

文章编号:1005-0523(2015)01-0115-06

基于CCCII电流模式二阶有源多功能滤波器设计

李园海,高海生

(华东交通大学电气与工程学院,江西 南昌 330013)

摘要:提出一种基于CCCII的电流模式多功能二阶滤波器的电路。整个滤波电路由3个CCCII构成并通过RC电路接地,在输出端能实现高通、低通、带通、带阻滤波功能,可通过调节电路参数适应多种性能要求。设计结构简单,可独立调整其电路的截止频率和品质因数,无源灵敏度较低。通过PSpice软件对电路性能进行分析,仿真结果证明了该电路设计准确可行。

关键词:电流控制模式;CCCII;多功能滤波器;PSpice

中图分类号:TN713

文献标志码:A

作为现代电子系统中不可缺少的电路模块,滤波器在随着信号精度要求不断提高的需求下越来越受到重视,双二阶滤波能够很方便地级联成为高阶滤波器,又可以单独使用,因此在整个滤波器的研究发展中占据了重要的位置^[1-2]。电流模式双二阶滤波结构综合了电流模式滤波电路的动态范围与带宽较广,动态范围较大的诸多优点。基于第二代电流传输器CCII(current conveyor II)的电流模式滤波器因相对传统运放构成的电压模式有源滤波器在线性度、信号频带和动态范围等性能上优势明显,因此近年来国内设计并推出了各种不同类型的电流模式滤波器,并进行了深入研究和改进。但由于CCII自身特性,无法完全消除其X端的寄生电阻,这就导致了基于CCII的电路产生传输误差^[3]。如若需要对滤波器设计进行调整,哪怕对电路参数进行调节,需要对无源器件的大小进行调整,这就涉及到更换元件的问题,十分麻烦。第二代电流控制电流传输器CCCII作为CCII的改良形式,在A.Fabre和O.Suaïd提出后受到了研究者广泛关注,其具有很强的通用性和较宽的增益带宽积。电路中通过利用双极型晶体管的线性互导的特性,可控制偏置电流 I_b 来调节X端寄生电阻 R_x 的大小,达到实现整个系统的电调谐功能^[4]。

设计电路为二阶电流模式单输入多输出滤波器结构,仅采用较少的阻容元件接地,以CCCII作为基本模块,通过对输出端的线性连接,能够实现高通低通带通带阻全通5类通用的滤波功能。该电路是通过在各类基于传统运放滤波器的电路上进行改进,利用CCCII模块进行实现,结构简单、集成度高、中心频率和无源灵敏度都较低。

1 电路理论与设计

1.1 CCCII——器件及端口特性

CCCII利用内部直流偏置控制X端的寄生电阻的特性以达到电压可调的特性^[5]。其不仅保留了CCII的所有特性(输入、输出端口的矩阵关系),还通过改变直流偏置电源增加了新的特性。

图1为设定的CCCII实现模块下层电路,输入端口X与Y之间的电路为混合跨导线性环路,由双极性晶体管Q1~Q4组成,其电流关系为 $I_1 I_3 = I_2 I_4$ ^[5]。电路所需的直流偏置电流 I_b 通过Q9~Q13回路组成的镜像电流源提供,而Q5~Q8构成的两个互补电流镜能够在Z端输出X端的复制电流,-Z端作为反向输出端^[6-7]。 R_x

收稿日期:2013-11-01

作者简介:李园海(1988—),男,硕士,研究方向为有源滤波器设计;高海生(1960—),男,教授,研究方向为电力电子电路、装置、系统的计算机仿真及辅助设计。

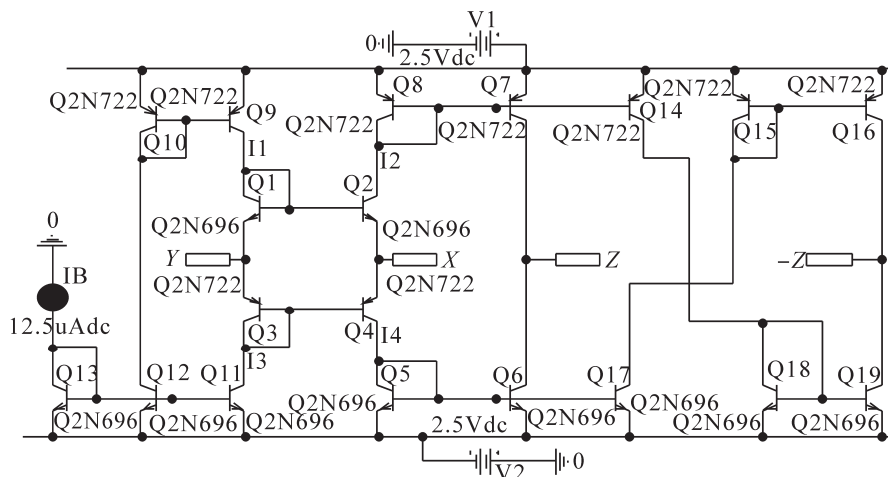


图1 新型电流传输器CCCII电路原理图

Fig.1 Circuit diagram of new current conveyor CCCII

为 X 端的寄生电阻,其值 $R_x = V_T / 2I_B$ (V_T 是温度电压当量,常温下约为26 mV)。很明显,可通过改变偏置电流 I_B 来控制 R_x 的值^[9]。电流传输矩阵如式(1),+、-号分别表示同相和反相输出。

$$\begin{bmatrix} I_Y \\ V_X \\ I_Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & R_x & 0 \\ 0 & \pm 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_Y \\ I_X \\ V_Z \end{bmatrix} \quad (1)$$

图2(a)所示为CCCII在PSpice中设定的层次电路外部模型,2(b)为其等效电路。

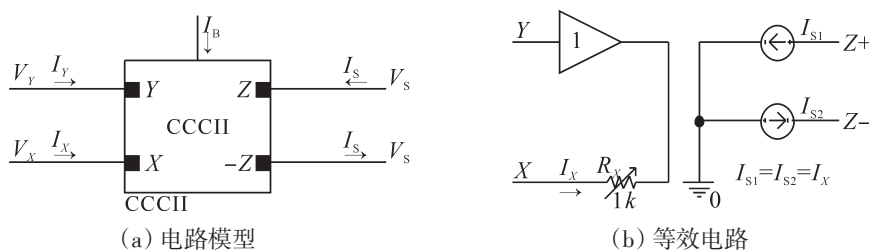


图2 CCCII的层次电路模型和等效电路

Fig.2 Hierarchical circuit model and the equivalent circuit of CCCII

1.2 二阶滤波器结构设计

该滤波器设计仅由3个CCCII器件、1个接地电阻和两个接地电容构成,电路结构较为简单,CCCII1输入端通过电流源 I_m 作为唯一一外部输入电流, I_{out1} , I_{out2} , I_{out3} 为输出电流端,见图3。

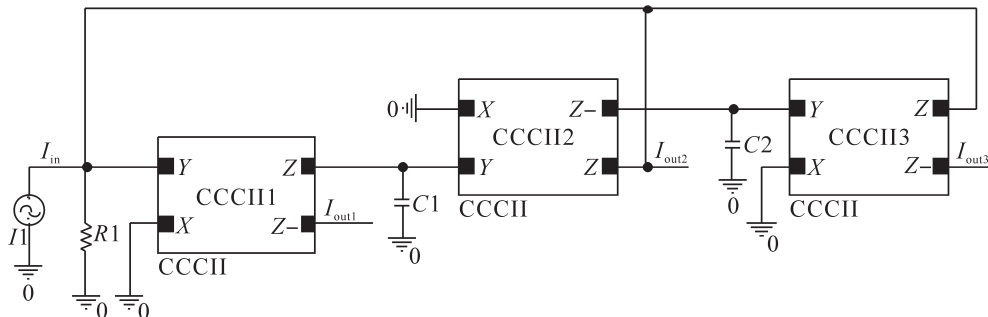


图3 基于CCCII的双二阶电流模式滤波器

Fig.3 Second-order current mode filter based on CCCII

1.3 传递函数计算

根据图3的滤波器电路结构、基尔霍夫电流定律(KCL)及CCCII本身端口特性,可得如下方程组:

$$I_R R = V_{Y1} = -I_{X1} R_{X1} \quad (2)$$

$$-I_{out1} \frac{1}{sC_1} = V_{Y2} = -I_{X2} R_{X2} \quad (3)$$

$$-I_{out2} \frac{1}{sC_2} = V_{Y3} = -I_{X3} R_{X3} \quad (4)$$

$$I_{in} + I_{out2} = I_{out3} + I_R \quad (5)$$

由上述方程整理可得

$$H_1 = \frac{I_{out1}}{I_{in}} = \frac{RR_{X2}R_{X3}C_1C_2s^2}{R_{X1}R_{X2}R_{X3}C_1C_2s^2 + RR_{X3}C_2s + R} = \frac{\frac{R}{R_{X1}}s^2}{D(s)} \quad (6)$$

$$H_2 = \frac{I_{out2}}{I_{in}} = \frac{RR_{X3}C_2s}{R_{X1}R_{X2}R_{X3}C_1C_2s^2 + RR_{X3}C_2s + R} = \frac{\frac{R}{R_{X1}R_{X2}C_1}s}{D(s)} \quad (7)$$

$$H_3 = \frac{I_{out3}}{I_{in}} = \frac{R}{R_{X1}R_{X2}R_{X3}C_1C_2s^2 + RR_{X3}C_2s + R} = \frac{\frac{R}{R_{X1}R_{X2}R_{X3}C_1C_2}}{D(s)} \quad (8)$$

还可将 $I_{out1}, I_{out2}, I_{out3}$ 3 个输出端的电流相互连接到一起,则可得到

$$I_{out4} = I_{out1} + I_{out3} \quad (9)$$

$$I_{out5} = I_{out1} + I_{out2} + I_{out3} \quad (10)$$

$$H_4 = \frac{I_{out4}}{I_{in}} = \frac{RR_{X2}R_{X3}C_1C_2s^2 + R}{R_{X1}R_{X2}R_{X3}C_1C_2s^2 + RR_{X3}C_2s + R} = \frac{\frac{R}{R_{X1}}s^2 + \frac{R}{R_{X1}R_{X2}R_{X3}C_1C_2}}{D(s)} \quad (11)$$

$$H_5 = \frac{I_{out5}}{I_{in}} = \frac{RR_{X2}R_{X3}C_1C_2s^2 + RR_{X3}C_2s + R}{R_{X1}R_{X2}R_{X3}C_1C_2s^2 + RR_{X3}C_2s + R} = \frac{\frac{R}{R_{X1}}s^2 + \frac{R}{R_{X1}R_{X2}C_1}s + \frac{R}{R_{X1}R_{X2}R_{X3}C_1C_2}}{D(s)} \quad (12)$$

其中,分母 $D(s) = s^2 + \frac{R}{C_1R_{X1}R_{X2}}s + \frac{R}{C_1C_2R_{X1}R_{X2}R_{X3}}$ 为转化成 s 变量的二阶形式,由该式可得到电路的极点频率与极点 Q 值分别为

$$\left. \begin{aligned} \omega &= \left[\frac{R}{C_1C_2R_{X1}R_{X2}R_{X3}} \right]^{\frac{1}{2}} \\ \frac{\omega}{Q} &= \frac{R}{C_1R_{X1}R_{X2}} \\ Q &= \left[\frac{C_1R_{X1}R_{X2}}{C_2RR_{X3}} \right]^{\frac{1}{2}} \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

经过理论分析可知,在不改变电路结构的前提下,通过选取不同的输出端就可以实现低通、高通、带通等不同的滤波功能。

由式(6)可知, I_{out1} 实现了高通滤波器,由式(7)可知, I_{out2} 实现了带通滤波器,由式(8)可知, I_{out3} 实现了低通滤波器,由式(11)可知, I_{out4} 也就是通过组合 I_{out1} 与 I_{out3} 输出端,可实现带阻滤波器,由式(12)可知, I_{out5} 也就是 $I_{out1}, I_{out2}, I_{out3}$ 的组合输出,实现了全通输出,由于 3 个基本输出端口均为高阻, I_{out4}, I_{out5} 只需将基本输出端线性连接即可实现^[8-9]。

由推算得出的极点频率与极点 Q 值可知,这两个参数都受到各 CCCII 寄生电阻 R_x 的影响,而 R_x 可通过 CCCII 的偏置电流进行调节,因此,无需调整设计电路的无源器件参数,就能够方便的调试滤波器性能,电调谐作用明显。

1.4 灵敏度分析

对于一个有源网络,灵敏度分析是十分必要的,灵敏度是衡量由于环境改变而引起元件变化造成的滤

波器影响的偏差大小^[10-11]。其定义式为 $S_X^F = \frac{X}{F} \frac{\partial F}{\partial X}$ 。

根据灵敏度的定义式,可计算各参数灵敏度大小如下:

$$S_{R_{X1}}^{\omega P} = S_{R_{X2}}^{\omega P} = S_{R_{X3}}^{\omega P} = S_{C_1}^{\omega P} = S_{C_2}^{\omega P} = -0.5, S_R^{\omega P} = 0.5 \quad (14)$$

$$S_R^Q = S_{C_2}^Q = S_{R_{X3}}^Q = -0.5 \quad (15)$$

$$S_{C_1}^Q = S_{R_{X1}}^Q = S_{R_{X2}}^Q = 0.5 \quad (16)$$

上述计算表明,由此电路得到的二阶滤波器其无源灵敏度均为与电路无关的常数,且绝对值均小于1,由此可见各参数无源灵敏度都是比较低的。

2 仿真环境介绍

电路仿真分析是模拟电路设计的核心部分,由于模拟电路结构复杂多样,对仿真工具也提出了较高的精度与速度等各方面要求,目前在众多电力电子仿真软件里,OrCAD PSpice有着广泛的用户人群。该软件由OrCAD公司推出,在对各类电路进行仿真分析的过程中,能够紧密结合电路原理图,构建与实际元件特性十分相似的电路元件模型,仿真波形与实际电路检测的结果十分相近,因此在电路设计中具有十分重要的指导意义^[12]。

PSpice软件的优点在于:

- 1) 能够提供电路所进行的模拟仿真包含了瞬态、稳态和频域状态,包括直流分析、交流分析、瞬态分析、参数分析、噪声分析、温度分析、蒙特卡罗分析和最坏情况分析等多类分析功能。
- 2) PSpice对电路的精确模拟、分析及优化范围很广,可以从直流一直到大于100 GHz的微波范围。
- 3) 该软件为设计者提供了上万个的模拟器件仿真模型用于设计需要,用户也可以通过使用自行设定参数变量,构建自己所需的器件模型。
- 4) PSpice在电路设计中相当于一个软件板,使用户从不同角度对设计的电路进行研究与分析,大大提高了设计效率,节约了开发成本。

3 电路仿真与分析

为了验证电路的正确性及电路性能,利用PSpice对所设计的电路进行模拟仿真测试,通过OrCAD Capture CIS绘制层次电路原理图3及CCCII模块下层电路图1,通过PSpice A/D Edition仿真输出交流分析波形。测试过程中CCCII模块下层电路即图1的三极管NPN管选择Q2N696,PNP管选择Q2N722,Q2N722与Q2N696的参数设置如表1所示^[13]。

表1 参数设置

Tab.1 Parameter settings

Q2N722	Q2N696
IS=121.E-18 EG=1.206 bf=137.5 vaf=159.4 ikf=6.974e-3 ise=36e-16 ne=1.713 br=0.7258 var=10.73 ikr=2.198e-3	IS=73.5e-0.18 bf=110
+ re=1 RB=524.6 rbm=25 RC=50 CJE=0.214e-12 VJE=0.5 MJE=0.28 CJC=0.983e-13 VJC=0.5 mjc=0.3 xcjc=0.034	+ vaf=51.8 ikf=2.359e-3 ise=25.1e-16 ne=1.650 br=0.4745 var=9.96 ikr=6.478e-3 re=3 rb=327
+ CJS=0.913e-12 vjs=0.64 mjs=0.4 fc=0.5 TF=0.425e-9 xtb=1.538 xti=2 TR=0.425e-8	+ rbm=24.55 rc=50 cje=0.180e-12 vje=0.5 mje=0.28 cjc=0.164e-12 vjc=0.8 mjc=0.4 xcjc=0.037 cjs=1.03e-12
	+ vjs=0.55 mjs=0.35 fc=0.5 tf=0.610e-9 tr=0.610e-8 eg=1.206 xtb=1.866 xti=1.7

3个CCCII器件电源电压为2.5 V,偏置电流均为13 μA ,得到寄生电阻 R_i 为1 k Ω ,取电阻 R 为1 k Ω ,电容 $C_1=C_2=0.1 \mu\text{F}$,计算得出 $\omega=10^6 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$, $Q=1$,令输入交流 $I_m=2 \text{ A}$,仿真结果及特性曲线见图4和图5。

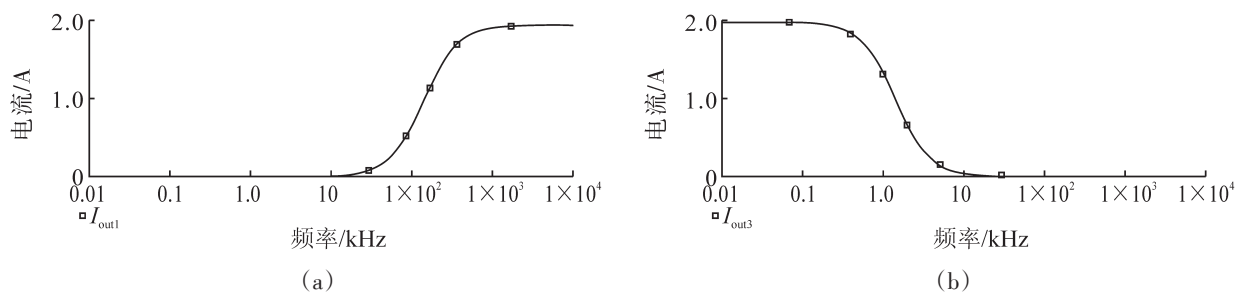


图4 高通与低通幅频特性曲线

Fig.4 High-pass and low-pass amplitude-frequency characteristic curve

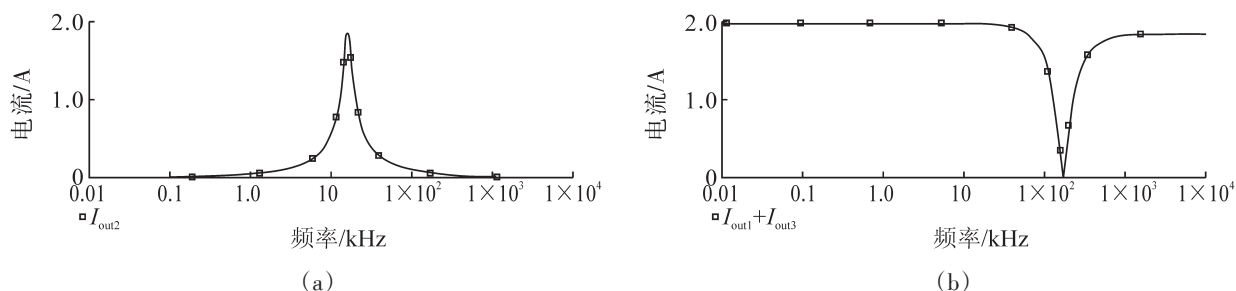


图5 带通与带阻幅频特性曲线

Fig.5 Band-pass and band-stop amplitude-frequency characteristic curve

图4、图5仿真结果波形分别显示为高通、低通和带通、带阻的幅频特性,其中心频率约为140 kHz,与 $\omega=10^6 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$ 的理论数据相近。

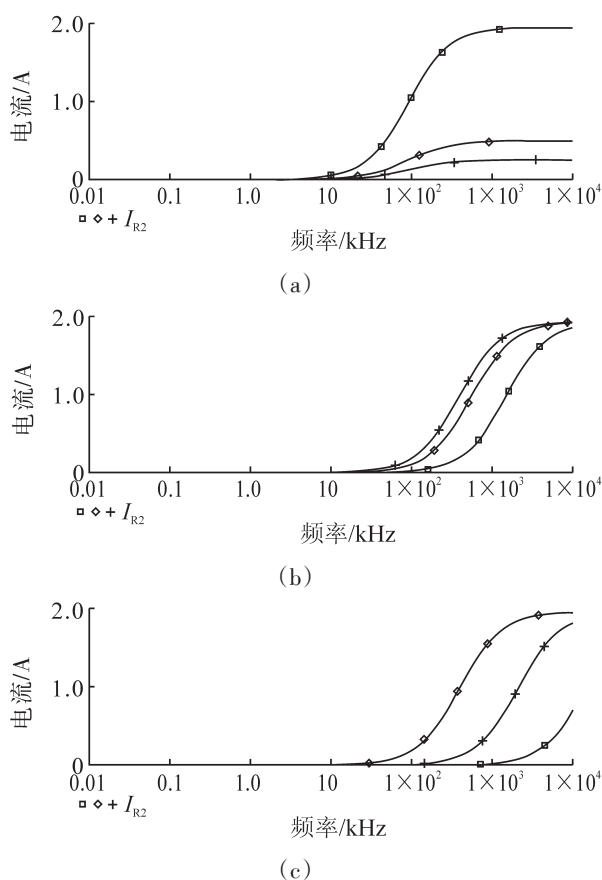
电路中,电路内置参数值的变动对电路的性能有着不同的影响,通过对设计电路的无源器件与 CCCII 偏置电流进行参数扫描分析,以电路高通输出端 I_{out1} 进行检测,可得到参数变化对电路影响的特性曲线。

图6为 $I_{B1}(I_{B2})=1.3\backslash2.6\backslash13 \mu\text{A}$, $C_1=0.1\backslash1\backslash10 \text{ nF}$ 时的高通输出特性曲线。而在分析过程中我们发现 I_{B3} 、 C_2 和 R 对电路影响十分小,可以忽略。

从图中我们可以看出,通过调整 I_{B1} 、 I_{B2} 或者 C_1 的取值,可以达到调整电路的线性、带宽等性能的作用。由于无源器件 C_1 的调节需要通过更换其电路元件来完成,较为麻烦,因此通常利用较为方便的电流源 I_{B1} 、 I_{B2} 来进行调节。将 I_{B1} 用作电路粗调, I_{B2} 用作电路细调,可以很方便的使电路达到最精确最优的性能。

4 结论

在第二代电流控制电流传输器 CCCII 的基础上展开研究,提出了一个基于 CCCII 的电流模式多功能滤波器,设计得到的电路结构较为简单,无源器件较少,便于集成。极点频率和极点 Q 值相互独立,可利用 CCCII 偏置电流进行调节,电调谐性能良好。通过计算机 PSpice 仿真分析验证其能够实现多种滤波功

图6 I_{B1} 、 I_{B2} 、 C_1 取不同值时的高通输出特性曲线Fig.6 High-pass output characteristic curve for different value of I_{B1} , I_{B2} , C_1

能,无源灵敏度低。

通过对两个电路中的有源器件与无源元件进行参数扫描分析,针对元件参数变化给电路线性、带宽等性能带来的影响进行了研究,使电路实现的过程中能够合理选择出各元件参数的最佳取值,达到实际需要的滤波效果。

参考文献:

- [1] CHEN H P, CHU P L. Versatile universal electronically tunable current-mode filter using CCCII[J]. IEICE Electron Express, 2009, 6(2): 122-128.
- [2] 王春华. 新颖的基于CCII的电压模式二阶滤波器[J]. 微电子学, 1998, 28(1): 49-53.
- [3] FABRE A, SUAID O. High frequency applications based on a new current controlled conveyor[J]. IEEE Trans on Circuits and Systems, 1996, 43(2): 82-91.
- [4] 周细凤, 曾荣周. 基于OTA和CCCII的电流模式可调谐滤波器[J]. 计算机工程与应用, 2013, 49(7): 78-84.
- [5] SUWAT MANEEWAN, BANCHAI SREEWIROTE, WINAI JAIKLA. Electronically tunable voltage-mode universal filter using DDCC and CCCII[J]. International Conference on Circuits System and Simulation, 2011, 7(2): 34-42.
- [6] 谭阳红, 贺迅宇, 韦力强, 等. 单输入多输出通用可调滤波器的CCCII实现[J]. 株洲工学院学报, 2006, 20(2): 61-64.
- [7] PAUL S K, PANDEY N. Realization of plus-type CCCII based voltage mode universal filter[C]//Proceedings of IEEE IntSymp on Integrated Circuits, 2007: 119-122.
- [8] 刘燕鹏, 彭良玉, 杨春慧. 基于MOCII和CCCII的三输入单输出滤波器的设计[J]. 现代电子技术, 2012, 35(8): 33-37.
- [9] YUCE E, MINAEI S. ICII-based universal current mode analog filter employing only grounded passive components[J]. Analog Integr Circ Sig Process, 2009, 58(2): 161-169.
- [10] 官雪辉, 陈鹏, 刘海文, 等. 超宽带滤波器的研究现状与进展[J]. 华东交通大学学报, 2011, 28(1): 15-17.
- [11] PANDEY N, PAUL S K. All-pass filter based on CCII- and CCCII-[J]. Int J Electron, 2004, 91(8): 485-489.
- [12] 李妍, 于海勋. 基于新型CCCII电流模式二阶带通滤波器设计[J]. 电子设计工程, 2012, 20(17): 67-71.
- [13] 谭阳红. 基于OrCAD16.3的电子电路分析与设计[M]. 北京: 国防工业出版社, 2011: 103-109.

Design of Adjustable Multi-order Filter Based on CCCII Current Mode

Li Yuanhai, Gao Haisheng

(School of Electrical and Electronic Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: This paper presents a circuit model of multi-functional second-order filter based on CCCII current mode. The whole filter circuit was constituted by only three CCCII and five ground RC elements. The parameters of characteristic elements in the circuit were modified to achieve the functions of low-pass, high-pass, band-pass and band-stop filters on the output side. The proposed model had simple design structure, independently adjustable circuit quality factor and the cutoff frequency, and lower passive sensitivity. Through the PSpice software simulation of the circuit performance, the circuit design was proved accurate and feasible.

Key words: current control mode; CCCII; multi-functional filter; PSpice

(责任编辑 刘棉玲)