

【交通物流 / Transportation Logistics】

考虑储能装置的普速铁路列车节能运行图优化

冀璇¹, 张玉召^{1,2}, 高坤盈泽¹, 崔朝晖³

1) 兰州交通大学交通运输学院, 甘肃兰州 730070; 2) 高原铁路运输智慧管控铁路行业重点实验室, 甘肃兰州 730070;
3) 中国国家铁路集团有限公司运输调度指挥中心, 北京 100844

摘要: 针对普速铁路系统再生制动能量利用率低和能源浪费严重等问题, 以提升能源利用效率为核心目标, 建立安装储能装置的节能运行图优化系统理论, 探索再生制动能即时利用与延时利用的协同优化路径. 基于普速铁路列车运行特性, 以列车首站发车间隔和停站时间为决策变量, 同时考虑列车追踪间隔安全阈值、越行情况动态调整规则及储能装置容量限制等多维度约束条件, 建立以再生制动能总利用量最大化为目标函数的优化模型. 设计基于模拟退火的求解算法并以兰新线兰州至武威段为案例进行验证, 构建包含15个车站、白天某时段共43列客货列车的场景测试. 结果表明, 系统总再生制动能利用量达到4 134.38 kW·h, 再生制动能利用率达到56.28%. 探讨发车间隔、停站时间、储能装置容量、列车开行对数及可以产生再生制动能的机车比例变化对节能率的影响, 结果显示, 在高密度行车与高再生能机车比例(约58%)条件下, 协同优化运行图参数与储能装置容量, 节能率最高可达86.33%. 通过净现值方法进行经济效益分析, 在10 a评估期内, 储能装置投资的净现值始终保持正值, 充分证明了储能装置的安装不仅能够有效提高能源利用效率, 同时也能带来可观的经济效益.

关键词: 铁路运输; 节能运行图; 储能装置; 普速铁路; 再生制动能; 交通规划; 模拟退火算法
中图分类号: U292.4+1 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3724/SP.J.1249.2026.03316

Energy-efficient train timetable optimization for conventional railways considering energy storage systems

Ji Xuan¹, ZHANG Yuzhao^{1,2}, GAO Shenyongze¹, and CUI Zhaohui³

1) School of Traffic and Transportation, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, Gansu Province, P. R. China

2) Key Laboratory of Railway Industry on Plateau Railway Transportation Intelligent Management and Control, Lanzhou 730070, Gansu Province, P. R. China

3) Traffic Control Center, China State Railway Group Co. Ltd., Beijing 100844, P. R. China

Abstract: To address the low utilization of regenerative braking energy and significant energy waste in conventional railway systems, this study aims to improve energy utilization efficiency by developing an energy-efficient timetable optimization framework incorporating energy storage systems. The proposed approach enables coordinated utilization of regenerative braking energy through both immediate and delayed mechanisms. Based on operational characteristics of conventional railways, an optimization model is formulated with the objective of maximizing total

Received: 2025-05-13; **Revised:** 2025-12-30; **Accepted:** 2026-01-05; **Online (CNKI):** 2026-02-06

Foundation: National Natural Science Foundation of China (71761025); Science and Technology Research and Development Program of China State Railway Group Co. Ltd. (P2024X003)

Corresponding author: Professor ZHANG Yuzhao (yuzhaozhang@126.com)

Citation: Ji Xuan, ZHANG Yuzhao, GAO Shenyongze, et al. Energy-efficient train timetable optimization for conventional railways considering energy storage systems [J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2026, 43(3): 316-326. (in Chinese)

Open access: This article is licensed under the CC BY 4.0 License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

<http://journal.szu.edu.cn>



regenerative braking energy utilization. The decision variables include train departure intervals at the origin station and dwell times, subject to multiple constraints such as safety headway requirements, dynamic overtaking rules, and energy storage capacity limits. A simulated annealing-based solution algorithm is developed and validated through a case study of the Lanzhou-Wuwei section of the Lanxin railway. A test scenario involving 15 stations and 43 passenger and freight trains during a certain daytime period shows that the total regenerative energy utilization reaches 4 134.38 kWh, corresponding to a utilization rate of 56.28%. Sensitivity analysis is conducted to examine the effects of departure intervals, dwell times, storage capacity, train frequency, and the proportion of regenerative braking-capable locomotives on energy-saving performance. Results indicate that under high-density operation of regenerative braking-capable locomotives (approximately 58%), coordinated optimization of timetable parameters and storage capacity can achieve a maximum energy-saving rate of 86.33%. An economic evaluation based on net present value (NPV) method shows consistently positive returns on energy storage investment over a 10-year horizon. These findings demonstrate that integrating energy storage systems into timetable optimization not only enhances energy utilization efficiency but also yields significant economic benefits.

Key words: railway transportation; energy-efficient train timetable; energy storage systems; conventional railway; regenerative braking energy; traffic scheduling; simulated annealing algorithm

低碳环保、节能减排是铁路行业未来的发展趋势,截至2024年底,中国铁路营业里程达到 1.62×10^5 km,每天开行列车数量达 3.5×10^4 列,列车牵引能耗占铁路运营能耗的近2/3,具有巨大的节能潜力。列车节能运行相关研究主要分为两类:一类是通过优化区间驾驶策略降低列车运行能耗^[1-5];另一类是通过提高列车再生制动能的利用率减少能源浪费。其中,再生制动能的利用又可分为即时利用和延时利用,即时利用通过调整列车发车间隔和停站时间等因素最大化列车再生制动能量的直接使用率。RAMOS等^[6]通过最大化列车牵引工况和制动工况的重叠时间来提高再生能量的利用;LI等^[7]提出随机优化方法,采用优化行车间隔和停站时间的方式,使不同延误场景下的再生能量利用量最大化;LE等^[8]考虑同向列车间的再生能量利用,通过优化行车间隔和停站时间提升再生能量利用,并设计模拟退火(simulated annealing, SA)算

法进行求解;YANG等^[9]通过优化停站时间提升双向列车间的再生能量利用,并设计遗传算法进行求解。彭其渊等^[10]利用发车间隔和停站时间的可控性,提出一种基于再生制动的地铁多列车节能运行策略模型;冯瑜等^[11]基于再生制动能利用最大化优化了的多列车运行协调时刻表;郑亚晶等^[12]在不改变列车开行方案的基础上,研究最大化同一供电臂下列车到站的产能时间段,以及列车发车的用能时间段重叠区间;革新等^[13]研究高铁列车再生制动能利用最大化的节能时刻表编制模型;张弛等^[14]运用引力搜索算法优化列车时刻表,使相邻列车牵引和制动重叠时间最大化,提高了节能效率;王若愚等^[15]通过多列车牵引制动重叠时间框架,以及融合多头注意力机制的多智能体协同深度确定性策略梯度算法进行求解,以优化总能耗。

延时利用可分为回馈式和储能式,如图1。其中,A、B及C三条横线表示3相交流电网的3相

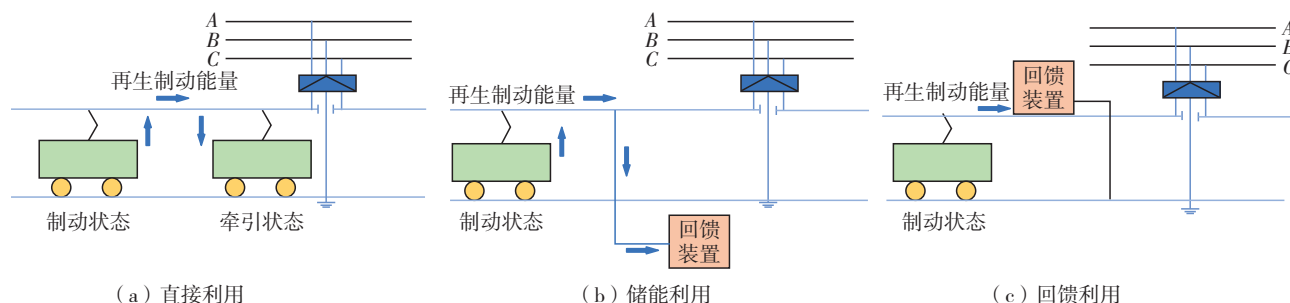


图1 再生能量利用方式

Fig. 1 Regenerative braking energy utilization methods of (a) direct utilization, (b) energy storage utilization and (c) feedback utilization.

线. 回馈式回收利用方式对再生制动能量的利用率严重依赖于外部耗电系统, 在供电条件本就薄弱的地区, 该方案的适用性受到一定制约^[16]. 相比之下, 储能装置对山区路段复杂环境的适用性较强. BARRERO 等^[17]对比机载和固定式储能系统(energy storage system, ESS)的优缺点, 旨在降低直流地铁网络的总能耗; ROCH-DUPRÉ 等^[18]研究电气化铁路储能装置的最佳选址和规模问题; 卢景涛^[16]以高速铁路长大坡道为研究背景, 基于实测数据研究混合储能系统的容量优化配置; 刘方中^[19]针对电气化铁路长大坡道中列车再生制动能量利用率不高和牵引网网压波动的问题, 提出一种储能型列车再生制动能量利用方案. 然而, 现有研究多集中于储能装置自身容量和寿命的优化, 较少与运行图结合考虑节能问题. 刘佩^[20]在节能运行图研究基础上考虑储能装置, 采用基于模拟的禁忌搜索算法进行求解; 郝京^[21]研究基于储能装置利用的列车时刻表与速度曲线分层优化方法.

目前, 再生制动能利用的研究主要集中于地铁和高铁, 对于普速铁路的研究相对较少. 与地铁相比, 普速铁路站间距长, 列车密度小, 再生制动能量传输效率低, 难以及时利用, 更加依赖储能装置实现节能; 与高铁相比, 并非所有普速铁路列车都可以产生和利用再生制动能, 一些老旧型号的电力机车, 仍依赖传统的机械制动或空气制动系统, 在考虑再生能量利用时需要更加精细化; 普速列车运行图的编制更为复杂, 多类型列车混跑, 客货列车速度差异大, 运行图需兼顾优先级与越行条件.

本研究从增大再生能量利用角度出发, 深入分析普速列车的特性及其再生能量的实际利用方式, 探讨普速列车节能运行图问题. 以首站发车间隔和停站时间为决策变量, 以再生制动能量的即时利用和延时利用总量最大化为目标, 重点探讨储能装置对运行图节能率的影响, 并通过净现值分析方法评估储能装置安装的经济可行性.

1 再生制动能量计算

普速列车再生制动能量的大小与列车运行状态、线路条件及运行图安排密切相关. 普速铁路站间距长、坡度变化大, 且部分机车不具备再生制动能力, 其能量计算较为复杂. 本研究基于文献[13]提出的时空网格法, 对其进行适应性改进, 以计算

<http://journal.szu.edu.cn>

表1 参数符号及其说明

Table 1 Parameter symbol description

符号	说明
γ	回转质量系数, 取 $\gamma = 0.06$
Δt	时间步长
F_{QY}, F_{ZD}, F_{ZL}	牵引力、制动力、阻力
f_{jb}, f_{pd}, f_{qx}	基本阻力、坡道附加阻力、曲线附加阻力
N	时间区间数量
S, s	车站集合、索引
I, i	列车集合、索引
z_i	0-1 变量, 列车 i 的机车是否能产生再生能量, 若能产生, $z_i = 1$; 否则 $z_i = 0$
C_p^0	储能装置 p 的最大容量
h_p	储能装置 p 的所在位置
M, m	牵引供电区间的集合和索引
$o(i), d(i)$	表示列车 i 的始发、终到站
$J_{o(i), \min}, J_{o(i), \max}$	列车首站发车间隔下限、上限
$\theta_{o(i)}^{n, 1}$	第 1 列列车的首站发车时刻
$T_{s-1, s}^i$	列车 i 在区间 $(s-1, s)$ 的运行时分
$\alpha_{起}, \alpha_{停}$	列车起、停附加时分
$\phi_{总}^i$	列车 i 的总旅行时间上限
$v_{\min}^{s, s+1}, v_{\max}^{s, s+1}$	区间 $(s, s+1)$ 的最小、最大允许速度
$\tau_{\min}^s, \tau_{\max}^s$	车站 s 的最小、最大停站时间
J_s^d, J_s^a	车站 s 的最小发车间隔、最小到达间隔
δ_s	车站 s 的不同时发到及不同时到发最小时间间隔

表2 决策变量符号及其说明

Table 2 Decision variable symbol description

符号	说明
$J_{o(i)}^{i, i+1}$	第 i 列与第 $i+1$ 列列车在始发站的发车间隔
τ_s^i	列车 i 在 s 站的停站时间

列车再生制动能量. 该方法通过时间与空间两个维度的离散化, 精确描述列车运行中的能量流动, 适于分析普速铁路系统中复杂的能量传输特性. 表 1 至表 3 为计算中的参数符号、决策变量符号、中间变量符号及其说明.

1.1 再生制动能量

列车在运行过程中受到的合力为

$$F_{\text{合}} = \begin{cases} F_{QY} - F_{ZL}, & \text{牵引阶段} \\ 0, & \text{巡航阶段} \\ -F_{ZL}, & \text{惰行阶段} \\ -F_{ZD} - F_{ZL}, & \text{制动阶段} \end{cases} \quad (1)$$

表3 中间变量符号及其说明
Table 3 Intermediate variable symbol description

符号	说明
$F_{\text{合}}$	列车运行过程中所受到的合力
a_n	第 n 个时间步长的加速度
v_n	第 n 个时间步长的初速度
γ_n	第 n 个时间步长内的列车行走距离
$F_{\text{QY}}(v_n), F_{\text{ZD}}(v_n)$	第 n 个时间步长内的牵引力与制动力, 其数值由该步长的初速度 v_n 确定, 根据机车牵引和制动特性曲线取值
$E_{\text{QY}}(n), E_{\text{ZD}}(n)$	第 n 个时间步长的牵引能耗和制动能耗
$E_{\text{QY}}^{i, [t, t+\Delta t], [h(t), h(t+\Delta t)]}$	在 $[t, t+\Delta t]$ 时间间隙内, 列车 i 所处位置为 $[h(t), h(t+\Delta t)]$ 时的牵引能耗
$E_{\text{ZD}}^{i, [t, t+\Delta t], [h(t), h(t+\Delta t)]}$	在 $[t, t+\Delta t]$ 时间间隙内, 列车 i 所处位置为 $[h(t), h(t+\Delta t)]$ 时的再生能量
$E_{\text{QY}}^{m, [t, t+\Delta t]}, E_{\text{ZD}}^{m, [t, t+\Delta t]}$	每个时空网格供电分区 m 、 $[t, t+\Delta t]$ 内的牵引能耗和再生能量
$\eta(\varepsilon)$	再生制动能传输效率, ε 为前后两车之间的距离或制动车和储能装置之间的距离
$\varepsilon_{ij}(t)$	t 时刻再生制动能从制动列车 i 传输至牵引列车 j 的路径长度
$\varepsilon_{ip}(t)$	t 时刻再生制动能从制动列车 i 传输至储能装置 p 的路径长度
$x_{[t, t+\Delta t]}^m(i)$	0-1 变量, 列车 i 在时空网格供电分区 m 、 $[t, t+\Delta t]$ 内是否有牵引能耗, 若有, $x_{[t, t+\Delta t]}^m(i) = 1$, 否则, $x_{[t, t+\Delta t]}^m(i) = 0$
$\gamma_{[t, t+\Delta t]}^m(i)$	0-1 变量, 列车 i 在 m 、 $[t, t+\Delta t]$ 内是否有再生能产生, 若有, $\gamma_{[t, t+\Delta t]}^m(i) = 1$, 否则, $\gamma_{[t, t+\Delta t]}^m(i) = 0$
$L_{[t, t+\Delta t]}^{a, m}(j)$	在 $[t, t+\Delta t]$ 、 m 内牵引列车 j 的平均里程位置
$L_{[t, t+\Delta t]}^{b, m}(i)$	在 $[t, t+\Delta t]$ 、 m 内制动列车 i 的平均里程位置
$E_{js}^{m, [t, t+\Delta t]}$	每个时空网格内的再生制动能即时利用量
E_{js}	总的再生制动能即时利用量
$E_{\text{store}}^{p, \text{th}}(t)$	t 时刻理论上可存入储能装置 p 的能量
$E_{\text{store}}^{p, \text{ac}}(t)$	t 时刻实际存储到储能装置 p 的能量
$E_{t-\Delta t}^p$	$t-\Delta t$ 时刻储能装置 p 的存储能量
E_{waste}^p	因超出储能装置容量而未能存储在储能装置 p 中的能量
E_{ys}^m	供电区间 m 延时利用的能量
E_{ys}	延时利用的总能量
$\theta_s^{d, i}, \theta_s^{a, i}$	列车 i 在 s 站的发车、到达时刻
λ_s^j	0-1 变量, 若列车 i 在 j 之前占用 s 至 $s+1$ 区间, $\lambda_s^j = 1$, 否则 $\lambda_s^j = 0$

$$F_{\text{ZL}}(v, t) = f_{\text{jb}} + f_{\text{pd}} + f_{\text{qx}} \quad (2)$$

考虑到普速列车的运行特点, 取 $\Delta t = 2\text{ s}$ 进行微分, 有

$$a_n = \frac{F_n^{\text{合}}}{(1 + \gamma)M} \quad (3)$$

$$V_n = V_{n-1} + a_{n-1}\Delta t \quad (4)$$

$$\gamma_n = \frac{a_{n-1}\Delta t}{2} + V_{n-1}\Delta t \quad (5)$$

以列车 i 在 $[s-1, s]$ 为例, 列车 i 在每个时间步长内的牵引能量 $E_{\text{QY}}^i(n)$ 和再生制动能量 $E_{\text{ZD}}^i(n)$ 为

$$E_{\text{QY}}^i(n) = \frac{F_{\text{QY}}(v_n) + F_{\text{QY}}(v_{n-1})}{2} \gamma_n, 1 \leq n \leq \mu_{\text{qy}}^i \quad (6)$$

$$E_{\text{ZD}}^i(n) = \frac{F_{\text{ZD}}(v_n) + F_{\text{ZD}}(v_{n-1})}{2} \gamma_n z_i,$$

$$T_{s-1, s}^i - \mu_{\text{zd}}^i \leq n \leq T_{s-1, s}^i \quad (7)$$

其中, μ_{qy}^i 和 μ_{zd}^i 表示列车在该区间内的牵引持续时间与制动持续时间. 时间步长 Δt 和供电分区将运行图划分为多个时空网格, 每个时空网格内的牵引能耗与再生制动能为

$$E_{\text{QY}}^{m, [t, t+\Delta t]} = \sum_{[h(t), h(t+\Delta t)] \in m} \sum_{i \in I} E_{\text{QY}}^{i, [t, t+\Delta t], [h(t), h(t+\Delta t)]}, \quad m \in M, t \in T \quad (8)$$

$$E_{\text{ZD}}^{m, [t, t+\Delta t]} = \sum_{[h(t), h(t+\Delta t)] \in m} \sum_{i \in I} E_{\text{ZD}}^{i, [t, t+\Delta t], [h(t), h(t+\Delta t)]}, \quad m \in M, t \in T \quad (9)$$

1.2 能量传输效率

能量从制动列车传递至牵引列车或储能装置时, 传输效率随距离增加而降低. 距离对再生制动能量利用率的影响可表示为^[22]

$$\eta(\varepsilon) = (-0.0532\varepsilon^2 + 0.24\varepsilon + 0.6351) \times 100\% \quad (10)$$

其中, 距离 ε 分为两种场景, 分别对应再生制动能的即时利用和延时利用, 具体解释如下.

1) t 时刻再生制动能从制动列车直接传输至牵引列车的路径长度 $\varepsilon_{ij}(t)$ 为

$$\varepsilon_{ij}(t) = |L_{[t, t+\Delta t]}^{q, m}(j) - L_{[t, t+\Delta t]}^{b, m}(i)| \quad (11)$$

$$L_{[t, t+\Delta t]}^{q, m}(j) = \frac{(h(t) + h(t + \Delta t)) \sum_{i \in I} x_{[t, t+\Delta t]}^m(j)}{2 \sum_{j \in I} x_{[t, t+\Delta t]}^m(j)} \quad (12)$$

$$L_{[t, t+\Delta t]}^{b, m}(i) = \frac{(h(t) + h(t + \Delta t)) \sum_{i \in I} y_{[t, t+\Delta t]}^m(i)}{2 \sum_{i \in I} x_{[t, t+\Delta t]}^m(i)} \quad (13)$$

$$x_{[t, t+\Delta t]}^m(i) = \begin{cases} 1, E_{\text{QY}}^{i, [t, t+\Delta t], [h(t), h(t+\Delta t)]} \neq 0 \\ 0, \text{其他} \end{cases} \quad (14)$$

$$y_{[t, t+\Delta t]}^m(i) = \begin{cases} 1, E_{\text{ZD}}^{i, [t, t+\Delta t], [h(t), h(t+\Delta t)]} \neq 0 \\ 0, \text{其他} \end{cases} \quad (15)$$

2) t 时刻再生制动能从制动列车传输至储能装置的路径长度 $\varepsilon_{ip}(t)$ 为

$$\varepsilon_{ip}(t) = |L_{[t, t+\Delta t]}^{b, m}(i) - h_p| \quad (16)$$

1.3 再生制动能即时利用量

根据所需牵引能量及可用再生能量的较小值, 计算每个时空网格内实际被利用的再生能量、总的再生制动能即时利用量分别为

$$E_{\text{js}}^{m, [t, t+\Delta t]} = \eta[\varepsilon_{ij}(t)] \min(E_{\text{QY}}^{i, [t, t+\Delta t], [h(t), h(t+\Delta t)]}, E_{\text{ZD}}^{i, [t, t+\Delta t], [h(t), h(t+\Delta t)]}) \quad (17)$$

$$E_{\text{js}} = \sum_{t \in T_m \in M} \sum \eta[\varepsilon_{ij}(t)] \min(E_{\text{QY}}^{i, [t, t+\Delta t], [h(t), h(t+\Delta t)]}, E_{\text{ZD}}^{i, [t, t+\Delta t], [h(t), h(t+\Delta t)]}) \quad (18)$$

1.4 再生制动能延时利用量

再生制动能的延时利用通过储能装置实现, 其可利用能量及实际存储量受到多重因素制约. t 时刻理论上可用于存入装置 p 的能量为即时利用后的剩余再生能量, 为

$$E_{\text{store}}^{p, \text{th}} = E_{\text{ZD}}^{m, [t, t+\Delta t]} - E_{\text{js}}^{m, [t, t+\Delta t]} \quad (19)$$

t 时刻实际能够存储到储能装置 p 中的能量受装置中剩余容量的限制, 为

$$E_{\text{store}}^{p, \text{ac}}(t) = \begin{cases} E_{\text{store}}^{p, \text{th}}, & E_{\text{store}}^{p, \text{th}} \leq C_p^0 - E_{t-\Delta t}^p \\ C_p^0 - E_{t-\Delta t}^p, & \text{其他} \end{cases} \quad (20)$$

因超出储能装置容量而未能存储在储能装置 p

中的能量为

$$E_{\text{was}}^p = \begin{cases} 0, & E_{\text{store}}^{p, \text{th}} \leq C_p^0 - E_{t-\Delta t}^p \\ E_{\text{store}}^{p, \text{th}} - (C_p^0 - E_{t-\Delta t}^p), & \text{其他} \end{cases} \quad (21)$$

由于能量从制动列车传递至储能装置时具有损耗, 则供电区间 m 内的延时利用能量为

$$E_{\text{ys}}^m = \eta[\varepsilon_{ip}(t)] (E_{\text{store}}^{p, \text{ac}} - E_{\text{waste}}^p) \quad (22)$$

最终将所有供电区间的能量进行累加, 延时利用的总能量为

$$E_{\text{ys}} = \sum_{t \in T_m \in M} \sum (E_{\text{cc}}^m - E_{\text{was}}^m) \eta[\varepsilon_{ip}(t)] \quad (23)$$

2 模型建立

2.1 问题描述

普速铁路列车牵引质量大, 制动过程中产生的再生制动能量较高. 若能将这部分能量回馈至牵引网, 供同一供电臂内其他处于牵引工况的列车使用, 则可有效降低牵引能耗. 然而, 普速铁路固有的特点导致再生制动能量传输损耗大、即时利用率低. 再生制动能无法被直接利用的情形主要包括: ① 供电臂内两列车均处于再生制动状态; ② 供电臂内仅单列车产生再生能量而邻车处于非牵引状态; ③ 供电臂内无再生能量产生. 当情况①造成能量过剩及情况②发生时, 均可通过安装储能装置实现再生能量的延时利用, 本研究集中在前两种情况的优化.

当普速铁路供电臂内的双列车机车均具有再生制动系统时, 可通过同站利用和异站利用方式进行能量利用. 若再生制动能无法即时利用, 在牵引变电所或分区所配置储能装置成为提升利用率的关键, 其节能效果取决于运行图参数与储能配置的协同优化.

基于上述分析, 本研究以再生制动能总利用量 $E_{\text{利用}}$ 最大化为优化目标, 即最大化即时利用量与储能装置储存能量之和,

$$\max E_{\text{利用}} = E_{\text{js}} + E_{\text{ys}} \quad (24)$$

由于普速铁路采用上、下行独立供电系统, 本研究选取下行方向作为研究对象(上行方向原理相同). 再生制动能总利用量最大化的建模过程基于以下假设: ① 不考虑客流变化引起的质量变化; ② 站间运行时间以及牵引制动时间已知; ③ 储能装置的充放电效率为 100%, 不考虑其循环寿命衰减, 且充放电功率无限制.

2.2 约束条件

1) 始发站发车间隔约束

$$J_{o(i), \min} \leq J_{o(i)}^{i, i+1} \leq J_{o(i), \max}, J_{o(i)}^{i, i+1} \in \mathbf{Z}^+ \quad (25)$$

$$\theta_s^{d, i} = \theta_{o(i)}^{d, 1} + \sum_{i=1}^{l-1} J_{o(i)}^{i, i+1} \quad (26)$$

2) 停站时间约束

$$\tau_{\min} \leq \tau_s^i \leq \tau_{\max}, \tau_s^i \in \mathbf{Z}^+ \quad (27)$$

3) 列车发车时刻和到达时刻为中间变量, 需满足计算规则约束

$$\theta_s^{a, i} = \theta_{s-1}^{d, i} + T_{s-1, s}^i + \alpha_{\text{起}} + \alpha_{\text{停}} \quad (28)$$

$$\theta_s^{d, i} = \theta_s^{a, i} + \tau_s^i \quad (29)$$

4) 为提高列车周转效率, 保证旅客服务质量, 根据运营管理要求, 列车的总运行时间需控制在一定范围内, 即

$$\theta_{d(i)}^{a, i} - \theta_{o(i)}^{d, i} \leq \phi_{\text{总}}^i \quad (30)$$

5) 瞬时速度 V_n 的约束为

$$V_{\min}^{s, s+1} \leq V_n \leq V_{\max}^{s, s+1} \quad (31)$$

6) 相邻两列车在到达同一车站或从同一车站出发时, 需满足车站最小到达和出发时间间隔约束,

$$\theta_s^{d, j} - \theta_s^{d, i} - J_s^d \geq M(\lambda_s^{ij} - 1), \forall i, j \in I, s \in S \quad (32)$$

$$\theta_s^{d, i} - \theta_s^{d, j} - J_s^d \geq -M\lambda_s^{ij}, \forall i, j \in I, s \in S \quad (33)$$

$$\theta_{s+1}^{a, j} - \theta_{s+1}^{d, i} - J_s^a \geq M(\lambda_s^{ij} - 1), \forall i, j \in I, s \in S \quad (34)$$

$$\theta_{s+1}^{a, i} - \theta_{s+1}^{d, j} - J_s^a \geq -M\lambda_s^{ij}, \forall i, j \in I, s \in S \quad (35)$$

7) 到发和发到时间间隔约束为

$$|\theta_s^{d, i} - \theta_s^{a, j}| \geq \delta_s \quad (36)$$

8) 储能装置容量限制约束为

$$E_{t-\Delta t}^p + E_{ys}^m \leq C_p^0 \quad (37)$$

执行以下步骤.

步骤1 邻域解生成.

1) 分层调整.

第1层(即时利用): 随机选择1列货车 i , 对其发车间隔和停站时间进行调整, 调整该列车与前一列车在始发站的发车间隔 $J^{i-1, i}$, 调整量 ΔJ 从离散步长集合 $\{-2 \text{ min}, -1 \text{ min}, 1 \text{ min}, 2 \text{ min}\}$ 中等概率随机选取, 在 s 站的停站时间 τ_s^i 的调整量 $\Delta \tau$ 从 $\{-1 \text{ min}, 0 \text{ min}, 1 \text{ min}\}$ 中等概率随机选取.

第2层(储能利用): 若供电分区 m 在 t 时刻即时利用后仍有剩余再生能量, 且储能装置未满, 则将其存入储能装置.

2) 动态约束修复.

列车越行约束: 遍历每个区间 $(s, s+1)$, 检测是否存在低速列车 i 阻挡高速列车 j 的冲突条件, 即满足 $\theta_s^{a, i} < \theta_s^{a, j}$ 、 $\theta_s^{d, i} > \theta_s^{d, j}$, 且列车 j 在区间运行时分更短, 则进行修复操作. 插入虚拟时间窗口, 将低速列车 i 在站 s 发车时刻 $\theta_s^{d, i}$ 强制后移1个固定时间窗口长度 Δw , 即 $\theta_s^{d, i, \text{new}} = \theta_s^{d, i, \text{old}} + \Delta w$. 为避免列车 i 总旅行时间超标, 在 $s+1$ 站的停站时间 τ_{s+1}^i 进行补偿性缩短, 即 $\tau_{s+1}^{i, \text{new}} = \max(\tau_{\min}, \tau_{s+1}^{i, \text{old}} - \Delta w)$, 确保总运行时间约束不被破坏.

储能容量约束: 检查每个储能装置 p 在各时刻的储能量, 若 $E_t^p > C_p^0$, 则调整相关列车的停站时间, 减少向该储能装置充电的列车停站时间, 改变再生制动能量的产生模式, 减少能量浪费.

步骤2 计算目标函数值 $f(\rho_{\text{new}})$.

步骤3 依据 Metropolis 准则决定是否接受新解.

步骤4 记录历史最优解, 并按降温系数降低温度.

3 算法设计

3.1 模型分析与算法设计

传统 SA 算法在求解该复杂优化模型时, 存在邻域搜索盲目性与约束处理不足的问题, 因此, 本研究从设计分层调整策略和动态约束修复策略两个方面进行改进.

3.2 算法步骤

3.2.1 初始化

1) 输入参数. 输入算法参数与案例数据.

2) 生成初始解 ρ_0 . 生成满足约束的初始运行图解, 并计算其再生能量利用总量 $f(\rho_0)$.

3.2.2 迭代优化过程

循环条件: 当当前温度 $T_k \geq$ 最低温度 $T_{\min}$ 时,

4 案例及结果分析

4.1 案例参数设置及求解

兰新线兰州至乌鲁木齐全长 1 725 km, 本研究兰州至武威段长度为 303 km, 共分布 15 个车站, 主要经过甘肃省中西部地区, 沿线途经乌鞘岭等地, 地形复杂且地势起伏大. 以 SS8 和 HXD1 两种类型牵引机车为例进行算例验证, 包含 7 个供电分区(图 2), 每个供电分区分别设置 1 台储能装置, 容量为 500 kW·h. 08:00—22:00 时段开行 43 列车, 其中, 25 列可以产生再生制动能, 其他参数由于篇幅限制在此不一一列出.

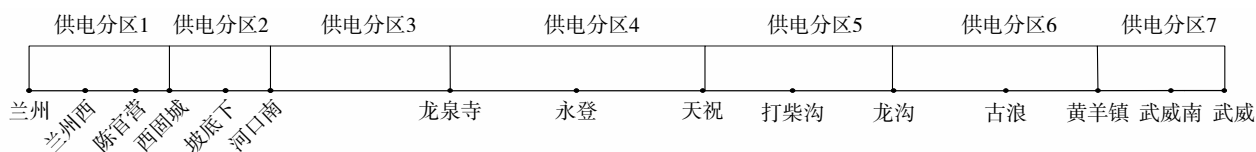


图2 供电分区划分情况

Fig. 2 Power supply section partitioning configuration.

基于本研究构建模型,采用改进的模拟退火算法进行求解,最终获得了具有显著节能效果的运行图方案.优化后的运行图如图3,其中,绿色线条

代表货车;红色线条代表客车.优化算法迭代图如图4.该方案实现系统总再生制动能利用量 $4\,134.38\text{ kW}\cdot\text{h}$,再生制动能利用率达56.28%.

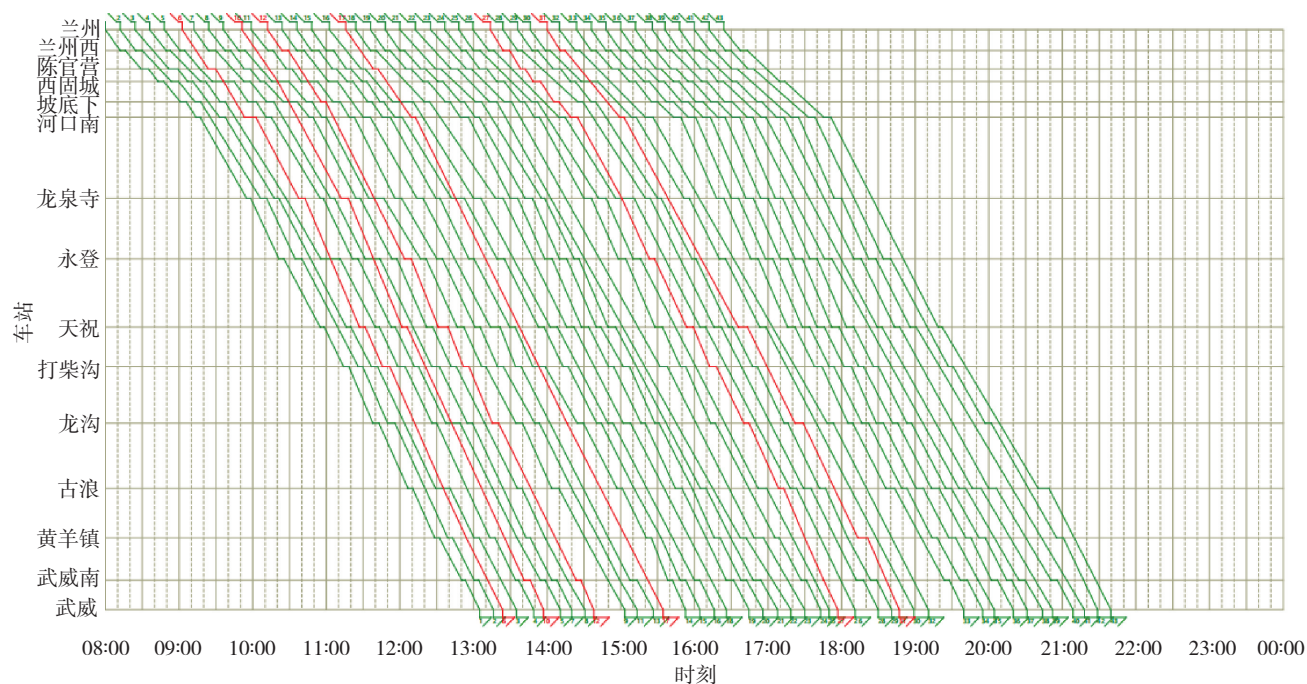


图3 兰新线兰州—武威段节能运行图

Fig. 3 The energy-saving train timetable from Lanzhou to Wuwei section of the Lanzhou-Xinjiang railway.

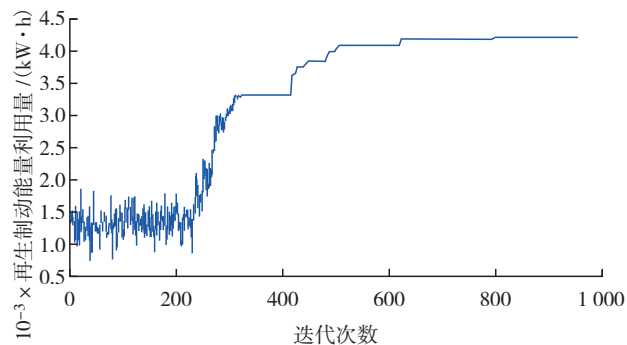


图4 改进模拟退火算法迭代过程

Fig. 4 Evolution of objective function value in improved SA algorithm.

4.2 结果分析

4.2.1 发车间隔和停站时间对节能率的影响

在节能运行图优化过程中,将首站发车间隔与停站时间作为决策变量,其调整对再生制动能利用

率具有显著影响.可增加列车运行密度,提升牵引和制动工况的时间重叠概率,增加再生能量的即时利用.本研究案例中,优化后平均首站发车间隔为11.7 min,再生能量利用率提升28.5%.平均停站时间5.1 min,再生能量利用率提升15.2%,如表4.结果验证了运行图参数调整对能量时空匹配的关键作用,但受限于储能装置容量与安全间隔阈值,进一步优化需结合线路条件动态平衡效率与约束.

4.2.2 储能装置对节能率的影响

图5为不同储能装置容量下各供电分区能量利用情况,其中,横轴表示7个分区,如1—4表示车站1至车站4为1个分区.可见,储能装置的引入显著提升了再生能量利用率.当未安装储能装置时,列车再生制动能量仅依赖即时利用模式,总产

表4 运行图优化前后参数变化

Table 4 Comparison of parameter values before and after timetable optimization

情形	平均发车 间隔/min	平均停站 时间/min	再生能量利 用率变化/%
优化前	16.0	10.0	28.5
优化后	11.7	5.1	15.2

生量为 7 345.68 kW·h, 实际利用量仅 634.38 kW·h, 能量利用率低至 8.64%, 能量浪费较为明显. 当安装容量为 500 kW·h 的储能装置后, 总利

用量可以提升至 4 134.38 kW·h, 利用率达 56.28%, 表明储能系统在该容量下即可实现能量回收利用的新突破. 将储能装置容量扩大至 1 000 kW·h 时, 利用率高达 83.94%, 接近理论峰值. 当采用 2 000 kW·h 的储能装置时, 利用率为 86.33%, 仅增加 2.39%. 显然高容量不符合经济效益, 建议将 1 000 kW·h 配置作为性价比最优方案, 在保证利用率的同时实现建设成本与运营效益的最佳平衡.

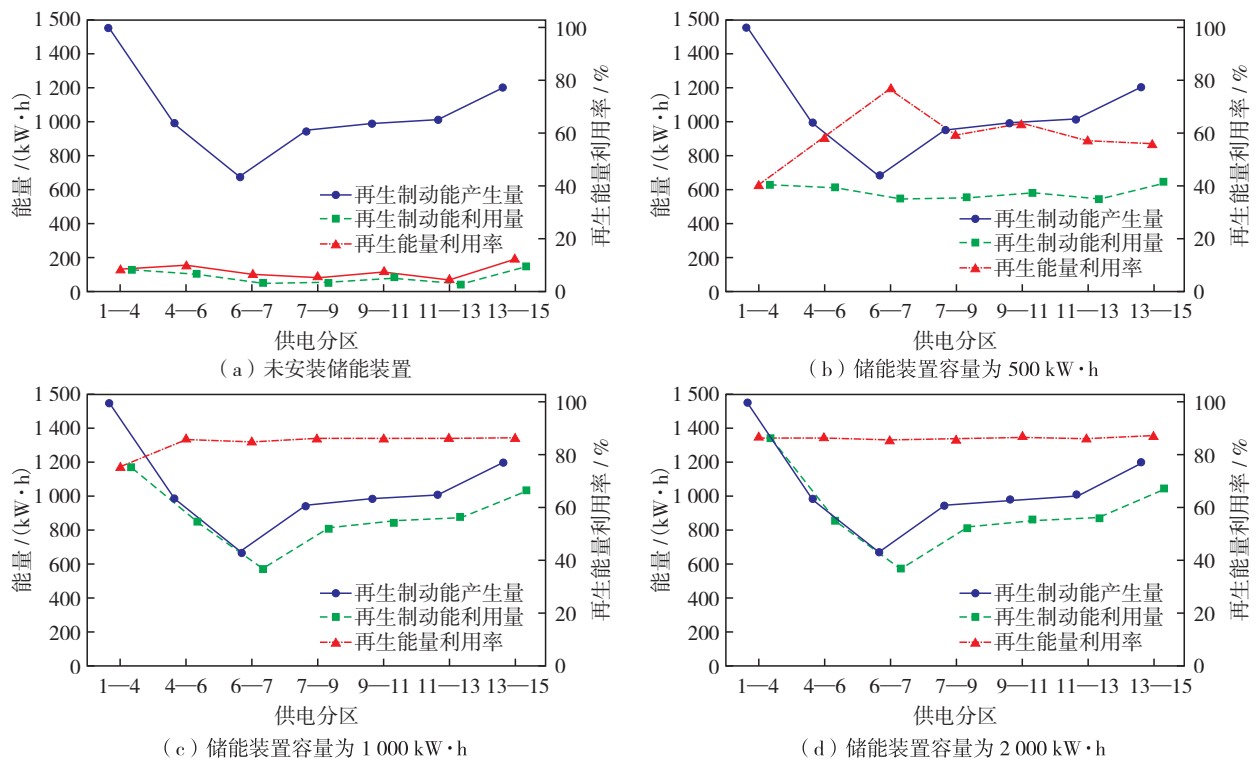


图5 不同储能装置容量下各供电分区能量利用情况

Fig. 5 Energy (left axis) and utilization rate (right axis) of power supply sections under energy storage capacity of (a) 0, (b) 500, (c) 1 000 and (d) 2 000 kW·h. The solid blue line represents the amount of regenerative braking energy generated. The dashed green line represents the amount of regenerative braking energy utilized. The dotted red line represents the utilization rate of regenerative braking energy.

储能装置容量与线路坡度紧密相关. 在陡坡区段, 列车下坡时频繁制动导致再生制动能量瞬时功率高、总量大, 需配置大容量储能装置以快速吸收能量; 中坡度区段再生制动能分布平稳, 中等容量可覆盖能量波动周期; 平缓区段再生制动能分散且总量低, 仅需小容量即可满足. 因此, 在平缓区段, 优先考虑优化列车运行参数来提高再生制动能量利用率, 而在坡度较大的区段, 配置储能装置十分必要.

4.2.3 列车开行对数和可以产生再生制动能的机车比例

列车开行密度和再生制动机车比例是影响再生制动利用率的关键因素, 图6为4种场景下各供电分区再生制动能与储能利用率, 对应储能装置容量均为 500 kW·h. 由图6(a)可见, 可产生再生制动能的机车比例约为 20%, 各供电分区的再生制动能产生量相对较低, 储能装置利用率也普遍较低, 仅为 20%~30%, 储能装置效率有限, 可不安装储能装置以避免资源浪费. 图6(b)中可产生再生制动能

的机车比例约为 60%，储能装置利用率大幅提高至 60%~90%，此时安装储能装置可以实现能量高效回收。图 6(c)中可产生再生制动能的机车比例约为 23%，但由于列车密度大，虽储能装置利用率也较为可观，但整体再生制动能规模有限，可不设储能装置。图 6(d)中可产生再生制动能的机车比例约为

58%，所有供电分区的储能装置利用率均达 100%，表明在高密度列车和高再生制动机车比例条件下，必须安装储能装置以实现能量利用最大化。因此，普速铁路中是否安装储能装置要根据线路特性、列车运行模式以及能量需求分布来综合判断，以上研究结果可为未来优化储能系统配置提供一定参考。

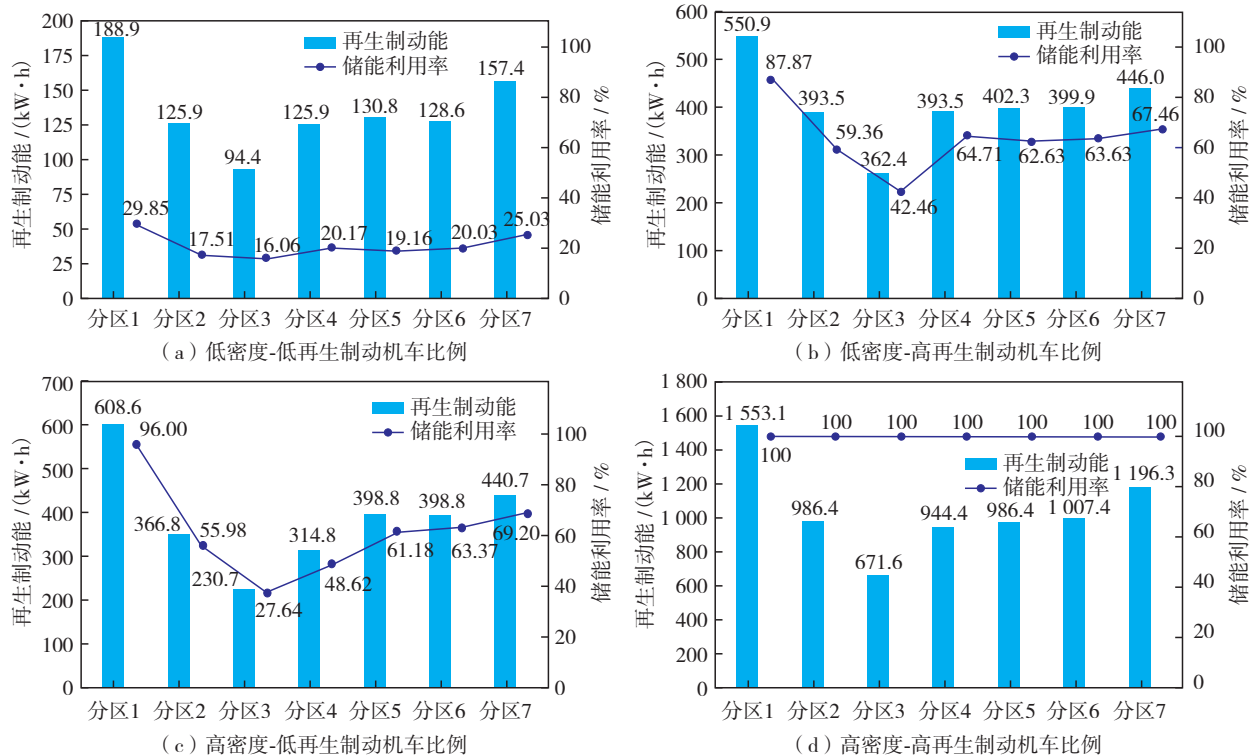


图6 四种场景各供电分区再生制动能产生量与储能装置利用率对比

Fig. 6 Comparative diagram of regenerative braking energy generation (left axis) and storage utilization rates (right axis) across power supply sections under (a) low density - low regeneration brake locomotive ratio, (b) low density - high regeneration brake locomotive ratio, (c) high density - low regeneration brake locomotive ratio and (d) high density - high regeneration brake locomotive ratio.

4.3 安装储能装置成本分析

储能装置的应用虽能显著提升能源利用率，但其初始安装成本较高，本研究采用净现值(net present value, NPV)法，评估储能装置的经济可行性。净现值法在评估储能项目投资效益时广泛采用，文中的净现值分析模型及主要经济性指标的采用，参考了相关领域的研究实践^[23]。

结果显示，在初始总投资 350 万元、电价 0.8 元/kW·h、折现率 10% 的情况下，储能装置的引入使日均能量回收从 1 057.3 kW·h 提升至 5 833.33 kW·h，年增加节能量达 1 743 250 kW·h。在经济效益上项目投资回收期为 3 a，优于行业平均水平；在 NPV 变化趋势上，第 10 a 时净现值高达 506.9 万元。验证了该方案在经济可行性与长期投资价值上的双重优势，为铁路系统提供了量化决策依据。

5 结 论

针对普速铁路列车节能运行优化问题开展深入研究，取得显著节能效果，主要研究结论如下：

1) 构建以发车间隔和停站时间为决策变量的节能运行图优化模型，结合模拟退火算法求解，实现了再生制动能的即时利用与延时利用协同优化。通过协同优化运行图参数和储能装置，总利用量达 4 134.38 kW·h，系统再生制动能利用率从 8.64% 提升至 56.28%，表明优化运行图参数对能量时空匹配具有关键作用。

2) 引入 500 kW·h 容量储能装置即可实现 56.28% 的利用率，1 000 kW·h 容量时利用率达 83.94%，接近理论峰值，而 2 000 kW·h 容量时仅

微增2.39%。因此,储能装置容量的选择要平衡安装成本与节能效益。储能装置容量还需与线路坡度动态适配,建议在平缓区段主要依靠优化运行图参数来提高再生制动能利用率;而在坡度较大的区段,则应重点配置储能装置,以应对能量瞬时功率高、总量大的特点。

3) 提升再生制动机车比例至60%以上可显著释放节能潜力。本案例中再生机车比例从23%增至58%时,储能利用率平均提升42%;若比例进一步提高至60%以上,结合优化运行图参数,再生能利用率和年节能量将会有新突破,该量化结果为铁路低碳化提供明确路径,即优先改造老旧机车、推广再生制动技术,并协同运行图优化策略,最大化能源回收效率与减排效益。

4) 通过单目标优化揭示了调整运行图参数和布设储能装置与提升再生制动能利用率之间的关系,实际应用需进一步平衡经济效益与社会价值。后续研究将转向多目标优化,系统整合经济、节能与社会指标,以寻求综合最优解,为运营决策提供更全面的依据。

基金项目:国家自然科学基金资助项目(71761025);国家铁路集团有限公司科技研究开发计划资助项目(P2024X003)

作者简介:冀璇(jixuan0923@163.com),兰州交通大学硕士研究生。研究方向:普速铁路列车节能运行图优化。

引文:冀璇,张玉召,高坤盈泽,等.考虑储能装置的普速铁路列车节能运行图优化[J].深圳大学学报理工版,2026,43(3):316-326.

参考文献 / References:

- [1] 赵东升,赵鹏,姚向明,等.基于工况序列寻优的列车节能操纵策略优化[J].交通运输系统工程与信息,2024,24(2):157-165.
ZHAO Dongsheng, ZHAO Peng, YAO Xiangming, et al. An energy-efficient train driving strategy based on regime sequences optimization [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2024, 24(2): 157-165. (in Chinese)
- [2] 革新,张玉召.考虑驾驶策略的高速列车运行图节能优化方法[J].交通信息与安全,2022,40(6):118-126,136.
GE Xin, ZHANG Yuzhao. An energy-saving method based on optimized timetable for high-speed trains considering driving strategy [J]. Journal of Transport Information and Safety, 2022, 40(6): 118-126, 136. (in Chinese)
- [3] 盛昭,蔡伯根,上官伟,等.一种结合时刻表调整的列车节能驾驶优化方法[J].铁道学报,2019,41(10):68-75.
SHENG Zhao, CAI Bogen, SHANGGUAN Wei, et al. Energy-efficient optimization method for train operation combining driving strategy and timetabling [J]. Journal of the China Railway Society, 2019, 41(10): 68-75. (in Chinese)
- [4] 李蔚,刘高峰,赵思哲,等.基于不同速度控制模式的列车驾驶策略优化研究[J].铁道科学与工程学报,2022,19(8):2169-2181.
LI Wei, LIU Gaofeng, ZHAO Sizhe, et al. Research on the optimization of train driving strategy based on different speed control modes [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2022, 19(8): 2169-2181. (in Chinese)
- [5] YING Peiran, ZENG Xiaoqing, SONG Haifeng, et al. Energy-efficient train operation with steep track and speed limits: a novel Pontryagin's maximum principle-based approach for adjoint variable discontinuity cases [J]. IET Intelligent Transport Systems, 2021, 15(9): 1183-1202.
- [6] RAMOS A, PENA M T, FERNÁNDEZ A, et al. Mathematical programming approach to underground timetabling problem for maximizing time synchronization [J]. Dirección y Organización, 2008, 35: 88-95.
- [7] LI Xiang, YANG Xin. A stochastic timetable optimization model in subway systems [J]. International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-Based Systems, 2013, 21(S1): 1-15.
- [8] LE Zhao, LI Keping, YE Jingjing, et al. Optimizing the train timetable for a subway system [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2015, 229(8): 852-862.
- [9] YANG Xin, CHEN A, LI Xiang, et al. An energy-efficient scheduling approach to improve the utilization of regenerative energy for metro systems [J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2015, 57: 13-29.
- [10] 彭其渊,李文新,王艺儒,等.基于再生制动的地铁列车开行策略研究[J].铁道学报,2017,39(3):7-13.
PENG Qiyuan, LI Wenxin, WANG Yiru, et al. Study on operation strategies for metro trains under regenerative braking [J]. Journal of the China Railway Society, 2017, 39(3): 7-13. (in Chinese)
- [11] 冯瑜,陈绍宽,冉昕晨,等.考虑再生制动能利用的城市轨道交通列车节能运行优化方法研究[J].铁道学报,2018,40(2):15-22.
FENG Yu, CHEN Shaokuan, RAN Xinchun, et al. Energy

- saving operation optimization of urban rail transit trains through the use of regenerative braking energy [J]. *Journal of the China Railway Society*, 2018, 40(2): 15-22. (in Chinese)
- [12] 郑亚晶, 李耀辉, 李雨恒, 等. 再生制动条件下地铁列车运行图的节能优化[J]. 华南理工大学学报自然科学版, 2021, 49(7): 1-7.
ZHENG Yajing, LI Yaohui, LI Yuheng, et al. Energy saving optimization of metro train working diagram under regenerative braking [J]. *Journal of South China University of Technology Natural Science Edition*, 2021, 49(7): 1-7. (in Chinese)
- [13] 革新, 张玉召, 黄志鹏. 基于再生制动能利用的高铁列车运行图优化[J]. 深圳大学学报理工版, 2023, 40(5): 539-545.
GE Xin, ZHANG Yuzhao, HUANG Zhipeng. Optimization of high-speed train timetable based on regenerative braking energy utilization [J]. *Journal of Shenzhen University Science and Engineering*, 2023, 40(5): 539-545. (in Chinese)
- [14] 张驰, 谭南林, 刘敏杰, 等. 地铁再生制动系统仿真及节能优化研究[J]. 中国铁道科学, 2019, 40(3): 112-118.
ZHANG Chi, TAN Nanlin, LIU Minjie, et al. Research on simulation and energy saving optimization of regenerative braking system for subway [J]. *China Railway Science*, 2019, 40(3): 112-118. (in Chinese)
- [15] 王若愚, 周慧娟, 秦勇, 等. 基于再生制动能高效利用的列车运行方案优化[J]. 铁道运输与经济, 2024, 46(12): 76-87.
WANG Ruoyu, ZHOU Huijuan, QIN Yong, et al. Optimization of train operation plans based on efficient utilization of regenerative braking energy [J]. *Railway Transport and Economy*, 2024, 46(12): 76-87. (in Chinese)
- [16] 卢景涛. 高速铁路长大坡道再生制动能量储存回收优化配置研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2023.
LU Jingtao. Research on optimal configuration of energy storage and recovery for regenerative braking on long steep slope of high-speed railway [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2023. (in Chinese)
- [17] BARRERO R, TACKOEN X, VAN MIERLO J. Stationary or onboard energy storage systems for energy consumption reduction in a metro network [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 2010, 224(3): 207-225.
- [18] ROCH-DUPRÉ D, CAMACHO-GÓMEZ C, CUCALA A P, et al. Optimal location and sizing of energy storage systems in DC-electrified railway lines using a coral reefs optimization algorithm with substrate layers [J]. *Energies*, 2021, 14(16): 4753.
- [19] 刘方中. 长大坡道储能型列车再生制动能量利用方案研究[J]. 电气化铁道, 2020, 31(5): 27-31.
LIU Fangzhong. Research on energy utilization scheme of regenerative braking for energy storage trains on tracks with long steep gradient [J]. *Electric Railway*, 2020, 31(5): 27-31. (in Chinese)
- [20] 刘佩. 基于再生能量利用的城轨列车节能运行图优化研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2020.
LIU Pei. Research on energy-efficient train timetable optimization based on regenerative braking energy in urban rail transit [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2020. (in Chinese)
- [21] 郝京. 基于分层协同优化的城市轨道交通列车时刻表与速度曲线一体化决策模型与算法研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2020.
HAO Jing. Research on integrated decision model and algorithm of urban rail transit train timetable and speed curve based on hierarchical collaborative optimization [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2020. (in Chinese)
- [22] 魏润斌, 杜鹏, 杨雍彬, 等. 地铁列车再生制动能量利用分析与时刻表优化方法研究[J]. 铁道学报, 2020, 42(8): 1-9.
WEI Runbin, DU Peng, YANG Yongbin, et al. Analysis on utilization of regenerative braking energy for metro trains and research on timetable optimization method [J]. *Journal of the China Railway Society*, 2020, 42(8): 1-9. (in Chinese)
- [23] 杨萌, 施凯杰, 李虎军, 等. 考虑储能运营模式的时序生产模拟及新能源消纳评估[J]. 现代电力, 2024, 41(1): 124-133.
YANG Meng, SHI Kaijie, LI Hujun, et al. Time series production simulation and renewable energy accommodation evaluation considering energy storage operation mode [J]. *Modern Electric Power*, 2024, 41(1): 124-133. (in Chinese)

【中文责编: 方圆; 英文责编: 淡紫】