

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2015.09.026

基于负反馈的低通滤波器设计

王腾飞¹, 王腾帅², 张宗艳³

(1. 大同煤炭职业技术学院 机电工程系, 山西 大同 037000; 2. 黑龙江科技大学 研究生学院, 黑龙江 哈尔滨 150027; 3. 上海南自科技股份有限公司, 上海 200333)

摘要: 针对巴特沃斯和切比雪夫低通滤波器的特性缺陷问题, 对其幅频特性、滤波效果、负反馈原理等方面进行了分析与研究, 提出了一种基于负反馈原理的低通滤波器设计方法, 对电路的转移函数进行了理论推导, 与低通滤波器的转移函数对比, 得出了电路参数与元件值的对应关系, 并利用软件仿真确定元件参数的范围, 进一步通过实验细化参数, 直至满足设计要求指标。实验结果表明, 相比较传统的低通滤波器而言, 基于负反馈的低通滤波器有更好的截止特性和频率特性、有更陡的衰减特性、通带内的频率特性更平坦, 能够满足实际的需要。

关键词: 低通滤波器; 负反馈; 幅频特性; 逼近函数

中图分类号: TP2; TN8

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2015)09-1267-04

Design of low-pass filter based on negative feedback

WANG Teng-fei¹, WANG Teng-shuai², ZHANG Zong-yan³

(1. Department of Mechanical and Electrical Engineer, Datong Vocational and Technical College of Coal, Datong 037000, China; 2. Graduate School, University of Science & Technology of Heilongjiang, Harbin 150027, China; 3. Shanghai Nanzi Science & Technology Co., Ltd., Shanghai 200333, China)

Abstract: Aiming at the problem of the characteristics shortcomings of Butterworth and Chebyshev low-pass filters, the amplitude frequency characteristic, the filtering effect and the principle of negative feedback were analyzed and researched, a design method of low-pass filter based on the principle of negative feedback was investigated, The transfer function of the design circuit was theoretically deduced, the transfer function was compared with that of low-pass filter, the relations between the circuit parameters and component values was established, and the method of software simulation to confirm the approximate range of the parameters was presented, so as to meet the requirement of the design, the parameters was adjusted constantly. The results indicate that the cut-off characteristics and frequency of low-pass filter circuit based on negative feedback is better, the fading characteristic is steeper, and the frequency band is smoother, which can meet the actual needs.

Key words: low pass filter; negative feedback; amplitude frequency characteristics; function approximation

0 引 言

随着无线通信设备的广泛应用, 声音、图像和数据等被很好地进行远距离传送。低通滤波器作为通信系统的发射端前级, 是主要的选频装置, 主要用于抑制高频信号, 通过低频信号, 提高信号的传输度, 因此低通滤波器是通信系统的一个重要部件, 其性能的优劣直接影响着通信性能的好坏^[1-2]。除此之外, 滤波器还被广泛应用于航天、雷达、电子对抗、仪器仪表等系统

中^[3], 其设计方法和特性分析的研究工作越来越重视, 滤波器已经成为众多设计中的关键技术之一。

理想的低通滤波器可以使所有低于截止频率的信号顺利地通过, 而将所有高于截止频率的信号无限地衰减。然而, 这种理想的特性在实际当中是无法实现的, 所有的电路设计只能尽量去逼近理想特性。研究者所选择的逼近函数不同, 获得的响应也不同。“巴特沃斯响应”带通滤波器和“切比雪夫响应”带通滤波器是目前使用较多的低通滤波器。巴特沃思滤波器的

通带响应平坦,接近 DC (直流)信号,对于保持增益的平坦性非常重要,但衰减特性差。而“切比雪夫响应”滤波器衰减特性好,但对电路元件的变化不敏感,对电路元件的要求极高^[4-5]。

针对传统低通滤波器存在的特性缺陷,本研究将负反馈理论引入低通滤波器设计中,设计一种基于负反馈原理的低通滤波器。为了寻求电路元件参数的合适值,笔者采用 Pspice 软件进行电路仿真,初步确定参数值的大致范围,在此基础上,搭建了实际电路进行实验,通过细致地调整电路参数,直至能够满足实际的特性要求。

本研究通过研究传统低通滤波器的频率特性、基于负反馈的低通滤波器设计等问题,为低通滤波器的进一步改进设计提供一定的理论参考依据。

1 传统低通滤波器的特性分析

1.1 巴特沃斯滤波器的特性

巴特沃斯低通滤波器的平方幅频特性响应函数为:

$$|H(j\omega)|^2 = A(\omega^2) = \frac{1}{1 + \left(\frac{\omega}{\omega_c}\right)^{2N}} \quad (1)$$

式中: ω_c —滤波器的截止频率, N —滤波器的阶数。

通过用 Matlab 软件作出巴特沃斯滤波器的平方幅频特性曲线如图 1 所示。

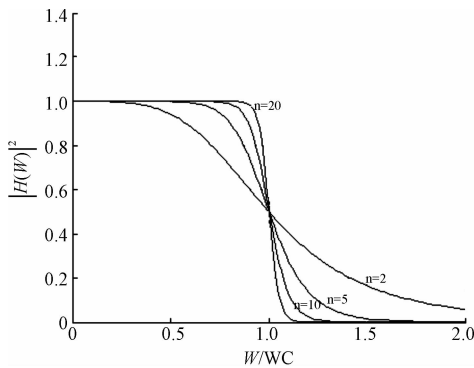


图 1 巴特沃斯滤波器的平方幅频特性曲线

该滤波器的特点为:在低频通带内的幅频平方特性平坦,随着频率的增大,响应的平滑度下降;滤波器的阶数越高,频率特性越接近矩形,滤波效果越好。

1.2 切比雪夫滤波器的特性

切比雪夫低通滤波器的平方幅频特性响应函数为:

$$|H(j\omega)|^2 = A(\omega^2) = \frac{1}{1 + \varepsilon^2 C_N^2\left(\frac{\omega}{\omega_c}\right)} \quad (2)$$

式中: ω_c —滤波器的截止频率; N —滤波器的阶数; ε —小于 1 的正数,表示低频通带范围内的幅值纹波情况;

$C_N^2\left(\frac{\omega}{\omega_c}\right)$ —切比雪夫多项式,定义为:

$$C_N^2(x) = \begin{cases} \cos(N\cos^{-1}(x)) & |x| \leq 1 \\ \cosh(N\cosh^{-1}(x)) & |x| > 1 \end{cases} \quad (3)$$

通过用 Matlab 软件作出切比雪夫低通滤波器的特性曲线如图 2 所示。

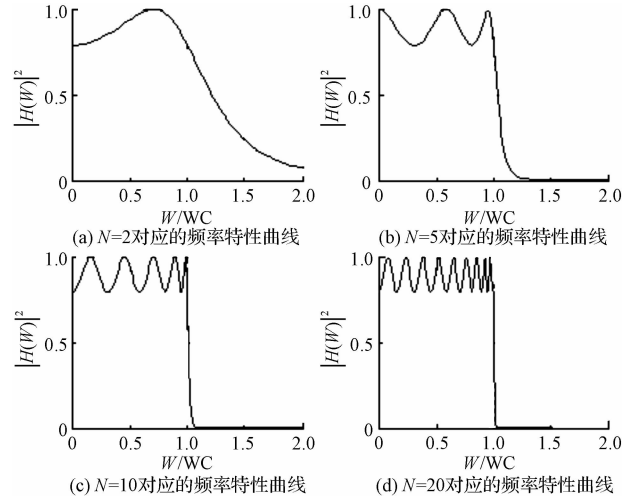


图 2 切比雪夫滤波器的平方幅频特性曲线

该滤波器的特点为:在低频通带内存在着波纹波动,在高频阻带内下降,衰减特性明显,滤波器的阶次越高,频率特性越接近矩形,滤波效果越好。同巴特沃斯滤波器相比,在相同的阶数下,切比雪夫滤波器的过渡带更窄,但这种特性是以牺牲低频通带内的平坦性为代价的^[6-7]。这种滤波器适用于需要快速衰减而不允许在阻带内存在波动的信号电路中。

2 基于负反馈的低通滤波器设计

负反馈是控制论的重要概念,是指将系统的输出量返回到输入端,使返回量起到与输入量相互抵消的作用,使系统的误差趋近于零或为零,使得系统趋于稳定。负反馈在运算放大器中获得了广泛的应用,它采用电压或电流取样,克服了系统开环增益的影响,改变了放大器的频率特性,使得运算放大器的闭环增益趋于稳定值^[8-9]。利用负反馈,还可以使得运算放大器的频带范围变宽,幅频特性变得比较平坦。

为了克服上述低通滤波器存在的缺陷,本研究提出了一种基于负反馈的低通滤波器电路,所设计的电路如图 3 所示。

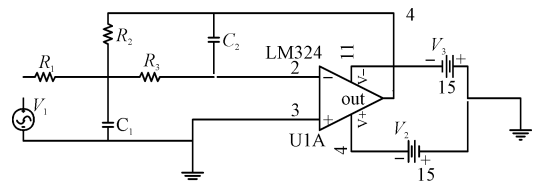


图 3 具有负反馈结构的低通滤波器电路

根据节点电压法知:

$$\begin{cases} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + sC_1\right)V_1(s) - \frac{1}{R_1}V_i(s) - \\ \frac{1}{R_3}V_2(s) - \frac{1}{R_2}V_o(s) = 0 \\ V_2(s) = 0 \\ \left(\frac{1}{R_3} + sC_2\right)V_2(s) - \frac{1}{R_3}V_1(s) - sC_2V_o(s) = \\ 0 \Rightarrow V_1(s) = -sR_3C_2V_o(s) \end{cases} \quad (4)$$

根据上述方程组可求得电路的转移函数为:

$$H(s) = \frac{V_o}{V_i} = -\frac{\frac{1}{R_1}}{s^2R_3C_1C_2 + s\left(\frac{R_3C_2}{R_1} + \frac{R_3C_2}{R_2} + \frac{R_3C_2}{R_3}\right) + \frac{1}{R_2}}{-\frac{1}{R_1R_3C_1C_2}} = \frac{1}{s^2 + s\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}\right)\frac{1}{C_1} + \frac{1}{R_2R_3C_1C_2}} \quad (5)$$

低通滤波器的转移函数表达式为:

$$H(s) = H_0 \frac{\omega_p^2}{s^2 + \frac{\omega_p}{Q}s + \omega_p^2} \quad (6)$$

将上述式(5,6)进行比较,可得电路参数与元件值的对应关系如下:

$$\omega_p = \frac{1}{\sqrt{R_2R_3C_1C_2}} \quad (7)$$

$$\frac{1}{\omega_p Q} = \left(\frac{R_2R_3}{R_1} + R_2 + R_3\right)C_2 \quad (8)$$

$$Q = \frac{R_1}{(R_1R_2 + R_2R_3 + R_3R_1)C_2\omega_p} = \frac{R_1 \sqrt{R_2R_3C_1C_2}}{(R_1R_2 + R_2R_3 + R_3R_1)C_2} \quad (9)$$

$$|H_0| = \frac{R_2}{R_1} \quad (10)$$

3 负反馈低通滤波器电路参数配置

本研究采用 Pspice 软件进行电路仿真,预先确定电路参数的大致范围。然后通过实验来验证设计电路的可行性^[10-13],所设计的电路参数为:

$$\begin{cases} Q = \frac{1}{3} \\ \omega_p = 5 \times 10^4 \text{ rad/s} \end{cases} \quad (11)$$

为了减小分立元件的分散性,取 $R_1 = R_2 = R_3 = R$, $C_1 = C_2 = C$,可得:

$$\omega_p = \frac{1}{\sqrt{R_2R_3C_1C_2}} = 5 \times 10^4 \quad (12)$$

$$R = \frac{1}{\omega_p C} = \frac{1}{5 \times 10^4 \times 10^{-9}} = 20 \text{ k}\Omega \quad (13)$$

$$Q = \frac{R_1 \sqrt{R_2R_3C_1C_2}}{(R_1R_2 + R_2R_3 + R_3R_1)C_2} = \frac{R^2C}{3R^2C} = \frac{1}{3} \quad (14)$$

$$H_0 = \frac{R_2}{R_1} = 1 \quad (15)$$

3.1 电阻 R_1 对幅频特性的影响

由上述公式知 R_1 对 ω_p 没有影响,但是改变 R_1 的数值会影响中心频率的幅度和大小, R_1 越大,中心频率的幅度会越大。当电路中的其他参数不作改变时, R_1 取 10 k Ω ,50 k Ω ,100 k Ω ,150 k Ω ,200 k Ω 时对应的幅频特性曲线 a 、 b 、 c 、 d 、 e 如图 4 所示。

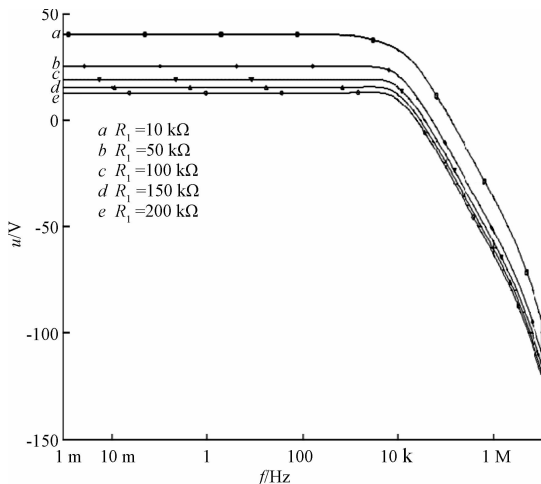


图4 电阻 R_1 变化时的低通滤波器幅频特性曲线

从图 4 可以看出: R_1 的数值变化时, Q 与 ω_p 几乎不发生变化,因此没有必要在电路中改变 R_1 的预设值,需要对 C_1 与 C_2 进行分析。

3.2 电容 C_1 对幅频特性的影响

当电路中的其他参数不作改变时, C_1 取 2 nF,20 nF,200 nF,400 nF,600 nF 时对应的幅频特性曲线 a 、 b 、 c 、 d 、 e 如图 5 所示。

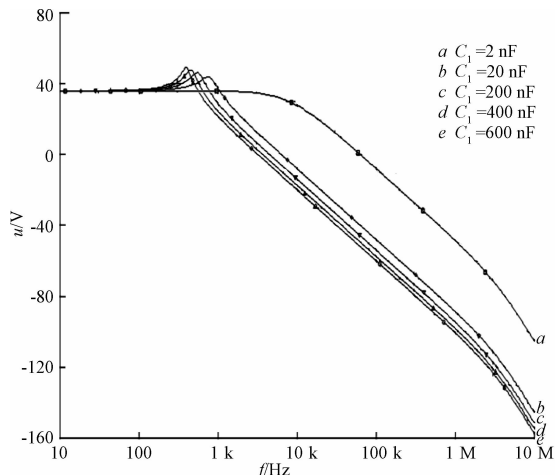


图5 电容 C_1 变化时的低通滤波器幅频特性曲线

由 $\omega_p = 5 \times 10^4 \text{ rad/s}$,知 $f_p = 7961.78 \text{ Hz}$ 。从图 5

可以看出: C_1 越大, Q 越大,低频通带的带宽越窄,中心频率的幅度越大,越远离 f_p ,为此 C_1 的数值不宜过大,适中效果较为理想。

3.3 电容 C_2 对幅频特性的影响

当电路中的其他参数不作改变时, C_2 取 0.001 nF, 1.001 nF, 2.001 nF, 4.001 nF, 6.001 nF 时对应的幅频特性曲线 a 、 b 、 c 、 d 、 e 如图 6 所示。

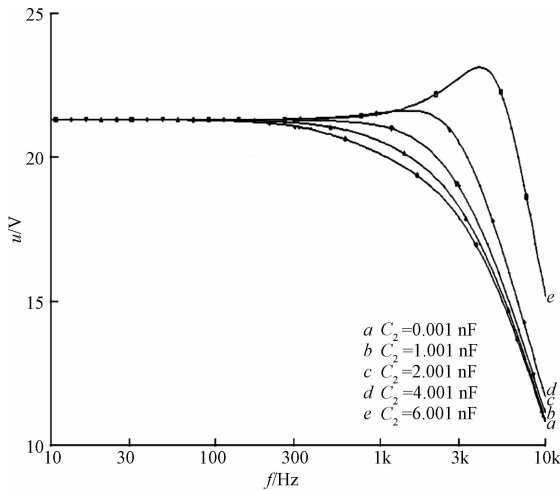


图 6 电容 C_2 变化时的低通滤波器幅频特性曲线

从图 6 可以看出: C_2 越小, Q 越大,低频通带的带宽越宽,中心频率的幅度越大,越远离 f_p ,为此 C_1 的数值不宜过小,适中效果较为理想。

3.4 合适电路参数下的结果分析

本研究通过上述的 Pspice 软件仿真,大致确定了电路参数的取值范围。通过反复搭建实际电路得到:当 $R_1 = 2.3 \text{ k}\Omega$, $R_2 = R_3 = 20 \text{ k}\Omega$, $C_1 = 100 \text{ nF}$, $C_2 = 0.001 \text{ nF}$,其他参数不变时,电路的极点频率 $f_p \approx 7953.28 \text{ Hz} \approx 7961.78 \text{ Hz}$,满足了设计的要求。

由此可见:仅改变 R_1 、 C_1 、 C_2 中的某一个参数很难满足设计的要求,在设计基于负反馈的低通滤波器电路时,可以根据实际要求来改变电路元件的参数,达到实现所需滤波器优化设计的要求。

4 结束语

本研究提出的基于负反馈低通滤波器的设计与参数确定方法得到了实验验证,实验结果表明该方法可

以满足本研究的设计要求,该方法不但可以被应用于滤波器的电路设计中,而且对微波和毫米波无线通信系统也有一定的借鉴作用,为今后的研究提供了重要的参考依据。

随着高性能元件的不断出现,低通滤波器的应用范围会被拓展到更多的领域和更高的频率范围,可以预见,在下一阶段,低通滤波器的设计将朝着集成化、高性能和宽阻带的方向进行发展。

参考文献 (References):

- [1] 崔海飞. 高性能小型化微带低通滤波器的设计[D]. 南京:南京理工大学电光学院,2013.
- [2] 吕绪敬. 宽阻带微带低通滤波器的设计与研究[D]. 成都:电子科技大学自动化工程学院,2013.
- [3] KUO J T, SHIH E. Wideband bandpass design with three-line microstrip structures [J]. *IEEE Trans MTT-S Int. Microwave*, 2001, 149 (56): 1593-1596
- [4] 赵晓群, 张 洁. 巴特沃斯低通滤波器的实现方法研究[J]. 大连民族学院学报, 2013, 15 (1): 72-75.
- [5] 徐志国, 杨 娟. 基于 WEBENCH 的巴特沃斯低通滤波器的设计[J]. 金陵科技学院学报, 2014, 30 (4): 30-33.
- [6] 林开司, 张 露, 林开武. 巴特沃斯低通滤波器优化设计与仿真研究[J]. 重庆工商大学学报:自然科学版, 2014, 31 (6): 58-62.
- [7] 龚作豪, 沈君凤. 巴特沃斯低通滤波器的仿真设计[J]. 信息通信, 2014, 29 (7): 40-41.
- [8] ZHU L, WANG H. Ultra-wideband bandpass filter on aperture-backed microstrip line [J]. *Electronics Letters*, 2005, 41 (18): 1015-1016.
- [9] 李庆东. 新型超宽带滤波器的设计与研究[D]. 成都:电子科技大学自动化工程学院, 2013.
- [10] 许 勇. 面向对象的机电系统结构及行为建模[J]. 机电工程, 2011, 28 (1): 94-98.
- [11] 胡 政, 温熙森. 机电一体化系统建模与仿真方法[J]. 机电工程, 1998, 28 (1): 94-98.
- [12] 曹湘琪, 姚 斌, 郑勤红, 等. 圆柱形微波加热器的建模与仿真优化[J]. 包装与食品机械, 2014 (3): 25-27.
- [13] 欧青立, 赵平荣, 游 森. 基于三次非线性记忆阻器的有源低通滤波器[J]. 应用科技, 2014, 41 (5): 6-10.

[编辑:张 豪]

本文引用格式:

王腾飞, 王腾帅, 张宗艳. 基于负反馈的低通滤波器设计[J]. 机电工程, 2015, 32 (9): 1267 - 1270.

WANG Teng-fei, WANG Teng-shuai, ZHANG Zong-yan. Design of low-pass filter based on negative feedback [J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2015, 32 (9): 1267 - 1270.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>