

基于多目标优化的敖江流域梯级水库水资源调度研究

翁 硕¹, 林明财², 林建锋², 王 浩¹, 谢皓南¹

(1. 福州大学土木工程学院; 2. 福建省水利规划院)

摘要:针对敖江流域霍口—山仔梯级水库群供水、发电和生态目标水资源多目标协同问题,提出一种基于改进 NSGA-III 算法的多目标非劣解集优选方法,通过引入两层参考点法与边界权重法构造决策策略,实现对非劣解集的科学优选,并基于该方法构建了敖江流域梯级水库群多目标调度模型。与单目标调度模型对比分析结果表明:多目标调度模型有效解决了高维目标下参考点指数级增长的难题;相较于单目标(发电、供水或生态)调度模型,多目标调度模型在保持发电量一定的同时,显著降低了发生供水短缺的概率,消除了生态用水不足的情况,且弃水量大幅减少;多目标调度显著平衡了发电、供水与生态风险,验证了其在复杂约束条件下的综合优化优势。

关键词:梯级水库;多目标协同;非劣解集;NSGA-III 算法;敖江流域

Research on water resources operation of cascade reservoirs in the Aojiang River Basin based on multi-objective optimization//Weng Shuo¹, Lin Mingcai², Lin Jianfeng², Wang Hao¹, Xie Haonan¹ (1. College of Civil Engineering, Fuzhou University; 2. Fujian Provincial Water Conservancy Planning Institute)

Abstract: To address the multi-objective coordination problem of water supply, power generation, and ecological targets in the Huokou-Shanzai cascade reservoir system of the Aojiang River Basin, this study proposed a multi-objective non-inferior solution set optimization method based on the improved NSGA-III algorithm. By constructing a decision-making strategy that integrates the two-layer reference point method and the boundary weighting approach, this method achieves the scientific selection of the non-inferior solution set. Based on this method, a multi-objective operation model for the cascade reservoir system in the Aojiang River Basin was established and compared with single-objective operation models. The results indicate that the multi-objective operation model effectively addresses the challenge of exponential growth in reference points under high-dimensional objectives. Compared to single-objective (power generation, water supply, or ecology) operation models, the multi-objective operation model maintains a certain level of power generation while significantly reducing the probability of water supply shortages, eliminating ecological water deficits, and substantially decreasing spillage. The multi-objective operation model effectively balances the risks among power generation, water supply, and ecological goals, demonstrating its comprehensive optimization advantages under complex constraints.

Key words: cascade reservoirs; multi-objective collaboration; non-inferior solution set; NSGA-III algorithm; the Aojiang River Basin

随着我国水利水电建设的快速发展,全国已建成数量庞大的水库工程体系,水利水电工程重点已从规划建设进入运行管理关键时期^[1]。在气候变化与人类活动双重影响下,水资源供需矛盾加剧,流域生态保护与高质量发展对梯级水库群的多目标协同调控提出了更高要求。梯级水库群优化调度虽能提升水资源利用率,但面临多目标、高维、强约束、非线性耦合问题。进行多目标协同优化调度不仅能提升水资源综合利用效率,而且是保障流域生态安全、支撑区域可持续发展的重要手段^[2-3]。目前,使用高效计算方法已成为解决上述问题的重要途径,遗传

算法因其搜索全局最优解的能力突出,已成为水库优化调度中的研究热点^[4-5]。因此,开展梯级水库优化调度研究,充分发挥水库间的相互补偿作用,提高水能资源利用效率,具有重要的科学价值和现实意义。

众多学者通过构建协同模型与使用遗传算法探索多目标协调问题。在多目标协调方面,Feng 等^[6]构建了近似动态规划(ADP)框架,嵌入长短期记忆神经网络(LSTM)动态建模水电站非线性关系,结合模糊聚类支持向量机提取智能调度规则,显著降低了计算复杂度,同时通过多目标合作搜索算法

(MOCSA),解决了发电-生态多目标协同问题;Jin等^[7]提出了基于协同理论的多目标协同调控框架(MOSRR),通过划分初级与次级需求优先级,结合层次分析法和粒子群优化算法,解决了黄河上游水库群在发电、供水、水沙调控及生态维护之间的协同问题,显著提升了初级需求保障率;李洁玉等^[8]提出了黄河水沙调控多目标协同模型,结合系统耦合协调度理论,揭示了排沙与发电的强竞争关系以及生态与发电的弱竞争关系,采用NSGA-II算法实现了目标函数的动态权重调整;曾坤^[9]针对水风光互补系统,构建了中长期多目标优化模型,发现枯水年风光高占比场景下目标冲突最复杂,需通过耦合协调调度模型平衡效益。在遗传算法应用和改进方面,王小安等^[10]以遗传算法为求解手段,构建了梯级水电系统短期发电优化调度模型,实现了对复杂约束条件下非线性优化问题的高效求解,为梯级水电站短期发电提供了有效解决方案;王学斌等^[11]构建了针对黄河下游梯级水库的多目标调度模型,并利用改进快速非劣解集排序遗传算法(ICGC-NSGA-II)进行求解,探究了水库在供水、发电以及生态效益之间的平衡关系;吴云等^[12]对NSGA-II算法在约束条件处理和遗传操作越界处理方面进行了改进,并给出了3种不同的优化配置方案供决策者使用;陈立华等^[13]针对标准遗传算法(SGA)局部寻优能力较差、易早熟等不足,提出了超立方体浮点数编码自适应遗传算法(AGA)和超立方体浮点数编码遗传模拟退火算法(SA-GA)。尽管现有研究取得了显著进展,但现有模型大多基于固定权重或约束转换,缺乏动态调整机制,方法多侧重单目标效益提升,缺乏多目标协同效益的量化评估框架。目前流域水资源调度都是以水库群为基础,需依靠梯级水库之间的关系进行优化调度,仅依靠单目标水库进行优化的方式已难以满足调度需求。

本文基于敖江流域霍口一山仔梯级水库,分别构建了考虑供水、发电、生态的单目标和多目标优化调度模型,采用动态规划逐次逼近法(DDDP)和基于边界交叉构造权重法的非支配排序遗传算法-III(NSGA-III算法)对模型分别进行求解,同时构建了梯级水库多目标调度方案评价体系,并采用层次分析法和熵权法相结合的主客观权重法计算权重,最后构建模糊优选评价模型确定最优调度方案,并引入供水风险分析,以期为梯级水库的调度管理提供科学依据和决策支持。

1 研究区概况

敖江发源于福建省宁德市,全长137 km,河道平

均坡降2.6‰。敖江流域(26°15'N~26°38'N,119°06'E~119°39'E),流域总面积2665 km²,海拔5~1479 m,整体地势西高东低,上游峡谷众多,陡坡急流纵横交错,中间夹杂有山谷盆地;下游河道相对较宽,坡度较缓。敖江流域位于亚热带季风性气候区,受季风影响,有时会出现极端降雨或台风,多年平均气温为19.1℃,最高气温可达38.7℃,最低气温为-3.8℃;历年最大日降水量为212 mm(1973年),多年平均水面蒸发量为1019 mm。流域属于山区河流范畴,水资源丰富,水流变化剧烈,汛期来水颇丰,水量激增,易引发洪涝灾害;非汛期则可能面临干旱挑战。敖江流域供水规划主要涵盖福州第二水源供水工程、塘坂引水二期工程以及罗源敖江供水工程三大工程。

2 研究方法

2.1 多目标优化调度模型

2.1.1 目标函数

考虑水库工程不同运行目标,分别以河道外供水缺水量最小(F_1)、系统多年平均发电量最大(F_2)、河道内生态缺水量最小(F_3)这3个目标建立梯级水库单目标优化调度模型,如式(1)~(3)所示。单目标调度模型采用DDDP优化算法进行求解。而梯级水库多目标优化调度模型综合考虑供水目标、生态目标和发电目标,通过NSGA-III算法计算梯级水库调度的帕累托最优解集,以确保梯级水库系统的供水效益、生态效益、发电效益达到最佳^[14]。同时,为提高水资源利用率,在3个目标函数的基础上还需设置发电弃水量最小(F_4)为目标函数(式(4))。

$$F_1 = \min W_d = \begin{cases} 0 & R_d \geq Q_d \\ \min \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (Q_{dj} - R_{dj}) \Delta t & R_d < Q_d \end{cases} \quad (1)$$

$$F_2 = \max E = \max \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n N_{ij} \Delta t / T = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (K_i R_{geij} H_{ij} \Delta t) / T \quad (2)$$

$$F_3 = \min W_e = \begin{cases} 0 & R_e \geq Q_e \\ \min \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (Q_{ej} - R_{ej}) \Delta t & R_e < Q_e \end{cases} \quad (3)$$

$$F_4 = \min W_{rs} = \begin{cases} 0 & R_{ge} \geq Q_{ge} \\ \min \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (R_{geij} - Q_{gei}) \Delta t & R_{ge} < Q_{ge} \end{cases} \quad (4)$$

式中: W_d 为调度期内河道外供水缺水总量; i, m 分别为水库序号及水库总数; j, n 分别为调度时段序号和调度时段总数; Q_{dij} 为河道外供水需水流量, 包括生活需水流量、工业需水流量、河道外生态需水流量; R_{dij} 为河道外供水流量; Δt 为单个时段长度; E 为梯级水库系统平均年发电量; N_{ij} 为发电出力; T 为调度年数; K_i 为水电站的出力系数; R_{geij} 为发电流量; H_{ij} 为发电水头; t 为发电时长; W_e 为调度期内生态缺水总量; Q_{eij} 为河道生态需水流量; W_{rs} 为调度期内发电弃水总量; R_{eij} 为河道生态供水流量; Q_{gei} 为水轮机最大过机流量。

2.1.2 约束条件

本文将需水分为生活需水、工业需水、生态需水和河道外生态需水 4 个类别, 并按照供水优先级以最小生态需水、生活需水、工业需水、适宜生态需水、河道外生态需水的顺序进行水库供水。多目标调度模型与各单目标调度模型的约束条件包括水库水量平衡约束、库容约束、水库水位约束、泄流能力非负约束、水库间水力联系约束、电站出力约束、水轮机最大过机流量约束和最小生态下泄流量约束:

$$V_{i,j+1} = V_{ij} + (Q_{lij} - R_{ij} - Q_{sij})\Delta t \quad (5)$$

$$V_{ijmin} \leq V_{ij} \leq V_{ijmax} \quad (6)$$

$$Z_{ijmin} \leq Z_{ij} \leq Z_{ijmax} \quad (7)$$

$$R_{ij} \geq 0 \quad (8)$$

$$Q_{li+1,j} = R'_{ij} + q_{ij} \quad (9)$$

$$N_{ij} \geq N_{ijmin} \quad (10)$$

$$R_{geij} < Q_{gei} \quad (11)$$

$$R_{ij} \geq Q_{eijmin} \quad (12)$$

式中: V_{ij} 、 $V_{i,j+1}$ 分别为水库 i 的初、末库容; Q_{lij} 、 R_{ij} 分别为水库 i 第 j 时段的平均入库流量和出库流量; Q_{sij} 为水库 i 第 j 时段的损失流量; V_{ijmin} 、 V_{ijmax} 分别为水库 i 第 j 时段的最小和最大库容; Z_{ij} 为水库 i 第 j 时段的水位; Z_{ijmin} 、 Z_{ijmax} 分别为水库 i 第 j 时段的最小和最大允许水位; R'_{ij} 为水库 i 第 j 时段可汇入下游水库的下泄流量; q_{ij} 为水库 i 第 j 时段下游河段的区间入流量; N_{ijmin} 为水库 i 第 j 时段的最小出力; Q_{eijmin} 为水库 i 第 j 时段河道内最小生态需水流量。

2.1.3 决策变量

各单目标优化调度模型以调度期内各水库不同时段的下泄流量作为决策变量, 调度期为 1957—2018 年, 以月为计算时段。多目标优化调度模型以调度期内不同时段末各水库库容作为决策变量, 调度期为 1957—2018 年, 以月为计算时段, 由汛期初 (4 月初) 开始, 共 744 个时段。以上模型均由霍口、山仔两座水库参与调度。

2.1.4 优化算法

2.1.4.1 DDDP 优化算法

DDDP 优化算法的求解步骤主要包括常规动态规划算法求解和改进算法求解两部分^[15]。常规动态规划算法求解步骤主要为: ①确定阶段变量, 把水库的调度期按月为时段划分为 K 个阶段, 以 k 代表阶段变量 ($k = 1, 2, \dots, K$); ②选取水库库容为状态变量; ③对状态变量进行离散, 离散点数为 N ; ④选取时段 t 的水库下泄流量 Q_t 作为决策变量; ⑤建立状态转移方程; ⑥确定阶段目标, 通常取各时段发电量最大或供水量缺额最小; ⑦建立动态规划逆时序递推方程, 动态规划逆时序递推过程可参考文献^[16]。

改进算法求解步骤如下: ①在可行域内选定每个水库的初始调度线; ②为每个水库定义一个优化通道, 半径向量为 $\omega_i = (\omega_{i1}, \omega_{i2})$, 以初始解为基准生成 3 个候选解, 即初始解 - ω_i 、初始解、初始解 + ω_i ; ③利用常规动态规划算法中的递推方程推求优化调度线; ④用前面步骤中得到的优化调度线替代初始调度线; ⑤重复前面离散、推求优化调度线和替代初始调度线的操作直至满足收敛条件 $|(F_d - F_{d-1})/F_{d-1}| \leq \varepsilon_1$, 其中 F_d 为第 d 次迭代时的目标函数值, ε_1 为收敛条件值, 迭代结束。

2.1.4.2 NSGA-III 算法

NSGA-III 算法是遗传算法的一类改进, 不同于 NSGA-II 算法的选择机制, NSGA-III 算法引入参考点机制以有效求解 3 个及以上高维目标的多目标优化问题。

NSGA-III 算法中常见的权重构造方法有均匀权重法、自适应权重法、随机权重法、边界交叉法等^[17]。故本文使用边界交叉法构造权重, 将参考点置于标准化超平面上, 形成 $M-1$ 维标准单纯形, 并沿各目标轴分为 p 份。常规 NSGA-III 算法中, 随着目标维度 M 的增加, 若仅提高分区数量 p 来增强参考点的细致度, 会导致参考点总数呈指数级增长, 增加计算复杂性和存储需求。为避免上述问题, 本文采用两层参考点产生策略, 增加内层, 该策略在保留原有参考点框架的基础上, 通过引入两层参考点结构, 优化了传统方法中分割份数 p 对中间点产生和参考点数量的影响, 在保持中间点生成能力的同时, 有效控制了参考点的总数, 从而提高了方法的适用性和效率, 具体方法可参考文献^[14]。

2.2 多目标非劣解集方案优选

2.2.1 方案评价指标体系构建

综合考虑霍口-山仔梯级水库调度目标及决策者主观倾向, 选取梯级水库供水缺水量、发电量、生

态缺水量、发电弃水量、供水可靠性、发电可靠性、生态可靠性及供水易损性、发电易损性、生态易损性指标构建评价指标体系。其中可靠性度量整个调度期内供水量(发电量、生态供水量)满足需求的时段数,易损性度量供水(发电、生态供水)不足时段的平均缺少程度,可靠性与易损性的计算公式为:

$$I_1 = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T (G_t = D_t) / T \quad (13)$$

$$I_2 = \frac{\sum_{G_t < D_t} (D_t - G_t)}{\sum_{G_t < D_t} D_t} \quad (14)$$

式中: I_1 、 I_2 分别为可靠性和易损性; $\frac{1}{T} \sum_{t=1}^T (G_t = D_t)$ 为指示函数,当 $G_t = D_t$ 时取值为 1,否则为 0; G_t 为时段内实际供水量、发电量和生态缺水量; D_t 为时段内供水、发电和生态供水需求; $\sum_{G_t < D_t} (D_t - G_t)$ 为所有发电、供水、生态供水不足时段内的缺水量总和; $\sum_{G_t < D_t} D_t$ 为所有发电、供水、生态供水不足时段内的需水总量。

各指标按照式(15)进行归一化处理,其中梯级发电量、可靠性指标为正向指标,采用正向归一化公式计算,其余指标为逆向指标,采用逆向归一化公式计算。

$$y_{ij} = \begin{cases} (x_{ij} - x_{ijmin}) / (x_{ijmax} - x_{ijmin}) & x_{ij} \text{ 为正向指标} \\ (x_{ijmax} - x_{ij}) / (x_{ijmax} - x_{ijmin}) & x_{ij} \text{ 为逆向指标} \end{cases} \quad (15)$$

式中: x_{ij} 为第 j 个方案中第 i 项指标的原始值; y_{ij} 为第 j 个方案中第 i 项指标的归一化值; x_{ijmin} 为第 i 项指标在所有方案中的最小值; x_{ijmax} 为第 i 项指标在所有方案中的最大值。

指标权重的确定方法分为主观法和客观法。其中主观法易偏离实际,客观法忽视决策者偏好,水库多目标评价体系复杂,需结合两者优点。因此,本文采用层次分析法和熵权法相结合的主客观权重法计算权重,主客观综合指标权重求解公式为

$$w_{int} = \alpha w_{sub} + (1 - \alpha) w_{obs} \quad (16)$$

$$\text{其中 } \alpha = \frac{\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n w_{subi} y_{ij}}{\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n w_{subi} y_{ij} + \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n w_{obsi} y_{ij}}$$

式中: w_{int} 为主客观综合指标权重; α 为主观权重分配系数; w_{sub} 为层次分析法指标主观权重; w_{obs} 为熵权法指标客观权重; w_{subi} 为第 i 项评价指标的主观权重; w_{obsi} 为第 i 项指标的客观权重。

2.2.2 模糊优选评价模型构建

本文采用模糊数学理论量化模糊因素,综合评价后优选多目标非劣解集调度方案。方案 j 与最优

方案和最劣方案间差异的综合权函数如式(17)所示,该函数通常用于量化方案 j 与这两个极端解集之间的相对接近程度。

$$f_i(u_j, w_i) = u_j^2 \sum_{i=1}^m [w_i (g_i - r_{ij})]^2 + (1 - u_j)^2 \cdot \sum_{i=1}^m [w_i (r_{ij} - b_i)]^2 \quad (17)$$

式中: u_j 为隶属度; w_i 为求得的第 i 项指标的主客观综合权重; m 为指标数; n 为非劣解集调度方案数; i, j 分别表示指标序号和调度方案序号; r_{ij} 为第 j 个方案第 i 项指标的归一化值; g_i 为非劣解集方案集中归一化指标 i 的最大值,即最优方案; b_i 为非劣解集方案集中归一化指标 i 的最小值,即最劣方案。

建立多目标决策模型:

$$\min \{f(\mathbf{u}, \mathbf{w}_i) = [f_1(u_1, w_i), f_2(u_2, w_i), \dots, f_n(u_n, w_i)]\} \quad (18)$$

$$\text{s. t. } \begin{cases} \sum_{i=1}^m w_i = 1 & w_i > 0, i = 1, 2, \dots, m \\ 0 < u_j < 1 & j = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (19)$$

通过构造拉格朗日函数,求解上述决策模型,获得隶属度计算公式:

$$u_j = \left\{ 1 + \frac{\sum_{i=1}^m [w_i (g_i - r_{ij})]^2}{\sum_{i=1}^m [w_i (r_{ij} - b_i)]^2} \right\}^{-1} \quad (20)$$

将主客观综合权重代入式(20)计算隶属度,依据方案隶属度对各非劣解集方案进行排名,并结合实际情况从非劣解集中选取最优方案。

3 结果与分析

3.1 方案优选结果

通过改进 NSGA-III 算法求解梯级水库多目标优化调度模型,并根据多目标优化所得的非劣解集设置多目标优化调度模型的调度方案集。多目标调度模型通过优化求解后可得到 969 个非劣解集,将得到的非劣解集绘制于同一坐标系下,得到梯级系统长系列发电量、供水缺水量、生态缺水量、弃水量 4 个目标值的帕累托图,如图 1 所示。

基于前述主客观综合赋权法和模糊优选模型,确定了梯级水库多目标优化调度的最优方案。多目标调度模型和单目标调度模型的调度结果对比如表 1 所示。分析调度结果可知,与发电单目标调度结果相比,多目标调度减少了少量发电量,显著降低了供水缺水量,完全消除了生态缺水,并减少了弃水量。与供水单目标调度相比,多目标调度在增加发电量的同时,仍能有效减少供水缺水,完全消除生态

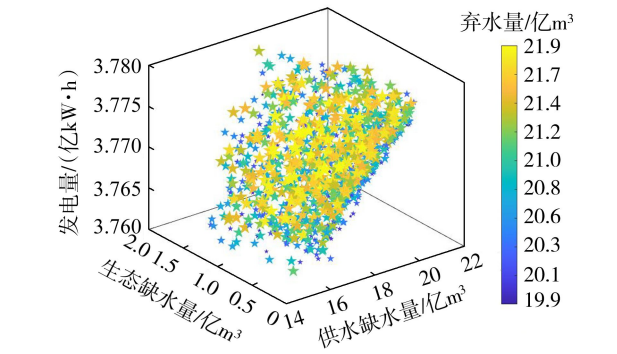


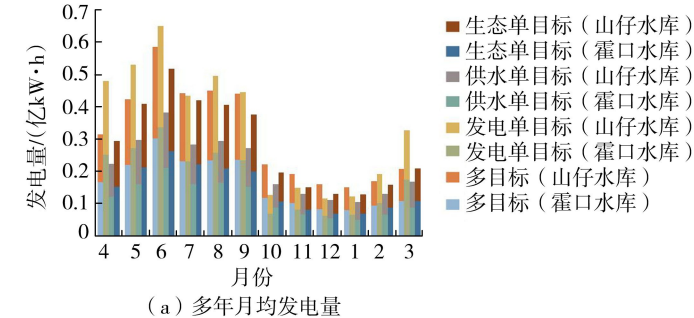
图1 多目标帕累托图

表1 单目标和多目标调度结果对比

模型	水库	多年平均 发电量/ (亿 kW · h)	多年供水 缺水总量/ 亿 m³	多年生态 缺水总量/ 亿 m³	多年弃水 总量/亿 m³
发电单 目标	霍口	2.144	23.583	0.603	5.910
	山仔	1.931	85.045	1.226	37.522
	梯级	4.075	108.628	1.829	43.433
供水单 目标	霍口	1.386	1.233	0.782	14.211
	山仔	1.177	7.240	2.617	53.990
	梯级	2.563	8.473	3.399	68.201
生态单 目标	霍口	1.784	7.545	0.000	7.700
	山仔	1.618	30.656	0.000	28.153
	梯级	3.402	38.201	0.000	35.853
多目标	霍口	1.980	4.621	0.000	4.351
	山仔	1.788	11.188	0.000	15.817
	梯级	3.767	15.809	0.000	20.168

缺水,并大幅减少弃水。与生态单目标相比,多目标调度同样提升了发电量,大幅减少了供水缺水和弃水,且维持了生态需水的完全满足。

梯级水库多年月均发电量和系统历年发电量见图2。由图2可知,系统多年平均年发电量中,发电单目标调度最高,供水单目标调度最低。年发电量最大值分别出现在1997年和2016年,此外,各目标下发电量最大值均集中于6月。多目标调度6月发电量低于发电单目标调度,同时高于供水和生态单目标调度。除发电单目标梯级系统发电量最小值出现在12月,供水、生态单目标及多目标调度梯级系统发电量最小值均出现在1月。多目标调度最小月发电量为0.152亿kW·h,与发电单目标调度(0.117亿kW·h)相比增加了29.822%,与供水单



目标调度(0.105亿kW·h)相比增加了44.51%,与生态单目标调度(0.13亿kW·h)相比增加了17.016%。

多目标调度结果中,霍口水库、山仔水库及梯级系统在枯水期平均发电量均高于发电、供水和生态单目标调度,增幅显著;霍口水库、山仔水库、梯级系统多年平均丰水期发电量分别为1.392亿、1.269亿、2.662亿kW·h,三者的平均发电量较发电单目标调度有所下降,相比供水和生态单目标调度则有显著增加,总体而言,多目标调度在枯水期发电量优化明显,丰水期则在保证供水与生态基础上有所调整。

梯级水库系统多目标和各单目标下的河道外供水情况见图3。由图3可知,多目标调度显著减少了供水年缺水量,与发电单目标相比降幅大,但略高于供水单目标和生态单目标。多目标和各单目标下,最大供水缺水量发生在2003年。梯级系统供水缺水情况主要出现在10月至次年3月,属于枯水期。多目标调度结果中,霍口水库、山仔水库及梯级系统枯水期缺水量均低于发电单目标情况,略高于供水单目标和生态单目标。此外,缺水情况主要发生在山仔水库,霍口水库缺水较少。

梯级水库系统河道内生态缺水情况见图4,多目标和生态单目标情况均能满足生态需水,无缺水情况发生。而发电单目标和供水单目标在枯水期存在生态缺水,2003年最为严重。发电单目标调度结果中,霍口水库、山仔水库、梯级系统多年平均枯水期生态缺水量分别为0亿、0.019亿、0.019亿m³,供水单目标调度结果中,霍口水库、山仔水库、梯级系统多年平均枯水期生态缺水量分别为0.012亿、0.042亿、0.054亿m³。由上述分析可知山仔水库下游河道为主要缺水区域,霍口水库至山仔水库区间河道缺水状况则较轻微。

图5为梯级水库系统的历年弃水量。由图5可知,多目标调度显著减少了年弃水量,相比发电、供水和生态单目标均有明显下降,最大弃水量出现在1990年。多目标和各单目标调度下,梯级系统弃水

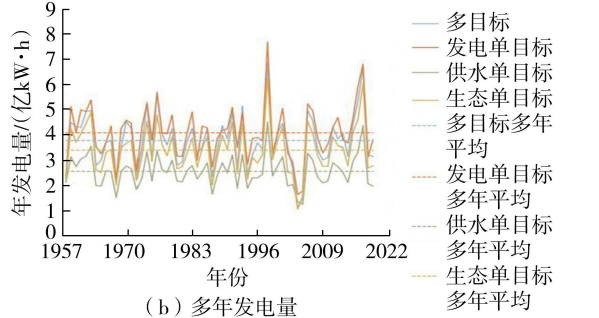


图2 梯级水库系统多年月均发电量和多年发电量

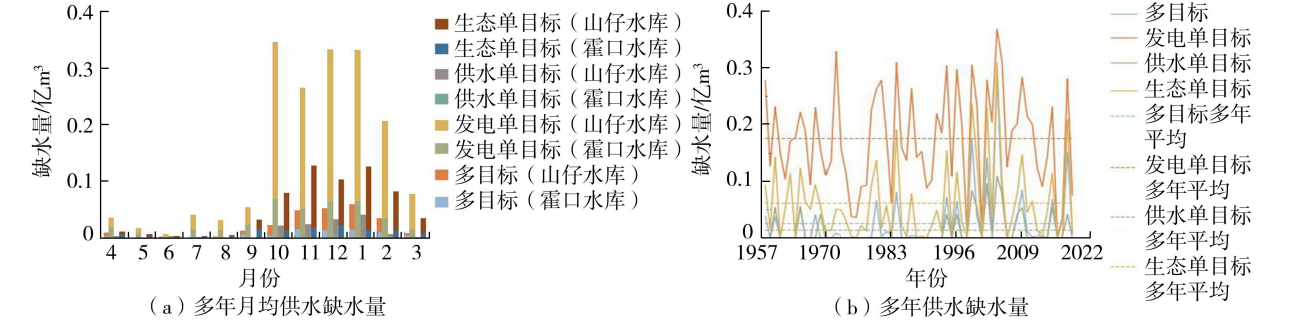


图3 梯级水库系统河道外多年月均供水缺水量和多年供水缺水量

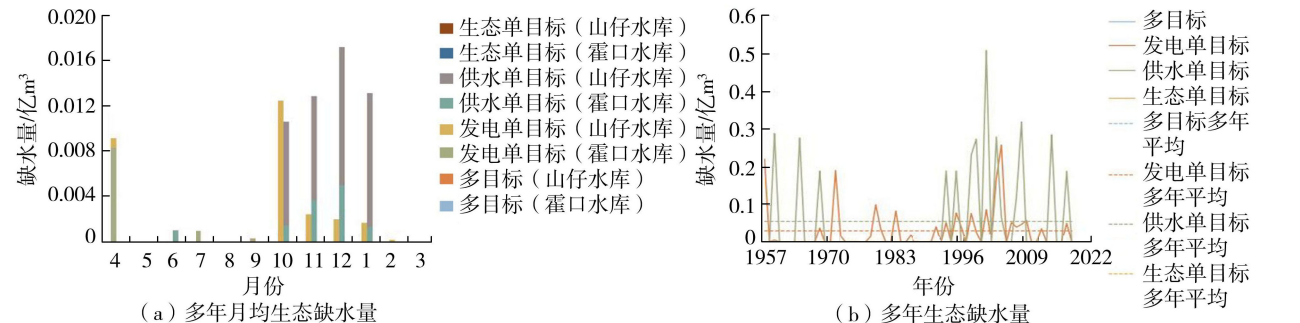


图4 梯级水库系统河道内多年月均生态缺水量和多年生态缺水量

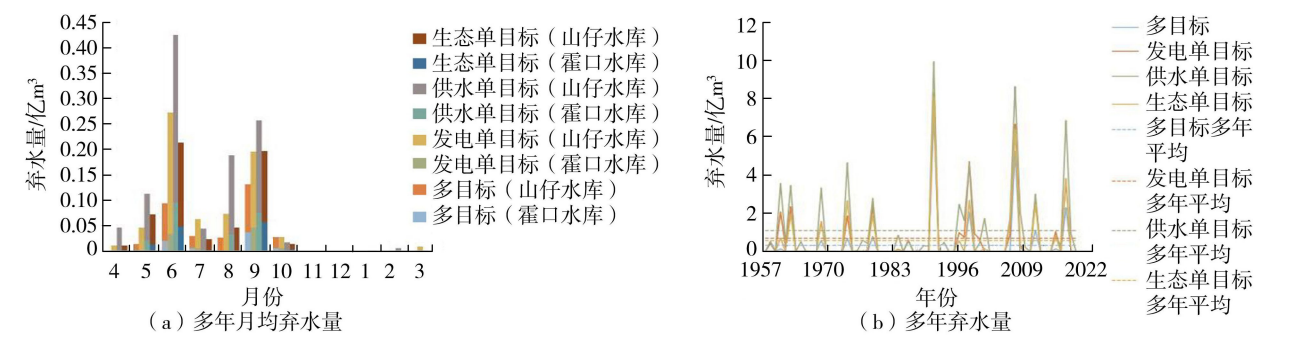


图5 梯级水库系统多年月均弃水量和多年弃水量

情况主要出现在丰水期,多目标调度下霍口水库弃水较少,而山仔水库弃水较多,这主要是因为霍口水库的水库库容和调节性能优于山仔水库。

3.2 入库出库流量变化

3.2.1 霍口水库

霍口水库作为敖江流域中上游龙头水库,具有年调节特性,在梯级水库调度中起主导作用,霍口水库的多年入库流量和多目标优化调度后的出库流量变化过程如图6所示。从图6可以看出,多目标优化调度起到了蓄丰补枯的作用。为分析霍口水库入库流量及各模型优化后出库流量的状况,计算霍口水库多年(1957—2018年)月均入库流量及出库流量序列水文要素的统计特征值,结果如表2所示。由表2可知,霍口水库月均入库流量平均值为41.674 m³/s,标准差为37.204 m³/s,变差系数为0.893。各模型优化后出库流量平均值与入库流量相差不多,各模型的出库流量变差系数均小于入库流量变差系数,其中多目标出库流量的变差系数最

小,发电单目标的变差系数最大。结果表明,梯级水库优化调度对径流有调节作用,坦化了出库流量过程,具有蓄丰补枯的作用。

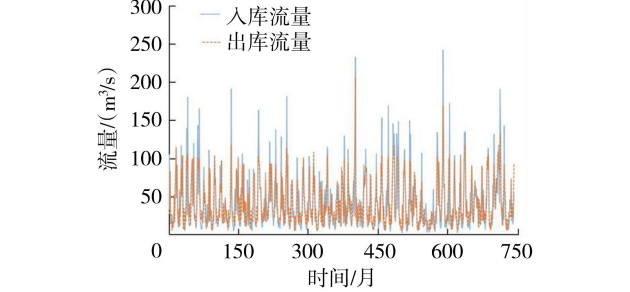


图6 霍口水库多年入库出库流量

表2 霍口水库月均入库流量和出库流量统计

特征值	平均值/ (m³/s)	标准差/ (m³/s)	变差系数
历史入库流量	41.674	37.204	0.893
多目标出库流量	41.348	29.582	0.715
发电单目标出库流量	41.305	34.653	0.839
供水单目标出库流量	41.465	31.898	0.769
生态单目标出库流量	41.387	31.176	0.753

多年平均月入库流量及各模型优化后出库流量变化过程如图 7 所示。从图 7 可以看出,相比入库流量,丰水期出库流量大多有所降低,枯水期出库流量大多有所增加,其中多目标优化调度对径流的调节作用最明显,蓄丰补枯效果尤为显著。

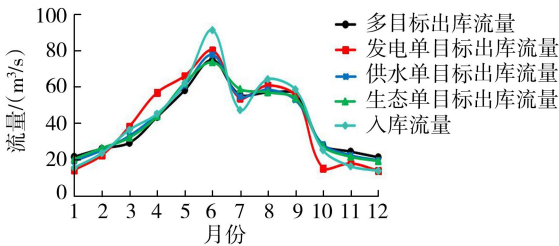


图 7 霍口水库多年平均出库流量

3.2.2 山仔水库

与上游霍口水库优化调度后,山仔水库的入库流量和出库流量均发生了变化,山仔水库多年历史入库流量及多目标调度后山仔水库入库、出库流量变化过程如图 8 所示。由图 8 可知,多目标优化后山仔水库入库、出库流量均呈现削丰补枯的变化趋势。

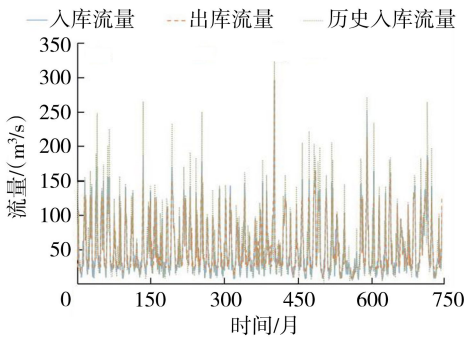


图 8 山仔水库历年入库出库流量

为分析山仔水库历史入库流量及各模型优化后入库、出库流量的变化状况,计算山仔水库多年(1957—2018 年)月均入库流量及出库流量序列水文要素的统计特征值,结果如表 3 所示。由表 3 可知,山仔水库历史入库流量平均值为 $57.381\text{ m}^3/\text{s}$,标准差为 $51.066\text{ m}^3/\text{s}$,变差系数为 0.890,均略大于优化后的入库、出库流量情况。多目标优化后历年月均入库、出库流量平均值分别为 $53.035\text{ m}^3/\text{s}$ 、 $52.697\text{ m}^3/\text{s}$,标准差分别为 $42.207\text{ m}^3/\text{s}$ 、 $39.443\text{ m}^3/\text{s}$,变差系数分别为 0.796、0.748,与单目标调度模型相差不大。从各模型出库流量的变差系数来看,除发电单目标调度外,其余模型的出库流量变差系数均小于相应入库流量的变差系数,其中多目标出库流量的变差系数最小,发电单目标的变差系数最大。结果表明,梯级水库优化调度对径流有调节作用,有效调节了山仔水库的入库流量和出库流量,稳定了径流过程。

表 3 山仔水库月均入库流量和出库流量统计

特征值	平均值/ (m^3/s)	标准差/ (m^3/s)	变差系数
历史入库流量	57.381	51.066	0.890
多目标入库流量	53.035	42.207	0.796
多目标出库流量	52.697	39.443	0.748
发电单目标入库流量	53.975	46.511	0.862
发电单目标出库流量	53.606	46.739	0.872
供水单目标入库流量	52.976	45.240	0.854
供水单目标出库流量	52.766	43.410	0.823
生态单目标入库流量	53.225	43.523	0.818
生态单目标出库流量	52.938	41.022	0.775

多目标调度模型和各单目标调度模型模拟的山仔水库多年平均月入库流量及出库流量变化过程如图 9 所示,并与山仔水库多年平均历史入库流量进行对比。由图 9 可知,相比历史入库流量,丰水期优化后入库流量大多有所降低,枯水期优化后入库流量大多有所增加;丰水期优化后入库流量降低幅度大于枯水期入库流量增加幅度;优化后出库流量变化过程与优化后入库流量相似,其中枯水期出库流量的增大幅度大于入库流量。由此可见,梯级水库优化调度具有蓄丰补枯的作用,其中多目标优化模型的优化效果相对较为明显。

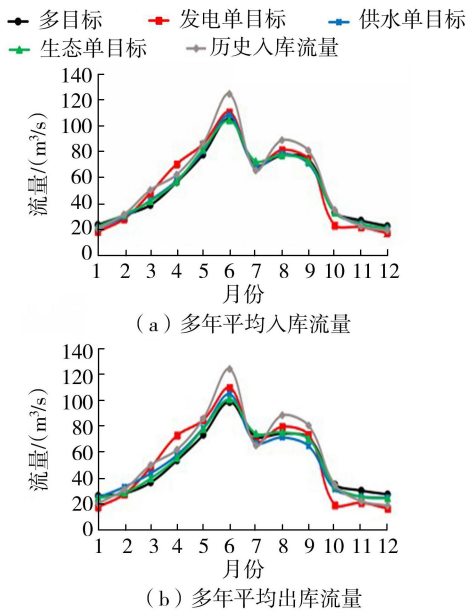


图 9 山仔水库多年平均入库和出库流量

3.3 风险分析

本文所建立的多目标非劣解集方案评价体系共选取了 10 个评价指标,即梯级水库发电量、发电可靠性、发电易损性、供水缺水量、供水可靠性、供水易损性、生态缺水量、生态可靠性、生态易损性、发电弃水量,并将所构建的多目标非劣解集方案评价体系中的各评价指标按式(15)进行归一化处理。

采用前文所述主客观综合赋权法确定多目标非劣解集方案评价体系中各指标的综合权重,具体计

算结果如表 4 所示。最后,将确定的各评价指标主客观综合权重代入模糊优选公式(式(20)),计算各非劣解集方案隶属度,依据方案隶属度值对各方案进行排序。根据排序大小,最终选取隶属度最大(0.901)的方案为多目标调度模型的最优方案。

表 4 各评价指标权重

指标	层次分析法 主观权重	熵权法 客观权重	主客观综合 赋权法权重
发电量	0.027 19	0.100 03	0.063 15
发电可靠性	0.044 53	0.100 02	0.071 93
发电易损性	0.041 94	0.099 91	0.070 56
供水缺水量	0.078 66	0.100 07	0.089 24
供水可靠性	0.098 67	0.100 16	0.099 41
供水易损性	0.098 67	0.099 94	0.099 30
生态缺水量	0.161 19	0.099 97	0.130 96
生态可靠性	0.209 70	0.100 04	0.155 56
生态易损性	0.209 70	0.099 93	0.155 50
发电弃水量	0.029 74	0.099 93	0.064 40

根据研究区流域梯级水库系统 1957—2018 年多目标调度结果,针对发电、供水、生态目标进行风险分析,结合研究区域的特点,选取发电风险因子、供水风险因子、生态风险因子进行计算与分析,风险指标为:

$$I_3 = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^T Y_i \tag{21}$$

其中 $Y_i = \begin{cases} 1 & \text{时段内实际情况不满足设计需求} \\ 0 & \text{时段内实际情况满足设计需求} \end{cases}$
式中: I_3 为风险指标; Y_i 为第 t 时段需求满足状态指示变量。

通过计算多目标非劣解集中的风险因子,确定发电、供水和生态风险的阈值范围分别为 15.46%~19.35%、17.74%~25%、0%~2.82%。根据各风险因子的计算结果进行频率分析,绘制各风险因子的频率分布直方图及分布曲线(图 10)。由图 10 可知,数据接近正态分布趋势,因此本文依据正态分布的 3σ 原则,将风险划分为可接受、可容忍和不可接受 3 个等级,以便于量化评估风险等级。具体阈值如下:发电风险 [15.46%, 18.08%) 可接受、[18.08%, 18.78%) 可容忍、[18.78%, 19.60%] 不可接受;供水风险 [17.74%, 23.3%) 可接受、[23.3%, 24.56%) 可容忍、[24.56%, 25.75%] 不可接受;生态风险 [0%, 1.63%) 可接受、[1.63%, 2.5%) 可容忍、[2.5%, 3.05%] 不可接受。

对比多目标最优方案与各单目标优化结果中的风险指标可知,在多目标最优方案中,发电风险、供水风险指标分别控制在 16.4%和 20.16%,而生态风险指标为 0%,展现了较优异的综合平衡能力。发电单目标发电风险、供水风险、生态风险指标分别为 31.32%、41.26%、10.35%;供水单目标发电风

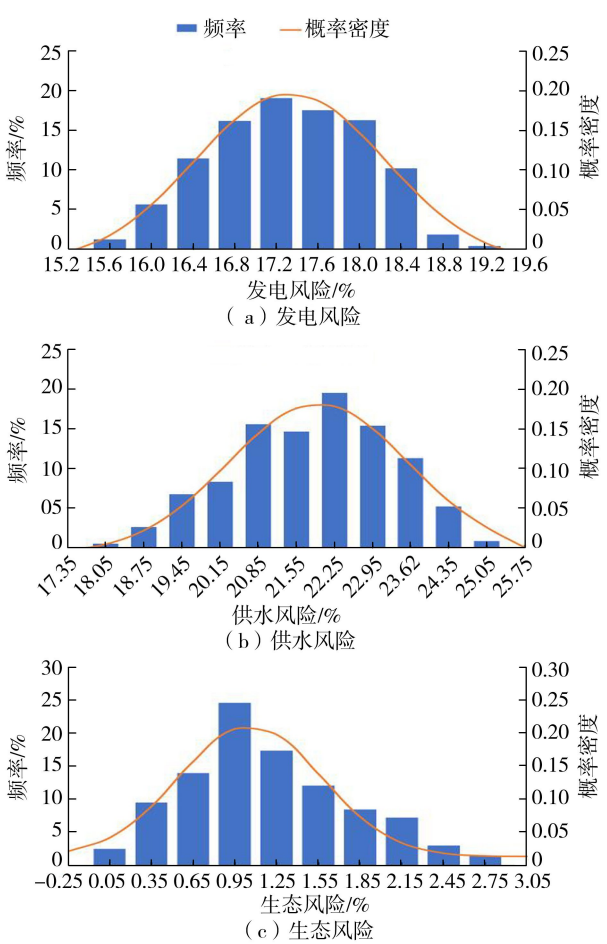


图 10 发电、供水和生态风险因子频率直方图

险、供水风险、生态风险指标分别为 31.99%、4.44%、2.15%;生态单目标发电风险、供水风险、生态风险指标分别为 26.61%、28.09%、0%。相比之下,发电单目标优化提升了发电量,其发电风险、供水风险及生态风险均显著高于其他方案,显示出明显的风险不平衡性。

分析原因可知,发电单目标调度模型通过最大化系统发电量的方式,可能在丰水期过度放水发电,导致枯水期水库蓄水量不足,无法持续满足发电需求。图 11 为不同模型下梯级水库多年月均发电量。由图 11 可知,发电单目标调度模型在丰水期累计发电量达 3.04 亿 kW·h,高于多目标调度模型丰水期累计发电量、供水单目标调度模型丰水期累计发电量和生态单目标调度模型丰水期累计发电量,但是发电单目标调度模型枯水期累计发电量为 1.03 亿 kW·h,低于多目标调度模型枯水期累计发电量 1.11 亿 kW·h。这种“涸泽而渔”的策略虽然提高了总发电量,却加剧了时段性发电短缺的风险(如枯水期发电量骤降)。丰水期发电单目标调度模型的发电风险、供水风险、生态风险指标分别为 16.13%、36.02%、22.31%,而枯水期分别为 45.43%、60.35%、43.82%,虽然丰水期大大降低了

发电风险,但是枯水期的发电、供水和生态风险指标都大大提高。而多目标调度模型通过平衡发电、供水和生态需求,合理分配水资源,确保了发电量的稳定性(如枯水期发电量显著提升),减少了极端短缺的可能性。因此,尽管单目标调度模型总发电量更高,但因波动性大、保障性差,其发电风险(31.32%)显著高于多目标调度模型(16.4%)。供水单目标优化则在保障供水方面表现最佳,供水风险低至4.44%,其发电风险和生态风险处于较高水平。生态单目标优化使生态风险降至0%,在发电和供水方面风险则较高。

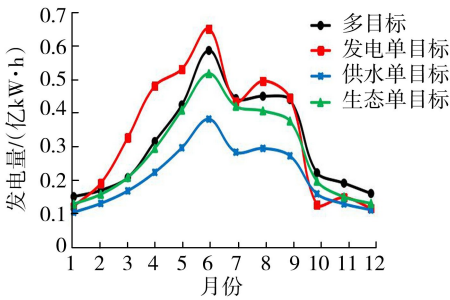


图 11 不同模型模拟的梯级水库多年月均发电量

综上所述,单目标优化在提高效益的同时,其他领域风险将显著增加。而多目标优化调度模型则能够在发电、供水和生态保护之间找到更加均衡的解,各目标风险指标均控制在较低且可接受的范围内,体现了良好的整体性。

4 结 语

本文采用 NSGA-III 算法及两层参考点法构建了敖江流域梯级水库多目标调度模型,有效解决了高维空间点数激增问题,并构建了多目标非劣解集优选模型,同时引入供水风险分析对多目标和单目标调度结果进行了分析。研究得出,与发电单目标调度模型相比,多目标调度模型能够在保持发电量稳定的同时显著降低发生供水短缺的概率,消除生态用水不足的情况,且弃水量大幅减少,优化效果显著;梯级水库多目标优化调度对径流的调节优势优于传统单目标调度,具有良好的蓄丰补枯作用;与单目标调度模型相比,多目标调度模型在发电、供水和生态保护之间找到了更加均衡的解,各目标风险指标均控制在较低且可接受的水平内,证实了多目标调度模型优于单目标调度模型。

参考文献:

[1] 张利平,夏军,胡志芳. 中国水资源状况与水资源安全问题分析[J]. 长江流域资源与环境,2009,18(2):116-120. (Zhang Liping, Xia Jun, Hu Zhifang. Situation and

problem analysis of water resource security in China[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin,2009,18(2):116-120. (in Chinese))

[2] 赵紫薇,杨哲,张全旺,等. 考虑预报不确定性的梯级水库群联合优化调度[J]. 水利水电科技进展,2025,45(4):67-75. (Zhao Ziwei, Yang Zhe, Zhang Quanyang, et al. Joint optimal operation of cascade reservoirs considering forecast uncertainty [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2025, 45 (4) : 67-75. (in Chinese))

[3] Hong Kunhui, Zhang Wei, Ma Aixing, et al. Multi-objective synergetic operation for cascade reservoirs in the Upper Yellow River[J]. Water,2024,16(10):1416.

[4] 温进化,张松达,王士武. 遗传算法在多目标水库群调度中的应用研究[C]//水系统与水资源可持续管理——第七届中国水论坛论文集. 北京:中国自然资源学会水资源专业委员会,中国地理学会水文地理专业委员会,中国水利学会水文专业委员会,等,2009:391-394.

[5] 黄显峰,王宁,刘志佳,等. 基于改进 NSGA-II 算法的梯级水库多目标优化调度[J]. 水利水电科技进展,2024,44(4):51-58. (Huang Xianfeng, Wang Ning, Liu Zhijia, et al. Multi-objective optimal operation of cascade reservoirs based on improved NSGA-II algorithm [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2024,44(4):51-58. (in Chinese))

[6] Feng Zhongkai, Zhang Li, Mo Li, et al. A multi-objective cooperation search algorithm for cascade reservoirs operation optimization considering power generation and ecological flows[J]. Applied Soft Computing, 2024, 150: 111085.

[7] Jin Wenting, Wang Yimin, Chang Jianxia, et al. Multi-objective synergetic reservoir operation in a sediment-laden river[J]. Journal of Hydrology, 2021, 599: 126295.

[8] 李洁玉,李航,王远见,等. 黄河水沙调控多目标协同模型构建及应用[J]. 水科学进展,2023,34(5):708-718. (Li Jieyu, Li Hang, Wang Yuanjian, et al. Construction and application of a multi-objective collaborative model of water and sediment regulation in the Yellow River [J]. Advances in Water Science, 2023, 34 (5) : 708-718. (in Chinese))

[9] 曾坤. 水资源短缺地区水风光中长期多目标协同运行研究[D]. 荆州:长江大学,2023.

[10] 王小安,李承军. 遗传算法在短期发电优化调度中的研究与应用[J]. 长江科学院院报,2003,20(2):13-15. (Wang Xiaohan, Li Chengjun. Research and application of genetic algorithm to cascade hyroelectric stations' short-term optimization scheduling [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2003, 20 (2) : 13-15. (in Chinese))

(下转第 62 页)

究[D]. 杭州:浙江大学,2023.

[12] 关晓迪,何盛东,魏欢欢,等. 基于 Mogi-Coulomb 强度准则的竖井井壁压力计算[J]. 建井技术,2022,43(1): 15-20. (Guan Xiaodi, He Shengdong, Wei Huanhuan, et al. Calculation on pressure in mine shaft lining based on Mogi-Coulomb strength criterion [J]. Mine Construction Technology,2022,43(1): 15-20. (in Chinese))

[13] Cheng Y M, Hu Y Y, Wei W B. General axisymmetric active earth pressure by method of characteristics-theory and numerical formulation [J]. International Journal of Geomechanics,2007,7(1):1-15.

[14] Chehadeh A, Turan A, Abed F, et al. Lateral earth pressures acting on circular shafts considering soil-structure interaction [J]. International Journal of Geotechnical Engineering,2019,13(2): 139-151.

[15] 朱正国,安辰亮,朱永全,等. 地铁深竖井土压力理论研究[J]. 岩石力学与工程学报,2013,32(增刊2):3776-3783. (Zhu Zhengguo, An Chenliang, Zhu Yongquan, et al. Research on soil pressure theory of deep subway shaft [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2013,32(S2):3776-3783. (in Chinese))

[16] 应宏伟,梁文鹏. 方竖井基坑平动模式挡墙的主动土压力[J]. 上海交通大学学报,2018,52(11): 1459-1466. (Ying Hongwei, Liang Wenpeng. Spatial active earth pressure against translating retaining walls in square shaft excavations[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2018,52(11):1459-1466. (in Chinese))

[17] Benmebarek S, Khelifa T, Benmebarek N, et al. Numerical evaluation of 3D passive earth pressure coefficients for retaining wall subjected to translation [J]. Computers and Geotechnics,2008,35(1):47-60.

[18] Schmüdderich C, Tschuchnigg F, Wichtmann T. Rigorous lower and upper bounds for the 3D passive earth pressure problem [J]. Géotechnique Letters, 2020, 10(2): 100-105.

[19] Yang Xiaoli, Li Zhengwei. Upper bound analysis of 3D static and seismic active earth pressure[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering,2018,108:18-28.

[20] Li Zhengwei, Yang Xiaoli. Three-dimensional active earth pressure for retaining structures in soils subjected to steady unsaturated seepage effects[J]. Acta Geotechnica, 2020,15(7):2017-2029.

[21] Li Zhengwei Yang Xiaoli. Three-dimensional active earth pressure under transient unsaturated flow conditions[J]. Computers and Geotechnics,2020,123:103559.

[22] Soubra A H, Galvani D, Regenass P. Three-dimensional active earth pressures [C]//Barcelona:European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering. Barcelona:ECCOMAS,2000.

[23] 顾慰慈. 挡土墙土压力计算[M]. 北京:中国建材工业出版社,2001:240-242.

[24] 张恒志,徐长节,何寨兵,等. 基于离散元方法的不同挡墙变位模式下有限土体主动土压力研究[J]. 岩土力学, 2022, 43(1): 257-267. (Zhang Hengzhi, Xu Changjie, He Zhaibing, et al. Study of active earth pressure of finite soils under different retaining wall movement modes based on discrete element method [J]. Rock and Soil Mechanics,2022,43(1):257-267. (in Chinese))

(收稿日期:2025 - 03 - 18 编辑:熊水斌)

(上接第 54 页)

[11] 王学斌,畅建霞,孟雪姣,等. 基于改进 NSGA-II 的黄河下游水库多目标调度研究[J]. 水利学报,2017,48(2): 135-145. (Wang Xuebin, Chang Jianxia, Meng Xuejiao, et al. Research on multi-objective operation based on improved NSGA-II for the lower Yellow River [J]. Journal of Hydraulic Engineering,2017,48(2): 135-145. (in Chinese))

[12] 吴云,曾超,杨侃,等. 基于改进 NSGA-II 算法的水资源多目标优化配置[J]. 人民黄河,2020,42(5): 71-75. (Wu Yun, Zeng Chao, Yang Kan, et al. Multi-objective optimal allocation of water resources based on improved NSGA-II algorithm [J]. Yellow River, 2020,42(5): 71-75. (in Chinese))

[13] 陈立华,梅亚东,董雅洁,等. 改进遗传算法及其在水库群优化调度中的应用[J]. 水利学报,2008,39(5): 550-556. (Chen Lihua, Mei Yadong, Dong Yajie, et al. Improved genetic algorithm and its application in optimal dispatch of cascade reservoirs [J]. Journal of Hydraulic Engineering,2008,39(5):550-556. (in Chinese))

[14] Deb K, Jain H. An evolutionary many-objective optimization algorithm using reference-point-based nondominated sorting approach, part I: solving problems with box constraints [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation,2014,18(4):577-601.

[15] Heidari M, Chow V T, Kokotović P V, et al. Discrete differential dynamic programming approach to water resources systems optimization [J]. Water Resources Research,1971,7(2):273-282.

[16] 蒋志强. 嵌套结构并行多维动态规划算法及其应用研究[D]. 北京:华北电力大学,2015.

[17] 丁洋洋. 分解策略型多目标进化算法中的自适应机制研究[D]. 南京:南京信息工程大学,2018.

(收稿日期:2025 - 03 - 09 编辑:俞云利)