

基于 EPICS 的 SHINE 束线站定时设备 控制系统

曾孟麒¹ 尹亮¹ 尹聪聪^{1,2} 怀平^{1,2}

1(上海科技大学 上海 200120)

2(中国科学院上海高等研究院 上海 201210)

摘要 上海硬 X 射线自由激光装置(Shanghai High Repetition rate XFEL and Extreme light facility, SHINE)整体采用基于白兔协议(White Rabbit, WR)技术的定时系统。束线站定时系统接收外部参考信号,并通过定时主节点、WR 交换机和从节点等 WR 设备将定时信号分发到各光束线和实验站。定时设备控制系统基于简单网络管理协议(Simple Network Management Protocol, SNMP)与实验物理与工业控制系统(Experiment Physics and Industrial Control System, EPICS)开发,可远程监测和控制分布式定时设备。该系统获取定时设备硬件相关参数,通过 EPICS IOC(Input/Output Controller)保存至内存数据库。定时系统参数可以通过 PyDM(Python Display Manager)编写的用户界面查看,并可在 Archiver Appliance 中存档与检索。通过测试证明此控制系统能够实时监测设备参数,并能远程控制信号时延及脉宽等,满足 SHINE 光束线与实验站的定时需求。

关键词 SHINE, 定时系统, 白兔协议, EPICS, SNMP

中图分类号 TL503.6

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2023.hjs.46.070102

Development and implementation of an EPICS-based timing equipment control system for SHINE beamlines and endstations

ZENG Mengqi¹ YIN Liang¹ YIN Congcong^{1,2} HUAI Ping^{1,2}

1(ShanghaiTech University, Shanghai 200120, China)

2(Shanghai Advanced Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201210, China)

Abstract [Background] Shanghai High Repetition rate XFEL and Extreme light facility (SHINE) employs a White Rabbit (WR)-based timing system. This timing system operates via the utilization of beamline - endstation division, which receives external reference timing signals and distributes them to each beamline and endstation via WR timing network devices, including master nodes, WR switches and slave nodes. [Purpose] This study aims to develop a timing equipment control system (TECS) to address the requirements of remote monitoring and control of distributed timing equipment. [Methods] Based on Experiment Physics and Industrial Control System (EPICS) and Simple Network Management Protocol (SNMP), an approach for acquiring timing equipment parameters was employed. These parameters were stored in the resident memory database through EPICS Input/Output Controller (IOC) and accessed via a user interface developed with PyDM (Python Display Manager). Archive and retrieval of timing equipment parameters were implemented in the Archiver Appliance historical archiving system. Finally, test environment was set up in laboratory to verify the validity and reliability of this TECS. [Results & Conclusions]

第一作者: 曾孟麒, 男, 1996 年出生, 2023 年于上海科技大学获硕士学位, 研究领域为数据采集和 EPICS 实时控制系统

通信作者: 尹聪聪, E-mail: v-yincc@shanghaitech.edu.cn

收稿日期: 2023-03-01, 修回日期: 2023-05-22

First author: ZENG Mengqi, male, born in 1996, graduated from ShanghaiTech University with a master's degree in 2023, focusing on data acquisition and EPICS real-time control system

Corresponding author: YIN Congcong, E-mail: v-yincc@shanghaitech.edu.cn

Received date: 2023-03-01, revised date: 2023-05-22

This control system underwent testing exhibits its effective functionalities, including real-time monitoring equipment parameters, as well as remote control of equipment signal delay and pulse width. These capabilities are essential in meeting the requirements of SHINE beamlines and endstations.

Key words SHINE, Timing system, White Rabbit, EPICS, SNMP

上海硬 X 射线自由电子激光装置 (Shanghai High Repetition rate XFEL and Extreme light facility, SHINE) 是一台高重复硬 X 射线自由电子激光 (Free Electron Laser, FEL) 大科学装置, 产生的 X 光脉冲最高重复频率可达 1 MHz, 在物理、化学、材料、生命科学等诸多领域都有非常广泛和重要的应用^[1]。定时系统作为整个装置运行的时钟, 精确控制着所有需要同步触发的设备, 保证各节点的时钟同频同相, 是使装置中各类设备协调运行的重要保障^[2]。

大型实验物理装置的时钟同步系统分别经历了基带分布系统、事件分布系统和白兔协议 (White Rabbit, WR) 定时系统三个阶段^[3-4]。WR 定时系统是欧洲核子中心 (CERN) 发起的建立在同步以太网和精确时钟同步协议 (IEEE 1588) 上的时钟和数据传输协议, 可自动补偿传输延迟, 实现大范围、高可靠性、拓扑结构灵活的亚纳秒级别的时钟同步, 因此成为目前大型科学装置定时系统的主流方案^[5]。欧洲大型电子对撞机 (Large Hadron Collider, LHC)、欧洲同步辐射光源 (European Synchrotron Radiation Facility, ESRF) 和我国的高海拔宇宙线观测站 (Large High Altitude Air Shower Observatory, LHAASO) 等大科学装置的定时系统都基于此系统进行开发^[6]。

EPICS (Experimental Physics and Industrial Control System) 是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软件系统, 具有模块化、可裁剪、易扩展、便于管理维护与升级的特点^[7-9], 目前, 在北京正负电子对撞机 (Beijing Electron-Positron Collider, BEPC)、上海同步辐射光源 (Shanghai Synchrotron Radiation Facility, SSRF)、美国直线加速器相干光源 (Linac Coherent Light Source, LCLS) 等^[10-12]上百个大型物理实验装置和项目中得到应用。

在控制系统下完成设备的定时同步, 是这些大装置数据监测和控制的重要一环。德国自由电子激光装置 FLASH 基于分布式面向对象控制系统 (Distributed Object-Oriented Control System, DOOCS) 开发了控制软件, 能够通过用户和专家界面对定时板卡进行远程控制和参数配置^[13]。美国 LCLS 基于事件分布系统通过 EPICS 的输入输出控制器 (Input/Output Controller, IOC) 接口进行事件码

传输, 并开发了控制软件用于设置提供给设备的触发信号特性^[14-15]。合肥先进光源 (Hefei Advanced Light Facility, HALF) 基于事件分布系统在 EPICS 架构下开发了定时系统软件, 包括驱动程序、实时数据库和操作界面^[16]。中国散裂中子源 (China Spallation Neutron Source, CSNS) 束线站基于 White Rabbit 定时系统, 使用 EPICS 系统进行控制, 并结合 MySQL 数据库实现了数据的显示和存储^[17]。

基于 SHINE 束线站定时系统框架, 开发了 White Rabbit 定时设备的控制系统。该系统通过 SNMP 驱动程序接入 EPICS 控制系统框架, 同时通过 PyDM 编程实现用户操作界面 (Operator Interface, OPI), 能够实时地对定时设备进行远程控制管理和状态监测。本文提出的定时设备与控制系统之间的数据通信方案设计及技术实现, 为 SHINE 束线站定时系统的软件控制奠定了基础。

1 背景

硬 X 射线自由电子激光每束光脉冲能量、到达时间、束团长度等参数都可能不同, 故需要精确的时间戳表征每束光脉冲。SHINE 定时系统分为加速器定时系统和束线站定时系统, 加速器定时系统控制着保证电子束团被加速到设计能量而产生满足要求的自由电子激光的相关设备。束线站定时系统接入加速器定时系统提供的定时信号, 并将此定时信号分发到 3 条光束线和 10 个实验站, 为实验站电荷耦合器件 (Charge Coupled Device, CCD) 相机、硅像素阵列探测器等成像探测器、谱学探测器、束线站诊断设备提供定时信号。

SHINE 定时重复频率为 1.003 086 4 MHz, 基于此频率, SHINE 定制的 WR 定时硬件设备能够提供定时脉冲信号 (Trigger) 和束团编号 (BunchID) 给对应的目标设备^[18]。通过定时脉冲信号触发束监测设备 BLM、软线能谱仪、软线能量分辨率设备、激光器泵浦源等设备, 使光束线和实验站上的设备能够同步工作。通过提供束团编号给光束位置监测设备 BPIM、脉冲能量诊断 GMP/HAMP、脉冲时间诊断 TM、fADC 等, 产生带时间标签的数据, 从而能够基于统一的时间标签对实验数据进行光束参数分析、物理参数分析等。束线站定时系统需要开发相关应用软件管理和控制离散分布的定时设备, 实现远程

实时监测和控制的预期目标。

2 SHINE束线站定时设备控制任务和控制内容

2.1 需求分析

如图1所示,定时系统底层基础硬件设备有WR定时交换机(White Rabbit Switch, WRS)、扇出型定时从节点、嵌入型定时从节点、WR终端设备和BunchID采集设备。WR定时主节点接收来自

SHINE同步系统的外部参考信号,与加速器基准信号锁相,整个SHINE只有一个WR定时主节点,存在于加速器定时系统。WR交换机将带有时间频率信号的数据经光纤传到下一级WR交换机或从节点设备。扇出型定时从节点输出定时触发信号给需要定时的设备,嵌入型定时从节点可同时输出定时触发信号和束团编号BunchID给需要定时的设备。因此,各级交换机和从节点需要接入控制网络,包括链路状态、端口状态、运行模式、硬件温度、机器时钟延时和脉宽在内的多项参数都需要进行远程监测或者控制。

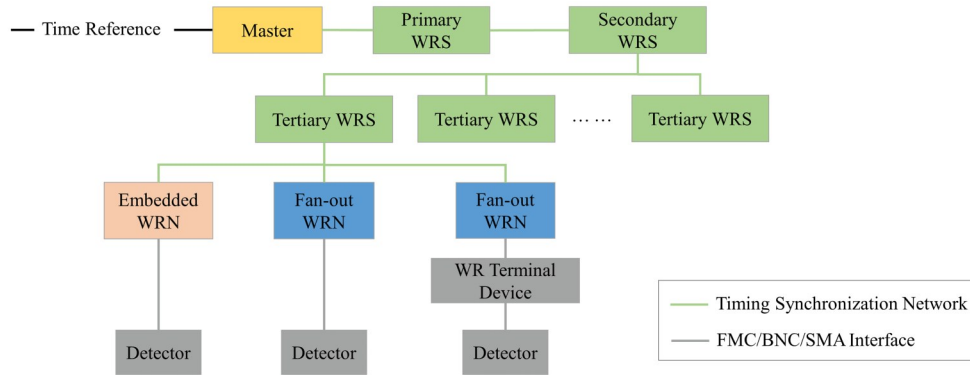


图1 SHINE束线站定时系统底层硬件架构
Fig.1 Timing system hardware architecture of beamlines and endstations in SHINE

为了保障束线站定时系统的顺利运行,主要对SHINE定制的WR定时交换机和WR定时从节点(White Rabbit Node, WRN)的相关参数进行监测和控制。WRS是实现White Rabbit时钟同步协议的交换机,拥有18个用于数据交换的1000 Mbps以太网SFP接口以及1个用于交换机管理的100 Mbps以太网RJ45接口。WRN是一款实现White Rabbit双端口节点功能的通用FMC标准子卡。WRN可以给FMC载板提供同步准确度好于1 ns、同步精度小于30 ps的时钟信号。

WRS的18个千兆光纤同步端口用于连接定时同步网络,端口1默认为Slave状态接收上级WR设备的时钟信号,端口2~18为Master,向下级WR设备传递同步时钟。此设备的参数信息包括软硬件版本、硬件温度、内部操作系统状态、锁相环状态、精确同步时钟协议(Precision Time Protocol, PTP)参数、端口状态等信息;WRN主要有1个同步端口和10路机器时钟SMA接口输出,同步端口连接WRS,既可用于定时信号同步,也可用于WRN远程控制设备,机器时钟SMA接口连接目标设备,输出定时脉冲触发信号。因此,控制软件不仅需要实现远程控制端口使能状态和设置掩码,同时也需要能够对每路机器时钟延时和脉宽参数进行调节。根据图2参数分

类,上层用户界面需要能够实时显示当前WRS和WRN的状态信息,同时能够对输出port进行开关控制以及对延迟和掩码信息进行远程设置。

2.2 系统总体架构

如图3所示,SHINE束线站定时设备系统网络按照网络功能不同划分为两层。底层为定时同步网络,用于连接定时交换机、扇出型定时从节点和嵌入型定时从节点等定时基础硬件,实现定时系统的时钟同步,最终将加速器一级WR定时交换机输出的定时信号传输到定时系统末端。一方面通过扇出型从节点输出定时脉冲给只需要外部触发的目标设备,另一方面通过嵌入型从节点同时输出触发脉冲和BunchID给需要将采集到的数据打上时间戳的探测器类设备。上层为定时设备控制网络,运行接入EPICS控制系统的定时监控IOC服务器,用于定时基础硬件的监测和控制,一方面基于标准千兆以太网通过定时设备控制网络连接定时交换机管理口实现对定时交换机的控制管理,另一方面需要通过网络异频转换模块与定时交换机同步端口相连来实现对定时从节点的控制管理。因为定时同步网络为异频千兆以太网,物理层传输频率与标准以太网传输频率不同,所以需要通过网络异频转换模块实现两

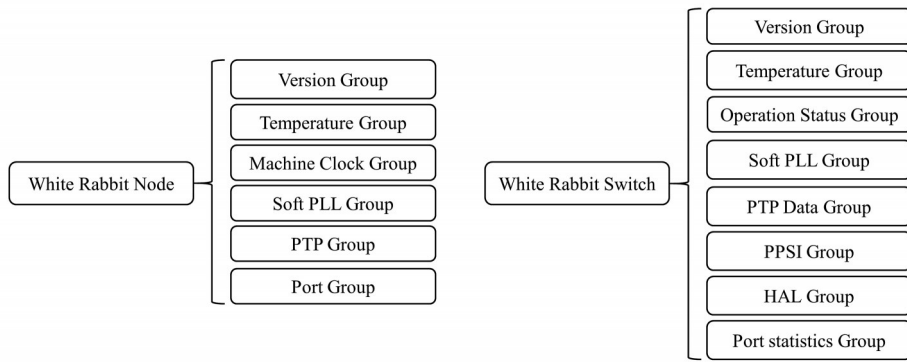


图2 SHINE 定时基础设备参数分类
Fig.2 Parameter classification of basic equipment of SHINE timing system

个网络之间的数据交换。定时设备监控服务器运行基于 SNMP 协议的 EPICS IOC, 获取定时设备的实时参数并存储到实时数据库。同时上层还运行有定时设备操作人员交互界面 (Operator Interface, OPI)

的 PC 机, 通过以太网接入 EPICS 控制网络传输定时参数, 实现定时设备的远程监测和参数配置, 以及运行历史归档工具 (Archiver Appliance, AA) 存储服务器对重要数据进行归档存储。

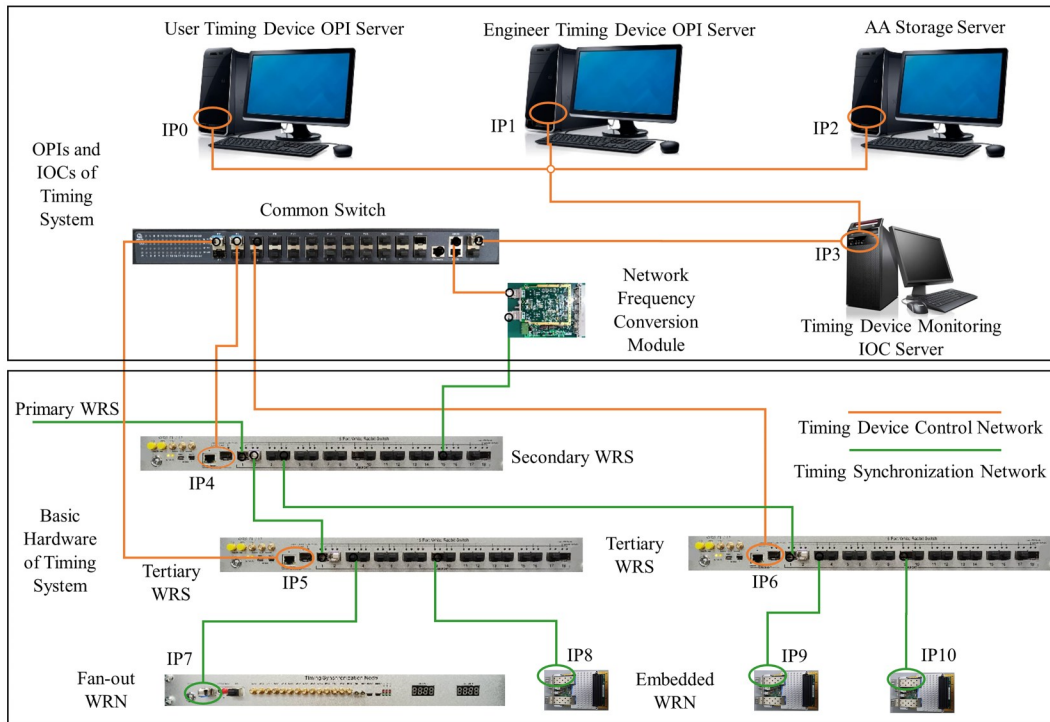


图3 束线站定时设备控制系统网络总体架构
Fig.3 Overall architecture of the network of the timing equipment control system for the beamlines and endstations

3 软件设计方案

图4为本文设计的控制系统软件架构。首先, 运行在 WR 设备上的 SNMP 代理获取设备数据信息, 根据定时设备监控 IOC 服务器上的 SNMP 管理者的请求命令, 结合管理信息库表 (Management Information Bases, MIB) 查询相应的设备状态信息或者执行相应的操作, 并将操作响应返回给 SNMP 管理者; 其次, EPICS 的 SNMP 驱动获取响应数据并

根据实时数据库 db 文件解析成相应的过程变量 (Process Variables, PV), 从而使其能够通过通道访问协议 (Channel Access, CA) 被 PyDM 设计的 OPI 界面获取并显示; 最后, PV 变量也能够被历史归档工具 AA 所存储, OPI 也能够通过 PyDM 提供的 HTTP 接口对 AA 归档的数据检索和显示。反过来, 在 OPI 执行的设置操作也会沿此数据路径映射成对应的操作指令对 WR 设备进行控制和参数配置。

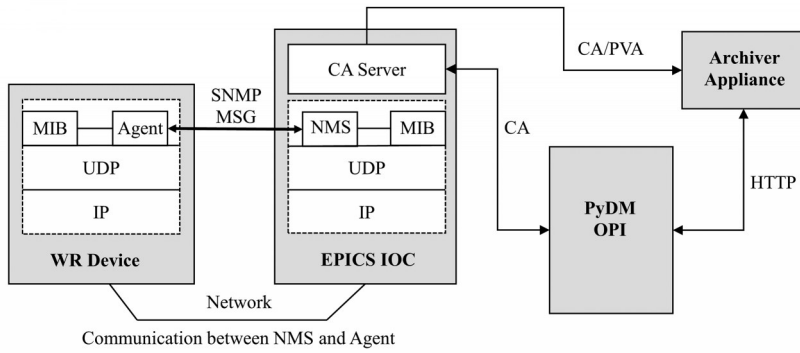


图4 束线站WR设备控制系统软件架构
Fig.4 Software architecture of WR equipment control system for beamlines and endstations

3.1 设备驱动数据获取

SNMP即简单网络管理协议是专门基于IP网络管理网络节点(服务器、工作站、交换机、路由器等)设计的一种标准应用层协议。WR交换机和WR从节点是一种特殊的交换机,也基于SNMP协议进行管理。如图5所示,网络管理系统(Network-Management Systems, NMS)运行应用程序,监视和控制被管理设备。被管理设备是一个网络节点,包含SNMP代理(SNMP Agent)、MIB等模块。NMS通过MIB作为接口访问SNMP Agent与被管理设备交互。MIB是一个数据库,描述了被管理设备维护的变量。MIB在数据中定义了被管理设备一系列属性,包括对象名称、对象的状态、对象的访问权限和对象的数据类型等。MIB以树状结构进行存储,用从根开始到树的节点表示的唯一路径OID来标识被管理对象。

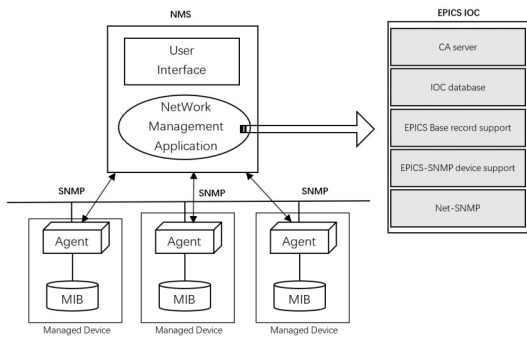


图5 SNMP结构和EPICS SNMP驱动
Fig.5 Diagram of SNMP structure and EPICS SNMP driver

因定时设备管理接口采用SNMP协议,故上位机监控软件采用基于SNMP驱动的EPICS IOC软件。EPICS SNMP是基于EPICS框架开发的设备支持程序,底层调用NET-SNMP基础库,上层兼容EPICS记录支持程序,使得SNMP对每一个对象的操作变成对每一个记录的操作。通过此驱动程序完

成与设备的数据交换,并将设备参数提供给实时数据库接口。

3.2 实时数据库设计

IOC是EPICS软件的核心,是连接OPI和现场设备层的中间件^[19],IOC通过db实时数据库向下与现场设备层通过网络等通信方式完成数据的实时采集和存储、向上响应来自OPI客户端的请求,将实时数据传给OPI。实时数据库db文件是IOC的核心,基于WR设备提供的私有MIB库,根据定时需求里的相关参数信息编写EPICS的实时数据库db文件。

通过db文件描述的record记录,实时数据库能够接收和存储WR设备回送的SNMP应答数据,并且按照record中记录名、设备类型、链接域、扫描周期等映射成对应的PV变量。使用的record类型包括ai、ao、longin、longout、stringin、mbbi、calc等,示例如下:

```
record (longout, " $ (DEV) :
wrpcPtpConfigDeltaRxSet") {
    field(DESC, "Set delta rx to be set")
    field(DTYP, "Snp")
    field(EGU, "ps")
    field(SCAN, "Passive")
    field(OUT, "@ $ (HOST) public WR-WRPC-
MIB: : wrpcPtpConfigDeltaRx. $ (GROUP)
INTEGER: 100 i")
}
```

由于采用了EPICS SNMP设备驱动,除了DTYP字段应该声明为"Snp"外,INP/OUT字段的格式如下所示,其中“host”为主机IP,“community”声明所属团体,“dataLength”为回送数据的临时缓冲大小,“set_type”为SNMP数据类型所对应的标识符。

```
@host community OIDname mask dataLength
[set_type[special_flags]]
```

单台设备对应的PV数量达到 10^3 级别,因此,为了减少系统轮询压力,对于不同的设备信息类别,在SCAN域采用不同的扫描周期。对于不会轻易改变的软硬件版本类信息采用“Passive”,对于端口使能状态等时效性要求较高的参数,采用“0.5 second”等较小扫描周期。此外为了提升db文件的复用率,对于批量同类设备可以在record中采用宏替换字段“\$(DEV)”和“\$(HOST)”来区分设备,采用“\$(PORT)”区分同一设备的多个同类端口,最后在IOC启动脚本里通过dbLoadRecords命令加载具体指定宏字段。

3.3 用户界面设计与开发

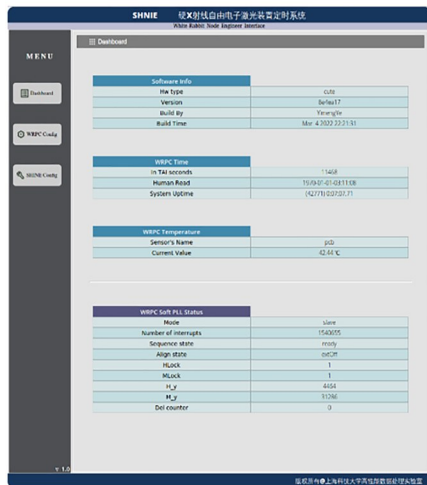
PyDM是基于Python和Qt构建控制系统图形用户界面的新框架,其提供了一个通过Qt Designer简单拖放控件来创建用户界面的平台,还允许通过Python代码来实现自定义的功能^[20]。Qt的跨平台

特性和Python环境的友好度使得PyDM成为目前EPICS下设计操作人员界面的优选方式之一。

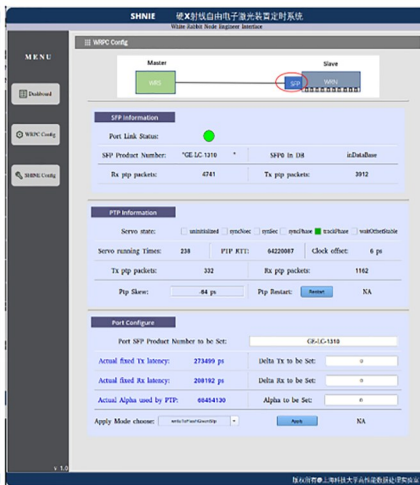
根据实际使用需求,同时限制普通用户的操作权限,WRN设计时区分为用户界面和专家界面。如图6所示,WRN用户OPI界面是专家OPI界面贴合用户视角所做的功能提炼,主要提供定时从节点设备温度等关键状态信息、各机器时钟通道的开关控制及输出信号的延迟和脉宽的配置等功能。专家界面则是细化设备的各项运行参数以及设备所有配置功能的集合。对于定时交换机而言,只需提供专家界面,如图7所示,对18路port链路状态、设备硬件模块温度、子系统状态、锁相环和PTP参数等信息进行实时监测。OPI的实时显示的信息来源于硬件实时参数所映射的相应PV变量,按照扫描优先级进行扫描,通过CA协议从实时数据库中监测相应PV值变化。



(a)



(b)



(c)



(d)

图6 定时从节点OPI WRN用户界面(a)和专家界面(b~d)截图
Fig.6 Snapshot of WRN OPI user interface (a) and WRN engineer interface (b~d)

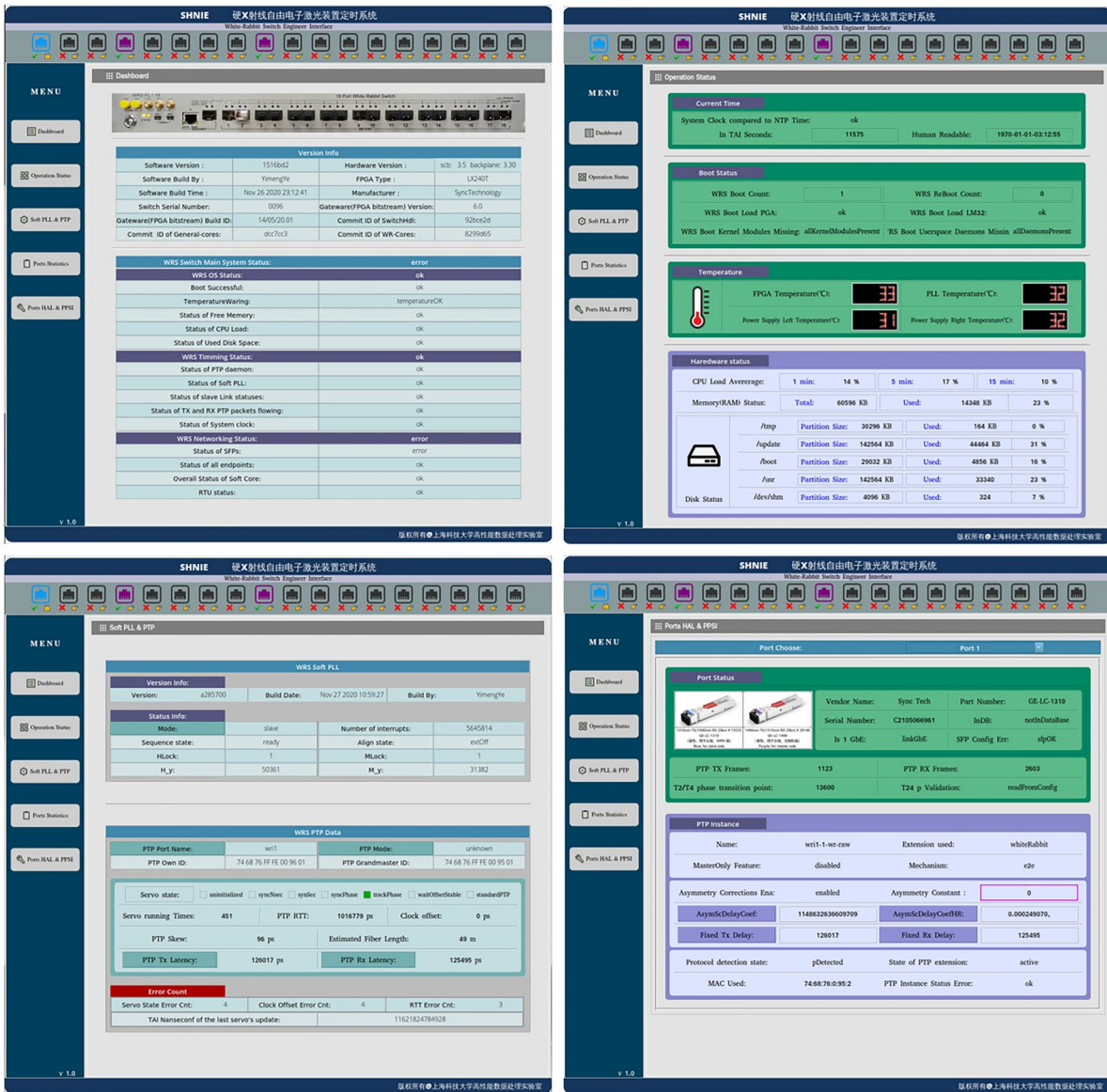


图7 定时交换机OPI截图
Fig.7 Snapshot of WRS OPI

图形用户界面 OPI 开发流程为：先通过 Qt designer 按照开发需求设计 UI 界面，指定组件属性和设计整体 UI 布局，再通过 Python 编程实现 UI 界面的操作交互功能。使用 PyDM 组件可以通过指定 channels 格式为 ca://<PV NAME> 或者 archiver://<PARAMS> 来声明数据来源即 PV 变量是通过 CA 协议获取还是从 AA 中获取。在 PyDM 框架下使用 Python 编程时，所想要显示的界面子类必须要继承 PyDM 的 Display 基类。在实现操作交互功能时需要用到 Qt 的信号与槽机制，如图 8 显示的是通过 python 的 EPICS 接口 PyEPICS 来通道访问获取 PV 变量数据，定时监测 PV 值的变化并显示的逻辑流程图。

3.4 数据归档与检索

Archiver Appliance 历史存档软件通过 CA、PVA 协议访问并存储 EPICS IOC 获取的实时 PV 数据，并且将数据按照短期、中期和长期进行分期归档^[21-22]。Archiver Appliance 采用谷歌 PB (Protocol Buffer) 进行数据序列化，二进制格式存储和传输数据效率更优。在 PyDM 中通过将环境变量 PYDM_ARCHIVER_URL 指向 AA 程序位置或检索应用程序 URL，可实现用 PyDM 组件基于 HTTP 协议对 PV 数据进行检索或者归档的操作。归档存储的定时设备参数，可以用来实验期间定时设备的平均运行状态分析和故障分析，以及评判定时设备的使用寿命。

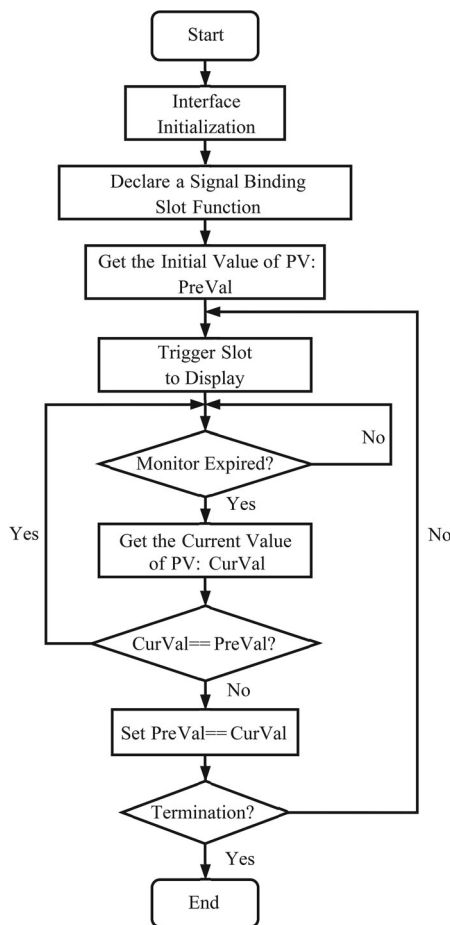


图8 信号与槽机制的PV值监视流程图

Fig.8 Flowchart of PV value monitoring through signal and slot mechanism

4 系统测试结果与讨论

SHINE束线站定时网络设备的软件开发与系统测试在SHINE束线站数据实验室中开展。定时测试的硬件环境构成包括Inter(R)Core(TM)i9-10980XE CPU@3.00 GHz、WR定时交换机、WR定时从节点,软件环境为Centos 7 64位、EPICS base 7.0.6、EPICS SNMP 1.1.0.4(NSCL/FRIB)。系统测试的主要目标是OPI对设备参数的实时监测性能和远程控制响应速度。

在定时系统由定时设备正确搭建的测试环境下开发的EPICS SNMP IOC能够在定时设备监控服务器上稳定运行。通过IOC启动脚本里指定WR设备名的宏字段来监测对应设备参数,对单台WRS和WRN的设备参数能够映射成2 500多个PV并存储在实时数据库中,并且能够通过CA协议进行get和put操作。说明IOC与设备的通信是正常且稳定的。

通过PyDM环境下执行的Python脚本启动对应设备的OPI,对于优先级较高的参数如端口状态等,数据采样周期最短可以达到0.5 s。对于设备温度等

比较平稳的参数,数据采样周期在4 s。通过OPI设置信号时延和脉宽等配置参数,机器应用的响应时间可达2 s。OPI在AA历史数据中的检索的显示间隔达到3 s。

本设备控制系统能够长时间稳定地实现对WR设备的实时监视和控制管理,同时通过AA与PyDM的数据接口,能够将归档存储的数据检索显示。OPI界面简洁,系统响应时间满足要求,基于Python环境移植方便。证明了本定时网络设备控制系统的可用性、实时性、易用性和稳定性。

5 结语

本文开发了一套SHINE束线站定时设备控制系统,实现White Rabbit设备的管理与监控。该系统基于EPICS控制系统和SNMP协议,主要功能包括实时数据获取与监测、设备远程控制、数据归档和存储。该软件通过定时设备样机搭建的定时网络下的实际测试,实现了对WR设备定时参数的远程监测和归档存储,满足了SHINE束线站的定时工程要求。未来将在基于整个束线站的定时设备网络拓扑结构下,能够简单地宏观性地控制分布于不同位置的定时设备。本文积累的WR设备控制软件开发框架经验为完善后续束线站总体定时设备控制网络奠定了基础。

作者贡献声明 曾孟麒负责软件开发,系统测试和调试、论文撰写和修改;尹亮负责硬件设备技术支持、参与问题讨论;尹聪聪负责SHINE束线站定时系统的工程设计、技术研发与平台建设,论文研究方案的提出与修改指导;怀平负责SHINE束线站定时系统总体目标的设计、项目管理,论文修改指导,研究经费支持。

参考文献

- 赵振堂,冯超. X射线自由电子激光[J]. 物理, 2018, 47(8): 481 - 490. DOI: 10.7693/wl20180801.
ZHAO Zhentang, FENG Chao. X-ray free electron lasers [J]. Physics, 2018, 47(8): 481 - 490. DOI: 10.7693/wl20180801.
- 于春蕾,赵欢,胡守明,等. 基于高精度脉冲发生器的定时系统设计[J]. 核技术, 2019, 42(4): 040102. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2019.hjs.42.040102.
YU Chunlei, ZHAO Huan, HU Shouming, et al. Design of timing system based on high accurate pulse generator [J]. Nuclear Techniques, 2019, 42(4): 040102. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2019.hjs.42.040102.
- Lipiński M, van der Bij E, Serrano J, et al. White rabbit

- applications and enhancements[C]//2018 IEEE International Symposium on Precision Clock Synchronization for Measurement, Control, and Communication (ISPCS). September 30 - October 5, 2018, Geneva, Switzerland. IEEE, 2018: 1 - 7. DOI: [10.1109/ISPCS.2018.8543072](https://doi.org/10.1109/ISPCS.2018.8543072).
- 4 李成. 大型物理实验装置高精度时间同步技术研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2012.
LI Cheng. Research on high-precision time synchronization technology of large-scale physical experiment device[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2012.
- 5 CERN. White Rabbit[EB/OL]. 2020-12-11. <https://www.ohwr.org/projects/white-rabbit/wiki>.
- 6 潘维斌. LHAASO实验高精度时间测量系统研究[D]. 北京: 清华大学, 2014.
PAN Weibin. Research on high precision time measurement system of LHAASO experiment[D]. Beijing: Tsinghua University, 2014.
- 7 Argonne National Laboratory. EPICS Home at Argonne [EB/OL]. 2021-02-28. <https://epics.anl.gov/index.php>.
- 8 Yin C C, Zhang N, Li Y P, *et al.* The design of RMT-based IOC redundancy at RCPI experimental platform in TMSR[J]. Nuclear Science and Techniques, 2014, **25**(6): 060402. DOI: [10.13538/j.1001-8042/nst.25.060402](https://doi.org/10.13538/j.1001-8042/nst.25.060402).
- 9 张宁, 尹聪聪, 韩立峰, 等. 基于EPICS的冗余方法在反应堆控制系统中的应用研究[J]. 核电子学与探测技术, 2013, **33**(11): 1350 - 1353.
ZHANG Ning, YIN Congcong, HAN Lifeng, *et al.* Application study of EPICS-based redundant method for reactor control system[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2013, **33**(11): 1350 - 1353.
- 10 雷革, 徐广磊, 汪林, 等. BEPCII事件定时系统[J]. 核电子学与探测技术, 2008, **28**(3): 451 - 455, 469. DOI: [10.3969/j.issn.0258-0934.2008.03.001](https://doi.org/10.3969/j.issn.0258-0934.2008.03.001).
LEI Ge, XU Guanglei, WANG Lin, *et al.* BEPCII event timing system[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2008, **28**(3): 451 - 455, 469. DOI: [10.3969/j.issn.0258-0934.2008.03.001](https://doi.org/10.3969/j.issn.0258-0934.2008.03.001).
- 11 赵黎颖, 殷重先, 刘德康. 事件系统在SSRF主定时系统中的应用[J]. 核技术, 2006, **29**(1): 1 - 5.
ZHAO Liying, YIN Chongxian, LIU Dekang. Application of event system in SSRF timing system[J]. Nuclear Techniques, 2006, **29**(1): 1 - 5.
- 12 Dusatko J, Allison S, Browne M, *et al.* The LCLS timing event system[R]. SLAC National Accelerator Lab., Menlo Park, CA (United States), 2012. DOI: [10.1063/1.1521045](https://doi.org/10.1063/1.1521045).
- 13 DESY. FS-FLASH USER[EB/OL]. 2020-02-05. confluence.desy.de/display/FLASHUSER/Trigger+Howto.
- 14 Krejcik P, Akre R, Allison S, *et al.* Timing and synchronization at the LCLS[J]. SLAC Publication, 2007.
- 15 SLAC. Timing & synchronization system[EB/OL]. 2022-03-31. <https://confluence.slac.stanford.edu/display/timing/Time+control+and+calibration>.
- 16 翟港佳, 孙晓康, 宣科, 等. 合肥先进光源定时系统设计[J]. 核技术, 2022, **45**(12): 120102. DOI: [10.11889/j.0253-3219.2022.hjs.45.120102](https://doi.org/10.11889/j.0253-3219.2022.hjs.45.120102).
ZHAI Gangjia, SUN Xiaokang, XUAN Ke, *et al.* The design of Hefei advanced light facility timing system[J]. Nuclear Techniques, 2022, **45**(12): 120102. DOI: [10.11889/j.0253-3219.2022.hjs.45.120102](https://doi.org/10.11889/j.0253-3219.2022.hjs.45.120102).
- 17 Zhuang J, Li J, Lei H U, *et al.* The design of CSNS instrument control[C]//Proceedings of the International Conference on Accelerator and Large Experimental Control System. 2017: 895 - 899. DOI: [10.18429/JACoW-ICALEPCS2017-TUPHA196](https://doi.org/10.18429/JACoW-ICALEPCS2017-TUPHA196).
- 18 Ye Y, Li H, Li J, *et al.* Timing system based on customized frequency White Rabbit network in SHINE [J]. Journal of Instrumentation, 2022, **17**(9): T09009. DOI: [10.1088/1748-0221/17/09/t09009](https://doi.org/10.1088/1748-0221/17/09/t09009).
- 19 阎映炳, 冷用斌, 杨嵩. EPICS在线数据分析软件包研制及应用[J]. 核技术, 2008, **31**(3): 170 - 173.
YAN Yingbing, LENG Yongbin, YANG Song. Development and experiment of EPICS online data analysis software package[J]. Nuclear Techniques, 2008, **31**(3): 170 - 173.
- 20 SLAC Lab. PyDM - Python display manager[EB/OL]. 2022-11-17. <http://slaclab.github.io/pydm/index.html>.
- 21 李嘉曾, 韩利峰, 李丹清, 等. 基于大数据平台的EPICS历史数据归档系统[J]. 核技术, 2019, **42**(11): 110603. DOI: [10.11889/j.0253-3219.2019.hjs.42.110603](https://doi.org/10.11889/j.0253-3219.2019.hjs.42.110603).
LI Jiazeng, HAN Lifeng, LI Danqing, *et al.* EPICS historical data archiving system based on big data platform[J]. Nuclear Techniques, 2019, **42**(11): 110603. DOI: [10.11889/j.0253-3219.2019.hjs.42.110603](https://doi.org/10.11889/j.0253-3219.2019.hjs.42.110603).
- 22 赵子龙, 徐慧超, 龚培荣. 基于Archiver Appliance的束线数据管理系统[J]. 核技术, 2018, **41**(3): 030102. DOI: [10.11889/j.0253-3219.2018.hjs.41.030102](https://doi.org/10.11889/j.0253-3219.2018.hjs.41.030102).
ZHAO Zilong, XU Huichao, GONG Peirong. Management and query system for the beamline operation data based on Archiver Appliance at SSRF[J]. Nuclear Techniques, 2018, **41**(3): 030102. DOI: [10.11889/j.0253-3219.2018.hjs.41.030102](https://doi.org/10.11889/j.0253-3219.2018.hjs.41.030102).
- 23 Priller J. EPICS SNMP device support module (NSCL/FRIB) [EB/OL]. [2022-04-19]. <https://groups.nslc.msu.edu/controls/files/devSnmp.html#Support>.