

数字滤波器级联设计及仿真

崔永青¹, 史琳芸¹, 阴超波²

(1. 宝鸡职业技术学院 机电信息学院, 陕西 宝鸡 721013;

2. 西安理工大学 自动化与信息工程学院, 陕西 西安 710048)

摘要: 测振仪中使用的数字加速度传感器信号存在自身噪声和环境噪声, 采用 MATLAB 仿真工具对加速度传感器信号进行频谱分析, 识别干扰信号。干扰信号影响加速度传感器输出的准确性和稳定性, 针对噪声干扰分别采用 IIR 低通数字滤波器设计和 MATLAB 工具箱 Fdatool 进行陷波数字滤波器设计得到滤波器数字模型。在对单个滤波器效果进行仿真验证之后, 再对它们实施级联设计, 从而获得双重的滤波效果。对经级联滤波处理后的加速度传感器数据进行仿真分析, 结果表明所设计的级联滤波器实现了低通滤波和陷波滤波的双重目的, 且不会对有用信号造成影响, 有效提高了系统的抗干扰能力。

关键词: 数字滤波器设计; IIR 数字滤波器; 滤波器级联; 低通滤波器; 陷波滤波器

中图分类号: TP391

文献标识码: A

DOI: 10.19358/j.issn.2096-5133.2020.08.010

引用格式: 崔永青, 史琳芸, 阴超波. 数字滤波器级联设计及仿真[J]. 信息技术与网络安全, 2020, 39(8): 52-56.

Design and simulation of digital filter cascade

Cui Yongqing¹, Shi Linyun¹, Yin Chaobo²

(1. Department of Electrical and Mechanical Information, Baoji Vocational and Technology College, Baoji 721013, China;

2. School of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: The digital acceleration transducer used in the vibration meter exists self noise and environment noise. MATLAB simulation tool is used to analyze the spectrum of acceleration transducer signal and discriminate intrusion signal. Intrusion signal may influence the accuracy and stability of the output signal of acceleration transducer. Be directed against the noise, this paper uses IIR low pass digital filter and MATLAB toolbox Fdatool notching digital filter to design digital filter dividually. After verifying the result of each single filter, a cascade design is implemented to achieve double filter effect. The result of simulation analysis of data that processed by cascade filter indicates that the design of cascade filter satisfies the requirement of low pass filtering and notching filtering, and has no effect on useful signal, which can effectively improve the capacity of resisting disturbance.

Key words: design of digital filter; IIR digital filter; filter cascade; low pass filter; notching filter

0 引言

在测振仪中, 需要应用到数字加速度传感器, 它输出的所有信号都属于加速度数字信号。对于该信号而言, 如果处于噪声环境中, 会大大降低加速度传感器输出信号的准确性。因此, 需要通过数字滤波器对其进行处理。数字滤波器的工作原理是依据离散系统的特性对系统的输入信号进行加工和变换, 从而使它们的频谱或者信号波形发生变化, 保证被需要的频率信号顺利通过, 并抑制无用的信号通过。对于数字滤波器而言, 其不仅具有很高的滤

波精度, 而且它的灵活性也比较好。

本文以传感器的输出信号作为研究对象, 分析其频谱特性, 针对其中的噪声信号设计相应的数字滤波器。通过低通滤波器, 能够把高频的信号阻挡在外面, 对于低频信号, 则尽量保持其信号的准确性。理想低通滤波器具有非常好的滤波效果, 几乎不存在失真现象, 一般情况下, 把通频特性视为矩形, 但在实际应用过程中, 在所截止的频率中存在一些过渡带。通过陷波滤波器能够把频率范围较小的信号筛选出来, 陷波滤波器可以将某一特定信

号频率点的信号衰减为零,而对于其他的频率信号保持不变。结合该加速度传感器的使用环境和要求,将低通滤波器与陷波滤波器两者进行级联设计作用于传感器输出,从而得到准确有效的信号。

1 对加速度传感器信号进行频谱分析

采集加速度传感器的输出信号,并对其进行频谱分析^[1],结果如图1所示。结合该传感器的使用环境,认为该信号在50 Hz附近存在较大噪声。同时对于该加速度传感器而言,其使用频率范围为300 Hz以下的低频段,因此300 Hz以上的信号可以不用考虑。

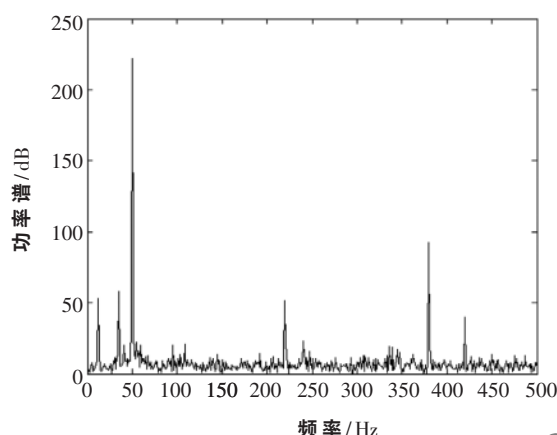


图1 加速度传感器原始信号频谱分析

2 数字滤波器设计

通过上述分析可知加速度传感器输出信号存在50 Hz单点噪声,同时该传感器使用频率为300 Hz以下低频段。因此设计300 Hz低通数字滤波器和50 Hz陷波数字滤波器级联完成对加速度传感器信号的滤波处理,从而减少自身噪声和环境噪声对加速度传感器输出信号的干扰。

数字滤波器具有精度高、稳定性强和灵活性好等优点。根据离散系统的时域特性,数字滤波器划分为以下两种类型:无限冲激响应滤波器(IIR滤波器)、有限冲激响应滤波器(FIR滤波器)^[2-3]。对于IIR数字滤波器,在获得同样的技术指标时,它的阶数更少^[4]。通过深入分析IIR数字滤波器的特性^[5-12],本文采用IIR数字滤波器进行设计。

2.1 300 Hz低通数字滤波器设计

IIR低通数字滤波器设计步骤如下^[13]:

(1)分析实际的工程需求,明确滤波器需要的性能指标。对于一般的性能指标而言,通常包含阻带

截止频率 ω_s ,阻带衰减 α_s ,通带截止频率 ω_p ,通带衰减 α_p 。

(2)在明确所需的技术指标以后,构建相应的数字滤波器模型。综合分析数字低通滤波器的相关技术指标,并将其化转为模拟低通滤波器所需的技术指标。在这一过程中,主要应用的是双线性变换法,其中,边界频率存在以下转换关系,见式(1),其中 Ω 表示模拟角频率, w 表示数字频率。

$$\Omega = \frac{2}{T} \tan\left(\frac{1}{2}w\right) \quad (1)$$

(3)按照模拟低通滤波器的技术指标设计模拟低通滤波器。

(4)构建模拟滤波器 $H(s)$,并使其从 s 平面转移到 z 平面,从而得到数字低通滤波器的系统函数 $H(z)$ 。

IIR数字滤波器在MATLAB中的实现方法如下:

首先,根据数字低通滤波器的性能要求设计模拟低通滤波器,然后通过脉冲响应不变法或双线性变换法将其进行数字化,转化为所需的数字低通滤波器。在MATLAB中进行IIR滤波器设计的相关函数说明如下^[14]:

(1)巴特沃兹滤波器设计函数: $[B, A] = \text{butter}(N, W, \text{options})$

该函数得到一个用有理分式表示的低通数字滤波器系统函数,该系统函数的分子分母系数向量为 B 和 A 。该函数的参数 N 为指定低通滤波器的阶数, W 为截止频率。

(2)巴特沃兹滤波器阶次选择函数: $[N, W] = \text{buttord}(W_p, W_s, R_p, R_s, 's')$ 或 $[N, W_n] = \text{buttord}(W_p, W_s, R_p, R_s)$

设计出符合巴特沃兹低通滤波器所需的最低阶次 N 以及3 dB截止频率 W_n ,其中 W_p 代表通带截止频率, W_s 代表阻带截止频率, R_p 代表最大通带衰减, R_s 代表最小阻带衰减, s 表示模拟滤波器。

(3)双线性变换函数: $[B_z, A_z] = \text{bilinear}(B_s, A_s, F_s)$

把模拟滤波器的 $[B_s, A_s]$ 转换成实际采样频率为 F_s 的数字滤波器 $[B_z, A_z]$ 。其中 B_s 为模拟滤波器传递函数的分子系数行向量, A_s 为模拟滤波器传递函数的分母系数行向量。

(4)频率特性响应函数: $[H, w] = \text{freqs}(b, a, N)$

函数可以得到数字滤波器的频率响应 $H(z)$ 。其中 b 表示连续系统的系统函数分子多项式的系统

向量, a 表示连续系统的系统函数分母多项式的系统向量, N 表示频率等分点数, 默认为 512。

2.2 50 Hz 陷波数字滤波器设计

当带阻滤波器具有很窄的阻带时, 通常将其称作是陷波滤波器。陷波滤波器的设计是以模拟滤波器为原型, 通过一定变换转换为数字滤波器^[15]。在设计陷波滤波器时, 常常应用以下两种方法: (1) 通过 z 平面零极点法, 设计 IIR 数字陷波滤波器; (2) 通过 MATLAB 的信号处理设备, 设计数字滤波器。

(1) 在设计 IIR 数字陷波滤波器时, 一般采用的是 z 平面零极点法。由 IIR 滤波器的传递函数知道, 它的分子、分母多项式作因式分解可得式(2):

$$H_z = A \frac{\prod_{i=1}^M (1 - c_i z^{-1})}{\prod_{i=1}^M (1 - d_i z^{-1})} \quad (2)$$

其中, A 代表的是系统的增益。如果把 z 当作极坐标, 那么对于 $z = re^{j\omega}$, 当 $r=1$ 时, 所进行的 z 变换称作是傅里叶变换。所以, 在上面的 IIR 数字滤波器的传递函数中, 对于复变量 z , 如果利用 $e^{j\omega}$ 进行取代, 就能够获得 IIR 数字滤波器的频率特性 $H(e^{j\omega})$ 。采用该方法设计一个 IIR 陷波滤波器, 如对 w_0 点进行陷波, 即当 $w = w_0$ 时, $|H(e^{j\omega})| \approx 1$, 则取极点 $z = ae^{\pm jw_0}$, 从而得到 IIR 陷波滤波器传递函数如式(3)所示:

$$H(z) = \frac{1 - 2\cos w_0 z^{-1} + z^{-2}}{1 - 2a\cos w_0 z^{-1} + a^2 z^{-2}} \quad (3)$$

(2) 通过 MATLAB 的信号处理工具箱 Fdatool 对数字滤波器进行设计十分便捷, 可大大减小工作量。在进行设计时, 可以对比分析滤波器具有的不同特

性, 调整相关的参数, 以获得最佳的设计效果。

本文在设计 50 Hz 陷波滤波器时, 主要应用的是 MATLAB 信号处理工具箱 Fdatool。选择 Design Filter, 滤波器类型选择单点陷波滤波器, 设计方法为 IIR, 采样频率为 1 000 Hz, 陷波频率为 50 Hz。在把陷波滤波器的所有系数都计算完成以后, 再深入分析陷波滤波器的相关性能, 进而验证滤波器是否达到了设计要求。选择 Fdatool 的菜单“Analysis”->“Magnitude Responae”, 启动幅频响应分析, 得陷波滤波器频谱如图 2 所示, 该图表示该陷波滤波器对 50 Hz 单点信号能够进行有效衰减, 满足设计要求。

2.3 低通滤波器和陷波滤波器级联设计

针对加速度传感器信号的噪声分别设计 300 Hz 低通滤波器和 50 Hz 陷波滤波器之后, 将两个滤波器进行级联设计以达到低通滤波和陷波滤波双重目的。具体实现方法即先将原始信号经低通滤波处理, 之后再经过陷波滤波处理, 这样即可达到两个滤波器级联的效果。级联设计如图 3 所示。



图 3 滤波器级联设计

3 对滤波处理后的信号进行频谱分析

3.1 低通数字滤波器

通过上述巴特沃兹滤波器设计出了 300 Hz 低通数字滤波器, 在对原始信号实施低通滤波以后, 再进行频谱分析, 最终分析结果如图 4 所示。对比原始数据频谱, 表明 300 Hz 以上信号基本被滤除,

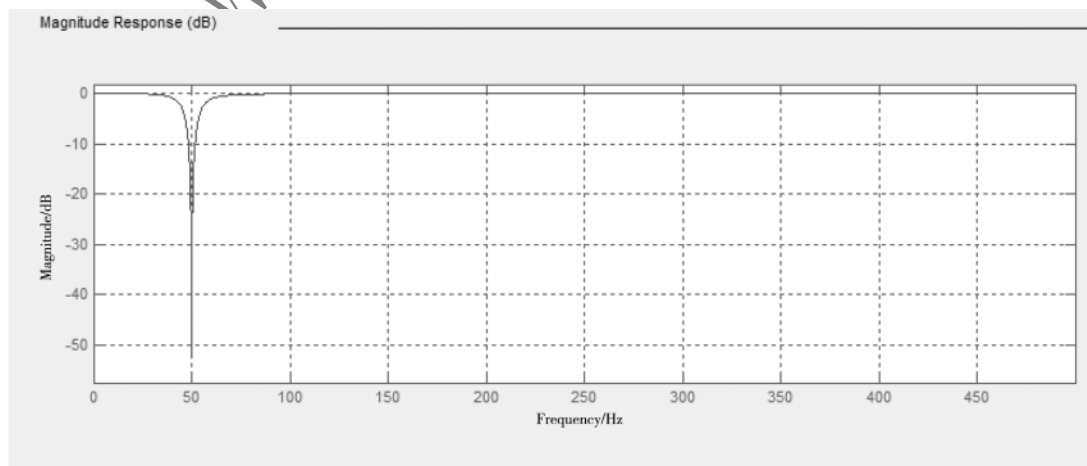


图 2 采用 Fdatool 设计陷波滤波器

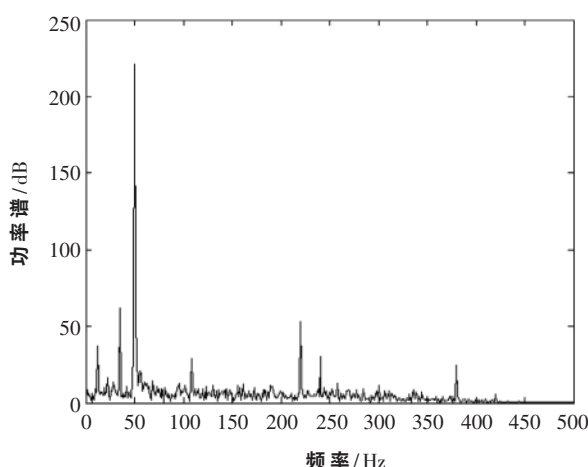


图4 经 300 Hz 低通滤波器处理后信号频谱分析

300 Hz 以下信号不受影响,从而可知该滤波器有效地实现了低通滤波功能。

3.2 陷波数字滤波器

对该陷波滤波器作用于原始信号后的数据进行频谱分析,结果如图 5 所示。对比原始数据频谱,表明 50 Hz 单点噪声已被滤除,其他信号不受影响,从而可知该陷波滤波器有效实现了 50 Hz 陷波滤波功能。

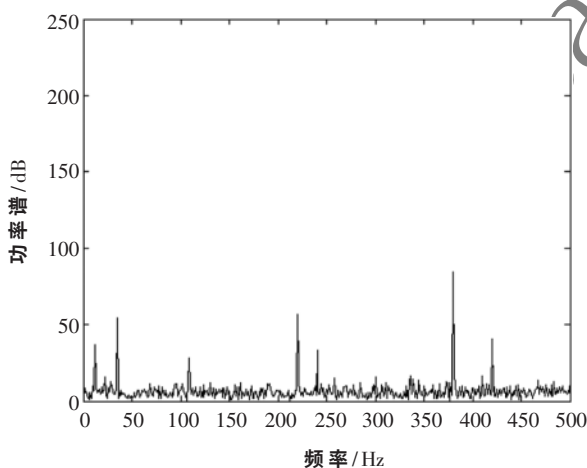


图5 经 50 Hz 陷波滤波器处理后信号频谱分析

3.3 低通数字滤波器与陷波滤波器级联

在分别验证了低通滤波器和陷波滤波器的滤波作用之后,将两个滤波器级联作用于加速度传感器信号,对经滤波后的数据进行频谱分析,如图 6 所示。数据频谱表明 50 Hz 单点噪声和 300 Hz 以上噪声均被有效滤除,并且两个滤波器级联不影响各自单独的作用,满足了对该信号的滤波设计要求。

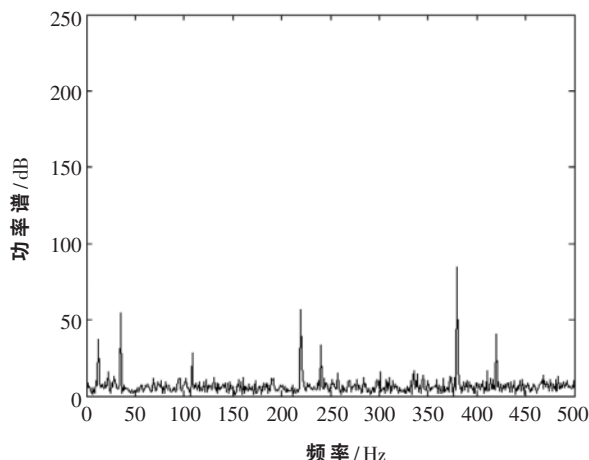


图6 经低通滤波器和陷波滤波器级联处理后信号频谱分析

4 结束语

对于加速度传感器信号而言,因为受到各种因素的影响,通常存在高频或者低频的干扰信号,从而导致信号失真现象,为了解决这一问题必须进行滤波处理。根据传感器的使用环境要求、噪声信号水平,本文设计了 300 Hz 低通滤波器、50 Hz 陷波滤波器,把其中高于 300 Hz 频率的噪声和 50 Hz 单点噪声消除掉,最终得到所需的低频信号。本文详细阐述了 IIR 低通数字滤波器的具体设计方法,并通过 MATLAB 工具箱 Fdatool 设计陷波滤波器的具体过程。在分别验证了单个滤波器的性能之后,将两个滤波器级联起到对传感器信号进行双重滤波的作用。对经滤波处理的输出信号与原始信号进行对比分析,该级联滤波器有效地起到了滤波作用,并且未对有用信号造成影响,有效提高了系统的抗干扰能力。同时本文所设计的数字滤波器操作过程简便、易于实现。

参考文献

- [1] 丛玉良,王宏志,赵晓晖.数字信号处理原理及其 MATLAB 实现(第 2 版)[M].北京:电子工业出版社,2009.
- [2] 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.
- [3] 孙洪等.数字信号处理——基于计算机的方法(第三版)[M].北京:电子工业出版社,2007.
- [4] 陈真,王钊.IIR 数字滤波器的仿真设计与分析[J].实验技术与管理,2016,33(7):122-125.
- [5] 黄丽薇,郑英,王迷迷,等.IIR 数字滤波器的研究与设计[J].信息技术,2015(9):187-190.

- [6] 刘兴,张鹤.基于 MATLAB 的 IIR 数字滤波器的设计与仿真分析[J].机电设备,2015,32(5):68-72.
- [7] 李艳凤,陈后金.IIR 数字滤波器设计中频率转换探究[J].电气电子教学学报,2018,40(3):103-105,127.
- [8] 顾绮芳,马列坚.数字滤波器性能指标优化中 IIR 的设计与仿真[J].江苏科技信息,2017(29):41-43.
- [9] 赵普渡.基于双线性变换法的 IIR 滤波器设计与仿真[J].机电技术,2015(6):61-64.
- [10] 佟星元,贺璐璐,杜慧敏,等.针对级联型 IIR 滤波器群延时的均衡优化技术[J].电子学报,2019,47(8):1717-1723.
- [11] 桂成东,谭平平,姜力铭,等.基于 MATLAB 的 IIR 数字带阻滤波器的设计及研究[J].湖南理工学院学报(自然科学版),2018,31(3):41-46,77.
- [12] 姚佳旭,朱磊,潘杨,等.基于 STM32 的级联型 IIR 数字滤波器设计[J].电子测量技术,2018,41(17):95-99.
- [13] 刘凤举,吴简彤,刘力.基于双线性变换法的 IIR 数字滤波器设计与 MATLAB 仿真[J].自动化技术与应用,2008(9):44-47.
- [14] 沈慧钧,罗霄华,王思伟.用双线性变换法设计 IIR 滤波器[J].山西电子技术,2008(6):37-39.
- [15] 袁丽华,洪华松,漆新民.陷波滤波器的设计及其应用[J].自动化与仪器仪表,2004(4):22-24.

(收稿日期:2020-04-22)

作者简介:

崔永青(1989-),女,硕士,工程师,主要研究方向:数字信号处理。

(上接第 51 页)

检测算法易于实现,具有很好的实时性及鲁棒性,且可以准确提取出运动目标,得到的目标完整且轮廓清晰。

参考文献

- [1] 王聪,刘明光,齐飞.智能视频监控系统动态目标检测与识别算法综述[J].电气技术,2018,19(9):20-25.
- [2] 陈法领.运动目标检测方法及其实时实现技术研究[D].沈阳:中国科学院沈阳自动化研究所,2009.
- [3] 汪国强,盖琪琳,于怀勇,等.基于背景差分法的视频目标检测算法研究[J].黑龙江大学学报,2014,5(4):64-68.
- [4] 刘洁.基于光流法的运动目标检测和跟踪算法研究[D].徐州:中国矿业大学,2015.
- [5] BARNICH O, VAN DROOGENBROECK M. ViBe: a universal background subtraction algorithm for video sequences[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2011, 20(6): 1709-1724.
- [6] 高健焮,陈健.基于改进 ViBe 算法的运动目标检测方法[J].计算机应用,2017,37(S2):104-107.
- [7] 李亚伟,曹凯,王杰,等.一种改进的 ViBe 鬼影抑制算法[J].广西大学学报(自然科学版),2017,42(2):712-719.
- [8] 甘玲,赵华翔.一种改进的 ViBe 算法结合多特征融合的阴影移除方法[J].微电子学与计算机,2015(11):152-157.
- [9] 李凌.背景建模算法研究与实现[J].淮北职业技术学院学报,2013,12(3):94-96.
- [10] 曹建芳,陈俊杰,赵青杉.一种改进的 HSV 颜色空间量化方法及其应用[J].南京师范大学学报(工程技术版),2014,14(2):68-73.
- [11] 陈文杰,王命延.车辆阴影消除算法[J].计算机与现代化,2011(9):30-32.

(收稿日期:2020-03-30)

作者简介:

官洪运(1960-),男,教授,硕士生导师,主要研究方向:图像通信与信息处理。

井倩倩(1995-),通信作者,女,硕士研究生,主要研究方向:图像处理 and 计算机视觉。E-mail: 843288396@qq.com。

王亚青(1993-),女,硕士研究生,主要研究方向:火灾图像处理。

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《信息技术与网络安全》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）、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！

《信息技术与网络安全》编辑部
中国电子信息产业集团有限公司第六研究所