

物理学

数值模拟天线与等离子体的耦合过程

杜 丹 龚学余<sup>1</sup> 王振华<sup>1</sup> 尹 岚<sup>1</sup> 杨文超<sup>1</sup>  
(南华大学数理学院,核科学技术学院<sup>1</sup>,衡阳 421001)

**摘 要** 采用等离子体平板模型和三维天线模型研究 JET 装置中离子回旋频段的天线与等离子体的耦合过程,在离子回旋波被等离子体全部吸收的假设条件下,通过数值求解等离子体中的快磁声波方程,得到天线耦合到等离子体的总功率随天线到外金属壁的距离的增加而增加。  
**关键词** 平板模型 三维天线模型 离子回旋共振加热 耦合功率  
**中图分类号** 0532; **文献标志码** A

核聚变研究是当代自然科学中一项具有重大意义的前沿研究领域。它的目标是为人类提供取之不尽的新能源。聚变能具有资源无穷尽性、环境可接受性和经济竞争性,是目前认识到的可以解决人类能源和环境问题的最重要的途径之一。在受控核聚变的研究中,利用辅助功率对等离子体进行加热是实现聚变装置高参数稳态运行的核心问题。

日前得到广泛应用的辅助加热方法主要有中性束注入和射频波加热。射频波加热中的离子回旋共振加热因为其加热效率高并且系统的造价相对较低,已被世界各聚变装置广泛采用<sup>[1,2]</sup>,将是未来商业聚变反应堆的主要辅助加热手段之一。离子回旋共振加热技术的最重要问题之一就是如何通过天线将射频波源的能量有效地耦合到等离子体中变成波的能量,离子回旋共振加热天线系统的设计在射频波加热技术中起着至关重要的作用。优化的天线系统,对电磁波的激发、传播有着重要的影响,因此理论上优化天线设计能避免人力和物力上的浪费。

利用等离子体平板模型和三维天线模型<sup>[3]</sup>研究了 JET 装置中离子回旋频段的天线与等离子体的

耦合过程,通过数值求解,得到天线到外金属壁的距离对天线耦合到等离子体的总功率的影响,为离子回旋共振加热的聚变实验提供一定的理论指导。

1 物理模型

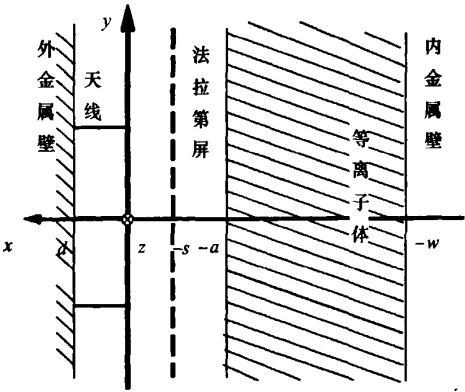


图1 三维天线及等离子体示意图

在 JET 装置中,因为离子回旋共振加热的天线系统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,所以天线与等离子体的耦合问题可以采用笛卡尔坐标系,如图 1 所示。 $x$  轴表示 JET 装置的径向, $y$  轴和  $z$  轴分别表示 JET 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,

2010 年 6 月 21 日收到  
973 子项目(2009GB105002)和  
国家自然科学基金(10775066)资助  
第一作者简介:杜 丹,汉族,讲师,研究方向:等离子体物理。

在径向上分布不均匀,其密度在径向上为抛弧形分布: $n(x) = n_0 - (n_0 - n)[1 + \frac{(x + a)}{r_0}]^2$ ,其中  $n_0$  和  $n$  分别为等离子体中心处和边缘处的密度。约束纵向磁场  $B(x) = B_0/[1 + (r_0 + x)R_0]$ ,  $B_0$  为装置中心磁场强度,  $r_0$ 、 $R_0$  分别为装置的小半径与大半径。 $d$ 、 $s$ 、 $a$  分别为外金属壁、法拉第屏、等离子体边界到天线中心导体的距离。

JET 装置中的离子回旋共振加热天线系统由关于极向和环向对称放置的四天线构成,采用三维天线模型进行描述,既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。单根天线在极向上的长度为  $W_y$ ,在环向上的宽度为  $W_z$ ,环向上天线的间距为  $d_z$ ,电流强度为 1 ka,天线系统的电流成反对称分布的情况<sup>[4]</sup>。

在真空区域  $-a < x < d$ ,电磁场满足 Maxwell 方程组:

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (1)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (2)$$

对方程式(1)和式(2)进行 Laplace - Fourier 变换,根据托卡马克装置的特点,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:

$$d^2 \vec{\psi} / dx^2 - p^2 \vec{\psi} = \vec{\varphi} \quad (3)$$

式(3)中  $\vec{\psi} = (cB_z, E_z)$ ,  $\vec{\varphi} = (c\varphi_b, \varphi_r)$ ,

$$\varphi_b = -\mu_0 (dj_y/dx - ik_z j_x),$$

$$\varphi_r = (1/\omega \epsilon_0) (k_x dj_x/dx + ik_z k_y j_y),$$

方程中  $c$  为真空中的光速,  $k_0 = \omega/c$  是真空中波数,  $k_y$  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(3)满足边界条件:

(a) 装置外金属壁处

$$E_y(x=d) = E_z(x=d) = 0 \quad (4)$$

(b) Faraday 屏处 ( $\sigma_y = 0, \sigma_z = \infty$ )

$$E_z(x=-s) = 0 \quad (5)$$

(c) 真空与等离子体边界处,定义  $\xi$  为面阻抗

$$\frac{E_y(x=-a)}{\omega B_z(x=-a)} = \xi \quad (6)$$

等式(3)加上边界条件式(4)一式(6)是一组完备的方程组,用 Green 函数方法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<sup>[3]</sup>:

$$\frac{d}{dx} \begin{bmatrix} i\omega B_z \\ E_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\mu k_y - k_z^2 \\ 1 - \frac{k_y^2}{u} \mu k_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i\omega B_z \\ E_y \end{bmatrix} \quad (7)$$

其中  $u = k_0^2 \epsilon_1 - k_z^2$ ,  $\mu = \epsilon_2 k_0^2 / u$ ,  $k_z^2 = u(1 - \mu^2)$ ,  $\epsilon_1, \epsilon_2$  为冷等离子体介电张量分量<sup>[5]</sup>。应用 WKB 近似方法数值求解方程(7)得到面阻抗的大小,再采用 Green 函数法求方程(3)得到真空中的电磁场。假设离子回旋波被等离子体全部吸收,根据传输线理论,天线耦合到等离子体的功率可以表示为

$$P = -\frac{1}{2} \iiint_V \vec{E} \cdot \vec{j}^* dv = -\frac{\alpha \mu_0}{8\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} \left\{ g | \chi_t |^2 + i \frac{d}{p^2} | j_x |^2 + ih | \zeta_c |^2 \right\} dk_y dk_z$$

$$\text{其中 } \chi_t = j_y(k_y, k_z) - \frac{ik_y}{p^2} j_x(k_y, k_z),$$

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

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

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

## 2 数值计算及分析

图2画出天线耦合功率随  $k_z$  和  $d$  变化的曲线。从图中可以看出,在 JET 装置中,当采用如图2所示的计算参数时,天线与等离子体的功率主要集中在  $-13 \text{ m}^{-1} < k_z < 13 \text{ m}^{-1}$  的区域,而最大值在  $|k_z| = 6.5 \text{ m}^{-1}$  附近,在此处等离子体中传播的快磁声波满足“谐振腔”条件,所以耦合功率较大。另外当天线到外金属壁的距离  $d$  从 0.025 m 增加到 0.10 m 时,天线耦合到等离子体中的总功率是逐渐增多。换句话说,在其它实验条件相同的情况下,增加天线与外金属壁的距离,可以提高 JET 聚变装置中离子回旋共振加热的耦合效率。

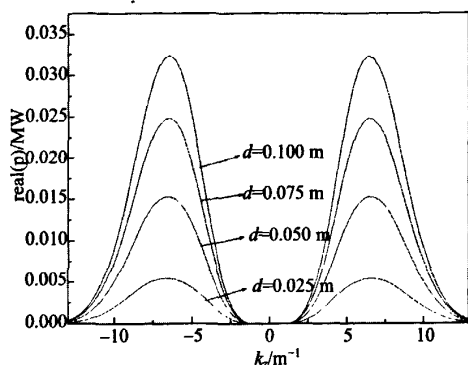


图2 天线耦合功率随  $k_z$  和  $d$  变化的曲线

计算参数为:  $W_y = 0.40$  m,  $W_z = 0.10$  m,  $R_0 = 2.96$  m,  $r_0 = 1.30$  m,  $B_0 = 3.45$  T,  $d_z = 0.06$  m,  $a = s = 0.025$  m

目前,离子回旋共振加热系统中天线设计的优化准则是如何在有限的真空室里,发射尽可能少的射频波得到更好的天线耦合的功率谱。模拟结果显示,在其它实验条件相同的情况下,增加天线与外金属壁的距离满足天线设计的优化准则,可以在一定程度上为离子回旋共振加热的聚变实验提供比较有意义的理论指导。

### 3 结论

采用等离子体平板模型和三维天线模型,数值

模拟了 JET 装置中离子回旋频段的天线与等离子体的耦合过程。模拟结果表明:增大天线到外金属壁的距离可以提高天线耦合到等离子体中的总功率。增加天线与外金属壁的距离满足天线设计的优化准则,从一定程度上提高 JET 聚变装置离子回旋共振加热的耦合效率。

### 参考文献

- 1 Colas L, Bécoulet M, Costanzo L, *et al.* Heat load Patterns on torus supra ICRH antennas. 27th EPS Conference on Contr Fusion and Plasma Physics, Budapest, 2000; ECA 24B:792—795
- 2 Schilling G, Wukitch S J, Lin Y, *et al.* Assessment of ICRF antenna performance in alcator C-Mod. 31st EPS Conference on Plasma Physics, London, 2004; ECA 28G: P—2. 167
- 3 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. Computer Physics Communication, 1986; 40: 1—22
- 4 Bhatnagar V P, Koch R. Power deposition profiles and poynting vector distribution of phased antenna arrays in the ion-cyclotron resonance heating of a net/intor-type tokamak. Nuclear Fusion, 1986; 26 (1): 61—72
- 5 Pécoul S, Heuraux S, Koch R, *et al.* Numerical modeling of the coupling of an ICRH antenna with a plasma with self-consistent antenna currents. Computer Physics Communication, 2002; 146:166—187

## Numerical Simulation of the Antenna-plasma Ccoupling

Du Dan, GONG Xue-yu<sup>1</sup>, WANG Zhen-hua<sup>1</sup>, YIN Lan, YANG Wen-chao<sup>1</sup>

(Department of Mathematics and Physics and Department of Nuclear Science and Technology<sup>1</sup>, University of South China, Hengyang 421001, P. R. China)

[Abstract] The coupling of the ICRF antennas to the plasma in JET was studied by employing a plasma slab model and a 3-D antenna model. Through using a hypothesis that all the ion cyclotron waves which reaches the plasma bulk is completely absorbed, the fast magnetosonic waves equations were numerically resolved. The results showed that the increase in the distance between the antennas and outer metal wall corresponds to the increase in the coupled total power of the antenna-plasma.

[Key words] the slab model 3-D antenna model the ion cyclotron resonance heating (ICRH) coupled power

## 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>