

电流模式 N 阶 CCCII(±)-C 低通滤波器的系统设计

彭良玉¹,何怡刚²,黄满池¹,吴 杰²

(1. 湖南师范大学物理与信息科学学院,湖南长沙 410081;2. 湖南大学电气与信息工程学院,湖南长沙 410082)

摘 要: 提出了一种基于多输出电流控制传送器(multiple outputs current controlled conveyor II, CCCII ±)的多环反馈电流模式 n 阶低通滤波器的系统设计方法. 用该方法可产生出多种不同结构的 n 阶低通滤波器. 所有 n 阶滤波器均由 n 个 CCCII ±及 n 个接地电容组成. 面向实际电路,完成了 PSpice 仿真,结果表明所提出的电路方案正确有效.

关键词: 电流模式; 电流控制传送器; 反馈网络; 有源滤波器; 系统设计

中图分类号: TN713 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2003) 08-1234-03

A Systematic Design of Current-Mode Nth-order CCCII(±)-C Low-Pass Filter

PENGLiang-yu¹, HE Yi-gang², HUANG Man-chi¹, WU Jie²

(1. College of Physics and Information Science, Hunan Normal University, Changsha, Hunan 410081, China;

2. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha, Hunan 410082, China)

Abstract: A systematic method of designing multiple-loop feedback current-mode nth-order lowpass filter based on multiple outputs current controlled conveyor is presented. Different kinds of nth-order low-pass filter structure are obtained by this method. The proposed nth-order filter is constructed by n CCCIIs and n grounded capacitors. PSpice simulation for an actual circuit is conducted, and the result shows that the proposed circuit is valid and effective.

Key words: current-mode; current controlled conveyor; feedback network; active filter; systematic design

1 引言

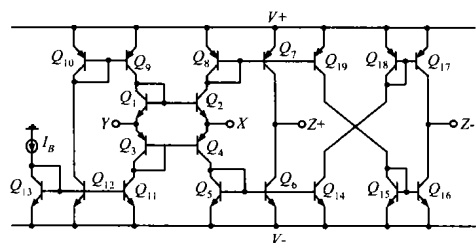
电流传送器(CCI)自问世以来,在模拟电路设计中得到了广泛的应用^[1,2].但由于 CCI 的 X 端存在寄生电阻,所以导致了基于 CCI 的电路产生传输函数误差.基于此,A. Fabre 等人利用双极型晶体管的线性互导(Translinear Loop)特性实现了电流控制传送器^[3,4](Current Controlled Conveyor),且电路结构简单,从而提高了频响,降低了功耗.目前,基于 CCCII 的电流模式二阶滤波器已有一些报道,但对用 CCCII 构成的高阶滤波器的研究明显不足.本文提出了一种基于 CCCII ±的多环反馈电流模式任意阶低通滤波器的系统设计方法.用该方法可以设计多种结构的 n 阶多环反馈低通滤波器.每个滤波电路只需 n 个 CCCII ±和 n 个接地电容元件,无需接任何电阻元件.滤波器的极点角频率可通过调节偏置电流的大小实现电调谐.电路具有设计简单、灵敏度低和模块化的优点.

2 n 阶滤波器的系统设计方法

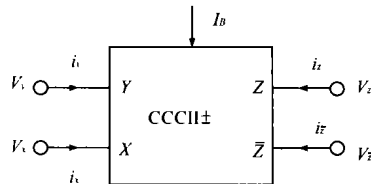
2.1 CCCII ±器件简介

多输出电流控制传送器(CCCII ±)实现原理及电路符号如图 1 所示.其电流传输矩阵为

$$\begin{bmatrix} i_y \\ v_x \\ i_z \\ i_{z^-} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & R_x & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_y \\ i_x \\ v_z \end{bmatrix}, R_x = V_T / (2 I_B) \quad (1)$$



(a) 原理实现



(b) 电路符号

图 1 多输出电流控制传送器(CCCII ±)

式(1)中, $V_T = 26\text{mV}$ (室温), 电阻 R_X 被偏置电流 I_B 控制.

2.2 系统结构框图实现

基于 CCCII ± 的电流模式 n 阶低通滤波器总体结构框图如图 2 所示. 它由前馈网络和反馈网络两部分组成. 前馈网络由 n 个依次相连的 CCCII ± 积分器组成, 反馈网络由各 CCCII ± 的反相端连接至包含本 CCCII ± 在内和它前部的各 CCCII ± 的 Y 输入端的连线组成.

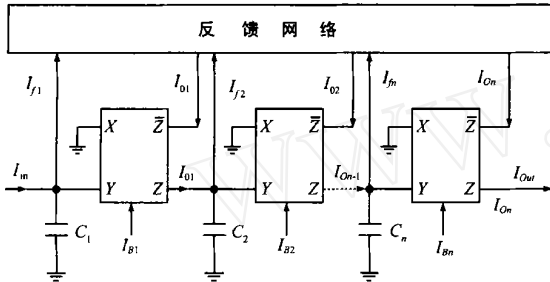


图 2 基于 CCCII ± 的电流模式 n 阶低通滤波器结构框图

2.3 系统电路方程的确定

由图 2 知, 反馈网络方程为

$$I_f = FI_0 \tag{2}$$

其中, $I_0 = [I_{01}, I_{02}, \dots, I_{0n}]^T$, $I_f = [I_{f1}, I_{f2}, \dots, I_{fn}]^T$, 当 $i > j$ 时, $f_{ij} = 0$, 所以 F 为一上三角阵, 即

$$F = \begin{bmatrix} f_{11} & f_{12} & f_{13} & \dots & f_{1n} \\ 0 & f_{22} & f_{23} & \dots & f_{2n} \\ 0 & 0 & f_{33} & \dots & f_{3n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & f_{nn} \end{bmatrix} \tag{3}$$

在图 2 中, 根据 CCCII ± 端口特性, 可列出如下电流方程

$$\left. \begin{aligned} I_{in} - I_{f1} &= S_1 I_{01} \\ I_{01} - I_{f2} &= S_2 I_{02} \\ I_{02} - I_{f3} &= S_3 I_{03} \\ &\dots \\ I_{0n-1} - I_{fn} &= S_n I_{0n} \end{aligned} \right\} \tag{4}$$

其中, $i = R_{xi} C_i$, $R_{xi} = V_T / (2 I_{Bi})$ ($i = 1, 2, \dots, n$), 由式(3)、(4)得

$$\begin{bmatrix} s_1 + f_{11} & f_{12} & f_{13} & \dots & f_{1n-1} & f_{1n} \\ -1 & s_2 + f_{22} & f_{23} & \dots & f_{2n-1} & f_{2n} \\ 0 & -1 & s_3 + f_{33} & \dots & f_{3n-1} & f_{3n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & -1 & s_n + f_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{01} \\ I_{02} \\ I_{03} \\ \dots \\ I_{0n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ \dots \\ 0 \end{bmatrix} I_{in} \tag{5}$$

其中 $I_i = [I_{in}, 0, 0, \dots, 0]^T$

$$A(S) = \begin{bmatrix} s_1 + f_{11} & f_{12} & f_{13} & \dots & f_{1n-1} & f_{1n} \\ -1 & s_2 + f_{22} & f_{23} & \dots & f_{2n-1} & f_{2n} \\ 0 & -1 & s_3 + f_{33} & \dots & f_{3n-1} & f_{3n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & -1 & s_n + f_{nn} \end{bmatrix} \tag{6}$$

$A(S)$ 为滤波器的系统矩阵, 图 2 的系统结构电路方程为

$$I_0 = A(S)^{-1} I_i \tag{7}$$

图 2 电路结构的电流传输函数为:

$$H(S) = I_{out} / I_{in} = I_{0n} / I_{in} = 1 / |A(S)| \tag{8}$$

其中 $|A(S)|$ 为系统矩阵 $A(S)$ 的系数行列式.

3 n 阶滤波器的生成

n 阶滤波器的生成步骤如下: (1) 确定 n 阶滤波器的系统矩阵 $A(S)$; (2) 确定 $A(S)$ 的行列式 $|A(S)|$, 从而求得电流传输函数 $H(S) = 1 / |A(S)|$; (3) 选择不同的反馈系数 f_{ij} , 得出不同结构形式的多环反馈 n 阶滤波电路. 下面以三阶滤波器的设计为例进行说明. 由式(6)得三阶滤波器系统矩阵为

$$A(s) = \begin{bmatrix} s_1 + f_{11} & f_{12} & f_{13} \\ -1 & s_2 + f_{22} & f_{23} \\ 0 & -1 & s_3 + f_{33} \end{bmatrix} \tag{9}$$

由式(8)、(9)得三阶低通滤波器的传输函数

$$H(S) = 1 / [S^3 (s_1 s_2 s_3 + S^2 (s_1 f_{23} + s_2 f_{33} + s_3 f_{11} + s_1 f_{22}) + S (s_1 f_{22} f_{33} + 2 f_{11} f_{33} + 3 f_{11} f_{22} + s_1 f_{23} + s_3 f_{12}) + (f_{11} f_{22} f_{33} + f_{12} f_{33} + f_{11} f_{23} + f_{13})]$$

选择不同的 f_{ij} , 可综合出不同结构形式的三阶低通滤波器.

结构 1: $f_{11} = f_{12} = f_{13} = 1, f_{22} = f_{23} = f_{33} = 0$

$$H(S) = \frac{1}{S^3 (s_1 s_2 s_3 + S^2 (s_1 + s_2 + s_3) + 1)} \tag{11}$$

结构 2: $f_{11} = f_{12} = f_{23} = 1, f_{22} = f_{33} = f_{13} = 0$

$$H(S) = \frac{1}{S^3 (s_1 s_2 s_3 + S^2 (s_1 s_2 + s_1 s_3) + 1)} \tag{12}$$

结构 3: $f_{11} = f_{12} = f_{33} = 1, f_{13} = f_{22} = f_{23} = 0$

$$H(S) = \frac{1}{S^3 (s_1 s_2 s_3 + S^2 (s_1 s_2 + s_2 s_3) + S (s_2 + s_3) + 1)} \tag{13}$$

结构 4: $f_{11} = f_{22} = f_{13} = 1, f_{12} = f_{23} = f_{33} = 0$

$$H(S) = \frac{1}{S^3 (s_1 s_2 s_3 + S^2 (s_1 s_3 + s_2 s_3) + S s_3 + 1)} \tag{14}$$

结构 5: $f_{11} = f_{22} = f_{23} = 1, f_{12} = f_{13} = f_{33} = 0$

$$H(S) = \frac{1}{S^3 (s_1 s_2 s_3 + S^2 (s_1 s_2 + s_2 s_3) + S (s_1 + s_3) + 1)} \tag{15}$$

结构 6: $f_{11} = f_{22} = f_{33} = 1, f_{12} = f_{13} = f_{23} = 0$

$$H(S) = \frac{1}{S^3 (s_1 s_2 s_3 + S^2 (s_1 s_2 + s_2 s_3 + s_1 s_3) + S (s_1 + s_2 + s_3) + 1)} \tag{16}$$

六种不同结构三阶电流模式低通滤波电路如图 3 所示.

从图 3 中可以看出, 三阶滤波器由三个 CCCII ± 和三个接地电容组成, 可进一步推断 n 阶电流模式低通滤波器由 n 个 CCCII ± 和 n 个接地电容组成.

4 计算机仿真

为了证实电路的可行性, 对图 3 中结构 1 电路进行管子级的 PSPICE 仿真模拟, CCCII ± 所用 PNP 管用 Q2N722 实现, NPN 管用 Q2N696 实现, 电源电压取 $\pm 2.5V$. 令 CCCII ± 的偏置

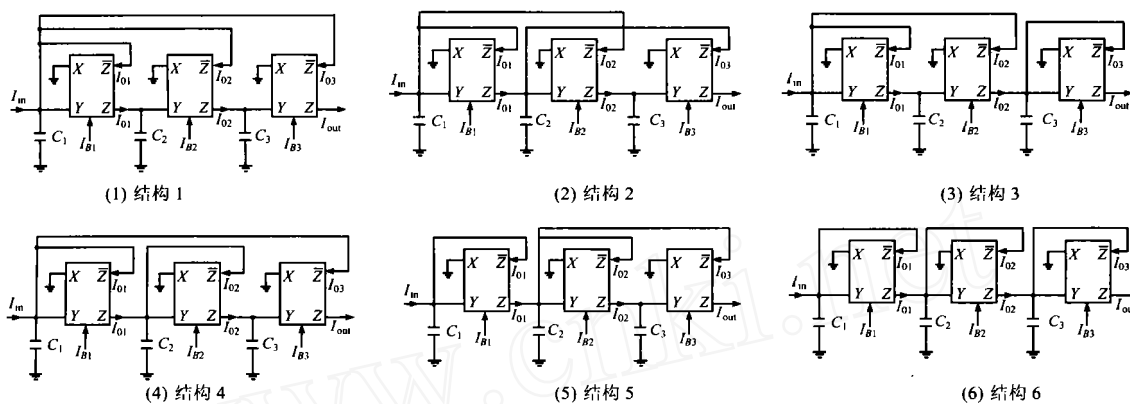


图3 六种不同结构的三阶电流模式低通滤波器

电流均为 $13\mu\text{A}$, $C_1 = C_2 = 1.592\text{nF}$, 输入电流为 1mA . 仿真结果如图4所示, 图4证实了所设计电路的可行性.

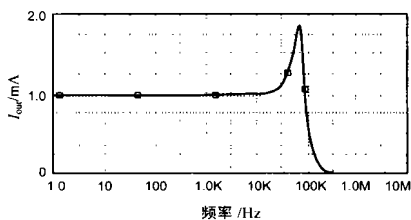


图4 结构1仿真频响

5 结论

提出了电流模式 n 阶 CCCII(±)-C 低通滤波器的系统设计方法, 该方法不仅适用于低阶, 而且适用于高阶低通电流模式滤波器的设计, 设计方法简单、明了, 综合性强. 能产生出多种不同结构的 CCCII(±)-C 多环反馈低通滤波器, 且每种滤波器结构简单, n 阶滤波器只由 n 个 CCCII ± 和 n 个接地电容组成, 无需外接任何电阻, 通过控制偏置电流的大小, 可实现滤波器的极点角频率等参数的电调谐. 每种结构的多环反馈滤波器都易于单片集成.

参考文献:

[1] HIGASHIMURA M, et al. Simulation of lossless floating inductance using two current conveyors and an operational transconductance amplifier [J]. Int. J. Electronics, 1989, 66(4) : 633 - 638.
 [2] HOU C L, et al. New configuration for single-CCII first-order and bi-quadratic current-mode filters [J]. Int. J. Electronics, 1991, 71(4) : 637

- 644.
 [3] FABRE A, et al. High frequency applications based on a new current controlled conveyor[J]. IEEE Trans on CAS (I), 1996, 43(2) : 82 - 91.
 [4] FABRE A, et al. Low power current-mode second-order bandpass IF filter [J]. IEEE Trans on CAS (II), 1997, 44(6) : 436 - 446.

作者简介:



彭良玉 女, 1965 年 9 月生于江西省九江市, 1995 年在湖南大学获理论电工硕士学位, 现为湖南大学电气与信息工程学院博士生, 湖南师范大学电子信息科学系副教授, 研究方向为信号处理和有源滤波器设计, 发表学术论文 40 余篇.



何怡刚 男, 1966 年 12 月生于湖南, 博士, 教授, 博士生导师, 现主要从事模拟集成电路、滤波器、故障诊断等领域的研究工作, 发表学术论文 120 余篇.

黄满池 男, 硕士, 副教授, 主要从事电子及其计算机应用研究工作.

吴杰 男, 教授, 博导, 主要从事电路理论及其应用研究工作.