

基于深度学习的水利工程坝体裂缝智能识别技术研究

温燕霞¹, 黄修奖²

(1. 广西凯阔建筑工程有限公司, 广西 来宾 546100;

2. 广西理工职业技术学校, 广西 南宁 530031)

摘要 针对高混凝土坝巡检中裂缝漏检率高、定位耗时长的问題, 构建了一种改进注意力机制的轻量化 U-Net 模型, 实现裂缝识别从数据采集、预处理、训练到边缘部署的全流程。模型在编码解码阶段引入通道注意力与深度可分离卷积, 结合结构化剪枝与量化感知训练, 在边缘计算平台上实现单幅高分辨率图像的快速推理。测试集总体精确率、召回率、F1 值与 IoU 分别达 0.94、0.92、0.93 与 0.89。工程验证表明, 相比人工巡检, 应用该模型后准确率显著提升, 漏检率大幅降低, 处理速度与复核效率均得到明显改善, 具备良好的工程实用价值。

关键词 混凝土重力坝裂缝检测; 轻量化 U-Net; 通道注意力; 边缘计算; 量化感知训练

中图分类号: TP183; TV698.2

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.19.003

0 引言

高坝在汛期台风暴雨等极端天气窗口期, 对毫米级裂缝的快速筛查提出严峻的时效与精度要求^[1]。受坝体曲率、高空风载及光照条件等因素影响, 传统人工目视与超声检测方法难以有效覆盖背光侧、顶拱等观测盲区, 且易受混凝土龄期增长导致的表层碳化干扰, 致使裂缝识别存在明显的漏检与定位延迟问题^[2-3]。现有检测流程在广域覆盖与弱边缘识别之间难以兼顾, 亟需构建一种兼具高精度与高时效的自动化识别方法^[4]。深度学习视觉方法可端到端同步捕捉裂缝与背景纹理梯度, 结合轻量化网络与注意力机制, 在边缘设备上实现高分辨率影像的实时推断^[5]。将识别结果与坝面 GIS 及数字孪生平台融合, 有望提升巡检效率、盲区覆盖与复核一致性, 推动高坝安全运维向标准化与智能化发展。

1 研究基础与坝体裂缝数据采集处理

1.1 水利工程坝体裂缝识别现状与深度学习技术应用分析

针对南方某混凝土重力坝汛后巡检中裂缝漏检率达 18.7%、单条裂缝定位耗时 43 min 的运维瓶颈, 传统人工目视受限于坝面曲率与高空风载, 易在背光侧及廊道顶拱形成盲区, 超声脉冲透射法因耦合层碳化致使信噪比衰减 9 dB, 进一步放大漏判风险。相较之

下, 深度学习卷积网络以高分辨率可见光影像为输入, 通过端到端训练将“先分割后识别”的两阶段流程压缩为单次前向推理, 在保持 0.5 mm 宽度敏感度的同时, 将单幅 4K 影像处理耗时降至 120 ms 以内。结合“空窗期 4 h 完成全坝面扫描”的运维要求, 轻量化 U-Net 在嵌入式 Jetson 边缘节点上可实现 28 FPS 实时推断, 为数字孪生平台提供毫米级裂缝语义图层, 展现出深度学习视觉范式对高坝运维时效瓶颈的工程契合性。

1.2 坝体裂缝数据采集与预处理

鉴于该重力坝巡检空窗期仅 4 h, 工程单位将 2022 年 9 月至 2023 年 3 月期间, 五次登高巡检获取的 5 000 张 4K 可见光影像, 作为原始样本库使用, 样本覆盖背光侧、顶拱、溢流面等盲区, 涵盖 0.2 mm ~ 25 mm 宽度裂缝以及网状、纵向、斜向三种形态, 同步记录 10:00-14:00 强直射、16:00-18:00 侧光、夜间补光三种光照条件。为抑制高空风载引入的高频噪声, 先对 RAW 影像开展 $\sigma=1.2$ 的高斯滤波去噪工作, 随后借助限制对比度自适应直方图均衡化在 YUV 通道的 Y 分量上进行局部增强, 把裂缝边缘梯度与混凝土麻面纹理的对比度从原图的 42 提升至 68, 同时避免过增强带来的伪影。标注阶段选用 LabelMe 开源工具, 由两名具备五年坝工经验的工程师沿裂缝骨架进行多边形闭合, 把背景、裂缝、渗水晕染三类像素当作标签来使用, 对分歧像素引入第三仲裁, 最终形成像素级掩膜^[6]。

作者简介: 温燕霞 (1991-), 女, 本科, 工程师, 研究方向: 水利水电工程。

数据集按时间顺序分层抽样,以7:2:1比例划分为训练、验证与测试子集,确保同一坝段影像不会跨集泄漏,为后续轻量化U-Net提供一致性基准。

2 基于深度学习的坝体裂缝识别模型构建

2.1 改进U-Net 裂缝分割模型架构设计

针对毫米级裂缝识别中纹理相似与光照变换并存的场景约束,本研究以经典U-Net为主干架构,在编码器与解码器对应层级嵌入通道注意力模块,以提升对裂缝弱边缘与复杂麻面纹理的区分能力。整体采用对称的四级编码与四级解码结构,编码路径逐级叠加通道数为32、64、128、256,解码路径采用双线性插值上采样与编码特征拼接以恢复边缘细节。为适应边缘部署,以深度可分离卷积替代标准卷积,并采用组归一化以保障小批量训练的稳定性。特征图尺寸约束关系如下:

$$H_{out} = \frac{H_{in} + 2p - k}{s} + 1, W_{out} = \frac{W_{in} + 2p - k}{s} + 1 \quad (1)$$

式(1)中, H_{out} 与 W_{out} 表示输出特征图的高与宽, H_{in} 与 W_{in} 为输入特征图的高与宽, k 为卷积核尺寸, s 为步幅, p 为零填充大小。通道注意力模块在编码卷积块尾部及解码拼接后加入,通过全局平均与瓶颈映射生成逐通道权重,实现裂缝显著性的重标定,在前两级编码层采用较小压缩比以保留细节通道,高层适度压缩以抑制背景响应,整体兼顾弱小裂缝可分性与边缘实时推断需求。

2.2 模型训练与参数优化

鉴于该重力坝裂缝像素分布高度不均,本研究把1.2节得到的像素级掩膜当作训练基底来使用,按瓦片裁剪与重叠采样生成 512×512 子块,并在亮度、色温与轻微仿射上进行在线增强,以覆盖直射、侧光与补光情境。训练批次依据时间分层进行混合,确保不同坝段与不同宽度裂缝在批次内保持均衡曝光。

从损失函数的配比来看,微小裂缝像素占比偏低会放大类别不平衡的优化难度,因此把Dice Loss作为主损失来引入,用于直接对重叠率进行优化,公式如下:

$$\mathcal{L}_{Dice} = 1 - \frac{2 \sum_{i=1}^N p_i g_i + \epsilon}{\sum_{i=1}^N p_i + \sum_{i=1}^N g_i + \epsilon} \quad (2)$$

式(2)中, p_i 表示第 i 个像素的裂缝预测概率, g_i 为对应像素的真实标注取值, N 为当前子块像素总数, ϵ 为避免分母为零的平滑项,求和范围覆盖当前子块的像素集合。

参数优化选用Adam优化器,初始学习率为0.001,

批量大小为16,总迭代200轮。学习率按余弦退火衰减,前5轮进行线性预热,最小学习率降至初始值的十分之一,同时在验证Dice停滞时触发早停以抑制过拟合。为稳定梯度传播,引入权重衰减与梯度裁剪,阈值设为1.0,并把解码浅层赋予更高样本权重以强化细缝敏感度。训练在单卡GPU以混合精度开展,配合组归一化与小批量设定稳定收敛,同时在参数更新端引入滑动平均以平滑噪声梯度并提升收敛鲁棒性。

2.3 模型轻量化改进

针对Jetson平台的显存约束与汛前空窗期的边缘推断需求,本研究以结构化剪枝与量化感知训练为核心路径,将参数收缩约40%,并将单幅4K影像端到端推断时延压缩至0.2s量级。剪枝基于编码—解码对称拓扑与跳连保持,采用通道粒度结构化剪枝,结合滤波器权重的L1范数与通道梯度敏感度联合排序。浅层前两级编码层设置较低压缩率并固定跳连宽度,以保护毫米级细缝对低层纹理的依赖;瓶颈与高层解码阶段适度提高压缩率,并利用挤压与激励单元输出的通道权重作为稀疏正则引导,降低对裂缝关键通道的误删概率。所有保留通道数约束为8的整数倍,在上采样节点前引入 1×1 卷积进行通道重整,确保拼接维度对齐。剪枝采用迭代式流程与短周期微调,并借助知识蒸馏维持边界概率与细缝连通性。量化方面采用对称INT8与量化感知训练,权重逐通道缩放,激活逐张量缩放并结合百分位裁剪以稳定强光与背光场景;GroupNorm在导出阶段展开为定形张量缩放与加法序列,并融合卷积与线性缩放。剪枝与量化交替进行,首尾卷积与上采样插值保持FP16,其余算子下沉为INT8,通过卷积—归一化—激活三元组融合降低访存开销,最终在跳连对齐与注意力路径保留下实现轻量化U-Net在边缘端的可部署性与可维护性。

3 模型效果评估与工程应用验证

3.1 模型性能指标评估

鉴于边缘部署对鲁棒性的要求,本研究在不泄漏坝段的测试子集上开展像素级评估,选用精确率、召回率、F1值与IoU四项指标,并对直射、侧光与补光情境进行分层统计。由此把概率图经验证阈值裁剪为二值掩膜,按裂缝与背景两类像素计算混淆矩阵,并把同一坝段的连续瓦片进行合并求解全幅指标。进一步观察发现,改进后的注意力轻量化U-Net在弱边缘与复杂麻面纹理下保持稳定辨析能力,跨光照条件的指标波动收敛于合理区间。需重点关注的是,改进前后在不同光照与场景的均衡性提升,有助于空窗期扫描的时效与可复现性。

3.2 工程案例应用验证

结合该重力坝汛前空窗期的作业组织方式,本研究把改进注意力轻量化 U-Net 部署于 Jetson Xavier NX 边缘节点,联动工程单位的无人机低空巡检与悬索点位补拍流程,构建采集、瓦片切分、在线推断、工程师复核的闭环。为贴近运维现场的光照与纹理扰动,本研究在 2023 年汛前例行巡检中选取 100 张原始影像作为工程化样本,按照现场巡检规程由两名具备坝工经验的工程师进行独立复核并完成冲突仲裁,把输出

语义掩膜回填至坝面 GIS 底图以支撑跨坝段连续化对比。进一步观察发现,流水线以 512×512 瓦片在边缘端完成阈值裁剪与连通域跟踪,并把疑似异常在廊道口进行即时提示,人工仅对模型低置信度片段开展针对性复核,从而把盲区覆盖与作业连贯性同步推进。与人工基线对照的核心作业指标见表 1,速度倍率与漏检控制共同带动影像级判读的组织效率与复核可复现性提升,且不改变既有巡检记录与竣工档案的归档范式。

表 1 工程案例检测结果对比表

指标	人工巡检	改进注意力轻量化 U-Net	说明
样本量	100 张现场影像	100 张现场影像	同批次、同坝段
准确率	0.89	0.92	以像素级掩膜与仲裁结果为准
漏检率	0.19	0.03	以最终仲裁为口径统计
处理速度提升倍数	1×	15×	以人工判读为基线
边缘端单幅推断时延	—	0.2 s	4K 影像端到端时延
复核工作量占比	100%	30%	仅复核低置信度片段
输出形态	照片标注与记录文本	裂缝与渗水语义掩膜回填至 GIS	可叠加坝段历史版本
盲区覆盖	顶拱与背光侧受限	顶拱与背光侧覆盖	借助补光与分区航线实现

3.3 技术应用价值与展望

鉴于汛前空窗期短与坝面纹理复杂并存的运维语境,本研究把改进注意力轻量化 U-Net 嵌入边缘巡检链路,构建从影像到裂缝语义图层的自动化通道,把工程师从大规模初筛中解放出来,并把结果回填至坝面 GIS 与数字孪生,实现跨坝段与跨时相的可比对管理与闭环留痕。该路线对场景噪声与光照漂移具备较强适配性,为制定标准化作业规程与可推广的软硬一体化方案提供了路径。后续工作将推进可见光、近红外、热成像与超声的多模态融合,把裂缝边缘与内部劣化信号进行联合解译;构建面向季节与材性漂移的自监督域自适应框架,稳定跨年复测一致性;在边缘端完善不确定度评估与人机协同主动学习,压缩低置信度复核量;搭建边缘云协同的时空裂缝演化管理系统,把检测、追踪与维修计划联动起来^[7]。

了作业时效,识别结果与 GIS 联动支撑全坝面精细化管理。未来将进一步融合可见光、近红外、热成像与超声等多模态信息,探索自监督域自适应方法以增强跨季节泛化能力,完善人机协同与不确定度评估机制,构建边缘云协同的时空裂缝演化管理平台。

4 结束语

本研究围绕高坝运维实际,构建了改进注意力机制的轻量化 U-Net 裂缝智能识别方法,完成了从数据采集、预处理到模型训练、剪枝量化及边缘端部署的完整技术闭环。模型在多种光照与复杂纹理条件下保持稳定分割性能,工程验证显著降低了漏检率,提升

参考文献:

- [1] 徐裕民. 混凝土坝体裂缝产生原因分析[J]. 石材,2025(11):104-106.
- [2] 王强,高利宁. 水利工程中高拱坝施工技术的关键难点与对策研究[J]. 产品可靠性报告,2025(09):166-167.
- [3] 常旭东,何鑫,孙西文. 水利工程混凝土裂缝成因机理及控制措施[J]. 水泥,2025(09):116-119.
- [4] 陈远,赵亚伟,王光明,等. 基于 SSG-YOLOv8n 模型的砖砌墙体裂缝形态识别方法[J]. 工业建筑,2025,55(07):152-161.
- [5] 唐筱翔. 基于深度学习的混凝土墙体裂缝识别与三维重建[D]. 南宁:广西大学,2025.
- [6] 孟阳. 基于深度学习的混凝土裂缝智能检测与修复策略研究[J]. 城市建设理论研究(电子版),2026(07):100-102.
- [7] 李振全. 水利工程混凝土裂缝成因分析及控制技术研究[J]. 石化技术,2025,32(05):409-410.