



基于时变参数的重力储能系统功率波动特性研究

王义龙¹, 郭刘壹¹, 张嘉蔚¹, 吴高昀², 张连成³, 赵海森²

(¹北京信息科技大学机电工程学院, 北京市 海淀区 100192; ²新能源电力系统国家重点实验室 (华北电力大学), 北京市 昌平区 102206; ³北华航天工业学院电子与控制工程学院, 河北省 廊坊市 065000)

摘要: 针对采用长距离钢缆牵引固体质量块的重力储能系统, 在离散质量块运动过程中钢缆弹性特性会导致功率波动, 采用恒定刚度与阻尼系数难以准确描述长距离钢缆张力的动态响应规律, 导致系统功率波动特性分析产生较大误差。针对这一问题, 本文首先研究了长距离钢缆结构特点及受力分布规律, 推导出时变刚度与阻尼特性数学模型, 并结合长度 55 cm、直径 5 mm 的钢缆拉伸实验, 验证了模型的有效性; 其次, 提出了基于时变参数的重力储能系统功率波动分析方法, 构建了钢缆牵引端与底端重物侧的弹性动力学方程, 有效计及离散质量块装卸引起的力矩突变、进而导致功率波动; 最后, 以一套牵引电机位于高势能位的 250 kW 重力储能系统为例, 系统分析了在长度 100 m、直径 60 mm 钢缆牵引下, 分析不同质量块数量、单块质量及运行速度对储能系统的功率波动衰减时长及波动幅度的影响规律, 结果表明: 输出额定功率时, 在线运行质量块总重量保持不变、仅调整质量块数量的前提下, 力矩突变由 10% 增至 25% 时, 功率波动衰减时长基本不受影响, 但高势能位牵引端功率波动由 20% 线性升至 50%, 低势能位重物侧功率波动呈非线性放大趋势, 约为牵引端的 2.04 倍; 当保持质量块总数为 5 块, 仅通过调整总质量由 20 t 至 80 t、速度由 1.25 m/s 至 0.32 m/s, 且仍保持额定输出功率时, 牵引端力矩、功率波动基本不变, 但重物侧功率波动由 16% 增至 130%, 功率波动衰减时长同步延长为 4.27 s 至 12.74 s, 上述波动导致牵引电机的机械功率整体波动最大可达 40.46%, 本文研究成果可为大容量重力储能系统的功率波动特性及平滑控制策略提供重要支撑。

关键词: 重力储能系统; 时变参数; 功率波动; 钢缆

doi: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2026.0575

中图分类号: TM 714.1

文献标志码: A

文章编号: 2095-4239 (XXXX) XX-1-11

Power Fluctuation Characteristics of Gravity Energy Storage Systems Based on Time-Varying Parameters

WANG Yilong¹, GUO Liuyi¹, ZHANG Jiawei¹, WU Gaoyun², ZHANG Liancheng³, ZHAO Haisen²

(¹College of Mechanical and Electrical Engineering, Beijing Information Science and Technology University, Haidian District, Beijing 100192, China; ²State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources(NCEPU), Changping District, Beijing 102206, China; ³School of Electronic and Control Engineering, North China Institute of Aerospace Engineering, Langfang 065000, Hebei Province, China)

Abstract: In gravity energy storage systems (GESS) using long-distance wire ropes to haul

收稿日期: 2026-07-03; 修改稿日期: XXXX-2026-08。

基金项目: 国家自然科学基金 (52177041)

第一作者: 王义龙 (1980—), 男, 博士, 副教授, 研究方向: 新型储能与新能源发电, E-mail: wangyilonghu@163.com; 通信作者: 赵海森, 男, 博士, 教授, 研究方向: 新能源电力系统分析与控制, E-mail: zhaohisen@163.com。

引用本文: 王义龙, 郭刘壹, 张嘉蔚, 等. 基于时变参数的重力储能系统功率波动特性研究[J]. 储能科学与技术, XXXX, XX(XX): 1-11.

Citation: WANG Yilong, GUO Liuyi, ZHANG Jiawei, et al. Power Fluctuation Characteristics of Gravity Energy Storage Systems Based on Time-Varying Parameters[J]. Energy Storage Science and Technology, XXXX, XX(XX): 1-11.

solid mass blocks, the elastic characteristics of the wire ropes cause power fluctuations during the movement of discrete mass blocks. Using constant stiffness and damping coefficients fails to accurately describe the dynamic response of the long-distance wire rope tension, resulting in substantial errors in the system power fluctuation analysis. To address this issue, the structural characteristics and force distribution of long-distance wire ropes were first investigated, and a mathematical model of time-varying stiffness and damping characteristics was derived. The validity of the model was verified through a tensile experiment on a wire rope with a length of 55 cm and a diameter of 5 mm. Second, a GESS power fluctuation analysis method based on time-varying parameters was proposed. Elastic dynamic equations for the traction end and the bottom mass side of the wire rope were constructed to effectively account for the abrupt torque variations caused by the loading and unloading of discrete mass blocks, which subsequently lead to power fluctuations. Finally, taking a 250 kW GESS with the traction motor located at a high-potential position as an example, the influence of the number of mass blocks, individual block mass, and operating speed on the power fluctuation decay time and fluctuation amplitude was systematically analyzed under the traction of a wire rope with a length of 100 m and a diameter of 60 mm. The results show that when outputting the rated power, under the premise of keeping the total weight of the online running mass blocks constant and only adjusting the number of mass blocks, an increase in abrupt torque variation from 10% to 25% basically does not affect the power fluctuation decay time. However, the power fluctuation at the high-potential traction end linearly increases from 20% to 50%, while the power fluctuation at the low-potential mass side exhibits a non-linear amplification trend, reaching approximately 2.04 times that of the traction end. When the total number of mass blocks is maintained at 5, and the total mass is adjusted from 20 t to 80 t while the speed is adjusted from 1.25 m/s to 0.32 m/s, still maintaining the rated output power, the torque and power fluctuations at the traction end remain basically unchanged. Nevertheless, the power fluctuation at the mass side increases from 16% to 130%, and the power fluctuation decay time simultaneously extends from 4.27 s to 12.74 s. The aforementioned fluctuations cause the overall mechanical power fluctuation of the traction motor to reach a maximum of 40.46%. The research results provide important support for the power fluctuation characteristics and smoothing control strategies of large-capacity gravity energy storage systems.

Keywords: Gravity energy storage system; Time-varying parameters; Power fluctuation; Wire rope

重力储能作为新型储能技术,因其具有长时、大容量、环境友好、选址灵活等优势,同时在新能源波动的抑制、新型电力系统超长时功率调节中可起到关键性作用,因此近年来被大量学者所关注^[1-3]。基本工作原理是通过长距离机械牵引装置完成固态质量块的升降,实现电能与重力势能的相互转化^[4-6]。为了满足长时大容量设计需求,其有效的方式是增加运行质量块的质量以及升降高度,但单体大质量的质量块会对机械结构产生较大的应力作

用,通常采用多个质量块分布连续运行,而多质量块具有离散颗粒特性,在运行过程中会产生力矩突变^[7-8]。通常采用钢缆实现质量块的长距离升降,而钢缆的机械柔性结构具有弹性特性,使得在力矩突变条件下产生振荡,引起并网点功率波动,降低并网稳定性。因此,需要建立可准确分析重力储能长距离牵引机械结构的弹性功率波动模型,揭示不同运行工况的功率波动变化规律,为后续功率波动抑制策略的提出奠定理论基础。

针对上述问题,国内外学者已开展了相关研究。在建模方面,文献[9]探究了竖井重力储能多绳摩擦提升系统的设计方法及静、动态防滑性能,建立了静态张力计算模型和动态张力防滑模型;文献[10]针对单个质量形式下,钢缆张力、弯曲和阻尼效应的非线性问题,提出可分析风扰动的传递矩阵与有限段法结合的动态建模方法;文献[11]针对钢缆牵引结构形式,建立了基于钢缆的充放电双模式下绳索张力与运动位移响应的动态模型;文献[12]分析了钢缆的非线性损耗机制,建立了通过优化轮绳径比等参数可有效降低钢缆能量耗散模型。

在功率波动特性分析方面,文献[13]针对质量不连续、非线性摩擦、多个有效载荷之间的分段耦合等非线性扰动引起的功率波动问题,分析了并网侧的功率波动特性;文献[14]围绕单通道系统在质量块交接暂态时的质量断崖式突变问题,分析了并网点的功率稳定特性;文献[15]分析了由离散质量块独立交接作业以及物理脱钩导致的机械瞬态冲击所引起的功率波动特性。文献[16]针对载荷质量的骤变引起的电机侧输出功率波动问题,研究了并网有功功率的波动特性及平滑机制;文献[17]针对基于卷扬提升机的重力储能系统中多重物切换导致功率的间歇性和波动性,对电机变流并网点的功率波动进行分析。

上述研究,虽然对重力储能的机械牵引环节的防滑、非线性机械应力、位移响应、损耗机制以及系统能效等环节建立相关模型,并针对力矩突变导致的功率波动对并网点影响特性进行了分析,但相关研究针对长距离牵引装置在动力学建模过程中,并未分析柔性结构引起的弹性振动特性,尤其在钢缆力学参数时变对功率波动耦合影响的系统性分析上研究较少。针对上述问题,首先,研究了长距离钢缆的受力规律,推导出时变刚度与阻尼特性数学模型;其次,构建基于时变参数的弹性动力学方程,提出重力储能系统机械环节功率波动分析方法;最后,以重力储能典型结构参数为例进行仿真分析,揭示不同质量块数量、单块质量及运行速度对储能系统的功率波动衰减时长及波动幅度的影响规律。

1 重力储能系统结构及机械弹性特性

1.1 重力储能系统机械结构特性

重力储能主要通过长距离机械结构升降固体质

量块,实现能量的储存与释放,按升降形式可分为垂直式和斜坡式两种。不同形式的升降方式上有所差异,但机械结构构成基本相同,本文以斜坡式为例,其典型结构示意图如图1所示^[18]。储能系统主要包括牵引装置、变速装置、钢缆、质量块、高位堆栈场和低位堆栈场,其中可通过增大绞盘及多股缠绕方式改善钢缆在大力矩驱动下的打滑问题。为了满足大容量、长时储能需求,重力储能系统需增加落差以提升势能密度,因此,质量块升降需采用长距离机械牵引装置完成系统运行。

牵引装置是实现储能介质空间转移的关键环节,通常可采用钢缆、链条和皮带等形式。长距离、大力矩传动方式下,链条自重较大、效率不高;皮带形变量大、使用寿命较短;相比之下,钢缆具有同等承载能力,且柔韧性好、传动效率较高,因此,本文综合考虑以钢缆传动作为研究对象。

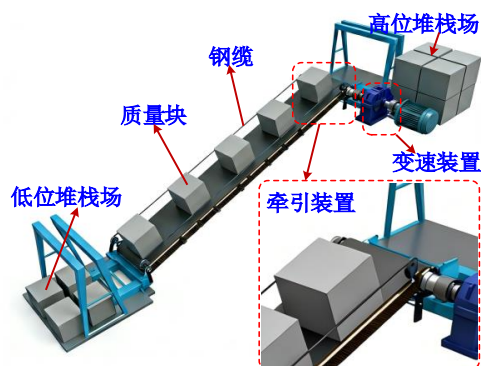


图1 斜坡式重力储能系统

Fig. 1 Slope-type gravity energy storage system

1.2 重力储能系统运行原理及力矩突变特性

结合图1与重力储能运行原理可知,若采用单一质量块驱动,其较大质量将使牵引装置承受极高的载荷,从而对机械装置的结构强度提出更高要求,为削弱单体大质量的质量块对机械结构造成的集中应力,通常采用多个质量块均匀分布运行的方案。

虽然使用多个质量块在同一斜坡轨道上分布运行,能有效分摊载荷、降低单点冲击,但并未彻底消除质量块的离散性,因此在质量块加、减载过程中,仍会引发一定的力矩突变,进而对长距离机械牵引环节产生较大的冲击,导致机械及并网点的功率波动。在系统设计阶段,选取运行质量块时,需

要综合考虑机械强度,以 100 m 驱动距离、250 kW 系统设计功率为例,运行总质量通常为 20 至 100 吨,可选取的质量块数量为 4 至 10 个,数量较少会增加系统功率波动量,而数量较多会增加质量块码放控制难度,因此,工程上需综合考虑质量块数量。若运行总质量为 50t、质量块数量为 5 个,则运行过程中的力矩波动量理论上为 20%,如图 2 所示。

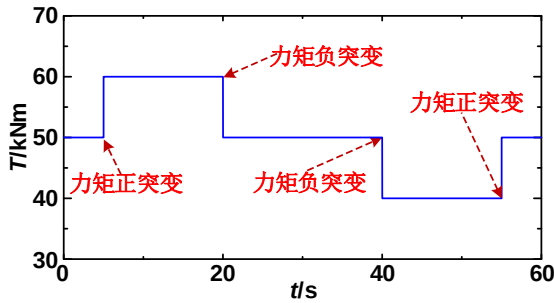


图2 力矩突变示意图

Fig. 2 Schematic diagram of sudden torque change

1.3 长距离牵引装置的弹性特性

在重力储能系统中,当采用钢缆作为长距离牵引装置时,因其由多股钢丝螺旋捻制而成,在承受张力作用时,内部会发生微观滑移与形变,长距离与螺旋结构使得牵引装置表现出弹性特性。在系统充放电运行过程中,受质量块离散运行带来的力矩突变影响,弹性特性在引起机械传动系统振动的同时,还会加剧牵引端的机械功率波动,最终导致并网点功率波动,降低储能系统的充放电稳定性。

2 长距离牵引装置弹性特性机理分析

储能介质运行过程中产生的力矩突变,作用到具有弹性特性的长距离钢缆牵引装置上,会导致机械环节力矩振荡,进而引起系统功率波动。钢缆的弹性特性主要受等效刚度、阻尼系数影响,本文研究对象为多质量、多绳段耦合系统,使得阻尼系数与刚度之间存在耦合关联,导致系统振荡过程更加复杂。

2.1 牵引钢缆等效刚度

钢缆的等效刚度为弹性范围内所受轴向拉力及产生形变量之间的比值,如公式(1)所示。

$$k = \frac{F}{\Delta L} \quad (1)$$

式中, k 是钢缆的等效刚度, F 是钢缆所受的

轴向拉力, ΔL 是钢缆受力后的形变量。

2.1.1 轴向拉力分析

当钢缆受到作用力时,由于轴方向受力占主体,径向力相比较小,因此,主要分析轴向的受力情况,结构受力如图3所示。由图可知,轴向力通过螺旋缠绕结构传递到各钢丝,根据螺旋角不同可分为中心股钢丝、一次螺旋钢丝和二次螺旋钢丝,螺旋角分别为 0° 、 α 、 γ , 钢丝横截面积分别为 A_ω 、 A_α 、 A_γ , 总的轴向拉力可分为作用于中心股钢丝的轴向拉力 F_0 , 作用于一次螺旋钢丝的轴向拉力 F_α , 以及作用于二次螺旋钢丝的轴向拉力 F_γ , 三者受力关系如公式(2)所示。

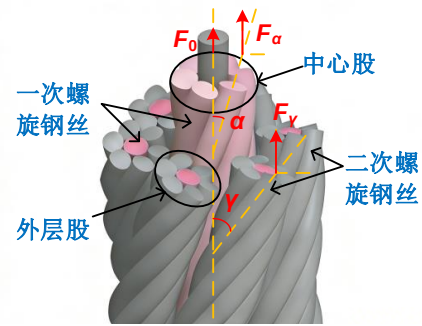


图3 钢缆结构及受力图

Fig. 3 Structure and force diagram of the wire rope

$$F = F_0 + F_\alpha + F_\gamma \quad (2)$$

由钢缆物理结构与受力分析可知,不同螺旋结构形式下的轴向受力表达式如公式(3)所示。

$$\begin{cases} F_0 = EA_\omega \epsilon_r \\ F_\alpha = (p + q - 2)EA_\alpha \epsilon_r \cos^3 \alpha \\ F_\gamma = (p - 1)(q - 1)EA_\gamma \epsilon_r \cos^3 \gamma \end{cases} \quad (3)$$

联立公式(2)(3)则:

$$F = EA_\omega \epsilon_r \lambda \quad (4)$$

式中, E 为单根钢丝弹性模量, p 为钢缆螺旋股数, q 为单股螺旋钢丝数, ϵ_r 为绳应变, λ 为轴向力系数, 由于 A_ω 、 A_α 、 A_γ 之间相差较小, 可近似认为相等, 表达形式如公式(5)所示。

$$\lambda = 1 + (p + q - 2)\cos^3 \alpha + (p - 1)(q - 1)\cos^3 \gamma \quad (5)$$

2.1.2 钢缆等效形变量分析

钢缆受力后的形变量,主要包括材料形变和结构形变,结构形变又分为钢丝间接触形变和摩擦滑移形变,则形变量 ΔL 表达式如下:

$$\Delta L = \Delta L_m + \Delta L_c + \Delta L_r \quad (6)$$

式中, ΔL_m 、 ΔL_c 、 ΔL_r 分别为材料形变量、接

触形变量和摩擦形变量。

上述形变量中，材料形变量源于钢丝的弹性伸长，与钢缆作用力及绳长有关。接触变形为作用力下钢丝间接触产生的局部压扁变形。摩擦变形由接触面微观滑移引起，即滑移导致的附加伸长，则形变量如公式（7）所示。

$$\Delta L = \frac{FL}{EA_{\omega}\lambda} + \xi_c \left(\frac{FL}{EA_{\omega}\lambda} \right)^{2/3} L^{1/3} + \frac{\xi_r F}{EA_{\omega}\lambda} \quad (7)$$

式中， L 为钢缆长度， ξ_c 为接触形变系数， ξ_r 为摩擦形变系数， ξ_c 、 ξ_r 表述如下：

$$\xi_c = n_c \left(\frac{9}{16E^2 R} \right)^{1/3} (EA_{\omega}\lambda_1)^{2/3} \quad (8)$$

$$\xi_r = \mu C \lambda_2 / \lambda_1 \quad (9)$$

式中， E 为等效弹性模量， R 为等效曲率半径， n_c 为单位长度内接触点数， λ_1 为接触形变-螺旋角系数， C 为比例系数， λ_2 为摩擦形变-螺旋角系数， μ 为摩擦系数。

联立公式（1）、（4）、（7）可推导出等效刚度数学表达式。

$$k = \frac{EA_{\omega}\lambda F^{1/3}}{(L + \xi_r) F^{1/3} + \xi_c (EA_{\omega}\lambda)^{1/3} L} \quad (10)$$

由公式（10）可知，钢缆等效刚度具有变参数特性，除了受结构和材质参数影响外，主要与轴向力、长度有关。

2.2 牵引钢缆阻尼系数

阻尼系数表征了其在动态载荷作用下耗散机械能的能力，影响机械振荡衰减时长。根据振动力学理论，阻尼系数表示为公式（11）。

$$c = 2\phi \sqrt{km} \quad (11)$$

联立公式（10）（11）可得阻尼系数最终表达式，如公式（12）所示。

$$c = \frac{2\phi (EA_{\omega}\lambda)^{1/2} F^{2/3}}{\left\{ \left[(L + \xi_r) F^{1/3} + \xi_c (EA_{\omega}\lambda)^{1/3} L \right] g \right\}^{1/2}} \quad (12)$$

式中， ϕ 为阻尼比，主要源于内部钢丝间的粘滞阻尼，针对牵引钢缆承受突变力矩的工况，取值范围通常为0.07-0.23^[19-20]。

由公式（12）可知，钢缆阻尼系数同样具有变参数特性，除了受结构和材质参数影响外，同样与轴向力、长度有关。在牵引装置动力学模型中，钢缆阻尼系数会影响系统振荡的衰减时长、位移响应以及功率输出的平稳性。

由钢缆阻尼系数与运动速度可得到阻尼力的表

达式，如式（13）所示。

$$F_c = -cv \quad (13)$$

式中， F_c 为阻尼力， v 为运动速度。

2.3 钢缆时变参数特性分析

钢缆刚度与阻尼系数的主要影响因素包括轴向拉力和绳长，当重力储能充放电需求不同时，运行功率通常可工作在20%额定功率至额定功率之间，质量块重力不同，则相应钢缆系数也随之变化，而质量块重力相同时，不同的牵引长度也会影响钢缆刚度与阻尼系数。

2.3.1 载荷对参数的影响分析

以钢缆长度为100 m，额定载荷为1000 kN为例，综合钢缆的迟滞软化特性与文献实测数据，本文取基准等效阻尼比为0.125^[19-20]，其他结构参数满足驱动力要求且不变，分别对钢缆施加100 kN至1000 kN的驱动力进行分析，得到 k 、 c 与 F 的关系，如图4所示。

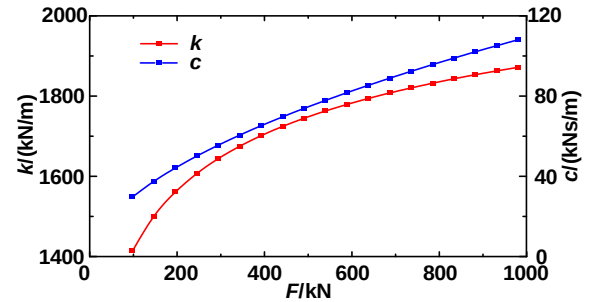


图4 弹性与阻尼系数随载荷的变化曲线

Fig. 4 Variation curves of the stiffness and damping coefficients with load

由图4可知，当载荷为额定载荷20%、80%时，即200 kN、800 kN驱动力时，等效刚度分别为1560 kN/m与1832 kN/m，阻尼系数分别为44 kNs/m与95 kNs/m，驱动力从载荷20%增加至80%，等效刚度增加量约17.44%，阻尼增加约115.91%。由此可知，刚度与阻尼系数与载荷呈非线性正相关，同等载荷变化范围内，阻尼的影响敏感度更高，在变载荷工况下，建立非线性弹性与阻尼模型能够更加准确地响应动态规律。

2.3.2 钢缆长度对参数的影响分析

设计钢缆驱动力为500 kN，其他结构参数满足驱动力要求且不变，分别针对钢缆长度100 m至1000 m进行分析，得到 k 、 c 与 L 的关系，如图5所示。

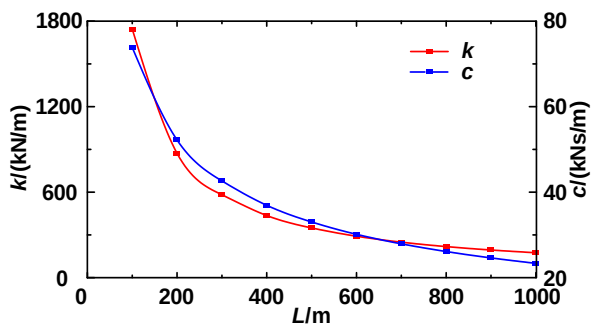


图5 弹性与阻尼系数随长度的变化曲线

Fig. 5 Variation curves of the stiffness and damping coefficients with length

由图5可知,刚度与阻尼系数与钢缆长度近似成反比。在绳长较短时,刚度与阻尼系数均变化急剧,如绳长从200m增加到1000m长度时,等效刚度分别为872kN/m与174kN/m,降低了约80.05%,阻尼系数分别为52kNs/m与23kNs/m,降低了55.77%。由此可知,随着钢缆长度的增加,刚度与阻尼系数呈现出急剧衰减的趋势,在同等驱动力作用下,会导致更大幅值的振荡、延长衰减时长。

2.3.3 实验验证

由于实验条件的局限性,无法开展大型设备加载实验,同时结合公式(14)可知,沿钢缆方向的力为有效作用力。因此,为验证理论模型的有效性,本文使用垂直式载荷加载试验平台,针对钢缆的拉伸性能进行了实验验证,实验设备如图6所示。实验设置钢缆的有效长度为55 cm、横截面直径为5 mm,施加0.076 kN至1.140 kN的载荷,测出不同的形变量,结果如表1所示。

根据实验所得数据,计算出钢缆在不同载荷下的等效刚度,如图7所示。

由图7的实验计算结果可知,随着钢缆所受载

表1 钢缆所受不同载荷下的形变量

Table 1 Deformation of the wire rope under different loads

序号	载荷 (kN)	形变量 (mm)
1	0.076	0.152
2	0.204	0.308
3	0.412	0.528
4	0.612	0.748
5	0.824	0.962
6	0.912	1.062
7	1.140	1.308

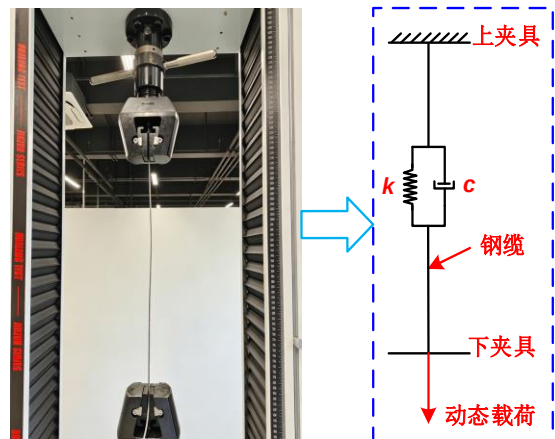


图6 实验设备和等效模型

Fig. 6 Experimental setup and equivalent model

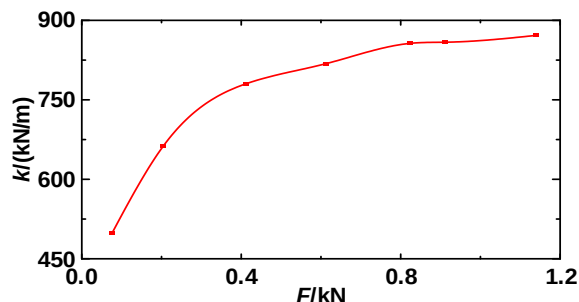


图7 实验等效刚度变化曲线

Fig. 7 Variation curves of the experimental stiffness coefficient

荷的增大,其等效刚度呈现非线性增长趋势。与仿真数据对比可知,两者变化趋势相同,当测试力为0.204 kN增加至0.824 kN时,等效刚度分别为662 kN/m与856 kN/m,变化量为29.31%,实验结果有效验证了本文所提研究方法的合理性与准确性。

2.4 牵引装置弹性动力学方程

在力矩突变引起的功率波动过程中,钢缆高势能位牵引端受力最大,并直接作用于减速环节,最终导致并网点的功率产生波动,而低势能位重物侧的位移最大,对机械牵引环节冲击最剧烈。因此,本文重点针对钢缆牵引端以及重物侧进行受力分析,其结构等效模型如图8所示。

如图8所示,长距离钢缆与质量块等距串联,共有 n 节钢缆-质量块单元,每段钢缆等效刚度为 k_i 、阻尼系数为 c_i ,位移 x_i 为第 i 个质量块与初始位置的相对位移, $i=0, 1, \dots, n$,系统牵引端受到第1段钢缆的拉力 T_1 。

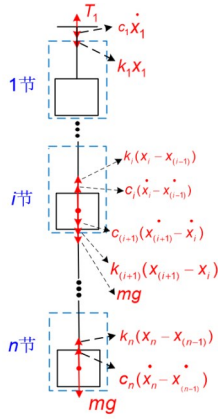


图8 钢缆-质量块串联式物理模型

Fig. 8 Series physical model of the wire rope and heavy block

由图1可知，稳定状态下，钢缆所受的力主要包括重力分量、摩擦力以及空气阻力，由于质量块运行速度与迎风面积相对较小，其产生的载荷与重力分量相比小于0.1%，因此忽略空气阻力，则沿钢缆方向受力及等效质量如公式（14）所示。

$$G = mg = M_0 g \sin \theta + \mu M_0 g \cos \theta \quad (14)$$

式中，质量块质量为 M_0 ，等效质量为 m ，等效重力为 G ，斜坡倾角 θ ，动摩擦因数 μ 。

当系统处于静平衡时，各个钢缆质量块单元静平衡位置受力分析如公式（15）所示。

$$\begin{cases} k_i(x_i - x_{(i-1)}) = mg + k_{(i+1)}(x_{(i+1)} - x_i) \\ k_n(x_n - x_{(n-1)}) = mg \end{cases} \quad (15)$$

在动态运行工况下，图8中牵引端和底端的受力分析如公式（16）所示。

$$\begin{cases} T_1 = k_1 x_1 + c_1 \dot{x}_1 + m \ddot{x}_1 \\ k_n(x_n - x_{(n-1)}) + c_n(\dot{x}_n - \dot{x}_{(n-1)}) = mg + m \ddot{x}_n \end{cases} \quad (16)$$

钢缆所承受的轴向载荷 F_i ，等于其承载的静态载荷 M_i 与系统加减速产生的惯性力的叠加，如公式（17）所示。

$$F_i = M_i(g + \ddot{x}_i) \quad (17)$$

轴向载荷影响钢缆的等效刚度 k_i 、阻尼系数 c_i 变化。中间段每个钢缆-质量块单元受到上下两段钢缆的拉力和自身重力，动力学方程如公式（18）所示。

$$m \ddot{x}_i + k_i(x_i - x_{(i-1)}) + c_i(\dot{x}_i - \dot{x}_{(i-1)}) = k_{(i+1)}(x_{(i+1)} - x_i) + c_{(i+1)}(\dot{x}_{(i+1)} - \dot{x}_i) + mg \quad (18)$$

对于第 i 个节点，定义状态向量 y_i ，如公式（19）所示。

$$y_i = [y_{1i} \ y_{2i}]^T = [x_i \ \dot{x}_i]^T \quad (19)$$

该节点状态变量的导数，如公式（20）（21）所示。

$$\dot{y}_{1i} = \dot{x}_i = y_{2i} \quad (20)$$

$$\dot{y}_{2i} = \frac{1}{m} [k_i y_{1(i-1)} - (k_i + k_{(i+1)}) y_{1i} + k_{(i+1)} y_{1(i+1)} + c_i y_{2(i-1)} - (c_i + c_{(i+1)}) y_{2i} + c_{(i+1)} y_{2(i+1)}] + g \quad (21)$$

将二阶微分方程组转化为一阶方程组的标准形式，如公式（22）所示。

$$\begin{bmatrix} \dot{y}_{1i} \\ \dot{y}_{2i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \frac{k_i}{m} & \frac{c_i}{m} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_{1(i-1)} \\ y_{2(i-1)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{k_i + k_{(i+1)}}{m} & -\frac{c_i + c_{(i+1)}}{m} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_{1i} \\ y_{2i} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ g \end{bmatrix} \quad (22)$$

质量块的力矩突变通过钢缆传递到牵引端，导致牵引端钢缆张力发生改变，进而引起高势能位牵引端功率的动态响应，如公式（23）所示。低势能位重物侧功率波动如公式（24）所示。

$$P = (k_1 x_1 + c_1 \dot{x}_1 + m \ddot{x}_1) \dot{x}_1 \quad (23)$$

$$P_n = mg(\dot{x}_n - \dot{x}_{(n-1)}) \quad (24)$$

式中，牵引端输出功率为 P ，底端质量块功率为 P_n 。

本文采用隐式时间积分法对微分方程进行时间域离散，并结合数值迭代法进行非线性求解。高势能位牵引端机械功率连接发电机侧，其较高功率波动难以满足电力系统对功率平滑输出的要求。低势能位重物侧功率波动作为系统底部激振源，不仅加剧了低势能位连接处钢缆断裂与质量块脱离斜坡轨道的风险，更会增加传动系统损耗，并作为滞后扰动影响系统稳定性。

3 重力储能机械环节功率波动特性分析

基于所提出的时变参数功率波动分析方法，本文以一套牵引电机位于高势能位的250 kW重力储能系统为例，系统分析了在长度100 m、直径60 mm钢缆牵引下，不同质量块数量、单块质量及运行速度对储能系统功率波动特性的影响规律，已将沿斜坡的重力分量及动摩擦力统一等效为质量块的等效质量，后续仿真分析中使用的质量参数均指该等效质量。

3.1 恒定与时变参数条件下的功率波动对比分析

以在线运行质量块总质量为50 t, 质量块数量为5块, 运行速度为0.5 m/s为例, 分别对钢缆等效刚度和阻尼系数采用恒定、时变两种参数形式进行分析, 得出高势能位牵引端功率与低势能位重物侧功率波动特性, 如图9所示。

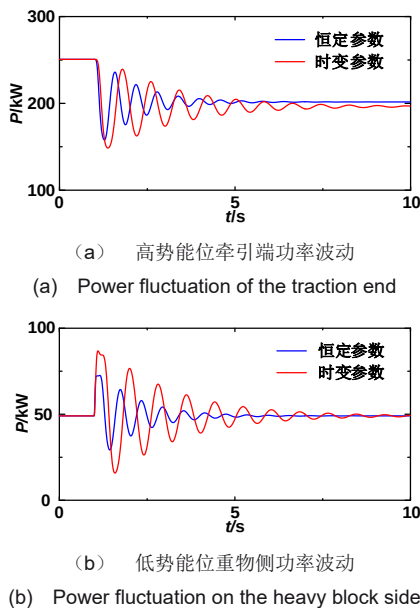


图9 恒定与时变参数功率波动对比
Fig. 9 Comparison of power fluctuation curves between constant and time-varying parameters

由图9可知, 时变参数与恒定参数相比, 功率波动量与衰减时长均有所增加, 其中高势能位牵引端功率在恒定参数与时变参数分析时, 功率波动量分别为158 kW与149 kW, 衰减时长分别为3.98 s与6.64 s, 牵引端输出功率波动量与衰减时长分别相差5.7%与66.83%。低势能位重物侧功率波动量与衰减时长分别相差19.65%与78.48%。由此可知, 采用时变参数进行分析能够更加准确反映长距离钢缆弹性、阻尼系数在不同工况下的非线性力学特性。

3.2 不同质量块数量的功率波动特性分析

重力储能系统工程设计中, 综合考虑牵引距离、重物总质量以及控制难度等多种因素, 采用不同数量质量块在线运行, 以质量块总质量为50 t, 运行速度为0.5 m/s为例, 质量块运行数量分别设为10、8、6、4块, 对应的理论力矩突变量分别为10.00%、12.50%、16.67%和25.00%, 针对上述

参数对高势能位牵引端功率与低势能位重物侧功率进行分析, 结果如图10、图11所示。

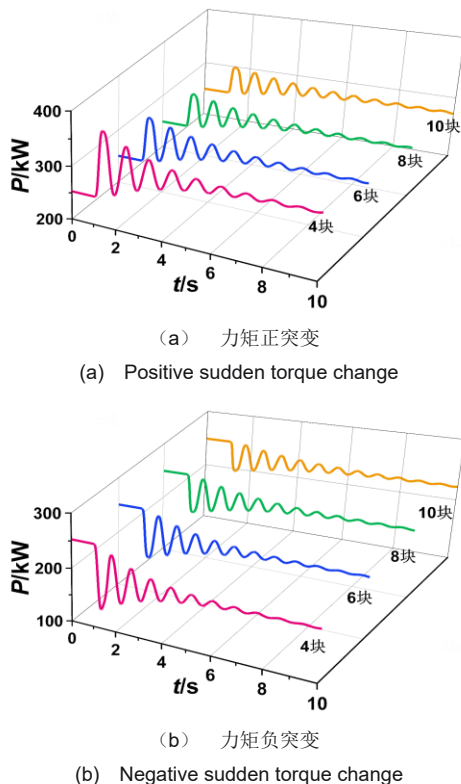
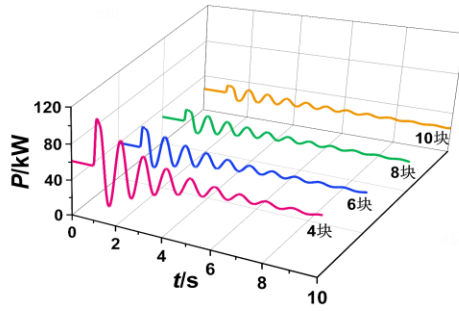


图10 不同力矩突变量的高势能位牵引端功率波动
Fig. 10 Power fluctuation curves of the traction end under different sudden torque changes

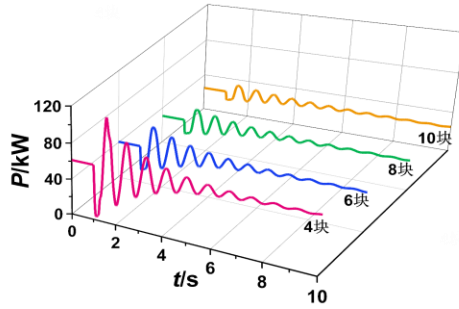
由图10可知, 不同力矩突变下的衰减时长基本稳定在5.56 s至6.39 s之间, 而功率波动率变化较大。当质量块数量为10块、8块和4块时, 力矩正突变下的功率波动率依次为19.6%、24.8%和50.4%; 负突变下的功率波动率依次为21.6%、27.6%和46%。由此可知, 力矩正、负突变下的功率波动率基本相同, 当力矩突变率由10%增至25%, 功率波动约由20%增至50%, 高势能位牵引端功率波动呈近似线性放大效应。

由图11可知, 低势能位重物侧的功率衰减时长基本不变, 功率波动趋势和牵引端功率波动相似, 但功率波动率更大, 以4块质量块为例, 稳定时功率约63kW, 在力矩正、负突变两种工况下, 峰值功率分别为113kW与4kW, 波动率为79.37%、93.65%, 约是牵引端功率波动率的2.04倍。由此可知, 力矩突变率由10%增至25%, 功率波动量约由38%增至85%, 低势能位重物侧功



(a) 力矩正突变

(a) Positive sudden torque change



(b) 力矩负突变

(b) Negative sudden torque change

图 11 不同力矩突变量的低势能位重物侧功率波动
Fig. 11 Power fluctuation curves on the heavy block side under different sudden torque changes

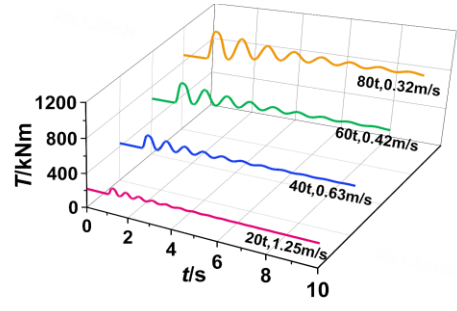
率波动具有非线性放大效应。

3.3 恒定功率条件下不同质量-速度配比的功率波动特性分析

当系统设计的额定功率一定时,可采用不同质量与速度的配比方案,考虑机械结构强度及控制难度等因素,总质量与运行速度通常可选择 20t, 1.25m/s、40t, 0.63m/s、60t, 0.42m/s、80t, 0.32m/s 等不同配比方式。每种配比条件下的质量块数量均为 5 块,得到高势能位牵引端力矩、功率波动与低势能位重物侧功率波动,如图 12、13、14 所示。

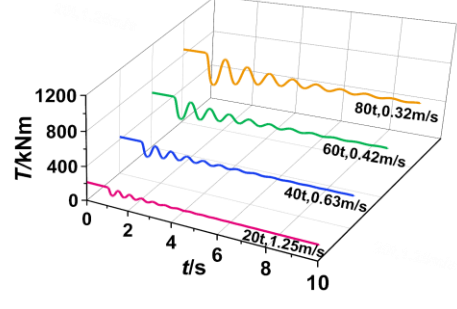
图 12 是不同质量-速度配比方案下高势能位牵引端力矩波动仿真结果,由图可知,当采用 40 t, 0.63 m/s 质量速度配比时,力矩正、负突变两种工况下,额定力矩分别为 400 kNm,峰值力矩分别为 558 kNm、237 kNm,两者相差了 39.5%、40.75%;当采用 80t, 0.32m/s 质量速度配比时,额定力矩分别为 800 kNm,峰值力矩分别为 1114 kNm、444 kNm,两者相差 39.25%、44.5%。

图 13 是不同质量-速度配比方案下高势能位牵



(a) 力矩正突变

(a) Positive sudden torque change



(b) 力矩负突变

(b) Negative sudden torque change

图 12 不同质量-速度匹配的高势能位牵引端力矩波动
Fig. 12 Torque fluctuation curves of the traction end under different mass-velocity matchings

引端功率波动仿真结果,由图可知,当采用 40t, 0.63m/s 质量速度配比时,力矩正、负突变两种工况下,峰值功率波动率分别为 40.12%、40.44%,衰减时长分别为 5.63s、6.11s;当采用 80t, 0.32m/s 质量速度配比时,峰值功率波动率分别为 39.93%、40.46%,衰减时长分别为 7.32s、8.03s。

结合图 12、13 可知,当力矩突变率相同时,不同质量-速度配比条件下,高势能位牵引端力矩和功率波动率基本不变,但随着质量增大,力矩的波动幅值会随之增大,功率波动的衰减时长呈对数型增加。

图 14 是不同质量-速度配比下低势能位重物侧功率波动,由图可知,当采用 20t, 1.25m/s 质量速度配比时,力矩正、负突变两种工况下,峰值功率为 58 kW 与 47 kW,功率波动率为 16%、6%,衰减时长分别为 4.27 s、2.13 s;当采用 40 t, 0.63 m/s 质量速度配比时,峰值功率为 74 kW 与 42 kW,功率波动率为 48%、16%,衰减时长分别为 7.89s、4.99s;当采用 80 t, 0.32 m/s 质量速度配

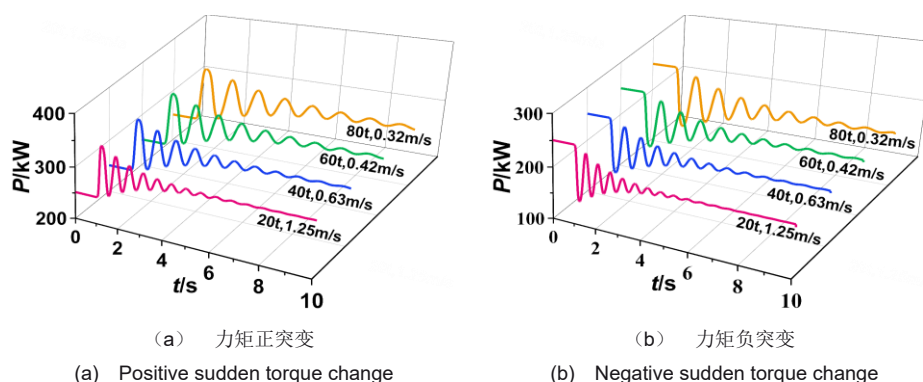


图 13 不同质量-速度匹配的高势能位牵引端功率波动

Fig. 13 Power fluctuation curves of the traction end under different mass-velocity matchings

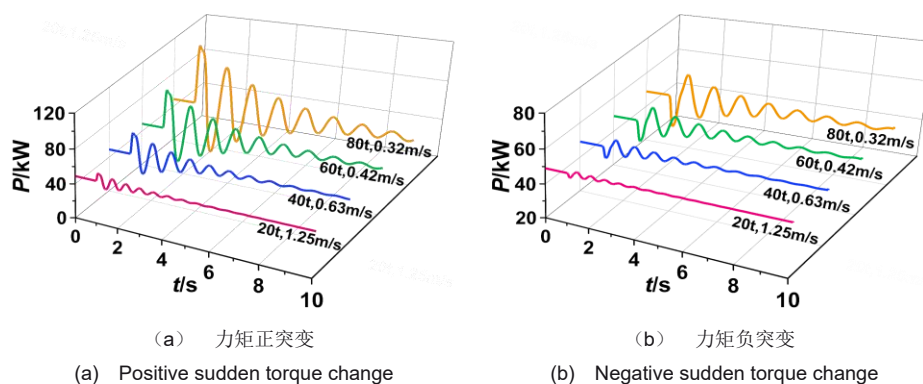


图 14 不同质量-速度匹配的低势能位重物侧功率波动

Fig. 14 Power fluctuation curves on the heavy block side under different mass-velocity matchings

比时, 峰值功率分别为 115 kW 与 31 kW, 功率波动率为 130%、38%, 衰减时长分别为 12.74 s、8.85 s。因此, 由 20 t 增至 80 t 的不同质量-速度配比时, 正力矩冲击下功率波动率由 16% 增至 130%, 负力矩冲击下功率波动率由 6% 增至 38%, 功率波动剧烈程度随载荷提升显著加剧, 且正力矩冲击波动率远高于负力矩冲击。

4 结 论

(1) 本文针对重力储能系统长距离钢缆牵引装置, 分析了钢缆多层螺旋缠绕结构特点, 以及各层钢丝轴向受力的分布规律, 明确了钢缆弹性与阻尼系数的主要影响因素, 推导出钢缆刚度、阻尼系数时变特性数学模型, 并结合长度 55 cm、直径 5 mm 的钢缆拉伸实验, 验证了模型的有效性。

(2) 分析了重力储能运行过程中钢缆的弹性动力学特性, 提出了长距离牵引钢缆时变参数条件下的重力储能系统机械环节功率波动分析方法, 构建

了钢缆牵引端与底端重物侧的弹性动力学方程。通过与恒定参数模型对比, 功率峰值与衰减时长分别相差 19.65% 与 78.48%。

(3) 功率波动仿真结果表明, 额定功率下, 总质量恒定仅调整质量块数, 使力矩突变由 10% 增至 25%, 波动衰减时长基本不变, 高势能位牵引端功率波动由 20% 线性升至 50%, 低势能位重物侧呈非线性放大至其 2.04 倍; 保持 5 块数量不变, 仅通过调整总质量由 20t 至 80t、速度由 1.25 m/s 至 0.32 m/s, 高势能位牵引端波动基本稳定, 但低势能位重物侧功率波动由 16% 剧增至 130%, 衰减时长同步延长为 4.27 s 至 12.74 s。

参考文献

- [1] 王青山, 李妍, 张群, 等. 基于带传动的垂直式重力储能系统能效分析模型与实验验证[J]. 储能科学与技术, 2025, 14(03):1141-1149.
WANG Q S, LI Y, ZHANG Q, et al. Energy efficiency analysis model and experimental verification of vertical gravity energy storage system based on belt drive[J]. Energy Storage Science

- and Technology, 2025, 14(03): 1141-1149.
- [2] Wenxuan T ,Zhengang L ,Weijiang C , et al.Solid gravity energy storage: A review[J].Journal of Energy Storage,2022,53.
- [3] Z. Wang et al., "Dynamic Programming-Based Mass Block Stacking Method of Gravity Energy Storage System for Minimum Energy Consumption, " in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 61, no. 6, pp. 9628-9639, Nov.-Dec. 2025.
- [4] 陈述平, 章光裕, 陈一铭, 等. 重力储能技术研究进展及展望[J]. 储能科学与技术, 2026, 15(4):1360-1362.
- CHEN S P, ZHANG G Y, CHEN Y M, et al. Research progress and prospect of gravity energy storage technology[J]. Energy Storage Science and Technology, 2026, 15(4): 1360-1362.
- [5] Sean O .Weights-Based Gravity Energy Storage Looks to Scale Up[J].Engineering,2022,143-6.
- [6] Z. Wang et al., "Key Parameters Design of Chain-Rail Based Slope Gravity Energy Storage System for Optimal Efficiency," in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 62, no. 1, pp. 1349-1358, Jan.-Feb. 2026.
- [7] 喻恒凝, 姚良忠, 程帆, 等. 重力储能在新型电力系统中应用:前景及挑战[J]. 中国电机工程学报, 2025, 45(18):7177-7193.
- YU H N, YAO L Z, CHENG F, et al. Application of gravity energy storage in novel power systems: prospects and challenges[J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(18): 7177-7193.
- [8] Z. Wang et al., "Mass-Block-Dragging-Based Starting Method for Synchronous Generator/Motor of Gravity Energy Storage System, " in IEEE Transactions on Industry Applications.
- [9] Shi Q ,Wang D ,Zeng X , et al.Research on the Design of Multi-Rope Friction Hoisting System of Vertical Shaft Gravity Energy Storage System[J].Applied Sciences,2024,14(17):7556-7556.
- [10] Cai K ,Han Y ,Zhu Y , et al.Dynamic modeling and performance analysis of suspended weight gravity energy storage system under wind loads[J]. Journal of Mechanical Science and Technology,2026,40(1):1-14.
- [11] Anisa E , Asmae B , Mohamed B . Modeling and Performance Evaluation of the Dynamic Behavior of Gravity Energy Storage with a Wire Rope Hoisting System[J]. Journal of Energy Storage, 2021,33102154-.
- [12] 罗晓悦, 邱清泉, 靖立伟, 等. 垂直式重力储能系统能效研究[J/OL]. 储能科学与技术, 1-16[2026-06-09].
- LUO X Y, QIU Q Q, JING L W, et al. Research on energy efficiency of vertical gravity energy storage system[J/OL]. Energy Storage Science and Technology, 1-16[2026-06-09].
- [13] Chen Y ,Li X ,Tong W , et al.Dynamic modeling and coordinated control of mountain cable-type gravity energy storage for efficient grid integration[J]. Journal of Energy Storage, 2026, 155(PA): 121474-121474.
- [14] 周睿, 洪剑锋, 曹君慈, 等. 竖井式重力储能发电效率及功率稳定策略研究[J]. 储能科学与技术, 2024, 13(10):3556-3565.
- ZHOU R, HONG J F, CAO J C, et al. Research on power generation efficiency and power stability strategy of vertical shaft gravity energy storage[J]. Energy Storage Science and Technology, 2024, 13(10): 3556-3565.
- [15] Hu J ,Zha K ,Wang Y , et al.Power control strategy of slope gravity energy storage system based on permanent magnet synchronous motor[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2025,3011(1):012070-012070.
- [16] 李震, 王斌, 牟雪鹏, 等. 基于瞬时功率镜像补偿的斜坡式重力储能系统功率平滑控制策略[J]. 电机与控制应用, 2024, 51(05):12-20.
- LI Z, WANG B, MOU X P, et al. Power smoothing control strategy of slope gravity energy storage system based on instantaneous power mirror compensation[J]. Electric Machines & Control Application, 2024, 51(05): 12-20.
- [17] 赵永明, 邱清泉, 聂子攀, 等. 重力/飞轮综合储能电机交流并网系统设计及运行特性[J]. 储能科学与技术, 2022, 11(12):3895-3905.
- ZHAO Y M, QIU Q Q, NIE Z P, et al. Design and operating characteristics of motor converter grid-connected system for gravity/flywheel integrated energy storage[J]. Energy Storage Science and Technology, 2022, 11(12): 3895-3905.
- [18] 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.
- 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.
- [19] Moussa L ,P.S. B ,E.R. M .Quasi-static cyclic behavior of wire rope isolators: comprehensive experimental study and improved mathematical modeling[J].Heliyon,2022,8(10):e10944-e10944.
- [20] 彭苗娇, 吴惠松, 林麒, 等. 考虑绳阻尼的绳系并联机器人动力学特性分析[J]. 北京航空航天大学学报, 2020, 46(2):304-313.
- PENG M J, WU H S, LIN Q, et al. Dynamic characteristics of wire-driven parallel robot with wire damping[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2020, 46(2): 304-313.