

MODERN ENGINEERING SCIENCE

现代工程科学

2024. 04

第 6 卷 第 32 期

总第 40 期



2897-3604

香港星源出版社
STAR SOURCE PUBLISHING

MODERN ENGINEERING SCIENCE

现代工程科学



香港星源出版社
STAR SOURCE PUBLISHING

现代工程科学

Modern Engineering Science

2024 年 04 月 第 32 期

本刊声明

《现代工程科学》是由香港星源出版社出版的工程类高水平学术期刊，聚焦结构工程、智能制造、材料科学、绿色建筑、系统控制等核心方向，突出工程理论与产业应用的融合研究。本刊致力于展示具有前沿性、实用性与工程价值的研究成果，服务于技术创新、工程实践与产业发展。通过严格的同行评审机制与国际化学术交流平台，推动全球工程科技的深度协同与知识共享。

刊期：本刊为双月刊，每年六期。每期围绕现代工程领域的重大技术进展与核心挑战设立主题，兼顾学术前沿、工程实践与产业转化，推动工程科学在全球创新发展格局中的协同进步。

出版社信息

主管：香港星源出版社
主办单位：香港星源出版社
主编：黄志远
执行主编：王依婷
社内编辑：
何宇辰 廖承骏 彭思颖 钟凯琳
何颂 段思远 郑伊凡 崔文昊
邓晨 李婧瑜 方泽 韩泽宁
王若函 吴思洁 许柏睿 唐煜文
魏天朗

网址：<https://www.ssxin.com>
电话：+852 6855 8145
邮箱：info@ssxin.com
刊期：双月刊

目 录 CONTENTS

结构健康监测中基于压电传感器的数据融合算法研究	李安民 001
智能建造流程中的 BIM- 数值耦合仿真方法探讨	邱敏 005
智慧工地中的风险识别与管理系统集成建模	杜宸宇 009
大跨度桥梁施工仿真与安全风险预测集成框架	王亦凡 012
装配式建筑施工周期与成本平衡模型构建	马思远 015
基于深度学习的混凝土缺陷检测系统研究	赵玉洁 019
施工场景下复杂地质环境的实时感知与建模	郭启荣 023
面向城市更新项目的绿色施工组织优化策略	张芷涵 027
施工全过程数字孪生建模平台的设计与验证	陈雅婷 031
复杂环境中自动化设备布设路径算法优化	吴凯 035
基于施工日志的进度偏差自动预警机制研究	林静怡 039
新型装配式连接节点的数值模拟与疲劳性能分析	江梓浩 043
施工设备碳排放模型的构建与参数敏感性研究	黄瑾瑜 047
地下空间开发中的监测反馈与智能调整机制	胡天睿 051
基于 LCA 的施工材料环境影响量化体系构建	孙乐然 055
市政工程智能调度平台设计与多目标调控算法研究	陈柏年 059
高原地区施工环境中 AI 混凝土配比系统开发	王依婷 063
面向施工阶段的数值模拟驱动型成本优化机制研究	焦蒞昊 067
工程模拟驱动下的施工组织动态优化策略	廖承骏 072
基于 BIM 与 GIS 集成的多工地联动施工调度方法研究	林晓晨 075

面向施工阶段的数值模拟驱动型成本优化机制研究

焦蒞昊

(天津理工大学 300000)

摘要:

施工阶段的成本控制历来是工程管理的核心议题，但传统控制方法多依赖静态预算与事后核算，缺乏动态预测与实时干预能力，导致资源浪费与成本超支问题频发。随着数值模拟技术的进步及 BIM 平台应用的深入，基于模型预测与算法优化的成本控制机制逐渐成为工程项目数字化管理的重要方向。本文基于《数值模拟的成本优化分析平台 V1.0》软件著作权成果，提出一种融合模拟建模、多目标成本函数构建与优化算法驱动的成本控制机制，针对施工阶段的关键资源消耗进行动态预测与决策干预。

通过构建工序级别的参数化模型，并引入粒子群与遗传算法混合优化策略，平台可对多个施工方案进行仿真模拟与成本对比，最终辅助管理人员实现方案优选与成本策略调整。本文以某基础设施项目为案例，验证了平台在材料消耗、人工配置与施工节奏调整等方面的预测准确性与优化成效。结果表明，该机制可有效提高成本控制前移深度，提升施工组织对成本目标的响应能力与执行力。研究为工程施工管理中数值模拟应用的深化提供了新范式，也为智慧建造背景下的工程数字决策系统提供了有力支撑。

关键词：数值模拟；成本优化；施工阶段；算法驱动；工程管理平台

一、引言

1.1 研究背景

在当前建筑业转型升级的大背景下，“智慧建造”成为行业发展的重要方向。工程项目不再单纯依赖人工经验与静态图纸，而是逐步引入数字建模、动态仿真、智能控制等技术手段，以实现全生命周期的可视化管理与成本可控。尤其是在施工阶段，因其资源消耗集中、决策链条复杂、环境变量多变，如何在执行过程中实现“动态感知—模型预测—优化干预”，成为工程管理面临的重大挑战。

传统施工成本管理多依赖于事前预算与事后结算之间的经验性比对，难以应对施工过程中的突发事件、资源调配瓶颈与工期扰动。而在实际项目中，材料浪费、过度人力投入、设备使用冗余等现象普遍存在，使得“决策滞后性”成为成本控制的关键短板。

1.2 研究动因

近年来，数值模拟 (Numerical Simulation) 在建筑结构分析、施工进度推演、能耗评估等领域得到广泛应用。借助建模语言、物理场模拟与算法优化能力，数值模拟技术可将复杂系统的运行过程进行数字化表达，进而进行策略测试与动态调整。其特点在于：建模与仿真相结合、预测与验证相呼应、系统与数据协同发展。

尽管数值模拟在结构工程、交通工程等领域已有

大量成功应用，但其在“施工成本动态优化”这一工程管理核心问题上的落地仍较为有限。一方面，成本构成多维异构，涉及工期、材料、人工、施工方案等多个要素，难以建立统一建模方式；另一方面，施工过程中数据的获取滞后与不完整，也限制了预测机制的建立。

为此，本文在《数值模拟的成本优化分析平台 V1.0》软著成果基础上，系统构建了面向施工阶段的成本模拟—优化机制，探索如何借助数值模拟技术将成本控制前移，并嵌入施工决策链条之中。

1.3 研究目标与内容

本研究旨在：

- 建立一种可工程部署的数值模拟驱动型成本优化机制；
- 构建包含多目标、多约束的成本函数表达体系；
- 设计融合粒子群与遗传算法的优化模型，实现施工参数的组合优化；
- 基于平台功能实现与工程实践验证优化机制的有效性；
- 探讨该机制在后续施工阶段决策、资源管理、绩效评估等方面的可拓展价值。

二、研究基础与系统平台结构

2.1 数值模拟在施工管理中的应用基础

数值模拟技术起源于工程力学和物理领域，是通过构建数学模型与计算方法对复杂系统行为进行预测与分析的重要手段。随着建筑信息化与工程管理智能化的发展，数值模拟逐步从结构分析、应力计算拓展至施工组织、资源配置、进度调度等管理环节。在施工管理领域，其核心优势在于：可以在不进行实际施工的前提下，通过参数化建模与模拟运算，识别施工组织过程中的瓶颈、冲突与资源不匹配，从而为方案选择与成本控制提供依据。

特别是在多专业协同、资源有限制、工序逻辑复杂的大型施工项目中，传统成本控制方式常依赖于预算与经验判断，存在滞后性强、预测精度低、调整成本高等问题。而数值模拟所具备的“行为可视、变量可控、反馈可调”特征，使其成为提升施工成本预测与控制精度的重要工具。

2.2 施工阶段成本的构成特点与演化机制

施工阶段的成本并非固定总量的线性分解，而是一个随工序安排、资源配置、进度计划不断动态变化的复杂系统。从实务角度出发，施工成本大致可划分为以下四类：

- 材料成本：包括各类建筑材料、构件、半成品的采购与消耗。该项成本受供货周期、现场损耗与设计变更影响较大；

- 人工成本：指各类工种人力的劳务费用，通常随作业密度、并发工序数量和施工强度同步变化；

- 机械设备成本：主要包括施工机械的台班费用、能源消耗、调度空转等，与调度效率密切相关；

- 管理费用与间接成本：包括项目管理、安全、质量、临建设施、保险及规费等开销，具有一定周期性和非线性波动特征。

这些成本要素之间并非彼此独立，而是高度耦合。某一要素的变化常常引发链式反应，例如施工节奏变化将同时影响人机资源计划、材料耗损节奏与管理成本分布。因此，构建一种基于数值模拟的、多变量联动的成本预测机制，成为突破传统控制模式的有效路径。

2.3 “数值模拟的成本优化分析平台 V1.0”的系统逻辑与功能结构

《数值模拟的成本优化分析平台 V1.0》是围绕施工阶段成本动态控制难题而开发的一套专业化软件系统，旨在通过建模、运算、优化与反馈四位一体的机制，实现成本控制的前移、主动化与智能化。

平台整体由四个功能层次构成：

第一，建模与参数设定层。用户可在该层设定施工工序顺序、资源配置比例、工期约束、预算限额等

关键参数，形成可用于模拟运行的多维输入数据。该层强调参数的工程可解释性，支持直接输入施工计划文档与材料清单。

第二，模拟运行层。平台内置的数值模拟引擎支持多工序并行仿真，涵盖资源动态调度、进度演化与成本累积过程模拟。模型可选择连续时间建模或离散事件模拟方式，适配不同类型的工程管理需求。

第三，优化计算层。系统支持多种智能算法进行成本路径优化，包括遗传算法、粒子群算法与局部搜索算法等。用户可根据项目特性选择单一或组合算法，通过迭代运行获得最优或次优资源配置方案，实现材料、人力、机械等多维成本目标的平衡控制。

第四，分析与输出层。模拟与优化结果可生成多维报告，包括成本波动分析、资源利用效率评估、施工路径建议与风险敏感性提示等，辅助项目管理团队进行数据驱动的决策与复盘。

本平台的最大特点在于：不仅具备强大的数值运算能力与多算法支持机制，还特别强化了与项目实际施工语境的适配能力，例如成本结构的动态约束表达、施工现场参数的快速录入、数据接口的开放性等。这些特性使得平台不仅适用于学术研究，也具备在工程项目一线落地的可操作性与延展性。

三、算法设计与优化模型

构建一套面向施工阶段的数值模拟驱动型成本优化机制，不仅需要具备能够表达工程实际过程的参数化模型，还必须具备可供运算求解、优化路径分析的数学算法与逻辑结构。本章围绕“模拟—建模—优化”三位一体的技术路线，深入探讨平台背后的核心机制与算法流程。

3.1 施工工序建模与参数结构设定

成本模拟的第一步是对施工过程进行合理建模。与传统静态成本计算不同，本平台采用动态工序链条构建方式，以工序为最小单位，对每一个作业环节设置资源投入、时间安排、消耗特征等参数字段。

每个工序节点包含以下变量：

- 作业时长（ t ），可设为区间变量；
- 材料单耗（ m ），随工艺标准或经验库调用；
- 人工投入（ h ），按工种分层设定；
- 机械台班（ e ），含单价、作业强度、可利用率；
- 成本函数权重（ w ），由管理方自主赋值，体现目标导向。

系统将这些变量组织成一条“施工工序链”，并通过逻辑条件设置相邻工序间的前后置关系、并发/串联条件与资源依赖路径，从而形成可被求解的逻辑

网络图结构。该建模方式的优点是贴近项目实际，且可根据施工进度动态调整变量值，满足实时模拟需要。

3.2 多目标成本函数建模与表达形式

施工阶段的成本优化并非单一目标求解问题，而是一个包含多目标、多约束的组合优化过程。平台构建的成本函数模型综合考虑以下三个主要维度：

1. 成本最小化目标：即全周期资源投入的货币值总和最小；
2. 进度合理性约束：项目总工期不能超过节点计划或合同目标；
3. 资源均衡度要求：避免过度集中或长时间闲置，提高使用效率。

表达形式如下：

$$\text{Minimize: } C_{\text{total}} = \sum (m \times P_m + h \times P_h + e \times P_e)$$

其中， P_m 、 P_h 、 P_e 分别代表材料、人工、设备的单价， m 、 h 、 e 为相应投入量， C_{total} 为目标成本函数。约束条件包括：

- $\sum t_i \leq T_{\text{max}}$ (进度约束)
- $h_i / H_{\text{max}} \leq \varepsilon$ (人工强度约束)
- $\Delta e_i \leq \delta$ (设备配置浮动约束)

该多目标优化函数可根据实际项目偏好进行权重调整，形成偏重成本压缩、进度保障或资源均衡的多种方案组合。

3.3 优化算法设计与适配分析

针对上述模型，平台采用粒子群优化 (Particle Swarm Optimization, PSO) 与遗传算法 (Genetic Algorithm, GA) 混合策略进行求解。该策略结合了 PSO 在解空间搜索上的全局探索能力与 GA 在局部跳跃上的自适应变异优势，在多变量耦合场景中表现出较优解稳定性与收敛速度。

具体流程如下：

- 初始种群生成：构造多个“施工方案粒子”，每个粒子包含变量组合值；
- 适应度评估：使用目标函数对粒子进行成本—进度双维度评估；
- 粒子群全局更新：基于历史最优与群体最优经验调整当前解；
- 遗传机制嵌套：定期引入变异、交叉操作，防止陷入局部最优；
- 收敛判断与终止：达到设定收敛阈值或最大代数后输出最优解。

该算法在平台实验中表现出在 100 维以内变量空间中可于 15 - 30 秒内收敛，并保持平均误差在 2.8% 以内，满足工程级部署要求。

3.4 模拟—优化联动机制设计

单次优化只能提供局部解的快照，但施工项目是一个连续推进的动态系统。为此，平台构建了“模拟—优化—反馈—再优化”循环机制。

- 首先通过初始模型进行方案模拟；
- 接着进行优化运算并输出可选组合方案；
- 然后将优化结果嵌入项目实际施工计划；
- 最后在实际施工数据反馈后调整参数、重新计算优化路径。

这一机制实现了模型的自适应演进，确保模拟预测始终与现场实际保持联动状态，有效解决了传统优化策略“方案落地难、数据脱节强”的现实问题。

四、实证研究：基于某基础设施项目的应用分析

为检验数值模拟驱动型成本优化机制在实际工程中的可行性与效果，本文选取华东地区某产业园配套基础设施建设工程作为实证对象，对平台进行部署与全周期模拟运行。项目主要包含道路硬化、场地土方平整、雨污排水管网铺设等多个子项，具有工序跨度大、施工并发度高、资源调度复杂等典型特征，适用于多变量优化模型验证。

4.1 项目背景与建模设定

该项目施工期为 6 个月，总建筑面积约为 28,000 平方米，预算控制目标为 2,800 万元，施工单位为市政一级总包方。项目部提供了详尽的施工组织计划书、资源清单、合同节点进度要求与关键物资单价。

平台建模阶段主要完成了以下设定：

- 拟定了共计 38 个工序节点，覆盖 6 个专业工种与 3 类主要机械设备；
- 设置了材料、人工、机械三类成本变量，其中材料项包含碎石、商品混凝土、管材等 14 种要素；
- 设定了 5 个约束条件，包括总工期控制、关键路径保障、施工高峰错峰调度、人机资源均衡、材料阶段性进场时点；
- 成本目标函数权重配置为：材料 40%，人工 30%，机械 20%，间接费 10%。

通过平台建模模块将上述参数编码，完成了标准化输入数据集构建。

4.2 模拟运行与优化结果

系统先进行了基础路径模拟，输出的未优化施工方案模拟结果显示，总施工成本预计为 2957 万元，较预算存在约 157 万元浮动空间，其中材料费用占比过高（约达 61%），反映出前期材料进场计划不合理，形成阶段性堆积浪费。

随后进入优化计算流程，平台运行遗传算法—粒

子群算法混合优化机制，通过约 4000 轮迭代后输出 4 组备选方案，均满足工期约束与关键路径调度要求。其中一组方案的总成本控制 2712 万元以内，相较模拟初始方案节约 245 万元，节约率达 8.2%，其中材料消耗结构最为紧凑，机械设备利用效率提升 12.6%。

施工单位选取该最优方案进行现场部署试运行，并同步构建了施工过程中关键节点的反馈机制。在持续 4 周的运行中，平台对实际消耗数据进行周期性回溯，并根据现场反馈动态调整参数。

4.3 平台实际表现与用户评价

项目部反馈显示，平台在以下方面体现出实际应用价值：

- 成本预测精准性：关键工序的材料单耗与人工投入误差控制在 5% 以内，明显优于以往经验估算方式；
- 施工决策辅助性强：通过对比多组模拟路径与优化结果，项目管理层对资源配置有了更为量化的决策依据；
- 模型可调节性高：当因外部原因出现计划变更时，平台能快速调整参数并在短时间内生成新方案；
- 操作便捷性良好：平台界面友好，建模过程清晰，非技术出身人员经过短期培训亦能掌握基本操作。

该实证案例证明，基于数值模拟的成本优化机制不仅具备理论可行性，更具备良好的工程实用性与组织推动力。在传统成本管控与智能建造之间，建立起了一个可落地、可验证、可反馈的中介机制。

五、机制构建与策略建议

数值模拟驱动的成本优化机制不仅是一种工具应用，更是一种项目管理逻辑的重构。其核心在于通过模拟预测、算法干预与反馈调节，打通从计划编制到资源配置再到成本控制的全链条闭环。基于前文的建模设计与实证研究结果，本文尝试将该机制总结为一套可迁移、可推广、可持续演化的决策支撑体系，并就后续优化与行业推广提出若干建议。

5.1 成本优化的闭环机制模型

本平台所形成的机制，具有如下典型结构：

第一阶段是预测驱动。借助数值模拟技术对施工组织方案进行参数化表达，实现对关键资源消耗、路径安排与工期分布的“前视性”预测，为后续优化提供量化基线。

第二阶段是算法干预。通过遗传算法与粒子群优化策略对多目标成本函数进行求解，输出满足工期、预算、资源效率等要求的若干可选方案。

第三阶段是动态反馈。在项目实施过程中引入滚

动调整机制，周期性采集实际数据，与模型预测进行偏差比对，并据此调整后续工序变量，形成“学习式”运行模式。

该机制实现了从传统静态预算管控向动态行为优化的转变，是智能建造时代成本管理范式的一种系统性升级。

5.2 推广应用中的关键路径建议

为了推动该机制在更广泛的施工管理实践中应用，应当从以下三个方向展开建设：

（1）组织认知升级

当前施工单位普遍存在“建模即复杂”“算法难以理解”的心理障碍，亟需通过制度引导与知识普及推动项目管理者转变观念。建议通过案例分享、行业沙龙、试点项目等方式，将“数值模拟+成本管理”的理念逐步纳入一线管理人员的技能体系。

（2）平台集成能力提升

单一成本优化平台的应用价值易受到数据割裂与流程孤岛的制约。建议在后续平台迭代中加强与 BIM 系统、项目管理平台（如 PMIS）、财务系统的接口打通，推动模拟结果直接转化为资源调度建议与合同履约支持材料，提升全流程应用效率。

（3）行业规范化制度建设

目前建筑业在成本模拟方面尚无统一标准或行业指导文件，导致各单位自建模型、各自为政。建议由行业协会、科研院校牵头，制定“工程项目成本优化建模技术指南”，明确术语、变量、建模路径与算法选型原则，为平台工具的产业化推广与评估提供制度支撑。

5.3 面向多维优化的未来拓展

本机制虽已涵盖工期、成本与资源平衡等维度，但未来仍可向以下方向拓展：

- 绿色建造维度：将碳排放量、能耗指标等纳入成本函数中，形成“低碳优先”的优化机制；
- 风险容忍度维度：在不确定性建模基础上，构建风险预期与应对策略的联合优化框架；
- AI 驱动增强维度：引入深度学习与图神经网络技术，对施工历史数据进行训练，提升模型预测精度与自主调参能力。

六、结论与展望

施工阶段作为工程项目中资源集中投入、变动因素频繁的重要阶段，其成本控制能力直接决定了项目的经济效益与执行绩效。然而，传统成本控制多依赖静态预算与事后分析，缺乏对施工过程的动态预测与实时调控能力，已难以适应当前智慧建造的发展趋势。

本文基于《数值模拟的成本优化分析平台 V1.0》软件成果，从系统建模、优化算法、实证验证等多个角度出发，构建了一套以数值模拟为核心的成本优化机制。通过参数化工序建模、多目标成本函数构建及遗传-粒子群混合算法的引入，实现了从方案预测、资源匹配到成本优化的全过程决策支持。平台在基础设施工程中的实际应用表明，其在提升成本管控精度、缩短决策周期、增强组织响应能力等方面具有显著成效。

研究表明，数值模拟技术不仅具备强大的建模与运算能力，更为成本控制机制提供了全新的逻辑支撑。成本不再是单一结果，而是一系列动态过程的反馈变量。通过与实际施工数据的持续联动，该机制可不断进行参数更新与路径优化，逐步形成“自适应—可学习—嵌入式”的成本管理系统。

展望未来，该机制仍存在进一步深化的空间。首先，在多项目并行、复杂场地条件下的适应性仍需增强；其次，平台与 BIM、ERP 等系统的深度集成能力有待完善；第三，应持续拓展碳排放监测、风险干预等多维指标维度，使优化机制兼顾成本、进度、环境与社会责任等多重目标。同时，人工智能与建筑工业化的结合将进一步推动该机制向“智能感知—预测优化—自动调度”的高级形态演进。

本研究为数值模拟技术在施工成本控制中的系统化应用提供了理论框架与实证验证，也为未来建筑项目的智能化决策提供了实践样本与方法支持。

参考文献

[1] Sepanosian, T., Küpers, X., Joza, P.,

Massah, F., & Bemthuis, R. (2024). An IoT-Based Architecture for Real-Time Emission Monitoring at Construction Sites[C]// Proceedings of the 26th International Conference on Business Informatics: 139 - 148.

[2] Meng, Q., & Zhu, S. (2020). Developing IoT Sensing System for Construction-Induced Vibration Monitoring and Impact Assessment[J]. Sensors, 20(21): 6120.

[3] Nguyen, H. A. D., Nguyen, L., & Ha, Q. P. (2020). IoT-enabled Dependable Co-located Low-cost Sensing for Construction Site Monitoring[C]// Proceedings of ISARC 2020.

[4] Xu, S., Li, X., Liu, Q., Dong, H., Xu, X., Yan, L., & Zhang, Y. (2024). Intelligent Monitoring System for Environmental Protection during the Construction Period of Pumped Storage Power Station[J]. Cluster Computing, 28: 100.

[5] Feng, X. (2015). Research on Construction Project Cost Control System based on Multivariate Optimization Theory[C]// Proceedings of IEMB 2015: 774 - 778.

[6] Sharma, V., Zaki, M., Jha, K. N., & Krishnan, N. (2021). Machine Learning-Aided Cost Prediction and Optimization in Construction Operations[J]. Engineering, Construction and Architectural Management.

现代工程科学

MODERN ENGINEERING SCIENCE



2897-3604

香港星源出版社
STAR SOURCE PUBLISHING