

# 基于多元数据感知的路面服役韧性评价技术

蒋宏,王宝辉,蔡 氧

[上海市城市建设设计研究总院(集团)有限公司,上海市 200125]

**摘要:** 随着中国道路建设由增量模式转为存量模式,道路大规模管养时代已经到来。应用感知设备获取数据和评价路面服役韧性是交通强国战略背景下的研究趋势。首先,分析了影响路面服役韧性的内、外部影响因素,评价了既有路面服役韧性评价指标的不足。在此基础上,提出了路面服役多元感知体系的构成,主要包括交通荷载感知、路表环境感知、路基状态感知和路面服役状态感知,并根据感知设备的类型,探讨了基于深度学习神经网络的输入参量、输出参量及相关技术路线。为长寿命道路研究拓展了新思路,对实现道路健康的全过程、智能化、主动式管理,提升道路基础设施韧性有一定借鉴作用。

**关键词:** 韧性城市;路面服役韧性;评价指标;多元感知体系;深度学习模型

**中图分类号:** U416

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1009-7716(2023)09-0020-05

## 0 引言

《2021年交通运输行业发展统计公报》显示,截至2021年末,全国公路总里程已达528.07万km,位列世界第一<sup>[1]</sup>。2020年全国公路养护公共财政支出决算数为885.83亿元<sup>[2]</sup>,由“建”转“管”和“养”的趋势十分明显(见图1),预计“十四五”末“管”和“养”将达到千亿规模。大规模养护时代已到来。

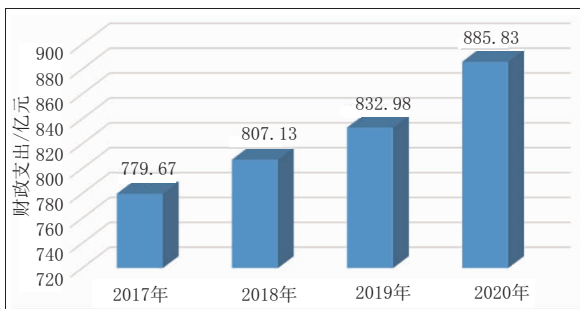


图1 2017—2020年我国公路养护公共财政支出变化

随着我国已通车各等级道路相继达到设计使用寿命,如何科学评判道路的实际健康状况变得十分重要和紧迫。国家相关部门近几年大力推进道路设施数字化、养护专业化、管理现代化、运行高效化、服务优质化,以提高道路的韧性。具体表现在以下几个方面:

### (1)多样化的评价技术指标

2007年交通运输部颁布行业标准《公路技术状

况评定标准》(JTG H20—2007)(2019年被新版标准替代),从而建立了我国公路技术状况的评价体系。公路技术状况指标由简单的“好路率”转变为更多元化的指标,如“MQI”、“PQI”以及“优等路率”、“优良路率”等。这种改变有利于推动公路技术状况评价水平的提升。

### (2)完善的道路管养科学决策体系

道路管养科学决策是道路设施管理发展的必然要求。随着公路技术状况评价体系的发展,道路管养决策体系逐渐从无到有,并不断丰富。这个体系以技术状况评价为基础,包括大中修工程比例、预防性养护比例,以及自动化检测和科学决策覆盖率等。这些改进反映了管养决策理念及技术水平的不断提升,并在实践中逐渐深化。

### (3)从被动修路到主动养路

过去,发现道路健康状况不良,往往采取被动的修路方式;现在,道路基础设施数字化,利用传感器监测或大数据分析可主动发现道路病害,并采取对策。这种转变使得道路的健康状况管理逐渐实现了从被动修路模式到主动养路模式,延长了道路的使用寿命,提升了道路行驶品质。

### (4)大数据分析及人工智能的应用

当前的科技发展阶段以数据深度挖掘及其与相关行业的融合应用为特征。在道路运营过程中,不同程度和类型的病害会影响行驶的舒适性和安全性。目前,应用深度学习模型进行路面病害目标识别成为本领域的研究热点,而道路健康分析评价与信息技术的

收稿日期:2023-06-27

基金项目:2020年度交通运输行业重点科技项目(2020-ZD3-025)

作者简介:蒋宏(1981—),男,博士,高级工程师,从事道路交通规划与设计工作。

融合发展也成为本领域未来的发展趋势。

### (5)长寿命道路设计

传统道路的设计使用年限为15~20 a,而长寿命道路的设计使用寿命可达30 a以上。为了实现路面长寿命的目标,新技术手段被引入,通过使用多种传感器获取各种数据,监测道路系统的磨损、裂缝和其他损坏情况,并提前预测维护需求。这种全新的技术手段与5G、数字化、智能化和人工智能等新一代路面技术相结合,日益成为本领域的研究热点。

## 1 路面服役韧性影响因素及评价指标

### 1.1 路面服役韧性影响因素

路面服役韧性的影响因素主要包括内部因素和外部因素。路面建成投入使用后,在外部环境的长期作用下,其服役韧性逐渐衰减,总体上是一个外因推动内因,量变引发质变的过程。

#### (1)内部因素

内部因素主要由道路本体条件决定,包括路面类型(沥青面层、混凝土面层)、路面结构设计参数、道路材料、道路施工质量控制等。在我国,道路施工质量控制是影响道路预期使用寿命的重要因素之一。

#### (2)外部因素

外部因素是指道路路面的长期使用环境,主要包括直接作用于路面的交通荷载(轴载及作用次数)、路基承载力以及气象气候等自然条件;此外还包括一些人为因素,如道路的日常养护措施等。这些外部因素目前绝大多数可通过感知设备来获取。

### 1.2 既有路面服役韧性的评价指标

2007年交通运输部颁布行业标准《公路技术状况评定标准》(JTG H20—2007),其中公路技术状况(MQI)的评定主要由路基技术指标(SCI)、路面技术状况指标(PQI)、桥隧构造物指数(BCI)及沿线设施指数(TCI)加权计算得到<sup>[3]</sup>。各权重的计算主要以人工调查获取,工作量较大。由于我国幅员辽阔,各地区的道路使用环境、气候及养护水平也存在较大的差异,因此该通用标准的普适性较差。

路面技术状况指标(PQI)从划分路段基本调查单元开始,通过对损坏程度、平整度和路面结构强度等7项指数的检测和调查,结合各道路的等级,取权重后计算得到。采用数字化技术进行道路状况评定时,传统指标已经不适应数字化的需求,需要针对数字化监测提出新的评价体系和标准。

综上所述,目前的路面技术状况评价指标仅呈现了“果”,无法明确是何种“因”导致道路状况恶化,更无法动态预测道路的使用寿命。随着物联网、大数据及人工智能的快速发展,各种传感器的应用也拓展了长寿命道路的设计理论和研究方向。

## 2 路面服役多元感知体系的构成

基于多元感知技术的路面服役韧性评价技术是一种利用多种传感器和数据分析技术对道路运行情况进行评估的技术。其基本原理是通过安装在道路上的传感器收集多种数据信息,如道路表面形貌、荷载、温度等,通过数据分析和处理,评价道路的运行状况和服役韧性。

具体来说,基于多元感知技术的路面服役韧性评价技术主要包括以下几个方面:

(1)传感器安装:在道路上安装多种传感器,如振动传感器、应变传感器、摄像头等,以收集道路运行时的多种数据信息。

(2)数据采集与处理:收集到的多种数据信息需要进行采集和处理,如实时采集、存储、清洗、预处理等。

(3)特征提取:通过数据分析和处理,提取出相关特征,如路面平整度、轴载谱、车速、温度等。

(4)建立模型:基于特征提取结果,建立相应的模型,用于预测和评估道路的运行状况和服役韧性。

(5)结果评估与展示:将模型预测结果进行评估和展示,反馈给相关部门和用户,用于养护决策和方法改进。

### 2.1 路面服役影响因素感知

路面服役韧性变化是一个动态的、复杂的过程,且影响因素较多,如果针对各种影响因素都设置传感器来采集数据,不仅前期的设备投入费用较高,而且后期的数据处理还会耗费大量的时间。比较合理的做法是,在甄选出路面服役韧性的主要影响因素后,再确定合适的感知设备。经研究总结,以下为部分重要影响因素的感知设备。

#### (1)交通荷载感知

路面结构的设计寿命是与预测当量轴载相对应的,轴载的大小和作用次数对道路服役韧性起到至关重要的作用。动态称重系统(Weight-in-Motion, WIM)(见图2)可以有效感知多车道情况下车辆的总重、轴重、通过速度等信息,极大地提高了交通荷载数据采集的效率和精度<sup>[4-5]</sup>。

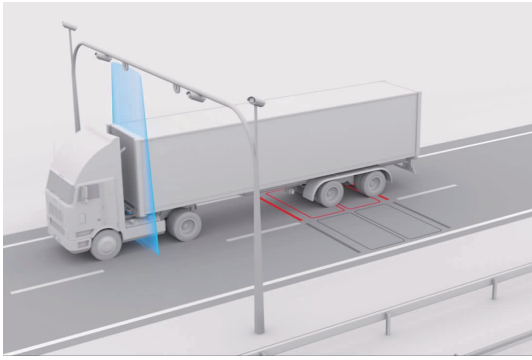


图2 动态称重系统(WIM)示意图

来源: <http://solusiindustri.com/apa-itu-sistem-weigh-in-motion-ini-penjelasan/>

### (2) 路面环境感知

道路暴露在大气环境中,其性能主要受到路表温度、降水及太阳紫外线等的影响。例如:温度会影响沥青材料的蠕变性能,进而导致车辙,诱发裂缝的发展;湿度是影响路面强度和路基承载力的重要外部因素,而叠加重交通后会加速路面性能的衰减;太阳紫外线的长期照射也会加速沥青面层材料物理性状的变化。

通过环境传感器站(Environmental Sensor Stations, ESS)可实现对路面气象要素的全天候监测以及数据记录、存储和传输。一般的环境传感器站包括监测天气、路面、水位和空气质量状况的传感器。该设备可固定或永久置于道路沿线,也可根据情况采用便携或移动式设备。如图3所示,ESS采用塔式固定并配置仪表吊杆,监测塔一般安装在距路面9~15 m的范围内,塔基应尽量与路面处于同一标高,并采用围栏保护<sup>[6]</sup>。

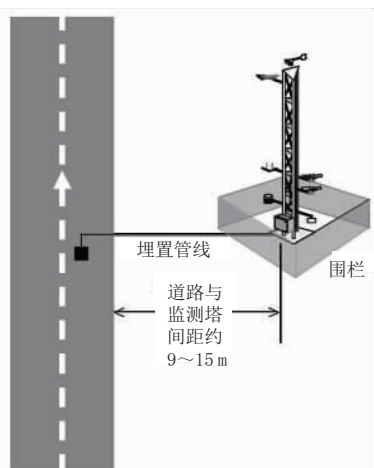


图3 相对于道路的所需塔架位置

来源: U.S. Road Weather Management Program—Sensor Siting And Weather Information Integration Projects

### (3) 路基、路面状态感知

作用于路面的荷载会通过路面结构扩散传递至

路基,路基沉降导致的附加应力达到一定程度时会打破路面结构的受力平衡,最终传导至路面,引发路面的病害。此外,不良地质条件、地下管线结构缺陷、地下构筑物施工扰动引起的土体变形等因素也会导致路基的应力状态发生变化。

由于路基病害具有较强的隐蔽性,其病害机理的形成也较为复杂,单点布设路基沉降监测传感器的可靠性和时效性较差,且大范围监测面临着高昂的成本问题。相比之下,通过搭建分布式光纤传感网络可实现对路基的广域监测,可实时感知应变、振动和温度等信息,实现对路基沉降变形的长效、动态监测<sup>[7]</sup>。此外,流量和交通荷载的变化直接影响路面的劣化速度,结构健康监测(Structural health Monitoring, SHM)将光纤布拉格光栅传感器(Fiber Bragg Grating Sensor, FBG)植入道路结构中(见图4),可提供实时交通荷载和温度引起的道路结构层底部的水平应变,由此累计的大量数据将有助于路面设计方法的革新<sup>[8]</sup>。



图4 光纤布拉格光栅传感器(FBG)

来源: [https://www.researchgate.net/figure/BVDZ-Port-of-Antwerp-2019\\_fig1\\_346898703](https://www.researchgate.net/figure/BVDZ-Port-of-Antwerp-2019_fig1_346898703) [accessed 27 Feb, 2023]

## 2.2 路面服役状态感知

以往对道路病害的判别依靠肉眼,近年来随着计算机图像运算能力的提升和深度学习模型的不断迭代,将图像目标识别相关算法应用于路面病害的检测是近几年热门的研究方向之一。其主要是通过获取道路病害的照片,利用目标检测网络模型(Faster RCNN、Yolo)对道路病害的类型进行训练和识别,经过大数据训练改进后的模型对于路面病害的识别率可以达到90%以上<sup>[9-10]</sup>。路面图像的采集可采用无人机或车辆(见图5),搭载激光和探地雷达等设备后,还可以实现对路面承载能力(激光自动弯沉

仪)、车辙深度(激光式车辙检测仪)的检测,绘制路面结构层的雷达图谱,构造路面的“CT 影响”模型。此外,针对车载雷达无法动态实时检测道路性能的缺点,可通过埋设路侧感知设备等方式,建立车(载)路(侧)联合感知体系,扩展动态数据神经元。

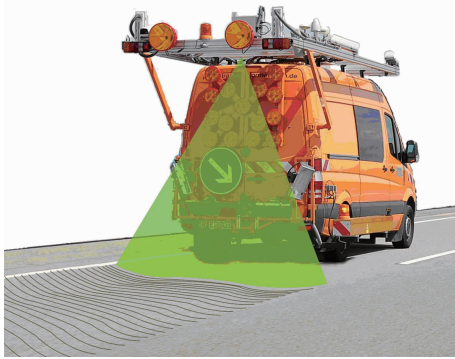


图 5 路面图像采集车

来源: [https://www.researchgate.net/figure/Mobile-mapping-system-STIER\\_fig1\\_336157008](https://www.researchgate.net/figure/Mobile-mapping-system-STIER_fig1_336157008)

### 3 路面服役韧性的深度学习预测模型

#### 3.1 路面服役韧性的一般预测模型

以往,道路使用性能的预测模型主要针对道路某一项性能指标,根据预测模型的机理可分为确定型和概率型两种类型。

确定型预测模型是以力学为基础的回归模型,反映路面结构或功能等性能随着路面材料、交通荷载、环境因素等影响因素的变化而发生变化的情况,具体还可以分为力学模型、经验模型和力学-经验模型 3 种。

考虑到各种影响因素的不确定性,概率型预测模型是根据路面某一时期的状况来预测其将来各个时刻(或时期)的变动状况的一种预测方法,其中以马尔科夫预测模型的应用最为广泛。

除以上常见的预测模型以外,时间序列模型等也用于道路服役韧性的预测。

#### 3.2 基于深度学习的路面服役韧性预测模型

深度学习是人工智能领域的一种机器学习方法,利用其人工神经网络可实现对大量数据的自动学习和预测。相比传统的路面服役韧性预测模型,深度学习在处理大数据时具有极佳的效果,且预测准确率高度依赖于数据,数据量越大其表现效果越好。深度学习模型能够自动提取数据特征,并根据数据集进行自我修正。此外,深度学习可通过神经网络的层数和节点,将输入映射到输出,能够解决复杂的数据关系,将路面性能衰减机理简化为一个“黑箱模

型”。图 6 为路面服役韧性预测模型技术路线。

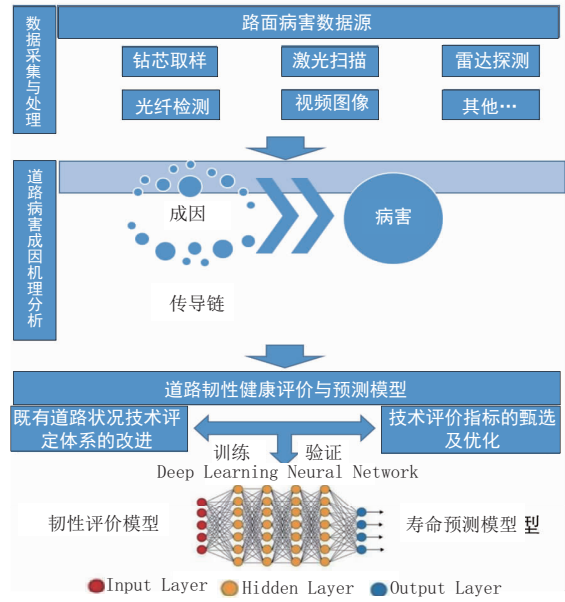


图 6 路面服役韧性预测模型技术路线图

基于感知设备获取的道路监测数据,采用神经网络方法分别定义输入参量和输出参量,建立沥青路面性能预测模型。

#### (1) 输入参量

模型输入参量的选择,首先应考虑感知设备容易获取且长期可靠稳定的数据,并剔除对模型预测结果影响不显著的变量。根据上文所述感知设备采集的类型及其特点,梳理出输入参量(见表 1)。

表 1 神经网络模型输入参量属性一览表

感知类型	输入参量	变量类型	描述
路面本体信息	面层类型	类型变量	沥青混合料的类型、材料及各种外加剂的组合
	面层厚度	数值变量	一般在 16~20 cm
	基层类型	类型变量	刚性基层、半刚性基层和柔性基层及其细分类型
	基层厚度	数值变量	一般在 20~40 cm
交通荷载感知	交通量	数值变量	每天累计通过车辆
	总质量	数值变量	车辆累计通过总质量
	轴载谱参数	数值变量	车辆各级轴载的作用次数
路面结构内部环境感知	等效作用轴次	数值变量	采用等效单轴载荷(ESAL)衡量
	结构内温度	数值变量	面层、基层和其他组成部分在不同深度或位置处的温度
其他感知器数据	结构内湿度	数值变量	路面不同深度或层次中测量湿度水平
	路基变形沉降	数值变量	长期变形和累积变形
	养护性质	类型变量	中修、功能性大修、结构性大修等
	养护周期	数值变量	距建成通车的时间间隔

路面的本体信息主要来源于设计资料,反映机动车道的路面结构、上下面层采用的沥青混凝土类型及其厚度、基层和垫层的材料及厚度等,实际设计中路面设计参数一般根据道路等级确定。交通荷载的数据通过 WIM 收集后,最终可将其换算为各种轴型的轴载累计频率,或通过轴载谱模型拟合<sup>[11]</sup>。路表环境感知通过 ESS 获取,其中值得关注的是路面含水量,它影响路面结构的强度、压实度、刚度和稳定性。

#### (2) 输出参量

输出参量应是一个能够反映路面技术状况的指标,可根据地域交通特点和实际情况选择单一性或综合性指标。通过视频采集和激光扫描等技术手段,获取路面病害数据和路面构造深度等信息,最终通过标准化和归一化将其转换为一个修正的 PQI 指标。

## 4 结 语

基于多元感知技术的路面服役韧性评价技术具有数据全面和准确性高、实时性和可操作性强等优点,但目前路用感知技术的应用还存在着感知设备应用设计和实施标准不统一、感知设备稳定性和耐久性较差、感知数据的多源异构性等问题<sup>[12]</sup>。但是,随着我国交通强国战略的持续推进和不断深入,人工智能、大数据、云计算、新材料、物联网等技术的更新迭代,将新型技术引入传统交通基础设施建设和改造中,通过数字化手段,形成传统道路工程与现代数据科学工程的耦合,实现对道路健康的全过程、全要素、智能化、主动式管理,是提升道路基础设施韧

性的重要手段,也是长寿命道路工程设计及管养技术发展的必然选择。

#### 参考文献:

- [1] 中华人民共和国中央人民政府.2021 年交通运输行业发展统计公报[EB/OL].(2022-05-25)[2023-01-12].[http://www.gov.cn/shuju/2022-05/25/content\\_5692174.htm](http://www.gov.cn/shuju/2022-05/25/content_5692174.htm).
- [2] 前瞻产业研究院.2022 年中国公路养护行业市场现状及发展前景分析公路建设未来将带动公路养护千亿市场发展[EB/OL].(2021-11-10)[2023-01-12].<https://baijiahao.baidu.com/s?id=1716032273023590926>.
- [3] JTG H20—2007,公路技术状况评定标准[S].
- [4] 邓金明.多通道车辆动态称重系统与实现研究[D].成都:电子科技大学,2021.
- [5] 赵千.基于多传感器的路面动态称重系统研究[D].北京:北京科技大学,2021.
- [6] PAUL A,LYNETTE C,ANDREW D. U.S. Road Weather Management Program – Sensor Siting and Weather Information Integration Projects [EB/OL].(2022-05-04)[2023-01-12].<https://ops.fhwa.dot.gov/weather/resources/publications/sirwec06/index.htm>.
- [7] 韦超群,邓清禄.基于分布式光纤技术的路基沉降监测应用研究[J].工程地质学报,2020,28(5):1091-1098.
- [8] Braunfelds J, Senkans U, Skels P, et al. Road Pavement Structural Health Monitoring by Embedded Fiber-Bragg-Grating-Based Optical Sensors[J/OL]. Sensors, 2022, 22(12):4581[2023-01-12].<https://doi.org/10.3390/s22124581>
- [9] 沙爱民,蔡若楠,高杰,等.基于级联卷积神经网络的公路路基病害识别[J].长安大学学报(自然科学版),2019,39(2):1-9.
- [10] 郎洪,温添,陆键,等.基于深度学习的三维路面裂缝类病害检测方法[J].东南大学学报(自然科学版),2021,51(1):53-60.
- [11] 施玉芬.江苏省高速公路交通量与轴载分布特性研究[D].南京:东南大学,2010.
- [12] 刘朝晖,柳力,李文博,等.融合感知特性的道路铺装结构设计体系研究综述及应用展望[J].中国公路学报,2022,35(7):18-35.

## 《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴,为您提供平台,携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

投稿网站:<http://www.csdqyfh.com> 电话:021-55008850 联系邮箱:cdq@smedi.com