

DOI: 10.11991/yykj.202111017

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1191.U.20211230.1431.002.html>

20 kW 磁控管频率推移特性的功率合成实验研究

刘臻龙^{1,2}, 唐正明², 刘长军³

1. 西华师范大学 电子信息工程学院, 四川 南充 637002

2. 西南电子技术研究所, 四川 成都 610036

3. 四川大学 电子信息学院, 四川 成都 610064

摘 要:为突破能源互联网应用中微波功率对工业应用规模和无线通信距离的限制,开展了基于 S 波段 20 kW 磁控管推移特性的两路连续波磁控管功率合成系统实验研究。从理论上分析了 20 kW 磁控管频率推移特性的功率合成系统的可行性和高效合成条件,从实验中完整表征 20 kW 磁控管的推移特性,并通过该特性成功实现了双管功率合成。测试结果表明,基于 20 kW 磁控管频率推移特性的功率合成系统两路合成输出功率为 34.0 kW,合成效率为 92.3%,合成之后的频率谱有一定改善,为磁控管在能源互联网领域的应用起到了重大推动作用。

关键词:磁控管; 频率推移; 功率合成; 互注入; S 波段; 真空管; 高功率; 效率

中图分类号: TN123

文献标志码: A

文章编号: 1009-671X(2022)01-0090-05

Study on the power synthesis system of 20 kW magnetrons based on frequency pushing

LIU Zhenlong^{1,2}, TANG Zhengming², LIU Changjun³

1. School of Electronics and Information Engineering, China West Normal University, Nanchong 637002, China

2. Southwest China Research Institute of Electronic Technology, Chengdu 610036, China

3. School of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu 610064, China

Abstract: The microwave power output does not satisfy the requirements for energy Internet because of the increasing industrial processing scale and the modern wireless communication distance. To break through such limitations, an experimental study on two-way 20 kW S-band magnetrons power synthesis system based on frequency pushing is proposed. The feasibilities and condition for high-efficiency power synthesis system are analyzed theoretically, and meanwhile, the pushing characteristics of the 20 kW magnetron are completely characterized in the experiment, and the power synthesis of two tubes is successfully realized by this characteristic. The test results show that the synthesized output power of the power synthesis system based on the frequency pushing characteristics of 20 kW magnetron is 34.0 kW, and the synthesis efficiency is 92.3%. The frequency spectrum after synthesis has been improved to a certain extent, which has greatly promoted the application of magnetron in the field of energy Internet.

Keywords: magnetron; frequency pushing; power combining; mutual injection; S band; vacuum tube; high power; efficiency

磁控管以其高转化效率和巨大的低成本优势,在深空通信、空间太阳能电站和微波加热领域有着无法替代的地位。然而,在能源流和信息流深度结合的今天,随着能源互联网的高速发

展,对微波源的输出(连续波)功率提出了更高的要求^[1]。例如,高功率微波等离子体化学气相沉积法制造金刚石膜,要求 S 波段连续波功率达到 60 kW 以上^[2]。遗憾的是,目前并没有能满足这一条件且高效廉价的微波源, S 波段连续波磁控管最高输出功率仅可以达到 30 kW,其主要的产商有美国理查森和布洛(S94610E, Richardson & Burle)和中国南京三乐(CK-2121),中国南京三乐生产的磁控管在稳定性和寿命等方面与国外还存在一定的差距^[3]。单只磁控管微波源功率容量远不能满

收稿日期: 2021-11-07. 网络出版日期: 2021-12-31.

基金项目: 国家自然科学基金项目(62101366, 61271074); 中电天奥技术创新基金项目(H21017); 973 计划项目(2013CB328902)。

作者简介: 刘臻龙,男,工程师,博士。
唐正明,男,教授,博士。

通信作者: 刘臻龙, E-mail: zhenlong_liu@foxmail.com.

足目前的需求。对多个廉价的磁控管进行功率合成,是满足当下应用需求的最佳选择。但磁控管的输出幅相特性差,难以直接合成,必须对磁控管的幅相进行有效控制后再进行功率合成。从目前磁控管功率合成技术的研究中我们发现其存在以下2个方面的难题:通常采用基于外注入的注入锁定功率合成技术^[4-8]需要增加高纯度的注入锁定信号,成本高;而采用非相干功率合成方法^[9-10],由于磁控管的一致性差造成功率合成效率低,非相干功率合成的互耦设计不合理甚至会影响微波源的工作稳定性和工作寿命。针对上述的问题,本文并提出了一种基于磁控管推移特性的互注入功率合成技术,并进行实验验证。该技术不仅为低成本磁控管大功率微波功率合成的技术难题提供一种通用技术解决方案,还能为工业微波能、空间无线能量传输系统、深空通信高功率微波应用领域的发展起到重大推动作用。

1 磁控管推移特性的功率合成结构

图1为本文所提出的两路基于磁控管推移特性的功率合成系统框图,2只磁控管通过环行器输出高功率微波至三端口功率合成器,环行器剩余的1个端口与负载相连,由于三端口功率合成器与现实的环行器隔离度有限,磁控管1输出的部分功率会透射过三端口功率合成器,反向注入磁控管2;同理,磁控管2的部分输出功率也将注入磁控管1。这样的互耦方式保证了2只磁控管的稳定工作,当磁控管满足锁定条件与特定的幅相特性时,2只磁控管可以相互锁定,将在同一频率上振荡,完成2只磁控管的功率合成,输出至最终的负载端。

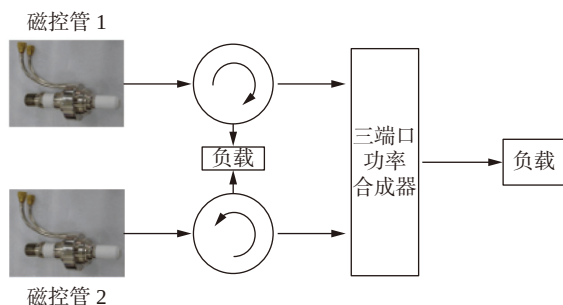


图1 基于推移特性磁控管系统框图

2 功率合成效率因素分析

图1中的2只磁控管输出信号经过环行器入射 H-T 功率合成器,两路磁控管入射到 H-T 合成器参考平面的信号分别为 $P_1 e^{j\varphi_1}$ 和 $P_2 e^{j\varphi_2}$, 则根据 H-T 合成器的 S 参数矩阵^[11], 可得 H-T 合成器的合

成输出为

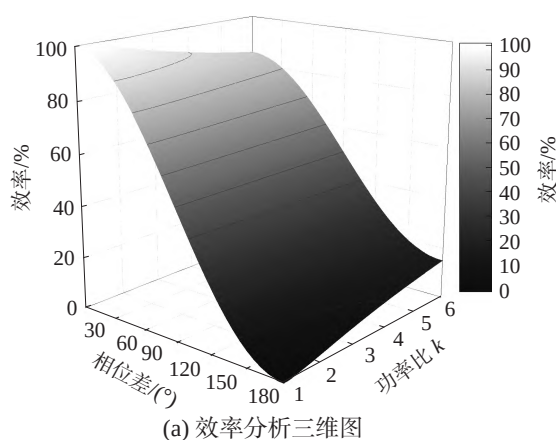
$$P_{H-T} = \frac{1}{2}(P_1 + P_2) + \sqrt{P_1 P_2} \cos \Delta\varphi \quad (1)$$

式中 $\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$ 。

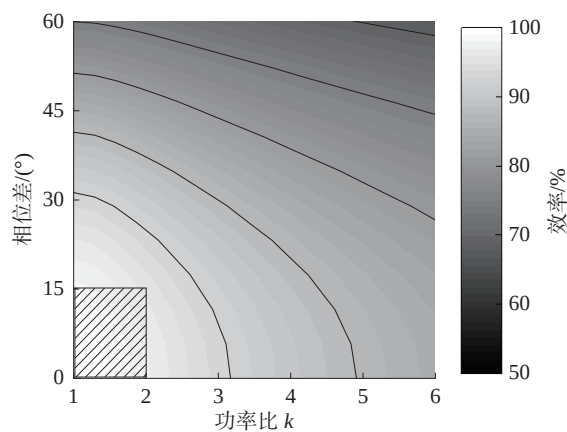
引入功率比 k , 令 $k = P_1/P_2$, 则通过式(1)可计算出 H-T 功率合成效率为

$$\eta_{c-H-T} = \frac{P_{H-T}}{P_1 + P_2} = \frac{1}{2} + \frac{\sqrt{k} \cos \Delta\varphi}{1+k} \quad (2)$$

式(2)的估算为无耗条件下 H-T 功率合成器合成效率与两路输入信号幅相不平衡之间的关系,为了更直观地表述这种关系,将式(2)映射成图2。



(a) 效率分析三维图



(b) 效率分析投影平面图

图2 H-T 功率合成器效率分析

从图2中可以看出,当两路磁控管入射 H-T 功率合成器的幅度相等、相位差为 0° 时,合成效率达到最大,无耗合成的效率高达 100%。随着相位差和功率比进一步增大,合成效率逐渐降低,当磁控管等幅入射 H-T 功率合成器时,相位差为 90° 时也无合成效应。当磁控管同相位入射 H-T 功率合成器时,功率比 $k = 5.8$ 时,合成器无合成效应。即使两路磁控管入射信号的功率比达到 3 dB、相位差达到 15° ,无耗 H-T 功率合成器的合成效率也能达到 95% 以上。

3 磁控管幅相控制分析

从上面的分析中可以知道,为了达到 H-T 合成器的高效合成条件,磁控管的幅度和相位必须进行控制。磁控管的输出功率(幅度)很容易通过调节阳极电流来实现;所以本节重点分析在图 1 的系统中如何实现磁控管的相位控制。

图 1 的 2 个磁控管是相同的,每个磁控管既是注入源,又是受控振荡器。磁控管之间通过信号的互相耦合来相互控制并实现互相锁定,从而实现频率和相位的控制。磁控管互注入锁定满足 Slater 的理论^[12],因此定义表征两只磁控管之间的复耦合系数 $\xi_{12}e^{j\Phi_{12}}$ 和 $\xi_{21}e^{j\Phi_{21}}$,则图 1 中 2 只磁控管满足式(3)和式(4)^[12]:

$$\frac{d\varphi_1}{dt} = \omega_1 + \frac{\omega_1\xi_{21}}{2Q_{1e}} \sin(\Phi_{21} + \varphi_1 - \varphi_2) \quad (3)$$

$$\frac{d\varphi_2}{dt} = \omega_2 + \frac{\omega_2\xi_{12}}{2Q_{2e}} \sin(\Phi_{12} + \varphi_2 - \varphi_1) \quad (4)$$

式中: ω_1 和 ω_2 、 Q_{1e} 和 Q_{2e} 分别为 2 只磁控管单独的自由振荡频率和外观品质因数, φ_1 和 φ_2 为 2 只磁控管的输出相位, $\xi_{12}(\xi_{21})$ 表示自由振荡频率为 $\omega_2(\omega_1)$ 的磁控管对自由振荡频率为 $\omega_1(\omega_2)$ 的磁控管的耦合强度, Φ_{12} 和 Φ_{21} 则表示互注入路径上带来的相位超前或者滞后。

为了描述互注入磁控管之间的相位差,用式(3)减去式(4),得

$$\frac{d\Delta\varphi}{dt} = \Delta\omega + \left[\frac{\omega_1\xi_{21}}{2Q_e} \sin(\Phi_{21} + \Delta\varphi) - \frac{\omega_2\xi_{12}}{2Q_e} \sin(\Phi_{12} - \Delta\varphi) \right]$$

式中: $\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$, $\Delta\omega = \omega_1 - \omega_2$ 。

由于图 1 的系统中合成系统的 2 只单管系统完全对称,假设 $\xi_{12}e^{j\Phi_{12}} \approx \xi_{21}e^{j\Phi_{21}} \approx \xi e^{j\Phi}$, $Q_{1e} = Q_{2e} = Q_e$,在稳态情况下, $d\Delta\varphi/dt = 0$,则实现双管高效功率合成 $\Delta\varphi = 0$ 的条件为

$$\omega_1 \approx \omega_2$$

磁控管的一致性通常比较差,而控制磁控管的频率的办法之一为磁控管的推移特性。

4 20 kW 磁控管频率推移特性

磁控管的频率推移通常是指磁控管的振荡频率随着阳极电流变化而变化,根据 Chen 等^[13]理论,瞬时磁控管的自由振荡频率 ω' 为

$$\omega' = \omega_0 - \omega_0 \frac{B}{2Q_e} + \frac{b}{2C}$$

式中 b 描述了频率推移效应。 b 应遵循关系为

$$g = -\frac{1}{R} \left(\frac{V_{dc}}{V_{mw}} - 1 \right)$$

$$b \approx b_0 + g \tan \alpha$$

式中: V_{dc} 为 A-K 间隙, b_0 为常数, α 为推移因子。 B 描述了频率牵引效应。

磁控管的推移曲线并不是单调曲线。我们直接在功率合成系统中对磁控管的推移特性进行了测试。

5 20 kW 磁控管功率合成系统

根据上述分析,依照图 1 所示的原理图,完成了 20 kW 基于磁控管推移特性的功率合成系统,系统框图如图 3 所示。图 3 中大箭头指示磁控管产生的微波大功率信号传输方向,小箭头指示磁控管之间互相耦合的信号传输通道。此处说明一点,图 3 中通过最终负载功率控制磁控管阳极电流的反馈支路未在图中表示。完成后的整个系统测试如图 4 所示。

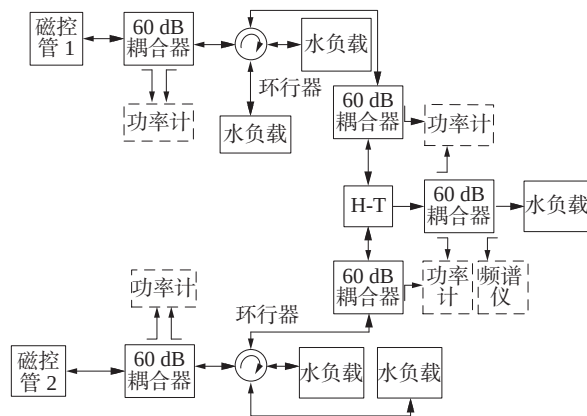
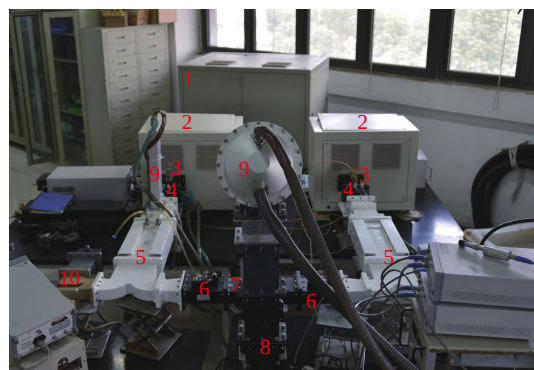


图3 20kW 磁控管功率合成框图



(1.WY30S-02 电源; 2.磁控管及机箱; 3、4.60 dB 耦合器; 5.环行器; 6. 60 dB 耦合器; 7.H-T 功率合成器; 8.转接波导; 9.大功率水负载; 10.注入环行器和端接匹配负载)

图4 磁控管功率合成系统测试

首先挑选其中 1 只磁控管,测试其 20 kW 磁控管的推移特性,如图 5 所示。图 5 描述了 20 kW 磁控管输出功率高于 5.0 kW 时,磁控管自由振荡输出频谱随阳极电流的变化。随着磁控管输出平均功率从 5.7 kW 增加至 20.0 kW,磁控管自由振荡输出频谱越来越尖锐,磁控管输出基底噪声也呈现下降趋势,且随着阳极电流的增加,磁控管

自由振荡的中心频率也随之增加。然而,当磁控管输出功率达到 20.0 kW 时,磁控管的中心频率比功率为 18.9 kW 的中心频率回退了 550 kHz,这是由于 20 kW 磁控管的推移特性受到阳极块温升的影响。因此,为了实现双管的功率合成,只需要选择不受阳极块温升影响的频率区域,适当降低频率高的一只管子的阳极电流,随着阳极电流的下降,其振荡频率也随之下落,实现 2 只磁控管的自由振荡频率区域一致,达到高效的功率合成。

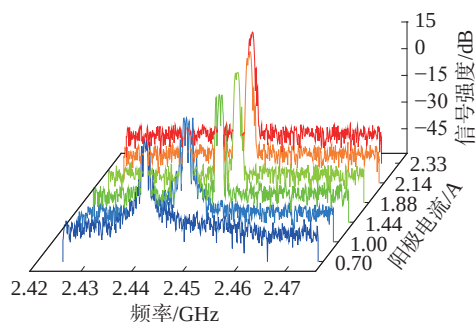


图5 20 kW 磁控管推移特性

首先同时把两路磁控管开启,并将双管功率分别推至 19.0 kW,测量该系统不进行频率推移自由振荡合成端的输出频谱,测量结果如图 6 所示。2 只磁控管馆分别在 2.447 GHz 和 2.449 GHz 自由振荡,并存在交调产物,2 管之间的相对相位显然在剧烈抖动,我们在测试其平均功率时发现,双管输出功率及合成功率都存在较大的抖动,无稳定输出,这是由于双管之间的周期牵引引起的。

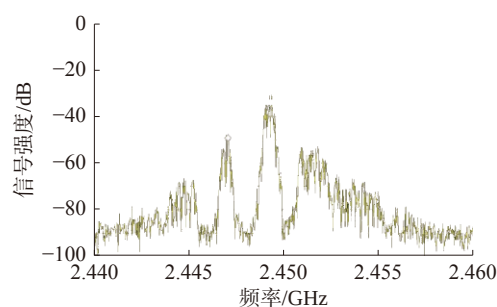


图6 双管自由振荡合成频谱图

为了实现稳定的合成输出,根据上述分析,依次开启一路频率较高的磁控管,并关闭另外一路,调节阳极电流,使得磁控管的自由振荡频率接近另外一只管子的自由振荡频率,将两路磁控管的自由振荡频率牵引至近似相等。经过调节后,如图 7 所示,一路磁控管的自由振荡中心频率牵引至 2.4476 GHz,此时调节后的磁控管传输至 H-T 的入射功率为 17.8 kW;另外一路开启后频率和功率和原来保持一致,因磁控管外接环行器的微小差异,2 只磁控管之间互注入的功率分别为 150.0 W

和 185.0 W,两路磁控管共同振荡在 2.4475 GHz。此时,相对于单管磁控管振荡频谱频率抖动和颤噪基本消失了,并且振荡频谱比自由振荡的频谱明显收窄,其频率稳定性明显提高,但因缺少外注入信号,输出频谱的略差与外注入功率合成方式^[4]。如图 7 所示,合成之后的频谱质量获得一定的提升,H-T 功率合成器输出端测得合成输出的平均功率为 34.0 kW,计算得出功率合成器的合成效率为 92.3%,接近理论估算的效率。迄今尚未见到 S 波段磁控管以互注入的方案合成达到这个功率和效率的报道。最后,测量了 30 min 该功率合成系统的总功率波动情况,两路 20 kW 磁控管的合成功率基本维持在 34.0 kW 左右,即使受到市电和电源自身波动的干扰,通过利用磁控管的推移特性,两路合成总功率的最大抖动在整个 30 min 仅仅为 0.30 dB。

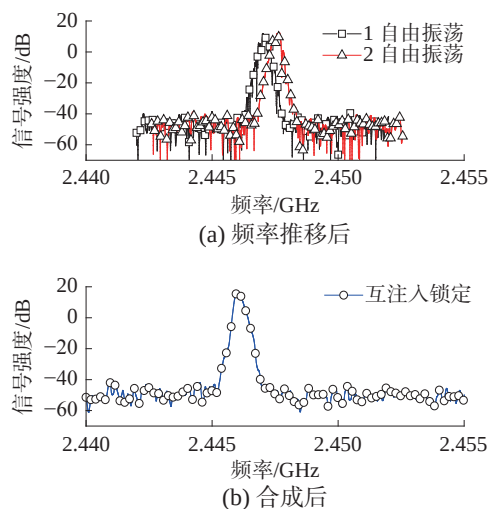


图7 磁控管功率合成实验结果

6 结论

本文提出了一种无需外部信号注入的基于 20 kW 磁控管推移特性的互注入低成本功率合成技术,并进行实验验证:

- 1)完整表征了 20 kW 了磁控管的推移特性;
- 2)基于推移特性实现双管合成功率大于 34 kW,合成效率高于 92%;
- 3)功率合成稳定高,功率抖动小于 0.3 dB。

参考文献:

- [1]吴群. 磁控管的研究现状与发展趋势 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2000, 32(5): 9-12.
- [2]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): 451-455.

(下转第 110 页)

- circular concrete-filled steel tube stub columns[J]. Journal of constructional steel research, 2007, 63: 165–174.
- [5] HAN L H, LIU W, YANG Y F. Behavior of concrete filled-steel tubular stub columns subjects to axially local compression[J]. Journal of construction steel research, 2008, 64(4): 377–387.
- [6] WANG Y Y, YANG Y L, ZHANG S M. Static behaviour of reinforcement-stiffened square concrete-filled steel tubular columns[J]. Thin-walled structures, 2012, 58: 18–31.
- [7] 杨有福, 黄翔宇. 矩形钢管再生混凝土短柱的轴压性能[J]. 华南理工大学学报, 2017, 45(12): 121–126.
- [8] 王坚, 陈誉, 刘超, 等. 冻融循环作用后不锈钢管混凝土短柱性能研究[J]. 广西大学学报, 2017, 42(3): 1159–1163.
- [9] 唐红元, 李政周, 范璐瑶, 等. 矩形不锈钢管混凝土短柱轴压性能试验研究[J]. 西南交通大学学报, 2020: 1–9.
- [10] 李怡, 王丹伶, 郭银, 等. 轴压作用下带剪力键的钢管桩桩芯混凝土受力研究[J]. 水利水电技术, 2020, 51(4): 212–219.
- [11] 唐红元, 范璐瑶, 赵鑫, 等. 圆不锈钢管混凝土短柱轴压承载力性能研究[J]. 地震工程与工程振动, 2021, 41(1): 63–69.
- [12] FENG Zhou, BEN Young. Web crippling of aluminium alloy channel sections with flanges restrained[J]. Thin-walled structures, 2020, 148: 106576.
- [13] AHMED Mizan, LIANG Qingquan. Numerical analysis of thin-walled round-ended concrete-filled steel tubular short columns including local buckling effects[J]. Structures, 2020, 28: 181–196.

本文引用格式:

岳鹏, 何建, 李豪强, 等. 轴心受压带剪力键的不锈钢管混凝土短柱承载力试验研究[J]. 应用科技, 2022, 49(1): 105–110.

YUE Peng, HE Jian, LI Haoqiang, et al. Mechanical performance of the concrete-filled stainless steel tubular stub columns with shear keys under axial loading[J]. Applied science and technology, 2022, 49(1): 105–110.

(上接第 93 页)

- [3] LIU Z, CHEN X, YANG M, et al. Experimental studies on a 1 kW high-gain S-band magnetron amplifier with output phase control based on load-pull characterization[J]. IEEE transactions on plasma science, 2018, 46(4): 909–916.
- [4] 银振宇, 位宇, 刘臻龙, 等. 1 kW 注入锁定连续波磁控管微波相干合成实验研究[J]. 应用科技, 2016, 43(5): 20–23.
- [5] LIU Z, CHEN X, YANG M, et al. Experimental studies on a four-way microwave power combining system based on hybrid injection-locked 20 kW S-band magnetrons[J]. IEEE transactions on plasma science, 2018, 47(1): 1–8.
- [6] LIU Z, CHEN X, YANG M, et al. Experimental studies on a low power injection-locked continuous wave magnetron[C]// 2017 IEEE/MTT-S International Microwave Symposium. Hawaii: IEEE, 2017.
- [7] SHINOHARA N, MATSUMOTO H, HASHIMOTO K. Phase-controlled magnetron development for SPORTS: Space power radio transmission system[J]. URSI radio science bulletin, 2017, 77(3): 29–35.
- [8] LAI C, ZHAO C, LI K, et al. Highly efficient microwave power system of magnetrons utilizing frequency-searching injection-locking technique with no phase shifter[J]. IEEE transactions on microwave theory and techniques, 2020, 68(10): 1–1.
- [9] SHINOHARA N, MATSUMOTO H. Research of magnetron phased array with mutual injection locking for space solar power satellite/station[J]. Electrical engineering in Japan, 2010, 173(2): 21–32.
- [10] YI Z, HUANG K, AGRAWAL D K, et al. microwave power system based on a combination of two magnetrons[J]. IEEE transactions on electron devices, 2017, 64(10): 1–7.
- [11] GUO L, LI J, HUANG W, et al. A compact four-way power combiner[J]. IEEE microwave & wireless components letters, 2017, 27(3): 239–241.
- [12] SLATER J C. The phasing of magnetrons[R]. Cambridge: MIT, 1947.
- [13] CHEN S C. Growth and frequency pushing effects in relativistic magnetron phase-locking[J]. IEEE transactions on plasma science, 1989, 18(3): 570–576.

本文引用格式:

刘臻龙, 唐正明, 刘长军. 20 kW 磁控管频率推移特性的功率合成实验研究[J]. 应用科技, 2022, 49(1): 90–93, 110.

LIU Zhenlong, TANG Zhengming, LIU Changjun. Study on the power synthesis system of 20 kW magnetrons based on frequency pushing[J]. Applied science and technology, 2022, 49(1): 90–93, 110.