

BEPC II 低温控制系统研制

李刚¹⁾ 赵籍九 王克祥 岳珂娟

(中国科学院高能物理研究所 北京 100049)

摘要 北京正负电子对撞机重大改造工程(BEPC II)首次应用低温超导技术建造低温系统. 低温控制系统通过控制前端低温系统的压力、液位、流量和功率等过程变量, 分别产生饱和液氮、两相氮和过冷的单相液氮, 使用这三种不同形式的氮流来冷却超导设备. 低温控制系统采用EPICS+PLC双层架构体系, 实现对前端低温超导设备的全自动控制. EPICS主要完成低温系统的过程控制、逻辑控制和PID闭环控制; PLC负责前端关键设备的联锁控制, 用于保护低温超导设备的安全.

关键词 BEPC II EPICS PLC PID

1 引言

北京正负电子对撞机重大改造工程(BEPC II)于2001年启动. BEPC II采用双环交叉角对撞方案, 使用微包络函数和多束团对撞以提高亮度^[1]. 为了实现束流亮度提高100倍的目标, BEPC II将使用三种低温超导设备, 即超导高频腔(SRFC)、超导螺线管磁铁(SSM)和超导插入四极磁体(SCQ).

低温控制系统采用EPICS+PLC双层架构体系^[2], 通过对现场设备: 传感器、变送器和执行器的监测和控制, 分别产生饱和和液氮、两相氮和过冷的单相液氮来冷却超导设备. 低温控制系统也具备记录和存储过程变量, 设定和修改变量的报警阈值, 查看实时数据和历史数据等功能.

2 低温控制系统

低温控制系统由两部分组成如图1所示, 一部分是压缩机、制冷机系统的控制, 由Linde公司开发完成. 该系统由西门子公司Step 7 PLC产品和Profibus组成, 安装WinCC开发软件包进行系统开发. 第二部分是位于SRFC、SCQ、和SSM现场的低温设备如阀箱、冷箱、杜瓦、冷却管线的控制. 这套系统由AB-PLC ControlLogix5500和AB-1756 I/O模块组成, 使用ControlNet和RSLogix5500等组态软件进行开发. AB-PLC通过安装在VME中的ControlNet接口卡与EPICS系统进行数据交换. 本文所述的低温控制系统主要指第二部分即现场的低温设备控制.

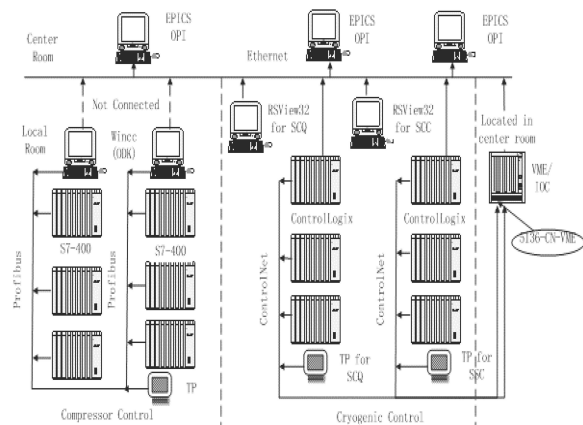


图1 低温控制系统结构图

3 EPICS系统

BEPC II控制系统采用分布式体系结构, 即国际上通行的“标准模型”. 系统从逻辑上划分为三级, 即操作员接口级 (Operator interface layer), 子系统处理级 (Subsystem layer) 和设备接口级 (Device interface layer).

The Experimental Physics and Industrial Control System (EPICS)^[3] 由国外各大高能物理实验室联合开发的一套源码开放的软件工具集, 支持高能物理实验和加速器界普遍使用的VME和CAMAC等前端设备. 目前, 世界各地有120多个加速器装置采用EPICS开发他们的控制系统.

低温控制系统作为BEPC II控制系统的一个分支, 不但要具有独立调试、运行的能力, 也要求能够

无缝集成到中央控制系统. 采用EPICS开发BEPC II的低温控制系统即可满足以上要求.

4 EPICS+PLC 双层控制结构

BEPC II 低温系统为三种超导设备提供冷量, 使得超导设备能够稳定地工作在超导状态. 如果低温系统提供的冷量波动较大, 则SRFC、SSM和SCQ容易发生失超. 超导设备失超时, 如果低温控制系统没有采取有效的保护措施, 则可能直接损坏SRFC、SSM和SCQ等超导设备. 在失超之后, 低温系统需要经过较长时间地调节并补充液氮, 才能使低温系统从失超状态恢复到低温冷量的正常供给模式. 因此, 低温系统一旦投入使用, 必须能够保持长期、稳定地运行.

低温系统在调试和运行过程中, 经常需要根据超导设备要户要求, 修改控制流程和控制逻辑来优化超导设备的工作模式. 如果采用传统的PLC过程控制方式, 必须将新编译完成的应用软件装载到PLC处理器模块内, 再重新上电工作以后, 新的控制流程和控制逻辑才能生效. 因此, 低温系统必须先停机, 否则在控制系统重新上电的过程中, 前端的各个执行机构将恢复到初始状态, 如果低温系统没有停机将直接改变低温工作模式, 引发低温shutdown甚至引发超导设备的失超. 每次低温系统需要较长的时间完成系统的降温和复温过程, 显然传统的PLC过程控制结构不再适应低温控制系统的需求和发展.

基于EPICS开发的低温控制系统, 可以解决以上问题. 将低温控制系统的实时数据存放在EPICS/IOC分布式实时数据库系统中, 每个数据库记录对应于一个PLC的I/O通道, 如设备的温度、压力、液位等输入信号和阀门调节, 加热器功率调节等输出信号等.

根据低温系统的需求, 在EPICS/IOC内, 通过实时数据库将PLC硬件的I/O通道信号连接起来, 编制低温系统控制模式和控制逻辑. 在低温的调试和运行期间, 低温系统新的需求以及控制模式和控制逻辑, 在不停机的情况下, 可以随时在VME/IOC中进行修改, 解决了PLC代码不能在线修改的问题, 提高了低温系统有效运行时间, 保证BEPC II对撞机的工作效率. 同时, 将一些不需要经常修改和关键的设备联锁保护逻辑放在PLC内实现, 一旦EPICS端发生故障, PLC内的联锁功能仍然能够工作, 及时保护前端设备的安全.

因此, EPICS+PLC的双层控制结构的设计, 不但合理规划了低温系统的控制流程和联锁逻辑的分布, 而且也充分应用了EPICS的灵活性和前端PLC的可靠性, 使得EPICS和PLC即独立又统一的集合为一体, 提高了控制系统的灵活性, 增强了系统的可靠性.

4.1 EPICS数据库设计

为了保持低温系统在动态负载下的平稳运行, 低

温系统设计和应用了许多PID算法调节和控制液位、压力等过程变量.

EPICS核心之一即运行在常驻内存的实时数据库, 如模拟量输入AI、模拟量输出AO、数字量输入BI、数字量输出BO、条件选择SEL、闭环调节算法PID等数据库记录. 图2为一个典型的PID闭环回路结构示意图, 其中AI为来自温度传感器的过程变量, PID为闭环调节算法, AO为控制阀门的输出信号.

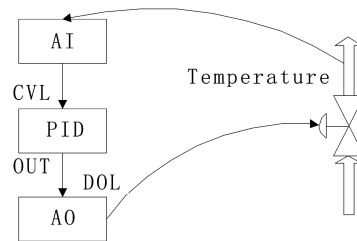


图2 典型PID闭环回路

在实际应用中需要根据被控对象的特性, 设计合适的PID闭环控制回路, 下面以BEPC II超导腔的液位控制为例, 介绍两个PID共同作用控制液位的方式. BEPC II超导腔低温系统中, 超导腔采用浸泡式冷却方式, 其特殊性要求浸泡超导腔的液氮池内液位波动在 $\pm 1\%$, 该液位的稳定控制主要通过入口阀调节液氮流量和液氮池内的加热器功率补偿来自高频腔的动态热负荷来实现.

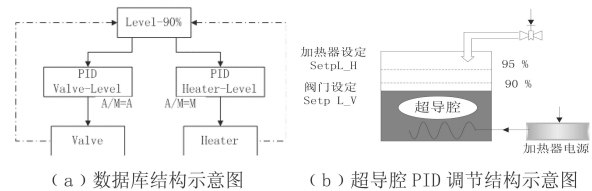


图3 两个PID控制超导腔液氮池液位的结构图

由于BEPC II两个超导腔的安装位置离低温控制机柜较远, 约80m. 因此, 如果直接根据高频的腔压信号, 计算加热器的输出功率, 必然有部分功率损失在传输导线上, 造成理论计算的热负荷与加热器补偿的热负荷的偏差, 而损失的这部分热负荷需要通过调节液氮冷量来补偿. 如果偏差较大, 将导致液面较大的波动和较长时间内系统的不平稳. 根据BEPC II的实际情况和调研, 控制方案如图3所示: 通过液氮入口阀的主PID回路调节氮的冷量, 在加热器补偿来自高频热负荷的基础上, 增加辅助PID功率调节补偿导线上的热负荷损耗, 加热器的输出功率:

$$P_{heater} = P_{State} + PRF + PPID.$$

P_{State} 为加热器的静态热负荷, PRF 为来自高频的动态热负荷, $PPID$ 为加热器的补偿调节功率. 阀门的开度调节 $V=L_VPID$ 自动调节入口液氮的流量来控制冷量. $SetpL_H$ 为加热器的PID的设定值, $SetpL_V$ 为阀门PID设定值, 一般情况下, $SetpL_V$ 要

远小于 $SetpL.H$.

EPICS 完成的其它控制逻辑有 SSM 和 SCQ 电流引线的控制方式、低温系统 Ready 信号的生成和取消等功能. 电流引线的控制方式要求, 低温系统能够根据电流引线上的电流大小, 及时调节氦气流量的供给, 确保电流引线常温端不结冰, 而电流引线的冷端工作在超导状态.

4.2 联锁保护逻辑

低温控制系统不但要保障超导设备 (SRFC, SCQ 和 SSM) 长期稳定的工作在超导状态, 也要设计考虑设备在系统故障时的安全性. 如超导腔液氦池内的液氦没有积液之前, 严禁启用液位计; 如氦池内液位较低或者发生漏热时, 必须立即关闭加热器电源以免烧毁加热器; SCQ 和 SSM 发生失超时, 要求控制系统强制打开流量控制器至最大开度, 确保最大冷量氦冷却电流引线, 保护电流引线安全. 所有这些低温系统的联锁保护逻辑功能都由 PLC 独立承担.

当 PLC 检测设备联锁保护条件满足时, 应立即自动执行联锁动作, 保障设备安全. 而联锁状态的恢复, 必须由操作员根据现场情况和低温工作模式, 经人工复位. 下面以超导腔液氦入口阀为例, 介绍底层 PLC 内联锁逻辑如何动作保护关键设备^[4,5].

超导腔是压力敏感设备, 如果超导腔液氦容器内的压力过高, 必须立即关闭液氦入口阀, 保护超导腔.

因此, 设计了液氦入口阀的联锁保护逻辑用于保护超导腔设备安全, 液氦入口阀的联锁条件如下:

$P > 1.26$ 或者 $L > 98\%$: InterLock 起效, 关闭 Valve (默认状态); $P < 1.25$ 且 $L < 86\%$ 且人工复位 Reset: 复位 InterLock, 准备工作. 其中 P 对应于液氦容器内的压力, L 为氦池内液氦的液位.

5 结束语

从 2005 年 7 月以来, BEPC II 低温控制系统经过了系统调研、方案设计、论证以及样机的预制研究等阶段. 在预研中解决了低温控制系统建造的关键技术问题, 确定了 EPICS+PLC 双层结构的控制方案. 于 2006 年 1 月超导腔侧低温控制系统投入试运行, 完成假负载调试. 2006 年 6 月与高频系统协作完成第一台 SRFC 垂直测试验收. 2006 年 10 月至 2007 年夏 BEPC II 调束运行期间, 超导腔侧低温控制系统运行正常. 另外, 2007 年 5 月, 超导磁体 (SCQ 和 SSM) 侧低温控制控制系统投入试运行, 与 SCQ 组和 SSM 组共同努力, 完成了 SCQ 和 SSM 联合励磁到额定工作电流, 并保持 24h 稳定工作在超导状态.

作者在此感谢德国 DESY 实验室 Mr. Matthias Clausen 和 Dr. Holger Lierl 在 BEPC II 低温控制系统设计建造过程中给予帮助. 感谢中国科学院高能物理研究所低温组和中国科学院理化技术研究所低温控制系统设计和调试阶段给予的帮助和支持.

参考文献 (References)

- 1 ZHANG Chuang et al. The Preliminary Design of the BEPC II. In-House Report, Beijing. 2002 (in Chinese) (张闯等. BEPC II 初步设计. 内部报告, 北京. 2002)
- 2 Matthias Clausen. Review Summary[R]. Beijing: BEPC II Cryogenic Control Seminar, 2005
- 3 Martin R. Kraimer EPICS Input/Output Controller (IOC) Application Developer's Guider [EB/OL]. [2003]

<http://www.aps.anl.gov/epics/docs/USPAS2003.php>

- 4 SONG Bo-Sheng. The Program Theory, Arithmetic and Tip of PLC [M]. Beijing: China Machine Press, 2005 (in Chinese) (宋伯生. PLC 编程理论. 算法及技巧[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005)
- 5 JIN Yi-Hui. Process Control [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1993 (in Chinese) (金以慧. 过程控制[M]. 北京: 清华大学出版社, 1993)

Research of Cryogenic Control System at BEPC II

LI Gang¹⁾ ZHAO Ji-Jiu WANG Ke-Xiang YUE Ke-Juan

(Institute of High Energy Physics, CAS, Beijing 100049, China)

Abstract The superconducting cryogenic system has been designed and deployed in the Beijing Electron-Positron Collider Upgrade Project (BEPC II). Process variables, including the pressure, level, flow and so on, are manipulated to get the liquid helium, two-phase helium flow and supercritical helium flow, which are used to cool down the three kinds of superconducting devices respectively. The system fully automates the superconducting cryogenic control with the structure of EPICS+PLC. EPICS is used to take charge of the process control, the logical control and the PID control loops whereas the low level interlocks of the pivotal equipments are run in PLCs to protect the superconducting device from damage.

Key words BEPC II, EPICS, PLC, PID

Received 7 January 2008

1) E-mail: li75gang@ihep.ac.cn