



智库式重力储能布局方案及结构体系研究

陈燕¹, 陈康泽², 黄慧¹, 唐敢², 尹凌峰³, 陈松钰²

(¹中国能源建设集团江苏省电力设计院有限公司, 江苏 南京 211102; ²南京航空航天大学土木与机场工程系, 江苏 南京 211106; ³东南大学土木工程学院, 江苏 南京 211189)

摘要: 在全球能源低碳转型与储能需求日益增长的背景下, 智库式重力储能这种新型物理储能技术, 不仅对环境友好, 而且布局灵活, 具有重要的战略意义和应用前景。本研究围绕智库式重力储能结构开展了递进式对比研究, 首先提出了穿梭式、区间式、平行式三种布置方案, 在发电量约100 MWh相同条件下, 从占地面积、用钢量、层间位移角及经济性等维度对比了三种布置方案; 然后基于平行式方案, 对比混凝土结构、钢结构、型钢混凝土结构及钢管混凝土结构四种主体材料体系; 最后针对纯框架侧向刚度不足问题, 对比框架-剪力墙与框架-支撑两种抗侧力体系。结果表明, 在布局方案对比中, “平行式”方案为最优布局; 在材料方案对比中, “型钢混凝土柱+混凝土梁”组合结构为最佳方案; 在抗侧力体系方案对比中, “框架-支撑”体系为最适配方案。因此以“平行式”布局为基础、“型钢混凝土柱+混凝土梁”为主体承重体系、“框架-支撑”为抗侧力体系的组合结构方案, 在满足储能功能与结构安全的前提下, 较好地协调了结构性能、建筑功能与经济性之间的关系, 可为工程设计提供参考。

关键词: 重力储能; 抗侧力体系; 平行式布局; 型钢混凝土柱; 框架-支撑体系

doi: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2026.0383

中图分类号: TK 02

文献标志码: A

文章编号: 2095-4239 (2026) 10-4025-11

Research on the layout scheme and structure system of think tank type gravity energy storage

CHEN Yan¹, CHEN Kangze², HUANG Hui¹, TANG Gan², YIN Lingfeng³, CHEN Songyu²

(¹China Energy Engineering Group Jiangsu Electric Power Design Institute Co., Ltd., Nanjing 211102, Jiangsu, China; ²Department of Civil and Airport Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, Jiangsu, China; ³School of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, Jiangsu, China)

Abstract: Against the background of global low-carbon energy transition and rapidly growing demand for energy storage, stacked gravity energy storage represents an environmentally friendly and flexibly deployable physical energy storage technology with important strategic value and promising engineering prospects. This paper presents a progressive comparative study on the structural design of stacked gravity energy storage systems. Three layout schemes, namely shuttle-type, zonal, and parallel configurations, are proposed and comprehensively compared in terms of land occupation, steel consumption, inter-story drift

收稿日期: 2026-05-07; 修改稿日期: 2026-08-03。

基金项目: 中国能源建设集团江苏省电力设计院有限公司技术开发项目资助 (32-JK-2023-028)。

第一作者: 陈燕 (1974—), 女, 硕士, 高级工程师, 研究方向为能源电力系统结构, E-mail: chenyan@jspdi.com.cn; 通信作者: 唐敢, 副教授, 研究方向为新型储能系统及结构体系, E-mail: tanggan@sina.com。

引用本文: 陈燕, 陈康泽, 黄慧, 等. 智库式重力储能布局方案及结构体系研究[J]. 储能科学与技术, 2026, 15(10): 4025-4035.

Citation: CHEN Yan, CHEN Kangze, HUANG Hui, et al. Research on the layout scheme and structure system of think tank type gravity energy storage[J]. Energy Storage Science and Technology, 2026, 15(10): 4025-4035.

ratio, and economic performance under a rated capacity of approximately 100 MWh. Based on the optimal parallel layout, four structural material systems, including concrete, steel, steel-reinforced concrete composite, and concrete-filled steel tubular structures, are further evaluated. To improve the insufficient lateral stiffness of conventional frame structures, two lateral force-resisting systems, frame-shear wall and frame-brace systems, are also compared. The results show that the parallel layout achieves the best overall performance among the three layout schemes. The composite system consisting of steel-reinforced concrete columns and concrete beams exhibits superior structural and economic performance among all material schemes. Furthermore, the frame-brace system is the most suitable lateral resistance solution for such structures. The integrated structural scheme adopting parallel layout, steel-reinforced concrete columns and concrete beams as the primary load-bearing system, and frame-brace lateral resistance can effectively balance structural performance, functional requirements and economic efficiency, while satisfying the safety and operational requirements of gravity energy storage projects. The outcomes provide a feasible design reference for future engineering practice.

Keywords: gravity energy storage; lateral force resisting system; parallel layout; steel-reinforced concrete column; frame-brace system

在全球持续探索低碳发展路径的背景下, 各国都在积极助推新一轮能源技术革命的加速发展, 旨在构建安全高效、绿色低碳、清洁环保的新型能源体系^[1-5]。提升能源利用效率、扩大可再生能源应用比例、保障国家能源安全并引领能源技术革命, 其战略意义离不开清洁能源技术与储能产业的高质量发展^[6-9]。围绕“双碳”目标, 国家接连发布能源产业新政, 重点锁定可再生能源并网及电网侧辅助服务等方向, 支持力度明显提升^[10-15]。在国家政策大背景下, 可再生能源发电规模持续扩大, 储能是保障电力系统安全稳定运行最直接的解决措施之一。

重力储能属于机械类储能技术, 其基本原理是利用高差变化, 通过储能介质的升降实现电能与重力势能的相互转换。针对重力储能技术方案, 国内外学者及研究机构在不同应用场景提出了多种创新: 日本建成全球首座海水抽水蓄能电站, 库容 56.4 万立方米, 水头 136 米, 出力 30 MW; 美国 Ares 公司提出基于退役铁路的山地牵引式重力储能, 利用电力机车牵引重物往返于不同海拔轨道, 实现势能存储与释放^[16-17]; 天津大学提出依托山体的重力储能系统, 通过倾斜铁轨、拖车、绞盘及电动发电一体机搬运重块^[18]; 徐州中矿大公司提出一种高效重力储能装置, 采用动滑轮组省力, 有效降低电机功率与设备成本^[19]; 中国科学院电工研究所

提出铁路轨道运载车辆储能系统, 通过高低海拔间运输重物实现储能释能^[20]; 葛洲坝中科储能公司提出利用煤矿废弃矿井竖井的重力储能, 解决矿井闲置问题、降低成本并提升安全性^[21]; 贾海梁等^[22]提出利用大型露天矿坑建设抽水蓄能、重力储能、光伏光热储能和油气储备的综合方案, 实现空间重塑、储能与生态再生协同; 杨鹏等^[23]提出利用油田废弃井筒建设重力储能, 通过提升下放系统控制储能单元升降, 为油田风光存储提供新途径; 邱清泉等^[24]综述了竖井、地面构筑物 and 斜坡三种固体重力储能技术, 分析了其在功率波动、自动接驳等方面的关键瓶颈与研究进展, 并指出未来需结合废弃矿井改造以降低建造成本、提升系统稳定性; 罗晓悦等^[25]提出垂直式重力储能能效评估方法, 建立全要素能效模型, 通过 2 吨重物、7.5 kW 样机验证了多绳缠绕式与摩擦式方案的能效差异。

上述重力储能方案各具特色, 但大多依赖于特定的自然地形(如山地、矿坑、竖井)或采用塔吊等单一提升装置, 在场地适应性、模块化扩展和结构可控性等方面仍存在一定局限。例如, 抽水蓄能和废弃矿井方案受地理资源约束明显, 塔吊式重力储能的单体容量有限, 而铁路牵引式系统则对轨道长度和坡度要求较高。为突破上述限制, 探索一种结构独立、布置灵活、可标准化建设的智库式重力

储能形式具有重要意义。

基于上述背景,本研究首先提出智库式重力储能结构的穿梭式、区间式、平行式三种布置方案,在发电量目标(约 100 MWh)相同的前提下对三种方案进行占地面积、用钢量及结构性能等多维度对比,然后基于优选出的平行式方案对比混凝土结构、钢结构、型钢混凝土结构及钢管混凝土结构四种主体材料体系,最后针对纯框架侧向刚度不足的问题对比研究框架-剪力墙与框架-支撑两种抗侧力体系。

1 三种布局方案

基于课题组前期研究基础,综合考虑电控专业运行策略与能环专业能耗评估需求,从重物块运输路径、调度策略灵活性、升降机配置数量及成本控制等多个维度出发,初步探索了三种适用于智库式重力储能结构的布局方案,分别为穿梭式、区间式和平行式。三种方案均采用全楼无楼板设计,次梁兼作小车运行轨道,直接决定重物块的搬运路径与运输效率,以下分别对三种方案的技术路线进行阐述。

穿梭式:如图 1 所示,采用网格化轨道布局,在库区内部,重物块根据次梁位置可进行横向或者竖向运输,在库区四周,可进行双向运输,形成环形运输通道,具备良好的通行能力。该方案运输路径规划简洁清晰,轨道系统布局规整,便于实现自动化控制与路径寻址。存取策略遵循“先进后出、后进先出”原则,可满足对存取时序有明确要求的储能场景。升降机配置数量适中,能够保障重物块在竖向的高效转运,但调度策略相对固定,在路径优化方面存在一定局限。

区间式:如图 2 所示,将库区划分为若干独立运输区间,各区间内部形成闭合轨道网络,重物块可在区间内实现双向灵活运输,区间之间通过升降机实现重物块的竖向转运。该方案采用模块化设计理念,各区间结构形式统一,便于标准化生产与现场装配,具有良好的可扩展性与适应性。调度策略灵活,可根据实时储能需求动态调整重物块存取顺序与路径,系统容错能力强,但路径规划较为复杂,对控制系统的智能化水平要求较高。

平行式:如图 3 所示,采用平行轨道布局,重物块沿竖向进行单向运输,轨道系统结构简洁清

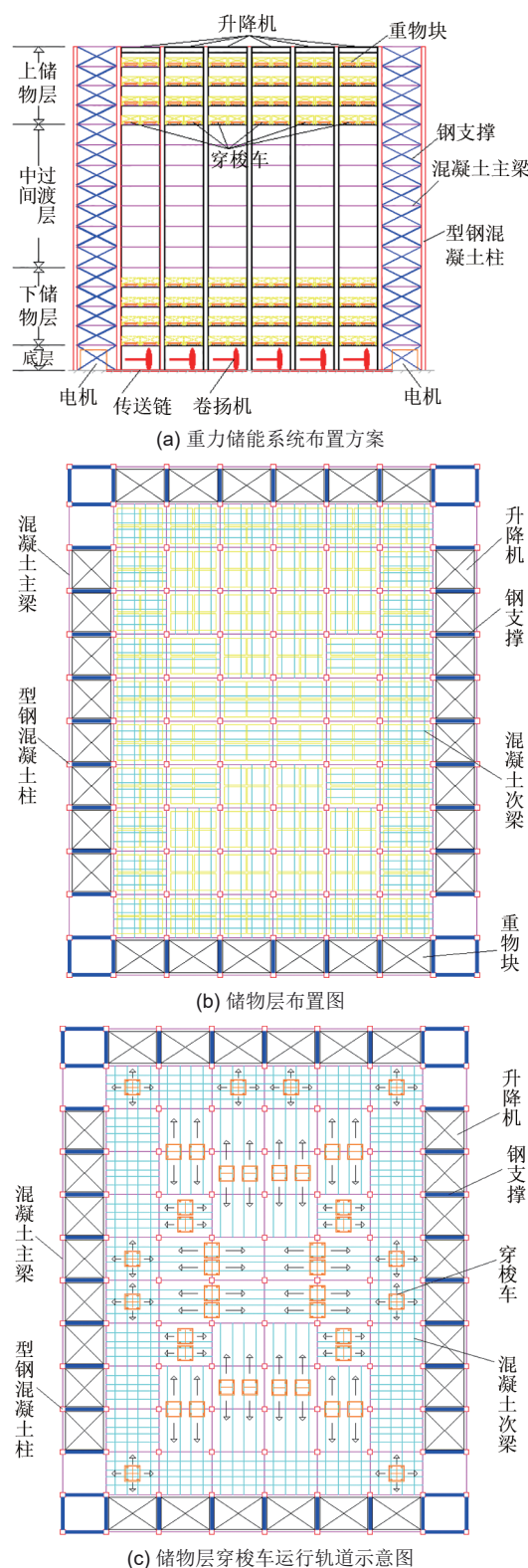


图 1 穿梭式布置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of shuttle-type layout

晰,节点连接少,具有显著的工程经济性与施工便捷性。该方案运输路径规划最为简洁,轨道布置规

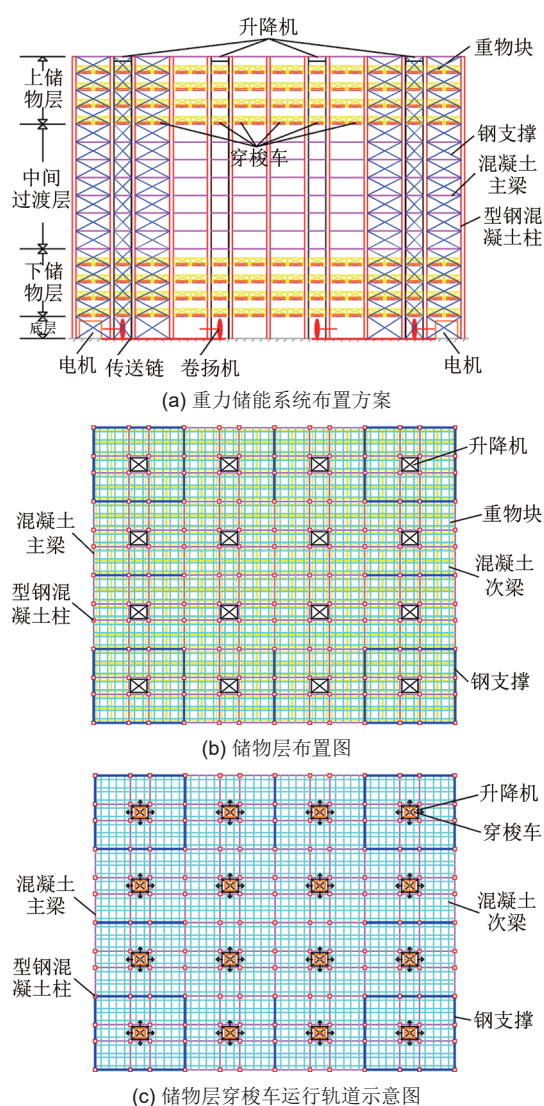


图2 区间式布置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of zone-based layout

整, 控制系统设计难度较低, 设备投资与后期维护成本优势突出。升降机配置数量较少, 有效降低设备投入, 同时简化了竖向转运调度逻辑, 使系统运行更加稳定可靠。运输方向单一、路径明确, 重物块流动秩序性强, 适用于大规模连续作业场景。

2 方案对比

2.1 相关因素分析

按照发电量相同 (接近 100 MWh) 的前提标准, 进行穿梭式、区间式和平行式的对比。假设其他条件保持不变, 重物块尺寸一样, 结构高度一致, 每层储物层重物块数量相同, 即可保证在发电量相同的情况下, 进行三种方案的纯框架结构横向

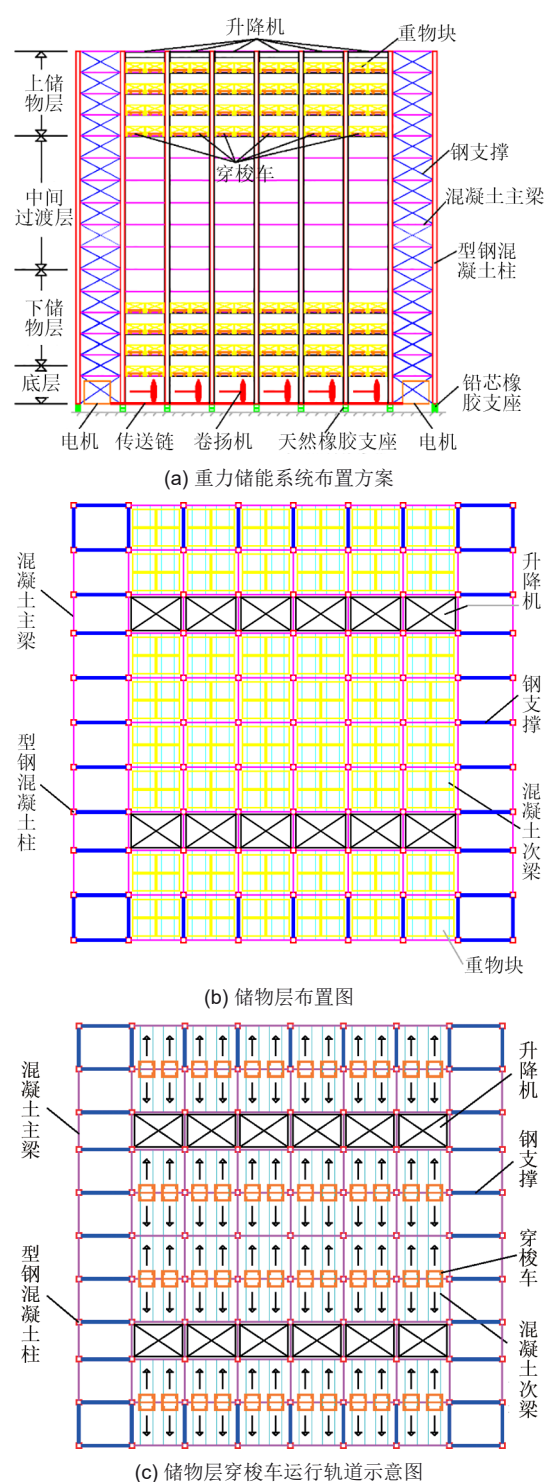


图3 平行式布置示意图

Fig. 3 Schematic diagram of parallel layout

比较。

(1) 重物块尺寸选型。初步选用重物块尺寸为 $2.7\text{ m} \times 3.5\text{ m} \times 1.2\text{ m}$, 其采用混凝土制作, 混凝土容重按 25 kN/m^3 , 其体积为 11.34 m^3 , 每块重量为

283.5 kN。重物块通过四向穿梭车搬运。

(2) 结构高度。为确保结构体系对比研究的一致性,所涉及的三种方案均采用完全相同的竖向布置与总高度控制。

底层设置为设备层,结构高度取为 5.0 m。主体存储区由上、下两组储物层构成,每组各 8 层,层高 3.8 m。在上下储物层之间,设置中间过渡层,共计 24 层,层高 4.0 m,以确保结构整体侧向刚度分布的合理性,并为可能的竖向传力路径优化提供空间。结构总高度为: $5.0 + (3.8 \times 8) + (4.0 \times 24) + (3.8 \times 8) = 161.8$ m。

(3) 每层储物层重物块数量。根据重物块尺寸 $2.7 \text{ m} \times 3.5 \text{ m} \times 1.2 \text{ m}$,钢柱与重物块间距 250 mm,重物块与重物块间隔 250 mm,钢柱示意尺寸暂取 $800 \text{ mm} \times 800 \text{ mm}$,穿梭式和平行式最小发电单元里储存 4 个重物块,区间式最小发电单元里储存 24 个重物块。在最小发电单元基础上排列,每层重物块数量:穿梭式 1444 个,区间式 1440 个,平行式 1440 个。

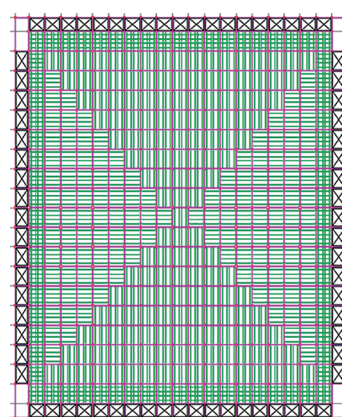
(4) 发电量近似计算。如图 4 所示,三种方案下一次梁轨道的布置存在明显差异,直接影响重物块运输路径及荷载传递方式。穿梭式采用网格化轨道,在库区内部次梁单向布置,在库区四周,次梁双向布置,传力路径分散;区间式形成独立闭合轨道网络,局部梁系密集;平行式轨道沿单一方向布置,次梁体系最为简洁,有利于简化传力路径并降低用钢量。

以穿梭式为例,进行发电量计算。单块重物块重量 283.5 kN,单块发电量约 38534 kJ。一层布置 1444 个重物块,共 8 层储物层,全部重物块总发电量约 114.99 MWh,按 85% 发电效率折算后,实际发电量为 97.74 MWh,接近 100 MWh 的设计目标。

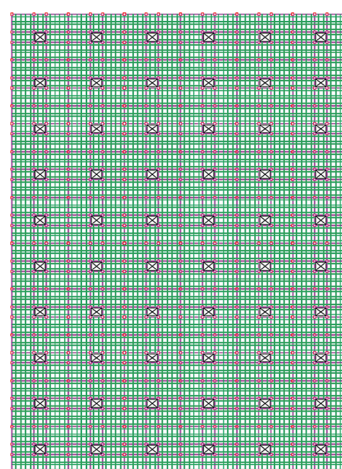
(5) 电机及其传动装置布置。如图 5 所示,分别对三种方案的电机及传动装置提出不同的空间布置形式,各方案的技术特点如下:

穿梭式:共布置 8 台电机,数量处于适中水平,电机及其传动装置采用沿结构外侧排列,传动路径直接,不存在设备交叉布置问题,施工安装与后期检修维护较为便利。

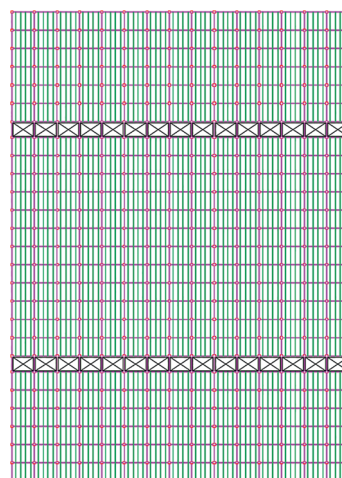
区间式:共布置 16 台电机,数量在三者中最多。卷扬机需通过拉索斜向布置以适应不同运输方向,布置形式较为复杂,部分区域存在设备交叉布置风险,空间占用率较高,对结构内部净空及后期



(a) 穿梭式



(b) 区间式



(c) 平行式

□ 框架柱 主梁 次梁轨道 ⊗ 升降机位置示意

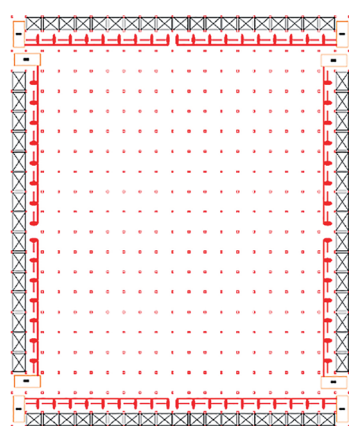
图 4 次梁(轨道)布置示意图

Fig. 4 Schematic diagram of secondary beam (track) layout

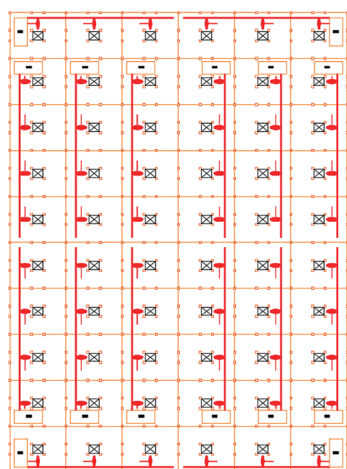
运维提出更高要求。

平行式:共布置 4 台电机,数量最少,电机及

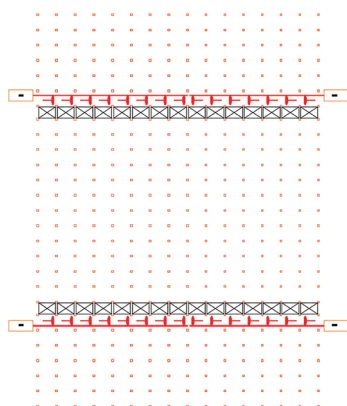
其传动装置均位于结构外侧，传动路径简洁清晰，无设备交叉布置现象，空间利用率高，施工难度低，后期维护方便。



(a) 穿梭式



(b) 区间式



(c) 平行式

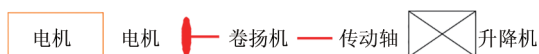


图5 电机及传动装置布置

Fig. 5 Arrangement of motor and transmission device

2.2 结构基本性能对比

(1) 荷载的取值。恒荷载：结构自重由程序自动计算，屋面顶板与外围护墙板重量以面荷载传递至框架；活荷载：重物块与升降机活载按集中力形式施加于梁单元最不利位置；雪荷载：雪荷载不与屋面活荷载同时组合，取较大值。基本雪压按100年重现期取值；风荷载：依据《建筑结构荷载规范》确定，基本风压按规范取值；地震作用：采用振型分解反应谱法。设防烈度7度，设计基本地震加速度 $0.10g$ ，场地类别II类，特征周期 $0.35s$ 。智库式重力储能结构按荷载效应的最不利组合设计。

(2) 应力比较验。对三种方案进行结构分析和荷载组合校验后，将计算结果进行汇总。为确保三种方案在结构性能对比中的可比性，通过调整构件截面尺寸，控制各方案关键构件应力比水平基本一致。穿梭式和平行式柱网布置及受力特征相似，采用相同的构件截面，其柱截面从底层 950×32 过渡至顶层 400×16 ，应力比分布较为接近，如底层柱分别为 0.620 和 0.607 ，上层储物层主梁应力比分别为 0.859 和 0.878 ；区间式由于柱间距更近，柱数量相对较多，其构件截面尺寸较小，柱截面从底层 800×30 过渡至顶层 400×16 ，上层储物层主梁采用 $HN700 \times 300 \times 16 \times 20$ ，应力比为 0.875 ，与穿梭式、平行式基本持平。

(3) 占地面积对比。穿梭式占地 $25130 m^2$ ，区间式 $23521 m^2$ ，平行式 $22931 m^2$ 。占地面积排序为穿梭式>区间式>平行式，平行式最小。

(4) 用钢量对比。平行式总用钢量 13.40 万吨，较穿梭式(15.68 万吨)减少 14.5% ，较区间式(14.38 万吨)减少 6.8% ，排序为穿梭式>区间式>平行式。

(5) 层间位移角对比。在水平向荷载作用下对三个方案的结构位移进行计算，并对层间位移角的计算结果进行汇总。结果显示，区间式最大(地震 $1/536$ ，风 $1/531$)，穿梭式最小(地震 $1/1349$ ，风 $1/1423$)，平行式居中(地震 $1/1201$ ，风 $1/1304$)。层间位移角排序为区间式>平行式>穿梭式，表明区间式抗侧刚度最小，穿梭式最大。

(6) 周期对比。穿梭式 $T_1=4.59s$ (Y向平动)， $T_2=4.34s$ (X向平动)， $T_3=4.05s$ (扭转)；区间式 $T_1=8.11s$ (X向平动)， $T_2=7.62s$ (扭转)，

$T_3=7.48\text{ s}$ (Y向平动); 平行式 $T_1=4.77\text{ s}$ (X向平动), $T_2=4.52\text{ s}$ (扭转), $T_3=4.39\text{ s}$ (Y向平动)。周期数值表明, 区间式整体刚度最小, 平行式次之, 穿梭式最大, 与层间位移角分析结果一致。区间式与平行式的第二周期均为扭转振型, 周期比 (T_3/T_1) 分别为 0.94 和 0.95, 接近规范限值, 需增设支撑以改善抗扭刚度; 穿梭式周期比为 0.88, 抗扭性能相对较好。

(7) 三种方案的对比分析汇总。本节在发电量目标 (约 100 MWh) 相同、重物块规格、结构高度及每层储物数量基本一致的前提下, 对“穿梭式”“区间式”与“平行式”三种方案进行了系统的结构分析与综合对比。通过建立纯框架结构模型并进行详细的荷载组合计算与校验, 主要结论如下:

(1) 经济性方面, 平行式优势显著。其占地面积最小 (22931 m²), 总用钢量最低 (13.40 万吨)。

(2) 结构性能方面, 平行式满足规范要求。层间位移角地震 1/1201、风 1/1304, 满足限值要求; 构件应力比分布合理。

(3) 系统布置方面, 平行式最为简洁高效。升降机与电机数量最少, 为 4 台, 设备布置集中规整。

(4) 综合比选, 平行式为最优推荐方案。

3 结构材料方案对比

为确定智库式重力储能结构的最优材料体系, 本节基于 2.2 节推荐的平行式纯框架结构, 系统对比混凝土结构、钢结构、型钢混凝土结构及钢管混凝土结构四种材料方案。为确保不同材料方案在相同传力机制下可比, 本研究聚焦于纯框架体系。

3.1 方案概述与设计参数

(1) 混凝土结构。该方案设防烈度 7 度, 抗震等级二级。竖向承重构件采用矩形截面混凝土柱, 水平构件采用矩形截面混凝土梁。下层储物层、中间过渡层及上层储物层梁、柱均采用 C70 混凝土, 顶层采用 C50 混凝土。

(2) 钢结构。该方案设防烈度 7 度, 抗震等级三级。竖向承重构件采用焊接箱形截面钢柱, 水平构件采用 H 型钢梁。下层、过渡层、上层储物层采用 Q355B 钢, 顶层采用 Q235 钢。

(3) 型钢混凝土柱+砼梁。该方案采用型钢混凝土柱与普通混凝土梁相结合的框架体系。柱内配

置十字劲性型钢骨架, 下层、过渡层、上层储物层采用 C70 混凝土内包 Q355B 十字型钢, 梁采用 C70 钢筋混凝土; 顶层采用 C50 混凝土。

(4) 钢管混凝土柱+砼梁。该方案采用矩形钢管混凝土柱与普通混凝土梁相结合的框架体系。柱内灌注 C70 混凝土, 钢管采用 Q355B; 梁采用 C70 钢筋混凝土; 顶层采用 C50 混凝土。

3.2 结构性能分析与经济性初步分析

(1) 混凝土结构。结构前三阶周期呈“平-扭-平”序列, 扭平比 0.92。地震作用下最大层间位移角 1/693, 风荷载下 1/1331, 均满足规范限值 1/544。柱轴压比最大 0.63, 梁柱配筋率均满足规范要求。混凝土总用量 156545 m³, 钢筋总用量 31929 吨, 综合造价约 3.18 亿元。

(2) 钢结构。钢结构框架结构性能分析主要在于自振周期、位移与层间位移角、梁挠度、构件强度及稳定性等四个方面: 结构自振周期 $T_1=5.02\text{ s}$ 。地震作用下最大层间位移角 1/1096, 风荷载下 1/1371, 均满足规范限值 1/250。主梁最大挠度 1/1066, 次梁 1/634, 满足规范要求。构件最大应力比 0.76。总用钢量 12.69 万吨, 综合造价约 10.78 亿元。

(3) 钢管混凝土+砼梁。结构自振周期 $T_1=6.34\text{ s}$ 。地震作用下最大层间位移角 1/678, 风荷载下 1/1245, 均满足规范要求。柱的配筋率、配箍率和轴压比均满足规范要求。混凝土总用量 142220 m³, 型钢用量 14198 吨, 钢筋用量 26437 吨, 综合造价约 3.93 亿元。

(4) 钢管混凝土+砼梁。结构自振周期 $T_1=6.13\text{ s}$ 。地震作用下最大层间位移角 1/711, 风荷载下 1/1349, 满足规范要求。柱的轴压比、等效应力比均满足规范要求。混凝土总用量 141000 m³, 钢材用量 29950 吨, 钢筋用量 20295 吨, 综合造价约 4.87 亿元。

3.3 材料综合对比与方案建议

(1) 结构性能对比汇总。四种方案在纯框架体系下的主要结构性能指标对比如表 1 所示, 钢结构方案刚度与变形最优 (周期最短、位移角最小); 型钢混凝土和钢管混凝土方案刚度与混凝土方案基本持平。所有纯框架方案均存在抗扭不足、侧向刚度不规则、承载力突变及刚重比不满足等共性问题, 后续需引入支撑或剪力墙等抗侧力体系进行优化。

表 1 四种方案主要结构性能指标

Table 1 Main structural performance indicators of the four schemes

性能指标	混凝土结构	钢结构	型钢混凝土柱+砼梁	钢管混凝土柱+砼梁
基本周期 T_1/s	6.18	5.02	6.34	6.13
扭平比(T_2/T_1)	0.92	0.94	0.92	0.92
地震作用下最大层间位移角	1/693	1/1096	1/678	1/711
风荷载下最大层间位移角	1/1331	1/1371	1/1245	1/1349
关键构件承载力控制	轴压比、配筋率	应力比 (强度、稳定)	轴压比、含钢率、配筋率	轴压比、宽厚比、等效应力比
整体刚度表现	刚度一般，位移角满足但裕度较小	刚度最大，位移控制最优	刚度略低于 纯混凝土方案	刚度略高于 纯混凝土方案
共同局限性	各方案均呈现“平-扭-平”振型，扭平比接近限值，抗扭刚度相对偏弱，存在侧向刚度不规则、楼层承载力突变、结构刚重比不满足等共性问题，此为纯框架体系的固有特征。			

(2) 经济性初步对比汇总。四种方案的建造成本呈现清晰的阶梯分布：混凝土结构造价最低（3.18 亿元）；钢结构造价显著最高（10.78 亿元）；两种组合结构造价居中，其核心原因是仅在关键竖向构件中使用钢材（型钢或钢管），型钢混凝土方案（3.93 亿元）造价接近混凝土方案，而钢管混凝土方案（4.87 亿元）造价明显上升。

(3) 综合评价与方案建议。综合性能与经济性对比分析，各方案特点明确：混凝土结构经济性最优，钢结构性能领先但造价高昂，钢管混凝土方案性价比不具优势；由于智库式重力储能结构构件数量庞大且钢筋混凝土性价比更优，型钢混凝土（型钢混凝土柱+混凝土梁）组合结构在综合权衡中表现最为突出。

4 结构抗侧力体系方案对比

型钢混凝土柱-混凝土梁主体框架方案，虽在竖向承载工况下表现出良好的工作性能，但其自身抗扭刚度较弱、侧向刚度不足，且沿高度方向的刚度分布不均匀，导致结构整体对抗水平荷载的能力有限。为此，本研究将进一步开展抗侧力体系的研究，重点围绕框架-剪力墙结构与框架-支撑结构两种典型体系，旨在通过合理的体系选型与布置，弥补上述刚度缺陷，显著提升结构的整体抗侧刚度、抗扭性能与刚度分布的均匀性，从而形成安全、可靠且经济合理的结构方案。

4.1 抗侧力体系方案设计

4.1.1 方案概述

如图 6 所示，在平行式“型钢混凝土柱+混凝土梁”主体框架基础上，每榀框架最外侧区间增设

抗侧力构件。基于小车仅沿 Y 向运输的特点，结构在 X 向抗侧能力薄弱，在外围 X 向增设两个区间布置抗侧力构件。

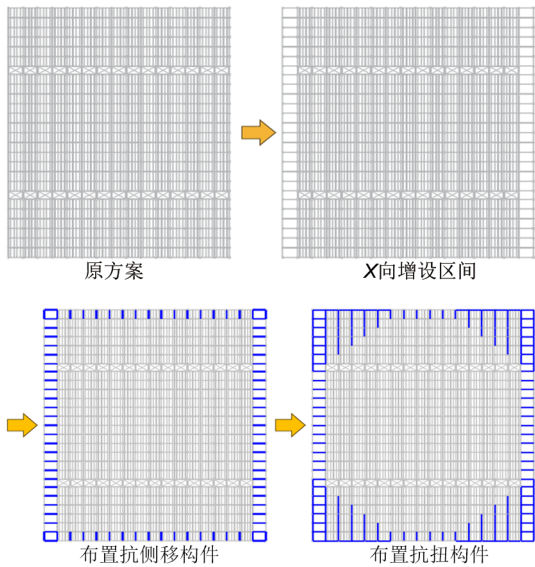


图 6 抗侧力构件布置平面示意图

Fig. 6 Plan schematic diagram of lateral force resisting member layout

4.1.2 框架-剪力墙结构

剪力墙采用普通混凝土墙，墙厚沿高度分段变化：下层储物层 300 mm，中间过渡层 250 mm，上层储物层和顶层 200 mm。下层储物区外围关键柱由 850 mm×850 mm 加强至 900 mm×900 mm。剪力墙轴压比及配筋均满足规范要求。

4.1.3 框架-支撑结构

支撑采用 Q235 钢材，圆管 $\Phi 273\times 9$ 截面。下层储物区外围关键柱同样进行了加强。支撑刚度、

强度及稳定性均满足规范要求。

4.1.4 结构性能对比分析

本节基于盈建科整体指标计算结果，从以下五个维度对纯框架、框架-剪力墙及框架-支撑三种抗侧力体系进行对比分析。

(1) 结构刚度与自振周期。框架结构第一周期 T_1 为6.34 s (X向)，扭平比达0.92，表明其侧向刚度低且扭转效应显著；框架-剪力墙结构 T_1 缩短至3.58 s (X向)，扭平比为0.64，说明剪力墙大幅提升了侧向刚度并有效控制了扭转；框架-支撑结构 T_1 为4.94 s (X向)，扭平比为0.74，其刚度提升适度，且扭转响应得到较好抑制，在刚度增强与抗扭性能之间取得了较平衡的效果。

(2) 抗侧与抗扭性能。在地震与风荷载作用下，框架结构的层间位移角最大（地震X向1/678，风载X向1/1245），抗侧刚度最弱；框架-剪力墙结构层间位移角最小（地震X向1/1060），抗侧刚度最强，但扭转位移比（X向1.59，Y向1.68）均超限（限值为1.50），显示其抗扭效能不足；框架-支撑结构抗侧刚度适中（地震X向1/1030），且扭转位移比（X向1.21，Y向1.32）满足规范，在提供有效抗侧刚度的同时保证了结构的抗扭可靠性。

(3) 结构规则性与连续性。如表2所示，框架结构刚度和承载力均不满足规范（X/Y向刚度0.98/0.94，承载力0.72），存在竖向薄弱层；框架-剪力

墙与框架-支撑结构两项指标均优（刚度1.0，承载力>0.8），能有效保证结构竖向连续性。尽管三者33层质量比均大于限值，体现出“上重下轻”布局的共性特征，但就规则性控制而言，两种抗侧力体系显著优于纯框架结构。

表2 结构抗侧力体系规则性与连续性指标

Table 2 Regularity and continuity index of structural lateral force resistance system

指标		框架结构	框架-剪力墙结构	框架-支撑结构
质量比		4.51 (33层)	3.16 (33层)	4.04 (33层)
侧向刚度不规则	X向	0.98 (不满足)	1	1
	Y向	0.94 (不满足)	1	1
楼层承载力突变	X向	0.72 (不满足)	0.85	0.81
	Y向	0.72 (不满足)	0.87	0.84

(4) 抗震与抗风性能。如表3所示，抗震方面，框架-剪力墙剪重比最高（1.58%~1.60%），因其刚度过大导致地震作用显著增强；框架结构剪重比最低（1.20%），但与其刚度不足相呼应；框架-支撑结构则居中（1.22%~1.45%），体现了刚度与地震响应的合理平衡。稳定性上，三类体系刚重比均小于10，其中框架-支撑结构最低（1.93~2.85），故重力二阶效应最为显著。在抗风舒适度方面，所有结构的顺风向与横风向加速度响应均远低于规范限值，风振效应不构成控制因素，其中框架-剪力墙结构因刚度最大，风振响应最小。

表3 结构抗侧力体系抗震与抗风性能指标

Table 3 Seismic and wind resistance performance index of structural lateral force resistant system

指标		框架结构	框架-剪力墙结构	框架-支撑结构
剪重比（调整后）	X向	1.20%	1.58%	1.22%
	Y向	1.20%	1.60%	1.45%
结构刚重比	X向	5.35	3.66	1.93
	Y向	6.78	6.02	2.85
风振舒适度/(m/s²)	X向（顺风向）	0.007	0.004	0.006
	Y向（顺风向）	0.006	0.004	0.005
	X向（横风向）	0.004	0.001	0.002
	Y向（横风向）	0.003	0.001	0.002

(5) 经济性初步评估。如表4所示，框架结构材料用量与造价最低（混凝土14.22万m³，钢筋2.64万吨，造价3.94亿元），经济性最优；框架-剪力墙结构因增设混凝土墙体，混凝土用量大幅增至19.86万m³，钢筋用量亦最高（3.04万吨），造价显著上升至4.77亿元；框架-支撑结构虽混凝土

（15.60万m³）与钢筋（2.74万吨）用量介于二者之间，但由于需设置大量钢支撑（Q235钢材7949吨），总造价达4.86亿元，为三者中最高。这表明，抗侧力体系的引入均会提升建造成本，其中剪力墙体系主要表现为混凝土与钢筋用量激增，而支撑体系则主要体现为钢材用量的显著增加。

表 4 结构抗侧力体系经济性初步评估

Table 4 Preliminary economic evaluation of structural lateral force resisting system

工程用量		框架结构	框架-剪力墙结构	框架-支撑结构
混凝土用量/m³	C50	1162	1757	1311
	C70	141058	196852	154698
钢材用量/t	Q235	0	0	7949
	Q355	14198	16090	16090
钢筋用量/t	HRB400	26437	30429	27394
造价/亿元		3.94	4.77	4.86

4.2 综合对比与方案建议

综合对比表明，框架结构虽经济性最优，但侧向刚度不足、扭转效应显著，且存在刚度与承载力突变等不规则项，无法满足结构的抗侧与抗扭要求；框架-剪力墙结构虽大幅提升了侧向刚度并改善了结构规则性，但其抗扭性能不足（扭转位移比超限）、自重显著增加导致经济性较差，且在地震作用下响应偏大；框架-支撑结构则在侧向刚度提升、扭转控制（位移比满足规范）、结构规则性改善等方面均表现良好，同时在材料用量与造价上更为均衡，综合体现了安全、合理与经济性的统一，是本研究推荐的抗侧力体系方案。

5 结 论

围绕智库式重力储能结构，本研究首先提出智库式重力储能结构的穿梭式、区间式、平行式三种布置方案，在发电量目标（约 100 MWh）相同的前提下对三种方案进行占地面积、用钢量及结构性能等多维度对比，然后基于优选出的平行式方案对比混凝土结构、钢结构、型钢混凝土结构及钢管混凝土结构四种主体材料体系，最后针对纯框架侧向刚度不足的问题对比研究框架-剪力墙与框架-支撑两种抗侧力体系。主要结论如下：

（1）在布置方案中，“平行式”为最优布局形式。平行式在确保层间位移角、构件应力比等关键性能指标满足规范要求的前提下，实现了占地面积最小（22931 m²）、总用钢量最低（13.40 万吨）及机电系统布置最简洁（仅需 4 台电机）的综合优势，为后续进一步研究的推荐方案。

（2）在主体结构材料体系中，“型钢混凝土柱+混凝土梁”为最佳材料组合。该方案显著提升了柱

的承载力与延性，有效应对巨大竖向荷载；其估算造价约 3.93 亿元，较纯混凝土方案（3.18 亿元）增幅有限，远低于纯钢结构方案（10.78 亿元），实现安全提升与成本控制的平衡，为主体结构的推荐材料体系。

（3）在抗侧力体系方案中，“框架-支撑”为适配的侧向力抵抗系统。框架-剪力墙结构虽大幅提升侧向刚度，但在无连续楼盖条件下抗扭效能不足，扭转位移比超限，且自重激增导致经济性下降；框架-支撑结构则能通过直接的轴向传力机制，在有效提升侧向刚度、完全满足抗扭要求的同时，实现更优的材料经济性，为智库式重力储能结构适配的抗侧力体系方案。

（4）综合上述研究，形成智库式重力储能结构的整体优选方案。以“平行式”布局为基础、“型钢混凝土柱+混凝土梁”为主体承重体系、“框架-支撑”为抗侧力体系的组合结构方案为整体优选方案。该方案在满足储能功能与结构安全的前提下，较好地协调结构性能、建筑功能与建设经济性之间的关系，为后续深入设计与工程实施奠定基础。

参 考 文 献

[1] 吴琦, 金洋, 韩旭. "双碳"目标下的能源发展路径[J]. 有色冶金节能, 2021(6): 6-9.

WU Q, JIN Y, HAN X. Energy development path under the "2-stage carbon reduction" goal[J]. Energy Saving of Nonferrous Metallurgy, 2021(6): 6-9.

[2] 林伯强, 杨梦琦. 碳中和背景下中国电力系统研究现状、挑战与发展方向[J]. 西安交通大学学报(社会科学版), 2022, 42(5): 1-10. DOI: 10.15896/j.xjtuskb.202205001.

LIN B Q, YANG M Q. China's power system research in the context of carbon neutrality: Current status, challenges, and development direction[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University (Social Sciences), 2022, 42(5): 1-10. DOI: 10.15896/j. xjtuskb. 202205001.

[3] LEE J U. IEA, World Energy Outlook 2020[J]. KEPCO Journal on Electric Power and Energy, 2021, 7(1): 2465-8111. DOI:10.18770/KEPCO.2021.07.01.025.

[4] 陈海生, 凌浩恕, 徐玉杰. 能源革命中的物理储能技术[J]. 中国科学院院刊, 2019, 34(4): 450-459. DOI: 10.16418/j. issn. 1000-3045. 2019.04.010.

CHEN H S, LING H S, XU Y J. Physical energy storage technology in energy revolution[J]. Bulletin of the Chinese Academy of Sciences, 2019, 34(4): 450-459. DOI: 10.16418/j. issn.1000-3045.2019.04.010.

[5] 任建明. "碳中和"背景下的风电发展[J]. 农村电气化, 2021(7): 60-63. DOI:10.13882/j.cnki.ncdqh.2021.07.019.

- REN J M. Wind power development in the context of carbon neutrality[J]. Rural Electrification, 2021(7): 60-63. DOI:10.13882/j.cnki.ncdqh.2021.07.019.
- [6] 刘英军, 刘畅, 王伟, 等. 储能发展现状与趋势分析[J]. 中外能源, 2017, 22(4): 80-88.
- LIU Y J, LIU C, WANG W, et al. Analysis of development status and trend of energy storage technology[J]. Sino-Global Energy, 2017, 22(4): 80-88.
- [7] 前瞻产业研究院. 2020年中国电力行业发展现状分析[J]. 电器工业, 2020(10): 48-50.
- Forward looking Industry Research Institute. Analysis on the development status of China electric power industry in 2020[J]. China Electrical Equipment Industry, 2020(10): 48-50.
- [8] 彭程, 彭才德, 高洁, 等. 新时代水电发展展望[J]. 水力发电, 2021, 47(8): 1-3, 98. DOI:10.3969/j.issn.0559-9342.2021.08.001.
- PENG C, PENG C D, GAO J, et al. Prospects for hydropower development in a new development stage in China[J]. Water Power, 2021, 47(8): 1-3, 98. DOI: 10.3969/j.issn.0559-9342.2021.08.001.
- [9] CHATURVEDI D K, YADAV S, SRIVASTAVA T, et al. Electricity storage system: A gravity battery[C]//2020 Fourth World Conference on Smart Trends in Systems, Security and Sustainability (WorldS4). July 27-28, 2020, London, UK. IEEE, 2020: 412-416. DOI:10.1109/WorldS450073.2020.9210321.
- [10] 李苑. 推动储能产业发展多项政策正加紧制定[N]. 上海证券报, 2021-07-12. DOI:10.28719/n.cnki.nshzj.2021.003020.
- [11] 童家麟, 洪庆, 吕洪坤, 等. 电源侧储能技术发展现状及应用前景综述[J]. 华电技术, 2021, 43(7): 17-23. DOI: 10.3969/j.issn.1674-1951.2021.07.003.
- TONG J L, HONG Q, LYU H K, et al. Development status and application prospect of power side energy storage technology[J]. Huadian Technology, 2021, 43(7): 17-23. DOI: 10.3969/j.issn.1674-1951.2021.07.003.
- [12] 王珏, 廖溢文, 韩文福, 等. 碳达峰背景下抽水蓄能-风电联合系统建模及有功功率控制特性研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2021, 52(9): 172-181.
- WANG J, LIAO Y W, HAN W F, et al. Modeling and active power control characteristics of pumped storage-wind hybrid power system in the context of peak carbon dioxide emission[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2021, 52(9): 172-181.
- [13] 王晓涛. 新型储能“十四五”规模骤增核心技术坚持自主可控[N]. 中国经济导报, 2021-08-03(005). DOI: 10.28095/n.cnki.ncjld.2021.001854.
- [14] 吴智泉, 贾纯超, 陈磊, 等. 新型电力系统中储能创新方向研究[J]. 太阳能学报, 2021, 42(10): 444-451. DOI: 10.19912/j.0254-0096.tynxb.2021-0762.
- WU Z Q, JIA C C, CHEN L, et al. Research on innovative direction of energy storage in new power system construction[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2021, 42(10): 444-451. DOI: 10.19912/j.0254-0096.tynxb.2021-0762.
- [15] 邓恢平. 新能源+储能是未来储能主要应用领域[N]. 中国电力报, 2021-07-15(005). DOI:10.28061/n.cnki.ncdlb.2021.001313.
- [16] BOTTENFIELD G, HATIPOGLU K, PANTA Y. Advanced rail energy and storage: Analysis of potential implementations for the state of west Virginia[C]//2018 North American Power Symposium (NAPS). September 9-11, 2018, Fargo, ND, USA. IEEE, 2019: 1-4. DOI:10.1109/NAPS.2018.8600665.
- [17] RUOSO A C, CAETANO N R, ROCHA L A O. Storage gravitational energy for small scale industrial and residential applications[J]. Inventions, 2019, 4(4): 64. DOI: 10.3390/inventions4040064.
- [18] 罗振军, 黄田, 梅江平, 等. 依托山体的重力储能系统: CN103867408A[P]. 2014-06-18.
- [19] 谭国俊, 冯维, 杨波, 等. 高效重力储能装置: CN106704121A[P]. 2017-05-24.
- [20] 肖立业, 史黎明, 韦统振, 等. 铁路轨道运载车辆储能系统: CN108437808A[P]. 2018-08-24.
- [21] 张正秋, 武安, 张海川. 一种依托煤矿矿井的重力储能系统: CN209676010U[P]. 2019-11-22.
- [22] 贾海梁, 王宁宁, 吴云, 等. 大型露天矿坑综合储能路径及关键技术问题[J]. 安全与环境工程, 2026, 33(2): 21-40.
- JIA H L, WANG N N, WU Y, et al. Comprehensive energy storage paths and related key technical problems at large open-pit mines [J]. Safety and Environmental Engineering, 2026, 33(2): 21-40.
- [23] 杨鹏, 王军伟, 陈亚军, 等. 油田废弃井筒重力储能技术分析及构想 [J]. 设备管理与维修, 2026(1): 5-7. DOI:10.16621/j.cnki.issn1001-0599.2026.01.02.
- YANG P, WANG J W, CHEN Y J, et al. Analysis and conception of gravity energy storage technology for abandoned wellbore in oilfield[J]. Plant Maintenance Engineering, 2026(1): 5-7. DOI: 10.16621/j.cnki.issn1001-0599.2026.01.02.
- [24] 邱清泉, 肖立业, 罗晓悦, 等. 重力储能技术的研究进展[J]. 电工电能新技术, 2025, 44(10): 50-61.
- QIU Q Q, XIAO L Y, LUO X Y, et al. Research progress of gravity energy storage technology[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2025, 44(10): 50-61.
- [25] 罗晓悦, 邱清泉, 靖立伟, 等. 垂直式重力储能系统能效研究[J]. 储能科学与技术, 2026, 15(6): 2341-2354.
- LUO X Y, QIU Q Q, JING L W, et al. Energy efficiency analysis of vertical gravity energy storage systems[J]. Energy Storage Science and Technology, 2026, 15(6): 2341-2354.