

引用格式: 曾小超, 史沁鹏, 洪剑锋, 等. 坚井式重力储能系统模型构建及功率优化 [J]. 南方能源建设, 2025, 12(5): 37-47. ZENG Xiaochao, SHI Qinpeng, HONG Jianfeng, et al. Model establishment and power optimization of vertical gravity energy storage system [J]. Southern energy construction, 2025, 12(5): 37-47. DOI: 10.16516/j.ceed.2024-319.

坚井式重力储能系统模型构建及功率优化

曾小超¹, 史沁鹏¹, 洪剑锋²[✉], 姜健宁¹, 曹君慈², 刘伟民¹

(1. 中国电力工程顾问集团华北电力设计院有限公司, 北京 100120;

2. 北京交通大学 电气工程学院, 北京 100044)

摘要: [目的]随着“碳达峰”“碳中和”目标的提出, 全球推动能源结构转型, 加快构建以新能源为主体的新型电力系统。新型能源并网的间歇性与不稳定性对储能技术提出了更高的要求。重力储能作为一种新型物理储能技术, 具有广阔发展前景, 但其输出功率缺乏稳定性, 功率曲线亟待优化。[方法]文章对坚井式重力储能系统的运行过程进行分析, 建立了物理模型、效率模型和功率模型。在此3种基本模型上建立了多目标优化的总模型, 以功率平稳、波动率最小为优化目标, 以3种模型结合实际情况设置约束条件, 得到重物在运行过程中的最优参数配置。[结果]经过储能系统的仿真验证, 所建立总模型在电网需求功率等级分别为30 MW、40 MW、50 MW时, 对输出功率曲线均有较好的优化效果, 优化后的波动率分别为3.9%、4.6%、8.7%。[结论]基于所提出的优化模型, 重物介质质量不变的前提下, 随着电网需求功率等级的提高, 输出功率波动率随之提高, 功率等级增加了20 MW的情况下, 功率波动率增加了4.8%; 电网需求功率等级不变的前提下, 随着重物介质质量的增加, 输出功率波动率随之降低, 当重物质量从80 t增加到了150 t时, 40 MW下的功率波动率减小4.2%。该模型有较好的可行性, 对日后坚井式重力储能工程项目的建设具有指导意义。

关键词: 多目标优化; 最优参数配置; 功率平稳; 坚井式重力储能; 新型电力系统

DOI: 10.16516/j.ceed.2024-319

文章编号: 2095-8676(2025)05-0037-11

CSTR: 32391.14.j.ceed.2024-319

中图分类号: TK02; TM91



论文二维码

Model Establishment and Power Optimization of Vertical Gravity Energy Storage System

ZENG Xiaochao¹, SHI Qinpeng¹, HONG Jianfeng²[✉], JIANG Jianning¹, CAO Junci², LIU Weimin¹

(1. North China Power Engineering Co., Ltd. of China Power Engineering Consulting Group, Beijing 100120, China;

2. School of Electrical Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: [Objective] With the proposal of the "carbon peak" and "carbon neutrality" goals, the global push for the transformation of the energy structure is accelerating the construction of new power systems dominated by renewable energy. The intermittency and instability of the new energy sources connected to the grid place higher demands on energy storage technologies. Gravity energy storage, as a novel physical energy storage technology, has broad prospects for development. However, its output power lacks stability, and the power curve urgently needs to be optimized. [Method] This paper analyzed the operation process of a shaft-based gravity energy storage system and established physical, efficiency, and power models. Based on these three fundamental models, an overall model for multi-objective optimization was developed with the goals of stabilizing power output and minimizing fluctuation rates. Constraints were set by combining the three models with real-world conditions to determine the optimal parameter configuration for the weight during operation. [Result] Simulation verification of the energy storage system shows that the established overall model effectively optimizes the output

收稿日期: 2024-09-17 修回日期: 2024-10-08 网络首发日期: 2024-10-24

基金项目: 中国能源建设股份有限公司重点科技项目“新型物理储能技术研究”(CEEC2022-ZDYF-06); 中国电力工程顾问集团华北电力设计院有限公司科技项目“基于坚井的重力储能技术研究”(JBGS2023-03)

power curve at the grid demand power levels of 30 MW, 40 MW, and 50 MW. The optimized fluctuation rates are 3.9%, 4.6% and 8.7%, respectively. **[Conclusion]** Based on the proposed optimization model, under the condition of constant medium mass of the weight, the output power fluctuation increases as the grid demand power level rises. When the power level increases by 20 MW, the power fluctuation rate increases by 4.8%. Under the condition of constant grid demand power level, the output power fluctuation rate decreases as the medium mass of the weight increases. When the mass of the weight increases from 80 t to 150 t, the power fluctuation rate at 40 MW decreases by 4.2%. The model demonstrates good feasibility and provides valuable guidance for future vertical gravity energy storage projects.

Key words: multi-objective optimization; optimal parameter configuration; stable power; vertical gravity energy storage; new power systems

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

随着“碳达峰”“碳中和”目标的提出，大力发展战略新能源，推进新型电力系统的建设已经成为未来发展的趋势^[1]。为此，越来越多的分布式电源开始接入电网。由于分布式电源发电的间歇性和波动性，势必会给电网带来不小的冲击，影响电网的电能质量。为保障电网安全稳定地运行，建立风光储混合系统成为了最有效的措施之一^[2-4]。储能技术可分为物理储能、化学储能、电磁储能、热储能，不同的储能技术应用场景与技术路线相异，需结合环境、成本等多种因素进行灵活选择^[5-6]。在众多储能技术中，重力储能技术由于其选址灵活、对环境污染小、寿命长等特点，近些年来备受关注，成为储能领域的研究热点之一^[7-8]。

重力储能技术方案主要有活塞式重力储能、竖井式重力储能、垂直式重力储能和斜坡式重力储能 4 种类型^[8-9]。在这 4 种类型的方案当中，竖井式重力储能通过对废弃矿井资源进行二次利用，建设成本低，且竖井占地面积小，稳定性好，安全系数高，具有良好的发展前景，在国内外建立了先进的示范性平台：国外 Gravitricity 公司于 2021 年在爱丁堡斯利港建造了示范性平台，该平台由 250 m 的钻井和两个 7 t 的重物组成，发电效率高达 90%，反应速度达到秒级，使用寿命长达 50 a^[10]；国内中国科学院提出了国内首个自研利用单梁门式提升机的竖井式重力储能装置，并开展了储能量级为 10 kW 的充放电性能测试。该装置采用了智能控制，可以自动化运行并在孤岛模式或并网模式下工作^[11]。

国内外对竖井式重力储能的研究尚处于起步阶段，技术尚未成熟，电力市场价格、资本利率等因

素也会影响重力储能系统的成本，与重力储能的商业化尚有距离，仍需进一步探索^[12-13]。英国的重力电池初创公司 Gravitricity 针对英国 Midlands 地区数以千计的废弃矿井首次提出竖井式重力储能方案，该方案利用废弃矿井，将重物与绞车相连悬挂在矿井中，利用重物的下落和抬升实现能量的存储和释放。此外，牛津大学的 Morstyn 等^[14] 通过对竖井式重力储能技术进行数学建模并分析数据，说明了竖井式重力储能技术的可靠性和经济性，可以循环利用废弃矿井，以此来节省建设成本。文献 [15] 建立了重力储能系统的储能容量、能量、功率密度、和平准化度电成本的计算模型，探讨了传统滚筒卷扬机和基于线性电机的多活塞提升机的两种提升方案的性能。Energy Vault 公司^[16] 提出了储能塔结构，储能介质采用混凝土砌块，利用起重机吊起或下放实现系统储能和释能，储能容量能达到 35 MWh，往返效率可达到 90%。国内方面，已经提出了多种竖井式重力储能方案。葛洲坝中科^[17] 于 2018 年提出了利用矿井提升机和废弃矿井提升和下落重物，以此来实现能量存储和释放的技术方案；中煤能源研究院^[18] 于 2021 年提出了配置有矿车，罐笼，并筒，电机及控制系统一体化的技术方案，该方案可以利用自动吊具或罐笼自动抬升多个重物，并设置有重物横移平台将上下仓的重物运送到指定位置。此外，中国科学院电工研究所^[19] 提出一种斜坡式储能方案，利用调度系统控制运载车辆在上游与下游车站之间往返，可大大提高斜坡重力储能的控制精度。天津大学提出在山体斜坡轨道的上仓与下仓增设码垛机实现储能介质的转移^[20]。储能技术的效率与经济性是评定系统性能的两个重要指标，文献 [21] 与文献 [22] 均建立了斜坡轨道式重力储能系统

模型, 分别探究了对于该储能方案的效率、再生制动能量的影响因素。文献[23]分析了框架式重力储能系统的经济性, 提出了较为完整的成本计算方法, 为框架式重力储能系统降低平准化度电成本提供了参考。

通过国内外的研究现状可知, 目前, 竖井式重力储能技术方案的研究正在如火如荼地进行。但大多数研究成果只停留在整个系统方案的设计及对装置本身性能的研究上, 对系统内部的运行模式及各部分的参数配置的研究还不够完善。文章在竖井式重力储能装置物理模型、效率模型、功率模型的基础上, 采用最优化理论进行多目标优化研究; 在满足模型的限制条件下, 以功率平稳、波动率最小为优化目标, 对竖井式重力储能的各部分参数进行优化, 得到单模块最优参数和配置, 为后续的工程建设提供理论依据。

1 问题描述及基本物理模型

1.1 问题描述

竖井式重力储能装置由矿井、电力电子变流装置、钢丝绳和绞盘所组成的抬升系统及重物块所组成, 如图1所示。其基本工作原理与抽水蓄能类似, 就是在电网电能充足时, 多余的电能驱动电机抬升重物, 将电能转换为重力势能存储; 当电网电能不足时, 将重物下放, 带动电机旋转发电, 将存储的重力势能转换为动能输送回电网。

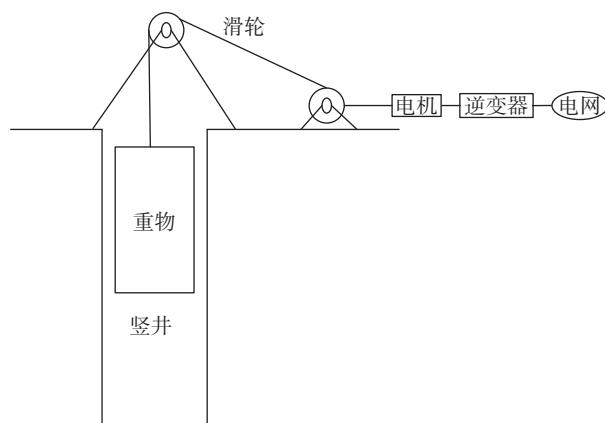


图1 竖井式重力储能装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of a vertical gravity energy storage device

重物提升系统主要由重力轮机、钢丝绳、提升容器、罐道等组成, 重物输送及装卸系统主要由装卸输送机、缓存输送机、巷道母车、巷道子车、转运母车等组成。在重力轮机的驱动下, 钢丝绳带动装有重物块的提升容器沿竖井罐道上下往复运动, 实现电能的存储与释放。装载重物块的罐笼连接钢绳的一端, 钢丝绳的另一端卷绕在钢丝绳绞盘上, 钢丝绳绞盘与电动发电一体机通过机械传动机构连接, 且电动发电一体机通过变压器与电网连接。

电动发电一体机可依靠电子技术自动实现发电模式和电力拖动模式的切换。当系统发电时, 重物下落带动电动发电一体机转轴旋转进行机械能向电能的转换。电动发电一体机既能在较大转速范围内输出恒定的力矩进行电能的存储, 也能在较大转速范围内实现电能的释放。发出的电能通过变压器和电力电子变流装置输出电网, 进行电能的补充。电网也可经变压器和电力电子变流装置输入储能系统实现电能的存储。

电力电子变流系统是实现储能发电系统与电网间的交直流转换功能, 并通过控制策略实现对储能发电系统的充放电管理、网侧负荷功率跟踪、电池储能系统充放电功率控制等功能; 重物块是能量存储的介质, 重物块高度的变化实现了能量之间的相互转化, 利用电动发电一体机对重物的抬升和下降实现能量转化这一过程。

从原理可以看出, 竖井式重力储能系统主要起到向电网输送电能, 削峰填谷的功能。为此, 重力储能要求能够满足电网的电能需求和电能质量, 这就需要储能系统能够输出平稳且满足电网所需求的功率。此外, 系统的储能效率也是评判系统的重要指标。在重力储能系统中, 发电效率既与系统内部损耗(电机损耗、电力电子装置变流损耗)有关, 也与重物块运动过程中所产生的物理损耗有关。因此, 文章最优化的目的就是确定合适的运行参数, 使得在满足物理条件、系统效率要求的前提下, 使得竖井式重力储能装置的输出电功率的平稳性最好, 功率波动率最低, 再根据运行参数确定整个装置的运行状态, 以此来实现多目标优化。

1.2 物理模型

竖井式重力储能装置通过重物的抬升和下落来实现能量的转换, 在下落运动过程中, 主要根据加速度的不同分为3段: 匀加速下落过程、匀速下落过程和匀减速下落过程3段, 如图2所示。

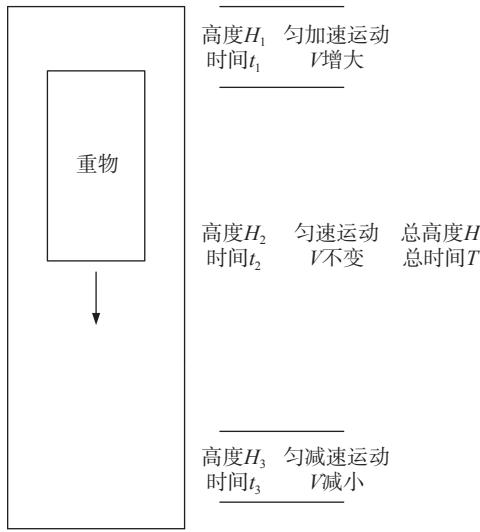


图 2 物理过程示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the physical process

根据运动学方程和牛顿第三定律对下落过程进行数学建模：

根据匀加速下落过程、匀速下落过程和匀减速下落过程的 3 段运动过程，其速度方程为：

$$v(t) = \begin{cases} a_1 t & 0 < t < t_1 \\ v_m & t_1 < t < t_1 + t_2 \\ a_2 t & t_1 + t_2 < t < t_1 + t_2 + t_3 \end{cases} \quad (1)$$

式中：

a_1 ——匀加速段加速度 (m/s²)；
 a_2 ——匀减速段加速度 (m/s²)；
 v_m ——匀速段速度，即速度最大值 (m/s)；
 t_1 、 t_2 、 t_3 ——匀加速段、匀速段和匀减速段的运动时间 (s)。

每段过程中的高度方程：

$$\begin{cases} H_1 = \frac{1}{2} a_1 t_1^2 \\ H_2 = v_m t_2 \\ H_3 = v_m - \frac{1}{2} a_2 t_3^2 \end{cases} \quad (2)$$

式中：

H_1 、 H_2 和 H_3 ——匀加速段、匀速段和匀减速段的运动路程 (m)。

每段过程中的时间方程：

$$\begin{cases} t_1 = v_m / a_1 \\ t_2 = H_2 / v_m \\ t_3 = v_m / a_2 \end{cases} \quad (3)$$

通过对下落过程进行物理建模，可以得到几个关键量的表达式，并利用物理模型搭建系统内部的效率模型和功率模型。

2 系统模型建立

2.1 效率模型

系统效率是衡量重力储能系统的一个重要指标，直接关系到经济效益和系统性能。重物块在运动下落过程中，主要受到空气阻力和内壁摩擦力的阻碍，产生风阻损耗和摩擦损耗。

风阻损耗的大小主要与重物块形状、运行速度有关，其表达式为：

$$E_{Lw} = \int_0^T \frac{1}{2} C_w A \rho v^3 dt \quad (4)$$

式中：

A ——迎风面积 (m²)；
 ρ ——空气密度 (kg/m³)；
 C_w ——阻力系数。

空气密度 ρ 与大气压和温度有关，其表达式为：

$$\rho = 1.293 \times \frac{P_2}{P_1} \times \frac{273}{T} \quad (5)$$

式中：

P_2 ——实际压力 (Pa)；
 P_1 ——标准大气压， 1.013×10^5 Pa；
 T ——热力学温度 (K)。

C_w 阻力系数可查表得到，根据实际情况不同取值不同，与下落物体的形状有关。

重物下落与框架内轨道接触，会产生摩擦损耗，该摩擦力大小为一个常量，与实际工况有关，用 f_s 表示，则运动过程中摩擦损耗：

$$E_{Ls} = f_s H \quad (6)$$

除了重物块在运动过程中的损耗外，还有很大的一部分损耗来源于系统内部，包括电机损耗、齿轮箱损耗和变流器损耗。

1) 电机损耗

电机在运行过程中产生大量的热量会导致电机温升过高，从而影响电机正常运行。电机温升的主要原因是来自电机内部的损耗问题，电机中的损耗主要包括铜损、铁损、机械损耗和杂散损耗四种类型。电机损耗与速度、电机转矩有关，电机效率用

函数表示 $\eta_G(v, T_e)$, 文章中取为 96%^[22]。

2) 变流器损耗

重力储能装置中电能变换部分的变流器也存在一定效率损耗: 变流器在将电能从一种形式转换为另一种形式的过程中, 会有一定的能量损失。这部分损耗主要来自电子元件的导通和开关过程中产生的导通损耗、开关损耗等。变流器损耗与功率、电压有关, 变流器效率用函数表示 $\eta_{inv}(P, U)$, 取 95%^[22]。

3) 齿轮箱损耗

制造齿轮的材料不是刚体, 不可避免存在弹性变形, 在反复弹性变形时就要消耗能量; 而且弹性变形使得齿轮啮合不再是理论上的纯滚动, 就会存在滑动摩擦。运动过程中产生损耗, 齿轮箱损耗与选型有关, 是个常量, 齿轮箱效率用 η_{motor} 表示, 取 92%^[22]。

综合上述损耗, 系统的发电效率可表示为:

$$\eta = \frac{mgH - f_s H - \int_0^T \frac{1}{2} C_w A \rho v^3 dt}{mgH} \eta_{motor} \eta_{inv} \eta_G \quad (7)$$

式中:

m ——重物块的质量 (kg);

T ——重物块下落过程的总时间 (s);

H ——竖井高度 (m)。

2.2 功率模型

重物下落过程中所产生的电功率大小由速度和牵引力所决定, 根据物理学方程:

整体过程中的牵引力:

$$F = mg + ma \quad (8)$$

式中:

F ——重物块所受钢丝绳的拉力 (N);

a ——重物块运动过程中的加速度 (m/s^2)。

下落过程中的瞬时功率:

$$P = F(t)V(t) \quad (9)$$

由此推断出重物下落过程中整体功率方程:

$$P = Fv = \begin{cases} m(g - a_1)a_1 t_1 & 0 < t < t_1 \\ mgv_1 & t_1 < t < t_1 + t_2 \\ m(g + a_2)(v_1 - a_2(t - t_1 - t_2)) & t_1 + t_2 < t < T \end{cases} \quad (10)$$

功率曲线如图 3 所示, 整个功率变化过程分为 3 部分, 与速度曲线趋同。在匀加速段, 功率匀速

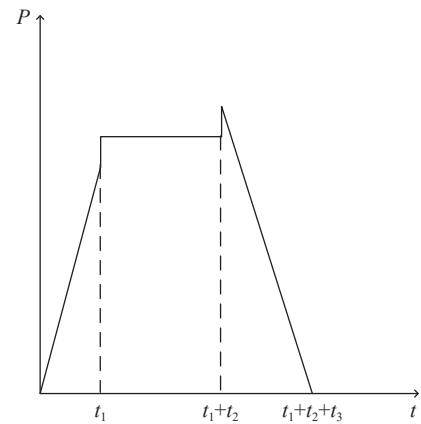


图 3 功率曲线简图

Fig. 3 Simplified diagram of power curve

上升, t_1 时刻由于拉力发生突变, 功率也随着突变; 在匀速段, 功率稳定输出; 在匀减速段, 功率再次发生突变后匀速下降。由整体功率模型可以看出, 在重物下落过程中, 功率的变化幅度很大。电网所期望的重力储能系统应能输出平滑稳定的功率曲线。因此, 功率模型中采用多个通道的功率叠加补偿的方法。采用多个竖井式重力储能子系统进行功率叠加, 每个竖井式重力储能系统之间开始输出功率的时间相互错开再进行每个子系统的功率叠加, 以此来达到对功率曲线进行补偿的目的, 达到输出平稳功率曲线的效果。

在系统实际运行过程中, 还需要考虑重物块拆卸和装运的时间, 因此, 功率补偿更为重要, 输出平稳的功率, 这也成为多目标优化的限制条件之一。为此, 文章采用错相叠加的方法。由于两个通道的功率曲线进行叠加可以形成具有波峰和波谷的波形。将波峰波谷进行叠加就可以实现功率补偿的作用, 选取通道数为 4, 在 4 个通道数的情况下, 将 2 个通道分为一组, 一组中 2 个通道只要能实现叠加出波峰波谷时间相等的波形, 就可以通过平移得到另一组的图像, 从而实现两者之间的波形互补, 平滑功率曲线。

施加以下限制条件, 即加速段与减速段加速度相等:

$$a_1 = a_2 \quad (11)$$

叠加图形中波谷和波峰长度相等, 波谷的时间为装卸重物时间, 装卸重物时系统停止输出功率, 功率最低。波峰时间为两条功率曲线匀加速和匀减

速段叠加互补的时间和经过相位延时叠加后匀速段的时间：

$$t_s = t_x + t_1 \quad (12)$$

式中：

t_s ——装卸重物时间 (s)；

x ——一组功率曲线的相位差。

再根据第一章中的物理学方程，整理可以得到速度与加速度，高度间的限制条件：

$$v_m = \sqrt{(h a_1/3 + t_s^2 a_1^2/4) - t_s a_1/2} \quad (13)$$

再根据该条件得到其他 3 个通道电机的延时启动时间：

$$T_1 = t_s + t_1 \quad (14)$$

$$T_2 = t_2 - t_s \quad (15)$$

$$T_3 = t_1 + t_2 \quad (16)$$

式中：

T_1 、 T_2 、 T_3 ——第 2—4 台电机的延时启动时间 (s)。

图 4 的功率对比可以看出，引入上面几个限制条件后，功率波动率显著降低，达到很好的效果。该条件应作为整个优化模型的约束条件。

3 功率优化模型及算例

3.1 优化模型

从上述所建立的物理模型、效率模型、功率模型可知，系统运行中各部分的参数之间是相互耦合的，需要采用优化算法对重物块升降速度曲线，重物块参数（总重量、尺寸及数量）进行优化，得到在电网适应性要求下的单模块最优配置参数。

优化目标：功率波动率是电网对储能系统的重要考核标准，储能系统的输出功率能力和系统效率也是主要的考核标准之一。以功率波动率最小为主要优化目标，将系统效率和系统输出功率两个优化目标转化为约束函数，对总模型进行多目标优化。在满足物理过程及系统效率的限制条件下，对重物块的升降速度曲线进行优化，在达到功率波动率最小的前提下得到重物块下落过程中的最优参数：

$$f(x) = \min \{\delta\} = (P_{\max} - P_{\min})/\bar{P} \quad (17)$$

式中：

P_{\max} ——功率最大值 (MW)；

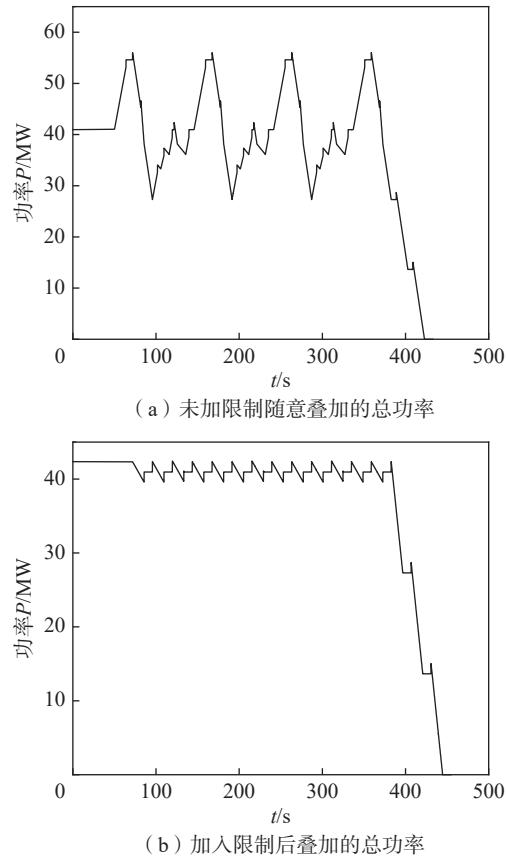


图 4 不同条件下的功率对比

Fig. 4 Power comparison under different conditions

P_{\min} ——功率最小值 (MW)；

\bar{P} ——平均功率 (MW)。

约束条件：根据前面的运动、功率和效率模型确定约束条件。重物块在下落的运动过程中，为满足三段式的运动过程（匀加速段，匀速段，匀减速段），加速度和匀速段的速度参数设置应受到竖井高度的限制：

$$H > \frac{1}{2} a_1 t_1^2 + \frac{1}{2} a_2 t_3^2 \quad (18)$$

$$H > \frac{V_m^2}{2a_1} + \frac{V_m^2}{2a_2} \quad (19)$$

根据功率模型，为保持功率波动率比较小，速度、竖井高度和加速度需满足以下限制：

$$a_1 = a_2 \quad (20)$$

$$v_m = \sqrt{(h a_1/3 + t_s^2 a_1^2/4) - t_s a_1/2} \quad (21)$$

各个通道的延时时间应满足：

$$\begin{cases} T_1 = t_q + t_1 \\ T_2 = t_2 - t_q \\ T_3 = t_1 + t_2 \end{cases} \quad (22)$$

竖井式重力储能系统在向电网输送电能时应满足电网的功率需求:

$$P_0 \geq P_g \quad (23)$$

重力储能装置的系统效率应不低于 75%:

$$\eta \geq 75\% \quad (24)$$

考虑实际的系统运行情况, 重物块的拆卸和装运时间应满足:

$$10 \text{ s} \leq t_q \leq 50 \text{ s} \quad (25)$$

在重物块下落的物理过程中, 为符合安全规定, 矿井提升系统的提升速度必须满足:

$$v_m \leq 0.6 \sqrt{H} \quad (26)$$

考虑到实际工程建设, 对竖井高度加以限制:

$$600 \leq H \leq 1200 \quad (27)$$

考虑机械反应时间和实际情况, 加速度不能过大, 应满足:

$$\begin{cases} a_1 \leq 1.4 \text{ m/s}^2 \\ a_2 \leq 1.4 \text{ m/s}^2 \end{cases} \quad (28)$$

在确定好目标函数和限制条件后, 采用遗传算法对多目标优化模型进行求解。遗传算法是模仿达尔文进化论的一种多目标优化算法, 包括变异、遗传、自然选择三大要素, 其可以经过迭代产生一代代的个体, 使得越来越接近于目标函数值, 更容易得到全局最优解而不是局部最优解。

由于目标函数为非线性函数, 考虑到计算时间, 将初始种群数设为 200, 迭代数设为 40, 运用遗传算法对重物块运动参数进行优化, 从而得到一组合适的运动曲线对应更低的功率波动率。

重力储能系统需要与电网进行能量交换, 补偿电网的电能。为此, 多目标优化的思路是给定电网所需的功率, 经过优化后得到一组优化参数使得功率波动率最小。随后, 通过给定不同的功率来测试多目标优化模型对参数的优化, 观察功率波动率的变化情况及优化效果。

3.2 算例分析

功率波动率是新能源系统、储能系统并网的重要考核指标, 大的功率波动会给电网带来冲击, 恶化电能质量。风电由于其发电的不确定性, 对风电功率波动的平滑和抑制是目前新能源领域主要的研究对象之一^[24]。对重力储能系统来说, 功率优化和平滑至关重要。因此, 在多目标优化模型的基础上,

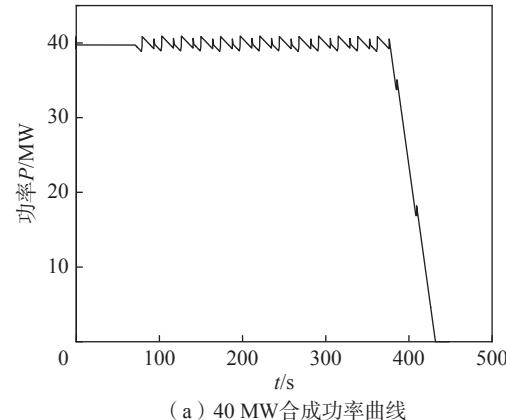
以波动率为主要优化目标, 进行不同功率需求和不同重物质量下的参数配置优化求解。

3.2.1 不同功率需求下的优化

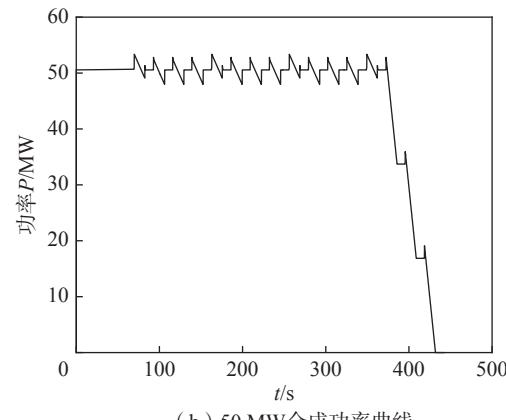
设定电网需要的功率为 40 MW, 重物块的质量确定为 100 t, 采用遗传算法对重物块的装卸时间 t_s 、竖井高度 H 、重物块下落的速度最大值 v_m 、加速度 a 进行优化。

优化后参数为 $v_m=17.7275 \text{ m/s}$, $a_1=a_2=0.7617 \text{ m/s}^2$, 竖井高度 $H=957.084 \text{ m}$, 装卸重物时间为 $t_s=16.0735 \text{ s}$, 优化后叠加功率如图 5 所示。从图 5 (a) 可以看出, 优化模型可以满足电网所需功率的要求, 并在该要求下能有效地优化出一组配置参数使得功率波动率较低, 达到功率稳定的要求。在 40 MW 功率需求下优化后功率波动率达到 4.6%。

其他条件不变, 改变电网需求功率为 50 MW, 对模型进行优化, 优化后得到参数配置: $v_m=17.2 \text{ m/s}$, $a_1=a_2=1.3 \text{ m/s}^2$, 竖井高度 $H=1200 \text{ m}$, 装



(a) 40 MW合成功率曲线



(b) 50 MW合成功率曲线

图 5 设定电网所需功率下的功率叠加波形

Fig. 5 Power superposition waveform of power required by the grid

卸重物时间为 $t_s=10.2$ s。叠加功率如图 5 (b) 所示, 可以看出, 优化模型也能达到 50 MW 功率需求, 在该需求下, 功率波动率为 8.7%。图 5 中两图对比可以看出, 随着功率等级的增大, 波动率也随之增大。在前文的功率模型中可以知道系统的发电功率与速度大小呈正相关。理想情况下 4 个通道的功率叠加最大值为四段匀速段功率叠加。40 MW, 50 MW 下匀速段功率叠加大小相同, 40 MW 时经功率平滑优化叠加后功率更低, 功率损失更大。因此更高的功率需求具有更高的波动率, 但却有更小的功率损失率。

经过上述的对比, 改变电网需求功率为 30 MW, 其他条件不变, 对模型进行优化, 优化后得到参数配置: $v_m=10.376$ m/s, $a_1=a_2=0.5945$ m/s², 竖井高度 $H=877.1$ m, 装卸重物时间为 $t_s=11$ s, 叠加功率如图 6 所示。

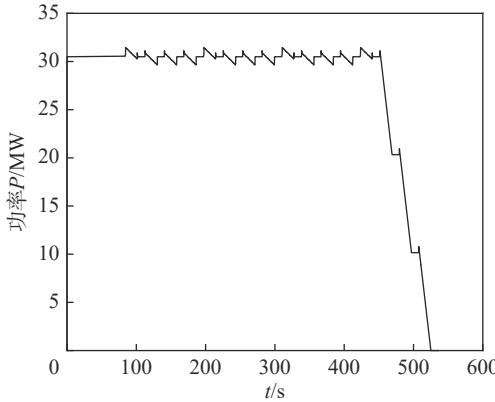


图 6 设定电网所需 30 MW 功率下的功率叠加波形

Fig. 6 Power superposition waveform at 30 MW of power required by the grid

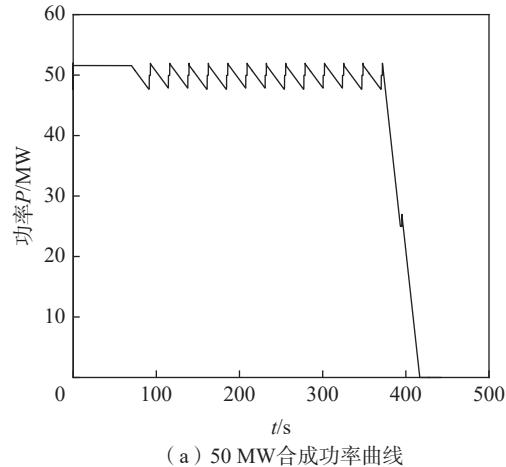
由图 5 和图 6 可以看出, 对于各种功率需求, 优化模型都能达到要求, 并输出平稳的功率曲线。30 MW 下的功率波动率为 3.9%, 由此可知随着功率的增大, 波动率也逐渐增大。

3.2.2 不同重物质量下的优化

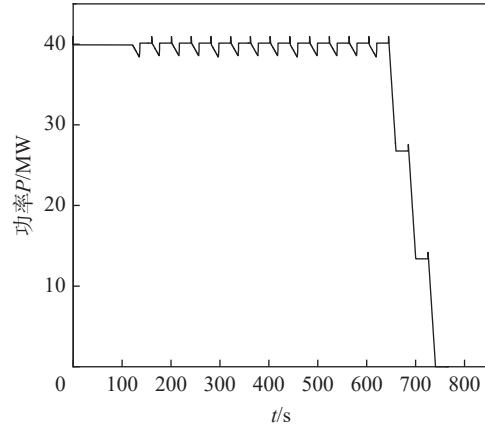
改变重物的质量为 150 t, 优化功率需求在 50 MW、40 MW、30 MW 下的重物块运动参数, 得到 50 MW 下的参数配置: $v_m=16.99$ m/s, $a_1=a_2=0.788$ m/s², 竖井高度 $H=786.7$ m, 装卸重物时间为 $t_s=25.05$ s; 40 MW 下的参数配置: $v_m=9.1$ m/s, $a_1=a_2=0.6$ m/s², 竖井高度 $H=1092.8$ m, 装卸重物时间为 $t_s=26.1$ s; 得到 30 MW 下的参数配置: $v_m=$

6.9 m/s, $a_1=a_2=0.4$ m/s², 竖井高度 $H=731.1$ m, 装卸重物时间为 $t_s=18.37$ s, 合成功率如图 7 所示。

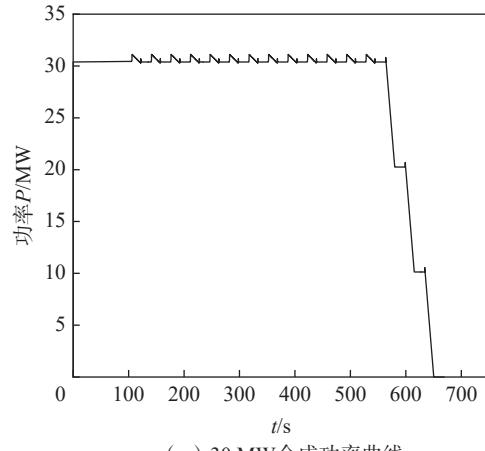
图 7 中 50 MW 时功率波动率为 8.1%, 40 MW 时功率波动率为 4.5%, 30 MW 时功率波动率为



(a) 50 MW合成功率曲线



(b) 40 MW合成功率曲线



(c) 30 MW合成功率曲线

图 7 不同功率需求下 150 t 重物合成功率曲线

Fig. 7 Synthetic power curve of 150 t weight under different power requirements

3.1%。可以看出, 在改变重物质量的情况下, 波动率随功率需求的增大而增大。与 100 t 时的情况做对比, 可以看出, 在其他条件不变时, 增大重物块质量可以减小波动率, 这是由于输出功率大小与重物块质量成正比。在增大重物块质量的情况下, 与原来相比, 其效果相当于减小了功率需求, 依据功率需求越小波动率越小的结论, 功率波动率也随之减小。

改变重物的质量为 80 t, 优化功率需求在 50 MW、40 MW、30 MW 下的重物块运动参数, 得到 50 MW 下的参数配置: $v_m=21.4$ m/s, $a_1=a_2=1.5$ m/s², 竖井高度 $H=1272$ m, 装卸重物时间为 $t_s=11.5$ s; 40 MW 下的参数配置: $v_m=17.2$ m/s, $a_1=a_2=1.3$ m/s², 竖井高度 $H=1199.7$ m, 装卸重物时间为 $t_s=10.1$ s; 30 MW 下的参数配置: $v_m=17.1$ m/s, $a_1=a_2=0.9323$ m/s², 竖井高度 $H=713.1065$ m, 装卸重物时间为 $t_s=13.3678$ s, 合成功率如图 8 所示。

图 8 中 40 MW 时功率波动率为 8.7%, 30 MW 时功率波动率为 6.1%, 50 MW 时功率波动率为 17.5%。与前面算例对比可以看出, 在减小重物质量的情况下, 功率波动率也增大, 且功率越大波动率增加的幅度越大。这是由于输出功率大小与重物块质量成正比。在减小重物块质量的情况下, 与原来相比, 其效果相当于增大了功率需求, 依据功率需求越大波动率越大的结论, 功率波动率也随之增大。

4 结论

针对目前竖井式重力储能系统运行特性研究较少的现状, 建立了竖井式重力储能系统的优化总模型。该模型是为了在满足电网功率需求的前提下, 优化重物的运行参数, 达到电网对稳定功率波动的要求。文章先从系统特性入手, 建立了物理运动模型、效率模型和功率模型, 在此模型基础上搭建了功率优化模型。并通过实际算例对模型进行验证, 模拟了电网需求在 30 MW、40 MW、50 MW 的情况下的优化结果, 同时对不同重物质量下进行优化, 对结果进行对比分析, 得出以下结论:

1) 对重力储能系统进行建模并运用最优化理论进行优化, 可实现平稳的功率输出, 以满足不同等级的功率需求。

2) 在相同重物质量的情况下, 功率需求越

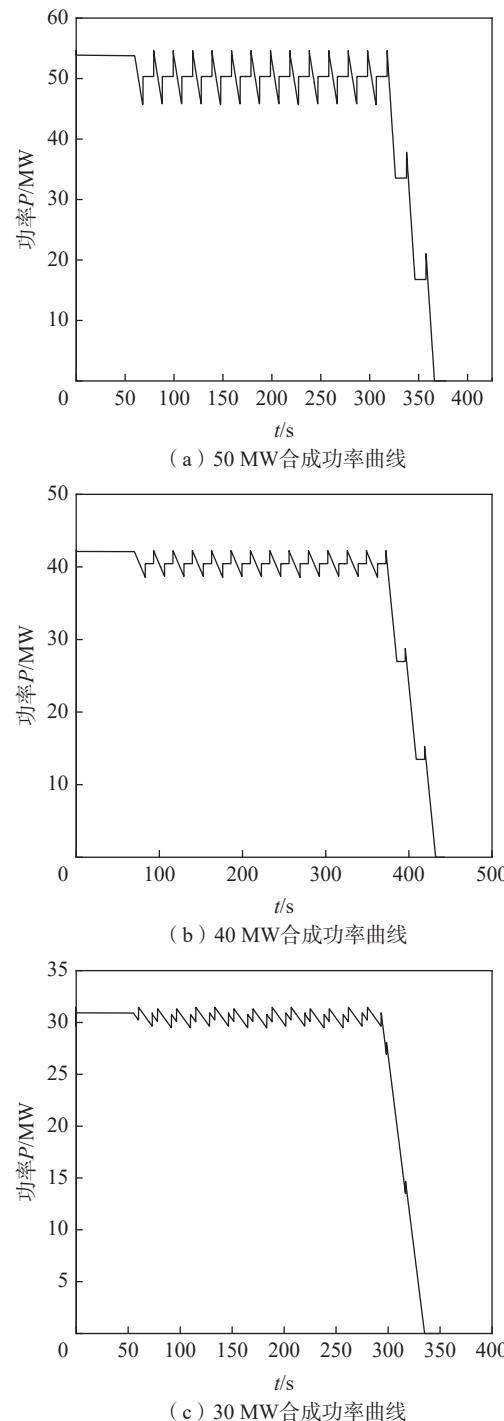


图 8 不同功率需求下 80 t 重物合成功率曲线
Fig. 8 Synthetic power curves of 80 t weight under different power requirements

高, 功率波动率越大, 功率波动率与功率需求呈正相关。

3) 在相同功率需求的情况下, 重物质量越高, 功率波动率越小, 功率波动率与功率需求呈负相关。

重物质量的增加相当于在原来质量的基础上减小了功率需求, 从而使波动率呈现相反的变化趋势。

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](https://doi.org/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.): 4-12. DOI: [10.3969/j.issn.1001-425X.2023.z1.002](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-425X.2023.z1.002).
- [2] 侯慧, 徐焘, 肖振峰, 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).
- [3] 王立强, 王琪. 风光储系统参与电网调频与消纳技术研究 [J]. *内蒙古电力技术*, 2024, 42(1): 9-14. DOI: [10.19929/j.cnki.nmgdls.2024.0002](https://doi.org/10.19929/j.cnki.nmgdls.2024.0002).
- WANG L Q, WANG Q. Research on participation of wind-solar-storage system in power grid frequency regulation and consumption technology [J]. *Inner Mongolia electric power*, 2024, 42(1): 9-14. DOI: [10.19929/j.cnki.nmgdls.2024.0002](https://doi.org/10.19929/j.cnki.nmgdls.2024.0002).
- [4] 赵懿, 杨俊丰, 庞建霞, 等. 考虑混合储能主动参与风光储电站的功率分配与调频策略 [J]. *电力建设*, 2024, 45(7): 144-155. DOI: [10.12204/j.issn.1000-7229.2024.07.013](https://doi.org/10.12204/j.issn.1000-7229.2024.07.013).
- ZHAO Y, YANG J F, PANG J X, et al. Power-distribution and frequency-regulation strategies for wind-solar power stations actively supported by hybrid-energy storage [J]. *Electric power construction*, 2024, 45(7): 144-155. DOI: [10.12204/j.issn.1000-7229.2024.07.013](https://doi.org/10.12204/j.issn.1000-7229.2024.07.013).
- [5] 杨闯, 朱曙光, 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](https://doi.org/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](https://doi.org/10.3969/j.issn.1672-0210.2023.02.004).
- [6] 薛福, 马晓明, 游焰军. 储能技术类型及其应用发展综述 [J]. *综合智慧能源*, 2023, 45(9): 48-58. DOI: [10.3969/j.issn.2097-0706.2023.09.007](https://doi.org/10.3969/j.issn.2097-0706.2023.09.007).
- XUE F, MA X M, YOU Y J. Energy storage technologies and their applications and development [J]. *Integrated intelligent energy*, 2023, 45(9): 48-58. DOI: [10.3969/j.issn.2097-0706.2023.09.007](https://doi.org/10.3969/j.issn.2097-0706.2023.09.007).
- [7] 夏焱, 万继方, 李景翠, 等. 重力储能技术研究进展 [J]. *新能源进展*, 2022, 10(3): 258-264. DOI: [10.3969/j.issn.2095-560X.2022.03.010](https://doi.org/10.3969/j.issn.2095-560X.2022.03.010).
- XIA Y, WAN J F, LI J C, et al. Research progress of gravity energy storage technology [J]. *Advances in new and renewable energy*, 2022, 10(3): 258-264. DOI: [10.3969/j.issn.2095-560X.2022.03.010](https://doi.org/10.3969/j.issn.2095-560X.2022.03.010).
- [8] 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).
- [9] 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).
- [10] FRAENKEL P, WRIGHT M. Apparatus and method for electrical energy storage: GB2518125A [P]. 2015-03-18.
- [11] 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](https://doi.org/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).
- [12] 陈云良, 刘旻, 凡家异, 等. 重力储能发电现状、技术构想及关键问题 [J]. *工程科学与技术*, 2022, 54(1): 97-105. DOI: [10.15961/j.jsuse.202101140](https://doi.org/10.15961/j.jsuse.202101140).
- CHEN Y L, LIU M, FAN J Y, et al. Present situation, technology conceptualization and key problem for gravity energy storage [J]. *Advanced engineering sciences*, 2022, 54(1): 97-105. DOI: [10.15961/j.jsuse.202101140](https://doi.org/10.15961/j.jsuse.202101140).
- [13] 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](https://doi.org/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](https://doi.org/10.14139/j.cnki.cn22-1228.2022.05.001).
- [14] MORSTYN T, CHILCOTT M, MCCULLOCH M D. Gravity energy storage with suspended weights for abandoned mine shafts [J]. *Applied energy*, 2019, 239: 201-206. DOI: [10.1016/j.apenergy.2019.01.226](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.01.226).
- [15] BOTHA C D, KAMPER M J. Capability study of dry gravity energy storage [J]. *Journal of energy storage*, 2019, 23: 159-174. DOI: [10.1016/j.est.2019.03.015](https://doi.org/10.1016/j.est.2019.03.015).
- [16] 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: [10.1016/j.est.2019.03.015](https://doi.org/10.1016/j.est.2019.03.015).

- 1109/MSPEC.2021.9311456.
- [17] 张正秋, 武安, 张海川. 一种依托煤矿矿井的重力储能系统: 209676010U [P]. 2019-12-22.
- ZHANG Z Q, WU A, ZHANG H C. Gravity energy storage system depending on coal mine: 209676010U [P]. 2019-12-22.
- [18] 宋立平, 董宝光, 王东军, 等. 一种基于矿井立井筒、提升、运输系统的重力储能系统: 209536772U [P]. 2019-10-25.
- SONG L P, DONG B G, WANG D J, et al. Gravity energy storage system based on mine shaft erecting, lifting and transporting system: 209536772U [P]. 2019-10-25.
- [19] 肖立业, 史黎明, 韦统振, 等. 铁路轨道运载车辆储能系统: 108437808A [P]. 2018-08-24.
- XIAO L Y, SHI L M, WEI T Z, et al. Railway track carrier vehicle energy storage system: 108437808A [P]. 2018-08-24.
- [20] 罗振军, 黄田, 梅江平, 等. 依托山体的重力储能系统: 103867408A [P]. 2014-06-18.
- LUO Z J, HUANG T, MEI J P, et al. Gravity energy storing system relying on massif: 103867408A [P]. 2014-06-18.
- [21] 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.
- 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.
- [22] SALEH M, DUTTA O, ESA Y, et al. Quantitative analysis of regenerative energy in electric rail traction systems [C]// Anon. Proceedings of 2017 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, Cincinnati, OH, USA, October 1-5, 2017. Cincinnati: IEEE, 2017: 2-7. DOI: 10.1109/IAS.2017.8101774.
- [23] 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.
- 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.
- [24] 靳雯皓, 刘继春. 平滑风电功率波动的混合储能系统容量优化配置 [J]. 分布式能源, 2017, 2(2): 32-38. DOI: 10.16513/j.cnki.10-1427/tk.2017.02.005.
- JIN W H, LIU J C. Capacity optimization configuration of hybrid energy storage system for smoothing wind power fluctuation [J]. Distributed energy, 2017, 2(2): 32-38. DOI: 10.16513/j.cnki.10-1427/tk.2017.02.005.

作者简介:



曾小超 (第一作者)

1970-, 男, 正高级工程师, 学士, 长期从事火电、新型储能等电力工程设计工作
(e-mail) zengxc@ncpe.com.cn.

曾小超



史沁鹏

1979-, 男, 正高级工程师, 硕士, 长期从事储能技术研究工作
(e-mail) shiqp@ncpe.com.cn.

洪剑锋 (通信作者)

1988-, 男, 副教授, 博士, 长期从事新型储能系统技术、电气传动控制研究工作
(e-mail) jfhong@bjtu.edu.cn.

洪剑锋

姜健宁

1989-, 男, 高级工程师, 学士, 长期从事储能技术研究工作
(e-mail) jiangjn@ncpe.com.cn.

曹君慈

1979-, 男, 教授, 博士, 长期从事新型储能技术、电气传动技术等研究工作
(e-mail) jccao@bjtu.edu.cn.

刘伟民

1998-, 男, 硕士, 长期从事机械、新型储能等电力工程设计工作
(e-mail) liuwm@ncpe.com.cn.

(编辑 徐嘉铖)