

离子回旋共振加热天线阻抗测量系统设计

曾现祥, 赵燕平, 刘大明

(中科院等离子体物理研究所, 安徽合肥 230031)

摘要: 为了监测 HT-7 托卡马克离子回旋共振加热 (ICRH) 实验过程中天线阻抗的变化情况, 采用传输线探针方法, 设计了一套基于虚拟仪器技术的天线阻抗自动测量系统; 阐述了该系统的工作原理、设计方案和硬件、软件实现方法; 详细介绍了高频信号处理电路部分和系统软件的设计与开发; 测试结果表明, 整个系统稳定可靠, 界面友好, 满足实验要求。

关键词: 离子回旋; 天线; 阻抗测量; 虚拟仪器; LabVIEW

Design of Ion Cyclotron Resonant Heating Antenna Impedance Measurement System

Zeng Xianxiang, Zhao Yanping, Liu Daming

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

Abstract: In order to study variety of antenna impedance in ICRH experiment on HT-7 Tokamak, measurement system based on virtual instrument technology has been developed. It adopts the method of probes on transmission line. The system principle, design and realization of the hardware and the software are presented. The details about design of RF signal processing circuit and system software are given. In the test, the system is characterized by good GUI, reliability and stability.

Key words: ICRH; antenna; impedance measurement; virtual instruments; LabVIEW

0 引言

离子回旋共振加热 (Ion cyclotron resonant heating, 简称 ICRH) 系统主要由高频发射机, 同轴传输线, 阻抗匹配装置和天线 (称为 ICRH 天线) 组成^[1], 天线是其中的关键部件。研究表明, ICRH 天线输入阻抗很低, 其电阻分量在几欧姆左右, 而高频发射机和同轴传输线的特性阻抗为几十欧姆。而且, 在等离子体放电期间, ICRH 天线的输入阻抗随等离子体参数的变化而变化^[2], 这不仅影响波与等离子体的耦合效率, 还影响波与传输系统的匹配特性。为了提高波与等离子体的耦合效率以及改善波与传输系统的匹配状况, 必须详细了解等离子体放电期间的 ICRH 天线阻抗。以前的离子回旋共振加热实验中采用网络分析仪只能对 ICRH 天线阻抗进行静态空载测量 (即无等离子体情况下的静态天线阻抗测量), 不能实现等离子体放电期间的天线阻抗动态测量, 本文采用虚拟仪器技术设计了 ICRH 天线阻抗自动测量系统。

虚拟仪器是计算机与测试技术相结合的产物。与传统的测量仪器相比, 具有节约成本、可靠性强、使用灵活、测控兼备等优点^[3]。通过在 ICRH 天线阻抗测量系统中采用虚拟仪器技术, 不仅能够减少测试仪器的使用, 实现测量的自动化, 而且能使系统设计更简单、更灵活、扩展性更强。利用 LabVIEW^[4] 虚拟仪器开发软件, 能够缩短系统软件的开发周期, 提高系统整体水平。

1 系统工作原理

ICRH 天线阻抗测量采用传输线探针法^[5-6]: 即采集传输线上任意三个探针电压, 由传输线理论计算而得到天线阻抗, 原理如图 1 所示。

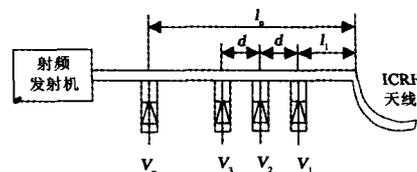


图 1 探针法 ICRH 天线阻抗测量原理图

假设采集所用三个探针到 ICRH 天线的距离分别为 l_1, l_2, l_3 , 相邻探针的距离均为 d , 采集得到的三个探针电压分别为 V_1, V_2, V_3 , 三个探针的耦合系数分别为 k_1, k_2, k_3 , 并假设射频传输线为无耗传输线, 即 $\gamma = j\beta$, 其中相位常数 $\beta = \frac{2\pi * f}{c}$ 由射频波频率决定。假设 ICRH 天线阻抗为 $Z_L = R + jX$, 根据无耗传输线上电压分布函数 $V(d) = V_L (\cos\beta d + j \frac{Z_L}{Z_0} \sin\beta d)$, 可得到三个探针电压方程组, 通过求解计算, 即可得到 ICRH 天线阻抗。

其中, 探针耦合系数的准确标定对测量结果影响很大, 采用的是静态空载匹配的标定办法。即在无等离子体的情况下, 在传输线上加载射频波并使整个传输系统达到匹配状态, 根据射频发射机的输出功率 P 和传输线的特性阻抗 Z_0 , 可得计算得到传输线上的分布电压 U_0 (匹配状态下传输线上电压处处相等), 再由测得的每个探针电压 V_i , 即可得到每个探针的耦合系数。

收稿日期: 2005-10-12; 修回日期: 2005-11-26。

作者简介: 曾现祥 (1981-), 男, 河南省正阳县人, 硕士研究生, 主要从事离子回旋共振加热 (ICRH) 天线的阻抗测量和调配控制的研究。

2 系统结构和硬件设计

2.1 ICRH 天线简介

HT-7 托卡马克装置中的 ICRH 天线结构比较特殊, 是一个置于法拉第屏蔽内的具有环形结构的单匝线圈, 结构如图 2 所示。主要辐射单元为两个长约 50 cm, 宽约 7 cm 的垂直放置的电流带状导体, 并通过 50 Ω 的同轴线馈电。整个天线结构置于 HT-7 托卡马克真空室内 (低磁场侧), 并可在水平方向移动 (8 cm), 以提高天线与等离子体的耦合效率^[1]。

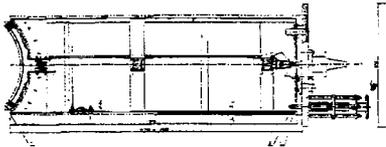


图 2 ICRH 天线结构图

2.2 系统结构和硬件组成

ICRH 天线阻抗测量系统完成 HT-7 托卡马克放电期间 ICRH 天线阻抗的自动测量、数据存储、数据显示和报警提示等功能, 包括硬件系统和软件系统两个部分, 整个系统框图如图 3 所示。

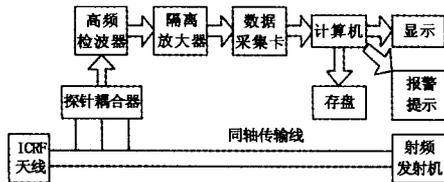


图 3 ICRH 天线阻抗测量系统框图

系统硬件主要由探针耦合器、高频检波器、隔离放大器、数据采集卡、计算机等组成。当同轴传输线上加载射频波时, 根据电容耦合原理, 探针耦合器从同轴传输线中耦合出高频电压信号, 经高频检波器整流滤波后转化为直流电压信号, 再经隔离放大器放大, 数据采集卡将信号进行 A/D 转换后, 送给系统程序, 进行数据处理和计算, 同时将采集数据进行存储, 并实时显示和报警提示。

本系统采用凌华 (ADLINK) 公司的 PCI-9111HR 多功能采集卡。16 通道, 16 位分辨率, 最高采样率 100 kS/s, 满足实际采样速度和精度要求。这种数据采集卡基于 32 位 PCI 总线技术, 即插即用, 输入配置灵活, 操作简单, 并且支持 LabVIEW 软件, 能够简化系统软件设计, 缩短软件开发周期。

2.3 高频检波电路设计

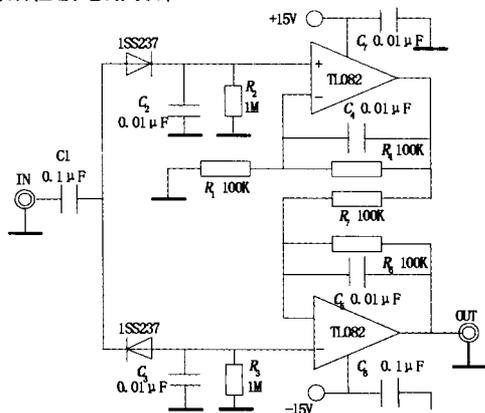


图 4 由运算放大器 TL082 组成的高频有源检波器

在信号采集处理过程中, 耦合器和隔离放大器以及数据采集卡都容易做到线性化, 而检波器部分因为二极管的导通电压不为零, 有一部分为非线性区域, 因此, 检波器的线性设计就显得非常重要。根据系统要求, 设计了一种由运算放大器 TL082 组成的高频有源检波电路, 如图 3 所示。

该检波电路主要由输入电路、检波器和运算放大器组成。该电路对输入的高频信号正负半周分别检波, 再由运算放大器将检波电压相加变成直流信号, 克服了普通检波器仅使用二极管检波时导线分布电容的影响, 从而使检波后的电压更为准确。

在系统工作所用射频范围输入信号下, 对该有源检波电路进行测试, 得到该检波器在不同频率下的特性曲线如图 5 所示, 表明该检波器在此频率范围的检波性能很好。

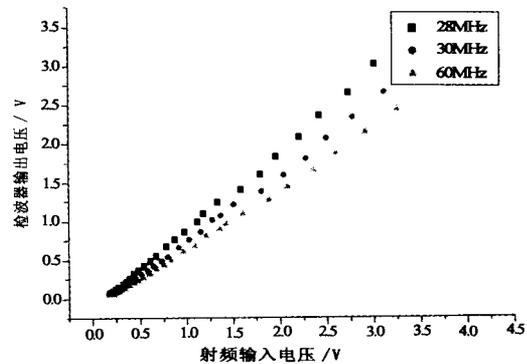


图 5 检波器特性曲线图

2.4 抗干扰措施

由于现场距离采集计算机有一段距离, 且现场周围环境存在较大的电磁干扰, 为了提高采集系统的抗干扰能力, 采取了以下措施: 在探针耦合器周围加上屏蔽盒, 隔离来自现场其他设备的高频电磁辐射干扰; 使用屏蔽电缆作为信号传输线, 消除信号传输过程中空间的电磁波干扰; 并在采集系统终端使用隔离放大器, 对被测信号和数据采集系统予以隔离, 降低被测信号的共模干扰。

3 系统软件设计

系统软件采用 NI 公司的图形化虚拟仪器开发软件 LabVIEW 7.0^[4] 进行设计, LabVIEW 软件以简单直观的图形编程方式, 众多源码级的设备驱动程序, 丰富实用的仪器控制、数据分析、数据存储和数据显示功能函数库, 使用户能快速地构建自己的测量仪器或测量仪器系统, 并且支持网络功能, 能够实现远程测量和控制。系统软件采用模块化设计思想, 将整个系统软件分为模式选择、参数设置、数据采集、阻抗计算、数据存储、数据显示以及报警提示等程序模块, 软件流程如图 6 所示。

各部分功能如下:

初始参数设置: 程序开始前进行采集模式、采样参数、采样时间、探针参数、报警提示参数、炮号获取 IP 地址和端口号、文件保存目录等的设置。

监测触发信号: 程序开始处于等待触发状态, 如果收到总控触发信号, 程序自动进行探针电压的采集、天线阻抗的计算, 同时进行数据存盘和显示, 否则继续等待触发。

采集是否结束: 根据初始设定的采样时间, 如果已经到了

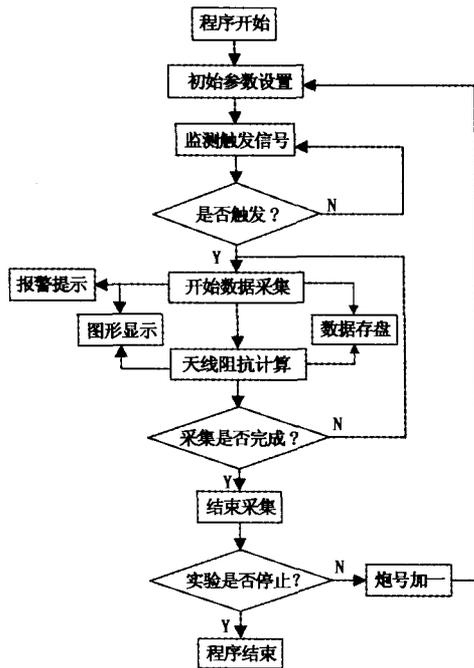


图 6 系统软件流程图

达, 程序自动结束本次数据采集, 等待下一次触发, 否则继续进行本次电压采集和阻抗计算。

实验是否停止: 如果实验过程中不出现特殊情况, 实验继续进行, 程序自动进入下一次循环, 否则可以人工结束程序运行。

3.1 探针电压采集程序

目前, HT-7 托卡马克工作模式为稳态长脉冲放电, 放电时间最高已达上百秒, 放电间隔大约为几分钟, 各子系统在总控的触发信号下统一协调工作。为了测量等离子体放电期间 ICRH 天线阻抗的变化情况, 本文的探针电压采集程序也是基于这种触发模式开发的, 并提供了模拟触发和炮号触发两种工作方式。

为了扩展程序性能, 采集程序提供了人工和自动两种采集模式。在自动采集模式下, 程序不断监测触发信号, 若触发开始, 则程序自动进行信号采集、处理、存储和显示。完成设定时间长度的采集后, 结束本次采集, 然后继续监测触发信号, 等待下一次实验开始。在人工采集模式下, 可以任意时刻开始、暂停或者结束对被测信号的采集。前一种模式适合短脉冲放电期间的探针电压采集, 后一种模式适合长脉冲放电情况下探针电压采集。

在数据采集的过程中, 通过 LabVIEW 的 TCI/IP 网络协议模块从总控获取实验炮号, 并将采集数据以炮号作为文件名进行自动存储, 同时在前面板图形进行显示, 如果超过指定界限, 则会发出声音和显示报警, 提示实验人员采取相应措施。

3.2 ICRH 天线阻抗计算程序

根据采集到的传输线上探针电压, 即可计算得到 ICRH 天线阻抗。由于计算过程比较复杂, 不便直接利用 LabVIEW 的图形模块进行连线编程, 而是采用了 LabVIEW 提供的代码接口节点 CIN (Code Interface Node) 功能。它是 LabVIEW 调用 C 语言的接口, 用户将需要调用的 C 代码编译成 LabVIEW 所能识别的代码格式 (. lsb 文件) 后和此节点相连, 当程序

执行到此节点时, 将会自动调用与此节点相关联的外部代码, 并向 CIN 传递特定的数据结构, 而且通常情况下, 使用 CIN 可获得较高的程序效率, 因为 LabVIEW 中数据的存储格式遵循了 C 语言的数据存储格式, 二者完全相同^[7]。

ICRH 天线阻抗计算程序用 C 语言编写, 在 VC++ 6.0 下编译调试, 然后装入 LabVIEW 的 CIN 节点, 运行效果很好。ICRH 天线阻抗计算程序同其它模块程序一起, 构成了整个 ICRH 天线阻抗测量系统软件, 测试结果如图 7 所示。

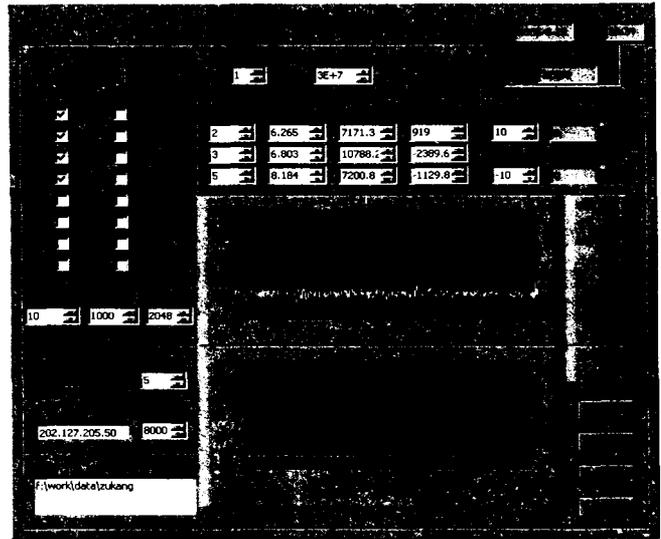


图 7 系统软件测试结果图

4 结果与讨论

本文所述的该套系统已经完成设计和模拟测试, 取得了很好的运行效果, 且具有稳定可靠, 界面友好, 易于操作和扩展等特点。本系统将在下一轮 HT-7 托卡马克离子回旋共振加热实验中投入使用, 以实现托卡马克放电期间 ICRH 天线阻抗的自动测量, 这为研究等离子体放电期间天线阻抗变化提供可靠依据, 也为天线阻抗匹配提供参数。

参考文献:

- [1] Yang X K, Wang Z S, Zhao Y P et al. ICRH system for HT-7 superconducting Tokamak [J]. Fusion Engineering and Design, 1998, 30-40; 129-133.
- [2] Qin C M, Zhao Y P, et al. Design of a new type of stub tuner in ICRH experiment [J]. Plasma Science & Technology, 2003, 5 (3): 1779-1784.
- [3] 卢敬军, 唐厚君. 基于虚拟仪器的变频器测试系统 [J]. 计算机测量与控制, 2005, 13 (5): 418-420.
- [4] 雷振山. LabVIEW 7.0 实用技术教程 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 2005.
- [5] 王兆申, 王亚民, 许德政. 离子回旋共振加热实验中用于瞬态射频阻抗测量的探针阵列的误差分析 [R]. 中国核科技报告, 北京: 原子能出版社, 1988.
- [6] 李俊, 赵燕平, 陈湘波. ICRF 天线阻抗测量和调配系统的设计和实现 [J]. 微计算机信息, 2001, 7 (9): 27-28.
- [7] 李俊, 陈湘波. LabVIEW 与 C 语言的混合编程 [J]. 自动化与仪器仪表, 2001, 5: 62-64.