用信号流图和通用积分器设计开关电容滤波器

程代伟 范天颖
(北京航空航天大学 机械工程及自动化学院)

摘 要 阐明了用信号流图和开关电容通用积分器设计开关电容低通滤波器的方法. 本设计方法简明直观, 物理概念清楚, 便于掌握, 容易推广到其它类型(如高通、带通等)开关电容滤波器的设计. 文中通过一个五阶梯形开关电容滤波器的设计实例加以说明, 并采用通用电路分析程序 PSpice5.0 来验证设计, 结果表明文中提出的方法是一种设计开关电容滤波器的有效方法.

关键词 信号流图; 积分器; 有源滤波器; 开关电容通用积分器; 开关电容滤波器
分类号 TN 713

由于双端接载的无源 LC 梯形滤波电路具有灵敏度最低的特点, 人们常常以它作为原型滤波器, 然后通过适当的方法将它转换为新型的滤波器结构. 而且无源滤波器的设计理论已十分成熟和完善, 有成套的设计图表供设计者直接查用, 从而使设计工作大为简化.

本文从已经设计好的无源 LC 梯形低通滤波器出发, 利用信号流图和通用积分器来设计相应的开关电容低通滤波器. 其基本思路为: 将 LC 梯形滤波器中的各支路电压作为上结点, 将各支路电流作为下结点, 画出包含积分运算关系的信号流图, 并对信号流图进行变换, 然后根据变换后的信号流图列写 LC 梯形电路中的电压运算关系, 最后用开关电容通用积分器实现信号流图中的运算关系, 得出相应的开关电容滤波器电路. 文中通过一个五阶梯形开关电容滤波器(SCF)的设计实例加以说明, 并给出了计算机仿真结果.

1 信号流图

下面以五阶低通椭圆型 LC 滤波器为例, 来说明如何根据信号流图列写 LC 梯形电路中的电压运算关系.

在图 1 所示的五阶 LC 低通滤波器中, 为使电路中只包含积分运算关系, 需要对电路进行等效变换[1], 变换后的电路如图 2 所示.

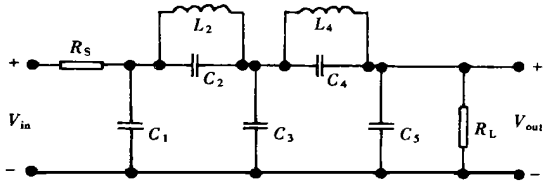


图 1 五阶 LC 低通原型滤波器

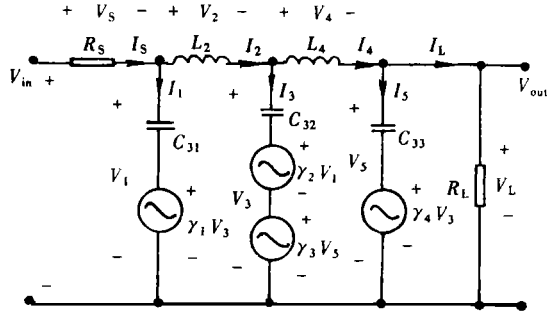


图 2 五阶 LC 低通原型的等效电路

图中

$$\gamma_3 = \frac{C_4}{C_2 + C_3 + C_4}$$

$$\gamma_4 = \frac{C_4}{C_4 + C_5} \qquad \gamma_1 = \frac{C_2}{C_1 + C_2}$$

$$\gamma_2 = \frac{C_2}{C_2 + C_3 + C_4}$$

$$C_{31} = C_1 + C_2$$

$$C_{32} = C_2 + C_3 + C_4$$

$$C_{33} = C_4 + C_5$$

在图 2 中, 将各支路的端电压和支路电流作为状态变量, 列写基尔霍夫电压电流方程, 据此可画出相应的信号流图. 为便于用开关电容通用积分器来实现 SCF 的设计, 需要对信号流图进行变换[2], 变换后的信号流图如图3所示. 图中 R_0 为

收稿日期: 1998-04-03 第一作者 女 34 岁 讲师 北京电子科技学院 100070 北京

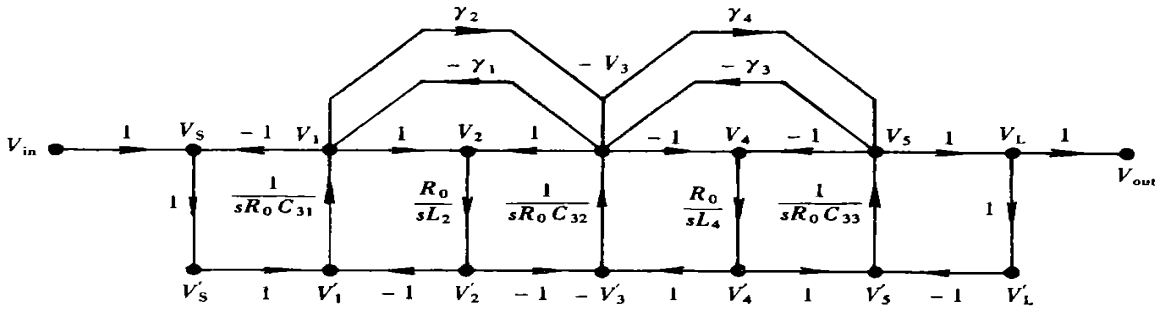


图 3 LC 低通原型的信号流图

比例电阻, 为分析方便, 取 $R_0 = R_S = R_L = 1\,\mathrm{k}\Omega$. 根据图 3, 容易求出各个结点变量间的关系为

$$V_{1(s)} = \frac{1}{sR_0C_{31}}(V_{in(s)} - V_{1(s)} - V'_{2(s)}) - \gamma_1(-V_{3(s)}) \quad (1a)$$

$$V'_{2(s)} = \frac{R_0}{sL_2}[V_{1(s)} + (-V_{3(s)})] \quad (1b)$$

$$-V_{3(s)} = -\frac{1}{sR_0C_{32}}(V'_{2(s)} - V'_{4(s)}) - \gamma_2 V_{1(s)} - \gamma_3 V_{5(s)} \quad (1c)$$

$$V'_{4(s)} = -\frac{R_0}{sL_4}[(-V_{3(s)}) + V_{5(s)}] \quad (1d)$$

$$V_{5(s)} = \frac{1}{sR_0C_{33}}(V'_{4(s)} - V'_{L(s)}) - \gamma_4(-V_{3(s)}) \quad (2)$$

从信号流图中容易看出

$$V'_{L(s)} = V_{L(s)} = V_{5(s)} \quad (3)$$

将式(3)代入式(2), 得

$$V_{5(s)} = \frac{1}{sR_0C_{33}}(V'_{4(s)} - V_{5(s)}) - \gamma_4(-V_{3(s)}) \quad (4)$$

将式(1)和式(4)的电压运算关系用开关电容通用积分器实现, 就得到相应的开关电容滤波器电路.

2 开关电容(SC)通用积分器

SC 通用积分器如图 4 所示, 其 z 域等效电路如图 5 所示. 由于运放的反相输入端为虚地, 根据图5 容易求出其输入输出关系为

$$V_{out(z)} = \frac{\alpha_1 z^{-1}}{1-z^{-1}}V_{1(z)} - \frac{\alpha_2}{1-z^{-1}}V_{2(z)} - \alpha_3 V_{3(z)} - \frac{\alpha_4}{1-z^{-1}}V_{out(z)} \quad (5)$$

若 $\alpha_4 = 0$, 则

$$V_{out(z)} = \frac{\alpha_1 z^{-1}}{1-z^{-1}}V_{1(z)} -$$

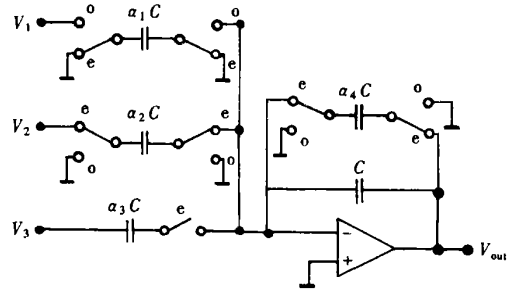


图 4 SC 通用积分器

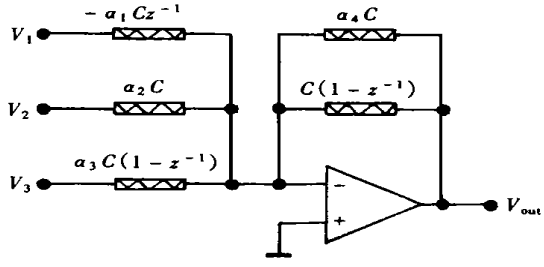


图 5 SC 通用积分器的 z 域等效电路

$$\frac{\alpha_2}{1-z^{-1}}V_{2(z)} - \alpha_3 V_{3(z)} \quad (6)$$

此时, 积分器是无损的.

将式(5)及式(6)分别转换到 s 域为

$$V_{out(s)} = \frac{\alpha_1}{sT}V_{1(s)} - \frac{\alpha_2}{sT}V_{2(s)} - \alpha_3 V_{3(s)} - \frac{\alpha_4}{sT}V_{out(s)} \quad (7)$$

$$V_{out(s)} = \frac{\alpha_1}{sT}V_{1(s)} - \frac{\alpha_2}{sT}V_{2(s)} - \alpha_3 V_{3(s)} \quad (8)$$

由式(7)及式(8)可看出, SC 通用积分器可用来实现多个输入信号之间的积分运算和比例运算.

在实际中, 图 4 的电路可简化为图 6 的形式.

图6 的电路称为共享开关电路. 通过开关共享, 可减小滤波器的芯片面积. 更重要的是减小与开关寄生电容有关的非理想效应[3].

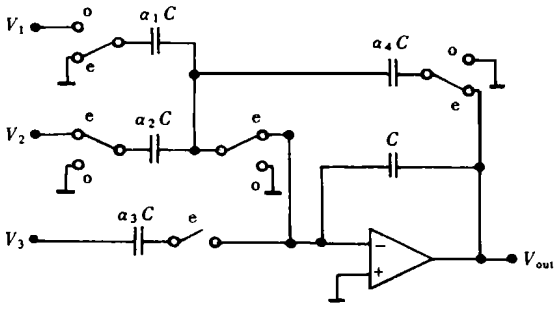


图 6　共享开关的 SC 通用积分器

3　设计举例

下面准备设计一个用于 PCM 电话系统中的发送低通滤波器, 用开关电容电路实现. 其模拟域技术指标如下所示[2].

通带: $f < f_p = 3.4\,\text{kHz}$

$A_p = 0.1\,\text{dB}$

通带波纹为 0.1dB

阻带: $f \geqslant f_s = 4.6\,\text{kHz}$

$A_s = 32.6\,\text{dB}$

阻带衰减为 32.6dB

时钟频率为 128 kHz.

其中 f_p 为通带上限频率; A_p 为通带最大衰减; f_s 为阻带下限频率; A_s 为阻带最小衰减.

用综合法设计此原型滤波器[4], 所得电路如图 1 所示.

反归一化, 可求出图 1 中的各元件值为

$C_1 = 0.037\,96\,\mu\text{F}$

$C_2 = 0.009\,814\,\mu\text{F}$　$L_2 = 53.634\,\text{mH}$

$C_3 = 0.065\,04\,\mu\text{F}$

$C_4 = 0.031\,64\,\mu\text{F}$　$L_4 = 35.379\,\text{mH}$

$C_5 = 0.024\,63\,\mu\text{F}$

2 个衰减极点频率分别为

$$f_2 = \Omega_2 f_c = 6.939\,1\,\text{kHz}$$

$$f_4 = \Omega_4 f_c = 4.757\,2\,\text{kHz}$$

其中 f_c 为实际的截止频率.

将图 1 的电路代入实际元件值, 用通用电路分析程序 PSpice5.0 进行计算机仿真, 其幅频特性曲线如图 7 所示. 结果表明所设计的电路满足技术指标的要求.

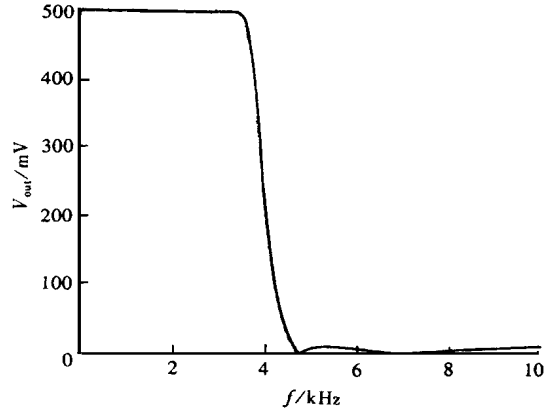


图 7　计算机仿真结果

根据第 1 节的分析, 图 1 电路中的运算关系可用式(1)和式(4)来描述, 将式中的各运算关系分别用开关电容通用积分器来实现, 就得出开关电容滤波器电路如图 8 所示.

为了用通用电路分析程序 PSpice5.0 对图 8 的电路进行计算机仿真, 需要先求出它的连续时间等效电路, 根据 SC 滤波器的连续时间等效电路

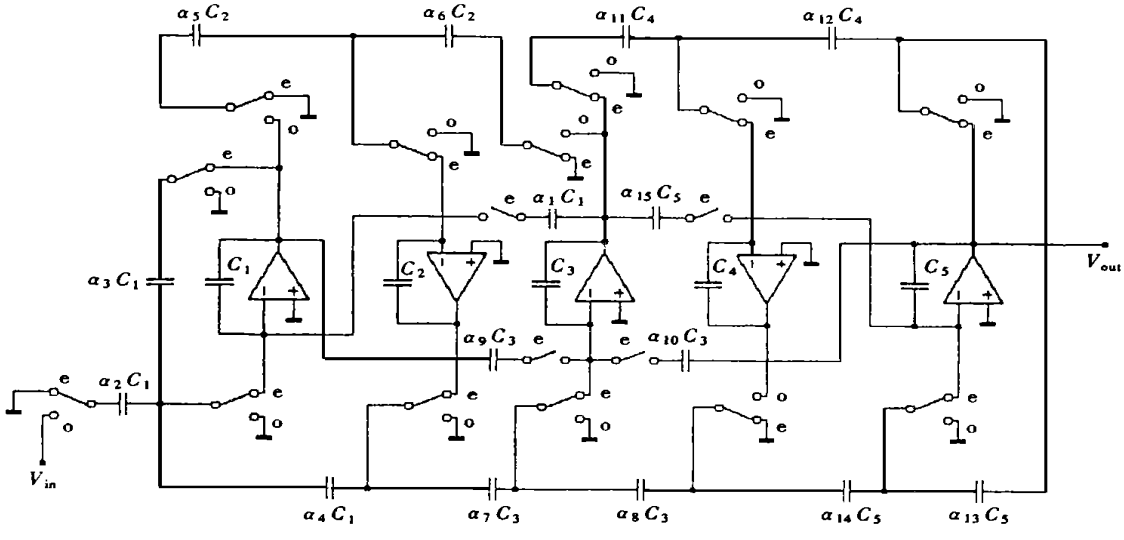


图 8　SC 滤波器电路

及原型滤波器中的电压运算关系可求出相应的电容比 α, 再取 $C_1 = C_2 = C_3 = C_4 = C_5 = 20$ pF, 则可根据 α 计算出其余各电容的值, 据此可计算连续时间等效电路中的各元件值并编制 PSpice5.0 的输入源程序[2], 经 PSpice5.0 仿真后, 其输出结果如图 9 所示.

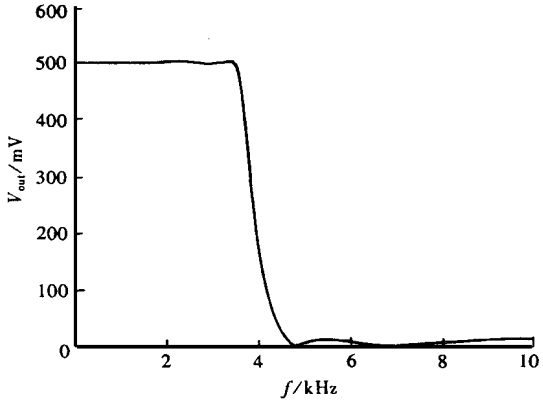


图 9 SC 滤波器的仿真输出响应

将图 9 与图 7 的原型滤波器响应相比较, 两者十分吻合, 说明所设计的 SC 滤波器满足要求.

4 结 论

根据无源 LC 梯形滤波器的信号流图, 可用 SC 通用积分器设计出相应的 SCF 电路. 按照本方法设计的 SCF 电路保留了 LC 原型滤波器的低灵敏度特性, 并且对寄生电容不灵敏.

参 考 文 献

1 Gray P R, Senderowicz D, Ohara H. A single-chip NMOS dual channel filter for PCM telephony applications. IEEE J Solid-State Circuits, 1979, 14(6): 981~991

2 程代伟. 模拟集成滤波器设计: 开关电容(SC)和开关电流(SI): [学位论文]. 北京: 北京航空航天大学机电工程系, 1998

3 Laker K R, Sansen W M C. Design of analog integrated circuits and system. New York: McGraw-Hill, 1994

4 黄席椿, 高顺泉. 滤波器综合法设计原理. 北京: 人民邮电出版社, 1978

Design of Switched-Capacitor Filters Using Signal-Flow Graphs and General Integrator

Cheng Daiwei Fan Tianying

(Beijing University of Aeronautics and Astronautics, School of Mechanical Engineering and Automation)

Abstract A new design method of switched-capacitor low-pass filter using signal-flow graphs and the general integrator is presented. The method is of simplicity, clear physical concept and convenience for use. It can also be applied easily to the design of other kinds of SCF(Switched-Capacitor Filter)(e.g. high-pass and band-pass etc). An example is given to show the design of a fifth-order ladder SCF, and the general-purpose circuits simulation programs Pspice5.0 is used to verify the design. It shows that the design method based on SFG(Signal Flow Graphs) and the general switched-capacitor integrator is efficient.

Key words SFG(Signal Flow Graphs); integrators; active filters; general switched-capacitor integrator; SCF(Switched-Capacitor Filters)