

EAST – ICRF 天线阻抗及传输线 驻波电压的测量

郑高伟,毛玉周,赵燕平,陈根,郑芬,何钟鑫

(中国科学院等离子体物理研究所,合肥 230031)

摘要:为准确测量等离子体放电期间离子回旋加热天线输入阻抗以及同轴传输线的驻波电压和电流,建立了基于探针阵列、LabVIEW 数据采集及分析的天线阻抗测量系统;采用非线性曲线拟合的方法计算天线输入阻抗及驻波电压、电流和输入功率;将计算结果与定向耦合器的测量数据进行对比,验证阻抗测量的精度。

关键词:天线阻抗;驻波电压;测量;非线性曲线拟合

中图分类号: TL 62 + 4 **文献标志码:** A **文章编号:** 0258-0934(2013)02-0135-06

EAST 超导托克马克是我国开展受控热核聚变研究的新一代实验装置。受控热核聚变研究中采用多种加热手段提高等离子体能量,其中离子回旋(ICRF) 加热方法是最有前途的加热手段之一。离子回旋加热系统主要由高频发射机、同轴传输线、三支节液态调配器和天线(ICRF 天线)组成^[1];等离子体放电期间,ICRF 天线作为发射机的负载使用。实践表明,微波在天线端的反射非常大而且等离子体放电期间天线的输入阻抗随等离子体状态改变而改变^[2],为了提高波与等离子体的耦合效率、改善传输线之间的匹配状况,通常在 ICRF 天线与发射机之间加一个三支节液态调配器。因此准确测量天线端阻抗及传输线之间的行驻波电压分布,可以为今后快速匹配做基础;同时利用测得的驻波电压分布可以方便建立电压保护系统。

收稿日期:2012 - 02 - 08

基金项目:国家磁约束核聚变能研究专项(2010GB110000)和中科院知识创新工程(Y05FCQ1126、Y05FCQ0126)。

作者简介:郑高伟(1984 -),男,河北人,硕士研究生,研究方向:微波工程。

1 基本原理

1.1 传输线电压、电流,天线输入阻抗及入射功率的计算原理

ICRF 加热系统的原理如图 1 所示。根据图 1 测量天线输入阻抗(以下简称天线阻抗)及行驻波电压(发射机与天线之间的同轴传输线直径 $\phi = 230 \text{ cm}$,特征阻抗 $Z_c = 50 \Omega$),探针阵列位于天线与调配器之间,由于天线端反射很大(图 1 中 l_1 段),所以驻波比较大。

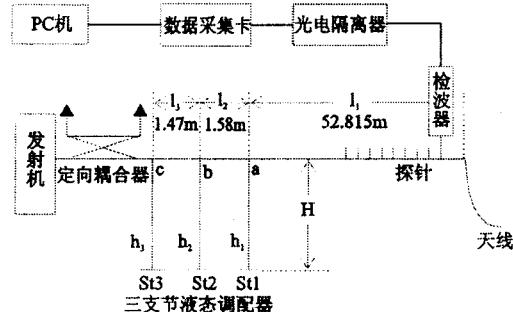


图 1 ICRH 加热系统原理图

根据微波传输线理论^[3](若无提示,则坐标以天线为原点 z 轴指向发射机方向),如果传输线终端不匹配,那么传输线中的微波由入射波与反射波叠加而成,线上任意位置的电压

$|U(z)|$ 和电流 $|I(z)|$ 即可写为:

$$|U(z)| = |U^+(0)| \sqrt{1 + |\Gamma(0)|^2 + 2|\Gamma(0)| \cos(2\beta z - \varphi_\Gamma)}; \quad (1)$$

$$|I(z)| = |I^+(0)| \sqrt{1 + |\Gamma(0)|^2 - 2|\Gamma(0)| \cos(2\beta z - \varphi_\Gamma)}. \quad (2)$$

式中: $I^+(0) = U^+(0)/z_c$, 相位常数 $\beta = 2\pi f/c$ 。则传输线任意位置电流:

$$|I(z)| = \left| \frac{U^+(0)}{z_c} \right| \sqrt{1 + |\Gamma(0)|^2 - 2|\Gamma(0)| \cos(2\beta z - \varphi_\Gamma)}. \quad (3)$$

理论上, 对已知频率的电磁波, 只要测出 3 个不同位置 z_1, z_2, z_3 以及对应的电压 $U(z_1), U(z_2), U(z_3)$, 建立 3 个方程组:

$$|U(z_1)| = |U^+(0)| \sqrt{1 + |\Gamma(0)|^2 + 2|\Gamma(0)| \cos(2\beta z_1 - \varphi_\Gamma)}; \quad (4)$$

$$|U(z_2)| = |U^+(0)| \sqrt{1 + |\Gamma(0)|^2 + 2|\Gamma(0)| \cos(2\beta z_2 - \varphi_\Gamma)}; \quad (5)$$

$$|U(z_3)| = |U^+(0)| \sqrt{1 + |\Gamma(0)|^2 + 2|\Gamma(0)| \cos(2\beta z_3 - \varphi_\Gamma)}. \quad (6)$$

解方程组可以得到 $U^+(0), \Gamma(0), \varphi_\Gamma$ 3 个未知数, 进而推算出阻抗、电压、电流及入射功率^[4-5]; 但是实际工作中存在诸多干扰和误差, 导致测量数据不够精确。

为了提高测量准确性及工程可行性, 本实验在天线附近等间隔放置 12 个电压探针, 分别测出对应的电压值, 采用非线性曲线拟合的方法(以下简称拟合), 利用式(1)拟合计算出 3 个未知数 $|U^+(0)|, |\Gamma(0)|, \varphi_\Gamma$, 进而可以计算出传输线上电压分布电流分布, 再根据 $\Gamma(z) = |\Gamma(0)| e^{j\varphi_\Gamma} e^{-2\beta z}$ 计算传输线任意位置 z 处的反射系数, 则可以计算任意位置的阻抗; 当 $z = 0$ 时, 得到天线端阻抗 Z_L 。

$$Z_L = \frac{U(0)}{I(0)} = z_c \frac{1 + \Gamma(0)}{1 - \Gamma(0)}. \quad (7)$$

根据拟合参数, 得到传输功率:

$$P = \frac{|U^+(0)|^2}{2z_c} (1 - |\Gamma|^2). \quad (8)$$

综上所述, 可以计算出传输线上的电压、电流、天线的输入阻抗及输入功率。

此外, 根据传输线理论可知, 已知终端阻抗的传输线阻抗变换公式为:

$$Z_{in} = \frac{U(z)}{I(z)} = z_c \frac{Z_L + jz_c \tan(\beta z)}{z_c + jZ_L \tan(\beta z)}. \quad (9)$$

1.2 利用天线阻抗计算 3 支节调配器前端的功率反射系数

如图 1 所示, l_1, l_2, l_3 分别为天线到液态调配器前端的 3 段传输线长度; h_1, h_2, h_3 分别为 St1, St2, St3 3 个枝节的油面高度; H 为枝节的总高度。设 jb_1, jb_2, jb_3 分别为对应短路枝节的导纳, 以 St1 枝节为例, 计算枝节导纳时可以把短路枝节看作高度为 h_1 的终端短路传输线(介质为硅油)和长度为 $H - h_1$ 的阻抗变换(介质为空气)两部分的组合, 得到枝节端口处导纳^[5]:

$$jb_1 = j \frac{\tan(\beta_1 h_1) \tan[\beta(H - h_1)] - \sqrt{\epsilon_r}}{50[\tan(\beta_1 h_1) + \sqrt{\epsilon_r} \tan[\beta(H - h_1)]]}. \quad (10)$$

式中: $\beta = 2\pi f/c$; $\beta_1 = 2\pi f \sqrt{\epsilon_r}/c$ 。

若天线端阻抗为 Z_L , 变换长度为 l_1 , 则根据公式(9)得到 $Z_a(l_1)$ 为距天线 l_1 处(即从 a 点向右侧看)的阻抗。根据公式(10)得到 St1 的导纳 jb_1 , 则 a 点左侧的导纳 $Y'_a = Y_a(l_1) + jb_1$, 其中 $Y_a(l_1) = 1/Z_a(l_1)$; 得到 St1 之后的阻抗 $Z'_a = 1/Y'_a$ 。同理根据 l_2, l_3, h_2, h_3, H 可以计算得到调配器前端(即 c 点向后看)的阻抗。计算电压反射系数 $|\Gamma|$, 将其平方与定向耦合器测得的功率反射系数进行对比验证。

2 系统结构

2.1 探针结构

利用探针测量各点对应的电压, 如图 2 所示。

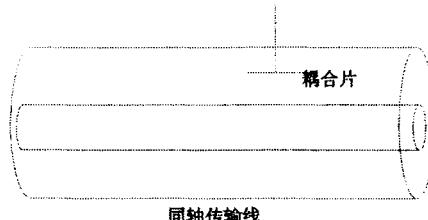


图 2 探针结构示意图

采用电容耦合方式从同轴线耦合出一部分

微波电压信号 V_n^* , 利用探针的耦合系数 C (微波矢量网络分析仪测得 $C = 10 \log \frac{P_{out}}{P_{in}} = 20 \log \frac{V_n^*}{V_n}$), 进而计算求得 $V_n = \frac{V_n^*}{10^{C/20}}$ 。根据耦合系数, 利用探针端口的微波电压信号, 计算传输线内电压值。

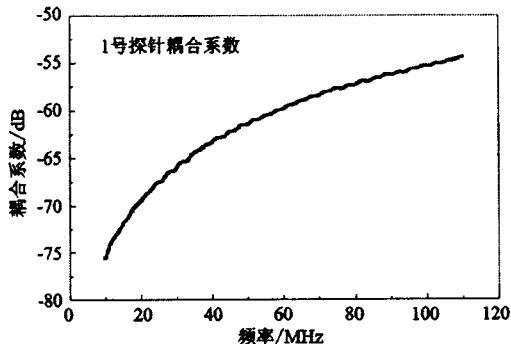


图3 椭合系数随频率的变化

2.2 高频检波器结构

图4为无源高频检波器电路图。

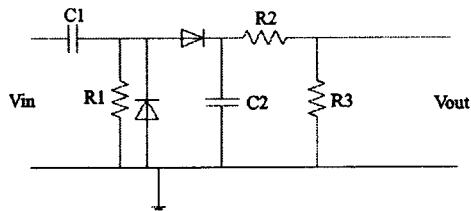


图4 无源高频检波器电路图

从探针耦合出来的微波信号经过检波器后变为直流电压信号, 通过测量输入微波信号与输出的直流电压信号, 对检波器各频率点进行定标, 测出输入输出关系, 采用最小二乘法进行三次多项式拟合, 找出对应关系; 对检波器输出电压进行测量, 间接得到检波器的输入峰峰值电压; 再通过探针耦合系数 C , 最终得到同轴传输线电压。图5为1号检波器在27 MHz输入峰峰值电压与输出直流电压关系曲线, 由此可计算出探针口的微波信号的峰值电压。

3 长度参数修正

由于每段同轴传输线之间均有一对厚度为3 cm聚四氟乙烯法兰盘支撑, 而支撑所在的这段传输线相当于介质为聚四氟乙烯的同轴传输线, 其传播系数比空气介质传播系数大, 理论计算时需要等效成介质为空气的直线同轴传输线。另外每个转弯处均有一个直角弯头, 弯头

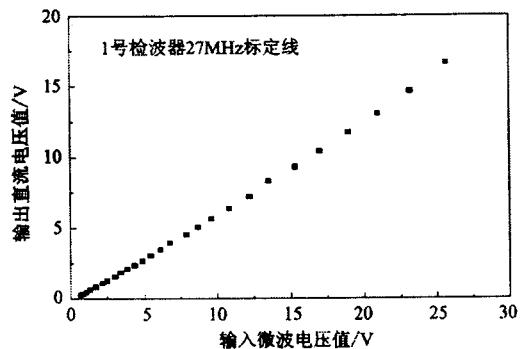


图5 检波器输入输出电压

存在使得微波传输的等效长度与测得的结构长度不相等, 因此利用传输线长度进行匹配模型计算时, 需要利用矢量网络分析仪对传输线长度进行修正。

3.1 传输线长度修正

直角弯头中心线的结构长度为0.5 m, 但是由于直角的存在, 微波电长度并不是严格等于0.5 m, 本实验利用矢量网络分析仪测出直角弯头的等效长度, 测量原理如图6所示。

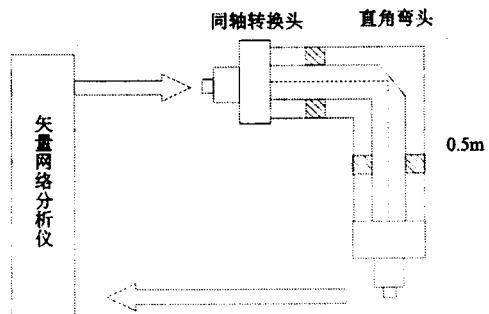


图6 弯头电长度测量原理图

若以波源为坐标原点, 则沿Z轴传播的行波电压为 $U(z) = U^+(0)e^{-j\beta z}$; 矢量网络分析仪接收端口的相位 $\varphi = -\beta z$, 设弯头的等效长度为 l , 则接收端的相位 $\varphi = -2\pi fl/c = kf$, 其中 $k = -2\pi l/c$ 。通过矢量网络分析仪扫频测定直角弯头的相位随频率的变化关系, 求出斜率 k , 进而得到等效长度 $l = -ck/2\pi$ 。利用相同原理也可以测得聚四氟乙烯支撑对长度的影响。测量步骤如下: 将2个转换接头相连接, 测出转换接头的等效长度 l_0 ; 待测器件两端与转换接头相连接, 根据相同原理测出此时的等效长度 l_1 , 则器件的等效长度 $l_2 = l_1 - l_0$ 。设器件的结构长度为 l , 则修正电长度 $\Delta l = l_2 - l$ 。

图7为直角弯头的频率—相位图。按照上述步骤测出的弯头及聚四氟乙烯支撑对长度的影响, 同时, 为了进一步验证测量结果的正确

性,利用 HFSS 软件进行仿真计算,结果如表 1 所示。

对比表 1 数据可知,直角弯头等效为直线长度时为 45.7 cm,而不是 50 cm;在直线传输线每增加一个厚度为 3 cm 聚四氟乙烯支撑,传输线等效长度增加 1.15 cm。

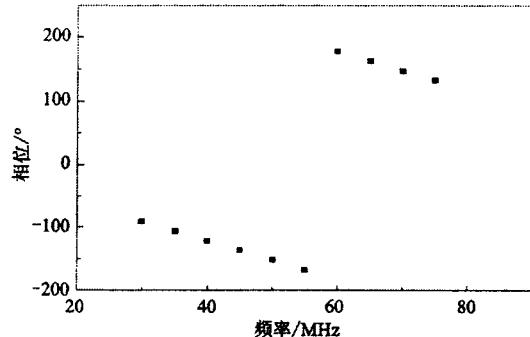


图 7 直角弯头的相位 - 频率图

表 1 直角弯头及四氟支撑的修正长度

	实际长度(厚度)/cm	等效长度/cm	测量结果 Δl /cm	HFSS 仿真结果 Δl /cm
直角弯头	50	45.7	-4.3	-4.5
聚四氟乙烯支撑	3	4.15	1.15	1.3

3.2 液态调配器枝节的总高度修正

理想的点连接情况下得到短路枝节导纳计算公式(10),但实际的 T 型连接并不是理想点连接(图 8(a)),短路枝节的内导体与横向传输线内导体相连接,导致短路枝节的内导体比外导体长。建立 HFSS 仿真模型(图 8(a)),同

时按照导纳公式(10)(式中 $H = 5.81$ m 为短路枝节底部至横向内导体中心的高度)计算得到阻抗虚部随高度变化情况如图 8(b)所示。从图 8(b)中可以看出,两者趋势一致,但公式计算得到的结果小于仿真结果。

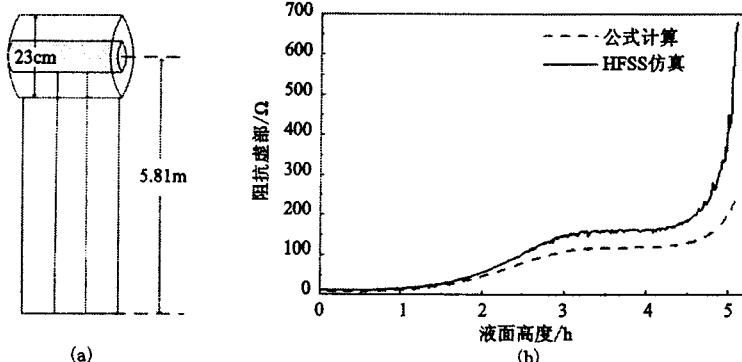


图 8 短路枝节 T 型连接(a)示意图,(b)阻抗 - 高度图

然而,当短路枝节内外导体高度相同时,两条曲线完全重合。为了减小公式计算误差,实验中采用修正短路枝节总高度 H 使公式计算的阻抗与仿真的阻抗相同(结果如图 9)。依据实际结构建模,利用 HFSS 仿真计算出导纳随高度 h 变化的数据,再根据公式(10)拟合出最佳总高度 H (H 看做变量拟合)。在频率为 27 MHz 下高度由 5.81 m 修正为 $H = 5.9452$ m,即:当高度 $H = 5.9452$ m 时,公式计算得到短路枝节阻抗与 HFSS 仿真结果重合。因此,采用三支节液态调配器模型(图 1),利用修正后的传输线长度参数,经公式计算可以更准确地

得到调配器与发射机端的反射系数。

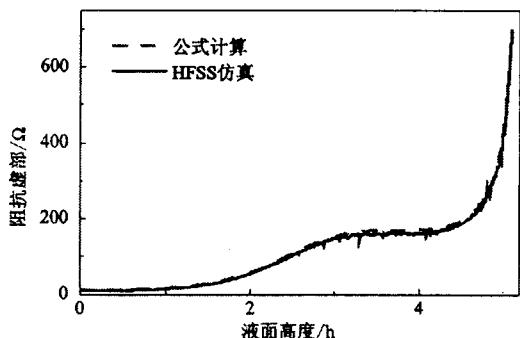


图 9 修正高度 H 后阻抗 - 高度图

4 系统软件设计

系统软件采用美国 NI 公司的图形化编程虚拟仪器开发软件 LabVIEW 进行设计, 软件分两部分。图 10 所示采集及计算界面部分的 5 个数据显示窗口依次显示采集各通道电压信号随时间变化、天线输入阻抗随时间变化、电压在传输线上的分布、电流在传输线上的分布以及传输线阻抗沿传输线变换; 界面右下角数据显示电压驻波比和入射功率等。图 10 中左端是天线端即坐标原点位置, 传输线上探针测得的电压与计算电压非常吻合(从下向上第 3 个波形窗口), 且电压最低点、电流最高点、阻抗虚部零点、实部最小点在同一位置。

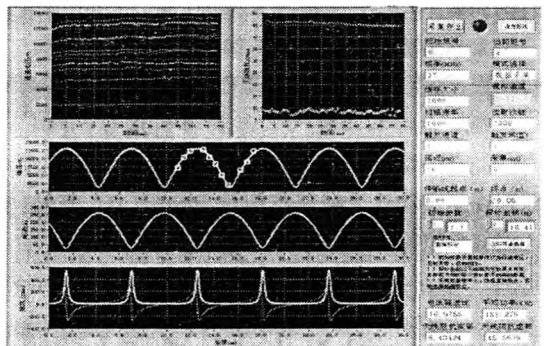


图 10 采集计算界面

图 11 阻抗匹配界面是利用修正后的传输线长度参数得到的, 界面显示了每经过一次阻抗变换后归一化导纳在史密斯原图上的变化, 计算出调配器与发射机之间的功率反射系数, 并与定向耦合器测量值进行对比。从图 11 可以看出, 经过三支节液态调配器后天线阻抗逐渐变换到史密斯圆图的中心匹配区(右下角史密斯圆图)。

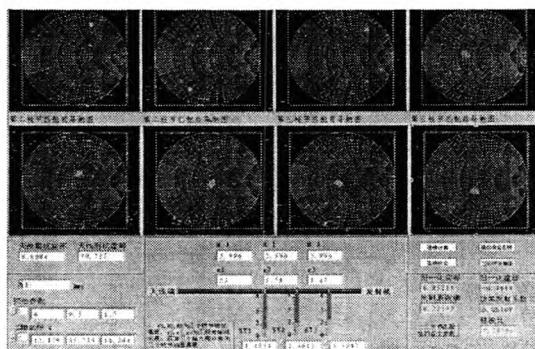


图 11 阻抗匹配界面

5 软件测量精度验证

为了验证软件计算是否正确, 利用公式(1)生成数据点, 采用软件拟合出相应的阻抗及功率参数, 并将其与其设定值进行对比, 结果如表 2 所示。从表 2 中看出, 拟合得到的结果非常精确, 证明软件计算没有错误。

表 2 拟合精度数据对比

生成数据时随机参数			拟合反推结果		
实部/ Ω	虚部/ Ω	功率/kW	实部/ Ω	虚部/ Ω	功率/kW
10	20	180.00	9.997	19.994	179.960
9	20	166.90	8.997	19.994	166.900
7	20	138.10	6.998	19.994	138.800
5	20	105.00	4.998	19.994	105.070

6 实验结果

离子回旋加热时, 其入射功率和反射功率由发射机输出端口的定向耦合器测得。为了验证实验测量精度, 本文利用上述提到的方法计算得到调配器前端的功率反射系数和输入功率, 分别将其与定向耦合器的测量结果进行对比, 验证阻抗测量的准确性。通过 2011 年入射频率为 27 MHz 的实验数据计算得到的结果如表 3 所示。

从表 3 中可以看出, 计算得到的功率反射系数与定向耦合器测得的功率反射系数差别很

小, 计算得到的功率与定向耦合器测得的入射功率减反射功率结果相近, 同时图 10 看出传输线上探针采集的电压与计算得出的电压十分吻合, 表 3 中阻抗实部最小值是对应传输线变换公式中虚部为零时的实部值。

7 结论

2011 年实验期间, 测试系统运行良好, 界面友好且易于操作; 采集电压与计算电压吻合, 定向耦合器测得的功率和反射系数与软件计算结果十分接近, 充分验证了测量的准确性。

表3 实际测量的输入阻抗及功率

炮号	天线端阻 抗/ Ω	拟合计算结果					定向耦合器测量结果				
		传输线 阻抗实 部最小 值/ Ω	传输线 电压最 大值/ V	传输线 电压最 小值/ V	传输线 电流最 大值/ A	传输线 电流最 小值/ A	功率/ kW	功率反 射系数	功率反 射系数	入射功 率/kW	反射功 率/kW
		V	V	A	A						
112012	$6.15 + 41.98i$	3.6	11366	817	227.3	16.3	100	0.10	0.12	123	15
112034	$6.07 + 43.57i$	3.4	11714	808	234.3	16.1	146	0.10	0.10	181	21
112036	$8.40 + 45.50i$	4.5	12998	1184	260.0	23.8	161	0.10	0.08	185	16
112041	$8.20 + 44.10i$	4.6	13416	1242	268.3	24.9	190	0.10	0.11	228	26
112090	$7.20 + 44.40i$	3.9	13720	1091	274.4	21.9	170	0.10	0.09	195	18
112151	$6.70 + 44.30i$	3.8	13531	1013	270.6	20.4	152	0.08	0.09	160	15
112145	$8.32 + 45.66i$	4.5	12445	1121	248.9	22.5	167	0.12	0.09	200	20
112502	$8.17 + 45.80i$	4.4	12370	1092	247.4	21.9	151	0.10	0.12	180	23
112521	$8.20 + 45.50i$	4.4	12895	1151	257.9	23.1	170	0.07	0.05	180	10

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, 39 - 40: 129 - 133.
- [2] Qin C M, Zhao Y P, Mao Y Z, et al. Design of a new type of stub tuner in ICRF experiment [J]. Plasma Science & Technology, 2003, 5(3): 1779 - 1784.
- [3] 闫润卿, 李英惠. 微波技术基础 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1997: 15 - 24.
- [4] 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.
- [5] 曾现祥. ICRH 天线阻抗测量与调配 [D]. 安徽: 中国科学院等离子体物理研究所, 2007.

Measurement of Antenna Impedance and Voltage of Standing Waves Along the Transmission Line EAST Ion Cyclotron Resonant Heating System

ZHENG Gao - wei, MAO Yu - zhou, ZHAO Yan - ping, CHEN Gen,
ZHENG Fen, HE Zhong - xin

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

Abstract: In order to accurately measure the ICRH antenna impedance, as well as the voltage and current of standing waves along the transmission line during plasma discharge, a new impedance measurement system based on probe - array, data acquisition and analysis by LabVIEW has been developed. In this paper, the input antenna impedance, as well as the voltage, current and input power of standing waves, were calculated using non - linear curve fitting method. The precision of impedance measurement was proved by the way of contrasting the calculation results with the measurement data by directional coupler.

Key words: antenna impedance; voltage of standing waves; measurement; non - linear curve fitting

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)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)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立，一直致力于专注于微波、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)，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>