

通用电流模式滤波器的系统设计

王 翠

(盐城工学院 实验教学部, 江苏 盐城 224051)

摘要: 电流模式滤波电路因具有频带宽, 功耗小, 动态范围大等优点已逐渐应用在高频、高速信号处理电路中, 当前电流模式滤波电路中对通用高阶电流模式滤波器的设计研究存在明显不足, 通过对电流模式滤波器的通用传输函数进行系统分析, 提出了基于 MOCCH 设计任意阶电流模式滤波器的电路, 该电路结构简单, 元件参数容易确定, 所有的 RC 元件均接地, 便于单片集成。改变输出电流的组合方式, 可实现多种功能的滤波器。结合实例进行了电路设计及 PSPICE 仿真, 仿真结果证实了该设计的可行性。

关键词: 电流模式; 传输函数; 滤波器

中图分类号: TN713

文献标识码: A

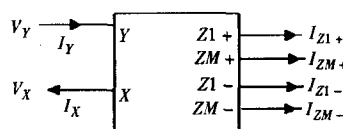
文章编号: 1671-5322(2012)04-0022-05

电流模式滤波电路因具有速度快, 功耗低, 频带宽, 线性度好等优点受到国内外学者的青睐^[1], 全集成化连续时间滤波器是由有源器件和无源器件构成的选频网络, 广泛应用于通信、视频信号处理, 电子测量等领域。近年来, 二阶电流模式滤波器的研究相对比较成熟, 也有许多学者对特殊功能高阶电流模式滤波器的设计做了大量工作^[2], 但对通用型滤波器的研究尚显不足。本文通过对电流模式滤波器的传输函数进行系统分析, 提出了一种通用电流模式滤波器的综合设计电路, 电路采用了 $2n+2$ 个有源器件 MOCCH, n 个接地电容和 $2n+3$ 个接地电阻实现。

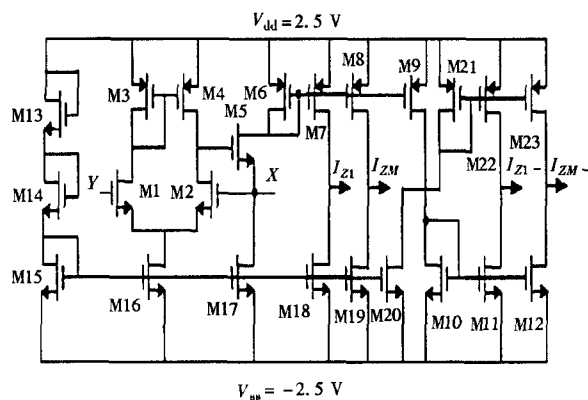
1 MOCCH 端口特性及电路

第2代电流传输器(CCII)是一种功能很强的电流模标准器件, 具有功耗低、电路结构简单的特点特别适合电流模式滤波器设计。1991年 Surakampontorn^[3]提出了一个 CMOS CCII 电路, 本文也在此电路基础上, 对电路参数优化, 采用基本电流镜将其扩展成多端输出 MOCCH。MOCCH 电路符号及内部电路如图1所示。符号中 X 、 Y 分别是电流和电压输入端, Z 和 Z^- 是互补的电流输出端, 其端口理想特性为:

$$\begin{cases} I_Y = 0 \\ V_X = V_Y \\ I_{Z1+} = I_{ZM+} = I_X = -I_{Z1-} = -I_{ZM-} \end{cases}$$



a MOCCH 电路符号



b CMOS MOCCH 内部电路

图1 MOCCH 电路符号及实现电路

Fig. 1 Symbol and realization of MOCCH circuit

收稿日期: 2012-11-13

作者简介: 王翠 (1979-), 女, 江苏泰兴人, 讲师, 硕士, 主要研究方向为数模混合集成电路设计。

图2为MOCCHII构成的电流积分器、比例器综合电路,根据MOCCHII的端口特性,可以计算出 I_{O3} 、 I_{O2} 、 I_{O1} 与 I_{in} 之间的关系。

$$I_{O3} = \frac{R_b}{R_a} I_{O1}, I_{O1} = \frac{1}{sC_n R_b} I_{in}, I_{O2} = -I_{O1} \quad (1)$$

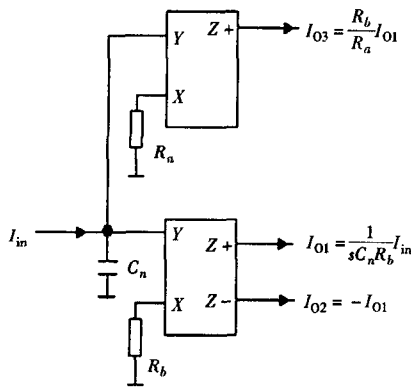


图2 电流积分器、比例器的综合电路

Fig.2 Integrated circuit of the current integrator and amplifier

2 通用电流模式滤波器的系统设计

电流模式滤波器的传递函数^[4]为:

$$H(S) = \frac{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + a_{n-2} s^{n-2} + \dots + a_2 s^2 + a_1 s + a_0}{b_n s^n + b_{n-1} s^{n-1} + b_{n-2} s^{n-2} + \dots + b_2 s^2 + b_1 s + b_0} \quad (2)$$

将式(2)分子分母各除以 $b_n s^n$:

$$H(S) = \frac{\frac{a_n}{b_n} + \frac{a_{n-1}}{b_n} s^{-1} + \dots + \frac{a_2}{b_n} s^{2-n} + \frac{a_1}{b_n} s^{1-n} + \frac{a_0}{b_n} s^{-n}}{1 + \frac{b_{n-1}}{b_n} s^{-1} + \dots + \frac{b_2}{b_n} s^{2-n} + \frac{b_1}{b_n} s^{1-n} + \frac{b_0}{b_n} s^{-n}} \quad (3)$$

设 $\frac{I_{out}}{I_{in}} = \frac{I_{out}}{Y} \times \frac{Y}{I_{in}}$, 设

$$\frac{Y}{I_{in}} =$$

$$\frac{1}{1 + \frac{b_{n-1}}{b_n} s^{-1} + \frac{b_{n-2}}{b_n} s^{-2} + \dots + \frac{b_2}{b_n} s^{2-n} + \frac{b_1}{b_n} s^{1-n} + \frac{b_0}{b_n} s^{-n}}$$

$$Y = I_{in} - \frac{b_{n-1}}{b_n} Y s^{-1} - \frac{b_{n-2}}{b_n} Y s^{-2} \dots - \frac{b_2}{b_n} Y s^{2-n} -$$

$$\begin{aligned} & \frac{b_1}{b_n} Y s^{1-n} - \frac{b_0}{b_n} Y s^{-n} = I_{in} - \frac{b_{n-1}}{b_n} Y s^{-1} - \\ & \frac{b_{n-2}}{b_{n-1}} s^{-1} \left(\frac{b_{n-1}}{b_n} Y s^{-1} \right) - \frac{b_{n-3}}{b_{n-2}} s^{-1} \left(\frac{b_{n-2}}{b_n} Y s^{-2} \right) \dots \\ & - \frac{b_1}{b_2} s^{-1} \left(\frac{b_2}{b_n} Y s^{2-n} \right) - \frac{b_0}{b_1} s^{-1} \left(\frac{b_1}{b_n} Y s^{1-n} \right) \end{aligned} \quad (4)$$

则

$$\begin{aligned} \frac{I_{out}}{Y} &= \frac{a_n}{b_n} + \frac{a_{n-1}}{b_n} s^{-1} + \frac{a_{n-2}}{b_n} s^{-2} + \\ & \dots + \frac{a_2}{b_n} s^{2-n} + \frac{a_1}{b_n} s^{1-n} + \frac{a_0}{b_n} s^{-n} \\ I_{out} &= \frac{a_n}{b_n} Y + \frac{a_{n-1}}{b_n} Y s^{-1} + \frac{a_{n-2}}{b_n} Y s^{-2} + \\ & \dots + \frac{a_2}{b_n} Y s^{2-n} + \frac{a_1}{b_n} Y s^{1-n} + \frac{a_0}{b_n} Y s^{-n} = \\ & \frac{a_n}{b_n} Y + \frac{a_{n-1}}{b_{n-1}} \left(\frac{b_{n-1}}{b_n} Y s^{-1} \right) + \frac{a_{n-2}}{b_{n-2}} \left(\frac{b_{n-2}}{b_n} Y s^{-2} \right) + \\ & \dots + \frac{a_2}{b_2} \left(\frac{b_2}{b_n} Y s^{2-n} \right) + \frac{a_1}{b_1} \left(\frac{b_1}{b_n} Y s^{1-n} \right) + \frac{a_0}{b_0} \left(\frac{b_0}{b_n} Y s^{-n} \right) \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} &= I_{O(n)} + I_{O(n-1)} + I_{O(n-2)} + \dots \\ &+ I_{O(2)} + I_{O(1)} + I_{O(0)} \end{aligned} \quad (6)$$

$$I_{O(i)} = \frac{a_i}{b_n} Y s^{i-n} \quad i = 0, 1, 2, \dots, n \quad (7)$$

由梅森公式,式(4)、式(5)的电路信号流程如图3所示。根据信号流程图,基于MOCCHII器件实现的通用型电流模式滤波器电路见图4。

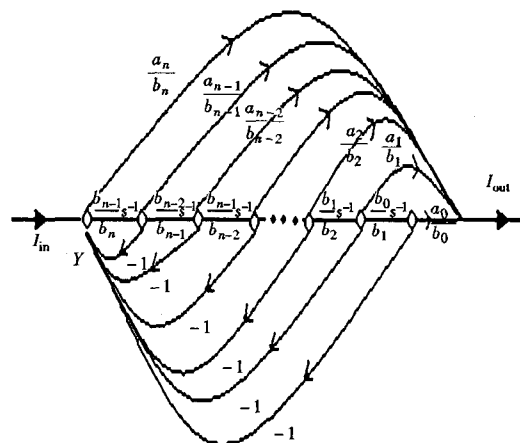


图3 通用电流模式滤波器的信号流程图

Fig.3 Signal flowchart of universal current-mode filter

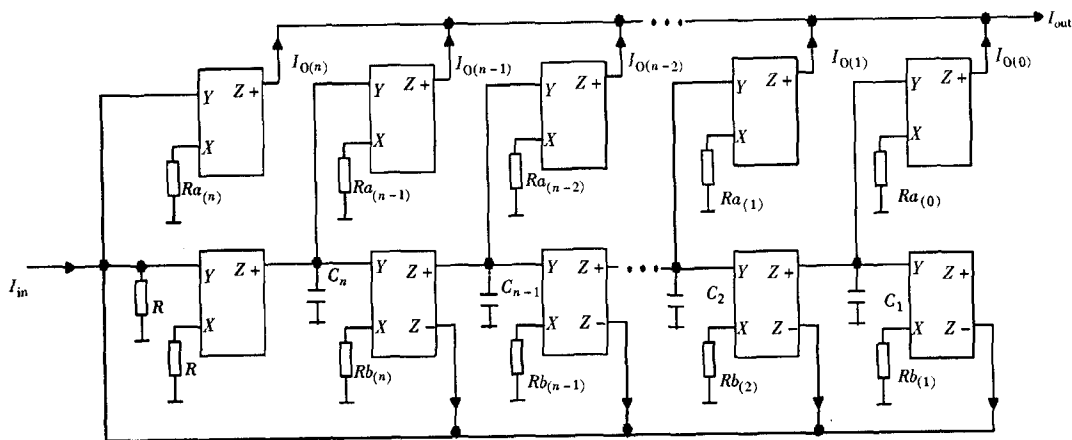


图 4 基于 MOCII 高阶电流模式滤波器的设计电路

Fig. 4 Norder current-mode filter design circuit based on the MOCII

图 4 中利用 MOCII 构成电流积分、比例电路,元件参数确定如下:

$$Ra_{i-1} = \frac{b_{i-1}}{a_{i-1}} Rb_{(i)}, (i = 1, 2, \dots, n) \quad (8)$$

$$\tau_i = C^i Rb_{(i)} = \frac{b_i}{b_{i-1}}, (i = 1, 2, \dots, n) \quad (9)$$

$$Ra_{(n)} = \frac{b_n}{a_n} R \quad (10)$$

$$R = Rb_{(i)}, (i = 1, 2, \dots, n) \quad (11)$$

改变电流 I_{out} 内的 $I_{O(i)}$ 输出组合可实现低通、高通、带通、带阻的滤波功能。

3 设计实例

以截止频率为 50 kHz 的三阶巴特沃斯滤波

器的设计来验证该方法的正确性。三阶归一化巴特沃斯滤波器^[5]多项式系数: $D(S) = S^3 + 2S^2 + 2S + 1$ 。

3.1 模型参数确定

三阶滤波器模型电路如图 5, 设 $R1 = R2 = Rb_{(3)} = Rb_{(2)} = Rb_{(1)} = 10 \text{ k}\Omega$, $Ra_{(3)} = Ra_{(2)} = Ra_{(1)} = Ra_{(0)} = 10 \text{ k}\Omega$, 根据参数确定公式(9)计算出 $\tau_3 = C_3 Rb_{(3)} = 0.5$, $\tau_2 = C_2 Rb_{(2)} = 1$, $\tau_1 = C_1 Rb_{(1)} = 2$, 可以计算出归一化电容参数: $\overline{c3} = 0.5 \times 10^{-1} \text{ F}$, $\overline{c2} = 1 \times 10^{-4} \text{ F}$, $\overline{c1} = 2 \times 10^{-4} \text{ F}$, 取 $f_p = 50 \text{ kHz}$, 可得电容参数为: $c3 = 0.1592 \text{ nF}$, $c2 = 0.31847 \text{ nF}$, $c1 = 0.6369 \text{ nF}$ 。

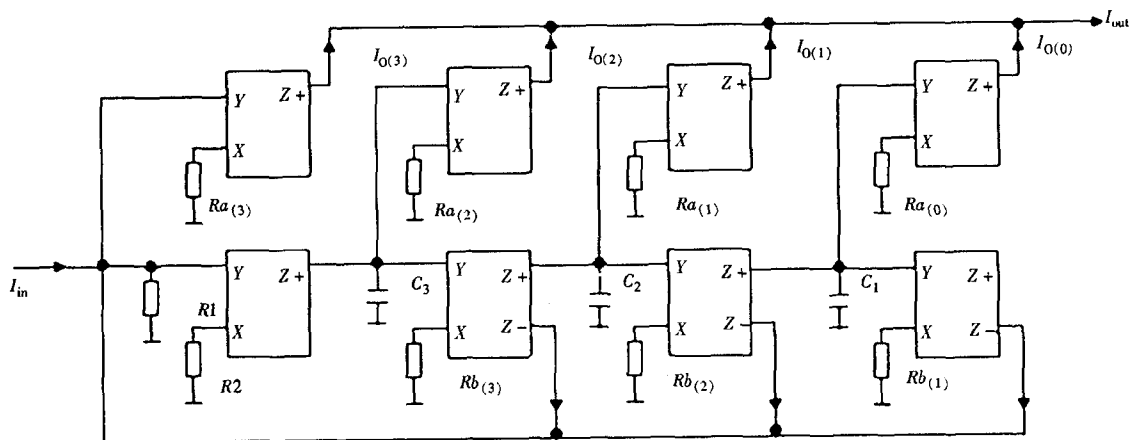


图 5 三阶电流模式滤波器的设计

Fig. 5 Third-order current mode filter design

3.2 仿真验证

MOCCH 基于 0.5 μm CMOS 工艺参数,电源电压为 2.5 V,经优化计算,MOS 管沟道尺寸如表 1,可满足 MOCCH 的端口跟随特性。

表 1 MOS 管沟道尺寸
Table 1 The dimensions of mos transistor

MOS	W/L
M1,M2,M3,M4	20/0.5
M5,M13-M16	80/0.5
M17-M20,M21-M23	10/0.5
M6-M8,M10-M12	50/0.5

对三阶巴特沃斯滤波器 PSPICE 仿真,幅频特性如图 6, $I_{\text{out}} = I_{O(0)}$, 实现低通滤波, $I_{\text{out}} = I_{O(3)}$ 则实现高通滤波, $I_{\text{out}} = I_{O(3)} + I_{O(0)}$ 实现带阻滤波, $I_{\text{out}} = I_{O(2)}$ 或 $I_{O(1)}$ 时则实现带通滤波功能,仿真结果正确。

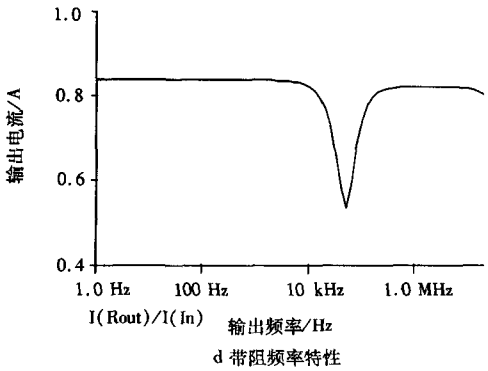
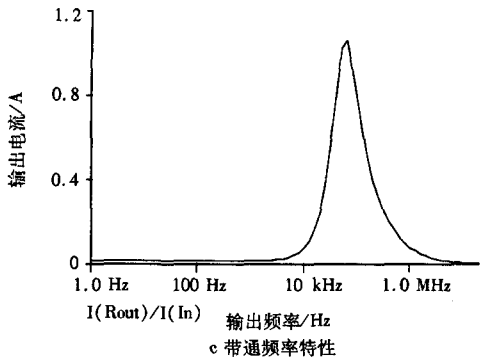
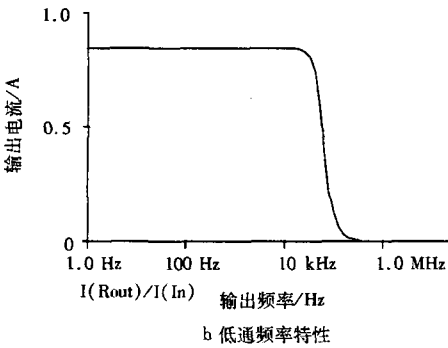
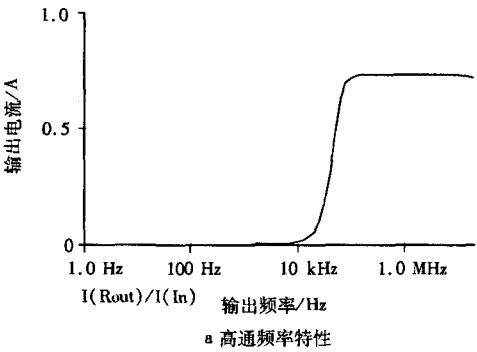


图 6 三阶巴特沃斯滤波器的仿真结果

Fig. 6 The simulation results of the third-order Ba wosi filter

4 结论

本文提出了一种基于 MOCCH 的通用电流模式滤波器的设计电路,并以三阶多功能巴特沃斯滤波电路设计为例进行仿真验证,证明了该模型电路的正确性,提出的电路具有以下优点:(1)通用性强,适合任意电流模式滤波器设计。(2)电路结构简单,仅用 $2n+2$ 个有源器件, $2n+3$ 个接地电阻及 n 个接地电容构成,易于集成,元件参数容易确定。(3)实现的滤波器性能优良。(4)改变输出电流的不同组合可实现多种滤波功能。有望应用于电子测量和信号处理等领域。

参考文献:

- [1] 彭良玉,何怡刚,黄满池. 电流模式 N 阶 CCCII - C 低通滤波器的系统设计[J]. 电子学报,2003,31(8):1 234 - 1 236.
- [2] [美]毕查德,拉扎维. 模拟 CMOS 集成电路设计[M]. 陈贵灿,译. 西安:西安交通大学出版社,2003.
- [3] Surakampontom W, Riewruja V, Kumwachara K, et al. Accurate CMOS - based current conveyors[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 1991,40(4):699 - 703.
- [4] 秦世才,高清运. 现代模拟集成电子学[M]. 北京:科学出版社,2003.
- [5] 王卫东. 现代模拟集成电路原理及应用[M]. 北京:电子工业出版社,2008.
- [6] Fabra A, Saaid O, Boucherron C. High frequency applications based on a new current controlled conveyor[J]. IEEE transactions on circuits and system sl: Fundamental theory and applications, 1996,43(2):82291.
- [7] 郭静波,王赞基,戴逸松. 基于 MOCCII 的差分式电流模式连续时间滤波器[J]. 通信学报,1997,18(6):59 - 63.

Systematic Design of Universal Current Mode Filter

WANG Cui

(The Experimental Teaching Department, Yancheng Institute of Technology, Yancheng Jiangsu 224051, China)

Abstract: Current mode circuit presents such advantages as wide bandwidth, low power consumption and so on. It has been widely used in the high frequency and high speed signal processing circuit. At present, there is obvious deficiencies in the design of universal current mode filter. Based on the analysis of universal current mode filter transfer function. Nth - order current - mode filter circuit was presented by MOCCII. The circuit structure is simple, the design element parameter is easy to determine. All the elements are grounded, so it is convenient to be integrated. A variety of functions can be realized by changing the combination of the output current of the filter. The circuit and PSPICE are designed with actual examples. The results prove the validity of the proposed design.

Keywords: current mode; transfer function; filter

(责任编辑:张振华)