

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2021.02.009

考虑风险因素影响的引水隧洞施工方案优选

余佳,焦铮,苏哲,任炳昱,王国浩,肖尧

(天津大学水利工程仿真与安全国家重点实验室,天津 300072)

摘要:为了综合考虑活动时间随机变化、施工机械故障以及塌方、涌水等风险对引水隧洞施工方案优选的影响,实现施工方案的合理选择,提出考虑风险因素影响的引水隧洞施工方案优选方法。该方法建立考虑风险因素影响的隧洞施工方案优化模型;采用 Levy 飞行自适应混沌粒子群(LFACPSO)优化算法来求解优化模型以获得 Pareto 方案集,该算法引入 Levy 飞行来提高粒子跳出局部最优的能力,同时采用混沌算法来初始化粒子,并自适应地调整粒子惯性权重系数;采用直觉模糊熵权幂平均(IFEWPA)方法,在考虑专家评价犹豫度的条件下从待选方案集中优选出最终方案。工程实例应用表明,相比不考虑风险影响的施工方案仿真进度和计划进度,综合考虑风险因素影响的仿真进度更贴近工程实际,证明了考虑风险因素影响的引水隧洞施工方案优选方法的有效性;与自适应混沌粒子群(ACPSO)算法、粒子群优化(PSO)算法和带精英策略的非支配排序遗传(NSGA-II)算法相比,LFACPSO 算法所得的 Pareto 优化方案数量平均值最大,标准差最小,表明了 LFACPSO 算法的优越性与鲁棒性。

关键词:引水隧洞;施工方案优选;施工风险因素;Levy 飞行自适应混沌粒子群算法;直觉模糊熵权幂平均方法;Pareto 方案集

中图分类号:TV512 文献标志码:A 文章编号:1000-1980(2021)02-0155-07

Construction scheme optimization of diversion tunnel considering influence of risk factors

YU Jia, JIAO Zheng, SU Zhe, REN Bingyu, WANG Guohao, XIAO Yao

(State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract:To comprehensively consider the influence of activity time randomness, machinery failure, collapse, water inflow and other risks on the construction scheme optimization of a diversion tunnel, and realize a reasonable selection of the construction scheme, the construction scheme optimization method of diversion tunnel is proposed considering the influence of risk factors. To begin with, the optimization model of construction scheme considering risk factors is established. In addition, an Levy flight adaptive chaos particle swarm optimization (LFACPSO) algorithm is proposed to solve the model for obtaining the Pareto scheme set. In this algorithm, the Levy flight is adopted to improve particles' ability of jumping out of the local optimum, then the chaos algorithm is used to initialize particles, and the inertia weight coefficient is adjusted adaptively. Finally, the IFEWPA method is used to select the final scheme considering the experts' hesitation degree from alternative scheme set. The application shows that, compared with construction scheme simulation schedule neglecting risk factors and planned schedule, the simulation schedule considering risk factors is closer to the actual schedule, which proves the effectiveness of the construction scheme optimization method considering risk factors. Furthermore, LFACPSO algorithm is compared with ACPSO, PSO and NSGA-II algorithms, and the results prove the superiority and robustness of LFACPSO algorithm, with the maximum mean value and the minimum standard deviation.

Key words: diversion tunnel; construction scheme optimization; construction risk factors; LFACPSO; IFEWPA; Pareto scheme set

引水隧洞施工过程面临着活动时间随机变化、施工机械故障以及塌方、涌水等风险因素。然而,现有的施工方案优选研究缺乏考虑风险因素的影响,这导致无法获得合理的施工方案。因此,在考虑风险因素影响下进行引水隧洞施工方案优选具有重要的意义。考虑到隧洞施工待选方案数量庞大,有必要首先采用多目标优化方法筛选出 Pareto 方案集,然后综合考虑专家意见从中优选出最终方案。

基金项目:国家自然科学基金(51679165);国家重点研发计划(2016YFC0401806);国家自然科学基金创新研究群体项目(51621092)
作者简介:余佳(1992—),女,博士研究生,主要从事水电路地下工程施工智能仿真与风险分析研究。E-mail:yj1592533724@126.com
通信作者:任炳昱,副教授。E-mail:renby@tju.edu.cn
引用本文: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.

在进行多目标优化问题^[1]求解时,粒子群优化(PSO)算法由于结构简单、收敛速度快、参数设置少等优点,已被广泛应用^[2-3]。针对传统 PSO 算法易陷入早熟收敛等缺点,国内外学者通过改进算法惯性权重和加速因子^[4],与人工鱼群算法^[5]、模拟退火算法^[6]、蚁群算法^[7]等结合来优化粒子的搜索精度和效率。本文提出 Levy 飞行自适应混沌粒子群(LFACPSO)算法,利用 Levy 飞行的强跳跃特性来改进粒子的更新方式,提高粒子跳出局部最优的能力;此外,采用混沌算法来初始化粒子,并自适应地调整粒子惯性权重系数以提高粒子的局部和全局搜索能力。

国内外学者对水电地下工程和大坝工程施工方案优选进行了研究,如毕磊等^[8]提出了基于数据包络分析的隧洞施工方案评价与优选方法,赵延喜等^[9]利用层次分析法和模糊集法构建了 TBM 施工风险综合评判计算模型,何伟^[10]利用灰色系统方案决策理论进行隧洞施工方案优选,张孝远等^[11-13]采用模糊多属性决策法、逼近理想解法、数据驱动的 D-AHP 方法对大坝工程施工方案进行了优选。虽然这些研究考虑了模糊、灰色等不确定性,但是现有研究缺乏从活动时间随机变化、施工机械故障以及塌方、涌水等风险因素入手分析其对优化过程的影响,且在方案优选过程中缺乏考虑决策者的犹豫度。因此,本文提出考虑风险因素影响的引水隧洞施工方案优选方法,建立综合考虑风险因素影响的施工方案优化模型,采用 LFACPSO 算法求解模型获得 Pareto 方案集,并采用多属性群决策直觉模糊熵权幂平均(IFEWPA)方法,在考虑专家犹豫度条件下从 Pareto 方案集中优选出最佳方案。

1 考虑风险因素影响的引水隧洞施工方案优选方法

1.1 考虑风险因素影响的引水隧洞施工方案优化数学模型

建立考虑风险因素影响的引水隧洞施工方案优化数学模型。以考虑风险因素影响的工期和成本均值最小为目标建立目标函数。由于引水隧洞工程可能涉及多个施工标段,因此优化目标中常包含多个工期目标,目标函数 g 为

$$g = \min(\bar{T}_1, \bar{T}_2, \dots, \bar{T}_Z, \bar{C}) \tag{1}$$

其中
$$\bar{T}_u = f(y_{1,1}, \dots, y_{1,r_1}, \dots, y_{s,1}, \dots, y_{s,r_s}) \quad (u = 1, 2, \dots, Z)$$

$$\bar{C} = \sum_{i=1}^s \sum_{j=1}^{r_i} \bar{c}_{i,j} y_{i,j} \quad \bar{c}_{i,j} = \sum_{k=1}^l e_k n_{i,j,k} \bar{t}_{i,j}$$

约束条件为

$$\sum_{j=1}^{r_i} y_{i,j} = 1 \quad (i = 1, 2, \dots, s) \tag{2}$$

其中
$$y_{i,j} = \begin{cases} 1 & \text{当第 } i \text{ 个工序的第 } j \text{ 个方案被选中} \\ 0 & \text{当第 } i \text{ 个工序的第 } j \text{ 个方案未被选中} \end{cases}$$

式中: $y_{i,j}$ ——索引变量; s ——需进行方案优选的工序数量,个; $j=1,2,\dots,r_i$; r_i ——第 i 个工序的待选方案数量,个; $\bar{T}_u$ ——第 u 个工期目标, d ,为方案集合 $\{y_{1,1}, \dots, y_{1,r_1}, \dots, y_{s,1}, \dots, y_{s,r_s}\}$ 下的仿真工期均值; Z ——工期目标的数量,个; $\bar{C}$ ——成本均值,元; $\bar{c}_{i,j}$ ——第 i 个工序在第 j 个方案下的平均费用,元,此处为直接费用^[14]; l ——施工机械设备种类,个; e_k ——第 k 种施工机械每台每天的费用,元; $n_{i,j,k}$ ——工序 i 在第 j 个方案中施工机械 k 的数量,台; $\bar{t}_{i,j}$ ——工序 i 在方案 j 下的平均持续时间, d 。

1.2 考虑风险因素影响的引水隧洞施工仿真方法

引水隧洞施工中面临着活动时间随机波动、施工机械故障以及塌方、涌水等风险的影响。采用网络计划技术(CPM)和循环网络仿真技术(CYCLONE)耦合方法^[14]来模拟各类风险综合影响下的隧洞施工过程。其中,活动时间随机波动通过概率分布来表示^[15];施工机械故障风险的影响通过为钻机、自卸汽车、装载机等机械赋予故障间隔时间及故障处理时间参数,并将其考虑到钻孔和出渣活动模拟过程中;塌方、涌水等突发地质风险事件的影响通过采用贝叶斯网络^[16]计算风险发生概率并将其嵌入 CYCLONE 模型来实现。采用贝叶斯网络计算风险事件发生概率的过程详见文献[17]。

1.3 基于 LFACPSO 算法的引水隧洞施工方案多目标优化方法

1.3.1 LFACPSO 算法

1.3.1.1 基于 Levy 飞行的粒子更新方法

Levy 飞行是一种非高斯随机过程,是一种短距离搜索与偶尔长距离行走相间的行走方式,其步长 S 服

从 Levy 分布。目前常采用 Mantegna 等^[18]提出的算法模拟 Levy 分布:

$$S = \frac{\mu}{|v|^{1/\beta}} \tag{3}$$

式中: S ——随机步长; β, μ, v ——Levy 分布的控制参数, $0<\beta<2$,取 $\beta=1.5$ ^[19], μ, v 服从正态分布, $\mu \sim N(0, \sigma_\mu^2), v \sim N(0, \sigma_v^2)$,且有:

$$\sigma_\mu = \left[\frac{\Gamma(1+\beta) \sin \frac{\pi\beta}{2}}{2^{(\beta-1)/2} \beta \Gamma(\frac{1+\beta}{2})} \right]^{\frac{1}{\beta}} \quad \sigma_v = 1 \tag{4}$$

在优化方案求解过程中,当粒子停留在某一局部位置的次数大于预设值时(本文取 10 次^[20]),则在粒子速度更新公式中引入 Levy 飞行,以使其跳出局部最优。基于 Levy 飞行的粒子速度和位置更新公式如下:

$$v_{i,t+1} = \omega L(x_{i,t}) + c_1 \zeta(p_{i,t} - x_{i,t}) + c_2 \eta(p_t - x_{i,t}) \tag{5}$$

$$x_{i,t+1} = x_{i,t} + v_{i,t+1} \tag{6}$$

其中 $L(x_{i,t}) = 0.01 S x_{i,t} \text{random}(\text{size}(x_{i,t}))$

式中: $x_{i,t}$ ——第 i 个粒子在第 t 代进化过程中的位置; $p_{i,t}$ ——第 i 个粒子搜索到的历史最优位置; p_t ——整个粒子群搜索到的历史最优位置; $v_{i,t+1}$ ——第 i 个粒子在 $t+1$ 代进化过程中的速度; ω ——惯性权重; c_1, c_2 ——学习因子,取 $c_1 = c_2 = 2.0$; ζ, η ——符合 $[0, 1]$ 均匀分布的随机数; $\text{size}(x_{i,t})$ —— $x_{i,t}$ 的维度; $\text{random}(\text{size}(x_{i,t}))$ ——在 $x_{i,t}$ 各维度上生成 $0 \sim 1$ 随机数。

1.3.1.2 粒子混沌初始化

混沌运动具有遍历性、随机性、对初值的敏感性等特点^[21]。采用混沌序列来初始化粒子有助于提高种群多样性及粒子搜索的遍历性,克服随机初始化的不足。采用如下的 Logistic 混沌方程:

$$Z_{q+1} = dZ_q + (1 - Z_q) \tag{7}$$

式中: Z_q ——第 q 次迭代后的混沌变量取值; d ——混沌系统的控制参数,取 $d=4$ 。初始值 $Z_0 \in (0, 1)$ 且 $Z_0 \notin \{0.25, 0.50, 0.75\}$ 时,系统处于完全的混沌状态。

1.3.1.3 自适应惯性权重

采用自适应调整惯性权重的策略,使惯性权重随迭代次数的改变而变化。惯性权重 ω 的调整方式如下:

$$\omega_t = \frac{(\omega_{\max} - \omega_{\min})t}{t_{\max}} + \omega_{\min} \tag{8}$$

式中: ω_t ——第 t 次迭代的惯性权重值; $\omega_{\max}, \omega_{\min}$ ——最大、最小惯性权重; $t_{\max}$ ——最大迭代次数。

1.3.2 基于 LFACPSO 算法的施工方案多目标优化流程

基于 LFACPSO 算法的施工方案多目标优化流程如下:(a) 确定每个工序的待选方案,采用考虑风险因素影响的仿真方法计算各方案下的目标值;(b) 初始化算法参数,包括粒子数量、最大迭代次数、学习因子 c_1 和 c_2 、最大和最小惯性权重等;(c) 采用混沌理论初始化粒子,其中一个粒子对应一种施工方案组合;(d) 计算初始粒子的适应度值,并将粒子当前的适应度值设为其初始最优适应度值;(e) 选择领导粒子,判断粒子位置未更新的次数是否大于 10 次,若未大于 10 次,则采用传统的粒子更新公式^[22]来更新速度和位置,否则,采用式(5)(6)来更新粒子的速度和位置;(f) 选取非支配解,并根据式(8)更新惯性权重;(g) 判断算法是否满足终止条件,若满足,则输出 Pareto 方案集合,否则,返回步骤(e)继续迭代。

1.4 施工方案多属性群决策 IFEWPA 方法

施工方案多属性群决策 IFEWPA 方法首先采用 IFPWA 算子,在考虑专家犹豫度的条件下进行专家意见融合,获得集成矩阵,然后采用直觉模糊交叉熵来计算属性权重,以优选出最终方案。

1.4.1 基于 IFPWA 算子的专家意见融合方法

将专家评价用直觉模糊数来表示,形成直觉模糊评价矩阵。第 k 个专家的直觉模糊矩阵 A_k 为

$$A_k = \begin{bmatrix} \alpha_{1,1,k} & \cdots & \alpha_{1,n,k} \\ \vdots & & \vdots \\ \alpha_{m,1,k} & \cdots & \alpha_{m,n,k} \end{bmatrix} \tag{9}$$

式中: $\alpha_{i,j,k}$ ——专家 k 对方案 i 中目标 j 的直觉模糊评价, $\alpha_{i,j,k}=(\mu_{i,j,k},v_{i,j,k},\gamma_{i,j,k})$; $\mu_{i,j,k},v_{i,j,k},\gamma_{i,j,k}$ ——专家评价的隶属度、非隶属度、犹豫度, $\mu_{i,j,k},v_{i,j,k},\gamma_{i,j,k}\in[0,1]$; m ——待选方案数量; n ——优化目标数量。

采用 Song 等^[23]提出的方法计算直觉模糊集之间的相似度,并替代 P-A 算子中的支持度函数,得到 IFPWA 算子,该算子的支持度函数 Sup 计算公式为

$$\text{Sup}(\alpha_{i,j,k},\alpha_{i,j,l})=\frac{1}{2}\left[\sqrt{\mu_{i,j,k}\mu_{i,j,l}}+2\sqrt{v_{i,j,k}v_{i,j,l}}+\sqrt{\gamma_{i,j,k}\gamma_{i,j,l}}+\sqrt{(1-v_{i,j,k})(1-v_{i,j,l})}\right] \tag{10}$$

$$T(\alpha_{i,j,k})=\sum_{l=1,l\neq k}^p\lambda_l\text{Sup}(\alpha_{i,j,k},\alpha_{i,j,l}) \tag{11}$$

式中: $\text{Sup}(\alpha_{i,j,k},\alpha_{i,j,l})$ —— $\alpha_{i,j,l}$ 对 $\alpha_{i,j,k}$ 的支持度函数; $T(\alpha_{i,j,k})$ ——所有变量对 $\alpha_{i,j,k}$ 的总支持度; p ——专家数量; λ_l ——专家 l 评价的重要性程度, $\sum_{l=1}^p\lambda_l=1$ 。

利用 IFPWA 算子将 p 个直觉模糊评价矩阵 $A_k(k=1,2,\cdots,p)$ 融合为集成评价矩阵 A :

$$A=\text{IFPWA}(A_1,A_2,\cdots,A_p)=\left(1-\prod_{k=1}^p(1-\mu_{i,j,k})^{\xi_{i,j,k}},\prod_{k=1}^p(v_{i,j,k})^{\xi_{i,j,k}},\prod_{k=1}^p(1-\mu_{i,j,k})^{\xi_{i,j,k}}-\prod_{k=1}^p(v_{i,j,k})^{\xi_{i,j,k}}\right) \tag{12}$$

其中

$$\xi_{i,j,k}=\frac{\lambda_k[1+T(\alpha_{i,j,k})]}{\sum_{q=1}^p\lambda_q[1+T(\alpha_{i,j,q})]}$$

式中: $\xi_{i,j,k}$ ——各专家评价直觉模糊集之间的相互支持程度, ξ 越大则相互支持程度越高。

1.4.2 基于直觉模糊交叉熵的属性权重计算方法

存在直觉模糊集 $A=\{\langle x,\mu_A(x),v_A(x)\rangle\mid x\in X\}$ 和 $B=\{\langle x,\mu_B(x),v_B(x)\rangle\mid x\in X\}$,其中 $\mu_A(x),v_A(x)$ 分别为有限非空集 X 中元素 x 对集合 A 的隶属度和非隶属度, $\mu_B(x),v_B(x)$ 分别为元素 x 对集合 B 的隶属度和非隶属度。记 $a=1+\mu_A(x)-v_A(x),b=1+\mu_B(x)-v_B(x),c=1-\mu_A(x)+v_A(x),d=1-\mu_B(x)+v_B(x)$,则 A 与 B 的直觉模糊交叉熵为

$$C(A,B)=\sum_{x\in X}\left(\frac{1}{2}a\log_2\frac{2a}{a+b}\right)+\sum_{x\in X}\left(\frac{1}{2}c\log_2\frac{2c}{c+d}\right) \tag{13}$$

由于上述直觉模糊交叉熵不满足对称性,故直觉模糊集的对称交叉熵为

$$C^*(A,B)=C(A,B)+C(B,A) \tag{14}$$

在多属性决策过程中,属性 G_j 的相似度 $F(G_j)$ 可表示为

$$F(G_j)=\frac{1}{m(m-1)}\sum_{i=1}^m\sum_{k=1,k\neq i}^m[1-C^*(r_{i,j},r_{k,j})] \tag{15}$$

$F(G_j)$ 越高,表明属性 G_j 越不重要,一般赋予较低的权重值。因此,对于 m 个方案 n 个属性的多属性决策问题,属性 $G_j(j=1,2,\cdots,n)$ 的权重 w_j 可由下式计算得到:

$$w_j=\frac{1-F(G_j)}{\sum_{j=1}^n[1-F(G_j)]} \tag{16}$$

式中: $r_{i,j}$ ——集成评价矩阵中第 i 个方案下第 j 个目标的直觉模糊数。

确定所有属性权重 $w_j(j=1,2,\cdots,n)$ 后,将 m 个待选方案的 n 个指标综合起来,得到全局偏好值 R_i (式(17)),根据该值将所有待选方案排序即可获得最优方案。

$$R_i=\left(1-\prod_{j=1}^n(1-\mu_{i,j})^{w_j},\prod_{j=1}^n(v_{i,j})^{w_j},\prod_{j=1}^n(1-\mu_{i,j})^{w_j}-\prod_{j=1}^n(v_{i,j})^{w_j}\right)\quad(i=1,2,\cdots,m) \tag{17}$$

式中: μ_{ij},v_{ij} ——集成矩阵 A 中第 i 个方案下第 j 个属性的直觉模糊评价的隶属度与非隶属度。

方案 i 的得分函数值 t_i 为

$$t_i=1-\prod_{j=1}^n(1-\mu_{i,j})^{w_j}-\prod_{j=1}^n(v_{i,j})^{w_j}\quad(i=1,2,\cdots,m) \tag{18}$$

2 工程应用

某引水隧洞 C2 标段采用钻爆法施工,包括 1 号隧洞和 2 号隧洞的西端洞段,1 号隧洞长 4 700 m,2 号隧洞长 6 000 m。1 号、2 号隧洞均分成上部和下部开挖,且两条隧洞之间每间隔 500 m 布置一条横通道,整个标段共设置 8 条横通道。采用考虑风险因素影响的施工方案优选方法进行 C2 标段施工方案优选。

2.1 基于 LFACPSO 算法的施工方案多目标优化

C2 标段施工方案优选以总工期 $\bar{T}_1$ (即 2 号隧洞工期)、1 号隧洞工期 $\bar{T}_2$ 和及施工成本 $\bar{C}$ 最小为目标。各条隧洞不同施工部位可供选择的施工机械见表 1。

采用考虑风险因素影响的引水隧洞施工仿真方法获得各工序在不同施工机械方案下的工期及成本,然后采用 LFACPSO 算法进行施工方案多目标求解。对 200 个粒子进行混沌初始化,设置最大迭代次数为 1 000 次,算法学习因子 $c_1=c_2=2.0$,最大惯性权重 $\omega_{\max}=1.0$,最小惯性权重 $\omega_{\min}=0.2$ 。通过算法求解获得 27 个 Pareto 方案如图 1 所示,图中圆的半径越大,表示成本越高。

2.2 基于 IFEWPA 方法的施工方案多属性群决策

邀请 3 位专家分别对 27 个 Pareto 方案中的总工期 $\bar{T}_1$ 、1 号隧洞工期 $\bar{T}_2$ 、成本 $\bar{C}$ 3 个指标进行评价,得到每个专家评价的直觉模糊矩阵,并通过式 (10) (11) 计算评价矩阵的支持度。本文认为 3 位专家的重要性相同,故取 $\lambda_1=\lambda_2=\lambda_3=1/3$,计算得到 3 位专家评价矩阵之间的总相互支持度矩阵。将支持度矩阵代入 IFPWA 算子的融合式 (12) 中可以得到综合 3 位专家意见的集成评价结果如图 2 所示。

根据式 (13) 和式 (14) 分别得到对于总工期 ($\bar{T}_1$)、1 号隧洞工期 ($\bar{T}_2$) 及成本 ($\bar{C}$) 目标,各方案之间的直觉模糊交叉熵。然后利用式 (15) 获得各目标的相似度分别为 $F(\bar{T}_1)=0.812\ 3$ 、 $F(\bar{T}_2)=0.851\ 1$ 、 $F(\bar{C})=0.964\ 4$ 。根据式 (16) 计算总工期、1 号隧洞工期及成本的权重分别为 $w_1=0.50$ 、 $w_2=0.40$ 、 $w_3=0.10$ 。

根据获得的各目标权重及集成的专家评价结果,由式 (17) 计算得到各施工方案的全局偏好值,并根据式 (18) 获得相应的得分函数值。由图 3 可知,各方案的得分函数值均不相同,且方案 17 的得分函数值最大,为综合最优方案。在方案 17 中,1 号隧洞上部配置 21 台手风钻、10 台自卸汽车、2 台装载机,2 号隧洞上部配置 21 台手风钻、12 台自卸汽车、2 台装载机,1 号隧洞下部配置 6 台手风钻、2 台自卸汽车、1 台装载机,2 号隧洞下部配置 10 台手风钻、3 台自卸汽车、1 台装载机,横通道配置 6 台手风钻、4 台自卸汽车、1 台装载机。

2.3 对比分析与讨论

为了证明本文所提出方法的有效性,以 2 号隧洞上部 800 m 开挖段为对象,将优选方案 17 下考虑风险综合影响的仿真进度与不考虑风险影响的仿真进度、实际进度、计划进度进行对比,结果如图 4 所示。由图 4 可知,在 800 m 段开挖过

表 1 C2 标段可选机械参数

Table 1 Optional machinery parameters of C2 construction block

施工部位	手风钻/台	三臂台车/台	装载机/台	自卸汽车/台
1 号、2 号隧洞上部	16 ~ 21	1 ~ 2	1	5 ~ 6
1 号、2 号隧洞上部	16 ~ 21	1 ~ 2	2	10 ~ 12
1 号、2 号隧洞下部	4 ~ 10	0	1	2 ~ 4
横通道	4 ~ 10	1	1	3 ~ 5

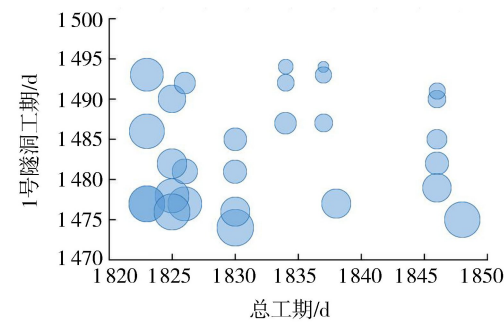


图 1 Pareto 方案集

Fig. 1 Pareto scheme set

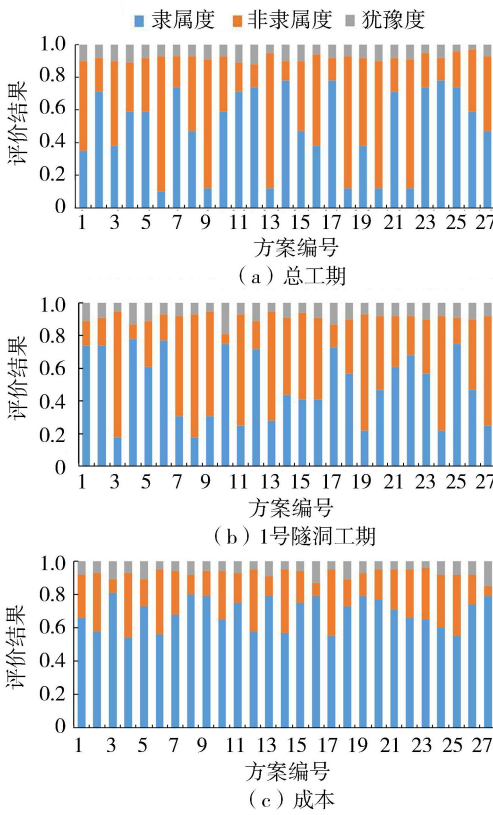


图 2 专家集成评价结果

Fig. 2 Integrated evaluation results of experts

程中,相比于不考虑风险影响的仿真进度和计划进度,考虑风险综合影响的仿真进度与实际进度更加贴近。在完成 800 m 开挖时,实际工期为 175 d,考虑风险综合影响的平均仿真工期为 169 d,不考虑风险影响的平均仿真工期为 155 d,计划工期为 159 d,考虑风险综合影响的仿真工期更接近实际工期。

为了证明提出的 LFACPSO 算法在进行隧洞施工方案多目标优化方面的优越性,选取不带 Levy 飞行的自适应混沌粒子群(ACPSO)算法、传统的 PSO 算法和带精英策略的非支配排序遗传(NSGA-II)算法分别进行优化模型的求解。各算法的初始种群均设置为 200 个,迭代次数为 1 000 次,每种算法分别重复计算 10 次,并对 10 次计算的结果进行对比分析,结果如图 5 所示。

从算法的优化结果来看,LFACPSO 算法所得的平均 Pareto 优化方案数量最大,为 24.6 个,而 ACPSO 算法、PSO 算法、NSGA-II 算法所得的平均方案数量分别为 20.6 个、21 个、20.7 个。由此可知,相比其他算法,LFACPSO 算法求解方案多目标优化模型的能力更强,所得 Pareto 方案集更加完备。

从算法的鲁棒性来看,LFACPSO、ACPSO、PSO、NSGA-II 算法 10 次计算所得 Pareto 方案数量的标准差分别为 2.61、5.12、5.10、3.95。对比其他算法,LFACPSO 算法求解结果更稳定,鲁棒性更高。

3 结 语

本文提出了考虑风险因素影响的引水隧洞施工方案优选方法。该方法首先在综合考虑活动时间随机变化、施工机械故障以及塌方、涌水等风险因素影响下建立施工方案优化模型,克服了现有施工方案优选研究缺乏考虑风险因素影响的不足。其次,针对传统 PSO 算法局部搜索能力差、易陷入早熟收敛的不足,提出了 LFACPSO 算法来求解优化模型,该算法采用基于 Levy 飞行的粒子更新方式来提高粒子跳出局部最优的能力,同时采用混沌算法来初始化粒子,并自适应地调整粒子惯性权重系数以提高算法的全局与局部搜索能力。最后,针对现有施工方案优选研究未能体现专家犹豫度的不足,提出了施工方案多属性群决策的 IFEWPA 方法,在考虑专家犹豫度的条件下优选出最终方案。相比计划进度和不考虑风险影响的仿真进度,综合考虑风险影响的仿真进度与实际进度更加吻合,证明了本文提出方法的有效性。将 LFACPSO 算法与 ACPSO、PSO 和 NSGA-II 算法进行对比,结果表明,LFACPSO 算法所得的 Pareto 方案集更加完备,结果更稳定,证明了该算法的有效性与鲁棒性。

参考文献:

[1] 袁艳斌,杨惜岁,陈丽雅,等. 基于多目标准则的流域站网优化[J]. 河海大学学报(自然科学版),2019,47(2):102-107. (YUAN Yanbin, YANG Xisui, CHEN Liya, et al. Optimization of the basin hydrologic network based on multi-objective criteria [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2019, 47(2): 102-107. (in Chinese))

[2] AMINBAKSH S, SONMEZ R. Discrete particle swarm optimization method for the large-scale discrete time-cost trade-off problem[J]. Expert Systems with Applications, 2016, 51: 177-185.

[3] 邓显羽,彭勇,叶碎高,等. 粒子群算法在水库(群)优化调度研究中的应用综述[J]. 水利水电科技进展, 2010, 30(5): 90-94. (DENG Xianyu, PENG Yong, YE Suigao, et al. Review on application of particle swarm optimization to operation of

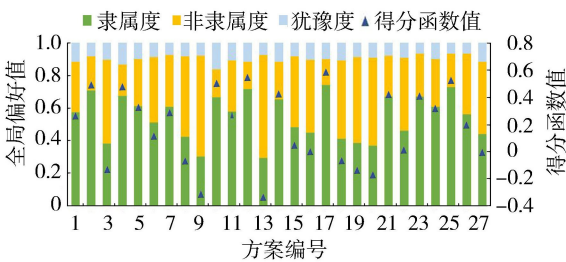


图3 施工方案的全局偏好值及得分函数值
Fig.3 Global preference values and score function values of construction scheme

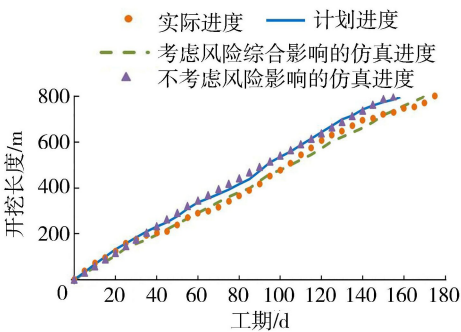


图4 2号隧洞上部施工进度对比
Fig.4 Comparison of construction schedule of number 2 tunnel upper section

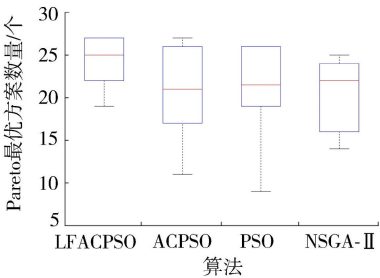


图5 方案优化模型的不同算法求解结果对比
Fig.5 Comparison of solution results of different algorithms for scheme optimization model

- reservoirs (groups)[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2010, 30(5): 90-94. (in Chinese))
- [4] 李孝全,黄超,徐晨洋,等. 基于改进 PSO-LSSVM 和蒙特卡洛法的电力系统可靠性评估[J]. 河海大学学报(自然科学版),2016,44(5):458-464. (LI Xiaoquan, HUANG Chao, XU Chenyang, et al. Reliability evaluation of power system based on improved PSO-LSSVM and Monte Carlo simulation[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2016, 44(5):458-464. (in Chinese))
- [5] 袁光辉,樊重俊,张惠珍,等. 一种新的粒子群算法与人工鱼群算法的混合算法[J]. 上海理工大学学报,2014,36(3):223-226. (YUAN Guanghui, FAN Chongjun, ZHANG Huizhen, et al. Hybrid algorithm integrating new particle swarm optimization and artificial fish school algorithm[J]. Journal of University of Shanghai for Science and Technology, 2014, 36(3): 223-226. (in Chinese))
- [6] 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))
- [7] 陈伟,蒋艳. 改进的蚁群与粒子群算法求解 TSP 问题[J]. 信息技术,2016(5):162-165. (CHEN Wei, JIANG Yan. Improving ant colony algorithm and particle swarm algorithm to solve TSP problem[J]. Information Technology, 2016(5):162-165. (in Chinese))
- [8] 毕磊,钟登华,胡连兴,等. 基于数据包络分析的隧洞施工仿真多方案评价与优选[J]. 水力发电学报,2014,33(1):234-240. (BI Lei, ZHONG Denghua, HU Lianxing, et al. Project evaluation and optimization of tunnel construction using DEA simulation and analysis[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2014, 33(1): 234-240. (in Chinese))
- [9] 赵延喜,徐卫亚. 基于 AHP 和模糊综合评判的 TBM 施工风险评估[J]. 岩土力学,2009,30(3):793-798. (ZHAO Yanxi, XU Weiya. Risk assessment of TBM construction for tunnels based on AHP and fuzzy synthetic evaluation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(3):793-798. (in Chinese))
- [10] 何伟. 灰色系统理论在隧洞工程中的应用研究[D]. 西安:西安理工大学,2010.
- [11] 张孝远,周建中,曹广品,等. 基于模糊多属性决策的高混凝土坝浇筑方案优选[J]. 四川大学学报(工程科学版),2011, 43(4):32-38. (ZHANG Xiaoyuan, ZHOU Jianzhong, CAO Guangjing, et al. Fuzzy multiple attribute decision making optimal selection for construction scheme of high concrete dam[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2011, 43(4):32-38. (in Chinese))
- [12] ZHONG Denghua, HU Wei, WU Binping, et al. Dynamic time-cost-quality tradeoff of rockfill dam construction based on real-time monitoring[J]. Journal of Zhejiang University(Science A), 2017, 18(1):1-19.
- [13] ZHANG Jun, ZHONG Denghua, ZHAO Mengqi, et al. An optimization model for construction stage and zone plans of rockfill dams based on the enhanced whale optimization algorithm[J]. Energies, 2019, 12(3):1-29.
- [14] 钟登华,刘东海. 大型地下洞室群施工系统仿真理论方法与应用[M]. 北京:中国水利水电出版社,2003.
- [15] 钟登华,张元坤,吴斌平,等. 基于实时监控的碾压混凝土坝仓面施工仿真可视化分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2016,44(5):377-385. (ZHONG Denghua, ZHANG Yuankun, WU Binping, et al. Simulation and visual analysis for construction of storehouse surface of RCC dam based on real-time monitoring[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2016, 44(5): 377-385. (in Chinese))
- [16] 周建方,张迅伟,唐椿炎. 基于贝叶斯网络的沙河集水库大坝风险分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2012,40(3): 287-293. (ZHOU Jianfang, ZHANG Xunwei, TANG Chunyan. Dam risk analysis of Shaheji Reservoir based on Bayesian network[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2012, 40(3): 287-293. (in Chinese))
- [17] YU Jia, ZHONG Denghua, REN Bingyu, et al. Probabilistic risk analysis of diversion tunnel construction simulation [J]. Computer-aided Civil & Infrastructure Engineering, 2017, 32(9): 748-771.
- [18] MANTEGNA R N, STANLEY H E. Stochastic process with ultraslow convergence to a gaussian the truncated levy flight[J]. Physical Review Letters, 1995, 74(24): 4959.
- [19] YANG Xinshe, DEB S. Engineering optimisation by cuckoo search[J]. International Journal of Mathematical Modelling and Numerical Optimisation, 2010, 1(4):330-343.
- [20] ZHANG Haowei, XIE Junwei, HU Qiyong, et al. A hybrid DPSO with levy flight for scheduling MIMO radar tasks[J]. Applied Soft Computing, 2018, 71:2542-2547.
- [21] 朱新国,张展羽,刘莉. 基于混沌优化 GMDH 网络的灌区地下水水位预测[J]. 河海大学学报(自然科学版),2010,38(3):317-321. (ZHU Xinguo, ZHANG Zhanyu, LIU Li. Prediction of groundwater levels in irrigation districts based on chaos optimization of GMDH neural network[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2010, 38(3):317-321. (in Chinese))
- [22] 李文倩,王乾伟,王飞,等. 基于 Vague 集的地下洞室地震安全评价[J]. 河海大学学报(自然科学版),2017,45(5):413-418. (LI Wenqian, WANG Qianwei, WANG Fei, et al. Seismic safety evaluation of underground cavern with Vague set[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2017, 45(5):413-418. (in Chinese))
- [23] SONG Yafei, WANG Xiaodan, LEI Lei, et al. A novel similarity measure on intuitionistic fuzzy sets with its applications[J]. Applied Intelligence, 2015, 42(2): 252-261.