

高速公路多桥梁集群交叉施工资源调配与进度优化管理研究

刘志才

新疆北新路桥集团股份有限公司 新疆 乌鲁木齐 830000

摘要：高速公路建设中多桥梁集群交叉施工场景日益普遍，其资源调配与进度管理面临高度耦合的时空约束和动态不确定性，传统项目管理方法难以有效应对。本文立足系统工程视角，系统分析多桥梁集群交叉施工的资源冲突机理与进度耦合特征，提出“资源-进度”协同优化的理论框架。在此基础上，构建基于多项目资源平衡的动态调配模型，设计面向集群施工的进度滚动优化策略，并建立资源调配与进度优化的协同联动机制。研究表明，多桥梁集群施工管理的关键在于突破单一项目的线性思维，转向集群整体的非线性协同管理，通过资源优先级动态排序、缓冲区弹性控制和信息共享机制实现整体效能最优。本文旨在为复杂施工场景下的精细化管控提供理论支撑与方法指引。

关键词：高速公路；多桥梁集群；交叉施工；资源调配；进度优化

引言

随着我国高速公路建设不断向山区、丘陵及城市密集区延伸，同一标段内多座桥梁同步或交叉施工的情形日益普遍。这种多桥梁集群施工模式在缩短整体工期的同时，也带来了前所未有的管理挑战——有限的施工资源需要在多个作业面之间动态分配，各桥梁的施工进度相互牵制，任何一个节点的延误都可能通过资源链条传导至全局。传统以单一项目为单位的资源计划和进度安排，在此类高度耦合的施工场景中往往力不从心。从理论层面审视，多桥梁集群交叉施工本质上是一类多项目并行环境下的资源受限项目调度问题（Resource-Constrained Multi-Project Scheduling Problem, RCMPSP），但其特殊之处在于：各子项目（单座桥梁）之间并非完全独立，而是共享同一地理廊道内的临时设施、运输通道和大型机械，形成了远超一般多项目情景的时空耦合强度。与此同时，桥梁工程自身的工序逻辑刚性（如桩基→承台→墩柱→梁体→桥面）进一步压缩了进度调整的弹性空间。本文的核心思路是将“资源调配”与“进度优化”从传统的先后串行关系转变为协同并行的整体性问题，揭示二者在集群施工条件下的深层耦合逻辑，并构建面向实践的管理框架。

1 多桥梁集群交叉施工的系统特征与管理困境

1.1 集群施工的时空耦合特征

多桥梁集群施工区别于分散式单桥施工的首要特征，在于其显著的时空耦合性。从空间维度看，当多座

桥梁集中于同一施工标段时，各作业面不仅共享同一地理区域内的进场道路、混凝土拌合站、钢筋加工厂等固定设施，还可能因施工机械的移动路径交叉、材料运输通道重叠而产生相互干扰。从时间维度看，各桥梁的不同施工阶段对同类型资源的需求形成错峰或叠加，使得资源负荷在时间轴上呈现非均匀分布——某些时段多座桥梁同时进入混凝土浇筑高峰期，对搅拌运输车 and 泵送设备的需求激增；另一些时段则可能普遍处于工序间歇或养护等待期，资源闲置率上升^[1]。这种时空耦合意味着集群施工的整体效率并非各桥梁施工效率的简单加总，而是受到资源竞争强度、空间冲突概率和工序衔接顺畅度的共同调节。当资源供给相对充裕时，各作业面可基本独立推进；一旦资源趋紧，一座桥梁的资源占用会直接削弱其他桥梁的施工能力，形成“此长彼消”的竞争格局。

1.2 资源冲突的类型与成因

多桥梁集群施工中的资源冲突可从两个维度加以分类。其一为同类型资源在时间维度上的竞争，即多座桥梁在同一时期需要同类资源（如吊车、模板、预应力张拉设备），而资源总量无法同时满足全部需求，必须通过排程确定先后顺序。其二为不同类型资源在空间维度上的冲突，例如混凝土运输车辆通道与预制梁板运输通道重叠，导致某一时段只能保障一方通行，实质上构成了运输资源的隐性竞争。深层成因方面，除资源供给的绝对不足外，更常见的是资源配置的结构性失衡与信息不对称。各桥梁工区往往独立上报资源需求计划，缺乏统一的需求整合与冲突消解机制；项目管理层难以实时

掌握各作业面的资源利用效率和真实进度状态,资源调度决策只能依赖经验判断而非数据支撑。此外,施工过程中的不确定性(如天气变化、地质条件差异、材料到货延迟)进一步放大了资源需求预测的偏差,使原本平衡的资源计划更容易滑入冲突状态。

1.3 传统管理方法的适应性局限

面对多桥梁集群交叉施工的复杂性,传统管理方法的局限日益显现。首先,以甘特图和关键路径法为代表的进度计划工具,本质上适用于工序逻辑相对固定的单一项目,其假设各活动之间的资源竞争可以被忽略或预先完全协调,这在集群施工中难以成立。其次,资源计划通常作为进度计划的附属环节进行事后匹配,缺乏与进度的动态交互——当实际施工偏离计划时,资源调整往往滞后于进度变化,形成恶性循环。再次,传统管理模式各桥梁工区独立核算、各自负责,缺乏对集群整体利益最大化的激励导向,工区间倾向于争夺资源而非协同共享^[2]。这些局限的根本原因在于:传统方法将资源问题与进度问题拆解为两个相对独立的子问题分别处理,而未能认识到在集群交叉施工条件下,二者实为同一枚硬币的两面。这一认识上的缺失,呼唤着一种能够将资源调配与进度优化融为一体的新管理框架。

2 资源调配优化的理论框架与关键参数

2.1 多项目资源平衡的基本原则

多桥梁集群的资源调配优化,应遵循三项基本原则。其一是全局最优原则,即资源分配决策不应以某座桥梁的进度最优化为目标,而应以集群整体工期、成本和质量综合绩效最大化为导向。其二是动态适配原则,资源调配方案必须随施工实际进展滚动调整,而非一次性定终身。其三是弹性冗余原则,在资源计划中预留适当的安全裕度,以吸收施工过程中的不确定性冲击,避免局部扰动引发系统级连锁反应。

2.2 资源优先级动态排序机制

在多桥梁竞争有限资源的情形下,合理的优先级设定是实现有序调配的前提。本文提出一种综合优先级动态排序机制,将影响资源分配优先级的因素归纳为三类:工期敏感度(该桥梁当前延误对集群总工期的影响程度)、资源依赖度(该桥梁对特定资源的不可替代性需求)和施工状态紧急度(是否处于工序关键窗口期)。三类因素通过加权综合形成各桥梁的动态优先级指数,资源分配按照指数高低依次满足。关键在于“动态”二字——优先级并非一成不变,而是随着各桥梁施工阶段推移、延误累积程度变化以及资源供需格局演变

而实时更新。这种动态性确保资源调配能够及时响应现场变化,将有限资源持续导向最需要的作业面。

2.3 资源需求预测与调配决策参数体系

资源调配决策的质量很大程度上取决于需求预测的准确性。在多桥梁集群场景下,资源需求预测应综合考虑计划进度、实际完成率、资源消耗速率和不确定因素发生概率等多源信息。建议建立包括以下核心参数的决策支持体系:各桥梁单位工序的资源强度系数、资源可用量时间窗函数、工序间资源释放与承接的时间间隔、资源转换与运输的时空成本系数等。上述参数体系中,特别值得关注的是“资源释放-承接”时间差——即某桥梁完成某一工序后释放出的资源,需要经过多长时间才能被另一桥梁的下一工序有效利用。这一看似细节的参数,在交叉施工中往往决定了资源利用率的瓶颈所在,应作为调配决策的核心考量之一。

3 进度优化管理的策略体系

3.1 集群进度计划编制的层级分解方法

多桥梁集群的进度计划不应是一张包罗万象的总表,而应采用分层编制的思路。建议将计划体系划分为三个层级:集群总体里程碑层,规定各桥梁关键节点的完成时限,体现整体控制目标;单桥主体进度层,针对每座桥梁的工序逻辑编制详细作业计划,确保单桥施工的内在合理性;交叉协调窗口层,识别不同桥梁之间因资源共享或空间干扰而形成的协同约束,设置专门的协调窗口期^[3]。三层计划之间通过控制点逐级传导约束——上层计划为下层提供边界条件,下层计划的执行反馈又为上层计划的调整提供依据。这种层级分解既保持了进度计划的整体性和严肃性,也为各桥梁工区保留了一定的自主调度弹性。

3.2 基于缓冲管理的进度动态调整

针对集群施工中的不确定性,本文引入缓冲管理理念并加以场景化改造。具体而言,在集群总体进度计划中设置三类缓冲:项目缓冲,置于集群最终完工节点之前,用于吸收整体层面的累计延误;汇入缓冲,设置在关键资源从一座桥梁转移至另一座桥梁的衔接处,用于缓解资源移交延迟造成的衔接风险;资源缓冲,在关键资源需求量临近供给上限的时间区段预先安排替代方案或增加储备。缓冲管理的关键在于监控各桥梁对缓冲的消耗速率,而非仅仅关注缓冲的剩余总量。当某桥梁的缓冲消耗速率异常升高时,即触发预警,管理层据此提前调整资源分配策略或启动赶工措施,将问题消弭于萌芽状态,而非事后补救。

3.3 工区间进度协同的协调规则

多桥梁集群施工的进度协同,离不开明确的工区间协调规则。本文建议从三个方面构建规则体系:一是信息同步规则,规定各桥梁工区按固定频率(如每日)上报实际进度与资源使用情况,确保管理层掌握统一、及时的数据基础;二是冲突仲裁规则,当资源需求冲突无法通过常规调配化解时,依据前述动态优先级机制进行裁决,裁决结果具有强制执行效力;三是补偿规则,因资源调配优先级的调整导致某桥梁工期被动延误的,在后续资源分配中给予优先补偿,以维护工区间的基本公平,避免博弈行为侵蚀整体利益。

4 资源调配与进度优化的协同联动

4.1 协同管理的必要性分析

本文的核心论点是:在多桥梁集群交叉施工中,资源调配与进度优化不应作为两个前后衔接的管理环节,而应作为同一决策过程的双重约束同时加以处理。这一论断的理论依据在于:资源约束是进度计划可行性的前提条件,不匹配资源供给的进度计划无异于空中楼阁;反过来,进度安排决定了资源需求的时域分布,不基于真实进度的资源调配必然与实际需求脱节。二者相互构成对方的约束边界,任何单向的“先计划、后调配”思路都会导致次优解甚至不可行解。

4.2 “资源-进度”双向耦合机制

更深层次地看,资源与进度之间的耦合并非静态的“输入-输出”关系,而是一个动态演化的双向反馈循环。资源调配决策影响各桥梁的实际施工速度,进而改变进度计划的实现程度;进度的提前或滞后又反向影响后续资源的可支配数量(因为某些资源可能提前释放或延迟移交)。这种双向耦合意味着,管理干预必须作用于循环本身而非单点——例如,适度降低某一桥梁的资源供给以保障另一桥梁的关键工序,虽然在短期内牺牲了前者的进度,但可能通过后者关键节点的按期达成而降低集群整体的缓冲消耗,最终反而有利于全局。理解这一耦合机制,是走出“资源越充足、进度越理想”这一线性思维误区的关键^[4]。在多桥梁集群场景下,合理的资源适度紧缺有时反而能倒逼各工区提高施工组织效率、减少窝工浪费,关键在于精准把握“紧”的边界在哪里。

4.3 协同联动机制的构建路径

基于上述分析,本文提出构建“资源-进度”协同联动机制的三个实施路径。第一,组织层面设立集群调度中心,作为统一管理资源的专责机构,赋予其跨工区的资源调配权和进度协调权,打破各工区各自为政的组织壁垒。第二,流程层面推行“滚动计划-资源预配-执行监控-偏差响应”的四步闭环管理,以周(或旬)为周期滚动更新,确保计划和资源始终匹配当前现场状态。第三,信息层面建立集群施工管理数据平台,实时采集各桥梁的资源消耗、进度完成和异常事件数据,为动态优先级计算和缓冲消耗分析提供可靠的数据基础。三项路径之间相互支撑:调度中心是决策主体,闭环流程是运作规范,数据平台是技术底座,三者共同构成协同联动机制的完整架构。

5 结语

本文针对高速公路多桥梁集群交叉施工场景,系统分析了资源调配与进度优化的核心问题。研究指出,该场景本质为多项目并行下的资源受限调度,困境源于时空强耦合、资源冲突多样性及传统线性思维局限。为此,本文构建了以动态优先级排序和分层计划编制为核心的优化框架,提出“资源-进度”双向耦合协同联动机制。主要理论贡献在于突破将两者视为先后环节的传统思路,揭示其深层耦合关系并阐释协同管理逻辑与路径,为后续研究提供理论基础。展望未来,不确定性条件下的鲁棒性方法、AI辅助动态调度模型及不同规模集群的适用性边界是重要研究方向。随着建设向复杂地质和城市密集区延伸,相关研究具有持续深化的理论与现实意义。

参考文献

- [1] 王卓甫,张云华,丁继勇.资源受限多项目调度问题的研究综述[J].系统工程理论与实践,2022,42(8):2145-2160.
- [2] 刘志强,陈勇强,王雪青.基于关键链的工程项目进度-资源协同优化方法[J].中国管理科学,2021,29(6):187-196.
- [3] 张建平,李丁,林佳瑞.面向施工全过程的BIM资源动态管理框架研究[J].工程管理学报,2023,37(2):102-108.
- [4] 陈伟珂,牛力,黄艳蕊.高速公路桥梁群施工进度风险传递效应分析[J].公路交通科技,2022,39(4):78-85.