·粒子束及加速器技术·研究快报·

高能同步辐射光源直线加速器初期调束取得重要进展*

孟 才[1,2]， 曹建社[1,2]， 何大勇[1,2]， 何 平[1,2]， 焦 毅[1,2]， 康 玲[1,2]， 康 文[1,2]，
李 健[1,2]， 李京祎[1,2]， 林国平[1,2]， 龙锋利[1,2]， 齐 欣[1,2]， 屈化民[1,2]，
宋 洪[1]， 随艳峰[1,2]， 王 生[1,2]， 徐 刚[1,2]， 叶 强[1]，
张 旌[1,2]， 张敬如[1,2]， 潘卫民[1,2]

（1. 中国科学院 高能物理研究所，北京 100049； 2. 中国科学院大学，北京 100049）

摘 要： 高能同步辐射光源（HEPS）是中国第一台第四代高能同步辐射光源，其加速器由直线加速器、增强器、储存环及输运线组成。报道了 HEPS 直线加速器的初期束流调试重要进展。HEPS 直线加速器是一台 500 MeV S 波段常温直线加速器，由热阴极电子枪、聚束系统、主直线加速器构成。在按时完成设备加工、安装和老练的基础上，于 2023 年 3 月 9 日启动束流调试，当天实现束流全线贯通。3 月 14 日束流能量达到 500 MeV，束团电荷量达到 2.5 nC。经过测量，直线加速器出口束流能散 0.4%，能量稳定度 0.06%，水平和垂直几何发射度分别为 233 nm 和 145 nm。目前直线加速器束团电荷量可达到 7.0 nC，相关束流调试正在进行。

关键词： HEPS 直线加速器；高能同步辐射光源；束流调试；束流能量；束团电荷量

中图分类号： TL53 **文献标志码：** A **doi:** 10.11884/HPLPB202335.230061

Progress of the first-stage beam commissioning of High Energy Photon Source Linac

Meng Cai[1,2]， Cao Jianshe[1,2]， He Dayong[1,2]， He Ping[1,2]， Jiao Yi[1,2]， Kang Ling[1,2]， Kang Wen[1,2]，
Li Jian[1,2]， Li Jingyi[1,2]， Lin Guoping[1,2]， Long Fengli[1,2]， Qi Xin[1,2]， Qu Huamin[1,2]，
Song Hong[1]， Sui Yanfeng[1,2]， Wang Sheng[1,2]， Xu Gang[1,2]， Ye Qiang[1]，
Zhang Jing[1,2]， Zhang Jingru[1,2]， Pan Weimin[1,2]

（1. *Institute of High Energy Physics*, *Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100049, *China*;
2. *University of Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100049, *China*）

Abstract: The High Energy Photon Source (HEPS) is the first fourth-generation synchrotron radiation source that will operate in high energy region in China. The HEPS accelerator consists of a linear accelerator, a booster, a storage ring and three transfer lines. This paper presents important progress on the HEPS Linac. The 500 MeV Linac has been constructed using S-band normal conducting structures, including a thermionic cathode electron gun, beam bunching system, and main accelerating section. After completing the equipment installation and high-power RF conditioning, the beam commissioning was started on March 9, 2023. The beam was successfully transferred to the end of the Linac on the same day, and a beam with 500 MeV of energy and 2.5 nC of pulse charge was achieved within 5 days. As measured up to date at the Linac exit, the beam energy spread and energy stability are 0.4% and 0.06% respectively, and the horizontal and vertical geometric emittances are 233 nm and 145 nm, respectively. The maximum bunch charge reaches up to 7.0 nC. Further beam commissioning will be implemented to gain full performance of the Linac.

Key words: HEPS Linac, High Energy Photon Source, beam commissioning, beam energy, bunch charge

* **收稿日期:** 2023-03-24； **修订日期:** 2023-04-01
基金项目: 中国科学院青年创新促进会项目（2019016）
联系方式: 孟 才，mengc@ihep.ac.cn。
通信作者: 焦 毅，jiaoyi@ihep.ac.cn;
李京祎，jingyili@ihep.ac.cn;
潘卫民，panwm@ihep.ac.cn。

高能同步辐射光源(High Energy Photon Source, HEPS)是国家重大科技基础设施建设“十三五”规划确定建设的 10 个重大基础设施之一，是中国第一台第四代高能同步辐射光源项目[1]。HEPS 电子能量 6 GeV，流强 200 mA，水平自然发射度低于 60 pm·rad，可提供能量达 300 keV 的 X 射线，在典型硬 X 射线波段的同步辐射亮度达 1×10^{22} $\mathrm{phs{\cdot}s^{-1}{\cdot}mm^{-2}{\cdot}mrad^{-2}{\cdot}(0.1\%BW)^{-1}}$[2]。HEPS 从 2019 年 6 月启动建设，计划建设周期 6.5 年，建成后将成为世界上亮度最高的第四代同步辐射光源之一，也将是我国第一台高能区同步辐射光源。它将和我国现有的光源形成能区互补，为多维度、实时、原位解析微观物质结构生成及其演化机制提供强大的支撑，成为探索物质内部结构与变化过程的强有力的科学工具。

HEPS 主要由加速器、光束线和实验站及相关配套设施组成[1]，如图 1 所示。HEPS 加速器由一台 500 MeV 直线加速器[3]、一条低能输运线[4]、一台全能量增强器[5]、一台 6 GeV 储存环[6] 和两条高能输运线[4] 组成。为满足超低发射度储存环的注入需求，采用在轴置换注入[7]，这种注入方式需要由注入器一次性提供束团所需电荷量。特别是基于核共振散射的 X 射线量子光学等前沿研究需要储存环填充约 15 nC 的高电荷量束团，这给注入器设计带来了极大挑战。为了应对该挑战，将增强器设计为同时具备束流加速和高能累积的功能[8]，并采用高单束团电荷量的直线加速器设计。

Fig. 1 High Energy Photon Source Linac

图 1 高能同步辐射光源直线加速器

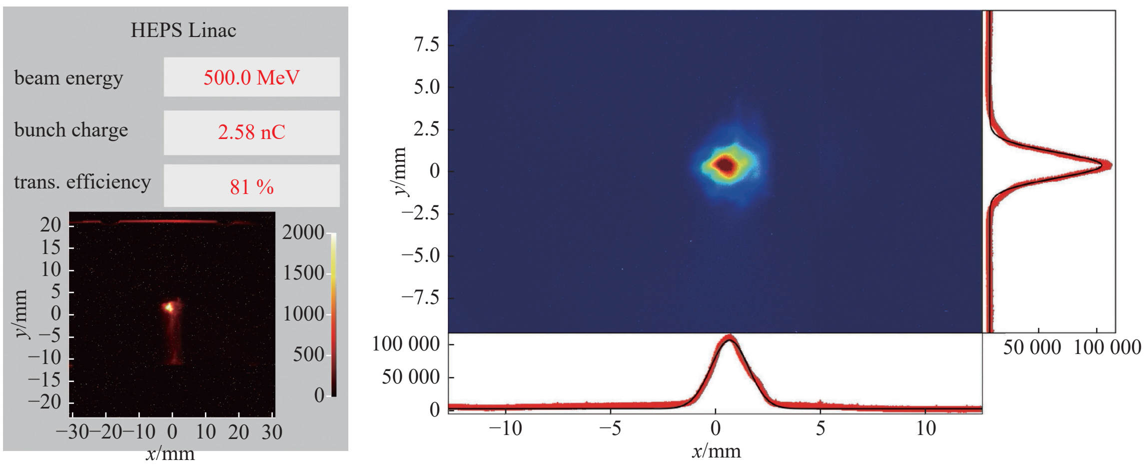
直线加速器[3] 采用 S-band 常温加速技术，由热阴极电子枪[9]、聚束系统[10] 和主直线加速器构成。在物理设计上，通过采用次谐波腔、预聚束器、聚束器和常规加速结构相结合的聚束系统，使直线加速器出口处的单束团电荷量可达 7 nC，在国际同类光源直线型(预)注入器中单束团电荷量最高。在技术创新方面，研发了采用弧形腔、内水冷结构、对称式耦合器的 3 m 长 S-band 高梯度加速结构，测试极限加速梯度达到 33 MV/m；研发了基于 IGBT 的固态调制器，脉冲重复稳定度优于 0.02%；研发了长寿命、高发射能力的阴栅组件，可发射半高宽 1 ns、大于 10 nC 的电子脉冲。此外，自主开发了调束软件基础架构 Pyapas[11]，具有面向物理、可扩展等特点，并包含功能完备的物理调束软件工具包。

HEPS 直线加速器于 2022 年 3 月 8 日开始批量设备安装，5 月 12 日实现全线真空封接[12]，9 月 23 日完成高功率老练。束流调试于 2023 年 3 月 9 日开始启动。当天上午 10:28 电子枪出束，12:15 束流到达直线加速器末端能量分析线中的废束站，实现束流全线贯通。3 月 14 日，直线加速器末端束团电荷量达到 2.5 nC。经过束流测量，束流能散为 0.4%，能量稳定度为 0.06%，水平、垂直几何发射度分别为 233 nm 和 145 nm。随后进行了高束团电荷量测试，直线加速器出口电荷量大于 7 nC(见表 1)。初步调束测试结果如图 2 所示，相关束流调试正在进行。

表 1 直线加速器参数

Table 1 Linac parameters

parameter unit	beam energy/MeV	maximum pulse charge/nC	beam energy spread/%	emittance(horizontal/vertical)/(nm·rad)
design value	500	7.0	0.5	70
measured value	500.0±0.3	7.2	0.4(@2.5 nC)	233/145(@2.5 nC)



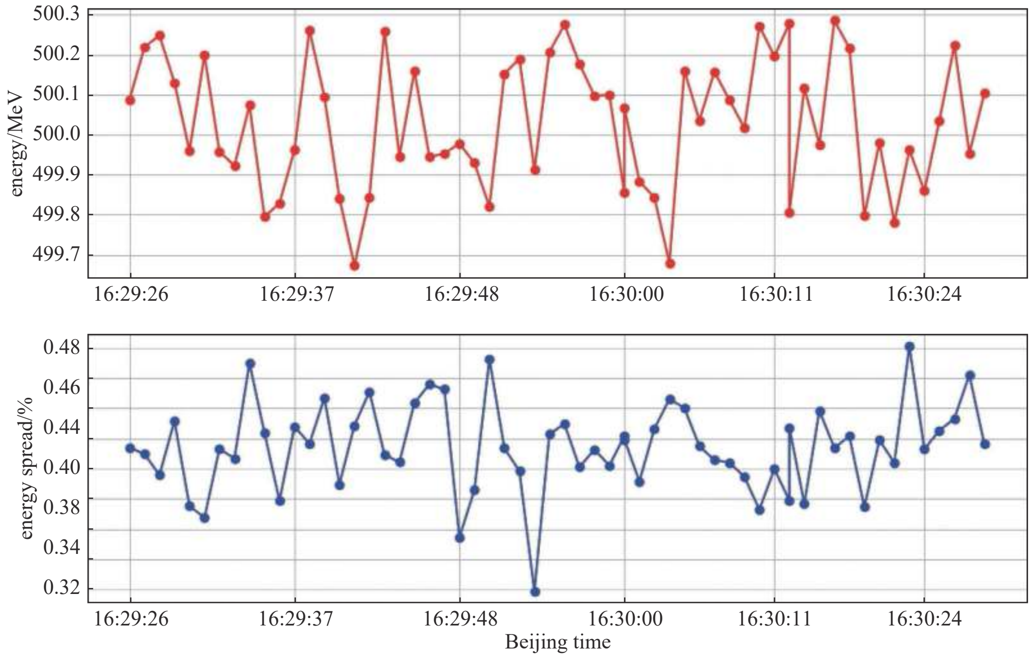


Fig. 2　First-stage commissioning results of the HEPS Linac

图 2　HEPS 直线加速器初步调束结果

HEPS 直线加速器初期调束进展顺利，验证了物理设计的可行性，表明硬件系统的性能满足设计要求。后续将在此基础上继续优化参数和提升性能，以全面达到设计指标。这是 HEPS 装置建设的一个重要里程碑。HEPS 进入科研设备安装、调束并行阶段。

致　谢　感谢所有参与 HEPS 直线加速器设计、建设、调试的 HEPS 团队成员。

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] Jiao Yi, Xu Gang, Cui Xiaohao, et al. The HEPS project[J]. Journal of Synchrotron Radiation, 2018, 25(6): 1611-1618.

[3] Meng Cai, He Xiang, Jiao Yi, et al. Physics design of the HEPS LINAC[J]. Radiation Detection Technology and Methods, 2020, 4(4): 497-506.

[4] Guo Yuanyuan, Wei Yuanyuan, Peng Yuemei, et al. The transfer line design for the HEPS project[J]. Radiation Detection Technology and Methods, 2020, 4(4): 440-447.

[5] Peng Yuemei, Duan Zhe, Guo Yuanyuan, et al. Design of the HEPS booster lattice[J]. Radiation Detection Technology and Methods, 2020, 4(4): 425-432.

[6] Jiao Yi. Latest physics design of the HEPS accelerator[J]. Radiation Detection Technology and Methods, 2020, 4(4): 399.

[7] Duan Zhe, Chen Jinhui, Guo Yuanyuan, et al. The swap-out injection scheme for the high energy photon source[C]//Proceedings of the 9th International Particle Accelerator Conference. 2018.

[8] Peng Y M, Duan Zhe, Guo Yuanyuan, et al. Status of HEPS booster lattice design and physics studies[C]//Proceedings of 9th International Particle Accelerator Conference. 2018.

[9] Wang Shengchang, He Dayong, Meng Cai, et al. Development and simulation of a gridded thermionic cathode electron gun for a high-energy photon source[J]. Nuclear Science and Techniques, 2023, 34: 39.

[10] Zhang Shipeng, Wang Shengchang, Cai Meng, et al. The physics design of HEPS Linac bunching system[J]. Radiation Detection Technology and Methods, 2020, 4(4): 433-439.

[11] Lu Xiaohan, Ye Qiang, Ji Hongfei, et al. Status of high level application development for HEPS[C]//Proceedings of the 18th International Conference on Accelerator and Large Experimental Physics Control Systems. 2021.

[12] Meng Cai, Gan Nan, He Dayong, et al. Development progress of HEPS LINAC[C]//Proceedings of the 13th International Particle Accelerator Conference. 2022.