

基于 PLC 的直线加速器联锁保护系统

仇文君 周大勇 陈建锋 沈立人 刘亚娟

(中国科学院上海应用物理研究所 上海 201800)

摘要 介绍一个在 EPICS 软件环境下实现的用于加速器的联锁保护系统。系统选取以 PLC 为核心基于硬件的技术路线, 联锁信号以硬件方式在各系统间直接连接, 联锁逻辑由 PLC 处理完成。联锁事件的上报、存档、分析则通过 EPICS 控制软件系统实现, 联锁事件由联锁系统 PLC 上报到中控系统, PLC 通过以太网与 EPICS 通信。

关键词 控制系统, EPICS, PLC, 联锁

中图分类号 TP277

可编程控制器(PLC)是专门为在工业环境下应用而设计的数字运算操作的电子装置。1969 年, 由 DEC 公司研制的第一台 PLC 成功地取代了通用汽车公司的液压部门既复杂又昂贵的继电器控制系统, 开启了新型控制技术的发展。近年来, PLC 以其可靠性高、控制灵活、易于操作等特点, 在大型实验物理装置控制系统中得到广泛应用^[1]。

实验物理与工业控制系统(EPICS, Experimental Physics and Industrial Control System)是 90 年代初由美国洛斯阿拉莫斯国家实验室和阿贡国家实验室等联合开发的大型控制系统软件开发工具。发展至今, 已被全世界数十个大型科学研究工程项目所采用。本文介绍的用于上海光源(Shanghai Synchrotron Radiation Facility, SSRF)直线加速器的联锁保护系统, 是一个在 EPICS 框架下由计算机和 PLC 组成的分布式控制系统, 可在各种不同的运行模式下确保机器设备的安全运行和人身安全, 及时发现设备的故障和异常状态, 输出保护控制信号及报警信号, 并完成联锁事件的记录与存档。

1 硬件结构

1.1 FA-M3R 系列 PLC

目前, 主流的 PLC 大多配有 Ethernet 接口。横河的 MR-3R 系列产品具有高速度、高可靠性等先进功能, 且价格适中, 具有很好的性价比。EPICS 系统中也有以太网的设备支持和记录支持。应用于直线加速器联锁保护系统的 PLC 采用 F3SP53-4S 型号的 CPU, FA-M3 采用梯形图结构程序, 程序的创建、编辑和维护可在相互独立的块中间完成, 再根

据要求任意组合程序块。由于使用了位号和其他逻辑信号名称, 所以在终端分配之间就可编制程序^[2]。

1.2 FA-M3R PLC 控制网络

FA-M3R 系列 PLC 的控制网络分为三层结构(图 1): 1) 通过 Ethernet, ADS-net 或 PROFINet 进行人机上位通信; 2) 通过 FL-net, PROFIBUS-DP, FA-Link 等网络进行控制器之间的通信; 3) 在现场设备之间采用 DeviceNet, PROFIBUS-DP 等流行的现场总线通讯^[3]。

1.3 直线加速器联锁保护系统

直线加速器位于加速器的前端, 主要由电子枪系统、束流管道系统、真空系统、微波与调制器及波导系统、磁铁与电源系统、冷却水系统等构成。直线加速器的运行安全要素, 主要在于电子枪高压与发射出束、微波功率输出等必须在满足安全运行条件的前提下发生, 而安全运行条件来自各设备系统及外部, 这样在直线加速器内部各设备系统、及与外部系统之间, 存在着一个交叉的联锁保护关系。

2 软件结构

2.1 设备驱动模块

基于 Ethernet 的控制器在 EPICS 环境下已经有了一系列 Device/Driver 支持模块, 以日本在 JAERI-KEK 项目中开发的模块 Device/Driver 为例, 包括: 通用驱动模块, 通用设备支持模块和对于所支持的设备所用到的特定的设备模块(device-specific module)。其软件结构如图 2。

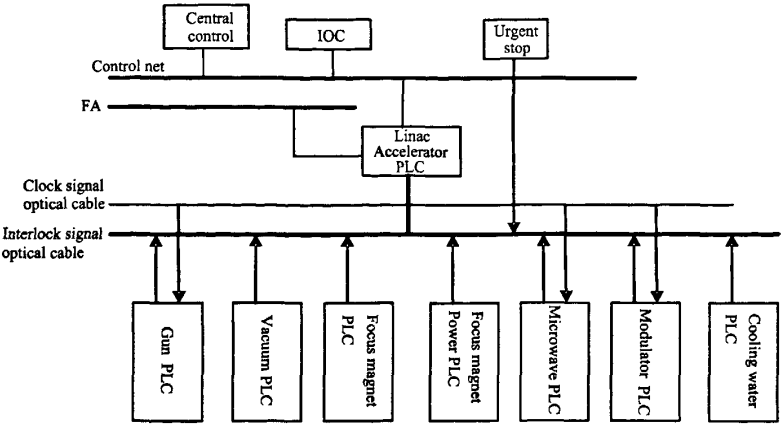


图 1 直线加速器联锁保护系统框图
Fig.1 System architecture

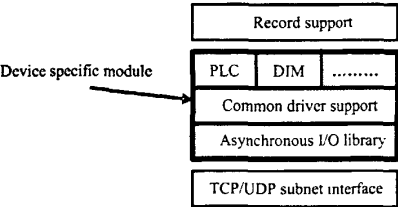


图 2 软件结构
Fig.2 System software architecture

2.1.1 设备特定模块(Device-specific module)^[4]

Device-specific module 的重要部分是建立一个能发送到远端设备和解析响应消息，并能通过解析数据库记录的 link field 来获得地址信息的命令(commands)，每个设备特定模块必须具备如下 3 个功能：

- (1) 连接域解析器(Link field parser)：在初始化 IOC 时,通过对实时数据库记录中 Link field 的解析指定通道(channel)的地址信息。
- (2) 命令构建器(Command constructor)：建立一个命令，发送给远端指定地址的设备，如果操作是写(write)，能将数据记录缓存(Record buffer)中传送给命令消息(Command message)。
- (3) 响应解析器(Response parser)：在响应消息(Response message)到达时解析其内容，操作为读(read)时将包含在消息中的数据传送到记录缓存(Record buffer)。

2.1.2 异步 I/O 库模块(Asynchronous I/O library)^[5]

Asynchronous I/O library 通过一系列 API 来支持上层的 device-specific module，这些 API 包含了 EPICS 中异步设备支持的技术细节。Asynchronous I/O library 有两个主要函数：

(1) 通用的初始化函数。初始化函数启动 Link field parser 来确定远端设备和要读/写的地址。初始化函数也初始化一种结构，该结构需要在调用记录结束时执行回调(Call back)。

(2) 通用读/写函数。读/写函数在一次异步 I/O 中被调用两次，即初始化和 I/O 处理完成时。初始化时，调用 Command constructor，形成一条消息(message)，并把 I/O 请求放在 MPF(Message passing facility)队列中，再通知该次事件(event)的 MPF。I/O 处理完成时，读/写函数什么也不做，因为 Response parser 在函数调用之前已传送好数据。

以上两个函数可成为 EPICS 中 DEST(Device support entry table)中特定的记录/设备支持模块的成员函数。

2.1.3 通用驱动支持(Common driver support)^[6]

通用驱动支持建立一个 MPF，每个通讯服务器(Communication server)运行于不同的远端设备上(每个远端设备为不同的 server)。所有对于远端设备的 I/O 请求都会在 MPF 队列中排序。一个 MPF 包含以下线程：

- (1) 发送任务(Send task)：从 I/O 队列中获得 I/O 请求，调用命令建构器(Command constructor)将信息字节放到缓存中，并将其发送给远端设备，然后阻塞(block)，直到 Receive task 得到一个响应消息。
- (2) 收取任务(Receive task)：等待响应消息到来，调用 Response parser 解析消息，后使被阻塞(blocked)的 Send task 线程转到下一个循环中，最终生成一个回调(Call back)请求完成此次异步 I/O。
- (3) 超时处理(Timeout handler)：当 watch-dog 中的计时器到达计时时间时，取消此次 I/O 处理。同时生成一个回调信息，ERROR。

2.2 PLC 程序设计

2.2.1 联锁信号分析

联锁信号有以下几种形式：

- (1) 联锁故障信号（来自外部）；
- (2) 联锁控制信号（输出到定时触发控制）。

信号统计表如表 1。

表 1 直线联锁信号统计
Table 1 Signals of machine interlock system

系统 System	输入信号 Input signal	输出信号 Output signal
电子枪系统 Gun trigger	1	1
真空系统 Vacuum status	17	0
聚焦电源 Power supply status	2	0
微波系统 Microsoft wave	13	0
调制器 Modulator	2	0
恒温水 Cooling water status	13	0
定时系统 Clock system	0	8
辐射安全联锁 PPS status	2	0
中控急停 Urgent stop button	2	0
合计 Total	52	9

2.2.2 MPS 状态定义

- (0) OFF：停机状态。
- (1) READY：开机——PLC 自检 OK：联锁逻辑未启动，联锁输出状态为禁止状态，该状态下可进行运行模式切换与设置修改。
- (2) RUN：联锁逻辑启动：不能进行运行模式切换与设置修改。
- (3) FAULT：PLC 故障，PLC 通讯连接中断，系统状态或运行模式错误，这时联锁逻辑停止运行。联锁输出端置为禁止状态。

2.2.3 输入信号状态锁存

当一个联锁输入信号指示为故障状态时，MPS 系统即按预定逻辑采取联锁保护措施，输出相应的联锁保护信号。此后，联锁输入信号可随时回复到非故障状态，此时联锁保护信号是否复位，取决于联锁输入信号类型：非自动复位信号和自动复位信号。

即使联锁输入信号回复到非故障状态，MPS 系统仍需通过操作员确认操作才撤消联锁状态；而自动复位信号，MPS 系统将自动复位联锁保护输出信号。PLC 为每个联锁输入信号设置一个对应的锁存位，其状态定义为“UNLOCK”（非故障）与“LOCK”（故障）两种。

2.2.4 联锁输入信号处理子流程

对每个联锁输入信号按图 3 的标准流程处理。

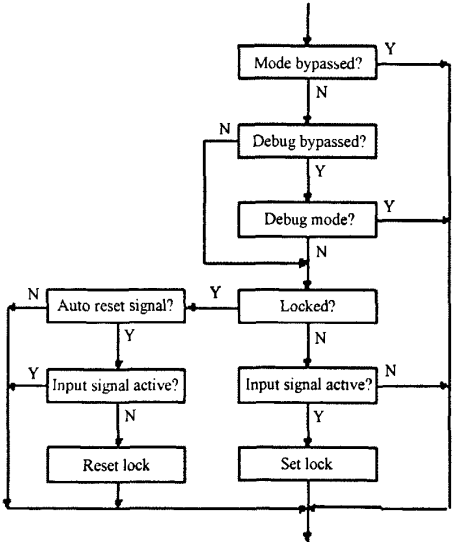


图 3 联锁输入信号处理流程
Fig.3 Flow chart of input signal processing

Mode bypass：模式旁路信号，指在特定模式下无需进行联锁处理的信号；Debug bypass：调试旁路信号，在加速器调试过程中，可对输入信号进行旁路设置，以暂时去掉对这些联锁输入信号的响应。只有系统总状态在调试模式下，旁路设置才起作用。

2.2.5 联锁保护输出信号处理子流程：

联锁输出信号状态定义：(1) 允许：允许目标设备正常运行；(2) 禁止：禁止目标设备的特定功能运行。

对每个联锁输出信号，按图 4 流程检查所有相关联锁输入信号的锁存位，只要有一个锁存位指示为“lock”即故障状态，该输出信号即输出为禁止状态。

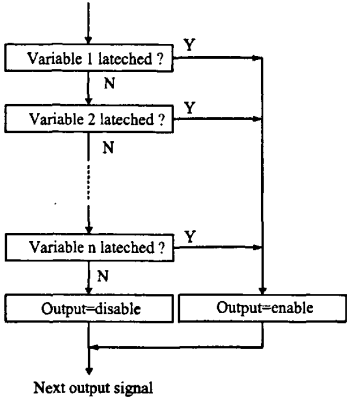


图 4 联锁输出信号处理流程
Fig.4 Flow chart of output signal processing

2.2.6 程序的主流程

联锁系统启动后，首先执行系统自检，若系统正常，则执行 reset process，复位各联锁锁存量。然后轮循扫描联锁报警信号，并作相应处理，如图 5。

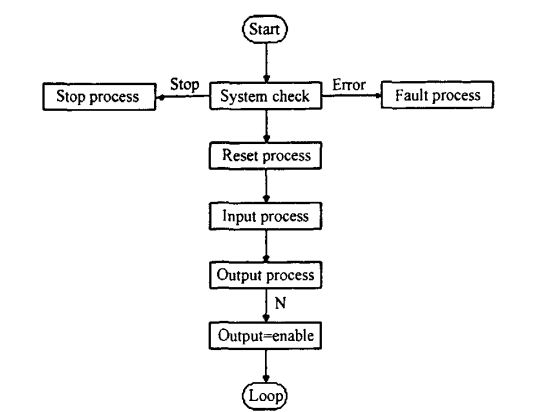


图 5 系统主流程
Fig.5 Main process of the system

2.3 IOC 实现

EPICS 标准软件环境中，有现成的支持该应用的记录类型：bi(Binary input)，bo(Binary output)^[7]。其典型应用例子如下：

```
record(bi,"$(user):VaVState1") {
    field(SCAN,".1 second")
    field(DTYP,"Yew Plc")
    field(INP,"@10.30.3.15(0x3001)#X301")
    field(ZNAM,"Off")
    field(ONAM,"On")
    field(ZSV,"NO_ALARM")
    field(OSV,"NO_ALARM")
    field(COSV,"NO_ALARM")
}
```

bi 记录实例中，SCAN 域被定义为 0.1 s 扫描处理一次，设备类型 DTYP 被定义为 YOKOGAWA PLC。INP 用来标明了读取记录的地址。

2.4 OPI 实现

操作员接口界面采用软件工具 EDM 实现。EDM(Extensible Display Manager for EPICS)是由 ORNL EPICS 组织提供和维护的一种交互性的 GUI 编辑器和执行引擎。它是基于部件的，由其他 EPICS 合作者的成员共同扩建^[8]。

图 6 为联锁保护系统的操作界面。

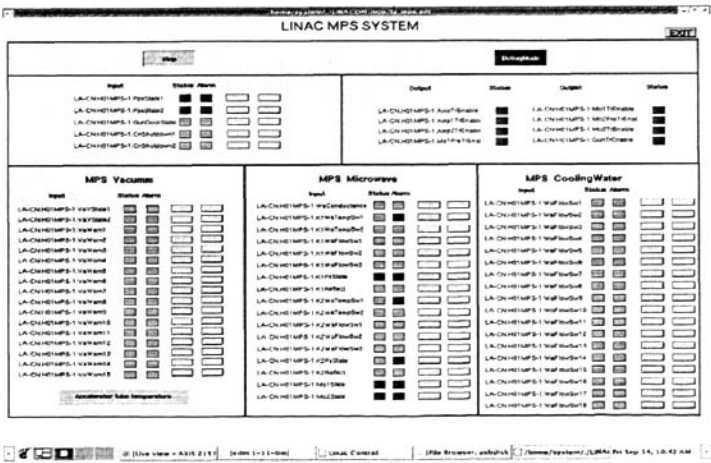


图 6 OPI 监视界面
Fig.6 Operation interface

3 网络结构

加速器控制系统多采用 EPICS。EPICS 软件的通讯协议结构为 CA(Channel access)，其基于 IP 协议^[9]。图 7 为加速器控制系统的一般架构。

以太网技术的发展，使控制系统的结构得以简化，如图 8。

EPICS 工具和以太网控制器不但能降低整个系统的成本，还能大大简化系统结构，使整个控制网络结构统一，增强了控制系统的可控制性，便于今后的维护和扩展。

采用以太网控制器的控制系统的通讯结构也相应的发生变化，如图 9。

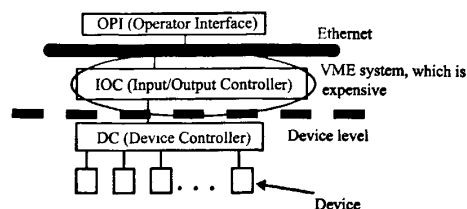


图 7 加速器控制系统的一般架构
Fig.7 Normal architecture of the linac control system

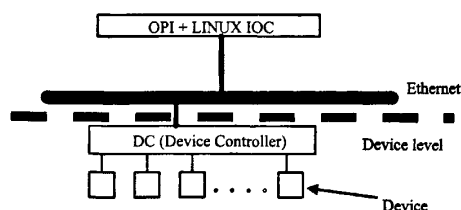


图 8 采用带有以太网接口控制器的控制系统架构
Fig.8 System architecture with Ethernet interface

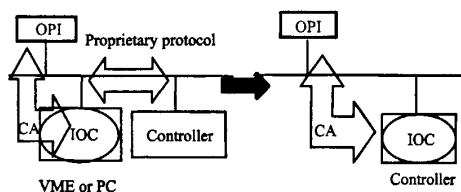


图 9 协议结构的变化
Fig.9 Conversion of the protocol

4 结束语

在 EPICS 环境下采用 PLC 来实现机器联锁保护系统,是大型加速器系统的一个普遍适用的方法。作为一个应用实例,本项研究工作已应用于一台上海光源 150 MeV 直线加速器的全局联锁机器保护系统中。

根据直线加速器联锁保护系统的需求特点,选取以 PLC 为核心的基于硬件的技术路线,联锁信号以硬件方式在各系统间直接连接,联锁逻辑由 PLC

处理完成,以满足联锁系统的高可靠性要求。联锁报警信号是通过 PLC 的光电隔离直流输入模块输入,联锁输出信号是通过 PLC 的继电器输出模块输出。闭态为正常,开态为报警。本系统的联锁保护响应速度可达到 10 ms。

参考文献

- 1 Stein J. Nuclear Instruments & Methods in Physics Research, 1994, A253: 210-212
- 2 宋伯生. PLC 编程理论、算法及技巧. 机械工业出版社, 2005
SONG Bosheng. PLC programming theory, algorithms and techniques. Machinery Industry Press, 2005
- 3 周万珍, 高鸿斌. PLC 分析与设计应用. 电子工业出版社, 2004
ZHOU Wanzhen, GAO Hongbin. PLC analysis and design applications. Electronics Industry Publishing House, 2004
- 4 Furukawa K. Network Based EPICS Drivers for PLC'S and Measurement Stations, Proc. of ICALEPCS 99, Trieste, Italy, 1999. 409
- 5 Hunt S. Integration of industrial PLCs into an EPICS control system, Proc. of ICALEPCS 2003, Gyeongju, Korea
- 6 Furukawa K, Chiba J, Kamikubota N, et al. Implementation of the EPICS software support for network based controllers, Proc. of ICALEPCS 2003, Gyeongju, Korea
- 7 EPICS R3.14 Channel Access Reference Manual. <http://www.aps.anl.gov/epics/base/R3-14/6-docs/CAref.html>
- 8 IOC Application Developer's Guide. <http://www.aps.anl.gov/epics/base/R3-14/7.php>
- 9 Barrett D J. Linux Pocket Guide, O'Reilly Media, Inc. 2004

Machine interlock and protection system based on PLC for the SSRF linac

CHOU Wenjun ZHOU Dayong CHEN Jianfeng SHEN Liren LIU Yajuan

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

Abstract This paper describes a machine interlock and protection system used for accelerators based on EPICS (Experimental physics and industrial control system). The system is composed of a front-end computer and an FM-3R logic controller PLC. The alarm signal is passed by the hardware directly, and would be deal with PLC. The reporting, recording and analyst of the event are accomplished by EPICS control software. And PLC is linked to the EPICS by Internet.

Key words Control System, EPICS, PLC, Machine interlock

CLC TP277