

# 托卡马克中 ICRH 天线的优化设计

杜 丹<sup>1</sup>, 龚学余<sup>2</sup>, 刘文艳<sup>1</sup>, 李伟军<sup>1</sup>, 尹 岚<sup>1</sup>, 陈 铀<sup>1</sup>

(1. 南华大学数理学院, 衡阳 421001; 2. 南华大学核科学技术学院, 衡阳 421001)

**摘 要:**采用等离子体平板模型和三维天线模型数值模拟了托卡马克中 ICRH 天线与等离子体的耦合过程, 模拟结果表明在其它实验条件相同的条件下, 与反对称电流和馈线端长度短的天线相比, 对称电流分布和馈线端长度长的发射天线可获得更有效的功率耦合。

**关键词:**平板模型; 三维天线模型; 离子回旋共振加热; 功率谱; 天线馈线端长度

**中图分类号:** O532

**文献标志码:** A

## 1 引言

离子回旋共振加热(ICRH)是托卡马克辅助加热的主要手段之一, 目前世界各核聚变实验室, 对于离子回旋共振加热的实验和理论研究都取得了较大的进展。实验方面, JET、TORE SUPRA、ALCATOR C-MOD<sup>[1-3]</sup>等许多装置采用辐射功率从几兆瓦到几十兆瓦的射频波用于离子回旋共振加热, 取得了良好的运行效果。理论研究方面, 因为未来的聚变装置国际热核实验堆(ITER)要求辅助加热的功率达到 73MW 以上, 而离子回旋共振加热是 ITER 上运行的辅助加热方式之一, 所以理论研究提高离子回旋共振加热效果的优化方案受到科学家的关注。例如文献[4]采用波与粒子相互作用的线性理论, 分析了在 HT-6M 装置上基频离子回旋共振加热少数离子浓度和平行波数的优化选择; 后来又有人讨论了 ITER 装置上天线的阻抗匹配对耦合效率的影响<sup>[5]</sup>; 最近, Messiaen<sup>[6]</sup>数值模拟了 ITER 装置 ICRH 天线的相位和等离子体密度优化参数的选取。尽管如此, 托卡马克中 ICRH 天线馈线端长度和天线电流分布对离子回旋共振加热效果的影响却很少有人系统讨论过。

本文采用等离子体的平板模型和三维天线模型<sup>[7]</sup>, 数值模拟了托卡马克中 ICRH 天线馈线端长度和天线电流分布与天线辐射功率谱的关系。根据天线物理设计的指导原则是在保证其系统不发生电压击穿的前提下, 选择适当的天线结构以获得最大的等离子体耦合效率, 得到了托卡马克中 ICRH 天线馈线端长度和天线电流分布的优化选择。

## 2 模型

在托卡马克中, 当发射天线与等离子体耦合的距离与等离子体的半径和天线的极向长度相比很小时, 天线与等离子体的耦合问题可以采用等离子体平板模型进行描述。如图 1 所示,  $x$  轴表示托卡马克装置的径向,  $y$  轴和  $z$  轴分别表示托卡马克装置的极向和环向。等离子体分布在  $-w < x < -a$  的区域, 等离子体密度假设在极向和环向均匀分布, 在径向上分布不均匀, 密度在径向上为抛物线分布  $n(x) = n_0 - (n_0 - n)[1 + (x + a)/r_0]^2$ , 其中  $n_0$  和  $n$  分别为等离子体中心处和边缘处的密度。纵向磁场  $B(x) = B_0[1 + (r_0 + x)/R_0]$ ,  $B_0$  为托卡马克中心磁场强度,  $r_0$ 、 $R_0$  分别为托卡马克的小半径与大半径。 $d$ 、 $s$ 、 $a$  分

收稿日期: 2010-07-16; 修订日期: 2010-11-02

基金项目: 973 子项目(2009GB105002); 国家自然科学基金资助项目(10775066); 湖南省教育厅科学研究项目(10C1175)

作者简介: 杜丹(1979-), 女, 湖北洪湖人, 硕士, 讲师, 主要从事核聚变与等离子体物理研究。

别为金属外壁、法拉第屏、等离子体边界到天线中心导体的距离。

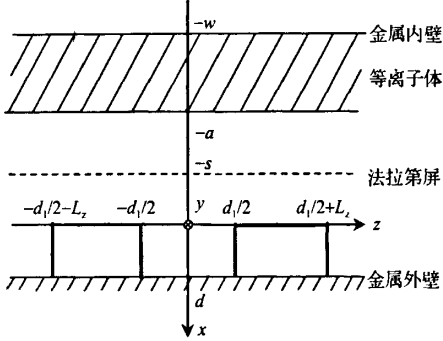


图 1 天线与等离子体耦合模型示意图

托卡马克中离子回旋共振加热天线由关于极向和环向对称放置的四电流带构成, 天线中心导体位于  $x=0$  处, 天线的馈线端与金属外壁接触。采用三维天线模型进行描述, 即认为天线在极向上的长度为有限长并且考虑馈线端电流的影响。电流带在极向上的长度为  $L_y$ , 在环向上的宽度为  $L_z$ , 环向上电流带的间距为  $d_1$ , 电流强度为 1kA, 讨论离子回旋共振加热天线的电流成对称激发和反对称激发两种情况, 如图 2 所示。

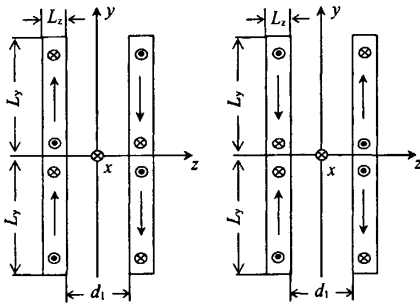


图 2 对称电流激发和反对称电流激发

在托卡马克的真空区域, 即金属外壁到等离子体边界之间, 此区域有激励电流分布, 对于时谐电磁波, Maxwell 方程组可简化为:

$$\nabla \times E = i\omega B \quad (1)$$

$$\nabla \times B = j - i\omega\epsilon_0 E \quad (2)$$

对式(1)、(2)进行 Laplace-Fourier 变换, 根据托卡马克的特点, Fourier 变换时  $z$ 、 $y$  方向周期分别取  $2\pi R_0$ 、 $2\pi r_0$ ,  $x$  方向保持离散, 整理变形得到真空中的纵场  $B_z$ 、 $E_z$  满足微分方程组<sup>[6]</sup>:

$$\frac{d^2 B_z}{dx^2} - p^2 B_z = -\mu_0 \left( \frac{dj_y}{dx} - ik_y j_x \right) \quad (3)$$

$$\frac{d^2 E_z}{dx^2} - p^2 E_z = \frac{1}{\omega\epsilon_0} \left[ k_z \left( \frac{dj_x}{dx} + ik_y j_y \right) - iH^2 j_z \right] \quad (4)$$

式中,  $\epsilon_0$  为真空电容率;  $\mu_0$  为真空磁导率;  $k_0 = \omega/c$  为真空中的波数;  $k_y$  和  $k_z$  分别是波在极向和环向上传播的波数。  $H^2 = k_0^2 - k_z^2$ ,  $p^2 = k_y^2 + k_z^2 - k_0^2$ 。

方程组(3)、(4)满足边界条件:

a. 托卡马克外壁为金属壁, 但对铜等金属导体来说, 可看作理想导体处理, 即有电导率  $\sigma = \infty$ , 射频波电场和磁场在金属外壁处( $x=d$ )满足:

$$E_y = E_z = 0, \quad \frac{dB_z}{dx} = 0 \quad (5)$$

b. 法拉第屏为带有梳齿缝隙的铜制金属屏, 缝隙平行于模型  $z$  方向, 也作理想金属处理有  $\sigma_{yy} = 0$ ,  $\sigma_{zz} = \infty$ , 在  $x \leq -s$  区域电磁场的  $E_z$  分量全部被屏蔽掉, 即有:

$$E_z = 0 \quad (6)$$

c. 在真空与等离子体边界处( $x=-a$ ), 定义  $\xi$  为面阻抗, 有:

$$\xi = E_y / \omega B_z = E_y^p / \omega B_z^p \quad (7)$$

式中,  $E_y^p$ 、 $B_z^p$  为等离子体内的电磁场。式(3)、(4)加上边界条件(5)~(7)是一组完备的方程组, 用 Green 函数方法<sup>[7]</sup>可求出真空中的纵场。因为面阻抗由真空与等离子体边界的电磁场确定, 所以需要求解等离子体中的快磁声波方程:

$$\frac{d}{dx} \begin{bmatrix} i\omega B_z^p \\ E_y^p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\mu k_y & -k_\perp^2 \\ 1 - \frac{k_y^2}{u} & \mu k_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i\omega B_z^p \\ E_y^p \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中,  $u = k_0^2 \epsilon_1 - k_z^2$ ;  $\mu = \epsilon_2 k_0^2 / u$ ;  $k_\perp^2 = u(1 - \mu^2)$ ;  $\epsilon_1$ 、 $\epsilon_2$  为冷等离子体介电张量分量<sup>[8]</sup>。应用 WKB

近似方法数值求解方程(8)得到面阻抗的大小,再采用 Green 函数法求方程组(3)、(4)得到真空中的电磁场,则天线辐射到真空中的功率可以表示为:

$$P = -\frac{1}{2} \iiint_V \mathbf{E} \cdot \mathbf{j}^* dv \quad (9)$$

$$= -\frac{\omega \mu_0}{8\pi^2} \iint_{-\infty}^{\infty} \left( g |\chi_1|^2 + i \frac{d}{p^2} |j_x|^2 + i h |\zeta_c|^2 \right) dk_y dk_z$$

其中,

$$\chi_1 = j_y(k_y, k_z) - \frac{ik_y}{p^2} j_x(k_y, k_z) \quad (10)$$

$$\zeta_c = ik_y j_y(k_y, k_z) + j_x(k_y, k_z)$$

$$g = -i \frac{p}{H^2} \frac{p \sinh(pa) + i \xi H^2 \cosh(pa)}{p \sinh[p(a+d)] + i \xi H^2 \cosh[p(a+d)]} \sinh(pd) \quad (11)$$

$$h = \frac{k_z^2}{k_0^2 H^2} \frac{\sinh(ps) \sinh(pd)}{p \sinh[p(s+d)]} \quad (12)$$

### 3 数值计算及分析

为了求出式(9)的数值解,编制了计算程序 CICRFA。下面以 JET 装置<sup>[7]</sup>为例,讨论数值求解的结果。图3~图6表示对称电流和反对称电流激发的天线辐射功率谱随天线馈线端长度变化的情况。计算参数为:  $L_y = 0.60\text{m}$ ,  $L_z = 0.10\text{m}$ ,  $R_0 = 2.96\text{m}$ ,  $r_0 = 1.30\text{m}$ ,  $B_0 = 3.45\text{T}$ ,  $d_1 = 0.06\text{m}$ ,  $s = 0.025\text{m}$ ,  $a = 0.025\text{m}$ 。

从图3~图6中可以看出,天线辐射到真空中的功率随天线馈线端长度的增加而增加,馈线端长度的增加不改变谱的分布宽度。在其它实验参数相同的条件下,天线对称电流分布激发的辐射功率如图5、图6所示,要比天线反对称电流分布激发的高如图3、图4所示,对称电流激发的能量主要集中在  $k_y = 0$  附近如图6所示,射频波能量沿极向弱扩散,而反对称电流激发的极向谱比对称电流激发的要分布宽一些,在  $|k_y| = 3$  附近产生了两个功率极大值,射频波能量沿极向扩散多如图4所示。

对于离子回旋共振加热,射频功率的不同谱分量的加热效果有很大区别。好的离子回旋共振加热效果要求<sup>[9]</sup>:对于天线辐射极向谱,射频波的能量

尽可能地集中在  $k_y = 0$  附近,即要求波沿极向是弱扩散的;对于天线辐射环向谱,当它分布比较宽时,  $|k_z|$  较大的谱分量所占的比例就比较大,这样射频波的能量就能够顺利进入到等离子体中心区域,并

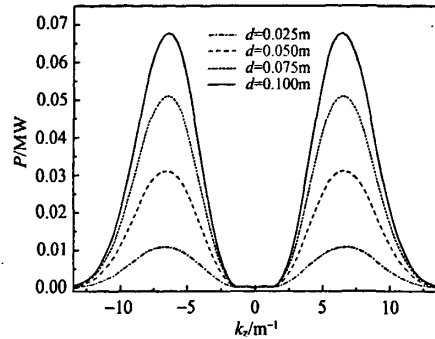


图3 反对称电流激发的环向功率谱分布图

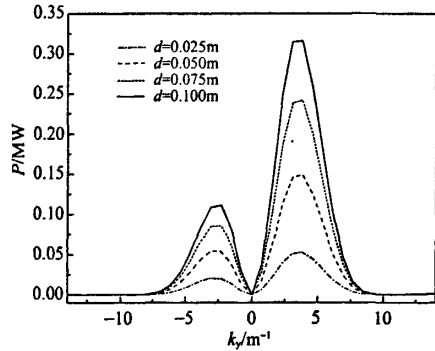


图4 反对称电流激发的极向功率谱分布图

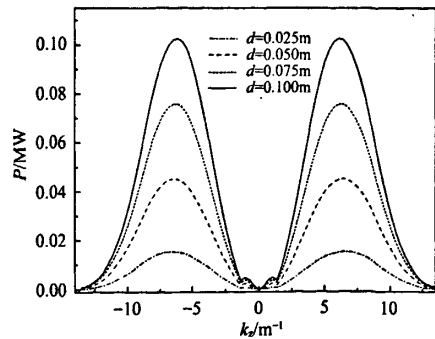


图5 对称电流激发的环向谱功率分布图

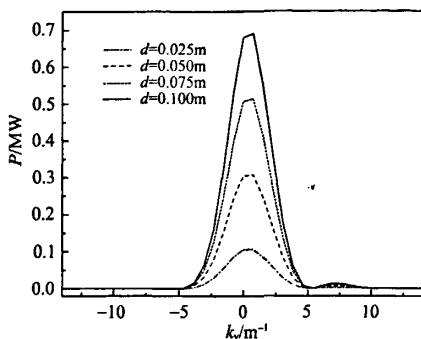


图6 对称电流激发的极向功率谱分布图

能够被等离子体充分吸收。通过对天线辐射功率谱的比较分析,得出在保证其它实验条件相同的条件下,对称电流分布和馈线端长度长的天线系统发射的射频波与等离子体耦合效率高,离子回旋共振加热效果好的结论。

#### 4 结论

本文采用等离子体的平板模型和三维天线模型,数值模拟了托卡马克中 ICRH 天线与等离子体的相互作用。通过对天线辐射功率谱的对比分析,得出在托卡马克中相对于反对称电流分布和馈线端长度短的离子回旋共振加热天线,对称电流分布和馈线端长度长的天线更满足天线设计的优化准则,可以从一定程度上提高离子回旋共振加热效果的结论。

#### 参考文献:

- [1] Mossessian D A, Groebner R J, Moyer R A, et al. Edge dimensionless identity experiment on DIII-D and Alcator C-Mod [J]. *Physics of Plasmas*, 2003, 10: 689–698.
- [2] Brémont S, Agarici G, Beaumont B, et al. High power density and long pulse operation with Tore Supra ICRF facility [J]. *Fusion Engineering and Design*, 2003, 66–68: 453–460.
- [3] Monakhov I, Walden A, Blackman T, et al. Tests of load-tolerant external conjugate-T matching system for A2 ICRF antenna at JET [J]. *Fusion Engineering and Design*, 2005, 74: 467–471.
- [4] 沈学民, 沈林放. HT-6M装置上离子回旋波的传播和吸收 [J]. *核聚变与等离子体物理*, 1995, 15(1): 27–36.
- [5] Lamalle P U, Messiaen A, Dumortier P, et al. Study of mutual coupling effects in the antenna array of the ICRH plug-in for ITER [J]. *Fusion Engineering and Design*, 2005, 74: 359–369.
- [6] Messiaen A, Koch R, Weynants R R, et al. Performance of the ITER ICRH system as expected from TOPICA and ANTITER II modelling [J]. *Nucl. Fusion*, 2010, 50: 025026.
- [7] Koch R, Bhatnagar V P, Messiaen A M, et al. A global solution of the ICRH problem based on the combined use of a planar coupling model and hot-plasma ray-tracing in tokamak geometry [J]. *Computer Physics Communication*, 1986, 40: 1–22.
- [8] Pécoul S, Heurax S, Koch R, et al. Numerical modeling of the coupling of an ICRH antenna with a plasma with self-consistent antenna currents [J]. *Computer Physics Communication*, 2002, 146: 166–187.
- [9] 朱学光, 匡光力, 赵燕平, 等. 快波加热的天线设计 [J]. *计算物理*, 2000, 17(6): 712–718.

## Optimization of the ICRH antenna design for tokamak

DU Dan<sup>1</sup>, GONG Xue-yu<sup>2</sup>, LIU Wen-yan<sup>1</sup>, LI Wei-jun<sup>1</sup>, YIN Lan<sup>1</sup>, CHEN You<sup>1</sup>

(1. Department of Mathematics and Physics, University of South China, Hunan Hengyang 421001;

2. Department of Nuclear Science and Technology, University of South China, Hunan Hengyang 421001)

**Abstract:** The coupling of the ICRF antenna to the plasma in tokamak is studied by using a plasma slab model and a three-dimensional antenna model. The simulation results show that under the same conditions, the antenna of symmetric current distribution and a long feeder may have more effective power coupling than the antenna of antisymmetric current distribution and a short feeder.

**Key words:** Slab model; Three-dimensional antenna model; Ion cyclotron resonance heating (ICRH); Power spectrum; Length of the antenna feeder

## 如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深, 让许多工程师望而却步, 然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上, 我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识, 借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))专注于微波射频和天线设计人才的培养, 推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程, 化繁为简, 直观易学, 可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛, 让天线设计不再难...



### HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书, 课程从基础讲起, 内容由浅入深, 理论介绍和实际操作讲解相结合, 全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程, 可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计, 让天线设计不再难...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

### CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程, 由经验丰富的专家授课, 旨在帮助您从零开始, 全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程, 边操作边讲解, 直观易学; 购买套装同时赠送 3 个月在线答疑, 帮您解答学习中遇到的问题, 让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>



### 13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程, 培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合, 全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作, 同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习, 可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试...

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



## 关于易迪拓培训:

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立,一直致力和专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养;后于 2006 年整合合并微波 EDA 网([www.mweda.com](http://www.mweda.com)),现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地,成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 ADS、HFSS 等专业软件使用培训课程,广受客户好评;并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书,帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司,以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

## 我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年, 10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养,更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果,又能免除您舟车劳顿的辛苦,学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲,结合实际工程案例,直观、实用、易学

## 联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>