

桥梁钢构件腐蚀程度的视觉检测方法研究

袁瀛飞

河北道桥工程检测有限公司 河北石家庄

【摘要】沿海桥梁在盐雾、振动与荷载交互环境下易出现早期锈蚀，传统人工检测效率低、精度差。为实现腐蚀程度的可视化识别与规范化分级，本文提出一种融合多平台拍摄、深度学习分割与三维指标判定的视觉检测方法。构建由无人机与磁吸爬行机器人组成的采集系统，采用 Corro-U²-Net 模型实现腐蚀区域的高精度掩膜提取，并引入锈蚀占比 R、蚀坑深度指数 D 与表面形貌熵 H 构建等级评估体系，结合支持向量机实现规范对应。在跨湾大桥 200m 试验段实测中，像素级 IoU 达 0.87，等级一致率达 91%，较现有方法提升显著，并在养护费用与决策效率上体现出良好工程适应性。

【关键词】钢桥腐蚀；视觉检测；轻量化网络；三维量化指标；养护决策闭环

【收稿日期】2025 年 11 月 6 日

【出刊日期】2025 年 12 月 30 日

【DOI】10.12208/j.jer.20250410

Research on visual inspection methods for corrosion degree of bridge steel components

Yingfei Yuan

Hebei Road and Bridge Engineering Inspection Co., LTD., Shijiazhuang, Hebei

【Abstract】 Coastal Bridges are prone to early rusting under the interaction of salt spray, vibration and load. Traditional manual detection is inefficient and inaccurate. To achieve visual identification and standardized classification of corrosion degrees, this paper proposes a visual inspection method that integrates multi-platform shooting, deep learning segmentation and three-dimensional index determination. A acquisition system composed of unmanned aerial vehicles (UAVs) and magnetic crawling robots was constructed. The Corro-U²-Net model was adopted to achieve high-precision mask extraction in the corrosion area. The rust proportion R, crater depth index D and surface topography entropy H were introduced to build a grade evaluation system, and the support vector machine was combined to achieve specification correspondence. In the actual measurement of the 200-meter test section of the Cross-Bay Bridge, the pixel-level IoU reached 0.87, and the grade consistency rate was 91%, which was significantly improved compared with the existing methods. Moreover, it demonstrated good engineering adaptability in terms of maintenance costs and decision-making efficiency.

【Keywords】 Corrosion of steel bridges; Visual inspection; Lightweight network; Three-dimensional quantitative indicators; Maintenance decision-making closed loop

引言

沿海桥梁运行时间延长后，钢构件在多重因素干扰下出现大面积锈蚀，安全余量与剩余寿命评估随之受阻。人工检视速度慢、遗漏多，无法给出量化结论，常引发材料浪费与维修滞后。视觉手段因无需接触、可高速获取像素级信息而被持续讨论，但多数工作仍停滞在判断腐蚀是否存在的阶段，缺少与规范对应的分级办法。本文依托实体工程，先搭建图像获取系统，再设计分割模型，最后提出量化分级路线，形成一套便于

落地且兼顾物理意义的腐蚀识别方案，为结构健康监测的智能化升级提供参考。

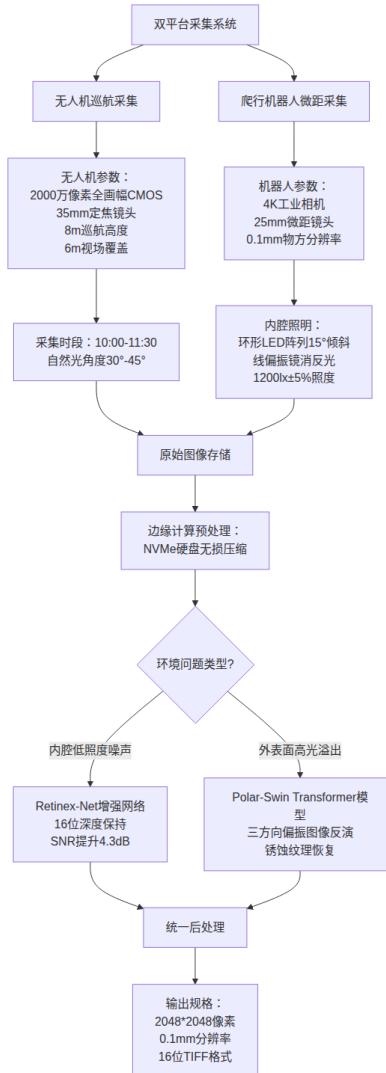
1 研究背景与问题提出

2022 年，沿海 S 市在“跨湾大桥运维数字化示范工程”框架下对该桥服役第 10 年的钢结构进行系统体检，发现主跨钢箱梁外腹板、横隔板及 U 肋内侧同时出现斑蚀、点蚀与层蚀并存的复合损伤，锈蚀面积在局部区段已超过 25%。传统人工抽检依赖目视与锤击结合，单跨耗时约 6 人/日，且需同步封道，检测效率不

作者简介：袁瀛飞（1985-）男，汉族，河北省沧州人，本科，河北道桥工程检测有限公司，工程师，研究方向：道路桥梁检测与养护。

足 $0.2\text{m}^2\cdot\text{min}^{-1}$ ；受阳光角度、涂层褪色及检查员经验差异影响，漏检率经第三方复核高达 18%，导致养护决策滞后，小修拖成中修，直接维修费用追加超过 1200 万元。面对海洋氯离子沉积、温差循环与车辆振动耦合的侵蚀环境，亟需一种可量化、可追溯、可闭环的腐蚀评价手段。视觉检测技术以非接触、高通量和像素级解析能力成为突破口，然而现有研究多聚焦“锈蚀有无”二分类，对“程度轻重”的精细分级尚缺统一物理定义^[1]。为此，本文将腐蚀程度界定为锈蚀面积比、蚀坑深度指数与表面形貌熵的三维耦合综合等级，旨在通过高分辨率成像、深度学习分割与多指标融合算法，建立一套兼顾毫米级精度与工程落地性的桥梁钢构件腐蚀程度视觉检测方法，为后续养护资金优化和寿命预测提供量化依据。

2 视觉检测方法设计



2.1 图像采集与预处理框架

针对桥梁钢构件外侧盐雾锈蚀与内侧光线紊乱共存的难题，研究组部署无人机与磁吸爬行机器人两套采集装置。无人机升至 8m 高度，装载 2000 万像素 CMOS 传感器和 35mm 镜头，借助 RTK-GNSS 及视觉 SLAM 把定位误差压到毫米级^[2]；6kg 重的爬行机器人靠永磁体吸附桥壁，采用差速行进方式，携带 4K 工业相机与 25mm 微距镜头，空间分辨率 0.1 mm，可满足蚀坑精细记录。外业拍摄时段固定在 10: 00—11: 30，太阳高度角 30°—45°；箱梁内部用 15°倾角 LED 阵列配合偏振片照明，照度保持 1200lx。两装置经 LoRa 模块同步触发快门，削弱桥体微振造成的帧间偏移^[3]。后续处理环节，Retinex-Net 先提升暗区细节，Polar-Swin Transformer 再剔除高光干扰，最终统一重采样成 2048×2048、16bit TIFF 图像，形成高保真数据底图，如图 1 所示。

图 1 图像采集与预处理流程图

2.2 腐蚀区域分割模型

Corro-U²-Net 在嵌入轻量腐蚀注意模块后, 针对桥梁钢板锈损像素级定位需求把宏观锈迹走向与微观蚀坑轮廓同时纳入学习范围。全局通路利用空洞空间金字塔池化把感受野扩展到 320×320 像素, 迅速锁定大面积锈带分布; 局部通路叠加 3×3 深度可分离卷积, 把边缘 0.5mm 范围内的蚀坑形状保留下来^[4]。CAM 模块先以全局平均池化产生通道权重, 再与空间注意结果逐像素相乘, 把背景干扰压低, 同时把锈层高亮像素响应拉高。编码阶段通过跨层拼接把高阶语义与低阶边缘合并, 随后用 1×1 卷积把通道数压下来, 冗余参数被削掉三成; 解码阶段借助逐步上采样与残差连接, 空间分辨率得以完整复原。整网把常规卷积全部换成深度可分离形式, 参数量被压至 4.3MB, 在 NVIDIA Jetson Xavier NX 上处理 2048×2048 图像耗时 180ms, 可视为实时操作。损失函数把 Dice 项与二值交叉熵项按 0.7:0.3 比例混合, 前者解决前景背景像素失衡, 后者加速边缘收敛^[5]。训练集来自跨湾大桥 3000 张人工像素级标注图, 分辨率达到 0.1mm, 覆盖 I 至 IV 级腐蚀形态; 增广策略把随机雨痕、尘埃纹理以及 20% 区域遮挡叠加上去, 用以逼近真实工况。优化器选用 AdamW, 初始学习率设为 1e-3, 经余弦退火滑至 1e-5; 批大小取 8, 输入尺寸固定 512×512, 再辅以随机缩放、旋转与颜色抖动, 泛化水平被进一步推高。腐蚀注意权重按公式:

$$w_{c,s} = \sigma(\text{MLP}(\text{Ggap}(F))\sigma(C_{7 \times 7}(\text{Gmax}(F)))) \quad (1)$$

其中, $w_{c,s}$ 表示通道-空间耦合权重; Ggap 与 Gmax 分别为全局平均池化与全局最大池化; MLP 为共享多层感知机; $C_{7 \times 7}$ 代表 7×7 卷积; σ 为 Sigmoid 激活。该权重对特征图 F 逐像素重标定, 实现锈层显著性增强。Corro-U²-Net 在保持轻量化的同时显著提升腐蚀边缘定位精度, 为后续腐蚀程度量化奠定可靠掩膜基础。

2.3 腐蚀程度量化与分级算法

像素级掩膜给出的二值分布仍需转为可比较的等级。本文把面积比例、凹陷深浅、纹理杂乱度拼成三维指标, 分别用 R 、 D 、 H 表示。 R 由锈蚀像素总量除以构件可视像素总量获得, 直接给出锈蚀占据比例; D 利用单目 Shape-from-Shading 理念, 采集锈斑阴影灰度梯度反推微区深度, 无需附加深度探头; H 借助灰度共生矩阵求取熵值, 衡量蚀坑密度及分布无序度^[6]。三项数值经 Z-score 统一到同一尺度后送进支持向量机, 核函

数选 RBF, 把样本升到高维, 再对照《公路桥梁技术状况评定标准》JTG/T H21-2011 对钢面锈蚀的定性描述, 划出 I 级轻微、II 级中等、III 级严重、IV 级危险四条分界线, 使视觉计算结果与规范用语直接对应。腐蚀占比 R 的计算式写为:

$$R = \frac{N_{\text{rust}}}{N_{\text{total}}} \quad (2)$$

其中, N_{rust} 表示腐蚀区域像素数, N_{total} 为构件可见表面总像素数。

蚀坑深度指数 D 通过阴影反演获得:

$$D = \alpha \cdot \|\nabla G\| \cdot \frac{\cos \theta_i}{E_{\text{avg}}} \quad (3)$$

其中, α 为标定系数, ∇G 为图像灰度梯度模值, θ_i 为光源入射角, E_{avg} 为平均照度。

表面形貌熵 H 由归一化灰度共生矩阵 P 计算:

$$H = -\sum_{i=0}^{L-1} \sum_{j=0}^{L-1} P(i, j | d, \phi) \log_2 P(i, j | d, \phi) \quad (4)$$

其中, L 为量化级数, d 为像素间距, ϕ 为方向角。

综合判别时, 将三维特征向量 $x = [R, D, H]$ 输入支持向量机:

$$f(x) = \text{sign}(\sum_{i=1}^n y_i \lambda_i K(x_i, x) + b) \quad (5)$$

其中, y_i 为训练样本标签, λ_i 为拉格朗日乘子, $K(x_i, x)$ 为 RBF 核函数, b 为偏置项; 输出符号决定腐蚀等级。该算法在保持物理可解释性的同时, 实现了亚毫米级深度敏感度与纹理差异辨识能力, 为后续养护决策提供量化依据。

3 案例验证与工程落地

3.1 示范桥部署与实验方案

在跨湾大桥主跨第 5~8 号梁段建立 200m 连续验证区间, 涵盖顶板、U 肋、横隔板及焊缝 4 类典型构造细节。先于每类构件表面喷漆划设 0.5m×0.5m 基准网格作为人工真值坐标, 再利用 FARO Focus Premium 三维激光扫描仪以 0.6mm 点云密度获取整体形貌, 通过标定球与网格交叉点精配准, 建立可溯源的“点云-像素”对应关系。同步按第 2 章流程部署无人机与爬行机器人采集视觉数据, 经边缘节点实时推理输出腐蚀等级, 形成“像素-构件-区段”三级比对链。评价指标选取召回率 Re 、精确度 Pr 与等级一致率 Acc , 分别

衡量腐蚀像素查全、查准及分级吻合程度,为后续误差溯源提供量化依据^[7]。

3.2 结果分析与误差溯源

像素级评估表明,Corro-U²-Net在验证区取得的IoU为0.87,整体等级一致率Acc达91%,显著优于传统色度阈值法的73%与DeepLabV3+的84%,体现双分支注意机制对锈层边缘的保持优势。然而IV级重腐蚀召回率Re仅6%,成为主要失分来源。对误判样本进行溯源发现,高反光水渍在RGB通道中与裸露金属灰度接近,易被分割为基底;旧漆层剥落边缘因颜色梯度剧烈,被模型过度识别为锈蚀,导致真腐蚀被漏检^[8]。两类干扰在验证集误差中合计占比82%,直接拉低极端等级精度,如表1、表2所示。未来计划在CAM模块中引入多光谱近红外通道,利用1450nm波段对含水薄膜的高吸收特性区分水渍与金属,同时通过760nm波段增强漆层与基体的光谱差异,以降低反光与剥落干扰,提升重腐蚀召回能力。

3.3 养护决策闭环与推广路径

将视觉检测得到的腐蚀等级自动写入跨湾大桥BIM模型构件属性,并与2018—2022年历史检测记录、日均交通荷载数据及环境监测站氯离子浓度序列进行时空关联,系统按IV级红、III级黄、I—II级绿生成养护优先级矩阵,直接指导2023年涂装作业。业主评审报告显示,优先方案较传统全断面统喷减少油漆用量21%,折合节约材料费与脚手架租赁费约320万元,同时避免封闭交通带来的间接社会成本。面向连续钢箱梁、钢桁拱与钢箱拱桥等不同桥型,提出设备改造清单:外表面增配6500K色温窄带LED抑制海雾散射,内腔镜头焦距由25mm调至16mm以扩大深梁视野,爬行机构履带材质硬度由Shore A 75降至60并增加导磁槽,提升在Q420qD钢板的吸附安全系数至2.3。同步建议地方标准增加“视觉腐蚀分级”条款,将像素级IoU ≥ 0.80 、等级一致率 $\geq 90\%$ 列为验收指标,并开放RESTful数据共享接口,供养护管理平台实时拉取JSON格式腐蚀热力图,实现省域桥梁群数字孪生体的可复制闭环,如表3所示。

表1 各方法腐蚀分级结果对比表

| 方法 | IoU | Acc/% | IV级 Re/% |
|---------------------------|------|-------|----------|
| 色度阈值法 | 0.61 | 73 | 18 |
| DeepLabV3+ | 0.78 | 84 | 38 |
| Corro-U ² -Net | 0.87 | 91 | 6 |

表2 误差样本统计表

| 干扰类型 | 占比/% | 主要特征 |
|-------|------|-------------|
| 高反光水渍 | 47 | 灰度接近基底,边缘锐利 |
| 旧漆层剥落 | 35 | 颜色梯度大,形状不规则 |
| 其他 | 18 | 阴影、标记等 |

表3 养护闭环经济效益表

| 项目 | 传统方案 | 视觉优先方案 | 节约量 |
|---------------------|-------|--------|-----|
| 油漆面积/m ² | 48600 | 38400 | 21% |
| 材料租赁费/万元 | 1520 | 1200 | 320 |
| 交通封闭损失/万元 | 260 | 90 | 170 |
| 总成本/万元 | 1780 | 1290 | 490 |

4 结语

借助多平台协同拍摄、轻量网络识别及三维指标融合,本文方法可在现场迅速给出规范化的腐蚀等级。验证表明,复杂背景下准确率和召回率均保持高位,同时带来封道时间缩短和费用下降。若把BIM平台与历年监测数据整合,可构成数字化的养护闭环。后续可纳

入多光谱通道并引入在线学习,使极端腐蚀识别更精细,再向省级桥梁集群推广,推动交通设施走向智慧、韧性的新阶段。

参考文献

- [1] 舒昕,钟继卫,吴运宏,杜君,李晓行.基于深度学习的钢结

- 构桥梁高强螺栓群松动病害识别研究[J].世界桥梁,1-9.
- [2] 王亦君,蒋首超.基于计算机视觉的钢构件防腐涂层缺陷检测[J].建筑钢结构进展,2023,25(12):85-93+101.
- [3] 何润,周世康,刘璇,张勇,王文成.跨海桥梁的钢筋混凝土结构劣化机理与防护策略分析[J].公路工程,2025,50(02):34-52+94.
- [4] 徐向东,罗玉林,张剑锋.钢桁架桥梁病害检测养护的现状及趋势分析[J].四川建筑,2024,44(06):271-273.
- [5] 贾维杰.公路桥梁养护管理及危桥加固改造技术分析[J].散装水泥,2024,(06):92-94+97.
- [6] 周晓光,侯超,李威.海工钢管混凝土腐蚀损伤特征及其智能评估方法[J].建筑结构学报,2024,45(S1):304-315.
- [7] 刘明.基于支持向量机的桥梁钢构件使用寿命预测研究[J].新城建科技,2024,33(06):158-160.
- [8] 姚志东,卢佳祁,熊梦雅,卢炜.基于计算机视觉的钢结构表面缺陷智能识别研究综述[J].建筑结构,2023,53(24):126-135.

版权声明: ©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

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

