

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2107788

# 联合时变低通与改进形态学滤波的智能 在线称量方法研究\*

孙彪<sup>1</sup>, 滕召胜<sup>1</sup>, 唐思豪<sup>1</sup>, 林海军<sup>2</sup>, 唐求<sup>1</sup>

(1. 湖南大学电气与信息工程学院 长沙 410082; 2. 湖南师范大学工程与设计学院 长沙 410081)

**摘要:**针对检重秤在复杂工业生产环境下,受机械传动、被测物体自身振动和外界随机扰动影响导致的传感器输出信噪比低、称量准确性难以满足要求等问题,提出一种联合时变低通与改进形态学的快速数据处理新方法:时变低通滤波器作为一级滤波,通过在信号跃变时,迭代优化滤波器参数,使边沿信号得以快速响应,有效消除冲击干扰,并抑制称重信号在滤波过程中的相位失真;然后采用改进形态学滤波器进行二级滤波,通过选择零值线性结构元素,并优化结构元素长度以及操作算子的权值系数,加快了动态称重的响应速度。实验结果表明,该方法能有效抑制各类干扰影响,提高测量准确度,最终实现运行速度达120 m/min,最大称量400.0 g,满足国家标准《GB/T 27739—2011 自动分检衡器》XIII级要求的检重秤搭建。

**关键词:** 检重秤; 动态称重; 振动干扰; 时变低通滤波器; 改进形态学滤波

中图分类号: TH715.1+94 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 510.40

## Intelligent online weighing by jointed time-variant low-pass and improved morphological filter

Sun Biao<sup>1</sup>, Teng Zhaosheng<sup>1</sup>, Tang Sihao<sup>1</sup>, Lin Haijun<sup>2</sup>, Tang Qiu<sup>1</sup>

(1. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;  
2. College of Engineering and Design, Hunan Normal University, Changsha 410081, China)

**Abstract:** The signal of checkweigher is affected by vibrations rising from the mechanical transmission systems, the measured object itself and other random interferences. As a result, the signal-to-noise ratio of the sensor output is exceptionally low, and the weighing results are difficult to meet the requirements of the national standards. To solve these problems, this paper combines the advantages of time-variant low-pass filter and morphological filter, and proposes a novel fast data processing method. The time-variant low-pass filter is used for one-stage filtering. The filter parameters are optimized and adjusted iteratively when the signal changes, so that the edge signal can respond quickly, the impact interference can be eliminated effectively and the phase distortion of the weighing signal in the filtering process can be suppressed. Then, an improved morphological filter is used to conduct the secondary filtering. By selecting zero-value linear structural elements, and optimizing the length of structural elements and the weight coefficient of the operator, the response speed of dynamic weighing is accelerated. Experimental results show that the proposed method can effectively suppress various interferences and improve the weighing accuracy. Finally, a checkweigher system is constructed in this paper, which can achieve a maximum operating speed of 120 m/min and a maximum weighing of 400.0 g. It meets the requirements of the national standard "GB/T 27739-2011 Automatic Catchweighing Instruments" category XIII Scale.

**Keywords:** checkweigher; dynamic weighing; vibration disturbances; time-variant low-pass filter; improved morphological filter

收稿日期: 2021-04-20 Received Date: 2021-04-20

\* 基金项目: 国家自然科学基金(51775185)、国家重点研发计划项目“国家质量基础多要素综合应用示范及体系”(2019YFF0216800)、湖南省战略性新兴产业科技攻关与重大科技成果转化项目(2018GK4005)资助

## 0 引言

检重秤是将不同质量的预包装分载荷按其质量与标称设定点的差分值细分为两类或更多类的一种质量分类自动秤<sup>[1]</sup>。随着现代工农业的快速发展,检重秤在生产线上的用量骤增,为被测物体非静止、生产线不停机状态下的快速称量、分检发挥了重要作用<sup>[2]</sup>。但在动态称量过程中,物体加载持续时间短,且存在机械振动、电磁干扰以及外界环境噪声等因素的影响,称重信号难以达到平稳状态,从而严重影响动态检重秤的分拣效率和称量准确性<sup>[3]</sup>。

为解决动态称量信号中各种干扰问题,使检重秤性能满足现代化生产要求,国内外学者提出了各种解决办法<sup>[1-7]</sup>,然而基于参数估计的系统辨识法过于理想化,神经网络的训练对数据量要求太高,于是,滤波法发挥了重要作用。频谱分析表明,干扰相对于称量信号主要分布在高频范围,因此低通滤波器(low-pass filter, LPF)是一种有效的信号处理方法<sup>[8]</sup>:通过设置适当的截止频率,可抑制高频干扰,提高动态检重的准确性。但传统LPF在性能与响应速度之间存在矛盾,其截止频率越低,滤波器响应时间越长,导致检重秤在高速运行情况下的滤波响应时间大于被测物体的加载时间,使得测量准确性降低<sup>[8]</sup>。

时变低通滤波器(time-variant low-pass filter, TVLPF)一定程度上弥补了传统LPF对跃变信号响应时间过长的不足<sup>[9]</sup>。在信号跃变时,TVLPF带宽调整变大,使边沿信号得以快速响应;跃变结束后,逐渐将带宽调回最佳值,使干扰被有效滤除<sup>[10]</sup>。虽然TVLPF兼顾了滤波效果和响应速度,但作者发现在检重秤高速工况(速度100 m/min以上)的实际应用中,由于运行速度快,物体加载时间过短,难以取得满意结果。

形态学滤波器(morphological filter, MF)是一种非线性、非平稳滤波器,是基于积分几何和随机集论建立的有别于基于时域、频域的信号处理方法<sup>[11]</sup>。该方法利用待处理信号的局部形状特征,通过数学形态变换将一个复杂信号分解为具有物理意义的各个部分,使其与背景剥离,并保持信号主要的形状特征<sup>[12]</sup>。然而,MF易受冲击干扰的影响。因此,为满足动态检重秤高速运行下的快速准确分检,本文提出一种联合时变低通与改进形态学滤波方法(time-variant low-pass and improved morphological filter, TVLP-IMF)。首先将传感器输出信号经TVLPF进行一级预处理,有效消除机械振动、环境冲击干扰;然后采用IMF进行二级滤波,提升传感器响应速度;最终对IMF输出进行估计,得到相应被测物体的重量值,实现动态检重秤高效率、高准确度的称量与分检。

## 1 动态检重秤的构成与干扰机理

### 1.1 动态检重秤工作原理

动态检重秤主要分为进料带、称量带和分选带等3个部分,其结构如图1所示。各部之间通过无刷直流电机,同步齿型带及托辊等进行传动。被测物体随进料带运动开始进入动态检重流程。称重过程由前后两个光电传感器进行标定,前光电位于进料带与称量带交界处,后光电位于称量带与分选带交界处。物体传送到前光电处,遮挡光源触发前光电,记录该时刻为 $t_1$ 。物体完全进入称量带后,前光电不再被遮挡,因而再次触发,记录该时刻为 $t_2$ 。后续过程与前光电类似,物体开始离开称量带时触发后光电,记录该时刻为 $t_3$ ;物体完全离开时记录为 $t_4$ 。如图2所示, $t_1-t_4$ 构成了一个完整的称量周期。

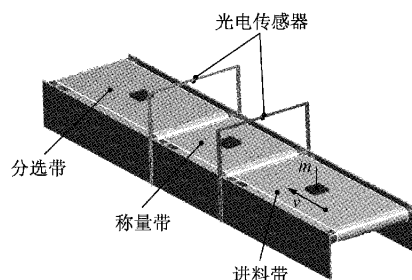


图1 动态检重秤平台

Fig. 1 Dynamic checkweigher platform

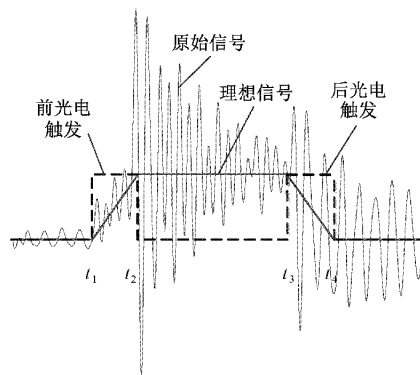


图2 称量传感器加载信号波形

Fig. 2 Weighing signal of checkweigher

### 1.2 动态检重秤干扰分析

动态检重秤在运行过程中,电机、前后托辊、同步齿型带和皮带等传动机构产生的周期性振动干扰,被测物体自身产生的随机振动干扰,空间辐射干扰,电源干扰以及信号采集电路的随机噪声等,都将反映在采集信号中,从而导致信噪比较低<sup>[7]</sup>。当干扰频率与系

统固有频率一致或接近时,系统将产生共振,振动干扰幅值将增长数倍<sup>[6]</sup>。

为深入研究干扰特性,本文对检重秤机械振动干扰进行了理论分析。当皮带运行速度为  $v_c$  时,皮带、托辊及电机产生的振动频率  $f_b, f_p, f_m$  可表示为<sup>[7]</sup>:

$$\begin{cases} f_b = \frac{1}{l_c} v_c \\ f_p = \frac{1}{2\pi r_p} v_c \\ f_m = \frac{n_p}{n_m} f_p = \frac{n_p}{2\pi n_m r_p} v_c \end{cases} \quad (1)$$

其中,  $l_c = 200$  mm 为称量段皮带长度;  $r_p = 14.35$  mm 为托辊半径;  $n_p = 25$  为托辊齿数;  $n_m = 15$  为电机齿数。

为避免工频干扰的影响,系统设计了 50 Hz 的硬件低通滤波器,因此,仅考虑频率在此范围内的噪声,其中机械系统具有固有频率,分别为 19.23 Hz 和 34.74 Hz<sup>[7]</sup>。检重秤空载运行信号的 FFT 结果验证了理论分析,频谱特性如图 3 所示。可见,FFT 结果与理论计算结果相符,且相对于被测物体加载信号对应的直流分量,各干扰频率主要分布在高频段。据此,快速有效消除干扰影响可采用低通滤波方法<sup>[8]</sup>。

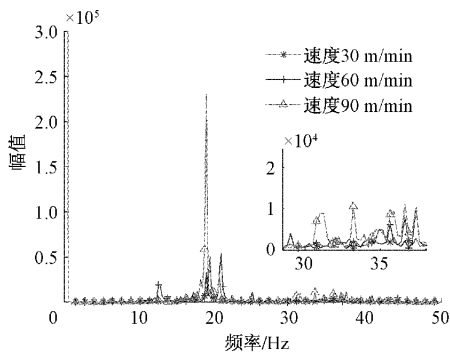


图 3 空载信号频谱分析

Fig. 3 Spectral analysis of signal without loading

## 2 检重信号的时变低通滤波

### 2.1 线性低通滤波器

在检重秤信号处理应用中,低通滤波器 (low-pass filter, LPF) 能有效抑制系统机械振动干扰及其他随机噪声<sup>[13]</sup>。而一阶 IIR 的级联在构建 LPF 中应用最为广泛,可表示为<sup>[14]</sup>:

$$y(n) = \beta(x(n) + x(n-1)) - \alpha y(n-1) \quad (2)$$

式中:  $x(n)$  为滤波器输入;  $y(n)$  为输出。  $\alpha, \beta$  为滤波器的设计参数, 分别有:

$$\alpha = \frac{f_c - \frac{c}{\pi\Delta}}{f_c + \frac{c}{\pi\Delta}} \quad (3)$$

$$\beta = \frac{1 + \alpha}{2} \quad (4)$$

$$c = \sqrt{\sqrt{2} - 1} \quad (5)$$

其中,  $\Delta$  表示信号数字化采样间隔;  $f_c$  为滤波器截止频率;  $k$  代表一阶 IIR 级联的个数。

为验证 LPF 在检重秤上应用的特点与局限, 本文采用 3 个一阶 IIR 级联构建 LPF 对信号进行处理, 并设置截止频率为 2 Hz, 其结果如图 4 所示。由图 4(a) 可知, 在低速情况下, LPF 基本能够满足要求, 但其截止频率与响应时间之间存在矛盾, 如图 4(b) 和 (c) 所示, 在中高速情况下 (速度 60 m/min 以上), LPF 将无法同时满足干扰的有效消除与滤波器的快速响应。因此, LPF 在检重秤上应用需做进一步改进, 而 TVLPF 的提出, 在一定程度上弥补了 LPF 在跃变信号处理中的不足<sup>[10]</sup>。

### 2.2 时变低通滤波器

时变低通滤波器 (time-variant low-pass filter, TVLPF) 的思想是在信号跃变时将带宽调大, 使边沿信号得以快速响应; 跃变结束后, 逐渐将带宽调回最佳值,

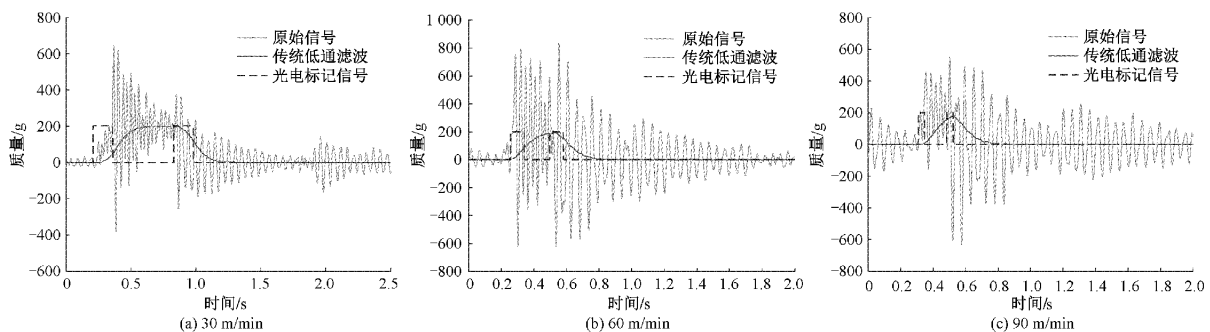


图 4 LPF 在检重秤的应用

Fig. 4 Application of the LPF on checkweigher

使信号中的干扰被有效滤除,从而实现滤波效果和响应时间同时满足实际应用需求<sup>[10,14]</sup>。由此,时变一阶 IIR 可表示为:

$$y(n) = \beta(j)(x(n) + x(n-1)) - \alpha(j)y(n-1) \quad (6)$$

其中,  $\alpha(j)$  和  $\beta(j)$  为时变参数, 分别有:

$$\alpha(j) = \frac{f_c(j) - \frac{c}{\pi\Delta}}{f_c(j) + \frac{c}{\pi\Delta}} \quad (7)$$

$$\beta(j) = \frac{1 + \alpha(j)}{2} \quad (8)$$

$$f_c(j) = f_\infty + (f_0 - f_\infty)\lambda^{(j-1)/(\varepsilon(N-1))} \quad (9)$$

其中,  $f_c(j)$  为时变截止频率如图 5 所示,  $j = 1, \dots, N$  为加载段标号, 其中  $j = 1$  对应  $t_1$  时刻,  $j = N$  对应  $t_3$  时刻;  $f_0$  为初始截止频率;  $f_\infty$  为终止截止频率, 且有  $f_\infty < f_0$ ;  $\lambda$  为较小实数;  $\varepsilon$  为衰减率, 控制截止频率的衰减速率。由图 5 可知, 当  $\varepsilon = 1.0, \lambda = 0.01$ <sup>[14]</sup> 时有  $f_c(N) = f_\infty + (f_0 - f_\infty)\lambda \cong f_\infty$ 。

为对比 LPF 与 TVLPF 在动态检重秤信号处理上的

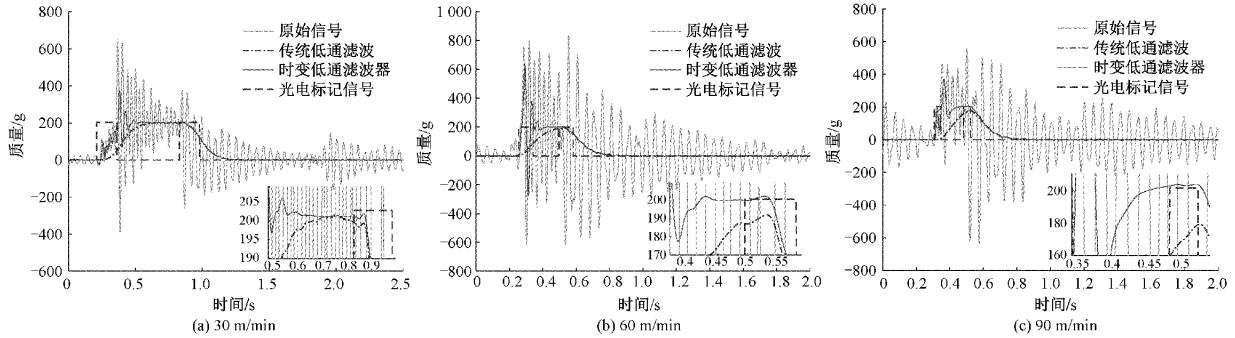


图 6 LPF 与 TVLPF 应用对比

Fig. 6 Comparisons of LPF and TVLPF

### 3 改进数学形态学滤波

数学形态学是基于积分几何和随机集论的一种非线性、非平稳滤波方法, 它可以有效消除噪声并保留原信号的形状特征, 已广泛应用于图像及一维信号滤波、分割和特征提取等领域<sup>[15]</sup>。针对 TVLPF 的输出信号  $y(n)$ , 其定义域为  $D[y] = \{1, 2, 3, \dots, L\}$ ,  $L$  为信号长度。结构元素  $g(m)$ ,  $D[g] = \{1, 2, 3, \dots, M\}$ ,  $M$  为结构元素长度, 且  $L \geq M$ , 则膨胀和腐蚀运算可定义为<sup>[16]</sup>:

$$(y \oplus g)(n) = \max_{m=1, \dots, M} [y(n-m) + g(m)] \quad (10)$$

$$(y \ominus g)(n) = \min_{m=1, \dots, M} [y(n+m) - g(m)] \quad (11)$$

式中:  $\oplus$  和  $\ominus$  符号分别表示形态学的基本运算膨胀和腐蚀。而关于  $y(n)$  的形态开和闭运算可定义为:

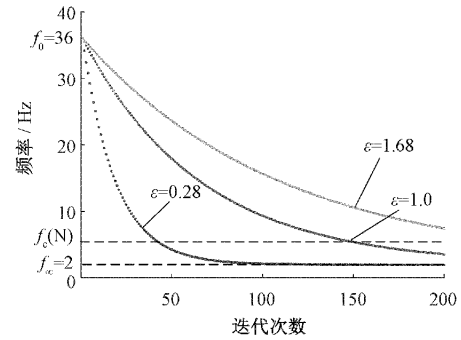


图 5 不同衰减率  $\varepsilon$  下  $f_c(j)$  变化示意图 ( $N=150, \lambda=0.1$ )

Fig. 5 Plots of  $f_c(j)$  with different  $\varepsilon$  ( $N=150, \lambda=0.1$ )

应用效果, 分别根据式(2)和(6), 采用 3 个 IIR 级联构建滤波器, 滤波结果如图 6 所示, 由图 6 可知, TVLPF 能有效消除干扰, 且在加载段内能使信号快速趋于平稳, 提升滤波器响应速度。然而, TVLPF 在更高速要求下, 由于系统运行速度快, 物体加载时间过短, 其性能仍存在不足如图 6(c) 所示。因此, 本文提出采用改进形态学滤波方法对称重信号做进一步处理。

$$(y \circ g)(n) = (y \ominus g \oplus g)(n) \quad (12)$$

$$(y \cdot g)(n) = (y \oplus g \ominus g)(n) \quad (13)$$

其中,  $\circ$  和  $\cdot$  符号分别表示形态学开运算和闭运算。将形态学的 4 种基本算子进行不同组合, 可获得多种形态学操作。文献<sup>[17]</sup>总结了形态学 4 类基本算子与由此衍生出来的另外 7 类算子的特性, 发现闭-开 & 开-闭平均算子具有最优滤波效果, 其定义如下:

$$y_{\text{cooc}}(n) = \frac{y_{\text{co}}(n) + y_{\text{oc}}(n)}{2} \quad (14)$$

其中,  $y_{\text{co}}(n)$  和  $y_{\text{oc}}(n)$  分别为闭-开和开-闭算子, 有:

$$y_{\text{co}}(n) = (y \cdot g \circ g)(n) \quad (15)$$

$$y_{\text{oc}}(n) = (y \circ g \cdot g)(n) \quad (16)$$

然而, 在对动态检重秤信号处理过程中, 作者发现闭-开 & 开-闭平均算子会导致滤波后信号幅值失真。故

而,本文在此基础上提出一种改进形态学滤波方法,即闭-开 & 开-闭加权形态学滤波算法,定义为:

$$y_{wcooc}(n) = w \times y_{co}(n) + (1 - w) \times y_{oc}(n) \quad (17)$$

式中:  $w \in [0, 1]$  为权值系数,可以发现,当系数为 0.5 时,其等效为闭-开 & 开-闭平均算子。

## 4 TVLP-IMF 的动态检重应用

### 4.1 实验数据采集

在工业生产中,为节省生产线占地面积,通常采用多线并行方式,现场如图 7 所示。因此,本文以广州追远公司双线并行动态检重秤为研究对象,采用中航电测仪器股份有限公司生产的 ZEMIC L6D-C3 单点式电阻应变式传感器,其量程为 0~10 kg,输出灵敏度为 (2.0±0.2) mV/V。以 2 kHz 采样率,分别对系统运行速度为 30、60、90、120 m/min 4 种速度,静态重量为 52.3、175.4、201.7、329.5 g 的纸盒包装物件的传感器输出信号进行采样,每个物件在不同速度下,反复加载 20 次,共计采集 320 组不同工况下多种重量载荷信号。

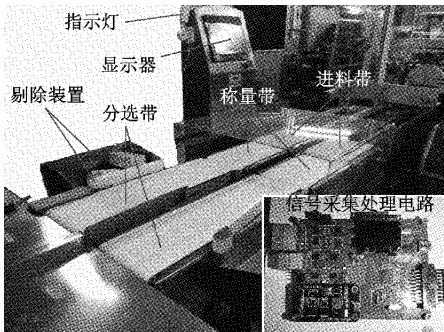


图 7 动态检重秤工作现场

Fig. 7 Dynamic checkweigher system in-field

### 4.2 TVLP-IMF 的应用

联合时变低通与改进形态学滤波 (time-variant low-pass and improved morphological filter, TVLP-IMF) 算法结合了 TVLPF 与形态学滤波器 (morphological filter, MF) 的优点,能将载荷信号与背景噪声快速准确剥离,从而提升系统分拣效率和称量准确性。该算法具体步骤如下:

步骤 1) 参数初始化。根据运行速度,初始化参数  $f_c$ 、 $f_0$ 、 $f_\infty$ 、 $\varepsilon$ 、 $N$ 、结构元素长度  $M$  以及权值系数  $w$ ;

步骤 2) 一级滤波。通过光电判断称量段是否存在被测物体。当存在被测物体加载时,采用 TVLPF 对信号进行处理,反之,则采用 LPF 对信号进行滤波;

步骤 3) 二级滤波。利用 IMF 对步骤 2) 的输出结果做进一步滤波处理。

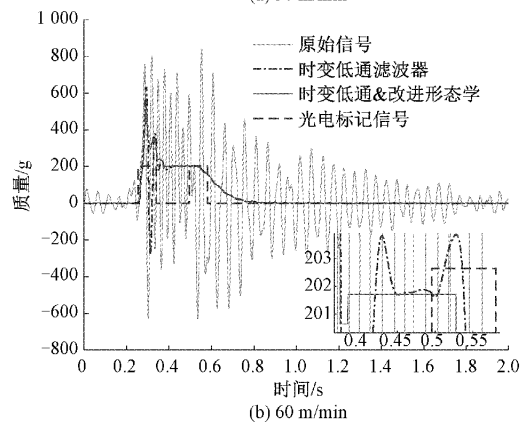
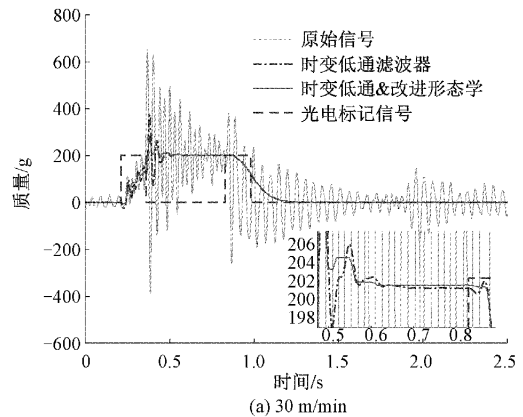
然而,TVLP-IMF 算法的性能取决于参数的选择,为

使算法具有最佳性能,本文在大量实验基础上,各参数优化选择如下:

1) TVLPF 参数优化。TVLPF 的效果取决于加载段初始截止频率  $f_0$ 、终止截止频率  $f_\infty$ ,以及衰减率  $\varepsilon$  等参数的设置。本文采用 3 个 IIR 级联构建 TVLPF,并设置空载段为 2 Hz 的固定截止频率,由图 5 可知,当设置  $\lambda = 0.01$  和  $f_\infty = 0.05$  Hz 时,TVLPF 的性能主要由初始截止频率  $f_0$  和衰减率  $\varepsilon$  决定,其中  $f_0 \in [20, 45]$ ,  $\varepsilon \in [0.5, 2.0]$ ,根据网格搜索法优化<sup>[3]</sup>,得各速度最佳参数分别有:30 m/min 为  $f_0 = 24$  Hz、 $\varepsilon = 1.08$ ; 60 m/min 为  $f_0 = 26$  Hz、 $\varepsilon = 1.08$ ; 90 m/min 为  $f_0 = 36$  Hz、 $\varepsilon = 1.08$ ; 120 m/min 为  $f_0 = 36$  Hz、 $\varepsilon = 0.8$ 。

2) IMF 参数优化。IMF 的性能主要取决于结构元素的形状和长度,操作算子以及权值系数。根据研究表明,结构元素的选择对滤波结果影响较小<sup>[18]</sup>,为计算简便,本文选取幅值为 0 的直线型结构元素,进行闭-开 & 开-闭加权操作。设置结构元素长度取值范围为 [200, 800],权值系数取值范围为 [0.5, 1],根据网格搜索优化得到参数分别有结构元素长度为 600, 420, 350, 350,权值系数分别为 0.7, 0.85, 0.9, 0.9。

根据上述最优参数设置,TVLPF 与 TVLP-IMF 在动态检重秤上的应用结果如图 8 所示。由图 8 可知,在 TVLPF 的基础上应用 IMF 所得结果准确性更高,加载信号能更快趋于平稳。



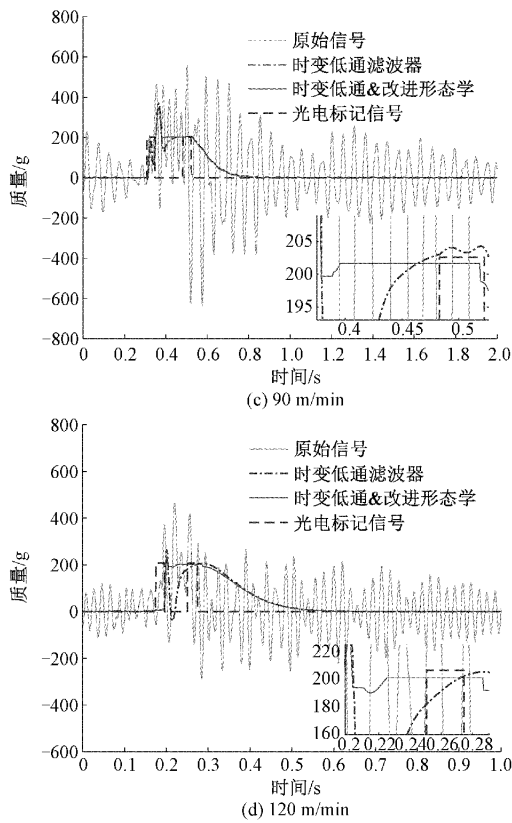


图8 时变低通滤波法与TVLP-IMF对比

Fig. 8 Comparison of time-variant low-pass filter and TVLP-IMF

4.3 实验结果分析

动态检重秤信号在经 TVLP-IMF 算法滤波后,选择加载段  $t_3$  时刻对应的滤波值为终值,被测物体的重量可估计为:

$$M = M_{cal} \frac{D - D_0}{D_{cal} - D_0} \quad (18)$$

式中:  $M_{cal}$  为校正时所用砝码重量;  $D = y_{weoc}(N)$  代表被测物体加载段  $t_3$  时刻对应的滤波输出值;  $D_0$  代表空载时

滤波输出值;  $D_{cal}$  为校正砝码的滤波输出值。

为分析 TVLP-IMF 算法在动态检重秤上应用的综合性能,本文采用国家标准《GB/T 27739—2011 自动分检衡器》<sup>[19]</sup> XIII 级准确度要求,如表 1 所示,其中系统平均示值,平均误差,标准偏差的计算公式分别为:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (19)$$

$$\mu = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) \quad (20)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (21)$$

式中:  $\bar{x}$  表示平均示值;  $x_i$  表示被测物体重量估计值;  $n$  表示测试集中相应质量的样本个数;  $\mu$  表示平均误差;  $\sigma$  表示标准偏差。算法综合性能的评估有<sup>[20]</sup>:

$$\Lambda = |\mu| + 3\sigma \quad (22)$$

表1 自动分检衡器国家标准  
Table 1 National standards on automatic catchweighing instruments

砝码质量/g	最大允许平均误差 $\mu/g$	最大允许标准偏差 $\sigma/g$
52.3	$\pm 0.5$	0.3
175.4	$\pm 0.5$	0.4
201.7	$\pm 0.5$	0.5
329.5	$\pm 0.5$	0.5

根据式(20)~(22),TVLPF 和 TVLP-IMF 算法的性能对比如表 2 所示。检重秤在中低速情况下,TVLPF 算法能够满足国家标准对 XIII 级检重秤的要求,然而,中高速情况下(如:90 m/min 的运行速度以上),TVLPF 已无法满足国家标准。而 TVLP-IMF 在高速度工况下,不仅能满足国标要求,更进一步提升了检重秤的测量准确性,因此,本文所提算法 TVLP-IMF 在动态检重秤上的应用具有更好的效果。

表2 TVLPF 与 TVLP-IMF 性能对比  
Table 2 Performance comparisons of TVLPF and TVLP-IMF

速度/ (m/min)	算法	52.3			175.4			201.7			329.5		
		$\mu$	$\sigma$	$\Lambda$	$\mu$	$\sigma$	$\Lambda$	$\mu$	$\sigma$	$\Lambda$	$\mu$	$\sigma$	$\Lambda$
30	TVLPF	-0.3	0.2	0.9	-0.2	0.3	1.1	-0.3	0.2	0.9	0.4	0.4	1.6
	TVLP-IMF	0.2	0.1	0.5	-0.1	0.1	0.4	0.1	0.1	0.4	-0.1	0.1	0.4
60	TVLPF	0.3	0.2	0.9	-0.2	0.3	1.1	0.3	0.3	1.2	0.4	0.4	1.6
	TVLP-IMF	-0.1	0.1	0.4	0.1	0.1	0.4	0.2	0.1	0.5	-0.2	0.2	0.8
90	TVLPF	0.5	0.2	1.1	0.6	0.4	1.8	0.6	0.5	2.1	0.4	0.6	2.2
	TVLP-IMF	0.2	0.1	0.5	-0.1	0.2	0.7	-0.3	0.2	0.9	0.2	0.2	0.8
120	TVLPF	-0.6	0.3	1.5	0.8	0.5	2.3	0.8	0.5	2.3	1.1	0.6	2.9
	TVLP-IMF	-0.2	0.2	0.8	0.4	0.2	1.0	0.3	0.2	0.9	-0.2	0.3	1.1

## 5 结 论

本文介绍了动态检重秤的工作原理,分析了不同速度工况下干扰的频谱特性,针对现有动态检重秤高速运行条件下,测量准确性低的问题,提出一种联合时变低通与改进形态学滤波方法。本文算法在时变低通滤波器基础上通过加权形态学滤波算法,有效抑制了各类干扰的影响,加快了传感器的响应速度。通过实验分析,本文所提算法能在更大速度运行范围内,进一步提升称量准确性,最终满足国家标准 XIII 级检重秤的规范要求,实现了最高速度 120 m/min,最大称量 400.0 g 的动态检重秤的搭建。

### 参考文献

- [ 1 ] PIETRZAK P. Fast filtration method for static automatic catchweighing instruments using a nonstationary filter[J]. *Metrology & Measurement Systems*, 2009, 16(4): 669-676.
- [ 2 ] NIEDŹWIECKI M, MELLER M, PIETRZAK P. System identification based approach to dynamic weighing revisited[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2016, 80: 582-599.
- [ 3 ] PAWLOWSKI A, RODRÍGUEZ F, SÁNCHEZ-HERMOSILLA J, et al. Adaptive weighing system with fast nonstationary filtering and centrifugal force compensation[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2017, 66(12): 3210-3217.
- [ 4 ] PAWLOWSKI A, RODRÍGUEZ F, SÁNCHEZ-HERMOSILLA J, et al. Fast nonstationary filtering for adaptive weighing system [ C ]. 2015 IEEE 20th Conference on Emerging Technologies & Factory Automation (ETFA). IEEE, 2015: 1-6.
- [ 5 ] HALIMIC M, BALACHANDRAN W. Kalman filter for dynamic weighing system [ C ]. 1995 Proceedings of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics. IEEE, 1995, 2: 786-791.
- [ 6 ] 胡清, 滕召胜, 孙彪, 等. 基于变步长自适应陷波器的在线检重抗振方法研究[J]. *仪器仪表学报*, 2019, 40(7): 24.  
HU Q, TENG ZH SH, SUN B, et al. Anti-vibration method for checkweigher based on variable step-size adaptive notch filter[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2019, 40(7): 24.
- [ 7 ] SUN B, TENG Z, HU Q, et al. Periodic noise rejection of checkweigher based on digital multiple notch filter[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2020, 20(13): 7226-7234.
- [ 8 ] PIETRZAK P. Dynamic mass measurement using a discrete time-variant filter [ C ]. 2010 IEEE 26-th Convention of Electrical and Electronics Engineers in Israel. IEEE, 2010: 000151-000155.
- [ 9 ] PISKOROWSKI J, BARCINSKI T. Dynamic compensation of load cell response: A time-varying approach [ J ]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2008, 22(7): 1694-1704.
- [ 10 ] 赵偏偏. 带宽可调的快响应时变低通滤波器[D]. 济南: 山东大学, 2017.  
ZHAO P P. Adjustable-bandwidth and fast-response to time-varying low-power-filter [ D ]. Jinan: Shandong University, 2017.
- [ 11 ] 张景元, 何玉珠. 基于形态学的自动驾驶仪振动信号基线漂移去噪[J]. *北京航空航天大学学报*, 2018, 44(5): 907-913.  
ZHANG J Y, HE Y ZH. Removing baseline drift in vibration signal of autopilot based on morphology [ J ]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2018, 44(5): 907-913
- [ 12 ] 胡爱军, 唐贵基, 安连锁. 基于数学形态学的旋转机械振动信号降噪方法 [ J ]. *机械工程学报*, 2006(4): 127-130.  
HU AI J, TGAN G J, AN L S. De-noising technique for vibration signals of rotation machinery based on mathematical morphology filter [ J ]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2006(4): 127-130.
- [ 13 ] RICHIEDEI D, TREVISANI A. Shaper-based filters for the compensation of the load cell response in dynamic mass measurement [ J ]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2018, 98: 281-291.
- [ 14 ] PIETRZAK P, MELLER M, NIED ŹWIECKI M. Dynamic mass measurement in checkweighers using a discrete time-variant low-pass filter [ J ]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2014, 48(1-2): 67-76.
- [ 15 ] 李季, 潘孟春, 唐莺, 等. 基于形态滤波和 HHT 的地磁信号分析与预处理 [ J ]. *仪器仪表学报*, 2012, 33(10): 2175-2180.  
LI J, PAN M CH, TANG Y, et al. Analysis and preprocessing of geomagnetic signals based on morphological filter and Hilbert-Huang transform [ J ]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2012, 33(10): 2175-2180.
- [ 16 ] 陶功权, 谢清林, 刘晓龙, 等. 形态学滤波方法在车

- 轮非圆化信号降噪中的应用[J]. 机械工程学报, 2020, 56(18): 116-122.
- TAO G Q, XIE Q L, LIU X L, et al. Application of morphology filtering method in the de-nosing of wheel out-of-roundness signals [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(18): 116-122.
- [17] LI Y, LIANG X, LIU W, et al. Development of a morphological convolution operator for bearing fault detection[J]. Journal of Sound and Vibration, 2018, 421: 220-233.
- [18] 沈长青, 朱忠奎, 孔凡让, 等. 形态学滤波方法改进及其在滚动轴承故障特征提取中的应用[J]. 振动工程学报, 2012, 25(4): 468-473.
- SHENG CH Q, ZHU ZH K, KONG F R, et al. An improved morphological filtering method and its application in bearing fault feature extraction[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 25(4): 468-473.
- [19] 中华人民共和国国家标准. 自动分检衡器: GB/T 27739—2011 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.
- Chinese National Standards. Automatic catchweighing instruments: GB/T 27739-2011[S]. Beijing: Standards Press of China, 2012.
- [20] NIEDŹWIECKI M, PIETRZAK P. High-precision FIR-

model-based dynamic weighing system [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2016, 65(10): 2349-2359.

### 作者简介



孙彪, 2015年于湖南大学获得学士学位, 现为湖南大学博士研究生, 主要研究方向为智能检测与信息处理。

E-mail: biaosun1993@163.com

**Sun Biao** received his B. Sc. degree from Hunan University in 2015. He is currently pursuing his Ph. D. degree at Hunan University. His main research interests include intelligent detection and information processing.



滕召胜(通信作者), 分别于1995年和1998年在湖南大学获得硕士学位和博士学位, 现为湖南大学教授、博士生导师, 主要研究方向为智能检测与控制系统。

E-mail: tengzs@126.com

**Teng Zhaosheng** (Corresponding author) received his M. Sc. degree and Ph. D. degree both from Hunan University in 1995 and 1998, respectively. He is currently a professor and a Ph. D. advisor at Hunan University. His main research interests include intelligent detection and control system.