

EAST 等离子体破裂的数值模拟

牛兴平¹, 吴斌²

(1. 安阳工学院理学部, 安阳 455000; 2. 中国科学院等离子体物理研究所, 合肥 230031)

摘要: 利用 TSC 程序非刚性、可变形等离子体模型的特点, 对 EAST 装置等离子体由于发生垂直位移事件而产生破裂的过程进行了模拟, 计算了 halo 电流和真空室应力在破裂过程中的变化情况, 对不同初始条件的破裂情况进行了比较, 并模拟了利用杀手弹丸注入快速熄灭等离子体的过程。

关键词: 非圆截面; 破裂; halo 电流; 杀手弹丸注入

中图分类号: O532⁺.23

文献标识码: A

1 引言

托卡马克放电中经常会发生破裂现象, 即放电突然在很短的时间内终止。发生破裂的原因可能是撕裂模的迅速发展, 所形成的磁岛结构使靠近边界的等离子体与器壁发生热接触, 或由于等离子体平衡失控(位移不稳定性), 等离子体柱整体碰壁, 造成强烈的等离子体与器壁的相互作用, 并引起大量杂质加入等离子体, 使等离子体迅速冷却, 电流通道被堵塞, 最后等离子体中的热能及其周围导体中所储存的磁能都在很短的时间内释放出来^[1]。破裂对装置主要有三个方面的损坏: (1)大量热量瞬间沉淀到偏滤器等真空室内部部件上; (2)产生 halo 电流和涡旋电流以及作用于导体部件上的电磁力; (3)产生的逃逸电子作用于真空室壁上会熔化金属部件。大部分引起破裂的物理原因都已经被确定了, 文献[2~4]对破裂发生的起因和过程进行了详细的描述, 但关于它们的动力学机制人们还没有完全掌握。因此, 目前的实验运行主要靠人们的经验, 破裂的发生经常是不可避免的。本文对 EAST 装置等离子体由于发生垂直位移事件而产生破裂的过程进行了模拟, 计算了 halo 电流和真空室应力在破裂过程中的变化情况, 对不同初始条件的破裂情况进行了比较, 并模拟了向等离子体注入高 Z 物质加快放电终止速度的情况, 为 EAST 装置将来的实验运

行提供参考。

2 对 EAST 等离子体破裂的模拟

EAST 是一个具有大拉长非圆截面的等离子体位形的托卡马克, 放电中等离子体可能会发生垂直位移事件而产生破裂是一个至关重要的问题, 因此有必要了解对垂直不稳定性控制失败后等离子体的运动状况及破裂过程中 halo 电流和真空室应力的变化情况。

理论上的垂直不稳定性分析方法主要有能量原理和直接求解运动方程两类。能量原理方法依照真空区扰动磁能方法不同又分成求解积分方程和直接求解拉普拉斯方程的渐近近似方法两类, 而解运动方程依照求解作用力的方法不同也可分成求解磁场和求解电感回路方程两种处理方法。运用能量原理的优点是比较简单, 能够给出稳定性判据, 但难以考虑被动导体的电阻效应, 不能给出等离子体垂直位移随时间的演变过程, 而 TSC 程序^[5, 6]所使用的直接求解等离子体的运动方程的方法则能弥补这个不足, TSC 程序求解电阻 MHD 方程组可以精确模拟等离子体与被动反馈板和主动反馈线圈等周围导体之间的相互作用。

利用 TSC 程序非刚性、可变形等离子体模型的特点, 模拟了 EAST 等离子体放电由于发生垂直位

收稿日期: 2007-03-05; 修订日期: 2007-09-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10505022, 10405024)

作者简介: 牛兴平(1977-), 男, 安徽合肥人, 安阳工学院理学部讲师, 研究方向: 等离子体物理理论与计算机模拟。

移事件而产生破裂的过程,下面先介绍TSC程序中等离子体halo电流模型,然后给出模拟结果。

2.1 TSC 程序中等离子体 halo 电流模型

假设 Ψ_L 是等离子体最外闭合磁面的极向磁通值, Ψ_0 是磁轴处的磁通值。定义等离子体halo电流区域的磁通值 $\Psi_H = \Psi_L + \alpha_H(\Psi_L - \Psi_0)$, α_H 是一个输入值。因此,用TSC程序计算的没有导体的区域就被分成了三个部分:等离子体区 $\Psi_0 < \Psi < \Psi_L$,halo电流区 $\Psi_L < \Psi < \Psi_H$ 和真空区 $\Psi_H < \Psi$ 。这三个区中求解场和动量的方程组是相同的,但能量方程不同。在等离子体区,温度随时间的变化是用文献[6]中介绍的输运模型来计算的,在halo电流区和真空区,温度被设定为输入值 T_H (halo)和 T_v (真空),通常 $T_v \ll T_H$,所以halo电流区比真空区导电性能更好。

在halo电流区,我们认为等离子体是零压力梯度的,即:

$$j \times B = 0 \quad (1)$$

关于环向场和等离子体速度的两维变量的时间积分中用到的边界条件也需要做相应的修正。

一般在轴对称系统中磁场可以写成:

$$B = \nabla\phi \times \nabla\psi(R,Z) + g(R,Z)\nabla\phi \quad (2)$$

由式(2)可以得到电流密度:

$$\mu_0 J = \Delta\psi \nabla\phi + \nabla g \times \nabla\phi \quad (3)$$

式中,等号右边第一项是环向电流密度;第二项是极向电流密度。可以看出极向电流完全由环向场函数 g 决定。

g 对时间的偏导可由法拉第定律求出:

$$\frac{\partial g}{\partial t} + R^2 \nabla \cdot [-\nabla\phi \times E] = 0 \quad (4)$$

2.2 模拟结果

首先使用 TSC 程序计算一个上下对称的双零等离子体平衡位形。3.7s时 EAST 等离子体平衡位形是一个上下对称的D形截面:大半径 $R_0 = 1.77\text{m}$,小半径 $a = 0.4\text{m}$,拉长比 $\kappa = 1.5$,三角变形 $\delta = 0.38$,等离子体电流 $I_p = 1\text{MA}$,等离子体halo电流区设定为固定宽度 $\alpha_H = 0.4$,有效电荷数 $Z_{\text{eff}} = 2.0$,温度 $T_H = 4\text{eV}$ 。通过主动反馈线圈使磁轴的垂直位置 Z_{mag} 从3.9~4.0s由赤道面移动到赤道面上0.2m处,然后关闭垂直反馈控制系统。由于垂直不稳定性,等离子体在垂直方向上移动并发生破裂。

图1给出了等离子体电流和磁轴垂直位置 Z_{mag} 随时间的变化情况。等离子体电流从4.0s时的1MA

下降到4.2s时的0.19MA。同一段时间内,磁轴的垂直位置 Z_{mag} 从中平面上0.2m移动到中平面上0.38m。

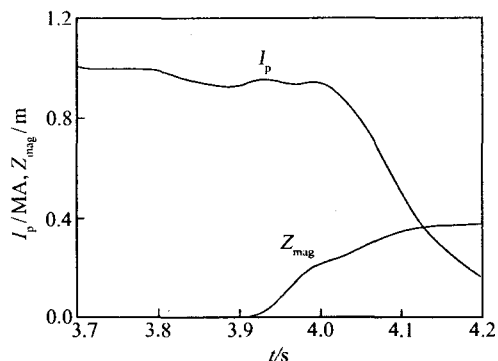


图1 等离子体电流和磁轴垂直位置 Z_{mag} 随时间的变化

图2是大半径 R_0 、小半径 a 、拉长比 κ 、三角变形 δ 随时间的变化。可以看到,随着破裂的发生,大半径 R_0 和小半径 a 几乎没有什么变化,拉长比 κ 和三角变形 δ 都有所下降。

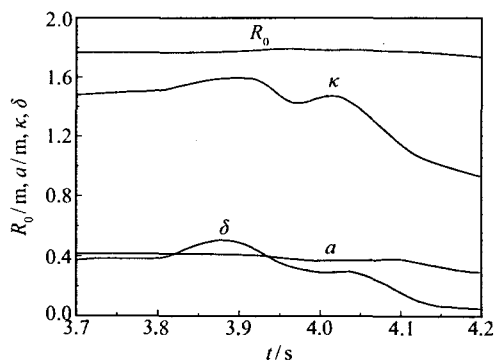


图2 大半径 R_0 、小半径 a 、拉长比 κ 和三角变形 δ 随时间的变化

图3是halo电流随时间的变化,halo电流在4.1s时达到峰值21kA。图4是极向电流产生的作用于真空室上的电磁力,该力的水平分量的峰值大约是350kN,垂直分量的峰值大约是360kN。

2.3 初始垂直位移对破裂的影响

等离子体的初始垂直位移不同,导致的破裂过程中垂直位移速度和电流消亡速度也是不同的。将上述模拟中的初始垂直位移改变为0.1m,即主动反馈线圈使磁轴的垂直位置 Z_{mag} 从3.9s时在赤道面移

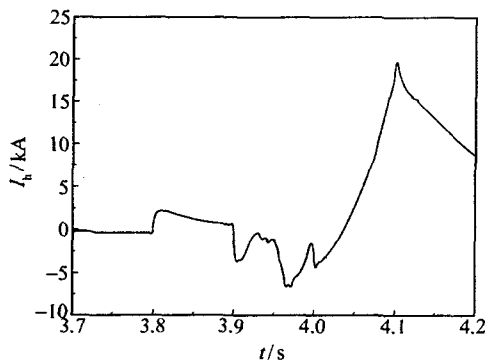


图 3 halo 电流 I_h 随时间的变化

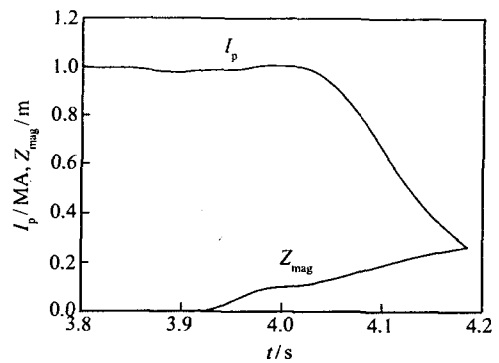


图 5 等离子体电流和磁轴垂直位置 Z_{mag} 随时间的变化

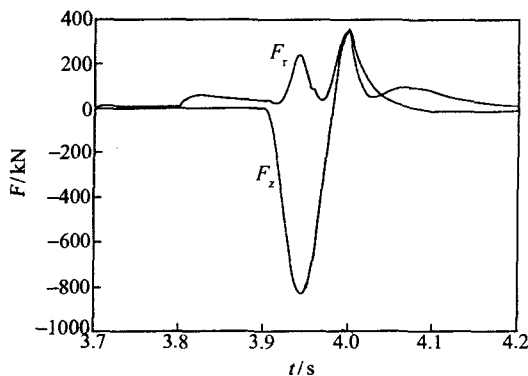


图 4 真空室上受到的力

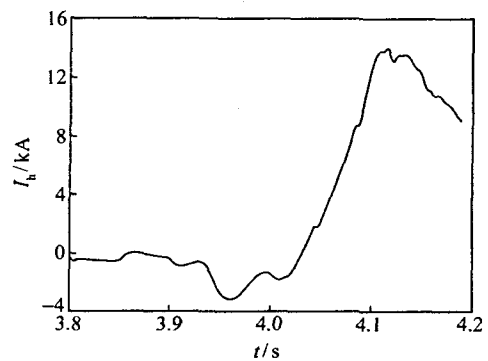


图 6 halo 电流 I_h 随时间的变化

动到 4.0s 时在赤道面上 0.1m 处, 然后关闭垂直反馈控制系统。图 5 ~ 图 7 就是这次模拟中等离子体电流和磁轴垂直位置 Z_{mag} 、halo 电流和真空室上受到的力随时间的变化。

通过比较可以看出, 等离子体电流消亡速度和垂直位移速度在初始垂直位移 10cm 情况下比初始垂直位移 20cm 情况下要略微快一些, 而在初始垂直位移 10cm 情况下 halo 电流和真空室上受到的力的峰值要比初始垂直位移 20cm 情况下小得多。

2.4 halo 区的温度 T_H 和宽度 α_H 对 Z_{mag} 的增长率的影响

模拟中设定的 halo 区的温度 T_H 对磁轴垂直位置 Z_{mag} 的增长率是有影响的, 选用了不同的 halo 区温度 $T_H = 1eV$ 、 $2eV$ 和 $4eV$ 作了对比, 模拟结果如图 8 所示。可见, 增长率是随着 halo 区的温度增加而减小的。

影响磁轴垂直位置 Z_{mag} 的增长率的因素还有模拟中设定的 halo 区的宽度 α_H 。作了三次模拟来

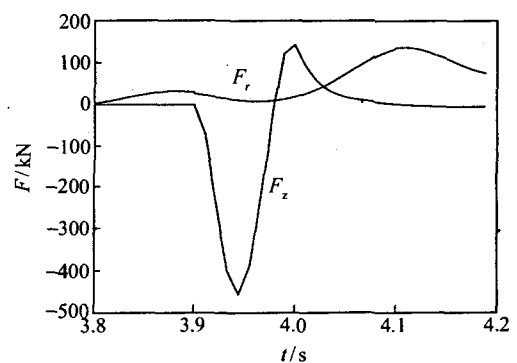
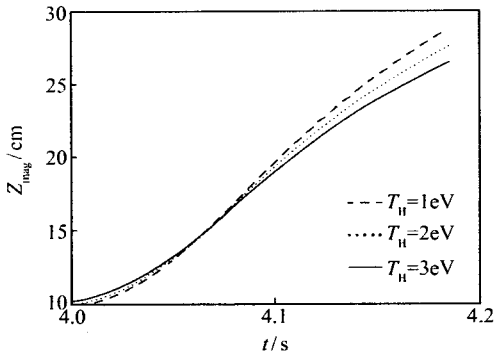
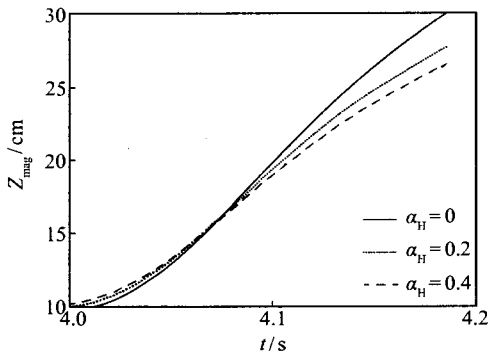


图 7 真空室上受到的力

看宽度 α_H 的影响, 这三次模拟中 T_H 都等于 $4eV$, α_H 分别为 0 (即没有 halo 区)、0.2 和 0.4, 结果如图 9 所示。可见, 增长率是随着 halo 区的宽度增加而减小的。

通过对这两组对比模拟的结果分析发现, 设定的 halo 区的温度 T_H 和宽度 α_H 对等离子体电流消亡速度没有显著影响。

图8 不同 halo 温度下磁轴垂直位置 Z_{mag} 的变化图9 不同 halo 宽度下磁轴垂直位置 Z_{mag} 的变化

3 破裂防护的模拟

对应于破裂对装置的三个方面的损坏,防止破裂也有三个主要目标:(1)降低沉淀到偏滤器等部件上的热量;(2)尽量避免 halo 电流的产生,降低其作用于真空室和真空室内部件上的电磁力;(3)防止逃逸电子的产生^[7]。

对破裂主要是被动防止法,即让等离子体运行在离磁流体不稳定性边界较远的参数区中。这主要是适当减小总放电电流,使边缘安全因子大于2.5或3,这样 $m=2$ 的磁岛就不易发展起来;其次是调整电流剖面,使模数较小的撕裂模不易发生。另外,也研究了用外加螺旋磁场或用可调节沉积剖面的加热方法来控制电流剖面,得到较稳定的运行区。

目前提出的几种主动防止破裂的方法是:

a. 中性点(NP): 等离子体垂直方向上的快扰动会引起外部电流和等离子体之间力的不平衡,这个不平衡会使等离子体产生垂直方向的位移。最理想的状况就是等离子体电流质心在某一点处时这个

不平衡为0,这样经过一段时间等离子体的垂直位移也变成0。当某个时刻 t_0 等离子体的初始垂直位移为 δz_0 ,则等离子体垂直位移 δz 按照指数方式 $\delta z = \delta z_0 e^{\gamma(t-t_0)}$ 变化,其中 γ 是垂直不稳定性的增长率。假设 δz_0 为等离子体质心初始垂直位置的函数,我们认为NP就是 $\delta z_0=0$ 的位置。因此,假如初始等离子体被放置在NP附近,则由于 δz_0 很小,与别的情况相比,一段时间后等离子体的位移也会很小。对于装置完全上下对称且等离子体也是完全上下对称的情况,很显然, $z=0$ 的轴上的点都是NP。对于非对称的位形,NP的位置就不那么明显了。JET上的一些实验和相关模拟证明了当等离子体发生密度极限破裂时NP的存在,JT60-U也有这方面的实验和模拟^[8]。在NP附近运行 halo 电流和真空室上的力都会大幅度降低。

b. 杀手小球:通过向等离子体注入高Z物质可以使等离子体电流在比电流自然消亡更短的时间里降为0,这样就可以在发生破裂时使放电迅速终止。这种方法还可以抑制来自偏滤器的杂质,减少偏滤器上沉积的热量^[9,10]。

c. 比较完善的防止破裂的方法是神经网络控制方法。神经网络ANN(artificial neural network)是以计算机网络系统模拟生物神经网络的智能计算系统,网络上的每个结点相当于一个神经元,可以记忆(存储)、处理一定的信息,并与其它结点并行工作。求解一个问题是向人工神经网络的某些结点输入信息,各结点处理后向其它结点输出,其它结点接受并处理后再输出,直到整个神经网络工作完毕,输出最后结果。如果通过一个样板问题“教会”神经网络处理这个问题,即通过“学习”而使各结点的加权值得到肯定,那么这一类的问题它都可以解。好的学习算法会使它不断积累的知识,根据不同的问题自动调整一组加权值,使它具有良好的自适应性。此外,它本来就是一部分结点参与工作。当某结点出故障时,它就让功能相近的其它结点顶替有故障结点参与本题工作,使系统不致中断。所以,它有很强的容错能力。目前JET和ASDEX-U上的人工神经网络系统在预报破裂方面已可以达到80%~90%的准确率^[11-13]。

下面模拟了向等离子体注入高Z物质加快放电终止速度的情况。等离子体的初始平衡位形与前面的模拟相同,控制主动反馈线圈使磁轴的垂直位置

Z_{mag} 从3.9~4.0s由赤道面移动到赤道面上0.1m, 然后关闭垂直反馈控制系统。从4.01s开始每隔5ms射入一个含氮的氘丸, 氘丸半径6mm, 以 $3700\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的速度从赤道面的外侧垂直入射, 氘丸中氮的含量为0.05%。

图 10 是等离子体电流 I_p 与磁轴垂直位置 Z_{mag} 的关系图。可以看到, 在垂直方向上移动相同距离的情况下, 加入弹丸的等离子体电流消亡速度要明显的快于不加弹丸的自然消亡速度, 从而可以在发生破裂时使放电迅速终止。

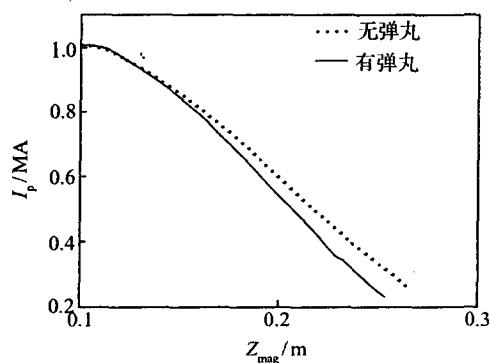


图 10 等离子体电流与磁轴垂直位置的关系

4 总结

模拟了 EAST 等离子体放电由于发生垂直位移事件而产生破裂的过程。在模拟中假设在主等离子体周围有 halo 电流区域, 它有固定宽度 $\alpha_H = 0.4$ 和温度 $T_H = 4\text{eV}$, 通过主动反馈线圈使等离子体发生垂直位移, 然后关闭垂直反馈控制系统, 等离子体由于垂直不稳定性在垂直方向上移动并发生破裂。模拟得到了等离子体电流、磁轴垂直位置和其它等离子体参数随时间的变化。在初始垂直位移为 0.2m 的破裂过程中, halo 电流的峰值为 21kA, 环向电流产生的作用于真空室上的电磁力的水平分量的最大值是 350kN, 垂直分量的最大值是 360kN。

对不同初始垂直位移的情况进行了比较, 发现等离子体电流消亡速度和垂直位移速度在初始垂

直位移小的情况下要更快一些, 而初始垂直位移越小, halo 电流和真空室上受到的力也就越小。

对 halo 区不同的温度 T_H 和宽度 α_H 对破裂过程的影响做了分析, 发现磁轴垂直位置的增长率是随着 halo 区的温度和宽度增加而减小的, 但设定的 halo 区的温度和宽度对等离子体电流消亡速度没有显著影响。

还比较了中性点 NP、杀手小球、人工神经网络等主动防止破裂的方法。模拟了向等离子体注入高 Z 物质加快放电终止速度的情况, 在垂直方向上移动相同距离的情况下, 加入弹丸的等离子体电流消亡速度要明显快于不加弹丸的自然消亡速度, 从而可以在发生破裂时使放电迅速终止。

参考文献:

- [1] 石秉仁. 磁约束聚变原理与实践 [M]. 北京: 原子能出版社, 1999.
- [2] Schüller F C. Disruptions in tokamaks [J]. Plasma Phys. Contr. Fusion, 1995, 37: A135.
- [3] Wesson J A. Disruptions in JET [J]. Nucl. Fusion, 1989, 29: 641.
- [4] Pautasso G. Causes, precursors and mechanisms of disruptions in ASDEX-Upgrade [A]. ICPP & 25th EPS Conf. on Control Fusion and Plasma Physics [C]. Praha: ECA, 1998, Vol. 22C, 520.
- [5] Jardin S C. Dynamic modeling of transport and positional control of tokamaks [J]. J. Comp. Phys., 1986, 66: 481.
- [6] Jardin S C. TSC simulation of ohmic discharges in TFTR [J]. Nucl. Fusion, 1993, 33: 371.
- [7] Riccardo V. Disruptions and disruption mitigation [J]. Plasma Phys. Contr. Fusion, 2003, 45: A269.
- [8] Nakamura Y. Axisymmetric disruption dynamics including current profile changes in the ASDEX-Upgrade tokamak [J]. Plasma Phys. Contr. Fusion, 2002, 44: 1471.
- [9] Whyte D G. Disruption mitigation using high-pressure noble gas injection on DIII-D [A]. IAEA Conf. [C]. Lyon: 2002.
- [10] Bakhtiari M. Study of plasma termination using high-Z noble gas puffing in the JT-60U tokamak [J]. Nucl. Fusion, 2005, 45: 318.
- [11] Pautasso G. On-line prediction and mitigation of disruptions in ASDEX-Upgrade [J]. Nucl. Fusion, 2002, 42: 100.
- [12] Cannas B. Disruption forecasting at JET using neural networks [J]. Nucl. Fusion, 2004, 44: 68.
- [13] Windsor C G. A cross-tokamak neural network disruption predictor for the JET and ASDEX-Upgrade tokamaks [J]. Nucl. Fusion, 2005, 45: 337.

Disruption simulation for the EAST plasma

NIU Xing-ping¹, WU Bin²

(1. Anyang Institute of Technology, Anyang 455000;

2. Institute of Plasma Physics, the Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031)

Abstract: The disruptions due to vertical displacement event for the EAST plasma are simulated in this article by using the TSC program. Meanwhile, the evolutions of the halo current and stress on vacuum vessel are calculated; the disruptions at different initial conditions are compared with each other, and killer pellet injection is simulated for the device fast shutting-down.

Key words: Non-circle cross section; Disruption; Halo current; Killer pellets injection