

EAST 低温系统主运行模式的控制流程设计与分析

邵新安 庄明 白红宇 金毅彬
(中国科学院等离子体物理研究所 合肥 230031)

摘要 EAST 托卡马克核聚变实验装置是世界上从事核聚变研究的先进科学设备。EAST 低温系统是该装置的主要子系统之一,其相应 DCS 控制系统具有很高的稳定性和可扩展性,各部分的控制相互独立、并行执行。本文详细介绍和分析了 EAST 低温控制系统及在正常降温、稳态和失超模式下的控制流程设计。

关键词 EAST, 低温系统, 核聚变, DCS

中图分类号 TK264.1, TP271

EAST (Experimental Advanced Superconducting Tokamak) 托卡马克核聚变实验装置, 又称 HT-7U, 是中国科学院等离子体物理研究所承担的国家级大科学工程项目。它将是世界上第一个同时具有全超导磁体和灵活冷却结构的托卡马克, 对世界核聚变研究将产生重要影响。该装置将于 2005 年左右在中国科学院等离子体物理研究所建成, 该装置的建成将使我国成为世界上少数几个拥有这种类型超导托卡马克装置的国家, 从而使我国磁约束核聚变研究进入世界前沿。EAST 低温系统, 作为该项目中主要子系统之一, 是为 EAST 装置的纵场和极向场超导磁体稳定运行提供冷量, 同时该系统的 2 kW/4 K 氦制冷机还用来生产液氦以满足其他实验及用户的需求。低温系统总体上由三部分构成: 压缩机站、制冷机冷箱部分、托卡马克磁体冷却部分。

图 1 给出了 EAST 低温系统的示意图。需要冷

却的低温部件包括有: 16 个纵场线圈、14 个极向场线圈、纵场线圈盒、热辐射屏、26 根电流引线 (其中极向场 24 根) 以及 26 根 Busline (超导总线)。EAST 装置根据冷却部件的不同所采取的冷却方式也是不相同的。极向场线圈由制冷机节流路提供的 110 g/s、3.8 K 的超临界氦冷却。纵场线圈和线圈盒的冷却在降温阶段由制冷机来提供氦流; 在实验运行时由氦循环泵提供大流量的 3.8 K 超临界氦迫流冷却纵场线圈, 4.5 K 超临界氦冷却线圈盒。氦制冷机提供 58 K、5.3 bar 的氦气冷却热辐射屏 (即冷屏)。电流引线则是在装置部分温度降到位后直接采用液氦冷却。低温系统通过一套 DCS 控制系统控制整个制冷循环。需要控制的参数包括压力、温度、液面以及流量, 监控的点位达 1252 个。如此复杂的系统对控制系统硬件可靠性、软件稳定性和灵活性提出了很高的要求。

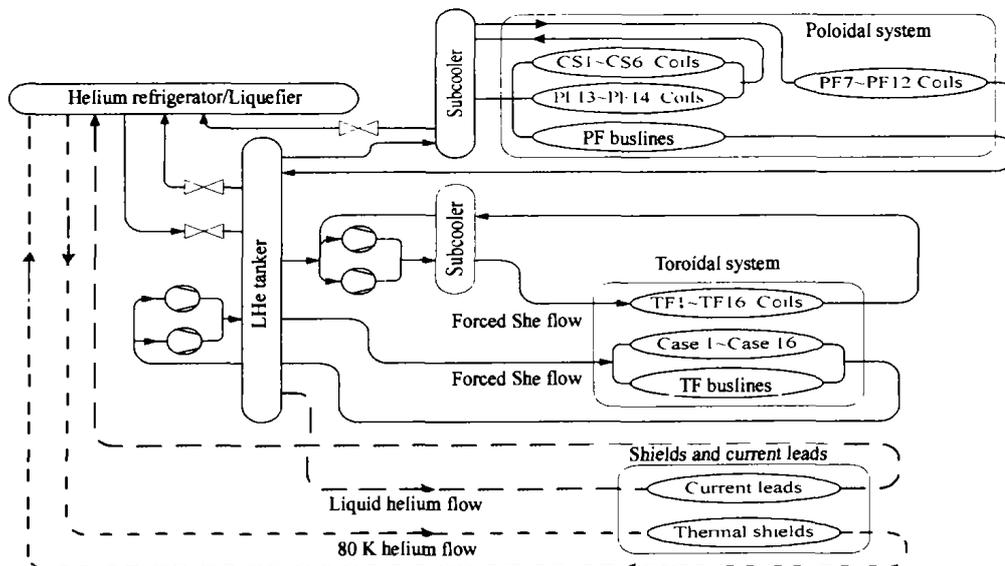


图 1 EAST 低温系统概念图

Fig.1 Illustration of EAST cryogenic system

1 控制系统的实现

1.1 系统硬件结构

EAST 低温控制系统采用美国 EMERSON 过程控制有限公司 Delta-V 集散式控制系统。该系统基本的设计理念是系统的稳定性以及系统的可扩展性(如图 2)。由图 2 可以看出,该低温控制系统由一台型号为 WS340 的工程师站(Pentium 4/2GHz/512MB/21#)、三台型号为 GX260 的操作员站(Pentium 4/2.4GHz/512MB/21#)、OPC Client/Server 各一台和四个现场控制机柜组成,它们通过冗余的工业以太网实现通信。四个控制柜采用 MD 控制器及相关 I/O 卡件来完成整个低温系统设备的现场级控制,并通过冗余的以太网与中央控制室进行数据通讯。工程师站作为该控制系统的核心,除了完成过程历史数据的采集和处理、控制系统诊断、系统软件组态等任务外,同时还可以转换为操作员站,结合装置降温和实验运行的流程图画面,将现场采集的数据以工艺参数化和图形化的形式提供给操作员,并将操作员的控制思想通过相应的软件控制模块反映到磁体降温和实验运行的过程控制中。操作员站负责过程的监视、直观的流程图画面显示和操作控制。Delta-V 作为一个独立的控制系统,通过 OPC (OLE for Process Control) Server 实现与外网的数据交换并承担一定的工艺换算,最终将结果传到工程师站用于控制和监测。

为了满足控制系统对可靠性的要求,对主要部

件采用冗余配置:冗余的控制网络、冗余的 MD 控制器和控制器电源等等,并且采用 UPS 电源保证整个控制系统的供电持续性。在主网络或者主 MD 控制器出现故障时,冗余的网络和 MD 控制器能实现相互间无扰切换。另外,Delta-V 仿真软件也是具有革命性的,它可以在无须连接任何硬件的情况下,对系统支持的所有功能,包括连续控制、批量控制和先进控制等进行组态,同时还可对工作站上相关的显示、报警、历史数据和 OPC 功能进行仿真。

1.2 系统初期控制方案

建设如此大的氦低温系统在我国也是第一家。目前系统的设备采购和安装调试以及组态工作正在有条不紊地进行中。对一些重要设备(如氦透平膨胀机由俄罗斯的 Gelymash 公司制造)的性能了解、掌握和重要参数的设置等都决定了设备在正式运行后除了系统本身的故障外,还会有很多的难题出现。为了使系统刚开始就能成功运行,也是遵循一个新事物发展的规律,我们当前设计的系统减小了由计算机来控制的成份。如纵场部分的几个排气阀门和极向场中的几个进气阀门相互间的调节(使得磁体各降温支路同步),在目前设计中除阀门的开启和关闭采用计算机控制外,在降温过程中的判断和调节都是由操作人员完成的;又如透平、循环泵等主要设备的启动也都是半自动化操作。以后随着对该控制系统的逐渐熟悉和掌握,将全部实现自动化控制。

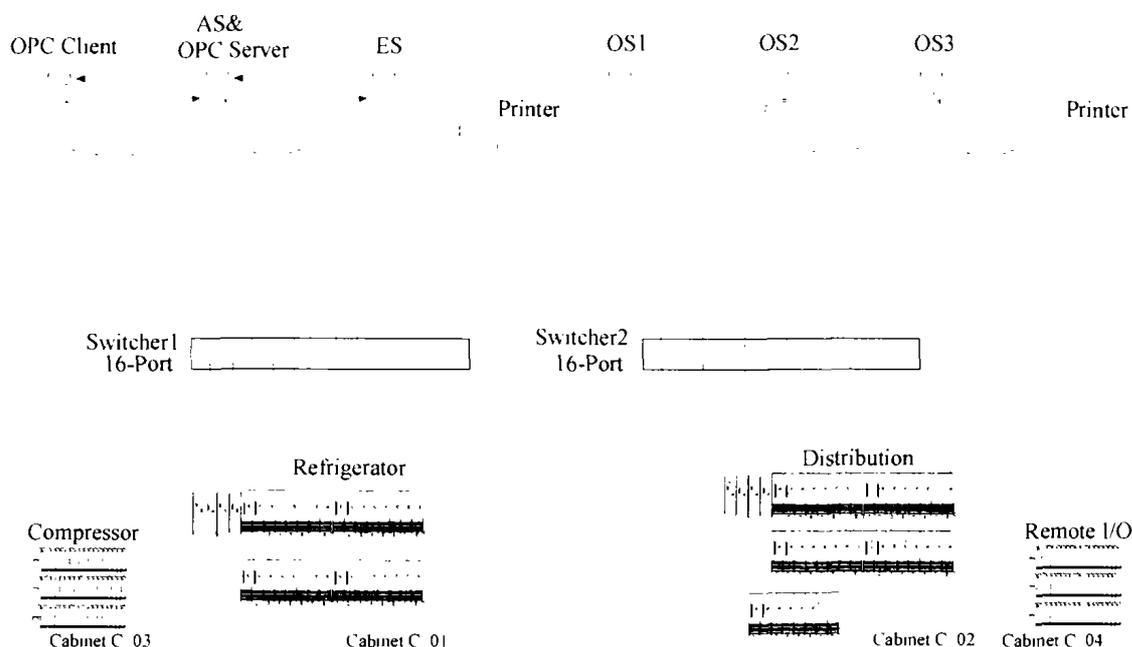


图 2 EAST 低温系统控制结构图

Fig.2 EAST cryogenic control system

2 系统流程设计与分析

EAST 低温系统由等离子体物理研究所自己设计,设计制冷量要求为 1050 W/3.5 K + 200 W/ 4.5 K + 13 g/s LHe/4.4 K + 25 kW/ 90 K。两级螺杆压缩机将氮气从 1.04 bar 压至 5.1 bar 再压缩至 20 bar。再经过三级滤油器、活性炭吸附器、干燥器、粉尘过滤器后进入制冷机冷箱。20 bar 的氮气进入冷箱后分成两路,一路 110 g/s 提供给透平膨胀机 T4,经膨胀降温后给 80 K 装置冷屏制冷;另一路 210 g/s 制取 4 K 温度级的冷量给磁体降温。4 K 温度级的制冷循环由五个冷却级组成,依次为液氮冷却级、透平膨胀机 T1、透平膨胀机 T2、透平膨胀机 T3 和节流级。当需要 3.5 K 的制冷量时,制冷机采用氮循环泵减压来实现。10000 L 的液氮杜瓦是为制冷

机液化储存液氮并且在实验运行需要的冷量增加时给予液氮补充。

EAST 低温系统共有 10 种稳态运行模式,30 种过渡运行模式,实现装置从常温到 3.5 K 的预纯化、正常降温、液化、实验运行以及失超等异常情况的处理。

2.1 从常温到 7 K 的降温过程

降温是指把托卡马克装置中的冷质部件降温至所需的工作温度。该降温过程实现的温降最大,所耗用的时间也最多,大概需要 10 d 左右的时间来完成这个过程。图 3 给出了该降温过程的示意图(结合图 4 中透平启动条件),这是一个降温接近 7 K 时的气路走线图。

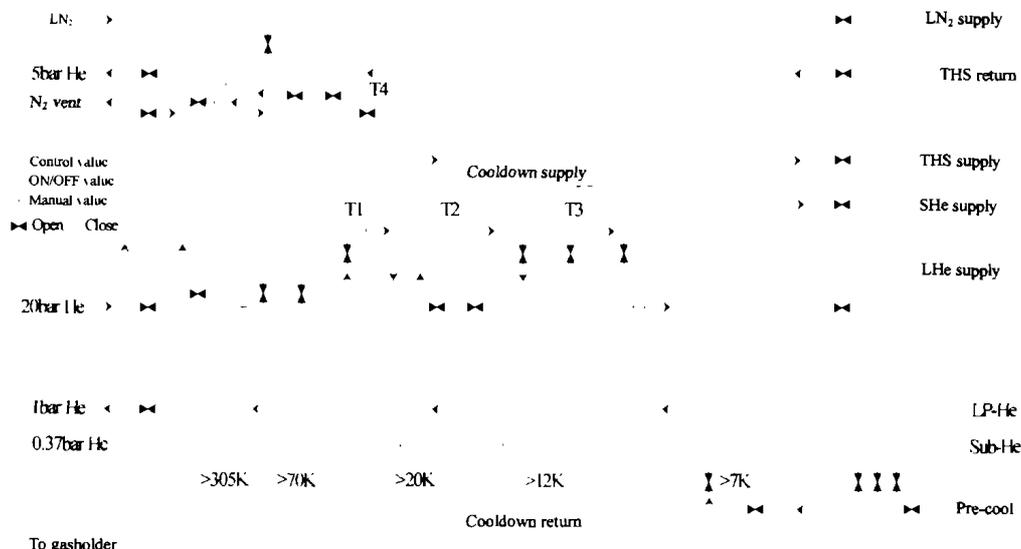


图 3 制冷机降温过程简图 (300 K—7 K)

Fig.3 Flow diagram for the cooling objects of refrigerator

在刚开始回气温度在常温附近时,所有四个透平均不启动。冷屏和装置的预冷都有相应的预冷进气支路和预冷回气支路。在装置回温降到 120 K、冷屏回温降到 110 K 时,分别启动透平 T1、T2 和透平 T4,此时冷屏预冷的支路在 T4 启动后关闭,此后的冷屏冷却操作基本不变,只是根据回气温度的高低相应地调整进排气流量和适时地补充液氮,装置部分的预冷支路也要进行相应的切换。在装置回气温度降到 65 K 时启动透平 T3, T3 启动后装置的预冷支路也关闭。具体的温度和压力的变化如图 4 所示。在这个降温过程中,要根据温度的不同不断地切换回气支路,使从预冷回气路来的冷却回气通过七级不同温度级的换热器与高压氮路交换冷量,以达到对冷量的充分利用。同时在该过程中还

要对低压和负压路进行预冷,为降温到 7 K 以下的回气路切换做准备。

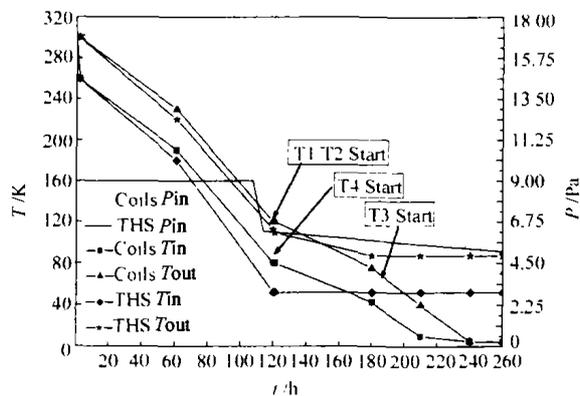


图 4 降温时各温度、压力点的变化

Fig.4 Cooldown curves for temperature and pressure

2.2 7 K 以下的降温过程

这个时候装置的冷却回气不再走预冷回气路回制冷机。纵场冷却回气回过冷槽,极向场冷却回气回液氮槽,分别从负压路和低压路回到制冷机。降到 6 K 以下时,开始给液氮槽和过冷槽充液氮,并且要对两个槽的液位进行控制直到实验结束。在整个降温过程中还要并行地执行对其他检测点的控制,如节流前压力、透平的转速、磁体进排气温差、冷却氮的流量分配等等。所有的降温过程和检测点的控制都是全自动化、并串结合执行的。

2.3 稳态模式

EAST 低温系统包括 10 种稳态模式,包括 80 K 待命模式、4.5 K 待命模式、4.5 K 待命 + 液化模式等等。每种模式都可以根据实验需要而稳定地存在。需要从一个稳态模式切换到另一个稳态模式时,操作人员只须在控制面板上按下从当前模式到需要转换的模式的按钮,系统就会自动地经过一些过渡模式实现这一操作。以后随着工程实验的需要和系统规模的扩大(以后还会再增加两台低压压缩机和一台高压压缩机),运行时间会增加。若 EAST 装置每年运行一轮,则只需每年降温一次。对于大型低

温装置,由于降温和回温费时,在不进行实验时,让设备处于某一个比较低温区的稳态模式(如 4.5 K 待命 + 液化模式),这样就可减少降温和回温的次数。

2.4 失超过程处理

所谓失超,就是超导体因某种原因突然失去超导特性而进入正常态的过程。超导体是在极高的电流密度下工作的,又处于超低温环境,失超永远是超导磁体的一个严重问题,即使是十分可靠的低温系统也要充分考虑失超后系统的安全性。

CICC (Cable-in-Conduit Conductor) 导体的失超一般是因各种扰动导致局部的热负荷,从而使得导体温度上升而失超。失超的基本过程是电磁能量转换为热能的过程。失超后因常导态的导体迅速扩展而使得电阻迅速增加,在大电流下发出巨大的热量。巨大的热能会将冷却的液氮迅速汽化,从而引起过高的压力,如果不能将这些氮气迅速释放,很可能对设备造成损害甚至会有爆炸等极端事故出现,所以失超后对冷却气体的泄放至关重要,下面给出了纵场磁体和线圈盒失超后的处理流程图(图 5)。

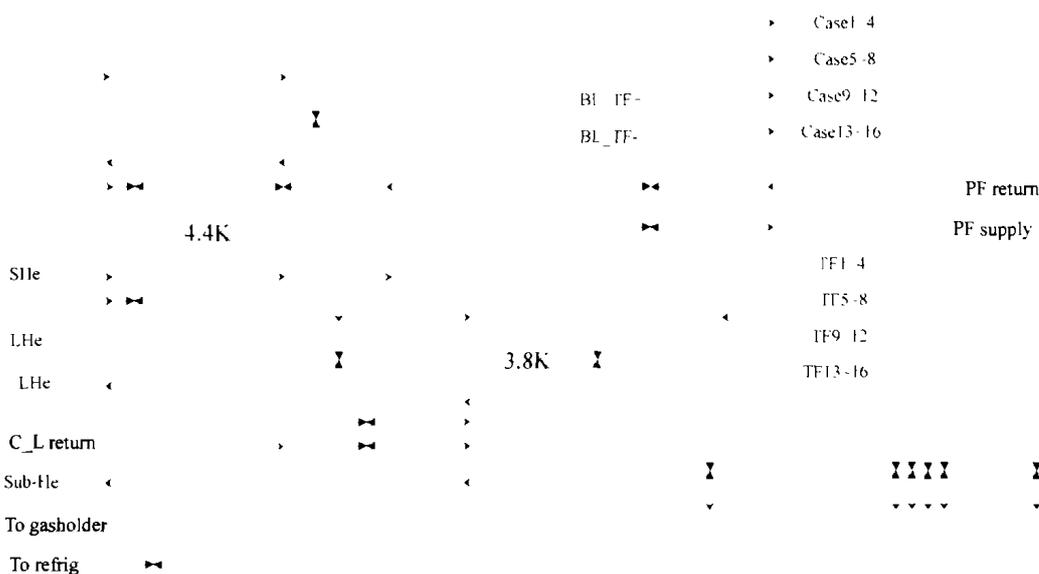


图 5 纵场磁体失超流程图

Fig.5 Quench sequence program for TF coils

从图 5 中可以看出,接到失超信号后,控制系统立即执行打开失超泄放阀门的操作,往制冷机泄放冷氮气流,同时切断给磁体供冷的进排气阀门(如图中虚线所示)。循环泵则减速或停止运行。与此同时,电源失超系统启动,迅速切断电源。制冷机部分操作保持不变,可以选择给 10000 L 液氮杜瓦生产液氮。极向场和纵场的降温是相互独立的,此时

极向场仍然是按照正常操作进行。在失超结束、开始重新降温前,首先根据磁体温度判断出失超的大小,再选择不同的降温路线开始新一轮的降温。

3 结论

EAST 装置 2kW 氮低温系统是迄今为止我国建造的最大的氮低温系统。该低温系统与其 DCS 控制

系统已在中科院等离子体物理研究所建成, 并即将进入系统调试阶段。它是我国自主研制的大型 EAST 低温系统与 DCS 的结合, 为 EAST 装置自动化运行创造了条件。同时作为 EAST 托卡马克核聚变实验装置的重要组成部分, 对我国的核聚变研究具有重要意义。

参考文献

- 1 王如竹, 汪荣顺. 低温系统. 上海: 上海交通大学出版社, 2000. 136—190
WANG Ruzhu, WANG Rongshun. Cryogenic system. Shanghai: Shanghai Jiaotong University Press, 2000. 136—190
- 2 Bai H Y, Bi Y F, Wang J R, *et al.* ICEC 19, 2002: 183—186
- 3 Aymar R. ICEC 19, 2002, 97—104
- 4 Kim Y S, Oh Y K, Kim W C, *et al.* ICEC 19, 2002: 109—112
- 5 沈维道, 蒋智敏. 工程热力学. 第二版. 北京: 高等教育出版社, 1983. 308—320
SHEN Weidao, JIANG Zhimin. Engineering thermodynamics. 2nd ed. Beijing: Higher Education Press, 1983. 308—320
- 6 Bai H Y, Bi Y F, Zhang M. Plasma Sci Technol, 2002, 4(3): 1305—1310

Flow design and analysis of cryogenic-control system for EAST under various operating conditions

SHAO Xin'an ZHUANG Ming BAI Hongyu JIN Yibin

(*Institute of Plasma Physics, the Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031*)

Abstract EAST is an advanced device for the study of nuclear fusion around the world. The cryogenic system is one of primary subsystems of EAST. The cryogenic control system is based on DCS, which has high stability and expansibility. And every part of the control system is independent and performs pallelly. The paper describes the cryogenic-control system of EAST and flow design during the cooldown, steady-state operation and quench situation.

Key words Experimental advanced superconducting tokamak (EAST), Cryogenic system, Nuclear fusion, DCS

CLC TK264.1, TP271