

# EAST 离子回旋波加热 快速阻抗匹配系统的研究

陈 根<sup>1</sup>, 赵燕平<sup>1</sup>, 毛玉周<sup>1</sup>, 禹胜林<sup>2</sup>

(1. 中国科学院 等离子体物理研究所, 安徽 合肥 230031;

2. 南京信息工程大学 电子与信息工程学院, 江苏 南京 210044)

**摘要:**离子回旋波加热是 EAST 装置最重要的辅助加热方法,在实验中获得了明显的加热效果。射频功率源与天线负载之间阻抗匹配才能保证最大的加热功率输出。在射频加热实验中,等离子体参数的改变将会引起天线负载阻抗的快速变化,为应对这一情况研制出了快速阻抗匹配系统。本文采用解析法和计算机仿真相结合的分析方式,研制了该阻抗匹配系统的铁氧体匹配支节,并对其性能进行了测试。测试结果表明,快速阻抗匹配系统的时间响应速度明显优于传统匹配方式的,可作为实时匹配的候选者。

**关键词:**EAST; 离子回旋波加热; 阻抗匹配

**中图分类号:**TL612.11

**文献标志码:**A

**文章编号:**1000-6931(2013)07-1256-06

**doi:**10.7538/yzk.2013.47.07.1256

## Research on Fast Impedance Matching System for ICRF Heating in EAST

CHEN Gen<sup>1</sup>, ZHAO Yan-ping<sup>1</sup>, MAO Yu-zhou<sup>1</sup>, YU Sheng-lin<sup>2</sup>

(1. Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;

2. School of Electronics & Information Engineering, Nanjing University  
of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)

**Abstract:** Ion cyclotron range of frequency (ICRF) heating is used in EAST Tokamak as one of the most significant auxiliary heating tools, and it shows a good performance. The antenna should be matched to radio frequency generator to ensure maximum power of heating. In the experiment of ICRF heating, variable plasma parameters will induce to fast vary loading impedance of antenna. The fast impedance matching system being fit for this situation was developed. By using analysis method and computer simulation, the ferrite tuner was developed and tested as the most important part of matching system. The test results show that good time response of the tuner is much faster than that of traditional method, and this can make it to be the candidate for real-time matching.

**Key words:** EAST; ICRF heating; impedance matching

**收稿日期:**2012-01-10; **修回日期:**2012-04-09

**基金项目:**国家自然科学基金项目资助(11075182);中国科学院知识创新工程青年人才领域专项前沿项目资助(Y05FCQ1126);国家磁约束核聚变能研究专项资助(2010GB110000)

**作者简介:**陈 根(1979—),男,安徽石台人,博士研究生,电磁场与微波技术专业

离子回旋波加热作为托卡马克辅助加热手段之一,在世界很多磁约束受控热核聚变实验装置(Tokamak)上均获得了显著的加热效果<sup>[1-4]</sup>。在 EAST 全超导托卡马克实验装置中同样采用了该种加热方式<sup>[5-9]</sup>。离子回旋波加热系统主要包括发射机、传输系统、天线 3 部分,根据微波传输线理论,3 部分的阻抗必须匹配才能保证最大的微波功率注入至 EAST Tokamak 实验装置中,从而帮助实现点火条件。

理论分析和实验结果均表明,在某些情况下,如 L-H 模转化、ELM 模,均能引起天线负载阻抗的快速变化。在实现天线和传输系统快速匹配方面,世界上其他 Tokamak 装置已做了很多研究<sup>[10-13]</sup>。快速铁氧体匹配系统的第 1 次测试是在 20 世纪 90 年代<sup>[14]</sup>,目前已在 C-MOD 装置上实现了正式应用并取得了良好的实验效果<sup>[15-16]</sup>。

在 EAST 2010 年秋季离子回旋波加热实验中,已实现了 H 模稳态运行实验<sup>[17]</sup>。为确保离子回旋波加热系统的稳态运行,需研制 ms 级的快速阻抗匹配系统。本文阐述快速阻抗匹配系统的核心部分,即铁氧体支节的研制内容,并讨论相应测试结果。

# 1 铁氧体支节

铁氧体支节主要包括磁轭、永磁体、偏置磁场线圈及部分填充铁氧体材料的带状线(图 1)。通过改变偏置磁场的大小,使铁氧体材料的磁导率发生相应的改变,最终实现整个装置的等效电长度的变化。由于该装置的工作频率为 25~70 MHz、峰值功率为 300 kW,合理的物理尺寸、电击穿保护及响应时间成为铁氧体支节研制项目的主要难点。

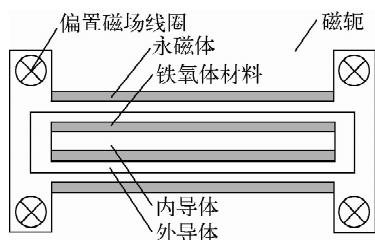


图 1 快速铁氧体支节示意图  
Fig. 1 Schematic diagram of fast ferrite tuner

## 1.1 合理的物理尺寸

铁氧体材料通常工作在饱和状态下,在铁氧体样品内部的偏置磁场,由于铁氧体表面的边界条件通常不同于外加场。当外磁场与铁氧体材料平面垂直时,由于材料表面上磁感应强度  $B$  的连续性,铁氧体材料的磁导率  $\mu$  可表示为偏置磁场  $H$  和饱和磁化强度  $M_s$  的函数:  $\mu=1+M_s/H$ 。因此,铁氧体材料在一定条件下可用标量磁导率来描述,从而简化了理论分析过程。

对无耗传输线,特性阻抗  $Z_0$  和传播常数  $\beta$  可表示为:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L_0}{C_0}} \tag{1}$$

$$\beta = \omega \sqrt{L_0 C_0} \tag{2}$$

其中:  $\omega$  为工作频率;  $L_0$  和  $C_0$  分别为传输线的分布电感和分布电容。

本装置中带状线的分布电感与铁氧体材料的磁导率相关,通过改变铁氧体材料的磁导率即可实现等效电长度的变化。采用有限元分析方法,带状线在不同偏置磁场下的分布电容和分布电感均可计算得到。

因为带状线结构具有多个独立参数,当分析这些独立参数对工作状态的影响时,需假定其他参数是恒定的。图 2 示出了特性阻抗和相对传播常数作为内导体宽度  $w$  函数的计算结果。在计算过程中,假定铁氧体材料的厚度及其他尺寸保持不变。从图 2 可看出,传输线的特性阻抗越低,引入的相对传播常数越大,即可获得更为显著的差分等效电长度。为保证在

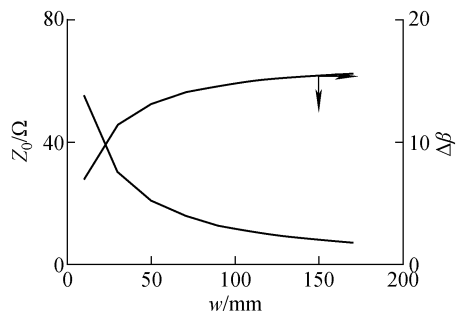


图 2 不同内导体宽度下的特性阻抗和差分传播常数  
Fig. 2 Characteristic impedance and relative phase propagation constant with variable inner conductor widths

25~70 MHz 工作频率范围内获得紧凑的物理尺寸和合理的重量,铁氧体支节采用了低阻抗的带状线结构。

另外,铁氧体支节是一可变阻抗的短路带状线结构,它的连接端口处一定是失配的(图 3)。端口阻抗及带状线的特性参数(特性阻抗、传播常数、长度)均会影响整个支节的等效电长度。为了描绘等效电长度的变化,本文计算了该支节  $S_{11}$  参数的差分相移  $\Delta\varphi$ 。

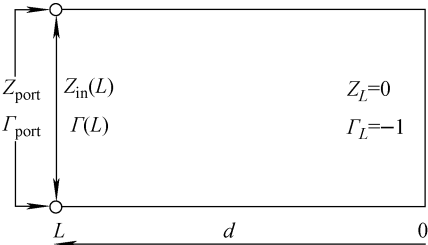


图 3 终端短路带状线的等效射频电路

Fig. 3 Equivalent radio frequency circuit of shorted strip line

利用传输线理论,输入端口的反射系数可表示为:

$$S_{11} = \Gamma_{\text{port}} = \frac{Z_{\text{in}}(L) - Z_{\text{port}}}{Z_{\text{in}}(L) + Z_{\text{port}}} \quad (3)$$

其中:  $\Gamma_{\text{port}}$  为端口反射系数;  $Z_{\text{in}}(L)$  为短路线入射端的输入阻抗;  $L$  为支节的长度;  $Z_{\text{port}}$  为连接处的端口阻抗。

$Z_{\text{in}}(L)$  还可表示为:

$$Z_{\text{in}}(L) = Z_0 \frac{1 - e^{-j2\beta L}}{1 + e^{-j2\beta L}} \quad (4)$$

其中,  $d$  为距离短路端的长度。

根据式(1)~(4),可得:

$$S_{11} = \frac{(-1 + e^{j2\alpha d \sqrt{L_0 C_0}}) \sqrt{\frac{L_0}{C_0}} - (1 + e^{j2\alpha d \sqrt{L_0 C_0}}) Z_{\text{port}}}{(-1 + e^{j2\alpha d \sqrt{L_0 C_0}}) \sqrt{\frac{L_0}{C_0}} + (1 + e^{j2\alpha d \sqrt{L_0 C_0}}) Z_{\text{port}}} \quad (5)$$

得到差分相移为:

$$\Delta\varphi = \text{Arg}(S_{11})|_{B_{\text{max}}} - \text{Arg}(S_{11})|_{B_{\text{min}}} \quad (6)$$

其中,  $B_{\text{max}}$  和  $B_{\text{min}}$  分别为偏置磁场磁感应强度的最大和最小值。

图 4 为 1 组不同工作频率下典型差分相移

的分布曲线。由图 4 可看出,对长度有限的结构,差分相移与频率密切相关,越高的频率可得到越大的差分相移。同时,差分相移在支节长度上表现出一定的周期性。选取合理的支节长度,以保证在工作带宽内实现全频段的差分相移要求。

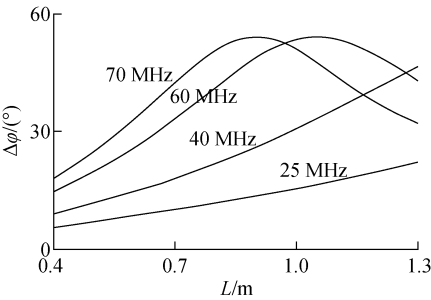


图 4 不同频率下铁氧体支节的差分相移随长度的分布  
Fig. 4 Different phase shift as a function of line length at different working frequencies

1.2 电击穿保护

铁氧体支节需工作在高功率环境下,峰值功率达 300 kW,因此,该装置的各参数设计均需考虑其在工作高功率环境下的稳态运行情况。电击穿保护是影响高功率下稳态运行的最重要因素,必须对其进行分析。采用阻抗变换的方法,本文计算了铁氧体支节带状线结构中电场的分布情况,其等效电路图如图 5 所示。

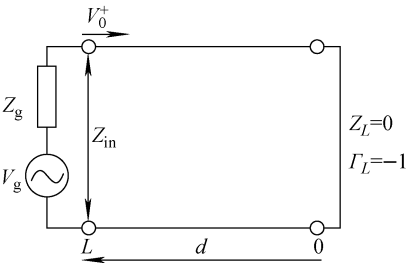


图 5 终端短路带状线的等效电路

Fig. 5 Equivalent circuit of shorted strip line

对终端短路的无耗传输线,沿线的电压可表示为入射波和反射波电场的和,有:

$$V(d) = V_0^+ (e^{j\beta d} + \Gamma_L e^{-j\beta d}) \quad (7)$$

其中:  $V_0^+$  为入射波电压的幅值;  $\Gamma_L$  为短路端的反射系数。

对该支节,在接口处的电压还可表示为:

$$V(d=L)=V_g\frac{Z_{in}}{Z_{in}+Z_g}\tag{8}$$

其中: $V_g$  为源电压; $Z_g$  为源内阻。

利用式(7)和(8)在接口处相等的关系,求解  $V_0^+$  得:

$$V_0^+=V_g\frac{Z_{in}}{Z_{in}+Z_g}\cdot\frac{1}{(e^{j\beta L}+\Gamma_Le^{-j\beta L})}\tag{9}$$

因为部分填充铁氧体材料的带状线是终端短路的结构,所以  $\Gamma_L=-1$ 。根据传输线理论,输入阻抗  $Z_{in}=jZ_0\tan(\beta L)$ , 并将式(1)和(2)代入,可得沿线电压:

$$V(d)=V_g\frac{\sqrt{\frac{L_0}{C_0}}\tan(\omega L\sqrt{L_0C_0})}{\sqrt{\frac{L_0}{C_0}}\tan(\omega L\sqrt{L_0C_0})-jZ_g}\times\frac{e^{j\omega d\sqrt{L_0C_0}}-e^{-j\omega d\sqrt{L_0C_0}}}{e^{j\omega L\sqrt{L_0C_0}}-e^{-j\omega L\sqrt{L_0C_0}}}\tag{10}$$

图 6 示出典型的铁氧体支节沿线电场分布,其中电压幅值是相对于信号源电压  $V_g$  的归一化电压。在确定铁氧体支节各相关尺寸时,需对多个参数进行考虑。在结构参数确定后,即可对支节内电场分布情况进行分析,然后反过来修正结构参数,这是一反馈分析过程,需综合考虑性能要求和高功率的稳态运行。

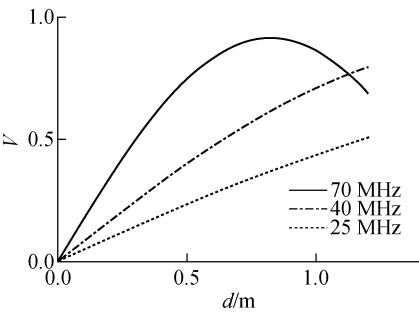


图 6 带状线归一化电压分布  
Fig. 6 Normalized voltage distribution of strip line

1.3 响应时间

铁氧体支节的响应时间主要受两方面的影响:导体的涡流效应、偏置磁场线圈的自感。

本文选用 Maxwell 3D 程序进行计算机仿真分析涡流效应的影响。带状线的外导体开了多条缝隙以减少涡流的影响,内导体则采用中空结构以方便水冷降温。外导体中缝隙的数目及位置是由计算机仿真结果与机械加工难度共

同决定的。随着偏置磁场变化频率的上升,渗入铁氧体材料内部的偏置磁场将减少(图 7)。50 Hz 时,磁场在整个铁氧体材料中分布均匀,平均值为 0.04 T;500 Hz 时,磁场开始变形,但比较均匀,平均值约为 0.03 T;1 kHz 时,整个磁场变形严重,平均值仅约 0.01 T。

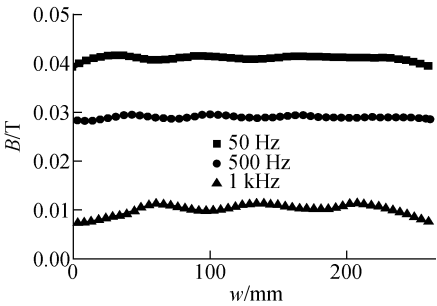


图 7 渗入铁氧体材料内的磁场分布  
Fig. 7 Magnetic field distribution penetrating to ferrite materials

在设计偏置磁场线圈过程中,在满足设计目标的前提下,应尽量减小磁场线圈的电感。本文采用 Maxwell 3D 程序计算机仿真分析线圈电感和工作频率的关系(图 8),随着工作频率的增加,电感量下降,0~1 kHz 频率范围内,电感约为 2~7 mH。为提高磁场线圈的响应时间,本装置选用的供电电源采用了四象限控制开关。这种四象限开关电源最显著的优点是在电流变向时,可将磁场线圈中的电流能量储存后,再反馈到线圈中,从而显著提高磁场线圈电流的稳定时间及铁氧体支节的响应时间。

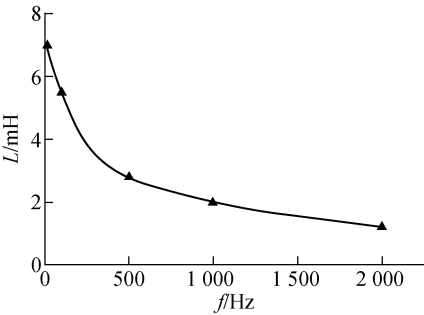


图 8 不同工作频率下磁场线圈的自感  
Fig. 8 Self-inductance of magnetic coil at different working frequencies

2 测试及结果分析

基于上述关于铁氧体支节的理论分析,研制出第 1 个测试原型,以饱和磁化强度为 0.18 T 的 YIG 材料作为带状线中部分填充的铁氧体材料,钕铁硼材料作为直流偏置磁场,为 YIG 材料提供合适的工作点。所需的可变偏置磁场约为  $\pm 0.04$  T,由 1 对磁场线圈串联后提供。因加工难度低及价格便宜,磁轭部分选用了软铁材料。

为测量铁氧体支节的射频性能,选用矢量网络分析仪记录全反射状态下的  $S_{11}$  参数,测试结果如图 9 所示。支节的差分相移随着工作频率的增大而增大,工作频率为 70 MHz,在回波损耗低于设计值时,可达到最大差分相移,约为  $70^\circ$ 。在 25~70 MHz 工作频率内,铁氧体支节的差分等效电长度均实现了 30 cm 的可调变化范围,满足设计要求。

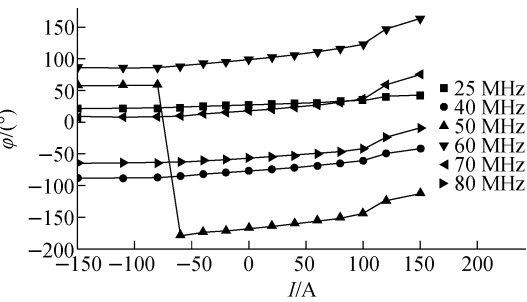


图 9 可变磁场线圈电流下铁氧体支节的相位  
Fig. 9 Phase of ferrite tuner with variable currents under different bias magnetic coils

另外,为测试铁氧体支节的响应时间,选用定向耦合器置于支节与信号源之间,通过耦合的入射波和反射波信号来测量  $S_{11}$  参数,并记录在实时监控系统中(图 10)。通过改变偏置磁场线圈中的电流,使铁氧体支节工作在不同的稳定状态,即可获得稳定的铁氧体支节相位。因此,铁氧体支节的时间响应可从其各稳态之间切换过程中的时间延迟得出。图 11 为 1 组典型的测试结果,铁氧体支节的响应时间约为 340 ms。磁轭部分选用的软铁材料,由于其工作频率不高,同时自身产生的涡流影响也较大,是造成这种时间延迟的主要原因。在后续研究中,将着重解决此

问题,以提高铁氧体支节的响应时间,满足 EAST 离子回旋波加热系统实时匹配的需求。

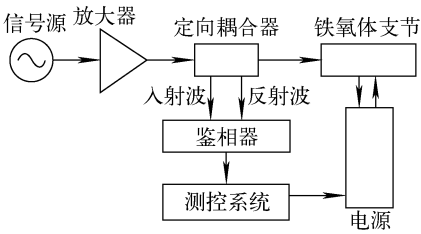


图 10 测试快速铁氧体支节响应时间的结构  
Fig. 10 Configuration of test for response time of fast ferrite tuner

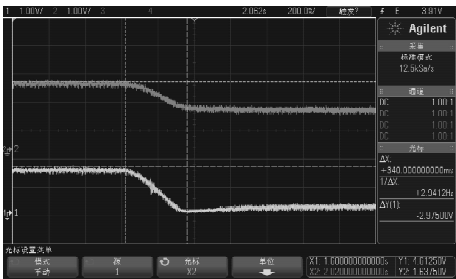


图 11 快速铁氧体支节的响应时间  
Fig. 11 Response time of fast ferrite tuner

3 结论

采用有限元、解析式、计算机仿真相结合的方法,讨论了铁氧体支节的研制过程。测试结果表明,在 25~70 MHz 频率范围内,铁氧体支节能实现至少 30 cm 的等效电长度的变化,满足设计要求。该种支节的响应时间约为 340 ms,优于传统支节的调配速度,表明其可作为 EAST 离子回旋波加热实验研究中实时匹配系统的候选方案。

参考文献:

[1] BREMOND 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.  
[2] GREENWALD M, ANDELIN D, BASSE N, et al. Overview of the Alcator C-Mod program[J]. Nuclear Fusion, 2005, 45: S109-S117.  
[3] OGAWA M, TSUJI-LIO S, KOMORI A, et al. Magnetic fusion energy studies in Japan[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Re-

- search A, 2007, 577(1-2): 30-36.
- [4] ZHAO Y P, LI J, LUO J R, et al. Electron heating by ion Bernstein wave in the HT-7 Tokamak[J]. Plasma Physics and Controlled Fusion, 2001, 43(3): 343-353.
- [5] ZHAO Y P, HU J S, ZHANG X J, et al. RF experiments and future plan on superconducting Tokamak HT-7 and EAST[J]. AIP Conference Proceedings, 2009, 1 187: 181-188.
- [6] QIN C M, ZHAO Y P, LI D C, et al. Suppression of MHD instabilities by ion Bernstein wave (IBW) heating in the HT-7 Tokamak[J]. Plasma Physics and Controlled Fusion, 2010, 52(8): 085012.
- [7] ZHANG X J, ZHAO Y P, WAN B N, et al. Physics and engineering aspects of ICRF heating system on EAST[C]//23rd IAEA Fusion Energy Conference. Daejeon, South Korea: [s. n.], 2010.
- [8] WAN Y X, LI J G, WENG P D. Overview progress and future plan of EAST project[C]//21st IAEA Fusion Energy Conference. [S. l.]: [s. n.], 2006.
- [9] GAO X. Diagnostics for first plasma study on EAST Tokamak[J]. Physics Letters A, 2008, 372(13): 2 286-2 290.
- [10] KAYE A, BHATNAGAR V, CRAWLEY P, et al. The JET wideband matching system[C]//12th Top Conference on Radio Frequency Power in Plasmas. [S. l.]: [s. n.], 1997: 389-392.
- [11] WADE T J, JACQUINOT J, BOSIA G, et al. Development of the JET ICRH plant[J]. Fusion Engineering and Design, 1994, 24(1-2): 23-46.
- [12] BOSIA G. High-power density ion cyclotron antennas for next step applications[J]. Fusion Science and Technology, 2003, 43(2): 153-160.
- [13] DURODIE F, MESSIAEN A, VERVIER M, et al. Development of a load: Insensitive ICRH antenna system on TEXTOR[J]. Fusion Engineering and Design, 2003, 66-68: 509-513.
- [14] BRAUN F, ICRH Team, ARNOLD W. Fast matching of load changes in the ion cyclotron resonance frequency range[C]//18th IEEE/NPSS Symposium on Fusion Engineering. Albuquerque, USA: [s. n.], 1999: 395-398.
- [15] LIN Y, STILLERMAN J A, BINUS A, et al. Digital real-time control for an ICRF fast ferrite tuning system on Alcator C-Mod[J]. Fusion Engineering and Design, 2008, 83(2-3): 241-244.
- [16] LIN Y, BINUS A, WUKITCH S J. Real-time fast ferrite ICRF tuning system on the Alcator C-Mod Tokamak[J]. Fusion Engineering and Design, 2009, 84(1): 33-37.
- [17] ZHANG X J, ZHAO Y P, MAO Y Z, et al. Current status of ICRF heating experiments on EAST [J]. Plasma Science and Technology, 2011, 13(2): 172-174.