

文章编号: 1001-4322(2006)12-2015-04

# 多注速调管 $\pi$ 模双间隙腔截止波导输出回路研究\*

林福民<sup>1</sup>, 丁耀根<sup>2</sup>

(1. 汕头大学 物理系, 广东 汕头 515063; 2. 中国科学院 电子学研究所, 北京 100080)

**摘 要:** 用数值模拟的方法研究了多注速调管  $\pi$  模双间隙腔加载截止波导两节滤波器型输出回路的特性, 并重点研究了  $\pi$  模双间隙腔与截止段的耦合结构对输出腔间隙阻抗频率特性的影响, 以及耦合接头和电容性销钉对截止波导滤波器的调谐作用。研究结果表明:  $\pi$  模双间隙腔连接截止波导段的耦合口的尺寸主要影响输出腔的外观品质因数, 而耦合接头的粗细和电容性销钉的大小和插入深度对截止波导滤波器的调谐具有重要影响。另外, 由于耦合接头相当于在截止段中引入了一个附加电感, 这使滤波器谐振电路的品质因数变大, 谐振峰变窄。因此,  $\pi$  模双间隙腔加载截止波导滤波器型输出回路并不比单间隙腔加载截止波导滤波器型输出回路有更好的带宽优势。

**关键词:** 多注速调管; 双间隙腔; 截止波导滤波器; 输出回路

**中图分类号:** TN122 **文献标识码:** A

在低射频段, 速调管的输出波导截面较大, 导致输出回路的体积较大。另外, 采用横截面较大的输出波导与输出腔耦合, 也会破坏聚焦磁场的均匀性, 使聚焦磁场的横向分量增大, 影响了电子注的通过率 and 换能效率的提高。多注速调管对电子注聚焦系统的设计要求更高, 较大横截面波导与输出腔耦合将给多注速调管的聚焦系统的设计带来更大的困难。若采用截止波导段与输出腔耦合, 既能明显缩小输出回路的体积, 又能减少设计聚焦系统的困难。因此, 在较低射频段的多注速调管中采用截止波导耦合输出是一种很好的设想。中国科学院电子学研究所首次在一个 S 波段多注速调管中采用截止波导耦合输出结构, 并在截止波导段中加入电容圆栓构成滤波器型输出回路<sup>[1]</sup>, 取得了很好的效果, 该管在 200 kW 输出功率水平下的 1 dB 相对带宽达到 9.1%, 效率高达 41%。参考文献 [2] 中已对单间隙腔加载截止波导滤波器型输出回路进行了研究, 并研究了截止波导段的长度和电容性销钉的位置对输出腔间隙阻抗频率特性曲线的影响规律, 本文则重点研究  $\pi$  模双间隙腔加载截止波导滤波器型输出回路, 并重点研究  $\pi$  模双间隙腔与截止波导段的耦合结构对输出腔间隙阻抗频率特性的影响规律, 以及截止波导滤波器的调谐问题。

## 1 输出回路的结构和特性

图 1 是适合于 L 波段多注速调管的  $\pi$  模双间隙腔加载截止波导滤波器型宽带输出回路的总体结构图。图 1 中输出腔是四耦合槽  $\pi$  模双间隙重入式圆柱腔<sup>[3-8]</sup>, 直径  $\phi 101$  mm, 高 40 mm, 重入式漂移管头直径  $\phi 42$  mm, 相互作用间隙宽 8 mm, 共有 19 个电子注孔, 每个电子注孔孔径  $\phi 6$  mm。截止段横截面  $82$  mm  $\times$   $40$  mm, 长度 89.5 mm, 中间插入两个直径为  $\phi 36$  mm、深度为 26 mm 的电容圆栓, 分别位于离谐振中心轴线 77 mm 和 120 mm 处。耦合口位于离腔中心轴 49.5 mm 处, 尺寸为  $40$  mm  $\times$   $10$  mm, 引入电流的耦合接头  $\phi 6$  mm, 弯成直角, 最末端位于离腔中心轴 55 mm 处。

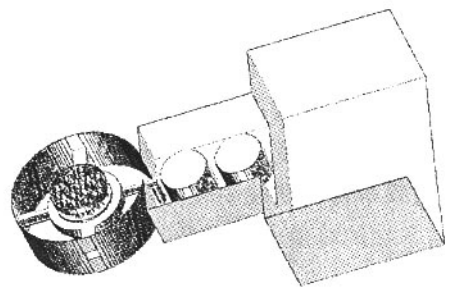


Fig. 1 Structure of  $\pi$  mode double gap cavity loaded by cutoff waveguide filter  
图 1  $\pi$  模双间隙腔加载截止波导滤波器输出回路结构图

采用速调管宽带输出回路 3 维模拟计算方法<sup>[9-10]</sup>可以得到其输出腔等效间隙阻抗的频率特性曲线, 如图 2 所示。输出腔等效间隙阻抗实部最大值为  $2\ 652.4\ \Omega$ , 1 dB 波动的频带范围为  $1\ 215 \sim 1\ 265$  MHz, 1 dB 相对

\* 收稿日期 2006-04-06; 修订日期 2006-08-23  
基金项目 国家 863 计划项目资助课题 广东省自然科学基金资助课题(04300742)  
作者简介 林福民(1964—), 男, 广东汕头人, 博士, 教授, 目前主要从事高功率微波器件研究; lffm@sohu.com。

频宽只有 4%。经过很长时间的模拟计算,该输出回路很难通过进一步优化结构得到更宽输出频带。

### 2 耦合结构对间隙阻抗频率特性的影响

模拟计算过程显示  $\pi$  模双间隙腔与截止波导的耦合口和耦合接头对等效间隙阻抗频率特性的影响非常敏感,只要耦合口或耦合接头的尺寸和位置稍微变化一点点,输出腔等效间隙阻抗频率特性曲线的变化就很明显。

耦合口微小改变后输出腔等效间隙阻抗频率特性曲线的变化情况见图 3。耦合口越靠近输出腔中心轴线,输出腔间隙阻抗实部的峰值越小,同时中央凹下越多。这说明耦合口越靠近输出腔中心轴线,两节滤波器输出回路中两个对间隙阻抗起主要作用的谐振模式的频率间隔越大。

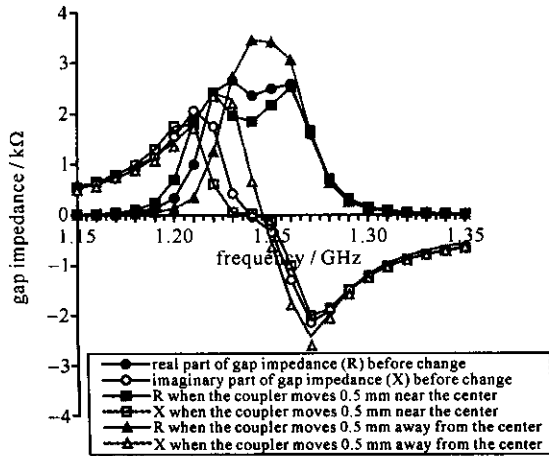


Fig. 3 Influence of the coupling port on the gap impedance  
图 3 耦合口对输出腔等效间隙阻抗的影响

耦合口离输出腔中心轴线越远,耦合口尺寸越小,输出腔与截止段耦合将越弱,输出腔外观品质因数越大。若输出腔外观品质因数太小,两节滤波器电路中两个谐振模式的频率间隔太大,输出腔间隙阻抗实部的频率特性曲线中两峰值中央凹下太多,超过 1 dB。若输出腔外观品质因数太大,两节滤波器电路中两个谐振模式对间隙阻抗的贡献叠加后,间隙阻抗实部的频率特性曲线中只有一个峰值,输出带宽较窄。因此,输出腔外观品质因数存在一个最佳值,这与文献 [11] 的结论相吻合。

耦合接头微小改变后输出腔等效间隙阻抗频率特性曲线的变化情况见图 4。耦合接头变粗,输出腔间隙阻抗实部的频率特性曲线中较高频率端的峰值大幅增高,较低频率端的峰值大幅降低。反之,若耦合接头变细,较高频率端的峰值大幅降低,较低频率端的峰值大幅增高。这说明耦合接头的粗细对谐振腔与截止段的调谐具有重要影响。其主要原因是:弯成直角的耦合接头在截止滤波器段中引入了相当大的等效电感,而该等效电感的大小与耦合接头的粗细有很大的关系。

带通滤波器的谐振角频率  $\omega = 1/(LC)^{1/2}$ 。若耦合接头越粗,其等效电感越小,这导致截止滤波器的谐振频率向高频端漂移,因此,间隙阻抗实部的频率特性曲线中右峰升高,左峰降低;反之,若耦合接头越细,其等效电感越大,截止滤波器的谐振频率向低频端漂移,间隙阻抗实部的频率特性曲线中右峰降低,左峰升高。

其次,当耦合接头的粗细偏离最佳值时,滤波器通带区的间隙阻抗虚部的线性也变差。若耦合接头增粗,间隙阻抗相位零点偏向高频端;反之,若耦合接头变细,间隙阻抗相位零点偏向低频端。

### 3 截止段中销钉等效电容对间隙阻抗频率特性的影响

由于截止波导呈现纯电感性,所以必须在截止段中插入电容性销钉才能达到调谐,形成带通滤波器。图 5 和图 6 分别显示电容性销钉的尺寸和插入深度改变以后输出腔间隙阻抗频率特性的变化情况。

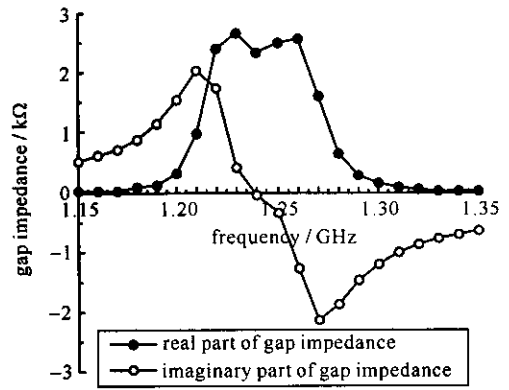


Fig. 2 Equivalent impedance of gap of output cavity vs frequency  
图 2 输出腔等效间隙阻抗的频率特性曲线

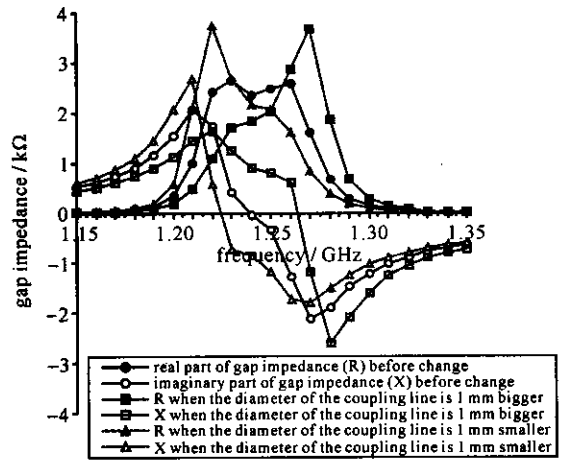


Fig. 4 Influence of the coupling connector on the gap impedance  
图 4 耦合接头对输出腔等效间隙阻抗的影响

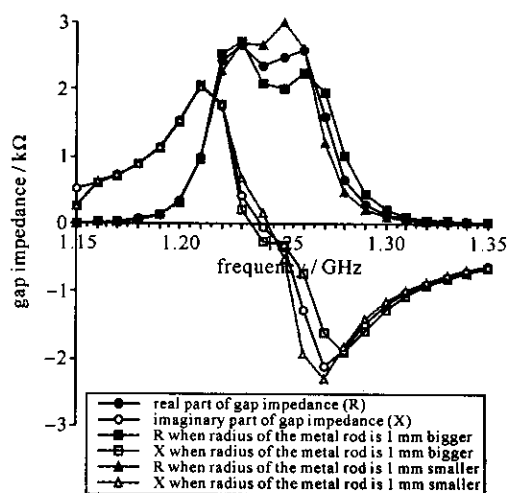


Fig. 5 Influence of radius of the metal rod on the gap impedance

图 5 销钉尺寸对输出腔等效间隙阻抗的影响

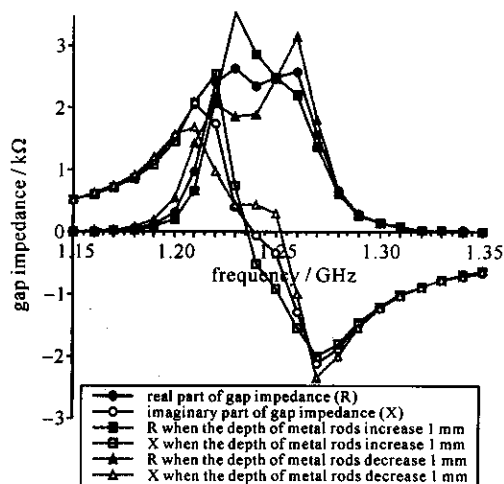


Fig. 6 Influence of the depth of metal rods on the gap impedance

图 6 销钉插入深度对输出腔等效间隙阻抗的影响

从图 5 和图 6 可以看到：销钉的电容减小，间隙阻抗实部的频率特性曲线中右峰升高，左峰降低；反之，销钉的电容增大，间隙阻抗实部的频率特性曲线中左峰升高，右峰降低。其主要原因是：带通滤波器中等效电容减小，谐振频率将向高频端漂移；反之，带通滤波器中等效电容增大，谐振频率将向低频端漂移。这种变化规律非常类似于耦合接头增大使带通滤波器中等效电感减小所表现出的变化情况，只不过是减小电感使谐振峰稍微变宽，减小电容使谐振峰稍微变窄，这是由于减小电感使谐振电路的品质因数降低，而减小电容使谐振电路的品质因数提高。

## 4 结 语

本文重点研究了  $\pi$  模双间隙腔与截止波导的耦合结构对输出腔等效间隙阻抗频率特性的影响规律，以及截止波导滤波器的调谐问题。研究表明： $\pi$  模双间隙腔与截止波导连接的耦合口尺寸主要影响输出腔的外观品质因数，而耦合接头的粗细和电容性销钉对滤波器的调谐具有重要影响。

虽然  $\pi$  模双间隙腔具有特性阻抗高的优势，但它与截止波导段耦合时只能采用环耦合，通过耦合接头引入电流至截止波导中，这种耦合方式进一步增大了具有电感性的截止波导中的等效电感，从而增大了带通滤波器谐振电路的品质因数，使谐振峰变窄，因此， $\pi$  模双间隙腔加载截止波导滤波器电路的带宽难以提高，其带宽潜力并不好于文献 [2] 中所研究的单间隙腔加载截止波导滤波器谐振电路。

## 参考文献：

- [1] 丁耀根, 彭鈞, 朱允淑, 等. S 波段多注宽带速调管的研制 [J]. 电子科学学报, 1996, 18(2): 221-224. (Ding Y G, Peng J, Zhu Y S, et al. Research on the S-band multi-beam klystron. *Journal of Electronics*, 1996, 18(2): 221-224)
- [2] 王策略, 林福民, 丁耀根. 速调管截止波导滤波器输出回路研究 [J]. 真空电子技术, 2005 (2): 25-28. (Wang C L, Lin F M, Ding Y G. Research on cut-off waveguide filter output circuit of klystron. *Vacuum Electronics*, 2005 (2): 25-28)
- [3] Lien E, Robinson D. Study and investigation leading to the design of broadband high-power klystron amplifiers [R]. Technical Report ECOM-02157-1. 1967.
- [4] Zhao Y X. An impedance measurement method for double-gap klystron cavity [J]. *IEEE Trans on Electron Devices*, 1982, 29(2): 316-340.
- [5] Marder B M, Lemke R W. Theoretical and experimental investigation of a method for increasing the output power of a microwave tube based on the split cavity oscillator [J]. *J Appl Phys*, 1994, 75(10): 5423-5432.
- [6] 崔学芳, 刘庆想, 李旭东, 等. 一种新型双间隙输出腔的理论和实验研究 [J]. 强激光与粒子束, 2001, 13(2): 204-208. (Cui X F, Liu Q X, Li X D, et al. Theory analysis and experiment investigation of an original double-gap cavity. *High Power Laser and Particle Beams*, 2001, 13(2): 204-208)
- [7] 林福民, 丁耀根, 沈斌. 强耦合双间隙微波谐振腔的特性分析 [J]. 电子与信息学报, 2003, 25(7): 982-989. (Lin F M, Ding Y G, Shen B. Analysis of characteristic of strong coupling two gap cavity. *Journal of Electronics and Information Technology*, 2003, 25(7): 982-989)
- [8] 林福民, 丁耀根. 适合于低波段宽带多注速调管的四耦合槽  $\pi$  模强耦合双间隙输出腔的设计和讨论 [J]. 真空电子技术, 2003, (4): 39-41. (Lin F M, Ding Y G. Research and design of a  $\pi$ -mode strongly coupling two-gap output cavity with four coupling slots suitable to low frequency broadband MBK. *Vacuum Electronics*, 2003, (4): 39-41)

- [ 9 ] 林福民,丁耀根,刘铁山,等. 宽带速调管滤波器加载输出腔间隙阻抗的频率特性的模拟计算方法[ J ]. 电子与信息学报, 2003, 25( 12 ): 1798-1804. ( Lin F M, Ding Y G, Liu T S, et al. Simulation computation method for computing the gap impedance vary with frequency output cavity loaded with a filter. *Journal of Electronics and Information Technology*, 2003, 25( 12 ): 1798-1804 )
- [ 10 ] 林福民,丁耀根,张志强,等. 速调管双间隙腔的间隙阻抗矩阵频率特性的模拟计算方法[ J ]. 电子与信息学报, 2004, 26( 9 ): 1480-1486. ( Lin F M, Ding Y G, Zhang Z Q, et al. Simulation computation method for calculating the impedance matrix of double gap cavity of klystron. *Journal of Electronics and Information Technology*, 2004, 26( 9 ): 1480-1486 )
- [ 11 ] 丁耀根,陆孝厚. 具有两节滤波器的速调管宽带输出端的设计方法[ J ]. 电子学通讯, 1982, 4( 3 ): 168-174. ( Ding Y G, Lu X H. Design considerations of the two-stage-filter type output circuit of broadband klystrons. *Journal of Electronics*, 1982, 4( 3 ): 168-174 )

## Research on an MBK output circuit of $\pi$ -mode double gap cavity loaded by cutoff waveguide filter

LIN Fu-min<sup>1</sup>, DING Yao-gen<sup>2</sup>

( 1. *The Department of Physics, Shantou University, Shantou 515063, China* ;

2. *Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, P. O. Box 2652, Beijing 100080, China* )

**Abstract** : The paper analyzes the characteristic of a multiple-beam klystron output circuit,  $\pi$ -mode double gap cavity loaded by cutoff waveguide filter, with 3D simulation method. The research is focused on the influence of the size of the coupling port, coupling line and the capacitive metal rods in cutoff waveguide on the gap impedance. The result shows that, the size of the coupling port has strong influence on the external quality factor of the output cavity, while the size of the coupling line and the capacitive metal rods mainly affect the tuning frequency of cutoff waveguide filter. Since the coupling line brings about an additive inductance in cutoff waveguide filter, which makes the quality factor bigger and resonant band narrower,  $\pi$ -mode double gap cavities are not more advantageous to achieve wider band than the single gap cavities loaded by cutoff waveguide filters.

**Key words** : Multiple-beam klystron ; Double gap cavity ; Cutoff waveguide filter ; Output circuit