



·特种电源技术·

HEART-50 重复频率高功率脉冲驱动源研究*

李 嵩^{1,2}, 杨汉武^{1,2}, 樊玉伟¹, 张自成^{1,2}, 高景明^{1,2},
荀 涛^{1,2}, 樊 鹏^{1,2}, 陈冬群¹, 钱宝良¹

(1. 国防科技大学 前沿交叉学科学院, 高功率微波技术研究所, 长沙 410072; 2. 脉冲功率激光技术国家重点实验室, 长沙 410072)

摘 要: 通过理论计算、数值仿真和实验验证的方法, 研究了一台峰值功率数十 GW、重复频率 5 Hz 的重复频率高功率脉冲驱动源, 命名为“HEART-50”。该脉冲驱动源由充电电源、初级开关、脉冲形成线、主开关、阻抗变换线, 以及假负载构成。首先介绍了 HEART-50 重复频率高功率脉冲驱动源整体设计思路; 其次, 对基于混合液体介质的高功率脉冲形成线和气体介质主开关进行了数值分析, 并对其全电路工作能力进行了仿真分析; 最后, 对研制的 HEART-50 重复频率高功率脉冲驱动源进行了实验验证。结果表明, 脉冲驱动源能够输出峰值电压 520 kV, 脉冲宽度约 90 ns, 脉冲上升沿小于 25 ns, 重复频率 5 Hz 的准方波电脉冲, 峰值电功率约为 25.3 GW, 且具有较好的运行稳定性。

关键词: 脉冲功率技术; 高功率; 重复频率; HEART-50

中图分类号: TM214

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202234.210526

High power repetitive rate pulse generator HEART-50

Li Song^{1,2}, Yang Hanwu^{1,2}, Fan Yuwei¹, Zhang Zicheng^{1,2}, Gao Jingming^{1,2},
Xun Tao^{1,2}, Fan Peng^{1,2}, Chen Dongqun¹, Qian Baoliang¹

(1. College of Advanced Interdisciplinary Studies, National University of Defense Technology, Changsha 410072, China;

2. State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology, Changsha 410072, China)

Abstract: A high power pulse generator with peak power over tens of GW and repetitive rate of 5 Hz, named HEART-50, is studied theoretically, numerically, and experimentally. The generator is composed of charging source, primary compress switch, pulse forming line, main switch, impedance transmission line, and dummy load. Design considerations of the generator are discussed. Then key parameters which influence performance of the mixed-liquid-dielectrics based pulse forming line is numerically investigated. PSpice software is used to study the whole circuit of the generator. The HEART-50 has been built and experimentally studied in our laboratory. Quasi-square pulses with peak voltage over 520 kV, pulse duration approximately 90 ns, rise-time of 25 ns, and repetitive rate of 5 Hz, are achieved on the dummy load with good uniformity.

Key words: pulsed power technology, high power, repetitive rate, HEART-50

峰值功率数十 GW 的重复频率高功率脉冲驱动源在高功率微波产生^[1-3]、高能激光泵浦^[4]、粒子束材料处理^[5-6], 以及等离子体物理研究^[7-8]等领域具有广泛的应用前景^[9-12]。基于高功率气体开关和液体介质脉冲形成线的高功率脉冲驱动源具有峰值功率高、绝缘结构简单, 以及成本较低等优点, 得到了本领域的广泛关注和重点研究。本文研制了一台基于液体储能介质脉冲形成线和高功率自击穿气体开关的高功率脉冲驱动源, 着重介绍了利用混合液体介质实现高功率脉冲形成线输出电参数的调节方法和高功率气体开关的绝缘设计, 并进行了实验验证。研制的高功率脉冲驱动源能够应用于强流相对论电子束产生和高功率微波技术相关研究。

1 HEART-50 设计

HEART-50 重复频率高功率脉冲驱动源主要由初级能源分系统、高压脉冲调制系统、附属系统和假负载构成,

* 收稿日期: 2021-11-26; 修订日期: 2022-05-31

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51707199); “湖湘青年科技英才”项目 (2020RC3030); 脉冲功率激光技术国家重点实验室主任基金项目 (SKL2021ZR02)

联系方式: 李 嵩, lisong1102nudt@163.com。

图 1 给出了 HEART-50 电路结构图。初级能源分系统由恒流电源、初级储能电容、低气压开关构成；高压脉冲调制系统包括磁芯式脉冲变压器、基于混合液体介质的高功率脉冲形成线，高功率气体开关，以及变阻抗传输线；附属系统主要包括控制设备、测量设备以及液体介质处理设备；假负载为 CuSO_4 溶液。

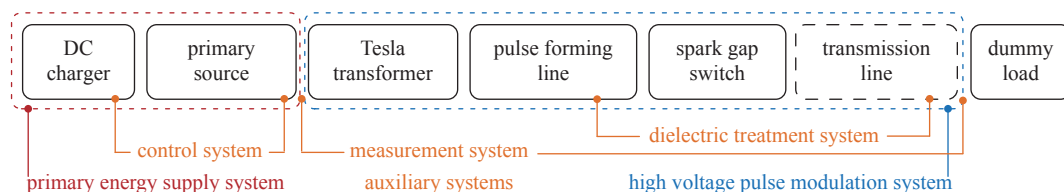


Fig. 1 Scheme of the HEART-50

图 1 HEART-50 脉冲驱动源电路结构图

HEART-50 重复频率高功率脉冲驱动源工作过程可以进行如下描述：初始时刻，恒流电源将工业电提供的三相交流电能源进行整形，并对初级储能电容进行充电（数百 ms 量级）。达到设定电压（数十 kV 量级）后，控制设备触发初级能源分系统中的低气压开关快速放电。电脉冲经过脉冲变压器升压后将能量转移至脉冲形成线中（数 μs 量级），当峰值电压超过高功率气体开关的击穿电压（数百 kV 量级）时，能量经由形成线和开关的整形和压缩，并经过变阻抗传输线传递至假负载，产生准方波电脉冲。

表 1 归纳了 HEART-50 核心电参数。该脉冲驱动源具有峰值功率高及可重复频率运行等特点，在等离子体物理、高功率微波产生等领域具有重要应用价值。

表 1 HEART-50 核心电参数

Table 1 Summary of key parameters of HEART-50

peak voltage/kV	repetitive rate/Hz	impedance/ Ω	pulse duration/ns	energy per pulse/kJ	average power/kW
~390	5	3.3	90	4.5	22.5

2 HEART-50 核心器件及数值仿真

2.1 电参数可调谐液体介质脉冲形成线

脉冲形成线是高功率脉冲驱动源的核心器件之一。设计的 HEART-50 采用电参数可调谐的液体介质脉冲形成线。该装置具有耐压水平高、绝缘恢复性好、易于散热等优点，很好的契合了该脉冲驱动源应用需求^[13]。设计液体介质脉冲形成线由去离子水和酒精的混合溶液构成，通过调节两种液体储能介质的体积比，改变脉冲形成线相对介电常数，进而实现高功率脉冲形成线特性阻抗和脉冲宽度的可调谐运行。

公式(1)和公式(2)给出了液体介质高功率脉冲形成线特性阻抗和脉冲宽度与储能介质相对介电常数的对应关系。

$$Z = \frac{1}{2\pi \sqrt{\epsilon_r}} \ln\left(\frac{R_o}{R_i}\right) \quad (1)$$

$$\tau = \frac{2\sqrt{\epsilon_r} l}{c} \quad (2)$$

式中： Z 为特性阻抗； ϵ_r 为相对介电常数； R_o 和 R_i 分别为脉冲形成线外筒内半径和内筒外半径； τ 为脉冲宽度； c 为真空介质中的光速； l 为脉冲形成线内筒长度。

图 2 给出了 HEART-50 特性阻抗随混合液体介质中去离子水所占比例的变化关系图。其中绿色带圆形符号的曲线表示去离子水与酒精的混合液体，红色带三角形符号的曲线表示去离子水与乙二醇的混合液体。可以看出，在确定的结构尺寸下，由于去离子水的相对介电常数达到约 80，特性阻抗随去离子水比例的增大而减小，且减小幅度逐步减小。可以通过曲线、混合液体成分和设计的特性阻抗，获得混合液体比例，HEART-50 的设计特性阻抗为 3.3Ω ，因此去离子水的比例约为 30%。

图 3 为 HEART-50 脉冲宽度随混合液体介质中去离子水所占比例的变化关系图。其中绿色带圆形符号的曲线表示去离子水与酒精的混合液体，红色带三角形符号的曲线表示去离子水与乙二醇的混合液体。可以看出，驱动源输出电脉冲宽度随去离子水比例的增加而增大。

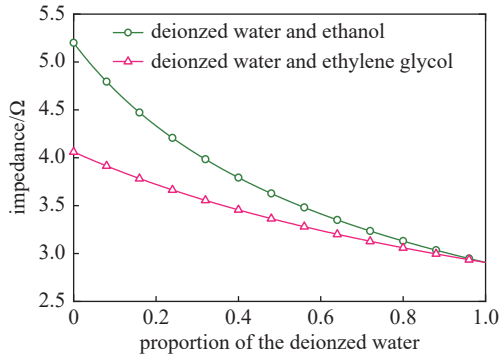


Fig. 2 Characteristic impedance of the generator vs proportion of the deionized water

图 2 特性阻抗随混合液体介质中去离子水所占比例的变化关系图

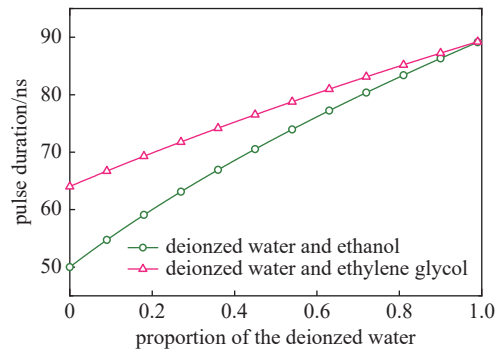


Fig. 3 Pulse duration of the generator vs proportion of the deionized water

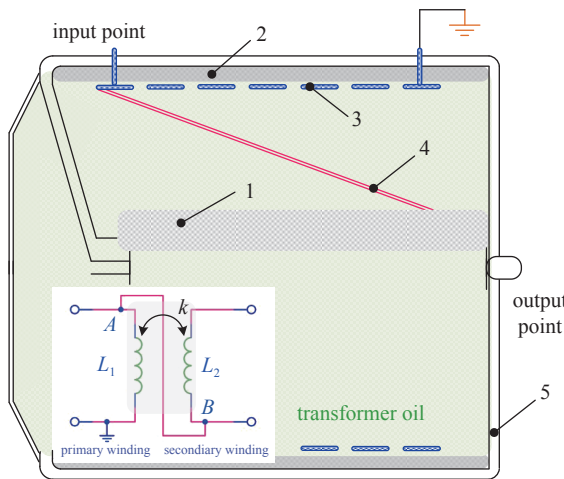
图 3 脉冲宽度随混合液体介质中去离子水所占比例的变化关系图

2.2 磁芯式脉冲变压器

图 4 为 HEART-50 中的磁芯式脉冲变压器结构图, 主要包括内磁芯、外磁芯、初级绕组、次级绕组、外壳、绝缘支撑和绝缘介质。该器件将初级绕组的高压端 (A 点) 与次级绕组的低压端 (B 点) 相连, 尽管耦合系数会稍有降低, 但脉冲变压器的变比能够增加 1。对于 HEART-50 脉冲变压器变比相对较小的实际情况, 该连接方法具有较大意义。低电压测试结果表明该磁芯式脉冲变压器的变比为 20, 耦合系数约为 0.92。该磁芯式脉冲变压器的设计电压为 1 MV。

2.3 自击穿高功率气体开关

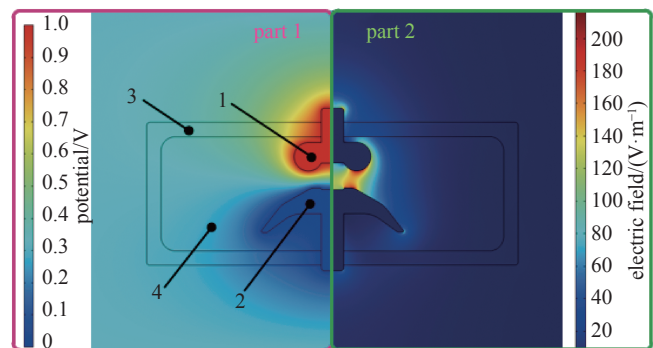
开关性能直接决定了高功率脉冲驱动源的工作能力^[14-15]。综合考虑耐压能力、使用寿命, 以及系统结构特性等因素, HEART-50 重复频率高功率脉冲驱动源采用 SF₆ 填充的高功率自击穿气体开关。使用有限元分析软件对气体开关进行了 2D 数值仿真, 优化后得到了开关内部电场和电势分布如图 5 所示。开关结构简单, 主要由高压电极-1、低压电极-2、外壳-3 和填充介质-4 构成。仿真结果可以看出, 通过结构优化, 设计的气体开关在电极间存在明显的场增强区域, 这对自击穿气体开关工作稳定性的提升具有重要的意义。由于开关工作时的峰值电流达到数十 kA, 且运行于重复频率模式, 需要对电极材料和外壳结构进行细致设计。



1-inner core; 2-outer core; 3-primary winding; 4-secondary winding; 5-shield

Fig. 4 Structure of the magnetic core pulse transformer

图 4 HEART-50 磁芯式脉冲变压器结构图



Part 1-potential distribution; Part 2-electric field distribution

Fig. 5 Field distribution of main switch

图 5 主开关近场分布图

2.4 HEART-50 重复频率高功率脉冲驱动源电路仿真

使用 PSpice 软件对 HEART-50 重复频率高功率脉冲驱动源进行了数值仿真。图 6 为 HEART-50 脉冲驱动源电路图。其中, DC charger 为直流充电电源; C₀ 为初级储能电容; S₀ 为初级能源中的低气压气体开关; PT 为磁芯式脉冲变压器; PFL 为液体介质脉冲形成线; S_m 为自击穿

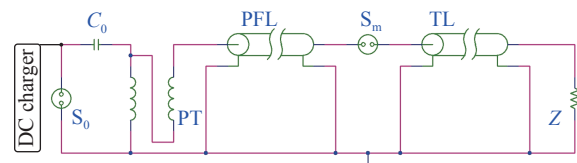


Fig. 6 Circuit of the HEART-50

图 6 HEART-50 重复频率高功率脉冲驱动源电路图

气体开关; Z 表示假负载。为了满足更广泛的负载应用需求, 设计了变阻抗传输线 TL。

图 7 为 HEART-50 重复频率高功率脉冲驱动源电路仿真结果。可以看出, 当初级储能电容的充电电压设置为 48 kV 时, 脉冲形成线在约 6.2 μs 的时间内被充电至约 629 kV, 自击穿气体开关导通后, 若不设置 TL, 负载阻抗 3.3 Ω , HEART-50 驱动源能够实现峰值电压约 310.2 kV, 脉冲宽度约 90 ns 的准方波电脉冲输出, 满足设计需求。若将阻抗提升至 10.6 Ω , 这时在负载上会获得峰值电压约为 486.2 kV, 但峰值电流会减小。反射的存在造成到达负载的能量效率降低。若设置 TL 阻抗为 7 Ω , 且负载阻抗为 10.6 Ω , 则能够在负载上获得峰值电压 528.2 kV 的准方波电脉冲, 且反射相对较小, 波形较好。阻抗变换传输线的工作介质也为去离子水和酒精的混合液, 能够通过调节液体介质比例, 调节、优化电参数, 提升输出波形质量。

3 HEART-50 实验研究

搭建了 HEART-50 重复频率高功率脉冲驱动源, 如图 8 所示。采用电阻分压器和 Rogowski 线圈分别对假负载的脉冲电压和脉冲电流进行测量。图 9 为重复频率工作状态下, HEART-50 重复频率高功率脉冲驱动源典型输出波形。

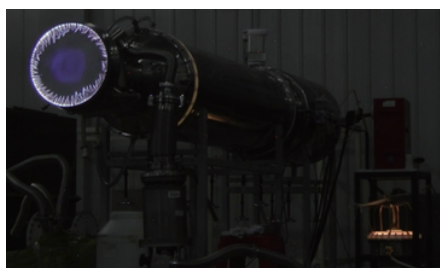


Fig. 8 Photo of the HEART-50

图 8 HEART-50 重复频率高功率脉冲驱动源实物图

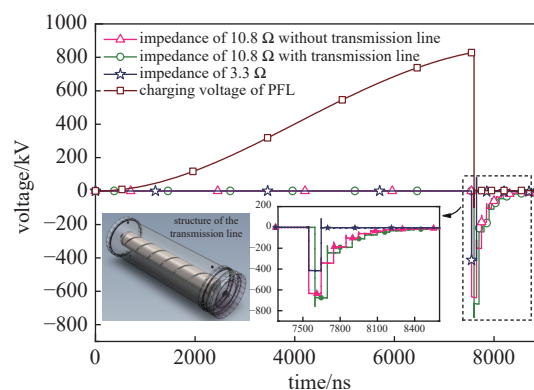


Fig. 7 Numerical result of the circuit analysis

图 7 HEART-50 重复频率高功率脉冲驱动源电路仿真结果

搭建了 HEART-50 重复频率高功率脉冲驱动源, 如图 8 所示。采用电阻分压器和 Rogowski 线圈分别对假负载的脉冲电压和脉冲电流进行测量。图 9 为重复频率工作状态下, HEART-50 重复频率高功率脉冲驱动源典型输出波形。

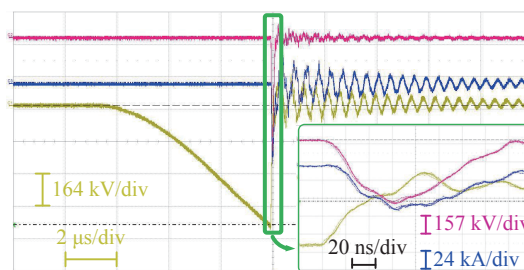


Fig. 9 Experimental result of the HEART-50 (repetitive rate)

图 9 HEART-50 重复频率高功率脉冲驱动源典型输出波形

可以看出, HEART-50 重复频率高功率脉冲驱动源中基于混合液体储能的脉冲形成线充电电压约为 625.7 kV, 耐压时间约为 6.32 μs 。该脉冲驱动源能够稳定运行于峰值电压 522.7 kV, 峰值电流约 48.4 kA, 峰值功率约 25.3 GW, 脉冲宽度约为 90 ns, 脉冲上升沿约为 25 ns。十分重要, 该脉冲驱动源在 5 Hz 重复频率条件下, 连续工作 5 个电脉冲的输出电压峰值抖动仅为约 2%, 具有很好的波形一致性。HEART-50 重复频率高功率脉冲驱动源已应用于强流相对论电子束物理和低阻抗高功率微波源等领域研究。

4 结 论

本文研制的峰值功率数十 GW 的重复频率高功率脉冲驱动源在强流相对论电子束产生、高功率微波技术研究, 以及等离子体物理研究等领域具有广泛的应用前景。通过使用去离子水与酒精等混合液体介质进行储能, 能够实现高功率脉冲驱动源特征阻抗 3.0~5.5 Ω 、脉冲宽度 50~90 ns 的范围内进行调节, 进一步拓宽应用领域; 高功率气体开关采用自击穿形式, 结构简单, 通过合理设计封装外筒和电极间距, 能够在保证绝缘可靠的条件下, 实现气体开关在 5 Hz 的稳定工作。该脉冲驱动源在等离子体研究领域的应用正在开展中。

参考文献:

- [1] Bluhm H. 脉冲功率系统的原理与应用[M]. 江伟华, 张弛, 译. 北京: 清华大学出版社, 2008: 75-149. (Bluhm H. Pulsed power systems: principles and applications[M]. Jiang Weihua, Zhang Chi, trans. Beijing: Tsinghua University Press, 2008: 75-149)
- [2] Zhang Jun, Jin Zhenxing, Yang Jianhua, et al. Recent advance in long-pulse HPM sources with repetitive operation in S-, C-, and X-bands[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2011, 39(6): 1438-1445.
- [3] Song Lili, He Juntao, Ling Junpu. A novel Ka-band coaxial transit-time oscillator with a four-gap buncher[J]. *Physics of Plasmas*, 2015, 22(5): 053107.

- [4] 刘锡三. 高功率脉冲技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005: 380-401. (Liu Xisan. High pulsed power technology[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2005: 380-401)
- [5] Mueller G, Bluhm H J, Heinzel A, et al. Status and recent progress in pulsed power applications at KIT[C]//Proceedings of the IEEE International Conference Record of Power Modulator Symposium. Hollywood, 2002.
- [6] Qian Baoliang, Li Chuanlu, Liu Yonggui, et al. Relativistic electron-beam generation in a gas-loaded foil-less diode[J]. *Applied Physics Letters*, 1998, 73(17): 2420-2422.
- [7] 李欣然, 张舟, 何孟兵, 等. 脉冲放电等离子体处理甲基蓝废水的研究[C]//第六届全国脉冲功率会议论文集. CPPC-2019-F005, 杭州, 2019. (Li Xinran, Zhang Zhou, He Mengbing, et al. Study on methyl blue wastewater treatment by pulse discharge plasma[C]//Proc of 6th Pulsed Power Conference. CPPC-2019-F005, Hangzhou, 2019)
- [8] 谌怡, 叶茂, 王卫, 等. 基于玻纤板层叠Blumlein线的MHz重频、ns脉宽的感应电压叠加器[C]//第六届全国脉冲功率会议论文集. CPPC-2019-A033, 杭州, 2019. (Shen Yi, Ye Mao, Wang Wei, et al. Induction voltage adder of MHz repetitive rate and ns pulse width based on PCB stacked Blumleins[C]//Proc of 6th Pulsed Power Conference. CPPC-2019-A033, Hangzhou, 2019)
- [9] Li Song, Gao Jingming, Sack M, et al. Study on a solid-state pulse generator based on magnetic switch for food treatments by pulsed electric field (PEF)[C]//1st World Congress on Electroporation and Pulsed Electric Fields in Biology, Medicine and Food & Environmental Technologies. Portorož, 2015: 55-59.
- [10] 米彦, 孙才新, 姚陈果, 等. 陡脉冲肿瘤治疗仪的研制及应用[J]. *重庆大学学报*, 2003, 26(2): 12-14. (Mi Yan, Sun Caixin, Yao Chenguo, et al. Development and application of steep pulse apparatus for tumor treatment[J]. *Journal of Chongqing University*, 2003, 26(2): 12-14)
- [11] Sack M, Eing C, Stängle R, et al. Electric measurement of the electroporation efficiency of mash from wine grapes[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2009, 16(5): 1329-1337.
- [12] Yu Liang, Liang Lin, Li Feilong, et al. Design and study on efficient triggering circuit for reversely switched dynistor[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2014, 42(2): 350-357.
- [13] 王刚, 张喜波, 王俊杰, 等. 基于Tesla变压器和Blumlein线的低抖动重频脉冲发生器[J]. *强激光与粒子束*, 2016, 28: 045005. (Wang Gang, Zhang Xibo, Wang Junjie, et al. Low-jitter repetitive pulsed generator based on Tesla transformer and Blumlein pulse forming line[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2016, 28: 045005)
- [14] 张喜波, 孙旭, 王刚, 等. 一种多间隙开关抖动特性研究[C]//第六届全国脉冲功率会议论文集. CPPC-2019-A073, 杭州, 2019. (Zhang Xibo, Sun Xu, Wang Gang, et al. Study on jitter characteristics of a multi-gap switch[C]//Proc of 6th Pulsed Power Conference. CPPC-2019-A073, Hangzhou, 2019)
- [15] 李桂萍, 王新新, 袁建生. 亚纳秒气体开关中气体击穿的数值计算[J]. *强激光与粒子束*, 2004, 16(4): 540-544. (Li Guiping, Wang Xinxin, Yuan Jiansheng. Numerical calculation of gas breakdown in ultrafast gas switch[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2004, 16(4): 540-544)