

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2017.07.014

# 基于向量分割的动态称重模型优化方法

李浩<sup>1,2</sup>, 宿金菲<sup>3</sup>, 赵敏慧<sup>1</sup>, 梁杰<sup>2</sup>

(1. 东南大学 交通学院, 江苏 南京 210000; 2. 西安文理学院 西安市物联网应用工程实验室, 陕西 西安 710065;  
3. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064)

**摘要:** 动态称重技术能够显著减少货车称重时间提高收费站通行能力, 然而受其模型所限, 对于变速运动或车轮静止于传感器上的车辆则无法准确进行测量。针对以上问题, 以路面交互模型以及部分承载式动态称重模型为基础, 提出了一种基于向量分割的部分承载动态称重模型。利用压电石英传感器结合该模型, 以动态传感器稀疏阵列的形式构建了一种4排直列式动态称重系统。在哈同高速哈尔滨东收费站对系统进行了低温、定性与定量的测试。试验结果表明: 该系统稳定性好, 在-28℃状态下温度漂移仅为0.5%, 响应速度为0.2s; 在95%置信区间内, 精确度为±3%以内, 特别是能够解决动态称重中“二次起停”的问题。该系统能够为重载交通智能化管理提供一定的支持。

**关键词:** 智能运输系统; 动态称重; 向量分割法; 传感器稀疏矩阵; 压电石英传感器; 路面交互模型

中图分类号: U492.3<sup>+</sup>21

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268(2017)07-0101-07

## An Optimization Method for Weigh-in-Motion Model Based on Vector Segmentation

LI Hao<sup>1,2</sup>, SU Jin-fei<sup>3</sup>, ZHAO Min-hui<sup>1</sup>, LIANG Jie<sup>2</sup>

(1. School of Transportation, Southeast University, Nanjing Jiangsu 210000, China;  
2. Xi'an Laboratory of IOT Engineering, Xi'an University, Xi'an Shaanxi 710065, China;  
3. School of Highway, Chang'an University, Xi'an Shaanxi 710064, China)

**Abstract:** WIM technique can significantly reduce the truck weighing time and improve the toll-station traffic capacity. However, limited by model, no ideal method can accurately weight vehicles with variable speed or wheels stilling on the sensors. Focusing on above problem, a surrounding load-bearing WIM model based on vector segmentation is proposed. A 4-row cylinder-in-line dynamic WIM system in the form of dynamic sensor sparse matrix is built by using piezoelectric quartz sensor and combining with the proposed model. The low-temperature, qualitatively and quantitatively experiments on the system are carried out in Harbin east toll station of Harbin - Tongjiang expressway. The experimental result shows that (1) the system has high stability, the temperature drift is only 0.5% at -28℃ and the response speed is 0.2s; (2) the accuracy is within ±3% with 95% confidence interval, especially the problem of “secondary start-stop” in WIM can be solved effectively. The WIM system is conducive to heavy-duty traffic intelligent management.

**Key words:** ITS; Weigh-in-Motion (WIM); vector segmentation method; sensor sparse matrix; piezoelectric quartz sensor; pavement interaction model

## 0 引言

随着交通运输业的发展, 收费场站的快速化、

自动化、智能化进程越来越被重视, 自2012年起, 针对货车超限以及快速称重等问题, 交通运输部颁布了多条法令, 旨在提高收费场站通行能力, 缓解

收稿日期: 2016-10-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(71563045); 西安市科技计划项目(CXY1531WL25)

作者简介: 李浩(1982-), 男, 陕西西安人, 博士后, 副教授。(lihao82@126.com)

交通压力, 节能减排。其中与动态称重技术 (WIM) 的相关法令越来越多, 可见其在未来将成为解决收费场站通行能力的一个重要切入点。WIM 自 2003 年引入我国以来, 一直备受瞩目, 众多学者以及科研机构就 WIM 中的传感器种类、布设方法、优化算法等方面做了大量研究。例如: 王选仓等<sup>[1]</sup>于 2014 年利用多排压电石英传感器结合小弯板的方式, 提出了一种多排并列式传感器布设方法, 在车速不高于 20 km/h 时, 误差可控制在  $\pm 5\%$  以内。王翥等<sup>[2]</sup>于 2012 年提出了一种基于多数据融合的动态称重传感器布局方法, 该方法通过对每个轴的荷载信号进行动态模拟, 使信号的实时性更强。2014 年山东德鲁泰公司<sup>[3]</sup>推出了双台面动态称重汽车衡, 并自主研发了与之相适应的模型以及算法。然而在实际应用中, 动态汽车衡的精度远没有试验中的效果好, 特别是在车辆二次起停后漂移非常大。这是由于目前所使用的测量方法参考模型基本为静态模型<sup>[4]</sup> (包括计量标准)。目前动态称重系统采用的数学模型基本为差分模型, 该模型主要通过记录车轮碾压传感器所产生响应的积分差来记录车辆的瞬时重量, 测量值与车速以及车辆行驶状态线性相关。当车轮静止与传感器受力时, 轮速度为 0, 积分差也为 0, 这时传感器阵列无法正确采样, 因此会产生漂移<sup>[5]</sup>。本研究提出一种基于向量分割的动态称重模型优化方法, 该方法利用向量分割原理将轮重的整体响应按照响应波形面积分割成  $N$  个极值, 将每个极点形成的面积积分求和, 从而剔除了传感器无响应状态下形成的误差, 将车轮静止于传感器时的状态作为车辆以 0 km 的速度运动进行处理, 从而解决了动态称重中二次起停误差大的问题。

## 1 模型的构建

### 1.1 系统框架设计

经验证, 采用单一方法对模型进行优化都会因系统缺陷产生误差, 因此, 在考虑系统框架设计时, 采用由欧拉·伯努利路面交互模型辅以向量分割法进行混合模型设计。首先利用路面交互模型得到运动状态下车轮对地面的加速度, 接着利用向量分割法将动态称重模型进行重构, 即将传感器反馈的波形按照轮胎轨迹进行分割, 然后求极值。将每个分割点得到的极值进行线性叠加得到单个轮重, 再将每个轮重相加, 得到整车重量。系统结构图如图 1 所示。

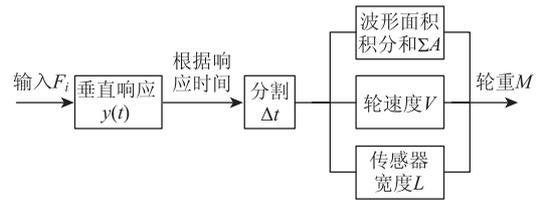


图1 系统结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of system structure

### 1.2 欧拉·伯努利路面交互模型

车辆在运动状态下通过传感器时, 会对地面产生一定的压力  $F$  (如图 2 所示), 然而受路面环境的影响, 压力大小随着车辆震动而发生变化<sup>[6]</sup>。因路面为刚性, 车辆底盘具有一定的黏弹性, 因此车辆对地面的压力可用车辆对地加速度表示, 记为  $a(t)$ , 则整个系统可认为是一个与路面加速度相关的拉普拉斯函数<sup>[7]</sup>, 记为:

$$f(t) = a(t) \left(1 - \frac{t^2}{\mu^2}\right) e^{-\frac{t^2}{2\mu^2}}, \quad (1)$$

式中,  $a(t)$  为随时间变化的线性加速度, 可用响应波形的面积积分表示;  $\mu$  为在单位时间内行驶速度的高斯响应标准差;  $t$  为车轮通过传感器的响应时间。

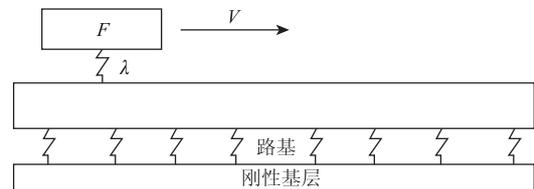


图2 欧拉·伯努利路面交互模型

Fig. 2 Euler Bernoulli pavement interaction model

在模型中, 由于路面被认为是具有弹性的一维梁, 可将车轮震动转化为动荷载, 大小可用随时间变化的正弦函数来表示<sup>[8]</sup>。假设车辆的悬架为刚性, 即单位缩进量  $\lambda = 0$ , 那么车轮对地面的加速度是一个垂直响应, 可表示为:

$$a(t) = Fm^{-1}\beta(vt), \quad (2)$$

式中,  $a(t)$  为车辆对地垂直位移;  $\beta(vt)$  为匀速状态下单位荷载的路面响应, 其与路面的结构和材料特性有关<sup>[9]</sup>。因  $a(t)$  与  $F$  线性相关, 车辆对地垂直压力可用车辆对地加速度的一维函数表示, 即:

$$a(t) = FTe^{-\frac{v^2 t^2}{2\mu^2}}, \quad (3)$$

式中  $T$  为弹性系统振动幅度。

经过低通滤波后, 将其表示为与传感器响应线

性相关的函数,可记为:

$$a(t) = FT \frac{v^2}{\mu^2} \left(1 - \frac{\Delta t^2}{\mu}\right) e^{-\frac{\Delta t^2}{\mu}}, \quad (4)$$

式中  $a(t)$  为刚性系统对地相对位移(用加速度表示);  $F$  为车辆对地平均压力;  $T$  为弹性系统振动幅度;  $v$  为车辆瞬时速度;  $\mu$  为高斯标准差;  $\Delta t$  为车轮滑动通过传感器相对位移的积分差。

### 1.3 基于向量分割的动态称重模型

车辆在运动状态下通过传感器时,其瞬时对地压力可表示为<sup>[10]</sup>:

$$F = \left(\frac{V}{L}\right)ACg, \quad (5)$$

式中,  $L$  为传感器宽度;  $V$  为车速;  $A$  为车轮负载的波形面积;  $C$  为标定系数;  $g$  为重力加速度。

由式(5)可知,动态称重的精度与车速及传感器宽度有关。动态称重传感器安装后与路面成为一个有机整体,车轮对地接触面与传感器上表面产生相对滑动,以类似线性扫描的方式与轮胎整体进行滑动,即传感器与附近路面共同承担车轮负荷,当  $L$  越小时得到的瞬时压力越精确(可理解为最小量程越小),其相应波形图如图3所示<sup>[11]</sup>。

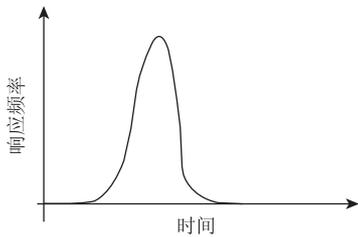


图3 部分承载模型波形响应

Fig.3 Partly load-bearing waveform response

车辆通过传感器的瞬时速度  $v(t)$  和车轮与传感器之间的相对滑动位移  $y(t)$  可以用式(1)中的相对加速度  $a(t)$  表示,记为:

$$y(t) = y(0) + v(0)t + \int_0^t \int_0^\xi aTdTd\xi, \quad (6)$$

式中,  $y(t)$  为车轮与传感器之间的相对滑动位移;  $y(0)$  为初始位移;  $v(0)t$  为车辆通过传感器时的初始速度;  $\delta$  为传感器响应极值。

这时根据传感器的宽度与车轮通过传感器时的响应时间与车辆速度之间的关系,可得到传感器宽度与最大轮迹间的倍数关系<sup>[12]</sup>。假设路面水平,传感器与周围路面共同承担车轮负荷,每条传感器的影响值即为车轮对地加速度的瞬时极值。将时间  $t$  内的所有极值叠加,即可得到车轮在时间  $t$  内的平均对地加速度,从而得到车轮整体重量。考虑到车轮静

止于传感器时,传感器在该时刻的响应为0,令分割次数为  $n$ ,则车辆通过传感器的整体速度可以分割成  $n$  个响应时刻的瞬时速度,记为:

$$v(n) = \frac{y(n) - y(n-1)}{T}, \quad (7)$$

式中,  $v(n)$  为第  $n$  次分割时的瞬时响应速度;  $y(n)$  为第  $n$  次分割时的车轮对地相对位移;  $T$  为整体响应时间。

$n$  个分割点的瞬时加速度可表示为:

$$a(n) = \frac{v(n) - v(n-1)}{T}, \quad (8)$$

式中,  $a(n)$  为第  $n$  次分割时的车轮对地瞬时加速度;  $v(n)$  为第  $n$  次分割时的瞬时响应速度;  $T$  为整体响应时间。

转换成单位向量记为:

$$\begin{bmatrix} a(n) \\ a(n-1) \\ \vdots \\ a(0) \end{bmatrix} = \frac{1}{T^2} \begin{bmatrix} 1 & -2 & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 1 & -2 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y(n) \\ y(n-1) \\ \vdots \\ y(0) \end{bmatrix}. \quad (9)$$

由式(9)可知,当车轮静止于传感器时,其响应为0,但该时刻的响应值不作为分向量进行计算。当车轮相对于传感器产生滑动时,传感器产生响应,记做初始向量,车轮整体离开传感器时的响应记为  $n$  维向量,每个向量线性相关,则每个响应值均为有效值,将  $n$  维向量得到的响应求其积分和,即得到车轮的整体响应,据此推算出单个车轮对地平均压力,再根据式(5)转换为整车质量即可。

### 1.4 传感器的选型

采用向量分割法的前提是货车轮胎最小触地长度为400 mm(即部分承载方式),如图4所示,如采用单条传感器宽度大于最小轮迹的传感器,车轮被认为是整体置于传感器上,分割次数记为0,破坏了模型的计算条件,也不符合动态称重模型的要求(可以理解为使用最小刻度为cm的尺子无法测量以mm为单位的物体长度)。完全承载方式得到的响应值随着车速增加及车辆震动频率增大大会产生较大噪声,这种噪声无法通过滤波完全去除,因此该方式更适合静态称重模型<sup>[13]</sup>。根据《动态公路车辆自动衡器检定规程》(JJG907—2006)的有关规定,动态汽车衡进行静态试验的前提是衡器具备静态称量模

式、并且作为集成控制衡器使用,即“用于确定参考车辆总质量,或静态参考单轴载荷的标准计量器具”,即要求被测对象在测量瞬间完全静止于测力面上,这种模型并不适合动态称重,因此在进行动态称重时,车辆只能是低速,或准静态的情况下通过传感器<sup>[14]</sup>。由图4(b)可知,动态响应的波形图为尖波,即测量值均为瞬时响应,当车轮静止于承载面时,瞬时响应为0,即变为图4(a)中的平顶部分。因此要采用部分承载的动态称重模型需解决绝对静止状态,即车轮静止于传感器时的情况。因此文中引入的向量分割方法只适用于部分承载的传感器,即传感器宽度小于400 mm。

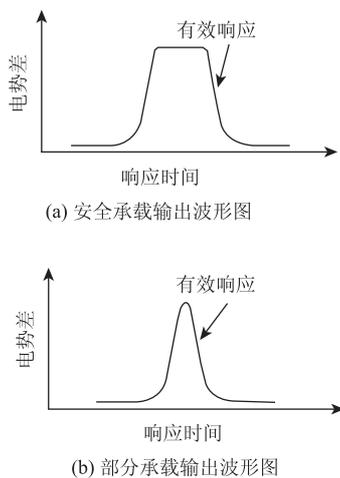


图4 波形输出图

Fig. 4 Curves of fully load-bearing waveform output and partly load-bearing waveform output

## 2 试验验证

### 2.1 试验方案

测试原型系统由瑞士某公司生产的9195 E/F511型压电石英传感器、瑞士某公司生产的5163E/F5114CH电荷放大器、国内某公司生产的RDA7802-0型称重数据采集器、国内某公司生产的GVD322型车辆分离器构成。测试用车为东风EQ1161K3G型3轴载重货车,测试地点为哈同高速哈尔滨东收费站。为避免温度漂移带来的影响,测试时间为2016-10-15至2016-10-20,测试温度为8~14℃。传感器采用如图5的并列4排的方式进行排列,根据计算传感器间距设定为490 mm。

测试方案采用先定性后定量的方式进行测量。首先对测试车辆进行标定,接着分别以0, 5, 15, 20, 25, 30 km/h的速度通过传感器进行测重,每个速度点运行10次,取平均值,再与标准值进行对

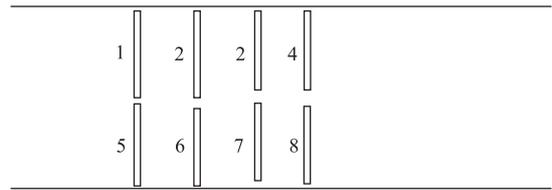


图5 传感器布局

Fig. 5 Layout of sensors

比,利用平均误差的准确度来进行描述,其表达式为:

$$ERR_n = G_n/G_0 - 1, \quad (10)$$

式中, $ERR_n$ 为 $n$ 次测量的准确度; $G_n$ 为第 $n$ 次测量值; $G_0$ 为标准参考值。

同时利用最小二乘法对数据进行修正,再与标准值进行对比,利用精密度来表示修正后的误差量,其表达式为:

$$DEV_n = G_n/G_{avg} - 1, \quad (11)$$

式中, $DEV_n$ 为 $n$ 次测量值的偏差; $G_n$ 为第 $n$ 次测量值; $G_{avg}$ 为测量平均值。

定量分析采用以完全承载模型及基础动态模型为算法的国内某公司ZCS-30型称台式动态称重系统(完全承载模型)与Ezway-30石英晶体式动态称重系统(基础动态称重模型)做对比,分别以0, 5, 15, 20, 25, 30 km/h的速度通过传感器进行测重,每个速度点运行10次,取平均值,修正后与标准值进行对比,得到比前两种模型精度更高的幅度及系统连续性,用均方差表示,表达式为<sup>[15]</sup>:

$$STDEV = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})^2}{n}}, \quad (12)$$

式中, $STDEV$ 为标准方差; $S_i$ 为标准差; $\bar{S}$ 为平均误差。

### 2.2 试验数据定性分析

本次试验所使用的传感器宽度为50 mm,所测车辆最大轮迹 $P$ 为400 mm,因此,向量分割次数 $N=8$ ,即传感器波形经过8次分割,其波形响应波形如图6所示。



图6 向量分割后波形叠加响应图

Fig. 6 Waveform superposition response diagram after vector segmentation

由图 6 可知, 将单条传感器信号按照积分法进行向量分割后, 原本只产生 1 次响应的电频信号被分割为 8 次, 且每个影响均可用随时间变化的正弦函数来表示, 只需对每个响应波形求其面积的积分和, 即可得到准确的整体响应。定性测试数据如表 1 所示。

表 1 定量测试数据  
Tab. 1 Quantitative test data

动态重量/ t	平均速度/ (km · h <sup>-1</sup> )	平均误差/ 差/%	修正误差/ 差/%	标准差/t
14. 216	0	1. 54	1. 22	0. 329 2
14. 042	4. 88	0. 316	0. 3	0. 129 4
14. 121	10. 21	0. 71	0. 55	0. 138
14. 169	15. 24	1. 20	1. 02	0. 199 1
14. 344	20. 53	2. 45	1. 99	0. 288 9
14. 245	24. 35	1. 75	1. 25	0. 318 9
14. 036	30. 07	1. 02	0. 78	0. 128 3

注: 标准重量 14 t, 温度 11 ℃, 样本容量 70 个。

由表 1 数据可知, 采用新模型构成的系统, 初测平均误差最大为 2. 45%, 经过修正后误差最大为 2. 02%, 符合 JJG907—2006 中规定的 2 类 2 级标准。同时数据线性不相关, 具有离散型, 这说明系统鲁棒性较强, 每个数据都具有偶发性, 系统误差较小。同时均为正误差具有统一的偏差方向, 方差较小, 说明系统具有一定的连续性, 便于进行校条与数据的优化<sup>[16]</sup>。

### 2. 3 试验数据定量分析

使用 3 轴货车空重载, 从 0 km/h 起进行测量, 每提升 5 km/h 的速度进行 1 次统计, 分别对 ZCS - 30 型称台式动态称重系统和 Ezway - 30 石英晶体式动态称重系统进行对比。试验数据统计结果如表 2 所示。

表 2 不同系统误差统计表  
Tab. 2 Statistics of different system errors

速度/ (km · h <sup>-1</sup> )	试验系统平均 误差/%	ZCS - 30 平均 误差/%	Ezway - 30 平均 误差/%
0	1. 60	0. 15	97
5. 12	0. 86	3. 53	3. 57
9. 98	0. 73	3. 87	2. 24
15. 32	1. 00	4. 02	3. 88
21. 44	1. 40	5. 73	4. 75
25. 13	1. 20	8. 42	4. 33
30. 21	1. 53	8. 77	4. 59

注: 标准重量 15 t, 温度 13 ℃, 样本容量 210 个。

由表 2 可知, 试验系统在车轮静止于传感器受力面时略有漂移, 经标定并使用最小二乘法对数据进行修正后, 在 95% 置信区间内其绝对误差的平均值仅为 1. 60%。当车速以 5 ~ 30 km/h 通过传感器时, 其绝对误差仅为 1. 53%, 符合 JJG907—2006 所规定的动态 I 级, 同时具有相同的误差偏移度, 易于线性修复。采用完全承载模型的 ZCS - 30 型称台式动态称重系统, 在车轮静止于受力面时, 其绝对误差仅为 0. 15%, 当车速不高于 15 km/h 时, 其绝对误差最高为 4. 02%; 当车速高于 15 km/h 时漂移增幅很快; 当车速接近 30 km/h 时, 绝对误差最高, 可达 8. 77%。采用典型动态称重模型的 Ezway - 30 石英晶体式动态称重系统在车轮静止于受力面并再次启动时, 漂移较大, 绝对误差达 97%, 当车速在 5 ~ 10 km/h 时漂移明显降低, 绝对误差的平均值为 4. 59%。

由图 7 可知, 试验用系统标准差较小, 即大多数数据均为有效值, 在 95% 置信区间内称重数据整体偏移较小。使用完全承载模型的 ZCS - 30 型称台式动态称重系统在低速状态下数据偏移较小, 但当车速超过 10 km/h 时偏移量明显增加, 说明该系统在高速称重状态下稳定性不佳。采用典型动态称重模型的 Ezway - 30 石英晶体式动态称重系统在低速状态下, 特别是车辆静止时, 动态称重响应为 0, 标准差非常大, 导致无法进行正常称重, 也无法对数据进行修复, 当车辆处于运动状态过称时, 标准差又急剧减小, 稳定性不佳。

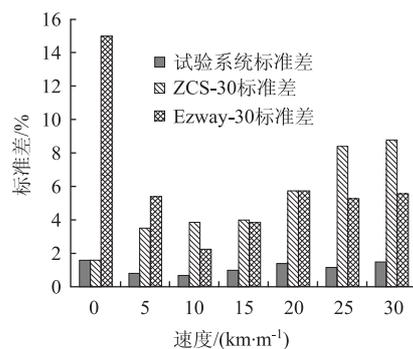


图 7 三种系统标准差对比图

Fig. 7 Comparison of standard deviations of 3 systems

综上所述, 采用完全承载模型构建的动态称重系统在车辆以极低速通过时, 准确度较好, 但超过一定速度时, 系统精确度急剧下降, 无法在非现场执法、无人值守的主线收费站以及货车 ETC 等方面进行应用<sup>[17]</sup>。采用典型动态称重模型的系统, 由于其无法克服二次起停带来的误差, 无法适用于车流

量较大的收费场站,同时对司机跳称、拖称等非法操作也无法进行容错处理<sup>[18]</sup>。同时以上两种系统产生的数据没有同一偏差性,不便于数据优化。采用向量分割法进行模型重构后的试验系统具有误差小、稳定性强、数据偏移方向一致、易于校调的特点,能够完全克服动态称重中遇到的二次起停等问题,同时能够对拖称、跳称、走S形等非法操作进行处理,具有广泛的应用市场。

### 3 结论

(1) 使用向量分割法结合路面交互模型及部分承载动态称重模型构成的新模型,更符合动态称重原理,能够从算法上解决货车拖称、跳称、冲称等异常行驶状态,即在车辆变速运动状态下能精确测量车辆重量,这种模型适用于任何种类的窄条重力传感器(例如小弯板)构成的动态汽车衡。

(2) 使用改进模型的动态称重传感阵列能够将车轮静止状态作为准动态(即车辆以极小速度的运动状态通过传感器)进行处理,解决了二次启停漂移过大的问题。

(3) 使用新模型构建的动态称重系统无论是从横向还是从纵向比较,稳定性及精确度均有较大提高,对未来实现货车ETC、非现场执法治超、无人值守的主线收费站模式起到促进作用。

(4) 压电石英传感器虽然具有很多优点,但也存在着不可克服的缺陷,例如在测量模型上无法完全做到与路面环境无关。随着传感器技术的发展,将会有效率更高、鲁棒性更强的传感器来代替压电石英传感器,例如在今后的研究中考虑使用光纤传感器、光栅传感器等代替压电石英传感器。

#### 参考文献:

#### References:

- [1] 王磊,周伟,董敏毅,等.高速公路EWTC系统场站布设方案研究[J].公路交通科技,2016,33(9):120-126.  
WANG Lei, ZHOU Wei, DONG Yi-min, et al. Study on Station Arrangement for Expressway EWTC System [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2016, 33 (9): 120 - 126.
- [2] 邵仙鹤,鲁志成,王翥.基于最小二乘曲面拟合的流量计量温度补偿算法[J].传感技术学报,2016,29(6):897-902.  
SHAO Xian-he, LU Zhi-cheng, WANG Zhu. Temperature Compensation Algorithm Based on Least

- Squares Curve Fitting in Flow Measurement [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2016, 29 (6): 897 - 902.
- [3] 李建波,牛昱光.基于 $\mu\text{C}/\text{OS}-\text{III}$ 的整车式动态称重仪表[J].仪表技术与传感器,2015(7):28-31.  
LI Jian-bo, NIU Yu-guang. Full-vehicle Dynamic Weighing Instrument Based on  $\mu\text{C}/\text{OS}-\text{III}$  [J]. Instrument Technique and Sensor, 2015 (7): 28 - 31.
- [4] 王磊,尹燕,周伟,等.高精度阵列式压电石英动态称重系统研究[J].中国公路学报,2016,29(5):137-143.  
WANG Lei, YIN Yan, ZHOU Wei, et al. Study on Dynamic Weighing System of High Precision Array Piezoelectric Quartz [J]. China Journal of Highway and Transport, 2016, 29 (5): 137 - 143.
- [5] HERNANDEZ S, TOK A, RITCHIE S G. Integration of Weigh-in-Motion (WIM) and Inductive Signature Data for Truck Body Classification [J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2016, 68: 1 - 21.
- [6] HERNANDEZ S, TOK A, RITCHIE S G. Integration of Weigh-in-Motion and Inductive Signature Technology for Advanced Truck Monitoring [C] // Transportation Research Board 93rd Annual Meeting. Washington, D. C.: Transportation Research Board, 2015: 87 - 99.
- [7] JENG S T, CHU L, CETIN M. Weigh-in-Motion Station Monitoring and Calibration Using Inductive Loop Signature Technology [C] // Transportation Research Board 94th Annual Meeting. Washington, D. C.: Transportation Research Board, 2015: 45 - 55.
- [8] 刘浪,尤吉.公路桥梁车辆荷载效应的外推计算[J].土木工程学报,2015,48(4):59-64.  
LIU Lang, YOU Ji. Extrapolation Method for Truck Load Effects on Highway Bridges [J]. China Civil Engineering Journal, 2015, 48 (4): 59 - 64.
- [9] 蔡钊,马林华,黄绍城,等.基于序数势博弈的WSN拓扑控制算法[J].计算机科学与探索,2016,10(8):1112-1121.  
CAI Zhao, MA Lin-hua, HUANG Shao-cheng, et al. Ordinal Potential Game Based Topology Control Algorithm for WSN [J]. Journal of Frontiers of Computer Science & Technology, 2016, 10 (8): 1112 - 1121.
- [10] KOLLIPARA V D. A Rheology Model of Soft Elastomeric Capacitor for Weigh-in-Motion Application [D]. Ames: Iowa State University, 2013: 34 - 39.
- [11] CHAO S H, LOH C H. Application of Singular Spectrum Analysis to Structural Monitoring and Damage Diagnosis of Bridges [J]. Structural and Infrastructure Engineering, 2014, 10 (6): 708 - 727.

- [12] 杨晓明, 李宗津. 基于水泥基压电传感器的车辆监测研究 [J]. 传感技术学报, 2013, 26 (2): 266-270. YANG Xiao-ming, LI Zong-jin. Monitoring of Vehicle Using Cement-based Piezoelectric Sensors [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2013, 26 (2): 266-270.
- [13] 黄必飞, 冯志敏, 张刚, 等. 压电薄膜车辆动态称重系统算法研究 [J]. 传感技术学报, 2016, 29 (6): 941-946. HUANG Bi-fei, FENG Zhi-min, ZHANG Gang, et al. Research on Algorithm of Piezo-film Vehicle Weigh-in-Motion System [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2016, 29 (6): 941-946.
- [14] 柳江, 林晨, 叶明, 等. 馈能悬架变论域模糊控制 [J]. 上海交通大学学报, 2016, 50 (8): 1139-1143. LIU Jiang, LIN Chen, YE Ming, et al. Variable Universe Fuzzy Control of Energy-regenerative Suspension [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2016, 50 (8): 1139-1143.
- [15] 王强, 刘仰韶, 张文忠, 等. 光纤高速汽车动态称重系统 [J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2014, 34 (3): 145-150. WANG Qiang, LIU Yang-shao, ZHANG Wen-zhong, et al. High Speed WIM Based on FBG for Vehicles [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2014, 34 (3): 145-150.
- [16] 柳江, 林晨, 叶明, 等. 馈能悬架变论域模糊控制 [J]. 上海交通大学学报, 2016, 50 (8): 1139-1143. LIU Jiang, LIN Chen, YE Ming, et al. Variable Universe Fuzzy Control of Energy-regenerative Suspension [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2016, 50 (8): 1139-1143.
- [17] NASSIRI S, BAYAT A, KILBURN P. Traffic Inputs for Mechanistic-empirical Pavement Design Guide Using Weigh-in-Motion Systems in Alberta [J]. International Journal of Pavement Engineering, 2014, 15 (6): 483-494.
- [18] ZHANG Y, ZHAO C, HE J, et al. Vehicles Detection in Complex Urban Traffic Scenes Using Gaussian Mixture Model with Confidence Measurement [J]. IET Intelligent Transport Systems, 2016, 10 (6): 445-452.

(上接第68页)

- HUANG Chao. Research of Calculation Method of Bearing Capacity of Pile Foundation in Mudstone Considering Effect of Sediment [D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2015.
- [13] YIN Z Z, ZHU H, XU G H. A Study of Deformation in the Interface between Soil and Concrete [J]. Computers and Geotechnics, 1995 (17): 75-92.
- [14] GHABOUSSI J, WILSON E L, ISENBERG J. Finite Element for Rock Joints and Interfaces [J]. Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, 1973, 99 (SM10): 833-848.
- [15] 刘蓓. 红黏土与混凝土结构接触面力学特性的试验研究 [D]. 长沙: 中南大学, 2013. LIU Bei. Experimental Research of Interface Mechanical Property of Red Clay and Concrete Structure [D]. Changsha: Central South University, 2013.
- [16] JGJ94—2008, 建筑桩基技术规范 [S]. JGJ94—2008, Technical Code for Building Pile Foundations [S].
- [17] 曾友金, 王年香, 章为民. 软土质地区微型桩基础离心模型试验研究 [J]. 岩土工程学报, 2003, 25 (2): 242-245. ZENG You-jin, WANG Nian-xiang, ZHANG Wei-min. Study on Centrifuge Model Tests of Mini-pile Foundation in Soft Soil [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, 25 (2): 242-245.
- [18] 徐光明, 章为民. 离心模型中的粒径效应和边界效应研究 [J]. 岩土工程学报, 1996, 18 (3): 80-86. XU Guang-ming, ZHANG Wei-min. Study on Particle Size and Boundary Effect in Centrifuge Tests [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1996, 18 (3): 80-86.
- [19] GARNIER J. Scale Effects in Piles and Nails Loading Tests in Sand [C] // Proceedings of the International Conference Centrifuge 98. Rotterdam: Balkema; 1998: 205-210.
- [20] TB10002.5—2005, 铁路桥涵地基和基础设计规范 [S]. TB10002.5—2005, Code for Design on Subsoil and Foundation of Railway Bridge and Culvert [S].