

• 水工岩石力学 •

DOI:10.12454/j.jsuese.202400960



本刊网刊

基于组合赋权-云模型的抽水蓄能电站综合效益评价

侯公羽¹, 马晓赞^{1,2}, 孙晓荣^{1*}, 张欣怡¹, 陈钦煌¹, 李 乐², 符欢欢¹, 李唯伊¹

(1. 中国矿业大学(北京) 力学与土木工程学院, 北京 100083; 2. 中国建筑第二工程局有限公司, 北京 101149)

摘 要:抽水蓄能作为电力系统中最为成熟的新能源储能技术, 凭借其能调节电网负荷、平衡电力波动及提升系统稳定性的独特优势, 已成为实现中国“双碳”目标的重要路径之一。因此, 对抽水蓄能电站综合效益进行科学评估, 是项目决策及政策制定中至关重要的一环。为此, 本文提出一种基于博弈论组合赋权-云模型的综合效益评价模型。首先, 运用社会网络分析法(SNA)筛选关键评价指标, 构建包含财务评价、国民经济评价、技术效益、动态效益、静态效益、电网效益、综合可持续性效益和社会效益 8 个 1 级指标及其下属 30 个 2 级指标的评价指标体系。其次, 采用序关系分析(G1)法和 CRITIC(criteria importance through intercriteria correlation)法相结合的方式, 对各评价指标进行主观与客观权重赋值。通过引入博弈论组合赋权方法, 进一步优化各指标的权重分配。最终, 基于云模型构建综合效益评价模型。利用博弈论组合赋权-云模型对紫云山抽水蓄能电站进行实例分析, 结果表明, 该电站的综合效益评估等级为“好”, 与实际情况相符, 充分验证了所构建模型的有效性与准确性。该研究不仅为抽水蓄能电站的综合效益评估提供了科学的评估框架, 并为类似项目的决策和实施提供了理论支持和实践依据。

关键词:抽水蓄能电站; 博弈论; 云模型; 综合效益评价; 社会网络分析法; 序关系分析法; CRITIC 法

中图分类号:TV743

文献标志码:A

文章编号:2096-3246(2026)01-0018-13

在实现“碳达峰碳中和”目标的推动下, 中国将新型电力系统建设纳入国家战略, 明确以新能源作为主体能源的发展目标^[1]。新能源发电的随机性和间歇性特点, 导致大规模并网对电网系统的汇集、调峰、调频、转移支援等能力提出了更高的技术要求, 因此, 电网需配套一定规模的储能装置以提高新型电网的稳定性和可靠性^[2]。作为电力系统中的重要储能方式, 抽水蓄能电站因其经济性、技术成熟、运营周期长及调配灵活等优势, 已成为支撑新能源大规模接入电网的关键支撑技术^[3-4]。因此, 抽水蓄能电站的综合效益评价不仅关系到电站本身的经济和技术可行性, 还对推动新能源发展、优化电力系统结构具有重要意义。

近年来, 国内外学者对抽水蓄能电站综合效益的评价进行了不同程度的探讨。柳咏梅^[5]与张东^[6]主要从经济效益角度构建指标体系, 揭示了抽水蓄能在投资决策和区域经济中的基础作用; 王昊婧^[7]在此基础上引入环境效益, 构建了经济与环境双重视角的运营

评价体系, 并明确了影响电站高效运行的关键因素, 体现了评价指标由单一向多维转变的趋势; Dallinger 等^[8]通过调度模型与市场均衡分析, 探讨了抽水蓄能在提升电网灵活性和社会效益方面的作用, 拓宽了效益评价的应用领域; Wei 等^[9]基于电站调峰与储能特性构建了电网服务评价指标体系, 重点解析了其在提升系统稳定性和促进新能源消纳中的贡献, 为多维度评价提供了新视角; Peng 等^[10]提出了基于系统运行仿真的多维价值评估方法, 全面量化抽水蓄能在新型电力系统中体现的经济、安全、社会和环境效益, 为低碳转型和系统稳定性提升提供了定量支持; 为进一步完善评价体系的全面性, 杨欢^[11]基于知识累积视角构建了一套包含环境、国民经济、服务功能、技术、运营和社会效益的多维评价指标体系, 实现了由局部评价向全局多维考量的跃升。综上, 抽水蓄能电站效益评价方法由单一经济指标逐步向涵盖环境、电网服务等多维度评价演进, 但现有研究在指标体系的全面性

收稿日期:2024-11-18 修回日期:2025-03-28 网络出版日期:2025-04-17

基金项目:国家自然科学基金委员会与神华集团有限责任公司联合资助重点项目(U1261212; U1361210)

作者简介:侯公羽(1965—), 男, 教授. 研究方向:大型建设项目综合效益评价. E-mail: hgyht@126.com

* 通信作者:孙晓荣, E-mail: 2992427689@qq.com

上仍存在不足,难以全面反映抽水蓄能电站在复杂电力系统中的综合价值。

在抽水蓄能电站综合效益评价过程中,权重分配是确定各指标相对重要性的关键步骤,其方法主要分为主观赋权法和客观赋权法。常用的主观方法包括层次分析法、德尔菲法和序关系分析(G1)法,能够充分反映专家经验;而熵权法和主成分分析法等客观方法则依托数据统计,能减少人为偏差。现有研究多采用主客观方法相结合的策略以优化权重分配。例如:Huang等^[12]在电力市场环境下,结合G1法与熵权法进行赋权,探讨了抽水蓄能电站在市场化运营中的收益表现;高瑾瑾等^[13]采用改进的熵权法-G1法对评价指标进行赋权,其结果与实际情况较为吻合,证明了该方法在反映各指标相对重要性方面的有效性;Tan等^[14]提出的基于改进G1-熵权法的评价模型,显著提高了评估精度和适应性。然而,多数研究在权重组合中仍采用较为简单的主客观叠加方法,未能充分考虑各评价指标之间的相互作用及其对权重分配的动态影响;同时,定性分析或单一量化方法难以有效融合指标中的不确定性和模糊性信息,导致评价结果在稳健性和直观性方面存在不足,限制了其在实际应用中的参考价值。

为弥补上述不足,本研究旨在构建一个全面的评价指标体系,对抽水蓄能电站的多维效益进行系统评估。首先,采用社会网络分析法识别和确定评价指标,确保指标体系的全面性;其次,利用G1法对指标进行主观赋权,并采用CRITIC法对指标进行客观赋权,同时结合博弈论优化组合权重;最后,基于云模型构建

抽水蓄能电站综合效益评价模型,从而提供一种直观且定量的分析方法。

1 研究方法

针对现有研究在评价指标体系完整性、权重分配合理性及评价方法稳健性方面的不足,同时结合抽水蓄能电站调频、调相、启动成功率、调峰填谷等运行特性,本研究构建了一种基于博弈论组合赋权-云模型的抽水蓄能电站综合效益评价方法。该方法依次包括指标筛选、权重优化与评价建模3个核心阶段,各方法相互关联、层层递进,共同构建科学合理的评价体系。

1)评价指标体系构建。采用社会网络分析法(SNA),基于抽水蓄能电站综合效益评价相关文献,构建指标网络,并通过中心度分析筛选关键指标,确保指标体系全面性和独立性。这一阶段为后续权重计算和综合评价奠定了科学基础。

2)权重计算与优化。在G1法和CRITIC法赋权的基础上,采用博弈论思想优化两种权重,化解抽水蓄能电站多目标决策中主观偏好与客观数据之间的矛盾,为云模型计算提供更科学的权重输入。

3)评价建模。基于博弈论组合赋权优化的权重与指标效益评价价值,采用逆向云算法计算各指标的正态云数字特征,通过正向云发生器生成电站实际效益云图,并与标准云模型进行空间匹配,依据最大贴近度准则判定综合效益等级。实现对抽水蓄能电站综合效益的量化评估。

整体评价流程图如图1所示。

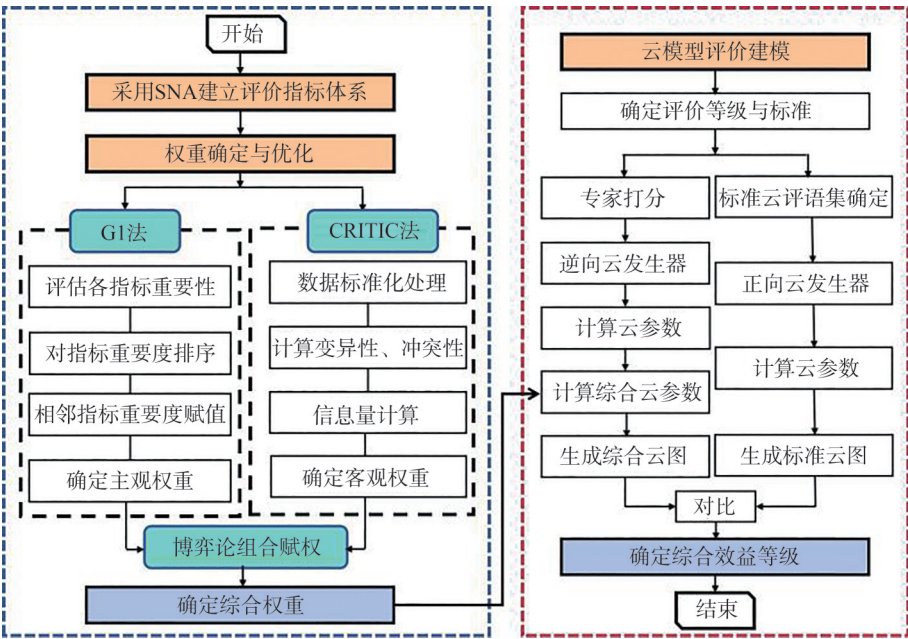


图1 抽水蓄能电站综合效益评价流程图

Fig. 1 Flowchart of the comprehensive benefit evaluation process for pumped storage power plants

2 基于SNA构建评价指标体系

SNA 是一种研究社会系统中关系与结构的有效工具。该方法通过可视化节点及其相互作用的边,帮助识别网络中的关键节点和核心成员^[15]。

在抽水蓄能电站综合效益评价指标的选取过程中,采用SNA能够清晰地揭示评价指标之间的关系,识别具有较高中心度的关键指标。这一过程不仅提升了评价框架的系统性与有效性,还优化了指标选择,确保所选指标能够全面反映电站的多维效益。其步骤如下:

1) 样本选择与筛选。以中国知网作为文献数据库,将“抽水蓄能*效益评价”(*为逻辑与)作为研究文献的检索字段。检索项目包括“主题”“篇名”“关键词”“摘要”4项。总计检索出相关研究文献总库数 60 篇,选取主要主题为“抽水蓄能电站”的 50 篇文献作为初步研究对象。对检索得到的文献进行筛选,筛选标准为研究文献的主题与抽水蓄能电站综合效益评价的相符程度,相符程度高的文献作为研究样本。根据以上原则,最终筛选出 22 篇文献作为研究样本。

2) 构建网络与指标提取。首先对筛选的样本进行研读,构建社会网络,对 1 级指标进行提取汇总,经统计,从样本文献中共提取 10 项 1 级指标。随后,建立评价指标关系矩阵,利用社会网络分析软件Ucinet 6 进行数据处理后,使用软件NetDraw绘制网络图。1 级指标社会网络图如图 2 所示,2 级指标社会网络图如图 3 所示。

3) 分析解释与合并指标。提取网络中心度较高的指标,如“经济效益”“财务评价”“国民经济评价”“环境效益”“社会效益”“动态效益”“电网效益”“静态效益”“技术效益”“可持续发展效益”等。为简化模型,且在综合效益评价时特别强调环境因素在可持续发展中的作用,故考虑将指标“环境效益”和“可持续发展效益”合并为更广泛的指标“综合可持续性效益”。为避免指标之间存在包含关系,依据文献[5],将隶属于“经济效益”下的 4 个指标——“财务评价”“国民经济评价”“动态效益”和“静态效益”,作为独立的 1 级指标进行处理。

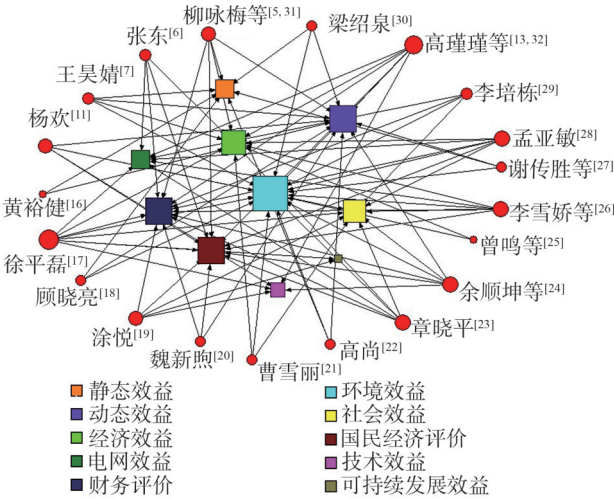


图 2 1 级指标社会网络图
Fig. 2 Social network diagram of primary indicators

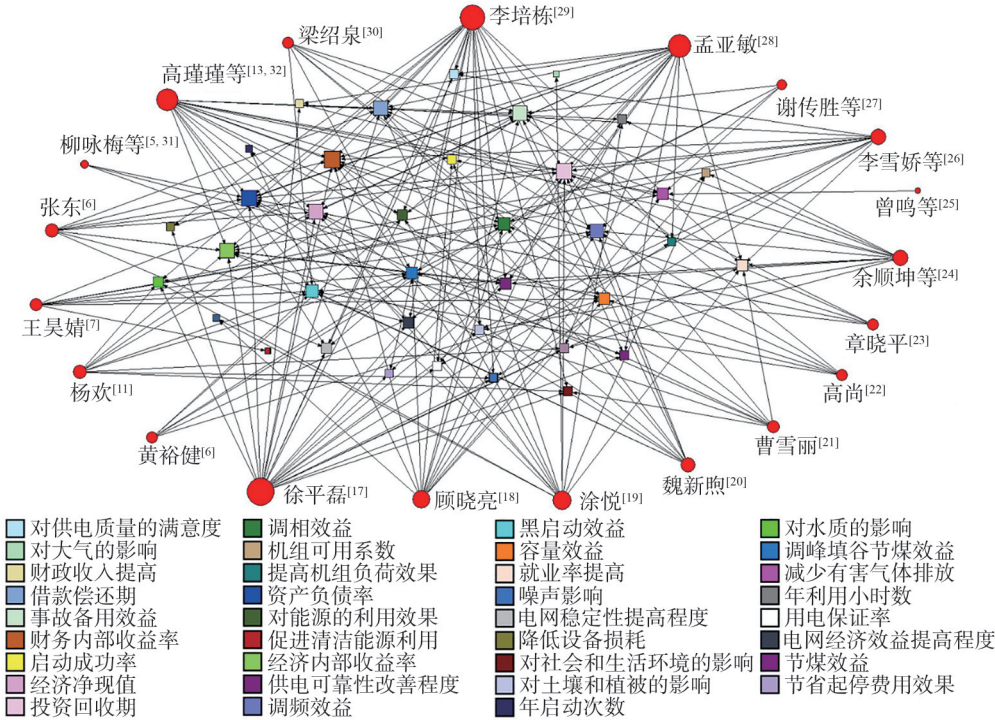


图 3 2 级指标社会网络图
Fig. 3 Social network diagram of secondary indicators

在 2 级指标的筛选过程中,剔除出现频率较低的指标,如“荷载跟随效益”和“生物丰度指数”等。整合概念平行的指标,例如,采用整合方法,将“减少 SO₂ 的排放”“减少 CO₂ 的排放”及“减少氮氯化物的排放”3 个指标归纳为“对大气的影 响”,统一反映电站在大 气污染控制方面的综合贡献。与此同时,对于概念交叉较为明显的指标,如“对社会和生活环境的影响”与“社会效益”以及“调峰填谷节煤效益”与“节煤效益”等,则根据评价需求保留其一,确保指标之间相互独立、无冗余。最终构建的评价体系包括 8 个 1 级指标和 30 个 2 级指标。具体评价指标体系如表 1 所示。

表 1 抽水蓄能电站综合效益评价指标

Tab. 1 Evaluation indicators for the comprehensive benefits of pumped storage power plants				
序号	1 级指标	2 级指标	指标内涵	属性
1	财务评价 B ₁	财务内部收益率 C ₁	电站在全生命周期内,C ₁ 表示使项目净现值等于 0 时所对应的折现率(该指标用于衡量项目资本金的盈利水平;若其数值高于行业基准收益率,说明项目财务可行性较强,投资回报能够满足预期)	正向
2		投资回收期 C ₂	投资成本通过收益回收所需的时间长度(回收期越短,表明电站抗风险能力越强,资金流动性越好)	负向
3		借款偿还期 C ₃	借款本金和利息偿还完毕所需的时间	负向
4		资产负债率 C ₄	负债总额占资产总额的比例,反映抽水蓄能电站财务结构的稳健性	负向
5	国民经济评价 B ₂	经济内部收益率 C ₅	项目净效益现值等于 0 时的折现率(若高于社会折现率,表明资源配置效率高,对国民经济的净贡献显著)	正向
6		经济净现值 C ₆	按社会折现率计算的各年净效益现值总和(衡量抽水蓄能电站项目对国民经济的净贡献,该指标大于 0 表明项目在全社会视角下具有经济合理性,净效益突出,支持能源结构优化目标)	正向
7	技术效益 B ₃	启动成功率 C ₇	电站启动成功的次数与总启动尝试次数的比率	正向
8		年利用小时数 C ₈	电站每年实际运行时间与总小时数的比率	正向
9		机组可用系数 C ₉	机组可用小时数与统计期间小时数的比率,反映机组处于备用状态的比率	正向
10		年启动次数 C ₁₀	电站每年启动的总次数,频繁启动以满足电网调频、调相的需求	正向
11	静态效益 B ₄	年频率合格率 C ₁₁	达到规定频率要求的年运行时间比率	正向
12		容量效益 C ₁₂	提供可靠的电力容量支撑,缓解电网高峰负荷压力,减少新建电源投资需求,优化系统装机结构。	正向
13		调峰填谷节煤效益 C ₁₃	通过削峰填谷平衡负荷,降低火电机组调峰频率与深度,减少煤耗及碳排放,提升系统经济运行水平。	正向
14	动态效益 B ₅	调频 C ₁₄	快速响应电网频率波动,调节有功功率输出,维持电力系统频率稳定,保障电能的质量	正向
15		调相 C ₁₅	动态调节无功功率,改善电压稳定性,增强电网抗扰动能力,降低输电损耗	正向
16		事故备用 C ₁₆	在电网突发故障或功率缺额时,迅速启动供电,提升电力系统安全可靠	正向
17	电网效益 B ₆	黑启动能力 C ₁₇	电站在电网全面停电时,利用自身资源独立启动并助力电网逐步恢复供电的能力,增强电网应对紧急情况的韧性	正向
18		供电可靠性改善程度 C ₁₈	电站对提高电网供电可靠性的贡献	正向
19		电网稳定性提高程度 C ₁₉	电站对电网整体稳定性提升的影响	正向
20	综合可持续性效益 B ₇	电网经济效益提高程度 C ₂₀	电站对电网经济效益提升的贡献	正向
21		对水质的影响 C ₂₁	施工期间会产生大量含有石油和悬浮物的生产废水(需通过有效收集和无害化处理,防止对水体和水质造成污染)	负向
22		噪声影响 C ₂₂	电站运营产生的噪声对环境的影响	负向
23		对大气的影 响 C ₂₃	施工期间产生大量的废气及有害气体(需采取有效措施减轻大气污染)	负向
24	社会效益 B ₈	对土壤及植被的影响 C ₂₄	施工期间会对电站周围土壤及植被进行不同程度的清理(需进行有效管理,降低对土壤及植被的破坏)	负向
25		就业率提高 C ₂₅	电站建设与运营直接创造工程技术、运维管理、配套服务等岗位,并间接带动设备制造、建材供应等关联产业就业,提升区域劳动力吸纳能力	正向
26		降低设备损耗效果 C ₂₆	通过调峰填谷减少火电机组频繁启停及低负荷运行,降低设备机械磨损与热应力损伤,延长机组寿命,节约维护成本	正向
27	对能源的利用效果 C ₂₉	节省启停费用效果 C ₂₇	替代火电承担调峰任务,减少机组启停次数,避免高能耗、高成本的启停过程(如燃料消耗、设备损耗),优化运行经济性	正向
28		提高机组负荷效果 C ₂₈	稳定电网负荷曲线,使火电/水电机组在高效负荷区间运行,提升机组利用效率,降低单位发电煤耗与排放强度	正向
29		促进相关产业的发展 C ₂₉	电站对上下游相关产业发展(如水域旅游)的推动作用	正向
30	对能源的利用效果 C ₃₀		电站帮助其他电源保持稳定运行,避免频繁启停,提升整体能源利用效率	正向

3 基于组合赋权-云模型的综合效益评价模型

3.1 基于 G1 法的主观权重确定

G1 法又称序关系法,通过相邻指标间的相对重要程度关系来确定权重,对各个指标进行加权时无需建立矩阵及一致性检验^[33],计算过程较层次分析法更加简单。采用 G1 法进行抽水蓄能电站主观权重确定时,可以有效避免主观性过强及误差较大的问题,其具体步骤如下。

1)确定序关系。假设抽水蓄能电站综合效益的评价指标集为 $\{X_1, X_2, \dots, X_n\}$, n 为评价指标个数。首先,邀请专家对指标进行优先级排序。在第 1 轮选择中,各位专家从指标集 $\{X_1, X_2, \dots, X_n\}$ 中选出一个最为重要的指标,记为 X_1^* 。然后,在剔除 X_1^* 后的剩余指标中,继续选出下一个最为重要的指标,记为 X_2^* 。以此类推,最终得到一个唯一的指标优先级序列,记为 $X_1^* > X_2^* > X_3^* > \dots > X_n^*$ 。

2)判定相邻指标间的相对重要性。专家对第 $k-1$ 个评价指标 X_{k-1}^* 与第 k 个评价指标 X_k^* 的重要程度之比 r_k 进行合理判定,表 2 为根据常用文化用语,建立基于 9 级语气算子的 r_k 赋值^[34]。 r_k 表达式为:

$$r_k = \frac{w_{k-1}^*}{w_k^*} \quad (1)$$

式中, w_k^* 为序关系中第 k 个指标 X_k^* 的原始权重, $k=2, 3, \dots, n-1, n$ 。

表 2 评价指标重要性赋值

r_k	取值说明
1.0	指标 X_{k-1}^* 与指标 X_k^* 同样重要
1.2	指标 X_{k-1}^* 比指标 X_k^* 稍微重要
1.4	指标 X_{k-1}^* 比指标 X_k^* 明显重要
1.6	指标 X_{k-1}^* 比指标 X_k^* 强烈重要
1.8	指标 X_{k-1}^* 比指标 X_k^* 极端重要
1.1、1.3、1.5、1.7	重要性介于相邻两数值之间

3)指标权重计算。根据给定的 r_k 赋值,评价指标 X_n^* 的主观权重计算式为:

$$w_n^s = \left(1 + \sum_{k=2}^n \prod_{j=k}^n r_j \right)^{-1} \quad (2)$$

式中, w_n^s 为评价指标 X_n^* 的主观权重。根据式(3)依次计算剩余 $n-1$ 个指标主观权重。

$$w_{k-1}^s = r_k w_k^s \quad (3)$$

4)确定最终主观权重向量 $\boldsymbol{W}^s = (w_1^s, w_2^s, \dots, w_n^s)$ 。

3.2 基于 CRITIC 法的客观权重确定

CRITIC 法是由 Diakoulaki 等^[35]提出的一种客观赋权方法。其综合考虑了指标间的变异性和冲突性^[36],通过标准差衡量各指标的离散度,并利用相关系数评估指标间的相互依赖性,减少信息冗余。该方法能够客观确定指标权重,有效避免主观干扰,确保权重分配的科学与合理性。其步骤如下:

1)数据标准化处理。为消除不同指标量纲差异,对各指标数据进行标准化处理,得到 $\boldsymbol{X} = (x_{ij})_{m \times n}$ 。对于效益型指标(数值越大越优),采用式(4)进行标准化处理;对于成本型指标(数值越小越优),采用式(5)进行标准化处理。

$$x_{ij} = \frac{a_{ij} - \min_j(a_{ij})}{\max_j(a_{ij}) - \min_j(a_{ij})} \quad (4)$$

$$x_{ij} = \frac{\max_j(a_{ij}) - a_{ij}}{\max_j(a_{ij}) - \min_j(a_{ij})} \quad (5)$$

式(4)、(5)中: x_{ij} 为第 i 个专家对第 j 个评价指标评分值的标准化处理结果, $i=1, 2, \dots, m, j=1, 2, \dots, n, m$ 为参与评分的专家数量, n 为评价指标数量; a_{ij} 为第 i 个专家对第 j 个评价指标的实际评分值。

2)计算指标变异性 σ_j 。

$$\sigma_j = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (x_{ij} - \bar{x}_j)^2} \quad (6)$$

式中, σ_j 为第 j 个指标的标准差, $\bar{x}_j$ 为第 j 个评价指标的算术平均值。

3)计算指标冲突性。

$$r_{jp} = \frac{\sum_{i=1}^m (x_{ij} - \bar{x}_j)(x_{ip} - \bar{x}_p)}{\sqrt{\sum_{i=1}^m (x_{ij} - \bar{x}_j)^2 (x_{ip} - \bar{x}_p)^2}} \quad (7)$$

式中, r_{jp} 为第 j 个指标与第 p 个指标的相关系数, $p=1, 2, \dots, n$ 。

$$y_j = \sum_{p=1}^n (1 - r_{jp}) \quad (8)$$

式中, y_j 为第 j 个指标与其他指标之间的冲突性。

4)计算评价指标信息量。

$$C_j = \sigma_j y_j \quad (9)$$

式中, C_j 为第 j 个指标的信息量。

5)指标客观权重计算。

$$w_j^o = \frac{C_j}{\sum_{j=1}^n C_j} \quad (10)$$

式中, w_j^o 为第 j 个指标的客观权重。

6)确定最终客观权重向量 $\boldsymbol{W}^o = (w_1^o, w_2^o, \dots, w_n^o)$ 。

3.3 基于博弈论组合赋权的最终权重确定

采用博弈论组合赋权的方法,将主、客观权重作为博弈双方,使得最终权重与主、客观权重的离差和最小^[37],以求得公共最大利益。同时弥补了单一赋权的局限性,使所确定的抽水蓄能电站评价指标权重更具可信度。其计算过程如下:

1)构造权重向量集。对 n 个评价指标分别采用主、客观两种赋权方式,得到指标权重集 $W^c = \{W^s, W^o\}$,组合权重向量 W^c 可以表示为:

$$W^c = \alpha(W^s)^T + \beta(W^o)^T \quad (11)$$

式中: W^c 为任意组合权重向量; α 和 β 分别为主观权重组合系数和客观权重组合系数, $\alpha + \beta = 1, \alpha, \beta \in [0, 1]$; W^s 为主观权重向量; W^o 为客观权重向量。

由此可知,第 j 个指标的组合权重 w_j^c 可以表示为:

$$w_j^c = \alpha w_j^s + \beta w_j^o \quad (12)$$

2)为使最终组合权重向量与 W^s 和 W^o 的离差和最小,需构建目标函数,对 α, β 进行优化:

$$\min_{\alpha} \sum_{j=1}^n \left[(w_j^c - w_j^s)^2 + (w_j^c - w_j^o)^2 \right] \quad (13)$$

3)根据矩阵的微分性质可知,优化条件需满足式(14)所示梯度等式:

$$\begin{bmatrix} W^s(W^s)^T & W^s(W^o)^T \\ W^o(W^s)^T & W^o(W^o)^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} W^s(W^s)^T \\ W^o(W^o)^T \end{bmatrix} \quad (14)$$

式中, θ_1 和 θ_2 分别为临时主、客观权重组合系数。

4)通过对 θ_1 和 θ_2 进行归一化得到最终组合系数:

$$\alpha = \frac{\theta_1}{\theta_1 + \theta_2} \quad (15)$$

$$\beta = \frac{\theta_2}{\theta_1 + \theta_2} \quad (16)$$

5)确定最终优化的组合权重向量 W^c 。

3.4 基于云模型的综合效益评价模型

3.4.1 云的基本概念

云模型理论是李德毅等^[38]提出的一种定性与定量相结合的模型处理方法。设 U 为一个定量论域, C 为 U 上的定性概念,数值 $x \in U$,论域 U 所对应的定性概念 C 对于任意 x 都存在一个有任意倾向的随机数 $\mu(x) \in [0, 1]$,称 $\mu(x)$ 为 x 的隶属度,记为 μ : $\forall x \in U, x \rightarrow \mu(x)$, x 在 U 上的分布称为云(Cloud),每个 x 称为云滴,记为 $\text{Drop}(x, \mu(x))$ ^[39-40]。在云模型中,通过结合论域和隶属度,可以更加精准地模拟和分析系统中的不确定性和模糊性,从而为评价提供更加可靠的支持。

3.4.2 正态云数字特征

云模型的数字特征,包括期望 E_x 、熵 E_n 和超熵 H_e ,是评估概念不确定性的关键参数。其中,期望 E_x 反

映云滴在论域内的集中趋势,是云滴分布的中心位置;熵 E_n 作为不确定性的度量,描述了定性概念的模糊性;而超熵 H_e 进一步量化了熵本身的不确定性,云滴的离散程度则是由超熵决定,超熵越大云滴的离散程度越大^[41]。通过这些参数,可以将评价指标从定性描述转化为定量表达,实现概念的数值化。

3.4.3 基于正态云模型实现过程

1)构建指标评价集。根据抽水蓄能电站的特点,通过咨询相关领域的专家,本研究将抽水蓄能电站的综合效益划分为5个等级,具体为综合效益非常差、综合效益差、综合效益一般、综合效益好、综合效益非常好,有效论域为 $[0, 10]$ 。为简化评估过程,减少主观因素影响,选择平分论域的方法作为评分区间。并在此基础上,邀请相关领域的专家根据实际情况进行评分。评价集及评分区间如表3所示。

表3 抽水蓄能电站综合效益评价集及评分区间

Tab. 3 Comprehensive benefit evaluation set and scoring range of pumped storage power plants

综合表述	评分区间
综合效益非常差	[0,2)
综合效益差	[2,4)
综合效益一般	[4,6)
综合效益好	[6,8)
综合效益非常好	[8,10]

2)通过博弈论组合赋权模型计算权重。

3)标准云模型图绘制。划分评价等级及评价区间,将区间转化为能够衡量综合评价效果的标准云数字特征 $\text{Cloud}(E_x, E_n, H_e)$,其特征值形成过程如式(17)所示,并利用Matlab绘制标准云模型图。

$$\begin{cases} E_x = (V_{\max} + V_{\min})/2, \\ E_n = (V_{\max} - V_{\min})/6, \\ H_e = f \end{cases} \quad (17)$$

式中: $V_{\max}$ 为评价等级区间的上限; $V_{\min}$ 为评价等级区间的下限; f 为固定值,取0.3。

4)确定2级指标云相关参数。将评价指标评分结果通过云发生器逆向法转化为云参数,其步骤如下。

a. 计算均值:

$$\bar{B}_j = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m b_{ij} \quad (18)$$

式中, $\bar{B}_j$ 为第 j 个评价指标评分均值, b_{ij} 为第 i 个专家对第 j 个评价指标评分。

b. 计算方差:

$$S_j^2 = \frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^m (b_{ij} - E_{xj})^2 \quad (19)$$

式中, S_j^2 为第 j 个评价指标的方差, E_{xj} 为第 j 个评价指标

的期望。

c. 计算云参数:

$$\begin{cases} E_{xj} = \bar{B}_j, \\ E_{nj} = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m |b_{ij} - E_{xj}|, \\ H_{ej} = \sqrt{|S_j^2 - E_{nj}^2|} \end{cases} \quad (20)$$

式中, E_{nj} 为第 j 个评价指标的熵, H_{ej} 为第 j 个评价指标的超熵。

5) 确定综合评价云相关参数。基于计算得到的 2 级指标云数字特征和已知的博弈论组合权重 w_j^c , 逐步推导出 1 级指标及目标层的云数字特征。计算过程为:

$$\begin{cases} E_x = \sum_{j=1}^n w_j^c E_{xj} / \sum_{j=1}^n w_j^c, \\ E_n = \sum_{j=1}^n (w_j^c)^2 E_{nj} / \sum_{j=1}^n (w_j^c)^2, \\ H_c = \sum_{j=1}^n (w_j^c)^2 H_{ej} / \sum_{j=1}^n (w_j^c)^2 \end{cases} \quad (21)$$

6) 生成云图。通过 Matlab 编写正向云发生器算法, 并将综合评价云相关参数导入正向云发生器中, 从而得到综合评价云图。将综合评价云图与标准云模型图的位置及形状进行对比, 两者重合度最高的区域判定为当前等级状态。

4 实例应用

4.1 工程概况

紫云山抽水蓄能电站位于湖北省, 电站总装机容量 1 400 MW, 装设 4 台额定容量 350 MW 混流可逆式水泵水轮发电机组, 年发电量 15.6 亿 kW·h, 年抽水电量 20.8 亿 kW·h, 装机年发电利用小时数 1 113, 建设期 8 a, 运营期 40 a, 静态投资 558 600 万元, 资本金 111 720 万元, 长期贷款本 446 880 万元, 贷款年利率 4.3%。本文对该抽水蓄能电站的综合效益等级进行评价。

4.2 指标权重确定

本研究邀请了 5 名业内专家对指标的重要性进行排序, 其各自侧重的研究方向分别为电力系统、能源经济、工程技术、环境科学以及政策法规领域, 确保从多角度、全方位对指标进行评价。依据表 2 确定的重要性比值, 利用式(2)~(3)计算出各指标的主观权重。同时, 基于专家对指标的重要性评分结果, 根据式(4)~(10)计算得到各指标的客观权重。最后, 运用博弈论方法, 依据式(11)~(16)对主客观权重进行组合优化, 确定最优组合系数分别为 0.697 6 和 0.302 4, 各指标最终的组合权重如表 4 所示。

表 4 抽水蓄能电站评价指标权重结果
Tab. 4 Weight results of evaluation indicators for pumped storage power plant

1 级指标	2 级指标	G1 法主 观权重	CRITIC 客观权重	博弈论 组合 权重
财务评价 B ₁	财务内部收益率 C ₁	0.050 0	0.033 7	0.045 1
	投资回收期 C ₂	0.041 6	0.054 2	0.045 4
	借款偿还期 C ₃	0.028 9	0.054 2	0.036 6
	资产负债率 C ₄	0.034 7	0.054 2	0.040 6
国民经济 评价 B ₂	经济内部收益率 C ₅	0.035 0	0.033 7	0.034 6
	经济净现值 C ₆	0.042 0	0.037 8	0.040 7
技术效益 B ₃	启动成功率 C ₇	0.040 7	0.027 0	0.036 6
	年利用小时数 C ₈	0.048 9	0.024 0	0.041 4
	机组可用系数 C ₉	0.068 4	0.023 1	0.054 7
	年启动次数 C ₁₀	0.028 3	0.023 7	0.026 9
	年频率合格率 C ₁₁	0.033 9	0.047 0	0.037 9
静态效益 B ₄	容量效益 C ₁₂	0.022 3	0.024 0	0.022 8
	调峰填谷节煤 效益 C ₁₃	0.031 2	0.024 0	0.029 0
	调频 C ₁₄	0.037 6	0.022 7	0.033 1
动态效益 B ₅	调相 C ₁₅	0.020 1	0.022 8	0.020 9
	事故备用 C ₁₆	0.029 0	0.032 2	0.030 0
	黑启动能力 C ₁₇	0.024 1	0.032 2	0.026 5
电网效益 B ₆	供电可靠性改善 程度 C ₁₈	0.107 4	0.022 8	0.081 8
	电网稳定性提高 程度 C ₁₉	0.089 5	0.022 8	0.069 3
	电网经济效益提高 程度 C ₂₀	0.063 9	0.024 1	0.051 9
	对水质的影响 C ₂₁	0.024 8	0.024 7	0.024 8
综合可持续 性效益 B ₇	噪声影响 C ₂₂	0.020 7	0.024 7	0.021 9
	对大气的影响 C ₂₃	0.029 7	0.024 1	0.028 0
	对土壤及植被的 影响 C ₂₄	0.017 2	0.042 5	0.024 9
	就业率提高 C ₂₅	0.012 4	0.065 4	0.028 4
社会效益 B ₈	降低设备损耗 效果 C ₂₆	0.007 2	0.032 2	0.014 8
	节省起停费用 效果 C ₂₇	0.005 0	0.031 1	0.012 9
	提高机组负荷 效果 C ₂₈	0.007 2	0.022 8	0.011 9
	促进相关产业的 发展 C ₂₉	0.010 3	0.048 9	0.022 0
	对能源的利用 效果 C ₃₀	0.008 6	0.043 3	0.019 1

4.3 基于云模型的综合效益评价

基于抽水蓄能电站综合效益评分区间, 对各评价指标进行效益评分。结合已确定的指标权重, 通过逆向云发生器将其转换为相应的云数字特征。根据式(17)~(21), 计算出 1、2 级指标的云数字特征, 结果如表 5 所示。

表5 抽水蓄能电站评价指标云数字特征

Tab. 5 Cloud digital features of evaluation indicators for pumped storage power plant

1级指标	1级指标云特征参数	2级指标	2级指标云特征参数
财务评价B ₁	(6.371 3, 0.867 8, 0.323 8)	财务内部收益率C ₁	(7.800 0, 0.802 1, 0.237 9)
		投资回收期C ₂	(6.800 0, 0.802 1, 0.237 9)
		借款偿还期C ₃	(5.600 0, 0.902 4, 0.119 6)
		资产负债率C ₄	(5.000 0, 1.002 7, 0.703 3)
国民经济评价B ₂	(7.875 7, 0.685 7, 0.244 2)	经济内部收益率C ₅	(8.200 0, 0.802 1, 0.237 9)
		经济净现值C ₆	(7.600 0, 0.601 6, 0.248 8)
技术效益B ₃	(6.717 1, 0.609 3, 0.327 4)	启动成功率C ₇	(7.200 0, 0.401 1, 0.197 9)
		年利用小时数C ₈	(6.200 0, 0.802 1, 0.237 9)
		机组可用系数C ₉	(7.000 0, 0.501 3, 0.498 7)
		年启动次数C ₁₀	(5.600 0, 0.601 6, 0.248 8)
		年频率合格率C ₁₁	(7.200 0, 0.802 1, 0.237 9)
静态效益B ₄	(7.519 7, 0.601 6, 0.248 8)	容量效益C ₁₂	(6.400 0, 0.601 6, 0.248 8)
		调峰填谷节煤效益C ₁₃	(8.400 0, 0.601 6, 0.248 8)
动态效益B ₅	(7.280 2, 0.835 0, 0.218 4)	调频C ₁₄	(7.400 0, 0.902 4, 0.119 6)
		调相C ₁₅	(6.800 0, 0.902 4, 0.621 0)
		事故备用C ₁₆	(7.200 0, 0.902 4, 0.119 6)
		黑启动能力C ₁₇	(7.600 0, 0.601 6, 0.248 8)
电网效益B ₆	(7.449 6, 0.764 0, 0.234 0)	供电可靠性改善程度C ₁₈	(8.200 0, 0.802 1, 0.237 9)
		电网稳定性提高程度C ₁₉	(7.200 0, 0.802 1, 0.237 9)
		电网经济效益提高程度C ₂₀	(6.600 0, 0.601 6, 0.248 8)
综合可持续性效益B ₇	(5.699 6, 0.696 4, 0.193 0)	对水质的影响C ₂₁	(5.800 0, 0.401 1, 0.197 9)
		噪声影响C ₂₂	(5.400 0, 0.601 6, 0.248 8)
		对大气的影响C ₂₃	(5.400 0, 0.902 4, 0.119 6)
		对土壤及植被的影响C ₂₄	(6.200 0, 0.802 1, 0.237 9)
社会效益B ₈	(7.002 2, 0.898 4, 0.212 3)	就业率提高C ₂₅	(6.200 0, 0.802 1, 0.237 9)
		降低设备损耗效果C ₂₆	(7.000 0, 1.002 7, 0.072 9)
		节省起停费用效果C ₂₇	(7.400 0, 0.902 4, 0.119 6)
		提高机组负荷效果C ₂₈	(6.200 0, 0.802 1, 0.237 9)
		促进相关产业的发展C ₂₉	(7.200 0, 0.802 1, 0.237 9)
		对能源的利用效果C ₃₀	(8.200 0, 0.802 1, 0.237 9)

将表5中1级指标云特征参数代入式(19),得出综合评价云数字特征(7.026 0, 0.749 4, 0.271 6)。通过Matlab正向云发生器生成综合效益评价云图,结果如图4所示。图4中,黑色点云表示各效益评价等级对应的标准评价云的云滴集合,红色点云表示经逆向云发生器生产的紫云山抽水蓄电站实际综合效益云的云滴集合。

由图4可知,紫云山抽水蓄能电站的综合评价云图与“综合效益好”的标准云图基本吻合,说明该电站的综合效益评价等级为“好”,且其综合云的熵值和超熵值均较低,表明评价结果具有较高的可靠性和稳定性。

为进一步深入分析紫云山抽水蓄能电站的综合效益,本文选取部分关键指标进行重点讨论。指标选取遵循以下原则:一是,体现抽水蓄能电站的特有属

性,如调频、黑启动能力等;二是,能够反映电站综合效益中的短板,为后续改进措施提供明确优化方向。部分2级指标评价云图如图5所示。

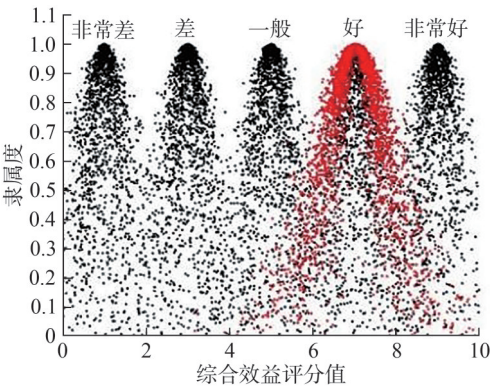


图4 综合效益评价云图

Fig. 4 Comprehensive benefit evaluation cloud diagram

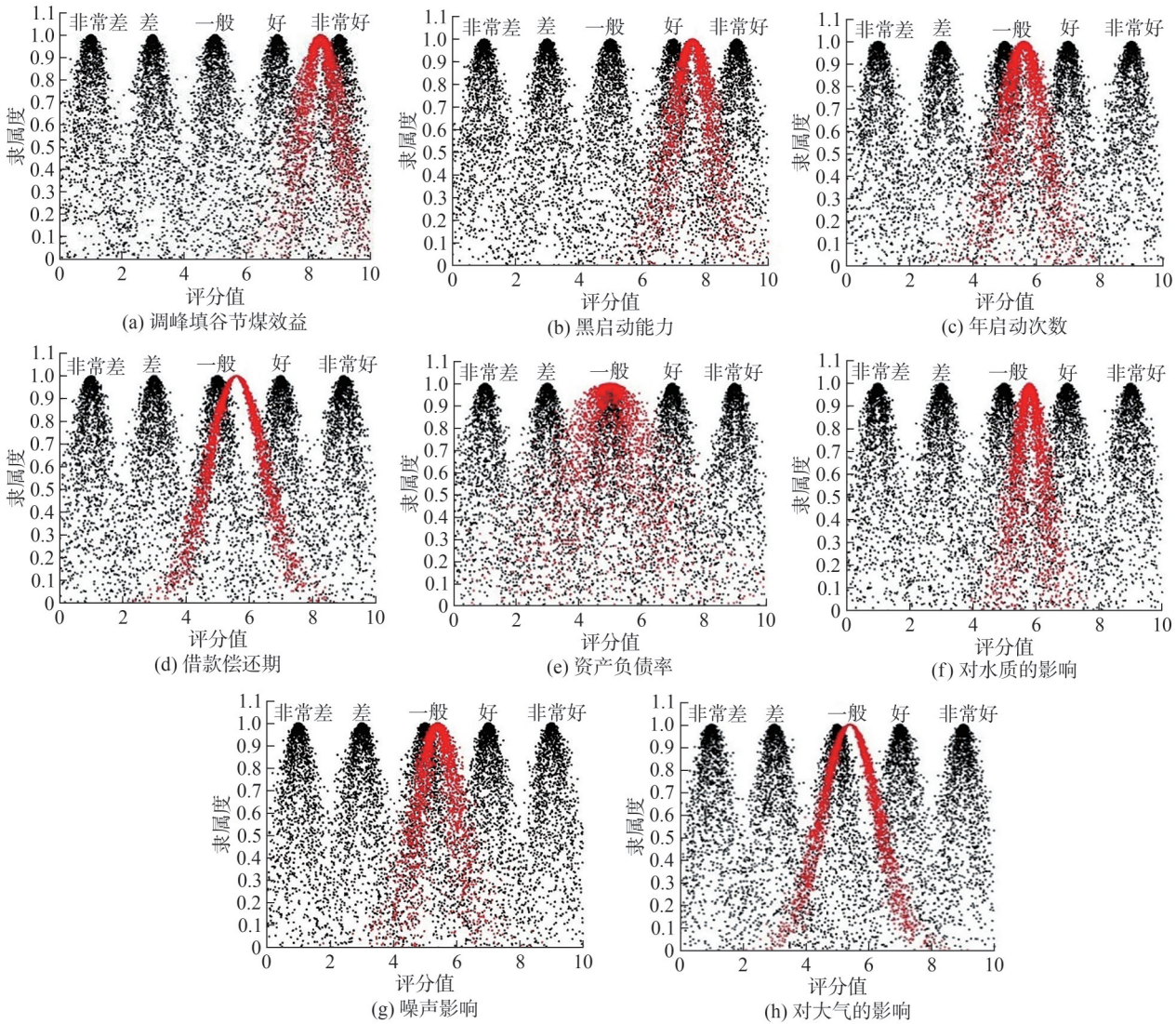


图5 部分2级指标评价云图

Fig. 5 Evaluation cloud diagram of partial secondary indicators

从抽水蓄能电站特有的属性来看,其综合效益主要体现在对电网的调峰填谷节煤效益、调频、调相、事故备用以及黑启动等方面。根据表5数据可知,紫云山抽水蓄能电站在这些方面的表现总体较好,尤其是调峰填谷节煤效益(C_{13})和黑启动能力(C_{17})评分较高,充分体现了其在平滑负荷曲线、减少火电调煤耗以及增强电网韧性方面的显著作用。具体数据显示,该电站每年可减少系统火电煤耗达41.1万元,在无任何外部电源支撑的情况下,可在30 min内完成机组自启动并向区域电网供电,相较于传统火电机组黑启动时间缩短75%。然而,年启动次数(C_{10})的评分较低。虽然设计启停次数为5 000次/a,但实际运行中电网负荷峰谷差波动性较大,现有调度策略未能充分发挥电站的灵活调节能力,导致实际启动次数不足。

在财务经济评价方面,借款偿还期(C_3)和资产负债率(C_4)的评分均处于“一般”区间,显示电站的财务

结构尚有改进空间。紫云山抽水蓄能电站的静态总投资达71.91亿元,但其资本金财务内部收益率仅为8%,借款偿还期长达15 a,资产负债率高达65%。较长的偿还周期和较高的负债比例,使得项目在财务风险和资金流动性方面存在较大压力。

在综合可持续性效益方面,对水质的影响(C_{21})、噪声影响(C_{22})及对大气的影响(C_{23})评分均处于“一般”区间,表明电站施工过程中对环境的负面影响尚未得到充分控制。具体环境指标显示,施工废水回用率达到85%,但库区悬移质含沙量为 0.318 kg/m^3 ,且泥沙年输移量高达4 270 t;同时,敏感区域内声屏障覆盖率不足,导致昼间噪声水平未低于75 dB、夜间未低于55 dB,施工扬尘和机械尾气排放问题仍需进一步强化管控。

4.4 改进意见

1)针对年启动次数方面的不足,采用智能优化算

法,实现抽水与发电功率的动态匹配,确保电站根据负荷波动合理启动;通过数据驱动的调度策略,优化电站响应时间和启动次数,使运行更贴近实际负荷需求,避免因启动次数不足而影响电网调节功能。

2)针对财务方面的不足,建议在项目融资过程中,探索专项债券、绿色金融工具及碳资产抵押等多元化融资方式,以降低融资成本;通过引入不同资本平台优化项目融资结构,有效分散单一融资渠道带来的风险,从而改善借款偿还期过长和资产负债率较高的问题。

3)针对综合可持续性效益方面的短板,采用高效絮凝沉淀技术,在扩库区设置生态浮岛网格以拦截泥沙;在敏感区域布设低噪声型钻爆设备,并加密声屏障布局,以降低施工噪声影响。此外,基于实时 $PM_{2.5}$ 监测数据,设定扬尘浓度预警阈值,结合智能雾炮车自动降尘系统,并辅以防尘网全封闭围挡,以有效控制施工扬尘。

5 结论

1)基于社会网络分析法,本文构建了抽水蓄能电站综合效益评价指标体系,涵盖财务评价、国民经济评价、电网效益、社会效益、综合可持续性效益、动态效益、静态效益和技术效益8个1级指标,并细化为30个2级指标,提升了指标体系的系统性、针对性。

2)基于G1-CRITIC组合赋权及云模型理论,构建抽水蓄能电站综合效益评价模型。定性和定量相结合地对抽水蓄能电站综合效益进行评价,直观呈现各指标的效益水平。结合紫云山抽水蓄能电站进行实例分析,评价结果显示该电站的效益水平处于“好”的等级,与实际情况相吻合,验证了模型的有效性与准确性,并提出了相应的优化建议,以期提升电站效益水平。

参考文献:

- [1] Han Xu,Liu Zhongwen.Research on frequency modulation capacity configuration and control strategy of multiple energy storage auxiliary thermal power unit[J].Journal of Energy Storage,2023,73:109186.
- [2] Kiasari M,Ghaffari M,Aly H H.A Comprehensive review of the current status of smart grid technologies for renewable energies integration and future trends:The role of machine learning and energy storage systems[J].Energies,2024,17(16):4128.
- [3] Xu Y W,Yang J.Developments and characteristics of pumped storage power station in China[J].IOP Conference Series:Earth and Environmental Science,2018,163(1):012089.
- [4] Kong Yigang,Kong Zhigang,Liu Zhiqi,et al.Pumped storage power stations in China:The past,the present,and the future[J].Renewable and Sustainable Energy Reviews,2017,71:720-731.
- [5] Liu Yongmei.Research about economical benefit of Tai'an pumped storage power station project[D].Baoding:North China Electric Power University (Hebei),2008.[柳咏梅.泰安抽水蓄能电站项目经济效益评价研究[D].保定:华北电力大学(河北),2008.]
- [6] Zhang Dong.Economical benefit study of pumped storage power station based on comprehensive evaluation method[D].Beijing:North China Electric Power University,2014.[张东.基于综合评价法的抽水蓄能电站项目经济效益研究[D].北京:华北电力大学,2014.]
- [7] Wang Haojing.Pumped-storage power station operation efficiency evaluation method[D].Beijing:North China Electric Power University,2016.[王昊婧.新形势下我国抽水蓄能电站运营效益评价方法研究[D].北京:华北电力大学,2016.]
- [8] Dallinger B,Schwabeneder D,Lettner G,et al.Socio-economic benefit and profitability analyses of Austrian hydro storage power plants supporting increasing renewable electricity generation in Central Europe[J].Renewable and Sustainable Energy Reviews,2019,107:482-496.
- [9] Wei Min,Niu Yunyi,Li Xiaofei,et al.Comprehensive evaluation of pumped storage power plant serving power grid considering energy storage ability[C]//Proceedings of the 2021 IEEE 2nd International Conference on Information Technology,Big Data and Artificial Intelligence (ICIBA).Chongqing:IEEE,2022:1081-1085.
- [10] Peng Yumin,Yang Ying,Chen Man,et al.Value evaluation method for pumped storage in the new power system[J].Chinese Journal of Electrical Engineering,2023,9(3):26-38.
- [11] Yang Huan.Evaluation research of pumped storage power station based on the perspective of knowledge accumulation[D].Zhengzhou:North China University of Water Resources and Electric Power,2020.[杨欢.基于知识累积视角的抽水蓄能电站评价研究[D].郑州:华北水利水电大学,2020.]
- [12] Huang Xiaoying,Wang Qingran,Wu Haoyu,et al.Benefit evaluation of pumped storage power station in electricity marketization environment[J].IOP Conference Series:Earth and Environmental Science,2020,558(5):052036.
- [13] Gao Jinjin,Zheng Yuan,Li Jianming.Study on comprehensive evaluation of tech-economic benefit index system of pumped storage hydropower station[J].Water Resources and Hydropower Engineering,2018,49(7):152-158.[高瑾瑾,郑源,李涧鸣.抽水蓄能电站技术经济效益指标体系

- 综合评价研究[J]. 水利水电技术, 2018, 49(7): 152–158.]
- [14] Tan Yudong, Xie Guosheng, Xiao Yunhao, et al. Comprehensive benefit evaluation of hybrid pumped-storage power stations based on improved rank correlation-entropy weight method[J]. *Energies*, 2022, 15(22): 8414.
- [15] Jin Xiangyang, Li Yang, Yu Lei, et al. Construction and application of green and low-carbon evaluation indicators for coal mining areas[J]. *Coal Science and Technology*, 2024, 52(4): 131–142. [金向阳, 李杨, 于雷, 等. 煤矿区绿色低碳评价指标构建及应用[J]. *煤炭科学技术*, 2024, 52(4): 131–142.]
- [16] Huang Yujian. The benefits and the business model of evaluation of the pumped storage power station[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2012. [黄裕健. 抽水蓄能电站的效益评价及经营模式的探讨[D]. 广州: 华南理工大学, 2012.]
- [17] Xu Pinglei. The research on technologic economics comprehensive appraisal of pumped storage plants[D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2009. [徐平磊. 抽水蓄能电站技术经济综合评价研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2009.]
- [18] Gu Xiaoliang. The comprehensive evaluation study on pumped storage power station's benefits[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2011. [顾晓亮. 抽水蓄能电站效益综合评价研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2011.]
- [19] Tu Yue. Comprehensive benefit post-evaluation of pumped storage power station[D]. Nanchang: Nanchang University, 2018. [涂悦. 抽水蓄能电站综合效益后评价研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2018.]
- [20] Wei Xinxu. Comprehensive benefit evaluation analysis of pumped storage power plants[J]. *China Science and Technology Information*, 2021, (12): 106–108. [魏新煦. 抽水蓄能电站综合效益评价分析[J]. *中国科技信息*, 2021, (12): 106–108.]
- [21] Cao Xueli. The comprehensive evaluation on pumped-storage power station construction project with the concept of harmony[D]. Baoding: North China Electric Power University (Hebei), 2011. [曹雪丽. 和谐理念下抽水蓄能电站建设项目综合评价研究[D]. 保定: 华北电力大学(河北), 2011.]
- [22] Gao Shang. The financial and economic evaluation of Hohhot's pumped storage project[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2012. [高尚. 呼和浩特市抽水蓄能电站项目财务和经济效益评价[D]. 北京: 华北电力大学, 2012.]
- [23] Zhang Xiaoping. Economic evaluation of Huang Gou pumped storage power plant construction project[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2018. [章晓平. 荒沟抽水蓄能电站建设项目经济评价研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2018.]
- [24] Yu Shunkun, Song Yuqing. Comprehensive evaluation on pumped-storage power station based on vae-matter element analysis[J]. *Modern Electric Power*, 2022, 39(3): 295–301. [余顺坤, 宋宇晴. 基于变分自编码器-物元分析法的抽水蓄能电站效能综合评价[J]. *现代电力*, 2022, 39(3): 295–301.]
- [25] Zeng Ming, Zhou Hui, Wang Lei, et al. Benefit evaluation model of pumped storage power station based on gray correlation TOPSIS method[J]. *Water Resources and Power*, 2013, 31(8): 155–157. [曾鸣, 邹晖, 王蕾, 等. 基于灰色关联 TOPSIS 法的抽水蓄能电站效益评价模型及应用[J]. *水电能源科学*, 2013, 31(8): 155–157.]
- [26] Li Xuejiao. Based on the fuzzy comprehensive evaluation model of water pumped storage power station comprehensive evaluation research of the problem[J]. *Hydropower and Pumped Storage*, 2017, 3(5): 36–38. [李雪娇. 基于模糊综合评判模型的海水抽水蓄能电站综合评价问题的研究[J]. *水电与抽水蓄能*, 2017, 3(5): 36–38.]
- [27] Xie Chuansheng, Jia Xiaoxi, Chen Yingjie, et al. Comprehensive benefit evaluation of pumped storage power station based on PCA-modified radar map method[J]. *Water Resources and Power*, 2012, 30(3): 68–70. [谢传胜, 贾晓希, 陈英杰, 等. 基于 PCA 改进雷达图的抽水蓄能电站效益综合评价[J]. *水电能源科学*, 2012, 30(3): 68–70.]
- [28] Ming Yamin. Research on indicators of pumped storage power station[D]. Baoding: North China Electric Power University (Hebei), 2007. [孟亚敏. 抽水蓄能电站综合评价指标体系的研究[D]. 保定: 华北电力大学(河北), 2007.]
- [29] Li Peidong. Research on comprehensive evaluation of pumped storage power station's benefits[D]. Baoding: North China Electric Power University (Hebei), 2007. [李培栋. 抽水蓄能电站效益的综合评价研究[D]. 保定: 华北电力大学(河北), 2007.]
- [30] Liang Shaoquan. Operation control and benefit analysis of pumped storage power station[D]. Jinan: Shandong University, 2019. [梁绍泉. 抽水蓄能电站运行控制与效益分析[D]. 济南: 山东大学, 2019.]
- [31] Liu Yongmei, Chen Mingliang. Research about economical benefit of Tai'an pumped storage power station project[J]. *Shandong Dianli Jishu*, 2009, (4): 15–17, 27. [柳咏梅, 陈明良. 泰山抽水蓄能电站经济效益评价[J]. *山东电力技术*, 2009, (4): 15–17, 27.]
- [32] Gao Jinjin, Zheng Yuan, Li Jianming. Comprehensive evaluation of economic benefits of pumped storage power plants by improved order relation analysis method[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2018,

35(4):137–142.[高瑾瑾,郑源,李润鸣.基于改进序关系分析法的抽水蓄能电站经济效益综合评价[J].长江科学院院报,2018,35(4):137–142.]

[33] Wang Xuejun,Guo Yajun.Analyzing the consistency of comparison matrix based on G1 method[J].Chinese Journal of Management Science,2006,14(3):65–70.[王学军,郭亚军.基于G1法的判断矩阵的一致性分析[J].中国管理科学,2006,14(3):65–70.]

[34] Bao Xueying,Chai Naijie,Wang Qicai,et al.Comprehensive effect of energy-saving measures on railway green construction based on G1 method and improved DEA models[J].Journal of the China Railway Society,2018,40(10):15–22.[鲍学英,柴乃杰,王起才,等.基于G1法和改进DEA的铁路绿色施工节能措施综合效果研究[J].铁道学报,2018,40(10):15–22.]

[35] Diakoulaki D,Mavrotas G,Papayannakis L.Determining objective weights in multiple criteria problems:The critic method[J].Computers & Operations Research,1995,22(7):763–770.

[36] Lu Ling,Pu Qiuping,Wang Min,et al.Distribution line vulnerability assessment based on game theory and improved CRITIC – AHP[J].Water Resources and Power,2024,42(9):208–211.[鲁玲,蒲秋平,王敏,等.基于博弈论与改进CRITIC–AHP的配电网线路脆弱性评估[J].水电能源科学,2024,42(9):208–211.]

[37] Zong Xiang.Research on the evaluation of residents’ satisfaction in the renovation of old residential areas based on cloud model[D].Ganzhou: Jiangxi University of Science and Technology,2023.[宗香.基于云模型的老旧小区改造居民满意度评价研究[D].赣州:江西理工大学,2023.]

[38] Li Deyi,Meng Haijun,Shi Xuemei. Membership clouds and membership cloud generators[J].Journal of Computer Research and Development,1995,32(6):15–20.[李德毅,孟海军,史雪梅.隶属云和隶属云发生器[J].计算机研究与发展,1995,32(6):15–20.]

[39] Zhu Chang’an,Hu Wenhua,Xue Dongfang,et al.Radar system quality evaluation based on a combination weighting-gray cloud model[J].Journal of Ordnance Equipment Engineering,2023,44(5):133–141.[朱常安,胡文华,薛东方,等.基于组合赋权–灰色云模型的雷达质量评估[J].兵器装备工程学报,2023,44(5):133–141.]

[40] He Yonggui,Liu Jiang.Electric Internet of things security risk assessment based on combined weighting-cloud model[J].Power System Technology,2020,44(11):4302–4309.[何永贵,刘江.基于组合赋权–云模型的电力物联网安全风险评估[J].电网技术,2020,44(11):4302–4309.]

[41] Ma Wei,Xie Lirong,Ma Lan,et al.Probabilistic modeling of short-term wind power prediction errors and output fluctuations[J].Acta Energiæ Solaris Sinica,2023,44(11):361–366.[马伟,谢丽蓉,马兰,等.短期风电功率预测误差及出力波动的概率建模[J].太阳能学报,2023,44(11):361–366.]

Comprehensive Benefit Evaluation of Pumped Storage Power Plant Based on Combined Weighting and Cloud Model

HOU Gongyu¹, MA Xiaoyun^{1,2}, SUN Xiaorong^{1*}, ZHANG Xinyi¹, CHEN Qinhuang¹, LI Le², FU Huanhuan¹, LI Weiyi¹

(1.The College of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China;
2.China Construction Second Engineering Bureau Limited, Beijing 101149, China)

Abstract:

Objective The comprehensive evaluation of pumped storage power plants is of critical importance for ensuring that these systems, which play a pivotal role in grid regulation, renewable energy integration, and the achievement of national carbon reduction targets, are operating optimally. In practice, however, evaluation processes often suffer from incomplete indicator systems, imbalanced subjective and objective weight assignments, and a lack of robust methodologies capable of adequately reflecting uncertainties and fuzziness in complex systems. Therefore, the present study proposes a novel comprehensive benefit evaluation method for pumped storage power plants, which integrates game theory-based combined weighting with cloud model theory. The objective is to develop a systematic, objective, and adaptable evaluation framework that provides scientific support for decision-making and operational optimization in pumped storage power plants.

Methods Firstly, based on an extensive literature review, this study employed social network analysis (SNA) to screen the key indicators required for the comprehensive benefit evaluation of pumped storage power plants. Through centrality analysis, it removed redundant indicators. It merged overlapping concepts, which ultimately formed an evaluation indicator system comprising eight primary categories (financial evaluation, national economic evaluation, technical benefits, dynamic benefits, static benefits, grid benefits, comprehensive sustainability, and social benefits) and 30 corresponding secondary indicators. Secondly, it used a nine-level linguistic operator to quantify the relative importance of adjacent indicators, and it applied a recursive formula to compute subjective weights. The CRITIC method quantified indicator variability and conflict by calculating the standard deviation and correlation coefficient, generating objective weights. Then, game theory integrated and optimized the two sets of weights by constructing an objective function that minimized the deviation between subjective and objective weights. The optimal combination

coefficient was then determined to achieve a dynamic balance in weight allocation. Finally, a comprehensive benefit evaluation model was developed based on cloud model theory. Expert rating data for each indicator were first normalized, and an inverse cloud generator computed the cloud numerical characteristics (expectation E_x , entropy E_n , and hyper-entropy H_e) to capture the inherent uncertainty of the data. Then, using the predetermined combination weights of secondary indicators, the cloud numerical characteristics of primary indicators, and the overall evaluation were synthesized step by step. A forward cloud generator in Matlab generated a comprehensive benefit cloud map, and the effectiveness level was determined through spatial matching and the maximum closeness criterion. In addition, a case study on the Ziyunshan pumped storage power plant was conducted to validate the practical applicability of the proposed model.

Results and Discussions The evaluation results of the comprehensive benefits of the Ziyunshan pumped storage power plant showed that its overall evaluation cloud diagram ($E_x=7.026\ 0$, $E_n=0.749\ 4$, $H_e=0.271\ 6$) closely aligned with the standard cloud diagram for “good overall benefits” ($E_x=7.000\ 0$, $E_n=0.670\ 0$, $H_e=0.300\ 0$), verifying the effectiveness of the constructed model. The analysis of key indicators revealed that the peak shaving and valley filling coal-saving benefit ($E_x = 8.400\ 0$) fell within the good range, with an estimated annual reduction of 411 000 tons of coal consumption for thermal power generation, which verified the pumped storage power plants’ pivotal role in load balancing and carbon reduction. The black start capability ($E_x = 7.600\ 0$) fell within the good benefit range, with an actual response time 75% shorter than that of conventional thermal power plants, which highlighted its technical advantage in enhancing grid resilience. However, the annual start-up frequency ($E_x = 5.600\ 0$) reached only 68% of its designed value, reflecting the inadequate adaptability of dispatch strategies to load fluctuations. In terms of financial and economic evaluation, the loan repayment period ($E_x = 5.600\ 0$) and asset-liability ratio ($E_x = 5.000\ 0$) corresponded to a repayment term of 15 years and a high debt ratio of 65%, revealing long-term debt repayment pressure and capital structure risks. Regarding comprehensive sustainability benefits, the expectation values of environmental indicators, such as impacts on water quality, noise, and air, were all below 6.0, classifying them in the average benefit range. Although the construction wastewater reuse rate reached 85%, the suspended sediment concentration in the reservoir area remained as high as 0.318 kg/m³, and noise levels in sensitive areas exceeded the standard by 10 dB, indicating the need for further optimization of environmental management measures. These results indicated that although pumped storage power plants demonstrated significant operational benefits, continuous improvements in environmental management measures were still required to comply with stricter environmental regulations.

Conclusions The study concludes that the proposed evaluation method, which integrates game theory-based combined weighting with cloud model analysis, provides a scientifically rigorous and robust framework for assessing the comprehensive benefits of pumped storage power plants. Its successful application to the Ziyunshan pumped storage power plant case study confirmed that the evaluation results closely align with actual operational performance, validating the effectiveness and reliability of the approach. Accordingly, the integration of advanced weighting techniques with fuzzy quantitative modeling enhances the objectivity of the evaluation and provides meaningful insights for identifying key areas for improvement. These findings indicate that the method has significant potential for broader application in evaluating energy storage systems and other complex engineering projects, ultimately contributing to more informed decision-making and improved operational efficiency.

Key words: pumped storage power plant; game theory; cloud model; comprehensive benefit evaluation; social network analysis method; G1 method; CRITIC method

(编辑 吴芝明)

引用格式: Hou Gongyu, Ma Xiaoyun, Sun Xiaorong, et al. Comprehensive benefit evaluation of pumped storage power plant based on combined weighting and cloud model[J]. Advanced Engineering Sciences, 2026, 58(1): 18–30. [侯公羽, 马骁赞, 孙晓荣, 等. 基于组合赋权-云模型的抽水蓄能电站综合效益评价[J]. 工程科学与技术, 2026, 58(1): 18–30.]