第 49 卷 第 1 期：411-417 高电压技术 Vol.49, No.1: 411-417
2023 年 1 月 31 日 High Voltage Engineering January 31, 2023
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20220327

基于冲击脉冲辐射天线的高功率超宽带电磁脉冲辐射系统

王绍飞，谢彦召，葛晓宇
（西安交通大学电力设备电气绝缘国家重点实验室，西安 710049）

摘　要：为给超宽带电磁脉冲效应机理与防护技术的研究提供实验平台，研制了一种基于冲击脉冲辐射天线(impulse radiation antenna, IRA)的高功率超宽带电磁脉冲辐射系统，辐射系统由差分脉冲高压源、锋化开关、IRA和介质透镜等部分构成。设计中，差分脉冲高压源由基于氢闸流管的脉冲源驱动副边中心抽头的脉冲变压器实现；设计的紧凑型锋化开关高度仅为 1 cm，开关间隙为 1 mm，可嵌入 IRA 天线馈电点，开关最高工作气压可达 3 MPa；基于菲涅尔定理设计了介质透镜，以校正锋化开关和绝缘变压器油对 IRA 天线辐射中心的影响，改善了天线的辐射特性；辐射系统可通过改变锋化开关的气压和充电电压调节系统辐射功率。测试实验表明辐射系统的主要技术参数如下：在时域，在天线主轴距离口径面 5.5 m 处辐射电场脉冲上升沿约为 330 ps，幅值约为±8 kV/m，远场有效电势最高可达 44 kV，辐射功率可调；在频域，中心频率为 400 MHz，基于能量范数比定义的信号频带为 80 MHz~1 GHz，信号带比约为 12.5，百分比带宽为 170.4%。辐射系统能够为开展超宽带电磁脉冲效应阈值规律及防护技术的研究提供一个辐射功率可调的试验平台。

关键词：超宽带电磁脉冲；差分脉冲高压源；冲击脉冲辐射天线；电磁环境

High-Power Ultra-Wideband Electromagnetic Pulse Radiation System Based on the Impulse Radiating Antenna

WANG Shaofei, XIE Yanzhao, GE Xiaoyu
(State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: In order to provide an experimental platform for research on ultra-wideband electromagnetic pulse effect mechanism and protection technology, a high-power ultra-wideband electromagnetic pulse radiation system based on impulse radiation antenna (IRA) is developed. The radiation system is composed of a differential high-voltage pulsed source, a peaking switch, an IRA, and a dielectric lens. In the design, the differential pulsed source is realized by the pulse source based on hydrogen thyristor driving the pulsed transformer with secondary side center tapped. The designed compact peaking switch has a total height of only 1 cm and a switch gap of 1 mm. It can be embedded at the feeding point of IRA antenna, and the maximum working pressure of the switch can reach 3 MPa. Based on the Fresnel's theorem, a dielectric lens is designed to correct the influence of high-voltage gas switch and insulating transformer oil on the radiation center of IRA and improve the radiating performance of the antenna. The radiation system can adjust its radiation power by changing the air pressure and charging voltage of the gas switch. The test results show that the main technical parameters of the radiation system are as follows: in the time domain, the rising edge of the radiation electric field pulse is about 330 ps, the amplitude is about ±8 kV/m, the far-field effective potential is up to 44 kV, and the radiation power is adjustable; In the frequency domain, the center frequency of the radiating field is 400 MHz, the frequency band defined based on the energy norm ratio is 80 MHz~1 GHz, and the band ratio is about 12.5, which means the percentage bandwidth is 170.4%. The radiation system can be used as a test platform for the research of UWB electromagnetic pulse effect threshold and protection technology.

Key words: ultra-wideband electromagnetic pulse; differential pulse high voltage source; impulse radiation antenna; electromagnetic environment

基金资助项目：国家自然科学基金(52007140)。
Project supported by National Natural Science Foundation of China (52007140).

0 引言

在有意电磁干扰(intentional electromagnetic interference，IEMI)领域，人们已经清楚认识到频率在200 MHz~5 GHz 范围内的强电磁信号容易耦合到电子系统，从而干扰电子系统的正常机能，甚至造成不可逆损伤[1-5]。超宽带电磁脉冲信号时域前沿快，持续时间短，频域频谱范围宽，因此高功率超宽带电磁脉冲一旦被不法分子利用，将会对高度依赖电子设备的基础设施系统的有序运行造成严重威胁[6-7]。开展高功率超宽带电磁脉冲辐射技术的研究，可以为超宽带电磁脉冲效应机理与防护技术的研究提供实验平台[8]，对于保障电子设备电磁安全具有一定的积极意义。

20 世纪 80 年代以来，高功率超宽带电磁脉冲技术的研究进入了高潮，世界各国研发了多种相关辐射系统，包括 TEM 喇叭天线[9]、圆锥天线、Valentine 天线等辐射系统[10-12]。其中以美国空军研究实验室研发的冲击脉冲辐射天线(impulse radiating antenna, IRA)系统[13]和俄罗斯大电流所研发的组合振子天线阵列(combined antenna array)系统最具代表性[14]，为世界各国所沿用。国内方面主要是中国工程物理研究院[15]、西北核技术研究所[16]、西安交通大学[17-18]等单位研发了基于 IRA 天线、TEM 喇叭天线和组合振子天线阵列的超宽带高功率微波辐射系统。此外军械工程学院[19]、西安电子科技大学[20]、西南交通大学[21]、哈尔滨工业大学[22]等单位研发了不同类型的 IRA 天线辐射系统。其中，文献[19-21]所研发的辐射系统均为小功率辐射系统，远场电势为几十伏量级，主要对天线馈臂进行了改进设计。目前所报道的大功率 IRA 天线辐射系统均不涉及辐射功率调节，而在电磁脉冲效应试验中，往往要求辐射功率可调以研究效应对象的阈值规律。此外，以上 IRA 天线辐射系统中，只有美国空军研究实验室研发的 Prototype IRA 系统设计了介质透镜以校正天线辐射中心，但未具体分析实际效果。本文则研发了一套辐射功率可调的基于IRA天线的高功率超宽带电磁脉冲辐射系统。此外，根据馈电结构特点将IRA天线馈电点的绝缘变压器油箱设计成了介质透镜形式，在保证绝缘强度的前提下，校正了锋化开关和绝缘变压器油对IRA天线辐射中心的影响，并通过仿真验证了其对天线辐射性能的提升效果。

所研制的 IRA 天线辐射系统为大功率系统，由基于氢闸流管和脉冲变压器的差分高压脉冲源、锋化开关以及 IRA 天线等模块组成。系统辐射电场的频率范围为 80 MHz~1 GHz，中心频率为 400 MHz，远场有效电势最高可达±44 kV。辐射系统可通过调节直流源电压、锋化开关的气压获得一系列工作点，实现对系统辐射功率的调节，从而为开展超宽带电磁脉冲效应阈值规律及防护技术的研究提供试验平台，对于保障电子设备在复杂电磁环境下的电磁安全具有重要意义。

1 IRA 天线辐射系统总体构成

所研制的IRA天线辐射系统总体上由脉冲源和辐射天线两部分组成，其原理构成如图 1 所示。

辐射系统的工作过程为，直流源通过充电电容 C_0 给氢闸流管充电，达到氢闸流管工作电压后，加触发信号，使氢闸流管导通，从而产生脉冲高压。脉冲电压通过副边中心抽头的脉冲变压器升压，并转换为差分高压脉冲，然后通过电容 C_p 给锋化开关 S_0 充电，到达击穿电压后，S_0 击穿导通，形成快前沿高压脉冲，给 IRA 天线馈电，高功率电磁脉冲能量通过 IRA 天线辐射至自由空间形成强电磁脉冲环境。

实际设计中，锋化开关镶嵌在 IRA 天线的馈电点处，并采用变压器油提高馈电结构的绝缘强度。为了减小锋化开关对天线口径的阻塞，要求开关体积尽可能小。此外为了校正开关和变压器油对天线辐射中心的影响，装载变压器油的油箱采用与变压器油的介电常数相近的材料，并基于菲涅尔定理设计成介质透镜形状，使得辐射系统的视在辐射中心位于IRA天线的焦点处，从而改善天线的辐射特性。

2 IRA 天线辐射系统脉冲源设计

2.1 基于氢闸流管与脉冲变压器的差分高压源

差分脉冲高压源模块主要由氢闸流管、触发

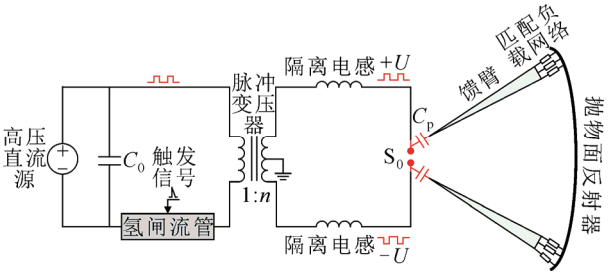


图 1 IRA 天线辐射系统示意图

Fig.1 The diagram of the IRA system

源、脉冲变压器、隔离电感等组成。采用的氢闸流管峰值阳极正向电压为 33 kV，实际工作电压不超过 20 kV。脉冲变压器采用磁芯绕制而成，为满足高压条件下的绝缘要求，线圈采用带绝缘层的高压导线绕制。脉冲变压器变比为 1：5，即产生脉冲电压的最大值为±50 kV。隔离电感主要作用是防止锋化开关击穿后形成的快脉冲(频率较高)返回脉冲变压器，而影响磁芯工作性能。设计的隔离电感采用双向绕制并联电感对，避免了隔离电感产生的电磁辐射对其他电路的影响。差分脉冲高压源模块及双向绕制并联电感对如图 2 所示。

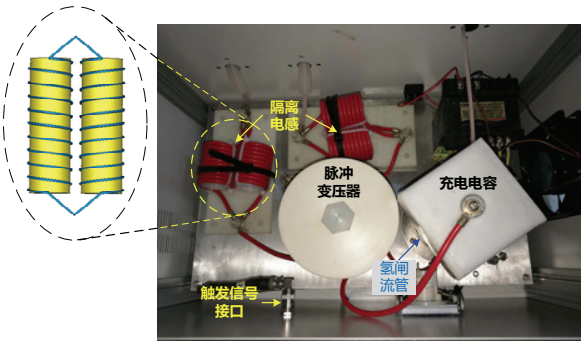


图 2　差分脉冲高压源模块

Fig.2　The picture of the differential HV pulser

差分脉冲高压模块设计的关键在于氢闸流管触发源的设计，其原理如图 3 所示。内置按键产生的开关信号，经过可重复触发单稳态触发器 74LS123 去除毛刺和抖动，将信号调理至 5 V TTL 电平、脉宽约 400 ns 的控制信号，以实现固定导通时间和稳定触发。该控制信号通过门极驱动器驱动高压 MOSFET，产生一个幅值约为 700 V 的脉冲电压，作为氢闸流管的栅极触发脉冲信号。

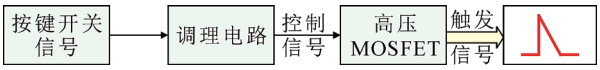


图 3　差分脉冲高压源模块

Fig.3　The picture of the differential HV pulser

氢闸流管触发控制电路输出的触发脉冲波形如图 4 所示，波形稳定，重复性好，能够产生前沿约 200 ns、半高宽约 2.25 μs、幅值约 700 V 的低压触发信号，可以成功触发氢闸流管，产生初级高压脉冲。

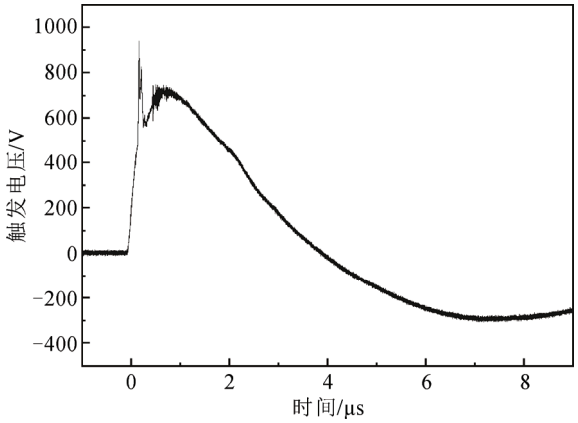
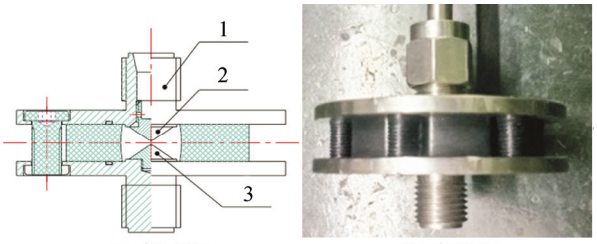


图 4　氢闸流管触发源输出脉冲波形

Fig.4　The waveform of the trigger voltage of the hydrogen thyratron

2.2　锋化开关设计

脉冲源模块进行脉冲压缩的核心部件为锋化开关，所采用的锋化开关为高压气体开关，内充氮气绝缘。为了产生亚纳秒前沿，幅值为数十千伏的高压脉冲，要求开关间隙尽可能小，工作气压要尽可能高。此外，如图 1 所示，锋化开关须安装在 IRA 天线的焦点处，为了减小开关对辐射口径的阻挡，要求开关体积尽可能小。设计了间隙 1 mm，圆锥电极，耐压在数兆帕的紧凑型锋化开关，见图 5。设计的开关直径为 5.5 cm，高度为 1 cm，结构紧凑。经测试，所设计的锋化开关耐压在 3 MPa 以上。



(a) 剖面图　　(b) 实物图

1—开关充气接口；2—开关上电极；3—开关下电极

图 5　锋化开关

Fig.5　The picture of the peaking switch

3　IRA 天线设计

3.1　共面馈臂 IRA 天线设计

标准 IRA 天线由抛物面反射器、恒阻抗馈臂和匹配负载组成，馈臂通常为 TEM 传输线。IRA 天线的设计要点在于基于 TEM 传输线的馈臂设计。IRA 天线馈臂的主要设计形式包括双锥馈臂、曲板馈臂和共面平板馈臂 3 种。其中共面平板馈臂因其口径阻塞率较小而被广泛采用。为了提高天线的工作带宽，共面平板馈臂通常设计为恒阻抗。共面平板馈臂 IRA 天线的结构如图 6 所示。

图中 D 为抛物面反射器口径直径；F 为抛物面焦距；$(\beta_0, \beta_1, \beta_2)$为共面平板馈臂结构参数；$R_L$ 为匹配负载。

通常采用球极映射和保角变换计算IRA天线的特性阻抗和结构参数[13]。可以得到，IRA 天线共面平板馈臂特性阻抗 Z_c 的表达式为

$$Z_c = \eta_0 \frac{K(m)}{K'(m)} = \eta_0 \frac{K(m)}{K(1-m)} \tag{1}$$

式中：K 为第一类完全椭圆积分；K'为其一阶导数；η_0 为真空波阻抗；m 为馈臂结构参数，m 满足

$$m^{1/2} = \frac{\tan\beta_1}{\tan\beta_2} \tag{2}$$

根据式(1)可得到共面平板馈臂特性阻抗与其结构参数的关系如图 7 所示。

确定馈臂设计阻抗后，即可根据式(1)求得 m。然后结合抛物面直径 D 和焦距 F 计算馈臂的结构参数为

$$\begin{cases} \beta_0 = \arctan\left(\dfrac{1}{2f_d - 1/(8f_d)}\right) \\ \beta_1 = 2\arctan(m^{1/4}\tan(\beta_0/2)) \\ \beta_2 = 2\arctan(m^{-1/4}\tan(\beta_0/2)) \end{cases} \tag{3}$$

式中，f_d 为焦径比，f_d=F/D。

考虑到天线口径阻塞率及与脉冲源阻抗匹配的需要，IRA 天线共面馈臂的特性阻抗一般设计为 400 Ω，通常两对馈臂并联馈电，天线输入阻抗为 200 Ω。

3.2 介质透镜设计

所设计的IRA天线系统由于馈臂之间嵌入了锋化开关，开关具有一定体积，导致馈电点不能严格位于抛物面焦点处，因而需设计介质透镜对辐射中心加以校正。此外由于工作电压较高，天线馈电处需要进行绝缘设计，设计中采用变压器油提高绝缘强度。因此可基于菲涅尔定理将变压器油和装载油箱设计成介质透镜形状[23-24]，在增加绝缘强度的同时，起到校正天线辐射中心的作用。介质透镜的设计是 IRA 天线设计的关键，在柱坐标系(r, φ, z)中介质透镜的设计原理如图 8 所示。

图 8 中，l_1、l_2 分别为开关中心和反射面焦点到 z 轴透镜边界的距离；h_0 为透镜口径处半径；θ_{1max} 为 z 轴与锥板馈臂角平分线的夹角，θ_1 为相应参变量；θ_{2max} 为 z 轴折射光路边界的夹角，θ_2 为相应参变量；ε_1、ε_2 分别为透镜内、外介质的介电常数。

从图 8 中可以看出，介质透镜基本工作原理为

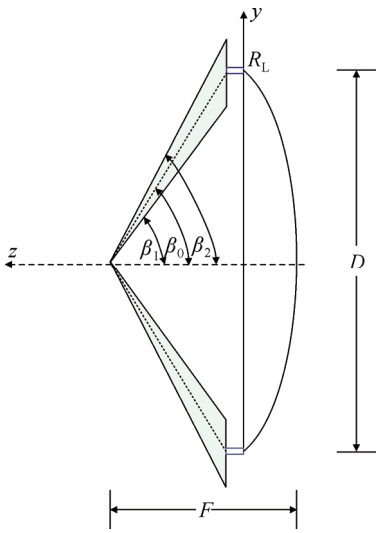


图 6 共面馈臂 IRA 天线示意图

Fig.6 The diagram of the pulser

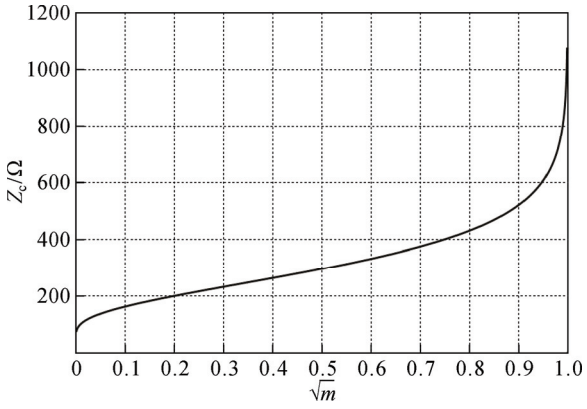


图 7 共面馈臂特性阻抗与结构参数的关系

Fig.7 The dependence of the impedance on the structure parameter of the co-planar feeding arms

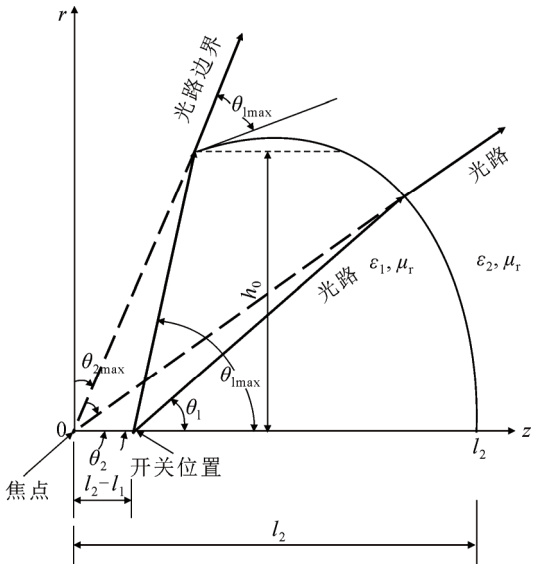


图 8 介质透镜设计原理[24]

Fig.8 Design principle of dielectric lens

开关位置发出的电磁波，经介质透镜折射后，透射波的反向延长线相交于抛物面的焦点处，则焦点为电磁波的视在激发点。然后根据菲涅尔定理可以计算出介质透镜的形状，令其表达式为

$$r = f(z) \tag{4}$$

结合 IRA 天线馈臂结构参数，可以得到图 8 中各参数的几何关系为

$$\theta_{2\max} = 2\arctan\left(\frac{1}{4f_{\mathrm{d}}}\right) = \beta_0 \tag{5}$$

$$\begin{cases} \dfrac{l_1}{h_0} = \dfrac{\cos\theta_{2\max} + \sqrt{\varepsilon_{\mathrm{r}}}\sin\theta_{2\max} - 1}{\left(\sqrt{\varepsilon_{\mathrm{r}}} - 1\right)\sin\theta_{2\max}} \\ \dfrac{l_2}{h_0} = \dfrac{\sqrt{\varepsilon_{\mathrm{r}}}\left(\cos\theta_{2\max} + \sin\theta_{2\max}\right) - 1}{\left(\sqrt{\varepsilon_{\mathrm{r}}} - 1\right)\sin\theta_{2\max}} \end{cases} \tag{6}$$

式中 ε_{r} 为透镜内外介质介电常数之比，$\varepsilon_{\mathrm{r}}=\varepsilon_1/\varepsilon_2$。令

$$A = (l_2/l_1) - 1, \quad B = (l_2/l_1) - \sqrt{\varepsilon_{\mathrm{r}}} \tag{7}$$

则根据菲涅尔定理可以得到，当参数 θ_1 从 0 到 90°变化时，θ_2 满足

$$\cos\theta_2 = \frac{AB\sin^2\theta_1}{B^2 - 2AB\sqrt{\varepsilon_{\mathrm{r}}}\cos\theta_1 + A^2\varepsilon_{\mathrm{r}}} + \left|B\cos\theta_1 - A\sqrt{\varepsilon_{\mathrm{r}}}\right| \cdot \frac{\sqrt{B^2 - 2AB\sqrt{\varepsilon_{\mathrm{r}}}\cos\theta_1 + A^2\varepsilon_{\mathrm{r}} - A^2\sin^2\theta_1}}{B^2 - 2AB\sqrt{\varepsilon_{\mathrm{r}}}\cos\theta_1 + A^2\varepsilon_{\mathrm{r}}} \tag{8}$$

可以得到介质透镜形状的参数方程为

$$\begin{cases} z = \dfrac{h_0\tan\theta_1\left(l_2/h_0 - l_1/h_0\right)}{\tan\theta_1 - \tan\theta_2}, 0 \le \theta_1 \le 90° \\ r = z\tan\theta_2 \end{cases} \tag{9}$$

3.3 IRA 天线参数设计与仿真

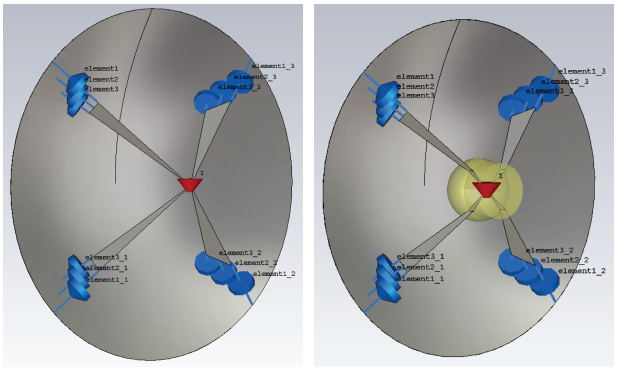
拟设计的 IRA 天线抛物面反射器的直径为 1.2 m，焦距为 0.42 m，焦径比为 0.35，天线输入阻抗为 200 Ω。结合共面馈臂设计方法，即可确定 IRA 天线结构参数。所采用的锋化开关高度为 1 cm，采用变压器油提高绝缘强度，变压器油介电常数为 2.26，取介质透镜口径处直径为 20 cm，结合馈臂结构参数，即可完成介质透镜的设计。建立的 IRA 天线的仿真模型如图 9 所示。

从仿真模型可以看出，加入介质透镜后，对天线的馈电结构进行了修正。通过仿真计算了介质透镜的设计对天线辐射性能的提升效果，两种天线的电压驻波比仿真结果如图 10 所示。

从电压驻波比计算结果可以看出，设计介质透镜后，IRA 天线的阻抗匹配特性得到了显著提升，尤其是在高频段，在 0~1 GHz 范围内基本实现了电压驻波比小于 3。

4 IRA 天线辐射系统测试实验

组装完成的 IRA 天线辐射系统如图 11 所示。经过安装调试，确定了系统的几个工作点，即开关充气气压与氢闸流管充电电压的对应关系。通过锋化开关压缩后的快脉冲直接连接馈臂给天线馈电，



(a) 不含介质透镜　　(b) 含介质透镜

图 9　IRA 天线仿真模型

Fig.9　The simulation models of the IRAs

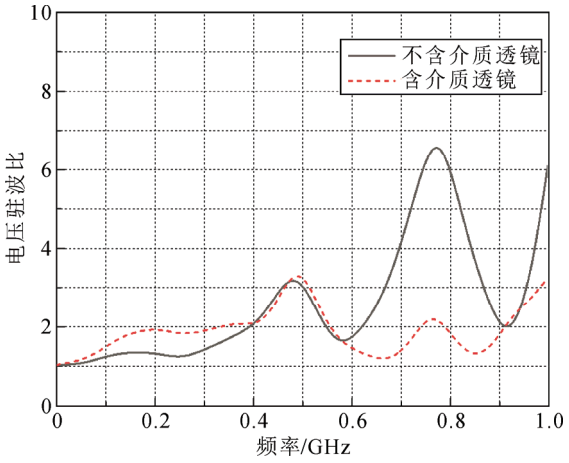


图 10　IRA 天线的电压驻波比

Fig.10　Simulation model of the LEMP simulator

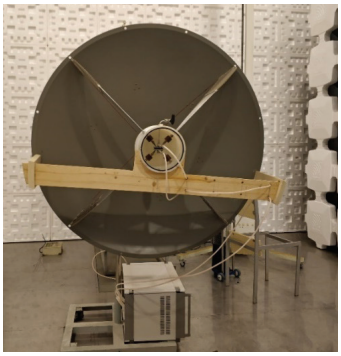


图 11　IRA 天线辐射系统实物图

Fig.11　The picture of the IRA system

这种馈电方式决定了天线输入电压难以实测，因而确定工作点过程中，通过测试系统辐射场来监测系统工作状态。

工作点的确定过程为，固定充气气压，然后调节氢闸流管的充电电压，并在距离天线辐射中心 5.5 m 处测试辐射场，以监测系统的工作状态。随着充电电压的升高，锋化开关恰好击穿，电压继续升高，辐射场不再随之增强，则该临界击穿电压即为辐射系统在该气压下的工作电压。辐射场的测试在微波暗室中进行，测试系统的配置如图 12 所示。得到的 IRA 天线辐射系统工作点如表 1 所示。

辐射场测量天线为 TEM 喇叭天线，极板长度为 93 cm，口径宽度为 10 cm，口径高度为 2 cm。根据小张角 TEM 喇叭天线理论模型，可计算得到其等效高度为 1 cm，理论上下限转折频率分别为 51.3 MHz 和 185 GHz[15]，其实际上限频率与制作工艺有关，所采用的 TEM 喇叭天线上限频率在 3 GHz 以上。时域方面，该 TEM 喇叭天线能够测量脉宽小于 6.2 ns 的脉冲。

由于馈电电压难以实测，辐射系统的性能测试主要是对系统的辐射场进行测试。3 MPa 工作条件下，测得其主轴方向距离天线口径 5.5 m 处辐射场波形及频谱如图 13 所示。

从辐射场波形可以看出，在辐射场主脉冲之前有一个预脉冲，这是由馈电点脉冲部分能量直接前向辐射产生的。辐射场预脉冲持续时间约为 2.7 ns，与理论分析值一致。主脉冲上升沿约为 330 ps，脉宽为 2.3 ns(10%幅值脉宽)，幅值约为±8 kV/m，有效电势为±44 kV。从频谱图可以看出，辐射场中心频率为 400 MHz，基于能量范数比定义的信号频带为 80 MHz~1 GHz[25]，信号带比约为 12.5，百分比带宽为 170.4%。辐射场信号频带包含在 TEM 喇叭天线的比例段响应频带内，脉宽在 TEM 喇叭天线可测脉宽范围内，表明其能够近似不失真的实现脉冲场的时域测试。

在实际效应实验中，可以通过调节直流高压源的充电电压和锋化开关的气压，改变辐射电场的强度，从而研究实验对象的效应阈值等特性。

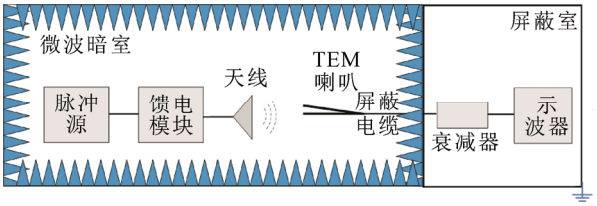


图 12 IRA 天线辐射系统测试实验配置

Fig.12 The configuration of the measurement system

表 1 IRA 天线系统工作点

Table 1 The working point of the IRA system

气压/MPa	充电电压/kV	辐射场幅值/(kV·m^{-1})
1.0	7	5.0
2.4	10	6.2
3.0	15	8.0

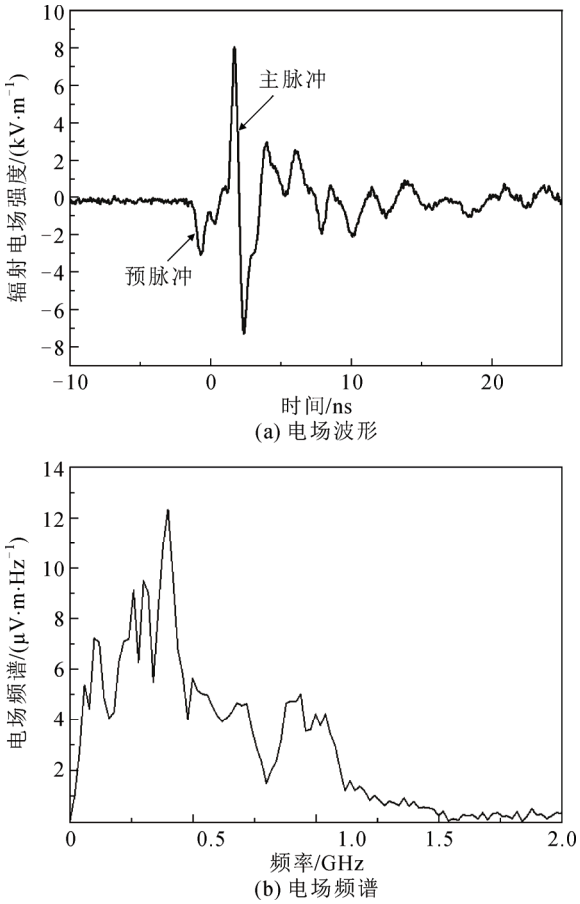


图 13 IRA 天线的辐射电场强度波形和频谱

Fig.13 Waveform and spectrum of the radiating field

5 结论

1）辐射系统的主要技术参数为：辐射电场脉冲上升沿约为 330 ps，辐射远场有效电势为±44 kV；频域中心频率为 400 MHz，基于能量范数比定义的信号频带为 80 MHz~1 GHz，信号带比约为 12.5，百分比带宽为 170.4%。

2）设计了介质透镜，消除了由于锋化开关和绝缘变压器油对 IRA 天线辐射中心的影响，改善了天线的辐射特性。

3）通过调节锋化开关的气压及充电电压，实现了系统辐射功率可调，可用于开展效应对象阈值规律的研究。

参考文献 References

[1] GIRI D V, TESCHE F M. Classification of intentional electromagnetic environments (IEME)[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2004, 46(3): 322-328.

[2] NITSCH D. Coupling and effects of ultra-wideband pulses into/on complex electronic systems[D]. Hamburg, Germany: University of Technology Hamburg-Harburg, 2005.

[3] SAVAGE E, RADASKY W. Overview of the threat of IEMI (intentional electromagnetic interference)[C]//Proceedings of 2012 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility. Pittsburgh, USA: IEEE, 2012: 317-322.

[4] 张耀辉，李跃波，韩 超，等. 用于高功率电磁脉冲防护的 SiC-TVS 器件设计研制[J]. 高电压技术，2020，46(6)：2114-2121.
ZHANG Yaohui, LI Yuebo, HAN Chao, et al. Design and development of SiC-TVS devices for high power electromagetic pulse protection[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(6): 2114-2121.

[5] 张冬晓，陈亚洲，程二威，等. 适用于无人机数据链电磁干扰自适应的环境监测系统[J]. 高电压技术，2020，46(6)：2106-2113.
ZHANG Dongxiao, CHEN Yazhou, CHENG Erwei, et al. Environmental monitoring system suitable for electromagnetic interference adaptation of UAV's datalink[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(6): 2106-2113.

[6] 熊久良，武占成. 超宽带对典型调频引信安全性的影响[J]. 高电压技术，2016，42(6)：1997-2002.
XIONG Jiuliang, WU Zhancheng. Effect of ultra-wide band on security of typical frequency modulation fuze[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(6): 1997-2002.

[7] 付胜华，娄文忠，苏子龙，等. 引信-超宽带强电磁脉冲效应阈值试验研究[J]. 北京航空航天大学学报，2021，47(10)：2075-2080.
FU Shenghua, LOU Wenzhong, SU Zilong, et al. Threshold test study of fuze-ultrawideband high electromagnetic pulse effect[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2021, 47(10): 2075-2080.

[8] 周璧华，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，2019：141-142.
ZHOU Bihua, SHI Lihua, WANG Jianbao, et al. Electromagnetic pulse and its engineering protection[M]. 2nd ed. Beijing, China: National Defense Industry Press, 2019: 141-142.

[9] 李强兵，刘 丹. 一种电磁脉冲辐射系统设计[J]. 太赫兹科学与电子信息学报，2021，19(3)：453-457.
LI Qiangbing, LIU Dan. A design of electromagnetic pulse radiation system[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2021, 19(3): 453-457.

[10] 高怀林，张志强，高冬平，等. 高功率电磁脉冲产生技术与应用[J]. 中国科学：物理学 力学 天文学，2021，51(9)：092007.
GAO Huailin, ZHANG Zhiqiang, GAO Dongping, et al. Generation of high-power electromagnetic pulses and its application to radiation effect research: a review[J]. Scientia Sinica Physica, Mechanica & Astronomica, 2021, 51(9): 092007.

[11] PRATHER W D, BAUM C E, TORRES R J, et al. Survey of worldwide high-power wideband capabilities[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2004, 46(3): 335-344.

[12] CADILHON B, CASSANY B, MODIN P, et al. Ultra wideband antennas for high pulsed power applications[M]. MATIN M. Ultra Wideband Communications: Novel Trends-Antennas and Propagation. Rijeka, Croatia: InTech, 2011: 278-306.

[13] GIRI D V. High-power electromagnetic radiators: nonlethal weapons and other applications[M]. Cambridge, USA: Harvard University Press, 2004.

[14] KOSHELEV V I, BUYANOV Y I, BELICHENKO V P. Ultrawideband short-pulse radio systems[M]. Boston, USA: Artech House, 2017: 380-384.

[15] 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.

[16] 石一平，易超龙，樊亚军，等. 一种高功率共面馈电脉冲辐射天线的设计实验[J]. 强激光与粒子束，2016，28(4)：41-44.
SHI Yiping, YI Chaolong, FAN Yajun, et al. Design and experiments on a kind of high-power coplanar-feed impulse radiating antenna[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2016, 28(4): 41-44.

[17] 王绍飞. 基于效应最大化原则的超宽带电磁脉冲辐射天线技术研究[D]. 西安：西安交通大学，2018.
WANG Shaofei. The technology of ultra-wideband antennas based on the principle of the maximization of electromagnetic pulse effects[D]. Xi'an, China: Xi'an Jiaotong University, 2018.

[18] WANG S F, XIE Y Z, GAO M X, et al. Optimizing high-power ultra-wideband combined antennas for maximum radiation within finite aperture area[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2019, 67(2): 834-842.

[19] 王 赟，陈永光，王庆国，等. 用镜像法计算冲击脉冲辐射天线辐射电场[J]. 高电压技术，2012，38(9)：2308-2313.
WANG Yun, CHEN Yongguang, WANG Qingguo et al. Radiated electric field calculation of Impulse radiating antenna applying image method[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(9): 2308-2313.

[20] 周虹娟. IRA 超宽带脉冲天线技术研究[D]. 西安：西安电子科技大学，2021.
ZHOU Hongjuan. Research on ultra-wideband impulse radiating antenna (IRA) technology[D]. Xi'an, China: Xidian University, 2021.

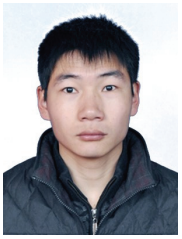
[21] 陈伶璐. 反射面型脉冲辐射天线的快速优化方法研究[D]. 成都：西南交通大学，2014.
CHEN Linglu. Study of fast optimization approach for reflector impulse-radiating antennas[D]. Chengdu, China: Southwest Jiaotong University, 2014.

[22] 张 春. IRA 天线辐射性能的优化[D]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学，2008.
ZHANG Chun. Optimization on radiation performance of IRA (impulse radiating antenna)[D]. Harbin, China: Harbin Institute of Technology, 2008.

[23] STONE W R. Review of radio science[M]. New York, USA: Wiley-IEEE Press, 1999: 403-439.

[24] ALTUNC S, BAUM C E, CHRISTODOULOU C G, et al. Design of a uniform electromagnetic dielectric lens for launching an approximate spherical TEM wave[C]//Proceedings of 2009 International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications. Turin, Italy: IEEE, 2009: 8-11.

[25] IEC. Electromagnetic compatibility (EMC)-Part 2-13: environment – high-power electromagnetic (HPEM) environments – radiated and conducted: IEC 61000-2-13[S]. Geneva, Switzerland: International Electrotechnical Commission, 2005.



王绍飞(通信作者)
1989—，男，博士，助理教授
主要从事高功率电磁脉冲产生、辐射、测量及应用等方面的研究工作
E-mail: sfwang2019@xjtu.edu.cn

WANG Shaofei
Ph.D.
Corresponding author

收稿日期 2022-03-16 在线出版日期 2022-06-01 编辑 曹昭君