



AC78xx Filter Parameter Setting Guide

文档版本： 1.0

发布日期： 2023-05-29

© 2013 - 2023 杰发科技

本文档包含杰发科技的专有信息。未经授权，严禁复制或披露本文档包含的任何信息。

由于产品版本升级或其他原因，本文档内容会不定期进行更新。

修订信息

版本	日期	作者	修订说明
1.0	2023-05-29	ATC	初版

版权声明

本文档包含 AutoChips 公司的机密信息。禁止未经授权使用或披露本文档包含的信息。对因未经 AutoChips 公司授权而全部或部分披露此文档内容而给 AutoChips 公司带来的任何损失或损害，AutoChips 公司将追究责任。

AutoChips 公司保留对此处任何信息进行更改的权利，此处的信息如有变更，恕不另行通知。AutoChips 公司对使用或依赖此处包含的信息不承担任何责任。

本文档的所有信息均“按原样”提供，不提供任何形式的明示，暗示，法定或其他形式的保证。AutoChips 公司明确拒绝对适销性，非侵权性和针对特定用途的适用性方面的所有暗示保证。AutoChips 公司对本文档可能使用、包含或提供的任何第三方软件不提供任何担保，并且用户同意仅向该等第三方寻求与此相关的任何担保索赔。AutoChips 公司对于根据用户规格或为符合特定标准或公开论坛而产生的任何交付物，也不承担任何责任。

文档目录

修订信息	2
版权声明	3
文档目录	4
插图目录	5
表格目录	6
1 简介	7
1.1 本文目的	7
1.2 软件环境	7
2 滤波器原理	8
2.1 原理推导	8
2.2 仿真验证	9
3 滤波器实现	10
3.1 滤波器设计验证	10
3.2 滤波器示例	12
4 缩略语	14
5 参考资源	15

插图目录

图 2-1 一阶无源 RC 滤波器	8
图 2-2 构建离散化滤波器仿真图	9
图 2-3 Analog Filter Design 模块仿真图	9
图 2-4 构建滤波器与滤波器模块滤波输出对比	9
图 3-1 Filter Designer 设计一阶 LPF 图	12
图 3-2 HFI 二阶低通滤波器设计图	13

表格目录

表 3-1 Butterworth 滤波器分母多项式系数表	10
表 4-1 术语缩写	14
表 5-1 相关资源简介	15

1 简介

1.1 本文目的

本文主要目的是为了介绍说明 AC78xx 电机 Demo 板的电机控制软件中所使用的数字滤波器设计方法，让用户了解相关低通，带通等不同阶数数字滤波器的开发应用。



说明：

本文档中，AC78xx 包含 AC7801x、AC781x 和 AC7840x 系列产品。

1.2 软件环境

本文档中介绍的数字滤波器是基于 AC78xx 系列微处理器开发中电机控制 App 实际应用示例。电机控制 App 提供相关功能滤波器参数设置接口，用于支持 AC78xx 用户在电机应用自定义开发滤波器，以满足实际工况性能需求。

2 滤波器原理

电机控制的软件实现中，常用的滤波器有：低通滤波器 Low Pass Filter (LPF)、高通滤波器 High pass Filter (HPF)、带通滤波器 Band pass Filter (BPF) 等。下面以使用最广泛的一阶无源低通滤波器为例，推导介绍滤波器的工作原理。

2.1 原理推导

一阶无源低通滤波器电路原理示意图如图 2-1 所示：

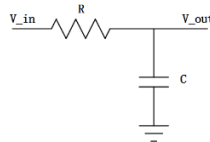


图 2-1 一阶无源 RC 滤波器

其中， V_{in} 为输入电压， V_{out} 为输出电压， R 为电阻， C 为电容。由图 2-1 可得：

$$V_{out} = \frac{1}{1 + j\omega RC} V_{in} \quad (1)$$

此 RC 滤波电路滤波截止频率可表示为：

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} \quad (2)$$

由(1)式可推导出滤波电路传递函数，并进行 Laplace 变换可得传递函数：

$$H(s) = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{1}{RCs + 1} \quad (3)$$

令 $\omega = \frac{1}{RC}$ ，则(3)式可等效为通用低通滤波器传递函数 $H(s) = \frac{\omega}{s + \omega}$ 。当角频率 $\omega < 2\pi f_c$ ，系统传递函数幅值随角频率增加而逐渐衰减，此时输入信号可正常通过；直至角频率到达 $2\pi f_c$ 时，系统输出信号幅值衰减值输入值 0.707 倍，高于此角频率信号受到滤除而难以通过被截止。因此，该电路可实现通低频，阻高频的低通滤波器功能。

(3)式为低通滤波器传递函数，但在 MCU 等数字处理器中，要想实现同样的低通滤波器功能，还需要对低通滤波器进行数字离散化。以 $s = \frac{1-z^{-1}}{T_s}$ 带入(3)式，并联立(2)式可得：

$$H(s) = \frac{1}{RCs + 1} \Rightarrow \frac{1}{\frac{1-z^{-1}}{T_s} RC + 1} = \frac{1}{\frac{f_s + 2\pi f_c}{2\pi f_c} - \frac{f_s}{2\pi f_c} z^{-1}} = \frac{\frac{2\pi f_c}{f_s + 2\pi f_c}}{1 - \frac{f_s}{f_s + 2\pi f_c} z^{-1}} \quad (4)$$

其中， f_c 为低通滤波器截止频率， $f_s = \frac{1}{T_s}$ 为滤波器采样频率。根据对滤波器 z 域传递函数离散化后(4)式，即可直接移植到数字处理器中运行，其数字表达式为：

$$Y_{(n)} = \frac{2\pi f_c}{f_s + 2\pi f_c} X_{(n)} + \frac{f_s}{f_s + 2\pi f_c} Y_{(n-1)} \quad (5)$$

2.2 仿真实验

在 Matlab-Simulink 中建立仿真模型，依据(5)式构建自定义低通滤波器如图 2-2 所示。同时选用 simulink 仿真库中 Analog Filter Design 模块配置低通滤波器如图 2-3 所示。将上述公式 (5) 的滤波结果与 Simulink 的 Analog Filter Design 模块的滤波结果进行对比如图 2-4 所示。

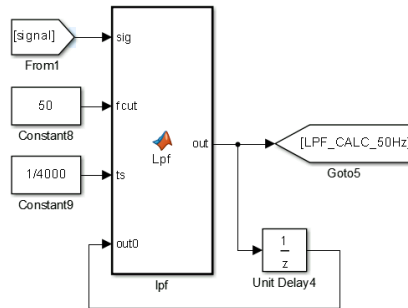


图 2-2 构建离散化滤波器仿真图

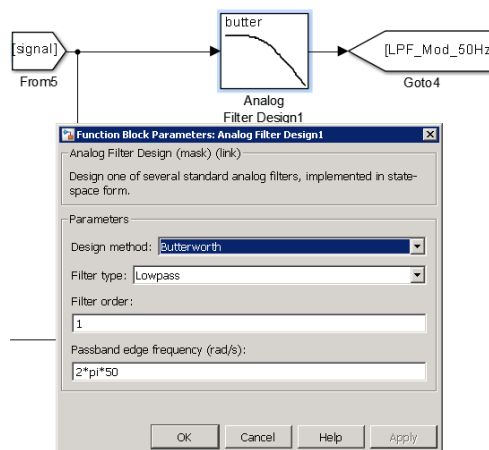


图 2-3 Analog Filter Design 模块仿真图

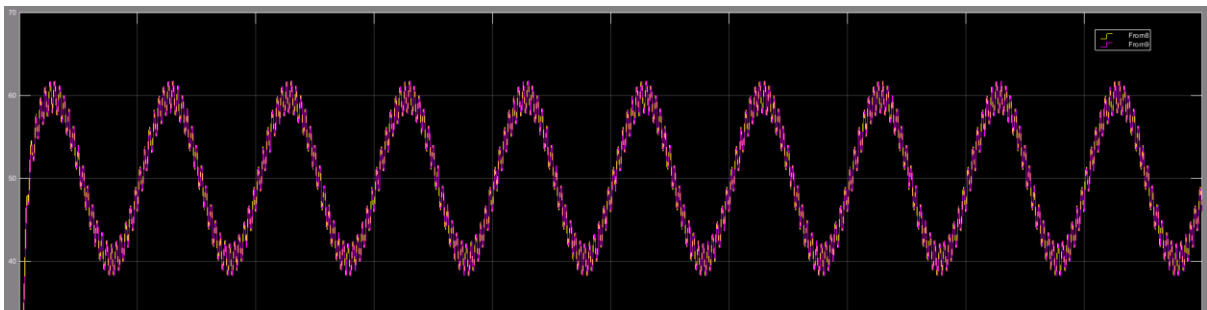


图 2-4 构建滤波器与滤波器模块滤波输出对比

图 2-4 中黄色曲线为根据(5)式构建滤波器计算结果，红色曲线为 Analog Filter Design 模块的滤波效果，可见离散化后(5)式的滤波结果与模块的滤波效果一致。

3 滤波器实现

3.1 滤波器设计验证

电机控制中使用的滤波器很多，因此滤波器的设计非常关键。在数字芯片中执行的数字滤波器主要有两种：IIR 滤波器和 FIR 滤波器。IIR 和 FIR 实现之间的数学区别在于 IIR 滤波器使用一些滤波器过去的输出作为输入。由于 IIR 滤波器的递归性质，IIR 可以使用更少的阶数来实现与 FIR 相同的性能。因此，从计算的角度考虑，这使得 IIR 滤波器比 FIR 滤波器更快。如果必须在实时应用程序中实现滤波器，通常选择 IIR。

IIR 滤波器有多种实现类型，例如：Butterworth 型，Chebyshev 型，Cauer 型和 Bessel 型等。本章节以 Butterworth 型滤波器为例，介绍滤波器的功能设计与验证。

归一化的 Butterworth 滤波器的传函一般形式为：

$$H(s) = \frac{d_0}{a_0 + a_1s + a_2s^2 + \dots + a_Ns^N} \quad (6)$$

一般希望保持通带增益为 0dB，因此设定 $d_0 = a_0$ 。

在 $d_0 = a_N = a_0 = 1$ 情况下 Butterworth 多项式的系数如表 3-1 所示：

表 3-1 Butterworth 滤波器分母多项式系数表

N	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7	a_8	a_9
1	1								
2	1.4142								
3	2.0000	2.0000							
4	2.6131	3.4142	2.1613						
5	3.2360	5.2360	5.2360	3.2360					
6	3.8637	7.4641	9.1416	7.4641	3.8637				
7	4.4939	10.097	14.591	14.591	10.097	4.4939			
8	5.1258	13.137	21.846	25.688	21.846	13.137	5.1258		
9	5.7587	16.581	31.163	41.986	41.986	31.163	16.581	5.7587	
10	6.3924	20.431	42.802	64.882	74.233	64.882	42.802	20.431	6.3924

在已知滤波器 H(s) 传递函数多项式系数情况下，不同滤波器阶数和不同滤波器类型的离散化公式各不相同。以一阶 Butterworth 低通滤波器 $H(s) = \frac{1}{s+1}$ 为例，其离散化过程满足：

$$s = \frac{1}{C_1} \frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}} \quad (7)$$

$$C_1 = \tan \frac{\omega_c}{2} \quad (8)$$

其中: $\omega_c = 2\pi f_c / f_s$

将(7)式代入 H(s)可得 z 域表达式:

$$H(z) = \frac{\frac{C_1}{C_1+1} + \frac{C_1}{C_1+1}z^{-1}}{1 + \frac{C_1-1}{C_1+1}z^{-1}} = \frac{b_0 + b_1z^{-1} + b_2z^{-2}}{a_0 + a_1z^{-1} + a_2z^{-2}} \quad (9)$$

即离散化后的数字滤波器表达式为:

$$Y_{(N)} = \frac{C_1}{C_1+1}X_{(N)} + \frac{C_1}{C_1+1}X_{(N-1)} - \frac{C_1-1}{C_1+1}Y_{(N-1)} \quad (10)$$

令截止频率为 50Hz, 采样频率为 4000Hz, 可分别计算出的各项系数值:

$$C_1 = \tan\left(\frac{\pi * 50}{4000}\right) = \tan(0.03927) = 0.0393$$

$$b_0 = b_1 = \frac{C_1}{C_1 + 1} = 0.03781$$

$$a_0 = 1 \quad a_1 = \frac{C_1 - 1}{C_1 + 1} = -0.09243$$

$$b_2 = a_2 = 0$$

即 H(s)离散化到 Z 域内可表示为:

$$H(z) = \frac{\frac{C_1}{C_1+1} + \frac{C_1}{C_1+1}z^{-1}}{1 + \frac{C_1-1}{C_1+1}z^{-1}} = \frac{0.03781 + 0.03781z^{-1}}{1 - 0.09243z^{-1}} \quad (11)$$

为验证该离散化表达式, 可采用 Matlab 软件中 Filter Designer 进行设计滤波器验证。在 Filter Designer 中将滤波器配置为一阶 Butterworth 型低通滤波器, 采样频率 4000Hz, 截止频率 50Hz, 生成数字滤波器如图 3-1 所示。由图 3-1 可知, (11)式离散化结果与 Filter Designer 设计结果完全一致, 验证无误。

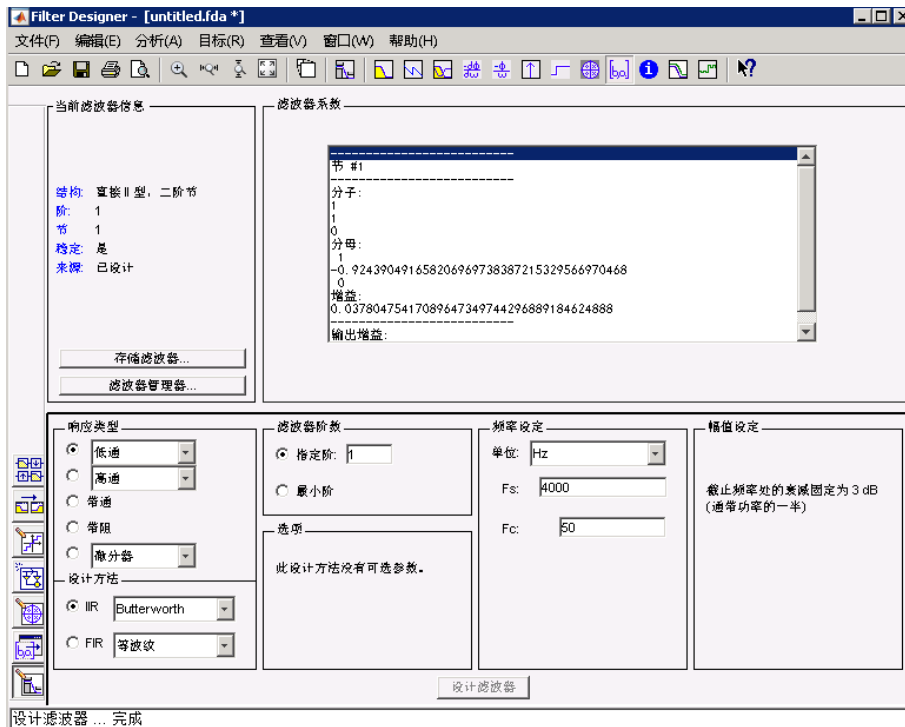


图 3-1 Filter Designer 设计一阶 LPF 图

综上所述，Fliter Designer 在设计滤波器时，已根据滤波器类型，阶数，采样/截止频率等特性自动设计相应低通滤波器，并输出离散数字化滤波器最终结果。Fliter Designer 设计滤波器简化了滤波器离散化过程中复杂推导计算，可直接移植到数字处理器中运行。

3.2 滤波器示例

ATC 电机算法 App 中滤波器设计即根据 3.1 节介绍方法设计，直接采用 Matlab 中 Fliter Designer 插件工具设置后自动生成使用。以高频注入算法中使用的二阶低通滤波器为示例，在高频注入算法配置参数头文件中注释如下：

```

/* @brief Two order band pass filter and low pass filter parameters design, user can refer to
"ATC_AC78xx_Filter_Parameter_Setting_Guide" document.
*   Filter transfer function:  $y(n) = A0 * x(n) + A1 * x(n-1) + A2 * x(n-2) + B1 * y(n-1) + B2 * y(n-2)$ .
*   Different filters can be obtained by matching different coefficients A and B. */

/* HFI 2rd LPF COEFF 8kHz pwmfreq, 200Hz cutFreq */
#define LPF_A0      Math_IQ(0.0055)
#define LPF_A1      Math_IQ(0.0111)
#define LPF_A2      Math_IQ(0.0055)
#define LPF_B1      Math_IQ(1.7786)
#define LPF_B2      -Math_IQ(0.8008)
    
```

以上滤波器配置参数由 Fliter Designer 直接配置生成，采样频率 8000Hz，截止频率 200Hz，生成二阶 Butterworth 型低通滤波器如图 3-2 所示。

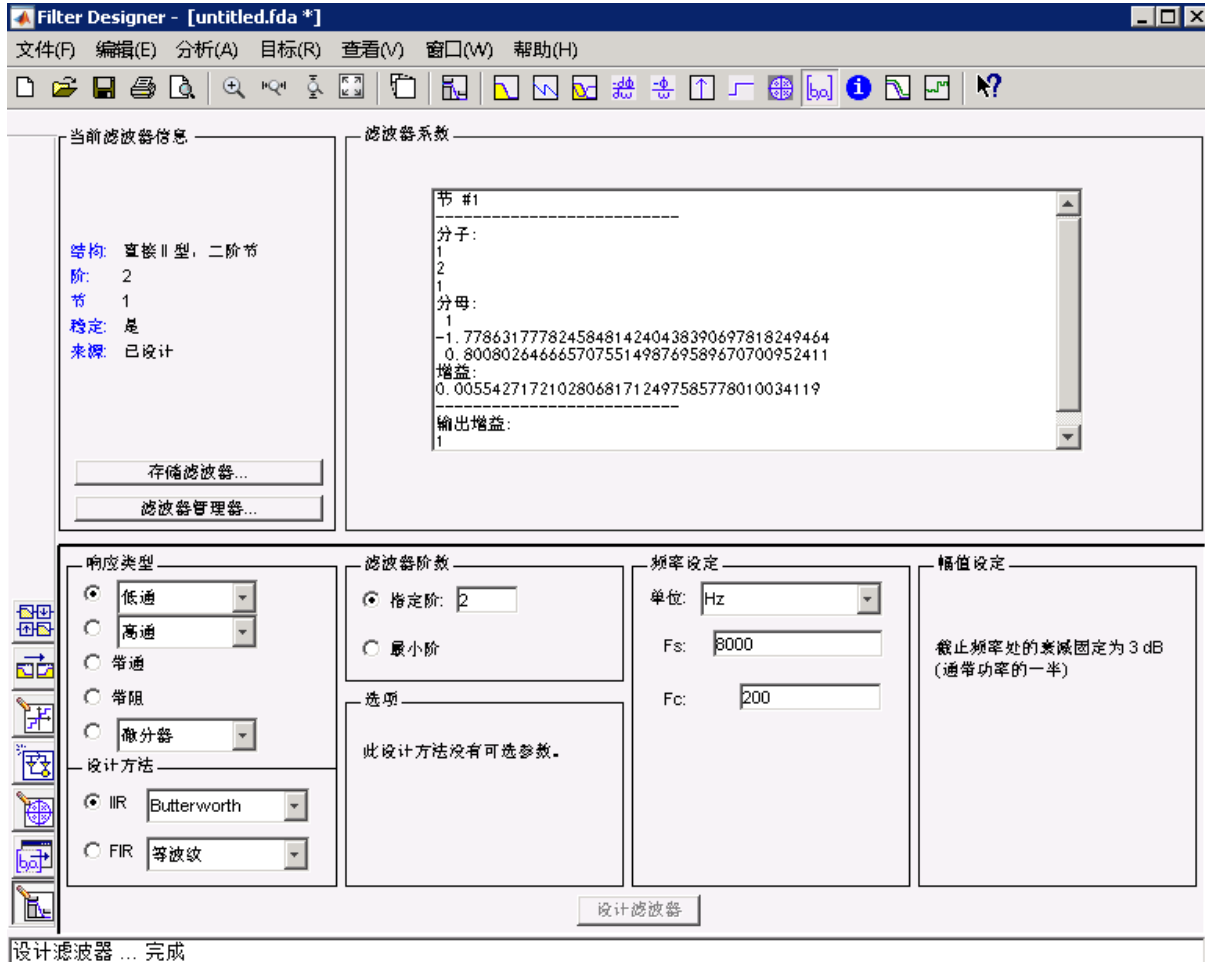


图 3-2 HFI 二阶低通滤波器设计图

4 缩略语

表 4-1 术语缩写

缩略词	全称	描述
Low Pass Filter	Low Pass Filter	低通滤波器
BPF	Band Pass Filter	带通滤波器
IIR	Infinite Impulse Response	无限脉冲响应
FIR	Finite Impulse Response	有限脉冲响应

5 参考资料

可参考的资源有：

表 5-1 相关资源简介

资源类型	资源名	资源简介
书籍	数字信号处理	西安电子科技大学出版社