

受控核聚变托卡马克等离子体水平位移平衡控制系统

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: 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的结构和控制方式, 提出了相应的数学模型和控制模式, 并在 HT-6M 托卡马克装置上成功地进行了实验. 其独特的技术方案为 HT-7U 超导托卡马克的位形反馈控制提供了理论基础和实践经验.

关键词: 核聚变; 等离子体; 平衡控制

1 前 言

在世界能源日益缺乏, 环境污染愈加严重的今天, 一种取之不尽而又毫无污染的新能源正引起人类社会愈加广泛的重视, 这就是核聚变所产生的能源. 托卡马克(Tokamak)正是从事该项物理实验所必不可少的装置. 在所进行的核聚变等离子体物理实验中, 适时控制等离子体在环形真空室中的平衡位置是成功进行物理实验的基本条件之一. 这一控制已由早期利用真空室上的涡流实现被动反馈控制, 发展到用闭环反馈系统实现外加磁场的主动负反馈控制. 并对等离子体进行有目的磁约束, 以达到平衡控制的要求. 随着物理实验的深入进行, 对平衡控制的工程技术要求也随之提高. 同时现代电力电子技术的发展也为工程技术在快速、精确控制等离子体位置的实验中提供了必要的条件.

本文针对 HT-6M 托卡马克装置在进行高功率波加热时, 为维持等离子体平衡而对平衡控制技术提出的特殊要求. 在系统地分析了高功率波加热对等离子体平衡的影响基础上, 提出了相应的控制系统数学模型和控制模式. 并在 HT-6M 装置上成功地进行了实施. 取得了较好的实验效果. 为今后中大型托卡马克等离子体水平位移平衡控制的研究提供了宝贵经验.

2 托卡马克等离子体平衡控制的方式

托卡马克等离子体平衡控制有三种方法: ① 被动反馈控制, ② 主动反馈控制, ③ 主被动反馈控制. 理想导体壳中的载流等离子体柱的平衡是恒稳的, 它呈完全的被动反馈控制. 但早期的托卡马克如 T-3, T-4 等, 紧贴真空室壁的厚而近似封闭的导体壳并非理想导体. 当等离子体处于非平衡态而在真空室中发生偏移运动时, 导电壳上感应涡流与等离子体电流相互作用, 从而起到限制等离子体运动而达到近似的平衡. 这是一种不完全的被动反馈控制. 到七十年代后期, 随着托卡马克装置尺寸扩大, 参数提高和放电持续时间延长, 这种被动反馈控制已被主动反馈控制所取代. 即由可控电源供电的线圈取代导体壳, 利用线圈中电流产生的磁场来代替涡流的作用. 该磁场由程序垂直场和反馈垂直磁场组成, 程序垂直场线圈中的电流预先设定程序, 大致跟踪等离子体平衡对垂直场要求的变化. 反馈垂直磁场则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. 从这几种控制方法上看, 被动反馈控制具有响应快速和自动跟踪的品质, 但始终有一位移并保持平衡的持续时间有限. 主动控制恰恰相反, 因此, 某些装置采用了主被动兼有的反馈控制. 这样可大大降低对主动反馈控制系统快响应指标的要求.

HT-6M 托卡马克是一个从事磁约束等离子体物理研究的中型装置,它的水平位移平衡垂直场由程序垂直场线圈、反馈场线圈两组线圈提供,分别可提供总平衡场的 80%,20% 左右.由于 HT-6M 是一台空心变压器结构、无导体壳和薄壁真空室的托卡马克,真空室材质为不锈钢,壁厚仅 5mm,其对外场响应的趋肤时间 T_s 仅为 0.8ms.故 HT-6M 装置对等离子体的平衡几乎不提供被动反馈控制效应,必须完全依靠快速响应的主动反馈控制.

3 托卡马克载流等离子体的数学模型及物理意义

托卡马克中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,其内部的运动方式和能量交换是相当复杂的.要想用一个精确的数学模型来全面地描述其运动变化规律是非常困难的,但如果适当地简化和假设反而有利于对其规律性的认识.在此,为把握等离子体柱的整体特性,不考虑等离子体内部的运动变化而只考虑其在外部磁场作用下的运动规律.假设等离子体电流 I_p 为常数,在薄导电壳的情况下,等离子体的运动方程^[1,2]为:

$$\frac{dx}{dt} = \frac{2\pi b^2}{\mu_0 I_p} \left[\frac{1}{T_s} (B_{\perp} - B_{\perp 0} - B_{vf}) - \frac{dB_{vf}}{dt} \right], \quad (1)$$

$$B_{\perp} = \frac{\mu_0 I_p}{4\pi R} \left(\ln \frac{8R}{a} + \beta_p + \frac{l_i - 3}{2} \right). \quad (2)$$

其中 $B_{\perp}$ 是平衡等离子体所需要的垂直场, $B_{\perp 0}$ 为等离子体电流 I_p 是常值时的程序垂直场,其为一定值. B_{vf} 为反馈控制垂直场. x 为等离子体电流 I_p 的位移, $T_s = \mu_0 \delta b \sigma / 2$ 是真空室对于反馈场的趋肤时间常数,其中 σ 为真空室的电导, δ 为真空室壁厚, l_i 为等离子体环的内电感, β_p 为热磁压化, R, a 分别为等离子体的大小半径. b 为真空室的小半径.对等离子体运动方程(1)式进行化简,并令 $K_s = \frac{2\pi b^2}{\mu_0 I_p}$, 得

$$B_{vf} + T_s \frac{dB_{vf}}{dt} + \frac{T_s}{K_s} \frac{dx}{dt} = B_{\perp} - B_{\perp 0}. \quad (3)$$

对此式进行拉氏变换,得

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

(4)式给出了等离子体位移 $x(s)$ 与反馈场 $B_{vf}(s)$ 和实际垂直场 $B_{\perp}(s)$ 之间的对应关系,式中 $B_{\perp}(s) - B_{\perp 0}(s)$ 为维持等离子体平衡所需的垂直场与实际程序垂直场之差.在没有反馈场时,单位长度的等离子体受到非平衡力为 $I_p \cdot [B_{\perp}(s) - B_{\perp 0}(s)]$.并在此力的作用下,发生移动.直到等离子体处于新的平衡态.由于在放电过程中,等离子体的能量运行形式相当复杂. $B_{\perp}(s) - B_{\perp 0}(s)$ 的变化规律很难定量给出,在此设 $N(s) = B_{\perp}(s) - B_{\perp 0}(s)$ 为系统的随机扰动量.由此得到载流等离子体位移和外加平衡磁场的动态关系传递函数框图如图 1 所示.

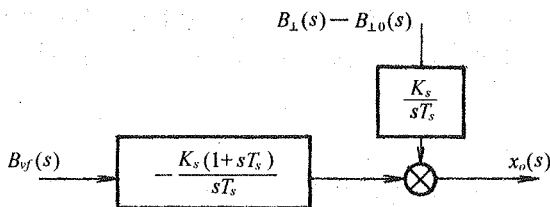


图 1 载流等离子体动态平衡传递函数框图

4 托卡马克等离子体水平位移平衡控制系统的传递函数

当 HT-6M 装置进行高功率的离子回旋共振加热(ICRH)实验时,由于等离子体的温度升高,等离子体热磁压比 β_p 有一跳跃,要求控制等离子体水平位移的平衡垂直场随之增大.由于 HT-6M 装置的特点,其程序垂直场一般不变,只有适时增加反馈垂直场才能满足要求.从控制角度看,当进行高功率波加热时,由于 β_p 提高很快,则由式(2)可知 $B_{\perp}(s)$ 增长也很快.由

于程序垂直场 $B_{\perp 0}$ 是一常数,故由(4)式可知其扰动量 $N(s) = B_{\perp}(s) - B_{\perp 0}(s)$ 相当于一阶跃扰动,它会导致等离子体的位移有一突变.这一突变的平衡将由反馈场调节.

因此,当 HT-6M 进行 1MW 高功率波加热时,必须完全依靠反馈场提供快速响应的主动反馈控制.为了使该控制系统具备快响应的品质,反馈场线圈采用大功率 GTO 直流斩波器作为供电电源的方案^[3].由此组成等离子体水平位移平衡控制系统的基本结构图.如图 2 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.其基本原理为:以等离子体位移 x 作为控制量, x 是等离子体电流重心相对于真空室小截面中心的偏移. x 经水平位移测量系统采样之后,经 8098 单片机 A/D 转换并与单片机为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(斩波器)的开通和关断.达到改变反馈场线圈中电流,进而调节反馈磁场大小的目的.从而满足等离子体平衡的需要,将等离子体控制在预先设置的位置上.

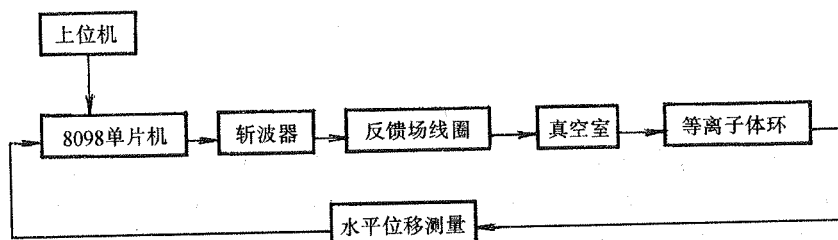


图 2 HT-6M 等离子体水平位移平衡控制系统结构图

在整个闭环控制系统中,斩波器实质上是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场投入时,斩波器输出电压为 U_n ,反之为 0.由于反馈场线圈为一电感负载,其电流 I_{vf} 与控制量 U 之间的关系为:

$$T_f \frac{dI_{vf}}{dt} + I_{vf} = K_c U, \quad U \begin{cases} U = U_n, & e > 0, \\ U = 0, & e \leq 0. \end{cases} \quad (5)$$

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

真空室壁是一个导电壳,外面的磁场进入真空室内有一定的驰豫时间,由此可将其视为一惯性环节,得到真空室内反馈场与反馈场线圈电流之间的关系为:

$$T_s \frac{dB_{vf}}{dt} + B_{vf} = k_f I_{vf}. \quad (6)$$

式中, $T_s = \mu_0 \sigma b \delta / 2$ 是真空室对于反馈场的趋肤时间, k_f 为磁场灵敏系数.将式(6)代入式(5),对其进行拉氏变换,得到斩波器输出电压 $U(s)$ 与反馈磁场 $B_{vf}(s)$ 之间的关系:

$$\frac{(1 + T_f s)(1 + T_s s)}{K_f \cdot K_c} B_{vf}(s) = U(s), \quad \begin{cases} U(s) = U_n, & e > 0, \\ U(s) = 0, & e \leq 0. \end{cases} \quad (7)$$

由载流等离子体动态平衡的传递函数式(4),可得到整个控制系统的传递函数框图.为了使该系统具备快速响应的特性.采用 Bang-Bang 控制器进行位置平衡控制.同时为了使该系统超调量减小,调节时间缩短,改善系统的响应特性,引入速度反馈校正.如图 3 为校正后的传递函数图.

其控制规律是明确的,误差信号: $e = x_0(s) + \tau \dot{x}_0(s) - x_r(s)$, 式中 e 为位移输出值 x_0 及其微分量与位移设定值 x_r 之差. τ 为速度反馈系数,当 $e > 0$ 时,斩波器输出电源电压 U_n . 反之,当 $e \leq 0$, 斩波器输出为 0.

5 控制系统稳定性分析

由于该系统是采用了斩波器和 8098 单片机的数控系统, 其位移输出值 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, 如要采样信号不失真, 只须信号的采样频率大于该系统最高频率的两倍以上。从该系统的开环传递函数可知, 其最高频率约为

400Hz。因此, 采样频率只须 800Hz 以上即可。考虑到 8098 单片机和斩波器的时延, 选定该系统的最佳采样频率为 5kHz。用相平面法对该系统进行稳定性分析, 可得相平面方程为

$$T_f \ddot{e} + \dot{e} = \frac{K_s}{T_s} N - \frac{K_c K_f K_s}{T_s} U. \quad (8)$$

式中, N 为垂直场阶跃扰动量, U 为斩波器的输出电压, 由此得到相平面轨迹的两条渐近线。当 $e > 0$ 时, $U = U_n$, 则相平面轨迹趋于渐近线: $\dot{e} = \frac{K_s}{T_s} N - \frac{K_c K_f K_s}{T_s} U_n$ 。当 $e \leq 0$ 时, $U = 0$, 则相平面

轨迹趋于渐近线: $\dot{e} = \frac{K_s}{T_s} N$, 如图 4 所示。显然, 该系统稳定的条件是: $\frac{K_c K_f K_s}{T_s} U_n > \frac{K_s}{T_s} N$, 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。

6 高功率波加热下的等离子体水平位移平衡控制实验^[4]

实验条件: 等离子体大、小半径之比 $R/a = 65\text{cm}/20\text{cm}$, 纵向磁场 $B_T = 11\text{kGs}$, 等离子体电流 $I_p = 50\text{kA}$, 离子回旋共振加热功率 $P_{\text{ICRH}} = 300\text{ kW}$, 低杂波驱动功率 $P_{\text{LHCD}} = 90\text{ kW}$, 波加热总功率 $P_T = P_{\text{LHCD}} + P_{\text{ICRH}} = 420\text{ kW}$, 设定等离子体位移 $X_r = 2.2\text{ cm}$ 。

实验结果: 位移偏差 $e \leq \pm 2.9\text{ mm}$, 如图 5 所示。

从中可以看到, 该系统具备了快响应的品质, 其位移偏差控制精度相当高, 达到小于 $\pm 3.0\text{ mm}$ 。

7 结 论

通过近 2 年的实验运行, 该系统运行可靠、控制精度高, 取得较好的实验效果, 现将结论总结如下。

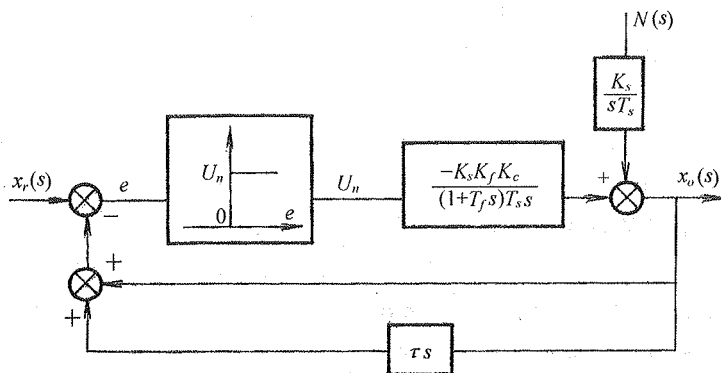


图 3 控制系统传递函数图

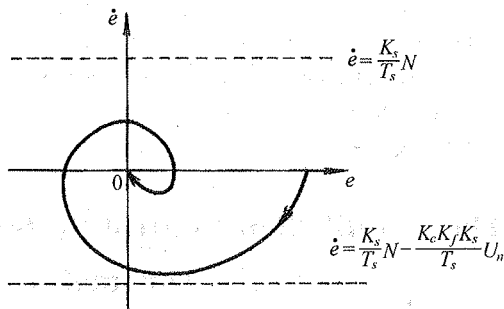


图 4 控制系统相平面轨迹图

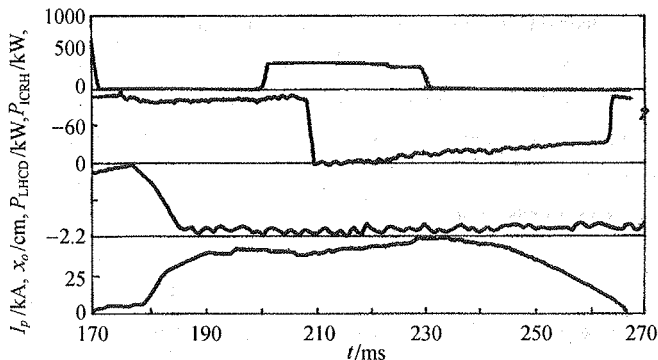


图 5 高功率波加热下等离子体位移平衡控制实验

P_{ICRH} —— 离子回旋共振加热功率/kW, P_{LHCD} —— 低杂波驱动功率/kW
 x_0 —— 等离子体位移/cm, I_p —— 等离子体电流/kA

① 通过对园截面等离子体动态平衡的数学模型的推导,弄清了等离子体位移与反馈场和实际平衡垂直场之间的对应关系.并将高功率波加热时,等离子体位移的突变视为一大的随机扰动.进而利用反馈磁场对这一随机扰动进行调控的技术方案是正确的.

② 分析了整个控制系统各环节的数学模型,提出了时间最优控制的 Bang-Bang 控制模式.并在该系统中引入了速度反馈校正,改善了系统的响应特性.采用大功率 GTO 为基本开关器件的直流斩波器电源电路,极大地提高了反馈控制系统的快响应能力.

③ 该控制系统的研制成功,不仅在理论上为中大型托卡马克等离子体平衡控制提供了依据,而且其独特的技术方案在一定程度上为 HT-7U(拉长等离子体截面的超导托卡马克)的位形反馈控制提供了重要的经验.

总之,托卡马克等离子体的平衡控制技术,使长期的平衡控制理论研究与现代电力电子技术相结合,并在此基础上,成功地实现了对高功率波加热下的等离子体位置平衡控制.

参 考 文 献

- 1 宫本健朗.热核聚变等离子体物理学.北京:科学出版社,1981,134-171
- 2 Mukhovatov, V. S., Shafranov V. D.. Plasma equilibrium in a Tokamak. Nucl. Fusion, 1971, 11(3): 605-608
- 3 Bonicelli, T.. Factory and site tests on the 25MW GTO power amplifier for the control of the JET plasma vertical position. JET-P(93)31, May, 1993
- 4 苏建龙. 高功率波加热下的等离子体水平位移平衡控制. 中科院等离子体所博士论文, 合肥, 1996

The Equilibrium Control System of the Plasma Horizontal Position in the Tokamak Controlled Nuclear Fusion

SU Jianlong, PAN Yuan and LIU Baohua

(Institute of Plasmas Physics, Chinese Academy of Science • Hefei, 230031, PRC)

Abstract: In this paper, the structure and the control mode of the plasma horizontal position equilibrium control system in the HT-6M Tokamak have been analyzed systematically. The relevant math model and control mode were provided, and the experiment was done successfully in the HT-6M Tokamak. The special engineering method provides the theory foundation and practice experience for the HT-7U superconduction Tokamak.

Key words: nuclear fusion; plasma; equilibrium control

本文作者简介

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 1934年生. 现为中国科学院等离子体物理研究所研究员, 博士生导师. 主要研究方向为核聚变与等离子体物理.

刘保华 1941年生. 现为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.