

HL-2A 等离子体约束参数的实时确定^{*}

袁保山[†] 游天雪 秦运文 冯北滨 季小全

(核工业西南物理研究院 成都 610041)

(2005 年 4 月 20 日收到 2005 年 6 月 17 日收到修改稿)

在 HL-2A 等离子体放电过程中,利用 CF 编码计算出的等离子体边界磁场,计算出 Shafranov 积分 S_1 , S_2 和 S_3 ,再利用反磁通导出极向比压 β_p ,等离子体内自感 l_i ,等离子体磁轴的大半径 R_m ,等离子体的能量 W_{dia} ,能量约束时间 τ_E ,再用电流矩导出等离子体的电流中心(R_c , Z_c).实时确定这些量对于及时了解和改进装置的放电和改善等离子体性能很有意义.

关键词:等离子体约束,Shafranov 积分

PACC:5525

1. 引言

等离子体的内自感 l_i 和极向比压 β_p 是托卡马克装置等离子体的重要参数,它是等离子体约束性能的主要标识参数.对于下一代托卡马克装置等离子体的实时控制,它们又是必需的重要参数.通常利用从等离子体边界磁场导出的 Shafranov 三个积分参数 s_1 , s_2 和 s_3 ^[1]推算出来,再利用测量的反磁通将二者分开.对于拉长比 k 较大的等离子体,可以直接利用拉长比 k 将二者分开^[2,3].这里我们用电流丝和有限电流元模型编写的重建等离子体平衡边界的 CF 编码^[4,5]计算等离子体边界和磁场,再用反磁通将二者分开,实时给出 HL-2A 等离子体内自感 l_i 和 β_p .这对于研究人员及时了解装置的放电和等离子体的约束情况是很有意义的.本文还介绍了等离子体的能量 W_{dia} ,能量约束时间 τ_E ,等离子体磁轴的大半径 R_m ,等离子体的电流中心的计算(R_c , Z_c).给出了计算的公式,并介绍了计算结果.

2. 计算公式

利用电流丝模型和有限电流元模型为 HL-2A 编写的等离子体边界识别编码 CF^[4,5],经过修改和完善用来实时确定等离子体边界 LCFS(last closed

flux surface)的磁场.这样不但可以推算出等离子体电流的中心位置,还可以求出 Shafranov 三积分 s_1 , s_2 和 s_3 ,再用测量的反磁通就可以导出等离子体内自感 l_i 和极向比压 β_p 等.

根据电流密度矩的理论^[6],等离子体电流中心大半径 R_c 和垂直位置 Z_c 为

$$R_c = \frac{1}{\mu_0 I_p} \oint_l (2RZB_n + R^2 B_\tau) dl, \quad (1)$$

$$Z_c = \frac{1}{\mu_0 I_p} \oint_l (-R \ln RB_n + ZB_\tau) dl, \quad (2)$$

这里 l 是包围等离子体的任意极向路径, B_n 和 B_τ 是沿该回路的法向和切向的磁场分量.在等离子体边界上的磁场 $B_\tau = B_p = \sqrt{B_z^2 + B_r^2}$, B_z 和 B_r 为垂直磁场和水平磁场,而 $B_n = 0$,则(1)和(2)式简化为

$$R_c = \frac{1}{\mu_0 I_p} \oint_s R^2 \sqrt{B_z^2 + B_r^2} ds, \quad (3)$$

$$Z_c = \frac{1}{\mu_0 I_p} \oint_s Z \sqrt{B_z^2 + B_r^2} ds, \quad (4)$$

式中 I_p 为等离子体电流, $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$.

用 LCFS 上磁场定义等离子体约束特性的三个 Shafranov 积分公式^[1,2],其中

$$s_1 = \frac{1}{(\mu_0 I_p)^2 R} \int [(B_\tau^2 - B_n^2) \rho \mathbf{n} \cdot \mathbf{e}_\rho - 2B_\tau B_n \rho \mathbf{e}_\tau \cdot \mathbf{e}_\rho] ds_n,$$

^{*} 国家自然科学基金(批准号:10175022)资助的课题.

[†] E-mail: yuanbs@swip.ac.cn

式中 ρ 是等离子体边界到中平面上某一点的距离, $\mathbf{e}_\rho$ 是 ρ 的单位矢量. 回路 l 所在环面的环面元 $ds_n = 2\pi R dl$, $\mathbf{n}$ 是法向矢量, 在边界上 $B_\tau = B_p$, $B_n = 0$. 取等离子体边界 l 线积分, 则对上式进行整理得到

$$s_1 = \frac{\pi}{B_{pa}^2 V} \int_l B_p^2 \rho \mathbf{e}_\rho \cdot \mathbf{n} dl$$

$$= \frac{\pi}{B_{pa}^2 V} \int_l B_p^2 (R \mathbf{e}_R + Z \mathbf{e}_Z - R_0 \mathbf{e}_R) \cdot \mathbf{n} dl, \quad (5)$$

式中 R_0 是上述极坐标原点的径向坐标. 同理可以得到

$$s_2 = \frac{\pi R_c}{B_{pa}^2 V} \int_l B_p^2 R \mathbf{e}_R \cdot \mathbf{n} dl, \quad (6)$$

$$s_3 = \frac{\pi}{B_{pa}^2 V} \int_l B_p^2 R Z \mathbf{e}_Z \cdot \mathbf{n} dl, \quad (7)$$

这里 $B_{pa}^2 = \oint_l B_p^2 dl / \oint_l dl$, B_{pa} 为等离子体边界上的平均磁场, V 为等离子体体积, $\mathbf{e}_R, \mathbf{e}_Z$ 分别是 R 和 Z 坐标的单位矢量, $R_0 = 1.65\text{m}$, l 为极向截面等离子体边界路径.

Shafranov 参数

$$\beta_p + \frac{l_i}{2} = \frac{s_1}{2} + s_2 \left(1 - \frac{\delta}{2}\right), \quad (8)$$

$$\beta_p = \mu + s_1 + s_2 \delta. \quad (9)$$

对于圆截面具有弱不对称性 $s_1 \approx 1$, 并且 $\delta \ll 1$ (9) 式可以简化为

$$\beta_p = \mu + 1.$$

内自感

$$l_i = 2s_2(1 - 1.5\delta) - s_1 - 2\mu, \quad (10)$$

式中

$$\delta = 1 - \frac{R_c}{R_0}, \quad (11)$$

反磁参数

$$\mu = \frac{8\pi B_l(R_g)}{(\mu_0 I_p)^2} \Delta\phi = 2 \frac{B_l(R_g)}{s_p B_p^2} \Delta\phi, \quad (12)$$

这里 $\Delta\phi$ 为反磁磁通, $B_l(R_g)$ 是等离子体几何中心点的环向磁场, s_p 为等离子体的截面积, B_p 为等离子体边界上的磁场.

对于有一定拉长比的等离子体, 其内自感可以用下式计算:

$$l_i = \frac{1}{\alpha - 1} \left(\frac{s_1}{2} + \frac{s_2}{2} \delta - s_3 \right), \quad (13)$$

这里 $\alpha = \frac{2 \int_V (\mathbf{B}_p \cdot \mathbf{e}_Z) dV}{\int_V B_p^2 dV}$, 在有一定拉长比时可

以取

$$\alpha \approx \frac{2k^2}{k^2 + 1}. \quad (14)$$

但是对于 HL-2A 的等离子体, k 接近于 1, 所以无法使用 (13) 式, 只能利用反磁磁通由 (12) 式确定 μ , 再通过 (9) 和 (10) 式分别求出 β_p 和 l_i .

等离子体能量^[7]为

$$W_{dia} = \frac{3}{8} \mu_0 R_g \beta_p I_p^2. \quad (15)$$

能量约束时间为

$$\tau_E = \frac{W_{dia}}{P_T - \partial W_{dia} / \partial t}, \quad (16)$$

式中总功率 $P_T = P_{\Omega} + P_{RF} + P_{NB}$, P_{Ω} 为欧姆加热功率, P_{RF} 为射频加热功率, P_{NB} 为中性注入加热功率.

$$P_{\Omega} = V_l I_p - \frac{\partial}{\partial t} (0.25 \mu_0 R_m l_i I_p^2), \quad (17)$$

磁轴的径向位置 R_m ^[8]为

$$R_m = R_g + \frac{a_p^2}{2R_g} [0.5s_1 + (1 - 0.5\delta)s_2]$$

$$\times \left(1 - \frac{2a_p}{3R_g}\right) - 0.016, \quad (18)$$

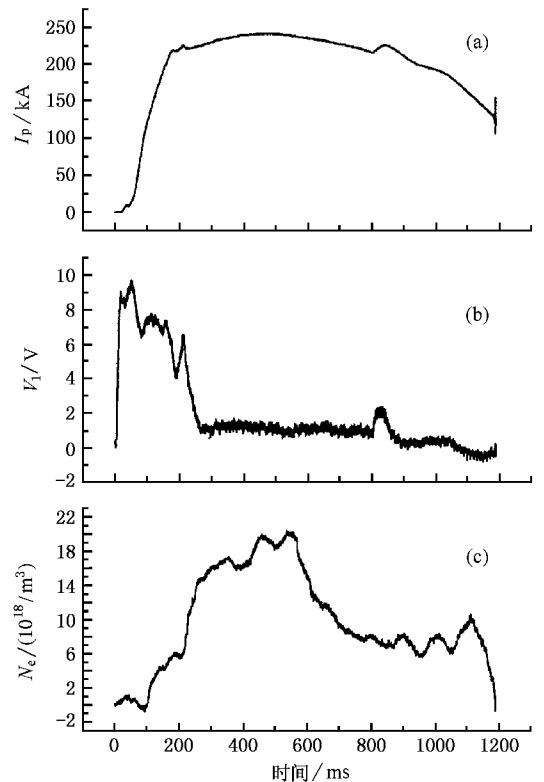


图 1 2895 次放电的等离子体电流 I_p , 环电压 V_l 和平均电子密度 N_e

式中 R_g 是等离子体几何中心的大半径, a_p 是等离子体的小半径.

3. 计算结果

2895 次是一次带有偏滤器位形的欧姆加热放电, 平顶从 200ms 开始一直持续到 1000ms, 217ms 开始形成偏滤器位形. 图 1 给出了等离子体电流 I_p 、环电压 V_l 和平均电子密度 N_e 随时间变化的曲线. 图 2 是 384ms 时刻的等离子体边界位形. 图 3 给出了

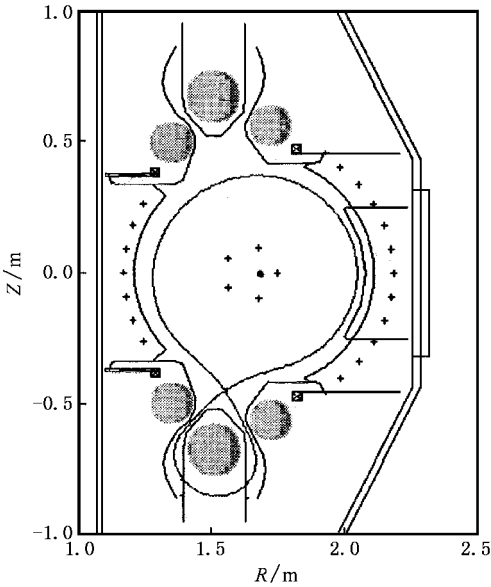


图 2 2895 次放电 384ms 时的等离子体边界

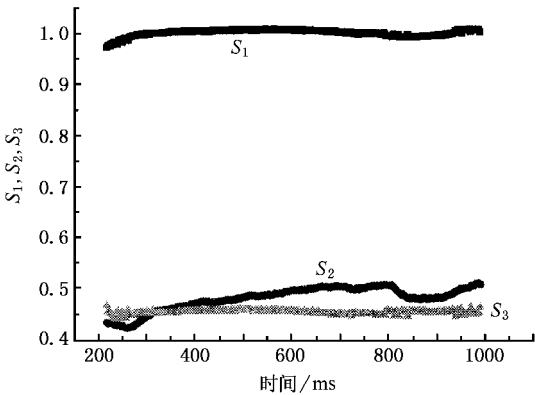


图 3 2895 次放电 Shafranov 积分 s_1 , s_2 和 s_3

Shafranov 三个积分 s_1 , s_2 和 s_3 随时间变化的情况. 可以看出 $S_1 \approx 1$ 是个典型的弱对称的近似于圆截面的欧姆放电. 图 4 给出了 Shafranov 参数 $\beta_p + l_i/2$

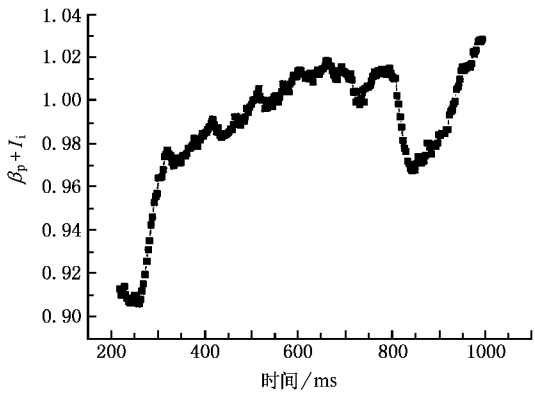


图 4 2895 次放电内 Shafranov 参数 $\beta_p + l_i/2$

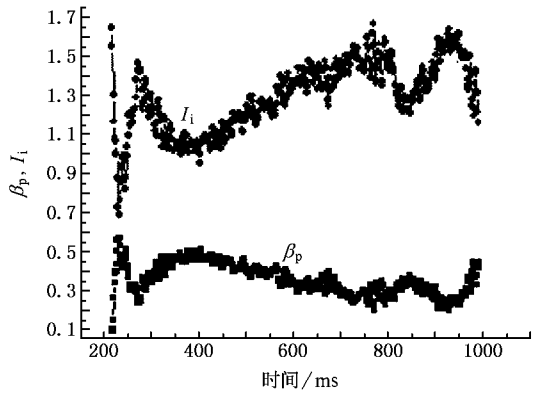


图 5 2895 次放电内自感 l_i 和 β_p

随时间变化的情况. 图 5 给出了分开的极向比压 β_p 和内自感 l_i . 图 6 给出了等离子体能量 W_{dia} 随时间变化的情况. 图 7 给出了能量约束时间 τ_E 的演变. 图 8 是等离子体电流中心 (R_c, Z_c) 和磁轴水平位置 R_m 随时间的变化情况.

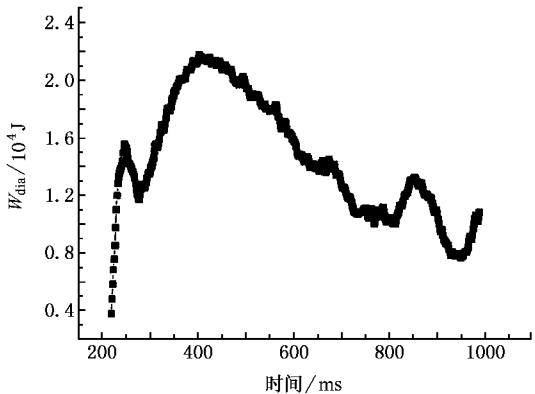


图 6 2895 次放电等离子体能量 W_{dia}

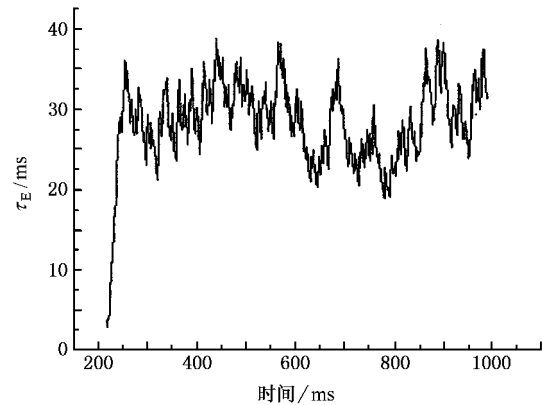


图 7 2895 次放电等离子体能量约束时间 τ_E 的演变

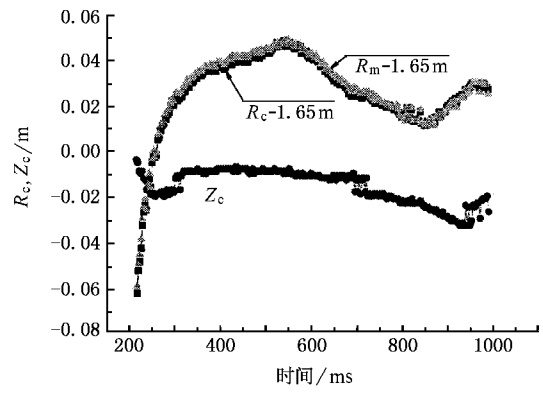


图 8 2895 次放电等离子体电流中心(R_c , Z_c)和磁轴水平位置 R_m 随时间的变化情况

4. 结 论

本文利用 CF 编码计算的等离子体边界磁场计算了等离子体电流中心(R_c , Z_c),等离子体磁轴的大半径(R_m),Shafranov 三个积分 s_1 , s_2 和 s_3 ,利用反磁通计算出等离子体极向比压 β_p ,内自感 l_i ,等

离子体的能量 W_{dia} 和能量约束时间 τ_E 的演变,并且以 2895 次放电为例给出了计算结果.结果完全符合等离子体物理规律,实时给出这些参数对于及时了解和改进装置的放电情况以及改善等离子体的性能有重要意义.特别是对于等离子体某些约束参数的实时控制更有意义.

[1] Shafranov V D 1971 *Plasma Physics* **13** 757

[2] Lao L L , John H St , Stambaugh R D , Pfeiffer W 1985 *Nuclear Fusion* **25** 1421

[3] Barana O , Murari A , Joffrin E , Sartori F *et al* 2004 *Nuclear Fusion* **44** 335

[4] Yuan B S , Liu L , Li F Z , Mao S Y 2004 *Nuclear Fusion and Plasma Physics* **24** 81 (in Chinese) [袁保山、刘 莉、李芳著、毛苏英 2004 核聚变与等离子体物理 **24** 81]

[5] You T X , Yuan B S , Liu L , Li F Z 2005 *Chin . Phys .* **14** 560

[6] Zaharov L E , Shafranov V D 1973 *Sov . Phys . Tech . Phys .* **18** (2) 151

[7] Jiang Y X , Cui Z Y , Ran L B *et al* 1992 *Nuclear Fusion and Plasma Physics* **12** 21 (in Chinese) [姜云霞、崔正英、冉利波等 1992 核聚变与等离子体物理 **12** 21]

[8] Barana O , Muhari A , Sartori F 2002 *Plasma Physics and Controlled Fusion* **44** 2271

Real-time determination of plasma confinement parameters in HL-2A^{*}

Yuan Bao-Shan[†] You Tian-Xue Qin Yun-Wen Feng Bei-Bin Ji Xiao-Quan

(*Southwestern Institute of Physics , Chengdu 610041 ,China*)

(Received 20 April 2005 ; revised manuscript received 17 June 2005)

Abstract

During the plasma discharge in HL-2A , the magnetic field at the plasma boundary is computed using currents filaments code . The Shafranov integrals S_1 , S_2 and S_3 are deduced ; the poloidal beta , internal inductance , the horizontal position of the magnetic axis R_m and the plasma energy W_{dia} are calculated ; the current center of plasma(R_c , Z_c) is computed with the current moments . The real time determination of these quantities is of significance for understanding and adjusting the HL-2A discharge in time , and for improving plasma performance .

Keywords : plasma confinement , Shafranov integrals

PACC : 5525

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 10175022).

[†] E-mail : yuanbs@swip.ac.cn