

微波谐振器系统的调谐实验研究*

石峰 杨涓[†] 汤明杰 罗立涛 王与权

(西北工业大学航天学院, 西安 710072)

(2014年1月9日收到; 2014年3月18日收到修改稿)

圆台谐振腔和微波产生及传输装置可以形成一套和外界独立的微波谐振器系统. 由于壁面上电磁压强差的作用, 圆台谐振腔可能产生净电磁力, 这需要从实验上给予证明. 为此首先应对独立的微波谐振器系统进行调谐实验研究, 使系统时刻处于谐振状态, 这是实验证明净电磁力存在的重要保证. 为此, 本文对圆台谐振腔进行低信号调谐实验, 同时配合调谐元件, 准确地调试 2.45 GHz 频率下的谐振状态, 分析温度对谐振状态的影响. 实验结果表明该微波谐振器谐振频率 2.44895 GHz、品质因数 117495.0823, 而且当腔体壁温升高时谐振频率减小、品质因数出现周期性振荡.

关键词: 应用电磁学, 电磁波传输, 微波射频仪器和设备

PACS: 41.20.-q, 41.20.Jb, 07.57.-c

DOI: 10.7498/aps.63.154103

1 引言

利用自由空间中电磁场形成的电磁压强产生推力已经被公开发表的研究论文所证实^[1,2], 其产生推力的系统是一个开放系统. 相对自由空间而言, 如果微波谐振器系统中的电磁压强差能产生电磁力, 则又会出现一种新型的推进方案.

微波谐振器系统主要由圆台谐振腔和微波产生及传输装置组成, 其中圆台谐振腔是净电磁力的主要来源. 圆台谐振腔由金属导体制成, 如果电磁波输入到谐振腔后产生谐振现象, 则腔体内任何位置反射波和入射波的相位都相等, 总电场和磁场振幅是入射波和反射波的直接叠加, 从而总电场和磁场振幅分别大于入射波幅值. 再恰当地选择谐振模式, 使腔体前后两端壁面产生电磁压强差, 谐振腔就会产生沿轴向分布的净电磁力. 腔体内场幅值的增加以及电磁压强差的存在将使圆台谐振腔产生净电磁力^[3-5].

为了从实验上证明圆台谐振腔净电磁力的存在, 需要对一套和外界独立的微波谐振器系统进行

调谐实验研究, 使该系统时刻处于谐振状态. 为此, 本文对圆台谐振腔进行低信号调谐实验, 同时配合调谐元件, 准确地调试出 2.45 GHz 频率下的谐振状态, 并实验分析温度对谐振状态的影响, 给出系统在真实功率条件下的参数特征.

2 微波谐振器的组成

由圆台谐振腔构成的微波谐振器系统如图 1 所示, 它是一套精确的频率跟踪系统, 由铁锂电池调理电源、信号源、放大器、波导、圆台谐振腔、检波器和辐射散热器组成, 其中信号源和放大器构成固态源. 系统工作时, 信号源把电能转换为毫瓦级、频率为 2.45 GHz 的电磁能输入到放大器中, 放大器在电能的作用下把毫瓦级能量放大到数百瓦的能量并沿波导传输到圆台谐振腔内. 当圆台谐振腔的固有谐振频率和信号源输出的频率相同时, 电磁波在圆台谐振腔内谐振, 检波器信号处于极大值状态, 圆台谐振腔可能产生轴向净电磁力 F . 相反, 当圆台谐振腔谐振频率和信号源输出频率不同时, 检波器信号处于极低水平, 这时不断改

* 国家自然科学基金(批准号: 90716019)资助的课题.

[†] 通讯作者. E-mail: yangjuan@nwpu.edu.cn

变信号源输出频率,直到和圆台谐振腔谐振频率相符合,这时检波器信号达到极大值,电磁谐振器系统谐振,圆台谐振腔可能产生净电磁力.文献[6]从理论上论述了圆台谐振腔品质因数和净电磁力成正比,因而谐振腔在其谐振频率点上准确谐振并具有高品质因数是产生净电磁力的关键因素.

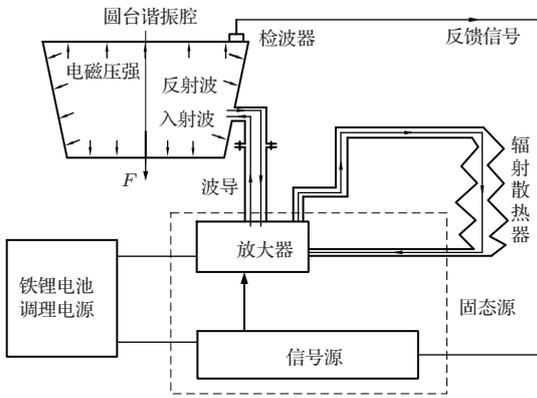


图1 微波谐振器系统结构示意图

3 微波谐振器系统谐振状态的保证条件

3.1 基于谐振腔结构的保证条件

电磁波传输进一段封闭的空腔波导时,既能储存电场能,又能储存磁场能,因而腔体可等效为一低频的RLC电路.当外加的电源频率 ω 与RLC电路的自由振荡频率 ω_0 相吻合时,发生谐振,电路中存贮的能量最大.封闭波导腔内电磁场产生谐振的原理与此相同,因而发生谐振的条件为:1)腔内的最大电能与最大磁能相等;2)腔内存在 $\left(\frac{1}{4} + \frac{n}{2}\right)$ 或 $\left(\frac{1}{2} + \frac{n}{2}\right)$ 个纯驻波, $n = 1, 2, 3, \dots$;3)腔体内的电感抗与电容抗相等.理论上,谐振腔内的微波谐振模式存在多样化,为了产生明显的电磁力,需要在圆台谐振腔内选择等效的、高品质因数的TE₀₁₁模式.根据微波理论[7],TE₀₁₁模只能存在于圆柱谐振腔内.而针对圆台谐振腔,TE₀₁₁模的电磁特征方程无法求解.但是如果在圆台谐振腔侧壁采用TE₀₁模的矩形波导进行微波耦合将会在圆台谐振腔内激励起相似圆柱谐振腔内TE₀₁₁模的电磁场分布,因而此处采用TE₀₁₁来描述所用的谐振模.根据微波谐振腔理论,文献[6]确定了电磁谐振器系统中圆台谐振腔的结构,从而在理论上保证了圆

台谐振腔谐振于2.45 GHz的TE₀₁₁模.

3.2 基于系统匹配的保证条件

对于图1所示的微波谐振器系统,圆台谐振腔、波导和固态源三者的等效阻抗相等时,系统达到匹配,此时微波输出功率全部被谐振腔吸收[8].当系统不匹配时,微波功率输出到谐振腔有反射,这时需要在谐振腔附近产生一新的反射波,使它恰好和反射波等幅反相,彼此抵消,从而达到系统匹配.产生这新一反射波的方法是使用矩形微波耦合窗和双螺调配器如图2所示,其中矩形微波耦合窗用在圆台谐振腔和波导之间,双螺调配器用在矩形微波耦合窗口和固态源之间.调整出恰当的矩形微波耦合窗尺寸 L_1, L_2 和双螺调配器中两个螺钉的深度 L_3, L_4 就可以使微波谐振器系统达到准确的匹配状态.

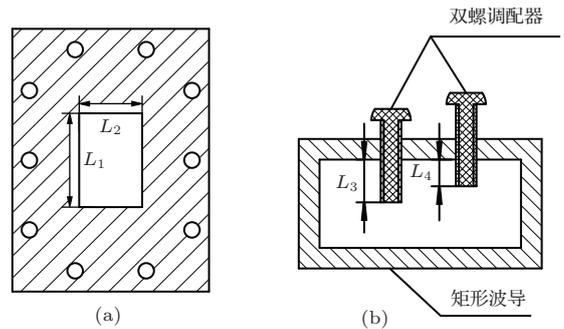


图2 微波谐振器的匹配元件 (a) 矩形微波耦合窗; (b) 双螺调配器

4 圆台谐振腔的低信号调试

4.1 调试原理

在谐振模态和谐振频率确定条件下,根据谐振腔理论,就可以设计加工出圆台谐振腔.实际上,由于设计计算、加工和装配误差会导致实际谐振腔偏离于理想谐振结构;另外环境温度变化和腔体内表面集肤深度内热效应也会引起腔体径向和轴向上的尺寸发生变化,这些不确定因素不仅影响谐振腔的谐振频率,还影响品质因数.因而要根据谐振腔回波损耗的调试实验方法确定腔体具体结构、谐振频率和品质因数.

定义回波损耗为

$$L_r = 10 \lg \frac{P_r}{P_1}, \quad (1)$$

其中 P_r 为从谐振腔反射出的功率, P_1 为输入到谐振腔的功率. 定义品质因数 Q 为谐振腔内电磁场的总储能与一个周期内损耗能量之比的 2π 倍, 即

$$Q = 2\pi \frac{W}{p_L T_0} = \frac{\omega_0 W}{p_L}, \quad (2)$$

其中 W 为腔内电、磁总储能, p_L 为谐振腔内平均损耗功率, T_0 为谐振周期.

图 3 表示一个典型的回波损耗测试曲线, 曲线的最低点为谐振状态, 对应的频率为谐振频率 f_0 . 品质因数可按公式 $Q = \frac{f_0}{f_2 - f_1} = \frac{f_0}{\Delta f}$ 来计算, 其中 $\Delta f = f_2 - f_1$ 为谐振频率带宽. 可见, 谐振频率与谐振频率带宽的比值决定了品质因数.

如图 4 所示, 微波谐振器调谐系统由网络分析仪、矩形微波耦合窗、双螺调配器和圆台谐振腔组成, 圆台谐振腔又由侧壁、大小端盖构成, 其中网络分析仪通过微波传输电缆与谐振腔连接. 调试

前, 先对网络分析仪进行短路校准, 即反射测量归一化. 再接入待调试的器件, 测量谐振腔在谐振频率附近的回波损耗, 确定品质因数. 通过更换大小端盖、矩形微波耦合窗以及调整双螺调配器螺钉深度进行调试, 从而确定谐振于 2.45 GHz、具有最高品质因数的结构组合.

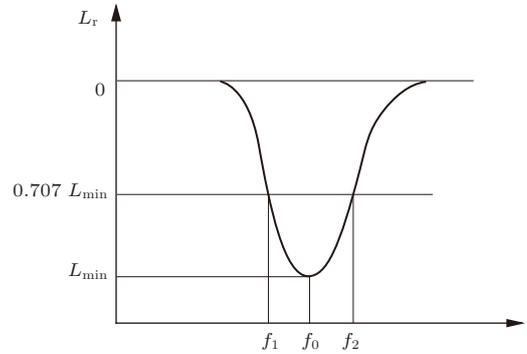


图 3 回波损耗测试曲线

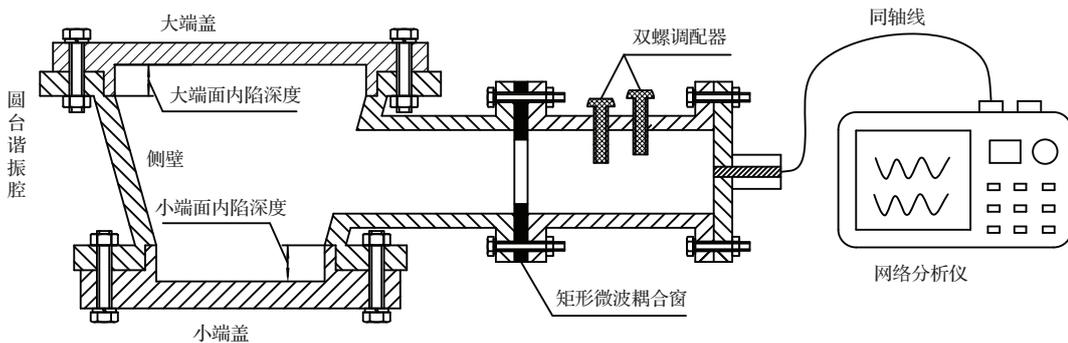


图 4 微波谐振器调谐系统

4.2 调试结果及分析

4.2.1 圆台谐振腔的调试

1) 不同大小端盖组合. 采用 7 套具有不同内陷深度的大小端盖, 可以得到 49 种不同组合, 针对大小端面内陷深度的不同, 调试后选择出大端面内陷深度 4 mm、小端面内陷深度 12 mm 为最佳组合, 此时谐振频率最接近 2.45 GHz, 而且品质因数最高. 其回波损耗曲线如图 5 (a) 所示, 从中得出谐振频率 2.4500 GHz, 谐振带宽 2.5×10^{-3} GHz, 品质因数 976.9753.

2) 不同结构的矩形微波耦合窗. 采用 15 种不同尺寸的矩形微波耦合窗, 在最佳大小端盖组合基础上, 经过调试, 最终选择出 $L_1 = 43.34$ mm,

$L_2 = 31.78$ mm 时矩形微波耦合窗最佳, 此时谐振频率最接近 2.45 GHz, 而且品质因数最高. 其回波损耗曲线如图 5 (b) 所示, 从中得出谐振频率 2.4500 GHz, 谐振带宽 1.6×10^{-3} GHz, 品质因数 1512.887.

4.2.2 最佳结构圆台谐振腔和双螺调配器的调试

在上述圆台谐振腔调试基础上, 增加双螺调配器进行调试, 调整双螺钉插入深度直到获得最佳的调试结果如图 5 (c) 所示, 此时谐振频率最接近 2.45 GHz, 而且品质因数最高. 从中得出谐振频率 2.44895 GHz, 谐振带宽 2.0843×10^{-5} GHz, 品质因数 1.175×10^5 .

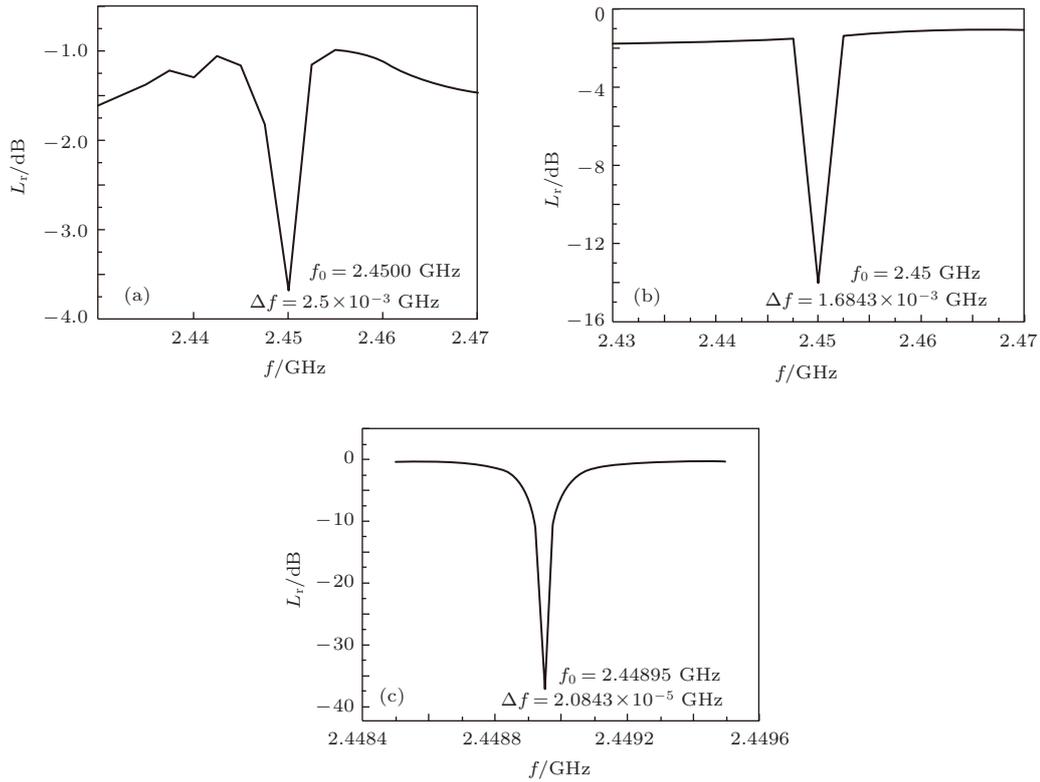


图5 回波损耗测试曲线 (a) 最佳大小端面组合; (b) 最佳矩形微波耦合窗; (c) 最佳螺钉深度双螺调配器

4.3 温度对谐振腔谐振状态的影响

4.3.1 实验规律

根据回波损耗测试曲线可知, 品质因数越高, 谐振带宽越窄, 谐振频率和品质因数对腔体的变形越敏感. 为此在谐振腔外壁加热源, 以产生腔体结构的热变形效果.

将热源分别置于小端面、大端面 and 侧壁面, 测量回波损耗, 再确定谐振频率 f_0 和最低回波损耗 L_{rm} 随热源处温度的变化如图 6 所示. 图 6(a), (b) 为热源置于小端面测试结果, 图示表明温度从 32.5 °C 升高到 49.9 °C 时, 谐振频率从 2.4495 GHz 减小到 2.44885 GHz, 最低回波损耗在 -54 和 -17 dB 之间振荡, 且振荡幅值逐渐减小. 图 6(c), (d) 为热源置于大端面外壁测试结果, 图示表明温度从 29.5 °C 升高到 40.4 °C 时, 谐振频率从 2.44970 GHz 减小到 2.449375 GHz, 最低回波损耗在 -43 和 -17 dB 之间振荡, 且振幅先增大后减小. 图 6(e), (f) 为热源置于外侧壁面测试结果, 图示表明温度从 28.7 °C 升高到 32.8 °C 时, 谐振频率从 2.44935 GHz 减小到 2.44915 GHz, 最低回波损耗在 -42 和 -17 dB

之间振荡, 且振幅基本不变. 从图 6 还可计算出品质因数, 计算结果表明热源置于不同位置时, 最高品质因数都为 120000, 最低品质因数都为 40000.

4.3.2 实验现象分析

谐振频率不断下降这一现象可用微波谐振腔的微扰理论 [8] 进行解释. 由电磁场理论可知, 当腔壁受到微扰时, 有如下关系:

$$\frac{\omega - \omega_0}{\omega_0} = \frac{(\bar{w}_e - \bar{w}_m) \cdot \Delta v}{\bar{W}}, \quad (3)$$

式中, ω 为微扰后的谐振圆频率; ω_0 为微扰前的谐振圆频率; \bar{w}_e, \bar{w}_m 分别为扰动处的平均电能密度和磁能密度; Δv 为体积变化, 当腔壁内凹时, $\Delta v < 0$, 当腔壁外凸时, $\Delta v > 0$; \bar{W} 为微扰后谐振腔内总的平均电磁能. 表 1 说明了各种扰动下频率变化的情况.

表 1 腔壁微扰时频率的变化

		内向微扰	外向微扰
		$\Delta v < 0$	$\Delta v > 0$
微扰区域	强磁场、弱电场	$\omega > \omega_0$	$\omega < \omega_0$
	弱磁场、强电场	$\omega < \omega_0$	$\omega > \omega_0$

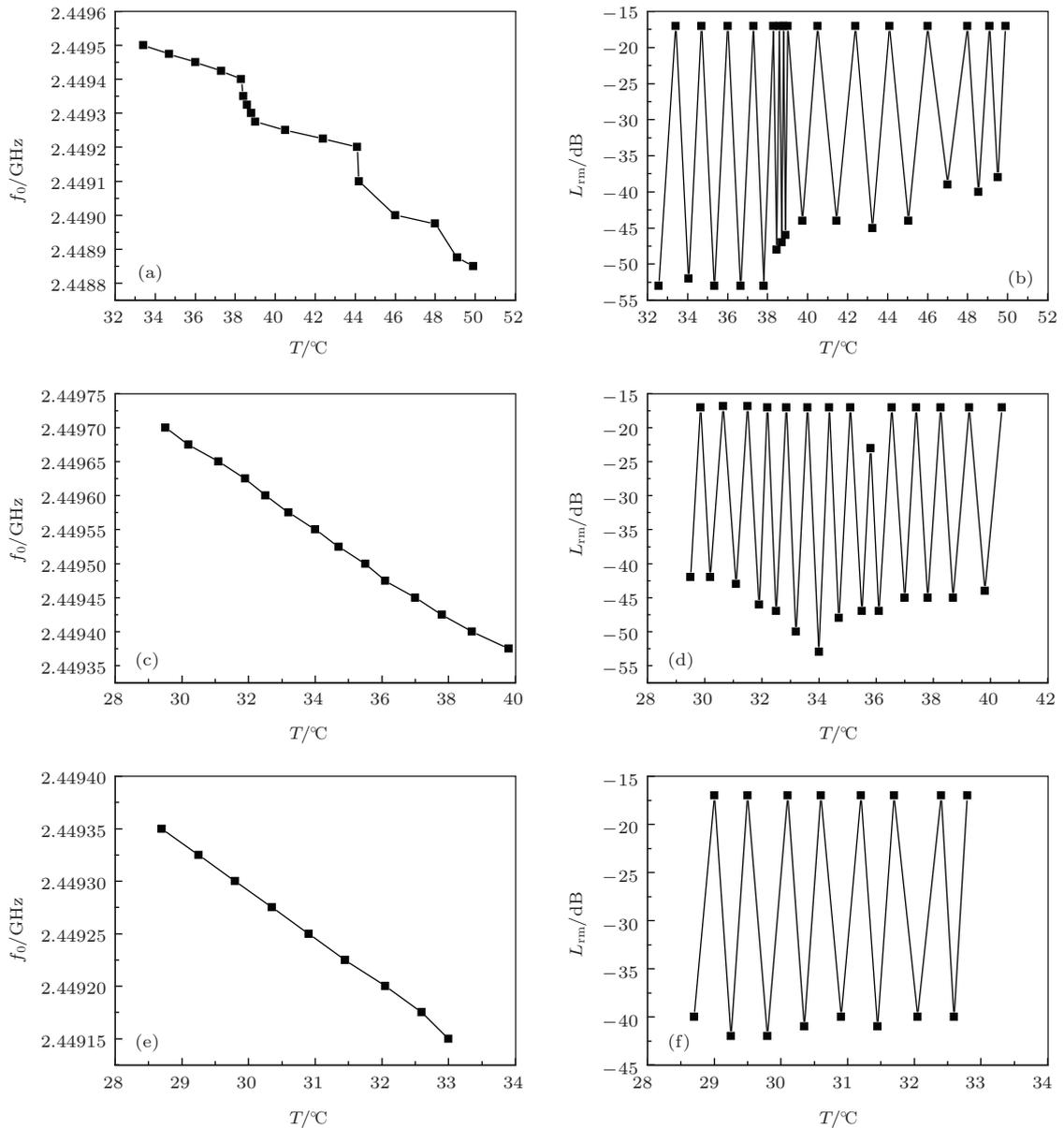


图6 系统谐振频率和最低回波损耗随温度变化的测量结果 (a), (b) 热源置于小端面外壁; (c), (d) 热源置于大端面外壁; (e), (f) 热源置于侧面外壁

根据圆台谐振腔内电磁场分布^[3]可知,在谐振腔内壁面上电场强度始终低于腔内平均值,而磁场强度始终高于腔内平均值.在腔体正常工作时,集肤深度内的热损耗使腔体产生热变形,在螺栓固定下热膨胀使壁面向外凸,这种体积变化十分微小.综上所述,这种条件属于在强磁场、弱电场处的外向微扰.由上表可知,微扰后的谐振频率小于微扰前的谐振频率.

回波损耗大小交替变化现象是由网络分析仪扫描频率无法连续引起的,即网络分析仪只能给出扫描频率点上的回波损耗值.图7(a)所示为实际回波损耗曲线,假设两个相邻的频率点为 f_1, f_2 .

随着加热时间的增加,圆台谐振腔体积不断膨胀,则 t_1, t_2, t_3 和 t_4 时刻实际的回波损耗曲线逐渐向左移动,谐振频率分别为 f_1, f_{01}, f_{02}, f_2 ,最低的回波损耗值都为 L_{min} .但是由于网络分析仪扫描频率无法连续,记录的回波损耗曲线无法和实际曲线一致,即当回波损耗曲线位于 f_1 和 f_2 之间时,实际记录的曲线存在失真、只能给出扫描频率点上的信息.图7(b)给出网络分析仪记录的回波损耗曲线,扫描频率间隔 $\Delta f = f_1 - f_2$.定义 $L_{ri}f_1, L_{ri}f_2$ 为某加热时刻 i 下实际曲线在频率为 f_1, f_2 时的回波损耗值和最低回波损耗值,其中 $i = 1, 2, 3, 4$.对于 t_1 时刻,网络分析仪记录的是真实曲线,谐振频

率为 f_1 , 最低回波损耗为 L_{r1f2} . 对于 t_2 时刻, 网络分析仪记录的测试曲线失真, 即测试谐振频率依然是 f_1 , 而不是 f_{01} , 测试的最低回波损耗值为 L_{r2f2} . 对于 t_3 时刻, 网络分析仪记录的测试曲线谐振频率为 f_2 , 而不是 f_{02} , 测试的最低回波损耗值为 L_{r3f1} . 对于 t_4 时刻, 网络分析仪记录的是真实曲线, 谐振频率为 f_2 , 最低回波损耗 L_{r4f1} . 由此可见, 由于扫频频率间隔的存在, 只有在扫描频率点上回波损耗的测量曲线才符合实际, 除此之外的测量曲线都存在失真, 应该剔除. 这样图 6 (b), (d) 和 (f) 所给出

的实际最低回波损耗曲线应该处理为如图 8 所示的曲线.

从图 8 可得, 当热源置于小端面时, 回波损耗从 -53 dB 逐渐升高到 -38 dB; 当热源置于大端面时, 回波损耗从 -42 dB 下降到 -53 dB 再升高到 -44 dB 左右; 当热源置于侧壁时, 回波损耗发生振荡性变化, 但始终保持在 -40 dB 以下. 由此可得, 影响谐振腔品质因数降低 (回波损耗增大) 的主要因素是小端面温度的升高.

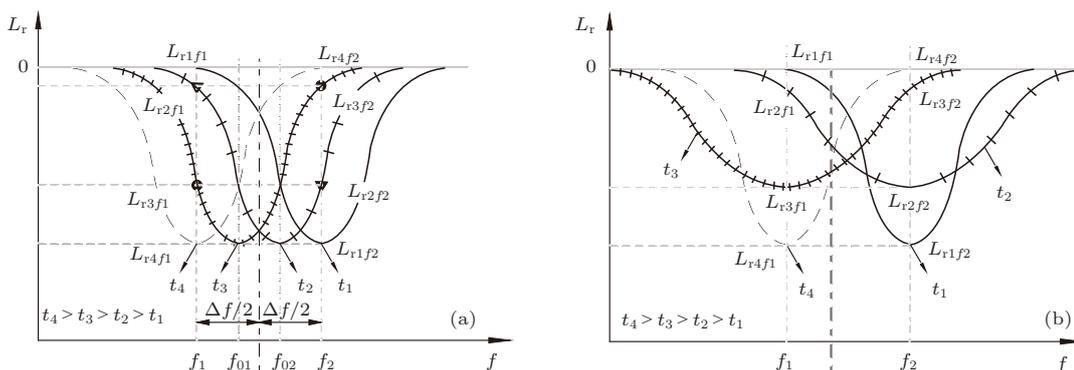


图 7 回波损耗曲线 (a) 实际曲线; (b) 网络分析仪扫频显示曲线

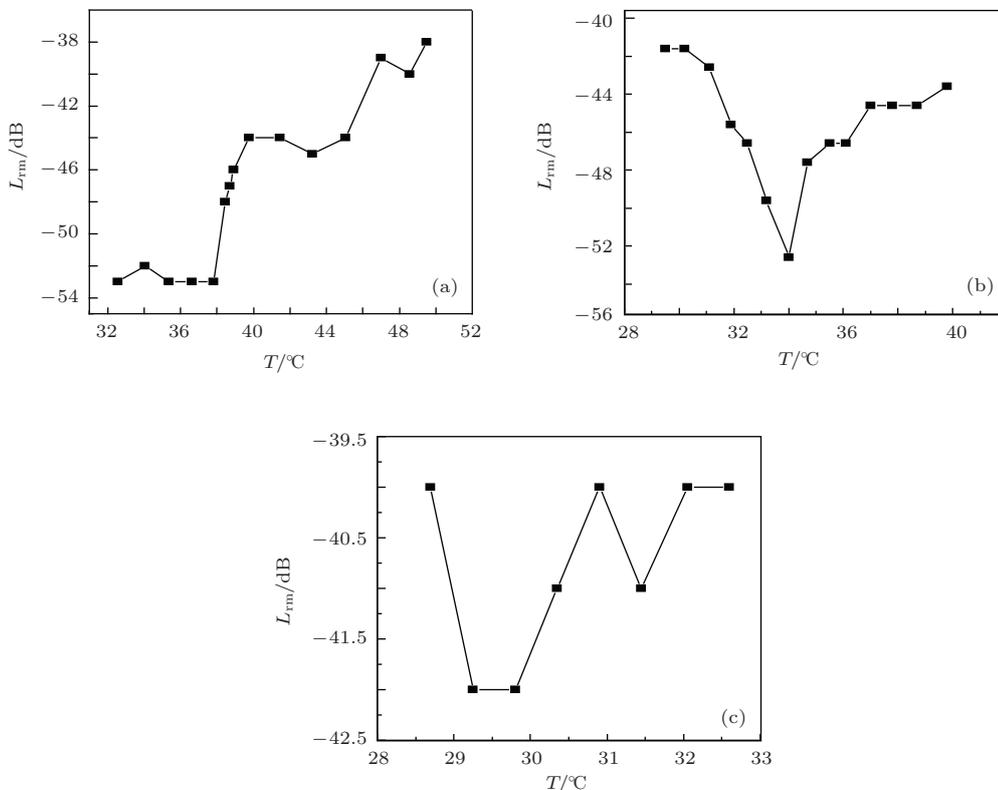


图 8 实际最低回波损耗随温度的变化规律 (a) 小端面; (b) 大端面; (c) 侧壁

5 微波谐振器系统在实际功率条件下的调试

5.1 调试过程

图9是真实功率条件下的微波谐振器系统,其中铁锂电池调理电源的开与关、固态源的开关和变频均由红外遥控控制,而且铁锂电池调理电源上有监控固态源输出和反射功率的指示表.系统操作过程为:打开铁锂电池调理电源,分别给信号源和放

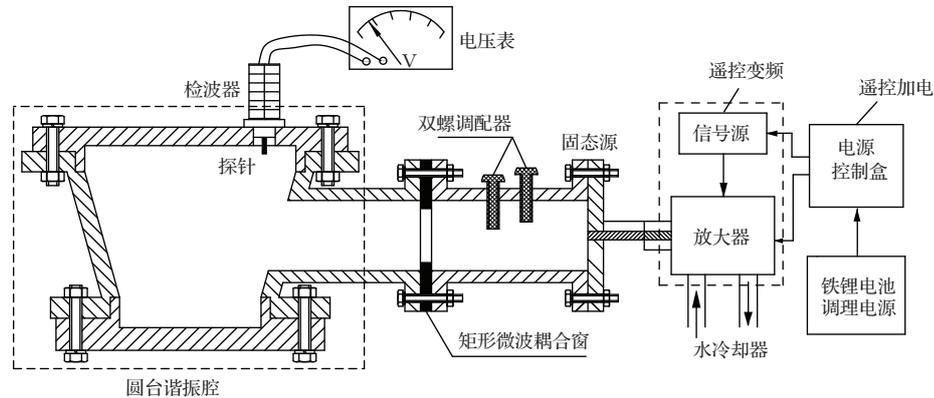


图9 真实功率条件下的微波谐振器调试系统

5.2 调试结果

5.2.1 谐振状态检测

图10给出真实功率下系统中信号源输出频率与检波信号电压关系的测量曲线.从图中看出,开机后信号源输出频率2.45 GHz不变时,由于谐振腔受热而谐振频率不断减小,谐振腔失谐,检波器

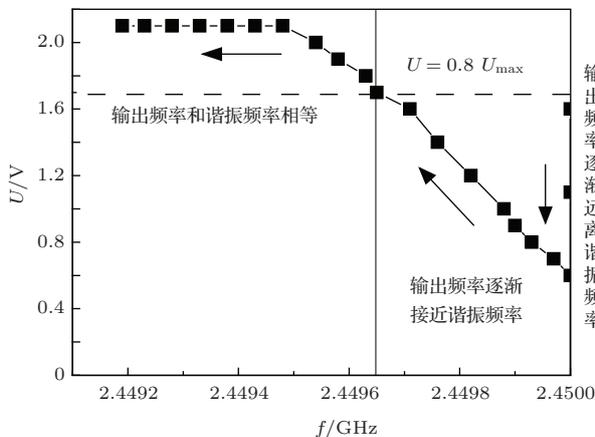


图10 信号源输出频率和检波器信号间的关系

放大器加电,不断调整信号源的输出频率使检波器的信号时刻保持最大,此时系统谐振.

借鉴圆台谐振腔的低信号调试结果,可以预测实际功率条件下圆台谐振腔壁面集肤深度内微波加热导致的腔体膨胀会使系统失谐,从而使检波信号降低,因而实际功率条件下对系统调试时应以检波器信号最大标示系统的谐振状态.系统电源打开后,信号源首先输出中心频率2.45 GHz,随后就发现检波信号不断降低.因而系统开启后,信号源输出频率应从中心频率开始不断地降低以获得检波信号的最大值,实验中降频步长为10 kHz.

反馈信号不断降低.以后快速降低信号源输出频率,则输出频率不断趋近谐振频率,谐振腔趋于谐振,故检波器反馈信号不断升高.当信号源输出频率与谐振频率基本相等时,谐振腔处于良好的谐振状态,检波器反馈信号趋于极大值.这里认为检波信号 $U \geq 0.8U_{\max}$ 时系统处于良好的谐振状态.故实际降频时,需保证检波器信号始终在1.7 V以上.

5.2.2 腔体表面温度变化

在真实功率条件下,谐振腔壁面集肤深度内的热效应会使腔体温度升高,故研究腔体表面温度的变化规律有助于验证微波谐振器是否达到谐振状态.为此,我们用热电偶测量如图11所示腔体表面不同位置处的温度.温度测量过程中应该不断降低信号源输出频率以保证检波器信号时刻保持最大值2.1 V处,即保证谐振腔时刻处于谐振状态.测量点温度随时间变化如图12所示,图示表明小端面中心处的温度首先开始快速上升,随后其他位置处的测温点也逐渐开始升温,且彼此的温度相近,很明显小端面中心为热源.

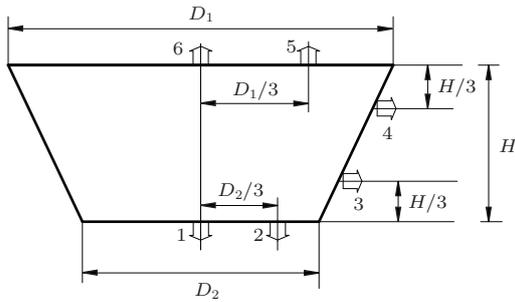


图 11 测量点位置

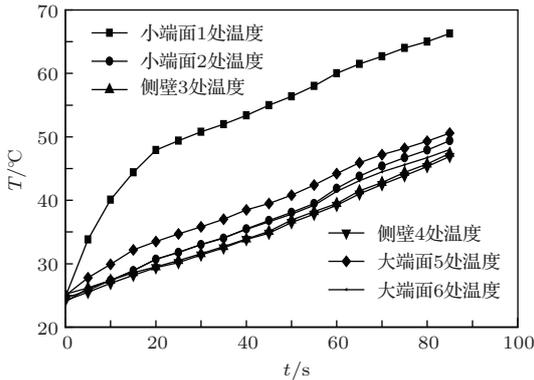


图 12 谐振腔表面温度随时间变化

要解释这种温度变化规律,首先要根据圆台谐振腔内的电磁波传输规律进行理论解释.为了使推力器获得最大的电磁力,要求电磁波在圆台谐振腔内传输到小端面时截止,即波长接近于截止波长 $\lambda = \lambda_c$, 群速度 $v_g = c\sqrt{1 - (\lambda/\lambda_c)^2} = 0$. 而在大端面处,要求电磁波的波长为自由空间波长 $\lambda = \lambda_0$, 群速度 $v_g = c\sqrt{1 - (\lambda_0/\lambda_c)^2}$. 这表明电磁波的能量传输到小端面时全部沉积到金属表面从而转化为端面集肤深度内的热能.而在大端面处电磁波的群速度接近光速,全部电磁波能量被壁面反射回来,因而在理想情况下,电磁波的能量不会转化为壁面集肤深度内的热能.从现有的微波推力器圆台谐振腔内电磁场数值计算结果来看^[3],电磁场强度计算值在轴线附近较大,这就表现出在小端面中心处有较高的集肤深度内热能,因而升温较快,而且温度高于其他位置.从理论上讲,大端面集肤深度内虽然没有电磁波能量沉积,但是随着推力器工作时间的延长,由于金属热传导作用大端面的温度也会逐渐升高.

6 结 论

本文采用矩形波导为传输线、耦合窗和双螺调配器为匹配元件,利用网络分析仪对微波谐振器系统的圆台谐振腔进行了实验调试,并获得了理想的谐振状态,即谐振频率为 2.44895 GHz,品质因数高达 117000,且发现谐振频率随腔体温度升高而不断降低以及回波损耗周期性振荡的实验现象.从网络分析仪的扫频工作特点出发,解释了回波振荡原因,并剔除了回波损耗的失真值.针对固态源微波谐振器系统,以谐振腔大端面壁面检波器信号为反馈信号,在真实功率条件下,经红外遥控装置对匹配源进行远程开关和降频后,检波器信号始终保持在 2.1 V 左右的最大状态,实现了整个微波谐振器系统的精确调谐,使之能时刻处于谐振状态.最后对腔体壁面各主要点的温度监测表明谐振腔小端面中心处发热最为显著,符合谐振腔的工作特点.本实验为进一步开展独立的微波谐振器系统推力测量及动态实验奠定了良好基础.

参考文献

- [1] Geoffrey A. Landis 2000 *Microwave Pushed Interstellar Sail: Starwisp Revisited*, AIAA 3337
- [2] Nakagawa T, Mihara Y, Komurasaki K, Takahashi K, Sakamoto K, Imai T 2004 *J. Spacecraft and Rockets* **41** 151
- [3] Yang J, Li P F, Yang L 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 124101 (in Chinese) [杨涓, 李鹏飞, 杨乐 2011 物理学报 **60** 124101]
- [4] Yang J, Wang Y Q, Ma Y J, Li P F, Yang L, Wang Y, He G Q 2013 *Chin. Phys. B* **22** 050301
- [5] Yang J, Yang L, Zhu Y 2010 *J. Northwestern Polytechnical University* **28** 807 (in Chinese) [杨涓, 杨乐, 朱雨 2010 西北工业大学学报 **28** 807]
- [6] Qiu X M, Tang D L, Sun A P, Liu W D, Zeng X J 2007 *Chin. Phys. B* **16** 196
- [7] Liao C En 1994 *Basic Technology of Microwave* (Xi'an: Xidian University Press) (in Chinese) [廖承恩 1994 微波技术基础 (西安: 西安电子科技大学出版社)]
- [8] Li S F, Li C R, Song C L 2013 *Fundamental Course of Optical Waveguide Theory*, (Beijing: Publishing House of Electronics Industry) (in Chinese) [李淑凤, 李成仁, 宋昌烈 2013 光波导理论基础教程 (北京: 电子工业出版社)]

Resonance experiment on a microwave resonator system*

Shi Feng Yang Juan[†] Tang Ming-Jie Luo Li-Tao Wang Yu-Quan

(College of Astronautics, Northwestern Polytechnic University, Xi'an 710072, China)

(Received 9 January 2014; revised manuscript received 18 March 2014)

Abstract

A microwave resonator system is made, which has a tapered resonant cavity, a microwave source, and a transmission device. Because of the electromagnetic pressure gradient on the tapered resonant cavity, a net electromagnetic force along the axis of the cavity may be observed, which is needed to verify experimentally the use of the independent microwave resonator system. It is also needed to keep the independent microwave resonator system in resonating state, which is the important procedure to demonstrate the possibility of net electromagnetic force. Thus, a low-signal resonating experiment on the tapered resonant cavity combined with resonating parts is completed to accurately find out the resonant frequency of 2.45 GHz and to analyze the influence of temperature on the resonant state. Experimental result shows that the resonant frequency and quality factor of the independent microwave resonator system are 2.44895 GHz and 117495.08 respectively. When the temperature of the tapered resonant cavity wall rises, the resonant frequency will be decreased and the quality factor changed separately.

Keywords: applied classical electromagnetism, electromagnetic wave propagation, microwave and radiowave instruments and equipment

PACS: 41.20.-q, 41.20.Jb, 07.57.-c

DOI: [10.7498/aps.63.154103](https://doi.org/10.7498/aps.63.154103)

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 90716019).

[†] Corresponding author. E-mail: yangjuan@nwpu.edu.cn