

⑦

685-691

超导托卡马克

第48卷第4期 1999年4月  
1000-3290/1999/48(04)/0685-07物理学报  
ACTA PHYSICA SINICAVol. 48, No. 4, April, 1999  
©1999 Chin. Phys. Soc.

# 等离子体电流位移反馈控制 HT-7 铁芯超导托卡马克等离子体电流和 水平位移多变量反馈控制

傅鹏 刘正之<sup>\*</sup> 罗家融 夏海燕

\* (中国科学院等离子体物理研究所, 合肥 230031)

(1998年8月21日收到; 1998年9月21日收到修改稿)

TL631.24  
TL612

对有双层低温厚壁铜壳的铁芯超导托卡马克等离子体电流和位移反馈控制进行了分析, 采用一种新颖的方法对铁芯饱和而引起的电磁参数非线性和时变性进行了处理, 用等效正反串线圈模型代替厚壁铜壳, 从而建立了 HT-7 超导托卡马克等离子体电流和水平位移反馈控制状态方程模型. 并采用了检测中间状态变量进行补偿而达到解耦的目的, 设计出了托卡马克等离子体位移和电流反馈控制系统, 在实验中得到了很好的结果. 该方法大大减少了反馈控制的计算工作量并提高了响应速度. 使得铁芯、厚壁铜壳与线圈之间的强耦合给等离子体控制带来的困难迎刃而解.

PACC: 5255; 5275

## 1 引言

托卡马克受控热核聚变是人类下世纪替代煤和油的新能源. 我国 HT-7 超导托卡马克装置其规模和参量介于中小型装置和堆芯装置之间, 可以承担聚变工程中有关堆芯连续运行的物理和工程等重大课题的研究. HT-7 托卡马克是铁芯装置, 其极向场电磁系统主要有: 产生和加热等离子体的欧姆加热线圈; 控制等离子体水平位移的垂直场线圈; 为了使纵场稳定在超导状态运行, 防止极向磁场快速变化对超导线圈的影响, 同时抑制等离子体的快速运动, 在等离子体外围有两层厚度为 1.5 cm 的圆截面环形铜壳, 其温度处于低温 80 K, 铜壳在大环方向有极向绝缘缝隙. 装置的中心柱、横轭和侧柱是叠片铁芯的. 装置结构如图 1 所示.

托卡马克放电运行时, 等离子体在自身的压力和外加磁场的作用下发生位移. 这种位移如果不加控制将使等离子体与壁相撞而引起等离子体破裂, 放电失败. 因此好的等离子体位移控制是等离子体放电的关键技术之一. HT-7 超导托卡马克等离子体位移偏差、等离子体电流偏差、反馈控制响应时间要求为

$$\Delta X \leq 0.5 \text{ cm}; \Delta I_p \leq 10 \text{ kA}; \Delta t \leq 1 \text{ ms}.$$

HT-7 托卡马克装置在等离子体外围有两层厚壁铜壳, 其渗透时间常量通过实验测定为 460 ms. 它的屏蔽作用使外加反馈磁场不能迅速通过而作用于等离子体电流环, 影响

等离子体位移控制;铁芯的饱和特性使托卡马克电磁参量呈非线性和时变性;极向场各线圈之间存在较强的耦合,等离子体电流控制与水平位移控制之间相互影响.这些原因都使得 HT-7 装置等离子体控制复杂化,严重影响了 HT-7 装置的正常运行.

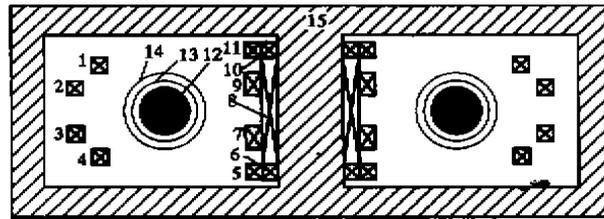


图1 HT-7托卡马克装置结构简图 1,2,3,4,7,9为垂直场线圈;8为欧姆加热场线圈;5,11为偏磁场线圈;6,10为水平场线圈;12为真空室和等离子体;13为内铜壳;14为外铜壳;15为铁芯

在国内外相似的托卡马克装置中,曾经常常采用在导电壳内部增设快速反馈场线圈或外加解耦变压器来解决等离子体难于控制的问题.这样需要另加一套电源和一套线圈,或一套解耦变压器.不仅要增加很大的资金支出,而且使得问题复杂化.为此,我们采用了多变量控制方法,在对铁芯托卡马克电磁参量线性化和在铜壳等效模型的基础上,建立了等离子体多变量状态方程.在由状态方程模型到反馈工程实现中,我们在常规的多变量控制方法之外,另辟蹊径,对状态变量及其微分信号进行实时测量,以直接补偿线圈之间耦合的方式来达到去耦的目的,最后再对目标量实施控制.大大减少了计算机反馈计算工作量,提高了系统响应速度.

## 2 控制模型建立

根据铜壳在等离子体平衡中的作用,我们对每个铜壳用水平方向和垂直方向的两对

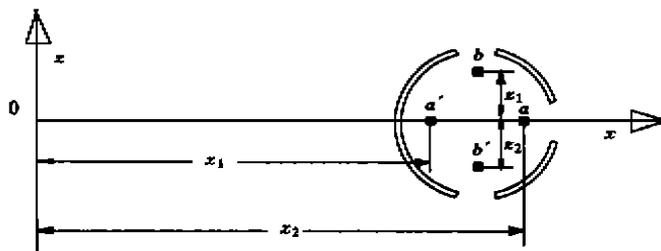


图2 铜壳的等效线圈对简图  $a, a'$ 为铜壳水平位置等效正反串线圈对;  
 $b, b'$ 为铜壳垂直位置等效正反串线圈对

等效正反串线圈来代替<sup>[1]</sup>,如图2所示.在考虑等离子体水平位移时,仅需计及水平方向的一对等效正反串线圈即可.

在放电过程中,铁芯中心柱的磁通由不饱和到饱和而变化,托卡马克极向场参量也是

时变和非线性的. 根据文献[2]分析, 在装置的正常运行区间, 铁芯并非工作在深度过饱和状态, 铁芯磁导率在数千至数十范围内变化. 通过对均匀磁化无限长铁芯周围圆形电流环矢势的分析可知, 一对正反串圆形电流环的电磁参量与铁芯饱和状态基本无关. 另一方面, 从铁芯托卡马克极向场线圈系统的几何位形及电磁特性着眼, 可以将其看成由几对位于铁芯中心柱外围的正反串线圈组成, 铁芯的激磁电流分量较小, 可以忽略. 根据 HT-7 铁芯托卡马克的实验测量, 当铁芯进入饱和时(激磁安匝 $\cong 12$  千安匝), 最大误差约为 1%; 当铁芯在深度过饱和和以内时(激磁安匝 $\leq 112$  千安匝), 最大误差不超过 8%. 这些误差在控制时可作扰动处理. 据此我们可以认为: 等离子体电流环和加热场线圈电流构成一对正反串线圈(p); 内外垂直场线圈构成一对正反串线圈(e); 内、外铜壳在水平方向各构成一对等效正反串线圈(c1)和(c2), 它们是线性的. 从而实现了线性化, 可以列出线圈回路磁链平衡方程

$$[L][I] + \int [\Omega][I]dt = \int [V]dt. \quad (1)$$

而等离子体扩张力与外磁场作用于等离子体的力相平衡, 用磁场方程表示为

$$B_{z0} = B_z, \quad (2)$$

其中 $[L]$ ,  $[\Omega]$ ,  $[I]$ ,  $[V]$ 为由 p, e, c1, c2 线圈构成的电感矩阵、电阻矩阵、电流矩阵、电源电压矩阵;  $B_z$ ,  $B_{z0}$ 分别为等离子体受到的外磁场和等离子体自身扩张力的等效磁场.

对方程(1)微分可得回路电压方程

$$\frac{d}{dt}([L][I]) + [\Omega][I] = [V], \quad (3)$$

即

$$\frac{d[L]}{dt}[I] + [L]\frac{d[I]}{dt} + [\Omega][I] = [V]. \quad (4)$$

将等离子体作为瘦环近似时, 上式中电感矩阵的变化仅与等离子体位移有关, 当等离子体位置移动时, 等离子体自感及与其它线圈之间的互感将发生变化, 而其它线圈的自感及互感参量不变.

$$\frac{d[L]}{dR} \frac{dX}{dt}[I] + [L]\frac{d[I]}{dt} + [\Omega][I] = [V]. \quad (5)$$

同时有

$$\begin{aligned} \frac{dl_{ij}}{dR} &= -2\pi R_0 k_{zi} \quad (i = e, p, c1, c2); \\ \frac{dl_{ij}}{dR} &= 0 \quad (i, j = e, c1, c2), \end{aligned} \quad (6)$$

其中  $R$  为等离子体大环半径,  $R_0$  为等离子体大环中心位置;  $X$  为等离子体在大环方向的位移, 有  $R = R_0 + X$ ,  $X \ll R$ ;  $l_{ip}$  为等离子体自身的自感或第  $i$  个线圈与等离子体等效线圈的互感;  $l_{ij}$  为第  $i$  个线圈的自感或第  $i$  个线圈与第  $j$  个线圈的互感;  $k_{zi}$  表示第  $i$  个线圈在等离子体中心区域产生的垂直磁场因子;  $i, j$  表示托卡马克等效线圈 e, p, c1, c2 等. 并

有

$$\frac{d[\mathbf{L}]}{dR} = \begin{bmatrix} 0 & -2\pi R_0 k_{ze} & 0 & 0 \\ -2\pi R_0 k_{ze} & -2\pi R_0 k_{zp} & -2\pi R_0 k_{zc1} & -2\pi R_0 k_{zc2} \\ 0 & -2\pi R_0 k_{zc1} & 0 & 0 \\ 0 & -2\pi R_0 k_{zc2} & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

$$B_z = K_{ze} I_e + k_{zp} I_p + k_{zc1} I_{c1} + k_{zc2} I_{c2}, \quad (8)$$

$$B_{z0} = k_{zb} I_p, \quad (9)$$

其中

$$k_{zb} = \frac{\mu_0}{4\pi R} \left( \ln \frac{8R}{a} + \beta_p + \frac{l_1}{2} - \frac{3}{2} \right), \quad (10)$$

在等离子体温度一定时  $k_{zb}^{[3]}$  基本上是常量。

由(2), (5)–(10)方程整理可得极向场系统在等离子体发生位移时的方程为

$$\begin{aligned} k_{ze} I_e + k'_{zb} I_p + k_{zc1} I_{c1} + k_{zc2} I_{c2} &= 0, \\ k_{ze} \frac{dY}{dt} + l_{ze} \frac{dI_e}{dt} + l_{ep} \frac{dI_p}{dt} + l_{ec1} \frac{dI_{c1}}{dt} + l_{ec2} \frac{dI_{c2}}{dt} + \Omega_e I_e &= U_e, \\ k_{zb} \frac{dY}{dt} + l_{ep} \frac{dI_e}{dt} + l_{pp} \frac{dI_p}{dt} + l_{pc1} \frac{dI_{c1}}{dt} + l_{pc2} \frac{dI_{c2}}{dt} + \Omega_p I_p &= U_o/n, \\ k_{zc1} \frac{dY}{dt} + l_{ec1} \frac{dI_e}{dt} + l_{pc1} \frac{dI_p}{dt} + l_{c1c1} \frac{dI_{c1}}{dt} + l_{c1c2} \frac{dI_{c2}}{dt} + \Omega_{c1} I_{c1} &= 0, \\ k_{zc2} \frac{dY}{dt} + l_{ec2} \frac{dI_e}{dt} + l_{pc2} \frac{dI_p}{dt} + l_{c1c2} \frac{dI_{c1}}{dt} + l_{c2c2} \frac{dI_{c2}}{dt} + \Omega_{c2} I_{c2} &= 0, \end{aligned} \quad (11)$$

其中

$$k'_{zb} = k_{zp} - k_{zb}, \quad U_o = U_p/n,$$

且

$$\frac{dY}{dt} = -2\pi R_0 I_p \frac{dX}{dt}. \quad (12)$$

方程(11)就是 HT-7 托卡马克等离子体位移和电流控制方程。这是一个多变量输入多变量输出的控制方程,其控制对象为等离子体水平位移、等离子体电流;控制量为垂直场电源电压、加热场电源电压;中间变量为垂直场电流、加热场电流、内铜壳电流、外铜壳电流等。对于这样较复杂的系统可以用现代控制理论的状态空间法进行优化而实时反馈控制。

将上述方程化为矩阵形式的标准状态方程,代入其电磁参量并用传递函数矩阵表示为

$$\begin{bmatrix} \mathbf{Y} \\ \mathbf{I}_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{7.2 \times 10^3 (s - 177.2)(s + 3.8)}{(s + 51.8)(s + 3.9)} & \frac{-3.9 \times 10^2 (s - 1200)(s + 4.4)}{(s + 51.8)(s + 3.9)} \\ \frac{-1.96 \times 10^3 (s + 270)(s + 2.8)}{(s + 51.8)(s + 10.4)(s + 3.9)} & \frac{6.0 \times 10^3 (s + 73.9)(s + 5.9)}{(s + 51.8)(s + 10.4)(s + 3.9)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_e \\ U_o \end{bmatrix}. \quad (13)$$

### 3 反馈控制的实现

在 HT-7 托卡马克装置中, 加热场和垂直场电源电压是同一个量级, 因此方程(11)是一个典型的强耦合的多变量控制系统, 可以按照一般多变量控制方法进行反馈控制.

但是在我们的控制系统中, 由于对控制反应速度要求较高, 反馈控制计算机在实时控制时除进行反馈计算外, 还要承担反馈信号的数据采集、控制信号的检测、等离子体破裂及电源过流的保护、计算机硬件的驱动等大量工作, 以现有的工控微机采用一般多变量控制方法远远不能满足要求. 所以采用了一种更为简单实用的控制方法. 将(11)式中(P)线圈和(E)线圈回路的  $l_{ep} \frac{dI_p}{dt}$ ,  $l_{ee} \frac{dI_e}{dt}$  移项到方程等号右边得

$$\begin{aligned} k_{ze} \frac{dY}{dt} + l_{ee} \frac{dI_e}{dt} + l_{ec1} \frac{dI_{c1}}{dt} + l_{ec2} \frac{dI_{c2}}{dt} + \Omega_e I_e &= U'_e; \\ k_{zb} \frac{dY}{dt} + l_{pp} \frac{dI_p}{dt} + l_{pc1} \frac{dI_{c1}}{dt} + l_{pc2} \frac{dI_{c2}}{dt} + \Omega_p I_p &= U'_o. \end{aligned} \quad (14)$$

代入其电磁参量并作适当运算, HT-7 等离子体电流和水平位移控制方程可以传递函数矩阵表示为

$$\begin{bmatrix} Y \\ I_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{7.1 \times 10^3 (s - 154)(s + 9.4)}{(s + 61.4)(s + 7.1)} & \frac{4.1 \times 10^2 (s + 790)(s + 12)(s + 5.1)}{(s + 61.4)(s + 7.1)(s + 4.5)} \\ \frac{5.0 \times 10^2 (s - 685.8)(s + 4.1)}{(s + 61.4)(s + 7.1)(s + 4.5)} & \frac{5.6 \times 10^3 (s + 7.4)(s + 6.0)}{(s + 61.4)(s + 7.1)(s + 4.5)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U'_e \\ U'_o \end{bmatrix}. \quad (15)$$

在  $U'_e$ ,  $U'_o$  为同一个量级时, 可以看出其耦合比较小. 在反馈设计中可以忽略相对小一个量级的值, 作近似处理, 该忽略项视为扰动量. 在等离子体电流为 100 kA 左右时, 由(12)和(15)式得

$$\begin{aligned} X &= \frac{9.3 \times 10^{-3} (s - 154)(s + 9.4)}{s(s + 61.4)(s + 7.1)} U'_e; \\ I_p &= \frac{5.6 \times 10^3 (s + 7.4)(s + 6.0)}{(s + 61.4)(s + 4.5)(s + 7.1)} U'_o, \end{aligned} \quad (16)$$

其中  $U'_e = U_e - l_{ep} \frac{dI_p}{dt}$ ,  $U'_o = U_o - l_{ee} \frac{dI_e}{dt}$ , 其物理意义是在垂直场线圈电源电压中补偿加热场等离子体等效线圈对其的耦合, 在加热场电源电压中补偿垂直场线圈对其的耦合.  $\frac{dI_p}{dt}$ ,  $\frac{dI_e}{dt}$  之值可以通过实时检测而得到. 方程(16)为单输入单输出系统, 在反馈控制设计时是较容易实现的.

我们可以对系统进行极点配置. 选择位移反馈传递函数为  $H_x(s)$ , 选择等离子体电流反馈传递函数为  $H_p(s)$ , 则不难得出

$$\begin{aligned} H_x(s) &= \frac{0.1(s + 4 \times 10^3)(s + 5)}{s}; \\ H_p(s) &= \frac{2.5 \times 10^{-3}(s + 1 \times 10^4)(s + 10)}{s}. \end{aligned} \quad (17)$$

其位移反馈闭环传递函数和等离子体电流反馈的闭环传递函数分别为

$$G_{cx}(s) = \frac{-9.3 \times 10^{-4}(s+4000)(s-154)(s+9.4)(s+5)}{(s+48.5)(s+6)[(s+5.2)^2+8.0^2]}$$

$$G_{cp}(s) = \frac{9.3 \times 10^{-1}(s+10000)}{(s+9300)} \quad (18)$$

#### 4 实验结果与结论

根据上述理论分析和工程设计,我们利用一台工控微机成功地实现了 HT-7 超导托卡马克等离子体电流和水平位移的多变量反馈控制,在实验中得到了非常好的结果.等离子体电流和位移得到了很好的控制,放电时间大大延长,低混杂波电流驱动和离子回旋共振加热等得以顺利实现,并出现了明显效果,解决了长期以来悬而未决的问题.图 3 是其典型放电波形.该反馈控制的实现使 HT-7 超导托卡马克的运行和实验跃上一个新的台阶.

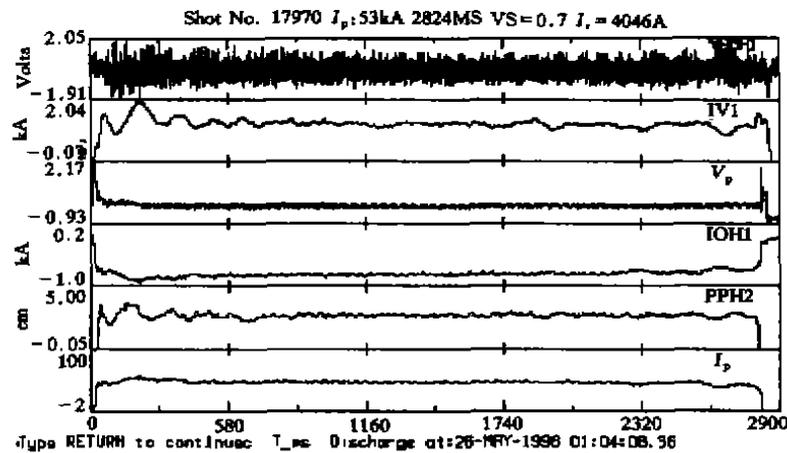


图 3 HT-7 托卡马克反馈控制放电波形 V<sub>OH1</sub> 为加热场取样电压(V);IV1 为垂直场线圈电流(kA);V<sub>p</sub> 为等离子体环电压(V);IOH1 为加热场线圈电流(kA);PPH2 为等离子体水平位移(cm);I<sub>p</sub> 为等离子体电流(kA)

理论分析和实验结果表明:在 HT-7 超导托卡马克中,虽然铁芯的非线性、两层低温厚壁铜壳对外控制磁场的屏蔽、线圈之间强耦合的存在,对等离子体控制带来很大困难,但是只要建立合理的数学模型,采用适当的控制方法,就可以很好地实现对等离子体电流和位移的反馈控制;而不必要在内铜壳内部增加快反馈场线圈,或在电源回路中加入解耦变压器,节约了大量时间和投资.多变量控制的应用可以说是现代先进托卡马克等离子体控制的必由之路.

[1] P. Fu, Z. Z. Liu, J. Z. Xu, *Chinese Journal of Nuclear Science and Engineering*, 18(4)(1998), 335(in Chinese).

- [2] P. Fu, Z. Z. Liu, J. Z. Xu, *ASIPP Research Report*, CH9809(1998), p. 1(in Chinese)
- [3] S. Y. Zhu. *Principle of Nuclear Fusion* (Chinese University of Science and Technology, Hefei, 1992), p. 149(in Chinese).

## MULTI-VARIABLE FEED-BACK CONTROL OF PLASMA CURRENT AND HORIZONTAL POSITION IN HT-7 SUPER-CONDUCTIVE TOKAMAK

FU PENG LIU ZHENG-ZHI LUO JIA-RONG XIA HAI-YAN

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

(Received 21 August 1998; revised manuscript received 21 September 1998)

### ABSTRACT

In the analysis of HT-7 superconductive tokamak which consists of iron core, thick copper shell and multi-coupling coils system, the electromagnetic parameters are linearized by a novel method; the copper shell is replaced by an equivalent pair of coils in series-opposing; and the multi-coupling is compensated by an intermediate state variable. As a result, the plasma control equation can be set up and solved more simply and easily. The feed-back control system has been designed and rather good results were obtained in experiment. This feed-back control system has high response speed, less computing time and is easy to carry out.

PACC: 5255; 5275