

低碳视角下施工阶段资源调度优化与碳足迹分析

林波¹ 陈义^(通讯作者)²

1. 中国石化销售西藏分公司 西藏自治区拉萨市 850000

2. 上海地铁维护保障有限公司车辆分公司 上海市 200031

【摘要】：在工期紧与工序交叉的施工场景中，资源调度将设备、材料与人员的时空匹配外显为可计量活动，直接决定碳足迹与成本表现。为此，本文构建调度变量到排放活动的稳定映射与量化框架，将作业节拍、车辆周转与班组接续转化为燃油、电耗与里程等活动清单，并采用省级电网排放因子与道路移动源核算规范进行折算。在此基础上建立以碳足迹与直接成本为双目标的多目标调度模型，设置资源、工期、时间窗、连续性与冷启动频度等约束，采用遗传算法在滚动时域求解并配套可行性修复与稳健评估。深圳某住宅项目案例基于十五分钟时间块数据实施对比，结果显示阶段碳足迹由一百二十吨二氧化碳当量降至九十五吨，降幅二十点八个百分点；单位面积排放由一点三九五降至一点一零五千克二氧化碳当量每平方米；直接成本由三点五二百万元降至三点三六百万，降幅四点五个百分点。减排主要源于柴油机具怠速压缩与运输空驶抑制。该方法同样适用于西藏等高海拔生态脆弱区的施工低碳调度，可有效应对高原地区燃料燃烧效率变化与排放因子差异带来的挑战。研究形成可复用的数据接口与优化路径，为施工现场低碳与成本协同提供方法支撑。

【关键词】：施工资源调度；碳足迹；多目标优化；遗传算法；滚动时域

0 引言

建筑施工阶段受工期压力与工序交叉影响，设备与运输的时空组织往往形成长时怠速、短倒频繁与冷启动增多等现象，使柴油机械燃烧与道路运输尾气成为主要排放源，同时夜间照明与小型发电叠加形成负荷峰。既有研究多聚焦材料全寿命核算或单机节能，难以将现场调度变量与排放活动形成一致口径的映射，致使碳足迹管理与日常计划脱节。面向碳达峰碳中和目标，亟需在可执行的施工组织单元内，将作业节拍、车辆时间窗与班组接续转译为活动数据，建立与排放因子相容的量化方法，并将碳足迹与直接成本纳入统一目标以指导调度决策。基于此，本文提出低碳导向的施工资源调度方法，构建调度变量到活动清单的数据接口，采用电力与燃料排放权威口径进行折算，建立双目标优化模型并嵌入资源、时间窗与工序连续性等现场约束，结合遗传算法与滚动时域机制完成求解与动态适配，最后通过真实项目验证方法的有效性与可落地性。特别地，西藏地区海拔高、生态环境脆弱，施工期短且燃料燃烧效率受含氧量影响显著，引入本文方法有助于针对性抑制怠速排放与优化运输路径，为高原绿色施工提供技术支撑。

1 施工阶段资源调度与碳足迹的关联机制研究

在工期紧、工序交叉的施工场景中，资源调度把设备、材料与人员的时空匹配固定下来，并把能源消耗路径外显为可计量的活动数据。就机械配置而言，台数组合、机型匹配与负荷率决定单位时间燃料消耗与怠速比例，塔式起重机与挖掘机节

拍错位会引起间歇运行与长时怠速，从而放大直接排放。针对材料运输，供应批次、车辆类型、满载率以及线路组织共同作用于里程与尾气排放，短倒频繁或干线切换失衡会增加空驶与冷启动。关于人力安排，班组到岗与工序接续把设备等待、返工概率与夜间照明需求推高，形成用电与燃油叠加的负荷峰。综合判断，关键排放源聚焦于柴油机械燃烧与道路运输尾气，同时混凝土泵送和现场发电亦构成重要来源，逻辑上资源调度变量与排放活动数据可建立稳定映射，可把作业节拍、车辆周转与班组接续转译为排放核算的活动清单。为刻画上述映射，可借助基础核算法表示为：

$$CF = \sum_i E_i \cdot EF_i$$

其中， CF 表示施工阶段碳足迹总量，单位为 $\text{kg CO}_2\text{e}$ ； E_i 表示第 i 类活动数据，如柴油消耗量、车辆行驶里程或设备用电量，单位与排放因子保持一致； EF_i 表示对应排放因子，单位为 $\text{kg CO}_2\text{e}$ 每单位活动量。

2 低碳导向的施工资源调度优化模型构建

2.1 施工资源调度的碳足迹量化方法

面向工期紧张且工序交叉的施工组织情境，本研究把机械使用、材料运输与人力活动划分为三类可计量排放路径，并把作业节拍、车辆周转与班组接续转化为活动数据，形成与资源调度变量相容的碳足迹量化框架。机械环节聚焦柴油机具与电驱设备，碳足迹受负荷工况、怠速比例与有效工时共同影响，燃料排放因子选用

IPCC 2006

指南默认值并以项目入库油品的低位发热量与密度检测值完成体积换算，电力排放因子采用项目所在省级电网年度平均值并遵循国家温室气体核算指南发布口径。对于西藏等高海拔地区，需根据当地实测的柴油燃烧效率与低氧工况修正燃料消耗强度及排放因子，本框架预留了海拔校正参数接口。材料运输环节以趟次与里程为核心活动量，结合车辆满载率、道路等级与交通拥堵系数修正单位里程油耗，把短倒频繁与冷启动对油耗的抬升作为里程等效系数处理，车辆燃料排放因子参照道路移动源核算规范并按国四至国六技术阶段设置差异。人力活动环节通过班组到岗、夜间作业时长与照明功率密度描述用电消耗，同时把现场小型发电机使用时段独立核算，以电网排放因子与小型柴油机排放因子分别折算为碳足迹；为避免重复计量，把设备等待与返工引致的额外燃油和用电单列入相应作业包。排放因子采用碳当量口径时，温室气体折算系数选用IPCC第五次评估报告一百年时间范围的全球变暖潜势值，并把CO₂、CH₄与N₂O折算至CO₂e。

$$CF_m = \sum_{k=1}^n (Q_k^{op} \cdot t_k^{op} + Q_k^{idle} \cdot t_k^{idle}) \cdot EF_{diesel}$$

其中， CF_m 表示机械使用阶段碳足迹，单位为kg CO₂e；

Q_k^{op} 为第k台设备在负荷状态下的燃油消耗强度，单位为L per h； Q_k^{idle} 为第k台设备在怠速状态下的燃油消耗强度，单位为L per h； t_k^{op} 与 t_k^{idle} 为对应工时，单位为h； EF_{diesel} 为柴油排放因子，单位为kg CO₂e per L。

2.2 多目标资源调度优化模型设计

鉴于工期紧张与工序交叉的组织情境，本研究把碳足迹最小化设为核心目标，并兼顾直接成本控制，构建多目标施工资源调度模型。模型的决策变量覆盖设备台数组合与机型匹配、作业节拍与占用时段、车辆趟次与装载率及发车时窗、线路选择与周转周期、班组到岗时点与工序接续。目标函数以全阶段碳足迹与直接成本为双目标，成本范围囊括燃料、电力、台班、运输与夜间照明等费用。约束体系围绕资源数量与可得性窗口、总工期与关键工序时限、工序优先关系与空间冲突避免、供应时效与车辆到达时间窗、道路通行能力与场内作业面容量展开，同时加入塔机与泵车共用冲突、混凝土浇筑连续性、车辆冷启动与启停频度抑制、班组昼夜劳动时段等专项约束。由此把调度变量映射至活动清单的数据接口与2.1节提出的量化方法相衔接，使目标度量与可行域界定保持一致。偏好表达选用加权和、阈值约束与帕累托集合综合策略，以适配不同碳价与工期压力情景下的权衡需求。为贴合施工现场动态变化，模型设置

滚动时域与时间步长，把供应批次、进出场窗口与作业占用转换为时段块，并对到货波动与交通拥堵引入情景集与惩罚费用，促使方案避免长时怠速与空驶。模型输出包含台数组合与换班计划、车辆调度与线路方案、班组接续与夜间作业安排，同时给出碳足迹与成本的二维绩效坐标，见图1。

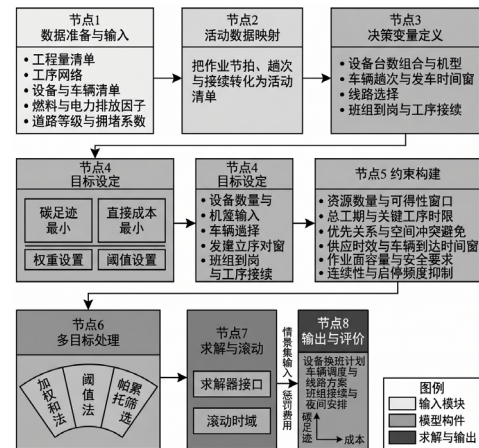


图1 多目标优化模型构建流程图

2.3 优化模型的求解算法选择

鉴于模型包含设备配置、车辆调度以及班组接续等多类离散变量还叠加时间窗以及工序优先关系，本研究选用遗传算法来开展求解工作，以在大规模组合空间中获得高质量的可行方案。编码设计把设备台数组合、作业节拍与占用时段、车辆趟次与发车时窗、线路选择以及班组到岗时点编制为多段整数染色体，段内以时间块序列表达，基因元素记录资源一时段一作业包信息，滚动时域把染色体拼接，同时设置可行性标签便于后续修复。适应度函数把全阶段碳足迹以及直接成本合并度量，运用自适应加权和表达偏好，在碳预算触发时叠加阈值惩罚；罚项覆盖资源容量、工序优先、空间冲突、车辆到达时间窗、道路通行能力、塔机以及泵车共用、浇筑连续性、冷启动频度上限以及班组昼夜时段等约束；把怠速时长以及空驶里程按等效活动量纳入评价，使适应度与量化框架保持一致。遗传操作采用启发式初始化按关键路径以及车辆周转优先生成种群，选择阶段结合锦标赛以及拥挤度维持多样性，交叉阶段运用保序顺序交叉维持时间约束，变异阶段实施交换、插入、时窗微调以及车辆合并或拆分，配套修复算子把时间窗冲突以及资源超配调整；精英保留用来继承优质个体，交叉以及变异概率依据可行率以及收敛速度动态调整；在滚动时域内把上一周期优选注入初始种群，对交通拥堵以及到货波动情景采用稳健评估，以获得对现场扰动适应性更强的调度方案。

3 施工资源调度优化方案的碳足迹效果验证

3.1 案例数据采集与方案实施

本研究选取深圳市龙华区观澜街道恒瑞雅苑住宅项目主体至二次结构交叉阶段为案例，项目由4栋33层剪力墙住宅及两层地下室组成，施工场地紧凑且垂直运输需求高。围绕资源调度与碳足迹的映射需求，研究团队在为期四周的基线期开展原始数据采集，把机械、运输与人力三类活动纳入统一时间块。机械侧，针对2台塔式起重机、1台混凝土泵车、1台装载机以及1台小型柴油发电机，调取设备控制系统与加油台账，叠加GNSS与油耗采集终端，提取有效工时、怠速时段、冷启动次数与电力消耗。材料运输侧，以预拌混凝土与钢筋为对象，记录供应商出厂时刻、车辆号牌与轨迹，结合道路拥堵等级与场内等候，计算往返里程与空驶区间，并对短倒频繁的班次进行标记。人力侧，按照班组维度收集到岗时点、班次长度与夜间作业时长，关联现场照明功率密度与临电分表，使人力活动的用电与小型发电机使用形成可追溯清单。数据经异常剔除、单位统一与作业包映射后，输入碳足迹量化接口并形成活动清单。时间粒度统一至15 min，并以发动机转速、液压压力与设备位置稳定性构建怠速识别规则，同时把车辆进出场门岗刷卡与GPS轨迹对齐校验，保证里程与趟次的一致性。基于上述基线，运用构建的多目标调度模型生成低碳方案，把塔机节拍与泵送窗口进行重排，把混凝土与钢筋车辆的发车时窗与装载率进行协同，把班组接续与夜间施工时段进行重新配置，同时设置冷启动频度和长时怠速抑制策略。方案以滚动时域方式推送至现场，现场管理团队同步布设司机候车区、预制构件临时堆场与设备自动停机策略，并把日计划与碳预算在班前会中明确到作业包层级，形成模型到执行的闭环。方案落地依靠信息化调度看板与司机端小程序发布时窗约束，供应商与劳务班组按日滚动确认，异常工况以情景集规则触发替代路径。现场安全与文明施工要求与低碳约束一并纳入班组技术交底，避免因调整节拍引发安全风险与返工概率上升。

3.2 优化效果的碳足迹对比分析

鉴于本阶段组织情境呈现工序交叉与垂直运输密集的复合特性，本研究把基线期方案与低碳导向调度方案在相同四周时域内进行逐时对比，指标覆盖阶段碳足迹总量、单位面积碳排放

放与直接成本三类度量。对比采用统一的活动清单接口与15 min时间块数据，以保证不同方案在设备负荷、车辆里程与夜间用电等口径上的一致性。为了获得单位面积指标，把本阶段涉及的4栋住宅及两层地下室在主体至二次结构交叉阶段的累计作业面积核定为86,000 m²，数据来源于工程量清单与BIM统计的对齐口径。

从碳足迹总量来看，活动数据聚合后的结果对应为基线期120 t CO₂e与优化后95 t CO₂e，降幅为20.8%。把上述总量折算至单位面积后，基线期为1.395 kg CO₂e per m²，优化后为1.105 kg CO₂e per m²，进一步说明单位作业规模上的排放强度得到同步压降。由调度策略与活动数据的映射关系出发，可以看到减排主要来源于两条路径：其一，把塔式起重机与泵车的节拍进行重排并约束等待上限，把长时怠速时段压缩至较短窗口，从而降低柴油机在低负荷状态下的无效燃耗；其二，把混凝土与钢筋运输的发车时窗与装载率进行协同，把短倒与冷启动导致的油耗抬升转化为可控的里程等效量，空驶里程在滚动时域内被有效削减。需重点关注的是，班组接续的均衡化把夜间照明用电峰值拉平，电耗虽在局部时段略有回升，但在电网排放因子作用下对阶段总量的影响明显小于柴油燃烧的下降幅度，未改变总体下降趋势。

与碳足迹同步评估的直接成本体现出协同收益。把燃料、电力、台班、运输与夜间照明纳入同一成本口径后，基线期直接成本为3.52million CNY，优化后为3.36 million CNY，降幅为4.5%。这一变化与机具怠速的降低、车辆周转的合并以及发车窗口的错峰安排存在一致性，对应的台班与油耗费用下降覆盖了夜间补强照明与时窗控制所带来的边际管理成本。由此可见，在不突破工序连续性与资源可得性约束的前提下，把作业节拍、车辆时窗与班组接续联动优化，能够在阶段总量与单位面积两类碳指标上形成实质性下降，同时维持成本侧的温和收敛，为后续在更长时域内开展滚动优化提供了可操作的路径。值得指出的是，该优化框架已预留海拔与气候参数接口，可迁移至西藏那曲、拉萨等高原城市的类似住宅项目，针对低温低氧条件下柴油燃烧效率降低、设备启动能耗增加等特点进行定制化校准，助力高原施工低碳转型

表1 某住宅项目施工资源调度优化前后碳足迹对比表

指标	基线方案	优化方案	差异率
碳足迹总量 t CO ₂ e	120.00	95.00	-20.8%
单位面积碳排放 kg CO ₂ e per m ²	1.395	1.105	-20.8%
直接成本 CNY	3.52 million	3.36 million	-4.5%

4 结语

本文围绕施工阶段低碳与成本协同的目标，提出一套从数

据到决策的闭环方法。首先建立调度变量与排放活动的映射，将设备负荷与怠速、车辆趟次与里程、班组到岗与夜间作业等

要素统一为可核算的清单，并与权威排放因子口径对接，保证计量一致性。其次构建以碳足迹与直接成本为双目标的调度模型，系统纳入资源可得性、工期边界、工序优先、空间冲突、车辆到达时间窗、浇筑连续性与冷启动频度等约束，并以遗传算法实现多段整数编码、保序交叉与可行性修复，配合滚动时域与情景集提升对现场扰动的适应力。案例表明，精细化的节拍重排与时窗协同能够有效压缩柴油机具低负荷运行和运输空驶，带动碳足迹与直接成本同步下行，体现低碳与经济性的协同潜力。管理层可据此在日计划中引入碳预算与等待上限，推

行司机候车区与自动停机策略，结合信息化看板实现跨主体协同。研究仍受限于单项目样本、排放因子时序差异与数据质量波动，未来可扩展至跨项目多主体协同，耦合碳价与供能结构变化，探索与电动设备替代、数字孪生与强化学习的融合，以形成更高频、更稳健的施工低碳调度能力。特别地，后续研究可聚焦西藏、青海等高原高寒地区，结合当地清洁能源（如光伏、地热）利用现状与碳交易试点政策，开发适应低氧、大温差环境的施工设备调度策略，推动西部生态敏感区基建工程的碳中和进程。

参考文献

- [1]周凯,王景全,王震,高传松,潘巍.基于低碳目标的混凝土建筑结构设计方法研究进展[J].建筑结构学报,2025,46(07):113-130+141.
 - [2]祖勋.基于全生命周期理论的企业节能减排施工优化策略[J].石油和化工设备,2025,28(11):249-250+245.
 - [3]张萌,王剑涛,李东辉,朱智雷,秦伟,崔皓博,谢刚,孟歆.抽蓄工程土石方平衡与进度的协同优化方法[J].水电与新能源,2025,39(11):35-39.
 - [4]闫林君,王亚妮,陈慧鑫,刘晶晶.地下装配式建筑施工工期-成本-碳排放的均衡优化[J].兰州大学学报(自然科学版),2025,61(03):357-363.
 - [5]董俊杰,李鹏,魏艳萍,王涵.基于LCA的不同路面结构建设期碳排放和能耗评价研究[J].材料导报,2025,39(S1):138-142.
 - [6]朱玉琴,王笑宇.基于BIM的装配式建筑物化阶段碳排放对比研究[J].安全与环境学报,
 - [7]王倩.绿色金融视角下优化建筑企业负债结构的研究[J].产权导刊,2025,(07):60-62.
 - [8]舒红宇.“双碳”目标下建筑施工企业绩效评价研究[J].会计之友,2024,(12):40-45.
 - [9]凌云鹏,周波,徐楠,郭占伍,刘行,李伟,聂婧,赵贤.考虑碳交易成本与预测不确定性的源荷储优化调度方法[J].现代电力,
- 作者简介:林波(1984—),男,汉族,大专,研究方向为工程管理。