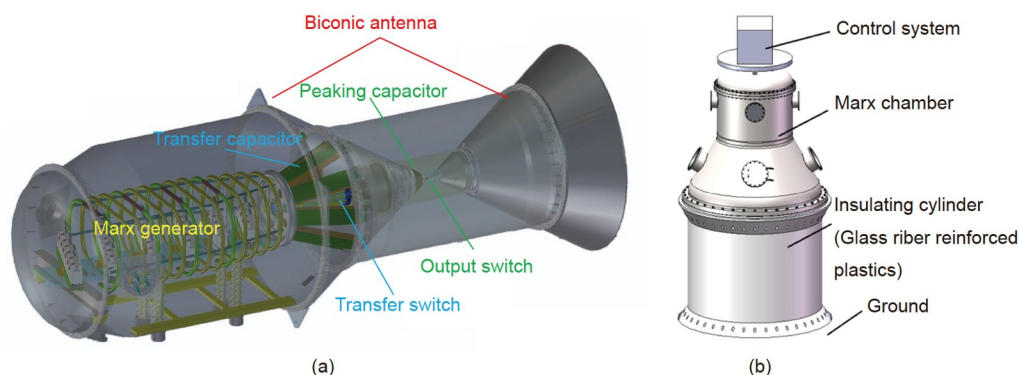


图 3 (网络版彩图)西北核技术研究所的HPD型模拟器NEMP的2.5 MV脉冲源(a)和新建VPD型模拟器3 MV脉冲源(b)设计图
Figure 3 (Color online) The 2.5-MV pulser (a) for the HPD-type simulator NEMP and 3-MV pulser (b) for a VPD-type simulator developed at NINT.

缘, 工作气压提高到0.3 MPa, 机芯设计为40级串联、每级正负充电形式, 结构呈双列交叠, 轴向和径向结构都较为紧凑, 总的建立电感调控到约20 μH . 由于内部绝缘支撑结构的优化, 该Marx发生器可工作到额定电压 ± 50 kV.

为进一步发展可车载机动的脉冲源, 近来, 一方面开展了直线型Marx发生器对公路运输振动冲击力学环境的适应性研究, 对一种32级模块化机芯进行了数值仿真和响应测试^[25]. 另一方面尝试引入在高功率微波脉冲源中已经较为成熟的Tesla变压器技术. 国内外报道的Tesla变压器最高输出电压已达到2.7 MV, 大多按重复频率运行设计, 采用变压器油绝缘后, 结构紧凑, 分立元件数量较少. 如将其用作HEMP模拟器初级高压源, 可按单次运行、气体绝缘设计. He等人^[26]在2018年报道了初步的验证性结果, 在设计变压比120:1、初级储能电容8 μF 、充电4.5 kV条件下, 从次级获得峰值电压550 kV、充电时间2.6 μs , 经优化改进, 已将输出电压提升到800 kV.

(3) MV级脉冲电容器

脉冲源的中储电容、峰化电容容值参数均在100 pF量级, 工作电压数MV, 充电时间分别在100和10 ns量级. 中储电容设计为多条轴对称布置的长条臂并联成锥台状, 单条臂由数百个薄膜电容元件串联而成、容值数十皮法, 结构如图4(a)所示, 每个元件容值为数十纳法, 由金属箔包夹聚丙烯或聚酯膜组成, 直流耐压可达10 kV或以上. 为提高中储电容的耐压, 可增加串联元件的数量, 单条臂的长度也相应增大, 如从数十厘米增加到1 m以上, 由此带来的结构电感变化相比初级高压源总电感可以忽略.

西北核技术研究所的NEMP模拟器的中储电容设计容值0.5 nF, 耐压3.2 MV, 与初级高压源共用 SF_6 绝缘气体环境. 标称4 MV垂直极化导波型模拟器中储电容设计容值1.8 nF, 外绝缘介质为变压器油, 内绝缘介质为十二烷基苯, 结构为7条臂并联, 每条臂包含400个元件, 理论上可承受6 MV电压, 在Marx充电 ± 40 kV、对中储电容充电电压峰值3.1 MV条件下测试, 连续20发次试验未出现绝缘问题^[27].

为了在天线负载上获得较理想的双指数波, 峰化电容的容值 C_p 与中储电容容值 C_T 、中储-峰化段电感 L_T 和天线负载阻抗 Z 需满足^[22]:

$$C_p = \frac{C_T \cdot L_T / Z^2}{C_T + L_T / Z^2}. \quad (3)$$

峰化电容也大多采用薄膜式元件, 整体结构需与天线共形设计以实现对抗负载的快速放电, 如在连接双锥或单锥天线的辐射波模拟器中设计为与锥面共形(如图4(b)所示), 在导波型模拟器中设计为与上下双极板结构共形. 由于峰化段需设计为低电感的紧凑结构, 该部件通常需要在10–20 cm的绝缘距离上耐受峰值数兆伏、前沿和半宽数十纳秒的快脉冲, 是HEMP模拟器中较容易受损的关键部件.

西北核技术研究所最早研制的NEMP模拟器采用同轴型峰化电容器, 设计容值130 pF, 由18个同心布置的电容器串联而成, 外绝缘环境为0.8 MPa的 SF_6 气体. 该构型下, 宏观电场分布有较强的平行于介质表面的分量, 有利于沿面闪络通道(主要是电子碰撞电离)的发展, 电场核算结果表明, 介质薄膜内的平均场强达到约120 kV/cm, 而同心电容器的金属电极边缘场强最高可达600 kV/cm以上, 即使有电负性的绝缘气体

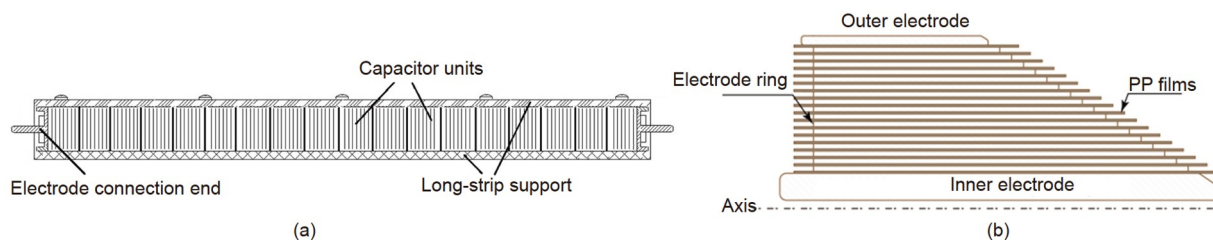


图 4 (网络版彩图)长条臂式中储电容器(a)和圆锥状同轴峰化电容器(b)结构示意图

Figure 4 (Color online) Schematics of the long-strip transfer capacitor (a) and the conic peaking capacitor (b).

强烈吸收金属表面发射的电子,也很难完全抑制住沿面闪络放电通道的发展. 通过在高压脉冲源上安装时间积分的光学图像诊断系统,对峰化电容在高压下的沿面闪络放电过程进行拍摄记录,证实在电压峰值接近2 MV时,峰化电容的最外层和最内层均已出现相邻层的闪络贯通^[28].

针对以上问题,Chen等人^[29]近年来首先检验了通过增大绝缘气体压力提高沿面绝缘性能的可行性. 对缩比样品的测试表明,在前沿约10 kV/ns的电脉冲陡度下,多层薄膜结构的沿面击穿电压对气体压力存在“饱和”效应,即气压增大到几个大气压后不再有效,综合考虑电子崩发展、介质薄膜表面电荷积聚与释放、空间电荷对电场增强效应等微观过程的唯象模型可以定性地解释以上结果. 另外,基于对电场分布特征和沿面闪络通道发展特点的关联分析,又探索了延长介质薄膜长度(如增加几个厘米)以限制层间闪络通道贯通的设计思路^[30],已在最新研制的脉冲源中测试验证.

对于导波型模拟器应用的平板型峰化电容,宏观电场分布主要表现为垂直于介质薄膜表面,理论上不利于沿面闪络通道发展,但结构上不能像同轴构型实现自箍紧式支撑,而引入其他的固体支撑绝缘子又难以耐受数百kV/cm的强电场. 为此探索出了一种以预埋磁体的磁力压紧多层电极的设计思路,该设计也附带了以外加磁场限制介质表面的自由电子运动从而抑制沿面闪络等离子体通道发展的效果,结合伸长介质薄膜的运用,已证实可用于耐压3 MV以上平板峰化电容器.

(4) 兆伏级自击穿式气体开关

中储开关和输出开关大多设计为自击穿式气体开关,由于气体放电过程具有一定随机性,开关设计的重点是控制击穿电压的分散性和导通的时延抖动. 中储

开关的设计不受结构电感的限制,主要构型基本都参考FEMP-2000,设计为紫外预电离的多级串联间隙,即以电阻分压方式从开关两端的高压脉冲上提取幅度约10 kV的低压脉冲促使一个毫米级间隙击穿放电,产生紫外光和自由电子,进而引燃主间隙.

Li等人^[31]对NEMP模拟器脉冲源用3 MV、三级串联的中储开关进行深入的研究设计,通过多种结构参数的比选和测试,指出每级开关的主间隙应设计为稍不均匀场,以兼顾较高的击穿电压和较小的电压分散性,并且在三级串联开关中,即使只有一个预电离小间隙动作、引燃一级主间隙,因另外两个主间隙会自动过压击穿,也能获得较低的击穿电压分散性. 在对预电离间隙产生的光脉冲进行细致诊断后,通过对不同结构参数预电离间隙作用效果的比对测试,进一步提出,预电离间隙的场型应尽可能设计为均匀场,可获得更快的紫外光前沿(3–4 ns)和更高的电子产生速率,从而实现最为稳定的自触发式击穿,实验结果表明击穿电压分散性可控制到0.7%–1.8%,而不使用预电离引燃结构的完全自击穿模式,该分散性可超过10%^[32]. 值得注意的是,以上实验研究是在开关电压上升时间约300 ns条件下完成的,而击穿时刻接近电压脉冲峰值(波形近似余弦函数),初步估计击穿时延的抖动在2–3 ns.

基于以上经验数据, Li等人^[33]为标称4 MV导波型模拟器脉冲源设计的中储开关为五级串联,单级主间隙距离40 mm,绝缘介质氮气的压力为0.2–0.8 MPa,对应开关的击穿总电压为1–4 MV. 实际测试结果显示,在工作电压1–3.2 MV范围内,击穿电压分散性小于1.6%,粗估击穿时延抖动约在5–7 ns.

为进一步减小中储开关的击穿时延抖动,近年来,Wang等人^[34]在电压脉冲前沿100–200 ns条件下继续开展紫外预电离中储开关的实验和仿真研究. 针对开关

动作时间间隔显著缩短的情况, 探索了一种让预电离间隙较早击穿、持续产生紫外光照射主间隙的设计思路, 具体可通过调节分压电阻的比值较便利地实现. 用单级开关在电压0.2–0.8 MV、前沿100 ns条件下的验证性试验表明, 击穿电压分散性可小于0.65%, 时延抖动可小于1 ns. 多级串联开关能否保持住这一低抖动性能有待进一步检验.

输出开关的结构相对简单, 一般为单个厘米级间隙, 电极构型尽可能设计成与天线共形, 以驱动双锥天线的HPD型模拟器为例, 输出开关典型结构如图5(b)所示. 开关工作场强达到0.1–1 MV/cm, 绝缘介质一般为气压在1.5 MPa以下的SF₆. 在前沿20–40 ns的电脉冲作用下, 要求击穿电压分散性在10%左右, 对应时延抖动在2–3 ns.

输出电压导通后馈入天线的电脉冲前沿 t_r 由峰化段电感 L_p 引起的时间常数 $\tau_L=L_p/Z$ 和气体放电火花通道电阻引起的时间常数 τ_R 决定, 电阻项估计为

$$\tau_R = 88(\rho/\rho_0)^{1/2} / (Z^{1/3} E_b^{4/3}) \text{ (ns)}, \quad (4)$$

其中 E_b 为开关击穿电场, 单位MV/m, ρ/ρ_0 表征绝缘气体相对标准常压状态的密度. 开关工作场强达到1 MV/cm可显著减小电阻项引起的时间常数, 如接近0.1 ns. 峰化段电感 L_p 的计算相对复杂, 其下限值为气体开关电感 L_s , 近似估计值为 $L_s \approx 14d$ (nH), d 为开关间隙距离(单位为cm). 以间隙距离3 cm、工作电压3 MV、天线阻抗75 Ω 为例, 开关电感对输出前沿的贡献就达到1.2 ns以上.

针对高压SF₆条件下的开关击穿场强预估, 文献[35]基于击穿过程的唯象判据和对部分数据的拟合分

析, 给出了半球电极在近似均匀场型、气压0.2–0.9 MPa条件下的击穿场强, 数值不超过0.6 MV/cm. Guo等人^[36]基于0.1 MV/cm高场强条件下不同材料和电极构型的开关实验结果, 分析提出在0.5 MPa气压以下, 电极表面场致发射产生初始电子的机制较为重要, 开关击穿时延和抖动主要取决于电极表面微凸起的长径比和分布特征, 表面粗糙度对时延抖动有显著影响, 而0.5 MPa以上的高气压下, 负离子解吸附产生有效电子的过程将起主导作用. 在参考早期研究给出的脉冲前沿100 ns或1 μ s条件下击穿场强经验公式的基础上, 结合间隙距离0.8 cm的气体开关在电压1 MV以下的实验结果, 进一步拟合给出了常见的半球、锥形、环形电极开关的击穿场强和击穿时延公式为^[37]

$$E_b = Ap^{0.5} k^{1/3}, \quad (5)$$

$$t_d = Bp^{0.5} k^{-2/3}, \quad (6)$$

其中 p 为气体压力, k 为脉冲电压斜率. 拟合系数 A 和 B 的取值分别介于105–125和85–100, 相同条件下以半球电极的击穿电压和时延最大.

4 大型辐射天线研究设计进展

大型HEMP模拟器的辐射天线从双锥偶极子或地面镜像单锥、平行板传输线等相对简单的构型发展而来, 因瞬态脉冲的波长范围在1–100 m, 而天线从馈入端到整体尺寸也与以上量值范围相当, 在保证大试验空间内的波形不失真、电脉冲到辐射场的转换效率高是天线设计追求的目标. 表1所列美国新建或升级的3台模拟器均应用了新的天线结构, 国内也初步开展了

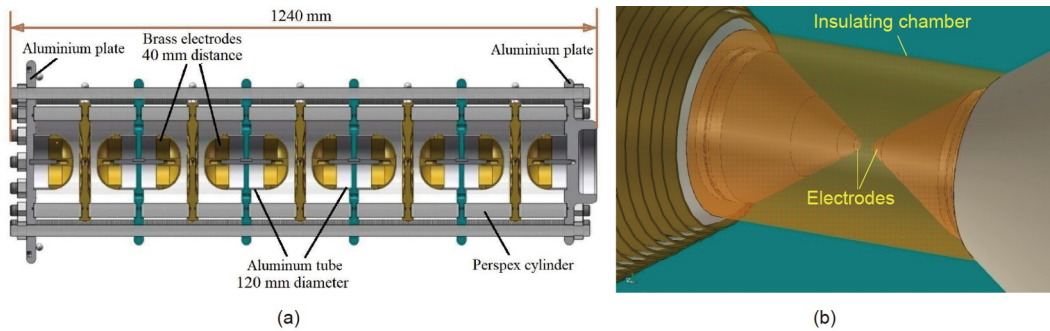


图 5 (网络版彩图)五级串联中储开关^[33] (a)和单间隙输出开关(b)结构示意图. 图片已获得使用授权

Figure 5 (Color online) Schematics of the five-series transfer switch [33] (a) and the single-gap output switch (b). (a) Reprinted with permission of ref. [33], Copyright©2022, IEEE.

验证性研究, 深化了对几种典型天线的认识.

(1) HPD天线

已应用的HPD天线均为双锥偶极子和导波结构组成的混合天线, 辐射脉冲的前沿到峰值部分由双锥段辐射, 低频部分由导波结构辐射, 脉冲后沿受到天线结构和阻抗不连续的影响. 根据双锥两侧导波结构的不同, 先后发展出了3种构型. 图6(a)所示双锥-笼形天线在20世纪70年代早期得到应用, 结构较简单, 直接将双锥段连接到较粗的对称振子上, 如TEMPS模拟器采用了直径9 m、总长300 m的天线. 另一种为双锥-椭圆笼形天线(如图1(a)所示), 从20世纪70年代中期在美欧得到广泛应用, 其主要改进在于通过阻抗加载的椭圆环平衡脉冲电场和磁场强度的比值, 以更逼真地模拟真实HEMP早期环境近似平面波的阻抗特点(约377 Ω), 同时能抑制被试飞机等对象与天线之间的相互作用, 并限制天线结构上的谐振. 但由于椭圆构型的不规则形状特点, 不便于构建大直径的笼形, 在双锥和笼形连接处的阻抗和结构不连续会限制辐射场宽频带输出, 导致辐射脉宽的损失. 最典型的是美国陆军机动

式模拟器HPD-II, 为便于运输和架设, 天线环直径仅3 m, 典型辐射半宽7–15 ns, 显著低于脉冲源接匹配负载下的输出半宽. 图1(a)所示USN-HPD模拟器采用直径5 m天线环, 负反射导致脉宽降低的问题仍然较重, 该模拟器在运行时采取了调控脉冲源输出开关提前击穿、以降低电场幅度为代价增加辐射场半宽的措施, 脉冲源对匹配负载的输出电压半宽超过50 ns, 但天线辐射场半宽仍只有约35 ns^[10].

为消除以上脉宽损失问题, 美国L-3通信公司提出将双锥末端连接到特征阻抗相当、由稀疏线栅阵列构成的双板导波结构上^[10], 在脉冲源正下方的试验空间内, 辐射场半宽基本不受结构不连续的影响. 文献中将天线称为水平极化有界波天线(Bounded Wave Antenna)^[10], 考虑到辐照场仍受地面反射作用、与其他HPD天线功能相似, 此处将其概括为双锥-平面线栅天线. 该天线构型在美国陆军AFEMPS模拟器上已得到应用, 脉冲源架高20 m条件下, 导波线栅结构两侧12个接地点在地面构成84 m×63 m^[8], 结构示意图如图6(b)所示. 按激励电压峰值3 MV、前沿2.5 ns、脉宽23 ns

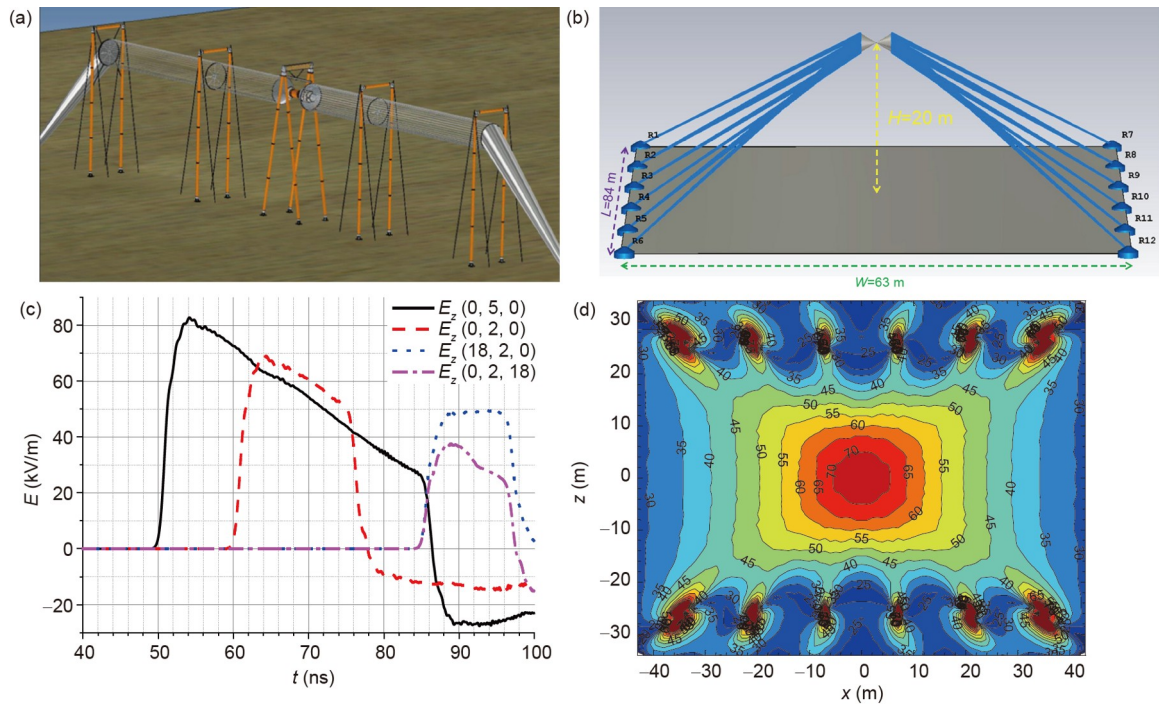


图6 (网络版彩图)水平极化辐射波天线的演变. (a) 早期应用的双锥-笼形天线; 对美国AFEMPS模拟器新结构天线的仿真建模图(b)及典型计算场波形(c)和场峰值二维分布(d)的仿真结果

Figure 6 (Color online) Evolution of the HPD-type antenna. (a) Bicone-cage antenna used in the early stage; simulation model (b), calculated typical waveforms (c), and contour map of peak E_z values (d) of the newly-developed antenna used by the USA AFEMPS simulator.

加载于双锥天线顶点, 计算天线辐射场特性如图6(c)和(d)所示. 图6(c)给出了离地高度5和2 m两个平面内4个测点的水平电场波形, 可见脉冲源正下方的(0, 5, 0)和(0, 2, 0)两个测点的电场在地面反射波到达前都保持了激励电压的双指数波特点, 没有受到天线结构不连续的影响, 远离双锥中轴垂直平面并靠近地面的(18, 2, 0)测点电场波形受到双锥上下部连接结构不对称的影响, 峰后波形出现近似平顶. 图6(d)给出了离地高度3.5 m平面内水平电场峰值的二维分布, 可见峰值超过50 kV/m的区域近似为长40 m、宽28 m的矩形, 该区域内场不均匀性约为1.4:1.

西北核技术研究所的NEMP模拟器设计采用了图6(a)所示双锥-笼形天线, 笼形振子的圆环直径为9 m, 在不损失辐射输出效率的情况下, 激励电压半宽超过50 ns, 辐射场半宽约23 ns. 考虑到图6(b)所示双锥-平面线栅天线去掉了大直径圆环, 线栅状导波结构便于灵活调整, 在工程架设和机动运输上都有较大便利性, 重点对该型天线深入开展了仿真研究和工程设计^[38], 完成了架高10和20 m条件下辐射场分布测试, 基本掌握了该型天线的设计方法.

(2) 垂直极化导波天线

早期研制的导波型模拟器均采用基于平行板传输线的TEM天线, 试验对象位于两个极板之间, 没有地面反射的影响, 可对模拟空中飞行状态的导弹或飞机开展试验. 该类天线的前锥段内传输近似球面波, 进入平行段的结构转折会破坏波阵面, 导致波形畸变. 从20世纪90年代中期开始研制快前沿模拟器后, 此类装置的天线基本都转向无平行段的三角锥板形天线, 试验空间位于前锥的后半段, 后锥采用分布式电阻链构成的稀疏阵列, 可传输快前沿脉冲, 并合理调控后锥段的反射波影响. 为避免被试对象的存在导致传输脉冲畸变过于严重, 一般要求被试对象最大高度不超过所在空间位置极板高度的2/3. 以垂直尾翼高度20 m的大型飞机为例, 天线最大高度应不小于30 m, 在此条件下, 如需提高试验场强, 只能成比例地提升脉冲源输出电压.

2018年, 美国海军空战中心在升级大型有界波装置VEMPS的天线系统时, 设计采用了图1(b)所示分叉式双三角锥天线^[11], 被试大型飞机的垂直尾翼可放置在分叉前锥板的中缝处, 垂直尾翼处的极板高度可与尾翼高度相当, 从而降低输出电压的要求. 安装完成的天线总长220 m, 最大跨度127 m (分叉中缝宽度约

25 m), 支撑主杆高度50 m, 可满足波音-747级别大型飞机试验需求. 美国陆军2010年建成的VEMPS装置也采用了与此类似的天线结构^[11], 试验空间高度达到35 m, 但具体结构参数未见报道.

国内早前对大型导波天线的研究设计还局限于带平行段的传统结构, 近年转向快脉冲源所需的线栅型锥板导波天线设计, 已改造或新建多台中型有界波装置均采用了这类天线. 文献^[39]在对大型双板导波结构的仿真研究中注意到, 上下极板等宽情况下土壤损耗会对电压传输效率产生显著影响, 提出了拓展地板板宽度屏蔽土壤损耗的设计思路.

(3) VPD天线

已建成的VPD模拟器天线均采用地面镜像单极线锥结构, 尺寸最大的是美国20世纪七八十年代研制的VPD-II和EMPRESS-II模拟器. 两台模拟器均采用了高度40 m、顶部直径60 m、阻抗60 Ω 的线锥天线, 锥面由24根电缆均布组成, 在地面架设的VPD-II以大面积铺设的金属丝网构成导电镜像面, 而在海面机动的EMPRESS-II则直接利用海水构成导电镜像面. 在两套线锥天线的锥面不同高度处引入了13层电阻加载, 以期降低电脉冲在天线末端开路反射的影响. 从有限的报道信息^[40]看, 该模拟器的辐射场波形仍然存在显著的脉宽损失问题, 如预期半宽约70 ns、实测半宽约40 ns. 在研究VPD天线过程中, 针对该问题开展了仿真验证, 简化建模如图7(a)所示, 线锥部分(含电阻)按真实高度建模, 地板板简化为直径100 m导体板, 计算所得离地高度1 m、距锥点10–50 m的不同测点归一化电场波形如图7(b)所示, 可见随着观测距离增大, 脉冲半宽逐渐变窄, 损失的半宽最终达到约30 ns. 进一步分析表明, 脉宽损失与锥面上行电流波在每层加载电阻处的反射有关. 此外, 从电场波形后沿的拖尾特征可以判断, 阻抗加载设计并没有能解决天线末端开路、电脉冲能量无法有效释放的问题, 激励电脉冲最终转化为天线锥面和地面间的静电场能量, 电压脉冲的长时间作用对脉冲源高压绝缘部件构成重要的风险因素. 后续在设计适用于快前沿脉冲源的VPD天线时应采用新的设计思路解决锥面加载和能量有效泄放的问题.

5 结论

当前HEMP模拟器研制的发展趋势为快前沿

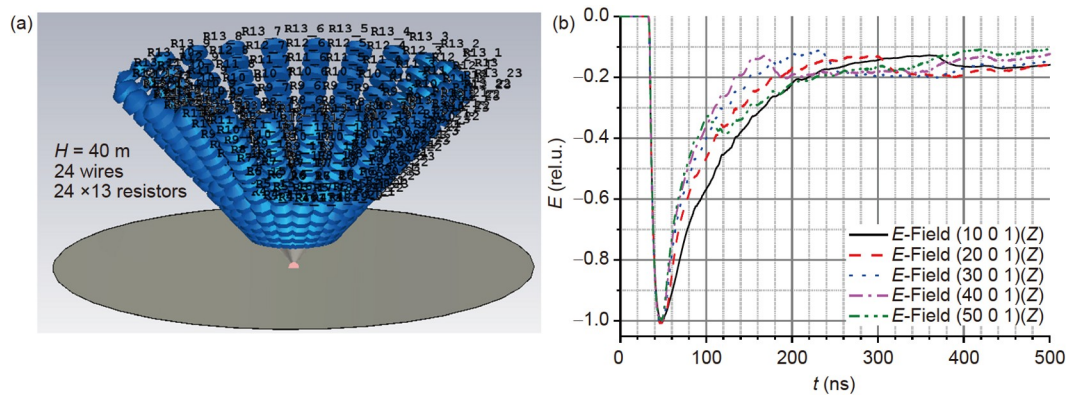


图 7 (网络版彩图)对美国VPD-II模拟器阻抗加载线锥天线的仿真建模(a)和典型计算波形(b)

Figure 7 (Color online) Simulation model (a) and typical calculated waveforms (b) of the resistively-loaded conic antenna used in USA VPD-II simulator.

(1–2 ns)、高场强(70–100 kV/m)、大试验空间(30–300 m). 已经研制的单边驱动型快脉冲源输出电压不低于3 MV, 双边驱动型快脉冲源最高运行电压5 MV; 新设计的水平极化辐射波天线和垂直极化导波天线通过结构上的创新, 分别降低了此前一直存在的辐射半宽损失, 以及试验空间高度对脉冲源电压的刚性限制. 由

于以上进展, 国际上已可在不小于70 m的试验空间内产生所需的快脉冲辐照环境, 面临的挑战是进一步提高电压到10 MV以上, 以使试验空间可扩大到300 m. 国内研制的单边驱动型脉冲源指标已经接近国外先进水平, 有待进一步攻关掌握可机动部署脉冲源、双边驱动高电压脉冲源及新型垂直极化天线等设计技术.

参考文献

- Baum C E. From the electromagnetic pulse to high-power electromagnetics. *Proc IEEE*, 1992, 80: 789–817
- Baum C E. Reminiscences of high-power electromagnetics. *IEEE Trans Electromagn Compat*, 2007, 49: 211–218
- Giles J C, Prather W D. Worldwide high-altitude nuclear electromagnetic pulse simulators. *IEEE Trans Electromagn Compat*, 2013, 55: 475–483
- Giri D V, Prather W D. High-altitude electromagnetic pulse (HEMP) risetime evolution of technology and standards exclusively for E1 environment. *IEEE Trans Electromagn Compat*, 2013, 55: 484–491
- Prather W D, Giri D V, Gardner R L, et al. Early developments in sensors and simulators at the air force weapons laboratory. *IEEE Trans Electromagn Compat*, 2013, 55: 431–439
- Shi L, Zhang X, Sun Z, et al. An overview of the HEMP research in China. *IEEE Trans Electromagn Compat*, 2013, 55: 422–430
- Meng C. Numerical simulation of the HEMP environment. *IEEE Trans Electromagn Compat*, 2013, 55: 440–445
- Blundell R. White sands missile range high power microwave systems. US White Sands Missile Range. In: Proceedings of the Directed Energy Test & Evaluation Conference. 2009
- Test operations procedure (TOP) 1-2-622 vertical electromagnetic pulse (VEMP) testing. US Army Developmental Test Command, 2009
- Bailey V, Carboni V, Eichenberger C, et al. A 6-MV pulser to drive horizontally polarized EMP simulators. *IEEE Trans Plasma Sci*, 2010, 38: 2554–2558
- Mazuc A. Technical challenges for E3 test facilities meeting new MIL-STD requirements. In: Proceedings of the 2017 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility & Signal/Power Integrity (EMCSI). Washington DC, 2017
- Nelson J M, Jones C S, Poston L A. USS *Anzio* EMPRESS II trial. *Naval Engineers J*, 1996, 108: 315–333
- Defense Threat Reduction Agency. Electromagnetic pulse (EMP) threat-level simulator (TLS) for ships [EB/OL]. Federal Business Opportunities. (2014-11-04) [2018-12-06]. (<http://www.fbodaily.com/archive/2014/11-November/06-Nov-2014/FBO-03566107.htm>)
- Fu H J, Zhang W G, Yue S C, et al. Electromagnetic pulse simulating test methods on system level (in Chinese). *Modern Defence Tech*, 2018, 46: 127–132 [傅海军, 张维刚, 岳思橙, 等. 系统级电磁脉冲模拟试验技术. *现代防御技术*, 2018, 46: 127–132]
- Chen W Q, He X P, Jia W, et al. Development of a 2.5 MV fast pulse generator for EMP simulation (in Chinese). In: Proceedings of the 14th

- National Conference on Nuclear Electronics & Detection Technology. 2008. 689–693 [陈维青, 何小平, 贾伟, 等. 2.5 MV快沿电磁脉冲模拟器脉冲功率源的研制. 见: 第十四届全国核电子学与核探测技术学术年会. 2008. 689–693]
- 16 Qiu A C. Application of Pulsed Power Technology (in Chinese). Xi'an: Shaanxi Science and Technology Press, 2016. 294–301 [邱爱慈. 脉冲功率技术应用. 西安: 陕西科学技术出版社, 2016. 294–301]
- 17 Wang H Y, Zhang G W, Chen W Q, et al. Development of a 4-MV fast rise pulsed driver for EMP simulator (in Chinese). In: Proceedings of the 6th Chinese Pulsed Power Conference. Hangzhou, 2019 [王海洋, 张国伟, 陈维青, 等. 4 MV快前沿电磁脉冲模拟装置脉冲功率驱动源的研制. 见: 第六届全国脉冲功率会议. 杭州, 2019]
- 18 Jia W, Chen Z Q, Guo F, et al. Development of 3.6 MV fast risetime pulsed driver for electromagnetic pulse simulator (in Chinese). In: Proceedings of the National Conference on High Voltage and Discharge Plasmas. Hefei, 2022 [贾伟, 陈志强, 郭帆, 等. 3.6 MV快沿电磁脉冲模拟器驱动源研制. 见: 2022年全国高电压与放电等离子体学术会议. 合肥, 2022]
- 19 Zhou K M, Li Z D, Deng J H. Design of a high-precision and widely tunable bounded-wave electromagnetic pulse simulator (in Chinese). High Power Laser Particle Beams, 2020, 32: 063004 [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. 强激光与粒子束, 2020, 32: 063004]
- 20 Jin H B, Kou K N, Dai Q J, et al. Simulation and experiment study on a horizontally polarized bounded-wave electromagnetic pulse simulator (in Chinese). High Power Laser Particle Beams, 2022, 34: 123003 [金晗冰, 寇科男, 戴弃君, 等. 水平极化有界波电磁脉冲模拟器仿真与实验研究. 强激光与粒子束, 2022, 34: 123003]
- 21 Naff J T. Spark gaps for EMP and SREMP pulsers. In: Proceedings of the 17th IEEE International Pulsed Power Conference. Washington DC, 2009
- 22 Gilman C, Lam S K, Naff J T, et al. Design and performance of the FEMP-2000: A fast risetime, 2 MV EMP pulser. In: Proceedings of the 12th IEEE International Pulsed Power Conference. Monterey, 1999
- 23 Belt D, Mazuc A, Sebacher K, et al. Operational performance of the Horizontal Fast Rise EMP pulser at the Patuxent River EMP test facility. In: Proceedings of the 18th IEEE International Pulsed Power Conference. Chicago, 2011
- 24 Xie L S, Zhang G W, Cheng Y P, et al. Development of a 4 MV oil-insulated Marx generator (in Chinese). In: Proceedings of the 2019 Annual Conference of Chinese Nuclear Society. Baotou, 2019 [谢霖桑, 张国伟, 程永平, 等. 一台4 MV油绝缘Marx发生器的研制. 见: 中国核学会2019年学术年会. 包头, 2019]
- 25 Wang H Y, Xiao J, Xie L S, et al. Modal analysis of the 32-stage modular Marx generator (in Chinese). High Power Laser Particle Beams, 2021, 33: 085001 [王海洋, 肖晶, 谢霖桑, 等. 32级模块化Marx发生器机芯模态分析. 强激光与粒子束, 2021, 33: 085001]
- 26 He S, Li J, Guo F, et al. Analysis of ohmic losses in tesla transformers utilizing the open magnetic-core. *AIP Adv*, 2018, 8: 085216
- 27 Chen Z Q, Xie L S, Jia W, et al. Development of a 3 MV transfer capacitor used in an electromagnetic pulse simulator (in Chinese). High Power Laser Particle Beams, 2021, 33: 095001 [陈志强, 谢霖桑, 贾伟, 等. 电磁脉冲模拟装置用3 MV中储电容器的研制. 强激光与粒子束, 2021, 33: 095001]
- 28 Wang Y, Chen Z Q, Jia W, et al. Analysis and experimental verification of the peaking capacitor's flashover process in an EMP simulator. *IEEE Access*, 2022, 10: 84003–84014
- 29 Chen Z, Jia W, Guo F, et al. Flashover characteristics of polypropylene films in SF₆ using nanosecond pulses. *IEEE Trans Dielect Electr Insul*, 2020, 27: 1–9
- 30 Chen Z Q, Ji S C, Jia W, et al. A coaxial film capacitor with a novel structure to enhance its flashover performance. *Rev Sci Instrum*, 2019, 90: 124709
- 31 Li J, Chen W, Chen Z, et al. Influences of electric field on the jitter of ultraviolet-illuminated switch under pulsed voltages. *Phys Plasmas*, 2014, 21: 033509
- 32 Li J, Chen W, Chen Z, et al. Effects of optical pulse parameters on a pulsed UV-illuminated switch and their adjusting methods. *IEEE Trans Plasma Sci*, 2015, 43: 3293–3297
- 33 Li J N, Xie L S, Wu W, et al. Design and experiment of a 4-MV self-triggered switch. *IEEE Trans Plasma Sci*, 2022, 50: 97–102
- 34 Wang T, Huang T, Wang H, et al. Using self-triggered sustaining pre-ionization to obtain nanosecond jitter in a MV pulsed gas switch. *IEEE Trans Plasma Sci*, 2021, 49: 4034–4037
- 35 Nam S H, Rahaman H, Heo H, et al. Empirical analysis of high pressure SF₆ gas breakdown strength in a spark gap switch. *IEEE Trans Dielect Electr Insul*, 2009, 16: 1106–1110

- 36 Guo F, Xie Y, Jia W, et al. Effect of electrode surface micro-protrusions on the breakdown time delay and jitter for nanosecond pulsed gas discharge under hundreds of kV/cm in sulfur hexafluoride. *Phys Plasmas*, 2020, 27: 083502
- 37 Guo F, Jia W, Xie L S, et al. Empirical formula of breakdown electric field and time delay for SF₆ gas switch under nanosecond pulse and hundreds of kV/cm electric field (in Chinese). *High Power Laser Particle Beams*, 2022, 34: 075004 [郭帆, 贾伟, 谢霖桑, 等. 百kV/cm场强下SF₆气体开关纳秒脉冲击穿场强和时延经验公式. *强激光与粒子束*, 2022, 34: 075004]
- 38 Xiao J, Wu G, Xie L S, et al. Influence of wire grating on horizontally polarized radiated-wave simulator with biconical-wire grating structure (in Chinese). *Acta Armament*, 2021, 42: 1708–1715 [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. *兵工学报*, 2021, 42: 1708–1715]
- 39 Wu G, Xiao J, Xie L S. Research on the loss and distortion characteristics of large two-plate guided-wave antennas for transmitting nuclear electromagnetic pulse (in Chinese). *Acta Armament*, 2023, doi: 10.12382/bgxb.2022.1243 [吴刚, 肖晶, 谢霖桑. 大型双板导波天线对核电磁脉冲传输损耗和畸变特性研究. *兵工学报*, 2023, doi: 10.12382/bgxb.2022.1243]
- 40 Electromagnetic Compatibility (EMC)-Part 4-32: Testing and measurement techniques-HEMP simulator compendium. IEC 61000-4-32. International Electrotechnical Commission, 2001

Progress in developing high-altitude electromagnetic pulse simulators

WU Gang^{1,2*}, JIA Wei^{1,2}, WANG HaiYang^{1,2}, XIE LinShen^{1,2}, CHEN ZhiQiang^{1,2},
GUO Fan, WU Wei^{1,2} & FENG HanLiang^{1,2}

¹National Key Laboratory of Intense Pulsed Radiation Simulation and Effect, Xi'an 710024, China;

²Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China

High-altitude electromagnetic pulse (HEMP) simulators, consisting of fast risetime pulsed drivers and large antennas, are utilized to produce intense transient electromagnetic environments in a large test volume greater than tens of meters. Key parameters of the electric fields of concern are limited in some special ranges, including pulse risetime of a few nanoseconds, full widths at half maximum of tens of nanoseconds, and peak intensities greater than 50 kV/m. These simulators can be used to test and evaluate the hardening performances of full-scale military equipment, such as large ground vehicles, aircraft, and ships. Globally, researchers target a fast risetime of 1–2 ns, high peak strength of 70–100 kV/m, and large test volume in the range of 30–300 m. Recently, both single-side and two-side driven fast pulsers were developed, with peak output voltages of 3 and 5 MV, respectively. New pulsers with improved antennas can help obtain a test volume greater than 70 m. However, it is a challenge to further improve the output voltage of single-side driven fast pulsers to more than 10 MV. Chinese researchers have developed several large HEMP simulators, with output voltages of single-side-driven fast pulsers greater than 3 MV. Given this background, the present study reviews the progress at Northwest Institute of Nuclear Technology and other research institutions, with respect to designs of critical components, such as compact primary high-voltage pulsers, pulsed megavolt capacitors with multilayer films, low-jitter gas switches, and large radiating antennas.

high-altitude electromagnetic pulse, simulator, fast risetime pulsed driver, radiating antenna, gas switch

PACS: 28.70.+y, 41.20.Jb, 51.50.+v, 84.70.+p

doi: [10.1360/SSPMA-2022-0484](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2022-0484)