

桩基础工程施工进度优化与资源配置管理研究

徐庆华

340321*****0172

摘要: 桩基础工程作为工程建设的关键性先行阶段,其施工进度与资源配置的效率与协同水平,直接决定了项目整体的工期履约能力、成本控制成效与综合效益。这一阶段的施工活动具有技术复杂、工序衔接紧密、受地质与环境不确定性影响显著、大型专用资源密集等特点,使得进度管理与资源配置面临严峻挑战。传统的管理方法常将进度计划与资源配置割裂处理,在静态、孤立的框架下运行,难以适应施工现场的动态变化,易导致进度延误与资源浪费的恶性循环。因此,构建一套深度融合进度优化与资源配置的动态协同管理体系,具有重要的理论价值与现实紧迫性。本研究旨在系统剖析桩基础工程施工中进度与资源管理的内在矛盾与核心问题,并基于系统工程、约束理论及精益建造思想,提出一个集成的“进度-资源”动态协同管理框架。

关键词: 桩基础工程;施工进度优化;资源配置;动态协同管理;关键链法;精益建造;建筑信息模型

DOI: 10.69979/3029-2727.26.03.043

引言

随着建设项目规模日益扩大、技术+地质条件复杂难度不断提升,以及业主对工期、成本、质量要求的日趋严格,传统割裂式的管理方法已难以满足现代工程管理的需求。精益建造理念的引入,强调消除浪费、创造连续的价值流;建筑信息模型等数字化技术的成熟,则为全过程、全要素的可视化协同管理提供了强大工具。在此背景下,本研究聚焦于桩基础工程这一特定且关键的阶段,深入探索施工进度与资源配置之间内在的耦合机理与协同优化路径,致力于构建一个以信息集成平台为支撑、以动态协同优化为核心、以实现项目综合效益最大化为目标的集成管理理论体系与实践框架。这一研究不仅对保障具体项目的成功实施至关重要,也对推动我国建筑业项目管理模式的转型升级具有积极的示范与引领意义。

1 桩基础工程施工进度与资源配置管理的特征剖析与核心挑战

1.1 内在特征分析

桩基础工程施工在进度与资源维度上呈现出区别于其他工程阶段的鲜明特征:

第一,工序逻辑的强序性与刚性。施工流程遵循严格的物理与时空效应规律,如“工程桩→围护结构施工→降水→分层土方开挖→水平支撑体系安装→基础底板施工”等,前后工序间多为强制性完成→开始关系,并行作业空间受限。这种强序性使得关键路径相对清晰,但其链条也异常脆弱,任一环节的延迟都会无损地传递至后续所有工序。

第二,资源需求的峰谷交替性与专用性。不同施工

活动对资源种类和强度的需求差异巨大。土方开挖阶段密集需要大小挖掘机、运输设备和环境保洁;桩基施工阶段则依赖专用桩工机械、混凝土和专业技术工人。资源需求曲线呈现剧烈的波动,给资源的平稳、均衡供应带来极大困难。同时,大型旋挖钻机、地下连续墙成槽机、大吨位履带吊等大型专用设备,其性能与可用性直接成为制约工效的瓶颈。

第三,对地质条件变化环境的高度敏感性与依赖性。地下水位、土层分布、岩溶、孤石等实际地质条件与勘察报告的差异,是最大的不确定性来源。地质条件的微小变化可能导致施工工效陡降、工艺变更甚至方案颠覆,从而对既定进度计划与资源投入计划产生剧烈冲击。

第四,施工场地的局限性与空间竞争性。尤其在城区密集区域,施工场地狭小,大型机械设备、材料堆场、运输道路、作业面之间存在激烈的空间竞争,设备移动、材料周转效率低下,直接影响进度并额外消耗资源。

1.2 面临的核心挑战

基于上述特征,当前管理实践主要面临以下几大挑战:

其一,“理想计划”与“资源约束现实”的冲突。基于网络技术编制的初始进度计划,因未充分考虑资源的有限性与竞争性,在实施中必然遭遇资源冲突,迫使计划频繁调整,失去其严肃性与指导性。

其二,应对动态不确定性的能力匮乏。当遭遇不可预见的地质障碍、持续恶劣天气或重大设计变更时,静态的计划体系缺乏有效的缓冲机制与弹性调整策略。管理决策多依赖于管理者的个人经验与应急反应,缺乏科学、系统的应对方法,容易导致纠偏成本高昂且效果不佳。

其三,资源配置的协同失调与“木桶效应”。人员、机械、材料、技术、资金等资源要素若配置不同步、不匹配,施工流程就会在“最慢的资源”处形成堵点。例如,混凝土供应能力不足导致大量已成型桩孔等待浇筑,不仅延误工期,更增大塌孔风险;测量放样速度跟不上挖掘进度,导致挖掘机闲置。

其四,信息流通壁垒与决策支持不足。进度信息、资源消耗信息、成本信息通常由不同部门分管,存储在相互隔离的系统或表单中,更新不及时,共享不充分。项目管理者难以获得实时、全景式的项目状态视图,无法精准回答“当前进度如何?资源消耗是否匹配?下一步资源需求是什么?”等关键问题,决策停留在“大概”和“估计”层面。

2 进度优化与资源配置集成管理框架的构建

为系统性地应对上述挑战,本文提出一个以“动态协同、闭环优化”为核心理念的桩基础工程施工进度与资源配置集成管理框架。该框架不是一个线性流程,而是一个持续循环、迭代上升的有机整体。

2.1 指导理念:动态协同与闭环优化

动态协同:摒弃将进度与资源作为独立变量处理的传统思维,强调二者在计划编制、执行监控、调整决策全过程中的一体化联动。进度计划是资源配置在时间轴上的投影,资源配置方案是进度计划在资源维度的具体化,二者必须在统一的信息平台和协同规则下同步生成、同步调整。

闭环优化(计划-执行-监控-调整循环):建立完整的控制闭环。基于多维信息制定集成计划(P),指导现场执行(D),通过实时数据采集监控进度与资源消耗状况(C),对比分析与计划的偏差,诊断问题根源,并采取针对性的调整措施(A),更新集成计划,开启新一轮循环。整个过程追求在动态中实现持续优化。

2.2 框架体系:四大核心构成模块

该框架由四个相互支撑、循环作用的模块构成:

基于精细化建模与全约束识别的集成计划模块:

深度工作分解与工艺建模:对桩基础工程进行层层分解,形成颗粒度适中、责任清晰的工作分解结构,并明确各项活动的工艺逻辑、持续时间估算及资源需求清单。

全要素约束识别:全面识别两类核心约束:技术逻辑约束(工序间的先后关系)和资源约束(包括设备数量、工种人数、工作面数量、资金流量等)。这是从“理论方案”走向“可行计划”的基础。

建筑信息模型辅助的虚拟建造:利用BIM技术创

建包含地质信息、支护结构、施工机械的三维模型,进行4D(时间)施工模拟。在虚拟环境中预演整个施工过程,直观检查空间冲突、工序衔接合理性、资源流动路径,从而在动工前优化施工组织设计,生成可视化的基准集成计划。

考虑资源约束的多目标进度优化模型与算法模块:

多目标优化设定:在满足技术逻辑和资源约束的前提下,建立优化模型。目标函数通常是多重的,例如:最短总工期、资源需求强度方差最小化(实现资源均衡)、关键资源利用率最大化,或在固定工期内追求总成本最小化。

关键链项目管理方法的引入:作为一种先进的进度管理思想,关键链法强调在考虑资源依赖关系后,项目中最长的任务链才是真正的“关键链”。它在项目末端集中设置“项目缓冲”以吸收整体风险,在非关键链汇入关键链处设置“接驳缓冲”以保护关键链不受非关键链延误的影响。这为资源配置指明了重点防护区域,使管理注意力更加聚焦。

智能优化算法的应用:对于大规模、多资源、多目标的复杂进度优化问题,可采用遗传算法、模拟退火算法、粒子群优化算法等元启发式算法进行求解。这些算法能够在庞大的解空间中高效搜索,找到满足多种约束条件且在各优化目标间取得良好平衡的满意解或帕累托最优解集。

基于动态预测与精益思想的资源配置与均衡策略模块:

资源需求的滚动预测:依据不断更新的短期进度计划(如三周滚动计划),动态预测未来短期内各类资源的需求数量、规格型号及需求时点,为资源采购、租赁和调度提供精确依据。

弹性化与混合式资源供应体系:建立“核心资源(自有/长期合作)+弹性资源(市场租赁/分包)”的供应模式。对需求稳定、核心工艺相关的资源采用稳定供应;对需求波动大、峰谷明显的资源,利用市场弹性资源进行调剂,以应对高峰需求,避免低谷期的闲置成本。

精益化现场资源管理:贯彻精益建造思想,着力减少资源在现场的七种浪费。推行“准时制”物料配送,根据施工节奏将钢筋、混凝土、支撑材料等精准配送到作业点,减少现场堆放与二次搬运;优化大型机械的行走路线与协同作业顺序,减少空驶和等待。

资源均衡优化:在保证总工期的前提下,利用非关键活动的总时差,通过调整其开始时间,对人力资源、通用设备等资源的日需求量进行“削峰填谷”,使资源消耗曲线尽可能平滑,从而降低资源管理复杂度、提高使用效率、减少成本波动。

依托数字孪生技术的实时监控与智能反馈调控模块：

“数字孪生”施工现场的构建：集成 BIM 模型、进度计划、资源计划，并接入物联网实时数据，构建与物理施工现场同步映射、交互的“数字孪生”体。这是实现动态协同的“智慧大脑”。

多源数据实时采集与融合：通过设备 GPS/北斗定位、传感器（监测机械油耗、转速）、RFID（追踪物料）、移动终端 APP（工序报验、工时填报）等手段，自动采集进度、资源、环境数据，并实时汇聚至统一平台。

可视化监控与智能预警：在数字孪生驾驶舱中，管理者可直观看到实际进度与计划进度的对比（如通过模型颜色差异），实时资源消耗与计划的偏差。系统内置规则引擎，当偏差超过预设阈值时自动触发预警，并通过短信、看板等方式推送至责任人。

模拟仿真与决策支持：基于当前孪生模型和历史数据，平台可进行多种“如果-那么”情景模拟。例如，模拟某种资源延迟到场对总工期的影响，或评估不同赶工方案（增加设备、改变工艺）的成本效益比，为管理者的调整决策提供量化、可视化的数据支持。

3 应用实例分析：某超高层建筑桩筏基础工程项目

3.1 项目概况与管理难点

该项目主楼采用钻孔灌注桩+厚板筏形基础，桩径大、数量多、入岩深。场区地质条件复杂，持力层岩面起伏大。难点在于：桩基施工是绝对关键路径，投入的十余台大型旋挖钻机是核心瓶颈资源；持力层岩层变化可能导致单桩成孔时间差异巨大，工期不确定性高；混凝土日需求量大且不均衡，供应协调压力大；场地狭小，桩机布置与泥浆循环系统布置困难。

3.2 集成管理框架的实施过程

集成计划与模拟：建立包含地质模型、桩位、施工机械的 BIM 模型。通过 4D 模拟，优化了桩机分批进场顺序、行走路径和泥浆池位置，避免了设备干涉，形成了考虑设备协同的基准计划。

关键链识别与缓冲管理：识别出“测放桩位→桩机就位→钻孔→清孔→钢筋笼安装→混凝土灌注”这一受桩机资源约束的循环作业链为关键链。在项目总工期末端设置了项目缓冲，并根据地质风险分区，为不同区域的桩群设置了差异化的接驳缓冲。

动态资源配置：利用平台每日汇总各桩机的实际钻进速率，动态预测未来三天的混凝土需求峰值，并提前与搅拌站协调供应计划。采用“核心搅拌站+备用搅拌站”的弹性供应模式。钢筋笼采用“工厂化分段预制、现场快速连接”的装配式工艺，缩短现场作业时间。

实时监控与智能调控：每台桩机安装传感器，实时上传钻进深度、速度、扭矩数据至平台。当某台桩机参数异常（预示可能遇到坚硬夹层或孤石），系统预警，技术团队立即介入分析，决定是否调整工艺参数或启用备用预案。通过监控缓冲消耗情况，动态调整桩机在关键区域与非关键区域的分配数量。

4 结论

本研究针对桩基础工程施工中进度与资源配置管理长期割裂的突出问题，构建了一个以动态协同与闭环优化为核心、融合先进管理方法与数字技术的集成管理框架。该框架通过“集成计划+多目标优化+精益配置+智能调控”四个模块的有机联动，实现了从静态、孤立管理向动态、协同管理的根本性转变。关键链法、建筑信息模型、精益思想及智能算法的深度应用，为应对地质条件不确定性、优化资源利用、保障进度目标提供了科学的工具模型。

参考文献

- [1] 丁士昭. 工程项目管理（第三版）[M]. 北京：中国建筑工业出版社, 2021.
- [2] 牟宏, 王建平, 贺灵童. 基于 BIM 的工程项目进度-成本-资源集成管理研究[J]. 土木工程与管理学报, 2016, 33(3): 81-86+92.
- [3] 乐云, 关贤军, 陈建国. 关键链项目管理方法研究综述[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2010, 38(6): 882-887.
- [4] 祁神军, 张云波. 精益建设推进中国建筑业生产方式转变的路径研究[J]. 建筑经济, 2012(10): 5-9.
- [5] 刘占省, 赵明, 徐瑞龙. BIM 技术与施工过程管理集成应用研究[J]. 施工技术, 2013, 42(18): 60-63+91.

作者简介：徐庆华，1981.2.8，性别：男，民族：汉，籍贯省市：安徽马鞍山，学历：本科，职称：高级工程师，研究方向：地基础，深基坑，工程管理，单位省市和邮编：江苏南京 243000