

竖井式重力储能系统发电效率影响因素

史沁鹏¹, 郭茹¹, 洪剑锋^{2,✉}, 王增晖¹, 李军³, 王昊¹, 曾小超¹, 姜健宁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;

3. 中能建数字科技集团有限公司, 北京, 100022)

摘要: [目的] 竖井式重力储能技术作为新型储能的一种, 具有对环境污染小、建设成本低、效率高等独特优势, 应用前景广泛, 但对于系统本身的发电特性及影响因素的研究仍不完善。竖井式重力储能系统的发电效率是储能系统的重要指标之一。[方法] 文章通过对竖井式重力储能系统的效率模型进行数学建模, 研究了在 3 种不同的重物块下落曲线下的效率影响因素, 并通过仿真实验探究这些因素对系统发电效率的影响趋势, 再对 3 种类型的速度曲线的效率特性进行对比分析。[结果] 研究表明, 下落速度对系统效率的影响十分显著, 适当降低速度可以提高发电效率; 竖井高度和重物块质量对发电效率的影响较小。3 种类型的速度曲线对比中, 梯形速度曲线和三角形速度的发电效率受其他因素的影响较小, 抛物线形速度曲线受其他因素的影响更敏感, 发电效率也相对更小, 梯形速度曲线在相同条件下的系统效率最大; 在大重量的重物块的前提下, 3 种速度曲线类型下的发电效率受其他因素的影响都很小。[结论] 由此, 采用大重量的重物块, 降低重物块的最大下落速度, 运用梯形速度曲线可以显著提高发电效率, 达到更好的系统性能。

关键词: 重力储能; 系统效率; 速度曲线

中图分类号: TM756.2

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2024)

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

Influencing Factors of Generation Efficiency of Vertical Gravity Energy Storage

SHI Qinpeng¹, GUO Ru¹, HONG Jianfeng^{2,✉}, WANG Zenghui¹, LI Jun³, WANG Hao¹, ZENG Xiaochao¹, JIANG Jianing¹

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

2. Beijing Jiaotong University, Department of Electrical Engineering, Beijing 100091, China;

3. China Energy Digital Technology Group Co., Ltd., Beijing 100022, China)

Abstract: [Introduction] As a new type of energy storage means, shaft-type gravity energy storage technology has unique advantages of low environmental pollution, low construction cost and high efficiency, and has a wide application prospect, but the research on the power generation characteristics and influencing factors of the system itself is still imperfect. The power generation efficiency of the shaft-type gravity energy storage system is one of the important indicators of the energy storage system. [Method] In this paper, through the mathematical modeling of the efficiency model of the shaft-type gravity energy storage system, the influencing factors of efficiency in case of three different heavy block fall curves were studied, and the influence trend of these factors on the power generation efficiency of the system was explored through simulation experiments, and then the efficiency characteristics of the three velocity curves were compared and analyzed. [Result] The results show that the falling speed has a significant effect on the efficiency of the system, and the power generation efficiency can be improved by reducing the speed appropriately. The height of the shaft and the mass of the heavy block have little effect on the efficiency of power generation. For the three velocity curves, the power generation efficiency of trapezoidal and triangular velocity curves was less affected by other factors, while the parabolic velocity curve was more sensitive to the influence of other factors, and the power generation efficiency was relatively smaller, and the trapezoidal velocity curve has the highest system

收稿日期: 2024-07-22 修回日期: 2024-08-17

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)

efficiency under the same conditions. Under the premise of heavy blocks with large weights, the power generation efficiency of the three velocity curves was less affected by other factors. [Conclusion] Therefore, using heavy blocks with large weights, reducing the maximum falling speed of heavy blocks, and adopting the trapezoidal velocity curve can significantly improve the power generation efficiency to achieve better system performance.

Key words: gravity energy storage; system efficiency; velocity curve

0 引言

随着“双碳目标”的提出,可再生能源的消费占比在不断提高。但由于受气候影响,太阳能、风能等可再生能源有较大的波动性,这些能源的接入会对电网产生较大的影响,影响电网的电能质量^[1]。因此,采用大容量、高效率的新能源、储能混合系统是不可避免的趋势,是实现分布式电源顺利接入电网,大力发展新型绿色可持续能源体系的有效保障^[2-3]。

以固体为储能介质的重力储能技术有选址灵活,对环境污染小等传统的抽水蓄能、电池储能技术所不具备的优势,近年来成为储能领域研究的热点之一^[4-5]。在斜坡式重力储能、活塞式重力储能等众多重力储能技术类型中,竖井式重力储能由于其占地面积小、建设成本低、安全性高等突出优势备受人们关注,具有良好的发展前景^[6-10]。

国内外对竖井式重力储能系统的研究尚处于起步阶段。竖井重力储能系统的技术方案由苏格兰 Gravitricity 公司针对英国 Midlands 地区数以千计的废弃矿井问题提出^[11],在爱丁堡利斯港口建设了示范性平台并进行实验测试。该实验把重达 50 t 的抬升到 15 m 矿井平台的顶部再落下,理论分析认为系统效率可达到 80%,使用寿命长达 50 年。在此基础上,Botha 等^[12]对技术方案进行了优化,提出了直线电机代替旋转电机应用在竖井式重力储能系统上,结果表明,应用直线电机可以解决传统方案中一次只能运输一个重物带来功率等级限制的问题。国内成型的技术方案由中国科学院电工研究所首次提出,方案采用罐笼和自动吊具提升多个重物,于 2022 年进行了模拟系统的自动化运行和充放电测试^[11]。在此基础上,为提高系统的控制精度、降低建设成本,中国矿业大学闫文举等^[13-14]提出带有多储能块协同控制下的基于直线电机的竖井式重力储能方案,结果表明,该改进方案可以在低成本下提高系统的控制精度,提高系统的整体效率。

竖井式重力储能系统内部特性方面,国外牛津大学的 Morstyn 等^[15]从理论上验证了重力储能系统的潜力和技术方案的可实施性,结果表明,竖井式重力储能系统能够以较小的占地面积形成较大规模的储能容量,具有良好的储能性能。综合目前的研究可以看出,当前对于竖井式重力储能系统的研究主要集中于单个系统技术方案的设计和优化。对于竖井式重力储能系统的充放电特性及发电效率方面缺乏相关的研究。发电效率作为衡量储能系统性能的重要技术指标之一,对其特性及影响因素的研究具有重要的实际工程建设指导意义。重物块的运行轨迹影响系统的损耗和效率,以及对外输出的功率。

目前,重物块的运行轨迹多见于梯形速度曲线^[16],其他形式的重物块运行轨迹研究较少。重物块的运行轨迹曲线有多种,包括梯形,多段线,三角形,抛物线,圆形以及多种曲线组合等,考虑到工程实际中电机控制曲线的实现难度以及轨迹曲线的典型性,文章选取了梯形,三角形和抛物线形 3 种曲线作为重物块的运行轨迹曲线进行了探究。分析了 3 种典型速度曲线下系统输出功率的特点及速度、竖井高度和重物块质量对发电效率的影响,旨在为竖井式重力储能工程提供理论的指导依据。

1 系统模型建立

1.1 工作原理

竖井式重力储能系统主要包括竖井平台、重物块、矿井提升机系统、发电电动一体机、电力电子变流装置等组成,如图 1 所示。

电力提升和发电装置包括井架天轮、钢丝绳绞盘、电动发电一体机和控制系统,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。当重物下落时,通过

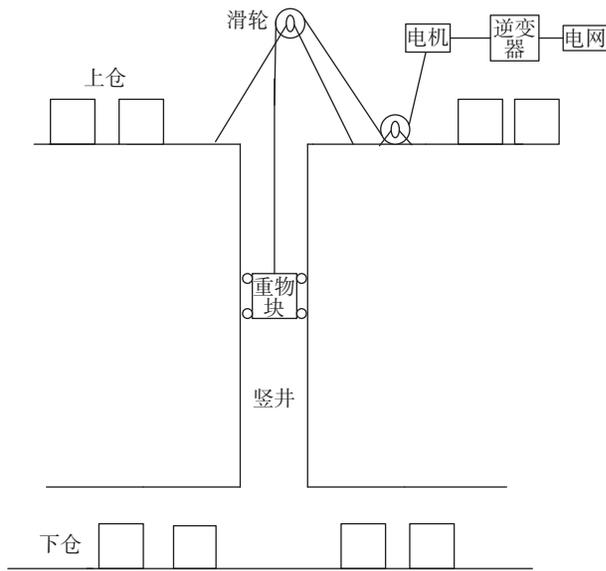


图 1 竖井式重力储能装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of shaft-type gravity energy storage device

钢丝绳的拉力带动电动发电一体机的转轴转动实现发电。电动发电一体机具有连续调速能力,可以在较大的转速范围内输出恒定力矩,也可以在较大的转速范围内发电。竖井式储能系统可通过变压器从电网获得电力,发电时则将电动发电一体机生成的电力经变压器或其他方式输入电网。

电力电子交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、网测负荷功率跟踪、电池储能系统充放电功率控制等功能;重物块作为能量存储的载体,通过其高低位置的改变来实现能量的存储和释放,并利用电机实现重力势能和电能之间的相互转换^[17-18]。

系统的运行过程主要分为储能和释能两个阶段。电价较低或电能富余时,电网提供电能,使电机与机械结构相互配合,将下仓重物截止提升至上仓并堆叠存储,电能转化为重力势能;电价较高或电能匮乏时,上仓重物介质通过机械结构降落至下仓并堆叠存储,降落过程驱动发电机发电,最终输送至电网。介质下落过程将经历加速、匀速、减速三个阶段,其中匀速阶段系统发出功率较为稳定,通常在匀速阶段进行并网发电。

1.2 速度模型

竖井式重力储能系统通过重物块下落时的重力

势能转换为动能来对外输出功率。在这个运动过程中,根据运动学定律和物理学定律可以得到下落过程中的数学模型:竖井式重力储能系统中重物块的下落过程根据其速度曲线的不同有不同的运动状态,文章中以典型的梯形速度曲线,三角形速度曲线,抛物线速度曲线来考虑。

1.2.1 梯形速度曲线

如图 2,在梯形速度曲线下根据运行状态的不同主要分为 3 段:匀加速下降段、匀速下降段和匀减速下降段,各段的速度表达式如式(1)。

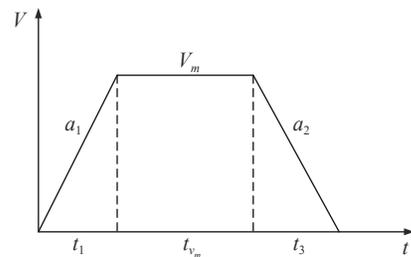


图 2 梯形速度曲线

Fig. 2 Trapezoidal velocity curve

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

式中:

- a_1 ——加速段加速度(m/s^2);
 - a_2 ——减速段加速度(m/s^2);
 - v_m ——匀速段速度(m/s),即速度最大值;
 - t_1, t_{v_m}, t_2 ——加速、匀速、减速段运动时间(s)。
- 各段的时间表达式为:

$$\begin{cases} t_1 = v_m / a_1 \\ t_{v_m} = H_{v_m} / v_m \\ t_2 = v_m / a_2 \end{cases} \quad (2)$$

式中:

H_{v_m} ——匀速段的运动路程(m)。

各段的运动路程表达式为:

$$\begin{cases} H_1 = \frac{1}{2} a_1 t_1^2 \\ H_{v_m} = H - \frac{1}{2} a_1 t_1^2 - \frac{1}{2} a_2 t_2^2 \\ H_2 = \frac{1}{2} a_2 t_2^2 \end{cases} \quad (3)$$

式中:

H ——竖井高度(m);

H_1 ——加速段运动路程(m);

H_2 ——减速段运动路程(m)。

1.2.2 三角形速度曲线

如图 3, 在三角形速度曲线下其运动过程主要分为匀加速段和匀减速段, 各段的速度表达式如式(4)。

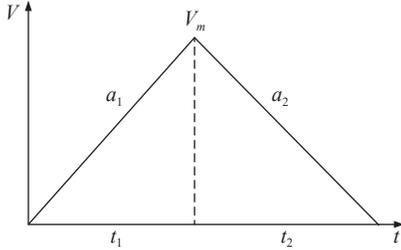


图 3 三角形速度曲线

Fig. 3 Triangular velocity curve

$$v(t) = \begin{cases} a_1 t & 0 \leq t \leq t_1 \\ v_m - a_2 t & t_1 \leq t \leq t_1 + t_2 \end{cases} \quad (4)$$

各段的时间表达式为:

$$\begin{cases} t_1 = v_m / a_1 \\ t_2 = v_m / a_2 \end{cases} \quad (5)$$

各段的运动路程表达式为:

$$\begin{cases} H_1 = \frac{1}{2} a_1 t_1^2 \\ H_2 = \frac{1}{2} a_2 t_2^2 \\ H = H_1 + H_2 \end{cases} \quad (6)$$

1.2.3 抛物线形速度曲线

如图 4, 当速度曲线为抛物线时, 加速度为随时间一直变化的变量, 速度和加速度表达式如式(7)和式(8)。

$$v(t) = a_m t - \frac{1}{2} A t^2 \quad (7)$$

$$a(t) = a_m - A t \quad (8)$$

式中:

a_m —— 加速度最大值 (m/s^2);

A —— 加速度变换率 (m/s^2)。

运动路程方程:

$$H = \frac{1}{3} a_m^3 / A^2 \quad (9)$$

1.3 效率分析

发电效率反应了储能系统的能量利用率, 重力储能系统具有能量转换率高的特点。竖井式重力储能系统的损耗主要来源于两部分: 重物块运动过程中的阻力损耗和能量变换过程中的损耗^[16]。

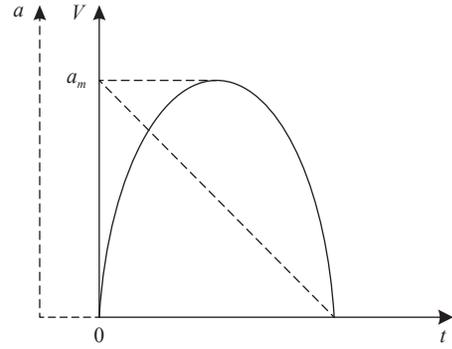


图 4 抛物线形速度曲线

Fig. 4 Parabolic velocity curve

重物块运动中的阻力损耗来源于下落过程中受到的空气阻力损耗, 及滑动时来源于内部的摩擦力损耗。风阻损耗:

$$E_w = \int_0^T \frac{A_b}{2} C_w \rho v(t)^3 dt \quad (10)$$

式中:

A_b —— 重物块的迎风面积 (m^2), 即重物块的表面积;

ρ —— 空气密度 (kg/m^3);

C_w —— 阻力系数。

滑动摩擦损耗:

$$E_f = \mu mg H \quad (11)$$

式中:

μ —— 滑动摩擦力系数, 取定值, 其大小与实际系统工况有关^[19]。

能量变换中的损耗主要包括电机损耗、齿轮箱损耗及电力电子变流器损耗^[18]。电机损耗来自于电机内部的铜损、铁损和机械损耗。电机效率用 η_G 表示。齿轮箱损耗由滑动摩擦造成, 齿轮箱效率用 η_{motor} 表示。变流器损耗是电力电子在开关过程中产生的开关和通态损耗, 变流器效率用 η_{inv} 表示。

综上所述, 系统的发电效率可以表示为:

$$\eta = \frac{mgH - \mu mgH - \int_0^T \frac{1}{2} C_w A_b \rho v^3 dt}{mgH} \eta_{\text{motor}} \eta_{\text{inv}} \eta_G \quad (12)$$

1.4 功率分析

竖井重力储能系统通过重物块下落时拖动电机旋转, 将重力势能转换为电能, 从而对外输出功率。根据牛顿运动定律和动力学方程, 下落过程中的牵引力大小如式(13)~(15)。

梯形速度曲线:

$$F(t) = \begin{cases} mg - Ma_1 & 0 \leq t \leq t_1 \\ mg & t_1 \leq t \leq t_1 + t_{vm} \\ mg + Ma_2 & t_1 + t_{vm} \leq t \leq t_1 + t_{vm} + t_2 \end{cases} \quad (13)$$

式中:

m ——重物块质量(kg);

M ——总位变质量(kg)。

总位变质量是整个提升系统等效出来的质量。

由于在矿井提升系统中,有直线运动的部件,有旋转运动的部件用一个假想的集中在卷筒圆周表面的当量质量来代替提升系统所有运动部分的质量,称为总变位质量。

三角形速度曲线:

$$F(t) = \begin{cases} mg - Ma_1 & 0 \leq t \leq t_1 \\ mg + Ma_2 & t_1 \leq t \leq t_1 + t_2 \end{cases} \quad (14)$$

抛物线形速度曲线:

$$F(t) = mg - M(a_m - At) \quad (15)$$

下落过程中的机械功率大小:

$$P(t) = F(t)v(t) \quad (16)$$

2 结果分析

根据效率分析,可以知道重物块下落速度、重物块质量,以及竖井高度是影响竖井式重力储能系统的发电效率的重要因素。本章通过改变3种速度曲线类型下这些参数设置来探究其对系统效率的影响,运用 Matlab 软件进行数学建模,搭建系统的效率模型。将模型中的参数取值及范围进行调整,对竖井式重力储能的发电效率进行仿真分析,探究其效率变化规律,并对三种重物块运行速度曲线下的效率进行对比。

2.1 梯形速度曲线

梯形速度曲线由加速度 a 和匀速段速度 V_m 两个参数决定,系统的其他相关参数设定参考文献 [20] 的重力储能系统参数设定,如表 1 所示^[20]。

重物块下落过程的相关参数设定:竖井高度和重物块质量决定了当次重物下落的发电量,进而决定了竖井式重力储能系统的系统规模。竖井式重力储能系统可依托废弃矿井建造,考虑到矿井的实际高度及竖井式重力储能系统规模的不同,竖井高度范围设定在 200~1200 m。根据 1.4 小节的功率分析,重物块质量与重物块的材料密度有关,重物块质

表 1 系统参数设置^[20]

Tab. 1 System parameter setting^[20]

参数	数值
迎风面积 A/m^2	9
空气密度 $\rho/kg \cdot m^{-3}$	1.225
空气阻力系数 C_w	0.5
滑动摩擦力系数 μ	0.02
电机效率 η_G	0.96
变流器效率 η_{inv}	0.95
齿轮箱效率 η_{motor}	0.92

量决定了储能系统的发电功率,重物块质量越大发电功率越大。根据国外相关示范平台及国内最新的技术方案,设定重物块的质量为 10~100 t 的范围。当重物块不受拉力,即自由落体运动时,其加速度约为重力加速度, $9.8 m/s^2$ 。故重物块下落时加速度不大于重力加速度,参数范围选取为 $0 \sim 8 m/s^2$ 。

对梯形速度曲线,根据上述参数范围,设定竖井高度为 1000 m,重物块质量为 10 t,改变重物块的下落速度:设定加速度 $a_1=a_2=1.5 m/s^2$,速度最大值 V_m 从 $0 \sim 40 m/s$ 变化,得到图 5(a)的图像;设定速度最大值 V_m 为 20 m/s,加速度 $a_1=a_2$,从 $0 \sim 8 m/s^2$ 变化,得到图 5(b)。

从图 5(a)可以看出,系统效率随着匀速段速度的增大而减小,且在低速时变化不显著,高速时随速度变化明显。根据式子(10),由于风阻损耗随速度的增大而增大,且增大速率为速度的三次方,故高速时效率受速度影响更大,且随着速度的增大效率减小,符合图 5(a)中规律。从图 5(b)可以看出,系统效率随加速度的增加而增大,与速度的变化规律相反。这是由于当速度最大值一定时,加速度越大,重物块的下落时间越短。结合式(10),反映到风阻损耗上是速度的立方对时间的积分变小,风阻损耗减小,系统效率增大。从整体来看,速度最大值从 0 变化到 40 m/s 后,发电效率减小了 2.5%,加速度从 0 变化到 $8 m/s^2$ 后,发电效率增加了 2.5%,都具有较为显著的影响。

保持重物块的下落速度曲线不变,改变重物块质量和竖井高度,仿真其系统效率的变化:设定速度为 20 m/s,加速度为 $3 m/s^2$,质量为 10 t,竖井高度从 200~1200 m 变化,得到图 6(a)的图像;设定速度为

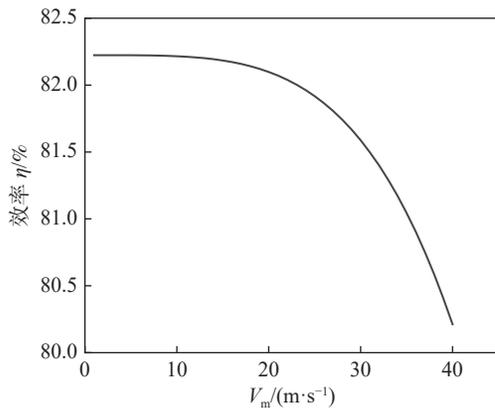
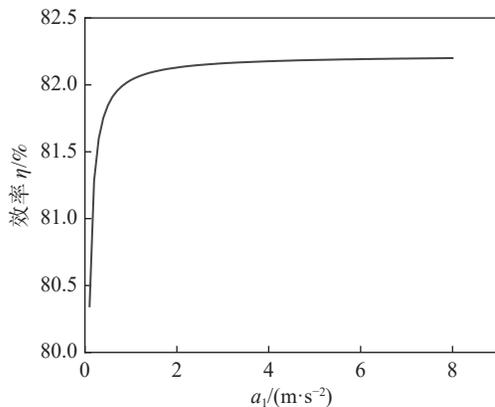
(a) 速度最大值 V_m 变化(b) 加速度 a_1 变化

图 5 不同速度下的发电效率变化

Fig. 5 Variation of power generation efficiency at different speeds
20 m/s, 加速度为 3 m/s^2 , 竖井高度为 1000 m, 重物块质量从 10 ~ 100 t 变化, 得到图 6(b) 的图像。

从图 6(a) 可以看出, 发电效率随高度 H 增加而增大, 但增加幅度很小。与高度变化一样, 从图 6(b) 中可以看出发电效率随重物块质量的增加而增大, 增加幅度也很小。重物块质量对效率的影响比高度大, 当高度从 200 增加到 1200 m 时, 效率只变化了 0.12%, 当质量从 20 t 增加到 100 t 时, 效率变化了 0.5%。从数值上看, 高度和质量对系统效率的影响都相对较小。结合式 (10) 和式 (12) 可以看出, 这是由于当重物块质量增加时, 重力势能增加, 风阻损耗不变, 故效率增加。当高度增加时, 重力势能和风阻损耗都增加, 故变化幅度很小。

2.2 三角形速度曲线

与梯形曲线设定类似, 设定竖井高度为 1000 m, 重物块质量为 10 t, 改变重物块的下落速度: 设定加速度 $a_1=3 \text{ m/s}^2$, 速度最大值 V_m 从 0 ~ 40 m/s 变化, 得到图 7(a) 的图像; 设定速度最大值 V_m 为 20 m/s, 加

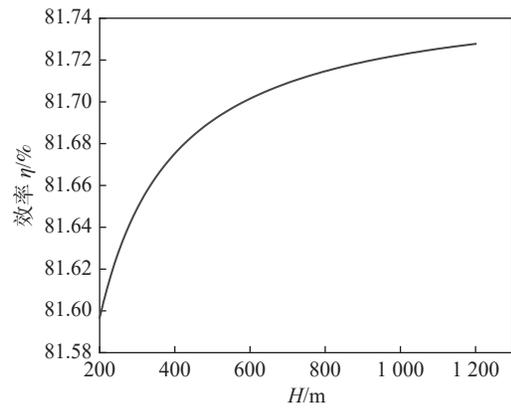
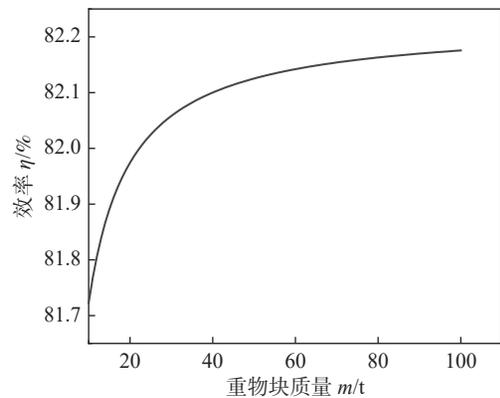
(a) 高度 H 变化(b) 重物块质量 m 变化

图 6 不同高度、重物块质量下的发电效率变化

Fig. 6 Variation of power generation efficiency in case of different heights and heavy block masses

速度 a_1 从 0 ~ 8 m/s^2 变化, 得到图 7(b) 的图像。

从图 7 可以看出, 与梯形速度曲线类似, 在三角形速度曲线下, 系统的发电效率也是随速度最大值的增大而减小, 随加速度的增大而增大, 变化趋势相同。两种类型的曲线对比可以看出, 三角形速度曲线下发电效率受速度的影响更大。当速度从 0 增加到 40 m/s 时, 梯形速度曲线和三角形速度曲线的效率分别减小了 2.5% 和 3.25%, 三角形速度曲线下的效率下降更快, 结合式 (1) 和 (4) 可以看出, 这是由于三角形速度曲线下没有匀速段, 当竖井高度一定时, 三角形速度曲线的加减速时间更长, 风阻损耗相应增大, 系统发电效率下降到更低的水平。

保持重物块的下落速度曲线不变, 改变重物块质量和竖井高度, 模拟发电效率的变化: 设定速度为 20 m/s, 加速度为 3 m/s^2 , 质量为 10 t, 竖井高度从 200 ~ 1200 m 变化, 得到图 8(a) 的图像; 设定速度为 20 m/s, 加速度为 3 m/s^2 , 竖井高度为 1000 m, 重物块质量从

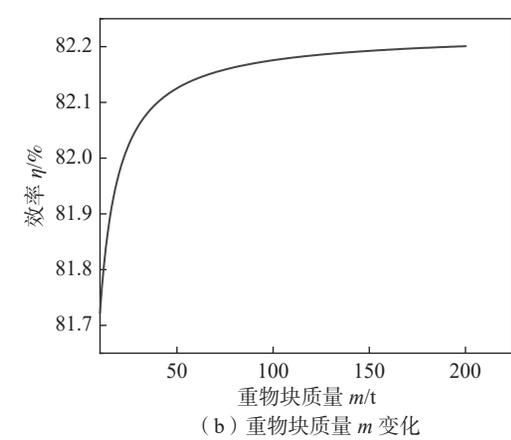
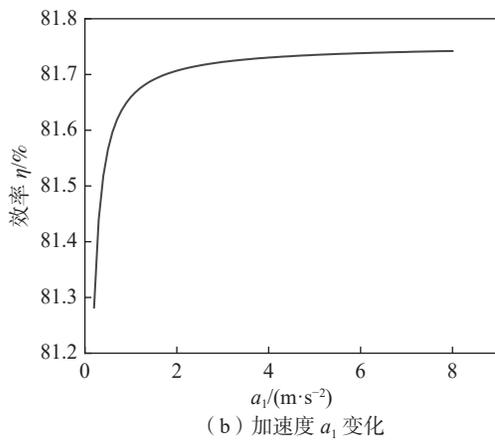
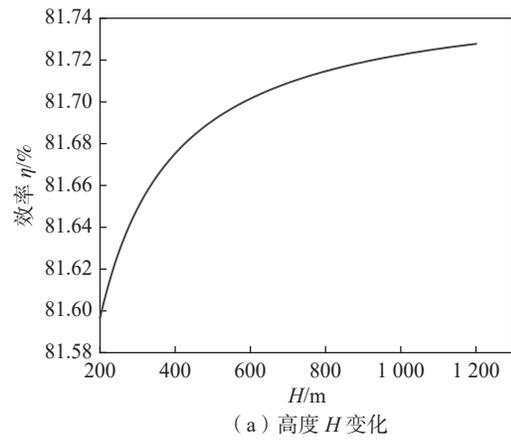
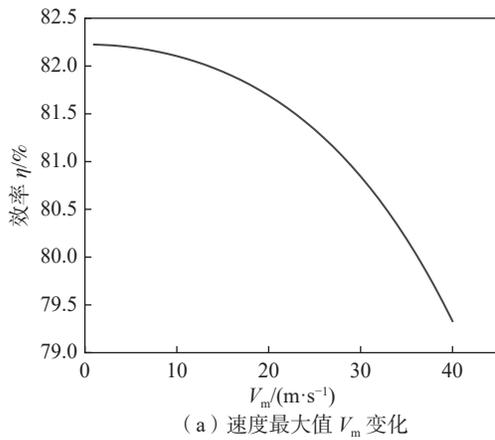


图 7 不同速度下的发电效率变化

Fig. 7 Variation of power generation efficiency at different speeds

10 ~ 100 t 变化, 得到图 8(b) 的图像。

从图 8(a) 可以看出, 系统效率随高度 H 增加而增大, 但增加幅度很小。与高度变化一样, 从图 8(b) 中可以看出发电效率随重物块质量的增加而增大, 增加幅度也很小。当高度从 200 增加到 1200 m 时, 发电效率增加了 0.16%; 重量从 10 增加到 200 t 时, 发电效率增加了 0.5%, 这与梯形速度曲线下的趋势类似, 产生这种现象的原因也相同。

2.3 抛物线形速度曲线

根据式(7), 抛物线形速度曲线由加速度最大值 a_m 和加速度变化率 A 决定, 因此通过改变这两个参数来观察效率随速度变化情况。设定竖井高度为 1000 m, 重物块质量为 10 t, 加速度最大值从 0 ~ 8 m/s^2 之间变化, 得到效率随加速度最大值变化的图像, 如图 9(a); 在竖井高度为定值的情况下, 加速度最大值和加速度变化率两者之间存在相互关系。为保证加速度最大值不超过重力加速度 $g(g=9.8 m/s^2)$, 设定加速度变化率从 0 ~ 0.5 m/s^3 变化, 得到效率随加速度

图 8 不同高度、重物块质量下的发电效率变化

Fig. 8 Variation of power generation efficiency in case of different heights and heavy block masses

变化率变化的图像, 如图 9(b)。

从图 9 可以看出, 在抛物线形速度曲线下系统效率随加速最大值的增加而减小、随加速度变化率的增加而减小, 且与前两种类型的速度曲线相比, 变化幅度较大。由式(7)可知, 当竖井高度一定时, 随着加速度最大值的增大, 运动时间 t 和速度最大值也随着增大, 故风阻损耗增大, 发电效率快速下降。由式(9)可知, 竖井高度为定值的情况下, 加速度最大值和加速度变化率两者之间存在相互关系。当加速度变化率下降时, 加速度最大值 a_m 增大, 故发电效率下降。两者对发电效率的影响都很显著, 加速度从 0 增加到 8 m/s^2 时发电效率减小了 12%, 远大于梯形速度曲线的 2.5% 和三角形速度曲线的 0.6%。

保持重物块的下落速度曲线不变, 改变重物块质量和竖井高度, 仿真系统发电效率的变化: 设定速度为 20 m/s, 加速度变化率为 0.4 m/s^3 , 质量为 10 t, 竖井高度从 200 ~ 1200 m 变化, 得到图 10(a) 的图像;

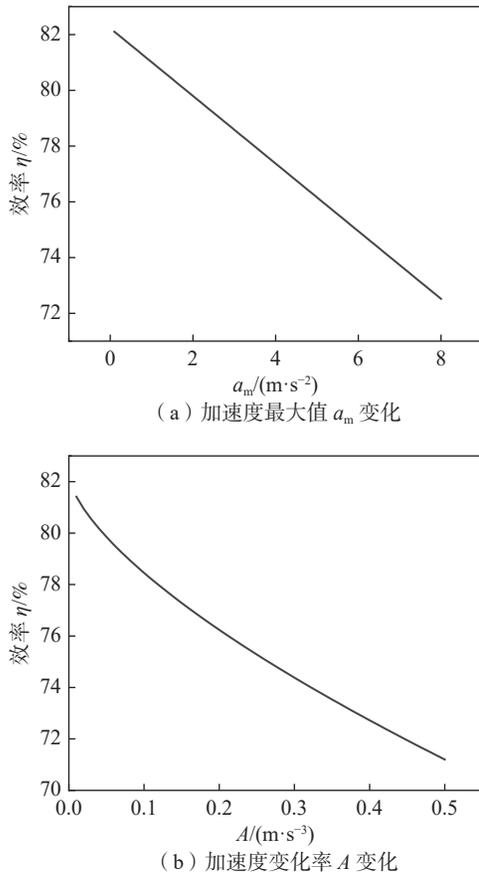


图9 不同速度下的发电效率变化

Fig. 9 Variation of power generation efficiency at different speeds

设定速度为 20 m/s, 加速度变化率为 0.4 m/s^3 , 竖井高度为 1000 m, 重物块质量从 10 ~ 100 t 变化, 得到图 10(b)。

从图 10 可以看出, 竖井式重力储能系统的系统发电效率随竖井高度的增加而减小, 随重物块质量的增加而增加。结合式(4)和式(9), 当加速度变化率为定值, 竖井高度增加时, 加速度最大值增加, 风阻损耗增大, 系统发电效率随之减小。与梯形曲线相比, 当高度 H 从 200 m 增加到 1200 m 时, 发电效率变化 12%, 比梯形时高 11.5%; 重量从 20 t 到 100 t 时变化 10%, 比梯形时高 9.88%。可以看出, 重物块质量和竖井高度对抛物线速度曲线下的发电效率影响十分显著。

2.4 对比分析

通过前述的分析, 得到了重物块质量, 竖井高度及速度对系统发电效率的影响趋势及变化规律。接下来通过在不同重物块质量、竖井高度的情况下改变速度曲线, 仿真竖井式重力储能系统发电效率的

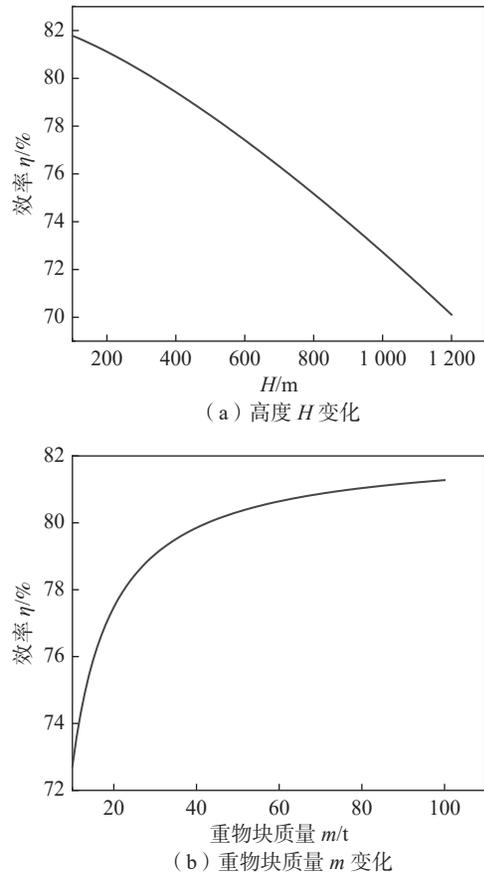


图10 不同高度、重物块质量下的发电效率变化

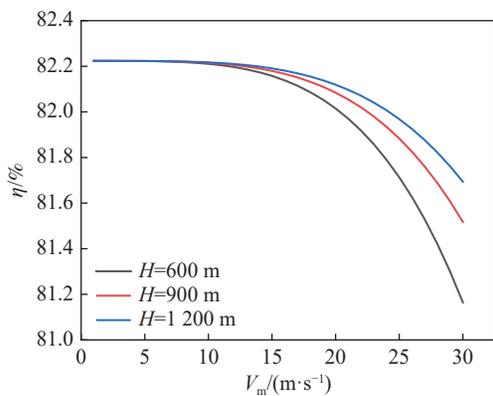
Fig. 10 Variation of power generation efficiency in case of different heights and heavy block masses

变化, 并进行对比分析, 以及 3 种速度曲线类型的结果对比, 如图 11 所示。

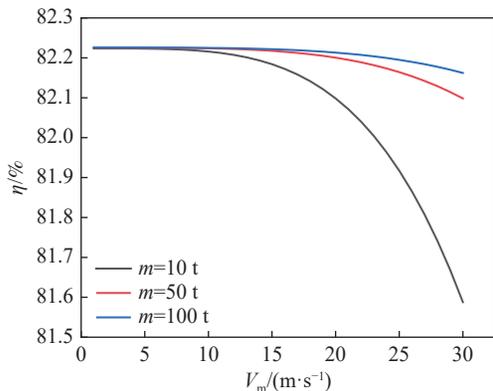
从图 11 可以看出, 梯形速度曲线和三角形速度曲线下系统效率的变化规律类似: 竖井高度和重物块质量增加时系统发电效率增加, 但增加幅度较小。速度最大值增大时系统发电效率减小, 速度对效率的影响要强于竖井高度和重物块质量的影响。此外, 当重物块质量较大时, 系统发电效率具有较好的惯性, 速度变化时发电效率几乎不变。这是由于重物块质量增加时重力势能增大, 风阻损耗对发电效率的影响减小, 而速度的改变只会影响风阻损耗的大小, 故在大重量重物块下系统发电效率几乎不变。与梯形速度曲线和三角形速度曲线不同, 抛物线形速度曲线下系统发电效率受速度的影响很大, 且随着竖井高度的增加系统发电效率反而下降。同样, 3 种速度曲线类型下, 重物块质量较大时系统发电效率都几乎不随时间变化, 具有良好的惯性。

由于梯形速度曲线和三角形速度曲线的相关速度参数相同: 加速度和加速度最大值, 因此在相同设定条件下将两种情况下效率随速度变化曲线进行对比: 设定竖井高度为 1000 m, 速度最大值为 20 m/s, 加速度 a_1 为 3 m/s^2 , 重物质量为 10 t, 得到仿真结果, 如图 12 所示。

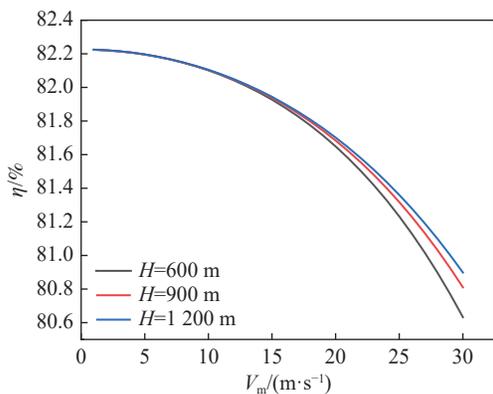
从图 12 可以看出, 在相同设定条件下, 速度的增加对三角形速度曲线下效率的影响比梯形速度曲线下更加显著。速度从 0 增加到 40 m/s 后, 三角形速度曲线下发电效率比梯形曲线下降低了 1.5%, 结



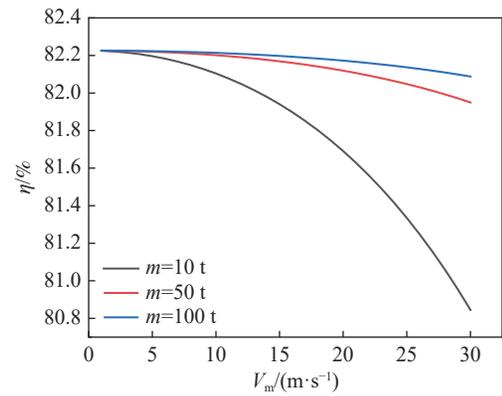
(a) 梯形速度曲线时不同高度下效率随速度变化



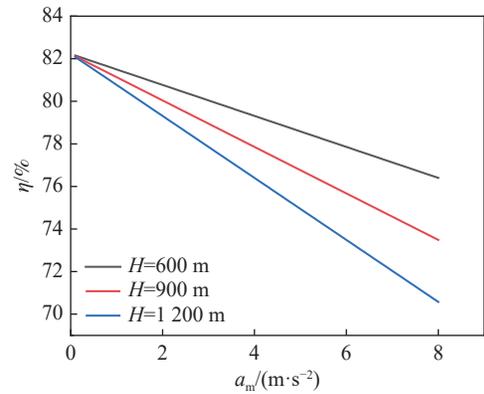
(b) 梯形速度曲线时不同质量下效率随速度变化



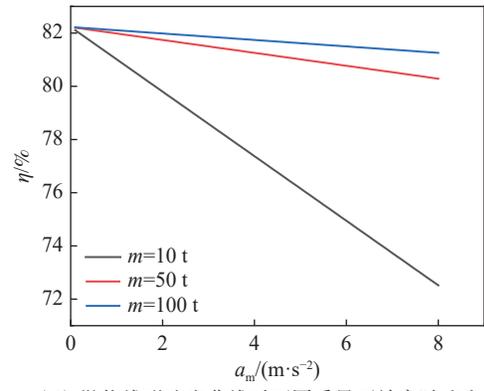
(c) 三角形速度曲线时不同高度下效率随速度变化



(d) 三角形速度曲线时不同质量下效率随速度变化



(e) 抛物线形速度曲线时不同高度下效率随速度变化



(f) 抛物线形速度曲线时不同质量下效率随速度变化

图 11 三种速度曲线类型的发电效率变化结果对比

Fig. 11 Comparison of power generation efficiency variation results for three speed curves

合式(1)和(4)可以推断, 这是由于三角形速度曲线下没有匀速段, 当竖井高度一定时, 三角形速度曲线的加减速时间更长, 风阻损耗相应增大, 系统发电效率下降到更低的水平。

3 结论

文章基于竖井式重力储能系统的系统模型进行

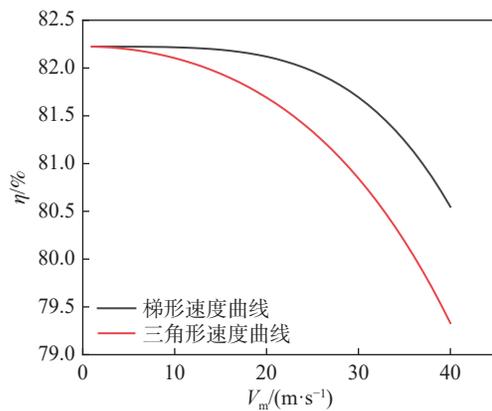


图 12 梯形和三角形速度曲线下效率随速度变化对比
Fig. 12 Comparison of efficiency variation with speed for trapezoidal and triangular speed curves

效率分析,研究了在 3 种不同的重物块下落曲线下的效率影响因素,并对 3 种类型的速度曲线的效率特性进行对比分析,得出以下结论:

(1) 竖井式重力储能系统的发电效率主要受重物块下落速度、重物块质量、竖井高度的影响。

(2) 3 种类型的速度曲线中,梯形速度曲线和三角形速度曲线的效率特性相似,都随竖井高度,重物块质量的增加而增大,但变化幅度较小。在与速度曲线相关的参数中,梯形速度和三角形速度曲线下的系统效率随匀速段速度的增大而减小,随加速度的增大而增大,且对发电效率的影响大于竖井高度和重物块质量。

(3) 抛物线型速度曲线下的系统发电效率特性与其他两种速度曲线不同,随竖井高度的增加而减小,随重物块质量的增加而增加,且变化幅度较大。在与速度相关的参数中,该种类型下发电效率随加速度最大值、加速度变化率的增大而增大,且变化幅度较大

(4) 3 种速度曲线类型下的发电效率均表现出在重物块质量较小时受速度影响大,重物块质量大时受速度影响很小的特点。

(5) 经过对比分析,采用梯形速度曲线时发电效率具有更好的特性:效率高、受运行参数的影响小,且在选择重物块时,选用质量更大的重物块能使系统发电效率几乎不受重物块运动过程的影响,达到更好的效果。

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(Supp1.): 4-12. DOI: 10.3969/j.issn.1001-425X.2023.z1.002.

[2] 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.

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.

[3] 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.

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.

[4] 陈海生,李泓,徐玉杰,等. 2023 年中国储能技术研究进展 [J]. *储能科学与技术*, 2024, 13(5): 1359-1397. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2024.0441.

CHEN H S, LI H, XU Y J, et al. Research progress on energy storage technologies of China in 2023 [J]. *Energy storage science and technology*, 2024, 13(5): 1359-1397. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2024.0441.

[5] 汤匀,岳芳,王莉晓,等. 全球新型储能技术发展态势分析 [J]. *全球能源互联网*, 2024, 7(2): 228-240. DOI: 10.19705/j.cnki.issn2096-5125.2024.02.012.

TANG Y, YUE F, WANG L X, et al. International development trend analysis of new energy storage technologies [J]. *Journal of global energy interconnection*, 2024, 7(2): 228-240. DOI: 10.19705/j.cnki.issn2096-5125.2024.02.012.

[6] 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.

[7] 修雅馨,刘钦节,付强,等. 废弃矿井地下空间物理储能方式对比与优选 [J]. *绿色矿冶*, 2024, 40(2): 6-13. DOI: 10.19610/j.cnki.cn10-1873/tf.2024.02.002.

XIU Y X, LIU Q J, FU Q, et al. Comparison and optimization of physical energy storage methods in underground space of abandoned mines [J]. *Sustainable mining and metallurgy*, 2024, 40(2): 6-13. DOI: 10.19610/j.cnki.cn10-1873/tf.2024.02.002.

[8] 张品,姚丽英,陈吉顺,等. 废弃矿井重力储能现状分析及构想 [J]. *内蒙古煤炭经济*, 2024(3): 9-11. DOI: 10.3969/j.issn.1008-0155.2024.03.004.

ZHANG P, YAO L Y, CHEN J S, et al. Analysis and conception of gravity energy storage in abandoned mines [J]. *Inner Mongolia coal economy*, 2024(3): 9-11. DOI: 10.3969/j.issn.1008-0155.2024.03.004.

[9] 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]. 2019-11-22.

- ZHANG Z Q, WU A, ZHANG H C. Gravity energy storage system depending on coal mine: 209676010U [P]. 2019-11-22.
- [10] 刘志强, 宋朝阳. 闭坑矿井竖井筒开发再利用科学探索 [J]. *煤炭科学技术*, 2019, 47(1): 18-24. DOI: [10.13199/j.cnki.cst.2019.01.003](https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2019.01.003).
- LIU Z Q, SONG Z Y. Scientific exploration of development and reutilization of vertical shafts in closed mines [J]. *Coal science and technology*, 2019, 47(1): 18-24. DOI: [10.13199/j.cnki.cst.2019.01.003](https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2019.01.003).
- [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] BOTHA C D, KAMPER M J, WANG R J. Design optimisation and cost analysis of linear vernier electric machine-based gravity energy storage systems [J]. *Journal of energy storage*, 2021, 44: 103397. DOI: [10.1016/j.est.2021.103397](https://doi.org/10.1016/j.est.2021.103397).
- [13] 闫文举, 杨宏伟, 孙芯竹, 等. 废旧矿井重力储能系统中多储能块地上地下运输及存储装置、方法: 202410308428.6 [P]. 2024-06-04.
- YAN W J, YANG H W, SUN X Z, et al. Overground and underground transportation and storage device and method for multiple energy storage blocks in waste mine gravity energy storage system: 202410308428.6 [P]. 2024-06-04.
- [14] 闫文举, 杨宏伟, 孙芯竹, 等. 废旧矿井用直线电机重力储能装置及其多储能块协同控制方法: 202311611162.4 [P]. 2024-03-01.
- YAN W J, YANG H W, SUN X Z, et al. Linear motor gravity energy storage device for waste mine and multi-energy-storage-block cooperative control method of linear motor gravity energy storage device: 202311611162.4 [P]. 2024-03-01.
- [15] 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).
- [16] 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).
- [17] 杨彦群, 刘钦节, 周京军, 等. 一种用于废弃煤矿重力储能系统及布置方法: 116207869A [P]. 2023-06-02.
- YANG Y Q, LIU Q J, ZHOU J J, et al. Gravity energy storage system for abandoned coal mine and arrangement method: 116207869A [P]. 2023-06-02.
- [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] ESTEBAN E, SALGADO O, ITURROSPE A, et al. Model-based estimation of elevator rail friction forces [C]//Proceedings of the Fourth International Conference on Condition Monitoring of Machinery in Non-Stationary Operations, Lyon, France, December 15-17, 2016. Lyon: Springer, 2016: 363-374. DOI: [10.1007/978-3-319-20463-5_27](https://doi.org/10.1007/978-3-319-20463-5_27).
- [20] 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), Fargo, ND, USA, 2018. IEEE, 2018: 1-4. DOI: [10.1109/NAPS.2018.8600665](https://doi.org/10.1109/NAPS.2018.8600665).

作者简介:



史沁鹏

史沁鹏(第一作者)

1979-, 男, 汉族, 正高级工程师, 电力系统及其自动化, 硕士, 长期从事储能技术研究工作。(e-mail)shiqp@ncpe.com.cn

郭茹

(1973-), 女, 汉族, 正高级工程师, 电力系统及其自动化, 本科, 长期从事电厂电力设计工作。(e-mail)guoru@ncpe.com.cn



洪剑锋

洪剑锋(通信作者)

1988-, 男, 北京交通大学副教授, 电气工程博士, 主要从事新型储能系统技术、电气传动控制研究(e-mail)jfhong@bjtu.edu.cn

王增晖

(1984-), 男, 汉族, 高级工程师, 材料科学与工程, 硕士, 长期从事物料搬运、新型储能等项目研发和工程设计工作。(e-mail)wangzengh@ncpe.com.cn

李军

(1978-), 男, 汉族, 正高级工程师, 电力系统及其自动化, 本科, 长期从事新能源、新型储能等电力工程设计与市场开发工作。(e-mail)1880005850@139.com

王昊

(1988-), 男, 汉族, 高级工程师, 船舶与海洋结构设计及制造, 硕士研究生, 长期从事机械、新型储能等电力工程设计工作。(e-mail)wanghao2023@ncpe.com.cn

曾小超

(1970-), 男, 汉族, 正高级工程师, 电力系统及其自动化, 本科, 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

姜健宁

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

项目简介:

项目名称 新型物理储能技术研究(CEEC2022-ZDYF-06)

承担单位 中国电力工程顾问集团有限公司华北电力设计院有限公司

项目概述 项目主要研究重力储能技术路线、结构布置方案、机电系统配置、大功率电动/发电机技术及其运行控制, 掌握应用于具体场景的重力储能电站成套技术方案。

主要创新点 (1)借鉴已有的重力储能结构, 提出新型重力储能系统结构; (2)运用多目标寻优算法, 得出最优系统运行参数; (3)对核心设备进行参数选取, 确定相关系统配置规划原则。

(编辑 徐嘉铨)