

面向行业规范的隧道 BIM 智能化应用方法研究

谢有顺^{1,2*} 林翔^{1,2} 王浩^{1,2} 王学勇^{1,2} 李薇^{1,2}

1. 云南省交通规划设计研究院股份有限公司; 2. 云南省交通投资建设集团有限公司

摘要: 为支撑隧道工程数字化有效管理, 解决当前应用中仍存在的规范落地碎片化、模型管理低效化及数据采集烦琐化三大突出问题, 本文重点研究构建标准规范库、采用基于 AI 的 OCR 技术实现图纸智能识别及依托三维 GIS 技术达成 BIM 模型高效无门槛表达的智能化应用方法体系。方法依托 MySQL 和 MongoDB 的双数据库架构构建标准规范库, 利用 dots.ocr 技术体系构建图纸识别 AI 技术流程, 融合多类三维 GIS 关键技术实现 BIM 模型轻量化表达、存储及交互。本文整合该方法体系, 形成了一套“规范驱动、技术集成、智能高效”的隧道工程 BIM 模型应用技术流程, 并在云南省某高速公路隧道数字化管理项目中开展示范应用。实践表明其显著提升了模型设计、属性采集、成果交付以及低门槛使用效率, 取得了可观的社会与经济效益, 有效支撑隧道 BIM 深化应用的实施。

关键词: 隧道工程数字化; 标准规范库; AI; 三维 GIS; BIM

DOI: 10.65976/3078-8145.2026.03.001

建筑信息模型 (Building Information Modeling, BIM) 为隧道工程数字化管理提供了重要支撑, 成为行业数字化转型的关键工具^[1-5], 但当前应用中仍存在三大突出问题: 一是规范落地碎片化, 尽管《公路工程信息模型应用统一标准 (JTG/T 2420—2021)》《公路工程 BIM 设计成果交付技术指南》等规范明确了构件分类、属性定义与交付要求, 却因依赖人工编码与手动属性录入, 导致“同一构件多编码、同一属性多名称”, 规范执行准确率不足; 二是模型管理低效化, 隧道 BIM 模型 (如 rvt 格式) 文件体积常达数百 MB 甚至 GB 级, 需依托 Revit、Bentley 等专业软件打开, 限制了跨部门协同与网页端轻量化浏览; 三是数据采集烦琐化, 隧道构件属性 (如衬砌厚度、混凝土强度等级) 主要来源于 PDF 设计图纸与检测报告, 人工提取录入不仅耗时耗力, 还易产生数据误差。三维 GIS 技术作为地理空间信息核心手段, 为隧道数字化应用提供连接现实世界的空间轻量化支撑^[6-11]; 基于 AI 的 OCR 文档识别技术以深度学习为核心, 为隧道数字化应用的图纸自动化识别提供关键支撑^[12-16]。本研究在梳理隧道 BIM 应用痛点需求的基础上, 研究构建一套“规范驱动、技术集成、智能高效”的隧道工程 BIM 模型应用技术体系, 推动隧道 BIM 行业规范从“纸质要求”向“自动化落地”转变, 为隧道工程全生命周期数字化管理提供保障。

1 智能化应用方法总体设计

研究以标准规范、三维 GIS 技术及 AI 技术为支撑,

针对当前 BIM 应用中的现存问题, 提出面向行业规范的隧道 BIM 智能化应用方法, 技术路线图如图 1 所示。

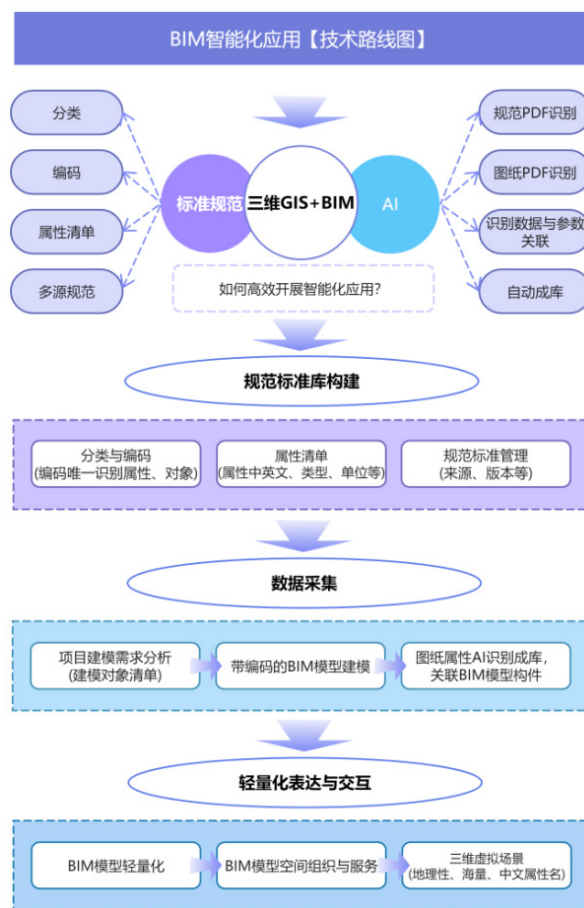


图 1 技术路线图

基金项目: 云南省交通运输厅科技创新及示范项目《高原山区连续桥隧群行车安全智能引导技术与协同控制系统研发及应用》(项目编号: 2024—40); 云南省交通规划设计研究院股份有限公司自立科技项目《公路工程勘察设计领域智慧中台构建关键技术及应用示范》(项目编号: YJSJ-ZL-2023-02); 企业科技创新项目, 云南省交通投资建设集团有限公司科技创新项目 (YCIC-YF-2023-04)。

作者简介: 谢有顺 (1992—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为公路工程“BIM+GIS”融合研究。

该方法首先通过解析标准规范文件，提取隧道 BIM 模型中设施、子设施、构件三级结构的分类与编码，以及该 BIM 模型三级结构对应的属性表；经结构化处理后构建标准规范库。其中，属性表通过三级结构的分类编码实现唯一识别，分类体系、编码体系及属性表体系均明确标注标准来源，多源标准规范的详细信息亦通过该标准规范库统一管理。其次利用 AI 技术实现图纸数据自动识别提取，并绑定到 BIM 模型结构上。最后利用三维 GIS 技术实现虚拟场景高效表达。为保障方法落地，本研究进一步建立了一套结合实际项目需求的系统化 BIM 应用工作流程，具体包括以下环节。

(1) 定义建模细则：建模细则依据标准规范库确定建模对象清单，并在清单中自动完成结构唯一标识码、分类编码及属性清单的定义；同时明确建模工作的周期、人力配置及责任分工；

(2) BIM 模型构建与属性填报：建模人员依据建模对象清单开展 BIM 模型构建，属性填报人员同步利用 AI 的 OCR 识别技术读取图纸，提取图纸中的各类参数；通过建立提取参数与待填属性清单各列的关联关系，自动完成待填属性清单的填写；

(3) 属性清单标准化处理：属性清单采集完成后，依据标准规范库将其各列名称自动进行中英文转换并结构化处理，随后入存储；

(4) 标识码与 BIM 模型关联：三级结构对应的属性清单入库后，分别生成数据库记录标识码；待 BIM 模型构建完成后，系统自动依据结构关联对应标识码，并将其嵌入 BIM 模型；

(5) BIM 模型网格优化：基于三维 GIS 轻量化技术，在保留 BIM 模型几何精度的前提下，对 BIM 模型网格进行优化；

(6) 地理空间属性定义：基于轻量化后的 BIM 模型，为其定义地理空间属性（包括国家 2000 坐标系、投影平面坐标系及 ENU 坐标系等）；

(7) 切片数据集发布：基于三维 GIS 虚拟场景空间组织算法，对 BIM 模型几何结构进行切片处理，随后将切片数据集通过服务器发布并支持访问；

(8) 三维虚拟场景交互实现：基于 BIM 模型数据服务构建三维虚拟场景，实现网页端的轻量化快速显示与交互；

(9) 属性查询机制构建：在三维虚拟场景中，建立 BIM 模型属性查询机制。通过点击交互操作获取交互对象属性数据库记录标识码，依据该标识码检索对应结构的属性信息；结合交互对象的 BIM 模型分类编码，基于标准规范库自动转换属性的中英文名称，

并推送至网页端实现属性展示。

2 智能化应用方法关键技术

2.1 标准规范库构建

研究采用双数据库架构，依托非结构化数据库 MongoDB 的动态文档特性，解决多源规范中隧道分类编码、属性表的差异性存储问题；借助关系型数据库 MySQL 的结构化管理，保障标准规范版本、来源等信息的准确性与可追溯性。针对不同规范中隧道“设施-子设施-构件”分类层级、编码规则的差异，及三级结构属性表在字段数量、中英文名、数据类型、约束条件上的不统一，将此类半结构化/非结构化数据存入 MongoDB；针对多源规范的版本、来源、发布时间等固定信息（如发布单位、实施日期、地方规范迭代记录），通过 MySQL 实现结构化存储，二者以“规范唯一标识”建立关联。

结合业务特性与隧道数据管理需求，研究以“标准规范-项目-专业-精细度”四级结构优化存储方案：“标准规范”级仍用 MySQL 存储，依托其强事务性与结构化优势存固定属性（如规范编号、生效日期），保障基础数据稳定一致；“项目”级和“专业”级合并为 MongoDB “项目-专业”集合嵌套存储——因数据量小且关联紧密，合并可减少跨集合查询开销，每个文档以项目为核心，含项目基本信息（名称、起止里程、施工单位）及关联规范 ID，通过数组字段嵌套专业信息（名称、代码、负责团队），既保层级又提查询效率（如查某项目所有专业可单文档完成）；“精细度”级按“规划-一工可-一初设-一施工-一竣工”阶段拆入 MongoDB 新集合，按里程间隔分文档存储（如 K100+325-K100+330 隧道明洞数据），每文档对应某阶段、专业、里程的数据对象，含阶段标识、专业 ID、BIM 精细度要求、数据内容及更新时间，既规避单文档超 16 MB 限制，又贴合项目推进逻辑。索引设计上，“项目-专业”集合构建 {标准规范 ID, 项目名称} 复合索引，“精细度”集合建 {专业 ID, 起始桩号, 终点桩号} 复合索引与阶段字段单键索引，支撑高频查询与跨专业汇总。整体方案贴合“按阶段管理、按专业协同”场景，提升全链路检索效率。存储结构原理如图 2 所示。

针对“精细度”层级的 MongoDB 存储节点，以“差异性数据动态适配”为原则优化：采用平铺式文档结构适配标准规范中三级结构的属性表定义，以分类编码唯一标识，属性表含规范定义的中英文名、单位、备注及规范来源字段，同时存储“父节点”唯一标识码确定分层结构，避免传统关系型数据库表结构变更的兼容性问题，优化原理如图 2 所示。

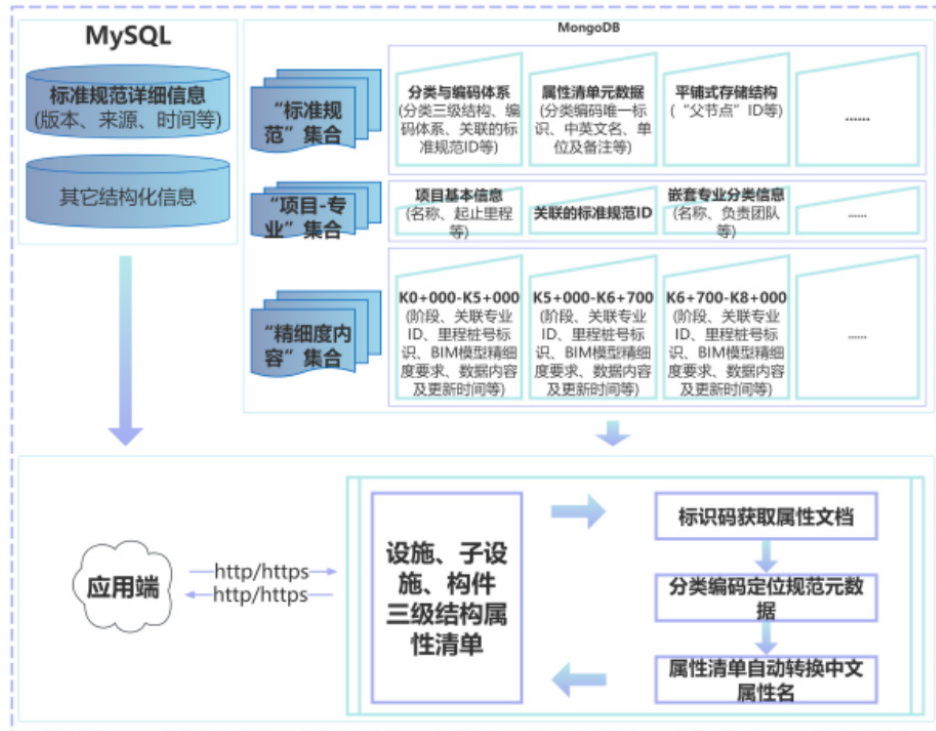


图 2 规范标准库原理示意图

2.2 基于 AI 的 OCR 文档识别技术

研究以 dots.ocr 技术体系,用于隧道工程图纸识别。利用 dots.ocr 技术的统一视觉-语言模型架构,通过深度融合卷积神经网络(CNN)的局部视觉特征捕捉能力,解决隧道图纸中细小组件标注的边缘轮廓识别问题,通过 Transformer 模型的全局语义关联能力,解决图纸标注自动关联构件参数问题。在环境布设层面,构建适配隧道工程应用的技术环境:服务器端 GPU 的部署,支撑项目级批量图纸的离线处理;软件端集成专用图像预处理模块,通过高斯去噪、透视校正、局部对比度增强等算法,修复隧道图纸扫描件中的污渍、褶皱、光照不均等问题;数据端搭建隧道工程图纸专用微调环境,基于《公路工程 BIM 设计成果交付技术指南》中规定的隧道三级结构(设施-子设施-构件)数据集,对模型进行小样本迁移学习,使识别结果与 BIM 属性清单的字段需求(如构件编码、几何参数、材料型号)精准对齐。通过 dots.ocr 精准识别图纸中的构件参数后,无须人工转录即可自动建立参数与 BIM 属性清单的关联,大幅提升属性填报效率。

2.3 轻量化表达与交互

研究围绕 BIM 模型从设计成果到应用落地的轻量化表达与交互需求,构建了“唯一标识赋码-几何轻量化-空间关联-空间数据组织-部署共享”的一体化技术流程,各环节通过精准的技术选型与逻辑耦合,保障 BIM 模型的数据唯一性、几何精度可控性、高效

可视化表达及跨平台应用适配性。具体技术流程如图 3 所示。

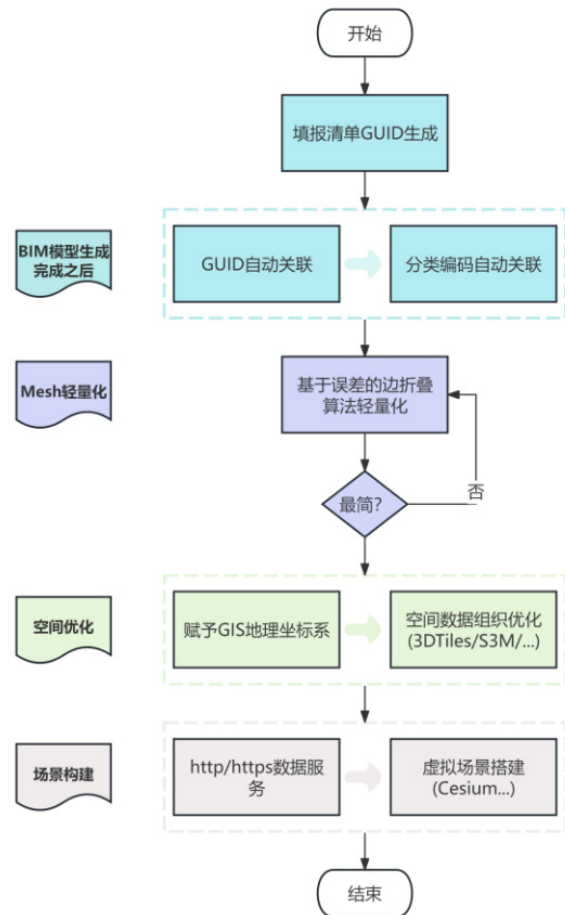


图 3 轻量化表达与交互原理示意图

在 BIM 模型数据唯一性管控层面，采用 GUID（全局唯一标识符）作为模型各级结构（设施 - 子设施 - 构件）的核心标识，其生成与属性填报清单创建深度绑定——系统基于标准规范库自动生成隧道 BIM 模型属性填报清单时，会同步为清单中每一项待填报构件（如隧道二次衬砌、超前支护导管、通风机设备）分配专属 GUID。待 BIM 模型设计完成后，系统通过接口自动读取清单中的 GUID 与标准规范库定义的分类编码，批量赋值至模型对应结构的属性字段，实现“模型几何信息 - GUID - 分类编码”三位一体绑定，为后续模型轻量化、空间定位及属性查询提供唯一数据索引。

为解决 BIM 模型（尤其隧道工程含钢筋网、预埋件等精细化构件）因 Mesh 网格量大导致的存储高、加载慢问题，研究采用基于误差的边折叠算法开展几何轻量化。算法在迭代折叠冗余边与面时，实时计算折叠后与原始网格的几何偏差，确保偏差低于预设阈值，既剔除不影响视觉呈现与工程计算的冗余几何信息（如重复微小面片、非必要细分边），又完整保留隧道受力关键部位的几何特征，避免精度损失。

为实现 BIM 模型与现实地理空间的精准关联，需为轻量化后模型赋予标准化空间坐标系。研究通过使用专业坐标转换工具，如 idesktopx，校准模型局部设计坐标与目标坐标系，将坐标偏差控制在厘米级，满足工程实践的空间精度要求。

在模型空间组织与存储管理环节，本研究采用四叉树算法构建高效空间索引，并结合行业主流规范存储数据。方法基于四叉树算法通过递归将模型空间划分为四个象限子区域，按构件空间位置分配至对应区域，形成层级化索引——当用户浏览模型部件时，系统可通过索引快速定位目标区域，避免遍历全量数据，大幅提升检索效率。同时，为保障跨平台兼容性，模型数据采用 3dTiles 或 S3M 规范存储：3dTiles 适配 Web 端轻量化加载，支持 LOD 分级存储（如远距加载低精度模型、近距加载高精度模型），契合网页端协同浏览；S3M 更适配 SuperMap 等国产 GIS 平台，满足工程与国产地理信息系统的深度集成需求，两种规范可按需选择，确保数据通用性。

模型完成空间组织与存储后，采用分布式服务器架构部署发布，并提供 HTTP/HTTPS 双协议数据访问接口。服务器还支持 REST API 接口，可让隧道施工管理平台、运维管理系统等第三方系统调用 BIM 数据，实现跨系统共享。

研究采用 Cesium 三维地理信息引擎实现 BIM 模型的高效浏览、查询与共享。Cesium 基于 WebGL 支

持浏览器无插件渲染，兼容 PC 端、移动端多终端，用户无须安装专用软件，即可通过网页端完成隧道 BIM 模型的多视角浏览（旋转、缩放、剖面查看）、空间测量（构件尺寸、两点距离计算）及属性查询——点击模型构件时，系统通过 GUID 索引关联属性数据库，实时调取构件的分类编码、材料参数、施工时间等信息并弹窗展示；同时，Cesium 支持模型与 GIS 数据叠加显示（如融合隧道 BIM 模型与卫星遥感影像、地形模型），帮助用户直观理解隧道与周边环境的空间关联。该 Web 共享模式打破传统 BIM “需专用软件打开”的局限，实现多参与方实时协同，为隧道工程设计交底、施工管控、运维巡检提供便捷可视化工具。

3 应用效果

为验证研究成果的工程实用性，研究选取云南某山地高速公路隧道数字化管理项目开展示范应用，该隧道里程为 1.2 km，传统 BIM 应用存在模型设计周期长、属性采集易出错、成果交付需专业软件支持等痛点。

应用过程中，依托本研究构建的标准规范库、AI-OCR 属性采集技术及 CesiumWeb 端可视化平台，实现了全流程效率突破：在 BIM 模型设计阶段，通过建模细则自动生成与多专业协同设计，隧道结构等模型的协同修改效率较传统方式提升 40% 以上，避免了因规范理解差异导致的反复返工；属性采集环节，借助 AI-OCR 技术自动识别图纸参数并匹配属性清单，人工录入工作量减少 75%，属性数据错误率大大低于传统手工填报错误率；成果交付阶段，基于 Web 的轻量化平台支持一线人员无门槛使用——无须掌握专业 BIM 软件操作技能，仅通过网页端即可完成模型浏览、关键构件属性查询（如衬砌厚度、钢筋型号）及成果导出，解决了传统 BIM 成果“落地难、用不起”的问题。依托本研究方法的管理系统示意如图 4 所示。

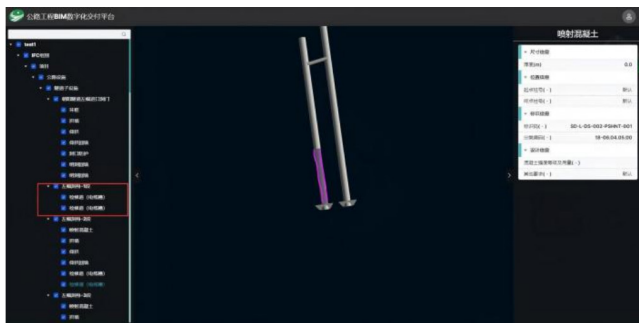


图 4 系统实例图

示范应用最终实现显著综合效益，项目实施周期比传统方式缩短一半，同时通过可视化交底降低了多参与方的沟通成本，其“低门槛、高效率”的应用模式也为西南地区山地高速公路隧道 BIM 技术推广提供

了可复制的实践经验。

4 结束语

本研究设计并实现了一种面向行业规范的隧道 BIM 智能化应用方法,通过构建标准规范库、采用基于 AI 的 OCR 技术实现图纸智能识别、依托三维 GIS 技术达成 BIM 模型高效无门槛表达,有效解决当前隧道 BIM 应用中存在的三大突出问题,为隧道 BIM 数字化应用提供了关键支撑。该方法已在云南省某高速公路隧道数字化管理项目中开展示范应用,实践表明其显著提升了模型设计、属性采集与成果交付效率,取得了可观的社会效益与经济效益。后续研究将进一步扩充图纸样本库、提升图纸参数识别精度,同时基于本研究方法,探索研发符合规范要求、兼具成本效益、低学习门槛的行业级数字化平台,以进一步深化对隧道 BIM 智能化应用的支撑作用,推动技术成果向更多工程场景落地转化。

参考文献:

- [1] 赵文祥,曲柄宇,王厚霖,等. BIM 技术在盾构管片预埋槽道优化中的应用研究[J]. 隧道建设(中英文),2025,45(2):375-381.
- [2] 刘少鹏,邓斌,曹影峰,等. 桥隧工程 GIS+BIM 正向设计方法与应用[J]. 隧道建设(中英文),2023,43(4):674-689.
- [3] 唐强,林述涛. 基于 BIM 技术的黄茅海跨海通道计量管理系统研究[J]. 公路交通科技,2023,40(S2):151-157+186.
- [4] 曹影峰,王勇,彭兴宇,等. 基于 BIM 技术的隧道工程数字化设计软件研发与应用[J]. 公路,2025,70(3):340-347.
- [5] 石芳芳,赵杏英,徐灵慧,等. 基于深圳 BIM 存储标准的市政工程模型质量自动检查[J]. 土木建筑工程信息技术,2024,16(4):86-90.
- [6] 王建伟,高超,董是,等. 道路基础设施数字化研究进展与展望[J]. 中国公路学报,2020,33(11):101-124.
- [7] 杨晓光,胡仕星月,张梦雅. 智能高速公路交通应用技术发展综述[J]. 中国公路学报,2023,36(10):142-164.
- [8] 杨旭,李毅,刘文博,等. 基于 BIM+GIS 的沥青路面表里全域病害数字孪生研究[J]. 中国公路学报,2023,36(3):120-135.
- [9] BARAZZETTI L,PREVITALI M,SCAIONI M. Roads detection and parameterization in integrated BIM-GIS using Lidar[J]. Infrastructures,2020,5(7):55.
- [10] 吴绍明,冯远鹏,闫怡雯,等. 基于 BIM+GIS 的高速公路数字沙盘研究及应用[J]. 公路工程,2023,48(2):73-80.
- [11] 魏新江,张阳,陈浙江,等. 基于 GIS 的隧道洞口边坡的稳定性分析[J]. 公路工程,2020,45(6):165-172.
- [12] 刘成林,金连文,白翔,等. 文档智能分析与识别前沿:回顾与展望[J]. 中国图象图形学报,2023,28(8):2223-2252.
- [13] 李鸿亮,刘禹良,廖文辉,等. 大模型时代的光学文字识别:现状及展望[J]. 中国图象图形学报,2025,30(6):2023-2050.
- [14] 刘崇宇,陈晓雪,罗灿杰,等. 自然场景文本检测与识别的深度学习方法[J]. 中国图象图形学报,2021,26(6):1330-1367.
- [15] LIU Y,LI Z,HUANG M,et al. OCR Bench: on the hidden mystery of OCR in large multimodal models[J]. Science China(Information Sciences),2024,67(12):23-35.
- [16] 徐诗康,刘俊峰,曾君,等. 基于跨模态和循环分解自注意力的场景文本识别[J]. 计算机工程与应用,2025,61(11):176-184.