

一种设计开关电容滤波器的系统方法

马金龙* 田福庸

(杭州电子工业学院电子工程系 杭州 310012)

【摘要】 提出了一种开关电容滤波器(SCF)设计的系统方法,即利用线性变换原理和压控电源等效变换技术,可以模拟 ARF 滤波器直接设计成 SCF;给出了 7 个设计 SCF 的基本积木块。该方法可成功设计各种 SCF,特别适宜于带通和低通 SCF 的设计,并举例说明了该方法的优越性。

关键词 开关电容; 滤波器; 压控电源; 线性变换; 积木块

中图分类号 TN713

H.G. Dimopoulos 和 A.G. Constantinides 提出了利用线性变换原理从无源滤波器来设计有源 RC 滤波器^[1], John A. Papadakis 首次将线性变换技术引入 SCF 的设计中^[2],但存在很多不足,主要有:1) 所用运放个数大大高于滤波器的阶数;2) 要求 $f_c \gg f_s$, 否则所设计的 SCF 电路不能满足设计指标。不过文献[1,2]开拓了 SCF 设计的一个新领域。其后,又有不少人用线性变换来设计 SCF,但设计过程很烦琐,形成不了系统方法。

一般的 ARF 由 7 个基本积木块组成,由此而设计的 SCF 也应由相应的 7 个基本积木块的 SC 电路组成,而且所设计的 SCF 保留了原型 ARF 的低灵敏度。我们首先利用线性变换原理来划分这 7 个基本积木块及建立 SC 电路,再利用压控电源等效变换技术消除 ARF 中的串臂电容和电感回路,并提出了一套 SCF 设计的系统方法,它可以克服前人的不足,以满足实际设计的需要。本方法设计简单且系统化,SCF 电路中运放个数仅为原型 ARF 的阶数,保留了原型 ARF 电路的低灵敏度,并对杂散电容不敏感。

1 设计原理

1.1 线性变换原理^[1]

对于无源双口网络,可用端口变换矩阵 S_1 ,将网络端口变量 $(VI)^T$ 变成 $(XY)^T$ 。

对图 1 所示的级联网络,当端口变换矩阵满足式(1)时,对应的变换网络如图 2b 所示。选择端口变换矩阵的约束关系为

$$S_{12} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} S_{21} \quad (1)$$

1.2 压控电源等效变换

压控电源等效变换是为了消除 ARF 中串臂电容和电感回路中的串臂电容,以达到减少 SCF 中运入个数的目的。可以用 VCCS 来消除串臂电容,用 VCVS 来消除电感回路。变换原理和结果如图 2 和图 3 所示。

1.3 系统设计法原理

首先,确定 ARF 的 7 个基本积木块,并利用线性变换建立相应的 SC 电路作为 SCF 的基本积木块。当由 ARF 设计 SCF 时,如存在串臂电容和电感回路,则用压控电源等效变换技术将其消除。

这样在设计 SCF 时,一旦选定各 ARF 积木块的端口变换矩阵后,就可代入相应的 SCF 积木块,并考虑压控电源的 SC 实现。最后正确连接所有的 SC 子电路并确定各系数,即得 SCF 电路。

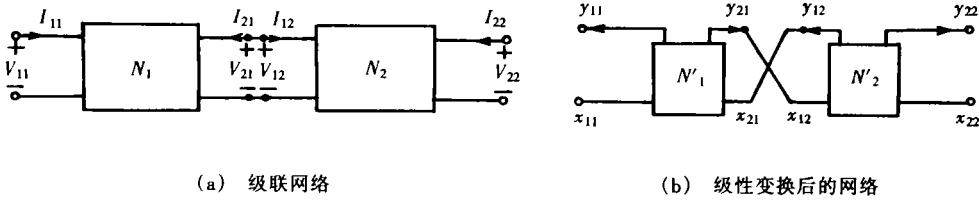


图 1 级联网络的线性变换

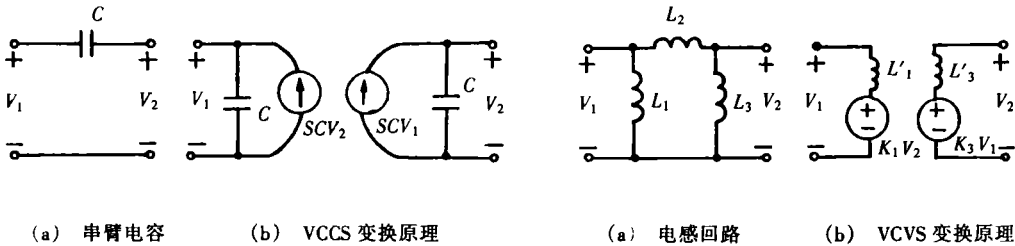


图 2 VCCS 等效变换原理

图 3 VCVS 等效变换原理

2 基本积木块

本设计法的关键是建立合理完善的 ARF 及 SCF 基本积木块。经反复研究,我们认为有 7 个 ARF 基本积木块(见表 1)。利用线性变换原理来建立 7 个 SCF 基本积木块,首先应确定每个 ARF 积木块的端口变换矩阵,其次求得其输入—输出关系,再用 SC 电路来实现这一关系,即可得到。在用 SC 来实现输入—输出关系时,选用双线性变换和 LDI 的 SC 电路,这样所设计的电路既具有双线性变换对杂散电容不敏感和 LDI 变换的 SC 电路简单的优点。

3 压控电源的 SC 实现

3.1 VCCS 的 SC 实现

VCCS 总是伴随并联电路出现的。VCCS 的存在相当于增加到并联电容的一条电流支路,因此用 SC 来实现 VCCS 时,只要在并联电容的 SC 电路的运放输入端增加一条电容支路即可。

3.2 VCVS 的 SC 实现

VCVS 与电感相串联的,因此用 SC 来实现 VCVS 时,只要在电感的 SC 电路的运放输入端增加一条带开关的电容支路即可。

4 设计步骤

步骤 1 根据给定的性能指标及 f_c 来决定是否需要预畸校正。若需要,则修正 ARF 的性能指标及参数。

步骤 2 ARF 中是否有串臂电容和电感回路。如存在,则采用压控电源等效变换将其消除。

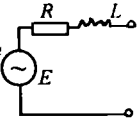
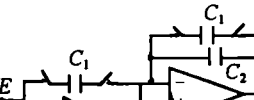
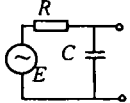
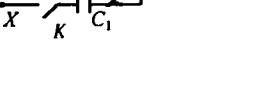
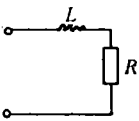
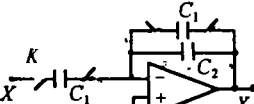
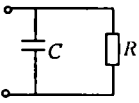

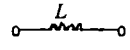
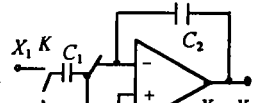
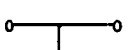
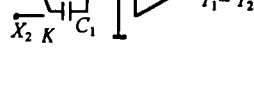
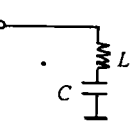
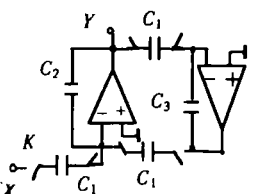
步骤 3 划分 ARF 中积木块,并确定每一积木块的端口变换矩阵。

步骤 4 根据所选定的端口变换矩阵,代之以相应的 SC 电路。

步骤 5 用 SC 实现压控电源,并正确连接每个子电路,即得到 SCF 电路。

步骤 6 确定各参数。

表 1 ARF 的基本积木块及 SC 电路

ARF 基本积木块	SC 电路	第一种 S_i 及 输入—输出方程 (开关 K 处于“开”状态)	第二种 S_i 及 输入—输出方程 (开关 K 处于“合”状态)	参数
		$Y = -\frac{\begin{bmatrix} 1 \\ R \end{bmatrix} (E - X)}{(L/R)S + 1}$	$Y = -\frac{\begin{bmatrix} -1 \\ R \end{bmatrix} (E + X)}{(L/R)S + 1}$	$\frac{C_2}{C_1} = \frac{L}{RT} - \frac{1}{2}$
		$Y = -\frac{\begin{bmatrix} -R \\ -1 \end{bmatrix} (E - X)}{CRS + 1}$	$Y = -\frac{\begin{bmatrix} R \\ -1 \end{bmatrix} (E + X)}{CRS + 1}$	$\frac{C_2}{C_1} = \frac{L}{RT} - \frac{1}{2}$
		$Y = \frac{\begin{bmatrix} 1 \\ R \end{bmatrix} X}{(L/R)S + 1} \text{ or } \begin{bmatrix} -1 & \\ & -R \end{bmatrix}$	$Y = -\frac{\begin{bmatrix} -1 \\ R \end{bmatrix} X}{(L/R)S + 1} \text{ or } \begin{bmatrix} 1 & \\ & -R \end{bmatrix}$	$\frac{C_2}{C_1} = \frac{L}{RT} - \frac{1}{2}$
		$Y = \frac{\begin{bmatrix} R \\ 1 \end{bmatrix} X}{CRS + 1} \text{ or } \begin{bmatrix} - & -R \\ -1 & \end{bmatrix}$	$Y = -\frac{\begin{bmatrix} R \\ -1 \end{bmatrix} X}{CRS + 1} \text{ or } \begin{bmatrix} 1 & -R \\ -1 & \end{bmatrix}$	$\frac{C_2}{C_1} = \frac{CR}{T} - \frac{1}{2}$
		$Y_1 = Y_2 = \frac{\begin{bmatrix} 1 \\ R \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} -1 & \\ & -R \end{bmatrix} \text{ or } \begin{bmatrix} -1 & \\ & -R \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 1 \\ R \end{bmatrix}}{(L/R)S}$	$Y_1 = Y_2 = \frac{\begin{bmatrix} 1 & \\ & -R \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} -1 \\ R \end{bmatrix} \text{ or } \begin{bmatrix} -1 \\ R \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 1 & \\ & -R \end{bmatrix}}{(L/R)S}$	$\frac{C_2}{C_1} = \frac{L}{RT}$
		$Y_1 = Y_2 = \frac{\begin{bmatrix} R \\ 1 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} R \\ 1 \end{bmatrix} \text{ or } \begin{bmatrix} -R \\ -1 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} -R \\ -1 \end{bmatrix}}{CRS}$	$Y_1 = Y_2 = -\frac{\begin{bmatrix} -R \\ 1 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} -R \\ 1 \end{bmatrix} \text{ or } \begin{bmatrix} R \\ -1 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} R \\ -1 \end{bmatrix}}{CRS}$	$\frac{C_2}{C_1} = \frac{CR}{T}$
		$Y = \frac{\begin{bmatrix} 1 \\ R \end{bmatrix} \text{ or } \begin{bmatrix} -1 & \\ & -R \end{bmatrix}}{(L/R)S} X - \frac{Y}{CRS}$	$Y = -\frac{\begin{bmatrix} -1 \\ R \end{bmatrix} \text{ or } \begin{bmatrix} 1 & \\ & -R \end{bmatrix}}{(L/R)S} X - \frac{Y}{CRS}$	$\frac{C_2}{C_1} = \frac{L}{RT}$ $\frac{C_3}{C_1} = \frac{CR}{T}$

5 设计时考虑的因素

5.1 节点电压参考极性选择

经压控电源等效变换后的 ARF, 为方便地用 SC 来实现压控电源, 要求节点电压的参考极性应正、负相间隔。

5.2 每一积木块端口变换矩阵的选择

应考虑以下几点:

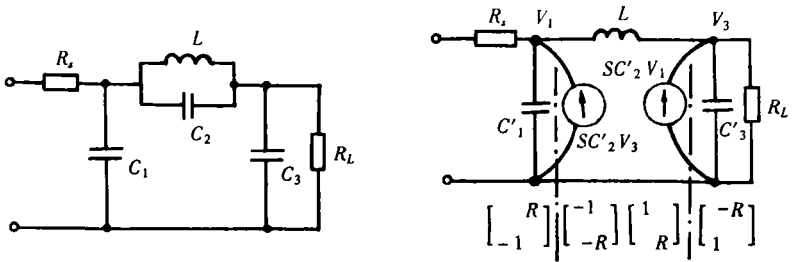
- 1) 节点电压的参考极性;
- 2) 相连的积木块的端口变换矩阵间的约束关系;
- 3) 只选表 1 中的几种。

6 设计实例

设计一低通 SCF, 其性能要求如下: 通带边界频率: $f_b = 5.6 \text{ kHz}$, 通带最大衰减: $A_{\max} = 0.1 \text{ dB}$, 阻带边界频率: $f_p = 14.7 \text{ kHz}$, 阻带最小衰减: $A_{\min} = 32 \text{ dB}$, 采样频率: $f_c = 200 \text{ kHz}$ 。设计过程如图 4 所示。

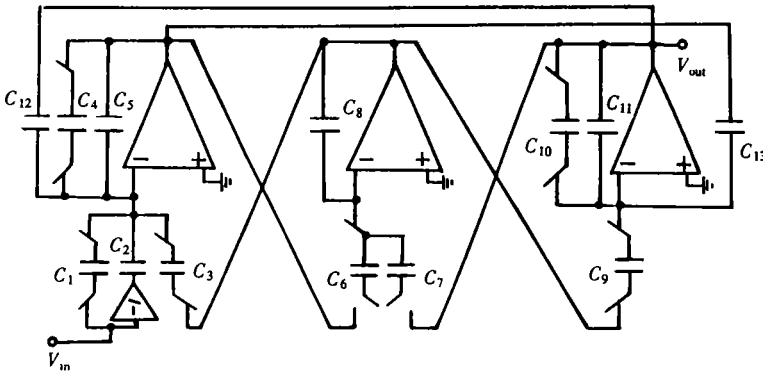
7 SPICE 模拟结果与结论

我们用 SPICE 对图 4c 进行了模拟, 结果如图 5 所示。由此可见, 我们所设计的 SCF 完全满足设计要求。



(a) ARF 电路

(b) 对(a)进行压控电源变换



(c) SCF 电路

图 4 实例的设计过程

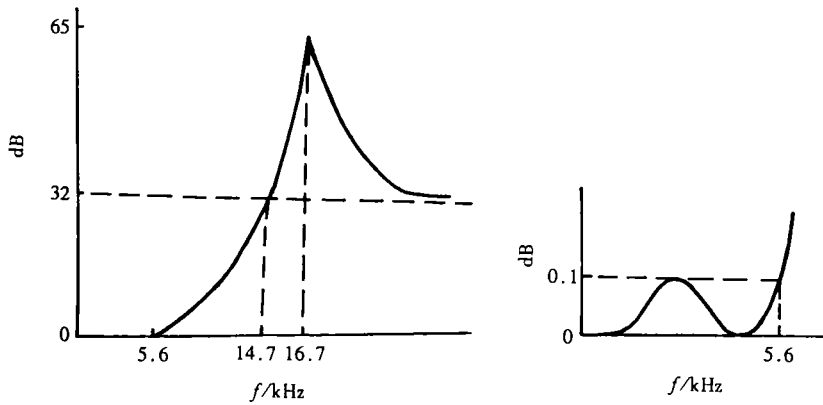


图5 实例的SPICE模拟结果

本文提供了一种设计 SCF 的系统方法,该方法在理论上是正确的,实际运用上是可行的。

参 考 文 献

- 1 Dimopoulos H G, Constantinides A G. Linear transformation active filters. IEEE Trans Circuits and Systems, 1978, CAS-25: 845 ~ 852
- 2 Papadakis J A. Linear transformation for switched capacitor filters design. ISCAS, 1984: 308 ~ 311
- 3 Yong T F, Long M J. Systematic method for the design of switched capacitor filters. IEE Electronics Letters, 1992 (28): 309 ~ 310

A Systematic Method for Design of Switched Capacitor Filters

Ma Jinlong Tian Fuyong

(Dept. of Electronic Eng., Hangzhou Institute of Electronics Engineering Hangzhou 310012)

Abstract This paper proposes a method for the design of switched capacitor filters (SCF) from analogue ARF filters (ARF) via the linear transformation and the equivalent voltage-controlled sources transformation. Basic building blocks are described for the design of any general SCF. The method suits the design of bandpass and lowpass SCF well. An example is given to illustrate the technique's efficiency.

Key words switched capacitor; filter; voltage-controlled sources; linear transformation; basic building block

编辑 黄 辛