

# 一种带宽可调的连续时间滤波器的设计

莫邦燮<sup>†</sup> 项 斌 陈江华 倪学文

(北京大学微电子研究院, 北京 100871)

**摘要:** 讨论了一种连续时间低通滤波器的电路结构和基本原理, 介绍了调整连续时间滤波器通带频率的方法. 对电路进行了计算机模拟, 模拟结果和理论计算基本一致. 电路采用  $1.2\mu\text{m}$  双层多晶硅双层金属 CMOS 工艺流片, 取得了满意的结果.

**关键词:** 连续时间滤波器; 电路设计; CMOS 电路

EEACC: 1285; 2570

中图分类号: TN432

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2006)S0-0332-03

## 1 引言

在集成电路的设计中, 连续时间滤波器是一种重要的模拟电路单元, 它在现代通信和控制系统中有着广泛的应用. 单片集成传统的有源连续时间滤波器是近年来模拟 VLSI 技术取得重要进展的领域之一.

连续时间滤波器是一种直接信号处理方式, 不需要采样保持、防混迭和平滑电路, 也没有采样数据滤波器的时钟馈入等问题<sup>[1]</sup>, 因而在发展开关电容数字滤波器的同时, 人们对连续时间滤波器进行了深入的研究. 一般来说, 连续时间滤波器主要应用于直接信号处理, 特别是动态范围要求适中的领域, 例如在硬盘驱动器的读通道中用一个低通连续时间滤波器滤去磁读取信号中的高频噪声, 此外还可用作开关电容滤波器的抗混迭和平滑滤波器<sup>[2]</sup>.

MEMS 传感器, 例如加速度计, 需要有相关的电路与它配套使用, 本文研究的连续时间低通滤波器电路就适用于 MEMS 传感器的小电容读出电路, 它可以滤去信号中的高频部分. 为了满足不同频率的使用需要, 在连续时间滤波器中增加了可编程调整滤波器截止频率的电路, 频率调节的范围在  $800 \sim 8000\text{Hz}$ .

## 2 连续时间滤波器的工作原理和电路结构

集成连续时间滤波器是在 RC 滤波器的基础上发展而来的. 图 1 是一个 1 阶连续时间滤波器的电路原理图. 它由 3 个电阻、1 个电容和 1 个运算放大

器组成<sup>[3]</sup>.

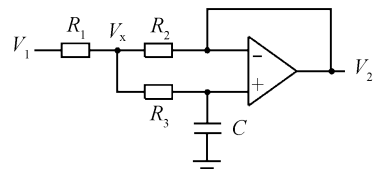


图 1 1 阶连续时间滤波器电路原理图

Fig. 1 Circuit configuration of one-pole continuous-time filter

设输入为  $V_1$ , 运放输出为  $V_2$ , 电阻  $R_1, R_2$  和  $R_3$  交点的电位是  $V_x$ , 电阻  $R_2$  的阻值是  $R$ ,  $R_1$  和  $R_3$  的阻值是  $2R$ , 下面推导它的传输函数, 根据运放的性质可得:

$$\frac{V_1 - V_x}{R_1} + \frac{V_2 - V_x}{R_2} = \frac{V_x - V_2}{R_3} = V_2 SC \quad (1)$$

由(1)式得

$$V_1 - V_x + 2(V_2 - V_x) = V_x - V_2 \\ 4V_x = V_1 + 3V_2 \quad (2)$$

由(1)式还可得

$$V_x - V_2 = 2SRCV_2 \\ V_x = (1 + 2SRC)V_2 \quad (3)$$

将(3)式代入(2)式解得

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{1}{1 + 8SRC} \quad (4)$$

公式(4)就是图 1 所示的 1 阶连续时间滤波器的传输函数.

将 2 个相同的 1 阶连续时间滤波器串联起来就可组成图 2 所示的 2 阶连续时间滤波器. 它是一个带宽可调的低通滤波器, 同时调节电路中的 2 个可变电容  $C$  就可改变连续时间滤波器的工作频率.

<sup>†</sup> 通信作者. Email: mobx@ime.pku.edu.cn

2005-10-11 收到, 2006-01-10 定稿

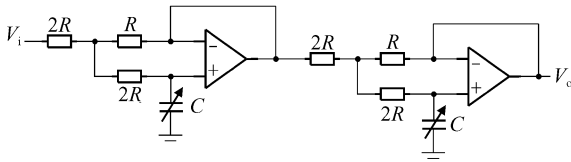


图2 2阶低通连续时间滤波器电路示意图

Fig.2 Circuit configuration of two-pole continuous-time filter

$$f_{-3dB} = \frac{1}{16 \sqrt{\sqrt{2} + 1} \pi RC} \quad (6)$$

由(4)式很容易得到2阶连续时间滤波器的传输函数：

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{1}{(1 + 8SRC)^2} \quad (5)$$

其中  $S = j\omega$ . 可见滤波器有2重极点, 它的低频增益为1.

滤波器的-3dB转折频率是：

### 3 通带频率调节电路的设计

为增加滤波器电路的使用范围, 满足低频下对不同频段的需要, 将连续时间滤波器的通带频率设计成可控调整. 设计连续时间滤波器的带宽调节范围是800~8000Hz, 带宽调节通过调节2阶连续时间滤波器的2个电容来实现, 如图3所示. 图中TG2~TG8是CMOS传输门, 每个传输门串接1个电容, 传输门由译码电路控制, CselCT0, CselCT1, CselCT2是片外输入的译码信号, 由于连续时间滤波器的2个可变电容C的变化相同, 所以用一套译码器同时控制这2个电容.

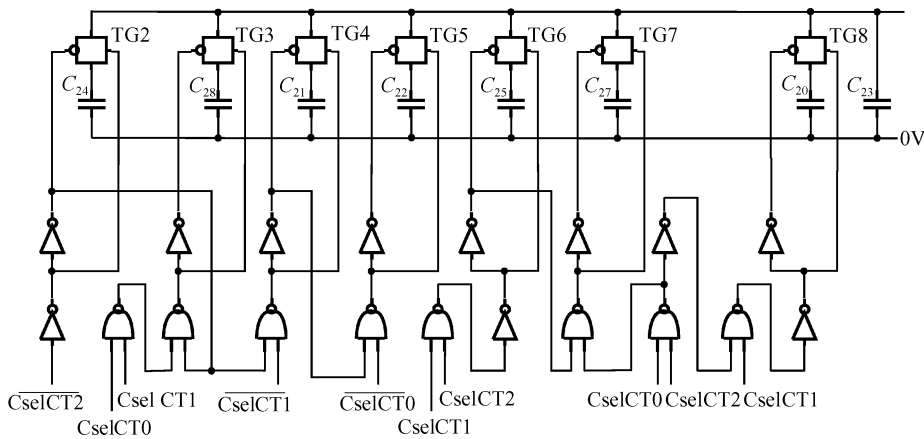


图3 连续时间滤波器的电容控制译码电路示意图

Fig.3 Capacitance control coding circuit of continuous-time filter

表1是带宽选择真值表, 当选择信号CselCT0, CselCT1, CselCT2全为“0”时, 所有传输门均未选通, 滤波器只接电容C23, 这时滤波器工作频率为8kHz. CselCT0为“1”, 其余为“0”时, 传输门TG5

被选通, 其他传输门均未被选通, 这时C22和C23并联, 电容C的值为C22 + C23. 当3个译码输入信号都是“1”时, 所有传输门都被选通, 这时电容值最大, 为8个电容之和, 这时滤波器的截止频率为800Hz.

表1 连续时间滤波器带宽控制表

Table 1 Bandwidth control of continuous-time filter

CselCT2	CselCT1	CselCT0	带宽/Hz	导通传输门	并联的电容
0	0	0	8000		C <sub>23</sub>
0	0	1	5800	TG5	C <sub>22</sub> C <sub>23</sub>
0	1	0	4200	TG4 TG5	C <sub>21</sub> C <sub>22</sub> C <sub>23</sub>
0	1	1	3000	TG3 TG4 TG5	C <sub>21</sub> C <sub>22</sub> C <sub>23</sub> C <sub>28</sub>
1	0	0	2000	TG2 TG3 TG4 TG5	C <sub>21</sub> C <sub>22</sub> C <sub>23</sub> C <sub>24</sub> C <sub>28</sub>
1	0	1	1400	TG2 TG3 TG4 TG5 TG7	C <sub>21</sub> C <sub>22</sub> C <sub>23</sub> C <sub>24</sub> C <sub>27</sub> C <sub>28</sub>
1	1	0	1000	TG2 TG3 TG4 TG5 TG6 TG7	C <sub>21</sub> C <sub>22</sub> C <sub>23</sub> C <sub>24</sub> C <sub>25</sub> C <sub>27</sub> C <sub>28</sub>
1	1	1	800	TG2 TG3 TG4 TG5 TG6 TG7 TG8	C <sub>20</sub> C <sub>21</sub> C <sub>22</sub> C <sub>23</sub> C <sub>24</sub> C <sub>25</sub> C <sub>27</sub> C <sub>28</sub>

对图 2 的连续时间滤波器取  $R = 90\text{k}\Omega$ ,  $C_{23} = 2.20\text{pF}$ ,  $C_{23} \sim C_{28}$  之和为  $125.98\text{pF}$ , 用工作站进行了电路模拟, 滤波器的 AC 扫描波形如图 4 所示, 模拟所得的连续时间滤波器最小、最大带宽分别为  $1.12$  和  $57.46\text{kHz}$ .

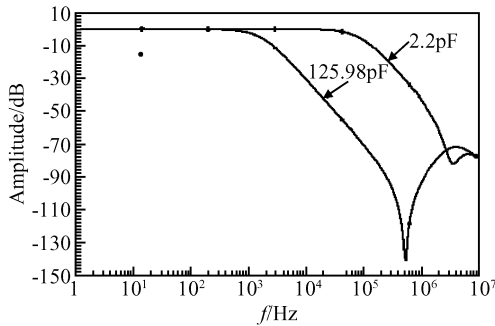


图 4 连续时间滤波器的 AC 扫描波形  
Fig. 4 AC waves of continuous-time filter

## 4 实验结果

带宽可调的连续时间低通滤波器采用  $1.2\mu\text{m}$  CMOS 工艺, 双层多晶硅双层金属进行版图设计, 电容的下极板是一次多晶硅, 电容的上极板为二次多晶硅, 它与 MOS 管多晶硅栅是同一层多晶硅, 电容介质是在生长栅氧化层时在第一层多晶硅上形成的  $\text{SiO}_2$ , 单位面积电容约为  $8.05 \times 10^{-4} \text{pF}/\mu\text{m}^2$ . 电阻选用  $\text{p}^+$  扩散区, 方块电阻约为  $60\Omega/\square$ , 经工艺流片, 连续时间滤波器的测试结果如图 5 所示. 图

中颜色较浅的是滤波器的输入信号, 它由信号发生器产生, 频率为  $5\text{kHz}$ ; 颜色较深的是滤波器的输出波形.

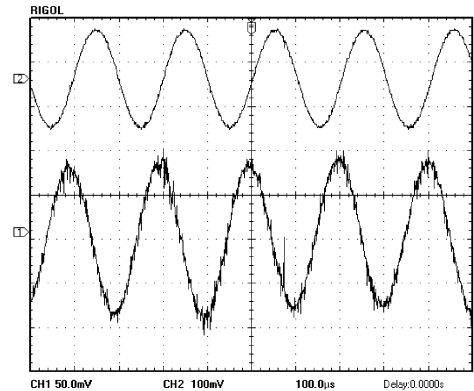


图 5 输入频率为  $5\text{kHz}$  时的测量波形  
Fig. 5 Input and output waves at  $5\text{kHz}$

## 参考文献

- [1] Hong Zhiliang. Design of analog circuits. Beijing: Science Press, 2005: 175 (in Chinese) [洪志良. 模拟集成电路分析与设计. 北京: 科学出版社, 2005: 175]
- [2] Tsividis Y P. Integrated continuous-time filter design—an overview. IEEE J Solid-State Circuits, 1994, 29(3): 166
- [3] Tong Shibai, Hua Chengying. Basis of analog electronic technology. Beijing: Higher Education Press, 2001: 345 (in Chinese) [童诗白, 华成英. 模拟电子技术基础. 北京: 高等教育出版社, 2001: 345]

## Design of Continuous-Time Filter with Adjustable Bandwidth

Mo Bangxian<sup>†</sup>, Xiang Bin, Chen Jianghua, and Ni Xuewen

(Institute of Microelectronics, Peking University, Beijing 100871, China)

**Abstract:** The circuit configuration and principle of continuous-time low pass filter is discussed. The frequency of continuous-time filter is adjusted by capacitance controlled coding circuit. Its simulation result is well agreed with the theoretical result. The continuous-time filter circuit is fabricated using a  $1.2\mu\text{m}$  double-poly double metal CMOS process, with satisfied results.

**Key words:** continuous-time filter; circuit design; CMOS circuit

EEACC: 1285; 2570

Article ID: 0253-4177(2006)S0-0332-03

<sup>†</sup> Corresponding author. Email: mobx@ime.pku.edu.cn

Received 11 October 2005, revised manuscript received 10 January 2006