

EAST等离子体垂直不定位移主动反馈控制

王海欣¹, 汪凤凤¹, 黄海宏¹, 吴义兵²

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

摘要: 在 EAST 装置上通过设置反馈控制系统来抑制等离子体的垂直位移。快控电源对主动反馈线圈励磁, 产生磁场抑制等离子体偏移。为满足等离子体位移快控电源大电流快速响应要求, 采用多组变流器并联运行。实验运行结果说明主动反馈控制系统设计方案合理, 达到了设计要求。

关键词: EAST 装置; 等离子体; 垂直不定位移; 快控电源

中图分类号: TL62; TM46

文献标识码: A

1 引言

托卡马克型的环形磁约束装置被认为是最有希望首先建成商用聚变动力堆的核聚变装置, 但托卡马克属于低 β 装置。 β 为等离子体压强和磁场能量密度的比值, 它表征了磁场约束等离子体的能力大小, β 一般为百分之几。从经济效益上考虑, 为了建立商用堆, 托卡马克的平均 β 值应达到10%左右。因此, 提高托卡马克的 β 值已成为当今国际核聚变研究中的一个极为重要的课题, 目前采用较多的是通过拉长等离子体截面的方法来提高托卡马克的 β 值。理论和实验的研究表明高的拉长比可以对放电带来很多优点^[1], 但是拉长的等离子体在垂直方向上存在着潜在的垂直位移不稳定性, 即当等离子体在垂直方向受到某种扰动, 使得拉长等离子体平衡失控, 等离子体柱在垂直方向上沿着同一个方向运动, 如果不加控制会整体碰壁发生破裂, 从而造成等离子体放电失败。在破裂放电时会导致严重的甚至破坏性的高热负荷, 高机械应力及大逃逸电子电流^[2]。因此, 需要反馈控制系统对等离子体的垂直不稳定性进行反馈控制。

2 等离子体垂直不稳定性分析^[3, 4]

EAST 装置是中国自行设计研制的国际首个全超导托卡马克装置, 该装置是一种轴对称的环形系统, 主要由激发等离子体电流的变压器、产生纵场的环向场线圈、控制等离子体柱平衡位置的平衡场线圈和环形真空室组成。中心螺线管上的电流在真空室内部产生变化的磁场, 变化的磁场又感应出电场, 最终实现击穿而产生等离子体。环向磁场和极向磁场形成螺旋形磁场, 促使等离子体电流沿环形螺旋磁力线运动, 从而达到约束等离子体的目的。极向场 14 个超导线圈 PF1 ~ PF14 相对于装置的赤道面对称布置, 如图 1 所示。

外部线圈以及等离子体产生的径向磁场和等离子体电流相互作用, 会在垂直方向上对等离子体产生洛伦兹力。定义磁场衰减因子 n (极向磁场的曲率):

$$n = -\frac{R}{B_z} \frac{\partial B_z}{\partial R} \quad (1)$$

式中, B_z 为外部极向磁场 B_{ext} 在 Z 方向的分量。等离子体受到来自外加磁场在 R 方向的分量施加的力为:

收稿日期: 2013-02-20; 修订日期: 2013-10-15

基金项目: 国际热核聚变实验堆(ITER)973 计划专项(2011GB109002); 国家自然科学基金(11275056)

作者简介: 王海欣(1976-), 女, 河南南阳人, 高级实验师, 从事计算机控制计算研究。

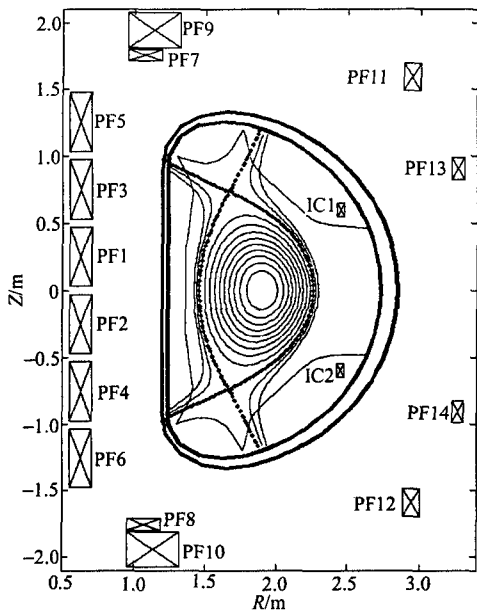


图 1 EAST 极向场线圈布置图

$$F_z = -2\pi R_0 B_R I_p \quad (2)$$

式中, R_0 为等离子体电流密度中心的 R 坐标; I_p 为等离子体电流数值; B_R 为外部极向磁场 B_{ext} 在 R 方向的分量。根据安培定则 $\nabla \times B = \mu_0 j$, 考虑静态磁场情况下($j=0$), 可得到:

$$\frac{\partial B_z}{\partial R} - \frac{\partial B_R}{\partial Z} = 0 \quad (3)$$

从式(1)~(3)可以得到等离子体垂直方向上受力随等离子体位置 Z 的变化关系:

$$\frac{\partial F_z}{\partial Z} = 2\pi R_0 I_p \frac{n B_z}{R} \quad (4)$$

图 2 给出了外部垂直场情况下等离子体被压扁和拉长的两种位形。从图 2 中可以看出, 正的衰减指数时, 等离子体位形是扁平的, 而负的衰减指数时, 等离子体位形是拉长的。当径向磁场分量为零, 即极向磁场不随 R 和 Z 变化时, 衰减指数为零。当上下两个线圈的电流方向与 I_p 相反时, 可得到如 2a 所示的扁圆形; 当上下两个线圈的电流方向与 I_p 相同时, 可以得到如图 2b 所示的椭圆形。

当 $B_z < 0$ 时, 等离子体的平衡情况可以分为以下几种情况:

1) 衰减指数 $n > 0$ 时, $\partial F_z / \partial Z < 0$, 等离子体

在垂直方向上是稳定的;

2) 衰减指数 $n < 0$ 时, $\partial F_z / \partial Z > 0$, 等离子体在垂直方向上是不稳定的;

3) 衰减指数 $n=0$ 时, $\partial F_z / \partial Z = 0$, 等离子体在垂直方向上处于临界稳定状态。

为了实现拉长位形的等离子, 必有衰减指数 $n < 0$, 故等离子体在垂直方向上存在不稳定性, 需对其进行反馈控制。

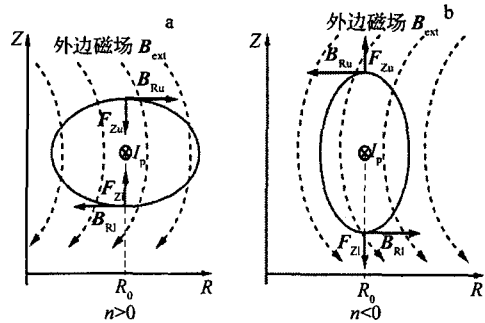


图 2 圆截面和拉长截面等离子体平衡所需的垂直磁场形态

a——圆截面等离子体平衡所需要的正曲率垂直磁场; b——拉长截面等离子体平衡所需要的负曲率垂直磁场。

3 等离子体垂直位移反馈控制^[5, 6]

等离子体垂直位移事件反馈运行的方式分为被动反馈和主动反馈两种。被动反馈是一种 ms 的快速响应, 一旦等离子体发生垂直位移, 周围的导体(如真空室壁导体)上感应出涡流, 感应出的涡流会产生磁场, 磁场的径向分量 B_R 和环向等离子体电流相互作用对等离子体施加与垂直位移方向相反的洛仑兹力, 从而对等离子体的垂直位移产生抑制的作用。EAST 等离子体垂直位移被动反馈由双层不锈钢真空室和真空室内两对被动导体板组成。但由于导体电阻对涡流的耗散作用, 当时间超过导体扩散时间后, 被动反馈作用就大大衰减。因此大于导体的扩散时间尺度的慢扰动, 必须采用主动反馈。主动反馈是将采集的等离子体垂直位移信号以一定方式反馈到主控电源, 使主动反馈线圈流过电流, 产生磁场达到控制等离子体的目的。

等离子体环在垂直方向上的运动方程为:

$$m_p \frac{d^2 Z}{dt^2} = -2\pi R_p I_p B_R \quad (5)$$

式中, m_p 、 Z 和 R_p 分别为等离子体的质量、垂直位移、环大半径。

等离子体垂直位移控制要考虑垂直位置增长率的大小, 其增长率用 γ 来表示为:

$$\gamma(t) = \frac{d \ln |Z(t)|}{dt} \quad (6)$$

EAST等离子体放电位形最大的增长率在 $1000s^{-1}$ 的量级, 而如果要对垂直不稳定性进行成功地反馈控制, 主动线圈的反应时间必须要小于垂直位移增长率。EAST真空室对极向场线圈产生的垂直场有24ms的屏蔽延迟, 对径向场有11.5ms的屏蔽延迟, 而EAST典型放电位形增长率的倒数在1ms的量级上。因此, 要对EAST中拉长位形的等离子体的垂直不稳定性进行有效的控制, 需要在真空室内安放快速控制线圈。图1中真空室内IC1和IC2是一对相对装置平面对称的主动反馈线圈, 通过垂直导体成鞍形连接, 通有等值电流以产生径向磁场, 来达到对等离子体垂直方向的反馈控制。

EAST主动反馈线圈工作原理如图3所示。其采用负反馈控制模式, 如图4所示。

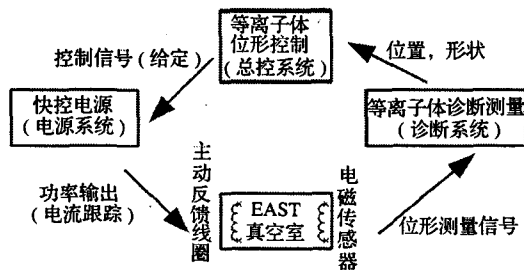


图3 EAST主动反馈线圈工作原理

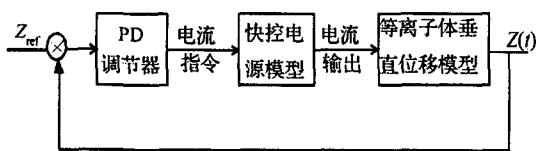


图4 垂直不稳定性负反馈控制回路

EAST的等离子体控制系统(PCS)检测等离子体的垂直位移, 来计算主控电源给定电流信号, 其

计算方法如式(7)所示, 主控电源对输入给定电流信号进行实时跟踪和线性放大。

$$i_c = -g_p Z_p + g_d \frac{dZ_p}{dt} \quad (7)$$

式中, g_p 为控制器比例系数; g_d 为控制器微分系数; Z_p 为等离子体垂直位移; i_c 为要求主控电源输出的电流。

EAST等离子体垂直位移快速控制电源(简称EAST快控电源)与真空室内的一组主动控制线圈组成等离子体垂直位移控制的主动反馈控制系统, 其物理目标是抑制等离子体固有的, 特别是在大拉长位形下的垂直不稳定性, 控制等离子体在垂直方向的快速漂移, 实现等离子体在垂直方向的平衡与定位。PCS检测等离子体垂直位移, 计算出对应磁场所需要的主动反馈线圈的励磁电流, 作为指令信号发送给电源系统, 电源系统实时跟踪输入指令, 并进行线性放大, 产生快速变化的磁场, 以抑制等离子体的不稳定垂直位移。

4 EAST快控电源

4.1 参数设计

为确定快控电源的参数, 应对等离子体发生垂直位移的开环增长率进行分析。从PCS服务器取得的垂直位移的实验数据, 应用最小二乘法按式(6)进行拟合, 作图比较等离子体垂直位置的实验值和计算值随时间的演化, 如图5所示。比较后发现, 拟合得到的垂直位移数值与实验值接近, 故数值模拟的等离子体垂直位移增长位移是可信的。

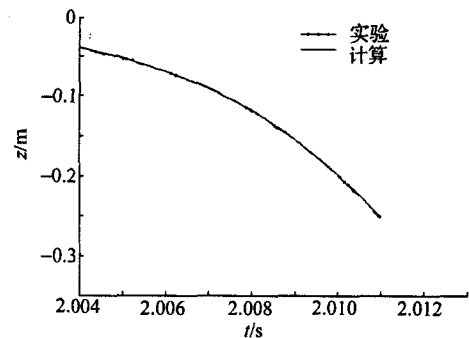


图5 等离子体垂直位移开环增长率数值拟合

假设等离子体已有 5cm 的初始位移,并有一定的等离子体垂直位移增长率,考虑仅通过快控电源进行闭环控制,产生快速磁场将等离子体拉回到位移中心点。按上述条件,确定快控电源的额定电压、电流和响应时间,参数如下:最高输出电压 $U_m = \pm 800\text{V}$;额定输出电流 $I_n = \pm 2500\text{A}$, 150s;短时过载能力 $I_m = \pm 5000\text{A}$, 1s;电流响应时间 $t_r \leq 5\text{ms}$, 5000 ~ -5000A。

4.2 系统设计

EAST 快控电源主要由整流变压器、AC/DC 整流器、DC/AC 逆变器、滤波与箝位、均流与保护等电路组成。考虑到 EAST 装置要求快控电源能够输出数千安培的负载电流,并具有快速的电流跟踪响应,而单台变流器难以实现如此大而快速的电流响

应,DC/AC 逆变器由多个逆变单元并联组成,其系统框图如图 6 所示^[7]。

电源整流部分采用 36 相干式整流变压器及二极管不控整流。变压器容量为 560kVA,原副边电压比为 10kV/0.7kV。变压器原边绕组具有 $\pm 5\%$ 电压调节抽头,副边绕组与原边绕组相位分别相差 $\pm 5^\circ$ 、 $\pm 15^\circ$ 、 $\pm 25^\circ$;每一相位绕组有两个同样的绕组,共 12 个绕组,每一相位的两个相同绕组作为一组整流桥的输入电源,共有六组整流桥。电源逆变部分由 24 个逆变功率单元模块并联组成,每四个逆变单元共用一组整流桥。逆变器采用二极管中性点箝位的半桥三电平逆变电路,逆变功率单元模块的交流输出侧设有环流电抗器,以限制模块并联运行时的环流。

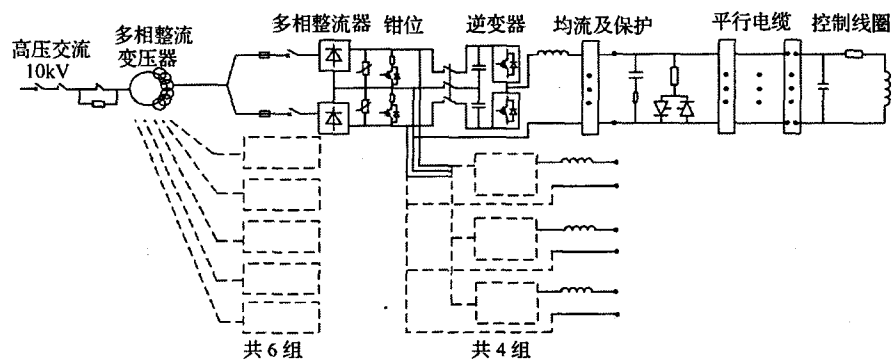


图 6 EAST 快控电源

4.3 逆变器并联均流设计

大容量通用正弦波逆变装置由若干逆变单元并联而成。由于参数的分散性,必然造成单元间的不均流和环流,过大的环流会使逆变器的负担加重,发散的环流将使系统崩溃。为抑制环流,需在逆变电源输出侧串联均流电抗器。均流电抗器在抑制环流的同时,由于其压降使得电源的特性变软,稳压特性变差。从限制动态环流的效果看,其电感值越大越好;但从稳压精确角度看,电感值越小越好,这就需要在这两方面综合考虑,以便达到最佳的控制效果^[8-10]。

考虑到 EAST 快控电源的作用是通过输出励磁电流来产生快速变化的磁场控制等离子体漂移,负

载为阻值很小的阻感性负载,电源输出电压主要影响的是电流上升率而不是电流值,为克服多模块并联不均流的问题,输入波形信号采用电流给定方式,输出电流实时跟踪给定信号,并进行线形功率放大,使其成为一种具有电流源特性的电压源型逆变器。每个逆变单元采用电流闭环比例调节器控制,其反馈取自单元内部均流电抗器上的电流,忽略调制中的非线性成份,即忽略输出的载波及所有高次成份,包括载波信号及输入信号的各次组合频率成份,每个逆变单元可简化为一个线性系统,其控制框图如图 7 所示^[7]。其中, K_0 为 PWM 调制放大器开环增益,逆变器内阻和均流电抗器阻抗近似表示为 $Z(s) = R + Ls$; β 为电流反馈系数。

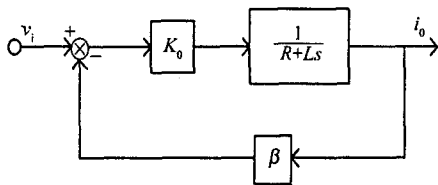


图 7 逆变单元控制框图

单元闭环传递函数为:

$$G(s) = \frac{K_0}{\beta K_0 + R + Ls} \quad (8)$$

与开环内阻 $Z(s) = R + Ls$ 相比, 闭环内阻变为 $\beta K_0 + R + Ls$, 若两个逆变单元并联运行, 可得环流:

$$\dot{i}_a = \frac{\dot{U}_1 - \dot{U}_2}{2(\beta K_0 + R + Ls)} \quad (9)$$

由于电流闭环使得逆变单元输出阻抗的实部增加了 βK_0 部分, 而虚部与开环时相同。若 $\beta K_0 \gg R$, 电流闭环负反馈对低频和直流环流的抑制能力大大增强; 而在高频段和电流变化较大时, 各单元间的环流仍主要取决于均流电抗器中电感的大小。需要注意的是, 增大 βK_0 有助于抑制环流, 提高系统在低频状态的均流能力, 但过高的 βK_0 会引起系统的不稳定。

在上述分析中, 将单元简化成一个一阶系统, 只考虑了电感性负载所形成的极点, 对于单极点系统闭环反馈不存在稳定性问题, 可实际上它并不是真正的单极点系统。

由于调制过程中会形成延迟, 设延迟时间为 τ , 则环路 PWM 调制放大器开环增益应为 $K_0 e^{-\tau s}$, 式(8)应改为^[11]:

$$G(s) = \frac{K_0 e^{-\tau s}}{\beta K_0 e^{-\tau s} + Ls + R} \quad (10)$$

由于 $\tau s \ll 1$, 则 $e^{-\tau s} \approx 1 - \tau s$, 则式(10)简化为:

$$G(s) = \frac{K_0(1 - \tau s)}{\beta K_0 + R + (L - K_0 \beta \tau)s} \quad (11)$$

显然, 系统稳定条件为 $L - K_0 \beta \tau > 0$ 。调制过程中最大延迟时间为载波周期 T , 则 $L > K_0 \beta T$, 设 f_k 为载波频率, 则系统稳定条件:

$$L f_k > \beta K_0 \quad (12)$$

因此, 应根据均流电抗器电感数值和载波频率

数值合理选择开环增益 βK_0 。当均流电抗器电感取值较高时, 能允许较大的 βK_0 , 有助于提高并联逆变器的均流能力, 但考虑到系统负载为线圈, 主要为感性, 提高均流电抗数值会影响负载电压数值和负载电流变化率, 降低电源电流响应能力, 故均流电抗的取值应限制在一个合理的范围内。而提高载波频率固然有利于系统稳定, 但载波频率的选择要受到功率器件允许开关频率的限制。

5 实验运行结果

为检测各逆变单元并联运行时的均流情况, 实验中用工控机通过 PXI-2204 采集卡记录了 1~12 个逆变单元的电流输出波形^[12], 如图 8 所示。图 8 中各逆变单元电流波形相似, 同一时刻的数值接近, 各逆变单元间瞬时均流情况满足设计要求。

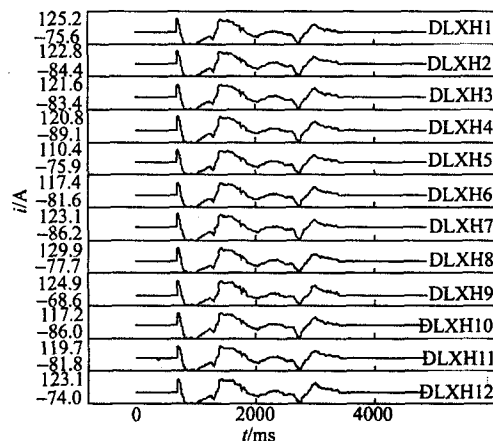


图 8 12 个逆变单元的输出电流波形

图 9 为 EAST 运行过程中采集的等离子体垂直位移信号、PCS 发出的命令及快控电源输出的电流波形。由图 9 中可看出, 快控电源跟踪性能良好, 主动反馈控制对等离子体垂直位移起到了很好的抑制效果。

6 结论

EAST 装置在真空室内安装了一对主动反馈线圈, 通过主控电源为其励磁以产生径向磁场, 来达到对等离子体垂直方向的反馈控制。实验运行结果

表明, 主动反馈控制能有效抑制等离子体在大拉长形下的垂直快速漂移, 有助于延长放电时间。

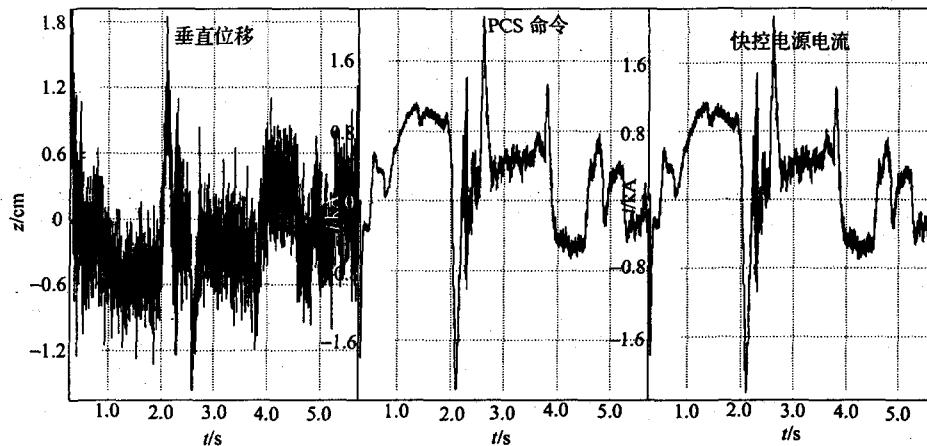


图9 等离子体垂直位移、PCS命令及快控电源输出电流波形

参考文献:

- [1] Bondeson A, Liu D H, Söldner F X, et al. MHD beta limits for advanced scenarios on JET [J]. Nucl. Fusion, 1999, 39(11): 1523-1533.
- [2] 刘成岳, 陈美霞, 吴斌. EAST 装置垂直不稳定性研究 [J]. 核聚变与等离子体物理, 2009, 29(4): 301-304.
- [3] 程曹军, 肖炳甲, 刘成岳. 基于 Corsica 的 EAST 等离子体平衡计算 [J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2011, 34(4): 613-616.
- [4] 刘成岳, 陈美霞, 宋逢泉. EAST 托卡马克等离子体电流和位形演化的数值模拟 [J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2008, 31(2): 314-316.
- [5] 刘旭峰. HT-7U 被动反馈线圈电磁问题的研究 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2004.
- [6] 刘磊. EAST 垂直不稳定性及反馈控制数值模拟 [D]. 合肥: 中国科学院等离子体物理研究所, 2008.
- [7] 黄海宏, 高格, 傅鹏, 等. 三电平大功率并联逆变电源在 EAST 系统中的应用 [J]. 核聚变与等离子体物理, 2008, 28(4): 358-361.
- [8] 陈良亮, 肖岚, 龚春英, 等. 逆变器并联系统直流环流产生原因及其检测与抑制方法 [J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(9): 56-61.
- [9] 杨淑英, 张兴, 张崇巍. 基于下垂特性的逆变器并联技术研究 [J]. 电工电能新技术, 2006, 25(2): 7-10, 80.
- [10] 姜桂宾, 裴云庆, 杨旭, 等. SPWM 逆变电源的无互联信号线并联控制技术 [J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(12): 94-98.
- [11] 黄海宏, 傅鹏, 高格, 等. EAST 快控电源逆变器并联分析 [J]. 电力电子技术, 2010, 44(3): 57-59.
- [12] 黄海宏, 吴义兵, 刘晓燕, 等. EAST 快控电源监控系统设计 [J]. 电气自动化, 2010, 32(1): 82-85.

Active feedback control used in plasma vertical unstable displacement for EAST

WANG Hai-xin¹, WANG Feng-feng¹, HUANG Hai-hong¹, WU Yi-bing²

(1. Hefei University of Technology, Hefei 230009; 2. Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031)

Abstract: The feedback control system is restrained plasma vertical displacement on EAST. Fast control power supply excites active feedback coils, which produces magnetic field to control plasma's displacement. To meet the requirement of large current and fast response, multi-inverters in parallel is presented. The validity of proposed scheme has been confirmed by experiments, the active feedback system can reach design demand.

Key words: EAST tokamak; Plasma; Vertical unstable displacement; Fast control power supply