

引用格式: 张帆, 欧阳章智, 牟征辉, 等. 基于模糊层次分析法的斜坡式重力储能系统选址策略[J]. 南方能源建设, 2025, 12(5): 26-36. ZHANG Fan, OUYANG Zhangzhi, MOU Zhenghui, et al. Site selection of slope-based gravity energy storage systems using fuzzy analytic hierarchy process [J]. Southern energy construction, 2025, 12(5): 26-36. DOI: 10.16516/j.ceec.2025-137.

基于模糊层次分析法的斜坡式重力储能系统 选址策略

张帆^{1,2}, 欧阳章智¹, 牟征辉¹, 贾文林^{2,✉}

(1. 中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广东 广州 510663;

2. 武汉理工大学 航海与能源动力工程学院, 湖北 武汉 430063)

摘要: [目的]斜坡式重力储能作为一种新兴机械储能技术, 能够有效提升可再生能源的就地消纳水平, 缓解风光发电的间歇性与波动性问题。项目的长期运行效益高度依赖于科学选址, 然而当前该领域尚缺乏系统的选址方法与实践。[方法]针对斜坡式重力储能系统的技术特点与适用场景, 提出了一种基于地理适应性分析与三角模糊层次分析法相结合的两阶段选址决策框架。第一阶段, 通过地理适应性分析, 建立涵盖地形高差、斜坡角度、土地利用与基础设施条件等关键因素的约束指标体系, 筛选出满足建设要求的候选场址; 第二阶段, 构建包含电力、经济和社会三大维度共计9个评价指标的多准则决策体系, 运用三角模糊层次分析法确定各项指标的权重, 并结合专家评分进行综合优劣排序。为了验证所提方法的适用性, 以贵州省贵阳市为案例区域开展实证研究。[结果]权重结果分析表明, 电力类指标尤其是电网稳定性在选址决策中占据主导地位, 而社会类指标权重最低。此外文章选定的最优场址上已建成10 kW的斜坡式重力储能样机系统, 进一步验证了决策框架的科学性与工程实用性。[结论]研究为斜坡式重力储能系统的科学选址提供了理论支持, 拓展了三角模糊层次分析法在重力储能系统选址领域的应用。

关键词: 斜坡式重力储能; 机械储能; 选址; 三角模糊层次分析法; 主客观评价

DOI: 10.16516/j.ceec.2025-137

文章编号: 2095-8676(2025)05-0026-11

CSTR: 32391.14.j.ceec.2025-137

中图分类号: TK02; TM91



论文二维码

Site Selection of Slope-Based Gravity Energy Storage Systems Using Fuzzy Analytic Hierarchy Process

ZHANG Fan^{1,2}, OUYANG Zhangzhi¹, MOU Zhenghui¹, JIA Wenlin^{2,✉}

(1. China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, Guangdong, China;

2. School of Naval Architecture, Ocean and Energy Power Engineering, Wuhan University of Technology,

Wuhan 430063, Hubei, China)

Abstract: [Objective] Slope-based gravity energy storage (SGES), an emerging mechanical energy storage technology, can effectively enhance the local consumption of renewable energy, mitigate the intermittency and volatility of wind and solar power. The long-term operational effectiveness of an SGES project is highly dependent on scientific site selection; however, there is currently a lack of systematic methodologies and practical experience in this area. [Method] Considering the technical characteristics and application scenarios of SGES, this study proposed a two-stage decision-making framework for site selection, combining geographic suitability analysis with the triangular fuzzy analytic hierarchy process (FAHP). In the first stage, geographic suitability analysis was conducted using an established constraint index system covering critical factors such as elevation difference, slope angle, land use, and infrastructure

收稿日期: 2025-05-09 修回日期: 2025-06-04 网络首发日期: 2025-08-18

基金项目: 南方电网有限责任公司重点科技项目“斜坡式重力储能关键技术研究及工程全景方案设计”(GZKJXM20220033)

conditions, thereby identifying candidate sites meeting construction requirements. In the second stage, a multi-criteria decision-making (MCDM) framework comprising nine evaluation criteria across electrical, economic, and social dimensions was developed. The triangular FAHP was employed to determine the criteria weights, and expert evaluations were integrated to comprehensively rank candidate sites. An empirical study was conducted in Guiyang, Guizhou Province, to validate the applicability of the proposed method. [Result] The weighting results indicated that electrical criteria, particularly grid reliability, dominate the site-selection decision, whereas social criteria have the lowest weights. Additionally, a 10 kW prototype of the slope-based gravity energy storage system has been successfully constructed at the selected optimal site, further demonstrating the scientific validity and practical utility of the proposed decision-making framework. [Conclusion] This research provides theoretical support for the scientific site selection of slope-based gravity energy storage systems and broadens the application of the triangular FAHP in the field of gravity energy storage site selection.

Key words: slope-based gravity energy storage; mechanical energy storage; site selection; FAHP; subjective and objective evaluation

2095-8676 © 2025 Energy China GEDI. Publishing services by Energy Observer Magazine Co., Ltd. on behalf of Energy China GEDI. This is an open access article under the CC BY-NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

0 引言

在全球能源危机与气候变化的背景下, 各国加快推进能源结构转型。作为全球最大的能源消费与碳排放国家, 中国明确提出“碳达峰”和“碳中和”目标, 加速了可再生能源发展并限制传统化石能源使用。政策推动下, 中国风电与光伏发电发展迅速。截至 2024 年底, 中国风电和光伏装机规模已达 1.35 TW, 占比首次超越火电装机规模。然而, 新能源的规模化发展给电力系统稳定性带来了挑战, 储能技术成为保障电网稳定运行的关键手段^[1]。

储能技术通过调节电力供需波动, 实现新能源的高效利用。按储能介质与形式, 储能技术分为机械储能^[2]、电化学储能^[3-4]、化学储能^[5-6]、电能储能^[7]和热能储能^[8-9]等类型。其中, 机械储能技术以其寿命长、环境友好等特点受到广泛关注, 具体可细分为飞轮储能^[10-11]、压缩气体储能^[12-14]和重力储能^[15]。重力储能利用介质的重力位移实现能量存储, 包括抽水蓄能^[16-17]、固体重力储能和活塞式重力储能^[18-19]等技术路径。相较于抽水蓄能对水资源与地形条件的严格限制以及活塞式重力储能的活塞结构固有的高摩擦损耗, 固体重力储能因使用固体重物(如固废材料)作为储能介质, 具有较强的地理适应性、环境效益与成本优势。

进一步地, 固体重力储能可细分为垂直式重力储能^[20-21]与斜坡式重力储能^[22-23](如图 1 所示)。前者依赖人工塔式结构或矿井建设, 成本较高; 后者则利用自然山体斜坡搭建轨道或缆车系统, 在建设成本、安全性与扩展性方面均具优势, 已逐步受

到学术界关注。但目前学界尚缺乏针对斜坡式重力储能的系统选址研究, 制约了其进一步推广应用。

本研究提出了一套针对斜坡式重力储能系统的两阶段选址决策框架: 首先, 利用人工选址方法, 通过地理适应性分析筛选备选场址; 其次, 采用模糊层次分析法(Fuzzy Analytic Hierarchy Process, FAHP)对选定场址进行综合评估和排序^[24], 形成科学决策依据, 并以贵州省贵阳市为实例区域, 验证了所提出方法的有效性。

1 斜坡式重力储能系统选址方法

1.1 基于地理适应性的备选地点选取

地理适应性分析旨在通过对目标区域的地理特征进行详细分析, 筛选出符合建设要求的备选场址。首先, 针对斜坡式重力储能系统的特点, 构建了相应的选址拓扑结构: 利用具有一定高度差的斜坡山体来建设系统的传动系统, 并在斜坡上下设立较为平坦的区域用于重物块的堆栈场。基于这一拓扑结构, 选定了斜坡高差、斜坡角度和上下堆栈场 3 个关键的地形适应性指标。除了地形适应性指标外, 基础设施的地理适应性指标同样至关重要。为确保系统建设的可行性与便利性, 选择了土地利用类型、与公路/铁路的距离、与灾害风险区域的距离及与风能/光伏电站的距离 4 项指标。通过综合评估这些因素, 初步筛选出符合条件的适宜选址点, 具体指标如表 1 所示。

本文中, 依据预设的选址指标与判定标准, 采用查阅地形图、工程地质资料和区域规划信息的方式, 对特定区域进行逐项判读与筛选。通过建立规

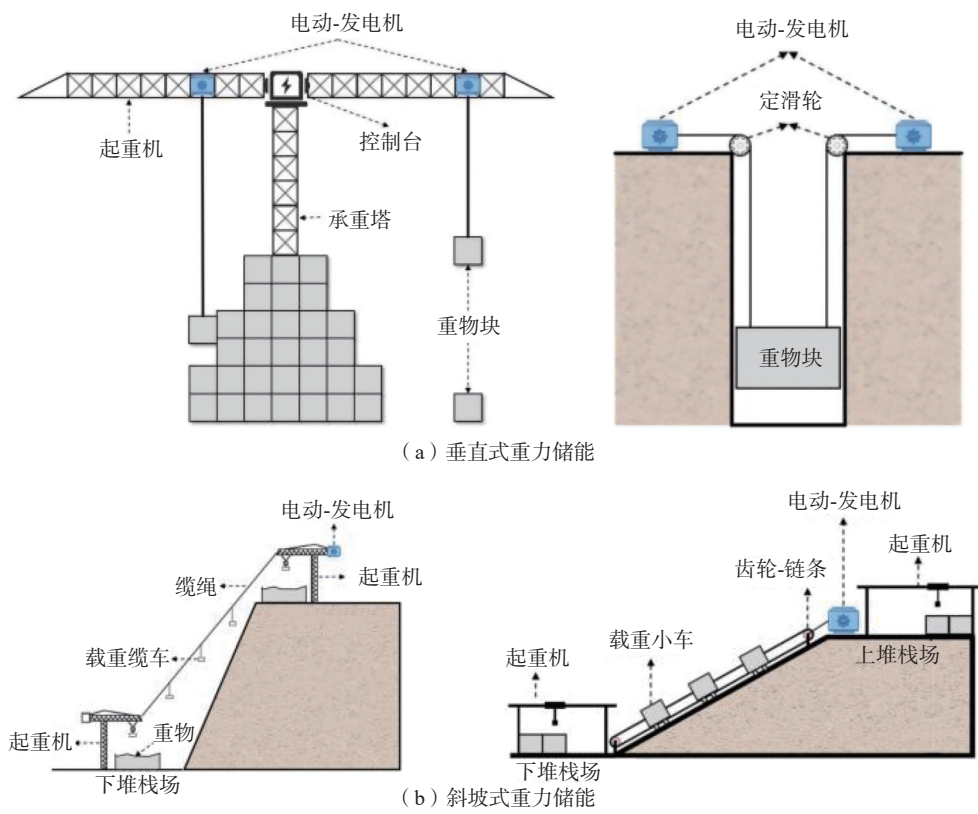


图 1 重力储能技术分类

Fig. 1 Classification of gravity energy storage technologies

表 1 地理适应性指标

Tab. 1 Geographical suitability indicators

类型	指标	适应性范围与描述
地形适应	斜坡高差	>100 m; 决定系统的最大储能容量和能量转化效率
	斜坡角度	15°~45°; 适中的角度有助于实现高效的传动, 同时降低施工难度和运行风险
	存在上下堆栈场	存在坡度小于3°且有一定面积的地势; 重物块的存放和调度, 减少土方工程和对自然地形的破坏
基础设施	土地利用	开发程度越低越适宜; 减少对环境和农业用地的影响
	距公路/铁路的距离	≤2 km; 有利于运输设备和材料, 降低建设成本并提高施工效率
	距灾害点的距离	>1 km; 保障系统的安全性和长期运行稳定性
	距离风/光发电站距离	<5 km; 优化能源的存储与调配, 提高储能系统的利用效率和资源整合度

则筛选表格, 识别出同时满足斜坡高差、地形平坦性、基础设施接近性等多项条件的场址, 作为后续优劣排序的备选场址。

1.2 基于 FAHP 的优劣排序

对基于 1.1 节挑选出来的备选场址, 采用三角模糊层次分析法进行优劣排序, 在多个备选场址中, 综合考虑各项评价指标在不确定性条件下的相对重要性与各场址的表现差异, 建立排序依据, 从而确定最优场址。

FAHP 是荷兰学者 Van Loargoven 在传统层次

分析法 (AHP) 的基础上提出的一种模糊扩展方法, 其核心思想是利用三角模糊数取代传统 AHP 的 1—9 标度, 构建模糊判断矩阵, 以解决指标重要性判断过程中的模糊性与不确定性^[25]。模糊判断矩阵与普通判断矩阵的根本区别在于, 前者对于每个指标都有一个模糊评判区间 $[u, l]$ 。该区间反映了专家评判结果的自信度, 从某种意义上也可理解成为数理统计中的“置信区间”。 (u, l) 越大, 自信度越小; 反之, (u, l) 越小自信度越大。FAHP 方法将自信度的概念引入到层次分析法中, 这样既可以定量地评

价选址点的综合情况,又可以反映信息的模糊性对评判结果的影响。

三角模糊数 $\tilde{M}$ 可以用三元组 (l, m, u) 表示,其隶属函数 $\mu_{\tilde{M}}(x)$ 可以表示为:

$$\mu_{\tilde{M}}(x) = \begin{cases} \frac{x-l}{m-l}, & x \in [l, m] \\ \frac{x-u}{m-u}, & x \in [m, u] \\ 0, & x \in (-\infty, l) \cup (u, +\infty) \end{cases} \quad (1)$$

式中, $l \leq m \leq u, x \in R, \mu_{\tilde{M}}(x): x \rightarrow [0, 1]$, l 和 u 分别表示 $\tilde{M}$ 的上界和下界, m 为 $\tilde{M}$ 的中值。一般地,三角模糊数 $\tilde{M}$ 可以记为 (l, m, u) 。

基于三角模糊数的模糊层次分析法大致分为以下步骤^[26],具体如下:

1) 建立选址评价指标体系

层次分析的结构模型通常由3层关系组成。最顶层(又称目标层),该层次只包括1个元素,一般是分析对象的预定;中间层(又称准则层),包括实现目标或理想所涉及的中间环节,如需要考虑的准则和子准则等,可以由若干个层次组成;最底层(又称措施层或方案层),包括为实现目标或理想可供选择的各种指标或方案等。结构模型中自上而下的支配关系所形成的层次结构,称为“递阶层次结构”。

2) 计算指标权重

(1) 构建三角模糊判断矩阵

邀请若干领域专家根据既定层次结构,对准层及方案层的各项因素进行两两比较评判。专家在评判过程中不仅要判断某一因素相对于另一因素的重要性,还需考虑判断的模糊性与不确定性。为此,采用三角模糊数 (l, m, u) 定量表示专家比较判断时两指标重要性的结果,其中 l 和 u 表示判断的模糊程度。指标 j 与指标 i 的重要性相比,用三角模糊数 a_{ij}^{-1} 表示。当给出 $[n(n-1)/2]$ 个模糊判断后,可得到由三角模糊数组成的模糊判断矩阵 $A = (a_{ij})_{n \times n}$,其中, $a_{ij} = (l_{ij}, m_{ij}, u_{ij})$, a_{ij} 是一个以 m_{ij} 作为中值的闭区间。

(2) 对均值矩阵 M 进行一致性检验

由于专家在两两比较各因素的重要性时可能存在逻辑不一致的情况,需对判断矩阵的逻辑一致性进行检验。在模糊AHP中,通常将模糊判断矩阵的中值部分近似处理为传统AHP的标准判断矩阵

阵,并通过计算其最大特征根 $\lambda_{\max}$ 来求解一致性指标(Consistency Index, CI),随后,将CI与对应阶数的平均随机一致性指标(Random Index, RI)进行比值运算,得到一致性比率CR,即 $CR=CI/RI$ 。当 $CR < 0.10$ 时,可认为判断矩阵的一致性是可以接受的,说明专家判断在整体上具有较好的逻辑连贯性;若超出该阈值,则需重新审视专家评分并调整判断内容,以提升模型可靠性。

中值 m 的取值依据AHP的1-9标度法确定(表2),三角模糊数的下界 l 和上界 u 可根据模糊程度加以确定, $(u-l)$ 越大,表示判断越模糊; $(u-l)$ 越小,表示判断越清楚;当 $u-l=0$ 时,判断是非模糊的,此时 $l=m=u$,与一般意义下的判断标度值相同。三角模糊数上下界的取值依据如表3所示。

表2 三角模糊数中值1-9的含义
Tab. 2 The meanings of the median values (1-9) for triangular fuzzy numbers

三角模糊数中值	含义
1	表示两指标相比同样重要
3	表示两指标相比,前者比后者稍微重要
5	表示两指标相比,前者比后者明显重要
7	表示两指标相比,前者比后者强烈重要
9	表示两指标相比,前者比后者极端重要
2, 4, 6, 8	表示上述相邻判断的中间值

表3 三角模糊数上下界取值依据
Tab. 3 Basis for determining the upper and lower bounds of triangular fuzzy numbers

分值自信度	$u-l$ 取值	数字特征	分值含义
高	1	$[\max(m-1/2, 1), m, \min(m+1/2, 9)]$	专家打分不模糊
低	2	$[\max(m-1, 1), m, \min(m+1, 9)]$	专家打分较模糊
一般	3	$[\max(m-3/2, 1), m, \min(m+3/2, 9)]$	专家打分很模糊

在得到模糊判断矩阵的中值矩阵(即为 M)后,通过式(2)计算CI值:

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (2)$$

式中:

$\lambda_{\max}$ ——中值矩阵 M 的最大特征根。

查对应阶次的RI表(表4),得到RI值:

表 4 不同指标数对应 RI 值
Tab. 4 RI values for different indicator numbers

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RI	0	0	0.52	0.9	1.12	1.26	1.36	1.41	1.46	1.49

然后计算 $CR=CI/RI$ ，如果 $CR<0.1$ ，则一致性检验通过。

(3) 构造模糊评判因子矩阵 E

$$E = (e_{ij})_{n \times n} = \begin{bmatrix} 1 & 1 - \frac{u_{12} - l_{12}}{2m_{12}} & \cdots & 1 - \frac{u_{1n} - l_{1n}}{2m_{1n}} \\ 1 - \frac{u_{21} - l_{21}}{2m_{21}} & 1 & \cdots & 1 - \frac{u_{2n} - l_{2n}}{2m_{2n}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 - \frac{u_{n1} - l_{n1}}{2m_{n1}} & 1 - \frac{u_{n2} - l_{n2}}{2m_{n2}} & \cdots & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中：

$e_{ij} = \frac{u_{ij} - l_{ij}}{2m_{ij}}$ ——标准离差率，代表专家评判结果的模糊程度。 e_{ij} 越大，评价的模糊度越大，可信度越低； e_{ij} 越小，评价的模糊度越小，可信度越高。

(4) 计算调整判断矩阵 Q

$$Q = M \times E = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & \cdots & m_{1n} \\ m_{21} & m_{22} & \cdots & m_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ m_{n1} & m_{n2} & \cdots & m_{nn} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & 1 - \frac{u_{12} - l_{12}}{2m_{12}} & \cdots & 1 - \frac{u_{1n} - l_{1n}}{2m_{1n}} \\ 1 - \frac{u_{21} - l_{21}}{2m_{21}} & 1 & \cdots & 1 - \frac{u_{2n} - l_{2n}}{2m_{2n}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 - \frac{u_{n1} - l_{n1}}{2m_{n1}} & 1 - \frac{u_{n2} - l_{n2}}{2m_{n2}} & \cdots & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

(5) 调整判断矩阵 Q 按列转换为对角线为 1 的判断矩阵 Q'

(6) 用方根法计算各项指标的权重

计算模糊判断矩阵 A 每行所有元素的 n 次方根：

$$\bar{\omega}_i = \left(\prod_{j=1}^n a_{ij} \right)^{\frac{1}{n}}, i = 1, 2, \cdots, n \quad (5)$$

式中：

$\bar{\omega}_i$ ——模糊判断矩阵 A 第 i 行所有元素的 n 次方根。

对 $\bar{\omega}_i$ 进行归一化处理：

$$\omega_i = \frac{\bar{\omega}_i}{\sum_{i=1}^n \bar{\omega}_i}, i = 1, 2, \cdots, n \quad (6)$$

式中：

ω_i ——第 i 个指标的权重值。

最终权重：

$$W = [\omega_1, \omega_2, \cdots, \omega_n] \quad (7)$$

(7) 计算各层次各指标权重

进行各层级指标的权重计算与排序分析。该步骤包括 2 个阶段：首先对每一判断矩阵进行层次单排序，计算出同一层次内各元素相对于上一层次元素的局部权重值；然后按照层次结构自上而下地传导权重，进行层次总排序，最终得到最底层各备选方案相对于目标层的综合权重。

3) 实例研究

计算得到最底层各备选方案相对于目标层的综合权重后，邀请专家根据各指标的实际情况进行评分，评分采用 10 分制。最终的排序是通过将各指标的权重与专家评分的乘积相加得出，从而综合考虑各因素的相对重要性和实际表现，以得到最优的备选方案。

2 斜坡式重力储能系统选址研究

2.1 选址评价指标体系

构建层次结构即斜坡式重力储能系统选址指标体系是进行选址评价的基础。为确保选址指标体系具备科学性、代表性与适用性，本文采用专家咨询法进行指标筛选与优化。

首先，基于国内外研究成果与相关标准，初步构建评价指标原始框架；随后邀请电力、经济和社会等相关领域的专家组成专家组，对储能系统建设及运行过程中的关键影响因素进行了深入分析并开展多轮咨询。专家需对每项指标的重要性与适用性进行判断，并可提出增补建议及定义说明。课题组对第一轮意见进行统计分析与归纳调整，形成专家意见汇总表与修订后的指标体系，并用于第二轮咨询反馈。通过反复迭代与意见融合，最终达成专家共识，构建出适用于斜坡式重力储能系统选址评估的多准则决策指标体系，如图 2 所示。体系涵盖电力、经济与社会 3 个维度共 9 个评价指标：

(1) 电力维度,包括当地负荷波动、可再生能源消纳率和电网稳定性;(2) 经济维度,包括单位储能成本、单位储能收益和投资回收期;(3) 社会维度,包括政策支持、提供就业和公众支持。

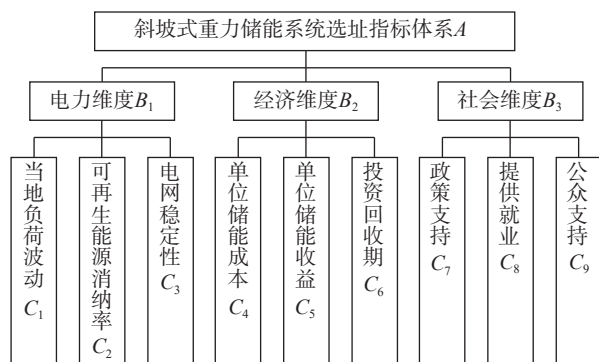


图2 斜坡式重力储能系统选址指标体系

Fig. 2 Index system for site selection of slope gravity energy storage system

2.2 指标权重

向专家组成员发放“斜坡式重力储能系统选址指标体系及权重计算”指标两两比较的问卷,在操作时,要求各专家内部进行充分讨论,意见一致之后形成一份专家群体打分表。通过有效专家群体问卷中专家群填写的信息用三角模糊数 (l, m, u) 构造模糊判断矩阵,建立各层次各个专家群的模糊判断矩阵。基于1.2节介绍的方法,计算各指标权重。

1) 一级指标权重计算

(1) 建立模糊判断矩阵

根据问卷中专家群填写的数据建立一级指标模糊矩阵,如表5所示。

表5 一级指标对于总目标的模糊判断矩阵

Tab. 5 Fuzzy pairwise comparison matrix for the first-level indicators with respect to the overall goal

	B_1	B_2	B_3
B_1	(1.00, 1.00, 1.00)	(1.00, 2.00, 3.00)	(1.50, 2.00, 2.50)
B_2	(0.33, 0.50, 1.00)	(1.00, 1.00, 1.00)	(1.00, 2.00, 3.00)
B_3	(0.40, 0.50, 0.67)	(0.33, 0.50, 1.00)	(1.00, 1.00, 1.00)

(2) 中值矩阵 M 一致性检验

根据表5得出中值矩阵,并对此矩阵进行一致性检验,如表6所示。

(3) 计算模糊评判因子矩阵 E

表6 中值矩阵一致性检验表

Tab. 6 Consistency check for the median matrix

	B_1	B_2	B_3	一致性检验
B_1	1.00	2.00	2.00	$\lambda_{\max}=3.0536$
B_2	0.50	1.00	2.00	CI=0.0268
B_3	0.50	0.50	1.00	RI=0.5200

注: $CR=0.0516<0.1$, 一致性检验通过。

根据公式(3)计算模糊判断因子矩阵 E :

$$E = \begin{bmatrix} 1.000 & 0.500 & 0.750 \\ 0.333 & 1.000 & 0.500 \\ 0.733 & 0.333 & 1.000 \end{bmatrix} \quad (8)$$

(4) 计算调整判断矩阵 Q

根据公式(4)计算调整判断矩阵 Q :

$$Q = \begin{bmatrix} 3.132 & 3.166 & 3.750 \\ 2.299 & 1.916 & 2.875 \\ 1.400 & 1.083 & 1.625 \end{bmatrix} \quad (9)$$

(5) 将矩阵 Q 对角线归一化后得到 Q'

$$Q' = \begin{bmatrix} 1.000 & 1.652 & 2.308 \\ 0.734 & 1.000 & 1.769 \\ 0.447 & 0.565 & 1.000 \end{bmatrix} \quad (10)$$

(6) 用方根法计算各项指标权重得到一级指标对于总目标的权重,如表7所示。

表7 一级指标 B_1-B_3 对于总目标 A 的权重

Tab. 7 Weights of the first-level indicators (B_1-B_3) with respect to the overall goal (A)

W_{B_1}	W_{B_2}	W_{B_3}
0.476	0.332	0.192

2) 二级指标权重计算

先计算二级指标对一级指标的权重,再通过对应一级指标的权重与二级指标的权重进行相乘计算得到二级指标对总目标的权重。由于二级指标相对于一级指标的三角模糊判断矩阵的构造原理和一级指标相对于总目标的三角模糊判断矩阵的构造原理以及权重计算方法完全相同,限于篇幅,此处省略部分计算过程,给出三角模糊判断矩阵及最终计算结果,如表8—表10所示,其中相对权重即为二级指标对于一级指标的权重计算结果,其中总权重即为二级指标对总目标 A 的权重计算结果,指标体系权重计算结果统计如表11所示。

2.3 实例研究

结合第一章提出的斜坡式重力储能系统选址评价方法和第二章计算得到的指标权重,对贵州省贵

表 8 C_1-C_3 对 B_1 的模糊判断矩阵及权重计算结果
Tab. 8 Fuzzy pairwise comparison matrix and resulting weights for C_1-C_3 with respect to B_1

	C_1	C_2	C_3
C_1	(1.00, 1.00, 1.00)	(0.33, 0.50, 1.00)	(0.14, 0.17, 0.20)
C_2	(1.00, 2.00, 3.00)	(1.00, 1.00, 1.00)	(0.25, 0.33, 0.50)
C_3	(5.00, 6.00, 7.00)	(2.00, 3.00, 4.00)	(1.00, 1.00, 1.00)
相对权重/%	11.10	22.20	66.70
总权重/%	5.28	10.57	31.75

注: $\lambda_{\max}=3.000\ 3$, $CI=0.000\ 2$, $RI=0.520\ 0$, $CR=0.000\ 3<0.1$, 一致性检验通过。

表 9 C_4-C_6 对 B_2 的模糊判断矩阵及权重计算结果
Tab. 9 Fuzzy pairwise comparison matrix and resulting weights for C_4-C_6 with respect to B_2

	C_4	C_5	C_6
C_4	(1.00, 1.00, 1.00)	(0.33, 0.50, 1.00)	(0.14, 0.17, 0.20)
C_5	(1.00, 2.00, 3.00)	(1.00, 1.00, 1.00)	(0.25, 0.33, 0.50)
C_6	(5.00, 6.00, 7.00)	(2.00, 3.00, 4.00)	(1.00, 1.00, 1.00)
相对权重/%	11.10	22.20	66.70
总权重/%	3.69	7.37	22.14

注: $\lambda_{\max}=3.000\ 3$, $CI=0.000\ 2$, $RI=0.520\ 0$, $CR=0.000\ 3<0.1$, 一致性检验通过。

表 10 C_7-C_9 对 B_3 的模糊判断矩阵及权重计算结果
Tab. 10 Fuzzy pairwise comparison matrix and resulting weights for C_7-C_9 with respect to B_3

	C_7	C_8	C_9
C_7	(1.00, 1.00, 1.00)	(5.00, 6.00, 7.00)	(1.00, 2.00, 3.00)
C_8	(0.14, 0.17, 0.20)	(1.00, 1.00, 1.00)	(0.33, 0.50, 1.00)
C_9	(0.33, 0.50, 1.00)	(1.00, 2.00, 3.00)	(1.00, 1.00, 1.00)
相对权重/%	63.50	11.70	24.80
总权重/%	12.19	2.25	4.76

注: $\lambda_{\max}=3.018\ 9$, $CI=0.009\ 4$, $RI=0.520\ 0$, $CR=0.018\ 2<0.1$, 一致性检验通过。

阳市进行了斜坡式重力储能系统选址评价分析。

根据第 1.1 节所述的地理适应性分析方法, 基于上述指标, 本文通过规划资料查阅和工程地质资料核实, 在贵阳市范围内初步筛选出 8 个候选场址(记为 D_1-D_8)。随后, 依据“是否满足所有硬性指标”的原则, 采用筛选表对 8 个场址进行初步判断, 如表 12 所示。

从筛选表可见, 最终符合全部筛选标准的场址有 3 个, 即 D_2 、 D_3 、 D_5 , 分别编号为 P_1 、 P_2 、 P_3 ,

表 11 权重计算结果
Tab. 11 Weight calculation result

一级指标	权重/%	二级指标	权重/%
电力因素 B_1	47.60	当地负荷波动 C_1	5.28
		可再生能源消纳率 C_2	10.57
		电网稳定性 C_3	31.75
经济因素 B_2	33.20	单位储能成本 C_4	3.69
		单位储能收益 C_5	7.37
		投资回收期 C_6	22.14
社会因素 B_3	19.20	政策支持 C_7	12.19
		提供就业 C_8	2.25
		公众支持 C_9	4.76

表 12 备选场址筛选与地理适应性判读表
Tab. 12 Candidate site screening and geographic suitability assessment

编号	高差/ m	坡度/ (°)	上下 堆栈	距道路/ km	土地 类型	距灾 害区/km	距风光 资源/km
D_1	85	12	无	1	林地	1	2
D_2	200	27	有	2	未利用	1.5	5
D_3	170	30	有	1.5	未利用	5	1
D_4	150	15	无	0.7	林地	2	10
D_5	110	21	有	1	工业预留	3	3
D_6	120	22	有	3	未利用	1	4
D_7	150	19	无	2	农业用地	3	1
D_8	50	38	有	0.5	生态保护	0.5	2

进入下一步的专家打分与 FAHP 权重加权综合评价阶段。

随后, 围绕已建立的选址评价指标体系中的电力、经济和社会 3 大类指标, 对各候选场址进行了现场调研与资料查阅, 邀请专家组依据各项评价指标对 3 处备选场址进行评分, 结合三角模糊层次分析法计算出各个因素对整体的权重, 计算 3 个备选场址的综合得分, 结果如表 13 所示。可以发现, 排序结果为 $P_2>P_3>P_1$, 因此在 3 个备选站点中, P_2 得分最高, 综合适宜性最优, 被确定为本研究所推荐的最优建设选址。图 3 为 P_2 场地的地形与储能系统布置三维效果图。

3 分析与讨论

3.1 权重结果分析

如图 4 所示, 从专家组得出的指标权重结果可知, 选址标准中电力类指标最重要, 其次是经济类和社会类指标。具体指标中, 电网稳定性 (C_3) 权

表 13 3 块候选场地各指标评分结果

Tab. 13 Evaluation scores for each indicator at the three candidate sites

指标	权重	P ₁	P ₂	P ₃
C ₁	5.28	7	6	8
C ₂	10.57	8	10	9
C ₃	31.75	7	10	9
C ₄	3.69	9	8	5
C ₅	7.37	8	8	8
C ₆	22.14	7	8	8
C ₇	12.19	7	10	9
C ₈	2.25	7	6	9
C ₉	4.76	8	10	5
加权得分		7.30	9.03	8.31
排名		3	1	2



图 3 P₂ 场地的地形与储能系统布置三维效果图

Fig. 3 3D rendering of the terrain and SGES system layout at site P₂

重最高, 提供就业 (C₈) 权重最低, 分析其原因如下:

1) 电力系统的稳定性是储能项目成功的基础。在储能系统的选址过程中, 电力类指标 (C₁—C₃) 决定了储能系统的必要性和优先部署区域, 因此其在选址中的权重最重。其中电网稳定性 (C₃) 是储能系统选址中最核心的因素, 储能系统在电网中的重要作用之一就是平衡供需波动, 避免系统过载或电压不稳。如果选址区域的电网稳定性较低, 储能系统的需求会更强, 因为它能在电网波动时提供支持, 避免频繁的电力中断和电压异常。同时, 电网越不稳定, 对储能系统的响应速度、容量要求越高, 以便在短时间内提供电力支持, 确保电网的稳定性。

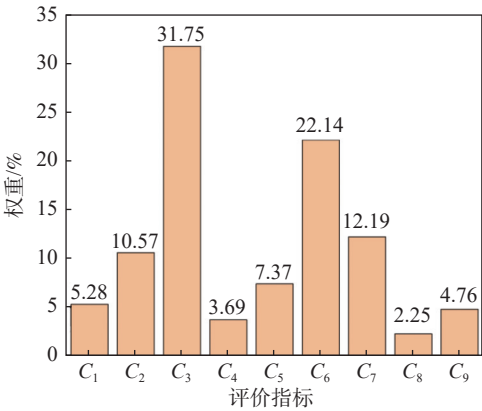


图 4 各评价指标的权重柱状图

Fig. 4 Bar chart of weights for each evaluation indicator

2) 经济类指标 (C₄—C₆) 虽然对储能系统的经济效益至关重要, 但它们是建立在电力系统稳定性需求的基础上的。没有电网稳定性的需求, 再优异的经济效益也难以推动储能系统的建设, 因此排在电力类指标之后。

3) 社会类指标 (C₇—C₉) 权重相对较低。社会类指标对项目的接受度有帮助, 但其对选址的影响更多是间接性的, 但相比电力系统的实际稳定性和经济可行性, 它们的重要性较低。特别是提供就业 (C₈) 指标虽然可以增加地方就业机会, 带来一定的社会经济效益, 但其在储能系统项目中重要性相对较低。储能项目的就业机会主要集中在建设期, 运营期的就业需求相对较小。因此, 尽管提供就业能带来一定的地方支持和社会效益, 但其影响时间较短。

3.2 选址结果分析

本研究采用两阶段选址方法, 以贵州省贵阳市为实证区域, 首先通过地理适应性分析筛选出符合斜坡式重力储能系统建设条件的备选场址 P₁、P₂、P₃, 其次基于构建的选址多准则评价体系, 运用三角模糊层次分析法对 3 处候选场址进行多维度分析, 排序结果显示 P₂ 综合适宜性最优, P₃ 次之, P₁ 排名最末。

从选址结果来看, 影响排序的关键在于各场址在高权重指标下的表现差异。具体而言, 在权重占比较大 (>10%) 的 4 项指标中——C₂ (清洁能源消纳率, 10.57%)、C₃ (电网稳定性, 31.75%)、C₆ (单位储能收益, 22.14%) 以及 C₇ (投资回收期, 12.19%) ——P₂ 在所有高权重指标上的评分均为

最高, P_3 次之, P_1 最低, 直接导致其在最终加权总分中的领先地位。这表明, 场址在关键性指标上的评分优劣对最终排序结果具有决定性作用。

此外, 值得注意的是, 虽然 P_1 在所有指标项上的评分均不低 (均大于等于 7 分), 但由于其在高权重指标上的得分相对较弱, 最终综合得分反而处于末位。而 P_2 与 P_3 尽管在部分低权重指标上的得分不高 (甚至存在 6 分或 5 分的项), 但其在关键指标上表现突出, 有效拉升了整体加权得分。这一现象说明, 排序不仅受指标权重的影响, 还受到各场址实际评分结果的显著作用, 共同决定了最终加权得分的波动与排序结构。在多准则评价中, 评分的局部高低在高权重指标下将被进一步放大, 从而对最终决策结果产生实质性影响。

综上所述, 本研究不仅验证了所构建指标体系与评估方法在储能系统选址中的可行性和实用性, 也进一步强调了在多准则决策中合理设定权重与精确评分的重要性。未来在相关选址实践中, 需高度关注权重分布与评分质量的耦合效应, 尤其应聚焦对高敏感度关键指标的深入评估, 以提升选址结果的科学性、稳定性与应用价值。

4 结论

在当前全球能源结构转型与新型储能技术快速发展的背景下, 斜坡式重力储能因其高效率、低成本、环境友好等优势, 成为促进可再生能源消纳和电网调节能力提升的重要储能路径。系统选址作为影响储能项目建设与运行成效的关键环节, 亟需采取科学有效的决策方法。为此, 本文构建了一套面向斜坡式重力储能系统的两阶段选址决策框架, 并以贵州省贵阳市为实证区域开展分析, 研究结论如下:

1) 文章提出的两阶段选址方法包括: 第一阶段通过人工判读与选址规则设定, 结合斜坡结构特征与基础设施约束, 设定 7 项地理适应性指标, 筛选出 3 处符合建设条件的候选场址 (P_1 、 P_2 、 P_3); 第二阶段构建包括电力、经济与社会 3 类共 9 项指标的多准则评价体系, 采用三角模糊层次分析法确定指标权重, 并结合专家评分完成对备选场址的加权排序。

2) 权重结果显示, 电力类指标在整体选址决策中占据主导地位, 尤其是电网稳定性被视为最关

键因素, 而社会类指标中的就业指标权重最低, 说明选址更关注运行基础而非间接社会效益。在 3 个候选场址中, P_2 在高权重指标上评分领先, 最终被确定为最优选址。选址结果进一步表明, 排序不仅受指标权重影响, 还受到实际评分差异的显著作用, 两者共同决定加权得分的波动趋势。

3) 在优选出的 P_2 场址基础上, 已成功建设一套 10 kW 的斜坡式重力储能样机系统。该系统于 2025 年 3 月 14 日入选南方电网发布的“新型电力系统十大重点建设工程”, 标志着本研究成果已初步实现从理论到工程实践的有效转化。

文章提出的决策框架为斜坡式重力储能系统的选址提供了一种方法, 但仍存在一定的局限性。由于斜坡式重力储能技术目前处于理论研究和初期工程阶段, 缺乏成熟的实际经验与案例支撑, 本研究所建立的评价指标体系及其权重设置主要依赖于专家意见和类似工程经验, 具有一定的主观性, 尚需通过广泛深入的现场调查和实证研究进一步完善与验证。未来的研究中, 计划引入大数据分析、机器学习等先进技术以增强决策模型的客观性, 并开展风险评估、经济性分析及可行性论证, 以全面提升斜坡式重力储能系统选址决策的科学性和实用性。

参考文献:

- [1] TONG W X, LU Z G, CHEN W J, et al. Solid gravity energy storage: a review [J]. *Journal of energy storage*, 2022, 53: 105226. DOI: [10.1016/j.est.2022.105226](https://doi.org/10.1016/j.est.2022.105226).
- [2] 王粟, 肖立业, 唐文冰, 等. 新型重力储能研究综述 [J]. *储能科学与技术*, 2022, 11(5): 1575-1582. DOI: [10.19799/j.cnki.2095-4239.2021.0590](https://doi.org/10.19799/j.cnki.2095-4239.2021.0590).
WANG S, XIAO L Y, TANG W B, et al. Review of new gravity energy storage [J]. *Energy storage science and technology*, 2022, 11(5): 1575-1582. DOI: [10.19799/j.cnki.2095-4239.2021.0590](https://doi.org/10.19799/j.cnki.2095-4239.2021.0590).
- [3] 钟莹. 电池储能参与燃煤发电机组 AGC 辅助服务经济分析 [J]. *南方能源建设*, 2023, 10(6): 64-70. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.06.007](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.06.007).
ZHONG Y. Economic analysis of battery energy storage participating in AGC ancillary service of coal-fired generating unit [J]. *Southern energy construction*, 2023, 10(6): 64-70. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.06.007](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.06.007).
- [4] 李学斌, 赵号, 陈世龙. 预制舱式磷酸铁锂电池储能电站能耗计算研究 [J]. *南方能源建设*, 2023, 10(2): 71-77. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.02.010](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.02.010).
LI X B, ZHAO H, CHEN S L. Research on energy consumption

- calculation of prefabricated cabin type lithium iron phosphate battery energy storage power station [J]. *Southern energy construction*, 2023, 10(2): 71-77. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.02.010](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.02.010).
- [5] 罗志斌, 孙潇, 孙翔, 等. 氢能与储能耦合发展的机遇与挑战 [J]. *南方能源建设*, 2022, 9(4): 24-31. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.04.003](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.04.003).
- LUO Z B, SUN X, SUN X, et al. The coupling development of hydrogen and energy storage technology: opportunities and challenges [J]. *Southern energy construction*, 2022, 9(4): 24-31. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.04.003](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.04.003).
- [6] 陈逸文, 赵晋斌, 李军舟, 等. 电力低碳转型背景下氢储能挑战与展望 [J]. *发电技术*, 2023, 44(3): 296-304. DOI: [10.12096/j.2096-4528.pgt.23022](https://doi.org/10.12096/j.2096-4528.pgt.23022).
- CHEN Y W, ZHAO J B, LI J Z, et al. Challenges and prospects of hydrogen energy storage under the background of low-carbon transformation of power industry [J]. *Power generation technology*, 2023, 44(3): 296-304. DOI: [10.12096/j.2096-4528.pgt.23022](https://doi.org/10.12096/j.2096-4528.pgt.23022).
- [7] POONAM, SHARMA K, ARORA A, et al. Review of supercapacitors: materials and devices [J]. *Journal of energy storage*, 2019, 21: 801-825. DOI: [10.1016/j.est.2019.01.010](https://doi.org/10.1016/j.est.2019.01.010).
- [8] SHEIKHOLESLAMI M. Analyzing melting process of paraffin through the heat storage with honeycomb configuration utilizing nanoparticles [J]. *Journal of energy storage*, 2022, 52: 104954. DOI: [10.1016/j.est.2022.104954](https://doi.org/10.1016/j.est.2022.104954).
- [9] 邹博, 任建地, 许道明, 等. 氯化物熔盐储热技术应用于新能源发电的研究进展 [J/OL]. *发电技术*, 2025: 1-15 (2025-01-13) [2025-06-04]. <https://link.cnki.net/urlid/33.1405.TK.20250113.1131.010>.
- ZOU B, REN J D, XU D M, et al. Recent developments on the application of chloride molten salt heat storage technology to new energy power generation [J/OL]. *Power generation technology*, 2025: 1-15 (2025-01-13) [2025-06-04]. <https://link.cnki.net/urlid/33.1405.TK.20250113.1131.010>.
- [10] 徐宪龙, 张艺凡, 孙浩程, 等. 飞轮储能技术及其耦合发电机组研究进展 [J]. *南方能源建设*, 2022, 9(3): 119-126. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.03.014](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.03.014).
- XU X L, ZHANG Y F, SUN H C, et al. Research progress of flywheel energy storage technology and its coupling power generation [J]. *Southern energy construction*, 2022, 9(3): 119-126. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.03.014](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.03.014).
- [11] 王俊月, 杨骥, 宋政湘, 等. 基于自适应 SOC 的电池-飞轮混合储能一次调频控制策略 [J]. *电力工程技术*, 2024, 43(5): 122-130. DOI: [10.12158/j.2096-3203.2024.05.012](https://doi.org/10.12158/j.2096-3203.2024.05.012).
- WANG J Y, YANG K, SONG Z X, et al. Primary frequency regulation strategy for battery-flywheel hybrid energy storage based on adaptive state of charge [J]. *Electric power engineering technology*, 2024, 43(5): 122-130. DOI: [10.12158/j.2096-3203](https://doi.org/10.12158/j.2096-3203).
- 2024.05.012.
- [12] 袁照威, 杨易凡. 压缩空气储能技术研究现状及发展趋势 [J]. *南方能源建设*, 2024, 11(2): 146-153. DOI: [10.16516/j.ceec.2024.2.14](https://doi.org/10.16516/j.ceec.2024.2.14).
- YUAN Z W, YANG Y F. Research status and development trend of compressed air energy storage technology [J]. *Southern energy construction*, 2024, 11(2): 146-153. DOI: [10.16516/j.ceec.2024.2.14](https://doi.org/10.16516/j.ceec.2024.2.14).
- [13] 郑开云, 池捷成, 张学锋. 一种双工质气体压缩储能系统及其可行性分析 [J]. *南方能源建设*, 2024, 11(2): 154-161. DOI: [10.16516/j.ceec.2024.2.15](https://doi.org/10.16516/j.ceec.2024.2.15).
- ZHENG K Y, CHI J C, ZHANG X F. An energy storage system with binary cycle gas compression and its feasibility analysis [J]. *Southern energy construction*, 2024, 11(2): 154-161. DOI: [10.16516/j.ceec.2024.2.15](https://doi.org/10.16516/j.ceec.2024.2.15).
- [14] 吴全, 孙春良, 郭海涛, 等. 压缩气体储能技术经济特点和发展方向探析 [J]. *油气与新能源*, 2023, 35(6): 90-98. DOI: [10.3969/j.issn.2097-0021.2023.06.013](https://doi.org/10.3969/j.issn.2097-0021.2023.06.013).
- WU Q, SUN C L, GUO H T, et al. Analyzing the technological and financial features and prospects for compressed gas energy storage technologies [J]. *Petroleum and new energy*, 2023, 35(6): 90-98. DOI: [10.3969/j.issn.2097-0021.2023.06.013](https://doi.org/10.3969/j.issn.2097-0021.2023.06.013).
- [15] 张京业, 林玉鑫, 邱清泉, 等. 基于斜坡和山体的重力储能技术研究进展 [J]. *储能科学与技术*, 2024, 13(3): 924-933. DOI: [10.19799/j.cnki.2095-4239.2023.0667](https://doi.org/10.19799/j.cnki.2095-4239.2023.0667).
- ZHANG J Y, LIN Y X, QIU Q Q, et al. Gravity energy storage technology based on slopes and mountains [J]. *Energy storage science and technology*, 2024, 13(3): 924-933. DOI: [10.19799/j.cnki.2095-4239.2023.0667](https://doi.org/10.19799/j.cnki.2095-4239.2023.0667).
- [16] NASIR J, JAVED A, ALI M, et al. Capacity optimization of pumped storage hydropower and its impact on an integrated conventional hydropower plant operation [J]. *Applied energy*, 2022, 323: 119561. DOI: [10.1016/j.apenergy.2022.119561](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.119561).
- [17] MAO Q H, GUO M X, LV J, et al. An investment decision framework for offshore wind-solar-seawater pumped storage power project under interval-valued Pythagorean fuzzy environment [J]. *Journal of energy storage*, 2023, 68: 107845. DOI: [10.1016/j.est.2023.107845](https://doi.org/10.1016/j.est.2023.107845).
- [18] TAHERI B, JABARI F, AKBARI FOROUD A. A green cogeneration microgrid composed of water-source heat pumps, a gravity energy storage, and a bio-fueled gas turbine: design and techno-economic optimization [J]. *Sustainable cities and society*, 2023, 95: 104594. DOI: [10.1016/j.scs.2023.104594](https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104594).
- [19] EMRANI A, BERRADA A, BAKHOUYA M. Optimal sizing and deployment of gravity energy storage system in hybrid PV-Wind power plant [J]. *Renewable energy*, 2022, 183: 12-27. DOI: [10.1016/j.renene.2021.10.072](https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.10.072).
- [20] TONG W X, LU Z G, HUNT J D, et al. Power control strategies

- for modular-gravity energy storage plant [J]. *Applied energy*, 2024, 361: 122908. DOI: [10.1016/j.apenergy.2024.122908](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.122908).
- [21] TONG W X, LU Z G, CHEN Y B, et al. Typical unit capacity configuration strategies and their control methods of modular gravity energy storage plants [J]. *Energy*, 2024, 295: 131047. DOI: [10.1016/j.energy.2024.131047](https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.131047).
- [22] 聂亚惠, 周学志, 郭丁彰, 等. 铁轨重力储能系统关键影响因素及其与风电场的耦合研究 [J]. *储能科学与技术*, 2024, 13(6): 1900-1910. DOI: [10.19799/j.cnki.2095-4239.2023.0962](https://doi.org/10.19799/j.cnki.2095-4239.2023.0962).
- NIE Y H, ZHOU X Z, GUO D Z, et al. Study on key influencing factors of the rail gravity energy storage system and its coupling with wind farms [J]. *Energy storage science and technology*, 2024, 13(6): 1900-1910. DOI: [10.19799/j.cnki.2095-4239.2023.0962](https://doi.org/10.19799/j.cnki.2095-4239.2023.0962).
- [23] 刘大猛, 牟雪鹏, 石博豪, 等. 斜坡式重力储能系统机械与电气联合仿真的多软件协同建模方法 [J]. *储能科学与技术*, 2024, 13(9): 3266-3276. DOI: [10.19799/j.cnki.2095-4239.2024.0243](https://doi.org/10.19799/j.cnki.2095-4239.2024.0243).
- LIU D M, MOU X P, SHI B H, et al. Multi-software collaborative modeling method for mechanical and electrical co-simulation of slope gravity energy storage systems [J]. *Energy storage science and technology*, 2024, 13(9): 3266-3276. DOI: [10.19799/j.cnki.2095-4239.2024.0243](https://doi.org/10.19799/j.cnki.2095-4239.2024.0243).
- [24] 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. DOI: [10.19783/j.cnki.pspc.240162](https://doi.org/10.19783/j.cnki.pspc.240162).
- QI C J, LI M Y, WU Y C, 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. DOI: [10.19783/j.cnki.pspc.240162](https://doi.org/10.19783/j.cnki.pspc.240162).
- [25] 曹馨匀. 基于三角模糊层次分析法的重庆地区建筑低碳化评价指标体系研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2014.
- CAO X Y. Research on evaluation index system of low-carbon building based on triangular fuzzy AHP in Chongqing [D]. Chongqing: Chongqing University, 2014.
- [26] 隋明刚, 魏巍. Fuzzy AHP 中权重确定方法的探讨与改进 [J]. *山西大学学报 (自然科学版)*, 2000, 23(3): 218-220. DOI: [10.3969/j.issn.0253-2395.2000.03.008](https://doi.org/10.3969/j.issn.0253-2395.2000.03.008).
- SUI M G, WEI Y. Discussion and improvement on calculating quotiety using Fuzzy AHP [J]. *Journal of Shanxi University (natural science edition)*, 2000, 23(3): 218-220. DOI: [10.3969/j.issn.0253-2395.2000.03.008](https://doi.org/10.3969/j.issn.0253-2395.2000.03.008).

作者简介:



张帆

张帆 (第一作者)

1984-, 男, 高级工程师, 在职博士, 主要从事新型储能技术研究工作 (e-mail) zhangfan@gedi.com.cn。

欧阳章智

1986-, 男, 高级工程师, 硕士, 主要从事建筑、市政、新能源等相关建设、技术管理工作 (e-mail) ouyangzhangzhi@gedi.com.cn。

牟征辉

1989-, 男, 学士, 主要从事新能源设计和电力规划研究工作 (e-mail) mouzhenghui@gedi.com.cn。



贾文林

贾文林 (通信作者)

1997-, 男, 博士在读, 主要从事重力储能技术研究工作 (e-mail) jwl19951029@163.com。

(编辑 徐嘉铖)