

# 低温数据采集在中性束注入中的设计与应用

盛 鹏 胡纯栋 刘 胜

(中国科学院等离子体物理研究所 合肥 230031)

**摘 要:**低温系统是中性束注入器(NBI)获得高真空的有效手段,因此对低温系统的测量和监控的能力将直接影响真空系统的质量。从硬件和软件上设计了一套可以精确测量和监控液氮温度和液氦温度的温度采集系统。硬件上根据液氮和液氦温度差别大的特点,采用 Pt100 和 Cernox 两种电阻温度传感器并设计了相匹配的信号放大、传输、A/D 采集及转换电路;软件上采用面向对象编程方法设计系统控制程序,使系统具有很高的重用性和扩充性。

**关键词:**中性束注入(NBI) 低温系统 温度采集系统 面向对象编程

**中图分类号:**TB611 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-6516(2006)01-0016-05

## Design and application of cryogenic data acquisition for Neutral Beam Injection

Sheng Peng Hu Chundong Liu Sheng

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

**Abstract:** The cryogenic system is an efficient method, which is used to get the high vacuum in Neutral Beam Injection system, so the ability to measure and control the temperature will directly affect the vacuum of system. This paper introduces a temperature acquisition system that can accurately measure and control the temperature of liquid nitrogen and liquid helium. According to the difference of temperature, Pt100 and Cernox resistance sensors are selected. The responding components, such as temperature signal amplifier, transformation components, A/D acquisition and conversion circuits are designed. The system controlling program has been developed with object-oriented programming method, that makes the system to be reused and extended easily.

**Key words:** Neutral Beam Injection; cryogenic system; temperature acquisition system; object-oriented programming

### 1 引 言

中性粒子束注入器(NBI)是涉及超高真空、低温、

精密机械制造、高功率电源工程、高功率诊断、测量和控制等领域的一项综合复杂的前沿技术,是磁约束受控热核聚变等离子体芯部加热和非感应电流驱动基本

收稿日期:2005-11-04;修订日期:2005-12-19

基金项目:国家自然科学基金(10575105)资助项目。

作者简介:盛 鹏,男,26岁,硕士研究生。

而有效的手段<sup>[1]</sup>。中性粒子束注入器工作时,离子源产生的大量粒子经过加速栅加速后在主真空室得到中性化。当漂移管道内达到  $10^{-6}$  Pa 以上的高真空时才能把真空室内中性粒子束流顺利引出,并将束流注入到 Tokamak 内部加热等离子体以达到满足聚变的温度。其结构如图 1 所示。达到高真空的有效方法就是采用低温冷凝泵,相对其他大容量的排气系统,具有几何尺寸小,理论抽速大的优势,可以使除氦气以外的气体冷凝成固态,从而达到抽除气体和净化空间的目的。

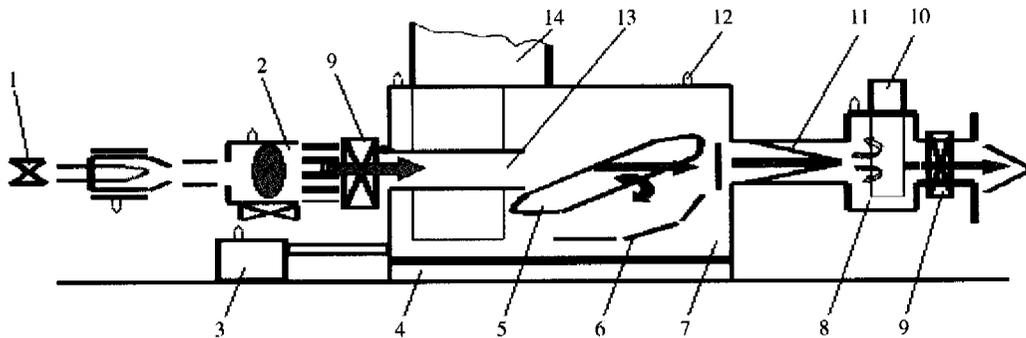


图 1 中性束注入器结构示意图

1. 进气阀; 2. 离子源; 3. 预抽系统; 4. 支撑架; 5. 偏转磁铁; 6. 离子收集板; 7. 主真空室; 8. 漂移室;  
9. 快速隔离阀; 10. 2 万升低温泵; 11. 量热计; 12. 真空计; 13. 中性化室; 14. 40 万升低温泵。

Fig. 1 Schematic diagram of Neutral Beam Injection

## 2 装置介绍

由低温冷凝泵<sup>[2]</sup>构成的低温系统是获得高真空必不可少的手段。低温冷凝泵(以下简称低温泵)启动之前必须对真空室进行真空预抽。预抽阶段由机械泵预抽和涡轮分子泵预抽两个阶段。当真空度达到  $1.0 \times 10^{-4}$  Pa 量级时,可以开启低温泵。首先向低温泵的氮路中充注液氮,此时系统温度逐渐下降。其次等到整个液氮部分的温度降至 77 K 时,为减少液氮损耗,在完成液氮充注后等待一段时间,尽可能利用热辐射来降低整个液氮系统的温度,再向氮路中充注液氮。最后用高纯度的氦气对液氮系统进行吹扫以纯化氮系统,随后开始注入液氮。在整个输液过程中,必须实时采集并监控实验系统各温度测量点的温度变化并作记录,以便为实验人员提供实时判断和实验结果分析。温度传感器在低温冷凝泵内的分布如图 2 所示。

## 3 硬件设计

为了在上述图 2 所示的低温泵降温过程中确保温度测量的可靠性和精确度,测量系统中对内外部液氮挡板温度和液氮冷屏温度的测量采用不同的 A/D

装置中使用低温泵控制漂移管道内的高真空从而避免向等离子体内注入束流时引起真空变化或者引入杂质粒子。由于温度测量和的控制的能力将直接影响装置内的真空度,所以建立一个温度采集系统测量和监控温度变化是必要的。本文设计了一套中性束注入器低温采集系统并加以应用。该系统主要包括液氮温区(77 K)和液氦温区(4.2 K)温度的测量、采集及系统控制软件的设计与实现,此外还涉及了多点远距离数据采集、数据分析、面向对象编程等技术。

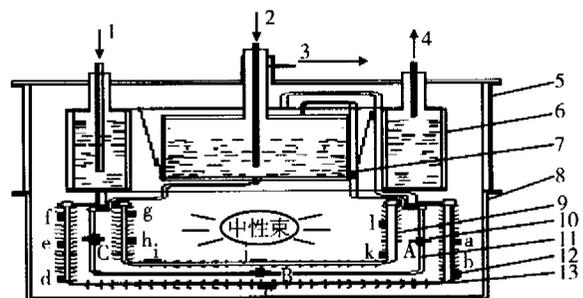


图 2 温度传感器在低温冷凝泵内的分布示意图

1. 液氮; 2. 液氦; 3. 氦气; 4. 氮气; 5. 低温泵外壁; 6. 液氮杜瓦;  
7. 液氮杜瓦; 8. 漂移管道外壁; 9. 内部氮路挡板; 10. Cernox 温度传感器;  
11. 液氮冷屏; 12. Pt100 温度传感器; 13. 外部氮路挡板。

Fig. 2 Layout drawing of temperature sensors in cryocondensation pump

采集和数据处理方法。这样可以根据液氮和液氦温度的差别采用不同的硬件以满足实验要求和降低成本。

### 3.1 氮路温度采集

氮路温度采集的硬件连接如图 3 所示。

图 3 中从 a 到 l 的 12 个铂测温电阻传感器 Pt100 的安装位置如图 2 所示。它们用于监测氮路挡

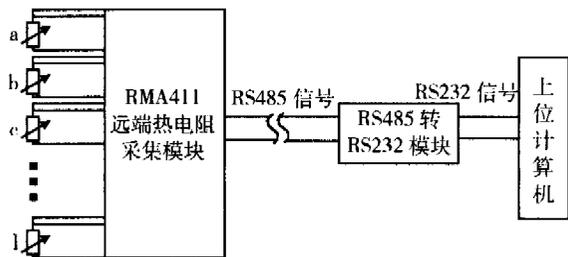


图3 氮温度采集硬件结构图

Fig. 3 Skeleton drawing of liquid nitrogen temperature acquisition

板各位置的降温过程,防止降温不均匀产生应力和变形,从而造成对低温泵的伤害。

本系统的总控制室距离实验现场较远,为了对多点液氮温度进行实时监测并简化测量系统,氮温度采集测量系统采用RMA411远端热电阻采集模块采集Pt100的电阻信号。RMA411远端热电阻采集模块,可采集16路Pt100或Cu50型热电阻,并可以转换成相应的温度值。采集模块采用MAX132CNG A/D转换芯片进行18位双积分模数转换,可直接对0~512 mV的信号进行处理,分辨率达2 μV/bit,同时采用了光电隔离技术,使模块的抗干扰能力进一步增强。数据采集模块的输出通过RS485接口和总线传输(其传输距离可达1 200 m),然后经RS232转接,与上位机实时通讯,从而实现计算机的数据采集与存储。

为了用铂测温电阻来检测温度,通常使用惠斯登电桥,或采用读出产生恒定电流时的端电压的方法,但是,由于铂丝的电阻值较低,所以导线的阻值不可忽略<sup>[3]</sup>。对于Pt100测温电阻,1 Ω的导线将会产生-2.5 °C的测量误差。为了消除导线电阻的影响,Pt100的测量采用三线恒流激励的方式。其原理图如图4所示。其中 $R_1, R_2, R_3$ 为导线电阻,假设所用的导线规格和长度均相同,则 $R_1 = R_2 = R_3$ ;恒流 $I_1, I_2$ 由恒流源提供,且 $I_1 = 2I_2 = 2I_3$ ,则有 $I_2 = I_3 = I$ ,根据运算放大器输入端的信号电压等于温度传感器上建立的信号电压,则有 $V_{Pt} = V_3 - V_2 = (I_1R_1 + I_3R_1 + I_3R_3) - (I_1R_1 + I_2R_2) = I_3R_t = V_{Pt}$ ,该电压只与温度传感器电阻 $R_t$ 和流过其上的电流 $I_3$ 有关,而与导线电阻无关。

3.2 液氮温度采集

氮路温度采集的硬件连接如图5所示。

图5中所示的Cernox传感器A,B和C的安装位置如图2所示。分别处在氮冷屏的注入口、底部及液

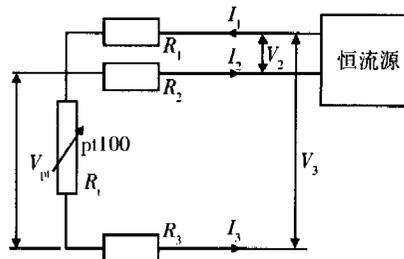


图4 三线恒流激励方式原理图

Fig. 4 Skeleton drawing for three-line constant current drive mode

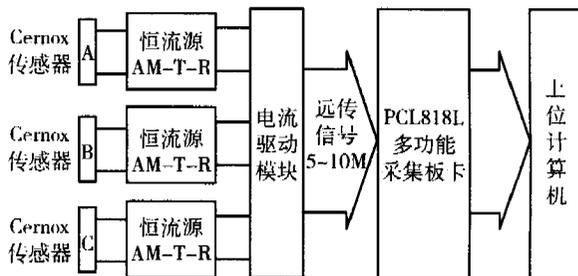


图5 氦温度采集硬件结构图

Fig. 5 Skeleton drawing of liquid helium temperature acquisition

氮出口处。通过对3个Cernox温度传感器信号的采集、放大和处理就可以知道冷屏的温度分布情况,从而可以控制液氮的注入量和速度,以防止冷屏受热不均变形损坏,同时还可以节省液氮用量。

液氮冷屏工作温度在4.2 K左右,这远低于Pt100的最低可测量温度,所以必须选择其它类型的温度传感器来测量。Cernox (CX-1050AA)温度传感器是经美国Lake Shore公司标定的电阻温度计,其测量量程为1.4~420 K,完全满足实验要求的温度范围。

为传感器提供大小适当、稳定的工作电流在Cernox温度传感器测量中是至关重要的。Cernox传感器是一种电阻温度系数为负的传感器,在室温下其阻值为几十欧,而在液氮温度4.2 K附近时电阻约在4~6 kΩ。在液氮温度下温度计的电压降应小于3 mV,为此专门定做了3路微小恒流源(AM-T-R-U5),可为传感器提供20 μA的工作电流。图5中的恒流源AM-T-R是一种精密恒流源激励器件,温度系数α为200 × 10<sup>-6</sup> °C。具有输入、输出、电源三方隔离功能。

电流驱动模块用来增强信号的电流强度以便远程传送。恒流源AM-T-R可以输出20 μA高精度稳

定电流,而信号调理隔离后输出的信号电流远小于 1 mA。如此小的电流信号易受外界噪声干扰和线路长度影响,且极不稳定。因而信号传输距离短,很难满足实验中传送 5~10 m 的要求。为此在恒流源输出后增加了一级电流驱动模块来提高信号输出的稳定性。此模块主要利用美国 National 公司生产的 LM324 进行同向信号跟随来完成。每块 LM324 可为 4 路液氮信号分别提供 50 mA 左右的驱动电流,并且可以保证 1 MHz 的信号带宽。这样就可以使 A/D 采集板卡采集到不失真的信号。

信号采集模块采用研华 (ADVANTECH) 开发的 PCL818 作为 A/D 采集转换模块。PCL 818 为 ISA 插槽的多功能数据采集卡。具有数据集中常用的 5 大功能:12 bit A/D 转换,12 bit D/A 转换,数字输入,数字输出和定时/计数。在 A/D 转换性能方面有如下特点:在 DMA 传输模式中完成 100 kHz 的 12 bit A/D 转换;软件编程方式选择通道的增益和模拟信号量程;数据传输模式中有程序控制传输、中断传输和 DMA 传输 3 种;具有双端变化从  $\pm 0.625$  到  $\pm 10$  V 的 5 种不同的量程。对于系统中的温度信号的缓慢变化和区间大的实验条件,采集卡的 100 kHz 采样率和  $\pm 10$  V 的量程足以满足实验要求。

#### 4 软件设计

系统控制程序采用 VC++6.0 以面向对象编程方法编写,系统中主要定义了 5 个功能类:系统控制类 (CApplication)、采集卡类 (CDataCard)、环境配置类 (CEnvironment)、内存管理类 (CMemory)、数据显示类 (CDisplay)。各系统类的关系如图 6 所示。

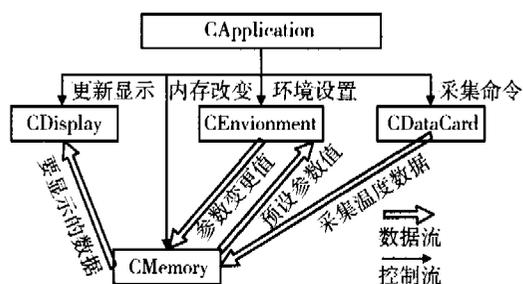


图 6 功能类关系图

Fig. 6 Schematic diagram of relations among function classes

##### 4.1 功能类介绍

类 CApplication 是系统的控制核心。负责与用户交互,接受用户输入的各种控制命令并调度相应的

功能类进行执行。例如:用户输入数据采集命令,则 CApplication 类实例便调用相应的 CDataCard 类实例执行数据采集功能。

类 CDataCard 是对数据采集卡各功能的封装。接受类 CApplication 的控制,并完成相应的数据采集功能。类 CDataCard 可以完成数据采集、数据转化功能。可以把传感器传来的电压信号通过相应的数据处理转换成用户需要的温度值,并把结果交给 CMemory 类进行存储。

类 CEnvironment 主要负责环境参数配置。通过 CEnvironment 类可以更改采集卡参数预设值、信号电压到温度值的标定信息、数据保存信息和数据通信格式等。

类 CMemory 是系统内存管理器,主要负责系统内存的申请、分配和释放,还负责内存数据与文件数据库的存取。

类 CDisplay 可根据设置的刷新频率对用户关心的数据进行实时更新。用户可以根据显示信息判断低温系统的工作状态。

##### 4.2 系统工作原理

系统的各功能类间通过控制信息协调工作,相互传递数据完成用户提交的各种命令。从图 6 可以看出:用户对系统的操作都由 CApplication 类负责解释并发出相应的控制协调信息。当用户需要采集数据时,CApplication 向 CDataCard 发出采集命令进行数据采集;当用户重设采集卡、数据存储信息时,CApplication 向 CEnvironment 发出环境设置命令进行环境改变和参数生效;当用户需要刷新显示信息或者系统内部内容改变时,CApplication 向 CDisplay 发出更新显示命令刷新显示内容;当系统启动、退出或者定时存储到达时,CApplication 向 CMemory 发出内存改变命令完成系统对内存的需求。

CMemory 类采用了智能管理方法对系统用到的内存进行分类管理。例如:温度采集中的数据管理利用动态创建缓冲区队列的方法根据用户对采集卡不同设置及显示刷新率不同进行内存管理优化。实验表明,这种方法既降低了内存开销又提高了系统对数据采集和显示的响应速度。

面向对象编程方法开发的程序具有很好的可重用性和扩展性。对于系统的氮路和氦路温度采集来说,对 CDataCard 类进行继承得到了两个子类,并对子类实现其特定的功能。子类与 CDataCard 的控制和数据传输的接口是一致的,从而使开发量减小且易

于集成和扩充。

## 5 结果与讨论

图7所示为系统测量的液氮路温度变化曲线。图中曲线A,B,C是氮冷屏注入入口、底部及液氮出口处传感器的温度变化曲线。记录了氮冷屏从降温到回温的温度变化,为实验中对低温系统运行状况和真空度分析提供了充分的数据资料。数据采集系统很好的测量和监控了低温系统,避免了因受热不均产生装置损坏。

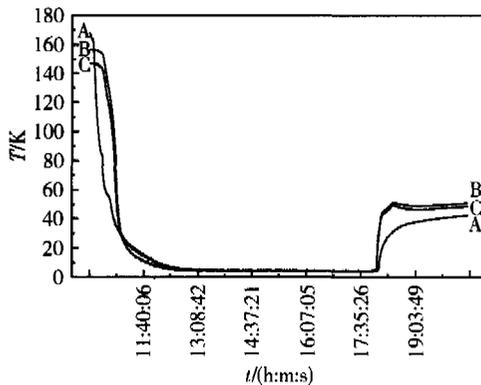


图7 液氮路的降温及回温曲线

Fig. 7 Graphical chart of helium system during temperature lowering and returning

图8所示为低温采集系统测量监控过程中的真空度变化曲线。从图中可以看出在液氮注入后,真空度急剧下降,这主要是因为中性化室内的 $O_2$ ,  $CO_2$ 和

水蒸气被冷凝了;在氮冷屏达到液氮温度后,除氮气外所有的气体都被冷凝,此时真空系统的真空度已达到 $7.2 \times 10^{-6}$  Pa,可以满足实验运行要求了。

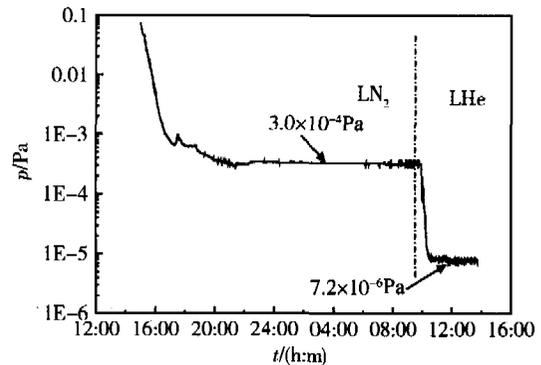


图8 低温冷凝泵运行中真空度的变化曲线

Fig. 8 Graphical chart of vacuum variety in cryocondensation pump during running

实验证明,该系统满足了温度采集和监控的要求,并对实验中降温过程的温度变化进行了实时采集、记录和保存。为实验人员提供了实时的温度数据和准确的实验记录。

## 参 考 文 献

- 石乘人. 磁约束聚变原理与实践. 北京: 原子能出版社, 1999. 192 ~ 197
- 陈长琦, 葛锐, 等. 中性束注入器漂移管道用低温泵的设计. 真空科学与技术, 2005, 25(2): 154 ~ 158
- 高桥清, 小长井诚. 传感器电子学. 北京: 宇航出版社, 1987. 73 ~ 77
- (10): 1907 ~ 1920
- Bald W B. Bubble growth constant for liquid hydrogen and liquid helium. Cryogenics, 1976, 16(12): 709 ~ 712
- Kenning D B R, Victor H D V M. Fully developed nucleate boiling: overlap of areas of influence and interference between bubble sites. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1981, 24(6): 1025 ~ 1032
- Basu N, Warriar G R, Chir V K. Onset of nucleate boiling and active nucleation site density during subcooled flow boiling. Journal of Heat Transfer, 2002, 124(4): 717 ~ 728
- Yeoh G H, Tu J Y, Lee T, et al. Prediction and measurement of local two-phase flow parameters in a boiling flow channel. Numerical Heat Transfer, Part A, 2002, 42(1-2): 173 ~ 192
- 李祥东, 汪荣顺, 顾安忠. 低温液体流动沸腾数值计算中的动量模拟. 低温与超导, 2004, 118: 53 ~ 58
- Li X D, Wang R S, Gu A Z. Numerical simulation of flow boiling of cryogenic liquids in tubes. In: 20th International Cryogenic Engineering Conference, Beijing, 2004
- Lee T H, Park G C, Lee D J. Local flow characteristics of subcooled boiling flow of water in a vertical concentric annulus. International Journal of Multiphase Flow, 2002, 28: 1351 ~ 1368

(上接第11页)

63 ~ 72

- Chen J C. Correlation for boiling heat transfer to saturated fluids in convection flow. I&EC Process Design and Development, 1966, 5(3): 322 ~ 329
- Liu Z, Winterton R H S. General correlation for saturated and subcooled flow boiling in tubes and annuli based on nucleate pool boiling equation. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1991, 34(11): 2759 ~ 2766
- 吴玉庭, 杨春信, 袁修干. 核态池沸腾的数值模拟. 化工学报, 2002, 53(5): 479 ~ 486
- Kirichenko Yu A, Slobozhanin L A, Shcherbakova N S. Analysis of quasi-static conditions of boiling onset and bubble departure. Cryogenics, 1983, 23(2): 110 ~ 112
- Ramming R, Weiss R. Growth of vapour bubbles from artificial nucleation sites. Cryogenics, 1991, 31(11): 64 ~ 69
- Thornicroft G E, Klausner J F, Mei R. Suppression of flow boiling nucleation. Journal of Heat Transfer, 1997, 119(3): 517 ~ 526
- Victor H, Del Valle M, Kenning D B R. Subcooled flow boiling at high heat flux. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1985, 28