

DOI:10.19651/j.cnki.emt.1802133

# 基于CFA的六阶切比雪夫有源低通滤波器设计与仿真\*

池思慧 刘宛 董金宁 赵柏树

(湖北大学计算机与信息工程学院 武汉 430062)

**摘要:**结合工程应用中对滤波器的需求,对基于CFA的有源低通滤波器的设计方法进行研究。选用一种典型的电流反馈型运算放大器,在对VCVS滤波电路传递函数分析的基础上,设计了基于CFA的六阶切比雪夫有源低通滤波器,并阐述了根据滤波器性能参数及截止频率确定电路参数的方法。软件仿真结果表明,该有源低通滤波器截止频率约为15 MHz,通带增益为39.796 dB,通带起伏为3.18 dB,过渡带衰减速率为-47.992 dB/倍频,滤波器性能指标与理论一致。该数据表明设计方法有效可行,可为其他有源滤波器的设计提供参考价值。

**关键词:** 电流模电路;电流反馈放大器(CFA);有源低通滤波器;切比雪夫多项式

**中图分类号:** TN713 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1010

## Design and simulation of six-order Chebyshev active low-pass filter based on CFA

Chi Sihui Liu Wan Dong Jinning Zhao Baishu

(School of Computer Science and Information Engineering, Hubei University, Wuhan 430062, China)

**Abstract:** Combined with the requirement of filter in engineering application, the design method of active low-pass filter based on CFA has been research. A typical current feedback operational amplifier has been selected. On the basis of the analysis of the transfer function of the VCVS filter circuit, a six-order Chebyshev active low-pass filter based on CFA has been designed. The circuit parameters have been determined according to the filter performance parameters and cut-off frequency. The software simulation results show that the cut-off frequency of the circuit is about 15 MHz, the pass band gain is 39.796 dB, the pass band fluctuation is 3.18 dB, the attenuation rate of the transition zone is -47.992 dB/frequency doubling, and the performance index of the filter is consistent with the theory. The datas indicate that the design method is effective and feasible, and can provide reference value for design of other active power filter.

**Keywords:** current mode circuit; current feedback amplifier (CFA); active low-pass filter; Chebyshev polynomial

## 0 引言

随着电流模<sup>[1]</sup>电路的高速发展,电子电路的工作频率不断提高,工程应用需要工作在更高频率范围的高频有源滤波器。而传统的有源滤波器受运算放大器带宽的限制,工作频率只能达到数十千赫兹左右<sup>[2]</sup>。近年来,国内外非常重视滤波器的研究,有源滤波器已被证明为集成电路技术应用最广泛的领域之一。文献[3-4]分别介绍其传递函数的推导过程,同时其参数的选取与设计方法已有规范化的流程与参考表格<sup>[5-6]</sup>。但这种设计方法参数选取十分受限。为此,本文选用一种典型电流反馈放大器(current

feedback amplifier,CFA)OPA603进行研究,用级联方式设计了一种六阶切比雪夫低通滤波器,并论述了设计原理、电路结构以及元件参数的选择方法,可实现任意参数有源滤波器的设计。

## 1 切比雪夫低通滤波器设计原理

切比雪夫I型滤波器<sup>[7]</sup>通带等纹波起伏,阻带衰减快。纹波越大,截止频率附近衰减越快,相比于巴特沃斯等<sup>[8-11]</sup>其他类型滤波器,切比雪夫滤波器过渡带具有更好的衰减特性。

切比雪夫I型低通滤波器的系统函数为:

收稿日期:2018-09-20

\* 基金项目:湖北省高等学校大学生实践创新训练计划项目(201710512052)资助

$$H(s) = \frac{1}{\sqrt{1 + \epsilon^2 C_n^2 \left(\frac{s}{j\Omega_c}\right)}} = \frac{K}{\prod_{k=1}^n (s - s_k)} \quad (1)$$

式中:  $\Omega_c$  为截止频率, 表示幅度响应某一衰减分贝数处的截止频率;  $n$  为滤波器的阶数,  $C_n(x)$  称为  $n$  阶切比雪夫多项式, 定义如下:

$$C_n(x) = \begin{cases} \cos[n \arccos(x)], & x \leq 1 \\ \cosh[n \operatorname{arccosh}(x)], & x > 1 \end{cases} \quad (2)$$

$C_n(x)$  可展开成  $x$  的多项式, 如表 1 所示。

表 1 切比雪夫多项式

$n$	$C_n(x)$
0	1
1	$x$
2	$2x^2 - 1$
3	$4x^3 - 3x$
4	$8x^4 - 8x^2 + 1$
5	$16x^5 - 20x^3 + 18x^2 - 1$
6	$64x^7 - 112x^5 + 56x^3 - 7x$

$n \geq 1$  时, 切比雪夫多项式的递推公式为:

$$C_{n+1}(x) = 2xC_n(x) - C_{n-1}(x) \quad (3)$$

对于已知传递函数的  $n$  阶低通滤波器, 可以用级联设计法设计。这种方法是基于将传递函数  $H(s)$  因式分解后化成低阶项乘积的形式来实现的。如果阶次  $n$  为偶数, 那么分解后的式子由  $n/2$  个二阶项组成。

$$H(s) = H_1(s) \times H_2(s) \times \dots \times H_{n/2}(s) \quad (4)$$

令  $\epsilon = 0.509$ , 即通带纹波为 1 dB 时, 由式(1)和式(2)可以得到归一化的六阶切比雪夫低通滤波器的传递函数为:

$$H(s) = K / (s^6 + 0.928s^5 + 1.931s^4 + 1.202s^3 + 0.939s^2 + 0.307s + 0.069) \quad (5)$$

六阶切比雪夫低通滤波器可以通过 3 个二阶低通滤波器级联构成。因此, 可将式(5)分解为 3 个因式乘积的形式, 分解结果如下:

$$H(s) = H_1(s) \times H_2(s) \times H_3(s) = \frac{K_1}{s^2 + 0.464s + 0.125} \times \frac{K_2}{s^2 + 0.340s + 0.558} \times \frac{K_3}{s^2 + 0.124s + 0.951} \quad (6)$$

由式(6)设计 3 个二阶低通滤波器进行级联。

## 2 电路设计及参数选择

压控电压源有源低通滤波器<sup>[12]</sup>结构如图 1 所示。当图 1 中的运放选用 CFA 时, 电路可工作在高频频段。

用 CFA 设计滤波器的方法与使用电压反馈运算放大器(voltage feedback amplifier, VFA)设计电路的传统方法相同, 输入端的电压约束条件和电流约束条件是电路设计的基本准则<sup>[13]</sup>。在图 1 中, 可以求得用等效品质因数  $Q$  表示的传递函数如下:

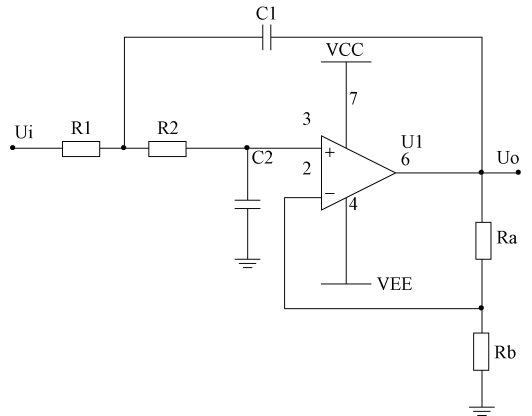


图 1 压控电压源有源低通滤波器

$$H(s) = \frac{K\omega_c^2}{s^2 + \frac{1}{Q}\omega_c s + \omega_c^2} \quad (7)$$

式中:  $Q$  为滤波器的等效品质因数;  $K$  为滤波器的通带增益;  $\omega_c$  为低通滤波器的截止频率。

由式(6)可知, 第 1 节低通滤波器归一化传递函数为:

$$H_1(s) = \frac{K_1}{s^2 + 0.464s + 0.125} \quad (8)$$

将其反归一化, 得到上限截止频率为  $\omega_c$  的低通滤波器传递函数为:

$$H_1(\bar{s}) = \frac{K_1\omega_c^2}{s^2 + 0.464\omega_c s + 0.125\omega_c^2} \quad (9)$$

将式(9)与式(7)对照可得第 1 节低通滤波器品质因数  $Q_1 = 0.761$ 。同理可得第 2 节与第 3 节低通滤波器品质因数分别为  $Q_2 = 2.198$ 、 $Q_3 = 8.004$ 。

将电路参数带入式(7)可得:

$$H(s) = -K / \{R_2 R_3 C_1 C_2 s^2 + [R_2 C_2 + R_1 C_2 + R_1 C_1 (1 - K)]s + 1\} \quad (10)$$

令:

$$\begin{cases} K = 1 + \frac{R_b}{R_a} \\ \omega_c = \frac{1}{\sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}} \\ Q = \frac{\sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}}{(R_1 + R_2)C_2 + R_1 C_1 (1 - K)} \end{cases} \quad (11)$$

即可得式(7)形式的二阶低通滤波器传递函数的表达式。

为方便计算, 令  $C_2 = C_1 = C$ , 则:

$$\begin{cases} K = 1 + \frac{R_b}{R_a} \\ \omega_c = \frac{1}{C \sqrt{R_1 R_2}} \\ Q = \frac{C \sqrt{R_1 R_2}}{R_2 C_2 + R_1 C_1 (2 - K)} \end{cases} \quad (12)$$

由式(12)可知,当截止频率 $\omega_c$ 与通带增益确定时,只需先固定 $C$ 的取值,其他元件参数 $C_2$ 、 $R_3$ 、 $R_2$ 、 $R_1$ 均可确定。电容的取值由滤波器的截止频率决定,如表2所示。

表2 截止频率与电容的取值表

$f_c$	电容 $C$
$\leq 100$ Hz	10 $\mu\text{F}$ ~0.1 $\mu\text{F}$
100 Hz~1 000 Hz	0.1 $\mu\text{F}$ ~0.01 $\mu\text{F}$
1 kHz~10 kHz	0.01 $\mu\text{F}$ ~0.001 $\mu\text{F}$
10 kHz~1 000 kHz	1 000 pF~100 pF
$\geq 1$ 000 kHz	100 pF~10 pF

例如,设计一个上限截止频率为15 MHz,通带增益为

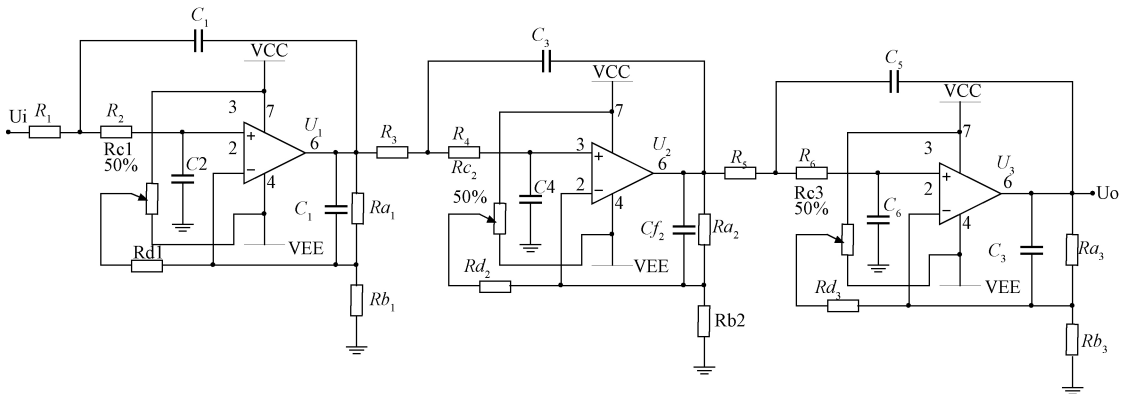


图2 六阶切比雪夫低通滤波器

用软件对图2电路进行仿真,仿真结果如图3所示。

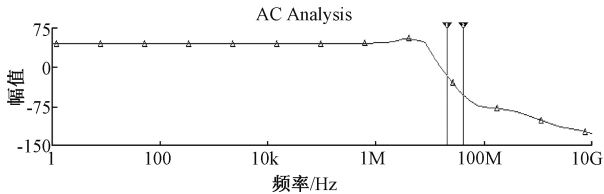


图3 低通滤波器频率响应

由图3可以看出,该六阶切比雪夫低通滤波器的截止频率约为15 MHz,通带增益为39.796 dB,通带起伏为3.18 dB。

不同频率下对应的增益如表4所示。

表4 不同频率对应增益

频率/MHz	20.12	30.25	40.18
增益/dB	-13.25	-36.18	-61.24

由表4可知,过渡带衰减速率为-47.99 dB/倍频。分析仿真数据可知,级联方式设计的六阶切比雪夫低通滤波器的性能指标与理论一致,从而验证了这种设计方法的正确性。

40 dB的六阶切比雪夫低通滤波器,各级元件参数如表3所示。

表3 各级元件参数

级数	Q	K	$R_1/\Omega$	$R_2/\Omega$	$R_a/\Omega$	$R_b/\Omega$	$C_1/pF$	$C_2/pF$
第1级	0.761	5	1 197.75	7 542.99	1 000	4 000	10	10
第2级	2.198	5	719.40	2 804.43	1 000	4 000	10	10
第3级	8.004	4	721.46	1 576.15	1 000	3 000	10	10

### 3 仿真与分析

采用级联方法设计的六阶切比雪夫低通滤波器电路如图2所示。图中 $C_{f1}$ 、 $R_{c1}$ 、 $R_{d1}$ 等元件分别为相位补偿<sup>[14]</sup>电容以及调零<sup>[15]</sup>电阻。

### 4 一个直观检测滤波器性能的例子

为检测滤波器性能,本文在通带和过渡带内各选取一个正弦波信号,通带内正弦波有效值为10 mV,频率为8 MHz,阻带内正弦波有效值为10 mV,频率为20 MHz。将这两个信号叠加,组成一个复合信号,波形如图4所示。将该信号作为输入信号,通过仿真,得到的输出波形如图5所示。

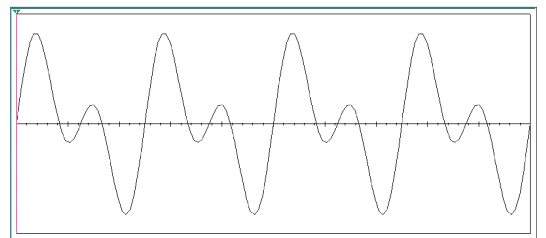


图4 复合信号波形

由图5可知,输出信号幅值为1.418 V,频率为7.983 MHz。通带增益约为40 dB,阻带内信号得到了有效地抑制,最终的输出接近标准的正弦波。仿真结果表

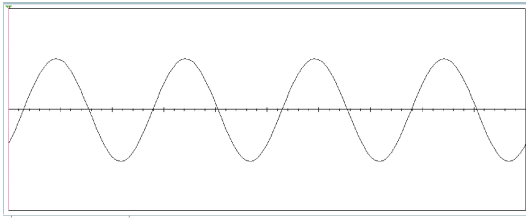


图 5 输出信号波形

明,设计的六阶低通滤波器性能达到设计要求。

## 5 结 论

1) 基于 CFA 的有源滤波器可以工作在高频频段(15 MHz 以上)。

2) 从数学角度来说,各部分级联的顺序是没有联系的。然而在实际应用中,由于高  $Q$  节中可能存在信号相位,为了避免动态范围的损失和滤波器的精度降低,可以把各节按  $Q$  值升高的顺序级联在一起。但是,高  $Q$  模块中任何落在谐振峰值处的噪声都可能被显著放大。因此,最优的级联顺序应该根据实际情况进行调整。

3) 切比雪夫 I 型滤波器纹波越大,截止频率处衰减越快。相比于巴特沃斯等其他类型滤波器,切比雪夫滤波器过渡带具有更好的衰减特性。

4) 由式(12)可知,增益和品质因数取决于元件的比值,截止频率取决于元件的乘积。由于元件容差和放大器的非理想特性,一个实际的滤波器有可能偏离设计的期望值。可按如下方式进行调谐:先调节  $R_1$  获得要求的  $W_c$ ,再调节  $R_0$  获得要求的  $Q$ 。这种调节方式会改变滤波器的通带增益,但并没有影响其频率特性。

## 参考文献

- [1] 彭良.基于 CFA 的运算电路设计与仿真[J].科技风,2018(13):87.
- [2] 阎群,李擎,崔家瑞,等.多重反馈二阶有源低通滤波器优化设计与仿真[J].现代电子技术,2018,41(14):14-18.
- [3] 刘小群.基于 Multisim 的四阶有源低通滤波器的设计与仿真[J].新技术新工艺,2011(6):34-36.

- [4] D.E.约翰逊,J.L.希尔伯恩.有源滤波器的快速实用设计[M].北京:人民邮电出版社,1983.
- [5] J.L.希尔伯恩.有源滤波器设计手册[M].北京:地质出版社,1980.
- [6] 龚作豪,沈君凤,切比雪夫低通滤波器的仿真设计[J].信息通信,2014(8):54-55.
- [7] 汪宇,查明,李纵,等.巴特沃斯型低通滤波器的归一化设计[J].舰船电子工程,2018,38(1):61-64.
- [8] SHIBENDU M, SUMAN K S, RAJIB K, et al. Optimal design of fractional order low pass Butterworth filter with accurate magnitude response [J]. Digital Signal Processing, 2018,72:96-114.
- [9] 苗汇静,谭博学,徐秀美.8 阶贝塞尔低通滤波器精确设计及应用[J].电子技术应用,2012,38(7):68-71.
- [10] 李娟娟,傅世强,孙爽.一种椭圆函数微带低通滤波器的设计与实现[J].电子科技,2015,28(11):69-70,74.
- [11] 高明甫,杨勇,孔令斌.二阶压控电压源低通滤波器设计[J].电子技术,2010,47(3):73-75.
- [12] 丰豪,王雅洁,赵柏树.基于 CFA 的运算电路设计与仿真[J].电子技术应用,2017(6):56-59.
- [13] 朱朝文,袁海文,郭鑫,等.基于相位滞后补偿的有源电力滤波器性能提高研究[J].电子科技大学学报,2016,45(3):393-398.
- [14] 缪英武.集成放大器及相关模拟电路失真特性研究[D].成都:电子科技大学,2012.
- [15] 赛尔吉欧·弗朗哥.基于运算放大器和模拟集成电路的电路设计[M].第 4 版.西安:西安交通大学出版社,2017.

## 作者简介

池思慧,本科生,主要研究方向为电子电路设计。

E-mail: 2697760948@qq.com

刘宛,本科生,主要研究方向为电子电路设计。

E-mail: 2735908819@qq.com

董金宁,本科生,主要研究方向为电子电路设计。

E-mail: 1602089895@qq.com

赵柏树(通信作者),教授,主要研究方向为电子电路设计。

E-mail: zhaobaishu03@126.com