

# 旋转电容滤波器主要性能指标研究

刘 玮,郭 玉,韩福娟

(中国地质大学 地球物理与空间信息学院,湖北 武汉 430074)

**摘要:** 旋转电容滤波器 RCF(Rotary Capacitor Filter)可以用通用运放、模拟开关及一般  $RC$  元件等器件组成。有中心频率稳定、电路简单、成本低廉等优点。介绍了 RCF 基本原理并对其幅频特性、相频特性及自身噪声等 3 个主要性能指标进行了实验研究,结果表明 RCF 具有良好的滤波特性,且输出噪声很小,能满足一般电路的要求。

**关键词:** 旋转电容滤波器; 幅频特性; 相频特性; 内部噪声

**中图分类号:** TN 713+.8; TM 933      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1006-6047(2006)01-0045-03

在电子测量系统内对信号的各种预处理电路中,广泛采用各种滤波电路抑制干扰,提纯有用信号。对于高频信号通常选用  $LC$  谐振电路,它具有  $Q$  值高,便于调谐等优点;然而对于低频信号, $LC$  谐振电路中的  $L$  体积大、制作困难,配谐更麻烦,且  $Q$  值不易做高,若将集成运算放大器及  $RC$  组成模拟电感  $L$ ,构成  $LC$  谐振电路,调谐也不易。显然,1 组  $RC$  只能对应某个固定的频率,而且  $R, L, C$  均受温度及老化的影响,工作频率的稳定性欠佳。

开关电容滤波器 SCF(Switched Capacitor Filter)<sup>[1-2]</sup> 用晶体振荡器产生的稳定的脉冲信号控制,使其频率特性非常稳定,只要给出不同的频率,就可以非常方便地控制滤波器的工作频率,具有良好的应用前景。其中,旋转电容滤波器 RCF(Rotary Capacitor Filter)可以选择通用运放、模拟开关以及普通  $RC$  元件,不必选择专用开关电容滤波器。因此,除了频率特性稳定、窄带特性优良外,还兼备电路简单、成本低廉的优点。

## 1 RCF 基本原理

RCF 是一种特定开关电容滤波器,抑制噪声能力很强。它由 1 个同步开关及 1 个  $RC$  积分电路组成,用以实现被测信号与开关函数相乘和积分功能。

图 1 是利用运算放大器构成的 RCF<sup>[3]</sup> 实用电路。电子开关  $S_1$  和  $S_2$  在方波信号控制下进行切换。

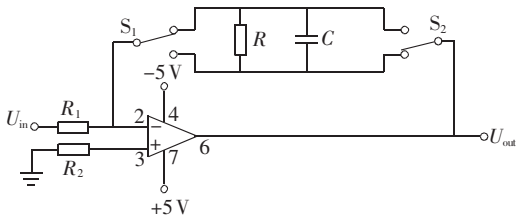


图 1 旋转电容滤波器电路  
Fig.1 Circuit of RCF

当方波为高电平时,  $S_1$  和  $S_2$  连接到如图所示位置,当方波为低电平时,  $S_1$  和  $S_2$  连接到开关的另一端。这样,电路就通过电子开关周期性地变换给  $RC$  电路充电的方向,达到滤波的目的。

根据运算放大器“虚短”与“虚断”原理及 RCF 基本原理<sup>[4-5]</sup>分析可得,电路的频率响应<sup>[6-7]</sup>函数为

$$H(\omega) = \frac{U_o(\omega)}{U_i(\omega)} = -\frac{4R}{\pi R_1} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{2n-1} \times \frac{1}{1 + j[\omega - (2n-1)\omega_0]RC} \quad (1)$$

幅频响应为

$$|H(\omega)| = \frac{4R}{\pi R_1} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{2n-1} \times \frac{1}{\sqrt{1 + \{\omega - (2n-1)\omega_0\}^2 RC^2}} \quad (2)$$

相频响应为

$$\Phi(\omega) = \arctan \{ [\omega - (2n-1)\omega_0]RC \} \quad (3)$$

等效噪声带宽为

$$B_e = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)^2} \frac{1}{2RC} = \frac{\pi^2}{8} \frac{1}{2RC} = \frac{\pi^2}{16RC} \quad (4)$$

分析可知,RCF 是一个梳状滤波器,各通带位于控制脉冲方波基频及其奇次谐波处,如图 2 所示(图中  $f, f_0$  分别为输入频率和中心频率,下同;  $4R/(\pi R_1)$  对应第 1 个波峰峰值,即当式(2)中  $\omega = \omega_0$  时,  $|H(\omega)| = 4R/(\pi R_1)$ ;  $1, 1/3, 1/5, 1/7, 1/9$  为相对幅值)。它允许与电子开关控制方波的基波或其奇次谐波频率相同的信号通过,抑制其他频率的噪声。 $RC$  越大,频带越窄,等效噪声带宽越小,抑制噪声的能力越强。

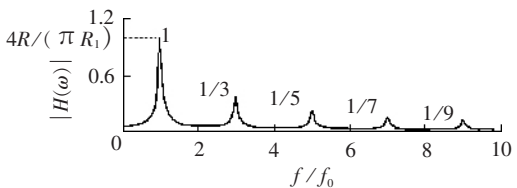


图 2 旋转电容滤波器电路幅频响应

Fig.2 Amplitude-frequency response of RCF

## 2 电路构成

图 3 为 RCF 电路的结构框图<sup>[6,8]</sup>。

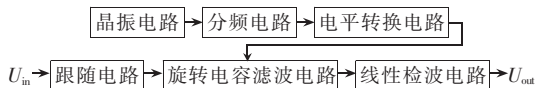


图 3 旋转电容滤波电路的结构框图

Fig.3 Block diagram of RCF structure

晶振及分频电路产生控制 RCF 中开关切换的频率信号,对输入信号进行选频。首先,晶振电路产生 32 768 Hz 的稳定方波信号,经分频电路进行 2 分频、4 分频和 8 分频,产生 16 384、8 192 和 4 096 Hz 方波信号,再经过 1 个三选一的机械开关,把其中 1 路信号送入电平转换电路,电平转换是为了适应不同芯片对供电电压的要求而设计的。使信号从原来的 0~+5V 变为  $\pm 5V$ ,这是为与模拟电子开关(CD4016)的供电电压( $\pm 5V$ )相匹配。电路输入信号经过电压跟随器后进入 RCF,其输出信号是方波信号各次谐波的叠加,所以要经过线性检波和 RC 滤波才能得到很好的波形输出。线性检波电路采用运放组成的典型的线性检波电路,其中包含 RC 滤波部分。

## 3 实验结果

### 3.1 幅频特性

#### 3.1.1 $f_0$ 为 4096 Hz 时的幅频特性

当输入信号频率  $f_0=4096$  Hz,幅度为 27 mV 时,输出  $U_{p-p}$  为 1 V,选取此点测量是为了便于幅频特性曲线的归一化处理。此时分别对输入信号的基波、3 次谐波、5 次谐波进行测量,得到图 4 所示的归一化后的幅频响应曲线。

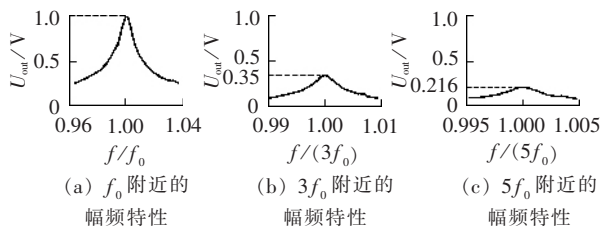


图 4 旋转电容滤波器的幅频特性

Fig.4 Amplitude-frequency characteristics of RCF

从图中可以看出,其曲线走向与前面的分析完全吻合,即:允许与电子开关控制方波的基波或其奇次谐波频率相同的信号通过,而抑制其他频率的噪声。从而显示了旋转电容滤波器是 1 个梳状滤波器,各通频带位于控制脉冲方波基频及其奇次谐波处。

#### 3.1.2 $f_0$ 为 3 种频率时的幅频特性

当输入信号频率  $f_0$  分别为 4096、8192、16384 Hz,幅度分别为 27、36、62 mV 时,输出  $U_{p-p}$  均为 1 V。在 3 个中心频率两侧取等间隔的点,测得图 5 所示的归一化曲线。

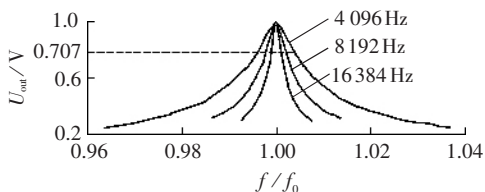


图 5  $f_0$  分别为 4096 Hz、8192 Hz、16384 Hz 时的幅频特性

Fig.5 Amplitude-frequency characteristics with  $f_0$  being 4096, 8192, 16384 Hz respectively

从图 5 可见:电路的等效带宽为纵坐标 0.707 的直线与各个中心频率所在曲线 2 交点之间的距离与其对应中心频率的乘积。在 Matlab 中放大测得曲线与  $y=0.707$  的交点的横坐标从左到右依次为 0.994 49、0.997 13、0.998 59、1.001 4、1.002 56、1.005 25。

于是可以得到电路的等效带宽为

$$B_w = (1.00525 - 0.99449) \times 4096 \approx 44 \text{ (Hz)}$$

$f_0=4096$  Hz 时,电路的等效品质因数为

$$Q_1 = f_0 / B_w = 4096 / 44 \approx 93$$

当工作频率为 8192 Hz 和 16384 Hz 时,等效品质因数分别为 186 和 372。因此,随着工作频率的增大,等效品质因数也随着增大,回路的选择性更好。

为充分显示电路的回路选择性,将  $f_0=4096$  Hz 的幅频响应曲线与 LC 串联谐振曲线进行对比,如图 6 所示。LC 串联谐振输出幅度表达式为

$$U(\eta) = \frac{U_R(\eta)}{U} = 1 / \sqrt{1 + Q^2(\eta - \frac{1}{\eta})^2}, \eta = \frac{f}{f_0}$$

上式中,  $Q=Q_1=93$ 。在 4096 Hz 附近取若干点,用 Matlab 作图得如图 6 所示的曲线(曲线 1、2 分别为 RCF、LC 串联谐振电路的幅频特性)。

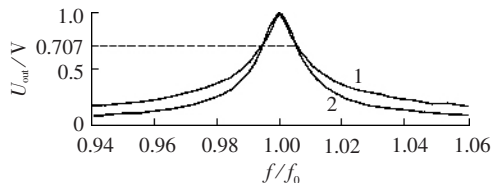


图 6  $f_0$  为 4096 Hz 时的幅频响应曲线与 LC 串联谐振的曲线对比图

Fig.6 Comparison between amplitude-frequency response curve with  $f_0$  being 4096 Hz and LC series syntonc curve

从曲线上可以看出,在 2 条曲线的通频带范围内吻合的非常好,所以串联谐振在这个范围内的性能反映了 RCF 的性能。串联谐振电路的这种输入-输出形式,对输出具有明显的选择性能,在  $\eta=1$  时,曲线出现高峰,输出达到最大。当  $\eta<1$  和  $\eta>1$  时,输出逐渐下降。随  $\eta \rightarrow 0$  和  $\eta \rightarrow \infty$  而逐渐下降至零,说明串联谐振电路对偏离谐振点的输出有抑制能力。只有在谐振点附近的频域内,即  $\eta=1+\Delta\eta$ ,才有较大的输出幅度,电路的这种性能称为选择性,其优劣取决于电路对非谐振频率的输入信号的抑制能力。从图中可见:曲线在谐振点附近的形状尖锐,当稍微偏离谐振频率,输出就急剧下降,说明对非谐振频率的输入具有较强的抑制能力,选择性很好。

3.2 相频特性

根据式(3)可得如图 7 所示相频特性曲线。由图可知,当输入信号频率为中心频率 4096Hz 时,输入-输出相位差为 0°,越是偏离中心频率,相位差越大。

3.3 输出噪声

电路的输出噪声是衡量一个实用电路的重要指标。在野外,电路在没有采取任何屏蔽措施时,采用蓄电池供电,电路在零信号输入条件下(即输入短路),用万用表直流 200 mV 档测量电路的输出直流噪声电压。已求得电路放大倍数为  $A_0 = [(1+100\text{ k}/5.1\text{ k})] \times 2 = 41.22$ ,所以输出端的噪声折合到输入端的等效噪声为  $U_{N(in)} = U_{N(out)}/A_0$ 。表 1 为在野外测得的电路输出噪声  $U_{N(out)}$  及折合到输入端的噪声  $U_{N(in)}$  的对照表。

表 1 输出噪声  $U_{N(out)}$  与折合到输入端的噪声  $U_{N(in)}$  的对照表

Tab.1 Contrast of  $U_{N(out)}$  and  $U_{N(in)}$

| $f_0/\text{Hz}$ | $U_{N(out)}/\text{mV}$ | $U_{N(in)}/\text{mV}$ |
|-----------------|------------------------|-----------------------|
| 4 096           | 0.69 ~ 0.70            | 0.0167~0.0170         |
| 8 192           | 0.58 ~ 0.59            | 0.0141~0.0143         |
| 16384           | 0.31 ~ 0.32            | 0.0075~0.0078         |

从表 1 可见:随着工作频率的增大,电路的输出噪声逐渐减小,这是因为模拟开关的切换速度加快,其延迟或停动的时间减小,从而抑制了噪声。将输出噪声等效到输入端后,它的值非常小,所以对于整个电路的输入不会造成影响。

电路的整个输出噪声很小。由于外界条件比较复杂,有电磁干扰存在,所以在相同条件下,实验室测得的电路输出噪声更小一些。如果在采取屏蔽措施的情况下,预计噪声将进一步降低。

4 结论与建议

a. 旋转电容滤波器具有良好的滤波特性,并且输出噪声很小,可以满足一般电路的要求。电路输出噪声与元器件的选择以及电路的布局都有密切的关系,因此应对其进行精心的选择与设计。

b. 选用 CD4016 作为旋转电容滤波器中的切换开关,当输入信号频率较高时,开关的切换时间就

会在整个信号的周期中占较大的比例。如选用更快的开关器件(如 74HC 系列芯片,场效应管),电路的高频性能会得到进一步改善。

c. 对于远离中心频率的信号,电路的抑制能力并不是很好,若采用两级旋转电容滤波电路,预计此特性会得到改善。

参考文献:

[1] 倪侠渔. 高阶开关电容滤波器的分析与设计[J]. 兰州铁道学院学报,1996,15(1):56-62.  
NI Xia-yu. Analysis and design of high-order switched capacitor filter[J]. Journal of Lanzhou Railway Institute, 1996,15(1):56-62.

[2] 刘新明. 开关电容滤波器及其在电子测量中的应用[J]. 仪表技术与传感器,1996(8):32-34.  
LIU Xin-ming. A switched capacitor filter and its applications in electronic measurement[J]. Instrument Technique and Sensor,1996(8):32-34.

[3] 杨尔滨,朱丹平. 一种简易微弱信号测试仪的设计[J]. 上海电力学院学报,1994,10(4):42-48.  
YANG Er-bin,ZHU Dan-ping. Design of a simple detector for measuring weak signals[J]. Journal of Shanghai Institute of Electric Power,1994,10(4):42-48.

[4] 高晋占. 微弱信号检测[M]. 北京:清华大学出版社,2004.

[5] 曾庆勇. 微弱信号检测[M]. 杭州:浙江大学出版社,2002.

[6] 陈照章. 跟踪滤波器的设计及其应用[J]. 仪器仪表学报,2001,22(3):244-246.  
CHEN Zhao-zhang. Development of follow-up filter and its application[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument,2001,22(3):244-246.

[7] 高晋占,宋丽. 开关电容滤波器频域分析[J]. 电子技术应用,2005(5):34-35.  
GAO Jin-zhan,SONG Li. Frequency field analysis of switched capacitor filter[J]. Electronic Technique Application,2005(5):34-35.

[8] 周明. 一种带电容网络的窄带陶瓷滤波器[J]. 电子元件与材料,2000,19(4):20-21.  
ZHOU Ming. A narrow band ceramic filter with capacitor network[J]. Electronic Components & Materials, 2000,19(4):20-21.

[9] 康华光. 电子技术基础[M]. 北京:高等教育出版社,2000.

(责任编辑:柏英武)

作者简介:

刘 玮(1981-),女,河北深泽人,硕士研究生,研究方向为无损检测(E-mail:liuwei\_work@163.com)。

Study on main performance indices of rotary capacitor filter

LIU Wei, GUO Yu, HAN Fu-juan

(China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** The RCF(Rotary Capacitor Filter) may be made of current operational amplifier, analog switch and general RC elements, which has advantages of steady center frequency, simple circuitry and low cost. Its basic principle is introduced, and its main performance indices, including amplitude-frequency characteristics, phase-frequency characteristics and internal noise are tested. Results show that it has good filtering performance with little noise, which can meet the requirements of general circuitries.

**Key words:** rotary capacitor filter; amplitude-frequency characteristics; phase-frequency characteristics; internal noise