文章编号: 1673-0062(2010)01-0005-03

电子回旋波驱动电流的饱和问题

彭晓炜,龚学余*,刘文艳

(南华大学 核科学技术学院,湖南 衡阳 421001)

摘 要:通过对聚变堆级条件下的电子回旋波电流驱动进行数值模拟,研究了不同发射波功率下的电流驱动,结果表明:随着波功率的加大,驱动电流会变大,但驱动电流的变化并不与波功率的增加成正比,当波功率较大时驱动电流会接近饱和.
 关键词:托卡马克;电子回旋波;电流驱动
 中图分类号:TL624,0532⁺.11
 文献标识码: A

The Saturation of Driven Current by Electron Cyclotron Wave

PENG X iao-wej GONG Xue-yu[°], LIU W en-yan

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

Abstract With the numerical simulation of electron cyclotron current drive in reactor scale tokamak, the current drive with different incident power are analyzed Numerical results show that the driven current can be enlaged with the increase of incident wave power, but they are not in a direct ratio. The driven current are close to saturation while the wave power turn to relatively high

Keywords tokanak, electron cyclotron wave, current drive

0 引言

电子回旋波电流驱动(ECCD)是一种非常有 吸引力的电流驱动方法,其主要的优点是波功率 能传播到等离子体的中心,有潜力提供在芯部和 近磁轴区域足够的电流驱动能力,可用于等离子 体运行状态的优化和不稳定性控制^[1-3].电子回 旋波系统对于现在的装置和下一步装置都具有许 多吸引人的技术特性,近年来,由于长脉冲、高功 率的回旋管源的显著发展,更加拓宽了这一技术 在托卡马克上的使用^[4-5].在将电子回旋波应用 于非感应电流驱动时,一方面希望能够在特定的 区域内驱动起特定大小和分布的电流,一方面希 望能够有较高的电流驱动效率.在固定的托卡马 克等离子体参数下,可以通过改变波的频率、发射 位置和发射角度来控制驱动电流的大小和分

收稿日期: 2009-12-22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (10775066); 高等学校博士点学科专项科研基金资助项目 (20094324120003)

作者简介:彭晓炜(1978-), 男,河北衡水人,南华大学核科学技术学院讲师,博士,硕士生导师.主要研究方向:托 卡马克中非感应电流驱动.* 通讯作者.

布^[6],也可以通过改变发射波的功率密度来影响 电流驱动的效率^[7].然而,在等离子体参数和上 述发射波参数均固定的情况下,是否可以通过调 整发射波的功率来获得期望大小和分布的驱动电 流,如果需要的驱动电流很大,是否总能够通过加 大发射波的输入功率来实现;即,波功率与驱动电 流之间存在一种怎样的关系,在电子回旋波电流 驱动中是否存在一个驱动电流所能达到的极限, 是一个有待研究的问题.

本文采用相对论 Fokker-Planck方程与波迹 方程联合求解的方法,对聚变堆级条件下的电子 回旋波电流驱动进行数值模拟,研究了波功率与 驱动电流之间的关系.

1 研究方法

要获得波驱动电流的大小,首先要求出电子 在波作用下的速度分布函数,然后根据分布函数 求出波驱动电流.电子速度分布函数所满足的方 程为:

$$\frac{\partial f_e}{\partial t} = \left(\frac{\partial f_e}{\partial t}\right)_w + \left(\frac{\partial f_e}{\partial t}\right)_c \tag{1}$$

其中, f_e是电子分布函数, (ϑ_e /∂t)_w 表示由波 引起的速度空间扩散而引起速度分布函数的变 化, (ϑ_e /∂t)_e 是由库伦碰撞项引起的速度分布函 数的变化. 在外来波驱动下, (ϑ_e /∂t)_w 在速度空 间使平衡分布函数产生畸变, 而 (ϑ_e /∂t)_e 的作用 是使任何偏离热平衡的分布函数, 在平均碰撞的 时间尺度上趋于热平衡时的麦克斯韦分布, 也就 是消除这个平台, 达到稳态平衡时, 方程右面的两 项应该相互抵消, 这时形成一个稳态畸变分布, 它 能在波存在的时间范围内持续的驱动等离子体电 流.

一但获得了电子分布函数 f_e就可以求得波驱 动的电流密度

$$J = -e \, \eta \int f_e \mathrm{d}^3 \eta \tag{2}$$

以及波功率沉积密度

$$P_{d} = \frac{1}{2}m_{e} \int \frac{\partial f_{e}}{\partial t} d^{3}v. \qquad (3)$$

关于 Fokker – Planck 方程, 已有很多研究工 作^[8-10],本文采用将相对论 Fokker– Planck方程 与波迹方程联合求解的方法,来计算功率沉积和 电流驱动,具体模型及计算方法详见文献 [11–

2 计算结果及分析

计算中选取电子回旋波从托卡马克等离子体 弱场侧发射,采用的托卡马克等离子体和电子回旋 波的参数为: $R_0 = 5.6$ m, a = 1.4 m, $B_{\varphi_0} = 8.0$ T, $T_{e0} = 30$ keV, $T_{i0} = 28$ keV, $n_{e0} = 2.0 \times 10^{20}$ m⁻³, $Z_{eff} = 1.5 \omega = 220$ GH z

图 1给出了 N^{II} = 0. 2588(发射角度为 15°) 时,发射波功率分别取 20,40,60,80和 100 MW 时的波功率沉积和驱动电流密度分布.可以看出, 入射波的功率加大后,波功率沉积的峰值位置会 向等离子体边缘方向偏移;波功率沉积总是先达 到一个峰值然后减小,当波功率大时,很快达到峰 值,然后迅速减小,当波功率小时,则是较慢达到 峰值,然后较慢的减小.这与文献 [13]根据波功 率沉积速率与扩散系数的关系得出完全一致.驱 动电流密度分布随波功率的变化与功率沉积的分 布有相近的特征,但变化幅度要小的多.



图 1 不同发射波功率下的波功率沉积分布 (a)和驱动电流密度分布(b)(正方形 20MW, 圆形 40 MW,正三角 60MW,菱形 80MW,倒三角 100 MW) Fig 1 Wave deposition profiles (a) and driven current profiles (b) with different incident power (Square 20 MW, Circle 40 MW, Up Triangle 60 MW, Diam ond 80 MW, Down Triangle 100 MW)

图 2给出了相应的总驱动电流大小随着波功

12] 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. 加助: Mathematical Science Publishing House. All rights reserved. 加助: Mathematical Science Publishing House. All rights reserved. 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. 2012 China Academic Publishing House. 20

但驱动电流的变大并不与波功率的增加成正比, 波功率较小时驱动电流的增加随功率的增加变化 比较明显,当波功率较大时驱动电流的增加随功 率的增加变化比较缓慢,甚至接近饱和.图 3给出 了相应的电流驱动效率随着波功率的变化.可以 看出,随着波功率的加大,电流驱动效率会有明显 的减小.



图 2 不同发射波功率下的总驱动电流大小

Fig 2 Driven current with different in cident power



图 3 不同发射波功率下的电流驱动效率

Fig 3 Current drive efficiency with different in cident power

3 结论

本文采用将相对论 Fokker- Planck方程与波 迹方程联合求解的方法, 对聚变堆级条件下的电 子回旋波电流驱动进行数值模拟, 研究了不同发 射波功率下的电流驱动, 结果表明: 入射波的功率 加大后, 波功率沉积的峰值会向等离子体边缘方 向偏移; 随着波功率的加大, 驱动电流会变大, 但 驱动电流的变大并不与波功率的增加成正比, 波 功率较小时驱动电流的增加随功率的增加随功率 较明显, 当波功率较大时驱动电流的增加随功率 的增加变化比较缓慢,甚至接近饱和,随着波功率 的加大,电流驱动效率会有明显的减小.

参考文献:

- [1] K imeva N A. Recent developments in electron cyclotron current drive[J]. Plasma Phys Control Fusion, 2001, 43 (12A): A 195-A 206
- [2] Prater R. Heating and current drive by electron cyclotron waves
 [J]. Phys of Plasma 2004, 5(11): 2349-2376
- [3] Robinson D C, Cox M, Lloyd R, et al Progress with heating and current drive technologies [J]. Fusion Eng And Des, 1999, 46(2): 355- 370
- [4] Thumm M. MW gyrotron development for fusion plasma applications[J]. Plasma Phys Controlled Fusion 2003, 45(12A): A143-A161.
- [5] Thumm M. Development of output windows for high power long pulse gyrotrons and EC wave applications
 [J]. Int J Infrared M illim Waves 1998, 19(1): 3 14.
- [6] 彭晓炜, 龚学余, 尹陈艳. 托卡马克等离子体中的电子回旋波电流驱动 [J]. 核聚变与等离子体物理, 2005, 25(1): 29-36
- [7] 彭晓炜, 龚学余, 刘文艳, 等. 发射波功率密度对电子
 回旋波电流驱动的影响 [J]. 核聚变与等离子体物
 理, 2010, 30(1): 150-153
- [8] Kamey C F F. Fokker- Planck and Quasilinear Codes [J]. Computer Physics Report 1986, 4 183-244.
- [9] Simonetto A, Shoucri M, Farina D, et al A numerical code for the solution of the relativistic bounce- averaged Fokker- Planck equation [R]. M itano Italy, IFP- CNR InternalReport FP 00/08, 2000.
- [10] 刘文艳,曹锦佳,彭晓炜,等.射频波加入下的 Fokker - P knck方程 [J]. 南华大学学报, 2005, 19(4): 1-6
- [11] 龚学余,彭晓炜,谢安平,等.托卡马克等离子体不同运行模式下的电子回旋波电流驱动[J].物理学报,2006,55(3):1307-1314
- [12] 彭晓炜, 龚学余, 刘文艳. 中心负剪切模式中的电子
 回旋波电流驱动数值模拟 [J]. 湘潭大学自然科学
 学报, 2006, 28(4): 24-30
- [13] ShiBR, Long Y X, Dong JQ, et al Fokker- planck study of tokamak electron cyclotron resonance heating
 [J]. Chinese Phys, 2003 12(11): 1251-1256