

强激光与粒子束

High Power Laser and Particle Beams

硬X射线自由电子激光装置聚束器低电平控制研究

张志刚 杨文峰 蒋鸿儒 徐凯 黄雪芳 余悦超 武海龙 吴宏 常强 郑湘 赵玉彬

Study on low-level control of buncher in hard X-ray free electron laser facility

Zhang Zhigang, Yang Wenfeng, Jiang Hongru, Xu Kai, Huang Xuefang, Yu Yuechao, Wu Hailong, Wu Hong, Chang Qiang, Zheng Xiang, Zhao Yubin

引用本文:

张志刚, 杨文峰, 蒋鸿儒, 徐凯, 黄雪芳, 余悦超, 武海龙, 吴宏, 常强, 郑湘, 赵玉彬. 硬X射线自由电子激光装置聚束器低电平控制研究[J]. *强激光与粒子束*, 2025, 37: 094001. doi: 10.11884/HPLPB202537.250106

Zhang Zhigang, Yang Wenfeng, Jiang Hongru, Xu Kai, Huang Xuefang, Yu Yuechao, Wu Hailong, Wu Hong, Chang Qiang, Zheng Xiang, Zhao Yubin. Study on low-level control of buncher in hard X-ray free electron laser facility[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2025, 37: 094001. doi: 10.11884/HPLPB202537.250106

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11884/HPLPB202537.250106>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

1.3 GHz连续波超导射频腔的数字低电平射频系统和腔模拟器设计及测试

Digital low-level radio frequency system and cavity simulator for 1.3 GHz continuous-wave superconducting radio-frequency cavity
强激光与粒子束. 2024, 36: 084005-1-084005-10 <https://doi.org/10.11884/HPLPB202436.230325>

超导腔数字自激垂直测试系统

Digital self-excited vertical test system of superconducting cavity
强激光与粒子束. 2020, 32: 045106-1-045106-6 <https://doi.org/10.11884/HPLPB202032.190320>

HIRFL-CSRE 脉冲堆积式高频数字低电平系统

Barrier bucket digital low level RF system in HIRFL-CSRe
强激光与粒子束. 2021, 33: 044004-1-044004-9 <https://doi.org/10.11884/HPLPB202133.200357>

上海软X射线自由电子激光装置直线加速器束流位置测量系统研制

Design of stripline beam position monitor for Shanghai soft X-ray free electron laser
强激光与粒子束. 2021, 33: 054003-1-054003-6 <https://doi.org/10.11884/HPLPB202133.210015>

高重频自由电子激光装置电源控制系统的研制

Development of a control system for power supplies in a high repetition rate X-ray free electron laser facility
强激光与粒子束. 2025, 37: 035020-1-035020-6 <https://doi.org/10.11884/HPLPB202537.240423>

基于MTCA的HLS-II直线加速器低电平系统改造

Upgrade of low level RF system based on Micro Telecom Computing Architecture (MTCA) for HLS-II LINAC
强激光与粒子束. 2020, 32: 084006-1-084006-5 <https://doi.org/10.11884/HPLPB202032.200080>



·粒子束及加速器技术·

硬 X 射线自由电子激光装置聚束器低电平控制研究

张志刚, 杨文峰, 蒋鸿儒, 徐 凯, 黄雪芳, 余悦超, 武海龙,
吴 宏, 常 强, 郑 湘, 赵玉彬

(中国科学院 上海高等研究院, 上海 201800)

摘 要: 硬 X 射线自由电子激光装置 (SHINE) 中常温 L 波段聚束器在电子束团进行压缩过程中发挥了关键作用, 有效提升了束流品质, 满足了 SHINE 对低发射度和低能散的注入要求。由于聚束器采用了 2-cell 的设计, 特研制了一套数字化低电平控制系统。该系统基于 FPGA 板卡和上下变频板卡的架构, 采用 I/Q 解调技术, 集成了幅度相位反馈、频率调谐及场平坦度多电机协调控制功能。在 10 kW 连续波运行中, 聚束器腔压的幅度稳定度 (peak-to-peak) 由开环的 $\pm 0.17\%$ 提高到闭环的 $\pm 0.03\%$, 相位稳定度 (peak-to-peak) 控制在 $\pm 0.05^\circ$ 以内, 场平坦度保持在 $\pm 2\%$ 以内, 满足了设计指标要求。此外, 还提出了一种基于模拟数字转换 (ADC) 采集的射频信号功率校准方法, 与功率计对比, 实测误差在 $\pm 2\%$ 以内, 验证了该方法的可行性, 为射频功率标定提供了一种可选方案。

关键词: X 射线自由电子激光; 数字低电平; 聚束器; 腔压稳定度; 功率校准

中图分类号: TL506

文献标志码: A

doi: [10.11884/HPLPB202537.250106](https://doi.org/10.11884/HPLPB202537.250106)

Study on low-level control of buncher in hard X-ray free electron laser facility

Zhang Zhigang, Yang Wenfeng, Jiang Hongru, Xu Kai, Huang Xuefang, Yu Yuechao,
Wu Hailong, Wu Hong, Chang Qiang, Zheng Xiang, Zhao Yubin

(Shanghai Advanced Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

Abstract: [Background] In the hard X-ray free electron laser (Shanghai high repetition rate XFEL and extreme light facility, SHINE), the normal-conducting L-band buncher plays a critical role in the compression of electron bunches, significantly improving beam quality and meeting the stringent injection requirements of low emittance and low energy spread. [Purpose] Due to its 2-cell structure, a dedicated digital low-level RF control system was developed. [Methods] This system, based on an architecture comprising FPGA and RF front-end boards, and adopts I/Q demodulation techniques. It incorporates amplitude and phase feedback, frequency tuning, and multi-motor coordination for field flatness control. [Results] During 10 kW continuous-wave (CW) operation, the amplitude stability (peak-to-peak) improved from $\pm 0.17\%$ in open-loop mode to within $\pm 0.03\%$ under closed-loop mode, while the phase stability (peak-to-peak) was controlled within $\pm 0.05^\circ$, and field flatness was maintained within $\pm 2\%$, fully meeting design specifications. Additionally, a radio-frequency (RF) power calibration method based on ADC acquisition of LLRF was proposed. [Conclusions] Experimental results showed calibration error was within $\pm 2\%$ when compared with a power meter, demonstrating reliability of this method as an alternative solution for RF power calibration.

Key words: X-ray free electron laser, digital low-level radio frequency, buncher, cavity voltage stability, power calibration

硬 X 射线自由电子激光装置 (SHINE) 的工程目标是建设一台能量为 8 GeV 的超导直线加速器, 采用四级加速、三级磁压缩实现大于 1.5 kA 的峰值流强, 配备 2 条波荡器线、2 条光束线和 6 个实验站。SHINE 装置具有更高

* 收稿日期: 2025-04-29; 修订日期: 2025-07-25

基金项目: 国家大科学装置项目

联系方式: 张志刚, zhangzg@sari.ac.cn。

通信作者: 赵玉彬, zhaoyubin@sari.ac.cn。

的光子通量、更短的脉冲结构和更优的相干性,将为高分辨成像、极端条件研究等领域提供稳定可靠的光源支撑。注入器是 SHINE 直线加速器的重要前端系统,负责产生并初步加速电子束,为后续高品质的束流传输和加速奠定基础。注入器关键设备包括:光阴极常温连续波甚高频(VHF)电子枪,用于产生高重复频率、高亮度的电子束团;常温 L 波段聚束器,实现电子束团纵向压缩,显著提升束流品质,满足低发射度和低能散要求;单腔和八腔超导加速模组,工作在 2 K 液氦环境下,承担进一步加速任务。其中,聚束器在压缩电子束长度、降低纵向发射度方面起到关键作用,为此,研发了基于 FPGA 和上下变频架构的数字化技术的低电平控制系统,实现射频场调控功能。

在 SHINE 中,聚束器采用双腔结构设计,相较于传统单腔结构,在能效和热管理方面具有显著优势。一方面,双腔结构可有效降低腔体功耗至单腔的一半,减轻对固态功率放大器的输出要求,契合国家节能减排的技术路线;另一方面,降低了单位体积的热功率密度,简化了冷却系统设计,提高了聚束器运行的稳定性和可靠性。为满足双腔结构的调控需求,SHINE 聚束器在每腔均配备高精度步进电机,用于实现谐振频率的实时跟踪与场平坦度的均衡。这对低电平控制系统提出了更高的要求:不仅需要具备加速场幅度和相位的反馈控制功能,还需要具有频率和场平坦度的多电机协调控制特性。针对上述需求,研发了基于 FPGA 架构的数字化低电平控制系统,其具备实时性和可编程性,能够实现复杂控制策略。国际上,美国 LCLS-II 自由电子激光项目装置同样采用基于现场可编程逻辑门阵列(FPGA)的自激环路控制方案^[1-2],具有高实时性和灵活性。欧洲自由电子激光装置(XFEL)和日本 Spring-8 同步辐射装置则采用基于 Micro TCA 平台的模块化控制系统^[3-5],便于系统扩展与维护。此外,国内上海同步辐射装置(SSRF)在储存环高频及增强器高频控制中也采用基于 FPGA 硬件平台设计的反馈控制^[6-9]方案,其高精度和高稳定性为 SHINE 系统设计提供了技术支撑。

SHINE 常温 L 波段聚束器系统是一个复杂的射频系统(如图 1 所示),主要由聚束器(buncher)、固态功率源(SSA)、环形器(circulator)、传输波导(waveguide)、低电平控制器(LLRF)、马达驱动器(motor driver)及配套的水电工艺设施构成,各设备的简要功能作用介绍如表 1 所示。

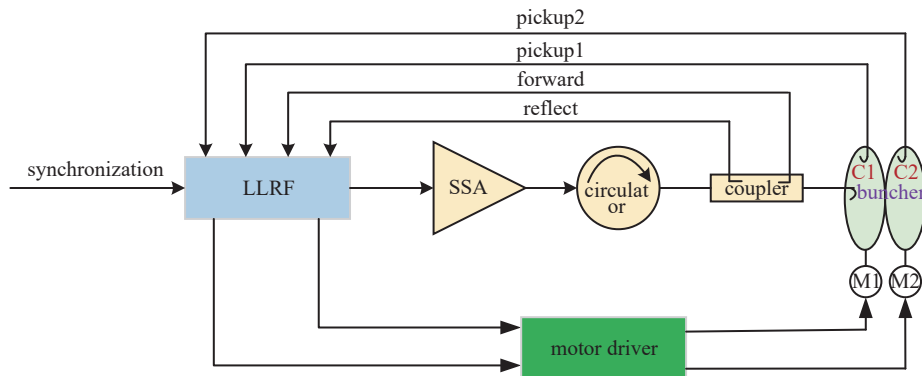


Fig. 1 Block diagram of RF system at SHINE buncher (LLRF: low-level radio frequency; SSA: solid-state amplifier)

图 1 SHINE 常温 L 波段聚束器系统框图 (LLRF: 低电平控制; SSA: 固态功率源)

表 1 SHINE 常温 L 波段聚束器系统设备功能简介

Table 1 Equipment function of SHINE buncher

equipment	function
buncher	compressed electron beam, reduce the beam emittance and energy spread
LLRF	control the RF field
SSA	amplify the RF power
motor driver	tune the resonance and field flatness
circulator	isolate the RF power from the buncher

在硬 X 射线自由电子激光装置中,工程设计对聚束器低电平控制的需求参数如表 2 所示。

表 2 SHINE 注入器聚束器低电平技术指标

Table 2 Parameters of LLRF for SHINE buncher

operation mode	frequency/MHz	quantity of feeding	amplitude stability(RMS)/%	phase stability(RMS)/(°)
continuous wave	1 300	single	0.02	0.02

1 关键设备等效分析

如图 1 所示, SHINE 常温 L 波段聚束器系统主要由聚束器、固态功率源、环形器和低电平控制器等关键设备构成。固态功率源存在非线性特性, 其输出信号在高功率区域可能出现幅度压缩和相位失真, 影响系统的幅度与相位稳定性。而聚束器为双腔结构设计, 对场强的控制提出更高要求。

固态放大器 (SSA) 是射频系统中重要设备之一, 其自身的非线性可能引起输出信号的幅度和相位失真, 进而影响系统的稳定性。为分析 SSA 的输入与输出信号的传输特性, 构建数学模型如图 2 所示, 功率传输关系可由公式 (1) 和 (2) 表示, 其中 $X_i(t)$ 、 $X_o(t)$ 分别表示放大器的输入和输出信号, $\rho(t)$ 、 $\varphi(t)$ 为输入射频信号的幅度和相位, 随时间缓慢变化。

SSA 的非线性可通过幅度和相位特性函数 $A[\rho(t)]$ 和 $\Phi[\rho(t)]$ 分别建模, 详见公式 (3) 和 (4) 表示, 对应固态放大器的幅度调制到幅度调制 (AM/AM)、幅度调制到相位调制 (AM/PM) 特性曲线。在线性区内, AM/PM 几乎为零, 输出信号相位基本不受输入信号幅度变化而变化; 而在非线性区域内, 输入信号幅度的变化会引起输出信号相位的附加相移。综合考虑 SSA 在实际运行中可能引入的幅度噪声和相位噪声, 可使用图 2^[9-12] 所示的等效模型对其进行近似描述, 该模型广泛应用于加速器射频系统的性能分析与补偿控制设计中。

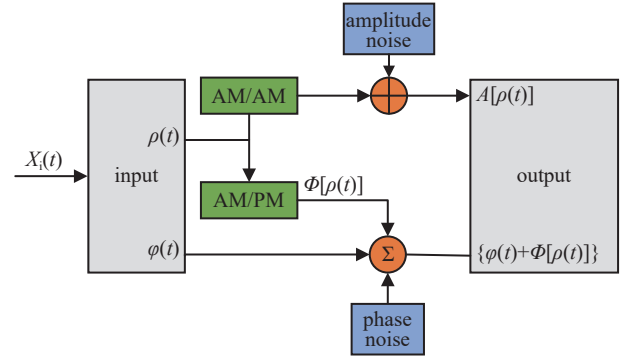


Fig. 2 Equivalent model of solid-state amplifier

图 2 固态放大器等效模型

$$X_i(t) = \rho(t) \exp[j\varphi(t)] \quad (1)$$

$$X_o(t) = A[\rho(t)] \exp[j(\varphi(t) + \Phi[\rho(t)])] \quad (2)$$

$$A[\rho(t)] = A_{\text{sat}}^2 \frac{\rho(t)}{\rho^2(t) + A_{\text{sat}}^2} \quad (3)$$

$$\Phi[\rho(t)] = \frac{\pi}{3} \frac{\rho^2(t)}{\rho^2(t) + A_{\text{sat}}^2} \text{ (rad)} \quad (4)$$

式中: A_{sat} 为放大器的饱和输入电压。

在硬 X 射线自由电子激光装置的注入段中, 聚束器用于调制和压缩电子束, 以满足高亮度的 X 射线输出的要求。该装置采用工作于 TE_{010} 模式的驻波腔结构, 其耦合腔与主腔之间的耦合关系原理如图 3(a) 所示, 在主腔和耦合腔上都部署了电机组件进行频率调谐和场平坦度调节。对于工作于 π 模的聚束器, 从腔的角度分析可等效一个 RLC 并联电路模型^[8-9,11-14], 如图 3(b) 所示, 其中 R 、 C 和 L 是谐振腔的等效阻抗、电容和电感, I_b 是平均束流的镜像电流。

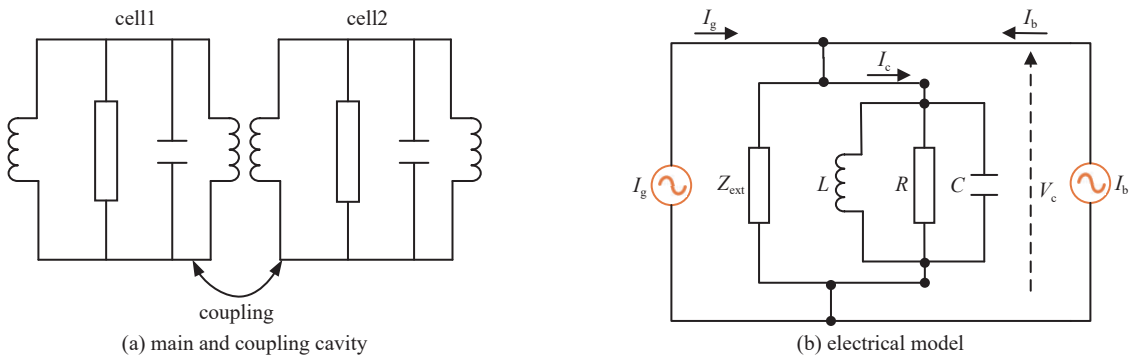


Fig. 3 Equivalent circuit of buncher

图 3 聚束器等效电路

根据诺顿等效原理及图 3(b) 所示电路模型, 可推导出聚束器的微分方程式为

$$\frac{d^2 V_c}{dt^2} + \frac{1}{R_L C} \frac{dV_c}{dt} + \frac{1}{LC} V_c = \frac{1}{C} \frac{dI}{dt} \quad (5)$$

$$R_L = R // Z_{\text{ext}} = \frac{R}{1 + R/n^2 Z_0} \quad (6)$$

$$I_c = I_g - I_b \quad (7)$$

式中: V_c 为腔压, I_b 是束流, I_g 是驱动器电流, I_c 是过分路阻抗的电流, Z_{ext} 是外部耦合阻抗, Z_0 为特性阻抗, n 为腔数量。

其关键参数如谐振频率 (f_0)、固有品质因素 (Q_0) 和分路阻抗 (R) 分别为

$$\omega_0 = 2\pi f_0 = 1/\sqrt{LC} \quad (8)$$

$$Q_0 = \omega_0 RC = R/L\omega_0 \quad (9)$$

$$R = 0.5r = 0.5(r/Q)Q_0 \quad (10)$$

式中: ω_0 为本征频率; r/Q 为单位长度的分路阻抗。

通过调节等效电路中的 R 、 L 、 C 参数, 可实现谐振频率调节、品质因素优化、阻抗匹配等关键因素的调控。

对固态功率源与聚束器的等效分析, 指出了非线性效应对输出功率的相位具有潜在影响和场强对控制需求。为满足聚束器对场强控制的高精度需求, 低电平控制系统需要具备频率调谐和场平坦度的调控功能。

2 场强控制

场强控制包含幅度相位反馈控制及频率调谐和场平坦度控制, 由于幅度相位环路控制与单 cell 场强控制原理相同, 在此不再展开论述。下文着重阐述频率调谐和场平坦度控制。

SHINE 注入段的常温聚束器为双腔结构, 每个腔体上配置一台步进电机, 即共计 2 台。针对装置在老炼阶段与调试运行阶段对控制精度提出的更高需求, 研制的数字化低电平控制器需同时实现两项重要功能: (1) 频率跟踪, 实时锁定 1.3 GHz 的同步时钟信号, 维持聚束器一直工作在谐振状态; (2) 场平衡调控, 通过调节两腔的腔场, 实现电场强度的动态平衡, 从而保证束流能量的一致性与加速效率。

在数字化低电平控制器的设计中, 频率调谐环路和场平坦度环路均基于数字正交 (IQ) 解调技术。控制器同步采集四个重要射频信号 (见图 1) 参与控制算法。频率调谐环路的目的是动态补偿由温度波动、机械变形或束流负载效应引起的谐振频率偏移, 确保加速腔在运行中始终保持与源匹配, 其工作机制为驱动两台步进电机朝相同方向运动, 从而实现动态调节双腔腔体的谐振频率, 使入射功率信号 V_{fwd} 和腔压 V_{c1} 信号之间的相位差 $\Delta\theta(V_{fwd}, V_{c1})$ 趋近于零 (见公式 (11))。而场平坦度环路则用于补偿因制造误差、热致变形或电磁耦合不均等因素导致的电场分布失衡, 通过驱动两个步进电机朝相反方向运动, 缩小两腔归一化腔压幅度差 $\Delta\text{amp}(V_{c1}, V_{c2})$ [7,9], 以实现双腔电场沿轴向的均匀分布, 确保电子束在纵向压缩过程中的对称性与稳定性。

在控制系统中, FPGA 根据聚束器的实时失谐角 $\Delta\theta(V_{fwd}, V_{c1})$ 和场平坦度腔压差比 $\Delta\text{amp}(V_{c1}, V_{c2})$, 分别产生两台步进电机的使能、方向和脉冲信号, 控制其调节动作。目的是使失谐角 $\Delta\theta(V_{fwd}, V_{c1})$ 趋近于零, 且归一化腔压差比 $\Delta\text{amp}(V_{c1}, V_{c2})$ 收敛至阈值内。以失谐角 $\Delta\theta(V_{fwd}, V_{c1})$ 为例 (见图 4), $\pm\text{Th2}$ 为电机启动阈值, $\pm\text{Th1}$ 表示停止阈值, 具体动作逻辑见表 3。场平坦度控制环路的阈值设置与电机响应机制亦类似, 均遵循图 4 和表 3 中所示的控制逻辑与条件触发关系。

$$\Delta\theta(V_{fwd}, V_{c1}) = \arctan 2(I_{fwd}, Q_{fwd}) - \arctan 2(I_{c1}, Q_{c1}), \quad (11)$$

$$\Delta\text{amp}(V_{c1}, V_{c2}) = (\sqrt{I_{c1}^2 + Q_{c1}^2} - \sqrt{I_{c2}^2 + Q_{c2}^2}) / \sqrt{I_{c1}^2 + Q_{c1}^2} \quad (12)$$

在 SHINE 的聚束器中, 数字化低电平控制器设计的调谐环路和场平坦度环路的控制流程图如图 5 所示, 系统

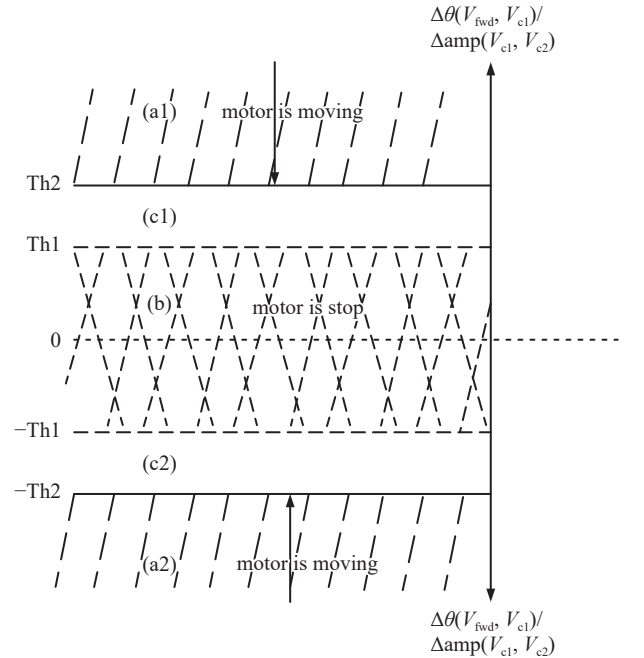


Fig. 4 Relationship between tuning thresholds and status of motor

图 4 马达运动阈值关系图

表 3 SHINE 频调环路失谐角与电机电作解析

Table 3 Analysis of the relationship between the tuning and status of motor in SHINE

area	analysis
(a1)	motor is moving
(a2)	motor is moving
(b)	motor is stopping
(c1)	1. motor is moving when changing from Th2 towards 0 within c1 2. motor is stopping when changing from 0 to Th2 within c1
(c2)	1. motor is moving when changing from -Th2 towards 0 within c2 2. motor is stopping when changing from 0 to -Th2 within c2

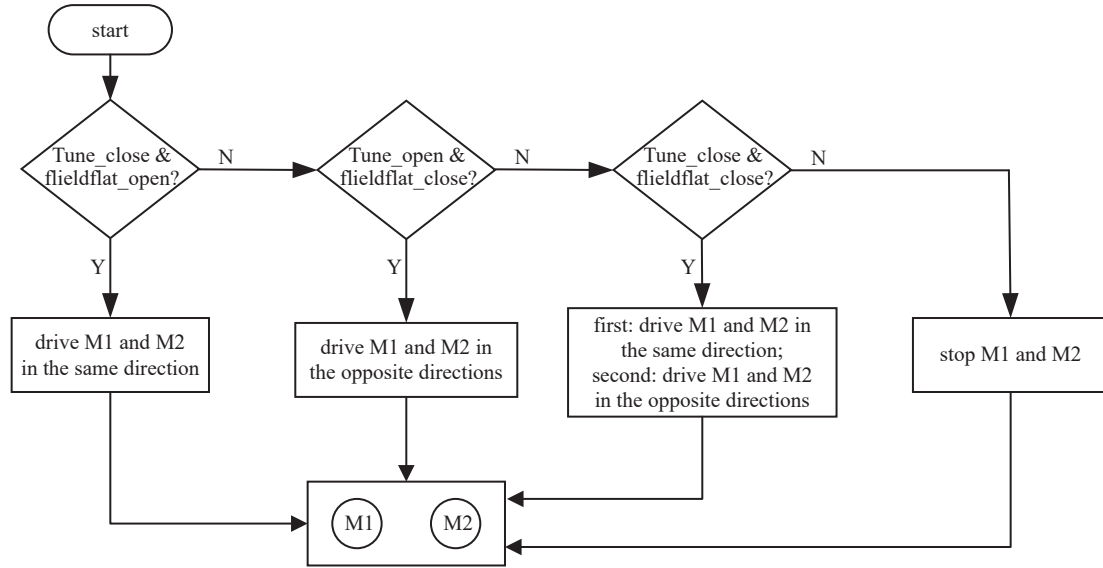


Fig. 5 Block diagram of the tuning and field flatness loops

图 5 频调环路和场平坦度环路控制流程图

依据实时采集的射频信号,在不同闭环控制模式下,驱动电机电作和方向的控制逻辑,以实现频率调谐与场分布均衡的目标。

3 运行数据分析

在 SHINE 项目中,聚束器数字化低电平控制软硬件的部署于 2024 年 8 月 13 日之前完成。随后,完成了射频信号校准、参数整定、聚束器频率调谐和场平坦度控制多电机电作逻辑验证,确保系统的性能和稳定性达到设计要求。9 月 24 日,系统顺利通过 14 kW 连续波老炼,验证了其在高功率条件下的稳定性和可靠性。于 9 月 26 日开展 10 kW 连续波闭环控制测试,幅度稳定度(peak-to-peak)由开环的 $\pm 0.17\%$ 以内提高到闭环的 $\pm 0.03\%$ 以内(见图 6 与表 4),相位稳定度(peak-to-peak)达到闭环 $\pm 0.05^\circ$ 以内(见图 7),场平坦度稳定性在 $\pm 2\%$ 以内(见图 8,调谐过程中,两个电机朝相同方向运行时会引起场平坦度的波动,但此阶段的波动幅度未达到触发场平坦度调节的阈值),完全满足设计要求,确保了射频系统在高功率运行中的稳定性和一致性;在 2024 年 12 月 22 日注入段束流性能测试验收中,系统的幅度和相位稳定性 RMS 值分别为 0.004% 和 0.006° ,均达到初步设计报告的验收指标。上述成果

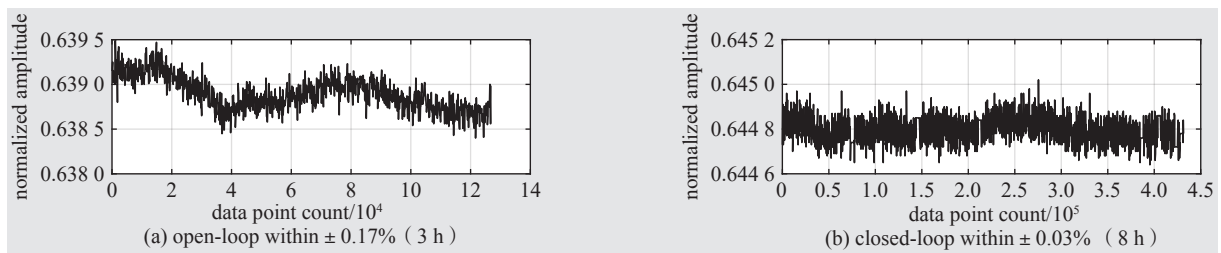


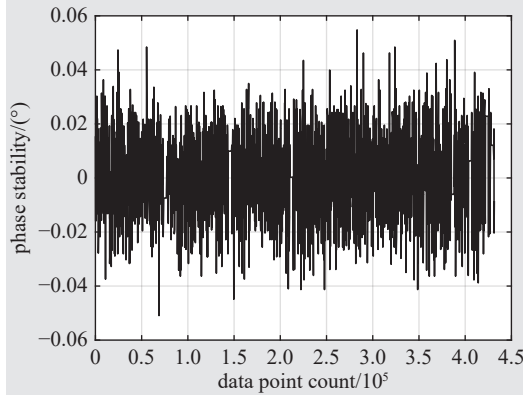
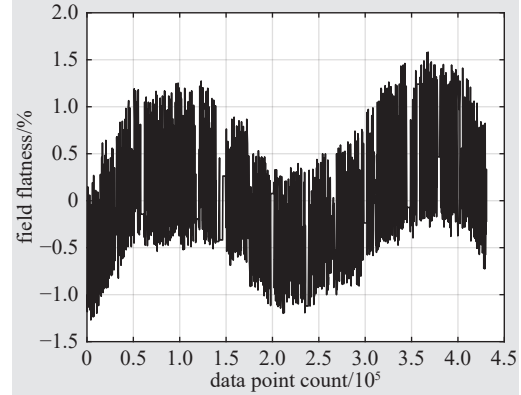
Fig. 6 Comparison of normalized amplitude stability of voltage

图 6 腔压幅度稳定性比较

表 4 聚束器幅度稳定性测试结果 (peak-to-peak)

Table 4 Results of normalized amplitude stability for buncher at SHINE (peak-to-peak)

	max	min	mean	amplitude stability/%	amplitude (RMS)/%
open-loop	0.6395	0.6384	0.6389	$\leq \pm 0.17$	0.019
closed-loop	0.6450	0.6446	0.6448	$\leq \pm 0.03$	0.00517

Fig. 7 Phase stability in closed-loop mode (peak-to-peak $\leq \pm 0.05^\circ$)图 7 闭环状态下腔压相位稳定性 (peak-to-peak $\leq \pm 0.05^\circ$)Fig. 8 Stability of field flatness in closed-loop mode ($\leq \pm 2\%$)图 8 闭环状态下场平坦度稳定性 ($\leq \pm 2\%$)

不仅验证了系统在高功率电子束条件下的控制能力,也为 SHINE 装置未来的规模化部署与长期稳定运行奠定了坚实的技术支持和实践经验。

在加速器领域中,射频功率标定与低电平控制系统在运行中相互配合,共同保障加速器系统的精确控制和稳定运行。射频功率标定是确保射频系统的输出功率稳定和精确的关键环节,其准确性是高效加速粒子束的重要保障。

4 射频功率标定

由于固态功率源厂商自身标定的功率精度不高,而低电平控制器自身采用的高速模数转换器(ADC),可实现连续更准确测量射频功率,为此,提出了一种基于高速 ADC 的射频功率标定方法。ADC 是将射频模拟信号转换为数字信号的关键器件,其主要功能是将时间连续、幅值连续的模拟信号,转换为时间离散、幅值离散的数字信号,过程通常包括取样、保持、量化及编码 4 个过程^[15-17],便于后续数字系统(如 FPGA、DSP、微处理器等)进行处理、储存或控制。

在基于 ADC 数据进行射频功率标定时,关键在于将 ADC 的数字量准确转换为对应的实际电压值,并据此计算信号的功率。ADC 输出值与输入电压之间的关系可通过公式(13)描述,为功率计算提供基础支撑。

$$V_{IN} = \text{digital data} * B_L \quad (13)$$

式中: V_{IN} 为 ADC 的输入电压;最低有效位 B_L 表示每个数字量对应的电压增量,其大小由 ADC 的分辨率与满量程范围共同决定,计算公式为

$$B_L = \frac{F_S}{2^N} \quad (14)$$

式中: N 为 ADC 的位数; F_S 为 ADL 的满量程范围。ADC 的分辨率、采样率及前端电路设计等因素均会影响测量结果的准确性。在实际工程中,采用 16 位高信噪比 ADC,并超 4 倍频率的时钟进行过采样,同时亦保证输入信号电平在 ADC 的输入范围内,以避免失真。

在利用 ADC 进行射频功率前,首先需对射频路径中的电缆插损进行精确校准,如图 8 所示的 pickup2(line1)、pickup1(line2)和 forward(line3),其校准步骤如下:

①首先,对功率计、信号源及标准测试电缆在目标频率点进行校准,确保测量精度。选择四个功率点(-20、-10、0 和 10 dBm)进行多次测试并取平均值,以减少随机误差对测量的影响。

②然后,连接待测电缆(如图 9 虚线框所示的 line3)进行联合插损测量并记录数据。拆装连接器后重复测量以

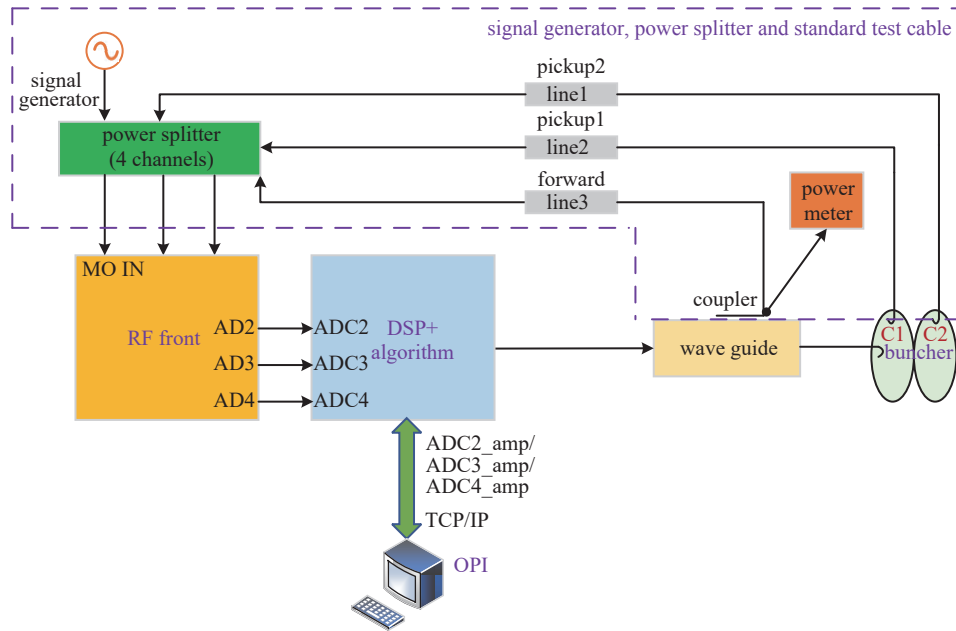


Fig. 9 Block diagram of calibrating the buncher LLRF

图 9 聚束器低电平控制器外部设备标定与内部 ADC 功率校准框图

确保结果的稳定性和可靠性。

③最后，调整信号源输出不同功率电平，通过功率计(power meter)实时监测功率值，并同时通过 ADC 采集和计算归一化幅度数据。如图 10 所示，记录功率电平与 ADC 归一化幅度值，进行曲线拟合，确保功率电平与 ADC 幅度值之间的映射误差控制在 $\pm 2\%$ 以内(见表 5 中 error ratio2, 抽取 5 个点做比较)。

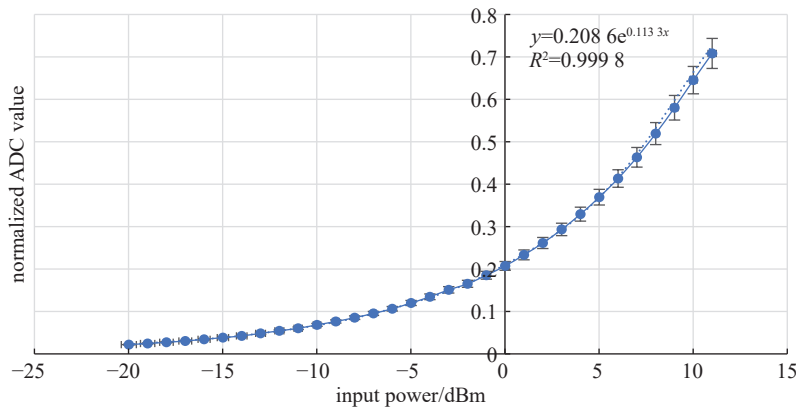


Fig. 10 Relationship between input power and ADC signal amplitude

图 10 输入功率与 ADC 采集信号的幅度拟合图

表 5 测试功率比较

Table 5 Comparison list of test power

$P_{\text{power-meter}}/\text{W}$	P_{SSA}/W	error ratio1/%	P_{ADC}/W	error ratio2/%
2001	1766	-11.74	2033	1.60
4004	3721	-7.07	3989	-0.40
5995	5722	-4.55	5990	-0.08
9023	8764	-2.87	9152	1.40
11398	10205	-10.47	11783	3.40

通过上述步骤，建立了归一化 ADC 幅度值与功率电平的拟合曲线，由 ADC 幅度值可反推出当前的实际功率电平。结合实际工程中的其他因素(如超导腔的低温端插损、波导耦合度等)，进一步计算源端的实际功率。该方法适用于射频信号测量与超导腔测试等应用场景，可有效提高射频功率测量的准确性。

5 结 论

本文基于 SHINE 注入段 L 波段聚束器的数字化低电平控制研制展开, 重点攻克了多电机协同控制的策略, 成功实现了频率调谐环路与场平坦度环路的联合调节, 显著提升了系统运行的稳定性和可靠性。通过 10 kW 连续波在线运行, 闭环控制系统将幅度稳定度由开环的 $\pm 0.17\%$ (peak-to-peak) 提升至 $\pm 0.03\%$ 以内, 相位稳定度达到 $\pm 0.05^\circ$ (peak-to-peak) 以内, 场平坦度在 $\pm 2\%$ 以内, 满足设计指标要求。此外, 本文还提出了一种基于 ADC 采集的射频信号功率校准方法, 误差控制在 $\pm 2\%$ 以内, 对射频功率测量提供了一种可选技术路径。

参考文献:

- [1] Huang G, Campbell K, Doolittle L, et al. LCLS-II gun/buncher LLRF system design[C]//9th International Particle Accelerator Conference. 2018: 2258-2261.
- [2] Ha G, Kim K J, Power J G, et al. Bunch shaping in electron linear accelerators[J]. *Reviews of Modern Physics*, 2022, 94: 025006.
- [3] Schmidt C, Ayvazyan V, Branlard J, et al. High level software structure for the European XFEL LLRF system[C]//Proceedings of 15th International Conference on Accelerator and Large Experimental Physics Control Systems (ICALEPCS 2015). 2015: 757-760.
- [4] Ohshima T, Ego H, Fukui T, et al. Development of a new LLRF system based on MicroTCA. 4 for the Spring-8 storage ring[C]// Proceedings of the 8th International Particle Accelerator Conference. 2017: 3996-3999.
- [5] Czuba K, Jezynski T, Hoffmann M, et al. RF backplane for MTCA. 4-based LLRF control system[J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2013, 60(5): 3615-3619.
- [6] Zhao Yubin, Yin Chengke, Zhang Tongxuan, et al. Digital prototype of LLRF system for SSRF[J]. *Chinese Physics C*, 2008, 32(9): 758-760.
- [7] Zhang Zhigang, Zhao Yubin, Xu Kai, et al. Digital LLRF controller for SSRF booster RF system upgrade[J]. *Nuclear Science and Techniques*, 2015, 26: 030106.
- [8] 张志刚, 赵玉彬, 徐凯, 等. 上海光源超导三次谐波腔低电平研制[J]. *核技术*, 2022, 45: 120101. (Zhang Zhigang, Zhao Yubin, Xu Kai, et al. Low level radio frequency controller for superconducting third harmonic cavity at SSRF[J]. *Nuclear Techniques*, 2022, 45: 120101)
- [9] 张志刚, 赵玉彬, 徐凯, 等. 基于 FPGA 的多 cell 腔的场平坦度控制[J]. *核技术*, 2017, 40: 020101. (Zhang Zhigang, Zhao Yubin, Xu Kai, et al. Control of field flatness based on FPGA for multi-cell cavity[J]. *Nuclear Techniques*, 2017, 40: 020101)
- [10] 邵琢瑕, 张通, 董自强, 等. 太赫兹近场高通量材料物性测试装置直线加速器微波系统研制[J]. *强激光与粒子束*, 2025, 37: 014004. (Shao Zhuoxia, Zhang Tong, Dong Ziqiang, et al. Development of linear accelerator microwave system for terahertz near-field high-throughput material physical property testing system[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2025, 37: 014004)
- [11] 张俊强, 俞路阳, 殷重先, 等. 次谐波聚束器相位控制的算法改进[J]. *强激光与粒子束*, 2011, 23(8): 2179-2182. (Zhang Junqiang, Yu Luyang, Yin Chongxian, et al. Algorithm improvement for phase control of subharmonic buncher[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2011, 23(8): 2179-2182)
- [12] 刘熔, 赵凤利, 黄永清, 等. 次谐波聚束系统固态放大器相位特性[J]. *强激光与粒子束*, 2009, 21(7): 1059-1062. (Liu Rong, Zhao Fengli, Huang Yongqing, et al. Phase characteristics of solid-state amplifiers in sub-harmonic bunchers[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2009, 21(7): 1059-1062)
- [13] 樊浩. 储存环中高次谐波腔的有关计算研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2013: 27-28. (Fan Hao. Calculation and research of the higher harmonic cavity in storage ring[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2013: 27-28)
- [14] 李健, 徐新安, 慕振成, 等. 中国散裂中子源直线射频功率源系统的研制[J]. *强激光与粒子束*, 2016, 28: 085101. (Li Jian, Xu Xin'an, Mu Zhencheng, et al. Linac RF power sources development for China spallation neutron source[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2016, 28: 085101)
- [15] Bellandi A, Branlard J, Diomede M, et al. Retraction notice to "Calibration of superconducting radio-frequency cavity forward and reflected channels based on stored energy dynamics" [NIMA 1062 (2024) 169172] [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2024, 1067: 169733.
- [16] Ma Jinying, Qiu Feng, Shi Longbo, et al. Precise calibration of cavity forward and reflected signals using low-level radio-frequency system[J]. *Nuclear Science and Techniques*, 2022, 33: 4.
- [17] Xu Tianzhe, Ji Fuhao, Weathersby S, et al. Calculation of RF-induced temporal jitter in ultrafast electron diffraction[DB/OL]. arXiv preprint arXiv: 2408.00937, 2024.