



T/CECS G XXXX: 20XX

中国工程建设标准化协会标准
Standard of China Association for Engineering Construction
Standardization

公路装配式梁桥混凝土外观质量智能检测
规程

Specification for Intelligent Inspection of Concrete Appearance
Quality of Prefabricated Beam Bridges on Highways
(征求意见稿)

中国工程建设标准化协会 发布

Issued by China Association for Engineering Construction Standardization

中国工程建设标准化协会标准

公路装配式梁桥混凝土外观质量智能检测
规程

Specification for Intelligent Inspection of Concrete Appearance
Quality of Prefabricated Beam Bridges on Highways

T/CECS XXX-202X

主编单位：上海勘测设计研究院有限公司

发布机构：中国工程建设标准化协会

实施日期：20×× 年 ×× 月 ×× 日

人民交通出版社股份有限公司

北 京

前 言

根据中国工程建设标准化协会公路分会《关于开展 2024 年第二批中国工程建设标准化协会标准（CECS G）制修订项目编制工作的通知》（中建标公路〔2024〕279 号）的要求，由上海勘测设计研究院有限公司承担《公路装配式梁桥混凝土外观质量智能检测规程》（以下简称“本规程”）的制订工作。

编制组经广泛调查研究，认真总结实践经验，参考有关国际国内先进标准，并在广泛征求意见的基础上，完成了本规程的编写工作。

本规程重点结合公路工程装配式梁桥特点，规定了装配式梁桥混凝土外观质量智能检测应遵守的准则、技术要求及关键控制标准，并与相关标准规范协调配套。本标准共 7 章和 4 个附录，主要内容是：总则、术语、基本规定、智能检测系统技术要求、外观质量缺陷智能检测、检测数据、检测报告、附录 A、附录 B、附录 C、附录 D。

请注意本规程的某些内容可能直接或间接涉及专利，本规程的发布机构不承担识别这些专利的责任。

本规程基于通用的工程建设理论及原则编制，适用于本规程提出的应用条件。对于某些特定专项应用条件，使用本标准相关条文时，应对适用性及有效性进行验证。

本规程由中国工程建设标准化协会公路分会负责归口管理，由上海勘测设计研究院有限公司负责具体技术内容的解释，在执行过程中如有意见或建议，请函告本标准日常管理组，中国工程建设标准化协会公路分会（地址：北京市海淀区西土城路 8 号；邮编：100088；电话：010-62079839；传真：010-62079983；电子邮箱：shc@rioh.cn），或上海勘测设计研究院有限公司（地址：上海市虹口区逸仙路 388 号；邮编：200434；传真：021-65420093），以便修订时研用。

主编单位：

参编单位：

主 编：

主要参编人员：

主 审：

参与审查人员：

目次

1 总则.....	1
2 术语和符号.....	2
2.1 术语.....	2
2.2 符号.....	4
3 基本规定.....	5
4 智能检测系统技术要求.....	12
4.1 无人机系统.....	12
4.2 地面机器人系统.....	14
4.3 无人船系统.....	15
4.4 水下机器人系统.....	17
4.5 攀爬机器人系统.....	18
5 外观质量缺陷智能检测.....	20
5.1 表征参数及量值化.....	20
5.2 智能检测工作.....	21
5.3 智能检测记录与编码规则.....	25
5.4 现场测试记录.....	27
6 智能检测数据处理.....	31
6.1 数据采集.....	31
6.2 数据处理.....	32
6.3 数据管理.....	35
7 智能检测成果及报告.....	38
7.1 影像成果.....	38
7.2 检测报告.....	38
附录 A 桥梁结构巡检路线规划.....	39
附录 B 典型缺陷校验.....	42
附录 C 缺陷智能识别.....	48
附录 D 缺陷数据集制作.....	52

本标准用词用语说明.....	54
引用标准名录.....	55

Contents

1 General provisions	1
2 Terminology and Symbols	2
2.1 Terminology.....	2
2.2 Symbols	4
3 Basic regulations.....	5
4 Technical requirements for intelligent inspection system.....	12
4.1 Unmanned aerial vehicle system	12
4.2 Ground robot system.....	14
4.3 Unmanned surface vessel system	15
4.4 Underwater robot system.....	17
4.5 Climbing robot system.....	18
5 Intelligent inspection of appearance quality defects.....	20
5.1 Characteristic parameters and quantification.....	20
5.2 Intelligent inspection work	21
5.3 Intelligent inspection records and coding rules	25
5.4 On-site test records	27
6 Intelligent inspection data processing.....	31
6.1 Data collection	31
6.2 Data processing.....	32
6.3 Data management	35
7 Intelligent inspection achievements and reports.....	38
7.1 Image achievements.....	38
7.2 Inspection reports.....	38
Appendix A Route planning for bridge structure inspection	39
Appendix B Verification of typical defects.....	42
Appendix C Intelligent recognition of defects.....	48
Appendix D Production of defect datasets.....	52

Explanation of wording.....54

List of quoted standards55

1 总 则

1.0.1 为明确公路装配式梁桥混凝土外观质量智能检测工作程序，合理选择智能检测设备和方法，规范智能检测作业要求，制定本规程。

1.0.2 本规程适用于公路装配式梁桥混凝土外观质量的智能检测，其它结构型式的桥梁可参照使用。

1.0.3 公路装配式梁桥混凝土外观质量智能检测应在保证准确性和可靠性的前提下，根据各种智能检测设备和方法的特点和适用范围，结合现场条件因素等进行合理选择。

1.0.4 公路装配式梁桥混凝土外观质量智能检测除应符合本规程的规定外，尚应符合国家和行业现行有关标准的规定。

2 术语和符号

2.1 术语

2.1.1 智能检测系统 intelligent inspection system

携带检测仪器设备，集成传感器、人工智能、自动控制和数据分析等多种技术的平台系统。

2.1.2 智能检测 intelligent inspection

利用智能检测系统自动完成桥梁混凝土外观质量检测，并应用人工智能等方法对外观质量缺陷进行自动识别及分析的过程。

2.1.3 人工检测 manual inspection

由专业检测人员目视或操作仪器完成桥梁混凝土外观质量检测，并通过人工对外观质量缺陷进行识别及分析的过程。

2.1.4 感知 perception

智能检测系统通过处理由各种传感技术获取的信息，形成对自身、环境、检测目标的整体认知和建构的过程。

2.1.5 定位 localization

智能检测系统通过处理由各种传感技术获取的信息，确定自身及检测目标在环境地图上位置的过程。

2.1.6 快速巡检 quick inspection

使用智能检测系统利用大视场快速随机对桥梁结构外观质量缺陷开展满足日常巡查和经常性检查要求的巡检作业。

2.1.7 定向巡检 targeted inspection

使用智能检测系统利用小视场慢速定向对桥梁结构外观质量缺陷开展满足定期检查和特殊检查要求的巡检作业。

2.1.8 外观质量缺陷 apparent quality defects

结构表面采用目视或无损检测方法可发现的，影响桥梁构件表面质量或观感，且可能对结构耐久性、使用性能或安全性产生不利影响的缺陷与异常现象。

2.1.9 裂缝 crack

混凝土结构表面延伸到构件内部的缝隙。

2.1.10 孔洞 void

深度超过保护层厚度的孔穴。

2.1.11 露筋 exposed reinforcement

钢筋未被混凝土包裹而形成的外露。

2.1.12 蜂窝 honeycombing

混凝土结构表面缺失水泥浆形成的局部蜂窝样粗骨料外露。

2.1.13 麻面 hungry spots

混凝土结构表面局部缺浆、粗糙，或密集小凹坑。

2.1.14 疏松 local porosity

混凝土由于离析、振捣不足而形成的局部不密实。

2.1.15 夹渣 slag inclusion

混凝土中夹有杂物。

2.1.16 混凝土剥落 concrete spalling

混凝土表层脱落、粗集料外露的现象。严重时，成片状脱落，钢筋外露。

2.1.17 掉角 edge chipping

构件角边处混凝土局部掉落，或出现不规整缺陷。

2.1.18 错台 joint offset

混凝土分缝处上下层错开一定的距离形成台阶。

2.1.19 渗水 leakage

水透过混凝土构件，在表面形成湿渍、水迹或水滴的现象。

2.1.20 泛碱 efflorescence

混凝土内部的可溶性盐分随水分迁移至表面，水分蒸发后形成的白色粉末状或晶状物质。

2.1.21 钢筋锈胀 corrosion-induced expansion of reinforcement

钢筋发生锈蚀后体积膨胀，对周围混凝土产生张力，导致混凝土开裂或保护层脱落的现象。

2.1.22 冲蚀 erosion

因水流冲刷引起的构件局部缺损。

2.1.23 磨损 abrasion

构件在车辆、水流等外界作用下出现的集料和砂浆的表面磨损脱损现象。

2.1.24 图像尺度因子 Image Scale Factor

图像中单位像素所代表的真实物理长度，为表征数字图像坐标系与物理世界坐标系映射关系的关键参数。

2.2 符号

ISF ——图像尺度因子，mm/pixel；

h ——物距，mm；

f ——焦距，mm；

S ——传感器对角线尺寸，mm；

P ——图像对角线像素数量，pixel；

δ ——像素校验值；

M ——典型缺陷样本结构物的物理长度尺寸，mm；

m ——典型缺陷样本结构物长度方向所占像素数量，pixel；

S ——缺陷面积，mm²；

N_0 ——缺陷像素个数；

a ——单个像素实际面积，mm²。

L ——裂缝实际长度，mm；

L_0 ——裂缝骨架线像素个数；

W ——裂缝实际平均宽度，mm；

3 基本规定

3.0.1 下列情况下，公路装配式梁桥混凝土外观质量宜采用智能检测：

- 1 人工检测难以开展或人工检测存在较大安全风险时；
- 2 需要长时间连续检测或大面积检测，人工检测效率较低时；
- 3 需要应用自动化检测，形成数字化成果时。

3.0.2 公路装配式梁桥混凝土外观质量智能检测的工作流程宜按图 3.1 执行，样本标定及数据集验证流程宜按图 3.2 执行。

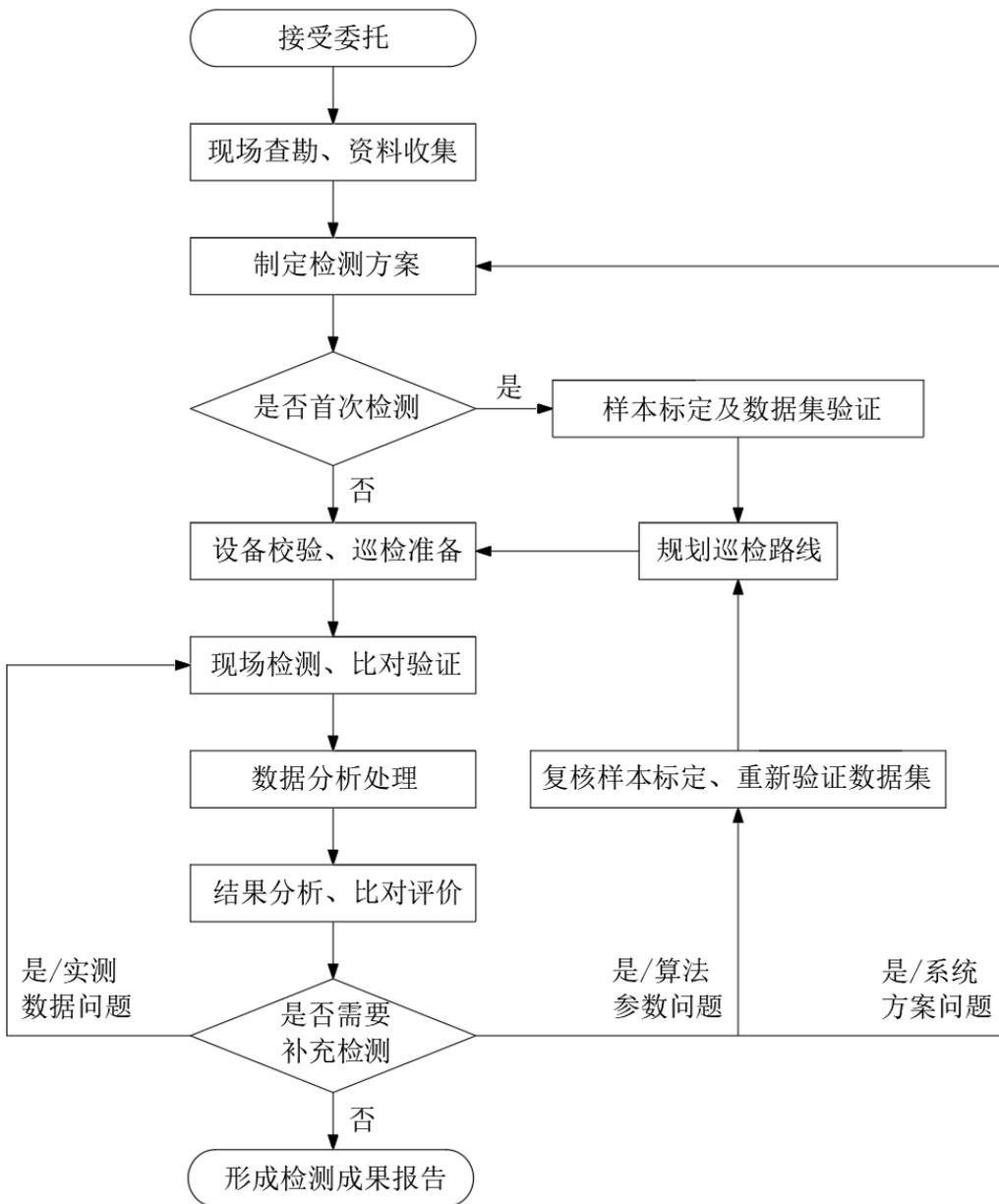


图 3.1 公路装配式梁桥混凝土外观质量智能检测的工作流程图

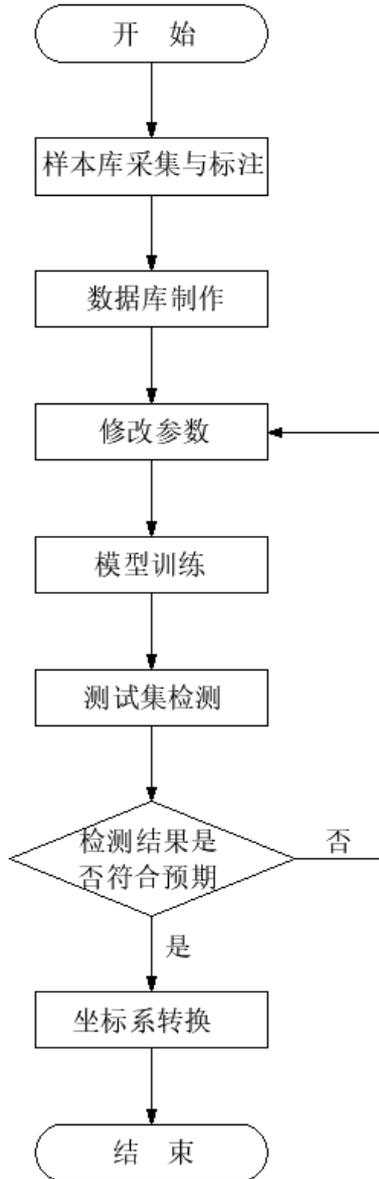


图 3.2 样本标定及数据集验证流程图

条文说明

公路装配式梁桥混凝土外观质量智能检测的工作流程图是对智能检测工作全过程和几个主要阶段的阐述。对于一般的公路装配式梁桥混凝土外观质量现场智能检测项目，流程图中的各个环节都是必不可少的；对于特殊项目的检测，根据检测目的和具体要求确定其检测程序和所包含的相应内容。

智能检测前期准备工作需在现场查勘和资料搜集的基础上，结合检测目的和需求，制定检测方案，着重关注智能检测系统选择和适应性分析。制定检测方案是检测工作的首要环节，其质量直接决定后续工作的成败。检测方案中对于智能检测系统选择，需充分考虑各类智能检测系统的优势和劣势，判断所选

设备和参数理论上能否满足检测精度要求。若为首次采用智能检测系统开展巡检工作，尚需开展样本标定及数据集验证和巡检路线规划工作。

样本标定及数据集验证流程参见图 3.2，通过现场试验了解智能检测系统对不同梁桥混凝土外观质量检测的适应性。一般先进行样本库采集和标注，剔除缺乏足够特征的样本，然后按照一定的策略进行训练数据集的制作。通过不断调整训练参数，使得训练后的网络模型检测效果符合预期。最后添加坐标系转换功能，将智能设备检测到的缺陷目标的坐标从像素坐标转换为世界坐标，从而使得后端人员能够获知缺陷的位置。通过样本采集和整理、数据筛选和数据集标注完成实验数据集的制作，建立数据集图像。数据集图像按照一定比例划分为训练集、验证集和测试集。对数据集进行标注，然后将数据集进行一定程度的随机打乱以避免模型在训练时陷入过拟合，同时也应避免数据集过于混乱而导致模型陷入欠拟合状态。再采用神经网络模型的深度学习方法进行缺陷检测。

关于巡检路线的规划可参考附录 A，若为手动控制巡检，由人工操纵智能检测系统载体，除必要的安全规范外无需约束；若采用固定路线巡检和自主智能巡检，由智能检测系统自主扫描规划巡检路线，需进行现场试验的适应性研究，开展针对其检测效率和检测死角做出相关约束的研究。

现场的检测工作按照既定的检测方案有序开展，检测人员依据现场检测场地、环境、交通组织情况等，有针对性地对智能检测系统进行调试和校验，做好相关准备工作后方可开展检测工作，以保障测试安全和数据精度。

为确保智能检测数据的准确可靠，建议在实施现场检测的同时，同步开展比对验证工作，并对检测数据进行实时整理、分析与处理，特别要重视对数据质量的即时检查。数据采集完成后，应立即对原始数据质量进行初步评估，重点核查图像清晰度、有无漏拍、重叠率是否达标等关键指标。若发现数据质量不符合要求，应及时组织重采或补采。

智能化检测的结果分析与比对评价是确保检测质量的关键环节。建议通过典型缺陷试件标定与人工抽样检测相结合的方式，对检测结果的精度进行综合判定。当发现精度不满足要求时，应根据问题根源采取针对性措施：若是算法参数问题，应首先复核样本标定并重新验证数据集，在调整算法或参数后重新开展检测分析；若由实测数据质量引起，则需返回现场检测环节，组织数据重新采集；若发现检测方案存在系统根本性缺陷，如智能检测系统选型不当导致精度无法达标等，则必须重新制定检测方案，从源头上进行系统修正。

当结果分析与比对评价表明实测数据质量合格后，方可形成最终的检测成果报告。

3.0.3 智能检测系统获取的混凝土外观质量应将缺陷进行参数化和量值化。通过算法识别检测时，应对缺陷样本进行标定、训练制作数据集并建立完善的参数

化模型，将缺陷量化为位置坐标、面积、长宽、深度等特征值，使得通过算法训练后的模型检测成果符合实际情况。

条文说明：

智能化外观质量检测中，智能检测系统可通过视觉、红外热成像或声呐检测等传感器获取的缺陷图像，再通过合理的算法处理进行缺陷量值化和参数化。实现量值化和参数化的首要实施步骤是缺陷识别，当前技术发展迅猛，衍生了多种识别方法，包括：利用 YOLO、SSD、RCNN 等基于深度学习的图像识别算法对缺陷的快速实时识别，从而获取图像中缺陷的具体区域；量值化和参数化的第二步是缺陷的边缘检测与计算，利用经典的 Canny、OTSU 算法、图像形态学处理方法等，可有效的获得缺陷的边缘/轮廓信息以及二值化后的缺陷图像；第三步是数值量化，即将缺陷量化为位置坐标、面积、长宽、分布范围等特征值。

3.0.4 开展现场检测工作前，应根据不同桥型、待巡检部位结构特点、环境条件等制定智能检测方案，合理选择一种或多种智能检测设备。搭载的检测设备应根据精度、量程、使用条件等要求合理选择，并定期进行标定或校准。混凝土外观质量缺陷的智能检测设备的选择可按表 3.1 的规定执行。

表 3.1 混凝土外观质量缺陷的智能检测设备的选择

序号	外观质量缺陷类别	表征参数	推荐的智能检测设备
1	裂缝	累计分布范围、累计数量、位置、最大长度、最大宽度	高分辨率可见光相机、线激光扫描仪、激光雷达
2	蜂窝、掉角、孔洞、混凝土剥落、错台、磨损	范围、累计面积、位置、最大深度	高分辨率可见光相机、深度相机、双目相机、激光雷达
3	麻面、疏松、夹渣	范围、累计面积、位置	高分辨率可见光相机、激光雷达
4	渗水、泛碱	范围、累计面积、位置	高分辨率可见光相机、热成像相机（仅渗水）、偏振光相机、多/高光谱相机、激光雷达
5	露筋、钢筋锈胀	范围、累计面积、位置、最大长度	高分辨率可见光相机、深度相机、双目相机、激光雷达
6	冲蚀、水下混凝土剥落、水下孔洞	范围、累计面积、位置、最大深度	水下高清相机、侧扫声呐、水下三维点云声呐

3.0.5 智能检测系统进行外观质量缺陷检测应满足以下基本要求：

- 1 具备通过各种传感技术进行自主感知和定位的能力。
- 2 具备对缺陷种类进行智能识别和准确划分的能力。
- 3 具备对所识别的缺陷进行量值化和参数化的能力。

条文说明：

外观质量的缺陷多具有明显的视觉特征或材料学特征，因此在人工检测过程中也主要采用人工观察的方式。近年来，基于深度学习的图像处理方法因其具有良好的适用性和准确性已被广泛应用于工业缺陷检测中。常见的工业缺陷检测算法包括 YOLO 和 SSD 等一阶检测算法，此类算法具有网络结构简单，泛化能力强等特点，因此选择基于神经网络模型的深度学习方法进行缺陷检测具有较好的普适性。

以 YOLOv5s 模型为例，YOLOv5 神经网络模型如**错误!未找到引用源。**3 所示，分为输入端、Backbone 主干网络、Neck 网络和 Head 输出端等四个部分，YOLOv5 其他模型均是在此基础上加深加宽或简化网络。基于 YOLOv5 的裂缝检测示例如**错误!未找到引用源。**3.4 所示。

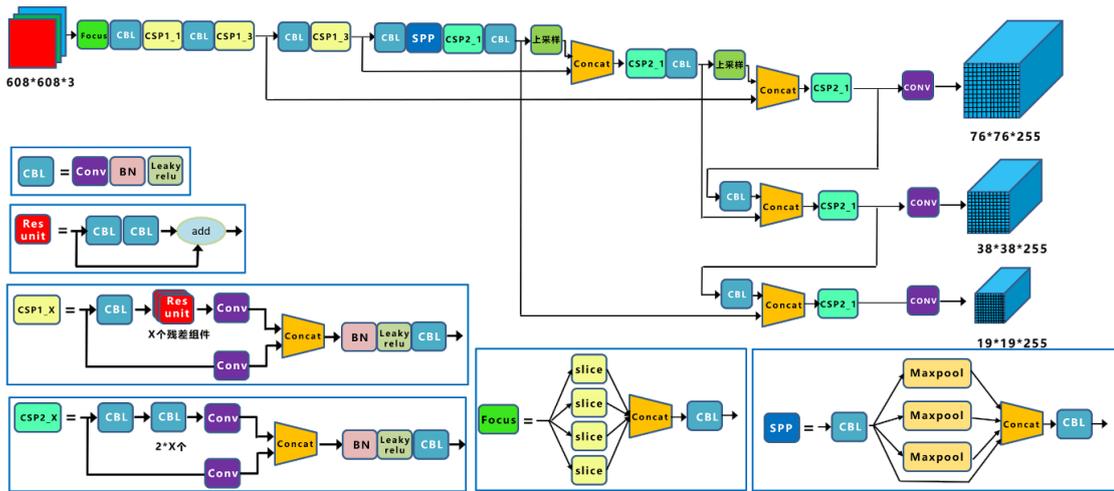
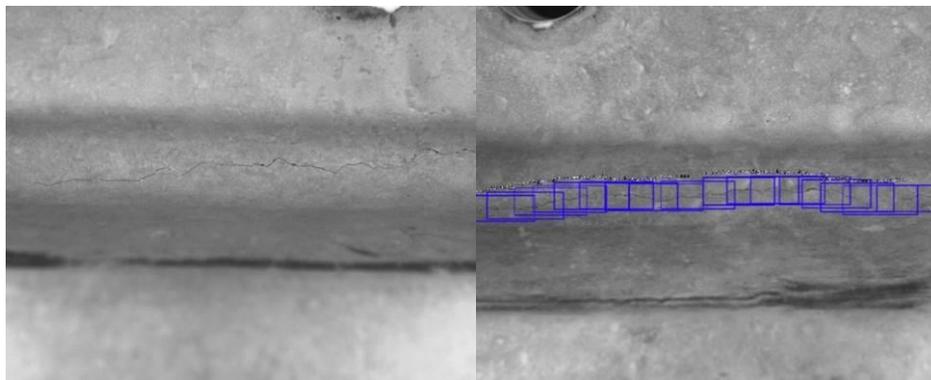


图 3.3 YOLOv5 网络结构图



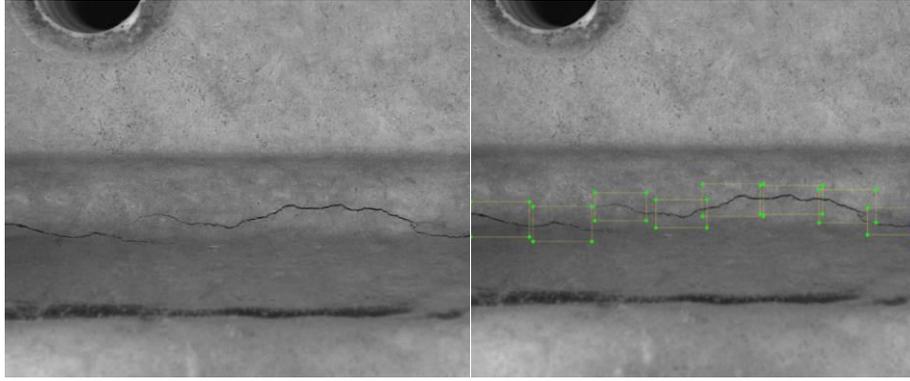


图 3.4 基于深度学习的裂缝检测效果示例

针对渗水检测，由于渗水区域水的存在导致其结构材料的热力学特征与其余部分有明显差异，因此为更好的发现潜在渗水和已存在的渗水，可采用红外热成像和高清彩色图像相结合的基于深度学习的联合渗漏检测方法。通过采用 YOLO 方法对相关样本数据集进行学习，可有效的实现对渗漏区域的高效、可靠检测，基于热力学特征的检测效果如错误!未找到引用源。3.5 所示。

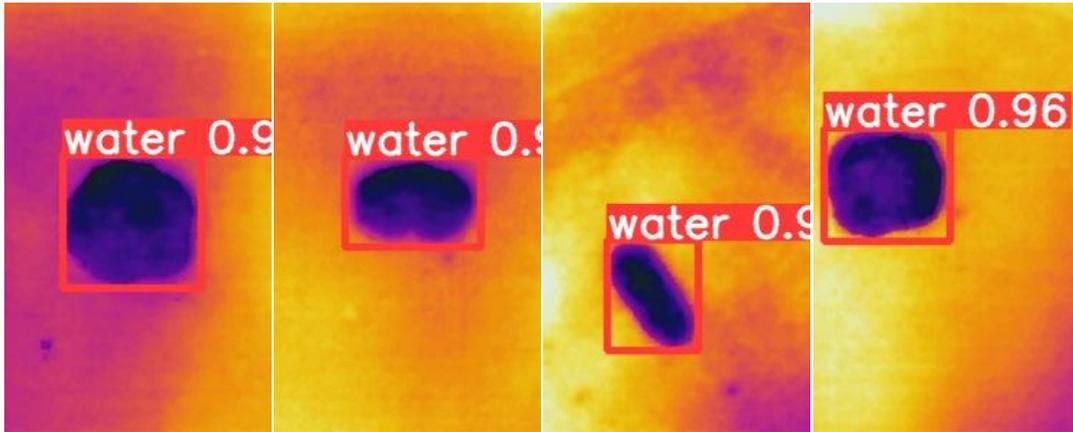
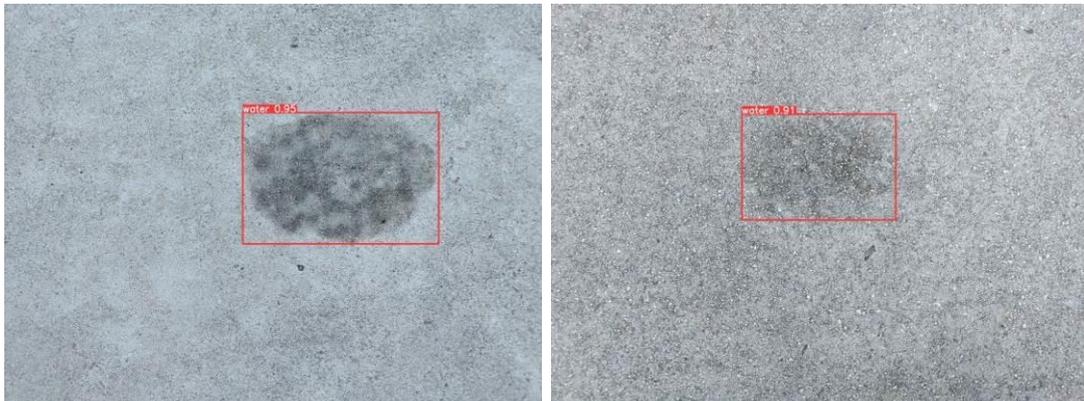


图 3.5 基于深度学习和热成像信息的渗漏检测效果示例

除采用热成像信息外，还通过采用常见的高清图像检测方式辅助检测。在渗水区域往往存在如错误!未找到引用源。3.6 的明显视觉特征，因此，同样可通过深度学习与边缘检测方法相结合，对相关样本进行学习训练，可有效的对常规图像中的渗漏区域进行快速的检测。



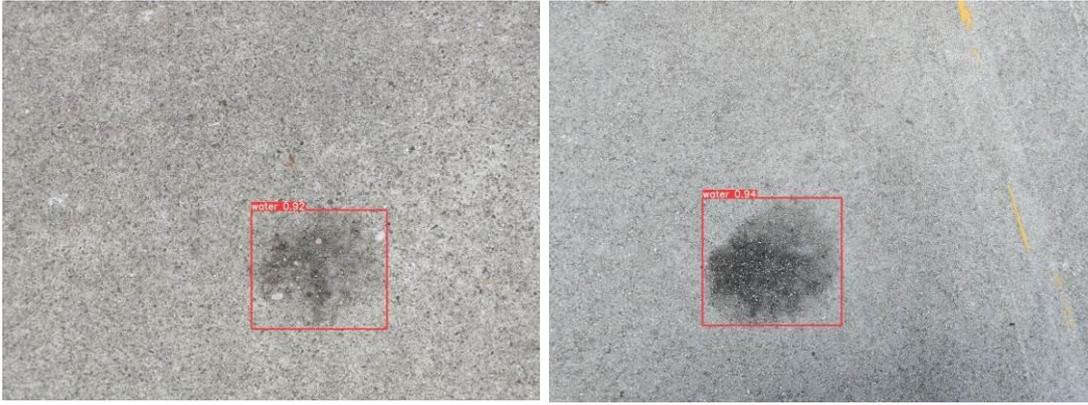


图 3.6 常规图像中的渗漏区域视觉特征示例

为避免数据量过低易导致神经网络出现过拟合现象，可进一步利用已建成项目建立典型混凝土结构渗漏的红外热成像图像数据库以及陈旧型渗漏和普通型渗漏的 RGB 图像数据库，为 YOLO 算法提供训练素材。针对外观质量的量值化测试多种方法的适用性并与已有数据集进行对比，从中选择一种或多种操作方法形成标准统一的量值化步骤。对于不同类别的外观质量缺陷，结合其量值化后的特征值再次分类、命名和定义，并与搜集的资料比对验证其重复性和标准性。

3.0.6 公路装配式梁桥混凝土外观质量智能检测的技术资料宜归入桥梁养护技术档案。对于已建立养护管理系统的桥梁，其检测数据和成果宜自动同步上传至管理系统。

4 智能检测系统技术要求

4.1 无人机系统

4.1.1 无人机系统组成宜满足以下要求：

- 1 宜选择多旋翼无人机。
- 2 搭载的设备可包括激光雷达、深度相机、高分辨率变焦可见光相机、红外热成像相机、三轴云台、高精度卫星定位模块等。
- 3 可搭载图像处理机载计算机系统实现复杂神经网络部署、进行大负荷并行运算、处理多种传感器数据。
- 4 宜配备专用地面站用于规划巡检作业路径、观察飞行状态、收集巡检结果等功能。

4.1.2 无人机系统技术性能宜满足以下要求：

- 1 满载续航时间不小于 30 min，遥控器遥控距离不小于 2km。
- 2 水平悬停精度在无卫星定位信号条件下不大于 $\pm 0.8\text{m}$ ，在有卫星定位信号条件下不大于 $\pm 0.5\text{m}$ ，在高精度定位条件下不大于 $\pm 0.1\text{m}$ 。
- 3 垂直悬停精度在无卫星定位信号条件下不大于 $\pm 0.6\text{m}$ ，在有卫星定位信号条件下不大于 $\pm 0.3\text{m}$ ，在高精度定位条件下不大于 $\pm 0.1\text{m}$ 。
- 4 具备上、下及水平方向全向避障功能，避障距离不小于 2m。
- 5 具备在有/无卫星定位信号条件下自主感知、避障、定位与导航功能，可自主规划巡检路线。
- 6 支持通过终端站控制相机执行拍照、录像指令、调整相机变焦倍数。
- 7 与终端站间保持图像稳定传输距离的能力应不小于 2km。
- 8 激光雷达具备 360°水平全向感知视野，垂直感知视野不小于 59°，扫描速度不小于 20 万点/秒，感知测量距离不小于 40m。
- 9 控制云台具备三轴自动稳定功能，控制精度满足不大于 $\pm 0.05^\circ$ 。
- 10 相机拍摄照片像素不小于 200 万，拍摄视频分辨率不小于 1920×1080 pixel，相机具备手动触发和自动触发功能。
- 11 红外热成像仪分辨率不小于 640×512 pixel，热灵敏度不大于 50mk@25°C，支持所有区域的温度测量。

4.1.3 无人机系统适应性宜满足以下要求：

- 1 现场作业风速不大于 6 级风。
- 2 机体主要电子设备部分防水等级不小于 IPX5。
- 3 现场作业温度在-10℃至 40℃范围内。

4.1.4 无人机系统现场作业宜满足以下要求：

- 1 宜配备飞行操作人员。飞行操作人员应具备无人机操作维护和突发情况处置能力，通过相应机型的操作培训，符合中国民用航空局 CAAC 对无人机驾驶员资质要求，并持对应机型无人机执照上岗。
- 2 起飞、降落点宜选取平坦的地方，场地面积不小于 2m×2m。
- 3 现场作业前应检查确认无人机各项数据及功能正常，包括无人机及遥控器电量、卫星数目、图传及拍照测试、指南针校对等。提前了解待巡检结构部位所在区域的禁飞情况，按规定提前申请，获得批准后才能作业。在待巡检结构周围，控制无人机进行性能校验调试，空中调试时间不小于 2min。无人机宜在视距内飞行且无遮挡，沿线应无影响飞行安全的因素，并制定特殊情况下停飞、避让等应对措施。
- 4 起飞和降落时，现场所有人员与无人机始终保持足够的安全距离，安全距离不小于 3m。
- 5 无人机与桥梁待检测部位的距离不小于 2m，无人机靠近桥梁待检测部位时，提升及平移速度不大于 1m/s。采用具备全向高精度避障、接触式探测或配备有防护罩的专用无人机进行抵近检查时，可在确保安全的前提下，不受上述距离限制。
- 6 根据不同检测需求，分别采用快速巡检和定向巡检两种方法采集外观质量缺陷数据。日常巡查、经常检查可采用快速巡检方法，定期检查、特殊检查宜采用快速巡检和定向巡检相结合的方法。
- 7 定向巡检方法图像像素点分辨率不低于 0.5mm/pixel。
- 8 快速巡检方法巡检方向重叠率和旁向重叠率不低于 30%，也可根据巡检现场实际情况，适当提高重叠率。

4.2 地面机器人系统

4.2.1 地面机器人系统组成宜满足以下要求：

- 1 宜选择无人车或多足机器人。
- 2 搭载的设备包括激光雷达、深度相机、高分辨率变焦可见光相机、红外热成像相机、三轴云台、高精度卫星定位模块等设备。
- 3 可搭载图像处理机载计算机系统实现复杂神经网络部署、进行大负荷并行运算、处理多种传感器数据。
- 4 宜配备专用地面站用于规划巡检作业路径、观察运行状态、收集巡检结果等功能。

4.2.2 地面机器人系统技术性能宜满足以下要求：

- 1 满载续航时间不小于 120min，遥控器遥控距离不小于 2km。
- 2 具备前、后、左、右四向全方位避障功能，避障距离不小于 1m。
- 3 具备在有/无卫星定位信号条件下自主感知、避障、定位、导航功能，可自主规划巡检路线。
- 4 支持通过终端站控制相机执行拍照、录像指令、调整相机变焦倍数。
- 5 与终端站间保持图像稳定传输距离的能力应不小于 2km。
- 6 激光雷达具备 360°水平全向感知视野，垂直感知视野不小于 $\pm 15^\circ$ ，扫描速度不小于 20 万点/秒，感知测量距离不小于 40m。
- 7 控制云台具备三轴自动稳定功能，控制精度满足不大于 $\pm 0.05^\circ$ 。
- 8 相机拍摄照片像素不小于 200 万，拍摄视频分辨率不小于 1920×1080 pixel，相机具备手动触发和自动触发功能。
- 9 红外热成像相机分辨率不小于 640×512pixel，热灵敏度不大于 50mk@25°C，支持所有区域的温度测量。

4.2.3 地面机器人系统适应性宜满足以下要求：

- 1 具备一定的越障能力，并能在特殊情况下自主采取停车、避让等应对措施。
- 2 机体主要电子设备部分防水等级不小于 IPX4。
- 3 现场作业温度在-10°C至 40°C范围内。

4.2.4 地面机器人系统现场作业宜满足以下要求：

- 1 宜配备地面机器人操作人员。操作人员具备地面机器人操作维护和突发情况处置能力，并通过相应机型的操作培训。
- 2 现场作业前应检查确认地面机器人各项数据及功能正常，包括地面机器人及遥控器电量、通讯信号强度、图传及拍照测试、指南针校对等。
- 3 操作人员应同时监控地面机器人姿态，及时对姿态进行调整，注意线路周围的障碍物。
- 4 根据不同检测需求，分别采用快速巡检和定向巡检两种方法采集外观质量缺陷数据。日常巡查、经常检查可采用快速巡检方法，定期检查、特殊检查宜采用快速巡检和定向巡检相结合的方法。
- 5 定向巡检方法图像像素点分辨率不低于 0.5mm/pixel。
- 6 快速巡检方法巡检方向重叠率和旁向重叠率不低于 30%，也可根据巡检现场实际情况，适当提高重叠率。

4.3 无人船系统

4.3.1 无人船系统组成宜满足以下要求：

- 1 宜选择纯电驱动的无人船。
- 2 搭载的设备可包括激光雷达、高分辨率变焦可见光相机、三轴云台、水下三维点云声呐、侧扫声呐、导航定位系统等设备。
- 3 宜配备水面控制台操作无人船运动及工作状态，实时展示无人船声呐及其他检测设备数据及状态，可通过监视窗口调试检测参数并存储检测数据，水面控制台应当保证水上作业的安全性及舒适性。
- 4 宜配备专用地面站用于规划巡检作业路径、观察运行状态、收集巡检结果等功能。

4.3.2 无人船系统技术性能宜满足以下要求：

- 1 满载续航时间不小于 120min，遥控器遥控距离不小于 2km。
- 2 无人船系统抗流能力不小于 3 节；本体结构具有开放性，便于搭载检测设备，水面控制台能提供额外传感器控制输入。
- 3 激光雷达具备 360°水平全向感知视野，垂直感知视野不小于±15°，扫描速度不小于 20 万点/秒，感知测量距离不小于 40m。

- 4 控制云台具备三轴自动稳定功能，控制精度满足不大于 $\pm 0.05^\circ$ 。
- 5 相机拍摄照片像素不小于 200 万，拍摄视频分辨率不小于 1920×1080 pixel，相机具备手动触发和自动触发功能。
- 6 水下三维点云声呐最大扫描距离不小于 10m，工作频率不小于 1300kHz，最大耐压水深不小于 100m，波束大小不大于 $1^\circ \times 1^\circ$ ，距离分辨率不大于 15mm，配套的采集软件宜具有采集数据、测量目标尺寸大小、实时记录影像及回放等功能。
- 7 侧扫声呐的水平波束角不大于 1.5° ，记录方式采用数字记录，配备姿态传感器，配套的采集软件宜具有实时记录时间、航向、侧扫声呐数据、调整发射功率和回放等功能。

4.3.3 无人船系统适应性应满足以下要求：

- 1 现场作业流速应符合设备抵抗水流性能的要求，流速不大于 2 节。
- 2 机体主要电子设备部分防水等级不小于 IPX5。
- 3 现场作业水温应符合设备适用温度的要求。
- 4 现场作业水域浪涌应符合设备安全部署要求。
- 5 现场作业气候应符合安全作业条件，应无大雨、大雪、大雾、雷电、冰雹、大浪等恶劣气象条件。

4.3.4 无人船系统现场作业应满足以下要求：

- 1 宜配备无人船操作人员。操作人员应具备无人船操作维护和突发情况处置能力，通过相应机型的操作培训。
- 2 采用水下三维点云声呐和侧扫声呐对冲蚀、水下混凝土剥落、水下孔洞进行检测时，应对常水位以下基础逐一进行检测。
- 3 数据采集按照规划测线进行连续采集，使用配备的导航系统记录完整的测线轨迹，通过后处理软件生成声呐图像。
- 4 标识和记录缺陷的位置及程度，结合桥梁结构基础的信息，识别和剔除异常数据，声呐图像不清晰或测量尺寸与基础信息不符合时，应进行复测。

4.4 水下机器人系统

4.4.1 水下机器人系统组成宜满足以下要求：

- 1 宜选择观测级水下机器人。
- 2 搭载的设备可包括水下高分辨率可见光相机、水下三维点云声呐、侧扫声呐、导航定位系统等；
- 3 宜配备水面控制台操作水下机器人运动及工作状态，实时展示检测数据及信息，可通过监视窗口调试检测参数并存储检测数据，水面控制台应当保证水上作业的安全性及舒适性。

4.4.2 水下机器人系统技术性能宜满足以下要求：

- 1 水下机器人系统抗流能力不小于 3 节；本体结构具有开放性，便于搭载检测设备，水面控制台能提供额外传感器控制输入，宜搭配功能机械手，可完成一定的水下作业任务。
- 2 水下高清相机像素不小于 200 万，拍摄视频分辨率不小于 1920×1080 pixel，水下高清相机和照明设施能同时转动，保证摄像机旋转角度内照明无死角。
- 3 成像声呐系统包括声呐探头、声呐主机、旋转云台、数据采集与处理软件，扫描范围满足从 0°~360°连续扫描，垂直波束宽度在 15°~35°范围内，水平波束宽度在 0.8°~3°范围内，声波脉冲宽度在 5μs~1000μs。

4.4.3 水下机器人系统适应性应满足以下要求：

- 1 现场作业流速应符合设备抵抗水流性能的要求，流速不大于 2 节。
- 2 现场作业水温应符合设备适用温度的要求。
- 3 现场作业海域浪涌应符合设备安全部署要求。
- 4 现场作业气候应符合安全作业条件，应无大雨、大雪、大雾、雷电、冰雹、大浪等恶劣气象条件。

4.4.4 水下机器人系统现场作业宜满足以下要求：

- 1 宜配备水下机器人操作人员。操作人员应具备水下机器人操作维护和突发情况处置能力，通过相应机型的操作培训。
- 2 水下机器人系统入水工作前宜进行干测试，通过干测试验证水下机器人与搭载设备各部件之间的耦合及运行情况。

- 3 通过作业船舶运载水下机器人系统至任务目的地，对水下机器人进行吊放部署作业，水下机器人开展检测任务并进行记录，水下机器人返回作业船舶进行回收，全部作业结束。
- 4 采用声呐成像检测时，遵循由远及近、由宏观至局部的原则，三维成像声呐应逐站采集空间数字信息。根据被测水域环境，调整声速、强度、伽马值使其能分辨最小待检目标。根据被测结构形态，调整声呐的探头方向使其清晰展现结构物的表观特征。数据采集过程中因搭载平台晃动造成数据无法拼接或改正，仪器长时间未校验，换能器杂波影响被测目标的检测精度与效果时，需要补测或重测。
- 5 采用高清水下摄像机进行检测时，遵循点式、线式的布置原则，测点、测线宜根据结构形态、走势而定。根据测区水域环境，调整、贴近被测水工建筑物表观，使其能清晰分辨待检目标。

4.5 攀爬机器人系统

4.5.1 攀爬机器人系统组成宜满足以下要求：

- 1 宜选择负压式、捆绑式等攀爬机器人。
- 2 搭载的设备可包括激光雷达、深度相机、高分辨率变焦可见光相机、红外热成像相机、三轴云台、六自由度活动机械臂、高精度卫星定位模块等。
- 3 可搭载图像处理机载计算机系统实现复杂神经网络部署、进行大负荷并行运算、处理多种传感器数据。
- 4 宜配备专用地面站用于规划巡检作业路径、观察运行状态、收集巡检结果等功能。

4.5.2 攀爬机器人系统技术性能宜满足以下要求：

- 1 攀爬高度不小于 10m，具备可变径能力；
- 2 具备在有/无卫星定位信号条件下自主感知、避障、定位、导航功能，可自主规划巡检路线；
- 3 支持通过终端站控制相机执行拍照、录像指令、调整相机变焦倍数；
- 4 与终端站间保持图像稳定传输距离的能力应不小于 200km；

- 5 激光雷达具备 360°水平全向感知视野，垂直感知视野不小于 15°，扫描速度不小于 20 万点/秒，感知测量距离不小于 40m；
- 6 控制云台具备三轴自动稳定功能，控制精度满足不大于 $\pm 0.05^\circ$ ；
- 7 相机拍摄照片像素不小于 200 万，拍摄视频分辨率不小于 1920×1080 pixel，相机具备手动触发和自动触发功能。

4.5.3 攀爬机器人系统适应性宜满足以下要求：

- 1 攀爬机器人宜在视距内行走且无遮挡；
- 2 宜具备防坠落自主紧急制动或坠落缓冲功能；
- 3 机体主要电子设备部分防水等级不小于 IPX3；
- 4 现场作业温度在-10℃至 40℃范围内。

4.5.4 攀爬机器人系统现场作业宜满足以下要求：

- 1 宜配备攀爬机器人操作人员。操作人员应具备攀爬机器人操作维护和突发情况处置能力，通过相应机型的操作培训；
- 2 现场作业前应检查确认攀爬机器人各项数据及功能正常，包括攀爬机器人及防坠落自主紧急制动或坠落缓冲功能、通讯信号、图传及拍照测试、指南针校对等。

5 外观质量缺陷智能检测

5.1 表征参数及量值化

5.1.1 公路装配式梁桥混凝土外观质量缺陷类别主要包括裂缝、孔洞、露筋、蜂窝、麻面、疏松、夹渣、混凝土剥落、掉角、错台、渗水、泛碱、钢筋锈胀、冲蚀、磨损等。

5.1.2 混凝土外观质量缺陷智能检测的表征参数和量值化精度要求宜符合表5.1.1的规定。

表 5.1.1 混凝土外观质量缺陷智能检测的表征参数和量值化精度要求

序号	外观质量缺陷类别	表征参数	量值化	精度要求
1	裂缝	累计分布范围	长 (L) × 宽 (W)	0.01m×0.01m
		累计数量	数量 N_{sum}	1
		位置	坐标 (X、Y、Z)	0.01m
		最大长度	长度 L_{max}	0.01m
		最大宽度	宽度 W_{max}	0.02mm
2	蜂窝、掉角、孔洞、混凝土剥落、错台、磨损	范围	长 (L) × 宽 (W)	0.01m×0.01m
		累计面积	面积 S_{sum}	0.01m ²
		位置	坐标 (X、Y、Z)	0.01m
		最大深度	深度 D_{max}	0.01m
3	麻面、疏松、夹渣、渗水、泛碱	范围	长 (L) × 宽 (W)	0.01m×0.01m
		累计面积	面积 S_{sum}	0.01m ²
		位置	坐标 (X、Y、Z)	0.01m
4	露筋、钢筋锈胀	范围	长 (L) × 宽 (W)	0.01m×0.01m
		累计面积	面积 S_{sum}	0.01m ²
		位置	坐标 (X、Y、Z)	0.01m
		最大长度	长度 L_{max}	0.01m
5	冲蚀、水下混凝土剥落、水下孔洞	范围	长 (L) × 宽 (W)	0.01m×0.01m
		累计面积	面积 S_{sum}	0.01m ²
		位置	坐标 (X、Y、Z)	0.01m
		最大深度	长度 L_{max}	0.01m

5.1.3 公路装配式梁桥常见的混凝土裂缝重点检测部位和典型裂缝特征可按表 5.1.2 取用。

表 5.1.2 公路装配式梁桥常见的混凝土裂缝重点检测部位和典型裂缝特征

桥型	重点检测部位	典型裂缝特征
简支梁桥	主梁跨中区域	梁板底面横向裂缝，或延伸至侧面
	梁端支座附近	自支座侧向跨中斜向上开展，与水平方向成 30°~60°角
	柱式墩台的盖梁	盖梁墩顶竖向裂缝，上宽下窄；靠桥墩斜向上发展斜向裂缝，与水平方向成 30°~60°角
	柱式桥墩、桥墩与盖梁（墩帽）连接处、墩底	环向裂缝、竖向裂缝
	简支转连续支座位置上翼缘	上翼缘混凝土斜向开裂
连续梁桥	主梁跨中区域	底面横向裂缝、腹板竖向裂缝
	主拉应力较大的腹板区域（一般约为跨径 1/4 处及其附近）	顶面（铺装层）横向裂缝或梁侧上部裂缝、腹板斜裂缝
	桥墩处梁体上部及其附近	腹板斜裂缝、沿预应力管道的纵向裂缝

5.2 智能检测工作

5.2.1 智能检测工作方案应包括下列内容：

- 1 桥梁概况。包括桥梁的基本信息，结构特点及以往检查、检测、维修加固情况说明等；
- 2 现场踏勘情况。包括桥梁周边环境，通讯、光照、风力及温湿度等作业条件，影响智能检测设备作业的潜在风险，并评估对检测作业的影响和拟定应对措施等；
- 3 智能检测依据及工作流程。包括智能检测所依据的标准规范，以及相关的设计、交竣工验收和历年定检报告等技术资料。结合实际情况按本规程第 3.0.2 条制订外观质量智能检测工作和样本标定及数据集验证流程；
- 4 构件编号及缺陷记录。对一般桥梁智能检测的构件编号及缺陷记录规则宜符合行业标准《在用公路桥梁现场检测技术规程》（JTG/T5214）附

录 A 和附录 B 的规定。对建立了养护系统的桥梁，可参照养护系统的规定制定；

- 5 智能检测设备及工作内容。根据桥型确定外观质量检查内容及检查重点，明确现场采用的智能检测系统、所搭载的检测设备、机器人感知和定位方法、巡检路线规划、外观质量缺陷识别方法及相关要求；
- 6 智能检测成果评价方法及流程。明确外观质量缺陷评价所依据的规范，制订具体的外观质量智能检测成果评价方法和人工检测抽样比对方案及流程；
- 7 组织实施。包括人员组织、交通组织、安全保障措施、质量保证措施以及应急预案等。

5.2.2 现场检测前，宜开展现场踏勘，对影响现场作业的强电磁干扰源、障碍物、空域及水域限制等潜在风险源逐一排查；对作业期间的通讯、光照、风力、降水及温湿度等环境条件是否满足作业要求逐一确认并拟定应对措施。

条文说明

现场踏勘是制定检测方案的重要环节，核心在于识别现场存在的典型缺陷或异常状况，标注待检桥梁中需重点关注的典型构件位置及特殊构造细节，以精准确定后续检测重点。同时，通过现场踏勘评估作业环境风险。是否存在无法规避、定位的强电磁干扰源，持续不稳定的定位/通信信号，检测路径与高压线等危险源安全距离不足，或作业空域/水域受限且无法获得许可等情形，以评判是否适合使用智能检测设备。仅当采取充分安全保障措施并获得所有必要许可后，方可在此类高风险场景下考虑使用智能检测设备。此外，现场检测宜选择光线充足、柔和的时间段，避免逆光及光照剧烈变化；光照不足时应配置补光装置。针对无人机检测，需高度警惕桥梁峡谷风、横风引发的局部强风效应，其作业允许的最大风速应严格遵守所用无人机的性能指标与操作手册要求。

5.2.3 现场检测前，智能巡检路线可按本标准附录A进行规划，并包括下列重点部位和构件：

- 1 主要承重构件和结构重要部位；
- 2 结构受力复杂和构造薄弱部位；
- 3 结构发生异常变形部位；
- 4 曾出现过结构性裂缝的构件或部位。

条文说明

由于现阶段智能检测设备和AI算法均无法实现对结构性裂缝和非结构性裂缝的智能检测识别，也无法自动区分结构受力复杂和构造薄弱部位，智能巡检路线规划时，建议通过人工前期干预指引智能检测系统重点关注易产生影响结构安全的结构性裂缝的重点部位和构件。

5.2.4 现场检测前，宜使用典型缺陷试件按本标准附录B对智能检测系统进行校验。

条文说明

成像设备参数（如相机、镜头）直接影响图像的畸变程度与分辨率，而现场光照条件则显著影响成像质量。这两者共同决定了图像数据的优劣，进而对智能算法的检测精度产生决定性影响。为确保智能检测结果的准确性与可靠性，建议在现场检测前进行系统校验：使用包含典型缺陷的专用试件进行校验，并将智能检测结果与典型缺陷试件进行比对评价。若发现校验结果存在异常，需及时对检测设备参数、智能算法模型进行针对性调整，并同步复核样本数据库在现场环境下的适应性。调整后需再次使用典型缺陷试件复测验证，直至校验结果符合要求为止。

5.2.5 现场检测时，选用智能检测系统应具备良好的集成性和扩展性，确保不同模块间的协调工作，以适应多样化的检测任务。

条文说明

智能检测系统通过其集成性，使不同检测设备能在统一平台上协同工作，实现数据的同步采集与处理；其扩展性则确保了系统能够根据多样化的桥梁检测任务与环境需求，灵活配置设备模块，适应复杂多变的现场条件。

5.2.6 根据智能化程度的不同，智能检测系统的控制方式可分为手动控制巡检、固定路线巡检和自主智能巡检。现场作业时应根据检测需求、场景条件、结构复杂程度和安全要求选择合适的控制方式。

条文说明

手动控制巡检作为智能检测系统最基础的控制方式，由操作人员通过遥控器直接操控系统的运动姿态与运行轨迹，所有决策均由人工完成。该模式操作灵活直接，但对操作人员的技能和经验有较高依赖。它常适用于现场踏勘、首次探查、局部区域巡检或在复杂环境下的精细操作。在此模式下进行常规作业时，系统应在操作人员或观测员的直接视距范围内运行；若确需执行超视距操

作，则必须确保图传与控制链路稳定可靠，并能通过机载传感器信息全面掌握系统运行状态。

固定路线巡检是指操作人员在作业前预先设定巡检路线、高度、重叠率等关键参数。智能检测系统将严格依据这些预设参数执行自动化巡检任务，操作人员仅在必要时介入调整轨迹。在此模式下，操作人员的角色转变为监控员，显著降低了人工操作的依赖。这种模式是实现检测工作智能化、标准化和可重复性的关键，尤其适用于对桥梁等结构的大面积区域进行重复性、标准化的检测任务。

自主智能巡检是智能检测系统的高级智能化形态，其核心在于系统不仅能独立执行检测任务，还可通过实时感知周边环境，自主完成路径规划、动态避障与任务调整。这一模式适用于未知或动态变化环境下的复杂检测场景。为实现这一目标，系统需具备三大关键能力：环境实时感知能力（精准捕捉环境动态）、自主路径规划能力（灵活适配复杂场景）及自主避障能力（确保作业安全）。需特别注意的是，在采用自主智能巡检模式前，必须对相关算法的可靠性与安全性进行充分验证，以保障复杂环境下作业的稳定性和数据的准确性与风险可控性。

5.2.7 根据检测需求的不同，可分别采用快速巡检和定向巡检两种检测方法开展桥梁混凝土外观质量智能检测，并满足以下要求：

- 1 通过快速巡检对桥梁整体状态和关键部位进行数据采集，成果能反映出明显的、严重的混凝土外观质量缺陷；
- 2 通过定向巡检对桥梁进行全覆盖数据采集，必要时对特定区域或构件进行高精度、多角度的检测，建立三维模型，清晰表达结构的细微特征，并能准确反映各类混凝土外观质量缺陷；
- 3 日常巡查、经常检查可采用快速巡检方法，定期检查、特殊检查宜采用快速巡检和定向巡检相结合的方法；
- 4 现场检测时，巡检向重叠率和旁向重叠率快速巡检不低于 30%，定向巡检不低于 50%，可根据巡检现场实际情况，适当提高重叠率。

5.2.8 对涉及结构性裂缝和非结构性裂缝识别宜后期通过人工判读。

条文说明

影响结构安全的结构性裂缝，主要是指分布在结构主要受力部位或主要承重构件上的具有受力活动性特征的结构性裂缝，主要由外荷载作用而产生，典型的结构性裂缝包括弯曲裂缝、剪切裂缝和剪扭裂缝等；影响结构耐久性的典

型非结构性裂缝，主要是指开裂严重或使用条件恶劣，不及时处理将导致结构性能衰退并降低使用寿命的非结构性裂缝，主要由混凝土收缩、温度变化、钢筋锈胀等原因引起，典型的非结构性裂缝包括收缩裂缝、温度裂缝和锈胀裂缝等。现场检测时，主要依据裂缝位置、分布、走向等指标来区分结构性裂缝和非结构性裂缝，重点关注开裂严重裂缝，一般是指裂缝表口宽度较宽、长度较长的主裂缝。由于目前相关研究和算法能力的限制，尚无法实现完全依靠智能检测系统自主识别区分结构性裂缝和非结构性裂缝，因此需要通过人工判读进行区分。

5.2.8 智能检测成果宜在条件允许下通过人工检测抽样进行比对验证，并满足以下要求：

- 1 人工检测抽样验证比对的最小样本数量宜涵盖所发现的各类外观质量缺陷，且每类缺陷比对不宜少于总数的 1%且不少于 1 处；
- 2 抽样比对重点验证缺陷识别的准确率、识别误差、测量误差等，综合评价比对结果的一致性。

条文说明：

为确保智能检测数据的准确性与可靠性，可通过典型缺陷试件标定与人工检测抽样验证相结合的方式开展结果比对。若比对结果一致性出现较大偏差，需对样本数据库进行复核；必要时，进一步补充完善缺陷样本标定与数据集，同时增加人工检测抽样验证的样本量，并训练优化缺陷识别算法。若经算法完善后，比对结果的一致性仍显异常，则改用其他检测方法。

5.3 智能检测记录与编码规则

5.3.1 智能检测编码规则：

- 1 现场记录的路线、桥梁、部件等，应按现行《公路数据库编目编码规则》（JT/T 132）和《公路桥梁命名编号和编码规则》（GB/T11708）进行编码；
- 2 构件编码宜采用 A-B-C-D 的形式，其中 A 为结构部位代码，B 为部件代码，C 为桥跨、墩台或桥联的序号，D 为构件序号；
- 3 结构部位代码 A：上部结构、下部结构、桥面系的代码分别为 1、2、3；
- 4 部件代码 B：按 01、02、03、04……的顺序表示各类部件的编号；

- 5 桥跨、墩台、桥联序号 C：桥跨、台、桥联由小桩号向大桩号侧按 1、2、3、4.....的顺序进行编号；
- 6 构件序号 D：同类构件横桥向排列时，序号由右向左依次为 1、2、3.....；同类构件纵向排列时，序号由小桩号向大桩号侧依次为 1、2、3.....；
- 7 由不同结构形式组成的桥梁应根据结构形式划分为多座桥梁分别进行编号。对于双幅桥梁，如果上、下部结构完全分离，则宜分别进行编号和技术状况评定。如果上部结构分幅，下部结构是整体式的，可按一座桥梁进行统一编号和技术状况评定；
- 8 不同桥型现场检测过程中的构件编码规则宜符合行业标准《在用公路桥梁现场检测技术规程》（JTG/T5214）附录 A 的规定。

条文说明

为保持与人工检测编码规则一致，智能检测编码规则主要参照现行《在用公路桥梁现场检测技术规程》（JTG/T 5214）。

构件编码中的 A、B、C、D 均采用阿拉伯数字形式表示，简单直观、便于应用。其中 A 为 1 位阿拉伯数字，B 为 2 位阿拉伯数字，C 和 D 按实际排序采用阿拉伯数字记录。例如 1-01-110-6，代表：

1——（结构部位代码 A）上部结构

01——（部件代码 B）主梁

110 跨——（桥跨序号 C）第 110 跨

6——（构件序号 D）从右至左第 6 片主梁

结构部位代码 A 与现行《公路桥涵养护规范》（JTG 5120）保持一致，上部结构下部结构、桥面系的代码分别为 1、2、3。部件代码 B 与现行《公路桥梁技术状况评定标准》（JTG/T H21）保持一致。桥跨、桥联和墩台序号 C，从小桩号向大桩号侧按 1、2、3、4.....的顺序进行编号。墩台编号（有 0 号桥台时）也可以依照惯例采用 0、1、2、3.....的顺序。构件序号 D 考虑到人工检测习惯还有我国道路右侧通行的特点，横桥向采用由右向左的编号顺序。

在定期检查过程中，一座桥梁可能包括了多种结构形式，这种情况要根据结构形式划分为多座桥梁，分别进行编号，避免编号和进一步技术状况评定的混乱。

5.3.2 智能检测记录规则：

- 1 现场各类外观质量缺陷的记录宜符合行业标准《在用公路桥梁现场检测技术规程》（JTG/T5214）附录 B 的规定，智能检测系统应自动记录并进行参数化和量值化处理。对于特殊的现场检测项目其记录表格可由检测单位进行自行设计；
- 2 宜建立智能巡检一体化数据平台对典型缺陷样本、训练数据集、原始数据及处理数据进行集中统一管理。

条文说明

为保持与人工检测记录规则一致，智能检测记录规则主要参照现行《在用公路桥梁现场检测技术规程》（JTG/T 5214）。

5.4 现场检测与记录

5.4.1 现场检测与记录宜按下列步骤进行：

- 1 选择一种或多种智能检测系统，制定合理的数据采集方案，确保数据的有效、完整；
- 2 根据目标大小、模型大小、检测速度等不同场景合理选择人工智能算法模型，然后采集桥梁典型外观质量缺陷数据，对典型缺陷试件进行校核，训练验证数据集，再进行模型训练和测试，最终建立并完善参数化模型，使得通过深度学习方法训练后的模型检测效果符合要求；
- 3 采用经深度学习算法训练并验证后的模型，通过快速巡检或定向巡检的方法检测并记录外观质量缺陷的类别、范围、长宽、深度和位置等量值化参数，并同步记录天气、风速、温度等外部环境条件；
- 4 将外观质量智能检测成果与人工检测抽样验证的结果进行比对分析；
- 5 对采集的数据进行备份；
- 6 智能检测系统宜自动记录缺陷图像和检测结果，自动生成的混凝土外观质量智能巡检记录表可按表 5.4.1 的规定执行；
- 7 宜按现行《公路桥梁技术状况评定标准》（JTG/T H21）评定外观质量缺陷标度。

表 5.4.1 混凝土外观质量智能巡检记录表

路线编号	—		路线名称	—	智能检测系统	—		上次巡检时间	—	
桥梁名称	—		桥梁编号	—	管养单位	—		建成年限	—	
结构类型	—		桥位桩号	—	桥梁全长(m)	—		本次巡检时间	—	
序号	结构部位	结构编号	构件名称	构件编号	缺陷类型	缺陷位置	量值化参数	智能检测结果	典型图像	自动记录文件位置
1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

5.4.2 混凝土外观质量缺陷智能检测的缺陷位置记录内容可按表 5.4.2 的规定执行。

表 5.4.2 公路装配式梁桥混凝土外观质量智能检测的缺陷位置记录内容

结构部位	结构类型	部件	构件部位	相对参考点/ 参考线	缺陷至参考点/ 参考线距离
上部结构	板梁	主梁	底面、左侧面、右侧面	小桩号侧、大桩号侧	中心距离或距离范围
		铰缝	铰缝	小桩号侧、大桩号侧	中心距离或距离范围
	T形梁	主梁	底面、腹板左侧面、腹板右侧面、马蹄左侧面、马蹄右侧面、左侧翼缘板、右侧翼缘板	小桩号侧、大桩号侧	中心距离或距离范围
		横隔板	底面、小桩号侧、大桩号侧	—	—
		湿接缝	—	小桩号侧、大桩号侧	中心距离或距离范围
	装配式箱梁	主梁	底面、左腹板、右腹板、左翼缘、右翼缘	小桩号侧、大桩号侧	中心距离或距离范围
		横隔板	底面、小桩号侧、大桩号侧	—	—
		湿接缝	—	小桩号侧、大桩号侧	中心距离或距离范围
	整体式箱梁	主梁	箱室内左侧腹板、箱室内右侧腹板、箱室内小桩号侧隔板、箱室内大桩号侧隔板、箱室内底板、箱室内顶板、箱室外底板、箱室外左腹板、箱室外右腹板、箱室外左侧翼缘板、箱室外右侧翼缘板	小桩号侧、大桩号侧、上侧、下侧、左侧、右侧	中心距离或距离范围

续表 5.4.2 公路装配式梁桥混凝土外观质量智能检测的缺陷位置记录内容

结构部位	结构类型	部件	构件部位	相对参考点/ 参考线	缺陷至参考点/ 参考线距离
下部结构	—	翼墙、耳墙	左侧、右侧	台背	中心距离或距离范围
		锥坡、护坡	左侧、右侧	台身	中心距离或距离范围
		桥墩（立柱、盖梁、系梁）	大桩号侧面、小桩号侧面、底面、顶面、左侧面、右侧面	墩顶、墩底、承台、系梁	中心距离或距离范围
		桥台	大桩号侧面、小桩号侧面、底面、顶面、左侧面、右侧面	台帽、台底、左侧、右侧	中心距离或距离范围
		墩台基础	顶面、侧面	—	—

5.4.3 混凝土外观质量智能检测的缺陷量值化参数自动记录和描述可按表 5.4.3 的规定执行。

表 5.4.3 公路装配式梁桥混凝土外观质量智能检测的缺陷量值化参数自动记录和描述

结构部位	缺陷类型	缺陷量值化参数						
		数量 (处、条)	长度 (m)	宽度 (mm)	位置	范围 (长×宽)	面积 (m ²)	深度 (m)
上部结构	蜂窝	✓	—	—	✓	✓	✓	✓
	麻面	✓	—	—	✓	✓	✓	—
	剥落、掉角	✓	—	—	✓	✓	✓	—
	孔洞	✓	—	—	✓	✓	✓	✓
	露筋、钢筋锈胀	✓	—	—	✓	✓	✓	—
	预应力构件损伤 (含齿板裂缝)	✓	✓	✓	✓	✓		—
	横向裂缝	✓	✓	✓	✓	✓		—
	纵向裂缝	✓	✓	✓	✓	✓		—
	竖向裂缝	✓	✓	✓	✓	✓		—
	斜裂缝	✓	✓	✓	✓	✓		—
	水平裂缝	✓	✓	✓	✓	✓		—
	网状裂缝	✓		✓	✓	✓	✓	—

续表 5.4.3 公路装配式梁桥混凝土外观质量智能检测的缺陷量值化参数自动记录和描述

结构部位	缺陷类型	缺陷量值化参数						
		数量 (处、条)	长度 (m)	宽度 (mm)	位置	范围 (长×宽)	面积 (m ²)	深度 (m)
下部结构	蜂窝	√	—	—	√	√	√	√
	麻面	√	—	—	√	√	√	—
	剥落、掉角	√	—	—	√	√	√	—
	孔洞	√	—	—	√	√	√	√
	磨损	√	—	—	√	√	√	—
	水平裂缝	√	√	√	√	√	—	—
	纵向裂缝	√	√	√	√	√	—	—
	网状裂缝	√	—	√	√	√	√	—
	冲蚀	√	—	—	√	√	√	√

5.4.4 混凝土外观质量缺陷智能检测结果的分类汇总和统计可按表 5.4.4 的规定执行。

表 5.4.4 混凝土外观质量缺陷智能检测结果分类汇总和统计表

路线编号	—	路线名称	—	智能检测系统	—	上次巡检时间	—	
桥梁名称	—	桥梁编号	—	管养单位	—	建成年限	—	
结构类型	—	桥位桩号	—	桥梁全长(m)	—	本次巡检时间	—	
序号	评价部件	构件总数	缺陷构件数	缺陷类型	缺陷数量	缺陷智能检测结果	典型图像	自动记录文件位置
1	—	—	—	—	—	—	—	—
2	—	—	—	—	—	—	—	—
3	—	—	—	—	—	—	—	—

6 检测数据

6.1 数据采集

6.1.1 智能检测的数据采集包括下列内容：

- 1 数据采集包括传感器数据获取、存储和传输；
- 2 数据采集方式可采用人工控制采集和自主采集，当自主采集无法完成任务时，宜采用人工控制进行补充。

6.1.2 可见光图像采集宜满足以下要求：

- 1 采集前宜对相机及镜头的基本参数进行标定；
- 2 选择光照适宜的时间进行，避免逆光拍摄，防止因过亮或过暗影响图像质量；
- 3 保持镜头中心正对目标部位，以提高数字图像中有效像素的数量；
- 4 现场设置合适的标定点或参考物，以便测量和分析。

6.1.3 红外图像采集宜满足以下要求：

- 1 采集前宜对红外热成像相机和可见光相机的基本参数进行联合标定；
- 2 选择合适的天气条件进行采集，避免极端温差、强日照辐射等影响图像质量；
- 3 根据现场光照情况调整拍摄参数，保证采集的数据有效可用，必要时可使用特定波长的滤镜去除背景热辐射，提高成像清晰度；
- 4 对红外图像数据做好实时标注与整理工作，以防图像特征过少或难以辨认导致无法将其与实际场景匹配。

条文说明

采集红外热成像图像的核心目的，是借助红外热成像相机捕捉桥梁表面及结构的热分布特征，从而有效识别由损伤或结构缺陷引发的热异常区域，进而精准检测桥梁表面潜藏的渗水、腐蚀等不易察觉的问题。为确保图像读数的准确性、清晰度及缺陷参数测量的可靠性，建议先对红外热成像相机进行标定；同时，通过对热成像相机与可见光相机开展联合外参标定，可为后续二者图像的匹配融合奠定基础。不过，极端温度与辐射会对成像质量产生干扰；而将热成像图像与可见光图像进行匹配融合，不仅能应对上述影响，还可有效改善热成像图像因特征信息较少而导致的环境认知障碍。

6.1.4 点云数据采集宜满足以下要求：

- 1 根据现场情况与检测方案选择探测距离适宜的雷达；
- 2 巡检路径宜使得采集点云地图形成闭环，计算闭合误差以评价定位的准确度；
- 3 巡检路径宜考虑潜在的结构遮挡导致的部分区域点云缺失；
- 4 控制智能检测系统与待测桥梁结构距离适中，确保激光束能够密集地接收场景的几何特征；
- 5 可结合可见光摄像头等其他传感器辅助采集，为点云数据的理解与分析提供额外的视觉信息；
- 6 及时检查点云数据情况，确保所采集点云完整覆盖目标部位，避免缺失或遮挡影响数据可用性。

条文说明

点云采集通常需借助定位技术拼接不同时刻的点云帧以获取整体点云，其中闭合误差是评价定位精度的重要指标。在规划巡检路径时，需特别注意可能因遮挡导致无法获取点云数据的桥梁结构；同时，智能检测系统与待测桥梁的距离应控制在雷达探测范围内，以保证点云具有足够的密度和精度。此外，由于采集中障碍物遮挡会影响点云完整性，因此采集后需及时检查数据是否完整可用。

6.2 数据处理

6.2.1 智能检测的数据处理包括三维建模分析、缺陷智能识别、缺陷定位、缺陷参数量值化，数据处理的内容和深度应与所选择的检测方法相匹配。

6.2.2 三维建模分析的数据处理宜满足以下要求：

- 1 桥梁结构的三维数字模型可为高精度点云模型、网格模型或 BIM 模型；
- 2 可见光数字图像数据处理时，可基于多视角几何方法进行三维重建，生成桥梁表面模型，影像数据需完整覆盖检测目标，其重叠率宜满足巡检向重叠率和旁向重叠率不低于 70%；
- 3 激光雷达数据处理时，可基于同步定位与建图方法进行三维重建，生成桥梁表面模型。

条文说明

在基于多视角几何的三维重建方法中，输入数据为经预处理后的图像，输出则为桥梁的三维点云模型及表面模型。数据处理阶段，首先通过算法自动提取各图像中的特征点，随后通过比对与匹配不同视角图像的特征点，构建各视角间的几何关联；基于特征点匹配结果，进一步估计各视角下的相机拍摄位置与姿态。利用相机位姿估计结果生成稀疏点云数据，可初步重建桥梁的三维结构；再通过密集匹配算法生成高精度稠密点云，以增强三维结构的细节表现；最终生成连续且平滑的桥梁三维表面模型。

在基于同步定位与建图（SLAM）的桥梁三维重建方法中，输入数据为激光雷达或图像帧数据，最终输出为桥梁的三维点云模型及表面模型。具体数据处理流程如下：首先，通过激光雷达与惯性导航传感器协同工作，实时估算设备的相对运动轨迹，并同步构建局部地图信息；随后，采用非线性优化算法对初步获取的设备轨迹进行全局优化，有效降低运动过程中因传感器噪声等因素产生的累积误差；同时，当设备再次经过已扫描区域时，通过回环检测技术识别重访场景，进一步修正并优化整体运动轨迹，提升轨迹的一致性与精度；在此基础上，依据优化后的精确轨迹，将不同扫描位置采集的点云数据进行空间配准与融合，构建覆盖桥梁整体结构的完整三维点云模型；最终，基于完整的三维点云数据，通过表面重建算法生成连续且平滑的桥梁三维表面模型。

6.2.3 缺陷智能识别的数据处理可采用数字图像处理方法、机器学习分类法、深度学习等方法，可按本标准附录 C 和附录 D 进行，并宜满足以下要求：

- 1 当桥梁结构表面洁净、图像背景简单、病害的几何特征较为固定时，可采用数字图像处理方法进行病害的智能识别，得到病害的局部特征图像；
- 2 对仅需检验桥梁区域是否存在病害的情况，可使用机器学习分类法进行病害的自动识别；
- 3 对于采集图像条件复杂、对病害定位算法抗干扰能力要求较高的场景，宜采用深度学习方法进行病害的自动识别；
- 4 对于具有特殊图像特征的桥梁结构，当一般的深度学习模型的病害识别准确度无法满足要求时，宜针对该桥梁开发专用的病害识别模型，并制作专用的数据集，以提升模型的识别准确度。

条文说明

基于数字图像处理的病害识别方法，核心原理是利用灰度图像中病害区域与背景的灰度值差异实现病害检出。该过程主要包括病害二值化与杂质过滤两

个关键步骤：病害二值化通过增强目标与背景的对比度完成初步分离，常用方法包括阈值法、滤波法等；杂质过滤则旨在去除二值化过程中产生的各类噪点，典型方法如面积阈值过滤法等。

深度学习作为机器学习中人工神经网络方法的延伸与发展，是机器学习的重要分支，近年来在技术上取得显著进展，并在结构病害检测领域展现出优异的应用效果。目前，卷积神经网络（CNN）是该领域应用最广泛的深度学习模型，同时随着技术迭代，其他先进的深度学习网络结构也逐步被引入。基于卷积神经网络的病害检测任务可分为三类：分类任务中，分类模型用于识别图像中的病害类型，常用模型包括 MobileNet、GoogleNet、ResNet 等；目标检测任务中，目标检测模型通过包络框标记图像中病害的具体区域，典型模型如 R-CNN、YOLO 等；语义分割任务中，语义分割模型则精确提取病害所在的像素级位置，代表模型有 FCN、Unet、DeepLab 等。

6.2.4 缺陷智能识别的数据处理结果宜采用人工识别检测进行抽样验证比对，算法准确率不宜低于 80%。当准确率不满足要求时，应收集漏检、误检样本制作新数据集，对模型进行迭代优化，训练完善缺陷识别算法模型后再进补充检测。

6.2.5 缺陷定位的数据处理宜建立二维影像与三维空间之间的几何映射关系，以三维坐标或其他清晰可追溯的方式标识出所识别的缺陷在桥梁结构上的空间位置，缺陷的物理尺寸可通过其空间定位点之间的几何关系计算得到。

6.2.6 缺陷定位的数据处理应具备下列一项或多项基本条件：

- 1 桥梁结构的三维数字模型；
- 2 缺陷影像采集时的相机精确位姿；
- 3 到缺陷点位的直接测距信息。

条文说明

基于模型的投影定位法的核心原理是综合利用三维模型与相机位姿信息。具体而言，通过已知的相机位姿参数，将二维影像中标记的病害点反向投影为空间射线，再通过求解该射线与三维模型的交点，即可确定病害点的三维坐标。作为当前主流的病害定位方法，其不仅定位精度较高，还具有较好的可视化效果。

基于直接测量的定位法的核心原理是综合利用相机位姿与直接测距数据，且无需依赖三维模型。其通过智能检测系统实时获取的高精度位姿信息，结合激光测距仪测得的视线方向距离，直接通过空间坐标变换即可解算病害点的三维坐标。该方法具有流程简单的优势，适用于对病害进行快速定位。

6.2.7 缺陷参数量值化的数据处理可按本标准附录 C 进行，并宜满足以下要求：

- 1 需要进行长度、宽度、面积等几何尺寸的缺陷参数量化时，宜采用缺陷识别区域特征图像为依据；需要进行缺陷点位数量的参数量化时，宜采用缺陷识别得到的目标检测结果数据；
- 2 拍摄距离较远、设备条件受限导致图像像素精度无法满足参数量化的准确度要求时，可在进行缺陷分割前先进行图像超分辨率重建，提升图像的像素精度；
- 3 在对裂缝长度、宽度进行参数量化时，可根据裂缝特征图像提取出裂缝骨架线与裂缝边界，以便于裂缝的几何尺寸计算；
- 4 出现多条裂缝相互交叉或裂缝分支的情况时，宜首先逐一拆解出单条裂缝的骨架线，再针对每一条单一裂缝进行参数量化。

6.3 数据管理

6.3.1 图像数据宜符合以下要求：

- 1 图像清晰，无明显模糊、噪点或变形；
- 2 图像的色彩和光照条件均匀，无过度曝光或阴影遮挡；
- 3 图像尺度因子的计算值不应大于任务设定值；
- 4 图片数据以.jpg/.bmp 等格式记录，包含位置、大小、时间等属性信息以.csv/.mat/.json 等格式记录；
- 5 视频数据格式以.mp4 等格式记录，需先进行采样处理并提取缺陷图片，采样过程应覆盖缺陷区域，确保图片有效性。

6.3.2 点云数据宜符合以下要求：

- 1 表征结构表面的点云厚度不大于 5 cm；
- 2 点云数据的平均尺度误差的绝对值不大于 0.5%。
- 3 三维点云模型以.ply/.pcd/.las 等格式记录。

条文说明

理论上，用于表征结构表面的点云厚度应趋近于零。然而在实际检测中，受设备精度与算法精度的限制，点云模型的表面可能会存在一定厚度，此为正常现象。为避免生成误差过大的点云成果数据，本条特规定了点云厚度的限值。

点云数据的尺度误差，是指相同物体的真实尺寸与点云中测量尺寸之间的偏差。其计算方式为：选取多个代表性尺寸（例如桥梁跨度、主梁高度、桥墩直径等），分别计算各尺寸的误差后取平均值，即得到平均尺度误差。

6.3.3 智能检测的数据管理宜符合以下要求：

- 1 所有采集的原始数据及数据处理不同阶段的成果，均应存储在安全、可追溯的系统中，包括本地服务器和云端服务器等，并在不同介质、不同地理位置中进行备份，确保数据完整性与可恢复性；
- 2 存储文件的命名按照“桥梁名称-部位-处理数据名称-年月日时间”的格式，确保文件标识清晰、可快速追溯；
- 3 存储系统设置加密功能，确保只有授权人员可以访问；定期进行数据访问和使用记录审查，识别和响应不当访问或潜在的数据泄漏风险；
- 4 宜建立智能检测巡检一体化数据平台，对典型缺陷样本、训练数据集、实测原始数据及处理数据进行集中统一管理；
- 5 巡检数据存储年限不低于 6 年，并指定专门的数据保管责任人，明确其岗位职责与数据保管要求。

6.3.4 图像类数据文件格式宜符合以下要求：

- 1 原始采集图像采用.jpg/jpeg、.bmp 格式；
- 2 缺陷处理图像采用.png、.tiff 格式；
- 3 超分辨率重建后图像采用.tiff 格式，确保量化分析精度。

6.3.5 视频类数据文件格式宜符合以下要求：

- 1 原始视频采用.mp4 格式；
- 2 采样提取帧同图像类数据的配套视频片段存储为.mov 格式。

6.3.6 点云与三维模型类数据文件格式宜符合以下要求：

- 1 点云原始数据采用.pcd、.las 格式；
- 2 三维模型数据采用.ply、.obj 格式；
- 3 轻量化模型采用.glb 格式。

6.3.7 属性与成果类数据文件格式宜符合以下要求：

- 1 位置、时间、设备参数等基础属性信息采用.csv、.json 格式；
- 2 模型训练数据集采用.xml、.txt 格式；
- 3 数据集配置文件采用.yaml 格式；

- 4 检测报告与统计成果采用.pdf、.xlsx 格式。
- 5 批量数据备份采用.zip/.7z 压缩格式，命名后缀标注“备份”及备份时间，确保压缩包内文件目录结构与原始存储一致。

条文说明

根据不同数据存储需求，分别针对原始数据、压缩数据、备份数据进行了存储可有效的保证后期不同任务需求下调用数据的便捷性、可用性和通用性。

7 检测成果报告

7.1 影像成果

7.1.1 影像成果宜包括以下内容：

- 1 操作人员、飞行辅助人员现场操作无人机采集数据的工作照。
- 2 外业采集的有效原始缺陷图片、视频等。
- 3 缺陷智能识别结果图等。

7.2 检测报告

7.2.1 检测报告宜包括下列内容：

- 1 工程概况。
- 2 检测目的。
- 3 检测依据。
- 4 检测内容与方法：包括所检查的内容、范围及智能检测系统巡检方案（硬件设备型号、巡检路线规划、缺陷智能识别数据处理方法等）。
- 5 构件编号及缺陷描述规则：对应构件、缺陷位置描述的编号规则。
- 6 桥梁外观质量缺陷智能识别结果。
- 7 与人工抽样验证比对结果。
- 8 结论及建议。
- 9 附录，包含仪器设备照片、病害示意图、工作照等。

附录 A 桥梁结构巡检路线规划

(资料性附录)

A.0.1 桥梁结构巡检路线规划可按照表 A.0.1 所述的特征进行路线规划。

表 A.0.1 桥梁结构巡检路线规划要点

结构类型	重点部位	路径特点
空心板梁	梁底、边板梁端腹板	之字形全覆盖梁底，定制化路径巡检梁端腹板。
小箱梁	梁底、腹板以及湿接缝	之字形全覆盖梁底和湿接缝，定制化路径巡检腹板。
T 梁	梁底、腹板以及湿接缝	之字形全覆盖梁底和湿接缝，定制化路径巡检腹板。
整体式箱梁	翼缘板、腹板、底板	之字形全覆盖梁底，一字形巡检翼缘板和腹板。

A.0.2 梁底巡检路线规划宜符合以下要求：

1 预制空心板梁、小箱梁和 T 梁梁底巡检应全覆盖，巡检向与跨径方向平行，航迹线宜采用之字形，采集的照片巡检向重叠度和旁向重叠度不宜小于 30%，如图 A.0.1 所示。

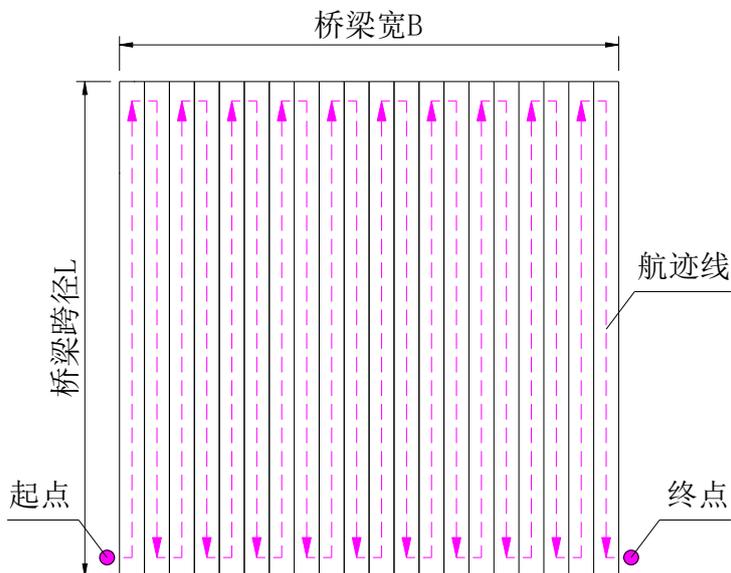


图 A.0.1 梁底巡检路线规划

2 对于小箱梁和 T 梁腹板可单独设置一字形航线，满足正对拍摄要求。

3 对于整体式箱梁，巡检向与跨径方向平行，遵循翼缘板→腹板→底板→腹板→翼缘板原则，实现每个面单独全覆盖检查。每个面宜采用一字形或之字形。

A.0.3 墩柱巡检路线规划宜符合以下要求：

- 1 单墩柱巡检宜将墩柱划分为 4 个面，巡检向与高度方向平行，航迹线宜采用之字形，采集的照片巡检向重叠度和旁向重叠度不宜小于 30%，如图 A.0.2 所示。
- 2 多墩柱巡检宜拆分成多个单墩柱再按照第 1 款进行检测。

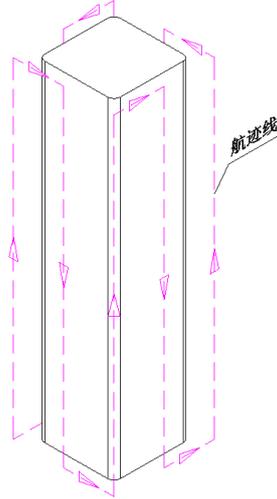


图 A.0.2 墩柱巡检路线规划

A.0.4 空心箱梁内部巡检路线规划宜符合以下要求：

- 1 宜采用可避障和跨越横隔板人孔的机器狗或者其他智能设备，逐个对每孔箱室顶板、底板和左、右腹板进行全覆盖检查，如图 A.0.3 所示。
- 2 智能巡检设备宜具备 GPS 定位和温湿度检测功能。

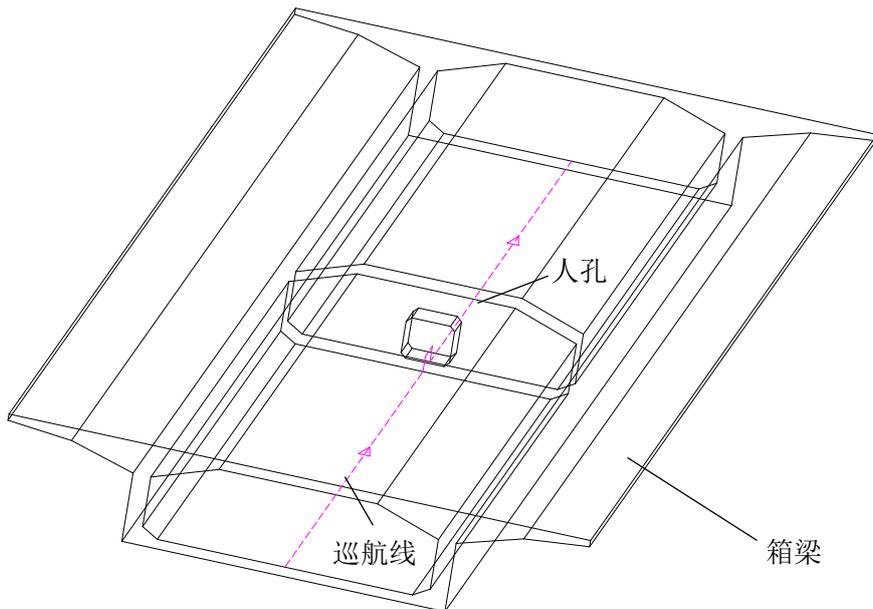


图 A.0.3 空心箱梁内部巡检路线规划

A.0.5 基桩水下巡检路线规划宜符合以下要求：

- 1 应避开周围水草等障碍物，保证全覆盖泥面以上桩基以及桩基与承台接头处的外观质量，如图 A.0.4 所示。
- 2 宜生成三维可视化成果，计算病害程度。
- 3 巡检线距离承台边净距不小于 0.5m。

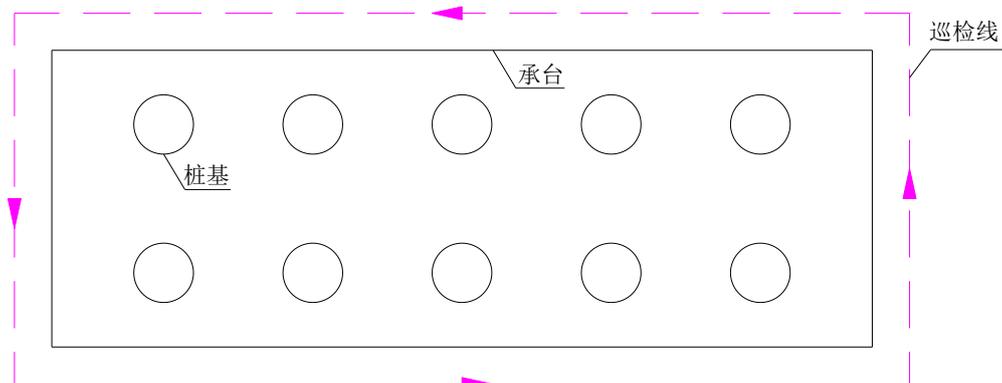


图 A.0.4 基桩水下巡检路线规划

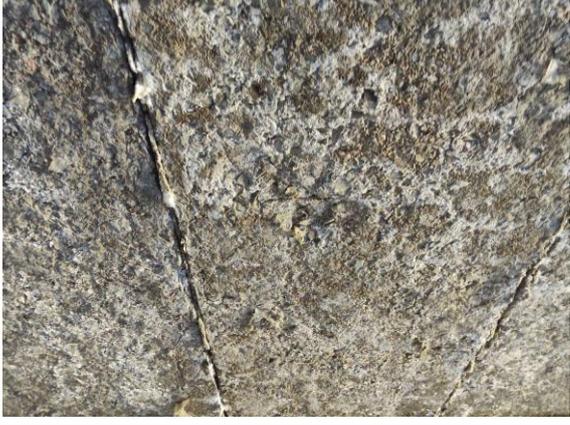
附录 B 典型缺陷校验

(资料性附录)

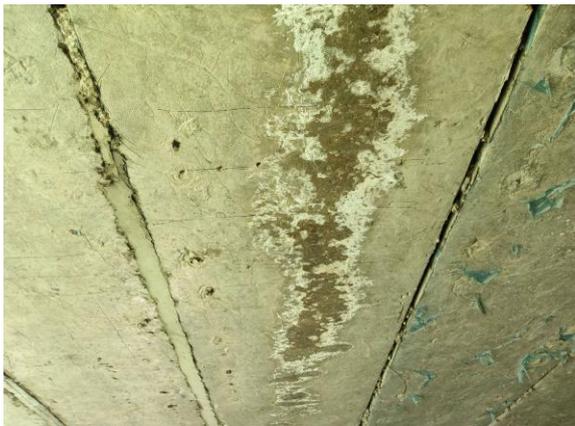
B.1 混凝土外观质量典型缺陷可参照表 B.1 所述的样本示例。

表 B.1 混凝土外观质量典型缺陷的样本示例

序号	外观质量缺陷类别	混凝土外观质量典型缺陷的样本示例
1	裂缝	
2	孔洞	
3	露筋	

序号	外观质量缺陷类别	混凝土外观质量典型缺陷的样本示例
4	蜂窝	
5	麻面	
6	疏松	
7	夹渣	

序号	外观质量缺陷类别	混凝土外观质量典型缺陷的样本示例
8	混凝土剥落	
9	掉角	
10	错台	
11	渗水	

序号	外观质量缺陷类别	混凝土外观质量典型缺陷的样本示例
12	泛碱	
13	钢筋锈胀	
14	冲蚀	
15	磨损	

B.2 成像模型选择

B.2.1 为兼顾计算效率与检测精度，宜采用针孔成像模型，保证病害定位与尺寸测量的工程精度需求。

B.2.2 在开展检测任务前，基于图像尺度因子预估当前采集参数下的最小可分辨病害尺寸，以验证检测方案的有效性。

B.2.3 通过确定的图像尺度因子，建立图像像素尺寸与病害实际物理尺寸的线性变换关系。

B.3 图像尺度因子的计算采用基于光学成像的相似三角形法则，当物距远大于焦距时，图像尺度因子可按公式（B.1）计算：

$$ISF = \frac{h \times S}{f \times P} \dots\dots\dots (B.1)$$

式中：

ISF ——图像尺度因子，mm/pixel；

h ——物距，mm；

f ——焦距，mm；

S ——传感器对角线尺寸，mm；

P ——图像对角线像素数量，pixel。

B.4 典型缺陷样本校验宜根据已有典型缺陷样本的结构物的物理长、宽大小，图片中典型缺陷样本的结构物长、宽所占像素个数，得到单个像素代表的实际物理尺寸大小，典型缺陷样本校验可按公式（B.2）计算：

$$\delta = \frac{M}{m} \dots\dots\dots (B.2)$$

式中：

δ ——像素校验值；

M ——典型缺陷样本结构物的物理长度尺寸，mm；

m ——典型缺陷样本结构物长度方向所占像素数量，pixel。

B.5 相机内外参数像素校验宜根据相机的内外参数，计算单个像素代表的实际物理尺寸，相机内外参数像素校验可按公式（B.3）计算：

$$\delta = ISF \times \frac{h}{f} \dots\dots\dots (B.3)$$

式中：

δ —— 像素校验值；

ISF —— 图像尺度因子，mm/pixel；

h —— 物距，mm；

f —— 焦距，mm。

附录 C 缺陷智能识别

(资料性附录)

C.1 缺陷智能识别

C.1.1 外观质量缺陷智能识别包括人工智能算法模型选择、典型缺陷样本标定、桥梁缺陷数据集收集、数据集制作、模型训练、模型测试和模型应用。

C.1.2 根据目标大小、模型大小、检测速度等不同需求场景选择人工智能算法模型，对典型缺陷样本标定，然后采集桥梁外观质量缺陷数据，制作数据集，进行模型训练、测试，若模型测试平均精度 $MAP \geq 0.5$ ，认为该模型有效，否则，重新选择模型，得到缺陷类型智能识别模型，输入智能检测系统采集待识别缺陷图像，输出缺陷检测结果图像及缺陷检测位置信息等，流程可按图 C.1 进行。

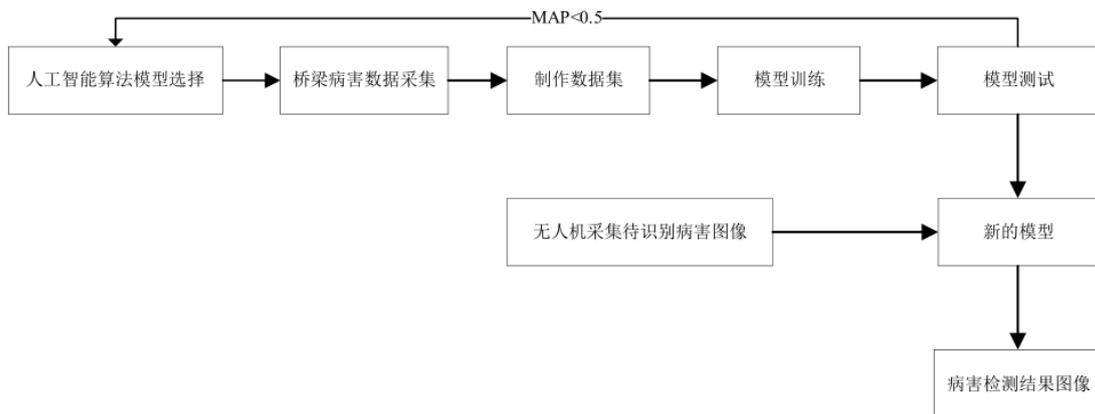


图 C.1 外观质量缺陷类型智能识别流程

C.1.3 数据集中每种类型缺陷照片数量不宜少于 500 张，正样本数量不少于负样本数量，宜根据样本特点及数据集大小合理选择。

C.1.4 宜不断通过收集漏检、误检样本制作新数据集的方式，对模型进行迭代优化，提高缺陷检测准确率。

C.1.5 在进行模型训练及应用前，宜首先验证图像采集设备的图像尺度因子，以确保图像分辨率满足病害细节识别需求，图像尺度因子应小于待检目标预估的最小物理尺寸，若不满足要求，应调整检测距离或更换相机镜头。

C.1.6 缺陷识别模型宜根据具体的视觉任务类型，在测试集上进行精度验证。模型关键指标最低精度要求宜符合表 C.1.6 的规定。

表 C.1.6 模型关键指标最低精度要求一览表

视觉任务类型	适用场景	关键指标	精度最低要求
图像分类	判定图片中是否有病害（有/无）	F1-score ① (F1 分数)	≥85%
目标检测	框选病害位置（外接矩形框）	AP ② (平均精度)	≥65%
语义分割	像素级勾勒病害轮廓（如裂缝走向）	IoU ③ (交并比)	≥60%

注①：F1-score 为综合考量模型精确率和召回率的调和平均数，用于衡量分类的稳健性。

注②：AP 为在不同召回率下的平均检测精度，用于衡量目标检测框的准确性。

注③：IoU 为预测区域与真实标签区域的交集与并集之比，用于衡量分割形状的重合度。

C.2 缺陷参数量值化分析

C.2.1 外观质量缺陷量值化参数智能分析宜包括典型缺陷样本标定、缺陷检测结果图像输入、缺陷检测结果灰度化、缺陷检测结果二值化、缺陷定量参数计算。

C.2.2 外观质量缺陷量值化参数智能分析宜先进行典型缺陷样本标定，将缺陷检测结果图像作为输入，然后进行灰度转换变为灰度图，将缺陷检测结果灰度图转换为多幅只包含一种缺陷的二值化图像，对每幅二值化图像进行缺陷定量参数计算得到缺陷参数识别结果，流程可按图 B.2 执行。

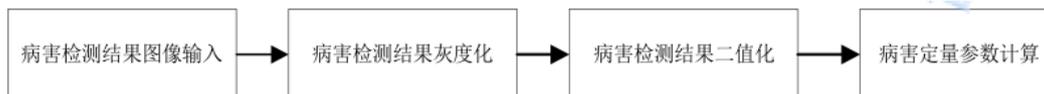


图 C.2 外观质量缺陷量值化参数智能分析流程

C.2.3 缺陷面积可按公式 (C.1) 计算：

$$S = N_0 \times a \dots\dots\dots (C.1)$$

式中：

S ——缺陷面积， mm^2 ；

N_0 ——缺陷像素个数；

a ——单个像素实际面积， mm^2 。

C.2.4 若 $S < S_t$ ，该连通区域面积过小，则认为该连通区域不是缺陷，应过滤掉， S_t 为最小缺陷面积值，宜根据待检测结构部位缺陷的特征进行取值，缺陷区域较小时， S_t 应取较小值，缺陷区域较大时， S_t 应取较大值。

C.2.5 裂缝实际长度可按公式 (C.2) 计算:

$$L = l_0 \times \delta \dots\dots\dots (C.2)$$

式中:

L ——裂缝实际长度, mm;

L_0 ——裂缝骨架线像素个数;

δ ——像素校验值。

C.2.6 若 $L < l_t$, 该连通区域过短, 不符合裂缝细长的特点, 可认为该缺陷不是裂缝, 应过滤掉, l_t 为最短裂缝长度阈值, 宜根据待检测结构部位裂缝的特征进行取值, 裂缝较短时, l_t 应取较小值, 裂缝较长时, l_t 应取较大值。

C.2.7 裂缝平均宽度可按公式 (C.3) 计算:

$$W = \frac{S}{L} \dots\dots\dots (C.3)$$

式中:

W ——裂缝实际平均宽度, mm;

S ——缺陷面积, mm^2 ;

L ——裂缝实际长度, mm。

C.2.8 若 $W > w_t$, 该连通区域的平均宽度过大, 不符合裂缝细长的特点, 可认为该缺陷不是裂缝, 应过滤掉, w_t 为最大裂缝宽度阈值, 宜根据待检测结构部位裂缝的特征进行取值, 裂缝较窄时, w_t 应取较小值, 裂缝较宽时, w_t 应取较大值。

C.2.9 任一点裂缝宽度等于该点裂缝骨架线的垂线到裂缝两侧边缘的距离; 裂缝最大宽度等于任一点裂缝宽度的最大值。

C.2.10 单个像素实际面积可按公式 (C.4) 计算:

$$a = \delta^2 \dots\dots\dots (C.4)$$

式中:

a ——单个像素实际面积, mm^2 。

δ ——像素检验值。

C.2.11 裂缝形态特征提取宜对二值化后的裂缝图像进行形态学处理, 并按下列步骤开展:

- 1 骨架提取, 提取裂缝区域的中轴线, 作为长度测量的基准。
- 2 轮廓提取, 提取裂缝区域的边缘边界, 作为几何宽度计算的边界约束。

- 3 图像增强，当图像分辨率不足以支撑精细化提取时，可采用双线性插值或基于深度学习的超分辨率重建方法对图像进行增强。

C.2.12 针对呈现交叉、分叉或网状形态的复杂裂缝，宜遵循先分解、后计算的原则，可利用拓扑分析算法识别裂缝的节点和端点，将复杂连通域拆解为若干条独立的单路径裂缝段，再对拆解后的每一条单裂缝分别进行长度、宽度等参数的量化计算。

C.2.13 可采用几何法计算裂缝的最大宽度或特定点宽度，并按下列步骤开展：

- 1 离散化采样，在裂缝骨架线上按等间距设置一系列测量点。
- 2 法线构建，计算骨架线在测量点处的切线方向，并构建其垂线。
- 3 边缘求交，获取垂线与裂缝两侧边缘轮廓的交点。
- 4 宽度计算，计算两个交点之间的欧氏距离作为该位置的裂缝宽度，取所有测量点宽度的统计最大值作为裂缝最大宽度。

C.2.14 缺陷参数量值化计算的成果宜满足下列要求：

- 1 缺陷面积的相对误差的绝对值不宜大于 40%；
- 2 裂缝长度值的相对误差的绝对值不宜大于 20%，宽度值的相对误差的绝对值不宜大于 40%；
- 3 缺陷点位数量的误差绝对值不宜大于 10%；
- 4 病害定位的位置误差不应大于 5cm；
- 5 宜能识别宽度不小于 0.2mm 的裂缝。

附录 D 缺陷数据集制作

(资料性附录)

D.0.1 通过标准缺陷样本标定、样本采集和整理、数据筛选和数据集标注完成测试数据集的制作，示例的数据集图像见图 D.1 所示。

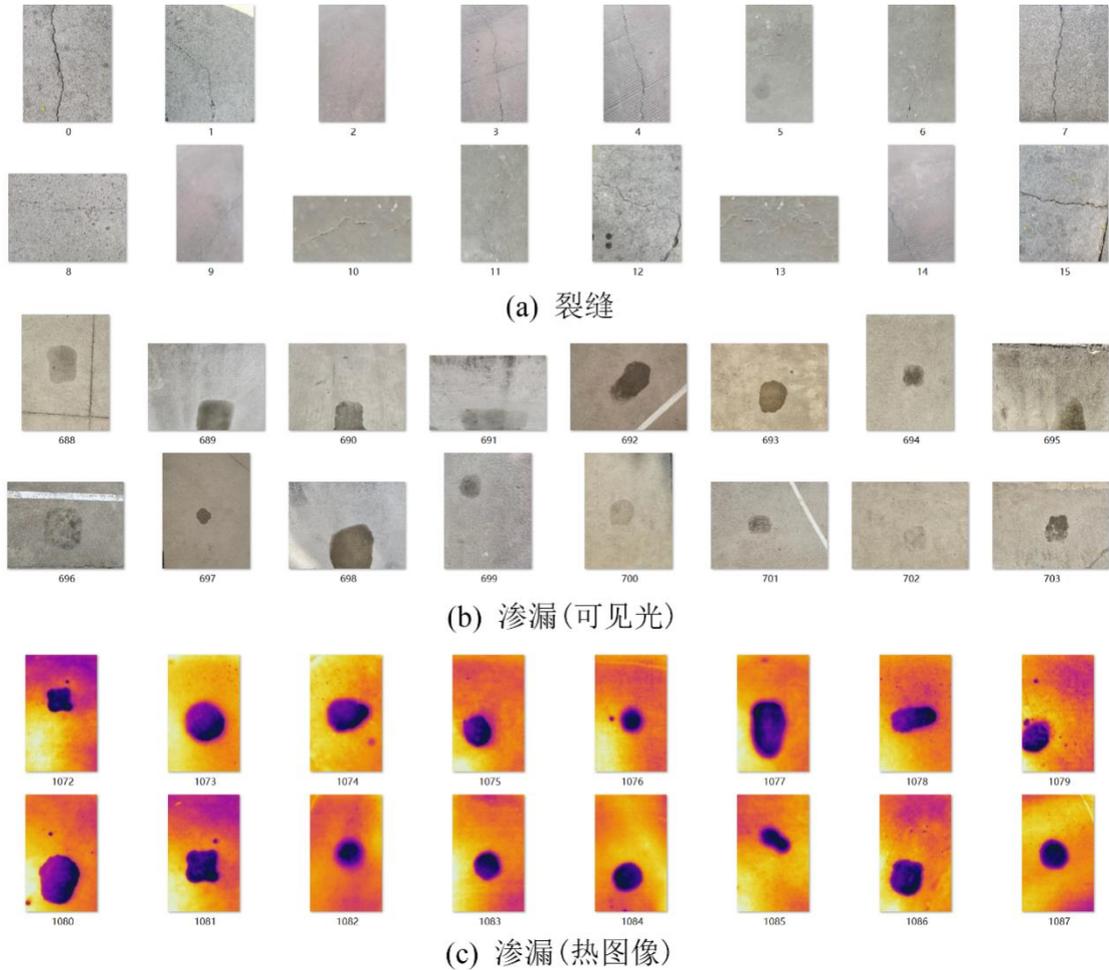
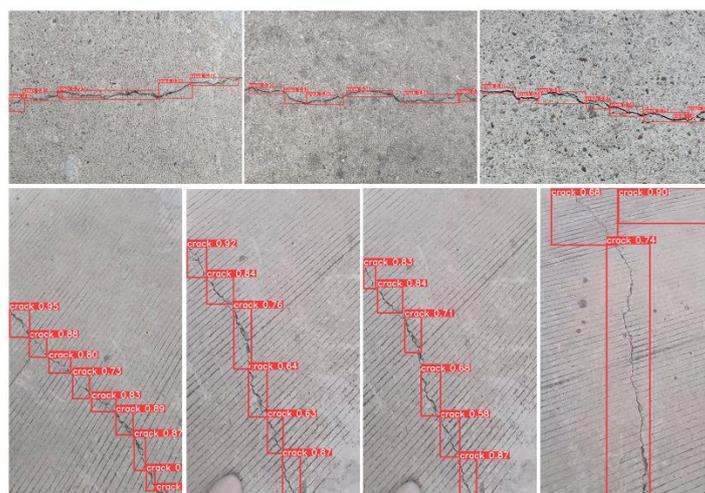


图 D.1 外观质量缺陷数据集制作

D.0.2 制作的数据集可按照 9:3:1 划分为训练集、验证集和测试集。

D.0.3 对制作的数据集进行标注，将数据集进行一定程度的随机打乱以避免模型在训练时陷入过拟合，同时也应避免数据集过于混乱而导致模型陷入欠拟合状态。

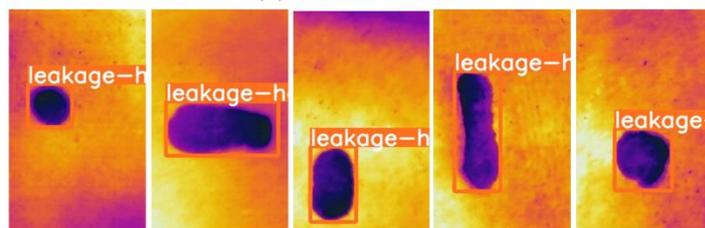
D.0.4 将训练出的神经网络模型在测试集上进行测试，示例的检测结果见图 D.2 所示。



(a) 裂缝



(b) 渗漏(可见光)



(c) 渗漏(热图像)

图 D.2 外观质量缺陷测试结果

本标准用词用语说明

1 本标准执行严格程度的用词，采用下列写法：

1) 表示很严格，非这样做不可的用词，正面词采用“必须”，反面词采用“严禁”；

2) 表示严格，在正常情况下均应这样做的用词，正面词采用“应”，反面词采用“不应”或“不得”；

3) 表示允许稍有选择，在条件许可时首先应这样做的用词，正面词采用“宜”，反面词采用“不宜”；

4) 表示有选择，在一定条件下可以这样做的用词，采用“可”。

2 引用标准的用语采用下列写法：

1) 在标准总则中表述与相关标准的关系时，采用“除应符合本标准的规定外，尚应符合国家和行业现行有关标准的规定”。

2) 在标准条文及其他规定中，当引用的标准为国家标准和行业标准时，表述为“应符合《××××××》（×××）的有关规定”。

3) 当引用本标准中的其他规定时，表述为“应符合本标准第×章的有关规定”、“应符合本标准第×.×节的有关规定”、“应符合本标准第×.×.×条的有关规定”或“应按本标准第×.×.×条的有关规定执行”。

引用标准名录

《公路工程质量检验评定标准 第一册 土建工程》 JTG F80/1-2017

《在用公路桥梁现场检测技术规程》 JTG/T 5214-2022

《公路桥梁技术状况评定标准》 JTG/T H21-2011

《公路桥涵养护规范》 JTG 5120-2021

《公路装配式混凝土桥梁设计规范》 JTG/T 3365-05-2022

《城市桥梁检测与评定技术规范》 CJJ/T 233-2015

《混凝土构造工程施工质量验收规范》 GB50204-2023

《公路桥梁命名编号和编码规则》 GB 11708-1989