



HEPS 增强器凸轨磁铁脉冲电源的设计与实现*

王冠文¹, 陈锦晖^{1,2}, 霍丽华¹, 刘鹏¹, 王磊¹, 史晓蕾¹,
段哲¹, 施华¹, 吴官健^{1,2}, 翟心哲^{1,2}

(1. 中国科学院高能物理研究所加速器中心, 北京 100049; 2. 中国科学院大学核科学与技术学院, 北京 100049)

摘要: 高能同步辐射光源(HEPS)是国内首台第四代同步辐射光源, 包括一个储存环、一个增强器以及一个直线加速器。作为典型的低发射度储存环(LER), 其动力学孔径远小于物理孔径, 对此选择了一种新颖的在轴置换注入方案。其中, 增强器负责实现束流从 500 MeV 到 6 GeV 的升能。为了降低增强器引出冲击磁铁的冲击强度, 在引出环节之前使用 4 台凸轨磁铁来辅助冲击磁铁完成这一动作。凸轨磁铁磁场波形要求底宽小于 1 ms 的半正弦波。根据仿真以及测试结果, 采用绝缘栅双极型晶体管(IGBT)串联快恢复二极管的经典 LC 谐振电路拓扑。此外, 设计了能量回收支路, 来降低电容在充电过程中功率损耗以及对输出脉冲电流波形的影响。目前, 已完成脉冲电源样机的研制与测试, 各项结果表明, 该脉冲电源能够满足高能光源增强器高能引出系统的各项要求。

关键词: 高能同步辐射光源; 注入引出; 脉冲电源; LC 谐振; 能量回收

中图分类号: TN78

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202436.230195

Design and implementation of HEPS booster bumper pulser

Wang Guanwen¹, Chen JinHui^{1,2}, Huo Lihua¹, Liu Peng¹, Wang Lei¹, Shi Xiaolei¹,
Duan Zhe¹, Shi Hua¹, Wu Guanjian^{1,2}, Zhai Xinzhe^{1,2}

(1. Accelerator Division, Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

2. School of Nuclear Science and Technology, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The High Energy Photon Source (HEPS) is the first fourth-generation synchrotron radiation light source in China, including a 6 GeV storage ring, a booster ring and a Linac. As a typical low emittance storage ring (LER), the dynamic aperture of HEPS is far smaller than the physical aperture. Hence, a novel on-axis swap-out injection scheme was chosen. The booster ring accelerates the beam from 500 MeV to 6 GeV. To reduce the extraction kick strength, before injection into the storage ring, four slow bumper magnets are applied to assist the kicker to accomplish extraction. The bumper pulse magnetic field waveform is a half-sine wave with 1ms pulse bottom width. Depending on the simulation and test, a classic LC resonance circuit topology with IGBT switching in series with fast recovery diodes is adopted. Besides, an energy recycle circuit is designed, to decrease power loss and reduce the influence on the output pulse current waveform during the capacitor recharge process. A pulsed power supply prototype is developed, and the testing results show that the bumper pulser can fully meet all the requirements of HEPS booster high energy extraction system.

Key words: HEPS, injection and extraction, pulser, LC resonance, energy recovery

高能同步辐射光源(HEPS)是基于典型低发射度存储环的新一代同步辐射光源, 相比第三代同步辐射光源, 能够提供更高亮度和更高横向相干度的同步辐射光。它的建成, 将使我国基础科学相关领域的研究在国际竞争中处于有利的位置, 为我国基础科学、工业应用、重大战略需求等多个方面的前沿研究提供全方位的支持^[1]。HEPS 主体包括一个周长约 1.4 km、能量 6 GeV 的储存环; 一个周长 454 m、能量 0.5~6 GeV 的增强器; 一个长度 49 m、能量 0.5 GeV 的直线加速器。受其小动力学孔径的限制, 一种新颖的在轴置换注入方案是 HEPS 储存环的基准选择^[2-7]。在轴置换注入过程中, 满能量的增强器同时也充当着累积环的作用。至多 10 个束团从直线注入到增强器, 并在

* 收稿日期: 2023-06-26; 修订日期: 2024-01-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(11675194)

联系方式: 王冠文, gwwang@ihep.ac.cn.

1 s 内完成 500 MeV 到 6 GeV 的升能。此后,以 50 Hz 的重复频率实现增强器到储存环逐束团的注入引出。其中,为了降低引出冲击磁铁的磁场强度,使用 4 台慢凸轨磁铁来产生局部凸轨降低引出难度。本文针对凸轨磁铁对电流的要求,提出了完整的样机设计方案,对样机性能进行了充分测试,并对实际使用过程中问题的解决方案进行了相关阐述。

1 设计方案及仿真分析

1.1 技术路线

与 HEPS 注入引出系统其他快脉冲电源相比,凸轨磁铁脉冲电源的脉冲速度相对较慢。因此,选择技术最为成熟的 LC 谐振电路作为首选方案。基础模型如图 1 所示,回路内各元件端电压满足二阶电路动态方程^[8]

$$LC \frac{d^2 U_c}{dt^2} + RC \frac{dU_c}{dt} + U_c = 0 \quad (1)$$

式中: L 代表回路电感量; C 代表回路电容容值; R 代表回路内电阻值; U_c 代表电容端电压。

进一步推导,可以得到理想条件无阻尼状态下 LC 谐振电路主要参数计算公式,即^[9]

$$\begin{cases} Z = \sqrt{\frac{L}{C}} \\ i = \frac{U_c}{Z} \\ \tau = \pi \sqrt{LC} \end{cases} \quad (2)$$

式中: Z 代表回路特征阻抗; i 代表峰值电流; τ 代表半正弦脉冲底宽; C 代表高压脉冲电容容值; L 代表负载磁铁电感量; R 代表回路内电阻值。

根据上述公式,可以得到回路参数,但实际电路会存在电阻,为了得到半正弦波形,电路需要工作在欠阻尼状态,即

$$R < 2 \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (3)$$

1.2 仿真分析及模型改进^[10-11]

考虑器件可靠性因素,选择固态开关作为功率器件,由于其内部寄生、或集成有反向二极管,开关关断后谐振电路产生的反向电流并不会截止。因此,外部串联快恢复二极管十分必要,仿真模型如图 2 所示,其中 R_1 为充电限流电阻, D_1 为外部串联快恢复二极管, D_2 为开关内部寄生或集成反向二极管。

尽管增加了外部串联反向截止二极管,但是由于受充电过程影响,负载端反向电流仍然存在。而且,随着充电限流电阻阻值的减小,反向电流峰值会增加。但是如果增加限流电阻阻值,受充电回路时间常数限制,当

$$R_1 > 5 \times \frac{19 \text{ ms}}{140 \mu\text{F}} \approx 27 \Omega \quad (4)$$

时电容电压不能得到及时补充,稳定运行后峰值电流低于理论值,此外,高压充电电源会有 50% 的功率浪费在充电电阻上,即

$$W_{R_1} = \int_0^{\tau} V_1 \times \sin \omega t dt - \frac{1}{2} CV_1^2 = \frac{1}{2} CV_1^2 \quad (5)$$

式中: ω 为脉冲电流角频率。

对于峰值电流 212.5 A、底宽 1 ms 的半正弦脉冲而言,其平均功率并不低,功率的浪费一方面会导致充电限流

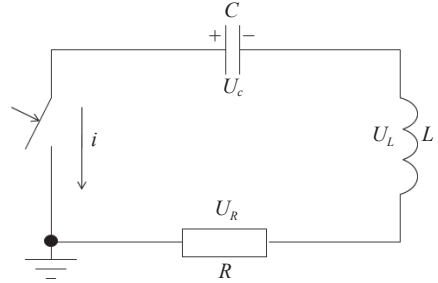


Fig. 1 LCR resonance circuit

图 1 LCR 谐振电路模型

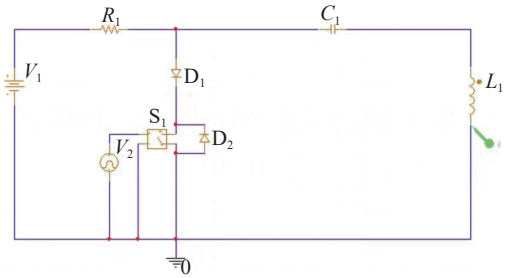


Fig. 2 Fundamental circuit Simulation at $R_1=50 \Omega$

图 2 $R_1=50 \Omega$ 条件下基础电路仿真模型

电阻发热异常,另一方面,在影响输出波形的同时,还会对充电电源输出能力提出更高要求。为了解决这一系列问题,设计增加了一条能量回收支路^[12-14],并增加了一只充电开关,如图3所示,能量回收支路由一只储能电感(L_1)与一组二极管串联组成(D_4),再并联在谐振电容两端。电感负责将放电结束后剩余的能量进行回收储存,二极管用于限制回路电流。根据仿真及经验,回收支路时常数最好10倍于放电主回路时常数,才会有明显的效果,根据式(2),即 $L_1 > 100L_2 \approx 66$ mH,且 L_1 不能饱和。考虑设备安装及外观一致性,电源机箱均选用3U尺寸,这在一定程度上限制了回收储能电感的尺寸,最终,确定电感规格为30 mH/40 A,通过仿真可以看到,当前电感满足使用需求。再通过合理分配充电开关(S_1)与主回路放电开关(S_2)之间的时序逻辑,最终可以得到理想输出波形。

2 电路设计与性能测试

根据计算与仿真结果,确定了功率器件的型号及数量,包括一只IGBT(FZ600R12KS4)作为主回路放电开关,另一只IGBT(IXYX100N120B3)作为充电开关,以及12只Si基二极管(IXYS-DSEI30-12A,每组6只)。测试结果如图4所示。

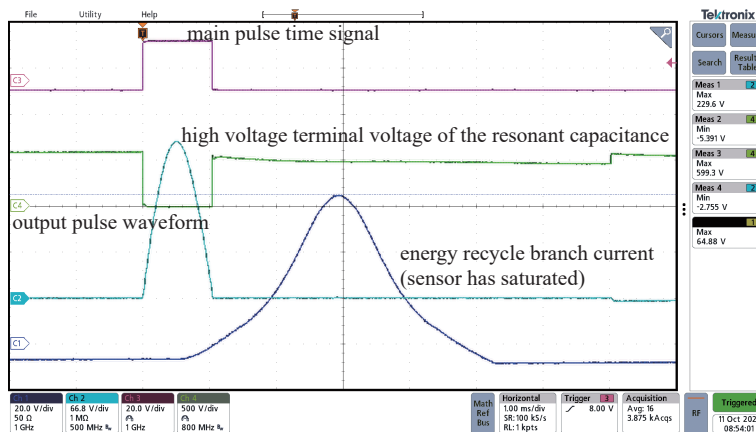


Fig. 4 Test waveform

图4 实验电路测试波形

考虑到输出脉冲相对较慢(1 ms底宽),监测单元选用组内自研的300 A DCCT即可满足测试需求。但是对于能量回收支路而言,课题组内现有的全部可用的电流互感器(Pearson品牌)均出现饱和,故通道1测试结果失真(仅波形畸变,不影响峰值电流值及回收支路波形底宽)。从图4可以清晰看到,谐振电容能量得到了及时的补充(通道4)。输出脉冲波形(通道2)与仿真结果一致,得到明显改善。此外,利用热成像仪观测可以看到充电电阻发热量明显变小,并且根据高压电源面板读数可以直观看到输出功率极大降低。

3 样机搭建及性能验收

3.1 电路设计及样机搭建

在上述实验基础之上,增加了一套时钟控制单元完成对两路驱动信号的精密控制^[15]。同时,强弱电区域功率器件驱动的有效隔离亦非常重要。此外,借鉴直流磁铁电源母线电容连接方法,将双层印制电路板(PCB)用作“叠层母排”对全部二极管进行布局连接,降低了二极管与散热片连接的难度、极大地节省了空间。电路原理如图5所示。

3.2 样机性能验收

样机研制完成后,用于真实负载(凸轨磁铁)的磁场测量。同时,在磁测过程中,进行各项性能指标的验收,具体参数如表1所示。

测试结果见图6,其中,输出脉冲底宽控制在1 ms以内,连续运行近2 h的峰值电流稳定度小于 $\pm 0.165\%$,此外,

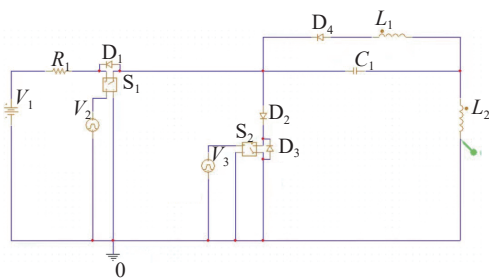


Fig. 3 Energy recovery simulation

图3 能量回收模型仿真

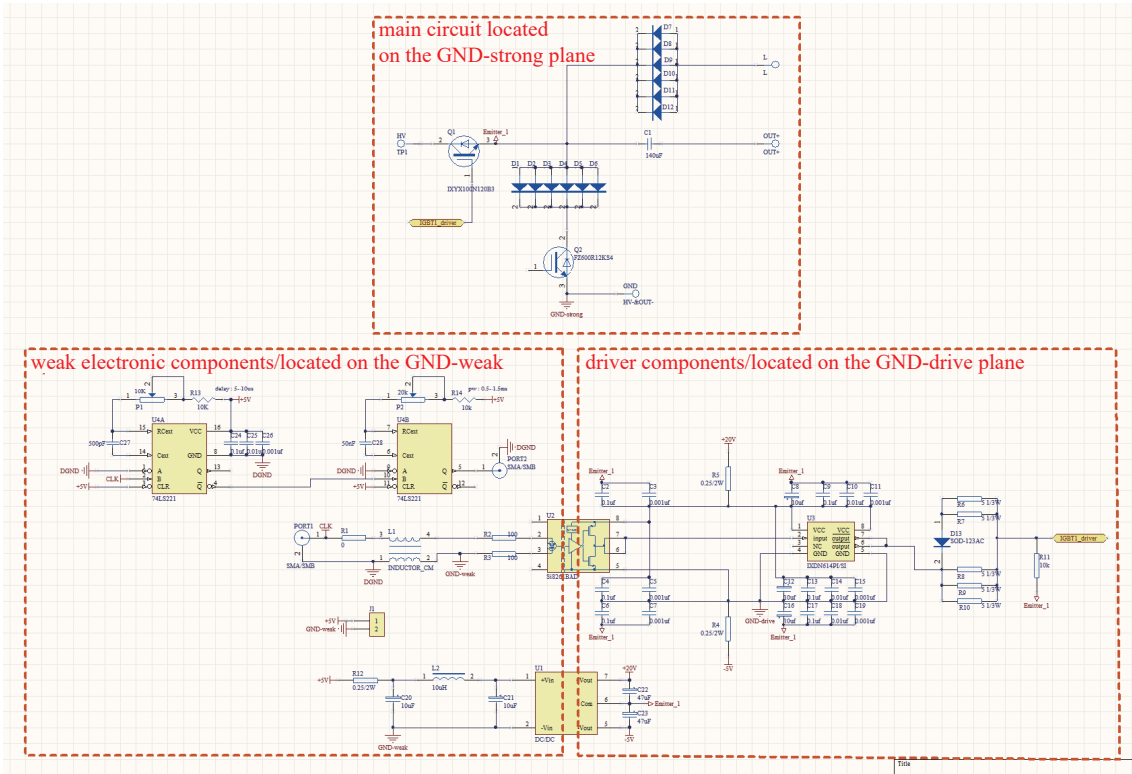


Fig. 5 Final circuit schematic

图 5 电路原理图

表 1 凸轨磁铁脉冲电源设计参数

Table 1 Design parameters of the pulsed power supply

output pulse bottom width@3%/ms	inductance of bumper magnet/mH	inductance of cable/ μ H	peak current/A	flatness of peak current/ns	stability of peak current	uniformity of waveform	frequency/Hz
≤ 1	0.66	≤ 40	≥ 212.5	≥ 10.3	$\pm 0.3\%$	5%	50

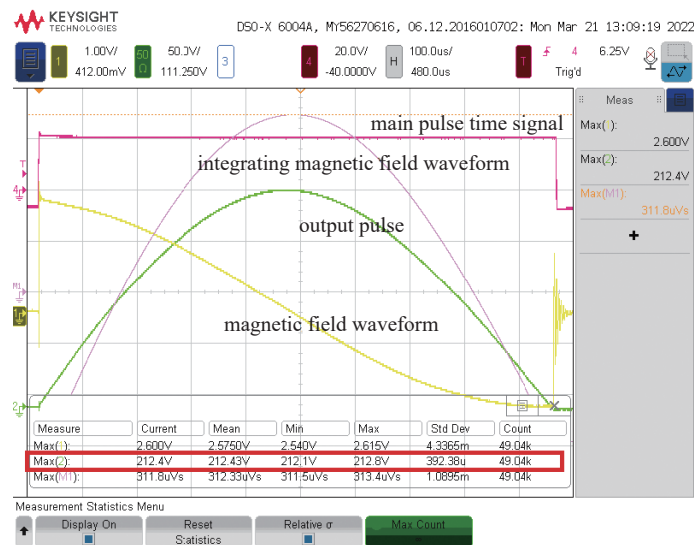


Fig. 6 Performance test

图 6 性能验收测试波形

峰值电流 212 A 时充电电源还有至少四分之一裕量, 可供后期实际调束阶段灵活调配, 10.3 ns 的峰值平坦度对于 1 ms 底宽的半正弦脉冲亦不是问题, 各项指标均满足设计要求。

4 线缆选择

为了方便后期检修, 减少设备运行维护时间, 提高机器运行效率, 全部脉冲电源均置于隧道外部。为此, 需要

使用至少 40 m 传输电缆。但是对于 LC 谐振方案来说, 整个回路寄生参数的大小会直接影响输出性能, 尤其是引入的寄生电感。使用射频同轴电缆, 不仅可以有效降低寄生电感, 还能够准确估算电感量 (250 nH/m), 并且在电感铺设过程中不需要特别注意走线方式。但是, 屏蔽层需要作为一根“电缆”与磁铁相连, 其阻抗相对较大。这在一定程度上会影响半正弦波形的形状, 更致命的是此时回路阻抗过高, 会增加充电电源输出需求, 对于当前工作条件, 给物理调束预留的提升空间过小, 甚至无法获得额定峰值电流。使用 SYV 50-12 射频同轴电缆进行测试可以看到, 一方面输出波形畸变明显; 另一方面, 获得额定峰值电流时, 充电电源输出电压已达到 670 V, 接近其极限输出, 裕量偏小。对此, 使用 2 根同轴电缆并联的方式可以解决上述问题, 但线缆较硬, 磁铁较小, 实际连接时操作十分困难, 对于后期维护极其不利。

为此, 专门订制了一种特殊的双绞带屏蔽的传输电缆, 测试过程中, 550 V 充电电压即可获取 212 A 峰值电流, 脉冲底宽 960 ns, 反推此时电缆引入的寄生电感约 7 μ H/50 m, 满足要求。此外, 对电缆铺设方式进行充分测试, 输出脉冲波形基本一致, 寄生电感几乎不变。

5 结 论

本文基于 LC 谐振方案, 完成了 HEPS 增强器凸轨磁铁脉冲电源的自主研制与性能测试, 并在此基础上对传统结构进行优化改进。能量回收支路的利用同样可以推广到系统内其他脉冲电源的研制当中。经过多次结构修改, 正式样机已制作完成, 同时, 新型电缆的联合研制使脉冲电源具备了隧道外工作的条件, 极大地缩短了后期运行维护的时间。最终, 全部性能指标均满足物理设计需求。

参考文献:

- [1] 焦毅, 潘卫民. 高能同步辐射光源[J]. *强激光与粒子束*, 2022, 34: 104002. (Jiao Yi, Pan Weimin. High Energy Photon Source[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2022, 34: 104002)
- [2] Xu G, Cui X H, Duan Z, et al. Progress of lattice design and physics studies on the High Energy Photon Source[C]//Proceedings of the 9th International Particle Accelerator Conference. 2018: 1375-1378.
- [3] Xu Gang, Chen Jinhui, Duan Zhe, et al. On-axis beam accumulation enabled by phase adjustment of a double-frequency RF system for diffraction-limited storage rings[C]//Proceedings of IPAC2016. 2016: 2032-2035.
- [4] Chen J H, Shi H, Wang L, et al. Strip-line kicker and fast pulser R&D for the HEPS on-axis injection system[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2019, 920: 1-6.
- [5] Chen J H, Shi H, Wang L. Fast kicker and pulser R&D for the HEPS on-axis injection system[C]//Proceedings of the 9th International Particle Accelerator Conference. 2018: 2846-2849.
- [6] Li J Y, Dong H Y, Duan Z, et al. Conceptual design of HEPS injector[C]//Proceedings of the 9th International Particle Accelerator Conference. 2018: 1394-1397.
- [7] 焦毅, 白正贺. 第四代同步辐射光源物理设计与优化[J]. *强激光与粒子束*, 2022, 34: 104004. (Jiao Yi, Bai Zhenghe. Physics design and optimization of the fourth-generation synchrotron light sources[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2022, 34: 104004)
- [8] 王震宇. 电路分析[M]. 北京: 科学出版社, 2006. (Wang Zhenyu. *Circuit analysis*[M]. Beijing: Science Press, 2006)
- [9] 清华大学电力系高电压技术专业. 冲击大电流技术[M]. 北京: 科学出版社, 1978. (High Voltage Technology Major in the Department of Electric Power at Tsinghua University. *High impulse current technology*[M]. Beijing: Science Press, 1978)
- [10] 游海龙, 张金力, 王鹏, 等. 电子线路 EDA 上机实验指导: 基于 Cadence/PSpice 17[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2019. (You Hailong, Zhang Jinli, Wang Peng, et al. *Electronic circuit EDA computer experiment guidance: based on Cadence/PSpice 17* [M]. Xi'an: Xidian University Press, 2019)
- [11] 张东辉, 毛鹏, 徐向宇. PSpice 元器件模型建立及应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2017. (Zhang Donghui, Mao Peng, Xu Xiangyu. *PSpice component model resume and application*[M]. Beijing: China Machine Press, 2017)
- [12] 乔汉青, 樊亚军, 夏文锋, 等. 时基反馈控制的 Tesla 变压器初级电源[J]. *强激光与粒子束*, 2018, 30: 085005. (Qiao Hanqing, Fan Yajun, Xia Wenfeng, et al. Time-base feedback controlled primary source of Tesla transformer[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2018, 30: 085005)
- [13] 许建军, 常安碧, 夏世维, 等. 新型高功率高重复频率脉冲电源研制[J]. *高电压技术*, 2003, 29(7): 43-44,53. (Xu Jianjun, Chang Anbi, Xia Shiwei, et al. Development of new type high power and high repetition rate pulse power supply[J]. *High Voltage Engineering*, 2003, 29(7): 43-44,53)
- [14] Wang Limin, Su Jianchang, Peng Jianchang, et al. Applications of series resonant power supply in Tesla transformer[C]//Proceedings of the 17th International Conference on High Power Particle Beams (BEAMS). 2008: 1-3.
- [15] Liu Peng, Chen Jinhui, Wang Guanwen. A high stability high voltage power supply design for HEPS injection system[J]. *Radiation Detection Technology and Methods*, 2021, 5(4): 564-569.