

考虑轮轨黏着的高速列车多目标速度曲线优化

付雅婷^{1, 2, 3}, 朱宏涛^{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. 江西省先进控制与优化重点实验室, 江西 南昌 330013; 3. 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: 高速列车运行环境复杂多变, 现有的给定运行速度目标曲线主要考虑列车运行的安全性和正点性, 难以改善列车的其他运行性能。为了满足高速列车日益增加的行车需求, 并改善列车的运行性能, 本文针对安全、节能、正点及舒适多个目标, 考虑轮轨间最优黏着, 提出一种改进的多目标运行速度优化方法。首先, 在满足区间限速以及列车动力学模型约束的前提下, 建立安全、节能、正点、舒适四个评价指标, 构成高速列车运行过程多目标优化模型; 其次, 在节能模型中考虑轮轨间黏着的影响, 优化牵引/制动力使得其保持在最优黏着范围内, 节约运行能耗; 最后, 采用基于参考点的非支配排序的优化算法(NSGA-III)对多目标运行速度曲线进行优化。对真实线路的仿真验证表明, 本文提出的考虑轮轨黏着的优化效果显著提高, 尤其在节能方面; 优化算法相较于 GA 和 NSGA-II, 本文的 NSGA-III 算法在收敛效果和收敛速度上均为更优。

关键词: 高速列车; 多目标优化; 黏着; NSGA-III

中图分类号: U236

文献标志码: A

Multi-objective speed curve optimization of high-speed train considering wheel rail adhesion

Fu Yating^{1,2,3}, Zhu Hongtao^{1,2,3}

(1. School of Electrical & Automation Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China; 2. Jiangxi Advanced Control and Optimization Key Laboratory, Nanchang 330013, China; 3. State Key Laboratory for Performance Monitoring and Guarantee of Rail Transit Infrastructure, Nanchang 330013, China)

Abstract: The operation environment of high-speed trains is complex and changeable. The existing target curve of given operation speed mainly considers the safety and punctuality of train operation, which is difficult to improve other operation performance of trains. In order to meet the increasing traffic demand of high-speed trains and improve the running performance of trains, this paper proposes an improved multi-objective speed optimization method for safety, energy saving, punctuality and comfort, considering the optimal adhesion between wheels and rails. First of all, on the premise of meeting the restriction of interval speed limit and train dynamics model, four evaluation indexes of safety, energy saving, punctuality and comfort are established to form a multi-objective optimization model of high-speed train operation process; Secondly, the influence of adhesion between wheel and rail is considered in the energy-saving model, and the traction/braking force is optimized to keep it within the optimal adhesion range, so as to save operating energy consumption; Finally, the non-dominated running speed curve. The simulation results of real lines show that the optimization effect of considering wheel

收稿日期: 2022-10-21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (U2034211, 52162048, 62003138); 江西省科技专项 (20203AEI009); 江西省青年科学基金重点资助项目 (20192ACBL21005); 流程工业综合自动化国家重点实验室联合基金 (2022-KF-21-03)

rail adhesion proposed in this paper is significantly improved, especially in energy saving; Compared with GA and NSGA-II, the NSGA-III algorithm in this paper has better convergence effect and convergence speed.

Key words: High speed train; multi objective optimization; adhesion; NSGA-III

随着高速列车运行速度以及行车密度的不断增加,列车运行中需要优化的目标也在不断增多^[1]。高速列车运行过程优化往往需要同时满足安全、节能、正点、舒适等多个目标,由于这些目标之间存在内部冲突,一个目标的优化往往要以其他目标的劣化为代价^[2]。例如为了正点到达车站,行驶中常常加速,则会导致旅客舒适度降低;为了节约能耗,司机尽可能多的采用惰行工况,则会导致列车晚点到站。为此,需要在四个目标中间做出协调和折中处理,不能过分偏袒某一目标,要尽可能使总体的目标达到最优^[3]。而列车需要在安全稳定的速度曲线下有序运行并且最大程度地节约列车运行过程中产生的能耗^[4]。与此同时,高速列车系统主要的能耗来源于运行过程中牵引/制动力所产生的能耗^[5]。而黏着力作为驱使列车运行的最终动力,其上限就是可利用牵引/制动力的最大值。若牵引/制动力超过当前位置的最大黏着力,不仅会降低电机功率,造成极大的能源浪费,而且严重时会导致车轮空转,发生安全事故^[6]。因此,若能将牵引/制动力约束在最大黏着力以下,则对降低能耗有着极大的帮助。

针对列车运行过程中的多目标优化问题,以及如何充分利用轮轨间黏着,国内外学者展开了诸多深入的研究与分析。张京^[7]将遗传算法与粒子群优化算法相结合,优化工况转换点,以此得到最优的速度曲线。张惠茹^[8]提出一种改进的非支配排序遗传算法,并通过实际线路数据生成优化后的节能驾驶曲线。李杰^[9]将新型人群搜索算法用于高速列车自动驾驶曲线优化过程。Lin J^[10]提出了一种改进的遗传算法,用于优化运行曲线的多目标模型。Li Wei^[11]针对高速列车 ATO 系统的特点,设计了基于萤火虫算法的列车运行曲线优化方法。李政毅^[12]发现在轮轨黏着特性曲线中存在当前轨面的最佳黏着点,在该点能够为列车提供更大的牵引力。李斌^[13]等研究了不同的黏着系数变化引发的列车控制力差异,研究表明轮轨间黏着不足将导致机车的最大牵引力不能有效发挥。吴业庆^[14]提出一种辨识最优蠕滑的方法,实现了最大黏着系数的利用,为稳定发挥牵引力提供了指导。B Wu^[15]研究了牵引过程中低黏着条件下的高速列车轮轨间力相互作用的数值。G Xiao^[16]提出了一种改进的防滑控制算法

用于调整牵引功率,以此确保最大程度地利用轮轨黏着。综合国内外相关文献,本文设想是否可以将高速列车运行多目标优化与轮轨间黏着相结合,使得优化效果更好。

基于上述分析,可以看出优化牵引/制动力尽可能不超过最大黏着力是节能减排的重要途径。对此,本文以高速列车实际线路数据为基础,将高速列车安全行驶、运行能耗、准点到站、乘坐舒适设为评价指标,区间固定限速条件与列车动力学方程为约束,建立高速列车运行过程多目标优化模型。同时在仿真中设定不同的最大黏着系数以此模拟实际驾驶中列车经过的不同轨面状况,在节能评价指标中将牵引/制动力超出最大黏着力的部分视为能源浪费。最后利用 NSGA-III 算法对模型进行优化,并与 GA 算法、NSGA-II 算法进行对比,验证方法的有效性和可行性。

1 高速列车纵向动力学模型

参考《列车运行控制系统》^[17],对运行过程中的高速列车进行受力分析,得到如下列车动力学方程:

$$\begin{cases} \frac{dt}{ds} = \frac{1}{v} \\ m \frac{dv}{dt} = U - f_0 - f_j \end{cases} \quad (1)$$

其中: m 为列车的质量; t 为列车当前运行时间; s 为列车当前位置; v 为列车当前运行速度; U 为电机施加的控制力, ($U > 0$ 为牵引力, $U < 0$ 为制动力); f_0 为基本阻力,可通过列车的牵引/制动特性曲线确定(图 1); f_j 为附加阻力,由列车当前位置的线路条件(坡道、曲线、隧道)确定,其计算公式如下:

$$f_j = w_i + w_r + w_s \quad (2)$$

其中, w_i 、 w_r 、 w_s 为列车当前所受到的坡道、曲线、隧道附加阻力。坡道附加阻力是列车在坡道上运行时,受到列车重力产生的沿运行方面相反的分力,其表达式如公式(3)所示;曲线附加阻力由很多因素有关,难以用理论公式计算,通常采用经验公式计算,其表达式如公式(4)所示;隧道附加阻力亦是用对应的经验公式求解,其表达式如公式(5)所示。

$$w_i = 1000g \frac{BC}{AB} = 1000g \cdot \sin \theta \quad (3)$$

其中, g 为重力加速度, BC 为标高差, AB 为坡道长度, θ 为坡道和水平方向的夹角。

$$w_r = \frac{600}{R} g \quad (4)$$

其中, R 为曲线半径, g 为重力加速度。

$$w_s = 0.00013 \cdot L_s \quad (5)$$

其中, L_s 为隧道长度。

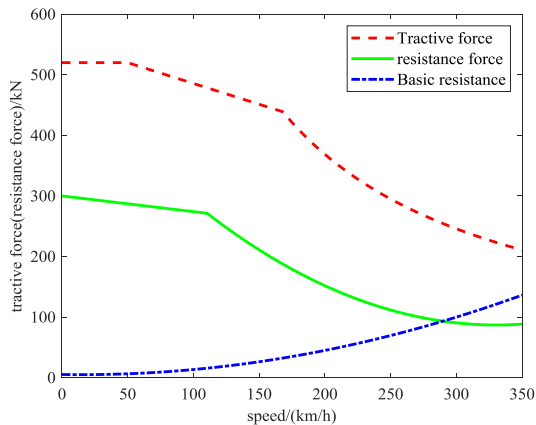


图1 CRH380AL型列车牵引/制动特性曲线

Fig.1 Traction/braking characteristic curve of CRH380AL train

1.1 多目标评价指标

本文建立的四个目标的评价模型如下:

①安全评价指标

高速列车在运行过程中的安全主要体现在不超速运行, 其安全评价模型为:

$$K_v = \frac{1}{V(l) - v} \quad (6)$$

其中: $V(l)$ 为高速列车当前位置 l 所对应的限速, v 为当前列车的运行速度, K_v 越小代表其安全性越高。

②节能评价指标

将运行线路划分为 N 个区段, 每段对应着不同的牵引/制动力和走行距离, 乘积得到每个区段的能耗, 所有区段的累加就是总适应度值^[18]。其节能评价模型为:

$$K_e = \sum_{i=1}^N U_i \cdot \Delta S_i \quad (7)$$

其中: U_i 为当前区段的控制力, ΔS_i 为当前区段的走行距离。

而在列车运行过程中, 轮对与钢轨之间的黏着系数会随着蠕滑速度不断改变。如图 2 所示, 黏着系数会随着轮轨间的蠕滑速度先增大到一个峰值

点, 也就是最大黏着系数, 之后再减小。在峰值点处轮轨可以传递最大的牵引/制动力, 也就是达到了最优黏着利用。峰值点左边为黏着区, 在这部分轮轨间处于黏着状态, 车轮不会打滑, 力得到了很好的发挥; 峰值点右边为滑动区, 在这部分车轮会发生打滑现象, 这时牵引/制动力是无法使用的^[19]。

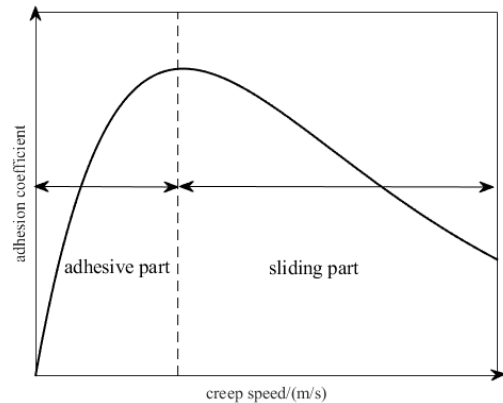


图2 列车运行中的轮轨黏着曲线

Fig.2 Wheel rail adhesion curve during train operation

为了保证牵引/制动力得到充分利用, 防止能源浪费, 应尽可能的让列车轮轨黏着状态处于峰值点或左侧黏着区。而在运行过程中, 列车会经过不同的路况, 对应着不同的最大黏着系数^[20]。为此, 本文考虑是否能在节能模型中加入黏着力影响, 将牵引/制动力超出当前路况的最大黏着力的部分视为浪费, 对超出的部分进行优化, 使其尽可能的减小, 以此达到节能的目的。为了验证这个想法, 本文在仿真中将实验线路按照里程均分为三段, 分别对应雨雪、潮湿、干燥三种轨面状态, 对应的最大黏着系数和黏着特性曲线如表 1、图 3 所示^[21]:

表 1 不同轨面状况对应的轨面系数

Tab.1 Rail surface coefficient corresponding to different rail surface conditions

Rail surface status				Maximum
	a	b	c	adhesion coefficient
Dry rail surface	0.54	1.0	1.2	0.27
Wet rail surface	0.54	0.72	1.2	0.13
Rain and snow rail surface	0.54	0.52	1.2	0.05

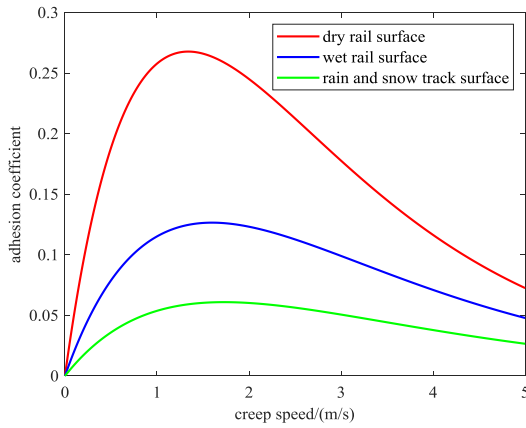


图3 不同轨面黏着特性曲线

Fig.3 Adhesion characteristic curve of different rail surfaces

根据表 1 可知在雨雪、潮湿、干燥三种轨面状态下的最大黏着系数,接着利用公式(8)求出对应的最大黏着力,其表达式如下所示:

$$F_a = \mu mg \quad (8)$$

综合上述分析,本文对原先的节能评价模型提出改进,在计算原有能耗的基础上再考虑当前路况下最大黏着力对于消耗能源的影响。首先求出列车当前时刻所处公里标、运行速度和运行工况,然后计算出对应的最大黏着力、牵引/制动力,接着对前者超出后者的部分进行优化,使其尽可能减小。改进后的节能评价模型表达式如下:

$$\begin{aligned} \text{if } U_i > F_a, K_e &= \sum_{i=1}^N U_i \cdot \Delta S_i + (U_i - F_a) \cdot \Delta S \\ \text{if } U_i = F_a, K_e &= \sum_{i=1}^N U_i \cdot \Delta S_i \end{aligned} \quad (9)$$

其中: U_i 为当前区段的牵引/制动力, F_a 为当前区段对应的最大黏着力, ΔS_i 为当前区段的走行距离。

③ 正点评价模型

以列车运行时间与运行图给定的站间运行时间的差值作为正点评价指标,其正点评价模型为:

$$K_t = T_0 - T \quad (10)$$

其中: T_0 为运行图给定的站间运行时间, T 为列车运行时间,两者越接近越好。 K_t 为正数代表提前到站,负数代表晚点到站。

④ 舒适评价模型

以两个相邻区段的加速度的差值作为舒适度评价指标,其舒适评价模型为:

$$K_a = \sum_{i=1}^N |a_i - a_{i-1}| \quad (11)$$

其中: a_i 为第 i 个区段的加速度。 K_a 越小说明加速度变换的越慢,旅客的舒适度越高。

综上所述,高速列车运行过程多目标优化模型如下:

$$f = \min G(K_v, K_e, K_t, K_a) \quad (12)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} \frac{dt}{ds} = \frac{1}{v} \\ m \frac{dv}{dt} = U - f_0 - f_j \\ v < V(l) \\ a \leq a_{\max} \\ v(0) = v(S) = 0 \end{cases} \quad (13)$$

其中: $G(\cdot)$ 为多目标适应度函数,公式(10)为模型约束。

2 基于参考点的非支配排序的高速列车多目标优化算法

目前已存在多种多目标优化算法,并在高速列车领域中展示了它们在处理两个或三个目标上的优势。随着高速列车行车密度与驾驶速度不断增加,列车运行过程中需要优化的目标也随之增加,传统的优化算法已经不足以解决新出现的问题,现在越来越需要开发出多目标优化算法来处理多目标(四个或以上目标)优化问题。为此,本文选取基于参考点的非支配排序的优化算法(NSGA-III)进行仿真优化。

NSGA-III 算法^[22]在带精英策略的非支配排序遗传算法(NSGA-II)的基础上提出改进。NSGA-II 算法^[23]引入精英策略提高了种群个体的质量,引入拥挤距离保证了种群个体的多样性,并利用快速非支配排序降低计算的复杂度。然而本文有四个需要优化的目标,需要选择具备处理四个或以上目标能力的优化算法。同时,当目标函数数量超过三个时,拥挤距离的计算成本较高,计算量极大,NSGA-III 算法在搜索前已经根据偏好设置好了搜索方向,有效地缩小了多维搜索空间的范围,极大地降低了算法运算量的同时提高了算法的收敛性。最重要的是在高速列车运行曲线优化中,对每个优化目标会存在不同程度地期望偏好,而 NSGA-III 算法会根据实际需求设置参考点和参考向量,以此达到有偏好的优化,更适用于高速列车优化的背景和本文所构建模型的求解。

2.1 数值求解方法

根据 NSGA-III 优化算法的基本思想, 结合高速列车行驶中的实际情况, 本文将 227.78km 的实验线路按照线路坡道变化, 划分为 0.7-0.8km 长度不一的 304 个区段, 一个区段只能存在一种运行工况并始终保持匀速运行。仿真中每隔 0.1 秒更新列车的运行速度、所处的公里标和控制工况, 结合图 1 求出当前列车的牵引/制动力。算法中将划分的各个区段作为单个个体, 对其进行优化, 并根据四个目标的适应度值判断优化是否成功。

基于上述的分析, 得到高速列车运行过程多目标优化算法的流程图如图 4 所示, 具体步骤如下^[24]:

Step 1 初始化参数, 包括种群数量、迭代次数、交叉率、变异率等, 设置结构体存放参数;

Step 2 种群初始化。根据实际线路数据和高速列车相关参数生成 50 组控制工况序列, 判断其是否符合实际驾驶情况, 并计算每组的适应度值和平均适应度值。

Step 3 从 50 组中选出总适应度值最小的一组作为初始工况序列, 作为初始种群 P, 记录四个优化目标的适应度值, 并生成参考点;

Step 4 对种群 P 进行交叉、变异操作, 得到另一个种群 Q, 检测其控制工况序列是否符合实际驾驶情况, 并计算四个优化目标的适应度值;

Step 5 合并种群 P 和种群 Q, 得到两倍个体数量的新种群 M;

Step 6 将新种群 M 进行快速非支配排序, 得到五个非支配层 F_1 、 F_2 、 F_3 、 F_4 、 F_5 ;

Step 7 优先从支配等级高的非支配层中的个体选出下一代种群, 若 F_1 、 F_2 、 F_3 、 F_4 、 $F_L(L \leq 5)$ 层中的个体总数恰好为 N, 则将以上非支配层中的个体选作下一代种群, 同时迭代次数增加 1, 执行 **Step 9**; 若 F_1 、 F_2 、 F_3 、 F_4 、 $F_L(L \leq 5)$ 层中的个体超过 N, 则先选择 F_1 、 F_2 、 F_3 、 F_4 、 F_{L-1} 层中的个体作为下一代种群, 剩余的个体执行 **Step 8** 进行选择;

Step 8 计算 F_L 层中每个个体与参考点的差值, 按照从小到大的顺序依次放入下一代种群, 直到数量刚好等于 N, 则不再选择个体, 生成新种群, 同时迭代次数增加 1;

Step 9 判断是否达到设定的迭代次数, 若是则终止迭代; 否则重复 **Step 4** 至 **Step 8**。

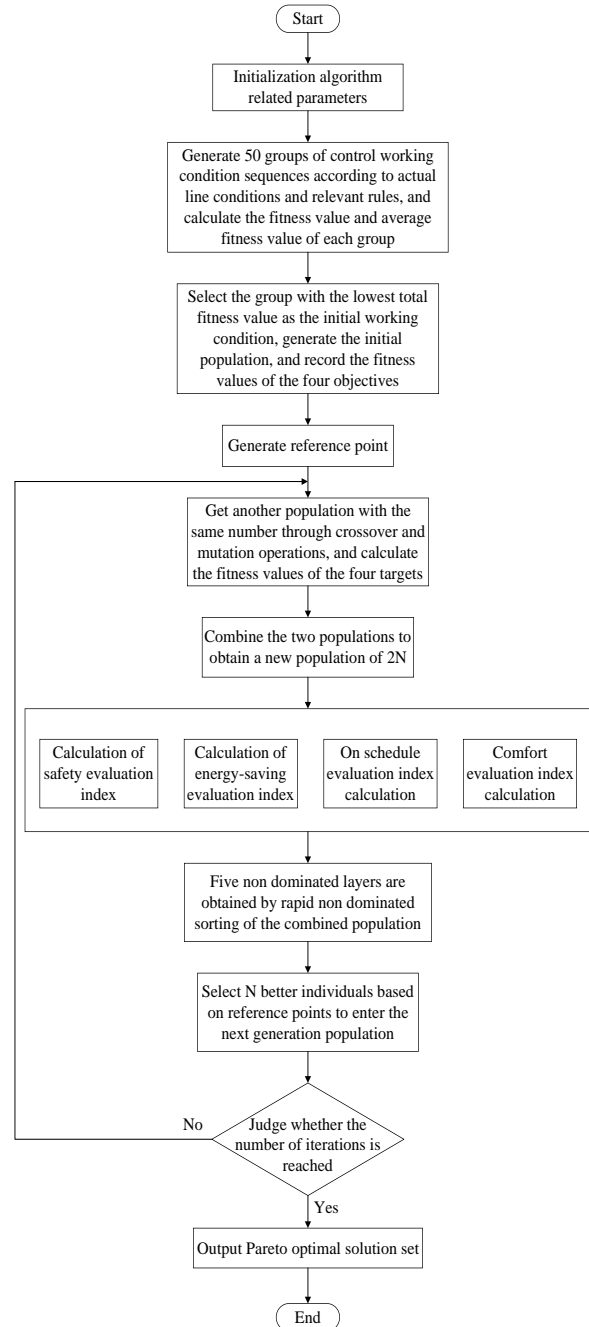


图4 高速列车多目标优化算法流程图

Fig.4 Flow chart of multi-objective optimization algorithm for high-speed trains

3 仿真实验结果分析

为了验证提出的基于参考点的非支配排序优化算法(NSGA-III)的改进模型对于高速列车运行过程多目标优化的有效性, 本文以京沪高铁线路上运营的 CRH380AL 高速列车为实验对象, 基于“泰安-徐州东”的实际运行数据进行仿真实验, 先将改进前后模型的优化结果进行对比, 验证模型的有效性; 再将 GA 算法、NSGA-II 算法与 NSGA-III 算法的优化结果进行对比, 验证方法的可行性。

仿真区段线路基本参数如表 2 所示^[25];

表 2 CRH380AL 型高速列车特性参数

Tab.2 Characteristic parameters of CRH380AL

high-speed train	
Parameter name	Parameter properties
Quality	890t
Maximum operating speed	380km/h
Continuous operation speed	350km/h
Emergency braking characteristics	$a_e=0.938\text{m/s}^2(v\leq 300\text{km/h})$
Emergency braking distance	$S_e\leq 3700\text{m}(v\leq 300\text{km/h})$
Service braking characteristics	$a_n=0.519\text{m/s}^2(v\leq 300\text{km/h})$
Service braking distance	$S_n\leq 4500\text{m}(v\leq 300\text{km/h})$

3.1 实验结果及分析

图 5 给出了 CRH380AL 高速列车某次在“泰安-徐州东”区间内运行的里程-速度曲线。其中，两站间的距离为 227.78km，运行图中给定的站间运行时间为 3088s，可接受的提前/晚点范围为 120s^[26]。

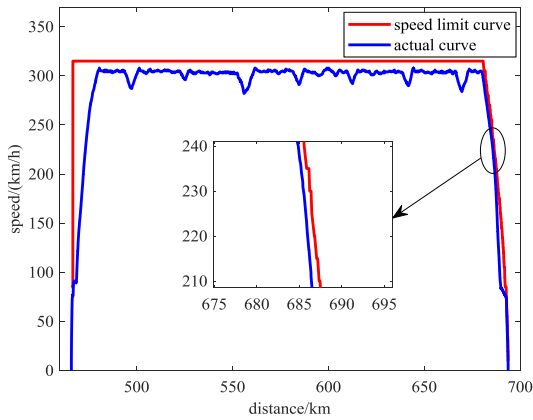


图5 动车组实际运行“V-S”曲线

Fig.5 Actual operation "V-S" curve of EMU

根据实际线路中的相关数据，计算出初始条件下四个目标的适应度值，如表 3 所示：

表 3 初始条件下的评价指标参数

Tab.3 Evaluation index parameters under

initial conditions	
Evaluating indicator	Parameter value
Safety evaluation index (h/km)	0.0785
Energy saving evaluation index (kN*km)	51349
On schedule evaluation index (s)	228
Comfort evaluation index (m/s ²)	0.2548

结合图 5 和表 3 可知列车运行过程中仍存在优化空间。例如对于安全目标，列车在制动过程中速度几乎接近当前路段的限制速度，存在很大的安全隐患；对于正点目标，速度过高导致时间超过了可接受的范围；对于节能目标有很大的改善空间。

为了提高列车运行过程中的整体效果，本文中在考虑轮轨间黏着的基础上，对节能评价模型作出了改进，并使用 NSGA-III 算法对四个目标进行仿真实验，得到优化后的速度-距离曲线如图 6 所示。

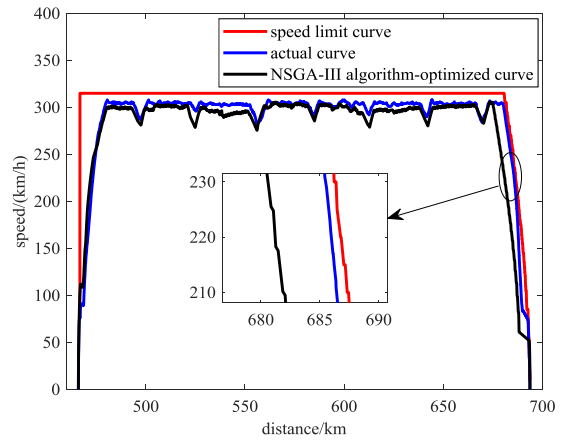


图6 动车组优化后的运行“V-S”曲线

Fig.6 Operation "V-S" Curve of EMU after optimization

优化仿真过程中进行了 100 次算法迭代，其总适应度值变化如图 7 所示：

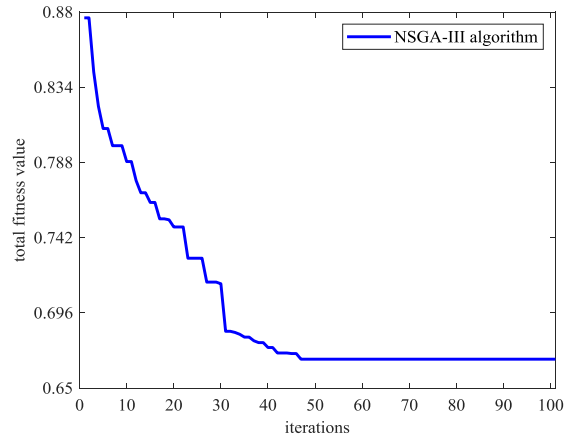


图7 NSGA-III算法优化过程

Fig.7 NSGA-III algorithm optimization process

将迭代 100 次后的结果进行计算，得到优化后的四项评价指标参数值，如表 4 所示：

表 4 优化后的评价指标参数

Tab.4 Optimized evaluation index parameters

Evaluating indicator	Parameter value
Safety evaluation index (h/km)	0.0529

Energy saving evaluation index (kN*km)	26118
On schedule evaluation index (s)	32
Comfort evaluation index (m/s ²)	0.0819

Comfort evaluation index (m/s ²)	0.0819	0.0794
--	--------	--------

通过图 6 可以直观地看出,列车在制动过程中,优化后的制动速度远远低于当前路段的限制速度,安全性能大大增加。对比表 3、4 可知,优化后所有的评价指标均得到提升,运行曲线安全性更高、能耗减少了一倍左右、到站时间更接近运行图给定的站间运行时间、舒适度也大幅度提升。为了进一步说明本文方法的有效性,下面将从模型和算法两个方面进行对比。

①模型的对比

改进的节能评价模型为公式(6),在公式(3)的基础上考虑了不同轨面的黏着系数,将牵引/制动力超出最大黏着力部分视为能源浪费进行优化,以此达到更好的节约能耗效果。为了验证改进模型的有效性,接下来用未改进的节能评价模型进行优化,得到结果如下所示。

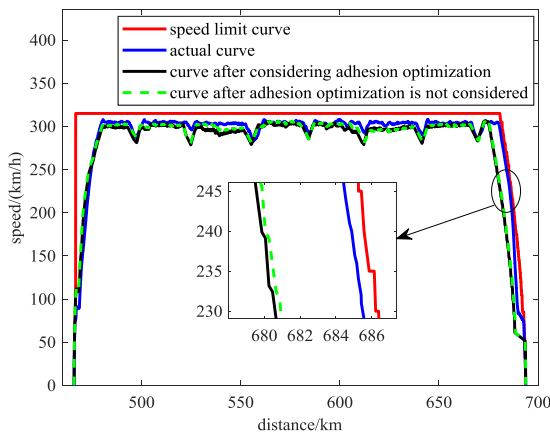


图8 不同模型对比的运行“V-S”曲线

Fig.8 Operation "V-S" curve compared with different models

表 5 不同模型优化后的评价指标参数对比

Evaluating indicator	Consider	No
	adhesion	consideration of adhesion
Safety evaluation index (h/km)	0.0529	0.0584
Energy saving evaluation index (kN*km)	26118	31541
On schedule evaluation index (s)	32	47

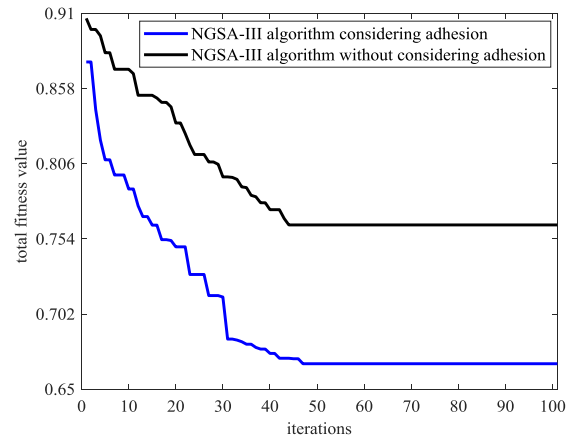


图9 不同模型优化过程对比

Fig.9 Comparison of optimization processes of different models

通过表 5 可以得出,未改进的节能评价指标比改进后的节能评价指标增加了 20.76%,总适应度值增加了 14.38%。仿真结果说明改进后的节能模型降耗成效显著,考虑不同轨面状态下的黏着力对提高能源开发利用、有效抑制不合理的能源浪费至关重要。

②算法的对比

为了验证 NSGA-III 算法是否适用于优化高速铁路运行过程中的目标曲线,本文选择 GA 算法与 NSGA-II 算法作为对比对象,从收敛速度、收敛结果两个方面进行比较,以此验证 NSGA-III 算法的可行性。

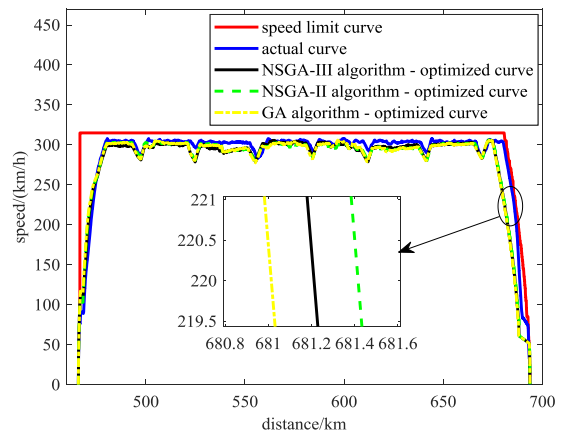


图10 不同算法对比的运行“V-S”曲线

Fig.10 Comparison of optimization processes of different models

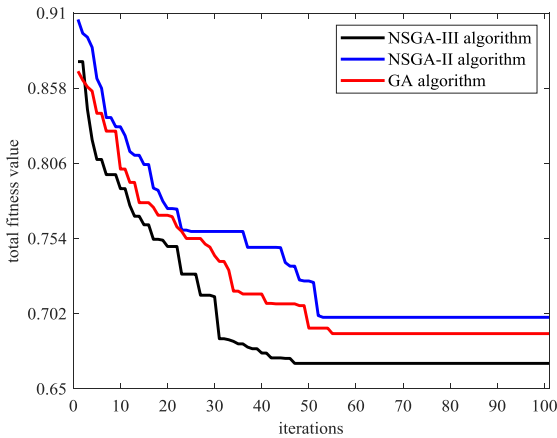


图11 不同算法优化过程对比

Fig.11 Comparison of optimization processes of different algorithms

表6 不同算法优化后的评价指标参数对比

Tab.6 Comparison of evaluation index parameters optimized by different algorithms

Evaluating indicator	NSGA-III	NSGA-II	GA
Safety evaluation index (h/km)	0.0529	0.0537	0.0533
Energy saving evaluation index (kN*km)	26118	26977	27409
On schedule evaluation index (s)	32	45	32
Comfort evaluation index (m/s ²)	0.0819	0.0806	0.0851

根据上述优化结果可以看出：从评价指标来判断，NSGA-III 算法的精度明显要高于 NSGA-II 算法和 GA 算法，且收敛速度更快。NSGA-II 算法容易陷入局部最优，全局寻优能力低于 NSGA-III 算法。这说明 NSGA-III 算法相较于其他两样算法具有显著的优越性。

4 结论

针对高速列车运行过程中的多目标优化问题，本文分析了列车受力情况，在满足区间固定限速以及车辆动力学方程约束的条件下，建立了行车安全、包含不同轨面状况下最大黏着力约束的能源消耗、准点到站、旅客乘坐的舒适度等四个评价指标，构成高速列车运行过程多目标优化模型。结合高速列车运行过程中的行车特点，选择基于参考点的非支配排序算法优化目标曲线。仿真中以“泰安-徐州东”站间为基础数据，对初始的实际线路进行优化，最终结果优化后四个评价指标都有所提升，尤其是节能评价指标。并且为了说明本文方法的有效性和可行性，在模型和算法方面均做了对比，结果显示

本文改进的节能模型对于降耗有着显著作用，考虑轮轨间的黏着对于高速列车多目标优化有极大的帮助；NSGA-III 算法在收敛速度和收敛效果都有极大的优势，非常适用于高速列车优化的实际领域。

参考文献：

- [1] 宋鸿宇,上官伟,盛昭等.基于弹复力调整的高速列车群动态运行轨迹优化方法[J].交通运输工程学报,2021,21(4):235-250.DOI:10.19818/j.cnki.1671-1637.2021.04.018.
SONG Hongyu, SHANGGUAN Wei, SHENG Zhao, et al. Optimization method of high-speed train group dynamic operation trajectory based on resilience adjustment [J]. Journal of Transport Engineering, 2021,21 (4): 235-250. DOI: 10.19818/j.cnki.1671-1637.2021.04.018
- [2] GU Qing, TANG Tao, CAO Fang, et al. Energy-efficient train operation in urban rail transit using real-time traffic information[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2014, 15(3): 1216-1233.
- [3] 闫璐,张琦,丁舒忻等.基于双目标优化的高速铁路列车运行调整[J].中国铁道科学,2022,43(2):161-171.
YAN Lu, ZHANG Qi, DING Shuxin, et al. High speed railway train operation adjustment based on double objective optimization [J] China Railway Science, 2022, 43(2): 161-171
- [4] 贾宝通,孟学雷,贾飞等.面向节能的高速列车追踪控制方案研究[J].铁道科学与工程学报,2021,18(08):1986-1996.
JIA Baotong, MENG Xuelei, JIA Fei, etc Research on energy-saving oriented high-speed train tracking control scheme [J] Journal of Railway Science and Engineering, 2021,18 (08): 1986-1996
- [5] YANG X, LI X, NING B,et al.A Survey on Energy-Efficient Train Operation for Urban Rail Transit[J].IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2015,17(1):2-13.
- [6] 徐传芳,陈希有,郑祥等.基于动态面方法的高速列车蠕滑速度跟踪控制[J].铁道学报,2020,42(02):41-49.
XU Chuanfang, CHEN Xiyu, ZHENG Xiang, et al. Creep speed tracking control of high-speed trains based on dynamic surface method [J]. Journal of Railways, 2020,42 (02): 41-49
- [7] 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):59-605.

- ZHANG Jing, ZHU Aihong. Optimization method of automatic train operation speed curve based on genetic algorithm and particle swarm optimization [J] *Computer Application*, 2022,42(2): 599-605.
- [8] 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):85-91.
- ZHANG Huiru, JIA Limin, WANG Li. Generation of energy-saving driving curve set for high-speed railway trains based on Pareto multi-objective optimization [J]. *Journal of Railways*, 2021,43(3):85-91.
- [9] 李杰. 基于多质点模型的高速列车追踪运行 ATO 多目标优化研究[D]. 兰州交通大学, 2021.DOI:10.27205/d.cnki.gltec.2021.000172.
- LI Jie. Research on ATO multi-objective optimization of high-speed train tracking operation based on multi particle model [D] Lanzhou Jiaotong University, 2021. DOI: 10.27205/d.cnki.gltec.2021.000172.
- [10] LIN J , LIU X .Speed Curve Optimization of High-speed Flying Train Based on Improved Genetic Algorithm[C]// 2021 7th International Symposium on Mechatronics and Industrial Informatics (ISMII). 2021.
- [11] LI W, ZHAO S, LI K, et al. Energy-Efficient Operation Curve Optimization for High-Speed Train Based on GSO Algorithm[C]// International Conference on Life System Modeling and Simulation, International Conference on Intelligent Computing for Sustainable Energy and Environment. Springer, Singapore,2021.
- [12] 李政毅,黄景春,余泳江.基于最佳黏着点搜索的黏着控制方法[J/OL].*铁道科学与工程学报*:1-9[2022-07-27].DOI:10.19713/j.cnki.43-1423/u.T20220827.
- LI Zhengyi, HUANG Jingchun, YU Yongjiang. Adhesion control method based on optimal adhesion point search [J/OL].*Journal of Railway Science and Engineering*: 1-9[2022-07-27].DOI:10.19713/j.cnki.43-1423/u.T20220827.
- [13] 李斌,杨忠良,罗世辉等.考虑轮轨黏着变化的货运列车纵向动力学仿真[J].*振动.测试与诊断*, 2021,41(6):1059-1065+1233.DOI:10.16450/j.cnki.issn.1004-6801.2021.06.003.
- LI Bin, YANG Zhongliang, LUO Shihui, et al. Longitudinal dynamics simulation of freight train considering wheel rail adhesion change [J]. *Vibration Testing and Diagnosis*, 2021,41(6): 1059-1065+1233.DOI :10.16450/j.cnki.issn.1004-6801.2021.06.003.
- [14] 吴业庆,赵旭峰,喻励志等.基于最优蠕滑辨识的高速列车黏着控制研究[J].*机车电传动*, 2020(2):12-16. DOI:10.13890/j.issn.1000-128x.2020.02.003.
- WU Yeqing, ZHAO Xufeng, YU Lizhi, et al. Study on adhesion control of high-speed trains based on optimal creep identification [J] *Electric drive of locomotive*, 2020 (2):12-16. DOI:10.13890/j.issn. 1000-128x.2020.02.003.
- [15] WU B, XIAO G, AN B, et al. Numerical study of wheel/rail dynamic interactions for high-speed rail vehicles under low adhesion conditions during traction [J].*Engineering Failure Analysis* ,2022,137:106266-.
- [16] XIAO G , WU B , YAO L , et al. The traction behavior of high-speed train under low adhesion condition[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2022, 131:105858-.
- [17] 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.DOI: 10.16749/j.cnki.jecjtu.2018.05.001.
- YANG Hui, FU Yating. Overview of Train Operation Modeling and Speed Control Methods [J]. *Journal of East China Jiaotong University*, 2018, 35(5): 1-8. DOI: 10.16749/j.cnki.jecjtu.2018.05.001.
- [18] 赵辉,代学武. 基于闭塞区间的高速列车运行时间与节能协同优化方法[J]. *自动化学报*,2020,46(03):471-481.
- ZHAO Hui, DAI Xuewu. Collaborative optimization method of high-speed train operation time and energy saving based on block section [J] *Acta Automatica Sinica*, 2020, 46 (03): 471-481
- [19] WU Bing, WU Tao, AN Boyang. Numerical investigation on the high-speed wheel/rail adhesion under the starved interfacial contaminations with surface roughness[J]. *Lubrication Science*,2020,32(3).
- [20] SHI L, MA L, GUO J, et al. Influence of low temperature environment on the adhesion characteristics of wheel-rail contact[J]. *Tribology International*, 2018, 127: 59-68.
- [21] 李中奇,张俊豪.基于快速自适应超螺旋算法的高速列车最优黏着控制 [J/OL]. *铁道科学与工程学报*:1-9[2022-04-22]. DOI:10.19713/j.cnki. 43-1423/u.T20211128.
- LI Zhongqi, ZHANG Junhao. Optimal adhesion control of high-speed trains based on fast adaptive super spiral algorithm [J/OL] *Journal of Railway Science and Engineering*: 1-9 [2022-04-22]. DOI: 10.19713/j.cnki.43-1423/u.T20211128.
- [22] Kalyanmoy Deb, “An Evolutionary Many-Objective Optimization Algorithm Using Reference-Point-Based Nondominated Sorting Approach, Part I: Solving

- Problems With Box Constraints,” IEEE Transactions on Evolutionary Computation, vol.18, no.4, pp.577-601, 2014.
- [23] Kalyanmoy Deb. Multi-Speed Gearbox Design Using Multi-Objective Evolutionary Algorithms[J]. Journal of Mechanical Design, 2003, 125(3):609--619.
- [24] 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.DOI:10.16383/j.aas.c190223.
- FU Yating, YUAN Junrong, LI Zhongqi, et al. Optimization of heavy haul train driving process based on coupler draft constraint [J]. Journal of Automation, 2019, 45 (12): 2355-2365. DOI:10.16383/j.aas.c190223.
- [25] LU Wei, QIN Shuangshuang, MU Zhiguo, et al. Simulation study on evacuation of CRH380AL high-speed train and its influencing factors[J]. China Safety Science Journal, 2020, 30(8): 164.
- [26] 张欣欣.高速列车运行控制[M].北京:北京交通大学出版社,2012.
- ZHANG Xinxin. High speed train operation control [M]. Beijing: Beijing Jiaotong University Press, 2012

作者简介



付雅婷(1988—),女,副教授,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,2011年本科毕业于华东交通大学,2014年硕士毕业于华东交通大学,2017年博士毕业于华东交通大学电气与自动化工程学院。E-mail: fuyating0103@163.com