

CN9100170

CNIC-00382

SIP-0040

# 中国核科技报告

CHINA NUCLEAR SCIENCE & TECHNOLOGY REPORT

HL-1装置 ZLJ 等离子体电流波形  
调节系统的研制与实验

DEVELOPMENT OF PLASMA CURRENT  
WAVEFORM ADJUSTING SYSTEM ZLJ  
FOR TOKAMAK DEVICE HL-1

*(In Chinese)*



原子能出版社

北京·1989·12

中国核情报中心

China Nuclear Information Centre

CNIC-00382

SIP-0040

# HL-1装置 ZLJ 等离子体电流波形调节 系统的研制与实验

王尚柄 胡浩天 唐芳群 周永正

储秀中 程家顺 高云霞

(西南物理研究院,四川)

## 摘 要

在 HL-1 装置欧姆加热中使用 ZLJ 等离子体电流波形调节系统后,实现了典型托卡马克放电波形调节,例如:80kA,450ms 长平顶;100kA,200ms 上升;200ms 平顶以及 180kA,400ms 慢上升等一系列不同速率慢上升等离子体电流规则波形。介绍了该系统的设计原理和最初实验结果。

**DEVELOPMENT OF PLASMA CURRENT WAVEFORM  
ADJUSTING SYSTEM ZLJ FOR TOKAMAK DEVICE HL—1**

*(In Chinese)*

**Wang Shangbing Hu Haotian Tang Fangqun Zhou Yongzheng**

**Chu Xiuzhong Cheng Jiashun Gao Yunxia**

**(SOUTHWEST INSTITUTE OF PHYSICS, SICHUAN)**

**ABSTRACT**

The control of some typical Tokamak discharge waveforms has been achieved by using plasma current waveform adjusting system ZLJ in the ohmic heating of HL—1. The discharge waveforms include a series of regular plasma current waveforms with various slow rising rate, such as 80kA, 450ms long flat—topping; 100kA, 200ms rising; 200ms flat—topping and 180kA, 400ms slow rising etc. The design principle of the system and the initial experimental results are described.

# 前 言

HL-1装置ZUJ等离子体电流波形调节系统是一个具有某些特色的系统:(1)是国内首次在大型直流机组上使用可控硅触磁装置;(2)采用先进技术,在国内首先使用微处理机可编程序调节装置,调节直流机电压随时间变化;(3)巧妙地采用调节直流机电压的方法来控制等离子体电流波形,和其他方法比较,这是一种花钱最少,效果显著的方法。本系统研制完成后,在1988年HL-1物理实验中先后调出了80kA、450ms长平顶;100kA、200ms上升、200ms平顶以及180kA、400ms慢上升等不同斜率慢上升等离子体的电流波形。它在HL-1装置上首次实现典型托卡马克规则波形放电,大大提高了HL-1装置等离子体电流波形控制水平,结束了放电波形不可控的状态。

## 1 原理分析

HL-1装置欧姆加热供电系统,在物理实验中是以电容器组放电建立等离子体电流的波头,以12MW直流机组供给稳定电压维持等离子体电流长达数百毫秒的平顶段。电容器组对放电波形只能作3~20ms范围内的调整。直流机组因缺乏调节手段,只能作平顶供电。多年来,物理实验所希望的慢上升波形和完全平直的波形等典型的托卡马克放电波形都无法在HL-1上实现。我们着眼于建立直流机组的调节手段,以控制放电波形,实现上述目标。其原理如图1所示。

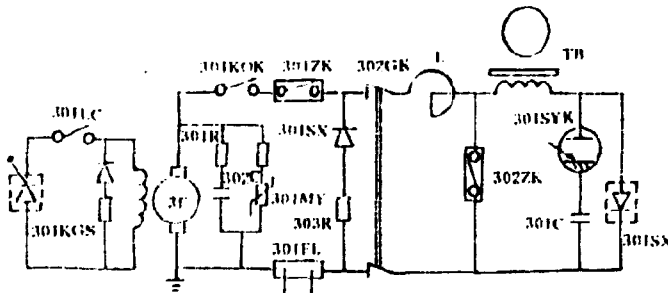


图1 欧姆加热电源主回路原理图

3F——脉冲直流机,ZMF-315/30,500V,30kA; 301KGS——可控硅触磁装置; 301KOK——直流快速开关,DS10-30Z/15,1500V,3kA; 301ZK——操作开关,ZN-10/1000,1000A; 301R——ZX1-2/28,0.14Ω; 301C——过电压保护电容器组,CZJN,100μF,60台; 301MY——高压电阻,MYN1-600V; 301FL——分压器,FL10kA/75mV; 302GK——隔离开关,GN6-10T/600; 302ZK——换流开关,KT-25; 301C——波头电容器组,MY5/190,190μF,288台; 301SYK——水银整流器SF7; 301SX——保护二极管组,500A,24路; 302SX——续流二极管组; 303R——电阻ZX1-1/28; L——电感储能线圈,TB——HL-1长脉冲变压器。

环绕HL-1长脉冲变压器中心柱的绕组,不仅有原边欧姆加热绕组和副边等离子体环,还有内真空室波纹管、偏磁绕组、水平磁场绕组和垂直磁场绕组,计算起来相当复杂,为了突出等离子体电流的波形问题,在此我们只考虑电容器组301C建立波头后直流机3F供电的平顶段、原边欧姆加热绕组和作为副边的等离子体环的关系。

通过分析欧姆加热电源等效电路,在铁芯变压器未饱和时,可得出等离子体电流  $I_p$  的公式如下:

$$I_p = k_1 \frac{(U - U_1)}{R} (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad (1)$$

在分析直流机励磁回路等效电路之后,进一步得出:

$$I_p = \frac{k_1}{R} [1.35k_2 V (1 - e^{-\frac{t}{\tau_1}}) \cos \alpha - V_1] [1 - e^{-\frac{t}{\tau}}] \quad (2)$$

式中:

- $k_1$  —— 铁芯变压器变比;
- $k_2$  —— 直流机励磁变比;
- $U$  —— 直流机电压;
- $U_1$  —— 续流二极管压降;
- $V$  —— 励磁整流柜交流侧电压;
- $R$  —— 欧姆加热电源主回路电阻, 13.85m $\Omega$ ;
- $\tau$  —— 欧姆加热电源主回路时间常数, 0.566 s;
- $\tau_1$  —— 励磁回路时间常数, 0.14s;
- $\alpha$  —— 励磁可控硅移相角。

在其他条件不变时,分别以  $U, t$  和  $\alpha, t, \tau_1$  为变量,可以得出下面两个公式:

$$I_p = f(U, t)$$

$$I_p = f(\alpha, t, \tau_1)$$

可得出如下结论:适当选取  $t$ ,采用开环调节  $U$  的波形是能够控制  $I_p$  的大小按一定规律变化的,即能获得可控制的等离子体电流波形。

## 2 研制内容

本系统的研制内容主要分为两个部分:可控硅励磁装置和微处理机可编程序调节装置。

### 2.1 可控硅励磁装置

可控硅励磁装置采用三相全控整流线路。其主回路包括自动空气开关、整流变压器、可控硅元件和灭磁开关。其保护方式,除采用通常使用的交流侧电流速断、交流侧过电压保护、硅元件过电流保护、硅元件过电压保护、直流侧过电流保护等常规保护方式外,还使用了励磁绕组一点接地保护,特别是采用了高能氧化锌压敏电阻器作为直流侧过电压保护,并合理地利用直流机励磁绕组大电感的滤波作用,大大削弱了可控硅整流柜对直流机产生的过电压作用和谐波影响,使大型直流机成功地与可控硅励磁装置连上。

### 2.2 微处理机可编程序调节装置

该装置主要由微处理机 APPLE II、接口控制箱、总线转换板、开关量输入输出板、A/D 转换板、隔离变压器、干扰抑制器、特种微机稳压电源以及多道给定电压调节器等设备组成。

本装置在完成对 HL-1 等离子体电流波形控制的过程中,还解决了在 HL-1 放电中对微机系统带来的空间干扰、电源干扰等多种强干扰影响问题,保证了微机系统的正常工作。

工作过程如下:首先根据实验要求,开关量输出口地址和程序控制的延时编制微处理机

程序,存入磁盘,然后预置多道给定调节器各档给定值。在实验中,控制信号从开关量输入口进入启动微处理机程序。微处理机在运行程序过程中,通过总线转换,不断按开关量输出口地址接通整流器的预置控制电压,并按微处理机循环次数的不同,自动控制接通时间。根据不同实验要求,通过修改微处理机程序和改变各档给定值来调节直流励磁电压,以达到控制等离子体电流波形的目的。微机可编程序调节装置工作示意图如图2:

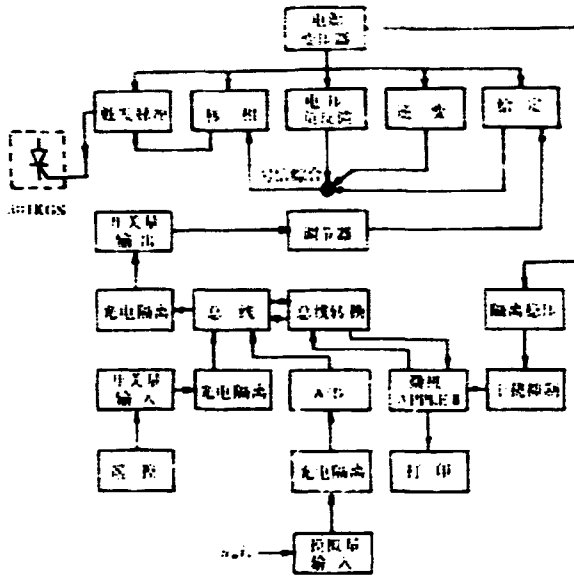


图2 微机可编程序调节装置工作示意图

### 3 实验结果

#### 3.1 以5mH电感线圈为负载的模拟试验

首先,以5mH电感线圈代替HL-1铁芯变压器,进行欧姆加热电流波形调节试验。在近百次放电试验中,ZLJ调节系统通过改变给定值和修改微机程序,以改变直流机输出电压波形。欧姆加热电源电流在换流后调出了慢上升区,从而为物理实验准备了条件。

#### 3.2 HL-1等离子体电流波形控制试验

在1988年HL-1物理实验BI中,开始了等离子体电流波形控制试验,ZLJ调节系统初步分5档预置给定值和微机延时。通过理论计算,预计直流机励磁电压波形。在HL-1实验中以此为依据,通过多次试验取得了以下实验结果。

(1)在HL-1上,第一次实现了80kA,450ms长坪的等离子体电流波形。

(2)在HL-1上,第一次实现了100mA,200ms上升200ms平顶的等离子体电流波形(直流机电压与电流波形见图3,等离子体环电流与环电压波形见图5)。

(3)在HL-1上,实现了100kA,250ms上升,300ms平顶的等离子体电流波形(等离子体环电流与环电压波形如图6)。

(4)在HL-1上,实现了180kA,400ms慢上升的等离子体电流波形(等离子体环电流与

环电压波形如图 7)。

为了便于比较,我们列出未加 ZLJ 调节系统时的等离子体环电流与环电压波形(见图 4)。

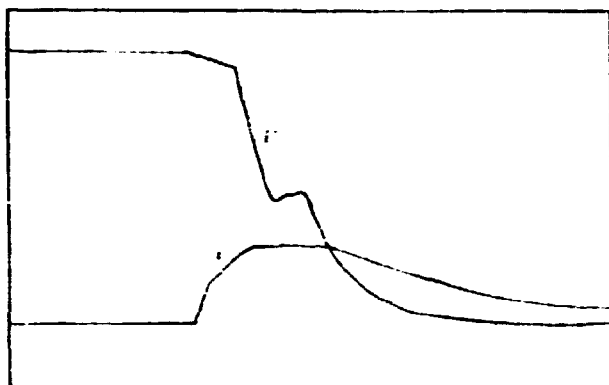


图 3 直流电压与电流波形

$V$ ——直流电压 6.7V/mm;  $i$ ——直流电流 307A/mm; 时标: 100ns/div.

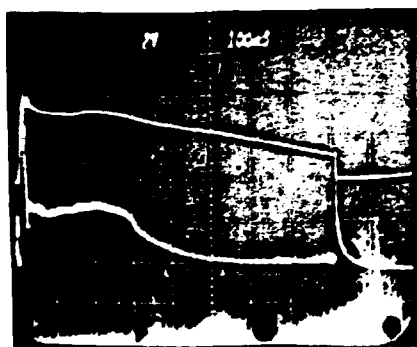


图 4 未加 ZLJ 调节系统时的环电流与环电压波形

$I_p$ ——等离子体电流, 50kA/div(上);  
 $V_p$ ——环电压 2V/div(下);  
 时标: 100ns/div.

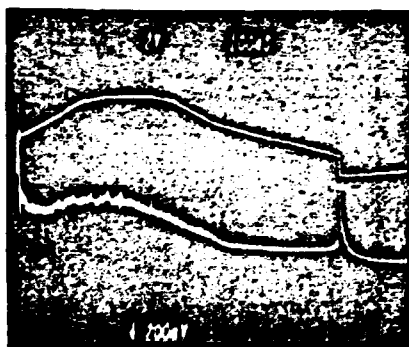


图 5 100kA, 200ms 上升, 200ms 平顶的等离子体电流波形

$I_p$ ——等离子体电流 50kA/div (上);  
 $V_p$ ——环电压 2V/div(下);  
 时标: 100ns/div.



图6 250ms上升,300ms

平质的等离子体电流波形

$I_p$  —— 等离子体电流 50kA/div(上一);

$V_e$  —— 环电压 2V/div(上二);

时标: 100ms/div.

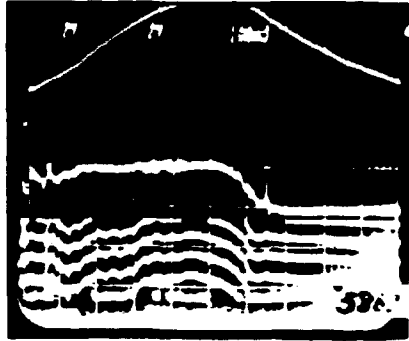


图7 180kA,400ms慢上

升的等离子体电流波形

$I_p$  —— 等离子体电流 50kA/div(上一);

$V_e$  —— 环电压 2V/div(上二);

时标: 100ms/div.

#### 4 结束语

ZLJ 调节系统在 HL-1 上实现了具有慢上升特点的典型托卡马克放电电流波形, 证明我们的研制工作是成功的。这一研制成果已开始物理实验中发挥作用。它改善了磁场穿透性能, 减少了电流上升阶段的杂质和 MHD 不稳定性, 进一步优化了等离子体品质。同时, 它还还为等离子体电流反馈控制打下了基础。

ZLJ 调节系统在 1988 年 HL-1 物理实验中已投入了近 2000 次装置放电。在实验中, 使用可靠, 调节精确, 重复性好, 受到好评, 被评为 1988 年 HL-1 实验重要成果之一。



# CHINA NUCLEAR SCIENCE & TECHNOLOGY REPORT



书号:15175-00382

P.O.Box 2103

Beijing, China

**China Nuclear Information Centre**