

EAST 装置等离子体放电位形快速识别研究^{*}

黄勤超^{1)†} 罗家融¹⁾ 王华忠¹⁾ 李 1)

1) 中国科学院等离子体物理研究所, 合肥 230031)

2) 解放军炮兵学院信息工程教研室, 合肥 230031)

(2005 年 2 月 8 日收到, 2005 年 5 月 8 日收到修改稿)

为了适应超导托卡马克装置 EAST 位形控制运行模式的需要, 研究了等离子体放电位形快速识别算法, 给出了等离子体放电位形重建的模拟计算结果, 并与美国 GA 平衡反演程序 EFIT 计算的平衡结果进行了详细的误差对比分析. 结果表明, 通过外部磁测量和合适的电流剖面模型, 并结合实时平衡重建算法可以快速地 EAST 等离子体放电位形进行识别.

关键词: 托卡马克, 等离子体, 平衡重建, 数值模拟

PACC: 5225, 5255, 5265

1. 引 言

最优化地进行托卡马克放电, 要求正确地反馈控制许多放电参数. 要做到这一点, 首先这些参数值必须被准确测量. 事实上许多放电参数, 如等离子体放电位形和安全因子剖面等, 到目前为止还不能被直接测量. 因此, 对等离子体放电位形的快速识别成为现代托卡马克装置实验很重要的工作, 是对等离子体位形的准确控制以及对偏滤器位形的 X 点和靶板打击点精确控制的基础. 从上世纪 80 年代末以来, 人们通过对等离子体周边磁场和磁通的测量并用磁测量信号重建等离子体放电位形的各种方法被相应地提出.

Swain 和 Neilson 提出了一种通过外部磁测量来重建等离子体形状和边界极向磁场线积分的有效方法^[1]. 在此方法中等离子体电流分布用一些电流丝来近似. 在 D-III^[2] 上, 已经显示这种方法能准确地确定大部分限制器的和偏滤器的等离子体位形. 但是, 当等离子体足够大, 能同时达到顶部, 内限制器和外限制器时, 或者等离子体电流分布很宽时, 这种方法就变得不准确了.

Luxon 和 Brown 提出了一种更为完善和精确的

方法^[3]. 在他们的方法中, 用分布源模拟等离子体电流. 这种方法还产生一个和 MHD 平衡约束一致的电流分布. 由于大量实验数据必须要常规处理, 所以非常需要一个可选择的、快的, 而且足够精确的方法来确定等离子体位形和总体电流分布.

Lao 和 John 等提出了基于 picard 迭代法的等离子体平衡重建方法^[4]. 该方法能够有效地重建电流分布参数, 等离子体位形和满足 MHD 平衡约束的电流密度分布. picard 迭代近似的保存了外部的磁测量, 用许多描述 β_p , I_i 和等离子体总电流 I_p 等物理参数, 将电流分布线性地用参数来表示, 并且通过交叉地平衡重建迭代来计算结果. 最初的非线性最优化问题被转换成一系列平衡迭代的最小二乘问题, 就可以容易地用偏导的方法解决. 这种解决线性最小二乘问题的方法对于截断误差和测量误差不敏感, 而且特别适合处理这样条件复杂的问题. 平衡重建同等地对待测量的极向磁通和有适当测量误差的其他信号, 不需要知道围绕计算区域边界的极向磁通. 无论是限制器的还是偏滤器的等离子体位形都能够被很好地处理. 这种方法对于超导托卡马克装置 (experimental advanced superconducting tokamak, EAST) 同样适用. EAST 装置的主要设计参数列于表 1 中.

^{*} 国家自然科学基金(批准号: 10475079)资助的课题.

[†] E-mail: qc_huang@ipp.ac.cn

表 1 EAST 装置的主要设计参数

纵场 B_0/T	3.5
等离子体总电流 I_p/MA	1
大半径 R/m	1.98
小半径 a/m	0.50
环径比 R/a	4
拉长比 κ	1.6—2
三角形变 δ	0.6—0.8
放电长度/s	1—1000
放电位形	双零/单零

2. 等离子体放电位形快速识别算法

就 EAST 装置而言,等离子体放电位形的重要特征主要包括是否存在 X 点以及它的数量和位置、最后一个闭合磁通面和限制器之间的距离、拉长比、三角形变、大半径、小半径以及在 X 点附近处磁力线和偏滤器靶板上的接触点.这些将影响 EAST 的运行特征.诸如 MHD 稳定性、放电时热量在偏滤器靶板上的沉积位置、等离子体垂直位置是否可以控制等等.

很多可以满足实时要求的等离子体快速识别,同时尽可能符合离线平衡重建结果的方法已经被提出.第一种方法采用了回归分析^[5,6],将一些诊断测量反演成一个或多个放电位形参数(如大半径或拉长比).方程是以容易实现实时计算为准.采用这种方法的实例是神经网络^[7]和函数参数化^[8].这些方法是将该方程表示平衡范围的平衡数据库输入回归分析程序,如果所选的方程不能很好地模拟位形参数和诊断之间的关系或实验中产生的平衡超出了平衡数据库的范围,这种实时分析将会出错.第二种方法是电流丝和与其类似的有限电流元法^[9,10],用细丝(线电流模型)来代表等离子体电流,使任意位置的极向磁通都可以计算.第三种方法是局部展开法^[11],利用局部磁场的位置扩张,从而诊断推测等离子体放电边界的位置.最后就是文中提到的基于 picard 迭代法的等离子体平衡重建方法.

为了快速识别等离子体放电位形,我们研究了基于 picard 迭代法的等离子体平衡重建方法.该算法的背景在文献[4]中给出,这里不再赘述.我们研究的重点在于怎样使算法符合 EAST 装置运行的要求,实际应用该算法为目的.原则是既要满足实时性的要求又要避免为了达到较高运行速度而造成算法

的准确性和适用性降低.

首先,我们简要介绍一下平衡重建算法^[12].平衡算法的核心是计算 R, Z 平面上极向磁通 ψ 的分布和环向电流密度 J_t ,使得该数据与诊断数据满足最小二乘意义上的拟合,同时满足 Grad-Shafranov 方程.

$$\Delta^* \psi_p = -\mu_0 R J_t(R, \psi), \quad (1)$$

$$\Delta^* = R \frac{\partial}{\partial R} \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial R} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}, \quad (2)$$

这里总的极向磁通为 $\psi = \psi_p + \psi_c$, ψ_p 是等离子体产生的磁通, ψ_c 是除了等离子体以外的所有电流源产生的磁通.电流密度由少量的几个自由参数表示的多项式模型.

$$J_t(R, \psi; \alpha_j, \gamma_j) = R \left[P'(\psi; \alpha_j) + \frac{\mu_0 FF'(\psi; \gamma_j)}{4\pi^2 R^2} \right], \quad (3)$$

这里 P 是等离子体压力, $F = 2\pi R B_t / \mu_0$ 是和极向电流相关的量. F' 表示关于极向磁通的偏导. α_j 和 γ_j 则是该模型中的自由参数.对于 P 和 FF' 选取比较常用的多项式形式.

$$P(\psi, R, Z) = \sum_{n=0}^{n_p} \alpha_n \psi_n^n, \quad (4)$$

$$FF'(\psi, R, Z) = \sum_{n=0}^{n_f} \gamma_n \psi_n^n, \quad (5)$$

这里, $\alpha_j = [\alpha_0, \alpha_1, \dots, \alpha_{n_p}]$, $\gamma_j = [\gamma_0, \gamma_1, \dots, \gamma_{n_f}]$, $\psi_N = (\psi - \psi_{\text{axis}})(\psi_{\text{bdy}} - \psi_{\text{axis}})$ 是归一化磁通函数, ψ_{axis} 是位于磁轴处的磁通值, ψ_{bdy} 是位于最后一个闭合磁通面的磁通值.

从实时性要求考虑,在 EAST 等离子体放电位形识别算法中,我们可以不采用从一个固定诊断数据集出发经过多次迭代求得一个收敛解来确定等离子体位形参数的方法.而是,对于每一次新的平衡重建,取得一个新的诊断数据集,最近的平衡解被当作起始点,仅做一次迭代.一次迭代求解的充分性在文献[11]中已经给出. EAST 等离子体放电位形识别算法流程如图 1 所示.

图 1 中得到的诊断数据向量 D 主要包括小探针测得的等离子体周边的局部磁场、单匝环测得的等离子体周边磁通值、Rogowski 线圈测得的等离子体总电流和极向场线圈的电流值.最一般的位形重建方法将所有环向电流源看成未知量,因此除了等离子体电流分布 J_t 的自由参数以外,外部极向场线

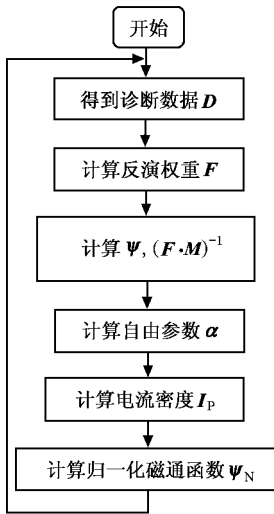


图 1 等离子体放电位形识别算法流程图

圈电流也可以作为未知量.但是,由于 EAST 位形快速识别的需要并且极向场线圈电流可以直接测量,我们把极向场线圈电流作为已知量而不用作为反演参数.反演权重向量 F (它的每一个元素对应于一个诊断信号测量误差的倒置)的计算公式是 $F = 1/\epsilon D$.根据多项式基本函数形式(4)式和(5)式,我们给出矩阵 ψ 的具体形式如下:

$$\psi = \left[R, R\psi_N, \dots, R\psi_N^n, \frac{1}{R}, \frac{\psi_N}{R}, \dots, \frac{\psi_N^n}{R} \right], \quad (6)$$

向量 R 表示计算网格点上的径向坐标值.矩阵 $M = G_p \times \psi$,其中 G_p 表示等离子体计算网格点电流与磁诊断信号之间的感应系数.通过矩阵 M 将诊断数据 D 和反演自由参数 U 联系在一起.如下式所示:

$$D = M \times U, \quad (7)$$

其中 $U = [I_c, \alpha]$,由于极向场线圈电流 I_c 不作为反演自由参数.因此,反演自由参数只有 α .在位形识别计算进行之前,诊断数据 D 中小探针和单匝环所测量的磁场和磁通值要相应地减去极向场线圈电流的磁场或磁通贡献部分.此时,反演自由参数为

$$\alpha = (F \cdot M)^{-1} \times (F \cdot D), \quad (8)$$

等离子体网格点上的电流为

$$I_p = \psi \times \alpha. \quad (9)$$

通过求解(1)式中的 Grad-Shafranov 方程,得到等离子体的磁通贡献 ψ_p .

极向场线圈的磁通贡献为

$$\psi_c = G_{\text{grid-coil}} \times I_c, \quad (10)$$

其中 $G_{\text{grid-coil}}$ 是极向场线圈和等离子体计算网格点之间的感应系数.这样就可以得到计算网格点上的总

磁通值为 $\psi = \psi_p + \psi_c$.通过寻找等离子体边界和磁轴算法得到等离子体边界磁通值 ψ_{bdy} 和磁轴磁通值 ψ_{axis} ,相应地得到归一化磁通 ψ_N .

通过以上等离子体位形识别算法流程分析可知,只要得到磁测量数据,并通过较少几个自由参数的位形重建计算就可以得到满足 Grad-Shafranov 方程的平衡解.只要得到真空室区域的磁通值,相应地等离子体位形参数就可以计算出来,从而达到位形识别的目的.另外, EAST 等离子体位形识别算法具有由一系列向量和矩阵操作组成的优点,这种操作是当前许多处理器所擅长的,从而能大大增强 EAST 等离子体位形识别的实时性.

提高位形识别算法运行速度的具体方法有:1)选择合适的计算网格大小,原则是计算区域内网格划分既不至于过小影响运行速度,也不至于过大而达不到计算精度要求.2)等离子体磁轴处的磁通值用网格点处的最大磁通值代替.由于磁轴附近区域的 $\nabla\psi$ 很小,可以避免求最大极向磁通的复杂过程.3)极向场线圈电流不作为反演参数,使得求解的反演参数大为减少,从而加快计算速度.4)根据放电位形演化趋势,合理选择对放电位形敏感度高的相应诊断信号参与位形重建计算,而不用反演全部的诊断信号.5)选择适合于并行化和向量化的单周期递减算法,加快求解 Grad-Shafranov 平衡方程的速度.

3. 模拟结果

为了证明以上算法对于准确重建等离子体位形的能力,下面利用 EAST 的配置,进行位形重建计算的误差对比分析. EAST 装置中磁诊断包括 39 个单匝环, 88 个磁探针, 2 个 Rogowski 线圈和 2 个逆磁线圈等. EAST 装置上单匝环和磁探针布置示意图如图 2 所示.空心圆点代表单匝环,实心圆点代表表示磁探针.每一个磁探针位置都布置了法向和切向的磁探针.

用美国 GA 提供的平衡反演代码 EFIT 计算得到的平衡结果来模拟磁诊断信号进行位形重建计算,并将重建结果与平衡结果进行对比分析.图 3(a)(b)分别是 EAST 下单零位形平衡计算结果和位形重建结果.图 4(a)(b)分别是 EAST 双零位形平衡计算结果和位形重建结果.

从重建位形和平衡计算位形对比情况来看,位形重建的效果很好.具体的位形参数对比情况列于

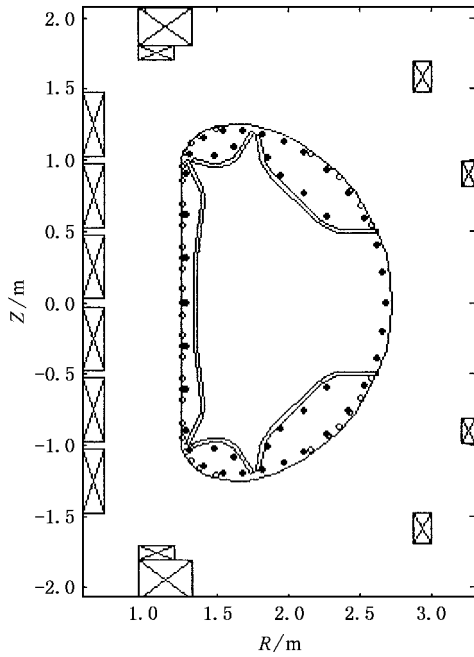


图 2 EAST 磁诊断布置示意图

表 2 EAST 位形重建对比结果($I_p = 1\text{MA}$)

	下单零位形 平衡结果	下单零位形 重建结果	双零位形 平衡结果	双零位形 重建结果
β_p	1.324	1.326	1.394	1.395
l_i	1.294	1.293	1.341	1.340
R	190.172	190.173	190.142	190.141
a/cm	45.840	45.835	44.087	44.086
κ	1.654	1.654	1.811	1.811
δ_u	0.387	0.387	0.602	0.602
δ_d	0.544	0.544	0.602	0.602
$V/10^8\text{cm}^3$	0.119	0.119	0.116	0.116
$R_{\text{axis}}/\text{cm}$	196.10	196.14	195.41	195.47
$Z_{\text{axis}}/\text{cm}$	4.225	4.221	0.000	0.000
$R_{x\text{-point}}/\text{cm}$	165.23	165.23	163.62	163.62
$Z_{x\text{-point}}/\text{cm}$	-76.98	76.98	-79.829	-79.831
$R_{\text{vsin}}/\text{cm}$	135.7	135.6	134.2	134.2
$Z_{\text{vsin}}/\text{cm}$	-88.4	-88.4	-91.4	-91.4
$R_{\text{vsout}}/\text{cm}$	178.9	178.9	177.8	177.8
$Z_{\text{vsout}}/\text{cm}$	-109.2	-109.2	-113.6	-113.6
$\text{gap}_{\text{in}}/\text{cm}$	8.5	8.5	10.3	10.3
$\text{gap}_{\text{outin}}/\text{cm}$	5.9	5.9	9.9	9.9
$\text{gap}_{\text{outd}}/\text{cm}$	11.3	11.3	9.9	9.9
$\text{gap}_{\text{top}}/\text{cm}$	24.1	24.1	17.5	17.5
$\text{gap}_{\text{bottom}}/\text{cm}$	20.7	20.7	17.5	17.5

表 2.

表 2 中,各参数符号说明如下: β_p 是极向比压, l_i 是等离子体内感, R 是大半径, a 是小半径, κ 是拉长比, δ_u 是上三角形变, δ_d 是下三角形变, V 是等离子体体积($R_{\text{axis}}, Z_{\text{axis}}$)是磁轴($R_{x\text{-point}}, Z_{x\text{-point}}$)是 X 点($R_{\text{vsin}}, Z_{\text{vsin}}$)是 X 点附近磁力线在内侧靶板上

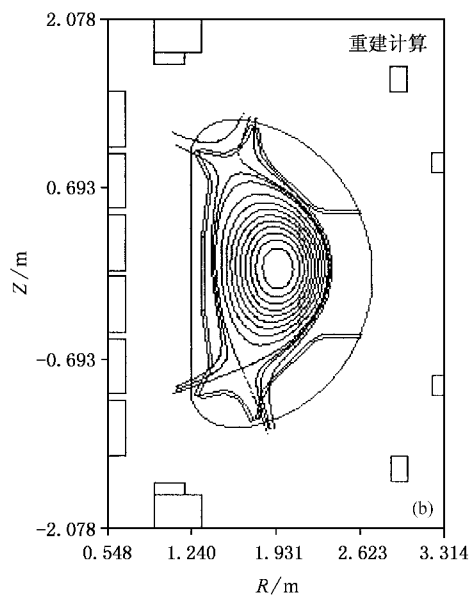
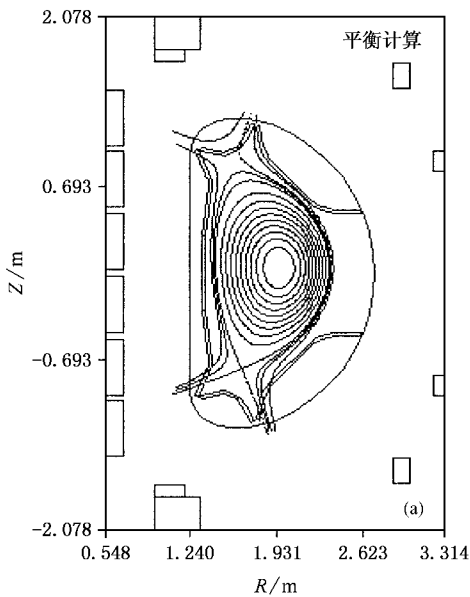


图 3 (a) EAST 下单零平衡位形 (b) EAST 下单零重建位形

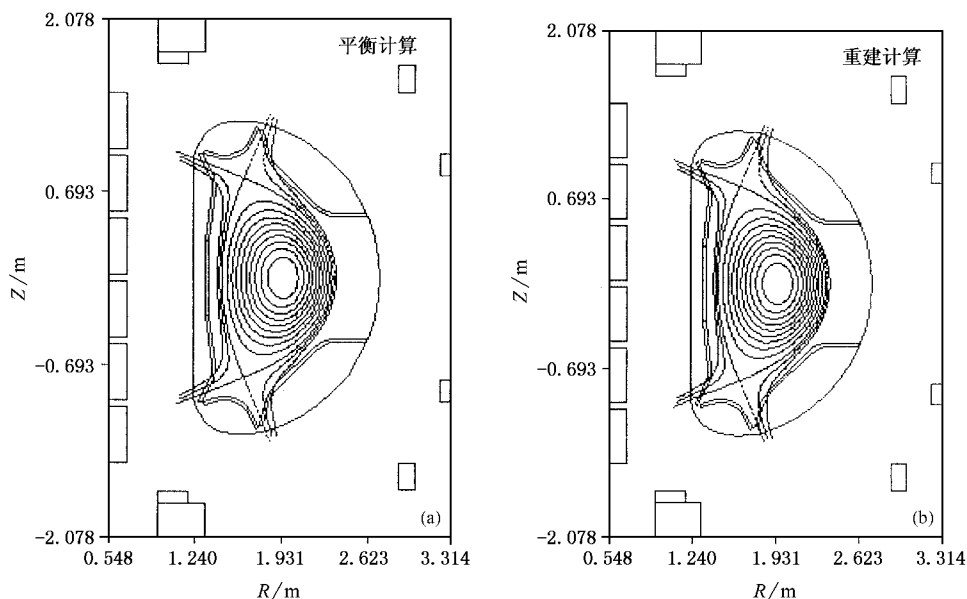


图 4 (a) EAST 双零平衡位形 (b) EAST 双零重建位形

的打击点 $(R_{\text{vsout}}, Z_{\text{vsout}})$ 是 X 点附近磁力线在外侧靶板上的打击点, $g_{\text{gap}_{\text{in}}}$ 是等离子体边界和内限制器的间隙, $g_{\text{gap}_{\text{outu}}}$ 是等离子体边界和上半部外限制器的间隙, $g_{\text{gap}_{\text{outd}}}$ 是等离子体边界和下半部外限制器的间隙, $g_{\text{gap}_{\text{top}}}$ 是等离子体边界和上半部偏滤器的间隙, $g_{\text{gap}_{\text{botd}}}$ 是等离子体边界和下半部偏滤器的间隙. 从表 2 中的位形重建参数对比情况来看, 下单零位形重建的最大相对误差为 -0.95% , 双零位形重建的最大相对误差为 -0.75% . 根据以上分析可知, 位形快速识别算法能够准确地重建 EAST 等离子体位形.

4. 结论和探讨

这项研究的结果显示, 通过外部磁测量和与

MHD 平衡约束一致的电流剖面模型, 利用适合于并行化和向量化的实时平衡重建算法可以快速地对 EAST 等离子体放电位形进行识别. 由于当前计算机技术的高速发展, 可以使得位形识别算法运行速度得到极大地提高. 文中利用 EAST 的配置情况, 对 EAST 等离子体位形快速识别算法进行了模拟分析. 从模拟分析结果情况来看, 该算法很好地重建了 EAST 平衡位形. 目前, EAST 装置没有建成并进行放电实验, 所以无法利用实测信号进行分析. 在 EAST 放电实验过程中, 我们将利用磁测量的实际信号进行位形快速识别的进一步研究.

感谢中国科学院等离子体物理研究所张澄研究员和俞国扬研究员在等离子体平衡理论上的悉心指导和沈飙副研究员在磁测量方面提供的帮助.

- [1] Swain D W, Neilson G H 1982 *Nucl. Fusion* **22** 1015
- [2] Lao L L, St John H, Stambaugh R D, Pfeiffer W 1985 *Nucl. Fusion* **25** 1421
- [3] Luxon J L, Brown B B 1982 *Nucl. Fusion* **22** 813
- [4] Lao L L, St John H, Stambaugh R D *et al* 1985 *Nucl. Fusion* **25** 1611
- [5] Wijnands T, Parlange F, Couturier B, Moulin D 1996 *Nucl. Fusion* **36** 1405
- [6] Matsukawa M, Hosogane N, Ninomiya H 1992 *Plasma Phys. and*

Controlled Fusion **34** 907

- [7] Lister J B, Schnurrenberger H 1991 *Nucl. Fusion* **31** 1291
- [8] Braams B J, Jilge W, Lackner K 1986 *Nucl. Fusion* **26** 699
- [9] hofmann F, Tonetti G 1988 *Nucl. Fusion* **28** 519
- [10] You T X, Yuan B S, Liu L, Li F Z 2005 *Chin. Phys.* **14** 560
- [11] O'Brien D P, Ellis J J, Lingertat J 1993 *Nucl. Fusion* **23** 467
- [12] Ferron J R, Walker M L, Lao L L, St John H *et al* 1998 *Nucl. Fusion* **38** 1055

Quick identification of EAST plasma discharge shape^{*}

Huang Qin-Chao^{1,2)} Luo Jia-Rong¹⁾ Wang Hua-Zhong¹⁾ Li Chong¹⁾

¹ *Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China*

² *Department of Information Engineering, Artillery Academy of PLA, Hefei 230031, China*

(Received 8 February 2005 ; revised manuscript received 8 May 2005)

Abstract

To meet the requirement of plasma shape control running mode on experimental advanced superconducting tokamak (EAST), this paper studies the quick identification algorithm of plasma discharge shape and gives the results of reconstruction simulation. Moreover, the code is checked by the equilibrium reconstruction code EFIT provided by GA in U. S. A. Results show that we can identify the shape quickly by using external magnetic measurements and appropriate current profile in conjunction with real time equilibrium reconstruction algorithm.

Keywords : tokamak , plasma , equilibrium reconstruction , numerical simulation

PACC : 5225 , 5255 , 5265

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 10475079).