

## 天线开关管频率特性的计算机辅助设计<sup>1</sup>

俞 辉 柯锦松

(中国科学院电子学研究所 北京 100080)

**摘 要:** 该文以集总参数元件为理论模型, 给出天线开关 (TR) 管频率特性的理论表达方程组, 用 FORTRAN 语言对它们进行了模拟计算; 给出了参差调谐、非四分之一波导波长耦合线以及元件损耗等一些非标准因素对频带特性的影响, 给出了四元件 TR 管的参差调谐及耦合线长度的最佳值, 并与试验结果进行了比较; 在程序设计中采用了计算机自动选择最佳参数以及屏幕图形方式技术直接显示计算曲线的方法。该文所采用的理论模型及计算方法也适用于一般微波滤波器的分析模拟。

**关键词:** 天线开关管 (TR 管), 微波放电器件, 微波滤波器

**中图分类号:** TN126, TP391.72 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-5896(2004)05-0835-06

## CAD of Bandpass Characteristics of Microwave Duplexer Tube (TR Tube)

Yu Hui Ke Jin-song

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

**Abstract** The simulation calculation with the computer using FORTRAN language for frequency characteristics of the microwave duplexer tube (TR tube) is described in this paper. It is based on the theory of microwave four terminal networks with lumped parameter elements. The theoretical equations expressing the frequency characteristics of TR tube is given firstly. Then the effects of some factors, such as the staggered tuning, the length of coupling transmission line, and the element loss on the frequency characteristics are calculated and discussed. The optimum values of staggered tuning and optimum length of the line of a four-resonate-element TR tube are given, and compared with the experimental data. In the program, the optimum parameters of the TR tube can be chosen automatically, and the curve of frequency characteristics is directly shown in the screen. The calculating model and method are also suitable for conventional microwave filter.

**Key words** Microwave duplexer tube (TR tube), Microwave discharge device, Microwave filter

### 1 引言

现代电子对抗中普遍采用宽频带雷达, 对天线开关管 (又称 TR 管) 频带的要求也越来越高, 对带宽的要求有时达到 15% 以上, 这时对 TR 管频带特性的设计变得非常重要。

宽带保护 TR 管在接收状态下, 实际上是一个带通滤波器, 它由输入、输出窗以及 2-3 个谐振放电隙组成, 各个谐振元件之间以波导段进行耦合。谐振元件间的耦合线长度为四分之一波导波长的 TR 管, 其频带特性的计算在过去很多文献中都作了报道<sup>[1-4]</sup>, 而且绝大多数管子的设计都是以此为基础的, 这是因为四分之一波导波长耦合线的输出导纳等于输入导纳的倒数, 计算比较容易进行, 而对于非四分之一波导波长耦合线, 需用普遍的导纳 (或阻抗) 变换式, 计算变得十分繁杂, 在没有计算机的辅助下这种计算是极其困难的, 我们曾在文献 [5] 中对谐振元件间距离的影响做了一些计算, 得出了一些有意义的结果, 国内尚未见报道, 下面本文将进一步以集总参数元件的理论模型, 对可能影响 TR 管频带特性的各个因素做较全面的计算; 讨论

<sup>1</sup> 2002-12-26 收到, 2003-06-13 改回

参差调谐、非四分之一波导波长耦合线以及元件损耗等一些非标准因素对频带特性的影响; 给出不同条件下、适用于 TR 管的最佳频率特性曲线; 并与试验结果进行比较。

## 2 理论模型

我们以四个谐振元件组成的 TR 管作为研究对象, 每个谐振元件均以集总参数表示, 其等效电路如图 1 所示。其中每个元件的归一化导纳为

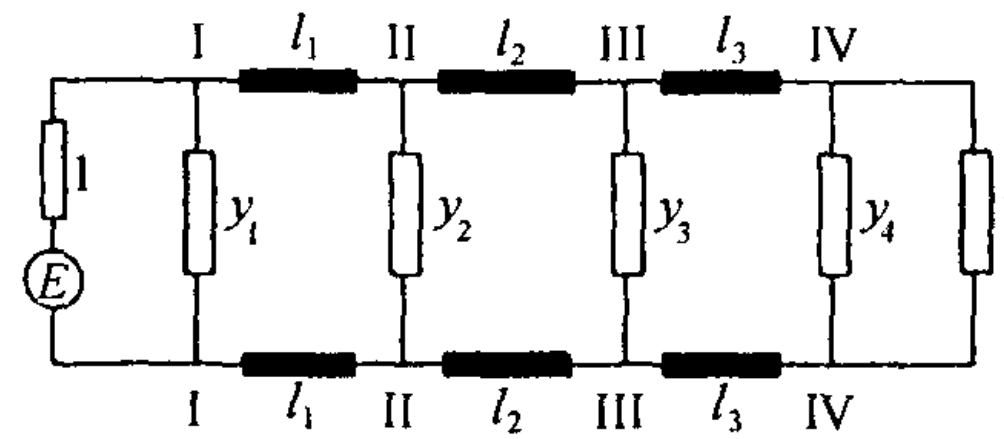


图 1 四元件 TR 管等效电路图

$$y_i = g_i + jb_i, \quad i = 1, 2, 3, 4 \text{ 为谐振元件的序号} \quad (1)$$

其中归一化电导<sup>[4]</sup>为

$$g_i = r_{0i} - 1 \quad (2)$$

其中  $r_{0i}$  为该元件在谐振点处的电压驻波比。

归一化电纳为

$$b_i = Q_i(2 + g_i)(f/f_{0i} - f_{0i}/f) \quad (3)$$

其中  $Q_i$  为该元件的有载品质因数,  $f_{0i}$  为该元件的谐振频率。式 (3) 在窄带时可写成

$$b_i = 2Q_i(2 + g_i)(f - f_{0i})/f_{0i} \quad (3')$$

其中  $f - f_0$  为半带宽。

图 1 中,  $l_i$  为谐振元件间的距离。左端为振荡源, 右端为负载, 波导的归一化导纳为 1。现将导纳从 IV-IV 面逐级变换至 I-I 面:

$$y_{IV} = 1 + y_4 \quad (4)$$

$$y_{III} = y_3 + (y_{IV} + j \tan \theta_3)/(1 + y_{IV} j \tan \theta_3) \quad (5)$$

$$y_{II} = y_2 + (y_{III} + j \tan \theta_2)/(1 + y_{III} j \tan \theta_2) \quad (6)$$

$$y_I = y_1 + (y_{II} + j \tan \theta_1)/(1 + y_{II} j \tan \theta_1) \quad (7)$$

其中  $\theta = 2\pi l_i/\lambda_g$ ;  $\lambda_g$  为波导波长。

由  $y_I$  可得到总反射系数

$$\Gamma = (1 - y_I)/(1 + y_I) \quad (8)$$

由此可得电压驻波比

$$r = (1 + |\Gamma|)/(1 - |\Gamma|) \quad (9)$$

显然, 式 (1)-(9) 方程组是四元件 TR 管频率特性的理论表达式, 从式 (1)-(9) 中可以看出, 影响频率特性的因素很多, 对于四元件的 TR 管有  $g_1, g_2, g_3, g_4, Q_1, Q_2, Q_3, Q_4, f_{01}, f_{02}, f_{03}, f_{04}, l_1, l_2, l_3$  共 15 个因素, 我们将就这些因素对频率特性的影响进行计算, 以得到适用于 TR 管的最佳频率特性。

### 3 程序的设计及其功能

根据以上公式, 我们用 FORTRAN 语言编写了程序, 由于需要改变的参数很多, 可得到非常多的计算数据, 为了有效地对数据进行处理, 我们在程序设计中采用了以下两种方法:

第一 用 VGA 的高分辨率图形方式 (1024×768, 16 色), 在屏幕上直接显示频率特性曲线, 并且可以随时改变参数, 随时显示。为此我们用汇编语言编制了多个可供 FORTRAN 调用的模块, 其中主要包括设置屏幕方式、画点、快速画线、图形方式下的读取数据及显示字符、快速拷屏等模块, 这样使得数据分析快速、准确、直观。

第二 用计算机测试、选取最佳频率特性。在一个给定的驻波比下, 对改变参数得到的所有曲线进行测试, 首先在给定的驻波比下测试边频两点, 再对带内各点进行测试, 如有多条曲线都满足给定的驻波比, 则选取各点驻波比之和为最小的曲线。用这种方法进行测试, 在一般的微机上实现时, 一千条曲线可在 5~10min 内完成, 这种速度对于很多参数大范围内测试有一定困难, 但对于六、七个参数在小范围内的测试、选择是很有效的。

本程序具有以下几个功能: (1) 快速显示功能。当改变某个或某些参数时, 数据输入后屏幕上的频率特性曲线立即显示对应这些参数的新曲线, 而原来的曲线仍保存在屏幕上, 同时曲线下面的 15 个参数值也为新值所代替, 从而可以直观比较前后曲线的优劣。(2) 读取数据功能。为了读取曲线上某点驻波比和频率的数据, 可以键入读取键, 数据立即显示在屏幕的右下角。(3) 快速打印功能。所得的曲线 (1 条或多条) 可由打印机直接打印出来。(4) 选择功能。当屏幕上给定出一条特性曲线, 但不知是否为最佳曲线, 这时可以键入选择键, 屏幕的右下角显示 VSWR=1.3(也可改变), 输入后选择程序进行,  $Q_2, Q_3, Q_4, f_{01}, f_{02}, f_{03}, f_{04}$  等不断在变, 经过选择后如有最佳曲线, 屏幕则会立即显示出来。(5) 普遍适用功能, 它适用于所有微波波段 TR 管频率特性的设计, 对其他微波滤波器的设计也有一定的参考价值。

### 4 计算结果及讨论

我们以四元件 S 波段 TR 管为例, 设其通带为 1850-2150MHz, 带宽为 15%, 带内驻波比小于 1.3。

**4.1 谐振元件间距离与参差调谐的影响** 对于谐振元件间距离不等于  $\lambda_{g0}/4$  以及每个元件不是调谐在同一频率的情况, 一般认为<sup>[2]</sup> 会使带宽增加, 带内损耗增加, 参差调谐会使频率特性产生畸变, 无助于改善带内频率特性。我们曾在文献 [5] 中对不同谐振元件间距离的情况进行了一些计算, 其主要结论是改变距离可使带宽及带内损耗都增加、中心频率与各元件的谐振频率偏离。计算结果表明, 适当选取各元件的谐振频率及各元件间  $Q$  值的比, 可以得到较理想的频率特性曲线。

由于我们所编的程序具有快速显示、准确直观的特点, 所以能够在短时间内对 15 个参量的影响进行了大量的计算, 给出很多曲线, 一个典型结果如图 2 所示。曲线 a 为当  $l_1 = l_2 = l_3 = 0.69 \lambda_{g0}/4$ , 满足驻波比小于 1.3,  $Q_1$  为最大时的最佳特性, 这时的  $Q$  值分别为  $Q_1 = 3.05$ ,  $Q_2 = 4.2$ ,  $Q_3 = 4.2$ ,  $Q_4 = 2.36$ , 每个元件的谐振频率分别为  $f_{01}=1920\text{MHz}$ ,  $f_{02}=1897\text{MHz}$ ,  $f_{03}=1897\text{MHz}$ ,  $f_{04}=1920\text{MHz}$ ; 如果不进行参差调谐, 通过改变后三个元件的  $Q$  值 ( $Q_2=4.25$ ,  $Q_3=4.25$ ,  $Q_4=2.05$ ) 和统一的谐振频率 (1900Hz), 得到的最好特性如图 6 曲线 b 所示。可以看到如不进行参差调谐, 特性将产生不对称的畸变, 这是由于元件间距离偏离  $\lambda_{g0}/4$  所造成, 而参差调谐可以在一定程度上抵销这种不对称的畸变。

当然应该注意, 如果元件间距离偏离  $\lambda_{g0}/4$  太多可能会对热参量有不利的影响, 因为 TR 管的最后一极着火短路后, 在前面  $\lambda_{g0}/4$  处建立了最高的电压, 如元件间距离偏离太多或频带太宽都可能给前一极的起弧带来问题, 但从我们的实验来看, 对于  $0.74\lambda_{g0}/4$  元件间距离、带宽为 15% 的 TR 管, 这种问题并不明显。

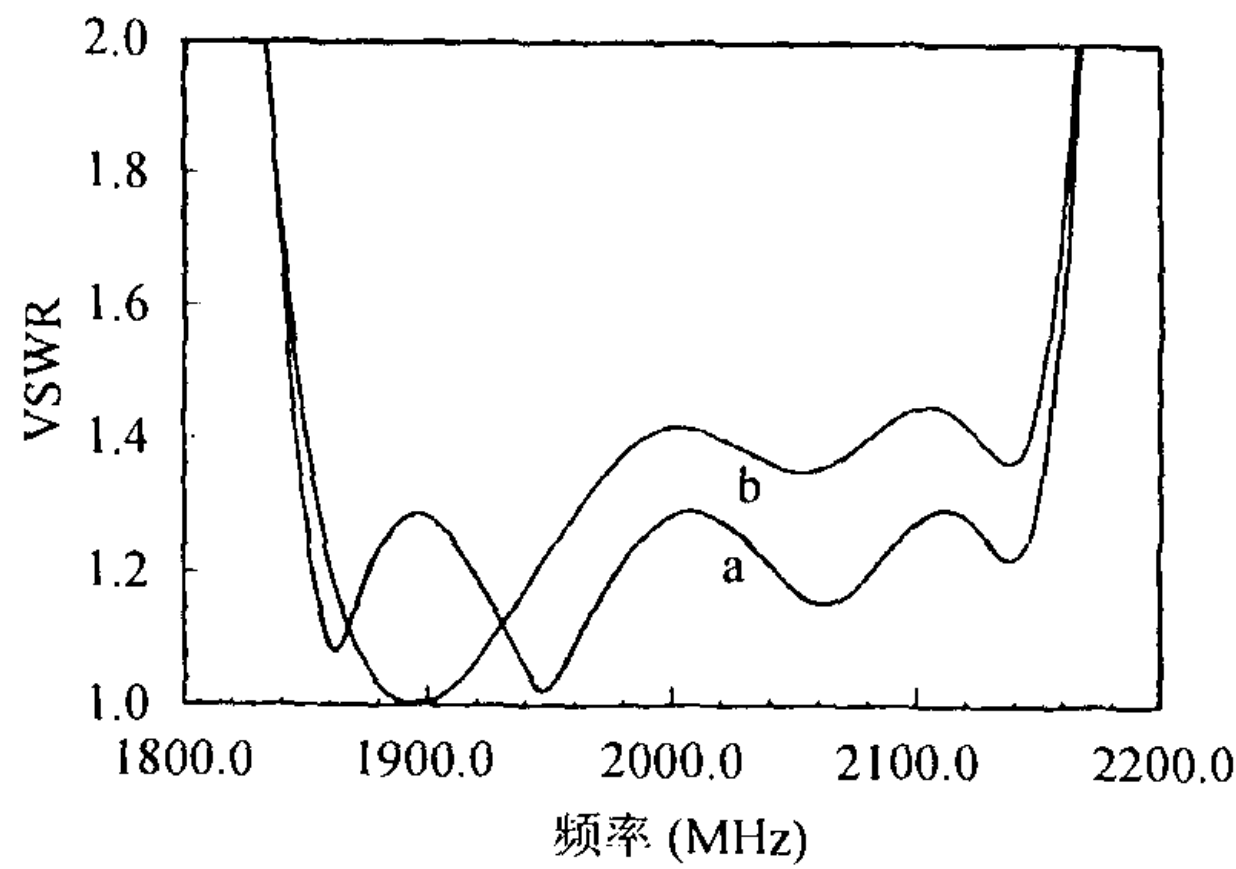


图 2 元件间距离  $l = 0.69\lambda_{g0}/4$  的最佳频率特性曲线  
 a 每级元件的谐振频率不一样 (即参差调谐)  
 b 每级元件调谐频率一样

另外我们的计算还表明: (1) 各元件间距离不相等时, 即  $l_1 \neq l_2 \neq l_3$  时, 得不到更好的特性; (2) 在元件间距离为  $\lambda_{g0}/4$  时, 参差调谐是没有好处的; (3) 元件间距离小于  $\lambda_{g0}/4$  与大于  $\lambda_{g0}/4$  所得的频率特性是一样的, 只是小于  $\lambda_{g0}/4$  时, 元件的谐振频率应比整个频带的中心频率低, 而大于  $\lambda_{g0}/4$  时, 元件的谐振频率应比整个频带的中心频率高; (4) 对于不同的  $Q_1$  和带宽有一个最佳的元件间距离、 $Q$  值配比和参差调谐频率。

(5) 各个元件间的距离缩短为  $l = \lambda_0/4$ , 即  $0.72\lambda_{g0}/4$  时, 整管频带可比  $\lambda_{g0}/4$  时增加 3~5%, 而驻波比可控制在 1.3 以下, 实际可达 15~16%。

为了便于设计, 我们对四元件 TR 管在不同  $l$  和  $b_{1m}$  下做了大量计算, 从而得到了第一回路最大电纳  $b_{1m}$  对应的最佳元件间距离和这时的驻波比的关系, 如图 3 所示。图 4 为对应的最佳  $Q$  值匹配  $Q_2 = \alpha_1 \cdot Q_1$ ,  $Q_3 = \alpha_2 \cdot Q_1$ ,  $Q_4 = \alpha_3 \cdot Q_1$ , 图 5 为最佳元件距离时对应的元件谐振频率,  $a$  为两谐振隙的谐振频率,  $b$  为前后窗的谐振频率。这样如给定了前窗的  $Q_1$  值和带宽即可求出  $b_{1m}$ , 由图 3 可得出最佳的元件间距离和可能达到的驻波比, 再从图 4 可得到这时后面各元件的  $Q$  值, 从图 5 可得到每一元件的谐振频率。

图 2 的频率特性曲线  $a$  的参数值也可以从图 3, 图 4, 图 5 的曲线中求得, 为了便于应用, 再举一例: 给定前窗的  $Q_1 = 2.5$ ; 带宽  $\Delta f = 0.15$ ; 设  $g_1 = g_2 = g_3 = 0$ , 从  $b_{1m} = 2Q_1\Delta f/f_0$  求得  $b_{1m} = 0.75$ , 再从图 3 曲线查得最佳的元件间距离  $l = 0.745\lambda_{g0}/4$ , 可能达到的驻波比为 1.21, 另从图 4 查得  $\alpha_1 = \alpha_2 = 1.44$ ;  $\alpha_3 = 0.78$ , 求得  $Q_2 = Q_3 = 3.6$ ;  $Q_4 = 1.95$ , 从图 5 求得最佳的  $f_{01} = f_{04} = 1929\text{MHz}$ ,  $f_{02} = f_{03} = 1911\text{MHz}$ 。

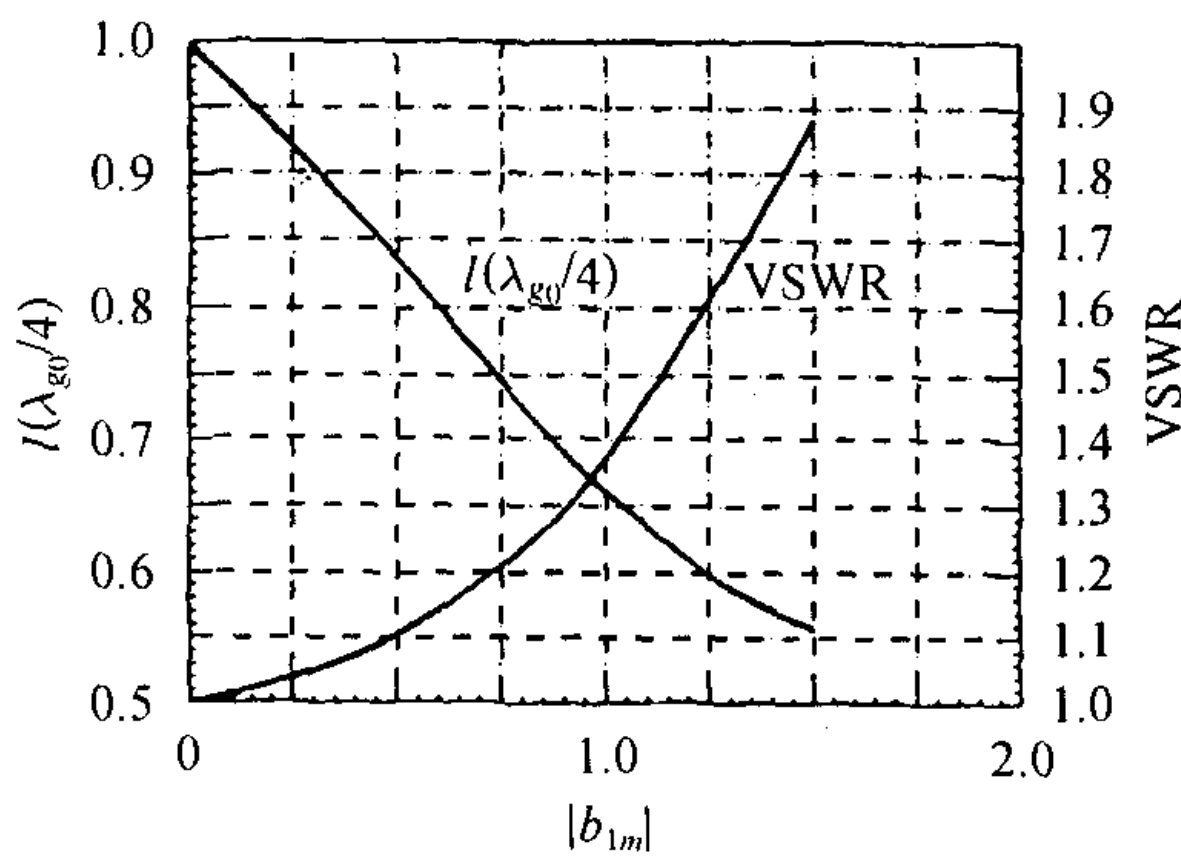


图 3 第一回路最大电纳  $b_{1m}$  与最佳元件间距离和驻波比的关系曲线

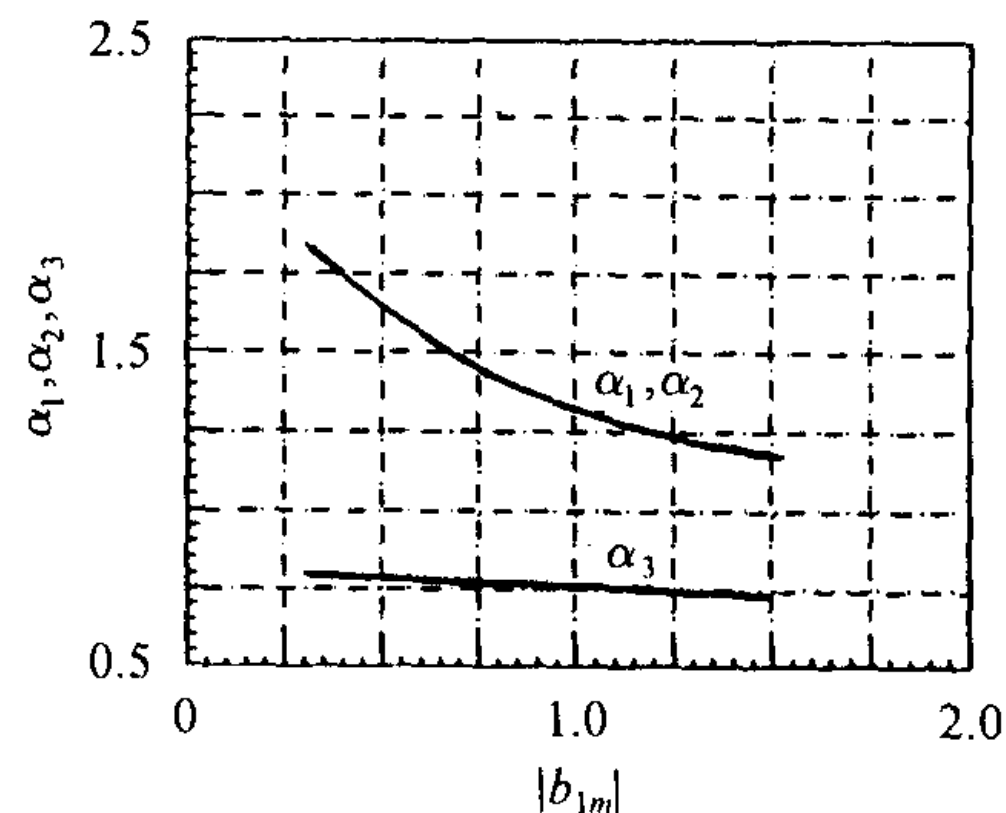


图 4 第一回路最大电纳  $b_{1m}$  与各级最佳  $Q$  值配比的关系

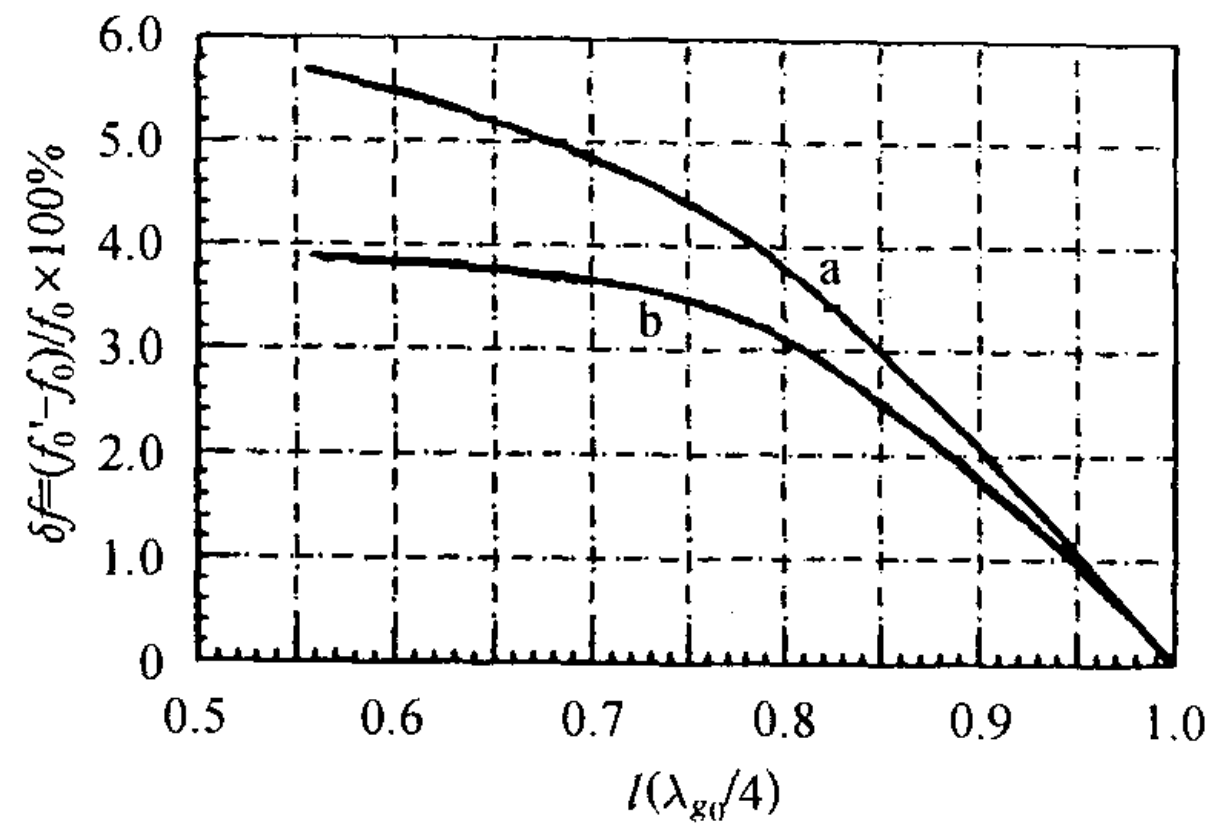


图 5 最佳元件间距离时各元件的谐振频率  
a 中间两谐振隙的谐振频率 b 前后窗的谐振频率

**4.2 元件损耗对频率特性的影响** TR 管中总要有一定的介质, 这些介质会引起一定的损耗, 这种损耗反应在等效电路中就是对应的电导  $g_i \neq 0$ , 一般 TR 管中的这种损耗不是太大,  $g_i$  一般在 0.1 左右, 这可通过式 (2) 用测量得到。首先看一下这种损耗对四元件 TR 管的影响, 图 6 为各元件电导取 0.1(曲线 b) 和 0.25(曲线 c) 时对图 2 频率特性 a 的影响, 可以看到损耗使波纹变得平缓, 整个带内的反射有所增加, 边带截止变缓。

**5 与实验结果的比较**

我们对四元件 TR 管的实际测试结果如图 7 曲线 a 所示, 由于设计、加工及调试中的原因, 它并没有完全达到最佳参数, 其元件间距离为  $\lambda_{g0}/4$ (即  $0.72\lambda_{g0}/4$ ), 所测得各单独元件的 Q 值分别为  $Q_1 = 2.7$ ,  $Q_2 = 4.1$ ,  $Q_3 = 4.1$ ,  $Q_4 = 2.1$ , 谐振频率分别为  $f_{01} = 1913\text{MHz}$ ,  $f_{02} = 1903\text{MHz}$ ,  $f_{03} = 1898\text{MHz}$ ,  $f_{04} = 1913\text{MHz}$ , 归一化电导分别为  $g_1 = 0.18$ ,  $g_2 = 0.12$ ,  $g_3 = 0.11$ ,  $g_4 = 0.1$ 。根据测得的这些元件值用上述计算模式计算的结果如图 7 曲线 b 所示, 可以看出计算结果与测试结果是基本符合的, 只是测试值稍差一些, 这可能是由于整管中没有考虑到的损耗以及测试误差所引起; 从带宽以及特性曲线的形状来看它们是比较一致的, 这说明用上述模型对实际情况模拟是可行的。

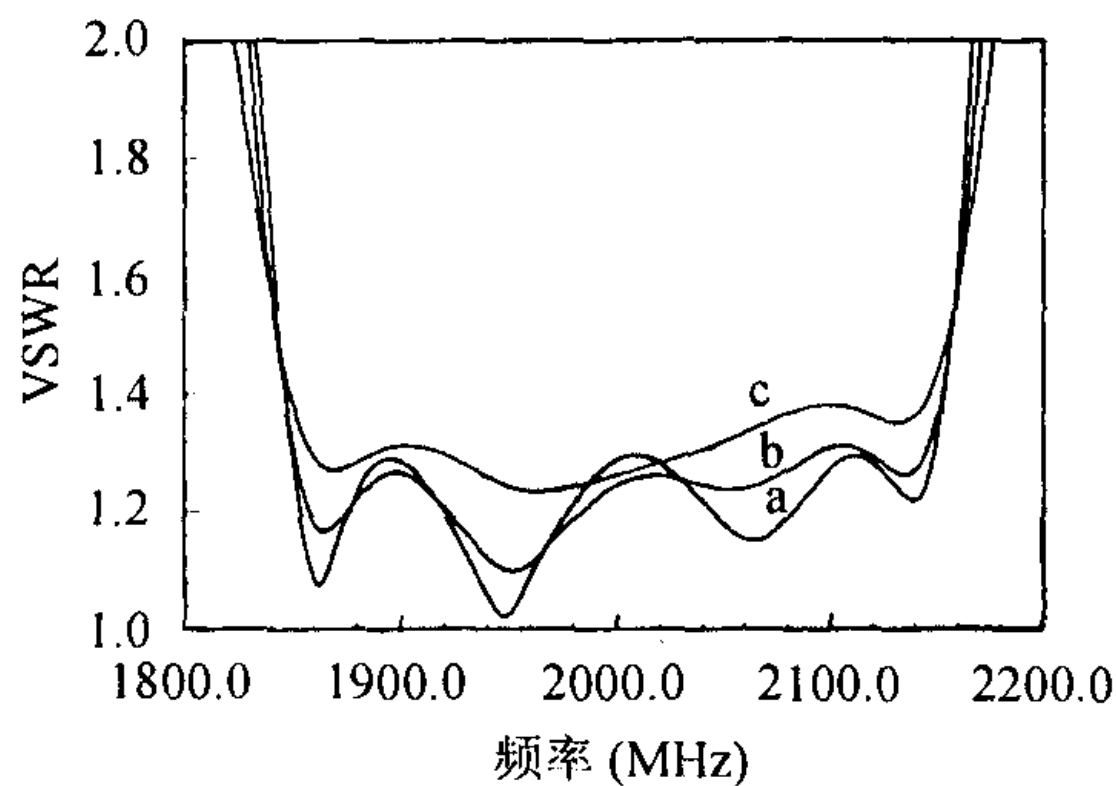


图 6 四元件 TR 管介质损耗 (即有功电导  $g_i$ ) 对频率特性曲线的影响, ( $l = 0.69\lambda_{g0}/4$ )  
a 同图 2 曲线 a,  $g_i = 0$   
b  $g_i = 0.1$   
c  $g_i = 0.25$

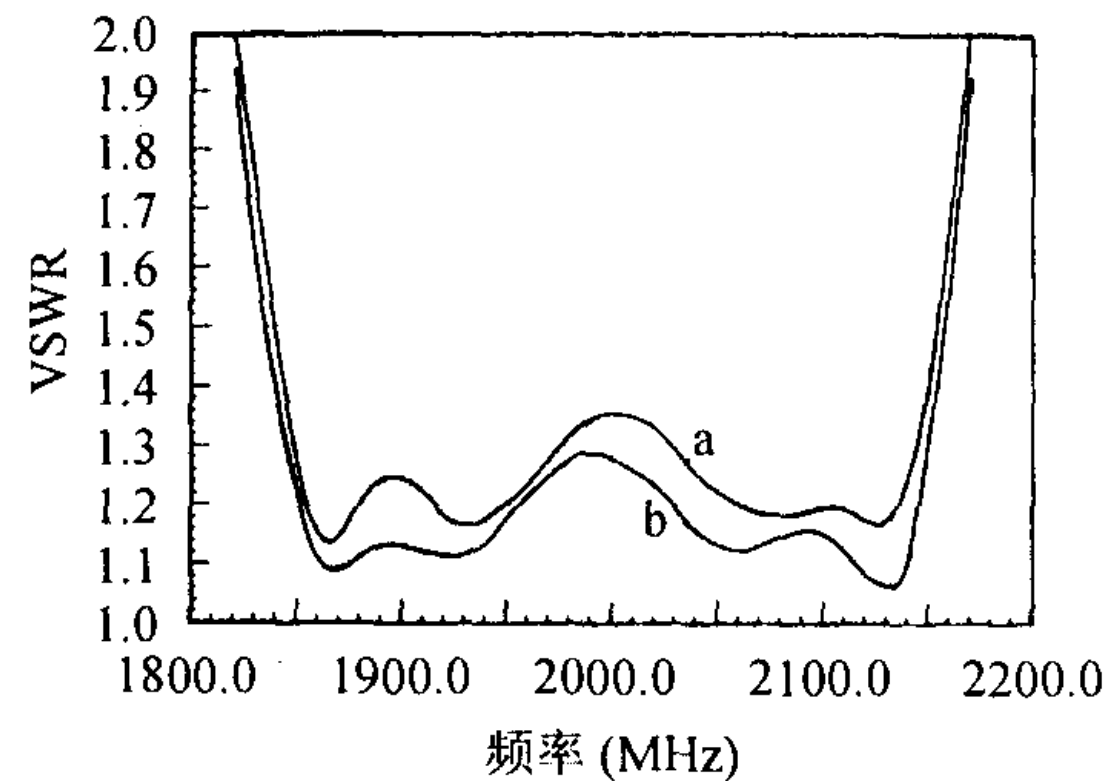


图 7 四元件 TR 管频率特性曲线  
计算值与实验值的比较  
a 实测结果  
b 理论计算结果

## 6 结论

(1) 四元件 TR 管, 元件间距离偏离  $\lambda_{g0}/4$  时, 带宽明显增加, 如对各元件进行参差调谐, 可改善其频率特性; 对应于一定的带宽和第一回路  $Q_1$  值, 有一个最佳的元件间距离, 该距离由图 3 给出, 这时必须对各元件进行参差调谐, 可以获得最佳的频率特性, 各元件的  $Q$  值和谐振频率由图 4、图 5 给出。

(2) 元件的损耗会使频率特性的波纹变平缓, 带内反射有所增加。

(3) 所用的计算模型与实验结果符合较好, 可在 TR 管设计过程中对其频率特性进行较好的模拟和选择。

(4) 本文所用的理论模型和计算方法也适用一般微波滤波器的计算、模拟。

感谢王勇主任及段德龙组长对文章发表的支持和建议, 感谢李玉竹在文章打字工作的帮忙。

## 参 考 文 献

- [1] 电子管手册编委会主编. 天线开关管设计手册. 北京: 国防工业出版社, 1983, 第三章.
- [2] Kraszewski A. Microwave Gas Discharge Devices. London Iliffe Books Ltd, 1967, Chap.4.
- [3] Лебедев ИВ. Резонансные Разрядники Антенных Переключателей. Москва: Советское Радио, 1976, Глава 3.
- [4] Smullin L D, Montgomery C G. Microwave Duplexers. McGraw-Hill Book company, 1948, Chap.3
- [5] 柯锦松等. 宽带天线开关管频率特性的理论计算. 电子科学学刊, 1991, 13(1): 42-47.

俞 辉: 男, 1964 年生, 博士, 研究方向为表面物理、计算机应用、微波器件等.

柯锦松: 男, 1935 年生, 研究员, 研究方向为气体放电及其应用、微波器件等.