

文章编号: 2095-4980(2016)06-0982-04

用于有界波模拟装置的高功率窄脉冲源研制

谢霖桑, 贾 伟, 郭 帆, 陈维青, 张国伟, 王海洋, 何小平

(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, 陕西 西安 710024)

摘 要: 为满足有界波模拟装置指标需求, 研制了一台高功率窄脉冲源。利用 Marx 发生器并联充电、串联放电的原理, 该脉冲源可实现百千伏的脉冲高压输出, 其最终输出电压幅值 100 kV, 上升时间 1.8 ns, 脉冲半宽 40 ns, 满足模拟装置指标要求。该脉冲源结构紧凑, 直径 18 cm, 长度 97 cm, 可用于在室内开展高空核电磁脉冲对待考核系统所产生的破坏效应和加固技术研究工作。

关键词: 有界波模拟器; 脉冲源; 核电磁脉冲

中图分类号: TN78

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201606.0982

High power pulse generator for bounded-wave EMP simulator

XIE Linshen, JIA Wei, GUO Fan, CHEN Weiqing, ZHANG Guowei, WANG Haiyang, HE Xiaoping

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

Abstract: A high power pulse generator is described, which has been used in a bounded-wave Electro Magnetic Pulse(EMP) simulator. The peak value of the generator output voltage is above 100 kV, the rise time of output waveform 1.8 ns, and its pulse-width 40 ns. The diameter of the generator is 18 cm, and its length 97 cm. The generator, with compact configuration, also can work in a repetitive mode. This system can be adopted to evaluate and improve the viability against Nuclear Electro Magnetic Pulse(NEMP) of weapons.

Keywords: bounded-wave Electro Magnetic Pulse simulator; pulse generator; Nuclear Electro Magnetic Pulse

为了在室内开展高空核爆电磁脉冲对待考核系统所产生的破坏效应和加固技术研究工作^[1], 需研制一台有界波模拟装置, 其中关键部件就是高功率窄脉冲源。该脉冲源产生的波形需满足高空核爆电磁脉冲主要特征^[1]。本文介绍了此高功率窄脉冲源的工作原理和主要结构, 并给出了实测波形, 与理论结果进行了比较, 符合预期目标, 为下一步开展高空核爆电磁脉冲效应和加固试验工作打下了基础。

1 脉冲源设计

IEC61000-2-9 标准中关于高空核爆电磁脉冲早期波形的指标要求为上升时间小于 2.8 ns, 脉冲半宽大于 18 ns, 场强大于 50 kV/m, 对应应有界波模拟装置 2 m 高的实验空间, 要求脉冲源输出电压幅值大于等于 100 kV。在脉冲功率技术中, Marx 发生器被广泛应用于各种高压脉冲的产生^[2]。本文设计的 Marx 发生器采用同轴结构, 以减小回路电感, 产生快上升时间的高压脉冲。为满足指标要求, 高功率窄脉冲源采用一级陡化方案, 主要由 Marx 发生器、峰化

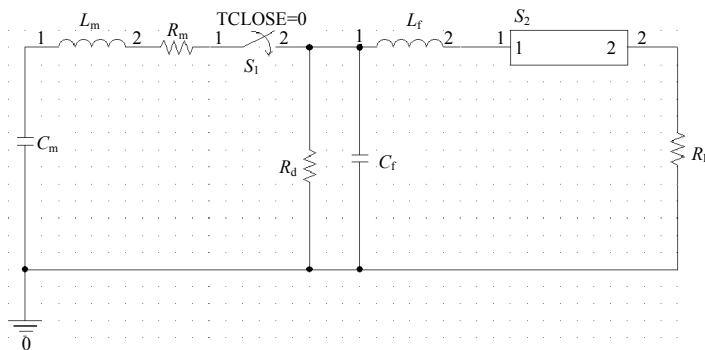


Fig.1 Schematic diagram of pulser
图 1 脉冲源工作原理图

收稿日期: 2015-07-24; 修回日期: 2015-09-04

基金项目: 装备预先研究资助项目

电容和峰化开关组成。其等效电路如图1所示^[3-4],图中 C_m, R_m 和 L_m 分别为Marx发生器的串联电容、串联电阻和串联电感。 R_d, R_L 分别为接地电阻、负载电阻; C_f 为峰化电容, L_f 为峰化回路电感(包括峰化电容电感、峰化接线电感、峰化开关电感), S_1 为Marx发生器建立时的等效主开关, S_2 为峰化开关。

为实现重频工作,根据模拟器的脉冲宽度与放电电容、天线特性阻抗的关系式(1)^[5-6]确定Marx发生器的等效放电电容 C_0 。

$$\begin{cases} L_0 = 12.7 \frac{R_L T_L}{n} \\ C_0 = 1.58 \frac{n T_L}{R_L} \end{cases} \quad (1)$$

式中 T_L 为脉冲宽度,取值28 ns; R_L 为天线特性阻抗,取值100 Ω ; n 为Marx级数,取值10级; C_0 为单级电容,根据式(1),计算得到单级电容 C_0 为4.4 nF。

根据式(2)^[7]可计算峰化电容。

$$C_f = \frac{L_m C_m}{L_m + R_L C_m} \quad (2)$$

式中 C_m 和 L_m 分别为Marx发生器的串联电容和串联电感。根据式(2)计算得 C_f 为75 pF。根据上述各参数理论值可仿真脉冲源输出波形,如图2所示。

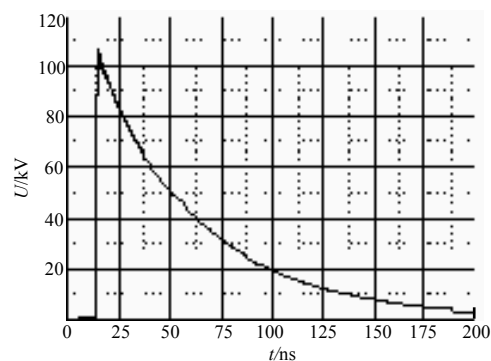


Fig.2 Theoretical output waveform of pulse generator
图2 脉冲源理想输出波形

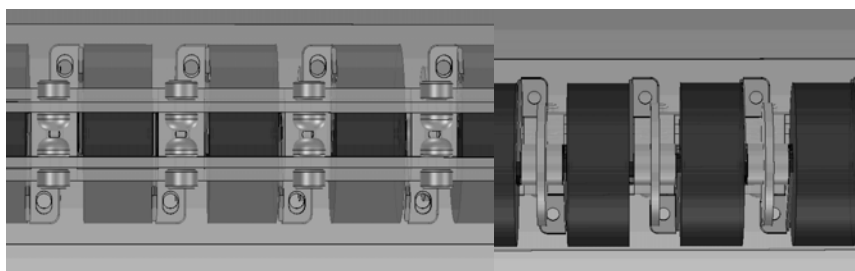


Fig.3 Structure of capacitor and switch in Marx generator
图3 Marx发生器内部电容与开关的安装结构

2 结构设计

2.1 机芯

为实现脉冲源小型化,开关无单独腔体,Marx发生器内部采用气体绝缘,机芯和外筒间采用固体绝缘以减小体积。从高压腔体安全使用考虑,腔体内气压不超过0.5 Mpa,为了获得较高的输出电压,开关间隙不能太小;但是为了获得较大的工作范围,开关间隙也不能太大。综合考虑,取开关间隙为2 mm,绝缘气体为氮气(或干燥空气)。电容采用横向排列,电容间放置固体绝缘子以实现电容间可靠绝缘和机芯长度最小化的要求。机芯结构如图3所示。级间最小绝缘长度5 cm,满足单级充电电压20 kV的要求。

级间充电组件采用隔离电感,为使发生器正常工作,除放电时隔离阻抗 ωL_0 (L_0 为单级隔离电感)足够大,还应使建立时间和输出脉宽之和远小于各级振荡周期 $0.5 \pi (2L_0 C_0)^{1/2}$ 的1/4。因此隔离电感越大越好。为此设计1 mH电感,如图4所示,电感长度为5 cm,内有磁芯,层间采用绝缘隔离以满足隔离要求。

2.2 峰化段结构

峰化电容采用同轴结构,峰化开关和峰化电容为一体化设计,如图5所示。其中峰化开关输出电极同时还是峰化腔的气路进出口,峰化电容内筒采用空心圆筒,减轻了重量。



Fig.4 1 mH inductance
图4 1 mH电感

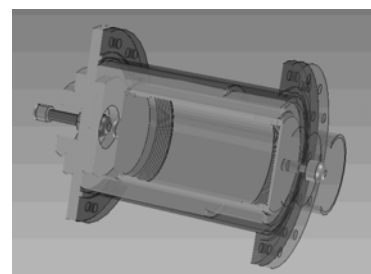


Fig.5 Peaking assembly structure
图5 峰化段结构图

根据式(3)计算同轴腔体电容:

$$C = \frac{2\pi\epsilon\epsilon_0}{\ln \frac{b}{a}} \quad (3)$$

式中: a 为外筒直径 120 mm; b 为内筒直径 90 mm。为保证脉冲源输出前沿满足要求, 根据脉冲源的工作范围确定峰化开关的间隙为 2 mm, 因此峰化段最高充气压力为 1 Mpa, 需对峰化段腔体和有机玻璃隔板进行压力核算后确定筒壁厚度和其他相关尺寸。

2.3 整机

根据上节内容设计加工了 Marx 发生器和峰化段, 发生器外筒和峰化电容外筒法兰尺寸一致, 二者可直接连接。整机实物如图 6 所示, 脉冲源总长为 967 mm, 外径为 180 mm。

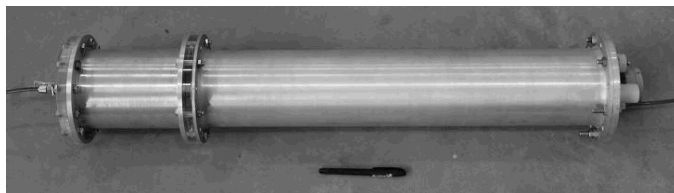


Fig. 6 Pulse generator
图 6 脉冲源整机实物图

3 调试结果

脉冲源接 100 Ω 天线负载, 单次运行时测得的电压波形如图 7 所示, 输出电压幅值 100 kV, 前沿 1.8 ns, 脉宽 40 ns, 脉宽比理论值大, 是由于仿真时未考虑杂散电容的影响。重频模式下由于受充电电源以及触发器的限制, 只能输出 5 个脉冲, 还需进一步改进以实现重频运行。

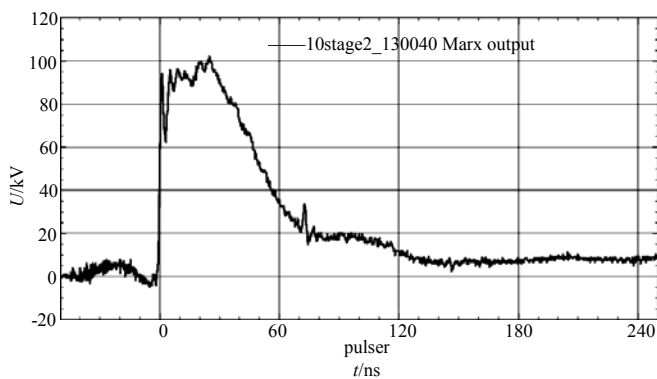


Fig.7 Output waveform with 100 Ω antenna
图 7 负载为 100 Ω 天线时的输出波形

4 结论

本文介绍了一台高功率窄脉冲源, 采用一级陡化方案, 设计时就以重频运行为目的, 研制了结构紧凑的 Marx 发生器和一体化设计的峰化段。

发生器采用气体绝缘, 并在各级电容间采用固体绝缘等方式进一步压缩腔体体积, 峰化开关输出电极同时也是峰化腔体的气路接口, 有利于进一步减小峰化段体积。脉冲源总长为 97 cm, 直径为 18 cm, 输出电压幅值为 100 kV, 前沿为 1.8 ns, 脉宽为 40 ns, 为下一步在室内开展高空核电磁脉冲效应和加固试验工作打下了基础。

参考文献:

- [1] 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. (XIE Yanzhao,WANG Zanji,WANG Qunshu,et al. High altitude nuclear electromagnetic pulse waveform standards: a review[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2003,15(8):781-787.)
- [2] 甘延青,宋法伦,卓婷婷. 同轴结构快 Marx 发生器设计及实验[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2014,12(1):89-92,135. (GAN Yanqing,SONG Falun,ZHUO Tingting,et al. Design and experimental research on a coaxial configuration Marx generator[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2014,12(1):89-92,135.)
- [3] 来定国,谢霖桑. Pspice 子模块在脉冲功率装置电路模拟中的应用[J]. 强激光与粒子束, 2012,24(3):689-692. (LAI Dingguo,XIE Linshen. Application of Pspice subcircuit to circuit simulation of pulsed power device[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2012,24(3):689-692.)
- [4] 谢霖桑,贾伟,郭帆,等. 用于有界波模拟器的紧凑型纳秒脉冲源[J]. 环境技术, 2014(Z1):60-62. (XIE Linshen,JIA Wei,GUO Fan,et al. A compact high voltage pulse generator for bounded-wave EMP simulator[J]. Environmental Technology, 2014(Z1):60-62.)
- [5] 王新新,张卓,肖如泉. 重复频率 Marx 发生器[J]. 电工技术学报, 1997,12(6):59-62. (WANG Xinxin,ZHANG Zhuo,XIAO Ruquan. Repetitive Marx generator[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 1997,12(6):59-62.)
- [6] 王新新,张卓,肖如泉. 重复频率 Marx 发生器的充电回路[J]. 高电压技术, 1997,23(1):37-40. (WANG Xinxin,ZHANG Zhuo,XIAO Ruquan. The charging circuit of a repetitive Marx generator[J]. High Voltage Engineering, 1997,23(1):37-40.)

(下转第 990 页)