

DOI: 10.7672/sgjs2026030014

大型岛屿石方工程多目标动态调度优化研究

毕洪武, 罗奇

(中交第三航务工程局有限公司宁波分公司, 浙江 宁波 315000)

[摘要] 大型岛屿基础设施建设常涉及复杂的石方开挖、转运与回填工程,其调度效率直接影响工程成本与进度。以某港口工程石料供需调度为研究对象,该工程具有多开挖区、多回填区、多物料类型、多运输方式、多仓储节点的特征,并伴随长周期、动态变化的月度需求。为解决石方调度问题,建立旨在最小化总陆运距离、最小化月度开采量波动、最小化堆料库存量的多目标优化模型。鉴于问题的 NP-hard 复杂性,设计并实现定制化的遗传算法进行求解。算法核心在于创新采用间接染色体编码方案,不直接编码具体的运输量,而是编码每月相对开挖强度,提高搜索效率。依据适应度函数通过完整的项目周期模拟器评估每个策略的优劣,并引入权重系数处理复杂约束。工程实践表明,该算法收敛并生成兼顾经济性、均衡性和时效性的石方调度方案。

[关键词] 港口;石方;调度;开挖;回填;遗传算法;路径优化

[中图分类号] U655.2

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2026)03-0014-08

Multi-objective Dynamic Dispatching Optimization of Large Island Stonework Project

BI Hongwu, LUO Qi

(Ningbo Branch of CCCC Third Harbor Engineering Co., Ltd., Ningbo, Zhejiang 315000, China)

Abstract: Large island infrastructure construction often involves complex stonework excavation, transportation and backfilling operations, where dispatching efficiency directly impacts project costs and schedules. Focusing on the stone supply and demand dispatching for a port project, this study addresses a problem characterized by multiple excavation zones, multiple backfill zones, diverse material types, multimodal transport, and multiple storage nodes, alongside long-cycle, dynamic monthly demands. To address this stonework dispatching problem, a multi-objective optimization model is established, aiming to minimize total land transportation distance, monthly excavation volume fluctuations, and stockpile inventory levels. Given the NP-hard complexity of the problem, a customized genetic algorithm is designed and implemented. The core of the algorithm lies in an innovative indirect chromosome encoding scheme that encodes monthly relative excavation intensities rather than specific transportation volumes, thereby enhancing search efficiency. A fitness function evaluates the performance of each strategy through a full project cycle simulator, utilizing weight coefficients to manage complex constraints. The engineering practice shows that the algorithm converges effectively, generating a stonework dispatching scheme that balances economic efficiency, operational stability and timeliness.

Keywords: ports; stonework; dispatching; excavation; backfilling; genetic algorithm; route optimization

0 引言

岛屿作为重要的海洋资源开发支点,其基础设施建设(如港口、工业园区、跨海大桥等)是国家海洋战略的重要组成部分。这类工程往往规模大,工

期长,并伴随着大量土石方工程。石方工程作为基建的“粮草”,其开采、加工、运输和回填等环节构成了项目的核心物流链条,其成本通常占项目总投资的相当比例。科学、高效地组织石方调度,在满足工程进度的同时,最大限度地降低运输成本、均衡生产负荷、减少资源闲置,是工程管理领域面临的关键挑战。

[作者简介] 毕洪武,高级工程师,E-mail:263525341@qq.com

[收稿日期] 2025-10-10

土石方工程优化是运筹学与工程管理的经典交叉问题,早期研究聚焦线性规划与网络流理论,旨在解决挖填平衡问题,即通过运输路径规划最小化土石方运输成本。随着问题复杂性提升(如引入时间窗、车辆容量、多物料约束),该问题演变为 NP-hard 的车辆路径问题变种。精确算法(如分支定界法)因组合爆炸难以求解大规模实例,使启发式与元启发式算法成为主流。线性规划与混合整数规划是早期核心工具,已有学者通过混合整数规划优化采石场生产调度。然而,混合整数规划要求模型严格线性且问题规模有限,难以处理非线性目标(如开采量方差)和动态决策过程,这推动了元启发式算法在复杂场景中的应用。元启发式算法通过模拟自然现象实现全局搜索,兼具处理复杂约束的灵活性,根据机制可分为基于种群的算法(如遗传算法、蚁群优化、粒子群优化)和基于单解的算法(如模拟退火、禁忌搜索),其在工程优化中的核心价值在于规避组合爆炸,同时逼近 NP-hard 问题的最优解。遗传算法模拟生物进化过程,通过选择、交叉和变异操作迭代优化解,工程实践表明其对非线性目标(如成本-资源均衡)和离散决策(如车辆调度)具有显著优势。已有研究将遗传算法应用于建筑工地土方运输,验证了其在多约束动态场景中的有效性。遗传算法全局搜索能力与解表示无关性,使其成为多目标耦合问题(如生产-库存协同)的理想选择。蚁群优化受蚂蚁觅食行为启发,通过信息素更新机制求解最优路径。蚁群系统在旅行商问题中表现优于模拟退火,其在 VRP 变种(如带时间窗的路径规划)中展现出高效性。然而,蚁群优化信息素机制在多重决策问题(如生产计划与运输调度协同)中设计复杂,且难以直接处理连续变量。可通过融合禁忌搜索提升蚁群优化局部搜索能力,但需针对问题特性定制信息素更新规则。

工程问题常涉及成本、时间、质量的冲突目标,主流方法包括加权求和法(将多目标转化为单目标,权重反映决策者偏好,因直观性在工程实践中广受欢迎)和 Pareto 优化(如 NSGA-II 算法生成非支配解集,供决策者权衡选择),已有研究在物流配送中结合蚁群优化与加权求和目标,优化了运输成本与时间均衡问题。

已有研究为土石方调度提供了方法论基础,但海陆联运、动态需求分配等特殊场景要求高度定制化,如蚁群优化需简化信息素机制以适应生产-库存耦合决策,遗传算法可融合局部搜索加速动态需求响应,利用混合策略(如蚁群优化+分布估计)提升

全局收敛性,元启发式算法在随机性强的场景中需平衡近似精度与计算效率。

本研究依托典型的岛屿群石方工程,其服务于大型港口和临港工业区建设,涉及多个开挖区、分布于不同岛屿上的多个回填区、若干碎石厂、多个临时堆料区及陆运和海运相结合的复杂运输模式。石料开采及回填工期长,且各回填区需求总量和月度填方量均有明确规定。这种多对多、动静态结合、含生产与仓储的复杂物流网络,使传统的经验式调度或简单的单目标优化方法难以胜任。

因此,针对此类问题展开深入研究,建立能够全面反映实际工况的数学模型,并设计能够有效求解该复杂模型的智能优化算法,不仅对具体的工程降本增效具有直接的现实意义,也能为未来类似的大型、复杂工程物流调度与资源配置提供有效的方法论和决策支持工具。

1 优化算法建模

本研究的核心任务是构建既能精确反映岛屿群石方工程复杂性,又利于智能算法求解的数学优化模型。为规避传统直接建模带来的组合爆炸难题,模型采用创新的间接编码与解码器相结合的策略,将复杂的调度决策抽象为易于遗传算法操作的形式,通过解码器将其转化为具体的调度方案,并确保方案在生成过程中满足产能、库存、需求等所有复杂运营约束。在优化目标上,模型构建了多目标加权函数,旨在协同优化两大核心指标,包括以最小化总运输成本为代表的项目经济性和以最小化月度工作量波动为代表的管理平顺性,最终为决策者提供兼顾成本与执行稳定性的综合最优解。

1.1 决策变量

采用间接编码思想,决策变量是一系列控制每月资源分配的策略基因,这些基因构成了遗传算法的染色体。

1.2 目标函数

优化目标是最小化加权组合函数 F , 其由 2 个归一化的子目标构成:

$$\min F = w_1 f_{\text{cost}}^{\text{norm}} + w_2 f_{\text{smooth}}^{\text{norm}} \quad (1)$$

式中: w_1, w_2 为预设的权重系数,分别表示对总运输成本和总工作量波动平顺性的重视程度; $f_{\text{cost}}^{\text{norm}}$ 为归一化运输成本; $f_{\text{smooth}}^{\text{norm}}$ 为归一化工作量波动。

1) 目标一:最小化总运输成本 f_{cost}

该目标是整个项目周期内,所有物料在不同月份 t 流动产生的运输成本总和,其计算如下:

$$f_{\text{cost}} = \sum_{t \in T} \sum_{(A, B) \in \text{AllRoutes}} TC[Q_{A, B, t}, D(A, B), T(A, B)] \quad (2)$$

式中: T 为工程施工总月份; $Q_{A,B,t}$ 为在月份 t 从 A 点到 B 点的物料运输量; TC 为综合成本函数,根据运输量及运输方式计算实际费用,其内部封装了起步价、里程价等复杂商业规则; $AllRoutes$ 为所有可能的运输路径; $D(A,B)$ 为 A 点到 B 点的运输距离; $T(A,B)$ 为 A 点到 B 点的运输方式。

2) 目标二:最小化月度工作量波动 f_{smooth}

该目标旨在使各作业点(包括开挖区 I 、回填区 J 、堆料区 K 和碎石厂 C)的月度工作量变化尽可能平稳,避免施工强度剧烈波动。本研究使用所有作业点相邻月份工作量差值的绝对值之和度量平顺性:

$$f_{smooth} = \sum_{x \in I \cup J \cup K \cup C} \sum_{t=2}^{30} |V_{x,t} - V_{x,t-1}| \quad (3)$$

式中: $V_{x,t}$ 为作业点 x 在月份 t 的工作量; $V_{x,t-1}$ 为作业点 x 在月份 $(t-1)$ 的工作量。

1.3 主要约束条件

1) 总开采量约束

每个开挖区的总开采量精确等于其地质储量上限。

2) 总需求满足约束

每个回填区接收到的每种物料总量精确等于其总需求。

3) 月度碎石产能约束

每个碎石厂在任一月份的加工量不能超过其月最高加工能力。

4) 堆料区容量约束

每个堆料区在任一月份结束时的库存量不能超过其最大堆料容量。

5) 物料平衡与时间窗口约束

各堆料区的库存变化需遵循物料平衡原则,即当月库存等于上月库存加上当月入库量减去当月出库量。此外,所有作业活动须在预设的时间窗口内进行。

6) 运输流向约束

通过染色体中分配优先级基因设计和解码器中需求拉动与供应推动的逻辑顺序隐式保证。

7) 未满足需求惩罚

尽管解码器在设计上会尽力满足所有需求,但在极端情况下(如总开采量小于总需求量),可能会出现无法满足的情况。为此,在目标函数中加入巨大的惩罚项,以确保遗传算法找到的任何可行解均首先满足了需求约束。

2 基于遗传算法的求解策略

针对上述模型特点,设计了基于间接编码和智

能解码器的定制化遗传算法,如图 1 所示。

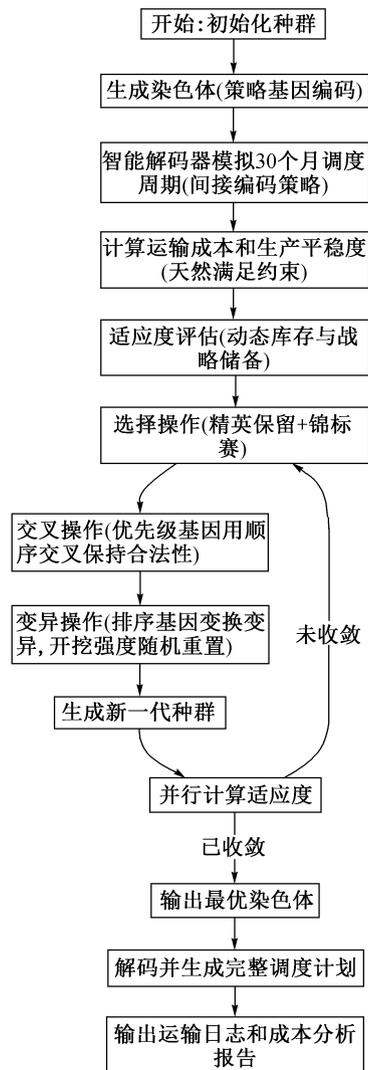


图 1 定制化遗传算法流程

Fig. 1 Flowchart of the customized genetic algorithm

2.1 染色体编码

1 个染色体(个体)代表 1 套完整、更高层次的调度规则,由以下几部分独立的基因构成。

1) 开挖强度基因

对于每个开挖区 $i \in I$,均有 1 组在其作业窗口 $[S_i, E_i]$ 内且取值范围为 $[0, 1]$ 的独立浮点数基因。这些基因的相对大小代表了该开挖区在各有效月份的开采意愿,不直接表示开采量,而是作为解码器计算合法月度开采量的输入。

2) 挖方点分配优先级基因

对于每个开挖区 $i \in I$,均有 1 个包含所有潜在目的地 $(J \cup K \cup C)$ 的排列组合。该排列组合定义了当挖方点 i 有富余石料(供应推动)时,应优先尝试运往哪个目的地。

3) 物料来源优先级基因

对于每个需要物料的节点(如回填区 J 、碎石厂 C),均有一系列来源地的排列组合。如回填区 J 需要块石时,其来源优先级基因为 $I \cup K$ 的排列,该排列定义了当该节点需要物料时(需求拉动),应优先尝试从哪个供应点获取。

这种编码规则而非编码流量设计,将其复杂的组合优化问题,转化为遗传算法擅长解决、鲁棒的参数和排序优化问题。

2.2 适应度函数与智能解码器

适应度函数是算法的引擎,其接收染色体后通过完整、按 30 个月时间步推进的确定性模拟器(解码器)执行该染色体代表的规则。

1) 解码机制

本研究的解码函数基本算法为基于离散时间的动态调度仿真器,以月为单位,从第 1 个月到第 30 个月进行循环。在每个月首先解析染色体中的开挖强度基因,计算当月各开挖区的理论产出量;然后将执行包含动态需求规划、双重战略储备、带约束的优先级调度机制复杂的资源分配与调度逻辑。对于动态需求规划机制,为精准匹配工程进度,函数并非僵硬地摊销总需求,而是依据外部输入的月度总需求曲线,动态计算并向各回填区下达当月的具体填方任务,使物料供应能够紧密跟随需求的波峰与波谷,是实现全局优化的基础。对于双重战略储备机制,为应对后期(当开挖区陆续作业完成后)物料供应风险,函数内置了双重战略储备逻辑,一是根据平均需求,主动提前生产并建立碎石战略储备;二是实时计算未来碎石生产所需的石料总量,并以此为安全红线,建立受保护的石方储备,严禁其他任务过早、非必要地消耗这部分为未来预留的战略原料。对于带约束的优先级调度机制,在执行资源分配时,函数严格遵循染色体中定义的优先级基因,所有调度均在同一包含多重现实约束的框架内进行,包括各开挖区的作业时间窗口、月度产能上限、堆料区库存容量及运输模式的自动判断(如岛内陆运与往返海运的成本计算差异),确保了每个生成的方案均具备物理上的可执行性。

2) 计算目标值

模拟结束后,所有运输量和工作量均已确定,据此计算总运输成本和总工作量波动。

3) 返回适应度

最终返回加权后的总目标函数值。

2.3 遗传算子

1) 选择

采用精英保留策略和锦标赛选择相结合的方式,每代最优的个体直接进入下一代,其余个体通过锦标赛方式选出父代。

2) 交叉

对于开挖强度基因(浮点数数组),采用单点或多点交叉。对于所有优先级基因(排列组合),采用顺序交叉,确保子代基因仍是合法的排列。

3) 变异

对于开挖强度基因,采用随机重置变异,将其替换为 0~1 的新随机数。对于所有优先级基因,采用交换变异,随机交换排列中的 2 个元素。

2.4 算法整体流程

1) 初始化

随机生成 N 个染色体,构成初始种群。

2) 并行评估

使用多进程将种群中所有个体的适应度评估任务分配给所有可用的 CPU 核心并行计算。

3) 迭代进化

重复选择父代→交叉与变异生成子代种群→并行评估新种群的适应度步骤。

4) 输出

进化结束后,种群中适应度历史最优的个体即为最终解。解码该染色体并再次运行模拟器,即可得到详细的运输日志、成本分析和可视化报告。

3 工程应用

3.1 工程概况

某港口工程总用地面积约 9km^2 ,分为 QS, MJS 基地,其中 QS 基地已有陆域面积约 1.94km^2 ,新成陆域面积 4.70km^2 。MJS 基地已有陆域面积约 0.76km^2 ,新成陆域面积 1.50km^2 。本工程开山区和回填区分散独立,3 个开山区均位于 QS 基地,开山后的石料需供给 7 个回填区,其中 6 个回填区位于 QS 基地,1 个回填区位于 MJS 基地。

该工程的调度优化问题不仅体现在其多源、多点、多模式的物流网络结构上,更在于其面临的一系列现实约束,对智能调度算法设计要求高。工程在启动初期遭遇时空瓶颈,因新成陆域场地无法使用,导致大量初期爆破开采的石料无处堆放,形成了须通过精妙时间差调度化解的难题。工程存在极端的供需强度波动,在长达 15 个月的高峰期内,月度填方需求高达 350 万~500 万 m^3 ,高峰期总需求量占整个施工期总需求量的 78.5%,这对维持生产、运输负荷的平稳性构成了考验。工程物料需求复杂,涉及块石与碎石,要求调度系统具备精细化的物料分拣、匹配与库存管

理能力。海陆联运任务艰巨且时效性强,总量 > 1 000 万 m³ 的石料需通过海路远距离运输至 MJS 基地,且面临着特定月份内百万方级的刚性交付需求,这对港口吞吐能力、船队调度与陆海衔接的协同效率提出了精确规划挑战。这些相互交织的空间限制、时间压力、物料多样性和动态高强度需求,共同构成了大规模、多约束的组合优化难题,凸显了开发高级智能算法实现降本增效的迫切性和核心价值。

3.2 参数设置与收敛性分析

首先将真实场景抽象成节点与节点间的连接(见图 2),然后运用前述编码方式将每月各节点间的运量比例编码为遗传算法的染色体进行优化,优化过程中将种群数量设为 1 000,迭代次数取 500。对不同交叉率和变异率参数组合进行了比较,根据优化过程的输出结果(见图 3),当交叉率取 0.8、变异率取 0.08 时优化效果最好,因此使用该参数组合进行训练。

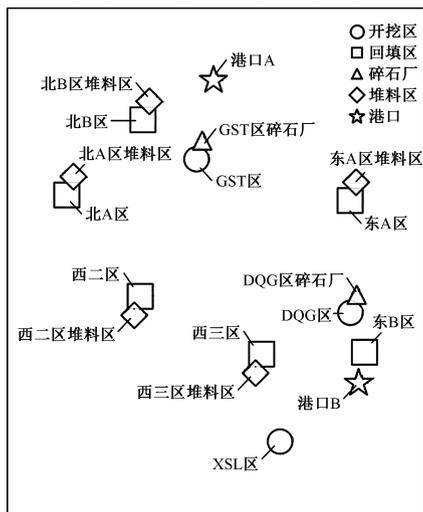


图 2 主要节点分布(除 MJS 基地)

Fig. 2 Distribution of major nodes (excluding MJS base)

在本工程背景下,控制总运输成本是首要经济目标,而工作量波动平顺性属于次要但重要的管理优化目标。通过与现场调度专家研讨,并结合多组对比试验,发现当权重系数 $w_1 : w_2 = 5 : 1$ 时,算法输出的方案在保持成本接近理论下限的同时,可有效抑制月度施工强度的剧烈波动(如避免某月运输量突增至正常水平的 3 倍以上),从而兼顾经济性与现场可执行性。

本研究同时对有无智能解码器功能的优化结果进行了比较,如图 4 所示。由图 4 可知,无智能解码器功能时,适应度虽收敛较快,但实际运输成本收敛较慢,维持在 65 000 万元以上。这是因为无智

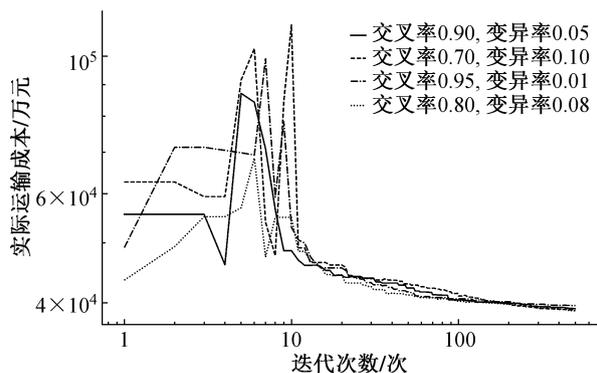


图 3 不同交叉率、变异率参数组合下的训练结果

Fig. 3 Training results under different combinations of crossover and mutation rates

能解码器功能时,在交叉、变异过程中得到了大量的非法基因组合,随着迭代次数的增加适应度虽较小,但转换到实际有物理意义的运量时,会存在矛盾点,如堆料区未进行堆料时开始往外提供石料,导致实际运输成本无法收敛。有智能解码器功能时,适应度虽收敛较慢,但基因组合经过智能解码后,均得到有意义的运输策略,保证整体优化方向是正确的,所以得到的实际运输成本收敛较好。有智能解码器功能时的收敛曲线表明,遗传算法通过迭代在巨大的解空间中有效探索并找到了高质量的解区域。曲线快速下降段说明算法快速排除了大量劣质解,后续的平缓收敛段是进行精细的局部搜索。

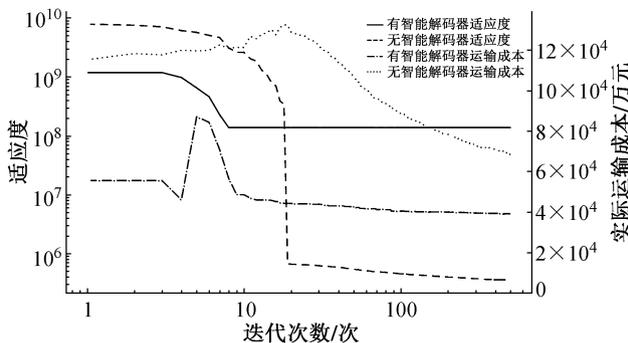


图 4 有无智能解码器功能的优化结果

Fig. 4 Optimization results with and without the intelligent decoder

3.3 优化结果分析

经过 500 次的进化,算法给出最优染色体对应的总运费为 39 148.70 万元,为直观理解调度方案,解码后得到的主要节点月度石料输入量和输出量如表 1 所示,运输网络如图 5 所示,图中带箭头曲线标注的数字表示各节点间的累计石方运输量,单位为万 m³。

表 1 主要节点月度石料输入量和输出量

Table 1 Monthly stone inflow and outflow at key nodes

万 m³

月度	挖方 (XSL 区)	挖方 (DQG 区)	挖方 (GST 区)	填方 (西三 区)	填方 (西二 区)	填方 (北A 区)	填方 (北B 区)	填方 (东A 区)	填方 (东B 区)	填方 (MJS 区)	输入 (西三区 堆料区)	输入 (西二区 堆料区)	输出 (西三区 堆料区)	输出 (西二区 堆料区)	处理 (GST区 碎石厂)	处理 (DQG区 碎石厂)
1	92.15	0	0	0.19	2.17	0.85	4.21	10.62	0.65	0	39.53	0	0	0	27.14	6.79
2	73.57	0	0	0.51	6.40	6.01	9.85	25.18	1.53	16.06	8.02	0	0	0	4.59	1.15
3	118.97	0	0	0.79	9.86	9.26	15.18	38.78	2.35	27.58	15.16	0	0	0	7.06	1.77
4	120.43	0	0	0.86	10.76	10.10	16.55	42.29	2.57	33.54	3.78	0	0	0	7.70	1.93
5	7.93	146.47	0	0.85	10.71	10.05	16.48	42.10	2.55	30.77	0	0	0	0	7.67	1.92
6	1.78	157.80	69.21	1.68	21.07	19.79	32.42	82.86	5.03	29.73	0	0	0	0	15.09	3.77
7	13.69	141.02	130.85	1.98	24.83	23.31	38.20	97.62	5.92	32.52	0	0	0	0	17.78	4.45
8	0.36	188.77	157.80	2.45	30.71	28.84	47.25	120.75	7.33	55.57	0	0	0	0	21.99	5.50
9	21.78	188.37	95.64	2.12	26.60	24.97	40.92	104.57	6.34	67.42	0	0	0	0	19.05	4.76
10	7.87	211.94	114.42	2.19	27.39	25.72	42.15	107.70	6.53	79.41	18.22	0	0	0	19.62	4.90
11	22.38	183.37	138.09	2.25	28.22	26.50	43.43	110.97	6.73	90.88	34.86	0	0	0	20.21	5.05
12	3.61	267.38	120.80	2.94	36.81	34.56	56.63	144.71	8.78	94.60	12.76	0	0	0	26.36	6.59
13	17.24	330.71	138.49	3.21	40.19	37.67	61.79	156.06	9.59	102.46	67.66	5.79	0	0	28.78	7.19
14	1.84	321.45	136.79	3.25	40.71	38.23	62.64	159.59	9.71	102.31	0	42.98	0	0	29.31	7.33
15	5.97	337.81	178.00	3.63	45.49	40.87	69.95	176.67	10.85	100.72	0	69.21	0	0	32.81	8.20
16	0	324.85	153.36	3.95	49.47	45.62	76.07	192.12	11.80	93.89	0	1.08	0	0	36.19	9.05
17	0	226.39	166.02	3.52	44.09	41.80	67.85	174.38	10.52	51.20	0	0	0	0	32.75	8.19
18	0	202.57	148.34	3.25	40.70	38.59	62.64	160.99	9.71	55.08	0	0	12.84	0	30.24	7.56
19	0	85.24	174.61	2.79	34.96	33.15	53.80	138.27	8.34	33.39	0	0	37.80	0	25.97	6.49
20	0	0	135.87	2.37	29.65	28.12	45.63	117.28	7.07	21.54	0	0	32.47	2.15	22.03	5.51
21	0	0	101.52	2.02	25.37	24.06	39.05	100.37	6.05	15.66	0	0	24.88	17.54	18.85	4.71
22	0	0	115.29	1.57	19.63	18.61	30.21	77.63	4.68	13.91	0	0	17.93	13.56	14.58	3.65
23	0	0	140.05	2.01	25.23	23.92	38.83	99.79	6.02	9.31	0	0	23.51	18.23	18.74	4.69
24	0	0	95.17	1.78	22.30	21.14	34.32	88.20	5.32	0	0	0	16.34	13.43	16.57	4.14
25	0	0	131.30	1.67	20.98	19.89	32.29	82.99	5.00	0	0	0	10.35	10.71	15.59	3.90
26	0	0	71.64	0.98	12.32	11.68	18.95	48.71	2.94	0	0	0	3.14	17.87	9.15	2.29
27	0	0	20.42	0.51	6.34	6.01	9.76	25.09	1.51	0	0	0	1.62	13.05	4.71	1.18
28	0	0	10.11	0.35	4.38	4.16	6.74	17.33	1.05	0	0	0	1.12	5.89	3.26	0.81
29	0	0	16.03	0.37	4.62	4.38	7.11	18.26	1.10	0	0	0	1.18	4.07	3.43	0.86
30	0	0	29.57	0.16	2.00	1.90	3.08	7.91	0.48	0	0	0	0.51	2.21	1.49	0.37

1) 空间关联性与产能适配策略

空间关联性与产能适配策略体现了算法对在何时、何地、动用何种资源的精准判断,核心是效率最大化。在工程开始初期(第1~4个月),开挖任务几乎全部由XSL区承担,以满足初期需求。从第5个月开始,大储量DQG、GST区开始大规模介入,这表明算法优先利用启动早、限制少的开挖区,待工程全面展开后无缝衔接主力高产能开挖区。在第15个月末XSL区作业完成后,其开挖任务被DQG、GST区承担,这2个开挖区产量维持在高位,如第16个月DQG区开挖量为324.85万m³,GST区开挖量为153.36万m³,这证明算法能够根据资源(开挖区)的生命周期,动态、前瞻性地重新分配生产任务,确保了物料供应的连续性。算法并不仅仅是就近取材,而是综合考虑了每个开挖区的时间窗口、总储量和月度产能上限,形成了接力式的生产模型,使不同特点的资源在最合适的阶段发挥最大作

用,实现了全周期内的产能平稳过渡与高效适配。

2) 动态库存调节机制

动态库存调节机制是整个方案的“战略蓄水池”,核心是平衡时间上的供需不平衡,实现“削峰填谷”。前中期为蓄力“填谷”,此阶段当开挖量超过当期填方需求时,大量的石方被送入堆料区,如在第15个月西二区堆料区输入量(入库量)高达69.21万m³,这是算法在预见未来需求变化进行的战略性储备。后期为释能“削峰”,此阶段尤其是在多个开挖区作业完成或减产,算法开始大量从堆料区取料,如在第19个月西三区堆料区输出量(出库量)高达37.80万m³,有力支撑了当月的填方任务。算法成功利用堆料区作为缓冲工具,将前中期富余的生产能力储存,精准地释放到后期产能不足阶段。这种跨越数月的库存调节,增强了方案灵活性和鲁棒性,是保证工程在面临资源限制时依然能平稳运行的关键。

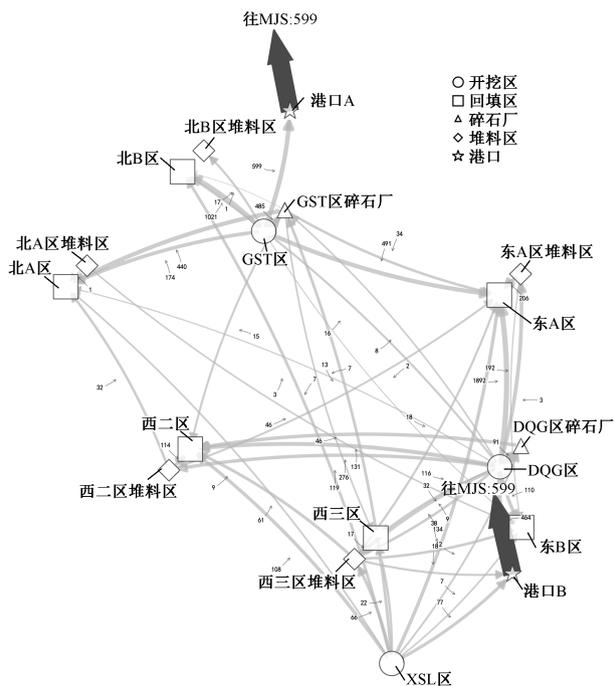


图 5 运输网络

Fig. 5 Transport network

3) 需求弹性分配模型

需求弹性分配模型体现了算法对工程需求的精准响应,核心是使资源投入与实际需求紧密同步。将各回填区与碎石厂需求量相加可知,每月的总需求量并非定值,而是呈明显波动。如在第 15 个月总需求量达到了高峰,而在工程末期(如第 27 个月)总需求量明显回落。这证明了解码函数中的动态需求规划机制起到了决定性作用,算法生成的不是僵化、平均主义的生产计划,而是具有弹性、与工程计划同频共振的动态模型,确保了各项资源在需求高峰期被集中投入,在需求平缓期相应减少,实现了资源利用效率最大化。

4) 长周期资源调度特征

长周期资源调度特征是最高层次的策略,体现了算法的远见卓识,核心是为了最终的全局最优,在当前做出具有战略意义的决策。一是碎石生产具有前瞻性,观察 GST, DQG 区碎石厂处理量可知,碎石厂从工程开始的第 1 个月持续生产,这并非为了满足眼前的少量碎石需求,而是执行了碎石战略储备逻辑,即在新鲜石料供应最充足、最廉价的前中期阶段,提前生产并储备加工周期长、后期原料获取难的关键物资碎石。二是时效性资源充分利用,算法在第 15 个月前,几乎完全耗尽了 XSL 区产能(从第 16 个月起该区开挖量为 0),而不是“省着用”,这是明智的长周期策略,充分利用有时限的资源,将其转化为稳定的库存(石方或碎石),从而为

生命周期更长的资源在工程后期应对不确定性保留了更大空间。该特征表明算法的优化目标是 30 个月周期的总成本最低,而非任何单个月份的成本最低,通过在前中期进行看似“不经济”的储备性生产,规避了后期因资源枯竭导致成本高昂的停工或紧急调度风险,展现了真正意义上的全局优化能力。

4 结语

1) 进行了全面的问题建模,系统刻画了包含产能约束、库存容量、作业时序、运输模式切换及物料转化(如块石转化为碎石)等多重现实因素的工程物流网络,准确反映了岛屿环境下港口工程石方调度的高度耦合性与动态性。

2) 创新了算法设计,提出策略导向的间接编码机制,将高维流量决策转化为易于遗传操作的强度向量与优先级序列,并配套开发了基于 30 个月全周期仿真的智能解码器,确保所有生成方案满足复杂运营约束。

3) 给出了实用的决策支持,输出兼顾总运输成本最小化与总工作量波动平顺性的可行调度方案,为工程管理者提供了可解释、可执行、量化的优化依据,验证了智能算法在大型土石方工程中的应用潜力。

4) 本研究模型采用确定性参数假设,未充分考虑地质变异、气象干扰或设备故障等不确定性因素对调度稳定性的影响,未来可引入鲁棒优化或随机动态规划方法,将关键输入建模为不确定集或概率分布,以增强方案的抗扰能力。采用的加权求和目标函数可替换为多目标进化算法,直接生成 Pareto 前沿解集,支持决策者根据项目阶段动态权衡成本与工作量波动平顺性。尽管本研究通过并行计算提升了效率,但全周期仿真在超大规模场景下仍面临计算瓶颈,未来可探索机器学习代理模型替代耗时解码过程或结合强化学习实现在线自适应调度,进一步提升算法实时性与扩展性。

参考文献:

[1] KIRKPATRICK S, GELATT C D, VECCHI M P. Optimization by simulated annealing[J]. Science, 1983, 220(4598): 671-680.
 [2] HOLLAND J H. Adaptation in natural and artificial systems: An introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence[M]. 1992.
 [3] DORIGO M, MANIEZZO V, COLORNI A. Ant system: Optimization by a colony of cooperating agents [J]. IEEE transactions on systems, man, and cybernetics, part B (cybernetics), 1996, 26(1): 29-41.
 [4] 王茹,李秘,伍志豪.基于 SLP 与 NSGA-II 的装配式建筑施工现场临时设施布置多目标优化研究[J].施工技术(中英文), 2024, 53(10): 125-132.

- WANG R, LI M, WU Z H. Multi-objective optimization of temporary facilities layout of prefabricated buildings based on SLP and NSGA-II [J]. *Construction technology*, 2024, 53 (10): 125-132.
- [5] DORIGO M, GAMBARDELLA L M. Ant colony system: A cooperative learning approach to the traveling salesman problem [J]. *IEEE transactions on evolutionary computation*, 1997, 1 (1): 53-66.
- [6] DORIGO M, DI CARO G, GAMBARDELLA L M. Ant algorithms for discrete optimization [J]. *Artificial life*, 1999, 5(2): 137-172.
- [7] GHOLIZADEH S, KAMYAB R, DADASHI H. Performance-based design optimization of steel moment frames [J]. *International journal of optimization in civil engineering*, 2013, 3 (2): 327-343.
- [8] 王成杰, 朱记伟, 曹佳伟, 等. 基于 BIM 与遗传算法的建筑施工进度优化 [J]. *施工技术(中英文)*, 2025, 54(5): 1-6, 19.
WANG C J, ZHU J W, CAO J W, et al. Building construction progress optimization based on BIM and genetic algorithm [J]. *Construction technology*, 2025, 54(5): 1-6, 19.
- [9] JALALI M R, AFSHAR A, MARINO M A. Ant colony optimization algorithm (ACO): A new heuristic approach for engineering optimization [J]. *World scientific and engineering academy and society*, 2005, 5(2): 606-610.
- [10] CHEN Y J. Ant colony optimization approach for stacking configurations [D]. Hong Kong: Lingnan University, 2011.
- [11] 徐俊杰. 元启发式优化算法理论与应用研究 [D]. 北京: 北京邮电大学, 2007.
XU J J. A study on the theory and applications of meta-heuristic optimization algorithms [D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2007.
- [12] KAREEM S W, HAMA ALI K W, ASKAR S, et al. Metaheuristic algorithms in optimization and its application: a review [J]. *Journal on advanced research in electrical engineering*, 2022, 6 (1): 7-12.
- [13] BIANCHI L, DORIGO M. Ant colony optimization and local search for the probabilistic traveling salesman problem: A case study in stochastic combinatorial optimization [M]. Heidelberg: Springer, 2006.
- [14] 李相勇. 车辆路径问题模型及算法研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2007.
LI X Y. A study on models and algorithms for vehicle routing problems [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2007.
- [15] 秦玲. 蚁群算法的改进与应用 [D]. 扬州: 扬州大学, 2004.
QIN L. Improvement and application of ant colony algorithm [D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2004.
- [16] LEVITIN G. The ant colony paradigm for reliable systems design [M]. Heidelberg: Springer, 2007.
- [17] ABE J, SUGIMOTO H. Study on algorithm for searching the optimum path by ant colony optimization and its application to optimum road alignment [J]. *Journal of applied mechanics*, 2008, 11: 221-232.
- [18] 李卓遥. 基于 GA-BP 模型的复合地层掘进参数研究 [J]. *施工技术(中英文)*, 2024, 53(13): 19-25.
LI Z Y. Research on tunneling parameters of composite strata based on GA-BP models [J]. *Construction technology*, 2024, 53 (13): 19-25.
- [19] 王爽瑶, 范爽, 王健, 等. 基于蚁群算法的物流配送路线优化研究——以重庆市渝中区为例 [J]. *经贸实践*, 2017(13): 31-32.
WANG S Y, FAN S, WANG J, et al. Research on optimization of logistics distribution route based on ant colony algorithm—Taking Yuzhong District of Chongqing as an example [J]. *Economic & trade*, 2017(13): 31-32.
- [20] HOUSSEIN E H, SAEED M K, HU G, et al. Metaheuristics for solving global and engineering optimization problems: Review, applications, open issues and challenges [J]. *Archives of computational methods in engineering*, 2024, 31(8): 4485-4519.
- [21] LIU F, LU C Y, GUI L, et al. Heuristics for vehicle routing problem: a survey and recent advances [J]. *ArXiv*, 2023: 04147.
- [22] 高尚. 蚁群算法理论、应用及其与其它算法的混合 [D]. 南京: 南京理工大学, 2005.
GAO S. Theory and applications of ant colony algorithm and hybridizing other algorithms [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2005.
- [23] 于月, 于德湖, 杨淑娟, 等. 基于 NSGA-II 算法的木结构建筑施工组织多目标优化研究 [J]. *施工技术(中英文)*, 2025, 54 (17): 1-6.
YU Y, YU D H, YANG S J, et al. Multi-objective optimization study of construction organization for timberwork buildings based on NSGA-II algorithm [J]. *Construction technology*, 2025, 54 (17): 1-6.