

文章编号:1673-0062(2015)02-0006-04

周期性驱动电流对双撕裂模不稳定性的影响

杨 振,路兴强*,龚学余

(南华大学 核科学技术学院,湖南 衡阳 421001)

摘 要:在 Hall MHD 方程组中引入外部驱动电流项,数值模拟驱动电流对双撕裂模不稳定性发展的影响. 研究表明,外部驱动电流在撕裂模磁岛的 x 点要比在 O 点抑制效果好;在 x 点加入反向外驱动电流对撕裂模的发展有抑制作用,周期性的外部驱动电流对双撕裂模不稳定性的抑制效果较好,在相同的模拟参数下,周期性的外部驱动电流加入越早对撕裂模的抑制效果越好.

关键词:撕裂模;驱动电流;MHD
中图分类号: O534+.2 **文献标识码:** A

The Effect of Periodic Current Drive on Unstability Time of Double Tearing Mode

YANG Zhen, LU Xing-qiang*, GONG Xue-yu

(School of Nuclear Science and Technology, University of South China, Hengyang, Hunan 421001, China)

Abstract: Considering the external drive current in Hall MHD equations, the effects of external current drive on the instability of the double tearing mode are numerically investigated. The results show that the double tearing mode can be suppressed by the current drive, the current drive at the X-point of tearing mode magnetic islands is better than at the O-point. Periodic external current drive has a good effect on stabilizing the double tearing mode, and the soon the better stabilizing effect.

key words: Current drive; Tearing mode; MHD

撕裂模不稳定性严重影响了托卡马克实验装置的约束性能,尤其是发生在安全因子 $q(q = m/n$, m 是极向模数, n 是环向模数) 比较小的有理面上,撕裂模不稳定性会引起等离子体宏观不稳定性,甚

收稿日期:2014-11-29

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41104094;11075073);博士科研启动基金资助项目(2010XQD30);湖南省教育厅基金资助项目(12B107);南华大学创新团队课题基金资助项目(NHCXTD03)

作者简介:杨 振(1990-),男,湖南常德人,南华大学核科学技术学院硕士研究生. 主要研究方向核聚变与等离子体物理. * 通讯作者.

至有可能引起等离子体破裂^[1-2]而终止实验. 首先发现 $m/n=1/1$ 的撕裂模不稳定性, 其与等离子体的锯齿波不稳定性密切相关; 而随后的研究表明 $m/n=2/1$ 撕裂模不稳定性也是引起等离子体大放电的主要原因之一, 因此抑制撕裂模不稳定性成为提高目前托卡马克实验装置约束性能亟待解决的难题. 由于双撕裂模在非线性重联阶段发展非常迅速, 其破坏性较之单撕裂模要严重得多, 所以研究抑制双撕裂模不稳定性的方法具有重大意义.

目前抑制撕裂模不稳定性的方法总体上是通过直接或间接改变有理面附近的磁剪切来抑制撕裂模不稳定性^[3]. 具体抑制撕裂模的研究大部分研究集中在通过局部加热^[4-6]或者外部驱动电流^[7-9]来改变有理面附近的磁场, 从而起到影响撕裂模磁岛发展的作用. 研究发现磁岛的形成会展平并减小内部的电流密度, 抑制撕裂模的方法主要集中于在磁岛内部加入扰动来抑制撕裂模不稳定性的发展, 因而大多数数值模拟都将外部驱动电流的位置选择在磁岛的 O 点处, 通过外部驱动电流维持内部的电流密度. 数值模拟外部驱动电流效应是通过欧姆定律方程引入的, 研究表明合理的外部驱动电流可以减小磁岛的尺度, 抑制磁岛增长^[10]. 本文的研究将在 Hall MHD 方程组^[11]的基础上, 通过欧姆定律方程引入外部驱动电流效应, 模拟外部驱动电流效应的引入对双撕裂模不稳定性产生的影响, 寻求利用外部驱动电流来抑制双撕裂模不稳定性增长的方法.

1 基本物理模型

本文应用大环径比的托卡马克装置中, 即 $\varepsilon \ll 1$, $\varepsilon = a/R$, a 是托卡马克小圆截面半径, R 是大环半径. 采用托卡马克平板近似的平衡位形, 忽略环效应. 标准的磁场可以表示成为:

$$\vec{B} = \vec{y} \times \nabla\psi + B_y \vec{y} \quad (1)$$

驱动电流在含 Hall 效应的欧姆定律中表达式:

$$\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B} = \eta(\vec{j} - \vec{j}_{cd}) + w\left(\frac{\vec{j} \times \vec{B}}{\rho} - \frac{\nabla P}{\rho}\right) \quad (2)$$

假设所有变量在环向是常量, 在数学上的表述为 $\frac{\partial}{\partial y} = 0$, 将一个空间三维问题简化为二维问题. 平板模型中, $\vec{x}$, $\vec{y}$, $\vec{z}$ 分别代表托卡马克的极向, 环向和径向, ψ 是磁通函数. 方程组经简化后为:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\vec{v} \cdot \nabla \rho - \rho \nabla \cdot \vec{v} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho \vec{v})}{\partial t} = & -\vec{v} \cdot \nabla(\rho \vec{v}) - \rho \vec{v} \cdot \nabla \vec{v} \\ & - \nabla(P + \frac{B^2}{2}) + (\vec{B} \cdot \nabla) \vec{B} \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \psi}{\partial t} = & -\vec{v} \cdot \nabla \psi + \eta(\vec{j} - \vec{j}_{cd})_y + \\ & w\left(\frac{\vec{j} \times \vec{B}}{\rho} - \frac{\nabla P}{\rho}\right)_y - (\vec{v} \times \vec{B})_y \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial B_y}{\partial t} = & -\vec{v} \cdot \nabla B_y - B_y \nabla \cdot \vec{v} + \vec{B} \cdot \nabla v_y + \eta \nabla^2 B_y - \\ & w\left\{\nabla \times \left[\frac{1}{\rho}(\vec{j} \times \vec{B} - \nabla P)\right]\right\}_y \end{aligned} \quad (6)$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} = -\vec{v} \cdot \nabla P - \gamma P \nabla \cdot \vec{v} + (\gamma - 1)\eta j^2 \quad (7)$$

其中, $\vec{v}$ 是等离子体流速, η 是等离子体电阻, P 是等离子体压强, $\vec{j}$ 是等离子体电流密度, $\vec{j}_{cd}$ 是外部驱动电流密度, 其表达形式是^[10]:

$$\vec{j}_{cd} = J_0 \left[e^{-\frac{(x-x_1)^2 + (z-z_1)^2}{\delta^2}} - e^{-\frac{(x-x_2)^2 + (z-z_2)^2}{\delta^2}} \right] \hat{y} \quad (8)$$

$\vec{B}$ 是磁场, $\vec{E}$ 是电场, 其中, 欧姆定律中含有 Hall 项, w 为 Hall 系数. 方程组各个变量由 B_0 , a , $Ta = a/v_A$, $\psi_0 = aB_0$ 等进行归一化. Ta , v_A 分别 Alfvén 时间和 Alfvén 速度^[12], $v_A = \sqrt{B^2/\mu_0\rho}$.

2 数值模拟结果与分析

1) 外部驱动电流加入在撕裂模磁岛 X 点和 O 点的影响

撕裂模不稳定性先在两个有理面上发展, 由于磁岛间距比较大, 一开始双撕裂模不稳定性的增长是以单个撕裂模不稳定性增长^[13], 随着磁岛逐渐长大, 磁岛间相互驱动, 进入到双撕裂模非线性磁场重联发展阶段. 抑制双撕裂模不稳定性需要在进入非线性重联阶段前加入反向的周期性外部驱动电流, 外部驱动电流的周期为 $80 Ta$ (Alfvén 时间), 其形式如图 1 所示, 外部驱动电流的大小为初始电流的 6.25%. 分别在撕裂模磁岛的 X 点和 O 点加入外部驱动电流, 模拟外部驱动电流对撕裂模磁岛不稳定性增长的影响, 模拟结果如图 2 所示, 其中 none 表示没有外部驱动电流时, 模拟区域等离子体的动能随时间的演化曲线; X^- 和 O^+ 分别表示在撕裂模磁岛的 X 点和 O 点加入外部驱动电流后, 模拟区域等离子体的动能随时间的演化曲线. 从图 2 中可以看出外部驱动电流加入后可以起到抑制撕裂模不稳定性增长的作用.

用,但从曲线的演化情况来看加入在撕裂模磁岛 O 点的外部驱动电流对撕裂模不稳定性只是起到了延缓作用,而加在 X 点的外部驱动电流是起到了抑制撕裂模不稳定性增长的作用,所以,加在 X 点的外部驱动电流抑制效果要好很多.

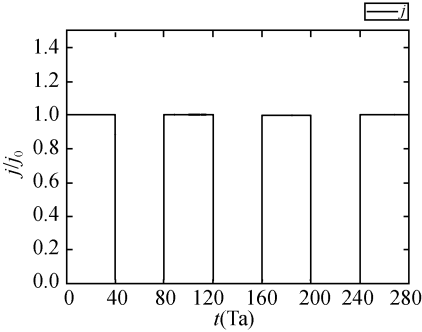


图 1 周期性外部驱动电流的形式

Fig.1 The form of periodic current drive

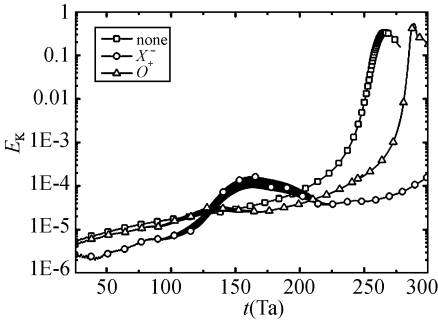


图 2 外部驱动电流加入在磁岛的 X 点和 O 点时
等离子体动能随时间的演化

Fig.2 The time evolution of the plasma kinetic energy with the driving current at the X -point and O -point of the magnetic islands

2) X 点加入周期性外部驱动电流的加入时间对双撕裂模发展的影响

为进一步了解加入在 X 点的外部驱动电流不同参数对抑制等离子体撕裂模不稳定性的影响,在其他参数不变的情况下,从不同时刻开始加

入外部驱动电流,研究外部驱动电流的加入时间先后对撕裂模不稳定性的影响.数值模拟的结果如图 3 所示,其中 $x - (none)$ 表示没有外部驱动电流时,模拟区域等离子体的动能随时间的演化曲线; $x - (30)$, $x - (60)$, $x - (90)$ 和 $x - (120)$ 分别表示在 30,60,90 和 120 个 Ta 时刻开始加入周期性外部驱动电流,从图中可以明显看出当外部驱动电流加入时等离子体的动能有明显的下降,说明外部驱动电流的加入对等离子体动能的增长起到了抑制作用,从曲线的变化趋势来看,周期性外部驱动电流的加入时刻越早,系统动能的增长就越慢,即对撕裂模的抑制效果越好.

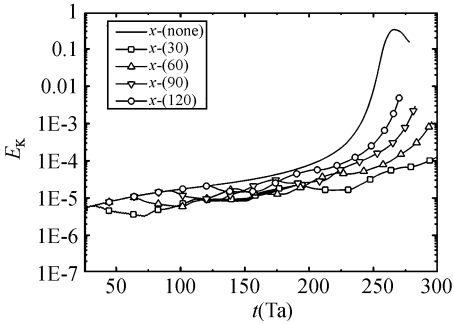
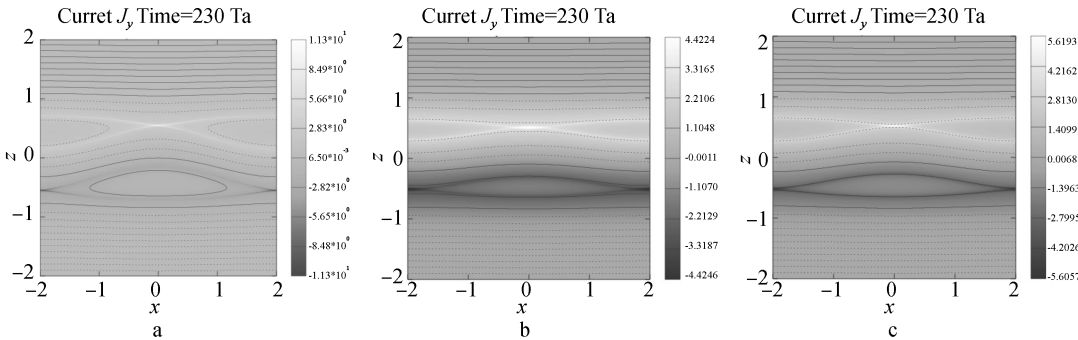


图 3 外部驱动电流加入时刻的
先后对等离子体动能增长的影响

Fig.3 The time evolution of the plasma kinetic energy at different injection time of the driving current

为了进一步了解周期性外部驱动电流加入后对模拟区域等离子体的影响,我们得到了 230 Ta 时刻等离子体的电流剖面图如图 4 所示,其中图 4a 表示没有外部驱动电流时电流剖面,从图 4b 至图 4e 分别表示从 30,60,90 和 120 Ta 时刻开始加入外部驱动电流时模拟区域的电流剖面图.通过剖面图的对比我们能清晰的看出外部驱动电流能抑制磁岛增长,相同时刻,外部驱动电流加入越早,磁岛的尺度越小(其中图 4b 的磁岛尺度最小).



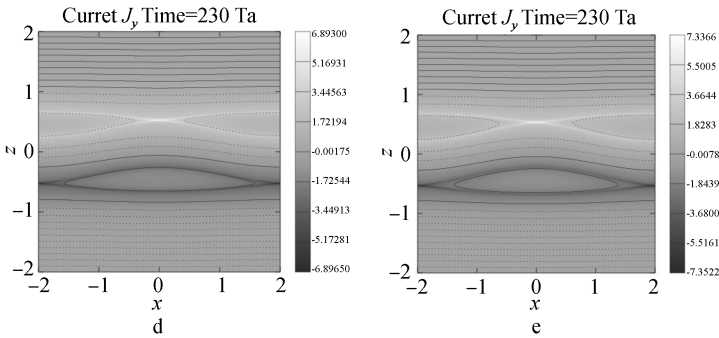


图 4 在 230 Ta 时刻模拟区域电流剖面

Fig. 4 The Current profiles at time =230 Ta in the simulation

3 结 论

本文工作是对含有外部驱动电流效应的 Hall MHD 方程组进行数值模拟,研究外部驱动电流对撕裂模不稳定性发展产生的影响,了解外部驱动电流对撕裂模不稳定性抑制作用的规律,寻求利用外部驱动电流抑制双撕裂模不稳定性发展的方法. 模拟结果表明在 X 点加入与初始电流方向相反的外部驱动电流对撕裂模的发展有抑制作用,而且周期性变化的外部驱动电流对双撕裂模不稳定性的抑制效果较好;对周期性外部驱动电流加入时刻先后进行了数值模拟,模拟结果表明:周期性外部驱动电流越早加入,对撕裂模不稳定性的抑制效果越好.

参考文献:

[1] Wesson J. Tokamaks [M]. Oxford: Oxford University Press,1997.

[2] McGuire K M, Robinson D C. Major disruptions in the TOSCA tokamak[J]. Phys. Rev. Lett. ,1980,44:1666.

[3] Yang X Q, Wang S J, Yang W H. Stabilization of tearing modes by oscillating the resonant surface[J]. Physics of Plasmas,2012,19:072503.

[4] Hoshino K,Mori M,Yamamoto T,et al. Avoidance of $q_a = 3$ disruption by electron cyclotron heating in the JFT-2M tokamak[J]. Phys. Rev. Lett. ,1992,69(15):2208.

[5] Classen I G J, Westerhof E, Domier C W, et al. Effect of heating on the suppression of tearing modes in tokamaks

[J]. Phys. Rev. Lett. ,2007,98(3):035001.

[6] Petty C C, La Haye R J, Luce T C, et al. Complete suppression of the $m = 2/n = 1$ neoclassical tearing mode using electron cyclotron current drive in DIII-D[J]. Nucl. Fusion,2004,44(2):243.

[7] Westerhof E, Lazaros A, Farshi E, et al. Tearing mode stabilization by electron cyclotron resonance heating demonstrated in the TEXTOR tokamak and the implication for ITER[J]. Nucl. Fusion,2007,47(2):85.

[8] Wang X G, Zhang X D, Wu B, et al. Numerical study on the stabilization of neoclassical tearing modes by electron cyclotron current drive [J]. Physics of Plasmas, 2015,22:022512.

[9] Poli E, Angioni C, Casson F J, et al. On recent results in the modelling of neoclassical-tearing-mode stabilization via electron cyclotron current drive and their impact on the design of the upper EC launcher for ITER[J]. Nucl. Fusion,2015,55(1):013023.

[10] Hegna C C, Callen J D. Interaction of bootstrap-current-driven magnetic islands[J]. Physics of Fluids B: Plasma Physics,1992,4(7):1855.

[11] Zhang C L, Ma Z W, Dong J Q. A simulation study of hall effect on double tearing modes[J]. Plasma Science and Technology,10(4):407.

[12] 马腾才,胡希伟,陈银华. 等离子体物理原理[M]. 合肥:中国科学技术大学出版社,1988.

[13] Pritchett P L, Lee Y C, Drake J F. Linear analysis of the double-tearing mode[J]. Phys. Fluids, 1980, 23(7), 1368-1374.