

人工智能在桥梁养护管理中的应用研究

张文君

浙江智建科技股份有限公司, 浙江 台州 317600

[摘要]人工智能技术的快速发展为破解传统桥梁养护管理瓶颈提供了创新路径。文中分析了人工智能赋能桥梁养护管理的重要意义,深入剖析了当前存在的传统检测方式效率低、病害识别准确性不足、监测数据利用率不高、养护决策科学性有待提升以及智能化管理体系建设不完善等问题。中国公路桥梁总量已突破百万座,其中中小跨径桥梁占比超80%,这类桥梁长期面临“监测成本高、覆盖范围窄、人工巡检难”的痛点。文章从构建智能监测体系、提升病害自动识别能力、建立状态预测与预警机制、推进数字化平台建设以及完善智能养护管理机制五个维度,提出了人工智能赋能桥梁养护管理的应用策略。

[关键词]人工智能;桥梁养护;智能监测;病害识别;预警机制

DOI: 10.33142/sca.v9i6.19794

中图分类号: U448.27

文献标识码: A

Research on the Application of Artificial Intelligence in Bridge Maintenance Management

ZHANG Wenjun

Zhejiang Zhijian Technology Co., Ltd., Taizhou, Zhejiang, 317600, China

Abstract: The rapid development of artificial intelligence technology provides an innovative path to break through the bottleneck of traditional bridge maintenance management. The article analyzes the important significance of empowering bridge maintenance management with artificial intelligence, and deeply analyzes the current problems of low efficiency of traditional detection methods, insufficient accuracy of disease identification, low utilization of monitoring data, need to improve the scientificity of maintenance decisions, and incomplete construction of intelligent management systems. The total number of highway bridges in China has exceeded one million, with over 80% of them being small and medium span bridges. These bridges have long faced pain points such as high monitoring costs, narrow coverage, and difficult manual inspections. The article proposes application strategies for empowering bridge maintenance management with artificial intelligence from five dimensions: building an intelligent monitoring system, enhancing the ability to automatically identify diseases, establishing a state prediction and warning mechanism, promoting the construction of digital platforms, and improving intelligent maintenance management mechanisms.

Keywords: artificial intelligence; bridge maintenance; intelligent monitoring; disease identification; early warning mechanism

引言

桥梁属于交通基础设施的关键部分,桥梁的安全运行同经济社会发展以及人民生命财产安全有着直接联系。随着服役年限的增加以及运营荷载的不断增大,大量的桥梁处在了病害高发期,结构性能退化风险也越来越大。到2030年中国要对所有高速公路、国道、省道普通桥梁进行监测覆盖,预计涉及桥梁的数量会超过50万座,一场关系到基础设施安全和智慧化转型的大型工程正在全面展开。但是传统的养护管理依靠人工巡查和定期检测,效率低、反应慢,不能满足不断增长的安全保障需求。重庆交通大学发布了国内第一个桥梁管养大模型,把200多本国家和地方的规范文件以及专业教材深度融合起来,并且

挖掘出了3000多座桥梁多年检测报告,从而创建起了包含5万多个三元组的桥梁管养领域最大的知识图谱。怎样把人工智能系统性地融入桥梁养护管理的全过程之中,已经成为行业亟待解决的重要问题。

1 人工智能赋能桥梁养护管理的重要意义

人工智能赋能桥梁养护管理有诸多战略价值。首先可以大大提高养护效率。传统的手工巡检受人力、作业环境等限制,覆盖面小、周期长、成本高,而以人工智能为核心的智能巡检系统可以实现全天候、全方位的自动检测,大大减少了人工的使用。广西交投科技自主开发的“人工智能+养护”技术中,无人机装载着AI动态生长算法系统对路面病害实施准确判定,促使养护工作由“人海战术”

转向“智能预警”。其次可以降低养护成本。桥梁轻量化监测方案主要针对位移、倾角、振动等关键“生命体征”，用低成本、易部署的智能设备把单桥监测成本大大降低，打破中小桥梁监测成本壁垒。其次可以提高养护决策的科学性。基于长短期记忆神经网络（LSTM）的公路桥梁技术状况退化预测方法，可以从构件层面上建立主梁退化模型，预测结构性能的发展趋势。另外，人工智能赋能是行业数字化转型的大势所趋，智能化技术所催生的数字孪生、闭环决策机制给桥梁全生命周期的风险预警和预防性养护赋予了科学依据。

2 当前桥梁养护管理存在的问题

2.1 传统检测方式效率较低

传统的桥梁检测大多依靠人工目视巡查以及定时的仪器检测，效率低是最大的障碍。人工巡检的作业周期长、成本高，受检查人员经验水平及作业条件的限制，不能对桥梁结构进行全方面的检测。大跨度桥梁高空部位及隐蔽结构，人工检测存在明显的盲区，大跨度桥梁桥面距谷底垂直高度可达几百米，人工巡检风险大、周期长、成本高，单次作业耗时长，巡检覆盖率低。传统的检测手段在恶劣天气下不能正常使用，检测计划被迫中断，不能得到连续的监测数据序列。

2.2 病害识别准确性不足

病害识别的准确程度直接影响到桥梁安全评定以及养护决策的好坏。传统检测中病害识别主要是依靠检查人员目视判断和简单的仪器测量，主观性强、一致性差。不同的检查人员对于同一个病害做出的判断会存在较大的差别，裂缝宽度、锈蚀程度等主要指标的认定标准很难统一^[1]。另外一些隐蔽性的病害，比如混凝土内部空洞、钢材内部裂纹等，依靠外观检查很难发现，直到病害发展到表面才造成不可逆的结构损伤。桥梁结构长期使用后会形成各种复杂的病害，传统的检测手段精度不高、耗时长，而激光雷达扫描、红外热成像等新的检测技术虽然可以克服接触式检测的不足，但是算法模型还需要进一步改进。

2.3 监测数据利用率不高

桥梁监测系统在长时间使用后会产生大量的结构响应数据，但是利用率很低。多源数据之间存在着格式不统一、接口不兼容的现象，不能进行有效的融合以及关联分析。目前桥梁管养数据分析存在着数据标准不统一、数据孤岛、模型不成熟、人才缺乏等问题。数据分散、碎片化造成养护管理人员很难从海量数据里找出重要信息，单一的数据源评价方式不准确，检测数据和监测数据也常常是两块分开的，不能形成一致的评价标准。历史数据缺少系

统的归档管理以及深入挖掘，不能从中提炼出结构性能退化的一般规律，监测数据的价值不能得到充分发挥。

2.4 养护决策科学性有待提升

目前桥梁养护决策大多依靠管理人员的经验来作出，缺少系统的量化评价手段。养护计划大多按照固定的周期来执行，而没有根据桥梁的技术状况进行动态的调整，“过度养护”和“养护不足”并存的现象时有发生。桥梁养护管理过程中检测数据利用率低，养护方案的科学性、经济性不能得到保证，急需建立以多源数据为基础的养护决策优化模型。在预算有限的情况下，怎样合理分配养护资源、确定养护优先级、选择最优的维修加固方案，缺少量化的决策支持工具。传统的决策模式是主观的、滞后的，对养护资金的使用效率产生影响，也加大了桥梁运营安全的不确定性。

2.5 智能化管理体系建设不完善

虽然人工智能技术在桥梁养护上已经使用起来，但是从整体上看，智能化管理体系还处在起步阶段，存在明显的碎片化特点。大多数桥梁管理机构没有建立统一的智能化管理平台，传感器布置、数据传输、分析处理、决策反馈等各个环节之间不能很好地衔接起来，还没有形成完整的闭环管理流程。目前各地桥梁监测系统的思路大体上相同，监测预警和报警系统没有分开设计，在实践中存在着大量的误报现象。缺少有关智能管理系统相关的技术标准和规范体系，各个设备之间、各个系统之间兼容性差，数据共享、业务协同难^[2]。既懂桥梁工程又会运用人工智能技术的复合型人才严重缺乏，在桥梁数量和管养数据急剧增加的时候，传统的单领域人才已经不能满足智能养护的要求，阻碍了智能化管理体系的创建与运转效能。

3 人工智能在桥梁养护管理中的应用策略

3.1 构建桥梁智能监测体系

建立包含桥梁全部结构的智能监测体系，是人工智能技术给养护管理带来的第一项工作。从传感网络上讲，应该布置各种各样的智能传感器，例如静力水准仪、振弦传感器、振动传感器等，对桥梁的沉降、位移、应变、裂缝、振动等重要参数实施即时观测。基于物联网、大数据、云计算和 BIM+GIS 三维可视化融合技术搭建起来的桥梁健康监测平台，在桥梁的重要部位安装传感器，可以对重要的参数实行全天候的自动监测。数据传输上要创建起基于物联网的高速数据传输网络，完成监测数据的及时回传和云端保存，塑造起涵盖“感知、传输、分析、决策”全部环节的智能监测体系。针对大多数是中小跨径桥梁的实际情况，桥梁轻量化监测应该遵循少指标、高集成、易部署

的原则，主要关注位移、倾角、振动等主要的“生命体征”，用低成本、易部署的智能设备来实现对桥隧状态的高效感知。

3.2 提升桥梁病害自动识别能力

以人工智能为驱动力的病害自动识别技术是提高桥梁检测效率和精度的主要方式。在图像采集方面，要充分发挥无人机航测、高清摄像、红外热成像等各类感知设备的作用，得到桥梁外表和内部结构高质量的影像资料。从算法模型上来说，应该用深度学习的目标检测算法来对裂缝、剥落、露筋等病害进行自动分割和识别。采用 YOLOv7_Seg 实例分割网络并对其进行轻量级可变形卷积改进，可以扩大小目标缺陷的感受野，增强小尺度缺陷特征，实现露筋、破损、蜂窝麻面、裂缝四种桥梁病害的分割和识别。无人机组网遥感巡检结果表明，AI 识别系统比传统的手工识别效率高很多，可以准确地识别出螺栓缺少、钢结构生锈等病害。还要建立病害特征库，不断积累、标注各种病害样本，从而不断改进识别模型的准确度和泛化能力。

3.3 建立桥梁状态预测与预警机制

桥梁状态预测和预警机制属于桥梁养护管理由被动养护向主动预防转变的重要环节。从状态预测的角度来说，应该建立以深度学习为基础的桥梁技术状况退化预测模型。基于长短期记忆神经网络（LSTM）的公路桥梁技术状况退化预测方法，可以从构件层面建立预应力混凝土箱梁桥主梁的退化模型，用回归分析理论建立桥网退化模型。预警方面要创建分级预警体系。建议创建如下的分级预警体系。

预警机制要实现动态预警、及时介入调查和处理，依靠分级分类管理防止误报、漏报的发生，从而保证风险在萌芽阶段得到有效控制。

3.4 推进桥梁养护数字化平台建设

数字化平台是各种智能养护技术集成的平台。首先要

创建 BIM+GIS 一体化的数字化底座，把桥梁三维模型、监测数据、检测记录等统一管理、可视化展示。以 BIM、数字孪生为依托的桥梁结构健康监测平台，对桥梁的沉降、位移、应变、震动、裂缝等参数实施实时监控并加以记录，从而创建起桥梁健康监测数字孪生体，而且配备了精确的预警告警系统。其次，数字化平台要支持多终端访问，平台有综合监管大屏、业务管理端、微信小程序等终端，综合监管大屏用直观图表展示桥梁健康评价结果、告警统计信息、传感器状态，小程序使管理人员可以在移动设备上及时收到告警信息并处理^[3]。平台还要逐渐将交通流量、气象环境等各类数据整合起来，对桥梁的运行环境进行全方位的感知，依靠多源数据融合以及数字孪生技术，达成对桥梁主要结构和隐蔽部分无遗漏、高精度的全方位监测，创建起全流程闭环的“检-监-养”一体化智慧管养体系。

3.5 完善智能养护管理机制与人才培养体系

智能养护管理机制以及人才培养体系，才是保证人工智能技术可持续应用的保障。从管理机制上来说，要创建起“感知、分析、决策、执行”的闭环养护管理流程，制订出包含桥梁全部生命周期的智能化养护管理制度。还要创建数据驱动的绩效考评机制，把智能监测数据应用效能、预警反应及时率、病害识别准确率等纳入养护单位的考评指标体系，形成评价、反馈、改进、再评价的闭环管理。在人才培育上要创建分层分类的培训体系，对技术人员开展 BIM 建模、AI 图像识别、数据处理等专业的培训。桥梁智能维养微专业把物联网、大数据、人工智能这些新一代信息技术同土木工程、计算机科学、数据科学等多学科优势结合起来，培育出具有跨学科思维和技能的复合型人才^[4]。应该依靠校企合作、产教融合来培育既懂桥梁工程又会运用数字技术的复合型人才。采用 DeepSeek 等人工智能技术创建本地知识库，给桥梁养护管理工作赋予科学准确的决策支撑，从根本上消除人才匮乏以及知识缺乏的状况。另外，要积极推进行业技术标准的制定工作，给人

表 1 桥梁状态分级预警体系

预警等级	状态描述	阈值参考指标（示例）	响应措施	责任主体	处置时限
蓝色预警	轻微异常，结构状态稳定	挠度超限<5%、裂缝宽度<0.10mm	加强日常巡查，加密监测频率	日常养护班组	7d
黄色预警	明显异常，需密切关注	挠度超限 5%~12%、裂缝宽度 0.10~0.18mm	组织专项检测，评估发展趋势	桥梁养护工程师	3d
橙色预警	严重异常，存在安全风险	挠度超限 12%~20%、裂缝宽度 0.18~0.25mm	限制交通荷载，制定维修方案	养护管理部门	24h
红色预警	危险状态，需紧急处置	挠度超限>20%、裂缝宽度>0.25mm	封闭交通，启动应急抢险加固	应急处置领导小组	2h

工智能在桥梁养护领域的大规模使用提供支持。

4 结语

人工智能技术深度应用之后,桥梁养护管理由以前的经验驱动转变为现在的数据驱动、主动预防。本文对目前桥梁养护管理检测效率低、病害识别不准确、数据利用率不高、决策科学性差、智能化体系不健全等主要问题进行了系统的分析,从创建智能监测体系、提高病害自动识别水平、建立状态预估和预警体系、创建数字化平台、完善管理机制和人才培育这五个方面给出了应用策略。在国家“十五五”规划推动公路桥梁监测全覆盖的战略背景下,中小跨径桥梁监测系统建设的重点将从“长大桥梁”向数十万座普通桥梁扩展,人工智能赋能桥梁养护管理也从行业创新变为公路管养的刚需标配。随着 BridgeGPT 等桥梁管养大模型的不断更新和轻量化监测技术的不断普及,人工智能对桥梁全生命周期安全管理工作起到的作用将

会越来越大,是推进交通基础设施数字化转型、智慧化升级的重要技术力量。

[参考文献]

- [1]雷时.人工智能在公路桥梁养护业务应用中的研究[J].智能建筑与智慧城市,2024(6):178-180.
- [2]李贵祥,陈克,操礼军,等.人工智能技术在公路桥梁养护管理决策中的应用研究[J].工程建设与设计,2026(9):70-72.
- [3]汪开喜,梁柱,沈国栋.基于知识图谱及人工智能的桥梁康养平台研究与应用[J].中国高新科技,2023(12):23-25.
- [4]黄佑胜,周远忠.桥梁养护研究新进展[J].城市建筑空间,2024,31(2):232-234.

作者简介:张文君(1985—),男,汉族,台州玉环人,现任职于浙江智建科技股份有限公司,从事的是道路桥梁与渡河工程专业。