

本文引用格式: 杨茂昌,潘少祠.一种用于干扰试验的高压脉冲模拟器设计[J].自动化与信息工程,2023,44(6):29-32.

YANG Maochang, PAN Shaoci. Design of a high-voltage pulse simulator for interference testing[J]. Automation & Information Engineering, 2023,44(6):29-32.

一种用于干扰试验的高压脉冲模拟器设计

杨茂昌¹ 潘少祠²

(1.广东中质检测技术有限公司, 广东 广州 510663

2. 广东省科学院电子电器研究所, 广东 广州 510400)

摘要: 通过原理分析、工程计算和建模, 设计一种高压脉冲模拟器, 用于模拟电磁环境中瞬时高压信号的干扰试验。该高压脉冲模拟器利用高压真空继电器进行极性转化, 高压水银开关实现放电。经测试, 该高压脉冲模拟器实现了 ns 级上升沿, 脉宽 1 μ s, 带载 50 Ω , 幅值 1.5 kV 的高压脉冲输出。

关键词: 安全测试; 电磁环境; 高压脉冲; 模拟器; 干扰试验

中图分类号: TP271; TP277 文献标志码: A 文章编号: 1674-2605(2023)06-0005-04

DOI: 10.3969/j.issn.1674-2605.2023.06.005

Design of a High-voltage Pulse Simulator for Interference Testing

YANG Maochang¹ PAN Shaoci²

(1.Guangdong Zhongzhi Testing Technology Co., Ltd., Guangzhou 510663, China

2.Institute of Electronic Products and Electrical Appliances, Guangdong Academy of Sciences, Guangzhou 510400, China)

Abstract: Design a high-voltage pulse simulator through principle analysis, engineering calculation, and modeling to simulate interference tests of instantaneous high-voltage signals in electromagnetic environments. The high-voltage pulse simulator utilizes a high-voltage vacuum relay for polarity conversion and a high-voltage mercury switch for discharge. After testing, the high-voltage pulse simulator has achieved a ns level rising edge and a pulse width of 1 μ s. High-voltage pulse output with a load of 50 Ω and an amplitude of 1.5 kV.

Keywords: security testing; electromagnetic environment; high-voltage pulse; simulator; interference test

0 引言

许多工业和商用设备, 如电梯、空调、灯具、影视设备等, 出厂前都要进行安全测试和可靠性测试。尤其是涉及公共安全的设备, 如电梯、消防设备、公共电力设备等测试会更加严格, 需通过接近方波的、伏秒积大于 1 kV μ s 的高压脉冲干扰测试。目前, 高压脉冲产生的方式主要有: 1) 可控双极性方式^[1], 通过可控高压开关切换极性产生高压脉冲, 实现方式简单; 2) 固态开关串并联方式^[2], 可实现高压脉冲, 但设计复杂, 不利于工程应用; 3) 磁压缩高压脉冲方式^[3], 可产生陡峭上升沿窄脉宽脉冲, 但仅适用于

脉宽为 100 ns 以内的高压脉冲; 4) Marx 压缩高压脉冲方式^[4-5], 可产生 ns 级上升沿、上百千伏的高压脉冲, 但脉宽波形不适合本文要实现的波形。

基于文献[1]的技术原理, 本文设计一种利用高压真空继电器进行极性转化, 高压水银开关实现放电的双极性高压脉冲模拟器, 实现 ns 级上升沿, 脉宽 1 μ s, 带载 50 Ω , 幅值 1.5 kV 的高压脉冲输出。

1 高压脉冲发生原理

高压脉冲模拟器是一种通过特殊开关将高压直流电源转换为脉冲输出的电源。本文设计的高压脉冲

模拟器利用放电回路的相位延时网络产生相位延迟、输出端叠加反相信号，最终获得输出脉冲信号，其原理示意图如图 1 所示。

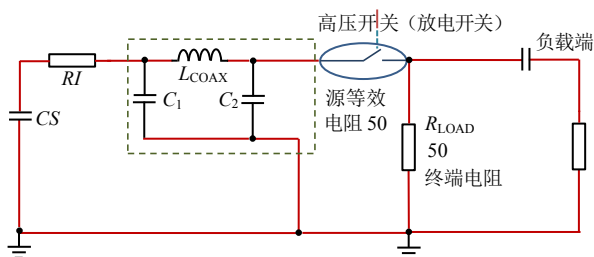


图 1 高压脉冲发生原理示意图

图 1 中， R_I 为充电电阻，与控制电路结合形成短路保护电路； C_S 为储能电容，是放电时的高压电源； L_{COAX} 为输出电感， C_1 和 C_2 为对地电容， L_{COAX} 、 C_1 、 C_2 组成同轴电缆的等效参数网络； R_{LOAD} 为脉冲输出端，外接被测试设备。

在高压开关（放电开关）闭合时，终端电阻 R_{LOAD} 与延时线缆（本文用同轴线缆作为延时线缆）的特性阻抗相等，终端电阻 R_{LOAD} 的电压是正的高压的 1/2；同时，在高压开关（放电开关）闭合的瞬间，回路阻抗从开路变为终端电阻 R_{LOAD} （50 Ω），终端电阻 R_{LOAD} 的电压（正的高压的 1/2）经延时线缆向高压电源 C_S 方向反射；当反射电信号到达充电电阻 R_I （170 kΩ）时， R_I 阻抗远大于延时线缆阻抗，形成第二次反射，以负的高压的 1/2 向终端电阻 R_{LOAD} 方向反射；当第二次反射电信号到达终端电阻 R_{LOAD} 时，与原来的正的高压的 1/2 抵消，形成一个完整的方波^[6]。方波宽度等于电信号在延时线缆上来回反射的时间，改变延时线缆长度可改变方波宽度。

电信号在真空中的传播速度为光速 3×10^8 m/s，即 0.3 m/ns。在其他传输介质中传播时，设传输介质的相对介电系数为 ϵ ，则电信号的传播速度为 $3/(10\sqrt{\epsilon})$ m/ns。传输延时公式为

$$TD = L \times 10\sqrt{\epsilon} / 3 \quad (1)$$

式中： L 为延时线缆的长度，单位 m； ϵ 为同轴线缆的相对介电系数。

2 硬件设计

基于上述原理设计合适的传输延时网络，使延时达到 μs 级别。本文的同轴线缆材料为特氟龙，相对介电系数为 2.1，公式(1)可简化为

$$TD = 4.83 \times L \quad (2)$$

由公式(2)可知，若输出 1 μs 脉宽的高压脉冲，延时线缆长度为 207 m。延时反射波的路径为先到源端再到负载端，所以实际延时线缆的长度为 $207/2 = 103.5$ m。

高压脉冲模拟器主要包括电源模块、升压模块、高压开关、储能模块、延时线缆和放电模块、控制电路等，电路模型如图 2 所示。

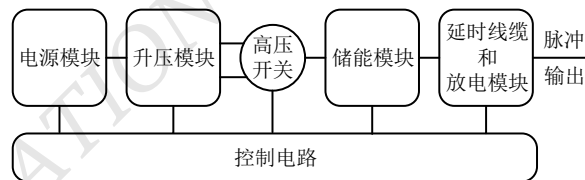


图 2 高压脉冲模拟器的电路模型

2.1 电源模块

电源模块为高压脉冲模拟器的供电电路，包括两部分：1) 高压脉冲模拟器的控制电路、高压开关和放电模块中高压水银开关的供电，采用符合 3C 认证的 AC/DC 开关电源，功率为 100 W，输出直流电压为 24 V/12 V/5 V；2) 升压模块的供电，采用符合 3C 认证的 AC/DC 开关电源，功率为 300 W，输出直流电压为 24 V^[7-8]。这两部分相互独立。

2.2 升压模块

升压模块为高压脉冲模拟器产生高压电源，采用双管正激电路拓扑结构，通过变压器一级升压，四级倍压整流升压到开路电压 3 kV。倍压整流二极管为高压硅堆二极管，耐压为 10 kV；电容为 22 nF、10 kV 的陶瓷电容^[9-10]。

2.3 高压开关

高压开关采用 JPK-23 陶瓷高压真空继电器进行正负电压切换，耐压为 12 kV，控制电压为 24 V^[11]。

2.4 储能模块

储能模块用于高压脉冲储能，主要包括 $170\text{ k}\Omega$ 的充电电阻 $R1$ 和 $6.2\text{ }\mu\text{F}$ 、 6 kV 的储能电容 $C5^{[12]}$ 。

2.5 延时线缆和放电模块

延时线缆和放电模块是高压脉冲模拟器的核心。延时线缆用于电信号的反射和延时，与储能模块和放电模块产生高压脉冲；放电模块采用 12 kV 耐压的高压水银开关^[11]。

2.6 控制电路

控制电路采用 STC32G12K128 单片机作为主控芯片，用于控制升压模块、高压开关和放电模块。其主要控制时序为：首先，控制升压模块进行升压；然后，根据实际产生正或负脉冲来控制高压开关选择极性；最后，控制放电模块的高压水银开关进行放电，产生高压脉冲，同时对过载和短路进行保护控制。

高压脉冲模拟器硬件的设计关键是延时线缆布设。根据公式(2)的计算，产生 $1\text{ }\mu\text{s}$ 的延时需要同轴线缆 103.5 m 。根据常用同轴线缆尺寸表(RG 系列)，

选择同轴线缆 RG-8，其外径为 10.3 mm ，耐压为 10 kV ，满足设计要求。

同轴线缆设计为圆形布设，如图 3 所示，线缆线圈剖面示意图如图 4 所示。考虑到高压脉冲模拟器为试验测试设备，外观尺寸不能太大，同时绕线后方便调整线缆长度，故设计为圆形绕线。

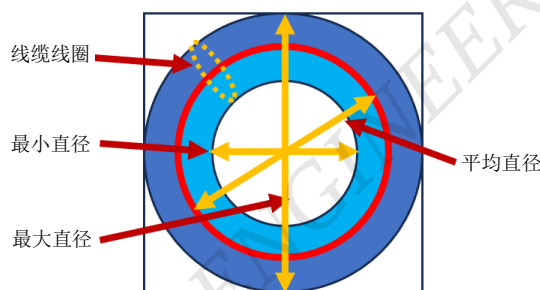


图 3 同轴线缆布设俯视图示意图

设定同轴线缆绕圈最小直径为 349 mm ，平均直径为 400 mm ，最大直径为 462 mm 。根据圆周长公式，同层中每圈对应的同轴线缆的绕线圆尺寸如表 1 所示。

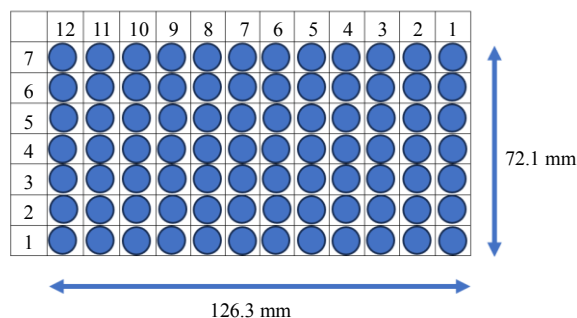
表 1 同轴线缆的绕线圆尺寸单层 1~12 圈

单位：mm

圈数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
直径	349	359	369	379	390	400	410	421	431	441	452	462
周长	1 095	1 127	1 160	1 192	1 224	1 257	1 289	1 321	1 354	1 386	1 418	1 451

由表 1 计算得到单层同轴线缆的总长度为 $15\ 274\text{ mm}$ ；同轴线缆布设的层数为 $103\ 500/15\ 274 = 6.77$ ，取整 7 层；线圈的截面尺寸为 $126.3\text{ mm}\times 72.1\text{ mm}$ 。如图 4 所示，整个线圈的剖面取整数尺寸为 $462\text{ mm}\times 72\text{ mm}$ 。整个同轴线缆布设后，整体外形尺寸长宽高为 $462\text{ mm}\times 462\text{ mm}\times 72\text{ mm}$ 。

高压脉冲模拟器机箱的外观尺寸为适用标准机柜尺寸，高度为 6U（1U 为 44.4 mm ），则高压脉冲模拟器长、宽、高为 $480\text{ mm}\times 480\text{ mm}\times 266\text{ mm}$ 。同轴线缆绕线后的尺寸为 $462\text{ mm}\times 462\text{ mm}\times 72\text{ mm}$ ，即使考虑布设同轴线缆间有空隙，余下的机箱空间足够放置其他模块。



圆圈表示同轴线缆布设位置，水平数字表示线缆布设圈数，垂直方向的数字表示线缆布设层数

图 4 同轴线缆布设线缆线圈剖面示意图

3 波形测量与实验分析

对高压脉冲模拟器进行波形测量与实验分析。测量设备为 $190\sim 202$ 带宽 200 MHz 的示波器、

THDP0100 高压探头和 $50\ \Omega$ 负载。其中, 高压探头电压衰减比为 $1000:1$, 示波器输入端电压比设置为 $1000:1$ 。

高压脉冲输出波形测量参数如表 2 所示, 测试波形如图 5、6 所示。

表 2 高压脉冲输出波形测量参数

序号	测量脉冲	上升沿/ ns	脉宽/ μs	幅值/ kV
1	正脉冲	1.8	1.2	1.52
2	负脉冲	1.9	1.1	1.53

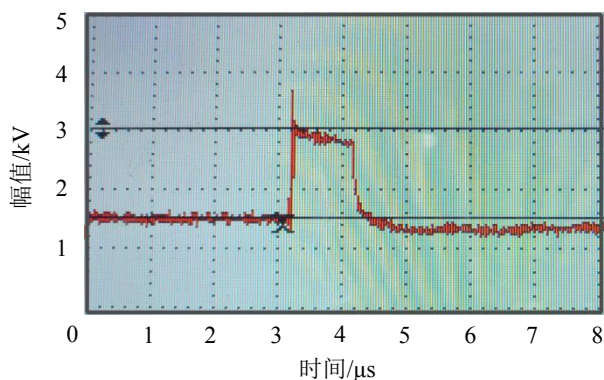


图 5 高压脉冲模拟器正脉冲输出波形

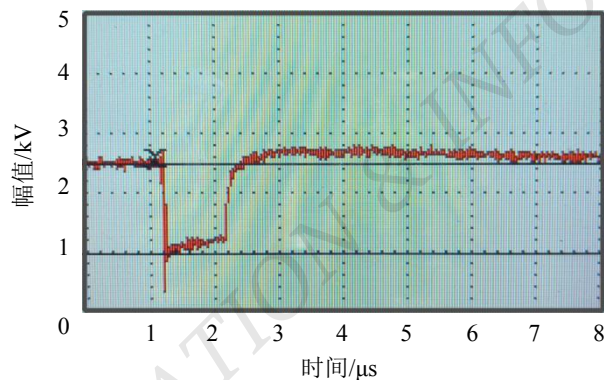


图 6 高压脉冲模拟器负脉冲输出波形

由图 5、6 可知, 高压脉冲模拟器产生的高压脉冲符合参数设计要求: 上升沿 $2\ \text{ns}$ ($\pm 20\%$), 脉宽 $1\ \mu\text{s}$ ($\pm 20\%$), 幅值 $1.5\ \text{kV}$ ($\pm 20\%$), 验证了本

作者简介:

杨茂昌, 男, 1972 年生, 本科, 高级工程师, 主要研究方向: 电力设备检测技术、电力电子技术。E-mail: 13903015705@139.com

潘少祠, 男, 1981 年生, 本科, 工程师, 主要研究方向: 电子技术和测控技术。E-mail: 13710081297@139.com

文设计的高压脉冲模拟器是可行的, 具有工程实用性。

4 结论

本文设计了一种高压脉冲模拟器, 用于电子设备的高压脉冲干扰测试。该高压脉冲模拟器采用同轴电缆组成的延时网络, 实现 $1\ \mu\text{s}$ 脉宽, $1.5\ \text{kV}$ 脉冲输出。本文设计方法具有工程易实现、成本较低、可靠性和安全性高等特点, 为实验室针对特定要求的脉冲测试提供了一种思路和方向。

参考文献

- [1] 张硕, 聂鹏飞, 庞存锁, 等. 可控双极性高压脉冲超声激励电源设计[J]. 信息技术, 2022(3): 17-23.
- [2] 施阳杰. 基于固态开关串并联的脉冲电源研制[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2022.
- [3] 寇科男, 刘冬, 金晗冰, 等. 电磁脉冲模拟器快前沿高压脉冲源设计[J]. 安全与电磁兼容, 2022(5): 34-39+52.
- [4] 赵宽祥. 基于 Marx 的全固态倍频高压脉冲电源技术的研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2022.
- [5] 姚学玲, 焦梓家, 孙晋茹, 等. 一级 Marx 压缩的高稳定纳秒脉冲电源的设计[J]. 强激光与粒子束, 2023, 35(6): 101-109.
- [6] 赵虹兵. 脉冲发生器信号合成模块设计[D]. 成都: 电子科技大学, 2016.
- [7] 李心怡. 基于 APFC 的双管正激变换器设计[D]. 长沙: 湖南大学, 2021.
- [8] 王瑞东. 正激式有源箝位电压模开关电源的研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2021.
- [9] 杨卫悦. 高压直流电源设计研究[D]. 天津: 天津理工大学, 2022.
- [10] 易磊. 一种高效率升压型 DC-DC 转换器设计[D]. 南京: 南京邮电大学, 2022.
- [11] 贺增辉. 便携式高压发生器的设计与研究[D]. 北京: 北方工业大学, 2022.
- [12] 周任晖. 直流高压电源保护电路设计[D]. 沈阳: 沈阳师范大学, 2023.