

# 动态车辆称重系统的算法研究

张惠芳 张海宁

(西安工业大学电子信息工程学院 西安 710021)

**摘要:**汽车动态称重系统的算法研究是动态称重系统研究中的难点。为了提高动态称重系统的测量精度,对传感器在车辆非停车状态下所得短历程信号进行分析,利用巴特沃斯低通滤波器滤除噪声信号中的高频分量后;采用 Levenberg-Marquardt 优化算法进行最小二乘法拟合,有效的抑制了低频周期随机干扰,实现了载荷的分离;通过载荷分离计算出车辆重量。实验表明,该算法能够提高动态称重系统的测量精度。

**关键词:**动态称重;数据处理;动态载荷;优化算法

**中图分类号:** TN911.7 U491 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.50

## Research on the algorithm of dynamic vehicle weighing system

Zhang Huifang Zhang Haining

(College of Electronic and Information Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China)

**Abstract:** Research on the algorithm of dynamic weighing system has become a difficulty in the research of dynamic weighing system. In order to improve the measurement accuracy of dynamic weighing system, the short-range signal of the sensor is analyzed in the condition of vehicle non stopping, and the high frequency components in the noise signal are filtered out by the Butterworth low-pass filter. The Levenberg-Marquardt algorithm is used to fit the least square method, which can effectively suppress the low-frequency periodic random interference and realize the separation of the load. Further, the weight of the vehicle is calculated by load separation. Experiments show that the algorithm can improve the measurement accuracy of dynamic weighing system.

**Keywords:** weigh in motion; data processing; dynamic load; optimization algorithm

### 1 引言

动态车辆称重系统<sup>[1]</sup>就是对传感器测量得到的行驶汽车的轮胎受力信号进行分析并计算出汽车重量的过程<sup>[2-3]</sup>。目前,我国自主研发的动态称重系统已大量投入使用,但其中很多称重系统只对采集到的受力信号做简单的滤波处理后<sup>[4]</sup>,采用最大值检测法<sup>[5]</sup>对滤波后的信号进行处理,忽略了其他微弱信号,所以测量误差较大。文中利用巴特沃斯低通数字滤波器<sup>[6]</sup>和 Levenberg-Marquardt 优化算法<sup>[7]</sup>对动态称重信号进行处理,极大地提高了动态称重系统的测量精度,进一步提高了自主研发的动态称重系统的实用性。

### 2 轮重动态称重信号分析

动态称重时,汽车以 10 km/h 的速度匀速通过称台的波形如图 1 所示。

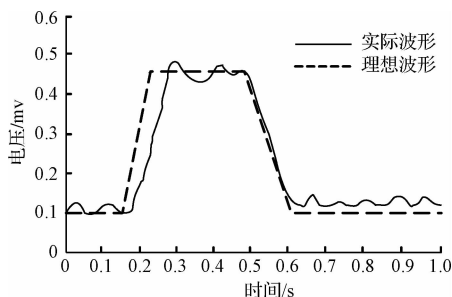


图 1 轮胎通过称台的波形

汽车经过称重平台时采集到的信号是由汽车的静态载荷和动态载荷两部分组成<sup>[8]</sup>。静态载荷即所测汽车的真实重量,动态载荷由若干个幅值和频率不同的信号组成。汽车通过称台时,对承重板产生的作用力除汽车的实际重量外,还包括汽车行驶过程中产生的冲击<sup>[9]</sup>,与路面耦合产生的耦合振动<sup>[10]</sup>等因素的干扰,直接影响了汽

收稿日期:2017-03

车动态称重系统的测量精度。轮重信号的频谱如图2所示。

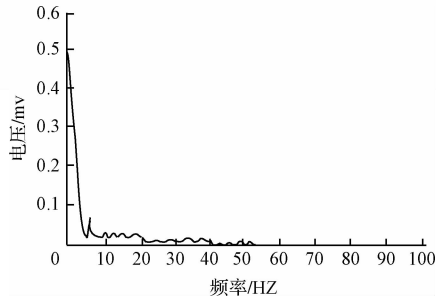


图2 轮重信号频谱

由图2可知,采集到的轮重信号有如下的特点:

- 1) 高于 100 Hz 的是车轮转动时产生的高频干扰,要完全滤除;
- 2) 60~100 Hz 的是检测系统自身振动产生的高频噪声,要完全滤除;
- 3) 0~60 Hz 的信号中包括由轮胎通过称台时稳态载荷产生的线性信号(需要得到的车辆真实低频信号)和车辆加载引起的频率约为 30 Hz 的周期振动信号(以下称为低频周期干扰)。

### 3 动态称重算法

#### 3.1 动态称重系统模型

由信号分解知识可知<sup>[11]</sup>,动态称重系统采集到的车重信号可以表达如下:

$$Y(t) = W + A_0 \sin(\omega_0 t + \varphi_0) + \sum_i A_i \sin(\omega_i t + \varphi_i) \quad (1)$$

式中:  $W$  是汽车真实重量,  $A_0 \sin(\omega_0 t + \varphi_0)$  是车重信号中的低频干扰信号,  $\sum_i A_i \sin(\omega_i t + \varphi_i)$  是车重信号中的高频分量。

#### 3.2 高频噪声的滤除

由图2可知,信号的频率主要在 0~60 Hz 范围内。因此,规定巴特沃斯低通滤波器的指标为通带截止频率为 60 Hz,通带衰减小于 1 dB,阻带截止频率为 100 Hz,阻带衰减大于 15 dB,采样频率,根据该指标最终设计了巴特沃斯低通滤波器。由 MATLAB<sup>[12]</sup> 计算得  $N=5$ ,所以巴特沃斯低通滤波器的传递函数如下:

$$H(z) = (1.25 \times 10^{-5} + 6.26 \times 10^{-5} z^{-1} + 1.25 \times 10^{-4} z^{-2} + 1.25 \times 10^{-4} z^{-3} + 6.26 \times 10^{-5} z^{-4} + 1.25 \times 10^{-5} z^{-5}) / (1 - 4.28 z^{-1} + 7.36 z^{-2} - 6.37 z^{-3} + 2.77 z^{-4} - 0.48 z^{-5}) \quad (2)$$

其差分方程为:

$$y(n) = \sum_{i=0}^5 b_i x(n-i) + \sum_{i=1}^5 a_i y(n-i) \quad (3)$$

式中:  $a = [4.28, -7.36, 6.37, -2.77, 0.48]$ ,  $b = [1.25 \times$

$10^{-5}, 6.26 \times 10^{-5}, 1.25 \times 10^{-4}, 1.25 \times 10^{-4}, 6.26 \times 10^{-5}, 1.25 \times 10^{-5}]$

运用上述设计的巴特沃斯低通滤波器对称重信号中的高频噪声进行滤除,则式(1)中去除高频噪声后的重构函数为:

$$Y(t) = W + A_0 \sin(\omega_0 t + \varphi_0) \quad (4)$$

#### 3.3 低频随机振动干扰的消除

低频干扰和有用信号混合在 0~30 Hz 的频段内,低频干扰振幅变化可以达到静态载荷的 8%。假设:若上秤点和下秤点选取合适,在短暂的称重过程中,滤除掉高频噪声之后,将式(1)表示为:

$$Y(t) = A_0 t + \sum_{i=1}^n A_i t \sin(2\pi f_i t + \varphi_i) \quad (5)$$

常规的滤波方法无法滤除低频干扰,需采取 Levenberg-Marquardt 优化算法进行最小二乘拟合<sup>[13]</sup>,拟合出低频干扰的振幅、频率、相位,然后在称重信号中滤除,得到理想的低频信号,并保留线性项。根据线性回归估计得到的残差,依次增加周期震荡个数,最后得到平稳随机残差序列<sup>7</sup><sup>[14]</sup>。实际拟合过程中,周期震荡项小于 3 个时,提取出低频干扰信号的振幅、频率、相位与拟合模型中的残差可以看成平稳数据。估计出每个模型的参数后,以它们为初值进行参数估计。在估计中不断使用 Levenberg-Marquardt 优化算法。

#### 3.4 仿真结果分析

仿真数据由  $y(t) = s(t) + n(t)$  产生。其中  $s(t)$  为信号,  $n(t)$  为噪声。

信号:  $s(t) = 20t$

噪声:  $n(t) = 6t \sin(2\pi \times 6t + 3\pi/2) + 4t \sin(2\pi \times 8t + 0)$

用于仿真的数据:  $y(t) = 20t + 6t \sin(2\pi \times 6t + 3\pi/2) + 4t \sin(2\pi \times 8t + 0)$

由于模型较为复杂,在拟合过程中,每增加一个周期项之前应根据残差数据的特征初步判定  $A_i, f_i, \varphi_i$ , 以此为初值,然后进行拟合。初值的选择决定了计算量的大小及结果的可靠性。

1) 初始相位的确定。因为低频干扰振幅变化可以达到静态载荷的 8%, 则  $A = 0.08A_0$ 。

2) 初始频率的确定。计算出去除高频噪声后的函数式(5)中的第一个极大点到第一个极小点两个点之间的点数  $n$ , 则初始频率  $f = f_i / (2 \times n)$ 。

3) 初始相位的确定。计算出去除高频噪声后的函数式(5)中的第一个点到第一个极值点之间的点数  $n_1$ , 若极值点是极大值点, 则  $\varphi = \frac{\pi}{2} - \frac{n_1}{n} \pi$ ; 若极值点是极小值点,

则  $\varphi = -\frac{\pi}{2} - \frac{n_1}{n} \pi$ 。

仿真信号如图3所示。

去掉一个周期干扰项的信号和两个周期干扰项的信号图分别如图4和5所示

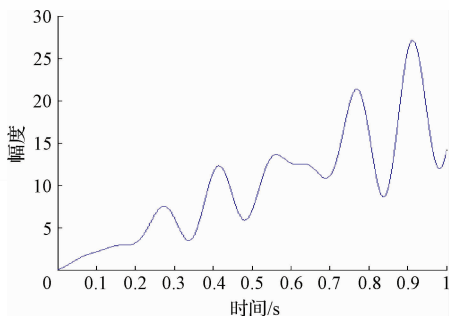


图3 仿真信号图

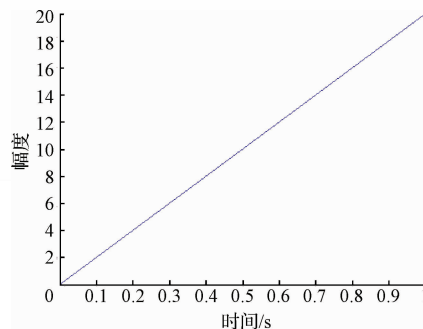


图5 去掉两个周期干扰项的信号图

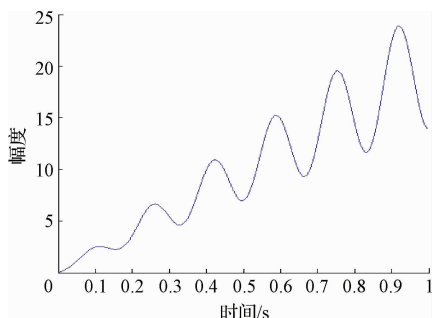


图4 去掉一个周期干扰项的信号图

消除噪声后得到信号  $s^*(t) = A^*t$ , 此时信噪比为:

$$SNR2 = 10\lg \left( \frac{\sum_{i=1}^m s^2(t)}{\sum_{i=1}^m [s(t) - s^*(t)]^2} \right) \text{ (dB)}.$$

#### 4 试验结果分析

实验采用静态情况下前轴重量为 5 620 kg, 后轴重量为 8 953 kg, 整车重量为 14 573 kg 的两轴货车对文中所提出的动态称重算法的称重系统进行检验, 实时所得的部分测量数据如表 1 所示。

通过对表 1 数据分析可得, 应用本文所提出的动态称重算法的称重系统对不大于 80 km/h 速度的车辆进行称重时, 总体误差处于 ±2%, 提高了系统的测量精度。

仿真信号的信噪比<sup>[15]</sup>为:

$$SNR1 = 10\lg \left( \frac{\text{信号的能量}}{\text{噪声的能量}} \right) = 10\lg \left( \frac{\sum_{i=1}^m s^2(t)}{\sum_{i=1}^m n^2(t)} \right) \text{ (dB)};$$

表 1 动态实验数据

序号	速度/(km·h <sup>-1</sup> )	前轴测量值/kg	前轴误差/%	后轴测量值/kg	后轴误差/%	总车重量/kg	整体误差/%
1	10	5 527	-1.7	8 799	-1.7	14 326	-1.7
2	20	5 530	-1.6	8 825	-1.4	14 355	-1.5
3	30	5 694	+1.3	9 112	+1.8	14 806	+1.6
4	40	5 513	-1.9	8 798	-1.7	14 311	-1.8
5	50	5 711	+1.6	9 080	+1.4	14 791	+1.5
6	60	5 723	+1.8	9 097	+1.6	14 820	+1.7
7	70	5 548	-1.3	8 821	-1.5	14 369	-1.4
8	80	5 724	+1.9	9 111	+1.7	14 835	+1.8

通过调整信噪比、周期干扰信号的频率、相位, 进行大量的仿真计算。最后, 保留的信号就是拟合过程全部结束后的线性项。

#### 5 结论

本文采用巴特沃斯低通滤波器和 Levenberg-Marquardt 优化算法对动态汽车称重信号进行处理, 降低了动态汽车称重系统算法的复杂度, 提高称重系统测量精度的同时, 还提高了检测站的工作效率, 对治理公路超限起到了推动作用。

#### 参考文献

- [1] 贾海庆, 辛星, 高雪池, 等. 动态称重系统数据采集及分析[J]. 公路交通科技, 2010, 27(6): 138-142.
- [2] 李惠敏, 李晓林. 关于车载动态称重算法研究[J]. 计算机仿真, 2016, 33(11): 140-143.
- [3] 陈楠. 车辆动态称重系统数据传输及算法研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2014.
- [4] 王伟涛. 无线便携式车辆动态称重系统的研究与设计[D]. 西安: 西安工业大学, 2013.

(下转第 61 页)