

程控开关电容低通滤波器的通用模块开发 *

杨春玲, 张 扬, 杨旭强, 齐 超

(哈尔滨工业大学 电气工程及自动化学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 滤波器在电子学噪声测量和谐波失真测量的过程中, 用于获取特定频带的信号或者抑制噪声。开发了一种带宽可调的程控开关电容低通滤波器模块, 采用 STM32 单片机输出频率可调的时钟信号控制滤波器截止频率, 改善了现有滤波器因参数固定而不能调节动态频率范围的情况。实验结果表明该程控滤波器通带在 10 Hz~40 kHz 可调, 对频带外信号有明显的抑制能力, 满足设计需求。

关键词: 开关电容滤波器; 程控滤波器; STM32

中图分类号: TN713

文献标识码: A

DOI: 10.16157/j.issn.0258-7998.212420

中文引用格式: 杨春玲, 张扬, 杨旭强, 等. 程控开关电容低通滤波器的通用模块开发[J]. 电子技术应用, 2022, 48(9): 136~139.

英文引用格式: Yang Chunling, Zhang Yang, Yang Xuqiang, et al. Development of general module for program-controlled switching capacitor low pass filter[J]. Application of Electronic Technique, 2022, 48(9): 136~139.

Development of general module for program-controlled switching capacitor low pass filter

Yang Chunling, Zhang Yang, Yang Xuqiang, Qi Chao

(School of Electrical Engineering and Automation, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: In the process of electronic noise measurement and harmonic distortion measurement, the filter is used to acquire the signal of specific frequency band or suppress the noise. In this paper, a programmable switching capacitor low-pass filter module with adjustable bandwidth is developed, and the clock signal with adjustable frequency output by STM32 MCU is used to control the cut-off frequency of the filter, which improves the situation that the existing filter cannot adjust the dynamic frequency range due to the fixed parameters. The experimental results show that the passband of the programmable filter can be adjusted at 10 Hz~40 kHz, and it has an obvious ability to suppress the out-of-band signals, which meets the design requirements.

Key words: switched capacitor filter; program-controlled filter; STM32

0 引言

在大数据时代, 获取可信度高的信号尤为重要。滤波器作为信号分析与处理过程中的常用器件, 主要用于抑制干扰信号, 适用于信号采集至输出过程中的每个阶段, 在不同的使用场景, 对信号的滤波特性及其频带范围的需求各有特点^[1~2]。

目前国内滤波器的产品类型很多, 传统的滤波器结构简单, 易于修理和维护^[3~5], 但由于其参数固定, 不适用于有较大动态频率范围调节的场景^[6~7]。即使可以设计滤波器组, 通过模拟开关选择不同的电阻电容调节截止频率^[8], 但是这类设计电路较为复杂, 可靠性与灵活性欠佳。

针对现有的不足, 本文结合微处理器的软硬件技

术, 开发一种可程控开关电容低通滤波器模块, 并就其设计、制作过程和应用方式进行讨论和研究。

1 总体方案设计

本文设计的程控滤波器, 其特点是以 STM32F103 微控制器为核心, 对滤波器的带宽进行调节。系统的总体设计方案如图 1 所示, 主要包括开关电容滤波电路、控制器、矩阵键盘、液晶屏与电源模块。系统采用矩阵键盘设置截止频率后, 通过控制器产生时钟信号控制滤波器带宽。滤波电路采用线性直流稳压电源进行供电。

滤波器选用引脚可编程的开关电容滤波器。其集成度较高, 功耗低, 带宽可通过程序控制截止频率的方式进行调节。设计将采用阶数较高的巴特沃兹滤波器模型, 在保证通带平坦度的同时保证滤波器的滚降率。

* 基金项目: 2020 年度黑龙江省高等教育教学改革重点委托项目(SJGZ20200052, SJGZ20200048);

2020 年度哈尔滨工业大学教学发展基金项目(XSZ2020005)

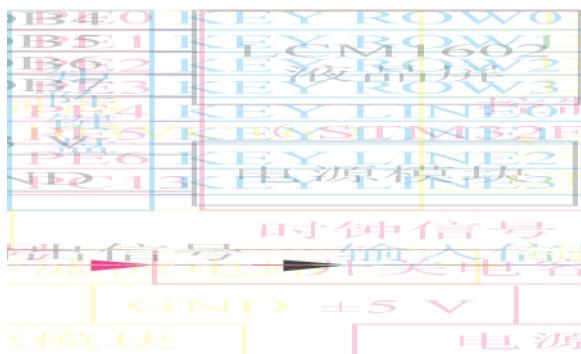


图 1 程控滤波器系统框架图

2 主电路设计

2.1 濾波器芯片選型

对于滤波器电路模块，需要选择合适的专用芯片。滤波器芯片选择需考虑的参数有：芯片的工作频率范围、截止频率的精度、滤波器阶数及滤波器控制方式。通过比较表 1 的滤波器芯片参数，选择由 Linear 公司设计的 LTC1068 作为开关电容滤波器芯片。该芯片的工作频率范围较大，相比表中其他芯片的截止频率精度最高。LTC1068 可以设计八阶滤波器，可以提供更高的过渡带滚降率，克服了巴特沃兹滤波器自身的不足^[9]。此外通过控制输入时钟信号频率就可以调整滤波器截止频率，故控制方式较为方便。

表 1 常用滤波器芯片

芯片型号	频率范围	频率精度/%	阶数/阶
MF10	≤ 30 kHz	± 6.0	2
LTC1063	0.3 Hz~40 kHz	± 0.5	5
LTC1068	≤ 56 kHz	± 0.3	8
MAX262	1 Hz~140 kHz	± 1.0	4
MAX260	0.01 Hz~7.5 kHz	± 3.0	4

2.2 低通滤波器设计

LTC1068 芯片内部包含四个相同的二阶滤波器，彼此直接级联，如果每个二阶滤波器稳定，级联后的整个系统就是稳定的^[10]。

LTC1068 有多种工作模式，其中模式 1 可用于二阶低通、带通、带阻滤波器设计，级联后适用于高阶巴特沃兹滤波器设计。与其他模式对比，该模式使用电阻较少，设计方便且成本低，而且其截止频率与时钟控制信号成正比，不会受到电阻精度的影响。故本文中 4 个二阶滤波器均使用模式 1。图 2 是模式 1 的原理图，可看到模式 1 可以实现低通 (LP)、带通 (BP)、带阻 (N) 输出。

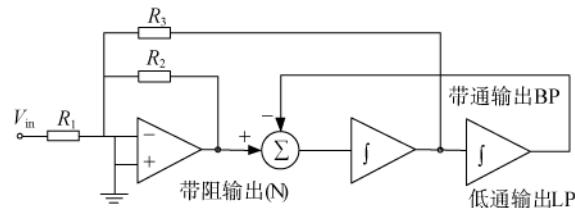


图 2 模式 1 结构原理图

根据自动控制理论, 模式 1 中低通输出可以由图 3 表示, 可以计算得到闭环传递函数, 如式(1)所示:

$$\frac{V_0}{V_{\text{in}}} = - \frac{R_2}{R_1} \frac{1}{s^2 + \frac{R_2}{R_1}s + 1} \quad (1)$$

其截止频率、品质因数、信号放大倍数如式(2)、式(3)、式(4)所示：

$$f_c = \frac{f_{\text{clk}}}{100} \times \sqrt{C} = \frac{f_{\text{clk}}}{100} \quad (2)$$

$$Q = \frac{\sqrt{C}}{B} = \frac{R_3}{R_2} \quad (3)$$

$$H_{\text{BP}} = -\frac{R_2}{R_1} \quad (4)$$

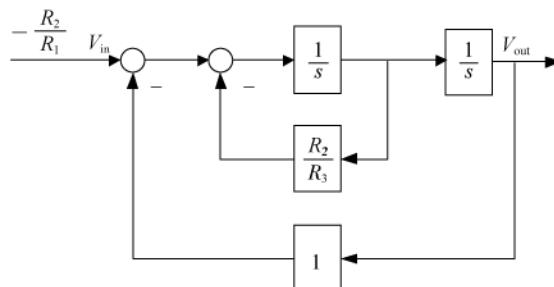


图 3 模式 1 低通滤波系统结构图

通过查询表 2, 可确定八阶滤波器的归一化分母多项式, 根据式(3)即可求得每级滤波器的品质因数。品质因数过大会产生幅频特性峰值化问题, 过小则导致过渡带平缓, 因此品质因数在 0.707 上下分布。为了确保谐振频率附近的稳定, 将 Q 值较低的环节置于前级。由此得到 LTC1068 各级滤波器的相关参数, 如表 3 所示。

表 2 巴特沃兹滤波器各阶低通多项式标准表

阶数	归一化分母多项式
1	$1+s$
2	$1+1.414s+s^2$
3	$(1+s)(1+s+s^2)$
...	...
8	$(1+0.39s+s^2)(1+1.111s+s^2)$ $(1+1.663s+s^2)(1+1.962s+s^2)$

表 3 LTC1068 各级滤波器工作参数表

编号	截止频率 / kHz	品质因数	模式	类型
B	50	0.606	1	低通
C	50	0.909	1	低通
A	50	2.55	1	低通
D	50	0.510	2	低通

该滤波器无需将信号放大，故设计时令各级滤波器的放大倍数乘积为 1 即可满足需求。给定 R_2 的阻值之后，通过式(3)和式(4)可得到 R_3 、 R_4 的阻值，从而确定滤波器主体电路的相关参数，如图 4 所示。引脚 3、19 为信号输入、输出端，引脚 21 输入时钟信号。电源与引脚 8 和引脚 23 连接。

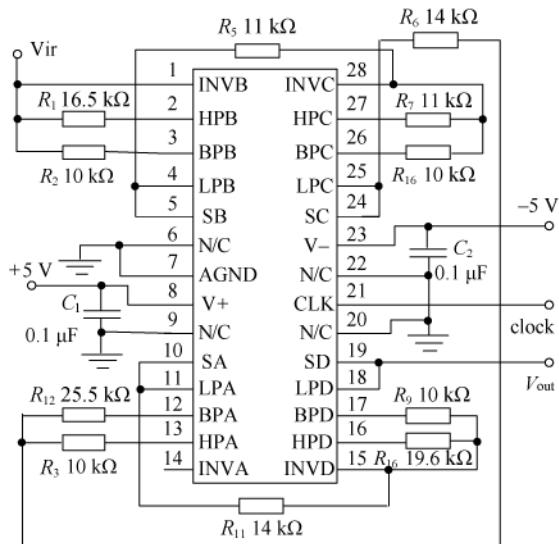


图 4 八阶低通滤波器电路原理图

2.3 滤波器交互式设计软件应用

为验证理论计算得出的滤波器参数，使用 Linear 公司开发的交互式滤波器设计软件 FilterCAD 验证上述滤波器设计^[11]，并进行仿真。软件设计流程如下：

(1) 进入设计界面，选择滤波器工作类型(低通、高通、带通、带阻)与经典的滤波器模型(巴特沃兹滤波器、切比雪夫滤波器、贝塞尔滤波器等)，设置通带增益、阻带衰减、截止频率、滤波器的阶数及品质因数。

(2) 选择开关电容滤波器芯片类型与工作模式，完成电路设计。通过对比，在误差范围内理论设计得到的滤波器参数与软件设计所得参数一致。

在该软件中可仿真得出输出信号的幅频特性与相频特性曲线。结果显示信号在截止频率 f_c 处衰减为 -2.89 dB 。信号频率为 $2f_c$ 时，信号衰减为 -48.09 dB ，说明阻带内对信号的衰减能力较强。

3 实验验证

根据前述设计，搭建实验测试平台，进行程控滤波

器相关实验，实验中使用的设备如表 4 所示。实验包括滤波器电路的低通性能测试以及自噪声测试。

表 4 实验设备清单

设备名称	型号	生产厂家	用途
直流稳压电源	SS3323	SUING	电路供电
波形发生器	DG4062	RIGOL	产生滤波器输入信号
示波器	MSO5072	RIGOL	观测数据

测试滤波器的低通性能时，通过单片机设置截止频率分别为 10 Hz、100 Hz、5 kHz、10 kHz、20 kHz、40 kHz 六挡。在每一挡测试时，令波形发生器产生一系列电压峰峰值固定且频率可变的正弦波，通过示波器记录输出信号幅值，绘制出幅频特性曲线。实验数据如图 5 和表 5 所示。

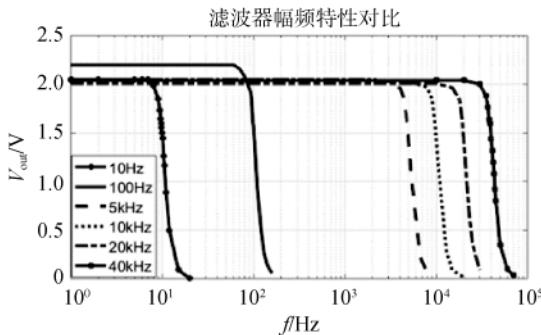
图 5 f_c 取不同频率时的输出信号幅频特性曲线

表 5 低通滤波器性能测试

设定截止频率	实际截止频率	相对误差/%
10 Hz	10.030 Hz	0.3
100 Hz	100.000 Hz	0
5 kHz	4.978 kHz	-0.44
10 kHz	9.955 kHz	-0.45
20 kHz	19.910 kHz	-0.45
40 kHz	40.000 kHz	0

由表 5 可知，截止频率可调，通带上限在 40 kHz，相对误差控制在 0.45% 以内，性能优于表 6 中所列出文献[11–13]的同类型滤波器。在误差范围内，部分幅频特性

表 6 同类文献中滤波器性能比较

滤波器芯片	低通带宽/kHz	最大相对误差/%
LTC1064 ^[11]	20	4.6
LTC1068 ^[12]	17	3.5
MAX262 ^[13]	10	4.0

曲线通带内信号幅值存在略低的情况，可能是受到测量仪器误差、滤波器内部电阻并非精密电阻等因素的影响。

系统自噪声也是滤波器系统中较重要的参数，反映系统本身对处理信号的影响。其测量方法如下：滤波器正常工作时将输入端接地，输出端连接到示波器，测得的交流有效值为噪声均方根值 V_{rms} ，由此可计算滤波器的自噪声水平，如式(5)所示：

$$V_{\text{noise}} = \frac{V_{\text{rms}}}{A} \quad (5)$$

式中 A 为系统的实际增益。测量结果如表 7 所示。

表 7 自噪声测试

频率/Hz	$V_{\text{p-p}}/\text{mV}$	$V_{\text{rms}}/\mu\text{V}$
10 000	3.264	575
100 000	3.670	569
5000 000	4.080	515
1 000 000	4.670	489

从表 7 结果可以观测到滤波器的噪声峰峰值低于 4.670 mV，等效输入噪声低于 575 μV ，在滤波器工作过程中对信号影响较小。

4 结论

本文设计实现了一种带宽可调的程控滤波器，研究了电路设计和程控方法，完成了带通可调的低通滤波器硬件电路模块设计和滤波器控制程序设计，并搭建实验测试平台，设计实验并进行测试。通过实验数据可知，该低通滤波器通带在 10 Hz~40 kHz 可调，且截止频率的误差控制在 0.45% 以内，实现低通滤波功能，满足设计需求，适用于噪声测量与谐波失真测量的实际工作。

参考文献

- [1] 王海亮.四通道程控滤波器的设计与实现[D].哈尔滨：哈尔滨工程大学，2014.
- [2] 严小黑，慕文静.层叠型小型化 5G FR2 频段滤波器设

(上接第 130 页)

- [3] 弓雷.ARM 嵌入式 Linux 系统开发详解[M].第 2 版.北京：清华大学出版社，2014.
- [4] 杨宗德.Linux 高级程序设计[M].第 3 版.北京：人民邮电出版社，2012.
- [5] 付扬.基于 Nios 软核的音频播放系统设计与实现[J].现代电子技术，2020,43(10):59–62.
- [6] 付志利.基于音频编解码器 TLV320AIC3106 与 FPGA/CPLD 的数字化语音处理系统[J].电子质量，2021(3):28–33.
- [7] 陈子为.基于 zynq 的视频实时拼接系统[J].电子技术应用，2021,47(2):67–71.

计[J].通信技术，2021,54(7):1768–1773.

- [3] 余晖冬，阮维剑，侯柳英.基于 ADS 的小型化切比雪夫带通滤波器的设计[J].科学技术创新，2021(20):147–148.
- [4] 吴星翰，许双婷，王杨，等.阻尼高通滤波器及其在高压直流系统中的应用[J].高电压技术，2021(8):1–9.
- [5] 任乐，徐金平.具有超宽带吸收特性的 Ku 波段带通滤波器设计[J].微波学报，2021(6):15–20.
- [6] 钟天云.基于 Multisim 的有源滤波器的设计[J].电子技术，2021,50(7):44–45.
- [7] 张斌，李磊，王元源，等.超宽带四通道开关滤波器的设计[J].火控雷达技术，2021,50(2):88–92, 102.
- [8] 王万生，关恩明.18 阶巴特沃兹有源低通滤波器设计[J].黑龙江科技信息，2015(21):57.
- [9] 朱思浩，罗显志.可配置八阶巴特沃斯低通滤波器的设计 [J].湖北大学学报(自然科学版)，2021,43(3):276–281.
- [10] KARANTZALIS P.Free FilterCAD 3.0 software designs filters quickly and easily[J].Electrical Design News, 2000, (25): A1–A2.
- [11] 单财良，鲁千红，罗玉文，等.基于 LTC1064 的多能程控滤波器设计[J].空军雷达学院学报，2010,24(1):47–50.
- [12] 曹彪，梁伟明.频带可变开关电容滤波器设计[J].集成电路通讯，2016(1):4–7.
- [13] 王文胜.基于 MAX264 的程控低通滤波器设计 [D].成都：电子科技大学，2010.

(收稿日期：2021-12-03)

作者简介：

杨春玲(1965-)，通信作者，女，博士，教授，主要研究方向：信号检测与处理、高精度仪器仪表设计、大规模集成电路实现，E-mail：1300802724@qq.com。

张扬(1999-)，男，硕士研究生，主要研究方向：电子系统设计、信号检测与处理。



扫码下载电子文档

- [8] 张艳辉.Vivado HLS 嵌入式实时图像处理系统的构建与实现[J].电子技术应用，2016,42(9):115–117.

(收稿日期：2022-02-22)

作者简介：

张来洪(1989-)，男，硕士，工程师，主要研究方向：嵌入式技术、电台主控及波形。

吴道远(1992-)，男，硕士，工程师，主要研究方向：嵌入式技术、电台主控及波形。

卢继川(1987-)，男，硕士，工程师，主要研究方向：嵌入式技术、电台主控及波形。



扫码下载电子文档

版权声明

经作者授权，本论文版权和信息网络传播权归属于《电子技术应用》杂志，凡未经本刊书面同意任何机构、组织和个人不得擅自复印、汇编、翻译和进行信息网络传播。未经本刊书面同意，禁止一切互联网论文资源平台非法上传、收录本论文。

截至目前，本论文已经授权被中国期刊全文数据库（CNKI）、万方数据知识服务平台、中文科技期刊数据库（维普网）、DOAJ、美国《乌利希期刊指南》、JST 日本科技技术振兴机构数据库等数据库全文收录。

对于违反上述禁止行为并违法使用本论文的机构、组织和个人，本刊将采取一切必要法律行动来维护正当权益。

特此声明！

《电子技术应用》编辑部

中国电子信息产业集团有限公司第六研究所