

EAST- ICRH 发射机宽频阻抗匹配网络的研究及实现

赵洪亮, 毛玉周, 陈 根

(中国科学院等离子体物理研究所十室, 合肥 230031)

摘要: EAST (Experimental Advanced Superconducting Tokamak) 是我国开展受控核聚变研究的一代实验装置, 离子回旋波加热(ICRH) 是在该装置中加热等离子体的重要手段之一。论文介绍了离子回旋发射机中阻抗匹配网络的原理及实现方法, 并采用 LabVIEW 软件和 PLC 相结合的方式开发了一套阻抗匹配网络调节系统。

关键词: 离子回旋波加热; 阻抗匹配; LabVIEW; PLC

中图分类号: TP273, TN81 **文献标识码:** A **文章编号:** 0258-0934(2010)01-0239-04

为了实现 EAST 装置的高参数和稳态运行, 需要高功率射频波能量, 以实现加热和驱动等离子体的目的。目前我所 ICRF 系统的主要技术指标中输出功率为 1.5MW, 频率范围为 30MHz- 110MHz。ICRF 系统主要由 5kW 固态功放, 150kW 放大器, 1.5MW 放大器和天线级联而成。在高功率射频发射级系统中, 各级放大器的输出阻抗都是 50 欧姆, 起连接作用的

同轴线的特性阻抗也是 50 欧姆, 而发射天线的输入阻抗一般视为一个实部为 3- 10 欧姆, 虚部是一个具有 400pF 电容效应的负载, 这就需要有一个阻抗匹配网络将发射机末级放大器与驱动级连接起来, 以实现末级放大器与驱动级的匹配。本文的目的就是要在工作频率为 30MHz- 110MHz 的范围内实现功率的无反射传输。

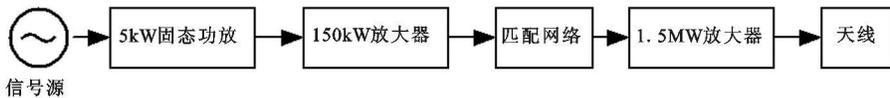


图1 ICRH 发射系统框图

1 方案的确定

1.1 阻抗匹配网络实现形式

单支节匹配操作方便, 但是要求支节与负

载之间距离连续可调, 在同轴线上不易实现; 三支节匹配比双支节匹配多一个支节, 增加了工程上具体实施的难度; 相比之下, 采用双支节匹配比较合适, 但是要克服其可能出现死区的缺点, 这就要求对所有可能出现的情况进行计算。

1.2 双支节的计算

在这里采用 A 矩阵的计算方法, A 矩阵特别适合于分析网络的级联情况, 克服了史密斯圆图和传输线输入阻抗公式的计算繁琐和灵活性差的缺点。如图 3 所示。运用 A 矩阵的级

收稿日期: 2008 12 23

基金项目: 国家自然科学基金委《利用离子波恩斯坦波抑制 MHD 的实验研究》(10675125)。

作者简介: 赵洪亮(1984), 男, 江苏无锡人, 中国科学院等离子体物理研究所硕士研究生, 从事托卡马克装置高功率离子回旋波发射机射频系统的研制。

连性,

$$[A] = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ j\bar{B}_1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & j\sin(\theta) \\ j\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ j\bar{B}_2 & 1 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} \cos(\theta) - \bar{B}_2\sin(\theta) & j\sin(\theta) \\ j[(\bar{B}_1 + \bar{B}_2)\cos(\theta) + (1 - \bar{B}_1\bar{B}_2)\sin(\theta)] & \cos(\theta) - \bar{B}_1\sin(\theta) \end{bmatrix}$$

$$\bar{Y}_{in} = \frac{A_{22}\bar{Y}_l + A_{21}}{A_{12}\bar{Y}_l + A_{11}} = 1 + j0 \text{ (匹配条件)}$$

其中 θ 是两个支节之间的电长度所对应的角度, \bar{B}_1, \bar{B}_2 分别是短路支节的归一化电纳值。这里, 就是要模拟两个支节之间取定归一化值以后, 同轴线 L 以 0.05 为一个步长变化时, 相应的 $1B$ 与 $1A$ 所对应的匹配长度。由于实际的需要, 我们对于支节的要求是 $1B$ 与 $1A$ 的长度最大不能超过 0.25 波长。注: 本文用的长度全是归一化的长度。

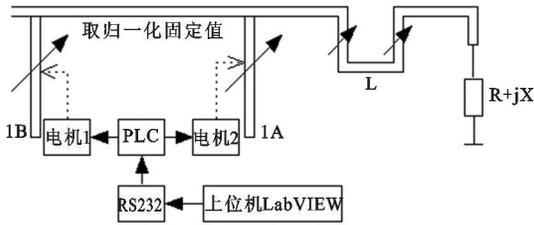


图2 匹配网络结构图

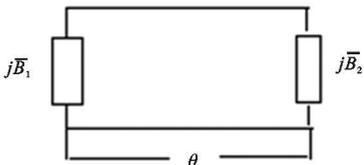


图3 计算原理图

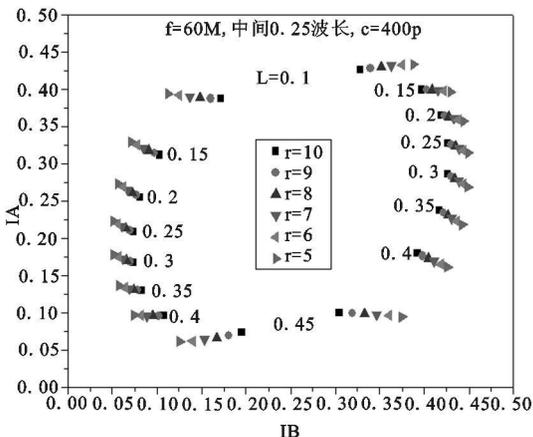


图4 60MHz 时双支节匹配点的分布

图4 是双支节之间取 0.25 波长, 频率为 60MHz 时的匹配点随 L 的分布, 图5 是阻抗实部为 7 欧姆, 频率为 30MHz 和 110MHz 时匹

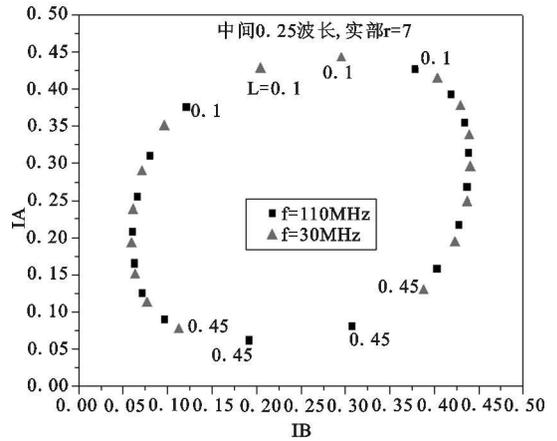


图5 30MHz 和 110MHz 匹配点的比较

配点随 L 的分布变化, 变化规律是 $L = 0.1$ 往下递减至 0.45。可以看出 (1) 对于同一个频率的图像 (即图 4) 来说 (负载的虚部相同), L 取 0.3 附近时对应的不同实部的点彼此靠得很近, 并且符合两支节实际调节长度的要求。(2) 对于不同的频率情况, 即图 5 (负载的虚部不同), 图像上相同的 L 值对应的匹配点的位置差异不太大, 但是当 L 取 0.1 和 0.45 时, 差异较大, 并且 $L = 0.1$ 时有些阻抗情况得不到匹配点。

因此, 如果允许有一定电压驻波比, $L = 0.3$ 的时候, 对于不同频率和不同阻抗实部的情况, 点的位置基本相同, 工程上认为基本达到阻抗匹配。在实际调节的时候只需要将归一化波长转化成实际的长度即可。

图6 是双支节之间取 0.125 和 0.25 波长, 频率为 30MHz 时, 匹配点随 L 变化的分布图, 变化规律是 $L = 0.1$ 往下递减至 0.45。比较可以看出, 0.125 波长分布的趋势与 0.25 波长差不多, 只是符合条件的点位置偏上。不同实部的点之间的距离较远, 满足两支节实际调节长度需求的情况也较少, 可选择的余地较少。

与纯电阻的情况 (无虚部) 相比较, L 取 0.1 与 0.45 时, 图像对应点的位置差异很大, 但是, 图的分布当中越往中间图像对应点的位置

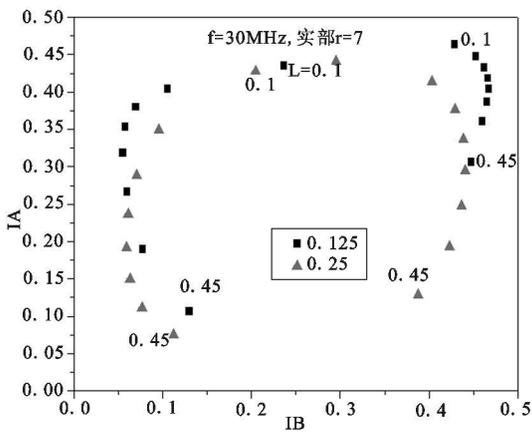


图 6 30MHz 中间 0.25 和 .125 波长时匹配点的分布

差异越小,与前面取 $L=0.3$ 的情况相似,这样对调节匹配有益。纯电阻的情况对于任何频率都一样(只有虚部才和频率有关)。

2 匹配网络结构

(1) PLC 与 LabVIEW 的结合,是工业控制系统中的一个较为理想的方案。本系统是支节调配控制,其上位机采用的是 LabVIEW 开发的控制系统软件;下位机利用 PLC 作为系统的硬件核心,对步进电机驱动进行控制。这里主要阐述下位系统主要硬件构成及程序控制。

可编程逻辑控制器 PLC (Programmable Logic Controller),具有很强的抗干扰能力,可以满足强电磁环境下的种种干扰,广泛应用于各种控制设备中。

步进电动机用作执行元件,把所收到的电信号转换成电动机轴上的角位移和一定的角速度输出。

(2) 网络组成见图 2。由于系统工作在强电磁环境下,因此控制器采用西门子 S7-200 系列的 PLC;本课题选用 S7-224PLC,它有 14 个输入点,10 个输出点,能够提供电机转动所需要的高速脉冲,电机转过的角度可以由 PLC 产生的脉冲数决定,电机的转速由每个脉冲周期的大小决定,而电机的转动方向可以由 PLC 输出继电器产生一个控制信号来决定。

上位机采用 LabVIEW 软件,利用自由口通信方式与 PLC 取得数据的传递。

电机采用的是北京和利时电机技术有限公司生产的 86BYG350CH 步进电机和 SH-32206 电机驱动器,电机的转矩为 7N.m。该

驱动器具有 16 种细分模式,这里使用其 400 步/转的细分模式。

本课题的直接控制对象为双支节调配的丝杠,由步进电机带动其旋转,从而推动短路支节前后移动。由于电机的力矩足够大,要求的转速也不快,所以电机一般不会出现失步的情况。上位机记下初始位置后,可由脉冲数精确计算出转动后的位置。

由于是对两个支节进行控制,因而 PLC 利用 S7-200 的脉冲输出指令(PLS)用于在高速输出点(Q0.0 和 Q0.1)上实现脉冲串输出(PTO)。步进电机需要脉冲和方向控制两个信号才能工作,这里采用 Q0.0 和 Q0.2 分别与电机控制器的脉冲和方向输入相对应,同理 Q0.1 和 Q0.3 与第 2 个步进电机的控制器相对应。其中,正反方向由高低电平决定。

3 程序控制

PLC 的程序在 WINDOWS 系统下通过编程软件 STEP 7- Micro/ WIN 编写的,然后将其下载到 PLC 中,使其运行。在用户程序执行阶段,PLC 总是按由上而下的顺序依次地扫描用户程序,在每个扫描周期,系统都要顺序执行程序,过程如下:

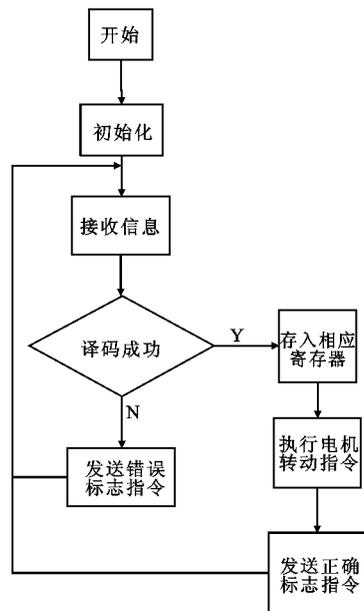


图 7 PLC 程序流程

(1) 初始化: PLC 的初始化程序包括对自由口通信时必须的特殊寄存器(SM)的赋值操作,主要是配置通信口的通信参数数据位、波特率、起止字符等。如 SM88 和 SM89 分别是检

测信息的开始和结束字符;对 SM87 的赋值主要是定义自由口协议;SMW92 是信息间的定时器;并且将中断事件 23(PORT0 接收完成),9(PORT0 发送字符)与 receivecom 和 xmtcom 两个程序相关联,以备在中断事件发生的时候调用。

(2)接收 LabVIEW 发送的信息时,将信息放到由 VB100 开头的接收缓冲区。紧接着,调用中断程序 receivecom,其主要任务是将数据转入译码区,以便接收缓冲区接收新的数据。

(3)对译码区的数据,进行 bcc 码的校验过程,然后对发送缓冲区写入必要的的数据,即字符数,起始字符,状态信息,数据,结束字符,并将该信息发送给上位机。其中,上位机中的 LabVIEW 主要就是通过状态信息来判断信息的接收过程是否正常。如果不正常,LabVIEW 重新发送信息。其中,PLC 接收到的和发送的信息的格式都是由 PLC 的指令集提供的。

LabVIEW 软件是一种数据流文件,其相关节点的执行取决于必要的的数据是否都已存在,存在的话就可以执行,因此它的运行方式是并行执行,这一点和大多数语言的顺序执行不同。在给 PLC 发送信息的过程中,由于 PLC 的程序运行是顺序执行的,因而 LabVIEW 不能把信息同时发送出去,必须采用顺序事件结构,即发送信息给 PLC 并且收到 PLC 回复的正确信息后才进行下一个信息的发送。

对于两个电机的控制,主要是将 Lab-

VIEW 通过写入 PLC 中不同的寄存器,再将这些寄存器中的数据赋值给相应的 SM 特殊寄存器来实现的。其中 SMW68 和 SMD72 分别是 PTO 0 的脉冲周期数和脉冲个数,SMW78 和 SMD82 分别是 PTO 1 的脉冲周期数和脉冲个数,所以,等 PLC 将脉冲数,脉冲周期和正反转信息同时接收到以后,直接运行脉冲输出指令(PLS),则可以驱动电机运转。

4 系统的测试结果:

从定位精度上来看,步进电机控制器的细分设置是 400 步/转,即 0.9 度/步。而丝杠每圈前进或后退 2.4mm,所以每个脉冲的精度是 0.006mm。即使当 PLC 或者步进电机控制器运行时由于外界的种种干扰致使电机减少了对少量的脉冲的响应,其影响也非常小,可以忽略。如果误差过大,还可以重新设置步进电机控制器的细分模式,共 16 种选择,最小 400 步/转,最大 30000 步/转。因此精度的要求完全可以达到。

参考文献:

- [1] 廖承恩.微波技术基础[M].陕西:西安电子科技大学出版社,1994.
- [2] 西门子有限公司, SIMATIC, S7-200 系统手册[Z].2003.
- [3] 杨乐平,李海涛,杨磊. LabVIEW 程序设计与应用[M].北京:电子工业出版社,2007.

The Research and Implementation of Impedance Matching Networks in EAST-ICRH Transmitter

ZHAO Hong-liang, MAO Yu-zhou, CHEN Gen

(Institute of Chinese Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, 230031, China)

Abstract: EAST (Experimental Advanced Superconducting Tokamak) is a new kind of equipment for doing controlled fusion research in China, where ICRH is an important way of heating plasma. The principle of matching and how to complete are introduced in the paper. The system of impedance matching is constructed by the way of using the software LabVIEW and PLC (Programmable Logic Controller).

Key words: ICRH, impedance matching, LabVIEW, PLC