

# EAST 放电的数值模拟及伏秒数分析

牛兴平<sup>1,2</sup>, 吴斌<sup>1</sup>

(1. 中国科学院等离子体物理研究所计算中心, 安徽合肥 230031;  
2. 安阳工学院理学部, 河南安阳 455000)

**摘要:** 用 TSC 程序模拟了 EAST 装置等离子体放电的全过程。模拟中考虑了自举电流, 并加入了离子回旋共振加热 ICRH 和快波电流驱动 FWCD, 得到了中心电子温度 4.5keV、中心离子温度 3.8keV、中心电子密度  $1.2 \times 10^{20} \text{m}^{-3}$  的 D 形截面的等离子体。根据模拟结果对 EAST 装置进行了伏秒数分析, 并研究了不同等离子体电流上升时间、有效电荷数  $Z_{\text{eff}}$  对放电的影响。

**关键词:** 自举电流; ICRH; FWCD; 伏秒数

**分类号:** O532+.23

**文献标识码:** A

## 1 引言

随着托卡马克装置规模的扩大, 装置的建设和运行的费用也越来越大。在装置的设计和运行阶段, 利用大型数值模拟程序开展放电模拟研究有助于提高装置运行效率, 降低装置实验成本。EAST 是中国科学院等离子体物理研究所的全超导托卡马克, 设计等离子体电流 1MA, 实验目标是达到大的拉长比和三角变形、实现长脉冲及稳态运行<sup>[1]</sup>。本文以托卡马克模拟编码(TSC)等程序为主要模拟工具, 模拟了 EAST 装置全放电过程中非圆截面等离子体位形的形成及演化过程。模拟中采用了位形反馈控制, 考虑了自举电流, 并加入了离子回旋共振加热(ICRH)和快波电流驱动(FWCD), 得到了一系列等离子体参数随时间演化的结果。根据模拟结果对 EAST 装置进行了伏秒数分析, 研究了不同电流上升时间和有效电荷数  $Z_{\text{eff}}$  对放电结果的影响, 为 EAST 装置将来的实验运行提供参考。

TSC 为美国普林斯顿等离子体物理实验室 (PPPL) 发展的重要数值模拟程序, 由于其模拟结果与实验数据吻合很好, 已被世界各国主要大装置采用。在国内 TSC 程序已用于 HT-7U 装置等离子体上升段和平顶段的放电模拟<sup>[2-5]</sup>, 本文是在这一工作

的基础上进一步考虑波加热和驱动的影响, 并把模拟扩展到包括下降段的整个过程。

## 2 TSC 程序

TSC 程序是一个自由边界轴对称托卡马克等离子体随时间的演变以及和它相关控制系统的数值模拟程序。通过在矩形计算网格上解理想磁流体方程组来模拟自由边界等离子体随时间的演变过程, MHD 方程组通过边界条件和外部极向场线圈中的电流相互耦合, 同时在磁面坐标中求解压力和温度的面平均输运方程。程序考虑了反常输运、新经典电阻率、自举电流、辅助加热、电流驱动、 $\alpha$  粒子加热、气泡模稳定性等许多物理模型, 可以用于模拟控制系统、辅助加热、电流驱动等问题<sup>[3]</sup>。该程序的主要特点是:

- 单独的电子能量方程和离子能量方程;
- 新经典电阻率;
- 自举电流;
- 时间平均的锯齿模型;
- Coppi-Tang 输运模型;
- 只考虑完全电离离子的辐射。

在文献[6, 7]中对 TSC 程序的物理模型进行了

收稿日期: 2006-02-15; 修订日期: 2006-08-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10505022)

作者简介: 牛兴平(1977-), 男, 安徽合肥人, 毕业于中国科学院等离子体物理研究所理论物理专业, 现于安阳工学院理学部任讲师, 研究方向为等离子体物理理论与计算机模拟。

详细描述。TSC 可以模拟等离子体参数随时间的演变及其与周围外部极向场线圈和真空室、被动导体中电流相互耦合的过程,可用于托卡马克装置的工程设计,如 PF 磁体设计、位形控制放电模拟、垂直位移快速控制系统、破裂后 Halo 电流的分布等方面,在 BPX、CIT、TPX、KSTAR、ITER 等项目中有着广泛的应用,后来也与实验数据分析相结合,应用在 TFTR、DIII-D、NSTX、TCV 等装置的伏秒数分析、破裂过程模拟、垂直位移稳定性研究中。

### 3 EAST 装置的放电模拟

EAST 装置极向场系统采用 14 个超导磁体上下对称布置,其极向场线圈的基本参数见文献[1]。由于 EAST 装置采用欧姆加热场、平衡场和成形场一体化设计,使 EAST 的极向场系统大大简化。在等离子体的产生、上升等阶段,7 对极向场线圈既要提供伏秒数进行欧姆加热,又要同时完成等离子体的位形控制,极向场线圈中的电流可以看成欧姆加热场电流、平衡场电流、成形场电流和反馈控制电流等的叠加,这给放电过程中极向场电流波形设计和等离子体位形控制带来了很大的难度。我们使用 TSC 程序对 EAST 装置等离子体从开始的小圆截面限制器位形逐渐演化为具有大的拉长比和三角变形的偏滤器位形的放电全过程进行了数值模拟。

模拟的初始状态是等离子体电流  $I_p=100\text{kA}$ 、大半径  $R=1.58\text{m}$ 、小半径  $a=0.2\text{m}$  的圆形截面。等离子体电流在 4s 内线性增长到最大值  $I_p=1\text{MA}$ ,同时大半径增加到 1.78m,小半径增加到 0.4m,拉长为 D 形截面。保持 12s 的平顶阶段,再用 4s 回复到初始状态。在 4s 时加入了 ICRH 和 FWCD。假设 ICRH

的输入功率分布为  $S_{\text{ICRH}}(\psi, t) \propto \frac{d^2 \hat{\psi}^{a_1} (1-\hat{\psi})^{a_2}}{(\hat{\psi}-a)^2 + d^2}$ , 其

中  $\hat{\psi}$  为归一化的角向磁通,系数  $a$ 、 $d$ 、 $a_1$ 、 $a_2$  由在预先输入值中进行线性插值得到其随时间的演化,在本文的模拟中都取为常数值: $a=0$ 、 $d=0.25$ 、 $a_1=0$ 、 $a_2=2.5$ ,总功率为 3MW。设 FWCD 的电流密度分布为  $J_{\text{FW}} \propto f(\hat{\psi}, t)B$ , 其中  $f(\hat{\psi}, t) = \frac{d^2 \hat{\psi}^{a_1} (1-\hat{\psi})^{a_2}}{(\hat{\psi}-a)^2 + d^2}$ ,

$\hat{\psi}$ 、 $a$ 、 $d$ 、 $a_1$ 、 $a_2$  的物理意义和取值同上,驱动力的总环向电流为 0.2MA。

图 1 给出了本次放电模拟得到的等离子体主要

参数(等离子体电流  $I_p$ 、大半径  $R$ 、小半径  $a$ 、磁轴水平位置  $x_{\text{mag}}$ 、拉长比  $\kappa$ 、三角变形因子  $\delta$ 、中心电子离子温度、中心电子密度、环向比压  $\beta$ ) 随时间的演化过程。

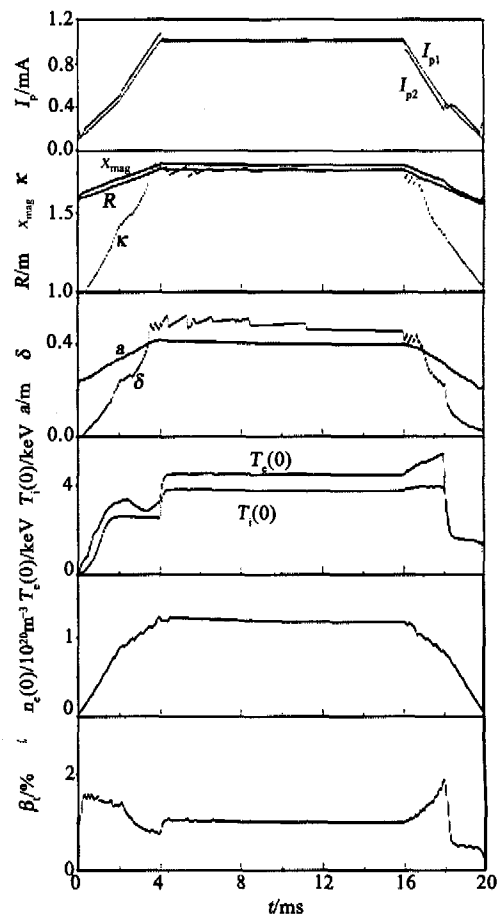


图 1 等离子体参数随时间的演化过程

从图 1 中可以看到,等离子体电流在前 4s 内几乎是线性地增长到最大值 1MA,在同一时间段中,大半径、小半径、磁轴水平位置、拉长比、三角变形分别从 1.58m、0.24m、1.58m、1.0、0 增长到 1.78m、0.4m、1.8m、1.78、0.5,等离子体从圆形截面拉长为 D 形截面。在保持了 12s 的平顶阶段后,又用了 4s 回复到初始状态。在平顶阶段中,中心电子温度为 4.5keV,中心离子温度为 3.8keV,中心电子密度为  $1.2 \times 10^{20}\text{m}^{-3}$ ,  $\beta_p$  值为 1% 左右,自举电流  $I_{bs}$  为 185kA。极向场线圈电流在时间点  $t=0, 4, 16, 20\text{s}$  的预设值和实际值列于表 1 中。表 2 列出了在这些时间点的等离子体主要参数的值。

表 1 极向场线圈电流的预设值和实际值

线圈	电流预设值/kA				电流实际值/kA			
	I(0)	I(4)	I(16)	I(20)	I(0)	I(4)	I(16)	I(20)
1	168.00	-6.00	-103.00	172.00	168.00	-2.23	-116.17	-22.29
2	168.00	30.00	-60.00	172.00	171.27	90.89	-68.35	-18.56
3	168.00	22.00	-54.00	172.00	171.27	115.04	-68.36	-52.93
4	200.00	470.00	530.00	10.00	200.00	470.00	530.00	10.00
5	1100.00	2300.00	2520.00	30.00	1103.25	2400.20	2509.55	25.59
6	20.00	-450.00	-750.00	-100.00	20.00	-437.83	-755.30	-145.25
7	98.00	-370.00	-430.00	-80.00	103.38	-399.80	-444.78	-87.74

### 4 伏秒数分析

装置设计中比较感兴趣的一个量就是整个放电过程中在某个位置建立和维持等离子体电流所需要的极向磁通变化量。我们选择参考点为  $R_{ref}=1.78m$ ,  $Z_{ref}=0$ , 并把这一点的总的极向磁通变化用  $\Delta\Phi_{total}$  表示。

可以将极向磁通变化看成由两部分组成: 一部分是等离子体电流在装置中心  $R=0$  与等离子体的内边界  $R=R_0-a$  之间区域产生的磁通  $\Delta\Phi^{external}$ , 另一部分是等离子体电流在  $R_0-a$  与参考点  $R_{ref}$  之间区域产生的磁通和等离子体内由于电阻性耗散消耗的磁通之和  $\Delta\Phi^{internal}$ 。即:  $\Delta\Phi_{total} = \Delta\Phi^{external} + \Delta\Phi^{internal}$ 。

$\Delta\Phi^{external}$  可以由以下公式计算得到<sup>[1]</sup>:

$$\Delta\Phi^{external} = L^{ext} I_p$$

其中,

$$L^{ext} = L_s - \mu_0 R \frac{M-1}{4} (\ln 8/\epsilon + \beta_p + l_i/2 - 3/2)$$

$$L_s = \mu_0 R \frac{f_1(\epsilon)(1-\epsilon)}{1-\epsilon + f_2(\epsilon)\kappa}$$

$$M = \frac{(1-\epsilon)^2}{(1-\epsilon)^2 f_3(\epsilon) + f_4(\epsilon)\kappa^{1/2}}$$

$$f_1(\epsilon) = (1 + 1.81\sqrt{\epsilon} + 2.05\epsilon) \ln 8/\epsilon - (2 + 9.25\sqrt{\epsilon} - 1.21\epsilon)$$

$$f_2(\epsilon) = 0.73\sqrt{\epsilon}(1 + 2\epsilon^4 - 6\epsilon^5 + 3.7\epsilon^6)$$

$$f_3(\epsilon) = 1 + 1.98\epsilon^2 + 0.49\epsilon^4 + 1.47\epsilon^6$$

$$f_4(\epsilon) = 0.25\epsilon(1 + 0.84\epsilon - 1.44\epsilon^2)$$

符号  $R$ 、 $\epsilon$ 、 $\beta_p$ 、 $l_i$  和  $\kappa$  分别是等离子体的大半径、纵横比  $a/R$ 、极向比压、内感和拉长比。

$\Delta\Phi^{internal}$  也可以分成两个部分: 由等离子体内的磁场感应的分量  $\Delta\Phi^{inductive}$  和电阻性耗散分量

$\Delta\Phi^{resistive}$ , 即:  $\Delta\Phi^{internal} = \Delta\Phi^{inductive} + \Delta\Phi^{resistive}$ 。

$\Delta\Phi^{inductive}$  可以由内感  $l_i$  计算得到,  $\Delta\Phi^{resistive}$  可以通过引入 Ejima 系数  $C_E$  来表示。

$$\Delta\Phi^{inductive} = \mu_0 R I_p \frac{l_i}{2}$$

$$\Delta\Phi^{resistive} = C_E \mu_0 R I_p$$

其中, Ejima 系数  $C_E$  是时间的函数, 且它的值与参考点的选择也有关。

表 2 中列出了在等离子体电流上升段结束时和平顶段结束时伏秒数分析的结果, 其中  $\Delta\Phi_{total}$  的值对于工程设计很重要。

表 2 等离子体主要参数值

参数	$t=0s$	$t=4s$	$t=16s$	$t=20s$
$I_p/MA$	0.10	1.07	1.01	0.12
$R_0/m$	1.57	1.78	1.78	1.58
$a/m$	0.22	0.41	0.40	0.23
$Z_{eff}$	1.0	1.0	1.0	1.0
$\langle n_e \rangle / 10^{20} m^{-3}$	0.05	1.2	1.2	0.05
$T_e(0)/keV$	0.05	3.56	4.50	1.26
$T_e(0)/\langle T_e \rangle$	1.90	3.32	3.68	2.98
$l/2$	0.64	0.62	0.72	0.82
$\beta_p/\%$	0.007	0.96	0.97	0.15
$\Delta\Phi^{external} / V \cdot s$	-	2.09	2.37	-
$\Delta\Phi^{internal} / V \cdot s$	-	2.51	4.50	-
$\Delta\Phi^{inductive} / V \cdot s$	-	2.31	2.34	-
$\Delta\Phi^{resistive} / V \cdot s$	-	0.20	2.16	-
$C_E$	-	0.09	0.97	-
$\Delta\Phi_{total} / V \cdot s$	-	4.60	6.87	-

### 5 等离子体电流上升时间和有效电荷数对放电结果的影响

### 5.1 等离子体电流上升时间

快速的电流上升时间可以减少上升段的电阻性耗散所消耗的伏秒数,但同时需要更大的功率提供电源,并会增加设备上的涡流损耗。在这里我们暂时不考虑这些条件,只研究不同的电流上升时间

对放电结果的影响。

我们做了几个不同电流上升时间的放电模拟,模拟的结果列于表 3 中,第二个就是我们在前面讨论了的,一、三、四分别是电流上升时间为 2s、5s 和 6s 的放电结果。

表 3 不同电流上升时间的放电结果

Case	$t_{\text{ramp}}/s$	$Z_{\text{eff}}$	$I_i^{\text{min}}$	$t_{\text{crit}}/s$	$\Delta\Phi(10)/\text{Wb}$	$C_E(10)$	$\Delta\Phi(t_{\text{crit}})/\text{Wb}$	$C_E(t_{\text{crit}})$
1	2	1.0	1.17	7	5.84	0.47	5.17	0.20
2	4	1.0	1.26	7	5.63	0.38	4.94	0.11
3	5	1.0	1.28	7.5	5.52	0.33	4.94	0.11
4	6	1.0	1.31	8	5.40	0.28	4.94	0.11
5	2	2.5	1.24	6.2	6.84	0.93	5.57	0.37
6	4	2.5	1.32	7.3	6.49	0.77	5.60	0.39
7	5	2.5	1.34	7.7	6.34	0.71	5.60	0.39
8	6	2.5	1.36	8.1	6.19	0.64	5.60	0.39

图 2 给出了由等离子体内的磁场感应的磁通  $\Delta\Phi^{\text{inductive}}$  随时间的演化过程。值得注意的是在上升段之后多长时间  $\Delta\Phi^{\text{inductive}}$  达到它的稳定值。对于上升段为 2s 的情况,当等离子体电流在  $t=2s$  时达到最大值 1MA,此时  $\Delta\Phi^{\text{inductive}}$  只是它稳定值的 83%,之后用了 5s 达到稳定值。相反我们注意到,对于上升段为 6s 的情况,在上升段结束时  $\Delta\Phi^{\text{inductive}}$  已达到稳定值的 94%,之后仅用了 2s 就达到稳定值。

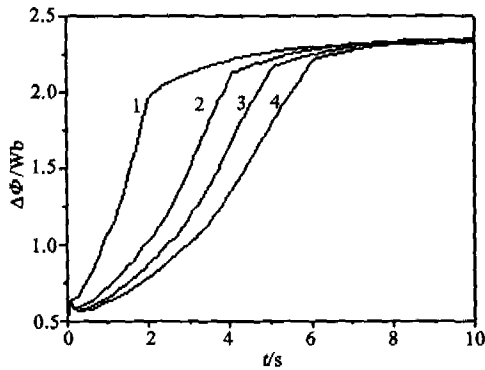


图 2  $\Delta\Phi^{\text{inductive}}$  随时间的演化过程

1、2、3、4 分别代表等离子体电流上升时间为 2s、4s、5s、6s 的情况。

图 3 给出了  $I_i$  随时间演化过程,它从另一个方面描述了同样的现象。 $I_i$  先是随时间减小,在上升段的末尾达到最小值  $I_i^{\text{min}}$ ,然后又逐渐增加到稳定值  $I_i^{\text{ss}}$ ,我们定义  $I_i$  达到稳定值  $I_i^{\text{ss}}$  的时间为  $t_{\text{crit}}$ ,这四次放电模拟得到的  $I_i^{\text{min}}$  和  $t_{\text{crit}}$  列于表 3 中。

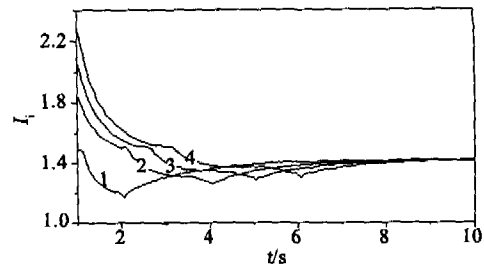


图 3 内感  $I_i$  随时间的演化过程

1、2、3、4 分别代表等离子体电流上升时间为 2s、4s、5s、6s 的情况。

### 5.2 有效电荷数 $Z_{\text{eff}}$

在前面的四次放电模拟中,取有效电荷数  $Z_{\text{eff}} = 1.0$ 。假如  $Z_{\text{eff}}$  大于 1.0,在伏秒数消耗的计算中将得到不同的结果。大的  $Z_{\text{eff}}$  会使等离子体电阻率增大,从而增加放电过程中的电阻性耗散所消耗的伏秒数,但这个效果会被两个因素抵消一部分。第一个因素是等离子体电阻率与电子温度的关系。大的  $Z_{\text{eff}}$  会使欧姆加热场增大,在电流上升阶段中某个特定时间点的等离子体温度也增大,从而会抵消一部分由于大的  $Z_{\text{eff}}$  而增大的等离子体电阻率。第二个因素是增大的电阻率会导致等离子体电流扩散时间减小,从而允许在不违背稳定性限制的条件下提高等离子体电流上升速度,由于感兴趣的量是从  $t=0$  到  $t=t_{\text{crit}}$  所消耗的伏秒数,等离子体电流上升速度的提高将会使  $t_{\text{crit}}$  减小,从而减小一部分由于大的  $Z_{\text{eff}}$  而增大的等离子体电阻率所导致的放电过程中增加的电阻性耗散所消耗的伏秒数。

为了验证上述说法,我们重复了前面的四次放电模拟,但把  $Z_{\text{eff}}$  从 1.0 改为 2.5, 结果列于表 3 中。

## 6 总结

用 TSC 程序对 EAST 装置进行了放电全过程的数值模拟, 对位形和电流的演化过程采用了反馈控制, 模拟中考虑了自举电流, 并加入了 ICRH 和 FWCD。整个过程为 20s, 其中上升段 4s, 平顶段 12s, 下降段 4s, 平顶段等离子体中心电子温度约为 4.5keV, 中心离子温度约为 3.8keV, 并得到了一系列等离子体参数随时间演化的结果。

根据这些模拟结果进行了伏秒数分析, 并研究了等离子体电流上升时间和有效电荷数  $Z_{\text{eff}}$  的不同对放电结果的影响, 发现伏秒数消耗并非在  $t = t_{\text{ramp}}$  时刻达到稳定值, 因为在这个时刻  $\Delta\phi^{\text{inductive}}$  仍然在变化, 直到  $t = t_{\text{crit}}$  时刻伏秒数消耗才达到稳定值。在增加  $Z_{\text{eff}}$  时, 等离子体电流扩散时间会减小, 这使我们可以保持 MHD 稳定性的同时提高等离子体电流上升速度。假如在增加  $Z_{\text{eff}}$  时没有改变等离子体电流上升速度, 那么在电流上升结束时大的  $Z_{\text{eff}}$  将会导致更多的伏秒数消耗, 例如对于固定的电流上升时间 4s, 把  $Z_{\text{eff}}$  从 1.0 增加到 2.5, 在固定时刻  $t=10\text{s}$  伏秒数消耗将会从 5.63 Wb 增加到 6.49Wb, 相应的  $C_E(10)$  将会从 0.38 增加到 0.77。因

此, 为了使放电过程中伏秒数消耗达到最小, 应在保证 MHD 稳定性的条件下尽可能的提高等离子体电流上升速度。

## 参考文献:

- [1] 武松涛. HT-7U 装置设计文集 [R]. 合肥: 中国科学院等离子体物理研究所, 1999.
- [2] Wu Bin. Introduction of fusion driven subcritical system plasma design [J]. Fusion Engineering and Design, 2003, 66-68: 181-186.
- [3] 吴斌, 张澄. HT-7U 等离子体位形与电流控制的数值模拟 [J]. 核聚变与等离子体物理, 2002, 22(3): 193.
- [4] Bin Wu. Discharge simulation of HT-7U tokamak [A]. 30<sup>th</sup> EPS Conference on Contr. Fusion and Plasma Phys., ECA, Vol. 27A [C]. St. Petersburg, 2003, P-1.150.
- [5] Bin Wu, Plasma vertical position control simulation of EAST tokamak [A]. 31<sup>st</sup> EPS Conference on Plasma Phys., London, 28 June-2 July 2004 ECA Vol.28G, P-5.131.
- [6] Jardin S C, Pomphrey N, Hoffmann F. Dynamic modeling of transport and positional control of tokamaks [J]. J. Computational Physics, 1986, 66: 481.
- [7] Jardin S C, Bell M G, Pomphrey N. TSC simulation of ohmic discharges in TFTR [J]. Nucl. Fusion, 1993, 33: 371.

## Discharge simulation for EAST and analysis of flux consumption

NIU Xing-ping<sup>1,2</sup>, WU Bin<sup>1</sup>

(1. Institute of Plasma Physics, the Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031;

2. Anyang Institute of Technology, Anyang 455000)

**Abstract:** A simulation code is used to simulate the whole tokamak discharge process for parameters relevant to EAST. This simulation takes into account of the plasma bootstrap current, ion cyclotron resonance heating and fast wave current drive. A D-shape plasma equilibrium with peak density of  $1.2 \times 10^{20} \text{m}^{-3}$ ,  $T_e = 4.5 \text{keV}$ ,  $T_i = 3.8 \text{keV}$  is got. According to the simulation results, we make a analysis of flux consumption for EAST, and study influences of the plasma current ramp up time and the effective charge.

**Key words:** bootstrap current; ICRH; FWCD; Flux consumption