

基于SSO算法的城轨列车速度曲线优化研究

胡融滨, 齐鲲鹏, 赵兴

(大连交通大学机车车辆工程学院, 大连 116028)

摘要:城轨列车在城市交通中发挥着越来越重要的作用,其运行性能的优劣直接关系到整个轨道交通系统的运行效率和服务质量。城轨列车速度曲线是影响列车运行性能和乘客舒适度的重要因素之一,为寻找最优列车速度曲线,提高列车运行效率、安全性和舒适性,同时降低运行能耗和停车误差,采用精子群优化算法(Sperm Swarm Optimization, SSO)进行列车速度曲线优化。首先通过对列车进行受力分析,建立动力学模型;然后建立以节能性、准时性、停车精确性、超限误差和舒适性为优化目标的基于加权求和的多目标优化模型;最后用SSO算法求解建立的列车速度曲线优化模型,获得优化模型的最优解,生成各项指标较优的目标速度曲线。同时针对不同的运行条件和场景,设计多组对照仿真,验证算法的普适性。研究表明,SSO算法收敛速度快,算法性能更好,能够有效优化列车速度曲线,提高列车的运行效率、安全性和舒适性,同时降低运行能耗和停车误差,且相对于最大运行能力曲线具有更高的节能率,停车误差更小,比最大运行能力的停车误差降低57.5%。通过多组对照仿真,也验证SSO算法对更加复杂线路条件的适应性。研究结果为列车速度曲线的优化提供新的思路和方法。

关键词:城轨列车; SSO算法; 多目标优化; 列车速度曲线; 列车运行性能

中图分类号:U239.5 文献标识码:A DOI:10.13238/j.issn.1004-2954.202407070001

Research on Speed Curve Optimization of Urban Rail Trains Based on SSO Algorithm

HU Rongbin, QI Kunpeng, ZHAO Xing

(School of Locomotive and Rolling-stock Engineering, Dalian Jiaotong University, Dalian 116028, China)

Abstract: Urban rail trains play an increasingly important role in urban traffic, and their running performance is directly related to the running efficiency and service quality of the whole rail transit system. The speed curve of urban rail trains is one of the important factors that affect the running performance and passenger comfort. In order to find the optimal train speed curve, improve the running efficiency, safety and comfort of trains, and reduce the running energy consumption and stopping error, the Sperm Swarm Optimization (SSO) algorithm was used to optimize the train speed curve. Firstly, the dynamic model of the train was established through the force analysis. Then a multi-objective optimization model based on weighted summation was established, which took energy saving, punctuality, stopping accuracy, speed-limit exceedance error, and comfort as optimization objectives. Finally, the SSO algorithm was used to solve the train speed curve optimization model, obtain the optimal solution of the optimization model, and generate the target speed curve with better performance indicators. At the same time, according to different operating conditions and scenarios, multiple comparative simulations were designed to verify the universality of the algorithm. The research results showed that the SSO algorithm had fast convergence speed and better performance, which effectively optimized the train speed curve,

improved the running efficiency, safety, and comfort of the train, and reduced the running energy consumption and stopping error. Compared with the maximum running capacity curve, it achieved a higher energy-saving rate, and a

收稿日期:2024-07-07; 修回日期:2024-09-11; 网络首发日期:2025-03-06

基金项目:国家自然科学基金青年基金项目(62001079)

作者简介:胡融滨(2000—),男,工学硕士,主要从事轨道交通智能控制研究工作,E-mail:1085841665@qq.com。

通信作者:齐鲲鹏(1976—),男,副教授,工学博士,主要从事列车运行控制、先进控制技术应用研究工作,E-mail:qikunpeng@djtu.edu.cn。

smaller stopping error, with a reduction of 57.5% compared to that of the maximum running capacity curve. The adaptability of the SSO algorithm to more complex line conditions was also verified by multiple comparative simulations. The research results provide a new idea and method for the optimization of train speed curve.

Key words: urban rail train; SSO algorithm; multi-objective optimization; train speed curve; train running performance

引言

城轨列车作为城市交通的重要组成部分,具有运输量大、运行速度快、安全可靠、舒适度高、节能环保等特点^[1],能够满足城市居民的出行需求,促进城市发展。近些年,城轨列车在节能环保、智能化、自动化等方面受到广泛关注,列车自动驾驶(Automatic Train Operation, ATO)^[2]系统成为研究热点。

近年来,国内外学者针对城轨列车的速度曲线优化开展广泛研究。一些学者利用先进优化算法等方法对速度曲线进行优化^[3-7],取得了一定的研究成果。WANG 等^[8]提出一种基于遗传算法的速度曲线优化方法,该方法将速度曲线的问题转化为一个多目标优化问题,通过选择合适的染色体编码方式和构造合适的适应度函数,实现速度曲线优化;DENG 等^[9]设计一种基于模拟退火算法和多参数控制策略的求解方法得到节能运行曲线,取得较好的节能效果;FERNANDEZ-RODRIGUEZ 等^[10]考虑中间目标点的到达时间,并提出一种改进的 MOPSO 来降低列车能耗;褚心童等^[11]提出一种基于蚁群算法的列车节能驾驶策略优化算法,该方法使用蚁群算法的离散组合优化技术对推荐速度曲线进行寻优;聂莹莹等^[12]提出一种改进交叉策略的差分进化算法的速度曲线优化方法,该方法通过引入差分进化的思想,能够实现速度曲线的快速全局寻优;王一栋等^[13]提出一种基于改进麻雀算法的优化策略进行列车速度曲线优化,并验证改进麻雀算法优化策略的有效性;黄江平等^[14]将一种改进粒子群算法进行列车速度曲线优化研究。

对城轨列车 ATO 系统中的速度曲线优化进行模拟研究,采用 SSO 算法优化列车速度曲线。首先,通过 MATLAB 仿真平台建立多目标的列车运行过程优化模型,设计以能耗、准时、精准停车、超限速和舒适性为优化目标的适应度函数;其次,采用 SSO 算法求解列车速度曲线多目标优化模型,获得优化模型的最优解,从而生成最优目标速度曲线;最后,选取城市轨道交通线路数据进行仿真,验证 SSO 算法在列车 ATO 运行多目标优化中的优越性,并研究分析该算法对时间和复杂限速的适应性。

1 构建列车优化模型

1.1 列车运动学模型

在进行列车的运动过程分析时,可将列车单质点模型^[15]用数学语言描述为

$$\frac{dt}{dx} = \frac{1}{v} \quad (1)$$

$$\frac{dv}{dt} = \frac{F(v) - B(v) - W_0(v) - W_i(x)}{(1 + \gamma)M} \quad (2)$$

式中, t 为列车的实际运行时间; x 为列车当前实际位置; v 为列车的实际运行速度; $F(v)$ 为牵引力,由列车牵引特性和列车运行速度共同决定^[16]; $B(v)$ 为制动力,由列车制动特性和列车运行速度确定; $W_0(v)$ 为戴维斯方程描述的基本阻力; $W_i(x)$ 为附加阻力,仅考虑坡道附加阻力; γ 为列车回转质量系数,与列车特性有关; M 为列车质量。

列车运行所受基本阻力计算公式如下

$$w_0 = a + bv + cv^2 \quad (3)$$

$$W_0(v) = M \cdot g \cdot w_0(v) \quad (4)$$

式中, w_0 为单位基本阻力; a, b 和 c 为戴维斯系数,通常给定; W_0 为列车运行所受基本阻力; g 为重力加速度。

坡道附加阻力的计算公式如下

$$w_i(x) = i \quad (5)$$

$$W_i(x) = M \cdot g \cdot w_i(x) = M \cdot g \cdot i \quad (6)$$

式中, w_i 为单位坡道附加阻力; i 为坡道的坡度千分数,取上坡为正值,下坡为负值。

1.2 列车运行性能指标

(1) 能耗指标

列车运行过程中,只在受牵引力的情况下,发动机处于耗能状态^[17],并将考虑线路平均满载率^[18]和平均站间距^[19]对牵引能耗的影响,根据牵引能耗计算理论得出牵引能耗的表达式如下

$$E = \int_0^T F(t) \alpha \beta ds = \int_0^T F(t) v(t) \alpha \beta dt \quad (7)$$

式中, E 为列车运行过程的牵引能耗; T 为运行时间; $F(t)$ 为 t 时刻的列车牵引力; $v(t)$ 为 t 时刻的列车速度; α 为线路平均满载率影响修正系数; β 为线路平

均站间距影响修正系数。

(2) 准时性指标

准时性指标可以表示为列车运行过程的计划运行时间与实际运行时间之差的绝对值^[20],其计算表达式如下

$$K_{\text{time}} = |T_{\text{plan}} - T| \quad (8)$$

式中, T_{plan} 为计划站间运行时间; T 为实际站间运行时间。

(3) 停车精确性指标

停车精确性指标可由列车目标停车点的位置与实际停车点位置之差的绝对值表示^[21],其计算表达式如下

$$K_{\text{stop}} = |S_{\text{target}} - S_{\text{stop}}| \quad (9)$$

式中, S_{target} 为列车目标停车点的位置; S_{stop} 为列车实际停车点的位置。

(4) 超限速误差指标

当列车当前速度超过限制速度时,超限速误差指标可由列车当前速度与列车当前限制速度之差^[22]表示,其计算表达式如下

$$K_v = V - V_{\text{limit}} \quad (10)$$

式中, V 为列车当前速度; V_{limit} 列车当前限制速度。

(5) 舒适性指标

舒适性可以通过冲击率来定义^[23],其计算表达式如下

$$J_{\text{erk}} = \frac{1}{T} \int_0^T \left| \frac{da}{dt} \right| dt \quad (11)$$

式中, a 为列车运行过程中的加速度; T 为运行时间。

1.3 建立基于加权求和的多目标优化模型

列车运行过程中要满足节能、准时、精准停车、超限速误差、舒适等目标,需将这些指标作为优化目标,多目标优化问题可将多个目标进行加权求和进行求解,将其转化为单目标优化问题^[24]。以 f_1, f_2, f_3, f_4, f_5 表示这 5 个待优化目标,可得优化模型

$$f = \{f_1, f_2, f_3, f_4, f_5\} \quad (12)$$

将上述 5 个待优化目标进行加权,可得目标函数如下

$$f = w_1 f_1 + w_2 f_2 + w_3 f_3 + w_4 f_4 + w_5 f_5 \quad (13)$$

$$\text{s. t. } \begin{cases} v(0) = v(S) = 0 \\ v(s) < v_{\text{limit}}(s), s \in (0, S) \\ t(0) = 0, t(S) = T \end{cases} \quad (14)$$

式中, $w_1 \sim w_5$ 为各个目标函数的权重; $v(0)$ 和 $v(S)$ 分别为列车初速度和末速度; $v_{\text{limit}}(s)$ 为列车在各个位置的限速; $t(0)$ 和 $t(S)$ 分别为列车运行的开始

刻和停车时刻。

将函数 f 的倒数作为适应度函数,即

$$F = \frac{1}{f} \quad (15)$$

式中, F 为需要优化的目标函数。

2 算法设计

SSO 算法具有精确的利用能力,许多研究证明了它的收敛速度、简单性和发现全局最优的能力,既可以用于科学研究,也可以用于工程研究,SSO 算法非常简单,其灵感来自精子群通过自然受精过程的行为^[25]。

SSO 算法中的每个精子都应该考虑当前速度、当前位置、到 x_{best} 的距离和到 x_{sgbest} 的距离来调整其位置。SSO 算法的数学模型可表示为

$$\begin{aligned} V_i(t) = & D \cdot \lg(\text{pH_Rand}_1) \cdot V_i + \\ & \lg(\text{pH_Rand}_2) \cdot \lg(\text{Temp_Rand}_1) \cdot \\ & (x_{\text{sgbest}_i} - x_i(t)) + \lg(\text{pH_Rand}_3) \cdot \lg(\text{Temp_Rand}_2) \cdot \\ & (x_{\text{sgbest}_i} - x_i(t)) \end{aligned} \quad (16)$$

该公式分为 3 部分,分别代表精子初始速度、精子个体最佳解和精子全局最佳解。式中, V_i 为迭代 t 时精子 i 的速度; D 为速度阻尼系数,取值 $0 \sim 1$; $\text{pH_Rand}_1, \text{pH_Rand}_2$ 和 pH_Rand_3 均为精子位置的 pH 值,取值 $7 \sim 14$; $\text{Temp_Rand}_1, \text{Temp_Rand}_2$ 均为精子位置的温度值,取值 $35.1 \sim 38.5$; x_i 为迭代 t 时精子 i 的当前位置; x_{best} 为迭代 t 时精子 i 的个体最佳位置; x_{sgbest} 精子群的全局最佳位置。

当前最佳解如下

$$x_i(t) = x_i(t) + v_i(t) \quad (17)$$

根据前面的模型,可以创建一个完整的 SSO 算法,步骤如下。

①初始化所有精子的位置。

②计算每个精子的适应度值。

③如果计算的适合度大于精子最佳解,则将当前值设置为精子最佳解。

④根据获胜者选择精子全局最佳解。

⑤使用速度更新规则更新搜索空间中的精子位置。

⑥将种群划分为三等分,在种群的第一部分中,用非均匀突变算子突变精子;在第二部分中,用统一突变算子突变精子;在第三部分中,不进行突变。

⑦未达到最大迭代则返回步骤 2 并重复,直到达到最大迭代次数。

为了验证 SSO 算法的性能,采用基准测试函数 Sphere 函数对 SSO 算法、GA 算法和 PSO 算法进行仿真,仿真结果如图 1 所示。

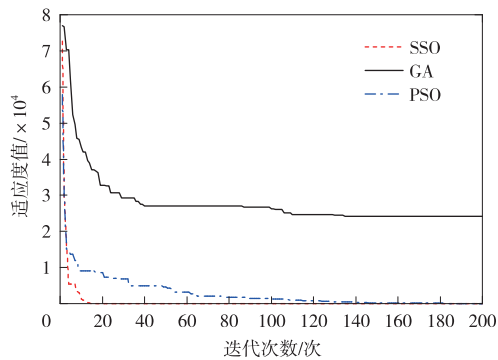


图 1 3 种算法 Sphere 函数适应度曲线对比

Fig. 1 Comparison of fitness curves of Sphere function for three algorithms

由图 1 可知,在种群大小为 30 和最大迭代次数为 200 的相同仿真参数情况下,对基准测试函数 Sphere 函数进行仿真,SSO 算法相较于 GA 算法和 PSO 算法适应度值更低,且收敛速度更快,全局搜索能力更强,搜索精度更高,也说明 SSO 算法的数学模型中相关参数的合理性。因此,SSO 算法性能更佳,将采用 SSO 算法对城轨列车速度曲线优化进行研究。

3 仿真与分析

3.1 列车参数及线路数据

仿真列车车型为 B 型车,B 型车相关参数如表 1 所示,线路数据如图 2 所示。

表 1 B 型车相关参数

Tab. 1 Related parameters of Type B car

列车参数	参数值
车型	B 型车
编组方式	三动三拖
列车长度/m	140
列车质量/t	194.295
列车基本阻力参数	$a=2.031; b=0.0622; c=0.001807$
最大加速度/(m/s^2)	1
最大减速度/(m/s^2)	1
回转质量系数	0.06
最大运行速度/(km/h)	80

3.2 算法参数设置

在仿真中,涉及的算法相关参数取值如表 2 所示。

表 2 算法相关参数值

Tab. 2 Values of algorithm-related parameters

算法相关参数	取值
种群大小/个	30
迭代次数/次	100
仿真步长/s	0.1

3.3 仿真结果

该线路区间设置计划运营时间为 200 s,计算出的

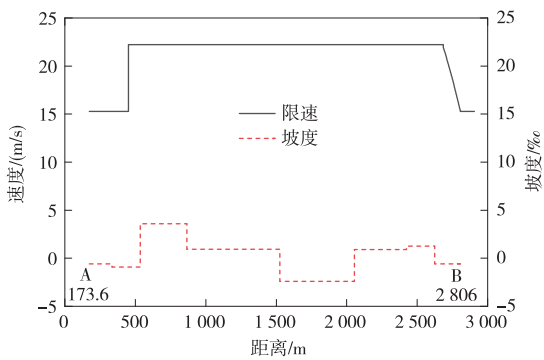


图 2 线路限速和坡度情况

Fig. 2 Speed limit and slope of line

最大运行能力曲线如图 3 所示,优化后的精子群算法优化 V-S 速度曲线如图 4 所示,精子群算法优化 V-T 速度曲线如图 5 所示,仿真得到的列车运行过程能耗、功率、加速度对比曲线如图 6 所示,各性能指标结果对比如表 3 所示。

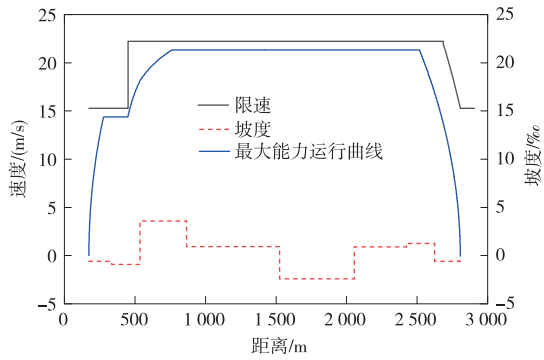


图 3 最大运行能力曲线

Fig. 3 Maximum running capability curve

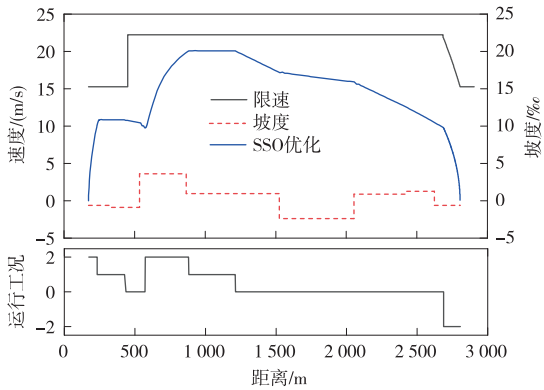


图 4 精子群算法优化 V-S 速度曲线

Fig. 4 Optimization of V-S speed curve by Sperm Swarm Optimization algorithm

由图 3~图 5 可知,最大运行能力曲线更加陡峭,且加速度变化率更大,舒适性差。而精子群算法优化得到的列车运行 V-S 曲线比较平缓,可以看到,列车运行过程中的两次惰行切换点分别为 437.5 m 和

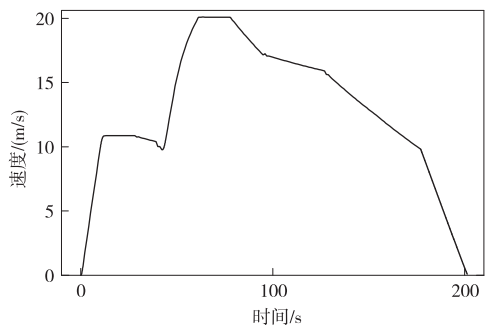


图 5 精子群算法优化 V-T 速度曲线

Fig. 5 Optimization of V-T speed curve by Sperm Swarm Optimization algorithm

1 212.9 m。当列车速度快要超过设计限速曲线时,则列车提前作出预判,改变列车运行工况,保证列车安全行驶。

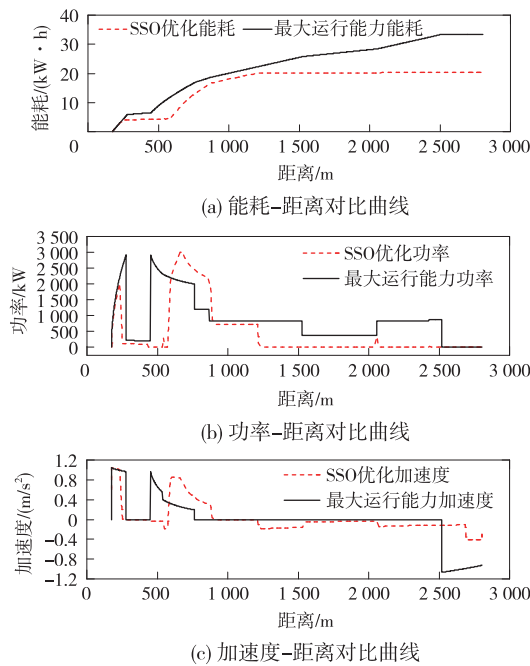


图 6 优化前后列车运行过程性能对比曲线

Fig. 6 Comparison of train operating performance curves before and after optimization

结合图 6(a) 和图 6(b) 可知,列车牵引能耗随着列车行驶距离的增加不断增加,列车功率受运行工况的影响。由列车运行工况可知,列车在牵引工况受到牵引力作用,列车加速,发动机处于耗能状态,功率出现峰值;列车在巡航工况,加速度为 0,匀速运行,仅克服列车运行总阻力而产生能耗;列车在惰行工况仅受列车运行总阻力,速度缓慢减小,不耗能;列车在制动工况,功率为 0,也没有能耗。由图 6(a) 可知,SSO 优化能耗曲线在 1 212.9 m 之后基本水平,列车不再输出能量,而最大运行能力曲线在 2 518.1 m 之前一直

在耗能,说明 SSO 算法优化的列车速度曲线在保证准时性的前提下尽可能多采用惰行工况,降低列车运行总能耗。由图 6(c) 可知,在 2 518.1 m 位置处,SSO 优化加速度没有产生大幅度变化,且在转变为制动工况时 SSO 优化加速度变化幅度小,不会给乘客带来强烈不适,满足乘客的舒适性要求。

表 3 列车运行性能指标结果对比

Tab. 3 Comparison of train running performance indicators

优化目标	最大运行能力	SSO 优化
时间/s	153.5	201.3
能耗/(kW·h)	33.452 8	20.276 7
停车误差/m	0.031 8	0.013 5
冲击率/(m/s ³)	2.782 5	0.021 858

由表 3 可知,SSO 算法优化后运行时间与计划运行时间的误差更小,准时性更好,可达到更好的优化效果;SSO 算法优化后运行速度曲线能耗更低,有更高的节能率,节能率达到 39.4%;SSO 算法优化后的列车停车误差更小,仅有 0.013 5 m,比最大运行能力的停车误差降低 57.5%;SSO 算法优化得到的运行速度曲线冲击率更小,舒适性更强。

综上所述,精子群算法优化列车运行速度曲线收敛速度快,算法性能更好,能够有效优化速度曲线,提高列车的运行效率、安全性和舒适性,同时降低运行能耗和停车误差。

3.4 算法的适应性分析

(1) 对时间的适应性

在实际线路中,不同站间的距离各不相同,运行时间也不相同,因此有必要验证算法对时间的适应性。在原线路的基础上,设置 2 组分别为 190 s 和 210 s 的计划运行时间进行仿真,得到不同计划运行时间 V-S 曲线如图 7 所示,不同计划运行时间列车运行过程能耗、功率、加速度对比曲线如图 8 所示,3 组计划运行时间的性能指标对比如表 4 所示。

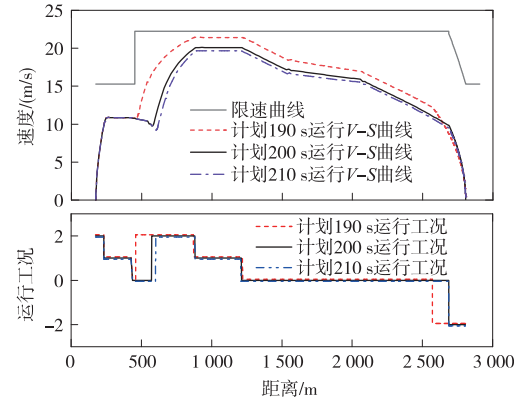


图 7 不同计划运行时间 V-S 曲线

Fig. 7 V-S curves of different planned running times

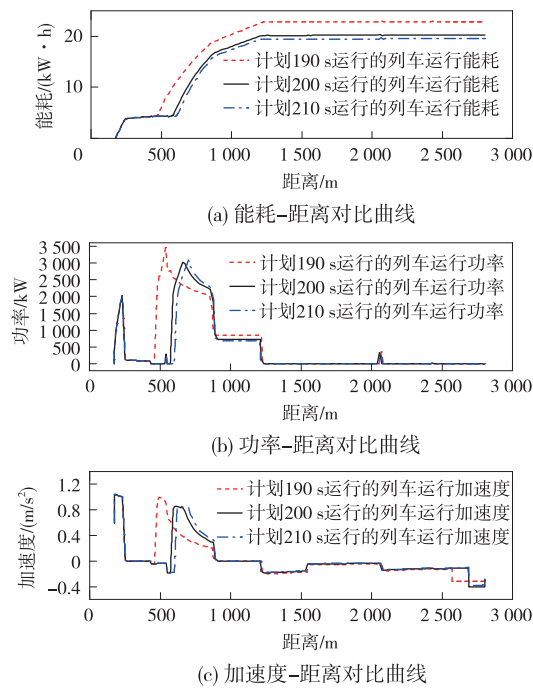


图 8 不同计划运行时间列车运行过程性能对比曲线
Fig. 8 Comparison of train running performance curves under different planned running times

表 4 SSO 算法在 3 组计划运行时间下性能指标结果对比
Tab. 4 Comparison of performance indicators of SSO algorithm under three groups of planned running times

计划时间/s	运行能耗/(kW·h)	运行时间/s	停车误差/m	超限速度误差/(m/s)	冲击率/(m/s ³)
190	22.891 6	190.45	0.018 5	0	0.022 838
200	20.276 7	201.30	0.013 5	0	0.021 858
210	19.552 3	207.15	0.017 4	0	0.021 528

由图 7、图 8 仿真结果可知,当计划运行时间为 190 s 时,列车运行 V-S 曲线在最上方,说明列车在限速范围内尽可能提高运行速度;当计划运行时间为 210 s 时,列车运行 V-S 曲线在最下方,说明列车充分利用计划运行时间,采用合适的运行速度准点到站。

从表 4 中 SSO 算法在不同计划运行时间下的性能指标来看,当计划运行时间为 190 s 时,能耗较多,冲击率较大,但能满足乘客的舒适性要求;当计划运行时间为 210 s 时,能耗较少,冲击率较小,但准时性相比较差;计划运行时间越短,越耗能,舒适性变差;计划运行时间越长,尽可能多地使用惰性工况,越节能,舒适性越好;说明 SSO 算法以牺牲可接受的运行时间和运行速度,以及可接受的准时性来降低运行能耗。

综上所述,精子群优化算法在列车 ATO 运行中能够灵活应对不同的计划运行时间,得到最优列车运行速度曲线,降低列车运行能耗,同时满足准点、停车精度和超限速度误差的要求,并可提高乘客的舒适性。

(2) 对复杂限速的适应性

在特殊线路上,由于上、下坡等特殊原因会有更多限速要求。因此,也有必要验证算法对更复杂限速线路情况的适应性,在原线路的基础上设定两组更加复杂的限速情况 2 和限速情况 3 进行仿真。新设定的两组限速情况与原限速情况对比如图 9 所示。

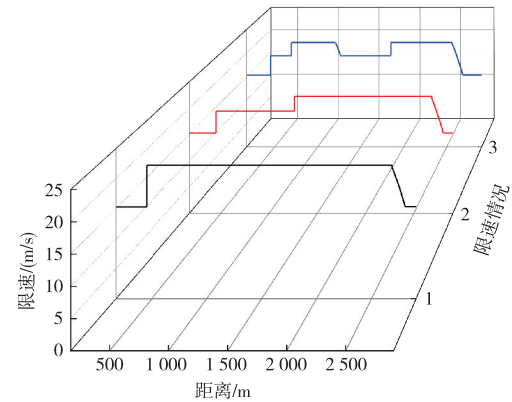


图 9 3 组限速情况对比
Fig. 9 Comparison of speed limits among three groups

对于限速情况 2 和限速情况 3,在原始坡度和其他仿真参数不变的基础上,分别设置一系列不同的计划运行时间进行对照仿真。针对限速情况 2,设置 3 个不同的计划运行时间分别为 195,200,205 s。针对限速情况 3,设置 3 个不同的计划运行时间分别为 200,205,210 s。3 组计划运行时间在限速情况 2 下的 V-S 曲线如图 10 所示,3 组计划运行时间性能对比如表 5 所示。3 组计划运行时间在限速情况 3 下的 V-S 曲线如图 11 所示,3 组计划运行时间性能对比如表 6 所示。

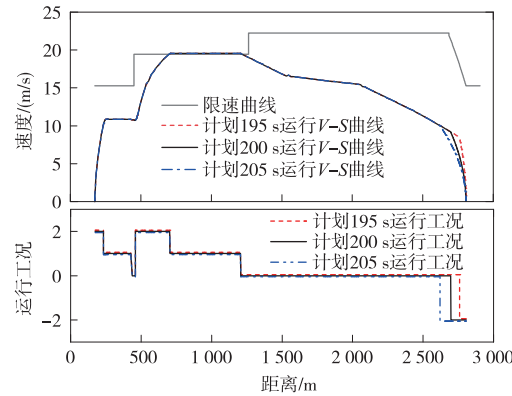


图 10 3 组计划运行时间在限速情况 2 下的 V-S 曲线
Fig. 10 V-S curves of three groups of planned running times under speed-limit condition 2

由表 6 可知,SSO 算法在列车 ATO 运行过程中适用于不同复杂程度的限速情况,也适用于限速变化幅度大且距离短的线路情况,控制效果能够使列车运行

安全且平稳,更加节能,且能够准点到站并精准停车,给乘客更加舒适的乘车体验,也验证 SSO 算法在不同限速情况下能够灵活应对计划运行时间的改变。

表 5 3 组计划运行时间在限速情况 2 下经过 SSO 算法优化的性能指标

Tab.5 Performance indicators of three groups of planned running times optimized by SSO algorithm under speed-limit condition 2

计划时间/s	运行能耗/(kW·h)	运行时间/s	停车误差/m	超限速误差/(m/s)	冲击率/(m/s ³)
195	20.197 3	194.35	0.008 6	3.791 6	0.026 224
200	20.197 3	199.90	0.014 1	3.791 6	0.022 307
205	20.197 3	205.05	0.019 3	3.791 6	0.020 871

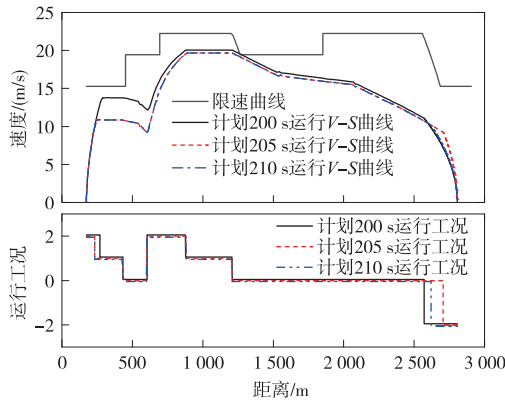


图 11 3 组计划运行时间在限速情况 3 下的 V-S 曲线
Fig. 11 V-S curves of the three groups of planned running times under speed-limit condition 3

表 6 3 组计划运行时间在限速情况 3 下经过 SSO 算法优化的性能指标

Tab.6 Performance indicators of three groups of planned running times optimized by SSO algorithm under speed-limit condition 3

计划时间/s	运行能耗/(kW·h)	运行时间/s	停车误差/m	超限速误差/(m/s)	冲击率/(m/s ³)
200	20.671 7	201.40	0.023 8	0.014 7	0.021 265
205	19.552 3	205.75	0.012 6	0	0.022 106
210	19.552 3	211.65	0.021 5	0	0.020 367

4 结 论

通过建立列车动力学模型进行列车在运动过程中的受力分析,以节能性、准时性、停车精确性、超限速误差和舒适性为优化目标,建立基于加权求和的多目标优化模型。采用 SSO 算法求解建立的列车速度曲线优化模型,能够获得优化模型的最优解,生成各项指标较优的目标速度曲线。通过模拟研究,主要结论如下。

(1)SSO 算法收敛速度快,算法性能更好,能够有效优化列车速度曲线,提高列车的运行效率、安全性和

舒适性,同时降低运行能耗和停车误差,相对于最大运行能力曲线有更高的节能率,节能率达到 39.4%,且停车误差更小,仅有 0.013 5 m,比最大运行能力的停车误差降低 57.5%。

(2)通过设定不同的计划运行时间和不同的限速情况分别进行对照仿真,验证算法能够在特殊情况下弹性调整列车运行时间并准点到站,同时能够在更加复杂限速条件下得到最优列车速度曲线。

参考文献:

[1] 丁鹏飞,董恩丞,姜军,等.城轨列车牵引网运行电压仿真分析[J].电工技术,2023(20):167-169.
DING Pengfei, DONG Encheng, JIANG Jun, et al. Simulation and Analysis of Operation Voltage of Traction Network for Urban Rail Train[J]. Electric Engineering, 2023(20):167-169.

[2] LI K, WANG Z S. Simulation of Comfort Algorithm for Automatic Driving of Urban Rail Train[J]. International Journal of Advanced Network, Monitoring and Controls, 2023,8(2):72-80.

[3] WANG D H, WU J J, WEI Y, et al. Energy-saving Operation in Urban Rail Transit: a Deep Reinforcement Learning Approach with Speed Optimization[J]. Travel Behaviour and Society, 2024, 36:100796.

[4] 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.

[5] DENG L B, ZHONG M, XU J, et al. Train Operation Curve Optimization for an Urban Rail Interval with Multi-parameter Adjustment[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2022,2676(12):811-826.

[6] LU G C, HE D Q, ZHANG J L. Energy-saving Optimization Method of Urban Rail Transit Based on Improved Differential Evolution Algorithm[J]. Sensors,2022,23(1):378.

[7] CHEN D W, WU Z J, LU Y Q, et al. Rapid Algorithm for Generating and Selecting Optimal Metro Train Speed Curves Based on Alpha Zero and Expert Experience[J]. Promet-Traffic and Transportation, 2024,36(3):560-579.

[8] WANG G Y, XIAO S, CHEN X, et al. Application of Genetic Algorithm in Automatic Train Operation[J]. Wireless Personal Communications, 2018,102(2):1695-1704.

[9] DENG L B, CAI L, ZHANG G Q, et al. Energy Consumption Analysis of Urban Rail Fast and Slow Train Modes Based on Train Running Curve Optimization[J]. Energy Reports, 2024,11:412-422.

[10] FERNÁNDEZ-RODRÍGUEZ A, SU S, FERNÁNDEZ-CARDADOR A, et al. A Multi-objective Algorithm for Train Driving Energy Reduction with Multiple Time Targets[J]. Engineering Optimization, 2021,53(4):719-734.

[11] 褚心童,张亚东,郭进,等.基于蚁群算法的列车节能驾驶策略优化算法研究[J].铁道标准设计,2021,65(2):159-164.
CHU Xintong, ZHANG Yadong, GUO Jin, et al. An Optimization Algorithm for Train Energy-saving Driving Strategy Based on Ant Colony Algorithm[J]. Railway Standard Design, 2021,65(2):159-164.

- and Robust Regression[J]. Railway Standard Design, 2017,61(2): 43-47.
- [21] 熊丽娟,朱洪涛,魏晖,等. 基于轨道相对测量数据识别曲线关键参数的研究[J]. 铁道学报,2018,40(4):127-134.
- XIONG Lijuan, ZHU Hongtao, WEI Hui, et al. Research on Curve Key-parameter Identification Based Upon Track Relative Survey Data [J]. Journal of the China Railway Society, 2018,40(4):127-134.
- [22] 易思蓉. 铁路选线设计[M]. 4版. 成都:西南交通大学出版社, 2017:96-101.
- [23] 魏晖,朱洪涛,赵国堂,等. 基于中点弦测模型的无砟轨道精测量迭代求解[J]. 西南交通大学学报,2015,50(1):131-136.
- WEI Hui, ZHU Hongtao, ZHAO Guotang, et al. Iterative Algorithm of HSR Ballastless Track Realignment Calculation Based on MCO Model[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2015,50(1): 131-136.
- [24] GAO Z, XIAO X, FANG Y P, et al. A Selective Review on Information Criteria in Multiple Change Point Detection[J]. Entropy, 2024, 26(1):50.
- [25] HAYNES K,FEARNHEAD P, ECKLEY I A. A Computationally Efficient Nonparametric Approach for Changepoint Detection[J]. Statistics and Computing, 2017,27(5):1293-1305.
- [26] TRUONG C, OUDRE L, VAYATIS N. Selective Review of Offline Change Point Detection Methods [J]. Signal Processing, 2020, 167:107299.
- [27] 茆诗松,王静龙,濮晓龙. 高等数理统计[M]. 2版. 北京:高等教育出版社,2006:147-158.
- (编辑:王婷)
-
- (上接第30页)
- [12] 聂莹莹,谢刚,郭彦宏,等. 基于改进 DE 的城轨列车节能速度曲线研究[J]. 铁路计算机应用,2020,29(11):30-35.
- NIE Yingying, XIE Gang, GUO Yanhong, et al. Research on Energy Saving Speed Curve of Urban Rail Train Based on Improved Differential Evolution Algorithm[J]. Railway Computer Application, 2020, 29(11):30-35.
- [13] 王一栋,肖宝弟,岳丽丽,等. 改进麻雀算法在列车 ATO 多目标优化中的应用[J]. 铁道标准设计,2024,68(7):192-199.
- WANG Yidong, XIAO Baodi, YUE Lili, et al. Application of Improved Sparrow Algorithm in Multi-objective Optimization of Train ATO[J]. Railway Standard Design, 2024,68(7):192-199.
- [14] 黄江平,程绍榕. 改进粒子群算法的轨道列车节能控制优化[J]. 华东交通大学学报,2020,37(2):56-63.
- HUANG Jiangping, CHENG Shaorong. Study on Energy-saving Control of Railway Train Based on Improved PSO[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2020,37(2):56-63.
- [15] 宿帅,唐涛,阴佳腾,等. 城轨列车节能运行控制与优化方法[M]. 北京:北京交通大学出版社,2021.
- [16] 景苏银,李华. 城市轨道交通列车混合编组运行的仿真与优化[J]. 城市轨道交通研究,2014,17(3):75-78.
- JING Suyin, LI Hua. Simulation and Optimization of Mixed Urban Rail Transit Train Marshalling[J]. Urban Mass Transit, 2014, 17(3):75-78.
- [17] ALBRECHT A, HOWLETT P, PUDNEY P, et al. The Key Principles of Optimal Train Control; Part 1: Formulation of the Model, Strategies of Optimal Type, Evolutionary Lines, Location of Optimal Switching Points[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2016,94:482-508.
- [18] 郑晓彬,柏赞,周姗姗. 基于实测数据的地铁列车能耗特征分析[J]. 交通运输系统工程与信息,2021,21(6):264-271.
- ZHENG Xiaobin, BAI Yun, ZHOU Shanshan. Metro Train Energy Consumption Characteristics Based on Empirical Data Analysis[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2021,21(6):264-271.
- [19] 杨辉,李莹,周艳丽. 基于 APSO 的地铁节能运行速度优化研究[J]. 铁道科学与工程学报,2020,17(8):1926-1934.
- YANG Hui, LI Ying, ZHOU Yanli. Research on Optimization of Energy-saving Operation Speed of Metro Based on APSO[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2020,17(8):1926-1934.
- [20] 汤旻安,王茜茜,蔚璠. 黄金比例 NSGA-II 算法在动车组列车多目标优化中的应用[J]. 铁道科学与工程学报,2020,17(10):2469-2478.
- TANG Minan, WANG Qianqian, YU Fan. Application of Golden Ratio NSGA-II Algorithm in Multi-objective Optimization of EMU Trains [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2020,17(10): 2469-2478.
- [21] 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):2704-2712.
- XU Kai, WU Lei, YANG Feifeng. Automatic Train Operation System in Urban Rail Transit Based on PSO-ICS Algorithm Optimization[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2017,14(12):2704-2712.
- [22] 赵立丹. 列车自动驾驶节能运行智能优化及深度强化学习[D]. 北京:北京交通大学,2020.
- ZHAO Lidan. Intelligent Optimization and Deep Reinforcement Learning for Energy-efficient Train Operation of Automatic Driving[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2020.
- [23] 黄璞,张琨,杜庆. 城市轨道交通列车自动控制停站舒适度研究[J]. 城市轨道交通研究,2023,26(6):39-43,49.
- HUANG Pu, ZHANG Kun, DU Qing. Research on Urban Rail Transit Train Stop-ping Comfort Level under Automatic Control[J]. Urban Mass Transit, 2023,26(6):39-43,49.
- [24] 李婉婷. 基于分层学习黄金正弦—鲸鱼算法的列车速度曲线优化[D]. 长沙:长沙理工大学,2022.
- LI Wanting. Multi-objective Optimization of Train Speed Based on Hierarchical Learning Golden Sine-whale Algorithm [D]. Changsha: Changsha University of Science and Technology, 2022.
- [25] SHEHADEH H A, AHMEDY I, IDRIS M Y I. Sperm Swarm Optimization Algorithm for Optimizing Wireless Sensor Network Challenges [C]//Proceedings of the 6th International Conference on Communications and Broadband Networking. Singapore Singapore. ACM,2018: 53-59.
- (编辑:夏梦然)