

TMSR 硝酸盐自然循环回路控制系统设计

张 宁^{1,2} 郭 冰^{1,2} 韩立欣^{1,2} 周大勇^{1,2}

1 (中国科学院上海应用物理研究所 嘉定园区 上海 201800)

2 (中国科学院核辐射与核能技术重点实验室 上海 201800)

摘要 为了对硝酸盐自然循环回路(Nitrate Natural Circulation Loop, NNCL)的各子系统及设备的运行状态进行在线监测及远程控制,设计并实现了具有分布式结构的控制系统,并根据工程实际对其软件模块进行了改进。主要包括对过程控制软件包进行结构优化,以提高多通道模式下数据传输效率;使用 PostgreSQL 关系型数据库取代本地数据存储方式进行数据存档管理和和查询;在操作员计算机中更新人机界面软件以获得更好的界面效果,配置 MATLAB 在线驱动接口用于数据在线处理。经过运行测试表明,此系统可长期有效地支持回路的调试运行,并为实验人员提供研究所需的实验数据及控制途径。

关键词 自然循环回路, EPICS, 在线监测, 分布式控制系统

中图分类号 TL99, TL362+.5

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2015.hjs.38.070401

非能动衰变热排出功能^[1-3]是反应堆非能动安全系统的重要组成部分,是确保事故条件下反应堆停堆状态堆芯失去主动冷却后,温度不超过限值的有效手段。中国科学院钍基熔盐堆(Thorium-based Molten Salt Reactor, TMSR)^[4]的 NNCL 实验回路就是模拟反应堆中用于非能动衰变热排出的辅助冷却系统(Direct Reactor Auxiliary Cooling System, DRACS)的运行模式,通过分析系统流动、换热等特性,来研究和解决非能动衰变热排出系统在待命、启动、启动时间、稳定运行等各个方面的性能指标以及未来设计中可能遇到的问题,并验证安全分析和热工水力计算方法在熔盐上的适用性和准确性。

NNCL 实验回路^[5]主要由加热器、熔盐池、熔盐储罐、热交换器(Draft Heat Exchanger, DHX and Natural Draft Heat Exchanger, NDHX)、空冷塔、膨胀罐和连接管道等组成。其主要原理是通过热流段和冷流段的流体密度差产生的驱动压头来驱动回路中熔盐的自然循环,从而将热量通过循环系统带到空冷塔中,再由空气自然对流排入大气。根据回路的运行原理与结构及实验相关要求,将系统控制任务划分为两部分:加热控制和中央控制。

加热控制主要实现回路中熔盐的温度控制,为模拟将熔盐热量通过回路循环带入空冷塔冷却的整个实验过程提供全程温度在线监测与控制。具体包括储罐加热、加热器加热、试验段加热、管路伴加

热、循环泵加热以及对回路中各部分温度传感器的数据采集。

中央控制是除加热控制以外其他各项控制的统称,主要包括以下部分:

(1) 熔盐循环控制:主要是在气路中,通过控制气体流速和压力来驱动熔盐在回路中的循环运动。具体包括调流量控制器、调压阀、气动阀控制以及压力传感器数据的实时监测。

(2) 模拟散热控制:主要在空冷塔中通过控制散热风机转速来实现熔盐温度冷却,达到散热目的。

(3) 用于系统安全运行的联锁保护控制。

(4) 其它反映回路各部分状态的信息监测,如超声波流量计、雷达液位计以及压力变送器等。

为便于实验数据的进一步分析研究以及对回路实验结果评估,控制系统需要提供历史数据的存档及调用功能,以及数学分析软件与实时数据和历史数据的接口。

1 NNCL 控制系统结构设计

根据 NNCL 回路对控制系统的工程实际需求以及相关技术积累,功能实现主要基于 EPICS (Experimental Physics and Industrial Control System)^[6]分布式控制系统来完成。系统中所有 PC 设备均配置为 Linux 操作系统。根据 EPICS 的系统结构以及参考 DCS (Distributed Control System)系统

中国科学院战略性先导科技专项(No.XDA02050100)资助

第一作者:张宁,男,1980年出生,2012年于中国科学院上海应用物理研究所获博士学位,研究领域为反应堆仪控系统和加速器束流诊断

通讯作者:周大勇, E-mail: zhoudayong@sinap.ac.cn

收稿日期:2015-01-20, 修回日期:2015-04-22

通常的设备功能结构划分, 设计了回路系统设备的三层结构。分别为现场设备层、过程控制层和监控

管理层。各层间软件构架及接口图如图 1 所示。

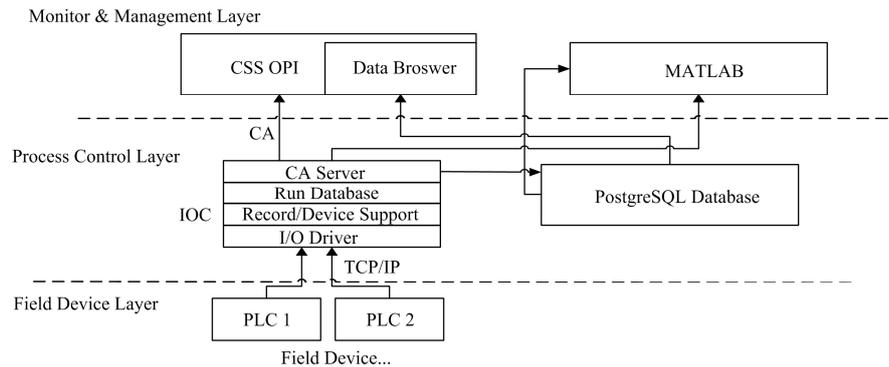


图 1 NNCL 控制系统软件结构图
Fig.1 Software diagram of NNCL control system.

最底层为现场设备层, 是控制系统与现场设备的 I/O 接口, 主要为两组横河(YOGOGAWA)AF-3M 型可编程逻辑控制器(Program Logic Controller, PLC)组件, 分别负责加热控制与中央控制 I/O。回路中各种传感器及控制器根据类型不同与对应 PLC 卡件模块相连接并将实时数据存储于模块寄存器中, CPU 模块以统一时钟将卡件寄存器数据与 CPU 内存数据进行 I/O 交换, 内存数据可通过 PLC 内置服务器被上位机访问。

过程控制层是整个分布式控制系统中间层及核心, 主要作用是通过 IOC (Input/Output Controller) 实现与现场设备层 PLC 内存数据的实时 I/O 操作及发布管理。为对历史数据进行更安全有效的调用和维护, 将数据存档方式从 channel archiver^[7]的本地文件存档模式升级为 PostgreSQL 关系型数据库模式, 并将数据库以服务器形式独立存放在过程控制层。IOC 与 PostgreSQL 数据库分别运行在两台 DELL PowerEdge R520 机架式服务器中。PostgreSQL 数据库通过 ArchiveEngine 数据库引擎将 IOC 发布的实时数据进行历史存档, 并通过指定的模式对外部提供历史数据访问。

监控管理层作为 EPICS 系统的结构顶层, 是操作员与系统的人机操作接口。由于 CSS (Control System Studio)软件包与之前回路^[8]中使用的 EDM (Extensible Display Manager)面板相比, 具有更丰富的插件功能及对历史数据库的接口支持, 因此在 OPI (Operator Interface)计算机中的人机界面基于 CSS 实现。主要包括实时数据监控界面、控制命令发布界面以及历史数据读取界面开发。针对回路实验人员对于数据处理的需求, 在监控管理层还需实现 MATLAB 在线获取实时及存档数据的途径。

基于计算机与设备间通讯连接的可靠性和可扩

展性以及设备实际硬件接口配置, 系统中各层间通信均采用网络传输方式。计算机和 PLC 通过 DELL PowerConnect 6248 交换机接入到局域网中, 局域网与外部物理隔离。控制系统设备形成了以交换机为核心的星型网络拓扑结构。其结构图如图 2 所示。

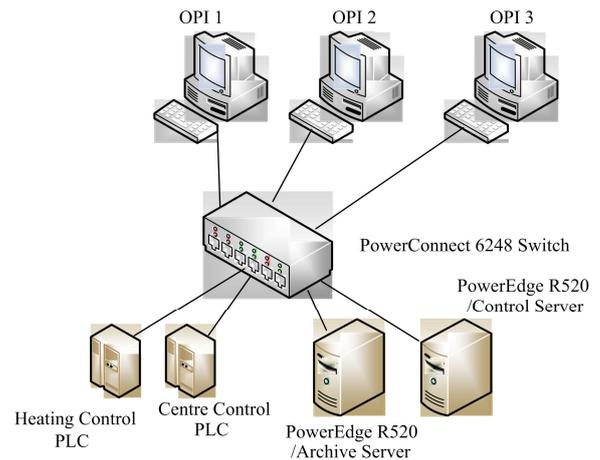


图 2 NNCL 控制系统硬件结构图
Fig.2 Hardware diagram of NNCL control system.

2 NNCL 控制系统服务器软件开发

NNCL 控制系统软件开发任务主要是实现 Linux 开发环境下 EPICS 系统的服务器级应用程序及设备软件间的 I/O 通信接口。包括 IOC 底层驱动与实时数据库、PostgreSQL 历史数据库及其与 IOC 接口引擎 ArchiveEngine。

2.1 IOC 软件设计

IOC 软件实现主要包括横河 PLC 的 I/O 通信驱动开发以及实时数据库的配置。横河提供了 EPICS 环境下与其 PLC 产品通信的驱动包 netDev, 其中

yew 目录内包含了 EPICS 多种记录支持(Record Support)模块, common 目录包含设备支持(Device Support)模块及驱动。一般情况下, 只要通过 IOC 标准模块创建 soft IOC, 然后对 netDev 源码编译并调用其生成的描述文件 yew.dbd 和 common.dbd 即

可实现与 PLC 的 I/O 通讯。

在回路系统中, I/O 通讯的变量共计 630 个, 主要为 AI/AO 类型, 如表 1 所示。根据工程实际要求, 进行周期扫描数据更新的频率为 1 Hz。

表 1 传感器及控制变量
Table 1 Sensor and controlling variable list.

模板名称 Template name	PV 类型 PV type	数量 Points
AI_T.template	模拟输入 Analog Input, AI	122
AI.template	模拟输入 Analog Input, AI	100
AO.template	模拟输出 Analog Output, AO	150
BI.template	二进制输入 Binary Input, BI	174
BO.template	二进制输出 Binary Output, BO	84

在 EPICS 运行机制中, 所有声明的实时数据库记录在初始化时都会被注册而进入被 EPICS 内核实时扫描的记录队列中。考虑到多通道连接下 IOC 驱动执行效率, 如果使用单线程驱动扫描所有记录的队列, 将会降低 IOC 与 PLC 数据传输效率, 甚至可能导致数据延迟或丢失。因此, 在实时数据库配

置中, 将 I/O 变量对应的记录按照不同 PLC 的数据来源划分为两组队列, 分别在两个 substitution 记录文件中声明。在软件设计中, 对 IOC 的支持模块结构进行重新设计, 主要通过双线程驱动分别对两组队列记录并行扫描处理, 经过重新设计后的 IOC 驱动结构如图 3 所示。

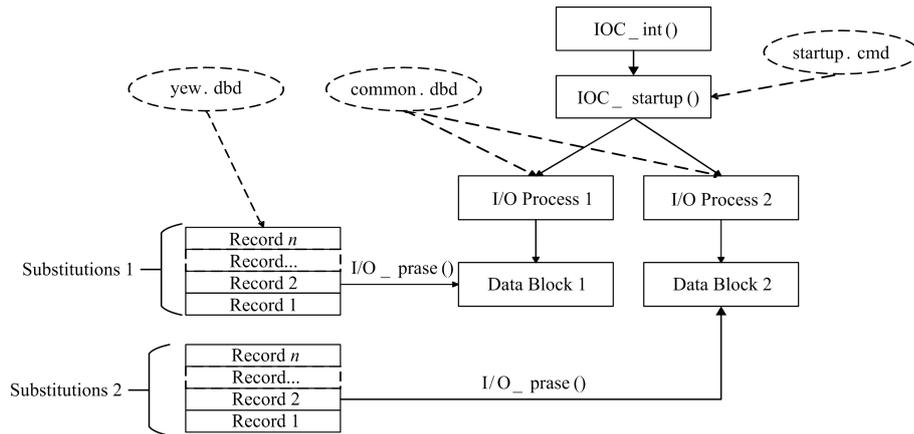


图 3 采用双线程并行处理 IOC 驱动结构图
Fig.3 Diagram of IOC driver with dual-thread and parallel processing.

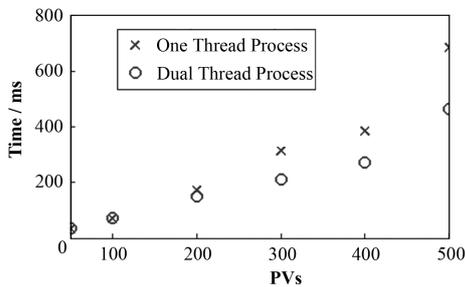


图 4 双线程与单线程驱动处理多个 PV 效率对比图
Fig.4 Efficiency comparison diagram of PVs process between single-thread and dual-thread driver.

为验证经过重新设计的 IOC 支持模块中驱动程序执行效率, 分别对 IOC 驱动在单队列记录处理模式与经过优化后的双线程并行处理模式进行不同

PV 数量情况下的 I/O 变量在每个扫描周期读取速度测试。测试结果如图 4 所示。

图 4 中横轴表示 PV 数量, 纵轴表示每次扫描 ai 类型记录后驱动执行速度, 记录扫描频率为 1 Hz。由图 4 可得, 当记录数量大于 300 时, 驱动程序执行效率明显降低。与单队列模式相比, 经过优化设计的双队列并行处理模式驱动执行效率明显提高。经过连续测试表明, 采用双队列并行处理的 IOC 驱动结构可以稳定运行。

2.2 PostgreSQL 及 IOC 接口引擎开发

从存档数据可靠性和风险分散性原则考虑, 在控制系统结构设计中将 PostgreSQL 数据库从操作员计算机中独立出来, 单独配置于过程控制层中具

有更高可靠性的机架式服务器中, 上层应用程序通过网络接口对数据库进行读写操作。为了与 IOC 实时数据库的 PV 变量存储格式兼容, 在数据库中建立了 EPICS 记录中各种域的对应数据表以及表之间

的链路关系。主要包括采样引擎、采样模式、状态定义、通道、通道组别、通道信息、采样数据、数据数组、通道状态、报警等级以及保留信息等, 其数据表结构与链路关系如图 5 所示。

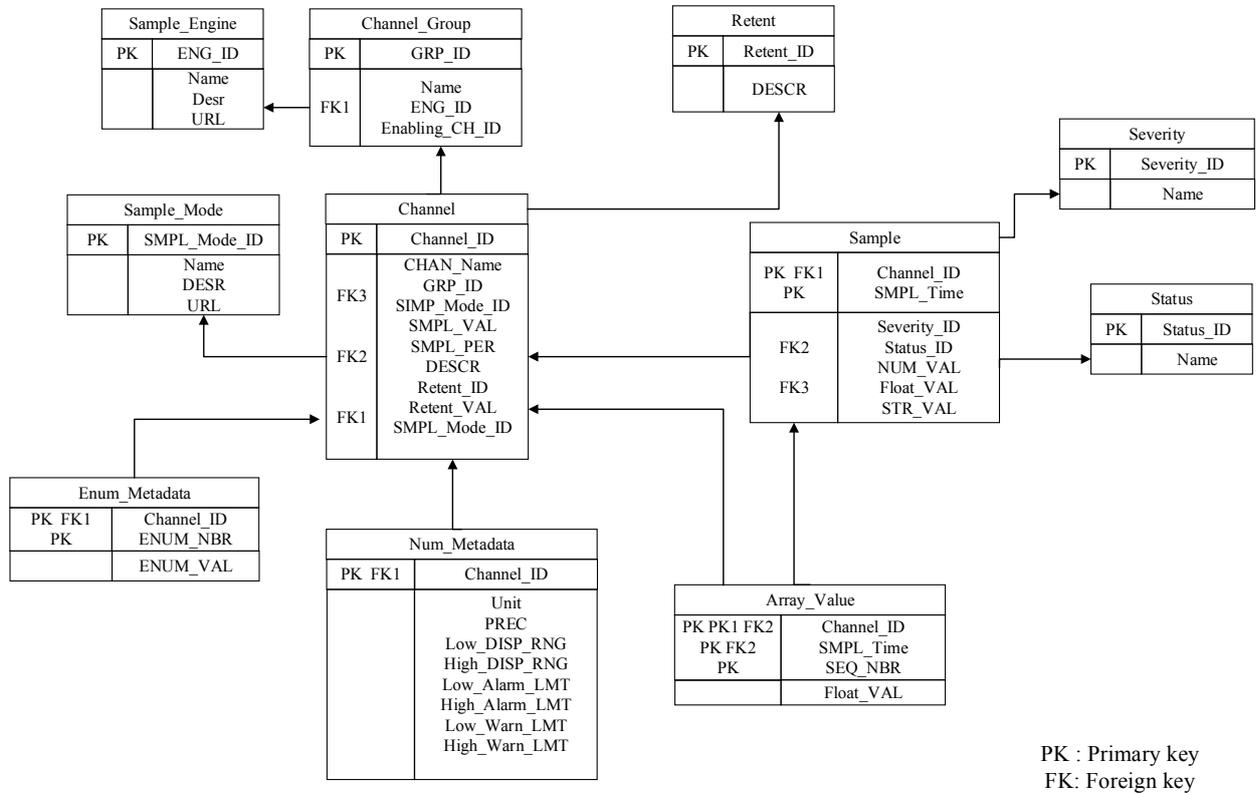


图 5 PostgreSQL 中数据表关系结构图
Fig.5 Tables relationship diagram in PostgreSQL database.

为建立 IOC 中 CA server 与 PostgreSQL 之间的数据传输通道, 需要在数据库运行的存档服务器中配置运行 RDB ChannelArchiver^[9]软件包, 由于此软件包是以 OPI 计算机中 CSS 插件形式存在, 因此需要将其源代码从 CSS 源码包中提取, 在存档服务器的 Eclipse IDE 开发工具中配置 JDK (Java Development Kit) 环境, 并在此环境中对 RDB ChannelArchiver 的 java 源码包进行编译, 分别生成用于通道连接的引擎程序 ArchiveEngine 与通道配置工具 ArchiveConfigTool。基于此引擎实现的 PV 数据存档系统软件结构如图 6 所示。

在图 6 存档系统中, ArchiveConfigTool 通过 setting.ini 和 Config.xml 文件分别设置与 CA server 和数据库连接的相关设置, 以及把 PV 变量映射为数据库存储数据的连接通道及通道数据刷新模式。对于 AI 与 AO 类型 PV 变量, 需要详细记录其变化过程, 因此数据存档采用 1 Hz 频率的周期性扫描方式, 即 sample 模式; 而 BO 与 BI 则只在数值发生

变化时存档, 即 monitor 模式。ArchiveEngine 在启动后将 IOC 发布的 PV 变量通过对应的连接通道映射进入数据库中存档。数据库通过网络服务模式, 可将数据发布到上层 CSS 中的 Data Browser 插件或 MATLAB 中。

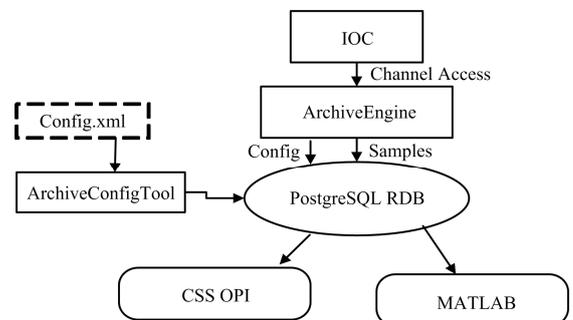


图 6 NNCL 数据存档系统软件结构
Fig.6 Software architecture of the NNCL data archive system.

3 人机界面开发及系统测试

人机界面开发目标是在监控管理层的 OPI 计算机中为操作员提供界面友好、功能全面的数据显示及命令发布操作界面。主要包括实现 CSS 人机界面及 MATLAB 数据库接口。并在此基础之上利用此界面程序进行系统测试。

基于 CSS 的人机界面采用分层显示的设计。主

界面在 NNCL 总体结构图中显示主要传感器数据及回路总体运行状态。主界面中不同设备标识可链接到该设备二级控制界面。各二级界面主要包括熔盐池、膨胀罐、储罐、管路、空冷塔、中控连锁、NDHX、气罐以及各部分加热控制界面等几部分。此外人机界面还包括基于 Data Browser 插件的历史数据库浏览界面。主界面及储罐控制二级界面见图 7 和 8。

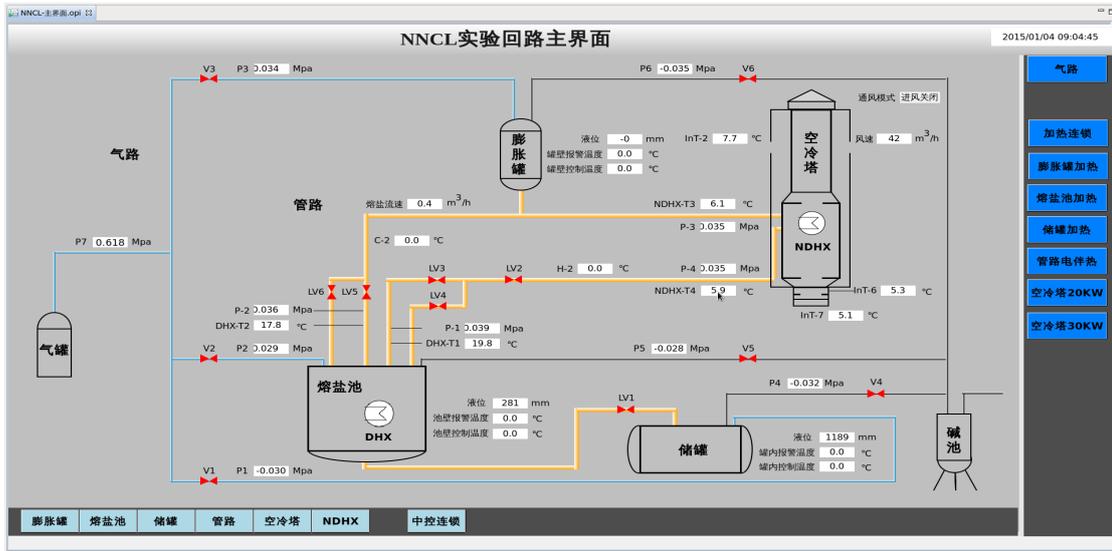


图 7 NNCL 控制系统 CSS OPI 主界面
Fig.7 Main interface of CSS OPI in NNCL control system.

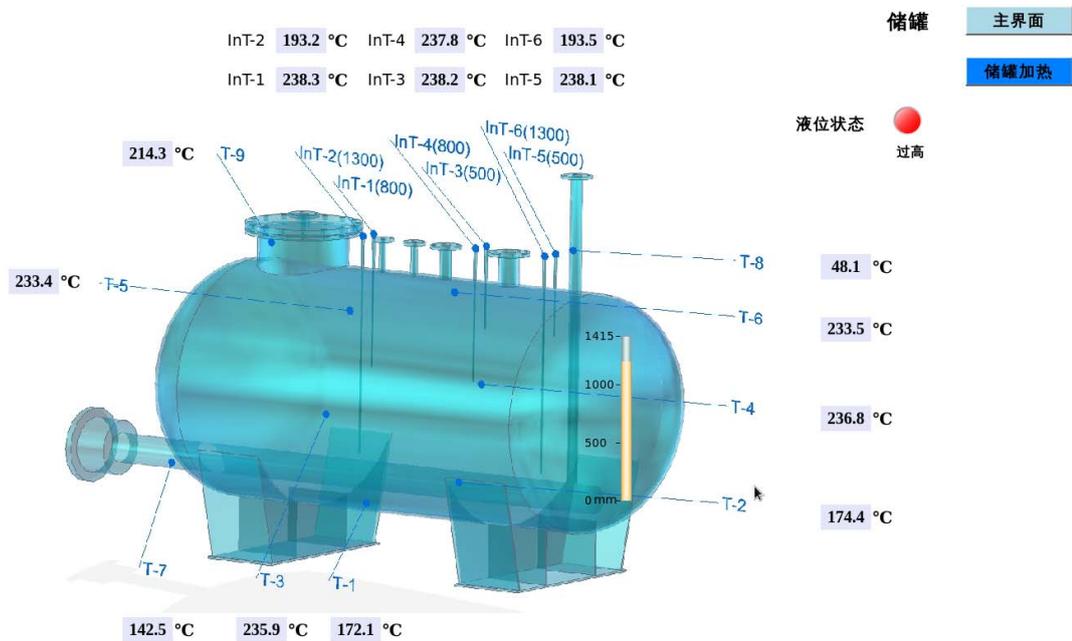


图 8 NNCL 控制系统 CSS 储罐界面
Fig.8 NNCL control system interface for storage tank.

开发 MATLAB 数学分析软件在线数据处理功能, 主要是实现与 IOC 实时数据库及 PostgreSQL 历史数据库的驱动接口。斯坦福大学开发了 MATLAB 及 SCILAB 与 IOC 的接口函数库 LabCA^[10], 对该库的配置文件进行 EPICS 环境下适用于 MATLAB 的相关配置及编译安装, 之后导入软件库的路径中即可调用从 IOC 中读取实时数据的库函数。PostgreSQL 也提供了供外部应用程序访问的 JDBC 接口驱动。将此驱动加载到 MATLAB 的驱动接口列表及路径中, 可实现在 MATLAB 中使

用命令行对数据库服务器的连接及数据读取功能。

系统测试主要是通过观察 CSS 人机界面能否正确显示在线数据和各部分运行状态, 以及通过历史数据曲线查看系统长期运行的可靠性。图 9 显示了利用 Data Browser 获取到空冷塔加热功率及温度变化的历史数据, 图 9 中曲线从上到下依次为热交换器加热效率设定、实测功率及两组实测温度, 图 10 显示 MATLAB 获取空冷塔三个不同位置测量的传感器温度曲线。

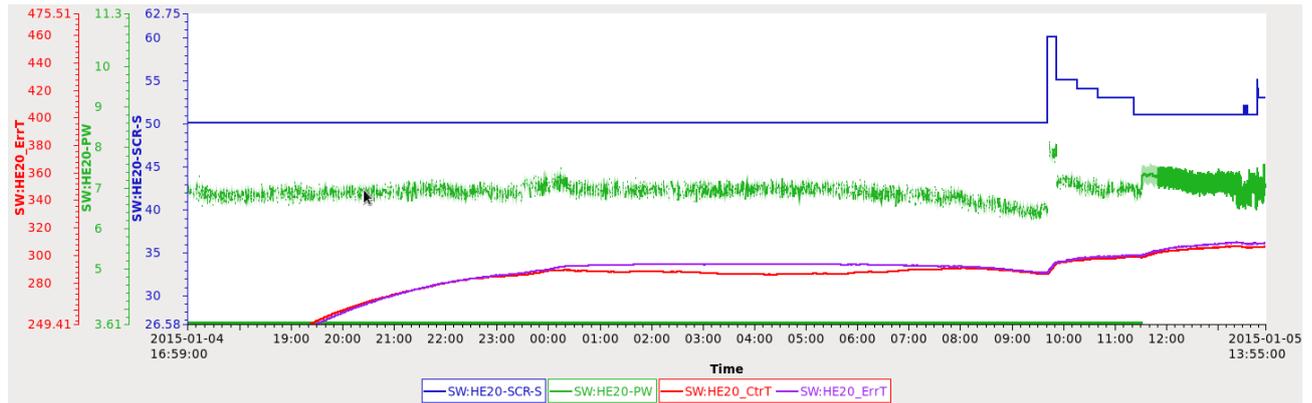


图 9 空冷塔加热功率及温度变化
Fig.9 Power and temperature variation of air cooling tower.

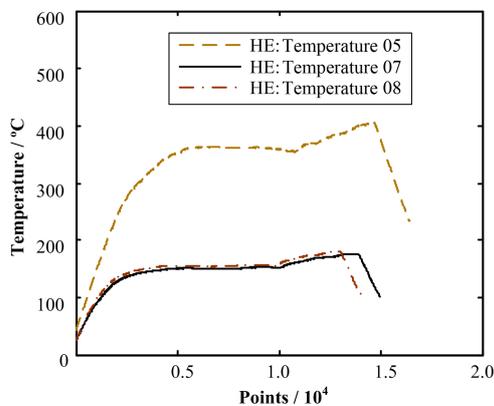


图 10 在空冷塔不同位置测量的温度变化曲线
Fig.10 Temperature variation curves of different location in air cooling tower.

4 结语

NNCL 的控制系统采用分布式设计并结合 EPICS 系统构架, 建立起对整个回路在线监测与命令发布的统一管理平台。经过对 IOC 驱动程序的优化设计, 提高了 I/O 通讯的传输效率; 通过 RDB ChannelArchiver 数据库接口, 将系统运行产生的大量数据存储于数据库服务器中, 采用双写入线程并

增加“上传线程”以“乒乓”切换方式控制两个写入线程可以进一步提高 RDB ChannelArchiver 的读写效率^[11]。利用基于 CSS 的人机界面以及 MATLAB 软件很好地实现了数据在线监测、查询及分析功能。这为回路后续的非能动衰变热排出的相关实验和研究提供了技术保障。

参考文献

- 1 Qualls A L, Cetiner M S, Wilson Jr T L. Advanced high-temperature reactor dynamic system model development[G]. ORNL/TM-2012/174
- 2 Zhou T, Peng C H, Wang Z H, *et al.* Application of grey model on analyzing the passive natural circulation residual heat removal system of HTR-10[J]. Nuclear Science and Techniques, 2008, **19**(5): 308–313
- 3 Wang X, Lyu Q, Sun X, *et al.* A modular design of a direct reactor auxiliary cooling system for AHTRs[J]. Transactions of the American Nuclear Society, 2011, **104**: 1077–1080
- 4 江绵恒, 徐洪杰, 戴志敏. 未来先进核裂变能—TMSR 核能系统[J]. 中国科学院院刊, 2012, **27**(3): 366–374. DOI: 10.3969/j.issn.1000-3045.2012.03.016

- JIANG Mianheng, XU Hongjie, DAI Zhimin. Advanced fission energy program-TMSR nuclear energy system[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2012, **27**(3): 366–374. DOI: 10.3969/j.issn.1000-3045.2012.03.016
- 5 林超, 蔡创雄, 王凯, 等. 硝酸盐自然循环回路空冷塔性能分析[J]. 核技术, 2014, **37**(12): 120601. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2014.hjs.37.120601
- LIN Chao, CAI Chuangxiong, WANG Kai, *et al.* Performance analysis of the air cooling tower for nitrate natural circulation loop[J]. Nuclear Techniques, 2014, **37**(12): 120601. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2014.hjs.37.120601
- 6 Kraimer M R, Anderson J B, Johnson A N, *et al.* EPICS application developer's guide[DB/OL]. <http://www.aps.anl.gov/epics>, 2010
- 7 Kay K, Gabriele C. Control system studio guide[DB/OL]. <http://cs-studio.sourceforge.net/docbook/index.html>, 2015
- 8 韩利峰, 陈永忠, 周大勇, 等. HTS 熔盐实验回路分布式控制系统设计[J]. 核技术, 2013, **36**(9): 090603. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2013.hjs.36.090603
- HAN Lifeng, CHEN Yongzhong, ZHOU Dayong, *et al.* Design of the distributed control system for HTS molten salt test loop[J]. Nuclear Techniques, 2013, **36**(9): 090603. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2013.hjs.36.090603
- 9 Chen Y S, Kuo C H, Chen J, *et al.* Implementation of the EPICS data archive system for the TPS project[C]. Proceedings of IPAC2013, Shanghai, China, 2013
- 10 Marsching S, Huttel E, Klein M, *et al.* First experience with the MATLAB middle layer at anka[C]. Proceedings of ICALEPCS2011, Grenoble, France, 2011
- 11 Hu Z, Mi Q R, Zhen L F, *et al.* EPICS data archiver at SSRF beamlines[J]. Nuclear Science and Techniques, 2014, **25**(2): 020103. DOI: 10.13538/j.1001-8042/nst.25.020103

Design of nitrate natural circulation loop control system in TMSR

ZHANG Ning^{1,2} GUO Bing^{1,2} HAN Lixin^{1,2} ZHOU Dayong^{1,2}

¹(Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Jiading Campus, Shanghai 201800, China)

²(Key Laboratory of Nuclear Radiation and Nuclear Energy Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

Abstract Background: Nitrate natural circulation loop (NNCL) is one of experimental platform in thorium-based molten salt reactor (TMSR), which was designed to study the heat transfer behavior and corrosion behavior of direct reactor auxiliary cooling system (DRACS). **Purpose:** This study aims to implement a distributed control system (DCS) with functionalities of system control, online state monitor and experimental data acquisition in NNCL. **Methods:** An experimental physics and industrial control system (EPICS) based distributed control system was designed for this project. An optimized support module structure was designed for I/O operation with low-level PLCs to improve the performance of input/output controller (IOC) runtime database, and a PostgreSQL database was employed for data archive by RDB ChannelArchiver. A control system studio (CSS) interface and MATLAB was implemented in operator interface (OPI) computers, for visual operation and experimental data calculation. **Results:** Testing for online operation and history data acquisition in OPI interface proved that the control system satisfied all requirements of NNCL control and state monitor with long-term effective. **Conclusion:** The system could provide efficient and reliable routine for online operation and would well support advanced study of DRACS on this NNCL platform.

Key words NNCL, EPICS, On-line monitoring, DCS

CLC TL99, TL362⁺.5