

一个基于 EPICS 框架的 EPU 前端反馈系统

蒋舸扬 姜伯承 方文定 陈广花 沈立人

(中国科学院上海应用物理研究所 上海 201800)

摘要 插入件是现代光源重要组成设备之一,其质量直接影响上海光源整体性能。由于建造和安装工艺的限制,插入件的磁场会对束流轨道稳定性产生影响。为降低对束流的扰动,在插入件电子束流入口和出口位置增加校正线圈实现自动补偿功能。因此我们设计了基于 EPICS 的插入件前端反馈系统,经测试,该前馈系统用户界面简洁,反馈控制功能完整可靠,实时性高,提高了束流的稳定性,为试验站稳定供光提供了保证。

关键词 粒子加速器,插入件,控制系统,EPICS,IOC

中图分类号 TN82

上海光源由一个 150 MeV 电子直线加速器、一个全能量增强器和一个 3.5 GeV 电子储存环组成。首期工程的 5 台插入件,包括两个真空内波荡器、一个椭圆偏振波荡器和两个扭摆器。其中,椭圆极化波荡器(Elliptically Polarized Undulator) EPU10 为软 X 射线谱学显微光束线站供光,是我国最长的一台波荡器^[1]。该 EPU 由 4 列安装在机械大梁和滑动梁上的磁化块组合构成,用户可通过 6 个独立伺服电机在一定范围内精确控制大梁和滑动梁位置,其中 4 个电机控制大梁上下运动调整磁间隙(GAP);2 个电机控制滑动梁横向移动调整磁场相位(SHIFT)。整个 EPU 系统由用户通过控制大梁和滑动梁的运动,带动安装其上的磁化块运动,从而改变磁场,最终实现同步辐射光极性的调整以满足不同物理实验的需求。

同步辐射光源对插入件的基本要求,是磁场调节对全环运行有尽可能小的不良影响,即要求插入件对全环闭轨扰动极小,不会因为插入件的调节影响环中其他光束线用光。但是,由于制作和安装工艺的限制,插入件安装后,会对束流轨道有所影响。为消除此类扰动,需建立一个闭环控制系统(EPU 前馈控制系统),主要内容包括在插入件的束流入口和出口位置各安装 4 个电磁校正线圈,分别由两组校正线圈电源控制,用于束流水平和垂直方向的校正;在梁位置改变时通过光栅尺实时反馈 GAP 和 SHIFT 位置,根据事先设定的 GAP 和 SHIFT 值及对应补偿线圈的电流值,自动设定校正线圈电流^[2]。同时,该闭环控制系统软件应基于 EPICS 框架和分

布式架构,以便无缝接入上海光源整个 EPICS 控制系统。

1 系统结构

EPU 前馈控制系统结构见图 1。

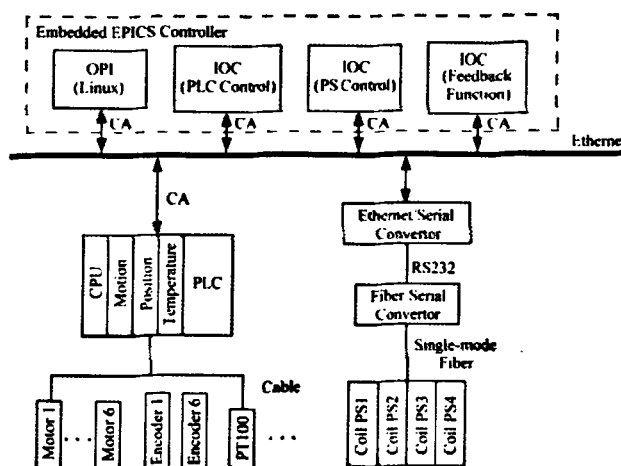


图 1 EPU 前馈控制系统结构
Fig.1 Architecture of EPU front-end feedback system.

EPU 前馈控制系统结构的核心部分由三个功能独立的 IOC (Input Output Controller)构成,驻留在一台嵌入式控制器中并通过以太网和 CA (Channel Access)协议进行互联。PLC 控制 IOC 负责控制一台西门子 S7-300 型 PLC。PLC 主要由运动模块、位置模块、网络模块和温度模块组成,通过电缆分别和电机、光栅尺及多个温度探头连接^[3]。IOC 通过

EPICS 的驱动程序将 EPICS 的 CA 协议转换为本地 PLC 通讯协议以实现电机和光栅尺的监控。电源监控 IOC 负责校正线圈电源的控制, 通过 EPICS 的串口驱动程序, 将 CA 协议转换为串口协议并在硬件上通过网络到串口及串口到光纤的转换, 实现光电隔离方式下 4 台数字电源的输入输出控制。第三个独立的 IOC 专门用于前馈逻辑的实现, 通过 CA 协议实时检测 PLC 控制 IOC 反馈的 GAP 和 SHIFT 读数, 比对预先存储在 IOC 中的查找表来获取对应的校正线圈电源值并立即通过电源监控 IOC 设置 4 个校正线圈电源电流值。整个前馈系统通过 3 个 EPICS IOC 的协同实现了闭环控制的同时, 通过 IOC 的协议转换将原本只能本地控制的 PLC 和电源控制器接入到光源的整个 EPICS 控制系统中, 实现了中控室对设备的远程控制。

2 软件设计

2.1 EPICS 介绍

EPICS (Experimental Physics and Industrial Control System) 是 20 世纪 90 年代初由美国洛斯阿拉莫斯国家实验室(LANL)和阿贡国家实验室(ANL)等联合开发的大型控制软件系统^[4], 许多大型科学研究工程项目都开始采用, 如中国科学院高能物理研究所的 BEPCII、上海光源、合肥等离子体物理研究所的 EAST 装置等。EPICS 软件结构共有 3 层:

(1) IOC: 输入输出控制器。它的核心是一个常驻内存的 runtime database 系统及相应的 record driver 和 device driver, 以记录的形式存在, 在本地实现对底层设备的输入输出控制。同时, 用记录间的逻辑连接可全部或部分实现此 IOC 对应设备的控制流程。整个控制系统中, 通过唯一的记录名称 (Process Variable) 来访问记录的值及其属性以实现对实际硬件设备的输入输出控制。

(2) CA: 通道访问协议。建立在 TCP/IP 协议基础上的一种访问机制。为 OPI (Operator Interface) 和 IOC 提供应用接口。提供通道定位、数据读写、访问监控、连接监测和自动重接等, 主要为 IOC 的记录提供封装好的网络访问服务。

(3) OPI: 操作台接口。主要包括各种用户界面/运行工具、报警管理工具、数据存档工具等。本系统的 OPI 采用 Linux 操作系统管理的 PC 机, 使用 EPICS 自带的界面编写工具 EDM 来定制各种 GUI(Graphical User Interface)界面, 用 CA 协议访问 IOC 中的运行数据库, 实现人机交互。

2.2 IOC 的实现

2.2.1 PLC 控制 IOC

底层西门子 S7-300 PLC 采用专门的运动模块来控制 6 个伺服电机, 为达到 μm 精度, 系统采用 ENDAT 接口的海德汉 LC481 光栅尺和 PLC 连接, 多个光栅尺的数据经过 PLC 处理后, 通过 PLC 专门的以太网模块 CP343 传递转换后的 GAP 和 SHIFT 值给 PLC 控制 IOC。除 GAP 和 SHIFT 值外, PLC 和 IOC 还要对其它大量数据如电机运动状态、温度信号等进行交换。在西门子通信协议不公开的情况下, 折中办法是在 PLC 上建立一个数据交换区, IOC 和 PLC 根据需要分别对其修改, 当数据改变后, 以中断方式通知对方进行读取, 实现监测数据的即时更新。软件实现过程为: 先建立 EPICS 开发环境, 在 LINUX 下用 GCC 编译器生成 S7-300 PLC 的 EPICS record driver 和 device driver 的 IOC 应用程序, 编写记录支持程序入口表 (Record Support Entry Table) 和设备支持程序入口表 (Device Support Entry Table) 及与 PLC 进行交互的 runtime database 文件, 编译后即完成 IOC 上的应用软件设计^[5]。在 PLC 控制 IOC 上运行的多条记录中, 以下实例为和前馈功能直接相关的获取 GAP 的 ai 记录: record(ai, "\$ (id): cur_gap_pos_mon")

```
{
    field(DESC, "current gap position")
    field(SCAN, "I/O Intr")
    field(DTYP, "S7plc")
    field(INP, "@Siemens_S7: 0/2 'T=UINT32'")
    field(LINR, "LINEAR")
    field(EGUL, 0)
    field(EGUF, 429496.7295)
    field(FLNK, "SR-PS:H08EPU:interp.PROC")
}
```

EPICS 数据库提供了 5 种扫描类型: 周期扫描、事件驱动、I/O 中断、被动处理 (Passive) 和一次扫描^[6]。在实例中看出, 这里 ai 扫描类型采用 I/O 中断方式, 避免了频繁查询方式对 IOC 资源的消耗。另外 ai 记录的每次执行将用 FLNK 方式向前驱动前馈功能 IOC 执行, 这种中断传递和繁殖的机制将提高整个系统运行速度和性能。

2.2.2 电源监控 IOC

前馈系统的 4 台校正线圈电源采用本所开发的数字电源控制器, 电源监控 IOC 可通过串口光纤和 DSP 控制器按照指定的通讯协议通信从而获取电源状态和设置电源参数。整个 IOC 应用软件设计结构

和电源控制 IOC 类似, 依旧是记录驱动、设备驱动及运行数据库的设计。为避免自己编写繁琐的串口驱动程序, 我们采用 PSI 开发的 StreamDevice 驱动^[7]。StreamDevice 是一种基于数据流的设备通讯驱动软件模块, 通过发送和接受字符串指令来实现对串行或网络设备的控制。每个 StreamDevice 支持的 EPICS 记录, 其 INP/OUT 域都需使用一个由 ASCII 码定义的 protocol 协议文件来指定如何控制设备的输入/输出, 协议文件定义了记录和串行设备间的各种通讯协议。

```
以设置电流的 ao 记录为例:
record(ao,"$(PREFIX):SETI")
{
    field(DESC, "Magnet direct current set")
    field(DTYP, "stream")
    field(SCAN, "Passive")
    field(OUT,  "@power.proto  ao_set_current
terminall")
    field(EGU, "Amps")
    field(PREC, "4")
}
```

记录中 OUT 域指定了 power.proto 协议文件中的 ao_set_current 协议负责解析设置电流的串口通信指令。ao_set_current 协议如下:

```
ao_set_current {
    out "current %.2f"; #输出字符串"current"和保留 2 位小数的浮点数
    in "current %f";    #读入字符串"current"和电流值(浮点数格式)
}
```

由此可见, 基于 StreamDevice 驱动电源控制 IOC 开发相对简单, 用已有的 EPICS 第三方驱动极大地减少了 IOC 驱动开发的工作量, 这也是上海光源采用 EPICS 作为控制系统平台的原因之一。

2.2.3 前馈功能 IOC

整个前馈系统中, PLC 控制 IOC 和电源监控 IOC 主要实现了设备的驱动和控制, 而前馈核心逻辑的实现是通过前馈 IOC 完成的。与此前的两个 IOC 设计不同, 前馈 IOC 并不直接对硬件设备控制, 因此只需进行记录驱动支持和动态数据库的开发。前馈 IOC 只采用了 2 条记录, 一条记录用来打开/关闭前馈功能, 另一条 aSub 记录主要内容如下:

```
record(aSub,"$(P)interp")
{
    field(INPA,"SR-ID:H08epu:cur_gap_pos_mon
CA")
```

```
field(INPC,"SR-ID:H08epu:cur_shift_pos_mon
CA")
field(INPB,"$(P)feedback_auto PP")
field(OUTA, "SR-PS:H08EPU-PS1:SETI CPP")
field(OUTB, "SR-PS:H08EPU-PS2:SETI CPP")
field(OUTC, "SR-PS:H08EPU-PS3:SETI CPP")
field(OUTD, "SR-PS:H08EPU-PS4:SETI CPP")
}
```

记录有 3 个输入端子, 分别是 GAP、SHIFT 和前馈功能使能开关; 4 个输出端子, 分别对应 4 个校正线圈电源, 整个设计简单明了(图 2)。

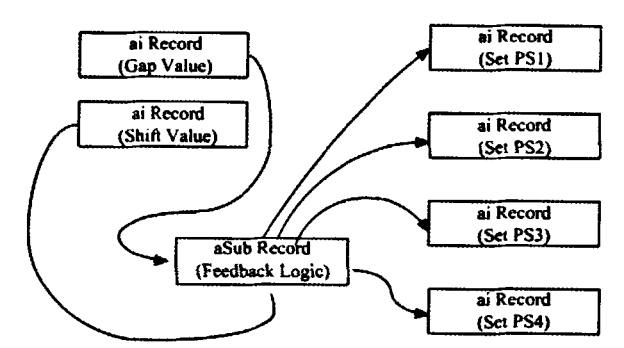


图 2 EPU 前馈系统 EPICS record 逻辑关系
Fig.2 Logic relationship of EPICS records in front-end feedback system.

当 aSub 记录被 PLC 控制 IOC 上运行的 GAP 或 SHIFT 记录激活时, 由记录驱动程序中的处理函数实现前馈功能。对记录驱动程序而言, 在初始化函数(init)部分从文件系统读取预设的几千条 GAP、SHIFT 及对应电源数据, 以三维数组的形式存放在 IOC 内存中, 数据内容片段见表 1。

表 1 EPU GAP 位置电源查找表
Table 1 Ps's lookup table for EPU's GAP position.

GAP / μm	SHIFT / μm	PS 1 /amp	PS 2 /amp	PS 3 /amp	PS 4 /amp
58.1	0	-0.14	0.02	0.31	0.17
58.2	-48.0	0.04	-0.08	0.55	-0.48
58.2	-47.9	0.04	-0.08	0.55	-0.47
58.2	-47.8	0.04	-0.08	0.55	-0.47
58.3	0	-0.14	0.02	0.31	0.17

记录驱动的处理函数(process)采用折半查找方式在以递增顺序存放在内存中的三维数组中先查找 GAP 或 SHIFT 值, 而后根据数组索引得到对应的电流值, 再通过数据库的 db CALink 方式驱动电源监控 IOC, 将电流值设置到校正线圈电源中, 从而实现整个前馈功能。值得一提的是, 在 GAP 或

SHIFT 连续改变时, 根据查找表内容, 在 GAP 位置变化时相对上一位置往往只有部分电源值需要重新设置, 因此在处理函数中需加以判断。这种方法有效地降低了电源监控 IOC 串口发送的数据量, 消除电源监控 IOC 的串口阻塞问题发生的可能。

2.3 用户界面

前馈功能的控制界面如图 3, 是用 EDM 软件来设计的。EDM 是一个基于 GUI 的 OPI 工具, 包含有一组图形控件, 通过设定控件的 PV 属性, 可遵循 CA 协议直接访问 IOC 上对应的运行数据库。

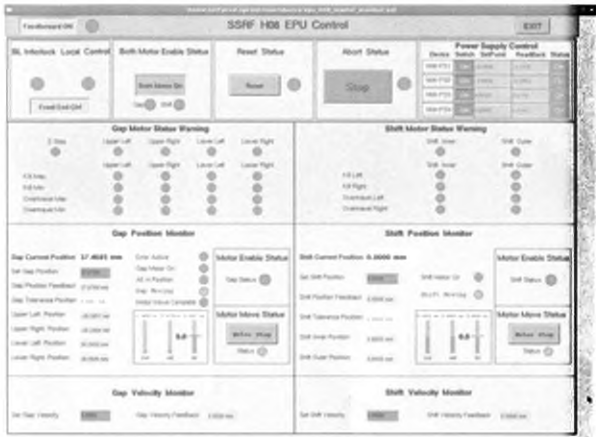


图 3 EPU 前馈系统用户界面
Fig.3 GUI of front-end feedback system.

前馈功能的关闭/使能按钮位于 EPU 控制界面的左上角, 用户可根据调试或运行状态的需要点击按钮打开或关闭前馈功能。所有技术细节都通过 IOC 功能的实现在后台完成。

3 系统应用

在 EPICS 软件环境下实现的 EPU 前端反馈系统, 已成功应用于上海光源软 X 射线谱学显微光束线站的调束及用户使用运行, 降低了插入件磁场对束流轨道的扰动。同时, 用此前馈系统的经验, 在此技术基础上通过修改已实现上海光源其它 4 台插入件实时前馈功能, 光源整体束流轨道性能得以提升, 降低了后级快反馈系统的负担。图 4 为 EPU 的 GAP 从 58.2 mm 调整到 90 mm 时, 前馈功能打开和关闭情况下, BPM 实时监测到的束流轨道图像。图中的两组曲线, 振幅较大的是无前馈时, 束流 X 方向扰动情况; 振幅较小的代表打开前馈功能后, 束流轨道 X 方向扰动情况。对比看出, EPU 系统加入前馈功能后, 束流稳定性得到提高。

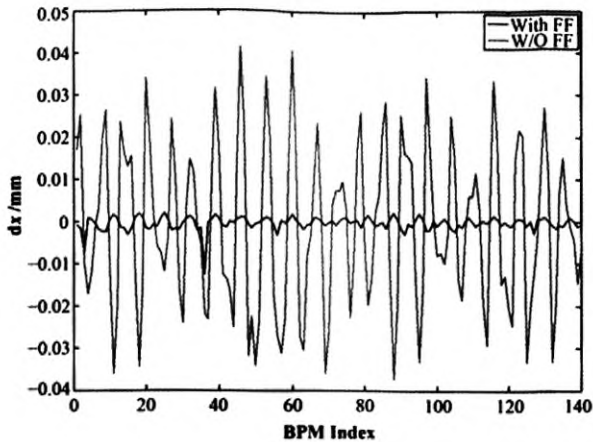


图 4 EPU 前馈系统测试效果
Fig.4 Performance of front-end feedback system.

4 结论

在 EPICS 框架下, 成功实现了上海光源插入件的前端反馈功能且无缝接入到光源 EPICS 控制环境中。根据不同设备和需求, 精巧地设计三个独立的 IOC, 完成对各个设备的控制和简单明了的上层用户界面。在 IOC 驱动程序及运行数据库中通过中断和 FLNK 激励方式, 有效地减少了查询方式带来的系统资源消耗并提高了系统运行速度。物理实验结果证实了该前馈系统结构完整, 可靠性高, 降低了插入件一二次积分磁场对束流的影响, 增强了轨道的稳定性, 为试验站稳定供光提供了可靠保证。

参考文献

- 1 Dai Z M, Liu G M, Yin L X, *et al.* Status of the SSRF storage ring[C]. Proceedings of EPAC08, Genoa, Italy
- 2 Rose A J, Lay S C, Bell A I, *et al.* Permanent magnet insertion device control systems on diamond[C]. Proceedings of PCaPAC08, Ljubljana, Slovenia
- 3 Zhang J, Zhou Q, Zhuo J. Local control system of the elliptically polarized undulator at SSRF[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2010, 20(3): 332-335
- 4 <http://www.aps.anl.gov/epics/about.php>[OL]
- 5 Kraimer Martin R. EPICS Input/Output Controller (IOC) Application Developer's Guide[Z], Release 3.14.8, Argonne National Laboratory, 02-DEC-2005
- 6 Philip Stanley. EPICS Record Reference Manual[Z], EPICS Release 3.13
- 7 <http://epics.web.psi.ch/software/streamdevice/>[OL]

Design of EPICS based front-end feedback system for the EPU of SSRF

JIANG Geyang JIANG Bocheng FANG Wending CHEN Guanghua SHEN Liren

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

Abstract As the key components of modern light source, insertion devices affect performance directly of the light source. Due to technological limitations in manufacturing and installation of an insertion device, its magnetic field may well disturb the electron beam orbit. One solution to this problem is to add correction coils at both end of insertion device. A front-end feedback system, based on EPICS architecture, has been developed at SSRF for the elliptically polarized undulator (EPU10). It has been demonstrated that this feedback system has enhanced stability of beam current, with concise interface, complete functional control and real time control, hence the guaranteed higher quality of synchrotron radiations from the insertion devices, for the soft X-ray beam line and stations.

Key words Accelerator, Insertion devices, Control system, EPICS, IOC

CLC TN82