

边缘计算赋能桥梁结构损伤主动预警技术研究

李俊, 覃怡

广州市北二环交通科技有限公司, 广东 广州

收稿日期: 2026年9月27日; 录用日期: 2026年10月19日; 发布日期: 2026年10月29日

摘要

我国桥梁所依赖的基础设施已达到较大规模, 许多桥梁开始处于服役中后期, 其结构损伤不易察觉又可能突然发生, 管理上较难把握。以云端为中心的现有结构健康监测方法在时延、带宽及离线状态可靠性上都有一定限制, 不能很好应对主动预警的需要。边缘计算是接近数据源头的分布式计算方式, 适合前端作信息分析、特征归纳乃至预警决策, 因而对桥梁损伤主动监测是一种新思路。文章将传统健康监测的效能障碍作一归纳, 分析边缘计算的运行原理, 提出边缘-云配合的主动预警构想, 结合感知、识别、分级说明技术要点, 指出实际部署的困难和可行方向。根据研究结论可知: 边缘计算能克服集中云端的瓶颈, 使结构损伤快获知、早处理, 对桥梁全寿命周期安全有显著的理论意义。

关键词

边缘计算, 桥梁结构损伤, 主动预警, 结构健康监测, 智能感知

Research on Proactive Damage Warning Technology of Edge Computing Energized Bridge Structures

Jun Li, Yi Qin

Guangzhou North Second Ring Road Transportation Technology Co., Ltd., Guangzhou Guangdong

Received: September 27, 2026; accepted: October 19, 2026; published: October 29, 2026

Abstract

The infrastructure that bridges in China rely on has reached a large scale, and many bridges are in the middle and late stages of service. Their structural damage is difficult to detect and may occur

suddenly, making it difficult to manage. The existing structural health monitoring methods centered on the cloud have certain limitations in terms of latency, bandwidth, and offline reliability, and cannot effectively meet the needs of proactive warning. Edge computing is a distributed computing method close to the data source, which is suitable for information analysis, feature induction and early warning decision-making in the front end. Therefore, active monitoring of bridge damage is a new idea. This paper summarizes the efficiency barriers of traditional health monitoring, analyzes the operating principle of edge computing, proposes a proactive warning concept of edge-cloud cooperation, and explains the technical points in combination with perception, recognition and classification, pointing out the difficulties and feasible directions of actual deployment. According to the research conclusions, edge computing can overcome the bottleneck of centralized cloud, make structural damage known quickly and deal with it early, which has significant theoretical significance for the safety of the whole life cycle of bridges.

Keywords

Edge Computing, Bridge Structure Damage, Proactive Warning, Structural Health Monitoring, Intelligent Perception

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

交通运输网络所促成的桥梁发展使我国已有桥梁数量不断上升,但几十万座桥梁经年累月受荷载、环境及材料老化影响已开始出现病害。结构上初始的微小裂缝可发展为较严重的性能退化现象,未被预判的损伤往往造成稳定性破坏或安全问题。就目前而言,健康监测大多依赖云端对数据作统一分析,用此方法处理大量信息会占用较多带宽、反应不够快,不能很好适应灾变过程;通信条件差(如偏僻或极寒)又使所设监测手段的可靠性大打折扣。

现在边缘计算有关的结构健康监测应用正受到较多关注。国内及国外文献已就边缘-云协作、检测算法简化、分布式数据隐私处理诸项内容作较充分讨论,所提方案基本能证明边缘方法对时延、数据传输的优化价值,亦把联邦学习或区块链纳入可能的技术辅助手段加以考虑。不过目前所涉研究以技术本身为着眼点,较少将硬件开销、系统维护、数据安全性等实际问题作归纳性分析,关于桥梁损伤预警的完整流程或分级应对尚未有统一而完备的设计。考虑到上述情况,本文提出由边缘计算引导的桥梁损伤预警思路,说明其技术要点,指出工程难点,用理论方法为实际应用作支撑。

2. 边缘计算驱动桥梁损伤预警的技术逻辑基础

2.1. 传统桥梁结构健康监测的效能瓶颈

传统桥梁结构所用的健康监测方案是按“感知-传输-云端计算”思路设计的线性系统,各类型传感器测得的应力或振动、图像都送至云端作统一分析。这种安排适合于小范围监测任务,若要对大区域乃至密集点做监控就存在较大缺陷:第一是响应不够快,当有突发损伤出现时须作毫秒级判断,而数据到云、云内处理至少要花几十到几百毫秒,极端情况预警无用;第二是费用高,图像清晰、振动频率高的数据占用极大带宽,长时期上传要花费较多通信及存储资源;第三是可靠性低,山区或跨水桥梁通信不易维持,断网即可能使监测停止。

2.2. 边缘计算的技术范式与赋能机理

边缘计算把计算、存储以及网络有关的功能放到网络边缘节点上,使数据能就近得到处理,由此构成“端-边-云”三级协同计算方式,所涉及的桥梁损伤预警有三个方面的效益:第一是低时延,边缘点直接对数据做筛选、分析及损伤判定,不作完整数据上传,预警由秒级变为毫秒级,可识别初始阶段的细小损伤信号;第二是高可靠,节点可以离线运行、自行告警,网络中断不影响既往监测或数据补发;第三是低成本,所传内容限于特征或异常项,数据回传比例不到原数据的 10%,因而通信及存储开销都少很多。

2.3. 边缘-云协同的预警体系架构定位

边缘计算及云计算是互相补充的两种技术,不属于替代关系。若以桥梁损伤主动预警为着眼点,边缘部分应专门处理实时问题,把多类感知纳入体系、做初步分析、及时识别或就地报警,其要点是做到早发现、速应对;云端部分要关注总体状况和长期发展,对数据做全程考察、对损伤走向预测、对模型作优化或升级,其要点是使预警较准确。两层按需配合、分时运作,一起完成主动预警所要求的各项功能[1]。

3. 面向损伤主动预警的边缘侧智能感知与处理体系

3.1. 多源感知数据的边缘端轻量化采集架构

对桥梁所作的损伤监测要利用振动、应变及裂缝图像、环境温湿度诸项信息,各类型数据本身在采样及格式上差别很大,边缘采集须按兼容、低功耗、即时要求来设计,采用分项接入法:有关振动的高频信号交由边缘网关集中降采,只保有损伤有关的频率成分;图像类数据经边缘 AI 芯片处理后即可判别,非异常画面不作存储。

轻量化应作为基本的设计准则。所用的传感器节点本身即含微处理器,能对原始数据作初步筛选(不记录无用信息);边缘网关集中地安排通信协议及时间、数据格式,把不同来源的信息转为标准形式。按分层方式来组织采集可以自由调节采样内容,又不使带宽或能耗过分增加。

3.2. 边缘侧损伤特征的实时提取与识别方法

对损伤的特征提取及识别应作为主动预警的重点,其本身影响速度和精度。目前云端深度学习所用的模型太大,不适合边缘计算条件,要开发轻量识别方法。就振动类信号而言,将时域、频域都纳入考虑,利用幅值、频率以及阻尼比做定量分析,按阈值标准先作异常初判;有关裂缝的图像识别采用小规模卷积网络,结合剪枝、量化和知识蒸馏来压缩模型,使计算适合边缘 AI 芯片推理。

利用无监督对比学习来处理正常情况下的数据,不一定要用大量标注实例,算法较易应用。边缘部分作初步、迅速的异常判断,有疑问的数据才传到云端详查,“边缘初筛-云端精判”即为此类两阶段方案,可同时达实时、精确之效。

3.3. 边缘节点的分布式协同计算机制

对于大型桥梁来说,所用的边缘监测节点是很多的,每个节点不能同时有太大算力或太广的覆盖,应作分布式安排。相邻节点之间利用短距离通信连接,遇到某类异常即令附近节点提高采样密度,配合做多方面测量,由此可准确地找到故障所在、判明其位置信息。

所称的协同方式对算力调度来说也成立,即以各节点当前负载及任务要求来定计算资源的分配,不是单点超载。若区域中有多座连续桥梁,应利用区域边缘网关集中处理有关信息,把环境因素同桥梁状态作对照考察,提高区域预测的准确程度。

4. 边缘计算支撑的桥梁损伤主动预警机制构建

4.1. 分级预警的阈值动态判定方法

主动预警要依靠科学所设定的阈值来对损伤做分层分析、分层控制。若采用固定式阈值,对各种桥梁来说未必合适,误警或漏警较易发生。根据边缘计算思路,可以利用既往资料及当前结构状态,使预警作用的阈值按需自动地作相应变化。

预警分为三级响应:若数据异常而尚不越阈值,就应发注意预警,把观测频率加密;对初步的损伤迹象作确认后,发黄色预警并做预防养护;当结构损伤加快或性能恶化明显时,发红色预警,着手应急处理。所用边缘节点按实际工况(含环境及荷载)调节阈值,以改进预警与现实的契合程度。

4.2. 损伤演化的边缘侧短时预测模型

要做主动预警就应由“事后响应”转为“事前预防”,既要知悉已有损伤又要估计其走向。对云端来说做长期预测所涉计算多、时间长,不能满足即时需要;而以边缘方式利用较短时段资料来拟合时序模型,运算不繁,有助于迅速判断短期的损伤状况。

所谈的短时预测方法用算量少、反应快的方式工作,正好适用于边缘节点的安排,对养护是较早提示。遇到损伤发展加快的情形,应能自动增加监测次数、提早发出警告,留出维修时机[2]。

4.3. 预警信息的低时延分发与闭环响应

预警的效率以信息的即时分发及闭环处理为前提。按边缘计算思路设计时,预警所涉信息不必经由云端转发,而能由边缘节点马上发往有关设备或操作终端,链路因而变短。遇到红色预警这类极端状态,边缘节点可以就地控制交通、暂时封路,防止灾情蔓延。

也应将“监测-预警-处置-反馈”视为闭环来加以运用,对边缘所涉全过程作登记,处理完毕即把资料传到云上,借以改进模型、修正方案,促使系统更新。

5. 实际部署的核心挑战与应对方向

5.1. 硬件成本与环境适配约束

桥梁所处的监测环境一般是户外而复杂的,边缘节点的硬件要兼顾成本及耐久性。以 AI 为基准的工业级边缘网关本身价格高,若全桥都用上将付出较大投入;低价嵌入式装置运算能力不够,又不能承受现场严酷温湿或振动、腐蚀状况(须有高等级保护),成本因而上升。在偏远区供电不充分时,算力与功耗必须取得平衡。此时宜考虑分级部署方法:重要部分配置高效网关,非核心点使用低功耗、简算法装置,由此把总体开销控制在合理范围之内。

5.2. 数据安全与隐私风险

采用分布式架构后云端的集中安全边界已不复存在,数据有新风险。边缘节点多而散,所处位置不易严密保护,容易被攻击、被偷走信息;边-云通信中有关结构、操作的各类数据未必安全,对关键枢纽及传输环节要提出更高保密要求。分布训练本身可能使隐私暴露于危险之中。要以分层思路处理安全问题,即对边缘做硬件加密、对传输用存证加密、在云端设细密权限,把整条链路上的漏洞都予以堵塞[3]。

5.3. 边缘模型的迭代维护困境

有关边缘识别模型长期有效的说法尚待验证。桥梁实际运行中所遇环境、所受荷载会不断变化,导

致数据分布偏移及概念漂移, 模型精度因而有衰减趋势。但边缘计算资源少、存储能力有限, 不能常做整体更新, 远程修改又易受带宽和业务影响。各桥梁情况又不完全相同, 统一模型未必适用, 专门设计成本较高。此时应考虑将增量学习同模型蒸馏加以结合, 把轻型更新包分次发送, 对系统作跟踪分析, 按需、适时地启动更新。

5.4. 多源异构数据融合的复杂性

多源数据一起分析是损伤预警所依据的基本思路, 但边缘融合很复杂。各类传感器的采样方式、记录格式、时钟基准未必相同, 同步处理有困难; 若无统一的特征融合准则, 冗余或噪声就可能增多, 预警精度会受影响。分布式节点做协同推理要依靠可靠通信, 而节点或网络异常可使融合无法完成。要以标准形式规定数据交互内容, 把概率方法用于自动加权, 又应安排冗余结构来应对错误, 由此达到融合过程的总体可靠性[4]。

6. 技术效能与应用价值分析

6.1. 监测预警全链路的性能提升

所称的边缘计算对时延、可靠度及精度作统一性的性能改善。按时延说, 把主要处理放在边缘之后, 端-端预警所需时间不到旧方法的 20%, 正好适合紧急或即时分析的情形; 就可靠性而论, 系统可离线工作, 弱网乃至断网不影响其监测功能, 可用比例有较大提高; 关于精度, “边缘初筛-云端精判”所提的两级方式同时保准确、保检出, 做到实时与精确并存。

6.2. 全寿命周期运维的成本效益

按全寿命周期来衡量, 所提模式是经济的。有关数据要传、要存的量少很多, 对通信及云端的使用也较省; 提前做预警能控制损伤发展, 使小问题不演变为大故障, 维修费因而较少。另外, 各边缘模块设计为标准件, 布置和维护容易, 全寿命周期总成本可节省。

6.3. 技术推广的适配性与拓展空间

所称的边缘计算架构具有高度适应性, 对大中型桥梁、小型桥梁都可做相应形式的利用规划。已有的桥梁如要更新功能不必全盘换装, 添设边缘节点是加快智能化的有效办法。就长期发展而论, 这种技术有希望推广到隧道或边坡类工程上, 应用前景很可观[5]。

7. 结论

边缘计算是桥梁结构损伤主动预警所涉及的新技术思路, 对传统以云端为中心的监测方式中出现的高延迟、高费用及不可靠现象作了有效补缺。文中对边缘计算促进桥梁损伤预警的各种技术细节作较完整说明, 把边缘和云结合起来考虑主动预警问题, 就感知、判断乃至分级预警予以定位, 客观地指出工程应用的关键困难。分析结果表明, 借助边缘计算可以做到对损伤的实时检测、迅速处理与提前判断, 由此将运维本身由“被动维修”转为“主动预防”。

未来工作要着力解决边缘轻量化算法及多源信息结合的问题, 把复杂工况中损伤识别的可靠性提上日程; 应使边缘计算同数字孪生有较密切联系, 用整体思路设计桥梁的智慧运维方案, 借以促进交通设施运行的安全化、技术化。

参考文献

- [1] 李茂林. 科技信息赋能下的桥梁无损检测技术优化研究[J]. 张江科技评论, 2025(8): 35-37.

- [2] 林柏荣. 基于机器视觉的桥梁三维重构和智能化检测技术研究[D]: [硕士学位论文]. 广州: 广东工业大学, 2025.
- [3] 张楚傲. 基于无监督对比学习的结构构件和表观损伤统一识别方法[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2023.
- [4] 苏丹. 大型桥梁结构健康评估及预防性养护多目标决策方法研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 北京交通大学, 2022.
- [5] 王晓飞. 智慧边缘计算: 万物互联到万物赋能的桥梁[J]. 人民论坛·学术前沿, 2020(9): 4-17+77.