

输入输出电容对孔耦合同轴滤波器性能的影响

曹良足,殷丽霞

(景德镇陶瓷学院 机械电子工程学院,江西 景德镇 333001)

摘要:为了提高滤波器的电性能,研究了孔耦合两腔介质同轴滤波器的调试技术。理论上分析了耦合谐振器的频率和有载品质因数(Q)值与输入、输出电容的关系。采用介电常数 $\epsilon_r = 74$ 的微波介质陶瓷制作了孔耦合两腔介质滤波器,通过观察反射系数(S_{11})波形讨论了输入、输出电容对滤波器性能的影响。结果表明,反射系数的波形和大小能直接反映出输入、输出电容的大小是否合适。最后制作出中心频率为 902 MHz、通带带宽 13.2 MHz、阻带衰减($f_0 \pm 40$ MHz) > 24.9 dB 的带通滤波器。该调试技术对两腔以上介质滤波器的调试具有指导作用。

关键词:介质滤波器;电长度;耦合电容;调试技术

中图分类号: TM25; TN713

文献标识码: A

Effect of I/O Capacitor on Properties of Coaxial Filter Coupled with a Hole

CAO Liangzu, YIN Lixia

(School of Mechanical and Electronic Engineering, Jingdezhen Ceramics Institute, Jingdezhen 333001, China)

Abstract: In order to improve properties of filter, the method of adjusting two-pole dielectric coaxial filter coupled with a hole had been developed. The relationships between frequency and loaded Q value of coupled dielectric resonator and I/O coupling capacitors were theoretically analyzed. Two-pole dielectric filter coupled with a hole was made of microwave dielectric ceramics with $\epsilon_r = 74$. The method of adjusting filter was discussed specifically by observing the S_{11} wave pattern. The results showed that S_{11} wave pattern and amplitude could reflect if I/O coupling capacitors were appropriate or not. Finally, the filter with the following characteristics was made: center frequency 902 MHz, pass-band width 13.2 MHz, stop-band attenuation at $f_0 \pm 40$ MHz higher than 24.9 dB. The adjusting technique was proved useful for more than two-pole dielectric filters.

Key words: dielectric filter; electric length; coupling capacitor; adjustment technique

0 引言

随着通信的快速发展,微波介质材料和器件的开发和生产势头越来越快。不同介电常数(ϵ_r)微波介质材料的改性研究和不同结构介质滤波器的设计方法都较成熟^[1-2],如 $\epsilon_r = 20$ 的 (Mg, Ca) TiO_3 系, $\epsilon_r = 38$ 的 (Zr, Sn) TiO_4 系和 $\epsilon_r = 90$ 的 (Ba, Pb) O- Nd_2O_3 - TiO_2 系材料已成为各生产厂家常用的材料,广泛用于制作介质微带天线、介质谐振器(DR)和介质滤波器。其实,材料改性和器件设计的最终目的是能制造出满足用户需求的产品,且能低成本地批量生产。目前国内关于介质同轴滤波器调试方面的文献较少,关于腔体滤波器调试技术的较多,李胜先^[3]和张秀华^[4]研究了计算机辅助调试技术

(CAT),通过提取被测滤波器的耦合矩阵,与理想矩阵进行比较,根据偏离量进行调试;李刚^[5]研究了基于矢量网络分析仪自动测试技术和输入反射系数零极点的计算机辅助调试方法;韩应宾^[6]采用改进的柯西法对交叉耦合腔体滤波器进行仿真与诊断;赵晓东^[7]利用粒子群优化算法(PSO)求出耦合矩阵,对广义切比雪夫滤波进行快速调试;李军^[8]研究了品质因数(Q)、耦合系数对腔体滤波器特性的影响;詹莉华^[9]介绍了根据反射系数相角差调试各节谐振器的谐振频率的方法。上述调试方法对数学知识(特别是矩阵理论)要求很高,可操作性不强。本文以孔耦合两腔介质同轴滤波器为研究对象,根据反射系数(S_{11})的波形,研究输入、输出电容对滤波

收稿日期:2011-02-25

作者简介:曹良足(1965-),男,江西都昌人,教授,工程硕士,主要从事微波介质材料和器件的研究。E-mail:clz4233@yahoo.com.cn.

器特性的影响,寻找快速简便的调试方法。

1 带通滤波器的电路与结构

根据现代微波滤波器的设计方法,带通滤波器经频率变换和导纳成电容耦合型和电感耦合型两种基本电路^[10]。图1为电容耦合型两级带通滤波器的等效电路。

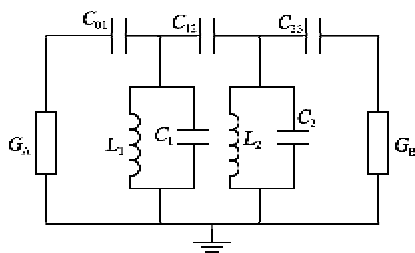


图1 两级带通滤波器等效电原理图

图1中, C_{01} 和 C_{23} 为输入、输出电容, C_{12} 为级间耦合电容, $L_1C_1 \sim L_2C_2$ 为并联谐振回路, G_A 、 G_B 分别为输入、输出端口的电导。由传输线理论可知,1/4波长短路同轴介质谐振腔等效为并联谐振电路^[11],图1可简化为图2,图中 θ_1 、 θ_2 为谐振器的电长度。

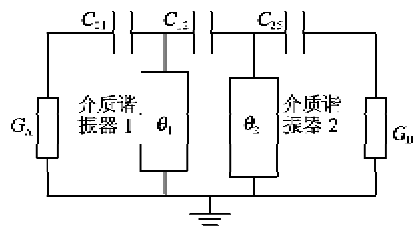


图2 介质谐振器带通滤波器的电路图

图2中,各参数可由低通归一化元件参数(g_0 , g_1 , g_2 , g_3)和滤波器的参数(中心频率 f_0 和通带相对带宽 W)进行计算^[10]。

耦合电容 C_{01} 、 C_{12} 和 C_{23} 均可使用集总电容,本文采用直通孔实现级间耦合,输入、输出耦合采用塑芯引线,图3为其结构示意图。图中, h 为陶瓷块的高度。

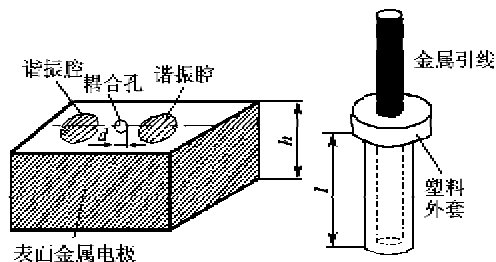


图3 介质滤波器的结构和塑芯引线

级间耦合大小与耦合孔直径 d 成正比^[12],当 d

一定,耦合系数一定,即 C_{12} 不变时, C_{01} 和 C_{23} 由塑芯引线的有效长度 l 决定。

2 理论分析与仿真

由图2可知,滤波器由2个介质同轴谐振器和3个耦合电容组成。即滤波器的性能由5个变量(θ_1 、 θ_2 、 C_{12} 、 C_{01} 、 C_{23})决定。当 d 一定时, C_{12} 不变。因此,滤波器的性能由4个变量(θ_1 、 θ_2 、 C_{01} 、 C_{23})决定。

将图1看成由2个电容耦合的单个谐振器组成,图4为电容耦合的单个谐振器的原理图。图中, G_A 为输入导纳, G_1 为谐振器的等效电导。

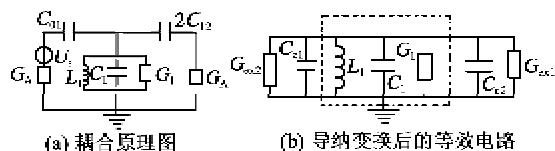


图4 电容耦合谐振器的电路

图4中, C_{ex1} 、 C_{ex2} 和 G_{ex1} 、 G_{ex2} 分别为导纳变换所产生的补偿电容和电导。谐振器的谐振频率和 Q_c 值为^[13]

$$f_0 = f_r \cdot$$

$$\frac{1}{\sqrt{1 + \frac{C_{01}/C_1}{(1 + \omega C_{01}/G_A)^2} + \frac{2C_{12}/C_1}{(1 + 2\omega C_{12}/G_B)^2}}} \quad (1)$$

$$Q_c = \frac{Q_u}{1 + \frac{(C_{01}\omega_0)^2}{G_A G_1} + \frac{(2C_{12}\omega_0)^2}{G_B G_1}} \quad (2)$$

式中: f_r 为谐振器固有的谐振频率; ω 为角频率; G_B 为输出端导纳; Q_u 为谐振器的无载 Q 值,与所用材料的介电损耗和谐振器的形状有关。 f_0 和 Q_c 用网络分析仪测试散射参数 S_{21} 曲线得到,如图5所示。图中 IL 为插入损耗。

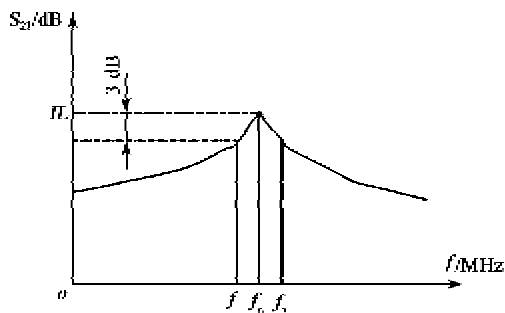


图5 电容耦合谐振器的 S_{21} 曲线

$$Q_c = \frac{f_0}{\Delta f_{-3dB}} = \frac{f_0}{f_2 - f_1} \quad (3)$$

当 $\omega C_{01}/G_A \ll 1$ 和 $2\omega C_{12}/G_B \ll 1$ 时, 式(1)可近似为

$$f_0 \approx f_r \left(1 - \frac{1}{2} C_{01}/C_1 - C_{12}/C_1 \right) = f_r (1 - \eta_{01} - \eta_{12}) \quad (4)$$

式中 η_{01} 和 η_{12} 为频偏系数。

由式(4)可知, $f_r > f_0$, 即谐振器的电长度小于 90° , 其偏差大小近似与耦合电容的大小成正比。由式(2)可得, C_{01} 越大, Q_e 越小, S_{11} 曲线的 3 dB 带宽越宽, 阻带衰减越小。

用 ADS2005A 进行仿真, 如图 6 所示。

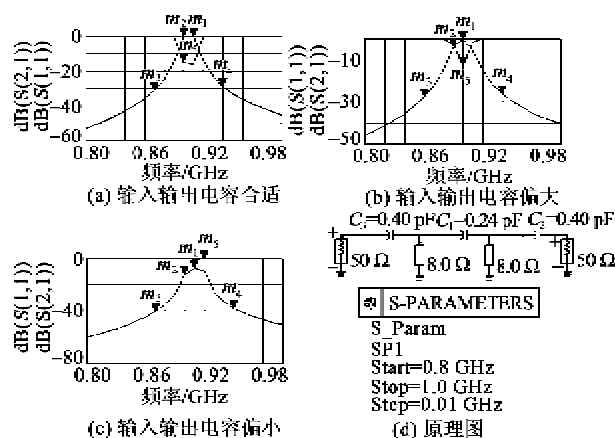


图 6 仿真原理图及仿真波形

由图 6 可知, 电长度为 87.25° (小于 90°), 输入、输出电容偏大时, 插入损耗增大, 阻带衰减减小; 输入、输出电容偏小时, 阻带衰减增加, 但中心频率升高了, 插入损耗明显增大。

3 实验过程

图 7 为介电滤波器的工艺流程图。

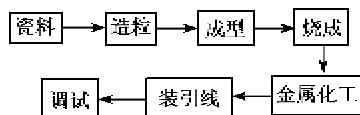


图 7 介电滤波器的工艺流程图

选取 $\epsilon_r = 74$ 的 $\text{BaO-TiO}_2\text{-Sm}_2\text{O}_3$ 系的微波介质材料制作介质滤波器。按照电子陶瓷的生产工艺配制瓷料, 然后加入质量分数约为 7% 的 PVA 粘合剂进行造粒, 采用干压成型, 在 1320°C 下烧结 2 h, 然后在除一个端面及耦合孔外的所有内外表面金属化, 产品的外形如图 3 所示。在两谐振孔内插入塑芯引线, 分别与网络分析仪的输入、输出端口连接, 用 E5071B 网络分析仪测量滤波器的 S 参数 (S_{21} 和

S_{11})。根据 S_{11} 的波形进行调试。

1) S_{11} 波形为一高一低的波谷, 如图 8 所示。

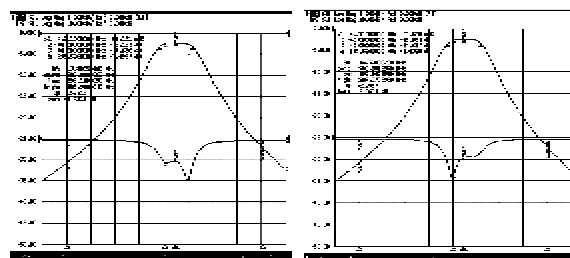


图 8 滤波器的频响曲线

通过判断可知, 图 8(a) 是由于输入端谐振器的频率偏低造成的, 图 8(b) 是由于输入端谐振器的频率偏高造成的。

2) S_{11} 波形出现单个很深的波谷, 如图 9 所示。

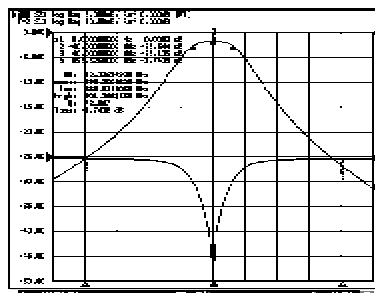


图 9 滤波器的频响曲线

图 9 的波形是由图 8 的谐振器频率进行相应的调整得到, 仔细观察 S_{21} 的波形, 发现通带很圆, 阻带衰减不对称, 这是输入输出耦合电容偏大的缘故。

3) S_{11} 波形出现两个间距很远的等高波谷, 如图 10 所示。

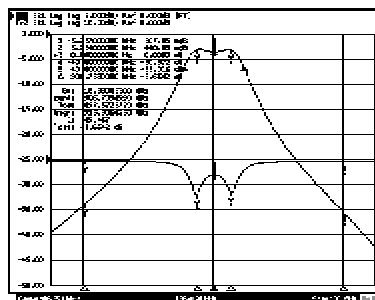


图 10 滤波器的频响曲线

S_{21} 波形出现明显的波纹 (即下凹), 这是典型的输入、输出电容偏小的情形, 是图 9 的输入、输出电容减小过多造成的; 但阻带衰减增加了, 插入损耗也增大了。

4) 理想的 S_{11} 波形, 如图 11 所示。根据 2) 和 3) 的分析, 选择合适的输入、输出电容, 可得到理想的 S_{11} 波形, S_{11} 波形出现 2 个靠近的波谷, 且有一波

峰,其幅值很大。 S_{21} 曲线的通带很平坦,阻带衰减较大。滤波器的电性能:中心频率 $f_0 = 902$ MHz,带宽 $\Delta f = 12.3$ MHz,插损 2.0 dB,阻带衰减大于 24.9 dB($f_0 \pm 40$ MHz 处)。

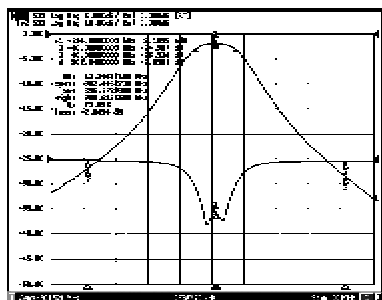


图 11 滤波器的频响曲线

滤波器的级间耦合为直通孔,孔径的大小决定了耦合系数的大小。孔径一定时,级间耦合也确定,即图 2 中的 C_{12} 是确定的,因此滤波器的调试变量就是输入、输出电容和谐振器的频率。以滤波器中心频率计算谐振器的高度为 9.66 mm,但滤波器的实际高度为 9.02 mm,电长度为 84° (小于 90°),与式 (4) 基本吻合。输入、输出耦合电容的大小与滤波器的阻带衰减密切相关,根据式 (2)、(3) 进行分析可知,当 C_{12} 一定时, C_{01} 越大,则 Q_e 越小; 3 dB 带宽越大,曲线越斜,即阻带衰减减小(见图 9),反之, C_{01} 越小,阻带衰减增加(见图 10)。通过调整塑芯引线的有效长度就能调节耦合的大小。谐振器的频率通过研磨其开路端面就行。

4 结论

1) 电容耦合 $1/4$ 波长介质同轴谐振器的频率高于滤波器的中心频率,其频偏系数可通过耦合电容计算。

2) 塑芯引线制作输入输出耦合电容,调整其有效长度可以改变电容的大小。

3) 观察 S_{11} 波形,能准确判断谐振频率的高低和输入、输出耦合电容的大小,然后进行相应的调试,就能得到满意的 S_{11} 和 S_{12} 波形。

4) 采用介电常数为 74 的微波介质材料制作两腔介质带通滤波器,经过调试后,滤波器的电性能为:中心频率 $f_0 = 902$ MHz,带宽 $\Delta f = 12.3$ MHz,插损为 2.0 dB,在 $f_0 \pm 40$ MHz 处,阻带衰减大于 24.9 dB。

5) 该调试技术对 2 级以上和其他结构的带通滤波器的调试有一定的指导作用。

参考文献:

- [1] FIEDZIUSZKO S J, HUNTER I C, ITOH Tatsuo, et al. Dielectric materials[J]. IEEE MTT, 2002, 50(3): 706-720.
- [2] LEVY R, SNYDER R V, MATHAEI G. Design of microwave filter[J]. IEEE MTT, 2002, 50(3): 783-803.
- [3] 李胜先, 吴须大, 傅君眉. 一种微波滤波器机辅调试的新方法[J]. 空间电子技术, 2004, (2): 4-11.
LI Shengxian, WU Xuda, FU Junmei. A new method of computer-aided tuning microwave filter[J]. Space Electronic Technology, 2004(2): 4-11.
- [4] 张秀华. 微波滤波器计算机辅助调试技术与方法研究[D]. 中国工程物理研究院, 2008.
- [5] 李刚. 微波滤波器的综合仿真和计算机辅助调试研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2007.
- [6] 韩应宾. 交叉耦合滤波器的综合与诊断调试[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2008.
- [7] 赵晓东, 王刚. 广义 Chebyshev 滤波器的优化设计及其快速调试技术研究[J]. 信息安全与通信保密, 2008(4): 71-74.
ZHAO Xiaodong, WANG Gang. Design and optimization of generalized Chebyshev filters and research on fast tuning technique[J]. Information Security and Communications Privacy, 2008(4): 71-74.
- [8] 李军, 贾宝富. 腔体滤波器调试技术研究[J]. 真空电子技术, 2009(2): 10-13.
LI Jun, JIA Baofu. Study on pre-debug of the cavity filters[J]. Vacuum Electronics, 2009(2): 10-13.
- [9] 詹莉华, 杨乃恒. 一种调试窄带微波滤波器的方法[J]. 现代雷达, 1999(1): 66-73.
ZHAN Lihua, YANG Naiheng. An adjustment method for narrow-band microwave bandpass filters[J]. Modern Radar, 1999(1): 66-73.
- [10] 顾继慧. 微波技术[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [11] 甘本跋, 吴万春. 现代微波滤波器的结构与设计[M]. 北京: 科学出版社, 1973.
- [12] 曹良足, 胡鸿豪, 金光浪, 等. 高可靠性微波滤波器组的设计与制作[J]. 压电与声光, 2007, 29(3): 250-252.
CAO Liangzu, HU Honghao, JIN Guanglang, et al. Design and manufacture of microwave filter-group with high reliability[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2007, 29(3): 250-252.
- [13] 曹良足, 郭童军. 介质陶瓷谐振器的参数测量[J]. 陶瓷学报, 2010, 31(4): 581-585.
CAO Liangzu, GUO Tongjun. Measurement of the properties of dielectric ceramics resonators[J]. Journal of Ceramics, 2010, 31(4): 581-585.