

# 基于分布式振动传感的车辆轴载感知方法

边泽英<sup>1,2,3</sup>, 赵鸿铎<sup>1,2</sup>, 彭科迪<sup>1,2</sup>, 曾孟源<sup>1,2,4</sup>, 郭牧<sup>1,2</sup>

(1. 同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804; 2. 同济大学 民航飞行区设施耐久与运行安全重点实验室, 上海 201804;  
3. 新加坡国立大学 土木与环境工程学院, 新加坡 119260; 4. 苏黎世联邦理工学院 土木工程系, 苏黎世 8093)

**摘要:** 提出了基于分布式振动传感的车辆轴载感知方法。采用分布式光纤感知路面振动, 建立光纤信号与路面振动位移映射关系及车辆轴载反演解析模型。利用足尺试验对所提车辆轴载反演解析模型进行拟合优度验证, 并通过自然车辆称重试验验证所提车辆轴载感知算法有效性。结果表明: 车辆轴载感知系统对单轴最大估计误差为 0.98%, 对车辆总重预估精度达到 0.34%, 且系统精度受车辆速度影响小, 符合国家对于单轴 2%、总重 5% 的精度标准。

**关键词:** 道路工程; 动态称重(WIM); 振动感知; 分布式光纤  
**中图分类号:** U416. 221; U416. 222 **文献标志码:** A

## Vehicle Axle Load Sensing Based on Distributed Vibration Fiber Technology

BIAN Zeying<sup>1,2,3</sup>, ZHAO Hongduo<sup>1,2</sup>, PENG Kedi<sup>1,2</sup>, ZENG Mengyuan<sup>1,2,4</sup>, GUO Mu<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Key Laboratory of Infrastructure Durability and Operation Safety in Airfield of CAAC, Tongji University, Shanghai 201804, China; 3. College of Civil and Environmental Engineering, National University of Singapore, Singapore 119260, Republic of Singapore; 4. Department of Civil, Environmental and Geomatic Engineering, ETH Zurich, Zurich 8093, Switzerland)

**Abstract:** This paper presents a method for sensing vehicle axle loads using distributed vibration fiber sensors to detect pavement vibrations. A mapping relationship between fiber optic signals and pavement vibration displacements is established, and analytical models for vehicle axle load inversion are proposed. Full-scale experiments are conducted to validate the accuracy of the proposed vehicle axle load inversion analytical models, while natural vehicle weighing tests are performed to

verify the effectiveness of the vehicle axle load perception algorithm. The results demonstrate that the vehicle axle load sensing system, based on the inversion analytical models, achieves a maximum estimation error of 0.98% for individual axle loads and a total weight prediction accuracy of 0.34%. These accuracies meet the national standards of 2% for single axle loads and 5% for total weight. Furthermore, the system accuracy remains unaffected by variations in vehicle speed.

**Key words:** road engineering; weigh-in-motion (WIM); vibration sensing; distributed optical fiber

智慧公路始于道路服役性能提升、道路全寿命低碳排放、道路使用寿命延长, 立足于新型路面结构设计理论与方法完善、耐久性路面材料开发以及科学养护管理<sup>[1-3]</sup>。上述研究既需要实际运行车辆轴载数据联动道路结构材料现场试验数据以支持精准有效的道路结构设计、材料研发、仿真建模, 也需要精细超载治理、道路科学保护<sup>[4-9]</sup>。

传统获得车辆轴载的方法为设置静态称重站, 安装和使用成本高昂, 限制车辆低速通过。动态称重(WIM)系统被提出以解决上述问题, 该类系统安装在公路车道上, 可以在不干扰交通流量的情况下估算高速车辆的轮载<sup>[10-12]</sup>。该类系统普遍采用以压电陶瓷、压电石英为基本压力元件的板式结构, 在带状区间布设, 通过单点传感器变形估算轴载。一方面, 车辆轴载受上下随机振动影响大, 传统传感器与轮胎接触时间短, 较难获取准确荷载信息; 另一方面, 现有压力元件长期服役性能不足, 且与路面协同性较差, 造成累积误差增大<sup>[13]</sup>。

路面振动是车辆和路面相互作用下的动力响

收稿日期: 2023-05-22

基金项目: 国家自然科学基金(51978520, 52008309, 52278457)

第一作者: 边泽英(1996—), 男, 博士生, 主要研究方向为智能路面监测。E-mail: zybian@tongji.edu.cn

通信作者: 赵鸿铎(1976—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为路面智能化技术与智能路面结构。

E-mail: hdzhao@tongji.edu.cn



论文  
拓展  
介绍

应,与车辆荷载及位置、路面结构和材料相关性<sup>[14]</sup>。已有研究表明,基于实测响应数据分析振动响应变化,可用于辨识路面结构、车辆参数。此外,可通过测量多断面结构振动响应以消除车辆随机振动对轴载结果的影响<sup>[13]</sup>。张文斌<sup>[15]</sup>率先采用埋入式应变计以实现动态荷载的轴型分类和轴载预估。Bajwa<sup>[14]</sup>通过无线压电传感器获取路面的多点振动信息以实现车型分配和荷载预估。Ye等<sup>[16-17]</sup>采用埋入式加速度计,实现轴载识别、损伤判别等功能。

面向多断面的路面振动监测,传统加速度计、位移计等点式传感器需要确定合理的监测密度。密度过高会加剧组网、安装的复杂度,密度过低则无法确保不同行驶车辆轮迹下路面振动响应的准确监测。因此,为实现基于路面振动的车辆称重,需要可长距离密集布设的低成本传感系统。

分布式振动光纤(DVOS)可捕获光纤沿线各点振动信息,实现长距离分布式测量,并具有易弯曲、体积小、耐腐蚀、抗电磁干扰等优势,保障恶劣环境下工作性能,已在长距离管道泄漏检测、围界入侵、地震源监测等领域得到广泛运用<sup>[18-21]</sup>。在道路领域,路面变形较小的特点有助于其与分布式光纤协同振动。Zhao等<sup>[21]</sup>采用分布式振动光纤,通过时频解析实现了车辆荷载分类与车型识别。Zeng等<sup>[22-23]</sup>利用分布式振动光纤监测数据解析路面振动场模态,监

测路面脱空和模量变化。上述研究结果表明,分布式振动光纤具有成本低、易部署、信息量大、耐久性好等优点,适于获取路面振动信号。上述研究过程主要通过构建光纤信号特征量与车辆参数、路面性能的映射关系,从频谱特性统计角度定性分析,缺乏对振动光纤时域测量信号物理意义的研究,缺少光纤信号与路面响应物理量映射关系的论证。

根据车辆荷载作用下路面响应函数特征,在路面振动分布式感知系统基础上,设计信号预处理流程,建立光纤信号与路面响应物理量关系;在典型车-路动力学模型基础上,从信号形态出发,利用模型参数辨识,将轴载求解转化为非线性最小二乘问题,并提出了轴载预估拟合算法;最后,开展现场落锤式弯沉仪加载试验及自然车辆试验对感知系统与解析方法准确性进行验证。

## 1 路面振动分布式感知系统

### 1.1 分布式振动光纤传感原理

分布式光纤振动传感的技术原理如图1所示。解调设备在光纤一端连续发射脉冲光,光纤不同位置处的后向瑞利散射光将在脉冲宽度内发生相互干涉作用从而形成干涉光场。当受振动扰动时,光纤轴向应变发生变化,从而影响干涉光场强度,因此可依据反射光强变化解调测点振动信号<sup>[24]</sup>。

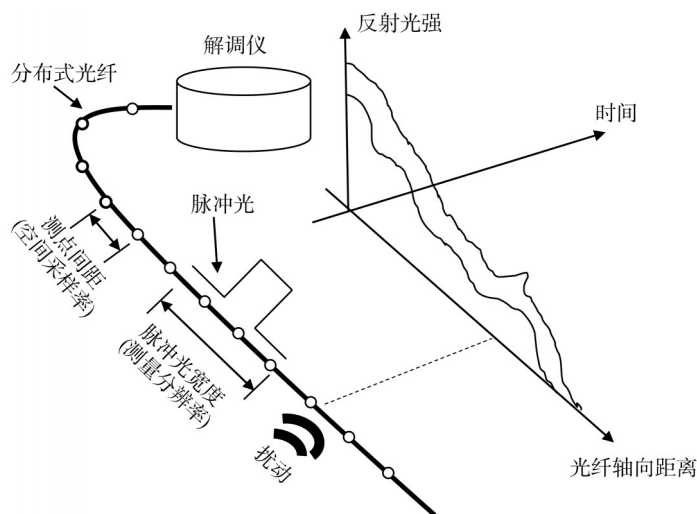


图1 分布式振动光纤解调原理

Fig.1 Schematic principle of distributed optical fiber vibration sensing

解调设备发射的脉冲光具有宽度,解调仪的测量分辨率趋近于脉冲光宽度。在小应变下,反射光强与脉冲光宽度区域内平均应变成正比。解调仪测点间距即空间采样率则为沿光纤轴向距离间隔分布

点位输出脉冲光宽度区间振动应变信息。

### 1.2 路面振动感知数据预处理

光纤感知数据含有大量冗余信号。原始数据中车致振动时段仅是监测时长的一部分,需截取振动

时段后再进行数据分析。对截取的振动信号进行降采样、降噪等时域预处理以提高数据质量, 保障后续分析效率和准确度。

系统实测点位移移动车辆作用原始信号如图 2 所示。从图 2 可以看出, 原始数据在一个较大范围内波动, 无法直接获取有用信息。采用长短时平均值比法识别振动有效区间, 计算振动信号的平均短时能量(STA)和平均长时能量(LTA)以及两者的比

值。设置两者比值阈值, 当两者之比超过阈值, 即可截取该短时段为振动时段。

相比中值滤波、平稳小波滤波、经验模态分解等非平稳信号降噪方法, 采用截止频率 5 Hz 的低通巴特沃斯滤波器以及二次差分对原始非线性振动信号降噪效果更好, 算法开销更少, 能更好地保留车致路面振动信号中有用的幅值和突变区间, 如图 2 所示。

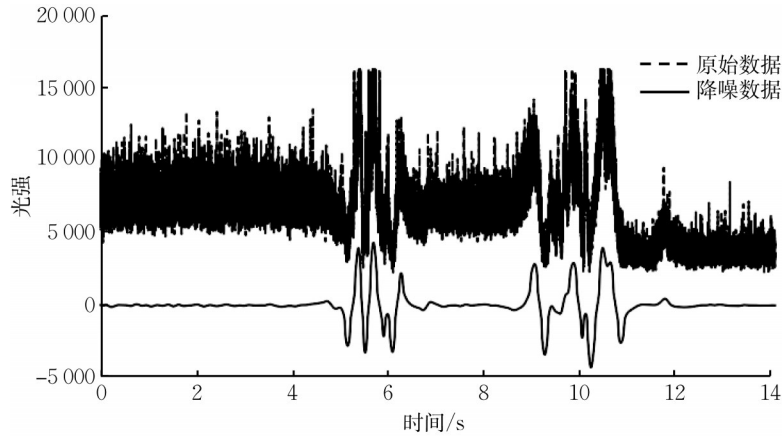


图 2 信号预处理

Fig.2 Signal preprocessing

### 1.3 路面振动感知原型系统设计

路面振动感知原型系统主要由解调仪、过渡传输光纤以及感知光纤圈组成。感知光纤圈由规定长度单模光纤两端缠绕成圈而成, 各感知光纤圈通过过渡传输光纤连接, 过渡传输光纤为单模铠装光纤。路面内部光纤组织通过过渡传输光纤与光纤解调仪连接。

通常解调仪测量分辨率为 4 m, 空间采样率为 1 m。感知光纤圈旨在提高路面空间分辨率, 通过光纤缠绕增大单位面积内的光纤长度(见图 3), 增大单位面积内测点数量以减少随机误差, 保证所有测点所受应变尽量相似<sup>[25]</sup>。后续可将若干感知光纤圈组成阵列以实现路面振动感知。

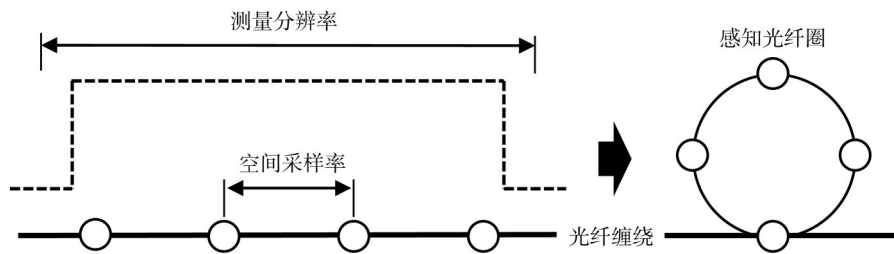


图 3 感知光纤圈设计

Fig.3 Sensing optical fiber ring design

光纤缠绕后环状光纤平均应变与光纤所在平面平均水平应变关系(见图 4)如下所示:

$$\epsilon_t(t) = \epsilon_x(t) \cos \alpha - \epsilon_y(t) \sin \alpha \quad (1)$$

$$E_t(t) = \frac{1}{2\pi r} \int_l \epsilon_t(t) ds = -\frac{\epsilon_x(t) + \epsilon_y(t)}{\pi} \quad (2)$$

式中:  $\epsilon_x$  为区域平均横向应变;  $\epsilon_y$  为区域平均纵向应变;  $\epsilon_t$  为环状光纤轴向应变;  $E_t$  为测点输出信号;  $r$  为光纤

圈半径;  $l$  为光纤圈周长;  $t$  为时间函数。针对路面小挠度变形, 在进行面层动力学响应分析时, 可使用 Kirchhoff 理论对竖向位移和水平应变建模, 如下所示:

$$\epsilon_x(t) = -z \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \quad (3)$$

$$\epsilon_y(t) = -z \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \quad (4)$$

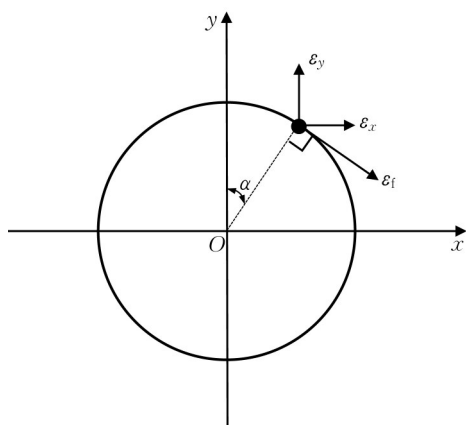


图4 感知光纤圈应变分析

Fig.4 Sensing optical fiber ring strain analysis

式中: $w$ 为竖向位移; $z$ 为光纤埋深。联立式(2)–(4)得到竖向位移与环状光纤信号关系,如下所示:

$$\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} = \frac{\pi E_f(t)}{z} \quad (5)$$

$$w = u + \frac{\pi E_f(t)}{4z} x^2 + \frac{\pi E_f(t)}{4z} y^2 \quad (6)$$

式中: $u$ 为待定系数。

初始状态下, $E_f=0, w=0$ 。在固定环状光纤半径及埋设深度后,竖向位移计算式为

$$w = \frac{\pi E_f(t)}{4z_0} r_0^2 \quad (7)$$

式中: $r_0$ 为环状光纤半径; $z_0$ 为环状光纤埋设深度。由式(7)可知,光纤原始信号与路面竖向位移成线性正比,经过数据预处理的振动信号表征路面竖向加速度。

## 2 基于路面振动的车辆轴载解析方法

### 2.1 车辆–路面加速度响应模型

沥青路面、连续水泥路面可用弹性温克勒基础上的复合一维欧拉梁进行简单路面–车辆相互作用建模。Rajagopal<sup>[26]</sup>给出了在不考虑车辆悬架振动时该模型竖向位移的解,如下所示:

$$w(t) = F\gamma^{-1}\psi(vt) \quad (8)$$

式中: $F$ 为轴载; $v$ 为车速; $\gamma$ 为单位长度路面的质量; $\psi$ 函数主要取决于路面的结构和材料性能。由式(8)可见,路面竖向位移与荷载为线性关系。单位荷载产生的路面响应可以看作两部分耦合的结果,一部分与路面结构状态相关,另一部分与荷载激励特性相关。从简化的位移响应模型入手,将加速度 $a(t)$ 响应也拆分为两部分,并建立函数模型,计算式如下

所示:

$$a(t) = F\gamma^{-1}v^2\psi(vt) \quad (9)$$

与位移响应类似,在车速相同的条件下,路面加速度响应幅值与轴载成正比,轴载大小、车速、路面结构与材料特性等都会影响加速度响应。根据实测位移响应以及Bajwa提出的响应理论<sup>[14]</sup>,单个轴载引起的路面响应可用高斯函数模拟,根据这一基本位移假设建立模型。路面位移的形状近似于高斯函数 $f(t) = \eta e^{-t^2/2\sigma_0^2}$ ,其中 $\eta$ 为控制峰值幅度, $\sigma_0$ 为控制曲线开口的宽度。假设路面竖向位移的解为

$$w(t) = F\eta e^{-\frac{v^2 t^2}{2\sigma_0^2}} \quad (10)$$

对 $t$ 求二阶导数,则路面加速度表达式为

$$a(t) = \frac{d^2 w}{dt^2} = -F\eta \frac{v^2}{\sigma_0^2} \left(1 - \frac{v^2 t^2}{\sigma_0^2}\right) e^{-\frac{v^2 t^2}{2\sigma_0^2}} \quad (11)$$

对该函数模型进行整理化简,令

$$\beta = \frac{F\eta v^2}{\sigma_0^2} \quad (12)$$

$$\sigma = \frac{\sigma_0}{v} \quad (13)$$

$$\psi(t, \sigma) = -\left(1 - \frac{t^2}{\sigma^2}\right) e^{-\frac{t^2}{2\sigma^2}} \quad (14)$$

$$a = \beta\psi(t, \sigma) \quad (15)$$

联立式(12)–(15),得到车辆轴载 $F$ 的表达式为

$$F = \frac{\sigma_0^2 \beta}{\eta v^2} = \delta \frac{\beta}{v^2}, \delta = \frac{\sigma_0^2}{\eta} \quad (16)$$

根据光纤实测信号形态,观察高斯位移函数的形状,得到以下特征:在 $t \rightarrow \pm\infty$ 时, $y(t)=0$ ;在 $t=0$ 时,车轮刚好到达测点, $y(t)$ 为最大值; $y(t)$ 为偶函数。高斯模型中,负峰值的绝对值大于正峰值,正负峰值之比(取绝对值)约为0.6。根据相关文献实测信号<sup>[25]</sup>,信号正负峰值之比约为0.7~0.8。正负峰值比值的差异导致信号拟合效果不佳。根据位移函数形状特征<sup>[14]</sup>,提出三角函数模型来近似表达实测位移形态。与高斯函数模型相比,函数 $\psi$ 发生改变,此时

$$\psi(t, \sigma) = \frac{-\cos(2\pi t/\sigma)}{(t/\sigma)^4 + 0.1875} \quad (17)$$

高斯函数模型与三角函数模型基本形态如图5所示。

### 2.2 基于模型参数辨识的轴载预估

根据式(14)–(17),未知参数 $\sigma$ 和 $\beta$ 可以通过实测光纤信号估算得到, $\delta$ 由道路自身结构、材料属性确定,需要由已知轴载车辆标定。以路面内某一感

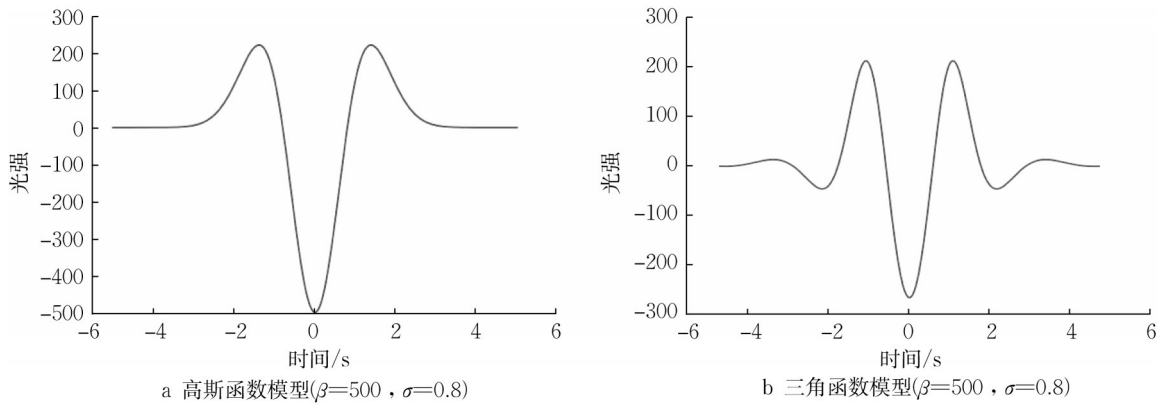


图5 模型形态示意图

Fig.5 Model morphology diagram

知光纤圈为研究对象,车辆第*i*轴在 $t=\mu_i$ 时到达光纤圈,该轮载引起的路面加速度响应为

$$a_i(t) = \beta_i \psi(t - \mu_i, \sigma_i) \quad (18)$$

当一辆*N*轴的车辆由远及近驶过光纤圈,光纤圈捕获的加速度响应是*N*个轮载引起的加速度在时间上的线性叠加,即:

$$a(t) = \sum_{i=1}^N a_i(t) = \sum_{i=1}^N \beta_i \psi(t - \mu_i, \sigma_i) \quad (19)$$

以双轴汽车为例,假设2个轴分别在2.0 s和3.0 s到达某光纤圈,则单侧前后轮分别引起的路面加速度响应<sup>[27]</sup>如图6所示。

传感器所得到的信号实为多个轮载引起加速度

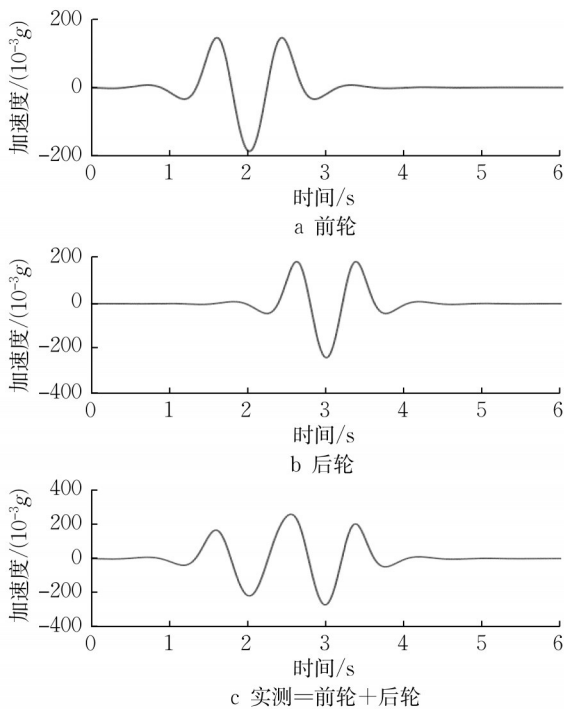


图6 双轴耦合信号

Fig.6 Dual axle coupling signal

响应的耦合值。设 $a_m(t)$ 为*N*轴卡车引起的路面加速度实测响应, $a(t)$ 为模型响应, $\epsilon(t)$ 为实测响应与模型响应间的误差,即 $\epsilon(t) = a_m(t) - a(t)$ ,则实测响应可写为

$$a_m(t) = a(t) + \epsilon(t) = \sum_{i=1}^N \beta_i \psi(t - \mu_i, \sigma_i) + \epsilon(t) \quad (20)$$

利用最小均方误差估计未知参数 $\{\beta_i\}_{i=1}^N$ , $\{\sigma_i\}_{i=1}^N$ 和 $\{\mu_i\}_{i=1}^N$ ,即:

$$\begin{aligned} (\beta_i^*, \sigma_i^*, \mu_i^*) &= \arg \min_{\beta_i, \sigma_i, \mu_i} \int_{-\infty}^{\infty} (\epsilon(t))^2 dt = \\ & \arg \min_{\beta_i, \sigma_i, \mu_i} \int_{-\infty}^{\infty} (a_m(t) - a(t))^2 dt = \\ & \arg \min_{\beta_i, \sigma_i, \mu_i} \int_{-\infty}^{\infty} (a_m(t) - \\ & \sum_{i=1}^N \beta_i \psi(t - \mu_i, \sigma_i))^2 dt \quad (21) \end{aligned}$$

使用最小二乘法求解式(21),得到 $\beta_i$ 、 $\sigma_i$ 及 $\mu_i$ 。根据研究, $v$ 可通过光纤圈信号峰值时间差获得。将上述参数代入式(14)、(17)则可获得轴载 $F_i$ 。

### 2.3 轴载预估方法优化

#### 2.3.1 足尺模型与感知系统搭建

试验场地水泥路面分为6个区域,图7中数字为区域编号,区域尺寸为4.0 m×2.5 m。路面内部光纤组织的平面布置形式如图7和图8b所示。在浇筑过程中依照1.3节所述,埋入路面振动感知原型系统。

在该试验场地进行了落锤式弯沉仪(FWD)加载及实车加载验证和轴载预估模型优化。与实车轴载相比,FWD加载的形式更为简单,消除了轮载由远及近的变化过程,降低了车辆随机振动影响,可近似作为移动平衡载,有助于进一步研究轴载预估模型。FWD各区域的中部以及左下角分别进行了7次

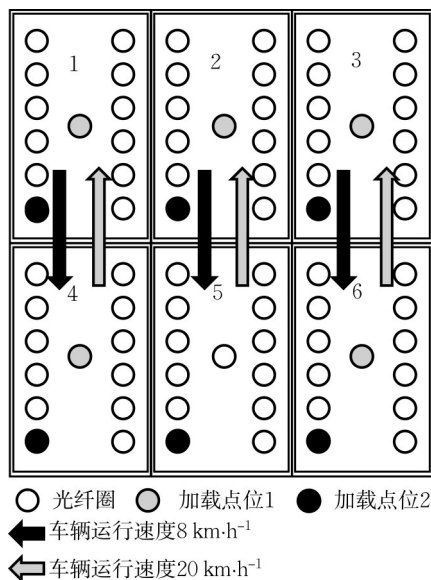


图7 振动光纤与加载工况布置

Fig.7 Optical fiber layout and loading configuration

FWD试验,FWD加载设备如图8a所示。每个加载点的荷载分为7级加载,按照先轻后重的顺序施加荷载,试验荷载如表1所示。为了确保信号稳定有效,在正式试验前进行2~3次预加载。实车加载工况设计如图8a所示,每次试验中指定车辆以20 km·h<sup>-1</sup>的速度前进,以8 km·h<sup>-1</sup>的速度后退,每一区域进行3次往返试验。

### 2.3.2 加速度响应模型效果对比分析

根据FWD加载以及自然车辆加载后振动光纤降噪曲线波谷确定参数 $\{\mu_i\}_{i=1}^N$ 初值,设定 $\{\sigma_i\}_{i=1}^N$ 、 $\{\beta_i\}_{i=1}^N$ 的初值为0.5,利用最小二乘法,基于式(21)

表1 单个加载点FWD试验荷载

Tab.1 Magnitude of single-site load using FWD

加载点位	FWD试验荷载/kN						
1	77.9	84.7	84.1	109.6	109.1	129.0	129.9
2	129.3	135.5	134.0	169.5	168.0	201.6	201.5

对参数求解,并拟合曲线。2个模型对自然车加载振动信号拟合结果如图9所示。该信号对应车速为8 km·h<sup>-1</sup>前后轴振动响应。在同一试验曲线下,三角函数模型的拟合结果比高斯函数模型的更切合实际。

从图9看出,由于正负峰值之比得到了调整,三角函数模型具有比高斯函数模型更好的拟合优度,主要峰值附近的突跳等细节也得到了体现。为定量描述模型拟合结果对振动实测值的拟合程度,使用决定系数( $R^2$ )对各函数模型的拟合优度进行对比。 $R^2$ 的定义如下所示:

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (22)$$

式中: $y$ 为原始振动序列; $n$ 为原始序列 $y$ 的长度; $\bar{y}$ 为均值; $\hat{y}$ 为序列拟合值。 $R^2$ 的取值范围是 $[0,1]$ , $R^2$ 的值越接近1,说明对实测值的拟合程度越好。

计算高斯函数模型、三角函数模型分别在FWD加载试验以及自然车辆加载试验中决定系数的统计特征值,如图10所示。小提琴图阴影宽度表示统计占比。FWD加载下,高斯函数模型决定系数最大值为0.964,最小值为0.924,均值为0.943;三角函数模型决定系数最大值为0.978,最小值为0.952,均



a FWD加载以及移动车辆加载实物图



b 振动光纤实物图

图8 足尺试验实物图

Fig.8 Full-scale test illustrations

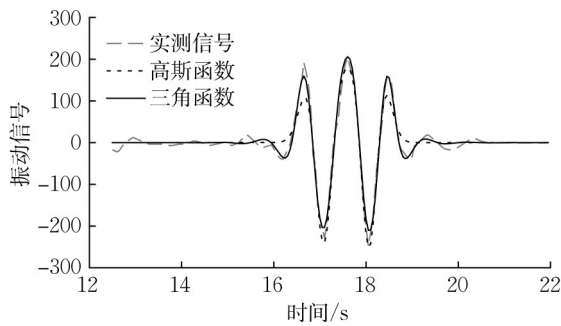


图 9 曲线拟合结果  
Fig.9 Curve fitting results

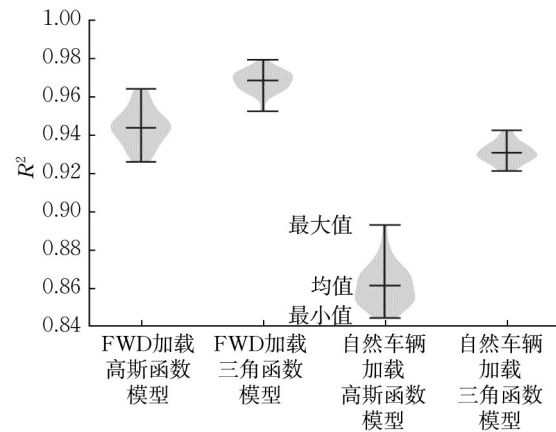


图 10 拟合效果  
Fig.10 Fitting results

值为 0.968。自然车辆加载下, 高斯函数模型决定系数最大值为 0.892, 最小值为 0.844, 均值为 0.861; 三角函数模型决定系数最大值为 0.941, 最小值为 0.921, 均值为 0.932。

由图 10 可见, 三角函数模型在 2 项加载试验中拟合优度均高于高斯函数模型, 这与图 9 一致。从 FWD 加载到自然车辆加载, 2 个模型  $R^2$  均下降。原因在于自然车辆轴载响应随机性高于 FWD 轴载, 导致信号非平稳性增加。高斯函数模型  $R^2$  下降最明显, 但能保持在 0.840 以上。三角函数模型的表现较好,  $R^2$  一直保持在 0.900 以上, 而统计方差小, 更稳定。

在所建立的 2 个加速度响应模型中, 车辆轴载  $F$  具有统一的计算形式 (见式 (16))。依照 2.2 节方法, 利用标定车辆获得路面内相关参数后, 计算后续车辆轴载。式 (11) 中车速  $v$  影响高斯函数零点区间范围, 零点区间范围可类比加载作用时间。在 FWD 轴载反算阶段, FWD 作用时间为 0.03~0.05 s<sup>[28]</sup>, 在相同加载设备、近似路面结构下, 可以认为 FWD 轴

载对路面的作用时间相同及  $v$  相同。在 FWD 加载试验中, 将  $\delta_i/v^2$  看作整体, 根据  $\beta_i$  估计  $F_i$ 。对于同一路面的加载点位 1 进行 7 次加载试验, 拟合得到参数  $\beta_i, i=1, 2, \dots, 7$ 。FWD 第 2 级加载稳定性好, 选择将第 2 次加载作为参照, 用该次加载拟合得到的路面特征值  $\delta_2$  计算其余 6 次试验的加载值, 验证模型轴载预估精度, 结果如表 2 所示。使用加载点位 1 得到的平均路面特征值, 计算加载点位 2 的 7 次加载试验加载值, 验证模型轴载预估泛化能力, 结果如表 3 所示。

2 个模型同组试验的平均相对误差分别为 6.25%、5.50%。最大偏差分别为 -9.69%、-8.65%。模型泛化后不同组试验最大误差均在 ±10% 以内, 三角函数模型误差比高斯函数模型更小。总体而言, 应选择三角函数作为后续轴载预估方法的基础函数。

表 2 加载点位 1 FWD 加载估算平均精度

Tab.2 Estimated average accuracy of FWD loading at load site 1

荷载编号	实际荷载/kN	高斯函数估计荷载/kN	高斯函数估计误差/%	三角函数估计荷载/kN	三角函数估计误差/%
1	77.9	71.2	-8.57	71.2	-8.65
2	84.7	84.7	0	84.7	0
3	84.1	76.0	-9.69	72.9	-6.46
4	109.6	106.2	-3.13	75.9	-2.58
5	109.1	118.1	8.28	84.3	8.16
6	129.0	119.0	-7.74	73.4	-5.81
7	129.9	129.7	-0.14	78.9	1.33
平均相对误差			6.25		5.50

### 3 原型系统现场试验

#### 3.1 试验设置

原型系统安装在上海蒸俞公路。现场试验布置

如图 11 所示。路面振动分布式感知系统由布置在路面内的 26 个感知光纤圈组成, 路面宽度为 4.00 m, 厚度为 0.25 m。一个商业动态称重 (WIM) 系统 OWS-ZWBH30 (梅特勒-托利多生产) 也被安装在

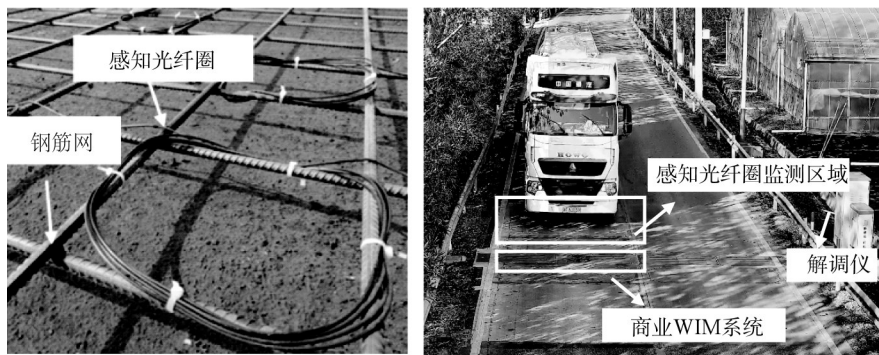
表3 加载点位 2 FWD 加载估算平均精度  
Tab.3 Estimated average accuracy of FWD loading at load site 2

荷载编号	实际荷载/kN	高斯函数估计荷载/kN	高斯函数估计误差/%	三角函数估计荷载/kN	三角函数估计误差/%
1	129.3	142.9	10.54	143.1	10.67
2	135.5	129.0	-4.83	130.4	-3.74
3	134.0	126.8	-5.36	130.3	-2.78
4	169.5	180.4	6.45	170.2	0.42
5	168.0	179.5	6.82	180.1	7.20
6	201.6	196.2	-2.69	184.9	-8.30
7	201.5	198.4	-1.56	211.5	4.97
平均相对误差			5.46		5.44

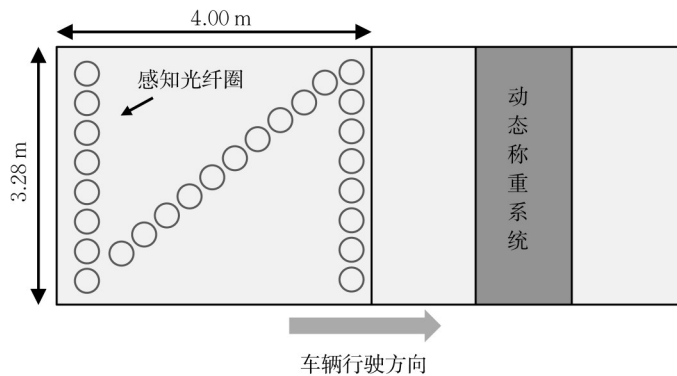
邻近的路面上。路面振动分布式感知系统测量由自然交通荷载激励的路面振动。路面振动分布式感知系统共采集了 293 辆不同速度车辆激励振动信号。系统采样频率为 2.5 kHz。当车辆经过时,振动传感系统测量路面振动,随后商业 WIM 系统测量轴载。商业 WIM 系统在车速 0~80 km·h<sup>-1</sup> 下单轴误差为 ±1.00%, 车辆总重误差为 ±1.00%, 因此该商业

WIM 系统数据作为车辆实际轴载。研究表明,感知光纤圈“Z”型布置可捕获车辆到达监测点位时间并根据不同光纤圈振动峰值时间差计算车辆速度。

测试路面采用装配式建造工艺,提前将传感纤维嵌入预制水泥路面板中,将光纤固定在钢筋网上,并预留接口用于传感光纤和路测设备连接。吊装预制水泥路面板替换 4 m 长原有单车道沥青面层。



a 传感器布设实物图



b 传感器布设方案

图 11 现场试验布置

Fig.11 Field test layout

振动系统采集车辆单根轴轴型编号如图 12 所示。轴载及车速统计结果如图 13 所示。采集的车辆单轴轴载在 2 000 kg 以内的超过 60%, 有少量超载货车。车速呈正态分布, 均值为 50 km·h<sup>-1</sup>。采集车辆在轴载分布和速度分布上符合普通等级公路路

况, 具有代表性。

### 3.2 轴载识别结果

选择 15% 的采集车辆作为训练样本, 其真实轴载作为先验知识代入模型, 计算标定路面特征值平均数, 并用剩余车辆真实轴载数据验证系统精度。



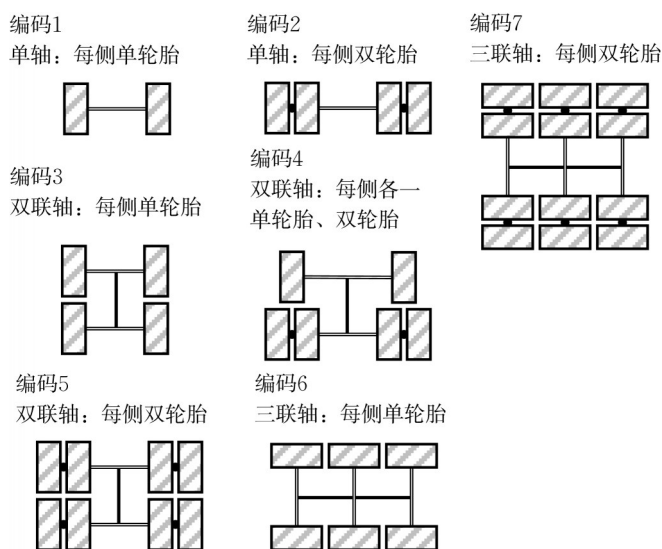


图 12 单根轴编号

Fig.12 Single-axle number

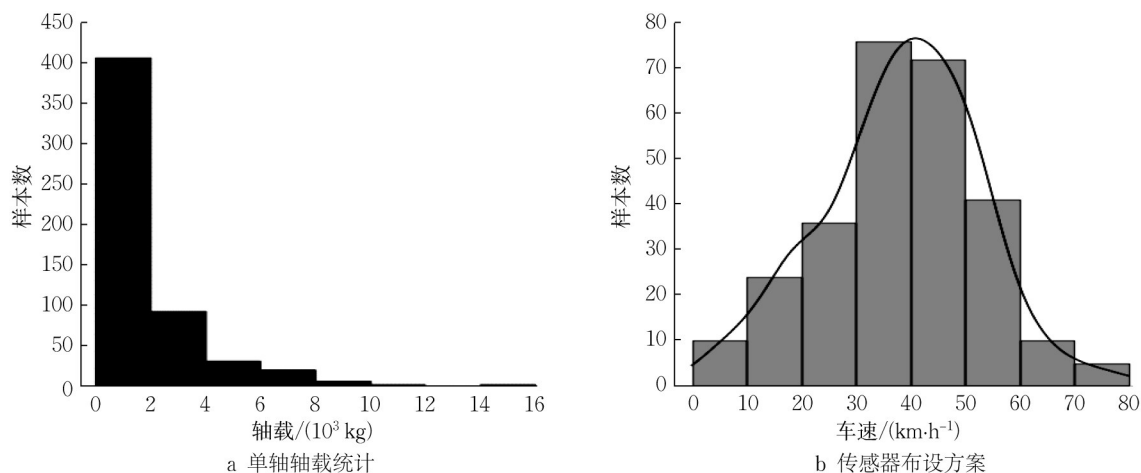


图 13 车流参数统计

Fig.13 Statistics of traffic flow parameters

图 14 比较了所提出计算算法与系统估计的轴载与真实轴载。估计的轴载接近真实的轴载,  $R^2$  为 0.98。不同轴型对应的轴载估计平均值和标准差如表 4 所示。由表 4 可见, 所提系统良好地预估了常见轴型的真实质量, 对于具有不同悬挂系统和轮胎特征的车辆都有较好的测量结果。随着车轴轮组的增加, 称重平均误差增大。整体上达到国家标准对于轴载误差在 2% 以内要求以及总重误差在 5% 以内的要求<sup>[29]</sup>。

图 15 为车速下车辆轴载估算误差百分比。车速为 0~20 km·h<sup>-1</sup> 时轴载估算误差绝对值最大为 6.68%, 均值为 0.42%。车速为 20~40 km·h<sup>-1</sup> 时轴载估算误差绝对值最大为 7.62%, 均值为 -0.10%。车速为 40~60 km·h<sup>-1</sup> 时轴载估算误差绝对值最大

表 4 车辆称重误差

Tab.4 Vehicle weighing criteria

轴编码	误差平均值/%	误差标准差/%
1	0.20	3.81
2	0.55	3.31
4	0.91	6.23
5	0.89	4.82
7	-0.98	4.45
车辆总质量/kg	0.34	3.67

为 8.76%, 均值为 0.26%。车速为 60~80 km·h<sup>-1</sup> 时轴载估算误差绝对值最大为 8.43%, 均值为 -0.15%。

各档速度估计误差均值不随速度改变而变化, 表明所提出系统的精度受车速影响较小。然而, 随着车速的增加, 轴载估算误差波动范围增大, 在 40~

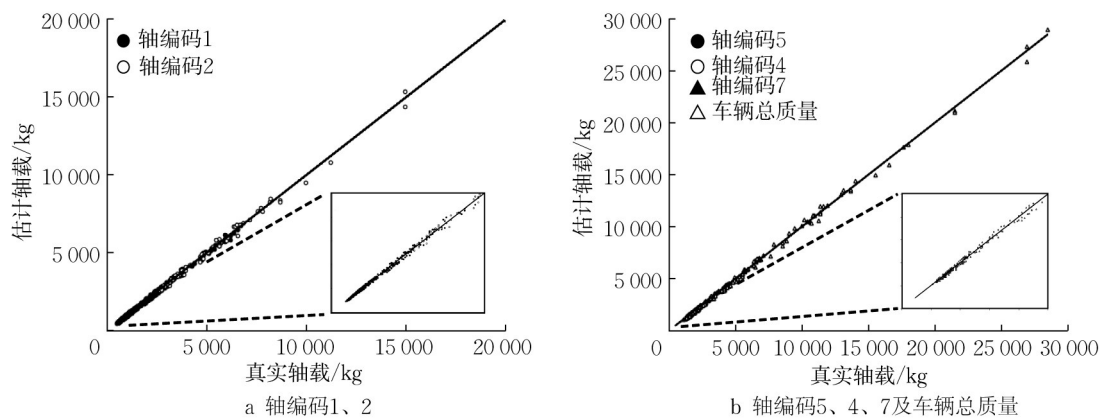


图14 估计轴载与真实轴载对比

Fig.14 Estimated weights against ground truth weights

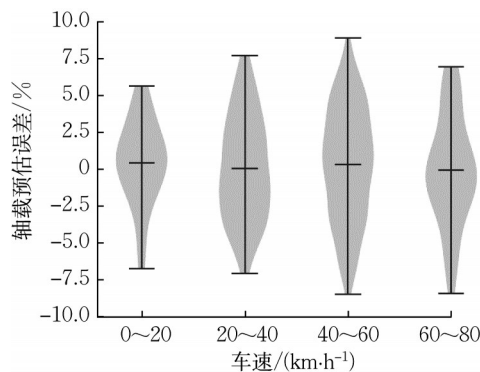


图15 不同车速下轴载预估误差

Fig.15 Estimated error of weights at different vehicle speeds

60 km·h<sup>-1</sup>时达到最大。原因是在高速状态下,速度越大,车辆动载系数越大,导致车辆动载变异区间增大。

## 4 结论

(1)根据光纤在路面水平方向受力,建立光纤信号与路面竖向位移映射关系。结合实际工况限制,提出了基于长短时平均值比法的有效信号切割算法以及低通巴特沃斯和二次差分组合滤波的信号预处理方法。信号预处理后,光纤振动信号与路面竖向加速度为线性关系。

(2)提出了基于高斯函数以及基于三角函数的2种车辆轴载反演解析模型,并使用最小二乘法求解车辆轴载。2种模型均对FWD冲击荷载和移动车辆荷载反演显示出良好的性能。其中,基于三角函数的车辆轴载反演解析模型性能更优,移动荷载曲线拟合优度为0.932,冲击荷载反演误差为5.50%,

迁移重建误差为5.44%。

(3)所提原型系统对单个轴载最大估计误差为0.98%,对车辆总重达到0.34%的精度,而且系统精度受车辆速度影响小。

### 作者贡献声明:

边泽英:论文整体撰写,提出称重算法以及设计实验。

赵鸿铎:研究选题,提供研究思路和技术指导。

彭科迪:实验主要研究人员,提供实验数据。

曾孟源:论文审定,论文整体结构指导。

郭牧:实验设计及数据整理。

### 参考文献:

- [1] 裴建中. 道路工程学科前沿进展与道路交通系统的代际转换[J]. 中国公路学报, 2018, 31(11): 1.  
PEI Jianzhong. Progress of highway engineering and generation upgrading of highway transportation system [J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, 31(11): 1.
- [2] 赵鸿铎, 朱兴一, 涂辉招, 等. 智能铺面的内涵与架构[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2017, 45(8): 1131.  
ZHAO Hongduo, ZHU Xingyi, TU Huizhao, *et al.* Concept and framework of smart pavement [J]. Journal of Tongji University(Natural Science), 2017, 45(8): 1131.
- [3] TAN Y, LIANG Z, XU H, *et al.* Research on rutting deformation monitoring method based on intelligent aggregate [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2022, 23(11): 22116.
- [4] ZHU X, ZHOU X, YE F, *et al.* Development and evaluation of cement/emulsified-asphalt based piezoelectric sensors for road weigh-in-motion system [J]. Smart Materials and Structures, 2021, 30(12): 125013.
- [5] HAN C, MA T, GU L, *et al.* Asphalt pavement health prediction based on improved transformer network [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2023, 24(4): 4482.

- [6] ZHOU B, PEI J, ZHANG J, *et al.* Joint design and load transfer capacity analysis of photovoltaic/thermal integrated pavement unit[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 380: 135029.
- [7] HE L, ZHOU Z, LING F, *et al.* A coarse-grained molecular model for simulating self-healing of bitumen [J]. *Applied Sciences*, 2022, 12(20): 10360.
- [8] 孙立军. 路面工程学[M]. 上海: 同济大学出版社, 2012.  
SUN Lijun. Pavement engineering [M]. Shanghai: Tongji University Press, 2012.
- [9] LV S, YUAN J, PENG X, *et al.* A structural design for semi-rigid base asphalt pavement based on modulus optimization[J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 302(6): 124216.
- [10] FERGUSON A C. Weighing vehicles in motion [J]. *Measurement and Control*, 1969, 2(12): T214.
- [11] ZHAO C, BIAN Z, ZHAO H, *et al.* Identification of moving load characteristic on pavement using FP cavity fiber optical technology[J]. *Sustainability*, 2022, 14(4): 2398.
- [12] KILBURN P. Weigh in motion report [R]. Calgary: Ministry of Transportation, 2008.
- [13] 曾孟源, 赵鸿铎, 边泽英, 等. 基于分布式光纤的混凝土路面振动场感知与解析[J]. *中国公路学报*, 2022, 35(7): 78.  
ZENG Mengyuan, ZHAO Hongduo, BIAN Zeying, *et al.* Sensing and analysis of concrete pavement vibration field based on distributed optical fiber[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2022, 35(7): 78.
- [14] BAJWA R S. Wireless weigh-in-motion: using road vibrations to estimate truck weights [D]. Berkeley: University of California, 2013.
- [15] 张文斌. 公路车辆动态荷载测量及车型分类技术的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009.  
ZHANG Wenbin. Research on dynamic loads measurement and vehicle classification on highway [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009.
- [16] YE Z, XIONG H, WANG L. Collecting comprehensive traffic information using pavement vibration monitoring data [J]. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 2020, 35(2): 134.
- [17] YE Z, LU Y, WANG L. Investigating the pavement vibration response for roadway service condition evaluation[J]. *Advances in Civil Engineering*, 2018, 2018: 2714657.
- [18] HUANG S, LIN W, TSAI M, *et al.* Fiber optic in-line distributed sensor for detection and localization of the pipeline leaks [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2007, 135(2): 570.
- [19] DIOUF B M, CHE A, FENG S. Study of a space-time monitoring of high-speed railway underline structure using distributed optical vibration sensing technology [J]. *Shock and Vibration*, 2019, 12: 1.
- [20] ZHAN Z. Distributed acoustic sensing turns fiber-optic cables into sensitive seismic antennas [J]. *Seismological Research Letters*, 2020, 91(1): 1.
- [21] ZHAO H, WU D, ZENG M, *et al.* A vibration-based vehicle classification system using distributed optical sensing technology [J]. *Transportation Research Record*, 2018, 2672(43): 12.
- [22] 曾孟源, 赵鸿铎, 吴荻非, 等. 基于振动感知的混凝土铺面板底脱空识别方法[J]. *中国公路学报*, 2020, 33(3): 42.  
ZENG Mengyuan, ZHAO Hongduo, WU Difei, *et al.* Identification of cavities underneath concrete pavement based on pavement vibration [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2020, 33(3): 42.
- [23] ZENG M, WU D, ZHAO H, *et al.* Novel assessment method for support conditions of concrete pavement under traffic loads using distributed optical sensing technology [J]. *Transportation Research Record*, 2020, 2674(4): 42.
- [24] 陈曦. 基于 $\Phi$ -OTDR的动态纳应变定量测量技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.  
CHEN Xi. Quantitative measurement of dynamic nano-strain based on  $\Phi$ -OTDR [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017.
- [25] ZENG M, ZHAO H, GAO D, *et al.* Reconstruction of vehicle-induced vibration on concrete pavement using distributed fiber optic [J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2022, 23(12): 24305.
- [26] RAJAGOPAL R. Large monitoring systems: data analysis, deployment and design [D]. Berkeley: University of California, 2009.
- [27] ZENG M, ZHAO H, WU D, *et al.* A vibration-based traffic monitoring system using distributed optical sensing technology [J]. *Journal of Testing and Evaluation*, 2019, 48(3): 1799.
- [28] LEIVA-VILLACORTA F, TIMM D. Falling weight deflectometer loading pulse duration and its effect on predicted pavement responses [R]. Washington DC: Transportation Research Board Committee, 2013.
- [29] 中华人民共和国国家市场监督管理总局. 动态公路车辆自动衡器: GB/T 21296—2020[S]. 北京: 中国质检出版社, 2020.  
State Administration for Market Regulation of the People's Republic of China. Automatic instruments for weighing road vehicles in motion: GB/T 21296—2020 [S]. Beijing: Quality Inspection Press of China, 2020.