

基于龙芯的 EPICS 实时控制器在超高温 熔盐泵测试装置上的应用

邓 琦^{1,2} 杨峥翰¹ 韩利峰¹ 黄 丽¹ 戴志敏^{1,2}

1(中国科学院上海应用物理研究所 上海 201800)

2(中国科学院大学 北京 100049)

摘要 超高温熔盐泵测试装置是一套用于研究泵、阀、换热器等关键设备在高温熔盐工况下性能的装置。为增强其控制系统的国产化程度及核心控制器的自主可控性,在国产自主指令架构 LoongArch 上设计研发了基于实验物理与工业控制系统 (Experimental Physics and Industrial Control System, EPICS) 的实时控制器。首先将 EPICS、IgH EtherCAT Master 等软件移植到基于 LoongArch 的嵌入式开发板上,解决软件与指令架构不适配的问题,实现控制程序的编写与执行、EtherCAT 主站通讯等功能,并对控制器的最小总线扫描周期进行测试;然后,针对超高温熔盐泵测试装置的控制需求,利用自主研发的 EPICS 扩展插件在该控制器上实现了 PID 温度控制、气路流量监测等功能;最后,在实际工况下对控制器的实时性、CPU 使用率等指标进行测试分析,评估控制器的性能表现。实验数据表明:该控制器的最小总线扫描周期为 50 ms,控制任务执行的延迟时间最大为 12.85 ms, CPU 性能表现良好,满足该项目的应用需求。该控制器已成功融入超高温熔盐泵测试装置的控制系统,取代了原 x86 服务器,目前在稳定运行中。

关键词 实时控制器, 国产自主指令集, LoongArch, 实验物理与工业控制系统, 超高温熔盐泵

中图分类号 TL362

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2025.hjs.48.240409

CSTR: 32193.14.hjs.CN31-1342/TL.2025.48.240409

Application of loongson-based EPICS real-time controller in the high-temperature molten salt pump testing facility

DENG Qi^{1,2} YANG Zhenghan¹ HAN Lifeng¹ HUANG Li¹ DAI Zhimin^{1,2}

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

2(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract [Background] The high-temperature molten salt pump testing facility is designed to evaluate the performance of pumps, valves, heat exchangers, and other critical equipments under high-temperature conditions. Currently, the controller, which is a fundamental component of the control system, primarily relies on imported technologies. [Purpose] This study aims to implement an independently controllable real-time controller that utilizes the domestic instruction set architecture known as LoongArch, along with the Experimental Physics and Industrial Control System (EPICS). [Methods] Firstly, softwares such as EPICS, IgH EtherCAT Master, and Dls-ethercat, were ported to an embedded development board which was based on the low-power processor LS2K1000LA running Linux operation system with the RT-PREEMPT patch. The basic functions of the controller were implemented using

第一作者: 邓琦, 女, 1995 年出生, 2016 年毕业于电子科技大学, 现为硕士研究生, 研究领域为 EPICS 实时控制算法模块

通信作者: 韩利峰, E-mail: hanlifeng@sinap.ac.cn; 戴志敏, E-mail: daizhimin@sinap.ac.cn

收稿日期: 2024-10-25, 修回日期: 2025-01-14

First author: DENG Qi, female, born in 1995, graduated from University of Electronic Science and Technology of China in 2016, master student, focusing on EPICS real-time control algorithm modules

Corresponding author: HAN Lifeng, E-mail: hanlifeng@sinap.ac.cn; DAI Zhimin, E-mail: daizhimin@sinap.ac.cn

Received date: 2024-10-25, revised date: 2025-01-14

the aforementioned open-source software. EPICS was utilized for control logic programming and execution whilst IgH EtherCAT Master enabled the communication between the EtherCAT master and slaves, and experiments were also designed to assess the minimum bus scan cycle of the controller. Subsequently, based on the requirements of the testing facility, an EPICS support module was developed to implement control programs that were previously executed on an x86 server, such as PID temperature control. Finally, the real-time performance and CPU efficiency of the controller were evaluated under heavy loads (78 PID control tasks). **[Results]** The test results indicate that the controller achieves a minimum bus scan cycle of 50 ms and a maximum execution latency of 12.83 ms for control task execution. Performance indicators related to CPU and memory are also satisfied with all requirements. **[Conclusions]** The controller implemented in this study fulfills the functionality and performance requirements of the high-temperature molten salt pump testing facility. It has successfully replaced the original x86 server and is operating stably in the high-temperature molten salt pump testing facility.

Key words Real-time controller, Domestic instruction set architecture, LoongArch, EPICS, High-temperature molten salt pump

为开展超高温熔盐泵、阀、换热器等关键设备在高温熔盐工况下的性能研究工作,中国科学院上海应用物理研究所搭建了一套由主回路系统、熔盐系统、气路系统、仪控系统、工艺系统及物性监测系统构成的超高温熔盐泵测试装置。测试装置的控制系統采用分布式控制系统架构,基于实验物理与工业控制系统(Experimental Physical and Industrial Control System, EPICS)搭建。EPICS是由美国洛斯阿拉莫斯国家实验室和阿贡国家实验室联合开发的用于构建分布式控制系统的开源软件,具有稳定可靠、高性能、可扩展等特点^[1],被应用于多个大型实验装置上^[2],在加速器、天文、核能领域已有丰富的技术积累^[3-8]。

超高温熔盐泵测试装置选用EPICS构建控制系统,实现了控制系统软件架构自主可控,但控制系统核心控制器仍然存在依赖进口产品的问题。EPICS的核心组件IOC(Input/Output Controller)具备实现工业控制器的能力,已有利用它实现过程控制的先例^[9-10],也有研究人员就如何解决IOC缺乏国产平台支持的问题进行了不同程度的探索。李国辉等^[11]在国产实时操作系统翼辉(SylixOS)上,开发了基于EPICS和EtherCAT总线协议的控制系统,实现了核能综合利用超轻水项目蒸发器液位控制;中国散裂中子源(China Spallation Neutron Source, CSNS)将EPICS IOC运行在国产控制器汇川AC800上,研制了伴生质子束实验平台的EPICS控制系统^[12];谢春杰等^[13]将EPICS IOC移植到基于MIPS架构的处理龙芯2K1000上,实现了控制指令发送、数据监测等功能,完成了对低电平系统的远程控制。

上述研究提出了EPICS IOC与各类国产平台适配的方案,但底层指令架构依赖国外产品的问题还未解决。龙芯的自主指令架构LoongArch从顶层架

构到指令编码等细节都为自主设计,从软件根源上实现了自主可控^[14]。本文选用基于LoongArch的嵌入式开发板,利用Linux、PREEMPT_RT补丁和EPICS等开源软件实现了一款完全自主可控的实时控制器。在超高温熔盐泵测试装置的应用结果表明,该控制器能够准确执行控制任务,稳定可靠,其总线扫描周期及其他关键指标均满足测试装置控制系统的要求。

1 控制系统架构

超高温熔盐泵测试装置的控制系统基于EPICS开发,EPICS的核心组件是IOC和通道访问协议(Channel Access, CA)。IOC包含一个常驻内存的实时数据库(IOC Database)和记录支持(Record Support)、设备支持(Device Support)、设备驱动(Device Driver)等模块^[15-16]。IOC Database存储各种类型的Record(如ai/ao、bi/bo、calc),通过定义Record的INP、OUT等属性,借助Record Support、Device Support模块,可实现IOC对指定设备读写以及对温度、压力等过程变量(Process Variable, PV)的管理。更重要的是,Record不仅可用于设备读写,用户还可通过定义Record属性和Record间的链接关系实现控制逻辑编程。因此IOC既能用于实现控制器,也可以是数据传输中间件。CA协议是基于客户端-服务器模型的通信协议,提供了统一的PV访问接口,实现了任意数量的IOC之间、IOC与其他服务器之间的透明数据传输。得益于IOC的独特设计和CA协议,EPICS控制系统具有良好的一致性和可扩展性。

超高温熔盐泵测试装置控制系统的架构如图1所示。主要分为三层:监控层、控制层和现场层。监控层由操作员接口(Operator Interface, OPI)构成,为

操作人员与系统的交互提供接口,负责运行操作界面、系统监控和数据可视化等应用,确保操作人员能够实时掌握系统状态;控制层主要由控制器组成,负责实时控制及数据处理;现场层则由传感器、阀门等设备组成。控制层中,有三台运行 IOC 的服务器负

责执行控制逻辑并驱动 EtherCAT 设备,承担控制器的任务;一台运行 IOC 的服务器作为数据传输中间件,基于 RS485/Modbus 协议建立 OPI 层与空冷可编程逻辑控制器 (Programmable Logic Controller, PLC) 及加热棒电流互感器的通信。

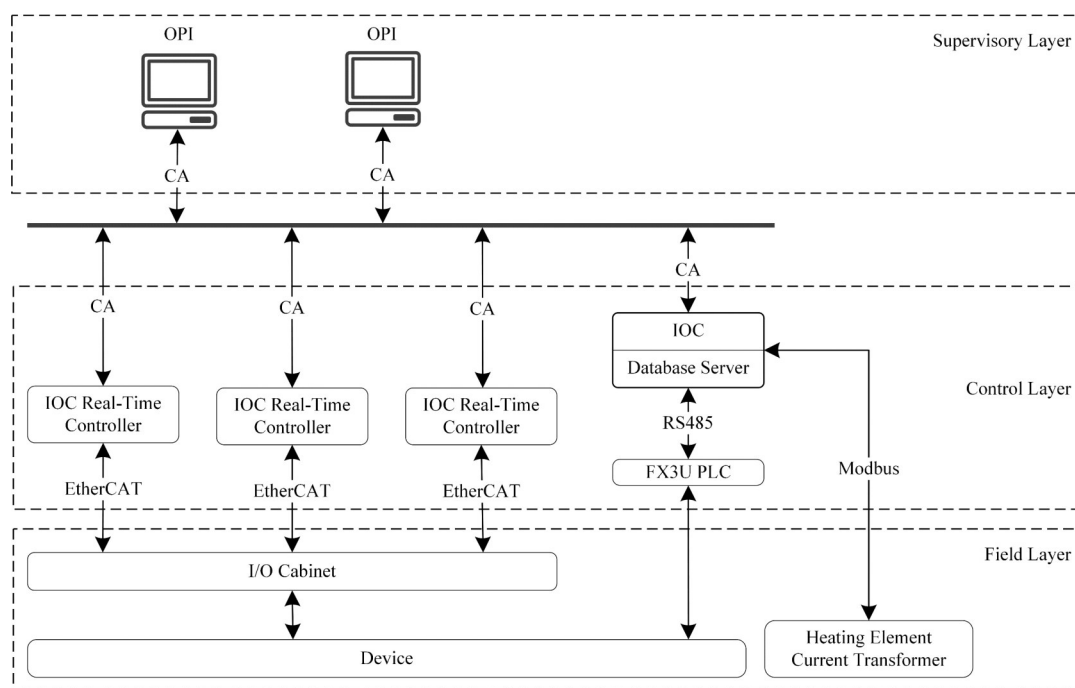


图1 超高温熔盐泵测试装置控制系统架构图

Fig.1 Architecture diagram of the control system for high-temperature molten salt pump testing facility

2 EPICS 实时控制器

2.1 硬件平台

原超高温熔盐泵测试装置的控制系统中, EPICS IOC 运行在基于 x86 架构的戴尔服务器 Precision 3430 上,而本文选用基于国产自主指令架

构 LoongArch 的嵌入式开发板——龙芯派二代,作为控制器的硬件平台。表1详细列出了戴尔服务器 Precision 3430 与龙芯派二代的主要配置。在确保控制器完全自主且符合应用需求的前提下,由于龙芯派二代的功耗、内核数量、主频均低于戴尔服务器 Precision 3430,控制器的整体费用显著降低。

表1 Precision 3430 与龙芯派二代主要配置对比
Table 1 The specification comparison of Precision 3430 and Loongson Pi Gen2

规格参数 Specification	戴尔服务器 Precision 3430	龙芯派二代 Loongson Pi Gen2
处理器 Processor	Intel i7-8700	LS2K1000LA
指令集架构 Instruction set architecture	x86	LoongArch
内核 Kernel	6 cores/64-bit	2 cores/64-bit
主频 Frequency	3.2 GHz	1 GHz
内存 Memory	32 GB	2 GB
功率 Power	< 200 W	< 20 W

2.2 软件架构

本文选用开源软件 EPICS、IgH EtherCAT Master^[17]、Dls-ethercat^[18] 和安装了 RT-PREEMPT 实时补丁的开源操作系统 Linux 实现控制器。IgH EtherCAT Master 是一个开源软件库,支持在 Linux

系统中实现 EtherCAT 主站功能,管理和控制 EtherCAT 从站设备。Dls-ethercat 是由英国钻石光源基于 IgH EtherCAT Master 开发的 EPICS 插件,它为 IOC 提供了对 EtherCAT 设备的支持。图2展示了控制器上运行的软件及它们之间的关系。首先,利

用 Dls-ethercat 创建 Scanner 总线扫描器, 对 EtherCAT 设备进行读写; 然后, 创建 I/O IOC 通过 socket 套接字和 Scanner 进行通信, 其中 Asyn 是提供异步读写支持的 EPICS 插件; 最后, 创建 Main IOC 执行具体的控制逻辑, 通过访问 I/O IOC 中的 PV 实现设备读写。

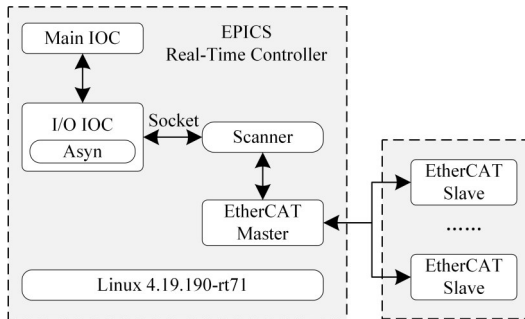


图2 控制器软件架构

Fig.2 The software architecture of the controller

由于龙芯派二代内存有限, 本文使用交叉编译工具 LoongArch GCC 8.3 GNU/Linux rc1.2 在标准 Linux 环境下编译, 再将生成的二进制文件下载到龙芯派二代运行。EPICS 等软件官方并未提供对 LoongArch 架构的支持, 因此控制器实现的难点之一就是软件与 LoongArch 架构的适配。以 EPICS

Base 为例, 要完成它与 LoongArch 架构的适配, 需要根据主机和目标平台的操作系统、架构, 编写 Makefile 文件, 制定对应的编译规则, 并按照 <CONFIG/CONFIG_SITE>.<host-os-arch>.<target-os-arch> 的格式为 Makefile 文件命名。

此外, 在 EPICS 配置时启用了 USE_POSIX_THREAD_PRIORITY_SCHEDULING=YES 选项, 让 EPICS 线程采用 SCHED_FIFO 调度策略使控制器满足实时性要求。开启此选项后, EPICS IOC 将为其线程分配实时优先级, 并执行内存锁定操作, 减少因线程切换或内存访问延迟而导致任务执行不稳定。

2.3 最小总线扫描周期

控制器通过周期性的扫描实现对信号的读写, 最小总线扫描周期是指控制器能够正确读写信号的最小扫描周期。因此, 最小总线扫描周期是控制器的重要指标之一。本文控制器的信号读写经由 Scanner 周期扫描和 IOC 的周期扫描两步实现, 所以本文设计搭建了一套测试程序, 测试 Scanner 和 IOC 的最小扫描周期, 取两者中较大的值为本文控制器的最小总线扫描周期。图3是测试装置示意图。首先, 在控制器 IOC 上模拟脉冲信号输出到 AO 端口,

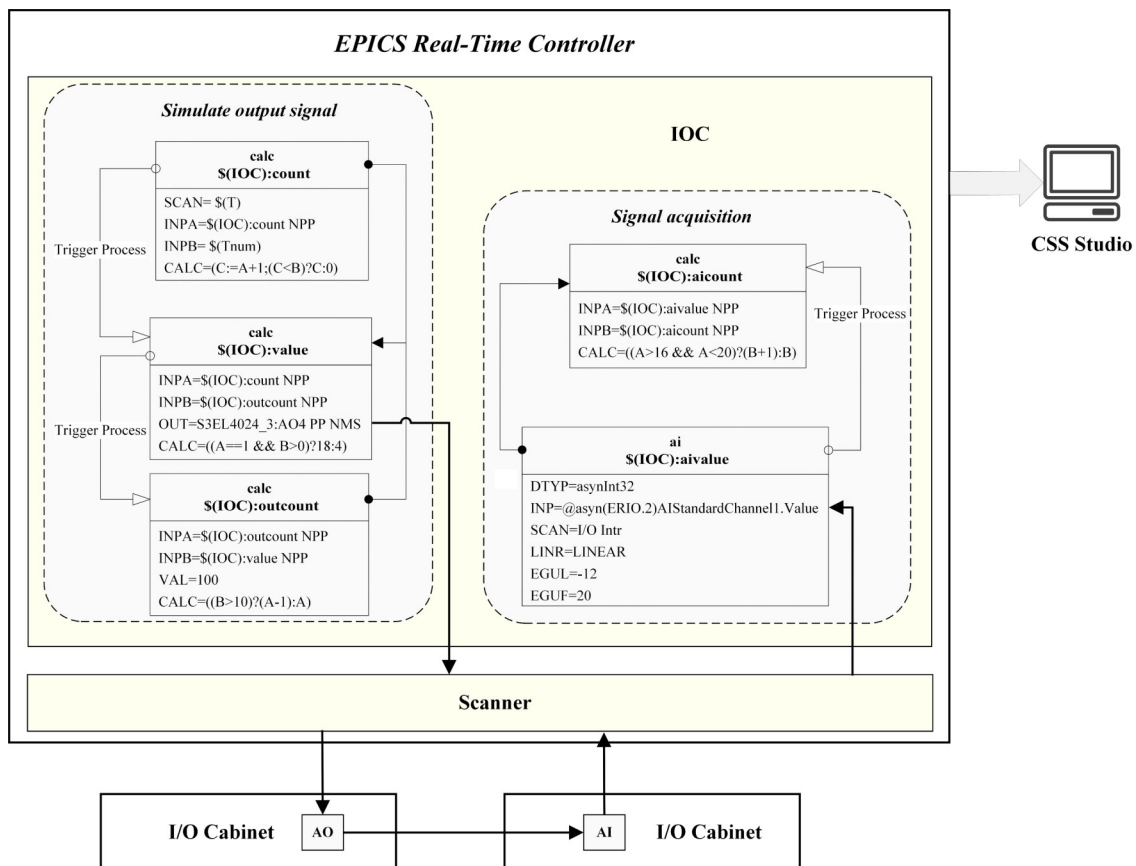


图3 测试程序示意图

Fig.3 Schematic diagram of the test program

再将AO端口引至另一I/O板卡的AI端口,由控制器IOC读取AI端口信号;然后,利用CSS Studio^[19]实时读取、记录和展示输入输出信号,观察波形的完整性、检查数量的正确性。最后,将Scanner和IOC的扫描周期都设置为 T ,不断减小 T ,观察输入输出信号波形的完整性、核对周期数量,将能正确计数、波形完整的最小周期作为控制器最小总线扫描周期。

图4展示了 T 为50 ms时最后5个周期的输入输出信号。最终测得最小总线扫描周期为50 ms,响应延迟最大值为113.96 ms,平均值为113.54 ms。

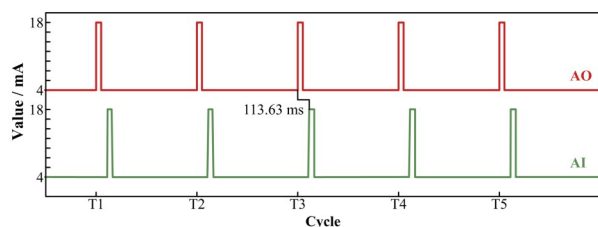


图4 输入输出信号图($T=50$ ms)

Fig.4 Illustration of the input/output signals ($T=50$ ms)

3 应用与性能评估

超高温熔盐泵测试装置控制系统中的温度控制、超温报警以及气路流量采集等已迁移至本文的EPICS实时控制器,取代了原来的戴尔服务器Precision 3430。通过监测控制器的CPU负载、使用率等性能指标,设计程序统计控制任务的延迟时间,对控制器在实际工况下执行大量高级控制任务的性能表现进行了评估。

3.1 控制功能开发

控制功能开发分为两个部分:一是定义I/O类Record,二是定义计算类Record。前者存储在Scanner IOC中,通过DTYP、INP等属性指定读写设备类型、地址等,实现I/O控制;后者则存储在Heater IOC中,利用calc、compress等类型的Record实现温度控制、超温报警的控制逻辑。

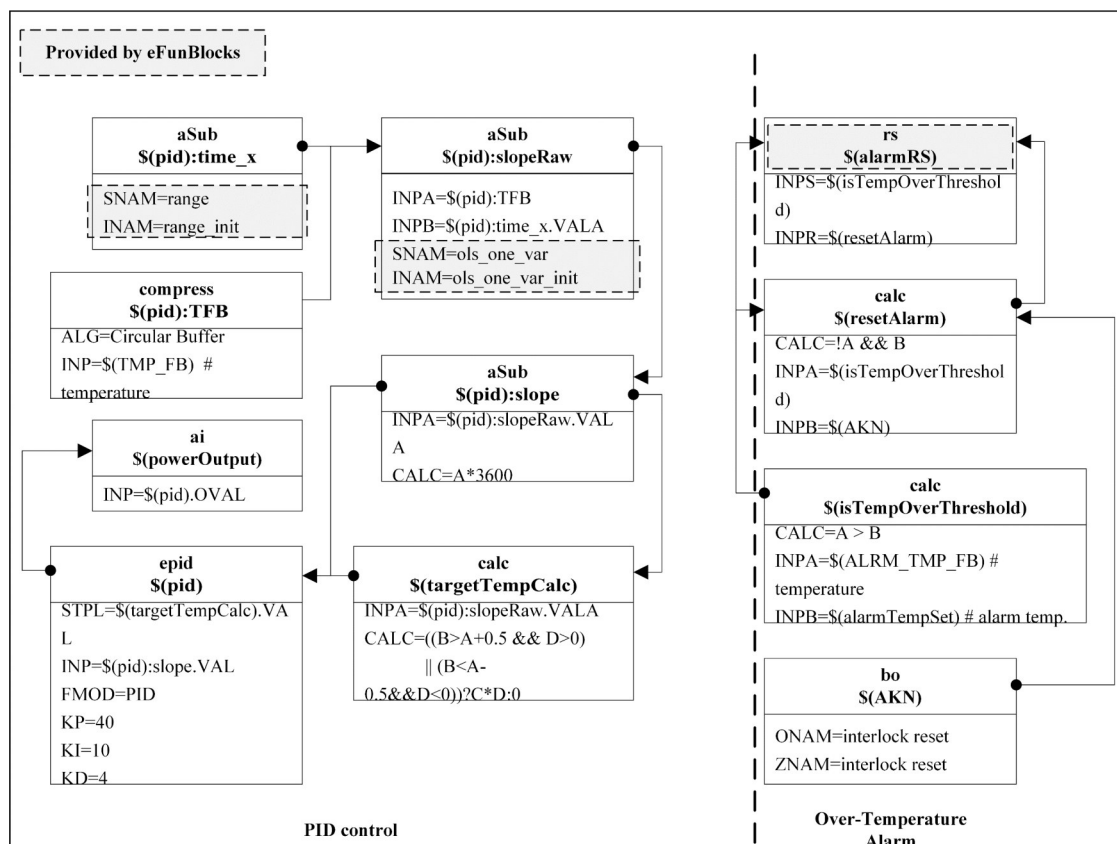


图5 IOC Database配置示意图

Fig.5 The schematic of IOC Database configurations

超高温熔盐泵的温度控制采用PID控制算法,基于阿贡实验室提供的记录类型“epid”实现^[20],控制目标为历史温度曲线的斜率(即单位时间内的温度增量),并在运行过程中根据采集温度与目标温度

的差距动态调整PID的目标斜率。当采集温度超过设定的报警温度,则会触发系统报警并保持,直到操作人员复位。图5是IOC Database配置示意图,为方便展示,只截取了部分配置并进行了简化。其中,

\$ (pid)\$: TFB 负责收集过去 180 s 的实际测量温度, \$ (pid)\$: slopeRaw 采用最小二乘法对历史温度曲线进行斜率拟合, 最终将斜率输入到负责 PID 控制的 \$ (pid)\$ 计算输出功率, 从而实现温度的调节。为优化代码结构、提升代码一致性和健壮性, 本研究还设计开发了 EPICS 扩展包 eFunBlocks, 提供最小二乘法斜率拟合、RS 触发器等常用算法。

3.2 运行情况

目前, 本文控制器已在超高温熔盐泵测试装置中稳定运行, 实现了 78 路 PID 温度控制和超温报警, 同时对气路管道的气体流量、气压进行了实时监测, 共约 2 200 个 PV。其控制任务的执行策略有 I/O 触发和周期性扫描两种, PID 控制任务采用周期性扫描, 周期为 1 s。图 6 是升温测试时某管道的温度曲线, 起始温度为 100 °C, 目标温度为 200 °C。测试结果显示, 升温期间的温度变化曲线斜率和温度稳态误差 (≤ 1.51 °C) 符合预设目标, 该控制器成功地将温度稳定在目标温度附近。

3.3 性能评估

为全面评估控制器性能, 本文设计实验对控制器的实时性和 CPU 性能指标进行测试分析。首先,

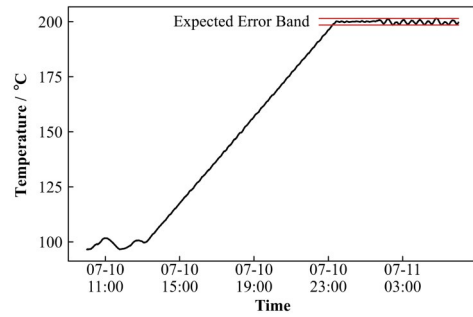


图 6 温度变化曲线

Fig.6 Variation curve of the temperature

在 eFunBlocks 中新增了一个算法模块, 用于计算周期性扫描任务的抖动, 即实际执行时间点与预期执行时间点之间的差异, 从而实现控制任务实时性的量化分析。然后, 将控制器运行的 78 路 PID 控制及其他周期性任务设置为相同周期, 并在不同周期设置下 (100 ms、200 ms 和 500 ms) 分别运行 2 h。最后, 记录并分析各个扫描周期设置下的抖动、内存使用率和 CPU 使用情况等。

数据表明, 三种扫描周期设置下都有 50% 的抖动大于 0 ms, 即发生延迟。表 2 是三种扫描周期设置下延迟时间的分布情况。三种扫描周期的延迟时间接近, 95% 的延迟时间不超过 1 ms, 最大延迟 12.85 ms。

表 2 延迟时间测试结果
Table 2 The statistics of latency

扫描周期 Scan cycle / ms	平均值 Average / ms	中位数 Median / ms	第 95 百分位 95th percentile / ms	最大值 Maximum / ms
100	0.29	0.15	1.00	12.85
200	0.31	0.17	0.95	11.61
500	0.26	0.13	0.83	11.76

测试期间, 内存使用率和 CPU 使用情况如表 3 所示。三种扫描周期下, 内存使用率均值都约为 29%。因为 IOC 启动时锁定内存大小主要受 IOC Database 大小的影响, 在 Record 数量和控制逻辑没

有发生变化的情况下, 扫描周期的变化并不会引起内存使用率的较大变化。而 CPU 表现则受扫描周期变化的影响很大, 特别是 CPU 负载率均值。

表 3 CPU 性能测试结果
Table 3 The statistics of CPU performance test

扫描周期 Scan cycle / ms	CPU 使用率均值 Average of CPU usage / %	CPU 负载率均值 Average of CPU load / %	内存使用率均值 Average of memory usage / %
100	33.83	203.94	28.32
200	18.20	113.19	29.09
500	11.14	47.60	29.01

CPU 负载率是 CPU 瞬时负载和 CPU 数量的比值。CPU 瞬时负载为某一时刻等待执行的任务数 (进程或线程), “等待执行”指的是任务处于可执行状态或不可中断状态; CPU 数量代表控制器瞬时处理能力, 因为控制器某一时刻能执行的任务数量为

CPU 数量。因此, 在控制逻辑单次运行时长和 CPU 数量不变的情况下, 当扫描周期为 100 ms 时 1 min 内发起执行请求的任务数量是扫描周期为 200 ms 时的两倍, 等待执行的任务数也接近两倍。同样的, 当扫描周期越短, IOC 线程执行次数越多, 占用 CPU

的时间也越长,CPU使用率也随之上升。

总体来看,在78路PID控制任务(约2200个PV)的负荷下,扫描周期为500 ms时,CPU负载率均值和使用率均保持处于较低水平,CPU运行状况良好,满足项目对实时性的要求。随着扫描周期减小,受限于控制器CPU内核只有两个,CPU负载率均值超过了100%。所以,若使用时无法减少控制任务或延长扫描周期,则应该选用配置更高的CPU。

4 结语

本文在基于国产自主指令架构LoongArch的硬件平台上实现了EPICS实时控制器,并对其最小总线扫描周期进行了测试。针对超高温熔盐泵测试装置控制系统的需求,开发了EPICS扩展插件对原控制程序进行优化并将其移植到了本文控制器,并在实际运行环境和任务负载下对该控制器的实时性和CPU性能进行了全面评估。实验数据表明,该控制器满足项目对总线扫描周期、实时性等关键指标的要求。目前,该控制器已取代了原x86服务器在超高温熔盐泵测试装置中稳定运行。本文控制器实现了底层指令架构国产化,提升了控制系统的国产化水平且有效降低了控制系统的构建成本。同时,性能测试结果也为控制器选型提供了重要参考。

作者贡献声明 邓琦负责控制程序开发与移植,性能测试,数据分析及文章撰写;杨峥翰负责EtherCAT相关软件的适配及测试;韩利峰负责提出研究思路,文章审阅与修订;黄丽负责提出文章修改意见;戴志敏负责研究方案指导、研究进度监督和研究项目管理。

参考文献

- 1 EPICS - Experimental Physics and Industrial Control System[EB/OL]. [2024-08-23]. <https://epics-controls.org>.
- 2 Projects - EPICS controls[EB/OL]. [2024-09-26]. <https://epics-controls.org/epics-users/projects/>.
- 3 洪春霞,周平,滑文强,等.上海光源小角X射线散射实验站自动校准系统研究[J].核技术,2021,44(1): 010102. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2021.hjs.44.010102.
HONG Chunxia, ZHOU Ping, HUA Wenqiang, *et al.* Automatic calibration system of small angle X-ray scattering experiment station at SSRF[J]. Nuclear Techniques, 2021, 44(1): 010102. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2021.hjs.44.010102.
- 4 张会杰,马应林,王宇飞,等. EPICS框架下HEPS人身保护系统平台设计[J].核电子学与探测技术,2021,41(5): 763 - 769. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0934.2021.05.007.
ZHANG Huijie, MA Yinglin, WANG Yufei, *et al.* Design of personal protection system platform based on EPICS for HEPS[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2021, 41(5): 763 - 769. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0934.2021.05.007.
- 5 刘文倩,韩利峰,黄丽,等.基于数字孪生的TMSR-SF0数据监控与可视化方案[J].核技术,2022,45(2): 020604. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2022.hjs.45.020604.
LIU Wenqian, HAN Lifeng, HUANG Li, *et al.* TMSR-SF0 data monitoring and visualization scheme based on digital twin[J]. Nuclear Techniques, 2022, 45(2): 020604. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2022.hjs.45.020604.
- 6 陈世超,李锐,左献迪,等.基于EPICS架构的熔盐堆实时建模与仿真平台开发及验证[J].核技术,2023,46(11): 110601. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2023.hjs.46.110601.
CHEN Shichao, LI Rui, ZUO Xiandi, *et al.* Development and validation of real-time modeling and simulation platform for molten salt reactor based on EPICS framework[J]. Nuclear Techniques, 2023, 46(11): 110601. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2023.hjs.46.110601.
- 7 曾孟麒,尹亮,尹聪聪,等.基于EPICS的SHINE束线站定时设备控制系统[J].核技术,2023,46(7): 070102. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2023.hjs.46.070102.
ZENG Mengqi, YIN Liang, YIN Congcong, *et al.* Development and implementation of an EPICS-based timing equipment control system for SHINE beamlines and endstations[J]. Nuclear Techniques, 2023, 46(7): 070102. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2023.hjs.46.070102.
- 8 余嘉莉,陈永忠,韩利峰.基于Qt的TMSR熔盐泵试验台架控制系统[J].核技术,2022,45(6): 060603. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2022.hjs.45.060603.
YU Jiali, CHEN Yongzhong, HAN Lifeng. The control system for TMSR molten salt pump experimental platform based on Qt[J]. Nuclear Techniques, 2022, 45(6): 060603. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2022.hjs.45.060603.
- 9 Wu W B, Xuan K, Xu W, *et al.* Development of a control system for the fourth-harmonic cavity of the HLS storage ring[J]. Nuclear Science and Techniques, 2018, 29(11): 153. DOI: 10.1007/s41365-018-0497-7.
- 10 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): 1001 - 1004. DOI: 10.3788/HPLPB20132504.1001.

- 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): 1001 - 1004. DOI: 10.3788/HPLPB20132504.1001.
- 11 李国辉, 韩利峰, 李丹清, 等. 基于国产操作系统的 EtherCAT 的控制系统开发[J]. 计算机应用, 2020, **40**(S1): 238 - 242. DOI: 10.11772/j. issn. 1001-9081. 2019112033.
- LI Guohui, HAN Lifeng, LI Danqing, *et al.* Development of EtherCAT control system based on SylixOS[J]. Journal of Computer Applications, 2020, **40**(S1): 238 - 242. DOI: 10.11772/j.issn.1001-9081.2019112033.
- 12 何泳成, 吴焯, 张玉亮, 等. CSNS 伴生质子束实验平台控制系统研制[J]. 核电子学与探测技术, 2023, **43**(1): 49 - 55. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0934.2023.01.009.
- HE Yongcheng, WU Xuan, ZHANG Yuliang, *et al.* Development of CSNS associated proton experimental platform control system[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2023, **43**(1): 49 - 55. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0934.2023.01.009.
- 13 谢春杰, 朱文超, 冯光耀, 等. S 波段直线加速器数字电平系统研制[J]. 原子能科学技术, 2023, **57**(6): 1271 - 1280. DOI: 10.7538/yzk.2022.youxian.0620.
- XIE Chunjie, ZHU Wenchao, FENG Guangyao, *et al.* Development of digital low-level RF system of S-band linac[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2023, **57**(6): 1271 - 1280. DOI: 10.7538/yzk.2022.youxian.0620.
- 14 LoongArch[EB/OL]. [2024-08-23]. <https://www.loongson.cn/system/loongarch>.
- 15 EPICS overview[EB/OL]. [2024-10-17]. https://docs.epics-controls.org/en/latest/getting-started/EPICS_Intro.html.
- 16 EPICS application developer's guide[EB/OL]. [2024-10-17]. <https://epics.anl.gov/base/R3-15/6-docs/AppDevGuide/AppDevGuide.html>.
- 17 EtherCAT-Master[EB/OL]. [2024-09-04]. https://etherlab.org/en_GB/ethercat.
- 18 DiamondLightSource/ethercat[EB/OL]. [2024-08-28]. <https://github.com/DiamondLightSource/ethercat>.
- 19 CS-Studio (Phoebus) [EB/OL]. [2024-11-15]. https://controlssoftware.sns.ornl.gov/css_phoebus/.
- 20 EPID record[EB/OL]. [2024-09-23]. <https://millenia.cars.aps.anl.gov/software/epics/epidRecord.html>.