

高速公路智慧服务区管控系统研发与应用

龙公林¹ 刘辰² 查理³

1 江西省交通工程集团有限公司, 江西南昌, 330000;

2 江西交投海通公路养护有限公司, 江西南昌, 330000;

3 江西省交投养护科技集团交通工程公司, 江西南昌, 330000;

摘要: 随着交通运输行业与信息技术的深度融合, 智慧服务区成为智能交通系统的关键组成部分。本文以梨东高速公路上饶服务区为研究对象, 依托沪昆高速梨园(赣浙界)至东乡段改扩建工程, 围绕智慧服务区管控系统展开研究。系统融合数字孪生、BIM(建筑信息模型)、物联网(IOT)及人工智能技术, 通过搭建三维可视化场景、研发管控平台、建立信息数据库, 实现施工安全、进度、交通流及成本的精细化管理。研究成果包括1项软件著作权、1项发明专利申请、1篇省级期刊论文及1项地方标准参编, 可有效提升服务区施工管理效率, 降低成本3.0%, 减少施工事故发生率50%, 为同类智慧服务区建设提供示范与参考。

关键词: 高速公路; 智慧服务区; 管控系统; 数字孪生; BIM; 物联网

DOI: 10.64216/3080-1508.26.01.020

1 引言

1.1 研究背景

我国高速公路建设已进入“提质增效”转型阶段, 服务区作为重要配套设施, 其管理水平直接影响交通网络效率与用户体验。传统服务区施工管理存在明显痛点: 安全监管依赖人工巡检, 存在盲区且事故响应滞后; 施工进度缺乏实时管控, 易因工序衔接问题延误工期; 施工与交通流协调不足, 常引发拥堵; 资源配置粗放, 材料与能源浪费严重, 建设成本偏高。在此背景下, 借助数字孪生、BIM、物联网等技术研发智慧服务区管控系统, 成为解决传统管理痛点、推动服务区建设现代化的必然选择。

1.2 研究意义

本研究的社会效益体现在: 实时监控施工安全, 快速响应紧急情况以保障人员生命财产安全; 精确管理施工进度, 减少对交通流的影响, 提升道路通行能力; 优化施工流程以降低碳排放, 符合绿色发展理念; 项目实施中还能培养行业技术人才, 整体提升交通基础设施建设领域技术水平。经济效益则表现为: 管控系统实现施工现场精细化管理, 减少资源浪费, 缩短工期15%-20%、降低建设成本3.0%; 上饶服务区作为沪昆高速重要节点, 优化升级后可带动周边旅游业及相关服务业增长, 促进区域经济发展。

1.3 研究依托工程

本研究依托沪昆高速梨园(赣浙界)至东乡段改扩建工程, 该项目起于上饶市玉山县梨园赣浙界(起点桩号K458+00), 途经上饶、鹰潭多区县, 终于抚州市东乡区东乡枢纽互通(终点桩号K657+620), 路线全长约201.158公里。系统研发与应用聚焦项目K543+500-K588+775区间的上饶服务区, 该服务区是本次改扩建核心房建项目之一, 涉及新增建筑面积约19668 m²、利用维修建筑面积6075 m², 涵盖多区域升级改造, 施工复杂度与管理难度高, 为系统研发提供典型应用场景。

2 系统研发的核心技术与目标

2.1 核心技术体系

系统研发以“多技术融合”为核心, 构建“感知-建模-分析-管控”技术框架, 关键技术涵盖四类: 一是BIM技术, 作为数据基础, 通过建立上饶服务区三维BIM模型整合多专业数据, 实现全阶段数据传递共享, 较传统二维图纸减少专业协同误差, 数据共享效率提升40%以上; 二是数字孪生技术, 基于BIM模型搭建服务区及周边数字孪生场景, 同步施工现场实时数据形成“物理实体-虚拟镜像”双向映射, 助力管理人员远程可视化监控、提前预判风险, 决策效率提升50%; 三是物联网技术, 部署人员定位终端、设备传感器等感知设备, 经5G网络实时采集人员、设备、环境数据, 采集频率达1次/分钟, 远超人工巡检效率; 四是人工智能技术, 通

过算法分析物联网数据,实现人员安全帽识别(准确率超 95%、响应时间<3 秒)与施工进度偏差分析(预警准确率 85%),为管理提供智能支撑。

2.2 系统研发目标

系统研发设定多维度目标:功能目标聚焦安全、进度、交通流、成本四大管理方向,分别实现施工安全实时监控与紧急响应、施工进度动态跟踪、施工与通行区域交通协调、资源消耗优化配置;技术指标目标明确形成 1 项软件著作权(梨东高速公路智慧服务区施工管控平台)、申请 1 项发明专利、发表 1 篇省级期刊论文、参编 1 项地方标准;效益目标则从多方面发力,安全上

事故发生率降低 50%以上且紧急响应缩至 5 分钟内,效率上进度管控效率提升 40%且工期延误率≤5%,经济上建设成本降 3.0% 且资源浪费减 25%,社会层面施工期交通拥堵时长减 30%且碳排放降 15%,全面覆盖功能、技术与效益维度,保障系统研发方向清晰、成果可控。

3 系统总体设计与实现

3.1 系统架构设计

智慧服务区管控系统采用“三层架构”设计,分别为感知层、平台层与应用层,各层功能明确、数据互通,具体架构如下表所示:

架构层级	核心组件	主要功能	技术支撑
感知层	物联网传感器、视频监控、人员定位终端、设备控制器	实时采集人员、设备、环境、进度数据	物联网、5G、GPS
平台层	数据存储服务器、计算服务器、BIM 模型服务器、AI 分析引擎	数据存储与处理、BIM 模型管理、AI 数据分析	云计算、大数据、BIM
应用层	安全管理模块、进度管理模块、交通流管理模块、成本管理模块	安全监控、进度跟踪、交通协调、成本控制	Web 开发、移动应用开发

3.2 关键模块实现

3.2.1 三维可视化场景搭建

以上饶服务区 BIM 模型为基础,结合卫星地图与现场测绘数据,搭建周边 3 公里范围内的三维环境场景,涵盖道路、建筑、绿化等要素。场景支持缩放、旋转、漫游等操作,管理人员可通过电脑或移动终端查看施工细节,例如:①点击某一施工区域,可显示该区域的施工班组、工序进度、设备状态等信息。②模拟施工工序的衔接过程,提前发现工序冲突,减少现场返工。

三维场景的搭建采用 Autodesk Revit 软件建模,Unity3D 软件进行可视化渲染,模型精度达 LOD400(构件级精度),可满足施工管理的精细化需求。

3.2.2 施工管控平台研发

作为系统核心的施工管控平台,基于 Java 语言开发并采用 B/S(浏览器/服务器)架构,支持电脑、手机、平板等多终端访问,且包含四大核心模块。其中安全管理模块可接入施工现场视频监控画面,支持 AI 安全帽识别,未佩戴时自动触发声光报警并推送预警信息至管理人员手机,同时能实现安全隐患“发现-整改-验收”的闭环管理,还可在火灾、坍塌等事故发生时自动生成应急处置方案并通知相关人员;进度管理模块能将施工总进度计划分解为月、周计划录入数据库,通过物联网

设备采集实际进度与计划对比生成偏差报表,再结合 AI 算法基于历史数据和当前偏差预测工期走势;交通流管理模块在施工区域前后 2 公里设监测点采集车流量、车速数据判断拥堵状态,拥堵时自动生成疏导方案并通过可变情报板提示驾驶员,还会统计拥堵时长以优化施工时间;成本管理模块借助物联网传感器采集材料用量、设备能耗等资源消耗数据,与预算对比生成成本偏差报表,进而提出资源优化建议以降低成本。

3.2.3 数字孪生信息数据库建立

建立服务区数字孪生三维模型施工阶段的完整信息数据库,数据库采用 MySQL 关系型数据库,存储的数据包括三类:

基础数据:服务区 BIM 模型数据、施工图纸数据、人员与设备信息(如人员姓名、工种、设备型号、出厂日期)。

实时数据:物联网设备采集的人员位置、设备状态、交通流量、资源消耗等数据,数据保留周期为项目全周期(2024-2026 年)。

分析数据:AI 算法处理后的安全预警数据、进度偏差数据、成本分析数据,用于生成报表与决策支持。

数据库支持数据的实时更新与查询,管理人员可通过平台快速检索所需信息,例如查询某一设备的历史运行记录、某一工序的进度数据等,数据查询响应时间小

于 1 秒。

3.3 系统测试与优化

3.3.1 测试环境

测试地点为上饶服务区施工区域,测试时间为 2025 年 3 月-2025 年 5 月,测试期间部署物联网设备 50 台(包括人员定位终端 20 台、视频监控 15 台、设备传感器 15 台),接入平台的数据源包括 10 个施工班组、8 台大型设备的实时数据。

3.3.2 测试内容与结果

功能测试:验证安全管理、进度管理等模块的功能是否正常,测试结果显示所有模块均能实现设计功能,无功能缺失。

性能测试:测试平台的并发访问能力、数据处理速度,结果显示平台支持 50 人同时在线访问,数据处理速度达 1000 条/秒,满足施工管理需求。

精度测试:测试 AI 安全帽识别准确率与进度预警准确率,结果显示安全帽识别准确率 96%,进度预警准确率 87%,均达到技术指标目标。

3.3.3 系统优化

基于测试结果,对系统进行两项优化:一是优化 AI

安全帽识别算法,解决逆光场景下识别准确率低的问题,将准确率提升至 97%;二是优化进度预测模型,增加天气因素(如雨天影响户外施工)的权重,将进度预警准确率提升至 89%。

4 系统应用效果分析

4.1 应用场景

智慧服务区管控系统于 2025 年 6 月在上饶服务区正式投入应用,覆盖服务区施工的全周期(2025 年 6 月-2026 年 6 月),应用场景包括:

(1)主体结构施工阶段:监控钢筋绑扎、混凝土浇筑等工序的进度与安全。

(2)机电安装阶段:跟踪设备安装进度,确保水电、通信系统的正常对接。

(3)装饰装修阶段:管理材料进场与使用,控制装修成本。

(4)试运行阶段:协调施工区域与通行区域的交通流,减少对用户的影响。

4.2 应用效果量化分析

通过对比系统应用前后的施工管理数据,量化分析系统的应用效果,具体数据如下表所示:

指标名称	系统应用前(2024 年 Q4)	系统应用后(2025 年 Q4)	提升/降低幅度
施工事故发生率	4 起/月	1 起/月	降低 75%
紧急事件响应时间	15 分钟	4 分钟	缩短 73%
工期延误率	18%	4%	降低 78%
建设成本(万元/m ²)	0.8	0.776	降低 3.0%
交通拥堵时长(小时/天)	5	1.5	减少 70%
资源浪费率	20%	15%	减少 25%

从数据可以看出,系统应用后在安全、进度、成本、交通流等方面均取得显著效果,完全达到预期目标。

4.3 应用推广前景

梨东高速公路智慧服务区管控系统的应用推广前景广泛,在省内,其在上饶服务区的应用成果已被江西省交通投资集团列为智慧服务区建设示范案例,计划 2026 年在沪昆高速鹰潭服务区、抚州服务区等其他服务区推广,覆盖里程约 200 公里。按单个服务区平均新增建筑面积 15000 m²、建设成本降低 3.0%(即每平方米节省 0.024 万元)计算,预计可节省建设成本约 540 万元;在省外,系统的数字孪生进度管控、AI 安全识别、精准成本控制等核心技术具有通用性,能适配其他省份高速

公路服务区建设,如浙江省计划借鉴该系统设计理念,于 2027 年在杭甬高速智慧服务区建设中引入类似管控系统,实现跨省应用,助力当地服务区建设成本优化;同时,项目参编的《江西省高速公路智慧服务区施工管理规范》将于 2026 年发布实施,明确了智慧服务区施工管控的技术要求与流程标准,其中包含成本精细化管理相关内容,为江西乃至全国智慧服务区建设提供技术参考,助力行业管理水平整体提升。

5 结论与展望

本研究以梨东高速公路上饶服务区为依托,成功研发融合数字孪生、BIM、物联网及人工智能技术的智慧服务区管控系统。该系统采用“感知-平台-应用”三层

架构,可实现施工安全、进度、交通流、成本的精细化管理,功能覆盖施工全周期;应用后成效显著,施工事故发生率降低75%、建设成本降低3.0%、交通拥堵时长减少70%,经济效益与社会效益突出;同时,研发过程形成1项软件著作权、1项发明专利申请、1篇省级期刊论文及1项地方标准参编的丰富技术成果,具备良好推广价值。

未来将从三方面推进系统发展:技术升级上,优化AI算法以增加施工质量缺陷识别功能,并引入数字孪生AR技术,助力提升系统智能化水平与现场作业效率;功能扩展上,延伸运维管理功能,对接施工与运维阶段数据库,实现“施工-运维”全生命周期管控;行业协同上,加强与高校、科研机构合作,如联合南昌大学研发“基于数字孪生的服务区能耗优化模型”,进一步降低运营能耗,推动绿色交通发展。

参考文献

[1]张喻.智慧服务区综合管控系统解析[J].中国交通

信息化,2024,(02):34-36.

[2]赵琪,郭森科,吴狄.智慧高速公路服务区管控平台实现[J].中国交通信息化,2021,(07):124-126.

[3]唐耀祥.高速公路智慧服务区安全管控智能化建设研究[J].山西交通科技,2020,(05):95-96+100.

[4]邓海龙,冯元,乔硕,等.基于交能融合的高速公路智慧服务区信息化管控平台设计[J].电子设计工程,2025,33(09):180-185.

[5]乔木.高速公路智慧服务区信息化综合管理平台的实践与研究[J].运输经理世界,2025,(19):65-67.

[6]周剑.高速公路智慧服务区的创新应用研究[J].科技与创新,2025,(07):154-157.

[7]郑正淼.高速公路智慧服务区信息化建设管理研究[J].运输经理世界,2024,(32):64-66.

项目名称:梨东高速公路智慧服务区施工管控系统研发,项目编号:2023JT0011。