

ICRH 天线发射谱 $n_{||}$ 对快波少数离子 加热效果的影响

任玉虎¹, 龚学余^{1,2}, 杜丹³, 李圣¹, 陈双粮¹, 任静¹

(1. 南华大学电气工程学院, 衡阳 421001; 2. 南华大学核科学技术学院, 衡阳 421001; 3. 南华大学数理学院, 衡阳 421001)

摘要: 采用等离子体分层模型, 利用 WKB 近似研究了离子回旋共振加热(ICRH)天线发射谱 $n_{||}$ 对离子回旋波在托卡马克等离子体的表面功率反射系数、吸收衰减的影响, 数值模拟了不同天线发射谱 $n_{||}$ 条件下快波少数离子加热的效果。模拟结果表明, 当其它实验参数一定时, ICRH 天线发射合适的 $n_{||}$ 能提高天线与等离子体的耦合效率, 增强少数离子加热的效果。

关键词: 等离子体分层模型; 离子回旋共振加热; 吸收衰减系数; 等离子体表面功率反射系数

中图分类号: O532

文献标识码: A

1 引言

离子回旋共振加热是托卡马克中一种重要的辅助加热方式。目前, 世界上现有的托卡马克装置如 JET、Alcator C-Mod、EAST 已采用了离子回旋共振加热(ICRH)用于辅助加热, 并取得了良好的加热效果^[1-3]。另外, 离子回旋波能控制等离子体环向转动、中心等离子体密度和杂质积累^[4], 从而改善托卡马克等离子体的约束和稳定性。因此, 离子回旋波在等离子体中的传播和吸收等方面的研究受到了科学家的关注。理论上, 研究快波在等离子体中的传播、吸收以及电流驱动的方法有 WKB 近似方法和全波法^[5]。例如, 文献[6]用波与粒子相互作用的线性理论分析了 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; Van Eester^[7]采用三维 Fokker-Plank 模型研究了在离子轨道漂移影响下, 离子回旋波的加热效果。

本文采用等离子体分层模型^[8], 利用 WKB 近

似推导出离子回旋波在 EAST 等离子体的功率表面反射系数、吸收衰减与 ICRH 天线发射谱 $n_{||}$ 的关系。数值模拟了离子回旋波在含有少数离子(H)的氦核(D)等离子体的表面功率反射系数、吸收衰减, 得到了能提高 ICRH 天线与等离子体的耦合效率的 ICRH 天线发射谱 $n_{||}$ 的取值范围, 为 EAST 离子回旋加热实验提供一定的理论指导。

2 模型与方法

在托卡马克中, 采用等离子体平板模型^[9]描述离子回旋共振加热天线与等离子体的耦合过程。如图 1 所示, x 轴为托卡马克的径向, y 轴(垂直纸面向里)和 z 轴为托卡马克的极向和环向。等离子体的区域为 $-a < x < c$, 靠近天线的低场侧截止层的厚度为 d_0 , 高场侧截止层的厚度为 d_2 , 共振层的厚度为 d_1 。在径向上等离子体密度的分布为:

$$n(x) = (n_1 - n_2) \left[1 - (x/x_0)^2 \right]^{0.2} + n_2$$
 其中 n_1 和 n_2 分别为

收稿日期: 2012-08-17; 修订日期: 2013-02-22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11075073, 11205086); 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20114324110001); 湖南省研究生创新项目(CX2012B379)

作者简介: 任玉虎(1986-), 男, 河南新乡人, 硕士研究生, 研究方向为电磁场与微波技术的应用。

等离子体中心处和边缘的密度,在极向和环向上等离子体密度为均匀分布。等离子体中离子温度分布为 $T_i(x) = (T_{i1} - T_{i2})[1 - (x/r_0)^2] + T_{i2}$ 。其中, T_{i1} 为等离子体中心的离子温度, T_{i2} 为等离子体边缘离子温度。等离子体的纵向磁场为线性分布 $B(x) = B_0(1 + x/R_0)$ 。其中, B_0 为中心磁场强度, r_0 为托卡马克小半径, R_0 为托卡马克大半径。

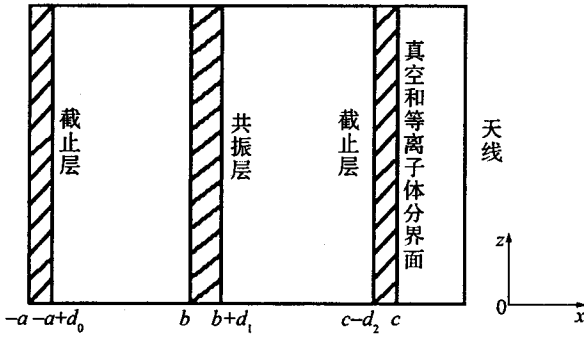


图1 天线与等离子体耦合模型示意图

WKB^[10]近似是一种几何光学近似方法,假设在一波长范围内介质的参数变化很小,波的场强可以看做由缓变的振幅和快变的相位两部分组成。设 D 是波的色散关系,在射线轨迹上的任一点, D 可以表示为:

$$D(k, \omega, r, t) = D_r(k, \omega, r, t) + iD_i(k, \omega, r, t) \quad (1)$$

式中, k 为波数; ω 为频率; r 为射线轨迹上任意一点的空间位置; t 为时间。第一项 D_r 描述波的传播特性,决定着波到达预期位置的可达性。第二项 D_i 代表波与粒子共振引起的波的衰减。设 τ 为代表射线轨迹的参量,则

$$\frac{dD}{d\tau} = \frac{\partial D}{\partial k} \frac{dk}{d\tau} + \frac{\partial D}{\partial \omega} \frac{d\omega}{d\tau} + \frac{\partial D}{\partial r} \frac{dr}{d\tau} + \frac{\partial D}{\partial t} \frac{dt}{d\tau} = 0 \quad (2)$$

设

$$dr/d\tau = \partial D / \partial k \quad (3)$$

$$dk/d\tau = -\partial D / \partial r \quad (4)$$

$$dt/d\tau = -\partial D / \partial \omega \quad (5)$$

$$d\omega/d\tau = \partial D / \partial t \quad (6)$$

则

$$dr/dt = \partial \omega / \partial k = V_g \quad (7)$$

由式(7)可知,射线轨迹的运动方向与波群速度方向一致,其方向代表了能流的方向。式(3)、(4)给定了一组正则运动方程,给定初始条件,即可求解波在等离子体中的运动轨迹。在离子回旋频率范围内,波随时间的阻尼率远小于实频率,即满足 $\omega_i \ll \omega_r$, 对波的色散关系做泰勒展开为:

$$D_r(k_{\perp r}, k_{\parallel}, \omega_r, r, t) + i \left[\frac{\partial D_r(k_{\perp r}, k_{\parallel}, \omega_r, r, t)}{\partial \omega_r} \omega_i + D_i(k_{\perp r}, k_{\parallel}, \omega_r, r, t) \right] \approx 0 \quad (8)$$

同样,波随空间的阻尼率 $k_{\perp i} \ll k_{\perp r}$ 对波的色散关系做泰勒展开为:

$$D_r(k_{\perp r}, k_{\parallel}, \omega_r, r, t) + i \left[\frac{\partial D_r(k_{\perp r}, k_{\parallel}, \omega_r, r, t)}{\partial k_{\perp r}} k_{\perp i} + D_i(k_{\perp r}, k_{\parallel}, \omega_r, r, t) \right] \approx 0 \quad (9)$$

由式(8)和(9)得到波的空间阻尼率为:

$$k_{\perp i} = \frac{\partial D_r / \partial \omega_r}{\partial D_r / \partial k_{\perp r}} \omega_i = -\frac{\omega_i}{V_{g\perp}} \quad (10)$$

采用等离子体分层模型描述离子回旋波在托卡马克等离子体中的反射和吸收衰减过程,即将等离子体在 x 方向分为 n 层,每一层中等离子体的密度是均匀的,层与层之间的密度不同,如图2所示。在每一层内,离子回旋波满足缓变振幅近似,通过WKB近似求解波在等离子体中的吸收衰减。在真空和等离子体分界面的电场反射系数为 Γ_1 ,第 i 层与第 $i+1$ 层等离子体分界面上电场的反射系数为 Γ_{i+1} ,每个子层的厚度为 d_i 。考虑 EAST 装置中,特定的 ICRH 天线发射结构导致在靠近天线的等离子体产生一定厚度的截止层,在高场侧同样有一定厚度的截止层,假定最后一层截止层的电场反射系数 $\Gamma_{n+1} = 1$,同时,忽略波在等离子体界面上的二次反射。

采用冷等离子体模型,等离子体的介电张量^[11]表示为:

$$\varepsilon = \begin{vmatrix} \varepsilon_{\perp} & -i\varepsilon_A & 0 \\ i\varepsilon_A & \varepsilon_{\perp} & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{\parallel} \end{vmatrix} \quad (11)$$

其中,平行方向是磁场 B 的方向。介电张量的各分

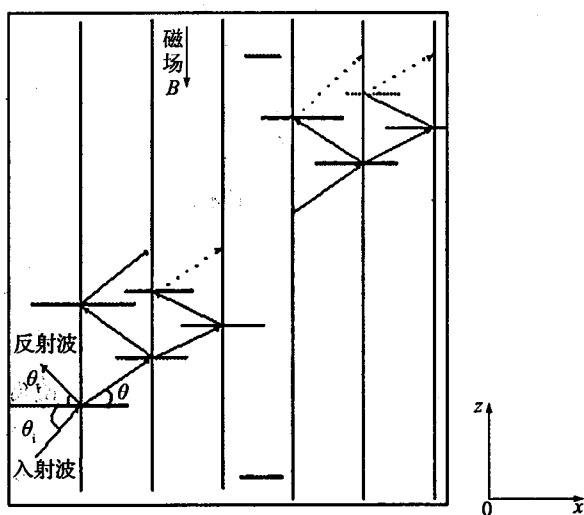


图2 等离子体分层模型示意图

量为:

$$\varepsilon_A = 1 - \sum_j \frac{\omega_{pj}^2}{\omega^2 - \Omega_j^2} \quad (12)$$

$$\varepsilon_A = \sum_j \frac{\Omega_j}{\omega} \frac{\omega_{pj}^2}{\omega^2 - \Omega_j^2} \quad (13)$$

$$\varepsilon_{\parallel} = 1 - \sum_j \frac{\omega_{pj}^2}{\omega^2} \quad (14)$$

其中, ω_{pj} 为等离子体频率; Ω_j 为粒子(电子或离子)回旋频率。

在离子回旋频段, 利用电子的小质量展开^[12]化简介电张量各元素。对于包含主离子氘(D)和少数离子氢(H)两种离子种类的等离子体, 在 $\omega \sim \Omega_D$ 的频率区域内, 介电张量的元素分别为:

$$\varepsilon_{\perp} = -\frac{\omega_{pD}^2}{\omega^2 - \Omega_D^2} - \frac{\omega_{pH}^2}{\omega^2 - \Omega_H^2} \quad (15)$$

$$\varepsilon_A = \frac{\omega}{\Omega_D} \frac{\omega_{pD}^2}{\omega^2 - \Omega_D^2} + \frac{\omega}{\Omega_H} \frac{\omega_{pH}^2}{\omega^2 - \Omega_H^2} \quad (16)$$

由麦克斯韦方程和欧姆定律得冷等离子体的色散关系为:

$$\begin{pmatrix} n_{\parallel}^2 - \varepsilon_{\perp} & i\varepsilon_A & -n_{\parallel}n_{\parallel} \\ -i\varepsilon_A & n_{\perp}^2 + n_{\parallel}^2 - \varepsilon_{\perp} & 0 \\ -n_{\parallel}n_{\parallel} & 0 & n_{\perp}^2 - \varepsilon_{\perp} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \end{pmatrix} = 0 \quad (17)$$

对于非寻常波(X 模) $E_x \neq 0, E_y \neq 0, E_z = 0$, 色散关系为:

$$n_{\perp}^2 = \frac{(n_{\parallel}^2 - \varepsilon_{\perp} + \varepsilon_A)(n_{\parallel}^2 - \varepsilon_{\perp} - \varepsilon_A)}{\varepsilon_{\perp} - n_{\parallel}^2} \quad (18)$$

通常情况下, 可以将非寻常波的电场表示成两个圆偏振分量之和:

$$E = E_+(e_x + je_y)e^{j\theta} + E_-(e_x - je_y)e^{j\theta} \quad (19)$$

其中,

$$E_x = E_+ + E_-, E_y = -j(E_+ - E_-) \quad (20)$$

由等离子体的色散关系式(18)和式(19)可得离子回旋波的偏振关系为:

$$\frac{E_+}{E_-} = \frac{\varepsilon_A + \varepsilon_{\perp} - n_{\parallel}^2}{\varepsilon_A - \varepsilon_{\perp} + n_{\parallel}^2} \quad (21)$$

在平衡麦克斯韦分布条件下, X 模回旋阻尼的空间阻尼率表达式^[12]为:

$$k_{Li} = \frac{\omega_{pi}}{c} \frac{\pi^{1/2}}{n_{\perp}} \left| \frac{E_+}{E_y} \right|^2 \frac{\omega_{pi}}{k_{\parallel} v_{Ti}} \frac{d}{db} [be^{-b} I_{l-1}(b)] \times \exp \left[- \left(\frac{\omega - l\Omega_i}{k_{\parallel} v_{Ti}} \right)^2 \right] \quad (22)$$

式中, n_{\perp} 为折射率在 x 方向的分量; $b = (1/2)(k_{\perp} v_{Ti} / \Omega_i)^2$; $I_{l-1}(b)$ 为 $(l-1)$ 阶修正贝塞尔函数; E_+ 为左旋波的振幅; v_{Ti} 为等离子体中离子运动的热速度; k_{\parallel} 为波矢 k 在 z 方向的分量。

离子回旋波在等离子体中两次穿过共振层的衰减为:

$$Att = 10 \lg \left| \frac{P_i}{P_r} \right| = 10 \lg [\text{abs}(1/s)] \quad (23)$$

式中, P_i 为进入等离子体的总功率; P_r 为两次穿过等离子体共振层后到达真空和等离子体分界面的功率, 则:

$$s = \sum_{i=1}^n \frac{|\Gamma_{i-1}|^2}{(1 - |\Gamma_i|^2)} \prod_{j=1}^i \left(1 - |\Gamma_j|^2 \right) \exp \left(\frac{-4k_{Li} d_i}{\sqrt{1 - \frac{\sin^2 \theta_0}{\tilde{\varepsilon}_{ri}}}} \right) \quad (24)$$

式中, 真空与等离子体界面的电场反射系数为:

$$\Gamma_1 = \frac{\tilde{\varepsilon}_{r1} \cos \theta_0 - \sqrt{\tilde{\varepsilon}_{r1} - \sin^2 \theta_0}}{\tilde{\varepsilon}_{r1} \cos \theta_0 + \sqrt{\tilde{\varepsilon}_{r1} - \sin^2 \theta_0}} \quad (25)$$

第 i 层等离子体与第 $i+1$ 层等离子体分界面的

电场反射系数为:

$$\Gamma_{i+1} = \frac{\frac{\tilde{\epsilon}_{r(i+1)}}{\tilde{\epsilon}_n} \cos \theta_i - \sqrt{\frac{\tilde{\epsilon}_{r(i+1)}}{\tilde{\epsilon}_n} - \sin^2 \theta_i}}{\frac{\tilde{\epsilon}_{r(i+1)}}{\tilde{\epsilon}_n} \cos \theta_i + \sqrt{\frac{\tilde{\epsilon}_{r(i+1)}}{\tilde{\epsilon}_n} - \sin^2 \theta_i}} \quad (26)$$

其中,

$$\tilde{\epsilon}_n = n_{\perp}^2(i) + n_{\parallel}^2(i), \theta_i = \arctan \frac{n_{\parallel}(i)}{n_{\perp}(i)} \quad (27)$$

3 数值计算结果与分析

为了求解等式(23)、(25), 利用迭代法编写相应的计算程序。下面以 EAST 装置为例, 讨论数值求解结果。图 3、图 4 分别表示离子回旋波在含有少数离子(H)的氦核(D)等离子体的表面功率反射系数以及衰减与天线的发射谱 n_{\parallel} 的关系。计算参数为 $R_0 = 1.75\text{m}$, $r_0 = 0.5\text{m}$, $n_{\parallel} = 0 \sim 20$, $n_i = 5 \times 10^{19}\text{m}^{-3}$, $n_2 = 0.5 \times 10^{19}\text{m}^{-3}$, $B_0 = 3.50\text{T}$, $n_{\text{H}}/n_{\text{D}} = 0.05$, $T_{\text{H}} = 1.5\text{keV}$, $T_{\text{D}} = 0.2\text{keV}$, 天线的发射频率 $f = 53\text{MHz}$, 等离子体分层数 $n = 100$ 。

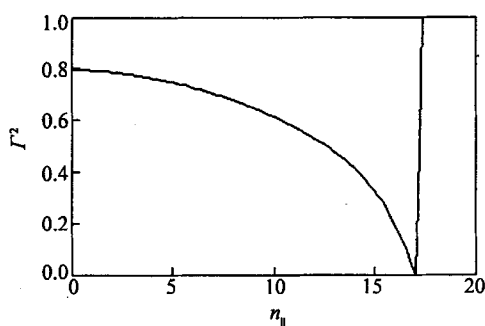


图3 离子回旋波在含有少数离子(H)的氦核(D)等离子体的表面功率反射系数与天线发射谱的关系曲线
 Γ^2 ——表面功率反射系数; n_{\parallel} ——天线发射谱。

从图3可以看出, 少数离子加热时等离子体的表面功率反射系数与 n_{\parallel} 的变化有着密切的关系, $0 < n_{\parallel} < 2$ 的谱分量在等离子体中的折射率与真空的折射率相差较大, 离子回旋波在等离子体表面的功率反射系数较大; $2 < n_{\parallel} < 17$ 的谱分量在等离子体中的折射率逐渐接近于真空折射率, 等离子体表面反射功率下降; $n_{\parallel} \approx 17$, 等离子体的折射率等于真

空中的折射率时, 离子回旋波不会在等离子体表面反射, 即表面功率反射系数为零。

从图4可以看出, 对于少数离子加热的等离子体来说, $0.5 < n_{\parallel} < 1.5$ 的谱分量在等离子体中的衰减较小, 它将在托卡马克装置中来回反射, 一定程度上加热边缘等离子体; 特别是 $n_{\parallel} < 0.5$ 的谱分量, 它在等离子体中几乎不衰减, 而且会在等离子体表面形成所谓的共轴模式^[13], 导致等离子体边界温度显著提高, 加剧边界高能离子对天线的轰击, 使得杂质浓度提高, 加热效果下降; $2 < n_{\parallel} < 11$ 的谱分量会引起离子回旋共振层展宽(如图5所示), 离子回旋波在等离子体中的衰减增大; $11 < n_{\parallel} < 18$ 的谱分量在引起离子回旋共振层展宽的同时, 在这个范围内截止层增加(如图6所示), 反射系数随 n_{\parallel} 减少, 离子回旋波在等离子体中衰减增大, 总的耦合效率增加, 加热效果好; 对于 n_{\parallel} 很大的谱分量, 离子和波不能满足离子回旋共振条件 $\omega - l\Omega_j - k_{\parallel}v_{\parallel} = 0$, 波在等离子体中的衰减也很小, 加热效果会下降; 而只有合适的 n_{\parallel} 的谱分量才能够进入等离子体中心区域, 并充分被等离子体吸收。总之, 从数值模拟结果可知当 ICRH 天线发射谱 n_{\parallel} 的选择范围为 13~16 时快波少数离子加热的效果好。此外, 秦成明^[14]利用 ICANT code 数值模拟了在典型的 EAST 等离子体物理参数和获得较好的 ICRH 天线辐射功率和阻抗条件, 天线的发射谱 n_{\parallel} 的取值约为 14。本文的结论基本上与其结论一致。

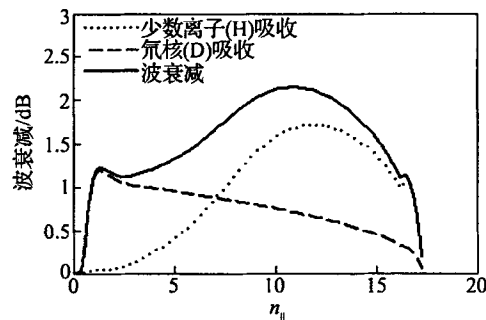


图4 离子回旋波在含有少数离子(H)的氦核(D)等离子体的吸收衰减与天线发射谱 n_{\parallel} 的关系曲线

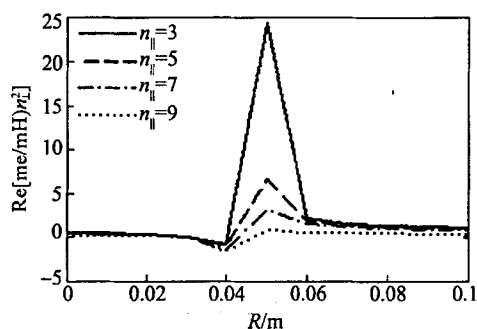


图5 $f=53\text{MHz}$ 时 $n_{||}$ 满足 $2 < n_{||} < 11$ 时 n_{\perp}^2 的实部
 R ——等离子体大半径方向。

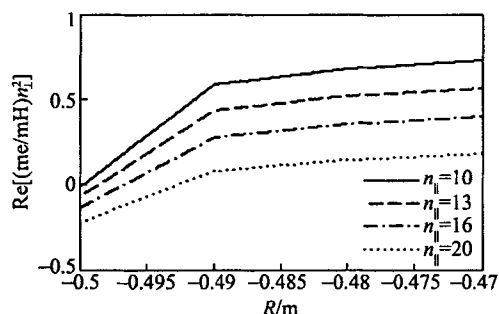


图6 $f=53\text{MHz}$ 时 $n_{||}$ 满足 $9 < n_{||} < 21$ 时 n_{\perp}^2 的实部
 R ——等离子体大半径方向。

4 结论

本文采用等离子体分层模型数值模拟了离子回旋波在托卡马克等离子体中的吸收衰减、功率表面反射系数与天线发射谱 $n_{||}$ 的关系, 通过对不同发射谱 $n_{||}$ 的功率表面反射系数和吸收衰减分析, 得出在典型的 EAST 等离子体物理参数下, $n_{||}$ 选择 13~16 时, 等离子体表面截止层厚度较小、接近于等离子体中心的共振层的宽度较大, 等离子体表面的功率反射系数较小且离子回旋波在等离子体中的吸收衰减较大, 能够较好的实现 ICRH 天线与等离子体的耦合, 提高天线的加热效果。

感谢南华大学王新林教授给予本文有益的指导。

参考文献:

- [1] Testa W G, Core G F, Gondhalekar, et al. Ion cyclotron resonance frequency heating of deuterium plasmas in the Joint European Torus: modeling of the resonant minority ion distribution function [J]. Physics of Plasma, 1999, 6: 3489-3497.
- [2] Rost J C, Porkolab M, Boivin R L, et al. Edge ion heating and parametric decay during injection of ion cyclotron resonance frequency power on the Alcator C-Mod tokamak [J]. Physics of Plasma, 2002, 9: 1262-1270.
- [3] Zhang Xinjun, Zhao yanping. Current status of ICRF heating experiments on EAST [J]. Plasma Science and Technology, 2011, 13: 172-174.
- [4] Chang C S, Philips R, White R, et al. Generation of plasma rotation by ion cyclotron resonance heating in tokamaks [J]. Physics of Plasma, 1999, 6: 1969-1977.
- [5] 刘燕, 龚学余, 杨磊, 等. 托卡马克中快波电流驱动下全波方程的数值求解 [J]. 计算物理, 2012, 5(29): 375.
- [6] 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.
- [7] Eester Van D. Towards more realistic ion cyclotron resonance heating Fokker-Plank modeling [J]. AIP Conference Proceedings, 2006, 871: 418-423.
- [8] Mounir Laroussi, J Reece Roth. Numerical calculation of the reflection, absorption, and transmission of microwaves by a nonuniform plasma slab [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 1993, 21(4): 366-371.
- [9] Koch R, Bhatnagar V P. 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.
- [10] Bhatnagar V P, Koch R, Geilfus P, et al. Ray-tracing modeling of ICRF heating of large tokamak [J]. Nucl. Fusion, 1984, 24(8): 955-976.
- [11] Stix T. Waves in plasmas [M]. New York: American Institute of Physics Press, 1992. 262-263.
- [12] Jeffrey Freidberg. Plasma physics and fusion energy [M]. New York: Cambridge University Press, 2007. 586.
- [13] 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.
- [14] 秦成明. EAST 离子回旋共振加热天线设计与研究 [D]. 合肥: 中科院等离子体物理研究所, 2005. 7.

Influence of the emission spectrum n_{\parallel} of ICRH antenna on the fast wave minority ion heating efficiency

REN Yu-hu¹, GONG Xue-yu^{1,2}, DU Dan³, LI Sheng¹, CHEN Shuang-liang¹, REN Jing¹

(1. Department of Electric Engineering, University of South China, Hengyang 421001;

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

3. Department of Mathematics and Physics, University of South China, Hengyang 421001)

Abstract: The relation of the power reflection coefficient in tokamak plasma surface and absorption attenuation of the ion cyclotron wave to the emission spectrum n_{\parallel} of ICRH antenna is studied by using a stratified plasma slab and the WKB approximation. The effect of fast wave minority ion heating in different emission spectrum conditions of ICRH antenna is numerical calculated. The simulation results show that under the same conditions, the coupling efficiency of the antenna with the plasma and the effect of fast wave minority ions heating can be improved and enhanced by suitable spectrum n_{\parallel} of ICRH antenna.

Key words: Stratified plasma slab; Ion cyclotron resonance heating (ICRH); Absorption attenuation coefficient; Power reflection coefficient in plasma surface

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)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)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)，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>