

文章编号: 1001 - 9014 (2010) 02 - 0105 - 05

# Ka 波段滤波器加载三间隙耦合输出腔的设计

王树忠, 马菁, 王勇, 全亚民

(中国科学院电子学研究所 中国科学院高功率微波源与技术重点实验室, 北京 100190)

**摘要:** 扩展相互作用速调管 (EIK) 由多个重入式多间隙耦合腔构成, 毫米波段高功率微波源的需求推动了 Ka 波段 EIK 的研制. 分别利用等效电路理论和场分析方法推导了由三个同样间隙构成的三间隙耦合输出腔间隙阻抗实部的计算公式, 然后应用等效电路方法获得了滤波器加载宽频带输出回路的基本参数, 应用场分析方法设计了冷测带宽达 4.6% 的滤波器加载三间隙耦合输出腔结构, 为宽频带 EIK 的研制打下坚实的基础.

**关键词:** 宽频带; 扩展相互作用速调管; 场分析法

**中图分类号:** TN122+.7 **文献标识码:** A

## DESIGN ON KA-BAND FILTER LOADED THREE-GAP COUPLED OUTPUT CAVITIES

WANG Shu-Zhong, MA Jing, WANG Yong, QUAN Ya-Min

(Key Laboratory of High Power Microwave Sources and Technologies,

Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

**Abstract:** The extended interaction klystron (EIK) consists of several reentrant multi-gap coupled cavities. The demand for high-power microwave sources in the millimeter-wave region promotes the development of a Ka-band extended interaction klystron (EIK). In this study, the real part of the impedance of the three-gap coupled output cavities composed by three uniform gap cavities was derived by using the equivalent circuit theory and field analysis method, respectively. The basic parameters of the broad band output circuit were obtained by using equivalent circuit theory. Filter loaded three-gap coupled output cavities with band width of 4.6% were designed by using field analysis method. It lays a solid foundation for the development of the broad band EIK.

**Key words:** broad band; extended interaction klystron; field analysis method

### 引言

扩展相互作用速调管 (EIK) 是把行波管和速调管结合起来发展而成的一种既有较高增益、又有较宽带宽的新型高功率毫米波器件. 它可以工作在 100GHz 以上<sup>[1]</sup>. EIK 在民用方面可用于降水量的测量<sup>[2]</sup>和卫星通信<sup>[3]</sup>, 在军事上可用于火控、监视、雷达跟踪及导弹寻的等. CP 加拿大分公司在 EIK 的研制方面处于世界领先地位, 其研制的 EIK 工作频率为 30 ~ 280GHz, 峰值功率为 3kW ~ 5W, 连续波功率为 1kW ~ 1W, 已广泛应用于多种领域.

EIK 采用的关键技术之一是多间隙耦合腔技术. 对于一个由  $N$  个间隙构成的多间隙耦合腔, 一方面谐振腔的面积变为单腔面积的  $N$  倍, 使得腔内

单位面积内的损耗下降为原来的  $1/N^2$ , 解决了高平均功率管子中高频热损耗的问题<sup>[4]</sup>; 另一方面多间隙耦合腔相当于一个串联电路, 每个腔的间隙电压变为原来的  $1/N$ , 这大大减少了高频击穿的可能性, 有利于峰值功率的提高. 输出腔的特性在很大程度上影响了整管的性能, 尤其是输出腔的特性阻抗值, 它是决定整管频宽的重要参数, 输出腔的特性阻抗值越高, 速调管的效率带宽乘积越大. 多间隙耦合腔的采用可以大大增加腔体的特性阻抗, 从而使 EIK 具有单位长度增益高的特点<sup>[5]</sup>. 同时多间隙耦合输出腔具有较高的特性阻抗, 可以实现宽频带高功率的功率输出. EIK 的这些优点使其特别适用于毫米波亚毫米波段.

分别利用等效电路理论和场分析方法推导了由

收稿日期: 2009 - 03 - 02, 修回日期: 2009 - 09 - 18

Received date: 2009 - 03 - 02, revised date: 2009 - 09 - 18

基金项目: 国家自然科学基金项目 (60701011, 60971073) 资助

作者简介: 王树忠 (1973-), 男, 河北承德人, 博士, 主要研究方向为多注速调管、带状注速调管和扩展相互作用速调管.

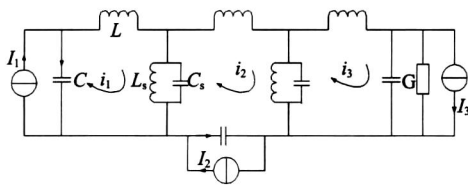


图 1 加载均匀波导的输出回路等效电路  
Fig 1 Equivalent circuit of output circuit loaded with uniform waveguide

三个同样间隙构成的三间隙耦合输出腔间隙阻抗实部的计算公式,利用等效电路理论分析,在  $Q_e = 35$  的情况下,三节滤波器加载三间隙输出回路的 1dB 带宽可以达到 5%左右.获得基本的参数,然后利用场分析方法,设计了膜片滤波器加载三间隙耦合输出腔的结构,模拟结果显示在有效间隙阻抗为 3470 的条件下,1dB 带宽达到 4.6%,这将为我们的研制出工作电压为 13kV、电流为 0.7A、热测带宽为 4%,输出功率为 2kW 的 EIK 打下坚实的基础.

### 1 三间隙耦合输出腔间隙阻抗实部的计算

输出回路带宽受到很多因素的影响,其中腔体间隙阻抗频率特性起到决定性的作用,间隙阻抗实部的带宽基本反映了输出回路的带宽.图 1 为加载均匀波导的输出回路等效电路.

振荡的能量通过第三腔耦合口到达输出波导,输出波导端口接匹配负载时,负载阻抗  $R_1 = Z_0$  (输出波导特性阻抗).从三间隙耦合腔看过去的负载为

$$G = 1/(N_r^2 \cdot Z_0) = 1/(R/Q \cdot Q_e),$$

$$\begin{cases} \left[ \frac{1}{Y_s} + Z_1 \right] \cdot i_1 - \frac{1}{Y_s} \cdot i_2 = \frac{I_1}{j c} \\ -\frac{1}{Y_s} \cdot i_1 + \left[ \frac{2}{Y_s} + Z_1 \right] \cdot i_2 - \frac{1}{Y_s} \cdot i_3 = \frac{I_2}{j c} \\ -\frac{1}{Y_s} \cdot i_2 + \left[ \frac{1}{Y_s} + j l + \frac{1}{Y_0} \right] \cdot i_3 = \frac{I_3}{Y_0} \end{cases},$$

$$\begin{cases} V_1 = \frac{1}{j c} (I_1 - i_1) \\ V_2 = \frac{1}{j c} (I_2 - i_2) \\ V_3 = \frac{1}{Y_0} (I_3 - i_3) \end{cases} \quad (1)$$

若间隙阻抗为  $\tilde{Z}_c$ ,根据微波理论可知  $\tilde{V} = \tilde{Z}_c \cdot \tilde{I}$ .

求得输出回路的间隙阻抗矩阵

$$\tilde{Z}_c = \tilde{C} - \tilde{C} \tilde{K}^{-1} \tilde{C} \quad (2)$$

$$\text{式中, } \tilde{C} = \begin{pmatrix} \frac{1}{j c} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{j c} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{Y_0} \end{pmatrix},$$

$$\tilde{K} = \begin{pmatrix} \frac{1}{Y_s} + Z_1 & \frac{1}{Y_s} & 0 \\ \frac{1}{Y_s} & \frac{2}{Y_s} + Z_1 & \frac{1}{Y_s} \\ 0 & \frac{1}{Y_s} & \frac{1}{Y_s} + j l + \frac{1}{Y_0} \end{pmatrix}.$$

若采用的是滤波器加载输出结构,相应的  $Y_0$  换为下面的  $Y_L$ ,它为在输出腔加三节滤波器的情况.

$$Y_L = G_L + B_L$$

$$= \frac{Y_0}{N_r^2} \frac{1 + j(x_1 - B_1)}{1 + B_1 x_1 + j x_1} \frac{1 + j(x_2 - B_2)}{1 + B_2 x_2 + j x_2} \quad (3)$$

其中,  $B_1$  和  $B_2$  分别为第一块和第二块电感膜片的归一化电纳,  $N_r$  为耦合口等效于变压器的变压比,  $x_1 = \tan l_1$ ,  $x_2 = \tan l_2$ , 为电磁波在波导中的传播常数,  $l_1$  为第一段波导的长度,  $l_2$  为第二段波导的长度.归一化电纳通过下面的公式计算求得

$$B = \frac{-s}{d} \text{ctg}^2 \left[ \frac{d}{2} \left( \frac{d}{a} - \right) (1 + 4\%) \right] \quad (4)$$

式中,  $a$  为波导宽边长度,  $d$  为膜孔宽度,  $s$  为膜片厚度.

输出回路的互作用阻抗 (即等效间隙阻抗) 定义为单位激励下,负载上的损耗功率.若忽略腔壁损耗,谐振能量全部馈出.所以三间隙耦合腔向外电路负载提供的总平均功率为:

$$\bar{P}_{\text{out}} = \frac{1}{2} \text{Re}(I_1^* V_1) + \frac{1}{2} \text{Re}(I_2^* V_2) + \frac{1}{2} \text{Re}(I_3^* V_3) \quad (5)$$

激励为输入腔的感应电流  $I_f = I_1$ . 设:

$$I_2 = K_1 I_f \exp(-j e P), \quad I_3 = K_2 I_f \exp(-j 2 e P).$$

在一般情况下,流经间隙 1、2、3 的感应电流的绝对值略微不同,而且流经间隙 2 的感应电流的相位比流经间隙 1 的电流相位落后  $e P$ ,流经间隙 3 的电流相位比流经间隙 1 的电流相位落后  $2 e P$ ,  $e$  代表电子注群聚电流的轴向传播常数,  $P$  代表相邻间隙中心线之间的距离,  $K_1, K_2$  为实数.则三间隙耦合输出回路的等效间隙阻抗为:

$$Z = 2 \bar{P}_{\text{out}} / |I_f|^2 \quad (6)$$

等效间隙阻抗实部的计算公式为

$$R = R_{11} + K_1^2 R_{22} + K_2^2 R_{33} + 2K_1 R_{12} \cos(e P) + 2K_2 R_{13} \cos(2 e P) + 2K_1 K_2 R_{23} \cos(e P) \quad (7)$$

忽略感应电流幅值的差异,三间隙耦合腔取模腔或2模腔时,等效间隙阻抗实部为:

$$R = \sum_{i=1}^3 (R_{ii} + 2 \sqrt{R_{ii} R_{(i+1)(i+1)}}) \quad (8)$$

注意上式中假设  $R_{44} = R_{11}$ .

## 2 三间隙耦合输出腔间隙阻抗实部的场分析计算方法

由电磁场理论可知,在输出波导中的平均输出功率为<sup>[6,7]</sup>

$$P_e = \frac{1}{2} \operatorname{Re} \left[ \int_S E \times H \cdot d\mathbf{s} \right] \quad (9)$$

当输出波导为矩形时,上式化为

$$P_e = \frac{1}{2Z_{TE_{10}}} \left[ \int_S E \times E^* \cdot d\mathbf{s} \right] \quad (10)$$

式中,  $Z_{TE_{10}} = 120 \sqrt{1 - (\lambda/2a)^2}$  是矩形波导  $TE_{10}$  模的波阻抗,  $a$  是矩形波导宽边的长度. 由公式(10)可知,只要找出波导中电场极大值处的平面,即可以在此平面上应用上式,求得平均输出功率,而在电磁仿真软件中很容易找到电场极大值平面,故  $P_e$  可求.

对于三间隙耦合输出腔,仍然可以近似认为各间隙电流  $I$  不变,因为只考虑电流的实部,电流的相位影响也可以忽略. 间隙电压可以通过对间隙上电场的积分来获得.

第  $i$  个间隙阻抗实部 ( $i=1, 2, 3$ )

$$R_i = \frac{V_i}{I} = \frac{\int E_{zi} \cdot dl}{I} \quad (11)$$

式中  $dl$  选择轴线上进行积分. 各间隙上产生的输出功率和总输出功率有如下关系

$$\frac{P_{e,i}}{P_e} = \frac{0.5 N_i}{0.5 N_1 + 0.5 N_2 + 0.5 N_3} = \frac{V_i}{V_1 + V_2 + V_3} \quad (12)$$

则有各间隙阻抗实部

$$R_i = \frac{(V_1 + V_2 + V_3) V_i}{2P_e} \quad (13)$$

总的有效间隙阻抗实部为

$$R = \sum_{i=1}^3 R_i = \frac{(V_1 + V_2 + V_3)^2}{2P_e} \quad (14)$$

根据公式(8),容易求得阻抗矩阵实部的各元

$$R_{ii} = \frac{R_i^2}{R_1 + R_2 + R_3} \quad (15)$$

## 3 滤波器加载三间隙耦合输出腔的设计

多间隙耦合腔的设计方法是结合整管的设计要

求,先进行单个腔体的设计,然后把多个腔体组合起来进行总体设计. 这里我们最关心的是谐振腔的特性阻抗  $R/Q$  和频率  $f$ . 模拟计算表明,谐振腔的  $R/Q$  随着腔高  $h$ 、间隙距离  $d$  的增加而增加,随着谐振腔半径  $r$ 、漂移管半径  $r_0$ 、漂移管壁厚  $t$  和漂移头厚度  $r_0$  的增大而变小. 腔体的频率随着腔高  $h$ 、半径  $r$  和漂移头厚度  $r_0$  的增加而降低,随着间隙距离  $d$  和漂移管壁厚  $r_0$  的增加而增大. 通过调节这几个参量可以获得所需要的频率和最大的  $R/Q$  值.

将要研制的 EIK 工作在 Ka 波段,工作电压为 13kV,电流为 0.7A,拟采用三间隙耦合输出腔. 从耐压的角度来考虑,间隙处的平均电场强度应该小于 10kV/mm,所以取间隙距离  $d > 0.44$ mm. 同时考虑到电子注通过间隙的时间必须小于半个高频周期,以保证从输出腔提取能量,所以取  $d < 0.94$ mm. 这样间隙  $d$  的取值范围为 0.44 ~ 0.94mm,综合考虑影响特性阻抗等几个因素  $d$  取为 0.6mm. 综合考虑电子枪的压缩比,阴极负载,通道内电子注电流密度及所需聚焦磁场大小,电子注半径取为 0.4mm,漂移管的半径取为 0.6mm. 三间隙耦合腔中存在五个模式,分别为  $-2/3$  模、 $-1/3$  模、 $2/3$  模、 $1/3$  模和  $2/3$  模. 波渡越角  $\theta_e = 2$  时,两个间隙中心之间的距离(漂移周期)  $P = 1.93$ mm,这时能保证输出回路具有较大的特性阻抗<sup>[8]</sup>. 而从图 2 给出的分析表明  $P = 1.85$ mm 时,各个模式都处于谐振腔电子负载为正的区,避免了杂模振荡的产生<sup>[9]</sup>,所以取  $P = 1.85$ mm. 两腔之间壁厚取为 0.25mm,则腔高  $h$  取为 1.6mm. 为保证漂移头的机械强度,漂移头壁厚  $r_0 = 0.3$ mm,漂移管壁厚  $t = 0.8$ mm,设计单个腔时,计算的谐振腔半径  $r = 2.51$ mm,  $R/Q$  值为 70. 三个间隙组合在一起构成三间隙腔时,耦合槽的角度越大,模式频率间隔越大,但耦合槽太大会影响腔的  $R/Q$ ,这里耦合槽角度  $113^\circ$ ,耦合槽径向厚度 0.2mm. 加上输出波导而不加滤波器时,采用群时延方法计算的  $Q_e = 86.8$ .

根据等效电路方法计算加载三节滤波器输出回路 1dB 带宽为 5.6% 时(参见图 3(b)),  $Q_e = 35$ ,归一化电纳  $-0.89$ ,根据公式(4)计算膜片厚度为 0.5mm 时,两模孔宽度  $d = 5.12$ mm,第一块膜片到耦合口及两膜片间的距离都为 6.4mm,在  $R/Q$  为 70 的情况下,1dB 带宽内阻抗最小值为 3842. 采用上面的设计参数,与电磁仿真软件相比有一定的差距,通过调节中间两段波导的长度和模孔的宽度,最终确定两模孔的宽度为 3.62mm 和 5.0mm,可以

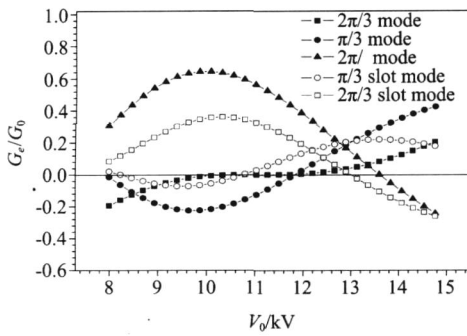


图 2 谐振腔电子负载电导随电压的变化关系 (间隙宽度  $d=0.6\text{mm}$ , 漂移管半径  $r_0=0.6\text{mm}$ , 填充比 0.7 时, 漂移周期调节到 1.85mm)

Fig 2 The beam loading conductance vs beam voltage (gap width  $d=0.6\text{mm}$ , drift tube radius  $r_0=0.6\text{mm}$ , fill factor is 0.7, drift period is 1.85mm)

获得如图 3(a)所示的是利用模拟软件设计的 4.6% 带宽的滤波器加载三间隙耦合输出腔结构. 计算 2 模的特性阻抗 200 (耦合孔的影响使特性阻抗降低),  $Q_e=35$ , 图 3(b)显示 1dB 带宽 4.6%, 带内有效阻抗值最低为 3474. 加载滤波器前后, 三间隙耦合腔内其它模式的  $Q_e$  值参见表 1. 从中可以看出, 加载滤波器后各模式的频率只有微小的变化,  $\pm 1/3$  模式的  $Q_e$  增大很多, 其中  $-2/3$  模的  $Q_e$  变为原来的 4 倍,  $2/3$  模的  $Q_e$  大约变为原来的 3 倍. 而  $\pm 1/3$  模的  $Q_e$  比加滤波器前略有增加. 图 4 给出了加载滤波器前后 2 模  $Q_e$  的变化, 加滤波器前, 在很窄的频带内有很高的  $Q_e$  值, 加滤波器后,  $Q_e$  值大大降低, 而且变化趋缓.

### 4 结论

分别利用等效电路理论和场分析方法推导出了三个同样间隙构成的三间隙耦合输出腔间隙实部的计算公式, 运用等效电路方法给出了宽频带输出回路的基本参数, 然后应用场分析方法设计了 Ka 波段三节滤波器加载三间隙耦合输出腔结构, 模拟带宽达到 4.6%, 同时考虑振荡的问题. 加载滤波器后,  $\pm 2/3$  模式的  $Q_e$  变为原来的 4 倍,  $\pm 1/3$

表 1 加载滤波器前后三间隙耦合输出腔中各模式的频率和  $Q_e$  值

Table 1 Frequency and $Q_e$ of each mode in the three-gap coupled output cavities without and with filter				
模式	$-2/3$	$-1/3$	$1/3$	$2/3$
$f(\text{GHz})$	29	31.2	38.65	42.35
$f(\text{GHz})$ (滤)	29	31	38.47	42.39
$Q_e$	278.9	143.4	140.3	269
$Q_e$ (滤)	1075.6	186.7	152.6	753.2

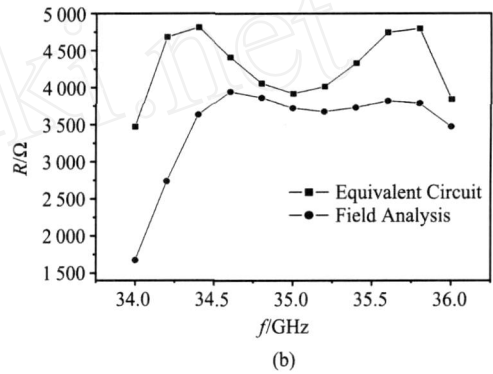
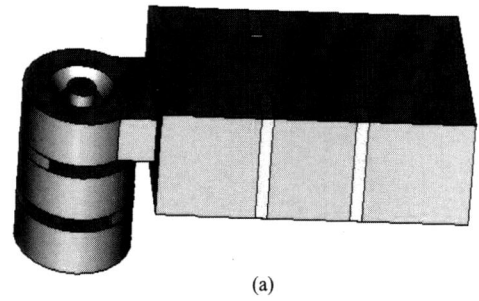


图 3 (a) 滤波器加载三间隙耦合输出腔结构 (b) 有效间隙阻抗

Fig. 3 (a) Geometry of filter loaded three-gap coupled output cavities (b) the real part of gap impedance

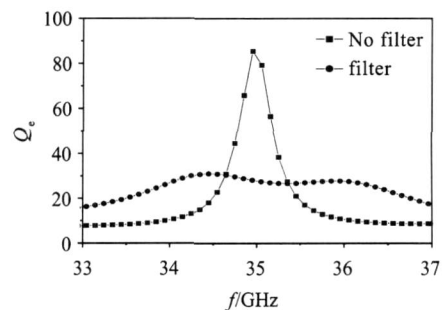


图 4 三间隙耦合输出腔加载滤波器前后  $Q_e$  的对比  
Fig. 4 The comparison of  $Q_e$  in three-gap coupled output cavities with and without filter

模式的  $Q_e$  略有增加,  $2/3$  模的  $Q_e$  约变为原来的 1/2. 本论文解决了展宽毫米波 EIK 输出回路带宽的关键技术问题.

### REFERENCES

[1] ZHUANG Xue-Zeng, On VME mm-wave devices [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (庄学曾. 真空微电子毫米波器件. 红外与毫米波学报), 1994, 13(4): 295—298  
[2] Albert R, Dave B, Brian S, State-of-the-Art W-band extended interaction klystron for the CloudSat program [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices* 2005, 52(5): 895—898

(下转 131 页)

Method	Fat		Protein	
	RMSEP	$R_p$	RMSEP	$R_p$
BPNN	0.008	0.989	0.006	0.989

### 3 结论

使用近红外光谱技术对奶粉脂肪和蛋白质含量的检测方法进行了研究.采用 Kennard-Stone对样本进行了分类,然后对 1557个变量进行小波变化,达到压缩去噪的目的.最后采用 RBF网络进行建模,通过优化扩散系数  $\sigma$  达到较好的效果.与 BP网络相比,RBF网络具有结构自适应确定、不易陷入局部极小、学习速度快、函数逼近能力强等优点.近红外光谱结合化学计量学方法能够实现对奶粉脂肪和蛋白质含量快速、无损检测,为今后奶粉脂肪与蛋白质等成分含量快速无损检测提供了新的化学计量学建模方法.将进一步研究近红外光谱技术在奶粉成分含量检测的应用,寻找利于建模的敏感波段,扩充奶粉品种和样本数量,并且进一步优化建模方法.

### REFERENCES

- [1] Reid L M, Woodcock T, O'Donnell C P, *et al* Differentiation of apple juice samples on the basis of heat treatment and variety using chemometric analysis of M R and N R data[J]. *Food Research International*, 2005, **38** (10): 1109—1115.
- [2] LV Li-Na ZHANG Yue, ZHOU Ding-Wen Composition analysis of milk by using near infrared diffuse reflection spectroscopy[J]. *Journal of Tianjin University* (吕丽娜,张玥,周定文.采用近红外漫反射光谱法分析牛奶成分.天津大学学报), 2004, **37** (12): 1093—1096.
- [3] JWU Di, He Yong, FENG Shui-Juan, *et al* Application of infrared spectra technique based on LS-support vector machine to the non-destructive measurement of fat content in milk powder[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves* (吴迪,何勇,冯水娟,等.基于 LS-SVM的红外光谱技术在奶粉脂肪含量无损检测中的应用.红外与毫米波学报), 2008, **27** (3): 180—184.
- [4] JWU D, He Y, Feng S J. Short-wave near-infrared spectroscopy analysis of major compounds in milk powder and wavelength assignment[J]. *Analytica Chimica Acta*, 2008, **610** (2): 232—242.
- [5] Borin A, Ferr o M F, Mello C, *et al* Least-squares support vector machines and near infrared spectroscopy for quantification of common adulterants in powdered milk[J]. *Analytica Chimica Acta*, 2006, **579** (1): 25—32.
- [6] Bishop C M, *Neural Networks for Pattern Recognition* [M]. Clarendon Press, Oxford, 1995.
- [7] Pulido A, Ruis nchez I, Rius F X. Radial basis functions applied to the classification of UV visible spectra[J]. *Analytica Chimica Acta* 1999, **388** (3): 273—281.
- [8] Fid ôcio P H, Poppi R J, Andrade J C. Determination of organic matter in soils using radial basis function networks and near infrared spectroscopy[J]. *Analytica Chimica Acta*, 2002, **453** (1): 125—134.
- [9] SHAO Yong-Ni, He Yong Method for predicting acidity of bayberry juice by using vis/near infrared spectra[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves* (邵咏妮,何勇.可见/近红外光谱预测杨梅汁酸度的方法研究.红外与毫米波学报), 2006, **25** (6): 478—480.
- [10] Feam T, Daviesb A M C. Near infrared reflectance spectroscopy as a tool for the determination of dichloromethane extractable matter and moisture content in combed wool slivers[J]. *Journal of Near Infrared Spectroscopy*, 2003, **11** (5): 333—339.
- [11] Kennard R W, Stone L A. Computer aided design of experiments[J]. *Technometrics*, 1969, **11**: 137—148.
- [12] Daszykowski M, Semeels S, Kaczmarek K, *et al* TOM-CAT: A MATLAB toolbox for multivariate calibration techniques[J]. *Chemometrics and intelligent laboratory systems*, 2007, **85** (2): 269—277.
- [13] Center for the Research and Development of FeiSi Technology. *The theory artificial of neural networks and its realization in Matlab7* [M]. Beijing: Electronics Industry Press (飞思科技产品研发中心编.神经网络理论与 Matlab7 实现.北京:电子工业出版社), 2006, 67.
- [3] Dobbs R, Hyttinen M, Steer B, *et al* Rugged and efficient Ka-Band extended interaction klystrons for satellite communication system[C]. *NEC2007*. 2007: 107—108.
- [4] Editorial Board of Vacuum Tube Design Manual *High-power klystron design manual* [M]. Beijing: National Defense Industry Press(电子管设计手册编辑委员会.大功率速调管设计手册.北京:国防工业出版社), 1979: 157—162.
- [5] Nguyen K T, Pershing D, Wright E L, *et al* Sheet-Beam 90GHz and 220 GHz extend-interaction-klystron designs [C]. *NEC2007*. 2007: 193—194.
- [6] LU Zhi-Gang Research on three-mode overlapped two-gap coupled cavity type output circuit[D]. Beijing: Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences(刘志刚.三模重
- 叠双间隙耦合腔输出回路的研究.北京:中国科学院电子学研究所), 2007: 31—37.
- [7] LN Fu-Min, DNG Yao-Gen, ZHANG Zhi-Qiang, *et al* Simulation computation method for calculating the impedance matrix of double gap cavity of klystron[J]. *Journal of Electronics and Information technology* (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.电子与信息学报), 2004, **26** (9): 1480—1486.
- [8] Shin Y M, Park G S, Scheitrum G P, *et al* Circuit analysis of an extended interaction klystron[J]. *Journal of the Korean Physical Society*, 2004, **44** (5): 1239—1245.
- [9] Ko K, Lee T G, Kröll N, *et al* A three-gap klystron output cavity at X-band[R]. *SLAC-PUB\_5760*, April 1992.

(上接 108页)