

基于多目标人工蜂鸟算法的 输水泵站优化调度

赵亚南¹, 张 良², 许佳明²

(1. 徐州市水利工程运行管理中心, 江苏 徐州 221000; 2. 江苏省工程勘测研究院有限责任公司, 江苏 扬州 225100)

摘要: 针对泵站传统调度方法难以协同优化运行效率与能耗的问题, 以郑集水利枢纽为研究对象, 构建了以运行效率最高与总能耗最低为目标的泵站多目标优化调度模型, 并引入多目标人工蜂鸟算法(MOAHA)进行求解。结果表明: 相较于常规经验调度, MOAHA优化方案使郑集东站在35、47、53 m³/s工况下的总运行效率平均提升约1.0%, 郑集西站在不同工况下效率亦得到稳定改进; 与遗传算法(GA)和粒子群算法(PSO)相比, MOAHA在复杂工况下具有更快的收敛速度和更优的寻优精度, 在东站53 m³/s工况中, 其优化方案日能耗较GA和PSO分别降低609 kWh与516 kWh。该研究为输水泵站的精细化、智能化调度提供了有效的模型方法与决策支持。

关键词: 输水泵站; 多目标优化; 人工蜂鸟算法; 运行效率; 总能耗

中图分类号: TV675 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-7839(2026)06-0040-0006

Optimal scheduling of water pumping stations based on multi-objective artificial hummingbird algorithm

ZHAO Yanan¹, ZHANG Liang², XU Jiaming²

(1. Xuzhou Water Conservancy Project Operation Management Center, Xuzhou 221000, China;

2. Jiangsu Province Engineering Investigation and Research Institute Co., Ltd., Yangzhou 225100, China)

Abstract: To address the challenge of coordinating operational efficiency and energy consumption in traditional pump station scheduling methods, this study takes the Zhengji Water Control Project as the research subject and establishes a multi-objective optimization scheduling model for pump stations aimed at maximizing operational efficiency and minimizing total energy consumption. The Multi-Objective Artificial Hummingbird Algorithm (MOAHA) is introduced for solution. The results show that compared to conventional empirical scheduling, the MOAHA-optimized scheme increases the overall operational efficiency of Zhengji East Station by approximately 1.8% under flow rates of 35, 47, and 53 m³/s, while also achieving stable efficiency improvements at Zhengji West Station across various conditions. When compared to Genetic Algorithm (GA) and Particle Swarm Optimization (PSO), MOAHA demonstrates faster convergence and superior optimization accuracy under complex conditions. At the 53 m³/s flow rate for East Station, its optimized solution reduces daily energy consumption by 609 kWh and 516 kWh compared to GA and PSO, respectively. This research provides effective model methods and decision support for refined and intelligent scheduling of water transfer pump stations.

Key words: water pumping station; multi-objective optimization; artificial hummingbird algorithm; operational efficiency; total energy consumption

收稿日期: 2026-02-02

作者简介: 赵亚南(1983—), 男, 工程师, 本科, 主要从事水利水电工程工作。E-mail: hou62228@163.com

泵站作为水资源配置及调度的关键工程设施,在区域供水、防洪排涝和生态补水等方面发挥不可替代的作用^[1]。随经济社会快速发展,气候变化影响逐步加剧,水资源的供需矛盾愈发凸显,泵站运行调度面临着提高效率、降低能耗等挑战^[2]。以往的泵站调度方式大多依靠经验规则或单一目标优化,难以在复杂多变的实际工况下平衡经济性、可靠性与环境效益。因此,探究高效智能的泵站优化调度办法,对提高水资源利用效率,促进水利工程智能化转变有重要意义^[3]。

智能优化算法在复杂工程调度中体现出显著优势^[4]。人工蜂鸟算法作为一种仿照蜂鸟觅食行为的新颖群体智能算法,具备收敛速度快、全局搜索效能强等特点,已在多个领域成功应用^[5],将该技术引入泵站调度中,尤其是面向多目标优化的特定场景中,有望在满足供水要求、减少能耗等多目标间实现有效平衡,为泵站精细化、智能化调度带来新思路^[6]。

本文以郑集水利枢纽为研究对象,针对其调度中存在的多目标协同难题,探索基于多目标人工蜂鸟算法的优化调度理论与方法,以求为区域水资源集约节约利用和智慧水利建设提供科学依据与技术借鉴。

1 工程概况

郑集水利枢纽位于铜山区郑集镇东侧,郑集河下游,主要由调水工程和防洪工程两大部分组成,而调水工程由东、西两座泵站组成。

郑集东站配6台1850KP-CV11.0-5.4型立式全调节轴流泵,单机流量11 m³/s,配TL1100-28/2150型高压同步电动机,五主机一备机,单机功率1 100 kW,总装机容量6 600 kW,设计流量55 m³/s,设计扬程5.4 m,平均扬程5.3 m,叶片安放角-2°,采用肘形流道进水、直管式出水,拍门断流,转速214.3 r/min。



图1 工程概况

郑集西站配6台1400ZLB5.5-5.5型立式轴流泵,单机流量5 m³/s,配YL630-16型450 kW高压异步电动机,五主机一备机,单机功率450 kW,总装机容量2 700 kW,设计流量25 m³/s,设计扬程4.7 m,最大扬程5.9 m,采用肘形流道进水、直管式出水,拍门断流,转速369 r/min。

2 泵站优化调度模型构建

构建泵站优化调度模型旨在通过数学建模与智能算法,在满足各项工程与运行约束的前提下,科学制定机组启停与流量分配方案,以实现多目标的综合最优。

2.1 优化调度目标函数

本研究建立以运行效率最高和总能耗最低为目标的综合函数。

总运行效率 f_1 最大化:泵站总运行效率 η_{total} 定义为总有效输出功率 P_{out} 与总输入电功率 P_{in} 之比,是衡量泵站能量转换综合性能的关键指标。最大化总运行效率的目标函数可表述为:

$$\max f_1 = \eta_{\text{total}} = \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}} = \frac{\rho g \sum_{i=1}^N (Q_i \cdot H_i)}{1000 \sum_{i=1}^N P_{\text{in},i}} \quad (1)$$

式中: ρ 为水体密度,kg/m³;g为重力加速度,m/s²;N为可运行机组总台数; Q_i 为第*i*台机组的运行流量,m³/s; H_i 为对应第*i*台机组的净扬程,m; $P_{\text{in},i}$ 为第*i*台机组的输入电功率,kW。对于全调节轴流泵, Q_i, H_i 和机组的效率 η_i 之间存在由水泵综合特性曲线确定的非线性关系,即 $P_{\text{in},i} = \frac{\rho g Q_i \cdot H_i}{1000 \eta_i}$ 。

总运行能耗 f_2 最小化:在考虑运行成本的场景下,最小化调度周期内的总能耗是核心经济目标。其目标函数为:

$$\max f_2 = E_{\text{total}} = \sum_{i=1}^N P_{\text{in},i} \cdot T \cdot \delta_i \quad (2)$$

式中: T 为调度时段长度,h; δ_i 为0~1决策变量,表示第*i*台机组的启停状态,1为运行,0为停机。

2.2 约束条件

模型的求解必须严格遵循泵站系统的物理规律与安全运行规程,主要约束如下:

(1)流量平衡约束:所有运行机组提供的总抽水流量必须精确满足调度指令的需求。

$$\sum_{i=1}^N (Q_i \cdot \delta_i) = Q_{\text{req}} \quad (3)$$

式中: N 为泵站内可用水泵机组的总台数; Q_i 为第*i*台机组的运行流量,m³/s; δ_i 为第*i*台机组的启停状

态变量,为0~1决策变量, $\delta_i=1$ 表示该机组运行, $\delta_i=0$ 表示停机; Q_{req} 为调度时段内要求泵站提供的总流量, m^3/s 。

单机流量约束:每台运行机组的流量必须控制在由水泵安全运行下限和设计上限所确定的可行范围内,以避免汽蚀、过载等不安全工况。

$$\delta_i \cdot Q_{\min} \leq Q_i \leq \delta_i \cdot Q_{\max} \quad (4)$$

式中, Q_{\min} 为单台水泵允许运行的最小安全流量,取额定流量的70%; Q_{\max} 为单台水泵允许运行的最大流量,取额定流量。当机组停机时,该约束自动将其流量限制为零。

(2)扬程特性约束:每台运行机组所需克服的总扬程由静扬程和随流量变化的管路水头损失共同决定,各运行机组工作于同一装置扬程下。

$$H_i = H_{\text{set}} = H_{\text{st}} + k \cdot Q_{\text{total}}^2, \forall i \in \{\delta_i = 1\} \quad (5)$$

$$Q_{\text{total}} = \sum_{i=1}^N (Q_i \cdot \delta_i) \quad (6)$$

式中: H_i 为第 i 台运行机组的工作净扬程, m ; H_{set} 为泵站装置扬程, m ; H_{st} 为静扬程,即出水池与进水池的水位差, m ; k 为泵站装置的总阻力系数, s^2/m^5 ; Q_{total} 为泵站总运行流量, m^3/s 。

(3)运行台数约束:同时投入运行的机组总数受到电气容量、设备状况或操作规程的限制。

$$\sum_{i=1}^N \delta_i \leq M \quad (7)$$

式中: M 为调度时段内允许同时运行的最大机组台数。

2.3 多目标人工蜂鸟算法

多目标人工蜂鸟算法(MOAHA)是针对泵站多目标优化调度问题的核心求解器。标准人工蜂鸟算法模拟了蜂鸟独特的飞行技巧,即轴向、对角、全向飞行和智能觅食策略,包括向导觅食、领地觅食和迁徙觅食。MOAHA在此基础上,引入了非支配排序与精英存档机制,其核心目标在于寻找一组能够有效权衡运行效率最大化与运行能耗最小化这两个目标的最优解集。

2.3.1 算法原理与泵站问题的映射

MOAHA将泵站的每一个可能的调度方案视为一个食源,算法中的每一只蜂鸟与一个食源位置相关联。在泵站调度问题中,蜂鸟的位置向量 $X=[x_1, x_2, \dots, x_D]$ 编码了一个完整的调度方案,其维度 D 对应决策变量的数量。

$$X=[\delta_1, Q_1, \delta_2, Q_2, \dots, \delta_N, Q_N] \quad (8)$$

位置向量直接包含了每台机组的启停状态 δ_i 和 Q_i 分配流量。算法的任务就是在满足前述所有

约束条件的飞行空间内,引导蜂鸟群体找到在 f_1 和 f_2 目标上均表现优异的食源区域。

2.3.2 算法求解过程

MOAHA的迭代过程主要以下阶段:

(1)初始化:在可行域内随机生成规模为 N_p 的初始蜂鸟种群,即随机产生 N_p 个不同的泵站调度方案。每个方案需通过约束校验,并计算其对应的两个目标函数值 f_1 和 f_2 。

(2)适应度评估与非支配排序:由于存在两个目标,算法采用非支配排序来评价解的优劣。一个解 X_1 支配另一个解 X_2 (记为 $X_1 < X_2$),当且仅当:在 f_1 和 f_2 上, X_1 至少有一个目标优于 X_2 ,且在所有目标上, X_1 都不差于 X_2 。

(3)食源引导与位置更新:算法模拟蜂鸟的3种智能行为来更新位置。

引导觅食,每只蜂鸟按一定概率记忆当前全局最优的某个食源,并飞向它。位置更新公式为:

$$X_{\text{new}} = X_{\text{target}} + a \cdot D \cdot (X_{\text{target}} - X_{\text{current}}) \quad (9)$$

其中, a 为引导因子; D 为基于飞行技巧的飞行方向矩阵。此行为促进算法开发已知的优秀方案区域。

区域觅食,蜂鸟飞向自己领地内的一个随机食源进行探索,更新公式为:

$$X_{\text{new}} = X_{\text{target}} + bDX_{\text{current}} \quad (10)$$

式中: b 为区域因子。此行为帮助算法在当前解附近进行精细搜索,避免早熟收敛。

迁徙觅食,当某个食源长期未被访问时,其对应的蜂鸟会放弃它,并迁徙到一个全新的随机位置:

$$X_{\text{worst}} = L_B + r(U_B - L_B) \quad (11)$$

式中: r 为随机数, L_B 和 U_B 分别为变量的上下界。此行为是维持种群多样性、跳出局部最优的关键。

(4)外部精英存档维护:算法会建立一个独立的外部存档,该存档的作用是保存迭代过程里找到的全部非支配解,每一次迭代完结之后,把新产生的非支配解与存档中的解进行比照:去除被新解支配的旧解;若没有一个存档中的解可以支配新解,便把此解添加到存档里面。

(5)终止与输出:当达到预先设置的最大迭代次数或者目标函数收敛阈值时,最终输出的外部存档即为所需的最优解集。

MOAHA算法的泵站优化调度过程如图2所示。

3 泵站优化调度

3.1 模型超参数设置

为实施MOAHA求解泵站优化调度模型,研究

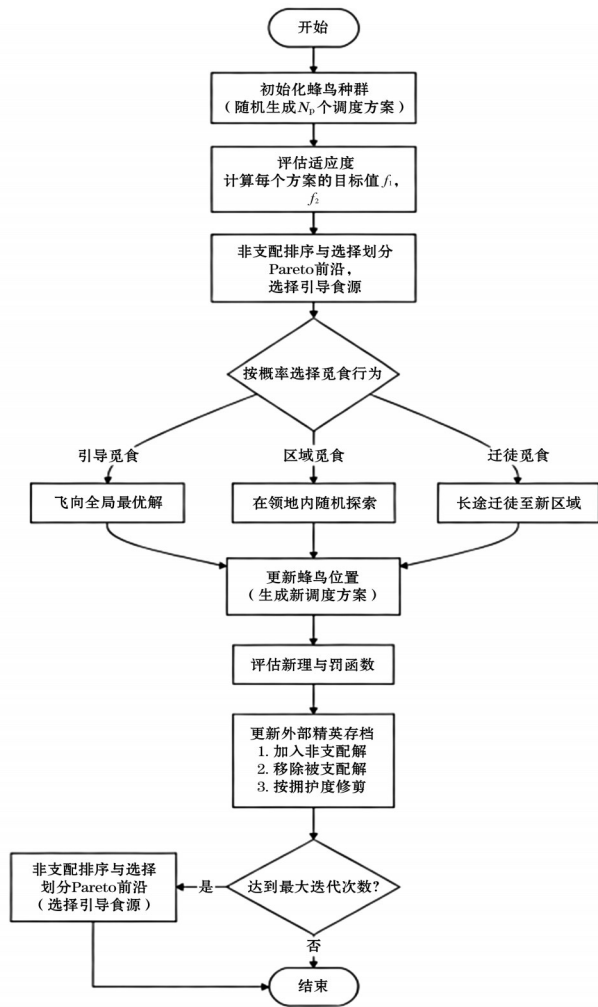


图2 MOAHA算法的泵站优化调度过程

首先对其关键超参数进行设定,其控制着算法的搜索行为,收敛特性和计算效率,是获得最优解关键。本研究中MOAHA的超参数设置情况如表1所示。

3.2 泵站优化调度

对于郑集东站,研究分别探究其在流量工况为

表1 实验环境和超参数设置

参数类别	参数项	设定值
算法种群参数	种群规模	50
	最大迭代次数	200
算法行为参数	引导因子 a	1
	区域因子 b	1
	引导觅食概率	0.5
	区域觅食概率	0.3
	迁徙觅食概率	0.2
飞行模式参数	迁徙周期	每20代
	轴向飞行选择概率	1月3日
	对角飞行选择概率	1月3日
多目标处理参数	全向飞行选择概率	1月3日
	外部存档大小	100
	拥挤度距离计算	启用

35、47和53 m³/s下常规与优化调度方案,对于郑集西站,分别探究了其在流量工况为13、17和23 m³/s下的调度方案。

3.2.1 常规调度方案

常规调度方案下,郑集东站和郑集西站两座泵站各机组流量、扬程及效率分别如表2和表3所示。

结果显示,常规调度方案下,两站运行效率均处于中等水平。郑集东站在35、47、53 m³/s工况下的总效率分别为85.0%、86.5%和86.0%,郑集西站在13、17、23 m³/s工况下效率为82.0%、82.5%和83.0%。两座泵站效率较低的原因在于平均分配策略:东站长机负荷在8.75~10.6 m³/s、西站在4.25~4.6 m³/s范围内,均明显偏离其额定高效点,即11 m³/s和5 m³/s。此外,流量增加导致泵站的水头损失增大,

表2 郑集东站常规调度方案下机组流量、扬程及效率

工况	所需总流量/(m ³ /s)	运行机组数/台	各机组流量/(m ³ /s)	泵站扬程/m	水头损失/m	单机效率/%	总运行效率/%
工况一	35	4	8.75, 8.75, 8.75, 8.75	5.25	0.45	85.0, 85.0, 85.0, 85.0	85.0
工况二	47	5	9.4, 9.4, 9.4, 9.4, 9.4	5.35	0.55	86.5, 86.5, 86.5, 86.5, 86.5	86.5
工况三	53	5	10.6, 10.6, 10.6, 10.6, 10.6	5.42	0.62	86.0, 86.0, 86.0, 86.0, 86.0	86.0

表3 郑集西站常规调度方案下机组流量、扬程及效率

工况	所需总流量/(m ³ /s)	运行机组数/台	各机组流量/(m ³ /s)	泵站扬程/m	水头损失/m	单机效率/%	总运行效率/%
工况一	13	3	4.33, 4.33, 4.33	4.65	0.35	82.0, 82.0, 82.0	82.0
工况二	17	4	4.25, 4.25, 4.25, 4.25	4.75	0.45	82.5, 82.5, 82.5, 82.5	82.5
工况三	23	5	4.6, 4.6, 4.6, 4.6, 4.6	4.85	0.55	83.0, 83.0, 83.0, 83.0, 83.0	83.0

东站从0.45 m增至0.62 m,西站从0.35 m增至0.55 m,这是因为扬程升高进一步改变了机组工作点。

3.2.2 优化调度方案

基于上述常规调度方案的缺陷,MOAHA从提高泵站运行效率,降低运行能耗角度对泵站运行进行优化,优化结果分别如表4和表5所示。

基于MOAHA的优化调度方案相较于常规方案,实现了运行能效上的系统性提高,就效率提升而言,当处于35、47、53 m³/s工况时,郑集东站总运行效率分别为85.1%、86.2%和88.2%,与常规方案的85.0%、85.5%和86.0%相比,平均提升约1.0%。对于郑集西站,在13、17、23 m³/s工况时,其效率分

表4 郑集东站优化调度方案下机组流量、扬程及效率结果

参数	所需总流量/ (m³/s)	运行机 组数/台	各机组流量/ (m³/s)	泵站 扬程/m	水头 损失/m	单机效率/ %	总运行 效率/%
工况一	35.0	4	11.0,8.0,8.0,8.0	5.25	0.45	88.5,84.0,84.0,84.0	85.1
工况二	47.0	5	11.0,11.0,9.0,8.0,8.0	5.36	0.55	88.5,88.5,85.5,84.0,84.0	86.2
工况三	53.0	5	11.0,11.0,11.0,10.0,10.0	5.44	0.64	88.5,88.5,88.5,85.8,85.8	88.2

表5 郑集西站优化调度方案下机组流量、扬程及效率结果

参数	所需总流量/ (m³/s)	运行机 组数/台	各机组流量/ (m³/s)	泵站 扬程/m	水头 损失/m	单机效率/ %	总运行 效率/%
工况一	13.0	3	5.0,4.5,3.5	4.66	0.36	84.0,82.8,79.5	82.1
工况二	17.0	4	5.0,4.5,4.0,3.5	4.76	0.45	84.0,82.8,81.0,79.5	81.8
工况三	23.0	5	5.0,5.0,5.0,4.5,3.5	4.86	0.55	84.0,84.0,84.0,82.8,79.5	82.9

别为82.1%、81.8%和82.9%,与常规的82.0%、81.5%和83.0%相比,除工况三基本持平外,其余工况均获得稳定改进。能效提升的途径为调度策略从平均分配调整为高效优先:优化方案让尽量多的机组在额定高效点周边运行,即便虽有小流量调节机组效率偏低,如西站3.5 m³/s机组效率为79.5%,但通过机组间负荷的协同优化,系统整体效率仍显著提高。优化之后的水头损失同常规方案大体相同,这证实算法在提升效率时没有显著增加水力损耗。

3.2.3 优化调度方案对比

为进一步验证MOAHA算法的优越性,构建了遗传算法(GA)及粒子群优化算法(PSO)与其进行对比。3种算法下,东、西两座泵站分别以53m³/s和23 m³/s为例,探究系统总效率随算法迭代次数的变化,如图3和图4所示。

结果显示,MOAHA算法在收敛速度、优化精度和鲁棒性方面均展现出明显优越性,对于郑集东站53 m³/s的工况时,MOAHA约在15代收敛到最优效率88.20%,而GA和PSO分别在大约20代、18代收敛至87.75%和87.83%的次优解,这反映MOAHA的引导迁徙混合搜索机制具备更强的全局寻优本领,能更快跳出局部最优。此效率方面的优势直接体现成经济效益,MOAHA方案一日能源消耗约为

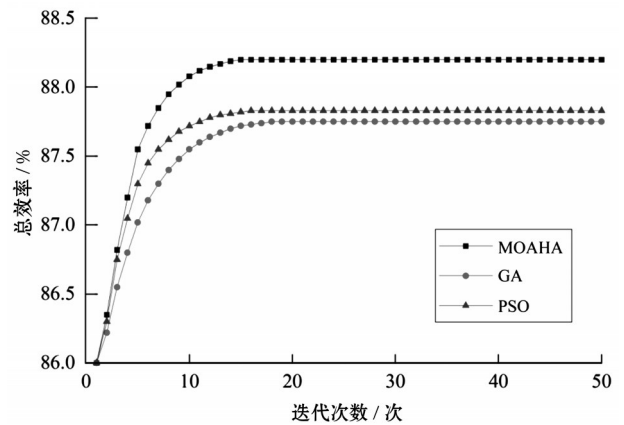


图3 郑集东站3种算法收敛过程

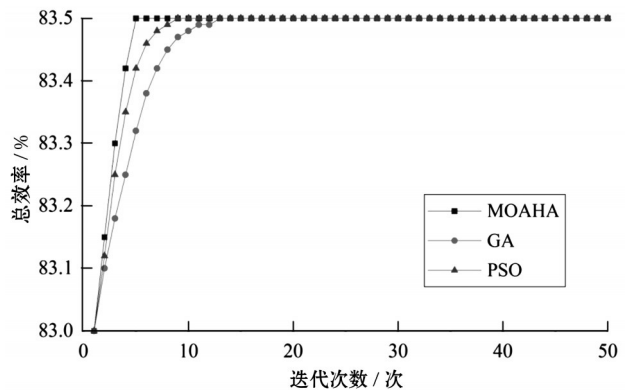


图4 郑集西站3种算法收敛过程

81 439 kWh,对比GA的82 048 kWh、PSO的81 955 kWh,分别降低609 kWh和516 kWh,即单站日节能的百分比约为0.74%和0.63%。在郑集西站23 m³/s工况下,3种算法最终都收敛到了82.9%的效率水平,但MOAHA实现收敛的速度更快。这一对比结果说明,就约束条件复杂、解空间呈现非线性的泵站调度问题而言,MOAHA依靠精细化的多维搜索方法,在解的质量上优于传统算法;而对于相对简单的问题,其优势主要反映在更快的收敛速度上,MOAHA在求解质量与计算效率上的平衡能力,使其更适合去求解实际的、具有多约束的泵站多目标优化调度问题。

4 结 论

本文针对郑集水利枢纽泵站,构建了以运行效率最高、总能耗最低为目标的多目标优化调度模型,并引入多目标人工蜂鸟算法(MOAHA)进行求解。结果表明,相较于常规调度方案,MOAHA优化方案能有效提升系统总运行效率,其中郑集东站各工况效率平均提升约1.0%,郑集西站效率也获得稳定改进。算法对比分析显示,MOAHA在求解精

度与收敛速度上均优于传统遗传算法与粒子群算法,特别是在复杂工况下能更快寻获更优解,验证了其在处理高维、非线性工程调度问题上的优越性与鲁棒性。本研究为泵站实现安全、经济、高效的精细化智能调度提供了切实可行的技术路径与决策支持。

参考文献:

- [1] 蓝旭坤,杨云,朱麟.用地紧缺地区输水泵站建设关键问题及解决措施[J]. 工程技术研究,2025,10(21):149-151.
- [2] 薄琳,李思文.西部地区灌区梯级泵站优化调度模型研究[J]. 水利技术监督,2026(2):236-240.
- [3] 黄秘昌.环北部湾广西水资源配置工程总体布局[J]. 广西水利水电,2025(6):64-68.
- [4] 戚庆军,吕海乐.梯级泵站优化调度模型研究及其应用[J]. 江淮水利科技,2025(5):58-64.
- [5] 张少恺,龙岩,管一,等.基于模型预测控制的泵站群联合调度研究[J]. 海河水利,2023(11):58-62.
- [6] 周迅,刘斌,周伏虎,等.基于改进人工蜂群算法的智能泵组优化研究[J]. 机械设计与制造工程,2022,51(11):119-123.

(上接第34页)

了全链条支撑,是数字孪生模型参数率定与动态仿真的可靠基础。

(2)数字孪生技术有效破解了改革遗留的“用水计划粗放、调度响应滞后、极端气候应对不足”等瓶颈。在沙河水库灌区中干渠试点,通过作物需水智能预报模型、渠系水动力仿真模型与灌溉决策集成系统,实现从“经验灌溉”向“预报—决策—调控”一体化模式跃升。2025年数字孪生试点区农田灌溉水有效利用系数达0.6817,明显优于同类中型灌区。

(3)制度与技术可以形成“制度嵌入技术、技术激活制度”的双向赋能机制。水权分配、超定额累进加价等规则可以被编码至数字孪生平台,使制度执行从人工监管转向自动触发;同时,数字孪生提供的精准需水预报与动态调度方案,可使“总量控制、定额管理”落地为可追踪指令,显著增强制度精准调控能力。

参考文献:

- [1] 顾涛,王一之,沈莹莹,等.数字孪生灌区先行先试建设成效与发展思考[J]. 中国水利,2025(13):34-41.
- [2] 刘宽,翟家齐,赵勇,等.面向生态健康的农业节水潜力评价框架[J]. 水资源保护,2025,41(6):217-226,258.
- [3] 陈茂山.农业水价综合改革的探索实践与方向重点[J]. 中国水利,2024(19):1-6.
- [4] 王金霞,张丽娟.绿色转型背景下农业节水的政策演进、发展困境及破解对策[J]. 中州学刊,2024(5):24-31.
- [5] 高惠嫣,朱睿,刘宏权,等.白洋淀西部平原参考作物腾发量长期变化趋势及其成因[J]. 中国农村水利水电,2022(3):155-162.
- [6] 武佳乐,李银坤,张钟莉莉,等.基于单作物系数法的温室秋季生菜蒸散量估算及验证[J]. 灌溉排水学报,2024,43(4):9-14.
- [7] 管光华,周致远,陈晓敏,等.输水渠系干支耦合仿真模型构建及控制方式[J]. 农业工程学报,2025,41(14):113-120.