第 51 卷 第 10 期：5306-5319 高电压技术 Vol.51, No.10: 5306-5319
2025 年 10 月 31 日 High Voltage Engineering October 31, 2025
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20250094

基于集对分析的电网调峰调频混合储能选型方法

王丽馨[1]，魏明宇[1]，刘禹彤[2]，王鑫太[1]，侯兆轩[1]
（1. 现代电力系统仿真控制与绿色电能新技术教育部重点实验室(东北电力大学)，吉林 132012;
2. 国网辽宁省电力有限公司经济技术研究院，沈阳 110015）

摘　要：针对满足电网调峰调频需求的混合储能优选问题，提出一种基于主客观赋权和集对分析的混合储能选型方法。首先，综合考虑调峰调频工况对储能的需求特性，从多角度构建指标体系。然后，采用区间层次分析法(interval analytic hierarchy process，IAHP)求取指标主观权重；采用改进熵权法求取指标的客观权重，有效解决传统熵权法在指标熵值趋近 1 时权重计算误差大的缺陷，并基于博弈论确定综合权重，提高了权重分配的合理性。接着构建了基于集对分析法的混合储能选型模型，通过引入联系数充分计及储能区间参数包含的不确定性，提高了选型结果的准确性。最后，以辽宁某地区调峰调频工况为例进行分析，并与常用选型方法的评价结果进行对比，结果表明所提方法通过考虑区间参数的不确定性，提高了混合储能选型结果的准确性和有效性，为后续开展储能规划提供技术支撑。

关键词：调峰调频；混合储能选型；评价指标集；主客观权重；博弈论；集对分析

Hybrid Energy Storage Selection Method for Power Grid Peaking Shaving and Frequency Regulation Based on Set Pair Analysis

WANG Lixin[1], WEI Mingyu[1], LIU Yutong[2], WANG Xintai[1], HOU Zhaoxuan[1]
(1. Key Laboratory of Modern Power System Simulation and Control & Renewable Energy Technology, Ministry of Education (Northeast Electric Power University), Jilin 132012, China;
2. Economic and Technical Research Institute of State Grid Liaoning Electric Power Co., Ltd., Shenyang 110015, China)

Abstract：Aiming at the optimization problem of hybrid energy storage that meets the peak shaving and frequency regulation demands of the power grid, a hybrid energy storage selection method based on subjective and objective weighting and set pair analysis is proposed. Firstly, considering the demand characteristics of energy storage in peak shaving and frequency regulation conditions comprehensively, we construct an index system from multiple perspectives. Then, the interval analytic hierarchy process (IAHP) is adopted to obtain the subjective weights of the indicators. The objective weight of the index is obtained by using the improved entropy weight method, which effectively solves the defect of large weight calculation error of the traditional entropy weight method when the entropy value of the index approaches 1. Moreover, the comprehensive weight is determined based on game theory, improving the rationality of weight distribution. Then, a hybrid energy storage selection model based on the set pair analysis method is constructed. By introducing the connection number to fully consider the uncertainties contained in the parameters of the energy storage interval, the accuracy of the selection results is improved. Finally, taking the peak shaving and frequency regulation working conditions in a certain area of China's Liaoning Province as an example, we analyze and compare the evaluation results of common selection methods. The results show that the method proposed in this paper can be adopted to improve the accuracy and effectiveness of the hybrid energy storage selection results by considering the uncertainty of interval parameters, providing technical supports for subsequent energy storage planning.

Key words：peak and frequency regulation; hybrid energy storage type selection; evaluation index set; subjective and objective weight; game theory; set pair analysis

基金资助项目：国家电网有限公司总部科技项目(SGXJJJ00NYJS2310023)。
Project supported by Science and Technology Project of the Headquarters of SGCC(SGXJJJ00NYJS2310023).

0 引言

随着“双碳”战略的不断深入，新能源大量并网已成为必然趋势[1]。以风电、光伏为代表的新能源具有间歇性、波动性和随机性，严重影响到电力系统的安全稳定运行以及为用户提供高质量电能[2]。其中，对电网的调峰调频影响尤为严重，急需一种可靠的调峰调频技术[3]。储能的双向能量处理能力、快速响应特性及灵活调度等优势，可有效应对新能源高渗透下的电网调峰调频问题[4-5]。由于不同的储能技术各有特点，适用的工况也各不相同，开展储能选型研究具有必要性与现实意义。然而，现有储能选型的研究大多是针对单一储能[6-9]，随着电力系统的发展，需要储能参与的工况增加，单一储能的劣势越来越明显，逐渐被 2 种及以上的混合储能取代。因此，根据实际工况选择最适宜的混合储能，充分发挥各自优势，是进行混合储能规划的第 1 步和重要前提。

近些年针对混合储能选型问题的研究已得到越来越多学者的关注。现有混合储能选型的思路主要为利用优化法和综合评价法。在利用优化法进行混合储能选型方面，文献[10]提出了一种两阶段的储能优化配置方法，在第 1 阶段对电力系统进行运行模拟并确定最优混合储能方案。文献[11]提出了一种考虑选型的混合储能容量配置方法，完成混合储能的选型和容量最优配置，有效平抑了风电波动。文献[12]提出了一种风电场混合储能双层优化配置策略，上层循环以储能组合方案为寻优变量，进而完成混合储能选型。上述利用优化法进行混合储能选型的研究多将选型作为优化模型的中间环节，在进行优化配置时同步完成混合储能选型，未建立系统的选型模型[9]。同时，利用优化法进行混合储能选型存在只能考虑经济指标和其他少量指标以及不能考虑区间指标和模糊指标的弊端。

在利用综合评价法进行混合储能选型方面，近些年通过考虑经济、技术等多维指标来进一步提高选型结果的准确性，越来越受到相关学者的关注。现有文献主要从指标权重确定和模型构建 2 方面开展研究。文献[13]提出了利用区间数和层次分析法的方法，分别对能量型和功率型储能进行优选，得到了由最优能量型储能和最优功率型储能构成的混合储能方案。文献[14]采用区间模糊数与区间直觉模糊数改进的偏好顺序结构评估法对各储能进行综合评价，得到 13 种应用场景下的最优混合储能方案。文献[15]提出了利用改进的效用组合方法，计算储能方案的效用值并确定最优的混合储能方案，消除了不同类型的储能对评价结果的影响。文献[16]提出了一种最优最劣法(best worst method，BWM)与优劣解距离法(technique for order preference by similarity to an ideal solution，TOPSIS)相结合的储能适用性评价方法，选出了适合调峰和调频的混合储能，为规划布局新型储能技术提供指导。目前储能发展仍不成熟，大量的储能参数仍以区间的形式给出，然而从目前研究来看，现有获取权重的合理性仍待进一步提高，并且评价方法大多集中在如何准确量化选型过程中存在的模糊因素，而对于区间数据掺杂的不确定性对选型结果的影响鲜有研究。

针对上述问题，为提高选型结果的可靠性，本文考虑了区间权重和区间指标值在自由度上的差异，并将集对分析联系数理论引入储能选型过程，在选型过程中考虑到区间数的不确定影响。首先，针对调峰调频工况进行储能需求分析，建立混合储能选型指标体系；其次，采用区间层次分析法(interval analytic hierarchy process，IAHP)求取指标主观权重，考虑到储能区间权重和区间参数值自由度的差异；采用改进熵权法求取指标客观权重，避免当指标熵值趋近 1 时产生较大误差，并基于博弈论确定指标的综合权重；然后，构建基于集对分析法的混合储能选型模型并完成储能方案排序及优选；最后，通过算例分析和现有选型方法结果进行对比验证了所提方法的可行性与有效性。

1 确定混合储能备选方案及评价指标

1.1 混合储能备选方案

调峰和调频是电力系统中最常见的辅助服务，且储能参与单一工况只在特定的时刻动作，而其他时段处于闲置或少出力，极大地浪费了储能资源[17]。因此本文考虑将储能应用于调峰调频协同场景，提高储能利用率。

目前针对本文调峰调频工况，常用的储能主要有压缩空气储能、抽水蓄能、锂电池、液流电池、飞轮储能和超级电容等。其中，以压缩空气储能、抽水蓄能、锂电池和液流电池为代表的能量型储能，特点是可以存储大量能量且能量密度高，能够在较长时间内释放大量能量，但响应速度较慢，不能快速调整输出功率，常用于电网调峰；以飞轮储能、

锂电池和超级电容为代表的功率型储能，特点是响应速度快且功率密度高，能够跟随电网的功率变化，在短时间内提供高功率输出，但能量密度较低，储存时间较短，常用于电网调频。

本文调峰调频工况下考虑的储能指标基础数据如附录 A 表 A1 和表 A2 所示[8-9,15,18]。

1.2 储能通用指标

通用指标是指储能应用在各种工况时大多会考虑的指标，具体如下：

1）循环寿命。即储能重复充放电的最大次数或持续使用的最高年限。调峰调频需要储能频繁地进行充放电操作，因此作为考虑的指标之一。

2）转换效率。即实际输出能量与输入能量的比值。储能频繁的充放电会带来能量损耗，转换效率越高，电网能量损耗越小。

3）成本指标。储能电站建设前期基础设施投入很大，故初始投资建设成本作为衡量其经济性的重要指标。同时，储能运行的单位成本反映了储能运行成本与容量或功率之间的关系[19]，也应作为考虑的指标。综上，储能电站的投资建设成本和单位运行成本分别反映了储能 2 方面的经济性，二者相互补充，将其纳入考量，能够较为全面地反映储能的经济性。

4）选址要求。即在选择储能安装地点时需要考虑一系列因素，以确保储能系统能够安全、高效、经济地运行，并符合环境和社会的要求。

5）安全性。储能的安全性是其在电力系统中广泛应用的重要考量因素，不仅取决于技术本身，还与设备设计、安装、运行和维护密切相关。

1.3 调峰调频工况下的特有指标

特有指标指的是储能参与本文调峰调频工况时需要重点考虑的指标，具体如下：

1）功率等级。储能的功率等级直接决定了其能够提供的最大功率输出能力。功率等级越高，能够提供的调频功率越大，支撑能力也就越强。

2）响应时间。主要包括接收指令时间和输出电力时间，响应时间越短，储能系统的灵活性和稳定性就越高。这对于电网调峰调频极为关键，尤其是调频工况，快速响应可以及时补偿电网的频率偏差，确保电网的稳定运行。

3）充放电持续时间。即储能在一次充放电循环中以最大功率持续充电或供电的时间长度。储能充放电持续时间越长，能够支持电网调峰调频的时间就越长。

4）放电深度。即储能在一次充放电循环中，从完全充电到完全放电的程度。调峰调频工况下对储能实际可利用容量有较高要求，因此也成为一项重要指标。

5）比特性。包含储能的比能量和比功率，即能量密度和功率密度。通常能量密度高的为能量型储能，功率密度高的为功率型储能。负荷高峰和频率波动时需要储能释放电力，以平衡电力供需和系统稳定，这需要储能具有较高的比特性。

1.4 构建储能选型指标集

图 1 为本文调峰调频工况考虑的储能选型评价指标集，包含经济 f_1、选址和安全 f_2、技术 f_3 指标。其中，经济指标包括储能建设初期的投资成本 $f_{1,1}$ 和后续提供服务的运行成本 $f_{1,2}$；选址和安全指标包含选址要求 $f_{2,1}$ 和运行安全 $f_{2,2}$；技术指标包括功率等级 $f_{3,1}$、转换效率 $f_{3,2}$、循环寿命 $f_{3,3}$、响应时间 $f_{3,4}$、充放电持续时间 $f_{3,5}$、放电深度 $f_{3,6}$、能量密度 $f_{3,7}$ 和功率密度 $f_{3,8}$。

2 基于集对分析法的混合储能选型方法

本文针对电网调峰调频下的储能优选，提出了一种基于集对分析法的混合储能选型方法。首先，分别采用 IAHP 法和改进熵权法求取指标的主客观权重，并基于博弈论确定指标的综合权重；然后，基于集对分析联系数理论分别进行能量型和功率型储能排序并确定最优混合储能方案。

2.1 求解指标权重

权重分为主观权重和客观权重，主观权重由工况结合专家经验确定，更符合实际需求，但未考虑储能指标数据，客观性较差；而客观权重有着客观优势，但不能反映出专家对不同工况下指标的重视程度，甚至会出现权重与实际工况相反的情况。针

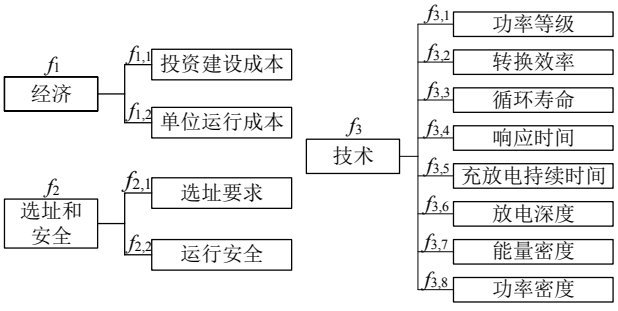


图 1 储能选型评价指标集

Fig.1 Index set of energy storage selection evaluation

对主客观权重的优缺点，本文采用平衡了二者的综合权重来弥补单一权重的不足。

2.1.1 IAHP 法求主观权重

本文通过对重要性标度方法上做出改进，进一步降低主观因素的影响，具体步骤如下文所述。

1）建立储能指标区间判断矩阵，即：

$$\boldsymbol{A}=\begin{bmatrix} [1,1] & \left[a_{12}^{\mathrm{L}},a_{12}^{\mathrm{U}}\right] & \cdots & \left[a_{1n}^{\mathrm{L}},a_{1n}^{\mathrm{U}}\right] \\ \left[a_{21}^{\mathrm{L}},a_{21}^{\mathrm{U}}\right] & [1,1] & \cdots & \left[a_{2n}^{\mathrm{L}},a_{2n}^{\mathrm{U}}\right] \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \left[a_{n1}^{\mathrm{L}},a_{n1}^{\mathrm{U}}\right] & \left[a_{n2}^{\mathrm{L}},a_{n2}^{\mathrm{U}}\right] & \cdots & [1,1] \end{bmatrix} \tag{1}$$

式中：$\left[a_{ij}^{\mathrm{L}},a_{ij}^{\mathrm{U}}\right]$为指标 i 相较于 j 的重要程度区间标度值，上标 L 和 U 分别为区间下限和区间上限；n 为考虑的储能指标个数。

现有选型文献大多采用传统 1—9 级标度，其受主观因素影响较大，导致权重计算的准确性受限，部分文献通过引入区间数代替具体数值，一定程度上可以提高准确性，但仍存在较大的主观性。为了进一步提高权重计算的准确性，本文采用指数标度进行改进。基于指数标度构造的判断矩阵可以实现判断矩阵的一致性最优，提高权重计算的精确度并减少主观因素的影响[20]，为后续选型提供更可靠权重。指数标度方法如表 1 所示，其中，1.316^{a}(a=0, 1, 2, ⋯, 8)根据韦伯-费希纳定律计算得到。

2）一致性检验。

利用式(2)和式(3)分别计算 k 和 l。

$$k=\sqrt{\sum_{j=1}^{n}\frac{1}{\sum_{i=1}^{n}a_{ij}^{\mathrm{U}}}} \tag{2}$$

$$l=\sqrt{\sum_{j=1}^{n}\frac{1}{\sum_{i=1}^{n}a_{ij}^{\mathrm{L}}}} \tag{3}$$

当 $k\le 1$ 且 $l\ge 1$ 时，区间判断矩阵一致性较好；否则需要重新构建，直到满足一致性为止。

3）求解区间判断矩阵，得到各储能技术指标的主观权重 ω_i^{sub}。

将区间判断矩阵 $\boldsymbol{A}=[a_{ij}\pm\Delta a_{ij}]_{n\times n}$ 分解成区间中点值判断矩阵 $\boldsymbol{A}_0=[a_{ij}]$ 和误差分布判断矩阵 $\Delta\boldsymbol{A}=[\Delta a_{ij}]$。利用式(4)和式(5)计算区间中值的几何平均值 g_i 进而确定各指标区间权重中值 ω_{0i}。

$$g_i=\left(\prod_{j=1}^{n}a_{ij}\right)^{\frac{1}{n}},\quad i=1,2,\cdots,n \tag{4}$$

表 1 IAHP 指数标度

Table 1 IAHP index scale

标度	定义(比较指标 i 与 j)
1.316^{0}	同等重要
1.316^{2}	稍微重要
1.316^{4}	明显重要
1.316^{6}	强烈重要
1.316^{8}	极端重要
$1.316^{1,3,5,7}$	介于 2 个重要程度之间
倒数	当比较指标 j 与 i 时

$$\omega_{0i}=\frac{g_i}{\sum_{j=1}^{n}g_j},\quad i=1,2,\cdots,n \tag{5}$$

式中：a_{ij} 为判断矩阵区间元素的中值。

利用式(6)和式(7)计算区间权重的误差分布值 $\Delta\omega_i$。

$$\Delta g_i^2=\left(\frac{g_i}{n}\right)^2\sum_{j=1}^{n}\left(\frac{\Delta a_{ij}}{a_{ij}}\right)^2,\quad i=1,2,\cdots,n \tag{6}$$

$$\Delta\omega_i=\sqrt{\left(\Delta g_i^2\left(\sum_{\substack{j=1\\ j\ne i}}^{n}g_j\right)^2+g_i^2\left(\sum_{\substack{j=1\\ j\ne i}}^{n}\Delta g_j^2\right)\right)\Bigg/\left(\sum_{j=1}^{n}g_j\right)^4} \tag{7}$$

式中：Δa_{ij} 为区间中值与上下限的距离；Δg_i^2 为区间中点值判断矩阵第 i 行极限误差的平方。

最后得到区间主观权重为：$\omega_i=\omega_{0i}\pm\Delta\omega_i$。

现有选型文献针对区间权重未考虑与储能区间参数值自由度的差异，本文利用式(8)将区间权重转化为确定性权重作为最终的主观权重 ω_i^{sub}。

$$\omega_i^{\mathrm{sub}}=\omega_i^{\mathrm{L}}+\frac{1-\sum_{i=1}^{n}\omega_i^{\mathrm{L}}}{\sum_{i=1}^{n}\omega_i^{\mathrm{U}}-\sum_{i=1}^{n}\omega_i^{\mathrm{L}}}\left(\omega_i^{\mathrm{U}}-\omega_i^{\mathrm{L}}\right) \tag{8}$$

式中：ω_i^{L} 和 ω_i^{U} 分别为主观权重的下限和上限。

2.1.2 改进熵权法求客观权重

由于传统熵权法在计算熵值趋近 1 的指标权重时会产生较大误差[21]，本文对传统熵权法进行改进，进而确定出更可靠的客观权重。

根据各储能指标的信息熵值(详细求解过程见附录 B)，求得客观权重的表达式为：

$$\omega_i^{\mathrm{obj}}=\begin{cases}\left(1-\bar{e}^{35.35}\right)\omega_{0i}+\bar{e}^{35.35}\omega_{3i}, & e_i<1\\ 0, & e_i=1\end{cases} \tag{9}$$

其中：

$$\omega_{0i}=\frac{1-e_i}{\sum_{i=1}^{n}(1-e_i)} \tag{10}$$

$$\omega_{3i}=\frac{1+\overline{e}-e_i}{\sum_{k=1,e_k\neq 1}^{n}1+\overline{e}-e_k} \tag{11}$$

式中：e_i为第 i 个指标的信息熵值，且 0≤e_i≤1；$\overline{e}$ 为所有不为 1 的熵值的平均值。

2.1.3 基于博弈论确定综合权重

将各指标的主客观权重分别构成主观权重向量 $\boldsymbol{\omega}^{\text{sub}}$ 和客观权重向量 $\boldsymbol{\omega}^{\text{obj}}$，本文引入博弈论思想，通过在主客观权重之间相互博弈，找到纳什均衡点[22]，以此作为分配依据得到综合权重向量 $\boldsymbol{\omega}$，从而提高权重分配的公平性和合理性。即：

$$\boldsymbol{\omega}=\alpha_1\boldsymbol{\omega}^{\text{sub}}+\alpha_2\boldsymbol{\omega}^{\text{obj}} \tag{12}$$

$$\begin{bmatrix}\boldsymbol{\omega}^{\text{sub}}\left(\boldsymbol{\omega}^{\text{sub}}\right)^{\text{T}} & \boldsymbol{\omega}^{\text{sub}}\left(\boldsymbol{\omega}^{\text{obj}}\right)^{\text{T}}\\ \boldsymbol{\omega}^{\text{obj}}\left(\boldsymbol{\omega}^{\text{sub}}\right)^{\text{T}} & \boldsymbol{\omega}^{\text{obj}}\left(\boldsymbol{\omega}^{\text{obj}}\right)^{\text{T}}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\alpha_1\\ \alpha_2\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{\omega}^{\text{sub}}\left(\boldsymbol{\omega}^{\text{sub}}\right)^{\text{T}}\\ \boldsymbol{\omega}^{\text{obj}}\left(\boldsymbol{\omega}^{\text{obj}}\right)^{\text{T}}\end{bmatrix} \tag{13}$$

式中：α_1 和 α_2 分别为主客观权重的分配系数。

2.2 基于集对分析法建立混合储能选型模型

2.2.1 集对分析简介

集对分析是一种有效处理不确定性问题的综合评价方法，基本思想是利用联系数对有关联的 2 个集合的确定性与不确定性进行数学分析。常用的综合评价方法大多忽略了区间指标含有的不确定性，将集对分析引入综合评价过程，利用其联系数理论，从包含区间指标差异性的 3 个方面进行分析，充分考虑区间指标的不确定性，使评价结果更可靠。

具体来说就是利用联系数的同一度、差异度、对立度这 3 个方面对 2 个集合进行分析评价，2 个集合的联系数的表达式可以简记为：

$$\mu=r+sv+tw \tag{14}$$

式中：r、s、t 分别称为 2 个集合的同一度、差异度、对立度，且 r+s+t=1；v、w 在本文作为标记。

基于上述内容，将储能方案与调峰调频工况的理想方案看成 2 个集合。因此，集对分析把这 2 个集合的联系划分成 3 部分，如式(15)所示。其中，$[0,p_{ij}^{-}]$ 部分表示储能 i 的指标 j 确定是理想指标的概率，记为 r_{ij}；由于 p_{ij} 在 $[p_{ij}^{-},p_{ij}^{+}]$ 任意一点上均可能取值，因此表示不确定是否为理想指标的概率，记为 s_{ij}；$[p_{ij}^{+},1]$ 部分表示储能 i 的指标 j 确定不是理想指标的概率，记为 t_{ij}。把“确定是理想指标”对应于“同一”，“不确定是否为理想指标”对应于“差异”，“确定不是理想指标”对应于“对立”，则区间数 p_{ij} 和理想值“1”的关系就可以用联系数表示。

$$\mu\left(p_{ij},1\right)=r_{ij}+s_{ij}v+t_{ij}w \tag{15}$$

式中：$r_{ij}=\dfrac{p_{ij}^{\text{L}}-0}{1-0}=p_{ij}^{\text{L}}$；$s_{ij}=\dfrac{p_{ij}^{\text{U}}-p_{ij}^{\text{L}}}{1-0}=p_{ij}^{\text{U}}-p_{ij}^{\text{L}}$；$t_{ij}=\dfrac{1-p_{ij}^{\text{U}}}{1-0}=1-p_{ij}^{\text{U}}$；$v\in(0,1)$；$w=1$。

2.2.2 构建混合储能选型模型

考虑到现有储能含有大量的区间指标，本文提出基于集对分析的联系数距离法完成储能方案排序，其中与理想方案联系数距离最小的方案为最优，具体步骤如下：

1）构造能量型或功率型储能决策矩阵 $\boldsymbol{Q}$，即：

$$\boldsymbol{Q}=\begin{bmatrix}\left[q_{11}^{\text{L}},q_{11}^{\text{U}}\right] & \left[q_{12}^{\text{L}},q_{12}^{\text{U}}\right] & \cdots & \left[q_{1n}^{\text{L}},q_{1n}^{\text{U}}\right]\\ \left[q_{21}^{\text{L}},q_{21}^{\text{U}}\right] & \left[q_{22}^{\text{L}},q_{22}^{\text{U}}\right] & \cdots & \left[q_{2n}^{\text{L}},q_{2n}^{\text{U}}\right]\\ \vdots & \vdots & & \vdots\\ \left[q_{m1}^{\text{L}},q_{m1}^{\text{U}}\right] & \left[q_{m2}^{\text{L}},q_{m2}^{\text{U}}\right] & \cdots & \left[q_{mn}^{\text{L}},q_{mn}^{\text{U}}\right]\end{bmatrix} \tag{16}$$

式中：q_{ij}^{L} 和 q_{ij}^{U} 分别为储能 i 在指标 j 方面的参数下限和上限。

2）决策矩阵规范化并修正。

储能各类指标中的效益型指标与成本型指标分别根据式(17)和式(18)进行规范化。

对于效益型指标：

$$\begin{cases}q_{ij}^{\text{L}*}=\dfrac{q_{ij}^{\text{L}}-\min\left(q_{ij}^{\text{L}}\right)}{\max\left(q_{ij}^{\text{U}}\right)-\min\left(q_{ij}^{\text{L}}\right)}\\ q_{ij}^{\text{U}*}=\dfrac{q_{ij}^{\text{U}}-\min\left(q_{ij}^{\text{L}}\right)}{\max\left(q_{ij}^{\text{U}}\right)-\min\left(q_{ij}^{\text{L}}\right)}\end{cases} \tag{17}$$

对于成本型指标：

$$\begin{cases}q_{ij}^{\text{L}*}=\dfrac{\max\left(q_{ij}^{\text{U}}\right)-q_{ij}^{\text{U}}}{\max\left(q_{ij}^{\text{U}}\right)-\min\left(q_{ij}^{\text{L}}\right)}\\ q_{ij}^{\text{U}*}=\dfrac{\max\left(q_{ij}^{\text{U}}\right)-q_{ij}^{\text{L}}}{\max\left(q_{ij}^{\text{U}}\right)-\min\left(q_{ij}^{\text{L}}\right)}\end{cases} \tag{18}$$

式中：$q_{ij}^{\text{L}*}$ 和 $q_{ij}^{\text{U}*}$ 分别为储能 i 在指标 j 方面的参数规范值的下限和上限。

当储能方案较少时，规范后的最优值为 1，最劣值为 0，在比较时放大了最优值的效用，同时也缩小了最劣值的效用，因此采用式(19)对规范后的结果进行修正，即：

$$\tilde{q}_{ij}=\exp\left(\left(q_{ij}^{*}-1\right)/h\right) \tag{19}$$

式中：$\tilde{q}_{ij}$ 为储能 i 在指标 j 方面的参数修正值；q_{ij}^{*} 为储能 i 在指标 j 方面的参数规范值；h 为调节系数，可以取 1、2、3 等自然数。修正后的储能指标参数范围为[$e^{-1/h}$，1]。

3）根据式(15)把规范后的决策矩阵转化为联系数矩阵 $\boldsymbol{\beta}$，即：

$$\boldsymbol{\beta}=\begin{bmatrix}\mu_{11} & \mu_{12} & \cdots & \mu_{1n}\\ \mu_{21} & \mu_{22} & \cdots & \mu_{2n}\\ \vdots & \vdots & & \vdots\\ \mu_{m1} & \mu_{m2} & \cdots & \mu_{mn}\end{bmatrix} \tag{20}$$

式中：μ_{ij} 为第 i 个储能的指标 j 的参数值经规范后的联系数，且 $\mu_{ij}=r_{ij}+s_{ij}v+t_{ij}w$。

4）确定理想储能方案。

在确定储能理想方案时，现有选型文献多采用由所有备选方案在各指标下的相对最优值构成的理想方案，这样定义的理想解与每个备选方案是紧密相连的，因而是相对的，这可能导致储能排序结果与实际相悖。本文采用指定储能各指标的绝对理想值代替现有文献中使用的相对理想值，从而保证只要在工况确定的情况下理想储能方案就不会改变，避免了储能排序结果出现偏差，提高选型结果的准确性和可靠性。

设完全满足调峰调频工况的储能指标 I_1、I_2、…、I_n 的绝对理想方案为：

$$\boldsymbol{G}=\begin{matrix}I_1 & I_2 & \cdots & I_n\end{matrix}\\ \begin{bmatrix}1+0v+0w & 1+0v+0w & \cdots & 1+0v+0w\end{bmatrix} \tag{21}$$

式中：“$0v$”和“$0w$”的含义分别为不确定是否为理想指标的概率为 0 和确定不是理想指标的概率为 0，即一定是理想指标。

5）计算各储能备选方案与绝对理想方案之间的联系数距离 $y_i(i=1,2,\cdots,m)$并排序，并确定调峰调频工况下的最优储能方案。

根据直觉模糊集之间的距离公式，考虑储能各指标的权重，备选方案与绝对理想方案之间的联系数距离为：

$$y_i=\sqrt[z]{\frac{1}{2}\sum_{j=1}^{n}\omega_j\left(\left|r_{ij}-1\right|^z+\left|s_{ij}-0\right|^z+\left|t_{ij}-0\right|^z\right)}=\\ \sqrt[z]{\frac{1}{2}\sum_{j=1}^{n}\omega_j\left(\left|r_{ij}-1\right|^z+\left|s_{ij}\right|^z+\left|t_{ij}\right|^z\right)},\ 1\le z\le\infty \tag{22}$$

式中：z 为所计算联系数距离的阶数。

y_i 的值越小，储能方案与绝对理想方案 $\boldsymbol{G}$ 越接近，其中值最小的方案即为最优储能方案。混合储能选型具体流程如图 2 所示。

3 算例分析

为了说明所提出的混合储能选型方法的有效性，本文针对辽宁某地区的调峰调频工况进行分析。

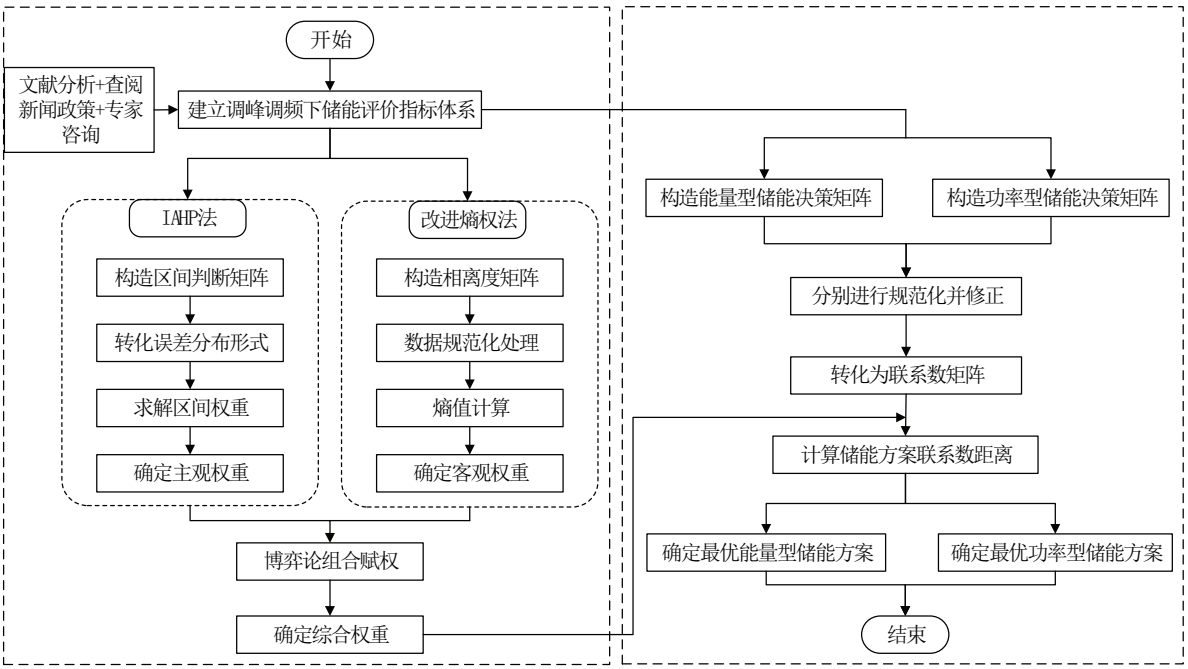


图 2 混合储能选型流程图

Fig.2 Flowchart of hybrid energy storage selection

选取抽水蓄能、压缩空气储能、全钒液流电池、锂电池、飞轮储能和超级电容作为备选方案，基础技术参数见附录 A 表 A1 和表 A2。本文考虑了针对调峰调频下常见的 12 个指标，具体如图 1 所示。

3.1 基于集对分析法建立混合储能选型模型

随着近些年储能技术的发展和经验的积累，储能的可行性已经得到了广泛的验证和认可，并且储能系统通常作为商业投资参与市场运行，而电力市场越来越关注其运营的经济效益，因此，储能的经济性越来越受到电力系统的关注。但无论是对于调峰还是调频场景，对于整体的技术性相较于其他准则更为重要且优势较为明显。

1）基于 IAHP 确定储能各指标主观权重。

通过征求专家意见、查阅文献和政策梳理对储能准则和指标的重要程度进行分析并打分，利用指数标度法构造的区间判断矩阵如附录 A 式(A1)—式(A4)所示。

上述矩阵通过一致性检验后，利用式(4)—式(7)进行求解，得到指标的区间权重见附录 A 图 A1，利用式(8)将区间权重转化为确定性主观权重，如表 2 所示。

2）基于改进熵权法确定储能指标客观权重。

本文考虑的各类储能指标中，功率成本、转换效率、能量密度等指标可以定量描述，但选址要求、运行安全等指标只能定性描述，因此，需要对这些定性指标进行分析并量化，定性指标的评价标准如表 3 所示。确定出各指标理想值后转化为相离度矩阵，对相离度矩阵规范化后求取各储能指标的熵值，最终计算得到各指标的客观权重，见表 2。

3）基于博弈论确定储能各指标综合权重。

利用式(12)、(13)对主客观权重进行组合，确定调峰调频工况下储能各指标的综合权重，如表 2 所示。通过模拟主客观权重之间进行博弈找到分配均衡点，既考虑了专家对调频调峰工况的经验判断和建议，又考虑了储能实际数据的客观事实，从而提高评价结果的全面性和可信度。

表 2 储能指标权重

Table 2 Energy storage index weight

指标	主观权重	客观权重	综合权重
功率等级	0.089 8	0.042 6	0.066 5
转换效率	0.093 9	0.113 0	0.106 0
循环寿命	0.109 7	0.055 5	0.080 3
响应时间	0.131 0	0.128 0	0.129 0
充放电持续时间	0.081 1	0.044 0	0.062 4
放电深度	0.093 9	0.124 5	0.113 4
投资建设成本	0.055 4	0.089 3	0.077 0
运行成本	0.079 2	0.091 9	0.087 3
能量密度	0.069 9	0.051 4	0.054 9
功率密度	0.071 1	0.044 0	0.053 8
选址要求	0.054 4	0.115 7	0.079 8
运行安全	0.070 6	0.100 1	0.089 4

表 3 定性指标的评价标准

Table 3 Evaluation criteria of qualitative indicators

指标	响应时间	选址要求	运行安全
优(4 分)	1~20 ms	高	高
良(3 分)	20 ms 到秒级	较高	较高
中(2 分)	秒级到分钟级	中	中
差(1 分)	分钟级到小时级	低	低

3.2 基于集对分析联系数理论的综合评价结果

1）分别建立能量型和功率型储能决策矩阵。

本文选取的是针对调峰调频复合工况的混合储能系统，其中既有能量型储能又有功率型储能，因此，需要将能量型和功率型储能分开考虑。分别建立的能量型和功率型储能决策矩阵如附录 A 式(A5)、(A6)所示。

2）对决策矩阵进行规范化并修正。

利用式(17)、(18)分别对能量型和功率型储能决策矩阵进行规范化，使得规范后的储能指标值限制在 0~1 之间，并根据式(19)修正规范后的结果，得到最终规范矩阵。

3）将修正后的规范矩阵转化为联系数矩阵。

利用式(15)分别将能量型和功率型储能的规范矩阵转化为联系数矩阵，转化结果如附录 A 式(A7)、(A8)所示。

4）计算各备选方案与理想方案之间的联系数距离。

设完全满足调峰调频工况的指标 I_1、I_2、…、I_n 的绝对理想值构成的能量型和功率型储能的绝对理想方案均为式(21)。

利用式(22)计算储能方案与理想方案之间的联系数距离，如表 4 所示，本文中 z 取 2，得到能量型和功率型储能的优劣排序。故综合考虑技术、经济、选址和安全指标，调峰调频工况下的最优混合储能方案为锂电池和超级电容。锂电池作为最优能量型储能，其在循环寿命上仍存在较大劣势，故在未来的锂电池发展中应重点提高此特性以保持其在调峰调频工况下的优势，具体见附录 A 图 A2 储能指标距离热力图。

表 4 各类储能与理想方案的联系数距离

Table 4 Number of connections between various types of energy storage and the ideal solution

储能类型	储能技术	联系数距离
能量型	抽水蓄能	0.392 5
	压缩空气	0.449 4
	全钒液流电池	0.450 5
	锂电池	0.392 4
功率型	超级电容	0.423 2
	锂电池	0.424 7
	飞轮	0.446 3

3.3 对比分析

为进一步验证本文所提混合储能选型方法的有效性，将所提方法和现有文献方法的选型结果进行对比。其中，对比 1 为采用文献[7]方法进行储能指标赋权，然后通过本文所提评价方法进行混合储能选型；对比 2 为采用所提赋权方法后，利用 TOPSIS 法求解得到调峰调频工况下各类储能的相对优劣排序并完成储能方案优选。能量型和功率型储能与理想方案的距离和相对贴进度如图 3、4 所示。图 5 为将上述方法得到的最优能量型储能应用到当地调峰前后，常规机组在某天内各时段的最大发电功率。

为了检验最优能量型储能和最优功率型储能的组合为最优混合储能方案，现利用文献[23]提出的方法对本文考虑的所有储能组成的 12 种混合储能方案进行配置。表 5 为配置所需的储能技术参数指标。图 6 为由该地区一周的实际采样点(每 15 min 采样 1 次)构成混合储能的参考功率。表 6 为满足该地区电网调峰调频需求下的储能备选方案组成的混合储能配置结果及成本。

分析图 3 和图 4 可以看出，3 种方法在功率型储能的评价结果排序一致，这表明本文所提方法能够兼容现有文献常用方法的功能与性能，间接验证了本文方法的稳健性。但在能量型储能的排序上 3 种方法存在差异，本文方法选择的最优能量型储能为锂电池，而对比 1 和对比 2 方法选择为抽水蓄能，造成这种现象的主要原因在于对比 1 中 IAHP 法仍具有较强的主观影响以及传统熵权法在计算熵值接近 1 的指标权重时存在较大误差，影响了储能指标权重的计算精度，而对比 2 中 TOPSIS 法未考虑储能区间指标含有的不确定性带来的影响和调峰调频工况下理想方案选取原则上存在的问题，最终导致了选型结果的不准确。通过分析这 2 种储能的指标参数可知，锂电池相较于抽水蓄能在响应时间、转换效率、能量密度、功率密度等指标上具有较大优势，符合本文对电网调峰调频特性和需求分析。分析图 5 可知，锂电池相较于抽水蓄能参与电网调峰

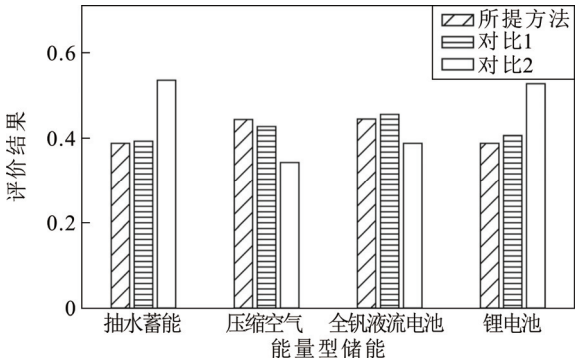


图 3 能量型储能评价结果

Fig.3 Evaluation results of energy storage

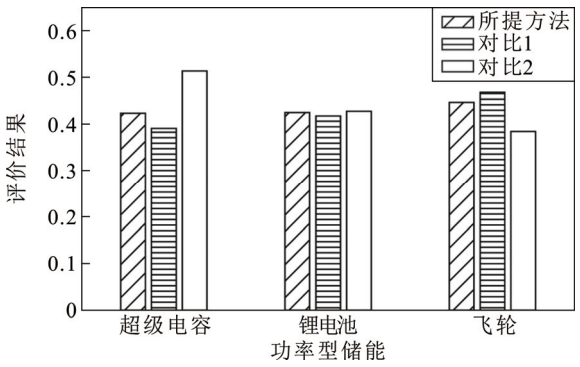


图 4 功率型储能评价结果

Fig.4 Evaluation results of power storage

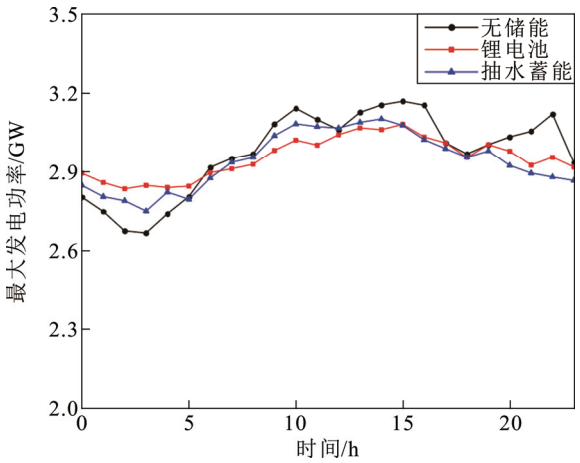


图 5 常规机组最大发电功率

Fig.5 Maximum generating power of conventional units

表 5 储能技术参数指标

Table 5 Energy storage technical parameters

指标	抽水蓄能	压缩空气	液流电池	锂电池	飞轮	超级电容
充放电效率	0.75	0.6	0.8	0.9	0.9	0.95
SOC 限值	0.15~0.85	0.2~0.8	0.2~0.8	0.1~0.9	0.08~0.92	0.1~0.95
功率成本系数/(元·KW^{-1})	2 000	1 800	2 300	2 450	8 400	1 860
容量成本系数/(元·KWh^{-1})	1 400	1 260	9 300	1 050	4 200	12 400
维护单价/(元·KWh^{-1})	0.02	0.03	0.02	0.02	0.04	0.01

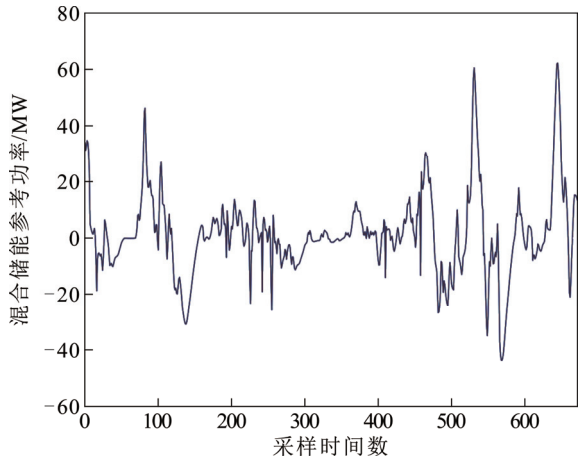


图 6 混合储能参考功率曲线图

Fig.6 Curve of hybrid energy storage reference power

的效果更好，进一步说明了所提方法的优势和有效性。通过对比 3 种方法，可以看出本文方法更适用于现有储能含有大量区间指标的现实情况。

基于该地区一周的混合储能参考功率以及配置所需的技术参数指标，得到的配置及成本计算结果如表 6 所示。分析表 6 可以看出，在满足电网调峰调频需求的前提下，锂电池和超级电容构成的混合储能组合方案配置后的总成本最低，为 1.12×10^8 元，配置结果为：锂电池额定功率为 32.1 MW，额定容量为 15.83 MWh，超级电容额定功率为 38.61 MW，额定容量为 4.17 MWh，这说明尽管锂电池和超级电容的初始投资建设成本较高，但锂电池投入运行后的成本较低，具有较高的效率、能量密度和较长的寿命，此外，超级电容的转换效率、放电深度和功率密度较其他功率型储能也有较大优势。综合考虑建设和运行 2 方面，锂电池和超级电容的混合储能方案可以在降低系统成本的同时达到较好的调峰调频效果。

表 6 12 种混合储能方案的配置结果及成本

Table 6 Configuration results and costs of 12 hybrid energy storage schemes

配置方案	E_n/MWh	E_g/MWh	P_n/MW	P_g/MW	总成本/元
抽蓄+锂电池	16.61	4.28	35.7	41.78	2.46×10^8
抽蓄+飞轮	16.61	4.34	35.7	40.56	2.56×10^8
抽蓄+超级电容	16.61	4.39	35.7	42.36	2.14×10^8
锂电池+锂电池	15.83	4.32	32.1	42.14	1.37×10^8
锂电池+飞轮	15.83	4.67	32.1	41.79	1.78×10^8
锂电池+超级电容	15.83	4.17	32.1	38.61	1.12×10^8
钒液流电池+锂电池	16.23	4.42	34.2	41.31	2.09×10^8
钒液流电池+飞轮	16.23	4.51	34.2	42.01	2.17×10^8
钒液流电池+超级电容	16.23	4.73	34.2	40.87	1.91×10^8
压缩空气+锂电池	16.46	4.35	33.7	41.65	1.99×10^8
压缩空气+飞轮	16.46	4.60	33.7	41.93	2.38×10^8
压缩空气+超级电容	16.46	4.54	33.7	41.20	1.85×10^8

注：E_n 和 E_g 分别为能量型和功率型储能额定容量；P_n 和 P_g 分别为能量型和功率型储能额定功率。

4 结论

1）本文在利用 IAHP 法求取主观权重时，通过指数标度提高了区间判断矩阵的一致性；求取客观权重时采用改进熵权法，有效解决传统熵权法在指标熵值趋近 1 时权重计算误差大的缺陷。同时，基于博弈论组合主客观权重，通过寻找纳什均衡点确保了权重分配的平衡性和合理性。

2）引入区间联系数理论到选型过程中，构建了基于集对分析的混合储能选型模型。评价过程中充分计及储能区间参数的不确定性影响，符合现有储能参数大多为区间数的实际情况，有效提高了选型结果的准确性。

3）算例结果表明，锂电池是最优的能量型储能，并且抽水蓄能与锂电池的差距很小，在功率等级需求较大的工况下可能将取代锂电池成为最优选择；超级电容是最优的功率型储能，并且其优势较锂电池和飞轮储能很明显，未来很长一段时间仍将作为最优功率型储能。

4）本文提出的混合储能选型方法，解决了现有单一储能选型不能满足实际需求的问题，并在算例中验证了所提方法的有效性。同时，提出的选型方法以储能参与调峰调频工况为例，但所提方法的应用范围不局限于该工况，其他不同工况需要考虑需求的差异性，为不同工况下的混合储能选型提供了新思路和通用方法。

附录见本刊网络版(http://hve.epri.sgcc.com.cn)。

参考文献 References

[1] 朱介北，罗贺予，俞露杰，等. 新型电力系统惯量-频率“云-网-端”感知与控制技术展望[J]. 高电压技术，2024，50(7)：3090-3104.
ZHU Jiebei, LUO Heyu, YU Lujie, et al. Modern power system inertia-frequency sensing and control technology outlook across “Cloud-Grid-Terminal”[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(7): 3090-3104.

[2] 宋 梦，林固静，蒙 璟，等. 共享储能关键技术与应用[J]. 上海交通大学学报，2024，58(5)：585-599.
SONG Meng, LIN Gujing, MENG Jing, et al. Key technologies and applications of shared energy storage[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2024, 58(5): 585-599.

[3] 陆秋瑜，胡骞文，杨银国，等. 共建共享模式下兼顾多场景需求的储能规划及成本分摊[J]. 高电压技术，2024，50(10)：4680-4690.
LU Qiuyu, HU Qianwen, YANG Yinguo, et al. Energy storage planning and cost allocation considering multi-scenario demands under co-construction and sharing business model[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(10): 4680-4690.

[4] 郭向伟，王 晨，钱 伟，等. 电池储能系统均衡方法研究综述[J]. 电工技术学报，2024，39(13)：4204-4225.
GUO Xiangwei, WANG Chen, QIAN Wei, et al. A review of equalization methods for battery energy storage system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(13): 4204-4225.

[5] ZHANG Z Y, DING T, MU C G, et al. Fully parallel algorithm for energy storage capacity planning under joint capacity and energy markets[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2024, 21(1): 257-268.

[6] 薛金花，叶季蕾，陶 琼，等. 电力储能技术的适用性评价模型与方法研究[J]. 高电压技术，2018，44(7)：2239-2246.
XUE Jinhua, YE Jilei, TAO Qiong, et al. Feasibility evaluation model and method of energy storage technologies in power system[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(7): 2239-2246.

[7] 李建林，马会萌，田春光，等. 基于区间层次分析法的电化学储能选型方案[J]. 高电压技术，2016，42(9)：2707-2714.
LI Jianlin, MA Huimeng, TIAN Chunguang, et al. Selection scheme of electrochemical energy storage based on interval analytic hierarchy process method[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(9): 2707-2714.

[8] 冯喜春，张松岩，朱天曈，等. 基于区间二型模糊多属性决策方法的大规模储能选型分析[J]. 高电压技术，2021，47(11)：4123-4133.
FENG Xichun, ZHANG Songyan, ZHU Tiantong, et al. Large-scale energy storage selection analysis based on interval type-2 fuzzy multiple attribute decision making method[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(11): 4123-4133.

[9] 齐彩娟，李牧远，吴奕辰，等. 基于最大评价差异的储能多场景区间模糊层次选型方法[J]. 电力系统保护与控制，2024，52(22)：104-115.
QI Caijuan, LI Muyuan, WU Yichen, et al. A fuzzy hierarchical selection method for an energy storage multi scenario interval based on maximum evaluation difference[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(22): 104-115.

[10] 司大军，姚一鸣，李玲芳，等. 面向可再生能源消纳的电网侧混合储能优化配置方法[J]. 电工电能新技术，2024，43(6)：90-100.
SI Dajun, YAO Yiming, LI Lingfang, et al. Optimal allocation method of grid-side hybrid energy storage for renewable energy consumption[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2024, 43(6): 90-100.

[11] 陆秋瑜，杨银国，陈俊生，等. 考虑选型的混合储能平抑海上风电波动的容量优化研究[J]. 武汉大学学报(工学版)，2024，57(6)：782-791.
LU Qiuyu, YANG Yinguo, CHEN Junsheng, et al. Research on capacity optimization of hybrid energy storage to stabilize offshore wind power fluctuation considering energy storage selection[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2024, 57(6): 782-791.

[12] 程筱鹏，程 静，王维庆，等. 风电场混合储能双级优化配置[J]. 电力电子技术，2023，57(4)：99-103，117.
CHENG Xiaopeng, CHENG Jing, WANG Weiqing, et al. Optimal configuration of dual stage wind farm[J]. Power Electronics, 2023, 57(4): 99-103, 117.

[13] LI H L, ZOU G B, ZHANG K K, et al. Selection of hybrid energy storage based on interval analytic hierarchy process[C]//2023 8th Asia Conference on Power and Electrical Engineering. Tianjin, China: IEEE, 2023: 754-758.

[14] WU Y N, ZHANG T, ZHONG K X, et al. Optimal planning of energy storage technologies considering thirteen demand scenarios from the perspective of electricity grid: a three-stage framework[J]. Energy Conversion and Management, 2021, 229: 113789.

[15] ZHANG Y X, ZHAO X Y, ZHAO Y, et al. Pre-selection scheme evaluation of hybrid energy storage for distribution network based on utility combination method[J]. Journal of Energy Storage, 2024, 88: 111497.

[16] 赵 娟，李秉晨，王 喆，等. 基于 BMW 和 TOPSIS 的新型储能场景适用性评价[J]. 储能科学与技术，2025，14(1)：443-455.
ZHAO Juan, LI Bingchen, WANG Zhe, et al. Evaluation of scenario applicability of new energy storage based on BMW and TOPSIS methods[J]. Energy Storage Science and Technology, 2025, 14(1): 443-455.

[17] 李军徽，潘雅慧，穆 钢，等. 高比例风电系统中储能集群辅助火电机组调峰分层优化控制策略[J]. 电工技术学报，2025，40(7)：2127-2145.
LI Junhui, PAN Yahui, MU Gang, et al. Hierarchical optimal control strategy for storage cluster-assisted thermal unit peaking in high-ratio wind power system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2025, 40(7): 2127-2145.

[18] ZUBIRIA A, MENÉNDEZ Á, GRANDE H J, et al. Multi-criteria decision-making problem for energy storage technology selection for different grid applications[J]. Energies, 2022, 15(20): 7612.

[19] 王佳旭，苗世洪，王廷涛，等. 考虑调峰-备用-爬坡-惯量多应用价值的大规模先进压缩空气储能多阶段优化规划[J]. 高电压技术，2025，51(3)：1339-1350.
WANG Jiaxu, MIAO Shihong, WANG Tingtao, et al. Multi-stage optimization planning of large-scale A-CAES with consideration of multi-application values including peak regulation, backup, ramping and inertia[J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(3): 1339-1350.

[20] 宁雪峰，张慧珍，许加柱. 基于改进 AHP-TOPSIS 的储能电站安全综合评估[J]. 太阳能学报，2024，45(5)：251-259.
NING Xuefeng, ZHANG Huizhen, XU Jiazhu. Comprehensive safety evaluation of energy storage power station based on improved AHP-TOPSIS[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2024, 45(5): 251-259.

[21] 黄大为，殷 航，曹旭东，等. 计及源-荷不确定性的屋顶集成光储系统容量配置[J]. 太阳能学报，2024，45(10)：363-372.
HUANG Dawei, YIN Hang, CAO Xudong, et al. Capacity configura-

tion of rooftop integrated photovoltaic-storage system considering source-load uncertainty[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2024, 45(10): 363-372.

[22] 周兰庭，郭　枫，王　浩. 土石坝运行安全评价的改进组合赋权-云模型[J]. 水利水电科技进展，2024，44(6)：86-92.
ZHOU Lanting, GUO Feng, WANG Hao. Improved combination weighting-cloud model for operation safety evaluation of earth-rockfill dams[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2024, 44(6): 86-92.

[23] 刘禹彤，赵　琳，王鑫太. 基于 SE-improved SGMD 的混合储能容量优化配置方法研究[J]. 高压电器，2024，60(10)：78-85，103.
LIU Yutong, ZHAO Lin, WANG Xintai. Research on optimal configuration method of hybrid energy storage capacity based on SE-improved SGMD[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(10): 78-85, 103.



王丽馨
1991—，女，博士，副教授，硕导
主要从事数据驱动的新能源电力系统稳定态势感知与控制、储能优化配置与运行方面的研究工作
E-mail: wanglxnedu@163.com

WANG Lixin
Ph.D.
Associate professor



魏明宇(通信作者)
2000—，男，硕士生
主要从事储能在新型电力系统中的应用规划方面的研究工作
E-mail: 18533175900@163.com

WEI Mingyu
Corresponding author

收稿日期　2025-01-20　修回日期　2025-05-06　　编辑　程子丰

附录 A

表 A1　各类储能系统的技术参数(一)

Table A1　Technical parameters of various energy storage systems(Ⅰ)

储能技术	投资建设成本/(元·kWh^{-1})	运行成本/(元·kWh^{-1})	功率等级/MW	转换效率/%	循环寿命/年	响应时间
抽水蓄能	1 000~1 600	0.1~0.3	100~2 000	75~80	50~60	s~min
压缩空气	400~1 000	0.1~0.25	10~350	60~70	20~30	s~min
全钒液流电池	1 500~3 000	0.2~0.4	0.003~10	65~85	5~10	20 ms~s
锂电池	800~2 000	0.1~0.3	0.001~10	88~92	5~15	20 ms~s
飞轮	2 500~4 000	0.3~0.6	0.005~5	85~95	15~30	1~20 ms
超级电容	2 000~5 000	0.3~0.8	0.001~1.5	95~98	8~20	1~20 ms

表 A2　各类储能系统的技术参数(二)

Table A2　Technical parameters of various energy storage systems(Ⅱ)

储能技术	充放电持续时间	放电深度	能量密度/(Wh·kg^{-1})	功率密度/(W·kg^{-1})	选址要求	运行安全
抽水蓄能	4~10 h	0.9~1	0.5~1.5	0.5~1.5	高	高
压缩空气	1~20 h	0.7~0.85	30~60	0.5~2	较高	较高
全钒液流电池	1.5~10 h	0.9~1	10~30	50~140	中	较高
锂电池	0.3~6 h	0.8~0.95	120~150	500~1 500	中	中
飞轮	15 s~15 min	0.8~0.9	10~30	400~1 500	低	较高
超级电容	1 s~30 min	1	2.5~15	500~5 000	中	中

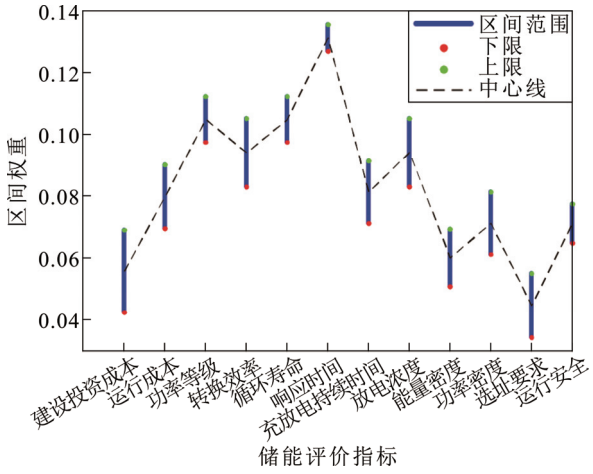


图 A1　储能指标区间权重

Fig.A1　Interval weight of energy storage indicator

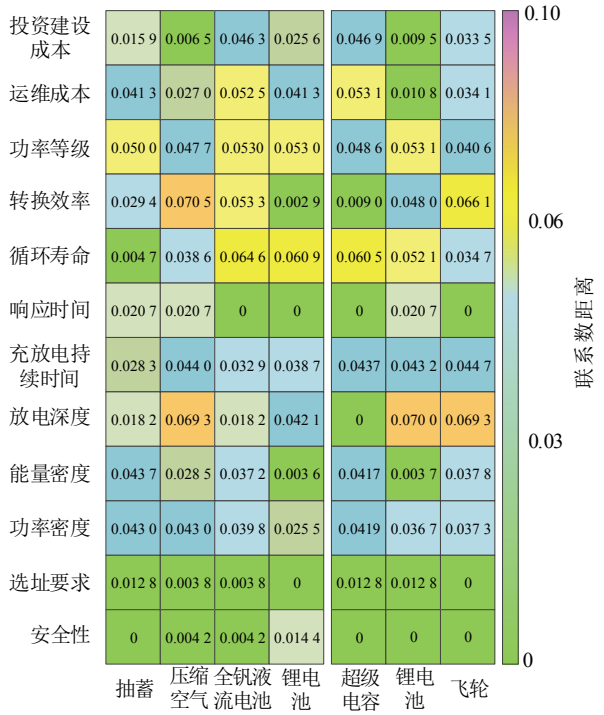


图 A2　储能指标距离热力图

Fig.A2　Energy storage index distance heat map

$$\boldsymbol{A}_1=\begin{bmatrix}[1,1] & \left[1.316^{-3},1.316^{-2}\right] & \left[1.316^{2},1.316^{3}\right]\\ \left[1.316^{2},1.316^{3}\right] & [1,1] & \left[1.316^{4},1.316^{6}\right]\\ \left[1.316^{-3},1.316^{-2}\right] & \left[1.316^{-6},1.316^{-4}\right] & [1,1]\end{bmatrix} \tag{A1}$$

$$\boldsymbol{A}_2=\begin{bmatrix}[1,1] & \left[1.316^{-3},1.316^{-2}\right]\\ \left[1.316^{2},1.316^{3}\right] & [1,1]\end{bmatrix} \tag{A2}$$

$$\boldsymbol{A}_3=\begin{bmatrix}
[1,1] & [1,1.316] & [1,1] & \left[1.316^{-1},1\right] & \left[1.316,1.316^{2}\right] & [1,1.316] & \left[1.316^{2},1.316^{3}\right] & \left[1.316,1.316^{2}\right]\\
\left[1.316^{-1},1\right] & [1,1] & \left[1.316^{-1},1\right] & \left[1.316^{-2},1.316^{-1}\right] & [1,1.316] & [1,1] & \left[1.316,1.316^{2}\right] & [1,1.316]\\
[1,1] & [1,1.316] & [1,1] & \left[1.316^{-1},1\right] & \left[1.316,1.316^{2}\right] & [1,1.316] & \left[1.316^{2},1.316^{3}\right] & \left[1.316,1.316^{2}\right]\\
[1,1.316] & \left[1.316,1.316^{2}\right] & [1,1.316] & [1,1] & \left[1.316^{2},1.316^{3}\right] & \left[1.316,1.316^{2}\right] & \left[1.316^{3},1.316^{4}\right] & \left[1.316^{2},1.316^{3}\right]\\
\left[1.316^{-2},1.316^{-1}\right] & \left[1.316^{-1},1\right] & \left[1.316^{-2},1.316^{-1}\right] & \left[1.316^{-3},1.316^{-2}\right] & [1,1] & \left[1.316^{-1},1\right] & [1,1.316] & [1,1]\\
\left[1.316^{-1},1\right] & [1,1] & \left[1.316^{-1},1\right] & \left[1.316^{-2},1.316^{-1}\right] & [1,1.316] & [1,1] & \left[1.316,1.316^{2}\right] & [1,1.316]\\
\left[1.316^{-3},1.316^{-2}\right] & \left[1.316^{-2},1.316^{-1}\right] & \left[1.316^{-3},1.316^{-2}\right] & \left[1.316^{-4},1.316^{-3}\right] & \left[1.316^{-1},1\right] & \left[1.316^{-2},1.316^{-1}\right] & [1,1] & \left[1.316^{-1},1\right]\\
\left[1.316^{-2},1.316^{-1}\right] & \left[1.316^{-1},1\right] & \left[1.316^{-2},1.316^{-1}\right] & \left[1.316^{-3},1.316^{-2}\right] & [1,1] & \left[1.316^{-1},1\right] & [1,1.316] & [1,1]
\end{bmatrix} \tag{A3}$$

$$\boldsymbol{A}_4=\begin{bmatrix}[1,1] & \left[1.316^{-4},1.316^{-2}\right]\\ \left[1.316^{2},1.316^{4}\right] & [1,1]\end{bmatrix} \tag{A4}$$

$$\boldsymbol{Q}_1=\begin{bmatrix}
[1000,1600] & [0.1,0.3] & [100,2000] & [75,80] & [50,60] & [2,2] & [4,10] & [0.9,1] & [0.5,1.5] & [0.5,1.5] & [4,4] & [4,4]\\
[400,1000] & [0.1,0.25] & [10,350] & [60,70] & [20,30] & [2,2] & [1,20] & [0.7,0.85] & [30,60] & [0.5,2] & [3,3] & [3,3]\\
[1500,3000] & [0.2,0.4] & [0.003,10] & [65,85] & [5,10] & [3,3] & [1.5,10] & [0.9,1] & [10,30] & [50,140] & [3,3] & [3,3]\\
[800,2000] & [0.1,0.3] & [0.001,10] & [88,92] & [8,12] & [3,3] & [0.3,6] & [0.8,0.95] & [120,150] & [500,1500] & [2,2] & [2,2]
\end{bmatrix} \tag{A5}$$

$$\boldsymbol{Q}_2=\begin{bmatrix}
[2000,5000] & [0.3,0.8] & [0.001,1.5] & [95,98] & [5,10] & [4,4] & [0.0003,0.5] & [1,1] & [2.5,15] & [500,5000] & [2,2] & [2,2]\\
[800,2000] & [0.1,0.3] & [0.001,10] & [88,92] & [8,12] & [3,3] & [0.3,6] & [0.8,0.95] & [120,150] & [500,1500] & [2,2] & [2,2]\\
[2500,4000] & [0.3,0.6] & [0.005,5] & [85,95] & [15,30] & [4,4] & [0.0042,0.25] & [0.8,0.9] & [10,30] & [400,1500] & [1,1] & [2,2]
\end{bmatrix} \tag{A6}$$

$$\boldsymbol{\beta}_1=\begin{bmatrix}
0.6303+0.1636v+0.2061w & 0.7939+0.2061v & 0.3679+0.2871v+0.3450w & 0.5404+0.3170v+0.1426w\\
0.5134+0.4866v & 0.6065+0.3935v & 0.3679+0.3487v+0.2835w & 0.5134+0.4866v\\
0.3867+0.6133v & 0.3697+0.0685v+0.5618w & 0.3679+0.0018v+0.6303w & 0.3679+0.0018v+0.6303w\\
0.5879+0.0994v+0.3127w & 0.3679+0.1350v+0.4972w & 0.4301+0.3734v+0.1965w & 0.8825+0.1175v\\
0.8338+0.1662v & 0.4832+0.0964v+0.4204w & 0.3679+0.035v+0.5971w & 0.3885+0.0293v+0.5822w\\
0.7165+0.2835w & 0.7165+0.2835w & 1 & 1\\
0.4439+0.1580v+0.3981w & 0.3812+0.6188v & 0.3910+0.2109v+0.3981w & 0.3679+0.1234v+0.5087w\\
0.7165+0.2835v & 0.3679+0.2387v+0.3935w & 0.7165+0.2835v & 0.5134+0.3331v+0.1535w\\
0.3679+0.0025v+0.6297w & 0.4481+0.0996v+0.4523w & 0.3920+0.0561v+0.5519w & 0.8182+0.1818v\\
0.3679+0.0002v+0.6319w & 0.3679+0.0004v+0.6318w & 0.3802+0.0235v+0.5963w & 0.5133+0.4867v\\
0.7165+0.2835w & 0.8465+0.1535w & 0.8465+0.1535w & 1\\
1 & 0.8465+0.1535w & 0.8465+0.1535w & 0.7165+0.2835w
\end{bmatrix} \tag{A7}$$

$$\boldsymbol{\beta}_2=\begin{bmatrix}
0.3679+0.3836v+0.2485w & 0.7515+0.2485v & 0.4668+0.2004v+0.3329w\\
0.3679+0.3836v+0.2485w & 0.7515+0.2485v & 0.4895+0.2619v+0.2485w\\
0.3679+0.0595v+0.5726w & 0.3679+0.6321v & 0.3680+0.2385v+0.3935w\\
0.7939+0.2061v & 0.4634+0.1669v+0.3697w & 0.3679+0.4260v+0.2061w\\
0.3679+0.0814v+0.5507w & 0.4148+0.0720v+0.5132w & 0.5488+0.4512v\\
1 & 0.7165+0.2835w & 1\\
0.3679+0.0320v+0.6002w & 0.3867+0.6133v & 0.3681+0.0154v+0.6165w\\
1 & 0.3679+0.4109v+0.2212w & 0.3679+0.2387v+0.3935w\\
0.3679+0.0325v+0.5996w & 0.8160+0.1840v & 0.3871+0.0562v+0.5567w\\
0.3760+0.6240v & 0.3760+0.0913v+0.5327w & 0.3679+0.0994v+0.5327w\\
0.7165+0.2835w & 0.7165+0.2835w & 1\\
1 & 1 & 1
\end{bmatrix} \tag{A8}$$

附录 B

储能指标信息熵值的详细求解过程如下：

（1）根据储能参数建立决策矩阵 $\boldsymbol{B}$。设有 m 个储能方案，n 个指标，则决策矩阵为：

$$\boldsymbol{B}=\begin{bmatrix}
\left[b_{11}^{\mathrm{L}},b_{11}^{\mathrm{U}}\right] & \left[b_{12}^{\mathrm{L}},b_{12}^{\mathrm{U}}\right] & \cdots & \left[b_{1n}^{\mathrm{L}},b_{1n}^{\mathrm{U}}\right]\\
\left[b_{21}^{\mathrm{L}},b_{21}^{\mathrm{U}}\right] & \left[b_{22}^{\mathrm{L}},b_{22}^{\mathrm{U}}\right] & \cdots & \left[b_{2n}^{\mathrm{L}},b_{2n}^{\mathrm{U}}\right]\\
\vdots & \vdots & & \vdots\\
\left[b_{m1}^{\mathrm{L}},b_{m1}^{\mathrm{U}}\right] & \left[b_{m2}^{\mathrm{L}},b_{m2}^{\mathrm{U}}\right] & \cdots & \left[b_{mn}^{\mathrm{L}},b_{mn}^{\mathrm{U}}\right]
\end{bmatrix} \tag{B1}$$

式中：b_{ij}^{L} 和 b_{ij}^{U} 分别为第 i 个储能方案的第 j 个指标的区间参数下限和上限。

（2）由于区间数无法直接利用熵权法，因此将决策矩阵 $\boldsymbol{B}$ 转化为相离度矩阵 $\boldsymbol{C}$，即：

$$\boldsymbol{C}=\begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & \cdots & c_{1n} \\ c_{21} & c_{22} & \cdots & c_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ c_{m1} & c_{m2} & \cdots & c_{mn} \end{bmatrix} \tag{B2}$$

式中：$c_{ij}=|b_{ij}^{\mathrm{L}}-b_j|+|b_{ij}^{\mathrm{U}}-b_j|$，$b_j$ 为第 j 个指标的理想值。

（3）将相离度矩阵规范化为 $\boldsymbol{D}$，矩阵 $\boldsymbol{D}$ 中的元素计算式为：

$$d_{ij}=\frac{c_{ij}}{\sum_{i=1}^{m}c_{ij}} \tag{B3}$$

（4）于是，求得各指标信息熵 e_i 的计算式为：

$$e_i=-\frac{1}{\ln m}\sum_{i=1}^{m}d_{ij}\ln d_{ij} \tag{B4}$$