

EAST 纯欧姆放电的数值模拟

刘成岳^{1,2}, 肖炳甲¹, 吴 斌¹, 刘连忠¹, 罗正平¹

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

摘 要: 利用 $1/2$ -D 平衡演化程序对 EAST 的首轮纯欧姆放电进行了数值模拟, 获得的模拟结果与实验结果吻合得很好。同时, 对放电全过程中的伏秒消耗进行了分析。

关键词: EAST; $1/2$ -D 平衡演化程序; 伏秒; 数值模拟

中图分类号: O511⁺.9

文献标识码: A

1 引言

EAST 是一台具有非圆截面的全超导托卡马克装置。实验目标是要实现长脉冲稳态运行, 以及在稳态运行条件下改善约束, 从而为未来先进聚变反应堆奠定工程技术和物理基础。同时其上开展的工作对未来在法国建成的 ITER 也具有重要的参考价值, 这使得它的建成在聚变领域具有重要的意义。

本文使用 $1/2$ -D 平衡演化程序对 EAST 首轮纯欧姆限制器位形的放电进行了模拟, 该程序已用于 PBX、TFTR、DIII-D 等托卡马克的放电模拟及 BPX、KSTAR、ITER 等装置的设计工作。

2 物理模型^[1,2]

$1/2$ -D 平衡演化程序是一个自由边界轴对称托卡马克等离子体随时间演变及其相关控制系统的数值模拟程序, 它通过在矩形计算网格上解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、 α 粒子加热、气泡模稳定性等多种物理模型, 它可以用于模拟控制系统、辅助加热、电流驱动等问题。程序采用笛卡儿空间网格把计算范围分为等离子体

区、真空区和导体区三个区。等离子体区与真空区的分界面可以随时间变化而变化, 它由第一个接触到限制器或含 X-point 的等磁通面确定。在每个区内分别求解经过一系列处理的 MHD-Maxwell 方程组, 这些处理包括引入了等离子体质量放大因子和粘滞放大因子、真空区电导等参数。由于这些特殊的处理, 方程组在穿越区域边界时形式并不发生改变, 其解仍保持连续, 便于进行数值求解。这里主要介绍 $1/2$ -D 平衡演化程序的特点, 详细物理模型的数学表述见文献[1, 2]。本程序中包括: (1) 单独的电子能量方程和离子能量方程; (2) 新经典电阻率; (3) 自举电流; (4) 时间平均的锯齿模型; (5) Coppi-Tang 输运模型; (6) 只考虑完全电离离子的辐射。初始的自由边界等离子体平衡是在一个矩形网格内形成, 由极向场电流提供边界条件。等离子体电子温度和离子温度是通过求解 $1/2$ -D 面平均输运方程获得。在粒子输运的模拟中, 等离子体密度具有如下的剖面分布形式: $n_e(\phi, t) = n_e^0(t) [1 - \hat{\psi}^{\beta_N}]^{\alpha_N} + n_b(t)$ 。其中, $\hat{\psi}$ 为归一化的磁通坐标, 在磁轴处为 0, 等离子体边界处为 1, $n_b(t)$ 和 $n_e^0(t)$ 分别为等离子体在边界及中心处的密度。在 EAST 第 2344 次放电的整个模拟中, 设 $\alpha_N = 1$, $\beta_N = 2$ 。

3 EAST 纯欧姆放电的程序场设计

收稿日期: 2006-12-30; 修订日期: 2007-04-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10505022); EAST 国家大科学工程“计投资(1998)1303 号项目”资助

作者简介: 刘成岳(1975-), 安徽省淮南市人, 合肥工业大学讲师, 中科院等离子体物理研究所博士研究生, 主要从事等离子体平衡与控制及托卡马克放电数值模拟的研究。

3.1 EAST 装置基本参数^[3]

EAST 极向场系统采用一体化的设计方法, 在等离子体的产生、上升、成形、平顶各阶段用于欧姆加热和位形控制的电流在同一线圈中流动, 不再单独区分欧姆加热线圈和位形控制线圈, 这种设计不仅可以使装置的运行更加灵活而且也可以使 EAST 极向场系统大大简化。EAST 装置极向场系统采用 14 个超导磁体相对于装置的赤道面对称布置。详细的极向场线圈位置、坐标及 EAST 各基本物理参数分别见图 1、表 1 和表 2。设置在装置中心的 6 个极向场线圈组成中心螺线管, 中心螺线管在纯欧姆加热下是等离子体放电的关键部件, 其主要功能是提供实验中等离子体击穿、爬升及平顶所需的伏秒消耗, 所以通常又称为欧姆场线圈, 其中 PF5 对于等离子体的三角形变有着重要作用。而位于中心螺线管旁边的一大一小两个线圈 PF7 和 PF9(通常称之为大偏滤线圈和小偏滤线圈)主要用于等离子体的拉长及获得高性能参数的等离子体, 在设计中为了尽可能贴近纵场线圈而将其一分为二; 同时, 为了只用一组电源对其供电而一直在放电波形上保持这两个线圈在各种位形下电流始终相同。PF11 和 PF13 主要提供垂直场, 用于等离子体的平衡, 抵抗等离子体内部向外的扩张力, 所以又称为平衡场线圈。

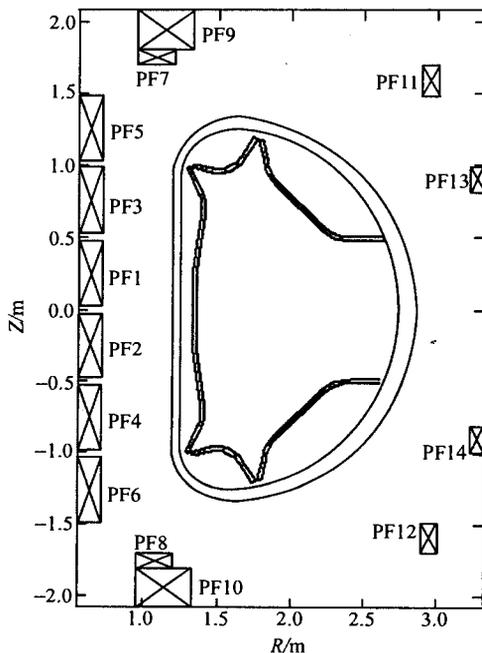


图 1 EAST 极向场线圈布置

表 1 极向场线圈的名字、几何尺寸及匝数

序号	名称	R/m	Z/m	$\Delta R/m$	$\Delta Z/m$	N_r	N_z
1	PF1	0.62866	0.25132	0.16078	0.45177	7	20
2	PF3	0.62866	0.75396	0.16078	0.45177	7	20
3	PF5	0.62866	1.2566	0.16078	0.45177	7	20
4	PF7	1.07217	1.7537	0.24694	0.09769	11	4
5	PF9	1.13679	1.94092	0.37618	0.27473	17	12
6	PF11	2.94558	1.59073	0.12844	0.21256	6	10
7	PF13	3.2698	0.90419	0.08896	0.17188	4	8
8	PF2	0.62866	-0.25132	0.16078	0.45177	7	20
9	PF4	0.62866	-0.75396	0.16078	0.45177	7	20
10	PF6	0.62866	-1.2566	0.16078	0.45177	7	20
11	PF8	1.07217	-1.7537	0.24694	0.09769	11	4
12	PF10	1.13679	-1.94092	0.37618	0.27473	17	12
13	PF12	2.94558	-1.59073	0.12844	0.21256	6	10
14	PF14	3.2698	-0.90419	0.08896	0.17188	4	8

表 2 EAST 装置基本物理参数

参数	设定值
环向场 B/T	3.5 ~ 4.0
等离子体电流 I_p/MA	1.0 ~ 1.5
大半径 R/m	1.70
小半径 a/m	0.4
拉长比 κ	1.5 ~ 2.0
三角变形 δ	0.3 ~ 0.5
中性束注入功率 P_{NB}/MW	4.0 ~ 8.0
离子回旋加热功率 P_{ICRH}/MW	3.0 ~ 6.0
低杂波电流驱动功率 P_{LHCD}/MW	3.5 ~ 8.0
电子回旋加热功率 P_{ECRH}/MW	0.5 ~ 1.5
脉冲时间/s	1000
位形	双零和单零位形

3.2 欧姆放电程序场波形设计^[4]

等离子体演化的设计是放电模拟方案中最核心的内容, 主要由放电程序场和等离子体电流、环向场、密度等参数的演化组成, 其中放电程序场的设计是最关键最复杂的部分。所谓放电程序场就是极向场中用来提供欧姆加热和控制等离子体位形变化的波形。由于 EAST 采用一体化的设计方案, 不再区分单独的加热场和平衡场等线圈, 在等离子体的产生、上升、成形、平顶各阶段用于欧姆加热和位形控制的电流在同一线圈中流动, 使得程序场的设计变得复杂, 但极向场线圈中的电流总的来说还可以看成是由欧姆加热场电流和平衡场电流两

部分叠加而成的。在整个放电过程中欧姆加热场在等离子体击穿时为正向最大,以后随着伏秒数的消耗,组成欧姆加热场的各个极向场线圈中的电流按比例减少,直到越过零点,再到达负向电流最大,至此伏秒数耗尽,放电结束。对于 EAST 首轮物理

实验是纯欧姆放电,不考虑任何的非感应电流驱动,等离子体完全依赖于欧姆加热。表 3 中给出了经过反复调整的 EAST 首轮物理放电中第 2344 次放电限制器位形等离子体爬升、平顶、下降的全过程放电波形参数。

表 3 EAST 第 2344 次放电的程序场波形参数

时间/s	极向场线圈电流/kA						等离子体 电流/kA	等离子体密 度/ 10^{19}m^{-3}	环向场函数 $\Gamma\cdot\text{m}$
	PF1	PF3	PF5	PF7,9	PF11	PF13			
0.0316	6.55	6.88	7.99	3.11	0.79	0.40	13.40	0.07	4.45
0.5	4.84	5.23	6.19	2.10	0.03	-0.43	138.91	0.38	4.45
0.58	4.84	4.89	5.73	1.98	-0.03	-0.47	156.43	0.40	4.45
1.517	2.67	3.36	3.83	0.58	-0.3	-0.30	157.09	0.35	4.45
2.1	2.22	2.77	3.13	0.42	-0.08	-0.43	85.58	0.357	4.45
2.2	2.08	2.63	2.94	0.34	-0.21	-0.74	70.40	0.353	4.45

4 模拟结果及实验比较

在 EAST 首轮物理放电模拟中,随机选取几次放电进行模拟。这几次放电的峰值电流为 148 ~ 250kA,放电脉冲时间为 2.05 ~ 4.5s,中心粒子密度为 $(0.4 \sim 1) \times 10^{19}\text{m}^{-3}$ 。由于 $1\frac{1}{2}$ -D 平衡演化程序不能模拟等离子体击穿,所以在大约 31ms 时投入模拟。模拟中所需的极向场线圈的位置、尺寸、匝数如图 1 和表 1 所示。初始等离子体平衡的建立依赖于初始的等离子体电流、极向场线圈的电流、初始环向场、初始安全因子以及初始压强。等离子体初始平衡建立后,它将随时间进行演化,我们以第 2344 次放电为例进行说明。图 2 ~ 图 5 分别给出了等离子体电流、极向场线圈电流、等离子体大半径及环电压随时间的演化。等离子体电流在 0.58s 达到平顶 156.43kA,维持平顶到 1.52s,然后等离子体电流下降,到 2.20s 降到 70.4kA,放电结束。与此同时,等离子体的大半径从外侧向内侧移动,最后在平顶稳定下来,平顶结束后又逐渐向外侧移动。可以看出,等离子体电流、极向场线圈电流的模拟结果与实验结果吻合得很好。这说明等离子体电流的爬升和等离子体位形及整个极向场的控制系统都非常稳定。在等离子体击穿后,极向场系统必须继续保持电流的变化以使环电压得以快速下降,平衡场必须开始投入,以使等离子体快速稳定上升。从图 5 中可以看出,等离子体击穿后的环电压与实验结果基本一致。对于等离子体的一些重要参数,比如中心安全因子、边界安全因子、离子温

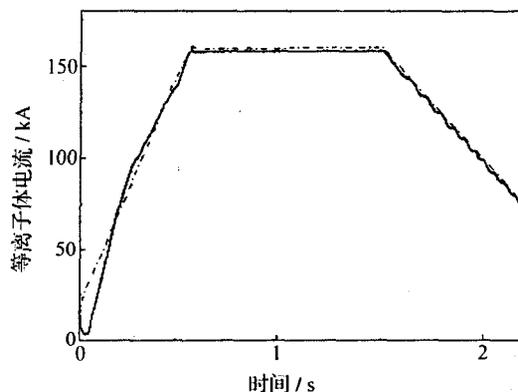


图 2 等离子体电流随时间的演变
虚线——模拟数据; 实线——实验数据。

度、拉长比、小半径、三角形变等也有模拟的结果,如图 6 所示,但目前还没有实验数据,这些结果对实验有着重要的参考价值。从拉长比的演化可以看出,在击穿后的初始时刻由于极向场 7 对线圈通的电流不是严格的一致,导致等离子体略微的拉长;随后拉长比降至 1 形成限制器位形,然后继续下降,表示此时的位形有点向里凹,同时大半径、小半径、三角形变发生相应的变化。

5 欧姆放电全过程伏秒消耗的分析

对于纯感应驱动托卡马克来说,来自欧姆加热变压器的伏秒是有限的,在整个放电过程中有效利用伏秒是非常重要的,所以有必要对整个放电过程的伏秒消耗进行分析。要想在某个位置建立和维持

等离子体电流和平衡位形, 极向场线圈提供的伏秒要大于等于等离子体在放电过程中的伏秒消耗。等

离子体所消耗的总伏秒数 $\Delta\Phi_{\text{tot}}$ 分为外部的伏秒消耗 $\Delta\Phi_{\text{ext}}$ 和内部的伏秒消耗 $\Delta\Phi_{\text{int}}$ 两部分。

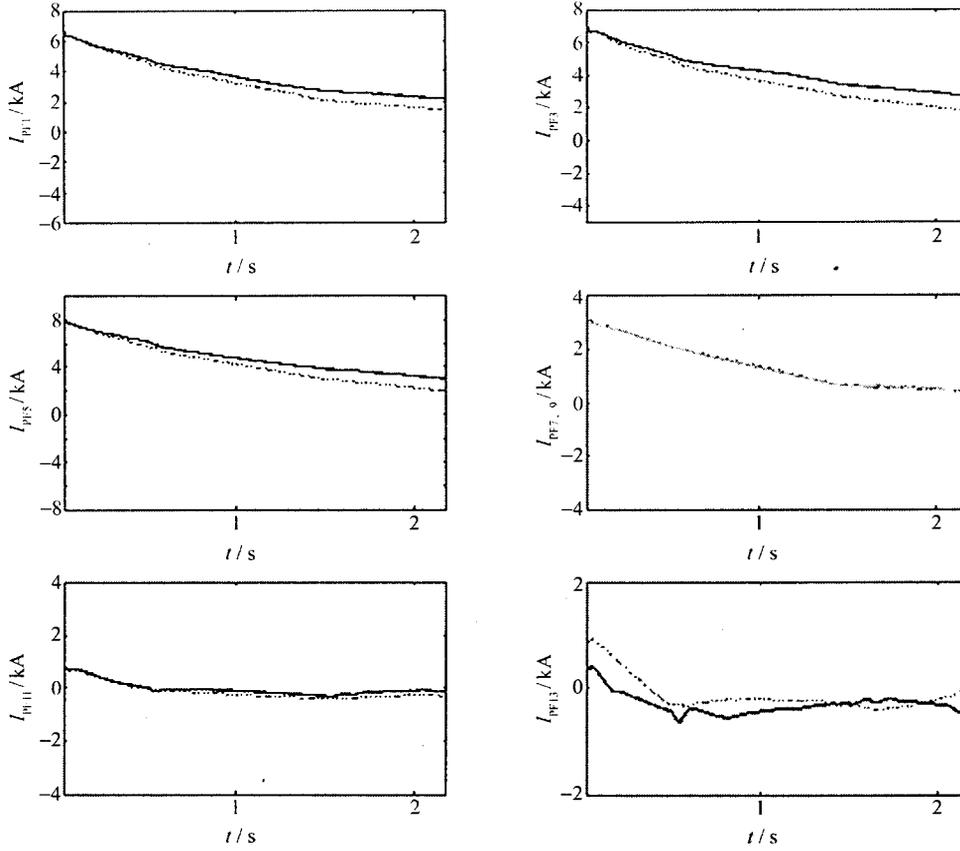


图3 极向场线圈电流随时间的演变

虚线——模拟数据; 实线——实验数据。

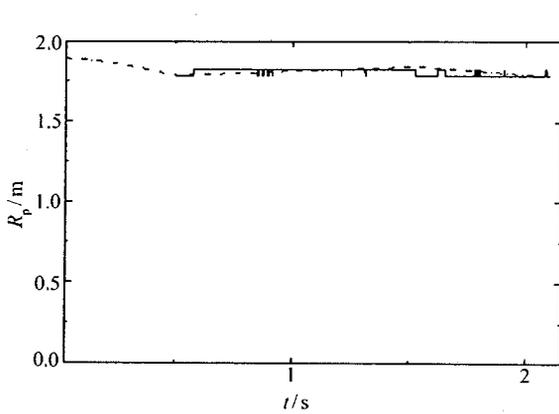


图4 等离子体大半径随时间的演化

虚线——模拟数据; 实线——实验数据。

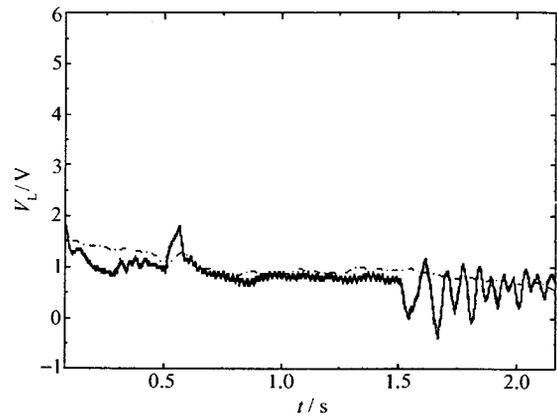


图5 环电压随时间的演化

虚线——模拟数据; 实线——实验数据。

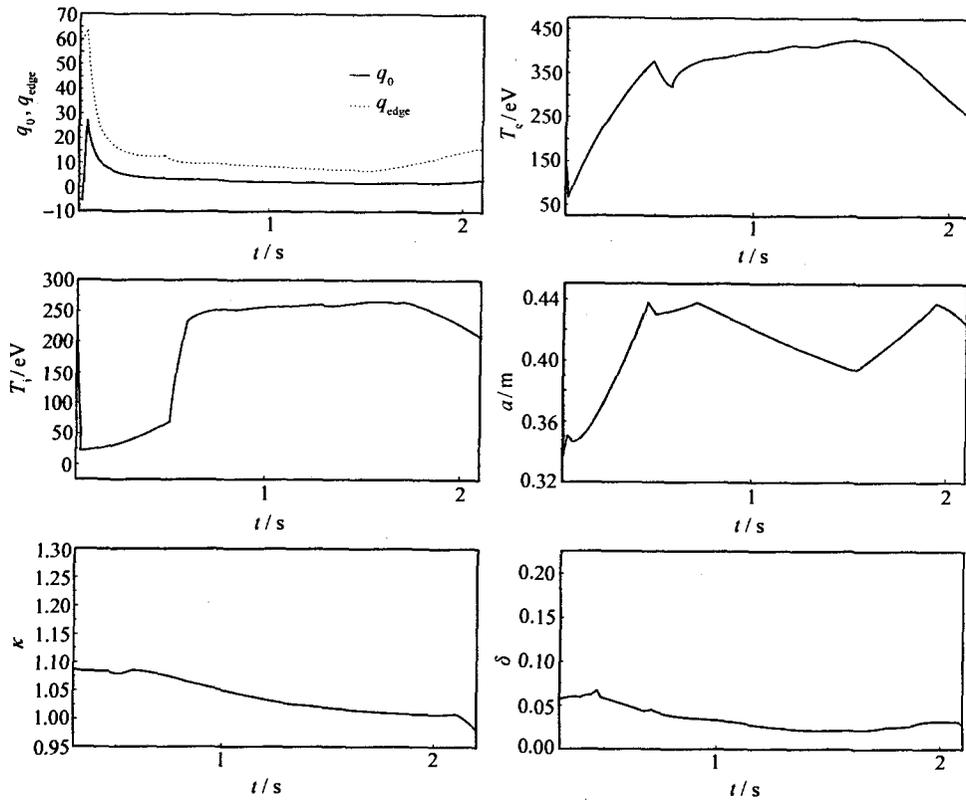


图 6 等离子体中心、边界安全因子(q_0 、 q_{edge})、电子温度(T_e)、离子温度(T_i)、小半径(a)、拉长比(κ)和三角形变(δ)随时间的演变

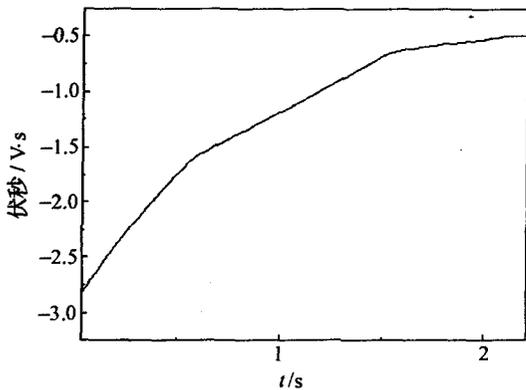


图 7 PF 线圈提供的伏秒随时间的变化

图 7 为极向场线圈提供的伏秒随时间的演化，图 8 为等离子体在放电全过程中的各种伏秒消耗。由图 8 可以看出，在等离子体达到平顶后，由感性磁通消耗 $\Delta\Phi_{ind}$ 和外部磁通消耗 $\Delta\Phi_{ext}$ 保持不变，总磁通消耗 $\Delta\Phi_{tot}$ 的增加仅仅是电阻性磁通消耗的贡献，其值为环电压和平顶时间的乘积。另外，在达

到平顶以后电阻性磁通消耗 $\Delta\Phi_{res}$ 几乎是保持线性增长，还可以看出，电阻性磁通消耗和内部磁通消耗非常接近。这表明，电阻性的伏秒消耗要远远大于电感性的伏秒消耗，意味着对于 EAST 首轮物理实验来说，杂质的含量还是比较高的。因此，对于下一轮物理实验来说，这也是要考虑的一个方面。

6 总结

利用 $1\frac{1}{2}$ -D 平衡演化程序对 EAST 欧姆放电的全过程进行了模拟，等离子体电流、等离子体大半径、环电压及 PF 电流波形的模拟结果与实验取得了较好的吻合，说明了程序本身在放电模拟中的可靠性。同时，对于本轮实验没有测得的量，比如中心和边界安全因子、离子温度、小半径等等等离子体的重要参数，也有模拟结果，这对于实验结果的分析 and 未来模拟放电的设计都有重要的参考价值。

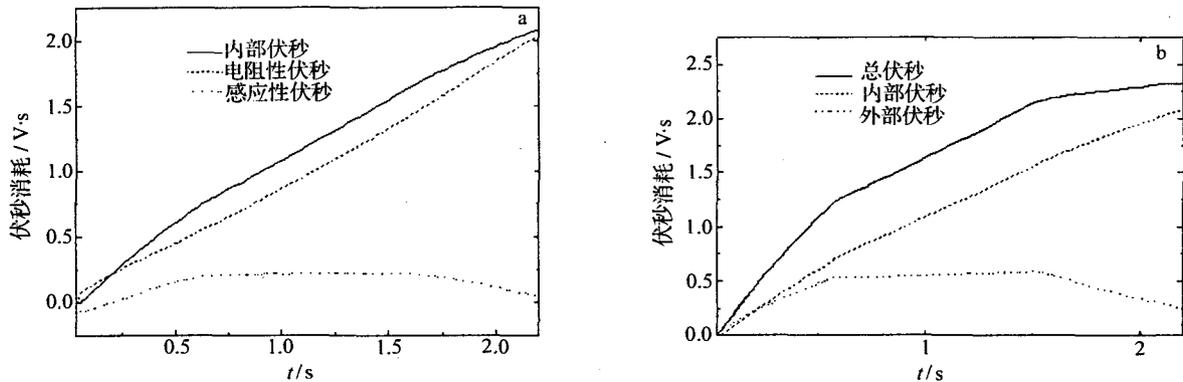


图8 等离子体在在放电过程中的消耗

a——内部伏秒、电阻性伏秒及感性伏秒的消耗; b——总伏秒、内部伏秒及外部伏秒消耗。

参考文献:

- [1] Jardin S C, Bell M G, Pomphrey N. TSC simulation of ohmic discharges in TFTR [J]. Nucl. Fusion, 1993, 33(3): 371.
- [2] Jardin S C, Pomphrey N, DeLucia J. Dynamic modeling of transport and positional control of tokamaks [J]. J. Comput. Phys., 1986, 66(2): 481.
- [3] 牛兴平. EAST 位形形成及演化的数值模拟 [D]. 合肥: 中国科学院等离子体物理研究所, 2006.
- [4] 吴斌. HT-7U 超导托卡马克装置的放电模拟研究 [D]. 合肥: 中国科学院等离子体物理研究所, 2002.
- [5] Bandyopadhyay I. Modeling of ohmic discharges in ADITYA tokamak using the tokamak simulation code [J]. Plasma Phys. Contr. Fusion, 2004, 46(9): 1443.
- [6] Jardin S C. Poloidal flux linkage requirements for the ITER [J]. Nucl. Fusion, 1994, 34(8): 1145.
- [7] Ejima S, Callis R W, Luxon J L, et al. Volt-second analysis and consumption in Doublet III plasmas [J]. Nucl. Fusion, 1982, 22(10): 1313.

Numerical simulation of ohmic discharge in the EAST tokamak

LIU Cheng-yue^{1,2}, XIAO Bing-jia¹, WU Bin¹, LIU Lian-zhong¹, LUO Zheng-ping¹

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

2. Hefei University of Technology, Hefei 230009)

Abstract: The first ohmic discharge in the EAST experiment is simulated using the famous $1/2$ -D equilibrium evolution code. A good agreement is obtained between modeling and experiment. At the same time, the volt-second consumption for the entire duration is analyzed.

Key words: EAST; $1/2$ -D equilibrium evolution code; Volt-second; Numerical simulation