

文章编号: 2095—0411 (2013) 03 - 0057 - 05

基于 FPAA 技术的工频滤波器设计方法研究^{*}

朱正伟, 孙广辉, 张 丹, 鲍海虹

(常州大学 信息科学与工程学院, 江苏 常州 213164)

摘要: 随着电子技术的不断发展, 电力电子给人类生活带来便捷时同时也带来许多困扰。交流电路传输时对日常仪器产生电磁干扰, 降低了仪器的性能。在此背景下以基于开关电容技术的 FPAA 芯片 AN221E04 为例对 FPAA 技术在工频滤波方面展开研究。首先介绍了 FPAA 技术特点及软件, 然后对设计流程做了详细描述, 最后应用软件进行仿真验证设计。软件仿真验证得滤波器阻带为 0.4Hz、通带为 2Hz, 在 50Hz 在处衰减为 80dB 的巴特沃斯工频滤波器, 滤波效果达到预期设计要求。

关键词: 现场可编程模拟阵列; 工频滤波; 设计流程

中图分类号: TP 368.1

文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.2095—0411.2013.03.015

Research of Design Method of the Power Notch Filter Based on FPAA

ZHU Zheng-wei, SUN Guang-hui, ZHANG Dan, BAO Hai-hong

(School of Information Science and Engineering, Changzhou University, Changzhou 213164, China)

Abstract: With the continuous development of the electronic technology, power electronics not only brought convenience to human life, but also a lot of troubles. During AC circuit transmission, the instruments suffer from electromagnetic interference in daily life, lowering the performance. In this context, the study of the FPAA technology in terms of power frequency filtering on the FPAA chip AN221E04 was carried out, which was based on switched capacitor technology. Firstly, the FPAA technical characteristics and the software were introduced. Secondly, a detailed description of the design process was described. Finally, the application software design was verified by simulation. The 50Hz Butterworth notch filter with the passband 3.01dB, stopband 30dB, and the bandwidth of stop band 0.4Hz was successfully developed. The results by software simulation showed the stopband of the filter was 40mHz, the passband was 2Hz and decreased to 80dB at 50Hz, and the filtering effect achieved the desired requirement.

Key words: FPAA; power frequency filtering; design process

50Hz 工频信号对日常仪器设备有很大的干扰, 例如对生理信号的提取^[1-3]、电子束曝光机束流测量电路^[4]、动态应变仪^[5]、广域电磁仪^[6]等的干扰, 所以工频信号滤波研究有着极为重要的现实意义。

目前文献中介绍的工频滤波器分为两大类: 模拟滤波器和数字滤波器。模拟滤波器主要通过分立元件搭建和大中规模集成电路构成, 这些电路的设计要求设计者具有丰富的经验, 同时电路的调试和升级都比较繁琐, 使得产品研发周期比较长; 数字

^{*} 收稿日期: 2012 - 12 - 29

基金项目: 常州市武进区科技发展 (工业) 计划项目 (WG2011003); 2012 年江苏省高等学校大学生实践创新训练计划立项项目 (2012JSSPITP1798)

作者简介: 朱正伟 (1963—), 男, 江苏常州人, 教授, 主要从事嵌入式系统研究。

滤波首先对原始信号进行采样, 然后进行相应的算法设计来实现滤波, 数据的采集不可避免的造成有用信号的丢失, 同时算法设计比较复杂、对控制器的运算能力要求较高。

FPAA (现场可编程模拟阵列) 技术的出现很好的解决了上述问题, 它直接对原始信号进行处理, 最大限度保持了原始有用信号。FPAA 技术采用模块化设计思想, 降低了开发难度。FPAA 电路具有在线编程特点, 设计者可以快捷的设计和验证设计的滤波电路。基于上述特点展开 FPAA 技术设计工频滤波器的研究。

1 FPAA 技术简介

1.1 开关电容代替电阻原理

FPAA 芯片制作工艺较多, 例如跨导运算技术、电压运算技术、开关电容技术、开关电流技术等^[7], 以基于开关电容技术的 FPAA 芯片 AN221E04 为例进行设计说明。AN221E04 芯片由 4 个可配置模拟电路块 (CAB) 构成, 每个 CAB 包含 1 个运算放大器和 8 个开关电容, 通过控制开关电容的导通可以实现各种功能的模拟电路。

电容模拟电阻的方式有双线性型模拟电阻、并联型模拟电阻、串联型模拟电阻、串并联型模拟电阻、对寄生电容不敏感的模拟电阻。下面以并联型模拟电阻为例说明开关电容的特点, 电路连接如图 1 所示。

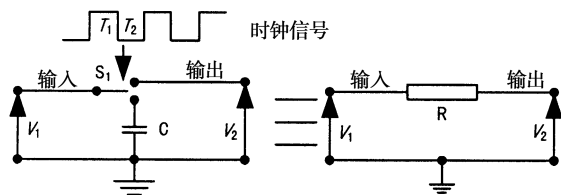


图 1 开关电容代替电阻原理图

Fig. 1 The schematic diagram of resistance instead of SC

在时钟信号 T_1 、 T_2 相位的控制下开关 S_1 周期接通 V_1 和 V_2 , 一个周期内电荷量的变化为 $C(V_1 - V_2)$, 因此, 电路中流向 V_2 的平均电流为:

$$I = \frac{C(V_1 - V_2)}{T} \quad (1)$$

由此可以推得等效电阻为:

$$R = \frac{V_1 - V_2}{I} = \frac{T}{C} = \frac{1}{Cf} \quad (2)$$

其中 T 为时钟周期, C 为电容容值, f 为时钟信号频率, V_1 、 V_2 为开关电容两端的电压值。

从 (2) 式知, 电阻值仅与电容值和时钟频率有关, 这使得不易集成的电阻可以用电容代替, 达到高度集成的效果。

1.2 开发软件

Anadigm 公司专门设置的 FPAA 开发 EDA 工具 AnadigmDesigner2 (简称 AD2), AD2 软件内置的一个仿真器, 仿真由虚拟信号器和示波镜组成, 虚拟信号发生器可以产生正弦波、方波、三角波、锯齿波、单脉冲及从第 3 方波形文件。设计者可以对系统提供的波形的幅值和频率进行设置。示波镜提供 4 通道探针, 可以同时 4 处端点进行观察, 设计者可以对采集到的信号的显示幅值进行不同设置, 以便于观察。设计者同时可以对仿真的步调和区间进行设计, 通过上面不同参数的组合, 设置不同的仿真参数以满足设计者不同的仿真需求。

AN221E04 芯片中包含 38 个基本模拟单元 CAM (Configurable Analog Module), 例如放大器、AD 转换器、比较器、乘法器等常用模块, 通过不同模块的组合可以快捷地搭建出各种常用模拟电路。同时, AN221E04 芯片具有动态编程特点, 可以通过控制器实时对电路进行参数设置。

AD2 提供了 Anadigm Filter 和 Anadigm PID 两种辅助软件。Anadigm Filter 是滤波电路设计工具, 它提供了低通、高通、带通、带阻和客户自己设计电路等 5 类电路, 每类电路有 5 种不同类型滤波电路相对应。设计者将滤波器各类参数输入到 Anadigm Filter 参数设置窗口, Anadigm Filter 会自动配置电路中各个开关电容的参数值, 下载配置电路到芯片中, 进行滤波电路验证, 电路修正后就可以到达实际应用的效果。Anadigm PID 是 PID 控制电路设计工具, 具体应用方法与 Anadigm Filter 相似, 这里不做介绍。

图 2 为 Anadigm 公司提供的二阶陷波滤波模块类型 I 电路。

电路对应的各个参数的计算公式如下:

$$\text{陷波频率: } f_{\text{notch}} = f_0 \sqrt{\frac{G_L}{G_H}} \quad (3)$$

$$\text{中心频率: } f_0 \cong \frac{f_c}{2\pi\sqrt{\frac{C_2 C_3}{C_A C_B}}} \quad (4)$$

$$\text{电压增益: } G_L \cong \frac{C_1}{C_2} \quad (5)$$

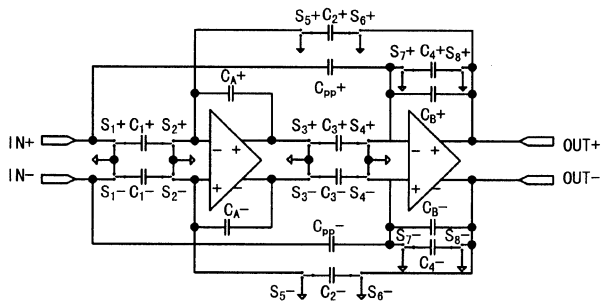


图 2 二阶陷波滤波模块

Fig. 2 Second-order notch filter module

高频增益： $G_H \cong \frac{C_{pp}}{C_B}$ (6)

品质因数： $Q \cong \frac{C_B}{C_A} \sqrt{\frac{C_2 C_3}{C_A C_B}}$ (7)

其中： C_1, C_2, C_3, C_4 为开关电容， C_A, C_B, C_{pp} 是反馈电容，各电容值可进行编程。

上述公式可以清晰地看出滤波效果与电容比值和时钟频率有关，这很好地避免了电阻由温度变化产生的线性漂移，从而使得滤波精度更高。同时在制造工艺中电容比值精度较高（小于 0.1%），电容代替电阻可以提高元件参数的精度，并且通过改变时钟频率和电容比可以获得丰富的参数值，从而可以满足不同性能要求的滤波器。

2 设计流程

FPAA 设计滤波器的一般流程如图 3 所示。

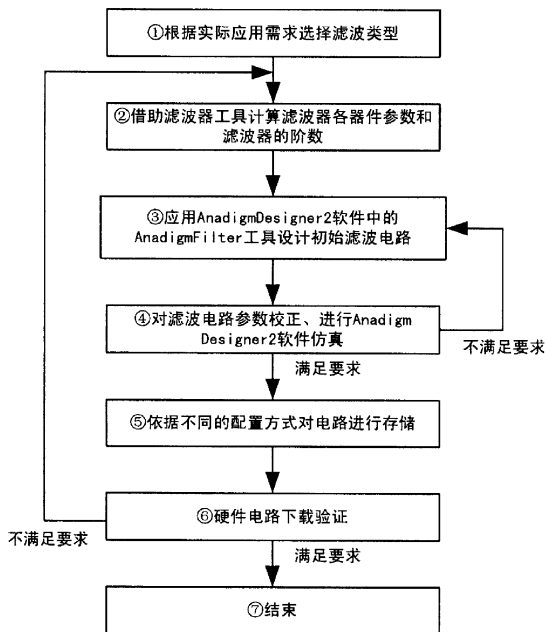


图 3 滤波器电路设计流程图

Fig. 3 The design flow chart of filter circuit

通过 matlab 工具箱 Filter Design & Analysis

Tool 来推算设计所需要的滤波器阶数。设计通带衰减为 3.01dB、阻带衰减为 30dB、阻带宽度为 2Hz 的巴特沃斯 50Hz 陷波器，采样频率 1 000Hz，通过软件运行得到满足上述要求的滤波器需要 6 阶。运行结果如图 4。

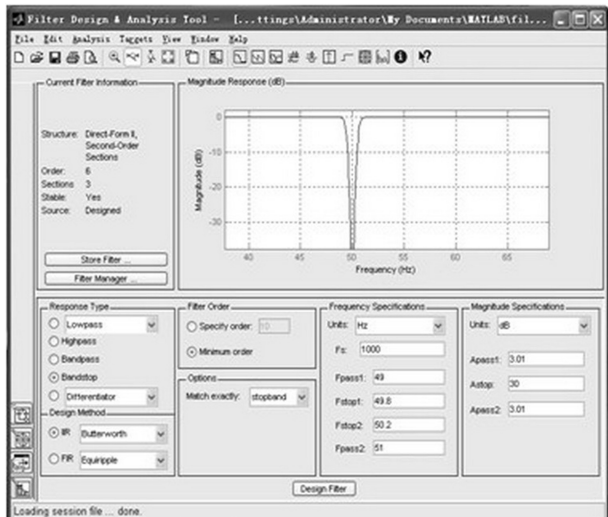


图 4 matlab 运算结果图

Fig. 4 The operating result of matlab

3 软件仿真

依据上述设计流程提供的滤波器阶数，在 AD2 软件中实现电路如图 5 所示。

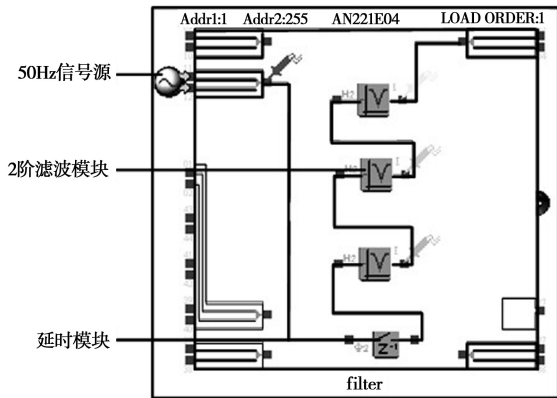


图 5 6 阶陷波电路

Fig. 5 The six-order trap circuit

各个设置参数：系统时钟 80kHz，模块时钟频率 1kHz，二阶带阻滤波器类型为类型 1，延时模块类型为相位 2，通带衰减 3.01dB，阻带衰减 30dB，中心频率 50Hz，阻带宽度 0.4Hz，通带宽度 2Hz。

各个滤波模块的中心频率 f_0 (Hz)、电压增益 G_L (dB)、高频增益 G_H (dB)、品质因数 Q 设置值和实际值如表 1 所示。

表 1 各模块电路设计值和实际值
Table 1 Each module value and actual value

模块名称	f_0/Hz		G_L/dB		G_H/dB		Q	
	设计值	实际值	设计值	实际值	设计值	实际值	设计值	实际值
CAB1	49.141	49	1.01	1.01	0.977	0.978	50	50.4
CAB2	50	49.9	1.01	1.01	1.01	1.01	25	25
CAB3	50.874	50.7	0.977	0.974	1.01	1.01	50	50.3

内置仿真器仿真效果如图 6、图 7 所示。

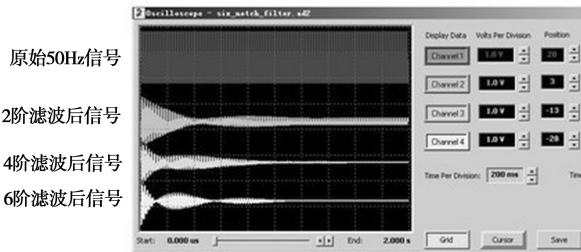
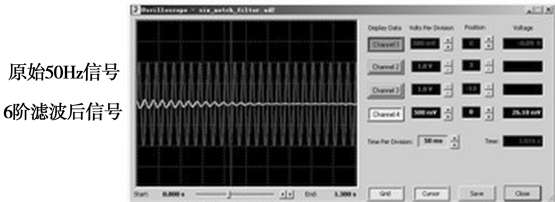


图 6 整体仿真图

Fig. 6 The overall simulation diagram



1秒后滤波稳定

图 7 滤波效果对比图

Fig. 7 The comparison chart of filter effect

通过图 6 可以清晰的看出滤波器阶数增加滤波效果变明显，图 7 可以看出 1s 后 50Hz 信号基本衰减到实验预期效果。

4 配置电路设计

4.1 配置方式

综合文献 [8, 9] 和 Anadigm 的使用手册配置方式可知 AN221E04 芯片主要有两种配置方式：一种是串行 EPROM 配置，另一种是微控制器实时配置。两种配置的方式通过 AN221E04 的 25 号引脚 MODE 来选择，低电平是微控制器配置，高电平为串行 EPROM 配置，设计实际应用电路时可以用跳线配置。图 8 给出了微控制器配置方式电路图。

图 8 中所示，通过微控制器 SPI 口配置 AN221E04 芯片。DIN 用来输入配置数据；CS2b 为片选信号，低电平有效；ACTIVATE 是数据配置完成反馈信号；PORb 是复位信号，低电平有效；具体数据操作通过微控制器的相应引脚信号来

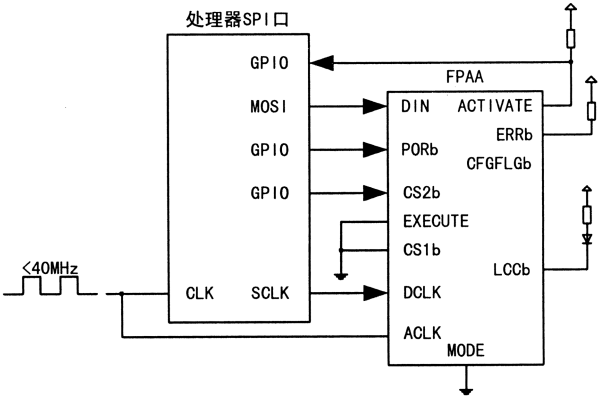


图 8 控制器配置电路图

Fig. 8 The circuit of controller configuration

实现。AN221E04 芯片中有 4 个 CAB 块，最多可以设计 8 阶滤波器，设计 6 阶滤波器只需一片 AN221E04 芯片就足够了，配置方式可以直接采用图 8 配置方式。一个系统可能会用到多片 FPAA 芯片，如果是多个芯片配置时，将前一片的 LCCb 引脚于下一片的 CS1b 相连接就可以了。

4.2 简易系统硬件电路

如图 9 所示，本系统的硬件电路由 STC89C52RC 单片机、存储器 24Cxx、串口电路、FPAA 芯片 AN221E04 组成。单片机主要功能是对 AN221E04 芯片进行配置，串口电路主要实现对单片机程序的更新，存储器主要对单片机及 FPAA 配置信息的存储。本电路主要是对软件仿真后的验证应用，由于实验条件的局限所以没有进行相应的设计电路验证，只提供理论电路连接图。

5 结 论

工频电磁波对日常仪器仪表设备影响较大，但目前的工频滤波电路存在设计周期长、调试难、算法复杂等问题。对此问题提出了一种设计简单、开发周期短、控制简单的工频滤波器。本文设计陷波滤波通过软件验证达到阻带为 0.4Hz、通带为 2Hz、衰减为 80dB 的设计要求。

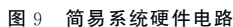


Fig. 9 The simple system hardware circuit

参考文献:

- [1] 韩晓新. 表面肌电信号采集电路的设计 [J]. 计算机测量与控制, 2011 (7): 1778 - 1780.
- [2] 王兵, 王魁, 梁晓霖, 等. 脑电信号中工频干扰去除的综合研究 [J]. 传感技术学报, 2010 (1): 87 - 92.
- [3] 田福英. 基于 DSP 的去除 ECG 工频干扰的陷波滤波器设计

[J]. 微计算机信息, 2012 (1): 63 - 65.

- [4] 陈振生, 王月, 张玉林, 等. 一种自动跟踪工频陷波器的研究与设计 [J]. 电子设计工程, 2012 (15): 184 - 187.
- [5] 琚裕强, 李忠富, 韦文斌. 动态应变仪数字滤波器设计 [J]. 广西工学院学报, 2011 (2): 81 - 85.
- [6] 黄丹, 裴婧, 蒋奇云. 广域电磁仪中的双 T 陷波器的优化设计 [J]. 物探与化探, 2011 (5): 626 - 629.
- [7] 王红培. 基于开关电容技术 FPAA 的 CAB 电路设计 [D]. 成都: 电子科技大学, 2009.
- [8] 金印彬, 王建校, 张虹. 现场可编程模拟阵列的微处理器配置模式及接口方法 [J]. 电子工程师, 2004 (5): 52 - 54.
- [9] 常龙, 朱正伟. 基于现场可编程模拟阵列 FPAA 的全波整流器的设计 [J]. 常州大学学报: 自然科学版, 2012, 24 (3): 53 - 56.