

EAST 离子回旋加热系统大功率隔直器的设计

李国超, 毛玉周, 赵燕平, 王 鹏

(中国科学院等离子体物理研究所 安徽 合肥 230026)

摘 要: 在 EAST 装置 1.5 MW 离子回旋波加热系统中, 发射机与天线分别有自己的接地点, 为防止两端地电平互相干扰, 设计了大功率隔直器。介绍了其设计原理, 并分析 S 参数, 端口的驻波比, 以及导体损耗和介质损耗所产生的热效应。

关键词: 隔直器; ICRH; DC Break; EAST

中图分类号: TP368.1

文献标识码: B

文章编号: 1004-373X (2004) 20-067-04

Design of High Power DC Break for ICRH of EAST

LI Guochao, MAO Yuzhou, ZHAO Yanping, WANG Peng

(Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Science, Hefei, 230026, China)

Abstract: 1.5 MW ion cyclotron wave heating system has been developed. The transmitter and the antenna both have their ground, which will severely perturb the system's normal working. To isolate the ground loop, the DC (direct current) break has been designed. The design principle has been presented; the microwave network parameters and the thermal effect caused by conductor loss and dielectric loss have been analyzed.

Keywords: dc break device; ICRH; DC break; EAST

1 引言

EAST 是我国在建的全超导托卡马克聚变装置, 为实现聚变点火的要求必须对托卡马克中的等离子体进行加热, 利用离子回旋波(磁约束等离子体产生的一种波动行为)进行加热是一种十分有效的手段。EAST 离子回旋波加热系统由 1.5 MW 发射机、同轴开关、定向耦合器、隔直器、三支节调配器、相移器、同轴馈口、天线组成。发射机电源为负高压, 有接地点, 天线也有接地点, 如图 1 所示, 天线的地也是托卡马克装置的地, 为装置周围各个诊断系统的共用地。而在一个系统中不允许有两个接地点, 故需要隔直器隔断两端的的地, 保证系统的正常工作。隔直器是离子回旋系统中必不可少的器件。

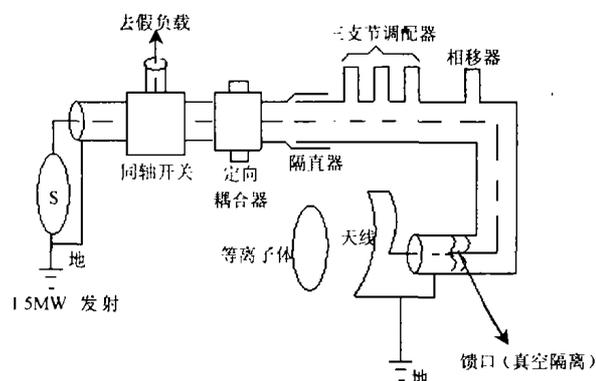


图 1 离子回旋系统略图

2 隔直器原理及结构

2.1 系统简介及隔直器的技术要求

高频发射机发射出的波(频率范围为 20~110 MHz, 功率范围为 0~1.5 MW) 经过同轴开关、定向耦合器与同轴传输线(内直径 99.9 mm, 外直径 230 mm, 特性阻抗 50 Ω) 相连, 向等离子体辐射能量的天线经过三支节调配器与前面的传输线达到阻抗匹配, 隔直器在中间断开两端的的地。

隔直器安装的位置在三支节调配器与定向耦合器之间, 这一段经过阻抗调配之后驻波比较小, 可以有效地提高隔直器使用的安全性。由上所述可知隔直器必须要和传输线有相同的特性阻抗, 较宽的通频带(20~110 MHz), 能够承受高的射频电压, 可以承受射频电流所产生的热, 做到射频短路, 直流断路。隔直器的技术要求是反射系数在 -20 dB, 插入损耗小于 0.1 dB, 特性阻抗为 50 Ω , 通频范围为 20~110 MHz。

2.2 隔直器的原理

隔直器的基本原理就是用电容来隔断两端的直流通路, 可以采用集总电容模式和分布电容模式。集总电容在同轴传输线上安装后导致的不连续性很容易产生高次消逝模, 使插入损耗过大, 故不采用。图 2 为隔直器采用分布电容模式的原理图, 两段同轴传输线对插, 在内外的间断处填充聚四氟乙烯, 形成分布电容, C 为在端口附近外加的一排集总电容, 以减小隔直器的射频容抗, 外面的屏蔽罩防止射频泄漏, 减少电磁辐射。其结构如图 2 所示。

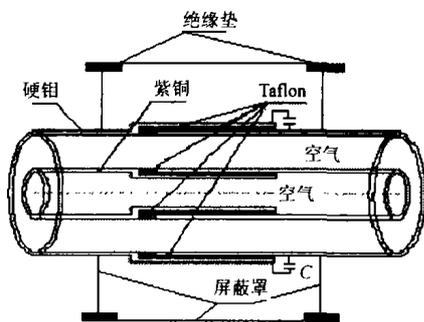


图2 隔直器结构图

3 隔直器S参数计算模型及计算结果和仿真结果

隔直器由两端的传输线和隔直部分组成，中间隔直段等效电路如图3所示，这样可以视为两段传输线中间串连一阻抗。 R_2, R_1 分别是根据趋肤效应得到的内外导体的等效电阻, L_2, L_1 为等效电感, C_1, C_2 为隔直段间隙所形成的电容, C_3 为隔直段内外导体之间的电容。各等效元件的具体表达式如下：

$$C_3 = 2\pi\epsilon_1\epsilon_0/\ln(b/a)$$

$$Z = \begin{bmatrix} R_1 + R_2 + j\omega(L_1 + L_2) - j\frac{1}{\omega}\left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}\right) & -j\frac{1}{\omega}\frac{1}{C_3} \\ -j\frac{1}{\omega}\frac{1}{C_3} & R_1 + R_2 + j\omega(L_1 + L_2) - j\frac{1}{\omega}\left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}\right) \end{bmatrix}$$

隔直段前后为特性阻抗为 z_{c1} 和 z_{c2} 的同轴传输线，则其归一化的阻抗矩阵为：

$$z = \begin{bmatrix} Z_{11}/z_{c1} & Z_{12}/\sqrt{z_{c1}z_{c2}} \\ Z_{21}/\sqrt{z_{c1}z_{c2}} & Z_{22}/z_{c1} \end{bmatrix}$$

归一化阻抗矩阵与散射矩阵(S)的变换关系为：

$$[S] = ([Z] - 1)([Z] + 1)^{-1}$$

隔直段前后的传输线特性阻抗仍旧为 50Ω ，波在此处可以视为无反射传输，其散射矩阵为：

$$s = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$$

由二端口网络的级联矩阵理论可知该器件的散射矩阵仍旧为隔直段的散射矩阵。

内导体材料为紫铜，外导体材料为硬铝，隔直段间隙填充介质材料聚四氟乙烯，隔直段长度从取 1000 mm ，两端传输线长各为 400 mm ，紫铜及铝的电特性参数如表1所示。

表1 紫铜及铝的电特性参数

材料	特性电导率 σ /s/m	导磁率 μ /m	趋肤深度 δ /m	表面电阻 / Ω
紫铜	$5.8e^7$	$4\pi e^{-7}$	$0.0661/\sqrt{f}$	$2.52e\sqrt{f}e^{-7}$
铝	$3.82e^{-7}$	$4\pi e^{-7}$	$0.0661/\sqrt{f}$	$3.22\sqrt{f}e^{-7}$

聚四氟乙烯的介电常数 $\epsilon_r = 2.1$ ，介质损耗角 $\text{tg } \delta = 4e^{-4}$ ，(均为 10 GHz 测得)，在所使用的频率范围内变化不大，可认为是常数。取间距 d 为 1 mm ，隔直段长度从 $0.5 \sim$

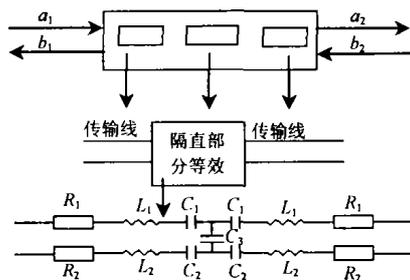
$$C_1 = 2\pi\epsilon_r\epsilon_0/\ln((b/d)/b)$$

$$C_2 = 2\pi\epsilon_r\epsilon_0/\ln((a-d)/a)$$

$$L_1 = L_2 = \frac{\mu}{4\pi}\ln(b/a)$$

$$R_1 = \frac{R_{c1}}{2\pi} \cdot \frac{1}{a} \quad R_2 = \frac{R_{c2}}{2\pi} \cdot \frac{1}{b}$$

其中： a, b 分别为内外导体的半径； d 为隔直段内导体与内导体，外导体与外导体的间隔距离均为单位长度的数值。



注： a_1, b_1 为归一化入射波反射波电压(a_2, b_2 同)

图3 中间隔直段等效电路

隔直部分等效电路的阻抗矩阵为：

1.5 m 变化，频率范围为 $10 \sim 120 \text{ MHz}$ ，未考虑外加集总电容，计算结果如图4所示，由左至右依次为 $\text{dbs}_{11}, \text{dbs}_{21}$ ， vswr (驻波比)。

从计算结果上可以看到随着隔直段长度的增加，传输特性变好，网络衰减变小，这是由于随着隔直电容量的增大，由于外加电容的阻抗变小，而随着频率的增加容抗也变小，对传输的影响变小，但在计算模型中没有考虑到可能出现的谐振现象， $f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ ，在等效模型中， C 的量级为 $10e^{-9}\text{F}$ ，电感 L 的量级为 $10e^{-7}$ 亨，出现的谐振频率为 $10e^7 \text{ Hz}$ ，在隔直器的使用频率范围内，这样在一些频点会出现谐振而不能应用在所期待的全部频率范围。为更准确的确定各种参数，用 Ansoft HFSS 9.0 进行仿真分析，仿真的模型图如图2所示，仿真结果如图5所示，由左至右依次为 $\text{dbs}_{11}, \text{dbs}_{21}$ ，输入端口的驻波比 vswr 。

从计算结果来看，隔直段长度越长对传输的影响越小，也就是隔直的电容量越大对射频功率传输的影响越小，但计算的结果没有反应出谐振的影响，在仿真分析的结果中有一些频点的传输很差，随长度的增加第一次出现的变差的峰下移，这正是谐振的影响，但在 0.5 m 的长度时在所要求的频率范围内并没有谐振峰的出现，综合以上的计算及仿真结果，选择隔直段的长度为 0.5 m 。形成隔直电容的间隔越小电容越大，但过小的间隔使加工的难度变大，难以做到，而间隔变大时电容变小，对传输的影响

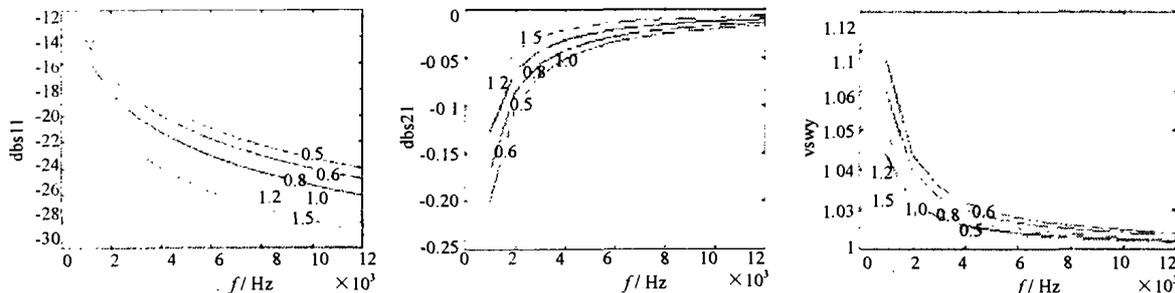


图4 计算结果

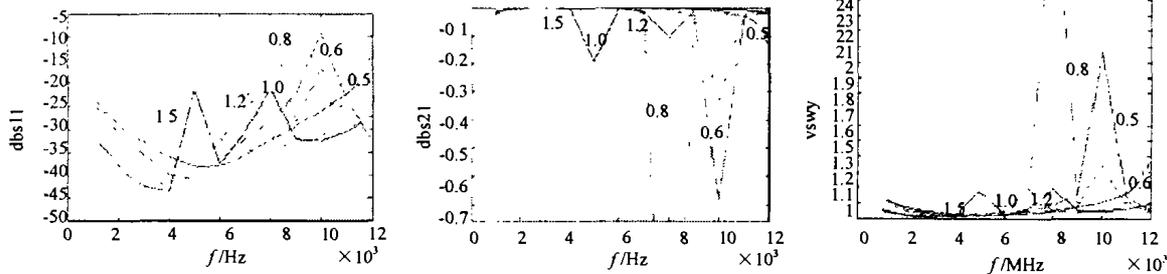


图5 仿真结果

过大，所以确定隔直段的长度0.5 m，间距为1 mm。计算结果显示在正常传输时的大部分频率范围内，|S21|均大于-0.05 dB，而仿真结果则全部的频率范围内（除去谐振峰附近）|S21|均大于-0.05 dB，那么插入损耗LI小于0.1 dB，满足隔直器的设计要求。插入损耗的计算公式为：

$$LI = 20 \log(1/|S21|^2)$$

4 隔直器的热耗分析

在高频作用下导体由于趋肤效应会有表面电阻，这样就会有热耗。离子回旋加热系统的运行模式是稳态高功率运行，导体的损耗将不可忽略，介质在高频作用下也会有损耗（等效为电导）。将隔直电容部分等效为电容与电导的并联，内导体所有的表面电阻等效为R₁，外导体的为R₂，输入端等效为一电流源，其电流大小为I = √P~2/Z₀，Z₀为传输线的特性阻抗，P为发射机的输出功率，由于隔直器端接匹配负载，可以等效为端接50 Ω负载。等效电导的大小为G = ωCtg δ。内外导体形成的分布电容分别为C_i2890PF，C_o6915PF，以内导体隔直段具体分析，介质上面的导体其上下表面均有表面电流分布，下面的导体仅有一面有电流分布，该段的导体损耗P_i为正常时的三倍，介质损耗P_d为：

$$P_i = 3P_c = 3 \frac{P}{Z_0} R_1 \quad P_d = \frac{P}{Z_0} \cdot \frac{\text{tg } \delta / \omega C}{1 + \text{tg } \delta}$$

内导体中间无水冷时，满功率运行时经过计算导体的温度在180 s可以升高100 ℃，介质的温升有70 ℃。ICRH需要稳态运行1 000 s，传输线的内导体必须要有水冷，外导体与内导体之间要有风冷（利用空气的流动带走能量），将隔直段看作三层圆筒壁，有恒定内热源，最内层有水冷，最外层有风冷的模型计算稳态时的温度分布及热量传递。

该导热问题具有轴对称性，主要是径向存在导热，忽

略轴向的导热，可以建立如图6所示的柱坐标系，考虑稳态时的温度分布，近似认为3部分与空气接触为绝热的，1部分与冷却水接触。

$$\frac{\partial^2 T_i}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial T_i}{\partial r} + \frac{q_i}{\lambda_i} = 0 \quad (i = 1, 2, 3)$$

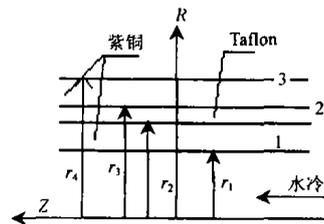


图6 导热坐标

其中：*i* = 1, 2, 3 分别为 1, 2, 3 的径向温度分布；*q_i* 为第 *i* 部分内热源，即单位体积所产生的热量。1 部分与冷却水相接触，3 部分与内导体与外导体与内导体之间的气体接触，可近似为绝热。根据热流的连续性边界条件可以写为如下形式：

$$\begin{aligned} r = r_1 \text{ 时, } t &= t_f \\ r = r_2 \text{ 时, } -\lambda_2 2\pi r l \frac{\partial T_2}{\partial r} &= -\lambda_1 2\pi r l \frac{\partial T_1}{\partial r}, T_2 = T_1 \\ r = r_3 \text{ 时, } -\lambda_3 2\pi r l \frac{\partial T_3}{\partial r} &= -\lambda_2 2\pi r l \frac{\partial T_2}{\partial r}, T_3 = T_2 \\ r = r_4 \text{ 时, } -\lambda_3 2\pi r l \frac{\partial T_3}{\partial r} &= 0 \end{aligned}$$

其中：*t_f* 为流体也就是水的温度，可以近似认为是常数，内热源的表达式如下：

$$\begin{aligned} q_1 &= \frac{P_c}{\pi(r_2^2 - r_1^2)l} \\ q_2 &= \frac{P_d}{\pi(r_3^2 - r_2^2)l} \\ q_3 &= \frac{2P_c}{\pi(r_4^2 - r_3^2)l} \end{aligned}$$

计算的最终表达式为：

$$T_1 = -\frac{q_1}{4\lambda_1}r^2 + c_1 \ln(r) + c_2$$

$$T_2 = -\frac{q_2}{4\lambda_2}r^2 + c_3 \ln(r) + c_4$$

$$T_3 = -\frac{q_3}{4\lambda_3}r^2 + c_5 \ln(r) + c_6$$

其中:

$$c_5 = \frac{q_3}{2\lambda_3}r_4^2, \quad c_3 = \frac{q_2 - q_3}{2\lambda_2}r_3^2 + \frac{\lambda_3}{\lambda_2}c_5$$

$$c_1 = \frac{q_1 - q_2}{2\lambda_1}r_2^2 + \frac{\lambda_2}{\lambda_1}c_3, \quad c_2 = t_f + \frac{q_1}{4\lambda_1}r_1^2 - c_1 \ln r_1$$

$$c_4 = (-\frac{q_1}{4\lambda_1} + \frac{q_2}{4\lambda_2})r_2^2 + (c_1 - c_3) \ln r_2 + c_2$$

$$c_6 = (-\frac{q_2}{4\lambda_2} + \frac{q_3}{4\lambda_3})r_3^2 + (c_3 - c_5) \ln r_3 + c_4$$

紫铜的密度 $\rho = 8954 \text{ kg/m}^3$, 比热 $c = 383.1 \text{ J/kg} \cdot \text{C}$, 导热系数 $\lambda = 386 \text{ W/(m} \cdot \text{C)}$, 聚四氟乙烯的密度为 $2.18 \text{ e}^3 \text{ kg/m}^3$, 比热为 $100 \text{ J/kg} \cdot \text{C}$, 导热系数为 $1.2 \text{ e}^{-1} \text{ w/m} \cdot \text{C}$ 。假定满功率稳态运行, 频率越高导体表面电阻越大, 损耗越大, 而介质损耗将减小, 但介质损耗同导体损耗相比很小 (参见前面计算公式), 所以频率为 100 MHz , 将上述数值带入计算的公式得到结果为:

$$T_1 = -196.3r^2 + 2.29e^3 \ln(r) + 7.23e^3$$

$$T_2 = -9e^4 r^2 + 5.55e^3 \ln(r) + 1.745e^4$$

$$T_3 = -392.6r^2 + 0.982 \ln(r) + 289.0$$

这样最高温度出现在 r_4 处, 大小为 286 C , 实际使用中还会有风冷, 隔直段前后地冷却效果还会好于此处, 导体中的温度升高比 286 C 要低, 聚四氟乙烯的熔点为 320 C , 完全可以满足工作的需要。

外导体本身的导体损耗为 (100 MHz) 为 60 J/s , 介质损耗 4 J/s , 中间有风冷时, 外导体不会导致强烈的温度升高。

5 结 语

通过上面的分析计算, 采用隔直段长 0.5 m 长的分布电容结构的隔直器避免了谐振在使用范围内的出现, 导体及介质损耗所产生的热不会影响隔直器的正常工作, 完全可以满足离子回旋波加热系统的需要。

参 考 文 献

- [1] 廖承恩. 微波技术基础 [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1994.
- [2] Kumazawa Ryuhei, Mutoh Takashi, Seki Tetsuo, et al. Steady State Test at High RF Voltage on transmission System for Ion Cyclotron Heating, Journal of Plasma and Fusion Research Vol. 75. No. 7 (1999), pp. 842-853.

作者简介 李国超 男, 硕士研究生。从事离子回旋波加热系统研究。
毛玉周 男, 高级工程师。主要从事离子回旋波加热系统研究。
赵燕平 男, 研究员。主要从事离子回旋波加热机理及加热系统研究。
王 鹏 男, 博士研究生。主要从事离子回旋波加热系统研究。

书 讯

序号	书 名	作 者	使用对象	定价
1	网页动画制作—FLASH 快速入门	张行等	大中专院校师生及专业人员办班和辅导教材	16.60
2	电子商务应用实务教程	陆均良等	实务型通用工具书。各类大中专院校师生及科技人员均适用	26.00
3	最新计算机基础教程	张金莲等	大中专院校、职校及初学者计算机基础课培训教材	26.00
4	全国计算机等级考试一级教程 (2002 大纲) 一级 B (Windows 环境) 考前指导	姚瑞光等	计算机等级考试一级专用	21.00
5	全国计算机等级考试一级 (2002 大纲) 题解、模拟试题及习题集	邢苗条等	计算机等级考试一级专用	15.00
6	全国计算机等级考试二级教程 (2002 大纲) 基础知识与 FOXBASE+ 考前指导	江代有等	计算机等级考试二级专用	18.00
7	电子电路设计与制版 Protel 99 教程	高有堂等	从事电子线路设计的科技人员及大专院校的师生	25.00
8	可编程序控制器及工业控制网络	殷华文等	从事工业自动化及工控研究员及设计制造者	35.00
9	最新会计电算化教程	张崇中等	大中专院校师生及多类会计电算化培训班 (主讲用友软件)	18.00

地址: 西安市雁塔西路 158 号双鱼花园广场 B 座 1606 室 电话: 029-85393376 邮编: 710061