

# 径向耦合多腔输出系统数值模拟分析<sup>1</sup>

张世昌 方希曾 秦文珍 顾伟

(中国科学院电子学研究所 北京 100080)

**摘要** 宽带速调管放大器是雷达、通讯系统核心部件,速调管输出系统的宽带特性对速调管带宽有至关重要的作用,该文论述了借助于三维电磁场计算程序《ISFEL 3D》对径向耦合多腔谐振输出系统的一对谐振腔(主腔和副腔)做了数值模拟分析,得到了不同于普遍使用的轴向耦合双间隙腔系统的场结构、模式类别和调谐带宽特性,据此结果设计了冷测实验模型,达到了离散(频率)工作点带宽 >7% 的要求。

**关键词** 速调管, 谐振腔, 数值模拟

**中图分类号** TN815

## 1 物理模型

我们分析的对象是由一个主腔和三个副腔构成的多腔输出系统,主腔和副腔之间在径向耦合,其结构如图 1 所示。4 个腔的轴互相平行,在计算分析中,为了简化计算模型,设定副腔之间无耦合关系,那么我们可以把四腔系统分割成独立的三对腔,如图 2 所示。

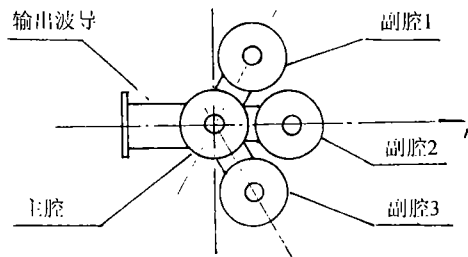


图 1 径向耦合多腔输出系统

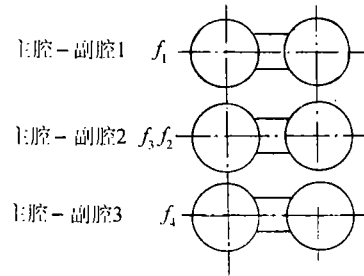


图 2 三对腔和工作频率

计算分析就可在一对腔上进行,其它二对腔分析方法类同,就不赘述了。双腔模型做了两种考虑,一种是针对模式、场分布、谐振频率和特征阻抗的求解,另一种方式是加上输出波导按散射方式求解谐振频率和腔间隙阻抗,以此作为第一种方式的补充。

## 2 计算模型

ISFEL 3D<sup>[1]</sup> 程序是针对在研究区域内,不存在电流密度的情况下设计的,它的基本方程是

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\partial \mathbf{B} / \partial t \quad (1)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = -\partial \mathbf{D} / \partial t \quad (2)$$

在媒质中的辅助场矢量  $\mathbf{H}$  和  $\mathbf{D}$  决定于媒质的极化强度  $\mu, \varepsilon$  和基本场量  $\mathbf{B}$  和  $\mathbf{E}$ , 其关系式为

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (3)$$

$$\mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E} \quad (4)$$

<sup>1</sup> 2001-12-17 收到, 2002-05-10 改回

把(1)和(2)式合并成一个场量的单独方程,首先对(1)式取旋度,再结合(3)和(4)式有

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{E} = -\mu \partial(\nabla \times \mathbf{H})/\partial t = -\mu \partial^2 \mathbf{D}/\partial t^2 = -\mu \varepsilon \partial^2 \mathbf{E}/\partial t^2$$

根据矢量恒等式  $\nabla \times \nabla \times \mathbf{A} = \nabla \nabla \cdot \mathbf{A} - \nabla^2 \mathbf{A}$ , 展开上式, 那么  $\nabla \times \nabla \times \mathbf{E} = \nabla(\nabla \cdot \mathbf{E}) - \nabla^2 \mathbf{E} = -\mu \varepsilon \partial^2 \mathbf{E}/\partial t^2$ , 在无源场内  $\nabla \cdot \mathbf{E} = 0$ . 所以得到

$$\nabla^2 \mathbf{E} - \mu \varepsilon \partial^2 \mathbf{E}/\partial t^2 = 0 \quad (5)$$

(5)式就是频率域波动方程,由此建立了有限差分的 ISFEL 3D 程序,用此来解双腔谐振系统是完全合适的.计算模型结构图,见图3-图5(模型坐标原点  $x = y = z = 0$ , 设在输入波导口).

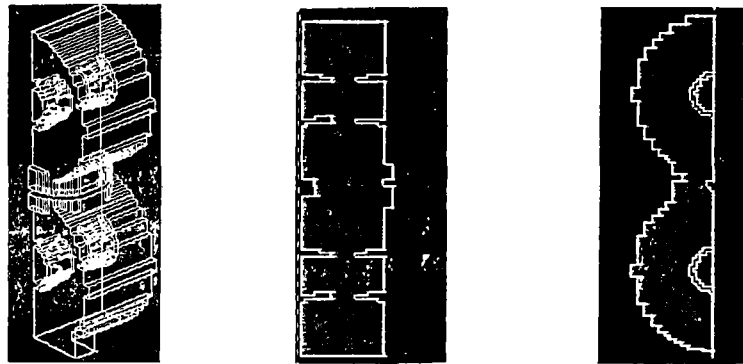


图3 1/2腔三维结构 图4 1/2腔断面图( $x = 0$ 平面) 图5 1/2腔断面图( $z = 55$ 平面)

将整个空间划分约200万个网格,因条件限制,网格划分不能太多,故对于细小尺寸计算中会带来一些误差.

模型设计为:两腔直径相同,  $d_1 = d_2$ ; 腔高相同,  $h_1 = h_2$ .

对于无加载腔体,在计算双腔谐振特性的同时,围绕宽带特性,我们控制两个可变参数  $\alpha$  和  $\gamma_2$ . 两个参数的定义是:  $\alpha$  是两个腔之间的耦合度,  $\gamma_2$  是两腔的频率比,在文献[2]中,具体形式为  $\alpha = L_0/L_1$ ,  $\gamma_2 = \omega_2/\omega_1$ ,  $L_0, L_1$  分别是耦合孔和主腔的电感,  $\omega_2$  和  $\omega_1$  分别是副腔和主腔的谐振频率. 在我们的工作中  $\gamma_2$  的定义与文献[2]相同,但表征量有所不同,我们间接地用  $\gamma_2 = h_{11}/h_{21}$  来代表,  $h_{11}$  是主腔上漂移头高度,  $h_{21}$  是副腔上漂移头高度.  $\alpha$  用耦合孔中的调谐杆的长度  $l$  来代表(实际表示耦合孔电容). 由于径向耦合,既有调谐杆,也有耦合孔,但因为耦合孔的直径受腔体高度的限制,尽量扩大耦合孔直径是不可能的,唯一可变的因素,也只有调试杆长度  $l$ . 调节  $\gamma_2$  是扩展径向耦合双腔系统带宽的主要手段之一,而且亦能影响  $(R/Q)$  值. 这点与轴向耦合双间隙腔调节带宽是不同的.

### 3 计算结果和分析

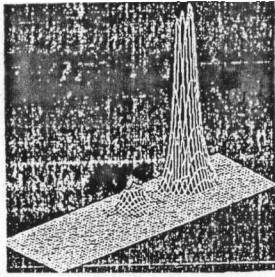
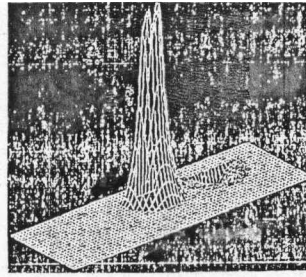
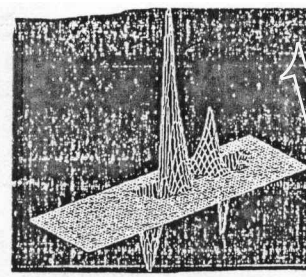
数值模拟设计在S波段进行,带宽约7%,根据 ISFEL 3D 程序模型方式,我们把径向耦合双腔系统分解成16个几何单元合成一个模型.

主要计算出前3个模式.给出了以下主要结果:(1)谐振频率、场分布、品质因数;(2)径向单腔、双腔模式;(3)频率变化的控制;(4)特征阻抗的变化.

### 3.1 频率和场分布

在  $\alpha = 0, \gamma_2 \approx 1$  时, 求解出前 3 个模式的频率和  $E_z$  场分布:  $f_1 = f_0 - 47\text{MHz}$ ,  $f_2 = f_0 - 36\text{MHz}$ ,  $f_3 = f_0 + 2936\text{MHz}$ .

在  $z = 51.5\text{mm}$ ,  $x = (0.0000, 37.00)$ ,  $y = (5.000, 177.000)$  平面上, 绘 3 个频率点的  $E_z$  场分布图, 结果见图 6—图 8.

图 6  $f_1$  的  $E_z$  场分布图 7  $f_2$  的  $E_z$  场分布图 8  $f_3$  的  $E_z$  场分布

从  $E_z$  场分布图不难看出:

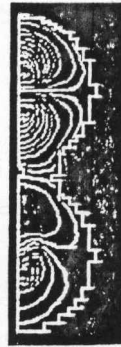
(1) 径向耦合双腔作为一个整体的场分布特征

$f_1$  所对应的场峰值为同方向双峰, 即腔感应电压  $V_1$  和  $V_2$  虽幅度不同但相位相同。因此,  $f_1$  所对应的模式为  $2\pi$  模, 表示为  $f_1 = f_{2\pi}$ 。  $f_2$  所对应的场峰为反方向双峰, 即  $V_1$  与  $V_2$  的幅度不同, 且相位也不同, 差  $180^\circ$ , 故  $f_2$  所对应的模式为  $\pi$  模, 表示为  $f_2 = f_\pi$ 。  $f_3$  呈现 4 个峰, 它前后两个峰各组成一个  $\pi$  模。  $V_1$  和  $V_2$  在方向上是偶对称, 因此它是一个  $2\pi$  模, 表示为  $f_3 = f_{2\pi}$ 。 三者的顺序是  $2\pi$  模- $\pi$  模- $2\pi$  模。

(2) 每个单腔上的模式结构

我们分别绘制出  $f_1$ (包括  $f_2$ ) 和  $f_3$  场的平面等位线图见图 9, 图 10。

在图 9 中  $f_1$ (或  $f_2$ ) 无论是在主腔中或是副腔中,  $E_z$  场等位线均是一个同心圆, 无疑主腔和副腔各单腔同是  $E_{01}$  模, 两个腔电场的相位同相或反相  $180^\circ$ , 外圈等位线两个腔相通, 表示有耦合。图 10 中的  $f_3$  模, 每个单腔有两个同心圆, 充分表明  $2\pi_+$  模已不是  $E_{01}$  模, 它是一个  $E_{21}$  模。因此径向耦合双腔系统中对于单电子注速调管, 我们仅能使用 3 个模式中的  $2\pi-$  模和  $\pi$  模模式, 而  $2\pi_+$  模模式无法使用。

图 9  $f_1, f_2$  场等位线分布图 10  $f_3$  场等位线分布

### 3.2 特征阻抗 ( $R/Q$ )

腔体特征阻抗表征腔间隙建立的有效场与腔储能之比。随着  $\gamma_2$  的变化, 每个单腔上的特征阻抗在不断的变化。我们选择主腔的  $x_1 = 0, y_1 = 98\text{mm}$  点, 副腔的  $x_2 = 0, y_2 = 147\text{mm}$  点的  $z$  线上, 计算了特征阻抗值, 结果见表 1。

表 1  $\alpha = 4$  时主、副腔特征阻抗值

	$\gamma_2$	11.6	1.14	1.08	1.05	1	0.97	0.95
$2\pi$ 模	$(R/Q)_1$	227.9	227.1	227.1	227.1	134.6	125.1	121.4
	$(R/Q)_2$	2.24	2.48	2.27	10.3	116.6	130.2	133.3
$\pi$ 模	$(R/Q)_1$	2	1.98	1.92	9.62	108.4	122.5	125.2
	$(R/Q)_2$	262.3	261.3	262.3	256.7	147.6	134.4	131.8

从表 1 不难看出在设计双腔径向耦合系统时, 除考虑模式、频率等外, 必须注意  $(R/Q)$  值的选择, 要在离散带宽内, 多个频率工作点上, 有均匀一致的分布, 才能保证在不同工作模式情况下, 减小功率效率增益的起伏。图 11 我们给出在  $\alpha = 4$  情况下主腔 (电子注加载腔) 的特征阻抗变化情况, 其中在  $\gamma_2 = 0.95$  处,  $2\pi$  模存在一个奇异点, 似乎短路全反射, 暂时还不能解释它存在的原因,  $2\pi$  模变化理应为点划线情况。从图上看在  $\gamma_2 = 1$  附近存在一个  $(R/Q)_\pi = (R/Q)_{2\pi}$  的区域 (剖面线区域), 这是我们要应用的特性之一。

### 3.3 $\alpha$ 和 $\gamma_2$ 对工作频率的影响

在  $\gamma_2 = 1$  的情况下, 调节耦合杆长度  $l$  对  $2\pi$  模和  $\pi$  模频率的影响, 如图 12 所示。

在  $\alpha = 0$  的情况下, 分别调整副腔上漂移头  $h_{11} > h_{21}$  和  $h_{11} < h_{21}$ , 使得  $\gamma_2 > 1$  和  $\gamma_2 < 1$ 。其频率特性如图 13 所示。

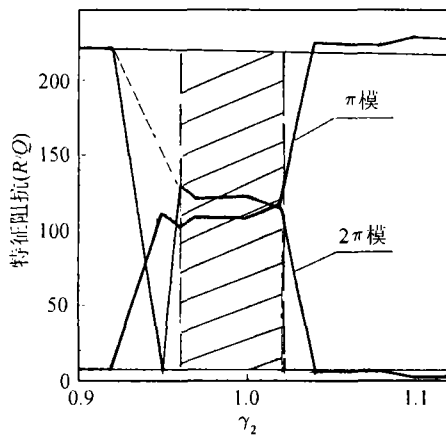


图 11  $\alpha = 4$  时主腔特征阻抗变化

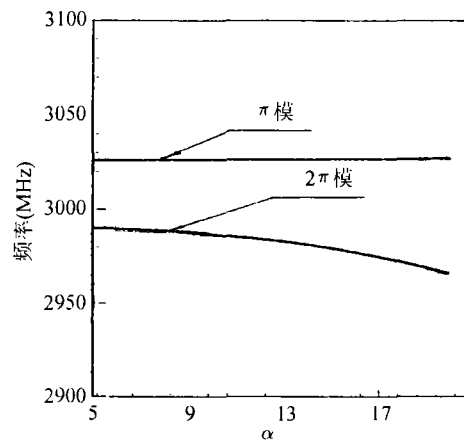


图 12  $\alpha$  对模式频率的影响

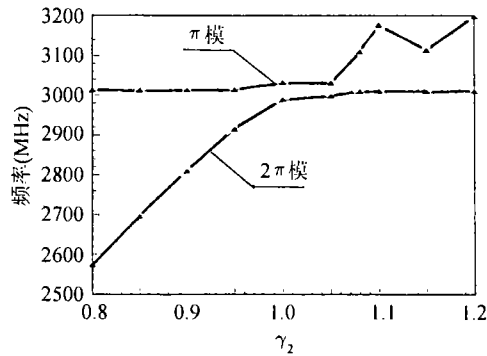


图 13 在  $\alpha = 0$  情况下,  $\gamma_2$  对频率的影响

以上两个图表明调节  $\alpha$  和  $\gamma_2$  是我们控制带宽的技术手段。

### 3.4 冷测模型实验结果

基于径向耦合双腔系统的数值模拟结果, 我们设计了图 1 所表示的多腔输出系统, 包括 1 个主腔和 3 个副腔, 带宽内工作频率点是:  $f_1 = f_0 - 93\text{MHz}$ ,  $f_2 = f_0 - 34\text{MHz}$ ,  $f_3 = f_0 + 25\text{MHz}$ ,  $f_4 = f_0 + 83\text{MHz}$ , 模型带有输出波导, 经冷测, 完全达到设计要求。

## 4 结 论

对 S 波段的径向耦合多腔系统进行数值模拟, 其高频特性归纳为以下几点:

(1) 指出了径向耦合双腔系统的模式构成次序是  $2\pi_-$ ,  $\pi$ ,  $2\pi_+$ , 它与轴向耦合的双间隙腔的模式次序  $\pi_-$ ,  $2\pi$ ,  $\pi_+$  不同, 具有反对称性特性。

(2) 给出了每个单腔上场的模式结构, 对于  $2\pi$  和  $\pi$  模, 它对应单腔上的场模式是  $E_{01}$  模。在径向耦合多腔系统中,  $2\pi_+$  模是不能使用的。

(3) 通过  $\alpha$  和  $\gamma_2$  来控制工作带宽是可行的。通过改变耦合杆的长度和直径  $d$  来影响谐振频率, 产生调频作用, 但频率的改变量有限, 约 10-30MHz 左右。主要扩展手段是调节  $\gamma_2$ , 它可以达到 200-300MHz。

(4)  $\alpha$  的变动对特征阻抗影响不大, 可以认为不会改变特征阻抗。而  $\gamma_2$  对特征阻抗有较大影响。所以在设计带宽时, 不仅要考虑  $\gamma_2$  对频率的影响, 还要注意到对特征阻抗的影响, 是确定工作频率、模式的充分条件。

本项工作, 还有继续深入研究的空间, 虽然数值模拟反映了三维场的计算, 但是仅描述了一对径向耦合腔的电特性关系, 本质上, 各副腔之间也存在耦合关系, 这点并没有得到反映, 有待进一步研究。

## 参 考 文 献

- [1] C. A. Silaev, ISFEL 3D, Electrical Engineering University, St. Petersburg, Russia, 1997.
- [2] E. Lien, D. Robinson, Study and investigation leading to the design of broadband high-power klystron amplifiers AD813227, 1981.

THE NUMERICAL SIMULATION OF  
THE RADIAL COUPLING MULTI-CAVITY RESONATORS

Zhang Shichang    Fang Xizeng    Qin Wenzhen    Gu Wei

*(Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)*

**Abstract** Broadband klystron is one of key devices in radar and communication system. The broadband performances of microwave output circuit play an important role for extending klystron's bandwidth. This paper describes the numerical results of a broadband output circuit-radial coupling multicavity circuit by using 3D electromagnetic field computation program, IS-FEL 3D, which includes the resonance performance, field distribution, mode construction and difference of radial with axial coupling multicavity circuit. The radial coupling multicavity circuit has been designed and manufactured, and the cold measurement shows that 7% bandwidth has been obtained.

**Key words** Klystron, Resonator, Numerical simulation

张世昌: 男, 1939年生, 研究员, 研究方向高功率微波器.  
方希曾: 男, 1941年生, 高级工程师, 研究方向微波测量.  
秦文珍: 女, 1944年生, 高级实验师, 研究方向微波测量.  
顾 伟: 男, 1967年生, 工程师, 研究方向结构设计.