

非现场治超动态称重考虑动态荷载研究综述

刘 铜¹, 王艳红¹, 丁 亮², 张曙光³, 宋宝华³

(1. 山东交通学院交通与物流工程学院, 济南 250357; 2. 济南市城乡交通运输局济南市交通运输综合行政执法支队, 济南 250098; 3. 山东德鲁泰信息科技股份有限公司, 济南 250100)

摘要: 在非现场治理超限超载系统执法过程中, 动态称重传感器通过测量汽车驶过承载器时的轴重来计算车辆总重。但是由于路面非绝对平整, 导致车辆在不规则路面行驶而产生耦合振动, 因此导致实际测量的轴重受到静载与车辆垂直振动的共同影响。通过对路面平整度预测、车辆动态荷载研究和非现场治超动态称重研究进行综述, 发现在非现场治理超限超载动态称重准确度方面, 要充分考虑路面平整度造成的动态荷载带来的影响。

关键词: 非现场治超; 称重准确度; 动态荷载; 路面平整度; 动态汽车衡

中图分类号: U491.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-1807(2024)19-0184-07

随着道路交通运输业的迅猛发展, 超限超载现象日益严重, 这不仅对道路交通安全构成了巨大威胁, 也加速了道路的损耗, 增加了公共财产的维护成本。超限超载车辆对路面的破坏是一个复杂的动态过程, 其中路面平整度的变化、车辆的动态荷载以及非现场治超动态称重的准确性之间存在着紧密的联系。

一方面, 超限超载车辆对路面造成的损害直接影响到路面的平整度。路面平整度不仅关系到行车安全和舒适性, 还直接影响到车辆行驶过程中的动态荷载。当路面不平整时, 车辆在行驶过程中会产生额外的动态荷载, 这种荷载远大于静态荷载, 从而加剧了对路面的损害, 形成了恶性循环。

另一方面, 车辆的动态荷载对非现场治超动态称重技术的准确性有着重要影响。非现场治超动态称重技术作为一种有效的交通管理手段, 其核心在于准确、快速地识别和处理超限超载车辆。然而, 由于路面不平整引起的车辆动态荷载的变化, 极大地增加了动态称重的难度和不确定性, 影响了治超工作的效率和效果。

因此, 综合考虑路面平整度测量、汽车动态荷载及非现场治超动态称重研究, 不仅有助于深入理

解超限超载对道路交通系统的综合影响, 还对提高非现场治超动态称重技术的准确性、进一步促进道路交通安全和道路维护管理水平具有重要的理论和实践意义。

1 路面平整度测量与预测研究

路面平整度是指路表面纵向的凹凸量的偏差值, 而路面粗糙度是指路表面骨料的棱角阻止轮胎滑动的能力。在交通部标准《公路工程名词术语》(JTJ 002—1987)和国家标准《道路工程术语标准》(GB J124—1988)中对路面平整度都有相同的定义。此外, 全国科学技术名词审定委员会公布的《公路交通科技名词》(1996)中, 表面平整度的英文名为“surface evenness”, 表面粗糙度的英文名为“surface roughness”^[1]。

在超限超载治理的背景下, 非现场治超点的施工与建设质量直接关系到后续治超工作的效果和效率。尤其是路面平整度, 它不仅影响动态称重系统的准确性, 还关系到车辆行驶的安全性和舒适性。然而, 即使在施工建设阶段达到了平整度的要求, 随着时间的推移和各种外部因素的影响, 如交通荷载、气候条件和维护管理水平等, 路面的平整度仍可能发生变化。这些变化可能会对非现场治超点的长期运行效果产生不利影响, 因此, 研究和

收稿日期: 2024-05-27

基金项目: 山东交通学院 2023 年研究生科技创新项目立项项目重点资助课题(2023YK067)

作者简介: 刘铜(1999—), 男, 山东济南人, 硕士研究生, 研究方向为道路交通运输; 王艳红(1999—), 女, 山东德州人, 硕士研究生, 研究方向为道路交通运输; 丁亮(1981—), 男, 回族, 山东济南人, 硕士, 科长, 研究方向为交通运输; 张曙光(1964—), 男, 山东泰安人, 硕士, 研究员, 研究方向为智慧交通; 宋宝华(1980—), 男, 山东济南人, 嵌入式工程师, 研究方向为动态汽车衡。

预测路面平整度变化是研究汽车对路面的动态荷载的基础。

1.1 路面平整度测量研究

路面平整度作为衡量道路质量的重要指标,直接影响着行车的舒适性、安全性和车辆的运营成本。随着交通量的增加和车辆行驶速度的提升,对路面平整度的要求也变得更加严格。为了确保道路的高质量和长寿命,准确测量和评估路面平整度变得尤为重要。以下综述当前路面平整度测量的主要方法、技术进展以及应用现状,探讨不同测量方法的优缺点,以期对相关领域的研究和实践提供参考。

陈广华等^[2]采用了车辆行车过程中产生的竖向振动加速度的平均绝对偏差作为行车振动加速度指标,建立了路面平整度-速度敏感度参数模型。Li等^[3]利用三维加速度传感器获取簧下加速度信号,使用迁移学习的方法将模型学到的知识在相似的车辆之间转移,进而评估路面平整度。朱立伟等^[4]基于激光雷达技术动态采集路面空间深度信息,通过选择合适的计算区域、加权滑动窗口滤波、采集设备的倾角消除等方法对数据进行分析处理,实现路面平整度标准差和国际平整度指数的快速计算。罗晨晖和麻友良^[5]充分考虑车辆行驶过程中由于路面平整度造成的振动影响,建立了道路不平度因子模型和车路之间的耦合性振动感应模型,实现最终的振动感应。杜昭等^[6]提出了一种基于车辆振动响应信号的路面纵断面高程反演及平整度估计方法,以车身振动响应信号作为测量值,借助网联车数量多的优势,采用高斯过程模型对多车估计结果进行拟合以实现多车结果的融合解析,提高方法的准确性。王昊等^[7]提出一种实用且高效的非机动车道路面平整度测量方法,即通过安装在自行车上的智能手机测量骑行时自行车的竖直方向加速度数据,计算竖直加速度均方根作为路面平整度指数。吴荻非等^[8]提出了一种基于车辆参数估计的振动式路面平整度检测快速标定方法,通过构建7自由度整车动力学模型,通过虚拟仿真获取车辆振动指标、车速与国际平整度指数IRI的多源回归模型,进而对路面平整度进行标定。

综上所述,当前路面平整度测量方法主要包括车辆振动响应分析、传感器数据采集、激光雷达技术及智能手机应用等。各方法在数据采集、处理速度和准确性上各有优劣,未来将向更高效、精准和智能化方向发展。

1.2 路面平整度预测研究

由于路面结构及材料、施工质量的差异,随着路段的日常使用情况及气候的影响,路面平整度会随之变化。道路在使用过程中,会产生车辙、坑洞、拥包、纵裂和横裂等影响路面平整度的路面破坏情况,尤其是超限超载车辆对路面平整度的危害极大。

近年来大多数研究倾向于使用机器学习和人工神经网络来预测和评估路面状况,得益于其处理海量数据的能力、高精度以及解决时间序列问题的有效性的优点。Damirchilo等^[9]采用极端梯度提升(XGBoost)进行路面平整度(IRI)预测,并通过支持向量回归(SVR)和随机森林(RF)模型进行对比,发现No.-200筛通过率、水力传导率和KESAL是预测IRI的最重要因素。Zhou等^[10]使用递归神经网络和人工神经网络预测无维护/修复情况下和维护后沥青混凝土(AC)路面的IRI值,涵盖全寿命周期。Bashar和Torres-Machi^[11]通过元分析发现机器学习(ML)算法平均捕捉到比传统技术多15.6%的变异性,RF表现最佳,人工神经网络(ANN)在小样本和大样本情况下均表现出色。Barros等^[12]使用ANN方法开发了预测混合路面粗糙度的模型,最佳模型的平均平方误差(MSE)为0.0023,平均绝对相对误差(MARE)为12.936, R^2 为0.88。Alatoom和Al-Suleiman^[13]利用智能手机测量数据和ANN开发了低成本、高精度的路面平整度模型,ANN在IRI预测方面表现优越,平均误差低于10%。韦威^[14]提出混合效应模型预测平整度,用随机效应反映路段间差异,模型有效预测了平整度发展规律。马鑫源等^[15]对比多种预测方法,发现基于决策树和提升算法的机器学习模型更适用于结果解释性研究。吕润华和于向前^[16]采用门控循环单元(GRU)网络层的编码器-解码器结构的预测,通过特征随机打乱的方式对不同输入特征的重要性进行了评估,结果显示路面结构和温度对于路面平整度预测比较重要。路鑫和钱学东^[17]以某省国道数据为例,基于XGBoost网络建立了IRI的预测模型,对路面平整度的相关特征数据进行了数据预处理分析,构建了XGBoost网络对路面平整度进行预测,对路面平整度的预测精度较高。杜耀辉^[18]对平整度检测数据及其影响因素多源数据进行获取与整合,筛选出路面平整度的重要特征因子,构建了一种基于高性能优化(HPO)的逆方差权重融合模型对路面平整度进行准确高效预测。许书展^[19]采用智能算法Ada Boost和随机森林进行机器学习,

搭建了 Ada Boost 回归和随机森林回归两个 IRI 预测模型,为了更准确地采集数据,设计了一种基于路面响应的便携式测量装置来采集振动等数据。周梦梦^[20]提出运用机器学习模型代替传统的经验设计法(MEPGD)评估连续钢筋混凝土路面(CRCP)的 IRI,以提高 CRCP 的平整度评估的准确性,将 MBAS 用于调整预测 CRCP 的 IRI 的机器学习模型,得到预测准确性最高的混合机器学习模型。黄凯枫和刘庆华^[21]提出使用卷积神经网络(CNN)与长短期记忆神经网络(LSTM)的结合(CNN-LSTM)对国际平整度指标进行预测,使用激光雷达采集的距离数据,将卷积神经网络与长短时记忆网络相结合,完成了对国际平整度指标的预测。

综上所述,当前主要的预测方法包括基于统计模型的方法、机器学习和深度学习的方法,以及基于物理模型的方法。统计模型方法主要依赖于历史数据,通过回归分析等手段来预测路面平整度的变化,这种方法在处理大数据和复杂非线性关系方面表现出色,显著提高了 IRI 预测的精度;机器学习和深度学习方法则利用大量数据进行训练,能够捕捉到更复杂的非线性关系,近年来在预测精度上有显著提升;基于物理模型的方法则通过模拟实际的路面荷载和材料特性来进行预测,能够提供较为详细的路面状态变化信息。未来的发展趋势可能包括进一步优化现有模型、融合多种算法的优点、开发更高效的数据采集和处理技术,以及在实际应用中验证和推广这些方法。

2 车辆动态荷载研究

由于路面不完全平整的特性,导致行驶在路上的车辆产生不断变化的动态荷载。同时,超限超载车辆的行驶会严重损害路面,也会导致路面结构发生一定的形变,路面形变反过来又影响行驶的车辆,使相同载重车辆的动态荷载变大。因此,在考虑非现场治理超限超载时的动态称重方面应该将路面和车辆视为一个完整的系统,研究车辆与道路之间的相互作用,并分析车辆在路面行驶的力学行为。

张超东和黎剑安^[22]提出了一种基于增秩 Kalman 滤波(AKF)算法的动态荷载识别和结构响应重构方法,实现状态和荷载向量的同时识别,实现未布置传感器处的结构动力响应重构,并通过 3 个有限元案例,初步验证了方法的可行性和有效性。颜全哲等^[23]基于车辆称重系统(WIM)数据,根据重载交通公路车辆荷载的统计特征建立相应的车

辆荷载模型,对典型公路简支梁桥和连续梁桥的汽车荷载作用效应进行分析。此外仍有不少学者基于 WIM 数据建立相应的时间演变模型,研究车辆荷载的荷载效应随时间变化的特征,探究公路桥梁车辆荷载的时变荷载效应及结构安全问题^[24-26]。Ma 等^[27]将耦合系统解耦为两个子系统,通过迭代方案独立求解,使用有限差分法和积分变换技术计算车辆和路面的动态响应,并通过有限元仿真验证路面动态响应的解。Cui 等^[28]通过扩展 Biot 理论建立了非饱和地基的控制方程,考虑路面不平影响,采用双傅里叶变换求解波长域问题,发现不平路面引起的附加动态荷载受路面粗糙度和车速影响,车速增加对垂直正应力、剪应力及应力路径影响较小,但水平正应力峰值增加,垂直位移减少。Wang 等^[29]研究利用有限元法(FEM)分析在非均匀轮胎-路面接触应力下沥青路面的动态响应,通过建立三维有限元模型,比较预测和实验测量的应力,发现剪切应力对车辙和纵向裂缝的发展有显著影响。张璐等^[30]以桥梁加速度为输入,仅采用有限的数据集训练 LSTM 网络,通过车桥耦合模型研究了环境噪声的影响及不同路面粗糙度下的识别效果来验证其准确性。李航等^[31]建立实际重载交通作用下的车辆荷载模型,利用 fortune 语言编制程序并结合 abaqus 二次开发功能实现车辆在桥上的移动计算,利用经验分布函数方法计算得出范围内的荷载放大系数,用于该重载交通桥梁设计和评估。焦美菊等^[32]提出一种新的预测模型即区组超阈值模型,研究超阈值模型和区组最大值模型之间的参数关联,通过车辆荷载效应的最大值模型求出任意使用年限内实际车流作用下的车辆荷载效应极值。

综上所述,车辆动力学模型是进行车辆-道路系统相互影响研究的基础,经典的模型有整车模型、1/2 车辆模型、1/4 车辆模型等。车辆动态荷载研究主要采用实验测量、数值模拟和理论分析相结合的方法。实验测量方面,广泛使用传感器、动态称重系统及无线传输技术,能够精确捕捉车辆荷载变化;数值模拟技术进展显著,有限元分析和多体动力学方法被广泛应用,提升了对复杂工况下荷载的预测能力;理论分析则通过建立数学模型,深入理解荷载分布规律。未来,智能化和大数据技术将进一步推动车辆动态荷载研究的发展,提高预测精度和应用广度。

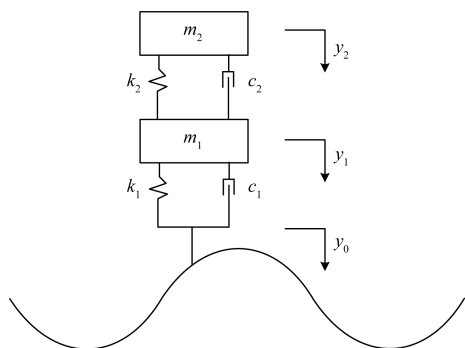
目前,在研究车辆动力模型方面,通常建立 2 自

由度 1/4 车辆模型进行研究,考虑轮胎形变、货车悬架变形、发动机振动等因素建立模型,既可将研究货车行驶动力学时的影响因素考虑到,又降低仿真的计算量。1/4 车辆模型示意图如图 1 所示。

综合论述发现,动载系数可以直观反映动态荷载。影响路面平整度的参数为振幅和波长,因此通过仿真进一步论证路面平整度对动态荷载的影响。采用 2 自由度的 1/4 车辆模型通过建立微分运动方程对振动系统进行求解分析。首先,假设求解过程忽略车辆自振作用;车辆左右对称;车辆在路面匀速直线运动,车轮与路面一直接触且视为点接触;轮胎的阻尼和刚度是胎压和轮载的函数,当行驶条件确定后,可视为定值。使用 MATLAB 软件进行分析,车辆结构参数选定:悬挂系统质量为 4 500 kg,刚度系数为 500 kN/m,阻尼为 15 kN/(s/m);非悬挂系统质量为 500 kg,刚度系数 1 500 kN/m,阻尼为 5 kN/(s/m)。

振幅指的是路面波形的高度变化。随着振幅的增加,路面的不平度也增加。这会导致车辆悬挂系统需要承受更大的动载荷,从而导致动载系数增加。如图 2 所示,在低振幅情况下,路面相对平坦,车辆悬挂系统的动载荷较小,动载系数较低。在高振幅情况下,路面起伏较大,车辆悬挂系统需要吸收更多的能量,动载系数显著增加。

波长是指路面波形的周期长度,波长对车辆的动载荷影响较大,因为它决定了车辆遇到路面不平度的频率。如图 3 所示,短波长意味着路面不平度变化频繁,车辆悬挂系统需要频繁响应,导致较高的动载系数。长波长意味着路面不平度变化缓慢,车辆悬挂系统有更多时间来调节和吸收冲击,动载系数相对较低。



m_1 为非悬架质量; m_2 为悬架质量; k_1 为非悬架刚度; k_2 为悬架刚度; c_1 为非悬架阻尼; c_2 为悬架阻尼; y_1 为非悬架垂直位移; y_2 为悬架垂直位移; y_0 为路面平整度函数

图 1 1/4 车辆模型示意图

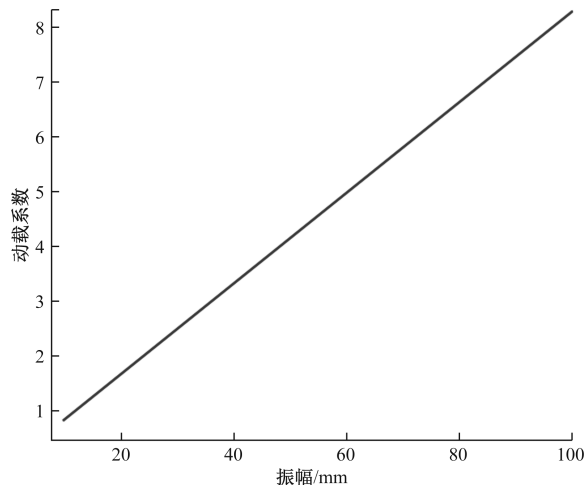


图 2 振幅与动载系数的关系

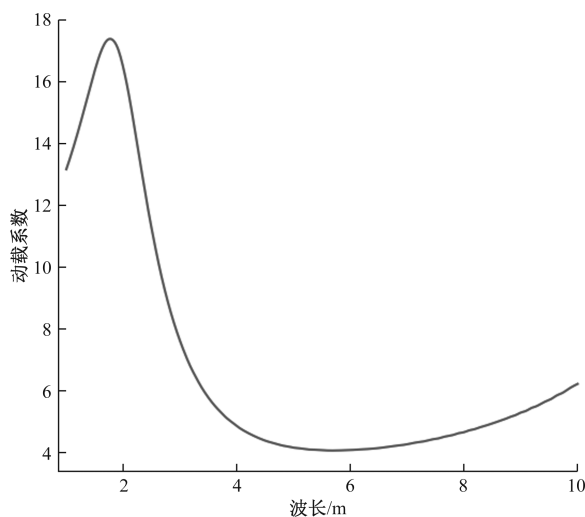


图 3 波长与动载系数的关系

由图 3 可以明确观察到路面平整度对动态荷载的影响。在货车动态荷载的研究上,随着技术的不断发展,考虑的因素越来越多,建立的车-路耦合模型也越来越完善,进而可以计算路面平整度、车辆速度等因素影响下的车辆动态荷载及动态荷载系数,通过分析车辆动态荷载与路面平整度的关系,结合路面平整度的测量,在非现场治理超限超载动态称重准确度方面作出新的突破。

3 非现场治超动态称重研究

非现场治超动态称重技术作为一种有效的道路监管手段,其准确性直接关系到超限超载治理的效果。然而,如前所述,路面平整度的变化和车辆在不同路面条件下的动态荷载,都对动态称重的准确性构成了挑战。因此,基于前述理论研究综述,对包括但不限于改进称重传感器技术、引入高级数据处理算法等多种方法的研究进行综述,以期提高称重系统的准确度和效率。

在非现场治理超限超载领域,目前应用最广泛的动态称重系统是基于路面的称重系统,这种系统通常将动态称重设备嵌入到路表面,用于测量车辆以一定速度通过动态称重设备时的轴载。为了最大限度地消除路面平整度对测量误差的影响,非现场治理超限超载通常选择台式动态称重系统^[33]。

目前,在提高动态称重准确度上无论是硬件方面还是软件方面都得到进一步的发展。杨建伟^[34]构建了基于视频分析的动态称重系统精度补偿框架,根据车辆不同行驶状态变化对称重精度的影响进行分析与补偿,进一步提高称重精度。乔可鑫^[35]在视觉辅助动态称重的基础上改进光纤布拉格光栅(FBG)传感器,在提高称重准确度的基础上,可以做到较为准确识别车辆模型位置。葛宗恩等^[36]提出了一种基于云平台的车辆动态称重及监测系统,通过对所有称重设备获取的数据进行筛选和匹配,识别出车辆在道路上的行驶轨迹和重量信息,对车辆多次称重数据的核准比较来判断车辆称重数据的准确性。袁科等^[37]提出了一种基于鲸鱼优化(WOA)算法和模拟退火(SA)算法混合优化的BP神经网络动态称重模型,通过仿真证明WOSA-BP车辆动态称重模型收敛速度快、精度高。

此外,随着科技的进步,新型的动态称重设备也应运而生。Kong等^[38]提出了一种基于轮胎-路面接触模型和计算机视觉技术的非接触式车辆重量识别方法,通过赫兹接触理论推导轮胎垂直力与变形的关系,结合图像分割和字符识别技术,确定轮胎变形和充气压力,从而计算车辆重量。杨萌^[39]在秤台水平前后和左右侧增加2个维度多向测力传感器的组合,提出新型“3D动态衡”结构及其分析计算的方法通过3D识别和AI计算的ETC“3D/AI”+,完全能够保障ETC货车WIM智能计缴路桥费的需求。高晓龙等^[40]设计了一种基于PC机采用窄条式称重传感器的车辆动态称重系统,精度满足实际工程需求,构建了动态称重、车牌识别、车辆图像获取、信息上传于一体的车辆动态称重系统,并应用于非现场治超实际工程应用中。为提高动态称重的准确性,相应的车载称重设备也应运而生。罗检民等^[41]研究了LY-T9车载智能动态称重系统动态称重的方法,通过综合分析和处理车载称重传感器输出的信号,得到车辆载重。在此基础上陈磊^[42]提出了基于互相关法优化的动态补偿称重算法和多传感器卡尔曼数据融合算法来提高车载动态称重的准确度。乔欢波^[43]基于钢板弹簧、软弹簧与平行

梁传感器三级线性传递关系,构建基于卡尔曼滤波和BP神经网络的整车称重预测模型,研究了不同行驶速度和不同路面等级对应加速度对车辆动态载荷的影响。王羽欣^[44]设计出一款基于光纤光栅的传感器结构,通过理论分析和实验研究,论证基于光纤光栅的车辆动态称重传感器具有灵敏度高、结构简单、抗干扰能力强及功能丰富的特点。

随着物联网和大数据技术的发展,非现场治超动态称重系统将更加智能化和精准化,实现对超载车辆的实时监控和精准打击。同时,随着人工智能技术的进步,图像处理和数据分析算法将更加成熟,进一步提升系统的可靠性和精度。总体而言,非现场治超动态称重技术将在未来交通管理中发挥更加重要的作用,推动交通运输行业向更加智能和高效的方向发展。

4 结论与展望

(1)路面平整度对车辆动态荷载的影响显著。路面平整度直接关系到车辆在行驶过程中所产生的动态荷载。平整度较差的路面会导致车辆产生较大的动态荷载,进而加剧路面的损耗,同时也会影响行车安全。因此,通过准确预测和监控路面平整度的变化,可以更有效地进行道路维护和管理,从而提高道路的使用效率和安全性。

(2)提高动态称重系统的准确度需综合考虑多种因素。在非现场治理超限超载执法工作中,货车行驶通过称重区时,其轴重数据受车辆动态荷载的影响较大。为了提高称重系统的准确度,需要综合考虑并消除车辆速度、加速度以及路面平整度等因素的影响。这不仅涉及轴载传感器硬件的优化,还需要在动态称重系统的数据处理方面进行深入研究和改进,以实现超限超载车辆的更精准识别和管理,从而减少对道路的损害并保证交通安全。

因此为提高非现场治理超限超载称重准确度,应在轴载传感器硬件和动态称重系统数据处理两个方面的基础上,继续研究汽车速度、加速度和路面平整度等因素对非现场治理超限超载动态称重准确度的影响。

参考文献

- [1] 公路工程名词术语:JTJ 002—1987[S].北京:人民交通出版社,1988.
- [2] 陈广华,张金喜,曹丹丹,等.智能手机检测的行车振动数据与路面平整度关系[J].北京工业大学学报,2021,47(10):1148-1158.
- [3] LI P, HU G, XIA H, et al. Efficient method based on re-

- current neural networks for pavement evenness detection [J]. *Measurement*, 2023, 212: 112676.
- [4] 朱立伟, 冷志鹏, 李宏伟. 基于激光雷达技术的路面平整度算法[J]. *物联网技术*, 2023, 13(3): 12-15.
- [5] 罗晨晖, 麻友良. 基于路面平整度模拟的汽车行驶振动感应研究[J]. *计算机仿真*, 2023, 40(2): 172-176.
- [6] 杜昭, 张文裕, 朱兴一. 基于网联车辆数据融合的路面平整度评估方法[J/OL]. *中国公路学报*, 1-26 [2024-05-05]. <https://tlink.lib.tsinghua.edu.cn:443/http/80/net/cnki/kns/yitlink/kcms/detail/61.1313.U.20230628.0943.004.html>.
- [7] 王昊, 李连营, 杨敏, 等. 一种自行车车载智能手机测量路面平整度的方法[J]. *测绘地理信息*, 2024, 49(3): 63-68.
- [8] 吴获非, 刘成龙, 覃伯豪, 等. 基于车辆参数估计的振动式路面平整度检测标定方法[J/OL]. *中国公路学报*, 1-21 [2024-05-05]. <https://tlink.lib.tsinghua.edu.cn:443/http/80/net/cnki/kns/yitlink/kcms/detail/61.1313.U.20240116.1024.006.html>.
- [9] DAMIRCHILLO F, HOSSEINI A, MELLAT PARAST M, et al. Machine learning approach to predict international roughness index using long-term pavement performance data [J]. *Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements*, 2021, 147(4): 04021058.
- [10] ZHOU Q, OKTE E, AL-QADI I L. Predicting pavement roughness using deep learning algorithms [J]. *Transportation Research Record*, 2021(11): 1062-1072.
- [11] BASHAR M Z, TORRES-MACHI C. Performance of machine learning algorithms in predicting the pavement international roughness index [J]. *Transportation Research Record*, 2021(5): 226-238.
- [12] BARROS R, YASARER H, UDDIN W, et al. Roughness modeling for composite pavements using machine learning [J]. *Materials Science and Engineering*, 2021(3): 032035.
- [13] ALATOOM Y I, AL-SULEIMAN T I. Development of pavement roughness models using artificial neural network (ANN) [J]. *International Journal of Pavement Engineering*, 2022, 23(13): 4622-4638.
- [14] 韦威. 沥青路面平整度评价及预测研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2022.
- [15] 马鑫源, 刘泉, 吴建涛. 基于机器学习方法的路面平整度预测及模型解释研究[J]. *市政技术*, 2023, 41(8): 39-44, 80.
- [16] 冯润华, 于向前. 基于编码器-解码器结构的路面平整度预测[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2023, 51(8): 1182-1190.
- [17] 路鑫, 钱学东. 基于XGBoost的路面平整度预测方法研究[J]. *市政技术*, 2023, 41(6): 10-14.
- [18] 杜耀辉. 基于多源数据和模型融合的路面平整度预测方法研究[D]. 西安: 长安大学, 2023.
- [19] 许书展. 基于智能算法的路面平整度预测研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2023.
- [20] 周梦梦. 基于LTPP的连续配筋混凝土路面平整度预测模型研究[D]. 北京: 中国矿业大学, 2023.
- [21] 黄凯枫, 刘庆华. 基于卷积长短期记忆网络的国际平整度指标预测[J]. *计算机与数字工程*, 2024, 52(1): 111-115.
- [22] 张超东, 黎剑安. 基于增秩 Kalman 滤波的动态荷载识别和结构响应重构[J]. *应用数学和力学*, 2021, 42(7): 665-674.
- [23] 颜全哲, 卓卫东, 王志坚, 等. 利用动态称重技术的福建省重载交通公路车辆荷载模型[J]. *福州大学学报(自然科学版)*, 2021, 49(3): 421-428.
- [24] 孟垂进. 基于WIM数据的公路桥梁车辆荷载时间演变特性及荷载效应研究[D]. 湘潭: 湘潭大学, 2024.
- [25] 阮陆权. 基于WIM数据的高速公路桥梁汽车荷载动态模型和限载分析[D]. 湘潭: 湘潭大学, 2024.
- [26] 李林春. 基于长期WIM数据的公路桥梁车辆荷载模型及效应研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2023.
- [27] MA X, QUAN W, DONG Z, et al. Dynamic response analysis of vehicle and asphalt pavement coupled system with the excitation of road surface unevenness [J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2022, 104: 421-438.
- [28] CUI X, LI X, HAO J, et al. Dynamic response of unsaturated poroelastic ground underlying uneven pavement subjected to vehicle load [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2022, 156: 107164.
- [29] WANG T, DONG Z, XU K, et al. Numerical simulation of mechanical response analysis of asphalt pavement under dynamic loads with non-uniform tire-pavement contact stresses [J]. *Construction and Building Materials*, 2022, 361: 129711.
- [30] 张璐, 冯东明, 吴刚. 基于LSTM网络的车辆动态荷载识别方法[J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2023, 53(2): 187-192.
- [31] 李航, 邬晓光, 张彦飞, 等. 重载交通路段公路车辆荷载模型及其效应研究[J]. *建筑结构*, 2023, 53(S1): 900-905.
- [32] 焦美菊, 郝建名, 陈露丹, 等. 基于长期监测的车辆荷载效应时变极值预测[J]. *郑州大学学报(工学版)*, 2023, 44(6): 105-111.
- [33] 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, 2011.
- [34] 杨建伟. 基于视频分析的动态称重系统精度补偿研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2024.
- [35] 乔可鑫. 基于光纤传感与视觉融合的桥梁式动态称重方法研究[D]. 西安: 长安大学, 2023.
- [36] 葛宗恩, 吴才章, 司延召, 等. 基于云平台的车辆动态称重及监测系统研究[J]. *山东农业大学学报(自然科学版)*, 2024, 55(2): 238-243.
- [37] 袁科, 许素安, 富雅琼, 等. 基于WOSA-BP的车辆动态称重算法研究[J]. *传感技术学报*, 2024, 37(1): 50-58.

- [38] KONG X, ZHANG J, WANG T, et al. Non-contact vehicle weighing method based on tire-road contact model and computer vision techniques[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2022, 174: 109093.
- [39] 杨萌. ETC货车动态称重WIM三维传感器结构“3D动态衡”及其市场应用的探讨[J]. *衡器*, 2023, 52(7): 25-29.
- [40] 高晓龙, 高爱章, 李刚, 等. 基于PC的窄条式车辆动态称重系统研究[J]. *数字制造科学*, 2023, 21(3): 193-198.
- [41] 罗检民, 罗珩馨, 贺华, 等. LY-T9车载智能动态称重系统在重型货运车辆治超的应用研究[J]. *衡器*, 2023, 52(6): 36-41.
- [42] 陈磊. 基于位移传感器的车载动态称重系统开发[D]. 十堰: 湖北汽车工业学院, 2023.
- [43] 乔欢波. 新型车载称重系统的设计与开发[D]. 淄博: 山东理工大学, 2024.
- [44] 王羽欣. 基于光纤光栅的车辆动态称重传感器的设计[D]. 武汉: 武汉工程大学, 2023.

Research Review of Dynamic Load Considerations in Non-stationary Overload Control Dynamic Weighing

LIU Tong¹, WANG Yanhong¹, DING Liang², ZHANG Shuguang³, SONG Baohua³

(1. School of Transportation and Logistics Engineering, Shandong Jiaotong University, Jinan 250357, China;

2. Jinan Urban and Rural Transportation Bureau, Jinan Comprehensive Administrative Law Enforcement Team of Transportation, Jinan 250098, China; 3. Shandong DeLuTai Information Technology Co., Ltd., Jinan 250100, China)

Abstract: In the enforcement process of non-stationary overload control systems, dynamic weighing sensors calculate the total weight of a vehicle by measuring the axle weight as the vehicle drives over the load carrier. However, due to the road surface not being perfectly flat, vehicles generate coupled vibrations when driving on irregular road surfaces, resulting in the measured axle weight being influenced by both static load and vertical vehicle vibrations. Based on the review of road surface smoothness prediction, vehicle dynamic load research, and non-stationary overload control dynamic weighing, it is found that the impact of dynamic loads caused by road surface smoothness must be fully considered to improve the accuracy of dynamic weighing in non-stationary overload control.

Keywords: non-stationary overload control; weighing accuracy; dynamic load; road surface smoothness; dynamic vehicle scale