

基于地面构筑物式与斜坡式重力储能系统研究综述

袁照威^{1,✉}, 李峻¹, 李军¹, 刘彪²

(1. 中能建数字科技集团有限公司, 北京 100022;

2. 北京交通大学, 北京 100091)

摘要: [目的] 重力储能作为一种新型的储能形式, 其在平衡电力供需、应对间歇性能源波动等方面在电力系统中发挥着越来越重要的作用。[方法] 文章以基于地面构筑物和斜坡式重力储能为例, 详细分析两种形式重力储能在国内外的研究情况。首先与传统储能形式进行对比, 给出重力储能的工作原理及其优势。其次, 给出了基于地面构筑物的重力储能系统和斜坡式重力储能结构的研究现状及其经济成本分析, 详细介绍了山地矿车式和山地缆车式两种典型的斜坡式重力储能系统结构, 阐述了坡度、重物质量等参数对系统效率、成本性能的影响。最后针对重力储能系统的技术特点给出了展望和建议。[结果] 基于地面构筑物的重力储能结构稳定, 初期投入成本较高, 适用于功率波动大的用户采用。斜坡式重力储能建设成本低、操作简单, 适用于高山地形, 且功率需求小的用户采用。[结论] 随着重力储能技术的逐步成熟, 其成本不断降低, 未来将作为一种新型储能对电力系统构建起到重要支撑作用。

关键词: 重力储能; 基于地面构筑物的重力储能; 斜坡式重力储能; 山地矿车式; 山地缆车式

中图分类号: TK02; TM619

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2024)

OA: <https://www.energychina.press/>

Research on the New Gravity Energy Storage Systems

YUAN Zhaowei^{1,✉}, LI Jun¹, LI Jun¹, LIU Biao²

(1. China Energy Digital Technology Group Co., Ltd., Beijing 100022, China;

2. Beijing Jiaotong University, Beijing 100091, China)

Abstract: [Introduction] Gravity energy storage, as a new form of energy storage, plays an increasingly important role in balancing power supply and demand, responding to intermittent energy fluctuations, and other aspects of the power system. [Method] Focusing on the gravity energy storage system based on ground structure and slope gravity energy storage, the paper analyzed in detail the research status of these two forms of gravity energy storage both domestically and internationally. Firstly, compared with traditional energy storage forms, the working principle and advantages of gravity energy storage were provided. Then, the research status and economic cost analysis of the gravity energy storage system based on ground structure and slope gravity energy storage structures were presented. Then, two typical types of slope gravity energy storage system structures, i.e. mountain mining car type and mountain cable car type, were introduced in detail, and the effect of parameters such as slope and weight on system efficiency and cost performance was explained. Finally, prospects and suggestions were given for the technical characteristics of gravity energy storage systems. [Result] The gravity energy storage system based on the ground structure is stable and has a high initial investment cost, making it suitable for users with large power fluctuations. The slope gravity energy storage features low construction cost and simple operation and is suitable for users in high mountain terrain with low power demand. [Conclusion] With the gradual maturity of gravity energy storage technology and its continuous cost reduction, it will play an important supporting role in the construction of power systems as a new type of energy storage in the future.

Key words: gravity energy storage systems; gravity energy storage system based on ground structure; slope gravity energy storage systems; mountain mining car type; mountain cable car type

收稿日期: 2024-05-06 修回日期: 2024-06-17

基金项目: 中国能源建设股份有限公司科技项目(CEEC2022-ZDYF-06)

0 引言

为了减少温室气体排放,保护生态环境以及应对煤炭、石油等不可再生资源的日益枯竭,太阳能和风能等新能源的应用越来越广泛。但其发电量受天气、温度等自然因素的影响很大,且发电具有随机性和间歇性,大规模接入电网系统后将会影响电力平衡,对电量消纳、稳定控制等方面带来较大的影响^[1-2]。为使在各类波动性电源接入电网后,电网能保障安全稳定运行,使用储能系统是最有效、最方便的解决措施^[1,3]。重力储能作为储能系统的一种,已成为最热门的储能技术课题之一^[4-6]。

重力储能的基本原理就是电力充足时由电动机推动重物由低处到高处,实现电能、机械能、重力势能的转换;在电力不足时重物由高处下降到低处,推动发动机旋转发电,实现重力势能、机械能、电能的转换^[7-8]。与重力储能相比,其他储能方式或多或少都存在着一一定的弊端:抽水蓄能是应用最广泛的储能系统,占整个储能的99%,最具有成本效益^[9],但对系统选址有着很高的要求,需要适宜的地理条件和水资源要求;化学储能响应时间快,对地理条件不受限,但对环境会造成较大的污染;压缩空气储能在储能容量、长寿命、低自放电方面显示出其独特的能力,但其放电深度低,效率低。重力储能把储能物质换成固体物质,绿色环保、选址灵活,具有大规模商业化的前景,因此成为目前储能领域研究的热门^[2]。

目前重力储能分为框架式重力储能、斜坡式重力储能、竖井式重力储能以及活塞式重力储能四种形式,文章针对其中较为典型且研究相对较多的框架式重力储能和斜坡式重力储能^[9]来进行分析,总结现有方案的主要技术路线和研究重心,形成两大储能类型的系统性研究方案。重点对斜坡式重力储能、框架式重力储能的原理、设备组成、储能容量等参数进行研究,对储能系统的发电效率、实际可行性方面进行了分析和验证。最后对两种储能类型从经济效益、系统效率、可行性和技术成熟度等方面进行比较,分析其应用条件和前景。

1 基于地面构筑物的重力储能

基于地面构筑物的重力储能属于垂直式重力储能^[10]中的一种,其采用建筑废料制作重物块,实现对

废弃物的再利用,通过构筑框架结构来实现重物块的升降,因此也称为框架式重力储能,为简化表达,后续提到的框架式重力储能即为基于地面构筑物的重力储能。与框架式重力储能归属同一类的还有塔吊式重力储能,塔吊式重力储能虽然其性能优越,结构简单,操作方便,但仍然存在许多需要解决的问题:由于其占地较大,所以单个储能塔容量有限,且混凝土块移动时的偏移及风速对其的影响需要考虑,最重要的是该结构不固定,对地震等自然灾害的抗性较差。

针对储能塔式重力储能装置存在的问题,2021年Energy Vault提出了改进的框架式重力储能方案——Evx 储能平台,如图1所示。Energy Vault公司的Evx重力储能模块,每个模块预计储存10 MWh能量。设计EVRC需要至少4块并排模块,并且最高抬升至120 m高,在该维度下,储存100 MWh能量大概需要9713 m²土地。在每个Evx模块结构中,大概有1300个30 t左右的重物(蓝色)被放置在支架上。当充电时,这些重物被抬起(黄色)并在建筑高层储存;放电时则相反。据该公司称,Evx塔可以达到80%~85%的往返效率,且技术使用寿命超过35 a,它采用可扩展的模块化设计,储能容量高达数GWh^[11]。2022年初,Energy Vault公司也宣布将与中国天楹公司携手,在江苏如东建设首个框架式重力储能项目,容量达100 MWh^[12]。

国内青岛研究所针对框架式重力储能系统的经济性进行了研究,建立了平准化储能成本指标(levelised cost of storage, LCOS),并分别对10 MWh、20 MWh、40 MWh和100 MWh的储能系统进行对比分析^[11]。框架式重力储能系统的主要成本分为初

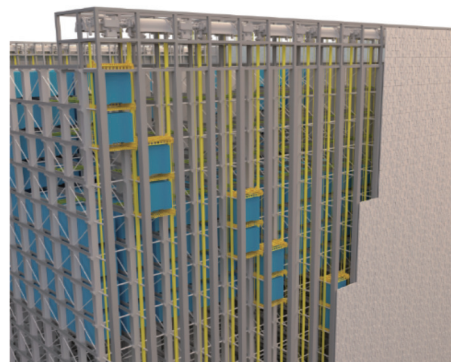


图1 Evx 储能平台

Fig. 1 Evx energy storage platform

始投资成本和运行维护成本, 该系统主要由框架式钢结构、重物单元、机电设备以及地基基础组成, 这 4 个构成了该系统的主要初始投资成本, 但与抽水蓄能不同的是, 该系统的装置简单, 具有回收性, 分析时需要考虑钢结构和重物单元的系统残值。如表 1 所示, 选取了容量分别为 10 MWh、20 MWh、40 MWh 和 100 MWh 的储能规模进行对比分析, 充分考虑框架式钢结构和重物单元的系统残值, 其中, 框架式钢结构残值按照 80% 考虑, 而重物单元的残值按照

100% 考虑, 计算得到的框架式重力储能系统成本数据如表 1 所示。计算中, 重力储能系统按照每天循环 1 次考虑, 每年运行 330 d, 系统的放电深度为 100%, 系统全过程效率为 85%, 系统寿命按照 50 a 考虑。同时, 计算中考虑了资本的时间价值, 基准折现率按 8% 考虑, 由于重力储能系统结构相对比较简单, 运行维护较少, 运维费用装机比按照 0.5% 考虑, 根据计算的结果显示, 框架式重力储能系统平准化全寿命度电成本可达 0.8 元/kWh 左右。

表 1 不同规模的储能成本

Tab. 1 Energy storage costs at different scales

储能方案规模	5 MW/10 MWh	10 MW/20 MWh	20 MW/40 MWh	50 MW/100 MWh
系统峰值功率/MW	5	10	20	50
控制系统及电机总投资/亿元	0.100	0.200	0.400	1.000
地基基础投资/亿元	0.079 8	0.154 0	0.303 5	0.740 1
重物单元投资/亿元	0.147 0	0.294 0	0.588 0	1.471 8
重物单元残值率/%	100	100	100	100
重物单元净投资/元	0	0	0	0
钢结构投资/亿元	0.307 3	0.614 5	1.229 0	3.076 4
钢结构残值率/%	80	80	80	80
钢结构净投资/亿元	0.061 5	0.122 9	0.245 8	0.615 3
初始总投资/亿元	0.063 4	1.262 5	2.520 5	6.288 2
初始净投资/亿元	0.241 2	0.476 9	0.949 3	2.355 3
基准折现率/%	8	8	8	8
运维费用装机比/%	0.5	0.5	0.5	0.5
系统放电深度/%	100	100	100	100
系统全过程效率/%	85	85	85	85
系统年运行天数/d	330	330	330	330
系统寿命/a	50	50	50	50
平准化度电成本/[元·(kWh) ⁻¹]	0.82	0.81	0.80	0.80

上海发电成套设备设计研究院 2020 年提出了一种利用行吊和承重墙堆叠重物的方案^[13]。该系统的主要设备组成包括: 质量块、承重结构、升降结构、发电机/电动机。承重结构主要包括质量块固定件、承重墙, 升降结构包括两个承重墙之间的升降通道, 行吊所组成。图 2 为一个行吊和承重墙堆叠重物的系统示意图, 实际系统由多个系统组成。系统正常工作时, 行吊固定用以承载质量块, 与承重墙直接相连并位于升降通道中, 行吊通过设置在其中的电动机处理搬运质量块。其工作原理为: 储能时, 多余的

电能驱动行吊吊住质量块, 承载质量块的固定件收起, 质量块被抬升至升降通道的上部, 上部的固定件伸出, 承载质量块, 多余的电能转换为质量块的重力势能; 释能时, 行吊吊住质量块, 承载质量块的固定件收起, 质量块下降至升降通道的下部, 下部的固定件伸出, 承载质量块, 质量块的重力势能转换为电能输送至电网。与储能塔式重力储能装置不同, 该装置具有稳定结构的固定装置, 对地理条件和环境的要求较小, 且可通过增加沉重墙的高度来增加储能容量, 无需增加占地面积, 用较小的占地面积就能实

现大容量的能量存储。

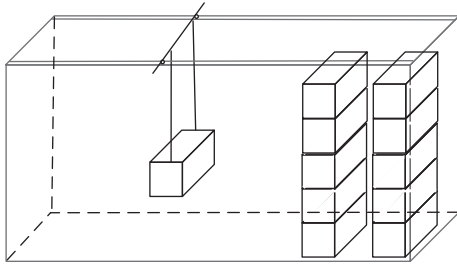


图 2 单个行吊与承重墙的示意图

Fig. 2 Diagram of a single bridge crane and load bearing wall

除上海成电研究所外,中国科学院工程热物理研究所也提出了一种框架式重力储能系统及其控制方法^[14]。其中该系统主要由一层或多层框架组成,框架中间由竖井、电动/发电组件、移动轨道、绳索和重物组成。该系统的主要工作原理是:当电能充足时,下层框架内的重物在移动轨道上移动,到合适的位置重物选择器将重物移动到竖井,竖井在绳索的抬升下将重物运送到上层框架,再通过重物选择器移动到移动轨道上载入,实现电能到重力势能的转换,释能时则过程完全相反。该框架式重力储能系统只需重物选择器接通相应水平轨道的电源就能将标准大小的重物合理分配,从而省去了有人值守的人工成本和因重物摆放不均匀造成空间利用不合理的情况。适用范围广泛,竖井、烂尾楼、构架结构等等皆适用,只需要铺设框架式轨道和滑轮即可,成本较低。轨道的形式对称架构,防止应力不均带来的安全隐患。系统可以充分调峰,将 N 块重物全部使用,或者微调峰,只用一块重物调整上下的高度就可能实现,操作简易灵活。系统不需要复杂的控制判断逻辑,只需要判断是储能还是释能即可。

2 斜坡式重力储能

考虑到可变的可再生能源需要在不同时间步骤中顺利地整合储能解决方案的需求,国际应用系统分析研究所的 HUNT 等提出了一种适用于低于 20 MW 的长期能源存储——山地重力储能(mountain gravity energy storage, MGES)^[15]。MGES 的基本原理是在两个具有地势差的储存点间,用矿车或者缆车装卸重物。当电能充足时,多余的电能驱动电动机用矿车或缆车将重物装载至高地势点,电能转化为重力势能;当电能不足时,矿车或缆车在地势低点

卸载重物,将重力势能转换至电能回馈电网^[16]。该技术已经成熟并应用于建筑、娱乐场所和采矿业等不同应用,具有很强的研究价值。

2.1 山地矿车式

斜坡式重力储能的代表性方案由美国 ARES (Advanced Rail Energy Storage) 公司在 2011 年提出,该方案利用不同高度的两个储能场来存储重力势能。使用电动汽车在两个储能场之间通过铁路运输重物^[17]。如图 3 所示,该系统主要由牵引电机轨道、运载车辆、发电/电动机、重物、上下游停放车站等组成。该装置的基本工作原理是当电能充足时,多余的电能驱动电动汽车将重物装载运输至上仓(高储能场),电能转化为重力势能;当电能不足时,电动汽车沿牵引轨道下坡,重物在下仓(低储能点)卸下。系统的功率由特定时间运行的列车数量和这些列车的速度决定^[18],系统充电或放电的时间长度可以根据设施中的重物数量而变化。

坡度对 ARES 系统的影响很大,不同坡度的摩擦系数不同,从而会对系统效率产生影响。西弗吉尼亚大学的 Gregory Bottenfield 就基于坡度的影响对 ARES 系统的选址展开了研究^[19],如图 4 所示,建立了系统模型分析其受力,建立数学模型,推导出其功

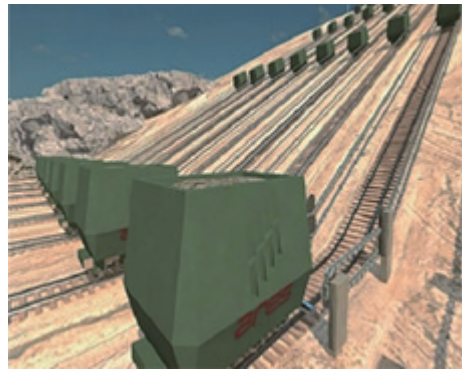


图 3 山地矿车式重力储能

Fig. 3 Mountain mining car type gravity energy storage

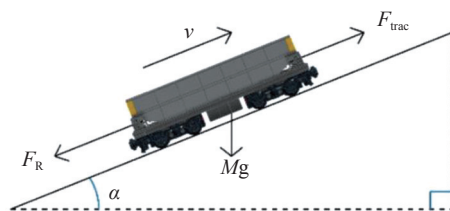


图 4 斜坡上运载车辆受力图

Fig. 4 Force diagram of a loaded vehicle on a slope

率的表达式。

$$T_G = \frac{r}{4}(f_r M g \cos(\alpha) + \frac{1}{2} C_w A \rho v^2 + M g \sin(\alpha) + M \frac{dv}{dt}) \quad (1)$$

$$P = \tau \omega \eta_G \quad (2)$$

式中:

T_G —— 转矩(N.m);

r —— 轨道车车轮半径(m);

f_r —— 滚动阻力系数;

M —— 轨道车的质量(kg);

ρ —— 空气密度(kg/m^3);

C_w —— 阻力系数;

α —— 倾角($^\circ$);

η_G —— 发电机效率(%);

g —— 重力加速度(m/s^2);

v —— 矿车的速度(m/s);

A —— 火车前部的面积(m^2);

ω —— 电机角速度(rad/s);

τ —— 力矩(N.m);

P —— 感应电机可转换为电能的机械功率(MW)。

根据其功率的数学表达式, 从 $-10^\circ \sim 10^\circ$ 中选取几个角度分析其功率大小, 得出了行驶路径的坡度对铁路系统可以产生或消耗的电力有很大影响的结果, 且实施先进铁路储能系统的理想位置将是中等坡度^[19]。

除了对坡度的研究, 国内中国科学院大学的秦婷婷、周学志等人基于 ARES 系统对铁轨重力储能的系统效率进行了研究^[20], 探究其不同的影响因素, 并基于 MATLAB 建立了重力储能系统模型, 系统模型由部件模型和控制策略模型组成, 其中部件模型包括载重车辆模型与永磁同步电机模型, 控制策略模型包括载重车辆速度控制模型、电机控制模型以及网侧变换器控制模型。在系统运行的两个阶段: 储能阶段和释能阶段, 系统效率的评判指标为:

$$\eta = \frac{E_{\text{ele_re}}}{E_{\text{ele_st}}} = \eta_{\text{st}} \eta_{\text{re}} \quad (3)$$

其中,

$$E_{\text{ele_st}}(1 - \eta_i \eta_m \eta_t) = E_{L_i} + E_{L_m} + E_{L_t} \quad (4)$$

$$E_{\text{ele_re}} \left(\frac{1}{\eta_r \eta_m \eta_t} - 1 \right) = E_{L_w} + E_{L_v} + E_{L_r} \quad (5)$$

式中:

$E_{\text{ele_re}}$ —— 流入电网的电能(MWh);

$E_{\text{ele_st}}$ —— 电网消耗的电能(MWh);

E_{L_i} —— 双向变流器损耗(MJ);

E_{L_m} —— 电机损耗(MJ);

E_{L_t} —— 传动系统损耗(MJ);

E_{L_w} —— 风阻损耗(MJ);

E_{L_v} —— 滚动损耗(MJ);

E_{L_r} —— 速度损耗(MJ);

η_i —— 变流器效率(%);

η_m —— 电机效率(%);

η_t —— 传动系统效率(%);

η_{st} —— 储能效率(%);

η_{re} —— 释能效率(%).

图 5 为铁轨重力储能系统能量流图, 由图中能量损耗可以看出, 影响系统效率的因素主要是载物及小车质量、车辆速度、坡度、斜坡高度及摩擦系数。之后基于 MATLAB 做了上述因素对效率影响的仿真, 由仿真结果可以得, 质量对系统效率几乎没有影响, 系统效率随着摩擦系数的增加而减小, 且幅度明显; 随着斜坡高度和坡度的增加而增加, 在坡度小于 9° , 高度小于 300 m 时显著增加, 当坡度超过 9° , 高度大于 300 m 时增幅开始放缓, 最后趋于平整。由此可见, 想要显著提高 ARES 系统效率指标, 选取平整的斜坡, 减小摩擦系数至关重要。同时, 选取 300 m 海拔差, 坡度 9° 的斜坡也能最具有效益地提高系统效率。

由于斜坡式储能系统利用了山地地形和轨道车辆, 因此其对选地有一定要求, 需要平整的山体来降低其摩擦系数, 且选地对储能点的建设规模施加了限制, 为此, ARES 开发了一种新技术, 可以更广泛地部署在海拔差异较小的斜坡站点上。ARES 通过用一个地面安装的高效绞盘驱动系统取代牵引驱动机车来完成这一改进, 这一新的重力动力储能系统设计被称为 ARESRidgeline 技术。其系统包括: 电缆绞盘、重载平板轨道、140 t 的重物、装载重物运输车、回程车。该系统能够低至 800 m 的海拔差上运行, 等级从 20% 到 50%, 能够在不同的位置上安装电缆驱动系统。通过采用互连的单绕绞盘系统, 取消了电缆滚筒分层, 电缆寿命延长到项目的寿命, 大大减少了项目的维护和电缆摩擦。通过机械地连接

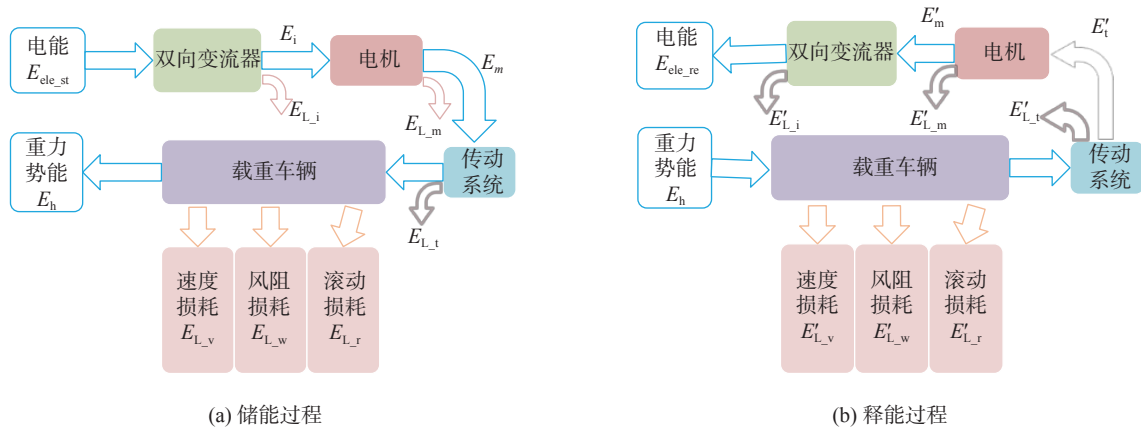


图 5 铁轨重力储能系统能量流图

Fig. 5 Energy flow diagram of a rail gravity energy storage system

相邻轨道上的上坡和下坡穿梭单元, 它们的权重相互抵消, 大大减少了空载车辆的功率损失。在这种设计下, 总体往返效率达到了 80%。

对于 ARES 所提出的模型方案, 国内也有许多专利研究^[21-23], 2014 年天津大学提出利用斜坡轨道和码垛机来实现重力储能的装置设计^[23], 该系统主要由高低海拔堆垛平台、斜坡铁轨、重物块、机电一体化装置和控制系统组成。铁轨端部安装有缆绳绞盘与电机相连, 牵引拖车爬坡。其利用多余电能驱动电机用缆绳牵引矿车或缆车将重物装载至高地势点, 电能转化为重力势能; 电能不足时, 矿车或缆车在地势低点卸载重物, 将重力势能转换至电能回馈电网。该系统提升效率可以达到 95%, 下降发电效率可以达到 92%, 系统总体效率可以达到 91%。

中国科学院电工研究所 2017 年提出了一种重载车辆爬坡储能方案, 采用永磁直线同步电机轮轨支撑结构分段储能^[24]。该储能系统主要由变流器、牵引电机轨道、铁路轨道、下游铁路道岔、下游车辆停放车站、运载车辆、调度控制系统等组成, 如图 6 所示。该装置通过不同的储能、释能方式进行车辆调度, 可以实现所有运载车辆同时上坡储能或下坡释能, 可以针对每一条铁路轨道安排运载车辆分时上坡储能或下坡释能。通过若干列运载车辆不同分时编组的运行策略, 实现储能或释放能量的灵活分配。且储能自耗率小, 效率更高, 设备寿命长, 维护费用低, 适用于高功率、大容量场合。

由于山地矿车式重力储能系统容量小, 特别适合作用于可再生能源发电系统中作储能能源, 因此国内国外有相当多的研究关于混合储能容量规划的

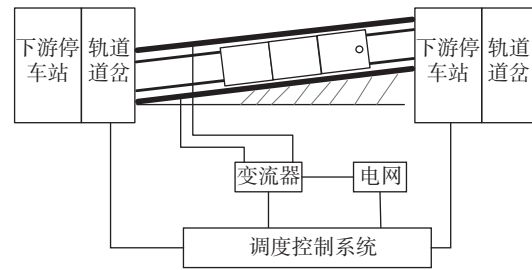


图 6 中国科学院铁轨储能系统图

Fig. 6 Diagram of the railway energy storage system of Chinese Academy of Sciences

问题, 研究其经济效益^[21, 25-27]。文献 [28-30] 对基于山体重力储能的风光储系统进行了多容量的配置优化, 建立了其规划模型的目标函数:

$$\min C_{\text{total}} = \min(C_{\text{IN}} + C_{\text{OM}} + C_{\text{BE}} - C_{\text{SE}} - C_{\text{EP}}) \quad (6)$$

式中:

- C_{total} ——混合系统总成本(元);
- C_{OM} ——系统的运行维护成本(元);
- C_{BE} ——向电网购电的成本(元);
- C_{SE} ——向电网售电的成本(元);
- C_{IN} ——系统的初始成本(元);
- C_{EP} ——环保收益(元)。

再加入约束条件, 进行系统容量规划设计。同时, 将不同的储能方式与风光系统混合配置, 最后发现当考虑重力储能方式时, 系统的容量配置最优, 重力储能的风光储联合发电系统容量优化规划模型有一定经济性和可靠性。

2.2 山地缆车式

为了解决小岛屿和偏远地区, 以及电力成本高

的电力系统,对储能的需求小于 20 MW,每月或季节性存储需求的问题,奥地利 IASA 研究所 2019 年在 Energy 杂志上发表了一种山地缆绳索道结构 MGES^[15]。该装置的主要工作原理是:通过将沙子或砾石从下部存储站点运送到较高的存储站点,将能量作为势能存储。然后通过将沙子或砾石从上部存储地点降低到下部存储站点来发电。将沙子或砾石装载到储存容器中是通过地下加油站进行的,其中阀门释放储存在上部或下部存储地点的沙子或砾石。与抽水蓄能电站等传统的长期蓄水方法相比, MGES 对环境的影响很小。该系统储能容量设计为 0.5 ~ 20 MWh,发电功率为 0.5 ~ 5.0 MW,系统效率约为 85%,储能平准化成本为 0.323 ~ 0.647 元/kWh。这种储能系统利用了天然山坡、使用砂砾作为储能介质可以减少建造成本,但缆车运载能力较低,室外环境对缆车运行影响较大,如何实现稳定高效率的能量回收是此系统的研究难点^[31]。

电普瑞电力工程有限公司 2020 年提出利用传送链提升重物的方案^[32],减少了能量的中间变换环节,可长时间连续工作。利用山体落差进行储能结构稳定,没有倒塌风险,可以实现更大规模的动力储能。其系统结构如图 7 所示,其中包括:重物、传送装置和发电装置,传送装置与发电装置连接,重物设置于传送装置上;传送装置包括上行传送装置和下行传送装置,通过上行传送装置将重物从低处运送到高处,通过发电装置将机械能转换为电能,通过下行传送装置将重物从高处运送到低处,通过发电装

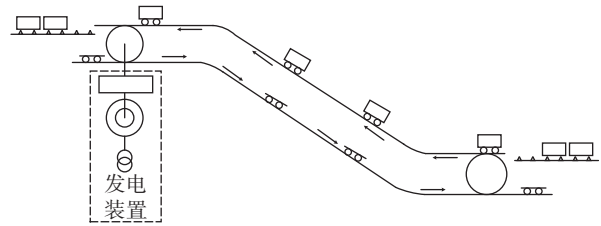


图 7 基于传送链的重力储能装置

Fig. 7 Gravity energy storage device based on transport chain

置将电能转换为机械能,本系统采用电机拖动传送链直接搬运重物,进行重力势能和电能的转换,减少了能量变换的中间环节,提高了重力储能系统的效率,降低了成本^[33]。

3 两种储能类型的对比

不同重力储能类型的性能对比如表 2 所示。

由表 2 可知,三种储能类型的效率相近,而山地矿车式重力储能由于其受地形条件影响很大(陡峭的地形会带来很大的摩擦损耗),故其效率的波动范围较大。与缆车式重力储能相比,山地矿车由于其需要平整土地并建设从下到上的完整轨道,初期投资成本很高,故其平准化度电成本远大于缆车式重力储能。而缆车式重力储能没有地形的限制,只需要建设高低海拔的两个平台及缆线架构,故其平准化度电成本较低。框架式重力储能由于其初期需要建设巨大的钢框架结构并打好地基,故其平准化度电成本远大于塔吊式,且重物与框架间的摩擦损耗也使得其效率低于塔吊式,但其结构稳定,维护成本低。

表 2 几种重力储能系统技术特点

Tab. 2 Technical characteristics of several gravity energy storage systems

重力储能类型	系统效率/%	平准化度电成本/[\$·(MWh) ⁻¹]	系统特点
框架式重力储能	85 ^[11]	110 ^[11]	可远程控制,结构稳定,抗灾性好,但建设成本高
斜坡式重力储能(矿车式)	75~86 ^[20]	142.55 ^[34]	装置简单,操作方便,但系统效率受坡度影响大
斜坡式重力储能(缆车式)	85 ^[15]	44~88 ^[15]	可以在任意海拔平面上建设,但缆车运载能力较低

4 结论

重力储能系统作为一种新型的储能系统,具有原理简单、形式多样、响应快速、选址方便、绿色环保等优点,是一种能够实现大规模储存和长时间储存的储能技术。通过对多种形式的重力储能系统的

研究现状进行详细介绍,总结了其技术特点和优势,结合我国基本情况对其应用前景进行了展望,得出以下结论:

1) 框架式重力储能结构稳定,受自然条件影响很小,但为建设其钢框架结构,初期投入的成本很高,也可远程控制,且可通过增加/减少通道的使用来调

整输出的电功率,适用于功率波动大的用户采用。

2)斜坡式重力储能系统利用山地资源,建设成本较低,操作简单。但其系统效率受坡度的影响很大,凹凸不平的地势带来的摩擦损耗很大。适用于多高山地形,山体平整的地区用户采用,也很适合与该地区的风能系统组成混合储能系统投入使用。山地缆车式重力储能选址灵活,可在任意海拔平面上建设,但由于运用缆车来搭载重物,其运载能力较低,适用于高山地形,且功率需求小的用户采用。

根据各种重力储能型式特点研究和分析,作出以下建议:

1)重力储能系统建设选址灵活,要求较低,可依靠发电站建设,例如风力发电站和太阳能发电站。当电网电力充沛,发电站的过剩电力可供重力储能系统进行储能,避免造成资源浪费;也可作为独立微网发电系统,为特定用户进行供电,其应用场景可根据用户需求灵活选取。

2)按照新型重力储能运行原理,上述几种新型重力储能技术应用过程中,均是重物块质量和其有效位移越大,储能级别和容量越高,但随之而来的工程风险也越来越高,如绳索悬重强度、地基及基坑稳定性、塔吊和绞车工作性能(如牵引力、牵引速度等)和重物块在牵引过程中力学完整性等,在建设重力储能系统时需要根据实际情况尽量选择悬重强度更高的绳索,稳定性更高的地基及基坑,性能更高的塔吊和绞车,并根据系统实际情况设定更高的安全标准,以确保系统的风险降到最低。

3)目前国内外关于重力储能系统的研究仍处于起步阶段,已有重力储能项目开始建设但均未实现并网运行,仍需加强对重力储能系统进行研究和实际应用,以期探寻到重力储能系统的稳定发展模式。建议可试制小重力储能样机,结构型式可为框架式,功率无须过大,可设计 kW 功率等级。

参考文献:

- [1] 韦媚媚, 项定先. 储能技术应用与发展趋势 [J]. *工业安全与环保*, 2023, 49(增刊 1): 4-12. DOI: 10.3969/j.issn.1001-425X.2023.z1.002.
- WEI M M, XIANG D X. Application and development trend of energy storage [J]. *Industrial safety and environmental protection*, 2023, 49(Suppl.1): 4-12. DOI: 10.3969/j.issn.1001-425X.2023.z1.002.
- [2] 杨闯, 朱曙荣, 边技超, 等. 新型物理储能技术路线分析 [J]. *电站辅机*, 2023, 44(2): 10-15. DOI: 10.3969/j.issn.1672-0210.2023.02.004.
- YANG C, ZHU S R, BIAN J C, et al. Analysis for new physical energy storage technology route [J]. *Power station auxiliary equipment*, 2023, 44(2): 10-15. DOI: 10.3969/j.issn.1672-0210.2023.02.004.
- [3] 王玉晴, 高志刚. 十大新型储能技术入选 近 30 家上市公司入局 [N]. 上海证券报, 2024-01-26(005). DOI: 10.28719/n.cnki.nshzj.2024.000397.
- WANG Y Q, GAO Z G. Ten new energy storage technologies were selected by nearly 30 listed companies [N]. *Shanghai Securities*, 2024-01-26(005). DOI: 10.28719/n.cnki.nshzj.2024.000397.
- [4] 郑冬冬, 戴彦德. 重力储能技术与我国发展新型储能的若干思考 [J]. *经济导刊*, 2023(7): 75-81.
- ZHENG D D, DAI Y D. The gravity energy storage technology and the development of new energy storage in China [J]. *Economic herald*, 2023(7): 75-81.
- [5] 胡乐松. 高效重力储能系统控制与调度优化方法研究 [D]. 济南: 山东大学, 2023.
- HU L S. Research on control and scheduling optimization method of high-efficiency gravity energy storage system [D]. Ji'nan: Shandong University, 2023.
- [6] 赫文豪, 李懂文, 杨东杰, 等. 新型重力储能技术研究现状与发展趋势 [J]. *大学物理实验*, 2022, 35(5): 1-7. DOI: 10.14139/j.cnki.cn22-1228.2022.05.001.
- HE W H, LI D W, YANG D J, et al. Research and development of novel gravity energy storage technologies [J]. *Physical experiment of college*, 2022, 35(5): 1-7. DOI: 10.14139/j.cnki.cn22-1228.2022.05.001.
- [7] MOORE S K. The ups and downs of gravity energy storage: startups are pioneering a radical new alternative to batteries for grid storage [J]. *IEEE spectrum*, 2021, 58(1): 38-39. DOI: 10.1109/MSPEC.2021.9311456.
- [8] 王玉莹, 杨晓斌, 陈君青, 等. 新型重力储能的原理效率及其选材选址分析 [J]. *工程研究-跨学科视野中的工程*, 2023, 15(3): 193-203. DOI: 10.3724/j.issn.1674-4969.23060601.
- WANG Y Y, YANG X B, CHEN J Q, et al. The principle efficiency of the new gravity energy storage and its site selection analysis [J]. *Journal of engineering studies*, 2023, 15(3): 193-203. DOI: 10.3724/j.issn.1674-4969.23060601.
- [9] DOVGALYUK O, YAKOVENKO I, BONDARENKO R. Prospects for gravity energy storage systems in Ukrainian electric power networks [C]//Proceedings of the 2021 IEEE 2nd KhPI Week on Advanced Technology. Kharkiv: IEEE, 2021: 622-627. DOI: 10.1109/KhPIWeek53812.2021.9569966.
- [10] 邱清泉, 罗晓悦, 林玉鑫, 等. 垂直式重力储能系统的研究进展和关键技术 [J]. *储能科学与技术*, 2024, 13(3): 934-945. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2023.0789.
- QIU Q Q, LUO X Y, LIN Y X, et al. Research progress and key

- technologies in vertical gravity energy storage systems [J]. *Energy storage science and technology*, 2024, 13(3): 934-945. DOI: [10.19799/j.cnki.2095-4239.2023.0789](https://doi.org/10.19799/j.cnki.2095-4239.2023.0789).
- [11] 刘晓辉, 袁康, 白亚奎, 等. 框架式重力储能系统经济性分析 [J]. *分布式能源*, 2023, 8(3): 47-53. DOI: [10.16513/j.2096-2185.DE.2308307](https://doi.org/10.16513/j.2096-2185.DE.2308307).
LIU X H, YUAN K, BAI Y K, et al. Economic analysis of frame gravity energy storage system [J]. *Distributed energy*, 2023, 8(3): 47-53. DOI: [10.16513/j.2096-2185.DE.2308307](https://doi.org/10.16513/j.2096-2185.DE.2308307).
- [12] 王柄根. 中国天楹: 推进首个重力储能项目建设 [J]. *股市动态分析*, 2023, (16):35.
WANG B G. China Tianying: promoting the construction of the first gravity energy storage project [J]. *Stock market trend analysis weekly*, 2023, (15):35
- [13] 郑开云, 梁宏, 蒋励. 一种重力储能系统及其使用方法: CN111692055A [P]. 2020-09-22.
ZHENG K Y, LIANG H, JIANG L. Gravity energy storage system and application method thereof: CN111692055A [P]. 2020-09-22.
- [14] 钟晓晖, 孙香宇, 荣晓敏, 等. 一种框架式重力储能系统及其控制方法: CN114977231A [P]. 2022-08-30.
ZHONG X H, SUN X Y, RONG X M, et al. Frame type gravity energy storage system and control method thereof: CN114977231A [P]. 2022-08-30.
- [15] HUNT J D, ZAKERI B, FALCHETTA G, et al. Mountain gravity energy storage: a new solution for closing the gap between existing short- and long-term storage technologies [J]. *Energy*, 2020, 190: 116419. DOI: [10.1016/j.energy.2019.116419](https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116419).
- [16] 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).
- [17] CAVA F, KELLY J, PEITZKE W, et al. Advanced rail energy storage: green energy storage for green energy [M]//LETCHER T M. *Storing Energy*. Amsterdam: Elsevier, 2016: 69-86. DOI: [10.1016/B978-0-12-803440-8.00004-X](https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803440-8.00004-X).
- [18] 彭晔. 轨道交通新能源开发利用潜力研究 [J]. *现代工业经济和信息化*, 2022, 12(7): 20-22. DOI: [10.16525/j.cnki.14-1362/n.2022.07.006](https://doi.org/10.16525/j.cnki.14-1362/n.2022.07.006).
PENG Y. Research on the development and utilization potential of new energy in rail transit [J]. *Modern industrial economy and informationization*, 2022, 12(7): 20-22. DOI: [10.16525/j.cnki.14-1362/n.2022.07.006](https://doi.org/10.16525/j.cnki.14-1362/n.2022.07.006).
- [19] BOTTENFIELD G, HATIPOGLU K, PANTA Y. Advanced rail energy and storage: analysis of potential implementations for the state of West Virginia [C]//Proceedings of 2018 North American Power Symposium. Fargo: IEEE, 2018: 1-4. DOI: [10.1109/NAPS.2018.8600665](https://doi.org/10.1109/NAPS.2018.8600665).
- [20] 秦婷婷, 周学志, 郭丁彰, 等. 铁轨重力储能系统效率影响因素研究 [J]. *储能科学与技术*, 2023, 12(3): 835-845. DOI: [10.19799/j.cnki.2095-4239.2022.0634](https://doi.org/10.19799/j.cnki.2095-4239.2022.0634).
QIN T T, ZHOU X Z, GUO D Z, et al. Study on factors influencing rail gravity energy storage system efficiency [J]. *Energy storage science and technology*, 2023, 12(3): 835-845. DOI: [10.19799/j.cnki.2095-4239.2022.0634](https://doi.org/10.19799/j.cnki.2095-4239.2022.0634).
- [21] 刘延龙, 陈晓光, 徐明宇, 等. 一种基于能量转换的山体重力储能系统斜坡运行控制方法: CN115653856A [P]. 2023-01-31.
LIU Y L, CHEN X G, XU M Y, et al. Mountain gravity energy storage system slope operation control method based on energy conversion: CN115653856A [P]. 2023-01-31.
- [22] 宋智, 王文龙, 胡远婷, 等. 一种基于光伏-山体重力储能联合发电系统的调度方法及电网分区配置方法: CN115940220A [P]. 2023-04-07.
SONG Z, WANG W L, HU Y T, et al. Scheduling method and power grid partition configuration method based on photovoltaic-mountain gravity energy storage combined power generation system: CN115940220A [P]. 2023-04-07.
- [23] 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.
LUO Z J, HUANG T, MEI J P, et al. Gravity energy storing system relying on massif: CN103867408A [P]. 2014-06-18.
- [24] 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.
XIAO L Y, SHI L M, WEI T Z, et al. Railway track carrier vehicle energy storage system: CN108437808A [P]. 2018-08-24.
- [25] 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).
- [26] 张陵, 南东亮, 赵启, 等. 基于重力储能的混合储能系统容量优化配置 [J]. *计算机仿真*, 2024, 41(1): 103-110. DOI: [10.3969/j.issn.1006-9348.2024.01.021](https://doi.org/10.3969/j.issn.1006-9348.2024.01.021).
ZHANG L, NAN D L, ZHAO Q, et al. Optimal configuration of hybrid energy storage system capacity based on gravity energy storage battery [J]. *Computer simulation*, 2024, 41(1): 103-110. DOI: [10.3969/j.issn.1006-9348.2024.01.021](https://doi.org/10.3969/j.issn.1006-9348.2024.01.021).
- [27] 向开端, 王辉, 彭婷婷, 等. 含混合储能的风光储系统容量优化配置 [J]. *科学技术与工程*, 2023, 23(31): 13415-13422. DOI: [10.3969/j.issn.1671-1815.2023.31.025](https://doi.org/10.3969/j.issn.1671-1815.2023.31.025).
XIANG K D, WANG H, PENG T T, et al. Optimal capacity allocation of wind-solar-storage system with hybrid energy storage [J]. *Science technology and engineering*, 2023, 23(31): 13415-13422. DOI: [10.3969/j.issn.1671-1815.2023.31.025](https://doi.org/10.3969/j.issn.1671-1815.2023.31.025).

- [28] 曾蓉. 山体储能技术及其与风电场联合出力的容量配置研究 [D]. 长沙: 长沙理工大学, 2016.
ZENG R. Research on mountain energy technology and its capacity configuration with wind farm [D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2016.
- [29] 刘志刚, 伍也凡, 肖振锋, 等. 基于重力储能的风光储系统多目标容量优化规划 [J]. *全球能源互联网*, 2021, 4(5): 464-475. DOI: [10.19705/j.cnki.issn2096-5125.2021.05.006](https://doi.org/10.19705/j.cnki.issn2096-5125.2021.05.006).
LIU Z G, WU Y F, XIAO Z F, et al. Multi-objective optimal capacity planning of the wind-photovoltaic-storage system based on gravity energy storage [J]. *Journal of global energy interconnection*, 2021, 4(5): 464-475. DOI: [10.19705/j.cnki.issn2096-5125.2021.05.006](https://doi.org/10.19705/j.cnki.issn2096-5125.2021.05.006).
- [30] 侯慧, 徐焘, 肖振锋, 等. 基于重力储能的风光储联合发电系统容量规划与评价 [J]. *电力系统保护与控制*, 2021, 49(17): 74-84. DOI: [10.19783/j.cnki.pspc.201449](https://doi.org/10.19783/j.cnki.pspc.201449).
HOU H, XU T, XIAO Z F, et al. Optimal capacity planning and evaluation of a wind-photovoltaic-storage hybrid power system based on gravity energy storage [J]. *Power system protection and control*, 2021, 49(17): 74-84. DOI: [10.19783/j.cnki.pspc.201449](https://doi.org/10.19783/j.cnki.pspc.201449).
- [31] 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).
- [32] 郭高朋, 查鲲鹏, 周亮, 等. 一种基于传送链的高效重力储能系统: CN112096580A [P]. 2020-12-18.
GUO G P, CHA K P, ZHOU L, et al. Efficient gravity energy storage system based on conveying chain: CN112096580A [P]. 2020-12-18.
- [33] 陈巨龙, 汪玉翔, 牟雪鹏, 等. 一种重力储能系统传送带式动能回收与机械冲击缓冲方法: CN116517798A [P]. 2023-08-01.
CHEN J L, WANG Y X, MOU X P, et al. Conveyor belt type kinetic energy recovery and mechanical shock buffering method for gravity energy storage system: CN116517798A [P]. 2023-08-01.
- [34] MOAZZAMI M, MORADI J, SHAHINZADEH H, et al. Optimal economic operation of microgrids integrating wind farms and advanced rail energy storage system [J]. *International journal of renewable energy research*, 2018, 8(2): 1155-1164. DOI: [10.20508/ijrer.v8i2.7056.g7401](https://doi.org/10.20508/ijrer.v8i2.7056.g7401).

作者简介:



袁照威

袁照威(第一作者, 通信作者)

1988-, 男, 高级工程师, 博士, 主要从事储能技术研究工作(e-mail) zwyuan6276@ceec.net.cn。

(编辑 徐嘉铖)