

### 3. 7GHz 大功率 3db 功分器设计

刘红宝, 王焕菊, 王晓洁, 刘甫坤

(中科院等离子体物理研究所, 安徽 合肥 230031)

**摘要:**设计了一种用于 3.7GHz 低杂波电流驱动(LHCD)系统的高功率 3db 功分器。论文基于奇偶模理论和 S 参数矩阵分析,得到初步的 3db 功分器结构参数,然后利用高频仿真软件 HFSS 进行结构仿真和参数优化,得到最优结构,使得 3db 功分器的  $V_{SWR}=1.02$ 、 $D=35\text{db}$ 、 $C=3.03\text{db}$ 、 $I=38.2\text{db}$ 。同时详细分析了大功率下的热损耗情况,提出了合理的散热方式,保证了功分器在长脉冲大功率时,表面平均温度处于  $63^\circ\text{C}$  的平衡状态。

**关键词:**低杂波电流驱动系统;3db 功分器;HFSS 仿真;热分析

**中图分类号:** TL82 **文献标识码:** A **文章编号:** 0258-0934(2008)06-1190-03

低杂波电流驱动因其有比较高的等离子体电流驱动效率而受到大多数托卡马克实验装置的青睐。设计中的 4MW 3.7GHz LHCD 系统由六路速调管放大器并联组成。其基本工作原理如图 1 所示。从微波振荡源输出的 3.7GHz 信号经过 PIN 开关,被 1 分 6 功分器分成六路,再经过各自的低功率移相器和前级放大器处理,形成 10W 的功率信号,以驱动最大连续输出功率为 700kW 的大功率速调管放大器,在每个速调管放大器后面的传输路径中,我们均接入了一个 3 级 3db 功分器组,这样就使得从每一路速调管放大器出来的大功率在进入相控阵天线之前,被等分成为 8 路较小的功率。此外,由于我们设计的 3db 功分器的两个输出端口具有  $90^\circ$  相位差,这样在负载对称的情况下,反射波基本不进入输入端口,从而使得该 3db 功分器组具有隔离器的功能,可以起到对

速调管的保护作用。

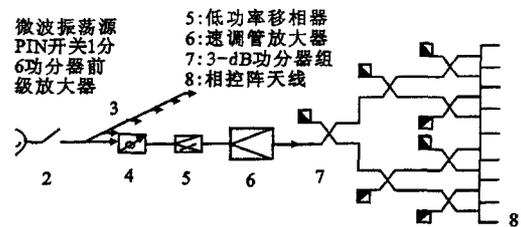


图 1 3.7GHz LHCD 单路传输系统图

本文首先结合奇偶模理论和四端口无源微波器件的 S 参数矩阵对 3db 功分器进行理论分析,得出初步的结构尺寸参数,进而利用 HFSS 进行结构的模拟和参数优化,最终使所设计的 3db 功分器(图 4)的  $V_{SWR}=1.02$ ;耦合度  $C=3.03\text{db}$ ;隔离度  $I=38.2\text{db}$ ;定向性  $D=35\text{db}$ 。

#### 1 结构设计

如图 2 所示的左右对称窄边完全开槽的 3db 功分器结构,若规定 1 端口为输入端口,2、3 为输出端口,4 为隔离端口。则理想状态下,根据奇偶模理论和 S 参数矩阵,有  $S_{11}^2 = P_r/P_0 \approx 0.0$ 。其中  $P_r$  是反射回端口 1 的功率, $P_0$  是从端口 1 输入的功率。根据端口 2、3 等功率输出的条件,计算得到耦合区内  $TE_{10}$  和  $TE_{20}$  模

收稿日期:2007-11-61

作者简介:刘红宝(1981—),男,河南人,中国科学院合肥物质科学研究院等离子体物理研究所硕士研究生,从事等离子体物理低杂波电流驱动和加热系统的研究。

式的相位差满足方程

$$\frac{2\pi l}{\lambda_{g10}} - \frac{2\pi l}{\lambda_{g20}} + \phi_r = \frac{\pi}{2} \quad (1)$$

其中  $\lambda_{g10}$ 、 $\lambda_{g20}$  分别为耦合区内  $TE_{10}$ 、 $TE_{20}$  模式的波导波长,  $l$  为耦合区的长度,  $\phi_r$  为耦合区内其它的非理想情况引起的相移。若忽略  $\phi_r$ , 则方程(1)的函数图像如图 3 所示。

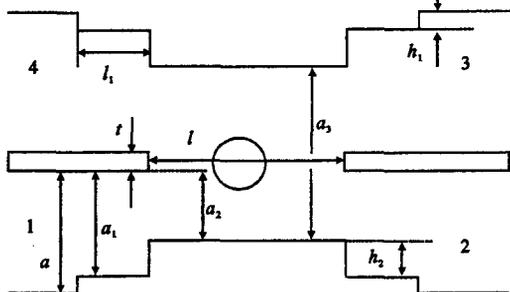


图 2 3db 功分器的结构简图

由于设计时图 2 中四个端口采用 WJB32 波导的尺寸, 即  $a=72.14\text{mm}$ 、 $b=34.04\text{mm}$ , 并且公共壁厚  $t=2\text{mm}$ , 因此, 依据图 3 我们在耦合区内引入高度为  $h_1+h_2=20\text{mm}$  的不连续阶梯, 从而保证耦合区内  $TE_{20}$  模式的正常传播和  $TE_{30}$  模式的截至。此时耦合区的尺寸为  $a_3=106.2\text{mm}$ 、 $l=72.92\text{mm}$ 。

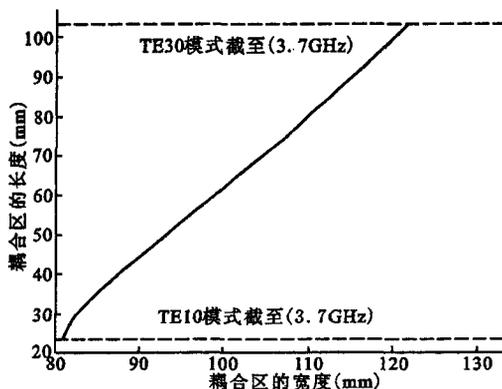


图 3 耦合区的长度和宽度的关系、  
 $TE_{30}$  和  $TE_{20}$  模式的截至位置图

我们知道, 对于截面尺寸为  $a \times b$  的波导类型结构, 在其内能够传播  $TE_{10}$ 、 $TE_{20}$  模式情况时,  $TE_{10}$ 、 $TE_{20}$  模式的波阻抗可表示为

$$Z_{TE_{10}} = \frac{120\pi}{\sqrt{1 - (c/2af)^2}} \quad (2)$$

$$Z_{TE_{20}} = \frac{120\pi}{\sqrt{1 - (c/2af)^2}} \quad (3)$$

因此, 对于上面阶梯引入造成的  $TE_{10}$  模式在功分器内的不匹配, 可由不连续波导的匹配理论给予解决, 通过计算可得  $h_1=11\text{mm}$ 、 $l_1=$

$27.1\text{mm}$ 。但是, 此时耦合区内  $TE_{20}$  模式的波阻抗  $Z_{TE_{20}}$  和前后与耦合区相连段内的  $TE_{10}$  模式波阻抗  $Z_{TE_{10}}$  不相等, 功分器仍然是失配的。这种失配引起高反射的同时, 也会引起隔离端口相对较大的漏出功率。

通过理论分析, 我们采取在耦合区的中心处安装直径约为耦合区宽度的 35%, 高度为耦合区高度的 20% 的圆形膜片的方法来加以解决。这样,  $TE_{10}$  模式在隔离端口环绕膜片的 H 场和激励端口的 H 场方向相反, 从而大大减小了隔离端口的漏出功率。同时, 这种耦合区内共振结构的存在, 也使得输入和输出端口的匹配情况大大改善, 极大地减小了反射。

## 2 HFSS 仿真和优化

通过对以上分析计算进行 HFSS 仿真, 我们发现耦合区的大小对耦合频率的影响比较大, 而膜片的尺寸对耦合率起决定作用。在选取耦合区的宽度  $a_3=106.28\text{mm}$ , 由(1)式算出耦合区的长度  $l=72.92\text{mm}$ , 同时模型的边界为铜材料边界的条件下, 用 HFSS 优化出的膜片尺寸为  $r=9.6\text{mm}$ 、 $h=6\text{mm}$ , 一级阶梯匹配段的长度为  $l_1=27.09\text{mm}$ 。并得到 S 参数和场型图如表 1, 图 4, 图 5, 图 6 所示。

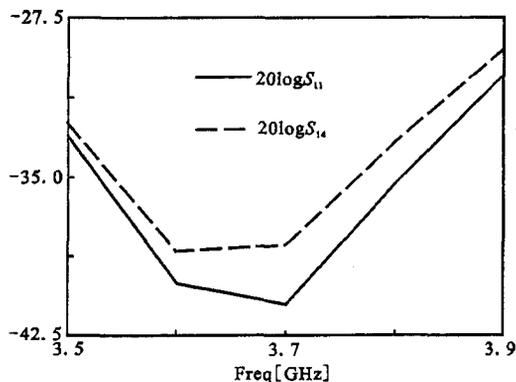


图 4 1,4 端口 db 数和频率的关系

根据上面图表的数据, 可计算出  $3.7\text{GHz}$  频点处功分器的耦合度为  $C=20\log|S_{13}|=3.03\text{db}$ 、定向性  $D=20\log(|S_{13}|/|S_{14}|)=35\text{db}$ 、隔离度  $I=20\log|S_{14}|=38.2\text{db}$ , 1 端口的输入驻波比  $VSWR \approx 1.02$ , 2, 3 端口输出波的相位差为  $89.8^\circ$ , 比  $90^\circ$  小了  $0.2^\circ$ 。可以看出, 所有的主要参数都是比较理想的。

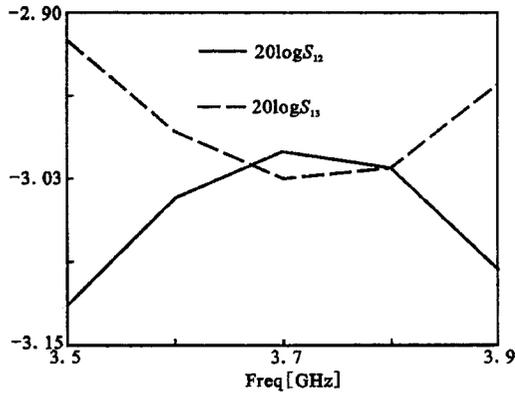


图5 2、3 端口 db 数和频率的关系

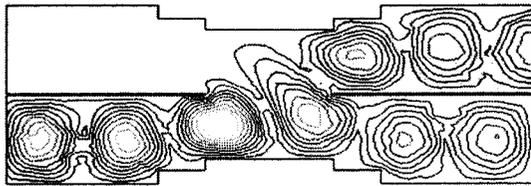


图6 功分器内部的电场的等势线平面图

表1 频率为 3.7GHz 处的 S 参数幅度表

Freq	SWavePort1:1	SWavePort2:1	SWavePort3:1	SWavePort4:1
3.7 GHz	0.010236	0.581070519	-0.111	0.70814
	0.011908	-0.2671	0.70815	0.011908
	0.0057945	0.721	0.0057945	0.0112596
	0.005853	0.005853	0.005853	0.005853

### 3 热效应分析与处理

由于功分器是  $H_{96}$  黄铜材料的腔体结构。则它的损耗主要包括器件壁的导体热损耗和内部的介质损耗。对于介质损耗,其介质衰减因数为

$$\alpha_d = \frac{\sigma}{2\omega\epsilon} \beta = \frac{\sigma}{\omega\epsilon} \frac{\pi}{\lambda_g} = \frac{\pi g \delta}{\lambda_g} \quad (Np/m) \quad (4)$$

其中  $tg\delta = \sigma/\omega\epsilon$  为介质的损耗角正切。在采用填充干燥空气的情况下,由于没有击穿时干燥空气的  $\sigma=0$ ,从而导致  $\alpha_d$  为零,这样则器件的损耗仅为器件壁的热损耗。由表 1 提供的数据,可计算出整个功分器的功率损耗量约占 1 端口输入功率的 0.0988%。也即对于 700kW 连续波功率输入,将有大约 691W 的功率转变为热损耗。考虑到功分器的总长度为 167.1mm、壁厚 4mm,材质为  $H_{96}$  黄铜,若假定不存在任何散热效应,其平均温升将达到 0.813°C/s,300s 后的纯数值温度将高达 244°C。

基于上面的分析,对于整个功分器散热,将同时考虑到空气对流、热辐射和水冷管强制冷却三种散热方式。通过详细的理论计算和 ansys 数值模拟,得出在室温为 25°C,空气流速为

2m/s;功分器表面的法向发射率  $\epsilon_n = 0.97$ ,安装在功分器上下宽面中心的直径 10mm 的紫铜管内水流进口温度 25°C、流速 1m/s 的情况下,功分器表面各点温度分布随时间的变化关系如图 7 所示。可以看出,在满足以上散热条件的情况下,功分器的平均温度最终将处于 63°C 的平衡状态,如果再考虑到实际工作时的一些其它情况,平衡状态时的温度将远低于这个温度。这就保证了在长脉冲大功率的工作过程中,功分器的结构和工作状态处于正常状态。

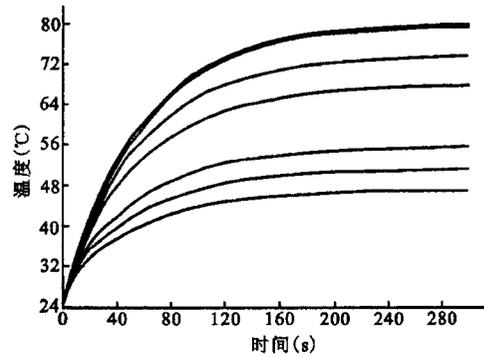


图7 功分器表面不同点温度随时间变化关系

### 4 结语

本文采用相对简洁的设计理论,优化了理论计算。利用 HFSS 进行的优化设计,在大大减小了隔离端口漏出功率的情况下,又很好地改善了输入输出端口的阻抗匹配,提高了功分器的耦合率。同时利用 ansys 对长脉冲大功率情况进行了温度平衡分析,提出了必要的散热条件,这对保证功分器在实际中的稳定工作具有重要的参考价值。

#### 参考文献:

- [1] 黄宏嘉,微波原理[M]. 北京:科学出版社,1963: 447-459.
- [2] 李宗谦,余京兆,高葆新,微波工程基础[M]. 北京:清华大学出版社,2004:231-239.
- [3] H, A, Bethe, Theory of diffraction by small holes [J]. Phys, Rev, 1944,66:163-182.
- [4] Louis W Hendrick, Ralph Levy. Design of waveguide marrow-wall short-slot couplers [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2000, 48(10):1771- 1774.

(下转第 1265 页,Continued on page 1265)

**参考文献:**

- [1] <http://www.ni.com>  
[2] <http://root.cern.ch>  
[3] 潘亚平,赵燕平,苏禹,等. 基于 Labview 的可执行文件调用的研究与实现[J]. 微计算机信息,2004,20(8):78.  
[4] 钱森,张书华,王贻芳,等. BESⅢ MUON 气体监测器数据获取系统[J]. 核电子学与探测技术,2008,28(2):258.  
[5] 王华,袁帆. Visual C++ ,LabVIEW,LabWindows /CVI 与 MATLAB 接口技术的研究[J]. 计算机应用研究,2007,24(2):281.  
[6] 彭宇宁,朱后. 利用 DLL 技术实现 LabVIEW 和 MATLAB 混合编程[J]. 计算机与现代化,2007,8:93.

## A data acquisition and analysis system based on LabVIEW and ROOT

QIAN sen<sup>1,2</sup>, WANG Zhi-gang<sup>1,2</sup>, CAI xiao<sup>1</sup>, LIU Chun-xiu<sup>1</sup>, WANG Yi-fang<sup>1</sup>, ZHANG Jia-wen<sup>1</sup>

(1. Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

2. Graduate university of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** An interfacing technology between LabVIEW and ROOT is realized by loading and running the executable file. This technology can make the best of their own advantages to design a powerful and efficient data acquisition and analysis system. This paper ends up with two successful application examples of this interfacing technology: the data acquisition system for the gas ratio monitor and the optical performance test system for the EMC crystal in BESⅢ.

**Key words:** LabVIEW; ROOT; Data acquisition system

---

(上接第 1192 页, Continued from page 1192)

- [5] Pandharipande V, M, and Das, B, N, Coupling of Waveguides through Large Apertures, Microwave Theory and Techniques[J], IEEE Transactions on Volume 26, Issue 3, Mar 1978 Page(s); 209 - 212.  
[6] 杨世铭,陶文铨. 传热学 [M]. 北京:高等教育出版社,1998.

## Design of 3.7GHz high power 3db power splitter

LIU Hong-bao, WANG Hua-nju, WANG Xiao-jie, LIU Fu-kun

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

**Abstract:** This paper deals with the design of high power 3db power splitter used in 3.7GHz Lower Hybrid Current Drive (LHCD) system, The initial structure parameters are obtained by analyzing the theory of o-model and e-model and S parameters matrix. Further analysis is performed by High Frequency Structure Simulator (HFSS) program which make sure  $C=3.03$  db,  $D=35$ db,  $I=38,2$ db. The thermal generation and cooling means for the large power transmission situation is analyzed too and the final average temperature is 63℃.

**Key words:** LHCD; 3db power splitter; HFSS simulation; thermal analysis