

单片晶体滤波器的计算机辅助 设计和分析

李丕宁 林 健

(航空航天部二院二零三所, 北京 100854)

摘要 本文是在深入研究单片晶体滤波器理论和等效电路的基础上, 首次利用单片晶体滤波器的综合设计与网络分析相结合的方法将过去人工设计和反复试验的过程全部在计算机中实现。在设计程序中, 为了避免解超越方程给出了半经验公式, 并对一些系数进行了修正。在分析程序中, 采用了模块技术和级联矩阵方法。本程序是在PC机汉字操作系统下用BASIC编写的。最后给出了用本程序设计制作的几种单片晶体滤波器。

关键词 单片晶体滤波器; 计算机辅助设计; 计算机辅助分析;

一、前 言

随着通信技术不断发展, 体积小、稳定性好、电性能和机械性能优异的单片晶体滤波器(简称MCF)得到迅速发展。而计算机的普及应用, 计算机辅助设计和分析已越来越显示其优越性。由于它运算速度快, 精度高, 可以在计算机内部完成模拟和优化过程, 节省大量人力物力, 极大地提高了效率。本文在深入研究单片晶体滤波器耦合理论和等效电路的基础上, 在计算机设计中, 将单片晶体滤波器综合设计与网络分析相结合, 将过去人工设计和反复实验的过程全部在计算机内部实现, 从而基本上一次就可制成达到设计要求的滤波器。大大提高了效率, 缩短了研制周期, 降低了成本, 具有较高的实用价值。本程序适合于切比雪夫型串联单片晶体滤波器。

二、单片晶体滤波器理论

1. 单片晶体滤波器耦合谐振理论^[1]

从能陷谐振子振动理论中可以得到只激励第一对称模与第一反对称模的矩形电极能陷判别式(本文只研究厚度扭曲波):

$$2na\sqrt{\Delta}/h \leq 2.4, n = 1, 3, 5, \dots \quad (1)$$

式中 $2a$ 是电极沿 z 方向长度, h 为晶体厚度, 对于 AT 切割 $h = 1670n/f_0$, $\Delta = (f_s - f_0)/f_0$, 是相对频回频率。对于圆形电极只要用电极直径 ϕ_0 代替 $2a$ 即可。

对于二重模能陷振子, 其系统的频率方程为

$$\begin{matrix} \text{th} \\ \text{cth} \end{matrix} (k_e d/2) = \frac{(k_e/k_s) \tan(k_e l_e) - 1}{(k_e/k_s) \tan(k_e l_e) + 1} \quad (2)$$

式中

$$\begin{cases} k_e = (n\pi/h) \sqrt{C_{66}/C_{55}} \sqrt{(f/f_e) - 1} \\ k_s = (n\pi/h) \sqrt{C_{66}/C_{55}} \sqrt{1 - (f/f_e)} \end{cases} \quad (3)$$

$f_e = (n\pi/h)h\sqrt{C_{66}/\rho}$ 为无电极区截止频率; $f_s = (n\pi/h)\sqrt{C_{66}/\rho}(1-r)$ 为有电极区截止频率; $r = \rho'h'/(\rho h)$, ρ' , ρ 分别为电极和晶片密度, h' , h 分别为电极和晶片厚度; d 为两电极之间间隔; l_e 为电极长度, $n = 1, 3, 5, \dots$ 是泛音次数。

(3)式中有 th 的方程为对称模频率方程, 有 cth 的为反对称模频率方程。从(3)式可看出, 对于每一谐振频率有一系列对称和反对称模式的能陷模式。对于单片晶体滤波器, 只需要第一对称模式和第一反对称模式。由这两种模式之间的耦合构成滤波器。而滤波器的带宽就由这两种模式的对称频率 f_{1s} 与反对称频率 f_{1a} 的间隔决定。我们引入耦合系数 k ,

$$k = (f_{1a} - f_{1s})/\sqrt{f_{1a}f_{1s}} \quad (4)$$

耦合系数可以通过解(3)式获得, 但(3)式无解析解, 即使用计算机解它也是很费时间的, 我们利用 W. D. Beaver^[2] 给出的半经验公式。沿 z 轴方向传播的厚度扭曲波为

$$K_z = (3/2n^2)(C_{55}/C_{66}((2l_e + d + 8.78h)/h)^{-2})\exp(-\sigma\Delta^{-1/2}nd/h) \quad (5)$$

$C_{55} = 6.8827 \times 10^{10} \text{N/m}^2$, $C_{66} = 2.8988 \times 10^{10} \text{N/m}^2$, σ 是由实验来确定的系数。

2. 单片晶体滤波器等效电路^[2-4]

图 1 是在谐振频率附近能陷振子等效电路; C_0 是静电容; R 是动态电阻, 由于石英晶体的 Q 值很高, R 一般可以忽略; L 和 C 为等效动态电感和电容, 动态电感 L 由下式决定:

$$L = 2.4n^3/(Af^3) \quad (6)$$

式中 A 是电极面积 (cm^2), f 是晶体谐振频率 (MHz), n 是泛音次数, $n = 1, 2, 3, \dots$ 。

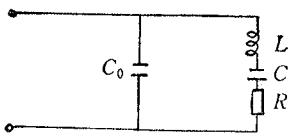


图1 能陷振子等效电路

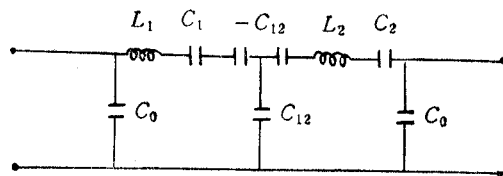


图2 二极点 MCF 等效电路

图 2 是二极点 MCF 等效电路。串联 MCF 就是由许多二极点 MCF 靠电耦合网络组成的。这种耦合网络一般用 T 型电容阻抗倒置电路来实现。T 型电容阻抗倒置电路的负电容要靠谐振电路中正电容吸收。图 3 是吸收负电容后的串联 MCF 等效电路。在实际设计滤波器时, 可选所有电感都相等, 即

$$L_1 = L_2 = L_3 = \dots L_n = R_0 q_1 / (2\pi B_{3dB}) \quad (7)$$

每一回路在其它回路开路时谐振在中心频率 f_0 上, 所以

$$C_1 = C_2 = C_3 = \cdots C_n = 1/(2\pi f_0 L_1) \quad (8)$$

耦合电容包括等效的声耦合和电耦合

$$C_{ij} = \begin{cases} C_i/K_{ij} - 2C_{0i}, & i = 2p, j = 2p + 1, p = 1, 2, \cdots, \text{电耦合} \\ C_i/K_{ij}, & i = 2p - 1, j = 2p, p = 1, 2, \cdots, \text{声耦合} \end{cases} \quad (9)$$

在(9)式中 $K_{ij} = B_{3dB} k_{ij}/f_0$, $k_{i,j}$, q_i 为归一化的耦合系数和品质因数, 可查表得到。 C_{0i} 是第 i 谐振器静电容, $C_{0i} = 0.402 A/h$, B_{3dB} 是滤波器的 3dB 带宽。

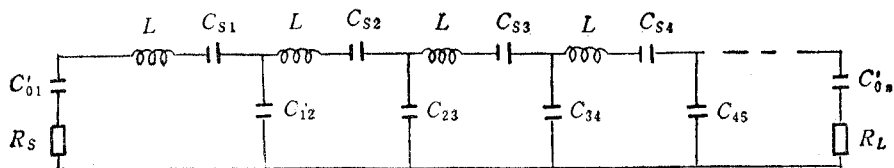


图3 吸收负电容后的串联 MCF 等效电路

上面各公式中的 R_0 是对应图 4(a), 而 MCF 等效电路中的两端网络为图 4(b), 这样就需要进行等效变换

$$R_0 = R_1/[1 + (R_1/X_0)^2], C_{01} = C_{01}[1 + (X_0/R_1)^2], X_0 = 1/(2\pi f_0 C_0) \quad (10)$$

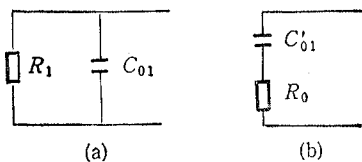


图4 两种端部网络

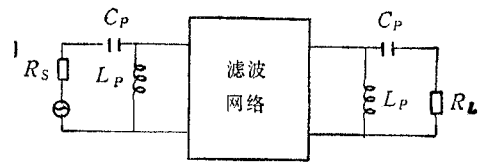


图5 加匹配网络的滤波网络

由于晶体存在静电容, 所谓相邻谐振器表面开路是不可能的, 因此在端部和内部谐振器的实际观测频率可用下列各式表示:

$$\begin{aligned} f_{s1} &= f_{s,n} = f_0[1 - (C_1/C_{01} + K_{12}^2)/2] \\ f_{ji} &= f_0[1 - (K_{i(i+1)} + K_{i(i-1)}C_{0i}/C_{i(i-1)})/2] \\ f_{s(i+1)} &= f_0[1 - (K_{i(i+1)} + K_{(i+1)(i+2)}C_{0(i+1)}/C_{(i+1)(i+2)})/2] \end{aligned} \quad (11)$$

在两端负载和 MCF 阻抗严重不匹配时, 需要加匹配电路。本文采用高通型匹配电路, 如图 5。设两端负载相等, 即 $R_L = R_s$, MCF 特性阻抗为 R_0 则

$$L_P = (R_0/\omega_0)\sqrt{R_1/(R_0 - R_1)}, C_P = 1/(\omega_0 \sqrt{R_1(R_0 - R_1)}) \quad (12)$$

三、计算机辅助设计和分析的实现

在前面论述的理论基础上, 我们在 PC 机汉字系统下采用高级 BASICA 编制了设计和分析程序。程序分三部分: (1) 滤波器晶体的设计, (2) 单片晶体滤波器设计, (3) 单片晶体滤波器分析。本设计具有下列特点:

(1) 首先将 MCF 综合设计与模拟分析相结合, 将设计一个合格的 MCF 的整个过程在微机系统中实现。首先用综合法设计出 MCF 的晶体参数(电极几何参数、镀回频率等), 然后进行模拟分析输出模拟曲线, 再与技术指标进行比较, 通过人机对话进行优化, 直到完全满意为止。

(2) 在程序设计部分, 通过改变输入参数避免解超越方程; 在程序分析部分采用模块技术和级联矩阵的方法, 简化了程序, 提高了运算速度。

(3) 程序三部分既可单独使用, 又可相互调用, 并且具有同时打印多条曲线的功能, 使程序灵活方便, 运算结果直观形象。

(4) 由于程序是用汉字系统编制的, 所以易读和易于操作。

1. 滤波器晶体设计程序

本部分主要计算晶体单片的研磨频率, 腐蚀频率和镀回频率, 其数学模型根据经验公式, 见表 1。

表 1 经验公式(f 是基频频率 (MHz))

中心频率 (MHz)	腐蚀频率 (kHz)	镀回频率 (kHz)
0.8—4	$1.4f^2 \pm 0.1f^2$	按(1)式
4—8	$1.2f^2 \pm 0.1f^2$	同上
8—14	$1.0f^2 \pm 0.1f^2$	同上
14—25	$0.7f^2 \pm 0.1f^2$	同上
25—30	$1.2f^2 \pm 0.1f^2$	同上
30—45	$1.0f^2 \pm 0.1f^2$	同上
45—75	$0.7f^2 \pm 0.1f^2$	同上
75—100	$0.6f^2 \pm 0.1f^2$	同上

2. 单片晶体滤波器设计程序^[9]

本程序数学模型就是以第二节为基础, 我们经过反复试验, 取(5)式中 σ 值为: 矩形双边分电极 $\sigma = 2.88$; 矩形单边分电极 $\sigma = 1.35$; 圆形双边分电极 $\sigma = 2.7$; 圆形单边分电极 $\sigma = 1.25$ 。我们注意到 $2l_e + d = l_s$ 是整个电极长度, 对于圆电极可用电极直径 ϕ_e 代替 $2l_e + d$ 。这样我们就可以将 $2l_e + d$ 做为一个已知量, 这也是符合实际设计滤波器的需要的。这样(5)式可化简为

$$K_s = (3/2n^2)(C_{55}/C_{66})[(l_s + \lambda_s)/h]^{-2} \exp(-\sigma \Delta^{1/2} nd/h) \quad (13)$$

令 $M = K_s = B_{3dB} k_{i(i+1)}/f_0$, $W = \sigma \Delta^{1/2} d/h$, $S = (3/2n^2)(C_{55}/C_{66})[(l_s + \lambda_s)/h]^{-2}$ 则上式化为

$$d = -(l/W) \lg(M/S) \quad (14)$$

这样就将关于 d 的超越方程(5)式化为普通方程(14)式。

3. MCF 分析程序^[6,7]

本文主要分析模拟滤波器的幅频特性, 但只要稍加扩展也可以分析模拟相频和群移特性。图 5 是两端接高通型匹配电路的滤波网络, 对此电路传输函数为

$$H(j\omega) = \sqrt{R_1 V_0 / (4R_s V_2)} \quad (15)$$

衰减为

$$A(\omega) = 20 \lg |H(j\omega)| = 10 \lg [R_L |V_0|^2 / (4R_S |V_2|^2)] \quad (16)$$

由(16)式可看出,只要找出 V_0/V_2 的关系,就可以建立计算机分析程序的数学模型。我们知道,对于一个四端网络,网络 A 矩阵有

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ I_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_2 \\ I_2 \end{bmatrix}, \text{ 且 } I_2 = V_2/R_L \quad (17)$$

又因为 $V_0 = I_1 R_S + V_1$, 这样我们可以得到

$$V_0/V_2 = (C + D/R_L)R_S + (A + B/R_L) \quad (18)$$

我们知道,如果一个网络可以分解成几个子网络的级联,则网络总 A 矩阵等于各子网络 A 矩阵之积,即

$$A = A_1 A_2 A_3 \cdots = \prod_{i=1}^n A_i \quad (19)$$

这样图 3 可以看成是由表 2 所给的 5 个基本网络反复组合而成的。这样只要知道 5 个基本模块的 A 矩阵,就可以获得网络总 A 矩阵。表 2 是 5 个基本网络及其 A 矩阵。通过(9)式就可以获得 MCF 四端网络的 A 矩阵。这样我们就建立起分析程序的数学模型。

四、设计实例、实验结果和分析

1. 设计实例和实验结果

根据所编程序设计出几种单片晶体滤波器。这几种滤波器既有基频也有泛音,既有窄带又有宽带。它们具有从二极点到八极点的各种电极形状,比较全面地验证了本程序的可行性和实用性。这里只给出 80.260MHz 三次泛音、四极点、圆形电极、单边分通带带宽为 12kHz 的单片晶体滤波器的计算机设计和模拟结果,以及按此设计制做的 MCF 的实际衰减曲线,见图 6。所得结果表明,实验结果和模拟曲线基本一致。

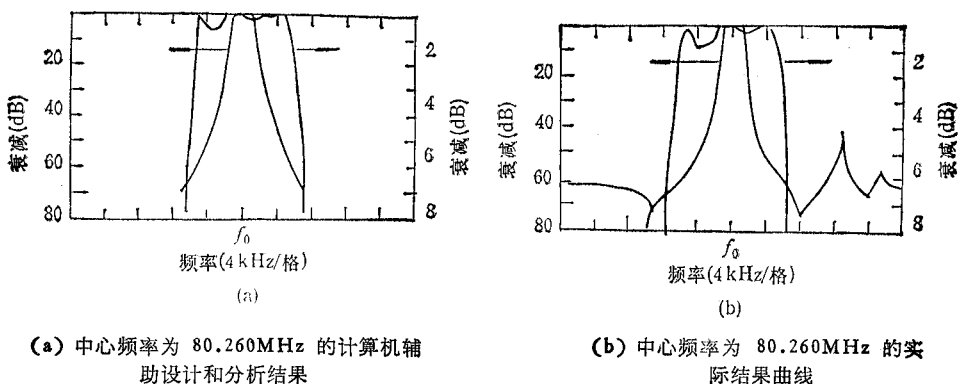
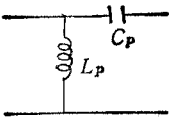
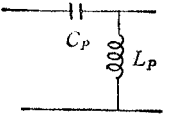
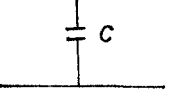
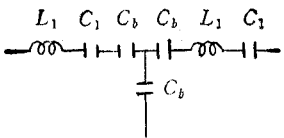
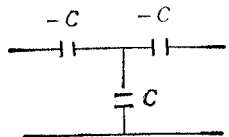


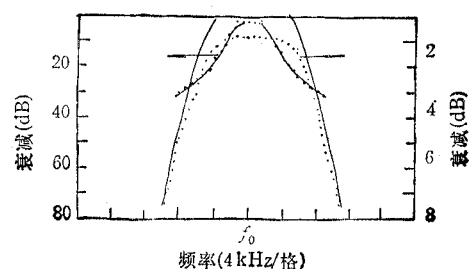
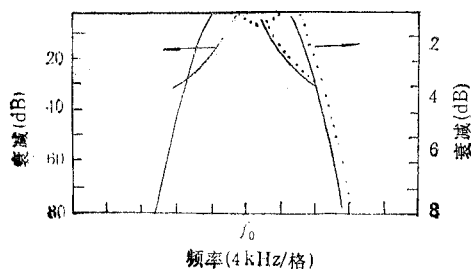
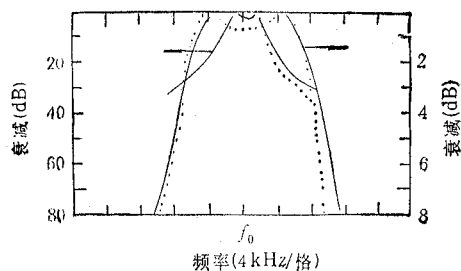
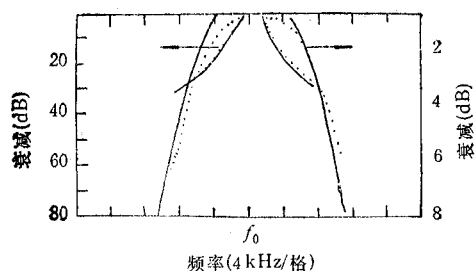
图 6

2. 实验结果的分析 and 讨论

本文用所编程序从理论上分析了端接阻抗、耦合电容、晶体内阻的变化对衰减特性的影响,得到一些很有意义的结果。图 7 和图 8 是端接阻抗变化 25% 时衰减曲线的变化情况。图 9 是端部有 2pF 并联电容和没有并联电容的特性变化。图 10 是内阻为 0 和 100Ω

表 2 5个基本网络和它们的A参数矩阵

基本网络	A 参数矩阵	
	$1 - (R_0 - R_s)\omega_0^2/(R_0\omega^2)$ $\omega_0/jR_0\omega\sqrt{R_s/(R_0 - R_s)}$	$-\omega_0\sqrt{R_s(R_0 - R_s)}/\omega$ 1
	1 $-j\omega_0\sqrt{R_L(R_0 - R_L)}/\omega$	$\omega_0/jR_0\omega\sqrt{R_L/(R_0 - R_L)}$ $1 - (R_0 - R_s)\omega_0^2/(R_0\omega^2)$
	1 $j\omega C$	0 1
	$-\omega C_b(\omega L_1 - 1/\omega C_1)$ $j\omega C_b$	$1 - \omega C_b(\omega L_1 - 1/\omega C_1)^2 + 1/\omega C_b$ $-\omega C_b(\omega L_1 - 1/\omega C_1)$
	0 $j\omega C$	$-1/j\omega C$ 0



时的情况。

五、结 束 语

经过试验验证,本文提出的将综合设计与网络分析相结合,将设计 MCF 整个过程全部在计算机中实现的思想以及在编制程序中采用的一些方法是确实可行的。大大提高了工作效率,缩短了研制周期,降低了研制生产成本,具有较高的实用价值。

参 考 文 献

- [1] O. Morio, Analysis of piezoelectric resonators vibrating in trapped energy modes, *Electron. Commum, Japan*, No. 9 Sept. 1965, pp. 84—93.
- [2] W. D. Beaver, Theory and design of the monolithic crystal filter, *Proc. 21st Ann. Symp. on Frequency control*, Atlantic City, NJ, USA, (1967), pp. 178—199.
- [3] H. A. Simpson, Composite filter structures incorporating monolithic crystal filters and LC network. *Proc. 25th Ann. Symp. on Frequency Control*, Atlantic City, NJ, USA, (1971), pp. 287—296.
- [4] 于泊然,压电晶体技术,1980年,第2期,第1—12页。
- [5] 李丕宁,压电晶体技术,1989年,第2期,第44—49页。
- [6] 龙树全,张杰,压电晶体技术,1989年,第2期,第36—43页。
- [12] 张巨洪编, BASIC 语言程序,清华大学出版社,北京,1983年1月。

THE COMPUTER OPTIMIZED DESIGN AND ANALYSIS OF MONOLITHIC CRYSTAL FILTERS

Li Peining Lin Jian

(Beijing Institute of Radio Metrology and Measurement, Beijing 100854)

Abstract Based on studying deeply the Monolithic Crystal Filter (MCF) theory and its equivalent circuit, the design and analysis of MCF by computer is described. In the design program, the quasi-empirical equation is given and some coefficients are modified for avoiding to compute transcendental equation. The building block technology and step connecting matrix method are used in analyzing program, so the program procedure becomes more simple and the computation speed is increased. Finally some kinds of monolithic crystal filters are designed and manufactured by using this program, and good results are obtained.

Key words Monolithic Crystal Filters; CAD; CAA