

上海软 X 射线自由电子激光装置联锁保护系统

于春蕾, 赵欢, 丁建国

(中国科学院上海应用物理研究所, 上海 201800)

摘要:为快速准确地对加速器关键设备提供有效保护,避免关键部件损坏,上海软 X 射线自由电子激光装置需搭建一套可靠的联锁保护系统。该联锁系统使用分布式架构,并采用可编程逻辑控制器(PLC)和实验物理与工业控制系统(EPICS)进行设计。为满足加速器不同的调试和运行需求,使用 Master 主站+本地子站的设计策略,最终设计并实现了运行模式管理和切换的功能。系统的所有功能已在设备运行中得到了检验,有效保证了加速器的安全运行。

关键词:联锁保护系统;可编程逻辑控制器;模式控制;实验物理与工业控制系统;主站点

中图分类号:TL503.6 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-6931(2018)04-0756-06

doi:10.7538/yzk.2017.youxian.0396

Interlock System for Soft X-ray Free-electron Laser in Shanghai

YU Chunlei, ZHAO Huan, DING Jianguo

(Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

Abstract: In order to protect the key devices rapidly and effectively from unexpected damage, a reliable interlock system was required and developed for soft X-ray free-electron laser (SXFEL) in Shanghai. The distributed interlock system was designed by programmable logic controller (PLC) and experimental physics and industrial control system (EPICS). The functions of management and switch among several modes were employed in the interlock system by the design way of Master station plus local sub-stations mode, so as to meet different demands of commissioning and running of the accelerator. All the functions of the interlock system were verified in the operation. The interlock system can ensure the accelerator work safely.

Key words: interlock system; programmable logic controller; mode control; experimental physics and industrial control system; Master station

上海软 X 射线自由电子激光装置(soft X-ray free-electron laser, SXFEL)是国内在建的第四代光源,是国家“十二五”重大科学装置,电子束设计能量为840 MeV,计划实现 8.8 nm 左右的相干软 X 射线出光、放大饱和,并进行

系列实验深入研究级联谐波放大工作模式,检验并掌握我国未来硬 X 射线 FEL 用户装置的各项重大关键技术^[1-2]。目前已完成的试验装置主要由注入器段、直线段和波荡器段组成。加速器的正常运行需各系统协同稳定工作,当

收稿日期:2017-06-29;修回日期:2017-08-24

作者简介:于春蕾(1987—),女,山东临沂人,助理研究员,博士,从事加速器控制系统研究

网络出版时间:2018-01-10;网络出版地址:<http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2044.TL.20180108.1354.010.html>

意外事故发生时,如真空泄漏、漏水、束流偏差等,须提供可对加速器设备做出保护措施的联锁保护系统,快速可靠地做出相应动作,避免机器设备损伤。联锁保护系统作为 SXFEL 关键系统之一,需具备较高的可靠性和稳定性,本文建立以 PLC 为核心,以网络总线为架构,辅以嵌入式技术和嵌入式工控机实现上位监控功能的分布式联锁保护系统^[3]。为满足不断升级的用户装置的需求,结合联锁系统信号量大、地域范围广的特点,使用 Master 主站点+本地子站点的设计理念,以各站点分段管理并协同工作的方式实现加速器的联锁逻辑控制,远程控制系统使用 EPICS 实现。

1 系统结构

SXFEL 联锁保护系统的远程控制采用基于分布式架构的实验物理和工业控制系统 (EPICS) 实现系统开发和运行, SXFEL 联锁保护系统结构如图 1 所示。操作员界面 OPI 通过局域网与输入输出控制器 IOC 相连,采用 EPICS 的 CA 协议进行通信^[4]。IOC 运行在 Linux 系统上,服务器使用的是 MOXA DA-662 嵌入式计算机,配备 16 个串口和 4 个网口。系统使用嵌入式软硬件技术,完成了嵌入式 EPICS IOC 开发。联锁保护系统与高频系统、真空系统、电源系统、水冷系统、定时系统及人身安全保护系统 (PPS) 等多个系统均设有联锁接口,目前联锁输入/输出控制信号已超过 500 个,其中主要的设备联锁信号列于表 1。联锁功能由 1 个 Master 主站点和 7 个本地子站

点联合完成, PLC 选用 Omron 公司的 CS1G-H 系列, CPU 型号为 CPU43, 利用其较快的运算速度和输入输出能力,通过搭配合适的模块组成不同的 PLC 站点,执行程序数据的采集、运算和输出,实现该站点的联锁功能。

表 1 主要的联锁信号统计

Table 1 Summary of main interlock signals

信号名称	信号数量
定时输出控制	12
真空预警和报警	106
泵电源状态	109
真空阀门状态和开关控制	75
调制器状态和开关控制	24
PPS 输入输出	3
冷却水状态	78
RF 开关	8
漏水和气压报警	15

2 PLC 联锁系统

考虑到系统的高可靠性要求和工作现场的电磁干扰以及被控对象的特殊性需求,采用在工业控制领域已广泛应用的 PLC 作为核心的系统构建方案。联锁相关的输入和输出信号全部为通过电缆直接连接的硬件信号,运行参数全部保存在 PLC 控制器内。因此,联锁保护逻辑功能不依赖于后台软件,在联锁设备正常运行并已正确设置的前提下,后台软件及网络故障、界面关闭、IOC 重启等均不影响安全联锁系统的正常运行。

2.1 站点逻辑

SXFEL 联锁保护系统信号多,参与联锁的系统和设备种类繁多,在设计时已考虑为今后升级的用户装置保留了余量,目前联锁系统由 1 个 Master 站点和 7 个分管本地联锁逻辑的子 PLC 站点构成。其中注入器段设 1 个子站,主加速器段根据 L1、L2、L3 3 个加速段设 3 个子站,波荡器段根据 FEL HGHG 级联的第 1 级与第 2 级设 2 个子站,光束诊断线设 1 个子站。光束线站点的联锁功能相对独立,与其他站点无数据交换,除光束线站点外各站点间的结构和信号传递如图 2 所示。

Master 站点具备运行模式管理和切换的

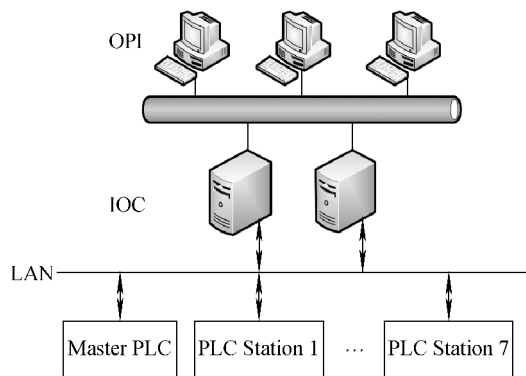


图 1 SXFEL 联锁保护系统结构

Fig. 1 Structure of interlock system for SXFEL

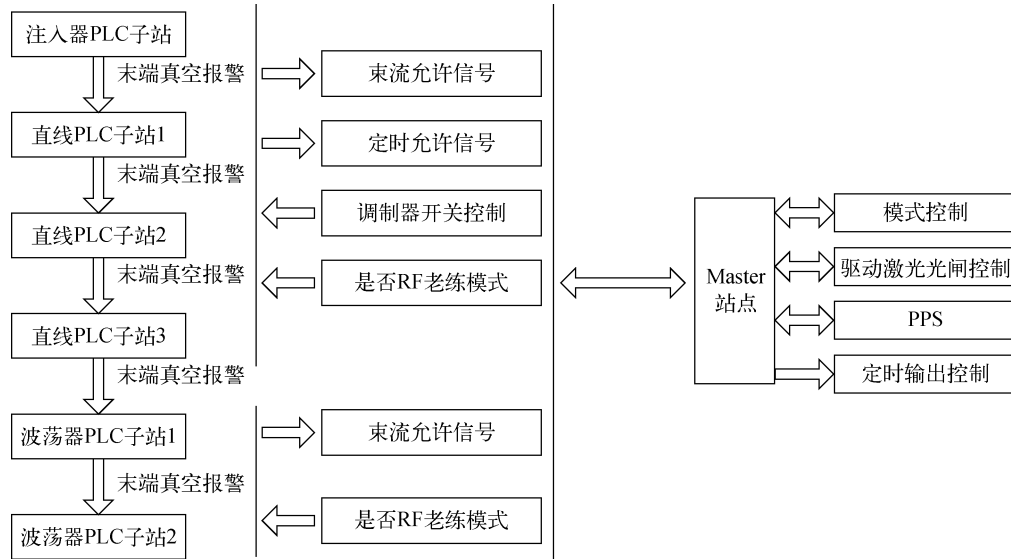


图2 联锁站点结构图

Fig.2 Scheme of interlock stations

功能,且能综合所选的模式和各联锁输入信号做出相应的逻辑判断和响应。一是将全局联锁信号、来自各站点的输出信号逻辑综合后扇出至注入器、主加速器、波荡器各站点参与联锁;二是要控制定时系统的输出信号,以关闭/开启定时系统的时序信号向设备的输出,并获取驱动激光光闸状态,关闭/开启驱动激光的光闸。此外,Master 站点接收2个PPS的输入信号,并通过逻辑算法输出1个联锁信号返回至PPS。

本地子站点连接所在加速器段的真空、阀门、水冷、气压、漏水等信号,各子站点依照加速器各段不同的联锁需求运行不同的联锁逻辑,保障本段设备的正常运行,并综合各逻辑信号后,向Master 站点发出束流允许信号和定时时序控制输出信号。子站的束流允许信号提供给Master 站点决定是否关闭光阴极电子枪驱动激光的光闸以停止束流,时序控制信号是Master 站点控制各功率源站设备定时输出的主要依据。此外,SXFEL 共有12台调制器,注入器和直线段的4个子站点还需根据调制器所在段的联锁信号和来自Master 站点的指令,完成调制器联锁状态的判断,控制调制器的运行和关闭。

本地子站的另一主要功能是实现本地真空保护功能,当出现真空泄漏时,通过阀门控制实现真空隔离,避免泄漏扩散。子站点之间需传输真空报警信号,上游站点将段末的真空报警

信号传送给下游子站作为真空保护输入信号。每个真空规设定两个Setpoint 阈值,当真空低于预警值时,联锁系统输出停止加速器束流的联锁信号;当真空度低于报警阈值时,启动真空保护,关闭对应的真空隔离阀门。即使本段无真空报警,PLC 站点接收到上游站点的末端真空报警信号,同样进行相应的联锁处理。段间阀门的控制与运行模式相关,且总是留给下游的PLC 控制。

2.2 运行模式

SXFEL 已于2016年12月完成所有的设备安装并进入调束阶段,在束流调试初期,需进行高频老练及加速器各段的调试。为方便物理人员使用,按照加速器运行的不同状态,联锁保护系统实现了模式控制和切换功能,调束人员可根据调试的具体情况选择特定的模式,联锁系统可在不同模式下匹配不同的联锁逻辑。

SXFEL 联锁保护系统目前共有7个运行模式,分别如下。

1) 停机模式。SXFEL 运行在停机模式下需关闭驱动激光光闸,停止除束测系统外的所有时序触发,关闭所有真空阀门。

2) RF(radio frequency)老练模式。RF老练模式下需停止驱动激光的定时输出控制并关闭激光光闸,在正常联锁状态下保持所有功率源的定时触发。

3) 注入器调试模式。此模式下仅进行注入器段的束流调试,注入器段开启正常的联锁保护,旁路直线段、波荡器段和束线段的联锁输入。

4) 主加速器调试模式。注入器和直线段进行束流调试,需在注入器段至主加速器末端建立正常的联锁,旁路掉波荡器段和束线段的联锁输入。

5) FEL 放大器调试模式。主加速器及波荡器段参与束流调试,在主加速器段到波荡器末端建立正常的联锁条件,包含波荡器的末端 B 铁、旁路束线段的联锁输入。

6) 运行模式。SXFEL 各段进入正常的运行状态,此时联锁保护系统按照预定的联锁逻辑正常运行。

7) 激光系统调试模式。激光系统调试时保留激光系统的时序触发,停止除束测系统外所有的定时输出。

模式控制使用硬件实现,模式面板的控制和具体的逻辑切换全部由 Master 站点管理实现。模式控制面板的设计如图 3 所示,需操作员使用钥匙启动模式选择功能,钥匙开关在“模式锁定”和“模式选择”之间切换。进入“模式选择”后,通过点击“选择按钮”可在 7 种模式下循环切换,选择完成后用钥匙旋转至“模式锁定”完成切换。Master 站点控制面板的所有操作,并在锁定模式后发送有效信息至各子站点和设备,整个系统实现在新模式下的联锁逻辑切换。

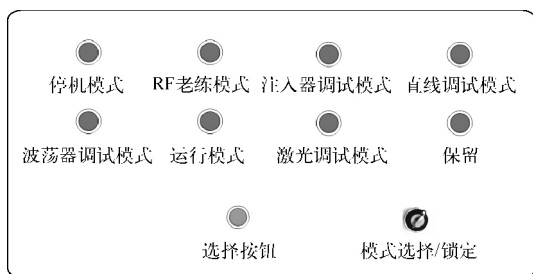


图 3 模式选择控制面板设计

Fig. 3 Control panel of mode selection

2.3 故障信号锁存

一旦参与联锁的设备发生故障或信号超出设定的阈值,联锁保护系统将按预定的联锁逻辑采取保护措施,输出相应的联锁保护信号。

当故障信号恢复正常,此时的联锁输出信号是否恢复取决于是否将联锁信号锁存^[5]。加速器正常运行时,故障信号一旦锁存,即使输入信号恢复正常,也必须由操作员确认后才能撤销联锁状态,无法自动复位。

SXFEL 联锁保护系统在装置正常运行或调试模式下,需锁存发生的联锁故障,而在 RF 老练模式时,由于各系统状态未达到运行标准,锁存功能可能会导致操作员频繁的复位操作,所以采用自动复位的方式消除联锁输出。Master 站点会发送是否进入 RF 老练模式的信号给各子站点,各子站点根据此信号判断本地联锁是否需锁存故障信号。对于每个 PLC 站点,每个联锁输入信号均对应 1 个锁存信号和 1 个复位信号,SXFEL 联锁输入信号的处理流程如图 4 所示。

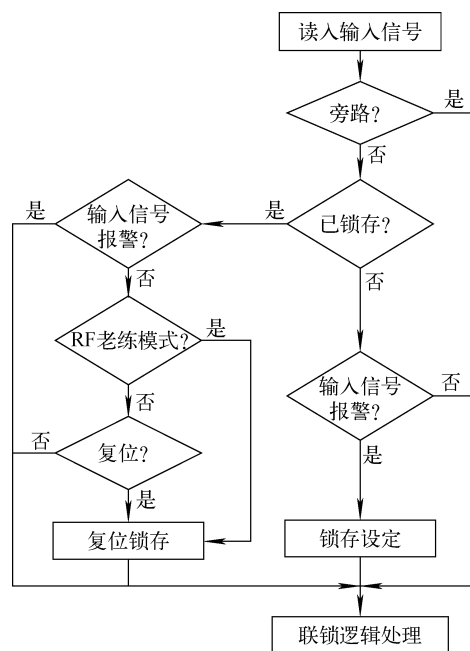


图 4 输入信号处理流程

Fig. 4 Work flow of input signal

3 EPICS 控制系统

IOC 作为 EPICS 的输入输出控制器,是将 I/O 设备信息纳入到 EPICS 控制最关键的部分。最初的 EPICS IOC 只能运行在 VxWorks 等少数 RTOS 上,随着 RTOS 和 Ethernet 的发展,EPICS 开发者通过增加 OSI 中间件的方法加入了对 POSIX 标准的支持,使 EPICS IOC

core 可被移植到多种 RTOS 中^[6]。SXFEL 联锁保护系统使用 MOXA DA-662 嵌入式计算机,通过 EPICS 核心程序的移植和交叉编译的方法,将 IOC 整合到 DA-662 内置的 Monta Vista Linux 系统上。联锁保护系统的 IOC 使用日本 KEK 开发的 netDev 设备驱动软件,该软件能实现对 OMRON CS1 系列以太网模块的通信支持,使用基于 Client/Server 的异步通信工作模式,支持各种常用的 EPICS 记录类型^[7]。通过软件包内建 OMRON INS 通信协议,IOC 可直接访问 PLC 中的内存映射表内容。

netDev 基于多进程的异步驱动,使用了套接字编程技术,支持 UDP 和 TCP 通信协议。

TCP 是基于连接的协议,在正式收发数据前,一定要经客户请求建立连接,服务器接受连接请求这一过程;而对于采用 UDP 传输协议的通信双方则不需要这一步,因此 SXFEL 联锁保护系统采用 UDP 通信协议。

操作员接口界面采用 EDM 开发,由联锁系统主界面和各段分界面组成,SXFEL 注入器部分联锁界面如图 5 所示。主界面中显示装置目前的运行模式、各站点的联锁状态以及真空、水冷等联锁信息的总览。在各加速器段和波荡器段的分界面,可进一步获得联锁输入信号的具体状态信息,并能进行相应的复位、旁路和设

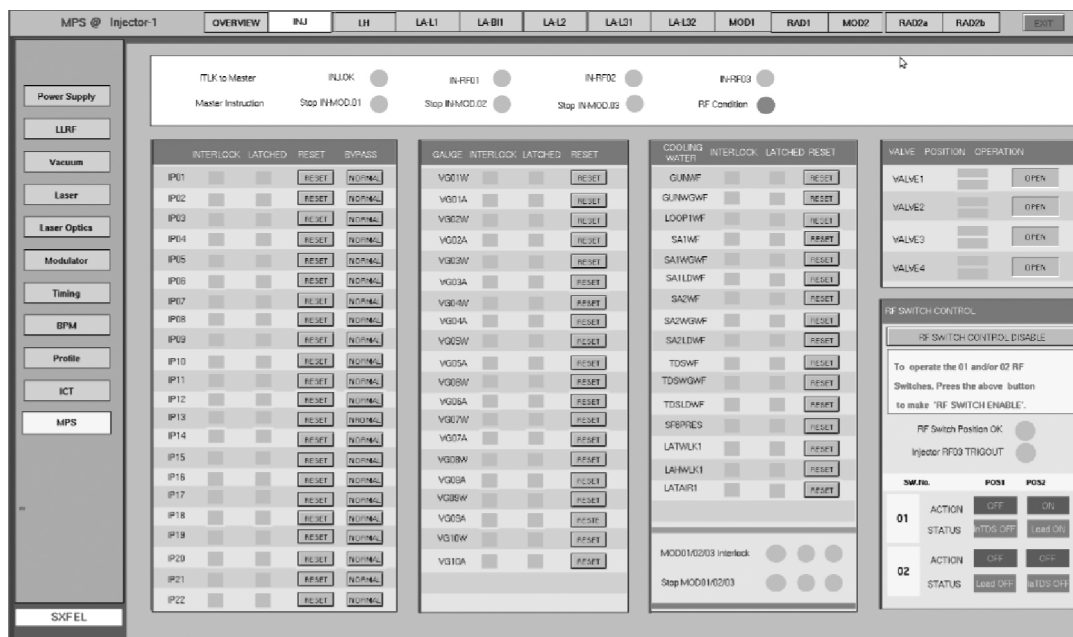


图 5 SXFEL 注入器部分联锁界面

Fig. 5 Interface of interlock system for SXFEL injector

4 小结

SXFEL 联锁保护系统使用 PLC 完成了所有联锁信号的采集、运算和联锁保护输出,通过 Master 主站点+本地子站点的设计方案,实现了具备运行模式切换和管理功能的联锁保护系统,完成了真空、水冷、高频、定时和人身安全等各系统的联锁保护要求。采用基于“标准模型”的 EPICS 分布式控制系统,搭建并实现了 SXFEL 联锁保护系统的远程控制。通过在线测试,系统的响应时间小于 15 ms,满足 SXFEL

试验装置在重复频率 10 Hz 下 100 ms 响应时间的物理需求,该性能也同时满足未来升级为 50 Hz 重复频率下提出的 20 ms 响应时间的要求。经过长时间的运行检验,SXFEL 联锁保护系统稳定可靠,联锁功能正常,有效满足了各阶段调试和运行的要求。

参考文献:

- [1] 赵振堂,王东. 种子型高增益自由电子激光研究进展[J]. 激光与光电子学进展,2013,50(8): 1-13.

- ZHAO Zhentang, WANG Dong. Seeded high-gain free-electron lasers[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(8): 1-13 (in Chinese).
- [2] 谷端,赵明华. 上海软 X 射线自由电子激光束流准直[J]. *强激光与粒子束*, 2012, 24(9): 2 183-2 186.
- GU Duan, ZHAO Minghua. Beam alignment for SXFEL[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2012, 24(9): 2 183-2 186(in Chinese).
- [3] 胡啸,熊永前,李东,等. 基于 PLC 的紧凑型回旋加速器联锁保护系统[J]. *电气传动*, 2010, 40(9): 66-70.
- HU Xiao, XIONG Yongqian, LI Dong, et al. Machine interlock and protection system based on PLC for compact cyclotron[J]. *Electric Drive*, 2010, 40(9): 66-70(in Chinese).
- [4] 郭玉辉,于春蕾,徐卫彬,等. ADS 注入器 II 控制系统软件平台设计[J]. *原子能科学技术*, 2014, 48(增刊): 704-707.
- GUO Yuhui, YU Chunlei, XU Weibin, et al. Design of software platform for injector II control system in ADS[J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2014, 48(Suppl.): 704-707 (in Chinese).
- [5] 仇文君,周大勇,陈建锋,等. 基于 PLC 的直线加速器联锁保护系统[J]. *核技术*, 2008, 31(7): 506-510.
- CHOU Wenjun, ZHOU Dayong, CHEN Jianfeng, et al. Machine interlock and protection system based on PLC for the SSRF linac[J]. *Nuclear Techniques*, 2008, 31(7): 506-510 (in Chinese).
- [6] 蒋舸扬,方文定,沈立人. 嵌入式上海光源 EPICS 插入件控制系统[J]. *强激光与粒子束*, 2013, 25(4): 1 001-1 004.
- JIANG Geyang, FANG Wending, SHEN Liren. Embedded EPICS based control system of insertion devices of Shanghai Synchrotron Radiation Facility[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2013, 25(4): 1 001-1 004(in Chinese).
- [7] ODAGIRI J, CHIBA J, FURUKAWA K, et al. EPICS device/drive support modules for network-based intelligent controllers[C]// *Proceedings of ICALEPCS 2003*. Gyeongju, Korea: [s. n.], 2003.