

短文

# 托卡马克等离子体的高精度快响应 平衡控制系统的研究

苏建龙 潘 垣 刘保华

(中国科学院等离子体物理研究所 合肥 230031)

**摘 要** 为了实现高功率波加热下等离子体的水平位移平衡控制,针对 HT-6M 托卡马克装置薄壁真空室的特点,成功地研制了由载流等离子体、薄壁真空室和反馈场磁体所组成的平衡控制系统. 用 1MW 大功率 GTO 直流斩波器作为反馈控制磁场电源,并采用 Bang-Bang 控制模式的技术,使该系统响应快、控制精度高. 在各种实验条件下,等离子体的实际水平位置控制在  $\pm 3\text{mm}$  以内,相应的控制精度小于 1.5%.

**关键词** 核聚变, 等离子体, 平衡控制.

## RESEARCH ON PLASMA EQUILIBRIUM CONTROL SYSTEM OF HIGH PRECISION AND FAST RESPONSE FOR THE TOKAMAK

SU Jianlong PANG Yuan LIU Baohua

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

**Abstract** In order to achieve plasma equilibrium control of horizontal position under high-power wave heating, an equilibrium control system for the HT-6M Tokamak with a thin-wall vacuum vessel has been studied and realized. The system is composed of the current carrying plasma, thin-wall vacuum vessel and feedback control field magnet. A 1MW GTO DC chopper is adopted for the power supply of feedback control magnetic field while the Bang-Bang control mode is used in this system. It makes the system have the ability of fast response and high precision. Under various conditions, the horizontal deviation of the controlled plasma is less than  $\pm 3\text{mm}$  with a corresponding controllable precision better than 1.5%.

**Key words** Nuclear fusion, plasma, equilibrium control.

## 1 引言

托卡马克装置中的等离子体是一个为导电壳所包围,处于复杂的电磁环境中的电流环.在受控核聚变等离子体实验中,适时控制等离子体在环形真空室中的平衡位置是首要解决的问题.早期利用导体壳上的涡流实现被动的反馈控制,现在采用外加磁场的方法,对等离子体进行有目的磁约束,以达到平衡控制的要求.HT-6M托卡马克是用来从事磁约束等离子体物理研究的一种中型装置,它的水平位移平衡垂直磁场由程序垂直场线圈、反馈场线圈两组线圈提供.程序垂直磁场预先设定程序,大致跟踪等离子体平衡对垂直磁场要求的变化;反馈磁场则是为了解决等离子体的随机扰动、提高位置的精度及系统的快速响应能力.由于等离子体的内部运动形式和能量交换相当复杂,目前还没有精确的数学模型能描述,这为准确控制等离子体的水平位移带来一定的难度.

本文系统地分析了 HT-6M 托卡马克等离子体水平位移平衡控制系统的结构,并采用大功率 GTO 斩波器作为反馈控制磁场电源和 Bang-Bang 控制模式的技术,在 HT-6M 装置上取得了较好的实验效果.为今后中大型托卡马克等离子体平衡控制研究提供了宝贵的经验.

## 2 托卡马克等离子体水平位移平衡控制系统的设计

当 HT-6M 装置进行高功率的离子回旋共振加热实验时,导致等离子体的位移有一突变.这一突变的平衡将完全依靠反馈场提供快速响应的磁场增量来调节.故为了使控制系统具备快响应的品质,反馈场线圈采用大功率 GTO 直流斩波器做为供电电源的方案.由此组成等离子体水平位移平衡控制系统的基本结构如图1所示.该系统由8098单片机、直流斩波器电源,反馈场线圈、真空室、等离子体环以及水平位移测量系统组成.

其工作原理为:等离子体位移  $x_0$  经水平位移测量系统采样之后,经8098单片机 A/D 转换并与预先设定的等离子体位移  $x_r$  相比较得到一偏差  $e$ .对  $e$  进行修正后成为控制量去控制反馈场电源的开通和关断.达到改变反馈场线圈中电流,从而调节反馈磁场大小,将等离子体控制在预先设定的位置上的目的.

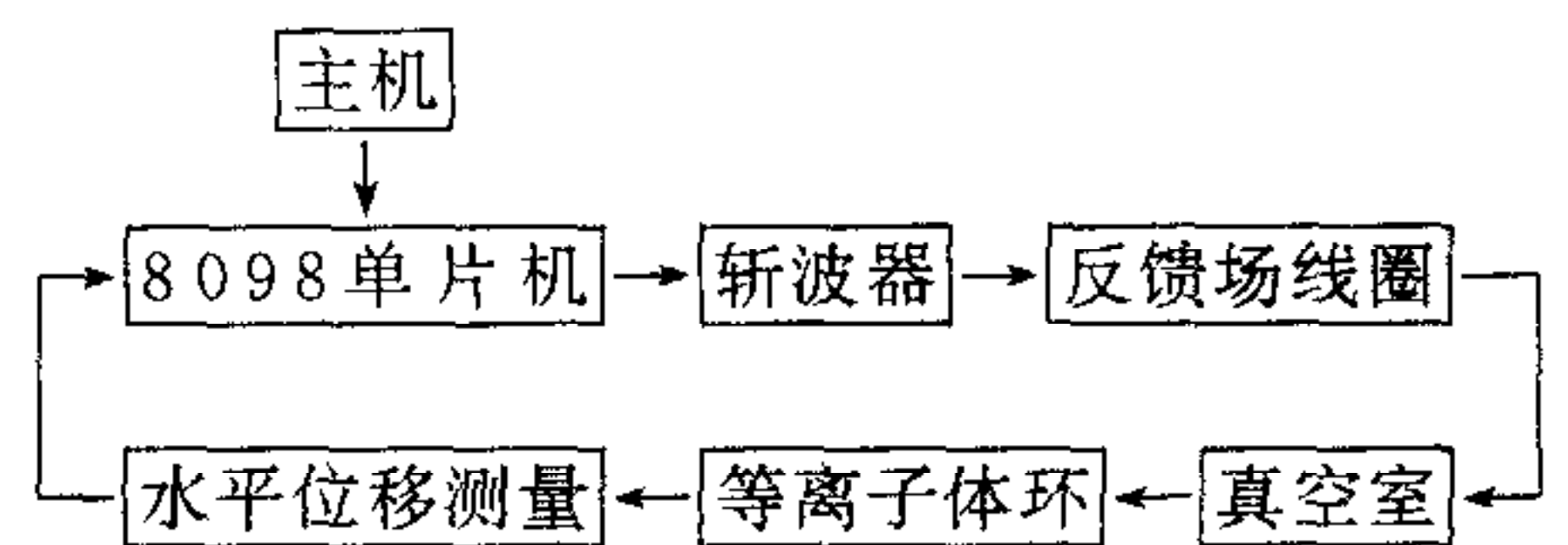


图1 等离子体平衡控制系统结构图

在整个闭环控制系统中,斩波器可视为一个非线性功率放大器,当等离子体偏离平衡位置需要一定的反馈磁场投入时,斩波器输出电压为  $U_n$ ,反之为0.其反馈场线圈电流  $I_{vf}$  与控制量  $U$  之间的关系为

$$T_f \frac{dI_{vf}}{dt} + I_{vf} = K_c U, \quad U \begin{cases} U = U_n, e > 0, \\ U = 0, e \leq 0. \end{cases} \quad (1)$$

上式中  $e = x_0 - x_r$  为位移输出值  $x_0$  与设定值  $x_r$  之差;  $T_f, K_c$  为反馈场线圈时间常数和电导.

真空室壁是个导电壳,可视为一惯性环节,得到真空室内反馈场与反馈场线圈电流之



间的关系为

$$T_s \frac{dB_{vf}}{dt} + B_{vf} = k_f I_{vf}, \quad (2)$$

式中  $T_s$  是真空室对于反馈场的趋肤时间;  $k_f$  为磁场灵敏系数. 将(2)代入(1), 进行拉氏变换, 得到斩波器输出电压  $U(s)$  与反馈磁场  $B_{vf}(s)$  之间的关系

$$\frac{(1 + sT_f)(1 + sT_s)}{K_f \cdot K_c} B_{vf}(s) = U(s), \quad \begin{cases} U(s) = U_n, & e > 0, \\ U(s) = 0, & e \leq 0. \end{cases} \quad (3)$$

载流等离子体动态平衡的传递函数<sup>[1]</sup>

$$X_0(s) = \frac{k_s}{sT_s} [B_{\perp}(s) - B_{\perp 0}(s)] - \frac{k_s(1 + sT_s)}{sT_s} B_{vf}(s). \quad (4)$$

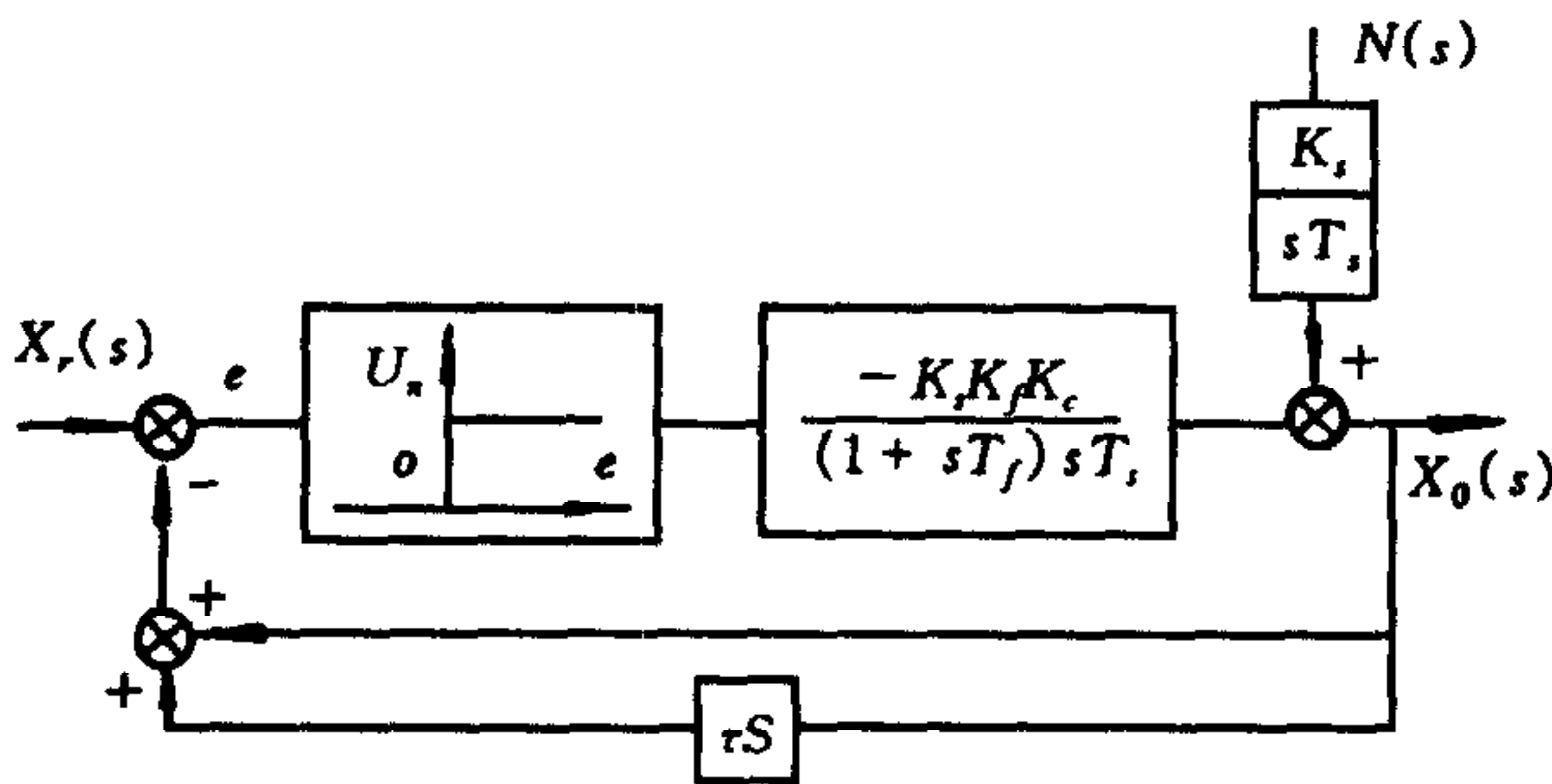


图2 控制系统传递函数图

上式中  $B_{\perp}(s)$  是平衡等离子体所需要的理论垂直场;  $B_{\perp 0}(s)$  为程序垂直场;  $X_0(s)$  为等离子体的位移;  $k_s$  为反应系数. 为使该系统具备快速响应的特性, 采用时间最优控制的 Bang-Bang 控制器. 并引入速度反馈校正以改善系统的响应特性. 可得校正后的传递函数图. 令  $N(s) = B_{\perp}(s) - B_{\perp 0}(s)$  为垂直场的阶跃扰动量, 如图2所示.

由于该系统是采用了斩波器和8098单片机的数控系统, 其位移  $x_0$  的采样频率选定对系统的稳定性和误差影响相当大. 根据采样定理, 并考虑到8098单片机和斩波器的时延, 选定系统的最佳采样频率为5kHz. 另外误差信号  $e = [x_0(s) + \tau \dot{x}_0(s)] - x_r(s)$ , 其中  $\tau$  为速度反馈系数.  $\dot{x}(s)$  由单片机当时采样值  $x_{0n}$  减去上一时刻采样值  $x_{0(n-1)}$  并除以采样间隔时间  $\Delta t$  所定.

### 3 控制系统的稳定性分析

由系统传递函数框图可知其系统的运动方程为

$$T_f \ddot{x}_0 + \dot{x}_0 = \frac{k_s}{T_s} (B_{\perp} - B_{\perp 0}) - \frac{k_c k_f k_s}{T_s} U, \quad U \begin{cases} U = U_n, & e > 0, \\ U = 0, & e \leq 0. \end{cases} \quad (5)$$

令  $\frac{k_s}{T_s} = A_0$ ,  $\frac{k_c k_f k_s}{T_s} = E_0$ ,  $B_{\perp} - B_{\perp 0} = N$ ; 假设输入量  $x_r$ 、扰动量  $N$  分别为一阶跃函数; 由  $e = x_0 + \tau \dot{x}_0 - x_r$  推导可得<sup>[2]</sup>

$$T_f \ddot{e} + \dot{e} = A_0 N - E_0 U, \quad U \begin{cases} U = U_n, & e > 0, \\ U = 0, & e \leq 0. \end{cases} \quad (6)$$

当  $e > 0$  时, 相平面轨迹趋于渐近线  $\dot{e} = A_0 N - E_0 U_n$ ; 当  $e \leq 0$  时, 相平面轨迹趋于另一渐近线  $\dot{e} = A_0 N$ . 如图3所示.

显然保持系统稳定的条件是  $E_0 U_n > A_0 N$ , 其物理意义表明只有当反馈场提供的瞬时磁场强度  $B_{vf}$  大于垂直场阶

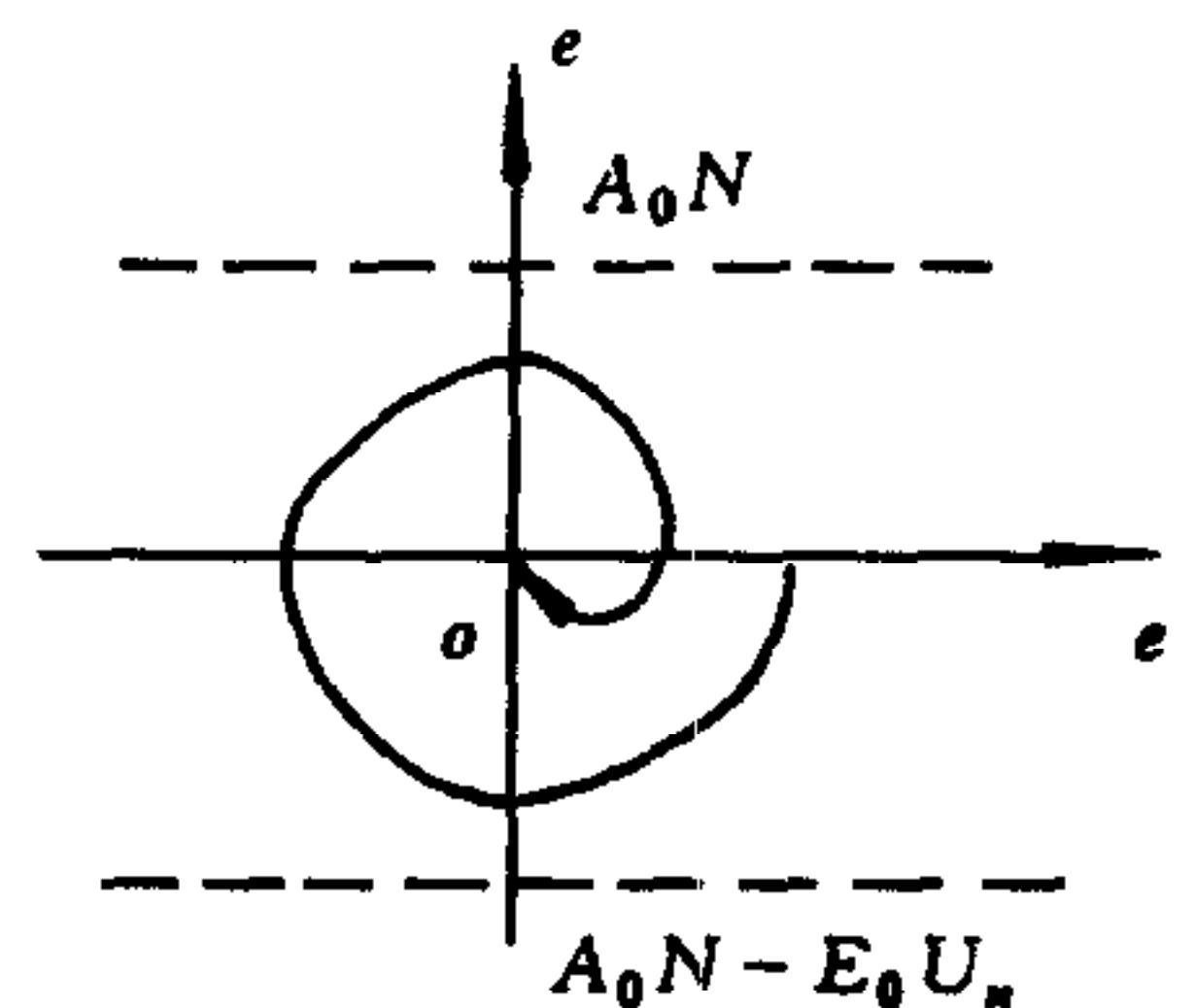


图3 控制系统根轨迹图

跃扰动量  $N$  时,系统才是稳定的,其系统的根轨迹最终趋于原点.

#### 4 高功率波加热下的等离子体水平位移平衡控制实验<sup>[3]</sup>

设定等离子体位移  $x_r = 2.2\text{cm}$ ,在等离子体电流  $I_p = 50\text{ kA}$ ,离子回旋共振加热  $P_{\text{ICRH}} = 300\text{ kW}$ ,低杂波驱动功率  $P_{\text{LHCD}} = 120\text{ kW}$  的情况下,实验可得位移偏差  $e \leq \pm 2.9\text{mm}$ ,精度达到1.5%,如图4所示.

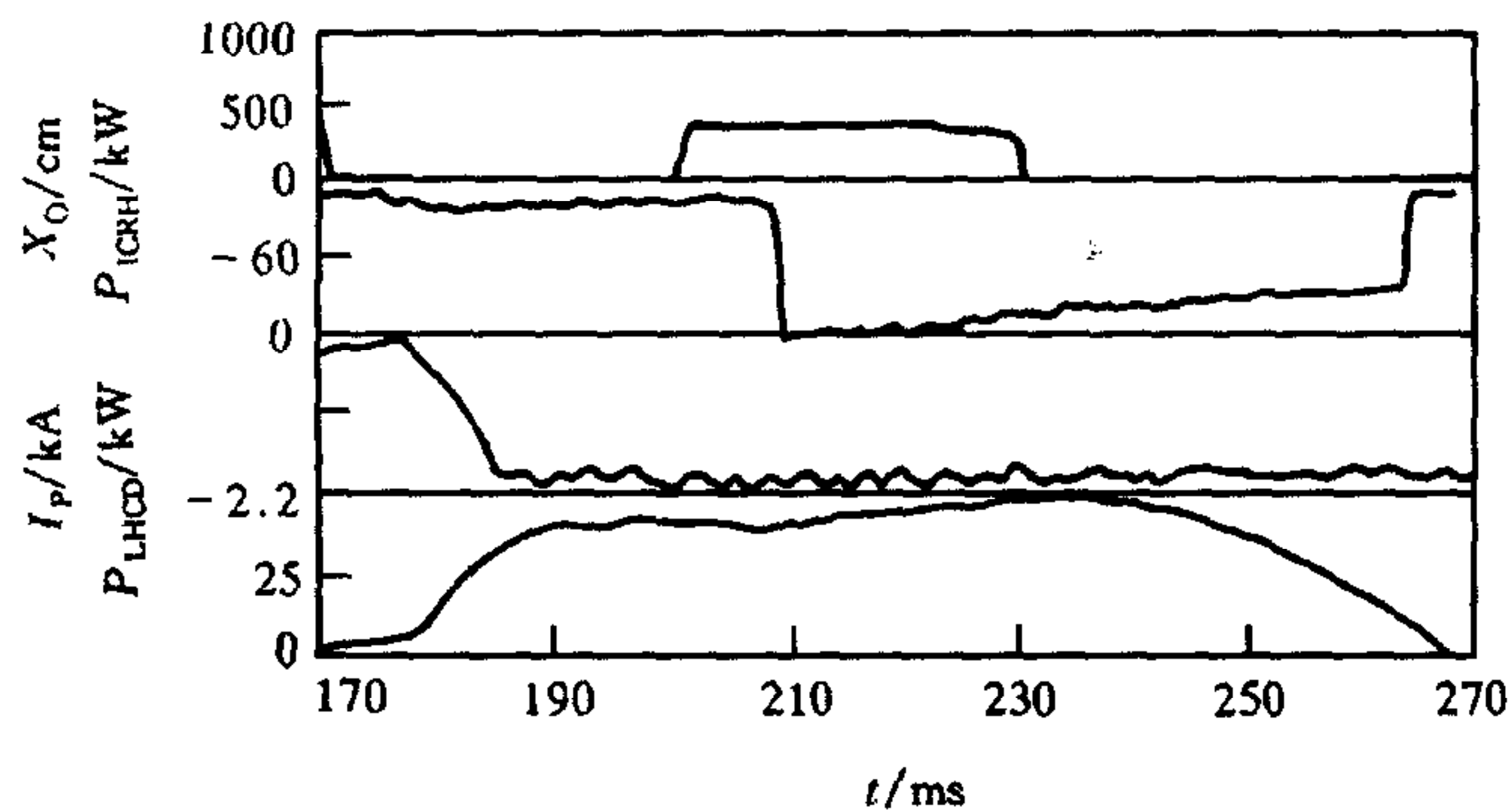


图4 等离子体水平位移平衡控制实验

#### 5 结论

通过2年的实验运行,该系统运行可靠,并取得较好的实验效果,现将结论总结如下:

1) 采用大功率 GTO 直流斩波器作为反馈磁场的电源和带微分环节的 Bang-Bang 控制模式,可极大地提高反馈控制系统的快响应能力和控制精度.

2) 该控制系统的研制成功,在理论上为中大型托卡马克等离子体水平位移平衡控制提供了重要的实验经验.

#### 参 考 文 献

- 1 Mukhovatov V S, Shafranov V D. Plasma Equilibrium in a Tokamak. *Nucl. Fusion*, 1971, 11(3):605—608
- 2 戴忠达编. 自动控制理论基础. 北京:清华大学出版社,1992. 441—465
- 3 苏建龙. 高功率波加热下的等离子体水平位移平衡控制[博士论文]. 合肥:中国科学院等离子体物理研究所,1996, 75—80

**苏建龙** 1964年生,1987年毕业于合肥工业大学电机专业,1996年获中国科学院等离子体物理研究所工学博士学位,现在其博士后站从事低温等离子体处理有机废水的机理研究.

**潘 垣** 1933年生,中国工程院院士,中国科学院等离子体物理研究所研究员,主要研究方向为核聚变与等离子体工程.