

# 一种腔体滤波器的计算机辅助调试方法

张秀华, 李 鹏, 雷建华

(中国工程物理研究院电子工程研究所, 四川省绵阳市 621900)

**摘 要:**介绍了一种对腔体滤波器进行计算机辅助调试的新方法。该方法首先建立一个理想的电路模型, 运用软件 DESIGNER 的优化拟合功能, 对滤波器的状态进行参数提取, 并对滤波器各调试元件与电路参数之间的关系进行了分析。通过实际状态的参数与理想状态的参数的对比, 找到二者的差异, 由此可指导调试。通过对一个腔体梳状线带通滤波器进行调试, 证明了该方法的有效性。

**关键词:**滤波器; 调试; S 参数; 参数提取; 灵敏度

**中图分类号:** TN713

## 0 引言

微波滤波器的调试是一项繁琐的工作, 需要比较丰富的实际操作经验。随着滤波器节数的增加, 调试所涉及的参数数量也增加, 调试难度也就大大提高。如果要进行大批量的生产, 势必要聘请很多经验丰富的工人, 这样就增加了产品的成本。目前, 国外对微波滤波器计算机辅助调试技术的研究取得良好成果, 并已应用于生产中, 取得了较好的效益。国内对这一领域的研究也取得了一些成果, 但在生产中应用还较少。

本文运用软件 DESIGNER 对一个梳状线带通滤波器的状态进行参数提取。通过梯度优化, 找到调试螺钉的最优位置。试验证明, 该方法对腔体滤波器的调试具有指导意义, 对调试人员的经验要求有所降低。

## 1 调试原理及步骤

### 1.1 调试原理

物理滤波器的初始指标不能满足给定的指标是由于滤波器设计理论的近似、生产中的误差等原因造成, 调试的目的就是为了让测量的 S 参数和根据指标设计的理想的 S 参数之间的误差变得越来越小。辅助调试的关键是要对滤波器电路参数进行准确提取和找出滤波器调试螺钉的位置与电路模型值之间的关系。在进行参数提取时, 力求准确。

运用 DESIGNER 的优化拟合功能对代价函数  $F$  进行梯度优化, 提取电路模型的参数。

$$F = \sum_j \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 (|S_{\text{mod},ij}| - |S_{\text{mea},ij}|)^2 \quad (1)$$

式中:  $S_{\text{mod},ij}$  为根据设计指标综合得到的 S 参数曲线;  $S_{\text{mea},ij}$  是测量的 S 参数曲线。

调试螺钉位置与电路模型参数值之间的灵敏度分析是通过每次改变一个调试螺钉的位置 ( $d_1 + \Delta d, d_2, d_3, d_4$ ) 然后测量滤波器的 S 参数曲线, 将 S 参数曲线导入 DESIGNER 中, 对此状态的滤波器进行参数提取, 找出它们之间的变化关系而得到的。

电路元件值与调试螺钉的位置关系为<sup>[1,2]</sup>:

$$\text{Element\_value} = \text{Element\_value}_i(\text{basis\_position}) + \sum_{j=1}^n s_{j,i} \frac{\Delta d_j}{d_j} \quad (2)$$

式中:  $\Delta d_j$  为螺钉  $j$  的位置变化量;  $d_j$  为螺钉  $j$  的位置;  $s_{j,i}$  为调试螺钉  $j$  位置对电路  $i$  模型参数值的变化率。

螺钉的最优位置是通过梯度优化最小化代价函数 (见式(3)) 而得来的<sup>[3]</sup>。

$$F = \sum_{j=1}^{n-1} (K_{\text{bas},jj+1} + K_{j,j+1}(w_1, w_2, \dots, w_n) - K_{\text{tar},jj+1})^2 + \sum_{i=1}^n (\omega_{\text{bas},i} + \omega_i(w_1, w_2, \dots, w_n) - \omega_{\text{arg},i})^2 + Q_{e,\text{bas},A} + Q_{e,A}(w_1, w_2, \dots, w_n) - Q_{e,\text{tar},A})^2 + Q_{e,\text{bas},B} + Q_{e,B}(w_1, w_2, \dots, w_n) - Q_{e,\text{tar},B})^2 \quad (3)$$

式中:  $K_{\text{bas},ij}$  为初始位置的耦合系数;  $K_{\text{tar},ij}$  为耦合系数的目标值;  $K_{ij}(w_1, w_2, \dots, w_n)$  为螺钉调到某个位置时的耦合系数;  $\omega_{\text{bas},i}$  为谐振器在初始位置的频率漂移, 谐振器在理想状态下的频率漂移理论上为 0;  $\omega_i(w_1, w_2, \dots, w_n)$  为螺钉调到某个位置时的频率漂移;  $Q_{e,\text{bas},A}, Q_{e,\text{bas},B}$  为初始状态下终端电阻反射到第 1 个 (第  $n$  个) 谐振器的外界  $Q$  值;  $Q_{e,\text{tar},A}, Q_{e,\text{tar},B}$  为理想状态下终端电阻反射到第 1 个 (第  $n$  个) 谐振器的外界  $Q$  值;  $Q_{e,A}(w_1, w_2, \dots, w_n), Q_{e,B}(w_1, w_2, \dots, w_n)$  为螺钉调到某个位置时外界  $Q$  值。

1.2 调试步骤

- a) 根据给定滤波器的指标(中心频率、带宽、通带起伏、带外抑止)在 DESIGNER 中建立一个理想的电路模型。
- b) 对滤波器进行一个大致的粗调,使  $S$  参数曲线呈现出带通滤波器的特性。
- c) 测量调试螺钉在初始位置的  $S$  参数。
- d) 把测量的  $S$  参数导入 DESIGNER 中,并提取滤波器调试螺钉在初始位置的电路参数值。
- e) 每次变化一个调试螺钉的位置  $\Delta d$ ,然后测量滤波器的  $S$  参数。
- f) 计算出调试螺钉位置与电路模型元件值之间的灵敏度。
- g) 计算滤波器初始状态的电路参数值与理想的电路模型参数值之间的差异,根据灵敏度分析,计算调试螺钉应该调整的尺寸。
- h) 根据步骤  $g$  得到的结果,调整滤波器调试螺钉的位置。
- i) 如果最后测试的指标还是达不到要求,重复步骤  $a \sim h$ 。

2 试验及结果

对 4 节梳状线滤波器进行调试,其结构见图 1。

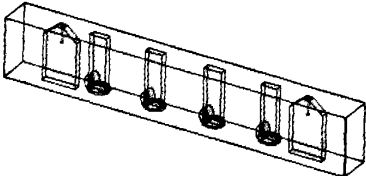


图 1 梳状线滤波器结构

图 2 是根据指标设计的理想状态和在失谐状态下的滤波器的  $S_{21}$  和  $S_{11}$  参数曲线。

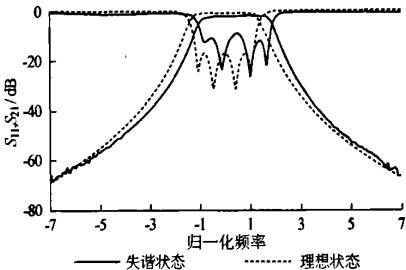


图 2 滤波器理想和失谐状态参数曲线

图 3 是由设计指标综合得到的理想电路模型<sup>[4]</sup>。

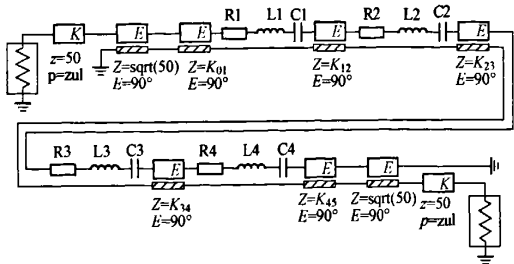


图 3 滤波器的理想电路模型

根据式(4)~式(6),可以算出理想模型的参数值,如表 1 所示<sup>[5]</sup>。

$$Q_{e,A} = \frac{g_0 g_1}{W}$$
(4)

$$Q_{e,B} = \frac{g_n g_{n+1}}{W}$$
(5)

$$K_{j,j+1} |_{j=1 \sim n-1} = \frac{W}{\sqrt{g_j g_{j+1}}}$$
(6)

式中:  $W$  为滤波器相对带宽;  $K_{j,j+1}$  为第  $j$  个和第  $j+1$  个谐振器之间的耦合;  $Q_{e,A}$  为终端电阻反射到第 1 个串联谐振器中所得出的  $Q$  值;  $Q_{e,B}$  为终端电阻反射到第  $n$  个谐振器中所得的  $Q$  值。

在 DESIGNER 中对滤波器初始状态进行参数提取,提取值如表 1 所示。提取参数的曲线拟合如图 4 所示(实线代表实测的失谐的  $S_{21}$  曲线,虚线代表拟合的  $S_{21}$  曲线)。

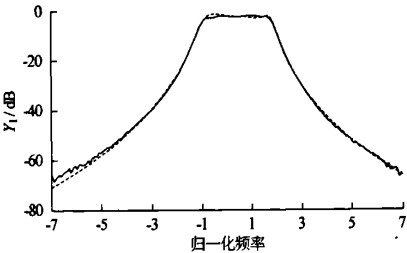


图 4 DESIGNER 中的曲线拟合图

通过改变螺钉的位置,然后对测量的  $S$  参数进行参数提取,得出网络灵敏度如图 5 所示。图 5 中只列出了螺钉 2 与电路参数值的变化关系,从图中可看出,螺钉的位置与电路参数值成近似线性关系。

表 1 电路模型的参数值

状 态	$Q_{e,A}$	$Q_{e,B}$	$K_{12}$	$K_{23}$	$K_{34}$	$\omega_1$	$\omega_2$	$\omega_3$	$\omega_4$
理想状态	58.54	58.54	0.015 74	0.012 46	0.015 74	0	0	0	0
初始状态	73.68	48.36	0.016 20	0.012 66	0.015 98	3.1	4.1	15.4	7.0
调试完毕	56.11	55.20	0.015 27	0.012 32	0.015 30	0.5	0.1	0.06	0.24

通过最小化函数(式(3)),可以得到螺钉的最优位置。将4个调试螺钉调到最优位置后,对测量的S参数曲线进行参数提取,提取的参数值如表1所示。图6是调试完毕后实测的和理想的 $S_{21}$ 曲线的幅度与相位。

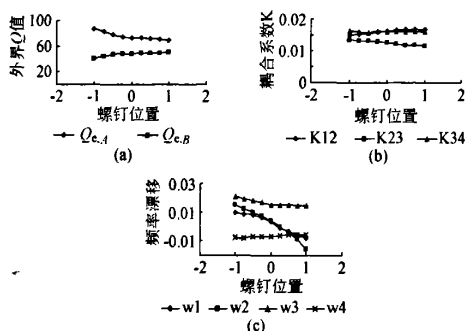


图5 网络灵敏度(螺钉2位置与参数值的变化关系)

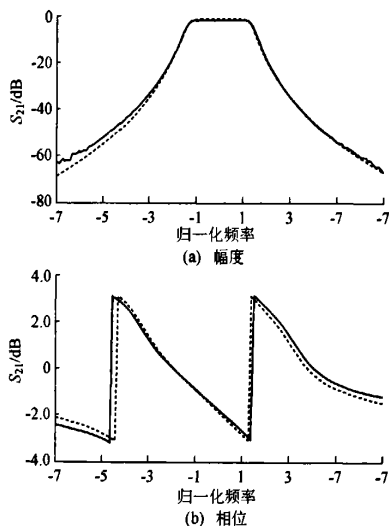


图6 理想的和调试完毕的 $S_{21}$ 曲线图

### 3 结束语

本文提出了一种用于微波滤波器计算机辅助调试的新方法,通过参数提取和灵敏度分析,找到满足指标的调试螺钉的最佳位置。只要滤波器的失谐控制在一定的范围内,该方法就可以迅速找到引起失谐的元件。通过对一个腔体的梳状线带通滤波器进行调试,验证了该方法的正确性、可行性。

### 参考文献

- [1] HARSCHER P, VAHLIDIECK R. Automated computer-controlled tuning of waveguide filters using adaptive network models[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2001, 49(11): 2125-2130.
- [2] HARSCHER P, VAHLIDIECK R, AMARI S. Automated test and tuning system for microwave filters[C]//Proceedings of 2001 IEEE International Microwave Symposium Digest: Vol 3, May 20-25, 2001, Phoenix, AZ, USA. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2001: 1543-1546.
- [3] HARSCHER P, VAHLIDIECK R, AMARI S. Automated filter tuning using generalized low-pass prototype networks and gradient-based parameter extraction[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2001, 49(12): 2352-2358.
- [4] MAYER B, VOGEL M H. Efficient design of Chebyshev band-pass filters with ansoft HFSS and serenade[EB/OL]. 2002. www.S2rd.com/bbs/List\_show.asp? BoardID = 30&page = 2.
- [5] 甘本祯, 吴万春. 现代微波滤波器的结构与设[M]. 北京: 科学出版社, 1973.

张秀华(1973-),女,助理工程师,硕士研究生,主要从事微波电路调试研究。

## A Method of Computer-aided Tuning for Microwave Waveguide Filter

ZHANG Xiuhua, LI Peng, LEI Jianhua

(Institute of Electronic Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

**Abstract:** For increasing productivity effect and reducing cost, computer-aided tuning technique is introduced in large volume production. This paper describes a new method for aided-computer tuning of waveguide filters. A ideal circuit model is established at first. Parameter values of filter's status are extracted by using optimized and fitted performance of DESIGNER. The relation between tuning elements of filter and circuit parameter is analyzed. The difference can be found by means of comparing ideal parameter values with real parameter values. So it can instruct tuning. This method has been tested with a four-resonator comb filter.

**Keywords:** filter; tuning; S-parameter; parameter extraction; sensitivity

## 微波滤波器设计培训——视频课程

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立, 致力和专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养, 是国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地。客户遍布中兴通讯、研通高频、国人通信等多家国内知名公司, 以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

我们推出的微波滤波器设计培训专题, 有资深工程师领衔主讲, 课程既有微波滤波器设计原理的详细解释, 也有各种仿真分析工具的实际设计应用讲解, 设计原理和设计仿真实践相结合, 向大家呈现各种结构的微波滤波器的完整设计流程。旨在帮助大家透彻地理解并实际的掌握各种微波滤波器的设计。



### 微波滤波器设计培训专题视频课程

高清视频, 专家授课, 中文讲解, 直观易学; 既有微波滤波器设计原理的详细解释, 也有像 ADS、CST、HFSS 各种仿真分析工具的实际设计应用讲解, 旨在帮助大家透彻地理解并实际的掌握各种微波滤波器的设计。

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/filter/>

### 更多专业培训课程:

- **HFSS 视频培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/>

- **CST 视频培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/cst/>

- **天线设计专业培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/>