

人工智能在公路桥梁施工安全隐患识别中的应用前景

胡 鹏 王 鹏

四川公路桥梁建设集团有限公司大桥工程分公司 四川 成都 610000

摘要：公路桥梁施工因其高空、露天、交叉作业密集等特点，历来是安全事故的高发领域。传统依赖人工巡检的安全管理模式，在效率、覆盖面和客观性上存在难以逾越的瓶颈。随着深度学习、计算机视觉、物联网等人工智能（AI）技术的飞速发展，其在安全隐患智能识别领域的应用正展现出革命性的潜力。本文系统探讨了AI技术在公路桥梁施工安全领域的应用逻辑与核心场景，重点分析了基于视频监控的人员不安全行为识别（如未系安全带、未戴安全帽）、基于无人机影像的结构风险智能诊断（如支架失稳、临边防护缺失）、以及多源数据融合的风险动态预警等前沿方向。深入剖析了当前AI应用所面临的数据壁垒、模型泛化能力不足、现场部署成本高等现实挑战。在此基础上，前瞻性地提出了构建“端-边-云”协同的轻量化AI架构、建立行业级安全风险数据库、推动AI与BIM/数字孪生深度融合等发展路径。研究表明，人工智能不仅是提升隐患识别效率与精度的技术工具，更是驱动公路桥梁施工安全管理范式从被动响应向主动预防、从经验驱动向数据驱动转型的核心引擎，其广阔的应用前景将为保障工程建设者生命安全和国家基础设施高质量发展构筑起一道坚实的智能防线。

关键词：人工智能；公路桥梁；施工安全；隐患识别；计算机视觉

引言

公路桥梁作为国家综合立体交通网的关键节点，其建设规模与技术难度持续攀升。然而，伴随着工程复杂性的增加，施工安全风险也日益凸显。据统计，高处坠落、物体打击、坍塌等事故在桥梁施工安全事故中占据绝对主导地位，而这些事故的背后，往往都存在着未能及时发现和有效干预的安全隐患。长期以来，施工现场的安全管理主要依靠专职安全员的人工巡检，这种方式不仅耗费大量人力物力，更受限于人的主观经验、疲劳程度和视野盲区，对于瞬时发生的违章行为或隐蔽的结构风险，常常力有不逮。进入数字经济时代，以人工智能为代表的新一代信息技术为破解这一难题提供了全新的思路。特别是近年来，深度学习算法在图像识别、目标检测等领域取得了突破性进展，使得机器具备了超越人眼的感知与分析能力。通过在施工现场部署摄像头、无人机、传感器等智能终端，可以实现对人、机、料、法、环等全要素的7x24小时不间断监控，并利用AI模型自动、精准地识别出各类安全隐患。交通运输部等部门也相继出台政策，鼓励“科技兴安”，推动智慧工地建设。在此背景下，深入研究人工智能在公路桥梁施工安全隐患识别中的具体应用场景、技术路径、现存挑战与发展前景，具有重大的理论价值和迫切的现实意义。

作者姓名：胡鹏 身份证号：511321198912252477

作者姓名：王鹏 身份证号：450327198911220036

1 公路桥梁施工安全的核心隐患与 AI 介入的必要性

1.1 传统安全管理模式的局限性

传统的桥梁施工安全管理是一个典型的劳动密集型过程。安全员需要每日穿梭于复杂的施工现场，凭借个人经验和肉眼观察来查找隐患。这种模式存在几个固有的缺陷：首先是效率低下，一个大型桥梁项目动辄数公里长，涉及多个作业面，单靠人力难以做到全面覆盖；其次是主观性强，不同安全员的专业水平和责任心差异巨大，导致隐患排查的标准不一、质量参差；再次是滞后性明显，许多隐患是在事故发生后才被追溯发现，缺乏事前预警能力；最后，对于一些高危或难以到达的区域（如百米高的桥塔、深水基础），人工巡检本身就带有极高的安全风险。这些局限性共同构成了安全管理的“不可能三角”——即无法同时兼顾全面性、实时性和经济性。

1.2 AI赋能安全管理的独特优势

人工智能技术的引入，恰好能够弥补上述短板。其核心优势在于能够实现大规模、自动化、标准化的风险感知。首先，AI系统可以接入遍布工地的视频监控网络，形成一张无形的“天罗地网”，对所有可视区域进行无差别、不间断的扫描，彻底消除了人为巡检的时空盲区。其次，经过海量数据训练的AI模型，其判断标准是统一且客观的，不受情绪、疲劳等因素干扰，能够确保隐患识别的一致性和可靠性。更重要的是，AI具备强大的模式识别能力，不仅可以识别显性的违规行为，还

能通过对历史数据的深度挖掘,预测潜在的风险趋势,从而将安全管理的关口前移,实现从“亡羊补牢”到“未雨绸缪”的根本转变^[1]。这种由数据驱动的主动式安全管理模式,正是现代大型建设工程所亟需的。

2 人工智能在安全隐患识别中的核心应用场景

2.1 基于视频分析的人员不安全行为智能识别

这是目前应用最为成熟、落地最快的场景。通过在关键作业点(如高空作业平台、起重吊装区、临边洞口)部署高清摄像头,AI系统可以实时分析视频流,自动识别多种典型违章行为。例如,利用YOLO(You Only Look Once)等先进的目标检测算法,系统能够精准定位画面中的每一个工人,并判断其是否正确佩戴了安全帽和反光背心。更进一步,通过姿态估计算法,系统甚至可以分析工人的身体姿态,识别出攀爬脚手架时不使用安全带、在吊物下方穿行等高风险动作。一旦发现违规,系统可立即触发声光报警,并将告警信息连同截图推送至相关管理人员的移动终端,实现秒级响应。浙江省青田至文成高速公路项目已成功部署此类系统,有效遏制了习惯性违章,显著降低了事故发生率。

2.2 基于无人机与遥感影像的结构风险智能诊断

对于大范围、高耸或地形复杂的桥梁工程,地面固定摄像头的视角有限。此时,搭载高清相机或红外热像仪的无人机便成为绝佳的补充。无人机可以按照预设航线自主飞行,快速获取整个工地的高分辨率正射影像和三维实景模型。AI算法随后对这些影像进行处理,能够自动识别出多种结构性隐患。例如,通过对比BIM模型或设计图纸,AI可以检测出脚手架或模板支撑体系是否存在搭设不规范、杆件缺失、整体倾斜等失稳征兆;通过对桥面边缘的图像分析,可以判断临边防护栏杆是否按要求设置;利用红外热成像技术,AI还能发现因混凝土内部缺陷或渗漏导致的异常温度场,从而揭示肉眼不可见的潜在病害^[2]。香港理工大学开发的多层次智能桥梁检测系统,正是集成了无人机、探地雷达和红外热成像,并辅以AI模型,实现了对桥梁表面及内部隐患的高效、精准识别。

2.3 多源异构数据融合的风险动态预警

单一维度的数据往往不足以全面刻画风险。未来的AI应用趋势是走向多源数据的深度融合。一个智能化的安全预警平台,会同时接入来自视频监控、无人机、IoT传感器(如应力计、倾角仪、风速仪)、人员定位手环、甚至气象预报等多种数据源。AI模型作为“大脑”,对这些异构数据进行关联分析和综合研判。例如,当风速传感器监测到现场风力达到六级,同时视频

分析发现仍有工人正在进行高空焊接作业,系统便会立即发出强风天气违规作业的复合预警;又如,当某处支架的应力传感器读数持续异常升高,而无人机影像又捕捉到该区域有局部变形,AI便可综合判断此处存在坍塌风险,并启动最高级别的应急响应预案。这种基于多维证据链的风险评估,极大地提升了预警的准确性和决策的科学性。

3 当前应用面临的挑战与瓶颈

3.1 高质量标注数据的稀缺与获取成本

AI模型,尤其是深度学习模型,其性能高度依赖于大规模、高质量的训练数据。然而,在公路桥梁施工安全领域,获取足够数量且精确标注的隐患样本(如各种角度、光照条件下的未系安全带图像)是一项极其耗时耗力的工作。施工现场环境复杂多变,同一类隐患在不同场景下表现形式差异巨大,这要求标注工作必须由既懂施工安全又懂AI的专业人员完成,成本高昂。数据的稀缺直接制约了模型的泛化能力,导致在一个项目上训练好的模型,换到另一个项目或另一种桥梁类型时,性能可能大幅下降。

3.2 复杂现场环境对模型鲁棒性的考验

施工现场是一个典型的非结构化、高干扰环境。强烈的阳光直射、雨雾天气、扬尘、设备遮挡等因素都会严重影响视频和图像的质量,给AI识别带来巨大挑战。例如,在逆光条件下,工人的轮廓可能模糊不清,导致安全帽识别失败;在雨天,雨水在镜头上的附着会形成噪点,干扰算法判断。此外,施工现场人员、车辆、设备密集,相互遮挡频繁,使得目标跟踪和行为理解变得异常困难^[3]。如何提升AI模型在恶劣环境下的鲁棒性(Robustness),是其能否真正落地的关键。

3.3 系统集成与现场部署的成本效益平衡

将一套完整的AI安全监控系统部署到一个大型桥梁工地,涉及硬件(摄像头、服务器、网络设备)、软件(AI平台、算法模型)和后期运维等多个方面的投入。对于许多中小型施工企业而言,这是一笔不小的开支。如何在保证系统性能的前提下,通过采用边缘计算、模型轻量化等技术手段,降低硬件要求和部署成本,是推广普及必须解决的问题。同时,AI系统需要与现有的项目管理、BIM平台等进行无缝集成,避免形成新的“信息孤岛”,这也对系统的开放性和兼容性提出了更高要求。

4 未来发展趋势与深化应用路径

4.1 构建“端-边-云”协同的轻量化AI架构

首要路径是构建“端-边-云”协同的轻量化AI架构。这一架构通过任务分层,有效解决了成本与性能的矛

盾。在前端,即部署在现场的智能摄像头或传感器,可以执行初步的、低复杂度的计算任务,例如简单的运动检测或人脸抓拍,从而过滤掉大量无效数据,减轻后端负担。在靠近数据源头的边缘计算节点(如工地集装箱内的小型服务器),则运行经过精心压缩和优化的轻量化AI模型。这类模型虽然参数量小,但足以胜任人员行为识别、安全装备佩戴检测等核心任务,能够实现毫秒级的本地响应,这对于需要即时干预的高风险场景至关重要。只有涉及长期数据存储、跨项目大数据分析或模型的周期性迭代更新等复杂任务,才会上送到云端进行处理。这种分层协同的模式,不仅保障了关键业务的实时性,还大幅降低了对网络带宽和中心化算力的依赖,使得AI解决方案对中小型项目也更具经济可行性。

4.2 建立行业级安全风险数据库与共享机制

单个企业或项目积累的数据无论在规模还是多样性上都极为有限。因此,亟需由行业协会、政府主管部门牵头,联合大型央企、顶尖高校和领先的技术公司,共同发起并维护一个国家级的公路桥梁施工安全风险图像与数据资源库。该数据库应系统性地收集涵盖悬索桥、斜拉桥、拱桥、梁桥等各种桥型,在不同施工阶段(基础、下部、上部、附属)、不同地域气候条件下产生的典型安全隐患样本。同时,必须制定一套统一、严谨的数据采集和标注标准,确保数据质量。通过设计合理的激励机制,如数据贡献积分可兑换算力服务或优先使用高级模型等,鼓励各方积极贡献数据,最终形成一个开放、共享、持续进化的行业“公共资源池”^[4]。这将从根本上解决模型训练的数据饥渴问题,加速整个行业的AI应用进程。

4.3 推动AI与BIM/数字孪生的深度融合

未来的智慧工地将不再是一堆孤立的智能设备,而是以高精度BIM模型为统一空间框架和信息载体,实时融合来自IoT、视频、无人机、人员定位等多源异构数据,构建出一个与物理世界完全同步、双向互动的数字孪生体。AI算法将在这个虚拟的、信息完备的环境中运行,

其能力将得到极大拓展。它不仅能对现状进行静态的隐患识别,更能基于物理仿真和历史数据,对未来的施工过程进行动态推演和风险预测。例如,在数字孪生平台上模拟一场突发的强对流天气,AI可以提前数小时甚至数天,精准预测哪些临时结构(如挂篮、塔吊)最有可能因风荷载而失稳,并自动生成加固方案和人员疏散路线。这种从“看见现在”到“预见未来”的能力跃迁,将使安全管理真正从被动响应转向主动规划,从治标走向治本,最终实现工程建设全过程的本质安全。

5 结语

人工智能在公路桥梁施工安全隐患识别领域的应用,正从概念验证走向规模化落地,其变革性力量已初现端倪。它通过赋予机器以“慧眼”和“大脑”,正在系统性地解决传统安全管理模式的固有缺陷,为高风险的桥梁建设筑起一道全天候、全方位的智能防护网。尽管在数据、算法鲁棒性和成本效益等方面仍面临挑战,但随着“端-边-云”架构的成熟、行业数据生态的建立以及与BIM/数字孪生技术的深度融合,这些障碍终将被逐一克服。展望未来,人工智能将不再仅仅是安全管理的一个辅助工具,而是会内化为整个工程建设管理体系的“神经中枢”,驱动安全管理范式发生根本性变革。这场由AI引领的安全革命,不仅关乎效率的提升,更关乎每一位建设者生命的守护,其深远意义值得我们全力以赴去探索和实践。

参考文献

- [1]金闽华.桥梁施工安全事故成因分析及预防对策研究[J].运输经理世界,2026,(01):116-118.
- [2]林兴麟.智能建造技术在大型桥梁施工中的应用研究[J].张江科技评论,2025,(11):70-72.
- [3]杨启志.5G赋能公路桥梁智能施工关键技术研究[J].智能建筑与智慧城市,2025,(08):165-167.
- [4]赵丽萍,马青青.智能建造技术在大型桥梁施工中的应用研究[J].城市建设理论研究(电子版),2025,(09):170-172.