

文章编号: 1673-3193(2024)06-0783-08

电击弹升压系统的设计及小型化

霍永清¹, 张亚军², 张泽健³, 白成聪¹, 张心怡³, 张鹏军³

(1. 重庆嘉陵特种装备有限公司, 重庆 400054; 2. 驻重庆第三军事代表室, 400060;
3. 中北大学机电工程学院, 山西太原 030051)

摘要: 针对现有电击武器射程短、威慑力不足等问题, 本文设计了一种使用18.4 mm霰弹枪专用小型电击弹的升压系统。该系统利用零电压开关技术在逆变电路中将碳基电池输出直流电转换为高频交流电, 采用倍压整流技术进行升压与交直流转换, 使得整个系统的输出电压值达到10 kV以上。同时, 对电击弹电路进行了小型化设计, 以满足18.4 mm霰弹枪发射器发射的要求。实验结果表明, 本文所设计的电击弹可以持续输出11 kV的电压, 频率为50 Hz, 满足设计的指标需求, 可以为电击武器的工程化改进提供技术支持。

关键词: 电击子弹; 泰瑟枪; 非致命武器; 特种弹药; ZVS电路

中图分类号: TJ411.7

文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.1673-3193.2024.06.007

引用格式: 霍永清, 张亚军, 张泽健, 等. 电击弹升压系统的设计及小型化[J]. 中北大学学报(自然科学版), 2024, 45(6): 783-790.

HUO Yongqing, ZHANG Yajun, ZHANG Zejian, et al. Design and miniaturization of electric shock bomb boosting system[J]. Journal of North University of China (Natural Science Edition), 2024, 45(6): 783-790.

Design and Miniaturization of Electric Shock Bomb Boosting System

HUO Yongqing¹, ZHANG Yajun², ZHANG Zejian³, BAI Chengcong¹,
ZHANG Xinyi³, ZHANG Pengjun³

(1. Chongqing Jialing Special Equipment Co., Ltd., Chongqing 400054, China;

2. The Third Military Representative Office in Chongqing, Chongqing 400060, China;

3. School of Mechanical and Electrical Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: In view of the short range and insufficient deterrent effect of the existing electroshock weapons, this paper designs a boosting system using small electroshock bullets for 18.4 mm shotguns. The use of zero-voltage switching technology in the inverter circuit will be carbon-based battery output DC converted to high-frequency alternating current, the use of doubling rectifier technology for boosting and AC/DC conversion, so that the output voltage value of the entire system to reach more than 10 kV. Meanwhile, the miniaturisation of the electroshock projectile circuit is designed to meet the needs of the 18.4 mm shotgun launcher launching. The experimental results show that the electric shock projectile designed in this paper can continuously output the voltage of 11 kV, the frequency is 50 Hz, which meets the design index requirements and can provide effective technical support for the engineering improvement of electric shock weapons.

Key words: electronic projectile; Taser; non-lethal weapon; special ammunition; ZVS circuit

收稿日期: 2023-11-27

作者简介: 霍永清(1976—), 男, 研究员级高级工程师, 硕士, 主要从事先进毁伤研究领域单兵班组弹药研究。E-mail: jialinghyq@163.com。

0 引言

非致命武器又称失能武器或者软杀伤性武器,旨在不对目标造成永久性伤害的前提下使目标短时间内丧失某种能力^[1],具有使目标快速失能的能力,伤亡率极低。依据其作用机理,非致命武器主要包括动能打击失能武器^[2]、声光干扰武器^[3-4]、化学失能武器、黏附型运动失能武器、电击失能武器^[5]等。许多学者针对不同的非致命武器在作用机理及效能评估方面开展了大量研究。在众多非致命性武器中,电击失能武器依靠其灵活的适应性、高可靠性、对目标生命安全的低威胁性,成为非致命武器领域的一大研究热点,并逐步演化出电击棍、电击枪、远程电击弹等^[6]多种形式。Baliatsas等^[7]阐述了电击武器的人体效应。张喜等^[8]研究了电击武器对人体的电击效应和作用机理,分析了电击武器电击致晕与致肌肉失能的作用机理,为电击武器的研发提供了理论支撑。电击枪的出现成功解决了普通电击武器攻击距离短、威慑力不足的缺点^[9],以泰瑟(Taser)枪为代表的电击枪已在欧美国家执法领域广泛使用,并且对志愿者及实战中的数据进行了研究。Ho等^[10-12]分析了传统与新型电击武器在志愿者人体的传导电流及可能导致的生理效应。Comeaux等^[13]则对比研究了泰瑟(Taser)x26电击枪窄脉冲与特定频率下的方波脉冲对肌电信号的干扰与肌肉控制效应。但是,由于电击枪的探针与枪体之间依靠引线连接,使得电击枪的射击距离受到限制,且射击后引线不易回收,武器在短时间内只具备单发射击的能力^[14]。为解决以上问题,泰瑟公司于2007年推出了无线增程电击弹(XREP),但由于对操作人员的技能要求较高,同时其使用也涉及复杂的法律和道德考量,因此并未大规模使用。国内对电击弹的研究起步较晚,宋艳生^[15]设计了一种新型电击子弹,提高了电击枪的环境适应能力,解决了只能有限次发射和发射后引线回收困难等问题。熊远波^[16]针对类似电击武器及使用枪械的整体方案进行了验证,为电击弹进一步研究提供了一定的技术思路。本文在现有电击弹模型的基础上,对其升压系统进行了改进。

现有升压技术较为成熟,使输出端充电至预设电压就可满足打击要求^[17]。一般使用开关电源实现不同电压之间的转换,这比线性稳压电源的转换效率高,工作频率高,且该装置尺寸小、重量轻。根据电路连接方式的不同,开关电源可分为

多种不同的电路拓扑,基本非隔离结构主要有Buck式、Boost式以及Buck-Boost式结构,而隔离型一般包括反激式、正激式、推挽式、桥式等形式。非隔离式电路中的开关元件稳定性较差,且需具备高耐压值,若要实现高压变换,则需要添加更多元器件来实现,所以并不适用。隔离型电路中的反激式结构最适合高压变换电路,可以在负载变化较大的情况下保持稳定的输出电压和电流,可靠性更高。同时,采用高频开关技术可以将传统的大型变压器和滤波器等元件替换为小型的电感和电容,进而减小系统整体的体积和重量,符合电击弹小型化的设计理念。

鉴于此,为增强电击武器的环境适应能力与武器射击精度,在18.4 mm霰弹枪弹丸结构的基础上,本文设计了高压电击弹的升压系统,并对电路进行了小型化设计,采用电容储能的供电方式,利用零电压开关(Zero Voltage Switch, ZVS)技术设计逆变电路来实现直流-交流过程,结合倍压整流电路实现了10 kV脉冲电压输出。对高压系统进行电压验证及放电试验,得到了电击弹输出指标,分析了电击弹的致伤效能,从而为电击武器的工程化改进提供全方位、多层次的有效技术支持。

1 电击武器作用机理分析

使用电击武器的目的是打击有生目标并使其失去行动能力,其作用本质为人体触电过程。过量的电流通过人体时会造成人体器官的损伤,甚至导致死亡,故需要对其作用机理进行分析,研究电压、电流等因素对人体的影响,从而为电击武器致伤效果指标的研究提供理论支持。^[18]

1.1 人体阻抗分析

在一般工频情况下,均可视人体电阻为无感阻抗,人体阻抗电路可以等效为“佛莱贝尔加等值电路模型”,其可视为由人体皮肤及人体各个部分如血液、肌肉等内部组织的电阻和皮肤电容串并联构成,如图1所示。其中,人体皮肤电阻通常为手和脚等接触表面的电阻,人体皮肤的电容值约为 $2 \times 10^{-8} \text{ F/cm}^2$ 。但是,本文设计的电击弹“探针”会刺破皮肤,电流会直接突破皮肤,作用到人体内部,故皮肤表面电阻可忽略不计,关于人体内部电阻,假设为恒值 500Ω ,与外界环境及

施加电压等条件无关。

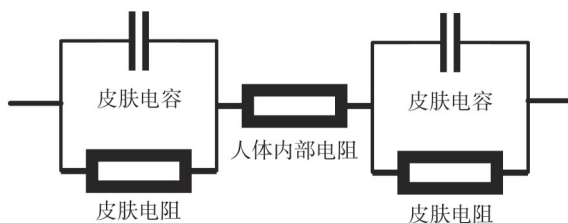


图1 人体等效阻抗

Fig. 1 Equivalent impedance of human body

如果电击弹两个“探针”与身体构成回路，成功放电则会导致打击目标的神经肌肉失能 (Neuro-Muscular Incapacitation, NMI)^[19-20]，造成其局部疼痛或强烈的不自主肌肉收缩。电流在探针或电极之间流动以传递电荷，并且通常会沿着电阻最小的路径流动。若考虑人体各部分的长度及面积，人同侧手臂到脚之间的全部电阻为 100%，从一手到双脚的内阻抗约为 75%，双手到双脚为 50%，而从双手到人体躯干的阻抗为手到手或一手到一脚阻抗的 25%。

如图 2 所示，在理想状态下，电击弹前端的“探针”在击中有生目标手臂的同时，电击弹本体自由下落，使得后端“探针”可刺中人体下端躯干内部，两者在人体内部构成回路，从而增强了电击弹的打击效果。

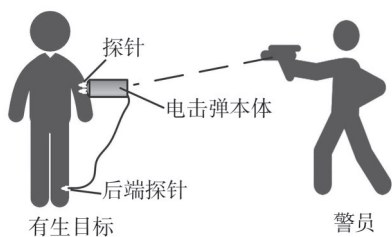


图2 作用原理图

Fig. 2 Principle diagram

1.2 作用机理及指标分析

生理学研究表明，细胞在静息状态时细胞膜内外存在电位静息差，当细胞受到刺激时，细胞膜可快速实现钠钾离子交换，实现静息电位翻转，进而形成动作电位。一系列动作电位沿着神经细胞传输，最终作用在骨骼肌细胞上，导致骨骼发生细胞纤维性收缩。待钠离子内流、钾离子外流动作完成，静息电位恢复后，细胞再次受到外部刺激时会再次形成动作电位，且新的刺激可与未完成的动作电位继续叠加，出现强制性收缩^[15]。利用该收缩原理，电击弹升压系统中产生的脉冲电流流经细胞时，会使

其发生多次电位翻转，促使骨骼肌发生强制性收缩，从而达到打击目的。

本文拟在所设计的电击弹升压系统的放电频率、放电电压、放电电流等关键指标上进行优化，确保骨骼肌细胞进行强制收缩，增强电击弹对人体的作用。关于放电频率，结合泰瑟枪等电击武器的相关数据，人体在通过频率为 50~60 Hz 的高压电的痉挛的可能性更大，故电击弹的放电频率为 50~100 Hz。对于电流和电压，人体在触电过程中起致命作用的因素是流过人体的电流，电压不会直接损伤人的心脏或者组织。人体平均摆脱电流在 6~22 mA 范围内，结合人体皮肤阻抗、人体内阻抗等关键特性，将放电电流定设定在 16~20 mA 范围内，力求做到电击部位麻痹、痉挛、伴随剧烈疼痛。同时，电击武器的功率要达到 14 W 以上，为达到良好的打击效果，将放电电压设置在 10 kV，且要能装入 18.4 mm 霰弹枪的弹丸结构模型中。将上述数据进行整合，各项参数整理结果如表 1 所示。

表 1 关键指标参数

Tab. 1 Index parameter

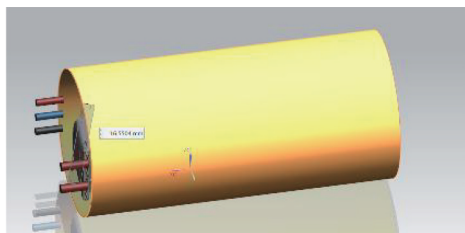
指标	量化数值
持续放电电流 I /mA	16~20(低频交流电)
放电电压 U /kV	10
放电频率 f /Hz	50~100
直径 D /mm	18.4
长度 L /mm	50

本文设计的电击弹升压系统通过“探针”将脉冲型电流送入人体，该过程与正常神经元放电原理类似，有生目标无法抑制该过程，一旦击中将会立即失去反抗力，可高效解决传统致晕型电击武器如电棒、泰瑟枪等的失能效果不明显、所需发射功率大等问题。

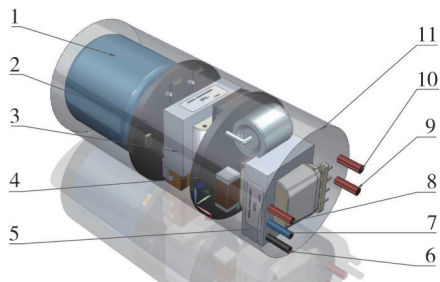
2 电击弹升压系统设计

为满足 18.4 mm 霰弹枪发射器发射的要求，需对电击弹升压系统进行小型化设计。

首先，电击弹使用碳基电容电池供电，既可满足输入需求，也可减小整体体积；其次，电击武器的电路输入只有 12 V，升压电路为输出符合要求的高压脉冲电路必须用变压器来实现变压，本文依据设计需求定制了小型化变压器；最后，充分利用弹体空间对元器件进行立体排布。电击弹装配及内部结构如图 3 所示。



(a) 装配示意图



1—电容电池；2—逆变电路；3—封装胶体；4—升压电路；
5—变压器；6—开关电极；7—公共地；8—充电正极；
9—高压放电端；10—高压放电端；11—树脂外壳

(b) 内部结构

图3 模型结构示意图

Fig. 3 Model structure diagram

2.1 ZVS逆变电路设计

传统的开关电源工作在硬开关状态，开关瞬间会造成开关损耗，而ZVS电路具有元件应力小、开关损耗小的优点，可提高变换器的工作频率。对于整体的升压电路，首先采用ZVS电路进行逆变，将碳基电容电池提供的12V直流电转换成高频交流电，具体的ZVS升压电路如图4所示。ZVS振荡模块的工作过程可分为5个阶段：

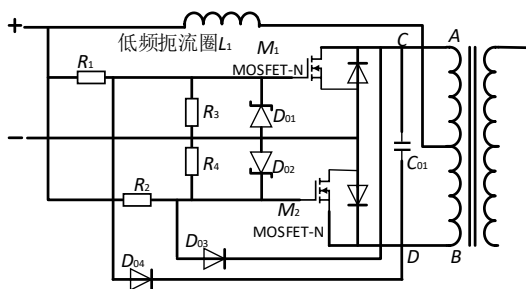


图4 ZVS升压电路

Fig. 4 ZVS boost circuit

1) 上电时刻 t_0 ：在上电瞬间，经过电阻 R_1 、 R_2 有电流作用到MOS管 M_1 、 M_2 的栅极上，与此同时，电流经过扼流线圈 L_1 后，只有微弱的电流经过 L_1 和变压器初级部分到达 M_1 、 M_2 的源极，此时

M_1 、 M_2 处于半导通状态。

2) $t_0 \sim t_1$ 时刻： L_1 达到饱和，电流到达 M_1 、 M_2 的源极。元件参数具有离散型，可能会导致 M_1 、 M_2 不能同时开启。假设 M_2 比 M_1 先开启，MOS管的压降几乎可以忽略，点 D 的电压逐渐趋近于0，二极管 D_{04} 导通，此时 M_1 管栅极电压逐渐降到0， M_1 截止，电流流向为从点 A 到点 D 。

在 M_2 导通的同时，因变压器上下线圈公用一个磁芯的结构特性，使其两个线圈具有相同的磁回路电流，在变压器初级部分的上部分线圈产生互感电流，方向为从点 A 逆时针到点 B 。互感电流产生后，内部的LC谐振电路为电容 C_{01} 充电， C_{01} 中的电流最大时，电流为正弦波趋势且逐渐减小，此时变压器初级部分中的感应电动势最大。

3) t_1 时刻： C_{01} 达到饱和，不再变化，变压器初级部分的感应电动势此时最小， C_{01} 开始向变压器初级部分线圈反向放电。点 C 为正时，其电压升高，二极管 D_{03} 截止， M_2 栅极达到限制电压， M_2 仍处于导通。点 D 为负时，其电压降低，二极管 D_{04} 导通， M_1 栅极电压逐渐趋近于0， M_1 截止，此时点 D 的电压接近于0，回路翻转，变压器初级部分线圈的互感电流为电容 C_{01} 充电。

4) $t_1 \sim t_2$ 时刻： M_2 导通， M_1 截止，此时点 D 电压为0，电流方向为从点 C 逆时针到点 B ，而互感电流在变压器初级线圈和电容 C_{01} 之间构成顺时针循环，为电容 C_{01} 充电。

5) t_2 时刻： C_{01} 再次达到饱和，开始向线圈放电，开始下一个循环。

由于ZVS电路中初级线圈两端每隔半个周期交替接地，中间抽头部分的电压有效值为输入直流电压 $V_{cc} = 10.8 \sim 13.2$ V，其周期相当于正弦波经过全波整流后周期的一半。ZVS电路输出峰值电压为上述生成的振荡回路的峰值电压 V_p 。

$$V_{cc} = \frac{\int_0^\pi A \cdot \sin dx}{\pi} = \frac{2A}{\pi} \quad (1)$$

$$V_p = 2A = \pi V_{cc} = 37.68 \text{ V}, \quad (2)$$

式中： V_{cc} 为输入直流电压； A 为电压参数； V_p 为振荡回路的峰值电压。

根据上述需求，MOS管作为主要原件，其上的最大电压为初级的峰值电压，选取STW13NK100Z，耐压高且稳定，不易被击穿。

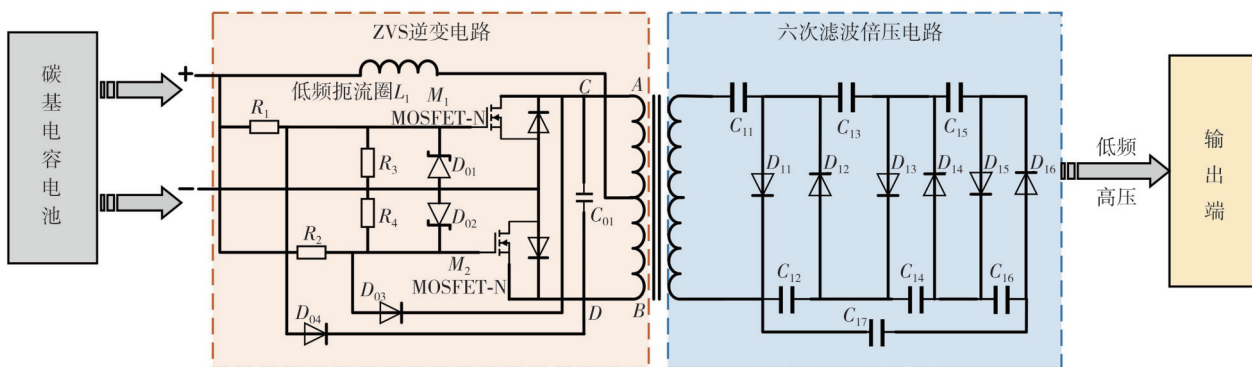


图 5 总体设计
Fig. 5 Overall design

2.2 高功率变压器

高功率变压器作为主要元器件之一，可以快速且大幅度地提高电压和传输能量，本文采用Ap法设计反激式变压器，满足小型化与高效化的设计。

因变压器传输过程中会产生损耗，故输出电压设为 12 kV，设变压器的功率传输效率 η 为 0.95，输出最大电压纹波为输出电压 U 的 1%，对于倍压整流电路，其视在功率 P_T 的计算公式为

$$\Delta U = 0.01U, \quad (3)$$

$$P_T = P_0 \left(1 + \frac{1}{\eta}\right) = (U + \Delta U) \cdot I \cdot \left(1 + \frac{1}{\eta}\right) = 41.46 \text{ W}. \quad (4)$$

再计算磁芯面积乘积

$$A_p = \left(\frac{P_T \times 10^4}{K_0 K_f f B_w K_j}\right)^{\frac{1}{1+X}} = 0.51 \text{ cm}^4, \quad (5)$$

式中： $K_0=0.4$ 为窗口利用系数； $K_f=1.414$ 为全波整流波的波形系数； f 为放电频率； $B_w=0.12 \text{ T}$ 为工作磁通密度； $K_j=366$ 为温度 25°C 时的电流密度系数；磁芯选择锰锌铁氧体磁芯，其常数 $X=-0.12$ 。

查阅磁芯手册，同时，考虑弹内体积较小，在保证上述参数的前提下，缩小变压器体积，选择 EI-28 型磁芯，其 $A_p=0.6028 \text{ cm}^4$ ，此时磁芯的有效截面积 $A_e=0.69 \text{ cm}^2$ 。

已知变压器 T_1 的初级电压 $V_p=37.68 \text{ V}$ 以及次级电压 $V_s = \frac{12000}{6} = 2000 \text{ V}$ ，此时变压器的变比为

$$n = \frac{N_p}{N_s} = \frac{V_p}{V_s} = \frac{37.68}{2000} = 0.019. \quad (6)$$

变压器初级匝数为

$$N_p = \frac{V_p \times 10^4}{K_f f B_w A_e} = 107.28. \quad (7)$$

此时， N_p 取整数 108，变压器初级绕 108 匝，其中心抽头。

变压器次级匝数为

$$N_s = \frac{N_p}{n} = 5646.31. \quad (8)$$

此时， N_s 取整数 5647，变压器次级绕 5647 匝。在变压器上述匝数确定的同时，绕制线圈时应该采取分段分组绕制的方式，减小每层匝数，同时增加层数，这样可以有效减小分布电容，抑制其对电路的影响。

2.3 倍压升压电路

倍压升压电路去掉了传统的 LC 滤波输出，没有输出电感和高频振荡的整流管，省去 RC 缓冲器，使得系统的复杂度降低，结构简单轻便，从而为电路小型化提供了条件。倍压整流电路主要是利用二极管单向导通的特性和电容两端电压不能突变且可以存储能量的特性，使得能量逐步往后级输送，同时线路上的电压也逐渐升高，形成多倍压整流电路，同时，为防止二极管被轻易击穿且保证电压达到预设指标，故设计为六倍压电路，如图 6 所示。

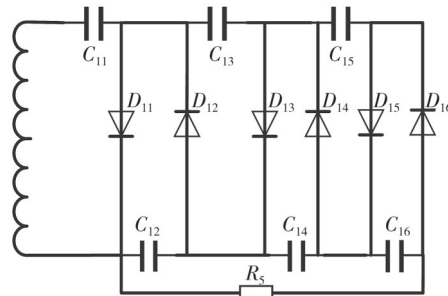


图 6 六倍滤波升压电路
Fig. 6 Sixth filter boost circuit

$0 \sim t_1$ 阶段：电源给 C_{11} 充电， D_{11} 导通，此时电源与 C_{11} 和 D_{11} 形成回路， C_{11} 端电压达到 V_m ；

$t_1 \sim t_2$ 阶段：电源电压反向，此时电容 C_{11} 可以

看作一个电压为 V_m 的电压源, C_{11} 与电源组成了 $2V_m$ 的电压向 C_{12} 充电, D_{11} 截止, D_{12} 导通, 形成充电回路, C_{12} 端电压达到 $2V_m$;

$t_2 \sim t_3$ 阶段: 电源电压变为正向, 电容 C_{12} 可以看作 $2V_m$ 的电压源, C_{12} 与电源形成串联的 $3V_m$ 的电压源, 而 C_{11} 相当于 $-V_m$ 的电压源, 最终电源与电容 C_{11} 和 C_{12} 形成 $2V_m$ 的电压向 C_{13} 充电, D_{11} 和 D_{12} 截止, D_{13} 导通, C_{13} 端电压达到 $2V_m$;

$t_3 \sim t_4$ 阶段: 电压变为反向, 二极管 D_{11} 、 D_{12} 、 D_{13} 截止, D_{14} 导通, C_{11} 、 C_{13} 和电源组成 $4V_m$ 的电压源, C_{12} 相当于 $-2V_m$ 的电压源, C_{11} 、 C_{12} 、 C_{13} 和电源组成端电压为 $2V_m$ 的电压源向 C_{14} 充电, 使得 C_{14} 端电压达到 $2V_m$;

以此类推, 使得 C_{15} 、 C_{16} 端电压皆为 $2V_m$, 输

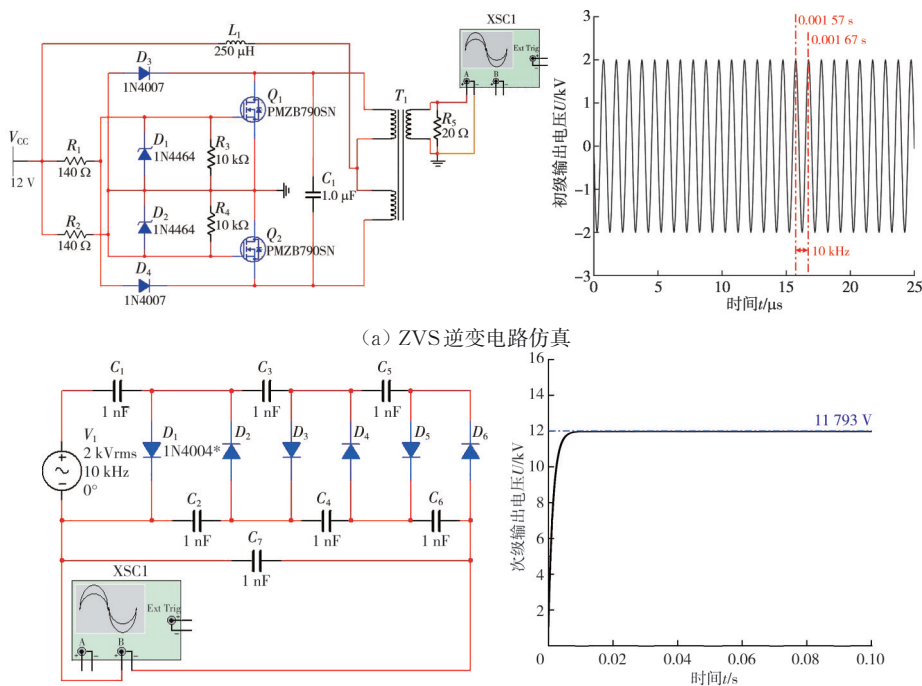
出端接在 C_{12} 、 C_{14} 、 C_{16} , 即最终该电路为一个六倍压电路。

倍压升压部分作为电源输出部分采用6个二极管及电容组成, 结构相对简单, 对各元件耐压要求较高, 二极管选择 UF4007GP-AP-HF, 可提供最高 2 kV 的反向耐压。电容选取耐压 5 kV 的陶瓷高压电容, 其电容值为 2.9×10^{-9} F。

3 实验验证

3.1 电击弹电压验证

按照上述理论分析在 Multisim 中搭建升压系统电路仿真模型, 仿真模型电路及仿真结果波形如图 7 所示。



(a) ZVS 逆变电路仿真
(b) 倍压升压电路仿真
图 7 电路仿真

Fig. 7 Circuit simulation

在输入端输入直流电压 12 V 时, ZVS 逆变电路经过变压器升压后输出的电压为 2 kV, 倍压升压电路输出端得到 12 kV 的输出电压信号。在理论及仿真结果可行的情况下, 为验证放电周期内电压输出的状态, 采用高压探针与示波器采集电击弹升压系统输出端的电压波形, 具体测试如图 8 所示, 结果如图 9 所示。

由图 9 可知, 电击弹输出端的输出电压满足 10 kV 指标, 最高输出电压为 11 232 V, 其放电频率约为 50 Hz。

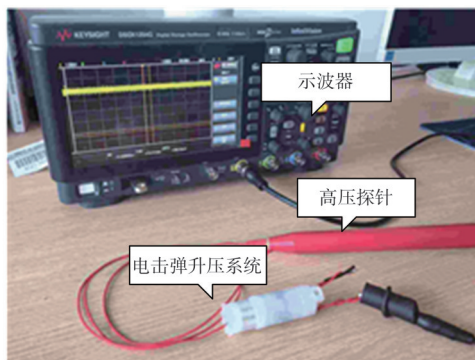


图 8 输出端电压波形测试图
Fig. 8 Output terminal voltage waveform test chart

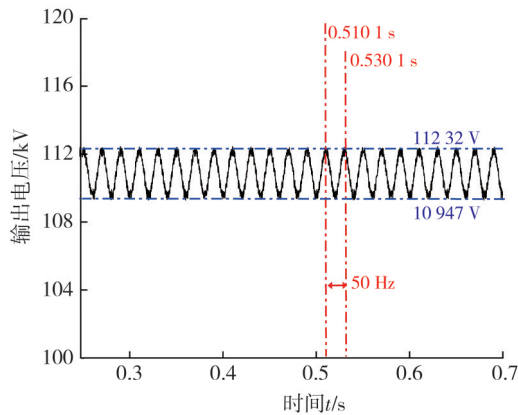


图 9 单放电周期内输出端电压波形

Fig. 9 Output terminal voltage waveform during a single discharge cycle

3.2 电击弹放电测试

为验证本文设计的电击弹的频率及电流指标,搭建电击弹放电性能测试平台,如图 10 所示。电击弹电路模块使用程控电源供电,使电击弹空载,利用高速摄影仪捕捉电击弹输出端击穿空气时产生的放电电弧持续时长,分析单次放电电流的大小。

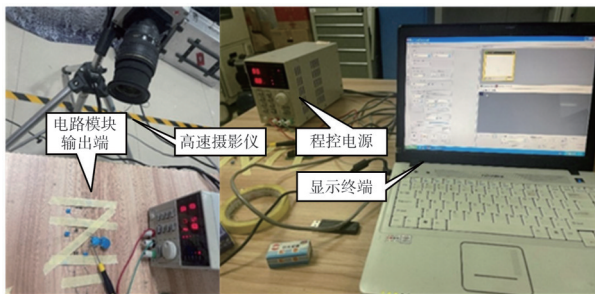


图 10 电击弹电路模块性能测试平台

Fig. 10 Electric shock bomb circuit module performance test platform

设置高速摄影仪采集频率为 250 Hz,采集到电击弹电路模块单次放电过程结果如图 11 所示,测试中输出端拉弧距离为 7 mm,电路中高压电容值 C 为 2.9×10^{-9} F。多次采集后可以观察到输出端整个放电过程持续时间 t 约为 0.02 s,结合上述电压测试中输出电压 U 可达 10 kV 以上,这里对 $U=11\ 232$ V 的放电电流进行分析。

单次放电电荷量 $Q=CU=2.9 \times 10^{-9}$ F \times 11 232 V = 3.27×10^{-4} C。

由于放电持续时间极短,单次放电可视为电流 I 恒定, $I=Q/t=3.27 \times 10^{-4}$ C / 0.02 s = 16.34 mA。

综上所述,本文所研究的电击弹测试所得结果在预期指标范围内,说明了理论模型与实际应用之间的契合度,验证了本文设计理论、技术实

现路径的准确性和有效性。

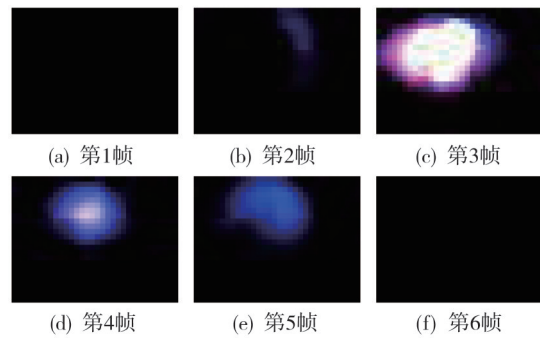


图 11 单次放电过程

Fig. 11 Single discharge process

无线增程电击弹(XREP),是一种自主式、无导线连接的电击弹,使用标准枪械(如 12 号霰弹枪)进行发射,可以实现远距离的电击能力^[21],本文设计的电击弹与其结构类似,两者参数对比如表 2 所示。与无线增程电击弹(XREP)相比,本文所研究电击弹的各项指标均有所提升,可以增强电击弹的效能,可以作为电击弹的工程化研究进行进一步的探索。

表 2 电击弹与 XREP 参数对比

Tab. 2 Comparison of parameters between electric shock bomb and XREP

指标	电击弹	XREP
持续放电电流 I /mA	16.34	1.3
放电电压 U /kV	11.232	0.5
放电频率 f /Hz	50	50~100
直径 D /mm	17	18.4
长度 L /mm	46	51

4 结 论

本文以 18.4 mm 霰弹枪弹丸为基础,结合现有电击武器技术,设计了电击弹的升压系统,其满足小型化、高度集成、自供电且可远程发射等指标。具体结论如下:

1) 依据人体机能对电击武器作用机理进行分析,保留现有电击武器成果点的基础上,对指标内容进行了细化,得到本文设计电击弹的主要参数;

2) 围绕 18.4 mm 霰弹枪弹丸进行了电击弹升压电路的小型化设计,建立了完整的电击弹丸模型,输出端可产生电压为 10 kV 以上,电流为 16.34 mA 的高电压,能够以 50 Hz 频率持续放电;

3) 最终实验结果表明,本文所设计的电击弹升压系统可以正常运行,且放电测试结果符合设计指标。

参考文献:

- [1] 邵晓鹏. 非致命动能武器致伤效应研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2020.
- [2] 赵法栋, 陈超明, 暴洪涛, 等. 非致命动能弹钝性冲击假人胸部的数值模拟[J]. 弹道学报, 2022, 34(4): 30-37. ZHAO Fadong, CHEN Chaoming, BAO Hongtao, et al. Numerical simulation of non-lethal Kinetic projectiles blunt impact on dummy chest[J]. Journal of Ballistics, 2022, 34(4): 30-37. (in Chinese)
- [3] 缪恒举. 非致命噪声武器对生物体听阈损伤试验与致伤效应研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2021.
- [4] 周畅, 周克栋, 赫雷, 等. 基于层次分析——贝叶斯网络的声波非致命武器致伤评估[J]. 兵器装备工程学报, 2019, 40(6): 222-227. ZHOU Chang, ZHOU Kedong, HE Lei, et al. Evaluation of acoustic non-lethal weapons based on analytical hierarchy-bayesian network[J]. Engineering Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2019, 40(6): 222-227. (in Chinese)
- [5] 覃彬, 臧立伟, 高瞳, 等. 电击武器作用生物体与含盐明胶模拟靶的相似性[J]. 兵工学报, 2022, 43(9): 2129-2135. QIN Bin, ZANG Liwei, GAO Tong, et al. Similarities of applying conducted electrical weapon to living target and to salt containing gelatin simulation target[J]. Acta Armamentarii, 2022, 43(9): 2129-2135. (in Chinese)
- [6] 杨力帆, 刘加凯. 电击非致命武器装备技术体系研究[J]. 兵工自动化, 2023, 42(5): 7-10. YANG Lifan, LIU Jiakai. Research on technical system of electric shock non-lethal weapon equipment [J]. Ordnance Industry Automation, 2023, 42(5): 7-10. (in Chinese)
- [7] BALIATSAS C, GERBECKS J, DÜCKERS M L A, et al. Human health risks of conducted electrical weapon exposure: a systematic review[J]. JAMA Network Open, 2021, 4(2): 53-62.
- [8] 张喜, 马永忠. 电击武器对人体的电击效应和作用机理研究[J]. 电子世界, 2018(9): 100. ZHANG Xi, MA Yongzhong. Study on the electric shock effect and mechanism of electric shock weapon on the human body[J]. Electronics World, 2018(9): 100. (in Chinese)
- [9] 杨强. 非致命电击武器致伤效应与评估技术研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2021.
- [10] HO J D, MINER J R, LAKIREDDY D R. Cardiovascular and physiologic effects of conducted electrical weapon discharge in resting adults[J]. Academic Emergency Medicine, 2006, 13(6): 589-595.
- [11] HO J D, DAWES D M, KUNZ S N, et al. The physiologic effects of a new generation conducted electrical weapon on human volunteers at rest[J]. Forensic Science, Medicine, and Pathology, 2020, 16(3): 406-414.
- [12] HO J D, DAWES D M, KUNZ S N, et al. A comparative study of conducted electrical weapon incapacitation during a goal-directed task[J]. Forensic Science, Medicine, and Pathology, 2020, 16(4): 613-621.
- [13] COMEAUX J A, JAUCHEM J R, COX D D, et al. Muscle contraction during electro-muscular incapacitation: a comparison between square-wave pulses and the TASER (@) X26 electronic control device [J]. Journal of Forensic Sciences, 2011, 56(S1): 95-100.
- [14] 雷海亮, 战仁军. 线膛式电击枪增程电击子弹设计[J]. 现代制造技术与装备, 2019, 55(5): 30-31. LEI Hailiang, ZHAN Renjun. Design of long-range electric shock bullet for rifle shot gun [J]. Modern Manufacturing Technology and Equipment, 2019, 55(5): 30-31. (in Chinese)
- [15] 宋艳生. 一种新型电击子弹[J]. 兵器装备工程学报, 2017, 38(2): 27-29. SONG Yansheng. A new type of electric shock bullets [J]. Engineering Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2017, 38(2): 27-29. (in Chinese)
- [16] 熊远波. 电击武器若干关键问题的研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2007.
- [17] 洪悦. 30 kV 可调直流高压电源设计[D]. 大连: 大连理工大学, 2011.
- [18] LEE R C. Cell injury by electric forces[J]. Annals of the New York Academy of Sciences, 2005, 1066(1): 85-91.
- [19] 冯建伟. 由电击武器对人体的生理效应谈其开发和应用[J]. 武警工程学院学报, 2010, 26(2): 25-27. FENG Jianwei. Exploration on the development and applications of electric attack weapon based on its physiological effects [J]. Journal of Engineering University of the Chinese People's Armed Police Force, 2010, 26(2): 25-27. (in Chinese)
- [20] TOMALAK W, RADLIŃSKI J, PAWLIK J, et al. Impulse oscillometry vs. body plethysmography in assessing respiratory resistance in children[J]. Pediatric Pulmonology, 2006, 41(1): 50-54.
- [21] KUNZ S N, GRAW M, PESCHEL O, et al. Evaluation of the long-distance conducted electrical weapon XREP[J]. Journal of Testing and Evaluation, 2012, 40(2): 281-291.