

S 波段连续波磁控管两路微波功率合成研究

黄何平, 陈潇杰, 刘臻龙, 刘长军

(四川大学电子信息学院, 成都, 610065)

cjliu@scu.edu.cn

摘要 为突破单个磁控管的功率容量限制, 采用多个磁控管进行功率合成是有效的方法。我们开展了基于两路 S 波段注入锁定连续波磁控管的微波相干功率合成系统的实验研究。实验采用波导功率合成器来进行功率合成。分析了两路磁控管的相位差对合成效率的影响更灵敏。当采用两种不同类型的磁控管进行功率合成时, 1 kW 的商用磁控管因为工艺上的差异较小, 很容易就可以挑选出可以进行功率合成的两支磁控管, 而对于 20 kW 工业用磁控管, 挑选过程则更为复杂。两种磁控管进行注入锁定和相干功率最高合成效率也略有不同。

关键词 连续波磁控管, 注入锁定, 功率合成

The Research of 2-Way Continuous Wave Magnetron Power

Synthesis on S Band

Heping Huang, Xiaojie Chen, Zhenglong Liu, Changjun Liu

(School of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu, 610064)

Abstract: In order to extend the power capacity of single magnetron, the power combining by multiple magnetrons is studied. We used two S-band injection-locked magnetron systems to accomplish the coherent power combining. The phase difference between two magnetrons is sensitive for the combining efficiency. When we use 1 kW oven magnetron and 20 kW large power magnetron in the experiments, the choosing of oven magnetron is easier than the large power magnetron. The combining efficiency of large power magnetron is slight lower than oven magnetron's.

Keywords: CW magnetron, Injection-locked, Power combining

1 引言

微波能作为一种新型的加热手段在食品工业、化工、垃圾处理、新材料制备等方面逐渐被广泛应用, 其特点是清洁, 高效^{1, 2}。随着我国产业结构的不断优化发展, 微波能将会在更多的工业领域得到更广泛的应用, 为降低我国的高能耗, 高污染, 促进经济的可持续发展和社会进步做出贡献。由于磁控管材料等制造技术上, 单个磁控管在其功率容量上存在输出上限。利用多个微波源进行微波相干

功率合成, 是拓展功率容量的有效手段³。相干功率合成技术在大功率微波武器、毫米波雷达技术等军事方面已经得到了较好的应用⁴。由于磁控管的微波输出信号本身频带宽、频率不稳定使得直接进行功率合成的效率难以保持稳定。因此需要通过对连续波磁控管进行注入锁定, 使得磁控管的频率相位特性达到稳定状态。再利用相干功率合成技术进行功率合成, 以便得到较高的合成效率, 提高微波能的利用率⁵。

2 相干功率合成效率分析

本文研究磁控管锁定的主要目的是将多个磁控管进行微波相干功率合成。采用封闭的波导功率合成器进行功率合成。将两路连续波磁控管的微波输出信号通过三端口的波导合成器进行功率合成。基于 3-dB 功率合成器的功率合成实验中，当输入微波功率信号 P_1 和 P_2 存在的相位差为 θ 时，输出的功率 P_3 为

$$P_3 = \frac{P_1 + P_2}{2} + \sqrt{P_1 P_2} \cos \theta \quad (1)$$

功率合成效率定义为

$$\eta = \frac{P_3}{P_1 + P_2} = \frac{1}{2} + \frac{\sqrt{k} \cos \theta}{1 + k} \quad (2)$$

其中 k 为输入功率之比 P_1 / P_2 。

根据公式 (2) 可以得出，当两路信号的相位差为 0 时，对应的效率与幅度的变化没有关系，也就是理想状态下合成效率为 100% 。当相位差为 180° 时， $k=1$ 处合成效率为 0 ，此时两路信号功率大小相同，相位相反，则信号将在合路器中两者发生抵消，使得信号在合路器中形成全驻波。因此若要实现高效率的功率合成，需要对信号的相位进行更精确的控制。相位差越小，幅度相同的情况下，合成效率越高。

3 磁控管相干功率合成实验

为了实验验证磁控管注入锁定后，相干合成的效率值，我们分别对 S 波段商用的微波炉磁控管和工业用的大功率磁控管进行了相干合成实验。

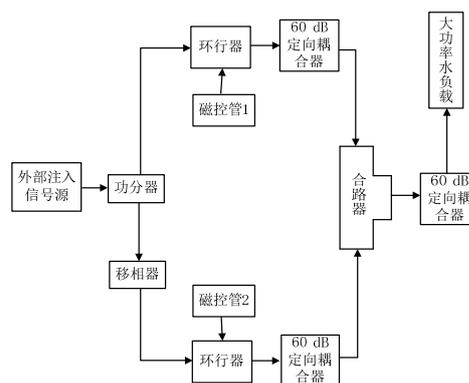


图 1 两路注入锁定磁控管相干功率合成系统

图 1 给出了两路注入锁定磁控管微波相干功率合成系统框图，图中外部注入信号源产生高稳定的注入信号，由功分器分为两路分别注入两个磁控管中进行锁定，60 dB 定向耦合器用于观测两个磁控管输出与合成后的信号功率、相位和频率信息。注入锁定后，通过调节移相器使得磁控管 2 相位与磁控管 1 同步，获得最佳合成功率，合成功率最终由波导合路器输出端的大功率水负载吸收。

商用 1 kW 微波炉磁控管由于大规模量产，因此在工艺上管子直接的差距较小，因此其振荡频率的差距较小，注入锁定后两支管子锁定的最佳频率

点比较靠近，相位差的波动较小，加上功率较小，所需注入信号的功率较低，因此能够用于合成的磁控管较容易挑选到，且合成效率基本能够达到95%以上。

表 1 两路 1kW 磁控管合成实验测试结果

No.	磁控管 1 (W)	磁控管 2 (W)	合成功率 (W)	最佳合成效率
1	977	975	1864	95.49%
2	981	983	1869	95.16%
3	999	1000	1909	96.50%
4	995	980	1884	95.39%

工业用 20 kW 磁控管其振荡频率的差距较大，注入锁定后两支管子锁定的最佳注入锁定的频率不同，相位差的波动较大，有些管子甚至不能进行相干功率合成。因此能够用于合成的磁控管挑选过程复杂。

表 2 给出了能够用于功率合成的两支磁控管的合成效率。且合成效率达到 92% 以上，比 1kW 的磁控管合成效率略低。工业用磁控管合成的功率略有下降的主要原因是电源的纹波较大，相位锁定效果在不同功率下，因为锁定频率不同而发生了改变。未来我们将进行更深入的研究。

表 2 两路 20 kW 磁控管合成实验测试结果

No.	磁控管	磁控管	合成功	最佳合
-----	-----	-----	-----	-----

	3 (kW)	4 (kW)	率 (kW)	成效率
1	5.74	5.43	10.4	93.1%
2	10.0	9.9	18.4	92.4%
3	13.7	13.5	25.3	93.0%
4	16.3	16.5	30.5	92.9%

4 结论

利用注入锁定技术对磁控管进行稳频锁相，并进行两路注入锁定磁控管的相干功率合成实验。当采用商用微波炉磁控管和工业用磁控管两种不同的磁控管，分别进行功率合成，最后实验测量的合成效率有一定差异。实验的差异进行了简要分析，具体的原因在未来的研究中，将进行详细的研究。

参考文献

- 1 刘长军, 吴昕. 微波能工业应用研究进展 [J]. 信息与电子工程, 2012, 10(4): 451-5.
- 2 张兆镛. 磁控管的历史、现状与未来发展——兼论微波功率应用的前景 [J]. 真空电子技术, 2016, 2): 38-41.
- 3 岳松, 张兆传, 高冬平. 阻抗匹配条件下磁控管的注入锁频 [J]. 物理学报, 2013, 62(17):
- 4 陈文奎, 林早军, 沈明强. 微波宽带超大功率合成技术 [J]. 舰船电子对抗, 2009, 32(01): 103-7.
- 5 LIU C, HUANG H, LIU Z, et al. Experimental Study on Microwave Power Combining Based on Injection-Locked 15-kW S-Band Continuous-Wave Magnetrons [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2016, 44(8): 1291-7.