

动态轴重称重信号的分析及EMD 处理方法的研究

□上海瑞仪动态称重研究工作室 王卫民

【摘要】 本文通过对轴重称重信号的采集，从力学角度分析了轴重称重过程中车轮的受力情况，找出了轴重称重信号波动的原因，并给出了从波动的轴重称重信号中求轴重的EMD方法。

【关键词】 EMD方法；轴重信号采集分析

概述

动态轴重重量信号是车轮以一定的速度通过称台时获取的。由于车轮在行驶过程中车体的震动，以及车轮特有的平动加滚动运动形式给轴重重量信号带来诸多的干扰噪声，使得真正轴重重量信

号淹没在噪声中。因此，不能以静态的称重信号处理方法来求解动态轴重重量信号。为了解析较高精度的动态轴重重量信号，我们可以运用HHT变换中的经验模式分解方法——EMD(empirical mode decomposition)方法对动态轴重重量信号进行处理。

1 动态轴重称重过程的力学分析及其信号波形

由自编的“动态轴重重量信号波形测量仪”软件获取的一个两轴车辆的两个动态轴重重量信号波形，如图1所示。

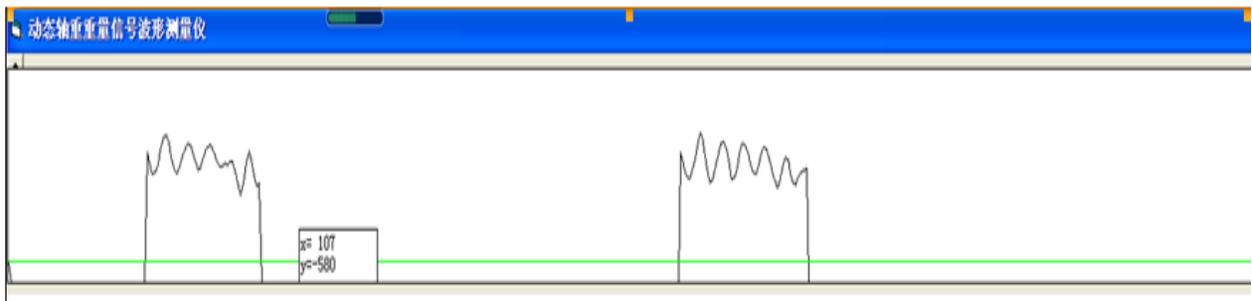


图1 车轮的轴重重量称重信号 $x(t)$

从图1可以看出，通过称台的轴重重量信号并不是一条“直线”，而是一条含有直流分量的近似“正弦波”。这个近似的“正弦信号”正是由于车轮轮轴的平动加滚动运动所引起的。

1.1 车轮在称台上的运动力学分析

设车轮在刚性台面上匀速沿水平直线运行，其半径为 r ，轮心速度 V_c ，车轮的转动角速度为 ω ，车

轮与称台之间的接触点为 O 。

由于车轮的行驶过程是滚动和滑动运动的组合，车轮的轮心速度 V_c 和在 O 点的线速度 ωr 都将发生变化。现用基点法分析车轮在称台上行驶时所发生的三种加速度变化情况，分别描述轮子在接触点 O 处加速度的变化，如图2 a), b), c)所示。

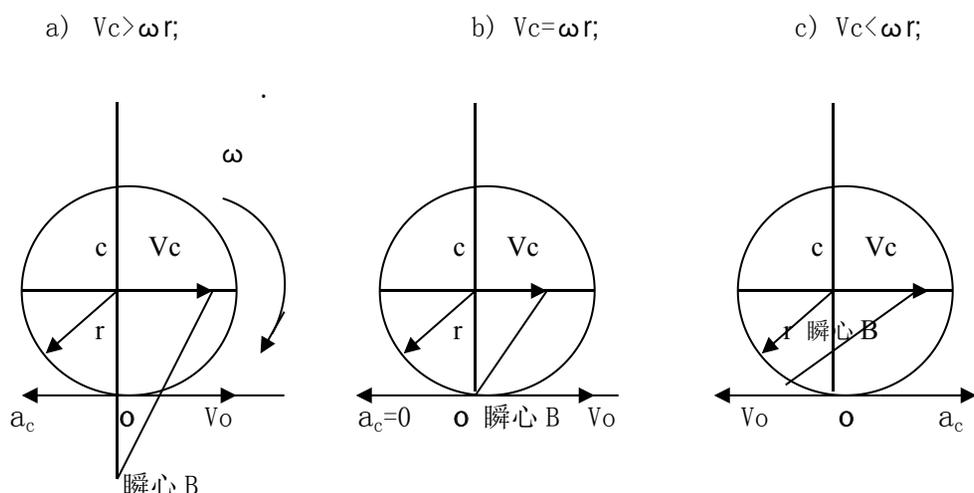


图2 轮轴行驶分析

当 $V_c > \omega r$ 时，车轮上的O点相对称台台面的滑动速度 V_o 向右，因此，车轮的滚动加速度 a_c 向左。这时车轮的瞬心B在接触点O以下，车轮以滚动带滑动模式运行。

当 $V_c < \omega r$ 时，车轮上的O点相对称台台面的滑动速度 V_o 向左，因此，车轮的滚动加速度 a_c 向右。这时车轮的瞬心B在接触点O以上，车轮也以滚动带滑动模式运行。

当 $V_c = \omega r$ 时，车轮上的O点相对称台台面的滑动速度 $V_o = 0$ ，因此，车轮的滚动加速度 $a_c = 0$ 。这时车轮的瞬心B和接触点O相重合，车轮仅以滚动模式运行。

当车轮在实际称台台面上匀速沿水平直线运行时，由于称台受称重元件的弹性体所承载，称台台面会随着车轮的运行而发生波动，车轮的滚动加速度 a_c 的方向也会随之波动，并在称台台面的水平方向和垂直方向产生水平分量 a_L 和垂直分量 a_V 。根据牛顿第二定律 $FV = ma_V$ ，其垂直分量 a_V 就产生垂直分力 FV ，这个垂直分力对车轮载荷的称重产生了一个干扰。图1中的波动主要来自这个加速度 a_c 的垂直分量 a_V 的影响。

需要指出的是，动态轴重称重必须使车辆在尽可能匀速行驶的状态下进行，以保证称台的垂直受力仅仅来自于轮轴的载荷，即动态轴重称重系统应该是一个惯性系统。称重过程中任何使车辆加速、

减速操作都会引起称台的垂直受力附加变化，从而导致称重精度的极大破坏。经实验发现，在一个二轴动态轴重称重系统中，当两轮轴经过定长窄条称台的时间不一致（即速度不一致）时，就会影响车辆的称重精度。

2 EMD信号处理方法在动态轴重称重信号检测中的应用

在动态公路车辆称重方案中，轴重式是一种具有较高的性价比的称重方式。因此在本案例中，采用两轴刚性车辆（车速10Km/h）、通过轴重式称台（长度1m）进行称重为实验方案。以车轮的首次接触称台和末次离开称台的重量阈值作为触发数据采集的开始和结束。

当称台的长度为定长时，车速越快，车辆通过的时间越短，数据采集系统所采集的数据也就越少，数据越少给系统的数字信号处理带来的困难越大。当然可以通过提高系统的数据采样率来提高采样数据的数量，但是采样数据的信噪比会随数据采样率提高而下降，这是一对矛盾。

在本案例中，采用中低速采样率，兼顾数据量和数据的信噪比。数据采样时间约为360ms（车速10Km/h时，车轮通过一米称台的时间约为360ms），扣除上下称台部分的数据，所能采集到的数据有限。真正有效部分的数据大约在200-300ms左右，在这部分数据中还伴有发动机低频震动，采用加窗

的信号处理方法会产生较大的频率泄漏，难以实现对低频信号的滤波。车轮通过称台所获取的称重信号通常是非平稳随机信号，用常规数字信号处理方法，难以获得较高精度车轮重量信号。

EMD 信号处理方法是针对处理非平稳随机信号的有效方法。它源自于美籍华裔科学家黄锬提出的解决非平稳非线性信号分析的HHT 变换（希尔伯特-黄变换），该变换的两个变换之一就是EMD(empirical mode decomposition)。EMD 将时域的一个复杂信号分解为一系列的简单信号。这一简单信号的分量被称之为“固有模式函数” IMF（intrinsic mode function）。通过对求解IMF 来对淹没在动态轴

重信号中的真实车轮重量进行估计，以获得较高精度的轴重重量。

2.1 仿固态模式函数IMF 的分解，求轴重重量过程：

设图1 车轮的轴重重量称重信号为 $x(t)$ 。对 $x(t)$ ，找出其局部最大值点和局部最小值点，再利用三次样条函数分别对这些局部最大值点和局部最小值点进行插值得到 $x(t)$ 的上包络线 $u(t)$ 和下包络线 $l(t)$ ，如图3 所示。求出上下包络线的均值

$$m_1(t) = [u(t) + l(t)]/2 \quad (2.1)$$

从而完成一次迭代。

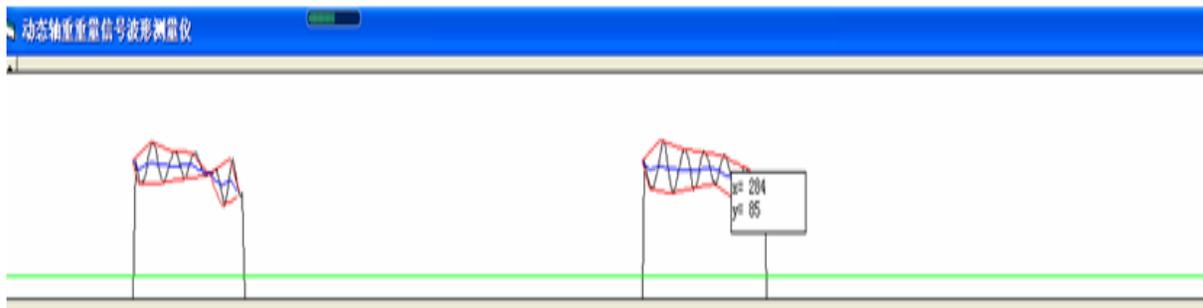


图3 红色曲线即为图1 $x(t)$ 的上下包络线

由于三次样条函数插值将会产生新的极值点，并且对原有的极值点会加以放大和平移。为此，在插值过程中也会在数据的端点处产生较大的扰动，因此(2.1) 式中得到的 $m_1(t)$ 只是一个粗略的轴重重量函数。为了精确求解车轮重量值，需要按上述方法再进行一次迭代。

找出 $m_1(t)$ 的局部最大值点和局部最小值点，同样利用三次样条函数对其得到的上包络线 $u_i(t)$ 和下包络线 $l_i(t)$ ，求出它们的均值线 $m_{i+1}(t)$ 。若由 $m_{i+1}(t)$ 求得的重量精度不够，则继续迭代。因此，有

$$m_i(t) = [u_{i-1}(t) + l_{i-1}(t)]/2 \quad (2.2)$$

直至 $m_i(t)$ 满足一定的重量精度为止。

经实验，采用此方法，在10km 车速时，单轴载荷称重精度不低于1%。

3 结束语

轮轴的动态称重信号通常持续的时间有限，而且是一种非平稳的随机信号，用常规的信号处理方法去处理会有一定的困难。而EMD 处理方法是一种

时域解决信号处理的方法，不受信号类型的制约，具有简单明了的特点。其运算量不是很高，尤其适合于像轮轴的动态称重信号的时后处理。

参考文献：

- [1] 周晓，对车轮滚动的受力分析及其应用的探讨，包钢科——1991.
- [2] 胡广书，现代信号处理教程（第二版），清华大学出版社，2015.
- [3] GBT21196-3- 动态公路车辆自动衡器- 轴重式，2020.

作者简介：王卫民，工程师，工学硕士，自1997 年至今一直从事动态称重信号处理研究及动态称重仪表的研发，曾经供职于上海耀华称重系统有限公司、苏州仅一测控技术有限公司、宁波柯力传感科技股份有限公司等单位的研发部门。