

基于 CODAC 的 ITER 电流引线测控系统

朱胜本 丁开忠 杜庆庆 冯汉升 陆 坤 刘承连 宋云涛

(中国科学院等离子体物理研究所 合肥 230031)

摘要 中国科学院等离子体物理研究所(Institute of Plasma Physical, Chinese Academy of Sciences, ASIPP)负责国际热核聚变实验堆(International Thermonuclear Experimental, ITER) 60根高温超导电流引线(High Temperature Superconducting Current Lead, HTSCL)产品的研制与测试,并在2013–2015年间开展了三对三种电流等级(68 kA、55 kA和10 kA)的高温超导电流引线认证制造。为检验电流引线的低温大电流性能,ASIPP与印度塔塔咨询服务公司(Tata Consultancy Service, TCS)及 ITER 合作开发了基于 CODAC (Control, Data Access and Communication)框架的 ITER 高温超导电流引线测控系统。该系统包括传统西门子 PLC300 工艺过程测控系统、基于 LabVIEW 的失超保护系统、基于 PLC400 冗余设计的互锁系统和基于 NI c 系列模块的快速控制系统(Plant system Controller, Fast Controls, PCF)。目前本系统已通过三轮验收测试并在2015年1月份的 ITER CC 10 kA 电流引线原型件和同年7月份的 ITER TF 68 kA 电流引线原型件中成功应用。结果表明,本系统能很好地满足电流引线的实验需求,得到 ITER 国际认同。电流引线测控系统软硬件遵照 ITER 的 CODAC 标准进行设计,是 CODAC 和互锁保护规范的首次在 ITER 真实组件物理性能测试的联合应用案例,可作为 ITER 采购包出厂验收推行的 CODAC 模范。

关键词 国际热核聚变实验堆, 高温超导电流引线, CODAC, 测控系统, EPICS

中图分类号 TL67

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2015.hjs.38.100401

中国科学院等离子体物理研究所(Institute of Plasma Physical, Chinese Academy of Sciences, ASIPP)于2012年底与国际热核聚变实验堆(International Thermonuclear Experimental, ITER)^[1]国际组签订了磁体馈线系统(Feeder)采购包计划,承担设计制造31条大型磁体馈线,其中电流引线有10 kA、55 kA、68 kA规格的66支高温超导电流引线。目前 ASIPP 已根据 ITER 技术要求,完成了一对68 kA 电流引线原型件和一对10 kA 电流引线原型件的设计和制造。55 kA 电流引线的制造计划在11月完成,预计在2015年底完成所有电流引线原型件的大电流5 K低温性能验证测试。为让电流引线测控系统软硬件设计符合 ITER 标准 CODAC (Control, Data Access and Communication)^[2],以便更合理地管理、集成,实现系统运行及控制规范,ASIPP 与 ITER 组织及印度塔塔咨询服务公司(Tata Consultancy Service, TCS)合作展开高温超导电流引线测控系统的搭建工作。

1 高温超导电流引线测控系统简介

高温超导电流引线在 ITER Feeder 系统中用于

从室温终端到低温超导磁体间的电热连接,是 Feeder 系统的关键部件。其要求具备优良的节冷作用,同时具有非常高的失冷或失超后的安全性、载流能力^[3]。

ITER 高温超导电流引线结构如图1所示,以10 kA 电流引线为例。在实际测试中,其室温终端被固定在室温约300 K环境下的室温终端盒(Bus bar)上,而低温超导段则工作在磁体线圈的5 K环境下,因此其工作温度梯度极高;测试中,它需要承受10 kV 直流高电压,65 K 接头电阻<25 nΩ,低温超导引线与 Bus bar 接头电阻<5 nΩ(测量电压要求达到10 μV 量级),以及快变三角波,保证冷端漏热小于3 W,且要作失冷测试(Lose Of Flow Accident, LOFA)时间>120 s^[4]。测试环境苛刻,数据采集精度要求极高(如电压采集在10⁻⁶ V 量级)。电流引线测试平台需要采集的信号主要分为两大类:(1)与引线本身相关,主要是测量引线本身温度分布、电位差信号;(2)与电流引线实验配套相关,如冷却系统的温度、压力、流量,电源系统的电流,真空系统的真空度等。另外,为保障高温超导组件热端运行在65 K 温度下,平台利用高温超导

第一作者:朱胜本,男,1991年出生,2013年毕业于华中科技大学(武汉),现为硕士研究生,计算机技术

通讯作者:丁开忠, E-mail: kzding@ipp.cas.cn

收稿日期:2015-03-18, 修回日期:2015-08-08

温度作为反馈,使用西门子自带的比例-积分控制模块(FB58)进行PID控制,通过CODAC提供的一套与可编程逻辑控制器(Programmable Logic Controller, PLC)交互的接口接收前台控制参数,输出4–20 mA信号控制低温阀门开度,从而调节冷却介质50 K氦气的流量实现高温超导的温端温度稳定在设定值上。FB58在PLC循环中断模块(OB35)中执行,动作周期设定为100 ms,满足电流引线的运行要求。

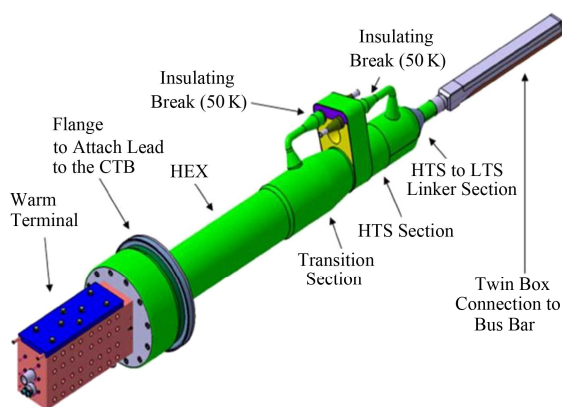


图1 高温超导电流引线结构图

Fig.1 Schematic diagram of the HTSCL structure.

测试中如果发生失超或过热情况,该平台应该有高可靠性的互锁保护机制切断电源保证电流引线设备安全性。因此该系统除了需要采集大量的电位、电流、电阻、流量、温度信号,还需要发出阀门的开关控制、流量调节及电源系统的急停等多种信号。

2 CODAC 简介

CODAC 框架^[5]是ITER国际为了规范各国合作而提出的一个基于EPICS (Experimental Physics and Industrial Control System)的分布式控制架构,在此框架下的控制系统将交互界面、数据采集、数据存储、控制服务等节点散布于松耦合的计算节点和分层的服中,再由网络将它们连接起来,实现现场、服务、人机界面隔离,无论在安全性、可伸缩性、容错性还是可扩展性、可重用性上都可圈可点。

3 硬件架构

按照ITER规范,一套完整的CODAC系统包括中央控制系统(Plant System Host, PSH)、信号采集系统、互锁系统、客户端等。根据此定义,电流引线测控系统硬件部分主要由工控机、交换机、信号采集模块、信号调理模块、逻辑控制器等构成^[2],逻辑框图如图2所示。来自电流引线及其附属系统

的各种信号通过信号调理及A/D转换后进入系统;PSH处理、分析信号,将其转换成EPICS的记录,并作存储、报警等操作;CODAC和其它客户端可以监视整个系统运行状态,也可以在线编辑运行参数,从而实现对系统的人为控制;安全系统分析数据,一旦发现不安全的因素,立即触发互锁保护整个系统。

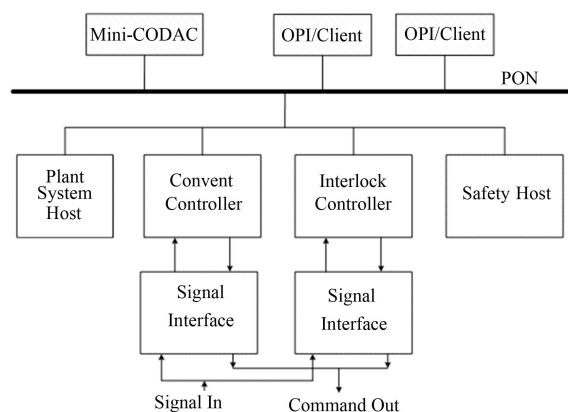


图2 高温超导电流引线测控系统逻辑框图

Fig.2 Logic diagram of control system.

3.1 信号处理

信号的采集根据实时性要求分为慢控和快控。慢控使用的是西门子的PLC 300系列和NI的cRIO组件;快控采用NI的PXIe-6259,通过NI PXI Express与工控机主板连接。为防止信号的高压、过流、浪涌等,也为提高系统的性能和精确度,大部分信号必须进行调理。与本系统相关的各种信号类型复杂,需要综合考虑信号的采样频率、精确度要求、输入输出范围等,因此选用的信号调理仪器种类繁多,如Dataforth DSCA40/41、Eurotherm的7100和Q488、Gantner Instruments e.bloox A5-CR、Lakeshore 231P等。

3.2 时钟同步

常用的网络时间协议(Network Time Protocol, NTP)基本满足慢控的时间需求。而快控要求极高精度的时间同步机制,通过PXI6682卡和精确时间同步协议(Precision Time Synchronization Protocol, PTP)产生的同步时间戳可以达到20–100 ns的精度,从而满足快控的时间需求。

3.3 互锁系统

互锁系统基于S7400FH PLC和ET200M远程子站创建,为提高可靠性,采用2oo3冗余架构。互锁系统的工作原理是:通过监控实时数据(电压、温

度、压力、流量等)判断与测控系统相连的电源系统(AC 20 kA)和冷却系统是否发生失效或其它故障,一旦发生故障,互锁系统能有序地断开电源、关闭系统,从而达到保护高温超导电流引线的作用。另外,还需要有可人为干预控制的接口,因此本系统还额外添加了急停按钮和用于在线监控的人机交互界面。如图 3 所示,PLC 控制逻辑发出电流信号,失效监控系统(Quench Detection, QD)、电源系统

(Power System, PS)、急停开关(Emergency Stop, ES)串联在电流回路中,这样,PLC、QD、ES 共同控制 PS 的开闭,只要任何子系统出现问题,回路变成开路,便可及时触发关闭电源,防止超导体失超,保证整个系统的安全。互锁系统的信号都通过 PON 网进入 CODAC 系统,由 CODAC 来负责存储、显示等。CODAC 端也可以发送急停、锁定电源等控制信号,直接干预互锁系统动作。

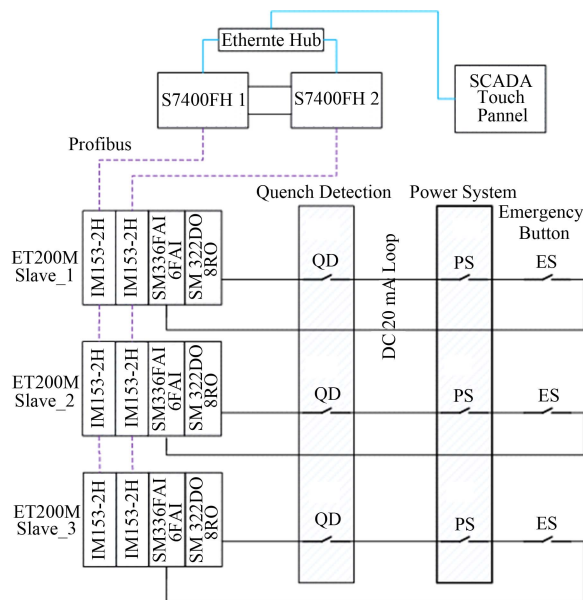


图 3 基于 S7400FH 的 2oo3 冗余架构互锁系统

Fig.3 Discharge loop in 2oo3 redundancy based on S7400FH.

3.4 与实验配套系统交互

在进行高温超导电流引线测试时,需要有相关的配套子系统提供实验环境,主要有低温系统、EAST 20 kA 电源系统、真空系统、室温终端防冻加热系统等。如当低温系统达到降温条件,将向控制系统发出低温 OK 的使能信号;当真空系统低于 10 Pa,停止电源通电;当引线处于等待状态,室温铜头温度低于 273 K 时,启动加热器系统,进行控制使室温终端达到 290 K。测控系统必须设计接口严格控制这些子系统,并协调各子系统之间的工作。

3.5 高精度数据采集及快速控制

值得一提的是,超导接头电阻需要采集的电压精度要求极高(微伏级),且具备在百毫秒内进行失超响应,常规的 PLC 已不能满足要求。本系统使用了采集精度为 24 bit 的 NI9219 等 NI c 系列组件,它由 4 槽以太网 RIO 扩展机箱 NI9416 通过以太网连接至 PC,此硬件在 CODAC 下没有直接可用驱动,不过 NI 内置 LabVIEW 转 EPICS 的接口,

因此我们没必要单独开发 NI 的设备驱动。基于此考虑,我们用一台装有 LabVIEW 的 Host PC 作为 NI9416 的控制器,利用 LabVIEW FPGA (Field Programmable Gate Array)编程获取 NI9219 模块的超导电压信号,并与设定值阈值比较,然后通过 NI9265 (输出模块)向电源发出控制。LabVIEW 中的数据在 NI 内置的 EPICS 服务器下将数据转化为 EPICS 网络过程变量,从而发布到 CODAC。另外,部分电压信号需要快速采集,使用 NI PXIe-6259 卡($1\text{ MS}\cdot\text{s}^{-1}$)采集,并由 PCF 服务器单独处理,快速存储到数据库。

3.6 总体架构

图 4 展示了本系统的总体硬件架构。各种传感器采集的信号经过调理器,通过模拟量采集卡 PLC、NI PXIe-6259 等转换为数字信号进入服务器。控制逻辑单元发出的控制指令通过隔离箱或继电器控制主系统及附属子系统。所有的硬件分布于三个机柜中,分别是现场机柜、服务器机柜及互锁系统机柜。机柜间通过工业网线和 Profibus 通讯。300 系列 PLC

执行普通的 PID 控制; PCF 配合 NI PXIe-6259 快速采集电压; LabVIEW 采集高精度电压, 并有一些的阈值, 一旦发现危险就通过 relay 发送控制信号到互锁系统的远程子站; 互锁系统利用关键信号 (包括

来自远程子站的采集信号及来自 CODAC 的配置信号) 进行系统保护。所有系统的信号最终都通过 PON 进入 PSH, 由 PSH 负责存储、警告、显示等。

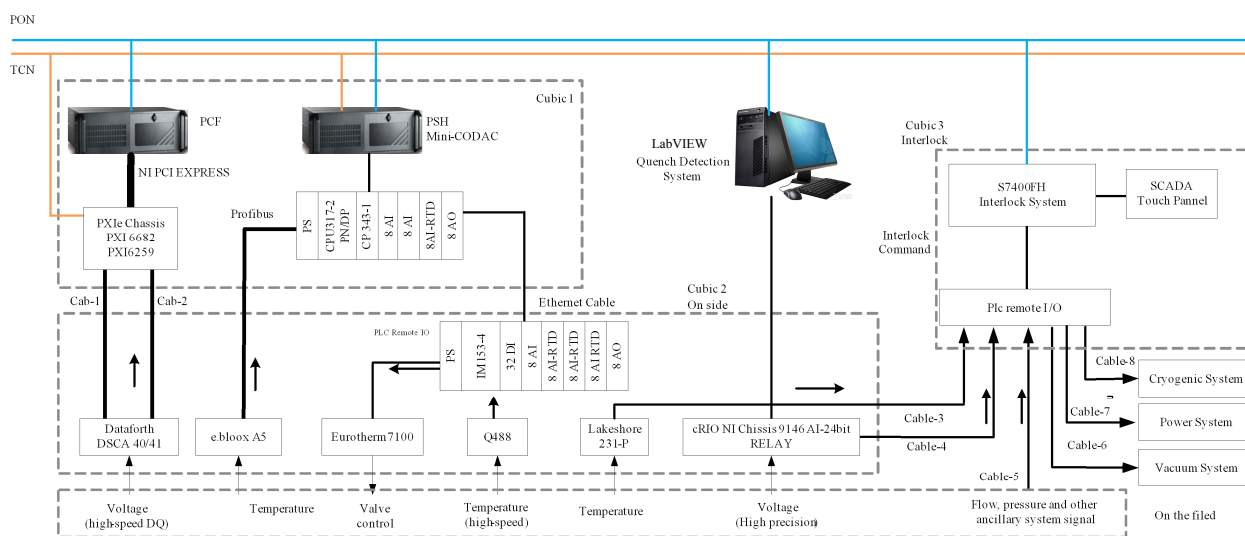


图 4 电流引线测控系统总体架构图

Fig.4 Hardware architecture of the control system.

4 软件设计

电流引线测控系统的软件主要由 PSH 端 IOC、PCF 端 IOC、CODAC 端存储系统及报警系统、客户端监控界面、PLC 的控制逻辑、QDS 的控制逻辑等几大部分组成。其中 IOC 是软件系统的核心, 控制逻辑是精髓。ITER CODAC 提供了一套强大便捷的开发环境和驱动程序。IOC 用 sdd-editor 编写, 我们使用的两种采集卡 PLC 和 NI PXIe-6259, 及时钟同步硬件 NI6682, ITER IO 已将其 EPICS 驱动作为标准内置于 CODAC v4.2 中, 因此 IOC 的编写大大简化, 主要是定义与 EPICS 相关的记录(Record)。

监控界面、数据归档和报警系统用 CSS 开发^[6], 并分别部署到多个子系统, 为提高数据安全性, 我们充分利用 CODAC 系统的分布式特性, 存储系统均采用两套并行存储, 将 CSS 生成的存储配置文件配置到两台服务器中, 分别启动 archives 服务; 存储方式采用 monitor 方式, 即只有当数据变化大于某个区间 (不同类变量有不同配置) 时才存储, 有效控制存储流量, 节省存储空间。PLC 的控制逻辑在西门子相关软件(Step7, Safety Matrix 等)下编写; NI9416 因为没有相应的 EPICS 驱动, 故使用 LabVIEW 开发。

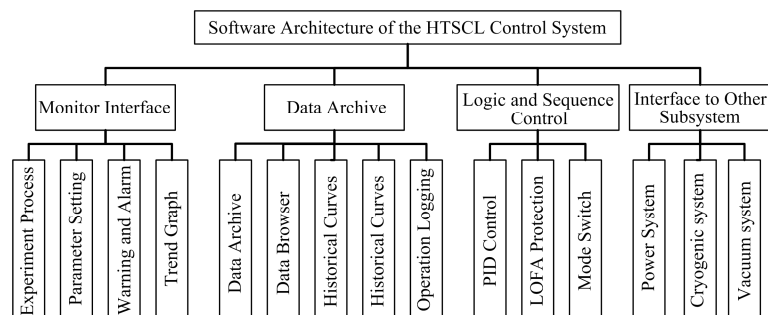


图 5 软件系统功能图

Fig.5 Software architecture of the control system.

从功能上看, 电流引线测控系统主要分为: 数据采集模块、温度控制模块、失超保护模块、错误报警模块、数据归档及查询模块、人机交互模块等, 如图 5 所示。整个软件架构以 IOC 为核心, 以 PLC 和 NI PXIe-6259、NI9219 等实现电流引线传感器信号的采集和控制, 并通过工业以太网与计算机(PSH)通讯。测量系统对采集的数据进行处理, 对不同测量点信号进行分级分析, 在适当的时候通过 PLC 的 AO/DO 模块或者 NI c 系列输出模块对外发出指令, 控制低温系统和电源系统等附属系统, 从而实现温度控制和失超保护功能。

5 结语

ITER 高温超导电流引线性能测试涉及到 900 W@4.5 K 大型氦低温系统、ITER 80 kA 电流测试平台、真空系统、水冷系统等多个配套子系统, 人员多、规模大, 且低温和电源系统的每天运行费用昂贵, 必须保证测试项目实验数据的有效性, 避免重复测量, 尽可能降低测试成本和风险, 因此对系统的可靠性、安全性要求极高。本系统采用 ITER 先进的设计标准, 采样精确度高, 系统响应快; 且考虑一定量的硬件冗余, 保证系统安全可靠地运行。结果表明本系统在数据采集、温度控制、失超保护等方面满足系统测试需求, 得到 ITER 国际认同。

本系统基于 CODAC 框架创建, 软硬件符合 ITER 规范, 作为 ITER 大科学工程项目中的一环, 这是必要的, 便于以后将电流引线系统集成到整个 ITER 装置中。电流引线测控系统是 ITER CODAC 和互锁保护的首次在 ITER 真实组件物理性能站点现场验收测试的联合应用系统案例, 得到 IO 的认可, 并在 ITER 官方网站进行报道。

致谢 感谢 ITER 专家 (Yang yifeng, Vergara Fernandez Antonio, Fernandez-hernando Juan luis 等) 和 TCS 公司专家 (Khandekar Ajit, Memane Aditya 等) 在系统调试期间的技术支持。

参考文献

- 1 冯开明. ITER 实验包层计划综述[J]. 核聚变与等离子体物理, 2006, 23(5): 84–85. DOI: 10.3969/j.issn.0254-6086.2006.03.001
FENG Kaiming. Overview of the ITER test blanket module program[J]. Nuclear Fusion and Plasma Physics, 2006, 23(5): 84–85. DOI: 10.3969/j.issn.0254-6086.2006.03.001
- 2 Utzel N, Klotz W, Wallander A, et al. ITER CODAC status and implementation plan[R]. Beijing: IEEE-NPSS Real Time Conference, IEEE, 2009
- 3 刘承连, 毕延芳, 丁开忠, 等. ITER 10 kA 电流引线高温超导段研究[J]. 原子能科学技术, 2012, 46(3): 45–46
LIU Chenlian, BI Yanfang, DING Kaizhong, et al. Study on high temperature super conduction module of 10 kA current lead for ITER[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2012, 46(3): 45–46
- 4 周挺志, 毕延芳, 丁开忠, 等. ITER 10 kA 高温超导电流引线试验机设计与测试[J]. 原子能科学技术, 2013, 47(1): 142–143. DOI: 10.7538/yzk.2013.47.01.0141
ZHOU Tingzhi, BI Yanfang, DING Kaizhong, et al. Design and test of 10 kA HTSCL for ITER[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2013, 47(1): 142–143. DOI: 10.7538/yzk.2013.47.01.0141
- 5 Listera J B, Farthingb J W, Greenwaldc M, et al. The ITER CODAC conceptual design[J]. Fusion Engineering and Design, 2007, 82(5–14): 1167–1173
- 6 郭冰, 张宁, 徐海霞, 等. TMSR CSS 集成开发工具软件的实现与应用[J]. 核技术, 2013, 36(11): 110602. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2013.hjs.36.110602
GUO Bing, ZHANG Ning, XU Haixia, et al. Research and implementation of control system studio for TMSR[J]. Nuclear Techniques, 2013, 36(11): 110602. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2013.hjs.36.110602

Monitor and control system of the current lead for ITER based on CODAC framework

ZHU Shengben DING Kaizhong DU Qingqing FENG Hansheng

LU Kun LIU Chenglian SONG Yuntao

(Institute of Plasma Physical, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

Abstract Background: Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences (ASIPP) is cooperating with India's Tata Consultancy Services (TCS) and International Thermonuclear Experimental (ITER) to build a new measurement and control system engineering for high temperature superconducting current lead (HTSCL) under the framework of CODAC (Control, Data Access and Communication). **Purpose:** This study aims to design a data acquisition and control system for this project that was implemented according to the requirements of CODAC system. **Methods:** It contains the fast controller, the conventional Programmable Logic Controller (PLC) system, i.e. the Siemens 300 series and 400 series PLC, is applied for slow controller and data acquisition sub-system, interlock sub-system using the integrated module of CODAC. Fast controller and quench detection sub-system were implemented by using National Instruments (NI)'s NI PXIe-6259, NI 9219, etc. modules and the LabVIEW programming with embedded Experimental Physics and Industrial Control System (EPICS) interface. Each subsystem is developed and applied by following the framework standard of ITER CODAC. **Results:** This proposed system has passed the second round of testing, showing that it full fills the experimental requirements of HTSCL test. **Conclusion:** The measurement and control system of HTSCL was designed completely in accordance with of ITER CODAC standard, it follows strictly the CODAC specification of ASIPP and ITER international organization. Most importantly, it's the first time to combine CODAC and interlock protection system of ITER for real physical performance test, it can be used as a model of CODAC norms in the future.

Key words ITER, HTSCL, CODAC, Measurement and control system, EPICS

CLC TL67