

基于复杂线路的货运列车多目标优化研究^{*}

李 旺^{1,2}, 金淼鑫^{1,2}, 段仁哲^{2,3}, 易灵芝^{2,3}

(1. 中车株洲电力机车有限公司, 湖南 株洲 412001;

2. 重载快捷大功率电力机车全国重点实验室, 湖南 株洲 412001;

3. 湘潭大学 自动化与电子信息学院, 湖南 湘潭 411105)

摘 要: 针对复杂线路的全局最优工况序列和最佳工况转换点位置难以确定的问题, 提出一种基于改进麻雀搜索算法 (ISSA) 最佳工况转换点位置多目标优化方法。分析货运列车运行约束条件, 根据性能指标要求构建以节能准点为优化目标的模型, 采用线性加权求和设计适应度函数; 根据实际运行线路限速和坡道情况规划求解复杂线路下货运列车工况序列, 采用基于自适应权重和 Levy 飞行扰动 ISSA, 求解此工况序列下的最佳工况转换点位置。仿真结果表明所设计的工况序列及转换点位置生成的目标速度曲线方法, 能在满足货运列车准点运行的前提下实现节能。

关键词: 货运列车; 工况序列及转换点位置; 多目标优化; 节能准点; 改进麻雀搜索算法

中图分类号: U284.48 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2023)05-0082-10

doi: 10.12177/emca.2023.047

Research on Multi-Objective Optimization of Freight Trains Based on Complex Lines^{*}

LI Wang^{1,2}, JIN Miaoxin^{1,2}, DUAN Renzhe^{2,3}, YI Lingzhi^{2,3}

(1. CRRC Zhuzhou Locomotive Co., Ltd., Zhuzhou 412001, China;

2. The State Key Laboratory of Heavy-Duty and Express High-Power Electric Locomotive, Zhuzhou 412001, China;

3. School of Automation and Electronic Information, Xiangtan University, Xiangtan 411105, China)

Abstract: It is difficult to determine the global optimal condition sequence and the location of the optimal condition conversion point of complex lines. In order to solve this problem, a multi-objective optimization method based on the improved sparrow search algorithm (ISSA) is proposed. The operation performance indexes and constraints of freight trains are analyzed, the optimization model with energy-saving punctuality is constructed, and the fitness function is designed based on linear weighted summation. According to the line speed limit and ramp conditions, a method for solving the working condition sequence of freight trains under complex lines is designed, and the position of the optimal working condition conversion point under the working condition sequence is obtained by the ISSA based on adaptive weight and Levy flight disturbance. The simulation results show that the target speed curve generated by the designed working condition sequence and the position of the conversion point can achieve energy-saving on the premise of meeting the on-time operation of freight trains.

Key words: freight train; working condition sequence and switching point position; multi-objective optimization; energy-saving punctuality; improved sparrow search algorithm (ISSA)

收稿日期: 2022-04-15; 收到修改稿日期: 2023-02-23

^{*} 基金项目: 湖南省自然科学基金项目 (2020JJ6009); 大功率交流传动电力机车系统集成国家重点实验室资助项目 (13221430000500)

作者简介: 李 旺 (1987—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为牵引传动技术。

易灵芝 (1966—), 女, 博士, 教授, 研究方向为交流调速与电力电子装置、计算智能、智能电网等。(通信作者)

0 引言

随着自动驾驶技术在高铁、地铁和城铁等轨道交通领域的应用和发展,列车的自动驾驶被证明是可行且高效的。列车自动驾驶系统可以协助或完全代替司机对列车进行控制,实现列车的各种功能,如精确到站停车、通过控制列车速度实现准点、节能运行等^[1]。货运列车由于载重大、编组长、运行线路长等,其自动驾驶技术的发展尚处于初期阶段。

列车自动驾驶系统通过车载控制器控制列车跟踪设定好的目标速度曲线运行,为了得到性能更好的目标速度曲线,国内外许多的科研人员对列车目标速度曲线进行了研究,并取得了大量的成果。列车速度曲线优化属于多目标优化问题,在求解方法上:Chang 等^[2]将启发式算法用于求解列车节能速度曲线,采用遗传算法对列车的情行转换点进行了求解。张京等^[3]结合了遗传算法和粒子群算法各自的优点,提出了一种新的算法求解列车多目标优化模型,得到了较好的效果。文献[4-6]分别对粒子群算法进行了不同程度的改进并应用于求解列车多目标优化模型;张惠茹等^[7]采用改进的多目标遗传算法二代非支配排序遗传算法(NSGA-II)求解得到了一组满足节能准点要求的速度曲线。Domínguez 等^[8]运用多目标粒子群算法来获得速度曲线中时间和能耗的 Pareto 前沿,结果优于 NSGA-II 等算法。Tang 等^[9]以速度、能耗和车钩力为目标,使用强化学习方法求解。Scheepmaker 等^[10]对列车模型和求解方法进行了详细的综述。在求解策略上:Song 等^[11]将运行区间划分成不同段,利用遗传算法求解得到每个区段内的最优速度。杨彦强等^[12]设计一种双重惩罚的遗传算法,完成各分段目标速度求解。杨杰等^[13]采用经典的四阶段节能策略,用启发式遗传算法求解巡航速度和惰行点位置。俞花珍等^[14]以工况转换点位置作为求解对象,采用遗传算法求得货运列车在长大下坡道上的最优工况序列。柴晓凤等^[15]将运行线路区间分为不同的场景,采用 Pareto 方法求得每个场景内的工况转换点。马阳阳等^[16]提出一种根据区间限速确定列车工况序列方法,改进人工蜂群算法求得工况转换点。

综上,当前已有多种智能算法成功应用于求解列车多目标优化问题,如遗传算法、粒子群优化算法(PSO)、差分进化算法和蚁群算法等。麻雀搜索算法(SSA)作为 2020 年新提出的算法^[17],寻优能力更强、参数少且求解精度高^[18],已成功应用于路径规划、图像分割和回归预测等领域。货运列车多目标优化模型属于多约束的非线性规划问题,可采用群智能 SSA 求解;针对 SSA 存在全局搜索能力弱,容易陷入局部极值的问题,提出一种基于自适应权重和 Levy 飞行扰动的改进麻雀搜索算法(ISSA),通过引入 Levy 飞行扰动策略,增加麻雀算法迭代后期跳出局部极值的能力。

与货运列车将子区间速度作为优化对象的求解策略相比,采用工况序列转换点作为优化对象的求解策略变量数相对较少,易于程序实现且优化效果好。目前运行工况序列大都采用四阶段节能策略或者直接提前给定,文献[16]提出的根据区间限速确定列车工况序列方法,忽略坡道对工况序列的影响,可能会降低控制性能。本文提出一种根据线路限速和坡道确定货运列车工况序列的方法,采用 ISSA 求解工况转换点位置,生成符合准点节能运行的目标速度曲线。

1 货运列车多目标优化

1.1 货运列车多目标优化问题

货运列车多目标优化问题可描述为,在满足限速、工况转换规则和工况的最小运行距离等约束条件下,找到最优的运行工况序列和各工况转换点的位置,使货运列车运行能耗、停车误差,以及与规定的运行时间误差小,如图 1 所示。其中,T、C、K、B 分别代表牵引、惰行、巡航和制动工况,当确定了区间工况序列后,只需知道相应的工况转换点位置,图 1 中 b、c、d、e、f 所代表的即工况转换点位置,可通过货运列车牵引计算得到一条确定的速度曲线,作为列车速度跟踪的目标指导列车运行。

鉴于本文所研究的内容,对货运列车模型做如下假设:(1)只考虑货运列车运行中受到的纵向力,如牵引力、制动力和运行阻力,暂不考虑列车间的作用力。(2)只考虑货运列车的牵引运行能耗,暂不考虑再生制动能量的利用和列车运行中的辅助能耗。(3)货运列车的牵引力和制动力

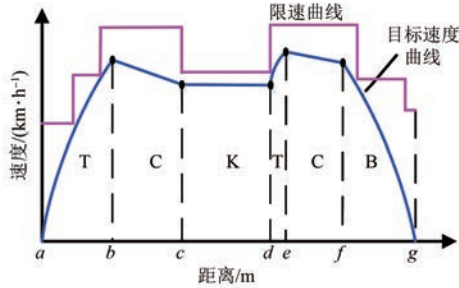


图1 货运列车目标速度曲线示意图

在运行速度范围内可以连续取值。

1.2 货运列车多目标优化模型

1.2.1 优化性能指标

(1) 运行能耗指标。采用牵引力做功,计算货运列车每个时间步长内的运行能耗:

$$E = \sum_{i=1}^n \Delta E_i = \frac{\sum_{i=1}^n F_t \cdot v_i \cdot \Delta t}{3\,600} \quad (1)$$

式中: E 为运行过程中的总牵引能耗; ΔE_i 为第*i*个时间步长 Δt 内的牵引能耗; F_t 和 v_i 为第*i*个时间步长 Δt 内的牵引力和速度。

由于不考虑再生制动能量,制动工况和惰行工况中的牵引能耗均取为0。

(2) 运行准点指标。虽然货运列车不像地铁和城铁那样对准点性要求那么严格,但也应考虑,在允许时间误差范围内到达终点则算满足准点的要求^[19],列车运行时间误差如下所示:

$$K_T = |T - T_0| \quad (2)$$

式中: T 为货运列车区间内实际运行时间; T_0 为列车时刻表给定的区间计划运行时间。

本文采用终点反推制动点的方式,保证停车位置的准确性,因此不将停车误差作为待优化的性能指标。

1.2.2 货运列车运行约束条件

货运列车运行途中需要遵守的约束条件如下所示^[20]:

$$\text{s. t.} \begin{cases} s_0 = 0 \\ s_T = S \\ v_0 = v_T = 0 \\ 0 \leq v_s \leq v_{\text{limit}}, s \in (0, S) \\ T \in T_0 \pm \varepsilon_t \\ S_{\text{工况}} \geq \frac{L}{2} \end{cases} \quad (3)$$

式中: s_0 、 s_T 分别为初始起动位置和终点停车位置, $s_0 = 0$ 、 $s_T = S$; S 为运行区间的长度; v_0 、 v_T 分别为起点和终点速度, $v_0 = v_T = 0$; s 为列车当前运行位置; v_s 为列车在*s*处的运行速度; v_{limit} 是速度限速; ε_t 为允许时间误差; $S_{\text{工况}}$ 为各工况之间的距离; L 为货运列车长度。

综上可得,货运列车的多目标优化模型如下所示:

$$\min \{E, K_T\} \quad (4)$$

2 复杂线路下货运列车工况序列确定

货运列车运行线路普遍较长且线路中包含不同类型的限速和坡道,限速根据前后区间限速值的大小可分为四种类型:凹型、凸型、上升型和下降型,如图2所示。根据货运列车在坡道上能否保持巡航运行状态分为三类:长上坡、长下坡和普通坡道。(1)长上坡。货运列车在此坡道上采用全力牵引工况依然无法保持匀速运行,列车速度会降低。(2)长下坡。货运列车在此坡道上采用惰行工况依然无法保持匀速运行,列车速度会升高。(3)普通坡道。除长上坡和长下坡其余坡道均归为普通坡道。

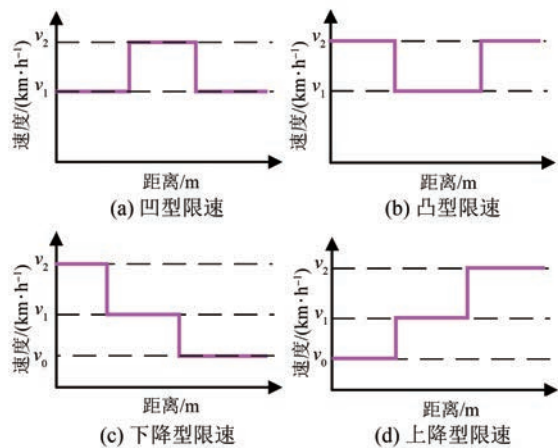


图2 货运列车运行线路的四种限速类型

四种限速和三种坡道组合构成了复杂多变的货运线路,一条包含不同坡道和限速的货运列车线路,如图3所示。

根据线路限速和坡道确定货运列车节能准点工况序列的方法操作步骤如下。

步骤1,根据线路限速得到节时策略下的操纵工况序列,节时策略对应的是货运列车最快运

行速度曲线,最快速度曲线计算流程如图 4 所示。每次循环中,牵引工况计算和巡航运行计算后会当前速度和位置进行迭代更新,当更新后的速度达到指定限速值后就进入制动工况计算,否则继续进入下一个循环。其中, v_{limit} 是货运列车在位置 x 处的限速; dv 是允许速度误差; v, x 分别是当前货运列车的速度和位置。

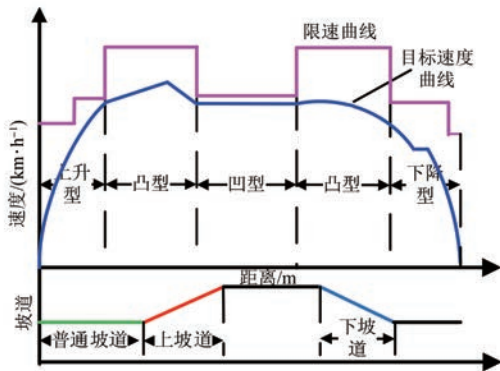


图 3 包含不同限速和坡道类型的货运复杂线路

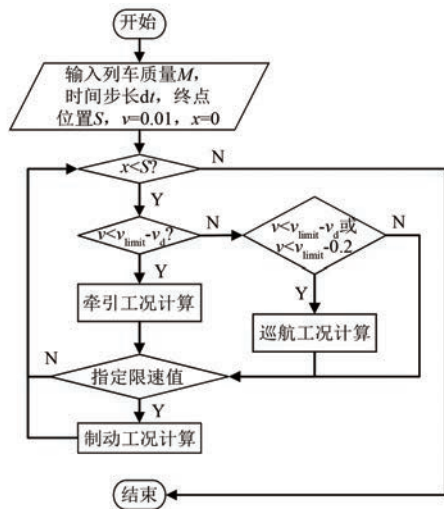


图 4 货运列车最快运行速度曲线计算流程

步骤 2,根据线路坡道情况,确定各坡道处应采取的节能策略。货运列车运行在上坡道处采用最大牵引力牵引;在下坡道处采用惰行工况有利于节能,如图 5 所示。

图 5(a)中,货运列车以巡航速度 v 进入长下坡,在起点 a 之前采用惰行工况提前降低运行速度,进入下坡道后货运列车的速度将会增加,当始出坡道终点 b 后,货运列车又恢复至巡航速度。

图 5(b)中,货运列车以巡航速度 v 进入长上坡,在起点 a 之前采用牵引工况提前升高运行速

度,进入下坡道后列车的速度将会减小,当始出坡道终点 b 后,货运列车又恢复至巡航速度。在普通坡道上的运行工况则根据线路限速来决定,当限速保持不变时,可考虑采用巡航运行或惰行工况运行。

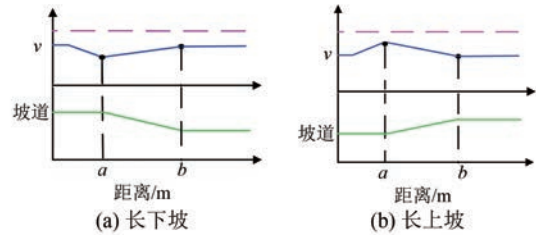


图 5 货运列车在不同坡道上的节能策略

步骤 3,货运列车运行在长上坡和长下坡转换处采用坡道节能工况,普通坡道上则采用最快速度曲线下的工况,从而得到一组新的既能保证列车准点运行又能利用坡道实现节能的工况序列。货运列车节能工况序列求解步骤如图 6 所示。

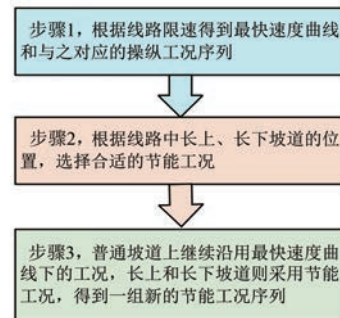


图 6 货运列车复杂线路下工况序列确定步骤

3 基于 ISSA 的货运列车多目标优化问题求解

3.1 基于自适应权重和 Levy 飞行扰动的 SSA

3.1.1 动态自适应权重与发现者更新公式

为了平衡算法的全局和局部搜索能力,引用非线性动态自适应权重 w ,如图 7 所示。前期 w 较大可以加快全局搜索能力,后期 w 较小可以更好地进行局部搜索。加入动态自适应权重的发现者位置表达式为

$$w = w_{\max} - (w_{\max} - w_{\min}) \cdot (t / \text{Max_iter})^2$$

$$X_i^{t+1} = \begin{cases} X_i^t + w \cdot (X_{\text{best}} - X_i^t) \cdot \text{rand}, & R_2 < ST \\ X_i^t + Q \cdot J, & R_2 \geq ST \end{cases} \quad (5)$$

式中: $w_{\max}$ 为最大权重值; $w_{\min}$ 为最小权重值; t 为当前迭代次数; Max_iter 为最大迭代次数; $R_2 \in [0, 1]$, $ST \in [0.5, 1]$ 分别为警戒值和安全值; X_i^t 为第 i 个麻雀在第 t 代时的位置; X_{best} 为当前全局最优位置; $rand$ 为 0~1 之间的随机数; Q 为服从正态分布的随机数; J 为一个 $1 \times d$ 维的值全为 1 的矩阵。

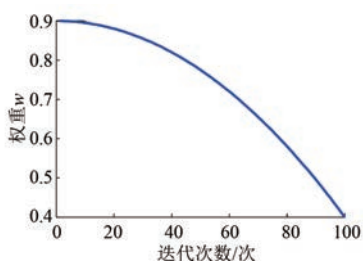


图7 麻雀算法的非线性自适应权重

3.1.2 Levy 飞行扰动和贪婪更新准则

为加强算法全局搜索能力,跳出局部最优解,引入 Levy 飞行策略对更新位置后的麻雀种群进行扰动操作。基于 Levy 飞行扰动的麻雀位置更新如下所示:

$$P = 1 - \frac{t}{Max_iter}$$

$$X_i^{t+1} = \begin{cases} X_i^t + l \oplus Levy(\lambda), & rand > P \\ X_i^t, & rand < P \end{cases} \quad (6)$$

式中: P 为自适应选择概率; $\oplus$ 为矩阵乘法的符号; l 为飞行步长控制因子, $l = 0.1 \cdot (X_i^t - X_{\text{best}})$; $Levy(\lambda)$ 为服从 Levy 分布的路径。

采用 Mantegna 算法模拟得到 Levy 飞行路径,步长计算如下所示:

$$Levy(\lambda) = \frac{\mu}{|\nu'|^{1/\eta}} \quad (7)$$

$$\begin{cases} \mu \sim N(0, \sigma_\mu^2) \\ \nu' \sim N(0, \sigma_{\nu'}^2) \\ \sigma_\mu = \left[\frac{\Gamma(1+\eta) \sin(\frac{\pi\eta}{2})}{\eta \cdot \Gamma(\frac{\eta+1}{2}) \cdot 2^{\frac{\eta-1}{2}}} \right]^{\frac{1}{\eta}} \\ \sigma_{\nu'} = 1 \end{cases} \quad (8)$$

式中: μ 和 ν' 为服从正态分布的随机数; η 为一个常数,通常取值为 1.5。

采用 Levy 飞行策略对麻雀位置再次更新后,引入贪婪更新机制,即只保留更新后更好个体的位置,差的个体则不会更新位置。贪婪更新机制如下所示:

$$X_i^{t+1} = \begin{cases} X_i^t, & f(X_i^t) < f(X_i^{t+1}) \\ X_i^{t+1}, & f(X_i^t) \geq f(X_i^{t+1}) \end{cases} \quad (9)$$

式中: $f(X_i^{t+1})$ 为第 i 个麻雀 Levy 扰动前的适应度值; $f(X_i^t)$ 为第 i 个麻雀 Levy 扰动后的适应度值。

3.2 基于 ISSA 的货运列车多目标优化

以第 2 节得到的工况序列作为控制输入,工况序列中各工况转换点的位置构成了一个麻雀个体,如图 8 所示。图 8 中, $S(n)$ 表示第 n 个工况转换点的位置。

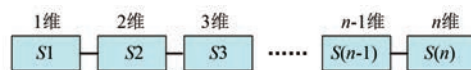


图8 麻雀个体组成结构

采用线性加权求和,将多目标优化问题转化为单目标优化问题求解,适应度函数设计如下:

$$\min F = w_1 F_T + w_2 F_E \quad (10)$$

$$\begin{cases} F_T = \left| \frac{T - T_0}{T_0} \right| \\ F_E = \left| \frac{E - E_{\min}}{E_{\min}} \right| \end{cases} \quad (11)$$

式中: $E_{\min}$ 为节能策略下得到的最小运行能耗; E 为区间实际运行能耗; w_1 、 w_2 分别为时间和能耗权重, $w_1 + w_2 = 1$ 。

基于改进麻雀算法的货运列车多目标优化问题求解流程见图 9,具体步骤如下。

步骤 1,输入货运列车、线路参数;初始化算法参数。

步骤 2,随机生成初始种群,并对种群中的个体进行牵引计算,只有通过牵引计算的个体才被放入初始种群中,直至初始种群被填满。

步骤 3,计算初始种群中每个麻雀个体的适应度值,并按适应度值从小到大进行排序;适应度值最小的麻雀个体作为当前全局最优解。

步骤 4,进入算法循环迭代更新位置,按照发现者、跟随者和警戒者更新公式对种群进行位置更新。

步骤 5,对更新后的个体进行检查,剔除不符

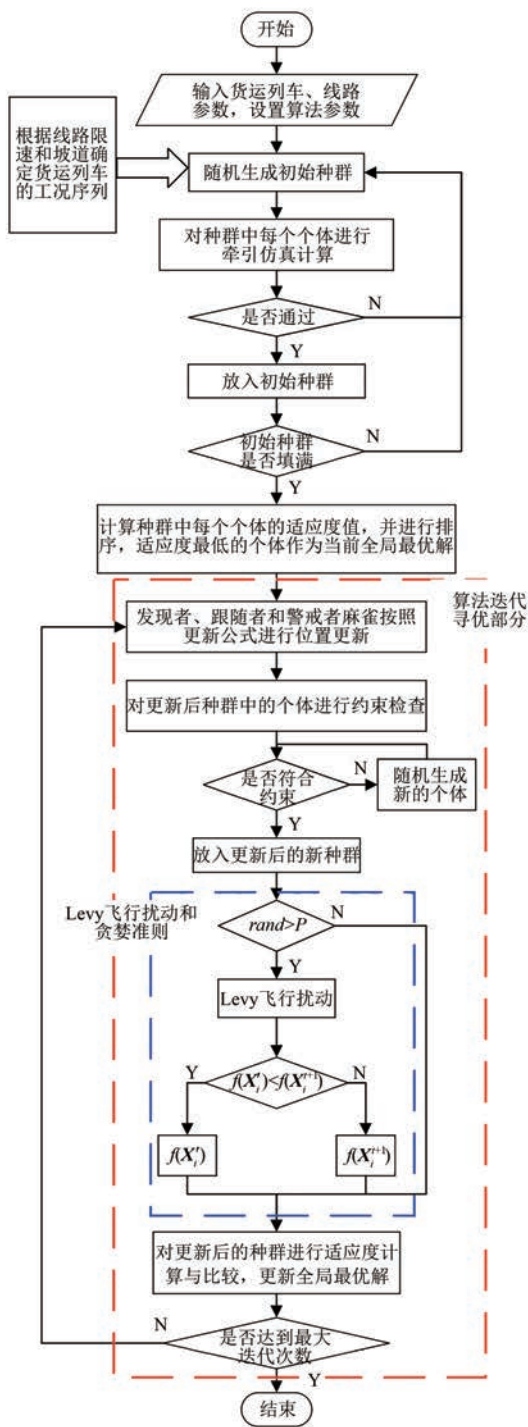


图9 基于ISSA的货运列车多目标优化流程

合约约束的个体,即无法通过列车牵引计算的个体,计算种群缺口数额并采用随机生成种群的方法进行补充。

步骤6,当 $rand > P$ 时,则对当前麻雀个体进行Levy飞行扰动,比较扰动后的个体和之前个体的适应度值,更小则认为扰动有效替换当前麻雀

的位置,其余则默认无效不进行位置更新。

步骤7,对更新后的新种群进行适应度值计算与比较,记录并更新全局最优麻雀的位置。

步骤8,判断是否达到最大迭代次数,是则输出当前全局最优解;否则跳转至步骤4,继续进行循环更新。

4 仿真设计

为验证本文所提方法的有效性,在MATLAB 2018b建立仿真模型进行相应仿真。

4.1 仿真参数设置

仿真线路限速、坡道和曲率信息如图10所示,线路运行参数设置如表1所示。

表1 线路参数

参数名称	参数值
线路全长/km	20
计划运行时间/s	1 500
允许时间误差/s	30
最小运行能耗/(kW·h)	470

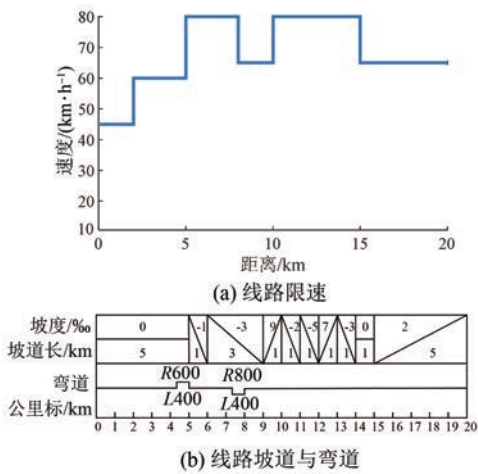


图10 仿真复杂线路限速与坡道

图10的仿真线路中包含2个长上坡和4个长下坡,四种限速类型均存在于前文所说的复杂线路中。

牵引机车为HXD₁型电力机车,货车为C80型号,机车、货车和编组信息分别如表2~表4所示。货运列车牵引、制动和基本阻力曲线如图11所示。在算法优化部分,种群数量设置为50,最大迭代次数为100次。各算法参数设置如表5所示。表5中, c_1 、 c_2 为学习因子, V_{max} 为粒子最大

表 2 HXD₁ 型机车参数

参数名称	参数值
计算质量/t	200
机车全长/m	35.2
最高运行速度/(km·h ⁻¹)	120
单位基本阻力/(N·kN ⁻¹)	$\omega_0 = 1.40 + 0.003\ 8v + 0.000\ 3v^2$

表 3 C80 型货车参数

参数名称	参数值
自重/t	20
载重/t	77
车长/m	12
单位基本阻力/(N·kN ⁻¹)	$\omega_0 = 0.92 + 0.004\ 8v + 0.000\ 125v^2$

表 4 编组数据

参数名称	参数值
机车数/辆	1
货车数/辆	50
编组总重/t	5 200
编组长度/m	600

表 5 各算法参数设置

算法名称	参数设置
PSO	$c_1 = c_2 = 2, V_{\max} = 4$
SSA	$PD = 20\%, R_2 = 0.8, SD = 10\%$
ISSA	$PD = 20\%, R_2 = 0.8, SD = 10\%, w_{\max} = 0.9, w_{\min} = 0.4$

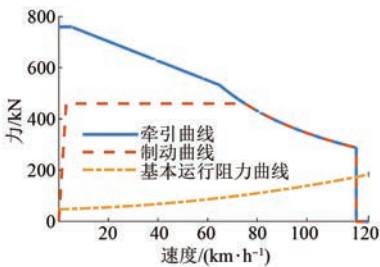


图 11 货运列车牵引、制动和阻力特性曲线

飞行速度; PD 为发现者比例; SD 为侦查者比例; R_2 为警戒阈值。

4.2 仿真结果分析

4.2.1 能耗时间权重设置

本文所搭建的货运列车多目标优化模型,采用线性加权求和给时间和能耗双目标进行赋权,鉴于目标就两个可直接通过测试不同权重下的优化结果,选择符合货运列车运行要求的权重值。不同权重下的优化结果如表 6 所示。由表 6 可知,能耗耗

重越高则能耗越低但运行时间增加,时间权重越高则时间越接近计划运行时间但能耗增加。对列车运行的要求,需要选择既能保证列车准点运行又能降低运行能耗的权重值。当时间和能耗权重设为 0.5、0.5 时,运行时间为 1 521 s 在计划运行时间的允许误差 30 s 之内且能耗较低满足对货运列车运行的要求,因此时间能耗权重分别设为 0.5、0.5。对上述得到的 9 组时间-能耗离散数据点进行二次多项式拟合,可以近似得到不同权重下能耗与时间对应的关系,如图 12 所示。

表 6 不同权重下货运列车优化结果比较

时间权重值	能耗权重值	能耗/(kW·h)	运行时间/s
0.9	0.1	603.43	1 500.6
0.8	0.2	592.26	1 501.6
0.7	0.3	584.80	1 511.2
0.6	0.4	580.13	1 525.6
0.5	0.5	581.41	1 521.0
0.4	0.6	565.50	1 601.4
0.3	0.7	565.46	1 605.3
0.2	0.8	565.21	1 621.7
0.1	0.9	560.56	1 667.9

由图 12 可知,时间与能耗成反比关系,但当时间增加到一定值时能耗将不再降低。

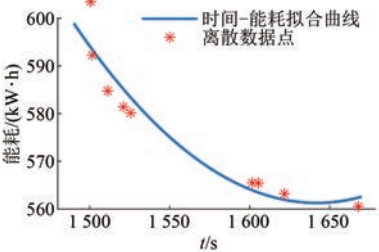


图 12 拟合得到不同权重下的时间与能耗关系

4.2.2 不同时间运行策略比较

根据 4.2.1 节所得结果,货运列车能耗与运行时间是成反比关系的,因此可以通过采用不同时间运行策略来进一步降低货运列车运行能耗,将区间运行时间分别设置为 1 470 s 和 1 530 s,采用 ISSA 求解,权重均设置为 0.5 和 0.5。仿真结果如图 13、图 14 所示,可以看出,随着区间运行时间的增加,货运列车惰行的距离将增加,惰行时间增长。求解结果如表 7 所示。

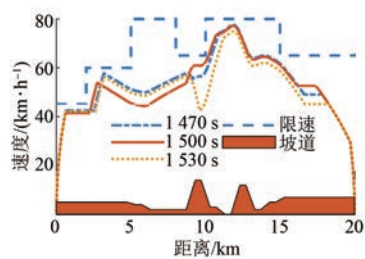


图 13 不同时间运行策略下的目标速度曲线

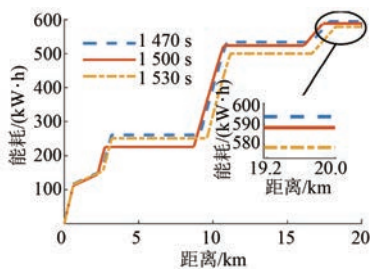


图 14 不同时间运行策略下的货运列车运行能耗

表 7 采用不同时间运行策略求解结果比较

运行时间 策略/s	实际运行 时间/s	能耗/ (kW·h)	能耗降低 率/%
1 470	1 470.2	593.78	0
1 500	1 500.0	588.43	0.8
1 530	1 530.4	578.69	2.5

由表 7 可得,区间运行时间 1 530 s 相比于 1 470 s,在时间增加了 60 s 的基础上,能耗降低了 2.5%,因此当运行条件允许时,可以通过采用

不同的时间运行策略,增加惰行距离从而降低区间运行能耗。

4.2.3 基于复杂限速和坡道的工况序列确定

根据本文所提方法结合线路限速和坡道信息,得到货运列车节能准点工况序列为牵引→巡航→牵引→惰行→牵引→惰行→巡航→惰行→制动,为验证所提策略的有效性,将本文方法、节时策略、经典四阶段策略以及节能策略进行比较。

各策略下的工况序列如表 8 所示。由表 8 可得,节时策略下工况转换次数最多为 12 次,本文方法和节能策略转换次数一样多均为 8 次,四阶段策略转换次数最少为 5 次,除了节时策略外,其他三种策略在中途运行时均没有采用制动工况,能有效减少动能的损失。在惰行工况的使用上,节时策略为 0 次,节能策略为 4 次最多。四阶段策略使用惰行工况 1 次,本文方法使用惰行工况 3 次,惰行工况的使用能有效降低能耗。各策略下的运行能耗和时间结果如表 9 所示。由表 9 可得,在运行时间方面节时和节能策略一个早到一个晚点,四阶段策略和本文方法均能满足准点的要求,在能耗方面,节时策略耗能最多,节能策略耗能最低,本文方法比节时、四阶段策略能耗分别降低了 44.4% 和 6.4%,比节能策略耗能高了 5.3%,而实际运行中列车的运行策略常采用四阶段策略,说明本文方法所得工况序列生成的目标速度曲线在满足准点的前提下更节能。由工况序列生成的目标速度曲线如图 15 所示。

表 8 不同策略下的工况序列及转换点位置

策略	工况序列及各工况转换点位置
节时	牵引—巡航—牵引—巡航—牵引—巡航—制动—巡航—牵引—巡航—制动—巡航—制动 657—2 001—2 647—5 002—6 245—6 908—8 017—10 000—11 000—14 210—15 000—18 600
节能	牵引—惰行—牵引—惰行—牵引—惰行—牵引—制动 572—3 971—4 769—9 160—10 730—18 000—18 390—19 770
四阶段	牵引—巡航—牵引—巡航—惰行—制动 572—2 200—2 831—17 540—19 460
本文方法	牵引—巡航—牵引—惰行—牵引—惰行—巡航—惰行—制动 601—2 243—2 728—8 716—10 718—16 124—17 390—19 690

表 9 不同策略的运行时间和能耗结果

策略	时间/s	能耗/(kW·h)
节时	1 275.2	1 058.53
节能	1 681.4	556.72
四阶段	1 502.3	628.61
本文方法	1 500.0	588.43

由图 15 所示的目标速度曲线看出,本文方法在长下坡上实行惰行工况,在长上坡上实行牵引工况,与其他策略相比,充分利用了坡道实现节能。

4.2.4 求解算法性能测试

将 ISSA 与 SSA 和 PSO 算法进行对比,各算法分别独立的求解 10 次,测试结果如表 10 所示。

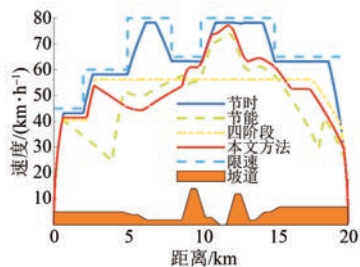


图 15 不同策略下的货运列车目标速度曲线

由表 10 知,ISSA 10 次独立试验下得到的平均适应度值要小于 SSA 和 PSO,证明 ISSA 总体寻优效果更好。对三种算法得到的结果进行线性拟合,结果如图 16 所示。

由图 16 得,ISSA 拟合后得到的曲线低于 PSO 算法和 SSA 拟合曲线,证明在同一时间下 ISSA 得到的能耗更低,同一能耗下,ISSA 花费的时间更少。取三种算法中适应度最优解绘制适应度变化曲线如图 17 所示。

表 10 不同算法求解 10 次所得结果

算法	最优解		最差解		平均值		平均适应度值
	能耗/(kW·h)	时间/s	能耗/(kW·h)	时间/s	能耗/(kW·h)	时间/s	
PSO	578.55	1 503.1	566.69	1 578.8	577.92	1 525.7	0.123 3
SSA	575.20	1 517.9	579.86	1 529.6	577.72	1 523.9	0.122 5
ISSA	542.63	1 589.1	532.37	1 677.6	555.27	1 573.7	0.115 0

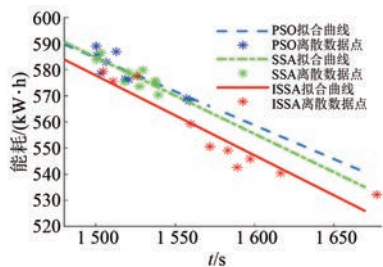


图 16 不同算法结果拟合曲线

下坡道上惰行的距离更长。表 12 为 3 种算法 10 次求解中能满足时间要求且适应度值最高的解。

表 11 三种算法最优解表示的工况序列及转换点位置

算法	工况序列及工况转换点位置							
	牵引	巡航	牵引	惰行	牵引	惰行	巡航	惰行
PSO	580	2 542	3 263	9 647	10 923	14 013	16 751	19 690
SSA	595	2 419	3 010	9 339	10 700	13 814	16 850	19 680
ISSA	482	1 824	2 557	9 381	10 626	14 068	16 682	19 880

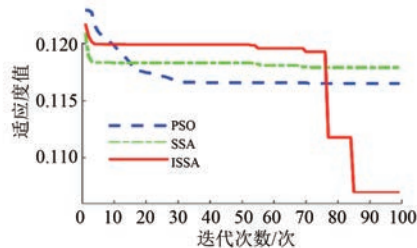


图 17 不同算法最优解适应度变化曲线

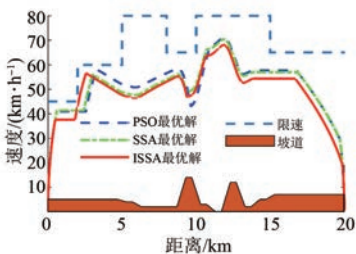


图 18 不同算法最优解适应度变化曲线

图 17 结果表明,ISSA 在迭代后期能跳出局部极值,最优解优于其他两种算法的结果,三种算法最优解工况序列及转换点位置如表 11 所示。不同算法最优解适应度变化曲线如图 18 所示。从表 11 和图 18 可以看出,ISSA 得到的最优解中牵引-惰行间的距离分别为 6 824 m 和 3 442 m 均大于 SSA 和 PSO 最优解中牵引-惰行运行的距离,ISSA 找到的最优解充分利用了惰行节能原理,在

表 12 三种算法中满足时间要求的货运列车多目标优化结果

算法	运行时间/s	能耗/(kW·h)	适应度值	准点率/%	节能率/%
PSO	1 503.1	578.55	0.116 5	100	0
SSA	1 517.9	575.20	0.117 9	100	0.58
ISSA	1 510.9	575.66	0.116 0	100	0.50

由表 12 可知,因为选取的是时间满足准点要求的解,所以三种算法优化得到的解在时间上均满足要求,在能耗上,10 次测试结果中 SSA 得到的结果能耗最低,但在总体适应度值上 ISSA 的值更低,说明其在时间和能耗两目标上得到的解,综合效果更好,证明了 ISSA 在求解货运列车多目标优化问题时表现更好。

5 结 语

(1) 通过给时间和能耗赋予不同的权重,可得时间和能耗之间成反比关系,仿真表明采用不同时间运行策略是有效降低货运列车运行能耗的措施之一。

(2) 在货运列车复杂线路中,使用本文根据线路限速和坡道确定得到的工况序列生成的目标速度曲线能满足货运列车准点节能运行的要求。

(3) 基于自适应权重和 Levy 飞行策略 ISSA 比 PSO 和 SSA 在求解货运列车多目标优化问题中表现更好。

(4) 本文采用单目标算法求解,一次只能得到一个权重值下的最优解,后续可考虑使用多目标优化算法求解得到一组非劣解。

【参 考 文 献】

[1] 唐涛,黄良骥. 列车自动驾驶系统控制算法综述[J]. 铁道学报,2003(2): 98.

[2] CHANG C S, SIM S S. Optimizing train movements through coast control using genetic algorithms[J]. IET Electric Power Applications, 1997, 144(1): 65.

[3] 张京,朱爱红. 基于遗传算法和粒子群优化的列车自动驾驶速度曲线优化方法[J]. 计算机应用, 2022, 42(2): 599.

[4] 徐凯,吴磊,杨飞凤. PSO-ICS 算法优化的城轨列车自动驾驶系统[J]. 铁道科学与工程学报,2017, 14(12): 2704.

[5] 李诚,王小敏. 基于粒子群优化的 ATO 控制策略[J]. 铁道学报,2017, 39(3): 53.

[6] 朱爱红,卢稳,宋丽梅. 基于小生境粒子群算法的 ATO 运行过程优化研究[J]. 铁道科学与工程学报,2017, 14(9): 1998.

[7] 张惠茹,贾利民,王莉. 基于 Pareto 多目标优化的高速铁路列车节能驾驶曲线集生成[J]. 铁道学报,2021, 43(3): 85.

[8] DOMÍNGUEZ M, FERNÁNDEZ-CARDADOR A, CUCALA A P, et al. Multi objective particle swarm optimization algorithm for the design of efficient ATO speed profiles in metro lines[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2014, 29: 43.

[9] TANG H, WANG Y, LIU X, et al. Reinforcement learning approach for optimal control of multiple electric locomotives in a heavy-haul freight train: a double-switch-Q-network architecture[J]. Knowledge-Based Systems, 2020, 190: 105173.

[10] SCHEEPMAKER G M, GOVERDE R M P, KROON L G. Review of energy-efficient train control and timetabling[J]. European Journal of Operational Research, 2017(2): 355.

[11] SONG Y, SONG W. A novel dual speed-curve optimization based approach for energy-saving operation of high-speed trains[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2016, 17(6): 1564.

[12] 杨彦强,刘海东,麻存瑞,等. 列车节能运行目标速度控制优化研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2019, 19(1): 138.

[13] 杨杰,吴佳焱,王彪,等. 基于启发式遗传算法的列车节能运行目标速度曲线优化算法研究[J]. 铁道学报,2019, 41(8): 1.

[14] 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.

[15] 柴晓凤,刘军,赖晴鹰,等. 考虑辅助停车区约束的中速磁浮列车速度曲线节能优化方法[J]. 中南大学学报(自然科学版),2019, 50(6): 1499.

[16] 马阳阳,孟学雷,贾宝通,等. 基于列车运行时间偏差惩罚的高速列车节能优化方法[J]. 交通信息与安全,2021, 39(4): 84.

[17] XUE J, SHEN B. A novel swarm intelligence optimization approach: sparrow search algorithm[J]. Systems Science & Control Engineering, 2020, 8(1): 22.

[18] 张九龙,王晓峰,芦磊,等. 若干新型智能优化算法对比分析研究[J]. 计算机科学与探索,2022, 16(1): 88.

[19] 李夏苗,胡思继,朱晓立. 直达输送货物的送达速度和准时性的调查研究[J]. 北方交通大学学报, 2002(2): 103.

[20] 石红国. 列车运行过程仿真及优化研究[D]. 成都:西南交通大学,2006.