文章编号：1007-4627(2012)02-0158-04

耦合带状线定向耦合器大功率合成器的设计

王皓宁[1,2]，许 哲[1]，赵红卫[1]，边志彬[1]

(1. 中国科学院近代物理研究所，甘肃 兰州 730000；
2. 中国科学院研究生院，北京 100049)

摘要：介绍了直线加速器高频全固态功率源中大功率合成器件－3 dB 定向耦合器的理论计算和工程设计过程，该合成器工作频率 80.5 MHz，输出连续波功率大于 20 kW。分析了合成器的功率容量，并对相应的理论计算结果、CST (Computer Simulation Technology)软件模拟计算结果和实际功率合成器件测量结果进行了比较。通过比较得出，CST 仿真结果与测试结果基本一致，隔离度和电压驻波比等实测指标优于设计指标，只有耦合度与设计指标有些偏差，总体上达到了预期的设计要求。在输出功率 20 kW 时，取样波形无失真，合成器无明显温升，满足固态功率源大功率稳定运行的要求。

关键词：定向耦合器；固态功率源；功率合成

中图分类号：O571.5　　**文献标志码**：A

1 引言

兰州重离子加速器(HIRFL)新的直线加速器 SSC-LINAC 作为 SSC (Separated Sector Cyclotron) 注入器，可将$^{238}U^{34+}$束能量从 0.140 MeV/u 加速到 0.97 MeV/u[1]，相应的高频固态功率源工作于点频状态，工作频率 80.5 MHz，输出功率为 40 kW 连续波。其中，10 kW 合成到 20 kW 采用空气介质宽边耦合带状线 3 dB 定向耦合器，由中国科学院近代物理研究所高频技术室自主研制。本文介绍了耦合带状线定向耦合器的理论计算和工程设计过程。目前国内发射机生产厂家在此频段内对大于 10 kW 的功率合成一般采用同轴硬馈管，不带隔离，因此各输出端口间的相互影响较大。本设计采用 3 dB 定向耦合器进行合成，由于定向耦合器本身有隔离端口，故隔离度可以做到较高的水平，并且隔离电阻可由隔离口直接用同轴电缆引至冷却部件上。同时在结构上采用输入共面的设计方法，大大简化了输入端的连接问题，此种设计方法目前并不多见，具有很高的实用性。

2 耦合带状线定向耦合器的设计

耦合带状线定向耦合器结构如图 1 所示。该结构由耦合金属带与上下接地金属板构成，导带和接地金属板之间为空气或其他填充介质。其中：W 为带状线导体的宽度；t 为带状线导体的厚度；s 为耦合带状线之间的间距；b 为上下接地板之间的距离。

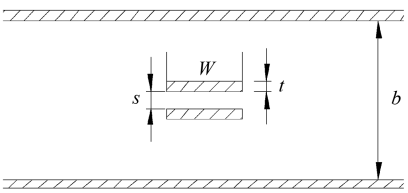

图 1 耦合带状线定向耦合器

2.1 设计指标

耦合带状线定向耦合器主要设计指标见表 1。

表 1 耦合带状线定向耦合器主要设计指标

名称	指标
中心频率/MHz	80.5
工作频率范围/ MHz	80.5±4

收稿日期：2011-09-13；　**修改日期**：2011-10-14

基金项目：国家自然科学基金资助项目(10635090)

作者简介：王皓宁(1979—)，男，甘肃甘谷人，工程师，硕士研究生，从事加速器高频功率源的应用研究；
E-mail：wanghn@impcas.ac.cn

隔离度/dB	≤−24
耦合度/dB	−2.97
耦合口与传输口分配电平差/ dB	<0.2
输入、输出电压驻波比(VSWR)	<1.2

2.2　理论计算与工程设计[2-3]

已知工作频率 $f_0=80.5$ MHz，耦合度 $C=-2.97$ dB，系统阻抗 $Z_0=50\ \Omega$。由公式

$$k=10^{C/20} \tag{1}$$

求得电压耦合系数 k 为 0.710。电压耦合系数与奇模特性阻抗 Z_{0o}、偶模特性阻抗 Z_{0e}的关系为

$$k=\frac{Z_{0e}-Z_{0o}}{Z_{0e}+Z_{0o}}\ 。 \tag{2}$$

奇模特性阻抗 Z_{0o}、偶模特性阻抗 Z_{0e}与系统阻抗的关系为

$$Z_0^2=Z_{0e}Z_{0o}\ 。 \tag{3}$$

由式(2)和式(3)求得奇模特性阻抗 Z_{0o}与偶模特性阻抗 Z_{0e}分别为

$$Z_{0o}=Z_0\sqrt{\frac{1-k}{1+k}}=20.590\ 7\ \Omega\ , \tag{4}$$

$$Z_{0e}=Z_0\sqrt{\frac{1+k}{1-k}}=121.414\ 1\ \Omega\ 。 \tag{5}$$

设计时，取耦合带状线线间距 $s=7$ mm，带状线厚度 $t=3$ mm，根据奇模特性阻抗 Z_{0o}，可求出耦合线宽度 $W=50.606\ 3$ mm；根据偶模特性阻抗 Z_{0e}，可求得 $b=70$ mm。耦合区的长度 L 为中心频率的四分之一波长，即

$$L=\frac{\lambda_g}{4}=\frac{1}{4}\frac{c}{f\sqrt{\varepsilon_r}}\ , \tag{6}$$

其中：L 是耦合区长度(单位为 m)；λ_g 是传输线上的波长(单位为 m)；c 是真空中的光速为 $c=2.998\times10^8$ m/s；f 是频率(单位为 Hz)；ε_r 是相对介电常数，没有单位，空气的相对介电常数为 1。计算可得 $L=931.677$ mm。实际加工的定向耦合器的体积为 950 mm×304 mm×74 mm。

3　功率容量的考虑

带状线传输的功率主要受两个因素的制约，一是介质本身的击穿强度(它与峰值功率相对应)；二是介质本身所能承受的最高温升(它与平均功率相对应)。显然在导体带的棱角处最容易发生电压击穿，相应地把带状线的导体带棱角改为光滑的圆角，则可提高其功率容量[4]。根据有关发射机生产厂家所做的试验，(25/8)" 50 Ω 馈管在 160 MHz 时可承受 20 kW 功率，当频率降低时，馈管功率容量会有所提高。通过计算可知，所设计带状线尺寸与(25/8)" 50 Ω 馈管尺寸相当，因此，合成器完全可以承受 20 kW 输出功率。

4　定向耦合器的 CST 仿真

我们采用 CST 微波工作室仿真软件对定向耦合器进行了建模和仿真。图 2 给出了模拟得出的定向耦合器隔离度与耦合度指标曲线。从图中可以看出，在中心频率处，定向耦合器的隔离度 I(dB)=−25.1 dB，耦合度 C(dB)=−2.9 dB，可见定向耦合器各项指标均满足设计要求。

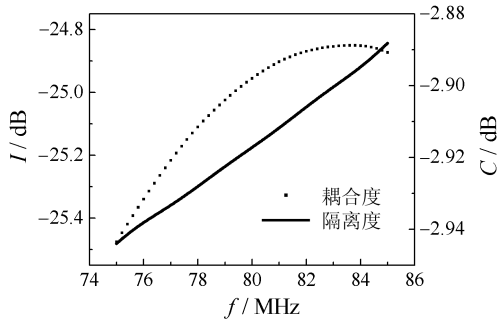

图 2　定向耦合器的隔离度与耦合度 CST 仿真结果

5　实物测试结果

实际加工完成的定向耦合器如图 3 所示。

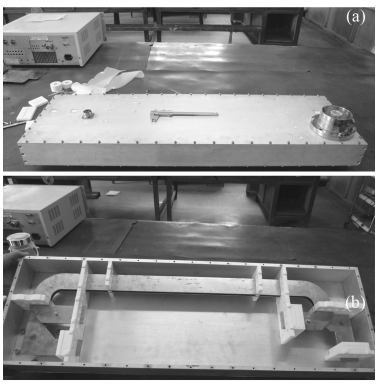

图 3　定向耦合器(a)及其内部结构(b)

5.1　指标测试

利用矢量网络分析仪对加工好的定向耦合器进

行测试，实测各项指标参数经整理如表 2 所列，其中分配电平差为耦合口与直通口耦合度之差。

表 2 定向耦合器实测结果

频率 /MHz	隔离度 I/dB	耦合度 C/dB	直通口 /dB	分配电平差/dB	输入驻波比 p
80.5	−26.57	−2.93	−3.06	0.13	1.03
76.5	−26.28	−2.96	−3.04	0.08	1.03
84.5	−26.98	−2.92	−3.04	0.12	1.02

从表 2 可以看出，测试结果与 CST 仿真结果基本一致，隔离度、分配电平差和电压驻波比等实测指标优于设计指标，只有耦合度与设计值有些微偏差，这是由于测试时采用的匹配负载不是标准的 50 Ω 所导致的。总之，测试结果是满足设计要求的。

5.2 加功率测试

将耦合带状线定向耦合器的功率加到 20 kW 并稳定运行一段时间后，通过示波器观察输出取样波形无失真，使用红外测温仪监测合成器及合成器隔离负载，温度均在 40 ℃以下，说明合成器加功率时损耗很小且隔离度很高，满足固态功率源大功率长期稳定运行的要求。

6 结论

通过对本定向耦合器的理论计算结果、CST 仿真结果与实物测试结果相比较，实际测试耦合度与设计值十分接近，各端口阻抗匹配程度很高，说明此设计方法合理和切实可行。对于此次设计的合成器，通过对各端口补偿电容的进一步优化，使隔离度指标优于−25 dB，从而达到了更理想的结果。

参考文献(References)：

[1] WANG Zhijun, HE Yuan, WU Wei, *et al*. Chinese Physics C, 2010, **34**(10): 1639.

[2] Tsinghua University Microstrip Circuit Group. Microstrip Circuit. BeiJing: Posts & Telecom Press, 1975, 171−226(in Chinese).
(清华大学微带电路编写组. 微带电路. 北京：人民邮电出版社，1975，171−226.)

[3] DAVID M P. Microwave Engineering (Third Edition). Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2006, 118−127(in Chinese).
(David M P. 微波工程(第三版). 北京：电子工业出版社，2006，118−127.)

[4] LI Xuyi. Electromagnetic Field and Microwave Technology (Volume II). Guangzhou: South China University of Technology Press, 2005, 142−147(in Chinese).
(李绪益. 电磁场与微波技术(下册). 广州：华南理工大学出版社，2005，142−147.)

Design of Coupled Stripline Directional Coupler Power Synthesizer

WANG Hao-ning[1, 2, 1)], XU Zhe[1], ZHAO Hong-wei[1], BIAN Zhi-bin[1]

(1. *Institute of Modern Physics*, *Chinese Academy of Sciences*, *Lanzhou* 730000, *China*;
2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100049, *China*)

Abstract: The principle of design and calculation of the power synthesis in the solid-state amplifier are described in this paper. The working frequency of the synthesizer is 80.5 MHz. The output continuous wave power is more than 20 kW; The synthesizer power capacity is analyzed. The theoretical calculation results, Computer Simulation Technology (CST) simulated results are compared with the measured results of the actual 3 dB couplers. The analysis of the measured results and CST calculated results shows that the simulation is in agreement with the measurement results which meet the design requirements of the solid-

Received date: 13 Sep. 2011; **Revised date**: 14 Oct. 2011

Foundation item: National Natural Science Foundation of China(10635090)

1) E-mail: wanghn@impcas.ac.cn

state amplifier. Except the coupling coefficient, the isolation, the VSWR and other parameters are better than the design target. When the output power is 20 kW, the sampling waveform has no deform and the temperature of the synthesizer is stable.

Key words: directional coupler; solid-state amplifier; power synthesis