

HL-2A 装置 LHCD 天线波谱测量 与数值计算

曾建尔, 陆志鸿, 袁 勇, 饶 军, 刘 永

(核工业西南物理研究院, 成都 610041)

摘要:用网络分析仪对 HL-2A 装置 LHCD 天线阵列子波导间的相位差, 子波导间的相对功率和各主波导的电压驻波比等参数进行了测量。用测量值代入程序计算得到的波谱与理论计算的结果进行比较, 表明天线发射的波谱与数值计算基本一致, 能满足将要在 HL-2A 进行的 LHCD 实验。

关键词:LHCD; 天线特性; 波谱

中图分类号: O532⁺.23

文献标识码: A

1 引言

在低杂波电流驱动实验中, 对经天线发射到等离子体中波的波谱有特殊要求, 现今所使用的用于 LHCD 实验的天线几乎无一例外都采用了阵列天线。根据文献 [1] 首先提出的这种天线理论所确定的阵列天线的波谱, 主要由波导阵列中相邻波导的相差来确定。在天线尺寸一定、相邻相差一定时, 原则上, 入射到等离子体中波的波谱就能被确定下来。为了能有效地进行驱动实验, 通常波谱应满足 $2 \leq N \leq 3$ 的条件。但是由于天线在加工过程中, 因加工精度等原因, 不可避免地造成天线实际尺寸与设计尺寸之间的误差, 这种误差有可能影响波导间的相差及通过子波导功率的不均衡, 最终影响波谱的分布。因此在天线安装上装置前, 测量出天线特性的有关参数并计算出其实际波谱对指导 LHCD 实验和分析实验结果都是有益的。

2 测量安排

HL-2A 装置上使用的 LHCD 天线是由 4 个主波导组成的 2×12 多节发射天线阵组成。每个主波导由 E 结面分成 6 个子波导, 子波导的宽度为 $b_p =$

8mm, 壁厚为 $d_p = 0.32\text{mm}$, 高 $h = 109\text{mm}$ 。整个测量部分为与微波传输部分过渡段相连接的最后一处整段, 它由天线发射窗口段、密封陶瓷(Al_2O_3)窗口段和相移段构成(如图 1 所示)。该多节发射天线阵设计成各主波导间和各子波导间的相位差皆为 90° , 天线传输部分的详细描述和参数见文献 [2]。

测量天线特性的仪器是 HP-8752C 型网络分析仪。网络分析仪 RF 输出端与天线相移段的开口处相连, RF 的输入端与一插入天线口的楔型假负载的探针相连。为了使从该处输入的 RF 功率经相移段、密封陶瓷窗口传输后再由天线发射窗口尽可能发射(或吸收)出去, 特地制作了 6 个楔型假负载, 表面涂抹了一层石墨粉, 插在天线发射窗口处(如图 2、图 3 所示), 以便尽可能地吸收传播到此的 RF 功率^[2,3]。该假负载对波吸收的有效与否对于天线参数的测量是很关键的, 这是因为倘若假负载对 RF 功率吸收不彻底, 波导中 RF 的反射较大时, 难以用网络仪测到天线的真实参数。在这种情况下, 在网络仪中反映出来的是主波导的电压驻波比较大。换句话说, 在测量中如果在测得某一组数据时的电压驻波比较高时, 这一组数据应视为不可靠, 在进行计

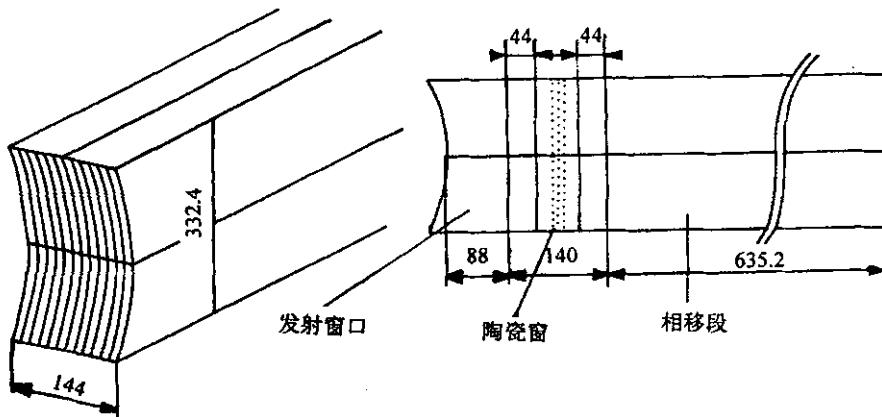


图 1 天线发射窗口、陶瓷窗和相移段的结构示意图

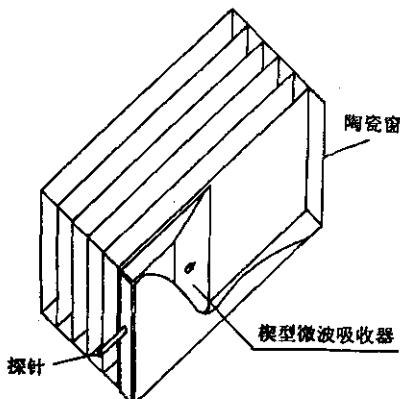


图 2 模型微波吸收器与天线口的安装示意图

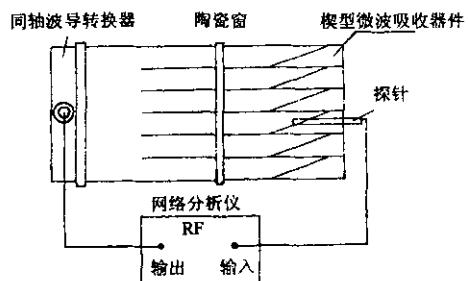


图 3 网络分析仪测试连接示意图

算时将不予采纳。

3 理论模型与计算 Code

这里计算 Code 的原理与文献[1]所述的原理相同，采用了半无界(等离子体占据 $x \geq x_0 \geq 0$ 空间)平板冷等离子体模型， z 轴与环向场一致，并假定波导的高度远大于宽度，此时波导内的场为：

$$\left. \begin{aligned} E_z^{wg}(x, z) &= \sum_{p=1}^N e^{ik_p x} \theta_p(z) \times \\ &\quad \left[\sum_{n=0}^{\infty} (\alpha_{np} e^{ik_n z} + \beta_{np} e^{-ik_n z}) \cos \frac{n\pi(z - z_p)}{b} \right] \\ B_z^{wg}(x, z) &= \sum_{p=1}^N e^{ik_p x} \theta_p(z) \times \\ &\quad \left[\sum_{n=0}^{\infty} -\frac{\omega}{ck_n} (\alpha_{np} e^{ik_n x} - \beta_{np} e^{-ik_n x}) \cos \frac{n\pi(z - z_p)}{b} \right] \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

这里我们仍然沿用 Brambilla 的注解 [1] 5]: p 为波导数, z_p 是第 p 个波导的 z 座标, ϕ_p 是与第 p 个波导有关的相位因子。函数 $\theta_p(z)$ 是“窗口”算子: 当 $z_p \leq z \leq (z_p + b)$ 时, 它为 1; 其它值时为零。也即:

$$\theta_p = \begin{cases} 1 & z_p \leq z \leq z_p + b \\ 0 & (\text{其它}) \end{cases}$$

$$\left. \begin{aligned} E_y^v(x, z) &= \int_{-\infty}^{\infty} [\sigma(k_z) e^{ik_{\perp}x} + \rho(k_z) e^{-ik_{\perp}x}] e^{ik_z z} dk \\ B_y^v(x, z) &= \int_{-\infty}^{\infty} \frac{k_0}{k_x} [\sigma(k_z) e^{ik_{\perp}x} - \rho(k_z) e^{-ik_{\perp}x}] e^{ik_z z} dk \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

这里, $\sigma(k_z)$ 是相应的入射到等离子体的场的耦合系数, $\rho(k_z)$ 是由于等离子体反射引起的反射系数。对于给定的 k_z , 等离子体场的反射率为:

$$\chi(k_z) = \frac{\rho(k_z)}{\sigma(k_z)} \quad (3)$$

现在考虑在等离子体中场的表现形式, 这里用二维冷等离子体模型^[6], 并有 $\omega_{ci} \ll \omega \ll \omega_{ce}, \omega_{pe} \ll \omega_{ce}$, 最后可得到如下方程:

$$\frac{\partial^2 E}{\partial x^2} + (k_0^2 - k_z^2) \left(\frac{x - x_0}{L} - 1 - \frac{n_0}{n_c} \right) E_z = 0 \quad (4)$$

$$\rho(k_z) = \begin{cases} 0 \\ \frac{k_0 E_0 + T^2(k_z) + \ln(Y)}{\mu_0 (k_z^2 - k_0^2) |1 - Y^2|} \end{cases}$$

这里 $T(k_z)$ 与 α_{np} 和 β_{np} 有关。然后编制 Code 就可以用数值计算得到波谱峰值及分布。将等离子体的参数 $x_0 = 1\text{cm}$, $dn/dx = 2 \times 10^{12}\text{cm}^{-4}$ 和天线的理论几何尺寸如波导的宽度 $b_p = 0.8\text{cm}$, 壁厚为 $d_p = 0.32\text{cm}$ 及子波导数目 $N = 12$ 和波导相邻间相差 $= 90^\circ$ 等参数代入程序得到的波谱见图 4 中的实线所示。应注意, 此时的 $\alpha_p = \exp(i2\pi p/N)$, 每个子波导内的 RF 功率是均分的。且子波导相邻间的相差都是 90° , 子波导的 α_p 所取的值依次为 $1, 0, -1, 0, \dots$ 等。现在我们将实验测量的结果示于表 1。表中列出了下面两排(12 个)子波导之间的相差, 各子波导的电场及两主波导的电压驻波比。这时各子波导之间的相差不再严格地等于 90° 。上层右边主波导的电压

而

$$k_n = (\omega^2/c^2 - n^2\pi^2/b^2)^{1/2}$$

天线波导口前与等离子体之间真空区域的入射波和反射波场有如下表达式(以 Fourier 积分形式表达):

在这里, 假设: $n_e = n_0 + (x - x_0) \frac{dn_e}{dx}$, $L = \frac{\epsilon_0 m_e \omega^2}{e^2 (\frac{dn_e}{dx})}$, n_0 为天线口处的等离子体密度。这样, 上述方程具有以下形式:

$$\frac{\partial^2 E}{\partial u^2} - uE = 0 \quad (5)$$

其解为 Airy 函数, 其传播解为 $E_z(u) = -iA_i(u) + B_i(u)$, 省略繁琐的推导过程, 利用边界条件求解方程(1)(2)(4), 最后可以得到计算波谱的表达式如下(详见文献[5]):

$$\begin{aligned} |k_z| &< k_0 & \\ |k_z| &> k_0 & \end{aligned} \quad (6)$$

驻波比为 1.126, 左边的为 1.246。这些主电压驻波比是较小的, 能够确保参数的真实性。这时将测得的表 1 中的相差值 $0^\circ, -91^\circ, 167^\circ$ 和 87° 和相对功率值的幅度值 1.0, 0.48, 0.98, 1.07 代入表达式 $\alpha_p = \exp(i2\pi p/N)$, 得出的值相应地为 1, -0.016, -0.95 和 0.05。这和理论值 1.0, -1 和 0 给出的理论值有一定的差别。将它们代入程序得到实际的功率谱, 用虚线也示于图 4 中。从图 4 中可以看到理论值计算的波谱和实测值代入计算的波谱的主瓣在 $N_{11} = 2.75$ 处基本重合。这种结果与 HT-7 装置上的结果十分相似^[7]。从计算的结果和测量的到的子波导间的相差及主波导的电压驻波比可以判断这组天线的计算和制作是满足设计要求的。

表 1 下面两排子波导相位差、功率和电压驻波比的测量值

主波导	子波导	子波导相邻间的相位差	$ s_{21} / \text{dB}$	功率相对值	电压驻波比
下面右边主波导	1	0°	0	1	1.126
	2	-91°	-3.1	0.48	
	3	167°	-0.1	0.98	
	4	87°	0.3	1.07	
	5	5°	3.8	2.4	
	6	-91°	0.4	1.09	
下面左边主波导	7	-160°	-2.0	0.63	1.246
	8	52°	-2.8	0.52	
	9	-13°	-2.5	0.56	
	10	-110°	-1.7	0.676	
	11	-162°	-0.7	0.85	
	12	66°	-1.3	0.74	

表 2 上面两排子波导相位差、功率和电压驻波比的测量值

主波导	子波导	子波导相邻间的相位差	$ s_{21} / \text{dB}$	功率相对值	电压驻波比
上面右边主波导	1	0°	2.15	1.64	1.11
	2	88°	2.90	1.95	
	3	173°	2.45	1.75	
	4	255°	1.50	1.41	
	5	-13°	1.20	1.31	
	6	111°	0	1.0	
上面左边主波导	7	201°	-1.1	0.776	1.94
	8	277°	-8.8	0.13	
	9	-18°	-5.7	0.27	
	10	79°	0.0	1.0	
	11	-145°	0.5	1.12	
	12	-1°	0.0	1.0	

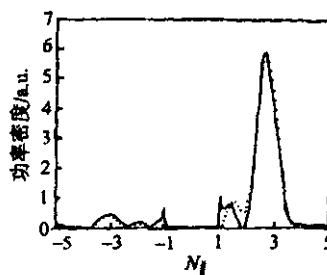


图 4 下面两主波导测量值与理论值计算的波谱的比较

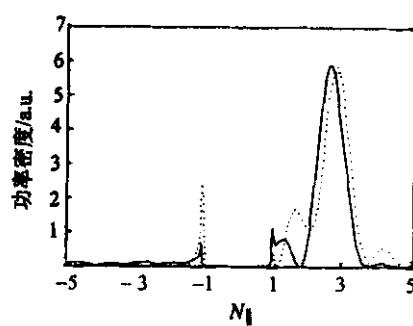


图 5 上面两排主波导测量值和理论值计算的波谱的比较

表 2 和图 5 是上层另外两主波导构成的一个 12 子波导天线的特性测量值和相应用理论值计算的波谱图。从图 5(上面一排另外两个主波导构成的一个 12 子波导天线的特性测量值和相应的用测量值和理论值计算的波谱图) 可看到测量值与理论值没有下层的结果理想。从图 5 可看到测量值与理论值的计算结果没有另一排 (见图 4) 的结果理想 : 功率谱的主谱与理论值有一定的偏差 , 且杂谱成分较多。值得注意的是我们对这上下两排天线特性进行过多次的测量计算出的结果显示下面两排天线测量值计算出的波谱与理论值相符得好些。对下层天线特性测量到的另几组数据计算得到的波谱与理论值计算的结果偏差会更大。

3 结论

综合测量数据和计算结果我们可得到以下结论 :

a. 用网络分析仪对 HL-2A 装置天线阵列测量的数据进行的计算与理论值计算的天线的功率谱基本吻合 , 波谱 $2 \leq N_{11} (2.75) \leq 3$, 完全满足 LHCD 实验的要求。

b. 上下两排天线所测数据计算的结果似有差别 , 目前的结果显示下面一排的结果与理论值吻合更好。

c. 自制的楔型微波吸收器在测量中得到了检验 , 测量中的电压驻波比 (VSWR) 可低到接近 1.1 , 完全满足测量要求。这不但为我们的测量提供了手段 , 也保证了测量数据的精度和可用性。

参考文献

- [1] Brambilla M. Slow-wave launching at the lower-frequency using a phased wave guide array [J]. Nucl. Fusion , 1976 , 16 (1): 47.
- [2] 刘永 , 李晓东 , 袁勇 , 等 . 用于 HL-1M 装置 LHCD 的多节发射天线阵 [J]. 核聚变与等离子体物理 , 1997 17(4): 41.
- [3] 陆志鸿 , 袁勇 , 曾建尔 . HL-2A LHCD 天线微波网络特性测量 [R]. GF 报告 . 2003
- [4] BERGER-BY G , BIBET Ph , CAPITAIN J J , et al. Control of the N_{11} spectrum on large tokamak lower hybrid RF system [A]. Fusion Technology , vol. 1 [C]. 1992. 442.
- [5] Boley C D. A code to calculate the spectrum of lower-hybrid waves launched by a Brambilla waveguide array [R]. ANL/EPP/TM - 135 (1980)
- [6] Knowlton S F , Pkolab M. Lower hybrid wave launching and antenna design [J]. Nucl. Fusion , 1989 29(9): 1544.
- [7] 王茂 , 刘岳修 , 刘甫坤 , 等 . HT-7 装置新低杂波相控波导阵天线及其微波特性测量 [J]. 核聚变与等离子体 , 2003 23(1) 55 - 60.

Measurement and numerical calculation of the spectrum of LHCD antenna in the HL-2A tokamak

ZENG Jian-er , LU Zhi-hong , YUAN Yong , RAO Jun , LIU Yong
(Southwestern Institute of physics , Chengdu 610041)

Abstract :The LHCD antenna in the HL-2A tokamak is a modified version of the one used in the HL-1M tokamak formerly. The reflection of the main wave-guide and the phase shift between the adjacent sub-wave guides have been measured. The measured results and spectrum calculation based on the measured parameters are described. The results show that the antennas will be useful for LHCD experiments in the HL-2A tokamak .

Key words :LHCD ;Antenna feature ;Spectrum

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>