

开关电容滤波器的系统设计与实现

周 蓉^{1,2}

(1. 西北师范大学 甘肃 兰州 730070; 2. 甘肃省化工高级技工学校 甘肃 兰州 730046)

摘要: 通过合理选择滤波器的类型和阶数,利用低 Q 值二级滤波器放在高 Q 值二级滤波器的前级,给每一级分配不同的增益使得每一级的输出峰值相同。从开关电容电路的原理入手,分析了开关电容电路和电容编程阵列,最终设计一个可编程开关电容 6 阶带通滤波器。选择合适的运算放大器参数。可编程滤波器系统共需 3 路时钟控制,滤波器编程参数控制模块用于实现芯片内部程序存储器编程控制。通过对设计的开关电容滤波器进行仿真,结果基本与设计目标吻合。

关键词: 开关电容; 可编程开关电容滤波器; 运算放大器; 软件设计

中图分类号: TN256

文献标识码: A

文章编号: 1674-6236(2010)10-0189-04

Design and implementation of systems for switched capacitor filter

ZHOU Rong^{1,2}

(1. Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China;

2. Chemical Advanced Technical Schools of Gansu Province, Lanzhou 730046, China)

Abstract: This paper based on the reasonable selection of filter and the type of order, using low- Q value secondary filter on high- Q secondary filter for each level before class, the distribution of different for each level of output gain peak. In this paper, from the principle of switching capacitors, analyzes the circuit and capacitance programming, design an array of programmable switching capacitors 6 rank bandpass filter. Choosing appropriate amplifier parameters, programmable filter system altogether 3 road clock control parameters control module, filter programming to realize the internal control program memory chips. Through the design of the switch capacitance filter, and simulation results are basically identical with the design target.

Key words: switched-capacitor; PSCF; operational amplifier; software design

开关电容滤波器 (Switch Capitor Filter, SCF) 是一种由 MOS 开关^[1]、电容器和运算放大器构成的离散时间模拟滤波器,实际应用中,该滤波器可与其他电路集成在同一个芯片上,通过外部端子的适当连接获得不同的响应特性。某些单独的开关电容滤波器可作为通用滤波器使用,例如自适应滤波^[2]、跟踪滤波、振动分析以及语言和音乐合成等。但运算放大器带宽、电路的寄生参数、开关与运算放大器的非理想特性以及 MOS 器件的噪声等都会直接影响这类滤波器的性能。开关电容滤波器的工作频率不高,其应用范围目前仅限于音频频段。但随语音/数据通信及微电子测量仪器领域内对单片集成 MOSFET 有源滤波器的需求剧增,促使了开关电容滤波器的研究与开发,特别是高阶 SCF。因此,这里提出一种开关电容滤波器的系统设计方案。

1 开关电容滤波器的选型

1.1 类型选择

这里所设计的开关电容滤波器是应用于电力线信号传

输,传输信号频率为 57.6 ± 16 、 76.8 ± 16 和 115.2 ± 16 kHz,所以需要电力线上的低频噪声(包括电力线上 50 Hz 的电源信号)滤除,同时还需要滤除各种不可知的高频噪声。这样带通滤波器成为最佳选择。

滤波器的理想滤波特性是,通带内信号完全无衰减通过,阻带内信号完全衰减^[3]。但实际应用中,理想的滤波器是不存在的,只能用传输函数近似表达其滤波特性。根据对滤波器特性的不同要求,选择不同形式的近似函数,从而得到常用的滤波器^[4]: 巴特沃思 (Butterworth) 滤波器、切比雪夫 (Chebyshev) 滤波器、椭圆函数 (Elliptic Function) 滤波器。

考虑电力线通讯中的信号与噪声特性,由于电力线所接触的环境复杂,噪声源多,所以电力线上的噪声能量很高。尤其在低频部分,其噪声能量比信号能量大很多倍。这就要求滤波器有良好的带外衰减特性,而且不允许阻带部分出现纹波。因此,椭圆函数滤波器就不能满足要求,而巴特沃思滤波器的衰减特性又不够好。综合考虑,切比雪夫滤波器是最佳选择。滤波器阶数越高,其滚降速度越快,但是也意味更大的功耗和版图面积。于是这里采用 6 阶带通切比雪夫滤波器。

收稿日期: 2010-07-20

稿件编号: 201007067

作者简介: 周蓉 (1972—), 女, 甘肃兰州人, 讲师, 硕士研究生。研究方向: 计算机测量与控制。

©1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

1.2 实现方式

高阶滤波器的实现方式主要有2种：级联法和梯形法。级联法需要先得出满足频率特性要求的S域传输函数 $H(s)$ ，然后经S域到Z域的频率变换后得出Z域传输函数 $H(z)$ 。再将 $H(z)$ 分解成一阶、二阶函数乘积，分别用一阶、二阶SC基本节实现，然后级联成整个开关电容滤波器电路。级联法实现高阶开关电容滤波器采用双线性变换法^[5]。这种方法简单明了，而且是直接级联，不存在基本节之间的反馈，只要基本节稳定，整个电路也就是稳定的。

梯形法是无源梯形的有源SC模拟实现的^[6]。这种方法可进一步分为元件阻抗模拟和跳耦，前者以LC梯形滤波器为原型，用SC电路模拟原型中的阻抗元件而保持电压电荷关系不变；后者则通过用信号流程图表示LC梯形电路中的电压电流关系，然后用SC积分器实现开关电容滤波器。其中，有源跳耦结构是实现高选择性SCF的最佳选择。因为这种跳耦滤波器不仅具有通带低灵敏度特性，而且对寄生电容不敏感，因此是设计者的最佳选择。

通过信号流程图法(SFG)，构建同相、反相、有损、无损开关电容积分器，获得梯形电路。但这种方法在LC电路原型的串臂中至少存在一个电感，而对于全极点高通SCF，不能使用这种方法，因而只能使用级联法。

2 可编程开关电容带通滤波器

滤波器的编程主要是针对其频域响应进行编程，包括通带频率 ω_0 、品质因数 Q 和传输函数增益的编程。其中，中心频率编程是最常用的，也是最重要的。这里设计的滤波器正是对中心频率的编程^[7]，为了得到最合理的编程二次节结构，首先应深入理解基本的二阶带通滤波器的频域响应。

低 Q 值开关电容二次节^[8]使用非常广泛，图1所示为一种常用的低 Q 值开关电容二阶带通滤波器(只要把所有的开关电容换算成对应的电阻，便可得到其连续时间RC的实现方式)，不难得出其Z域传输函数：

$$H(z) = -\frac{\alpha_4 z(z-1)}{(1+\alpha_6)z^2 + (\alpha_2\alpha_5 - \alpha_6 - 2)z + 1} \quad (1)$$

鉴于开关电容滤波器一般都是对信号进行过采样，可以做假设 $\omega T \ll 1$ 。于是可得低 Q 结构的等效S域传输函数：

$$H(s) = -\frac{\frac{\alpha_4}{T}s}{s^2 + \frac{\alpha_6}{T}s + \frac{\alpha_2\alpha_5}{T^2}} \quad (2)$$

为得到良好的动态范围，选取 $\alpha_2 = \alpha_5$ ，于是有：

$$\alpha_2 = \alpha_5 = \omega_0 T \quad (3)$$

$$\alpha_6 = \frac{\omega_0 T}{Q} \quad (4)$$

$$\alpha_4 = KT \quad (5)$$

可见，通过对 α_2 和 α_5 同步编程控制实现中心频率 ω_0 的调节，在时钟频率不变的情况下， $\alpha_6 = \omega_0 T/Q$ 不变，保证 ω_0/Q 不

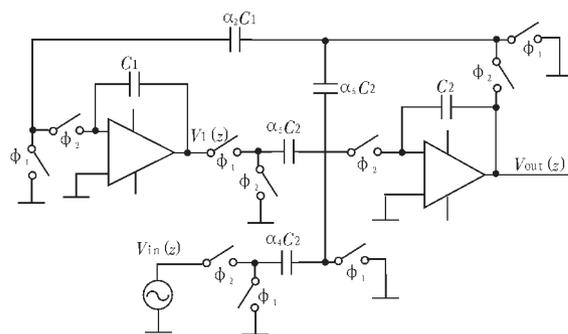


图1 低 Q 值开关电容二阶带通滤波器
Fig. 1 Switching capacitors second-order band-pass filter with low Q value

变，从而保证 ω_0 和 G_0 不变。这正是所需要的结构。然而在该设计的滤波器中， Q 值并不低，可能导致 $\alpha_6 = \omega_0 T/Q$ 会很小，接近于0.01，这又对电容散布带来不好的影响。

于是再对高 Q 结构进行分析，看是否更适合本文中滤波器中心频率编程的要求。为得到良好的动态范围，选取 $\alpha_2 = \alpha_5$ 。

这里需要说明的是，图1所示的低 Q 值开关电容二阶带通滤波器用到了两个运放，其输出端口分别为 $V_1(z)$ 和 $V_{out}(z)$ 。其中 $V_1(z)$ 对应低通滤波特性(如图2下方曲线)， $V_{out}(z)$ 对应带通滤波特性(如图2上方曲线)，其增益峰值都在滤波器的中心频率 ω_0 处获得。为了在滤波器内部得到最大的动态范围，需要在中心频率 ω_0 处 $V_1(z)$ 和 $V_{out}(z)$ 相等，分别求得 $V_1(z)$ 和 $V_{out}(z)$ 对应于 $V_{in}(z)$ 的传输函数，并计算函数对应于中心频率 ω_0 处的取值。计算方法很简单，将 $s = j\omega_0$ 分别代入传输函数 $V_1(z)$ 和 $V_{out}(z)$ 即可。不难发现，在中心频率 ω_0 处，当且仅当 $\alpha_2 = \alpha_5$ 时，有 $V_1(z) = V_{out}(z)$ 。图2和图3分别通过仿真分别给出了 $\alpha_2 = \alpha_5$ 时与 $\alpha_2 \neq \alpha_5$ 时两个运放的输出端的频率幅值响应。仿真结果也很好验证了低 Q 结构更适合该滤波器设计要求。

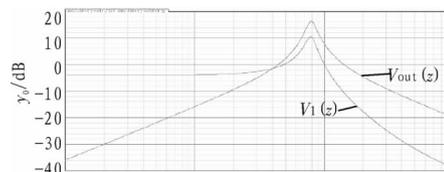


图2 $\alpha_2 = \alpha_5$ 时运放的输出端的频率幅值响应
Fig. 2 Frequency amplitude response of output of operational amplifier while $\alpha_2 = \alpha_5$

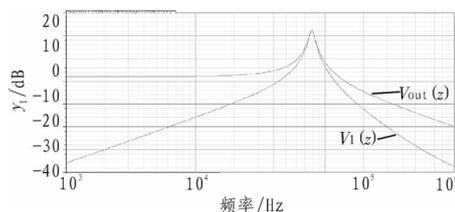


图3 $\alpha_2 \neq \alpha_5$ 时运放的输出端的频率幅值响应

Fig. 3 The frequency of the output amplitude response while $\alpha_2 \neq \alpha_5$

3 运算放大器的设计

运算放大器是开关电容滤波器中重要的元件。如果运算放大器的指标不合理,可能会影响到整个滤波器的性能。所以需要根据实际的滤波器的性能要求选择适当的运放指标,从而使整个系统满足要求。该滤波器的设计指标如表 1 所示。

表 1 运放所要满足的指标

Tab. 1 Parameters satisfied operational amplifier

工艺	CSMC05MS
功耗	$\leq 300 \mu\text{A}@5 \text{ V}$ 电源电压
直流增益	$\geq 70 \text{ dB}$
单位增益带宽	$20 \text{ MHz} \leq \text{GB} \leq 40 \text{ MHz}$
相位裕度	$\geq 60^\circ$
增益裕度	$\geq 12 \text{ dB}$
转换速率	$\geq 34 \text{ V}/\mu\text{s}$
500 mV 信号建立时间(精度 0.1%)	$\leq 120 \text{ ns}$
输出摆幅	$\geq \pm 2 \text{ V}$
等效输入白噪声	$\leq 30 \text{ nV}$

对于给定指标的运算放大器,合理的结构选择是整个设计中最为关键的一点。在考虑指标实现的同时,还需要考虑到可实现性,同等情况下选择更简单、版图更小的结构。选择一级运放。因为其负载电容就是补偿电容,无需特意去增加补偿电容,而且相对于二级运放(一般用米勒补偿),一级运放在电源抑制比等方面都有优势。

4 软件设计

系统控制主要包括输入仪表放大器控制、峰值检测控制、开关电容滤波器控制、增益控制、滤波器通道控制、输出反相控制、键盘控制、显示控制等部分。这里主要介绍开关电容滤波器的控制。开关电容滤波器的控制包括时钟发生模块和编程参数控制模块 2 部分。时钟发生模块用于生成的各个二阶滤波器组件的时钟信号,该可编程滤波器系统共需 3 路时钟控制。滤波器编程参数控制模块用于实现芯片内部程序存储器编程控制,包括滤波器编程参数读取模块和接口时序控制模块。

4.1 时钟发生模块

时钟信号发生器模块由频率跟踪检测、参数读取、除法器、分频器和时钟使能控制等部分构成。

1) 频率跟踪检测 滤波器在跟踪工作模式下,PLC 需检测信号的周期。对输入脉冲周期进行计数,将一个输入信号周期所占的时钟周期数输出给参数读取模块进行处理,程序较为简单。

2) 参数读取 根据滤波器类型、滤波器逼近函数和滤波器阶数生成 ROM 的读取地址。滤波器在典型和跟踪工作模式下选择对应的 ROM 读取除法器的被除数或除数;手动工作模式下,被除数为常数,除数直接从按键的键值输入缓冲区读取。由于系统使用 2 片 MAX260^[9],需要 4 路时钟,故要

读出 4 组被除数和除数。图 4 为参数读取模块的仿真波形,图中的 z1_f, z2_f, z3_f, z4_f 为 4 组被除数, d1_f, d2_f, d3_f, d4_f 为 4 组除数。

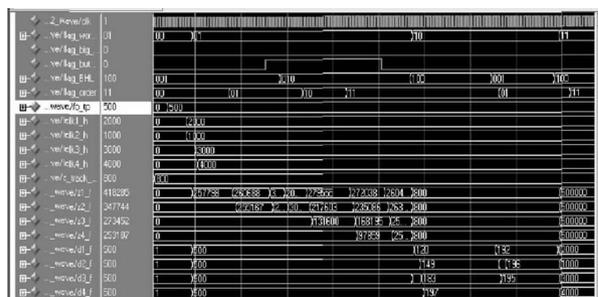


图 4 参数读取模块仿真波形

Fig. 4 Reading modules simulation waveform parameter

3) 除法器 由于 PLC 采用 50 MHz 的晶振,输入的中心频率(或截止频率)最大为 4 kHz,因此采用 26 位除法器。由于 PLC 的除法指令需要占用很大资源,本设计采用移位相减实现除法运算。除法器的状态图如图 5 所示,除法器的算法如下:将被除数从高位开始移入移位寄存器的低位,移位寄存器每移位一次后与除数相减,结果大于零则商置 1,将相减得到的结果后接还未移入移位寄存器的被除数再左移;结果小于零,则商置零,将原被减数后接还未移入移位寄存器的被除数再左移。如此移位相减直至被除数全部位数判断完成,即移位相减 26 次以后,除法完成。

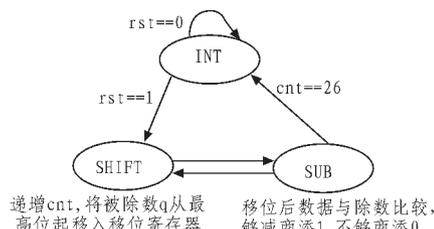


图 5 除法器的状态图

Fig. 5 State chart of besides time-multiplier

4) 分频器模块和时钟使能 分频器从除法器的结果作为分频系数对 PLC 的时钟频率分频,得到各个二阶滤波器组件的时钟信号。时钟信号产生后并不马上送入 MAX260 的时钟输入引脚,需检测到 MAX260 的编程代码下载完成后再使能时钟输出,下载过程中,时钟信号保持高阻态,且对未使用的二阶滤波器组件,其时钟信号亦保持高阻态。

4.2 滤波器编程参数控制

本系统中滤波器在典型和跟踪工作模式下的逼近函数是确定的,故其编程代码也是确定的,将编程代码存入存储器中,根据滤波器的各参数读取编程代码即可。手动模式下,编程参数由外部输入。为方便下载,将 4 个二阶滤波器节组件的编程代码组成一个 64 位的编程控制字。每种逼近函数的各阶低通、高通和带通滤波器对应一个 64 位的编程控制字,故共有 48 个编程控制字。每个编程控制字的格式中前 8 位对应第一片 MAX260 的二阶滤波器组件 A,第 16 位至第 32

位对应第一片 MAX260 的二阶滤波器组件 B,后 32 位对应第二片 MAX260。

控制字的位数是固定的,与滤波器设定的阶数无关,即与所使用的二阶滤波器组件的个数无关,未使用的二阶滤波器组件的对应控制字位置零,由于未使用的二阶滤波器组件的时钟信号保持高阻态,故对其进行写操作后该组件仍不会工作,不会对总滤波器构成影响。当使用第一片 MAX260 时,控制字的高 32 位全部置为零,此时控制字将使第二片 MAX260 进入低功耗的待机模式。

5 结 论

合理地选择滤波器的类型和阶数是滤波器设计的第一步,是由不同的应用需要,不同的信号与噪声特点,不同的精度要求来决定。基于电力现通讯信号的特点,采用 6 阶切比雪夫近似滤波器。通过对滤波器结构的比较,采用低 Q 结构,分析了开关电容电路和电容编程阵列,最终设计一个可编程开关电容 6 阶带通滤波器;在滤波器设计中,运放器选择增益为 70 dB,带宽为 10 倍时钟频率,是合理的性能指标;通过对设计的开关电容滤波器进行仿真,结果基本与设计目标吻合。

参考文献:

- [1] 高燕梅,王丽,付圆媛. 开关电容滤波器设计与仿真方法的研究[J]. 吉林大学学报:信息科学版,2005,23(4):373-375.
- [2] 刘国福,张屹,王光明. 可编程开关电容滤波器时钟产生电路的程控调节[J]. 自动化与仪器仪表,2002(2):48-50.
- [3] 康华光,陈大钦. 电子技术基础模拟部分[M]. 4版. 北京:高等教育出版社,1996.
- [4] 郑君里,杨为理. 信号与系统[M]. 北京:高等教育出版社,1981.
- [5] 李鸣华. 程控高阶有源滤波器的研究[J]. 浙江师范大学学报:自然科学版,1999,22(4):50-53,100.
- [6] 何乐生,黄惟一. 利用数模转换器 R-2R 梯形网络[J]. 现代电子技术,2002(5):30-32.
- [7] 肖勇. 一种数字控制的可编程多功能滤波器[J]. 现代电子技术,2001(11):85-86.
- [8] Gregorian R, Terms G C. Analog MOS integrated circuits for signal processing [M]. Publication of John wiley&sons,1986.
- [9] 刘强,郭文加. MAXIM 热门集成电路使用手册:第二册[M]. 北京:人民邮电出版社,1997.
- [10] LIU Guo-fu, ZHANG Yi, WANG Guang-ming. Programmable filter circuit switching capacitors produced the SPC adjust clock [J]. Automation and instrumentation,2002(2):48-50.
- [11] LI Ming-hua. SPC higher-order active filter [J]. Zhejiang Normal University Journal: Natural Sciences Edition,1999,22(4):50-53,100.
- [12] HE Le-sheng, HUANG Wei-yi. Using the digital-to-analog converters R-2R trapezoid network[J]. Modern Electronic Technology,2002,(5):30-32
- [13] XIAO Yong. A digital control programmable multi-function filter [J]. Modern electronic technology,2001(11):85-86.

针对 ZigBee® RF4CE 远程控制全面优化的 2.4 GHz 片上系统

德州仪器(TI)推出首款针对远程应用全面优化的 IEEE 802.15.4 片上系统。该 CC2533 不但能够以比其他同类器件更低的功耗及材料清单(BOM)成本与更高的可靠性构建单芯片远程控制,而且还可为家庭娱乐设备(电视、机顶盒、蓝光播放器以及家庭影院等)提供独特的解决方案。此外,TI 还提供包含参照设计与范例应用的免费 RemoTI 协议栈,可实施远程控制与目标控制器,加速产品上市进程。CC2533 是业界首款专为 ZigBee RF4CE 芯片市场设计的器件,其建立在 2009 年 5 月推出的业界验证的 CC2530 片上系统基础之上。

ZigBee RF4CE 最初发布于 2009 年 3 月,是一款标准化射频通信规范,可为器件实现更快的速度,更高的可靠性及灵活性,从而可实现更远的工作距离。它可消除目前红外(IR)遥控技术的视线与视野障碍。凭借双向通信技术,ZigBee RF4CE 还可带来一系列全新的功能及消费者体验。

CC2533 主要特性与优势如下:

- 1)片上存储器:不但可提供专为 ZigBee RF4CE 应用优化的 64 KB 与 96 KB 系统内可编程闪存选项,而且还提供引脚兼容的升级路径到采用 256 KB 闪存和 USB 接口的 CC2531;
- 2)低功耗:包括 1A 睡眠模式的 4 种高灵活电源模式可实现最低的流耗,与基于 IR 的遥控技术相比,可将电池使用寿命延长达 10 倍;
- 3)最佳性能:器件集成业界最佳的收发器,支持-97 dBm 典型接收机灵敏度以及 7 dBm 输出功率;
- 4)丰富的外设集:5 通道 DMA、23 个 GPIO、2 个 USART、SPI、I2C 以及 4 个定时器可支持更高的用户接口系统集成,从而可降低整体系统材料清单成本。

咨询编号:2010101023