

# 基于 MATLAB 信号处理工具箱的数字滤波器设计与仿真

丁磊,潘贞存,丛伟

(山东大学电气学院,山东 济南 250061)

**摘要:**介绍了一种利用 MATLAB 信号处理工具箱(Signal Processing Toolbox)快速有效地设计由软件组成的常规数字滤波器的方法。给出了使用 MATLAB 语言进行程序设计和利用信号处理工具箱的 FDA Tool 工具进行界面设计的详细步骤。利用 MATLAB 设计滤波器,可以随时对比设计要求和滤波器特性调整参数,直观简便,极大地减轻了工作量,有利于滤波器设计的最优化。还介绍了如何利用 MATLAB 环境下的仿真软件 Simulink 对所设计的滤波器进行模拟仿真。

**关键词:**数字滤波器; MATLAB; 无限长冲激响应; 有限长冲激响应

**中图分类号:** TN713; TN702 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2003)09-0049-03

## 1 引言

在电力系统微机保护和二次控制中,很多信号的处理与分析都是基于正弦基波和某些整次谐波而进行的,而系统电压电流信号(尤其是故障瞬变过程中)混有各种复杂成分,所以滤波器一直是电力系统二次装置的关键部件<sup>[1]</sup>。目前微机保护和二次信号处理软件主要采用数字滤波器。传统的数字滤波器设计使用繁琐的公式计算,改变参数后需要重新计算,在设计滤波器尤其是高阶滤波器时工作量很大。利用 MATLAB 信号处理工具箱(Signal Processing Toolbox)可以快速有效地实现数字滤波器的设计与仿真。

## 2 数字滤波器及传统设计方法

数字滤波器可以理解为是一个计算程序或算法,将代表输入信号的数字时间序列转化为代表输出信号的数字时间序列,并在转化过程中,使信号按预定的形式变化。数字滤波器有多种分类,根据数字滤波器冲激响应的时域特征,可将数字滤波器分为两种,即无限长冲激响应(IIR)滤波器和有限长冲激响应(FIR)滤波器。

IIR 数字滤波器具有无限宽的冲激响应,与模拟滤波器相匹配,所以 IIR 滤波器的设计可以采取在模拟滤波器设计的基础上进一步变换的方法。FIR 数字滤波器的单位脉冲响应是有限长序列。它的设计问题实质上是确定能满足所要求的转移序列或脉冲响应的常数问题,设计方法主要有窗函数法、频率采样法和等波纹最佳逼近法等。

在对滤波器实际设计时,整个过程的运算量是很大的。例如利用窗函数法<sup>[2]</sup>设计  $M$  阶 FIR 低通

滤波器时,首先要根据式(1)计算出理想低通滤波器的单位冲激响应序列  $h_d(n)$ ,然后根据式(2)计算出  $M$  个滤波器系数  $h(n)$ 。当滤波器阶数比较高时,计算量比较大,设计过程中改变参数或滤波器类型时都要重新计算。

$$h_d(n) = \frac{1}{s} \int_{-\infty}^{\infty} H(\omega) e^{jn\omega} d\omega \quad (1)$$

$$h(n) = h_d(n) w(n) \quad (2)$$

设计完成后对已设计的滤波器的频率响应要进行校核。要得到幅频相频响应特性,运算量也是很大的。平时所要设计的数字滤波器,阶数和类型并不一定是完全给定的,很多时候要根据设计要求和滤波效果不断地调整,以达到设计的最优化。在这种情况下,滤波器设计就要进行大量复杂的运算,单纯的靠公式计算和编制简单的程序很难在短时间内完成。利用 MATLAB 强大的计算功能进行计算机辅助设计,可以快速有效地设计数字滤波器,大大地简化了计算量。

## 3 数字滤波器的 MATLAB 设计

### 3.1 FDA Tool 界面设计

#### 3.1.1 FDA Tool 的介绍

FDA Tool(Filter Design & Analysis Tool)是 MATLAB 信号处理工具箱里专用的滤波器设计分析工具, MATLAB 6.0 以上的版本还专门增加了滤波器设计工具箱(Filter Design Toolbox)。FDA Tool 可以设计几乎所有的常规滤波器,包括 FIR 和 IIR 的各种设计方法。它操作简单,方便灵活。

FDA Tool 界面总共分两大部分,一部分是 Design Filter,在界面的下半部,用来设置滤波器的设计参数;

另一部分则是特性区,在界面的上半部分,用来显示滤波器的各种特性。Design Filter 部分主要分为:

Filter Type (滤波器类型) 选项,包括 Lowpass (低通)、Highpass (高通)、Bandpass (带通)、Bandstop (带阻) 和特殊的 FIR 滤波器。

Design Method (设计方法) 选项,包括 IIR 滤波器的 Butterworth (巴特沃思) 法、Chebyshev Type (切比雪夫型) 法、Chebyshev Type (切比雪夫型) 法、Elliptic (椭圆滤波器) 法和 FIR 滤波器的 Equiripple 法、Least-Squares (最小乘方) 法、Window (窗函数) 法。

Filter Order (滤波器阶数) 选项,定义滤波器的阶数,包括 Specify Order (指定阶数) 和 Minimum Order (最小阶数)。在 Specify Order 中填入所要设计的滤波器的阶数 ( $N$  阶滤波器, Specify Order =  $N - 1$ ), 如果选择 Minimum Order 则 MATLAB 根据所选择的滤波器类型自动使用最小阶数。

Frequency Specifications 选项,可以详细定义频带的各参数,包括采样频率  $f_s$  和频带的截止频率。它的具体选项由 Filter Type 选项和 Design Method 选项决定,例如 Bandpass (带通) 滤波器需要定义 Fstop1 (下阻带截止频率)、Fpass1 (通带下限截止频率)、Fpass2 (通带上限截止频率)、Fstop2 (上阻带截止频率), 而 Lowpass (低通) 滤波器只需要定义 Fstop1、Fpass1。采用窗函数设计滤波器时,由于过渡带是由窗函数的类型和阶数所决定的,所以只需要定义通带截止频率,而不必定义阻带参数。

Magnitude Specifications 选项,可以定义幅值衰减的情况。例如设计带通滤波器时,可以定义 Wstop1 (频率 Fstop1 处的幅值衰减)、Wpass (通带范围内的幅值衰减)、Wstop2 (频率 Fstop2 处的幅值衰减)。当采用窗函数设计时,通带截止频率处的幅值衰减固定为 6 db,所以不必定义。

Window Specifications 选项,当选取采用窗函数设计时,该选项可定义,它包含了各种窗函数。

### 3.1.2 带通滤波器设计实例

本文以一个 FIR 滤波器的设计为例说明如何使用 MATLAB 设计数字滤波器。在小电流接地系统中注入 83.3 Hz 的正弦信号,对其进行跟踪分析,要求设计一带通数字滤波器,滤除工频及整次谐波,以便在非常复杂的信号中分离出该注入信号。参数要求:96 阶 FIR 数字滤波器,采样频率 1000 Hz,采用 Hamming 窗函数设计。

本例中,首先在 Filter Type 中选择 Bandpass (带通滤波器);在 Design Method 选项中选择 FIR Win-

dow (FIR 滤波器窗函数法),接着在 Window Specifications 选项中选取 Hamming;指定 Filter Order 项中的 Specify Order = 95;由于采用窗函数法设计,只要给出通带下限截止频率  $f_{c1}$  和通带上限截止频率  $f_{c2}$ ,选取  $f_{c1} = 70$  Hz,  $f_{c2} = 84$  Hz。设置完以后点击 Design Filter 即可得到所设计的 FIR 滤波器。通过菜单选项 Analysis 可以在特性区看到所设计滤波器的幅频响应、相频响应、零极点配置和滤波器系数等各种特性如图 1 所示。设计完成后将结果保存为 1.fda 文件。

在设计过程中,可以对比滤波器幅频相频特性和设计要求,随时调整参数和滤波器类型,以便得到最佳效果。其它类型的 FIR 滤波器和 IIR 滤波器也都可以使用 FDA Tool 来设计。

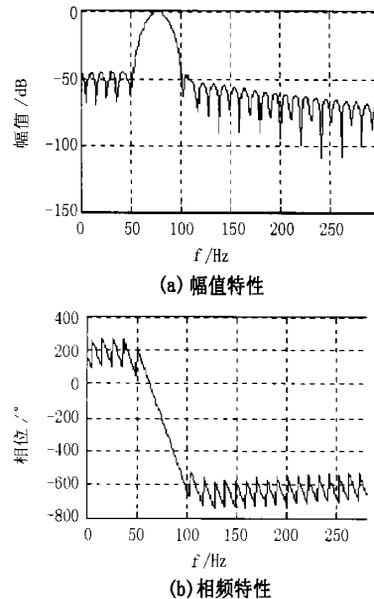


图 1 滤波器幅频和相频响应(特性区)

Fig. 1 Magnitude Response and Phase Response of the filter

### 3.2 程序设计法

在 MATLAB 中,对各种滤波器的设计都有相应的计算振幅响应的函数<sup>[3]</sup>,可以用来做滤波器的程序设计。

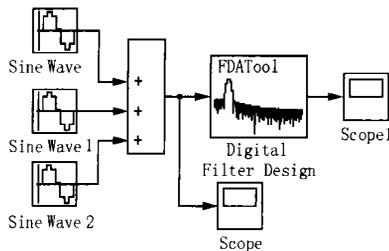
上例的带通滤波器可以用程序设计:

```
c = 95; %定义滤波器阶数 96 阶
w1 = 2 * pi * fc1 / fs;
w2 = 2 * pi * fc2 / fs; %参数转换,将模拟滤波器的技术指标转换为数字滤波器的技术指标
window = hamming(c + 1); %使用 hamming 窗函数
h = fir1(c, [w1/pi w2/pi], window); %使用标准响应的加窗设计函数 fir1
freqz(h, 1, 512); %数字滤波器频率响应
```

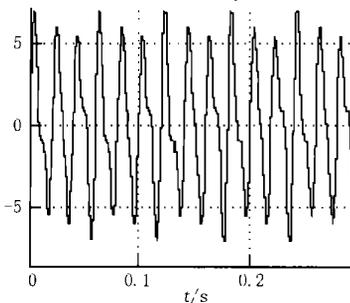
在 MATLAB 环境下运行该程序即可得到滤波器幅频相频响应曲线和滤波器系数  $h$ 。篇幅所限,这里不再将源程序详细列出。

#### 4 Simulink 仿真

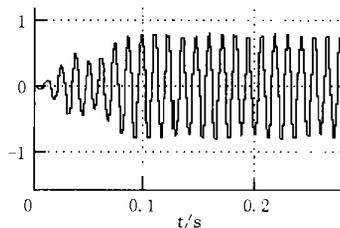
本文通过调用 Simulink 中的功能模块构成数字滤波器的仿真框图,在仿真过程中,可以双击各功能模块,随时改变参数,获得不同状态下的仿真结果。例如构造以基波为主的原始信号  $x(t) = 5\sin(100t) + 2\sin(200t) + \sin(2 \times 83.3t)$ ,通过 Simulink 环境下的 Digital Filter Design(数字滤波器设计)模块导入 3.1.2 中 FDA Tool 所设计的滤波器文件 1.fda。仿真图和滤波效果图如图 2 所示。



(a) Simulink 仿真图



(b) 原始离散波形



(c) 滤波后离散波形

图 2 Simulink 仿真图及滤波效果图

Fig.2 Simulink connections and waveform

可以看到经过离散采样、数字滤波后分离出了 83.3 Hz 的频率分量(scope1)。之所以选取上面的叠加信号  $x(t)$  作为原始信号,是由于在实际工作中要对已经经过差分滤波的信号进一步做带通滤波,信号的各分量基本与  $x(t)$  一致,可以反映实际的情况。本例设计的滤波器已在实际工作中应用,取得了不错的效果。

#### 5 结论

利用 MATLAB 的强大运算功能,基于 MATLAB 信号处理工具箱(Signal Processing Toolbox)的数字滤波器设计法可以快速有效地设计由软件组成的常规数字滤波器,设计方便、快捷,大大地减轻了工作量。在设计过程中可以对比滤波器特性,随时更改参数,以达到滤波器设计的最优化。利用 MATLAB 设计数字滤波器在电力系统二次信号处理软件和微机保护中,有着广泛的应用前景。

#### 参考文献:

- [1] 陈德树. 计算机继电保护原理与技术[M]. 北京:水利电力出版社,1992.
- [2] 蒋志凯. 数字滤波与卡尔曼滤波[M]. 北京:中国科学技术出版社,1993.
- [3] 楼顺天,李博菡. 基于 MATLAB 的系统分析与设计 - 信号处理[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,1998.
- [4] 胡广书. 数字信号处理:理论、算法与实现[M]. 北京:清华大学出版社,1997.
- [5] 蒙以正. MATLAB5. X 应用与技巧[M]. 北京:科学出版社,1999.

收稿日期: 2002-11-26; 修回日期: 2002-12-20

#### 作者简介:

丁磊(1980-),男,硕士研究生,研究方向为电力系统微机保护;

潘贞存(1962-),男,教授,博士生导师,研究方向为电力系统继电保护、电能质量分析、配网自动化等;

丛伟(1978-),男,博士研究生,研究方向为电力系统继电保护等。

### Design and simulation of digital filter based on Signal Processing Toolbox of MATLAB

DING Lei, PAN Zhen-cun, CONG Wei

(School of Electrical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China)

**Abstract:** This paper introduces a method based on the Signal Processing Toolbox of MATLAB to design the digital filter effectively. To design the digital filter, it can be programmed by MATLAB language and designed by the FDA Tool interface. Particular steps of the two ways are given in this paper. Using this method, the parameters can be adjusted according to the design request and characteristics of filter momentarily. It reduces a lot of computation and is good for the optimization of filter design. The filter simulation based on Simulink under the condition of MATLAB is also introduced in this paper.

**Key words:** digital filter; MATLAB; FIR; IIR