

# 大耦合孔对速调管谐振腔参数的影响

黄 华\* 王平山 陈裕涛

(中国工程物理研究院应用电子学研究所 成都 610003)

**【摘要】** 论述大耦合孔对相对论速调管谐振腔的电场分布和特性参数(包括谐振频率、品质因数、特性阻抗、耦合系数等)影响的简要的理论分析与实验研究,以及相应参数的测试方法,并提出了新的耦合孔结构,解决了大耦合孔对谐振腔谐振频率、耦合系数、径向、圆周方向的电场分布的不良影响,其结果对高功率微波器的设计有重要的参考价值。

**关键词** 耦合孔; 谐振腔; 相对论速调管; 高频系统

**中图分类号** TN 751; TN 752; TN122

相对论速调管放大器(RKA)是用从输入腔耦合孔输入的微波调制电子束,经分离谐振腔的作用后,在经过输出腔间隙时激励起更强的微波,从输出腔耦合孔输出,使微波放大。对于 RKA,特别是强流 RKA,由于电子负载对谐振腔加载很重,腔有载  $Q$  值很低。为了达到谐振腔的设计  $Q$  值,提高腔体的功率容量等技术要求,往往在输入腔和输出腔壁上开较大的耦合孔,这时,谐振腔的径向和圆周方向的电场分布、谐振频率  $f_0$ 、品质因数  $Q$ 、特性阻抗  $R/Q$ 、耦合系数  $\beta$  等特性参数有较大变化,对腔的应用很不利。目前,谐振腔开大耦合孔带来的一系列影响尚没有简洁的理论分析与实验研究,给谐振腔参数的快捷、准确设计、加工和调试带来了很大的不便。本文对谐振腔开大耦合孔带来的一系列影响进行了详细的研究,提出了解决的措施,比较圆满地达到了谐振腔的设计要求。

## 1 大耦合孔对谐振腔电场分布的影响

在 X 波段 RKA 研究中,我们采用了双重入式圆柱谐振腔,如图 1 所示。当在谐振腔侧壁开大耦合孔后,腔的径向、圆周方向几何结构不再对称,导致电场分布也不对称,这对电场与电子束的相互作用效率以及电子束的传输、群聚很不利,也会影响谐振腔的稳定工作。当腔没有开耦合孔时,腔是轴向、径向、圆周对称的,理论计算其场分布比较简单,Henery 和 Garland 给出了该情况下腔间隙电场分布的一般表达式<sup>[1]</sup>。当谐振腔开耦合孔,特别是大耦合孔后,腔的几何对称性遭到了破坏,要精确求出腔中的场分布非常困难。原则上说,只要知道激励条件和边界条件,任何电磁场问题都变得易于求解。一般由变分法和有限元法,可以对任何形状腔中的电场,利用计算机给出数值解。如果腔中的边界条件很复杂,所取单元就相当多,计算起来就非常复杂。而且,在边界条件很复杂的情况下,也很难给出正确的边界条件,即使非对称谐振腔的 MAFIA 程序计算误差也很大。

我们用微扰法测试了开大耦合孔前后谐振腔内的电场分布。根据谐振腔的微扰理论<sup>[2]</sup>推导出

$$it \quad th \quad \frac{E(x)}{E_p} = \left[ \frac{df(x)}{df(x_p)} \right]^{1/2} \quad (1)$$

式中  $E_p$  为腔内峰值电场;  $df(x_p)$  为加入微扰体后频偏最大值;  $df(x)$  为微扰球位于  $x$  位置时的频率偏移。由实验测得耦合孔轴线的电场分布可知, 谐振腔开大耦合孔后, 电场最大值偏向开孔的一边。我们在进行腔体老炼时, 给腔体输入 130 kW 的连续脉冲微波(在大气中), 清楚地观察到腔内靠耦合孔一边的间隙有 RF 击穿现象。

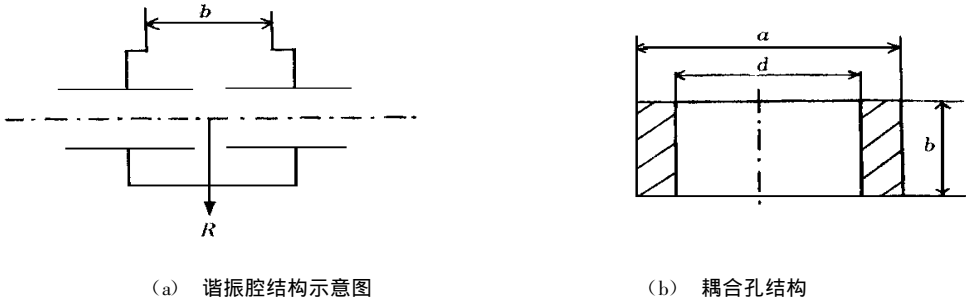


图 1 X 波段 RKA 谐振腔

## 2 大耦合孔对谐振腔谐振频率和品质因数的影响

### 2.1 理论分析

在 X 波段 RKA 研究中, 为了提高腔体的功率容量, 我们设计了如图 1 所示的电感窗式耦合孔。谐振腔和耦合孔等效电路如图 2 所示, 耦合孔可等效为感性阻抗, 等效归一化感抗为<sup>[3]</sup>

$$B = \frac{2\pi}{\beta a} \operatorname{ctg}^2 \left\{ \frac{\pi d}{2a} \left[ 1 + \frac{\alpha \gamma^3 - 3\pi \sin^2 \frac{2\pi d}{a}}{4\pi} \right] \right\} \quad (2)$$

式中  $\beta = [k_0^2 - (\pi/a)^2]^{1/2}$ ;  $\gamma^3 = [(3\pi/a)^2 - k_0^2]^{1/2}$ ;  $k_0$  是特征值;  $a$ 、 $b$ 、 $d$  分别是波导宽边、窄边和耦合孔宽度。利用  $B = B/Z_0 = \omega L/Z_0$ , 得

$$L_1 = \frac{BZ_0}{\omega} = \frac{2\pi Z_0}{\omega \beta a} \operatorname{ctg}^2 \left\{ \frac{\pi d}{2a} \left[ 1 + \frac{\alpha \gamma^3 - 3\pi \sin^2 \frac{2\pi d}{a}}{4\pi} \right] \right\} \quad (3)$$

式中  $Z_0$  是矩形波导的特性阻抗。知道了  $L_1$  后, 再根据有关公式<sup>[4]</sup> 求出  $L$ 、 $C$ , 就可利用

$$f = \frac{1}{2\pi[(L + L_1)C]^{1/2}} \quad (4)$$

算得腔的谐振频率。用  $P_d$  表示谐振腔消耗的功率,  $P_e$  表示输送到匹配波导负载  $R_L$  上的功率, 则  $P_e/P_d$  表示负载对谐振腔的加载程度, 称为耦合系数  $\beta$ , 那么

$$\beta = \frac{P_e}{P_d} = \frac{[U_m R_L / (R_L + R_g)]^2}{[U_m R_g / (R_L + R_g)]^2} = \frac{R_L}{2R_g} \quad (5)$$

由于

$$\beta = \frac{P_e}{P_d} = \frac{\frac{\omega_0 W}{P_d}}{\frac{\omega_0 W}{P_e}} = \frac{Q_0}{Q_e} \quad (6)$$

式中  $Q_0$  为谐振腔的固有品质因数;  $Q_e$  为外观品质因数。于是谐振腔的回路效率为

$$\eta_c = \frac{P_e}{P_e + P_d} = \frac{Q_L}{Q_e} = 1 - \frac{Q_e}{Q_e + Q_0} = \frac{\beta}{\beta + 1} \quad (7)$$

或 
$$Q_L = Q_0 / (1 + \beta) \quad (8)$$

式中  $Q_L$  为谐振腔的有载品质因数。

### 2.2 实验测试

我们用功率传输法测量了谐振腔的谐振频率和有载品质因数。为了减小探针对谐振腔的扰动,提高谐振频率的测量精度,除了使腔的微波输入器件匹配外,探针应尽量弱耦合,相应地要采用高灵敏度示波器或者宽动态范围的网络分析仪(如 HP8720C,动态范围为 103 dB)。

测试一组腔体的谐振频率与理论值的结果如表 1 所示。由表 1 知,开耦合孔后,谐振频率下降,与理论推导和 MAFIA 程序计算结果变化趋势相符<sup>[5]</sup>,但理论值比真实值高,主要是由于理论计算谐振频率的模型比较简单,并且模型是经过近似等效变换,而实际的谐振腔结构为了满足某些性能的要求,结构上有一些变形;另外,腔体谐振频率随其尺寸变化很灵敏,由于腔体尺寸加工误差,导致谐振频率变化(在 X 波段,腔体尺寸有 0.01 mm 的偏差,谐振频率有 37 MHz 的最大偏差)。所以,腔体谐振频率理论计算值与实际测试值有几百 MHz 的误差,特别是腔开大耦合孔后,频率偏差更大。不过,通过简要的理论计算和腔体冷测,能够掌握腔体谐振频率的真实值与理论值的偏差规律,对腔体的准确再设计有很大的帮助。有载品质因数和耦合系数的测量可用网络分析仪,测量的  $Q_L$  和  $\beta$  在实验误差允许的范围,与式(8)吻合得较好。

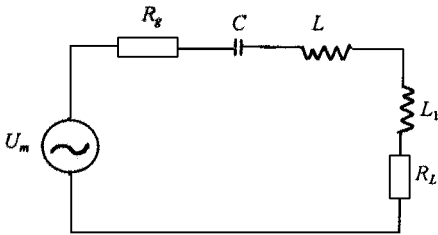


图 2 开耦合孔后谐振腔等效电路

表 1 谐振腔谐振频率及特性阻抗的比较

理论计算	实验测试	
	开孔前	开孔后
$f/\text{GHz}$	9.370	8.895
$\frac{R}{Q}/\Omega$	77	65.2

### 3 大耦合孔对谐振腔特性阻抗的影响

由图 2 可得谐振腔的特性阻抗

$$R/Q = [(L + L_1)/C]^{1/2} \quad (9)$$

可见,开耦合孔后,特性阻抗增大。用微扰法测量谐振腔的特性阻抗,让金属小球在谐振腔的轴线上移动,得

$$\frac{R}{Q} = \frac{40c \left[ \int \left| \Delta f(z) \right|^{1/2} dz \right]^2}{Vf_0^2} \quad (10)$$

式中  $c$  为光速;  $V$  为小球体积;  $f_0$  为没加小球时腔的谐振频率;  $\Delta f(z)$  为加入球前后腔谐振频率的变化, 测试结果如表 1 所示。由测试结果可以看出, 谐振腔开耦合孔后, 特性阻抗增大, 与理论推导相符。

## 4 解决措施

为了让电子束从电场最大处穿过, 使电子束在同一截面受到尽量均匀电场的调制, 提高腔体的功率容量, 可以采取谐振腔偏心设计或者腔体对称开耦合孔, 提高腔体间隙径向、圆周方向电场的对称性和均匀性。在 L 波段 RKA 输入腔与输出腔研究中, 我们采取了对称开耦合孔的方法, 一支路接阶梯渐变波导与磁控管微波源相接, 另一支路接可调短路活塞, 结构如图 3a 所示。通过调节短路活塞, 可以使谐振腔径向、圆周方向的场分布达到比较理想的分布, 同时, 可以调节谐振腔的谐振频率和耦合系数, 调节范围可达:  $f = 1\ 220\ \text{MHz} \sim 1\ 330\ \text{MHz}$ ,  $Q_L = 19.6 \sim 91.2$ ,  $\beta = 1.16 \sim 11.5$  (腔体可拆卸, 材料为无磁不锈钢)。利用这种输入腔, 当注入微波 500 kW 时, 电压 500 kV、电流为 4.5 kA 的空心电子束经过输入腔后, 得到了约 6% 的基波电流调制深度, 与理论计算很接近。输出腔采用在腔后端盖开四个对称的环形耦合孔, 通过一过渡段与  $50\ \Omega$  的同轴负载相接, 如图 3b 所示, 使腔的结构在径向、圆周方向对称, 其电场分布径向、圆周方向就对称了。利用这种输入腔和输出腔的 L 波段 RKA, 可得到了 536 MW 的输出微波。

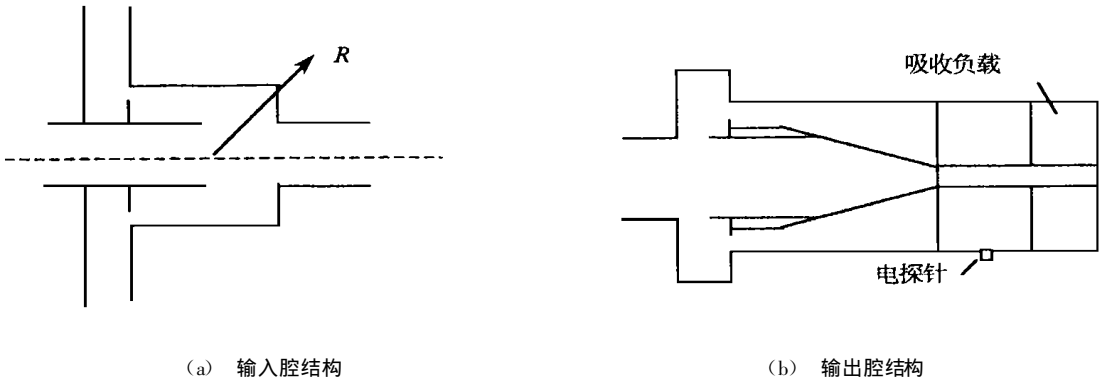


图 3 L 波段 RKA 谐振腔

## 5 结束语

大耦合孔对 RKA 谐振腔的电场分布、谐振频率、品质因数、耦合系数、特性阻抗等参数带来了比较大的变化, 本文通过理论分析和实验研究, 提出有效措施, 并应用在 L 波段 RKA 输入腔与输出腔设计中。输入腔对称开耦合孔, 并可调短路活塞, 解决了大耦合孔对谐振腔的谐振频率、 $Q_L$ 、径向、圆周方向电场分布对称性和均匀性的不良影响, 使 500 kW 的微波注入输入腔后, 电子束得到了约 6% 的基波电流调制深度; 输入腔从后端盖开四个对称的环形孔, 输出微波达到了 536 MW。

在谐振腔的测试过程中, 得到龚海涛、何琥、余虹的帮助, 在此表示诚挚的谢意!

参 考 文 献

- 1 Kosmahl Henery G, Branch Garland M. Studies on parameters of resonance cavity. IEEE Trans on Electron Devices, 1973, ED-20(7):79~85
- 2 张兆镗. 微波管高频系统的测量. 北京:国防工业出版社, 1983
- 3 柯林 R E. 微波工程基础. 北京:人民邮电出版社, 1981
- 4 电子管委员会编. 大功率速调管设计手册. 北京:国防工业出版社, 1979
- 5 高铁塔. 三维射频加速腔程序包 MAFIA 的开发和应用. 强激光与粒子束, 1992, 4(4):563~573

## Influence of Large Coupler on Cavity Parameters of Klystron Amplifiers

Huang Hua    Wang Pingshan    Chen Yutao  
(Institute of Applied Electronics CAEP Chengdu 610054)

**Abstract** The influence of large coupler on the cavity parameters of relativistic klystron amplifier is described in this paper. The parameters include the plots of electron field, resonance frequency,  $Q$  value, characteristic impedance, and coefficient of coupler. A new coupling structure is designed to resolve the influence, especially the resonance frequency, coupling coefficient and the plots of electron field. The results is very important for the device design of high power microwave.

**Key words** coupler; resonance cavity; relativistic klystron amplifier; high frequency system  
编辑 徐培红

.....  
\*科研成果介绍\*

### 电子镇流器电路计算机辅助分析设计软件包

主研人员: 钟洪声 杨显清 杨晋浩 黄香馥 石文 吴忠 程仁杰

该项目是“八五攻关”高效电子镇流器”中的一个子专题, 在对荧光灯瞬态、稳态工作特性分析的基础上, 采用非线性网络综合法, 建立了荧光灯模型库, 并开发模拟软件 E-BAD 版本。该软件用微机就可以对高频荧光灯电子镇流器进行分析, 对电子镇流器研制生产具有指导意义。

该成果在荧光灯电子镇流器电路动态特性非线性参数分析方面具有创新意义。

### 8 mm 毫米 YIG 扫频信号发生器

主研人员: 王鲁豫 曹康白 宋莉萍 张金贵 郑开明

该成果采用了国产半导体器件和磁性材料, 解决了毫米波器件宽带工作遇到的寄生参数问题, 毫米波有源器件与谐振回路的宽带耦合问题, 振荡器的宽带匹配输出问题, YIG 单晶材料在毫米波段内的电特性及 YIG 小球的安装工艺以及磁路设计技术及工艺问题等一系列关键技术。研制成功了 8 mm 全频段 YIG 扫频振荡器, 在 Ka 波段全频段范围内输出功率达到  $10 \text{ dBm} \pm 3 \text{ dB}$ , 线性度为  $\pm 3\%$ , 全频段范围内无死点, 无跳变点。

\*科 卞\*