

① 37-42

第18卷 第4期
1998年 12月核聚变与等离子体物理
Nuclear Fusion and Plasma PhysicsVol. 18, No. 4
Dec. 1998

HT-6B 托卡马克上的 MHD 扰动模式分析

钟方川^{1,2} 谢纪康² 徐至展¹⁽¹⁾ 中国科学院上海光机所, 上海 210800)⁽²⁾ 中国科学院等离子体所, 合肥 230031)

TL612.2

TL631.24

利用磁探针对 HT-6B 托卡马克上的 Mirnov 扰动的大环模数进行了分辨,发现在一次放电过程中 $n = 1, 2, 3, 4$ 的模数同时存在。对各模的频谱分析表明,当扰动较小时,各模扰动具有同为 20kHz 的单一频率;当扰动增大时,各模在 20kHz 的基础上出现 40kHz 的倍频。倍频出现的合理解释是磁岛岛宽的振荡。

关键词 托卡马克 MHD 扰动 模数 频谱

模式分析

1 引言

Mirnov 扰动是托卡马克运行中普遍存在的宏观磁流体不稳定性(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 $\exp[i(m\theta + n\varphi + \omega t)]$, 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,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,增加等离子体能量的损失,破坏等离子体约束,甚至导致等离子体大破裂的发生^[1-4]。因此,对 MHD 扰动的物理特征及其机制的研究一直是托卡马克等离子体物理实验中一个重要而基础的问题。MHD 扰动研究中一个重要工作就是对 Mirnov 扰动的模式——扰动的幅值、模数、频率及其空间位置进行分析。置于托卡马克真空室内外的分立磁探针、余弦探针和正弦探针是研究 MHD 扰动的最有效、最简易的诊断方法。

HT-6B 托卡马克自投入运行以来,在实验中观察到丰富的 MHD 扰动现象,并发现在一次放电过程中 Mirnov 扰动具有多个角向 m 模(由余弦探针得到)同时存在,且具有相同的频率,这些相同频率的不同 m 模能同时被外加的共振螺旋场所抑制^[5]。考虑环效应后,角向模数的分辨将存在串模效应^[6],那么 HT-6B 上这些具有相同频率的不同 m 模的扰动是反映等离子体中的确存在对应的扰动,还是由于环效应所致的串模现象,以及这些 m 模是对应一个 n 模还是多个 n 模呢?因此,为了更清楚地认识 HT-6B 上 MHD 扰动的模式,更准确地确定扰动的模数,在分辨极向模数的同时,还需分辨扰动的环向模数,以便更深入地分析 MHD 扰动的空间结构及其随时间演变的规律。为此利用沿大环分布的分立磁探针,首次对 HT-6B 上的 Mirnov 扰动的大环模数进行分辨,发现在一次放电过程中 Mirnov 扰动具有多个 n 模,并对各模的幅频特性进行了分析。

2 实验安排

HT-6B 是一个小型圆截面、空芯变压的托卡马克装置,其大小半径分别为 $R = 45\text{cm}$ 和 $a = 12.5\text{cm}$ 。为了分辨扰动的大环模数,在真空室赤道面外圆沿大环均匀地分布了 8 个 Mirnov 分立探针,探针的截面法向沿极向方向。对 8 个探针信号进行一维的傅里叶变换(FFT),可得扰动的大环模数;对扰动信号进行一维空间、一维时间的两维 FFT,则同时可得扰动的模数和频率。利用 $m = 2, 3, 4, 5$ 的余弦探针对小环模数进行监测。在实验中放电的线平均电子密度为 $n_e \approx (1.4 - 2.2) \times 10^{13}\text{cm}^{-3}$,边界安全因子 $q(a) \approx 2.5 - 5.0$ 。

3 实验结果

3.1 扰动的模数

图 1 是一次典型放电过程中对 8 个沿大环分布的小探针测得的磁扰动微分信号 \bar{B}_θ 进行一次空间傅里叶变换后得到的 $n = 1, 2, 3, 4(\cos 4\varphi)$ 各模信号及在一段时间内的展宽。由于大环模数的分辨不受环效应的影响,所以图 1 说明在一次放电过程中具有多个 n 模。图 2 为对应的余弦探针测得的小环的 $m = 2, 3, 4, 5$ 的信号。因此,在一次放电过程中多个 m/n 模同时共存。

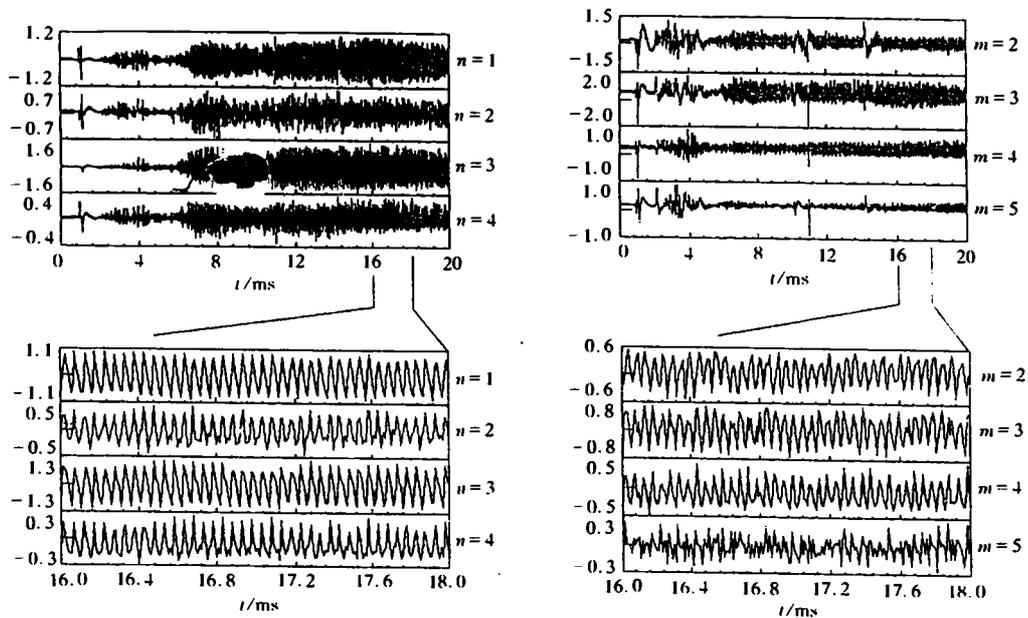


图 1 $n = 1, 2, 3, 4(\cos 4\varphi)$ 各模信号及其部分展宽

图 2 $m = 2, 3, 4, 5$ 各模信号及其部分展宽

3.2 扰动的幅度

由图 1 得到的各 n 模的扰动幅度随时间的变化规律如图 3 所示。从此图中可以看出,扰动具有撕裂模理论预言的从小幅值开始发展到饱和的过程^[7]。在 6ms 左右扰动开始突发增长,

经过约 1ms 左右的非线性增长达到饱和。在放电的其余时间里,扰动的幅值虽然随放电的参数变化(如 n_e 的变化)略有变化,但在无外部作用(如螺旋场的加入)、宏观放电参数(n_e 、纵场 B_T 等)保持不变及平衡控制较好时,不再有突发增长或衰减过程。这个饱和值几乎保持到放电结束,说明达到饱和后等离子体保持准稳定运行。

图 3 还清楚地显示,在一次放电中 $n = 1, 3$ 两模具有较大的扰动幅度,扰动磁场与等离子体电流产生的极向磁场之比 $\tilde{B}_\theta/B_\theta$ 在 0.01% 的范围,而 $n = 2, 4$ 两模在同一水平,较 $n = 1, 3$ 两模小一半左右。我们还发现,在所有的 $n_e, q(a)$ 放电中,这种 $n = 1, 3$ 模扰动大,而 $n = 2, 4$ 模扰动小的规律保持不变。表 1 给出了对应图 3 的放电在 $t = 16\text{ms}$ 时各 n 模的扰动磁场大小及其与等离子体电流产生的极向磁场之比,并给出由 $m = 2, 3, 4, 5$ 余弦探针得到的各 m 模作为对照。放电参数 $n_e = 1.80 \times 10^{13}\text{cm}^{-3}, I_p = 34.32\text{kA}$ 。可见, $m = 2, 3$ 模具有较大的幅值。这里需要指出的是, $n = 3$ 模具有较大的幅度与 $m = 4, 5$ 余弦探针测得的信号较小两者间并不互相矛盾。由于环效应的存在,虽然 $m = 4, 5$ 的余弦探针的输出信号较小,但等离子体中存在的 $m/n = 4/3$ 或 $m/n = 5/3$ 的扰动并不一定小。

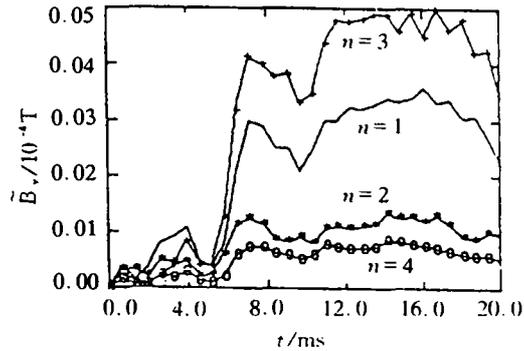


图 3 扰动幅度随时间的变化

表 1 各 n, m 模的扰动幅度

模数	$n = 1$	$n = 2$	$n = 3$	$n = 4$	$m = 2$	$m = 3$	$m = 4$	$m = 5$
$\tilde{B}_\theta/10^{-4}\text{T}$	0.06	0.032	0.08	0.02	0.039	0.040	0.015	0.014
$\tilde{B}_\theta/B_\theta$	0.01%	0.0056%	0.014%	0.0035%	0.0066%	0.0070%	0.0026%	0.0024%

根据撕裂模理论,越高的模数将越稳定,因此如果各种 n 模扰动存在,则模数从低到高,扰动应越来越小。而我们的实验显示 $n = 3$ 模比 $n = 2$ 模还大,为什么会出现这种“反常现象”,有待进一步的研究。在 TFTR 装置上进行有中性注入的 supershot 实验中也观察到了高 n 模的扰动^[1],它们在实验中观察到了 $m/n = 2/1, 3/2, 4/3, 5/4$ 模的存在,并且发现在一次放电中 $4/3$ 模比 $3/1$ 模来得大。在 JET 装置上也发现 $n = 3, 4$ 模的存在^[2]。因此,上述两装置的结果均支持了我们的实验结论,即在一次放电过程中具有 $n = 3, 4$ 等较高 n 模的扰动。

3.3 扰动的频谱特性

上面分析了扰动的模数和扰动的强度,下面分析扰动的频谱特性。将磁探针信号进行对时间的傅里叶变换(FFT),可得 MHD 扰动的频谱特性,结果发现二种情况:

a. 各模均只有频率为 20kHz 的一个频率尖峰。图 4 给出 $n = 4$ 模的频谱图,其它各 n, m 模都有相同的规律。

b. 各模除了具有 20kHz 的频率外,在扰动较大时还出现 40kHz 的倍频。图 5 为 $n = 3$ 模的频谱图,其它各 n, m 模都有相似的结构。各模均具有频率为 20kHz 的频率尖峰,同时在 13ms 开始,由于扰动幅度增大时,出现了频率为 40kHz 的倍频成分。

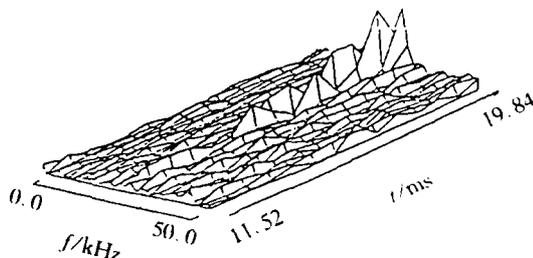


图 4 各 n, m 模为单频时 $n = 4$ 模的时间-频谱图

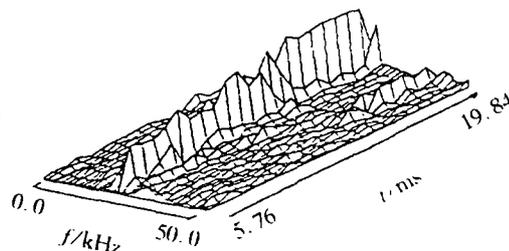


图 5 各 n, m 模出现倍频时 $n = 3$ 模的时间-频谱图

除了在磁探针上观察到倍频外,我们对中心软 X 射线(SX)信号上的 Mirnov 振荡也进行频谱分析,结果发出的 SX 信号上也有倍频信号的存在。因此,两种诊断的结果均证明 MHD 扰动中倍频扰动的存在。

我们分析了出现倍频时扰动的大小。结果发现,对于 $n = 1$ 和 $n = 3$,当 $\frac{\tilde{B}_0}{B_0} > 0.005\%$ 时,扰动频谱上将会出现 40kHz 振荡,对于 $n = 2$ 和 $n = 4$ 的模出现 40kHz 的倍频时, $\frac{\tilde{B}_0}{B_0} > 0.0026\%$ 。其中对于 $n = 1, 3, 4$ 的模,40kHz 振荡幅度为 20kHz 的 10% - 25%,而对于 $n = 2$ 模,40kHz 的分量可达 20kHz 的 50% 以上。

根据撕裂模理论, Mirnov 扰动是由磁岛的旋转所致,则上述的倍频现象一个合理的推断是,在磁岛旋转的同时其岛宽也存在振荡。 Mirnov 扰动幅度大小与磁岛大小及所在的共振面有关。现在假设磁岛不但存在旋转,而其岛宽也存在振荡。设旋转频率为 ω_1 , 振荡频率为 ω_2 , 则由扰动电流产生的扰动磁场^[6]为:

$$\tilde{B}_0(t) = \frac{\mu_0 j_{mn}}{2} \left(\frac{r_{mn}}{r}\right)^{m+1} r_{mn} \exp[i(\omega_1 t + n\varphi)] = A(1 + A_1 \cos\omega_2 t) \exp[i(\omega_1 t + m\theta + n\varphi)] \quad (1)$$

$$A = \frac{\mu_0 j_{mn0}}{2} \left(\frac{r_{mn}}{r}\right)^{m+1} r_{mn} \quad (2)$$

其中 r_{mn} 为磁岛所在的共振面位置, j_{mn} 为扰动电流的大小, A_1 为磁岛岛宽的振荡幅度, j_{mn0} 为电流的最大值。这里假设扰动电流与磁岛宽度成正比,而共振面位置保持不变。对 $\tilde{B}_0(t)$ 进行空间傅里叶变换得:

$$\tilde{B}_{mn}(t) = A(1 + A_1 \cos\omega_2 t) \exp(i\omega_1 t) \quad (3)$$

如果 $\omega_1 = 20\text{kHz}$, $\omega_2 = 20\text{kHz}$, 则将出现我们观测到的 20kHz 和 40kHz 的倍频。在以前 HT-6B 装置上的螺旋场实验中,加共振螺旋场(RHF)后分立探针间的位相差消失,但仍有 20kHz 的振荡存在,如图 6 示,支持了磁岛振荡存在的结论。由于 RHF 加入,磁岛与 RHF 相互作用,

将可能导致磁岛的停转,但由于磁岛振荡的存在,探针仍有信号输出。最近理论上考虑等离子体中存在的剪切流(shear flow)对撕裂模的影响,得到剪切流能引起磁岛的振荡^[6]。

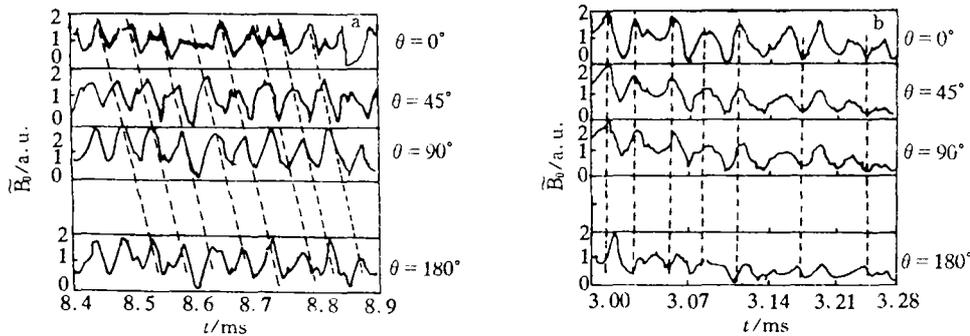


图6 在RHF作用下的磁扰动信号的相位变化

a——无RHF;b——有RHF。

4 结论和讨论

利用磁探针针对HT-6B托卡马克上的MHD扰动的模式进行了分析,得到:

a. 首次对HT-6B托卡马克上MHD扰动的大环模数进行了分辨,得到在一次放电过程中 $n = 1, 2, 3, 4$ 模同时存在,结合小环余弦探针的测量结果,从而肯定在一次放电过程中多个 m/n 模同时存在。在一次放电过程中 $n = 1, 3$ 模的幅值比 $n = 2, 4$ 的大1倍。这一反常现象有待进一步研究。

b. 利用一维和二维的快速傅里叶变换分析了各模频率特性随时间的变化规律。结果发现,各 n, m 模在扰动较小时均具有相同的20kHz左右的振荡频率,而当 $n = 1, 3$ 模的扰动幅度 $\frac{\tilde{B}_0}{B_0} > 0.005\%$ 时, $n = 2, 4$ 模的扰动幅度 $\frac{\tilde{B}_0}{B_0} > 0.0026\%$ 时,各模在具有20kHz频率的同时,出现40kHz的倍频振荡。磁岛岛宽的振荡可能是倍频现象产生的机制,但仍然不清楚为何一定是倍频,有待深入研究。

由于环效应的存在,极向模数的精确分辨存在困难,同时我们在实验中对大环和小环的分辨是独立进行的,因此很难将两者一一对应。要精确地确定 m/n 模,在增加磁探针组数的同时,还应再增加具有较好时空分辨的诊断手段,如ECE等。根据撕裂模理论,扰动应满足 $\frac{m}{n} \leq q(a)$, $q(a)$ 为边界的安全因子。不稳定性的发生具有共振的特性,即模数为 m/n 的扰动只能存在于 $q(r) = m/n$ 的磁面上。由于在稳定的欧姆放电过程中电流分布为抛物分布,安全因子 $q(r)$ 随 r 单调增加,在等离子体中心具有最小值(一般在1附近)。对于图2的放电, $q(a) = 3.87$,因此与各 n 模对应可能存在的 m 模的排列为 $n = 1$ 模: $m/n = 1/1, 2/1, 3/1$; $n = 2$ 模: $m/n = 2/2, 3/2, 4/2, 5/2$; $n = 3$ 模: $m/n = 4/3, 5/3$; $n = 4$ 模: $m/n = 5/4$ 。

我们的实验结果也表明,在 $q(r) = 1$ 和 $q(r) = 2$ 之间有可能存在多种模数的扰动,如 $m/n = 1/1, 2/1, 3/2, 4/3, 5/4$ 模。这些模的存在,必然加强中心区域能量的向外输运过程,造成 $q(r) = 1$ 的面内无净能量沉积出现,因此导致在HT-6B托卡马克上大幅度的MHD振荡与

锯齿振荡不能同时出现^[9]。

感谢中科院等离子体所 HT-6B 托克马克运行组的支持。

参考文献

- 1 Chang Z, Fredrikson E D, Callen J D, et al. Transport Effects of Low (m, n) MHD Modes on TFTR Supershots. Nucl. Fusion, 1994, 34(10):1309.
- 2 Snipes J A, Campbell D J, Hender T C, et al. Plasma Stored Energy and Momentum Loss during Large MHD Activity in JET. Nucl. Fusion, 1990, 30(2):205.
- 3 YU Changxuan, Brower D L, ZHAO Shujun, et al. Tearing Instabilities and Microturbulence in TEXT. Nucl. Fusion, 1992, 32(9):1545.
- 4 Wesson J A, Gill R D, Hugon M, et al. Disruptions in JET. Nucl. Fusion, 1989, 29(4):641.
- 5 CHEN Jiayun, XIE Jikang, HUO Yuping, et al. Global Structure of MHD Modes in Tokamaks. Nucl. Fusion, 1990, 30(11):2271.
- 6 Harley T R, Buchenauer D A, Coonrod J W, et al. TFTR Mirnov Coil Analysis with Toroidal Effects at Plasma Start up. Nucl. Fusion, 1989, 29(5):771.
- 7 White R B, Monticello D A, Rosenbluth M N, et al. Saturation of the Tearing Mode. Phys. Fluids, 1977, 20(5):800.
- 8 Persson M, Bonderson A. Oscillating Magnetic Islands in a Rotating Plasma. Phys. Fluids, 1990, B2(10):2315.
- 9 李林忠, 霍裕平, 谢纪康等. HT-6B 托卡马克放电区的精细结构. 中国科学, A 辑, 1990, 20(6):647.

(编辑部 1998 年 3 月 30 日收稿)
1998 年 6 月 8 日收到修改稿)

MHD MODES ANALYSIS IN THE HT-6B TOKAMAK

ZHONG Fangchuan^{1,2} XIE Jikang² XU Zhizan¹

(¹Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica, Shanghai 201800)

(²Institute of Plasma Physics, Academia Sinica, Hefei 230031)

ABSTRACT

The toroidal numbers of Mirnov oscillations in the HT-6B tokamak are distinguished by using magnetic coils. The results show that the $n = 1, 2, 3, 4$ modes exist simultaneously in tokamak discharge. Spectrum analysis indicates that the oscillations of every mode have same 20kHz frequency when their amplitudes are small. When the amplitudes increase, there is a double frequency with 40kHz appearing in spectrum with 20kHz oscillation. A reasonable explanation of the double frequency is the width oscillation of the magnetic island.

Key words Tokamak MHD fluctuations Mode number Spectrum