

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2019.04.002

基于 PVDF 传感器的车辆动态称质量系统 算法分析及应用

王 豪^{1a}, 纪少波^{1a}, 韩文扬², 韦金城², 李 萌^{1a}, 赵同军^{1a}, 葛 智^{1b}

(1. 山东大学 a. 能源与动力工程学院, b. 齐鲁交通学院 济南 250061; 2. 山东省交通科学研究院, 济南 250031)

摘要: 为有效管理车辆超限超载, 并为道路设计规划提供数据支撑, 基于聚偏二氟乙烯 (PVDF) 传感器提出一种适应高速公路动态称质量系统。针对压电膜传感器信号设计了电荷放大电路、单片机信号采集电路和 SD 卡存储电路等, 提出用滑动平均滤波算法进一步处理采样信号, 并对软件系统的设计流程进行了分析。为验证数据处理方案的准确性, 进行了室外场地模拟试验, 又进一步进行道路现场试验获取车辆载荷谱数据, 通过对数据的分析得到此路段实际交通量的结构组成。试验结果表明, 设计的称质量系统能够满足动态称质量的精度要求, 具有较高的实际应用价值。

关键词: 压电膜传感器; 电荷放大器; 滑动滤波; 轴质量; 交通流量

中图分类号: U46

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2019)04-009-08

Research and application of vehicle dynamic weighing system algorithm based on PVDF sensor

WANG Hao^{1a}, JI Shaobo^{1a}, HAN Wenyang², WEI Jincheng², LI Meng^{1a}, ZHAO Tongjun^{1a}, GE Zhi^{1b}

(1a. School of Energy and Power Engineering; 1b. Qilu Transportation, Shandong University, Jinan 250061, P.R.China; 2. Shandong Academy of Transportation Science and Research, Jinan 250031, P.R.China)

Abstract: In order to effectively manage overload and provide data support for road design and planning, a dynamic weighing system for expressway based on PVDF sensor is proposed. Aiming at PVDF sensor signal, charge amplifier circuit, SCM signal acquisition circuit and SD card storage circuit are designed. The sliding average filtering algorithm is proposed to further process the sampling signal, and the design process of the software system is analyzed. In order to verify the accuracy of the data processing scheme, outdoor site simulation tests were carried out. Furthermore, the data of vehicle load spectrum are obtained by field test, and the structure of the actual traffic volume is obtained by analyzing the data. The test results show that the weighing system can meet the accuracy requirement of dynamic weighing and has high practical application value.

Keywords: PVDF sensor; charge amplifier; sliding filtering; axle load; traffic

收稿日期: 2018-11-04

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51478252)。

Supported by National Natural Science Foundation of China(51478252).

作者简介: 王豪(1995—), 男, 山东大学硕士研究生, 主要从事测试方法及测试系统开发研究, (E-mail)1677473173@qq.com。

通讯作者: 纪少波, 男, 山东大学副教授, (E-mail)jibo@sdu.edu.cn。

车辆动态称质量具有检测速度快、效率高的特点,在交通管理中采用车辆动态称质量系统不仅可以有效地提高交通系统运输效率,还可以为交通运输的信息化管理提供科学的数据。目前市场上动态称质量设备大多采用聚偏二氟乙烯(PVDF)压电薄膜作为系统的称质量传感器,影响称质量精度因素主要包括车速、车辆振动、轮胎驱动力、路面激励以及系统自身产生的干扰等^[1-3]。对于如何提高动态称质量系统的测量精度,国内外学者做了大量的研究。文献[4]提出了一种离散小波变换的信号去噪方法,提高动态称质量系统的精度,但并未在实际道路进行测试及应用;文献[5-6]分析了环境温度及车速对称质量结果的影响,但试验中将传感器安装于道路中,过程较为复杂;文献[7]用阻尼振动模型分析 PVDF 传感器信号的变化过程,认为称质量信号主要分布在高频段,研究结论并未实际应用于轴质量信号测试分析;文献[8]提出了异谱分析(SSA)算法用于轴质量信号的降噪处理,但信号处理过程较为复杂,无法应用于实时测量场合。此外,提高称质量系统精度的技术还包括神经网络、数字滤波算法和数据融合技术等算法^[9-12],选用合理的滤波算法能够实现更优的滤波效果和更可靠的测量结果。

为此,笔者在前人研究的基础上,采用传感器快速安装方法,设计简洁可靠的车辆参数计算流程,开发了一套车辆动态称质量系统。为验证测试系统的精确性和稳定性,分别进行了室外场地模拟测试以及道路实际安装测试,得到了安装路段的车辆轴质量等参数,验证了设计的动态称质量系统具有较高的实际应用价值。

1 传感器安装

传感器的安装方式对信号产生有着重要的影响,传统的安装方式大多采用在道路上切槽,将传感器埋在路面以下合适的位置,然后用灌封材料填充。这种安装方式操作复杂,耗费人力物力,不易更换,一般用于永久性安装。临时安装则采用在道路表面贴的方式,这种安装方式简单易操作,对路面损伤小,拆卸方便。笔者采用压电膜传感器与地感线圈临时安装的方式,其安装位置如图 1 所示:两路压电膜传感器均与车辆行驶方向垂直铺设,地感线圈则铺设在两条传感器中间。

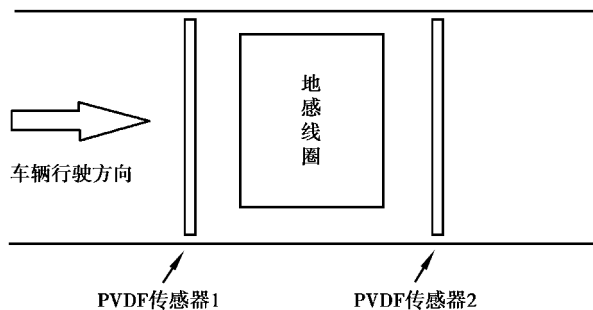


图 1 传感器安装位置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of sensor installation position

2 测试系统硬件结构

PVDF 传感器是利用压电材料的压电效应,当车辆经过安装在路面上的 PVDF 传感器时,传感器受压会输出电荷信号,电荷信号的大小与通过车辆的车速和轴质量有较大关系。系统以 MC9S08DZ60 单片机作为核心单元,使用 PVDF 压电薄膜作为称质量传感器,传感器输出信号通过信号处理电路转化为电压信号并进行放大处理。单片机具有 24 路 12 位 AD 采集通道,能够在保证采集精度的基础上,高速采集称质量信号。设计的传感器信号处理电路以 TL062 为电荷放大器,采用正负电源供电,将微弱的电荷信号转换为毫伏级的电压信号,如图 2 所示。通过后续的低通和高通滤波电路,能有效滤除信号中的干扰。

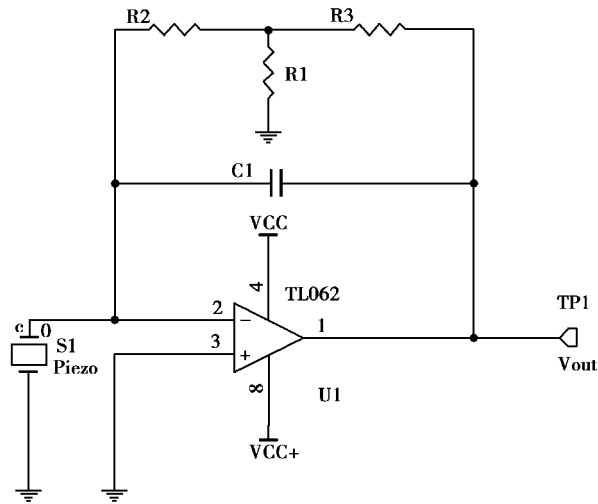


图 2 电荷放大电路

Fig. 2 Charge amplifying circuit

此外,系统能接收地感线圈开关信号,并将信号传递至单片机,告知车辆当前状态;为获得系统的工作温度,布置了 ds18B20 温度传感器;通过 RS-232 通讯功能将测试的数据实时向外传送并接收设置参数。系统增加了实时时钟和 SD 卡存储功能,实时监测车辆参数;设计了看门狗电路,防止系统意外死机,影响系统稳定工作。硬件电路设计如图 3 所示。

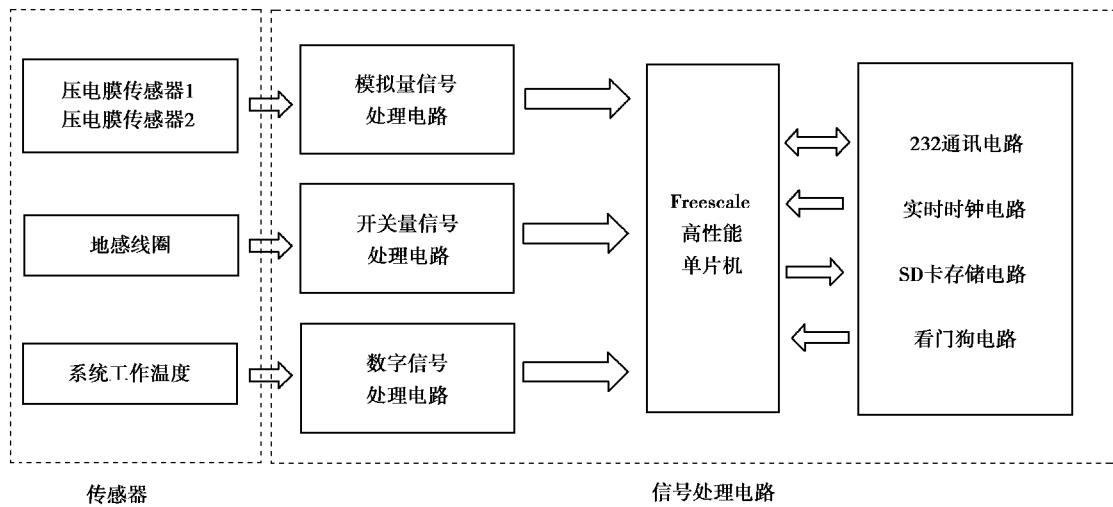


图 3 测试系统结构示意图

Fig. 3 Schematic diagram of test system structure

3 称质量算法设计

3.1 软件算法整体结构流程

笔者基于 PVDF 传感器设计出一套信号采集、处理以及存储的车辆检测系统。首先,利用单片机两路 AD 采集功能采集称质量信号,通过滑动平均滤波算法对信号进行处理。当车辆接触到传感器时,信号波形产生变化,此时,单片机高速采集称质量信号并进行积分运算;同时打开定时器,将车轴经过每个传感器的时间保存,用于计算车速和轴距。当车辆通过传感器安装区域后,则进入数据处理模块,计算得到单轴轴质量,同时得到轴距、轴数和车型,并将数据和车辆通过时间存储到 SD 卡中。测试系统软件算法整体结构流程如图 4 所示。

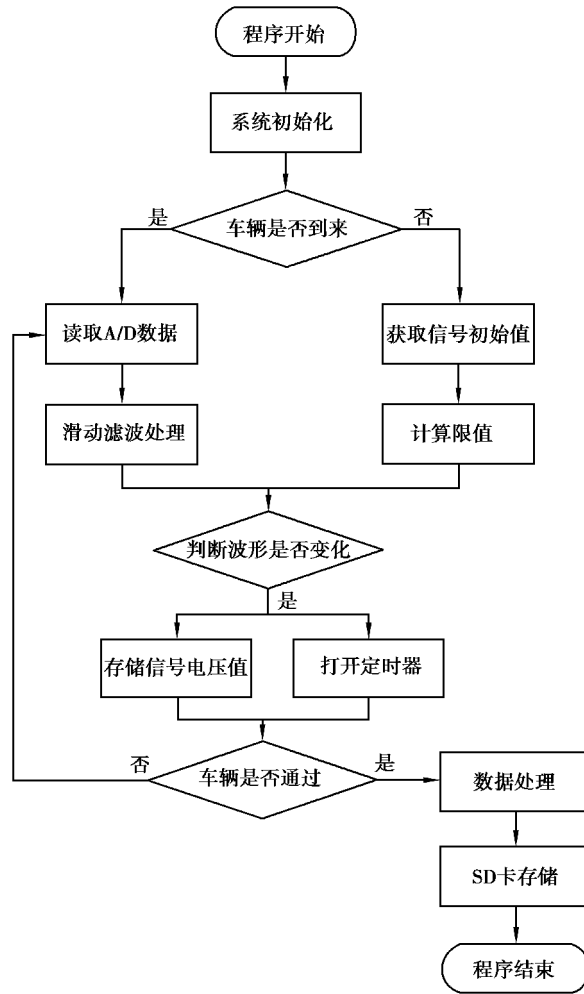


图 4 软件算法整体结构流程框图

Fig. 4 The flow chart of the overall structure of software algorithm

3.2 滑动平均滤波算法

滑动平均滤波算法采用递推形式来计算,可以实时处理非平稳数据,滤掉数据中频繁随机起伏的信号。相对于其他的实时信号处理方法,其计算量较小,计算速度快,适合于在线数据处理等实时性要求较高场合,可显著提高信噪比^[13]。

笔者将采集的称质量信号进行滑动平均滤波处理,数据存储到 K 个固定的内存单元中,每次数据采集结束,将最新数据存入内存单元最前面,去掉内存单元最后一个旧的数据,这样在内存单元中始终有 K 个数据。每次在“滑动”后把内存单元中的 K 个数据进行算术平均,得到滑动平均滤波的新数据,其表达式为

$$Y[n] = \frac{1}{K} \sum_{i=0}^{K-1} x[n-i], \quad (1)$$

式中: K 为固定的内存单元数; $Y[n]$ 为经过滑动平均滤波后的新数据。滑动平均滤波对单个脉冲信号的衰减较小^[14],所以利用滑动平均滤波处理单个脉冲信号,通过合理设置内存单元个数 K ,可以在抑制噪声的同时尽可能保存信号,从而提高信噪比。

3.3 数据处理方案

数据处理如图 5 所示,在数据计算过程中,车速作为最基本的车辆参数应首先计算得出。车速的计算可以通过 2 个压电膜传感器的安装距离 L 和车辆同一车轴经过 2 个传感器的时间 T 计算,即: $v=L/T$ 。为了减小计算误差,用同样的方法计算车辆每个车轴经过传感器的平均速度作为车辆的行驶速度 v 。

当轴数为 n 的同一辆车的不同车轴先后通过同一条平行放置的压电薄膜时,传感器会输出与车轴数对

应的 n 个脉冲信号;通过定时器得到前后脉冲信号之间的时间间隔 t_1, t_2, \dots, t_{n-1} ,时间间隔与车速的乘积则为相邻车轴之间的轴距,由轴距可推断出车型。

经过现场试验测试数据分析,确定了车辆轴质量计算公式为

$$W = C \cdot v \cdot \sum_{i=0}^n V[i] = C \cdot v \cdot A, \tag{2}$$

式中: W 为轴质量, C 为调整系数; $A = \sum_{i=0}^n V[i]$ 为脉冲信号的积分面积; v 为车辆行驶车速。

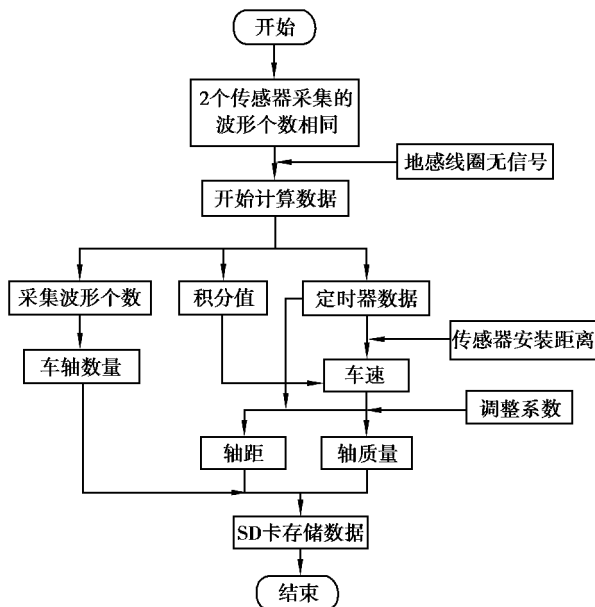


图 5 测试系统结构示意图

Fig. 5 Schematic diagram of test system structure

4 模拟测试试验分析

4.1 试验方法

为验证测试系统设计算法的准确性,在室外场地安装传感器并做现场测试。首先对试验车辆的各车轴进行称质量,以便与测试结果对比分析,确定测试系统的称质量误差。称质量采用型号为 Wheel Load Scale WL 101 的便携式静态体重秤,其在温度为 $-20\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的分辨率小于 50 kg。测量时环境温度为 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$,压电膜传感器安装于路面之上,通过 ds18B20 温度传感器测量的路面温度为 $22\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。考虑到试验条件、试验成本等因素,采用 2 种车型,分别是依维柯和福特全顺,试验车速范围 $20 \sim 40\text{ km/h}$,共采集数据 24 组,试验车辆参数见表 1。

表 1 试验车辆参数统计

Table 1 Statistics of test vehicle parameters

车型	车速/($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)	总质量/kg	1 轴轴质量/kg	2 轴轴质量/kg
依维柯	20~40	1 923	848	1 075
福特全顺	20~40	1 020	635	385

4.2 试验结果分析

通过与标准轴质量的对比,分别得到 2 辆车在不同车速下的单轴轴质量误差结果,如图 6 所示。由图 6 可见,各车速下的误差均在 $\pm 15\%$ 以内。关于系统的测试误差要求,1990 年,德克萨斯大学起草了 ASTM

E1318 标准^[15],该标准通过美国试验及材料协会(ASTM)标准委员会的认定,提出动态称质量测试系统的测试误差要求,如表 2 所示。根据图 6 实际测量结果误差曲线显示,本系统的测试结果符合美国标准委员会的认定,能够满足动态称质量系统的精度要求。

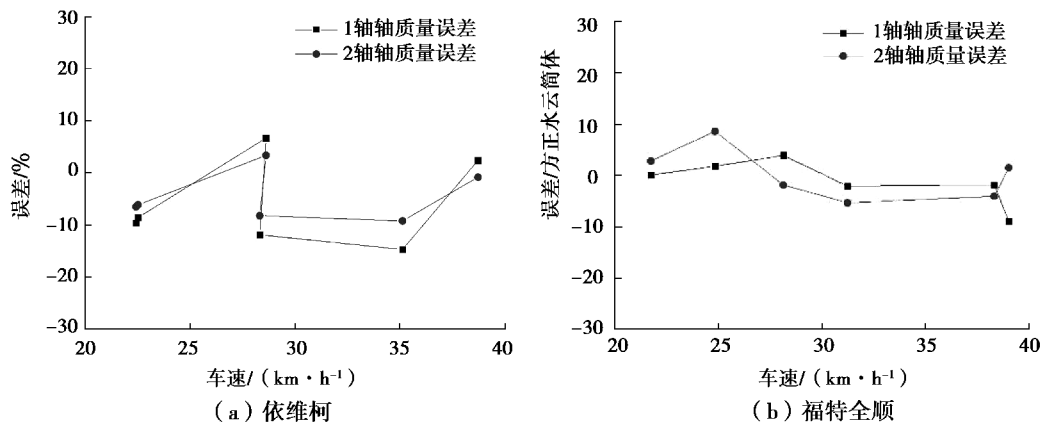


图 6 不同车速下的测量误差曲线

Fig. 6 Measurement error curves under different vehicle speeds

表 2 动态称质量系统的性能要求

Table 2 Performance requirements for dynamic weighing systems

参 数	传感器精度(置信度 95%)/%	
	I 类	II 类
轴载荷	±20	±30
轴载荷组	±15	±20
总质量	±10	±15

5 实际道路测试数据分析

通过模拟试验测试分析,采用上述数据处理方案能够较为准确地测量车辆轴质量等参数。为了对系统实际测试的效果进行评价,在日照莒县 G206 道路进行了现场试验,采集并存储车辆数据。以其中连续 300 辆车的实测数据进行分析,图 7 为根据车辆轴数进行分类的结果,由图 7 可知,2 轴轿车和 6 轴半挂牵引列车在交通流量中占据了相当大的比例,现场观测这个路段的车辆主要为人们出行所驾驶的小型轿车和货物流通所用的大型货车,与测量结果相符。

将监测车辆按行驶车速从小到大排序,然后按照 5 km/h 为一个间隔进行统计,统计车速范围 10~80 km/h,统计结果如图 8 所示。由图 8 可见,车速整体呈现正态分布的特点,整体车速偏低,主要的车速区间为 45~50 km/h。由于测量中 6 轴半挂牵引列车车辆较多,较低的车速有利于提高行车安全性。

图 9 为 2 轴及 6 轴车辆总质量的统计数据,由图 9 可见,2 轴车质量主要集中在 1~3 t,也有部分质量较大的 2 轴货车;6 轴车的总质量明显高于其他轴数的车辆,由于运输货物类型不同,总质量分布范围较广。车辆荷载的作用是影响路面使用寿命的关键因素之一,轴质量的测量数据将为道路的疲劳性能研究等提供数据支撑。

综上所述,测量数据中 2 轴轿车和 6 轴半挂牵引列车占有较大比重,交通总体构成变化较小;另外,测试路段的车辆车速偏低。小轿车的比重较大,道路建设中需要考虑选择合理的路线与城市道路进行连接,有效增强城市周围道路通行能力。6 轴半挂牵引列车载货较多,对道路质量要求较高,后续道路使用过程中需要加强管理维护。

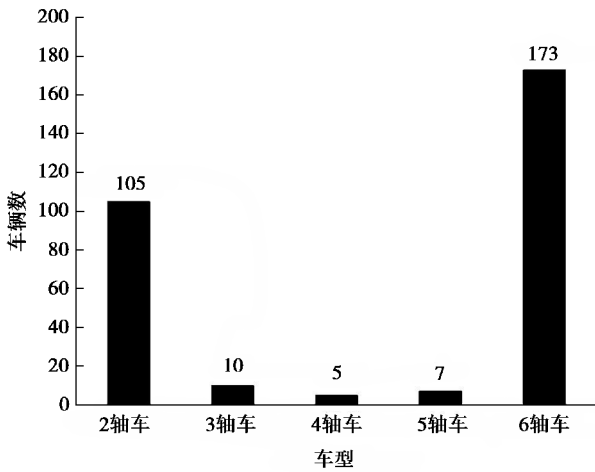


图 7 轴数分布直方图

Fig. 7 Histogram of axial number distribution

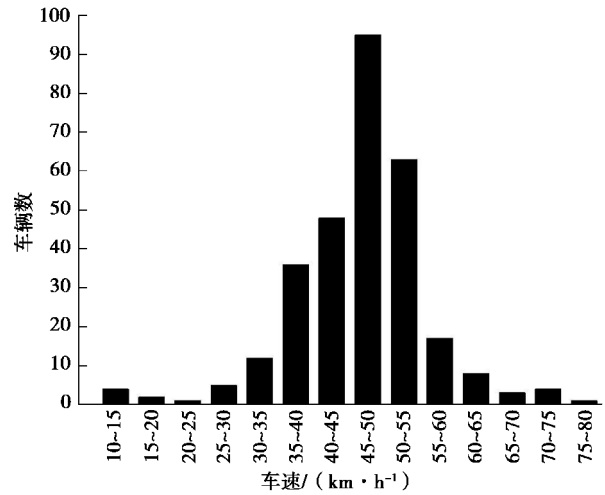
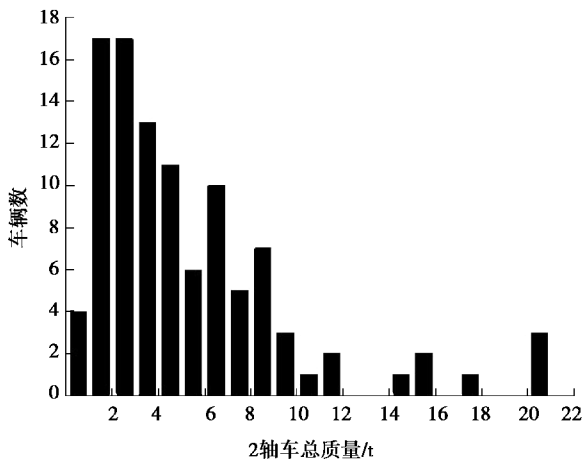
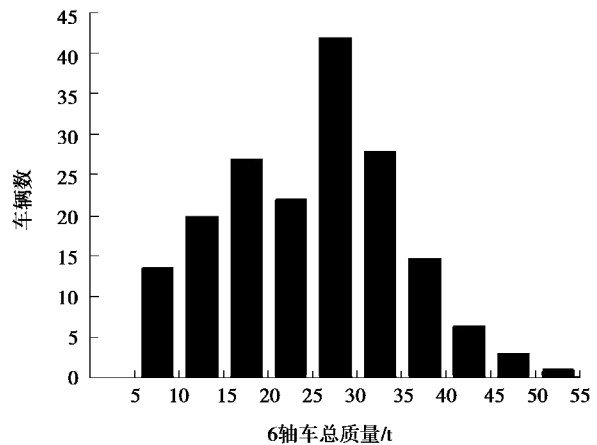


图 8 车速分布直方图

Fig. 8 Velocity distribution histogram



(a) 2轴车总质量直方图



(b) 6轴车总质量直方图

图 9 实测车辆总质量分布直方图

Fig. 9 Histogram of measured vehicle gross weight distribution

6 结 论

笔者围绕道路动态轴质量等参数的测试展开研究,在传感器安装方式、系统硬件设计及软件算法开发等方面开展工作,经现场试验测试分析,得出以下结论:

- 1) 传感器采用道路表面贴的安装方式,安装方便,易于实现,能够满足道路动态称质量快速测量的需求。
- 2) 开发了一套车辆动态称质量系统,系统的硬件电路能有效处理压电膜传感器信号,软件程序能够实现车辆轴数、轴质量、车速及轴距等参数的测试分析。
- 3) 通过现场实验测试,开发的系统能够稳定地测量道路车辆的轴质量等参数,为道路建设和管理维护提供了科学的数据支撑,系统具有较高的使用价值。

参考文献:

[1] 熊少康, 王凌川, 章家岩, 等. 基于 BP 神经网络的车辆动态称重技术[J]. 安徽工业大学学报(自然科学版), 2014, 31(1): 76-79.

XIONG Shaokang, WANG Lingchuan, ZHANG Jiayan, et al. A dynamic weighting system for vehicle based on BP neural

- network[J]. Journal of Anhui University of Technology(Natural Science), 2014, 31(1): 76-79.(in Chinese)
- [2] Burnos P, Rys D. The effect of flexible pavement mechanics on the accuracy of axle load sensors in vehicle weigh-in-motion systems[J]. Sensors(Basel, Switzerland), 2017, 17(9): E2053.
- [3] Hashemi Vaziri S, Haas C T, Rothenburg L, et al. Investigation of the effects of air temperature and speed on performance of piezoelectric weigh-in-motion systems[J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 2013, 40(10): 935-944.
- [4] Xu J, Ma B. Investigation of discrete wavelet transform for signal de-noising in weight-in-motion system [C] // International Conference on Future Computer and Communication, May 21-24, 2010, WuHan, China. IEEE, 2010: V2-769-V2-772.
- [5] Gajda J, Sroka R, Zeglen T, et al. The influence of temperature on errors of wim systems employing piezoelectric sensors keywords: piezoelectric sensors, temperature influence, temperature error of wim systems, error correction [J]. Metrology and Measurement Systems, 2013, 20(2):171-182.
- [6] Burnos P, Gajda J. Thermal property analysis of axle load sensors for weighing vehicles in weigh-in-motion system[J]. Sensors (Basel, Switzerland), 2016, 16(12): E2143.
- [7] 陈政, 钟汇才, 李庆, 等. 基于 PVDF 压电传感器的车辆动态称重信号的研究[J]. 传感器与微系统, 2012, 31(4): 36-39.
CHEN Zheng, ZHONG Huicai, LI Qing, et al. Study on signal of vehicle dynamic weighing based on PVDF piezoelectric sensor[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2012, 31(4): 36-39.(in Chinese)
- [8] 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 Bifei, FENG Zhimin, 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.(in Chinese)
- [9] 沈裴裴, 徐志玲, 陈群, 等. 车辆动态称重模型建立与分析[J]. 测控技术, 2015, 34(3): 5-8.
SHEN Peipei, XU Zhiling, CHEN Qun, et al. Creation and analysis of vehicle weigh-in-motion model[J]. Measurement & Control Technology, 2015, 34(3): 5-8.(in Chinese)
- [10] 张惠芳, 张海宁. 动态车辆称重系统的算法研究[J]. 国外电子测量技术, 2017, 36(7):52-54.
ZHANG Huifang, ZHANG Haining. Research on the algorithm of dynam vehicle weighing system [J]. Electronic Measurement Technology Abroad2017, 36(7):52-54. (in Chinese)
- [11] 李惠敏. 车载动态称重系统的研究与设计[D]. 太原:太原理工大学, 2016.
LI Huimin. Research and ddsign of truck-mounted dynamic weighing system [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2016. (in Chinese)
- [12] 郝晓娴, 牛昱光, 韩芝星, 等. 基于小波和 BP 神经网络的车载动态称重算法[J]. 仪表技术与传感器, 2017(8):110-113.
HAO Xiaoxian, NIU Yuguang, HAN Zhixing, et al. Vehicle dynamic weighing algorithm based on wavelet and BP neural network[J]. Instrument Technique and Sensor, 2017(8):110-113. (in Chinese)
- [13] 张斐, 刘志杰. 加速度传感器信号数据处理中滤波算法的应用[J]. 电脑与信息技术, 2018, 26(3): 1-4.
ZHANG Fei, LIU Zhijie. Filter algorithm's application in data processing on acceleration sensor signal[J]. Computer and Information Technology, 2018, 26(3): 1-4.(in Chinese)
- [14] 胡松, 江小炜, 杨光, 等. 滑动平均滤波在微弱脉冲信号检测中的应用[J]. 计算机与数字工程, 2007, 35(10): 169-171.
HU Song, JIANG Xiaowei, YANG Guang, et al. Using of moving average filter in faint pulse signal detection[J]. Computer and Digital Engineering, 2007, 35(10): 169-171.(in Chinese)
- [15] ASTM Committee. Standard specification for highway weigh-in-motion (WIM) systems with user requirements and test methods: ASTM E1318-09(2017)[S]. ASTM International, 2017.