

无限增益多路反馈带通滤波器的研究

熊俊俏, 戴璐平, 刘海英

(武汉工程大学 电气信息学院, 湖北 武汉 430205)

摘要: 本文通过对无限增益多路反馈滤波器的电路分析, 针对两种特殊情形, 提出了一种简单的元件参数选取新方法; 同时, 通过具体的级联滤波器实验研究, 分析了该滤波器动态范围下降的原因, 提出了改善的方法, 并进一步归纳了滤波器级联设计中的指标分配原则。本文介绍的方法和原则, 对同类滤波器的设计具有一定的参考价值。

关键词: MFB; 反馈滤波器; 信噪比

中图分类号: TN713+.8

文献标识码: A

文章编号: 1008-0686(2013)03-0084-03

Study on the Infinite Gain Multiple Feedback Band-pass Filter

XIONG Jun-qiao, DAI Lu-ping, LIU Hai-ying

(College of Electrical and Electronic Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430205, China)

Abstract: According to the theoretical analysis of infinite gain multiple feedback band-pass (MFB) filter circuit, a new simple method how to choose component is proposed for two special cases in this paper. At the same time, through the experimental study on the specific cascaded filter dynamic range, the reason for its decline is analyzed, and the methods how to its expansion is put forward too. Further, the criteria for allocation of its indicators is summarized for cascaded filter in this paper. All these have a certain reference value for the similar filter design.

Keywords: MFB; feedback filter; signal to noise ratio

无限增益多路反馈带通 MFB 滤波器具有极高的选择性和陡峭的过渡带, 在信号滤波中得到广泛应用。文献[1-2]分别介绍了其传输函数的推导过程, 同时其参数的选取与设计方法已有规范化的流程与参数参考表格^[3-4]。传统的滤波器设计并没有考虑电路参数与信噪比的关系, 这会影响滤波器性能的优化。本文通过分析 MFB 滤波器的参数与指标关系, 采用近似处理的方法, 提出了一种兼顾滤波器指标与信噪比的电路参数选取方法。

1 MFB 滤波器电路与性能分析

无限增益多路反馈带通 MFB 滤波器电路如图

1 所示。图中 R_3 和 C_1 构成两个反馈支路, 反馈强弱与信号频率有关。理想运算放大器的增益为无穷大, 因此称为无限增益多路反馈滤波器。增加 RC 环节后, 滤波器的过渡带变窄, 衰减斜率增大。

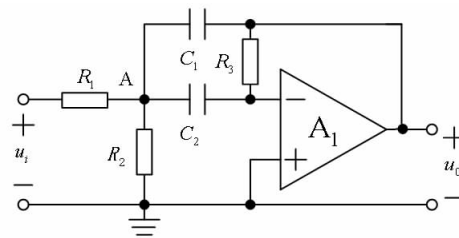


图1 无限增益多路反馈滤波器电路

令图1中A点电位为 V_A , 则节点电位方程为

收稿日期: 2012-12-03; 修回日期: 2013-05-01

作者简介: 熊俊俏(1966-), 男, 硕士, 副教授, 主要从事电子技术的教学与研究工作, E-mail: xiongjunqiao@sina.com

戴璐平(1969-), 女, 硕士, 讲师, 主要从事电子技术的教学与研究工作, E-mail: xiaoyv27@163.com

刘海英(1976-), 女, 硕士, 副教授, 主要从事电子技术的教学与研究工作, E-mail: Liuhaiying1976@163.com

$$(1/R_1 + 1/R_2 + j\omega C_1 + j\omega C_2) V_A - u_i/R_1 - j\omega C_1 u_0 = 0 \quad (1)$$

根据理想运算放大器反向输入端的“虚断”概念, 可得

$$j\omega C_2 V_A + u_0/R_3 = 0 \quad (2)$$

将上式代入式(1), 得到滤波器的传输函数为

$$H(j\omega) = u_0/u_i = R_2/R_1 \{ j [(1/R_1 + 1/R_2) / (\omega C_2 - \omega C_1 R_3)] - (C_1 + C_2) / C_2 \} \quad (3)$$

观察上式, 令其虚部为零, 得到滤波器的中心频率为

$$f_0 = \sqrt{(R_1 + R_2) / C_1 C_2 R_1 R_2} / 2\pi \quad (4)$$

中心频率所对应的放大倍数为

$$H(jf_0) = -R_3 / (1 + C_1 / C_2) R_1 \quad (5)$$

对应的品质因数 Q 为

$$Q = C_2 \sqrt{(R_1 + R_2) R_3 C_1 / C_2 R_1 R_2} / (C_1 + C_2) \quad (6)$$

为设计方便, 通常将电容取值为 $C_1 = C_2 = C$, 其对应的参数为

$$\left. \begin{aligned} f_0 &= \sqrt{(R_1 + R_2) / R_1 R_2} / 2\pi C \\ H(jf_0) &= -R_3 / 2R_1 \\ Q &= \sqrt{(R_1 + R_2) R_3 / R_1 R_2} / 2 \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

根据上式可见, 电容 C 的大小并不影响带通滤波器的增益 $H(jf_0)$ 和品质因数 Q , 而电阻 R_3 的变化会同时影响三个指标, R_1 、 R_2 的并联值则影响滤波器的中心频率和品质因数, R_2 不影响通带增益。

2 MFB 滤波器参数的选择

传统的无限增益多路反馈带通滤波器电路参数采用查表法选取^[3,4]。本文通过分析, 提出一种简洁的选取电阻值方法。

2.1 电容 C 的选取

电容的选取根据工作频率选择, 依靠经验值决定, 如表1所示。

表1 中心频率与电容的取值

中心频率 f_0	电容 C
$\leq 100\text{Hz}$	$(10 \sim 0.1) \mu\text{F}$
$(100 \sim 1000) \text{Hz}$	$(0.1 \sim 0.01) \mu\text{F}$
$(1 \sim 10) \text{kHz}$	$(0.01 \sim 0.001) \mu\text{F}$
$(10 \sim 100) \text{kHz}$	$(1000 \sim 100) \text{pF}$
$\geq 100\text{kHz}$	$(100 \sim 10) \text{pF}$

2.2 电阻的取值

由于滤波器的中心频率 f_0 和品质因数 Q 均与电阻 R_1 、 R_2 的并联值有关, 现在分别考虑 $R_1 \gg R_2$ 和

$R_1 \ll R_2$ 时电阻参数的选取。

(1) 满足 $R_1 \gg R_2$ (工程上常取 $R_1 \geq 10R_2$) 则式(7)可改为

$$\left. \begin{aligned} f_0 &= \sqrt{1/R_2 R_3} / 2\pi C \\ H(jf_0) &= -R_3 / 2R_1 \\ Q &= \sqrt{R_3 / R_2} / 2 \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

利用上式可快速获得元件参数值:

$$\left. \begin{aligned} R_1 &= Q / 2\pi f_0 C |H(jf_0)| \\ R_2 &= 1 / 4\pi f_0 Q C \\ R_3 &= Q / \pi f_0 C \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

上式应用的条件是 $R_1 \geq 10R_2$, 即 $Q \geq \sqrt{2.5 |H(jf_0)|}$, 对应于低增益情形。

(2) 满足 $R_1 \ll R_2$ (工程上常取 $R_2 \geq 10R_1$) 则式(7)可改为

$$\left. \begin{aligned} f_0 &= \sqrt{1/R_1 R_3} / 2\pi C \\ H(jf_0) &= -R_3 / 2R_1 \\ Q &= \sqrt{R_3 / R_1} / 2 \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

上式成立的条件是 $|H(jf_0)| = 2Q^2$, 此时可快速获得元件参数值为

$$\left. \begin{aligned} R_1 &= Q / 2\pi f_0 C |H(jf_0)| \\ R_2 &\geq 10R_1 \\ R_3 &= Q / \pi f_0 C \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

显然 $R_1 \ll R_2$ 只是 $|H(jf_0)| = 2Q^2$ 的特例, 对应于高增益情形。

3 实际电路的分析与测试

3.1 电路原理

图2为一个中心频率为10kHz的级联无限增益多路反馈滤波器实际电路。第一级和第二级电路组成两级级联的无限增益多路反馈滤波器, 第三级为低通滤波与放大电路, 要求调整系统的增益。

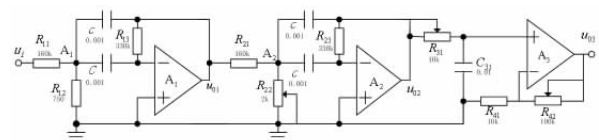


图2 中心频率为10kHz的多级MFB滤波器实际电路

根据式(4)~(6), 第一级电路的指标参数为

$$\left. \begin{aligned} f_0 &= \sqrt{1/R_{12} R_{13}} / 2\pi C = 10.12 (\text{kHz}) \\ H(jf_0) &= -R_{13} / 2R_{11} = -1.03 \\ Q &= \sqrt{R_{13} / R_{12}} / 2 = 10.5 \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

第二级无限增益多路反馈滤波器电路的 R_{22} 采用电位器调整,使两级滤波器的参数相同。于是可得,该级联的带通滤波器的理论参数为 $f_0 = 10\text{kHz}$, $H(j\omega_0) = 1$, $Q = 16.4$ 。

3.2 实验结果分析

从图 2 的电路的参数和配置看,级联的滤波器中心频率和品质因数由第一级和第二级决定,第三级实现增益要求,最大为 11 倍。但在实际测试中发现,输入中心频率的信号幅度须达到 1V(不同的组别稍有差别)以上才能有稳定的信号输出,否则输出信号幅度会产生起伏。对此选取两组不同的 R_{11} 、 R_{21} 值进行分析,对应表 2 所示的电路响应。表中电压为毫伏表测量的有效值(不考虑后一级放大电路 R_{12} 仍取 750Ω ,下同)。

表 2 不同 $R_{11} = R_{21}$ 时的电路特性

电路参数	160k Ω	10k Ω
u_i (V)	0.91	0.91
u_{A1} (V)	0.039	0.29
u_{O1} (V)	0.9	8.22
u_{A2} (V)	0.038	0.219
u_{O2} (V)	0.891	9.55
f_0 (kHz)	9.22	9.44
$A_V(f_0)$	-0.2dB	20.4dB
Q	16.6	16.5

当电阻 $R_{11} = R_{21} = 160\text{k}\Omega$ 时,两级滤波器的总增益为 -0.2dB,其中节点 A_1 、 A_2 的信号强度被衰减近 28dB;当 R_{11} 、 $R_{21} = 10\text{k}\Omega$ 时,滤波器的总增益为 20.4dB,其中节点 A_1 、 A_2 的信号强度被衰减近 10dB。此时中心频率有较小的偏移,但滤波器的品质因数没有变化。

从表 2 可以看出 R_{11} 、 R_{21} 取值 $10\text{k}\Omega$ 时,级联的滤波器已经达到了设计指标,完全可以节省后一级

放大电路;还可看出,当 $R_{11} = R_{21}$ 取值过大时,导致信号衰减过大,引入了更大的电阻噪声,降低了输出信号的信噪比。因此,在输入信号幅度较小时,输出信号的信噪比下降,信号幅度会随噪声起伏明显变化,出现幅度不稳定的现象。所以图 2 电路的输出信噪比下降和输入信号动态范围下降的主要原因是

不合理。由此可以认为:对于这种滤波器电路的参数选择应优先满足中心频率和品质因数,接着是滤波器元件参数,而增益参数作为次要参数。滤波器的增益不宜过小,以免降低输出信号的信噪比,降低输入信号的动态范围。

4 结语

本文提出了一种适合工程计算的无限增益多路反馈带通滤波器元件参数选取方法。我们针对实际的滤波器电路调试所出现的问题进行了比较分析,从提高输入信号的动态范围与输出信号的信噪比角度出发,说明了滤波器电路指标分配原则。即:在满足滤波器频率特性的同时可尽量提高增益,避免滤波器设计过程中先衰减后放大所引起的信噪比下降问题。

参考文献:

- [1] 李永安. 一种计算无限增益多路反馈滤波器增益的简便方法[J]. 南京: 电子工程师, 2005, 31(5): 31-32
- [2] 陈文渊, 沈斌坚. 二阶模拟带通滤波器的仿真和实现[J]. 杭州: 声学及电子工程, 2010, 99(3): 47-49
- [3] 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
- [4] J. L. 希尔伯恩. 有源滤波器设计手册[M]. 北京: 地质出版社, 1980

(上接第 54 页刘晓军等文)

参考文献:

- [1] 张立国, 刘晓琳. 国内外高校网络教学模式研究的元分析[J]. 兰州: 电化教育研究, 2012, 228(4)
- [2] 余欣欣, 李红波, 贾远娥. 论高校网络教学中存在的问题与对

策[J]. 桂林: 广西师范大学学报, 2005, 41(1)

- [3] 李书权, 侯勇, 崔实, 曾令全. 电机学课程教学改革的研究与实践[J]. 南京: 电气电子教学学报, 2006, 28(4)
- [4] 王玉, 高心等. “电力系统分析”课程的教学探索[J]. 南京: 电气电子教学学报, 2011, 33(2)