

数字建造智能算法驱动的公路工程全生命周期资源协同配置模型

潘 登

中国一冶集团有限公司 湖北 武汉 430080

【摘 要】：公路工程全生命周期资源配置面临信息割裂、调度粗放、决策滞后等难题，数字建造技术通过构建“模型驱动-数据贯通-算法优化”的协同体系，实现人、材、机、资金等要素的动态匹配与高效利用。本文系统综述 BIM 建模、物联网感知、智能算法在规划设计、施工建造、运营维护阶段的关键应用，揭示全生命周期模型在成本管控、工期优化、资源利用率提升等方面的核心优势，展望边缘计算、联邦学习等前沿技术的融合方向，为公路工程智能化转型提供理论框架。

【关键词】：数字建造智能算法驱动；公路工程；全生命周期资源协同配置模型

DOI:10.12417/2811-0536.25.11.025

针对公路工程全生命周期资源配置效率低下、协同性不足的难题，构建“BIM+物联网+智能算法”三位一体的资源协同配置模型。结合长短期记忆网络预测运营阶段养护资源需求。结合公路工程建设领域权威机构的调研，以高速某段为例，模型应用后项目工期缩短，资源利用率提升。研究表明数字建造技术通过全要素数据贯通与智能算法驱动，可显著提升公路工程全生命周期管理效能，为智慧交通建设提供新范式。

1 行业变革背景

公路工程作为国家基础设施的核心组成部分，其全生命周期管理涉及规划、设计、施工、运营等多个阶段，涵盖 100+类资源要素与 50+参与方协同。根据 2024 年交通运输部发布的行业统计报告，传统模式下，各阶段数据孤岛率超 70%，资源配置依赖经验决策，导致材料浪费率达 15%、机械闲置率超 30%、养护成本年均增长 8%。数字建造以建筑信息模型、物联网、人工智能为核心，通过物理世界数字化映射与智能算法驱动，正在重塑公路工程的资源配置范式。

(1) 行业痛点与研究意义：公路工程具有投资规模大、建设周期长、资源要素复杂，2024 年《交通运输行业发展统计公报》中，涉及 500+种材料、200+类设备等，传统管理模式存在规划、设计、施工、运营阶段数据割裂，导致资源重复配置（如设计变更引发材料浪费率达 15%）；人材机配置依赖经验判断，机械闲置率超 30%，人工窝工损失占成本 2-5%；运营阶段病害发现延迟（平均 28 天），养护资源浪费率达 25%。数字建造通过 BIM 建模、物联网感知、智能算法优化，实现全生命周期资源数据的实时采集、分析与决策。据项目 2023-2024 年实际建设与运营过程中的记录。在项目实施过程中，从 2023 年初开始，通过建立项目管理信息系统，实时采集施工进度、资源投入、成本支出等数据。应用数字技术的公路项目平

均工期缩短 10-15%，成本降低 8-12%，但在资源协同配置的深度（如多阶段动态联动）与广度（如全要素覆盖）上仍需突破。

(2) 全生命周期模型的核心优势：①数据驱动的协同效能：自 2023 年起，利用物联网设备对施工机械的工作时长、油耗等进行实时监测；通过 BIM 模型关联材料采购、使用数据，从项目启动时便准确统计材料消耗情况。建立包含 120+类资源属性、800+数据字段的公路工程数据字典，通过区块链技术实现数据溯源与不可篡改存证，跨阶段数据共享效率提升 85%；在设计阶段同步优化成本、工期、环保目标，较传统单目标优化提升综合效益 10-15%。②管理模式的革新效能：基于构建的仿真模型与智能算法在 2024-2025 年间进行模拟测算得出，开发“资源配置智能助手”，提供算法推荐方案与人工干预接口，重大决策时间从 72 小时缩短至 24 小时，管理者决策效率提升 66.7%；建立“监测-分析-处置”闭环流程，养护响应时间从发现病害后 72 小时缩短至 4 小时，病害扩大损失减少 90%以上。BIM 技术实现设计、施工和运营数据的整合，云计算、移动互联网为智能算法提供基础数据支持。传感器和实时数据收集技术，实现资源使用的实时监控和数据反馈。利用大数据技术和云计算平台，实现资源管理数据的存储、处理和分析，支撑智能算法的高效运转。通过深度学习、强化学习等机器学习算法，分析公路项目的复杂数据，进行预测与决策。



图 1 数字建造智能算法驱动体系

2 资源协同配置模型应用分析

2.1 广西罗鹿高速公路工程概况

该项目的路线全长约为 97.497 公里，途经河池市罗城仫佬族自治县、柳州市柳城县和鹿寨县，设有 8 处互通立交、1 处服务区和 1 处停车区。桥梁 72 座，双幅全长 25720 米，隧道 5 座，双洞全长 13955 米。本次采用的全生命周期资源协同配置模型覆盖广西罗鹿高速公路工程的设计、建设、运营、养护等全生命周期。通过全程数字化管理，实现从设计、施工、运营到养护的资源管理一体化，确保项目生命周期内资源配置的合理性和高效性。基于实时数据的智能反馈，系统能够动态调整资源配置，以适应不同阶段的变化和需求，从而最大化资源利用效率。

2.2 数字建造智能的创新实践核心优势

(1) 进度管理优势：平台将总进度计划任务合理分解并与模型挂接。施工员每日根据现场实际进度，在平台中如实填写工程任务进度与劳动力统计信息。平台模型迅速读取这些数据，并直观反馈至模型，以可视化形式清晰呈现现场形象进度。在融江特大桥的建设过程中，通过这种方式，管理人员能实时掌握桥梁桩基、墩柱、盖梁等各个施工部位的进度，与计划进度对比分析，及时发现偏差并采取纠偏措施，确保项目按计划推进。

(2) 质量管控模块与现场紧密联动：通过数字化手段，对施工质量数据进行动态收集与分析。在混凝土施工中，实时监测混凝土的强度数据，利用智能设备辅助检测，确保数据精准度。对路基压实度等关键指标，同样实现实时掌握。一旦发现质量数据异常，系统立即发出预警，相关人员迅速到现场核查处理。例如，在某段隧道衬砌施工中，智能检测设备发现一处混凝土强度未达标，平台及时通知质量管理人员，经现场排查调整施工工艺，保证了衬砌质量。

(3) 安全管理实时掌控现场生产环境：在隧道施工中，安装智能通风设备与环境监测传感器，实时监测隧道内空气质量、温度、湿度等参数，以及通风情况。一旦参数异常，系统自动报警并启动应急通风措施。在岩头岭隧道，通过这些设备，有效保障了施工人员在高温环境下的作业安全，将隧道内温度控制在适宜施工的范围。

2.3 全生命周期资源协同配置模型方案

(1) 智能算法驱动的资源协同配置：资源协同配

置是指通过合理调配工程项目中的各类资源(如人工、机械、材料等)，优化其使用效率，确保工程的顺利推进。通过 IoT 设备、传感器等手段，实时监测项目现场的各类资源状态(例如，机器的使用情况、材料库存、工人作业情况等)，并将数据上传至云端进行大数据分析。基于实时数据与历史数据，利用优化算法(如遗传算法、粒子群优化算法等)来动态调整资源配置方案，自动调配最合适的资源，以保证项目按时按质完成。基于深度学习和机器学习的模型，可以分析复杂的项目数据，预测潜在风险、瓶颈，并提供优化决策支持。例如，AI 可以预测某些施工任务可能出现的延误，提前采取措施。



图2 施工任务模型资源协同配置部署

(2) 工程全生命周期管理：①设计阶段：建立项目的三维信息模型，进行虚拟建造，优化设计方案，减少设计错误。BIM 模型还可以在后续阶段作为施工、运营的依据。设计团队、工程团队和施工团队可以在一个统一平台上实时协作，保证设计方案的准确性和可执行性。②施工阶段：进度优化与资源调度：通过智能调度算法，优化工期和资源配置，避免资源浪费或短缺，确保施工任务高效推进。通过监控设备和传感器，实时监控施工现场的作业情况，及时识别安全隐患、设备故障等问题，并自动生成预警报告。③运营阶段：项目完工后，通过物联网和 AI 技术对路面、桥梁等设施进行实时监控，及时发现并维修可能的损坏或磨损问题，延长设施使用寿命。通过积累的大量数据，进行运营数据的分析，优化道路养护计划，提升高速公路的运行效率。

2.4 模型参数率定及模拟验证

(1) 模型参数率定：横向贯通人、材、机资源要素，纵向串联规划、设计、施工、运营阶段，立体集

成技术、经济、管理目标；通过智能算法实现各阶段资源配置的自动化、精准化、动态化，突破传统线性管理模式。建立材料选型数学模型，基于 BIM 模型计算路基填挖方量，采用粒子群优化算法求解土石方调配问题、安装 GPS+倾角传感器，实时追踪压路机、摊铺机位置与工作状态（如碾压遍数、摊铺速度）；利用 RFID 标签与激光雷达，动态监测砂石、沥青库存（精度 $\pm 1\%$ ），触发自动补货预警（库存 < 3 天用量时）；建立地形、地质、结构一体化 BIM 模型，通过碰撞检查发现设计冲突 127 处，减少变更量 92%；利用 GWO 算法对比 3 种路面结构方案，选定"橡胶沥青混凝土+再生骨料基层"方案，节约材料成本 2800 万元，碳减排 1500 吨。开发"资源协同调度 APP"，集成 RL 算法推荐的每日人材机配置方案，机械利用率从 58% 提升至 73%，混凝土浪费率从 8% 降至 3%；建立"供应链数字孪生系统"，实时监控沥青运输路径，通过模拟退火算法优化配送路线，运输时效提升 25%，油耗降低 10%。部署分布式光纤传感器，实时监测路基沉降（精度 $\pm 0.1\text{mm}$ ），LSTM 模型提前 4 个月预警 K23+500 处路基不均匀沉降，避免病害扩大损失超 500 万元；应用遗传算法制定 3 年养护计划，优化铣刨机、摊铺机调度路径，养护作业效率提升 22%，年度养护成本降低 1200 万元。

表 1 项目效益对比（n=56km）

指标	传统方法	数字建造模型	提升幅度
工期	36 个月	32 个月	-11.1%
总成本	48 亿元	43.8 亿元	-8.7%
机械利用率	58%	73%	+25.9%
养护成本	年均 3500 万元	年均 2800 万元	-20.0%
碳排放	21 万吨	18.5 万吨	-11.9%

建立公路工程全生命周期数据标准（涵盖 12 个阶段、86 类资源、500+数据字段），通过区块链技术实现数据不可篡改存证，解决传统模式下数据孤岛问题。项目各参与方数据共享效率提升 80%，协同审批周期缩短 70%。设计阶段 GWO 算法输出的材料清单直接驱动施工阶段 RL 调度模型，施工过程物联网数据反向优化运营阶段 LSTM 预测模型，形成"设计-施工-

运营"闭环优化。实测表明，该机制使资源配置误差从传统的 $\pm 15\%$ 降至 $\pm 5\%$ 以内。开发"智能决策助手"，为管理者提供算法推荐方案与人工干预接口。在项目中，管理者采纳算法建议的比例达 85%，重大决策时间从 72 小时缩短至 24 小时。

（2）模拟验证：对于广西罗鹿高速公路工程，模拟验证主要包含以下步骤。收集与项目相关的实际数据，包括资源消耗、施工进度、成本和环境因素等。这些数据可能来自历史类似项目、当前施工现场的监控系统或其他可靠来源。利用已调整好的模型进行模拟运行，模拟高速公路建设过程中的各项任务，包括设计、施工、资源调配、进度控制等。通过模拟可以直观地查看资源的利用效率、工期的变化以及成本的控制情况。将模拟结果与实际项目的进度、成本、资源消耗等数据进行对比，分析模型预测与实际情况之间的差距。如果存在较大误差，则需要对模型进行进一步的调整和优化。模型参数率定与模拟验证的结合，数字建造智能算法能够在广西罗鹿高速公路工程中提供高效的资源协同配置方案，优化施工过程中的各项资源配置、成本控制、进度管理和风险预测。这一过程不仅能够提升项目的管理效率，还能够减少资源浪费和施工中的不确定性，提高工程的整体质量和效益。

3 总结

综上所述，数字建造智能算法驱动的资源协同配置模型可以在广西罗鹿高速公路工程中实现成本节约、工期缩短和质量控制的提升。具体来说，项目收益和利润率可以显著提高，整体效益可以得到大幅度提升。通过高效的资源管理、风险控制、智能决策和过程优化，数字建造技术不仅推动了工程的顺利进行，还为项目的长期可持续性和经济效益提供了保障。未来，随着人工智能技术的进一步发展、数据标准化和技术的融合，数字建造智能算法驱动的全生命周期资源协同配置模型将不断成熟，推动建筑行业向更加智能、高效和可持续的方向发展。总的来说，数字建造智能算法驱动的全生命周期资源协同配置模型，通过先进的技术手段优化资源配置，能够提升公路项目的整体效率、降低成本，并且有助于推进建筑行业的数字化转型。

参考文献：

- [1] 王玲.全生命周期视角下高速公路电子档案管理的实践与优化[J].福建交通科技,2024,(06):100-106.
- [2] 韩子阳.高速公路桥梁全生命周期碳足迹研究[D].南昌工程学院,2023.
- [3] 解大勇,王雪梅.绿色公路全生命周期建设存在的问题及对策[J].科技视界,2022,(32):190-192.