

# 基于精准停车及节能优化的列车速度跟随控制

彭云龙<sup>1</sup> 康元磊<sup>1</sup> 于逸尘<sup>2</sup> 李杰<sup>2</sup>

(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] 列车自动运行系统可以通过控制列车各执行机构实现列车的自主行驶, 对节约轨道交通系统的运行成本、提高列车运行安全保障极为重要。针对单一控制方法在列车自动运行速度跟随控制过程中停车准确性较低, 未能兼顾能耗优化等问题, 提出了一种列车自动运行速度跟随控制策略。[方法] 所提方法在传统 PID(比例-积分-微分)控制的基础上, 通过模糊控制器对 PID 参数进行在线整定调节, 并针对列车精准停车及运行节能分别进行算法设计。当列车运行至停车点附近时, 停止使用基于预设目标速度的速度反馈控制方式, 转而计算精准停车所需加速度, 并进行加速度反馈控制以提高停车精准性。同时在列车巡航过程中设计了一种牵引-惰行循环的节能巡航工况, 在检测列车符合相应巡航条件后, 采用该工况实现整体运行能耗的优化。[结果及结论] 在 MATLAB/Simulink 仿真软件中建立了列车及控制器的仿真模型, 通过与 PID 控制及模糊自适应 PID 控制在精准停车、节能等性能指标的对比, 验证了所提方法和模型的有效性。

**关键词** 城市轨道交通; 列车自动运行; 模糊自适应控制; 速度跟随控制; 精准停车; 节能优化

**中图分类号** U284.48

**DOI**:10.16037/j.1007-869x.2024.06.039

## Train Speed Following Control Based on Precise Parking and Energy Saving Optimization

PENG Yunlong<sup>1</sup>, KANG Yuanlei<sup>1</sup>, YU Yichen<sup>2</sup>, LI Jie<sup>2</sup>

(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] Automatic train operation (ATO) can achieve train autonomic running by controlling each actuator of the train, and is of great significance to reduce the operating cost of rail transit and further ensure train operation safety. In response to the problems such as low parking precision and failure to optimize energy consumption with the single control method in the process of ATO speed following control, a strategy for ATO speed following control is proposed. [Method] Based on the traditional PID (proportional integral-differ-

ential) control, the proposed approach performs online turning and adjustment of PID parameters by using fuzzy controller, and designs algorithms for train precise parking and energy saving operation separately. When the train is running closer to the stopping point, the speed feedback control method based on the preset target speed will fall out of use, the acceleration required for precise parking is calculated instead, and the acceleration feedback control is performed to improve the parking precision. At the same time, an energy saving cruise condition with traction-coasting cycle during the train cruise is designed. When the train is detected to meet a certain cruise condition, the corresponding condition shall be used to optimize the overall operation energy consumption. [Result & Conclusion] A simulation model for the train and controller is established in MATLAB/Simulink simulation software. The proposed method and model are verified to be effective by comparing the performance indicators such as precise parking and energy saving under PID control and fuzzy adaptive PID control.

**Key words** urban rail transit; automatic train operation; fuzzy adaptive control; speed following control; precise parking; energy saving optimization

近年来随着 ATO(列车自动运行)系统应用日益广泛, 相应速度跟随控制方法也引起业内诸多专家学者的广泛关注, 形成了一定研究成果<sup>[1-3]</sup>。目前主流 ATO 速度跟随控制方法主要有传统 PID(比例-积分-微分)控制、模糊控制、遗传算法和神经网络控制等。传统 PID 控制方法在目前 ATO 系统中得到较为广泛的应用, 但是存在工况切换次数过多、舒适性较差、能耗较高、参数难以整定等问题<sup>[4]</sup>。遗传算法作为一种全局优化算法, 具有寻找全局最优解的能力, 但是耗费时间较长<sup>[5]</sup>, 神经网络算法也具有类似特点<sup>[6]</sup>。而模糊控制实时性好, 但是其单独使用时难以实现精准停车, 文献[7]采用模糊控制和 BP(反向传播)神经网络相结合的方法, 实现精准停车同时减少列车能耗, 但该方法并未考虑突发扰动因素, 鲁棒性较差。

本文通过模糊控制规则对 PID 参数进行实时调节,构建模糊自适应 PID 控制器对列车目标速度进行跟随控制,并通过速度、加速度分阶段反馈控制的方式提高列车停车准确性,同时通过增加节能巡航工况以优化列车运行节能指标。

## 1 列车动力学建模

在城市轨道交通列车系统动力学计算中,为简化运算且不失一般性,可将列车视作单质点模型进行相应分析,由此可得运动方程为<sup>[8]</sup>:

$$a = \frac{dv}{dt_r} = \frac{F_{\text{合}}}{(1 + \gamma)M} \quad (1)$$

式中:

$a$ ——列车加速度;

$t_r$ ——列车运行时间;

$v$ ——列车运行速度;

$F_{\text{合}}$ ——列车所受合力;

$M$ ——列车质量;

$\gamma$ ——列车回转质量系数,典型经验值为 0.06。

其中,  $F_{\text{合}}$  可以表示为:

$$F_{\text{合}} = F_{\text{tr}} - F_{\text{br}} - F_{\text{re}} \quad (2)$$

式中:

$F_{\text{tr}}$ ——列车牵引力;

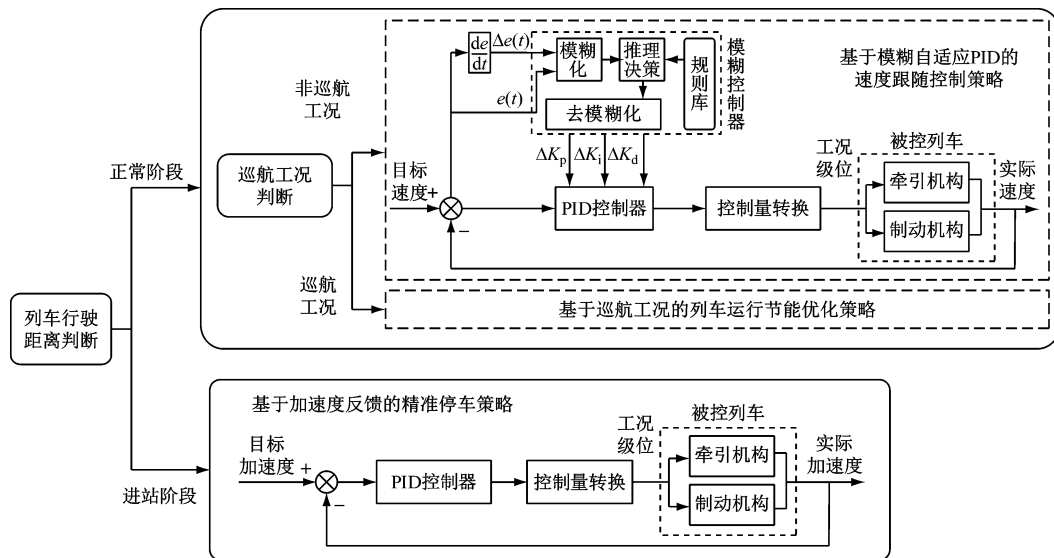
$F_{\text{br}}$ ——列车制动力;

$F_{\text{re}}$ ——列车所受阻力。

列车在运行过程所受阻力可以分为基本阻力与附加阻力两类,其中附加阻力包括弯道附加阻力和坡道附加阻力等,而基本阻力主要与列车型号及运行速度有关<sup>[9]</sup>。

## 2 改进 ATO 速度跟随控制策略

本文在 PID 控制基础上,提出一种兼顾精准停车和节能优化的改进 ATO 速度跟随控制策略(以下简称“改进控制策略”)。具体思路为:将运行区间划分为正常路段、巡航路段及精准停车路段。在正常路段中,通过模糊控制器对 PID 参数进行在线调整以优化控制;在巡航路段中,当满足巡航条件时,通过牵引-惰行循环的节能巡航工况,减少牵引区间长度,优化能耗指标;在精准停车路段中,从基于速度反馈的模糊自适应 PID 控制器切换为基于加速度反馈的 PID 控制器,通过减速度闭环实现更优的精准停车效果。改进控制策略的结构如图 1 所示。



注:  $e(t)$  为时刻  $t$  目标速度与实际速度反馈值的误差;  $\Delta e(t)$  为  $e(t)$  变化率;  $\Delta K_p$ 、 $\Delta K_i$  和  $\Delta K_d$  为 PID 控制器的 3 个参数调整量。

图 1 改进控制策略结构图

Fig. 1 Structure diagram with improved control strategy

### 2.1 基于模糊自适应 PID 的速度跟随控制策略

基于模糊自适应 PID 的速度跟随控制策略原理如图 1 中非巡航工况部分所示。首先,获取当前时刻  $t$  的目标速度,并计算  $e(t)$ ;随后,求取  $\Delta e(t)$ ,

并将二者作为模糊控制器的输入变量;经由模糊化处理后,根据规则库中事先整定完成的规则进行模糊推理,确定  $K_p$ 、 $K_i$  和  $K_d$  的调整量;最后,经过去模糊化处理得到实际参数调整量  $\Delta K_p$ 、 $\Delta K_i$  和  $\Delta K_d$ 。

在本算法中,输入变量和输出变量均采用七级模糊子集论域。输入变量  $e(t)$  的基本论域为  $[-1.5, 3.0]$ ,  $\Delta e(t)$  的基本论域为  $[-1.5, 3.0]$ 。输出变量

$\Delta K_p$  的基本论域为  $[-10, 10]$ ,  $\Delta K_i$  的基本论域为  $[-5, 5]$ ,  $\Delta K_d$  的基本论域为  $[-15, 15]$ 。输出变量与输入变量间模糊控制规则如表 1—表 3 所示。

表 1  $\Delta K_p$  模糊控制规则表Tab. 1 Tables of  $\Delta K_p$  fuzzy control rules

$e(t)$ 等级	$\Delta K_p$ 的模糊等级						
	$\Delta e(t)$ 为 NB 时	$\Delta e(t)$ 为 NM 时	$\Delta e(t)$ 为 NS 时	$\Delta e(t)$ 为 ZO 时	$\Delta e(t)$ 为 PS 时	$\Delta e(t)$ 为 PM 时	$\Delta e(t)$ 为 PB 时
NB	PB	PM	PM	PM	PS	ZO	ZO
NM	PB	PB	PB	PS	PS	ZO	NS
NS	PM	PM	PS	PS	ZO	NS	NS
ZO	PM	PM	PS	ZO	NS	NM	NM
PS	PS	PS	ZO	NS	NS	NM	NM
PM	PS	ZO	NS	NS	NM	NM	NB
PB	ZO	ZO	NS	NM	NM	NB	NB

注: 7 个模糊等级中, PB 为正大、PM 为正中、PS 为正小、ZO 为零、NS 为负小、NM 为负中、NB 为负大。下同。

表 2  $\Delta K_i$  模糊控制规则表Tab. 2 Tables of  $\Delta K_i$  fuzzy control rules

$e(t)$ 等级	$\Delta K_i$ 的模糊等级						
	$\Delta e(t)$ 为 NB 时	$\Delta e(t)$ 为 NM 时	$\Delta e(t)$ 为 NS 时	$\Delta e(t)$ 为 ZO 时	$\Delta e(t)$ 为 PS 时	$\Delta e(t)$ 为 PM 时	$\Delta e(t)$ 为 PB 时
NB	NB	NB	NM	NM	NS	ZO	ZO
NM	NB	NM	NM	NS	NS	ZO	NS
NS	NB	NM	NS	NS	ZO	PS	PS
ZO	NM	NM	NS	ZO	PS	PM	PM
PS	NM	NS	ZO	PS	PS	PM	PM
PM	ZO	ZO	PS	PS	PM	PM	PB
PB	ZO	ZO	PS	PS	PM	PB	PB

表 3  $\Delta K_d$  模糊控制规则表Tab. 3 Tables of  $\Delta K_d$  fuzzy control rules

$e(t)$ 等级	$\Delta K_d$ 的模糊等级						
	$\Delta e(t)$ 为 NB 时	$\Delta e(t)$ 为 NM 时	$\Delta e(t)$ 为 NS 时	$\Delta e(t)$ 为 ZO 时	$\Delta e(t)$ 为 PS 时	$\Delta e(t)$ 为 PM 时	$\Delta e(t)$ 为 PB 时
NB	PS	NS	NM	NB	NB	NB	PS
NM	PS	NS	NB	NB	NM	NS	ZO
NS	ZO	NS	NM	NS	NS	NS	ZO
ZO	ZO	NS	NS	NS	NS	NS	ZO
PS	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO
PM	PB	NS	PS	PS	PS	PM	PB
PB	PB	PM	PM	PS	PS	PS	PB

模糊自适应 PID 控制器的输出为代表速度误差的单一控制量。应用于列车时,还需要将该数值转化为列车执行结构所能接收的工况及对应级位。

## 2.2 基于巡航工况的列车节能优化策略

在列车巡航阶段,传统速度跟随控制方法往往

采用定速巡航的方法对牵引级位进行控制,若设置牵引-惰行循环的控制方法,则可以减少牵引区间长度,达到节能运行的目的<sup>[10]</sup>。巡航工况下的列车节能优化策略流程如图 2 所示。

为保证行车安全,在进入巡航工况前需要对列

车运行状态进行判断。只有满足全部巡航条件后,列车才能进入巡航工况。巡航条件包括:

1) 目标速度变化率较小,在阈值以内。所选阈值应稍大于目标速度曲线巡航区间的最大加速度变化率,令列车不满足进入牵引和制动阶段的条件。

2) 列车在一段时间内(如 2 s)速度极值与当前 ATO 目标速度误差不超过  $\pm 5\%$ 。此时,列车运行基本处于稳态,具体应用时的误差设定可根据实时性要求和安全性要求进行调整。

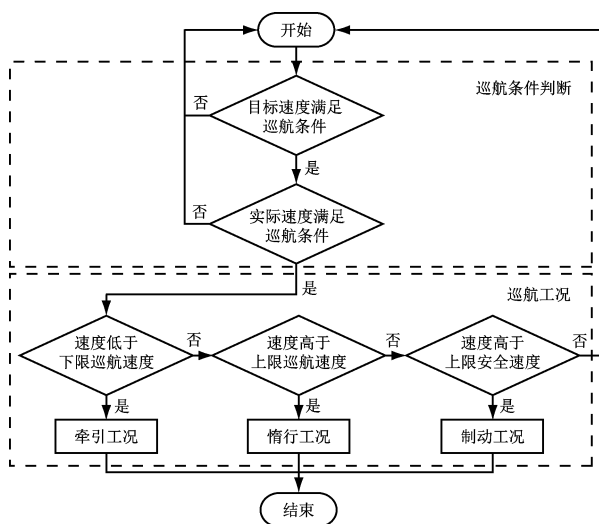
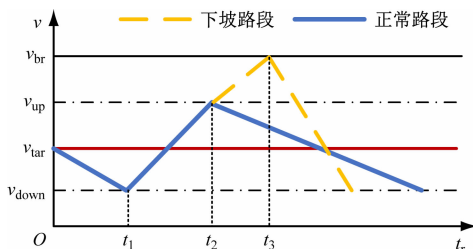


图 2 巡航工况下的列车节能优化策略流程图

Fig. 2 Flowchart of train energy-saving optimization strategy under cruising conditions

列车在每个控制周期都对巡航条件进行判断,仅当同时满足上述条件时,列车才进入巡航工况,当其中任一条件不满足时,均由模糊 PID 控制器进行控制。本文设计的巡航工况运行逻辑如图 3 所示。



注:  $v_{\text{down}}$  为下限巡航速度,  $v_{\text{tar}}$  为目标速度,  $v_{\text{up}}$  为上限巡航速度,  $v_{\text{br}}$  为上限安全速度;  $t_1$ 、 $t_2$ 、 $t_3$  为工况转换节点时刻。

图 3 巡航工况运行逻辑图

Fig. 3 Diagram of operation logic under cruising

当列车进入巡航工况时,控制器根据实际速度与速度阈值的关系来判断当前应切换的工况:

1) 当  $v \leq v_{\text{down}}$  时,如  $t_1$  时刻所示,此时列车输

出牵引工况,具体牵引级位根据舒适度及节能性指标设置,列车速度增加;

2) 当  $v \geq v_{\text{up}}$  时,如  $t_2$  时刻所示,此时列车输出惰行工况,速度下降至  $v_{\text{down}}$  并重复上述判断;

3) 若由于线路因素(如下坡路段)导致列车速度在惰行工况下仍持续上升,为保证行车安全,当  $v \geq v_{\text{br}}$  时,如  $t_3$  时刻所示,列车输出制动工况,使速度下降至  $v_{\text{down}}$  并重复上述判断。

## 2.3 基于加速度反馈的精准停车策略

列车停车误差主要来源于制动阶段,当 ATO 对速度目标曲线进行跟随时,往往不能在制动阶段保持稳定的制动加速度,从而造成停车误差。基于加速度反馈的精准停车策略将列车跟随控制分为正常阶段和进站阶段两部分:在正常运行阶段,使用基于速度反馈的控制器;当运行到距停车点附近时,利用列车实际位置对精准停车所需目标加速度进行计算,并执行加速度反馈控制。基于加速度反馈的精准停车策略流程如图 4 所示。

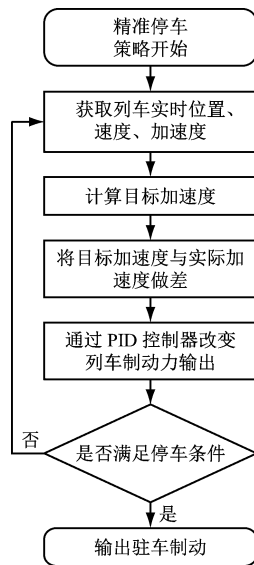


图 4 基于加速度反馈的精准停车策略流程图

Fig. 4 Flowchart for precise parking strategy based on acceleration feedback

当列车进入进站阶段后,目标加速度为:

$$a_{\text{tar}} = \frac{v^2}{2(s_{\text{end}} - s)} \quad (3)$$

式中:

$a_{\text{tar}}$ ——精准停车的目标加速度;

$s$ ——列车实时位置;

$s_{\text{end}}$ ——区间距离。

完成上述计算后,即可通过 PID 控制对列车实际的制动级位进行调节,实现精确停车。

### 3 仿真实验

#### 3.1 仿真系统建立

在 Matlab/Simulink 软件中搭建列车及 ATO 控制系统仿真模型,分别通过传统 PID、模糊 PID 及改进控制策略构建列车控制器对目标速度曲线进行跟随控制。仿真参数按某地铁线路两站间实际数据取值,如表 4 所示。仿真所得的跟随控制曲线及控制级位分别如图 5 及图 6 所示。

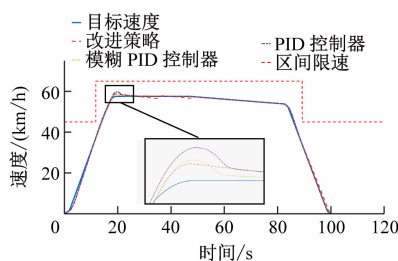
#### 3.2 仿真结果分析

分析各控制器性能可得,与传统 PID 控制器相比,采用模糊 PID 控制器进行参数整定的两类方法超调均较小,而改进控制策略整体跟随曲线与目标曲线间贴合程度更好,三种方法均符合安全要求及准时性要求。进一步地,通过舒适性、停车精准性及节能性指标对上述算法进行分析比较,以验证改进控制策略的可行性与有效性。

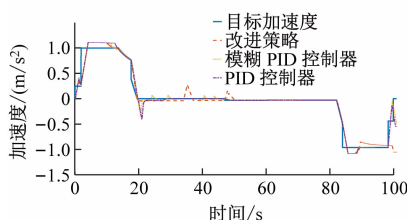
表 4 仿真参数取值表

Tab.4 Simulation parameter table

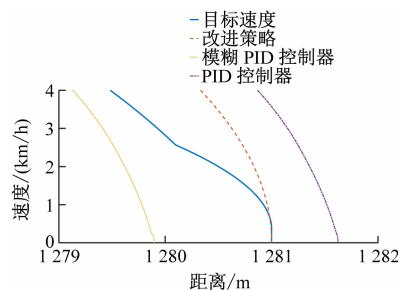
参数	取值
列车质量/t	359.4
列车长度/m	186.960
列车最大运行速度/(km/h)	160
出厂轮径/mm	860
最大可行制动加速度/(m/s <sup>2</sup> )	1.06
线路长度/m	1 281.0
站间限速/(km/h)	65
出入站限速/(km/h)	40
坐标为 0~83.0 m 段的线路坡度/‰	-1.52
坐标为 83.0~572.0 m 段的线路坡度/‰	0.20
坐标为 572.0~1281.0 m 段的线路坡度/‰	-2.8
坐标为 0~171.0 m 的线路曲线半径/m	-579.5
坐标为 647.6~758.8 m 的线路曲线半径/m	-1 500.0
坐标为 760.8~871.8 m 的线路曲线半径/m	1 500.0



a) 跟随控制 v-t 曲线



b) 跟随控制 a-t 曲线



c) 跟随控制 v-s 曲线(停车点)

图 5 跟随控制曲线

Fig. 5 Following control curve

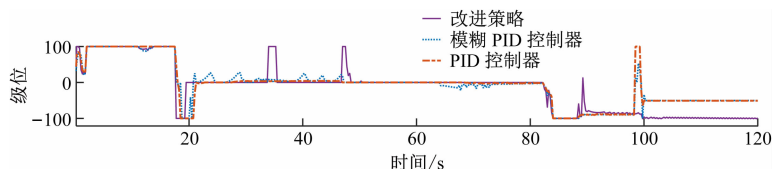


图 6 跟随控制级位

Fig. 6 Following control level

1) 舒适性。对比不同控制器所得加速度可知,同传统 PID 控制器及模糊自适应 PID 控制器相比,改进控制策略的级位变化次数显著减少,既提高了控制稳定性,也改善了乘客乘坐时的舒适性。

2) 停车精准性。由 PID 控制器及模糊 PID 控制器得到的停车点坐标分别为 1 281.623 473 m 和 1 279.896 902 m,与业界规定的  $\pm 0.3$  m 误差差距较大;由改进控制策略得到的停车点坐标为

1 281.000 015 m,可见显著提高了停车精度。

3) 节能性。通过对列车输出力做功的累计,PID 控制器及模糊自适应 PID 控制器控制下的能耗为 15.07 kWh 和 14.89 kWh,而本文所提优化策略控制下的能耗为 14.78 kWh,实现了节能目标。

### 4 结语

本文在对列车运动学模型进行分析的基础上,



提出了一种改进 ATO 速度跟随控制策略。在利用模糊控制器对 PID 参数进行在线整定的前提下,增加了牵引-惰行循环的巡航工况,节约了能耗,同时通过独立 PID 控制器对列车的制动阶段进行调整。仿真结果表明,所提方法在满足安全性及准时性的前提下,有效提高了列车 ATO 系统舒适性、停车精准性及节能性等性能指标。

本文在模型建立等方面仍存在提升空间,当前列车模型仅考虑了单质点情况,拟在后续研究中进一步建立多质点模型;同时,仍需考虑算法在更复杂线路环境下的改进与优化。

## 参考文献

- [1] 徐凯, 吴磊, 赵梅. 多种群分层联合优化的城轨列车 ATO 研究[J]. 铁道学报, 2018, 40(6): 90.  
XU Kai, WU Lei, ZHAO Mei. Study on urban rail train ATO based on unified optimization of multi-swarm hierarchical structure[J]. Journal of the China Railway Society, 2018, 40(6): 90.
- [2] 尚敬, 刘勇, 江帆. 机车自动驾驶技术研究与应[J]. 机车电传动, 2023(1): 1.  
SHANG Jing, LIU Yong, JIANG Fan. Research and application of locomotive automatic operation technology[J]. Electric Drive for Locomotives, 2023(1): 1.
- [3] 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.
- [4] 刘浩, 钱存元, 施招东. 基于模糊自适应 PID 控制的 ATO 系统控制算法[J]. 城市轨道交通研究, 2017, 20(3): 40.  
LIU Hao, QIAN Cunyuan, SHI Zhaodong. ATO system control algorithm based on fuzzy adaptive PID[J]. Urban Mass Transit, 2017, 20(3): 40.
- [5] 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): 599.
- ZHANG Jing, ZHU Aihong. Optimization method of automatic train operation speed curve based on genetic algorithm and particle swarm optimization[J]. Journal of Computer Applications, 2022, 42(2): 599.
- [6] 朱宇清, 白宝雪, 陈鸿辉, 等. 基于神经网络的货运列车速度曲线实时规划算法[J]. 控制与信息技术, 2019(3): 7.  
ZHU Yuqing, BAI Baoxue, CHEN Honghui, et al. A real-time speed profile planning algorithm for freight trains based on neural network[J]. Control and Information Technology, 2019(3): 7.
- [7] LIU W Y, HAN J G, LU X N. A high speed railway control system based on the fuzzy control method[J]. Expert Systems with Applications, 2013, 40(15): 6115.
- [8] 宋锴, 牛会想. 回转质量系数对高速列车牵引电算的影响[J]. 铁道机车车辆, 2010, 30(3): 56.  
SONG Kai, NIU Huixiang. Influence of rotary mass coefficient in high speed train traction calculation[J]. Railway Locomotive & Car, 2010, 30(3): 56.
- [9] 湛飞雨, 邱存勇. 基于切换系统的城市轨道交通列车 ATO 控制策略研究[J]. 计算机仿真, 2021, 38(7): 128.  
CHEN Feiyu, QIU Cunyong. ATO control strategy analysis of urban rail train based on switching system[J]. Computer Simulation, 2021, 38(7): 128.
- [10] 林颖. 基于在线计算方式的车载 ATO 运行模式曲线优化模型研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2013.  
LIN Ying. Online calculation based research of on-board ATO operation type profile optimization model[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2013.

· 收稿日期:2023-11-01 修回日期:2024-02-16 出版日期:2024-06-10  
Received:2023-11-01 Revised:2024-02-16 Published:2024-06-10  
· 第一作者:彭云龙,高级工程师,sf-pengyunlong@cqsf.com  
通信作者:于逸尘,硕士研究生,2130679@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

## 粤港澳大湾区将实现城际四线贯通运营

广佛南环(佛山西站—番禺站)、佛莞城际铁路(番禺站—东莞西站)即将开通运营,并将与已开通的佛肇城际(佛山西站—肇庆站)、莞惠城际铁路(东莞西站—小金口站)相连,粤港澳大湾区将实现城际四线贯通运营。

目前,广佛南环、佛莞城际将在完成试运行和各项相应的程序后尽快开通运营,开通后,将与已开通的佛肇城际、莞惠城际首末相连,实现四线贯通运营,形成一条全长 258 km、横跨 5 座城市、呈东西走向的交通大动脉,将有效加强广州、佛山、肇庆、东莞、惠州等 5 个城市的区域交通联系,大大缩短 5 个城市之间的通行时间,有助于加快形成“粤港澳大湾区 1 小时通勤圈”。  
(来源:广东发布)