

# 中性束注入器水流热量计系统优化分析

于玲<sup>1</sup> 栗翔<sup>1,2</sup> 许永建<sup>1</sup> 胡纯栋<sup>1</sup> 刘胜<sup>1</sup> 陈宇<sup>1</sup>

(1. 中国科学院等离子体物理研究所, 合肥 230031; 2. 中国科学技术大学, 合肥 230026)

**摘要:** 介绍了用于计算中性束注入实验中束流功率沉积的水流热量计系统优化及优化后的测试结果。前期的水流热量计系统利用串口传输和分散式牛顿模块采集, 采样率低、传输速度慢、抗干扰能力差、无法满足实验要求; 优化后的系统基于虚拟仪器, 采用 TCP/IP 协议传输和虚拟仪器技术, 提高了系统的采样率和精度、优化了数据传输速度及抗干扰能力。优化后的系统经测试可以准确监测中性束注入器装置上各热承载部件冷却水的温升及流量, 并分析得到中性束注入时束流在各热承载部件上的功率沉积。实验结果表明优化后的系统工作稳定, 使用灵活, 数据准确, 满足实验要求。

**关键词:** 中性束注入; 采样率; 温升; 虚拟仪器; 中性化效率

**中图分类号:** TL 65, TP 274 **文献标志码:** A **文章编号:** 0258-0934(2016)7-0677-05

中性束注入器(NBI)是一套能产生高能带电离子束并对其进行中行化形成高能中性粒子束,并将高能中性粒子束传输到聚变装置内用以加热等离子体的复杂系统<sup>[1-4]</sup>。NBI加热是在托卡马克上除了欧姆加热外,对等离子体外部加热和维持的四种主要加热手段(中性束注入、低杂波、离子回旋频段波、电子回旋频段波)中加热效率最高、物理机制最清楚的手段,它主要通过电荷交换和粒子间碰撞实现对离子和电子的加热<sup>[5-6]</sup>。由于电荷间的相互作用和加速电极的几何结构,束流在传输过程中发散。发散的束流在传输的过程必定会打在热承载部件上,给部件带来一定的能量沉积,从而给热承载部件带来热损伤,甚至破坏整个NBI系统。为了实现中性束对等离子体的高效加热,对离

子束(中性束)束功率的准确测量是必不可少的。

本文介绍的水流热量计系统(WFC)主要是通过流量传感器和压力传感器来实现对NBI装置上各热承载部件冷却水运行状态的监测;通过温差传感器和流量传感器来监测各热承载部件冷却水的温升及其流量,通过数据处理,最终实现对加速电极和各热承载部件功率沉积的分析<sup>[7-10]</sup>。WFC系统对EAST-NBI的正常运行有着重大的意义,它不仅提供了NBI运行时各加速电极的冷却水实时温升和束功率在各热承载部件上沉积分布等参数,还为EAST-NBI的正常运行提供了安全保障。

## 1 WFC系统的原理

WFC系统总体结构由温差采集子系统、流量采集子系统、进出水阀门、流量传感器、压力传感器等部件组成,如图1所示。压力传感器与流量传感器根据管道内冷却水的压力和流量情况时刻向控制系统发出数字量信号,其信号表示管内压力和流量状态,依据此信号可以判断如何调节进水阀门和出水阀门。最后通过温差传感器采集的温差值并结合流经该部件的冷

收稿日期: 2016-06-21

基金项目: 国家国际科技合作专项(2014DFG61950); 国家自然科学基金(11575240)资助。

作者简介: 于玲(1981-),女,河南南阳人,工程师,主要从事中性束功率沉积与能量分布研究。通信作者: 许永建,男,副研究员, E-mail: yjxu@ipp.ac.cn。

却水流量值,利用下式计算出束流经过该部件时的功率沉积,综合分析,从而得到整个 NBI 系统的功率沉积分布。

$$P_{water} = \frac{mc_p}{\Delta\tau} \int_0^{\infty} \Delta t d\tau \quad (1)$$

式中:  $P_{water}$  为水路法计算得出的束线总功率;  $C_p$  为水的比热;  $m$  为冷却水质量流量;  $\Delta t$  为进出水温差;  $\Delta\tau$  为引出束流的脉宽。

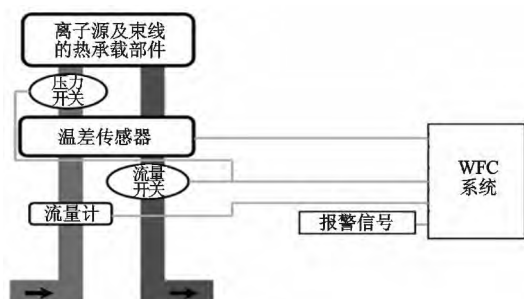


图1 WFC 系统原理图

## 2 WFC 系统的优化

前期的水流热量计系统利用串口传输和分散式牛顿模块采集,采样率及精度低、传输速度慢、抗干扰能力差,无法满足实验要求;优化后的系统采用 TCP/IP 协议传输和虚拟仪器技术,提高了采样率、传输速度及抗干扰能力。经测试,系统准确度提高、工作稳定、使用灵活,能充分满足实验要求。

### 2.1 优化前的 WFC 系统硬件配置

优化前的 WFC 系统利用多个 ADLINK 公司的 8 通道模拟量输入输出模块 ND-6018 安置在实验现场,采集装置各部件进出口水路上的温差传感器,实时返回温差值,并通过 458 总线传送给网络转换器 ND-8511(D)。ND-8511(D) 经过内部处理,把数据以 RJ45 口接入网络中,然后利用两个光纤收发器进行电隔离,把数据传输至控制区计算机,图 2 为优化前的 WFC 系统结构图。

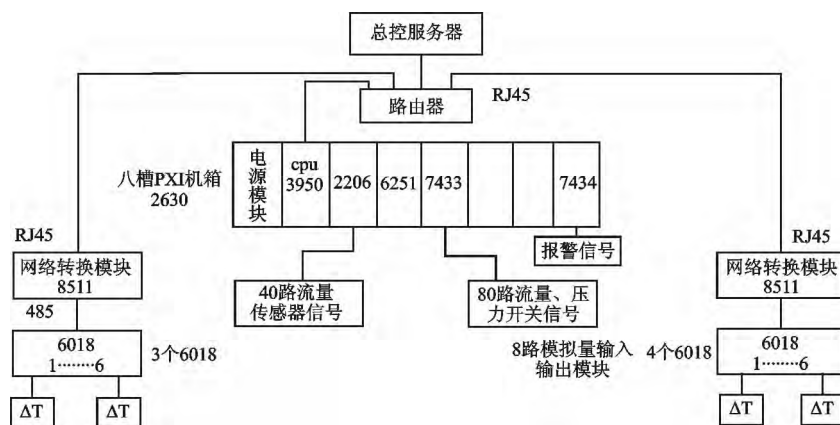


图2 优化前 WFC 系统示意图

在实验现场采用多个分散式 ND-6018 作为接线终端的工作模式,虽然提供了空间接线的灵活便利,但也造成屏蔽性差、抗干扰能力弱,采集信号易受高压强磁影响。在实时的温升曲线图中会出现尖锐的脉冲信号,淹没真实的实验数据。多个 ND-6018 共用一个网络转换模块 ND-8511(D),数据传输过程较为缓慢、易丢包。ND-6018 定义采集率为 10 Hz,但实验中从实际采集得到的数据来看,对于 ND-6018 每通道的采样仅为一个点。离子源各电极的水温达到最高值是一个很短的过程,每通道 1 Hz 的采集率不能满足电极冷却水温

升采集的需求。

采样率低会导致遗漏最高温度处的一些重要的点,影响数据的准确性。针对采样率过低的问题,尝试了不同的改进方法,如为每一个 ND-6018 配置网络转换模块 ND-8511(D),每通道采集速率提高至 1.5 Hz,效果不理想。另外通过提高端口的波特率,但终端计算机得到的数据量并未增加。通过减少每个 ND6018 的采集通道,将一块 ND6018 的 8 路采集通道减少为 3 路,每通道采样率可达 2 Hz,仍无法满足实验要求。因此需要通过更换硬件的方式来优化 WFC 系统。

## 2.2 优化后的 WFC 系统

优化后的 WFC 系统利用 NI 公司的 16 通道采样率为 1.25 MHz 模拟量输入模块 PXI-6251 进行采集。利用 SCXI-1349 使 12 槽 SCXI-1001 机箱与 PXI-6251 相连,在 SCXI-1001 内插入 32 通道输入模块 SCXI-1102,用 SH96-96 电缆将 SCXI-1102 的 32 路接线端引出,并在终端采用 TC-2095 对实时采集到的温度值进行冷端补偿,优化后的 WFC 系统硬件结构如图 3。

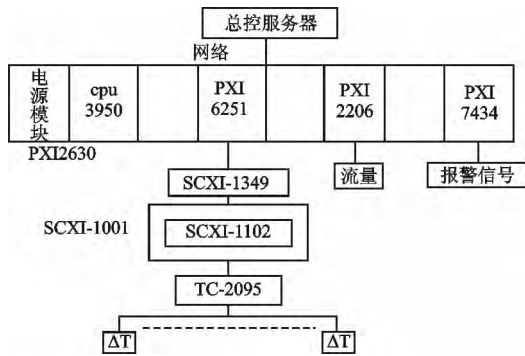


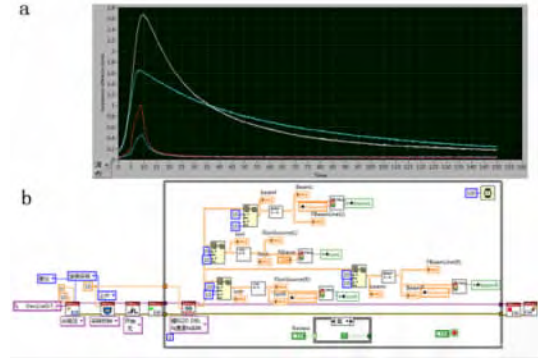
图 3 优化后 WFC 系统硬件结构示意图

优化后的 WFC 系统摒弃串口采集通信模式,避免了传输过程中数据的拥堵、丢失问题。32 通道输入模块 SCXI-1102 最高采样率可达 333 kS/s,实现了采样率从 0.01 ~ 10 kHz 的随意调节,解决了采集率过低问题。优化后的 WFC 系统引用 NI 公司的 TC2095 作为接线终端,接线主要采用屏蔽的 BNC 方式,并在软件中加入滤波功能,提高了整个系统的抗干扰能力。

基于 PXI 总线和虚拟仪器 LABVIEW 搭建的水流热量计系统,软件采用 LABVIEW 图形化编程语言使程序具有高性能与灵活性,为以后软硬件的升级、优化、更新提供了极大的方便。图 4 为优化后的 WFC 系统部分软件示意图,其中(a)为 WFC 系统的采集界面,(b)为 WFC 系统的部分程序框图。

## 3 优化前后对比与分析

束流注入时由于热量沉积,各加速电极的温度会在很短时间内达到峰值,电极上沉积的热量被冷却水带走,因此冷却水的温度在束流注入的瞬间也会迅速升高。图 5 给出了优化前后 WFC 系统所采集到的等离子体电极(PG)、梯度电极(GG)、抑制极(SG)、地电极(EG)四



(a 为系统采集界面, b 为系统程序框图)

图 4 优化后基于虚拟仪器的 WFC 系统部分程序示意图

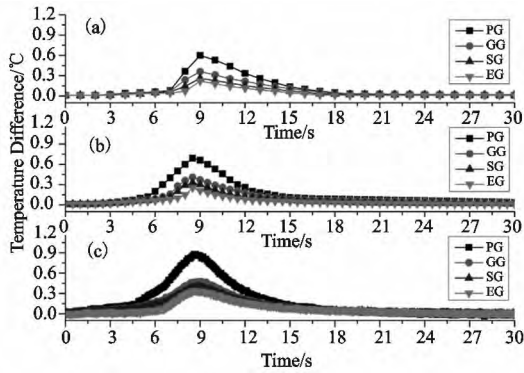
条水路温升曲线对比图。

图 5 为相同电参数下,不同测量方法所得到的四电极温升曲线图。图 5(a)为优化前基于 ND-6018 的 WFC 系统冷却水温升曲线图,图中采样点数偏少,存在关键数据点遗漏的问题,依据此来进行部件热沉积计算是不严谨的。图 5(b)为基于 ND-6018 硬件,通过增加采集模块,提高网络传输速率后,采集所得到的冷却水温升曲线图。由图可看出:相同时间内采样点数虽然有所增加,但在冷却水温升曲线的最高点仍存在漏点。图 5(c)为优化后的 WFC 系统冷却水温升曲线图,优化后的 WFC 系统基于虚拟仪器,用 1.25 MHz 模拟量采集模块 PXI-6251 代替 10 Hz 的牛顿模块 ND-6018,它的采样率可按实验要求随意调节,最高可达 10 kHz,对于捕捉冷却水温度变化趋势而言,是完全满足要求的。表 1 为优化前后分别利用 a、b、c 三种方法计算沉积在各电极上的能量值。由表 1 可看出,升级后的 WFC 系统(c)采集方法最精确,计算得到的各电极功率沉积值最高,误差最小。由此可看出,WFC 系统的升级优化对提高采样精度和计算功率沉积的准确性有显著作用。

表 1 优化前后沉积在各电极上的能量值

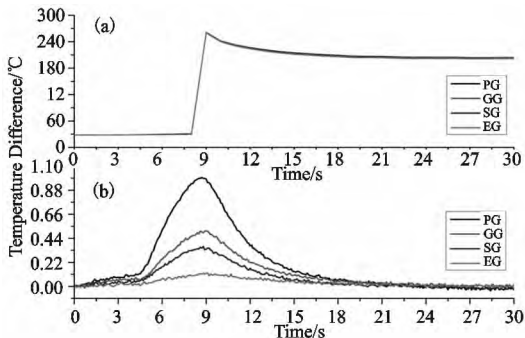
能量沉积/kJ	PG	GG	SG	EG
a	3.64	2.93	2.30	1.59
b	4.72	3.48	2.70	1.72
c	5.27	3.77	3.37	2.50

由于中性束注入系统工作在数万伏以上的强磁高压环境下,对传感器的绝缘性、抗强电磁干扰性、响应速度都有极高的要求。图 6 为进



(a) 为前期 WFC 系统温升曲线图，  
 (b) 为初步优化后 WFC 系统的温升曲线图，  
 (c) 为基于虚拟仪器的 WFC 系统温升曲线图  
 图 5 图 5WFC 系统改造前后四电极冷却水  
 温升对比图 (45 kV 24 A 2 s)

行滤波和抗干扰处理前后的温升曲线图,优化前的 WFC 系统,采集终端屏蔽性较差,高压打火时采集信号易受干扰,在实时的温升曲线中出现跳变的脉冲(如图 6(a)所示),造成 WFC 系统采集信号失真,无法实时获得各冷却水路的真实温度情况,以致使整个中性束注入实验处于盲目的运行状态;优化后的 WFC 系统通过对硬件进行升级的同时在软件中加入滤波功能,提高采集系统的抗干扰能力,图 6(b)为进行滤波和抗干扰处理后的温升曲线图。

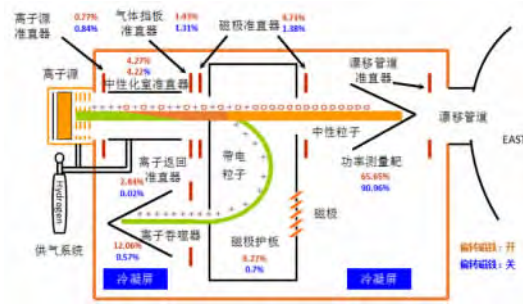


(a) 为滤波和抗干扰处理前的温升曲线图，  
 (b) 为滤波和抗干扰处理后的温升曲线图  
 图 6 电极冷却水温升曲线图

利用束线各热承载部件的冷却水的温升值并结合流量,可计算出束流在各部件上的热量沉积,图 7 为 40 kV、21.5 A、2 s 时,束流沉积分布图,由图可计算出束流在各热承载部件上的能量沉积和中性化效率。

#### 4 结论

本文针对中性化束注入实验中对诊断系统



(橙色为磁场关 蓝色为磁场开)

图 7 束流热量沉积分布图

的精确度、灵敏度、稳定性日渐提高的需求,优化了当前 WFC 系统使其能更好的满足实验要求。优化后的基于虚拟仪器技术的 WFC 系统整体稳定性更好,采样率和抗干扰能力的提高保证了离子源四电极的水路温升准确、实时地显示、保存、分析,为束功率精确计算和热沉积分析提供了可靠依据。

#### 参考文献:

[1]HU Chundong, NBI Team. First achievement of plasma heating for EAST neutral beam injector [J]. Plasma Science & Technology, 2015, 17(1): 1-3.  
 [2]XIE Yahong, HU Chundong, LIU Sheng. The R&D progress of 4 MW EAST - NBI high current ion source [J]. Review of Science Instruments, 2014, 85(3): 02B315.  
 [3]经浩,胡纯栋,李军.兆瓦级强流离子源地电极的位置度检验方法[J].核技术,2013,36(5):53-57.  
 [4]刘智民,胡纯栋,刘胜.EAST 强流离子源电源系统的初步测试运行[J].核技术,2011,34(11):837-841.  
 [5]宋士花,盛鹏,刘胜.中性束注入器离子源测试台可编程逻辑控制系统[J].强激光与粒子束,2011,23(6):1635-1639.  
 [6]XIE Yahong, HU Chundong, LIU Sheng. Experimental study of diagnosis neutral beam for HT-7 for Tokamak [J]. Plasma Science & Technology, 2008, 10(6): 690-693.  
 [7]XU Yongjian, HU Chundong, XIE Yuanlai. Analysis of the Cooling Water Temperature Rise of Accelerating Electrodes in EAST Neutral Beam Injector Beam Extraction [J]. Chinese Physics Letters, 2013, 30(3): 032901.  
 [8]于玲,胡纯栋,刘胜.基于虚拟仪器下的温度测量[J].核电子学与探测技术,2010,3(8):1050-1054.  
 [9]陈宇,胡纯栋,许永建.EAST 中性束注入器水流热量累积测量系统误差分析[J].核技术,2016,39(3):1-6.  
 [10]陈俞钱,谢亚红,胡纯栋.EAST NBI 强流离子源

## Optimization Analysis of Water Flow Calorimeter System of Neutral Beam Injector

YU Ling<sup>1</sup>, LI Xiang<sup>1,2</sup>, XU Yong-jian<sup>1</sup>, HU Chun-dong<sup>1</sup>, LIU Sheng<sup>1</sup>, CHEN Yu<sup>1</sup>

- (1. Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;
2. University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

**Abstract:** This article introduces the optimization of water flow calorimeter system which is used to calculate the beam power deposition in NBI experiment and its experimental results after optimization. Previous water flow calorimeter system uses serial transmission and decentralized acquisition module. Its low sample rate, slow transmission speed, bad anti-jamming ability cannot meet the experimental requirements. Using TCP/IP protocol and virtual instrument technology, the optimized system based on virtual instrument increases the sampling rate and accuracy, and transmission speed and anti-jamming capability are also improved. The optimized system can accurately measure the cooling water temperature rise and flow rate to calculate the beam power deposition on the heat-load components by test. Experiment results show that optimized system is stable, flexible, and can fully meet the experimental requirements.

**Key words:** neutral beam injection; sample rate; temperature rise; virtual instrument; neutralization efficiency