

基于 OTA-C 的多功能全集成电流模式双 2 阶滤波器

芦 艳¹, 裴 东², 张津京²

(1. 西北师范大学 实验室与设备管理处, 兰州 730070; 2. 西北师范大学 物理与电子工程学院, 兰州 730070)

摘 要: 采用 TSMC 0.18 μm CMOS 工艺, 设计了一种基于 OTA 的单输入多输出的多功能电流模式双 2 阶滤波器。滤波器的 5 个输出端口可同时得到低通、高通、带通、带阻和全通 5 种滤波功能。该电路结构简单, 仅需要 4 个 MO-OTA 和 2 个电容; 电路固有角频率 ω_0 及品质因数 Q 值独立可调; 灵敏度低, 均小于或等于 0.5。基于 BSIM3 模型参数, 采用 Hspice 仿真工具对电路进行了仿真, 结果表明滤波器性能良好, 版图符合设计要求。

关键词: CMOS; 滤波器; 电流模式; 跨导运算放大器(OTA)

中图分类号: TN432

文献标识码: A

文章编号: 1004-3365(2014)05-0675-04

DOI: 10.13911/j.cnki.1004-3365.2014.05.025

Multi-Function Fully-Integrated Current-Mode Biquad Filter Based on OTA-C

LU Yan¹, PEI Dong², ZHANG Jinjing²

(1. Department of Laboratory and Equipment, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, P. R. China;

2. College of Physics and Electronic Engineering, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, P. R. China)

Abstract: A multi-function current-mode biquad filter based on OTA-C was designed in TSMC 0.18 μm CMOS process. The filters had one input and five outputs. This filter could realize five kinds of filter function, such as low-pass, high-pass, band-pass, band-stop and all-pass by selecting the corresponding output. The circuit's structure was simple, and consisted of only four OTAs and two capacitances. The circuit could adjust separately the intrinsic angular frequency and the quality factor, and had low passive sensitivities (less than or equal to 0.5). The circuit was simulated based on BSIM3 model with Hspice. The results showed that the filter had nice performance, and its layout met the design requirements.

Key words: CMOS; Filter; Current mode; Operational transconductance amplifier

1 引 言

OTA-C 全集成电流模式连续时间滤波器因具有低电压、低功耗和良好的高频性能, 且电路结构简单、电子可调、能很好地与 MOS VLSI 工艺兼容等优点, 成为现代滤波器领域中一个极有前景的发展方向。考虑到双 2 阶 OTA-C 滤波器具有较强的通用性, 因此对其电路的研究有着重要的应用价值和参考价值。

在滤波器设计的文献中, 大部分 OTA-C 的滤波器电路所含的 OTA 器件偏多, 因此由其构成的高阶滤波器所需芯片面积过大、功耗过高; 所提出的多功能滤波器多是电压模式电路, 或是以多输入单

输出电路为多^[1-6], 或是实现的功能较少。针对这些问题, 考虑到电流模式对处理信号的优越性, 以及多输入单输出滤波器应用的繁杂性, 本文提出了一种单输入多输出的电流模式连续时间滤波器电路。在基本 OTA 电路^[7]和差分式 OTA 电路结构^[8]的基础上, 应用电流镜技术进行输出端扩展, 得到具有 4 个输出端的多输出跨导运算放大器, 以满足多功能滤波器的设计需求, 最终实现了具有 5 种滤波功能的电流模式连续时间滤波器电路。

2 电路结构

2.1 MO-OTA 电路

基于文献[7, 8]对基本 CMOS OTA 进行输出

收稿日期: 2013-07-17; 定稿日期: 2013-09-27

作者简介: 芦 艳(1982—), 女(汉族), 兰州人, 硕士, 教师, 主要研究方向为电路理论及应用。

端扩展,得到具有 4 个输出端的多输出跨导运算放大器。由此,解决了电路设计中要求具有多输出电流端,以实现反馈、运算等功能的需求。图 1 给出了 4 输出 OTA 电路结构。

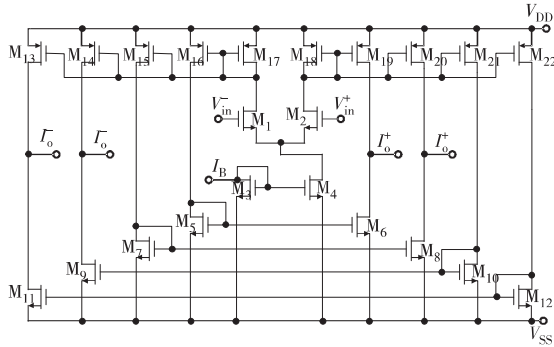


图 1 4 输出 OTA 电路图

图 1 中, $M_1 \sim M_6, M_{16} \sim M_{19}$ 组成基本 OTA。OTA 的输出端由电流镜电路组成,可通过增加电流镜来完成电流的移位、导向,从而得到多端输出。每增加 4 个 MOS 管便可增加 1 路输出电流。输出电流根据需要可同相或反相,图 1 分别用 I_o^+, I_o^- 表示, I_B 是偏置电流,即外部控制电流,其理想传输特性为^[9]:

$$\begin{aligned} I_o^+ &= G_m V_i \\ I_o^- &= -G_m V_i \end{aligned} \quad (1)$$

其中, G_m 为跨导增益,是跨导器的重要参数。设所有电流镜的传输比为 1,则在静态条件下,其跨导值为:

$$G_m = \sqrt{2KI_B} \quad (2)$$

其中, K 与 CMOS 工艺参数 μ_n, C_{ox} 及 MOS 集成电路的设计参数——沟道宽长比 W/L 有关,其值为:

$$K = \frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} \quad (3)$$

由此可知,确定了 CMOS 工艺之后,跨导值可由外控电流 I_B 调节,也可通过改变 W/L 来调节。

2.2 多功能电流模式 OTA-C 双 2 阶滤波器的设计

利用 4 输出 CMOS OTA 作为基本设计单元,提出了多功能滤波器,图 2 是用 OTA 电路符号所表示的电路图(电路符号中,“+”、“-”分别代表同相输出端和反相输出端)。该电路由 1 个接地电阻,1 个电流加法器和 2 个电流积分器组成。 G_{m0} 接为有源模拟电阻,代替电路结构中所需的电阻 R ,其值为 $R = 1/G_{m0}$,可将滤波器的输入电流 I_i 转换为跨导器的输入电压。两个电流积分器分别由 G_{m2}, C_2 和 G_{m3}, C_3 组成。 G_{m1} 构成电流加法器,完成反馈电流和输入电流相加。

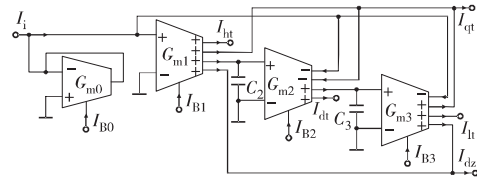


图 2 OTA-C 多功能滤波器电路结构图

将图 2 中 G_{m1}, G_{m2}, G_{m3} 3 个跨导的输出电流分别设为 $I_{Gm1}, I_{Gm2}, I_{Gm3}$,则可得到:

$$\begin{cases} I_{Gm1} = (I_i - I_{Gm2} - I_{Gm3}) \frac{G_{m1}}{G_{m0}} \\ I_{Gm2} = I_{Gm1} \frac{G_{m2}}{SC_2} \\ I_{Gm3} = I_{Gm2} \frac{G_{m3}}{SC_3} = I_{Gm1} \frac{G_{m2}G_{m3}}{S^2C_2C_3} \end{cases} \quad (4)$$

对(4)式进行整理,并将其与标准滤波器的传递函数进行比较可知,此滤波器电路可实现高通、低通、带通、带阻、全通 5 种滤波器功能。低通滤波器的电流传递函数为:

$$\frac{I_{lt}}{I_i} = \frac{I_{Gm3}}{I_i} = \frac{\frac{G_{m2}G_{m3}}{C_2C_3}}{S^2 + \frac{G_{m2}}{C_2}S + \frac{G_{m2}G_{m3}}{C_2C_3}}, G_{m0} = G_{m1} \quad (5)$$

高通滤波器的电流传递函数为:

$$\frac{I_{gt}}{I_i} = \frac{I_{Gm1}}{I_i} = \frac{\frac{G_{m1}}{G_{m0}}S^2}{S^2 + \frac{G_{m1}G_{m2}}{G_{m0}C_2}S + \frac{G_{m1}G_{m2}G_{m3}}{G_{m0}C_2C_3}} = \frac{S^2}{S^2 + \frac{G_{m2}}{C_2}S + \frac{G_{m2}G_{m3}}{C_2C_3}}, G_{m0} = G_{m1} \quad (6)$$

带通滤波器的电流传递函数为:

$$\frac{I_{dt}}{I_i} = \frac{I_{Gm2}}{I_i} = \frac{\frac{G_{m2}}{C_2}S}{S^2 + \frac{G_{m2}}{C_2}S + \frac{G_{m2}G_{m3}}{C_2C_3}}, G_{m0} = G_{m1} \quad (7)$$

带阻滤波器的电流传递函数为:

$$\frac{I_{dz}}{I_i} = \frac{I_{Gm1}}{I_i} + \frac{I_{Gm3}}{I_i} = \frac{S^2 + \frac{G_{m2}G_{m3}}{C_2C_3}}{S^2 + \frac{G_{m2}}{C_2}S + \frac{G_{m2}G_{m3}}{C_2C_3}}, G_{m0} = G_{m1} \quad (8)$$

全通滤波器的电流传递函数为:

$$\frac{I_{qt}}{I_i} = \frac{I_{Gm1}}{I_i} - \frac{I_{Gm2}}{I_i} + \frac{I_{Gm3}}{I_i} = \frac{S^2 - \frac{G_{m2}}{C_2}S + \frac{G_{m2}G_{m3}}{C_2C_3}}{S^2 + \frac{G_{m2}}{C_2}S + \frac{G_{m2}G_{m3}}{C_2C_3}}, G_{m0} = G_{m1} \quad (9)$$

当 $G_{m0} = G_{m1}$ 时,对于所有种类的滤波器来说,具有相同的特征角频率 ω_0 , Q 值和通带增益 H_0 :

$$\begin{cases} \omega_0 = \sqrt{\frac{G_{m2} G_{m3}}{C_2 C_3}} \\ Q = \sqrt{\frac{C_2 G_{m3}}{G_{m2} C_3}} \\ H_0 = 1 \end{cases} \quad (10)$$

由(10)式可知,可以通过改变 G_{m2} 来调节 ω_0 , 可通过改变 G_{m3} 来调节 Q , 通带增益 H_0 为固定值 1。

又由(6)式可知,高通滤波器的通带增益 H_0 可以通过改变 G_{m1} 来进行调节,它的特征角频率 ω_0 , Q 值和通带增益 H_0 值分别为:

$$\begin{cases} \omega_0 = \sqrt{\frac{G_{m1} G_{m2} G_{m3}}{G_{m0} C_2 C_3}} \\ Q = \sqrt{\frac{G_{m0} C_2 G_{m3}}{G_{m1} G_{m2} C_3}} \\ H_0 = \frac{G_{m1}}{G_{m0}} \end{cases} \quad (11)$$

3 灵敏度分析

根据灵敏度定义: $S_X^F = \frac{X}{F} \frac{\partial F}{\partial X}$, 求出 ω_0 和 Q 值

对 $G_{m0}, G_{m1}, G_{m2}, G_{m3}, C_2, C_3$ 的灵敏度,具体值为:

$$S_{G_{m0}}^{\omega_0} = S_{G_{m1}}^{\omega_0} = S_{G_{m2}}^{\omega_0} = S_{G_{m3}}^{\omega_0} = 0 \quad (12)$$

$$S_{G_{m2}}^Q = S_{G_{m3}}^Q = S_{C_2}^Q = S_{C_3}^Q = 0.5 \quad (13)$$

$$S_{C_2}^{\omega_0} = S_{C_3}^{\omega_0} = S_{G_{m2}}^Q = S_{C_3}^Q = -0.5 \quad (14)$$

由此可知,该多功能滤波器电路的元件参数不影响电路的灵敏度,且电路具有很好的灵敏度特性。

4 电路仿真结果

采用 TSMC 公司 0.18 μm CMOS 工艺的 BSIM3 模型参数,对电路进行 Hspice 仿真。

4.1 OTA 电路仿真结果

图 1 所示的 4 输出 OTA 电路中的各部分参数设置如下。

PMOS 管衬底接高电平 V_{DD} , NMOS 管衬底接低电平 V_{SS} 。

电路电源部分为: $V_{DD} = 0.75 \text{ V}, V_{SS} = -0.75 \text{ V}$ 。

在 MO-OTA 中,各个 MOS 管的宽、长值设为: M_1 和 M_2 中, $W = 100 \mu\text{m}, L = 1 \mu\text{m}$; $M_3 \sim M_{12}$ 中, $W = 55 \mu\text{m}, L = 1 \mu\text{m}$; $M_{13} \sim M_{22}$ 中, $W = 125 \mu\text{m}, L = 1 \mu\text{m}$ 。

跨导调谐范围是 OTA 的一个重要参数,决定着滤波器的调谐范围。图 3 给出了 MO-OTA

的跨导随频率变化情况的仿真结果。当 I_B 从 5 ~ 205 μA 变化时,其跨导值随之增大,跨导的可调谐范围大约在 0.12 ~ 1.8 mS 之间,带宽达 10 MHz 左右,通带内跨导值平稳,具有很好的线性特性。

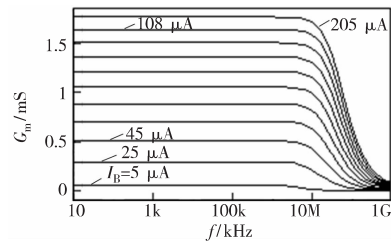


图 3 OTA 跨导随频率变化

4.2 滤波器电路仿真结果

图 2 所示电路中,电容元件取值为 $C_2 = C_3 = 300 \text{ pF}$, $I_{B0} = I_{B1}$ 保证 $G_{m0} = G_{m1}$, 则该多功能滤波器具有 5 种滤波功能(低通、高通、带通、带阻、全通)。当 $I_{B0} = I_{B1} = 100 \mu\text{A}$, $I_{B2} = I_{B3}$ 从 25 ~ 205 μA 变化时,固有频率随之增大。以带阻滤波器为例,响应曲线如图 4(a) 所示,可以看出 I_{B2} 和 I_{B3} 相等时, ω_0 可独立调节, Q 值并无变化,通带增益 $H_0 = 1$ 为固定值。当 $I_{B0} = I_{B1} = I_{B2} = 100 \mu\text{A}$, I_{B3} 从 25 ~ 205 μA 变化时, Q 值随之增大,固有频率也会随之增大,如图 4(b) 所示。而对于高通滤波器而言,其通带增益可通过模拟电阻 R 或 G_{m1} 加以调节,如图 4(c) 所示。外部控制电流 I_{B1} 从 25 ~ 205 μA 变化时, G_{m1} 值也随之变化,从而调节通带增益。其中, $I_{B0} = 25 \mu\text{A}$, $I_{B2} = I_{B3} = 100 \mu\text{A}$, 高通滤波器的通带增益随着 I_{B1} 增大而增大。

由仿真结果可以看出,改变偏置电流 I_B , 即可改变 OTA 的 G_m , 从而改变整个滤波器的截止频率,能够使其满足不同截止频率的应用需求。表 1 给出了这 5 种滤波器的参数调谐范围。

5 版图设计及后仿真结果

5.1 版图设计

使用 Tanner EDA 软件公司出品的 L-Edit Pro 版图设计软件,基于 TSMC 0.18 μm CMOS 标准工艺库,采用 N 阱工艺,设计的电路版图如图 5 所示。其中大尺寸管采用叉指结构,有效减小了大尺寸 MOS 管对性能的影响,也节省了 MOS 管的面积。电容采用层叠电容器结构,可获得单位芯片面积上的更大电容。信号走线采用 45° 拐角走线形式,改善了导电性能。同时设计了 ESD 保护电路^[10], 其中,电阻采用精度比较高的多晶硅电阻。芯片面积为 0.13 mm^2 , 系统最大功耗为 4.5 mW。

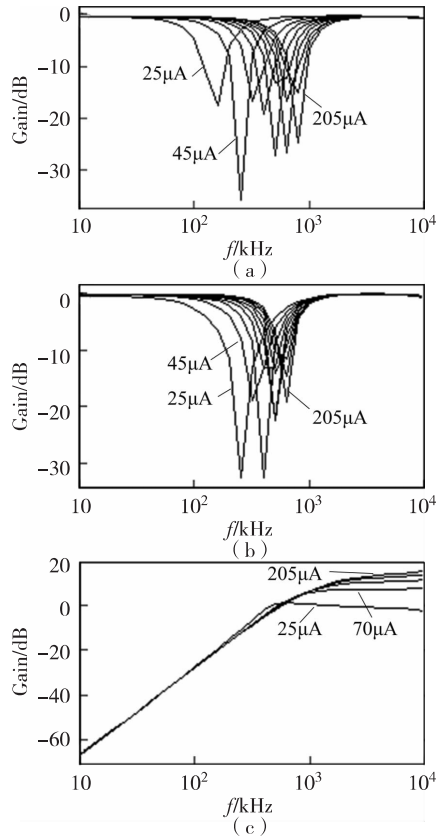


图 4 幅频特性曲线

表 1 滤波器参数

种类	参数
低通	$\omega_c = 173 \sim 920 \text{ kHz}, H_0 = 1$
高通	$\omega_c = 129 \sim 678 \text{ kHz}, H_0 = 0 \sim 15 \text{ dB}$
带通	$\omega_0 = 158 \sim 794 \text{ kHz}, H_0 = 1, BW = 153 \sim 736 \text{ kHz}$
带阻	$\omega_0 = 158 \sim 794 \text{ kHz}, H_0 = 1, BW = 28 \sim 600 \text{ kHz}$
全通	$\omega_0 = 158 \sim 794 \text{ kHz}, H_0 = 1, \text{通带最大衰减 } 1 \text{ dB}$

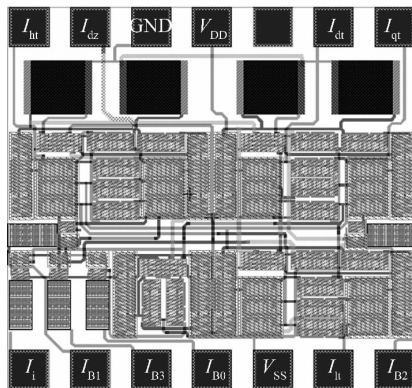


图 5 多功能滤波器的版图

5.2 后仿真结果

采用 Tanner EDA 软件对版图提取寄生电容和电阻进行后仿真测试,图 6 所示为此多功能滤波器的幅频特性,结果表明滤波器的性能良好,版图符合设计要求。

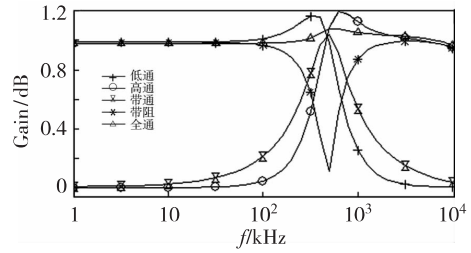


图 6 多功能滤波器幅频特性

6 结束语

提出了一种新颖的电流模式多功能滤波器电路。此电路所需元器件较少,仅需 4 个 OTA 和 2 个电容,不含电阻,便于集成,且芯片面积较小;电路结构简单,有利于降低功耗、成本及非理想性能的影响;可独立调节电路固有角频率 ω_0 及品质因数 Q 值,且具有很好的灵敏度特性,高通滤波器也可实现通带增益调节;在 5 个输出端口同时得到对同一信号的低通、高通、带通、带阻、全通 5 种滤波结果。采用 TSMC 0.18 μm CMOS 工艺,对滤波器电路进行了 Hspice 仿真及版图设计和后仿真。此双 2 阶滤波器电路通用性强,可用于实现高阶任意功能滤波电路。

参考文献:

- [1] 龙英. 全集成连续时间 OTA-C 有源滤波器的研究 [D]. 硕士学位论文. 长沙: 湖南师范大学, 2006.
- [2] 王春华. 差分式 CMOS 多功能电流模式滤波器 [J]. 微电子学与计算机, 2005, 22(1): 163-165.
- [3] 郑少锋. 用多输出的 CMOS 跨导器实现多功能二阶滤波器 [J]. 福建工程学院学报, 2003, 1(3): 29-32.
- [4] KOZIEL S, SCHAUMANN R, XIAO H Q. Analysis and optimization of noise in continuous-time OTA-C filters [J]. IEEE Trans Circ Syst, 2005, 52(6): 1086-1094.
- [5] 龙英, 李仲阳. 电流模式高阶 OTA-C 高通滤波器的设计 [J]. 微电子学与计算机, 2005, 22(9): 7-13.
- [6] 成坚, 何怡刚. 两输入全差分高频宽线性可调的 OTA 及其滤波器应用 [J]. 电路与系统学报, 2004, 9(4): 50-53.
- [7] 赵玉山. 跨导型放大器·原理·电路·应用 [M]. 北京: 电子工业出版社, 1994.
- [8] 王淑艳, 滕建辅. 基于相似矩阵的 OTA 全集成有源滤波器的设计 [J]. 天津大学学报, 2005, 38(5): 461-465.
- [9] 赵玉山, 王萍, 周跃庆. 跨导型放大器端口扩展特性 [J]. 天津大学学报, 1997, 30(2): 142-148.
- [10] 王自强. CMOS 集成放大器设计 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2007: 283-297.