

面向结构安全的公路道桥多源数据融合识别系统研究

李鹏¹ 陈柯¹ 刘鲁生¹ 王鹏² 张井先³

1 黑龙江省交通规划设计研究院集团有限公司, 黑龙江哈尔滨, 150000;

2 黑龙江路升公路科技开发有限公司, 黑龙江哈尔滨, 150000;

3 黑龙江省交投公路建设投资有限公司, 黑龙江哈尔滨, 150000;

摘要: 随着交通基础设施大规模发展, 公路道桥构造安全问题日益突出, 传统的检测手段存在数据量及实时性和精确性不高的缺陷。多源数据融合技术为完善公路道桥结构安全监测质量提供新思路。本文主要考虑满足公路道桥结构安全需求的多源数据融合辨识系统, 对多类型数据采集方式、预处理与融合算法、结构安全辨识和评价一体化途径进行详细的讨论, 基于多种、时间空间上多层次和多类型多层次融合辨识构建融合辨识框架, 对公路道桥结构状态实现实时跟踪和定位, 提高交通安全基础设施安全防御。该研究具有重要的理论意义及应用价值。

关键词: 公路道桥; 结构安全; 多源数据融合; 动态评估; 智能监测

DOI: 10.69979/3041-0673.26.01.008

引言

当今, 我国的公路与道桥工程在城市化的发展进程中具有十分重要的作用, 公路与道桥在进行公路道桥施工的工作中, 一流的施工质量与合理的施工速度有利于公路道桥的建设效果, 并显著提升城市的社会效益和经济效益, 促进城市的建设发展。随着交通基础设施建设大规模发展, 公路道桥结构安全问题日趋严重, 常规检测信息覆盖范围有限, 即时性与准确性不足, 难以满足现代化运维管理的需要。多种数据源(传感器网络、无人驾驶飞机观测、光学雷达、地形测绘等)所获得的信息, 可实现对公路道桥建筑物状态的全面、动态和及时感知, 进一步改善识别精度和预警能力, 提升对潜在风险的响应速度。

1 公路道桥结构安全监测的重要性

1.1 保障公路道桥结构长期稳定运营

公路道桥是交通运输网络的基础, 桥隧持续稳定工作的运行对公路地区交通畅通和经济稳步发展具有重要的意义。在长期使用过程中道桥结构会随着承受载重变化、自然老化和材料磨损等原因出现疲劳退化现象, 若不及时掌握道桥的自身情况则很有可能造成道桥裂缝的加剧、疲劳开裂等安全事件, 建立起有效的结构健康评估系统可实现对于关键部位的压力应变、运动位移、震动响应等方面的连续动态监测, 加深对结构变化趋势的认知, 制定合理预防性养护修理措施延缓结构降解过程, 避免因为维护的滞后性造成较大的后果。通过多元信息融合技术手段使时间信息和数据信息更加全面精

确化, 更好地把握路桥全生命周期的管理数据和决策支撑, 实现设施稳健、稳定、可持续的使用。

1.2 提升交通基础设施安全防护水平

随着公路道桥的使用率的提高, 承载力、疲劳度所带来的危害也越来越大, 因此结构安全性也会随之增长。建立可靠的结构健康监测体系可以帮助人们准确把握设备的状况且预知故障, 极大提升了公路道桥的防灾能力。通过数据多样化的方式结合, 将振动监测、位移监测、裂纹检测等数据来源有效地整合起来, 形成全区域、实时的状态感知网络, 提高了对异常情况的辨识灵敏性与识别正确率。完备的结构健康检查体系加强了公路道桥的防灾能力以及整个交通系统的弹性以及应变能力, 保证交通的安全可靠运转。

2 面向结构安全的公路道桥多源数据融合识别系统构建路径

2.1 多源数据采集体系构建路径

构建多源信息采集体系作为识别系统基础, 需要涵盖所有对结构状态相关的数据, 采用光纤光栅传感器、应变计、加速度片、位移传感器、地质雷达、无人机航测等多种检测手段进行综合获取公路道桥的变形、荷载、振动与表面损害的状况。合理地布置传感器系统可以实现重要受压部位的动态监测, 能够获取监测数据的空间范围精确性和时间精确性。利用无线通信网络和5G通信网络进行实时数据的传输和远程控制。例如江苏某横跨河道的特大桥, 通过部署一套光纤光栅传感器、高清相机及激光测距仪组成的多源信息采集装置对大桥主

梁在大风及大车荷载下产生的动力效应进行动态监测，采用这种综合信息采集方式可以较好地监测到公路道桥的结构状态变化，能够为后续数据的融合和结构健康评估提供详尽、准确的基础数据。

2.2 数据预处理与清洗技术路径

对多源数据收集而言，必然存在一定的噪声、缺失信息以及反常情况，在进行数据处理的过程中有必要运用一些相应的方法进行数据的预先处理以便于保证数据的连续性与真实性。常用的数据预处理方法有数据协调、数据填充、数据滤波以及数据标定等，其中数据标定便是应用最为广泛的，即为保证某些不同维度的数据之间能在同一个维度上进行比较而做出的数据尺寸的调整，防止由于量纲之间的差别而导致的后续分析受到影响。标准化公式如下：

$$x' = \frac{x - \mu}{\sigma}$$

其中， x 为原始数据， μ 为均值， σ 为标准差。通

过标准化，可以使得数据的均值为 0，标准差为 1，从而提高数据的稳定性和后续分析的精度。数据清洗过程中的另一个关键步骤是利用小波变换、卡尔曼滤波等方法去除噪声，确保输入的数据具有较高的质量，为后续的多源数据融合和分析提供准确的基础。

2.3 多源数据融合算法设计路径

通过多源数据融合算法，将多种传感器获取到的数据相结合，主要运用多源数据融合算法中深度卷积神经网络 (CNN) 和长短期记忆神经网络 (LSTM) 的算法，以此提升道路桥梁结构体健康状态的监测，提升准确率。这种算法融合多种设备的压力传感器、加速度传感器的输入，并依托深度学习方法挖掘并综合不同数据源中最重要的信息，以便优化检测结果。针对裂纹检测中存在的多层次规模的难点，设计了裂纹检测的高效检测流程，模型流程如图 1 所示，该检测流程首先采用 CNN 获得特征，然后再 SPP 模块中对不同大小的特征值进行调整，接着用 SE 注意进行特征通道关键重要性和减少噪音。

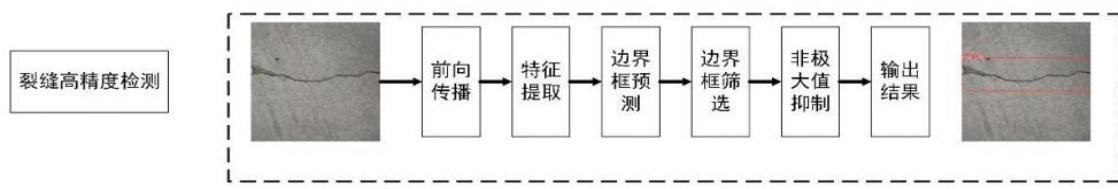


图 1 裂缝高精度检测流程

该数据融合算法能够有效提高损毁的检测精确度，而且在各种不同的情况中都能够保持常态化的运作。通过不断的机器学习，机器能够根据实时数据做出自我修正以便应对环境以及材料老化的各种因素。经过长时间的使用以后，这种方法将不断地优化自身，使得道路桥梁在整条人生命周期都能被监控及时预警，很大程度上保障了其结构安全。

2.4 结构安全识别与评估系统集成路径

整合系统的运用对保障建筑物结构安全性以及动态评估工作至关重要，因此需要一个对数据采集、分类、融合、分析和可视化的整合平台，它可以通过物联网技术、大数据技术、人工智能技术建立统一的数据管理与分析框架，实现在线接收、分析、处理的结果的智慧行动。它可以研究状态发展趋势、确定损伤部位、预测剩余寿命、发出危急预警，并可满足多层级用户进行互动以及决策辅助的能力。例如以浙江省某主干道桥为例，已经建立基于 BIM 模型构建、实时监测、AI 分析的智能平台，实时展示建筑健康状态和维修决策建议，缩短预警响应时间、增强维养成效。系统整合，形成高效的闭环式结构安全保障体系，实现了公路道桥结构智能检测、

科学评估、预控式营运，促进交通运输基础建设智慧化变革和安全保障。

3 面向结构安全的公路道桥多源数据融合识别系统的实施策略

3.1 多源数据采集与实时监测策略

多源数据采集与实时监测是基础设施信息化建设的基础，主要通过多种信息源数据采集技术及实时感知技术来实现。传感器类型及规格包括应变、加速度、温度、位移及裂缝仪等各种传感器，以及无人机激光雷达、地质雷达等多种辅助传感器，形成地空联合多源数据采集网络。利用 5G 通信技术和边缘计算技术，实现快速高效的数据即时上传和初处理，同时实现数据采集及时性与全面性。以深圳市跨海大桥为例，在该工程部署了上万个传感器，还利用无人机巡航对全桥位移、压力、裂纹等进行实时监控。通过建立全面的多源感知网络，实现实时监测结构的异常增长过程，实现后期监测数据的结合及变化分析，确保公路道桥的长期安全运行。同时，可以进一步提升数据检测精度和感知的时效性，为突发情况下的数据及时响应提供数据支持。未来，结合

物联网和大数据平台，监测系统可实现更加智能化的异常识别和灾害预警功能，提升整体监控水平。

3.2 数据融合与特征识别策略

为提升结构安全精度，要求整合来自不同渠道的信息并识别其属性，应对各种各样数据信息、时间一致性、空间分辨率等的差异。因此，还需要设计通用数据规范体系与多级级联模式，提升信息补充和滤噪特性。通过深度学习及时空分析技术，从各传感器捕获的信息中提取数据的主要特征，充分挖掘与结合多源数据信息。比如重庆某山地高速公路道桥隧道群监测任务，使用卷积神经网络（CNN）及图形神经网络（GNN）相结合的多源数据信息融合的建模方式，融合压力变形数据及震动特征，大大提升裂纹扩展与疲劳破坏检测精度。该系统优点能自主灵敏捕获少量异常信息，且能提供强有力的数据支持和特征基础用于结构健康状态评估和预警发布。因该模型的级联结构自带学习特性，能自主适应复杂环境变化保持较强适应性和识别特性。基于持续学习机制，该融合策略还可根据实时监测数据不断优化，增强系统长期运行的稳定性与准确性。

3.3 结构安全状态动态评估策略

动态评估的目的是实时数据采集和融合后更新公路和道桥结构的实际健康水平，提供准确的诊断和预警做出决定。要开发这样的评估架构，必须采用来自各个来源的数据时态轴和机器学习预测、状态空间建模和风险分析。这个系统可以根据数据实时计算损坏度量、疲劳寿命和剩余承载能力，动态地修正结构的安全等级。例如，江苏省的一个独特的道桥，监控系统使用基于长期短时记忆神经网络（LSTM）的时间序列预测模型的组合，然后结合使用实时间应变信息和裂纹扩散信息，准确跟踪道桥结构状态的动态演化并预测剩余使用寿命。动态评估不仅加深了对于公路道桥老化知识的理解，而且在损害初始就能够准确地预报，有助于制定科学的决策和资源的合理分配，总体提升公路和桥墩结构的实际使用安全性。动态评估技术为公路道桥维护管理的决策提供了有价值的预测参考，迈向预防维护。

3.4 系统智能化运行与维护策略

系统智能化的运行和维护有利于确保系统连续高效、稳定性地运行。为了达到这个目标，需要选择一种自我诊断系统状态、自适应系统功能需求和自我修复问题等的系统智能化运行方案，以保证系统连续长时间地收集数据、提供服务。通过物联网、大数据、人工智能等技术可以实现维护制度智能化，可提供远程实时监控、

提前预报和自动更新等服务，减少人力介入的需求以及营运成本。浙江省某套智能化公路桥梁健康监测系统采用了自学习机制和云计算智能管理中心，可以使系统自动识别传感器的故障情况，处理网络故障，并对自身的监测方法进行相应的调整，这就导致了系统能够了解自身的情况并在有需要的时候作出决定，该智能化运筹及维护方式能够提高整个系统的可靠性及其应急反应的速度，也减轻了日常维护的工作量，提高了对复杂情况工作状态适应的能力，这对于道路桥梁的健康管理而言是一个重要组成部分。

4 结语

面向结构安全的公路道桥多源数据融合识别系统，打破了传统的结构健康监测手段的局限性和不够全面、不及时的特点，构建了多层次的数据采集平台，对数据进行了有效预处理，给出了最佳的数据整合策略，并提出了动态结构健康指标体系，使结构健康状态可以智能感知、实时预警，并且被证明是实用可靠、可靠有效的。实验结果表明了其在实际工程中的有效性，具备较强的应用性以及普适性，有利于全生命周期的公路道桥管理，有利于自然灾害防控。随着人工智能、物联网技术以及大数据的不断发展，该多源数据融合识别系统会更加完善，公路道桥监控必将向着智慧化、精细化、可持续化方向进一步发展，公路道桥的基础设施安全将得到进一步提升。

参考文献

- [1] 孟维伟, 郭丽萍, 张兴宇. 雷达与视频融合的交通信息感知技术研究[J]. 城市道桥与防洪, 2022(10): 242-244.
- [2] 刘恋. 公路道桥混凝土结构施工技术与优化措施[J]. 工程建设(维泽科技), 2023, 6(8): 152-154.
- [3] 张新敏. 道桥建设中的道桥结构设计要点初探[J]. 门窗, 2022(14): 3-3.
- [4] 朱瑞祥. 公路道桥沉降段路基路面的施工技术[J]. 工程管理, 2022, 2(3): 27-28.
- [5] 朱荣. 基于道桥结构安全可靠性的车辆载重限值研究[J]. 城市道桥与防洪, 2021(6): 7-7.

作者简介：李鹏(1982.02-)，男，汉族，黑龙江省哈尔滨市人，正高级工程师，工程硕士，研究方向：公路数字化信息采集、AI深度学习算法、智能视觉识别、透视变换技术等，建设涵盖在役公路基础信息采集、治理、分析、仿真、可视化的高精度数字化技术体系。