

基于全局优化的列车自动驾驶实时规划算法

王 凯¹ 宋立博¹ 华润恺² 朱琴跃²

(1. 中车青岛四方机车车辆股份有限公司, 266111, 青岛; 2. 同济大学电子与信息工程学院, 201804, 上海)

摘 要 [目的] 针对现有城市轨道交通列车自动驾驶中目标速度规划算法运算量大、运算时间长而无法实时应对突发状况时线路限速临时改变的问题, 提出一种基于全局优化的目标速度实时规划算法, 实时生成规划速度曲线。[方法] 依据列车当前位置、当前速度、运行前方线路限速等条件, 首先通过逐点计算的方式生成最短用时规划速度曲线; 接着调整牵引、制动级位使列车保持匀加速/减速运行, 优化列车运行的舒适度指标; 并结合调整最高限速段的巡航速度减少不必要的牵引和制动时间, 优化列车运行的能耗指标, 最后输出列车规划速度曲线。[结果及结论] 仿真结果表明, 采用该算法实时生成的规划速度曲线满足了安全、准时和精准停车等基本约束条件, 相比传统规划算法, 提高了列车的运行舒适度, 降低了列车运行能耗; 同时, 也可以有效应对突发状况时线路限速临时改变的情况, 实现多个运行指标的优化。

关键词 城市轨道交通; 自动驾驶; 速度实时规划; 全局优化

中图分类号 U284.48

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.06.008

Real Time Planning Algorithm of Automatic Train Driving Based on Global Optimization

WANG Kai¹, SONG Libo¹, HUA Runkai², ZHU Qinyue²

(1. CRRC Qingdao Sifang Locomotive & Rolling Stock Co., Ltd., 266111, Qingdao, China; 2. School of Electronic and Information Engineering, Tongji University, 201804, Shanghai, China)

Abstract [Objective] The existing target speed planning algorithm for the automatic driving of urban rail transit train cannot handle in real time the temporary change of the line speed limit in case of emergency due to the large computational load and long computation time. With regard to the problem, a real-time target speed planning algorithm based on global optimization is proposed to generate the speed planning curve in real time. [Method] Based on the conditions of train current position, current speed and speed limit of the forward line, the speed planning curve is firstly generated in the shortest time through point by point calculation. Then the traction and braking levels are being adjusted to keep the train running at uni-

form acceleration or deceleration, optimizing the comfort index of the train running. Next, the cruising speed in the maximum speed limit section is adjusted to reduce unnecessary traction and braking time, optimizing the energy consumption index of the train running. Finally, the train speed planning curve is output. [Result & Conclusion] The simulation results show that the real-time speed planning curve generated by the proposed algorithm satisfies the basic constraints of safety, punctuality and accurate parking. Compared with the traditional algorithm, it improves the comfort level and reduces the energy consumption during train operation. Meanwhile, the proposed algorithm can effectively handle the temporary change of the line speed limit in emergency and optimize several operation indicators.

Key words urban rail transit; automatic driving; real-time speed planning; global optimization

随着自动驾驶相关技术的不断发展^[1], 越来越多的智能算法被应用于列车自动驾驶的速度规划中^[2-5], 取得了一定的效果。这些算法普遍存在计算量大、计算时间长等问题, 然而在实际运行中, 由于列车动力学模型参数具有很强的时变和不确定性, 且经常遇到突发状况需临时调整区间限速, 此时实时调整并生成 ATO (列车自动运行) 所需目标的规划速度曲线就显得十分关键。针对此, 近年来国内外专家学者开展了大量研究, 在多层和单层算法方面取得了一定成果。

在多层算法方面, 文献[6]设计了一种双层控制的寻优方法: 其中第一层根据庞特里亚金极大值原理计算分时速度; 第二层根据拉格朗日乘子法确定最优工况, 但没有考虑列车复杂的运行情况。文献[7]设计了基于分层思想的 ATO 运行曲线优化算法, 其基于底层算法分别对列车运行时间、舒适度及能耗进行了优化, 利用顶层算法实时调整规划速度曲线, 减少了计算时间, 但仍无法实现实时计算。

在单层算法方面, 文献[8]利用神经网络作为

列车驾驶控制器,设计了一种基于策略的强化学习算法,但神经网络算法在稳定性、结构选择等方面存在较多无法解决的问题;文献[9]建立了动态调整规划速度曲线的在线优化机制,引入了“时间窗”的概念,将离线优化和在线优化相结合,为列车在行程中实现节能和准点提供了一种实用的解决方案,但时间窗长度的选择较为随机,安全性无法得到保证。

为此,本文针对城市轨道交通列车自动驾驶系统,提出一种基于全局优化的目标速度实时规划算法,在保证列车安全、准时和精准停车的基础上,对列车能耗和舒适度指标进行了优化。

1 列车动力学模型、约束条件与评价指标

列车动力学模型是生成规划速度曲线的基础,在生成规划曲线时需要满足一定的约束条件,同时,还需兼顾运行性能指标以优化规划速度曲线。

1.1 列车动力学模型

列车在运行时主要受牵引力 F 、制动力 F_b 及阻力 F_{res} 的影响,基本受力情况如图1所示。

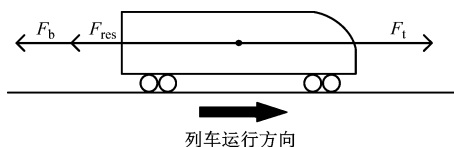


图1 列车受力情况

Fig.1 Train loading condition

列车动力学方程为^[9]:

$$F_t - F_b - F_{res} = Ma \quad (1)$$

式中:

M ——列车质量;

a ——列车加速度。

以某车型为例,列车所受最大牵引力 $F_{t,max}$ (单位 kN)、最大制动力 $F_{b,max}$ (单位 kN) 分别由牵引特性和制动特性得到,计算方法如下:

$$F_{t,max} = \begin{cases} 578.01, & 0 \leq \{v\} < 41 \\ \frac{23\ 698}{\{v\}}, & 41 \leq \{v\} < 124 \\ \frac{2\ 938\ 603}{\{v\}^2}, & 124 \leq \{v\} < 160 \end{cases} \quad (2)$$

$$F_{b,max} = \begin{cases} 38.1\{v\}, & 0 \leq \{v\} < 10 \\ 381, & 10 \leq \{v\} < 80 \\ \frac{30\ 480}{\{v\}}, & 80 \leq \{v\} < 160 \end{cases} \quad (3)$$

式中:

v ——列车运行速度,单位 km/h。

列车阻力 F_{res} 的计算方法如下:

$$F_{res} = F_{basic} + F_{add} \quad (4)$$

$$F_{basic} = (8.4 + 0.107\ 1\{v\} + 0.004\ 72\{v\}^2)\{M\} \quad (5)$$

式中:

F_{basic} ——基本阻力,单位 kN;

F_{add} ——附加阻力,单位 kN,视线路等情况确定。

其中, M 单位为 t。

1.2 约束条件

列车自动驾驶规划速度曲线需要满足安全、准时性和精准停车的约束条件,具体条件如下。

1) 安全约束:保证列车在线路上运行时的安全是至关重要的,即列车在线路上运行的速度 v 不能超过线路限速 v_m 。

2) 准时性约束:列车是否准点出发和到达决定着交通运输效率的高低,通常要求列车实际运行时间 T_e 与计划运行时间 T_o 的偏差在 5% 范围内。

3) 精准停车约束:由于城市轨道交通系统均安装了站台屏蔽门,通常要求城市轨道交通列车停车误差在 $-30 \sim 30$ cm 范围内。

1.3 评价指标

在满足了上述基本约束条件后,本文还将从能耗和舒适度指标出发,来评价规划生成的目标速度曲线是否合理。假设将运行区间线路总长度 L 等距离离散为 N 个点,其中第 n 点的位置为 s_n ,速度为 v_n ,加速度为 a_n ,牵引力为 $F_{t,n}$,制动力为 $F_{b,n}$,第 n 点至第 $n+1$ 点所用时间为 t_n ,则相邻两点位置间的运行步长 Δs 可表示为:

$$\Delta s = s_{n+1} - s_n = \frac{L}{N} \quad (6)$$

1) 能耗指标:列车的能耗评价指标一般采用牵引力的做功情况来表示。该指标越小,表征运行过程越节能。通过对单列车动力学模型进行计算,可以得到列车运行的能耗评价指标 E 为:

$$E = \sum_{n=1}^N \frac{F_{t,n}}{\mu} \Delta s \quad (7)$$

式中:

μ ——能量吸收率。

2) 舒适度指标:列车的舒适度评价指标 C 一般采用加速度的变化率来表示。该指标越小,表征列

车运行过程越舒适。

$$C = \sum_{n=1}^N \left| \frac{a_{n+1} - a_n}{t_n} \right| \Delta s \quad (8)$$

2 算法实现

2.1 算法功能介绍

本文提出的全局优化的列车自动驾驶实时规划算法将列车实际动力学模型和优秀驾驶经验相结合,在保证列车准点、精准停车的基础上,基于全局区间对列车运行的舒适度和能耗进行优化,特点是准时性强、停车精准,且计算简便。全局优化的列车自动驾驶实时规划算法的流程如图2所示。

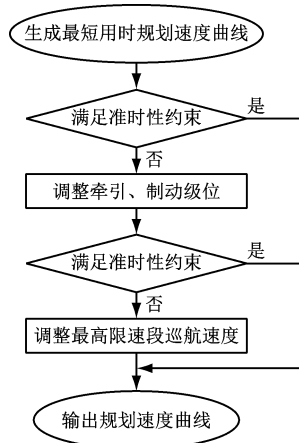


图2 全局优化的列车自动驾驶实时规划算法流程图

Fig.2 Flow chart of real-time planning algorithm for global optimization automatic driving train

该算法首先按照最大级位牵引、最高速度巡航、最大级位制动三种工况生成列车最短用时规划速度曲线,在此基础上判断是否满足准时性约束;若不满足,则调整牵引和制动级位使列车在牵引和制动阶段保持恒加速度运行;随后根据列车运行时刻表中计划用时,采取线性逼近法调整区间内最高巡航速度,最终生成满足要求的规划速度曲线。

2.2 生成最短用时规划速度曲线

生成最短用时规划速度曲线主要包括根据限速得到各限速段巡航速度、逐点计算得到制动曲线、逐点计算得到最短用时规划曲线三部分。

2.2.1 得到各限速段巡航速度

设列车各限速段巡航速度 v_c 等于该限速段的线路限速。

2.2.2 逐点计算得到限速曲线

在确定当前区间的最高巡航速度后,依次从区

间终点开始,以每个计算步长为单位,通过最大级位制动加速度反向逐点计算,再与巡航速度曲线相连后得到对应区间的限速曲线,曲线上每一个点都包含位置 $s_{\lim,n}$ 、速度 $v_{\lim,n}$ 这2种信息。

在每个限速区间分别进行计算,区间终点处的速度即为下一限速区间的巡航速度值。以终点区间的计算方式为例,终点区间的巡航速度为 v_c ,区间终点位置的速度 $v_{\lim,L} = 0$,则可以根据运动方程向前逐点计算,得到第 $n-1$ 点处的速度 $v_{\lim,n-1}$ 为:

$$v_{\lim,n-1} = \sqrt{v_{\lim,n}^2 + 2(F_{b,n,\max} + F_{\text{res},n})\Delta s/M} \quad (9)$$

式中:

$F_{b,n,\max}$ ——第 n 点所受最大制动力;

$F_{\text{res},n}$ ——第 n 点所受的阻力合力。

按照上述方法逐点计算,直到 $v_{\lim,n} > v_c$,得到从第 n 点到终点的制动曲线。将巡航速度曲线和制动曲线相连,便得到列车在当前线路条件下的限速曲线,如图3所示。

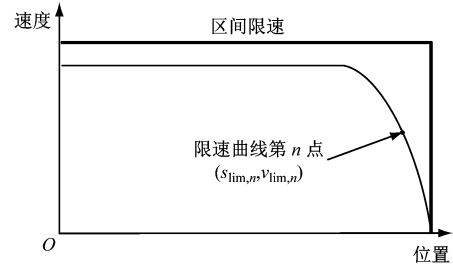


图3 限速曲线示意图

Fig.3 Speed limit curve diagram

2.2.3 逐点计算得到最短用时曲线

在生成限速曲线后,以每个计算步长 Δs 为单位,遍历全线,生成规划速度曲线,曲线上每一个点都包含位置 s_n 、速度 v_n 、第 n 点至第 $n+1$ 点所用时间 t_n 共3种信息。

计算方法为:从每个限速区间的起始位置出发,保持最大牵引级位工况直至速度达到区间巡航速度 v_c ,之后保持巡航速度不变直至速度达到限速曲线速度后转为制动工况(制动级位由限速曲线得到)。以起点区间的计算过程为例,区间起点位置的速度 v_0 为0,则可根据运动方程逐点计算,得到第 n 点处若采用牵引工况达到的速度 v_t 为:

$$v_t = \sqrt{v_n^2 + 2(F_{t,n,\max} - F_{\text{res},n})\Delta s/M} \quad (10)$$

式中:

$F_{t,n,\max}$ ——第 n 点所受最大牵引力。

假设限速曲线在第 $n+1$ 点处的速度值为 $v_{\lim,n+1}$, 若 $v_t > v_{\lim,n+1}$, 则采取巡航工况。此时第 n 点至第 $n+1$ 点所用时间 t_n 、第 $n+1$ 点的速度 v_{n+1} 分别为:

$$t_n = \frac{\Delta s}{v_n} \quad (11)$$

$$v_{n+1} = v_n \quad (12)$$

若 $v_t \leq v_{\lim,n+1}$, 则采取牵引工况。此时第 n 点至 $n+1$ 点所用时间 t_n 、第 $n+1$ 点的速度 v_{n+1} 分别为:

$$t_n = \left[-v_n + \sqrt{v_n^2 + 2(F_{t,n,\max} - F_{\text{res},n}) \Delta s / M} \right] M / (F_{t,n,\max} - F_{\text{res},n}) \quad (13)$$

$$v_{n+1} = v_t \quad (14)$$

若 $v_n > v_{\lim,n+1}$, 则当前位置需采取制动工况, 则根据运动方程第 n 点至 $n+1$ 点所用时间 t_n 、第 $n+1$ 点的速度 v_{n+1} 分别为:

$$t_n = \left[v_n - \sqrt{v_n^2 - 2(F_{b,n,\max} + F_{\text{res},n}) \Delta s / M} \right] M / (F_{t,n,\max} + F_{\text{res},n}) \quad (15)$$

$$v_{n+1} = \sqrt{v_n^2 - 2(F_{b,n,\max} + F_{\text{res},n}) \Delta s / M} \quad (16)$$

由此逐点计算直至终点位置处, 将每两个点间所用时间累加得到总用时 T_c , 同时生成最短用时规划速度曲线。

2.3 调整牵引、制动级位

采用参考加速度的方法实现匀加速度牵引、制动, 以提高乘客的舒适度。以牵引过程为例, 令牵引工况转巡航工况为第 i 点, 根据最短用时规划速度曲线在牵引工况转巡航工况处的受力情况, 依照列车运动方程得到该限速区间参考牵引加速度值 $a_{t,\text{ref}}$ 如下:

$$a_{t,\text{ref}} = (F_{t,i,\max} - F_{\text{res},i}) / M \quad (17)$$

式中:

$F_{t,i,\max}$ ——第 i 点所受最大牵引力;

$F_{\text{res},i}$ ——第 i 点所受的阻力合力。

从起点位置处根据此参考加速度值计算相应的牵引级位和制动级位; 同理, 制动阶段可依据制动加速度 $a_{b,\text{ref}}$ 作为参考加速度修改的每个点对应的制动级位, 最终输出调整后的规划速度曲线。

2.4 调整最高限速段巡航速度

根据时刻表中计划用时采用线性逼近法重新计算各限速区间的巡航速度。首先, 将最高限速段巡航速度降低至其上一限速区间巡航速度, 重新计算用时并判断: 若 $T_c < T_0$, 则继续降低此时的最高

限速区间巡航速度; 若 $T_c \geq T_0$, 则采用线性逼近法计算并调整原先最高限速段巡航速度, 即假设运行用时 T_c 与最高限速段巡航速度值 $v_{c,\max}$ 呈线性关系, 以此逐步调整 $v_{c,\max}$ 的值:

$$v_{c,i+1,\max} = v_{c,i,\max} (T_c - t_0) / (T_0 - t_0) \quad (18)$$

式中:

t_0 ——其他限速段用时之和。

反复用线性逼近的方式调整最高限速段巡航速度值, 直到实际用时满足准时性约束, 输出优化后的规划速度曲线即为全局优化曲线。

3 仿真验证

3.1 仿真参数

选取某实际线路的某一运行区间, 相应仿真参数如表 1 所示。

表 1 仿真参数表

Tab. 1 Simulation parameter table

参数类别	参数类别	参数值
线路条件	站间距离/m	1 287
	时刻表中计划用时/s	111
	0 ~ 83 m 限速/(km/h)	60
	> 83 ~ 572 m 限速/(km/h)	80
	> 572 ~ 1 287 m 限速/(km/h)	60
	0 ~ 83 m 坡度/‰	-1.52
	> 83 ~ 572 m 坡度/‰	0.20
	> 572 ~ 1 287 m 坡度/‰	-2.8
	0 ~ 171 m 线路曲线半径/m	-579.5
	列车质量/t	359.4
列车属性	最大速度/(km/h)	160

3.2 仿真与分析

3.2.1 正常运行时的速度规划

为验证本文所提实时规划算法的有效性, 将本文所提算法与传统规划算法的仿真结果分别进行对比分析。其中, 传统规划算法仅考虑准时性和停车精准性的基本约束条件, 且采用最大牵引-巡航-最大制动的工况组合方式。由此而得的两种规划算法下的仿真结果分别如图 4 和图 5 所示。

如图 4 可知, 采用本文所提算法生成的规划曲线可以识别线路中加速度变化率较大的工况切换位置, 并通过计算以巡航工况代替原先的牵引和制动工况, 在确保准时性的情况下, 减少了不必要的

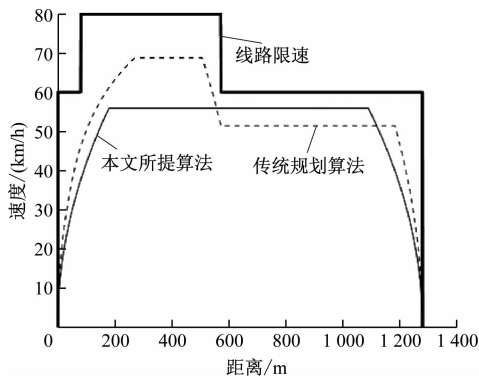


图4 两种规划算法下的规划速度曲线

Fig. 4 Planning speed curves under two planning algorithms

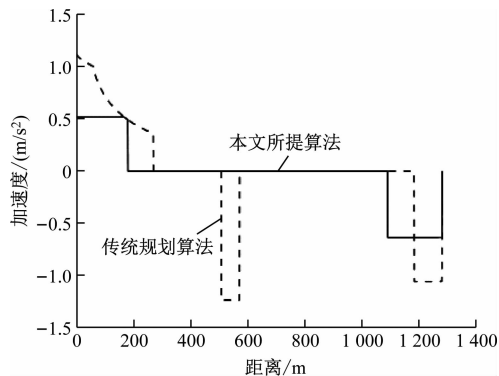


图5 两种规划算法下的加速度曲线

Fig. 5 Acceleration curves under two planning algorithms

牵引和制动过程,优化了列车运行能耗和舒适度指标。同时,表2所示的列车运行指标表明,虽然传统规划算法和本文所提算法均满足列车运行准点和精准停车的基本约束条件,但是采用本文所提算法后列车运行能耗和舒适度指标均显著优于传统规划算法,进一步验证了本文所提算法对能耗和舒适度指标优化的有效性。

表2 两种规划算法的仿真运行指标对比

Tab. 2 Simulation operation index comparison under two planning algorithms

算法种类	运行时间/ s	停车位置/ m	能耗/ (kWh)	舒适度/ (m/s ³)
传统规划算法	110.54	1 286.70	14.58	83.86
本文所提算法	110.86	1 286.82	13.65	29.14

3.2.2 突发状况时的速度规划

假设当列车运行至80 m处时,收到前方线路1 000~1 287 m处限速临时改变为40 km/h的信号,为此,基于本文所提算法实时生成新的规划速度曲线如图6所示。

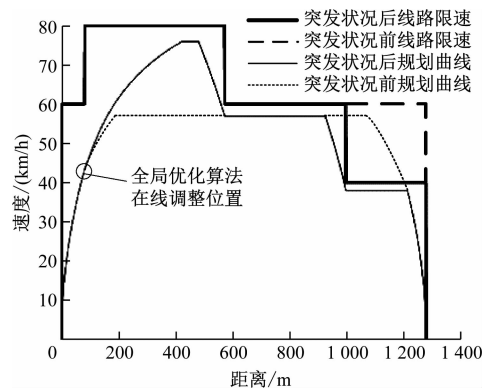


图6 本文所提算法在突发状况时的规划速度曲线

Fig. 6 Planning speed curve in case of emergency under the proposed algorithm

经计算可知,实时更新后的列车最终运行时间为110.78 s,停车位置为1 287.01 m,相比于时刻表中原定计划用时111 s、列车目标停车位置1 287 m可知,当列车运行前方限速发生改变时,本文所提算法可以实时生成规划速度曲线,并确保列车运行的安全、准点和精准停车。

4 结语

本文以列车自动驾驶规划速度曲线生成算法作为研究基础,重点探讨了分限速区间段规划速度控制策略与优化模型,提出了一种全局优化算法,可以在满足安全、准点和精准停车的基础上,兼顾能耗和舒适度的优化,并对此算法进行实际线路的仿真。经仿真验证,与传统规划算法相比,全局优化算法在实现准点和精准停车的基础上,实现了能耗和舒适度的优化,验证了本文所提算法的有效性。

本文提出的全局优化算法中,由于没有充分考虑采用惰行工况,从而造成规划速度曲线能耗优化不够。但是寻找惰行工况切换位置会增大算法本身的计算量,影响算法的实时性。为此,如何自适应选取惰行工况切换位置是提高该算法节能性的关键,也是下一步的研究方向。

参考文献

- [1] 宁滨, 郜春海, 李开成, 等. 中国城市轨道交通全自动运行系统技术及应用[J]. 北京交通大学学报, 2019, 43(1): 1.
NING Bin, GAO Chunhai, LI Kaicheng, et al. Technology and application of fully automatic operation system for urban rail transit in China [J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2019, 43(1): 1.

(下转第53页)

了制动器推出刚度对车辆振动性能的影响,主要研究结论如下:

1) 电机械制动器的推出刚度存在非线性特征,在常工作区内的推出刚度显著大于空气制动器。

2) 过大的制动器推出刚度易加剧制动时的车辆振动。

由此,建议降低电机械制动器的推出刚度,从而改善制动过程中的车辆振动性能。

本文测试得到的制动器推出刚度为准静态推出刚度,因闸瓦与车轮在接触过程中存在振动,因此建议对制动器的动态推出刚度进行详细的测试,从而更好地分析制动器推出刚度对车辆振动的影响。制动器推出刚度的降低可通过在推出机构串联小刚度结构实现,其具体结构设计及对车辆振动的影响有待进一步详细研究。

参考文献

- [1] ZHU Q, XIE J, ZHANG W, et al. Effect of the braking parameter on disc brake squeal of a railway vehicle [J]. *Wear*, 2023, 522: 204884.
 - [2] 李小彭, 李加胜, 李木岩, 等. 盘式制动系统参数对制动颤振的影响分析[J]. *振动、测试与诊断*, 2017, 37(1): 102.
LI Xiaopeng, LI Jiasheng, LI Muyan, et al. Analysis of the effect of disc brake system parameters on brake chatter[J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2017, 37(1): 102.
 - [3] TANG B, MO J L, XU J W, et al. Effect of perforated structure of friction block on the wear, thermal distribution and noise characteristics of railway brake systems [J]. *Wear*, 2019 (426/427): 1176.
 - [4] TANG B, MO J L, WU Y K, et al. Effect of the friction block shape of railway brakes on the vibration and noise under dry and wet conditions[J]. *Tribology Transactions*, 2019, 62(2): 262.
 - [5] 唐斌. 摩擦块界面特征对列车制动尖叫噪声及磨损行为的影响[D]. 成都: 西南交通大学, 2020.
TANG Bin. Effect of interfacial features of friction blocks on the squeal noise and wear behaviors of train railway brake[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2020.
 - [6] CASCETTA F, CAPUTO F, DE LUCA A. Squeal frequency of a railway disc brake evaluation by FE analyses[J]. *Advances in Acoustics and Vibration*, 2018: 4692570.
 - [7] CHEN G X, LV J Z, ZHU Q, et al. Effect of the braking pressure variation on disc brake squeal of a railway vehicle: test measurement and finite element analysis [J]. *Wear*, 2019 (426/427): 1788.
 - [8] 乔青峰, 杨伟东, 朱琪, 等. 铁路盘型制动噪声机理及其控制方法[J]. *西南交通大学学报*, 2021, 56(1): 62.
QIAO Qingfeng, YANG Weidong, ZHU Qi, et al. Generation mechanism of railway disc brake squeal and its suppression method [J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2021, 56(1): 62.
- 收稿日期:2023-12-07 修回日期:2024-03-20 出版日期:2024-06-10
Received:2023-12-07 Revised:2024-03-20 Published:2024-06-10
• 第一作者:刘寅虎,正高级工程师,liuyinhu@njhtzd.com
通信作者:杨震寰,博士研究生,yagznzhuan10@foxmail.com
• ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license
-
- (上接第48页)
- [2] 张明锐, 李俊江, 林永乐, 等. 基于免疫退火遗传算法的城市轨道交通列车节能运行策略[J]. *城市轨道交通研究*, 2021, 24(12): 28.
ZHANG Mingrui, LI Junjiang, LIN Yongle, et al. Research on energy-saving operation strategy of urban rail transit train based on immune annealing genetic algorithm [J]. *Urban Mass Transit*, 2021, 24(12): 28.
 - [3] 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.
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.
 - [4] HE Z, YANG Z, LV J. An energy-efficient operation strategy for high-speed trains[C]//2018 Chinese Control and Decision Conference (CCDC). Shenyang, China. New York: IEEE, 2018: 3771.
 - [5] 丁文君. 基于多目标决策的轨道交通 ATO 运行模式曲线优化研究[J]. *电子测量技术*, 2020, 43(12): 65.
DING Wenjun. Research on rail traffic ATO running mode curve optimization based on multiple targets decision [J]. *Electronic Measurement Technology*, 2020, 43(12): 65.
 - [6] XIAO Z, WANG Q, SUN P, et al. Real-time energy-efficient driver advisory system for high-speed trains [J]. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 2021, 7(4): 3163.
 - [7] 蔺嘉树. 基于改进萤火虫算法的 ATO 运行曲线优化研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2021.
LIN Jiashu. Research on optimization of ATO curve based on improved firefly algorithm [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiatong University, 2021.
 - [8] 黄畅, 姜辰宇, 邢昕铨. 基于强化学习的列车驾驶曲线节能优化算法[J]. *数字通信世界*, 2022(1): 19.
HUANG Chang, JIANG Chenyu, XING Xinquan. An energy-efficient train control approach based on deep Q-network methodology [J]. *Digital Communication World*, 2022(1): 19.
 - [9] LI Z, CHEN L, ROBERTS C, et al. Dynamic trajectory optimization design for railway driver advisory system [J]. *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*, 2018, 10(1): 121.
- 收稿日期:2023-08-13 修回日期:2023-10-12 出版日期:2024-06-10
Received:2023-08-13 Revised:2023-10-12 Published:2024-06-10
• 第一作者:王凯,工程师,kkw1207@163.com
通信作者:朱琴跃,教授,zqymelisa@tongji.edu.cn
• ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license