

# 中性束诊断电源系统及束流引出实验研究

张健<sup>1</sup>, 刘保华<sup>1</sup>, 胡立群<sup>1</sup>, 杜少武<sup>2</sup>, HT-7DNB组<sup>1</sup>

(1. 中国科学院等离子体物理研究所, 合肥 230031; 2. 合肥工业大学能源研究所, 合肥 230009)

**摘要:** HT-7中性束诊断电源系统的计算机控制系统由PLC、工控机、逻辑控制和定时单元等组成。对起弧、束流引出等实验进行了研究。在多种参数下, 通过调节弧压、进气量等观察了其对弧流的影响。初步实验结果表明, 在高压35kV、弧流80A的情况下, 束电流可以达到3.6A, 引出的中性束流功率可以稳定地达到50kW以上。

**关键词:** 中性束诊断; 电源系统; HT-7

**中图分类号:** TL62'3

**文献标识码:** A

## 1 引言

在等离子体诊断技术当中, 中性粒子能谱是测量等离子体离子温度  $T_i$  的重要手段。此外, 还有激光集体散射、中子产额以及线光谱多普勒展宽等多种测量手段。带电粒子束和中性粒子束可以由各种离子源产生, 它们的能量和飞行方向能够用电磁场来迅速调变。根据粒子束和等离子体中的电子和离子及电磁场的相互作用, 有可能测量多种参数。中性粒子射入等离子体后, 会产生电荷交换的快速中性粒子, 也会激发出特征光谱, 测量中性粒子能谱就可以判断等离子体中的离子温度  $T_i$ 。这套中性束诊断系统就是基于这一原理, 主要用于诊断等离子体离子温度和旋转速度等参数的实验装置。

原理上, 中性粒子诊断束(DNB)系统与中性粒子加热束注入(NBI)系统基本相同, 只是它们的用途不同。DNB系统主要用于诊断托卡马克中等离子体的物理参数, 而NBI系统则主要是用于等离子体的二次强功率加热。这两套系统都是利用高能中性粒子不受约束磁场的影响, 可以直接注入到等离子体中的原理, 即首先利用高能离子与同元素中性气体的电荷交换过程实现中性化, 然后再将高能中性化束注入托卡马克中与等离子体相互作用, 从而达到诊断或者加热等离子体的目的<sup>[1]</sup>。区别在于

用于诊断的中性束和用于加热的中性束对束流品质有着不同的要求。诊断束应具有强的聚焦能力、束斑较小、束流密度大, 以适合高空间分辨和高信噪比的测量。但是系统涉及到的技术更复杂、费用更高。国外也有装置利用中性粒子加热束代替中性粒子诊断束, 但是利用中性加热束来实现诊断的目标时, 对等离子体扰动大、空间分辨和测量精度比专用的诊断束系统获得的结果差很多。所以, 最近几年特别是在建的托卡马克装置上利用专门的中性诊断束已成趋势。我们这套中性粒子诊断束的优点是, 不用依赖中性加热束而可以作常规诊断, 对等离子体扰动小、空间分辨好、测量精度高。

本工作的主要任务就是对该套中性束诊断电源系统以及束流引出实验等进行研究。

## 2 电源系统概述

DNB电源系统的结构示意图如图1所示<sup>[2]</sup>。该套电源系统主要包括9套子电源系统, 其中有4套灯丝电源, 1套弧电源, 1套缓冲器电源, 1套加速极电源(正高压电源), 1套抑制极电源(负高压电源), 1套偏转磁体电源。另外, 还有梯度电源等附属配套电源系统。

该套DNB电源系统设计为允许束源每2min产

收稿日期: 2005-10-21; 修订日期: 2006-02-25

作者简介: 张健(1979-), 男, 汉, 安徽省芜湖市人, 博士研究生, 核能科学与工程专业, 现主要从事DNB电源及控制系统的研究工作。

生一个 100ms 的束流, 各套电源的最大运行参数列于表 1。

表 1 电源系统运行参数

电源	电压/V	电流/A
加速极电源	50000	7.3
梯度电源	44000	<<0.2
灯丝电源(4套)	12	160
弧电源	210	230
缓冲器电源	20	20
抑制极电源	-2500	1.5
偏转磁体电源	120	200

除了加速极电源以外, 其余各路电源的初级输入电压均为 480V(AC)。在束正常运行期间, 加速极电压是一个宽度为 100ms、幅度为 0~50kV 可调的脉冲高压, 并且灯丝电源、弧电源以及缓冲器电源等都浮在此高压上, 而抑制极电源和偏转磁体电源均以地电压作为参考。为了保护栅极, 系统要求在束打火时必须迅速切断高压电源, 此时由四极管 (EIMAC Y841) 构成的调制电路可以在十几  $\mu\text{s}$  内切断高压输出以保护加速极。在系统中还设计了一个由引燃管组成的撬棒(Crowbar)系统来提供对系统和四极管的保护, 当四极管保护失效时, 该撬棒保护系统可在  $10\mu\text{s}$  内将四极管的输入电压降为零。

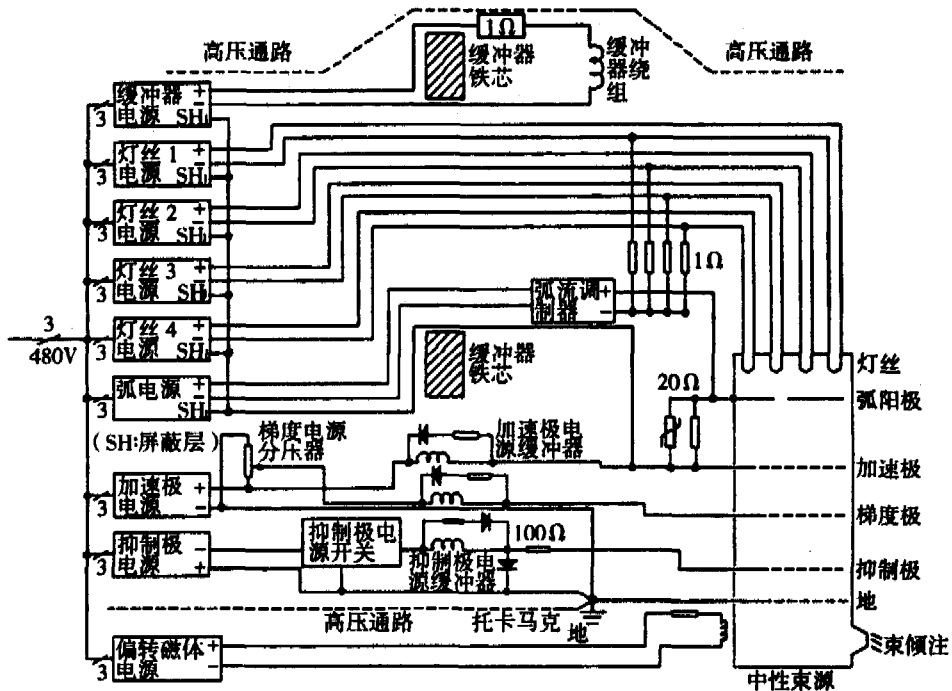


图 1 DNA 电源系统结构示意图

抑制极电源的输入电压为 480V(AC), 经自耦变压器调压后送至变换整流部分, 整流后得到的直流电压经调制电路调制后送至抑制极。在该电源中采用电子管 (EIMAC 3CX2500) 组成了一个调制电路, 该调制电路具有开关和调制的双重作用。当发生故障时, 它可以在  $100\mu\text{s}$  内切断抑制极的电压。

灯丝电源、弧电源和缓冲器电源在电路拓扑设计上是一致的, 它们的输入电压均为 480V(AC), 首先由自耦变压器调压 (初级调压) 后再由双向可控

硅调压 (次级调压), 经上述两次调压后送至隔离变压器和桥式整流电路, 整流后可得到六纹波的直流电压。

偏转磁体电源在电路拓扑结构上与灯丝电源、弧电源和缓冲器电源相似。不同的是它以地电压作为参考, 因而不需要高压隔离变压器。在整个电路中, 主要由熔丝和电路断路器来实现对它的保护, 并且使用一个自耦变压器来调节其输入电压。

### 3 控制系统概述

DNB 电源控制系统结构图如图 2<sup>[3]</sup>所示。主要包括上位机（采用工控机）、PLC、逻辑控制单元、定时单元及一些外围接口电路等。

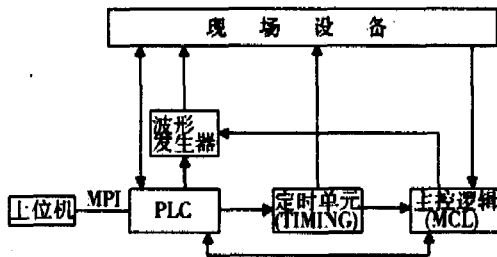


图 2 控制系统结构示意图

运行于上位机的 WinCC 主要用于对系统进行实时监控，而 Step7 用于对 PLC 进行编程。上位机与 PLC 之间采用 MPI（多点接口）方式进行通讯。定时单元主要用于设定 9 套子电源系统、束源气阀以及光谱测量等各部分的工作时序。主控逻辑主要用于对整个系统的故障信号进行综合处理。波形发生器用于设定灯丝电源、弧电源以及高压电源的工

作波形。

由于系统中有高压电源，为了提高系统的安全性、可靠性和抗干扰能力，还配有多种光电转换及电光转换器件。重要的触发信号全部实现了光纤传输，并且各路电源的测量信号也都实现了光隔离，即各路电源的电压、电流测量信号经 V/F 转换后由光纤传输，再经 F/V 转换送至采集计算机采集。

### 4 起弧及束流引出实验

在引出束流之前，起弧实验和放电锻炼是必需的。一方面通过起弧实验研究和理解离子源的放电特性，获得最佳的放电参数，掌握调试弧流的经验，为进一步的高压离子束流引出奠定基础；另一方面起弧放电也可以清洗真空室内壁，为提高离子产额和稳定束流引出创造良好的真空环境。

起弧及束流引出实验的关键在于电参数和进气量等参量的协调控制。电参数通过调节电源设定值来控制，进气量主要通过调节进气时刻、进气宽度以及针阀开度等来控制。

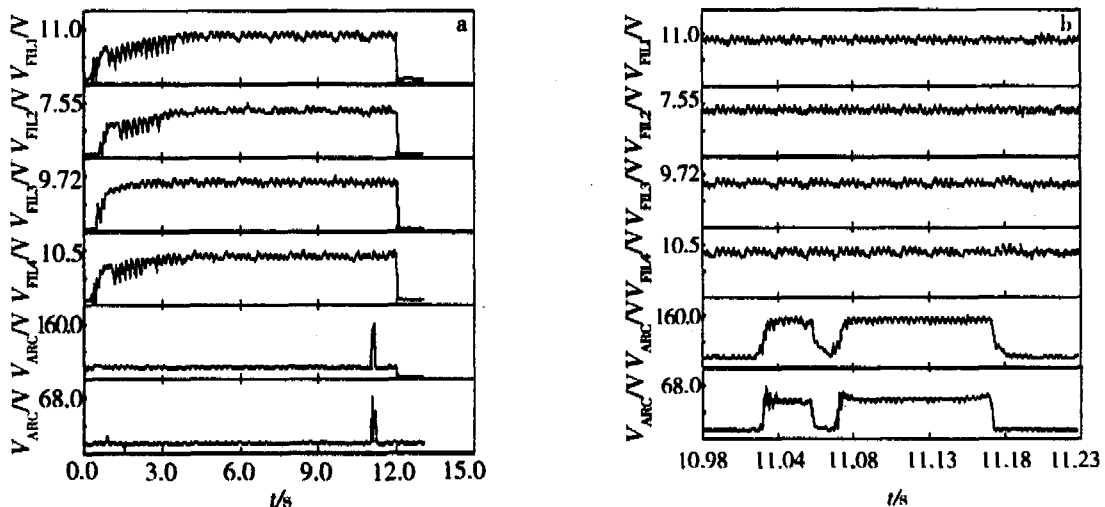


图 3 起弧时灯丝电压、弧压和弧电源的波形

a——灯丝电压及弧压、弧流波形；b——灯丝电压、弧压、弧流展开图。

#### 4.1 起弧实验

起弧时需要投入灯丝电源、弧电源以及进气。灯丝电源工作时间为 12s，前沿为 1s 按指数上升曲线。弧电源工作分为预电离和正常电离两部分，预

电离起始时刻为投入灯丝后 11s，脉宽为 35ms，关断 15ms 后正常电离 100ms；进气时刻为提前预电离 3.35s，进气时间为 3.5s，与正常起弧同步结束。当系统正常时，以上工作任务由波形发生器、

定时单元和主控逻辑等联合完成；当有故障发生时，主控逻辑迅速封锁输出脉冲，从而关断电源输出，起到保护离子源电极的作用。

起弧时灯丝和弧电源的波形如图 3 所示。

通过对灯丝电源、弧电源以及进气的控制，可以调节弧流的大小。

图 4 是在灯丝电压不变，其平均电流控制在 120A，进气时刻为提前预电离 3.35s，进气时间为 3.5s，不同针阀开度情况下，弧压对弧流的影响。

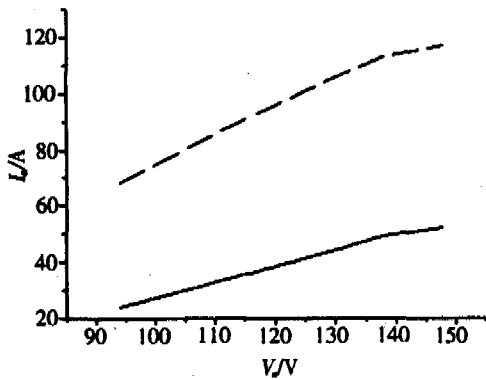


图 4 弧压对弧流的影响

$V_a$ ——弧压； $I_a$ ——弧流。——针阀：4.6；---针阀：4.8。

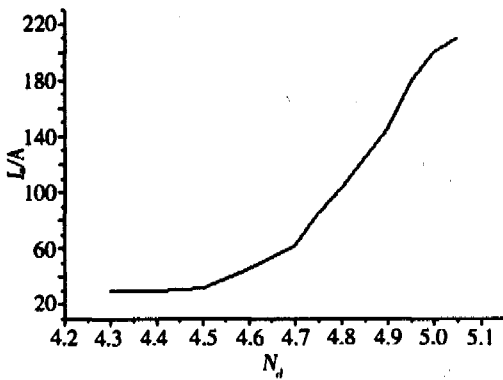


图 5 进气量对弧流的影响

$N_v$ ——针阀开度； $I_a$ ——弧流。

通过图 4 可以看出，随着弧压的增加，弧流有所上升，并有趋于饱和的特征。这主要是由于在灯丝发射电子恒定、进气量不变的情况下，弧压增加，电子能量随之增加，电离碰撞效率即电离碰撞截面增加，在宏观上表现为弧流增加；而当弧压超过一定值以后，电离碰撞截面又减小，表现为弧流随弧压的增加幅度变小了。

图 5 是在灯丝电压（灯丝平均电流 120A）、弧

电压不变，进气时刻为提前预电离 3.35s，进气时间为 3.5s，调节进气量（针阀开度）对弧流的影响。

从图 5 中可以看出，针阀开度在 4.5 以下时，随进气量的增加弧流只有很小的变化，这是由于在灯丝电压、弧压不变的情况下，电子的能量和数量都一定，而由于工作气体的密度太低，电离碰撞截面并没有随着针阀开度的增加而有明显增加，因此弧流没有明显变化。但当针阀开度在 4.5 以上时，弧流随针阀开度的增加上升明显。

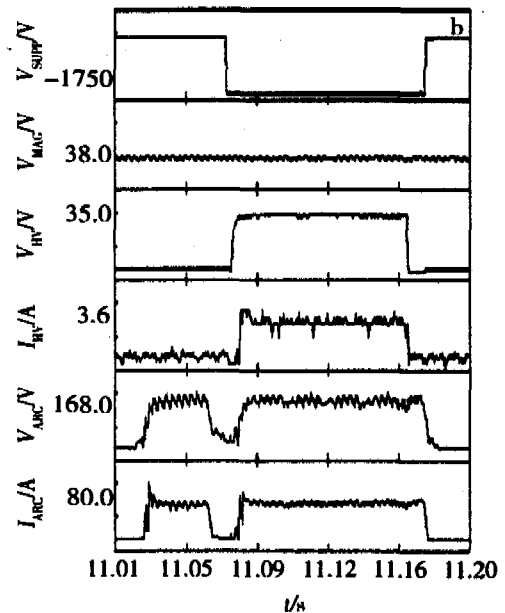
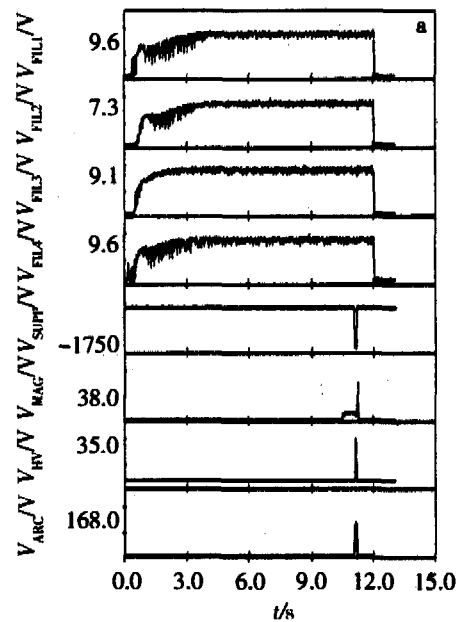


图 6 束流引出时各路电源的波形  
a——电源电压波形；b——波形展开图。

## 4.2 束流引出实验

中性束引出时, 在起弧的基础上还需要投入正、负高压电源和偏转磁体电源等。正、负高压电源与正常起弧同步, 而偏转磁体则覆盖整个起弧时间段, 可根据实际需要改变偏转磁体投入时刻。当系统正常时, 正常起弧时间就是出束时间。若在此期间系统发生故障, 如打火、四极管过流等, 保护系统会及时响应, 封锁触发脉冲, 关断四极管, 切除高压输出, 在故障更为严重的情况下, 撬棒保护动作, 泻放电容器组的能量, 以起到保护离子源电极的作用。

束流引出时各路电源的波形如图 6 所示。束流引出时将 4 根灯丝的平均电流控制在 120A, 弧压为 168V, 进气时刻为提前预电离 3.35s, 进气时间为 3.5s, 针阀设置在 4.87。从图 6b 可以看出, 弧流达到了 80A, 在高压 35kV 时引出离子流达到了 3.6A。从功率测量靶上热电偶测得的数据, 经计算得出束流功率约为 50kW, 中性化效率约为 40%。

在束流引出时, 为了保证系统能够稳定的出束, 并且尽可能地避免离子源内打火, 一方面希望离子源起弧室内的气压尽可能低, 只要能够保证有足够的弧流即可; 另一方面又希望中性化室的气压足够高以提高中性化效率, 从而提高束流功率。但是由于目前系统中只有一种进气手段, 即是从离子

源头部进气, 一部分供给起弧使用, 一部分供给中性化室使用, 这就使得在调节进气量的时候产生了矛盾, 这种矛盾使我们在调试束流以及束功率时受到了限制。

## 5 结束语

该套 DNB 系统的恢复与建成, 使 HT-7 装置上又增添了一种重要的诊断手段, 它能够诊断等离子体离子温度和旋转速度等重要参数。经过 HT-7 实验的锻炼, 证明了该套系统的可靠性、稳定性以及可信性, 也为今后在 HT-7 上获得良好的电荷符合交换光谱信号奠定了基础。

## 参考文献:

- [1] 石秉仁. 磁约束聚变原理与实践 [M]. 北京: 原子能出版社, 1999.
- [2] David Terry, James W Jagger, David Pavlovsky, et al. Power system for the text diagnostic neutral beam source [A]. Twelfth Symposium on Fusion Engineering, Monterey [C]. California: the University of Texas, 1987. 452.
- [3] David A Pavlosky, James W Jagger, David Terry, et al. Control system for the TEXT diagnostic neutral beam source [A]. Twelfth Symposium on Fusion Engineering, Monterey [C]. California: the University of Texas, October, 1987. 651.

## Power system for diagnostic neutral beam and study on the experiment of neutral beam extraction

ZHANG Jian<sup>1</sup>, LIU Bao-hua<sup>1</sup>, HU Li-qun<sup>1</sup>, DU Shao-wu<sup>2</sup>, HT-7 DNB Group<sup>1</sup>

(1. Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Science, Hefei 230031;

2. Energy Research Institute, Hefei University of Technology, Hefei 230009)

**Abstract:** Control system of power supply for HT-7 diagnostic neutral beam source was composed of PLC, timer and master control logic. The experimental results show the good facility and reliability. The arcing and beam extraction are studied experimentally. The influences on the beam current are observed by adjusting arc voltage and gas injection at different cases. The neutral beam power of 50kW and beam current about 3.6A were obtained in this operation period with 35kV HV and 80A arc current.

**Key words:** Diagnostic Neutral Beam; Power Supply System; HT-7