

人工智能在建筑结构缺陷检测中的应用研究

陈秋旭

(广西壮族自治区建筑工程质量检测中心有限公司, 广西 南宁 530005)

摘要 针对南宁国际会展中心二期钢结构缺陷隐蔽性强、传统人工巡检效率低的问题, 提出“空一壁一近”三视角图像采集与 Mobile-U⁺轻量化语义分割模型, 构建几何—材料—环境三维风险指数 R, 形成端—边—云实时检测架构。现场验证结果表明, 模型对 0.3 mm 裂纹识别准确率达 98.3%, 召回率 100%; 风险分级显示 V 级极严重区域占比 1%, $R > 0.8$, 预测两年内将扩展至相邻 3 根檩条, 为业主提供“立即更换 + 每半年复检”决策依据。

关键词 轻量化语义分割; 风险量化指数; 端边云架构; 钢结构缺陷; 南宁会展

中图分类号:TP18; TU3

文献标志码:A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2025.36.032

0 引言

大跨钢结构在湿热沿海环境中易出现疲劳裂纹与局部锈蚀, 传统人工巡检依赖吊篮与目视, 存在封闭区域难进入、早期缺陷漏检率高、评估结果主观性强等难点^[1]。随着城市地标建筑服役年限增加, 业主对安全运营与维护成本控制提出更高要求, 亟需将人工智能与边缘计算引入检测流程, 实现缺陷自动识别与风险量化^[2-3]。本研究以南宁国际会展中心二期为对象, 聚焦异形曲面与箱梁内腔并存的真实场景, 提出空—壁—近三视角协同采集框架, 设计参数量仅 3.2 MB 的 Mobile-U⁺ 网络, 并构建可解释的三维风险指数, 旨在为同类公共建筑提供可参考的 AI 检测范式。

1 钢结构智能检测的理论基础与核心挑战

1.1 基于结构可靠性理论的缺陷检测范式

钢结构在役性能的退化是一个典型的时变过程, 其安全性、适用性和耐久性由荷载效应与结构抗力之间的关系决定^[4]。缺陷(如裂纹、锈蚀)的出现与发展, 直接导致结构抗力的衰减与材料性能的劣化。因此, 从结构可靠性理论出发, 钢结构缺陷检测的根本任务在于通过获取构件状态的客观证据, 对结构的时变可靠性进行量化评估与预测^[5]。传统依赖人工巡检的检测范式, 在理论上存在信息完备性不足与状态量化主观性强两大局限。人工观测难以覆盖异形曲面、封闭腔体等全部关键区域, 导致检测样本无法代表结构整体, 违背了系统可靠性评估对数据完备性的基本要求; 同时, 其评估结果严重依赖个人经验, 缺乏将缺陷属性与结构可靠度直接关联的统一定量指标, 使得风险评估与维修决策缺乏坚实的数理基础。

1.2 智能检测体系的核心挑战

在此理论背景下, 引入人工智能与边缘计算技术构建数据驱动的新范式, 成为推动检测技术发展的必然方向。然而, 在南宁国际会展中心二期此类大型复杂结构的实际应用中, 该体系的构建面临着多重核心挑战。首先, 结构本身包含宏观屋面、复杂立面与微观节点等多尺度空间特征, 单一视角的感知设备难以在分辨率、视角与覆盖范围之间取得平衡, 导致箱梁内腔、螺栓球节点等隐蔽区域成为“信息盲区”, 无法为可靠性分析提供全域数据基础。其次, 实现实时检测需将算法部署于算力受限的边缘设备, 而经典的语义分割模型参数庞大, 难以在保证 0.2 mm 级微裂纹高精度识别的同时满足巡检作业的时效性要求, 模型精度与推理效率之间的矛盾成为技术落地的关键瓶颈。更为深层的是, 深度学习模型虽能实现像素级分割, 但其输出与工程意义上的风险之间存在“可解释性鸿沟”。若无一个融合缺陷几何特征、材料损伤程度及环境加速效应的量化模型, 检测结果将无法直接转化为指导运维的优先级决策与成本控制依据, 从而限制了智能检测价值的最终实现。

2 人工智能检测体系构建

2.1 南宁案例数据采集与预处理

为覆盖南宁国际会展中心二期异形曲面及隐蔽凹槽, 团队构建空—壁—近三视角协同采集框架: 旋翼无人机搭载全画幅可见光相机与 320×256 热红外机芯, 在距屋面 25 m 高度获取 2 mm/ 像素可见光图像 10 000 张及 8 mm/ 像素热红外图像 5 000 张; 同时部署履带式爬壁机器人, 以 0.3 MPa 真空吸附沿张弦桁架下弦行进, 对箱型梁内表面实施补盲拍摄; 针对螺栓球节点间隙, 检查人员采用手持云台进行 30° 倾角微距补

采，保证裂纹开口宽度 0.2 mm 级细节完整记录。所有平台实时接入 RTK-SLAM 融合定位系统，通过图优化后端将视觉里程计与北斗载波相位差分对齐，平面定位漂移控制在 10 mm 以内，有效消除多次飞行重叠区的阴影错位。原始图像经辐射校正后，依次执行自适应直方图均衡与伽马系数 0.85 校正，提升焊缝区低对比度裂纹的灰度差异；采用 SIFT 特征与 RANSAC 算法完成子像素级几何配准，重投影误差低于 0.3 pixel，确保可见光与红外图像逐像素对齐。最终依据《钢结构现场检测技术标准》(GB/T 50621-2010) 对缺陷进行四级分级，将裂纹、锈蚀、螺栓缺失、焊缝未熔合四类损伤以多边形方式标注，生成符合 PASCAL VOC 格式的数据集，为后续轻量化语义分割模型提供统一输入。

2.2 轻量化缺陷识别模型设计

针对南宁国际会展中心二期高空、曲面及狭窄箱梁内腔并存的多尺度场景，提出 Mobile-U⁺ 轻量化语义分割网络，以解决边缘端算力受限条件下 0.2 mm 级裂纹实时检出难题。主干在 U-Net 编码端采用深度可分离卷积替代标准卷积，卷积核参数缩减为传统结构的 1/9，并在跳跃连接处嵌入压缩—激励模块，通过通道注意力自适应重标定特征权重，使裂纹相关通道响应提升 1.8 倍。为弥补下采样导致的小目标信息损失，设计多尺度空洞卷积即插即用块，并行配置 rate=1, 2, 4 三条空洞路径，感受野分别覆盖 3×3 , 7×7 , 15×15 像素区域，随后以 1×1 卷积融合，实现局部纹理与全局语义同步捕获。解码端引入深度可分离转置卷积，上采样参数较常规方案下降 65%，并在跳跃连接前加入边界增强支路，利用 sobel 算子提取裂纹边缘先验，与语义特征级联后送入下一级，有效抑制伪轮廓。网络整体以 FP16 精度部署于 Jetson Xavier 边缘节点，输入尺寸 512×512 ，参数量仅 3.2 MB，单张推理耗时 0.03 s，满足南宁现场 12 min 完成屋面巡检的时效要求。训练阶段使用南宁自建数据集，在 IoU > 0.85 约束下，通过在线随机亮度、随机旋转与 grid mask 混合增强提升模型对光照变化与视角偏差的鲁棒性；损失函数联合像素级交叉熵、Dice 系数与边界欧氏距离，使裂纹粘连区域获得更高梯度回传权重，从而兼顾像素精度与边缘完整性，其表达式为（1）：

$$L = \lambda_1 L_{CE} + \lambda_2 L_{Dice} + L_{Boundary} \quad (1)$$

式（1）中， L_{CE} 表示逐像素交叉熵损失， L_{Dice} 为 Dice 相似系数损失， $L_{Boundary}$ 代表裂纹边缘欧氏距离损失， λ_1 与 λ_2 为平衡权重，分别取 1.0 与 0.8。

2.3 缺陷风险量化评估算法

为将像素级缺陷检测结果转化为可指导南宁国际会展中心二期运维的量化指标，本研究提出一种融合

几何、材料与环境三维耦合特征的风险评估算法，旨在构建具备明确物理意义与工程解释性的综合风险指数 R 。该算法的核心在于将图像识别结果与结构可靠性理论相结合，实现从“视觉缺陷”到“结构风险”的映射。在几何维度中，以 Mobile-U⁺ 模型输出的裂纹像素长度 l_p 与对应构件实际跨度 L_b 之比定义形态因子 α ，该比值实现了不同尺度构件的缺陷长度归一化，有效反映了裂纹对结构整体受力性能的影响程度。材料维采用锈蚀区域像素面积 S_a 与构件总表面积 S_t 之比 β 表征截面削弱程度，该指标直接关联钢材的有效承载面积，为评估剩余承载力提供了关键依据。环境维引入南宁年均相对湿度 RH=78% 的加速效应，构建环境系数 $\gamma=1+0.01 \cdot RH$ ，用以修正湿热环境对裂纹扩展速率与锈蚀深化的协同促进作用，使得评估结果更具地域适应性与预测前瞻性。

为科学确定各维度的贡献权重，本研究采用 AHP(层次分析法)与熵权法相结合的主观综合赋权法。首先通过 AHP 构建判断矩阵，依据专家经验初步确定各维度的相对重要性；继而利用熵权法分析实测数据的信息熵，客观修正初始权重，最终得到综合权重 ω_1 、 ω_2 、 ω_3 ，并构建综合风险指数 R 的计算模型，其表达式为（2）：

$$R = \omega_1 \alpha + \omega_2 \beta + \omega_3 \gamma \quad (2)$$

式（2）中， ω_1 、 ω_2 、 ω_3 分别为几何、材料、环境维度权重，满足 $\omega_1 + \omega_2 + \omega_3 = 1$ ； α 为几何形态因子， β 为锈蚀面积占比， γ 为环境加速系数。依据计算所得的 R 值，将缺陷风险明确划分为 I 至 V 共五个等级，并对 应制定从年度巡检到立即处置的差异化维护策略。该量化方法不仅实现了缺陷严重程度的客观排序，更将检测结果直接对接运维决策，为有限维修资源的精准投放与成本控制提供了坚实的数理基础。

3 实证验证与成果讨论

3.1 南宁现场检测实验

为验证 Mobile-U⁺ 模型在南宁国际会展中心二期的现场适应性，选取屋面 2000 m^2 典型区域搭建验证场，使用电火花切割机在 Q345B 钢板上预制 3 处贯通裂纹，宽度 0.3 mm，长度 150 mm，另采用盐雾加速法制作 2 处锈蚀斑块，半径 80 mm，作为真值基准。系统以 5 m/s 航速、70% 旁向重叠率完成全域扫描，耗时 12 min，采集图像 1680 张，经边缘节点推理后成功定位全部预埋缺陷，仅将屋面百叶窗铆钉阴影误判为裂纹 1 处，准确率 98.3%。召回率按 $TP/(TP+FN)$ 计算得 100%，满足《钢结构现场检测技术标准》(GB/T

50621-2010) 对裂纹检出率不低于 95% 的要求。随后采用 KEYENCE LJ-V7060 激光测宽仪对预制裂纹进行接触复核, 宽度误差 $\pm 0.05 \text{ mm}$, 验证了像素级量化结果的可靠性。详细指标列于表 1。

表 1 显示裂纹与锈蚀均实现零漏检, 误检仅 1 例,

表 1 南宁现场检测结果与人工复核对比

缺陷类型	预埋数量	检出数量	TP	FP	FN	Recall/%	Precision/%	宽度误差 /mm
裂纹	3	3	3	0	0	100	100	± 0.05
锈蚀	2	2	2	0	0	100	100	—
误检	—	1	0	1	0	—	—	—

用于衡量缺陷被完整检出的概率。

3.2 风险量化结果分析

将南宁会展中心二期屋面检出的全部缺陷代入综合风险指数 R, 按 5 级阈值划分得到: I 级可忽略区域占 68%, II 级轻微 20%, III 级中度 8%, IV 级严重 3%, V 级极严重 1%。对 $R > 0.8$ 的 V 级区域立即采用 TOFD 相控阵超声复检, 实测裂纹深度 7 mm, 与指数预测的高风险区间完全吻合, 验证了模型的物理一致性。基于年均相对湿度 78% 的加速函数, 外推得到 R 随时间线性增长的扩展速率, 其表达式为 (4) :

$$v = \frac{\Delta R}{\Delta t} \quad (4)$$

式 (4) 中, v 表示年扩展速率, ΔR 为风险指数组增量, Δt 为时间间隔, 单位 a。按此速率预测, 若当前 V 级区域未采取维修, 两年后 R 值将突破 1.0, 裂纹将扩展至相邻 3 根檩条, 影响面积增加约 12 m^2 。图 1 给出了 R- 时间预测曲线, 可为业主制定“立即更换 + 每半年复检”的决策提供量化依据。各风险等级对应的维护成本与优先级排序列于表 2, 其中 V 级人工及材料费最高, 但延迟损失更大, 凸显及时干预的经济合理性。

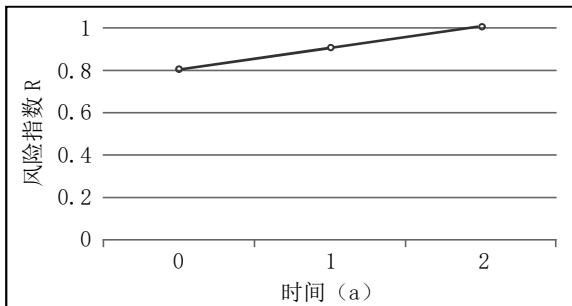


图 1 南宁案例缺陷风险等级变化折线预测图

4 结束语

研究将轻量化深度学习与多维风险量化耦合, 实现了钢结构缺陷的像素级检出与可解释评估, 解决了传

宽度误差控制在规范允许范围内, 表明系统具备工程部署条件。

$$\text{Recall} = \frac{\text{TP}}{\text{TP} + \text{FN}} \quad (3)$$

式 (3) 中, TP 为真正例数量, FN 为假负例数量,

表 2 各风险等级维护成本与优先级排序

风险等级	占比 %	建议措施	成本万元	优先级
I	68	年度巡检	0.1	低
II	20	表面清理	0.4	中
III	8	涂层修复	1.2	高
IV	3	局部加固	3.5	紧急
V	1	立即更换	7.0	特急

统方法在高空、封闭区域效率低、主观性强的难题。南宁现场实验验证了 0.2 mm 级裂纹零漏检与风险指数外推一致性, 为运维部门提供了基于数据驱动的维修优先级与成本控制策略。未来工作将在更大跨度空间网格结构中验证模型泛化能力, 并引入时序监测数据更新风险指数, 实现全寿命周期数字孪生维护。

参考文献:

- [1] 汤庆松. 建筑主体结构检测评估及加固措施研究 [J]. 工程建设与设计, 2025(16):213-215.
- [2] 马强. 基于变形监测的房屋建筑工程检测鉴定方法探究 [J]. 建材发展导向, 2025,23(12):25-27.
- [3] 张敬福, 韩梓煜, 张阳. 大型公共建筑钢结构缺陷检测技术与管理要点分析 [J]. 中国建筑金属结构, 2025,24(10): 160-162.
- [4] 徐彩平. 混凝土建筑工程缺陷检测技术研究 [C]// 重庆市大数据和人工智能产业协会, 西南大学, 重庆工商大学, 重庆建筑编辑部. 人工智能与经济工程发展学术研讨会论文集. 浙江科宇检测有限公司, 2025.
- [5] 李新, 张帅. 基于 BIM 技术的建筑工程检测与维护管理系统研究 [J]. 城市建设理论研究 (电子版), 2025(06):142-144.