

# 托卡马克中电子回旋波与低杂波协同 电流驱动的负效应机制

陈少永<sup>1</sup>, 洪斌斌<sup>1</sup>, 杨文<sup>1,2</sup>, 唐昌建<sup>1</sup>, 张新军<sup>3</sup>

(1. 四川大学物理科学与技术学院, 成都 610065; 2. 中国科学院物理研究所, 北京 100190; 3. 中国科学院等离子体物理研究所, 合肥 230031)

**摘要:** 揭示了电子回旋波与低杂波协同驱动的净增协同电流与波注入功率之间所呈现的非线性关系。结果发现, 当低杂波功率较低时, 净增电流将随回旋波功率增大而减小甚至于变成负值, 本文将此现象定义为双波驱动的负效应, 并首次对其进行了相关的物理研究。研究表明, 回旋波引起低杂波功率沉积剖面峰化和捕获电子效应是导致负效应的两个主要原因。目前的研究有助于深入理解双波驱动物理以及设计相关实验, 并为相关的实验设计提供依据。

**关键词:** 托卡马克; 电子回旋波; 低杂波; 电流驱动

**中图分类号:** O532<sup>+</sup>.23

**文献标识码:** A

## 1 引言

射频波非感应电流驱动<sup>[1]</sup>是未来磁约束聚变装置<sup>[2]</sup>长脉冲运行不可或缺的条件, 如何提高电流驱动效率和控制电流剖面, 进而控制不稳定性是磁约束聚变迫切需要解决的问题。结合电子回旋波电流驱动(ECCD)的高度局域性和低杂波电流驱动(LHCD)的高效率, 研究人员提出了电子回旋波(ECW)和低杂波(LHW)协同电流驱动的概念<sup>[3]</sup>。ECW和LHW协同电流驱动的主要目的是获得更高的电流驱动效率和实现电流剖面优化。此后, 研究人员进行了许多相关实验研究, 在WT-2<sup>[4, 5]</sup>, JFT-2M<sup>[6, 7]</sup>和WT3<sup>[8, 9]</sup>上的早期协同电流驱动实验未能得出令人信服的结果, 2004年Giruzzi等人在Tore-supra<sup>[10]</sup>上的实验完美证实了ECW和LHW协同电流驱动的可行性, 并得到 $I_{EC+LH} > I_{EC} + I_{LH}$ 的结论, 其中 $I_{EC+LH}$ 为ECW与LHW共同驱动电流,  $I_{EC}$ 为ECW驱动电流,  $I_{LH}$ 为LHW驱动电流。

然而, 在TdeV<sup>[11]</sup>和VersatorII<sup>[12]</sup>上的协同电流驱动实验却得出了相反的结论, 即 $I_{EC+LH} < I_{EC} + I_{LH}$ , 本文将此现象命名为“负效应”。上述不同实验得出了不同的实验结论, 目前, 其中的物理机制还缺乏深入的认识, 协同净增电流( $I_{syn} = I_{EC+LH} - I_{EC} - I_{LH}$ )对双波功率等参数的依赖关系以及负效应出现的条件等都需要进一步的研究。

## 2 ECCD和LHCD协同净增电流的非线性及负效应现象

从速度空间方面考虑, ECW和LHW协同电流驱动的物理机制<sup>[13, 14]</sup>包括以下两种: a. ECW产生的高能电子进入LHW的共振区, 从而为LHW提供了更多的共振电子; b. LHW驱动的高能电子尾被ECW进一步加速。合理选择ECW参数能使ECW和LHW速度空间上的作用范围有一个更大的重叠区域, 从而使得上述两种物理机制同时存在, 以获

收稿日期: 2013-01-17; 修订日期: 2013-06-07

基金项目: ITER国内配套研究项目资助的课题(2009GB105003, 2010GB107003, 2013GB107002)

作者简介: 陈少永(1986-), 男, 四川省安岳县人, 四川大学讲师, 主要从事波加热与电流驱动研究。

得更大的净增协同电流。ECW 和 LHW 协同电流驱动物理上并没有新的波与电子作用方式，ECW 和 LHW 仍然分别受到回旋阻尼和朗道阻尼，如果他们在速度空间上没有重叠区域，则 ECW 和 LHW 协同驱动电流不存在，仅为它们的简单线性叠加<sup>[2]</sup>。

从小半径位置上考虑，恰当的选择 ECW 的极向角使得 ECW 沉积在 LHW 的峰值处，就能得到更大的净增协同电流，这已被 Tore Supra 上的实验<sup>[10]</sup>证实。LHW 具有很强的电流驱动效率，然而 LHW 的功率沉积剖面主要由天线参数和等离子体温度、密度剖面决定，这些一般都不易调整。与此相反，ECW 的沉积位置改变可以方便的通过调整 ECW 的极向入射角来实现，但由于 ECCD 的效率偏低，因此其改变电流剖面的能力有限。ECW 和 LHW 协同电流驱动能很好的发挥各自长处、相互弥补缺陷，从而达到改变电流剖面、控制不稳定性。

本文利用波迹追踪代码 Genray 和求解 Fokker-Planck 方程的代码 Cql3d<sup>[15]</sup>实现 ECW 和 LHW 协同电流驱动的三维模拟，以获得真实托卡马克位形中不同小半径位置的电子分布函数。模拟选取 HL-2A 托卡马克的参数：大半径  $R=1.65\text{m}$ ，小半径  $a=0.4\text{m}$ ，电子密度  $n_e=1.1\times 10^{19}\text{cm}^{-3}$ ，磁轴上的磁场  $B_t=1.12\text{T}$ 。ECW 采用弱场侧入射的二次非寻常模，ECW 的频率  $f_{\text{EC}}=68\text{GHz}$ ，其发射点的大半径位置  $R_{\text{EC}}=2.53\text{m}$ 、垂直位置  $z_{\text{EC}}=0\text{m}$ 。LHW 的频率  $f_{\text{LH}}=2.45\text{GHz}$ ，正向和反向 LHW 的平行折射率 ( $N_{\parallel}$ ) 峰值分别为 2.7 和 -3.1，它们的半波宽度分别为 0.9 和 0.5。

模拟过程中 ECW 的环向角为  $10^\circ$  (共振处的  $N_{\parallel}\approx 0.29$ )，以使得 ECW 和 LHW 在速度空间上匹配<sup>[13]</sup>。ECW 的极向角为  $0^\circ$ ，使得 ECW 沉积在 LHW 的峰值处，以获得更大的净增协同电流。通过模拟得出了净增协同电流随 ECW 功率 ( $P_{\text{EC}}$ ) 和 LHW 功率 ( $P_{\text{LH}}$ ) 变化，如图 1 所示。从图 1 中可以发现，在不同的  $P_{\text{LH}}$  条件下净增协同电流随  $P_{\text{EC}}$  呈现不同的非线性关系：图 1a 中先上升后下降；图 1b 中先上升后饱和；图 1c 中上升。图 1a 中负效应的出现更是值得深入研究，在负效应出现的区域均有

$P_{\text{EC}} > P_{\text{LH}}$ ，如图 2 中所示。模拟过程中并未考虑磁面之间的输运和高能电子损失，所以引起负效应的物理机制不可能是高能电子的约束不佳。深入理解负效应有助于解释之前的实验现象，也有利于在将来的实验中避免或利用负效应。

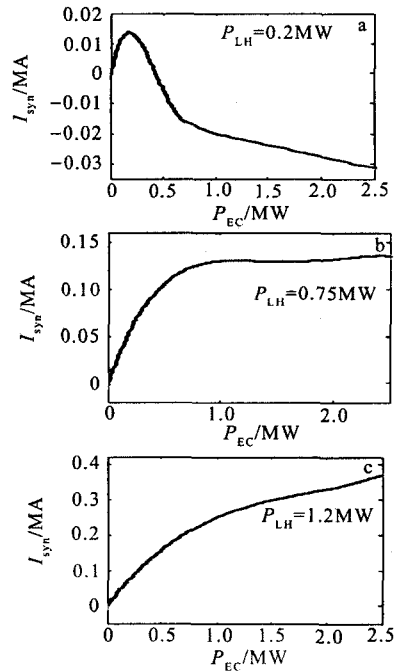


图 1 净增协同电流随 ECW 和 LHW 功率的变化

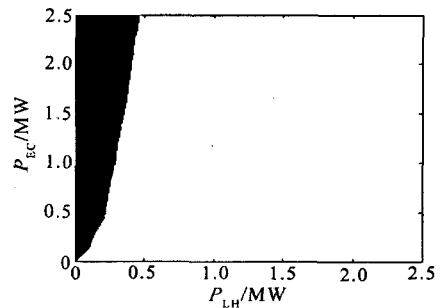


图 2 ECW 和 LHW 协同电流驱动负效应区域(黑色)

### 3 负效应物理机制

图 1a 中展示的是各磁面积分后的总净增协同电流随功率的变化情况，为了更详细地研究负效应，具体分析某个磁面上的电流密度情况将更具说

服力。选取  $P_{LH}=0.2\text{MW}$ ，各磁面上的电流密度如图 3 所示，其中，图 3a 和图 3b 中  $P_{EC}=0.2\text{MW}$ ，图 3c 和图 3d 中  $P_{EC}=1.5\text{MW}$ ，图 3a、图 3b、图 3c 和图 3d 中  $P_{LH}=0.2\text{MW}$ ，净增协同电流密度  $j_{syn}=j_{EC+LH}-j_{EC}-j_{LH}$ 。ECW 的功率主要沉积在  $r/a=0.25\sim 0.35$ ，随着 ECW 功率增加，LHW 的功率更多的沉积在这个区域，这也导致了在  $r/a=0.35\sim 0.6$  的净增协同电流一直为负值。因此，负效应可能的物理机制有两种：LHW 功率沉积剖面峰化和捕获电子效应。

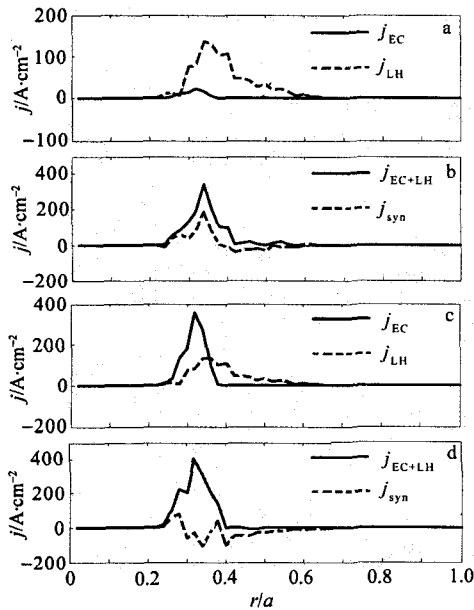


图 3 不同小半径处的电流密度

由以上分析可知，LHW 功率剖面的变化总体趋势是从边缘向温度、密度更高的中心移动，由此引起的 LHCD 效率的改变将影响净增协同电流的大小，甚至导致负效应。在此过程中变化的因素主要包括三方面：温度升高、密度升高、LHW 功率沉积剖面峰化。

对于某个磁面而言，温度的升高会提升 LHCD 效率已得到实验证实<sup>[16]</sup>，其物理原因是：温度提升增加了 LHW 共振电子数目，同时延长了 LHW 驱动的高能电子尾的慢化时间，但在本文的模拟中提

升幅度并不大。同样提升等离子体密度也可以提高 LHCD 的效率<sup>[16]</sup>，密度的增加使得与 LHW 发生朗道阻尼的电子变多，但也使得 LHW 驱动的高能电子尾的慢化时间变短，所以密度的提升也只能小幅度的提升 LHCD 效率<sup>[16]</sup>。

ECW 使得 LHW 功率沉积剖面峰化，进而影响 LHCD 效率，这个概念由本文首先提出，下面将对此做详细论述。当不存在 ECW 或者 ECW 功率比较低时，LHW 功率沉积在一个较宽的范围 ( $r/a=0.2\sim 0.7$ )，这样每个磁面上的 LHW 功率值都比较低；当 ECW 功率变大时，LHW 将主要沉积在 ECW 沉积的区域，其原因是 ECW 提升了当地的电子温度和 ECW 与 LHW 的协同效应。此时，由于 ECW 的沉积区域较窄，使得沉积在某些磁面上 LHW 功率密度变大，本文将此现象命名为“LHW 的功率沉积剖面峰化”。借助于一个 2D 相对论 Fokker-Planck 程序，图 4 展示了  $r/a=0.32$  磁面处 LHCD 效率 ( $\rho=j/P_{LHabs}$ ) 随着 LHW 吸收功率密度的变化情况，可见在这个磁面上的 LHCD 效率降低幅度较大，究其物理机制是朗道阻尼非线性特性决定。为方便叙述，定义了磁面上的 LHCD 驱动效率  $\rho$ ，并未采用传统的全局 LHCD 效率定义<sup>[16]</sup>。

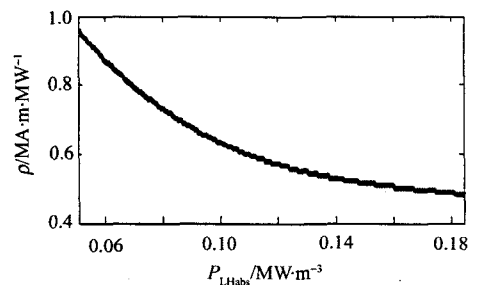


图 4  $r/a=0.32$  处 LHCD 效率 ( $\rho=j/P_{LHabs}$ ) 与 LHW 吸收功率密度 ( $P_{LHabs}$ ) 的关系

综上所述，温度和密度的上升提高 LHCD 效率，而 ECW 引起 LHW 功率沉积剖面峰化会降低 LHCD 效率。其中，前两方面因素由于效果很小几乎可以忽略，起主要作用的是后者，这也使得 ECW 引起的 LHW 功率沉积剖面峰化成为导致负效应的

重要原因。

对于图3中展示的在  $r/a = 0.25 \sim 0.35$  区域内出现的负效应另一个可能的物理原因就是捕获电子效应，众所周知捕获电子对电流驱动没有贡献，如果波驱动出来的高能电子被捕获，这样波的驱动效率必然会降低，而本文的负效应正是出现区域都有  $P_{EC} > P_{LH}$ 。ECW 通过回旋阻尼和电子发生能量交换主要增加电子的横向能量，因此随着 ECW 功率增加，LHW 驱动出的高能电子有可能因从 ECW 获得横向能量而被捕获，从而降低 LHCD 效率。

图5展示了特定能量 ( $E = 55\text{keV}$ ) 的电子分布函数，可以发现回旋波作用的区域靠近捕获区，这样 ECW 产生的高能电子容易被捕获，进而影响 LHCD 和 ECCD 协同电流驱动效率甚至导致负效应。图6展示了  $r/a = 0.32$  处，电流密度随 ECW 功率的变化。图7中反应的是捕获电子能量和通行电子能量的比值与 ECW 功率的关系。捕获电子能量和通行电子能量为：

$$E_{tr} = \langle (\gamma - 1) m_e c^2 (F_{EC+LH} - F_M) \rangle_{tr} \quad (1)$$

$$E_{passing} = \langle (\gamma - 1) m_e c^2 (F_{EC+LH} - F_M) \rangle_{passing} \quad (2)$$

式中， $\langle \dots \rangle_{tr}$  和  $\langle \dots \rangle_{passing}$  分别代表对捕获区和对通行区积分。

结合图6和图7可以发现净增协同电流减小的同时，捕获区的能量增加了，二者存在密不可分的联系。其物理机制是波的能量更多地沉积在了捕获区，导致驱动能力下降，甚至出现负效应。

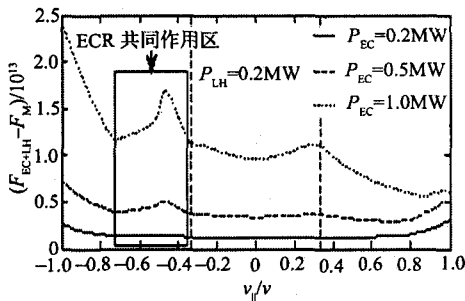


图5 LHW 和不同功率 ECW 共同驱动条件下的电子分布函数

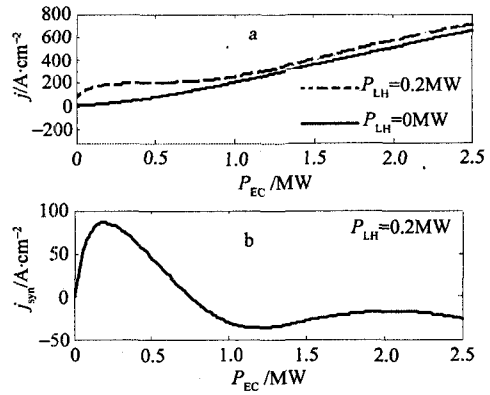


图6  $r/a = 0.32$  处，电流密度与回旋波功率的关系

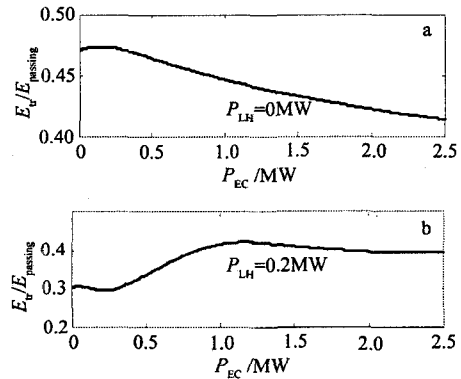


图7  $r/a = 0.32$  处， $E_{tr}/E_{passing}$  随 LHW 功率的变化

### 4 结论

LHW 和 ECW 协同电流驱动负效应的物理机制主要包括两方面：a. ECW 使得 LHW 功率沉积剖面峰化，从而引起 LHCD 效率下降；b. 捕获电子效应。以上两种机制都随着回旋波功率增加而增强，这也是负效应出现在  $P_{EC} > P_{LH}$  的原因。研究还表明，由于波驱动造成的扩散效应、因碰撞造成的高能电子慢化和由 ECW 与 LHW 功率比决定的捕获效应相互竞争，使得净增协同电流和波功率之间呈现非线性关系。

感谢核工业西南物理研究院龙永兴研究员的指导；感谢 Ron Prater 博士和 Bob Harvey 博士在 Genray 和 Cql3d 代码上的帮助。

## 参考文献:

- [1] Fisch N J. Theory of current drive in plasmas [J]. *Rev. Mod. Phys.*, 1987, 59: 175.
- [2] Polevoi A, Zvonkov A, Oikawa T, et al. Assessment of current drive efficiency and the synergetic effect for ECCD and LHCD and the possibility of long pulse operation in ITER [J]. *Nucl. Fusion*, 2008, 48: 015002.
- [3] Fidone I, Giruzzi G, Granata G, et al. Current drive by the combined effects of electron-cyclotron and Landau wave damping in tokamak plasmas [J]. *Phys. Fluids*, 1984, 27: 2468.
- [4] Ando A, Ogura K, Tanaka H, et al. Plasma current generation and sustainment by electron cyclotron waves in the WT-2 tokamak [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1986, 56: 2180.
- [5] Ando A, Ogura K, Tanaka H, et al. Enhancement of efficiency for lower hybrid current drive by electron cyclotron heating in the WT-2 tokamak [J]. *Nucl. Fusion*, 1986, 26: 107.
- [6] Yamamoto T, Hoshino K, Kawashima H, et al. Selective electron-cyclotron heating at down-shifted frequency in the lower-hybrid-current-driven plasma on the JFT-2M tokamak [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, 58: 2220.
- [7] Kawashima H, Yamamoto T, Hoshino K, et al. Second harmonic electron cyclotron heating of lower hybrid current driven plasma in JFT-2M [J]. *Nucl. Fusion*, 1991, 31: 495.
- [8] Maekawa T, Maehara T, Minami T, et al. Up-shifted frequency electron-cyclotron current drive in a lower hybrid current drive plasma [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1993, 70: 2561.
- [9] Maehara T, Yoshimura S, Minami T, et al. Electron cyclotron current drive in a lower hybrid current drive plasma [J]. *Nucl. Fusion*, 1998, 38: 39.
- [10] Giruzzi G, Artaud J F, Dumont R J, et al. Synergy of electron-cyclotron and lower-hybrid current drive in steady-state plasmas [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2004, 93: 255002.
- [11] Côté C, Côté A, Demers Y, et al. Lower hybrid wave coupling and current drive experiment on TdeV [A]. 1998 ICCP and 25th EPS Conference on Controlled Fusion and Plasma Physics [C]. Praha, Czech Republic, 1998. 1336.
- [12] Colborn J A, Squire J P, Porkolab M, et al. Current drive and magnetic turbulence experiments with electron cyclotron and lower hybrid waves on the Versator-II tokamak [J]. *Nucl. Fusion*, 1998, 38: 783.
- [13] Chen S Y, Hong B B, Liu Y, et al. Numerical analysis on the synergy between electron cyclotron current drive and lower hybrid current drive in tokamak plasma [J]. *Plasma Phys. Contr. Fusion*, 2012, 54: 11502.
- [14] 洪斌斌, 陈少永, 唐昌建, 等. 托卡马克中电子回旋波与低杂波协同驱动的物理研究 [J]. *物理学报*, 2012, 61: 115207.
- [15] Harvey R W, McCoy M G. The cql3d Fokker-Planck code [A]. Proceedings of IAEA Technical Committee Meeting on Advances in Simulation and Modeling of Thermonuclear Plasmas [C]. Montreal, 1992. 489.
- [16] 李文科, 丁伯江, 李妙辉, 等. EAST 装置低杂波电流驱动效率分析 [J]. *核聚变与等离子体物理*, 2010, 30: 157.

## Mechanisms of the negative synergy effect between electron cyclotron current drive and lower hybrid current drive in tokamak

CHEN Shao-yong<sup>1</sup>, HONG Bin-bin<sup>1</sup>, YANG Wen<sup>1,2</sup>, TANG Chang-Jian<sup>1</sup>, ZHANG Xin-Jun<sup>3</sup>

(1. College of Physical Science and Technology, Sichuan University, Chengdu 610065;

2. Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190;

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

**Abstract:** The synergy current drive by combining electron cyclotron wave (ECW) with lower hybrid wave (LHW) can be used to either increase the noninductive current drive efficiency or shape the plasma current profile. In this paper, the synergy current drive by ECW and LHW is studied with numerical simulation. The nonlinear relationship between the wave powers and the synergy current of ECW and LHW is revealed. When the LHW power is small, the synergy current reduces as the ECW power increases, and the synergy current is even reduced to lower than zero, which is referred as negative synergy in the this context. Research shows that the mechanism of the negative synergy is the peaking effect of LHW power profile and the trapped electrons effect. The present research is helpful for understanding the physics of synergy between electron cyclotron current drive and lower hybrid current drive, it can also instruct the design of experiments.

**Key words:** Tokamak; Electron cyclotron wave; Lower hybrid wave; Current drive