

在不改变区间运行时间的条件下地铁 列车制动率的仿真优化^{*}

潘 洋

(广州地铁设计研究院股份有限公司, 510030, 广州)

摘 要 [目的]随着我国城市轨道交通绿色低碳发展目标的提出,地铁节能减排的压力与日俱增。牵引能耗是地铁运营中最主要的能源消耗。因此,有必要对列车牵引能耗进行优化研究。[方法]考虑地铁设计和运营过程中列车制动率偏低的问题,在不改变区间运行时间的条件下即定时条件下,提出适当增加列车制动率和降低最高巡航速度的节能运行策略。在建立列车牵引仿真计算模型的基础上,提出定时条件下的计算方法。通过案例仿真来验证模型的可行性,以列车制动率为主要对象,分析其对牵引能耗的影响。[结果及结论]以平直区间进行仿真计算,结果表明:定时条件下,最高巡航速度越大的列车对制动率的变化越敏感,列车制动率提高的初期能明显降低列车最高巡航速度,从而达到降低牵引能耗的效果。以广州市域快轨 22 号线某区间为例进一步仿真验证节能策略的可行性及其节能效果,结果表明:定时条件下,当该区间制动率从 0.60 增加到 0.85 时,列车最高巡航速度可以从 141 km/h 下降至 117 km/h,可节约能耗比达 30%,节能效果明显。因此,地铁设计和运营中可适当提高列车制动率以节省牵引能耗。

关键词 地铁;牵引能耗;制动率;定时算法;仿真计算

中图分类号 TK01⁺⁸

DOI:10.16037/j.1007-869x.2025.01.057

Simulation and Optimization of Metro Train Braking Rate under the Timing Condition

PAN Yang

(Guangzhou Metro Design & Research Institute Co., Ltd.,
510030, Guangzhou, China)

Abstract [Objective] With the proposal of a green and low-carbon development goal for urban rail transit in China, metro is facing a daily increasing pressure of energy saving and emission reduction. Since traction consumes the main energy in metro operation, it is necessary to conduct a study on the optimization of traction energy consumption. [Method] In consideration of the low train braking rate in the process of metro design and operation, an energy-saving operation strategy is

proposed by appropriately increasing the train braking rate and lowering the maximum cruising speed under fixed interval running time condition, that is, under the timing condition. Based on the establishment of the train traction simulation calculation model, a calculation method under the timing condition is proposed. The feasibility of the model is verified through case simulation, and the impact of the braking rate on traction energy consumption is mainly analyzed. [Result & Conclusion] Simulation calculation is conducted on a flat and straight interval, results showing that under the timing condition, the larger the maximum cruising speed of the train is, the more sensitive it is to the change of the braking rate. In the initial period, the increase of train braking rate can obviously bring down the maximum cruising speed of the train, achieving the effect of reducing the traction energy consumption. The feasibility of the energy-saving strategy and its effect are further verified on a specific interval of Guangzhou Urban Rail Line 22. The results show that under the timing condition, when the braking rate on the interval is increased from 0.6 to 0.85, the maximum cruising speed of the train can be reduced from 141 km/h to 117 km/h, saving 30% of the energy consumption with a significant energy-saving effect. As a conclusion, the train braking rate can be appropriately increased in the metro design and operation to save traction energy consumption.

Key words metro; traction energy consumption; braking rate; timing algorithm; simulation calculation

截至 2021 年底,我国内地共 50 个城市累计开通地铁里程超过 7 000 km^[1]。随着“碳达峰、碳中和”目标的提出,城市轨道交通面临着绿色低碳发展的严峻考验。寻求合理的列车节能驾驶策略是城市轨道交通系统节能的关键^[2]。现有的研究多考虑巡航速度、惰行点位置等参数以求解节能速度-距离曲线,或者通过运营组织优化减少牵引能耗^[3-6],对于列车本身性能中的制动率研究还较少。

^{*} 广州地铁设计研究院股份有限公司科研项目(KY-2022-081)

地铁实际运营中的制动率往往低于设计值。本文旨在探讨在不改变区间运行时间的条件下,即定时条件下制动率对列车牵引能耗的影响及节能运行策略,为地铁设计和运营提供参考。

1 列车牵引仿真计算

1.1 列车动力学分析

城市轨道交通列车在实际运行中受牵引力、制动力和运行阻力的作用^[1]。列车所受合力为:

$$F(x, v, u) = u_i F_T(x, v) + u_j F_B(x, v) - f(x, v) \quad (1)$$

式中:

x ——列车位置;

v ——列车速度;

$F_T(x, v)$ ——列车所受的牵引力;

$F_B(x, v)$ ——列车所受的制动力;

$f(x, v)$ ——列车所受的阻力;

$F(x, v, u)$ ——列车所受合力;

u_i, u_j ——列车控制工况系数。

不同控制工况下 u_i 和 u_j 的取值情况见表1。

表1 列车控制工况系数

Tab.1 Coefficient of train control working condition

控制工况	u_i	u_j
牵引	1	0
巡航	1	0
惰行	0	0
制动	0	-1

牵引力和制动力应考虑列车性能与牵引制动率,计算公式如下:

$$\begin{cases} F_T(x, v) = \alpha F_{\max}(v) \\ F_B(x, v) = \beta F_{\min}(v) \end{cases} \quad (2)$$

式中:

$F_{\max}(v), F_{\min}(v)$ ——列车在速度 v 时最大的牵引力和最大的制动力;

α ——列车牵引率;

β ——列车制动率。

运行阻力由列车所处位置和当前速度共同决定,主要包括了基本阻力和附加阻力。基本阻力伴随列车运行全过程,主要与列车制式、编组等有关;附加阻力包括坡道附加阻力、曲线附加阻力、隧道附加阻力^[2],主要由线路条件决定。

1.2 运行约束条件

列车实际运行过程中还受到牵引特性曲线、起

终点状态等条件约束。

1) 受力约束:牵引力和制动力受到牵引制动特性曲线的限制。

2) 起终点状态约束:列车在区间起点和终点的速度均为0,同时满足停车精度的要求。

3) 速度约束:列车实际运行需遵守区间限速的约束。

1.3 牵引能耗与区间运行时间计算

将列车视为刚性质点,在同一仿真时段内列车的加速度保持不变。通过受力分析计算不同时刻下列车的位置、速度、加速度等信息。列车在牵引工况和巡航工况时需要施加牵引力^[3],以此计算牵引能耗。当列车制动停站达到精度要求时,记录此时的仿真时段总数,从而得出区间运行时间。

2 定时牵引算法

文献基于庞德里亚金极大值原理证明了列车节能的速度剖面包括“牵引、巡航、惰行、最大制动”4种控制工况^[4]。假定列车在区间的惰行点不变,通过调节巡航速度和制动率可以实现定时效果。算法设计流程如下:

步骤1 数据初始化。仿真计算某制动率和某惰行点下的区间运行时间,定义为标准时间;同时定义巡航速度允许调节值和时间允许误差值。

步骤2 调整参数进行迭代计算,巡航速度调节一次后计算区间运行时间。

步骤3 时间判断,将步骤2得到的区间运行时间与步骤1得到的标准时间对比,如果小于时间允许误差值,转入步骤4,否则转入步骤2。

步骤4 输出对应的区间运行时间和牵引能耗等数据,同时记录巡航速度、制动率等参数;结束计算。

3 案例分析

3.1 仿真试验

选取2.5 km平直区间做仿真试验。以制动率取0.6时计算得到的区间运行时间为标准时间。时间允许误差值为0.5 s。图1为定时条件下不同最高巡航速度的列车在各制动率下的速度剖面。

由图1可知:定时条件下,最高巡航速度越大的列车,随着制动率的提高,可以降低的巡航速度就越大。在制动率提高的初期,巡航速度降低的效果尤为明显。表2为仿真计算得到各制动率下的牵引

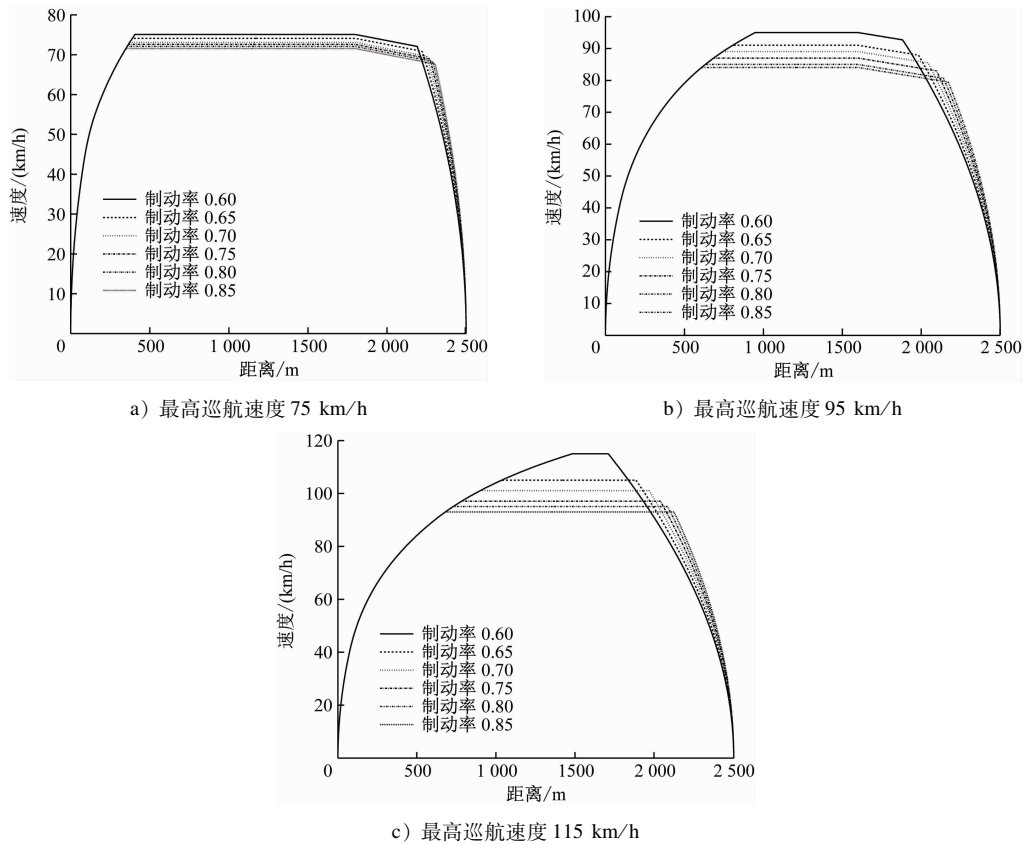


图 1 定时条件下不同制动率所对应的速度剖面

Fig. 1 Speed profile corresponding to different braking rates under timing conditions

表 2 各制动率下的运行时间和牵引能耗仿真计算结果

Tab. 2 Simulation calculation results of train running time and traction energy consumption under different braking rates

最高巡航 速度/(km/h)	制动率	实际巡航 速度/(km/h)	巡航速度 减少比例/%	牵引能耗/ (kWh)	运行时间/s	牵引能耗累计 减少比例/%
75	0.60	75.1	0	30.69	151.3	0
	0.65	74.1	-1.3	30.23	151.3	-1.50
	0.70	73.1	-2.7	29.76	151.5	-3.03
	0.75	72.6	-3.3	29.53	151.4	-3.78
	0.80	72.1	-4.0	29.29	151.4	-4.56
	0.85	71.6	-4.7	29.05	151.4	-5.34
95	0.60	95.1	0	56.58	143.3	0
	0.65	91.1	-4.2	52.72	143.4	-6.82
	0.70	89.1	-6.3	50.89	143.0	-10.06
	0.75	87.0	-8.5	49.04	143.1	-13.33
	0.80	85.0	-10.6	47.26	143.5	-16.47
	0.85	84.1	-11.6	46.42	143.3	-17.96
115	0.60	115.0	0	66.68	130.4	0
	0.65	105.0	-8.7	58.05	130.2	-12.94
	0.70	101.1	-12.1	54.87	130.0	-17.71
	0.75	97.1	-15.6	51.42	130.5	-22.89
	0.80	95.1	-17.3	49.74	130.5	-25.40
	0.85	93.0	-19.1	48.02	130.7	-27.98

能耗与运行时间数据。

由表 2 可知:

1) 制动率从 0.60 提高到 0.85, 最高巡航速度分别为 75 km/h、95 km/h、115 km/h 的列车, 其牵引能耗可分别节省 5.34%、17.96%、27.98%。

2) 随着制动率的提高, 最高巡航速度越大的列车节能效果越明显。当制动率提高到较大值时, 可以降低的巡航速度明显减少。这是因为此时列车需要保持一定的速度来维持定时效果。

3.2 实例仿真分析

3.2.1 实例数据

结合实际的线路条件进行分析, 选取广州市域快线 22 号线(规划方案)西塱—芳村区段。该区段长 3 739 m, 区间最高限速 160 km/h, 选用最高运营速度 160 km/h 的市域 D 型 8 节编组(6 动 2 拖)列车。列车戴维斯方程参数 a 、 b 、 c 分别为 1.008 980、0.005 102、0.000 199, 自重 381 t, 定员 2 030 人。

3.2.2 结果与分析

以制动率取 0.60 计算得到的区间运行时间为标准时间。图 2 为仿真计算得到各制动率下的列车速度剖面, 图 3 为定时条件下各制动率对牵引能耗与巡航速度的仿真影响。

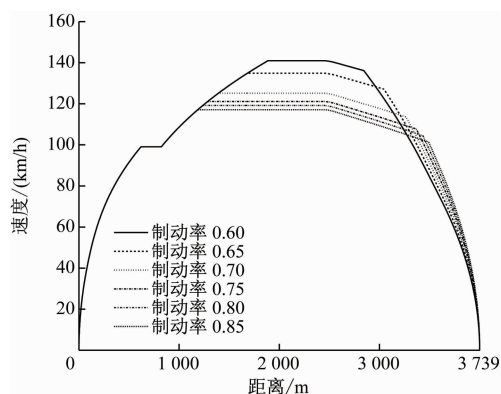


图 2 定时条件下各制动率所对应的速度剖面(西塱—芳村区间)

Fig. 2 Speed profiles corresponding to different braking rates under timing conditions (Xilang-Fangcun section)

由图 2 和图 3 可知: 与选取 2.5 km 的平直区间仿真计算类似, 广州市域快线 22 号线的区段仿真计算也表明, 制动率的提高可以明显降低列车的巡航速度, 同时减少牵引能耗。依据计算结果, 巡航速度可以从 141 km/h 下降至 117 km/h, 牵引能耗节省比最大可达到 30%。

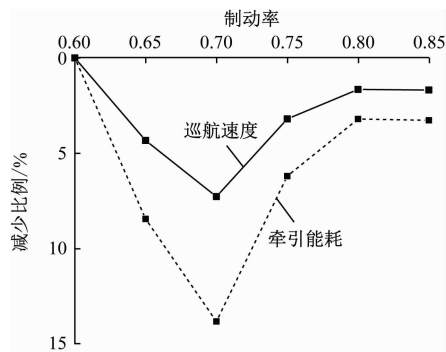


图 3 定时条件下制动率对牵引能耗与巡航速度的仿真影响

Fig. 3 Simulated influence of braking rate on traction energy consumption and cruising speed under timing conditions

4 结语

面向城市轨道交通设计与实际运营中的列车制动率取值问题, 在分析列车牵引计算模型的基础上, 设计了定时条件下的列车牵引能耗与运行时间计算方法。应用提高制动率和降低巡航速度的节能策略, 从理想平直线路仿真分析了制动率对牵引能耗的影响, 最后以广州市域快线 22 号线某区段为案例仿真验证了该策略的可行性。结果表明, 制动率的提高可以降低牵引能耗, 可为地铁列车选取合适的制动率提供参考。但本文仅基于四阶段控制策略, 与实际的列车控制工况可能存在一定的出入, 未来将结合智能算法寻求更为合理的制动率取值。

参考文献

- [1] 施仲衡, 丁树奎. 城市轨道交通绿色低碳发展策略[J]. 都市快轨交通, 2022, 35(1): 1.
SHI Zhongheng, DING Shukui. Strategies for green and low-carbon development of urban rail transit[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2022, 35(1): 1.
- [2] 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.
- [3] YE H, LIU R. Nonlinear programming methods based on closed-form expressions for optimal train control[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2017, 82: 102.
- [4] 代位, 韩宝明, 周玮腾. 面向定时节能运行的列车牵引计算算法[J]. 都市快轨交通, 2019, 32(4): 68.
DAI Wei, HAN Baoming, ZHOU Weiteng. Study on train traction calculation algorithm: a time-and energy-saving flow[J]. Ur-

- ban Rapid Rail Transit, 2019, 32(4): 68.
- [5] SU S, WANG X, CAO Y, et al. An energy-efficient train operation approach by integrating the metro timetabling and eco-driving [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2020, 21(10): 4252.
- [6] 付义龙, 荆敏, 沈景炎. 轨道交通列车节能运行组织措施探讨[J]. 都市快轨交通, 2020, 33(1): 36.
- FU Yilong, JING Min, SHEN Jingyan. Energy-saving operation and organization measures of rail transit trains[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2020, 33(1): 36.
- [7] 高豪, 张亚东, 郭进, 等. 基于动态规划的列车节能操纵优化方法[J]. 铁道学报, 2020, 42(8): 76.
- GAO Hao, ZHANG Yadong, GUO Jin, et al. Optimization of energy-efficient train operation based on dynamic programming approach[J]. Journal of the China Railway Society, 2020, 42(8): 76.
- [8] 汤旻安, 王茜茜. 基于黄金比例遗传算法的动车组列车节能优化研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2020, 17(1): 16.

- TANG Min'an, WANG Qianqian. Research on energy-saving optimization of EMU trains based on golden ratio genetic algorithm [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2020, 17(1): 16.
- [9] 张惠茹, 贾利民, 王莉, 等. 面向列车节能控制的时刻表优化[J]. 铁道学报, 2019, 41(2): 8.
- ZHANG Huiru, JIA Limin, WANG Li, et al. Study of timetable optimization based on train energy saving control[J]. Journal of the China Railway Society, 2019, 41(2): 8.
- [10] HOWLETT P. The optimal control of a train[J]. Annals of Operations Research, 2000, 98(1/2/3/4): 65.

· 收稿日期:2022-09-13 修回日期:2022-11-05 出版日期:2025-01-10
Received:2022-09-13 Revised:2022-11-05 Published:2025-01-10
· 通信作者:潘洋,工程师,798125501@qq.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 303 页)

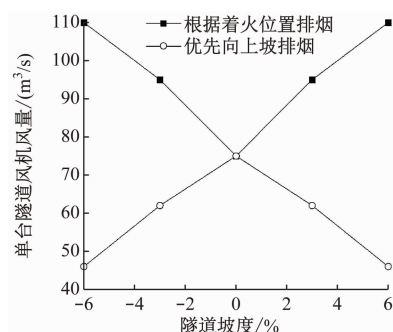


图3 两站一区间下隧道风机配置风量对比

Fig.3 Comparison of the fan configured air volumes in the tunnel section between two stations

4 结论

1) 隧道坡度为6%、热释放率为20 MW的火源相比坡度为3%、热释放率为5 MW的火源,临界风速从2.4 m/s增大至3.55 m/s,说明跨坐式单轨隧道火灾临界风速远高于常规地铁。

2) 火源热释放率为20 MW,坡度从6%变化至-6%,临界风速从2.46 m/s增大至3.55 m/s,说明跨坐式单轨隧道火灾临界风速受坡度影响尤为明显,因此设备配置计算应重点考虑坡度影响。

3) 对于两站一区间隧道,车站隧道风机配置风量与坡度呈线性相关。坡度为0%时,隧道风机单台风量约75 m³/s;坡度为-6%,隧道风机单台风量约110 m³/s;坡度为6%时,隧道风机单台风量约

46 m³/s。对于车站至洞口区间隧道,洞口射流风机可通过车站隧道风机结合坡度反算得到。

4) 常规地铁隧道火灾根据着火位置排烟,车站隧道风机风量与坡度的绝对值呈线性正相关。针对跨坐式单轨隧道火灾,创新性提出优先向上坡排烟的方案,此时隧道风机风量与坡度的绝对值呈线性负相关,特别是对于大坡度隧道,极大地减少了设备投资。

参考文献

- [1] 张铁英. 单轨列车的区间火灾救援与消防对策[J]. 城市轨道交通研究, 2014, 17(10): 25.
- ZHANG Tiejing. Rescue and protection solutions for monorail line section fire[J]. Urban Mass Transit, 2014, 17(10): 25.
- [2] YI L, XU Q, XU Z, et al. An experimental study on critical velocity in sloping tunnel with longitudinal ventilation under fire[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2014, 43: 198.
- [3] LI J, LI Y F, CHENG C H, et al. A study on the effects of the slope on the critical velocity for longitudinal ventilation in tilted tunnels[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2019, 89: 262.

· 收稿日期:2022-09-19 修回日期:2022-11-01 出版日期:2025-01-10
Received:2022-09-19 Revised:2022-11-01 Published:2025-01-10
· 通信作者:唐海峰,工程师,tahfeng@163.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