

文章编号:1005-0523(2025)05-0071-12



基于改进 SSA 的重载列车循环空气制动运行优化

付雅婷^{1,2,3}, 张文文^{1,2,3}, 杨 辉^{1,2,3}

(1. 华东交通大学电气与自动化工程学院, 江西 南昌 330013;

2. 华东交通大学江西省先进控制与优化重点实验室, 江西 南昌 330013;

3. 华东交通大学轨道交通基础设施性能监测与保障国家重点实验室, 江西 南昌 330013)

摘要:为了改善重载列车的运行性能,考虑长大下坡采用循环空气制动,提出了基于改进麻雀算法(SSA)的重载列车运行优化方法:对列车每节车辆进行受力分析,构建列车纵向动力学模型,建立了列车运行曲线的多目标优化模型,采用 Circle 混沌映射和线路要求生成初始种群,并使用自适应惯性权重因子和莱维飞行策略改进的 SSA 对列车在长大下坡的操纵策略进行优化。基于大秦线 HXD1 型重载列车实际数据的仿真结果表明,基于改进 SSA 对优化策略中列车的安全、节能和正点等关键指标有显著的改善效果。该研究可为长大下坡重载列车的循环空气制动运行理论提供一定的参考依据。

关键词:重载列车;长大下坡;空气制动;纵向冲动;改进 SSA

中图分类号:U239.4

文献标志码:A

本文引用格式:付雅婷, 张文文, 杨辉. 基于改进 SSA 的重载列车循环空气制动运行优化[J]. 华东交通大学学报, 2025, 42(5): 71-82.

Optimization of Circulating Air Braking Operation of Heavy-Haul Train Based on Improved SSA

Fu Yating^{1,2,3}, Zhang Wenwen^{1,2,3}, Yang Hui^{1,2,3}

(1. School of Electrical & Automation Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China;

2. Jiangxi Key Laboratory for Advanced Control and Optimization, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China;

3. State Key Laboratory for Performance Monitoring and Guarantee of Rail Transit Infrastructure, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: To improve the running performance of heavy-haul trains, a running optimization method for heavy-haul trains based on improved sparrow search algorithm (SSA) was proposed, considering the use of circulating air braking for long downhill descent. The force analysis of each train section was carried out, the longitudinal dynamic model of the train was constructed, and the multi-objective optimization model of the train operation curve was established; the Circle chaotic map and line requirements were used to generate the initial population, and the adaptive inertial weight factor and the SSA improved by Lévy flight strategy were used to optimize the maneuvering strategy of the train in the long downhill area. The simulation results based on the actual data of the HXD1 heavy-haul train on the Daqin Line show that the improved SSA has a significant improvement effect on

收稿日期:2024-12-18

基金项目:国家自然科学基金项目(62363011, 52472342);江西省自然科学基金项目(20242BAB26022);中国博士后科学基金项目(2024M760904)

the key indicators of the train in the optimization strategy, such as safety, energy saving and punctuality. This study can provide some reference for the theory of circulating air braking operation of long downhill heavy-haul trains.

Key words: heavy-haul train; growing downhill; air brake; longitudinal impulse; improved SSA

Citation format: FU Y T, ZHANG W W, YANG H. Optimization of circulating air braking operation of heavy-haul train based on improved SSA[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2025, 42(5): 71–82.

重载货运作为铁路运输的核心支柱,以其运输量大、效率高等优势,在我国经济建设中扮演着不可或缺的关键角色,是推动国家发展进程的重要驱动力^[1-2]。长编组、牵引重量大的重载列车在运行过程中,其受到的纵向冲动问题严重影响重载运输的安全和效率。特别是当重载列车在长大下坡运行时受到的纵向冲动更为明显,如果出现操作不当,轻则列车无法到站或者产生能源浪费,重则可能引发列车断钩、脱轨等严重事故。因此,对重载列车在长大下坡上的运行优化具有重大现实意义。

大秦铁路作为“西煤东运”战略框架下至关重要的能源物资运输通道,穿梭于崇山峻岭之间并包含多个长大下坡区段。特别是当列车在长大下坡行驶时,仅凭机车的电制动力不足以实现对列车速度的有效控制,必须采用循环空气制动,才能避免列车在运行过程中出现超速现象;同时又要满足对列车进行循环制动所需的充风时间,否则会影响列车的行车安全^[3-5]。Yu等^[6]针对重载列车在长大下坡采用循环制动时施加制动和缓解时机的问题,考虑了列车的运行机理及控制需求,以安全运行和最小化运行时间为目标,提出了一种基于粒子群优化算法的列车智能运行策略。林轩等^[7]针对重载列车在长大下坡道运行时面临的周期性制动问题,提出了一种长大下坡与相邻区间的最优连接的数值求解算法。俞花珍等^[8]针对如何实现重载列车在长大下坡安全运行问题,分析了速度、充风时间等约束条件,以制动与缓解的转换点为对象,提出了基于遗传算法的列车运行曲线生成算法。Su等^[9]针对重载列车在长大下坡施加空气制动时机选择问题,以运行距离最大和空气制动时间最短为目标,考虑线路限速、制动/缓解速度以及充风时间等操作约束,提出了一种混合整数线性规划方法用于列车运行轨迹的优化。姜

正等^[10]考虑制动和缓解的运行要求,提出了空电联合控速降速运用控制策略,以空气制动为主导,同时辅机车动力制动,实现了列车安全的运动。以上研究从多个角度开展了对重载列车在长大下坡运行的优化研究,但只考虑了速度或充风时间约束等,未考虑车辆间车钩缓冲装置的车钩力是否超过最大值或空气制动延迟对纵向冲动的影。当列车施加空气制动时,由于制动/缓解信号传播存在速度限制,其制动/缓解波速无法瞬间传达至后续车辆,可能会导致列车纵向力过大^[11],超出车钩力的承受极限,从而引发断钩、脱轨等严重后果。

针对上述问题,本文结合大秦线路运行情况,建立列车纵向动力学模型,计算空气制动和缓解的延迟时间,并考虑钩缓约束和充风时间等实际操作限制,以安全、节能和正点为评价指标,建立长大下坡循环制动的列车运行轨迹的多目标优化模型;然后,采用Circle混沌映射以及线路要求生成初始种群,并利用自适应惯性权重因子和Lévy飞行策略对麻雀算法(sparrow search algorithm, SSA)进行改进,优化获得满足性能需求的重载列车运行速度目标曲线;最后,通过对本文方法的仿真结果和自适应遗传算法(adaptive genetic algorithm, AGA)以及传统SSA算法的仿真结果的分析,证明了改进后算法的有效性。本研究为在长大下坡的重载列车的循环空气制动运行的理论方面提供了一定的参考依据。

1 重载列车纵向动力学模型的建立

如图1所示,将一整列重载列车的每节机车/车辆都视为一个独立的质点来进行受力分析,考虑每节机车/车辆的具体运行状态,可以真实的模拟重载列车在线路上的实际运行情况^[12]。图1中, m_i 为机车/车辆的质量, t , $i=0,1,2,\dots,n$, v 为速度。

对每个质点进行受力分析,机车/车辆的运动状

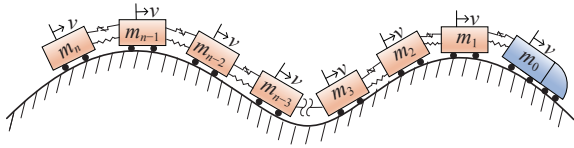


图1 重载列车的多质点模型图

Fig. 1 Multi-mass model diagram of a heavy-haul train

态由牵引力或电制动力、基本阻力、附加阻力、空气制动力、机车和车辆间以及车辆间的前后车钩力等多种力来决定,如图2所示。其运行状态的数学描述方程为

$$m_i \ddot{a}_i = F^i + F_{CR}^i - F_{CF}^i - W_1^i - W_2^i - F_B^i \quad (1)$$

$$F^i = \begin{cases} F_T - F_D, & i=0 \\ 0, & i=1,2,\dots,n \end{cases} \quad (2)$$

式中: m_i 为机车/车辆的质量, t , $i=0,1,2,\dots,n$; $\ddot{a}_i$ 为机车/车辆的加速度, m/s^2 ; F_{CR}^i 、 F_{CF}^i 分别为机车/车辆在运行过程中受到的前、后车钩力, kN , $F_{CR}^0=0$; W_1^i 、 W_2^i 分别为机车/车辆受到的基本阻力、附加阻力, kN ; F_B^i 为机车/车辆受到的空气制动力, kN ; F_T 、 F_D 分别为机车受到的牵引力和电制动力(后续车辆不受影响), kN 。

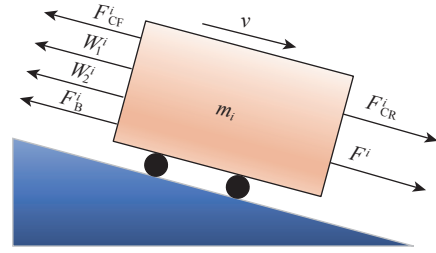
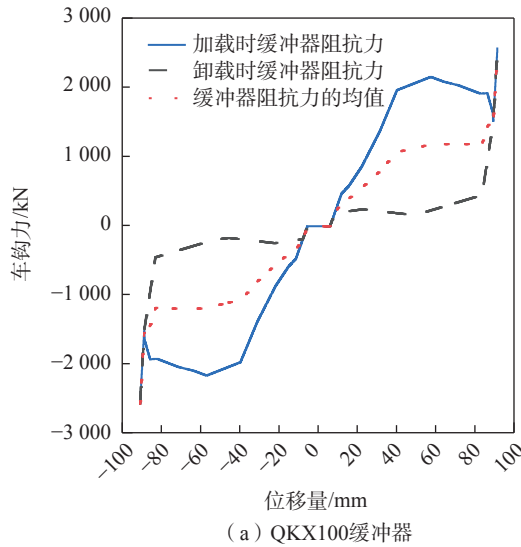


图2 列车纵向受力分析图

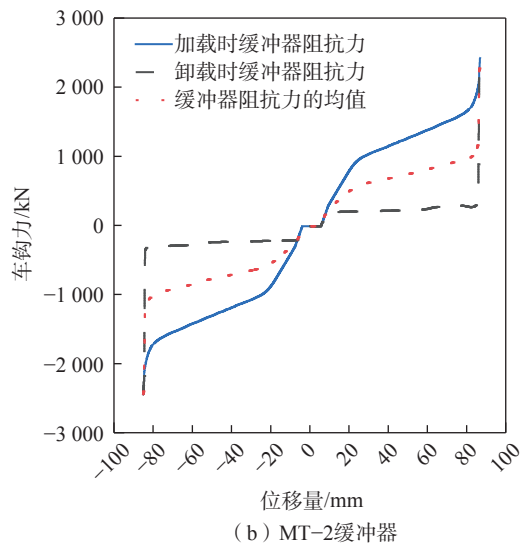
Fig. 2 Longitudinal force analysis diagram of the train

1.1 车钩力

重载列车是一种动力集中和大载重能力的运输系统,仅机车部分具备强大的牵引力。为确保列车整体协调运行,机车与车辆之间以及车辆与车辆之间均需通过列车钩缓装置紧密相连。列车钩缓装置负责传递机车牵引力和缓和列车运行中产生的纵向冲击力,是使整列列车能够平稳安全前进的关键。车钩力是由重载列车相邻车辆间的钩缓装置产生的^[13],当缓冲器位移量超过最大限制时,会使车钩力急剧增加。本文选用的两种钩缓装置的缓冲器特性曲线如图3所示。



(a) QKX100缓冲器



(b) MT-2缓冲器

图3 缓冲器特性曲线

Fig. 3 Buffer characteristic curve

1.2 牵引/电制动力

机车牵引力是指由列车机车装置产生的可调节的驱动列车前行的动力,而电制动力是使列车减速或停车的外力。列车在长大下坡运行时,需要合理使用空气制动力和电制动力,避免过大的纵向冲

动力导致列车车钩断裂或脱轨现象发生^[14]。因此,有必要研究机车牵引与制动特性,这对于在列车运行过程中合理调控牵引力或电制动力,确保列车安全稳定运行具有关键作用。本文采用的HXD1型机车的牵引力和制动力特性曲线如图4所示。

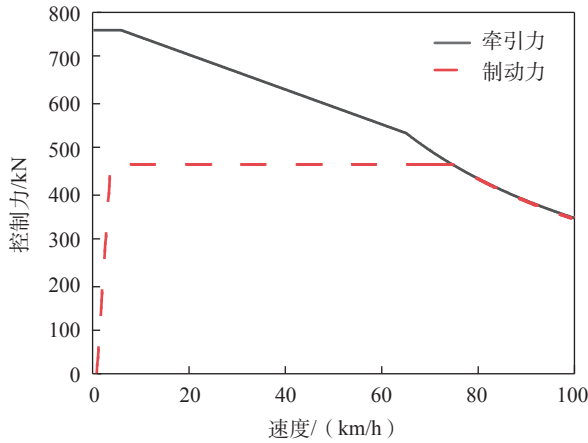


图4 机车牵引力和制动力的特性曲线

Fig. 4 Characteristic curves of locomotive traction force and braking force

2 空气制动模型的建立

空气制动系统由空气压缩机、总风缸、制动缸、副风缸、滑塞、活塞、制动阀、制动主管等装置组成^[15]。图5为重载列车空气系统结构示意图。在长大下坡运行过程中,由于线路坡度较大,机车的电制动力在列车自身重力作用下无法控制列车的速度,若不施加空气制动力,列车速度可能会超出线路限速,导致严重的安全隐患^[16]。

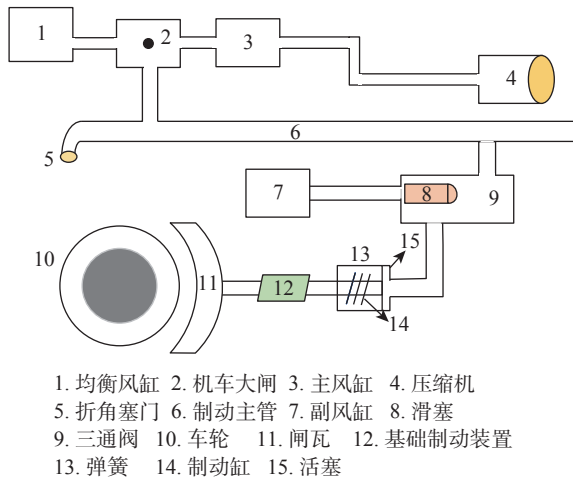


图5 重载列车制动系统结构示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the braking system structure of heavy-haul trains

2.1 空气制动力计算

重载列车利用空气制动机改变空气压强,驱动闸片紧压在车轮踏面或车轴上的制动盘,从而产生

有效的摩擦阻力,实现对列车的平稳减速或停车。空气制动力计算式为

$$F_B = \beta \sum_i \varphi_k \sum_i K_i \quad (3)$$

式中: F_B 为列车的空气制动力, kN; β 为列车制动系数(与减压量有关); K_i 为机车/车辆的一块闸瓦的实算压力, kN, 计算式见式(4); φ_k 为机车/车辆闸瓦的摩擦系数, 计算式见式(7)~式(8)。

机车与车辆每一块闸瓦的实算压力计算式为

$$K = \frac{\pi d_z^2 \eta_z P_z \gamma_z n_z}{10^6 n_k} \quad (4)$$

式中: n_k 为机车/车辆的闸瓦数; d_z 为制动缸的直径, mm; η_z 为传动效率; γ_z 为制动倍率; n_z 为制动缸数; P_z 为制动缸的压力大小, kPa。在制动和缓解过程中制动缸压力变化的计算式为

$$P_z(i) = \begin{cases} 0, & t < t_i^{\text{delay}1} \\ P_{\max} \left(\frac{t - t_i^{\text{delay}1}}{t_{\max 1}} \right)^{\lambda_1}, & t_i^{\text{delay}1} \leq t \leq t_1 \\ P_{\max}, & t > t_1 \end{cases} \quad (5)$$

$$P_z(i) = \begin{cases} P_{\max}, & t < t_i^{\text{delay}2} \\ P_{\max} \left(1 - \frac{t - t_i^{\text{delay}2}}{t_{\max 2}} \right)^{\lambda_2}, & t_i^{\text{delay}2} \leq t \leq t_2 \\ 0, & t > t_2 \end{cases} \quad (6)$$

式中: $P_{\max}$ 为制动缸压力最大值, kPa; $t_i^{\text{delay}1}$ 、 $t_i^{\text{delay}2}$ 分别为当前车辆制动缸开始充气或排风时间, s; $t_1 = t_i^{\text{delay}1} + t_{\max 1}$, $t_2 = t_i^{\text{delay}2} + t_{\max 2}$, 其中 $t_{\max 1}$ 为制动缸压力从初始状态上升到最大值所需的时间, s, $t_{\max 2}$ 为制缸压力从最大值到初始状态所需的时间, s。

机车/车辆闸瓦的摩擦系数计算式为

$$\varphi_{K1} = 0.441 \cdot \frac{K + 200}{4K + 200} \cdot \frac{2v + 150}{3v + 150} \quad (7)$$

$$\varphi_{K2} = 0.481 \cdot \frac{K + 200}{4K + 200} \cdot \frac{2v + 150}{3v + 150} \quad (8)$$

2.2 循环制动分析

重载列车纵向冲动力过大是制约其发展的主要因素,而列车在空气制动时的不同步性是造成这种纵向冲击的主要原因^[17]。在长大下坡的行驶过程中,为避免列车在重力作用下超速,一般会采用“空气制动-缓解-再制动-再缓解”的循环制动策略,其核心是在适当的时机实施和缓解空气制动,图6为循环制动示意图。

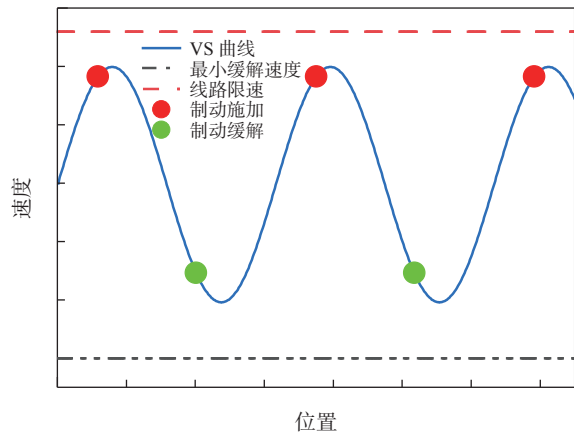


图6 循环制动示意图

Fig. 6 Schematic diagram of cyclic braking

重载列车在制动或缓解过程中,并非所有车辆同时进行,而是从机车施加指令由前向后逐节传播信号,列车编组越长延迟越明显,对车钩力的影响越大^[14-18]。若空气制动的实施或缓解位置不当,会造成纵向冲动力过大,致使列车超速甚至事故发生。从图7减压量为70 kPa的制动缸升压变化情况可以看出,在70 kPa减压量下,不同位置车辆的制动缸压强的变化存在一定延迟,越靠近机车的车辆越早进行制动。

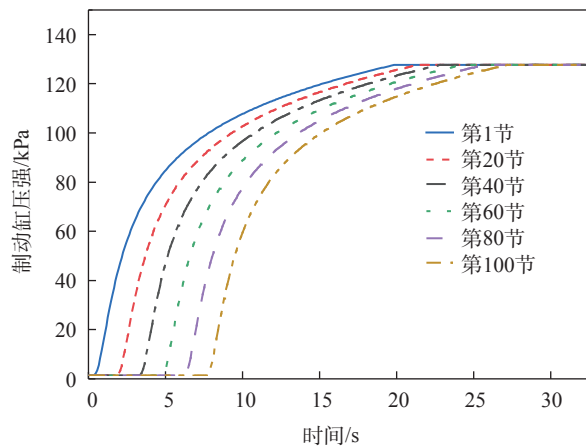


图7 减压量为70 kPa的制动缸升压变化

Fig. 7 The brake cylinder boost change with a pressure reduction of 70 kPa

针对空气制动模型,本文采用的制动缸计算模型根据参考文献[18]建立,其中相关参数根据车辆型号以及其制动机性能决定。根据文献[18]中的相关实验数据,验证本文建立的空气制动计算模型的准确度,对比验证结果如表1所示。从表1中可以

看出,两者制动距离误差和制动时间的差距不大,故本文空气制动力计算模型可行。

表1 空气制动计算对比

Tab.1 Comparison of air brake calculations

制动条件	开始制动点	初始速度/(km/h)	制动距离/m	制动时间/s	数据来源
平道紧急制动	K357+163	80.3	662.0	50.5	文献[18]
		80.4	668.0	57.6	本文仿真
坡道紧急制动	K64+114	80.4	947.0	71.3	文献[18]
		80.4	976.9	82.5	本文仿真

当减压量分别为50、60、70 kPa的情况下(其他条件相同),在运行过程中第20、40、60、80、100号车钩力的变化如图8~图10所示。图11是列车在3种减压量下的最大车钩力对比情况。表2为列车在行驶过程中产生的最大车钩力值。观察图8~图11可知,随着减压量的增加,车钩力的大小变化差异较大。50 kPa减压量下的车钩力变化最为平缓,运行过程中的车钩力相对较小;60 kPa时的车钩力适中;而70 kPa减压量下的车钩力最大,运行过程中的车钩力值整体也最高。这表明,减压量越小,车辆间的纵向冲动力就越小,列车运行越平稳。故为了减小车辆间的纵向冲动力,提高列车运行的平稳性,应选择较小的减压量。

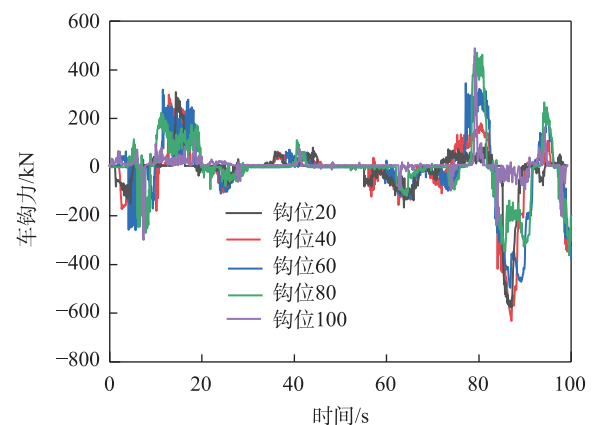


图8 50 kPa减压量的车钩力变化

Fig. 8 The change of coupler force with 50 kPa pressure reduction

3种减压量制动过程中列车的速度位移曲线如图12所示。初始情况相同时,在50 kPa减压量下,列车的速度没有明显下降趋势,反而有增大趋

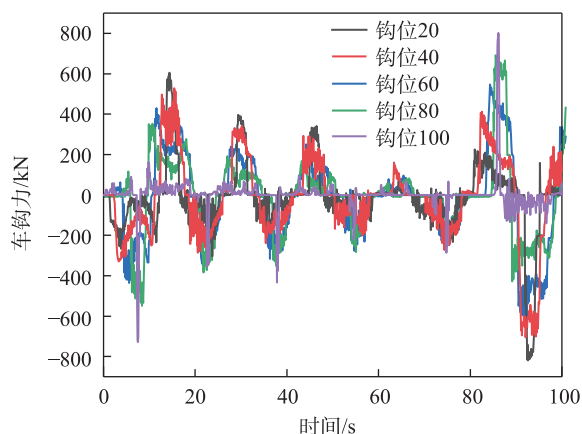


图9 60 kPa减压量的车钩力变化

Fig. 9 The change of coupler force with 60 kPa pressure reduction

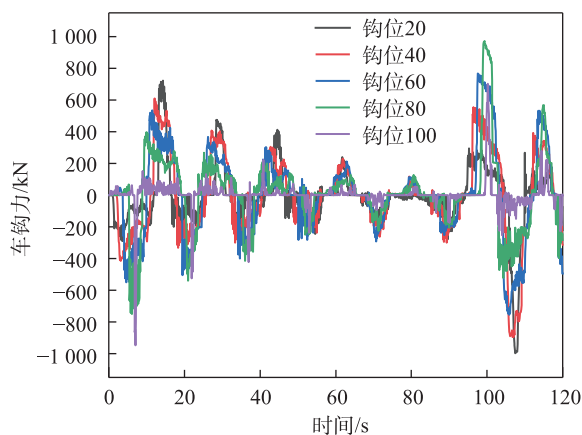


图10 70 kPa减压量的车钩力变化

Fig. 10 The change of coupler force with 70 kPa pressure reduction

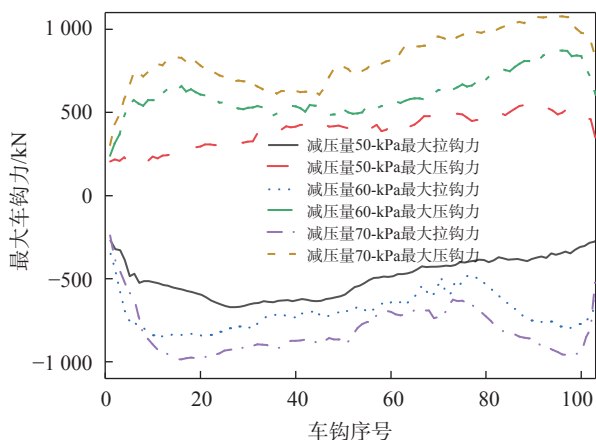


图11 3种减压量的最大车钩力对比

Fig. 11 Comparison of the maximum coupler force for the three types of pressure reduction

表2 3种减压量的车钩力对比

Tab. 2 Comparison of coupler forces for three types of pressure reduction

减压量	最大压钩力	最大拉钩力
50 kPa	502.35	-661.35
60 kPa	871.49	-834.73
70 kPa	1 051.86	-1 002.83

势并即将超速,表明减压量过小,制动效果不佳;在 60 kPa 减压量下,列车的速度从 75.0 km/h 下降到 61.2 km/h,随后开始上升;而在 70 kPa 减压量下,列车速度明显降低,从 75.0 km/h 下降到 40.1 km/h,表明减压量较大能有效减速,但会产生纵向冲动。因此当列车在长大下坡行驶时,根据当前列车运行状况和线路情况,选择合理的制动和缓解位置并采用合理的减压量,以避免产生较大的纵向冲动,以确保有效减速又保持列车平稳运行。

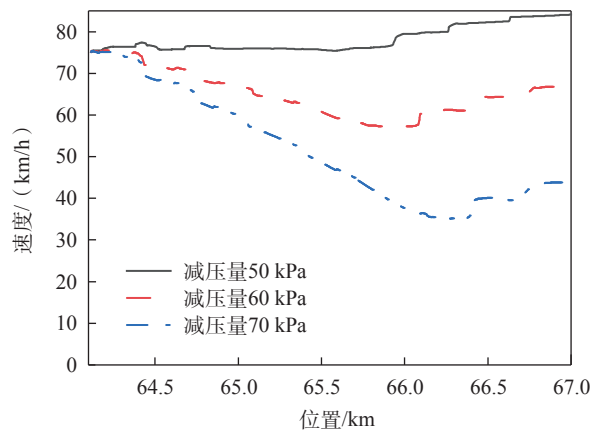


图12 3种减压量制动过程中的速度位移曲线

Fig. 12 Velocity displacement curves during braking for three types of pressure reduction

3 列车多目标优化模型

3.1 安全指标

重载列车运行过程中的车钩力大小应低于铁道科学研究所建议的阈值,若车钩力大小超过该阈值可能会出现断钩事故。根据由前后相邻车辆的速度差异使车辆间的缓冲器处于拉伸和压缩两种状态,车钩力可以分为拉钩力和压钩力。当每节车辆的速度在每一时刻与整列列车的平均速度相差较小时,不会产生较大的车钩力,故列车在运行过程中就较安全。因此列车的安全应考虑列车在运行过程中车辆间的速度差异和车钩力值的大小,故安全评价模型为

$$V = \sum_{i=1}^n \left(v_i - \frac{\sum_{i=1}^n v_i}{n} \right)^2 \quad (9)$$

$$F_{\text{num}} = \text{sum} \left(\frac{Fi_{\text{coupler}}}{F_{\text{umax}}} > \gamma \right) \quad (10)$$

$$\bar{F}_{\text{num}} = \frac{\sum_{j=1}^N F_{\text{num},j}}{N} \quad (11)$$

$$\bar{F}_{\text{max}} = \frac{\sum_{j=1}^N F_{\text{max},j}}{N} \quad (12)$$

$$\bar{F}_{\text{min}} = \frac{\sum_{j=1}^N F_{\text{min},j}}{N} \quad (13)$$

$$f = k_1 \left(\frac{F_{\text{max}}}{\bar{F}_{\text{max}}} \right) + k_2 \left(\frac{F_{\text{min}}}{\bar{F}_{\text{min}}} \right) + k_3 \left(\frac{F_{\text{num}}}{\bar{F}_{\text{num}}} \right) + k_4 \left(\frac{V}{\bar{V}} \right) \quad (14)$$

式中: N 为种群规模; n 为车辆数量; k_1 、 k_2 、 k_3 、 k_4 均为权重系数,且满足 $k_1 + k_2 + k_3 + k_4 = 1$, 本文取值分别为 0.3, 0.3, 0.2, 0.2; γ 为比例系数,取值范围为 0.75 ~ 1; F_{num} 为列车当前个体运行产生的车钩力与额定最大值的比值大于 γ 的次数总和; F_{umax} 为列车在正常运行工况下所允许的车钩力最大额定值, kN; Fi_{coupler} 为第 i 时刻列车在第 j 个麻雀个体运行产生的车钩力, kN; $\bar{F}_{\text{num}}$ 为所有个体运行中车钩力值与额定值的比值大于 γ 的次数的平均值; F_{max} 为列车在当前麻雀个体运行产生的最大拉钩力值; F_{min} 为最大压钩力值, kN; $\bar{F}_{\text{max}}$ 、 $\bar{F}_{\text{min}}$ 分别为所有个体在正常运行所产生的最大拉钩力和最大压钩力的平均值, kN。

3.2 节能指标

当列车在长大下坡运行时,无法单独依靠机车的电制动力来控制列车的纵向冲向力,必须进行空气制动防止列车的纵向冲向过大。而当空气制动持续使用时,会加剧制动装置与车轮之间的磨擦和损耗,这不仅会降低制动性能,还会大大增加维护成本^[5]。因此,以能耗和空气制动距离最小为目标,在保证列车安全运行的基础下提高能源利用效率,建立列车的节能评价模型为

$$Q_1 = Q_y + Q_0 \quad (15)$$

$$Q_y = \frac{U_w \sum (I_p t_y)}{60} \quad (16)$$

$$Q_0 = \frac{U_w \sum (I_{p0} t_0)}{60} \quad (17)$$

$$L_d = \sum_{i=1}^n \int_0^s \lambda ds \quad (18)$$

$$W = \sigma_1 Q_1 + \sigma_2 L_d \quad (19)$$

式中: σ_1 、 σ_2 分别为权重系数,且满足 $\sigma_1 + \sigma_2 = 1$, 本文取值分别为 0.7、0.3; L_d 为空气制动距离, km; λ 为 0 或 1; Q_1 为总耗电量, kW·h; Q_y 为机车的牵引耗电量, kW·h; U_w 为机车受电弓处网压, V; I_p 为机车牵引的用电有功电流, A; t_y 为牵引所用运行时间, s; Q_0 、 I_{p0} 、 t_0 分别为列车惰性或制动以及停车进站的耗电量、有功电流和时间。

3.3 正点指标

在保证安全、节能的基础上,尽量缩短列车运行时间^[19],提高列车的运行效率。故正点运行评价模型为

$$T = \sum_{i=1}^m T_i - T_U \quad (20)$$

式中: T_U 为规定的列车运行时间, s; T_i 为列车在每一个区间的实际运行时间, s, 共有 m 个运行区间。

综上所述,重载列车运行过程多目标优化模型为

$$f = \min G(f, W, T) \quad (21)$$

$$\begin{cases} v_{\min} < v < v_{\max} \\ t_m \geq t_c \end{cases} \quad (22)$$

式中: $G(\cdot)$ 为多目标适应度值函数; 式(22)为模型约束; $v_{\min}$ 、 $v_{\max}$ 分别为缓解最小速度和线路允许的最高速度; t_m 为缓解时间, s; t_c 为充风时间, s。

4 基于改进麻雀算法的重载列车多目标优化算法

麻雀算法是由薛建凯等于 2020 年首次提出的一种全新的智能优化算法^[20]。同时将种群分为 3 类:发现者、加入者、预警者,并通过不同的位置更新公式来模拟种群中的个体行为。

4.1 Circle 混沌

由于初始群体的随机性,使得麻雀种群容易出现集聚现象,分布不均匀,并对算法的效率产生不利影响,而混沌映射可以有效改善此问题^[21-22]。本文使用 Circle 混沌映射来提高种群的多样性, Circle 混沌映射公式为

$$x_{n+1} = \text{mod}\left(x_n + 0.2 - \frac{0.5}{2\pi} \sin(2\pi x_n), 1\right) \quad (23)$$

式中: n 为个体维度。

4.2 发现者位置更新

在标准 SSA 的寻优迭代过程中,随着迭代次数的增大,麻雀个体的搜索范围会逐渐减小,发现者容易陷入局部最优。为了提高发现者的全局搜索能力,本文引入自适应惯性权重因子^[23],其计算式为

$$\omega_i' = \begin{cases} \omega_{\min} + \frac{(\omega_{\max} - \omega_{\min})[f(x_i^t) - f_{\min}^t]}{f_{\text{avg}}^t - f_{\min}^t}, & f(x_i^t) \leq f_{\text{avg}}^t \\ \omega_{\min}, & f(x_i^t) > f_{\text{avg}}^t \end{cases} \quad (24)$$

因此,发现者的位置更新公式为

$$X_{ij}^{t+1} = \begin{cases} X_{ij}^t \cdot \omega, & R_2 > ST \\ X_{ij}^t + Q, & R_2 \leq ST \end{cases} \quad (25)$$

式中: $f(x_i^t)$ 为当前迭代的麻雀的适应度值; f_{avg}^t , $f_{\min}^t$ 分别为当前迭代所有麻雀的平均适应度值和最小适应度值; Q 为服从正态分布的一个随机数; $\omega_{\min}$ 和 $\omega_{\max}$ 分别为预设的最大和最小惯性系数; R_2 、 ST 分别为预警值和危险值,其中 $R_2 \in (0, 1]$, $ST \in [0.5, 1]$ 。

4.3 加入者位置更新

Lévy 飞行策略是一种具有随机特征的游走策略,可以增加种群的多样性,在寻找最优解时可以降低陷入局部最优解的风险。其表达式为

$$\text{Lévy}(\alpha) = \frac{\mu}{|v|^{\frac{1}{\alpha}}} \quad (26)$$

因此,加入者位置更新公式为

$$X_{ij}^{t+1} = \begin{cases} Q \cdot \exp\left(\frac{X_{ij}^t - X_{\text{worst}}^t}{t^2}\right) + 0.2\text{Lévy}(\alpha), & i > \frac{n}{2} \\ X_{\text{best}}^t + |X_{ij}^t - X_{\text{best}}^t| A^+ + 0.2\text{Lévy}(\alpha), & i \leq \frac{n}{2} \end{cases} \quad (27)$$

式中: $\text{Lévy}(a)$ 为飞行步长; $\mu \sim N(0, \sigma_\mu^2)$, $v \sim N(0, \sigma_v^2)$; X_{best}^t 、 X_{worst}^t 分别为当前第 t 次迭代的最优麻雀位置和最差麻雀位置; $A^+ = A^T(AA^T)^{-1}$, A 为元素为 1 或 -1 的 $1 \times d$ 矩阵。

4.4 预警者位置更新

预警者是由种群中的 10%~20% 的个体随机担任的,具备敏锐地意识到潜在危险的能力,在捕食者悄然逼近时向种群发出警报。预警者位置更新如下

$$X_{ij}^{t+1} = \begin{cases} X_{\text{best}}^t + \beta |X_{ij}^t - X_{\text{best}}^t|, & f_i > f_g \\ X_{ij}^t + K \left(\frac{X_{ij}^t - X_{\text{worst}}^t}{(f_i - f_w) + \varepsilon} \right), & f_i \leq f_g \end{cases} \quad (28)$$

式中: f_w 、 f_g 分别为种群中的最小适应度值和最大适应度值; ε 为极小常数,用来避免分母出现 0; β 为一个随机数,服从均值为 0、方差为 1 的正态分布; K 为当前麻雀的移动方向, $K \in [-1, 1]$ 。

列车运行过程的多目标麻雀算法计算流程图如图 13 所示。

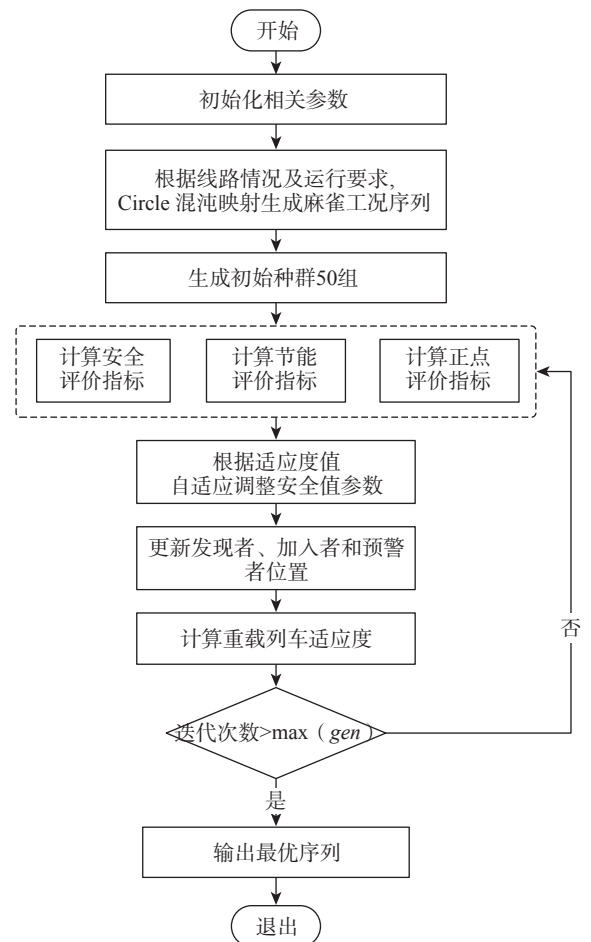


图 13 改进麻雀算法计算流程图

Fig. 13 The flow chart of improved SSA

具体步骤如下:

1) 初始化参数,包括种群数量 50 组、迭代次数 $\text{Max}(\text{gen})$,发现者、加入者、预警者数量,列车相关参数,线路条件和限速等。

2) 种群初始化,根据线路数据参数及重载列车的运行要求,使用 Circle 混沌优化初始麻雀种群,并

计算麻雀种群的适应度值,记录全局最好和最差的麻雀个体和适应度值。

3) 根据每一代迭代中所有麻雀个体适应度的大小,自适应地调整安全值ST,调整公式如下

$$ST = \begin{cases} \frac{\partial_1(f_{\max} - f_i)}{f_{\max} - f_{\min}}, & f_i \geq f_{\text{ave}} \\ \partial_2, & f_i < f_{\text{ave}} \end{cases} \quad (29)$$

式中: $f_{\max}$ 、 $f_{\min}$ 和 f_{ave} 分别为种群中的最大适应度值、最小适应度值和平均适应度值; f_i 为当前进行更新的适应度值; ∂_1 、 ∂_2 均为(0,1)的随机数。

4) 根据式(25)、式(27)、式(28)分别对种群中的发现者、加入者和预警者位置进行更新。

5) 不断进行迭代寻优并判断是否达到设定的最大迭代次数,若是则终止迭代;否则重复步骤3)~5)。

5 仿真实验结果分析

为了验证在长大下坡路段条件下,改进麻雀算法对重载列车运行轨迹优化方面的有效性和优化效果。本文选取了由HXD1型机车与C80车辆组合而成的重载列车作为实验对象。通过对比自适应遗传算法、传统SSA以及本文的改进SSA算法求解重载列车在长大下坡的多目标运行优化模型的结果,验证本文改进算法的有效性以及在重载列车多目标优化方面的优势。

如图14所示,本文采用大秦线王家湾站(公里标133 km)至涿鹿站(公里标168 km)区段的真实线路参数进行仿真实验,该线路段具有较多的坡道和弯道,列车的运行环境相对复杂,从而使得重载列车的驾驶难度增大。根据多目标优化获得的运行速度曲线,验证算法的有效性。

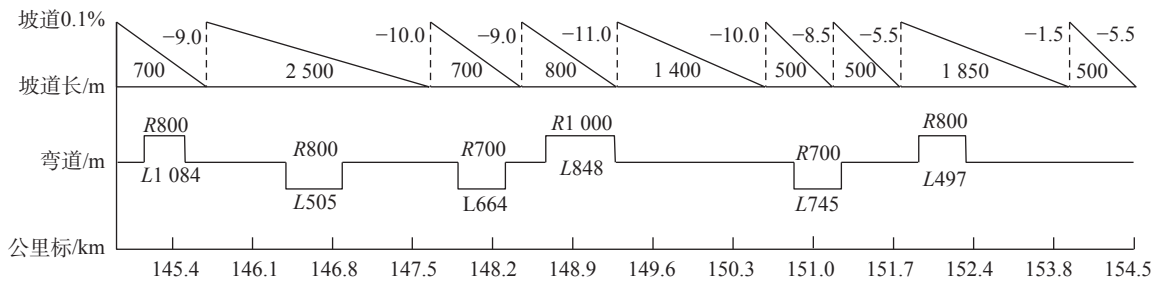


图14 王家湾站-涿鹿站区段部分线路数据

Fig. 14 Data of some lines in the Wangjiawan Station—Zhuolu Station

重载列车理想运行曲线如图15所示,在改进SSA算法得到的目标速度曲线中,公里标141.7 km处坡道为-11‰,大于坡度阈值-7‰,符合空气制动的条件。此时速度减压量为70 kPa,速度降为48.24 km/h,之后在公里标143~146 km内进行缓解充风,速度上升到70 km/h;在公里标146~152 km内以减压量60 kPa进行第2次制动、缓解和充风过程;当速度上升到70 km/h,公里标158~160 km内进行第3次制动,减压量为70 kPa,速度下降到50.08 km/h。在公里标165 km后列车降低速度并停车。而在传统优化的目标速度曲线中,在公里标140~142 km内进行第1次空气制动,减压量为80 kPa,速度下降到45.77 km/h,然后在142~146 km内进行缓解充风;在公里标146~158 km内,以减压量为60 kPa进行第2次制动、缓解和充风过程;在速度再次上升到70 km/h、公里标为158~160 km内进行第3次制动,

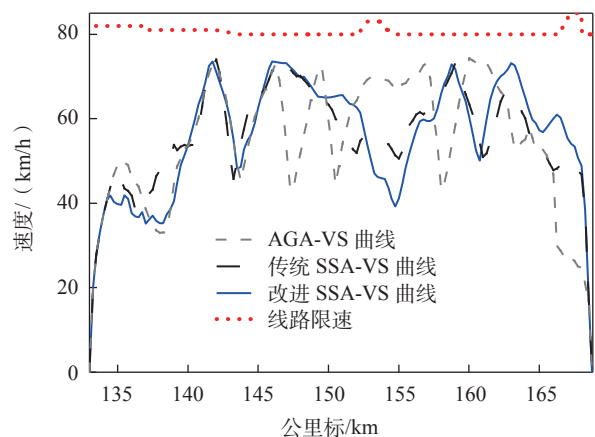


图15 重载列车理想运行曲线

Fig. 15 Ideal target curve for heavy-haul trains

减压量为70 kPa,速度下降到50.98 km/h。在公里标165 km后采用制动工况使列车停车。AGA、传统SSA和改进SSA算法的优化结果对比如表3所

示,虽然传统优化的空气制动距离比改进后的少 0.76 km,但在能耗方面,传统得到的运行曲线其能耗比改进 SSA 方法多出 148.04 kW。而对于 AGA 算法优化后的速度曲线,其制动距离与本文方法优化相比较小,但在 140~150 km 之间使用制动工况,消耗了过多的能量,导致其在能耗方面比本文提出的方法高出 189.88 kW。在 AGA 优化的速度曲线中,在施加空气制动时采取了制动工况,虽然减少了空气制动距离,但增加了运行能耗。

表3 算法优化结果对比

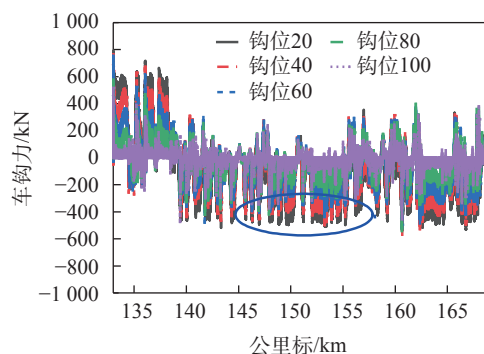
Tab.3 Comparison of algorithm optimization results

算法	时间/s	最大 压钩力/ kN	最大 拉钩力/ kN	空气制 动距离/ km	能耗/kW
AGA	2 607.2	1 065.5	-858.52	9.45	1 029.24
传统 SSA	2 512.1	1 053.6	-860.32	9.88	987.40
改进 SSA	2 558.5	1 000.0	-732.67	10.64	839.36

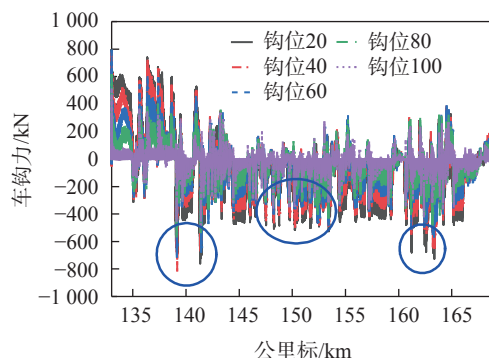
AGA、传统 SSA,以及改进 SSA 优化的列车第 20、40、60、80、100 号车钩的车钩力变化情况分别为图 16(a)、图 16(b)和图 16(c),可以看出,在相同线路情况下,AGA 优化得到的车钩力在 145~155 km 变化得更加频繁,不利于列车的安全运行;传统 SSA 优化得到的车钩力在 140 km 和 150 km 前后以及 160~165 km 起伏较大;而改进 SSA 优化的车钩力在相应的位置变化幅度不大,保证列车可以更加安全的运行。

图 17 是 AGA、传统 SSA 以及改进 SSA 算法优化得到的最大车钩力,可以明显的看出,改进 SSA 优化的列车最大拉钩力更为平缓,没有较大的上下波动,可以保证列车在长大下坡的安全运行,最大拉钩力为-732.67 kN。而传统 SSA 优化得到的最大拉钩力明显出现波动变化,最大拉钩力为-860.32 kN,比改进优化的多出-127.65 kN。AGA 优化的最大拉钩力在起伏更大,比本文方法多出-125.85 kN。

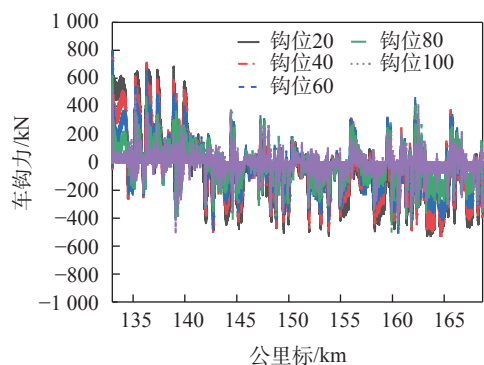
算法适应度值变化情况如图 18 所示。经过 30 次迭代,改进 SSA 算法适应度值从 0.856 显著下降至 0.716,展现出更好的优化效果。相比之下,AGA 算法的适应度从 0.856 降至 0.780;传统 SSA 算法的适应度值在同一迭代次数内从 0.856 降至 0.749,虽然也有所优化,但传统麻雀优化算法在迭代过程中容易陷入局部最优解,限制了其全局搜索能力。而



(a) AGA 优化车钩力结果



(b) 传统 SSA 优化车钩力结果



(c) 改进 SSA 优化车钩力结果

图 16 车钩力变化情况对比

Fig. 16 Comparison of coupler force variations

改进 SSA 算法则有效规避了这一缺陷,通过更高效的搜索策略,实现了对全局最优解的更好逼近。故改进 SSA 算法在优化效果上明显优于传统算法,验证了其优化策略的有效性。通过与 AGA 算法的优化效果相比,本文改进 SSA 算法的效果更好。

6 结论

1) 本文针对重载列车在长大下坡时纵向冲击力过大的问题,以列车安全、节能和正点为评价指标,建立了在长大下坡实施循环空气制动的重载列

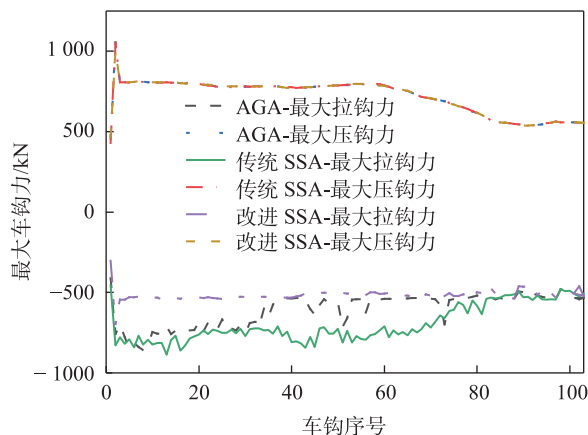


图 17 AGA、传统 SSA 以及改进 SSA 算法优化得到的最大车钩力

Fig. 17 The maximum coupler force optimized by AGA, conventional SSA, and improved SSA algorithms

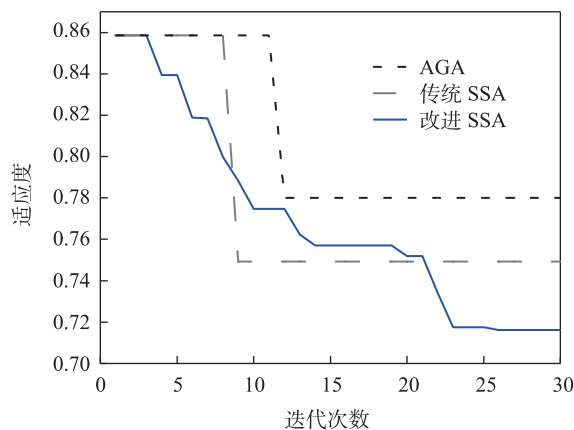


图 18 算法适应度变化对比

Fig. 18 Comparison of algorithm fitness changes

车的多目标优化模型。

2) 结合重载列车的运行特点和“王家湾站—涿鹿站”的线路情况,通过改进 SSA 算法,优化获得了重载列车的理想运行速度曲线。

3) 仿真结果显示,相较于 AGA 算法和传统 SSA 算法,改进 SSA 的方法显著降低了列车运行中的车钩力,有效防止了在长大下坡制动时可能发生的断钩事故,从而确保了列车的安全运行。同时,该方法在节能方面的效果更好。

4) 本研究验证了改进 SSA 的可行性,且发现改进 SSA 算法在收敛效果上表现出极大的优势。也表明本文算法适用于重载列车优化的实际领域,特别是对于在长大下坡道上施加循环空气制动的重载列车的运行过程,具有重要的参考意义。

参考文献:

- [1] 翟婉明, 赵春发. 现代轨道交通工程科技前沿与挑战[J]. 西南交通大学学报, 2016, 51(2): 209-226.
ZHAI W M, ZHAO C F. Frontiers and challenges of sciences and technologies in modern railway engineering[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2016, 51(2): 209-226.
- [2] YU H Z, TAI G X, LIN Z N, et al. Research on control strategy of heavy-haul train on long and steep downgrades[J]. Actuators, 2022, 11(6): 145.
- [3] 魏伟, 赵旭宝, 姜岩, 等. 列车空气制动与纵向动力学集成仿真[J]. 铁道学报, 2012, 34(4): 39-46.
WEI W, ZHAO X B, JIANG Y, et al. The integrated model of train air brake and longitudinal dynamics[J]. Journal of the China Railway Society, 2012, 34(4): 39-46.
- [4] 魏伟, 王强. 坡道上重载列车纵向冲动研究[J]. 振动与冲击, 2014, 33(5): 143-148.
WEI W, WANG Q. Influence of train brake on longitudinal impulse of a heavy haul train passing through a ramp[J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, 33(5): 143-148.
- [5] LIU W T, SU S, TANG T, et al. Study on longitudinal dynamics of heavy haul trains running on long and steep downhill[J]. Vehicle System Dynamics, 2022, 60(12): 4079-4097.
- [6] YU H, HUANG Y, WANG M. Research on operating strategy based on particle swarm optimization for heavy haul train on long down-slope[C]// Maui: 21st International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), 2018.
- [7] 林轩, 王青元, 刘强强, 等. 长大下坡区间货运列车周期性制动研究[J]. 铁道学报, 2019, 41(1): 50-58.
LIN X, WANG Q Y, LIU Q Q, et al. On periodic braking of freight trains on long steep downhill section[J]. Journal of the China Railway Society, 2019, 41(1): 50-58.
- [8] 俞花珍, 黄友能, 王明主, 等. 基于遗传算法的重载列车驾驶策略研究[J]. 铁道学报, 2020, 42(7): 110-116.
YU H Z, HUANG Y N, WANG M Z, et al. Research on operating strategies of heavy haul train based on genetic algorithm[J]. Journal of the China Railway Society, 2020, 42(7): 110-116.
- [9] SU S, HUANG Y C, LIU W T, et al. Optimization of the speed curve for heavy-haul trains considering cyclic air braking: an MILP approach[J]. Engineering Optimization, 2023, 55(5): 876-890.
- [10] 姜正, 王瑞, 杜海滨, 等. 重载自动驾驶机车长大下坡空电联合制动运用研究[J]. 交通运输系统工程与信息,

- 2023, 23(3): 311-318.
- JIANG Z, WANG R, DU H B, et al. Electro-pneumatic brake for heavy haul locomotive during automatic driving at long downgrade segment[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2023, 23(3): 311-318.
- [11] CHOU M, XIA X, KAYSER C. Modelling and model validation of heavy-haul trains equipped with electronically controlled pneumatic brake systems[J]. Control Engineering Practice, 2007, 15(4): 501-509.
- [12] 杨辉, 付雅婷. 列车运行建模与速度控制方法综述[J]. 华东交通大学学报, 2018, 35(5): 1-8.
- YANG H, FU Y T. A survey of modeling and speed control methods for operation of trains[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2018, 35(5): 1-8.
- [13] 付雅婷, 原俊荣, 李中奇, 等. 基于钩缓约束的重载列车驾驶过程优化[J]. 自动化学报, 2019, 45(12): 2355-2365.
- FU Y T, YUAN J R, LI Z Q, et al. Optimization of heavy haul train operation process based on coupler constraints [J]. Acta Automatica Sinica, 2019, 45(12): 2355-2365.
- [14] 李蔚, 姚美琪, 张勐轶, 等. 重载组合列车纵向力优化的联合制动分析及研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2023, 20(2): 694-705.
- LI W, YAO M Q, ZHANG M Y, et al. Analysis and research of blend braking for longitudinal force optimization of heavy haul combined train[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2023, 20(2): 694-705.
- [15] 孙树磊. 重载列车纵向冲动动力学研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2014.
- SUN S L. Research on heavy haul train longitudinal impulse dynamics[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2014.
- [16] 魏伟. 两万吨组合列车制动特性[J]. 交通运输工程学报, 2007, 7(6): 12-16.
- WEI W. Brake performances of 20 000 ton connected train[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2007, 7(6): 12-16.
- [17] WEI W, JIANG Y, ZHANG Y, et al. Study on a segmented electro-pneumatic braking system for heavy-haul trains [J]. Transportation Safety and Environment, 2020, 2(3): 216-225.
- [18] 何闻. 考虑纵向冲动的重载列车自动驾驶操纵研究[D]. 北京: 中国铁道科学研究院, 2023.
- HE W. Research on automatic operation considering longitudinal impulse of heavy haul trains[J]. Beijing: China Academy of Railway Sciences, 2023.
- [19] 付雅婷, 朱宏涛. 考虑轮轨黏着的高速列车多目标速度曲线优化[J]. 华东交通大学学报, 2023, 40(5): 59-67.
- FU Y T, ZHU H T. Multi-objective speed curve optimization of high-speed train considering wheel rail adhesion [J]. Journal of East China Jiaotong University, 2023, 40(5): 59-67.
- [20] XUE J K, SHEN B. A novel swarm intelligence optimization approach: sparrow search algorithm[J]. Systems Science & Control Engineering, 2020, 8(1): 22-34.
- [21] 张达敏, 徐航, 王依柔, 等. 嵌入 Circle 映射和逐维小孔成像反向学习的鲸鱼优化算法[J]. 控制与决策, 2021, 36(5): 1173-1180.
- ZHANG D M, XU H, WANG Y R, et al. Whale optimization algorithm for embedded Circle mapping and one dimensional oppositional learning based small hole imaging [J]. Control and Decision, 2021, 36(5): 1173-1180.
- [22] 宋立钦, 陈文杰, 陈伟海, 等. 基于混合策略的麻雀搜索算法改进及应用[J]. 北京航空航天大学学报, 2023, 49(8): 2187-2199.
- SONG L Q, CHEN W J, CHEN W H, et al. Improvement and application of hybrid strategy-based sparrow search algorithm[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2023, 49(8): 2187-2199.
- [23] 李昕燃, 靳伍银. 基于改进麻雀算法优化支持向量机的滚动轴承故障诊断研究[J]. 振动与冲击, 2023, 42(6): 106-114.
- LI X R, JIN W Y. Fault diagnosis of rolling bearings based on ISSA-SVM[J]. Journal of Vibration and Shock, 2023, 42(6): 106-114.



通信作者: 付雅婷(1988—), 女, 博士, 硕士生导师, 青年井冈学者, 研究方向为轨道交通优化运行与智能运维。
E-mail: fuyating0103@163.com。

(责任编辑: 吴海燕)