

基于列车节能运行的惰行-巡航组合控制策略

高 豪¹ 柴 娟² 凌小雀¹ 徐海贵¹

(1. 卡斯柯信号有限公司, 200072, 上海; 2. 上海地铁维护保障有限公司, 200233, 上海)

摘 要 [目的] 目前的列车运行控制系统集成了列车自动驾驶子系统, 可实现列车巡航控制。在保证服务质量的前提下, 为了进一步降低列车运行能耗, 有必要在既有列车运行控制策略的基础上, 研究惰行-巡航组合控制策略。[方法] 基于既有的列车运行控制策略, 介绍了惰行-巡航组合控制策略的研究思路。基于 Simulink 仿真软件, 以最小列车运行能耗和列车准点运行同时作为优化目标, 引入权重因子对双优化目标进行量纲一化处理, 根据线路条件划分多个控制阶段, 以最大牵引、惰性、巡航和最大制动作为各阶段的控制输入, 构建列车节能驾驶优化模型。利用遗传算法分别计算惰行-巡航组合控制策略和多次惰行控制策略下的列车节能优化运行曲线。[结果及结论] 在长上坡区间, 与多次惰行控制策略相比, 惰行-巡航组合控制策略的节能效果更好。在长下坡区间, 两种控制策略下的列车节能运行优化效果没有显著差异。保持相同目标运行时间, 多次设置不同目标运行能耗优化后发现, 列车采用惰行-巡航组合优化控制策略达到的节能效果更好且优化稳定性更高。

关键词 城市轨道交通; 列车运行控制系统; 节能运行; 惰行-巡航组合控制策略

中图分类号 U284.48

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.11.004

Coasting-cruising Combined Control Strategy Based on Train Energy-efficient Operation

GAO Hao¹, CHAI Juan², LING Xiaoque¹, XU Haigui¹

(1. CASCO Signal Ltd., 200072, Shanghai, China; 2. Shanghai Metro Maintenance Support Co., Ltd., 200233, Shanghai, China)

Abstract [Objective] Current train operation control system incorporates an automatic driving subsystem, enabling train cruising control. To further reduce train operational energy consumption while maintaining service quality, it is necessary to develop a coasting-cruising combined control strategy based on the existing train operation control strategies. [Method] Building on existing train operation control strategies, the research approach for the coasting-cruising combined control strategy is introduced. Based on Simulink simulation software, a train energy-efficient driving optimization model is

constructed. The optimization objectives are set to minimize train operational energy consumption and ensure punctual operation by introducing weight factors to normalize the dual-optimization goal. Multiple control stages are divided according to the line conditions, with maximum traction, coasting, cruising, and maximum braking as control inputs for each stage. The genetic algorithm is used to calculate respectively the train energy-efficient optimized operation curves under the coasting-cruising combined control strategy and the multiple coasting control strategy. [Result & Conclusion] In long uphill sections, the coasting-cruising combined control strategy demonstrates better energy-saving effects compared to the multiple coasting control strategy. But in long downhill sections, there is no significant difference in energy-saving optimization effects between the two control strategies. When maintaining the same target running time and optimizing for different target energy consumptions multiple times, it is found that the coasting-cruising combined control strategy could achieve better energy-saving effects with higher optimization stability.

Key words urban rail transit; train operation control system; energy-efficient operation; coasting-cruising combined control strategy

列车运行牵引能耗占城市轨道交通总能耗的 80% 左右^[1]。为了同时满足时刻表规定的运行时间要求和节能要求, 有必要研究列车运行控制策略。

1 研究背景

1.1 既有的列车运行控制策略

当列车在短区间运行时, 单次惰行控制策略已能满足列车节能优化运行的要求^[2]。因该情况的列车运行控制策略较为单一, 故本文不对其进行讨论。当列车在长区间运行时, 为满足运行时间要求和节能要求, 需要采用更为复杂的列车运行控制策略。常用的多次惰行控制策略通过多次施加牵引, 将列车运行速度保持在较高的水平。采用该策略时, 需要根据线路条件, 确定列车惰行次数, 进而优

化各惰行点位置。

根据真实条件建立的列车运行控制模型包含了大量非线性因素^[3]。对此,既有的列车运行控制策略采用数值法获得惰行点位置最优解^[4],从而确定列车节能优化运行曲线。文献[5]在列车惰行次数确定的前提下,利用遗传算法进行惰行点位置寻优。文献[3]采用启发式遗传算法,确定合适的列车惰行次数并寻找其相应的模式切换位置。文献[6]建立了列车追踪节能优化模型,并采用变长染色体遗传算法对其进行求解。

基于极大值原理,列车在连续控制条件下的最优速度曲线应该由“最大牵引、巡航、惰行、最大制动”4种控制模式构成^[7]。由于早期的机车无法实现巡航控制模式^[8],故既有的列车运行控制策略只包含最大牵引、惰行、最大制动3种控制模式。

1.2 列车惰行-巡航组合控制策略

随着科技的发展,如今的列车运行控制系统中设置了ATO(列车自动运行)子系统,可自动完成对列车牵引、巡航、惰行和制动的控制^[9]。既有的列车运行控制策略已无法满足要求,需要进行优化。

对此,本文在多次惰行控制策略的基础上加入巡航控制模式,提出列车惰行-巡航组合控制策略(以下简称“惰巡策略”)。

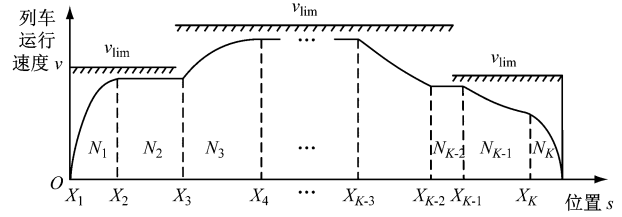
为验证惰巡策略的节能效果,本文构建列车节能优化运行模型,以列车运行能耗和运行时间为优化目标,以速度限制为约束条件,分别在惰巡策略和多次惰行控制策略下利用遗传算法计算列车运行曲线,确定惰行次数、巡航次数,以及惰行模式与巡航模式的组合方案,并对模式切换点进行寻优,最终得到两种运行控制策略节能优化运行曲线。

2 列车节能优化运行模型

根据限速条件和坡度值将列车所运行的区间划分为 L 个子区段,每个区段只包含一种限速条件和坡度值。文献[10]在考虑列车节能运行的前提下,证明了列车在单坡道单限速条件下的区段内最多切换3次控制模式。因此,列车在区间运行时最多完成 $3L$ 次控制模式的切换,即最大切换次数 $K=3L$ 。

当列车位置 $s \in [X_{k-1}, X_k]$ (其中 $k=1,2,\dots,K$)时,列车采用的控制模式为 $N_k, N_k \in \{-1,0,1,2\}$ 。当列车处于制动模式时, $N_k = -1$;当列车处于巡航模式时, $N_k = 0$;当列车处于惰行模式时, $N_k = 1$;当

列车处于牵引模式时, $N_k = 2$ 。则列车运行曲线由 N_k 及所对应的 X_k 决定。基于控制模式及其切换点的列车运行曲线如图1所示。



注: v_{lim} 为列车运行速度限制值。

图1 基于控制模式及其切换点的列车运行曲线

Fig. 1 Train operation curve based on control mode and its switching points

将 N_k 及其对应的 X_k 作为求解变量 x ,则有:

$$x = \{X_1, X_2, \dots, X_k, N_1, N_2, \dots, N_k\} \quad (1)$$

在长度为 D 的线路中,当列车选择惰巡策略时,变量求解域为:

$$\begin{cases} 0 \leq X_{k-1} \leq X_k \leq D, & k=1,2,\dots,K \\ N_k \in \{-1,0,1,2\}, & k=1,2,\dots,K-2 \end{cases} \quad (2)$$

当列车选择多次惰行控制策略时,变量求解域为:

$$\begin{cases} 0 \leq X_{k-1} \leq X_k \leq D, & k=1,2,\dots,K \\ N_k \in \{-1,1,2\}, & k=1,2,\dots,K-2 \end{cases} \quad (3)$$

对运行中的列车进行受力分析:

$$F_j = F_{tr} - F_b - F_{r,v} - F_{g,\theta} \quad (4)$$

式中:

F_{tr} ——列车受到的牵引力;

F_b ——列车受到的制动力;

F_j ——列车受到的合力;

$F_{r,v}$ ——列车运行速度为 v 时的列车运行阻力;

$F_{g,\theta}$ ——线路坡度为 θ 时的坡道附加阻力。

列车在不同列车运行控制模式下受到的牵引力、制动力及合力也不同。列车运行速度为 v 时,可施加的最大牵引力为 $F_{f,v}$,则:在最大牵引力模式下, $F_{tr} = F_{f,v}, F_b = 0, F_j = F_{f,v} - F_{r,v} - F_{g,\theta}$;在巡航模式下, $F_{tr} = F_{r,v} + F_{g,\theta}, F_b = 0, F_j = 0$;在惰行模式下, $F_{tr} = 0, F_b = 0, F_j = -F_{r,v} - F_{g,\theta}$;在制动模式下, $F_{tr} = 0, F_b = -F_{b,v}, F_j = -F_{b,v} - F_{r,v} - F_{g,\theta}$ 。其中, $F_{b,v}$ 为列车运行速度为 v 时的列车最大制动力。

列车运行过程中实际消耗的牵引能耗 E 为:

$$E = \int_0^t v F_{tr} dt \quad (5)$$

其中 t 为列车实际运行时间。列车运行时常会

因为旅客乘降、设备故障及突发事件等产生延误。对此,列车在节能运行的同时还要尽可能缩短区间运行时间,以应对可能会发生的延误,从而避免由延误导致的社会经济损失。可见,列车运行控制策略优化问题实际上是一个多目标优化问题。对此本文构建了基于列车运行能耗和运行时间的多目标函数 $\min y$:

$$\min y = \frac{E_w - E}{E_w} + \alpha \max \left\{ \frac{t_w - t_z}{t_w}, 0 \right\} + \beta \int_0^D \max \left\{ \frac{v_s - v_{lim}}{v_{lim}}, 0 \right\} ds \quad (6)$$

式中:

t_z ——实际列车运行总时间;

t_w ——目标列车运行总时间;

E_w ——目标列车运行总能耗;

α ——权重因子, $\alpha \in [0, 1]$;

β ——惩罚因子。

该目标函数由能耗子目标函数和时间子目标函数两部分组成。确定目标能耗和目标时间后,通过优化列车运行控制策略,可使列车实际运行能耗和实际运行时间尽可能小于或接近各自的目标值。本文对两个子目标函数做量纲一化处理,并选择权重因子 α 来权衡列车能耗目标与时间目标之间的重要程度。当列车延误晚点时,缩短区间运行时间的重要性大于节能的重要性, $\alpha \in [0, 0.5]$; 当列车比运行计划时间早时,能耗目标比时间目标更重要 $\alpha \in (0.5, 1.0]$; 当列车正点运行时, $\alpha = 0.5$ 。

列车在运行过程中需满足的约束条件为:

$$\begin{cases} a_0 = 0, & a_T = 0 \\ v_0 = 0, & v_T = 0 \\ s_0 = 0, & s_T = 0 \\ v - v_{lim} \leq 0 \end{cases} \quad (7)$$

式中:

a_0, v_0, s_0 ——列车在驶离站台前的初始加速度、初始速度及初始位移;

a_T, v_T, s_T ——列车到达下一站后的加速度终值、速度终值及位移终值。

不等式约束表示列车在区间运行过程中的运行速度不得超过所在位置对应的限速。

列车在运行时的模式切换还应该满足表 1 所示的约束条件。

列车出发后,须立即牵引提升运行速度,即

$N_1 = 2$ 。列车在靠近终点时,须依靠制动实现站台停车,即 $N_K = -1$ 。在列车运行过程中,须满足表 1 所示的运行模式切换条件,故列车在停站制动前,应处于惰行运行状态,即 $N_{K-1} = 1$ 。因此,求解变量可化简为:

$$x = \{X_2, \dots, X_K, N_2, \dots, N_{K-2}\} \quad (8)$$

表 1 列车控制模式切换约束条件

切换后模式	切换前不同模式的约束条件			
	牵引模式	巡航模式	惰行模式	制动模式
牵引	○	○	○	●
巡航	○	○	○	●
惰行	○	○	○	○
制动	●	●	○	○

注:○—可以切换;●—不可切换。

3 遗传算法

遗传算法结合了生物进化思想与计算机科学技术,适用于求解优化类问题,已大量应用于铁路领域。遗传算法一般包含选择、交叉及变异等运算过程。

3.1 变量编码

对于式(8),由于变量的求解域较大,需要对变量进行实数编码,以缩短变量的字符串长度。这样既能提高求解精度,还能提高求解效率。

3.2 适应度函数

遗传算法中,用适应度函数值来评价解的质量。适应度函数值越低,解的质量越好。本文采用的遗传算法适应度函数 y_F 为:

$$y_F = \alpha \max \left\{ \frac{E_w - E}{E_w}, 0 \right\} + (1 - \alpha) \max \left\{ \frac{t_w - t_z}{t_w}, 0 \right\} \quad (9)$$

3.3 选择运算

选择运算可实现对群体中个体的优胜劣汰:适应度低的个体,被遗传到下一代群体中的概率大;适应度高的个体,被遗传到下一代群体中的概率小。

本文采用轮盘赌作为遗传算法的选择算子,个体被选中的概率与其适应度函数值大小成反比。若个体 i 的适应度为 f_i ,则个体 i 被选中遗传到下一代群体的概率 P_i 为:

$$P_i = \frac{1}{f_i} / \sum_{i=1}^n \frac{1}{f_i} \quad (10)$$

3.4 交叉运算

交叉运算对两个相互配对的染色体按交叉概率 P_c 交换其部分基因,形成两个新个体。交叉运算是产生新个体的主要方法。

本文采用多点交叉作为遗传算法的交叉算子,在个体编码串上随机选择 q 个交叉点,然后在相邻点之间相互交换两个配对个体的部分染色体。

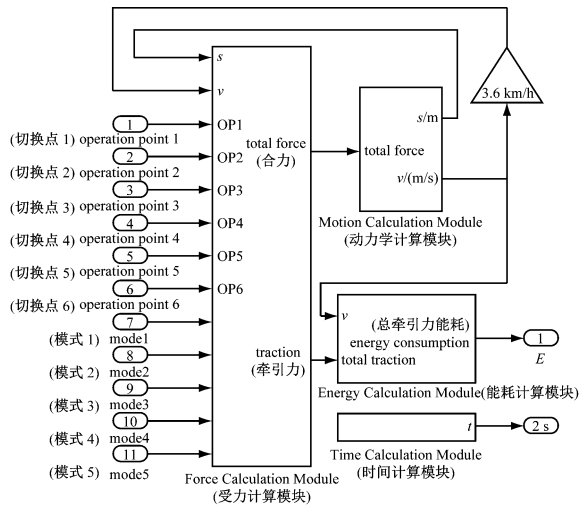
3.5 变异运算

变异运算按变异概率 P_m ,将个体编码串中的某些基因值用其他基因值来替换,从而形成一个新的个体。遗传算法中,变异运算是产生新个体的辅助方法,决定了遗传算法的局部搜索能力。

本文采用高斯变异作为遗传算法的变异算子。

4 仿真计算

基于 Simulink 软件,建立列车节能优化运行的仿真计算模型(以下简称“Simulink 计算模型”),如图 2 所示。该模型包括牵引力计算模块、列车动力学计算模块、能耗计算模块和运行时间计算模块。



注:OP 为切换点。

图 2 Simulink 计算模型结构示意图

Fig. 2 Diagram of Simulink calculation model structure

本文选取了一段 $D = 30$ km 的区间线路作为案例区间,列车车辆参数按文献[2]取值,并按不同的坡度和运行场景设计 2 个仿真案例。针对仿真案例,利用遗传算法分别优化惰巡策略和多次惰行控制策略下的列车运行曲线,并由 Simulink 计算模型计算得到优化后列车运行曲线对应的适应度、运行

能耗及运行时间,以进一步分析不同场景下两种控制策略的有效性。

4.1 仿真案例一

仿真案例一中,案例区间划分为 $\theta = -5\%$ 的长下坡区段(区段 1)和 $\theta = 5\%$ 的长上坡区段(区段 2),线路参数如表 2 所示。按区间坡度,案例区间存在 2 个限速区段($L = 2$),故 $K = 6$ 。因此 $x = \{X_2, X_3, X_4, X_5, X_6, N_2, N_3, N_4\}$ 。

表 2 仿真案例一的线路参数

Tab. 2 Line parameters of simulation Case 1

区段	区段坐标范围/km	区段限速/(km/h)	$\theta/\%$	目标运行时间/s	目标运行能耗/(kWh)
区段 1	[0,15)	200	-5	650	570
区段 2	[15,30]	300	5	650	1 020

假设列车正点运行,则 $\alpha = 0.5$;设置 $P_c = 0.8$, $P_m = 0.3$,初始种群大小为 20,迭代次数为 100 次,利用遗传算法依次优化惰巡策略和多次惰行控制策略下的列车运行曲线,并计算对应的 y_F 、 E 及 t_z 。案例一的仿真计算结果如表 3 所示。

表 3 仿真案例一的计算结果

Tab. 3 Calculation results of simulation Case 1

控制策略	区段	y_F	$E/(kWh)$	t_z/s
惰巡策略	区段 1	0.002 5	569.11	653.2
	区段 2	0.005 1	1 021.00	656.0
多次惰行控制策略	区段 1	0.007 3	557.61	659.3
	区段 2	0.015 3	1 019.00	668.0

由表 3 可见:当列车运行在区段 1 时,两种控制策略的优化结果相近;当列车运行在区段 2 时,两种控制策略下的列车牵引能耗相近,且多次惰行控制策略的运行时间更长、适应度更高。可见,惰巡策略的优化结果明显更好。

经分析,当列车运行在长上坡区段时,多次惰行控制策略无法使列车以较高的速度长时间持续运行,部分路段以列车最大牵引控制模式运行;当列车运行在长下坡区间时,两种控制策略下的列车均能以较高速度长时间持续运行,满足运行能耗和时间的要求,没有明显差异。因此,当列车运行在长上坡区段时,司机应采用惰巡策略来控制列车行车。

4.2 仿真案例二

仿真案例二中,案例区间 θ 均取 0,并在此基础

上设置了 5 个运行场景。在 5 个运行场景中, t_w 均取 650 s, E_w 依次取 800 kWh、790 kWh、780 kWh、770 kWh、760 kWh。选择与案例一相同的适应度函数及遗传算法算子, 针对 5 个运行场景, 利用遗传算法依次优化惰巡策略和多次惰行控制策略下的列车运行曲线, 并计算对应的适应度, 结果如图 3 所示。

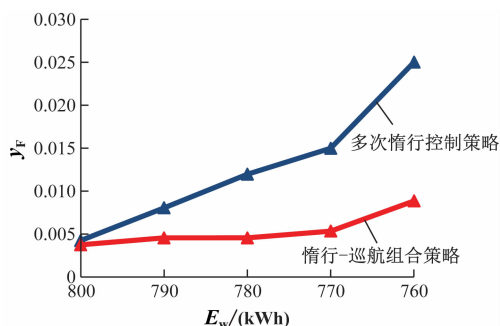


图 3 仿真案例二计算结果

Fig. 3 Calculation results of simulation Case 2

由图 3 可知: 与多次惰行控制策略相比, 惰巡策略优化解的适应度更低, 说明其优化质量更高; 且随着目标运行能耗的递减, 惰巡策略优化解的适应度变化小, 稳定性高。由此可知, 在相同目标运行时间的条件下, 司机采用惰巡策略的节能效果更好, 且稳定性高。

5 结语

本研究在早期由“最大牵引、惰行和制动”3 种控制模式组成的列车惰行控制策略的基础上, 加入了巡航控制模式, 构成了巡航-惰行组合控制策略。基于 Simulink 仿真软件, 以列车运行能耗和运行时间为优化目标, 构建 Simulink 计算模型。利用遗传算法分别优化惰巡策略和多次惰行控制策略下的列车运行曲线。根据计算结果, 分析比对两种控制策略下的列车运行节能优化效果, 得到以下结论:

当列车运行在上坡区间时, 司机采用巡航-惰行组合控制策略达到的节能优化效果更好。在下坡区间运行时, 两种控制策略下的列车节能优化效果差异不大。在目标运行时间相同的条件下, 司机采用惰巡策略达到的节能优化效果更好且稳定性高。

参考文献

- [1] GONZÁLEZ-GIL A, PALACIN R, BATTY P, et al. A systems approach to reduce urban rail energy consumption [J]. Energy Conversion and Management, 2014, 80: 509.
- [2] 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, 2016, 17(1): 2.
- [3] WONG K K, HO T K. Coast control of train movement with genetic algorithm [C] // The 2003 Congress on Evolutionary Computation, 2003. CEC '03. Canberra: IEEE, 2003: 1280.
- [4] 荀径, 杨欣, 宁滨, 等. 列车节能操纵优化求解方法综述 [J]. 铁道学报, 2014, 36(4): 14.
XUN Jing, YANG Xin, NING Bin, et al. Survey on trajectory optimization for train operation [J]. Journal of the China Railway Society, 2014, 36(4): 14.
- [5] CHANG C S, SIM S S. Optimising train movements through coast control using genetic algorithms [J]. IEE Proceedings-Electric Power Applications, 1997, 144(1): 65.
- [6] 卢启衡, 冯晓云, 王青元. 基于遗传算法的追踪列车节能优化 [J]. 西南交通大学学报, 2012, 47(2): 265.
LU Qiheng, FENG Xiaoyun, WANG Qingyuan. Energy-saving optimal control of following trains based on genetic algorithm [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2012, 47(2): 265.
- [7] ASNIS I A, DMITRUK A V, OSMOLOVSKII N P. Solution of the problem of the energetically optimal control of the motion of a train by the maximum principle [J]. USSR Computational Mathematics and Mathematical Physics, 1985, 25(6): 37.
- [8] BENJAMIN B, MILROY I, PUDNEY P. Energy-efficient operation of long-haul trains [C] // Fourth International Heavy Haul Railway Conference 1989. Brisbane: International Heavy Duty Federation, 1989: 369.
- [9] 王杰. CTCS-2 级 + ATO 列车运行控制系统方案研究 [J]. 铁道通信信号, 2011, 47(6): 11.
WANG Jie. Study on combining CTCS-2 level with ATO train control system [J]. Railway Signalling & Communication, 2011, 47(6): 11.
- [10] 顾青. 城市轨道交通列车节能优化运行研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2014.
GU Qing. Energy-efficient optimization driving method for trains in urban rail transit [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2014.

· 收稿日期: 2024-06-04 修回日期: 2024-06-24 出版日期: 2024-11-10

Received: 2024-06-04 Revised: 2024-06-24 Published: 2024-11-10

· 通信作者: 高豪, 工程师, gaohao@casco.com.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