

通过软 X 射线信号研究芯部等离子体的结构*

马天鹏^{1)†} 胡立群²⁾ 陈开云²⁾

1) 北方民族大学基础部, 银川 750021)

2) 中国科学院等离子体物理研究所, 合肥 230031)

(2008 年 4 月 15 日收到, 2008 年 6 月 11 日收到修改稿)

介绍了如何从软 X 射线原始信号上分析等离子体芯部磁场结构的方法. 在 HT-7 托卡马克上, 通过分析一炮典型的放电数据, 直接从软 X 射线原始信号上分析了磁岛的位置和旋转方向. 通过软 X 射线图像反演的结果和 Mirnov 信号上观察到的 $m = 2$ 模的走向验证了磁岛旋转的方向和位置.

关键词: 软 X 射线, MHD 不稳定性, 磁岛

PACC: 5270L, 5270

1. 引 言

高温等离子体中的 MHD 不稳定性是影响高温等离子体状态的重要因素, 因此一直是理论和实验研究的重要领域之一^[1]. MHD 不稳定性会在等离子体平衡位形中产生磁扰动, 因此, 只要反映磁场扰动的测量手段都可以用来研究 MHD 不稳定性, 如由密绕的线圈组成的磁探针, 可以用来测量磁扰动. 发生 MHD 不稳定的同时, 还会产生等离子体密度和温度的扰动, 因此, 凡是能精确的反映等离子体温度和密度变化的诊断信号都可以用来研究磁流体力学不稳定性. MHD 扰动被认为是撕裂模形成的磁岛旋转所致, 它在空间上具有螺旋结构 $\exp[i(m\theta + n\varphi + \omega t)]$ 其中 m, n 分别为扰动的小环模数和大环模数, ω 为扰动的频率. 实验表明, 高温等离子体中的 MHD 扰动能引起等离子体温度、密度及电流分布等宏观行为的变化, 增加等离子体的能量损失, 破坏等离子体的约束, 甚至导致等离子体大破裂的发生^[1-3]. 因此, 为了得到高约束、高 β 的等离子体, 对等离子体中 MHD 不稳定的物理机制的研究将是非常重要的. 在聚变等离子体研究中, MHD 不稳定性信号的分析处理主要是 MHD 扰动随时间的演化特性和扰动的空间结构. 近年来, 已经发展了包

括二维软 X 射线图像反演在内的一系列诊断方法^[4,5]. 最近, 奇异值分解技术 (singular value decomposition, SVD) 作为一种新方法被应用到确定 MHD 不稳定的模数^[6,7] 和分析在软 X 射线信号上观察到的 MHD 振荡的结构^[8,9].

本文主要介绍了从软 X 射线原始信号上分析等离子体芯部磁场结构的方法, 包括磁岛的位置和旋转方向.

2. HT-7 托卡马克软 X 射线诊断系统

HT-7 托卡马克现共有 5 个软 X 射线诊断阵列, 它们分别安置在 HT-7 托卡马克同一环向位置的不同方位上, 具体分布见图 1. 且每个阵列都拥有 46 个光电二极管探测器, 每个阵列所探测的中心道均为第 23 和第 24 道. 其中 A, B 两个探测阵列布置在水平方位, 分别与赤道面成 15° 夹角. 上窗口 D, E 两个阵列分别与垂直轴成 6° 和 18° 夹角. 下窗口 C 阵列与垂直轴成 9.4° 夹角. 为保证所需要的信号有可比性, 所有狭缝的宽度均选定为 0.9 mm. 所有阵列的狭缝中心到托卡马克小圆截面圆心距离均为 400 mm. 覆盖在每个狭缝上的薄膜厚度大约为 12—13 μm . 此探测系统的空间分辨率大约在 0.6—1.5 cm 之间, 时间分辨率为 4 μs , 灵敏面积为 3.96 mm^2 ,

* 宁夏回族自治区自然科学基金(批准号: NZ0847)和北方民族大学科研项目(批准号: 2006Y050)资助的课题.

† E-mail: ma_tianpeng@163.com

最大测量范围是 -27—27 cm. 该系统主要包括探测器、准直与狭缝以及前放 3 个部分. 为了得到较高信噪比的信号, 我们尝试使用了偏压放大器, 并取得了较为理想的数据.

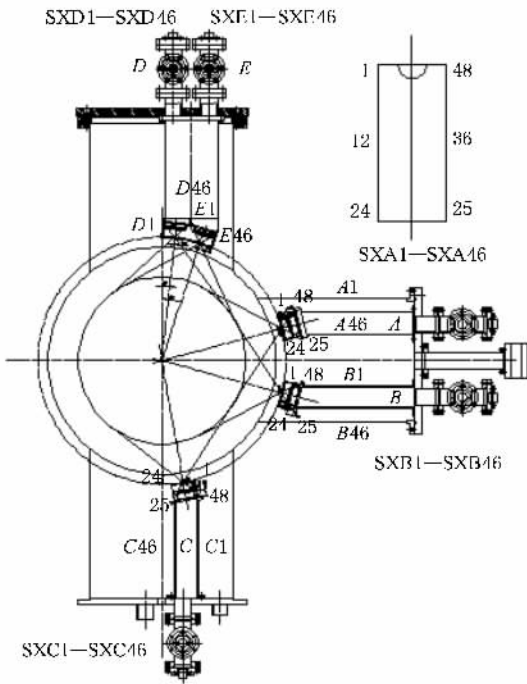


图 1 HT-7 软 X 射线阵列诊断系统示意图

3. 实验结果及分析

在 HT-7 托卡马克放电区结构研究中出现的重要现象之一是当等离子体密度比较高时, 锯齿振荡就转换成 MHD 振荡. 这在 IBW 以及双波协同 (LHW + IBW) 加热的条件下会经常发现这种特性.

图 2(a) 是在 IBW 情况下出现 MHD 振幅很强的一炮. 其典型的放电参数如下: 等离子体电流 $I_p \approx 160$ kA, 纵场强度 $B_z(0) \approx 1.80$ T, 中心弦电子密度 $N_e(0) \approx 2.1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$. IBW 在 190 ms 投入, 从 320 ms 起在磁探针信号上观察到了很强的 Mirnov 振荡, 并产生锁模, 引起了等离子体的破裂和 IBW 的反射保护. 在 390 ms 附近时软 X 射线信号也出现了很强的 MHD 振荡. 图 2(b) 是在 IBW 下软 X 射线信号上的 MHD 振荡局部波形随时间的演化图. 由图可知, 每个阵列中心道信号的振荡频率是其他信号振荡频率的两倍; 中心道两侧信号位相正好相反 (见图中心箭头). 由此可知此振荡是 $m = 1$ 的模.

模的走向就反映的是磁岛的旋转方向, 这可以

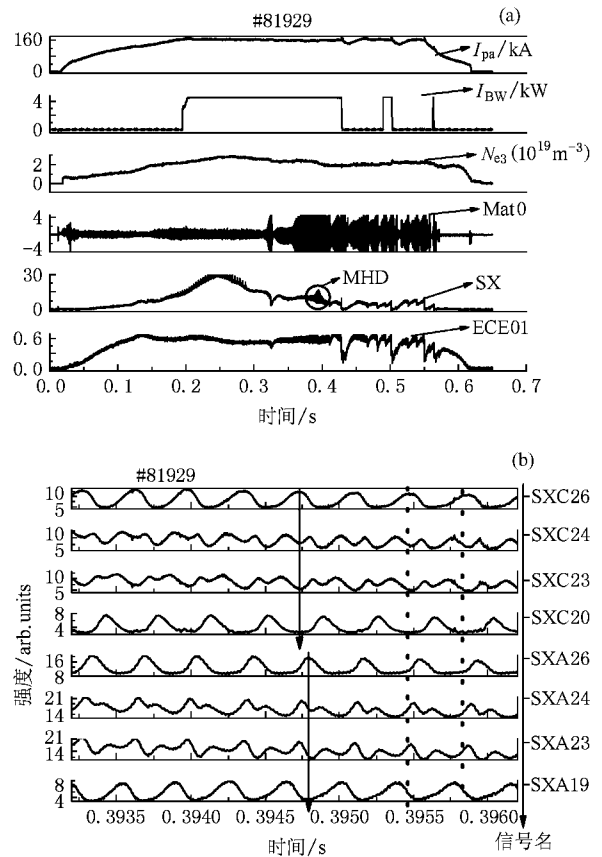


图 2 (a) #81929 的放电波形 (b) 软 X 射线信号上 MHD 振荡过程的局部展开图. 图中虚线表示在这个振荡周期内进行图像反演

从原始的软 X 射线信号上得出, 图 3 是软 X 射线 A 和 C 阵列中心道以及中心道两侧的信号振荡, 信号上带黑色箭头的实线反映了 $m = 1$ 模的走向即磁岛的旋转方向, 其中 SXA23 和 SXC24 分别探测的是水平和下垂直中心道的软 X 射线辐射强度, SXA19 和 SXA27 分别探测下面和上面的软 X 射线辐射强度, 而 SXC27 和 SXC20 分别探测弱场区和强场区的强度. 从图 3 可以清楚地看出, $m = 1$ 模及其磁岛是沿着逆时针方向旋转的, 且磁岛的位置就在原始信号凹下去的地方. 磁岛的旋转方向也可以从磁探针的 Mirnov 信号上得到了验证. 如图 4 所示, 在 HT-7 托卡马克上有两组极向磁探针和一组环向磁探针. 两组极向磁探针分布在两个不同的环向位置, 环向角相差 180° ; 每组有 12 个磁探针, 且平均分布在一个极向截面上. 每个磁探针有两个相互垂直的线圈组成, 可以分别测量极向和法向上的磁场, 且每相邻的两个磁探针极向角相位相差 30° . 图 5 是由极向磁探针测得的 Mirnov 信号, 由图 5 (虚线) 可看出, 信号

mat0(位于赤道面的低场侧)与信号 mat3(分布在垂直轴的上侧)位相反,而与信号 mat6(位于赤道面的高场侧)同相位,说明磁探针信号上看到的是 $m = 2$ 的模. 模的旋转方向也是沿着逆时针方向的(带箭头实线). 由于磁探针探测的是等离子体边缘信号,而软 X 射线辐射强度反映的是芯部等离子体信息,所以这两者并不矛盾.

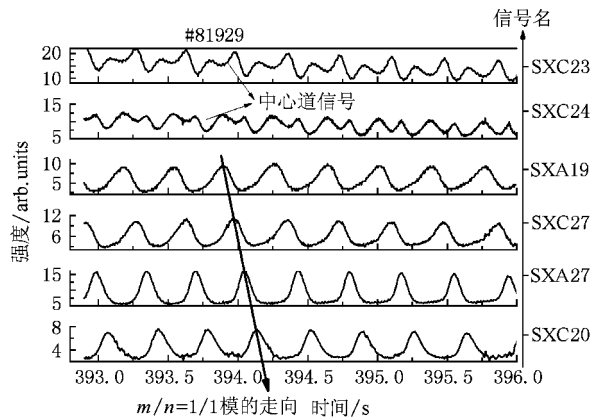


图 3 软 X 射线信号上 $m = 1$ 模的走向

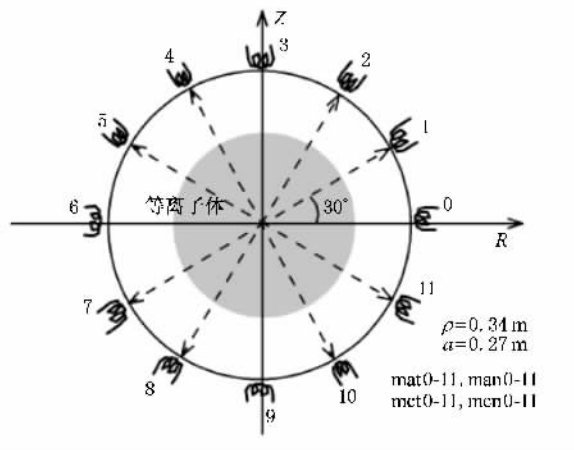


图 4 HT-7 托卡马克极向磁探针位置示意图

为了精确分析等离子体内部的扰动模式,我们利用软 X 射线反演得到的图像来分析 $m = 1$ 模的空间结构. 从图 2(b)中可以看出,由于 MHD 振荡幅度变化不大,也即这种振荡比较稳定,所以我们只需取一个周期来反演即可反映其物理过程. 图 6 是我们采用 Zemicke 多项式方法^[4,10]得到在一个 MHD 振荡周期内的软 X 射线图像反演结果(反演周期如图 2(b)中虚线所示).

从软 X 射线层析变换图上可以明显看出,等离子体柱的“热芯”(即磁轴)并不在其中心,而是偏移

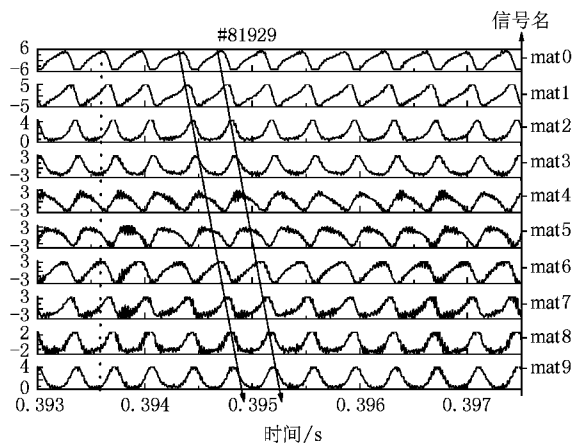


图 5 磁探针信号上模的走向

一定的位置并呈月牙形状,这个位置就是我们经常所谓的 $q = 1$ 面位置. 在与月牙形“热芯”相对的区域有一温度较低的圆形“冷泡”,即磁岛. 等离子体芯部的磁面结构主要就由这两部分组成. 在这一个 MHD 振荡周期内,月牙形的“热芯”和圆形“冷泡”所组成的芯部磁面结构在整体沿着电子逆磁方向极向旋转(HT-7 托卡马克从顶部向下俯视纵向磁场是顺时针方向,所以反演出的旋转方向正好是电子逆磁方向),旋转周期正好是 MHD 的振荡周期. 从图上可以得出,软 X 射线辐射强度反演得到 $m = 1$ 的磁岛和磁探针探测的 $m = 2$ 模旋转速度相同,说明等离子体中的 $m = 1$ 和 $m = 2$ 模都和磁岛旋转相关.

在图 2(b)中我们观察到了中心软 X 射线信号出现倍频现象,从反演图像上我们可以做如下的解释:形成的 $m = 1$ 的磁岛在旋转的过程中每旋转一周通过中心观察弦两次,因而在中心软 X 射线信号上观察到了倍频现象.

原则上讲,探测器探测到的弦积分信号的采样点越多,在弦方位空间分布越均匀,则反演结果的可信度就越高. 因此,在软 X 射线阵列中,为了得到最可靠的反演结果,以上的反演图像采用了水平 A 阵列、上垂直 E 阵列和下垂直 C 阵列. 图 7 是我们的探测阵列反演实验弦积分信号 $f(p, \varphi)$ 在弦方位空间图上的分布情况. 由图可知,运用布置在 HT-7 同一环向而不同极向方位的 3 个软 X 射线阵列来做反演,不但采样点在弦方位空间上的分布比较均匀,而且数据采样点的个数比较多,因此,经过这个反演系统所得到的反演结果就是比较可信的.

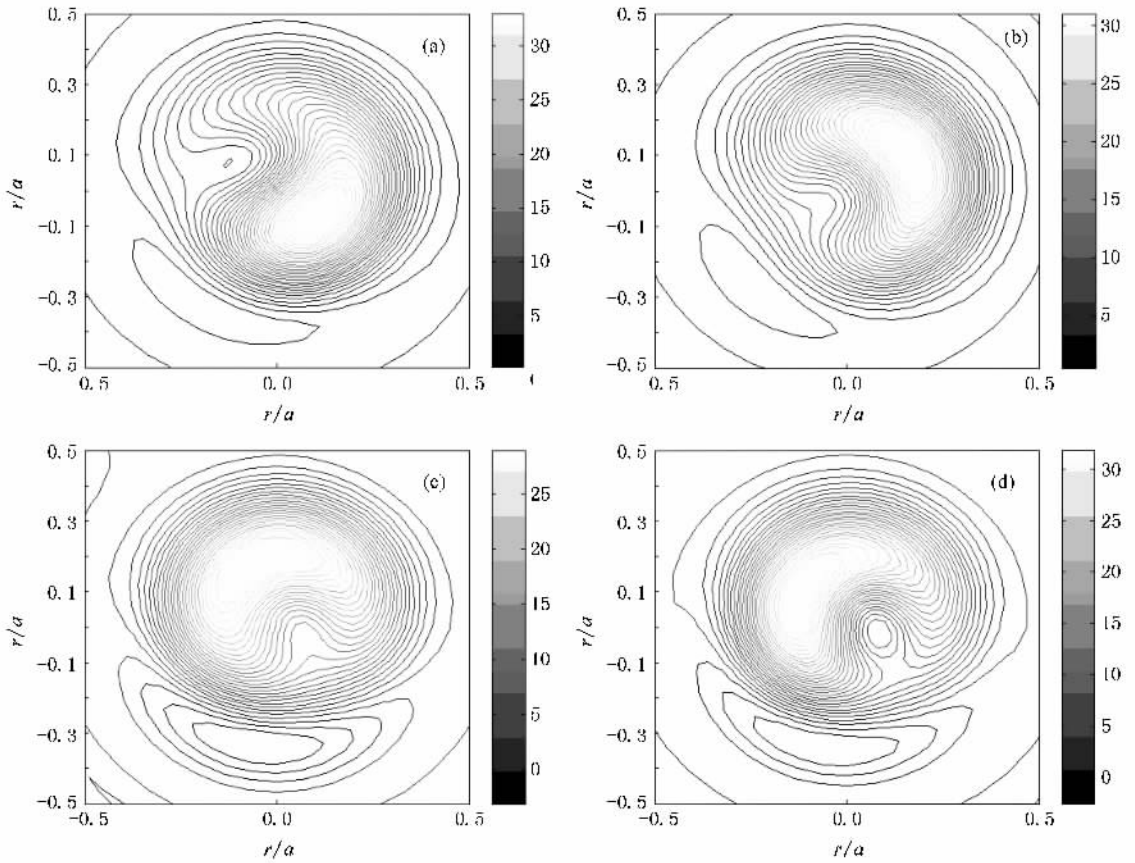


图 6 一个 MHD 振荡周期内的软 X 射线反演图 (a) $t = 395.422 \text{ ms}$, (b) $t = 395.482 \text{ ms}$, (c) $t = 395.580 \text{ ms}$, (d) $t = 395.602 \text{ ms}$

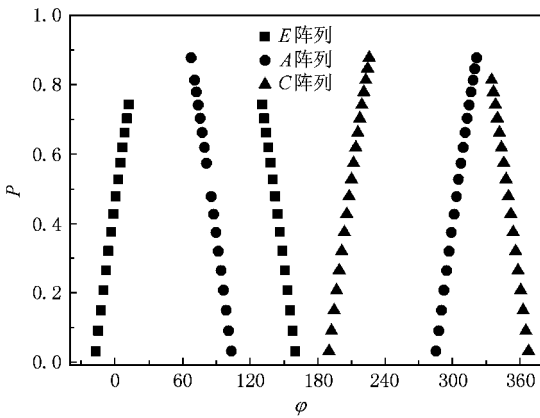


图 7 反演变换的弦积分信号采样点在弦方位空间 (p, φ) 上的分布图

4. 结 论

本文给出了从软 X 射线原始信号上分析等离子体芯部磁场结构的方法. 在 HT-7 托卡马克上, 通过分析一炮典型的放电数据, 直接从软 X 射线原始信号上分析了磁岛的位置和旋转方向, 并通过反演软 X 射线辐射强度得到 $m = 1$ 的磁岛和磁探针探测的 $m = 2$ 模旋转速度相同, 说明等离子体中的 $m = 1$ 和 $m = 2$ 模都和磁岛旋转相关; 磁岛旋转的方向和位置不但从软 X 射线图像反演的结果上得到了证明, 也从磁探针的 Mirnov 信号上得到了验证. 在 MHD 振荡区中心道软 X 射线信号出现的倍频现象, 是由于长大的磁岛造成中心的热芯的移动, 在一次循环过程中通过观察弦两次的结果.

- [1] Snipes J A , Campbell D J , Hender T C , von Hellermann M , Weisen H 1990 *Nucl. Fusion* **30** 205
- [2] Yu C X , Brower D L , Zhao S J , Bravenec R V , Chen J Y , Lin H , Luhmann N C , Jr Peebles W A , Ritz C P , Schoch P M , Yang X Z 1992 *Nucl. Fusion* **32** 1545
- [3] Wesson J A , Gill R D , Hugon M , Schuller F C , Snipes J A , Ward D J , Bartlett D V , Campbell D J , Duperrex P A , Edwards A W , Granetz R S , Gottardi N A O , Hender T C , Lazzaro E , Lomas P J , Lopes Cardozo N , Mast K F , Nave M F F , Salmon N A , Smeulders P , Thomas P R , Tubbing B J D , Turner M F , Weller A 1989 *Nucl. Fusion* **29** 641
- [4] Granetz R S , Smeulders P 1988 *Nucl. Fusion* **28** 457
- [5] Nagayama Y 1987 *J. Appl. Phys.* **62** 6
- [6] Ishida S , Nogashima A , Sato M , Isei N , Matoba T 1990 *Rev. Sci. Instrum.* **61** 2834
- [7] Nardine C 1992 *Plasma Phys. Control. Fusion* **34** 1447
- [8] Kim J S , Edgell D H , Greene J M , Strait E J , Chance M S 1999 *Plasma Phys. Control. Fusion* **41** 1399
- [9] de Wit T D , Pecquet A L , Vallet J C , Lima R 1994 *Phys. Plasmas* **1** 3288
- [10] Cormack A M 1964 *J. Appl. Phys.* **35** 2908

Study of central plasma structure using soft X-ray signals^{*}

Ma Tian-Peng^{1)†} Hu Li-Qun²⁾ Chen Kai-Yun²⁾

¹⁾ *Department of Basic Sciences , Beifang Ethnic University , Yinchuan 750021 , China)*

²⁾ *Institute of Plasma Physics , Chinese Academy of Sciences , Hefei 230031 , China)*

(Received 15 April 2008 ; revised manuscript received 11 June 2008)

Abstract

A method for studying the central plasma structure using soft X-ray signals in the HT-7 tokamak is reported. Through analysing a typical discharge with MHD instability , the position and rotation direction of magnetic island are obtained from the soft X-ray signals. The magnetic island position and rotation direction are validated from the contour map of soft X-ray emissivity and the $m = 2$ mode rotation direction observed on the Mirnov signals.

Keywords : soft X-ray , MHD instability , magnetic island

PACC : 5270L , 5270

^{*} Project supported by the Natural Science Foundation of Ningxia Hui Autonomy Region , China (Grant No. NZ0847) and the Scientific Research Fund of Beifang Ethnic University , China (Grant No. 2006Y050).

[†] E-mail : ma_tianpeng@163.com