

基于 WSN 的高速汽车动态载荷信号处理方法

吴义魁,王琪,江民俊,金帅
(南昌航空大学 信息工程学院,江西 南昌 330063)

摘要: 针对高速动态称重中低频动态载荷严重影响真实轴重称量的问题,通过引入无线传感器网络(WSN)技术,构建智能化称重传感器网络,提出了一种测量高速汽车载荷的系统方案及数据处理方法。分析称重系统采集的汽车动态载荷的振动频率,并构建信号模型,通过基于三参数对动态载荷正弦波曲线进行拟合,建立线性方程组,采用高效算法和信息处理得到精确的称重数据。仿真实验结果表明,该方法平均误差低,数据稳定性较高,而且对高速具有很好适应性,对解决高速动态汽车称重精度问题具有一定的意义。

关键词: 动态称重;无线传感器网络;动态载荷;参数估计

中图分类号: TP206

文献标识码: A

文章编号: 1674-7720(2011)09-0062-05

Application of wireless sensor network to dynamic weighing of vehicles

Wu Yikui, Wang Qi, Jiang Minjun, Jin Shuai

(School of Information Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

Abstract: By introducing the WSN technology and building the intelligent weighing sensor network, this paper proposed a high-speed vehicle load measurement system solutions and a data processing method. Through analyzing the frequency of weigh-in-motion signal, constructing the signal model, acquired the dynamic load signal frequency, then through the sine wave curve fitting which based on three parameters, using efficient algorithm and information processing acquired the accurate weighing data. Simulation results show that the average error is low, data stability is high, and this system solutions has good adaptability to solve the problem of high-speed dynamic vehicle weighing. So it has some significance for solving the problem of high-speed dynamic vehicle weighing.

Key words: weigh-in-motion; WSN; dynamic weighing; parameter estimation

车辆超载不仅严重损坏道路、桥梁等交通纽带,给社会带来巨大的经济损失,同时也是交通事故的主要原因之一。如何有效治理车辆超载问题一直在国内外备受关注,也是我国交通公路事业整治中的重点和难点。

动态称重是一项比较复杂的技术,其中数据处理是其关键,也是目前国内外动态称重研究的重点^[1]。当前,对车辆的载重检测主流方式是轴重称量,即通过测量汽车各轴重,通过累加得出整车重量。动态称重数据处理方法主要有傅里叶分析与均值滤波方法、非线性最小二乘法优化理论法、扩展卡尔曼滤波法、小波理论分析法、参数估计法和 EMD 经验模型分析法^[2-3]。其中,参数估计算法是一种根据采集的波形特点,采用特殊的数据处理方法,实现动态数据处理的一种较高精度的估算方法。该方法是未来智能交通系统动态数据处理发展的趋

势之一^[1]。本文所采用的汽车动态载荷信号处理方法即属于此方法体系。

1 称重无线传感器网络的布局

无线传感器网络 WSN (Wireless Sensor Networks) 以其低功耗、低成本、分布式和自组织的特点,在世界范围内受到广泛关注,成为 21 世纪学术界研究的焦点技术之一。本文在称重传感器布局上引入 WSN 方案也正是考虑到它的这些特点,通过智能网络节点间的协作进行采集时间的确定和载荷振动频率的估算,并在此基础上进行数据的融合与处理,得出较为精确的轴重。

图 1 为一个大型动态汽车称重系统网络拓扑局部示意图。本系统采用的是当前在 WSN 解决方案中备受青睐的 ZigBee 方案。图 1 下方为其中一通道路面上部署的条形传感器阵列。理论上此方案可以同时解决 16 通

道的高速汽车称重。

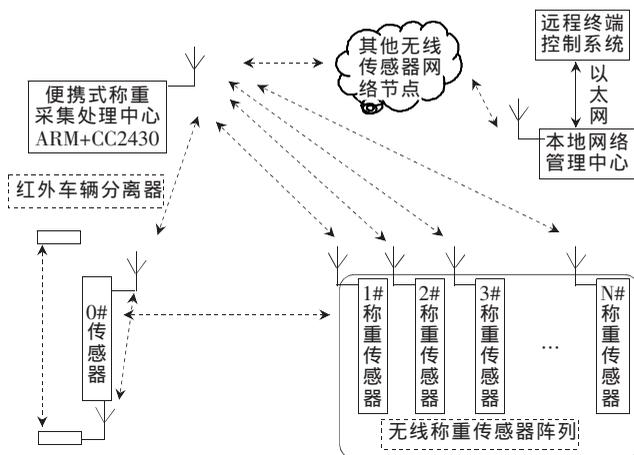


图1 动态汽车称重系统网络拓扑示意图

考虑到动态载荷振动频率在 2~15 Hz，以 140 km/h 作为汽车速度上限，则最大波长为 19.4 m。若要在该速度的基础上获取半个周期的数据，则首尾传感器(图中 1# 与 N#)间的距离应该在 10 m。本系统采用 10 个传感器进行布局，传感器的间距为 1 m，同时在前方 20 m~50 m 可视距离内部署一个传感器(如图 1 所示)。此 20 m 外的传感器可以是普通的车辆探测感知传感器或者与其他称重传感器节点等同的节点。

将传感器布局于 20 m 外主要是考虑到汽车的长度一般在 10 m 左右，而低功耗 ZigBee 模块无线传输距离一般在 50 m 以上，保证足够的距离(建议布局 30 m 远处)就可以保证有足够的时间用于获取红外分离器分离信息，并及时发送车型信息及轴数到前方载荷采集节点，通知其打开定时器进行计时和准备载荷的采集。

2 动态载荷信号模型的构建与分析

行驶中的汽车由于受到路面不平整和发动机的振动等原因，在垂直路面方向上会产生比较大的振动，形成动态载荷，因此作用在称台上的力并非恒定，而是包含了一部分不确定的动态载荷。在剧烈的振动下，载荷可以高达真实轴重的 30% 以上，振动频率范围在 3~15 Hz^[4]。而且动态载荷具体值与车速、路面平整度、载重、车型等等因素有关，具有明显的不确定性，其典型重力波形信号如图 2 所示。其模型可以表示为：

$$F(t) = W + \sum_{i=1}^n A_i \cos(2\pi f_i t + \theta_i) \quad (1)$$

其中， $F(t)$ 为某时刻动态载荷噪声与静态真实轴重之和， W 为静态真实载重， n 为动态载荷噪声数量， A_i 为动态载荷噪声幅值， f_i 为动态载荷噪声的振动频率， θ_i 为动态载荷噪声在经过称台时的初始相位角。

动态载荷噪声往往有多种，且振动幅值、频率和相位一般都不一样。从频率的角度，可以将其划分为高频和低频两部分。对于高频部分载荷，比较容易获取其多



图2 汽车动态载荷典型波形

个周期的信号，可以通过一般的滤波算法进行滤除。对于低频部分，主要由车身的振动引起^[5]，对称重结果干扰较大，而且在高速称重过程中一般很难得到其完整的振动波形。根据低频动态载荷噪声主要由车身振动造成，可以将式(1)模型简化为：

$$F(t) = W + A_0 \cos(2\pi f_0 t + \theta_0) \quad (2)$$

由式(2)可知，动态载荷的处理问题可以归结为基于三参数的正弦(余弦)波曲线拟合问题。

3 基于三参数的载荷正弦波曲线拟合

对于式(2)可以做如下恒定变形：

$$F(t) = W + B_0 \cos(2\pi f_0 t) + C_0 \sin(2\pi f_0 t) \quad (3)$$

令 $\omega = 2\pi f_0$ ，则式(3)变为：

$$F(t) = W + B_0 \cos(\omega t) + C_0 \sin(\omega t) \quad (4)$$

三参数正弦波曲线拟合的过程，即为在动态载波信号频率已知(即 ω 已知)的情况下，选取或寻找 W 、 B_0 、 C_0 的过程。为计算 W 、 B_0 、 C_0 ，可以选取线性无关的三组数据构造如下矩阵：

$$F = \psi \cdot X \quad (5)$$

$$\text{其中，} F = \begin{bmatrix} F(t_1) \\ F(t_2) \\ F(t_3) \end{bmatrix}, \psi = \begin{bmatrix} 1 & \cos(\omega t_1) & \sin(\omega t_1) \\ 1 & \cos(\omega t_2) & \sin(\omega t_2) \\ 1 & \cos(\omega t_3) & \sin(\omega t_3) \end{bmatrix}, X = \begin{bmatrix} W \\ B_0 \\ C_0 \end{bmatrix}.$$

通过以上分析可以看出，在动态载荷振动频率以及称重信号采集时间已知的情况下，动态载荷波形拟合的过程实际上可以归结为求解一组线性方程的过程。即将动态载荷处理的难题转移到采集时间的确定和载荷振动频率的测量上。本文的称重无线传感器网络的部署就是基于此需求。

4 载荷采集分析

4.1 采集时间序列的确定

由式(4)可以看出，对载荷曲线的拟合首先是对采集时间序列的确定。本传感器网络系统确定时间序列主要有两种方法：一种是通过车辆车速的测量及已知的传感器间距进行时间序列的确定；另一种是通过网络节点间时间同步，直接获取采样时间来确定。下面对第二种方法实现过程作简要说明。

0# 传感器节点在收到红外分离器节点广播的汽车相关信息后，立即向前方传感器阵列广播车辆到来信息。前方各称重节点收到信息后立即记录当前定时器时间，并在车辆每排车轮压上传感器时记下当前时间。假设某货车有轮子 3 排，并记其到达第一个传感器的时间(收到 0# 传感器发布同步计时报告信息到轮子压上传感

器之间的时间)分别为 t_{1a} 、 t_{1b} 、 t_{1c} 。若记其到达其他节点的时间分别为 t_{ia} 、 t_{ib} 、 t_{ic} ，其中 i 为第 i 号传感器，并将第一个传感器采集时刻作为零点时刻，则可将各采集时刻序列 Δt_{ia} 表示为： $\Delta t_{ia} = t_{ia} - t_{1a}$ 。由此便可得到 3 组(3 个轴的)采集时间序列： Δt_{ia} 、 Δt_{ib} 、 Δt_{ic} 。图 3、图 4、图 5 所示分别为前轮、中轮、后轮在依次通过各个采集节点时的载荷大小与采集时间序列对应关系的示意图。其中，各采集点所对应的时间即为所需要确定的采集时间点，其载荷大小即为对应时刻所采集的载荷大小。为提高波形视觉可观性，示意图中给出的是多于 10 个传感器采集节点时的示意图。

由以上分析也可知车速 v 可以简单地表示为：

$$v = 3S / (\Delta t_{10a} + \Delta t_{10b} + \Delta t_{10c}) \quad (6)$$

其中 S 为以 10 个传感器系统计算时，1# 传感器到 10# 传感器间距离。

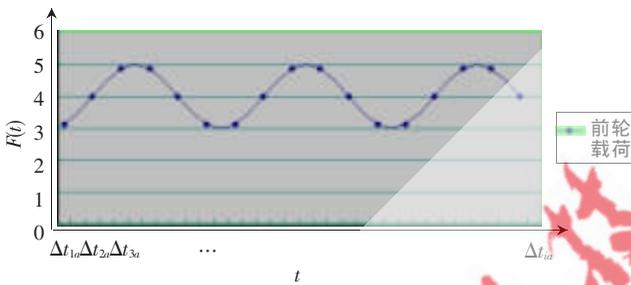


图 3 各称重传感器节点捕获前轮载荷时的示意图



图 4 各称重传感器节点捕获中轮载荷时的示意图



图 5 各称重传感器节点捕获后轮载荷时的示意图

4.2 载荷波动频率的估算

在确定采集时间序列后，最关键的是确定动态载荷的振动频率。这也是本文动态载荷处理算法的核心，即通过确定采集时间序列和估算载荷频率，将非线性动态载荷模型拟合问题转化为线性方程组求解的问题。

为了方便观察和分析，将图 3、图 4、图 5 合并于同

一个坐标系中，并假设此示意图为某高速行驶的汽车的 3 轴依次踩压在各个传感器上时，所采集的载荷数据如图 6 所示。本文以 10 个采集节点的系统进行研究，并取图 6 中各曲线的前 10 个采集节点数据进行分析。设前轴、中轴、后轴各采集点载荷大小分别为： $F(t_{ia})$ 、 $F(t_{bi})$ 、 $F(t_{ci})$ ，其中 i 表示第 i 个节点。

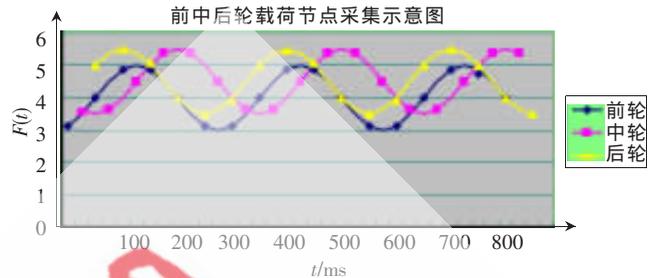


图 6 各称重传感器节点捕获 3 轴载荷时的示意图

由图 6 可看出，前轴载荷 $F(t_{ia})$ 大小变化中出现了两次峰值，分别为 $F(t_{a5})$ (或 $F(t_{a4})$)、 $F(t_{a6})$ (或 $F(t_{a10})$)；同时出现了两次谷值（这里假设满足出现两次谷值的判据，判据要求将在下文进行讨论），分别为 $F(t_{a1})$ 、 $F(t_{a6})$ (或者 $F(t_{a7})$)。由此可以得出前轴载荷测量过程中得出的频率估计值，分别记为 f_a 、 f'_a ，其中 $f_a = 1 / (\Delta t_{9a} - \Delta t_{3a})$ ， $f'_a = 1 / (\Delta t_{6a} - \Delta t_{1a})$ 。同理，由中轴载荷曲线及后轴载荷曲线可以得出其载荷测量估计值： f_b 、 f'_b 、 f_c (后轴载荷数据仅出现两次峰值)。其中 $f_b = 1 / (\Delta t_{7b} - \Delta t_{1b})$ ， $f'_b = 1 / (\Delta t_{4b} - \Delta t_{10b})$ ， $f_c = 1 / (\Delta t_{8c} - \Delta t_{2c})$ 。由此可以得到汽车在高速运动过程中载荷波动频率 f ，其大小可以表示为：

$$f = (f_a + f'_a + f_b + f'_b + f_c) / 5 \quad (7)$$

由以上分析知道，载荷波动频率的估计实际是根据采集的载荷数据的单调性进行周期的判断，当采集时间大于一个载荷波动周期时，可以非常容易地根据载荷出现峰值或谷值得出载荷的波动周期。下面给出出现两次峰值或谷值的判据，并简称为“峰值判据”和“谷值判据”。判据法则表述如下：

假设某次采集的数据序列中，在某个连续区间内存在 $F(t_m)$ 和 $F(t_n)$ 两个极大值，即数据序列存在且满足： $F(t_{m-1}) < F(t_m) > F(t_{m+1})$ ，同时 $F(t_{n-1}) < F(t_n) > F(t_{n+1})$ ，则称采集序列满足峰值判据。

假设某次采集的数据序列中，在某个连续区间内存在 $F(t_m)$ 和 $F(t_n)$ 两个极小值，即数据序列存在且满足： $F(t_{m-1}) > F(t_m) < F(t_{m+1})$ ，同时 $F(t_{n-1}) > F(t_n) < F(t_{n+1})$ ，则称采集序列满足谷值判据。

正如式(5)所示，若某传感器阵列采集的载荷序列在连续区间内存在多个区间同时满足峰值判据和谷值判据，则可以获取多个频率估计值，并通过求取平均值获取精度更高的频率估计值，以避免偶然误差。

根据峰值判据和谷值判据是以采集序列的周期大于一个载荷波动周期为前提的，以及当载荷波动频率较

低且车速较高时,完全可能出现载荷采集周期不全的情况,下文将针对残周期载荷波动频率估计问题进行探讨。

动态载荷振动频率在 2~15 Hz 之间,若某汽车速度高达 120 km/h 以上,且动态载荷波动频率低至 3 Hz 左右时,则只有 10 个采集节点且节点间距只有 1 m 的采集系统,将无法得到一个完整周期的载荷数据。如图 7 所示,某高速行驶的车辆经过称重传感器阵列时所采集的载荷波动数据中,没有一组数据满足峰值判据或者谷值判据。由此可知,基于峰值判据和谷值判据的载荷波动频率估计算法将无法完成载荷波动频率的估计,所以提出一种辅助判据法,并称其为“残周期判据”。判据法则表述如下:

残周期判据:假如某载荷序列在整个连续区间内不满足峰值判据和谷值判据,但同时存在一个极大值 $F(t_m)$ 和一个极小值 $F(t_n)$,即数据序列存在且满足: $F(t_{m-1}) < F(t_m) > F(t_{m+1})$,同时 $F(t_{n-1}) > F(t_n) < F(t_{n+1})$,则称载荷序列满足残周期判据。

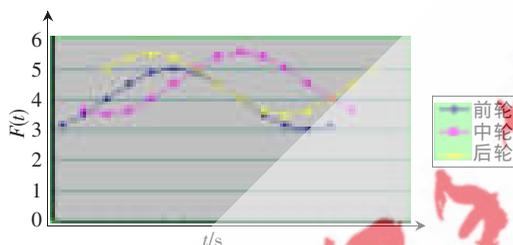


图 7 残周期载荷波动数据示意图

在图 7 所示情况下,轴轮数据及后轴数据均满足残周期判据。此时,载荷波动频率 f 可以表示为:

$$f = (f_b + f_c) / 2 \quad (8)$$

其中, $f_b = 1/2 (|\Delta t_{mb} - \Delta t_{nb}|)$, $f_c = 1/2 (|\Delta t_{mc} - \Delta t_{nc}|)$ 。

从残周期判据法则可知,残周期判据成立的条件是数据序列存在半个波动周期以上的数据区,其实是峰值判据或者谷值判据的子集,但由于其数据在时间域上较密集,所以在车速较高且载荷波动频率较低时,对载荷波动频率的估算精度往往更高。另外,由于系统在布局设计时已经充分考虑了采集半个载荷波动周期数据,所以一般情况下,特别是对于具有多排轮子的汽车,不会出现采集的多组载荷数据同时不满足残周期判据的情况,如图 7 所示,仅一组数据(前轮载荷数据)不严格满足残周期判据。假如出现某种特例,在系统算法设计时均可当作半周期处理,且取载荷波动频率为:

$$f = (f_a + f_b + f_c) / 3 \quad (9)$$

其中, $f_a = 1/2 (|\Delta t_{10a} - \Delta t_{1a}|)$, $f_b = 1/2 (|\Delta t_{10b} - \Delta t_{1b}|)$, $f_c = 1/2 (|\Delta t_{10c} - \Delta t_{1c}|)$ 。

5 算法实现与仿真分析

5.1 基于线性方程组的载荷求解算法及可行性分析

从以上动态载荷模型的分析过程可知,在采集时间序列确定及估算出载荷波动频率后,动态载荷波动曲线

拟合的问题,实际上已经转化为线性方程求解的问题。而且由式(4)可以看出,由三组线性无关载荷数据信息即可求式(3)中未知参量。矩阵 Ψ 的行向量有如下特性:当且仅当其中两组数据时间间隔为载荷波动周期时间的整数倍时,两行向量才线性相关,即矩阵 Ψ 为奇异矩阵。由此得出:在满足谷值判据(或峰值判据)或者残周期判据的数据区间内,任意选择 3 组数据即可满足矩阵 Ψ 中 3 组行向量线性无关,亦即矩阵 Ψ 为非奇异矩阵。由矩阵方程的理论可知,此时矩阵方程具有唯一解。

求解线性方程组的方法比较多,常见的有高斯消去法和迭代法。由于本系统要求解的方程组是三阶方程组,使用高斯消去法计算非常简单快捷(经分析和试验数据的验证,此载荷矩阵方程采用迭代法求解会遇到严重的发散问题)。此外,考虑到数值的稳定性,本系统采用高斯列主消去法,在计算过程中采用双精度浮点运算,将舍入误差降至极小,并对多组数据进行计算,对计算结果进一步融合,消除偶然性误差。

5.2 算法仿真与实验数据分析

依据 10 点传感器阵列系统和 3 轴车载模型,假定某车行驶速度高达 140 km/h,可构造如下载荷振动模型:

$$F(t) = 10 + 2.598 \sin(10\pi t) + 1.500 \cos(10\pi t) \quad (10)$$

式(10)模型实质是令式(3)中 $W=10$, $B_0=1.500$, $C_0=5.598$ 。也即对式(2)中动态载荷噪声的振幅 A_0 取 3,动态载荷噪声波动频率 f_0 取 5,初始相位角 θ_0 取 $\pi/6$,展开所得。由于传感器间距为 1 m,车速为 38.89 m/s,由此得出采样序列间隔时间大约 25.7 ms,根据矩阵方程列出各点计算信息值如表 1 所示,其曲线拟合图如图 8 所示,图 8 为以某牌 3 轴汽车为模型进行仿真计算后的载荷曲线图,其中轴距为 1.3 m 和 3.5 m。

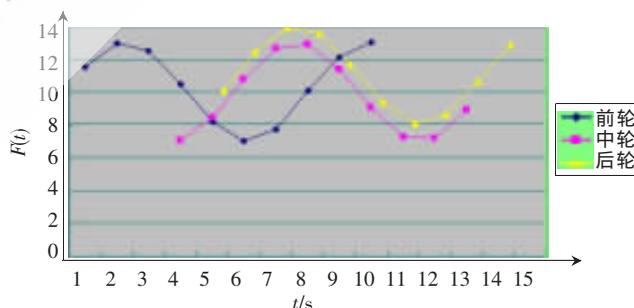


图 8 仿真结果拟合波形图

表 1 载荷模型矩阵中各元素的计算值

1#~10# 传感器时间序列/ms	$1W$	$2.598\sin(10\pi t)$	$1.5\cos(10\pi t)$	$F(t)$
$t=0$	1	0	1	11.5000
$t=26$	1	0.7289	0.6846	12.9206
$t=52$	1	0.9980	-0.0628	12.4986
$t=78$	1	0.6370	-0.7704	10.4993
$t=104$	1	-0.1252	-0.9921	8.1865
$t=130$	1	-0.8089	-0.5878	7.0168
$t=156$	1	-0.9823	0.1873	7.7289
$t=182$	1	-0.5359	0.9788	10.0759
$t=208$	1	0.2486	0.9686	12.0988
$t=234$	1	0.8762	0.4819	12.9992

表 1 数据是在 ARM 平台(LPC2478,主频采用 48 MHz)环境下,用 C 语言实现该算法,对载荷曲线进行拟合复原所测得的数据及各个算法性能(时间)数据。其中,时间数据是采用硬件定时器测量所得,其时间大小仅仅是高斯列主消去法计算花费的时间。为提高精度和算法的稳定性,在矩阵计算过程中采用双精度数据类型,输出时取其单精度数据位。从表 2 的结果可以看到数值结果非常稳定(最左边的传感器编号是指表 1 所对应的传感器数据,计算时采用了相邻的 3 组数据),误差都在万分之一以下。从计算时间上可以看到,算法占据 CPU 时间非常短,单次计算时间在 115 μ s 左右。

表 2 载荷拟合值与算法性能分析

传感器编号	高斯列主消去法	计算花费时间/ μ s	误差/%
1,2,3	9.999955	114	<0.001
2,3,4	9.999996	115	<0.0001
3,4,5	9.999923	113	<0.001
4,5,6	10.000168	117	<0.002
5,6,7	9.999770	117	<0.003
6,7,8	10.000071	116	<0.001
7,8,9	10.000060	115	<0.001
8,9,10	9.999792	117	<0.003

表 3 频率估算误差对载荷拟合的影响分析

传感器编号	列主消去法	误差/%
1,2,3	9.9348	-0.65
2,3,4	9.9436	-0.56
3,4,5	9.9912	-0.01
4,5,6	10.057	0.43
5,6,7	10.039	0.61
6,7,8	10.397	3.97
7,8,9	9.5507	-4.5
8,9,10	10.280	2.8
平均值	10.024	0.24

如果采用表 2 的 8 次计算结果进行拟合,其矩阵计算花费时间也在 1 ms 左右。如果再加上载荷频率估计算法实现所花费的时间和数据筛选等所花费的时间,整个数据处理时间可以控制在 10 ms 以内。这样中心处理系统完全有足够时间进行无线传感器网络的管理和数据收集工作(ZigBee 芯片接收十几个字节的短数据帧所需时间大约在 1 ms 左右,此外数据的接收和发送均采用 DMA 方式,几乎不会影响 CPU 对上次车辆载荷的处理)等。

对于载荷频率的估计,从表 1 的 $F(t)$ 列数据可以看到:10# 传感器所采集载荷虽然是 10 组数据中最大的,但由于没有第 11# 传感器的存在作为比较,根据峰值判据知道,此 10 组数据不能完成满足峰值判据(虽然在这种条件下完全有理由认为 2# 传感器节点数据到 10# 传感器节点的数据就是一组峰值判据区间数据)。但是此

10 组数据中的 2# 传感器节点数据到 6# 传感器节点的数据完全满足残周期判据,由此可以得出频率估计值 $f_0^*=1/[2\times(0.0257\times4)]=4.864$,与假定的载荷波动频率比较可以得出,基于单轴数据的频率估算误差为:

$$\delta_0=(5-4.864)/5=0.0272<3\%$$

表 3 是采用频率估计值为 4.864 进行静态载荷拟合的结果与误差分析。从表 3 可以看到:8 组数据最大误差在 4.5%,最小误差在 0.01%,将 8 组结果进行简单数据融合(求平均)后,误差在 0.24%。如果进一步对计算的结果进行融合,比如将其中任何 3 组数据均进行一次计算,并去除掉一部分较大结果和较小的结果,可以得到更稳定更精确结果。限于篇幅,不再一一列出计算结果。

从理论分析和仿真试验结果看,本文基于参数估计与线性拟合的载荷处理方法,其误差主要源于载荷波动频率估计误差。从表 3 仿真试验结果还可看到,频率估计误差可能导致局部误差波动较大,但经过一定数据处理后,其误差可以更小。基于传感器阵列的动态称重系统除了对高速和低频具有很好适应性外,还可以非常容易地剔除一些不良数据,使数值结果保持较高稳定性。

此外,基于无线传感器网络技术的汽车动态称重系统,由于具有很高的智能性,在网络管理方面具有很强的自组织自适应能力,可以推广应用于构建智能交通网络系统,具有一定的实用价值。

参考文献

- [1] 曹立平.中国衡器实用手册[M].北京:中国计量出版社,2005.
- [2] HUANG N E, SHEN Z, LONGS R, et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis [C]. Proceedings of Royal Society. London, 1998,44:903-995.
- [3] 周志峰,蔡萍,许嘉,等.基于经验模态分解的汽车动态称重数据处理[J].中国机械工程,2005,16(22):1813-1816.
- [4] 周志峰.应变式汽车轴重动态测量系统性能增长研究[D].上海:上海交通大学,2007.
- [5] Li Jianfeng, Zhou Lifang, Wang Qingqing. Study on dynamic weighing System base on intelligent algorithm [C]. IEEE International Conference on Control and Automation, 2007: 765-768.

(收稿日期:2011-01-01)

作者简介:

吴义魁,男,1983年生,硕士研究生,主要研究方向:动态称重,无线传感网络应用。

王琪,男,1964年生,教授,主要研究方向:无线传感器和无人机。