

基于水利知识图谱的梯级水电站智能调度方法

罗 玮^{1,2} 李英嘉¹ 胡诗若¹ 刘丁泉^{3*}
LUO Wei LI Yingjia HU Shiruo LIU Dingxiao

摘 要

针对传统梯级水电站调度方法采用静态权重策略难以适应水情、电力、生态实时变化,且水利领域知识高度分散、缺乏动态推理机制等问题,文章提出一种基于水利知识图谱的梯级水电站智能调度方法。首先构建融合水文、工程、生态及调度规则的水利知识图谱,对多源异构数据进行统一建模与语义关联;其次设计调度目标动态识别机制,将知识图谱推理结果与多源实时监测数据相结合,自动求取各目标的情境感知动态权重;最后引入改进粒子群优化算法求解调度策略,在满足硬约束安全的前提下实现多目标动态耦合与协同优化。以某流域三级梯级水电站为对象的仿真结果表明,所提方法在兼顾防洪安全与生态保护的前提下,较传统固定权重方法发电量提升7.63%、洪水削峰率提升19.05%、生态流量满足率提升12.35%,可显著提升梯级发电效率与综合调度效益。

关键词

水利知识图谱;梯级水电站;智能调度;多目标优化;知识推理

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2026.07.035

0 引言

梯级水电站是流域水资源配置体系中的核心枢纽,其调度方案的科学性直接关系到流域发电效益、防洪安全与生态环境保护。近年来,随着流域开发持续推进,多座水电站已形成梯级联合运行格局,使梯级水电调度问题呈现出多目标动态冲突、多约束条件叠加、各环节强耦合等鲜明特征。在不同水文条件下,调度的主导目标会发生显著变化,各目标之间的冲突也更为明显^[1]。因此,在严格遵守安全硬约束底线的基础上实现多目标动态协同优化,已成为当前梯级水电调度领域的重要研究课题。

传统梯级水电调度方法主要包括动态规划、线性规划及启发式优化算法等^[2],但这类方法存在一个长期未被充分解决的共性问题:需事先为各类调度目标赋予固定权重,且约束规则高度依赖专家经验。然而梯级水电运行所面临的水文条件、电力需求、生态保护要求都具有较强的动态性,预设的静态权重难以适应水文情势的实时变化。更深层的问题在于水利调度涉及大量领域知识,如水文演变规律、工程运行规范、生态保护约束等,这些知识分散于各类文档、数据库及专家经验之中,缺乏统一可操作的整合与表达机制,难以

融入调度决策的动态推理过程^[3]。

知识图谱技术近年来在智能决策领域得到广泛应用,其以结构化形式表示实体及关系,借助图推理实现复杂知识的关联分析,适合解决动态多目标优化问题^[4]。在水利领域,知识图谱为整合多源异构水利数据、构建智能决策系统提供了新途径^[5],可将专家知识、客观规则及实时情境转化为结构化知识网络,实现调度知识的可计算与可推理。然而,目前对梯级水电调度的研究多从优化算法本身出发,对水利领域知识的系统化建模及结合实时情境的动态推理仍存在不足,尚未真正完成从“静态权重调度”向“情境感知动态加权调度”的范式转变。

针对上述问题,本文提出一种基于水利知识图谱的梯级水电站智能调度方法。首先利用水利知识图谱组织多源异构水利信息,将领域知识、调度规则及实时工况融入结构化知识网络;其次借助知识图谱的推理能力确定并实时调整调度目标权重,实现从“静态权重”到“情境感知动态加权”的优化范式转变;最后结合改进粒子群优化算法生成调度策略。

本文主要贡献在于:

- (1) 构建面向梯级水电调度的水利知识图谱,实现水文、工程及调度规则等多源信息的统一表示;
- (2) 提出基于知识推理的调度目标动态识别方法,实现多目标权重的实时调整;
- (3) 通过改进粒子群优化算法生成调度策略,并结合仿真实验验证方法的有效性。

1. 清华大学水利工程系 北京 100084
2. 国能大渡河大数据服务有限公司 四川成都 610041
3. 北京智谱华章科技股份有限公司 北京 100084
[基金项目] 国家自然科学基金(52539001)

1 相关工作

1.1 水利知识图谱研究

随着智慧水利建设的推进,知识图谱技术逐步渗透到智慧水利系统的构建过程中^[6]。已有研究利用水利知识图谱实现了水文数据管理、工程设备管控、灾害预警等功能,并对水库、河道、气象要素等实体及其关系进行了系统建模,较好地解决了水利信息共享与语义查询问题。在此基础上,将水利知识图谱与调度优化算法深度融合,构建知识驱动的智能调度方法,对解决梯级水电调度难题具有重要的应用价值。

1.2 梯级水电站调度方法

梯级水电调度是水利工程与运筹优化领域的典型研究方向^[7]。传统方法以动态规划^[8]、线性规划^[9]及其改进形式为主,其中动态规划在大规模梯级系统中易遭遇“维度灾难”。为此,研究者转向粒子群优化、遗传算法及差分进化算法等智能优化方法,这类方法在复杂约束下能求得近似最优解,但其性能高度依赖参数设置,且目标函数多采用固定权重设计,难以适应动态变化的调度场景。近年来,基于强化学习的水库调度模型^[10]开始受到关注,该类方法可从历史数据中直接学习调度策略,但多数仍采用静态奖励函数,在多目标动态冲突与硬约束安全保障方面存在明显缺陷,且在数据短缺或极端水情下面临较大的不确定性。

2 本文方法

2.1 总体框架

本文提出的梯级水电站智能调度框架如图1所示,由水利知识图谱构建、调度目标动态识别、调度决策生成三个模块组成。首先,水利知识图谱构建模块完成多源异构水利数据的结构化建模与语义关联,将水文规律、工程规则、调度约束及实时情境融合为可计算、可推理的水利知识底座;其

次,调度目标动态识别模块融合知识图谱推理结果与实时水情、电力、生态监测数据,实现发电、防洪、生态三大调度目标权重的动态计算与自适应调整,形成情境感知的动态加权机制;最后,调度决策生成模块将动态权重融入改进粒子群优化算法,迭代求解满足硬约束安全底线的最优梯级调度策略。该框架实现了领域知识与调度算法的深度耦合,既克服了传统方法静态权重、固定奖励的局限性,又提升了调度决策的可解释性与自适应水平。

2.2 水利知识图谱构建

水利知识图谱是本文方法的知识底座,其构建过程以多源异构水利数据为基础,遵循“数据采集与预处理→模式层构建→数据层构建→推理层构建”的分层思路,逐步完成水文、工程、生态、调度规则四类核心要素的结构化表示与语义关联。各子模块层层递进:数据采集与预处理为知识图谱提供高质量、标准化的语料;模式层在语料基础上抽象出本体概念与语义关系,确立图谱的逻辑骨架;数据层依托模式层的本体定义将语料实例化为三元组并持久化存储;推理层则在前三层之上构建规则引擎,使图谱具备主动支撑调度决策的能力。

2.2.1 多源数据采集与预处理

数据采集覆盖梯级水电站调度相关的多维度数据源,包括结构化数据(水文监测、工程参数等)、半结构化数据(调度运行日志等)和非结构化数据(领域规范、专家文献等)。预处理阶段针对不同类型数据开展差异化处理:对结构化数据进行缺失值插补、异常值剔除和量纲统一;对半结构化数据通过正则表达式提取关键信息并转化为键值对形式;对非结构化数据采用BERT预训练模型^[11]结合命名实体识别技术抽取领域实体及属性,最终形成标准化的水利数据语料库,为后续模式层的本体抽象奠定数据基础。

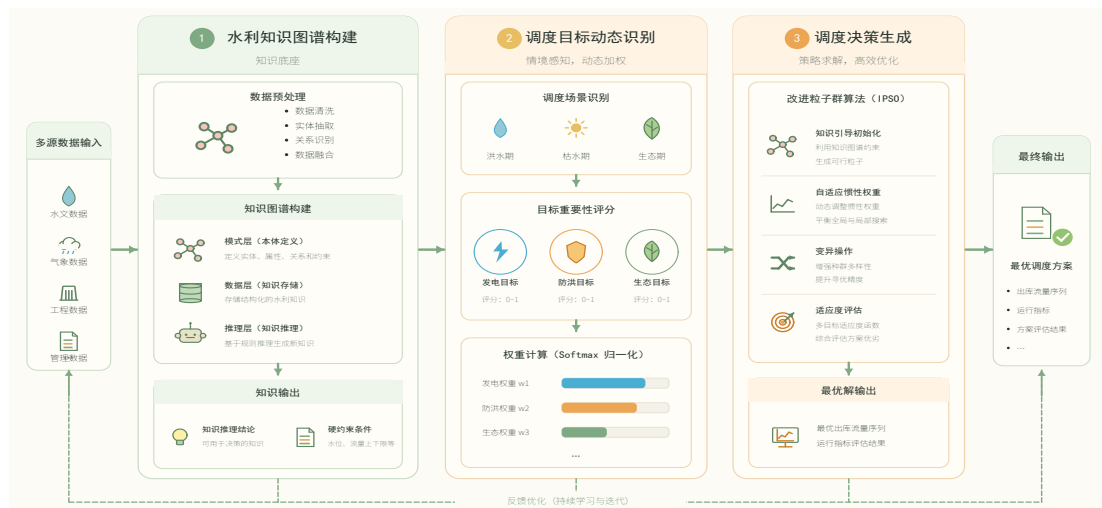


图1 基于水利知识图谱的梯级水电站智能调度方法流程示意图

2.2.2 模式层构建

在数据语料库的支撑下，模式层进一步抽象出图谱的逻辑骨架。采用自顶向下与自底向上相结合的方法构建：先基于水利领域专家知识定义核心本体概念，再结合数据语料补充细化概念关系，确保图谱的领域适配性与完整性。具体而言，首先确定四类核心顶层本体：水文本体、工程本体、生态本体、调度规则本体，各顶层本体下划分多级子概念，形成层级化的本体概念体系；其次，定义本体之间的语义关系，分为属性关系、时空关系、约束关系、规则关系四大类，实现不同本体概念的语义关联；最后，为每个实体与关系定义属性约束条件，保证图谱数据的一致性与合理性。

2.2.3 数据层构建

在模式层定义的本体框架下，数据层完成知识图谱的实例化构建。基于模式层的本体概念与关系，将预处理后的标准化数据映射为“实体—关系—实体”三元组形式，并采用 Neo4j 图数据库作为存储载体，利用其高效的图结构存储与关联查询能力实现三元组的持久化。针对实例数据中可能存在的同名实体歧义与冗余关系，进一步执行实体对齐与关系消歧处理。最终构建的水利知识图谱包含超过 10 万条三元组，实现了梯级水电站调度相关多源信息的统一结构化存储，为推理层提供完备的知识来源。

2.2.4 推理层构建

推理层是知识图谱主动支撑调度决策的核心，建立在前三层完整知识表达的基础之上。推理层采用规则推理方式构建水利领域推理规则库，实现从已知知识到未知调度知识的演绎，为调度目标权重计算提供知识支撑。结合水利领域规范、专家经验与历史调度案例，采用语义网规则语言（SWRL）定义推理规则，规则形式为“前提条件→结论”。例如，当“入库流量>洪水阈值”且“水位>警戒水位”时，可推断“调度场景为洪水期”且“防洪目标重要性评分提升”。将推理规则库与 Neo4j 图数据库结合，通过推理引擎实现实时水情数据与图谱知识的融合推理，输出当前调度场景及各目标的初始重要性评分，从而将静态的水利知识转化为支撑动态决策的可执行结论，自然衔接至后续的调度目标动态识别模块。

2.3 调度目标动态识别

调度目标动态识别模块以知识图谱推理结果与实时监测数据为输入，实现发电、防洪、生态三大调度目标重要性评分的动态计算，并通过归一化得到各目标的动态权重，从而克服传统方法固定权重无法适应水情动态变化的局限。该模块包含调度场景智能识别、目标重要性评分计算、动态权重归一化三个步骤。

2.3.1 调度场景智能识别

以知识图谱推理层的推理结果为基础，结合实时水情、

电力需求和生态监测数据，构建调度场景特征体系，采用模糊综合评价法实现调度场景的智能识别与分级。首先提取影响调度目标的核心特征，分为水文特征、电力特征、生态特征三类，并对各特征指标进行模糊化处理，划分为“高、中、低”或“达标、基本达标、不达标”等模糊等级。然后，将梯级水电站调度场景划分为洪水期、平水期、枯水期三大基础场景，各基础场景下根据特征指标组合划分分子场景并赋予优先级分级。最后，通过层次分析法确定各场景特征指标的权重，结合模糊隶属度函数计算各特征对不同场景的隶属度，经模糊合成运算得到当前水情下各调度场景的综合隶属度，将隶属度最大值对应的场景确定为当前调度场景。

2.3.2 目标重要性评分计算

针对发电（ g_1 ）、防洪（ g_2 ）、生态（ g_3 ）三大调度目标，构建多维度目标重要性评分模型，评分 s_i （ $i=1,2,3$ ）取值范围为 $[0,10]$ ，评分越高表示对应目标在当前调度场景下的重要性越强。评分计算融合知识图谱推理规则、实时监测数据与场景特征权重三方面因素：首先根据调度场景识别结果为各目标赋予基础评分 s_{i0} ，再结合实时监测数据与图谱推理规则对基础评分进行动态修正：

$$s_i = s_{i0} + \Delta s_i \times \alpha_i \quad (1)$$

式中： s_{i0} 为目标 i 的基础评分， Δs_i 为修正值， α_i 为修正系数。在此基础上，通过水利知识图谱的约束关系对计算得到的目标重要性评分进行校验，确保评分结果符合水利领域规范与梯级联合运行规则；若评分结果违反约束条件，则根据图谱知识进行自适应调整，最终得到各调度目标的最终重要性评分 s_1 、 s_2 、 s_3 。

2.3.3 动态权重归一化计算

为将目标重要性评分转化为可直接融入优化算法的目标权重，采用 Softmax 指数归一化方法对评分结果进行归一化处理，确保各目标权重之和为 1，且权重值与目标重要性正相关，权重计算公式为：

$$w_i = \frac{e^{s_i}}{\sum_{j=1}^3 e^{s_j}} \quad (2)$$

式中： w_i 为目标 i 的动态权重（ $i=1,2,3$ ）， s_i 为目标 i 的最终重要性评分， e 为自然常数。该归一化方法的优势在于能够放大不同目标重要性的差异，使权重分配更贴合当前调度场景的核心需求。例如，当防洪目标评分远高于其他目标时，其权重会被显著放大，确保调度算法优先满足防洪需求。最终得到的动态权重 w_1 （发电）、 w_2 （防洪）、 w_3 （生态）将作为调度决策生成模块的输入参数。

2.4 调度决策生成

调度决策生成模块以水利知识图谱提供的约束条件和动态识别模块输出的目标权重为基础，采用改进粒子群优化算

法 (IPSO) 求解梯级水电站多目标协同调度问题, 通过对传统粒子群算法的初始化策略、速度更新公式与惯性权重调整机制进行改进, 提升算法的收敛速度与全局寻优能力。

2.4.1 梯级水电站调度问题建模

首先对梯级水电站多目标调度问题进行数学建模。设调度周期划分为 T 个时段, 梯级水电站数量为 N , 以各电站的时段出库流量为决策变量, 记 $X = (q_{1,1}, q_{1,2}, \dots, q_{1,T}, q_{2,1}, \dots, q_{N,T})$, 其中 $q_{n,t}$ (m^3/s) 表示第 n 座水电站在第 t 时段的出库流量。

以结合动态权重 w_1 、 w_2 、 w_3 , 构建多目标综合优化函数, 将发电、防洪、生态三大子目标融合为单目标函数:

$$F = w_1 \cdot f_1 + w_2 \cdot f_2 + w_3 \cdot f_3 \quad (3)$$

式中: f_1 为发电效益目标函数, f_2 为防洪安全目标函数, f_3 为生态保护目标函数。

各子目标函数均进行归一化处理, 取值范围为 $[0,1]$ 。基于水利知识图谱中的工程、水文、生态及梯级联合运行知识, 确定模型的约束条件, 主要包括: 水库水位约束 $Z_{n,\min} \leq Z_{n,t} \leq Z_{n,\max}$ (来自工程本体); 出库流量约束 $q_{n,\min} \leq q_{n,t} \leq q_{n,\max}$ (来自工程与生态本体); 水量平衡约束 $V_{n,t+1} = V_{n,t} + (Q_{n,t} - q_{n,t}) \cdot \Delta t - L_{n,t}$ (来自水文本体); 梯级水流传递约束 $Q_{n+1,t} = q_{n,t-r}$ (r 为水流传递时间, 来自时空关系); 以及最小生态下泄流量约束 $q_{n,t} \geq q_{n,\text{eco}}$ (来自生态本体)。

2.4.2 改进粒子群优化算法设计

针对传统粒子群算法 (standard PSO, SPSO) 在求解高维带约束的梯级水电调度问题时易陷入局部最优、收敛速度慢及无效粒子率高等问题, 本文从粒子初始化、速度更新公式与惯性权重调整三个方面对 SPSO 进行系统改进。

(1) 基于知识图谱的约束引导粒子初始化。SPSO 采用纯随机方式初始化粒子位置, 易在解空间中生成大量违反水位、流量、水量平衡等硬约束的无效粒子, 导致前期迭代效率低下。本文充分利用水利知识图谱中工程本体与生态本体提供的出库流量上下限, 将每个粒子的初始位置严格限制在约束可行域内; 同时从历史调度案例库中检索与当前水情场景最相似的最优出库流量序列作为初始粒子的核心值, 叠加小幅随机扰动生成初始粒子群。该策略既保证了初始种群的可行性与多样性, 又使粒子初始位置更靠近最优解区域, 从而显著减少前期无效搜索。

(2) 引入个体最优变异项的速度更新公式。SPSO 的速度更新仅由惯性项、个体认知项与社会认知项三项构成, 在迭代后期容易因 $\text{pbest}_{k,t}$ 与 $\text{gbest}_{k,t}$ 高度趋同而陷入早熟收敛。为此, 本文在速度更新公式中引入个体历史最优变异项, 改进后的更新公式为:

$$v_{k,t+1} = w \cdot v_{k,t} + c_1 \cdot r_1 \cdot (\text{pbest}_{k,t} - x_{k,t}) + c_2 \cdot r_2 \cdot (\text{gbest}_{k,t} - x_{k,t}) + c_3 \cdot r_3 \cdot (\text{pbest}_{k,t} \otimes \text{rand}) \quad (4)$$

式中: $v_{k,t}$ 为第 k 个粒子第 t 次迭代的速度, w 为惯性权重, c_1 、 c_2 、 c_3 为学习因子, r_1 、 r_2 、 r_3 为 $[0,1]$ 之间的随机数, $\text{pbest}_{k,t}$ 为第 k 个粒子的个体历史最优位置, $\text{gbest}_{k,t}$ 为粒子群的全局最优位置, $\otimes$ 为逐元素乘法, rand 为 $[-0.5, 0.5]$ 之间的随机矩阵。新增的第四项 $c_3 \cdot r_3 \cdot (\text{pbest}_{k,t} \otimes \text{rand})$ 即为个体最优变异项, 其作用机制可从三个方面理解: 从理论角度看, 该项相当于在 $\text{pbest}_{k,t}$ 附近以可控幅度施加局部随机扰动, 等价于在每次迭代中为粒子注入一定的“探索能量”, 避免速度向量被 $\text{pbest}_{k,t}$ 与 $\text{gbest}_{k,t}$ 的差分项主导; 从种群多样性角度看, 当迭代后期种群 $\text{pbest}_{k,t}$ 与 $\text{gbest}_{k,t}$ 趋同时, 前两项的差分逐渐衰减为零, 而变异项不依赖差分, 能够持续维持种群在解空间中的扰动幅度, 从而抑制早熟收敛; 从与已有改进策略的对比来看, 传统差分进化中的变异操作通常在不同粒子间进行差分, 全局性强但易破坏精英解, 而本文的 $\text{pbest}_{k,t} \otimes \text{rand}$ 变异以粒子自身历史最优为基准、扰动幅度由 c_3 精细控制 (实验中取 0.5, 约为 c_1 、 c_2 的 1/3), 既保留了精英方向, 又兼顾了局部多样性。

(3) 基于迭代进度与适应度的自适应惯性权重调整机制。惯性权重 w 直接决定算法的全局搜索与局部搜索能力的平衡: w 越大, 全局搜索能力越强; w 越小, 局部搜索能力越强。SPSO 通常采用固定惯性权重或线性递减惯性权重 (linearly decreasing inertia weight, LDIW), 但 LDIW 仅考虑迭代进度的时间维度, 未考虑粒子适应度的差异, 对适应度较差的粒子缺乏针对性。为此, 本文设计同时考虑迭代进度与个体适应度的自适应惯性权重调整公式:

$$w = w_{\max} - \frac{(w_{\max} - w_{\min}) \cdot (f - f_{\min})}{f_{\text{avg}} - f_{\min}} \cdot \frac{t}{T_{\max}} \quad (5)$$

式中: $w_{\max}$ 、 $w_{\min}$ 分别为惯性权重的最大值和最小值, f 为当前粒子的适应度值, $f_{\min}$ 、 f_{avg} 分别为当前粒子群的最小适应度值和平均适应度值, t 为当前迭代次数, $T_{\max}$ 为最大迭代次数。该公式包含两层自适应机制: 在时间维度上, 因子 $t/T_{\max}$ 随迭代次数线性增长, 使惯性权重整体呈递减趋势——迭代初期保持较大 w 以增强全局搜索、避免错过潜在最优区域, 迭代后期减小 w 以增强局部搜索、加快收敛精度; 在个体维度上, 因子 $(f - f_{\min}) / (f_{\text{avg}} - f_{\min})$ 依据粒子相对适应度差异自适应调节——对于适应度较差 (f 较大) 的粒子, 该因子接近 1, 使其 w 较大、跳跃幅度更大, 从而快速跳出当前劣解区域; 对于适应度较好 (f 较小) 的粒子, 该因子接近 0, w 较小、扰动幅度更小, 从而进行精细的局部搜索。相较于 LDIW, 本机制的优势在于将群体内不同粒子的搜索行为差异化, 避免全部粒子同步收敛, 从而在保证收敛速度的同时显著提升解的精度与稳定性。

2.4.3 算法求解与调度策略生成

将上述数学模型与改进粒子群算法结合，通过“迭代搜索—适应度评价—约束校验”的闭环流程求解最优调度策略，具体步骤为：

- (1) 参数设置：粒子群规模 50~100、最大迭代次数 200~300、学习因子 $c_1=1.5$ 、 $c_2=1.5$ 、 $c_3=0.5$ 、惯性权重范围 [0.4, 0.9]、调度时段 $\Delta t=24\text{ h}$ ；
- (2) 粒子初始化：采用基于知识图谱的约束引导方法生成满足所有约束的初始粒子群；
- (3) 适应度计算：将各粒子位置代入综合目标函数得到适应度 $\text{Fitness}=F(X)$ ；
- (4) 个体最优与全局最优更新：分别对比并更新 $pbest_{k,t}$ 与 $gbest_{k,t}$ ；
- (5) 粒子速度与位置更新：依据式 (4) 与式 (5) 更新速度与位置，对违反约束的粒子采用边界重置法予以修正；
- (6) 终止判断：当达到最大迭代次数或连续 20 次迭代适应度变化小于 10^{-4} 时停止；
- (7) 将最终 $gbest_{k,t}$ 对应的出库流量序列作为最优调度策略，并将其计算所得的蓄水位、发电量等指标存储至知识图谱，作为历史案例支撑后续决策。

3 实验结果与分析

为验证本文提出的基于水利知识图谱的梯级水电站智能调度算法的有效性与优越性，选取实际流域三级梯级水电站系统为实验对象，设计对比实验，从发电量、防洪能力、生态保护三个核心维度，与传统固定权重调度方法、传统粒子群优化调度方法进行多指标对比分析，并对实验结果的合理性与算法的核心优势进行深度阐释，同时开展算法鲁棒性验证，确保方法在不同水文场景下的适用性。

3.1 实验设置

3.1.1 实验对象与数据来源

实验选取我国南方某流域三级梯级水电站作为研究对象，该梯级系统由上游、中游、下游三座水电站串联组成，流域内水文条件复杂、汛期洪水频发、枯水期电力需求较高，且河道生态流量保障要求严格，具有典型的梯级水电多目标调度特征。三座水电站的核心工程属性参数基于实际工程资料确定，如表 1 所示。

表 1 实验梯级水电站核心工程属性参数

水电站	总库容 /(10 ⁸ m ³)	有效库容 /(10 ⁸ m ³)	额定出力 /MW	防洪限制 水位 /m	死水位 /m	最小生态下 泄流量 /(m ³ ·s ⁻¹)
上游电站	8.2	5.6	320	365.0	342.0	85
中游电站	5.7	3.2	250	288.0	270.0	60
下游电站	3.1	1.8	180	215.0	202.0	45

实验数据包括三部分：（1）水文监测数据：选取该流域近 10 年的日降雨量、入库流量、水库水位等时序数据；（2）工程运行数据：机组额定出力、库容曲线、泄洪能力、防洪限制水位等参数，来源于工程设计文件与运行管理台账；（3）生态与电力数据：河道最小生态流量阈值由当地水利与生态环境部门联合划定，区域电力负荷数据来源于电网调度中心。实验选取一个典型水文年的 30 天为调度周期，涵盖平水期、汛期局部洪水过程及枯水期电力高峰阶段。

3.1.2 对比方法设定

- 为突出本文方法的改进效果，设置两种传统方法作为对比组，三组实验均采用相同的水文、工程、生态及电力数据。（1）固定权重方法：由专家经验预设发电、防洪、生态目标权重为 (0.5, 0.3, 0.2)，采用线性规划求解，权重在整个调度周期内保持不变；（2）传统 PSO 方法：采用标准粒子群算法求解，目标权重与固定权重方法一致，粒子规模 80、最大迭代次数 200、惯性权重线性递减、学习因子 $c_1=c_2=2.0$ ；（3）本文方法：基于知识图谱实现动态权重，采用改进粒子群算法求解，粒子规模 80、最大迭代次数 200、惯性权重自适应调整、学习因子 $c_1=1.5$ 、 $c_2=1.5$ 、 $c_3=0.5$ 。

3.1.3 评价指标

选取发电量、洪水削峰率、生态流量满足率三项量化指标评价算法性能。发电量 (GWh) 为梯级系统在调度周期内的总发电量，越高表示发电效益越好；洪水削峰率定义为 $\eta = (Q_{\max} - q_{\max}) / Q_{\max} \times 100\%$ ，其中 $Q_{\max}$ 为入库洪峰流量， $q_{\max}$ 为下泄洪峰流量，削峰率越高表示防洪能力越强；生态流量满足率定义为 $\gamma = \frac{1}{N \times T} \sum_{n=1}^N \sum_{t=1}^T I(q_{n,t} \geq q_{n,\text{eco}})$ ， $I(\cdot)$ 为指示函数， γ 越高表示生态保障效果越好。

3.2 实验结果与对比分析

3.2.1 多指标量化对比结果

将三种方法应用于实验梯级系统，在 30 天调度周期内进行仿真，结果如表 2 所示。本文方法在三项核心指标上均显著优于两种传统方法。在发电效益方面，梯级总发电量达到 138.2 GWh，较固定权重方法提升 7.63%，较传统 PSO 方法提升 4.15%，在保障防洪与生态约束的前提下实现了发电效益的有效增长；在防洪能力方面，洪水削峰率达到 75.0%，较固定权重方法提升 19.05%，较传统 PSO 方法提升 10.29%，对洪峰的削减效果更为显著；在生态保护方面，生态流量满足率达到 91.0%，较固定权重方法提升 12.35%，较传统 PSO 方法提升 8.33%，能够更好地满足河道生态流量需求。

表 2 不同调度方法的实验结果对比

方法	发电量 /GWh	洪水消峰率	生态满足率
固定权重方法	128.4	0.63	0.81
传统 PSO	132.7	0.68	0.84
本文方法	138.2	0.75	0.91

3.2.2 调度过程动态特征分析

为进一步揭示本文方法的优势,选取调度周期内典型洪水过程与枯水期电力高峰两个关键时段,对比三种方法的动态调度特征。在第 12~15 天的中小洪水过程中,上游电站入库流量从 $350 \text{ m}^3/\text{s}$ 骤升至 $890 \text{ m}^3/\text{s}$ 、超过洪水阈值 $600 \text{ m}^3/\text{s}$, 水库水位快速上涨。固定权重方法因权重不变、为追求发电效益导致出库调整滞后,水位一度接近防洪限制水位;传统 PSO 方法虽能优化出库流量,但权重固定使防洪目标优先级不足,洪峰削减有限。本文方法借助知识图谱的场景感知能力,自动将防洪权重提升至 0.65、发电与生态权重分别降至 0.20 与 0.15,三座电站提前加大出库以预泄库容,上游电站在洪峰到来前将水位降至防洪限制水位以下 2.5 m,规避了水位超限的硬约束风险,实现了梯级系统的“错峰、削峰”协同。

在第 22~28 天的枯水期电力高峰时段,流域入库流量降至 $120 \text{ m}^3/\text{s}$ 以下,电力负荷达到高峰。固定权重方法因权重未调整、为满足防洪固定权重而保持较低水位,蓄水量不足导致发电出力受限;传统 PSO 方法在固定权重下虽尽量提升发电出力,但库容利用效率不高。本文方法识别到枯水期发电高峰场景后,将发电权重提升至 0.60、防洪权重降至 0.15、生态权重保持 0.25,在严格满足生态流量硬约束的前提下协同优化各电站蓄水位与出库流量,充分利用有效库容进行水能转换,在电力高峰时段提升机组出力,体现了多目标动态耦合下的协同优化能力。

4 结论

本文提出了一种基于水利知识图谱的梯级水电站智能调度方法。该方法通过构建水利知识图谱实现多源异构水利信息的统一表达与可计算建模,借助知识图谱推理能力实现调度目标权重的动态识别与情境感知加权,并结合改进粒子群优化算法生成调度策略,在保障硬约束安全底线的前提下实现了多目标动态耦合与协同优化。仿真实验表明,与传统固定权重、静态奖励的调度方法相比,本文方法在发电量、洪水削峰率、生态流量满足率三项指标上分别提升 7.63%、19.05%、12.35%,有效提升了梯级水电系统在复杂水文情势下的调度自适应能力。未来研究将进一步把水利知识图谱嵌入深度强化学习的奖励函数与动作筛选过程,提升调度模型在极端水文环境下的动态决策与安全运行能力。

参考文献:

- [1] 赵晓云. 水库多目标智能调度模型构建与优化 [J]. 水利信息化, 2026(1):36-42.
- [2] 李勇. 基于动态规划的水库优化调度模型构建与性能测试 [J]. 中国新技术新产品, 2025(3):89-91.
- [3] 黄帆, 涂圣勤, 董峰, 等. 自学习知识图谱驱动的水电调度智能化研究 [J]. 国外电子测量技术, 2025,44(4):95-102.
- [4] 程楠楠, 魏璐露. 大规模语言模型驱动的场景化知识图谱构建研究 [J]. 信息技术与信息化, 2025(6):15-19.
- [5] 廖尚金, 张明辉. 知识图谱在智慧水利建设中的应用研究 [J]. 长江信息通信, 2025,38(8):196-201.
- [6] 刘伟平, 刘海波. 金沙江下游-三峡梯级水电走廊运行调度技术进展、挑战与对策 [J]. 中国水利, 2025(20):7-16.
- [7] 赵志鹏, 韩永栋, 程春田, 等. 大语言模型推理动作范式驱动的梯级水电优化调度方法 [J/OL]. 中国电机工程学报, 1-16[2026-06-10]. <https://link.cnki.net/urlid/11.2107.TM.20260115.1533.002>.
- [8] 吴双. 水电与储能系统联合优化调度研究 [J]. 农村电气化, 2025(11): 64-67.
- [9] 崔燕. 线性规划在灌区管理中的实施应用 [J]. 农业科技与信息, 2019(9): 115-116.
- [10] 雷其鸣, 牛庚, 桑学锋, 等. 基于改进强化学习算法的水库群多目标优化调度 [J]. 南水北调与水利科技 (中英文), 2025, 23(5): 1185-1195.
- [11] Devlin J, Chang Mingwei, Lee K, et al. BERT: pre-training of deep bidirectional transformers for language understanding[C]//Proceedings of the 2019 Conference of the North American Chapter of the Association for Computational Linguistics: Human Language Technologies.Brussels:ACL,2019: 4171-4186.

【作者简介】

罗玮 (1982—), 男, 四川犍为人, 清华大学创新领军工程博士, 高级工程师, 研究方向: 水利水电数字化转型, email: 76415341@qq.com。

李英嘉 (2002—), 女, 辽宁大连人, 本科, 研究方向: 水利智能化。

胡诗若 (1999—), 女, 辽宁本溪人, 博士, 研究方向: 水资源与水利智能化。

刘丁泉 (1990—), 通信作者 (email: dingxiao.liu@aminer.cn), 男, 河北衡水人, 博士, 研究方向: 大模型与智能体应用技术。

(收稿日期: 2026-05-05 修回日期: 2026-06-30)