

基于数字化技术的海涂区桥梁施工创新实践

陈良辉

温州市交通工程管理中心, 中国·浙江 温州 325015

摘要: 为破解沿海近海堤桥梁施工数字化技术瓶颈, 本文依托乐清市滨海大道桥梁工程项目, 深入分析近海堤海域滩涂区域桥梁施工核心难点, 系统性探究数字化技术与滨海桥梁全流程施工的融合路径, 从人员智能调度、进度质量安全智能风控、数字孪生施工运维等维度, 提出适配海域滩涂地质水文特征的数字化施工创新技术体系。经项目实地应用验证, 该技术体系可有效降低滩涂桥梁施工质量安全风险、缩短海上作业工期, 大幅提升近海海域桥梁施工智能化、精细化、绿色化水平, 可为沿海同类近海滩涂区桥梁工程施工提供实践参考与借鉴。

关键词: 数字化技术; 海涂区; 桥梁施工; 创新实践

Innovative Practice of Bridge Construction in Tidal Flat Areas Based on Digital Technology

Chen Lianghui

Wenzhou Traffic Engineering Management Center, China Zhejiang Wenzhou 325015

Abstract: To break through the digital technology bottleneck in the construction of bridges near coastal seawalls, this paper, relying on the Bridge Project of Yueqing Binhai Avenue, conducts an in-depth analysis of the core difficulties in bridge construction in the tidal flat areas of the sea near seawalls, systematically explores the integration path between digital technology and the whole-process construction of coastal bridges, and proposes an innovative digital construction technology system adapted to the geological and hydrological characteristics of sea tidal flats from the dimensions of intelligent personnel scheduling, intelligent risk control of schedule, quality and safety, and digital twin construction and operation & maintenance. Verified by field application in the project, this technology system can effectively reduce the quality and safety risks of bridge construction on tidal flats, shorten the offshore operation period, greatly improve the intelligence, refinement and greenness levels of bridge construction in offshore waters, and provide practical reference for the construction of similar bridge projects in coastal offshore tidal flat areas.

Keywords: Digital technology; Tidal flat area; Bridge construction; Innovative practice

1 引言

1.1 研究背景

乐清滨海大道地属海域滩涂区, 潮差大、台风多发, 滩涂为高含水率流塑淤泥软土, 土体承载力差, 海水腐蚀离子浓度高, 且与海堤施工交叉作业空间狭小, 桥梁耐久性管控难度大。传统施工依赖人工经验, 桩基、围堰、支架等工序缺少动态监测, 易引发塌孔、结构开裂、不均匀沉降、海工腐蚀等病害。

1.2 研究意义

当下物联网、数字孪生^[1]、AI 与机器视觉逐步融入土建工程, 数字化^[2-3]赋能滩涂桥梁智能施工成为行业创新主流方向。理论上可完善近海软基桥梁智能施工理论, 填补浙南海域相关研究空缺, 顺应数字中国发展战略; 实践中依托乐清市滨海大道项目成套智能施工体系, 破解海上软基施工管控难题, 提质增效且减少运维成本, 为同类工程提供标准化推广方案。

1.3 研究内容与技术路线

以滩涂段桥梁为对象, 先梳理海洋水文地质条件与施工痛点; 再搭建感知、融合、算法、应用四级 AI 施工架构; 针对桩基、承台、上部结构等工序研发适配数字化施工技术; 最终结合量化的应用效果, 梳理不足并给出优化对策。

2 近海堤海域滩涂区桥梁施工核心难点

结合乐清滨海大道项目现场工况, 总结近海堤滩涂海域桥梁施工五大核心技术难点, 也是人工智能^[4]技术重点攻坚方向, 项目采用传统桥梁施工工艺, 暴露出多项突出问题: 一是桩基与海堤依靠人工测量结合经验确定互相作用效果, 桥梁后期位移差不确定; 二是水下桩基成孔、清渣全程人工检测, 数据滞后, 施工质量隐患无法及时排查; 三是临海高空、临水作业依靠人工巡查管控, 安全事故防范能力薄弱; 四是各类海上大量承重临时设施依靠人工测控, 管控效果差; 五是预制梁养生依靠人工洒水, 人

为因素导致养生不均匀、外观色泽差。

3 数字化赋能滩涂桥梁施工整体架构

依托物联网、边缘计算、深度学习算法、机器视觉、大数据预测等人工智能核心技术，结合公路桥梁施工全流程工序，搭建适配乐清近海滩涂工况的四层智能化施工应用体系：

3.1 感知采集层

布设一体化智能感知终端，包含深层次位移传感器、桩基成孔检测仪、混凝土拌合传感器、无人机^[5] 航拍巡检设备、AI 高清视觉摄像头、扬尘监测仪等，全方位采集施工设备运行数据、现场人员作业数据、结构应力及变形监测数据，实现施工现场全要素数据实时采集。

3.2 数据融合层

搭建项目专属滨海大道项目数字化平台^[6]，整合地质勘察数据、设计图纸、现场实时监测数据，完成数据分类、脱敏与统一标准化处理，打通施工勘察、设计、施工、监测各环节数据壁垒，采用信息化技术^[7] 为智能算法运算提供完整数据支撑。

3.3 智能算法层

搭载适配滨海大道项目的人工智能核心算法，主要包含：深层次位移预测算法、混凝土养生智能调控算法、施工现场人员违规行为识别算法、施工进度动态优化调度算法四大核心算法。

3.4 场景应用层

将智能算法运算结果落地至桥梁实际施工场景，覆盖设计、人员管理、桩基施工、现浇施工、梁体预制及架设、现场安全管理、施工进度管控全施工流程，实现从人工经验施工向数据智能决策施工转变。

4 基于数字化技术的滩涂区桥梁施工技术创新实践

4.1 建立复杂结构物 BIM 模型

采用 BIM^[8] 技术对胜利北塘大桥预制长度小于墩身间距无盖梁的预制大箱梁钢筋进行精细化三维建模，全面开展钢筋构件碰撞检测，梳理各类冲突问题并编制完整碰撞报告。以模型及检测成果指导现场钢筋规范安装，针对性优化钢筋排布与施工工艺，提前规避施工隐患，减少返工，保障工程施工质量与效率。

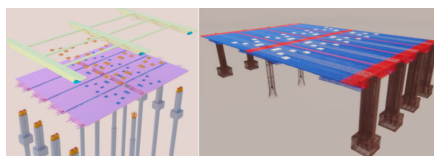


图1 预制大箱梁一般构造及钢筋三维建模

4.2 利用手机 App 实现人员应急调度

依托人员管理平台融合电子围栏技术，通过手机 APP 实时展示现场人员位置，为日常人员调配、作业统筹提供

精准数据支撑。面对台风等突发险情，平台可快速核查全员撤离状态与分布情况，实时跟进疏散进度，让应急指挥响应更高效、管控更有序，全面保障人员安全。



图2 人员应急调度web端页面

4.3 深层水平位移自动监测

采用深层水平位移自动监测系统，在临海堤加高桩基旁边的测斜管中布设专用监测元件，全天候自动采集土体不同深度水平位移数据，数据实时上传至管理平台。系统自动分析形变趋势、生成监测报表，数据异常即刻触发预警。大幅减少人工监测工作量，提升监测精度与连续性，精准把控地基稳定状态，为现场施工及管控提供数据支撑。

4.4 AI 智能结构安全安全管控创新

本项目桥梁施工重点结构安全管控点如围堰、挂篮、架桥机、现浇支架等，施工过程中受潮水冲击荷载、风荷载等可能导致结构变形、应力突变，均会产生较大的安全隐患。项目采用自动化数据监测平台，在围堰、挂篮、架桥机等主要受力结构布设应力、位移智能传感器，数据实时上传至 AI 监测平台，系统通过算法建立结构受力数值模型，一旦监测数据超出安全限值，立即自动发出预警。该技术应用后，项目围堰、支架及挂篮施工未发生一起结构安全隐患，临海施工结构安全大幅提升。

4.5 物联网混凝土 AI 智能质控

将拌合站、试验室、预制梁厂等关键区域全面接入物联网^[9-10] 监测体系，实时采集各类试验、预应力参数并在线汇总。系统自动比对标准值，数据异常时第一时间推送预警消息，提醒管理人员及时处置。实现关键工序全天候动态监管，从源头把控施工质量，有效保障工程建设质量。

4.6 App 自动控制预制梁养生

预制梁场将喷淋管道预埋至台座内部，依托 APP 实现远程操控。系统采用气雾式喷淋，可全天候自动喷淋保持梁体湿润。设备全程自动化运行，基本实现无人值守，既减轻人工劳作强度、提升作业效率，还兼具节水、成本低廉、安装与检修便捷的特点。

4.7 施工现场 AI 智能安全管控创新

滨海滩涂施工现场环境复杂，临水高空作业、大型机械交叉作业、台风突发天气作业风险极高，项目部署全域 AI 视觉智能安全管理系统：

(1) 通过现场高清 AI 摄像头，利用深度学习图像识别技术，自动识别未佩戴安全帽、临水临边违规作业、高

空抛物、等不安全行为，实时抓拍存档并联动现场广播警示。

(2) 依托无人机 AI 自动巡检技术，定期对桥梁高处结构、临海作业面进行全覆盖巡检，弥补人工巡检盲区，实现施工安全隐患早发现、早整改。

5 项目应用成效综合分析

乐清市滨海大道滩涂海域桥梁工程项目全面落地数字化相关施工创新技术以来，严格按照交通部及浙江省相关质量安全文件要求、公路桥梁工程质量验收标准执行，取得显著经济、质量、安全、进度四大成效：

(1) 质量：桥梁桩基一类桩合格率从传统施工模式的 92% 提升至 96%，大体积承台开裂病害发生率降至 0，桥梁软基不均匀沉降合格率 100%。

(2) 进度：依托智能监控，滩涂海域桥梁整体施工工期缩短 15% 左右，有效规避了沿海台风雨季、潜在隐患对施工进度的严重影响，保障项目按期通车目标推进。

(3) 安全：施工现场违规作业行为下降 36%，临海临水作业、海上施工零重大安全事故，现场安全隐患整改效率提升 60%，构建起智能化、全方位的滨海施工安全防护体系。

(4) 经济：AI 智能优化施工方案减少了施工材料浪费与大型设备无效能耗，项目单座滩涂桥梁施工综合造价降低约 6.8%；同时智能泥浆循环、精准混凝土配比等绿色施工工艺，减少滩涂海域施工污染物排放，实现近海工程绿色建设。

(5) 技术示范成效：依托项目形成的数字化创新与实践，已获得温州市平安百年品质工程第一期培育项目、BIM 奖 7 项、专利 40 余项、浙江省质量信得过班组等，为浙东南沿海同类桥梁工程提供成熟实践经验。

6 数字化施工技术现存问题与优化对策

6.1 现存实际问题

(1) 海域现场通信条件受限：近海滩涂偏远区域网络信号较弱，智能感知设备数据传输存在延迟、数据缺失。

(2) 专业复合型人才匮乏：现场施工人员熟悉桥梁施工工艺，但缺乏人工智能、大数据、智能设备运维相关专业知识，数字化技术应用落地存在阻力。

(3) 智能化施工初期投入偏高：智能感知设备、大数据平台搭建、AI 系统部署前期采购与搭建成本高于传统施工模式，中小规模滨海项目推广存在资金压力。

6.2 针对性优化改进对策

(1) 搭建边缘计算基站优化通信：在滩涂施工片区布设小型边缘计算基站，实现现场数据快速处理，减少云端传输依赖，避免网络信号薄弱带来的数据延迟问题。

(2) 开展定向专业技能培训：联合高校土木专业、智能建造企业，面向一线施工管理人员、技术人员开展“桥

梁施工 + 人工智能”双向技能培训，组建本地化智能施工技术团队。

(3) 研发轻量化智能施工设备：推广低成本、小型化、一体化智能监测终端，简化 AI 系统操作界面，降低中小滨海桥梁工程智能化改造投入成本，扩大技术推广范围；同时建设单位适当提高相关投入，已增加各参建单位创新、研发积极性。

7 结语

近海堤海域滩涂区桥梁工程是我国东南沿海交通基础设施建设的重点与难点工程，传统施工模式已无法适配复杂海域工况下高品质、高效率、高安全性的工程建设需求。本文以乐清市滨海大道项目为实际依托，系统探究了人工智能技术在滩涂海域桥梁勘察设计、桩基施工、围堰施工、混凝土质控、质量安全管理等全流程的创新应用路径，构建了完整的近海滩涂桥梁数字化施工技术体系，为滨海桥梁工程建设从传统人力施工模式全面向智慧化、数字化、绿色化施工模式转型升级，起到了引领作用。后续可进一步融合数字孪生、建筑机器人、无人施工设备等前沿技术，持续完善近海海域桥梁全生命周期智能化施工与运维体系。

参考文献：

- [1] 李建峰. 数字孪生与 AI 融合下桥梁工程智能施工体系构建[J]. 施工技术, 2023, 52(10): 23-28.
- [2] 王世坚, 陆晶晶. 装配式桩基码头构件制造与加工数字化技术[J]. 水运工程, 2023, (5): 182-186.
- [3] 徐杰, 孙涛, 戴剑博. 基于数字孪生技术的桩机姿态与工况监测系统[J]. 机床与液压, 2024, 52(2): 83-87.
- [4] 王浩宇, 陈铭. 人工智能在桥梁工程施工质量管控中的应用研究[J]. 土木工程学报, 2022, 55(S1): 78-85.
- [5] 黄鹏飞. 无人机机器视觉在桥梁施工现场安全巡检中的应用[J]. 中外公路, 2022, 42(03): 189-193.
- [6] 曾勃, 马智亮, 李帅勇等. 智能建造数字化平台相关技术研究进展[J]. 科技导报, 2025, 43(9): 84-92.
- [7] 陈祎, 王骁帆. 水泥搅拌桩施工信息化管控技术研究[J]. 公路, 2024, 69(10): 37-44.
- [8] 李俊亭, 田赢凤, 董艺佳等. 整合 BIM 和区块链的信息集成协同系统研究[J]. 建筑科学, 2024, 40(10): 253-260.
- [9] 李耀业, 王鹏, 张银博等. 物联网技术在项目管理领域研究综述[J]. 建筑经济, 2023, 44(3): 72-78.
- [10] 凌可胜, 王立新, 胡佳等. 基于物联网的静力压桩规范施工智能监测系统[J]. 传感技术学报, 2023, 36(3): 497-502.

作者简介：陈良辉（1971-），汉族，浙江省温州市人，本科，高级工程师；研究方向：公路桥梁施工技术。