

# 电爆炸丝和脉冲变压器驱动低阻抗负载研究

杨 宇, 伍友成, 耿力东, 王敏华, 郝世荣, 韩文辉, 张南川

(中国工程物理研究院流体物理研究所, 四川 绵阳 621900)

**摘要:** 对脉冲放电电路中金属丝发生电爆炸后产生的高压脉冲驱动脉冲变压器在低阻抗负载(19 Ω)上产生的电脉冲进行了研究, 利用 Ansoft Simplorer7 软件建立了模块化集中参数电路模型, 得到了与实验吻合的计算结果。初步研究表明, 电爆炸丝驱动脉冲变压器在低阻抗负载上不能产生超高压脉冲, 但可显著展宽负载得到的电压脉宽, 在需要长脉宽应用场合有潜在的应用前景。

**关键词:** 电爆炸丝; 脉冲变压器; 低阻抗负载; 仿真

中图分类号: TM41; TN245

文献标志码: A

文章编号: 1001-1609(2010)02-0039-03

## The Investigation of the Pulse over Low-impedance Load Excited by Electric Exploding Wire and Pulse Transformer

YANG Yu, WU You-cheng, GENG Li-dong, WANG Min-hua, HAO Shi-rong,  
HAN Wen-hui, ZHANG Nan-chuan

(Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang 621900, China)

**Abstract:** This paper has investigated the electric pulse over the low-impedance load(19 Ω)generated by the pulse transformer driven by the electric exploding wire (EEW). It has built a lump-parameter circuit model by the Ansoft Simplorer 7 code to simulate the circuit behavior and got the simulation results which agree with the experimental results well. The preliminary investigation shows that the pulse transformer driven by the EEW is impossible to generate super-high voltage pulse on low-impedance load, but the transformer can extend the pulse width obviously. This behavior has the potential to be used in the situation which needs long width pulse.

**Key words:** electrical explosion wires; pulse transformer; low-impedance load; simulation

### 0 引言

电爆炸断路器利用强电流流过金属丝时产生的焦耳热瞬间加热金属丝使其汽化、爆炸, 在爆炸过程中金属丝的电阻急剧增加起到了切断电路的作用, 在快速切断电流的过程中, 回路电感上感生出高电压脉冲( $U=LdI/dt$ )加载到负载上。利用该技术压缩脉冲电容器放电产生的电脉冲, 使输出变成快前沿的高功率脉冲(10~100 GW)是一种常见的脉冲功率调制手段, 具有体积小、成本低、结构简单的优点。但是随着输出电压的增高, 需要的爆炸丝长度、电容器储能以及电爆炸耗能都将明显增加, 这加大了系统的体积和装配难度, 降低了能量传递效率, 因此有必要研究是否可能将其他功率调制手段综合进

电爆炸功率调节装置从而进一步提高技术性能。

空心带绕脉冲变压器是一种常见的脉冲功率元件, 具有体积小、结构简单、响应速度快等优点, 可以对快脉冲进行倍压, 所以将爆炸丝和脉冲变压器结合使用。

电爆炸断路器是一种强非线性元件, 其在电路中与脉冲变压器形成复杂的交互作用关系, 要较为准确地预计此类电路的实际工作状况和理想参数, 必须对电爆炸金属丝、变压器等元件进行数值建模, 然后求解电路方程, 得到模拟电路的计算结果, 电路模拟可以快速得到多种参数下的实验结果, 找到影响实验的关键参数, 减少实验的盲目性。

Simplorer 是 Ansoft 公司生产的通用模块化电路仿真软件, 具备可靠的计算能力、极好的计算收敛性和丰富的元件库, 并支持用户自建模块, 可以较为

收稿日期: 2009-04-01; 修回日期: 2009-10-27

作者简介: 杨 宇(1980—), 男, 硕士, 研究实习员, 主要从事脉冲功率技术研究。

容易地建立模拟电路的集总参数模型, 适合含电爆炸元件的电路模拟, 可以方便地改变爆炸丝和电路参数进行计算, 得到规律性认识。

### 1 电路模拟原理

电爆丝的集总参数计算模型基于准静态近似<sup>[1]</sup>, 假设金属电阻只在两个基本过程中发生变化, 即定相加热过程和相变过程。相对于描述电爆炸过程的磁流体动力学模型<sup>[2]</sup>, 在此假设下, 金属电阻率可以由注入金属的比作用量确定, 工程中通常使用由实验测得的不同材料金属的电阻率-比作用量曲线将电爆炸元件定义为一个非线性电阻元件, 然后利用电路模拟软件加以仿真。

定义电流流过金属丝时的比作用量  $g$  为

$$g = \int_0^t j^2 dt \tag{1}$$

式(1)中,  $g$  为比作用量;  $j$  为金属中的电流密度;  $t$  是通电时间。显然, 比作用量的物理意义就是  $t$  时间内金属丝单位横截面积内的电流通过  $1 \Omega$  电阻时所产生的焦耳热。实验测得银丝的  $\rho-g$  曲线见图 1<sup>[3]</sup>。

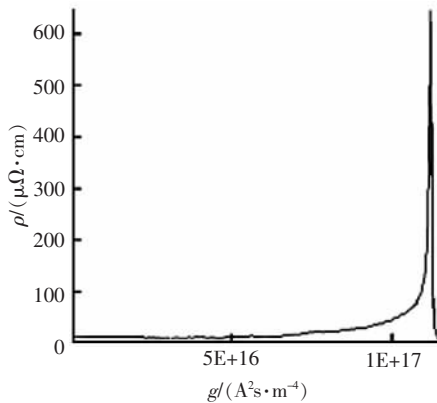


图 1 银丝的比作用量  $g$ -电阻率  $\rho$  曲线

根据比作用量模型可以设计如下的电爆丝电阻率迭代流程<sup>[4]</sup>: 对流过电爆丝的电流密度进行积分, 得到比作用量, 查电阻率-比作用量数据表得到此时的电阻率, 从而得到电爆丝该时刻的总电阻, 然后计算该电阻对电路的影响, 计算中忽略丝半径的变化。

模拟电路见图 2。

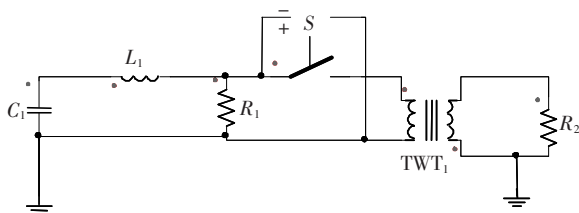


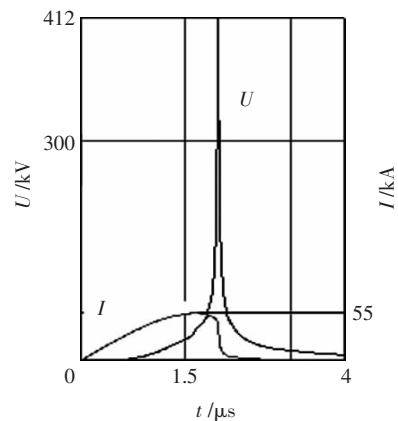
图 2 模拟电路图

图 2 中  $C_1$  为储能电容;  $L_1$  为回路电感;  $R_1$  为电爆丝准静态近似等效可变电阻模型;  $S$  为压控开关, 用于模拟自击穿间隙开关;  $TWT_1$  为理想变压器模型;  $R_2$  为负载。

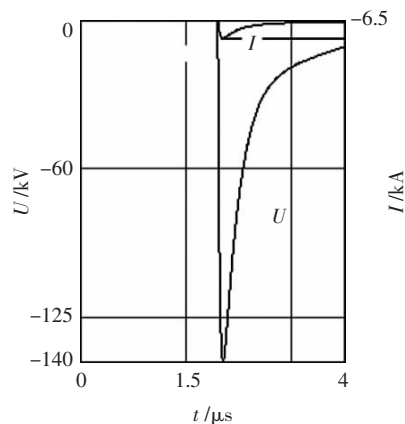
### 2 计算结果与分析

根据实验中常见的设备条件设置计算参数,  $C_1$  为  $3 \mu\text{F}$ 、充电  $60 \text{ kV}$ ,  $L_1$  为  $1.5 \mu\text{H}$ ,  $R_2$  为负载  $21 \Omega$ , 电爆丝为  $\Phi 0.07 \text{ mm}$  银丝, 长度  $320 \text{ mm}$ , 数量  $45$  根, 变压器耦合系数  $0.78$ , 初级电感  $1.8 \mu\text{H}$ , 次级电感  $7.4 \mu\text{H}$ , 采用图 1 所示的银丝比作用量-电阻率数据表定义可变电阻模型  $R_1$ , 其余参数采用程序默认设置。

计算给出的爆炸丝电压、电流和负载电压、电流波形见图 3。



(a) 爆炸丝上电压、电流波形



(b) 负载上电压、电流波形

图 3 模拟结果

从图 3 中可见, 电爆丝产生的电压脉冲经过变压器之后电压降低, 但是同时发现变压器显著展宽了脉宽, 电压脉冲半高宽从  $60 \text{ ns}$  扩展到约  $500 \text{ ns}$ , 根据水介质脉冲形成线的通常参数可以知道, 要利用形成线实现  $500 \text{ ns}$  脉宽需要非常庞大的装置, 大约需要  $10 \text{ m}$  长, 若用油线更会远大于该长度, 而爆炸丝功率调节装置的通常尺寸都在  $1 \sim 2 \text{ m}$ , 所以该

装置在需要长脉宽の場合有潜在的应用价值。

### 3 实验和分析

为了验证仿真模型的正确性和计算的可靠性,设计了验证实验,实验中采用铜箔带绕空心脉冲变压器,将两层绝缘聚酯薄膜中间夹铜箔带层叠放置

后在圆柱模具上绕制8圈,在第2圈处边缘焊接引出线作为变压器初次级的公共接地端。使用电感测量仪和互感测量仪分别测得初级电感 $1.9\ \mu\text{H}$ ,次级电感 $7.2\ \mu\text{H}$ ,互感 $2.6\ \mu\text{H}$ ,求得耦合系数为0.71,各参数与计算模型相同,取几次实验的数据和模拟结果对比见表1。

表1 实验数据与模拟结果对比

序号	充电电压/kV	爆炸丝数量/长度 mm	峰值丝电流/kA	峰值丝电压/kV	峰值负载电流/kA	峰值负载电压/kV	负载电压脉宽/ns
1	60	45 /320	55.7	397	7.1	131	510
2	60	45 /320	56.2	384	7.2	136	500
3	60	45 /320	55.6	421	7.1	147	515
4	60	45 /320	55.1	398	7.1	136	510
模拟结果	60	45 /320	51.0	409	7.0	142	490

从表1可见,考虑到实验的分散性和读数误差后,实验得到的主要结果与电路模拟结果基本一致,这证明了电路模型的正确性和计算的可靠性,可以认为使用该模型计算类似电路得到的结论是可信的。其中一次实验得到的负载电压波形和模拟波形对比见图4,可见模拟结果和实验数据良好吻合。

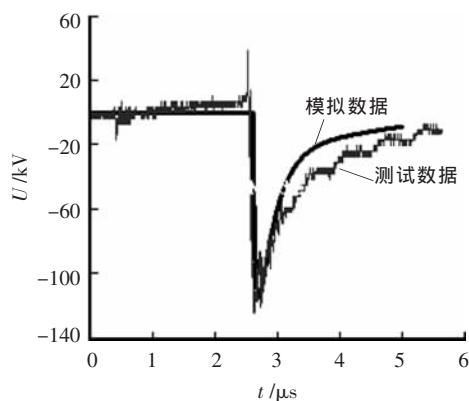


图4 实验得到的负载电压波形和模拟结果对比

### 4 结语

首次开展了爆炸丝驱动脉冲变压器在低阻抗负载上产生高压脉冲的模拟和实验研究,编制了电路模拟程序,通过实验,验证了计算模型的正确性和计算可靠性,证明该模拟电路可以用于相似电路的仿真计算。研究表明,在目前实验条件下,爆炸丝驱动脉冲变压器不能在低阻抗负载上产生超高压脉冲,但可显著展宽负载上得到的电压脉宽,在需要长脉宽の場合有潜在的应用价值。

### 参考文献:

- [1] TUCKER T J.EBW1:A Computer Code for the Prediction of the Behavior of Electrical Circuits Containing Exploding Wire Elements[Z].NTIS:SAND750041.
- [2] 杨宇,谢卫平,蒋吉昊,等.电爆炸金属丝电路特性的研究[J].电工技术,2005(6):54-57.
- [3] 杨宇.金属丝电爆炸特性及应用研究[D].北京:中国工程物理研究院北京研究生部,2005.
- [4] 杨宇.含电爆炸元件电路的Pspice模拟和实验研究[J].高压电器,2007,43(6):457-459.

(上接第38页)

- [3] 马仪,李明.高海拔输电线路导线电晕质量控制[J].科技兴电,2004(12):42-42.
- [4] 麻敏华.电晕笼中单根光滑导线和涂污导线直流电晕特性的研究[D].北京:清华大学,2007.
- [5] 关志成,麻敏华.电晕笼设计与应用相关问题的探讨[J].高电压技术,2006,32(11):74-77.
- [6] 毛颖科,关志成,王黎明,等.污秽实验室泄漏电流测量系统的研制[J].高压电器,2003,39(2):94-96.
- [7] 尚秋峰.光学电流互感器实用化方法的研究[D].北京:华北电力大学,2005.
- [8] 谢玉冰,游大海,黄上游.基于LabVIEW的光电式电流互感器测试系统[J].电力系统自动化,2004,28(22):95-99.
- [9] 濮峻嵩,戴玉松,朱康,等.三种数字化绝缘介损监测算法的软件仿真分析[J].西华大学学报,2005,24(2):19-23.
- [10] 杨乐平,李海涛,杨磊.LabVIEW程序设计与应用[M].北京:电子工业出版社,2005.