

# 谷粒清选损失检测信号的 Butterworth 高通滤波器降噪\*

倪军 毛罕平 张晓东 程秀花

(江苏大学现代农业装备与技术省部共建教育部重点实验室, 镇江 212013)

**【摘要】** 研究了提取强噪声背景下谷粒清选损失信号的方法及其硬件实现问题。提出运用 Butterworth 滤波器分离机组振动噪声与谷粒信号特征,根据信号过渡带宽度及阻带衰减量确定了满足滤波性能最低阶数,通过级联方式实现了以 VCVS 拓扑结构为基本单元的八阶 Butterworth 高通滤波器。利用 EWB 仿真软件对该滤波器进行了模拟分析,并在联合收获机上进行了清选试验。试验结果与仿真分析结果具有良好的一致性,表明该方法能从机组强噪声背景中提取出清选损失谷粒信号的频率信息。

**关键词:** 谷粒 清选损失 信号处理 Butterworth 滤波器 高阶滤波器 级联

**中图分类号:** S225.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2010)06-0172-05

## Application of Butterworth Filter for Testing Grain Cleaning Loss

Ni Jun Mao Hanping Zhang Xiaodong Cheng Xiuhua

(Key Laboratory of Modern Agricultural Equipment and Technology, Ministry of Education & Jiangsu Province, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

### Abstract

The problems about extracting cleaning signals in the heavy noise and its hardware implementation were discussed. The Butterworth filter was proposed to distinguish the vibration noise and the grain signals. The lowest order of filter to meet performance was determined according to its transition region width and stop-band attenuation. An 8-order Butterworth filter used VCVS topology structure as basic units was constructed by class-bind method. Analogue simulation of the high order filter was proceeding on EWB and refining test was proceeding on the combine. Experimental results was well coincided with simulation results and showed good filtering property in extracting grain signals in the heavy noise of combine.

**Key words** Grain, Cleaning loss, Signal process, Butterworth filter, High-order filter, Class-bind

### 引言

在联合收获机的性能测试中,谷粒清选损失是一项重要指标,它直接影响着收获机的生产效率和作业质量<sup>[1]</sup>。然而在收获过程中,机组的强振动、地面的颠簸以及混杂在清选损失谷粒中的颖壳、碎草等,都是干扰谷粒清选损失定量检测的重要因素。目前,国内对谷粒清选损失的定量检测研究较少,基本上集中在实验室静态试验阶段,忽略了恶劣的实

际收获工况对清选损失谷粒信号的影响,实用性较差。本文根据谷粒清选损失阵列传感器输出信号的频谱特性设计八阶 Butterworth 高通滤波器,并且进行电路模拟仿真和联合收获机联机试验。

### 1 清选信号频谱特性

在联合收获机清选筛排出物中有短茎秆、杂余和少量谷粒,相比茎秆和杂余,谷粒的含量很少,因此传感器检测到的谷粒信号非常微弱,极易受到外

部干扰而淹没在收获机强噪声之中。为了能有效地识别谷粒和其他杂物的撞击信号,提高谷粒检测的比率,试验中提出了构建压电晶体探测阵列的方案,实现参数多点实时测量<sup>[2]</sup>。本文研究机型为湖州200型全喂入式联合收获机,清选装置参数为:风扇正常工作转速1200 r/min,直径330 mm<sup>[3]</sup>。根据线速度与转速之间的关系,可以推导出正常工作下风扇的线速度为20.7 m/s。

在实验室里起动联合收获机,使滚筒以正常工作速度空转,采集压电探测阵列输出的机组振动信号,运用快速傅里叶变换对其进行频谱分析,结果如图1所示。从信号的频域特性可见,机组振动频率主要分布在0~7.5 kHz之间。喂入水稻,滚筒处于脱粒状态,大量颖壳、茎秆与清选损失谷粒一起以20.7 m/s左右的初速度被抛出清粮口,冲击到压电探测阵列上,阵列输出信号的频谱特性如图2所示。从信号的频谱中可见,颖壳、茎秆的频率比较低,淹没在机组振动信号的频带中,谷粒信号的频率比较高,在13~15 kHz,因此提取出谷粒信号,必须使用高通滤波器。考虑到实际收获中,由于稻谷的饱满度不全相同,其信号频率会有差异,而且即使饱满度相同的谷粒,与敏感元件碰撞的角度不同,产生的频率也会有差异,因此综合机组的振动频带,选取高通滤波器的截止频率为8 kHz。

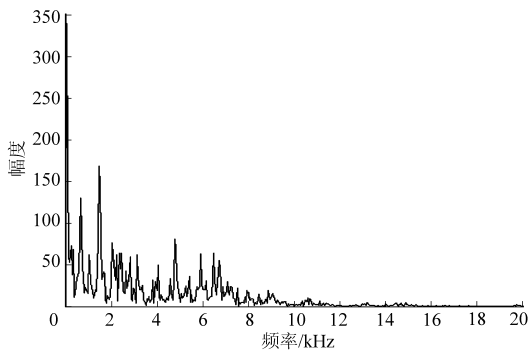


图1 机组振动信号频谱图

Fig.1 Frequency spectrum about vibration signal of combine

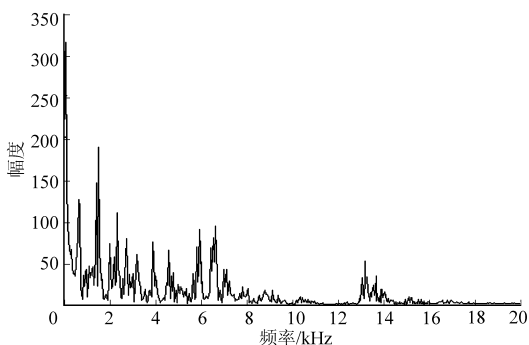


图2 清选信号频谱图

Fig.2 Frequency spectrum about cleaning signal of combine

## 2 高通滤波器的设计

### 2.1 滤波器类型的选取

根据滤波器不同的衰减特性,滤波器主要有: Butterworth 滤波器、Chebyshev 滤波器、Cauer 滤波器。Butterworth 滤波器在通带内有较为平坦的滤波特性,阻带内的衰减随频率单调增大; Chebyshev 滤波器在通带内呈现等起伏特性,而在阻带内的衰减具有较快的增长速率; Cauer 滤波器在通带和阻带内都呈现等起伏特性<sup>[4]</sup>。清选损失谷粒信号相对机组强振动信号而言频率较高,两者中心频率比较接近,因此目标是设计一个低频衰减尽可能小,阻带内的衰减具有较快增长速率,通带内较为平坦的高通滤波器。Butterworth 滤波器通带最平滑,阻带里响应为零,采用较高的阶数,可实现阻带内衰减的增长速率加快<sup>[5]</sup>。因此,按照 Butterworth 多项式逼近理想高通的衰减特性,可以达到预期滤波效果。

### 2.2 滤波器最小阶数的确定

滤波器的阶数是决定滤波器品质的主要参数之一,在满足性能指标的前提下,阶数应该尽可能小,以满足易于实现的要求。而在阶数和滤波器性能之间存在一定的函数关系,通过这一函数关系可以求出满足滤波器性能的最低阶数<sup>[6]</sup>。滤波器的阶数可根据过渡带宽度和阻带衰减量的要求来确定。由 Butterworth 滤波器衰减特性得

$$A = 10 \lg(1 + \Omega^{2n}) \quad (1)$$

式中  $\Omega$ ——滤波器归一化频率,对于高通滤波器,

$$\text{有 } \Omega = \frac{\omega_c}{\omega}$$

$\omega_c$ ——滤波器截止频率

$n$ ——滤波器阶数

$A$ ——滤波器有效衰减

当  $\Omega \gg 1$  时,式(1)可写成

$$A = 10 \lg \Omega^{2n}$$

于是有 
$$n = \left\lceil \frac{A}{20 \lg \Omega} \right\rceil + 1$$

式中,  $\lceil \cdot \rceil$  表示取整。

由此可以估算过渡带的上升速率。对于一个倍频程,即当  $\Omega_2 = 2\Omega_1$ , 则有

$$A_2 = 20n \lg(2\Omega_2) \quad A_1 = 20n \lg \Omega_1$$

$$A_2 - A_1 = 20n \lg(2\Omega_2) - 20n \lg \Omega_1 = 6n \text{ dB}$$

所以对于 Butterworth 滤波电路来说,其过渡带是以  $6n \text{ dB/倍频程}$  单调变化。

设滤波器在归一化频率  $\Omega = \Omega_s$  时的衰减量至少为  $A_s$ , 则

$$10 \lg(1 + \Omega_s^{2n}) \geq A_s$$

即 
$$n \geq \frac{\lg(10^{0.1A_s} - 1)}{\lg \Omega_s} \quad (2)$$

从式(2)可见,当  $\Omega_s$  越小,表示只要增加更小的频率,滤波器就应该已达到规定的衰减,即过渡带窄;  $A_s$  越大,表示按更大的衰减量定义过渡带上边界频率  $\Omega_s$ ,因此要求更高的滤波器阶数。

从图 2 中可以估算出阻带衰减量约为 48 dB;滤波器的过渡带期望足够窄,因此令归一化的频率  $\Omega_s = 2$ ,代入式(2),得

$$n \geq \frac{48}{20 \lg 2} \approx 8$$

取  $n = 8$ 。八阶 Butterworth 滤波器过渡带以 48 dB/倍频程单调变化。

### 3 八阶 Butterworth 高通滤波器参数的计算

滤波电路分为无源滤波电路和有源滤波电路两种。无源滤波电路在参数的选择上要考虑到前、后级阻抗以及特性设定问题,选择的自由度小,对于高阶滤波电路的设计,更为困难。有源滤波电路由于使用了运算放大器,因此各级滤波电路的输出阻抗与截止频率无关,而且输出阻抗能做得更低,以提高带载能力。对于设计高阶滤波电路,可以将前、后级之间相互独立地设计、确定各级滤波电路的截止频率以及决定品质因素  $Q$  值的  $RC$  参数<sup>[7]</sup>。

高阶滤波电路的实现方法有 5 类:直接综合法、级联实现法、电感模拟法、广义导抗法和多环反馈法<sup>[8]</sup>。在这几种方法中,级联实现法应用最广、最有效。级联实现法是将多个一阶和二阶滤波电路模块逐级连接,其中每个低阶滤波电路是独立的。任何  $n$  阶滤波电路,如果  $n$  为偶数,可以由  $n/2$  节二阶滤波电路级联而成;如果  $n$  为奇数,可以由  $(n-1)/2$  节二阶滤波电路和一阶滤波电路级联而成。为获得最大动态范围,级联顺序一般按照一阶滤波电路放在最前端,二阶滤波电路之间的最佳顺序是前节电路  $Q$  值要比后节低。

综上所述,对于八阶高通滤波电路的设计,可以选择 4 节二阶高通滤波电路级联而成,如图 3 所示。二阶高通滤波电路采用压控电压源(VCVS)拓扑结构,如图 4 所示。这种类型的滤波电路由于运算放大器为同相接法,输入阻抗很高,输出阻抗很低,所以滤波电路相当于一个电压源,电路性能稳定,增益容易调节<sup>[9]</sup>。

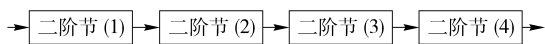


图 3 八阶滤波器级联方式

Fig. 3 Class-bind mode of 8-order filter

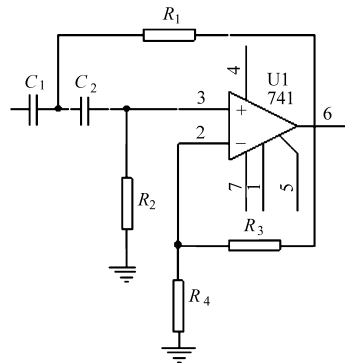


图 4 VCVS 拓扑结构二阶高通滤波电路

Fig. 4 2-order filter based on VCVS topology structure

按照级联原理,设计八阶高通滤波电路如图 5 所示。滤波电路特性指标:截止频率 8 kHz,放大倍数  $A_v = 1$ 。

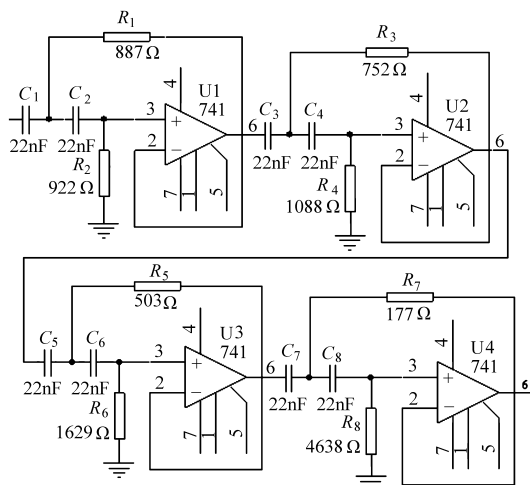


图 5 八阶高通滤波电路

Fig. 5 8-order high-pass filter

由 Butterworth 滤波器归一化表求出八阶 Butterworth 滤波器各节截止频率和  $Q$  值,如表 1 所示。

表 1 Butterworth 滤波器归一化

Tab. 1 Normalization of Butterworth filter

节次	截止频率归一化参数值	$Q$ 值
1	1.0	0.509 796
2	1.0	0.601 345
3	1.0	0.899 976
4	1.0	2.562 915

各元件参数计算如下:

取电容值:  $C_1 = C_2 = C_3 = C_4 = C_5 = C_6 = C_7 = C_8 = 22 \text{ nF}$ 。

第 1 级,由  $C_1 = 22 \text{ nF}$ ,  $Q_1 = 0.509 796$ ,得

$$R_1 = \frac{1}{2\pi \times 8 \times 10^3 \times 22 \times 10^{-9}} \times \frac{1}{2 \times 0.509 796} \approx 887 \Omega$$

$$R_2 = \frac{1}{2\pi \times 8 \times 10^3 \times 22 \times 10^{-9}} \times 2 \times 0.509 796 \approx 922 \Omega$$

第2级,由  $C_2 = 22 \text{ nF}$ ,  $Q_2 = 0.601345$ ,得

$$R_3 = \frac{1}{2\pi \times 8 \times 10^3 \times 22 \times 10^{-9}} \times \frac{1}{2 \times 0.601345} \approx 752 \Omega$$

$$R_4 = \frac{1}{2\pi \times 8 \times 10^3 \times 22 \times 10^{-9}} \times 2 \times 0.601345 \approx 1088 \Omega$$

第3级,由  $C_3 = 22 \text{ nF}$ ,  $Q_3 = 0.899976$ ,得

$$R_5 = \frac{1}{2\pi \times 8 \times 10^3 \times 22 \times 10^{-9}} \times \frac{1}{2 \times 0.899976} \approx 503 \Omega$$

$$R_6 = \frac{1}{2\pi \times 8 \times 10^3 \times 22 \times 10^{-9}} \times \frac{1}{2 \times 0.899976} \approx 1629 \Omega$$

第4级,由  $C_4 = 22 \text{ nF}$ ,  $Q_4 = 2.562915$ 得

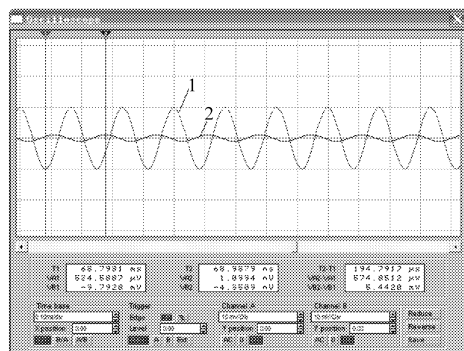
$$R_7 = \frac{1}{2\pi \times 8 \times 10^3 \times 22 \times 10^{-9}} \times \frac{1}{2 \times 2.562915} \approx 177 \Omega$$

$$R_8 = \frac{1}{2\pi \times 8 \times 10^3 \times 22 \times 10^{-9}} \times 2 \times 2.562915 \approx 4638 \Omega$$

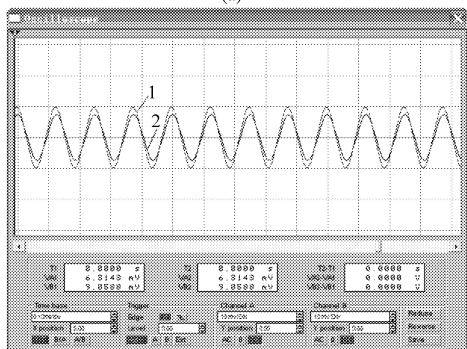
### 4 八阶 Butterworth 高通滤波器仿真与试验

#### 4.1 仿真验证

利用虚拟电子工作台 (EWB) 对设计的高通滤波电路进行仿真。给定输入为幅值 10 mV 的正弦信号,频率设置分别为 6 kHz、8 kHz。通过虚拟示波器观察电路对不同频率信号的响应程度如图 6 所示,其中波形 1 为原信号波形,波形 2 为滤波后信号波形。从图中可以看出,当输入信号  $f \leq 6 \text{ kHz}$  时,滤波电路对信号的响应几乎为零;当输入信号  $f \geq$



(a)



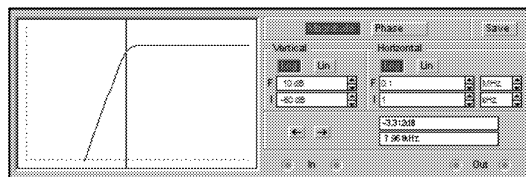
(b)

图6 滤波电路对不同频率信号的响应界面

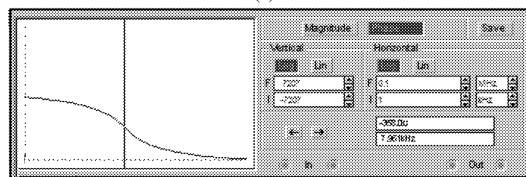
Fig. 6 Filter response under different frequency excitation

(a) 6 kHz (b) 8 kHz

8 kHz 时,滤波电路对信号的响应为单位响应,放大倍数为 1,信号几乎完全通过滤波电路。通过虚拟波特仪观察电路的频率特性,如图 7 所示。从幅频特性图中可以看出,滤波电路在  $-3.3 \text{ dB}$  处的频率为 7.96 kHz,在  $-48 \text{ dB}$  处的频率为 4.037 kHz,因此过渡带以  $48 \text{ dB/倍频程}$  单调上升。从相频特性中可以看出,在  $-3.3 \text{ dB}$  处最大相位移为  $-45^\circ$  左右。综上所述,所设计的高通滤波电路基本达到指标的要求。



(a)



(b)

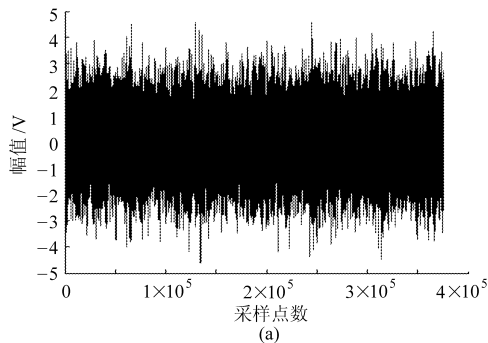
图7 八阶高通滤波电路频率特性界面

Fig. 7 Spectrum characteristics of 8-order high-pass filter

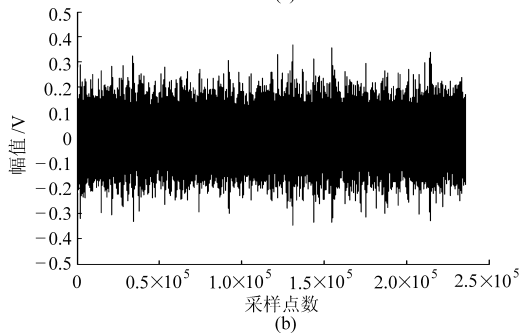
(a) 幅频特性 (b) 相频特性

#### 4.2 试验验证

在实验室里启动联合收获机,分别采集机组经过滤波前、后的振动信号进行对比,如图 8 所示。从图中可见,经过滤波电路处理后,大部分振动信号已被滤去,振动信号的幅值大大降低,从原先检测到的



(a)



(b)

图8 机组振动信号

Fig. 8 Vibration signal of combine

(a) 滤波前 (b) 滤波后

5 V 左右降低为 0.4 V 以下。喂入稻谷,滚筒工作在正常的脱粒状态下,清选筛抛出损失谷粒、颖壳、茎秆等混合物撞击到敏感元件上,探测阵列输出信号经过滤波电路处理后如图 9 所示。从图中可见,经过滤波后,颖壳、茎秆信号已经被滤出,谷粒信号从机组强振动干扰背景下分离出来,其幅值大于 0.5 V,

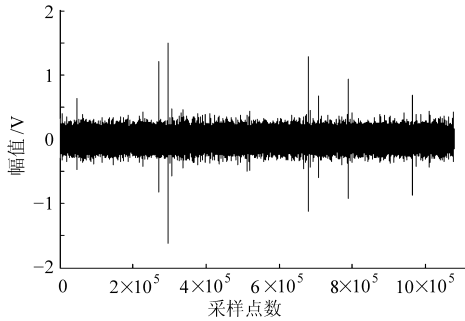


图 9 从强干扰背景下提取出的谷粒信号

Fig. 9 Extracting grain signals in heavy noise of combine

清晰可见。图中幅值大于 0.5 V 的冲击脉冲有 7 个,表示检测到的清选损失谷粒有 7 粒。根据滤波处理后谷粒信号与机组振动信号在幅值上的明显差别,通过后续灵敏度调节电路处理,可以进一步消除田间收获工况其他因素对谷粒信号的影响,为清选损失谷粒的定量检测奠定了基础。

## 5 结束语

基于联合收获机在收获过程中的强振动以及清选损失谷粒信号的微弱性,提出将 Butterworth 滤波器应用于分离机组振动噪声与谷粒信号特征。根据信号过渡带宽度及阻带衰减量计算出 Butterworth 滤波器的阶数,并完成了该滤波器的设计。通过仿真与试验,该滤波器能有效地滤除机组的振动信号以及颖壳、茎秆的冲击信号,较大程度地从机组强噪声背景中提取出清选损失谷粒信号。

## 参 考 文 献

- 北京农业机械化学院. 农业机械学:下册[M]. 北京:农业出版社,1981.
- 毛罕平,倪军. 阵列式压电晶体谷物损失传感器有限元分析及试验研究[J]. 农业机械学报,2008, 39(12): 123 ~ 126.  
Mao Hanping, Ni Jun. Finite element analysis and measurement for array piezocrystals grain losses sensor[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(12): 123 ~ 126. (in Chinese)
- 中机南方机械股份有限公司. 4LZ-2.0 型碧浪牌湖州 200 全喂入联合收获机使用说明书[M]. 2008.
- 黄席椿,高顺泉. 滤波器综合设计原理[M]. 北京:人民邮电出版社,1978.
- Tuncer Temel E, Sandri Guido V. Orthonormal wavelet representation using Butterworth filters[C]//Proceedings of SPIE—The International Society for Optical Engineering, 1992, V1706:122 ~ 128.
- Ghausi M S, Laker K R. 现代滤波器设计有源 RC 和开关电容[M]. 北京:科学出版社,1989.
- Fotopoulos S, Delipannis T. Active RC realization of high-order bandpass filter functions by cascading biquartic sections[J]. Circuit Theory and Application, 1984, 12(2): 223 ~ 238.
- 李远文,胡筠. 有源滤波器设计[M]. 北京:人民邮电出版社,1986.
- 王昊,李昕. 集成运放应用电路设计 360 例[M]. 北京:电子工业出版社,2007.
- 远坂俊昭. 测量电子电路设计——滤波器篇[M]. 北京:科学出版社,2006.
- 王长青,李爱军,王伟. Butterworth 滤波器在飞行控制系统设计中的应用[J]. 飞行力学,2009, 27(1): 74 ~ 76.  
Wang Changqing, Li Aijun, Wang Wei. Application of Butterworth filter to design of flight control systems[J]. Flight Dynamics, 2009, 27(1): 74 ~ 76. (in Chinese)
- Li Zhongshen. New study on Butterworth low pass filter[C]//Proceedings of the First International Symposium on Test Automation & Instrumentation (ISTA'2006). Beijing China: Beijing World Publishing Corporation, 2006, 6:1 532 ~ 1 535.