文章编号：1000-3673（2026）01-0112-10 中图分类号：TM 721 文献标志码：A 学科代码：470·40

融合引调水工程的抽水蓄能电站与光伏联合运行短期优化调度模型

龙鑫[1,2]，罗彬[2,3]，陈永灿[2,3]，陈刚[4]，聂状[2]，史华勃[4]

（1．西南石油大学电气信息学院，四川省 成都市 610500；
2．天府永兴实验室，四川省 成都市 610213；
3．水沙科学与水利水电工程国家重点实验室(清华大学)，北京市 海淀区 100084；
4．国网四川省电力公司电力科学研究院，四川省 成都市 610041）

Short-term Optimal Scheduling Model for Pumped Storage Power Station and Photovoltaic Joint Operation Integrating Water Diversion and Transfer Engineering

LONG Xin[1,2], LUO Bin[2,3], CHEN Yongcan[2,3], CHEN Gang[4], NIE Zhuang[2], SHI Huabo[4]

(1. School of Electrical Information, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, Sichuan Province, China;
2. Tianfu Yongxing Laboratory, Chengdu 610213, Sichuan Province, China;
3. State Key Laboratory of Hydroscience and Engineering (Tsinghua University), Haidian District, Beijing 100084, China;
4. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan Province, China)

ABSTRACT: To address the dual challenges of uneven spatial distribution of water resources and new energy consumption in the western region of China within the context of dual-carbon goals, this paper proposes the integrated development and operation of water diversion and transfer projects, pumped storage power plants, and photovoltaic (PV) power plants. Building on this premise, we introduce a short-term optimal scheduling model for the joint operation of these three components. First, an improved ant colony clustering algorithm is employed to manage PV output uncertainty and to construct PV output scenarios. Second, we meticulously model the constraints associated with the pumped storage plant, pumped storage units, water diversion and transfer projects, and the power grid to maximize the expected returns for the consortium while treating each unit as the smallest scheduling entity. Subsequently, the original model is transformed into a mixed-integer linear programming model through linearization and is solved using the commercial solver CPLEX. Finally, the case study demonstrates that the proposed model facilitates the spatial allocation of water resources across regions and ensures the full utilization of PV energy and the smooth delivery of PV output through rapid regulation by pumped storage. This approach enhances the consortium's revenue and effectively reduces the peak-to-valley difference in the grid, guided by the peak-to-valley parity tariff.

KEY WORDS: pumped storage power plants; water diversion and transfer projects; photovoltaic uncertainty; maximizing overall expected return; mixed integer linear programming

摘要：为解决“双碳”背景下我国西部部分地区同时面临水资源空间分布不均及新能源消纳的双重难题，提出将引调水工程、抽水蓄能电站及光伏电站三者统筹开发运行。基于此背景，提出了一种三者联合运行的短期优化调度模型。首先，采用改进蚁群聚类算法处理光伏不确定性，构建光伏出力场景；其次，以联合体期望收益最大为目标，以机组为最小调度单元，对抽蓄电站、抽蓄机组、引调水工程以及电网约束进行精细化建模；然后，将原模型经线性化处理转化为混合整数线性规划模型并通过商业求解器 CPLEX 进行求解；最后，通过算例分析表明，所提模型不仅实现了水资源的跨地域空间调配，还通过抽蓄快速调节能力实现光伏的全额消纳以及平稳送出并提高了联合体收益，又在峰谷平电价的引导下，有效降低了电网峰谷差。

关键词：抽水蓄能电站；引调水工程；光伏不确定性；整体期望收益最大；混合整数线性规划

DOI：10.13335/j.1000-3673.pst.2024.1411

0 引言

随着我国“双碳”目标的提出[1]，风光新能源高速发展，装机容量呈指数上升。在外送通道有限的情况下，如何实现随机性、波动性的风光新能源

基金项目：国家自然科学基金项目(U24B6011, 51909133)；天府永兴实验室重大项目(2023KJGG15)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (NSFC) (U24B6011, 51909133); Key Program of Tianfu Yongxing Laboratory (2023KJGG15).

的大规模并网消纳，减少弃风弃光，是目前电力系统亟须解决的问题[2-3]。给新能源电站配置储能是有效解决上述问题重要途径之一[4-5]，其中，抽水蓄能是目前为止技术最成熟、经济可靠性最高、容量最大的储能方式[6-7]。在国家能源局发布的《抽水蓄能中长期发展规划(2021—2035)》[8]中指出，到 2030 年，投产总规模 1.2 亿 kW 的目标。

另一方面，我国长期面临水资源分配不均问题，引调水工程是解决上述问题的重要手段，但在部分地区，山高谷深，直接建设引调水工程难度大，成本高[9]。在 2023 年 5 月国务院发布的《国家水网建设规划纲要》[10]中指出，要推进水网建设与电力行业融合起来，比如将抽水蓄能电站与引调水工程联合开发，可以降低提水扬程，节约社会资源，打破行业边界，不仅实现了水资源的空间调配，还为电网提供安全可靠的调节能力，实现了新能源的平稳消纳。

目前，大多数研究是针对抽水蓄能电站与风光新能源两者联合调度，主要以发电效益最大、运行成本最低、功率波动最小、弃风弃光最小等为目标。例如，文献[11]以联合体收益最大为目标建立风光蓄短期调度模型，采用混合整数规划对模型进行求解；文献[12]以系统运行成本最低为目标建立光蓄联合短期调度模型，运用改进乌鸦搜索算法对模型进行求解；文献[13]以联合系统运行收益最大、碳减排量最小、功率波动最小为目标的风光蓄联合调度模型，经归一化处理成单目标问题后使用改进的灰狼算法对模型进行求解；文献[14]以弃风弃光最小为目标建立了风光蓄联合调度模型，运用粒子群算法对模型进行求解；文献[15]建立了考虑风光相关性的风光蓄互补模型，以系统运行成本最低与计划偏差最小的两级优化目标，分别采用模糊多目标进化算法和改进粒子群算法对模型进行求解。

将抽水蓄能、引调水工程、新能源电站联合调度运行，能够有效统筹解决新能源消纳与水资源综合利用问题，其联合开发运行已逐步得到国内外研究人员的关注。例如，文献[16]分析了调水与储能结合在经济、技术、生态环境上的可行性以及对实现“双碳”目标所起到的积极作用；文献[17]对现有抽水蓄能电站与引调水工程研究成果进行总结，并得出须对两者融合建设运行的经济性进行评价；文献[18]采用单方调水成本对比法分析了抽水蓄能电站作为引调水工程的水源地可以减少提水扬程，同时新能源的加入能降低单位调水成本。可见，已有研究主要是从理论层面分析了引调水工程、抽水蓄能电站与新能源电站三者联合建设的概念、路线、可行性以及经济效益等方面，而缺少对抽水蓄能、引调水工程、新能源电站三者联合具体运行模式调度建模研究。

为此，本文提出一种抽水蓄能电站、引调水工程与光伏电站联合运行的短期优化调度模型。首先，采用基于变异思想的改进蚁群聚类算法处理光伏的不确定性，建立光伏典型出力场景；其次，从电源侧角度出发，以联合体期望收益最大为目标，并设置弃光惩罚以保证新能源的消纳，以机组为最小调度单位，分别对互补系统中抽水蓄能电站、抽水蓄能机组、引调水系统、电网等约束分别进行精细化建模，并特别在约束中从电网侧角度设置了特高压直流输电约束，考虑了电网输电安全性；然后，在模型求解方面，通过线性化方法将原模型转化为混合整数线性规划(mixed integer linear programming，MILP)模型，并在 JAVA 环境中使用 CPLEX 数学工具进行求解。最后，通过算例分析表明，所提模型不仅实现了水资源的跨地域空间调配，还通过抽蓄快速调节能力实现光伏的全额消纳以及平稳送出并提高了联合体收益，又在峰谷平电价的引导下，有效降低了电网峰谷差。

1　抽水蓄能-引调水工程-光伏联合运行模式

抽水蓄能电站、引调水工程与光伏电站所构成的联合系统如图 1 所示。引调水系统主要根据调水需求，由提水泵站、引水道等引水设施将水从抽水蓄能电站上库引入需要补水的水库里。抽水蓄能电站在峰平谷电价的引导下低储高发，在实现套利的同时，能有效降低电网负荷峰谷差。新能源消纳是通过抽水蓄能电站快速调节能力平抑光伏波动，并在同一并网通道下通过特高压直流实现远距离消纳。以上运行过程突破了传统调水工程的局限，一体化实现了供水、发电、新能源消纳等功能。

2　模型描述

2.1　目标函数

抽水蓄能电站、引调水工程与光伏联合运行的优势在于，既可以利用抽蓄机组的灵活调节能力配合光伏稳定消纳，又可以利用抽蓄上库作为水源通过提水泵站等引水设施向外供水。以联合体期望收益最大为目标，并设置弃光惩罚，保证光伏新能源的消纳与整体运行经济性，公式如下：

$$F=\max[p(s)(F_1+F_2+F_3-F_4-F_5-F_6)] \tag{1}$$

$$F_1=c_t^{\mathrm{gen}}\left(\sum_{t=1}^{T}\sum_{i=1}^{I}P_{i,t}^{\mathrm{gen}}-P_t^{\mathrm{ww}}\right)\Delta t \tag{2}$$

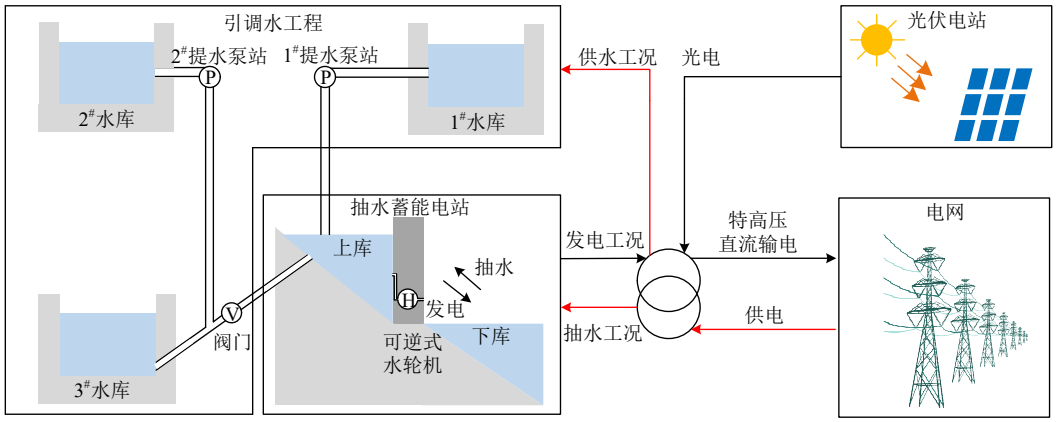


图 1　抽水蓄能-引调水工程-光伏联合运行模式

Fig. 1　Pumped storage-water diversion project-photovoltaic joint operation mode

$$F_2 = c_t^{\mathrm{pv}} \sum_{t=1}^{T} (P_{s,t}^{\mathrm{pv}} - P_t^{\mathrm{pw}}) \Delta t \tag{3}$$

$$F_3 = c \sum_{w=1}^{W} S_w \tag{4}$$

$$F_4 = c_t^{\mathrm{pump}} \sum_{t=1}^{T} \left(\sum_{i=1}^{I} P_{i,t}^{\mathrm{pump}} + \sum_{u=1}^{U} \sum_{v=1}^{V} P_{u,v,t}^{\mathrm{pump}} \right) \Delta t \tag{5}$$

$$\begin{aligned} F_5 = &\sum_{t=1}^{T} (c_{\mathrm{on}}^{\mathrm{a}} n_t^{\mathrm{ona}} + c_{\mathrm{off}}^{\mathrm{a}} n_t^{\mathrm{offa}}) + \sum_{t=1}^{T} (c_{\mathrm{on}}^{\mathrm{b}} n_t^{\mathrm{onb}} + c_{\mathrm{off}}^{\mathrm{b}} n_t^{\mathrm{offb}}) + \\ &\sum_{t=1}^{T} (c_{\mathrm{on}}^{\mathrm{c}} n_t^{\mathrm{onc}} + c_{\mathrm{off}}^{\mathrm{c}} n_t^{\mathrm{offc}}) \end{aligned} \tag{6}$$

$$F_6 = \sum_{t=1}^{T} c_t^{\mathrm{w}} P_t^{\mathrm{w}} \Delta t \tag{7}$$

式中：F 表示联合体调度期内的整体期望收益，元；F_1、F_2、F_3、F_4、F_5、F_6 分别表示抽蓄发电收益、光伏发电收益、供水收益、联合体抽水成本、机组开停机成本、弃光惩罚成本，元；$p(s)$ 为光伏第 s 种出力场景的出力概率；c_t^{gen}、c_t^{pv}、c_t^{pump}、c_t^{w} 分别表示时段 t 的水电上网电价、光伏上网电价、抽水电价、弃光惩罚，元/(kW·h)；$c_{\mathrm{on}}^{\mathrm{a}}$、$c_{\mathrm{on}}^{\mathrm{b}}$、$c_{\mathrm{on}}^{\mathrm{c}}$ 分别为抽蓄机组、提水泵站机组、阀门的开机成本，元/(台·次)；$c_{\mathrm{off}}^{\mathrm{a}}$、$c_{\mathrm{off}}^{\mathrm{b}}$、$c_{\mathrm{off}}^{\mathrm{c}}$ 分别为抽蓄机组、提水泵站机组、阀门的停机成本，元/(台·次)；c 为供水水价，元/m^3；$P_{i,t}^{\mathrm{gen}}$、$P_{i,t}^{\mathrm{pump}}$ 分别表示 t 时刻第 i 台抽水蓄能机组的发电功率、抽水功率，MW；P_t^{ww} 表示 t 时刻抽水蓄能电站的弃电功率，MW；$P_{s,t}^{\mathrm{pv}}$、$P_{s,t}^{\mathrm{pw}}$ 分别表示第 s 个场景下 t 时刻光伏电场出力、弃电功率，MW；$P_{u,v,t}^{\mathrm{pump}}$ 表示提水泵站 u 的机组 v 在 t 时刻的抽水功率，MW；S_w 表示第 w 个水库从抽水蓄能电站上库取走的总水量，m^3；n_t^{ona}、n_t^{onb}、n_t^{onc} 分别为抽蓄机组、提水泵站机组、阀门在 t 时段的开机台数，台；n_t^{offa}、n_t^{offb}、n_t^{offc} 分别为抽蓄机组、提水泵站机组、阀门在 t 时段的关机台数，台；Δt 为计算时段步长，h；I、W、U、V、T 分别表示为抽水蓄能机组总数、水库总数、提水泵站总数、提水泵站机组总数台、调度期总时段数。

2.2　约束条件

模型约束主要包括抽水蓄能电站约束、抽水蓄能机组约束、引调水工程约束以及电网约束 4 部分。

2.2.1　抽水蓄能电站约束、抽水蓄能机组约束

为突出本文模型关键约束，将常见的抽水蓄能电站约束、抽水蓄能机组约束补充至附录 A，主要包括上下库水量平衡约束、水位约束、水位库容约束、电站抽发互斥约束、机组出力、流量约束、机组抽水功率、流量等约束。

2.2.2　引调水工程约束

1）补水量约束。

$$0 \le 3600 \sum_{t=1}^{T} Q_{w,t} \Delta t - S_w^{\mathrm{plan}} \le \Delta S \tag{8}$$

式中：S_w^{plan} 表示水库 w 在整个调度期内计划需水量，m^3；ΔS 表示各水库在整个调度期结束后可多接收的水量，m^3；$Q_{w,t}$ 表示第 w 个水库在 t 时段的入库流量，m^3/s。

2）提水泵站机组抽水功率约束。

$$u_{u,v,t}^{\mathrm{pump}} \underline{P}_{u,v,t}^{\mathrm{pump}} \le P_{u,v,t}^{\mathrm{pump}} \le u_{u,v,t}^{\mathrm{pump}} \overline{P}_{u,v,t}^{\mathrm{pump}} \tag{9}$$

式中：$\overline{P}_{u,v,t}^{\mathrm{pump}}$、$\underline{P}_{u,v,t}^{\mathrm{pump}}$ 分别为提水泵站 u 的机组 v 的提水功率的上下限，MW；$u_{u,v,t}^{\mathrm{pump}}$ 表明提水泵站 u 的机组 v 在 t 时段的抽水运行状态变量，$u_{w,v,t} \in \{0,1\}$，当为 1 时，提水泵站处于抽水状态，反之为 0。

3）提水泵站机组抽水流量约束。

$$u_{u,v,t}^{\mathrm{pump}} \underline{Q}_{u,v,t}^{\mathrm{pump}} \le Q_{u,v,t}^{\mathrm{pump}} \le u_{u,v,t}^{\mathrm{pump}} \overline{Q}_{u,v,t}^{\mathrm{pump}} \tag{10}$$

式中：$\overline{Q}_{u,v,t}^{\mathrm{pump}}$、$\underline{Q}_{u,v,t}^{\mathrm{pump}}$ 分别为提水泵站 u 的机组 v 的抽水流量的上下限，m^3/s。

4）提水泵站功率特性曲线。

$$P_{u,v,t} = f_{u,v}^{\mathrm{PHQ}} (Q_{u,v,t}^{\mathrm{pump}}, H_{u,v,t}) \tag{11}$$

式中：$f_{u,v}^{\mathrm{PHQ}}(\cdot)$ 为提水泵站 u 的机组 v 的抽水功率-抽水流量-扬程关系曲线。

5）自然引水道约束。

$$u_t^{\mathrm{yin}}\underline{Q}_t^{\mathrm{yin}} \le Q_t^{\mathrm{yin}} \le u_t^{\mathrm{yin}}\overline{Q}_t^{\mathrm{yin}} \tag{12}$$

式中：$\overline{Q}_t^{\mathrm{yin}}$、$\underline{Q}_t^{\mathrm{yin}}$ 分别为引水道的抽水流量的上下限，m^3/s；自然引水道受阀门控制是否开启，$u_t^{\mathrm{yin}} \in \{0,1\}$，当为 1 时，阀门处于开启状态，反之为 0。需要说明的是，本文对阀门运行费用仅考虑了启停费用，并且是一个固定值，与阀门的开启角度、时间无关。

6）泵站、阀门开停机持续时间约束。

其公式与附录式(A9)抽蓄机组发电开停机持续时间约束同理，形式一致。

7）2#提水泵站与阀门的运行关联约束。

$$\begin{cases} u_{2,v,t}^{\mathrm{pump}} - u_t^{\mathrm{yin}} \le 0 \\ Q_{3,t} = u_t^{\mathrm{yin}}Q_t^{\mathrm{yin}} - \sum_{v=1}^{V} u_{2,v,t}^{\mathrm{pump}}Q_{2,v,t}^{\mathrm{pump}} \end{cases} \tag{13}$$

式中：2#提水泵站与阀门的运行状态存在关联，2#泵站不直接从抽水蓄能电站上库抽水，而是从自然引水道上抽水。该式约束了 2#提水泵站开启的前提必须是自然引水道阀门开启；当 2#提水泵站开启时，3#水库在 t 时段的入库流量等于自然引水道流量减去 2#提水泵站的抽水流量。

2.2.3　电网约束

1）输电断面约束。

$$\begin{cases} P_{s,t}^{\mathrm{w}} = \max(P_{s,t}^{g} - C_t, 0) \\ P_{s,t}^{g} = \sum_{i=1}^{I} P_{i,t}^{\mathrm{gen}} + P_{s,t}^{\mathrm{pv}} \\ P_{s,t}^{\mathrm{w}} = P_{s,t}^{\mathrm{ww}} + P_{s,t}^{\mathrm{pw}} \end{cases} \tag{14}$$

式中：$P_{s,t}^{g}$、$P_{s,t}^{\mathrm{w}}$ 分别表示在第 s 个光伏出力场景下在时段 t 时所有电源的总出力、弃电，MW；C_t 表示约束断面的输电容量上限，MW。具体弃光电还是弃水电是从联合体整体经济性角度考虑的。

2）特高压直流输电约束。

$$P_{s,t} = \begin{cases} P_{s,1}, & t \in [1, t_1] \\ P_{s,2}, & t \in [t_1, t_2] \\ \vdots & \\ P_{s,M}, & t \in [t_M, T] \end{cases} \tag{15}$$

$$P_{s,t} = P_{s,t}^{g} - P_{s,t}^{\mathrm{w}} \tag{16}$$

式中：$P_{s.t}$ 表示第 s 个光伏出力场景在时段 t 时联合体的输电量，MW；M 为联合体特高压直流输电曲线中需要保持稳定的阶梯数；t_M 为特高压直流输电曲线功率变化时间点。特高压直流输电因运行安全要求，输电功率不能频繁波动，故特高压直流日输电曲线一般要求为平滑的阶梯状[19-20]。

3　模型求解

3.1　模型转换

以上所建模型是一个多约束、多变量的高维混合整数非线性规划问题，难以直接进行求解。近年来随着商业软件的高速发展，混合整数线性规划(MILP)凭借其求解迅速，精确度高，逐渐应用于水电站调度领域[21-23]。模型中的非线性约束包括附录 A 式(A3)(A7)(A10)(A13)(11)(14)(15)。其中，抽水蓄能电站上下库水位-库容约束式(A3)的线性化方法可参考文献[24]；机组振动区约束式(A7)的线性化方法可参考文献[25]；抽水蓄能机组动力曲线(式(A10))、抽水蓄能机组抽水曲线(式(A13))、提水泵站机组抽水曲线(式(11))线性化方法可参考文献[26]。针对式(14)(15)的详细线性转换方法如附录 B 所示。

3.2　光伏出力场景构建

本文以光伏历史出力数据为样本，采用基于变异思想的改进的蚁群聚类算法，对光伏出力场景进行聚类。蚁群聚类算法的核心思想是 N 个样本在信息素矩阵的引导下，将其分配到 K 个聚类中，并求得聚类中心，使得距离指标所构成的目标函数达到最小[27]。

针对传统蚁群聚类算法收敛速度慢、易陷入局部最优解的问题，引入遗传变异操作，在每次迭代中对已找到的最优路径进行随机变异操作，判断是否有更优路径的产生，并以此路径的目标函数值更新信息素矩阵。同时传统蚁群聚类算法的距离指标为类内欧式距离，以该距离指标构成的目标函数来更新信息素矩阵仅考虑了每个样本与聚类中心的差异最小，而没有考虑不同聚类类别之间的差异性。因此为能同时考虑两者需求，将原距离指标改进为 CH(Calinski-Harabasz)指数，CH 指数通过计算各聚类样本与聚类中心的距离平方和与各聚类中心与全部样本均值的比值来获得，CH 指数越大则表明聚类结果越好，详细计算公式如下：

$$s = \frac{\mathrm{tr}(\boldsymbol{B}_k)(N-K)}{\mathrm{tr}(\boldsymbol{W}_k)(K-1)} \tag{17}$$

式中：$\boldsymbol{B}_k$、$\boldsymbol{W}_k$ 分别表示类间、类内的协方差矩阵，其详细公式如下：

$$\boldsymbol{B}_k = \sum_{k=1}^{K} N_k \| \boldsymbol{c}_k - \boldsymbol{c}_e \|^2 \tag{18}$$

$$\boldsymbol{W}_k = \sum_{k=1}^{K}\sum_{j=1}^{N_k} \| \boldsymbol{x}_{k,j} - \boldsymbol{c}_k \|^2 \tag{19}$$

式中：c_k、c_e分别表示类k与总样本的中心；N_k为第k个聚类中的样本数；$x_{k,j}$代表第k个聚类中第j个样本。

改进蚁群聚类算法详细步骤详见附录 C。

3.3 求解流程

本文所建立抽水蓄能电站-引调水工程-光伏联合运行短期期望收益最大模型的求解步骤如下。

步骤 1：设置计算条件并获取基本信息。包括提水泵站数量、抽蓄机组数量以及出力约束、水力联系约束、光伏历史出力、输电断面约束等。

步骤 2：模型线性转换。将所建模型中的非线性约束通过 3.1 所述的方法进行线性化处理，获得 MILP 模型。

步骤 3：光伏出力场景构建。通过历史光伏出力数据经 3.2 节所示方法得到光伏典型出力场景。

步骤 4：模型求解。将所建的 MILP 模型通过 JAVA 语言编写程序并调用 CPLEX 数学求解器进行求解。

步骤 5：结果输出。输出联合体整体效益期望值，不同光伏场景下的泵站抽水功率、机组出力、抽水功率、启停机时刻、水库水位等结果信息。

4 实例分析

4.1 工程背景

以西南地区正在规划的某抽水蓄能电站、光伏电站以及配套的引调水工程为参考构建应用实例，验证所提模型和求解方法的有效性。联合系统简化的网架关系结构如图 1 所示，剖面拓扑位置信息如附录图 D1 所示。其中，抽水蓄能电站有 4 台抽水蓄能机组；引调水工程包括 2 个提水泵站 4 台机组以及 1 个受阀门控制是否从抽蓄上库取水的自然引水道，需要说明的是，2#提水泵站的取水口在自然引水道上，不直接从抽蓄上库取水，抽水蓄能电站机组与提水泵站机组的特征参数如表 1 所示；光伏电站的装机容量 1200MW，并与抽水蓄能电站在同一输电断面下，最大输电容量为 1200MW。以 1 天为调度周期，15min 为单位调度时段。抽水蓄能机组、提水泵站机组、阀门的启停成本分别为 3000、2000、1500 元/(台·次)；抽水蓄能电站调度末期水位允许变幅为 0.1m；联合体输电曲线最大阶梯数不超过 12；计算软件为 CPLEX12.10；计算条件为联想台式电脑，6 核 12 线程，主频 2.5GHz，内存 16GB，硬盘 1TB。

电价峰谷时段划分根据四川省发改革委 2023 年发布的《关于调整我省分时电价机制的通知》设置[28]，其峰平谷电价设置参考已有文献设置[29]；抽水电价设置为各时段水电上网电价的 75%，光伏上网电价则根据国家发改委 2020 年发布的《光伏上网电价的政策有关事项通知》设置[30]，弃光惩罚设置为光伏电价的 40%，各电价具体设置如附录表 E1 所示。抽水蓄能电站向水库供水水价为 0.5 元/m^3，并分别向 1#、2#、3# 3 个水库补水 10 万、20 万、50 万 m^3。

表 1 抽蓄电站与泵站主要参数

Table 1 Main parameters of pumped storage power station and pumping stations

序号	电站	机组编号	发电功率区间/MW	抽水功率区间/MW	振动区间/MW	最小机组启停持续时间/h
1	抽水蓄能	1#、2#、3#、4#	(0，300)	(0，400)	(200，220)	1
2	1#泵站	1#、2#	—	(0，7)	—	1
3	2#泵站	1#、2#		(0，4)		1

4.2 结果分析与讨论

4.2.1 光伏出力场景分析

以 2018 年 1 月至 2022 年 1 月逐日实际出力为样本，按照 3.2 节所示方法对样本数据进行聚类，得到光伏出力场景。将目标聚类数设置为 4 个，对应场景的概率通过属于该场景下的样本数占总数的比例来求解。4 种出力场景的概率分别是 32%、28%、17%、23%，如图 2 所示。

为评价改进前后蚁群聚类效果，通过计算轮廓系数(silhouette coefficient，SC)(记为 C_{SC})进行比较，该指标值越大表明聚类结果越好，计算公式如下；同时对比改进前后迭代次数。

$$C_{SC}=\frac{1}{N}\sum_{n=1}^{N}\frac{b_n-a_n}{\max(a_n,b_n)} \tag{20}$$

式中：a_n表示第n个样本与簇内其他样本平均距离；b_n表示第n个样本与其他簇内样本平均距离。

改进前后聚类效果对比见表 2，可得到改进后迭代次数更少；C_{SC}更大。因此说明改进后蚁群聚类算法能有效提高聚类效果，有效减小迭代次数。

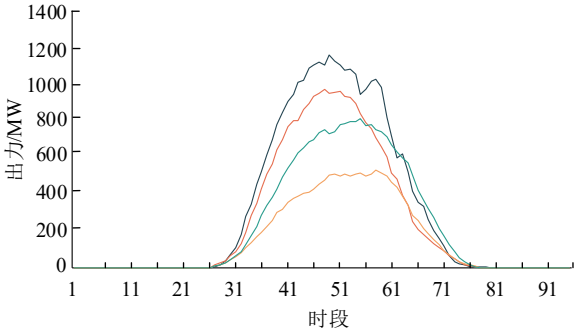


图 2 光伏电站出力场景

Fig. 2 Photovoltaic power plant output scenario

表 2　改进前后聚类效果

Table 2　Clustering effect before and after improvement

蚁群聚类	C_{SC} 系数	迭代次数
改进前	0.4623	1892
改进后	0.5439	984

4.2.2　联合体运行过程分析

以概率最大光伏出力场景为例对联合体及其组成部分运行过程进行分析讨论。模型计算时间为5.09s，计算效率高，能够有效满足短期调度时效性要求。

1）联合体出力过程。

联合体出力过程如图 3 所示，抽水蓄能电站通过自身灵活快速的调节能力跟随光伏的波动，使联合体出力曲线呈现平滑的阶梯状，满足特高压直流输电约束，有利于实现新能源的远距离消纳；同时为提高联合体收益，抽水蓄能电站“低储高发”完成套利、提水泵站的抽水工况运行在电价平谷期以及受目标函数弃光惩罚影响，光伏在调度期间总优先并网，无弃光产生。以上过程符合实际运行要求。

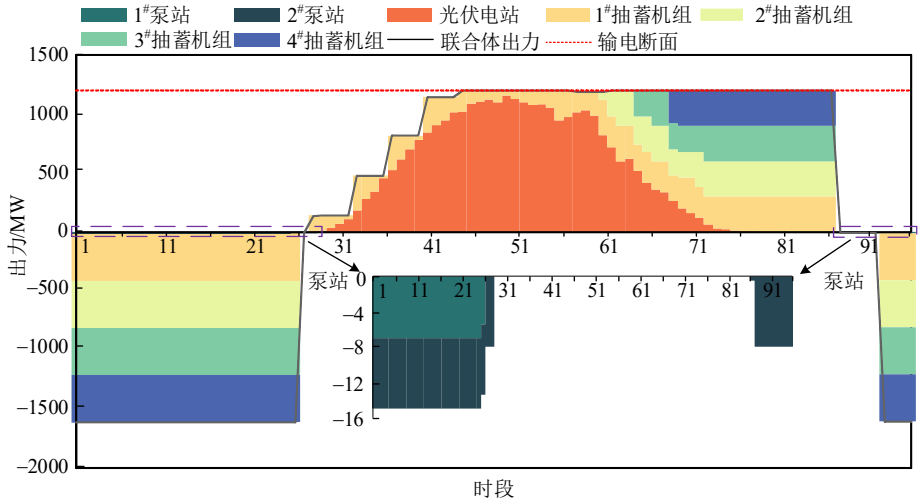


图 3　联合体出力过程

Fig. 3　Process of change of combine output

2）抽水蓄能机组出力过程。

抽水蓄能机组不同时段运行过程如图 4 所示，以 1#机组为例，在夜晚电价低谷时段，机组处于抽水工况存储水量并有效支撑了引调水工程的供水需求；在白天电价平、峰期，机组处于发电工况，在提高联合体发电收益的同时配合光伏平稳消纳。特殊地，抽水蓄能机组(2#、3#、4#)在白天 07:00—15:00 时段保持停机状态，是为了保证在后续在电价晚高峰时期抽水蓄能电站存有足够的水进行发电套利以及避免挤占输电通道从而造成弃光产生弃光惩罚。此外，也可以看出抽水蓄能机组出力过程均满足振动区约束、持续出力约束、抽发互斥、抽发状态转化约束等要求，保证了运行安全，也验证了本文约束的有效性。

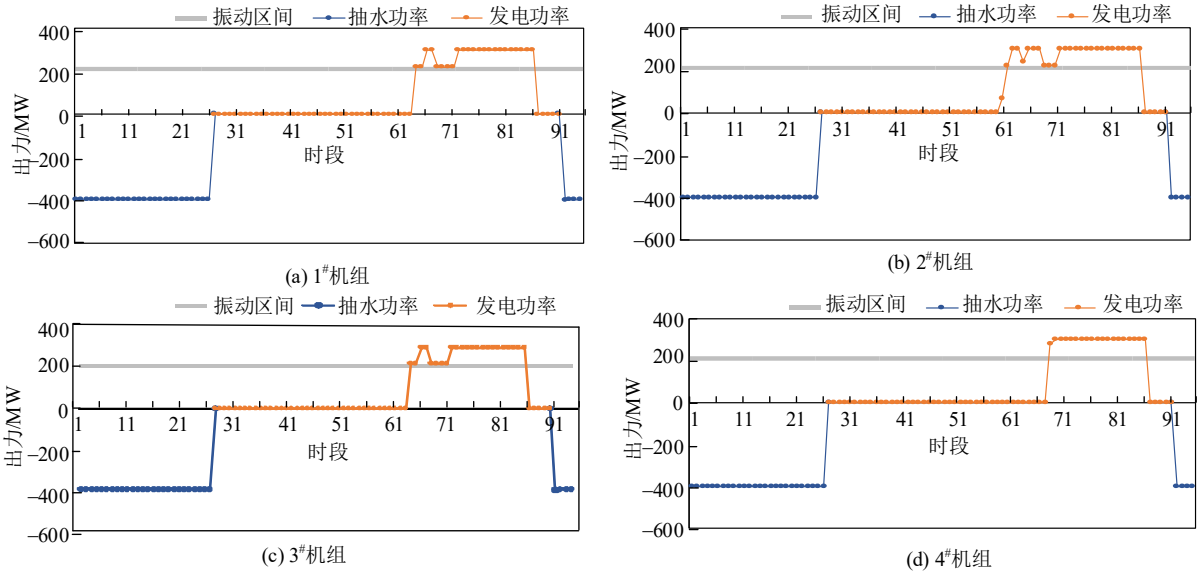
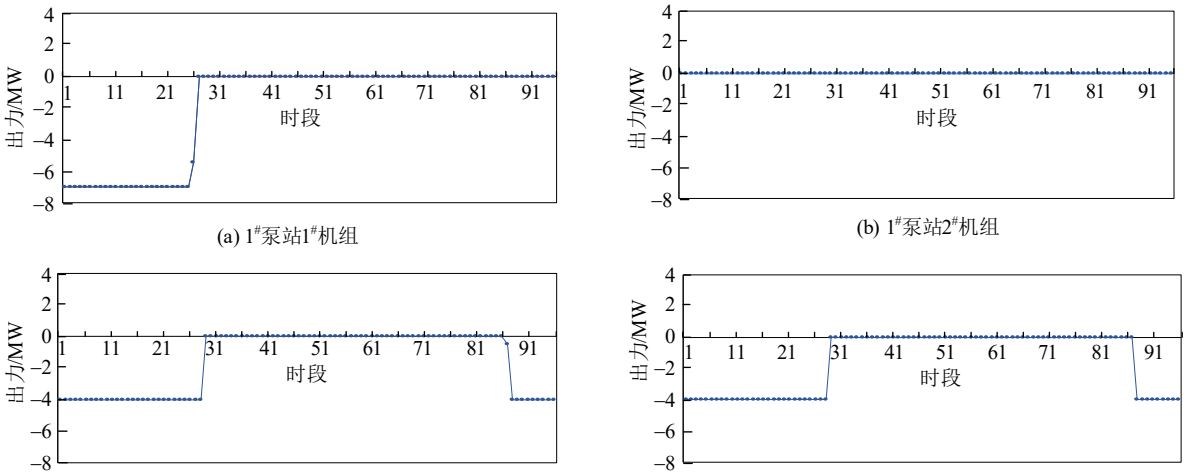


图 4　抽水蓄能机组不同时段运行过程

Fig. 4　Operation process of pumped storage unit in different periods

3）提水泵站机组运行状态分析。

各提水泵站机组运行过程如图 5 所示，以 2#泵站 1#机组为例，调水频次为 2 次，分析原因，为降低调水成本，机组首先会在 00:00—7:00 与 23:00—24:00 电价低谷时段进行抽水，同时只有当低谷时段机组满抽仍不能满足调水需求时，机组才会进入相邻电价平期进行抽水直至满足，则相应的调水时长就可以得到。特殊地，对于 1#泵站 2#机组在整个调度期处于停机状态，分析其原因，对于 1#水库的需水量，仅靠 1#泵站 1#机组在电价低谷期 00:00—07:00 内抽水即可完成供水任务，故 2#机组停机节省了机组启停成本。同时各提水泵站机组满足出力限制约束、开停机持续时间满约束等要求，验证了本文对泵站机组所提约束的有效性。



(a) 1#泵站1#机组　(b) 1#泵站2#机组

(c) 2#泵站1#机组　(d) 2#泵站2#机组

图 5　提水泵站机组不同时段运行过程

Fig. 5　Process of operating pumping station units at different periods

2#提水泵站与阀门控制的自然引水道运行关系如图 6 所示，对于自然引水道来说，因 2#提水泵站的取水口在自然引水道上，不直接从抽蓄上库取水，故自然引水道的引水频次与 2#提水泵站保持一致，而具体引水时长则由 3#水库的需水量所决定，同时可以看出，当 2#提水泵站进行抽水工况时，自然引水道 B 段的流量会相应的降低。上述内容验证了本文对此部分所提约束的有效性。

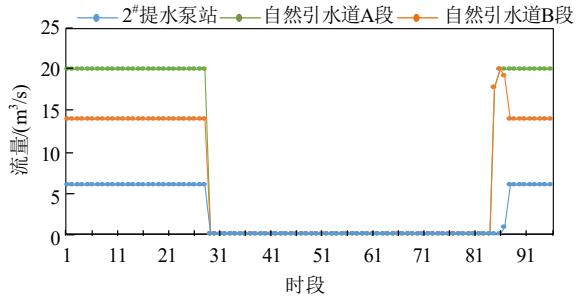


图 6　2#提水泵站与阀门控制的自然引水道运行关系

Fig. 6　2# lift pumping station in relation to valve-controlled natural diversion operation

4）不同引水总量对抽蓄电站运行分析。

为分析不同引水总量方案对抽蓄电站方式的影响，设置 2 种不同引水量方案，分别为：方案 1：本文模型(引水量 80 万 m^3)；方案 2：全时段以最大流量引水(引水量 241.92 万 m^3)，调度结果如附录 F 表 F1、图 F1 可知，2 种不同引水方案下，抽水蓄能电站从下库往上库的抽水总量一致。当引调水工程引水总量增加时，抽水蓄能电站可用于发电的水量减少，一定程度上影响了抽水蓄能电站的发电收益，方案 2 较方案 1 发电收益减小了 141.09 万元，降幅为 23%。但未对抽水蓄能电站本身功能造成影响，仍能够通过快速调节平抑光伏波动保证输电曲线为平滑的阶梯状，符合实际运行要求。

5）联合体调峰效果分析。

联合体调峰效果如图 7 所示，电网余荷峰谷差得到了有效降低，从 7745MW 下降至 4493MW，降幅为 41.99%，有利于电网侧的安全运行。分析原因，在丰平谷电价的引导下，抽蓄与泵站在夜间负荷低谷时段抽水增加电网负荷，体现“填谷”功能，在白天负荷高峰期，抽蓄电站同光伏一起并网供电，体现“削峰”功能。

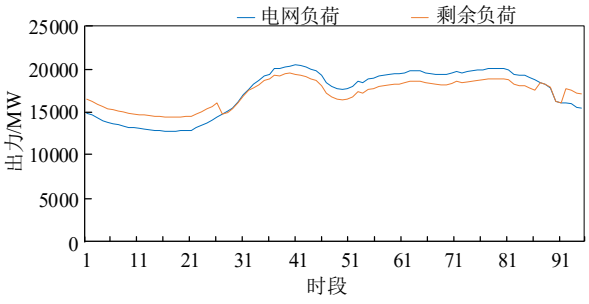


图 7　联合体调峰效果

Fig. 7　Consortium peaking shaving effect

4.2.3　联合运行结果对比分析

为验证本文所提模型下三者联合运行效果，另设置 2 种模型进行对比分析，对比模型 1 假设抽水蓄能电站仅与引调水工程联合运行，光伏电站不参与联合运行，但仍与抽水蓄能电站在同一并网通道；对比模型 2 假设抽水蓄能电站仅与光伏电站联合运行，引调水工程不参与联合运行，抽水蓄能电站不向引调水工程供水。对比模型仍以期望效益最大为目标，前者目标函数包括抽蓄发电效益、供水效益、抽蓄成本、供水成本；后者目标函数包括抽蓄发电效益、光伏收益、抽蓄成本、弃电惩罚。

其结果对比如表 3 所示。可以看出通过抽水蓄能、引调水工程与光伏联合运行，在相同的电网网架约束下，本文模型与对比模型 1 相比，总收益从 479.17 万元提高至 522.48 万元，增幅为 9.03%；分析原因，在不与光伏电站联合运行后，对比模型 1 目标函数无须考虑弃光惩罚，故抽蓄在电价高峰期会加大出力，挤占了处于同一断面下的光伏送出通道，造成了光伏弃光，使光伏收益降低，从而导致三者的总收益降低，但此时抽水蓄能电站收益变高，故在本文所提联合运行模式中，如果抽水蓄能电站、光伏电站属于不同的主体，则抽水蓄能电站的损失将由光伏电站做出一定的补偿。本文模型与对比模型 2 相比，总收益从 555.68 万元降低至 522.48 万元，降幅为 5.97%，分析其原因，对比模型 2 中抽水蓄能电站不用向引调水工程供水，而是将这一部分供水水量用于发电，其带来的发电收益大于补水收益，故本文所提模型总收益少于对比模型 2，但供水为民生工程，能给缺水地区带来巨大的社会收益。

表 3　不同方案结果对比分析

Table 3　Results comparison of different solutions

模型	收益期望/万元							弃光电量/(MW·h)
	抽水蓄能发电	抽水蓄能抽水	提水泵站抽水	光伏	供水收益	启停成本	总收益	
本文模型	620.93	360	3.87	235.22	40	9.8	522.48	0
对比模型 1	834.53	510.95	3.87	129.26	40	9.8	479.17	2639.77
对比模型 2	687.66	360	0	235.22	0	7.2	555.68	0

4.2.4　模型参数影响分析

本文模型中包括较多参数，合理的参数设置是模型能顺利求解的关键。其中，光伏电价是决定弃光的关键参数，有必要对其进行合理的讨论，基于本文实例，分别将光伏电价设置为 0.2、0.1、0.05 元/(kW·h)，弃光惩罚仍为各电价的 40%，且其他条件不变，分析对模型调度结果的影响，如表 4 所示。从结果可以看出，在光伏电价 0.4、0.2 元/(kW·h)时，光伏弃电量为 0，是因为此时光伏电价与弃光惩罚高，在电价高峰期，光伏总优先并网，而抽蓄可通过水库的调节能力，实现电量在电价峰平时段的转移，使其在输电通道充足的电价平期发电上网；而光伏电价从 0.1 元/(kW·h)开始，随着光伏电价的下降，弃光电量不断增多，是因为此时联合系统更偏向接受弃光以获得抽蓄在电价高峰期的更高收益，从而提高联合体收益。

表 4　不同光伏电价期望弃光分析

Table 4　Expectation of abandonment analysis for different PV tariffs

参数设置/(元/(kW·h))	弃光电量/(MW·h)
0.4(文中设置)	0
0.2	0
0.1	416.31
0.05	765.12

5　结论

将抽水蓄能、引调水工程、光伏电站联合调度运行，能打破水网与电网边界，一体化解决新能源消纳与水资源综合利用问题。为探索其运行模式，本文构建了抽水蓄能电站、引调水工程与光伏电站三者联合运行的短期调度模型，通过建模与求解，得到以下结论。

1）率先探索了抽水蓄能电站、引调水工程与光伏联合调度运行模式。本文所提出的三者联合互补系统的短期效益期望最大模型，不仅实现了水资源的跨地域的空间调配，还考虑了电源侧的发电收益，总收益从 479.17 万元提高至 522.48 万元，增幅为 9.03%；电网侧的输电平稳性与“削峰填谷”调峰作用。以机组为建模单位，提高了模型的精细化建模程度，能直接得到抽水蓄能机组、提水泵站机组、自然引水道的运行状态、频次、时间，提高了联合体的可调度性，更能符合实际调度需求。

2）采用基于变异思想改进的蚁群聚类算法方法处理光伏出力不确定性。针对传统蚁群聚类算法收敛速度慢、易陷入局部最优解以及在聚类时未考虑不同聚类类别之间的差异性的缺点。本文将原距离指标更改为 CH 指数，能在聚类时同时考虑簇内与簇间差异性，提高了聚类效果；其次引入遗传变异操作，有效减少了迭代次数，提高了求解效率。

3）融合多技巧和方法提高模型的求解效率。将引调水工程纳入联合调度后，引调水系统、抽蓄电站以及机组间的水力和电力耦合约束更为复杂，模型建模和求解难度大幅增加。针对模型中的非线

性约束，借鉴并引入了分段线性逼近、离散水头、增加 0-1 变量和辅助变量等线性方法，并引入调节状态变量对特高压直流输电约束进行线性化，完成了整个模型的线性化转换，并利用成熟商业求解软件，提高了模型的求解效率。

附录见本刊网络版(http://www.dwjs.com.cn/CN/1000-3673/current.shtml)。

参考文献

[1] 周孝信，赵强，张玉琼．“双碳”目标下我国能源电力系统发展前景和关键技术[J]．中国电力企业管理，2021(31)：14-17.
ZHOU Xiaoxin，ZHAO Qiang，ZHANG Yuqiong．Development prospects and key technologies of energy and power system under double carbon goals in China[J]．China Power Enterprise Management，2021(31)：14-17(in Chinese).

[2] 王月，申建建，程春田，等．考虑电站集群与发电时变特性的风光出力描述方法[J]．电网技术，2023，47(4)：1558-1569.
WANG Yue，SHEN Jianjian，CHENG Chuntian，et al．Description of wind and solar power generation considering power plant clusters and time-varying power characteristics[J]．Power System Technology，2023，47(4)：1558-1569(in Chinese).

[3] GUO Yi，MING Bo，HUANG Qiang，et al．Risk-averse day-ahead generation scheduling of hydro-wind-photovoltaic complementary systems considering the steady requirement of power delivery[J]．Applied Energy，2022，309：118467.

[4] 鲁宗相，李海波，乔颖．含高比例可再生能源电力系统灵活性规划及挑战[J]．电力系统自动化，2016，40(13)：147-158.
LU Zongxiang，LI Haibo，QIAO Ying．Power system flexibility planning and challenges considering high proportion of renewable energy[J]．Automation of Electric Power Systems，2016，40(13)：147-158(in Chinese).

[5] 罗彬，陈永灿，苗树敏，等．融合改造的混合式抽水蓄能与风电联合运行短期调度模型[J]．水利学报，2023，54(8)：955-966.
LUO Bin，CHEN Yongcan，MIAO Shumin，et al．A joint short-term operation model for wind power and hybrid pumped-storage hydropower plant[J]．Journal of Hydraulic Engineering，2023，54(8)：955-966(in Chinese).

[6] 梁振锋，李召，彭书涛，等．提升新能源承载能力的抽水蓄能容量配置研究[J]．电网技术，2024，48(10)：4206-4220.
LIANG Zhenfeng，LI Zhao，PENG Shutao，et al．Research on capacity configuration of pumped storage to improve the carrying capacity of new energy [J]．Power System Technology，2024，48(10)：4206-4220(in Chinese).

[7] 杨宇轩，周明，郭尊，等．双馈式变速抽蓄机组对新型电力系统多维支撑能力量化方法[J]．电网技术，2025，49(8)：3116-3127.
YANG Yuxuan，ZHUO Ming，GUO Zun，et al．Quantifying multi-dimensional support capabilities of variable-speed pumped storage for new-type power system[J]．Power System Technology，2025，49(8)：3116-3127(in Chinese).

[8] 中华人民共和国国家能源局．抽水蓄能中长期发展规划(2021-2035)[R]．北京：中华人民共和国国家能源局，2021.

[9] 刘泽洪，梁旭明，周原冰，等．基于新型抽蓄的绿色蓄能调水工程研究[J]．全球能源互联网，2022，5(6)：525-534.
LIU Zehong，LIANG Xuming，ZHOU Yuanbing，et al．Research on green water transfer project with energy storage based on new-type pumped storage[J]．Journal of Global Energy Interconnection，2022，5(6)：525-534(in Chinese).

[10] 中华人民共和国国务院．国家水网建设规划纲要[R]．北京：中华人民共和国国务院，2023.

[11] NAVAL N，YUSTA J M，SÁNCHEZ R，et al．Optimal scheduling and management of pumped hydro storage integrated with grid-connected renewable power plants[J]．Journal of Energy Storage，2023，73(Part B)：108993.

[12] MAKHDOOMI S，ASKARZADEH A．Daily performance optimization of a grid-connected hybrid system composed of photovoltaic and pumped hydro storage(PV/PHS)[J]．Renewable Energy，2020，159：272-285.

[13] 张良，郑丽冬，冷祥彪，等．基于灰狼算法的风-光-抽水蓄能联合系统多目标优化策略[J]．上海交通大学学报，2024，58(10)：1554-1566.
ZHANG Liang，ZHENG Lidong，LENG Xiangbiao，et al．Multi-objective optimization strategy for wind-photovoltaic-pumped storage combined system based on gray wolf algorithm[J]．Journal of Shanghai Jiao Tong University，2024，58(10)：1554-1566(in Chinese).

[14] 潘立刚，陈同法，王卿然，等．促进新能源消纳的风-光-抽水蓄能联合调度优化研究[J]．电工技术，2022(4)：76-80.
PAN Ligang，CHEN Tongfa，WANG Qingran，et al．Research on wind-photovoltaic-pumped storage joint scheduling optimization to promote renewable energy consumption[J]．Electric Engineering，2022(4)：76-80(in Chinese).

[15] 李树林，戴嘉彤，董海鹰，等．考虑相关性的风光抽蓄互补发电系统优化运行[J]．电力系统及其自动化学报，2019，31(11)：92-102.
LI Shulin，DAI Jiatong，DONG Haiying，et al．Optimal operation of wind power-photovoltaic-pumped storage joint power generation system considering correlations[J]．Proceedings of the CSU-EPSA，2019，31(11)：92-102(in Chinese).

[16] 李肇桀，张旺，姜斌，等．利用调水储能促进碳达峰碳中和目标实现的建议[J]．水利发展研究，2021，21(12)：17-18.
LI Zhaojie，ZHANG Wang，JIANG Bin，et al．Proposals for the use of water transfer energy storage to contribute to the achievement of peak carbon and carbon neutrality targets[J]．Water Resources Development Research，2021，21(12)：17-18(in Chinese).

[17] MAHFOUD R J，ALKAYEM N F，ZHANG Yuquan，et al．Optimal operation of pumped hydro storage-based energy systems：a compendium of current challenges and future perspectives[J]．Renewable and Sustainable Energy Reviews，2023，178：113267.

[18] 李五勤，吴彦，张世伟，等．引调水工程融合建设抽水蓄能电站的“调水+”新模式探讨[J]．南水北调与水利科技(中英文)，2023，21(6)：1184-1193，1203.
LI Wuqin，WU Yan，ZHANG Shiwei，et al．Discussion on the new model of “water diversion+” for the integration of water diversion projects in construction with pumped storage power stations[J]．South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology，2023，21(6)：1184-1193，1203(in Chinese).

[19] 郭怿．适应跨区域外送消纳的水风光储互补短期协调运行研究[D]．西安：西安理工大学，2023.

[20] 程春田，励刚，程雄，等．大规模特高压直流水电消纳问题及应用实践[J]．中国电机工程学报，2015，35(3)：549-560.
CHENG Chuntian，LI Gang，CHENG Xiong，et al．Large-scale ultra high voltage direct current hydropower absorption and its experiences [J]．Proceedings of the CSEE，2015，35(3)：549-560(in Chinese).

[21] YUAN Wenlin，WANG Xinqi，SU Chengguo，et al．Stochastic optimization model for the short-term joint operation of photovoltaic power and hydropower plants based on chance-constrained programming[J]．Energy，2021，222：119996.

[22] 刘欣雨，罗彬，陈永灿，等．融合改造的梯级混合式抽蓄短期调峰优化模型[J/OL]．电网技术，2024：1-13[2024-07-23].

https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2023.2047.
LIU Xinyu，LUO Bin，CHEN Yongcan，et al. Short-term peak shaving model of cascade hybrid pumped storage retrofitted from conventional hydropower[J/OL] . Power System Technology , 2024 : 1-13[2024-07-23]. https://doi.org/10.13335/j.1000-3673. pst. 2023. 2047(in Chinese).

[23] ZHAO Zhipeng，CHENG Chuntian，LIAO Shengli，et al. A MILP based framework for the hydro unit commitment considering irregular forbidden zone related constraints[J]. IEEE Transactions on Power Systems，2021，36(3)：1819-1832.

[24] CHENG Chuntian，WANG Jiayang，WU Xinyu. Hydro unit commitment with a head-sensitive reservoir and multiple vibration zones using MILP[J]. IEEE Transactions on Power Systems，2016，31(6)：4842-4852.

[25] 罗彬，陈永灿，刘昭伟，等. 梯级水光互补系统最大化可消纳电量期望短期优化调度模型[J]. 电力系统自动化，2023，47(10)：66-75.
LUO Bin，CHEN Yongcan，LIU Zhaowei，et al. Short-term optimal dispatch model for maximizing expectation of accommodation power of cascade hydro-photovoltaic complementary system[J]. Automation of Electric Power Systems，2023，47(10)：66-75(in Chinese).

[26] 苏承国，王沛霖，武新宇，等. 考虑机组组合的梯级水电站短期调峰 MILP 模型[J]. 电网技术，2018，42(6)：1883-1891.
SU Chengguo，WANG Peilin，WU Xinyu，et al. A compact MILP model for short-term peak shaving of cascaded hydropower plants considering unit Commitment[J]. Power System Technology，2018，42(6)：1883-1891(in Chinese).

[27] SHELOKAR P S，JAYARAMAN V K，KULKARNI B D. An ant colony approach for clustering[J]. Analytica Chimica Acta，2004，509(2)：187-195.

[28] 四川省发展和改革委员会. 关于调整我省分时电价机制的通知[R]. 成都：四川省发展和改革委员会，2023.

[29] 吴洋，苏承国，郭超雨，等. 考虑风电出力不确定性的风电-抽水蓄能互补系统短期优化调度[J]. 可再生能源，2023，41(9)：1222-1231.
WU Yang，SU Chengguo，GUO Chaoyu，et al. Short-term optimal scheduling of wind farms and pumped-storage hydropower plant complementary system considering wind power output uncertainty[J]. Renewable Energy Resources，2023，41(9)：1222-1231(in Chinese).

[30] 中华人民共和国发展和改革委员会. 关于 2020 年光伏发电上网电价政策有关事项的通知[R]. 北京：中华人民共和国发展和改革委员会，2020.



龙鑫

在线出版日期：2024-10-31。
收稿日期：2024-07-26。

作者简介：
龙鑫(2000)，男，硕士研究生，研究方向为水电系统优化运行，E-mail：1905203202@qq.com；
罗彬(1987)，男，通信作者，博士，副研究员，主要研究方向为水电系统优化调度与运行方式分析，E-mail：luobin1590@163.com；
陈永灿(1963)，男，博士生导师，长江学者特聘教授，主要研究方向为复杂水域动力特征和生境要素模拟与调控，E-mail：chenyc@tsinghua.edu.cn。

（责任编辑　马晓华）

附录 A

A1 抽水蓄能电站约束

上下库水量平衡约束。

$$\begin{cases} V_t^{\mathrm{up}} = V_{t-1}^{\mathrm{up}} + 3600(Q_t^{\mathrm{pump}} - Q_t^{\mathrm{gen}} - Q_t)\Delta t \\ V_t^{\mathrm{down}} = V_{t-1}^{\mathrm{down}} + 3600(R_t^{\mathrm{r}} + Q_t^{\mathrm{gen}} - Q_t^{\mathrm{pump}} - R_t^{\mathrm{c}})\Delta t \end{cases} \tag{A1}$$

式中：V_t^{up}、V_t^{down} 分别表示抽水蓄能电站上库、上库在 t 时刻的库容，m^3；Q_t^{pump}、Q_t^{gen} 分别表示抽水蓄能电站在 t 时刻的抽水流量、发电流量，m^3/s；Q_t 表示在 t 时刻抽水蓄能上库向水库的总供水流量，m^3/s；抽水蓄能电站下库修建在河道上，R_t^{r}、R_t^{c} 表示在 t 时刻下库的径流入库、出库流量，m^3/s。

水位约束。

$$\begin{cases} \underline{Z}_t^{\mathrm{up}} \le Z_t^{\mathrm{up}} \le \overline{Z}_t^{\mathrm{up}} \\ \underline{Z}_t^{\mathrm{down}} \le Z_t^{\mathrm{down}} \le \overline{Z}_t^{\mathrm{down}} \\ Z_1^{\mathrm{up}} = Z_{\mathrm{begin}}^{\mathrm{up}} \\ Z_1^{\mathrm{down}} = Z_{\mathrm{begin}}^{\mathrm{down}} \\ |Z_T^{\mathrm{up}} - Z_{\mathrm{end}}^{\mathrm{up}}| \le \Delta Z \\ |Z_T^{\mathrm{down}} - Z_{\mathrm{end}}^{\mathrm{down}}| \le \Delta Z \end{cases} \tag{A2}$$

式中：Z_t^{up}、Z_t^{down} 表示抽水蓄能电站上库在 t 时段的水位，m；$\underline{Z}_t^{\mathrm{up}}$、$\underline{Z}_t^{\mathrm{down}}$、$\overline{Z}_t^{\mathrm{up}}$、$\overline{Z}_t^{\mathrm{down}}$ 分别表示抽水蓄能电站上库、下库的最小、最大水位，m；$Z_{\mathrm{begin}}^{\mathrm{up}}$、$Z_{\mathrm{begin}}^{\mathrm{down}}$、$Z_{\mathrm{end}}^{\mathrm{up}}$、$Z_{\mathrm{begin}}^{\mathrm{down}}$ 分别表示抽水蓄能电站上库、下库的初始水位、末水位，m；ΔZ 表示调度末水位允许误差，m。

水位库容约束。

$$\begin{cases} V_t^{\mathrm{up}} = f_{\mathrm{zv}}^{\mathrm{up}}(Z_t^{\mathrm{up}}) \\ V_t^{\mathrm{down}} = f_{\mathrm{zv}}^{\mathrm{down}}(Z_t^{\mathrm{down}}) \end{cases} \tag{A3}$$

式中：$f_{\mathrm{zv}}^{\mathrm{up}}(\cdot)$、$f_{\mathrm{zv}}^{\mathrm{down}}(\cdot)$ 分别表示抽水蓄能电站上库、下库水位库容曲线。

电站抽发互斥约束。

$$u_{i,t}^{\mathrm{pump}} + u_{i,t}^{\mathrm{gen}} \le 1 \tag{A4}$$

式中：u_t^{pump}、u_t^{gen} 分别表示抽水蓄能电站在 t 时段运行状态变量，$u_t^{\mathrm{pump}} \in \{0,1\}$、$u_t^{\mathrm{gen}} \in \{0,1\}$，当 u_t^{gen} 为 1 时，表示抽水蓄能电站在时段 t 正处于发电状态，当 u_t^{pump} 为 1 时，表示抽水蓄能电站在时段 t 正处于抽水状态。

A2 抽水蓄能机组约束

机组出力上下限约束。

$$u_{i,t}^{\mathrm{gen}} \underline{P}_i^{\mathrm{gen}} \le P_{i,t}^{\mathrm{gen}} \le u_{i,t}^{\mathrm{gen}} \overline{P}_i^{\mathrm{gen}} \tag{A5}$$

式中：$P_{i,t}^{\mathrm{gen}}$ 表示第 i 台抽水蓄能机组在 t 时段的发电功率，MW；$\overline{P}_i^{\mathrm{gen}}$、$\underline{P}_i^{\mathrm{gen}}$ 分别表示第 i 台抽水蓄能机组发电功率的上、下限，MW；$u_{i,t}^{\mathrm{gen}}$ 表明机组 i 在 t 时段的发电运行状态变量，$u_{i,t}^{\mathrm{gen}} \in \{0,1\}$，当为 1 时，机组处于发电状态，反之则为 0。

机组发电流量上下限约束。

$$u_{i,t}^{\mathrm{gen}} \underline{Q}_i^{\mathrm{gen}} \le Q_{i,t}^{\mathrm{gen}} \le u_{i,t}^{\mathrm{gen}} \overline{Q}_i^{\mathrm{gen}} \tag{A6}$$

式中：$Q_{i,t}^{\mathrm{gen}}$ 表示第 i 台抽水蓄能机组在 t 时段的发电流量，m^3/s；$\overline{Q}_i^{\mathrm{gen}}$、$\underline{Q}_i^{\mathrm{gen}}$ 分别表示第 i 台抽水蓄能机组发电流量的上、下限，m^3/s。

机组振动区约束。

$$(P_{i,t}^{\mathrm{gen}} - \overline{P}_{i,e}^{\mathrm{gen}})(P_{i,t}^{\mathrm{gen}} - \underline{P}_{i,e}^{\mathrm{gen}}) \ge 0 \tag{A7}$$

式中：$\overline{P}_{i,e}^{\mathrm{gen}}$、$\underline{P}_{i,e}^{\mathrm{gen}}$ 分别表示第 i 台抽水蓄能机组第 e 个振动区的上、下限，MW。

机组水头约束。

$$H_{i,t} = \frac{Z_t^{\mathrm{up}} + Z_{t-1}^{\mathrm{up}}}{2} - Z_t^{\mathrm{down}} - H_{i,t}^{\mathrm{loss}} \tag{A8}$$

式中：$H_{i,t}$、$H_{i,t}^{\mathrm{loss}}$ 分别表示第 i 台抽水蓄能机组在 t 时刻的水头、水头损耗，m。

机组发电开停机持续时间约束。

$$\begin{cases} u_{i,t}^{\mathrm{gen}} - u_{i,t-1}^{\mathrm{gen}} = y_{i,t}^{\mathrm{on}} - y_{i,t}^{\mathrm{off}} \\ y_{i,t}^{\mathrm{on}} + y_{i,t}^{\mathrm{off}} \le 1 \\ y_{i,t}^{on} + \sum_{\lambda=t+1}^{t+T_i^{\mathrm{on}}-1} y_{i,\lambda}^{\mathrm{off}} \le 1 \\ y_{i,t}^{\mathrm{off}} + \sum_{\lambda=t+1}^{t+T_i^{\mathrm{off}}-1} y_{i,\lambda}^{\mathrm{on}} \le 1 \\ \sum_{t=1}^{T} y_{i,t}^{\mathrm{on}} \le M_i^{\mathrm{on}} \end{cases} \tag{A9}$$

式中：$y_{i,t}^{\mathrm{on}}$、$y_{i,t}^{\mathrm{off}}$ 分别表示第 i 台抽水蓄能机组在时段 t 的启动、停止操作变量，$y_{i,t}^{\mathrm{on}} \in \{0,1\}$，当为 1 时则表示机组启动，反之等于 0；$y_{i,t}^{\mathrm{off}}$ 同理；T_i^{on}、T_i^{off} 分别为机组 i 的最小持续开、关机时间，h；M_i^{on} 为机组 i 的最大启动次数，次；λ 为循环时刻指示变量，无实际意义。

机组动力特性约束。

$$P_{i,t}^{\mathrm{gen}} = f_i^{\mathrm{NHQ}}(Q_{i,t}^{\mathrm{gen}}, H_{i,t}) \tag{A10}$$

式中：$f_i^{\mathrm{NHQ}}(\cdot)$ 为第 i 台抽水蓄能机组的出力-水头-流量关系曲线。

机组抽水功率上下限约束。

$$u_{i,t}^{\mathrm{pump}} \underline{P}_i^{\mathrm{pump}} \le P_{i,t}^{\mathrm{pump}} \le u_{i,t}^{\mathrm{pump}} \overline{P}_i^{\mathrm{pump}} \tag{A11}$$

式中：$P_{i,t}^{\mathrm{pump}}$ 表示第 i 台抽水蓄能机组在 t 时段的抽水功率，MW。$\overline{P}_i^{\mathrm{pump}}$、$\underline{P}_i^{\mathrm{pump}}$ 分别表示第 i 台抽水蓄能机组抽水功率的上、下限，MW；$u_{i,t}^{\mathrm{pump}}$ 表明机

组 i 在 t 时段的抽水运行状态变量，$u_{i,t}^{\text{pump}} \in \{0,1\}$，当为 1 时，机组处于抽水状态，反之则为 0。

机组抽水流量上下限约束。

$$u_{i,t}^{\text{pump}} \underline{Q}_i^{\text{pump}} \le Q_{i,t}^{\text{pump}} \le u_{i,t}^{\text{pump}} \bar{Q}_i^{\text{pump}} \tag{A12}$$

式中：$Q_{i,t}^{\text{pump}}$ 表示第 i 台抽水蓄能机组在 t 时段的抽水流量，m^3/s；$\bar{Q}_i^{\text{pump}}$、$\underline{Q}_i^{\text{pump}}$ 分别表示第 i 台抽水蓄能机组发电流量的上、下限，m^3/s。

机组抽水功率特性曲线。

$$P_{i,t}^{\text{pump}} = f_i^{\text{PHQ}}(Q_{i,t}^{\text{pump}}, H_{i,\text{t}}) \tag{A13}$$

式中：$f_i^{\text{PHQ}}(\cdot)$ 为第 i 台抽水蓄能机组的抽水功率-水头-流量关系曲线。

机组抽水与发电互斥约束。

$$u_t^{\text{pump}} + u_t^{\text{gen}} \le 1 \tag{A14}$$

式中：对于任意的抽水蓄能机组，抽水、发电 2 种状态不能同时出现。

机组抽水时启停次数约束。

$$\sum_{t=1}^{T-1} | n_{t+1}^{\text{pump}} - n_t^{\text{pump}} | \le M^{\text{pump}} \tag{A15}$$

式中：n_{t+1}^{pump}、n_t^{pump} 分别表示在 $t+1$、t 时段正在抽水的抽水蓄能机组台数，M^{pump} 为抽水蓄能机组在抽水时总最大启停次数。

机组状态转换约束。

$$\begin{cases} u_{i,t\text{-}1}^{\text{pump}} + u_{i,t}^{\text{gen}} \le 1 \\ u_{i,t-1}^{\text{gen}} + u_{i,t}^{\text{pump}} \le 1 \end{cases} \tag{A16}$$

式中：对于任何的抽水蓄能机组，发电、抽水状态转换时必须经历停机状态，避免发电、抽水在两个相邻时段进行直接转换。

附录 B

B1 特高压直流输电约束线性化

特高压直流输电曲线为平滑的阶梯型，本文通过限制日输电曲线最大阶梯数 M 以及引入 2 个 0-1 变量 α_t、β_t 对式(14)完成线性转换。

$$-\alpha_t \Delta P \le P_{s,t+1} - P_{s,t} \le \beta_t \Delta P \tag{B1}$$

$$\begin{cases} \alpha_t + \beta_t \le 1 \\ \sum_{t=1}^{T} (\alpha_t + \beta_t) = M \end{cases} \tag{B2}$$

式中：$\alpha_t \in \{0,1\}$、$\beta_t \in \{0,1\}$ 表示特高压直流输电功率在 t 时段向上、向下调节指标参数，$\alpha_t = 1$ 则表示时段 $t+1$ 功率向上调节，$\beta_t = 1$ 则表示时段 $t+1$ 功率向下调节，当 $\alpha_t = 0$、$\beta_t = 0$ 时，则当时段输电功率不发生变化。同时为了保证在每次输电功率发生变化后能够保持平稳一段时间形成阶梯状，还需要满足以下约束：

$$\begin{cases} \alpha_t + \beta_{t+\xi} \le 1 \\ \alpha_{t+\xi} + \beta_t \le 1 \\ \sum_{\gamma=0}^{\xi} \alpha_{t+\gamma} \le 1,\ \sum_{\gamma=0}^{\xi} \beta_{t+\gamma} \le 1 \end{cases} \tag{B3}$$

式中：$\xi \in (1,\ 2,\ \cdots,\ T/M)$，$\xi$、$\gamma$ 为循环变量，无意义。故式(14)所提出的与时段相关且高度离散的非线性化约束可以通过式(B1)—(B3)实现线性化。

B2 输电断面约束线性化

由式(15)可知输电断面约束包含了 $\max\{\cdot\}$ 函数导致了约束的非线性，不能直接用于模型求解，本文通过引入 3 个连续变量 $\omega_{t,n}$ 和 2 个 0−1 变量 $\mu_{t,n}$ 实现线性化转换，具体步骤如下：

$$\sum_{n=1}^{3} \omega_{t,n} = 1,\ \sum_{n=1}^{2} \mu_{t,n} = 1 \tag{B4}$$

$$\omega_{t,1} \le \mu_{t,1},\ \omega_{t,2} \le \mu_{t,1} + \mu_{t,2},\ \omega_{t,3} \le \mu_{t,2} \tag{B5}$$

$$P_{s,t}^{g} = \sum_{n=1}^{3} \sigma_{t,n} \omega_{t,n} \tag{B6}$$

$$P_{s,t}^{\text{w}} = \sum_{n=1}^{3} \omega_{t,n} f(\sigma_{t,n}) \tag{B7}$$

式中：$\omega_{t,n}$ 实现式(15)的线性化；$\mu_{t,n}$ 限制 $\omega_{t,n}$ 的取值；$\sigma_{t,n}$ 为联合体出力的分位点，$\sigma_{t,1} = 0$，$\sigma_{t,2} = C_t$，$\sigma_{t,3} = M_{\text{big}}$，$M_{\text{big}}$ 为大于 C_t 的较大实数；$f(\sigma_{t,n})$ 为分位点出力高于 C_t 的出力，$f(\sigma_{t,1}) = f(\sigma_{t,2}) = 0$，$f(\sigma_{t,3}) = M_{\text{big}} - C_t$。故式(15)可以用式(B4)—(B7)进行等价代替。

附录 C

设置光伏历史出力数据样本集合为：

$$X = \{x_1, x_2, x_3, \cdots, x_N\} \tag{C1}$$

式中：N 为样本总数，样本特征数为 m。

初始化蚁群聚类算法参数：聚类数 $K = 4$、蚂蚁数量 $R = 100$、最大迭代次数 $L = 10000$、信息素蒸发率 $o = 0.1$、信息素阈值 $q = 0.9$、变异率 $b = 0.1$、信息素矩阵 Y，维度为 $N \times K$，初始值设置为 0.01。

计算每只蚂蚁的聚类结果矩阵：

$$D^l = \{d_{r,n,k}^l\} \tag{C2}$$

式中：$d_{r,n,k}^l$ 表示第 l 次迭代第 r 只蚂蚁将第 n 个样本划分到第 k 个聚类中。

聚类结果矩阵根据信息素矩阵中的值所确定。具体操作为某样本所产生的随机数如果都小于信息素阈值 q，则取信息素矩阵信息素最大的作为路径，当有多个，则随机选取；反之则各路径被选取的概率根据各路径信息素大小比例所确定。聚类中

心则为该聚类下所有样本的平均值。

寻找 CH 指数最大的聚类结果作为本次迭代的最优蚂蚁：

$$s^l = \max\{s_1^l\ ,\ s_2^l\ ,\cdots,\ s_R^l\ ,s^{l-1}\} \tag{C3}$$

式中：s_R^l 为第 l 次迭代时第 r 只蚂蚁的 CH 指数；s^l、s^{l-1} 分别表示第 l、$l-1$ 次迭代的最大 CH 指数。

对最优聚类结果进行随机变异。具体操作为随机生成 N 个 0-1 之间的数，分别代表 N 个样本，如果某样本生成的随机数的值小于变异率 b，则随机改变此样本的路径，生成一个新的聚类结果，计算此结果的 CH 指数，若比原最优蚂蚁 CH 指数大，则将此结果更新为最佳聚类，反之则不更新。

$$r^l = \max+\{s^l, \tilde{s}^l\} \tag{C4}$$

式中：r^l、$\tilde{s}^l$ 分别为经变异后的最大 CH 指数值、变异后 CH 指数值。

用变异后的最优聚类结果对信息素矩阵进行更新。

$$\boldsymbol{Y}^l = \boldsymbol{Y}^{l-1}(1-o) + \frac{\boldsymbol{E}}{r^l} \tag{C5}$$

式中：$\boldsymbol{Y}^l$ 表示第 l 次迭代后新信息素矩阵，$\boldsymbol{E}$ 为全为 1 的单位矩阵。

当在连续迭代 5 次后未变大，则停止迭代，若不满足则继续迭代

改进蚁群觅食聚类算法流程如图 C1 所示。

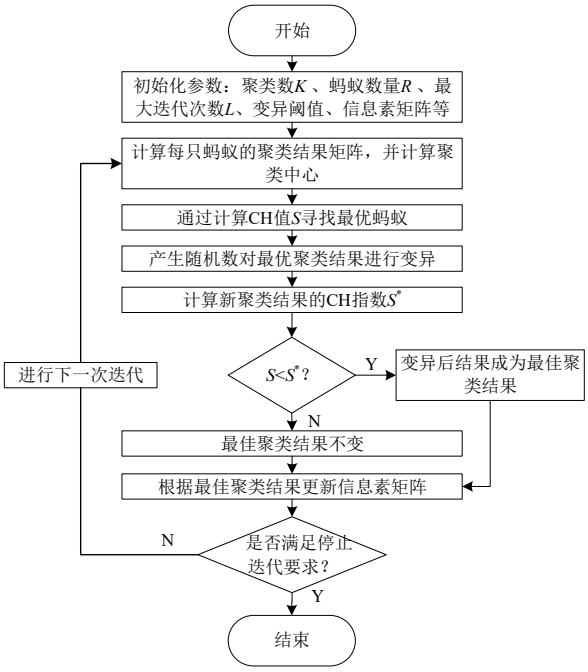


图 C1　改进蚁群聚类算法流程

Fig. C1　Flowchart of an improved ant colony clustering algorithm

附录 D

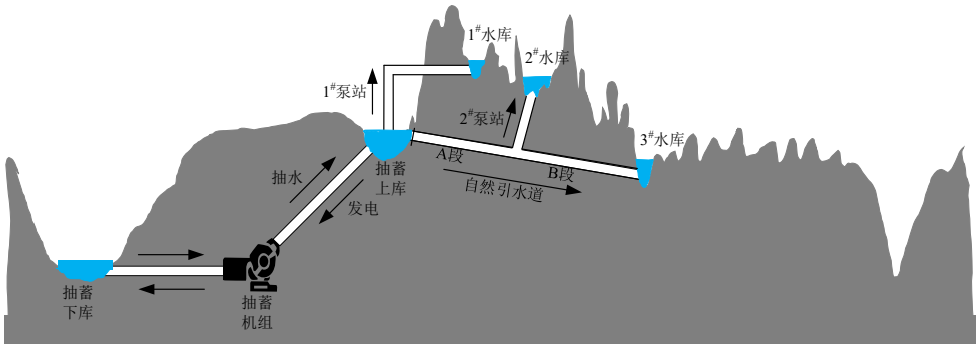


图 D1　联合系统剖面拓扑结构

Fig. D1　Joint system profile topology diagram

附录 E

表 E1　不同时段的电价

Table E1　Tariffs for different time periods

负荷类型	时段	抽蓄上网电价/(元/kW·h)	光伏上网电价/(元/kW·h)	抽水电价/(元/kW·h)
峰	[11:00—12:00]∪[16:00—21:00]	0.80	0.40	0.60
平	[08:00—10:00]∪[13:00—15:00]∪[22:00—23:00]	0.65	0.40	0.4785
谷	[01:00—07:00]∪[24:00]	0.40	0.40	0.30

附录 F

表 F1　不同方案收益对比

Table F1　Comparison of the benefits of different programmes

模型	收益/万元							弃光电量/(MW·h)
	抽水蓄能发电	抽水蓄能抽水	提水泵站抽水	光伏	供水收益	启停成本	总收益	
方案 1	611.07	360	3.87	300.92	40	9.8	578.32	0
方案 2	469.98	360	25.14	300.92	120.96	9.1	497.62	0

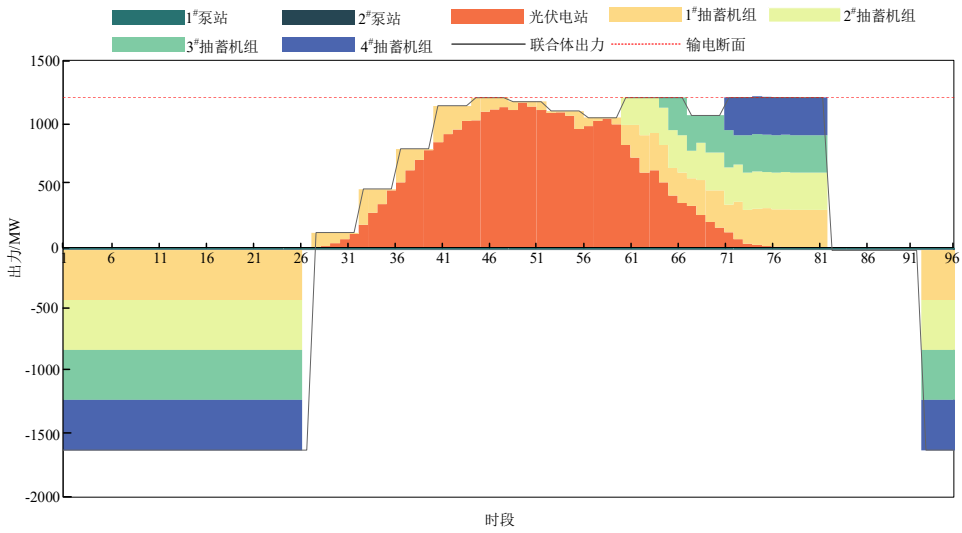


图 F1　方案 2 联合体出力过程

Fig. F1　Option 2 consortium force generation process