

基于 EPICS 的氦低温冗余控制系统设计开发与测试

张锦程^{1, 2}, 周芷伟^{2*}, 袁 恺², 张 岳²

(1. 安徽理工大学电气与信息工程学院, 安徽 淮南 232001;
2. 中国科学院合肥物质科学研究院, 安徽 合肥 230031)

摘要 为满足聚变堆主机关键系统综合研究设施 (CRAFT) 中超导磁体测试对稳定低温环境的迫切需求, 设计并开发了一套基于实验物理与工业控制系统 (EPICS) 的 4.5 K 氦低温控制系统。通过 EPICS 分布式架构实现系统模块化, 并开发出冗余输入输出控制器 (IOC) 以提高系统稳定性。基于 Phoebus 上位机开发实现低温系统全流程监控与操作。经测试, 低温控制系统稳定运行, 满足导体测试平台稳定性需求。

关键词 氦低温控制系统; 4.5 K 氦制冷机; 冗余架构; Phoebus

基金项目: “十三·五”国家重大科技基础设施项目 (项目编号: 2018-000052-73-01-001228)。

中图分类号: TP273+.5; TB651

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.04.005

0 引言

CRAFT 是面向聚变能源未来发展开展综合研究的大科学装置。在 CRAFT 中, 4.5 K 氦低温系统是关键支持设施之一, 其作用是为大尺寸超导线圈进行极低温条件下的试验考核服务^[1]。由于超导磁体性能测试通常具有周期长、能量密度高的特点, 低温系统的运行稳定性直接关系到实验的成败与设备安全。任何控制层面的瞬态故障或数据丢失, 都可能导致磁体失超甚至设备损坏, 因此对控制系统的可靠性与数据连续性提出了极高的要求。考虑到超导线圈试验时间长以及能量大的特点, 低温系统的可靠性对整个试验的成功与否及安全至关重要。由于任一控制层级出现瞬时故障或者数据缺失都有可能引起磁体失超乃至损毁设备, 故控制系统要求具有很高的可靠性和数据不丢失特性。

EPICS 是一种基于网络的软件系统, 是美国国家实验室和阿贡国家实验室合作开发的一套用于大型科学实验设施 (如粒子加速器、同步辐射光源等) 及工业自动化的开源分布式控制系统框架。在低温控制系统中, 将 PLC 作为仪表与执行设备的核心连接枢纽, 通过以太网与上层的 EPICS 中输入输出控制器 (Input/Output Controller, IOC) 建立稳定数据通道, IOC 在此架构中承担顺序逻辑控制、开环与闭环调节等关键运算, EPICS 高度模块化的结构可提供超导磁体测试平

台的集中监测管理、数据存储与分析、状态监测与故障诊断、自动控制与安全联锁等功能^[2-4]。但在用于超导磁体测试的具体应用方面, 标准 EPICS 架构还存在标准 IOC 架构容易出现单点失效情况而造成数据丢失的问题。针对以上问题, 本文设计了基于 EPICS 的 4.5 K 氦低温冗余控制系统。设计“PLC 硬冗余+IOC 软冗余”双重容错系统框架, 采用 Heartbeat 和 AutoSave 防止数据不一致情况发生^[5]。在 Phoebus 中设计并实现全过程监控程序, 提高了 CRAFT 导体测试平台运行的稳定性和自动化程度。

1 CRAFT 4.5 K 氦制冷机工艺流程

4.5 K 氦制冷机是中央螺线管模型线圈 (Central Solenoid Model Coil, CSMC) 测试稳定的冷量来源。CSMC 测试氦低温系统其主要包括两台凯撒螺杆压缩机、除油与回收系统、冷箱系统以及 CSMC 分配阀箱, 其中冷箱系统包括液氮预冷、一二级透平、三级透平与真空泵组等, CSMC 分配阀箱通过各支路氦气, 对 CSMC 高低场区超导体进行降温。CSMC 测试导体冷却是包括三个部分的一个完整的过程: 首先是 300 K 至 80K 预冷模式下的冷却, 将高压氦气分为两路, 其中一路经过换热器与液氮交换冷却, 另一路为常温氦气, 两路气体通过调节阀混合, 达到精确温度控制的目的, 并对导体进行预冷后气体返回系统; 随后在 80 K 到 4.5 K 冷

作者简介: 张锦程 (2000-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 大型氦低温控制系统的设计与开发。

***通信作者:** 周芷伟 (1982-), 女, 博士研究生, 研究员, 研究方向: 大型氦低温系统自动控制策略、智能故障诊断技术等研究。E-mail: zzw@ipp.ac.cn

却模式下,启动制冷机透平,将主流氦气分流,一部分进透平深度冷却用来制备液氮,另一部分通过旁通阀进氮槽冷却,当氮槽液位达15%及导体温度降到4.5 K时,预冷氦气循环泵,回气经调节阀返回;最后为4.5 K稳态运行模式,当循环泵预冷完成后,液氮杜瓦液位到达60%,待氦气循环泵冷却导体,并使得磁体内流速和温升满足试验需求后即可进入试验状态。总之,CRAFT 氦低温系统的滞后性大、关联性强、非线性明显,在从80 K降温到4.5 K的过程中,不仅要考虑透平转速的变化对J-T 阀开度的影响,还要注意两者之间的相互作用关系,一旦操作中断就容易导致系统压力波动。因此,控制系统设计必须满足全链路的高可用性,确保在数周的实验周期内零故障中断。

2 高可用氦低温控制系统架构设计

2.1 软硬件协同的总体架构设计

系统采用物理设备层—控制层—服务层的三层分布式架构。

物理设备层采用西门子冗余PLC为物理设备平台实现毫秒级的硬实时逻辑控制以及现场信号采集功能。由于氦低温制冷流程中压缩机及透平系统的重要性,所以选用西门子高可靠性的冗余PLC核心控制器S7-400H系列,其自带PROFINET接口组成MRP介质冗余环网,支持单CPU或者单通信线故障下的无扰动切换功能,保证控制指令的连续性。

控制层处于设备层上方,部署在高可用Linux服务器群内。该层部署了基于EPICS架构的IOC,利用S7驱动协议同下层PLC进行高频度通讯,并将物理I/O映射成EPICS PV变量。考虑到标准IOC的单点失效风险,在软件层面实现软备份功能,在主IOC和备IOC上分别安装Linux Heartbeat软件,检测主IOC或备IOC是否在线;同时安装EPICS AutoSave软件定时对PID参数进行备份,当主IOC切换到备IOC后,备IOC可以加载最新备份的数据,完成应用级的软热备。

通信服务层均采用EPICS Channel Access协议,满足系统内超12 000 PV的点位高并发通信需求,并在控制内网部署通道访问安全网关进行访问控制,实现内外网的数据逻辑隔离及安全发布;应用层开发Phoebus集成化监视客户端。实现工艺过程的可视化操作。为满足氦低温系统海量历史数据的存储,应用层采用混合存储方式,使用关系型数据库MySQL存储配置信息,并引入时序数据库InfluxDB来解决毫秒级采样频率的大量模拟量数据导致的传统数据库查询效率较低的问题。同时引入Kafka消息中间件及ElasticSearch告警服务模块实现告警信息即时通知以及各类告警事件统

计功能,最终形成了高可靠氦低温控制系统解决方案。

2.2 基于状态一致性的双层冗余机制

为满足低温系统连续运行需求,提出软硬件协同的双层冗余机制。在PLC硬冗余基础上,设计了基于状态一致性的IOC软冗余架构。针对IOC通常存在的单点失效风险,设计了基于Linux高可用架构的IOC软冗余集群。该集群利用Heartbeat心跳监测守护进程,通过专用心跳链路实时监控主从服务器的运行状态。系统对外显示唯一的虚拟IP地址,IOC运行正常时由主服务器持有虚拟IP并对外提供通道访问服务。

在以太网+串口双心跳链路都断开的情况下,如果检测出主IOC进程崩溃或者服务器宕机,那么Heartbeat将立即进行切换操作,把虚拟IP漂移出去并运行备份IOC进程,此时后备IOC替代了主IOC并把主IOC变成后备直到故障恢复。这样就从网络层面实现了客户机访问的透明化以及服务不中断。为解决IOC进程重启或者切换过程中由于变量重新加载而带来的状态信息丢失的问题,也就是实现关键状态的一致性,在IOC冗余框架内深入嵌入了EPICS的AutoSave动态状态保存组件。AutoSave功能的服务进程按一定时间周期将指定的不需丢弃的过程数据(例如PID回路的设定值、积分总量、报警限设置等)保存至专用的冗余网盘或者永久化的文件里。若出现主备IOC切换,在切换过程中,备用IOC启动后首先读取最新保存的AutoSave快照文件,将各项控制状态恢复到故障发生之前的状态。因此利用磁盘持久化的状态复制方式解决了控制器冷启动造成的工艺参数突变的问题,可以实现真正的零干扰冗余控制过程,从硬件到软件都做到了无缝冗余切换,保证了超导磁体试验所需的低温环境稳定性,在工程应用过程中,冗余切换的及时性决定了控制系统是否能稳定可靠工作。因此,该系统采用IOC集群中的多线程技术进行设计实现,各个线程负责不同的功能模块,如数据读取、计算、状态更新及通信传输等功能,因此减少冗余切换单元切换的时间,保证冗余单元之间发生主从切换时仍然能够达到毫秒级别的响应时间。对于氦低温系统的超导磁体失超保护来说,在冗余设计中专门设置了一路高优先级的独立保护链路,以确保在发生切换的过程中安全连锁信号依然可以做到实时快速反应,为实验装置及人员提供安全保障。

3 系统测试与运行分析

3.1 面向全流程的Phoebus监控体系实现

根据氦低温系统的工艺过程复杂、被控对象多等特点,在新的Phoebus系统架构下开发了状态监视、

逻辑控制和数据分析等功能的可视化监控画面；为保证操作效率以及人机交互界面美观，操作界面采用模块化布置方式，以导航条+中央区域的标准界面形式进行呈现。顶部为导航条，包含有各子系统（压缩机、冷箱、分配阀箱）导航条以及用户登录切换窗口，在中间为主控画面，采用 Tab 技术实现不同工艺画面之间的快速无缝切换，便于操作员在同一个地方完成全装置几千点参数的操作。

从人机界面上的设计方面来看，在实现过程中主要运用到了 Phoebus 框架中的 Template 模板组件以及宏替换功能来对监控画面进行模块化及规范化设计；针对本系统中多次出现的低温阀、循环泵、加热器等设备创建标准图元库，每一个图元都可通过宏变量接口预先设定并自动绑定到其底层 EPICS PV 上，实现了一次设计、全系统复用的一站式开发模式。在动态交互设计方面，为了解决静态图元无法直观反映阀门状态的问题，系统利用 Phoebus 内置 JavaScript 脚本引擎开发了动态渲染功能，阀门开通时主体变为绿色，填充度随着阀门开度同步变化，阀门关闭时主体变为红色，便于操作人员使用。同时，针对调节阀与 PID 控制回路，设计了标准化的弹出式操作面板，集成了手/自动模式切换、开度设定、PID 参数在线整定及输出限幅配置等功能，为复杂的降温流程调试提供了精细化的交互方法。在 Phoebus 监控终端集成了实时趋势分析模块（Data Browser）。该模块通过底层优化的数据接口，直接对接时序数据库 InfluxDB，在同一坐标系下叠加显示透平转速、J-T 阀开度、冷箱入口压力及液氦液位等多组关键变量。操作人员可以实时查看当前的点位数据曲线，通过时间轴的缩放功能，快速调取当前画面中重点部分并显示历史同期的运行数据。“实时+历史”对比分析机制，帮助工程人员在调试、运行阶段能及时准确地查看所需的历史数据并为进一步分析压缩机喘振边界探测与透平效率优化提供数据支持。

3.2 冗余架构的可靠性验证

为了检验 2.2 节提出的“双层冗余容错架构”，长期满负荷地进行系统试验。将数据调出显示了系统工作过程中，在 4.5 K 稳定后，透平 T1、T2 出口的压力及温度的变化情况。连续性：在几千小时的连续试验中 IOC 集群经历了很多次的计划性切换。压力—温度曲线非常光滑，没有由于主备切换而造成的断点和突变现象。

关于状态保持功能检测，主 IOC 进程的状态变化过程中 AutoSave 功能将 PID 设定值及累计流量正确保

存到备机，并且切换时间为 0~1 s 之间，PV 的变化范围为 ± 0.05 以内，在实际运行中实现了所谓的“零扰动切换”，达到了 CRAFT 磁体试验所需的高度稳定性指标要求。为了进一步证明冗余对于实际故障的有效性，进行了系统的故障试验，通过人为制造主服务器网络中断、IOC 进程异常退出等情况，在设定的时间内均可正常进行自动切换，并未对现场产生影响，包括关键的控制回路，例如透平转速调节、J-T 阀的压力控制等的输出都在允许范围之内，未发生失控事件。从系统冗余投入前后工作状态统计数据来看，平均无故障间隔明显增长，平均修复时间大幅度缩短，系统可用率提高，验证了冗余设计对于提高氦低温控制系统工作可靠性的工程意义。

4 结束语

本文针对 CRAFT 超导磁体测试平台对低温环境长周期稳定运行及复杂流体精确计算的严格需求，设计并研制了一套基于 EPICS 架构的 4.5 K 氦低温高可用控制系统。采用软件+硬件两重异构冗余方案，既满足了 S7-400H 底层硬件热备，又增加了利用 Heartbeat 心跳检测+AutoSave 持久化保存状态信息的冗余 IOC 集群，经现场实际验证，成功实现主、备服务器无缝切换，PV 值不受影响，较好地解决了传统工控系统故障恢复后出现的数据断层问题。以基于新一代 Phoebus 框架下的集成化监控实现为依托进一步证明了系统的实用性。本文所设计的硬实时控制+软实时服务的技术方案有效地兼顾了工业控制可靠性和科学实验灵活性的需求，可为未来聚变堆的大规模分布式控制系统设计提供工程实践参考。

参考文献：

- [1] 纵逸文. 聚变堆主机关键系统综合设施低温系统的可靠性分析研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2022.
- [2] 张会杰, 马应林, 王庆斌, 等. 基于 PLC 的高能同步辐射光源人身安全联锁系统设计 [J]. 工业控制计算机, 2019, 32(10):16-18.
- [3] 王灿, 孙晓康, 徐双, 等. 可调谐预聚束太赫兹自由电子激光装置控制系统开发 [J]. 核电子学与探测技术, 2025, 45(06):763-771.
- [4] 刘群, 陈留国, 李芳, 等. 合肥光源光束线站新型真空安全联锁系统设计 [J]. 真空科学与技术学报, 2025, 45(06): 431-435.
- [5] 张虹, 鲍国荣. 由决策机制驱动的时增心跳哈希锁定跨链协议 [J]. 自动化应用, 2025, 66(06):272-278.