

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2023.03.011

碳排放约束下的水工隧洞施工机群配置优化

靳春玲¹, 苏 旸¹, 贡 力¹, 刘晶晶¹, 魏健周²

(1. 兰州交通大学土木工程学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 中铁八局集团昆明铁路建设有限公司, 云南 昆明 650200)

摘要: 考虑碳排放约束条件, 基于水工隧洞施工机群配置优化和碳减排双赢的改进路径, 构建基于工期-成本-质量-碳排放量的多目标优化函数; 选择模拟退火算法改进后的粒子群算法, 参考施工机械台班费用定额和《IPCC 国家温室气体排放清单指南》计算施工机械的台班碳排放量; 将新型机械配置纳入碳排放因素, 建立以工期、成本、质量和碳排放为一级指标和 14 个二级指标的水工隧洞施工机群配置目标偏好权重评价指标体系, 并构建考虑碳排放的机群配置优化模型, 以滇中引水工程万家隧洞 3 号支洞为例开展多目标约束下的施工机群配置优化分析。结果表明: 建立的水工隧洞施工机群配置目标偏好权重评价指标体系可以较全面地考量施工机群对环境的影响性; 计算得出该施工机群主要碳排放源为隧道多功能作业台车和混凝土搅拌站, 碳排放量(以 CO₂ 计)达到 1 000 kg/台班。改进后的粒子群算法可以有效增强全局寻优的搜索能力, 识别施工机械中碳排放关键风险源, 模型优化结果与现场施工情况相符, 验证了模型的可行性。

关键词: 水工隧洞; 碳排放; 粒子群算法; 多目标优化; 施工机群配置

中图分类号: TV672.1; X511

文献标志码: A

文章编号: 1000-1980(2023)03-0084-07

Configuration optimization of construction machine group for hydraulic tunnel under carbon emission constraint

JIN Chunling¹, SU Yang¹, GONG Li¹, LIU Jingjing¹, WEI Jianzhou²

(1. School of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China;

2. China Railway 8 Bureau Group Kunming Railway Construction Co., Ltd., Kunming 650200, China)

Abstract: A multi-objective optimization function based on the schedule-cost-quality-carbon emission is constructed according to the improvement path of optimization of hydraulic tunnel construction machine fleet and carbon emission reduction under the constraint of carbon emission. A particle swarm optimization (PSO) after the improvement of simulated annealing (SA) is selected and the carbon emission per working unit of construction machines is calculated with the reference to the construction machine-working cost quota and IPCC guidelines. By incorporating the new mechanical configuration into carbon emission factors, an evaluation system with duration, cost, quality and carbon emission as the primary indicators and 14 secondary indicators is established and the optimization model of fleet configuration considering carbon emissions is built. The optimization of construction machine fleet configuration under multi-objective constraints was carried out in the No. 3 branch of Wanjia tunnel of the Dianzhong water diversion project. The results show that the established target preference weight evaluation system of hydraulic tunnel construction fleet configuration can comprehensively consider the impact of construction fleets on the environment. The main carbon emission sources of the construction machine fleet are tunnel multifunctional work cart and concrete mixing plant, and the carbon emission (CO₂) reaches 1 000 kg/machine working unit. The improved particle algorithm can effectively enhance the search capability of global optimization and identify the key risk sources of carbon emission in the construction machinery. Finally, the model optimization results are consistent with the on-site construction situation, which verifies the feasibility of the model.

Key words: hydraulic tunnel; carbon emission; particle swarm optimization; multi-objective optimization; construction machine group configurations

基金项目: 国家自然科学基金(51969011); 甘肃省科技计划(20JR10RA274, 21JR7RA301); 甘肃省教育厅优秀研究生“创新之星”(2022CXZX-594)

作者简介: 靳春玲(1976—), 女, 教授, 硕士, 主要从事绿色、低碳施工等研究。E-mail: jinchunling@mail.lzjtu.cn

通信作者: 苏旸(1997—), 男, 硕士研究生, 主要从事低碳施工管理与评价研究。E-mail: sy20121997@126.com

引用本文: 靳春玲, 苏旸, 贡力, 等. 碳排放约束下的水工隧洞施工机群配置优化[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023, 51(3): 84-90.

JIN Chunling, SU Yang, GONG Li, et al. Configuration optimization of construction machine group for hydraulic tunnel under carbon emission constraint[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2023, 51(3): 84-90.

随着国家水利工程建设的迅速发展,我国将“碳达峰、碳中和”纳入生态文明建设的整体布局^[1],开展减污降碳研究、促进生态环境保护成为水利工程建设的重要一环。水工隧洞在开挖-支护施工过程中要求各种机械具有较高的协作性,适合的机群部署能够安全高效地推进工程进度,在确保施工质量的同时极大程度地节约成本。此外,机械碳排放是工程建设领域主要的碳排放源头之一,所以,研究水工隧洞施工过程中机群配置的节能降碳问题非常必要。

目前,国内外对于施工机群配置问题的研究主要集中在铁路隧道快速施工、房屋工程和路面工程土石方开挖机械配置等方面^[2-4]。晁玉增^[5]以公路施工机群为研究对象,建立了质量约束下的工期-成本多目标优化函数,对路面机械配置进行了优化求解。鲍学英等^[6]提出了铁路隧道施工机械目标偏好权重评价指标体系,运用遗传算法对机械进行了优化配置,为多目标下的施工机械优化提供了有益参考。Chen 等^[7]提出一种基于免疫算法的机械资源智能配置方法,可以使每个工作计划达到最佳的施工过程。郝俊锁^[8]以滇中引水工程为例,指出运用机械化、自动化、信息化和智能化关键技术可以预警并控制施工风险,实现安全、快速和高效施工。建设领域节能减碳研究主要集中在全生命周期低碳建筑方面的清洁能源使用、材料选配、机械优化组合以及碳排放的测算和评价等。Liu 等^[9]从低碳结构、低碳材料、低碳能源、低碳技术和低碳管理五方面建立了低碳建筑评价指标体系和评价方法,以了解建筑企业自身的碳排放现状,并改善建筑建造过程中对碳排放有重大影响的环节和活动。Luo 等^[10]在建筑全生命周期评估(life cycle assessment, LCA)的基础上建立了碳排放计算模型,并针对不同地区和不同的工业建筑进行了整个生命周期的碳排放计算。余佳等^[11]基于施工机械故障、塌方等风险因素的影响,提出一种优选水工隧洞施工方案的智能算法模型,案例仿真结果更贴合实际工程。刘香香等^[12]利用蚁群算法寻找了使成本-工期-碳排放综合最优工序执行模式的组合。郑欢^[13]提出的改进自适应性混和遗传算法可求解多目标优化问题,设计了单点交叉和变异的修复式策略以避免不可行解的产生。单一的蚁群算法、遗传算法等用于处理优化问题时,收敛慢、运算复杂且易陷入局部最优。国内外关于施工机群配置方面的研究主要从工程质量、工期和成本角度进行考量,鲜有以综合碳排放量为指标的施工机群多目标优化配置研究,更缺乏针对水工隧洞开挖支护循环体系的机群配置研究。

在全球双碳背景下,从低碳发展的视角来考虑水工隧洞在开挖支护循环体系中的机群配置优化,对减少建设领域碳排放具有一定的实用性。本文基于前人的研究,在考虑碳排放约束的情况下,建立基于工期-成本-质量-碳排放量的多目标优化函数,选择模拟退火算法(simulated annealing, SA)改进后的粒子群算法(particle swarm optimization, PSO),开展多目标约束下的施工机群配置优化问题研究。

1 水工隧洞开挖与支护机群的选型与配置

目前工程建设大多采用以汽油、柴油和电力为动力的机械设备,其中油类机械设备能耗高,产生的碳排放量较大,且不可逆。水工隧洞的施工作业,主要体现在隧洞的开挖、出渣、支护等关键工序上,特别是隧洞的开挖、支护过程涉及大型设备,碳排放量较大。施工机群的选型、配置及其作业方式直接影响水工隧洞工程的建设安全、周期和成本,机群配置不合理将使工程质量和效益均得不到有力的保证^[14]。

隧洞开挖与支护体系包括开挖循环体系、出渣循环体系、初期支护循环体系和二次衬砌体系^[15-16],施工流程和部分施工机械如图 1 所示。本文主要针对隧洞开挖-出渣-支护-衬砌施工过程中涉及的机械进行优化配置。

2 基于混合 PSO 算法的隧洞施工机群配置

2.1 考虑碳排放的水工隧洞施工机群配置模型

机群最优配置的目的在于使各类机械在数量和技术参数上优势互补,从而在开挖支护作业中相互配合、协调,实现快速施工、经济高效、绿色、低碳的综合性成果。将各类机械设备集合为一个系统性的研究对象,运用模拟、仿真等方法,经分析、研判、处理,构建系统化的数字模型,继而采用一系列智能算法进行寻优求解,使机群配置方案较为合理。在现场施工作业中减少设备闲置情况,增强施工机械作业效率,同时做到环保低污染。

不同的施工机群配置方案在指导隧洞施工时会有不同的效率,直接影响隧洞日进尺的施工进度,继而影响整个施工工期^[17]。设隧洞工程拟配置的机械种类数为 n ,将各种机械的数量表示为向量 $\mathbf{A} = (A_1, A_2, \dots, A_n)$,则施工工期 T 可表示为机械配置向量 $\mathbf{A}$ 的函数:

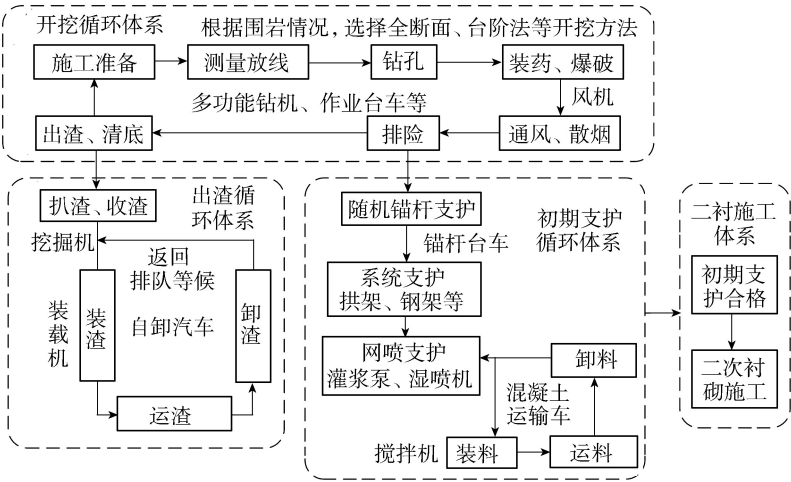


图 1 水工隧洞开挖-出渣-支护-衬砌循环体系施工机群工作过程

Fig.1 Work process of construction machine group in hydraulic tunnel excavation-slag-retaining-initial support cycle system

$$T(A) = T(\sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n A_{ij}) \tag{1}$$

式中: A_{ij} 为第 i 个工作面的第 j 种机械工作数量; a 为工作面总数。

根据施工机群配置方案和工期之间的联系,用 C 代表施工机群所产生的成本,即:

$$C = \sum_{j=1}^n C_j A_j T(A) \tag{2}$$

式中: C_j 为第 j 种机械的台班单价; A_j 为第 j 种机械的数量。可以看出,施工费用是关于施工机群设备配置方案、施工工期的函数,可用 $C(A, T)$ 表示。

在施工机群配置优化模型中考虑施工质量,引入质量成本理论,建立质量约束下的工期-成本多目标函数的施工机群优化模型^[5]。在兼顾极限质量成本和保本质量成本的前提下,用 $Q_{\min}$ 作为最小质量成本:

$$Q_{\min} = \sqrt{\frac{C(A, T) C_{\max}}{C_{\min}}} \tag{3}$$

式中 $C_{\max}$ 、 $C_{\min}$ 分别为所有机群配置方案中成本最大值和最小值。

目前,参考联合国政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)制定的《IPCC 国家温室气体排放清单指南》^[18] 和 GB/T 51366—2019《建筑碳排放计算标准》中的碳排放测算方法,采用最常用的碳排放系数法。施工机群配置只考虑柴油、汽油、电能的碳排放系数,具体测算公式为

$$R = 3.99A_d + 3.94A_g + 1.01A_e \tag{4}$$

式中: R 为施工机群总碳排放量; A_d 、 A_g 、 A_e 分别为隧洞施工阶段柴油、汽油和电能的消耗量。柴油、汽油和电能的碳排放系数(以每千克 CO_2 计)分别为 3.99 kg、3.94 kg 和 1.01 kg。

考虑各类目标的度量标准不同,为实现数据间直接有效的分析比较,统一进行无量纲化处理。统一标准后的工期目标、成本目标、质量目标、碳排放目标记作 T_F 、 C_F 、 $Q_{\min}$ 、 R_F :

$$T_F = \delta_1 \frac{T(\sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n A_{ij})}{T_{\max}} \tag{5}$$

$$C_F = \delta_2 \frac{C(A, T)}{C_{\max}} \tag{6}$$

$$Q_{\min} = \delta_3 \sqrt{\frac{C(A, T) C_{\max}}{C_{\min}}} \tag{7}$$

$$R_F = \delta_4 \frac{R_A}{R_{\max}} \tag{8}$$

式中: δ_1 、 δ_2 、 δ_3 、 δ_4 分别为工期、成本、质量和碳排放的目标偏好权重; $T_{\max}$ 为所有方案中工期的最大值; $R_{\max}$ 为所有方案的最大碳排放; R_A 为各方案的碳排放系数。综合考虑工期、质量、成本和碳排放多目标约束下的水

工隧洞施工机群配置优化模型为

$$\min Z = \delta_1 \frac{T(\sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n A_{ij})}{T_{\max}} + \delta_2 \frac{C(A,T)}{C_{\max}} + \delta_3 \sqrt{\frac{C(A,T)C_{\max}}{C_{\min}}} + \delta_4 \frac{R_A}{R_{\max}}$$

$$\text{s. t. } \begin{cases} \delta_1 > 0, \delta_2 > 0, \delta_3 > 0, \delta_4 > 0 \\ \delta_1 + \delta_2 + \delta_3 + \delta_4 = 1 \\ C(A,T) = C_i A_i (\sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n A_{ij}) \\ T_i U_j \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n A_{ij} = Q_i \\ \sum_{i=1}^a A_{ij} \leq Z_j \\ A_{ij} \geq 0 \text{ 且为整数} \\ 0 \leq T_i \leq T \end{cases}$$

$$(9)$$

$$(10)$$

式中: T_i 为第 i 个工作面工作完成的时间; U_j 为第 j 种机械的工作班次; Q_i 为第 i 个工作面的工程量; Z_j 为第 j 种机械的可支配总数。

若决策者考虑工程外部环境的变化,更偏向于实现某一目标时,其偏好权重会适当扩大,同时根据对应目标数据形成约束,这将直接作用于施工机群配置模型优化结果的求解。因此该模型极大程度上适用于实际隧洞施工,可根据实际情况变化及时进行调整和协调。

2.2 反熵权法确定目标偏好权重

根据建立的施工机群配置模型,结合水工隧洞开挖-出渣-支护-衬砌的施工机群系统作业过程,参考鲍学英等^[6]对铁路隧道施工机械优化配置研究得出的指标体系和指标计算规则,建立水工隧洞工期-成本-质量-碳排放量的评价指标体系,见图 2。

反熵权法是依据指标差异性客观确定指标的权重,计算方法如下:

步骤 1 运用极差法标准化处理指标数据,即对各个评价指标进行无量纲处理,消除不同指标间量纲的影响。得到标准化后的矩阵 X ,计算公式如下。

正向指标:

$$x'_{ij'} = \frac{x_{ij'} - x_{ij',\min}}{x_{ij',\max} - x_{ij',\min}}$$

$$(11)$$

负向指标:

$$x'_{ij'} = \frac{x_{ij',\max} - x_{ij'}}{x_{ij',\max} - x_{ij',\min}}$$

$$(12)$$

$$X = (x'_{ij'})_{m \times n'}$$

$$(13)$$

式中: $x'_{ij'}$ 为第 i' 个配置方案第 j' 个指标的标准化值; $x_{ij'}$ 为指标原始数值; m 为评价方案个数; n' 为评价指标数量。

步骤 2 计算指标反熵值 $h_{i'}$:

$$h_{i'} = - \sum_{j=1}^{n'} x'_{ij'} \ln(1 - x'_{ij'})$$

$$(14)$$

步骤 3 计算指标客观权重:

$$w_{i'} = h_{i'} / \sum_{i'=1}^m h_{i'}$$

$$(15)$$

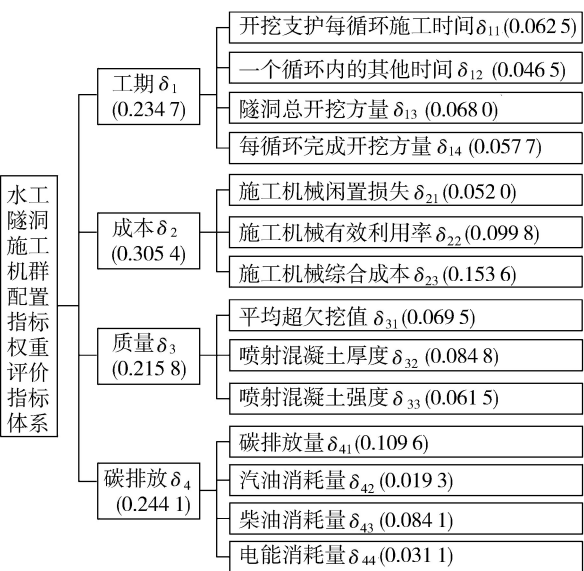


Fig. 2 Evaluation index system for target preference weight of hydraulic tunnel construction machine group configuration

2.3 混合粒子群(SA-PSO)算法优化流程

粒子群算法适合于解决动态性以及多目标约束下的优化问题,兼顾个体和全局,具有收敛快、运算结果贴近最优解等特点;不足之处是需要依据粒子间信息持续更新粒子的位置和速度,从而不断逼近最优解,使得 PSO 算法后期收敛速度较为缓慢^[19-20]。模拟退火算法是以高温物体的退火过程为指引,继而产生的一种解决优化问题的智能算法。其基本思想是为避免陷入局部最佳,同时要求保持高搜索精度,需要在解的领域内以概率选择非局部最优解,并令此解重复。以粒子群算法为主导,在运算过程中引入模拟退火机制,形成混合粒子群(SA-PSO)算法,以扬长避短,增强算法的整体性能。水工隧洞施工机群配置模型及其混合粒子群算法寻优求解流程如图 3 所示,具体步骤如下。

步骤 1 初始化各个粒子的速度和位置。设 D 维空间有 N 个粒子,则将第 i 个粒子的位置和速度定义为

$$\begin{cases} X_i = (x_i^1, x_i^2, \dots, x_i^k, x_i^d) \\ V_i = (v_i^1, v_i^2, \dots, v_i^k, v_i^d) \end{cases} \quad (16)$$

式中: x_i^k 为第 k 维空间第 i 个粒子的位置; v_i^k 为第 k 维空间第 i 个粒子的速度。

步骤 2 记录个体极值和全局极值。评估各粒子的适应值,将粒子的位置及适应值记作粒子的个体极值 B_p ,将所有个体极值中的最佳极值记作全局极值 B_g 。

步骤 3 确定算法的初始温度。

$$T_{t+1} = \lambda T_t \quad (0 < \lambda < 1, t = 0, 1, \dots, M) \quad (17)$$

$$T_0 = B_g^0 / \ln 5 \quad (18)$$

式中: λ 为退火常数惯性权重; T_t 为第 $t+1$ 次迭代的初始温度; M 为总迭代次数。

步骤 4 确定当前温度下各粒子的适应值。

$$F(x_i^t) = \frac{e^{-(f(x_i^t) - B_g^t)/T_t}}{\sum_{i=1}^N e^{-(f(x_i^t) - B_g^t)/T_t}} \quad (19)$$

式中: $F(x_i^t)$ 为第 t 次迭代过程中,第 i 个粒子对应的适应值; B_g^t 为第 t 次迭代中全局最佳极值; N 为初始化后的粒子群数。

步骤 5 更新粒子的位置和速度。在所有 X_i 中确定退火条件下全局最佳的替代值 X_i' 并更新位置和速度:

$$x_i^k(t+1) = x_i^k(t) + v_i^k(t+1) \quad (20)$$

$$v_i^k(t+1) = \eta v_i^k(t) + c_1 r_1 [p_i^k - x_i^k(t)] + c_2 r_2 [p_g'(t) - x_i^k(t)] + c_2 r_2 [p_g'(t) - x_i^k(t)] \quad (21)$$

其中

$$\eta = \frac{2}{2 - (c_1 + c_2) - \sqrt{(c_1 + c_2)^2 - 4(c_1 + c_2)}}$$

式中: $x_i^k(t)$ 为粒子第 t 次迭代时的位置; $v_i^k(t)$ 为粒子第 t 次迭代时的速度; $p_g'(t)$ 为模拟退火条件后第 t 次迭代过程中全局最优的代替值; p_i^k 为单个个体极值对应的粒子; η 为权重; c_1, c_2 为学习因子。

步骤 6 对比 B_p 和 B_g ,并更新 B_g ,再用式(16)进行退温操作。

步骤 7 当运算达到停止条件后,输出优化后的结果;否则返回步骤 4 继续进行搜索。

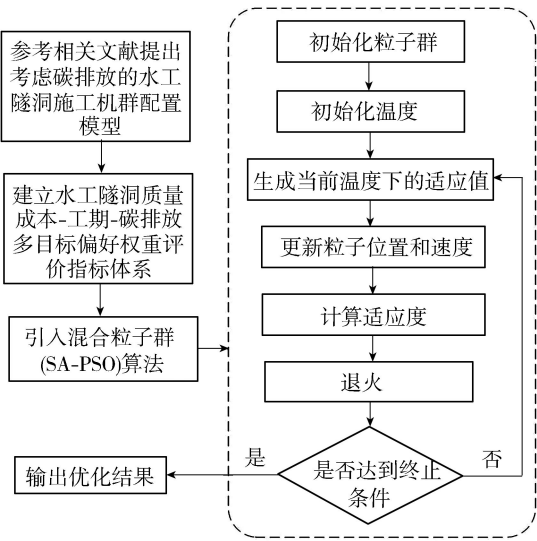


图 3 水工隧洞施工机群配置优化流程
Fig. 3 Optimization flow chart of hydraulic tunnel construction machine group configuration

3 案例分析

3.1 工程概况

以滇中引水工程万家隧洞 3 号支洞为例,进行隧洞开挖-出渣-支护-初砌作业循环中施工机群配置的优

化分析。万家隧洞进口段全长 16 257 m,包含 4 个支洞、1 个斜井、12 个工作面。3 号支洞长 1 030.0 m,纵坡为 8.26%,支洞高差为 83.15 m,与主洞交点桩号为 WJT8+384.343。支洞开工时间为 2019 年 12 月 1 日,工期为 18.1 月。该工程拟投入的主要施工机械设备及其碳排放系数如表 1 所示,碳排放量以 CO₂ 计。各机械设备台班单价根据 DBJ 53/T-58—2020《云南省建设工程造价计价规则及机械仪器仪表台班费用定额》进行折算。结合该隧洞石方工程相关工程量,可以确定各机械所需台班数。

表 1 拟投入主要施工机械设备及碳排放系数

Table 1 Major construction machinery to be invested and carbon emission coefficient							
名称	型号	生产能力	数量	台班单价/元	柴油/kg	电量/(kW·h)	碳排放量/(kg·台班 ⁻¹)
多功能钻机	ZML-160	钻深 120 m	2	522.33	36.64		146.19
隧道多功能作业台车	SCD112S		2	6 108.976	185.6	622.4	1 369.17
钻注一体锚杆台车	MT55	150 m/h	2	4 760.88	24	640	742.16
湿喷机组	SPM500	30 m ³ /h	3	2815.80		92.40	93.32
挖掘机	PC220	1.0 m ³ /斗	3	1257.02	63		251.37
装载机	WA380	2.5 m ³ /斗	3	884.39	75.11		299.69
装载机	ZL50	3 m ³ /斗	1	1 201.5	83.44		332.93
自卸车	15T		8	1 051.52	52.93		211.19
输送泵	HBT60A	60 m ³ /h	2	937.94		347.8	351.28
移动式柴油空压机	VF-12/7-CY	12 m ³ /min	1	587.06	65.1		259.75
空压机	24 m ³ /min	24 m ³ /min	6	389.18		524.620	529.87
混凝土搅拌站	HZS90	90 m ³ /h	1	4 088.58		992.25	1 002.17
混凝土运输车	8 m ³	8 m ³ /车	6	1 311.88	62.12		247.86
手持风动凿岩机	YT28	5m	30	11.50			0.00
混凝土湿喷机	TK600	6 m ³ /h	6	469.30		15.4	15.55
灌浆泵	TBW250/50		3	445.12		31.2	31.51
砂浆泵	C232 100/15		2	92.85		122.9	124.13
高速搅拌机	ZJ400	400L	1	332.98		110.616	111.72
砂浆搅拌机	0.45 m ³	0.45 m ³	2	249.30		15.17	15.32

3.2 确定目标偏好权重

根据建立的指标体系和指标计算规则^[6],确定指标数据,并在专家给出水工隧洞不同施工机群配置方案的经验值后,计算其施工成本,同时采用反熵权法计算各个指标权重和目标偏好权重,如图 2 中括号数据所示。此外,对比多种方案发现,不同机械的搭配在 4 个目标中均体现了侧重点,在满足质量安全的前提下,表现出其不同的目标偏好。

3.3 机群配置优化求解

利用混合粒子群(SA-PSO)算法对施工机群配置进行优化求解,计算结果见表 2。

该支洞工程设计断面为 46 m²,根据施工情况分为上下两个作业面施工,优化结果也是基于上述工程情况进行的优化。在利用多功能钻机和隧道多功能作业台车以及两个作业面的情况下,使 19 台凿岩机同时作业。按照工程计划的开挖日进尺、出渣量、往返循环时间,配备 PC220 挖掘机、WA380 装载机各 2 台,ZL50 装载机 1 台以及 6 辆 15 t 自卸车可以满足正常施工进度。工程Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ级围岩段占 88.3%,喷锚支护工作量大,因此在 MT55 钻注一体锚杆台车主导下配备 SPM550 湿喷机组 2 台和 TK600 湿喷机 4 台以满足施工需求。结合工程现场实际,对机械数量进行相应调整后,有助于提高机械有效利用率,

表 2 混合粒子群优化算法机群优化结果

Table 2 Machine group optimization results of hybrid particle swarm optimization algorithm

名称	型号	生产能力	优化数量
多功能钻机	ZML-160	钻深 120 m	2
隧道多功能作业台车	SCD112S		2
钻注一体锚杆台车	MT55	150 m/h	2
湿喷机组	SPM500	30 m ³ /h	2
挖掘机	PC220	1.0 m ³ /斗	2
装载机	WA380	2.5 m ³ /斗	2
装载机	ZL50	3 m ³ /斗	1
自卸车	15T		6
输送泵	HBT60A	60 m ³ /h	2
移动式柴油空压机	VF-12/7-CY	12 m ³ /min	1
空压机	24 m ³ /min	24 m ³ /min	6
混凝土搅拌站	HZS90	90 m ³ /h	1
混凝土运输车	8m ³	8 m ³ /车	6
手持风动凿岩机	YT28	5 m	19
混凝土湿喷机	TK600	6 m ³ /h	4
灌浆泵	TBW250/50		3
砂浆泵	C232 100/15		2
高速搅拌机	ZJ400	400 L	1
砂浆搅拌机	0.45 m ³	0.45 m ³	2

在工程效益和工期中均有所体现。

4 结 论

- a. 在新型机械配置优化模型中纳入碳排放因素,形成工期-成本-质量-碳排放的多目标优化函数,并以此构建水工隧洞施工机群目标偏好权重评价指标体系,以工期、成本、质量和碳排放为4个一级指标确定14个二级指标。多目标优化可以从全局出发,综合考量机械配置对工程情况及环境的影响,同时考虑外部环境或决策偏好变化及时进行施工机群配置优化。
- b. 借助隧洞工程量、机械台班费用定额以及《IPCC 国家温室气体排放清单指南》计算主要施工机械台班碳排放量,从表2得到隧道多功能作业台车和混凝土搅拌站的碳排放量已经超过了1 000 kg/台班,是该施工机群中的主要碳排放源。因此,该方法有助于对施工机械进行转型升级,为实现碳减排和环境保护提供参考。
- c. 混合粒子群算法可有效增强全局寻优能力,一定程度削弱了单一算法易陷入局部最佳解的局限性。同时,以滇中引水工程万家隧洞3号支洞为例,检验了模型的可行性,计算结果和现场施工情况相符,说明该模型优化结果可以为实际施工提供决策参考。

参考文献:

[1] 黄润秋. 把碳达峰碳中和纳入生态文明建设整体布局[N]. 学习时报,2021-11-17(001).

[2] 周荣. 高速铁路隧道钻爆开挖设备配置优化及研究[J]. 铁道工程学报,2016,33(12):82-87. (ZHOU Rong. Optimization and study of allocation of drill and blast excavation equipment for high-speed railway tunnels[J]. Journal of Railway Engineering Society,2016,33(12):82-87. (in Chinese))

[3] LIU Q N,ZACHAROPOULOU A. Study on mechanized construction of highway asphalt concrete pavement[J]. Journal of Mechanical Engineering Research and Developments,2016,39(1):178-186.

[4] 杨森森. 高原特长隧道快速施工及机械配套技术研究[D]. 北京:北京交通大学,2012.

[5] 晁玉增. 基于粒子群算法的公路施工机群优化配置研究[D]. 南京:南京林业大学,2011.

[6] 鲍学英,许锟. 考虑碳排放的铁路隧道施工机械配置优化模型[J]. 铁道学报,2020,42(9):157-164. (BAO Xueying,XU Kun. Optimization model of deployment of railway tunnel construction machinery considering carbon emission[J]. Journal of the China Railway Society,2020,42(9):157-164. (in Chinese))

[7] CHEN X L. A machinery resource intelligent configuration method using immune algorithm[C]//Proceeding of 4th International Conference on Intelligent Systems Design and Engineering Applications (ISDEA 2013). New York:IEEE,2013:5-8.

[8] 郝俊锁. 复杂地质特长深埋水工隧洞智能化施工关键技术研究[J]. 现代隧道技术,2021,58(6):188-196. (HAO Junsuo. Study on key intelligent construction technologies of super-long and deepburied hydraulic tunnels under complex geological conditions[J]. Modern Tunnelling Technology,2021,58(6):188-196. (in Chinese))

[9] LIU Zhongwen,DONG Xiaohong,GAO Pengzhao. Construction and applied research of low-carbon building evaluation index system[J]. IOP Conference Series:Earth and Environmental Science,2017,61(1):34-41.

[10] LUO Lei,CHEN Yiyu. Carbon emission energy management analysis of LCA-based fabricated building construction[J]. Sustainable Computing:Informatics and Systems,2020,27(9):42-49.

[11] 余佳,焦铮,苏哲,等. 考虑风险因素影响的引水隧洞施工方案优选[J]. 河海大学学报(自然科学版),2021,49(2):155-161. (YU Jia,JIAO Zheng,SU Zhe,et al. Construction scheme optimization of diversion tunnel considering influence of risk factors[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2021,49(2):155-161. (in Chinese))

[12] 刘香香,孙凤. 基于蚁群算法的装配式建筑施工工序多目标优化模型[J]. 土木工程与管理学报,2021,38(3):113-118. (LIU Xiangxiang,SUN Feng. Multi objective optimization model of installation process of prefabricated buildings based on ant colony algorithm[J]. Journal of Civil Engineering and Management,2021,38(3):113-118. (in Chinese))

[13] 郑欢. 基于碳排放的水电建设项目多目标决策模型与策略分析[J]. 科技管理研究,2018,38(13):243-250. (ZHENG Huan. Multi-objective optimization of hydroelectric construction project and strategy analysis based on carbon emissions[J]. Science and Technology Management Research,2018,38(13):243-250. (in Chinese))

[14] 欧阳结新. 公路隧道洞身开挖与支护的多机种机械化作业模式与集成研究[D]. 重庆:重庆交通大学,2015.

[15] 李朋伟. 基于多臂凿岩台车和湿喷机组的公路隧道施工机械化作业模式研究[D]. 重庆:重庆交通大学,2014.

[16] 申政,闵凡路,柏煜新,等. 砂土地层水下盾构隧道开挖面被动破坏数值模拟[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(1):158-166. (SHEN Zheng,MIN Fanlu,BAI Yuxin,et al. Numerical simulation of passive failure of underwater shield tunnel excavation face in sandy soil layer[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2023,51(1):158-166. (in Chinese))

[15] 樊科伟,严俊,刘苓杰,等. 木质素纤维改性季冻区膨胀土强度特性与微观结构研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2022, 53(1): 326-334. (FAN Kewei, YAN Jun, LIU Lingjie, et al. Study on strength characteristics and microstructure of expansive soil treated with lignin fibers in seasonal frozen area [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2022, 53(1): 326-334. (in Chinese))

[16] 方瑾瑾,杨小林,冯以鑫,等. 干湿循环后膨胀土力学特性的真三轴试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(5): 1043-1055. (FANG Jinjin, YANG Xiaolin, FENG Yixin, et al. True triaxial experimental study on mechanical properties of expansive soils after drying and wetting cycles[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(5): 1043-1055. (in Chinese))

[17] 王佩,宋新江,徐海波,等. 水泥改性膨胀土基本特性试验[J]. 水利水电科技进展, 2021, 41(3): 56-60. (WANG Pei, SONG Xinjiang, XU Haibo, et al. Experiments on basic characteristics of cement-modified expansive soil[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021, 41(3): 56-60. (in Chinese))

[18] 叶万军,吴云涛,杨更社,等. 干湿循环作用下古土壤细微观结构及宏观力学性能变化规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(10): 2126-2137. (YE Wanjun, WU Yuntao, YANG Gengshe, et al. Study on microstructure and macro-mechanical properties of paleosol under dry-wet cycles[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(10): 2126-2137. (in Chinese))

[19] 迟明杰,赵成刚,李小军. 砂土剪胀机理的研究[J]. 土木工程学报, 2009, 42(3): 99-104. (CHI Mingjie, ZHAO Chenggang, LI Xiaojun. Stress-dilation mechanism of sands[J]. China Civil Engineering Journal, 2009, 42(3): 99-104. (in Chinese))

[20] 袁俊平,邱豪磊,胡有方,等. 土石坝力学参数反演技术研究进展与展望[J]. 水利水电科技进展, 2021, 41(3): 1-10. (YUAN Junping, QIU Haolei, XU Youfang, et al. Research progress and prospects on inversion technology of mechanical parameters for earth-rockfill dams [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021, 41(3): 1-10. (in Chinese))

(收稿日期:2022-05-27 编辑:刘晓艳)

(上接第 83 页)

[35] BUSBY J, MARSHALL C. Design and construction of the øresund tunnel[J]. Civil Engineering, 2000, 138(4): 157-166.

[36] 刘晓东. 港珠澳大桥总体设计与技术挑战[C]//第十五届中国海洋(岸)工程学术讨论会论文集(上). 太原: 中国海洋工程学会, 2011: 25-28.

[37] LIN M, WANG R, LIN W. Artificial island construction using large steel cylinders[J]. Structural Engineering International, 2020, 30(4): 484-492.

[38] 孙钧. 港珠澳大桥岛隧工程建设的科技创新和运营后应关注的若干问题[J]. 隧道建设(中英文), 2018, 38(10): 1592-1602. (SUN Jun. Scientific and technological innovation and operation-related issues for island-tunnel of Hong Kong-Zhuhai-Macao Fixed Link Project[J]. Tunnel Construction, 2018, 38(10): 1592-1602. (in Chinese))

[39] 刘健,董焱赫,刘迪. 深中通道东人工岛总体设计及关键技术[J]. 公路, 2021, 66(2): 234-238. (LIU Jian, DONG Yanhe, LIU Di. Overall design and key technology of the east artificial island of the Shenzhen-Zhongshan Link [J]. Highway, 2021, 66(2): 234-238. (in Chinese))

(收稿日期:2022-03-21 编辑:胡新宇)

(上接第 90 页)

[17] 牛岩,韩霁昌,雷光宇. 基于粒子群算法的圆形隧洞锚喷支护优化[J]. 地下空间与工程学报, 2017, 13(增刊1): 175-181. (NIU Yan, HAN Jichang, LEI Guangyu. Bolt-shotcrete support optimization of circular tunnel based on particle swarm optimization[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2017, 13(Sup1): 175-181. (in Chinese))

[18] 政府间气候变化专门委员会. 2006 年 IPCC 国家温室气体清单指南[R]. 神奈川: 日本全球环境战略研究所, 2006.

[19] 张鑫,靳春玲,贡力,等. 基于 PSO-RBF 神经网络模型的铁路隧道突水危险性评价[J]. 铁道标准设计, 2022, 66(10): 143-148. (ZHANG Xin, JIN Chunling, GONG Li, et al. Evaluation of water inrush danger in railway tunnel based on PSO-RBF neural network model[J]. Railway Standard Design, 2022, 66(10): 143-148. (in Chinese))

[20] 孔爱良,梁硕,李春来,等. 基于改进粒子群算法的微电网优化运行[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2017, 45(6): 550-555. (KONG Ailiang, LIANG Shuo, LI Chunlai, et al. Optimizing micro-grid operation based on improved PSO [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2017, 45(6): 550-555. (in Chinese))

(收稿日期:2022-05-29 编辑:胡新宇)