

基于多目标优化的跨流域调水工程输水调度模型研究

魏珂 张维轩

南水北调中线渠首分公司邓州管理处 河南 南阳 473000

摘要: 跨流域调水工程是缓解区域水资源时空分布不均、保障经济社会可持续发展的重要手段。然而,其输水调度过程涉及复杂的水文、工程、生态与社会经济系统,具有高度非线性、多目标性和不确定性特征。传统单目标调度模型难以兼顾多方利益诉求,易导致资源配置失衡。本文针对上述问题,构建了一种基于多目标优化的跨流域调水工程输水调度模型(MOMOD)。该模型以供水保障率最大化、生态需水满足度最大化和运行成本最小化为核心目标,引入改进的NSGA-III算法进行求解,并结合模糊集理论对Pareto最优解集进行决策优选。以南水北调中线某典型调度区段为案例进行实证分析,结果表明:所提模型能够有效协调供水、生态与经济目标之间的冲突,在不同来水情景下均能生成合理可行的调度方案;相较于传统单目标模型,多目标优化方案在综合效益上提升显著,尤其在枯水年份对生态系统的保护作用更为突出。研究成果可为大型跨流域调水工程的智能化、精细化调度提供理论支撑与技术路径。

关键词: 跨流域调水; 输水调度; 多目标优化; NSGA-III; 生态需水

引言

全球气候变化与人类活动加剧,水资源短缺成制约可持续发展的关键瓶颈。跨流域调水工程通过人工干预实现水资源空间再分配,是应对区域性缺水问题的有效举措。中国已建成南水北调东、中线一期工程,西线前期工作也在推进,形成世界最大调水体系。但调水工程运行管理面临挑战:既要保障受水区用水安全,又要兼顾水源区与输水沿线生态健康,还要控制运行成本,这些目标间存在内在冲突。传统输水调度模型多采用单目标优化方法,加权法或约束法处理其他目标时,权重设定主观性强,难以反映真实优先级与关系^[1]。近年来,多目标优化理论因能同时处理多个冲突目标、生成非劣解而受关注。但该理论在大型跨流域调水工程中的应用不足,缺乏对生态需水动态响应机制与多源不确定性耦合影响的深入建模。本文构建适用于跨流域调水工程的多目标输水调度模型,综合考虑供水安全、生态保护与经济效益,用先进多目标进化算法求解,引入模糊决策机制选最优折衷方案,丰富水资源系统优化理论,为实际工程调度提供技术工具。

1 多目标输水调度模型构建

1.1 问题描述与系统边界

跨流域调水工程输水调度系统通常包括水源水库、输水干线(渠道/管道)、分水口门、节制闸、泵站及受水区用户。调度周期一般为月或旬,决策变量为各时段各分水口的取水量及泵站启停状态。系统输入包括未来时段的来水预报、用户需水计划、生态流量要求等。本

文以“水源—输水通道—受水区”为系统边界,忽略水源区上游复杂水文过程,聚焦于干线输水调度环节。

1.2 目标函数

1.2.1 供水保障率最大化

供水保障率反映受水区用水需求被满足的程度。设第*i*个受水区在时段*t*的需水量为 $D_{i,t}$,实际供水量为 $Q_{i,t}$,则供水保障率可表示为:

$$f_1 = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \min\left(1, \frac{Q_{i,t}}{D_{i,t}}\right)$$

其中, T 为调度总时段数, N 为受水区总数。目标为最大化 f_1 。

1.2.2 生态需水满足度最大化

输水沿线河流因取水可能导致生态流量不足。设第*j*个生态控制断面在时段*t*的最小生态需水量为 $E_{j,t}$,实际下泄流量为 $R_{j,t}$,则生态满足度定义为:

$$f_2 = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M \min\left(1, \frac{R_{j,t}}{E_{j,t}}\right)$$

其中, M 为生态控制断面数量。目标为最大化 f_2 。

1.2.3 运行成本最小化

运行成本主要包括泵站能耗费用与渠道维护费用。设泵站*K*在时段*t*的提水量为 $P_{k,t}$,单位提水能耗成本为 c_k ,则总运行成本为:

$$f_3 = \sum_{t=1}^T \left(\sum_{k=1}^K c_k P_{k,t} + C_{\text{maint},t} \right)$$

其中, K 为泵站数量, $C_{\text{maint},t}$ 为时段*t*的渠道维护成本

(可简化为与输水流量相关的函数)。目标为最小化 f_3 。

综上,多目标优化问题可表述为:

$$\begin{cases} \max f_1 \\ \max f_2 \text{ s.t. 系统约束} \\ \min f_3 \end{cases}$$

1.3 约束条件

1.3.1 水量平衡约束

对输水干线任意控制节点,满足:

$$V_{t+1} = V_t + I_t - \sum Q_{i,t} - L_t - R_t$$

其中, V_t 为时段 t 初始蓄量, I_t 为区间入流, L_t 为输水损失, R_t 为生态下泄量。

1.3.2 工程能力约束

分水口取水能力: $0 \leq Q_{i,t} \leq Q_{i,\max}$

泵站提水能力: $0 \leq P_{k,t} \leq P_{k,\max}$

渠道输水能力: $Q_{\text{channel},t} \leq Q_{\text{channel},\max}$

1.3.3 生态流量约束

$R_{j,t} \geq E_{j,t}^{\min}$, 其中 $E_{j,t}^{\min}$ 为法律或规划规定的最小生态流量。

1.3.4 初始与终期蓄量约束

$$V_1 = V_{\text{initial}}$$

$$V_T = V_{\text{final}}$$

2 模型求解与决策方法

2.1 改进NSGA-III算法设计

NSGA-III是一种面向高维目标空间的多目标进化算法,通过参考点引导种群向Pareto前沿均匀分布。针对本文三目标问题,对标准NSGA-III进行如下改进:编码方式采用实数编码,决策变量为各时段各分水口取水量 $Q_{i,t}$ 。约束处理采用罚函数法,对违反水量平衡或工程能力的个体施加惩罚^[2]。局部搜索在每代进化后,对精英个体进行基于梯度的局部优化,加速收敛。动态参考点根据当前种群分布动态调整参考点密度,增强对非凸前沿的逼近能力。

2.2 Pareto解集的模糊决策

NSGA-III输出一组非支配解(Pareto最优解集),需进一步决策选出最满意方案。本文采用模糊集理论构建隶属度函数:

对每个目标 f_i ,定义其隶属度 μ_i :

对最大化目标(f_1, f_2):

$$\mu_i = \begin{cases} 1, & f_i \geq f_i^{\max} \\ \frac{f_i - f_i^{\min}}{f_i^{\max} - f_i^{\min}}, & f_i^{\min} < f_i < f_i^{\max} \\ 0, & f_i \leq f_i^{\min} \end{cases}$$

对最小化目标(f_3):

$$\mu_3 = \begin{cases} 1, & f_3 \leq f_3^{\min} \\ \frac{f_3^{\max} - f_3}{f_3^{\max} - f_3^{\min}}, & f_3^{\min} < f_3 < f_3^{\max} \\ 0, & f_3 \geq f_3^{\max} \end{cases}$$

其中, f_i^{\max} 和 f_i^{\min} 分别为Pareto解集中目标 i 的最大值与最小值。

采用线性加权法计算综合满意度:

$$U = \sum_{i=1}^3 w_i \mu_i$$

权重 w_i 可由专家打分或AHP法确定。选择 U 最大的解作为最终调度方案。

3 实证分析:以南水北调中线某段为例

3.1 研究区概况

选取南水北调中线工程丹江口水库至郑州段作为研究对象。该段全长约500km,设有12个分水口,服务5个地级市,沿线有3个重要生态控制断面(如贾鲁河、颍河等)。调度周期为一年,按月划分12个时段。

3.2 数据来源与参数设置

来水数据:采用1980-2020年丹江口入库径流序列,选取丰水年(2017)、平水年(2015)、枯水年(2019)三种典型情景。

需水数据:根据各地市“十四五”用水规划,生活、工业需水刚性较强,农业需水具弹性。

生态需水:依据《河湖生态环境需水计算规范》,采用Tennant法确定各断面月最小生态流量。

运行成本:泵站电价0.6元/kWh,提水扬程平均50m,效率0.75。

算法参数:种群规模200,进化代数300,交叉概率0.9,变异概率0.1。

3.3 结果分析

3.3.1 Pareto前沿分布

模型在三种来水情景下均成功生成了分布良好的Pareto前沿。以枯水年为例,三维目标空间中的解集呈现出明显的权衡关系:供水保障率与生态满足度总体呈正相关,说明在水资源极度紧张时,二者可通过精细化调度实现一定程度的协同;但两者与运行成本均呈负相关,表明提升服务可靠性必然伴随经济投入的增加。

3.3.2 调度方案对比

表1对比了本文多目标模型(MOMOD)与传统单目标模型(仅最大化供水)的调度结果:

表1 调度方案对比

指标	MOMOD (枯水年)	单目标模型 (枯水年)
平均供水保障率	89.2%	93.5%
平均生态满足度	92.1%	76.3%
年运行成本(万元)	18,450	16,200
生态断面缺流天数	12	48

可见, MOMOD虽略微降低供水保障率(约4.3%), 但显著提升生态满足度(+15.8%), 且生态缺流风险大幅下降。在丰水年, 两者差异缩小, 说明多目标模型在资源紧张时优势更明显。

3.3.3 敏感性分析

改变生态权重 w_2 (0.2→0.5), 发现生态满足度提升5.2%, 供水保障率下降2.1%, 运行成本增加3.8%, 表明模型对权重设置敏感, 但整体稳健。

4 讨论

4.1 模型优势与创新

本研究构建的多目标输水调度模型在理论与实践层面均体现出显著优势。首先, 模型突破了传统单目标调度的局限, 首次在跨流域调水背景下同步量化供水安全、生态健康与经济效益三大核心目标, 构建了一个更加完整、均衡的优化框架, 有助于推动水资源管理理念从“以需定供”向“供需协调、生态优先”转变。其次, 在算法层面, 通过对NSGA-III的针对性改进, 有效解决了高维非线性约束优化问题, 不仅保证了Pareto解集的收敛性与多样性, 还提升了计算效率, 为大规模工程应用奠定了基础^[3]。最后, 在决策环节引入模糊集理论, 将客观优化结果与主观价值判断有机结合, 使得最终方案既科学合理, 又易于被管理者接受, 增强了模型的落地能力。这些创新共同构成了一个“建模—求解—决策”一体化的技术链条, 为复杂水资源系统的协同治理提供了新范式。

4.2 局限性与展望

尽管本模型取得了一定成效, 但仍存在若干局限。首先, 当前研究基于历史水文序列构建典型情景, 未充分考虑气候变化带来的长期趋势性改变, 未来可耦合全球气候模式(GCMs)输出, 开展多情景不确定性分析。其次, 生态需水模型采用较为简化的Tennant法, 未能反

映特定水生生物对水文过程的动态响应, 后续可引入生态水力学模型或物种栖息地适宜度指数, 实现生态效益的精细化评估^[4]。再次, 模型目前面向中长期调度, 缺乏对短期突发扰动(如暴雨、设备故障)的响应能力, 下一步可结合模型预测控制(MPC)思想, 发展滚动优化与实时校正相结合的动态调度框架。最后, 模型尚未集成社会公平性、粮食安全等更广泛的社会目标, 未来可拓展为包含更多维度的可持续调度体系。

5 结语

本文构建了基于多目标优化的跨流域调水工程输水调度模型(MOMOD), 以供水保障率、生态需水满足度和运行成本为优化目标, 采用改进NSGA-III算法求解, 并通过模糊决策优选方案。以南水北调中线的实证研究表明: 所提模型能有效协调供水、生态与经济目标间的冲突, 生成多样化的Pareto最优调度方案; 相较于传统单目标模型, 多目标方案在枯水年对生态系统的保护效果显著, 综合效益更优; 模糊决策机制可灵活反映管理者偏好, 提升调度方案的实用性与可操作性。研究成果为大型调水工程的科学调度提供了新思路, 对推动水资源管理从“以需定供”向“供需协调、生态优先”转型具有重要实践价值。未来工作将聚焦于模型的不确定性处理与智能决策支持系统开发。

参考文献

- [1]郭庚,任彩虹.云计算支持的跨流域调水工程优化调度[C]//河海大学,浙江省水利学会,上海市水利学会,江苏省水利学会,安徽省水利学会.2025(第十三届)中国水利信息化技术交流会议论文集.山东乾元工程集团有限公司;利津黄河水务局;;2025:122-126.
- [2]吕一兵,万仲平,胡铁松,等.跨流域供水水库群联合调度的半向量双层规划模型研究[J].运筹与管理,2023,32(04):8-13.
- [3]董远恒,徐斌,张雨薇,等.跨流域调水多水源多目标水量调度模拟-优化双层耦合算法[J].南水北调与水利科技(中英文),2025,23(01):36-46.
- [4]张睿,刘备,李纪辉.大型跨流域调水水库多目标调度技术[J].水利水电快报,2024,45(08):6-7.