

具有跳耦结构的电流模式低通滤波器设计¹

肖高标 吴杰 洪澜 尹新

(湖南大学电气工程系 长沙 410082)

摘要 本文讨论了电流模式 RC 梯形结构低通滤波器的一种有源实现方法——跳耦法，以此实现的电流模式低通滤波器采用 CCII，CCI 器件做为有源器件，比相应电压模式电路结构简单，且 RC 元件全部接地。这种跳耦结构和梯形结构一样具有低的元件灵敏度。

关键词 滤波器，梯形结构，跳耦，CC 器件

中图分类号 TN713

1 引言

众所周知，在所有电压模式滤波器结构中 RLC 梯形结构的元件灵敏度最低，基于这种无源模型的有源 RC 梯形结构仍保持同样的低灵敏度。这个结论对电流模式滤波器仍然成立。实现这种有源 RC 梯形结构通常有两种方法：(1) 用 RC 有源网络模拟无源结构中的电感或 FDNR(Frequency-Dependent Negative Resistance)；(2) 直接模拟无源梯形结构中的传输关系，如积分、微分、相加等关系。用 CC II 器件和 RC 元件可以容易实现模拟接地或浮接电感^[1-4]以及接地或浮接 FDNR^[5-8]。这样，用方法(1)实现梯形结构有源 RC 电流模式滤波器的问题已基本得到解决，而用方法(2)实现的梯形结构有源电流滤波器还未见报道。本文以低通滤波器为例，讨论了由这种方法实现的具有跳耦结构的电流滤波器设计方法。所得电路与具有跳耦结构的传统电压模式电路相比有如下优点：(1) 用 CC II 器件实现电流模式积分器、微分器、加法器，结构简单灵活；(2) 所有外接 RC 元件均接地。

2 电流模式跳耦结构实现

不失一般性，考虑图 1 所示梯形结构，串臂用导纳表示，并臂用阻抗表示。在图示参考方向下可列出下列支路关系式：

$$\left. \begin{aligned} V_1 &= Z_1(I_{in} - I_2), \\ I_2 &= Y_2(V_1 - V_3), \\ V_3 &= Z_3(I_2 - I_4), \\ I_4 &= Y_4(V_3 - V_5), \\ V_5 &= Z_5(I_4 - I_6), \\ I_0 &= I_6 = Y_6V_5. \end{aligned} \right\} (1)$$

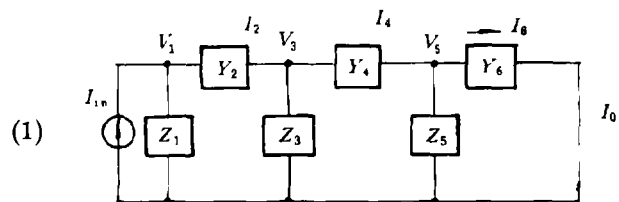


图 1 六阶低通梯形结构无源模型

¹ 1994-03-30 收到，1994-11-20 定稿
机械部教育司科技基金、湖南大学青年基金资助项目

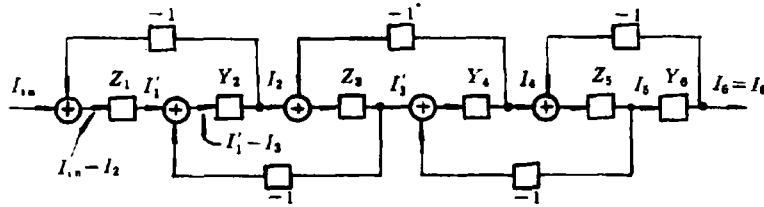


图2 具有跳耦结构的六阶电流模式滤波器框图

消除中间变量就可以得到电流传输函数。为了便于用 CC 器件实现，将中间电压变量 V_1, V_3, V_5 全部除以 R ，标度为电流变量 I'_1, I'_3, I'_5 ，即

$$\left. \begin{aligned} I'_1 &= (Z_1/R)(I_{in} - I_2), & I_2 &= (Y_2R)(I'_1 - I'_3), & I'_3 &= (Z_3/R)(I_2 - I_4), \\ I_4 &= (Y_4R)(I'_3 - I'_5), & I'_5 &= (Z_5/R)(I_4 - I_6), & I_0 = I_6 &= (Y_6R)I'_5. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中 R 为标度电阻。这样代替中间变量之后便得到了一系列电流局部传递函数，记为 $H_i^j(S)$ ， $i = 1, \dots, 6$ ，由 (2) 式得到图 2 所示框图。

3 低通滤波器设计

设六阶低通无源梯形模型如图 3 所示，将电源内阻抗 R_1 和负载电阻 R_2 考虑在最前和最后的导纳臂中。与图 1 对照可得

$$\begin{aligned} H_1^1(S) &= R_1 / [(1 + SR_1C_1)R], & H_1^2(S) &= R / (SL_2), & H_1^3(S) &= 1 / (SRC_3), \\ H_1^4(S) &= R / (SL_4), & H_1^5(S) &= 1 / (SC_5R), & H_1^6(S) &= R / (SL_6 + R_2). \end{aligned}$$

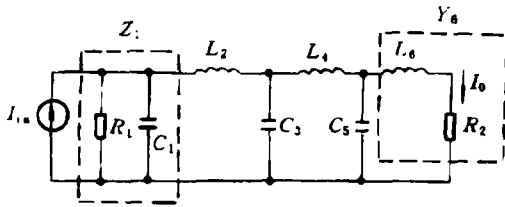


图3 六阶低通电流滤波器

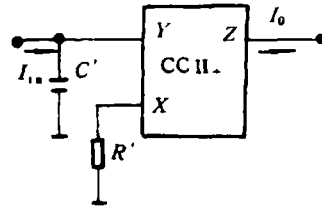


图4

$H_1^2(S), H_1^3(S), H_1^4(S), H_1^5(S)$ 是一简单的电流积分器，可用图 4 所示单 $CC II_+$ 结构实现。图中电流传输函数为 $H_I(S) = 1 / (SR'C')$ 。 $H_1^1(S), H_1^6(S)$ 可用图 5 结构实现，其电流传输比是 $H_I(S) = I_a/I_b = R' / [(1 + SR'C')R_0]$ 。图 2 框图中的相加关系只须将两路电流连在一起即可实现。但级间反馈则需另加一级 CC 器件。由 $CC II_-$ 和 $CC I_-$ 实现的电流负反馈结构示于图 6 中。考虑到 Z'_1 不一定是纯电阻，且需满足匹配条件 $Z'_1 = Z'_3$ ，故用 $CC I_-$ 实现较为可取。

由上述单元电路构成的完整六阶低通电流模式滤波器电路如图 7 所示。比较图 3 与图 7 电路，得设计方程之一：

$$\begin{cases} R'_1 = R_1, & C'_1 = C_1, & R'_2 = R, \\ R'_3 C'_2 = L_2/R, & C'_3 = C_3, & R'_4 = R, \\ R'_5 C'_4 = L_4/R, & C'_5 = C_5, & R'_6 = R, \\ R'_7 / [(1 + S R'_7 C'_6) R'_8] = R / (S L_6 + R_2). \end{cases}$$

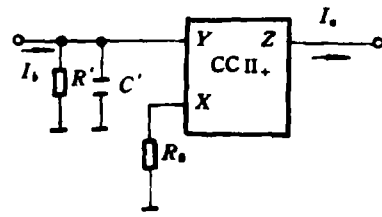


图 5

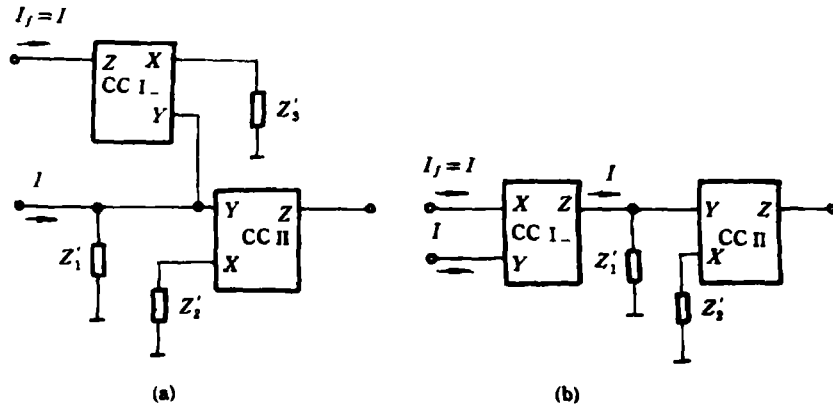


图 6 电流反馈的 CC 实现

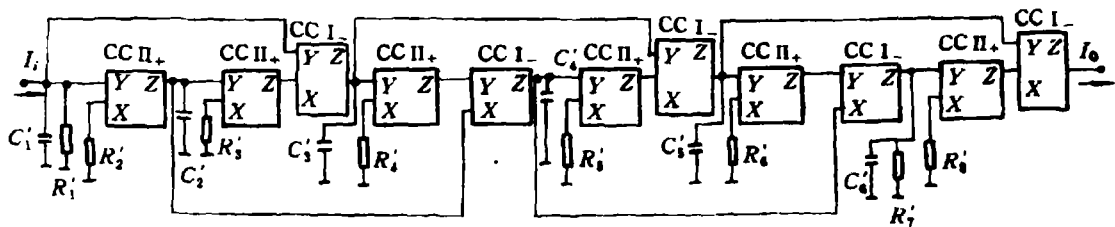


图 7 具有跳耦结构的电流模式六阶低通滤波器

做为例子，本文设计了一个六阶巴特沃思低通电流滤波器，3dB 截止频率为 100kHz。无源电路（参见图 3）元件参数的设计值如下： $R_1 = R_2 = 10\text{k}\Omega$ ， $C_1 = 82\text{pF}$ ， $L_2 = 22.5\text{mH}$ ， $C_3 = 307\text{pF}$ ， $L_4 = 30.7\text{mH}$ ， $C_5 = 225\text{pF}$ ， $L_6 = 8.2\text{mH}$ 。取标度电阻 $R = 10\text{k}\Omega$ ，用上述设计方程可计算出相应无源滤波器参数，标于图 7 中。该设计经 PSPICE 仿真，图 8 给出了仿真结果，证明符合设计要求。

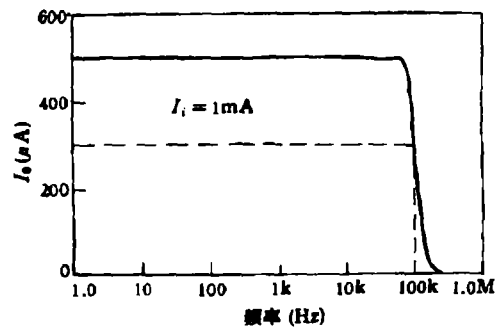


图 8 六阶巴特沃思低通滤波器 PSPICE 模拟结果

4 结 论

本文实现的具有跳耦结构的电流滤波器具有如下特点：(1)用 CC II, CC I 实现各级电流局部传递函数, 结构简单；(2)外接 RC 元件全部接地；(3)用 CC I₋ 实现电流负反馈, 精度较高, 且不需严格匹配；(4)具有梯形结构所共有的低灵敏度。

另外, 只要适当改变图 2 中局部传递函数形式就可以实现具有跳耦结构的高通、带通等其它类型的电流滤波器。这种结构还有其它变型, 本文从略。

参 考 文 献

- [1] Pal K. *Electron. Lett.*, 1981, 17(21): 807-808.
- [2] Senani R. *Electron. Lett.*, 1982, 18(10): 413-414.
- [3] Higashimura M, Fukui Y. *Int. J. Electron.*, 1989, 66(4): 633-638.
- [4] Chun-Li Hou, Yan-Pei Wu, Fu-Chao Lu. *Int. J. Electron.*, 1993, 74(4): 577-586.
- [5] Chun-Li Hou, Rong-Da Chen, Yan-Pei Wu. *Int. J. Electron.*, 1993 74(6): 917-923.
- [6] Pal K. *Electron. Lett.*, 1980, 16(16): 639-641.
- [7] Nandi S, Jana P B, Nandi R. *Electron. Lett.*, 1983, 19(7): 251.
- [8] Senani R. *Electron. Lett.*, 1984, 20(5): 205-206.

DESIGN OF CURRENT-MODE LOW-PASS FILTER WITH LEAPFROG STRUCTURE

Xiao Gaobiao Wu Jie Hong Lan Yin Xin

(Dept. of EE, Hunan University, Changsha 410082)

Abstract Leapfrog technique is discussed and used to realize current-mode lowpass active RC ladder structure. The current-mode lowpass filter realized by this method only takes CCII, CCI as active devices, and all RC elements are grounded, therefore, this structure is simpler than the relating voltage-mode one. It also has low sensitivity as the other ladder structures do.

Key words Filter, Ladder structure, Leapfrog, CC devices

肖高标: 男, 1965年生, 硕士, 讲师. 现从事电路、信号处理和电子技术等方面的教学科研工作.

吴杰: 男, 1957年生, 教授, 从事电路、信号、系统与滤波的教学科研工作.

洪澜: 女, 1961年生, 硕士, 讲师, 从事电路、CAD等方面的教学科研工作.