

上海光源插入件高精度前馈系统设计与实现

王鹤云 刘新忠 谭力源 朱海君 吕慧慧 宣守智 陈广花 缪海峰

(中国科学院上海高等研究院 上海 201204)

摘要 插入件作为同步辐射光源的核心设备,其磁场误差会导致束流轨道与光学畸变,进而影响光源的稳定性。针对上海光源在这一领域的迫切需求,实现了一套高性能的插入件远程控制与前馈补偿系统。该系统基于响应矩阵校正和 TBT(Turn-by-turn)数据,通过前馈调节插入件两端的校正磁铁及邻近四极铁的电流,对轨道扰动和光学畸变进行实时补偿。软件层面,构建出基于 Python 与实验物理及工业控制系统(Experimental Physics and Industrial Control System, EPICS)集成的控制架构。该架构将物理算法层与底层驱动解耦,实现对高维前馈表的灵活管理与实时插值计算,有效解决传统 C 语言驱动在复杂算法实现与数据维护方面的局限,显著提升系统响应效率与可扩展性。目前,该系统已成功应用于上海光源全部 27 台插入件,运行稳定可靠,将轨道畸变严格控制在水平 $5.0\ \mu\text{m}$ 与垂直 $3.5\ \mu\text{m}$ 以内,光学畸变(Beta-beating)抑制至 0.7% 以下,大幅提升束流稳定性。

关键词 上海光源, 插入件, EPICS, 前馈控制

中图分类号 TL503.6

DOI: 10.3724/j.0253-3219.2026.hjs.49.250420

CSTR: 32193.14.hjs.CN31-1342/TL.2026.49.250420

Design and implementation of a high-precision feed-forward system for SSRF insertion devices

WANG Heyun LIU Xinzong TAN Liyuan ZHU Haijun LYU Huihui
XUAN Shouzhì CHEN Guanghua MIAO Haifeng

(Shanghai Advanced Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201204, China)

Abstract [Background] Insertion devices (IDs) are core components of synchrotron radiation light sources. However, ID magnetic field errors during operation can induce significant beam orbit and optical distortions, thereby degrading the stability of the light source. [Purpose] This study aims to develop a high-precision remote control and feed-forward compensation system for IDs at the Shanghai Synchrotron Radiation Facility (SSRF) to mitigate beam orbit and optical distortions. [Methods] Firstly, feed-forward compensation tables for both orbit and optical distortions were derived using a response matrix-based method informed by turn-by-turn (TBT) data. Then, real-time compensation was achieved by remotely adjusting currents in corrector magnets at both ends of each ID and in adjacent quadrupole magnets. Subsequently, based on Python and EPICS integration, a control architecture integrating orbit and high-precision optical compensation was developed to decouple the physics-algorithm layer from the underlying drivers, hence enable flexible management and real-time interpolation of high-dimensional feed-

共同第一作者: 王鹤云,男,1990年出生,2016年于 Auburn University 获硕士学位,研究领域为加速器控制

刘新忠,男,1994年出生,2022年于中国科学院上海应用物理研究所获博士学位,研究领域为加速器束流动力学

通信作者: 缪海峰, E-mail: miaohf@sari.ac.cn; 陈广花, E-mail: chengh@sari.ac.cn

收稿日期: 2025-12-05, 修回日期: 2026-01-15

Co-first authors: WANG Heyun, male, born in 1990, graduated from Auburn University with a master's degree in 2016, focusing on accelerator control; LIU Xinzong, male, born in 1994, graduated from Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences with a doctoral degree in 2022, focusing on accelerator beam dynamics

Corresponding author: MIAO Haifeng, E-mail: miaohf@sari.ac.cn; CHEN Guanghua, E-mail: chengh@sari.ac.cn

Received date: 2025-12-05, revised date: 2026-01-15

forward tables, overcoming the limitations of traditional C-language drivers in complex algorithm implementation and data management. Finally, experimental test was conducted on SSRF 03EPU200 in Mode 1 and Mode 2 to verify its performance. **[Results]** Test results show that the system limits orbit distortions to within 5.0 μm horizontally and 3.5 μm vertically, and suppresses optical distortions (beta-beating) to below 0.7%, substantially enhancing overall beam stability. In addition, the feed-forward table measurement time is reduced by over 90% compared to the conventional scanning method, significantly improving operational efficiency. **[Conclusions]** The system has been successfully deployed on all 27 IDs at the SSRF with stable long-term operation, confirming the effectiveness of the Python-EPICS-based feed-forward architecture for high-precision simultaneous orbit and optical compensation at third-generation synchrotron light sources.

Key words Shanghai Synchrotron Radiation Facility (SSRF), Insertion devices (IDs), EPICS, Feed-forward control

上海同步辐射光源(Shanghai Synchrotron Radiation Facility, SSRF)作为第三代同步辐射装置,由150 MeV电子直线加速器、150 MeV~3.5 GeV增强器及周长432 m的电子储存环构成,自2009年投入运行以来,各项性能指标始终保持国际先进水平^[1-3]。插入件(Insertion Devices, IDs)作为第三代光源的核心部件,通过其周期性磁场使电子束产生高亮度的相干辐射光,以满足材料科学、生命科学等前沿领域的实验需求。SSRF目前已有27台插入件投入运行^[4-5],其中包含11台全永磁真空内波荡器(In Vacuum Undulator, IVU)、5台低温永磁波荡器(Cryogenic Permanent Magnet Undulator, CPMU)、7台椭圆极化波荡器(Elliptically Polarized Undulator, EPU)、3台常规永磁扭摆器(Wiggler)以及1台总长1.08 m的超导扭摆器(Superconducting Wiggler, SCW),该超导扭摆器的峰值磁场可达4.2 T,是硬X射线应用领域的关键设备之一。

上海光源的IVU最小磁间隙为6 mm,磁场周期涵盖18~26 mm,一次积分场误差精确控制在 $\pm 50 \text{ G}\cdot\text{cm}$ 以内;CPMU在80 K低温环境下运行,其采用的高性能永磁材料可使磁场强度较常温器件提升约20%,最小间隙为6 mm,峰值场强为1.0 T;EPU则通过4组独立可调的磁铁阵列,生成在线偏振与圆偏振之间连续可调的光束,为磁学与自旋电子学研究提供关键支撑。此外,为最大化光源的整体运行效率,SSRF已在其02、04、07、09、10、16、19和20号共8个直线节上部署了双插入件运行模式。

图1展示了由SPECTRA程序^[6]计算得到的上海光源插入件光谱亮度,IVU的最高亮度可达 $7.15 \times 10^{19} \text{ ph}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{mm}^{-2}\cdot\text{mrad}^{-2}\cdot(0.1\%B.W.)^{-1}$,在10 keV、50 keV和100 keV等关键能量点,光子亮度也分别达到了 4.23×10^{19} 、 2.26×10^{17} 、 $9.46 \times 10^{16} \text{ ph}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{mm}^{-2}\cdot\text{mrad}^{-2}\cdot(0.1\%B.W.)^{-1}$ 。上海光源27台插入件共同构成了覆盖红外至硬X射线的完整辐射谱系,为材料科学、生命科学等前沿研究提供了多样化的高品质

同步辐射光,成为推动多学科前沿研究的关键设施。

插入件在实际制造和安装过程中,不可避免地会产生一次、二次及高阶磁场积分误差,一次磁场积分影响粒子的角度,二次磁场积分影响粒子的位置,并最终引起储存环闭轨畸变。插入件的一次和二次磁场积分可以表示为:

$$\Delta x' = \frac{1}{B\rho} \int_0^L B(s) ds \quad (1)$$

$$\Delta x = \frac{1}{B\rho} \int_0^L \int_0^s B(s) ds ds \quad (2)$$

式中: $\Delta x'$ 为粒子经过插入件后速度的变化; Δx 为粒子经过插入件后位置的变化; $B\rho$ 为磁刚度; $B(s)$ 为插入件磁场沿纵向位置的分布。

对于有限磁极宽度的插入件而言,有限的磁极宽度导致插入件磁场强度随着与中心轴水平距离的增加而“滚降”,插入件磁场强度的“滚降”(二极铁边缘场效应)意味着粒子在通过插入件时将在磁极位置处交替地受到较强和较弱的场,其净效应表现为一种水平方向的散焦力。由于插入件的磁场分量 B_x 不为零,且插入件中的粒子沿水平方向做弯转运动,粒子的水平速度不为零。因此,对于偏离插入件中心平面的粒子而言,其将受到垂直方向的偏转力。因此,理想插入件同时存在水平散焦和垂直聚焦效应。此外,插入件制造过程中引入的四极场误差会带来额外的光学畸变。综上所述,插入件引起的闭轨畸变和光学参数漂移等效应,将严重影响束流品质和注入效率^[7-8]。

为应对插入件对束流稳定性的挑战,世界各大同步辐射光源均发展了成熟的前馈补偿技术。从国际前馈技术发展脉络来看,该领域经历了从硬件紧耦合到软件灵活集成的演进:静态补偿(第一代)系统主要依赖于底层硬件查表或嵌入式C代码实现,属于紧耦合架构。例如,美国先进光子源(Advanced Photon Source, APS)和瑞士光源(Swiss

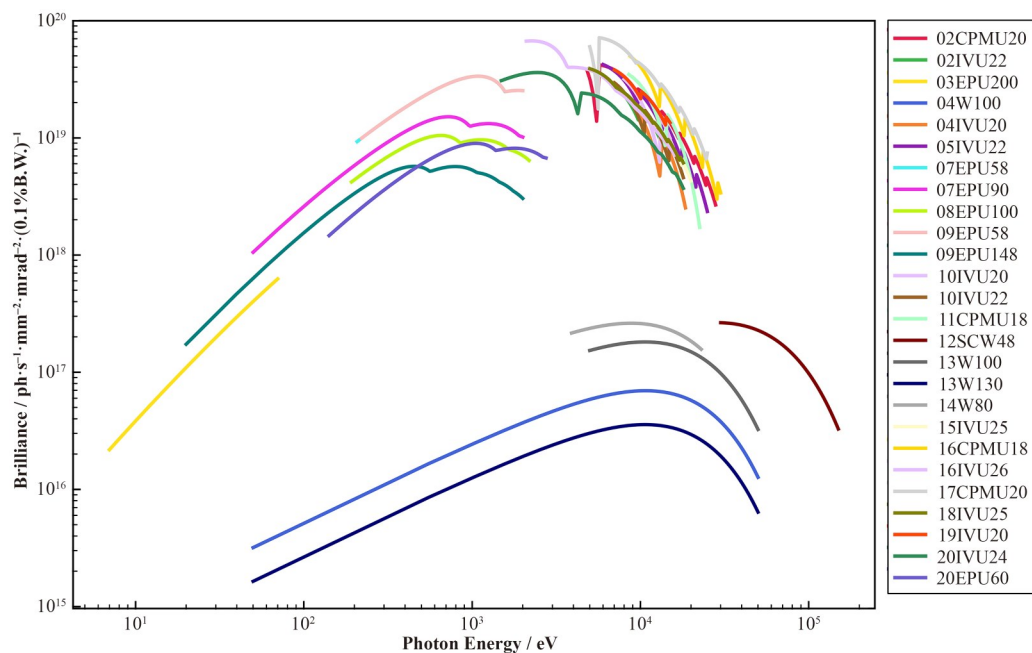


图1 上海光源插入件光谱亮度(彩图见网络版)

Fig.1 Spectral brilliance of insertion devices at the SSRF (color online)

Light Source, SLS)早期便采用了基于查表法的前馈系统^[9],这些系统主要关注轨道校正,轨道补偿效果可以达到微米级。随着EPU等复杂二维插入件的引入,以及对高精度光学补偿的需求,传统C/C++驱动在面对高维插补、数据维护和系统扩展性方面的局限性日益突出。部分设施(如LCLS-II)开始探索基于物理模型的补偿方法^[10]。

本研究在借鉴传统查表法的基础上,重点在前馈测量和软件架构上进行了创新,在补偿范围和性能上实现了突破:相比APS和SLS等早期系统只关注轨道补偿,本系统在统一架构下集成了轨道与高精度光学补偿。系统成功将轨道畸变严格控制在水平5.0 μm与垂直3.5 μm以内,同时将03EPU200的水平光学畸变(Beta-beating)由未补偿时的6.9%抑制至0.47%,垂直畸变抑制至0.66%,实现了显著优于仅专注于轨道校正的早期系统的全面补偿效果。在软件架构方面,本研究实现了基于Python与实验物理及工业控制系统(Experimental Physics and Industrial Control System, EPICS)深度融合的轻量级控制方案,有效解决了传统C语言底层驱动在高维插值运算和数据表维护方面的难题。这种利用Python生态实现算法层快速重构与维护的方案,代表了第三代光源控制系统向高层语言迁移的工程趋势,极大地提升了系统的可维护性、可靠性与数据处理效率。此外,本方案提出了基于响应矩阵和逐圈位置(Turn-by-turn, TBT)数据光学前馈表的快速测量方案,相比传统的扫描法,测量耗时缩短了90%

以上,进一步巩固了其在国际上的先进水平定位。

1 前馈控制系统

1.1 系统架构优化

早期的前馈功能直接在EPICS驱动层以C语言实现,这种紧耦合架构在处理如IVU的一维(Gap)前馈表时尚可应对,但在处理EPU的二维(Gap, Phase)轨道和光学前馈表时,存在数据格式不便维护、编程与调试难度大、固件程序无法人工核查等诸多缺陷。

面对上述挑战,本研究设计了一套基于Python与EPICS控制系统集成的轻量级架构^[11],利用DIAMOND光源开发的cothread软件包作为Python与EPICS的接口,将前馈系统在逻辑上解耦。该架构的创新在于利用Python实现复杂物理算法,并直接操作易于维护的Excel前馈表,从而兼顾开发效率与数据可维护性。为清晰展示新架构优势,与传统C语言架构的全方位对比见表1。

1.2 算法与程序实现

在算法实现上,当Python服务层监测到插入件参数变化超过预设阈值(如0.002 mm)且前馈功能使能时,系统立即执行插值计算。对于IVU和Wiggler等平面型设备,系统采用一维线性插值算法;对于EPU等椭圆极化插入件,系统则采用双线性插值算法,根据(磁间隙Gap, 相位Phase)坐标,在二维前馈表中精确计算20个校正电源(包括轨道校

表1 前馈系统架构对比
Table 1 Feed-forward system architecture comparison

对比维度 Comparison dimensions	传统C语言架构 Traditional C architecture	本Python架构 The Python architecture	优势量化与说明 Quantification and analysis of advantages
开发效率 Development Efficiency	低 Low	高 High	使用Python及开源库,算法开发与调试周期缩短约70% The use of Python and open-source libraries reduced the algorithm development and debugging cycle by approximately 70%
数据维护 Data maintenance	困难 Challenging	容易 Straightforward	前馈表以Excel格式存储,支持图形化编辑与版本管理,维护复杂度降低80%以上 The feed-forward table is stored in Excel format, supports graphical editing and version management, and reduces maintenance complexity by over 80%
代码可读性 Code readability	差 Poor	佳 Good	C程序逻辑与硬件操作混杂,难以阅读;Python代码贴近数学公式,可读性与可审核性大幅提升 In C programs, program logic is often intertwined with hardware operations, making them difficult to read. In contrast, Python code closely resembles mathematical formulas, leading to a significant enhancement in both readability and auditability
二维表支持 Two-dimensional table support	实现复杂,硬编码 Complex implementation, hard-coded	原生支持,动态加载 Native support, dynamic loading	可轻松处理二维乃至多维插值,扩展性显著增强 The system is capable of effortlessly handling interpolation in two and even multiple dimensions, leading to a significant enhancement in extensibility
调试与诊断 Debugging and diagnostics	依赖硬件,周期长 Hardware-dependent, long cycle	独立仿真,可视化强 Standalone simulation with powerful visualization	可在无硬件环境下进行算法仿真与数据验证,调试效率提升数倍 Algorithm simulation and data validation can be performed without physical hardware, enabling a multi-fold increase in debugging efficiency
系统耦合度 System coupling	紧耦合 Tight coupling	松耦合 Loose coupling	前馈逻辑与EPICS IOC分离,算法更新无需重新编译和重启IOC,系统稳定性与可维护性更高 Separation of the feed-forward logic from the EPICS IOC, algorithm updates require no recompilation or ioc restart, higher system stability and maintainability

正磁铁4个与光学和耦合补偿四极铁16个)的精确电流设定值。计算结果(电流值)最终通过EPICS CA被快速写回至相应的电源PVs,完成前馈补偿闭环。

以03EPU200为例,程序流程图如图2所示。程序启动后首先进行系统初始化操作,随后加载4种不同工作模式对应的光学前馈表并启动EPICS监控器以实时监测关键PV变量。前馈表中存储了在不同插入件参数(磁间隙Gap,相位Phase)下,保持束流稳定性所需的前馈电源电流值。监控逻辑分为两个主要分支:左侧分支负责处理光学前馈表更新流程;右侧分支则专注于间隙与相位变化以执行电流计算。在左侧路径中,系统持续监测光学前馈表更新按钮PV值。当其值为1时,程序进入相位模式选择步骤,并根据当前运行模式(模式1~4)选择对应的前馈表进行处理;若值为0,则退出更新流程并继续监测PV。选定工作模式后,系统调用判断函数,确定当前光学前馈表中Gap和Phase数量。这一步

骤确保系统正确识别前馈表结构,为后续插值计算奠定基础。系统读取相关PV当前值,基于预定义算法计算新值,并最终更新光学前馈表,完成光学参数闭环更新。在右侧路径中,系统并行监测Gap及Phase变化。当发生改变后,程序首先检查前馈执行按钮PV值。若值为0,系统不执行前馈控制,返回监测状态;其值为1时,则继续判断Gap或Phase的变化量是否超过阈值0.002 mm。对于超过阈值的显著变化,系统执行前馈补偿计算,并通过双线性插值算法精确计算所需电流值,最终将计算结果写入16个电源PV,实现对束流参数的精确校正。对于未超过阈值的微小变化,系统不进行前馈调整,确保控制的稳定性与抗干扰能力。

远程控制系统基于以太网分布式架构,运行于Linux CentOS操作系统之上。该系统的操作界面采用EPICS的扩展显示管理器(Extensible Display Manager, EDM)构建,可实现对设备的实时监控和动态图形化管理。硬件层由高稳定性的研华工控机

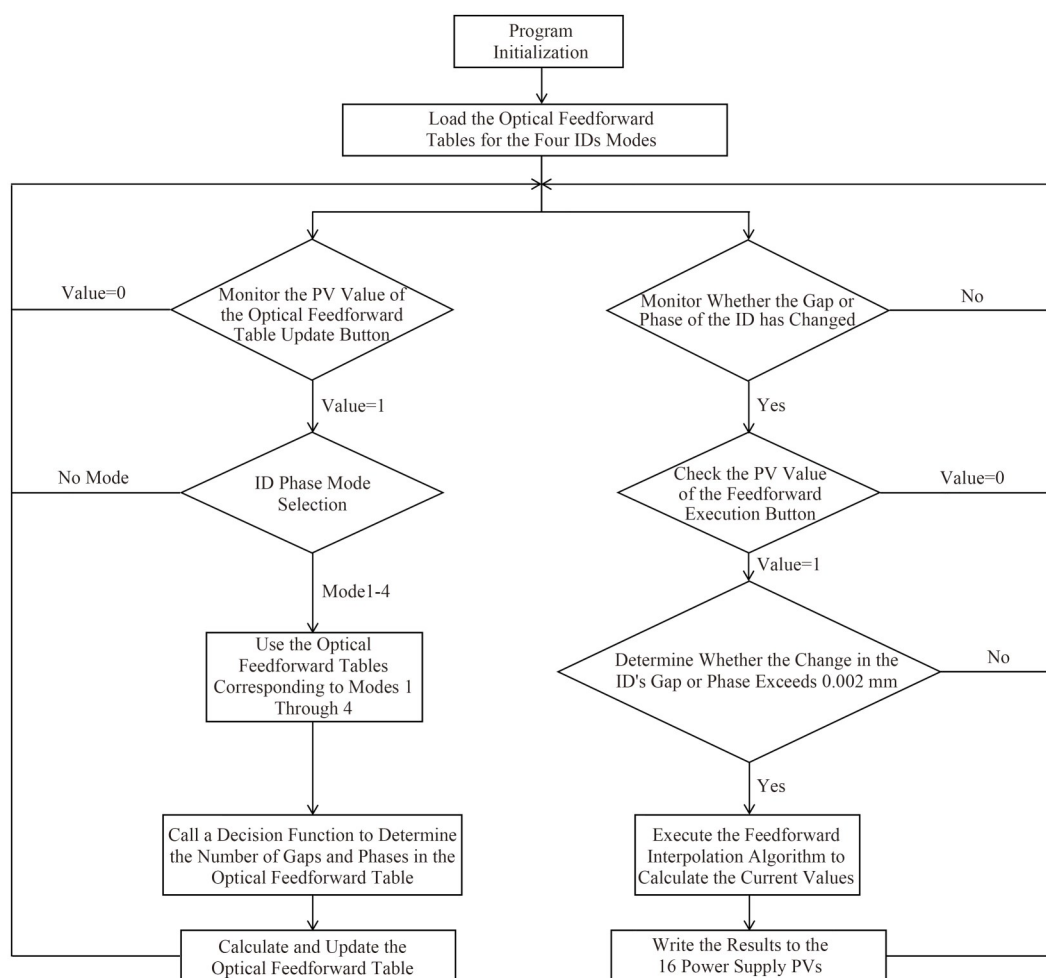


图2 上海光源03EPU200光学前馈流程图
Fig.2 Optical feed-forward flowchart of the SSRF 03EPU200

(ARK 系列)提供不间断的输入/输出控制(Input/Output Control, IOC)服务,底层则采用德国倍福(Beckhoff)或西门子(Siemens)可编程逻辑控制器(Programmable Logic Controller, PLC)。IOC 与 PLC 之间的数据通信根据硬件不同,分别采用通用协议 Modbus 或专有协议 S7nodave。在 IOC 管理层面,为确保关键进程的长期稳定性与高可用性,已部署 procServ 进程守护服务器。该服务器通过标准化协议(如 Telnet)提供远程管理访问,极大增强了进程的可靠性与管理效率,并支持远程协作。同时,为 IOC 配置系统级开机自启动脚本,实现关键服务自动化运行,从而简化运维流程。在人机交互界面方面,主控界面经过迭代设计,实现所有核心控制功能集中化与图形化。界面包含 4 个功能区:1)插入件控制与显示区,包括插入件间隙、相位、椭圆极化模式等参数设置;2)探测器和光栅尺等关键设备状态监控区,包括设备温度、真空度和光栅尺读数等;3)前馈表管理区,用于上传、下载、激活和监控前馈表;4)安全联锁与错误信息区,显示设备联锁状态、错误

报警等信息。此外,为实现前馈数据表便捷分发,开发了一套基于授权、类 FTP(文件传输协议)的文件传输系统。授权用户可通过执行自定义 Shell 命令访问该系统,在图形化界面内完成前馈数据表上传与下载,从而实现权限可控、操作便捷的文件管理。

1.3 系统性能评估与不确定度分析

为量化评估 Python 在实时控制场景下的性能,本研究针对计算密集型任务实施向量化运算与编译加速双重优化策略^[12-13]。为评估其效能,对前馈处理流程的关键环节进行基准测试,各环节具体性能数据对比如表 2 所示。系统最长的前馈处理延时为 3.5 ms,结合插入件的最大运动速度 $1 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 计算,该延迟导致的实际运动误差被严格控制在 $3.5 \mu\text{m}$ 以内,这一微米级的运动误差对束流轨道位置的扰动远小于 50 nm。考虑到上海光源束流位置监测器(Beam Position Monitor, BPM)的固有测量不确定度^[14]为 100 nm,系统延迟引入的轨道扰动($<50 \text{ nm}$)远低于诊断设备的精度极限。前馈电源的固有测量

不确定度为 0.3 mA, 实际模拟分析该数据对轨道影响小于 20 nm。因此, 该 3.5 ms 的前馈处理延时以及 0.3 mA 的前馈电流测量误差对轨道精度的影响可以忽略不计, 完全满足轨道稳定度亚微米级的严苛要求。

表 2 前馈处理流程关键环节耗时对比
Table 2 Comparison of time consumption in key stages of the feed-forward processing pipeline

处理环节 Processing stage	处理延时 Processing delay / ms
数据加载与解析 Data loading and parsing	1.5
二维插值计算 Two-dimensional interpolation	1.2
EPICS PV 写入 Writing to EPICS PVs	0.8
单次前馈总耗时 Total latency of a single feed-forward pass	3.5

2 插入件轨道前馈

上海光源的轨道前馈补偿系统通过在每台插入件两端配置独立的水平与垂直校正线圈抑制闭轨畸变。为确保在用户实验中动态调节磁间隙时, 束流轨道在所有位置均保持稳定, 系统采用基于轨道响应矩阵 (Orbit Response Matrix, ORM)^[15] 和奇异值分解 (Singular Value Decomposition, SVD)^[16] 的前馈校正方法。对于有 M 个束流位置监视器和 N 个校正磁铁的储存环, BPM 读数用 $(X_1, \dots, X_N)$ 表示, 校正磁铁强度用 $(\theta_1, \dots, \theta_N)$ 表示。轨道响应矩阵表示每块校正磁铁单位强度的变化对应的每个 BPM 位置处的束流轨道变化:

$$\begin{pmatrix} \bar{x} \\ \bar{y} \end{pmatrix} = \mathbf{M} \begin{pmatrix} \bar{\theta}_x \\ \bar{\theta}_y \end{pmatrix} \quad (3)$$

其中, $\mathbf{M}$ 为轨道响应矩阵, 其一般形式为:

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} \frac{\partial x_1}{\partial \theta_1} & \dots & \frac{\partial x_1}{\partial \theta_N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial x_M}{\partial \theta_1} & \dots & \frac{\partial x_M}{\partial \theta_N} \end{bmatrix}_{M \times N} \quad (4)$$

由于上海光源储存环中 BPM 和校正磁铁的个数不相等, 轨道响应矩阵不为方阵, 其逆矩阵无法被直接计算, 需要通过 SVD 方法求解。轨道响应矩阵可以被 SVD 分解为:

$$\mathbf{M} = \mathbf{U} \mathbf{S} \mathbf{V}^T \quad (5)$$

式中: $\mathbf{U}$ 矩阵的列是 $\mathbf{M} \mathbf{M}^T$ 的特征向量; $\mathbf{S}$ 由 $\mathbf{M}^T \mathbf{M}$ 的特征向量行组成; $\mathbf{V}$ 为一个对角矩阵, 其元素为奇异值, 等于 $\mathbf{M} \mathbf{M}^T$ 和 $\mathbf{M}^T \mathbf{M}$ 的特征值的平方根。此时, 矩阵 $\mathbf{M}$ 的逆矩阵可以被表示为 $\mathbf{M}^{-1} = \mathbf{V} \mathbf{S}^{-1} \mathbf{U}^T$, 完成闭轨校正所需的校正子强度变化量为 $\Delta \theta = -\mathbf{M}^{-1} \times \Delta x$, 其中, Δx 为目标轨道校正量, 即当前闭轨测量值与理想轨道的差值。

针对真空内波荡器 (In-Vacuum Undulator, IVU) 和扭摆器 (Wiggler) 等平面型插入件, 变量只有磁间隙一个, 可采用一维前馈表补偿, 例如 IVU 在 6~30 mm 的间隙范围内测量 25 个点, Wiggler 则测量 30~40 个点, 受限於校正线圈的响应速度与磁间隙的调节速率, 每台平面型插入件的前馈测量耗时约 15 min, 相比于传统的扫描法, 效率提升了 10 倍以上。图 3 以 02IVU 和 02CPMU 为例, 展示了平面型插入件轨道前馈补偿的典型效果。图中, 实线代表补偿前水平和垂直方向的轨道畸变均方根 (Root Mean Square, RMS) 值, 虚线则为补偿后的结果。下方曲线展示了入口 (En-HorCC, En-VerCC) 与出口 (Ex-HorCC, Ex-VerCC) 的 4 个校正线圈的电流值随磁间隙的变化关系。数据显示, 补偿前 02IVU 造成的水平和垂直的最大闭轨畸变分别为 7 μm 和 8 μm , 而 02CPMU 则高达 87 μm 和 54 μm 。经过前馈校正后, 两台插入件引起的最大闭轨畸变均被成功抑制在 3 μm 以内。此外, 前馈电源电流随插入件磁间隙的变化曲线具有良好的平滑性, 可为采用插值算法补偿任意间隙点的轨道扰动提供可靠依据。

对于需要在磁间隙 (Gap) 和相位 (Phase) 两个维度协同调节的 EPU, 其前馈补偿是二维的。为实现高效配置, 系统为 EPU 建立了包含 35 个间隙值和 30 个相位值的二维前馈补偿表。通过精细的补偿网格和优化的测量流程, 该系统能够对动态调节过程中的插入件参数进行快速、精确的补偿。

以 03EPU200 为例, 其在 Mode1 和 Mode2 下的前馈补偿效果如图 4 所示。在补偿前, 03EPU200 在水平和垂直方向引起的最大闭轨畸变分别高达 112 μm 和 250 μm 。经过轨道前馈校正后, 其引起的闭轨畸变被成功抑制在 3 μm 以内。目前, 该前馈控制系统已在上海光源全部插入件上部署应用。实测数据表明, 在所有运行模式下, 补偿后的水平轨道扰动小于 5 μm , 垂直轨道扰动小于 3.5 μm , 且系统长期运行稳定性良好。

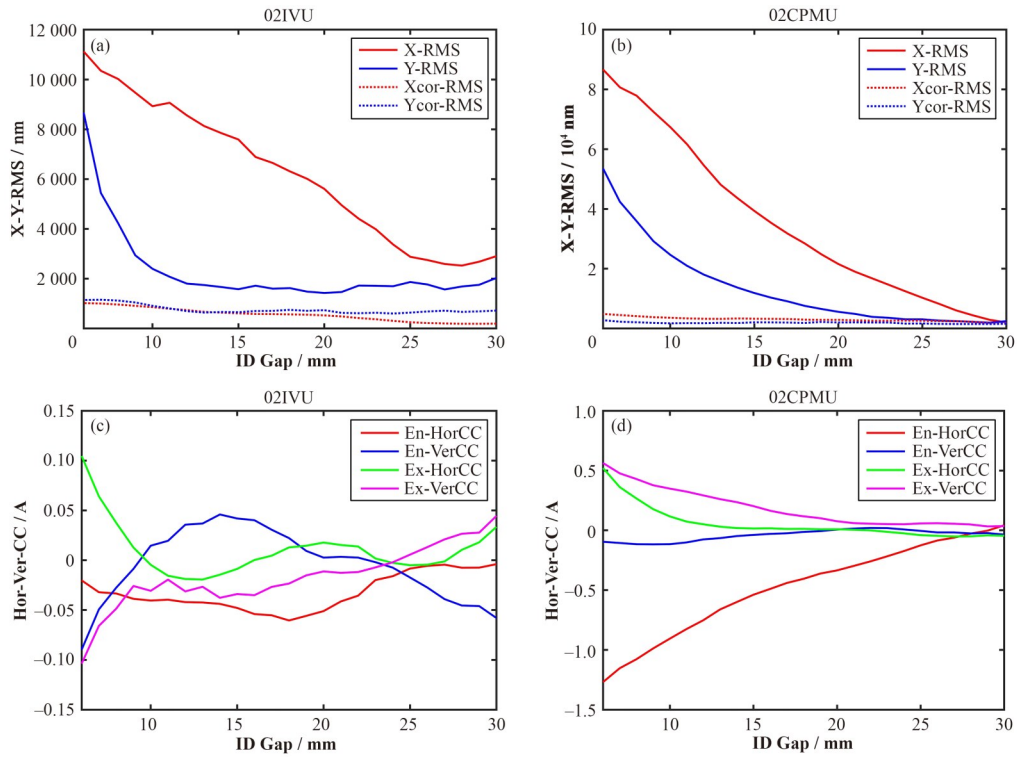


图3 02IVU&02CPMU 平面型插入件轨道前馈的补偿效果(彩图见网络版)

(a, b) 前馈开启前后的全环轨道扰动, (c, d) 4 个前馈电源电流与磁间隙的变化关系

Fig.3 Effect of 02IVU&02CPMU planar insert track feed-forward compensation (color online)

(a, b) Measured beam orbit distortion with the feed-forward (FF) system disabled (off) and enabled (on), (c, d) Correlation plots showing the linear relationship between the ID gap position and the currents applied to the four designated feed-forward corrector power supplies

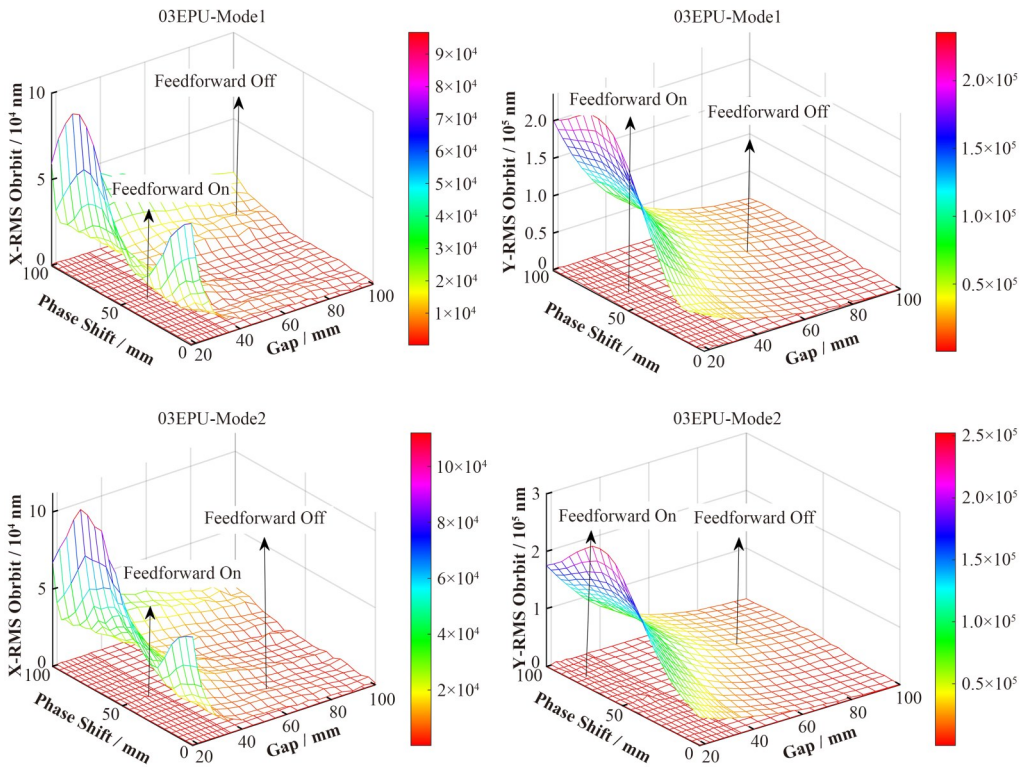


图4 03EPU Mode1和Mode2 补偿前后的全环轨道扰动(彩图见网络版)

Fig.4 Orbit distortion as a function of gap and phase shift for the 03EPU in Mode 1 and Mode 2, shown before (feed-forward off) and after (feed-forward on) compensation (color online)

3 插入件光学前馈

插入件磁铁的边缘场效应和误差场会对束流光学产生聚焦作用,引起储存环束流光学畸变,进而影响注入效率、束流寿命等关键参数。插入件引起的光学畸变的程度可以用沿全环分布的 β -beating ($\Delta\beta/\beta$) 的均方根(Root Mean Square, RMS)值和工作点偏移 Δv 来表示。在上海光源投入运行的插入件中,对束流光学有较大影响的插入件有 03EPU200 和 09EPU58,其余插入件贡献的光学畸变的贡献则可以忽略^[17]。以 03EPU200 为例,磁间隙和相位引起的水平和垂直方向工作点偏移 >0.01 ,故有必要对其引起的光学畸变进行补偿。

为此,上海光源建立了插入件光学前馈系统,通过调节插入件两侧弧段内的共 10 块四极铁和 6 块斜四极铁,实现对插入件在不同磁间隙、相位下引起的光学畸变补偿。与插入件轨道前馈方法类似的,插入件的光学前馈表需提前测定。为建立光学前馈表,上海光源采用了基于束流逐圈位置数据的光学测量方法^[18]。通过采集束流 TBT 数据并对其进行

ICA 分析,可以快速、精确地解析出由插入件引起的 Beta-beating 和工作点漂移。基于此测量结果,结合四极铁的线性光学响应矩阵(Linear Optic Response Matrix),反解计算出在不同插入件间隙和相位设定下,10 块四极铁和 6 块斜四极铁所需的前馈电流值,从而生成二维光学前馈表。在日常运行过程中,EPU 的光学前馈控制系统仅在其工作于最大磁间隙且 Shift=0 时允许执行模式切换,以保证不同极化模式下前馈四极铁电流值的连续性。

图 5 以 03EPU200 的 Mode 1 为例,展示了补偿前后插入件引起的光学畸变。补偿所采用的 10 块前馈四极铁和 6 块斜四极铁的电流最大变化量均小于 2 A。未补偿时,水平和垂直方向的光学畸变分别为 6.9% 和 2.8%,补偿后,光学畸变分别下降到了 0.47% 和 0.66%。与之相应的,补偿后插入件磁间隙变化引起的工作点偏移 $\Delta v_{x,y} < 0.002$ 。该结果表明,插入件光学前馈系统有效抑制了插入件磁间隙变化引起的光学畸变,确保储存环束流注入与光学状态的稳定,为上海光源的稳定运行提供了重要保障。

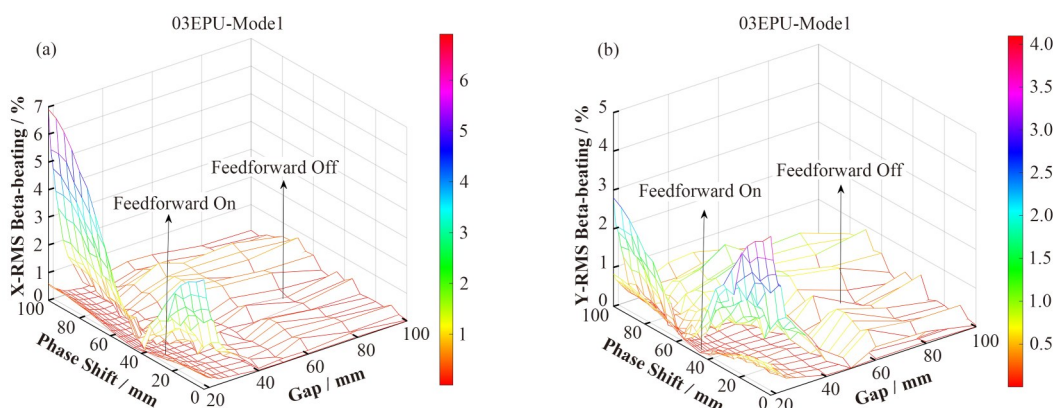


图5 03EPU Model1 水平(a)和垂直(b)方向补偿前后的光学畸变
Fig.5 Optical distortion in the horizontal (a) and vertical (b) directions with respect to gap and phase shift for 03EPU Mode 1 before and after feed-forward compensation

4 结语

本系统具备以下核心优势:1)模块化架构设计,通过异步通信接口实现算法、控制和界面的解耦,提升代码可读性与可维护性,支持模块独立调试与自动化测试;2)灵活的前馈参数管理,采用 Excel 作为参数载体,兼顾编辑便捷性与版本管理规范,支持参数动态加载与在线更新,无需停机即可生效;3)开放的算法集成能力,充分利用 Python 丰富的科学计算库简化算法实现,便于集成机器学习^[19-22]等先进技术,为自适应控制与智能决策提供扩展空间。

系统在实际应用中仍面临若干挑战,需要针对性优化。首先,系统实时性能受到 Python 全局解释

器锁机制的影响,从而制约多核处理器的并行计算能力。面对计算密集型任务可以搭建多进程架构^[23],将关键实时计算分配到独立进程中执行,从而规避性能瓶颈。其次,系统依赖管理复杂度较高,需确保 Python 运行环境、cothread 接口与 EPICS 库之间的版本兼容性。采用容器化部署方案可有效封装整个运行环境,不仅简化部署流程,还能保证系统跨平台运行的一致性。

该系统自 2024 年全面部署于上海光源 27 台插入件以来,已累计连续稳定运行超过 10 000 h。在最近一个运行年度内,系统未发生因 Python 内存泄漏或通信中断导致的束流丢失故障。经统计,软件

引起的平均故障间隔时间 (Mean Time Between Failure, MTBF) 优于 10 000 h, 充分展现了其高可靠性。此外, 实测数据的长期归档结果表明, 轨道前馈残差始终稳定收敛在设计指标 (5 μm) 以内, 这一性能验证了该软件架构在长期、高负载、准实时环境下的卓越鲁棒性与持续稳定性。

目前, 上海光源已实现微米级轨道稳定性和千分之一级工作点稳定性, 但性能的进一步提升仍受限于系统性动态误差。在轨道稳定性方面, 前馈系统虽能补偿插入件运动引起的静态畸变, 但难以覆盖电源随机抖动、环境温度引起的机械慢漂及 BPM 测量噪声。受限于目前 BPM 和电源等硬件的精度瓶颈, 前馈补偿存在底层极限。为此, 上海光源通过部署轨道慢反馈与快反馈系统, 利用多层反馈机制的深度耦合补偿宽频扰动, 使轨道稳定性达到亚微米水平。在光学稳定性方面, 工作点精度主要受限于 BPM 测量精度及 TBT 数据的信噪比。此外, 插入件极小间隙下的高阶多极场非线性效应, 也使得传统线性响应矩阵存在模型残差。

面向下一代同步辐射光源的严苛要求, 本研究基于 Python 与 EPICS 的架构具备良好的扩展潜力。在轨道稳定性优化上, 计划依托 Python 科学计算生态, 引入机器学习算法构建高阶非线性前馈模型, 以突破传统查找表的精度局限。硬件层面, 将匹配 50 nm 级 BPM 与 20×10^{-6} 级高性能电源, 夯实物理精度基础。软件层面, 通过多进程并发与容器化部署将系统延时压减至毫秒级, 实现前馈预补偿与轨道快反馈高频抑制的深度无缝集成。这一协同机制将确保束流在复杂工况下仍保持亚微米级的超高稳定度, 为未来高亮度相干光源的运行提供坚实保障。

5 总结

本研究成功研发并部署了一套集远程控制与前馈补偿于一体的高性能控制系统。该系统利用基于响应矩阵的快速校正算法, 结合以 Python 和 EPICS 为核心的软件架构, 实现了对上海光源插入件引起的束流轨道与光学参数扰动的精确、高效补偿。运行数据证实, 该系统将轨道畸变严格控制在水平 5.0 μm 与垂直 3.5 μm 以内, 同时将 03EPU200 的水平和垂直方向的光学畸变分别控制在 0.47% 和 0.66%。本研究的技术方案不仅验证了软件控制架构在加速器控制领域的应用价值, 还可为同类光源设施的系统开发与升级提供重要参考。

致谢 感谢上海光源加速器控制组与运行组的各位老师在本研究工作中所给予的大力支持与宝贵

帮助。

作者贡献声明 王鹤云、刘新忠负责软件架构设计、算法实现、数据分析、可视化, 撰写论文初稿; 谭力源负责实验调试、数据采集, 论文部分撰写和终稿修订; 朱海君负责软件开发和论文修订; 吕慧慧、宣守智参与了实验调试、数据采集, 论文修订; 陈广花、缪海峰对研究方案提供了总体构思与关键性指导, 为研究提供了技术支持, 审阅并修订终稿。

参考文献

- Xu H J, Zhao Z T. Current status and progresses of SSRF project[J]. Nuclear Science and Techniques, 2008, **19**(1): 1 - 6. DOI: 10.1016/S1001-8042(08)60013-5.
- Zhao Z T, Yin L X, Leng Y B, *et al.* Performance optimization and upgrade of the SSRF storage ring[C]// Proceedings of the 4th International Particle Accelerator Conference (IPAC 2013). 2013: 178 - 180.
- 赵振堂, 戴志敏, 张文志, 等. 上海粒子加速器大科学装置概述[J]. 复旦学报(自然科学版), 2023, **62**(3): 293 - 309. DOI: 10.15943/j.cnki.fdxh-jns.20230523.001.
- ZHAO Zhentang, DAI Zhimin, ZHANG Wenzhi, *et al.* Overview of particle accelerator based large-scale facilities at Shanghai[J]. Journal of Fudan University (Natural Science), 2023, **62**(3): 293 - 309. DOI: 10.15943/j.cnki.fdxh-jns.20230523.001.
- Zhu Y, Zhou S D, Yu C, *et al.* Design and measurement of a compact EPU magnetic structure[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2023, **1055**: 168489. DOI: 10.1016/j.nima.2023.168489.
- Wang H F, Zhang J M, Qian M F, *et al.* The magnetic field measurement systems for a cryogenic undulator and a superconducting undulator at SSRF[C]//Journal of Physics: Conference Series. 2018, **1067**: 082016.
- Tanaka T, Kitamura H. SPECTRA: a synchrotron radiation calculation code[J]. Journal of Synchrotron Radiation, 2001, **8**(6): 1221 - 1228. DOI: 10.1107/s090904950101425x.
- 张满洲, 王坤, 张庆磊, 等. DEPU 对上海光源储存环的影响与补偿[J]. 强激光与粒子束, 2017, **29**(7): 075103. DOI: 10.11884/HPLPB201729.170014.
- ZHANG Manzhou, WANG Kun, ZHANG Qinglei, *et al.* Compensations of double elliptical polarization undulator effects on the SSRF storage ring[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2017, **29**(7): 075103. DOI: 10.11884/

- HPLPB201729.170014.
- 8 焦广为, 田顺强, 相升旺, 等. 同步辐射光源新增线站相关加速器安装与调试[J]. 核技术, 2024, **47**(3): 030101. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2024.hjs.47.030101.
JIAO Guangwei, TIAN Shunqiang, XIANG Shengwang, *et al.* Installation and commissioning of accelerators associated with the new beamline in synchrotron radiation light source[J]. Nuclear Techniques, 2024, **47**(3): 030101. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2024.hjs.47.030101.
 - 9 Chrin J, Schmidt T, Streun A, *et al.* A feed-forward procedure to counteract orbit distortions and photon beam displacements from insertion device operation[C]// Proceedings of the 11th International Conference on Accelerator and Large Experimental Physics Control Systems (ICALEPCS07). 2007: 3.
 - 10 Edelen A, Huang X B. Machine learning for design and control of particle accelerators: a look backward and forward[J]. Annual Review of Nuclear and Particle Science, 2024, **74**: 557 – 581. DOI: 10.1146/annurev-nucl-121423-100719.
 - 11 何泳成, 王春红, 吴焯. EPICS IOC 与 EtherCAT 设备通信的一种方法[J]. 核技术, 2014, **37**(11): 110102. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2014.hjs.37.110102.
HE Yongcheng, WANG Chunhong, WU Xuan. A method of communication between EPICS IOC and EtherCAT devices[J]. Nuclear Techniques, 2014, **37**(11): 110102. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2014.hjs.37.110102.
 - 12 蒋舸扬, 姜伯承, 方文定, 等. 一个基于 EPICS 框架的 EPU 前端反馈系统[J]. 核技术, 2012, **35**(8): 568 – 572.
JIANG Geyang, JIANG Bocheng, FANG Wending, *et al.* Design of EPICS based front-end feedback system for the EPU of SSRF[J]. Nuclear Techniques, 2012, **35**(8): 568 – 572.
 - 13 王桐, 田亮. 一种非线性滤波器在协调控制系统前馈控制中的应用[J]. 电力科学与工程, 2015, **31**(8): 30 – 36. DOI: 10.3969/j.issn.1672-0792.2015.08.006.
WANG Tong, TIAN Liang. An application of nonlinear filter in the feed-forward control of coordinated control system[J]. Electric Power Science and Engineering, 2015, **31**(8): 30 – 36. DOI: 10.3969/j.issn.1672-0792.2015.08.006.
 - 14 朱立新, 程司农, 姚自明, 等. 高能同步辐射光源电源远控系统设计与实现[J]. 核电子学与探测技术, 2022, **42**(2): 210 – 216. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0934.2022.02.002.
ZHU Lixin, CHENG Sinong, YAO Ziming, *et al.* Remote control system design for the HEPs power supply[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2022, **42**(2): 210 – 216. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0934.2022.02.002.
 - 15 Chen J H, Zhang M Z, Zhao Z T. Orbit response matrix analysis and lattice periodicity restoration of the SSRF storage ring[J]. Chinese Physics C, 2009, **33**(9): 785 – 788. DOI: 10.1088/1674-1137/33/9/015.
 - 16 Huang X Y, Lu Y H, Wei S J, *et al.* New orbit correction method based on SVDC algorithm for ring based light sources[C/OL]//10th International Particle Accelerator Conference (IPAC'19). Melbourne, Australia, 19-24 May 2019. Geneva, Switzerland: JACoW Publishing, 2019: 3943 – 3945. <http://jacow.org/ipac2019/papers/thprb062.pdf>. DOI: 10.18429/JACoW-IPAC2019-THPRB062.
 - 17 Liu X Z, Tian S Q, Wu X, *et al.* Feedforward compensation of the insertion devices effects in the SSRF storage ring[J]. Nuclear Science and Techniques, 2022, **33**(6): 70. DOI: 10.1007/s41365-022-01052-8.
 - 18 Huang X, Sajaev V, Sun Y P, *et al.* Linear optics measurement for the APS ring with turn-by-turn BPM data [C]//Proceedings of 12th International Particle Accelerator Conference (IPAC'21). 2021: 707 – 710.
 - 19 Yuan C, Zhang W, Ma T, *et al.* Design and implementation of accelerator control monitoring system [J]. Nuclear Science and Techniques, 2023, **34**(4): 56. DOI: 10.1007/s41365-023-01209-z.
 - 20 Huang C, Lu J, Wen C. Variable Gain Feed-forward Control for Fast Positioning Servo System[C]// Proceedings of the 43rd Chinese Control Conference. South China University of Technology, 2024: 175 – 180. DOI: 10.26914/c.cnkihy.2024.030611.
 - 21 田青, 刘毅, 杨柳, 等. 高重频自由电子激光装置电源控制系统的研制[J]. 强激光与粒子束, 2025, **37**(3): 035020. DOI: 10.11884/HPLPB202537.240423.
TIAN Qing, LIU Yi, YANG Liu, *et al.* Development of a control system for power supplies in a high repetition rate X-ray free electron laser facility[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2025, **37**(3): 035020. DOI: 10.11884/HPLPB202537.240423.
 - 22 Lu Y H, Ye Q, Long F L, *et al.* The magnet power supply control system for high energy photon source[J]. Radiation Detection Technology and Methods, 2026, **10**(1): 102 – 107. DOI: 10.1007/s41605-025-00567-z.
 - 23 Wang R H, Gan Z Y, Guo Y H, *et al.* Design and implementation of a multi-protocol parallel accelerator control system architecture[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2026, **1083**: 171108. DOI: 10.1016/j.nima.2025.171108.