

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2024.05.006

高拱坝时序多属性施工方案随机智能优化方法

关涛,陈普瑞,肖一峰

(天津大学水利工程仿真与安全国家重点实验室,天津 300350)

摘要:为了解决当前施工方案优化方法大多忽略各关键节点施工进度指标的随机性对施工方案优化的影响,同时属性权重确定方法难以实现对高维度多层次的多属性决策问题进行整体优化的问题,提出了基于前景随机理论和麻雀搜索算法的高拱坝时序多属性施工方案随机智能优化方法。针对高拱坝工程建设特点,基于前景随机理论建立时序多属性随机智能优化模型,提出了基于阶段发展特征的动态参考点设置方法;基于麻雀搜索算法建立最优属性权重及时间权重搜索模型,并以差异最大化思想构造适应度函数,实现模型的求解。工程实例验证结果表明该优化方法具有合理性,优化结果与前景随机占优-CRITIC方法、随机占优方法优化结果一致,且具有更好的方案区分度。

关键词:高拱坝;时序多属性优化;动态参考点;前景随机理论;麻雀搜索算法

中图分类号:TV511

文献标志码:A

文章编号:1000-1980(2024)05-0045-07

Stochastic and intelligent optimization method of time-series multi-attribute construction schemes for high arch dams

GUAN Tao, CHEN Purui, XIAO Yifeng

(State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300350, China)

Abstract: In order to solve the problem that most of the current construction plan optimization methods ignore the impact of the randomness of the construction progress indicators of each key node on the construction plan optimization, and at the same time, it is difficult for the attribute weight determination method to achieve the overall optimization of high-dimensional and multi-level characteristic problems. This paper proposes a stochastic and intelligent optimization method for time-series multi-attribute construction schemes of high arch dams based on the prospect theory (PT) and the sparrow search algorithm (SSA). According to the construction characteristics of high arch dams, a time-series multi-attribute stochastic intelligent optimization model is established based on PT, and a dynamic reference point setting method is built based on the stage development characteristics. The optimal attribute weight and stage weight search model is established based on SSA, and the fitness function is constructed with the idea of maximizing differences to realize the model solving. The results of engineering application show that the proposed method is consistent with the optimization results of the prospect stochastic dominance-CRITIC method (PT-CRITIC) and the stochastic dominance method, and the proposed method has more advantages in scheme discrimination than the other two methods.

Key words: high arch dam; time-series multi-attribute optimization; dynamic reference point; prospect theory; sparrow search algorithm

高拱坝施工是复杂的随机动态过程,数百上千个坝块施工不仅会受到天气因素、现场施工设备运行状态、仓面备仓等众多随机因素影响,同时还需要满足施工导流、坝体控制高差等时空约束条件,因此,其与一般的大体积混凝土施工不同。施工过程仿真为高拱坝施工方案优化与决策提供了重要手段^[1]。基于多施工方案仿真成果,综合考虑各施工进度控制指标,采用智能优化方法得到的综合最优施工方案,可以为现场施工方案制定提供重要依据^[2]。

当前对施工方案优化已有较多研究:刘晓佳等^[3]采用基于熵值法的加权秩和比模型对桥梁的施工方案进行了优化研究;熊高祥^[4]基于价值工程理论构建了绿色施工方案优选模型;杨友炯^[5]提出采用计划评估

基金项目:国家自然科学基金项目(51839007,52222907)

作者简介:关涛(1989—),男,副教授,博士,主要从事水利水电工程施工智能化研究。E-mail:tao.guan@tju.edu.cn

引用本文:关涛,陈普瑞,肖一峰.高拱坝时序多属性施工方案随机智能优化方法[J].河海大学学报(自然科学版),2024,52(5):45-51.

GUAN Tao, CHEN Purui, XIAO Yifeng. Stochastic and intelligent optimization method of time-series multi-attribute construction schemes for high arch dams[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2024, 52(5): 45-51.

和审查技术(PERT方法)进行施工进度优化;关涛等^[6]综合考虑施工过程随机性,基于随机占优度理论实现了施工方案实时优化;钟登华等^[7]考虑混凝土重力坝施工过程中指标权重的变化,将VIKOR扩展方法应用到混凝土重力坝施工方案多属性决策中,提高了施工方案多属性决策的可靠性;余佳等^[8]提出了考虑风险因素影响的引水隧洞施工方案优选方法;Zhao等^[9]构建了以工期和鲁棒性为目标的多目标优化模型,并采用正余弦优化过的灰狼算法进行求解,实现了地下洞室群的施工方案优化;佟大威等^[10]采用极端梯度增强-粒子群优化(XGBoost-PSO)算法对经过变权功效系数法量化评价的重力坝有限元静动力分析结果进行寻优,实现了混凝土重力坝体型设计方案的优化。在高拱坝施工过程中,因施工导流约束,施工进度需满足多个关键节点工期形象面貌要求,同时高拱坝施工过程受到众多随机因素影响,因此高拱坝施工方案优化属于多方案时序多属性随机决策过程。然而以上研究主要以关键节点施工进度形象面貌作为约束条件,并基于整体施工进度指标进行分析,较少考虑各关键节点工期施工进度指标的随机性对方案决策的影响,降低了施工方案优化结果的准确性。

针对多方案时序多属性随机智能优化的研究^[11-16]主要使用区间型变量实现时序多属性决策,然而区间型变量会简化随机指标的特征而使其部分分布特性消失^[6]。针对具有较强随机性的高拱坝施工过程,现有研究难以实现属性指标为具有时序特征的连续型随机变量的方案优化。另一方面属性权重的确定是多属性决策的核心问题^[17-19],已有针对属性权重分析的研究^[20-25]主要针对主客观权重的平衡与融合,大部分的属性权重为单维且数量较少,难以实现具有高维多层次特点的时序多属性决策问题中的权重确定。

综上,当前较少有针对连续性随机变量的时序多属性优化研究,同时多属性决策问题中属性权重确定方法难以适应时序多属性决策问题的高维度多层次的特点,从而不能进行快速整体优化。因此本文提出了耦合前景随机理论(PT)与麻雀搜索算法的高拱坝施工方案时序多属性随机优化方法。基于前景随机理论构建高拱坝施工方案时序多属性优化模型,并综合考虑施工指标在各阶段的发展特点,提出高拱坝施工仿真优化指标动态参考点演进方法;针对当前属性权重确定方法难以适应时序多属性决策问题的高维度多层次特点的问题,将麻雀搜索算法(SSA)引入到属性权重确定方法中,建立属性权重智能搜索模型,以方案差异最大化为目标构建适应度函数,实现各阶段指标权重和时间权重的智能搜索确定,并在此基础上实现高拱坝施工方案智能优化。

1 施工方案时序多属性优化模型

1.1 模型总体框架

高拱坝施工方案时序多属性随机智能优化以施工过程仿真成果为基础^[26-28],根据多方案多次仿真结果,得到各关键节点各施工进度指标的概率密度函数;通过建立动态参考点,采用前景随机理论,针对各阶段施工方案构建各指标施工价值函数,并融合属性权重和时间权重构建施工方案价值函数;综合考虑高拱坝建设过程状态变化,基于麻雀搜索算法,以方案差异最大化为目标构建属性权重智能搜索模型,实现各阶段施工指标的融合与施工方案优化。在进行高拱坝施工方案优化过程中,必须保证施工总工期、关键节点工期形象面貌满足计划要求,同时各方案最大施工强度要小于最大施工能力。

1.2 模型构建

前景随机理论是在综合考虑心理学、博弈论以及决策过程中的非理性心理等因素的基础上进行决策分析的方法,具有参考点依赖性、风险偏好逆转以及损失规避等特点^[29],主要通过价值函数进行方案优劣分析。由于高拱坝施工过程存在较大的复杂性,同时对所在工程效益的发挥具有决定性影响,因此施工方案的优化与决策过程需要综合考虑决策者的非理性心理,以提升优化结果的可靠性。

假设通过仿真分析得到 t 阶段方案 i 的属性指标 j 的概率密度函数为 p_{ijt} ,则基于前景随机理论,得到属性为随机变量条件下 t 阶段方案 i 针对属性指标 j 的前景价值和方案 i 的综合前景价值分别为

$$V_{ijt} = \int \pi(p_{ijt}) \nu(\Delta x_k) \tag{1}$$

$$V_i = \sum_t w_t \sum_j w_{jt} V_{ijt} \tag{2}$$

其中

$$\pi(p_{ijt}) = \begin{cases} p_{ijt}^\gamma / [p_{ijt}^\gamma + (1 - p_{ijt})^\gamma]^{1/\gamma} & x \geq 0 \\ p_{ijt}^\delta / [p_{ijt}^\delta + (1 - p_{ijt})^\delta]^{1/\delta} & x < 0 \end{cases}$$
$$\nu(\Delta x_k) = \begin{cases} (\Delta x_k)^\alpha & \Delta x_k \geq 0, \Delta x_k = x_{ijt} - x_{jt} \\ -\theta(-\Delta x_k)^\beta & \Delta x_k < 0, \Delta x_k = x_{ijt} - x_{jt} \end{cases}$$

式中: V_{ijt} 为 t 阶段方案 i 针对属性指标 j 的前景价值; $\pi(\cdot)$ 为概率权重函数, 为事件发生概率 p 的单调递增对数形式^[30]; $\nu(\cdot)$ 为价值函数; γ 为风险收益态度系数, 取 0.61^[30]; δ 为风险损失态度系数, 取 0.72^[30]; α, β 分别为收益和损失区域价值幂函数的凹、凸程度, 取 $\alpha = \beta = 0.88$ ^[30]; θ 为损失区域比收益区域更陡的特征, 取 2.25^[30]; Δx_k 为指标偏离参考点的程度; x_{ijt} 为 t 阶段方案 i 属性指标 j 的值; x_{jt} 为 t 阶段属性指标 j 的参考点值; w_{jt} 为属性指标 j 在 t 阶段的属性权重; w_t 为 t 阶段的权重。

由于各属性指标量纲不同, 因此需要进行归一化处理。根据不同的属性指标整体方案优化的效果, 将指标分为成本型指标(指标值越小, 整体越优)和效益型指标(指标值越大, 整体越优), 通过归一化, 使得每个指标值均转为效益型指标。

然而高拱坝坝体结构复杂, 施工属性指标的值会随着不同阶段进行变化。因此, 高拱坝施工方案时序优化不仅要考虑到单阶段下方案之间的横向比较, 还应考虑各方案随时间发展各阶段的纵向变化规律间的比较, 否则难以反映方案动态发展态势及动态前景价值。为了实现高拱坝施工过程优化, 需要根据高拱坝施工特点进行动态参考点设置研究。

1.3 连续性随机变量动态参考点设置

为体现高拱坝施工过程中各属性的变化过程, 基于平均发展速度理念, 进行动态参考点设置。郝晶晶等^[11]定义了平均发展速度的概念, 并针对三角模糊数进行了相关算法定义。对于高拱坝施工过程, 属性指标主要为连续性随机变量, 因此需要进行针对高拱坝各关键节点特征设置动态参考点, 基于平均发展速度理念建立的连续性随机变量的动态参考点公式为

$$x_{jt} = \begin{cases} \bar{x}_{jt} & t = 1 \\ \bar{x}_{jt} + h_t \bar{x}_{j(t-1)} & 1 < t \leq l \end{cases} \tag{3}$$

其中

$$\bar{x}_{jt} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \int_j p_{ijt} x_{ijt} dx \quad h_t = s_{jt} - \bar{s}_j \quad s_{jt} = x_{j(t-1)} / x_{jt} \quad \bar{s}_j = (\bar{x}_{j1} / \bar{x}_{jl})^{1/l}$$

式中: $\bar{x}_{jt}$ 为属性指标 j 的期望均值; h_t 为 t 阶段参考点的设置参数; l 为阶段总数; m 为方案总数; s_{jt} 为属性指标 j 在 t 阶段的发展速度; $\bar{s}_j$ 为指标 j 的平均发展速度。

式(3)在实际决策问题中表现为: 当某阶段的方案发展速度超过平均速度时, 其前景值应增大; 当某阶段的方案发展速度低于平均速度时, 其前景值应减小。因此动态参考点能够反映方案在多阶段决策问题中的随时间发展的纵向比较效果, 体现不同方案在各阶段属性指标的变化过程。

1.4 基于麻雀搜索算法的权重确定方法

不同属性指标在不同阶段的属性权重均有所差异, 同时不同阶段价值函数对最终的评价结果也有所差异, 因而属性权重与时间权重之间存在相互影响关系, 仅考虑时间权重或者属性权重均无法实现方案的整体协同优化, 因此高拱坝时序多属性优化问题的权重确定属于高维度多层次优化问题。麻雀搜索算法可以对高维度多层次的变量进行搜索, 因此采用麻雀搜索算法对高拱坝时序多属性优化的属性权重和时间权重进行搜索。

麻雀搜索算法是一种新型自启发算法, 是根据麻雀捕食和反捕食行为建立模型进行迭代寻优, 该算法具有搜索精度高、收敛速度快、稳定性好等特点^[31-33]。

根据麻雀种群在整个捕食行为的过程, 将麻雀种群简化为发现者和加入者, 然后从中随机产生一部分作为警戒者。发现者是麻雀种群中适应度值较高的部分麻雀个体, 负责找寻食物并为整个麻雀种群移动提供方向, 加入者为了找寻食物需要不断监视发现者并向发现者靠近, 种群中的一部分麻雀发现危险成为警戒者, 向种群发出警告信号, 发现者、加入者和警戒者的位置更新公式参见文献[31]。

麻雀搜索算法为群智能优化算法, 寻优过程可以概括为全局搜索和局部开发两个步骤, 先是在搜索空间内进行广泛搜索, 尽可能地发现搜索空间内的可行解, 然后在全局搜索中搜索到较好解的周围通过局部开发提高解的质量, 从而实现对目标问题最优解的搜索^[31]。本文将麻雀搜索算法引入到多属性优化的权重确定

问题中,将高拱坝时序多属性随机智能优化模型中的指标权重和时间权重作为麻雀搜索算法中麻雀的位置坐标,通过麻雀算法对属性权重进行搜索,根据搜索结果进行方案比较,以实现方案优选。

采用方案差异最大化法构建适应度函数,将方案差异最大化设定为目标,使方案之间的综合前景值差异最大化,增强不同方案之间的可比性^[29],同时将约束条件作为惩罚项加入适应度函数中,以实现带约束条件的智能优化^[34]。基于上述思想,构建适应度函数如下:

$$\min F = \frac{2}{\sum_i |V_i - V_o|} + \lambda U$$

(4)

$$\text{s. t.} \begin{cases} \sum_j w_{jt} = 1 \\ \sum_t w_t = 1 \end{cases}$$

(5)

其中

$$U = \sum_i \left| 1 - \sum_j w_{ji} \right| + \left| 1 - \sum_t w_t \right|$$

式中: F 为适应度函数的适应度值,方案之间差异性越大则适应度越小; V_o 为除方案 i 以外任一方案的综合前景值; λ 为稳定系数; U 为约束项。

参照文献[35] 设置稳定系数,由于 U 与各方案综合前景差值相差 1 或 2 个数量级,为平衡适应度函数,取 $\lambda=10$ 。当 U 趋近于 0 时,算法将加强向约束条件内靠拢,当 U 无限趋近于 0 时,约束条件惩罚项将不再影响算法的搜索,说明稳定系数的设置比较科学合理。

2 实例验证

基于最大坝高为 210 m 的某高拱坝第 5 年 3 月 1 日的实时形象面貌进行施工方案优化研究。根据该坝现场施工导流与截流及工期完工时间要求,大坝在各关键节点形象面貌要求见表 1。

根据工程特点,针对大坝悬臂高度进行施工方案优化,共设置 3 套悬臂高度方案^[6],即整体悬臂高度 60 m 与孔口部分悬臂高度 50 m(方案 C1)、整体悬臂高度 70 m 与孔口部分悬臂高度 60 m(方案 C2)、整体悬臂高度 80 m 与孔口部分悬臂高度 70 m(方案 C3)。选定的属性指标包括超前达到关键节点面貌天数(X_1 ,提前为正,滞后为负)、从仿真开始的最大浇筑强度(X_2)、从仿真开始最大浇筑强度均衡性(X_3 ,为最大强度与平均强度比)、平均间歇期(X_4)、超过 14 d 混凝土坝块比例(X_5)。高拱坝施工是一个随机过程,施工仿真具有一定随机性,本文通过多次仿真分析,得到各施工方案在各阶段施工关键属性指标分布。基于 Guan 等^[36]的研究,本文采用正态分布的连续型随机变量对施工关键属性指标进行表达,同时将仿真得到的关键属性指标序列进行归一化,得到仿真结果见表 2。

表 1 关键节点形象面貌要求

Table 1 Requirements for image and appearance of key nodes

序号	关键节点	进度要求
1	第 5 年 5 月底(T1)	最低高程 1 020 m
2	第 5 年 12 月底(T2)	最低高程 1 055 m
3	第 6 年 5 月底(T3)	最低高程 1 100 m
4	第 6 年 9 月底(T4)	浇筑完成

表 2 施工方案仿真分析关键属性指标

Table 2 Key property indicators for simulation analysis of each construction scheme

关键节点	方案	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5
T1	C1	$N(0.46,0.37)$	$N(0.63,0.20)$	$N(0.50,0.23)$	$N(0.63,0.14)$	$N(0.80,0.11)$
	C2	$N(0.19,0.13)$	$N(0.42,0.21)$	$N(0.27,0.23)$	$N(0.61,0.16)$	$N(0.71,0.17)$
	C3	$N(0.16,0.07)$	$N(0.37,0.22)$	$N(0.30,0.15)$	$N(0.54,0.33)$	$N(0.71,0.30)$
T2	C1	$N(0.26,0.23)$	$N(0.54,0.26)$	$N(0.62,0.34)$	$N(0.44,0.33)$	$N(0.49,0.30)$
	C2	$N(0.63,0.30)$	$N(0.37,0.19)$	$N(0.24,0.19)$	$N(0.72,0.26)$	$N(0.71,0.23)$
	C3	$N(0.49,0.33)$	$N(0.42,0.14)$	$N(0.39,0.15)$	$N(0.49,0.21)$	$N(0.52,0.29)$
T3	C1	$N(0.18,0.22)$	$N(0.58,0.23)$	$N(0.59,0.30)$	$N(0.46,0.27)$	$N(0.34,0.20)$
	C2	$N(0.75,0.20)$	$N(0.41,0.19)$	$N(0.23,0.16)$	$N(0.87,0.35)$	$N(0.83,0.32)$
	C3	$N(0.57,0.22)$	$N(0.50,0.13)$	$N(0.27,0.1)$	$N(0.80,0.13)$	$N(0.78,0.12)$
T4	C1	$N(0.24,0.19)$	$N(0.58,0.23)$	$N(0.63,0.26)$	$N(0.36,0.25)$	$N(0.32,0.23)$
	C2	$N(0.59,0.19)$	$N(0.41,0.19)$	$N(0.30,0.22)$	$N(0.84,0.15)$	$N(0.77,0.15)$
	C3	$N(0.75,0.16)$	$N(0.50,0.13)$	$N(0.21,0.15)$	$N(0.85,0.08)$	$N(0.79,0.13)$

基于表 2 和式(3) 计算关键属性指标动态参考点的值见表 3。基于前景随机理论和式(1)(2) 得到关键属性指标前景价值见表 4。

表 3 关键属性指标动态参考点的值

Table 3 Dynamic reference points of each index of key properties

关键节点	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5
T1	0. 27	0. 47	0. 68	0. 41	0. 26
T2	0. 39	0. 45	0. 42	0. 62	0. 76
T3	0. 65	0. 42	0. 49	0. 54	0. 42
T4	0. 54	0. 59	0. 46	0. 87	0. 73

表 4 关键属性指标前景价值

Table 4 Prospective value of each indicator of key properties

关键节点	方案	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5
T1	C1	0. 659	0. 644	-1. 235	1. 010	2. 254
	C2	-0. 616	-0. 484	-2. 619	0. 906	1. 908
	C3	-0. 833	-0. 780	-2. 516	0. 423	1. 848
T2	C1	-0. 931	0. 275	0. 719	-1. 226	-1. 741
	C2	0. 954	-0. 611	-1. 223	0. 330	-0. 449
	C3	0. 257	-0. 287	-0. 279	-0. 910	-1. 566
T3	C1	-3. 018	0. 645	0. 273	-0. 674	-0. 599
	C2	0. 357	-0. 209	-1. 730	1. 322	1. 692
	C3	-0. 649	0. 338	-1. 494	1. 158	1. 597
T4	C1	-1. 992	-0. 196	0. 675	-0. 125	-0. 121
	C2	0. 110	-1. 213	-1. 109	-0. 329	0. 119
	C3	0. 929	-0. 648	-1. 709	-0. 228	0. 247

以式(4) 为适应度函数,自变量为 w_{ji} 、 w_t , 设定自变量上限为 0、下限为 1, 根据 Xue 等^[31] 的研究, 设定最大迭代次数为 1 000, 麻雀数量为 100, 搜索维度为 24, 安全阈值为 0. 8, 发现者比例为 0. 2, 警戒者比例为 0. 1, 得到结果如下: $w_1 = \{w_{j1} | j = 1, 2, \cdots, 5\} = \{0. 291, 0. 199, 0. 167, 0. 133, 0. 210\}$ 、 $w_2 = \{w_{j2} | j = 1, 2, \cdots, 5\} = \{0. 265, 0. 164, 0. 110, 0. 299, 0. 162\}$ 、 $w_3 = \{w_{j3} | j = 1, 2, \cdots, 5\} = \{0. 535, 0. 104, 0. 106, 0. 112, 0. 143\}$ 、 $w_4 = \{w_{j4} | j = 1, 2, \cdots, 5\} = \{0. 101, 0. 495, 0. 142, 0. 117, 0. 145\}$ 、 $\{w_t | t = 1, 2, 3, 4\} = \{0. 138, 0. 375, 0. 354, 0. 133\}$, 计算得到综合前景值为 $V = \{-0. 840, 0. 218, -0. 196\}$ 。因为在属性指标归一化时, 本文将属性指标统一转化为效益型指标, 因此方案 2 为最优。为验证本文方法(简称 M1) 的合理性和优越性, 同时采用 CRITIC 方法(即前景随机占优-CRITIC 方法, 简称 M2) 确定属性权重与时间权重结合时序属性指标进行施工进度方案分析, 得到各阶段权重为: $w_1 = \{w_{j1} | j = 1, 2, \cdots, 5\} = \{0. 187, 0. 159, 0. 307, 0. 295, 0. 052\}$ 、 $w_2 = \{w_{j2} | j = 1, 2, \cdots, 5\} = \{0. 221, 0. 141, 0. 311, 0. 177, 0. 150\}$ 、 $w_3 = \{w_{j3} | j = 1, 2, \cdots, 5\} = \{0. 272, 0. 098, 0. 266, 0. 168, 0. 196\}$ 、 $w_4 = \{w_{j4} | j = 1, 2, \cdots, 5\} = \{0. 476, 0. 107, 0. 337, 0. 021, 0. 058\}$ 及时间权重 $\{w_t | t = 1, 2, 3, 4\} = \{0. 300, 0. 129, 0. 290, 0. 281\}$, 最终得到各方案综合前景值为 $V = \{-0. 454, 0. 228, 0. 146\}$, 因此方案 2 为最优。采用关涛等^[6] 的方法(即随机占优方法, 简称 M3) 对整体施工进度方案进行优化分析, 得到各方案综合前景值 $V = \{0. 053, 0. 289, -0. 342\}$, 方案 2 最优。M2 和 M3 均认为方案 2 最优, 与本文方法所得结果一致, 同时经过工程实际验证方案 2 确实更加优越, 验证了本文方法的合理性。

采用 3 种方法的优、中、劣 3 种方案的综合前景值进行对比, 得到 3 种方法各方案之间的区分度见表 5。M1 在优与劣和优与中的比较中区分度更大, 由此其在方案区分度上比 M2 和 M3 具有一定的优势。在全面考虑施工过程各阶段属性指标随机性的情况下, 方案 C2 优于方案 C1 和方案 C3, 方案 C3 优于方案 C1, 而在未完全考

表 5 3 种方法方案区分度

Table 5 Scheme differentiation table of each method

方法	优与劣	优与中
M1	1. 058	0. 414
M2	0. 682	0. 082
M3	0. 642	0. 236

虑施工过程各阶段指标随机性的情况下(即 M3) 方案 C1 优于方案 C3, 与 M1 和 M2 存在差异, 说明在全面考虑施工过程各阶段指标随机性的情况下会存在结果差异, 而 M3 考虑不够全面, 在实际施工组织决策过程中应该综合考虑各方面影响因素, 因此本文认为在考虑了施工过程各阶段指标随机性之后进行决策更具有科

学性。综合来看 M1 更具有优势,更有利于方案优化。

利用本文所提方案优化方法进行分析,本文设定的3个方案中,方案2为最优方案,其次为方案3,最后为方案1。在实际工程施工过程中,施工方案决策者可以选择方案2作为施工方案指导现场施工。

3 结 语

以高拱坝工程特点为基础,提出了基于阶段发展特征的动态参考点设置方法,并基于前景理论与麻雀搜索算法进行时序多属性随机智能优化,实现了多阶段多属性条件下,综合考虑建设过程随机性的智能优化分析与决策。应用前景随机占优-CRITIC方法以及随机占优方法分别对待选方案进行优化分析得到优化结果,结果与本文方法一致,验证了本文方法的合理性。本文方法在方案区分度上比其他两种方法具有一定的优势,更有利于决策者做出决策。通过综合考虑多阶段施工方案优化成果,可以有效提升决策科学性。

参考文献:

- [1] 关涛. 高拱坝施工进度自适应仿真与实时控制理论及应用[D]. 天津:天津大学,2016.
- [2] 钟登华,杜荣祥,关涛,等. 心墙堆石坝仓面施工进度动态控制[J]. 河海大学学报(自然科学版),2017,45(4):283-290. (ZHONG Denghua, DU Rongxiang, GUAN Tao, et al. Dynamic control of construction progress of core rockfill dam storehouse surface[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2017,45(4):283-290. (in Chinese))
- [3] 刘晓佳,张可. 基于加权秩和比法的桥梁施工方案优选研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版),2018,37(10):21-25. (LIU Xiaojia, ZHANG Ke. Optimal schemes of bridge construction based on weighted rank sum ration method[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2018,37(10):21-25. (in Chinese))
- [4] 熊高祥. 基于价值工程原理的绿色施工方案优选研究[D]. 赣州:江西理工大学,2019.
- [5] 杨友嫻. 沥青混凝土心墙坝施工进度管理研究[D]. 西安:西安理工大学,2020.
- [6] 关涛,钟登华,任炳昱. 基于随机占优度的高拱坝施工方案优化研究[J]. 水力发电学报,2016,35(5):23-30. (GUAN Tao, ZHONG Denghua, REN Bingyu. Construction scheme optimization for high arch dams based on stochastic dominance degrees[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2016,35(5):23-30. (in Chinese))
- [7] 钟登华,赵江浩,任炳昱,等. 基于动态 VIKOR 扩展方法的混凝土重力坝施工方案多属性决策研究[J]. 水力发电学报,2017,36(4):1-10. (ZHONG Denghua, ZHAO Jianghao, REN Bingyu, et al. Multi-attribute decision making for construction schemes of concrete gravity dams based on dynamic VIKOR extension method[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2017,36(4):1-10. (in Chinese))
- [8] 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))
- [9] ZHAO Mengqi, WANG Xiaoling, YU Jia, et al. Optimization of construction duration and schedule robustness based on hybrid grey wolf optimizer with sine cosine algorithm[J]. Energies, 2020,13(1):215.
- [10] 佟大威,杨传会,余佳,等. 基于 XGBoost-PSO 的混凝土重力坝体型多目标优化设计[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(3):91-98. (TONG Dawei, YANG Chuanhui, YU Jia, et al. Multi-objective shape optimization of concrete gravity dam based on XGBoost-PSO[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2023,51(3):91-98. (in Chinese))
- [11] 郝晶晶,朱建军,刘思峰. 基于前景理论的多阶段随机多准则决策方法[J]. 中国管理科学,2015,23(1):73-81. (HAO Jingjing, ZHU Jianjun, LIU Sifeng. A method for multi-stage stochastic multi-criteria decision making concerning prospect theory [J]. Chinese Journal of Management Science, 2015,23(1):73-81. (in Chinese))
- [12] 牛福强,张国富,苏兆品,等. 多阶段多目标动态测试资源分配算法[J]. 计算机工程与设计,2020,41(3):656-663. (NIU Fuqiang, ZHANG Guofu, SU Zhaopin, et al. Multi-stage and multi-objective dynamic testing resource allocation algorithm[J]. Computer Engineering and Design, 2020,41(3):656-663. (in Chinese))
- [13] 李民,锁立赛,姚建明. 基于多阶段模糊规模效应量化的 TMC 模式下供应链调度优化研究[J]. 运筹与管理,2019,28(8):59-68. (LI Min, SUO Lisai, YAO Jianming. Research on supply chain scheduling optimization under TMC mode based on multistage fuzzy scale effect quantification [J]. Operations Research and Management Science, 2019,28(8):59-68. (in Chinese))
- [14] 张鸿. 基于区间多阶段随机规划的水资源优化配置模型及其应用[D]. 邯郸:河北工程大学,2019.
- [15] TAHERKHANI M, HOSSEINI S H, JAVADI M S, et al. Scenario-based probabilistic multi-stage optimization for transmission expansion planning incorporating wind generation integration[J]. Electric Power Systems Research, 2020,189:106601.
- [16] JI Ling, ZHANG Beibei, HUANG Guohe, et al. Multi-stage stochastic fuzzy random programming for food-water-energy nexus

management under uncertainties[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2020, 155: 104665.

[17] 薛会琴. 多属性决策中标权重确定方法的研究[D]. 兰州: 西北师范大学, 2008.

[18] 黄容. 面向占优决策的多准则权重优化与应用研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2021.

[19] 董增川, 陈牧风, 倪效宽, 等. 考虑模糊区间的水库群优化调度决策方法[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2021, 49(3): 233-240. (DONG Zengchuan, CHEN Mufeng, NI Xiaokuan, et al. Decision method of optimal operation of reservoir group considering fuzzy interval[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2021, 49(3): 233-240. (in Chinese))

[20] 刘小弟, 朱建军, 张世涛, 等. 考虑属性权重优化的犹豫模糊多属性决策方法[J]. 控制与决策, 2016, 31(2): 297-302. (LIU Xiaodi, ZHU Jianjun, ZHANG Shitao, et al. Hesitant fuzzy multiple attribute decision making method based on optimization of attribute weights[J]. Control and Decision, 2016, 31(2): 297-302. (in Chinese))

[21] 孙昱, 姚佩阳, 万路军, 等. 基于权重集结和相对优势关系的多属性决策方法[J]. 控制与决策, 2017, 32(2): 317-322. (SUN Yu, YAO Peiyang, WAN Lujun, et al. Multiple attribute decision making method based on weights aggregation and relative dominance relation[J]. Control and Decision, 2017, 32(2): 317-322. (in Chinese))

[22] 李贺. 属性权重完全未知的犹豫模糊多属性群决策方法研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2020.

[23] 韩二东. 属性权重未知 picture 模糊多属性决策方法及其应用[J]. 计算机应用研究, 2021, 38(12): 3657-3661. (HAN Erdong. Picture fuzzy multi-attribute decision making method with unknown attribute weight and its application[J]. Application Research of Computers, 2021, 38(12): 3657-3661. (in Chinese))

[24] WAN Shuping, JIN Zhen, DONG Jiuying. A new order relation for Pythagorean fuzzy numbers and application to multi-attribute group decision making[J]. Knowledge and Information Systems, 2020, 62(2): 751-785.

[25] 宋娟, 倪志伟, 武文颖, 等. 属性权重信息未知下基于概率对偶犹豫模糊信息相关性系数的多属性决策方法[J]. 模式识别与人工智能, 2022, 35(4): 306-322. (SONG Juan, NI Zhiwei, WU Wenying, et al. Multiple-attribute decision-making method based on correlation coefficient of probabilistic dual hesitant fuzzy information with unknown weights of attribute[J]. Pattern Recognition and Artificial Intelligence, 2022, 35(4): 306-322. (in Chinese))

[26] SONG Wenshuai, GUAN Tao, REN Bingyu, et al. Real-time construction simulation coupling a concrete temperature field interval prediction model with optimized hybrid-kernel RVM for arch dams[J]. Energies, 2020, 13(17): 4487.

[27] 宋文帅, 关涛, 任炳昱, 等. 拱坝施工仿真参数多因素概率预测方法[J]. 水力发电学报, 2022, 41(9): 150-160. (SONG Wenshuai, GUAN Tao, REN Bingyu, et al. Multi-factor probability prediction method of arch dam construction simulation parameters[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2022, 41(9): 150-160. (in Chinese))

[28] 韩峰, 余佳, 徐国鑫, 等. 基于改进 XGBoost 不平衡围岩超前分类方法的隧洞工程施工仿真研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023, 51(1): 150-157. (HAN Feng, YU Jia, XU Guoxin, et al. Study on tunnel construction simulation based on advanced classification of imbalanced surrounding rock using improved XGBoost[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2023, 51(1): 150-157. (in Chinese))

[29] 阎曼婷. 基于前景理论的不确定多属性决策研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2020.

[30] TVERSKY A, KAHNEMAN D. Advances in prospect theory: cumulative representation of uncertainty[J]. Journal of Risk and Uncertainty, 1992, 5(4): 297-323.

[31] XUE Jiankai, SHEN Bo. A novel swarm intelligence optimization approach: sparrow search algorithm[J]. Systems Science & Control Engineering, 2020, 8(1): 22-34.

[32] 张九龙, 王晓峰, 芦磊, 等. 若干新型智能优化算法对比分析研究[J]. 计算机科学与探索, 2022, 16(1): 88-105. (ZHANG Jiulong, WANG Xiaofeng, LU Lei, et al. Analysis and research of several new intelligent optimization algorithms[J]. Journal of Frontiers of Computer Science and Technology, 2022, 16(1): 88-105. (in Chinese))

[33] 高晨峰, 陈家清, 石默涵. 融合黄金正弦和曲线自适应的多策略麻雀搜索算法[J]. 计算机应用研究, 2022, 39(2): 491-499. (GAO Chenfeng, CHEN Jiaqing, SHI Mohan. Multi-strategy sparrow search algorithm integrating golden sine and curve adaptive[J]. Application Research of Computers, 2022, 39(2): 491-499. (in Chinese))

[34] 齐燕. 带约束多目标粒子群算法的研究和应用[D]. 成都: 电子科技大学, 2022.

[35] 吉建华, 苗长云, 李现国, 等. 基于 PSO 带式输送机 PID 控制器参数智能整定的适应度函数设计[J]. 机械工程学报, 2023, 59(22): 444-456. (JI Jianhua, MIAO Changyun, LI Xianguo, et al. Design of fitness function for intelligent parameter tuning of PID controller on belt conveyor with PSO[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2023, 59(22): 444-456. (in Chinese))

[36] GUAN Tao, ZHONG Denghua, REN Bingyu, et al. Construction simulation of high arch dams based on fuzzy Bayesian updating algorithm[J]. Journal of Zhejiang University (Science A), 2018, 19(7): 505-520.