

合肥光源飞扫控制系统研制

张天哲 孔安博 陈 凯 陈留国 刘功发

(中国科学技术大学 国家同步辐射实验室 合肥 230029)

摘要 合肥光源实验站现在的扫描实验全部是基于步进扫描模式的。这种步进模式下由于运动机构存在一定的死区时间,实验耗时长,效率低。为了提高实验效率,设计了一种基于硬件触发的飞扫控制系统,可以实现实验过程的快速连续扫描。该飞扫控制系统包括同步信号采集模块、同步运动控制模块以及软件控制模块,使用 EPICS (Experimental Physics and Industrial Control System) 架构实现设备控制,并基于 Bluesky 完成实验流程控制以及数据采集。随后在合肥光源的软 X 射线磁性圆二色实验站上进行了飞扫控制系统的部署和测试。测试结果表明,在满足采谱性能指标的前提下,该飞扫控制系统可将单次采谱时间从几十分钟量级降低至分钟量级,显著提高了实验效率和用户体验。

关键词 飞扫, FPGA, Bluesky, EPICS

中图分类号 TL503.6

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2024.hjs.47.020103

Development of on-the-fly mode control system for Hefei Light Source

ZHANG Tianzhe KONG Anbo CHEN Kai CHEN Liuguo LIU Gongfa

(National Synchrotron Radiation Laboratory, University of Science and Technology of China, Hefei 230029, China)

Abstract [Background] When conducting experiments at a synchrotron radiation facility, it is necessary to scan the position of the sample or the beam energy within a certain range. The scanning modes are categorized as step scanning and on-the-fly. In the step-scanning mode, there is a significant amount of dead time in the motion mechanism, which leads to long data acquisition times and low experimental efficiency. By contrast, the on-the-fly mode allows for continuous motion while triggering the detectors and sensors, avoiding the dead time of the motion mechanism and greatly improving the efficiency of the experiments. [Purpose] This study aims to propose and implement a hardware-triggered on-the-fly system to achieve rapid and continuous scanning during experimental processes for Hefei light source (HLS). [Methods] The proposed on-the-fly system mainly consisted of a synchronous signal acquisition module, a synchronous motion control module, and a software control module. The design of the hardware synchronous trigger module in the synchronous signal acquisition module was based on the field-programmable gate array (FPGA) development board Zynq7020. The encoder signals were decoded into position signals and used to trigger other devices based on position or time. This made it the central component for the on-the-fly mode. The design of the synchronous motion control module was based on a highly synchronous EtherCAT bus. The motion controller supported multi-axis coordination and programmable trajectory motion to meet the requirements of different experiments. The software control module utilized the experimental physics and

中国科学院人才支撑体系专项(No.KY231000044)资助

第一作者: 张天哲, 男, 1999 年出生, 2021 年毕业于江南大学, 现为硕士研究生, 从事加速器控制技术研究

通信作者: 陈留国, E-mail: chenliuguo@ustc.edu.cn

收稿日期: 2023-09-06, 修回日期: 2023-11-01

Supported by Chinese Academy of Sciences Talent Support System Project (No.KY231000044)

First author: ZHANG Tianzhe, male, born in 1999, graduated from Jiangnan University in 2021, master student, focusing on accelerator control technology

Corresponding author: CHEN Liuguo, E-mail: chenliuguo@ustc.edu.cn

Received date: 2023-09-06, revised date: 2023-11-01

industrial control system (EPICS) architecture for device control, and experiment flow control and data acquisition were implemented using Bluesky platform. Finally, the proposed on-the-fly system has been deployed and tested at the Soft X-ray Magnetic Circular Dichroism (XMCD) experimental station of HLS. **[Results]** The experimental results demonstrate that the on-the-fly mode system not only meets the spectral performance requirements, but also reduces the single acquisition time from tens of minutes in the step-scanning mode to approximately 1 min. **[Conclusions]** Therefore, the on-the-fly system designed and implemented in this study significantly improves the experimental efficiency and user experience.

Key words On-the-fly, FPGA, Bluesky, EPICS

在使用X射线进行材料表征时,相关扫描实验可进行多维度、多模态成像以及吸收谱学测试,从而全面、准确地得到样品内部结构和细节、元素组成和化学状态^[1-2]。合肥光源(Hefei Light Source, HLS)是真空紫外和软X射线同步辐射光源^[3]。目前, HLS 的软X射线磁性圆二色(X-ray Magnetic Circular Dichroism, XMCD)、催化与表面科学和计量等实验站在进行扫描实验时,均采用步进扫描模式。步进扫描模式的扫描过程是电机在运动到设定位置时停止,触发探测器或者传感器完成数据的采集和记录,然后再控制电机运动到下一个设定位置,重复上述过程,直到扫描结束。在步进扫描模式中,电机需要经历多轮的减速、停止与加速过程,由电机运动带来的死区时间在扫描总用时中占据极大比例,导致扫描过程耗时长,实验效率低^[4-5]。解决这个问题的一种有效方法是采用飞扫模式进行扫描实验,让电机在扫描过程中连续运动,并同步采集探测器数据,从而减少扫描用时,提高实验效率^[6]。

目前,国内外已经有一些实验站正在使用或者正在部署飞扫这种快速连续扫描系统,包括能量飞扫和空间位置飞扫。目前飞扫的实现方式主要有两种。第一种系统是使用集成了运动控制、位置捕捉并有同步触发功能的运动控制器,例如西班牙ALBA光源在其BL22线站使用Turbo PMAC控制器实现飞扫^[7]。第二种系统的运动控制部分由MAXv、IcePAP等不具有位置捕捉和硬件触发功能的控制器实现,借助外部计数卡或者同步触发硬件计算触发位置并完成触发,例如BESSY II光源、上海光源、ALBA光源的部分线站使用计数卡实现飞扫^[8-9];中国台湾TPS、日本KEK、法国SOLEIL、英国Diamond、美国NSLS-II、中国北京HEPS等光源通过基于FPGA的同步触发硬件实现飞扫^[10-17]。综合考虑两种方法,为了适应更多种类的运动控制器,本文选择使用第二种方法。参考SOLEIL和Diamond合作研制的硬件同步触发系统PandABox设计了基于国产SoM(System-on-module) Alinx-AC7020的同步

触发模块^[18-20]。开发了基于现场可编程门阵列(Field-Programmable Gate Array, FPGA) Zynq7020的硬件同步触发模块,并以它为核心构建了包含同步信号采集模块、同步运动控制模块、上层软件控制模块的飞扫控制系统。我们将这套飞扫控制系统应用于合肥光源XMCD实验站,实现了单色器能量飞扫实验,并对X射线吸收谱实验数据的一致性、稳定性和重复性等关键指标做了分析。实验结果表明,在满足采谱性能指标的前提下,该飞扫系统可显著提高实验效率和用户体验。

1 系统设计

飞扫的扫描过程主要包含电机运动和数据采集,为了快速、同步地完成扫描,本文设计的飞扫系统,主要由同步运动控制模块、同步数据采集模块以及上层软件控制模块组成。系统结构如图1所示,其中运动控制器负责按照设定的轨迹运动控制多轴电机同步运动,并通过编码器采集运动机构的位置编码信号发送给同步数据采集模块内的硬件同步触发模块。硬件同步触发模块根据编码器信号计算电机运动位置,依据预先设定的位置列表产生触发信号,提供给探测器或传感器触发数据采集。

HLS的控制系统是基于实验物理及工业控制系统(Experimental Physics and Industrial Control System, EPICS)的分布式控制系统^[21]。运动控制器、硬件同步触发模块、探测器或传感器的控制信号以及设备状态信息都通过EPICS网络传送。扫描控制软件基于Bluesky架构,Bluesky是由美国NSLS-II和APS实验室共同研发的用于科学数据采集、管理和分析的软件组件,是建立在硬件抽象层之上的数据收集框架^[22]。飞扫系统底层通过EPICS跟硬件进行交互,实现扫描方式、扫描范围、探测器控制、运动控制等参数的控制,探测器的实验数据采用以太网进行传输。上层应用软件主要实现扫描结果的处理、存储和显示。

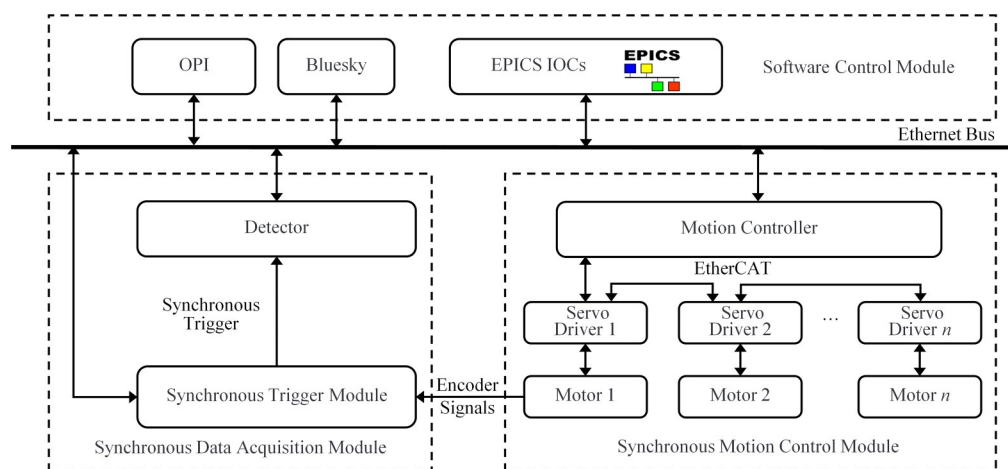


图1 飞扫系统结构图

Fig.1 Structure diagram of the proposed on-the-fly mode control system

1.1 同步运动控制模块

运动控制器负责接收上位机生成的运动路径，控制多轴电机同步运动。本文选择 Zmotion 公司的 ZMC464 运动控制器为同步运动控制模块核心。ZMC464 运动控制器最多支持 64 轴同步控制，支持编程以及 EtherCAT (Ethernet for Control Automation Technology) 接口，支持多轴插补功能，最大脉冲频率为 10 MHz，能提供电机较高的转速和位置精度。驱动器选择的是支持 EtherCAT 总线接口和 CiA 402 协议的驱动器。电机上的编码器信号一分为二，一路给同步触发模块用来计算位置，产生硬件同步触发；一路给运动控制器，实现闭环控制。ZMC464 运动控制器与多台驱动电机的驱动器采用

EtherCAT 主从模式进行通信来实现多轴同步，其中 ZMC464 为主站，挂载多台驱动器为从站。

ZMC464 运动控制器和 EPICS IOC (Input-Output Controllers) 之间采用 TCP 通讯。运动控制器的程序流程如图 2 所示。基于多任务技术进行编程，主任务创建新任务后，任务独立执行，各任务间互不影响。轨迹更新任务在上电后自动创建，循环等待上位机发送的运动轨迹信息，并将这些轨迹点存入运动控制器内的 TABLE 寄存器；主任务在上电后循环运行，根据上位机指令可以完成轴号选择、参数设定、运动等功能，当接收到启动飞扫的指令时创建飞扫任务，依据已设定轨迹完成多轴同步运动，完成运动后飞扫任务结束。

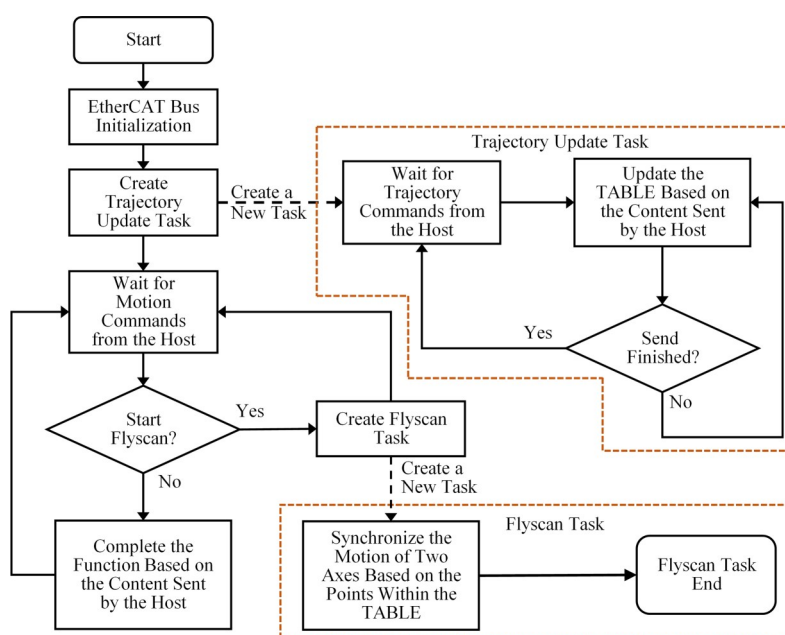


图2 运动控制器程序流程图

Fig.2 Flowchart of the motion controller program

1.2 同步触发模块

同步触发模块是为了在电机快速、连续运动时,根据电机的位置同步地产生触发信号,触发探测器完成数据采集。同步触发模块主要包含 Zynq 核心、编码器控制单元、脉冲 IO 单元、设备监控单元、供电

单元其结构如图 3 所示。Zynq 芯片型号为 XC7Z020-2CLG400,包含 FPGA programmable logic (PL)和 ARM Cortex-A9 processor system(PS),外接主要元器件为 DDR3、QSPI-flash、USB 串口、SD 卡、以太网 PHY。

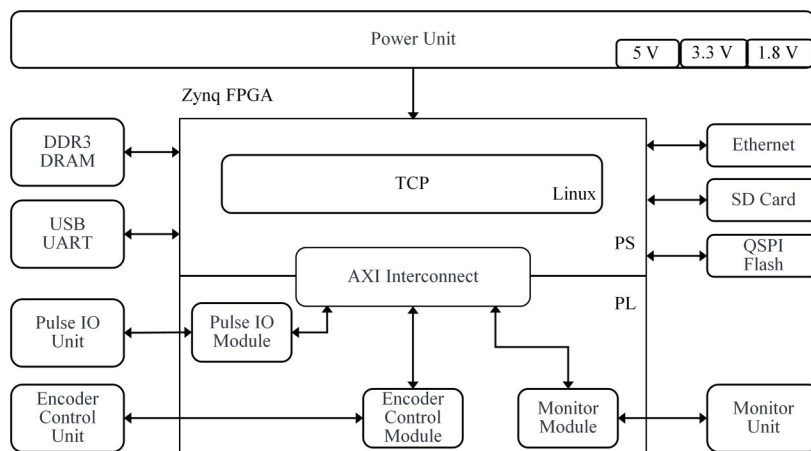


图3 同步触发模块系统结构图
Fig.3 Structure diagram of the synchronous trigger module system

编码器控制单元包括输入控制和输出控制两部分,支持正交(Quadrature)、同步串行接口(Synchronous Serial Interface, SSI)、双向同步串行接口(Bidirectional Synchronous Serial Interface, BISS)和数字同步串行协议(EnDat),使用跳线配置编码器信号类型。输入控制对接收的外部编码器信号进行电平转换后输入至 Zynq 的 PL 编码器端控制模块,输出控制则是将 PL 端编码器控制模块输出的波形输出至外部接口。PL 中编码器控制模块用于与编码器控制单元通信,提供控制信号、采集编码器波形数据并解码得到位置数据,同时也可根据位置序列产生编码信号送至编码器输出。

脉冲 IO 单元输入输出同步脉冲,接收 PL 端脉冲产生模块产生的脉冲信号进行转换输出单端或差分脉冲,接收外部脉冲信号转换发送至 PL 端。PL 端脉冲产生模块与脉冲 IO 单元通信,提供控制信号、采集输入脉冲信号,可配置脉冲数、宽度、频率、触发条件等参数,产生脉冲信号输出至脉冲 IO 单元。

设备监控单元用于采集设备内各类工作电压的状态以及风扇转速和温度数据,通过 I2C 跟 ZYNQ 芯片的 PL 端设备监控模块相连接。

PS 和 PL 之间通过可扩展互联总线(Advanced eXtensible Interface, AXI)互联,PL 端接口配置模块接收 PS 端控制需求和数据采集请求,对编码器控制和脉冲产生模块提供接口配置参数控制,收集位置数据和设备监控数据,打包后通过 AXI 总线发送至

PS 端。PS 上运行 TCP 服务器,上位机可以使用 IOC 通过 TCP 对同步触发模块进行访问,通过读写映射在用户空间的 PL 端寄存器,读取位置信息和配置参数。

1.3 软件控制模块

软件控制模块基于 Bluesky 框架进行开发,其结构如图 4 所示。底层的硬件设备通过以太网接入软件控制模块,通过 EPICS IOC 进行控制和状态读取。Ophyd 层将 EPICS PV 信息抽象为设备对象,并提供给 Bluesky 以 API 接口。在 Bluesky 中,扫描过程被抽象为 Plan,具体为调用实验需要的硬件对象按照实验过程执行一系列原子操作来完成整个实验。Bluesky 将飞扫的 Plan 定义为包括包括 kickoff、complete、collect 三个函数,其中 kickoff 先完成扫描和探测器相关的参数设置然后启动扫描,complete 是等待扫描完成最后执行,collect 完成对探测器数据的采集、处理。RunEngine 是 Plan 的解释器,通过执行设计好的 Plan 实现多设备联动完成特定实验。扫描运行过程中,RunEngine 同步将数据和元数据通过 Documents 的方式抛出,传递给多个回调函数,在回调函数中进行数据的实时处理、显示以及存储。从用户系统获取的包括用户 ID、实验类型、实验参数等内容作为元数据同时被存储,实验数据和元数据统一打包成 HDF5 文件格式,HDF5 可以处理复杂的数据结构,并支持高性能的数据存储和检索。

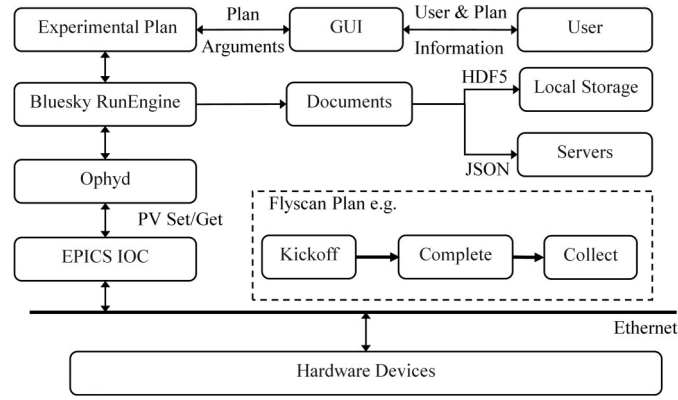


图4 软件控制模块结构图

Fig.4 Structure diagram of the software control module

2 飞扫系统应用

本文设计的飞扫系统在HLS的XMCD线站完成部署并应用在XAS实验采谱中。现场部署示意

图如图5所示,单色器的电机采用了鸣志公司的SSDC06-ECX-H,电机的编码器信号接入同步触发模块。

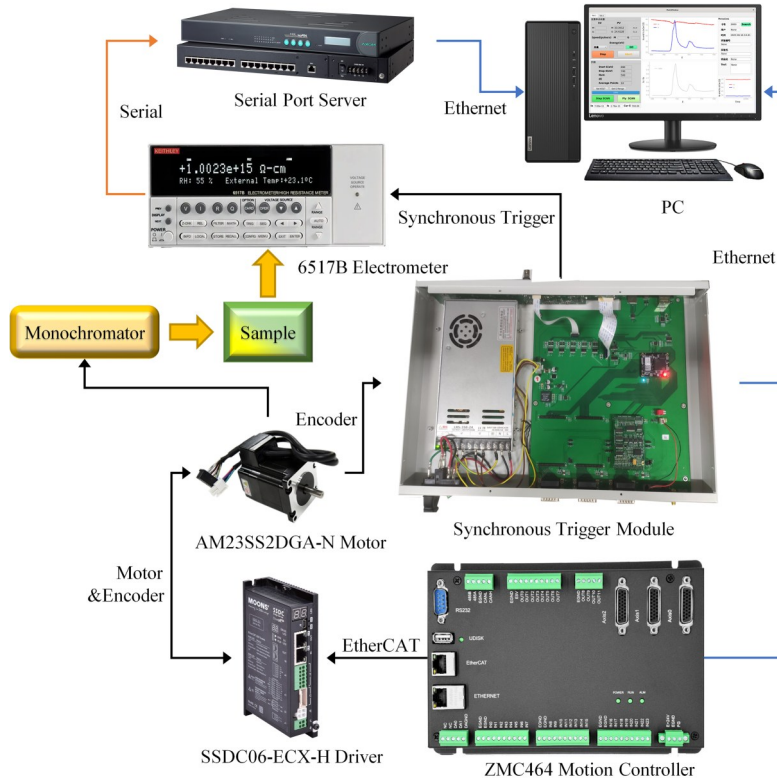


图5 现场部署示意图

Fig.5 Schematic of the on-site deployment

式(1)给出了光栅方程和聚焦关系,其中: α 、 β 分别为光栅的入射角和衍射角; λ 是波长; a_1 是光栅的设计参数; n 为光栅线密度; m 为衍射级次; r_1 、 r_2 分别为光栅的入射臂和出射臂^[23]。依据出射光能量不同计算出 α 、 β 。

$$\begin{cases} \sin \alpha + \sin \beta = n_0 m \lambda \\ \frac{\cos^2 \alpha}{r_1} + \frac{\cos^2 \beta}{r_2} + n_0 a_1 m \lambda = 0 \end{cases} \quad (1)$$

光栅单色器光路示意图如图6所示,由此可得到平面镜和光栅偏转角度的计算公式(2),其中: α 、 β 分别为光栅的入射角和衍射角; θ 、 φ 是平面镜和光

栅的偏转角度; γ 是运动机构的安装误差; X_m 、 X_g 是平面镜和光栅的位置, X_{0m} 、 L_{cm} 、 θ_{0m} 、 X_{0g} 、 L_{eg} 、 φ_{0g} 是初始位置和角度参数由标定得到。

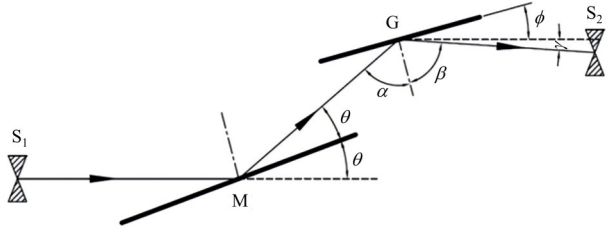


图6 光栅单色器光路示意图
Fig.6 Schematic of the light path in a grating monochromator

$$\begin{cases} \theta = \frac{\pi - \beta - \alpha - \gamma}{2} \\ \varphi = \frac{\pi}{2} - \beta - \gamma \\ X_m = X_{0m} + L_{cm}(\sin(\theta_{0m} + \theta) - \sin \theta_{0m}) \\ X_g = X_{0g} + L_{eg}(\sin(\varphi_{0g} + \varphi) - \sin \varphi_{0g}) \end{cases} \quad (2)$$

综合式(1)和式(2)通过能量计算对应波长得到光栅的入射角和衍射角 α 、 β 进而计算出平面镜和光栅的偏转角 θ 、 φ ,进一步得到能量和平面镜、光栅位置 X_m 、 X_g 之间的关系,即按照特定轨迹同步运动光栅和平面镜就可以连续改变能量。

进行飞扫实验的时候,控制平面镜和光栅位置的两个电机进行同时同步运动。两轴的联动运动控制采用连续直线插补运动,飞扫运动过程中,速度设定值为两个轴的合成速度,XMCD线站光栅-平面镜位置关系如图7所示,在常用实验能量段近似为线性,两个电机的速度近似匀速。同步脉冲的触发选择光栅电机的编码器作为触发。

光电流信号采集使用电流计 6517B, 6517B 可以在设定触发点数量的条件下,通过外触发进行采集并将采集的数据保存在内部寄存器中,当采集到

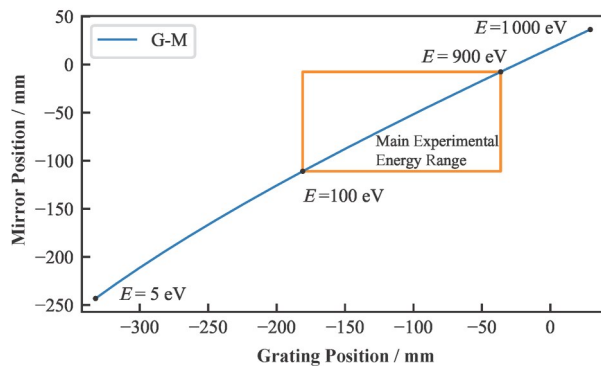


图7 XMCD线站光栅-平面镜位置关系
Fig.7 Relationship between the grating and mirror position in XMCD

数量上限时停止接收触发信号。使用 6517B 的 TRIGGER LINK 触发模式接收同步触发模块的 TTL 输出信号,进行同步数据采集。

上位机运行扫描控制软件,其飞扫的软件流程如图8所示。用户在图形界面上输入和实验相关的用户信息、样品信息以及扫描相关的起始能量、结束能量和能量间隔。根据扫描起始能量、结束能量以及能量间隔这3个参数计算得到对应的扫描能量点数量,再通过式(1)和式(2)计算得到每个扫描能量点对应的光栅和平面镜位置,联合这些位置信息即可得到对应扫描能量范围的光栅和平面镜二维运动轨迹。

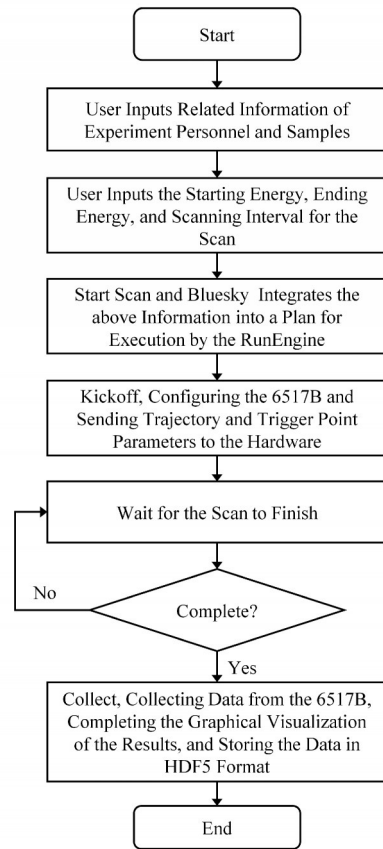


图8 飞扫软件流程图
Fig.8 Flowchart of the on-the-fly mode program

开始扫描后, RunEngine 执行飞扫 Plan, 在 Kickoff 过程完成对 6517B 电流计触发模式、触发点数量的设置以及将扫描轨迹和触发点参数分别发送给运动控制模块和同步触发模块,其中触发点参数以相对位置的形式存储在同步触发模块的序列列表模块,在开始扫描前将其内部位置参数设为 0 与序列列表首行位置对齐,设置结束后会给控制器下发开始飞扫的命令,控制器按照寄存器中保存的扫描轨迹驱动两台伺服电机同步运动。之后进入 Complete

过程等待扫描的结束,扫描结束后收集 6517B 电流计记录的数据,在图形界面上显示扫描结果并将数据以 HDF5 的格式存入数据库。

对于上位机下发的触发点参数,同步触发模块将其存储到序列列表模块中,并在初始状态指向序列列表第一行。扫描过程中,同步运动控制模块依据能量设置参数改变光栅、平面镜的位置,同时编码器将位置信号输入到同步触发模块,同步触发模块解码后得到电机当前位置,将当前位置与内部序列列表模块生成的触发位置进行比较,若满足序列列表当前行的预设条件则生成触发信号,触发 6517B 电流计记录当前电流,同时序列列表内部指向下一行,等待到达下一个触发位置再次触发,直到扫描结束。

3 飞扫控制系统性能测试

3.1 飞扫与步扫对比实验结果

首先是验证飞扫系统实验结果的正确性,即与传统步进扫描结果相比的一致性。对 Fe 样品在能量范围为 690~740 eV、能量分辨率为 0.1 eV 的条件下分别使用飞扫系统和步进扫描方式进行 XAS(X-ray Absorption Spectroscopy)实验。实验结果如图 9 所示,横轴为扫描能量范围,纵轴为两台 6517B 采集电流结果相除后归一化后的值。飞扫系统用时为 1 min 50 s,获得相同结果使用传统的步进扫描方式需要花费 25 min 左右。

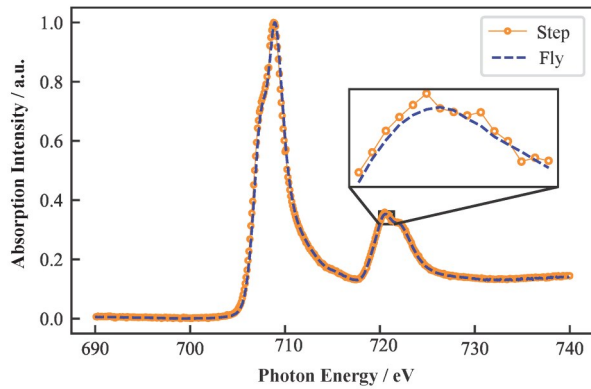


图9 XAS实验的一致性测试结果
Fig.9 Results of consistency testing in XAS experiments

可以看出,两次结果峰形一致、峰位置一致。以步进扫描结果为基准,依据式(3)计算平均绝对误差和相关系数^[24]。平均绝对误差是两组数据每个数据点误差绝对值的平均值,结果小说明两条曲线一致性越好;相关系数是两组数据的线性相关程度,越接近 1 则两条曲线越相关即一致性越好。

$$\left\{ \begin{aligned} \text{MAE} &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_{2,i} - y_{1,i}| \\ r &= \frac{\sum_{i=1}^n (y_{1,i} - \bar{y}_1)(y_{2,i} - \bar{y}_2)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (y_{1,i} - \bar{y}_1)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_{2,i} - \bar{y}_2)^2}} \end{aligned} \right. \quad (3)$$

其中:MAE是平均绝对误差; r 是相关系数; y_1 、 y_2 是步进扫描和飞扫实验中 6517B 采集的电流值。

经过计算,平均绝对误差结果为 0.01,相关系数为 0.993,两条曲线的最高峰半高宽均为 3.40 eV,说明使用飞扫模式只需要花费步进扫描十几分之一的的时间就可以得到一致性很高的结果,实验效率提高了十倍以上。

3.2 稳定性测试

为了测量飞扫系统多次实验结果的重复性即系统的稳定性,本文对 Co 样品在能量范围 275~315 eV,能量分辨率为 0.1 eV,使用飞扫系统进行 XAS 实验,以相同的运动速度采集了 10 组数据。为清晰展示,在原始数据上做了上下偏移,实验结果如图 10 所示。

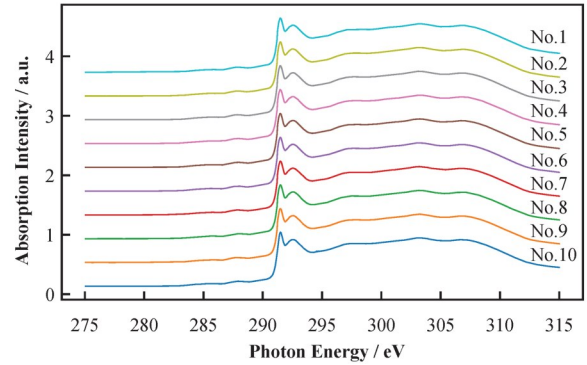


图10 XAS实验的稳定性测试结果
Fig.10 Results of stability testing in XAS experiments

依据式(4)计算多条曲线的平均绝对误差,与式(3)不同的是当有多条曲线时,先计算每条曲线与其他曲线之间的平均绝对误差,然后将它们求平均得到多条曲线之间的平均绝对误差,平均绝对误差越接近 0 说明多条曲线的偏差越小即结果越稳定。

$$\left\{ \begin{aligned} \text{MAE}_i &= \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^m \sum_{k=1, k \neq i}^n |y_{i,j} - y_{k,j}| \\ \text{MAE} &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \text{MAE}_i \end{aligned} \right. \quad (4)$$

其中:MAE是所有曲线的平均绝对误差; MAE_i 是每一条曲线与其他曲线计算出的平均绝对误差结果; n 是曲线数量; m 是数据数量。

10条曲线与其他曲线的平均绝对误差计算结果如表1所示,最后计算10组数据的平均绝对误差为 1.44×10^{-3} ,非常接近0,说明在相同实验条件下使用飞扫模式多次实验结果重复性高,稳定性好。

表1 每组数据的平均绝对误差
Table 1 Mean absolute error for each group

实验序号 Experiment number	平均绝对误差 Mean absolute error / 10^{-3}
1	1.47
2	1.84
3	1.47
4	1.44
5	1.34
6	1.17
7	1.26
8	1.56
9	1.44
10	1.45

3.3 不同扫描速度下的实验结果

对Fe样品改变不同的运动速度使用飞扫模式进行实验,分别花费1 min 20 s、1 min 50 s、5 min 5 s在相同能量范围、相同能量间隔完成三次XAS采谱,得到如图11所示结果,三次采谱结果峰形一致且峰位置一致。依据式(4)计算三次结果的平均绝对误差为 1.5×10^{-3} ,接近于0,可知结果基本一致。因此,本文设计的飞扫系统进行能量扫描受速度影响很小具有通用性,可以根据不同实验的要求,合理选择飞扫的运行速度以达到最好的实验效果。

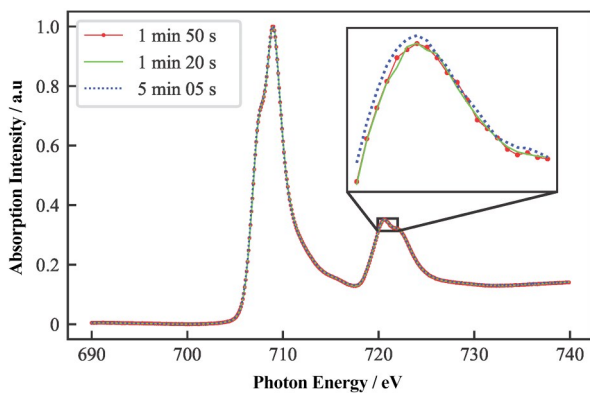


图11 XAS实验不同扫描速度测试结果

Fig.11 Results of different scanning speeds testing in XAS experiments

4 结语

为解决合肥光源线站现有步进扫描速度慢、效率低的问题,本文设计开发了一种基于硬件触发的

飞扫系统,基于Zynq 7020设计了硬件同步触发模块,并采用EtherCAT总线搭建了同步运动控制模块,在EPICS架构基础上采用Bluesky开发了软件控制模块,并在合肥光源的软X射线磁性圆二色实验站上部署、测试了该系统。实验结果表明,使用该系统进行XAS能量采谱,单次采谱时间相较于步进扫描模式的几十分钟量级缩短至分钟量级并且能保证吸收谱结果一致,达到了预定的设计目标。本文设计的飞扫系统提高了扫描实验的实验效率和用户体验,一方面为未来合肥先进光源(Hefei Advanced Light Facility, HALF)线站相关系统的搭建、调试打下了基础,另一方面由于设计的硬件系统和使用的软件框架具有良好的可拓展性,可为其他光源的实验站建设提供参考。

作者贡献声明 张天哲负责硬件开发,系统测试和调试;孔安博负责软件开发;陈凯负责测试和实验数据分析;陈留国负责统方案设计,论文的修改与指导;刘功发负责论文审阅和修改。

参考文献

- Kaulich B, Thibault P, Gianoncelli A, *et al.* Transmission and emission X-ray microscopy: operation modes, contrast mechanisms and applications[J]. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 2011, **23**(8): 083002. DOI: 10.1088/0953-8984/23/8/083002.
- Medjoubi K, Bonissent A, Leclercq N, *et al.* Simultaneous fast scanning XRF, dark field, phase-, and absorption contrast tomography[C]//*SPIE Optical Engineering + Applications. Proc SPIE 8851, X-ray Nanoimaging: Instruments and Methods*, San Diego, California, USA. 2013, **8851**: 100 - 106. DOI: 10.1117/12.2026680.
- 林广, 张大地, 张震, 等. 基于SciCat的合肥光源实验数据管理系统开发[J]. *核技术*, 2022, **45**(2): 020101. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2022.hjs.45.020101.
LIN Guang, ZHANG Dadi, ZHANG Zhen, *et al.* Development of experimental data management system for HLS-II based on SciCat[J]. *Nuclear Techniques*, 2022, **45**(2): 020101. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2022.hjs.45.020101.
- Enquist H, Bartalesi A, Bertrand B, *et al.* Continuous scans with position based hardware triggers[C]. Shanghai, China: 18th International Conference on Accelerator and Large Experimental Physics Control Systems (ICALEPCS2021), 2021. DOI: 10.18429/JACoW-ICALEPCS2021-FRBR04.

- 5 Lin B H, Li X Y, Lin D J, *et al.* Investigation of cavity enhanced XEOL of a single ZnO microrod by using multifunctional hard X-ray nanoprobe[J]. Scientific Reports, 2019, **9**: 207. DOI: 10.1038/s41598-018-36764-8.
- 6 Leclercq N, Berthault J, Langlois F, *et al.* Flyscan: a fast and multi-technique data acquisition platform for the SOLEIL beamlines[C]. Melbourne, Australia: Proceedings of ICALEPCS2015, 2015.
- 7 Reszela Z, Becheri F, Cuní G, *et al.* Implementation of continuous scans used in beamline experiments at Alba synchrotron[C]. San Francisco, CA, USA: 13th International Conference on Accelerator and Large Experimental Physics Control Systems (ICALEPCS2013), 2013.
- 8 Balzer A, Follath R, Suljoti E, *et al.* Status of the continuous mode scan for undulator beamlines at BESSY II[C]. Melbourne, Australia: Proceedings of the 15th International Conference on Accelerator and Large Experimental Physics Control Systems (ICALEPCS2015), 2015.
- 9 周永年, 张招红, 刘平, 等. 基于DCM的QXAFS数据采集与控制[J]. 核技术, 2015, **38**(5): 050101. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2015.hjs.38.050101.
ZHOU Yongnian, ZHANG Zhaohong, LIU Ping, *et al.* QXAFS data acquisition and control based on DCM[J]. Nuclear Techniques, 2015, **38**(5): 050101. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2015.hjs.38.050101.
- 10 Inami N, Takeichi Y, Ono K. Real-time motion control and data acquisition system for scanning X-ray microscopy using programmable hardware[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2014, **502**: 012011. DOI: 10.1088/1742-6596/502/1/012011.
- 11 Allen M S, Sracic M W. A new method for processing impact excited continuous-scan laser Doppler vibrometer measurements[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2010, **24**(3): 721 - 735. DOI: 10.1016/j.ymssp.2009.11.004.
- 12 HEPs. HEPs 线站飞扫实验技术取得重要进展[EB/OL]. [2022-04-25]. https://www.ihep.ac.cn/xwdt2022/gnxw/hotnews/2022/202210/t20221021_6537183.html.
HEPs. Significant progress has been made in the line scan experiment technology at HEPs[EB/OL]. [2022-04-25]. https://www.ihep.ac.cn/xwdt2022/gnxw/hotnews/2022/202210/t20221021_6537183.html.
- 13 Medjoubi K, Leclercq N, Langlois F, *et al.* Development of fast parallel multi-technique scanning X-ray imaging at Synchrotron Soleil[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2013, **463**: 012031. DOI: 10.1088/1742-6596/463/1/012031.
- 14 Izquierdo M, Hardion V, Renaud G, *et al.* SUMS: synchronous undulator - monochromator scans at synchrotron soleil[J]. Journal of Synchrotron Radiation, 2012, **19**(4): 619 - 626. DOI: 10.1107/s090904951201374x.
- 15 Joly L, Otero E, Choueikani F, *et al.* Fast continuous energy scan with dynamic coupling of the monochromator and undulator at the DEIMOS beamline [J]. Journal of Synchrotron Radiation, 2014, **21**(3): 502 - 506. DOI: 10.1107/s1600577514003671.
- 16 Cipiccia S, Batey D, Shi X, *et al.* Multi-scale multi-dimensional imaging at I13-coherence branchline in diamond light source[C]. AIP Conference Proceedings, 2019: 2054. DOI: 10.1063/1.5084623.
- 17 Hidas D, Kiss A M, Rakitin M, *et al.* High precision real-time insertion device and monochromator synchronization at NSLS-II[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2022, **1031**: 166505. DOI: 10.1016/j.nima.2022.166505.
- 18 Zhang S, Abiven Y M, Bisou J, *et al.* PandABox: a multipurpose platform for multi-technique scanning and feedback applications[C]. 16th International Conference on Accelerator and Large Experimental Physics Control Systems (ICALEPCS2017). Barcelona, Spain, 2017.
- 19 Uzun I S, Cobb T, Cousins A, *et al.* Panda motion project-a collaboration between SOLEIL and diamond to upgrade their position and acquisition processing platform[C]. 15th International Conference on Accelerator and Large Experimental Physics Control Systems (ICALEPCS2015). Melbourne, Australia, 2015.
- 20 Christian G B, Abbott M, Cobb T, *et al.* PandaBlocks-a flexible framework for Zynq7000-based SOC configuration[C]. New York, USA: 17th International Conference on Accelerator and Large Experimental Physics Control Systems (ICALEPCS2019), 2019.
- 21 黄章玲, 任广益, 陈裕凯, 等. 合肥光源辐射监测动态发布系统的设计及应用[J]. 核技术, 2015, **38**(5): 050104. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2015.hjs.38.050104.
HUANG Zhangling, REN Guangyi, CHEN Yukai, *et al.* Design and application of HLS radiation monitoring dynamic release system[J]. Nuclear Techniques, 2015, **38**

- (5): 050104. DOI: 10.11889/j. 0253-3219.2015. hjs. 38. 050104.
- 22 Allan D, Caswell T, Campbell S, *et al.* Bluesky's ahead: a multi-facility collaboration for an *a la carte* software project for data acquisition and management[J]. Synchrotron Radiation News, 2019, **32**(3): 19 - 22. DOI: 10.1080/08940886.2019.1608121.
- 23 佟亚军, 何晓业, 赵屹东, 等. 光栅单色器中精密直线位移的测试与标定系统[J]. 核技术, 2009, **32**(5): 321 - 325. DOI: 10.3321/j.issn: 0253-3219.2009.05.001.
- TONG Yajun, HE Xiaoye, ZHAO Yidong, *et al.* A system to measure and calibrate linear displacement of grating monochromators at BSRF[J]. Nuclear Techniques, 2009, **32**(5): 321 - 325. DOI: 10.3321/j.issn: 0253-3219.2009. 05.001.
- 24 Hodson T O. Root-mean-square error (RMSE) or mean absolute error (MAE): when to use them or not[J]. Geoscientific Model Development, 2022, **15**(14): 5481 - 5487. DOI: 10.5194/gmd-15-5481-2022.