

HL-2A 等离子体形状实时显示系统*

袁保山[†] 游天雪 刘 莉 杨青巍 冯北滨 李 强

(核工业西南物理研究院, 成都 610041)

为了研究 HL-2A 等离子体偏滤器位形, 我们研制了等离子体形状实时显示系统。采用固定位置电流丝和有限电流元的方法编写了 CF 编码。采用 32 道同时刻采集器 UA301 采集等离子体周围的磁场信息, 使用 P4 3GHz E CPU 组装的兼容计算机处理数据。这个系统每 4ms 采集一次数据并存盘, 每 16ms 重画一次等离子体边界。放电结束后可以详细地计算等离子体边界及其磁场以及由此导出的等离子体参数。

关键词: 等离子体平衡重建, 边界识别, 实时显示

PACC: 5525

1 前言

等离子体边界实时识别是大型托卡马克装置特别是带有偏滤器装置等离子体放电实验的重要的诊断工具之一, 识别出的边界可以给出等离子体演变的参数, 如等离子体与第一壁的缝隙距离、X点的位置、等离子体边界与偏滤器靶板的交叉点即打击点的位置、等离子体边界与波加热天线的距离, 还可以根据边界的磁场计算出等离子体的约束参数, 如 $\beta_p + I_i/2$ 等, 这对于了解等离子体参数在放电过程中的演变, 形状和位置等参数的精确控制, 对于提高波加热的效率都具有重要的意义, 特别是对于等离子体截面形状拉长比和三角形变大的装置显得更重要。等离子体边界的实时识别是实时显示的基础, 随着放电的进展把边界实时显示出来, 这为物理和实验人员及时了解装置的放电情况, 提供了一种直观而又快捷的诊断工具。对于带有偏滤器的现代托卡马克装置这是必须配备的系统, 在国外的几个主要装置上也都有这样的系统。

HL-2A装置具有上下对称的封闭式偏滤器。它不但可以做孔栏位形运行, 还可以带有双零和单零位形运行^[1]。然而, 它带有偏滤器位形运行时, 如何鉴别其位形? X点在哪里? 打击点又在哪里? 等离子体的位置和形状又是怎样的呢? 为此我们开展了“HL-2A等离子体边界实时显示系统”的研究工作。为了快速识别等离子体边界, 我们研究了固定电流丝和有限电流元的方法, 在此基础上对软件作了修改, 我们采用了 32 通道同时刻的 100kHz的采集器采集等离子体周围 18 个双向磁探针测量的磁场信号, 用P4 3GHz E CPU 组装的兼容计算机处理数据, 实现了对HL-2A等离子体形状的实时显示。本文对这项工作做一简要介绍。

2 基本原理

HL-2A 装置采用了分离式极向场线圈结构, 如图 1 所示。单独设置了欧姆加热线圈、

*国家自然科学基金(批准号: 10175022)资助的课题。

[†]E-mail: yuanbs@swip.ac.cn

垂直场线圈、偏滤器线圈和水平场线圈。偏滤器线圈由两个三线圈组和补偿线圈组成。三线圈组由 MP1、MP2 和 MP3 组成，分别布置在真空室内部的上下端。在真空室外部还有其补偿线圈。所以等离子体除了有孔栏位形外，还可以形成双零和单零偏滤器位形。为了抑制等离子体的垂直不稳定性，该装置布置了四个无源稳定导体。

在 HL-2A 装置上，偏滤器位形和 X 点是由 MP1、MP2、MP3 这三线圈组与等离子体电流一起构成四极磁场而形成的。MC 是补偿三线圈组在等离子体区域杂散磁场的。垂直场和水平场线圈产生的磁场不但对等离子体位置有直接影响，而且对 X 点和等离子体边界 LCFS 在偏滤器室内的轨迹也有一定影响。装置从 2003 年开始运行以来，一直在孔栏位形和下单零位形下运行。在单零位形下，采用 MP1 和 MP3 的电流相等并小于 MP2 线圈电流的方式下运行。在这种接线方式下，调节 MP2 与等离子体电流之比，MP2 与 MP1 的电流之比可以得到正常的偏滤器位形。下单零位形等离子体截面拉长些，拉长比为 $1.15 \geq k \geq 1$ 。

我们采用了固定位置多个电流丝^[2,3]和有限电流元方法^[4,5]编写 CF 编码。对于电流丝方法，等离子体电流产生的磁通为

$$\psi_p(r, z) = \sum_{j=1}^{nf} G(r, z; r_j, z_j) I_j \quad (1)$$

这里 $G(r, z; r_j, z_j)$ 是 Grad-Shafranov 平衡方程的 Green 函数, nf, r_j, z_j, I_j 分别是电流丝的个数、电流丝的坐标及其电流。

电流丝的位置是固定的，电流丝的电流使用最小二乘法拟合，由下面的目标函数即修正 Lagrange 函数确定。

$$S(I_j, \lambda) = \sum_{j=1}^{nf} \left(\frac{\partial L}{\partial I_j} \right)^2 + (I_p - \sum_{j=1}^{nf} I_j)^2 \quad (2)$$

这里

$$L = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^m \left(\frac{M_i - C_i}{\sigma_i} \right)^2 - \frac{\lambda}{2} (I_p - \sum_{j=1}^{nf} I_j) \quad (3)$$

式中 M_i, C_i, σ_i 分别是磁通环和磁探针的测量值、计算值和标准误差； λ 是一个小的常数。

对于有限电流元法，在等离子体内部第 j 个电流元的电流为

$$I_j = \int_s J_j F_j ds \quad (4)$$

这里

$$F_j = \left\{ 1 - \frac{|R - R_j|}{\Delta R} \right\} \left\{ 1 - \frac{|Z - Z_j|}{\Delta Z} \right\} \quad (5)$$

R_j 和 Z_j 是电流元的坐标， ΔR 和 ΔZ 是电流元在水平和垂直方向的半高度和半宽度。

约束条件是所有电流元的电流等于等离子体电流 I_p ，就是

$$g(J_j) = \sum_{j=1}^{ne} \int_{Z_j - \Delta Z}^{Z_j + \Delta Z} \int_{R_j - \Delta R}^{R_j + \Delta R} J_j F_j dR dZ - I_p = 0 \quad (6)$$

用最小二乘法拟合，残差平方和是

$$f = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^m w_i (M_i - \sum_{k=1}^{nc} q_{ik} (R_i, Z_i; R_k, Z_k) I_k - \sum_{j=1}^{ne} q_{ij} (R_i, Z_i; R_j, Z_j) I_j)^2 \quad (7)$$

这里 m 是磁探针数， nc 是极向场线圈数， ne 是电流元的个数。 M_i 是磁探针和磁通环的测量值， q_{ik} 和 q_{ij} 分别是极向场线圈和电流元的磁场系数。

目标函数取做

$$S(J_j, \lambda) = \sum_{k=1}^{ne} \left(\frac{\partial f}{\partial J_k} \right)^2 + g^2(J_j) + \alpha \sum_{j=1}^{ne} J_j^2 \quad (8)$$

式中 α 是一个小的常数。

3 实时显示系统的硬件

等离子体边界实时显示系统的硬件结构如图 1 所示。在内侧布置 7 个双磁探针(互相垂直)，在外侧布置 11 个双磁探针，它们布置在中心 $R=1.68\text{m}$, $Z=0.0\text{m}$, 半径为 0.505m 的圆周上，每两个相距 10.5° 。9 个磁通环，9 个部分 Rogowski 线圈布置在等离子体周围。极向场线圈电流也是用 Rogowski 线圈测量。这些信号都是经过有源积分器积分，由 100kHz 32 通道同时刻采样的 UA301 采集器采集。经过同时刻采样保持，再经 A/D 转换，变为数字信号，放在 FIFO 缓存里，供实时处理并存储于计算机硬盘里。采用兼容的 PC 计算机，CPU 为 3G E 具有超线程功能，数据总线为 800MHz 。使用 Windows XP 操作系统。为了在 HL-2A 二楼实验大厅大的 VGA 显示器显示，通过 1000M 的局域网与另一台 PC 计算机连接。

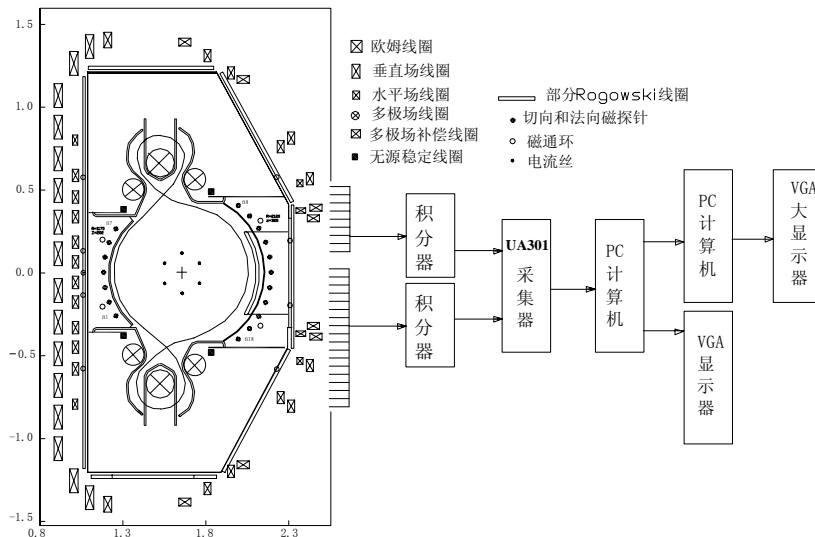


图 1 HL-2A 极向截面图和等离子体边界实时显示系统结构

4 在线和离线的运行

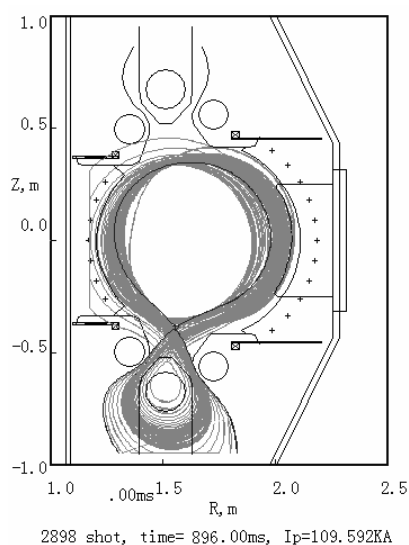
等离子体边界实时显示系统的软件由在线和离线两部分共五个程序构成。就是批处理程序、运行界面程序、实时处理程序、离线处理程序和画图程序。批处理程序组织其他四个程序的连续运行，在运行界面程序里操作人员输入放电序号，活动孔栏半径等参数供后面程序使用。实时处理程序在等离子体放电过程中一边用 4ms 一次的速度采集数据存盘，一边用 18 个磁探针信号和 9 个电流信号以 16ms 一次的速度计算出 260 多个顶点的多边形等离子体边界，擦除旧边界再画出新边界。其中计算等离子体边界的时间小于 1ms，大部分时间都用于擦除旧边界和画出新边界。每秒共画出 62 幅等离子体边界图，人们眼睛看到的是等离子体边界连续的变化。等离子体边界实时处理程序由两部分程序构成，数据采集和数据处理程序。数据采集程序用 VC 编写，数据处理程序用 Visual Fortran 编写。

在等离子体放电之前，运行批处理程序，打开运行界面，操作人员输入放电序号，活动孔栏半径，是否要保留边界等参数。接着画出真空室，线圈、磁探针位置等背景图。将极向场线圈和电流丝在磁探针位置的磁场系数和在等离子体空间各网格点的磁场系数调入计算机内存，此时准备就绪，等待等离子体启动的外触发命令。一旦接到等离子体电流启动的信号，采集器开始采集数据，计算机开始实时处理，CPU 从采集器的缓存里读取数据，按照前面叙述的算法计算这一组数据的等离子体边界，在 VGA 显示器上擦除旧边界并画出新边界来。

由于 WindowsXP 是一个多任务和多进程的操作系统，做上述实时数据处理时必须关闭不必要的任务和进程，优化操作系统，并将实时处理程序设置成优先级最高级别。

为了按照指定的时间间隔（一般最小是数据采集的时间间隔）慢速重新识别和演示每一时刻的等离子体边界，详细计算出要求时刻的等离子体边界各点（约 260 点）位置，画出边界，算出边界上各点的磁通和磁场，算出由边界几何参数和磁场参数导出的一些等离子体参数，如边界与第一壁的各点缝隙距离，等离子体的几何中心 (R_g, Z_g)，电流中心 (R_c, Z_c)，磁轴的在水平方向的位置 R_m ，等离子体的小半径 a_p ，等离子体的面积，体积，边界上的安

全因子 q_b 或偏滤器位形 95 磁面的安全因子 q_{95} ，X 点的位置，打击点的位置， $\beta_p + \frac{l_i}{2}$ 的

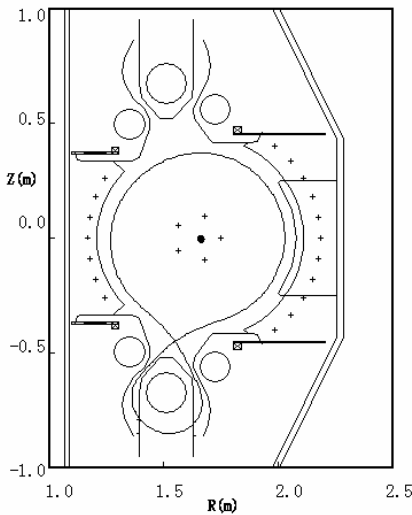


等。最后，画图程序画出等离子体主要参数在放电过程中随时间变化的曲线以便于研究人员分析使用。

图 2 给出了 2898 次放电在线识别的等离子体边界，保留了 64—896ms 时间段共 53 个边界图。从放电开始等离子体边界向里，约 300ms 左右水平位置回到 0 点，之后又慢慢向外移动。

图 2 2898 次放电在线识别的等离子体边界
(64—896ms 共 53 幅边界图)

电源经过扩建后, 2004 年的等离子体放电参数有较大提高, 图 3 是 2898 次放电 320ms 时刻的等离子体偏滤器位形。图 4 是 CF 编码给出的 2898 次放电的一组参数, (a) 是等离子体电流中心随时间变化的曲线, (b) 等离子体电流几何中心随时间变化的曲线, (c) 是 $\beta_p + l_i / 2$ 的变化情况, (d) 是打击点位置随时间变化的曲线, (e) 是偏滤器线圈 mp2 与 mp1



的电流之比 I_{mp2} / I_{mp1} , 偏滤器线圈 mp2 电流与等离子体

电流之比 I_{mp2} / I_p 的变化情况。 (f) X 点位置的变化情

况。这里我们定义缝隙是在以点 ($R=1.65m, Z=0.0$) 为中心的半径上等离子体边界与第一壁的距离。控制等离子体位置和保护第一壁的一些重要部位都要使用实时计算得到的缝隙值。图 5 是 2898 次放电六个点的缝隙变化的况。其中 0^0 位置缝隙指边界与固定孔栏之间的距离。

图 3 2898 次放电 320ms 时刻重建边界

(+表示电流丝, 中间的 \bullet 为电流中心的位置。等离子体电流为 235kA, 环向场 2.1T, X 点位置 ($X_r=1.552m, X_z=-0.451m$), 打击点 ($Z_i=-0.780m$ (内侧), $Z_o=-0.812m$ (外侧)), 等离子体几何中心 ($R_g=1.652m, Z_g=-0.069m$), 等离子体电流中心 ($R_c=1.664m, Z_c=0.007m$), 等离子体小半径 $a_p=0.380m$, 拉长比 $k=1.085$)

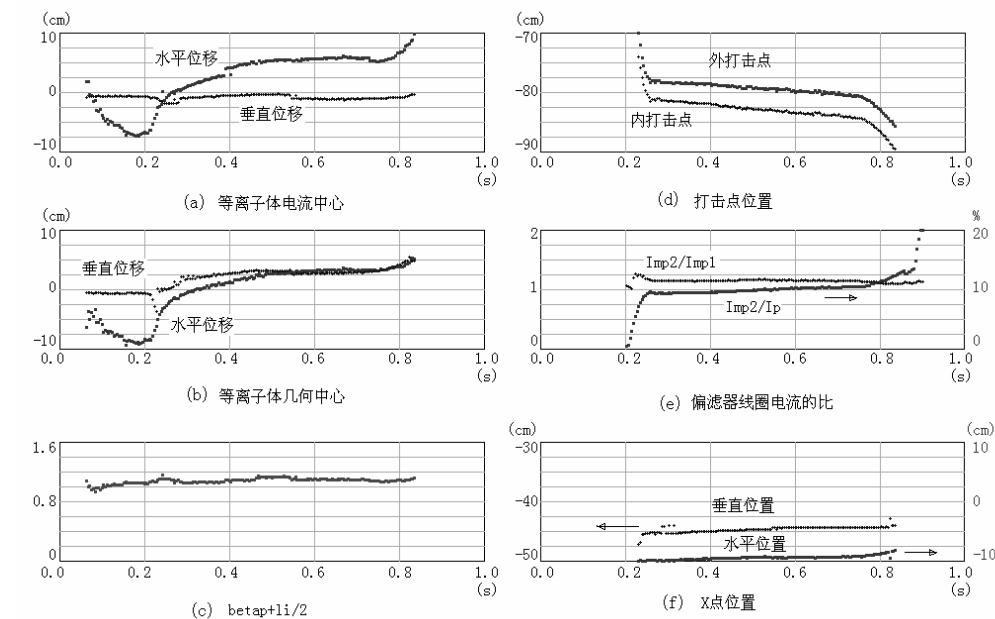


图 4 2898 次放电部分参数随时间变化的情况

(a) 等离子体电流中心位置的变化情况。 (b) 等离子体几何中心位置的变化情况。 (c) $\beta_p + l_i / 2$ 的变化

情况。图 4 (d) 打击点的变化情况。 (e) 偏滤器线圈 mp2 与 mp1 的电流之比 I_{mp2} / I_{mp1} , 偏滤器线圈

mp2 电流与等离子体电流之比 I_{mp2} / I_p 的变化情况。 (f) X 点位置的变化情况)

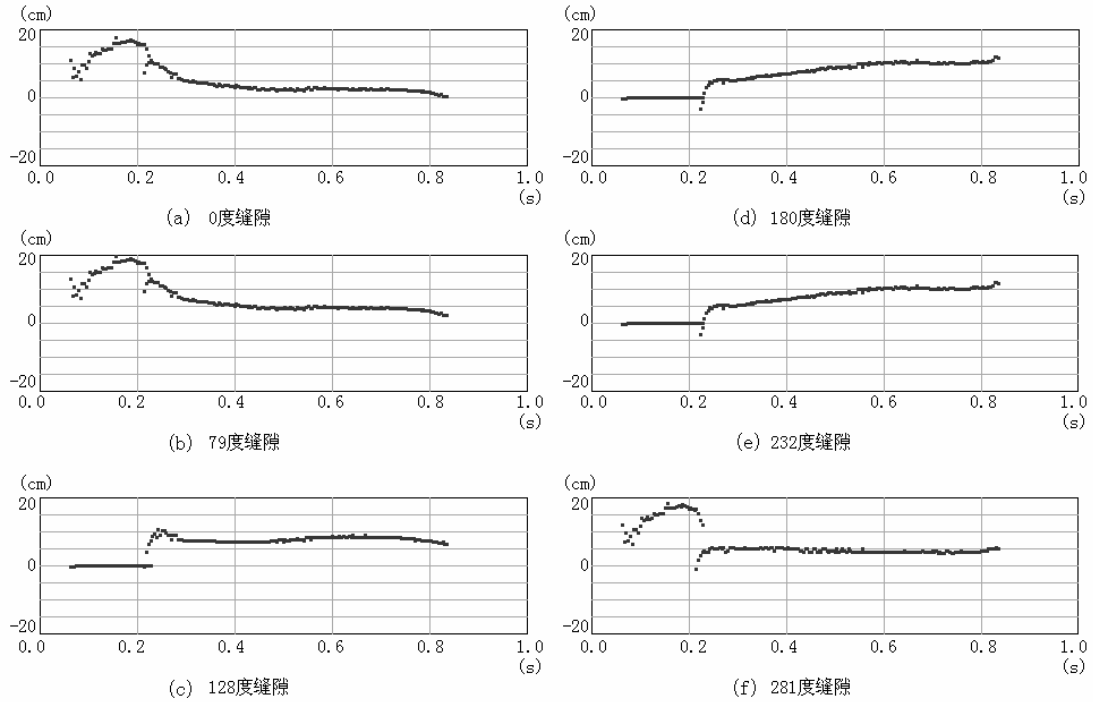


图5 2898次放电等离子体边界与第一壁之间的缝隙变化的情况
 ((a), (b), (c), (d), (e)和 (f) 分别是 0° , 79° , 128° , 180° , 232° 和 281° 处的缝隙)

5 结束语

在桌上和 HL-2A 上试验都表明, 对于可视化来说, 每秒能够画出 62 幅等离子体边界, 这个系统已经满足视觉的要求了。但是对于实时监测和控制而言, 还应该提高采集器的采样频率, 进而提高系统的数据处理速度。擦除和画出边界需要较多的时间。就是说不显示等离子体边界, 只是计算边界和缝隙, 这个系统可以用来做实时控制。当然采用实时操作系统还会提高数据的处理速度。

参考文献

- [1] Liu Dequan et al.,2003, Fusion Eng. Des, 66-68:147.
- [2] D.W.SWAIN, G.H.NEILSON,1982, Nuclear Fusion, 1982, 22 (8), 1015.
- [3] 袁保山, 刘莉, 李芳著, 毛苏英, 2004, 核聚变与等离子体物理, 24 (2) 81。
- [4] F.HOFMANN, G.TONETTI, 1982, Nuclear Fusion, 28 (3), 519.
- [5] YOU Tianxie, YUAN Baoshan, LIU Li, LI Fangzhu, 2005, Chinese Physics,14(3).

Real-time visualization system of plasma shape for HL-2A*

YUAN Bao-shan(袁保山)[†] YOU Tian-xue(游天雪) LIU Li(刘莉)
YANG Qing-wei(杨青巍) FEN Bei-bin(冯北滨) LI Qiang(李 强)
(Southwestern Institute of Physics, Chengdu)

Abstract: The real-time visualization system of plasma shape is developed for study the divertor plasma in HL-2A. The plasma boundary reconstruction code CF(Current Filaments) are written using the current filaments model and the finit current element model. The information of the magnetic field around plasma is gathered with USB data acquisition cards, UA301, having 100kHz/s, 32 channels with simultaneous sampling. A compatible computer with 3GHz E CPU processes the data. This system gathers and stores data in every 4ms, and draws the plasma boundary in every 16ms. After discharge, the plasma boundary and some plasma parameters which are inferred from one are calculated in detail.

Key words: plasma equilibrium reconstruction; boundary identification; Real-time visualization system

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

[†] PACC 5255