



·特种电源技术·

## 爆炸驱动铁电体电源快脉冲产生技术\*

伍友成, 刘高旻, 贺红亮, 邓建军, 戴文峰, 冯传均

(中国工程物理研究院 流体物理研究所, 四川 绵阳 621900)

**摘 要:** 以发展轻小型高电压脉冲驱动源为出发点, 提出采用爆炸驱动铁电体作为初级电源, 通过电感储能与电爆炸丝断路开关进行脉冲压缩和功率放大, 探索基于爆炸驱动铁电体电源的小型化高电压快脉冲产生技术。从爆炸驱动铁电体电源的全电路模型和铁电陶瓷材料特性出发, 通过理论分析和仿真研究, 分别对大电流模式和高电压模式的爆炸驱动铁电体电源的物理参数进行了设计, 获得了铁电体电源工作模式和电路参数对产生高电压脉冲的影响规律, 认为铁电体电源高电压模式更适合于与断路开关技术结合产生高电压快脉冲, 并通过实验对该技术原理进行了验证。实验中铁电体电源输出电流约 360 A、脉宽约 3.8  $\mu\text{s}$ , 对 17.5 nF 电容器充电至 75 kV, 电容器放电后在电爆炸断路开关中产生峰值大于 12 kA 的脉冲电流, 最终在 X 射线二极管负载上获得了电压峰值大于 180 kV、前沿 3 ns、脉宽 30 ns、电流峰值 3.4 kA 的高电压快脉冲。

**关键词:** 爆炸铁电体电源; 电感储能; 电爆炸断路开关; 高功率; 快前沿; 快脉冲

中图分类号: TM89

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202234.210471

## Fast pulse generation technology based on explosive driven ferroelectric generators

Wu Youcheng, Liu Gaomin, He Hongliang, Deng Jianjun, Dai Wenfeng, Feng Chuanjun

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

**Abstract:** To develop a light and small high voltage pulsed power source, an innovative fast pulse technology based on an explosive driven ferroelectric generator (EDFEG) is investigated. An EDFEG is used as the primary power supply, inductive energy storage technology and an electrical exploding opening switch (EEOS) are used to generate a high-voltage fast pulse. On the basis of full-circuit simulation model of EDFEGs and the material properties of ferroelectric ceramics, the circuit simulation research on this fast pulse technology is carried out. The simulation results reveal the influence of circuit parameters on high voltage pulse generation. The research shows that the high-voltage mode of EDFEGs is more suitable for generating high-voltage fast pulse combined with EEOS technology. As a result, the principle of this technology is verified in experiments. In the experiment, the output current of an EDFEG was about 360 A and its pulse width was about 3.8  $\mu\text{s}$ . The charging voltage of a 17.5 nF capacitor was 75 kV. After the capacitor was discharged, a pulse current with a peak value greater than 12 kA was generated in an EEOS. Finally, a high-voltage fast pulse with a voltage peak value greater than 180 kV, a rise time of 3 ns, a pulse width of 30 ns and a current peak of 3.4 kA was obtained on an X-ray diode load.

**Key words:** explosive driven ferroelectric generator, inductive energy storage, electrical exploding opening switch, high power, fast rising time, fast pulse

基于冲击压力去极化释放电荷的爆炸驱动铁电体脉冲电源(EDFEG)技术自提出以来,引起了国内外研究人员的广泛关注<sup>[1-3]</sup>。该类型脉冲电源通过铁电陶瓷的剩余极化提供初始储能,而铁电陶瓷的剩余极化强度可以在常温大气条件下长时间保持不变,且具有较高的能量密度,因此该种电源工作时不需要外部电源提供初级能源,携带方便,国内外研究人员对该种电源进行了长期而深入的研究。文献[4-5]中 EDFEG 作为独立的脉冲电源,利用铁电陶瓷释放的去极化电流直接在高阻负载上产生 100 kV 以上的高电压脉冲,主要用于驱动螺旋天线、直角喇叭天线

\* 收稿日期:2021-11-08; 修订日期:2022-02-21

基金项目:国家高技术发展计划项目

联系方式:伍友成, wuyoch@sina.com。

等高阻抗负载。EDFEG 也可作为爆炸脉冲电源的初级能源<sup>[6-7]</sup>,但在高功率脉冲电源中应用较少。从 EDFEG 在脉冲功率源中的应用来看,其作为初级电源可以分为两种工作模式:一是大电流模式,作为脉冲电流源为高功率脉冲装置提供大电流;二是高电压模式,作为脉冲电压源对高功率脉冲装置进行充电。

电感储能具有高储能密度的特点,已广泛应用于脉冲功率驱动源<sup>[8-9]</sup>,但电感储能型脉冲功率源的输出性能主要决定于断路开关技术。断路开关种类繁多,其中电爆炸金属丝或金属箔开关(EEOS)技术具有结构简单、适用范围大、参数灵活可调、易于实现脉冲功率源紧凑化等特点,得到了广泛应用<sup>[10-14]</sup>。本文以发展轻小型高电压脉冲驱动源为出发点,提出采用爆炸驱动铁电体作为初级电源,通过电感储能与电爆炸丝断路开关进行脉冲压缩和功率放大,探索基于爆炸驱动铁电体电源的小型化高电压快脉冲产生技术,期望在 X 射线二极管负载上获得峰值大于 100 kV、脉宽 25~50 ns、脉冲前沿小于 10 ns 的高电压快脉冲。

## 1 理论设计与仿真

### 1.1 大电流模式

利用多模块铁电陶瓷组合的 EDFEG 产生 kA 级的脉冲电流,可以直接馈入由储能电感  $L_s$  和断路开关 EEOS 串联组成的负载电路,如图 1 所示。当 EDFEG 输出电流足够使断路开关中的金属丝发生电爆炸时,EEOS 的电阻瞬间快速增大,流过储能电感的电流骤然减小,储能电感上电压  $LdI/dt$  快速上升产生脉冲高电压,经隔离开关 S 对脉冲前沿锐化后,在负载上产生快前沿高电压脉冲。

前期通过理论和实验对爆炸驱动铁电体脉冲电源中铁电陶瓷介电特性和电阻率进行了研究<sup>[15-17]</sup>,EDFEG 输出电流过程中铁电陶瓷分为压缩区和未压缩区,二者的介电特性具有明显差异。在电爆炸断路开关中,电爆炸之前金属丝电阻很小,EDFEG 放电电路近似为低阻尼系数的振荡电路,随电流的增加,金属丝将经历固态加热、融化、液态加热、气化爆炸以及等离子体形成等物理过程,同时金属丝的电阻也逐渐增大,在气化爆炸瞬间达到最大<sup>[18]</sup>。金属丝电爆炸过程一般采用比作用量来描述,即金属丝电阻率的变化可以由流过金属丝的电流所对应的比作用量来近似描述,比作用量定义为

$$g = \int_0^t j^2 dt \quad (1)$$

式中:  $g$  为比作用量,  $A^2s/m^4$ ;  $j$  为金属中的电流密度,  $A/m^2$ ;  $t$  为电流持续时间,  $s$ 。

利用已有的电阻率-比作用量曲线,采用 Pspice 对金属丝电爆炸电路进行仿真计算,计算过程实际上是电流与电阻率的迭代过程,结合 EDFEG 的全电路模型和电爆炸断路开关的 Pspice 模型构建仿真电路。仿真中将电爆炸断路开关用短路代替,以 EDFEG 去极化电流( $I_0$ )幅值分别为 5.0, 7.5, 15 kA 为例,对不同电感值时负载电流和铁电陶瓷堆电压进行仿真计算。根据去极化电流和陶瓷堆电压设计 PZT 陶瓷片组合参数和冲击波阵面大小,计算结果和 EDFEG 设计参数如表 1 所示。

表 1 不同参数时电感中的电流和 EDFEG 主要设计参数

Table 1 Simulation results of the current through the inductance and design parameters of the EDFEG

$I_0/kA$	$L=0.2 \mu H$				$L=1.0 \mu H$				$L=2.0 \mu H$			
	$I_L/kA$	$U_0/kV$	$m \times n$	$A_{shock}/cm^2$	$I_L/kA$	$U_0/kV$	$m \times n$	$A_{shock}/cm^2$	$I_L/kA$	$U_0/kV$	$m \times n$	$A_{shock}/cm^2$
5.0	7.9	5.8	114×1	70	8.3	21.6	114×3	210	8.9	45.8	114×7	490
7.5	11.8	9.7	170×2	204	13.1	28.2	170×4	408	13.4	63.2	170×9	918
15	23.5	17.4	340×3	612	26.2	54.3	340×8	1632	26.5	120.6	340×25	4335

分析计算结果可知:①储能电感  $L$  从 0.2  $\mu H$  增加到 2.0  $\mu H$ ,电感中电流  $I_L$  和铁电陶瓷电压  $U_0$  都逐渐增大,但电流增加幅度很少(约 13%),电压增加非常明显(约 7 倍),铁电陶瓷的数量(PZT,  $m$  为陶瓷片的组数、 $n$  为每组陶瓷片串联的数量)和冲击波阵面面积  $A_{shock}$  需要增加 4.5~8.3 倍;②去极化电流从 5.0 kA 增大到 15 kA,铁电陶瓷电压增大相同倍数,铁电陶瓷的数量和冲击波阵面面积理论上按电流倍数的平方关系增长,设计的铁电陶瓷数量和

冲击波阵面增加到约 9 倍。

从负载电流和 EDFEG 设计参数考虑, 增大电感产生的效费比非常低, 但电感储能-断路开关技术产生脉冲电压不仅与电感中的电流大小有关, 还与电流增长速度、电感大小等参数有关, 因此还需要结合金属丝断路开关对不同电感下产生的脉冲电压进行计算分析。在上述去极化电流和电感条件下, 对二极管负载电压进行模拟计算, 通过改变金属丝根数  $N$  和长度  $l$  对负载电压进行优化, 获得不同条件下最高的二极管电压  $U_d$  和脉冲半高宽  $\tau$ 。不同去极化电流和电感条件下优化的金属丝参数及负载电压与脉宽的仿真结果如表 2 所示。

表 2 不同去极化电流和电感条件下优化的金属丝参数及负载电压与脉宽的仿真结果  
Table 2 Optimized parameters of EEOS and simulation results of the voltage and pulse width

$I_0/\text{kA}$	$N$	$l/\text{mm}$	$U_d/\text{kV}$	$\tau/\text{ns}$	$N$	$l/\text{mm}$	$U_d/\text{kV}$	$\tau/\text{ns}$	$N$	$l/\text{mm}$	$U_d/\text{kV}$	$\tau/\text{ns}$
	$L=0.2\ \mu\text{H}$				$L=1.0\ \mu\text{H}$				$L=2.0\ \mu\text{H}$			
5.0	3	20	58	17	5	60	109	37	5	90	150	60
7.5	5	30	74	15	7	90	160	38	9	130	213	61
15.0	9	50	140	16	14	160	320	36	15	280	434	62

由表 2 可知, EDFEG 大电流工作模式驱动电感储能-断路开关产生高电压脉冲技术的一些规律: ①随电感增大, 负载电压逐渐升高, 脉冲宽度逐渐增加; ②随 EDFEG 输出电流增大, 负载电压按相近比例增大, 但脉冲宽度变化不明显。

结合表 1 的仿真结果和 EDFEG 设计参数分析, 从提高负载电压和输出能量的角度出发, 增大电感的效果更明显, 效费比更高。但在对负载电压脉冲宽度有限制 (25~50 ns) 时, 电感不能太大, 这时只能通过增大 EDFEG 输出电流来提高负载电压。为了降低铁电陶瓷上的电压, 减小铁电陶瓷数量, 可以在铁电陶瓷输出端并联比陶瓷对电容量大得多的电容。以去极化电流 7.5 kA、储能电感 1  $\mu\text{H}$  为例进行电路仿真, 相同条件下, 没有并联电容时负载电压为 160 kV、前沿 4.5 ns、脉宽 38 ns, 波形如图 2 所示; 并联 300 nF 电容时负载电压 120 kV、前沿 4.2 ns、脉宽 48 ns, 波形如图 3 所示。对比发现并联电容后 EDFEG 的铁电陶瓷数量减少一半, 同时脉宽增加 26%, 铁电陶瓷输出能量密度提高约 40%。

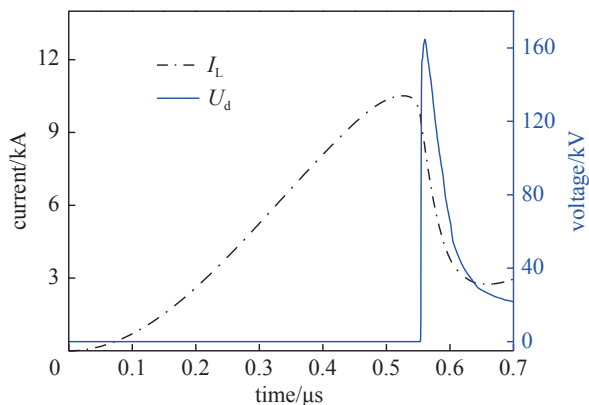


Fig. 2 Simulation waveforms of inductance current  $I_L$  and load voltage  $U_d$  without parallel capacitors

图 2 未并联电容时电感中电流及负载电压仿真波形

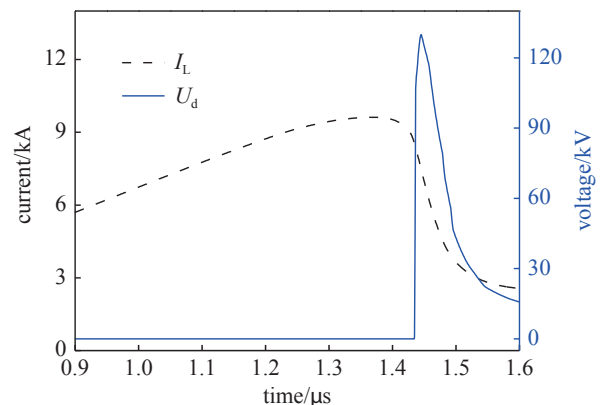


Fig. 3 Simulation waveforms of inductance current and load voltage when a 300 nF capacitor is connected in parallel

图 3 并联 300 nF 电容时电感中电流及负载电压仿真波形

综合考虑铁电陶瓷数量和冲击波阵面面积, 大电流工作模式 EDFEG 作为初级电源选择去极化电流幅值 7.5 kA、储能电感 1.0  $\mu\text{H}$ 、并联 300 nF 电容, 电路仿真计算 50  $\Omega$  负载上产生电压峰值约 120 kV、前沿 4.2 ns、脉宽 48 ns, EDFEG 设计尺寸约 200 mm $\times$ 160 mm $\times$ 60 mm。

## 1.2 高电压模式

在 EDFEG 高电压模式下, 利用电感储能-断路开关技术产生快脉冲高电压的电路原理如图 4 所示。EDFEG 对脉冲电容器  $C_1$  充电至数 10 kV 甚至 100 kV 以上, 电容器通过开关  $S_1$  对储能电感  $L_s$ 、断路开关 EEOS 放电, EEOS 的金属丝发生电爆炸, 流过储能电感的电流急剧减小, 储能电感两端电压产生脉冲高电压, 经隔离开关  $S_2$  对脉冲前沿锐化后, 在负载上产生快前沿高电压脉冲。

高电压模式 EDFEG 以组内多片铁电陶瓷串联来提高陶瓷堆的高电压承受能力, 多组并联增大输出电流。在

铁电陶瓷发生完全极化且不考虑漏电导的情况下,负载电容上产生的电压为

$$U_C = P_r m x_0 y_0 / (C_0 + C_1) \quad (2)$$

式中:  $U_C$ 为电容充电电压, kV;  $P_r$ 为铁电陶瓷剩余极化强度,  $\mu\text{C}/\text{cm}^2$ ;  $m$ 为铁电陶瓷并联的组数;  $x_0, y_0$ 分别为方块形铁电陶瓷电极面的宽度和长度, cm;  $C_1$ 为负载电容的电容容量, nF;  $C_0$ 为 EDFEG 中铁电陶瓷堆去极化后的等效电容容量, nF。

为了便于对比,采用与大电流模式 EDFEG 相同尺寸和数量的铁电陶瓷,通过适当的串并联组合满足对电容器的充电需求。铁电陶瓷工作电场按照 1~5 片平均电场 40 kV/cm, 6~10 片平均电场 35 kV/cm, 10~15 片平均电场 30 kV/cm, 15~20 片平均电场 25 kV/cm 的设计原则,释放电荷密度按  $35 \mu\text{C}/\text{cm}^2$  计算,设计 3 组工作参数: ①铁电陶瓷 20 串 9 并总共 180 片,负载电容容量 15.1 nF、充电 100 kV; ②铁电陶瓷 18 串 10 并总共 180 片,负载电容容量 18.7 nF、充电 90 kV; ③铁电陶瓷 15 串 12 并总共 168 片,负载电容容量 22.7 nF、充电 85 kV。3 种组合的 EDFEG 输出能量分别为 75.5, 75.7, 80.6 J, 第 3 种组合的 EDFEG 虽然铁电陶瓷数量少 8 片,但由于设计的工作电场更高,输出能量比另外两种更多,输出能量密度约  $0.50 \text{ J}/\text{cm}^3$ 。

分析发现,冲击压缩过程中未压缩区的介电系数对电容器的充电电压和输出能量均没有影响,所以对 EDFEG 的电路模型进行简化,建立高电压 EDFEG 驱动电感储能-断路开关的仿真电路。对上述 3 种条件分别进行仿真计算,得到不同储能电感条件下优化的断路开关参数和负载电压数据,如表 3 所示。其中 EDFEG 采用 20 串 9 并铁电陶瓷组合对 15.1 nF 电容器输出电流和充电电压波形如图 5 所示,负载电压脉冲波形如图 6 所示。

表 3 EDFEG 电压源模式不同条件的计算结果

Table 3 Simulation results with EDFEG in high-voltage mode

C/nF	$U_c/\text{kV}$	$L=0.3 \mu\text{H}$				$L=0.4 \mu\text{H}$				$L=1.0 \mu\text{H}$			
		N	l/mm	$U_d/\text{kV}$	$\tau/\text{ns}$	N	l/mm	$U_d/\text{kV}$	$\tau/\text{ns}$	N	l/mm	$U_d/\text{kV}$	$\tau/\text{ns}$
15.1	100	4	90	256	19	4	90	238	22	4	100	182	62
18.7	90	5	90	245	19	4	90	224	24	4	100	176	64
22.7	85	5	90	239	20	5	90	220	26	4	100	172	67

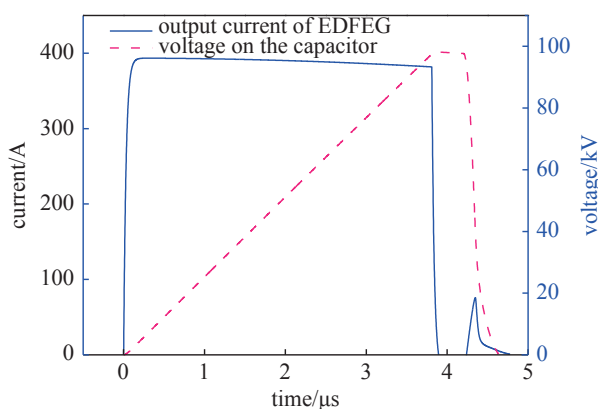


Fig. 5 Simulation waveforms of output current of EDFEG and charging voltage of the capacitor

图 5 EDFEG 输出电流和电容器电压仿真波形

由表 3 可知: ①EDFEG 输出电压越高, 负载电压越高; ②相同电容条件下, 电感从  $0.3 \mu\text{H}$  增大到  $1.0 \mu\text{H}$ , 输出电压逐渐下降, 脉宽逐渐增大; ③相同电感条件下, 电容从 15.1 nF 增大到 22.7 nF, 输出电压逐渐下降, 脉宽略有增加。

通过计算分析,在铁电陶瓷尺寸、数量相同的条件下,EDFEG 高电压模式脉冲驱动源设计参数为: EDFEG 尺寸为  $160 \text{ mm} \times 120 \text{ mm} \times 45 \text{ mm}$ , 电容器 15.1 nF, 考虑漏电损耗后充电电压 98.1 kV, 储能电感  $1.0 \mu\text{H}$ ,  $50 \Omega$  阻抗负载上

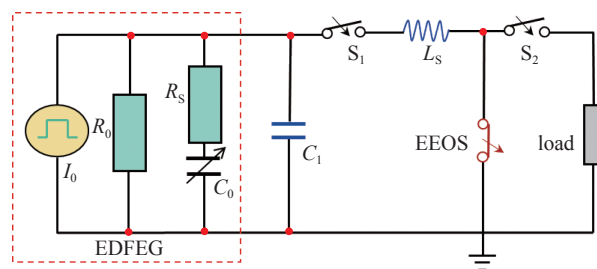


Fig. 4 Circuit schematic of an energy-storage inductor and an EEOS powered by a high voltage-mode EDFEG

图 4 EDFEG 电压源模式驱动电感储能-断路开关电路图

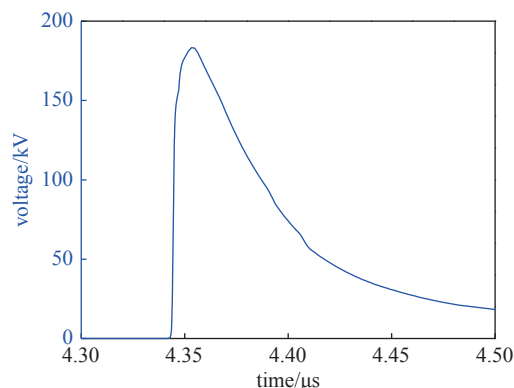


Fig. 6 Optimized waveform of load voltage powered by high-voltage mode EDFEG

图 6 EDFEG 电压源模式负载电压优化波形

产生电压峰值约 180 kV, 锐化后前沿约 5 ns、脉宽约 50 ns。与大电流模式相比, 高电压模式 EDFEG 通过电感储能、电爆炸断路器产生的电压更高, 需要的炸药量减少 1/2 以上。

## 2 实验研究

### 2.1 实验设计

为了验证 EDFEG 驱动电感储能、电爆炸断路器产生高电压脉冲的理论计算与仿真设计, 基于现有炸药网络板和脉冲电容器等实验条件进行了实验设计。炸药网络板可产生的冲击波阵面尺寸约 140 mm×100 mm, 可以布置 8 并 22 串的铁电陶瓷堆。释放电荷密度按 35  $\mu\text{C}/\text{cm}^2$  计算, 这种串并组合的铁电陶瓷堆输出电荷量约 1344  $\mu\text{C}$ , 可以对 14.9 nF 电容器充电至 90 kV, 对 16.8 nF 电容器充电至 80 kV。由于没有电容量完全匹配的电容器, 因此选择了比较接近的电容器(约 17.5 nF)进行实验, 计算该电容器充电约达到 75 kV, 此时铁电陶瓷串联数量可以减少至 15 片, EDFEG 总尺寸约 150 mm×110 mm×45 mm。

按照图 4 所示的 EDFEG 高电压输出驱动电感储能-断路器电路, 对储能电感及断路器的参数进行仿真优化, 结果如表 4 所示。

表 4 脉冲电容器 75 kV/17.5 nF 工作参数条件下模拟计算结果

Table 4 Simulation results with parameters 75 kV/17.5 nF of the capacitor

$l/\text{mm}$	$U_d/\text{kV}$	$\tau/\text{ns}$	$l/\text{mm}$	$U_d/\text{kV}$	$\tau/\text{ns}$	$l/\text{mm}$	$U_d/\text{kV}$	$\tau/\text{ns}$
$L=300\text{ nH}, N=4$			$L=400\text{ nH}, N=4$			$L=1000\text{ nH}, N=3$		
80	206	20	80	190	25	90	144	56

综合考虑脉冲宽度和脉冲电压, 选取的工作参数为: 储能电感 400 nH、断路器金属丝直径 0.05 mm、根数 4、长度 80 mm, 计算 50  $\Omega$  负载上电压 190 kV、前沿 4 ns、脉冲宽度 25 ns。在进行 EDFEG 实验之前, 利用常规高压电源给电容器充电 75 kV, 以电阻负载对储能电感和断路器的工作参数进行优化; 最后采用 EDFEG 作为初级电源, 进行技术方案的全电路实验验证。

### 2.2 实验结果

在电阻负载实验中, 固定电容器电容量 17.5 n) 和充电电压 75 kV、银丝直径 0.05 mm 主要改变银丝长度和根数、电感大小等参数对负载电压进行优化。分别对 3 种储能电感参数(短路放电实测分别为 298, 397, 445 nH)进行了实验研究, 负载电阻约 45  $\Omega$ 。选取每种电感参数下的实验最高输出电压和仿真计算结果如表 5 所示。3 种实验参数下仿真得到的负载电压波形如同图 7 所示, 电感 397 nH 时获得的典型实验波形如图 8 所示, 负载电压  $U_R > 150\text{ kV}$ 、脉冲前沿小于 4 ns、半高宽大于 30 ns。

表 5 脉冲电容器 75 kV/17.5 nF 工作参数条件下计算结果与试验结果

Table 5 Simulation results and experimental results with parameters 75 kV/17.5 nF of the capacitor

item	$U_d/\text{kV}$	$t_r/\text{ns}$	$\tau/\text{ns}$	$U_d/\text{kV}$	$t_r/\text{ns}$	$\tau/\text{ns}$	$U_d/\text{kV}$	$t_r/\text{ns}$	$\tau/\text{ns}$
	$L=298\text{ nH}, N=4$			$L=397\text{ nH}, N=4$			$L=445\text{ nH}, N=4$		
simulation results	193	3.5	19	174	3.7	24	163	4.2	27
experiment results	167	3.6	25	157	3.5	32	147	3.3	39

以上数据表明: 实验数据与计算结果的变化规律一致, 随电感增大负载电压峰值逐渐减小, 脉冲宽度逐渐增大。实验获得的电压比计算值偏低, 而脉宽比计算值偏大, 主要原因是实际中电爆炸丝的电阻率-比作用量变化曲线随实验条件的变化有所不同, 但计算结果对于认识变化规律和初选实验参数都有很大参考意义。

在以上验证基础上, 采用设计的 EDFEG 对 17.5 nF 电容充电, 再通过触发开关对储能电感、断路器放电, 实验获得 EDFEG 输出电流和电容器充电波形如图 9 所示。EDFEG 输出电流峰值接近 440 A、平均约 360 A, 电容器充电电压约 75 kV, 维持不到 1  $\mu\text{s}$  后开关触发导通, 电容器对储能电感和断路器放电, 最终在二极管负载上产生高电压快脉冲, 实验波形如图 10 所示。储能电感和断路器中电流  $I_L > 12\text{ kA}$ , 二极管电压最大峰值大于 180 kV、前沿 3.0 ns、脉宽 30 ns, 二极管电流在电压脉冲上升沿出现电流, 约 6 ns 后电流开始快速增大, 30 ns 后达到最大值 3.4 kA, 又经过 10 ns 二极管间隙闭合出现短路。从二极管电流变化可以简单分析二极管工作过程, 包括电子发射初期、等离子体形成和阴阳极间隙闭合 3 个发展阶段, 对应的二极管阻抗为超高阻、快速下降、短路, 二极管电压

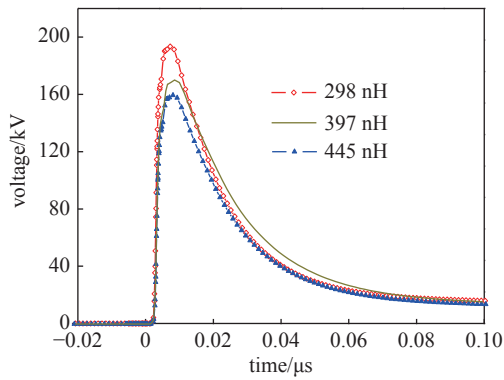


Fig. 7 Simulation load voltages  $U_R$  for different inductances

图 7 不同电感参数仿真负载电压波形

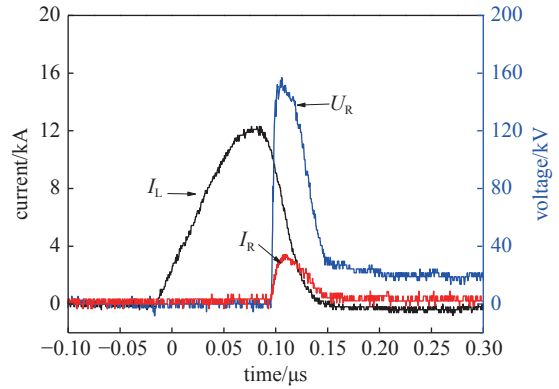


Fig. 8 Experimental inductor current  $I_L$ , load voltage  $U_R$  and load current  $I_R$

图 8 电感电流  $I_L$ 、负载电压  $U_R$  和电流  $I_R$  的试验波形

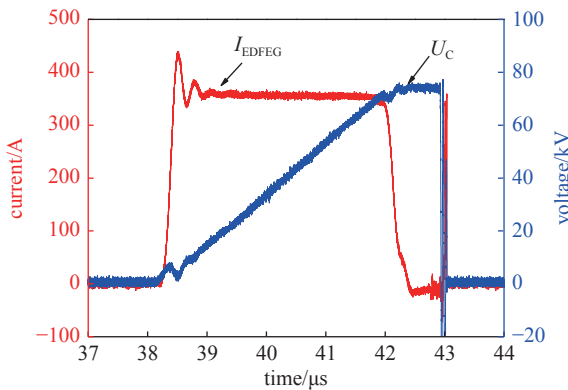


Fig. 9 Experimental output current  $I_{EDFEG}$  of EDFEG and charging voltage ( $U_C$ ) of the capacitor

图 9 EDFEG 试验输出电流  $I_{EDFEG}$  和电容器充电电压  $U_C$

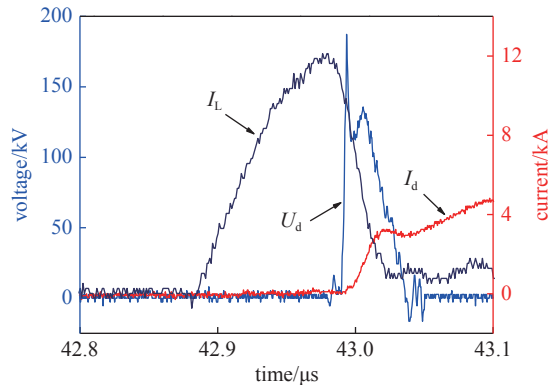


Fig. 10 Experimental inductor current  $I_L$ , diode voltage  $U_d$  and diode current  $I_R$  powered by the EDFEG

图 10 EDFEG 试验电感电流  $I_L$  和二极管电压  $U_d$ 、电流  $I_R$

也同步经历了瞬间达到最大值、快速回落形成第二峰值、缓慢下降到零的过程。

### 3 结 论

通过电路仿真和理论分析,研究了爆炸驱动铁电体电源作为初级电源驱动电感储能断路器产生高电压快脉冲的技术,对 EDFEG 大电流和高电压两种工作模式驱动电感储能断路器的电路进行了仿真研究,获得了 EDFEG 工作模式及电路参数影响高电压脉冲产生的规律:大电流模式下,随储能电感的增大,负载电压逐渐升高,脉冲宽度逐渐增加;随 EDFEG 输出电流的增大,负载电压相应增大。高电压模式下,随 EDFEG 输出电压的增加,负载电压相应升高;相同储能电容时随储能电感的增大,负载电压逐渐降低、脉宽增大;随储能电容的增大,负载电压逐渐下降,脉宽略有增加。两种模式相比,EDFEG 高电压模式更适合与电感储能断路器技术结合,实现脉冲驱动源的轻小型化。

基于仿真结果设计了高电压模式 EDFEG 驱动电感储能断路器的原理实验,在二极管上产生了电压峰值大于 180 kV、前沿 3.0 ns、脉宽 30 ns 的高电压快脉冲,二极管电流峰值 3.4 kA,验证了仿真研究结果和技术原理的可行性。

**致 谢** 感谢中国工程物理研究院流体物理研究所王海晏、谷伟、王敏华、韩旭等人在实验中的辛勤工作。

### 参考文献:

- [1] Tkach Y, Shkuratov S I, Dickens J, et al. Explosive driven ferroelectric generators[C]//Proceedings of the Pulsed Power Plasma Science 2001. 28th IEEE International Conference on Plasma Science and 13th IEEE International Pulsed Power Conference. Digest of Papers (Cat. No. 01CH37251). 2001: 986-989.
- [2] 刘高旻, 刘雨生, 张毅, 等. PZT 铁电陶瓷及其在脉冲能源中的应用[J]. 材料导报, 2006, 20(6): 74-77,81. (Liu Gaomin, Liu Yusheng, Zhang Yi, et al. PZT ferroelectric ceramic for shock-driven pulsed power supply[J]. Materials Review, 2006, 20(6): 74-77,81)
- [3] 杜金梅, 张毅, 张福平, 等. 冲击加载下 PZT 95/5 铁电陶瓷的脉冲大电流输出特性[J]. 物理学报, 2006, 55(5): 2584-2589. (Du Jinmei, Zhang Yi, Zhang

- Fuping, et al. Large current out-put of PZT 95/5 ferroelectric ceramics under shock loading[J]. *Acta Physica Sinica*, 2006, 55(5): 2584-2589)
- [4] Shkuratov S I, Baird J, Talantsev E F, et al. Note: miniature 120-kV autonomous generator based on transverse shock-wave depolarization of  $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$  ferroelectrics[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2011, 82: 086107.
- [5] Altgilbers L L. Recent advances in the development of ferroelectric generators[C]//Proceedings of the 19th IEEE Pulsed Power Conference. 2013.
- [6] Schoeneberg N, Walter J, Neuber A, et al. Ferromagnetic and ferroelectric materials as seed sources for magnetic flux compressors[C]//Proceedings of the 14th IEEE International Pulsed Power Conference. 2003: 1069-1072.
- [7] Shkuratov S I, Talantsev E F, Baird J, et al. Completely explosive ultracompact high-voltage nanosecond pulse-generating system[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2006, 77: 043904.
- [8] 高顺受, 杨礼兵, 陈英石, 等. 电感储能脉冲功率调节系统的研究[J]. *爆炸与冲击*, 1997, 17(1): 50-56. (Gao Shunshou, Yang Libing, Chen Yingshi, et al. An inductive energy pulsed power conditioning system[J]. *Explosion and Shock Waves*, 1997, 17(1): 50-56)
- [9] 王延, 张东东, 付荣耀, 等. 电感储能型大电流毫秒级脉冲源研制[J]. *电工技术学报*, 2020, 35(23): 5025-5030. (Wang Yan, Zhang Dongdong, Fu Rongyao, et al. Design of a high current inductive pulsed power supply with millisecond pulse width[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2020, 35(23): 5025-5030)
- [10] Chernyshev V K, Kucherov A I, Mezhevov A B, et al. Electroexplosive foil 500 kV current opening switch characteristics research[C]//Proceedings of the 11th IEEE International Pulsed Power Conference. 1997: 1208-1212.
- [11] Novac B M, Smith I R, Gregory K. High-power, high-voltage generator with a multi-pulse twin output[C]//Proceedings of the IEEE Conference Record - Abstracts. PPPS-2001 Pulsed Power Plasma Science 2001. 28th IEEE International Conference on Plasma Science and 13th IEEE International Pulsed Power Conference. 2001.
- [12] 杨礼兵, 高顺受. 高电压脉冲功率调节系统的数值模拟[J]. *强激光与粒子束*, 1996, 8(3): 400-406. (Yang Libing, Gao Shunshou. Numerical simulation of high voltage pulsed power conditioning systems[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 1996, 8(3): 400-406)
- [13] 郝世荣, 刘伟, 王敏华, 等. 电爆炸箔断路开关的理论和实验研究[J]. *强激光与粒子束*, 2004, 16(8): 1071-1074. (Hao Shirong, Liu Wei, Wang Minhua, et al. Theoretic and experimental study of exploding foil opening switch[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2004, 16(8): 1071-1074)
- [14] 郝世荣, 谢卫平, 丁伯南, 等. 一种基于电爆炸箔断路开关的多脉冲产生技术[J]. *强激光与粒子束*, 2006, 18(8): 1401-1404. (Hao Shirong, Xie Weiping, Ding Bonan, et al. Multi-pulse generation technique based on electro-explosive opening switch[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, 18(8): 1401-1404)
- [15] 伍友成, 刘高旻, 戴文峰, 等. 冲击波作用 $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.95}\text{Ti}_{0.05})\text{O}_3$ 铁电陶瓷去极化后电阻率动态特性[J]. *物理学报*, 2017, 66: 047201. (Wu Youcheng, Liu Gaomin, Dai Wenfeng, et al. Dynamic resistivity of  $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.95}\text{Ti}_{0.05})\text{O}_3$  depolarized ferroelectric under shock wave compression[J]. *Acta Physica Sinica*, 2017, 66: 047201)
- [16] 伍友成, 刘高旻, 戴文峰, 等. 铁电体电源中介质电阻特性及对输出电荷的影响[J]. *强激光与粒子束*, 2018, 30: 035007. (Wu Youcheng, Liu Gaomin, Dai Wenfeng, et al. Resistivity properties of ferroelectric ceramics and its effects on output charges in explosion-driven ferroelectric generator[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2018, 30: 035007)
- [17] Wu Youcheng, Liu Gaomin, Gao Zhipeng, et al. Dynamic dielectric properties of the ferroelectric ceramic  $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.95}\text{Ti}_{0.05})\text{O}_3$  in shock compression under high electrical field[J]. *Journal of Applied Physics*, 2018, 123: 244102.
- [18] 韩若愚, 邓成志, 冯娟, 等. 铜镍合金丝电爆炸放电特性与时空演化行为[J]. *强激光与粒子束*, 2021, 33: 065010. (Han Ruoyu, Deng Chengzhi, Feng Juan, et al. Discharge characteristics and spatial-temporal evolution of Cu-Ni alloy wire explosion[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2021, 33: 065010)