

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2108765

# 城市轨道交通列车速度曲线预测函数控制改进算法\*

王龙达<sup>1</sup>, 王兴成<sup>2</sup>, 刘 罡<sup>3,4,5</sup>, 徐传芳<sup>1</sup>

(1. 大连交通大学自动化与电气工程学院 大连 116028; 2. 大连海事大学船舶电气工程学院 大连 116026; 3. 上海交通大学自动化系 上海 200240; 4. 内蒙古民族大学工学院 通辽 028000; 5. 江西新能源科技职业学院机电工程学院 新余 338004)

**摘 要:**为有效解决城市轨道交通列车速度曲线跟踪控制问题,提出了一种速度曲线预测函数控制改进算法 IPFC。所提出的预测函数控制改进算法选用阶跃函数和 Morlet 小波函数作为基函数,其依据目标速度曲线的变化程度,给出了一种预测函数控制的基函数选择策略,该策略可实现小波与阶跃基函数的切换。除此之外,给出了一种基于系统性能模糊满意度与优化因子的柔化因子非线性自适应在线调整策略,通过调整优化因子能够进一步提升跟踪控制性能。基于大连城市轨道交通 12 号线中旅顺新港至铁山镇的城市轨道交通列车速度曲线跟踪控制场景,在硬件在环实验环境下得到的实验结果表明,所提出的 IPFC 能够显著改善控制系统的控制性能,节能、准时、停车精确、舒适 4 个性能指标都有明显的改善,特别是准时与精确停车,相比广泛应用于实际的传统改进算法均大幅提升超过了 55%。

**关键词:**城市轨道交通;速度曲线;预测函数控制;柔化因子;Morlet 小波函数

**中图分类号:** U268.7 TH113.2 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 580.3099

## An improved predictive function control algorithm for velocity curve of urban rail vehicle

Wang Longda<sup>1</sup>, Wang Xingcheng<sup>2</sup>, Liu Gang<sup>3,4,5</sup>, Xu Chuanfang<sup>1</sup>

(1. School of Automation and Electrical Engineering, Dalian Jiaotong University, Dalian 116028, China; 2. School of Marine Electrical Engineering, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China; 3. Department of Automation, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 4. College of Engineering, Inner Mongolia University for Nationalities, Tongliao 028000, China; 5. School of Mechanical and Electrical Engineering, Jiangxi New Energy Technology Institute, Xinyu 338004, China)

**Abstract:** To solve the tracking control problem for velocity curve of urban rail vehicle, an improved predictive function control algorithm IPFC is proposed. Step function and Morlet function are selected as two base functions. According to the change degree of target velocity curve, a strategy for basis function selection of predictive function control is given, which can switch wavelet and step basis function. In addition, an adaptive nonlinear online softening factor adjustment strategy based on the fuzzy satisfaction of system performance and optimization factor is proposed. This strategy can further improve the tracking control performance by using optimization factor. Taking the instance of velocity curve tracking control from Lvshun New Port to Tieshan Town pertain of the urban rail transit line No. 12 in Dalian as the test object, the hardware-in-the-loop test results show that the proposed IPFC can improve control performance of control system significantly. The quality indexes, such as energy conservation, accurate parking, punctuality and comfort, have obvious improvement effectiveness, especially for punctual and precise parking. Compared with the traditional improved algorithms widely used in practice, they are improved to be more than 55%.

**Keywords:** urban rail vehicle; velocity curve; predictive function control; softening factor; Morlet function

收稿日期: 2021-10-25 Received Date: 2021-10-25

\* 基金项目: 国家自然科学基金(60574018)、内蒙古民族大学国家基金培育项目(NMDGP17101)、内蒙古民族大学博士科研启动基金(BS416)项目资助

## 0 引言

城市轨道交通列车速度跟踪控制算法直接影响其列车运行安全及其综合性能品质<sup>[1]</sup>。伴随轨道交通事业的发展,人们对城市轨道交通列车运行过程综合性能指标的要求也日益提升,依靠传统的城市轨道交通列车速度曲线跟踪控制算法难于满足现实需求<sup>[2]</sup>。设计稳定、快速、精确地城市轨道交通列车速度曲线控制算法,以实现低能耗、高舒适度、高准时和精准停车的速度曲线跟踪控制,是提升其列车运行过程综合性能品质的最有效途径<sup>[3]</sup>。

早在1987年,日本日立公司就研制了城市轨道交通列车预测模糊控制自动驾驶系统,并将其成功应用于日本仙台地铁<sup>[4-5]</sup>。针对常坡段和一般变坡段的列车运行过程的最优控制问题,Golovicher<sup>[6]</sup>建立了优化控制序列的通用规则。Chang等<sup>[7]</sup>提出了基于差分进化(differential evolution, DE)的列车自动驾驶模糊控制算法。

近年来,许多的改进控制算法应用于列车自动驾驶系统中,如鲁棒控制、强化学习、物元模型等<sup>[8-10]</sup>。众多控制算法中,预测控制算法受到了国内外相关领域科研人员的广泛关注。柏赞等提出了一种基于模糊的模型预测控制算法,其用于连续不断的为大铁路机车提供实时控制指令,从而降低列车的牵引能耗,并通过实车实验验证了算法的有效性<sup>[11]</sup>。

众多预测控制算法中,第三代模型预测控制的预测函数算法(predictive function control, PFC)由Richalet等<sup>[12]</sup>和Kuntze等<sup>[13]</sup>于1987年共同提出并应用于工业机器人的快速高精度跟踪控制。因其具有优异的品质,也被应用于列车自动驾驶控制。基于对列车操纵模型及列车自动驾驶系统的分析,Wen等<sup>[14]</sup>提出了一种列车自动驾驶的基于预测函数控制算法的多模型直接广义预测控制(generalized predictive control, DGPC)方法<sup>[14]</sup>。王玉<sup>[15]</sup>采用预测函数控制作为核心算法,设计了列车速度控制器。

结合控制对象特性,对预测函数控制算法进行针对性的改进,能够有效提升其控制性能。基函数选择于预测函数控制而言尤为重要,其中,小波基预测函数控制算法具有明显较优的跟踪能力,适合于应用在高精度的跟踪控制场景<sup>[16-17]</sup>。为进一步提升预测控制算法的控制性能,蒋闻等<sup>[18-19]</sup>提出了一种柔化因子在线调整的预测控制算法。王国玉等<sup>[20]</sup>给出了一阶加纯滞后系统的预测函数控制的具体算法。

本文提出了城市轨道交通列车速度曲线预测函数控制改进算法(improved predictive function control, IPFC)。所提算法选用阶跃函数和小波函数作为基函数,并给出了

两种基函数的切换策略,并基于系统性能模糊满意度与优化因子,非线性自适应在线调整柔化因子。

## 1 城市轨道交通列车运行过程多目标评价模型

### 1.1 列车动力学方程

基于列车运行过程中列车的受力分析,结合牛顿第二定律,可以给出列车运行过程中的动力学方程。具体的列车运行过程中的动力学方程如下式所示。

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = v \\ Mv \frac{dv}{dx} = f(u, v) - R(x, v) - b(u, v) \\ t(0) = 0, |t(X) - \bar{T}| \leq \Delta T_{\max}, |X - \bar{D}| \leq \Delta S_{\max} \\ v(x) < V, v(0) = v(X) = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: $x$ 为列车实际运行位置; $t$ 为列车实际运行时间; $\bar{T}$ 为列车运行过程的预期运行时间; $\bar{D}$ 为列车运行过程的预期运行长度; $v$ 为列车实际运行速度; $V$ 为列车运行过程所允许的最高运行速度; $X$ 为列车运行过程的实际长度; $\Delta T_{\max}$ 和 $\Delta S_{\max}$ 分别为列车运行过程所允许的最大准点误差与停车误差; $M$ 为列车惯性质量; $M = (1 + \gamma) \times m$ , $\gamma$ 为回转质量系数, $m$ 为列车实际质量; $f(u, v)$ 和 $b(u, v)$ 分别为列车牵引力和制动力,与牵引力与制动力特性曲线、输入控制量 $u$ 和运行速度 $v$ 有关; $R(x, v)$ 为列车运行附加阻力,与运行位置 $x$ 和运行速度 $v$ 有关; $b(u, v)$ 为列车制动力<sup>[21]</sup>。

### 1.2 列车模型

列车运行过程中的列车模型是实现列车速度曲线跟踪控制所必需的。然而,难于给出精确的列车模型。城市轨道交通列车牵引系统主要由控制单元、制动电阻,以及变流设备等组成,因而不能把列车单纯的看作一个质点。首先,列车电机根据依据级位的操纵输出牵引力;然后,列车在牵引力和阻力的共同作用下运行。王洪坡基于最小二乘辨识,在采集得到列车运行的实验数据的基础上建立了普适的关于列车模型的二阶系统传递函数。列车模型其具体的形式如下所示。

$$G(s) = G_1(s) \cdot G_2(s) = \frac{0.07128}{s^2 + 0.4356s + 0.0324} \quad (2)$$

式中: $G_1(s) = \frac{612}{s + 0.34}$ ,其为固定环节,对应着列车的内部条件响应,反映列车级位与控制力之间的列车内在特性; $G_2(s) = \frac{1}{8621s + 822.4}$ ,其为可变环节,对应着列车的外部条件响应,反映列车控制力与运行速度之间的列车外在特性<sup>[22-23]</sup>。

### 1.3 城市轨道交通列车速度曲线跟踪控制评价指标

时间乘误差绝对值积分  $ITAE$  是一种常用的跟踪控制性能评价指标,其具体的计算公式如下:

$$ITAE = \int_0^{\bar{T}} t |e| dt \quad (3)$$

由于积分公式通常难于计算,工程应用中往往采用时间乘误差绝对值积分  $ITAE$  的近似计算公式,具体如下所示。

$$ITAE \approx \sum_{k=1}^K |e_k| \Delta t_k t_k \quad (4)$$

式中:  $k$  为时间周期索引值;  $K$  为运行过程的时间周期总数目;  $|e_k|$ 、 $\Delta t_k$ 、 $t_k$  分别为第  $k$  个时间周期的误差平均值、时间间隔、时间点。若跟踪控制时长  $T$  给定且控制周期设置为  $T_c$ ,则有  $\Delta t_k = T_c$ 、 $t_k = k \times T_c$ 、 $K = \left\lceil \frac{T}{T_c} \right\rceil$  成立,此时

$ITAE \approx \sum_{k=1}^K k(T_c)^2 |e_k|$ 。其中,  $\lceil \cdot \rceil$  为向上进位取整运算符。

### 1.4 城市轨道交通列车运行过程多目标评价模型

城市轨道交通列车运行过程需要同时兼顾节能、准时性、停靠准确性和舒适性等多个性能指标的优化,具体的目标函数分别如下所述。

#### 1) 节能

列车运行过程,其克服阻力所做功及附加能耗被称为列车的能量消耗  $E$ , 具体的计算表达式为

$$E = \frac{\int_0^{t(X)} F(u(t), v(t)) v(t) dt}{\xi_M} + \int_0^{t(X)} A(t) dt + \xi_B \int_0^{t(X)} B(u(t), v(t)) v(t) dt \quad (5)$$

式中:  $u(t)$ 、 $v(t)$  与  $A(t)$  为列车运行过程中  $t$  时刻的输入控制量、实际运行速度与辅助系统功率;  $\xi_M$  与  $\xi_B$  分别表示列车牵引时电能与机械能之间进行转换与列车制动时机械能与电能之间进行转换的系数。

#### 2) 舒适性

舒适度用以反映乘客的乘车质量,是衡量列车运行舒适性的重要指标,其为单位距离或单位时间的加速度变化的绝对值,其具体的计算表达式为

$$K_{Jerk} = \frac{\sum_{ik=1}^{ns} |a_{ik} - a_{ik-1}|}{\bar{D}} \quad (6)$$

式中:  $K_{Jerk}$  为舒适度;  $a_{ik}$  为列车在第  $ik$  个工况点的加速度;  $ns$  为工况点的数目;  $\bar{D}$  为预期的列车运行距离,其也可以用列车运行过程的预期时间  $\bar{T}$  所替代<sup>[24]</sup>。

#### 3) 停靠准确性

停车误差是指列车运行过程的实际运行距离与预期运行距离之差的绝对值,其具体的计算表达式为:

$$\Delta S = |\bar{D} - X| \leq \Delta S_{\max} \quad (7)$$

式中:  $\Delta S$  为停车误差绝对值。

#### 4) 准时性

准点误差可以表示为列车运行过程的实际运行时间与预期时间之差的绝对值,其具体的计算表达式为:

$$\Delta T = |\bar{T} - t(X)| \leq \Delta T_{\max} \quad (8)$$

式中:  $\Delta T$  为准点误差绝对值。

## 2 预测函数控制算法

### 2.1 基函数

对于预测函数控制而言,其控制品质主要取决于控制输入的结构。预测函数控制(PFC)算法中,控制输入被表示为一系列已知基函数  $\{f_1, \dots, f_n, \dots, f_N\}$  的线性组合。

$$u(k+i) = \sum_{n=1}^N \mu_n f_n(i) \quad (9)$$

式中:  $f_n(i)$  表示基函数  $f_n$  在  $i \times T_s$  时的值,  $T_s$  为采样周期,  $i \in [1, 2, \dots, P-1]$ ,  $P$  为优化时域的长度;  $\mu_n$  为第  $n$  个基函数的线性组合系数;  $N$  为选取的基函数的数目。

### 2.2 预测函数控制预测模型

预测函数控制(PFC)算法中,预测模型输出  $y_m(k)$  由两部分组成,一部分为自由响应  $y_{yf}(k)$ , 相当于零输入响应,它仅仅依赖于过去时刻的控制量及输出量,与当前时刻及将来时刻的控制量无关。另一部分为受迫响应  $y_{yf}(k)$ , 相当于零状态响应,它是当前时刻起加入控制作用后新增加的模型响应。

$$y_m(k) = y_{yf}(k) + y_{yf}(k) \quad (10)$$

### 2.3 参考轨迹

在模型算法控制中,为了使系统的输出能够平缓地逐渐达到设定值,避免出现超调,根据预测输出值和过程输出值,需要选定一条渐进趋向于未来设定值的曲线,称为参考轨迹。对渐进稳定系统而言,参考轨迹通常选取为一阶指数函数。预测函数控制(PFC)算法中,输出不直接跟踪设定值,而是跟踪下述参考轨迹。

$$y_s(k+i) - y_r(k+i) = \alpha^i [y_s(k) - y_r(k)] \quad (11)$$

式中:  $\alpha$  为参考轨迹的柔化因子,  $\alpha = e^{-\frac{T_s}{T_r}}$ ,  $\alpha \in [0, 1)$ ,  $T_s$  为采样周期,  $T_r$  为参考轨迹的期望上升时间常数,  $e$  为自然对数,文献[17]中,  $T_r = 2T_s$ ,  $\alpha \approx 0.607$ ,但对于高精度跟踪控制,采用这种柔化因子选取固定值的策略并不可取;  $y_s(k+i)$ 、 $y_s(k)$  为  $k+i$  时刻和  $k$  时刻的跟踪设定值;

$y_r(k+i)$  为  $k+i$  时刻的参考轨迹值,  $y_p(k)$  为  $k$  时刻的过程预测输出,  $y_s(k) - y_p(k)$  为  $k$  时刻的跟踪位置差;

$y_s(k+i) = y_s(k) + \sum_{n=1}^{n_c} c_n(k) i^n$ ,  $n_c$  为设定值拟合多项式的阶数,  $c_n(k)$  为设定值拟合多项式第  $n$  阶的系数。

2.4 滚动优化

最常用的性能指标是二次型性能指标,即在优化时域内取参考轨迹和预测输出的误差平方和最小。

$$\min J = \sum_{i=H_1}^{H_2} q_i [y_p(k+h_i) - y_r(k+h_i)]^2 + \sum_{i=1}^{H_u} r_i [\Delta u(k+i-1)]^2 \quad (12)$$

式中:  $H_1$ 、 $H_2$ 、 $H_u$  分别为最小预测步长、最大预测步长和控制时域;  $q_i$  和  $r_i$  分别为不小于0的误差权系数和控制权系数;  $y_p(k+h_i)$ 、 $e(k+h_i)$  分别为  $k+h_i$  时刻的过程预测输出和预测输出误差,  $y_p(k+h_i) = y_m(k+h_i) + e(k+h_i)$ ;  $h_i$  为拟合点。

令  $H_1 = 1$ 、 $H_2 = n_p$ 、 $q_i = 1$ 、 $r_i = 0$ , 则给出简化的二次型指标。

$$\min J = \sum_{i=1}^{n_p} [y_p(k+h_i) - y_r(k+h_i)]^2 \quad (13)$$

2.5 反馈校正

在控制过程中,过程输出与预测模型输出之间会存在一定程度的误差。为提升控制品质,采用过程实际输出  $y_p(k)$  与预测模型输出  $y_m(k)$  之间的误差  $e(k)$  对将来时刻的预测输出进行反馈校正。

$$e(k) = y_p(k) - y_m(k) \quad (14)$$

对于未来  $k+i$  时刻的预测输出误差  $e(k+i)$ , 一般在当前时刻  $k$  的误差  $e(k)$  的基础上采用多项式拟合法进行估计。

$$e(k+i) = e(k) + \sum_{n=1}^{n_e} e_n(k) i^n \quad (15)$$

式中:  $n_e$  为拟合多项式的阶数;  $e_n(k)$  为拟合多项式第  $n$  阶的系数。

2.6 控制量计算

预测模型选定后,以系统输入量为基础可直接预测系统输出。当采用离散状态空间形式的预测模型时,预测模型输出  $y_m(k)$  可表示如下。

$$\begin{cases} \mathbf{X}_m(k) = \mathbf{A}_m \mathbf{X}_m(k-1) + \mathbf{B}_m u(k-1) \\ y_m(k) = \mathbf{C}_m \mathbf{X}_m(k) \end{cases} \quad (16)$$

式中:  $\mathbf{A}_m$ 、 $\mathbf{B}_m$ 、 $\mathbf{C}_m$  为预测模型状态方程的系数矩阵,  $\mathbf{X}_m(k)$  为  $k$  时刻的预测模型状态向量,  $u(k-1)$  为  $k-1$  时刻系统的输入控制量。

由公式(5.1)、(5.2)和(5.8)可知,第  $k+i$  时刻的预测模型输出  $y_m(k+i)$  可由下述公式计算。

$$y_m(k+i) = \mathbf{C}_m \mathbf{A}_m^i \mathbf{X}_m(k) + \sum_{n=1}^N \boldsymbol{\mu}(n) g_n(i) \quad (17)$$

式中: 自由响应  $y_{yf}(k+i) = \mathbf{C}_m \mathbf{A}_m^i \mathbf{X}_m(k)$ ; 受迫响应  $y_{yf}(k+i) = \sum_{n=1}^N \boldsymbol{\mu}(n) g_n(i)$ ;  $g_n(i)$  为基函数  $f_n(i)$  作用下的模型输出。

$$\text{基于滚动优化与反馈校正, 令 } \boldsymbol{\mu}(k) = \begin{Bmatrix} \mu_1(k) \\ \dots \\ \mu_N(k) \end{Bmatrix},$$

$$d(k+h_i) = (1 - \alpha^{h_i})(y_s(k) - y_p(k)) + \sum_{n=1}^{\max\{n_c, n_e\}} \{c_n(k) - e_n(k)\} h_i^n - \mathbf{C}_m (\mathbf{A}_m^{h_i} - \mathbf{I}) \mathbf{X}_m(k),$$

$$\mathbf{g}_k(h_i) = \begin{Bmatrix} g_{k1}(h_i) \\ \dots \\ g_{kN}(h_i) \end{Bmatrix}, \text{ 则优化目标函数可简化为:}$$

$$\min J = \sum_{i=1}^{n_p} [\boldsymbol{\mu}(k)^T \mathbf{g}_{kn}(h_i) - d(k+h_i)]^2 \quad (18)$$

由  $\frac{\partial J}{\partial \boldsymbol{\mu}(k)} = 0$  可知  $\boldsymbol{\mu}(k) = (\mathbf{g}_k \mathbf{g}_k^T)^{-1} \mathbf{g}_k d(k)$ 。其

$$\text{中, } \mathbf{g}_k = [\mathbf{g}_k(h_1), \dots, \mathbf{g}_k(h_p)] = \begin{bmatrix} g_{k1}(h_1) & \dots & g_{k1}(h_p) \\ \vdots & \dots & \vdots \\ g_{kN}(h_1) & \dots & g_{kN}(h_p) \end{bmatrix}, \mathbf{d}(k) = \begin{bmatrix} d(k+h_1) \\ d(k+h_2) \\ \vdots \\ d(k+h_p) \end{bmatrix}.$$

令  $\mathbf{M} = (\mathbf{g}_k \mathbf{g}_k^T)^{-1} \mathbf{g}_k$ , 则  $\boldsymbol{\mu}(k) = \mathbf{M} d(k)$ 。

基于滚动优化与反馈校正,预测函数控制能够给出具体的控制量计算公式,第  $k$  时刻系统的输入控制量为<sup>[17]</sup>:

$$u(k) = \sum_{n=1}^N \mu_n f_{kn}(0) = \mathbf{f}_k(0)^T \mathbf{M} d(k) = k_0 [e(k) - y_p(k)] + \sum_{n=1}^{\max\{n_c, n_e\}} k_j [c_j(k) - e_j(k)] + \mathbf{k}_m \mathbf{X}_m(k) \quad (19)$$

$$\text{式中: } k_m = - \begin{bmatrix} \mathbf{C}_m (\mathbf{A}_m^{h_1} - \mathbf{I}) \\ \mathbf{C}_m (\mathbf{A}_m^{h_2} - \mathbf{I}) \\ \vdots \\ \mathbf{C}_m (\mathbf{A}_m^{h_p} - \mathbf{I}) \end{bmatrix}^T \mathbf{U}, \mathbf{U} = \mathbf{f}_k(0)^T \mathbf{M},$$

$$k_j = \mathbf{U}^T \begin{bmatrix} h_1^j \\ h_2^j \\ \vdots \\ h_p^j \end{bmatrix}, k_0 = \mathbf{U}^T \begin{bmatrix} 1 - \alpha^{h_1} \\ 1 - \alpha^{h_2} \\ \vdots \\ 1 - \alpha^{h_p} \end{bmatrix}.$$

### 3 列车速度曲线预测函数控制改进算法

#### 3.1 基于阶跃及小波基的预测函数控制算法

在预测函数控制算法中,控制精度主要取决于基函数的选择。通常,基函数选取阶跃、斜坡、指数、正余弦等函数。由于这些函数是全局函数,不能根据对参考轨迹在不同时刻的逼近精度不同进行灵活设置,从而导致损害了预测时域的整体优化目标的问题。小波函数具有紧支撑局部特性且在布局上能够灵活设置。当参考轨迹变化剧烈时,小波函数更适合于用作基函数。在预测时刻较小的时段,对参考轨迹逼近要求较高,可以设置以多个细尺度的小波基函数逼近;随着预测时刻的增大,对参考轨迹逼近要求逐渐降低,则以少量粗尺度的小波基函数逼近<sup>[17]</sup>。

本文选择 Morlet 小波作为小波基函数。Morlet 小波的计算表达式为<sup>[25]</sup>。

$$\psi(\beta_m, t) = \exp(-\beta_m^2 t^2 / 2) \cos(\pi t) \quad (20)$$

式中:  $\beta_m$  为带宽参数,其决定小波波形的衰减速度,  $\beta_m$  越大,其衰减速度越快。

子小波可以通过母小波的尺度伸缩和平移得到,可表示为<sup>[25]</sup>。

$$\psi(a_m, b_m, \beta_m, t) = \exp\left(-\frac{\beta_m^2 (t - b_m)^2}{a_m}\right) \cos(\pi(t - b_m)) \quad (21)$$

式中:  $a_m$  和  $b_m$  分别为尺度因子和平移因子。

$$\text{基函数 } f_k(h_i) \text{ 取值为 } \left[ \begin{array}{c} \psi(a_{m,1}, b_{m,1}, \beta_{m,1}, h_i), \dots, \\ \psi(a_{m,N}, b_{m,N}, \beta_{m,N}, h_i) \end{array} \right],$$

其中,  $h_i$  为拟合点;  $\psi(a_{m,j}, b_{m,j}, \beta_{m,j}, h_i)$  为第  $j$  个小波基函数在拟合点  $h_i$  的计算值,  $a_{m,j}$ 、 $b_{m,j}$  和  $\beta_{m,j}$  分别为其尺度因子、平移因子和带宽参数<sup>[26]</sup>。

本文中,基函数选用阶跃函数及小波函数。城市轨道交通列车目标速度曲线中,恒速段及小坡道惰行段的列车速度变化较缓,适宜选用阶跃基函数;而牵引段、制动段及长大坡道惰行段的列车速度变化较快,适宜选用小波基函数。列车运行过程中,优化时域的设定值变化量  $|c(k+P) - c(k)|$  (也即优化时域的目标速度变化量)能够较好的衡量当前阶段的目标速度曲线变化程度,其小于或者等于某一阈值  $\theta$  时,认为当前阶段的列车速度变化较剧烈,故选用阶跃基函数;否则,认为当前阶段的列车速度变化较缓,故选用小波基函数。基于阈值  $\theta$  的基函数切换规则具体如下图 1 所示。

图 1 中,  $\theta = \tan(\gamma) \times P \times T_c$ ,  $\gamma$  为阈值  $\theta$  所对应的夹角,  $P$  和  $T_c$  分别为优化时域和控制周期,  $P \times T_c$  称为被控区间。阈值  $\theta$  或阈值夹角  $\gamma$  需根据实际情况选择合适的值。

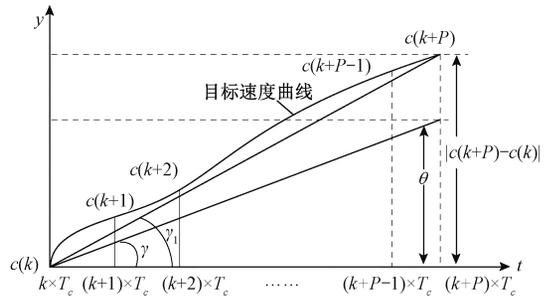


图 1 基于阈值  $\theta$  的基函数切换规则示意图

Fig. 1 Determination rules for selecting base function based on threshold  $\theta$

如图 2 所示,城市轨道交通列车目标速度曲线在被控区间呈现持续加速状态,由于  $\gamma_1 > \gamma$ 、 $|c(k+P) - c(k)| > \theta$ , 所以判定当前阶段的列车速度变化较剧烈,选用小波基函数。

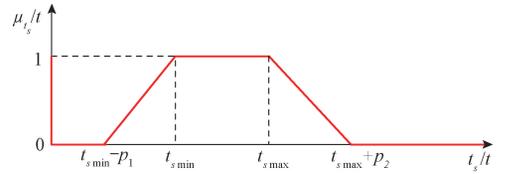


图 2 关于系统上升时间预估值的模糊满意度的隶属函数示意图

Fig. 2 Diagram for membership function of fuzzy satisfaction degree about estimated system response

就城市轨道交通列车速度曲线跟踪控制而言,  $\tan(\gamma_1)$  即是被控区间里的平均加速度绝对值  $|a_{ave}|$ , 其能够有效反映被控区间目标速度曲线变化的剧烈程度。由国际标准 ISO2631 可知,若以当前时刻为起点,其后较长时间的平均加速度绝对值大于  $0.315 \text{ m/s}^2$ , 则认为目标速度曲线在当前阶段变化较为剧烈<sup>[1]</sup>。假设速度、时间、加速度的单位分别为  $\text{km/h}$ 、 $\text{s}$ 、 $\text{m/s}^2$ , 可以给出阶跃与小波基函数切换阈值  $\theta$  的计算表达式。

$$\theta = 1.134 \times P \times T_c \quad (22)$$

#### 3.2 基于模糊满意度和优化因子的柔化因子在线调整

城市轨道交通列车速度曲线跟踪控制问题是实际工程应用中的一种具有模糊性质的控制问题。针对柔化因子对系统的控制目标(上升时间和输出抖振)的影响,对控制目标做模糊化处理以获得控制目标的模糊满意度指标<sup>[19]</sup>。

对于任意的采样时刻  $t$ , 其具体的系统上升时间预估  $t_s(t)$  计算公式如式(23)所示。

$$t_s(t) = \begin{cases} 0, & \dot{e}(t) = 0, e(t) = 0 \\ \frac{e(t)}{|\dot{e}(t)|}, & \dot{e}(t) < 0 \\ M, & \dot{e}(t) \geq 0, e(t) \neq 0 \end{cases} \quad (23)$$

式中:  $e(t)$  和  $\dot{e}(t)$  分别为当前实际输出与设定值之间的误差和误差变化率,其表示基于当前误差变化率  $\dot{e}(t)$ ,系统到达设定值所用的时间。当  $\dot{e}(t) = 0, e(t) = 0$  成立时,表明系统处于稳定状态,其系统上升时间为 0; 当  $\dot{e}(t) < 0$  时,系统输出与设定值之间的误差处于减小的态势,其系统上升时间用公式  $\frac{e(t)}{|\dot{e}(t)|}$  予以计算; 当  $\dot{e}(t) \geq 0, e(t) \neq 0$

成立时,系统输出与设定值之间的误差处于增大的态势,其系统上升时间用较大正数  $M$  表示。

基于采样时刻  $t$  的系统上升时间预估值  $t_s(t)$ , 从上升时间满足控制要求的角度, 可定义如下的系统上升时间预估值  $t_s(t)$  的模糊满意度  $\mu_{t_s(t)}$  的隶属函数。

$$\mu_{t_s(t)} = \begin{cases} 1, & t_s(t) = 0 \\ 0, & t_s(t) < t_{s \min} - p_1 \\ 1 + \frac{t_s(t) - t_{s \min}}{p_1}, & t_{s \min} - p_1 \leq t_s(t) < t_{s \min} \\ 1, & t_{s \min} \leq t_s(t) < t_{s \max} \\ 1 - \frac{t_s(t) - t_{s \max}}{p_2}, & t_{s \max} \leq t_s(t) < t_{s \max} + p_2 \\ 0, & t_{s \max} + p_2 \leq t_s(t) \end{cases} \quad (24)$$

式中:  $p_1$  和  $p_2$  为模糊宽度,其表示能够满足设计者要求的程度,城市轨道交通速度曲线跟踪控制中,  $p_1$  和  $p_2$  均不为 0 值;  $t_{s \min}$  和  $t_{s \max}$  分别为系统上升时间设计期望的上限值和下限值。具体的系统上升时间预估值  $t_s(t)$  的隶属度函数示意图如下图 2 所示。

预测时域内各个未来时刻的预测输出值  $y(t+i)$  的模糊满意度  $\mu_{y(t+i)}$  的隶属函数计算公式如式 (25) 所示。

$$\mu_{y(t+i)} = \begin{cases} 0, & y(t+i) < y_{\min} - s_1 \\ 1 + \frac{y(t+i) - y_{\min}}{s_1}, & y_{\min} - s_1 \leq y(t+i) < y_{\min} \\ 1, & y_{\min} \leq y(t+i) < y_{\max} \\ 1 - \frac{y(t+i) - y_{\max}}{s_2}, & y_{\max} \leq y(t+i) < y_{\max} + s_2 \\ 0, & y_{\max} + s_2 \leq y(t+i) \end{cases} \quad (25)$$

式中:  $i$  为优化时域中未来某个时刻的索引值;  $s_1$  和  $s_2$  为模糊宽度,其表示能够满足设计者要求的程度;  $y_{\min}$  和  $y_{\max}$  分别为预测输出设计期望的上限值和下限值。具体的关于预测输出值的模糊满意度的隶属函数示意图如下图 3 所示。

对上述的模糊满意度  $\mu_{y(t+i)}$  和  $\mu_{t_s(t)}$  进行模糊推理, 可得到采样时刻  $t$  下控制目标的模糊满意度指标  $\mu_{\min}$ 。

$$\mu_{\min} = \mu_{t_s(t)} \wedge \min \{ \mu_{y(t+1)}, \mu_{y(t+2)}, \dots, \mu_{y(t+p)} \} \quad (26)$$

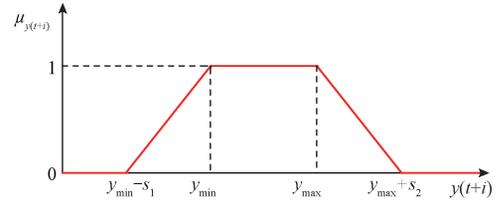


图3 关于预测输出值的模糊满意度的隶属函数示意图  
Fig. 3 Diagram for membership function of fuzzy satisfaction degree about predictive output

模糊满意度指标  $\mu_{\min}$  较大, 需使得柔化因子适当的减小; 反之, 模糊满意度指标  $\mu_{\min}$  较小, 需使得柔化因子适当的增大<sup>[19-20]</sup>。由柔化因子对系统响应速度和系统输出的抖振强度的影响关系, 在李少远、蒋闻的研究基础上<sup>[18-19]</sup>, 基于模糊满意度本文提出了一种柔化因子  $\alpha(\mu_{\min})$  指数形式在线调整函数, 具体的函数计算公式如下式所示。

$$\alpha(\mu_{\min}) = \alpha_{\max} \cdot e^{\mu_{\min}^{\beta} \cdot \ln\left(\frac{\alpha_{\min}}{\alpha_{\max}}\right)} \quad (27)$$

式中:  $\alpha_{\max}$  和  $\alpha_{\min}$  分别为柔化因子的最大值和最小值,  $\ln\left(\frac{\alpha_{\min}}{\alpha_{\max}}\right)$  为柔化因子增益系数, 其由  $\alpha_{\max}$  和  $\alpha_{\min}$  共同决定,  $0 \leq \alpha_{\min} < \alpha_{\max} < 1$ ;  $\beta$  为柔化因子在线调整函数曲线的优化因子, 其决定了柔化因子在线调整函数曲线的形态;  $e$  为自然对数。具体的关于模糊满意度的柔化因子在线调整函数曲线示意图如图 4 所示。

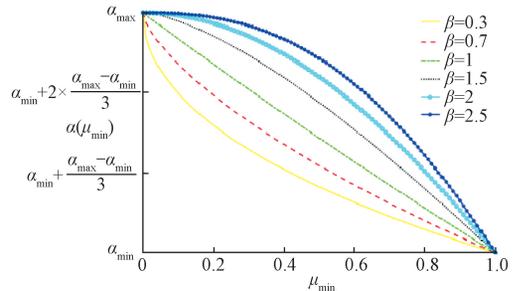


图4 关于模糊满意度的柔化因子的在线调整函数示意图  
Fig. 4 Diagram of online obtaining function softening factor about fuzzy satisfaction degree

由图 4 可知, 在线调整函数的趋势可以通过选择最适合的优化因子  $\beta$  优化调整, 以尽可能的提升预测控制算法的控制品质。若模糊满意度指标  $\mu_{\min}$  较小, 此时系统误测较大, 则通过适当的增大柔化因子来抑制系统输出的抖振; 若模糊满意度指标  $\mu_{\min}$  较大, 此时系统误差较小但上升时间较长, 则通过适当的减小柔化因子以加快系统响应速度。模糊满意度指标  $\mu_{\min}$  由 0 ~ 1, 柔化因子变速率的下降, 不同的趋势控制因子  $\beta$  决定了各个模糊

满意度指标  $\mu_{\min}$  所对应的柔化因子  $\alpha(\mu_{\min})$ 。若优化因子  $\beta$  取 1,则相当于柔化因子增益系数取  $\ln\left(\frac{\alpha_{\min}}{\alpha_{\max}}\right)$  的情况下,采用文献[19]提出的柔化因子在线调整策略。

### 4 城市轨道交通列车速度曲线跟踪控制硬件在环实验

#### 4.1 硬件在环实验硬件系统设计及平台架构

硬件在环实验硬件系统由 dSPACE 仿真机、信号适配系统及跟踪控制器 3 部分构成。dSPACE 仿真机采用 DS 系列处理器板卡,其基于真实数据、实时采集信号与城市轨道交通列车自动驾驶相关的大量电气、网络 and 动力学原理进行建模<sup>[26]</sup>。信号适配系统对被测系统的信号和仿真计算机板卡之间交互信号的电气与网络一致性进行调整。跟踪控制器内含写入了列车速度曲线控制算法的 TMS320F28335 内核 CPU 器芯片。硬件在环仿真过程中,采用 ControlDesk 软件可视化显示跟踪控制实时仿真结果,并由状态指示器及故障处理装置获取硬件在环仿真系统实时状态,从而为仿真监控人员施加监控指令提供依据<sup>[26]</sup>。具体的城市轨道交通列车速度曲线跟踪控制硬件在环实验硬件系统总体设计图如图 5 所示。

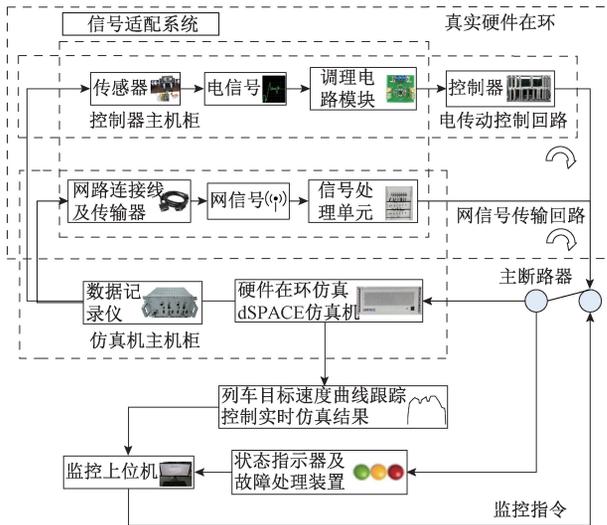


图 5 城市轨道交通列车速度曲线跟踪控制硬件在环实验硬件系统总体设计图

Fig. 5 Overall design diagram of velocity curve tracking control hardware-in-the-loop (HIL) test hardware system for urban rail vehicle

由图 5 可知,仿真机主机柜含有 dSPACE 仿真机及网信号传输回路硬件在环环节所需的硬件设备;控制器主机柜含有电传动控制回路硬件在环环节所需的硬件设备<sup>[27]</sup>。硬件在环实验环境中,含有控制器、传感器、数据

记录仪等真实硬件<sup>[28]</sup>。数据记录仪用以存储着实际的历史列车运行过程的实测大数据,从而为真实建模奠定基础。相比于纯模型仿真,硬件在环实验具有更高的验证有效性<sup>[29]</sup>。

#### 4.2 城市轨道交通列车速度曲线跟踪控制场景主要参数

本文选取大连轨道交通 12 号线旅顺新港至铁山镇的城市轨道交通列车速度曲线跟踪控制场景作为研究对象。大连城市轨道交通 12 号线已运营多年,设 8 座车站,7 个站间运行区间。具体的旅顺新港至铁山镇的城市轨道交通列车速度曲线跟踪控制场景主要参数如表 1 所示,其坡度及限速曲线如图 6 所示。

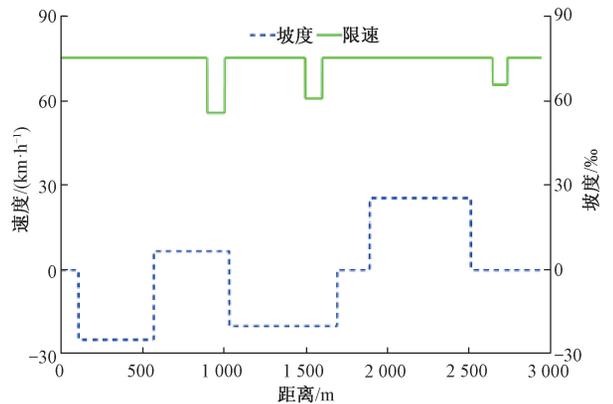


图 6 旅顺新港至铁山镇的坡度及限速曲线示意图

Fig. 6 The diagram for slope, limit speed curves from Lyushun New Port to Tieshan Town

表 1 旅顺新港至铁山镇的城市轨道交通列车速度曲线跟踪控制场景的主要参数

Table 1 The main parameters of the of velocity curve tracking control scenario for urban rail vehicle from Lyushun New Port to Tieshan Town

参数名称	参数值
车辆重量/t	211
最高车辆限速/(km·h <sup>-1</sup> )	78
站间运行距离/m	2 940
预期运行时间/s	195
车辆编组	2 动车 2 拖车
最大允许的停车误差/m	±0.2
最大允许的准点误差/s	±0.3

#### 4.3 硬件在环实验平台主要配置

城市列车速度曲线跟踪控制硬件在环实验平台的主要配置如下所述:MATLAB/simulink 版本为 2016b、监控上位机性能配置为 CPU Core i7-7770K @ 4.2 GHz、控制器中内核 CPU 芯片的型号为 TMS320F28335、dSPACE 仿

真机处理器板卡与控制台软件的版本分别为 DS1006 与 ControlDesk 6.1、主要通讯协议采用 MVB、校验方式采用偶校验。

#### 4.4 预测函数控制改进算法的主要参数

本文在同时兼顾计算速度和控制效果的基础上,结合经验和实验效果给出以下所提出的预测函数控制改进算法的主要参数。具体为:控制周期为 0.5 s,优化时域为 10,由式(23)可知,基函数切换阈值  $\theta$  为 5.67 km/h,拟合点为 3、5、8、9,模糊宽度  $p_1$  和  $p_2$  均为 0.006 s,  $s_1$  和  $s_2$  均为 0.02 km/h,系统上升时间与预测输出设计期望的上限值和下限值  $t_{s\_min}$  和  $t_{s\_max}$ 、 $y_{min}$  和  $y_{max}$  分别为 0.008 s 和 0.02 s、 $y_r - 0.02$  km/h 和  $y_r + 0.02$  km/h、 $y_r$  为目标速度,柔化因子最大值  $\alpha_{max}$ 、最小值  $\alpha_{min}$ 、优化因子  $\beta$  分别为 0.85、0.77、0.94。本文于拟合点 3、5 和 8、9 处分别选用了 2 种不同的 Morlet 小波基函数,尺度因子  $a_1$  和  $a_2$  分别为 1 和 2,平移因子  $b_1$  和  $b_2$  分别为 0 和 5,带宽参数  $\beta_1$  和  $\beta_2$  均为 0.5。

#### 4.5 城市轨道交通列车速度曲线跟踪控制硬件在环实验

为验证本文提出的预测函数控制改进算法的有效性,采用模糊比例积分微分控制 (fuzzy PID)<sup>[23]</sup>、传统动态矩阵预测控制 (traditional dynamic matrix control, TDMC)<sup>[24]</sup>、传统阶跃及斜坡基函数预测函数控制改进算法 (traditional predictive function control based on step and slope, TPFC1)<sup>[21]</sup>、传统 Morlet 小波基预测函数控制改进算法 (traditional predictive function control based on Morlet, TPFC2)<sup>[18,27]</sup>、所提出的预测函数控制改进算法 IPFC 分别实施城市轨道交通列车速度曲线跟踪控制。Fuzzy PID 与 TDMC 是两种广泛应用于实际的传统改进算法。若采用 TPFC2 实施跟踪控制,其列车运行过程的全程均采用 Morlet 小波基函数;采用 TPFC1 实施跟踪控制,则于目标速度变化较缓与较剧烈的不同阶段分别地选用阶跃与阶跃和斜坡基函数,基函数切换阈值  $\theta$  取值为 5.67 km/h。具体的城市轨道交通列车速度曲线跟踪控制仿真结果如图 7~9 和表 2 所示。

表 2 不同算法获得的跟踪控制结果

Table 2 Tracking control results of different algorithms

算法	ITAE	能耗 /kJ	准点误差 /s	停车误差 /s	舒适度 /( $m/s^2/km$ )
IPFC	262	74 075	0.043 9	0.046 4	20.658
TPFC2	305	75 028	0.068 5	0.075 1	24.570
TPFC1	420	76 248	0.077 0	0.083 5	29.043
TDMC	514	77 964	0.118 2	0.112 7	31.143
Fuzzy PID	584	80 357	0.152 9	0.152 9	32.729

由表 2 可知,IPFC 能够有效提升控制品质,节能、准时、精确停车、舒适 4 个性能指标以及时间乘误差绝对值积分 ITAE 都有相当程度的改善;相比 TDMC 和 Fuzzy PID,节能、准时、精确停车、舒适四个指标分别提升了 5.0%与 7.8%、62.9与 84.5%、58.8%与 69.7%、33.7与 36.9%,ITAE 提升了 49.0%与 55.1%。

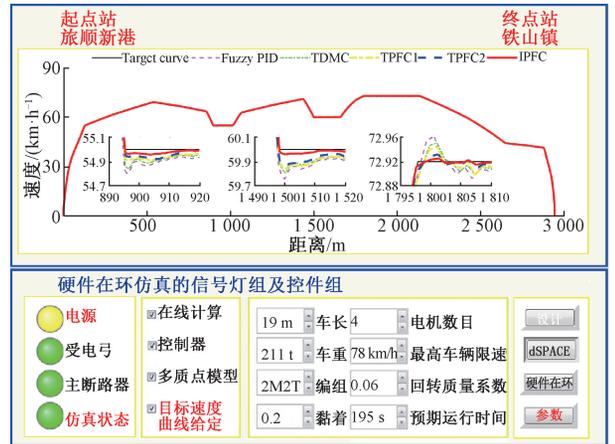


图 7 不同算法获得的速度-距离曲线图

Fig. 7 Distance-velocity curves obtained by different algorithms

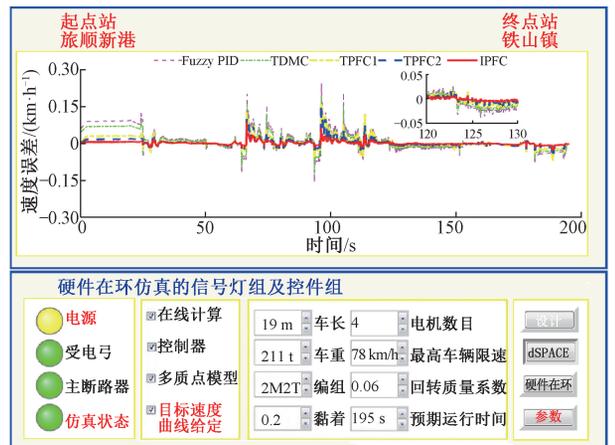


图 8 不同算法得到的速度误差-时间曲线图

Fig. 8 Time-velocity error curves obtained by different algorithms

图 7~9 中,电源接通,虚拟受电弓模块处于正常状态,主断路器正常闭合,硬件在环仿真环境无异常情况。

由图 7 和 9 可知,IPFC 获得了更理想跟踪控制的实际跟踪控制曲线;由图 8 可知,IPFC 使跟踪控制过程中的速度抖振现象得到了更明显的抑制;由图 9 可知,IPFC 获得了更理想的实际停车点,其与目标停车点 (195 s、2 940 m) 更接近。

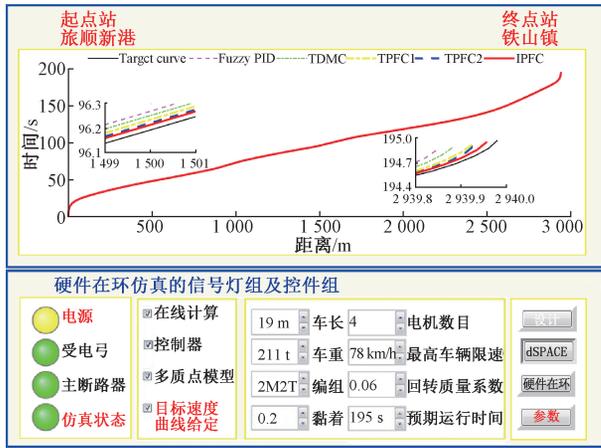


图 9 不同算法获得的时间-距离曲线图

Fig. 9 Distance-time curves obtained by different algorithms

## 5 结 论

为更有效的提升控制品质,本文提出了一种城市轨道交通列车速度曲线预测函数控制改进算法 IPFC。相比于传统跟踪控制算法,其具体的优势如下所述。

1) 依据目标速度曲线的变化程度,给出了一种预测函数控制的基函数切换策略,该策略可实现小波与阶跃基函数的合理切换,这有助于获得最佳的跟踪控制品质。

2) 在分析了预测函数控制中柔化因子对控制性能影响的基础上,给出了一种基于系统性能模糊满意度与优化因子的柔化因子非线性自适应在线调整策略,通过调整优化因子能够进一步提升跟踪控制性能。

最后,在城市轨道交通列车速度曲线跟踪控制硬件在环实验环境下,采用预测函数控制改进算法 IPFC 和用作对比的 4 种控制性能较好的控制算法分别实施城市轨道交通列车速度曲线跟踪控制。实验结果表明,相比于一些控制性能较好的控制算法,IPFC 能够显著改善控制系统的控制性能。

## 参考文献

[ 1 ] 卢稳,朱爱红,宋丽梅. 城市轨道交通列车运行过程的多目标优化研究[J]. 铁道标准设计, 2017, 61(2): 131-135.  
 LU W, ZHU AI H, SONG L M. Optimization research on ATO operation process based on niche particle swarm algorithm [ J ]. Journal of Railway Science and Engineering, 2017, 61(2): 131-135.

[ 2 ] GAO S, DONG H, CHEN YAO, et al. Approximation-based robust adaptive automatic train control: An approach for actuator saturation [ J ]. IEEE Transactions

on Intelligent Transportation Systems, 2013, 14(4): 1733-1742.

[ 3 ] HE T, XIONG R Q. Research on multi-objective real-time optimization of automatic train operation (ATO) in urban rail transit [ J ]. Journal of Shanghai Jiao Tong University (Science), 2018, 23(2): 327-335.

[ 4 ] MIYAMOTO S, YASUNOBU S, IHARA H. Predictive fuzzy control and its application to automatic train operation systems [ J ]. Anal of Fuzzy inf, 1987: 59-72.

[ 5 ] OSHIMA H, YASUNOBU S, SEKINO S. Automatic train operation system based on predictive fuzzy control [ J ]. International Workshop on Artificial Intelligence for Industrial Applications, 1998:485-489.

[ 6 ] GOLOVITCHER I. Control algorithms for automatic operation of rail vehicles [ J ]. Automated and Remote Control, 1986, 47(11): 1563-1570.

[ 7 ] CHANG C S, XU D Y. Differential evolution based tuning of fuzzy automatic train operation for mass rapid transit system [ J ]. IEEE Proceedings Electric Power Applications, 2002, 147(3): 206-212.

[ 8 ] ADRIÁN F R, ANTONIO F C, ASUNCIÓN P C, et al. Approximation-based robust adaptive automatic train control: An approach for actuator saturation [ J ]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation System, 2015, 16(4): 2061-2071.

[ 9 ] YIN J, CHEN D, LI L. Intelligent train operation algorithms for subway by expert system and reinforcement learning [ J ]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2014, 15(6): 2561-2571.

[ 10 ] MENG J, XU R, LI D, et al. Combining the matter-element model with the associated function of performance indices for automatic train operation algorithm [ J ]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2019, 20(1): 253-263.

[ 11 ] BAI Y, TIN K. H, MAO B, et al. Energy-efficient locomotive operation for Chinese mainline railways by fuzzy predictive control [ J ]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2014, 15(3): 938-948.

[ 12 ] RICHALET J, EL A D S A, ARBER C, et al. Predictive functional control [ C ]. In: Proceedings of the 10th IFACWorld Congress. Munich, Germany: 1987(4): 261-268.

- [13] KUNTZE H B, JACUBASCH A, RICHALET J, et al. On the predictive functional control of an elastic industrial robot[C]. Proceedings 25th Conference on Decision and Control, Athens, Greece, 1987: 1877-1881.
- [14] WEN S, YANG J, RAD AB, et al. Multi-model direct generalised predictive control for automatic train operation system[J]. IET Intelligent Transport Systems, 2015, 9(1): 86-94.
- [15] 王玉. 基于节能优化的列车自动驾驶算法研究[D]. 成都:西南交通大学, 2011.  
WANG Y. Research on optimization of automatic train operation for saving energy [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2011.
- [16] 刘春波, 王鲜芳, 章瑶, 等. 基于小波基函数和 Hammerstein 模型的预测函数控制[J]. 系统工程与电子技术, 2009, 31(8):1935-1939.  
LIU CH B, WANG X F, ZHANG Y, et al. Predictive functional control based on wavelet function and Hammerstein model [J]. Systems Engineering and Electronics, 2009, 31(8):1935-1939.
- [17] 武海博. 预测函数控制系统的鲁棒性研究[D]. 郑州:郑州大学, 2010.  
WU H B. The research on robustness of predictive functional control systems [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2010.
- [18] 蒋闻, 李少远. 预测控制器设定值柔化因子的在线调整[J]. 智能系统学报, 2009, 4(5): 433-440.  
JIANG W, LI SH Y. Real time tuning of the set-point softening factor for model predictive controllers [J]. CAAI Transactions on Intelligent Systems, 2009, 4(5): 433-440.
- [19] 蒋闻. 预测控制器设定值柔化因子的在线调整[D]. 上海:上海交通大学, 2009.  
JIANG W. On-line tuning of setpoint softening factor for model predictive controllers [D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2009.
- [20] 王国玉, 韩璞, 王东风. 预测函数控制及其应用研究[J]. 系统仿真学报, 2002(8):1087-1091,1108.  
WANG G Y, HAN P, WANG D F. Predictive functional control and its application study[J]. Journal of System Simulation, 2002(8):1087-1091,1108.
- [21] CHENG J, HOWLETT P. Application of critical velocities to the minimization of fuel consumption in the control of trains[J]. Automatica, 1992, 28: 165-169.
- [22] 王洪坡. 磁悬浮列车速度控制与自动驾驶系统研究[D]. 长沙:国防科学技术大学,2002.  
WANG H P. The research of maglev train speed control and autopilot system[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2002.
- [23] 王金刚. 模糊预测控制在 ATO 系统中的应用研究[D]. 兰州:兰州交通大学, 2011.  
WANG J G. Application research of fuzzy in the predictive control in the automatic train operation system[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2011.
- [24] 朱爱红, 卢稳, 宋丽梅. 基于小生境粒子群算法的 ATO 运行过程优化研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2017, 14(9):1998-2004.  
ZHU AI H, LU W, SONG L M. Optimization research on ATO operation process based on niche particle swarm algorithm [J]. Journal of Railway Science and Engineering,2017, 14(9):1998-2004.
- [25] LIN J, QU L SH. Feature extraction based on morlet wavelet and its application for mechanical fault diagnosis [J]. Journal of Sound & Vibration, 2000, 234(1):135-148.
- [26] 张兆中. 基于的列车自动驾驶仿真系统的设计与实现[D]. 北京:北京交通大学, 2010.  
ZHANG ZH ZH. Design and implementation of automatic train operation simulation based on dSPACE [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2010.
- [27] 王龙达, 王兴成, 刘罡, 等. 基于偏好的列车运行过程多目标鲨鱼优化算法[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(10):245-256.  
WANG L D, WANG X CH, LIU G, et al. Multi-objective shark smell optimization algorithm for train operation process based on preference [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(10): 245-256.
- [28] 马天和, 吴萌岭, 田春. 城轨列车减速度反馈制动力闭环控制方法[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(4): 197-205.  
MA T H, WU M L, TIAN CH. Deceleration-feedback braking force closed-loop control method for urban rail train [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(4):197-205.

- [29] XI G H, ZHAO X B, LIU Y, et al. A hierarchical ensemble learning framework for energy-efficient automatic train driving [J]. Tsinghua Science and Technology, 2019, 24(2):106-117.

## 作者简介



**王龙达**, 2021年于大连海事大学控制理论与控制工程专业获得博士学位。2013~2015年为中车大连电力牵引研发中心系统工程师。现任教于大连交通大学, 讲师。主要研究方向为列车自动驾驶智能优化与控制算法。

E-mail: ldwangdl@sina.com

**Wang Longda** received his Ph. D. degree in control theory and control engineering from Dalian Maritime University in 2021. He was a system engineer at CRRC Dalian R&D Co., Ltd. from 2013 to 2015. He is currently a lecture at Dalian Jiaotong University. His current research interests include intelligent optimization and control algorithms for automatic train operation.



**王兴成**, 1991年于东北大学获得硕士和博士学位。现任大连海事大学教授、博士生导师。主要从事鲁棒控制理论、船舶运动控制、非线性控制和复杂系统控制的研究。

E-mail: dmuwxc@dlmu.edu.cn

**Wang Xingcheng** received his M. Sc. degree and Ph. D. degree both from Northeastern University in 1991. Now, he is a professor and a Ph. D. advisor in Dalian Maritime University. His main research interests include robust control theory, ship motion control, nonlinear control and complex system control.



**刘罡**(通信作者), 2015年于大连海事大学控制理论与控制工程专业获得博士学位, 现于内蒙古民族大学工学院任副教授, 并于上海交通大学自动化系攻读读博士后。主要研究方向为故障诊断、信息

融合。

E-mail: liugang530242@163.com

**Liu Gang** (Corresponding author) received his Ph. D. degree in control theory and control engineering from Dalian Maritime University in 2015. He is currently an associate professor in the College of Mechanical Engineering at Inner Mongolia University for the Nationalities. He has been a postdoctoral fellow in Department of Automation of Shanghai Jiao Tong University. His main research interests include fault diagnosis and information fusion.