



垂直循环式直线电机重力储能系统设计与功率特性分析

艾立旺^{1,2}, 孙嘉隆¹, 蒋思远^{1,2}, 肖磊^{1,2}, 高彩霞^{1,2}, 许孝卓^{1,2}

(¹河南理工大学电气工程与自动化学院; ²河南省智能装备直驱技术与控制国际联合实验室, 河南 焦作 454003)

摘要: 针对垂直式重力储能系统在规模扩展过程中存在规模扩展方式受限以及多载台循环运行条件下系统功率特性尚不清晰的问题, 提出一种单井道结构垂直循环式直线电机重力储能系统。首先, 介绍系统拓扑结构和工作原理, 描述系统多种运行方式, 阐明载台循环复用、重物数量调节和载台错峰发车对系统扩容及功率调节的作用机理。其次, 通过错峰发车时序模型将批次内时移叠加和批次间循环复用统一描述, 建立多载台循环运行条件下的系统功率模型。最后, 结合 MATLAB/Simulink 构建联合仿真模型, 在最小安全间距约束下分析批次配置变化对系统储能规模与输出能力的调节作用, 并进一步研究启动相位参数对系统功率波动的影响。结果表明: 在设定参数及最小安全间距约束下, 改变系统在运重物数量可实现系统平均功率的离散调节; 在不同批次配置下, 调节批次内载台错峰发车程度可有效降低系统功率波动, 提高系统功率平稳性, 储能模式系统峰谷差和功率标准差最大降幅分别为 83.2% 和 85.6%; 释能模式系统峰谷差和功率标准差最大降幅分别约 99.1% 和 99.0%。

关键词: 重力储能; 直线电机; 循环式; 功率特性

doi: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2026.0585

中图分类号: TK 02

文献标志码: A

文章编号: 2095-4239 (2026) 10-4036-10

Design and power characteristic analysis of vertical circulating linear motor gravity energy storage system

AI Liwang^{1,2}, SUN Jialong¹, JIANG Siyuan^{1,2}, XIAO Lei^{1,2}, GAO Caixia^{1,2}, XU Xiaozhuo^{1,2}

(¹School of Electrical Engineering and Automation, Henan Polytechnic University; ²Henan International Joint Laboratory of Direct Drive and Control of Intelligent Equipment, Jiaozuo 454003, Henan, China)

Abstract: Vertical gravity energy storage systems suffer from limited scalability, and their power characteristics under multi-carrier-platform cyclic operation are ambiguous. To address these issues, this study proposes a linear-motor-based single-shaft vertical circulating gravity energy storage system. This study first introduced the system topology, operating principle, and multiple operating modes of the proposed system. Next, the action mechanisms of carrier-platform cyclic reuse, adjustment of the number of in-service heavy masses, and staggered carrier-platform dispatch in relation to the system capacity expansion and power regulation were elucidated. Subsequently, a staggered-dispatch timing-sequence model was adopted to generate a unified description of intra-batch time-shift superposition and inter-batch cyclic

收稿日期: 2026-07-03; 修改稿日期: 2026-07-27。

基金项目: 国家自然科学基金 (52307050); 河南省自然科学基金 (252300421328); 河南省科技攻关项目 (252102241048); 河南省博士后科研经费资助项目 (HN202426); 河南理工大学青年骨干教师资助计划 (2024XQG-01)。

第一作者: 艾立旺 (1989—), 男, 博士, 副教授, 从事直线电机与新型电磁直驱装备、新型重力储能/发电系统研究, E-mail: ailiwang@hpu.edu.cn; 通信作者: 许孝卓, 教授, 研究智能装备直驱技术及集成应用、新型重力储能发电系统, E-mail: xxz@hpu.edu.cn。

引用本文: 艾立旺, 孙嘉隆, 蒋思远, 等. 垂直循环式直线电机重力储能系统设计与功率特性分析[J]. 储能科学与技术, 2026, 15(10): 4036-4045.

Citation: AI Liwang, SUN Jialong, JIANG Siyuan, et al. Design and power characteristic analysis of vertical circulating linear motor gravity energy storage system[J]. Energy Storage Science and Technology, 2026, 15(10): 4036-4045.

reuse. Based on this description, a system-level power model with multi-carrier-platform cyclic operation was developed. Finally, a MATLAB/Simulink-based co-simulation model was constructed to analyze how batch-configuration variation regulates system energy storage capacity and output capability under the minimum safe-spacing constraint. Additionally, the model was used to examine the influence of start-up phase parameters on system power fluctuations. The results showed that under the minimum safe-spacing constraint, the system average power can be regulated discretely by adjusting the number of in-service heavy masses. Furthermore, under the parameter settings adopted in this study and across different batch configurations, system power fluctuations can be reduced and power stability regulation improved by appropriately regulating the degree of intra-batch staggered dispatch. In the energy storage mode, the system peak-to-valley difference and power standard deviation decreased by up to approximately 83.2% and 85.6%, respectively. In the energy release mode, the corresponding maximum decreased to approximately 99.1% and 99.0%, respectively.

Keywords: gravity energy storage; linear motor; vertical circulating structure; power characteristics

随着风电、光伏等可再生能源装机规模持续增长, 电力系统对大规模、长寿命、环境约束小的储能技术需求不断增强^[1]。重力储能具有选址灵活、储能介质稳定、循环寿命长等优势, 近年来受到国内外广泛关注^[2-4]。

现有研究从储能原理、选材选址和技术经济性等角度, 对不同重力储能方案的适用边界和工程实现条件开展了持续讨论^[5-6]。围绕铁轨式、斜坡式和废弃矿井式等技术路线, 已有研究分别从效率影响因素、功率平滑控制和系统参数优化等方面开展探索, 表明重力储能研究已由概念构想逐步延伸至性能分析、控制策略与容量配置等层面^[7-8]。相较于其他重力储能形式, 垂直式重力储能具有占地紧凑和场景适应性较强等特点, 该类系统具有较好的应用潜力^[9]。

针对垂直式重力储能的工程应用, 包兴芮等^[10]面向废弃矿井场景, 从风光储协同角度研究了重力储能电站容量配置和参数优化。相关研究^[11]针对废弃矿井场景下的悬挂式重力储能指出, 矿井深度、井筒尺寸以及驱动功率等条件会共同影响系统储能规模与功率能力。在系统运行性能方面, 周睿等^[12]建立了竖井式重力储能系统效率模型和功率模型, 分析系统结构参数对系统效率和输出功率的影响; 曾小超等^[13]在物理模型、效率模型和功率模型基础上构建了多目标优化模型, 以功率平稳和波动率最小为目标优化重物参数配置及输出功率曲线。此

外, 模块化重力储能可通过多个重物单元协同运行实现容量配置, 但多重物切换和功率叠加也会产生功率波动及协调控制问题^[14]。上述研究表明, 竖井式和废弃矿井式方案的储能规模及功率能力受到井筒条件和提升能力约束, 模块化方案能够通过增加运行单元扩展容量, 但也相应增加了多单元运行组织和功率协调控制需求, 垂直式重力储能的研究重点已逐步转向系统运行特性及其优化问题。

在此基础上, 直线电机为垂直式重力储能提供了新的实现思路。闫文举等^[15]围绕废弃矿井重力储能系统, 讨论了其构型设计、直线电机类型及多电机控制等关键技术, 指出采用固定定子轨道替代传统绳索和卷扬中间环节有助于提高系统稳定性。同时, 现有研究还开展了拓扑结构、构型设计和充放电策略优化等方面的探索^[16], 结果表明, 运行策略优化同样能够显著影响系统运行成本与输出特性。从结构与运行组织方式看, 现有竖井式和废弃矿井式方案多采用重物沿既定通道往返运行, 模块化方案主要通过增加重物或提升单元扩展容量, 已有直线电机方案则重点解决载荷直接驱动及多电机控制问题。然而, 针对单井道闭合循环条件下的载台循环、在运重物数量调节及多载台发车时序, 尚缺少统一的描述方法, 难以表征多载台循环运行过程中的功率叠加与波动规律。

基于上述分析, 本研究设计了一种垂直循环式直线电机重力储能系统, 该系统适用于具备竖向空

间、需要多载台连续循环运行及分级调节输出能力的应用场景。在系统运行机理分析的基础上，综合考虑批次内时移叠加、批次间连续投入和循环复用过程，建立了考虑多载台错峰发车的系统功率模型；进一步结合 MATLAB/Simulink 联合仿真，分析在运重物数量变化对系统输出能力的调节作用，并比较不同程度错峰发车条件下系统功率指标的变化情况，为垂直循环式直线电机重力储能系统的运行组织和功率平滑提供理论依据。

1 垂直循环式直线电机重力储能系统

1.1 拓扑结构

垂直循环式直线电机重力储能系统采用多轨道并行结构，可在垂直单井道条件下实现多载台循环运行。系统主要由载台、运输轨道、旋转层结构及直线电机驱动系统构成，上下分别布置储能区域，通过贯穿井道的垂直轨道运行载台实现重物的提升与下放。

如图 1 所示，系统整体呈正八棱柱结构，其外侧表面交替布置负载轨道与空载轨道，形成若干个循环路径。该结构适用于具备竖向空间、需要多载台连续循环运行及分级调节输出能力的应用场景。单井道多轨道布置能够实现负载运输与空载返回路径分离，并通过载台循环复用减少载台在系统内长期停留。直线电机初级、次级、直线导轨和滑轨构成直线电机驱动系统，载台由直线电机直接驱动运行，直线电机初级固定于载台侧面，次级铺设于轨道表面，实现垂直方向直接驱动。系统在井道上下端分别设置旋转层，通过旋转层实现载台在负载轨道与空载轨道之间的换轨衔接，在单井道内形成闭合循环路径。如图 2 所示，旋转层表面铺设与垂直轨道相匹配的过渡轨道，其旋转动力由内部弧形电机提供。系统参数见表 1。

1.2 运行方式

垂直循环式直线电机重力储能系统采用循环运行方式，载台并非沿单一通道往返运行。系统通过顶部和底部旋转层，将井道内交替布置的负载通道与空载通道连接形成循环路径。将按既定顺序依次投入运行的一组载台定义为同一批次。同一批次内相邻载台依次发出的时间差定义为批次内发车间隔，相邻批次首发载台进入系统的时间差定义为批次间发车间隔。前者反映同一批次内载台的时序分

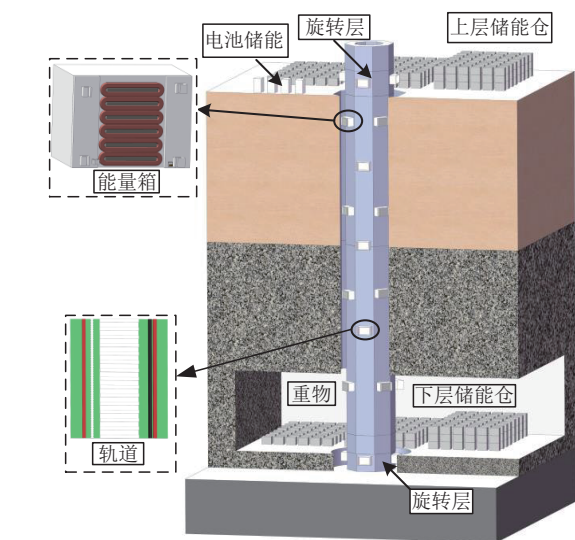


图 1 垂直循环式直线电机重力储能系统拓扑结构
Fig. 1 Topology of vertical circulating linear motor gravity energy storage system

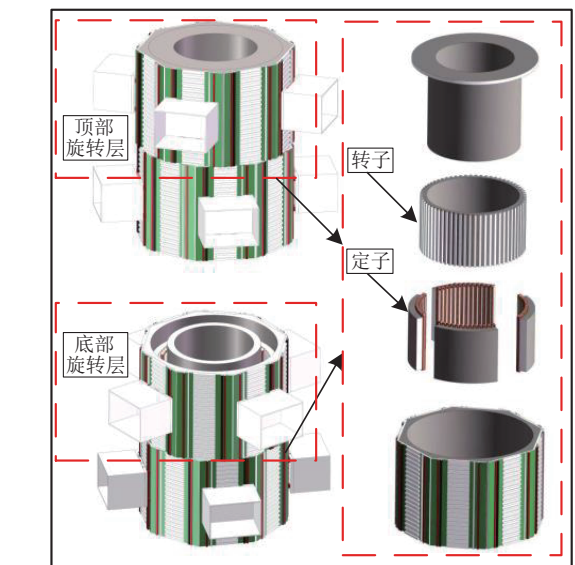


图 2 旋转层结构
Fig. 2 Rotating layer structure diagram

表 1 系统参数
Table 1 System size

参数	数值
系统高度	100 m
储能速度	1 m/s
释能速度	2 m/s
重物质量	12500 kg
能量箱质量	2500 kg
安全距离	30 m

散程度，后者反映系统在运重物持续投入的节拍。图 3(a)给出了单载台循环运行示意图。对于单个载

台而言，一个完整循环包括负载运行段、端部作业段和空载回收段：载台装载重物后进入负载通道完成单程垂直运输，到达端部旋转层后卸载重物，并随旋转层切换至对应空载通道返回另一端，进入下一轮运行准备状态。多载台运行时，载台按批次组织循环运行。如图 3(b)所示，同一批次内的载台分别布置于不同的并行轨道，可同时投入运行，形成同步发车方式。同步发车过程中，各载台沿相互独

立的轨道运行，并以同批次协同方式完成端部换轨作业，不形成相邻载台对同一工位的连续占用；相邻批次载台再次进入同一轨道时，仍需满足最小安全间距要求。如图 3(c)所示，多载台错峰发车时，同一批次内载台按照一定时间间隔依次投入运行，使其到达端部旋转层的时刻相互错开。此时，相邻载台需依次完成换轨和码垛作业，其到达时间间隔应满足端部作业时间约束。

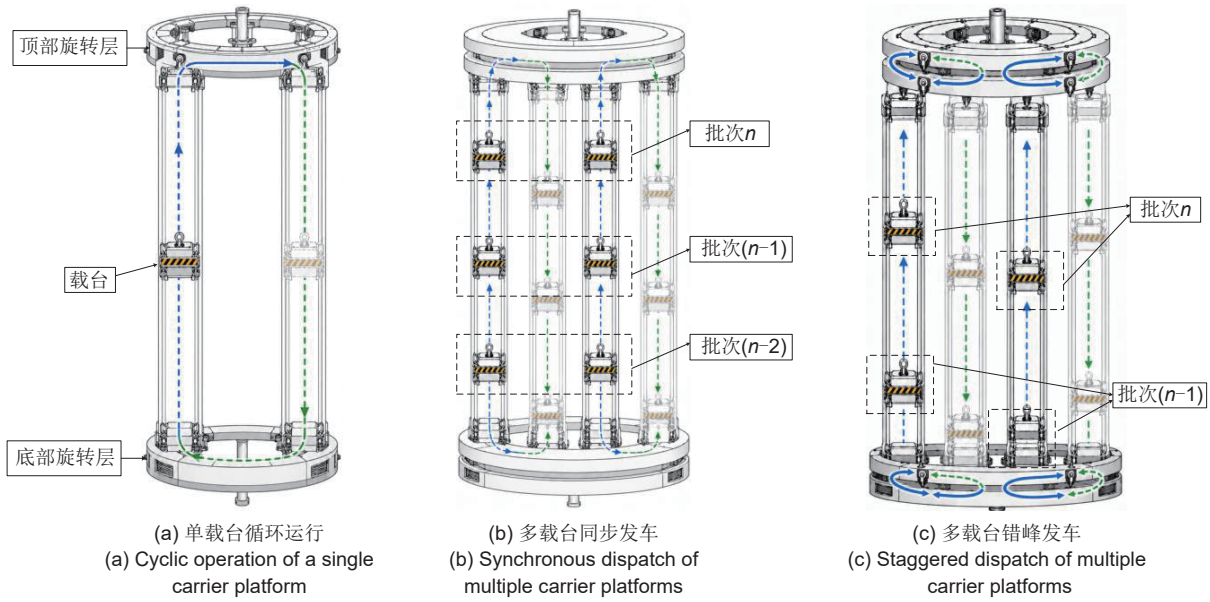


图 3 系统运行方式

Fig. 3 Schematic of system operating modes

2 系统功率模型

为分析垂直循环式单井道重力储能系统在载台错峰发车下的系统功率特性，在单载台循环运行过程基础上，建立基于启动相位的系统功率模型。

2.1 单载台循环运动学模型

设载台在井道内的有效直线运动高度为 H ，匀速运行速度为 v_m ，加速度为 a 。单程直线运动采用梯形速度曲线，包含加速、匀速与减速三段。

加速段时间为：

$$t_a = \frac{v_m}{a} \quad (1)$$

减速段与加速段的速度变化过程对称，减速段时间为：

$$t_d = t_a = \frac{v_m}{a} \quad (2)$$

匀速段时间为：

$$t_c = \frac{H}{v_m} - \frac{v_m}{a} \quad (3)$$

单程直线运动时间为：

$$T_v = t_a + t_c + t_d = 2t_a + t_c \quad (4)$$

式(1)~式(4)描述单个载台在竖直方向上由静止加速至匀速运行，并最终减速至静止的运动过程。考虑负载运行、端部作业和空载回收过程后，单个载台一次完整循环时间为 T_{cyc} 。其中，装载、卸载及旋转换轨等端部作业由系统辅助储能供能，不计入系统功率，但其持续时间计入单载台完整循环时间。

2.2 单载台完整循环功率

规定系统向电网输出功率为正，从电网吸收功率为负。单载台完整循环包括负载运行段和空载回收段，负载运行段等效质量记为 m_h ，空载回收段等效质量记为 m_e 。由于两阶段等效质量和运行方向不同，单载台循环功率需同时计入负载运行功率和空载回收功率。

单载台完整循环功率可写为:

$$p_0(t) = p_h(t) + p_e(t), 0 \leq t < T_{\text{cyc}} \quad (5)$$

式中, $p_h(t)$ 为负载运行功率; $p_e(t)$ 为空载回收功率。

在竖直运行阶段, 瞬时功率由牵引力和运行速度共同决定。对于任意运行阶段 q , 其功率表示为:

$$p_q(t) = [m_q g + m_q a_q(t)] v_q(t) \quad (6)$$

式中, m_q 为第 q 个运行段的等效质量; $v_q(t)$ 和 $a_q(t)$ 分别为该阶段的速度和加速度。重力项反映载台克服或释放重力势能对应的功率, 惯性项反映加速和减速过程中动能变化对瞬时功率的影响。式(6)用于描述竖直运行阶段的瞬时功率构成, 考虑到瞬时功率尖峰的存在^[17], 惯性功率项会产生瞬时功率突变。为突出多载台运行时序对系统功率的影响, 后续系统功率建模忽略惯性功率项, 采用式(7)作为单载台负载运行功率和空载回收功率计算的基础, 用于后续单批次载台功率时移叠加。

$$p_q(t) = m_q g v_q(t) \quad (7)$$

2.3 错峰发车时序模型

为描述同一批次内不同载台的发车时序关系, 定义启动相位参数 φ , 批次间发车间隔 ΔT , 则批次内相邻载台的实际错峰时间为 $\varphi \Delta T$ 。当 $\varphi=0$ 时, 批次内各载台同步发车; 当 $\varphi>0$ 时, 批次内载台按固定时间差错峰发车。对于错峰发车方式, 受旋转层换轨时间和码垛作业时间约束, 批次内发车间隔不能过小。因此, 非零启动相位参数只能在满足端部作业约束的离散可行值范围内选取。

每个批次包含 4 台载台, 则同一批次内第 j 个

载台相对于本批次首台载台的启动时刻为:

$$t_j = (j-1)\varphi\Delta T, j = 1, 2, 3, 4 \quad (8)$$

据此, 单批次功率可由单载台循环功率经时移叠加得到:

$$P_{\text{batch}}(t) = \sum_{j=1}^4 p_0(t - t_j) \quad (9)$$

式(8)和式(9)表明, φ 的变化改变了批次内各载台运行的时域重叠关系, 从而影响单批次功率波形的峰谷分布和平滑程度。

2.4 多批次系统功率模型

在单批次功率模型基础上, 建立多批次系统功率叠加模型。系统运行过程中, 投放的第 k 批次载台的启动时刻为:

$$t_k = (k-1)\Delta T, k = 1, 2, \dots, n \quad (10)$$

系统功率可表示为:

$$P_{\text{sys}}(t) = \sum_{k=1}^n \sum_{j=1}^4 p_0(t - t_k - t_j) \quad (11)$$

为保证载台资源的循环利用, 单载台完整循环时间 T_{cyc} 与批次间发车间隔 ΔT 满足:

$$N\Delta T = T_{\text{cyc}} \quad (12)$$

连续投入设定批次量的载台后, 首批次载台完成循环, 从而满足周期性条件:

$$P_{\text{sys}}(t + T_{\text{cyc}}) = P_{\text{sys}}(t) \quad (13)$$

多批次系统功率叠加模型如式(11)~(13)所示。该模型表明, 系统级功率由单载台循环功率、批次内启动间隔和批次间发车节奏共同决定。

为定量评价系统级功率输出特性, 选取平均功率、峰谷差和功率标准差作为主要评价指标, 其定义及作用见表 2。

表 2 系统功率特性评价指标

Table 2 Evaluation indices of system power characteristics

评价指标	定义式	作用
平均功率 $\bar{P}$	$\bar{P} = \frac{1}{T_{\text{cyc}}} \int_0^{T_{\text{cyc}}} P_{\text{sys}}(t) dt$	表征系统在一个循环周期内的平均功率水平, 用于评价系统输出能力等级。
峰谷差 ΔP	$\Delta P = P_{\text{max}} - P_{\text{min}}$	表征系统周期功率最大值与最小值之间的差异, 用于评价功率波动幅值。
功率标准差 σ_P	$\sigma_P = \sqrt{\frac{1}{T_{\text{cyc}}} \int_0^{T_{\text{cyc}}} [P_{\text{sys}}(t) - \bar{P}]^2 dt}$	表征系统功率围绕平均功率的离散程度, 用于评价系统运行平稳性。

3 仿真结果分析

3.1 功率仿真模型

基于前述系统功率模型, 构建了面向多载台循环运行功率的 MATLAB/Simulink 联合仿真框架,

流程如图 4 所示。

联合仿真按照单载台、单批次和多批次循环三个层级展开。首先, 在 Simulink 中建立单载台运动学与功率模型, 根据载台运行状态和速度曲线输出重载运行、端部作业及空载回收全过程的功率时

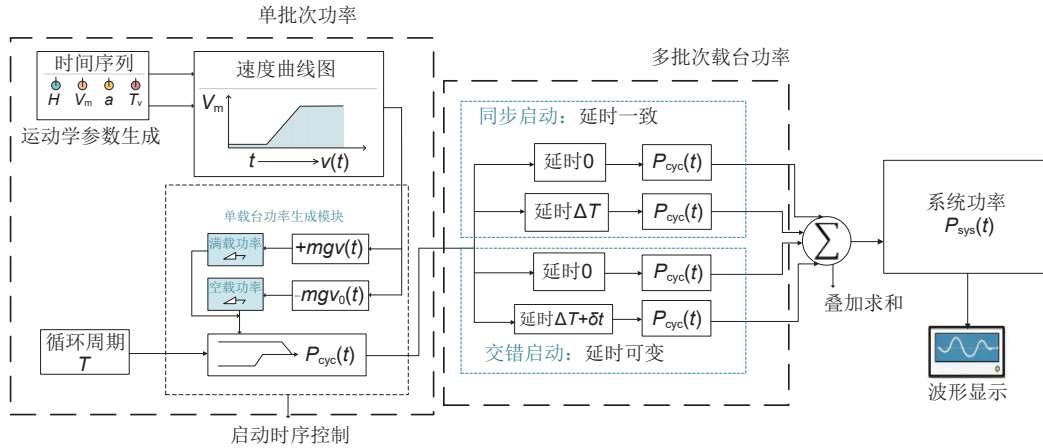


图4 多载台循环系统功率的MATLAB/Simulink联合仿真流程

Fig. 4 MATLAB/Simulink co-simulation workflow for power of multi-carrier cyclic system

序；随后依据批次内发车间隔，将4个单载台模型进行时移组合，得到单批次功率。MATLAB读取Simulink输出的单批次功率，按照批间发车间隔完成多批次时移叠加，并结合载台循环复用条件构造系统周期功率。

3.2 批次配置变化下的系统功率调控特性

功率可调是循环式重力储能系统的重要运行特征。在结构参数和单载台运行速度确定的条件下，批次配置 N 决定循环运行中参与运行的载台总数，进而影响重物数量、系统储能规模和平均功率水平。考虑多载台连续运行过程中的运行安全，取同一轨道上相邻载台最小安全间距(L_s)为30 m，并据此确定批次配置 N 的可行范围。当批间发车间隔 $\Delta T \geq t_a$ 时，前序载台已运行距离为：

$$s(\Delta T) = v_m \Delta T - \frac{v_m^2}{2a} \quad (14)$$

考虑同一轨道上相邻载台的运行安全，后续载台发出时，前序载台已运行距离应不小于最小安全间距，即满足 $s(\Delta T) \geq L_s$ ，可得批间发车间隔下限：

$$\Delta T_{\min} = \frac{L_s}{v_m} + \frac{v_m}{2a} \quad (15)$$

结合循环复用关系可得批次满足

$$N \leq \frac{T_{cyc}}{\Delta T_{\min}} \quad (16)$$

代入本研究参数，储能工况和释能工况下最大可行整数批次均为6。此外，当 $N=1$ 和 $N=2$ 时，系统运行接近单批次运行和双批次叠加，多载台连续接入与循环复用特征不充分，因此针对 $N=3、4、5、6$ 四种批次配置开展分析。

图5给出了不同批次配置下系统平均功率和功

率标准差的变化情况。由图5(a)可知，随着批次配置 N 增加，储能模式平均功率由-560.57 kW变化至-1121.15 kW，释能模式平均功率由1032.64 kW增加至2065.27 kW，系统可通过改变批次配置实现功率调节，且调节结果呈离散阶跃特征。由图5(b)可知，功率标准差并未随批次配置 N 增加而持续减小，说明仅通过增加在运批次难以同步改善系统功率波动。因此，需要进一步从多载台启动时序角度探究提升系统功率平稳性的方法。

3.3 启动相位对系统功率波动的影响

批次配置 N 变化主要体现为对系统输出能力的离散扩展，对功率波动的改善作用有限。为分析各载台功率时序叠加关系对系统功率波动的影响，以 $N=5$ 批次配置为例，分析 $\varphi=0、1/12、1/8、1/6$ 和 $1/4$ 五种启动相位设置下的系统功率曲线。由图6(a)可知，储能模式下，当 $\varphi=0$ 时，同一批次内载台同步发车，多载台功率分量在时间域内集中叠加，系统功率波动明显；随着 φ 增大，系统周期功率曲线趋于平缓。由图6(b)可知，释能模式下系统功率波形同样随 φ 增大而趋于平滑，且 $\varphi=0$ 同步发车时峰谷波动更为明显。这说明通过改变批次内各载台的发车时序，可调整多载台功率的时域叠加关系，从而改善系统功率波形。

为比较不同在运重物数量下错峰发车的调节效果，进一步补充 $N=3、4、6$ 工况，并与 $N=5$ 工况对比，分析不同 $N-\varphi$ 组合对应的功率品质指标变化。储能模式下，由图7可知，随着 φ 增大，不同批次配置下系统峰谷差、功率标准差均总体下降，表明错峰发车能够削弱同步发车引起的功率波动，

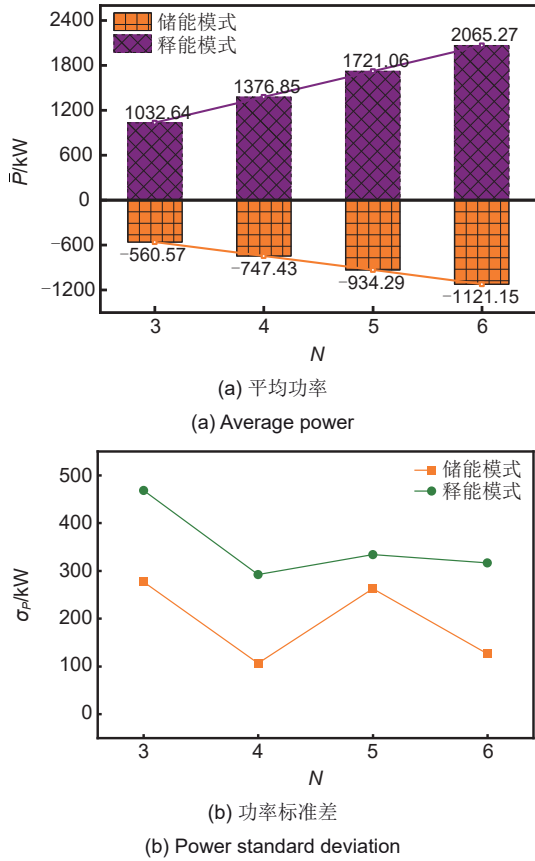


图5 不同批次配置下系统部分功率指标的变化
Fig. 5 Changes of some power indexes of system under different batch configurations

在本研究所考察工况中, 批次配置 $N=3$ 、启动相位 $\varphi=1/4$ 工况下, 系统峰谷差由 588.6 kW 降至 98.84 kW, 降幅为 83.2%; 功率标准差由 276.71 kW 降至 39.97 kW, 降幅为 85.6%, 为储能模式下的最大降幅。部分储能模式下的 $N-\varphi$ 组合在较大启动相位时指标值较为接近, 说明继续增大 φ 后的改善幅度减小。

图8给出了释能模式下不同 $N-\varphi$ 组合对应的变化, 同样可以看出释能模式下峰谷差和功率标准差均随 φ 增大明显降低, 在本研究所考察工况中, 批次配置 $N=4$ 、启动相位 $\varphi=1/4$ 工况, 系统峰谷差由 786.76 kW 降至 7.36 kW, 降幅为 99.1%; 功率标准差由 292.07 kW 降至 3.02 kW, 降幅为 99.0%, 为释能模式下的最大降幅。相较于储能模式, 在本研究考察工况范围内, 释能模式下错峰发车对功率波动的改善幅度更大。

综合图6~图8可知, 启动相位参数 φ 能够通过错开同一批次内载台发车时刻, 降低系统峰谷差

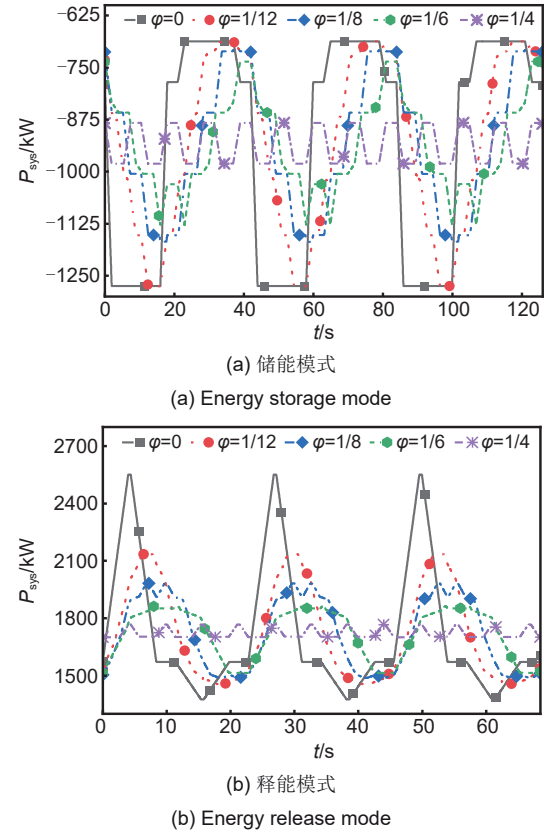


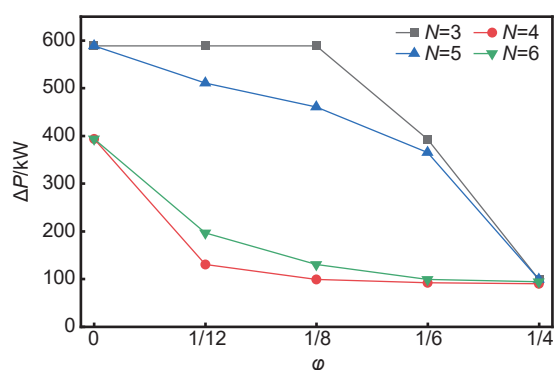
图6 批次配置 $N=5$ 时不同启动相位参数下的系统周期功率曲线
Fig. 6 Periodic system power curves under different start-up phase parameters at $N=5$

和功率标准差, 提高系统功率平稳性。同时, 不同批次配置下错峰发车对系统功率指标的改善程度存在差异, 其原因在于, 在启动相位参数相同的条件下, 改变批次配置不仅改变系统中参与叠加的载台数量, 还会同步改变批间发车间隔和批次内实际错峰时间。单载台循环功率由负载运行段和空载回收段构成, 其中负载运行功率与空载回收功率的符号、幅值和持续时间并不相同。功率标准差能够反映整个周期内功率围绕平均值的离散程度, 为进一步比较不同 $N-\varphi$ 组合下的系统功率平稳性改善效果, 后续采用归一化功率标准差进行分析。

3.4 不同 $N-\varphi$ 组合下的功率平稳性改善效果

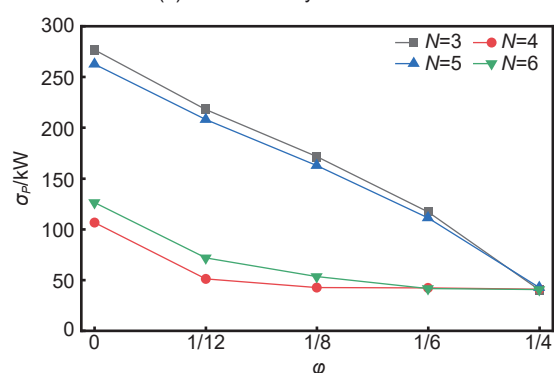
为比较不同批次配置下错峰发车对系统功率平稳性的改善程度, 以各批次配置对应的同步发车工况的功率标准差作为基准, 定义归一化功率标准差。

$$K_o(N, \varphi) = \frac{\sigma_P(N, \varphi)}{\sigma_P(N, 0)} \quad (17)$$



(a) 峰谷差

(a) Peak-to-valley difference



(b) 功率标准差

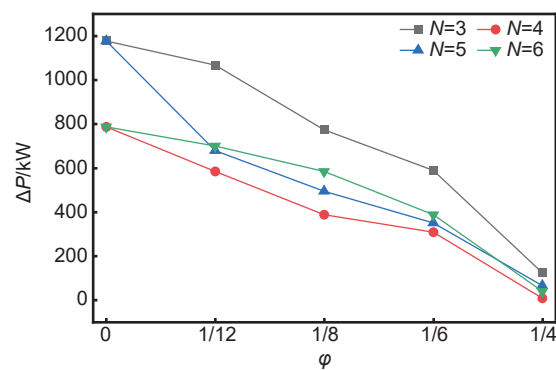
(b) Power standard deviation

图7 储能模式下启动相位参数对系统功率波动指标的影响
Fig. 7 Effects of start-up phase parameter on system power fluctuation indices in energy storage mode

式中, $\sigma_P(N, \varphi)$ 为批次配置 N 和启动相位 φ 组合工况下对应的功率标准差; $\sigma_P(N, 0)$ 为相同批次配置下 $\varphi=0$ 时的功率标准差。 K_σ 越小, 表示相对于同步发车工况的功率平稳性改善效果越明显。

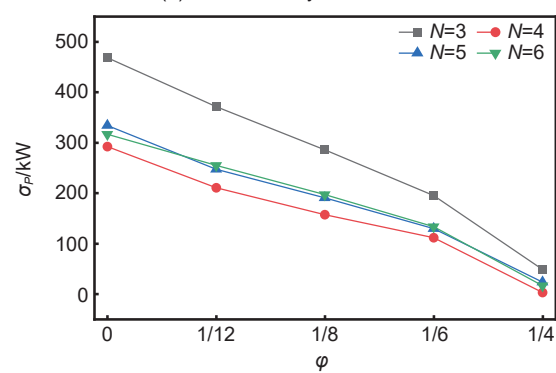
图9给出了储能模式下 K_σ 随批次配置和启动相位变化的归一化分布结果。由图可知, 随着 φ 增大, 不同批次配置下 K_σ 整体降低, 但下降幅度存在差异。其中, $N=3$ 、 $\varphi=1/4$ 工况和 $N=5$ 、 $\varphi=1/4$ 工况改善较为明显, K_σ 分别降至 0.144 和 0.161, 较同步发车工况分别降低 85.6% 和 83.9%; $N=6$ 、 $\varphi=1/4$ 工况下 K_σ 为 0.319, 较同步发车工况降低 68.1%。对于 $N=4$ 批次配置, 当 φ 增大至 $1/8$ 后, K_σ 基本稳定在 0.397 左右, 继续增大启动相位后的改善幅度较小。由此可见, $N=4$ 批次配置在 $\varphi \geq 1/8$ 后已接近稳定改善水平。

图10给出了释能模式下 K_σ 随批次配置和启动相位变化的归一化分布结果。由图可知, 释能模式



(a) 峰谷差

(a) Peak-to-valley difference



(b) 功率标准差

(b) Power standard deviation

图8 释能模式下启动相位参数对系统功率波动指标的影响
Fig. 8 Effects of start-up phase parameter on system power fluctuation indices in energy release mode

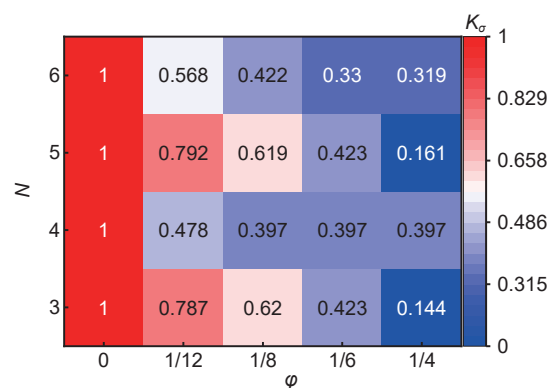


图9 储能模式下不同批次配置与启动相位参数对应的归一化功率标准差

Fig. 9 Normalized power standard deviation under different batch configurations and start-up phase parameters in energy storage mode

下 K_σ 随 φ 增大下降得更为明显。在 $\varphi=1/4$ 时, $N=3$ 、4、5、6 对应的 K_σ 分别为 0.103、0.010、0.070 和 0.052, 与同步发车工况相比分别降低 89.7%、99.0%、93.0% 和 94.8%。

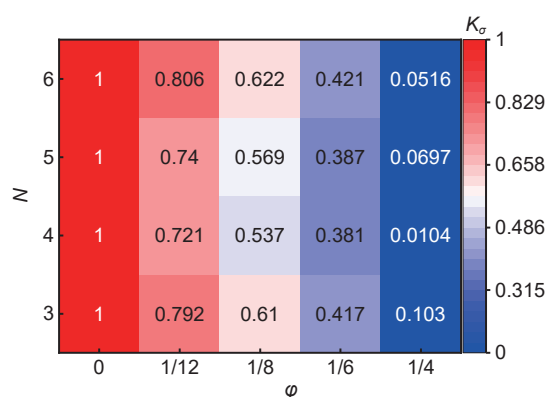


图10 释能模式下不同批次配置与启动相位参数对应的归一化功率标准差

Fig. 10 Normalized power standard deviation under different batch configurations and start-up phase parameters in energy release mode

综合图9、图10可以看出,储能模式和释能模式下错峰发车的改善幅度存在差异,不同批次配置下的功率平稳性改善效果并不完全单调,主要与负载运行段和空载回收段的功率幅值、持续时间及其叠加位置有关。按照本研究功率方向约定,储能模式下重物上升对应电动吸收功率,空载载台下降产生反向的回收功率;释能模式下重物下降对应发电输出功率,空载载台上升则消耗部分电功率。由于重物质量大于空载载台质量,系统功率波形主要由重载运行段决定,空载运行段形成幅值较小、符号相反的补偿分量。同步发车时,同批次载台的重载功率分量集中叠加,容易形成较大的功率峰值;调整启动相位后,各载台重载运行段在时间轴上错开,并可能与其他载台的空载运行段或低功率阶段交叠,从而削弱同号功率分量的集中叠加。

4 结论

针对垂直循环式重力储能系统功率特性,通过对批次配置和启动相位调节进行建模与仿真分析,在设定的结构参数、运行参数及最小安全间距约束下,得到以下结论:

(1) 系统功率可通过调整批次配置实现离散调节。在每批次载台数固定的条件下,通过调节批次配置,系统储能规模和平均功率水平随之增大。但批次配置变化主要表现为对系统输出能力的离散扩展,对功率波动的改善作用有限。

(2) 调整启动相位参数可改变各载台功率的时段叠加关系,从而降低系统功率波动,在设定参数

及最小安全间距约束下,储能模式下批次配置 $N=3$ 、启动相位 $\phi=1/4$ 工况,峰谷差和功率标准差的最大降幅分别为83.2%和85.6%;释能模式下批次配置 $N=4$ 、启动相位 $\phi=1/4$ 工况相应指标的最大降幅分别为99.1%和99.0%。在本研究考察工况范围内,释能模式下错峰发车对释能模式下功率波动的改善幅度更大。

(3) 错峰发车对不同批次配置下的系统功率平稳性均具有改善作用,但改善效果并不随批次配置增大而增强,而是受到批次配置与启动相位参数共同影响。合理调整批次配置与启动相位参数组合能够在不同输出能力等级下有效降低系统功率波动,提升系统运行平稳性。

参考文献

- [1] 陈海生,凌浩恕,徐玉杰. 能源革命中的物理储能技术[J]. 中国科学院院刊, 2019, 34(4): 450-459.
CHEN H S, LING H S, XU Y J. Physical energy storage technology in energy revolution[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2019, 34(4): 450-459.
- [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.
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.
- [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.
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.
- [4] CAI K, HAN Y F, XIA R, et al. Gravity energy storage: A review on system types, techno-economic assessment and integration with renewable energy[J]. Wiley Interdisciplinary Reviews: Energy and Environment, 2024, 13(6): e543.
- [5] 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.
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.
- [6] 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.
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.
- [7] 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.
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.
- [8] 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(5): 12-20.
LI Z, WANG B, MOU X P, et al. Power smoothing control strategy for slope gravity energy storage system based on instantaneous power mirror compensation[J]. *Electric Machines & Control Application*, 2024, 51(5): 12-20.
- [9] 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.
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.
- [10] 包兴芮, 刘钦节, 杨卿干, 等. 基于风光储配置模型的废弃矿井重力储能参数优化研究[J]. *中国矿业*, 2024, 33(8): 17-26.
BAO X R, LIU Q J, YANG Q G, et al. Research on parameter optimization of gravity energy storage in abandoned mines based on wind-solar storage configuration model[J]. *China Mining Magazine*, 2024, 33(8): 17-26.
- [11] MORSTYN T, CHILCOTT M, MCCULLOCH M D. Gravity energy storage with suspended weights for abandoned mine shafts[J]. *Applied Energy*, 2019, 239: 201-206.
- [12] 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 stabilization strategies for vertical gravity energy storage[J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2024, 13(10): 3556-3565.
- [13] 曾小超, 史沁鹏, 洪剑锋, 等. 竖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 X C, SHI Q P, HONG J F, et al. Model establishment and power optimization of vertical gravity energy storage system[J]. *Southern Energy Construction*, 2025, 12(5): 37-47.
- [14] TONG W X, LU Z G, HUNT J D, et al. Power control strategies for modular-gravity energy storage plant[J]. *Applied Energy*, 2024, 361: 122908.
- [15] 闫文举, 王洋, 孙芯竹, 等. 基于直线电机的废弃矿井重力储能系统研究进展与关键技术[J]. *储能科学与技术*, 2025, 14(1): 255-268.
YAN W J, WANG Y, SUN X Z, et al. Research progress and key technology of abandoned mine gravity energy storage system based on linear motor[J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2025, 14(1): 255-268.
- [16] 艾立旺, 王伟伟, 蒋思远, 等. 直线电机重力储能系统充放电策略优化[J]. *储能科学与技术*, 2025, 14(9): 3476-3487.
AI L W, WANG W W, JIANG S Y, et al. Charging and discharging strategy optimization of linear machine gravity energy storage systems[J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2025, 14(9): 3476-3487.
- [17] 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): 7177-7192.
YU H N, YAO L Z, CHENG F, et al. Prospects and challenges of gravity energy storage applications in new type power system[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2025, 45(18): 7177-7192.