

# 分布电容对脉冲电压源上升前沿的影响

研究了脉冲电压源性能测试过程中，分布电容对脉冲电压源上升前沿的影响。研究表明，包括测试探头和防护装置等导致的分布电容联合作用会使脉冲电压源上升前沿增加。针对脉冲电压源，分布电容导致的上升前沿在测试时增加了  $1\ \mu\text{s}$ 。研究方法可推广到其他脉冲电压源上升前沿的修正。

张 涛 谢庆海 贺红亮 刘高旻/中国工程物理研究院流体物理研究所  
伍 星/中国工程物理研究院总体工程研究所

## 0 引言

高压脉冲功率源是元器件检测及引信电子安全电压起爆系统的主要加载装置。近年，国内外的高压脉冲功率源技术发展迅速<sup>[1-3]</sup>，而小型高压脉冲功率源是现代高功率脉冲技术研究的重要内容之一<sup>[4]</sup>，脉冲电压源的上升前沿是表征电源性能的重要参数之一<sup>[5]</sup>。本文所研究的脉冲电压源通过冲击换能实现兆瓦级高功率输出。基本原理是在冲击波作用下铁电陶瓷由铁电相转换为反铁电相，剩余极化的去极化过程会实现电流的输出。本文所研究的脉冲电压源就是利用铁电陶瓷的这种冲击去极化效应制造的一种电源，其一般通过给铁电陶瓷两端并联一个电容器或大电阻，实现高电压的输出，如图1所示。



张 涛/研究实习生

### 关键词/Keywords

脉冲电压源 ·  
上升前沿 ·  
分布电容 ·

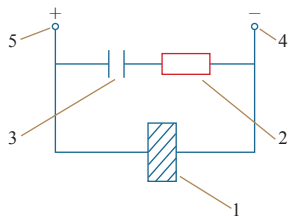


图1 脉冲电压源结构示意图

1—铁电陶瓷 2—负载电阻 3—负载电容 4—电源负极  
5—电源正极

在脉冲电压源的性能测试过程中，外部保护装置及测试仪器本身引入的分布电容均会使脉冲电压源的上升前沿变缓，从而使测试结果存在一定误差，而怎样通过实验过程中所得到的测试数据反推电源真实的上升前沿是本文的研究重点。

## 1 实验介绍

本文使用的实验装置如图2所示，在实验过程中，为了保护测试探头不被脉冲电压源工作过程中所需的冲击波破坏，一般采用如图2所示的防护装置对测试探头进行保护，而防护装置与电压源高压之间会存在分布电容，测试探头也可以等效为一容性负载，两者均会导致脉冲电压源在测试得到的上升前沿变缓。

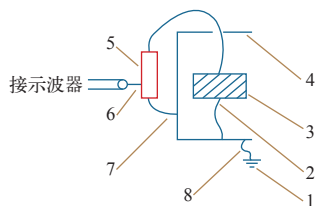


图2 脉冲电压源实验装置示意图

1—地 2—连接线1 3—脉冲电压源 4—防护装置  
5—测试探头 6—测试探头测试端口 7—测试探头地线  
8—防护装置地线

本文所采用实验装置的等效电路如图3所示。铁电陶瓷可以等效为恒流源、等效电容和漏电阻的并联形式，其中  $S_1$  为输出恒流源， $C_1$  和  $R_1$  为铁电陶瓷等效电容和漏电阻，其值分别为  $C_1 = 7.5\ \text{pF}$ ， $R_1 \approx 1.5\ \text{M}\Omega$ ； $C_2$  和  $R_2$  为并联电容和电阻，其值分别为  $C_2 = 4.5\ \text{pF}$ ， $R_2 = 1\ \text{k}\Omega$ ； $S_1$ 、 $C_1$ 、 $R_1$ 、 $C_2$  及  $R_2$  共同组成脉冲

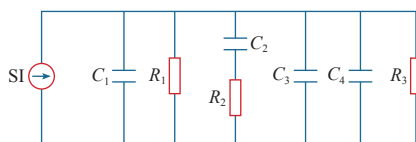
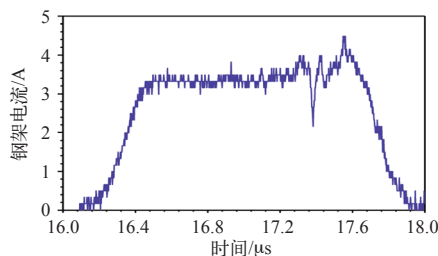


图3 实验等效电路图

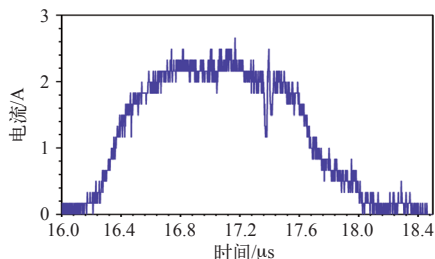
电压源； $C_3$ 为防护装置引入的分布电容， $C_4$ 为测试探头引入的分布电容，需要经过实验和计算得到； $R_3$ 为防护装置及测试探头的漏电阻，一般可认为 $R_3 \approx \infty$ 。

## 2 实验结果及分析

图4为脉冲电压源实验结果，其中图4a为流过保护装置地线的电流随时间变化的曲线，图4b为流过测试探头地线的电流随时间变化的曲线。



(a) 防护装置电流



(b) 测试探头电流

图4 脉冲电压源实验结果

### 2.1 计算防护装置引入的分布电容

防护装置引入的分布电容的计算思路：通过将地线电流积分获得装置在脉冲电压源放电过程中的累积电荷量，然后除以脉冲电压源的输出电压 $U=110\text{ kV}$ ，获得防护装置的分布电容。图5为地线电流对时间的积分波形。

装置上积累的总电荷为 $Q=5.004\text{ }\mu\text{C}$ ；根据式(1)计算可得防护装置引入的分布电容为 $C_3=45.4\text{ pF}$ 。

$$C_3 = \frac{\int_0^{\tau} I dt}{U} \quad (1)$$

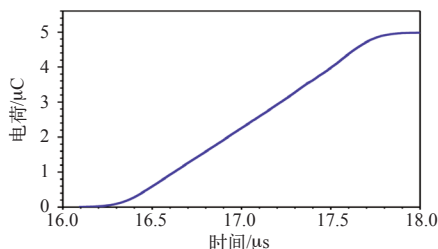


图5 防护装置累积电荷总量

### 2.2 测试探头引入的分布电容

测试探头分布电容的计算思路 and 上节防护装置的分布电容计算思路相同，即通过将测试探头地线电流积分获得探头在放电过程中的累积电荷量，然后除以脉冲电压源的输出电压 $U=110\text{ kV}$ ，获得测试探头的分布电容。图6为测试探头地线电流对时间的积分波形。

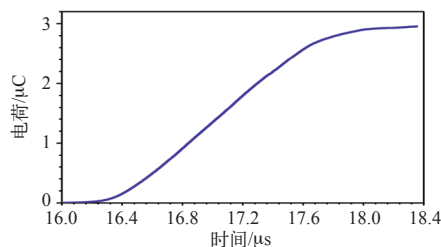


图6 测试探头累积电荷总量

测试探头上积累的总电荷为 $Q=2.955\text{ }\mu\text{C}$ ；根据式(2)计算可得测试探头的分布电容为 $C_4=26.9\text{ pF}$ ，即

$$C_4 = \frac{\int_0^{\tau} I dt}{U} \quad (2)$$

### 2.3 脉冲电压源上升前沿的计算

若要计算防护装置和测试探头对电压源上升前沿的影响，则首先需要考虑不带防护装置和测试探头时脉冲电压源的上升前沿。脉冲电压源自身的漏电阻为兆欧量级，本文中将其等效为无穷大，则不带防护装置和测试探头的等效电路如图7所示。

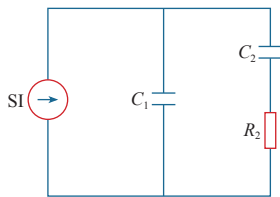


图7 不带防护装置和测试探头的等效电路图

假设陶瓷堆等效恒流源SI的输出电流为 $I$ ，流过陶瓷堆等效电容 $C_1$ 的电流为 $I_1$ ，流过负载电容 $C_2$ 和负载电阻 $R_2$ 的电流为 $I_2$ ，陶瓷堆及负载两端电压为 $U$ ，则有

$$\begin{cases} I = I_1 + I_2 \\ \int \frac{I_1 dt}{C_1} = \int \frac{I_2 dt}{C_2} + RI_2 \end{cases} \quad (3)$$

通过适当的推导，即可得到流过负载电容和负载电阻的电流 $I_2$ 为

$$I_2 = \frac{IC_2}{C_1 + C_2} (1 - e^{-\frac{C_1 + C_2}{C_1 C_2 R} t}) \quad (4)$$

继而可得到陶瓷堆及负载两端的电压 $U$ 为

$$U = R \frac{IC_2}{C_1 + C_2} (1 - e^{-\frac{C_1 + C_2}{C_1 C_2 R} t}) + \frac{\int \frac{IC_2}{C_1 + C_2} (1 - e^{-\frac{C_1 + C_2}{C_1 C_2 R} t}) dt}{C_2} \quad (5)$$

根据已知条件，陶瓷堆等效电容 $C_1 = 7.5$  pF，负载电容 $C_2 = 4.5$  pF，负载电阻 $R_2 = 1$  k $\Omega$ 。采用数值方法对式（5）进行求解。取求解步长 $\Delta t = 1$  ns，从初始时刻 $t = 0$  ns开始计算，可得如表1所示的结果。

表1 不同时刻电源两端电压结果1

| 时间/ns    | $U/\text{kV}$ |
|----------|---------------|
| 1        | 1.09          |
| 2        | 2.06          |
| 3        | 2.94          |
| $\vdots$ | $\vdots$      |
| 15       | 11.43         |
| $\vdots$ | $\vdots$      |
| 147      | 99.44         |
| $\vdots$ | $\vdots$      |
| 163      | 110.10        |

从表1中看出，当不考虑测试探头和防护装置时，脉冲电压源两端电压 $U$ 从11 kV上升至99.44 kV的时间即电压源上升前沿为 $\tau_1 = 0.132$   $\mu\text{s}$ 。

#### 2.4 带测试探头时脉冲电压源上升前沿的计算

当考虑测试探头对电压源上升前沿的影响时，等效电路如图8所示。其中陶瓷堆、测试探头漏电阻均为兆欧级，故将陶瓷堆、测试探头漏电阻等效为无穷大。

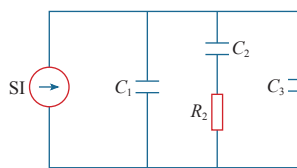


图8 带测试探头时的等效电路图

因为陶瓷堆等效电容和测试探头电容是并联结构，故可将图8的电路图等效如图9所示。

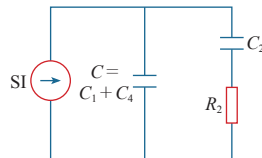


图9 带测试探头时的简化电路图

这样，可继续沿用上节中的计算，只需将 $C = C_1 + C_4$ 替换上节中的 $C_1$ 即可。将已知条件，铁电陶瓷等效电容 $C_1 = 7.5$  pF，负载电容 $C_2 = 4.5$  pF，负载电阻 $R_2 = 1$  k $\Omega$ ，测试探头电容 $C_4 = 26.9$  pF代入，使用数值方法对结果进行计算。依旧取求解步长 $\Delta t = 1$  ns，从初始时刻 $t = 0$  ns开始计算，可得如表2所示的结果。

表2 不同时刻电源两端电压结果2

| 时间/ns    | $U/\text{kV}$ |
|----------|---------------|
| 1        | 0.25          |
| 2        | 0.49          |
| 3        | 0.72          |
| $\vdots$ | $\vdots$      |
| 53       | 11.08         |
| $\vdots$ | $\vdots$      |
| 482      | 99.08         |
| $\vdots$ | $\vdots$      |
| 536      | 110.15        |

从表2中看出，当只考虑测试探头时，脉冲电压源两端电压 $U$ 从11 kV上升至99 kV的时间即电压源上升前沿为 $\tau_2 = 0.429$   $\mu\text{s}$ 。

#### 2.5 带测试探头和防护装置时的脉冲电压源上升前沿的计算

当考虑测试探头和防护装置对电压源上升前沿的影响时，等效电路如图10所示。其中陶瓷堆、测试探头和防护装置的漏电阻都很大，故将陶瓷堆、测试探头和防护装置的漏电阻等效为无穷大。

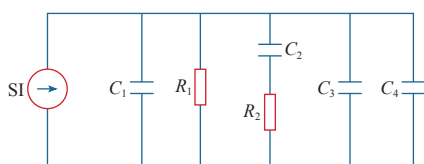


图10 带测试探头和防护装置时的等效电路图

陶瓷堆等效电容、防护装置及测试探头电容是并联结构,故可将图10的电路图等效为如图11所示。

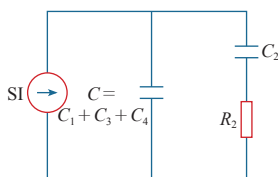


图11 带测试探头和防护装置时的简化电路图

这样,可继续沿用上节中的计算,只需将 $C = C_1 + C_3 + C_4$ 替换上节中的 $C_1$ 即可。将已知条件,铁电陶瓷等效电容 $C_1 = 7.5 \text{ pF}$ ,负载电容 $C_2 = 4.5 \text{ pF}$ ,负载电阻 $R_2 = 1 \text{ k}\Omega$ ,测试探头电容 $C_4 = 26.9 \text{ pF}$ ,防护装置电容 $C_4 = 45.4 \text{ pF}$ 代入,使用数值方法对结果进行计算。依旧取求解步长 $\Delta t = 1 \text{ ns}$ ,从初始时刻 $t = 0 \text{ ns}$ 开始计算,可得如表3所示的结果。

表3 不同时刻电源两端电压结果3

| 时间/ns    | $U/\text{kV}$ |
|----------|---------------|
| 1        | 0.10          |
| 2        | 0.21          |
| 3        | 0.31          |
| $\vdots$ | $\vdots$      |
| 116      | 11.05         |
| $\vdots$ | $\vdots$      |
| 1045     | 99.00         |
| $\vdots$ | $\vdots$      |
| 1162     | 110.08        |

从表3中看出,当考虑测试探头和防护装置对电源上升前沿的影响时,脉冲电压源两端电压 $U$ 从11 kV上升至99 kV的时间即上升前沿为 $\tau_3 = 0.929 \mu\text{s}$ 。该结果与实际测试结果 $\tau_3 = 0.9 \sim 1.1 \mu\text{s}$ 较为接近,如果扣除陶瓷堆、防护装置及测试探头的漏电阻及导线的分布电容带入的误差,计算可信度较高,该研究所用方法可用于电源上升前沿的计算。

三种状态电压源上升前沿的计算结果及实验

结果如表4所示。可以看出,计算结果和实验结果较为吻合,说明计算结果可信。

表4 不同状态电压源上升前沿的计算及实验结果

(单位:  $\mu\text{s}$ )

| 项目   | 电压源       | 电压源+测试探头  | 电压源+装置+测试探头 |
|------|-----------|-----------|-------------|
| 计算结果 | 0.132     | 0.429     | 0.929       |
| 实验结果 | 0.10~0.15 | 0.30~0.40 | 0.90~1.1    |

### 3 结束语

对脉冲电压源性能测试过程中,测试探头和防护装置导致的分布电容对脉冲电压源上升前沿的影响进行了研究。研究表明,在脉冲电压源的性能测试实验中采用防护装置和测试探头时,均会使电压源上升前沿测试结果产生一定增加。计算结果表明,测试探头会使上升前沿增加 $0.297 \mu\text{s}$ ,而防护装置会使电源两端电压 $U$ 上升前沿增加 $0.500 \mu\text{s}$ ,测试探头和防护装置联合作用会使电源两端电压 $U$ 上升前沿增加 $0.797 \mu\text{s}$ 。实验结果和计算结果较为吻合。该研究方法可以用于电源上升前沿的计算和修正。由于未计及电缆分布电容和分布电感对上升前沿的影响,计算结果和实验结果仍存在小量差异,后续将针对这方面进行研究。

### 参考文献

- [1] 梁勤金,石小燕.一种新型50 MW全固态高压纳秒脉冲源设计[J].现代雷达,2010,32(10):80-83.
- [2] 王莹.高功率脉冲电源[M].北京:原子能出版社,1991.
- [3] 周启明,孙庚晨,罗学金,等.100 kV高压ns陡脉冲的研制[J].高电压技术,2002,28(6):37-39.
- [4] 刘伟,刘正芬,孙奇志,等.一种小型爆炸脉冲高压源的设计与实验研究[J].高能密度物理,2013(2):59-64.
- [5] 赵涛,张海燕,邵杰,等.新型双极性高压快脉冲源的基本理论和实验[J].核技术,2011,34(7):549-552.

(收稿日期:2015-07-24) EA