

文章编号:1671-8879(2009)02-0098-03

## 汽车动态称重的新方法

郭兰英<sup>1</sup>, 梁波<sup>1</sup>, 董安国<sup>2</sup>

(1. 长安大学 信息工程学院, 陕西 西安 710064; 2. 长安大学 理学院, 陕西 西安 710064)

**摘要:**汽车振动引起的低频动态载荷影响汽车动态称重的精度,而且在车辆高速通过秤台时,采样数据序列短,采样未覆盖到 2 个极值点。为解决以上问题,提出了一种将经验模态分解与非线性拟合结合起来的新方法,进行了去除低频动态载荷的仿真试验和现场实测。结果表明,该方法能有效地降低低频动态载荷对称重精度的影响,车速小于 40 km/h 时,最大偏差小于等于 5%。

**关键词:**汽车工程;动态称重;经验模态分解;非线性拟合

**中图分类号:**U461.99 **文献标志码:**A

### New technology for weigh-in-motion of vehicles

GUO Lan-ying<sup>1</sup>, LIANG Bo<sup>1</sup>, DONG An-guo<sup>2</sup>

(1. School of Information Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China;

2. School of Science, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

**Abstract:** The precision of weight-in-motion (WIM) of vehicles is influenced by low-frequency dynamic load from vibration of vehicles. A new method based on combination of the empirical mode decomposition (EMD) method with nonlinear curve fitting method is proposed for weight-in-motion of vehicles when the sampling data sequence is too short to get two extreme points as the vehicles passing through the weighing platform with high-speed. The simulations and on-site experiments are carried out to reduce low-frequency dynamic load. The results illustrate that this method can effectively reduce the impact of the dynamic low-frequency load on the accuracy of weighing, and the maximum error is less than 5% when the vehicle velocity is lower than 40 km/h. 1 tab, 2 figs, 7 refs.

**Key words:** automobile engineering; weigh-in-motion; empirical mode decomposition; nonlinear curve-fitting

## 0 引言

动态称重(weigh in motion, WIM)是智能交通系统的重要组成部分。快速、准确地测量汽车轴载对于公路的运营、管理、养护和执法等方面都具有重要的意义。汽车在动态称重时,车辆的振动引起的动态载荷与车辆的轴载、行驶速度和车型等密切相

关,其频率较低,约 3~20 Hz,幅值可达 20%<sup>[1-2]</sup>。由于干扰的动态载荷频率很低,且采样信号太短,导致频率域干扰信号淹没在有效信号中,在短历程数据情况下,低频周期随机干扰在频域内无法予以消除<sup>[3]</sup>。所以,要想得到真实的轴载,需要把动态载荷分量从采样信号中分离出来。在时域内可以通过经验模态分解(empirical mode decomposition, EMD)

收稿日期:2008-05-10

基金项目:国家自然科学基金项目(50878026)

作者简介:郭兰英(1963-),女,江苏江都人,副教授,工学硕士,E-mail:lyguo@chd.edu.cn.

技术或参数估计法,把动态干扰从轴载信号中分离出来。在动态载荷个数较少时,参数估计法<sup>[4]</sup>可以快速得到较好的效果,但是其迭代修正过程需要计算大量的数据,并随着动态载荷个数的增加,计算量和计算时间都会剧烈增加。同时,由于实际采样的复杂性,实际波形与理想波形有一定差距,可能会导致初值选取离真实值较远,从而使迭代趋向发散而进入死循环。比较之下,经验模态分解是目前提取短数据序列趋势和均值的最好方法。但在车辆速度较高的情况小,由于采样时间内未采样到 2 个极值点的动态载荷,EMD 分解就不能进行。为此,本文采用一种将 EMD 与非线性拟合结合起来的新方法来降低动态载荷的影响,并进行仿真与实测试验,证明了这种方法的有效性。

### 1 动态称重的方法

#### 1.1 EMD 方法

EMD 是 Huang N E 等提出的一种新的信号处理方法<sup>[5]</sup>。EMD 分解方法认为,任何信号都是由不同的本征模函数(intrinsic mode function, IMF)合成,因此可以将信号中的各阶 IMF 分解出来。分解的结果是若干阶 IMF 与一个残余量的和,每一阶 IMF 都反映了信号动态特性,而残余量反映了信号的偏移量或稳态值。IMF 方法必须满足 2 个条件<sup>[6]</sup>:①整个数据集的极大值、极小值的数目和穿越零点的次数要相等或最多相差 1;②极大值点确定的上包络线和极小值确定的下包络线的均值要始终为 0。则 EMD 算法步骤如下:

(1) 对于分解的信号  $y(t)$ ,找出  $y(t)$  上所有的极值点,用 3 次样条曲线连接所有的极大值点,形成  $y(t)$  的上包络线;连接所有极小值点,形成  $y(t)$  下包络线。定义上下包络线的均值为  $m_1(t)$ , $y(t)$  与  $m_1(t)$  的差值设为  $h_1^k(t) = y(t) - m_1(t)$ 。

(2) 如果  $h_1^k(t)$  不满足 IMF 的 2 个条件,则令  $y(t) = h_1^k(t)$ ,然后重复步骤(1),得到  $h_1^k(t)$ ;经过  $k$  次迭代,直至得到  $h_1^k(t)$  满足 IMF 的 2 个条件,定义信号  $y(t)$  的第一阶 IMF 分量  $C_1(t) = h_1^k(t)$ 。

(3) 设  $r_1(t) = y(t) - C_1(t)$ ,令新信号  $y(t) = r_1(t)$ ,重复步骤(1)、(2),得到二阶 IMF 分量  $C_2(t)$ ;再令  $r_2(t) = y(t) - C_2(t)$  作为新的信号  $y(t)$ ,按此方法继续分解,直至标准方差  $S_D$ <sup>[7]</sup> 的大小在 0.2 ~ 0.3 之间。

$$S_D = \sum_{i=0}^T \left[ \frac{(h_1^{(k-1)}(t) - h_1^k(t))^2}{(h_1^{(k-1)}(t))^2} \right]$$

或  $r_n(t)$  已经成为单调函数,这样原始信号  $y(t)$  可以表示成各阶 IMF 与一个残余量  $r_n(t)$  的和

$$y(t) = \sum_{i=1}^n C_i(t) + r_n(t)$$

式中: $C_i(t)$  为第  $i$  阶 IMF 分量; $t$  为时间; $r_n(t)$  为残余量。

由于各阶 IMF 分量的上下包络线均值相等,因此可以认为各阶 IMF 只与信号所含的固有振动特性有关,与信号的稳态量无关,而将分解得到的残余量  $r_n(t)$  看作信号的稳态量。根据这个思路,将 EMD 用于动态称重的数据处理,滤除信号中的动态部分  $\sum_{i=1}^n C_i(t)$ ,求出与轴载对应的稳态部分  $r_n(t)$ 。

对 EMD 算法进行仿真,设实际采样信号为  $y'(t) = 1 + 0.2\sin(2\pi \times 3t + \pi/3) + 0.15\sin(2\pi \times 6t + \pi/6) + 0.18\sin(2\pi \times 9t + 4\pi/5)$  采样周期为 1 kHz,采样时间为 2 s,仿真结果如图 1 所示。

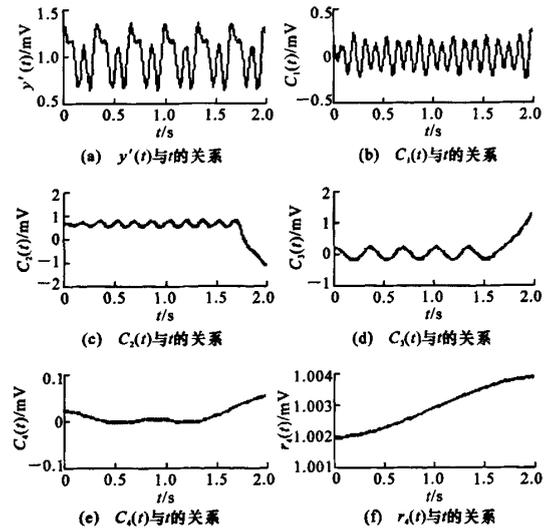


图 1 EMD 算法仿真结果

#### 1.2 非线性拟合法

从上述 EMD 分解过程可以看出,EMD 基于局部极值的 3 次样条插值方法,当序列中极值点个数小于 2 时,EMD 分解就不能进行。此时,可采用非线性拟合分离出动态载荷,从而降低或消除动态载荷的影响。

根据 WIM 系统的动力学原理和车辆载荷模型<sup>[7]</sup>,可构造称重信号  $Y(t)$  为

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

式中:  $A_0$  为静态载荷;  $A_i, B_i, C_i$  分别为第  $i$  个频率成分动态载荷的幅值、频率和初始相位;  $n$  为信号中动态载荷的频率成分数。

目标函数  $G(x)$  为

$$G(x) = \min \sum_{i=1}^m f_i^2(x) = \min \|f(x)\|^2 = \min \sum_{i=1}^m [Y(t_i) - y(t_i)]^2$$

式中:  $m$  为采样次数。

设  $x = [A_0, A_i, B_i, C_i | i = 1, 2, \dots, n]^T$ , 要获得最佳的静态轴载估计, 就要寻找最优的参数估计  $\hat{x}$

$$\hat{x} = [\hat{A}_0, \hat{A}_i, \hat{B}_i, \hat{C}_i | i = 1, 2, \dots, n]^T$$

式中:  $\hat{A}, \hat{A}_i, \hat{B}_i, \hat{C}_i$  分别为  $A_0, A_i, B_i, C_i$  的最优解。

目前, 有许多最优化算法可求解非线性最小二乘问题, 本文采用 Levenberg-Marquardt (简称 LM) 算法。LM 算法是高斯-牛顿法和梯度下降法的结合, 既有高斯-牛顿法的快速收敛性, 也有梯度下降法的全局搜索特性, 将 LM 算法应用于动态称重具有精度高、速度快的特点。

LM 算法步骤如下:

(1) 给定初始点  $x^{(0)}$ , 最大允许迭代次数  $M$ , 精度  $\epsilon, k = 0, \lambda_k = 10^4$ 。

(2) 计算  $\nabla F(x^{(k)})$ 。

(3) 当  $\|\nabla F(x^{(k)})\| < \epsilon$ , 则  $x^* = x^{(k)}$ , 停止计算; 否则转向(4)。

(4) 若  $k > M$ , 停止计算; 否则转向(5)。

(5)  $p^{(k)} = -[J(x^{(k)})J(x^{(k)})^T + \lambda_k I]^{-1} \cdot$

$$J(x^{(k)})F(x^{(k)})$$

(6)  $x^{(k+1)} = x^{(k)} + p^{(k)}$ 。

(7) 若  $F(x^{(k+1)}) < F(x^{(k)})$ , 则转向(8); 否则转向(9)。

(8)  $\lambda_{k+1} = 0.5\lambda_k, k = k + 1$ , 转向(2)。

(9)  $\lambda_{k+1} = 1.5\lambda_k, k = k + 1$ , 转向(2)。

式中:  $F(x) = [f_1(x), f_2(x), \dots, f_m(x)]^T; \nabla F(x^{(k)})$  为  $F(x)$  在  $x^{(k)}$  处的梯度;  $x^{(k)}$  为第  $k$  次的参数估计;  $I$  为单位矩阵;  $J(x)$  为  $F(x)$  在  $x^{(k)}$  处的 Jacobian 矩阵;  $k$  为迭代次数;  $\lambda_k$  为参数, 在迭代过程中它同时起控制搜索方向与步长的作用。

对 LM 算法进行仿真, 步骤如下:

(1) 对采样信号进行付里叶变换, 求出信号中包含的频率成分, 这样就减少了待拟合参数的个数, 降低了算法复杂度, 同时也大大降低了拟合结果对初值选择的敏感度。

(2) 根据先验知识确定待拟合参数的取值范

围。在算法的设计中, 取原始信号平均值的  $\pm 20\%$  作为信号中动态载荷幅值取值范围的上下限, 初始相位取值范围为  $0 \sim 2\pi$ , 取平均值的  $80\%$  和  $120\%$  作为信号中静态分量取值范围的上下限。

设实际的采样信号  $y'(t)$  仍为

$$y'(t) = 1 + 0.2\sin(2\pi \times 3t + \pi/3) + 0.15 \times \sin(2\pi \times 5t + \pi/6) + 0.18\sin(2\pi \times 9t + 4\pi/5)$$

对  $y'(t)$  进行付里叶变换, 确定待拟合的参数为 7 个, 根据先验知识取初值为

$$x^{(0)} = [0.9, 0.1, 0.1, 0.1, 0.1, 0.1, 0.1]^T$$

取采样周期为 1 kHz, 采样时间为 0.1 s, 采用 LM 算法对  $y'(t)$  进行非线性拟合, 求得的最优的参数估计  $\hat{x}$  为

$$\hat{x} = [1.0307, -0.3076, -4.0029, 11.7704, 0.0012, 2.0753, -1.6469, -0.1698, -91182, -21.3280]^T$$

拟合结果如图 2 所示。

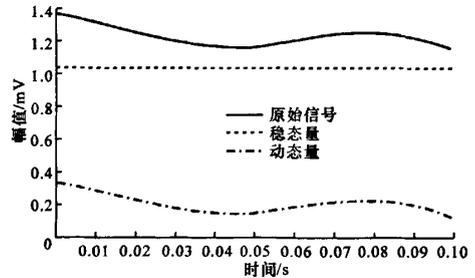


图 2 LM 算法仿真结果

LM 算法对参数初值比较敏感, 初值的选取决定了估计参数的精度。对动态称重而言, 关键是如何去掉动态载荷, 只要能准确地拟合出整个动态载荷, 并把它从采样信号中减去, 就可以得到表示轴载的静态分量, 而无需考虑单个参数的估计精度。

## 2 实测结果

实测中使用总轴载为 4 930 kg 的客车, 秤台长 3.5 m, 宽 0.7 m, 采样频率 1 kHz; 客车以不同的速度通过秤台。在处理数据之前, 首先对原始信号进行截止频率为 30 Hz 低通滤波; 然后确定动态称重数据序列的起点和终点, 进行有效信号的截取, 在此选用最大值判别法; 最后根据数据序列中极值点的个数选取 EMD 算法或非线性拟合算法。5 组实测结果如表 1 所示(见 106 页)。表 1 中数据显示该数据处理方法在车速小于等于 40 km/h 时轴载的最大偏差小于 5.0%。

(下转第 106 页)

并不是很明显,但对挂车各轮动作用影响很大,增大挂车悬架阻尼会减小挂车两轮对路面的动载荷;挂车悬架刚度增大,则会增加挂车的轮胎动载荷;拖车后轮的动载荷和动载系数则随着拖车后悬架阻尼的增大而持续降低;尽可能增大悬架阻尼以减轻车辆对路面的动作用力是十分有效的;拖车后悬架刚度增大时,拖车的动载荷和动载系数在原来悬架刚度值的1.5倍附近取得最小值。

**参考文献:**

**References:**

[1] 叶俊杰. 高等级公路车辆荷载特性研究[D]. 西安:长安大学,2007.  
 [2] Thomas D G, Karamihas S M. Heavy truck properties significant to pavement damage[C]//Bohdan T, Kulakowski. Proceeding of the Vehicle-road Interaction II Conference. Philadelphia, ASTM International, 1994: 52-63.  
 [3] Cebon D. Theoretical road damage due to dynamic tyre forces of heavy vehicles, part 1: dynamic analysis of vehicles and road surfaces[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Mechanical Engineering Science, 1988, 202(c2): 103-108.  
 [4] 宋一凡, 陈榕峰. 基于路面不平整度的车辆振动响应

分析方法[J]. 交通运输工程学报, 2007, 7(4): 39-43.  
 SONG Yi-fan, CHEN Rong-feng. Analysis method of vehicle vibration response caused by pavement roughness[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2007, 7(4): 39-43.  
 [5] 刘晶郁, 王少贻, 蔡红民. 重型载货汽车悬架的优化设计[J]. 长安大学学报, 自然科学版, 2008, 28(5): 103-106.  
 LIU Jing-yu, WANG Shao-zeng, CAI Hong-min. Optimal design of heavy truck suspension[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2008, 28(5): 103-106.  
 [6] Mario F, Martin L, Marc S, et al. Dynamic analysis of existing continuous bridge[J]. Journal of Bridge Engineering, 1998, 3(1): 28-37.  
 [7] 刘献栋, 邓志党, 高峰. 基于逆变换的路面不平度仿真研究[J]. 中国公路学报, 2005, 18(1): 122-126.  
 LIU Xian-dong, DENG Zhi-dang, GAO Feng. Study of simulation of road roughness based on inverse transform[J]. China Journal of Highway and Transport, 2005, 18(1): 122-126.  
 [8] 曾凡奇, 黄晓明. 超载对沥青路面的影响[J]. 交通运输工程学报, 2004, 4(3): 8-10.  
 ZENG Fan-qi, HUANG Xiao-ming. Asphalt pavement stress under overloading[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2004, 4(3): 8-10.

(上接第100页)

表1 实测结果

车速/(km·h <sup>-1</sup> )	5	10	20	30	40
最大偏差/%	2.10	2.80	3.40	3.70	4.77

**3 结 语**

(1)分析了影响动态称重精度的主要因素,并选用经验模态分解算法处理动态称重数据,提出了在采样时间内未采样到2个极值点情况下,采用非线性拟合的方法来降低或消除动态载荷的影响,具有一定的创新性。

(2)为了进一步研究该方法在汽车动态称重数据处理中的应用,一方面采集更多的车型、载质量、车速情况下的称重数据,进行EMD分解及非线性拟合试验;另一方面对EMD分解的边缘效应进行更深入的研究,寻找更有效的端点判定方法,减小边缘效应对动态称重的影响。

**参考文献:**

**References:**

[1] 李振锋. 基于光纤光栅的汽车动态称重系统的研究[D]. 武汉:武汉理工大学,2008.  
 [2] 周志峰, 蔡 萍, 陈日兴. 基于非线性拟合的汽车动态

称重数据处理新方法[J]. 上海交通大学学报, 2006, 40(5): 709-712.  
 ZHOU Zhi-feng, CAI Ping, CHEN Ri-xing. A new method of processing data of weigh-in-motion of vehicles based on nonlinear curve-fitting[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2006, 40(5): 709-712.  
 [3] Rakha H, Katz B, Al-Kaisy A. Field evaluation of weigh-in-motion screening on truck weigh station operations[J]. Intelligent Vehicles Symposium, 2003, 11(6): 74-79.  
 [4] 许 嘉, 蔡 萍, 周志峰, 等. 参数估计算法在汽车动态称重中的应用[J]. 自动化技术与应用, 2005, 24(8): 69-71.  
 XU Jia, CAI Ping, ZHOU Zhi-feng, et al. The parameter estimation algorithm and its application in vehicle weigh-in-motion[J]. Techniques of Automation and Applications, 2005, 24(8): 69-71.  
 [5] Huang N E, Shen Z, Long S R. A new view of nonlinear water waves: the Hilbert spectrum[J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 1999, 31: 417-457.  
 [6] 孙 璐. 运动车辆随机载荷及其激励下的地面动力响应的理论研究[D]. 南京:东南大学,1996.  
 [7] Ono T. On dynamic weighing of highway vehicles in motion[J]. SICE 2003 Annual Conference, 2003, 2(8): 2108-2115.