



基于扇形码放区的重力储能系统低能耗质量块码放方法

李炎朔¹, 吴高昀¹, 李俊龙¹, 焦盛林¹, 赵海森¹, 张连成², 陈巨龙³, 王祖凡⁴

(¹华北电力大学电气与电子工程学院, 北京 102206; ²北华航天工业学院电子与控制工程学院, 河北 廊坊 065000; ³贵州电网有限责任公司电网规划研究中心, 贵州 贵阳 550002;

⁴国网朝阳供电公司, 辽宁 朝阳 122000)

摘 要: 质量块码放是重力储能系统运行中的关键环节, 其码放方式直接影响运输路径、设备运行能耗和系统整体效率。由于重力储能系统通常需要配置大量质量块, 且单个质量块质量较大, 在充放电过程中频繁搬运和存放会产生较高能耗。自动导引车 (automated guided vehicle, AGV) 在码放区内具有较高的路径规划灵活性, 适用于重力储能质量块的自动化运输与码放。然而, 传统方形码放区在运行过程中容易造成 AGV 频繁启停和转向, 导致运输距离增加、运行时间延长, 并进一步降低系统能量利用效率。为降低质量块码放过程中的运输能耗, 本研究提出一种扇形码放区结构, 建立 AGV 码放过程能耗模型, 并以总能耗最小为目标, 采用遗传算法对质量块码放位置进行优化。以 1 MWh 和 100 MWh 重力储能系统为例, 分别对方形码放区和扇形码放区在传统码放方法与优化码放方法下的码放效果进行对比分析。结果表明, 遗传算法能够有效优化质量块存放位置, 降低码放能耗; 扇形码放区相较传统方形码放区能够减少 AGV 的绕行距离、启停次数和转向损耗。综合考虑码放区结构优化和码放位置优化后, 扇形优化方案相较方形传统方案的综合节能率可达到 20.28%~33.64%, 并具有一定的工程应用价值。

关键词: 重力储能; 优化算法; 路径规划; 码放区设计

doi: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2026.0428

中图分类号: TK 02

文献标志码: A

文章编号: 2095-4239 (2026) 09-3622-11

A low energy consumption mass block stacking method for gravity energy storage systems based on fan shaped stacking areas

LI Yanshuo¹, WU Gaoyun¹, LI Junlong¹, JIAO Shenglin¹, ZHAO Haisen¹, ZHANG Liancheng²,
CHEN Julong³, WANG Zufan⁴

(¹School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China; ²School of electronic and control engineering, North China Institute of Aerospace Engineering, Langfang 065000, Hebei, China; ³Power Grid Planning and Research Center of Guizhou Power Grid Co., Ltd., Guiyang 550002, Guizhou, China; ⁴State Grid Chaoyang Power Supply Company, Chaoyang 122000, Liaoning, China)

Abstract: Mass block stacking is a key process in the operation of gravity energy storage systems, directly impacting transport paths, equipment energy consumption, and overall

收稿日期: 2026-05-15; 修改稿日期: 2026-07-02。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52177041)。

第一作者: 李炎朔 (2002—), 男, 硕士研究生, 研究方向为重力储能码放优化, E-mail: 599766076@qq.com; 通信作者: 赵海森, 教授, 研究方向为电能转换与高效利用、先进电工材料及其电磁特性、新能源电力系统分析与控制, E-mail: zhaohisen@163.com。

引用本文: 李炎朔, 吴高昀, 李俊龙, 等. 基于扇形码放区的重力储能系统低能耗质量块码放方法[J]. 储能科学与技术, 2026, 15(9): 3622-3632.

Citation: LI Yanshuo, WU Gaoyun, LI Junlong, et al. A low energy consumption mass block stacking method for gravity energy storage systems based on fan shaped stacking areas[J]. Energy Storage Science and Technology, 2026, 15(9): 3622-3632.

system efficiency. Because gravity energy storage systems rely on numerous heavy mass blocks, frequent transportation and storage during charging and discharging consume significant energy. Automated guided vehicles (AGVs) offer high path-planning flexibility in stacking areas, making them suitable for automated mass block transportation and stacking in gravity energy storage systems. However, conventional square stacking areas tend to trigger frequent AGV start-stop cycles and turning during operation, thereby extending transport distances, prolonging operating time, and further reducing system energy-utilization efficiency. To mitigate transport-related energy consumption during mass block stacking, this study proposes a fan-shaped stacking-area layout, establishes an AGV stacking energy consumption model, and uses a genetic algorithm to optimize the mass block stacking positions to minimize total energy consumption. Using 1 MWh and 100 MWh gravity energy storage systems as case studies, the stacking performances of square and fan-shaped layouts were compared and analyzed under conventional and optimized stacking strategies. The results demonstrate that the genetic algorithm effectively optimizes the positions of mass blocks, significantly reducing energy consumption. Compared with conventional square stacking areas, the fan-shaped stacking design reduces AGV detour distance, start-stop frequency, and turning losses. By optimizing stacking-area layout and stacking position, the comprehensive energy-saving rate of the optimized fan-shaped scheme reaches 20.28%—33.64% compared with that of the conventional square scheme, demonstrating its strong engineering value.

Keywords: gravity energy storage; optimization algorithm; path planning; stacking-area design

重力储能系统形式多样,可分为垂直式、斜坡式等类型,但基本原理均是通过改变质量块高度实现电能与重力势能之间的转换^[1-2]。与电化学储能、压缩空气储能等技术不同,重力储能依赖质量块的搬运、码放和释放等机械作业过程。因此,质量块码放不仅是系统运行中的必要环节,也会影响运输能耗和系统作业效率。

Energy Vault 公司建设的塔式搬砖储能系统通过提升装置将质量块提升并堆叠,在释放阶段利用质量块下降驱动发电机发电^[3-4]。该类方案对提升装置强度、定位精度和堆叠稳定性要求较高。ARES 公司提出的轨道式重力储能系统通过重载机车沿斜坡轨道上下运行实现储能与释能^[5],但轨道布置会限制系统灵活性。Gravitricity 公司提出的竖井式方案通过大质量块在竖井中升降实现储能^[6],可减少多质量块码放问题,但对井筒结构、制动系统和提升系统要求较高。山地重力储能方案利用山地高差转移沙石、砾石等颗粒介质^[7],但其容量和功率受地形条件和运输能力限制较大。中国天楹如东重力

储能项目^[8-9],该类系统通常通过提升设备将质量块抬升至高位后,再由运输装置按既定顺序完成码放。在连续充放电、调度需求变化等工况下,固定码放路径和低灵活性运输方式可能增加车辆运行时间和运输能耗。

现有斜坡式重力储能系统为适应质量块形状,其上下码放区通常采用方形或矩形结构。该类结构布局规则、工程实现简单,但车辆在运行过程中容易频繁启停与转向,进而产生额外启停能耗和转弯能耗,降低码放环节乃至系统整体运行效率。

目前,重力储能系统中关于质量块码放方法的研究仍相对较少。已有研究主要关注码放顺序、抓取控制和局部路径优化。例如,有研究基于动态规划方法建立质量块码放模型,在给定充放电容量约束下求解码放方案^[10];也有研究引入深度神经网络方法提升斜坡式重力储能系统质量块抓取和定位效率^[11]。但总体来看,现有研究对码放区结构形态、运输车能耗构成、启停能耗和转弯附加能耗等因素考虑仍不充分。

物流仓储系统中的码放、搬运和路径调度问题已形成较丰富的研究基础。AGV能够通过路径规划、定位控制实现自主行驶,具有较强的平面移动能力和运行灵活性^[12-13]。现有AGV研究通过冲突检测、时空路径协调、死锁避免和多智能体路径搜索等方法,实现多车在有限空间内的无冲突运行^[14-15]。这些研究为重力储能质量块搬运和路径优化提供了一定参考。但是,重力储能系统与普通物流仓储场景并不完全相同。重力储能码放区结构和面积还受到地形、土建结构和经济性等因素制约。因此,传统物流仓储码放方法不能直接套用于重力储能系统。

针对上述问题,本研究重点分析能够减少车辆启停与转向的码放区结构,并建立包含启停能耗、距离相关能耗、转弯附加能耗和顶升能耗的码放能耗模型。在此基础上,提出以码放环节能耗最低为目标的质量块码放优化方法。最后,针对1 MWh和100 MWh重力储能系统进行算例分析,对比不同工况下方形码放区和扇形码放区中传统码放方法与优化方法的能耗差异并验证方法的正确性。

1 重力储能系统结构及基本原理

如图1所示重力储能系统主要由质量块、行吊、运输车、上下码放区等部分组成。其基本工作原理是利用电能与重力势能之间的相互转化实现储能与释能:在电网负荷较低或新能源出力富余时,系统利用外部电能驱动提升和运输设备,将质量块提升并搬运至高位,使电能转化为质量块的重力势能并完成储存;充电过程与放电过程相反,不再赘述。

在这一过程中,质量块码放是系统运行的关键

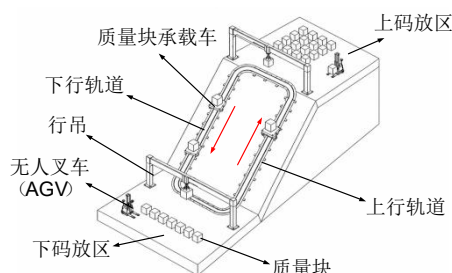


图1 重力储能系统结构图

Fig. 1 Structural diagram of a gravity energy storage system

环节。重力储能系统通常需配置大量质量块以满足额定容量和功率要求,而每个质量块在运输后必须存放于指定区域,以保证后续提升、搬运和释放过程有序进行。合理的码放方式不仅能够提高场地利用率,使有限空间布置更多质量块,同时可缩短运输路径、降低设备运行能耗,并减少多车协同作业时的冲突与等待。因此,码放区结构与码放策略直接影响系统效率及能耗。

2 重力储能系统质量块码放区及码放方法

2.1 现有码放结构及方法

对于现有质量块码放区,传统码放为保证工程可实现,从充放电轨道起,通道向左右对称延展,形成方形码放区。为避免前端码放导致同列后侧质量块绕行,传统方法按照靠近充放电轨道的中间列依次从后向前布置质量块。当中间轨道码满后,系统依次将质量块放置于相邻轨道,如图2所示。方形码放区内,车辆运行需要频繁转弯和调整方向,运输路径呈折线形式,车辆在从起点到目标码位的过程中多次改变行驶方向,这增加了运行时间,并使车辆重复经历减速、停车和再加速过程,从而显著增加启停和转向能耗。

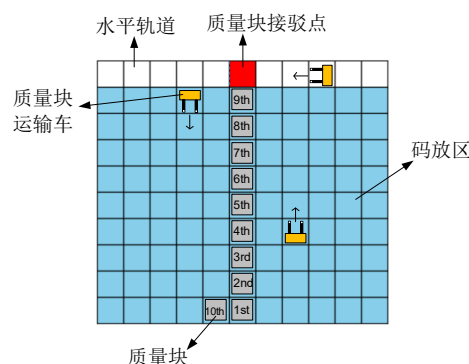


图2 方形码放区结构图

Fig. 2 Structural diagram of a square placement area

2.2 扇形码放区

2.2.1 扇形码放区结构

基于上述分析可知,方形码放区由于运输路径呈明显折线化,运输车在码放过程中需要频繁进行转弯、启停及方向调整,从而导致启停损耗和转向损耗较大,并使系统总完成时间相对较长。为减少码放过程中车辆重复转向与启停的次数,进一步缩

短运输路径并提升系统综合效率,本研究在此基础上提出了一种扇形码放区结构。

扇形码放区采用同心半圆环分层布置方式,中部设置起点,作为质量块装载与卸载的位置;起点上方布置若干层同心半圆轨道,质量块沿各层半圆轨道依次分布,形成由内向外逐层扩展的码放结构。该结构一方面可使AGV由起点更直接地驶向目标码位,减少路径折返并缩短运输时间;另一方面可简化AGV运输过程,从而在一定程度上减少频繁转弯及不必要的启停。扇形码放区布局如图3所示:运输车起点以红色标识,圆环轨道由内向外依次编号为1、2、3...n。

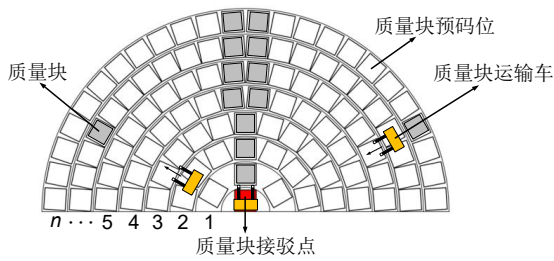


图3 扇形码放区结构图

Fig. 3 Structural diagram of a sector-shaped placement area

2.2.2 质量块运输车(AGV)

质量块码放区的AGV采用叉取式搬运结构,车体前部配备叉臂机构,质量块底部设有对应凹槽,AGV通过叉臂插入凹槽实现举升运输。该结构具有以下主要优势:

(1) 灵活性高: AGV无需依赖固定轨道,可根据码放区布局和目标码位位置自主规划行驶路径,适应复杂或可变布局的码放区;

(2) 适应性强: 当码放区规模、质量块数量或布局方式发生变化时,仅需调整AGV的导航与调度策略,无需对轨道等基础设施进行改造;

(3) 便于智能调度: AGV通常配备导航、定位与控制系统,能够较方便地实现多车协同、路径

规划和任务分配,更有利于重力储能系统的自动化和智能化运行。

AGV在码放区内沿规划路径前后运动如图4所示,通过叉臂机构完成质量块的装载与卸载。运输任务过程中,AGV先行驶至目标质量块位置并调整姿态,使叉臂对准底部凹槽;叉臂插入凹槽后,通过举升机构抬起质量块,使其底部脱离支撑面;随后AGV沿规划路径驶向目标码位[图(a)→图(b)→图(c)]。到达码位后,AGV调整姿态并控制举升机构下降,将质量块平稳放置,叉臂与质量块完全脱离后完成任务[图(d)→图(b)→图(a)]。

3 以能耗最低为目标的质量块码放方法

3.1 重力储能码放能耗模型

在重力储能码放过程中,码放区内部的能耗主要来源于运输车行驶路径上的启停、行驶与转弯过程。本研究将单次码放任务的能耗划分为车辆启停能耗、距离相关能耗、转弯附加能耗和顶升移栽能耗。

则单次任务总能耗可表示为:

$$E_i = E_{s,i} + E_{d,i} + E_{t,i} + E_{l,i} \quad (1)$$

式中, $E_{s,i}$ 为第 i 次任务的启停能耗; $E_{d,i}$ 为距离相关能耗; $E_{t,i}$ 为转弯附加能耗; $E_{l,i}$ 为顶升能耗。

对于总码放任务而言,当系统需完成 B 个质量块的运输与码放时,总能耗为:

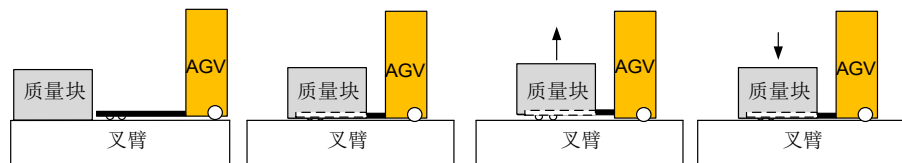
$$E_t = \sum_{i=1}^B E_i \quad (2)$$

3.1.1 启停能耗

在码放区的一次运输任务中,运输车通常经历起步—加速—匀速—减速—停车的运动过程。当车辆由静止加速至速度 v 时,其动能增量为:

$$E_k = \frac{1}{2} m_{eq} v^2 \quad (3)$$

式中, m_{eq} 为车辆运动的等效质量,由车辆自重与载荷质量决定;本研究假设车辆制动能量不回收,



注: (a) 叉臂与质量块脱离 (b) 叉臂插入凹槽内部 (c) 举升机构将质量块抬升 (d) 举升机构将质量块放下

图4 AGV工作过程图

Fig. 4 AGV working process diagram

因此车辆在减速停车过程中,其动能将全部损失。故一次完整的启停过程所对应的能量损失可表示为:

$$E_s = \frac{1}{2\eta_d} m_{eq} v_p^2 \quad (4)$$

式中, η_d 为车辆驱动系统效率; v_p 为该运动段所达到的峰值速度。当行驶距离不足以使车辆达到额定最高速度 v_{max} 时, v_p 应根据该段距离、加速度与减速度约束确定,而不直接取 v_{max} 。

若一条运输路径中存在多次停车与再次起步,则单次任务的启停能耗应按各启停过程累加:

$$E_{s,i} = \sum_{j=1}^{n_{s,i}} \frac{1}{2\eta_{a,j}} m_{eq,j} v_{p,j}^2 \quad (5)$$

式中, $n_{s,i}$ 为第 i 次任务中的启停次数; $m_{eq,j}$ 为第 j 次启停对应的等效质量,反映空载或载重状态下的差异。

3.1.2 距离相关能耗

运输车在行驶过程中需克服滚动阻力、机械传动阻力以及其他与路径长度相关的能量损失。本研究对距离相关能耗进行近似处理。则某一运动段的距离相关能耗可写为:

$$E_d = \frac{F_r s}{\eta_r} \quad (6)$$

式中, s 为该段行驶距离; F_r 为滚动阻力; η_r 为行驶过程的综合传动效率。设车辆滚动阻力系数为 f_r , 本研究为更贴近工程实际, 每一条通道的滚动阻力系数在 0.01~0.02 波动。其中滚动阻力参数不是同一轨道或同一次计算过程中随机变化的参数, 在一次算例中其不会发生变化。

并且, 考虑车辆在空载和载重状态下总质量不同, 距离相关能耗可进一步表示为:

$$E_d = \frac{f_r^{(0)} m_{eq} g s^{(0)} + f_r^{(1)} m_{eq} g s^{(1)}}{\eta_r} \quad (7)$$

式中, $s^{(0)}$ 和 $s^{(1)}$ 分别为空载段和载重段的行驶距离, $f_r^{(0)}$ 和 $f_r^{(1)}$ 分别为空载和载重条件下的滚动阻力系数。

3.1.3 转弯附加能耗

设 AGV 在转向过程中的瞬时输入功率为 $P_{turn}(t)$, 开始时刻为 t_0 , 结束时刻为 t_1 , 次转向能耗可表示为:

$$E_{turn} = \int_{t_0}^{t_1} P_{turn}(t) dt \quad (8)$$

式中, E_{turn} 为车辆完成一次转向动作所消耗的能量, $P_{turn}(t)$ 为转向过程中的瞬时功率。该方法能够较为直接地反映车辆转向过程中功率随时间变化

的特征, 适用于基于实测功率曲线或车辆动力学模型的能耗分析。

若 AGV 在转向过程中功率变化较小, 可将转向过程中的平均功率记为 P_{turn} , 近似写为:

$$E_{turn} \approx P_{turn} T_{turn} \quad (9)$$

式中, T_{turn} 为完成该次转向所需时间。当车辆以近似恒定角速度 ω 完成转角为 θ 的转向动作时, 有:

$$E_{turn} \approx P_{turn} \frac{\theta}{\omega} \quad (10)$$

则可得到转向能耗与转角之间的线性关系:

$$E_{turn} = K_\theta \theta \quad (11)$$

式中, K_θ 为单位转角等效能耗系数, 单位为 J/rad。该系数综合反映了 AGV 转向过程中的平均功率、角速度、轮地摩擦和传动损失等因素。

设第 i 次运输任务中, AGV 在空载段和载重段分别发生 $n_{t,i}^{(0)}$ 次和 $n_{t,i}^{(1)}$ 次转弯, $\theta_{ij}^{(0)}$ 和 $\theta_{ij}^{(1)}$ 分别表示第 i 次任务中空载段和载重段第 j 次转弯的转角, 则其转弯附加损耗可表示为:

$$E_{t,i} = E_{t,i}^{(0)} + E_{t,i}^{(1)} \quad (12)$$

因此, 第 i 次任务中 AGV 的总转弯附加损耗可写为:

$$E_{t,i} = k_\theta^{(0)} \sum_{j=1}^{n_{t,i}^{(0)}} |\theta_{ij}^{(0)}| + k_\theta^{(1)} \sum_{j=1}^{n_{t,i}^{(1)}} |\theta_{ij}^{(1)}| \quad (13)$$

式中, $k_\theta^{(0)}$ 和 $k_\theta^{(1)}$ 分别为空载和载重状态下的单位转角附加能耗系数。

3.1.4 顶升能耗

在质量块运输与码放过程中, 除车辆平面运动能耗外, 还存在由于顶升装置工作而产生的附加能耗。顶升过程主要包括两部分: 一是在起点位置将质量块顶起并完成装载, 二是在目标码位将质量块放下并完成卸载。

考虑顶升机构的传动损失、电机损失及液压/机械执行机构损失后, 实际输入能量可表示为:

$$E_{up} = \frac{m_b g h_l}{\eta_l} \quad (14)$$

式中, E_{up} 为单次顶升装载能耗, 单块质量块质量为 m_b , 顶升高度为 h_l , 重力加速度为 g , 顶升系统效率为 η_l 。因顶升与放下过程采用相同执行机构, 且能量损耗特性近似一致, 则可取 $E_{down} = E_{up}$ 。

此时, 单次顶升移载总能耗可写为 $E_l = \frac{2m_b g h_l}{\eta_h}$, 由于每完成一块质量块的码放, 都必然

发生一次顶升和一次放下，因此对于总码放块数为 B 的任务，总顶升移栽能耗为 $E_t = B \cdot E_l$ 。

3.2 质量块码放方法

本研究采用基于遗传算法最小能耗求解方法流程如下。为描述某一候选码位是否被选中，引入0-1决策变量：

$$x_i = \begin{cases} 1, & \text{true} \\ 0, & \text{false} \end{cases} \quad (15)$$

从物理意义上看，候选码位集合可理解为码放区内所有可用于放置质量块的位置集合。每一个候选码位对应一个基因位，若 $x_i=1$ ，表示第 i 个码位被选中并放置质量块；若 $x_i=0$ ，表示该码位不放置质量块。一个染色体即一个完整的码放策略可表示为 $X=(x_1, x_2 \cdots x_N)$ ，系统总运输损耗为：

$$F(X) = \sum_{i=1}^N E_i x_i \quad (16)$$

若只考虑总损耗最小，则优化目标为：

$$\min F(X) = \min \sum_{i=1}^N E_i x_i \quad (17)$$

在交叉和变异过程中，个体可能不再满足块数约束。为此，本研究引入罚函数对不可行个体进行惩罚。定义综合目标函数为：

$$\Phi(X) = F(X) + P(X) \quad (18)$$

其中， $P(X)$ 为罚函数。考虑块数约束、码放实施约束以及时间约束，罚函数定义为：

$$P(X) = \lambda_1 \left| \sum_{i=1}^N x_i - B \right| \quad (19)$$

式中， X_i 为用于惩罚块数约束的违反程度； λ_1 为块数约束对应的罚因子。由于遗传算法中通常“适应度越大表示个体越优”，因此将适应度函数定义为：

$$\text{Fit}(X) = \frac{1}{1 + \Phi(X)} \quad (20)$$

由此可见，当个体的总运输损耗越小、约束满足程度越高时，其适应度值越大，在后续进化过程中更容易被保留下来。设种群规模为 M ，则初始种群可表示为 $P^{(0)} = \{X_1^{(0)}, X_2^{(0)} \cdots X_M^{(0)}\}$ 。

初始种群中的每个个体采用随机方式生成，在种群进化过程中，本研究采用轮盘赌选择法与精英保留策略相结合的方式对个体进行选择。对于种群中第 m 个个体，其被选中的概率定义为：

$$p_m = \frac{\text{Fit}(X_m)}{\sum_{q=1}^M \text{Fit}(X_q)} \quad (21)$$

为增强种群重组能力，本研究采用单点交叉或

两点交叉方式生成新个体。将两个父代个体随机选取一个或两个交叉位置，对父代染色体片段进行交换，得到子代个体。设变异概率为 P_{mut} ，则对染色体中部分基因位执行翻转操作，即 $x_i=1 \rightarrow 0$ 或 $x_i=0 \rightarrow 1$ ，由于交叉和变异操作可能生成不可行个体，本研究引入可行性修正机制，若某个个体中选中码位数不等于 B ，则通过删除或补入基因位中的“1”进行调整，直至满足块数约束。最后，遗传算法满足以下任一条件时停止迭代：①达到最大迭代代数 G_{max} ；②连续若干代最优适应度值不再改善；③当前最优解已满足预设精度要求。

算法终止后，种群中适应度最高的个体记为 $X^*=(x_1^*, x_2^* \cdots x_N^*)$ ，其中满足 $x_i^*=1$ 的 B 个码位，即为最终得到的最小损耗码放策略，其对应的最小总运输损耗为：

$$E_{\min}(B) = \sum_{i=1}^N E_i x_i^* \quad (22)$$

上述求解方法流程如图5所示：

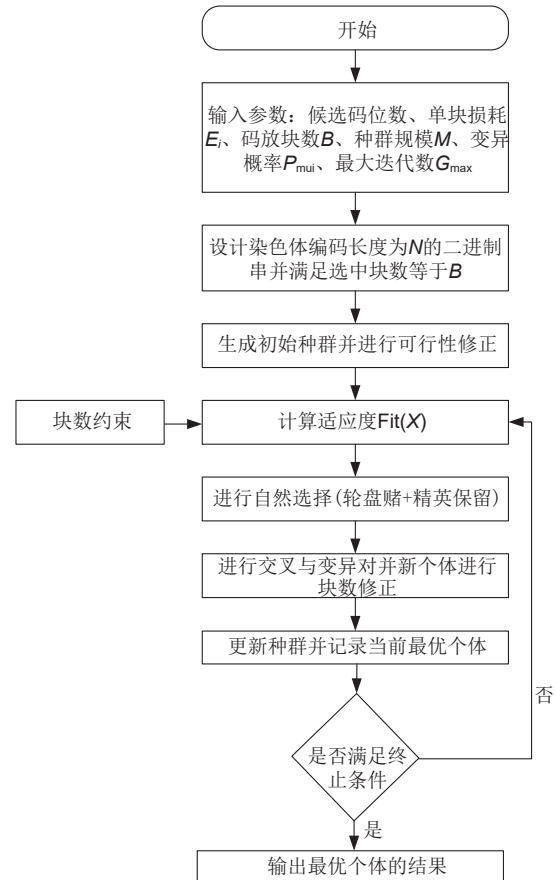


图5 遗传算法优化方法流程图
Fig. 5 Flowchart of the genetic algorithm-based optimization method

在优化算法确定最优码放位置后，需进一步对所选码位的实际码放顺序进行约束，在实际码放过程中，AGV 从中心起点出发，沿径向通道驶向目标码位，再转向调整至目标码位对应位置，最后完成质量块放置。为避免已存放质量块对后续 AGV 运输路径造成阻挡，本研究在最优码放位置确定后采用“先远后近、由外向内”的码放顺序。具体而言，优先码放半径较大的外层圆环码位，即优先放置处于码放区后方的质量块；当外层圆环中被选中的码位全部码放完成后，再依次向内层圆环进行码放，直至所有质量块码放完成。

综上，本研究所提扇形码放区的优化过程包括两个层次：首先，遗传算法根据距离能耗、启停能耗和转向能耗确定总能耗最小的码位集合；其次，在最优码位集合确定后，按照由外向内的顺序执行码放任务。该方法既保证优化结果具有较低的总能耗，又减少已存放质量块对后续运输路径的影响，提高了扇形码放区实际码放过程的可实施性。

4 算例分析

4.1 1 MWh 重力储能系统分析

算例中，重力储能系统基本参数如表 1 所示。

首先，分别对比方形码放区和扇形码放区在半载情况下优化算法与传统码放方法质量块在码放区的码放位置，如图 6 和 7 所示。可以发现方形码放区与扇形码放区在优化方法后的质量块大部分分布在起点附近，而传统方法下的质量块大都分布在离起点较远的位置上。因为不同轨道的摩擦系数不

表 1 重力储能基本参数
Table 1 Basic parameters of gravity energy storage

类别	数值	类别	数值
质量块质量/t	35	运输车最大速度 v	2
质量块长度与宽度/m	2.4	运输车加速度 a	0.5
运输车质量/t	15	滑动阻力系数 f_t	0.01~0.02
驱动系统效率 η_d	0.85	空载转向损耗系数/(J/rad)	4.15×10^3
行驶过程等效效率 η_e	0.9	载重转向损耗系数/(J/rad)	1.38×10^4

同，优化方法下的质量块分布并不对称，为减少距离能耗，优化算法可以根据不同轨道的摩擦系数找到最小能耗码放位置组合。

其次，为比较不同码放策略与不同码放区结构对系统能耗的影响，本研究选取以下四种方案进行对比分析：①方形码放区优化码放策略；②扇形码放区优化码放策略；③方形码放区传统码放策略；④扇形码放区传统码放策略。其中，优化码放策略以系统总运输能耗最小为目标，通过优化方法选择给定块数条件下的最优码位组合。为比较 1 MWh 系统不同码放方案下 AGV 能耗构成的差异，本研究选取半载和满载两种典型工况，对四种方案下的总能耗、启停能耗、距离能耗、转向能耗和顶升能耗进行了分项对比，结果分别如图 8 所示。

总体来看，1 MWh 系统半载与满载条件下的扇形码放区总能耗均小于方形码放区的总能耗，其中启停能耗和距离能耗较大，启停能耗占比最大。两种码放区的顶升能耗相同。

本研究在方形码放区和扇形码放区中均布置相同数量的质量块，即两种结构对应的系统储能容量

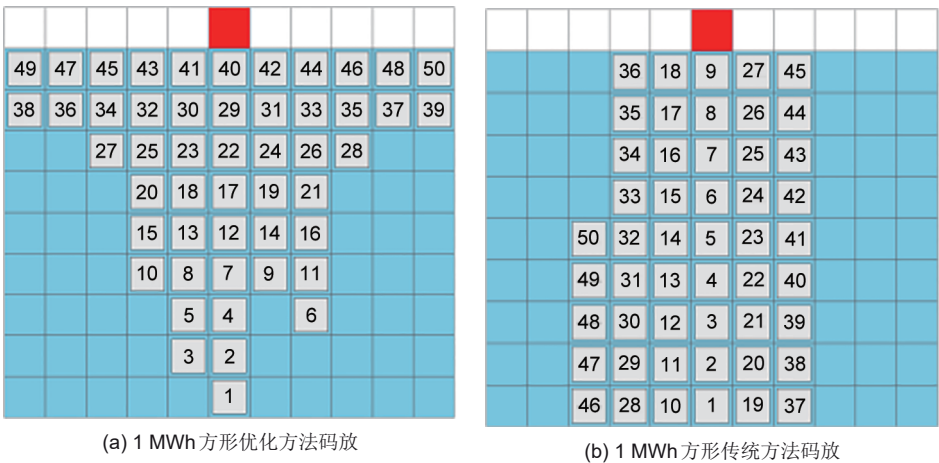


图 6 1 MWh 下系统半载方形码放区不同方法码放对比图
Fig. 6 Comparison of different stacking methods in a semi-loaded square stacking area for a 1 MWh system

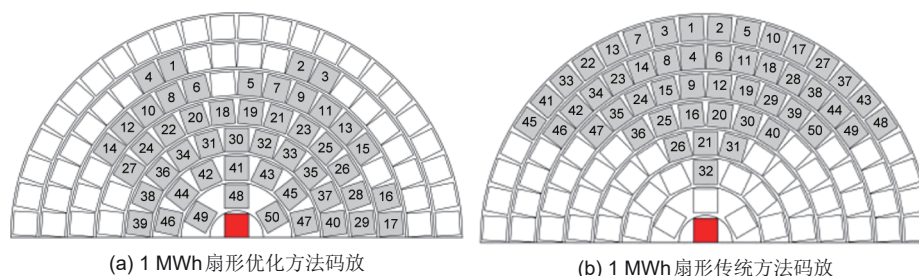


图7 1 MWh 下系统半载扇形码放区不同方法码放对比图

Fig. 7 Comparison of different stacking methods in a semi-loaded fan-shaped stacking area for a 1 MWh system

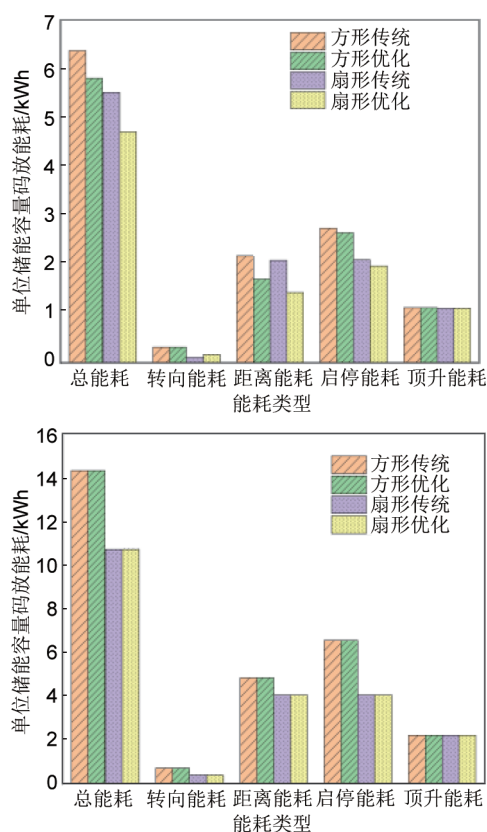


图8 (a) 1 MWh 半载下四种能耗对比图; (b) 100 MWh 满载下四种能耗对比图

Fig. 8 (a) Comparison of four types of energy consumption for the 1 MWh system under half-load conditions; (b) Comparison of four types of energy consumption for the 100 MWh system under full-load conditions

相同但两种结构在同一面积下的装载容量不同, 且实际工程征地边界通常以方形地块形式确定, 而扇形码放区的半圆外侧的边角区域难以被码放系统充分利用, 因此本研究引入征地利用系数 α , 即:

$$\alpha = \frac{A_s}{A_l} \quad (23)$$

式中, α 为征地利用系数; A_s 为码放区实际用于质量块布置的有效面积; A_l 为满足该码放区布置所需的外包征地面积。本研究的面积计算并非按质量块几何外形紧密拼接得到, 而是按工程可实施码位进行计算。扇形码放区中由环向和径向布置形成的不规则缝隙, 以及方形码放区中质量块间隔和通道面积, 均已计入码放区占地计算。

故设某一码放方案的实际运行能耗为 E , 征地利用系数为 α , 则其等效能耗可表示为:

$$E_e = \frac{E}{\alpha} \quad (24)$$

式中, E_e 为考虑土地利用效率后的等效能耗, 等效能耗对比如图9所示。

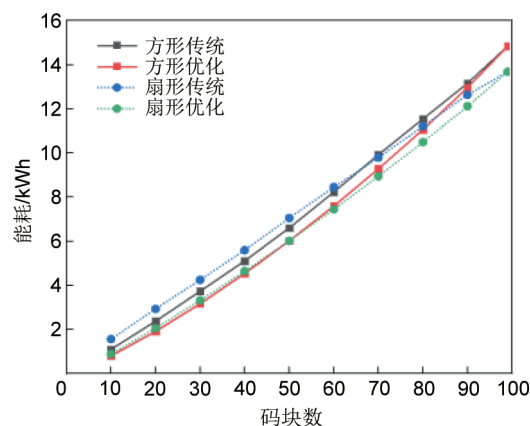


图9 1 MWh 等效能耗结果对比图

Fig. 9 Comparison of equivalent energy consumption results for the 1 MWh system

从图9可以看出, 在码放30块之后扇形优化方法的等效能耗逐渐小于方形优化方法, 在满载时刻达到最大差值。综上所述扇形码放区可以有效减少运输车的距离能耗、启停能耗和转向能耗且优化方法的能耗明显小于传统方法的能耗, 验证了方法的正确性。

4.2 100 MWh重力储能系统分析

半载优化方法下的质量块分布与1 MWh系统类似,如图10和11所示。由于不同轨道的摩擦系数不同,优化算法优先寻找摩擦系数小的轨道进行码放,所以整个码放区呈针刺状码放。

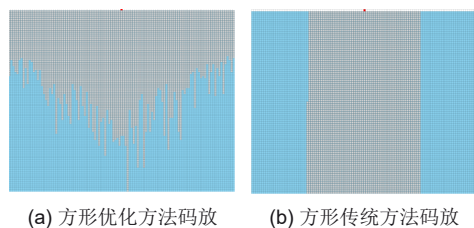


图10 100 MWh下系统半载方形码放区不同方法码放对比图

Fig. 10 Comparison of different stacking methods in a semi-loaded square stacking area for a 100 MWh system

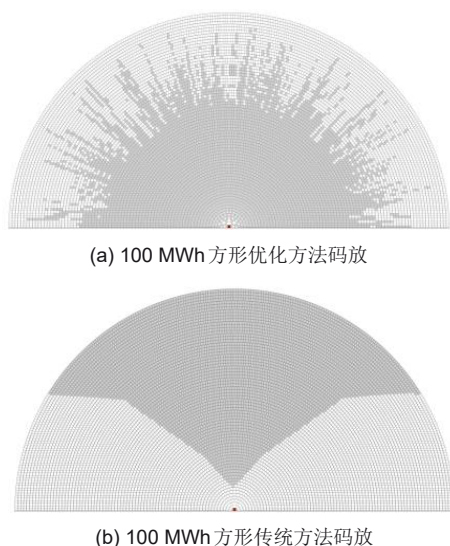


图11 100 MWh下系统半载方形码放区不同方法码放对比图

Fig. 11 Comparison of different stacking methods in a semi-loaded square stacking area for a 100 MWh system

与1 MWh系统类似,比较100 MWh系统在半载和满载两种典型工况下,对四种方案下的总能耗、启停能耗、距离能耗、转向能耗和顶升能耗进行对比,结果分别如图12所示。

对比图12中的四种能耗图,100 MWh系统半载与满载条件下的扇形码放区总能耗还是小于方形码放区的总能耗,其中启停能耗和距离能耗较大,与1 MWh系统不同的是距离能耗占比最大,因为

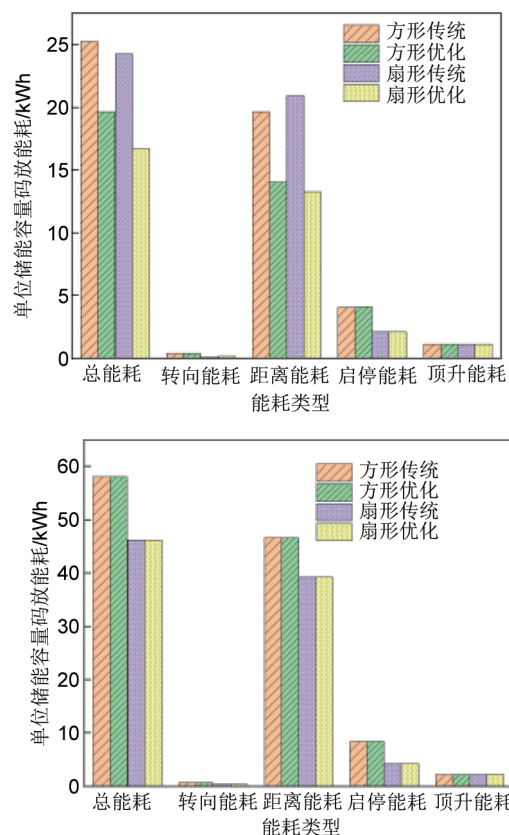


图12 (a) 100 MWh半载下四种能耗对比图;
(b) 100 MWh满载下四种能耗对比图

Fig. 12 (a) Comparison of four types of energy consumption for the 100 MWh system under half-load conditions; (b) Comparison of four types of energy consumption for the 100 MWh system under full-load conditions

系统块数增多,码放区更大距离能耗占据主导地位。

如图13所示,可以看出扇形等效能耗在满载时略小于方形码放区,说明面积变大后会对等效能耗造成一定影响,但在满载时扇形码放的等效能耗还是小于方形码放区。100 MWh系统扇形码放区可以有效减少运输车的距离能耗、启停能耗和转向能耗且优化方法的能耗明显小于传统方法的能耗,在实际工程应用中可以减小能耗。

为进一步量化优化算法与码放区结构对系统能耗的影响,本研究在总码放能耗的基础上定义算法节能率、结构节能率和综合节能率。设方形码放区传统方法总能耗为 $E_{S,t}$,方形码放区优化方法总能耗为 $E_{S,o}$,扇形码放区传统方法总能耗为 $E_{F,t}$,扇形码放区优化方法总能耗为 $E_{F,o}$ 。

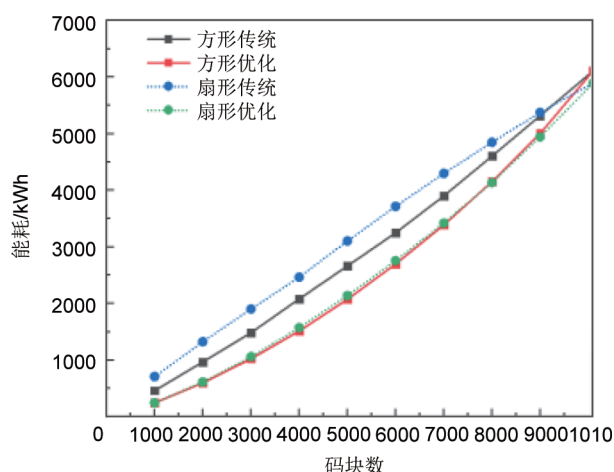


图13 100 MWh等效能耗结果对比图
Fig. 13 Comparison of equivalent energy consumption results for the 100 MWh system

算法节能率用于表征在码放区结构不变的条件下,遗传算法相较传统码放方法的节能效果。本研究以方形码放区为基准,其计算式为:

$$\eta_a = \frac{E_{S,t} - E_{S,o}}{E_{S,t}} \times 100\% \quad (25)$$

式中, η_a 为算法节能率。该指标反映了仅改变码放方法、不改变码放区结构时,优化算法对总码放能耗的降低程度。

结构节能率用于表征在传统码放方法下,扇形码放区相较方形码放区的节能效果,其计算式为:

$$\eta_s = \frac{E_{S,t} - E_{F,t}}{E_{S,t}} \times 100\% \quad (26)$$

式中, η_s 为结构节能率。该指标反映了仅改变码放区结构、不引入优化算法时,形码放区对总码放能耗的降低程度。

综合节能率用于表征本研究所提“扇形码放区+优化码放方法”相较传统方形码放方案的总体节能效果,其计算式为:

$$\eta_c = \frac{E_{S,t} - E_{F,o}}{E_{S,t}} \times 100\% \quad (27)$$

式中, η_c 为综合节能率。该指标同时考虑码放区结构优化和码放位置优化的共同作用,能够反映本研究所提方案相较传统方形码放方案的整体优化效果。

根据上述定义,不同系统容量和不同载荷工况下的总能耗及节能率计算结果如表2所示。

由表2可知,优化算法在半载工况下具有明显节能效果,其中1 MWh和100 MWh系统的算法节能率分别为8.829%和22.2%;在满载工况下,由于所有码位均被占用,优化算法对码位选择的调整

表2 不同容量下半载与满载节能率

Table 2 Energy-saving rates under half- and full-load conditions at different storage capacities

系统容量	工况	算法节能率/%	结构节能率/%	综合节能率/%
1 MWh	半载	8.829	13.141	25.890
1 MWh	满载	0	25.023	25.023
100 MWh	半载	22.205	3.736	33.64
100 MWh	满载	0	20.28	20.28

空间减小,因此算法节能率为0。仅考虑码放区结构变化时,半圆码放区相较方形码放区的结构节能率为3.736%~25.023%。综合考虑码放区结构优化和码放位置优化后,半圆优化方案相较方形传统方案的综合节能率为20.28%~33.64%,说明所提码放区结构与优化方法能够有效降低质量块码放过程中的总能耗。

5 结论

本研究针对重力储能系统质量块码放过程中车辆频繁启停、转向和行驶距离增加所造成的能耗问题,建立了AGV码放过程能耗计算模型,在此基础上,提出了扇形码放区设计,并采用遗传算法对质量块码放位置进行优化,所得结论如下:

(1) 本研究通过对比传统码放策略与优化算法1 MW重力储能系统在不同需求下的能耗表现,系统分析了方形与扇形码放区的码放节能效果。实验结果表明,优化算法在半载和满载条件下扇形码放区的总能耗、距离能耗、转向能耗和启停能耗均小于方形码放区,半载综合节能率为25.023%,满载综合节能率可达到25.89%,验证了优化方法的有效性。

(2) 对比传统码放方法与优化方法可以看出,遗传算法能够根据码放需求和能耗目标对质量块位置进行重新分配,使AGV的运行路径更加合理。优化后,质量块码放不再仅依赖固定顺序或规则排列,而是能够结合车辆行驶距离、启停次数和转向角度等因素进行综合寻优。

(3) 针对100 MWh重力储能系统,本研究进一步开展了等效能耗分析以及半载、满载条件下的分项能耗比较。结果显示,在大容量系统中,优化算法下扇形码放区的能耗仍低于方形码放区,半载综合节能率为33.64%,满载综合节能率可达到20.28%,说明该方法在系统规模扩大后仍具有较

好的适用性。随着质量块数量增加和码放任务频次提高,码放区结构对AGV行驶路径和能耗的影响更加明显,扇形码放区在降低运输能耗方面具有更突出的工程应用价值。

参考文献

- [1] Energy Vault. G-VAULT™ gravity energy storage[EB/OL]. [2026-05-12]. <https://www.energyvault.com/products/g-vault-gravity-energy-storage>.
- [2] MOORE S K. The Ups and downs of gravity energy storage: Startups are pioneering a radical new alternative to batteries for grid storage[J]. IEEE Spectrum, 2021, 58(1): 38-39. DOI:10.1109/MSPEC.2021.9311456.
- [3] ARES North America. Advanced rail energy storage: The power of gravity[EB/OL]. [2026-05-12]. <https://aresnorthamerica.com/>.
- [4] 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.
- [5] HUNT J D, ZAKERI B, FALCHETTA G, et al. Mountain Gravity Energy Storage: A new solution for closing the gap between existing short- and long-term storage technologies[J]. Energy, 2020, 190: 116419. DOI:10.1016/j.energy.2019.116419.
- [6] Energy Vault. Energy Vault announces successful testing and commissioning of first EVx 100 MWh gravity energy storage system by China Tianying[EB/OL]. (2024-05-07) [2026-05-12]. <https://www.businesswire.com/news/home/20240507725790/en/>.
- [7] China Tianying Inc. The first charging/discharging unit of Rudong 100 MWh GESS project successfully tested[EB/OL]. (2024-05-04) [2026-05-12]. https://www.cnty.cn/en/category_440/2866.html.
- [8] WANG Z, WU G, ZHANG Y, et al. Dynamic programming-based mass block stacking method of gravity energy storage system for minimum energy consumption[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2025, 61(6): 9628-9639. DOI: 10.1109/TIA.2025.3569250.
- [9] 陈巨龙, 李震, 朱永清, 等. 基于深度神经网络的斜坡式重力储能系统质量块抓取装置控制方法[J]. 电机与控制应用, 2023, 50(11): 37-45. DOI:10.12177/emca.2023.139.
CHEN J L, LI Z, ZHU Y Q, et al. Control method of mass block grasping device of slope gravity energy storage system based on deep neural network[J]. Electric Machines & Control Application, 2023, 50(11): 37-45. DOI:10.12177/emca.2023.139.
- [10] LE-ANH T, DE KOSTER M B M. A review of design and control of automated guided vehicle systems[J]. European Journal of Operational Research, 2006, 171(1): 1-23. DOI: 10.1016/j.ejor.2005.01.036.
- [11] QIU L, HSU W J, HUANG S Y, et al. Scheduling and routing algorithms for AGVs: A survey[J]. International Journal of Production Research, 2002, 40(3): 745-760. DOI: 10.1080/00207540110091712.
- [12] KIM C W, TANCHOCO J M A. Conflict-free shortest-time bidirectional AGV routeing[J]. International Journal of Production Research, 1991, 29(12): 2377-2391. DOI: 10.1080/00207549108948090.
- [13] MÖHRING R H, KÖHLER E, GAWRILOW E, et al. Conflict-free real-time AGV routing[M]//Operations Research Proceedings 2004. Berlin, Heidelberg: Springer, 2005: 18-24. DOI: 10.1007/3-540-27679-3_3.
- [14] SHARON G, STERN R, FELNER A, et al. Conflict-based search for optimal multi-agent path finding[C]//Proceedings of the Twenty-Sixth AAAI Conference on Artificial Intelligence. July 22-26, 2012, Toronto, Ontario, Canada. ACM, 2012: 563-569. DOI: 10.5555/2900728.2900809.
- [15] ZHONG M S, YANG Y S, DESSOUKY Y, et al. Multi-AGV scheduling for conflict-free path planning in automated container terminals[J]. Computers & Industrial Engineering, 2020, 142: 106371. DOI:10.1016/j.cie.2020.106371.