

平陆运河大型土石方多因子调配模型应用研究

郭天润^{1,2}, 陶诚忠^{1,2}, 张海杰^{1,3}, 范怀斌⁴

(1. 中交上海航道局有限公司, 上海 200002; 2. 中交上海航道勘察设计研究院有限公司, 上海 200120;
3. 中港疏浚有限公司, 上海 200020; 4. 安徽理工大学 土木建筑学院, 安徽 淮南 232001)

摘要: 平陆运河大范围土石方运输调配问题在建设项目中, 不仅涉及大量的土方开挖、运输和处置, 还受许多因素的制约, 如地形地貌、交通条件、环境保护要求、施工时间窗口、成本预算等。根据工程实际, 通过采用系统论和优化理论构建线性规划模型定义决策变量。明确决策的关键变量, 如不同地点的土石方开挖量、运输量、消纳量等。根据工程目标构建目标函数, 最小化运输成本、处理成本、时间成本等。利用线性规划求解器对模型进行求解, 得到最优的土石方调配方案。在施工过程中, 实时收集土石方开挖、运输、消纳的实际数据, 迭代反馈与优化。将实测数据与模型预测结果进行对比, 分析差异原因, 对模型假设与实际情况不符或未考虑到的因素进行优化调整。根据反馈调整模型参数或约束条件, 并根据优化后的模型结果, 调整施工计划、资源配置, 以提高效率和降低成本。该调配模型在运河航道工程中的成功应用, 具有重要的理论意义和工程实践价值。

关键词: 平陆运河; 土石方开挖; 线性规划; 调配模型; 迭代反馈

中图分类号: U615

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)07-0221-06

Application of multi-factor allocation model of large scale earthwork in Pinglu Canal

GUO Tianrun^{1,2}, TAO Chengzhong^{1,2}, ZHANG Haijie^{1,3}, FAN Huaibin⁴

(1. CCCC Shanghai Dredging Co., Ltd., Shanghai 200002, China;

2. Shanghai Waterway Engineering Design and Consulting Co., Ltd., Shanghai 200120, China;

3. CHEC Dredging Co., Ltd., Shanghai 200020, China;

4. School of Civil Engineering and Architecture, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

Abstract: The multi-factor allocation model for large-scale earthwork transportation in Pinglu Canal involves not only a large amount of earthwork excavation, transportation, and disposal in construction projects, but also is constrained by many factors such as topography, transportation conditions, environmental protection requirements, construction time windows, cost budgets, etc. A linear programming model is constructed to define decision variables on the basis of engineering practice by systems theory and optimization theory. The key variables for decision-making are clarified, such as excavation volume, transportation volume, and consumption volume of soil and stone at different locations. An objective function is constructed on the basis of engineering objectives to minimize potential costs such as transportation cost, processing cost, and time cost. A linear programming solver is used to solve the model, and the optimal earthwork allocation plan is obtained. Actual data on excavation, transportation, and disposal of earth and stone are collected in real time during the construction process, then measured data collected are iterated feedback and optimized. The measured data are compared with the predicted results of the model, and the reasons for the differences are analyzed. The factors that are inconsistent with the actual situation or not considered are optimized and adjusted. The model parameters or constraints are adjusted on the basis feedback. According to the optimized model results, the construction plan and resource allocation to improve efficiency and reduce costs are adjusted. The successful application of this allocation model in canal and waterway engineering has important theoretical significance and engineering practical value.

Keywords: Pinglu Canal; earthwork excavation; linear programming; allocation model; iterative feedback

收稿日期: 2024-09-25

作者简介: 郭天润 (1984—), 男, 高级工程师, 从事港口与航道工程规划、设计和施工。

在运河航道工程建设中,涉及的主要问题之一是大量土石方的运输调配,即对挖掘出来的土石方进行合理调配和利用,达到宏观掌控、资源化利用及降低碳排放和能源消耗等目的,而建立有效的调配模型是解决该问题的关键。最常用的调配模型为线性规划模型,即假设土石方调配问题是线性的,目标是最小化或最大化某个线性目标函数,同时满足一系列线性约束条件。这类模型计算方法简单、可操作性强、应用广泛,但在处理复杂约束条件时存在一定的局限性和不足^[1-4]。部分商业软件利用基于图论的模型算法进行分析和求解,包括最小生成树算法、最短路径算法等。此外,也有一些基于经验和规则的求解方法,如遗传算法、蚁群算法、粒子群算法等^[5-9],可以用于解决复杂的土石方调配问题,但初始建模过程较为复杂。另外,也有利用模糊数学理论进行建模和求解的方法^[10],以处理一些具

有模糊信息的土石方调配问题,弥补了确定性调配模型的不足。

因此,本文将全面梳理运河航道建设中的实际问题和限制条件,应用线性规划模型,根据复杂的约束条件和多因子影响因素进行优化,得出符合工程实际的调配结果,以解决大范围土石方运输调配问题,并为工程施工组织提供指导。

1 工程概况

本工程标段全长约5 km,对原河道进行拓宽浚深,土石方开挖总量约1 600万 m^3 ,包括一般土方开挖、一般石方开挖、航道疏浚和炸礁工程。为便于施工管理,沿河道划分为5个工区段。土石方卸土区位于标段尾,规划有8个卸土区,包括4个陆上卸土区和4个原河道卸土区,总计容量约1 951.3万 m^3 ,各工区段至各卸土区的运距在1~8 km,见图1。



图1 本工程平面布置

Fig. 1 Planar layout of the project

主体工程为土石方开挖,开挖工程量大、施工任务重、工期紧,且地处山丘河流,不具备大型船机进场作业条件,高峰期时共需要20余种、400余台机械设备同时作业,卸土区都集中在航道标段尾,而航道开挖区呈长线形,在河道两岸狭长区域内,密集施工管理和土石方调配具有巨大的挑战性。

因此,综合以上特点,工程重点是解决大量土石方的调配以及机械设备的运输组织问题。

2 模型建立

2.1 模型建立思路

本文的土石方运输调配模型是以系统论、优化理论为基础建立的线性规划模型,其建模步骤

为: 1) 对土石方的生产、运输、消纳等各个环节进行全面分析, 确定模型的边界条件和约束条件; 2) 在此基础上设定目标函数, 进行调配模型计算; 3) 根据计算结果, 进行优化资源配置; 4) 根据实施过程中的实测结果和工程实际, 进行迭代反馈, 继续优化模型, 最终得出优化结果, 实现工程效益最大化。

2.2 目标函数

目标函数是优化模型的核心, 是建立模型的前提和基础。在本文的模型中, 选择目标函数为综合运距 Z 值最小, 即:

$$\text{Min}Z = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n D_{ij} X_{ij} / E \quad (1)$$

式中: D_{ij} 为从第 i 开挖区到第 j 个卸土区的运输距离; X_{ij} 为从第 i 个开挖区挖土运到第 j 个卸土区的土石方工程量; E 为航道开挖土石方总工程量。

2.3 模型基础资料

模型建立前需要梳理和准备的基础资料有:

1) 各工区的陆上土方工程量、陆上石方工程量、水下土方工程量和水下石方工程量; 2) 各工区土方、石方的松散系数; 3) 根据地形、道路分布情况细分各卸土区, 各卸土区域卸土容量和与各工区连接道路对应的运距。

2.4 约束条件

1) 土石方产量约束。对于每个开挖区, 其挖出的土石方工程量要等于其储量, 即:

$$\sum_{j=1}^n X_{ij} = a_i \quad (i = 1, 2, \dots, m) \quad (2)$$

式中: a_i 为第 i 个开挖区可供挖土的工程量。

2) 卸土区容量约束。对于每个卸土区, 其总卸土容量要大于或等于卸土量, 即:

$$\sum_{i=1}^m X_{ij} \leq b_j \quad (j = 1, 2, \dots, n) \quad (3)$$

式中: b_j 为第 j 个卸土区填方的工程量。

3) 土方平衡约束。卸土区的总容量要满足土石方开挖总量的要求, 即 $\sum_{i=1}^m a_i \leq \sum_{j=1}^n b_j$, 否则无解。

4) 运输能力约束。对于每条道路的运输能力要小于等于其设计容量。

5) 非负约束条件。所有调配量均为非负数, 即 $X_{ij} \geq 0 (i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n)$ 。

6) 因第5工区的合作模式特殊, 优先考虑工区1~4的运输调配。

3 模型优化内容

3.1 卸土区的租地顺序因素

卸土区的用地手续是分批次完成, 其中卸土区10-1的用地手续第1批完成, 其他陆上卸土区用地手续在开工后3~6个月陆续完成, 原河道卸土区2~5用地手续在2024年后完成。这就使运距最小的调配方案不可能按照最理想的状态实施。优化思路为先在卸土区10-1内为每个开挖区配置一部分卸土容量, 保证工程的进度要求, 再根据下一批用地手续完成时间逐步考虑其他卸土区调配。即先假定陆上土方开挖量为开挖总量, 卸土区10-1为唯一卸土区, 进行模型计算得出各工区陆上土方开挖的卸土区域, 以满足3~6个月工程第1阶段的卸土需求, 后续再将已分配的区域作为边界条件输入模型再进行第2轮计算。

3.2 卸土区的归并整合

理论上来说, 卸土区划分得越细, 计算得出的调配方案综合运距就越小。但是过小的区块划分不仅不利于施工管理, 还会影响卸土效率。因此, 要根据初步的计算结果对同一工区相邻卸土区块进行规整合并, 对不同工区在一个卸土区块要进行分割处理, 优化调整卸土区块。

3.3 松散系数修正

模型的松散系数是根据土质情况和工程经验设定的。在工程实施一段时间后, 进行实际开挖与卸土工程量的比对, 以调整松散系数的值, 更新模型计算。

3.4 运输道路的更新

工程前期受雨季、台风等因素影响, 导致进度滞后。按照完成年度目标倒排计划, 计算得出旱季施工高峰期需要配备的机械数量, 以及随之带来的交通流量激增, 将超出本标段唯一的临时主便道的理论通行容量。因此, 在标段尾新建一

条施工便道通往卸土区，以满足高峰期交通流要求。根据新建标段尾道路布置，调整各工区对应卸土区的运距，并更新模型计算结果。

4 模型计算及比选

本标段有 8 个卸土区，总填方容量有一定富余。因此，启用或弃用不同的卸土区存在多种组合方式，见表 1。针对每种组合对应计算模型设定不同的约束条件，对每种组合的目标函数均进行最优求解，得出各组合下相应综合平均运距最小的调配方案。

表 1 卸土区组合计算方案

组合方案	启用的卸土区	情况说明
1	10-1、10-2、9、2~4	原河道卸土区 2~4 不存在耕地占用税
2	10-1、10-2、9、11-1、2、3	与组合方案 1 相比，卸土区 9 堆填顶高程增加 2 m，启用卸土区 11-1 需要新建山区施工道路
3	10-1、10-2、9	与组合方案 1 相比，卸土区 9 堆填顶高程增加 7 m，相应水土保持和边坡防护措施难度也会相应增加

在模型计算得出综合平均运距的基础上，考虑用地和修路成本、便道最大交通流负荷、卸土区的水保和边坡防护措施费以及协调工作难度等因素，对 3 个调配方案进行综合比选，见图 2。

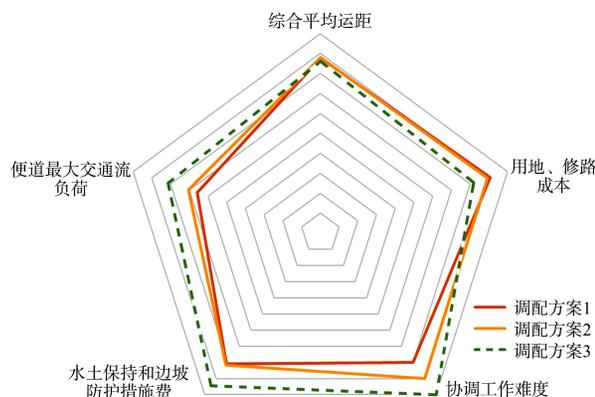


图 2 土石方运输调配方案比选雷达图

Fig. 2 Radar chart for comparison of earthwork transportation and allocation schemes

综合比选可得，3 个方案的综合平均运距较为接近，但调配方案 1 在水保和边坡措施、便道最大交通流负荷以及相关协调工作方面均有较大优势。因此，选择方案 1 作为本工程的土石方运输调配实施方案。最终结果见图 3、4。

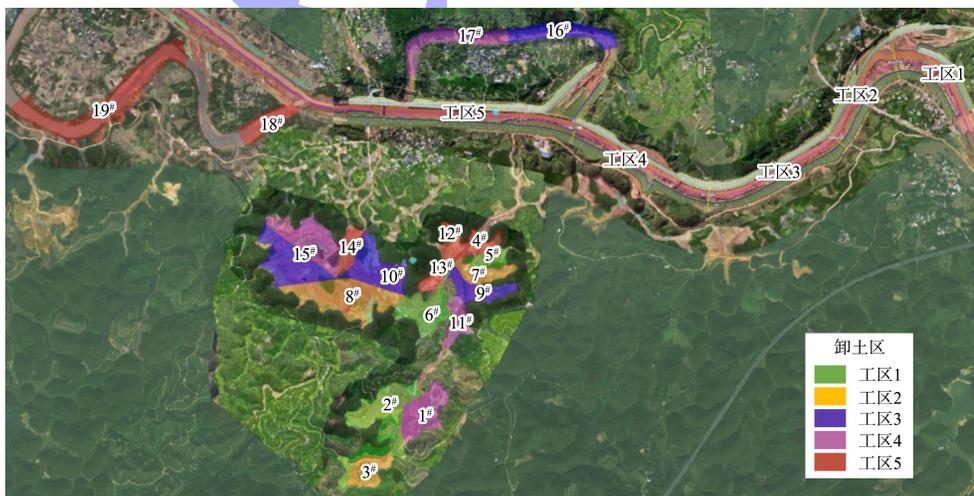


图 3 土石方运输调配最优方案的各卸土区布置

Fig. 3 Layout of unloading areas for best scheme of earthwork transportation and allocation

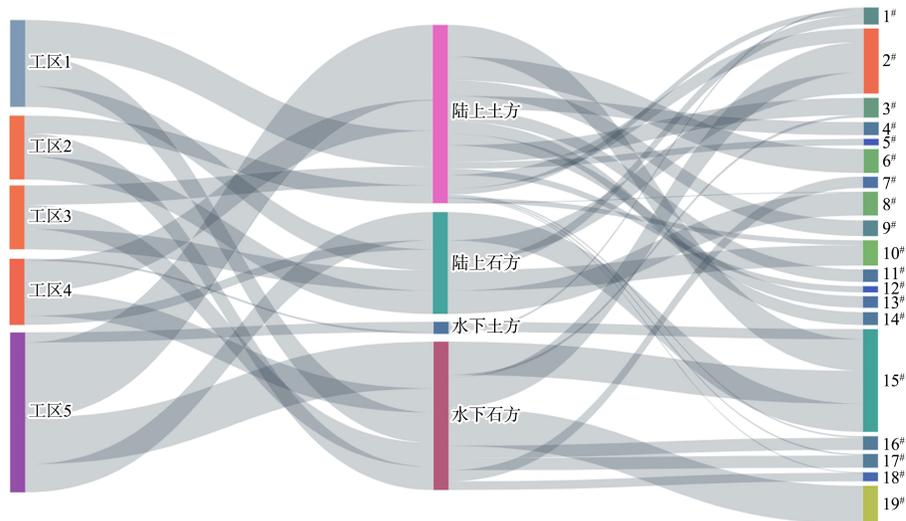


图4 土石方运输调配最优方案桑基图

Fig. 4 Sankey diagram of best scheme of earthwork transportation and allocation

5 结语

1) 本文从理论分析、模型构建、算法优化到实际应用等多个层面,对大范围土石方运输调配进行深入探讨;系统梳理土石方运输的基本原理与影响因素,特别考虑了卸土区用地顺序、运输道路等关键影响因子。基于此,构建高效、经济的运输调配模型,并通过求解与优化,显著提升了运输效率。

2) 以模型计算结果为基础,综合考量其他工程因素,优选出对项目利益最大化的调配方案,为资源配置和施工组织提供了有力的辅助决策支持。

3) 当前研究仍存在一些局限性和挑战,不确定性因素未全面考虑(如运输过程中的天气变化、交通拥堵等不确定性因素),对调度方案的影响尚未得到全面评估。地质条件影响未量化,即不同地质条件下土石方性质的差异对运输效率的影响程度尚未量化。

4) 在复杂多变的施工环境中,如何实现资源高效配置与动态调整的土石方运输调配,具有巨大的研究价值和潜力。

参考文献:

[1] 曹生荣,王先甲,申明亮.大型水电工程土石方调配系统分析及其优化调配模型[J].中国工程科学,2003,

5(7):72-76.

CAO S R, WANG X J, SHEN M L. Systems analysis and constitution of linear programming model for the earth-rock allocation system of massive water resources and hydropower projects [J]. Strategic study of Chinese Academy of Engineering, 2003, 5(7): 72-76.

[2] 上官甦,刘小明.公路建设工程大系统土石方调配优化[J].公路交通科技,2006(4):37-40.

SHANGGUAN S, LIU X M. Optimization of large-scale earth-rock works adaptation for highway construction [J]. Journal of highway and transportation research and development, 2006(4): 37-40.

[3] 陈海斌.优化土石方调配模型在某工程中的应用[J].水运工程,2012(12):225-229.

CHEN H B. Application of optimized earth-rock deployment model on project [J]. Port & waterway engineering, 2012(12): 225-229.

[4] 曹军义,杨宏斌,张发瑜.梨园水电站土石方调配方案研究[J].水利发电,2015,41(5):52-54.

CAO J Y, YANG H B, ZHANG F Y. Study on earthwork allocation for Liyuan hydropower station project [J]. Water power, 2015, 41(5): 52-54.

[5] 赵瑜,陈传宇,张建伟,等.基于遗传算法的面板堆石坝土石方调配研究[J].中国农村水利水电,2020(11):174-178.

ZHAO Y, CHEN C Y, ZHANG J W, et al. Research on the earthwork allocation of concrete face rockfill dam based on

genetic algorithm[J]. China rural water and hydropower, 2020(11): 174-178.

[6] 孙兴. 基于 GIS 的公路土石方调配研究与实现[D]. 长沙: 中南大学, 2012.

SUNX. The study and realize of highway earthwork allocation based on GIS [D]. Changsha: Central South University, 2012.

[7] 金鑫, 李瀚远, 杜蒙蒙, 等. 基于遗传: 蚁群算法的农田微地形特征土方调配路径研究[J]. 中国农机化学报, 2024, 45(8): 270-275.

JINX, LI H Y, DU M M, et al. Study on earthwork reallocation path for micro-topographic features of farmlands based on genetic-ant colony algorithm [J]. Journal of Chinese agricultural mechanization, 2024, 45(8): 270-275.

[8] 李擎. 基于 Civil 3D 的大型场地土方调配优化研究[D].

大连: 大连理工大学, 2023.

LI Q. Optimization of earthwork allocation for large sites based on Civil 3D [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2023.

[9] 周瑞园, 王慧, 宋春跃, 等. 基于 TransModeler 仿真的土石方调配装运机械配置优化[J]. 控制技术, 2018, 25(1): 82-87.

ZHOU R Y, WANG H, SONG C Y, et al. Equipment selection optimization of earthmoving operations using TransModeler simulation [J]. Control engineering of China, 2018, 25 (1): 82-87.

[10] 刘勇. 高心墙堆石坝施工方案综合优化与设计管理研究[D]. 天津: 天津大学, 2010.

LIU Y. Research on comprehensive optimization of construction schemes and design management for high core rock-fill dam[D]. Tianjin: Tianjin University, 2010.

(本文编辑 王璁)



(上接第 197 页)

[6] 陈富, 胡利文. 水下真空预压的加固机理及其密封铺膜施工工艺[J]. 水运工程, 2023(2): 146-153.

CHEN F, HU L W. Reinforcement mechanism and membrane laying and sealing construction process of underwater vacuum preloading [J]. Port & waterway engineering, 2023(2): 146-153.

[7] 杨林松, 袁程, 许晓刚, 等. 不同预测方法在真空预压固结度计算中的分析研究[J]. 中国水运, 2019, 19(9): 221-222.

YANG L S, YUAN C, XU X G, et al. Analysis and research on different prediction methods in the calculation of consolidation degree of vacuum preloading [J]. China water transport, 2019, 19(9): 221-222.

[8] 王天祥, 励彦德, 郭松. 4 种真空预压土体固结度预测方法及其效果对比[J]. 水运工程, 2019(S2): 119-123.

WANG T X, LI Y D, GUO S. Contrast of four vacuum preloading soil consolidation degrees prediction methods and effects[J]. Port & waterway engineering, 2019(S2):

119-123.

[9] 谢万东. 基于 Asaoka 法的软基处理动态设计[J]. 水运工程, 2020(12): 191-194, 205.

XIE W D. Dynamic design of soft soil improvement based on Asaoka method [J]. Port & waterway engineering, 2020(12): 191-194, 205.

[10] 燕继宇, 伍琪琳, 李建宇. 软土地基沉降计算中的固结度分析[J]. 水运工程, 2021(9): 174-177, 215.

YAN J Y, WU Q L, LI J Y. Analysis of consolidation degree in settlement calculation of soft soil [J]. Port & waterway engineering, 2021(9): 174-177, 215.

[11] 刘珂, 王敏丰, 李俊. 沿海地区软土应变固结度和应力固结度的计算分析[J]. 中国水运, 2023, 23(16): 158-160.

LIU K, WANG M F, LI J. Calculation and analysis of strain consolidation degree and stress consolidation degree of soft soil in coastal areas [J]. China water transport, 2023, 23(16): 158-160.

(本文编辑 王璁)