

基于确定性模型的高速列车二阶段自适应速度跟踪控制

谭 畅^{1,2†}, 姜 坤^{1,2}, 陈馨玥³

(1. 华东交通大学 电气与自动化工程学院, 江西 南昌 330013;

2. 华东交通大学 轨道交通基础设施性能监测与保障国家重点实验室, 江西 南昌 330013;

3. 华东交通大学 天佑学院, 江西 南昌 330013)

摘要: 针对传统自适应控制器暂态性能较差的问题, 本文设计了一种基于确定性模型的高速列车二阶段自适应控制器, 实现了对给定参考曲线的渐进跟踪。首先, 通过受力分析建立了列车的纵向动力学模型, 并根据先验知识确定列车模型中未知参数的区域范围, 从而在未知参数的区域范围内建立列车的确定性辨识模型集; 然后, 采用凸组合的思想设计控制器, 并利用二阶段自适应控制策略更新控制器参数; 最后, 以CRH380AL型高速列车在济南—徐州段的数据进行仿真实验, 仿真结果表明该控制系统具有理想的稳定和渐进跟踪特性, 并且能够快速逼近列车模型参数突变后新的工作点, 显著地改善了列车速度跟踪控制系统的暂态性能。

关键词: 高速列车; 多模型; 二阶段自适应; 速度跟踪控制; 暂态性能

引用格式: 谭畅, 姜坤, 陈馨玥. 基于确定性模型的高速列车二阶段自适应速度跟踪控制. 控制理论与应用, 2025, 42(1): 41–49

DOI: 10.7641/CTA.2023.30175

A speed tracking control scheme for high-speed trains based on second level adaptation with fixed models

TAN Chang^{1,2†}, JIANG Kun^{1,2}, CHEN Xin-yue³

(1. College of Electrical and Automation Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang Jiangxi 330013, China;

2. State Key Laboratory of Performance Monitoring and Protecting of Rail Transit Infrastructure, Nanchang Jiangxi 330013, China;

3. College of TianYou, East China Jiaotong University, Nanchang Jiangxi 330013, China)

Abstract: For the poor transient response of traditional adaptive controller, a second level adaptive controller with fixed models is designed to realize the asymptotic tracking of a given reference curve. Firstly, a longitudinal model of the train is established by force analysis. Then, according to the prior knowledge, the unknown parameter space of the train model is determined and a fixed identification model set of the train can be established within the unknown parameter space. The convex combination method is used to design the controller, and the second level adaptive control strategy is used to update the controller parameters. Finally, the simulation experiment is carried out with the data of CRH380AL type high-speed train processing in Jinan to Xuzhou Section. The simulation results show that the system has desired stability and tracking performance, and can quickly approach the new working point after a dynamic mutation of train model parameters, significantly improving the transient performance of the speed tracking control system.

Key words: high-speed train; multiple models; second level adaptation; speed tracking control; transient performance

Citation: TAN Chang, JIANG Kun, CHEN Xinyue. A speed tracking control scheme for high-speed trains based on second level adaptation with fixed models. *Control Theory & Applications*, 2025, 42(1): 41–49

1 引言

高速列车自动驾驶的实现是铁路建设迈向更智能的一大步^[1], 实现这一目标需要对高速列车运行过程

进行建模并设计合适的控制器使列车能够渐近跟踪目标速度和位移曲线. 然而在实际的列车运行控制过程中, 列车往往面临不确定的气动阻力、外部扰动、未

收稿日期: 2023–03–30; 录用日期: 2023–12–12.

†通信作者. E-mail: lovetanchang@163.com; Tel.: +86 13672222346.

本文责任编辑: 侯忠生.

国家自然科学基金资助项目(62003138), 江西省自然科学基金项目(20242BAB25087), 江西省自然科学基金项目(20202BAB202005), 江西省研究生创新专项资金项目(YC2022–s483)资助.

Supported by the National Natural Science Foundation of China (62003138), the National Natural Science Foundation of Jiangxi Province (20242BAB25087), the National Natural Science Foundation of Jiangxi Province (20202BAB202005) and the Postgraduate Innovation Special Fund Project of Jiangxi Province (YC2022–s483).

知的执行器故障等情况,这些情况都将导致列车系统参数发生突变^[2-3].此时列车往往会出现较大的暂态误差^[4],给列车的安全平稳运行带来隐患.因此,研究一种能够有效改善因列车系统参数发生突变而带来的暂态误差问题的控制器,具有重要意义.

针对高速列车的速度跟踪控制问题,国内外学者开展了大量的研究工作,主要的速度跟踪控制方法有基于PID及其改进的控制方法、智能控制方法、自适应控制方法等.PID控制方法因其设计简单和弱模型依赖性被广泛应用,但其控制精度和响应速度难以得到保证^[5].文献[6]将改进的粒子群算法和自抗扰控制算法结合,从而设计列车的速度跟踪控制器,其控制器跟踪精度较高,能基本贴合目标曲线,但是在列车改变工况时其跟踪误差会出现抖振现象.鉴于自适应控制在处理系统不确定性的优势,诸多学者将自适应控制应用于高速列车速度跟踪控制研究中.文献[7]采用传统单模型自适应控制方法设计列车的速度跟踪控制器,其针对慢时变运行环境具有较好的控制效果,但是当列车模型辨识参数的初始值距其真实值较远时,自适应控制受到辨识算法收敛速度的制约,难以取得令人满意的暂态控制性能.尤其是当列车在运行控制过程中由于运行环境发生改变,元器件老化等导致动态突变时,其在收敛速度上往往不能达到实际控制的要求甚至会导致系统不稳定^[8-9].

为了解决这个问题,许多研究将多模型应用于传统单模型自适应控制方法中以改善暂态性能^[10-11].例如,文献[12]将多模型自适应控制应用于非线性的微电网二次电压控制中.文献[13]将多模型中的切换机制引入基于神经网络的自适应控制系统中.作为主流的多模型自适应控制方法之一,基于切换的多模型自适应控制方法能够有效地改善传统单模型自适应控制方法存在的暂态性能差的问题,但是在实际应用过程中仍然存在3个待改善的问题^[14-15],一是存在不同辨识模型之间会频繁切换从而产生抖振甚至导致系统不稳定的问题;二是随着系统模型中未知参数数量的增加,所需辨识模型数量会指数级增加的问题;三是不同辨识模型间缺少信息的综合.为此,Narendra^[16-18]等提出了多模型二阶段自适应控制方法用于解决以上基于切换的多模型自适应控制方法存在的问题.多模型二阶段自适应控制方法属于加权多模型控制方法的一种,其利用辨识模型集提供的模型信息,在减少辨识模型集中模型数量的同时,保证了控制作用的连续性.文献[19]和文献[20]分别将多模型二阶段自适应控制方法应用于输入饱和的非线性系统和多变量周期系统中,均取得了较好的控制效果.文献[21]在具有参数不确定性和输入输出约束的2-DoF直升机模型中使用二阶段自适应控制方法来处理非线性系统的参数不确定性.文献[22]采用多模型二阶

段自适应控制方法设计高速列车速度跟踪控制器,该控制器具有良好的瞬态响应和跟踪精度,但由于自适应辨识模型参数构成的凸区域会逐渐收敛到特定值.而在实际运行过程中列车模型中的参数会因为运行环境改变而发生突变,收敛后的凸区域将不再包含新的列车模型参数,这将导致多模型退化,失去了多模型二阶段自适应瞬态响应快的优点.

为了改善高速列车在运行过程中因模型参数突变而产生的暂态误差问题,本文设计了基于确定性辨识模型的高速列车多模型二阶段自适应速度跟踪控制器.其主要思想是在列车模型中未知参数的区域范围内建立确定性辨识模型集,采用多模型和凸组合的思想设计控制器,利用二阶段自适应控制策略更新控制器参数,以实现列车的速度控制.本文设计的速度跟踪控制器能改善因列车模型参数发生突变而产生的暂态误差问题,从而保障列车安全、可靠和平稳的运行.此外,其辨识模型的参数固定不变,即使在列车模型参数发生突变的情况下也能保证良好的瞬态响应和较高的跟踪精度,有效克服多模型退化问题.

2 问题的提出

为了研究高速列车多模型二阶段自适应速度跟踪控制策略,本节首先通过受力分析建立高速列车的纵向动力学模型,并提出其控制目标.

2.1 高速列车动力学模型

鉴于高速铁路线路曲率半径大、坡度小和长度长的特点,本文将运行过程中的高速列车视为一个刚性质点并应用牛顿第二定律对其进行受力分析^[23-24],受力分析如图1所示.

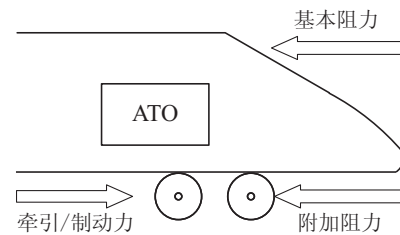


图1 列车动力学模型

Fig. 1 Diagram of high-speed train dynamics model

由图1可知,列车在运行过程中受到了牵引/制动力、基本阻力和附加阻力,根据牛顿第二定律可列出高速列车的纵向动力学模型

$$\begin{cases} \dot{s}(t) = v(t), \\ M\dot{v}(t) = F(t) - f_r(t) - f_g - f_c, \end{cases} \quad (1)$$

其中: M 为列车的总质量; $s(t)$ 为列车的位移; $v(t)$ 为列车的速度; $F(t)$ 为牵引/制动力,由执行机构产生,如机械驱动器、牵引电机、脉冲宽度调制器(Pulse Width Modulations, PWMs)等; $f_r(t)$ 为基本阻力; f_g 为坡道附加阻力; f_c 为曲线附加阻力.

基本阻力 $f_r(t)$ 可近似描述为^[25]

$$f_r(t) = a_r + b_r v(t) + c_r v^2(t), \quad (2)$$

其中 a_r 、 b_r 和 c_r 为基本阻力的系数, 它们与列车的运行环境和自身状态相关, 如质量、动车数量和分布、列车横截面积等。

注1 高速列车的基本阻力 $f_r(t)$ 由3个部分组成: 滚动阻力分量 a_r , 线性阻力 $b_r v(t)$ 和非线性阻力 $c_r v^2(t)$ 。第1项主要由机械阻力产生; 第2项主要由摩擦阻力和轨道的波浪作用产生; 第3项主要由空气阻力产生。当列车运行速度较高时, 最后一项 $c_r v^2(t)$ 将成为基本阻力的主要构成因素。由于列车的运行条件是不确定的或难以定量描述的, 故系数 a_r 、 b_r 和 c_r 是未知的。

高速列车的坡道阻力指列车在坡道上运行时, 由于列车重力沿倾斜方向上的分力所引起的运行阻力, f_g 可近似描述为^[26]

$$f_g = Mg \sin \theta, \quad (3)$$

其中 θ 为当前轨道的倾斜角, 它有3种情况: $\theta < 0$ 、 $\theta > 0$ 和 $\theta = 0$, 分别表示列车位于下坡轨道、上坡轨道和水平轨道。

高速列车的弯道阻力 f_c 表示为^[26]

$$f_c = 0.004DM, \quad (4)$$

其中 D 为曲率。

为了与经典控制理论中的表示符号一致, 后文将统一采用控制输入信号 $u(t)$ 来表示牵引/制动力 $F(t)$, 即 $u(t) = F(t)$ 。令 $x_1(t) = s(t)$, $x_2(t) = v(t)$, 那么根据式(2)–(4), 将式(1)写成如下的状态空间表达式形式:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + B[Gu(t) + Z(t)], \quad (5)$$

其中:

$$\begin{aligned} Z(t) &= -a - g \sin \theta - 0.004D - bx_2(t) - cx_2^2(t), \\ x(t) &= [x_1(t) \ x_2(t)]^T, \quad G = 1/M. \\ A &= \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad B = [0 \ 1]^T. \end{aligned} \quad (6)$$

为了在下一节中能更好地得出未知参数的辨识形式, 在这里将含有未知参数的 G 和 $Z(t)$ 分别分解为已知量和未知量两部分: $G = \phi_G \theta_G$, $Z(t) = \phi_Z^T(t) \theta_Z$, 其中: ϕ_G 和 $\phi_Z(t)$ 为已知量或可以测量的量, θ_G 和 θ_Z 为未知量, 分解如下:

$$\begin{cases} \phi_G = 1, \\ \theta_G = 1/M, \\ \phi_Z(t) = [-1 \ -x_2(t) \ -x_2^2(t)]^T, \\ \theta_Z = [a + g \sin \theta + 0.004D \ b \ c]^T. \end{cases} \quad (7)$$

分解后的高速列车模型如下:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + B[\phi_G \theta_G u(t) + \phi_Z^T(t) \theta_Z]. \quad (8)$$

状态空间表达式(8)即为本节推导得出的高速列车纵向动力学模型, 令 $\theta = [\theta_G \ \theta_Z^T]^T$, $\theta \in \mathbb{R}^4$ 为系统的未知参数向量, 故本文建立的高速列车纵向动力学模型中未知参数的维度为4维。

2.2 控制目标

通过对高速列车动力学建模分析可知, 列车模型中存在未知参数 θ , 且这些未知参数会随列车自身状态和运行环境的变化而改变, 这将导致列车在运行控制过程中出现较大的暂态误差甚至不稳定。鉴于多模型二阶段自适应控制方法具有参数收敛速度快的优点, 和确定性模型集不会自适应地缩小其所包含的未知参数区域范围。本文针对含有未知参数的高速列车动力学模型(8)采用基于确定性模型的二阶段自适应控制方法设计速度跟踪控制器。

因此, 本文的控制目标为: 采用基于确定性模型的二阶段自适应控制方法, 对含有未知参数的高速列车动力学模型(8)设计控制器 $u(t)$, 保证所有闭环信号有界, 实现其速度和位移对目标速度和位移的渐近跟踪。

3 控制器设计

为了实现第2.2节中的控制目标, 本节设计的基于确定性模型的二阶段自适应控制结构框图如图2所示, 设计步骤为: 采用第2节中建立的高速列车纵向动力学模型作为控制对象, 并根据控制对象的系统特性和控制目标选取一个稳定的参考模型; 然后基于匹配方程对高速列车纵向动力学模型进行系统参数化并根据先验知识确定列车模型中未知参数的区域范围, 从而在未知参数的区域范围内建立列车的确定性辨识模型集; 最后采用多模型和凸组合的思想设计控制器, 并利用二阶段自适应控制策略更新控制器参数。

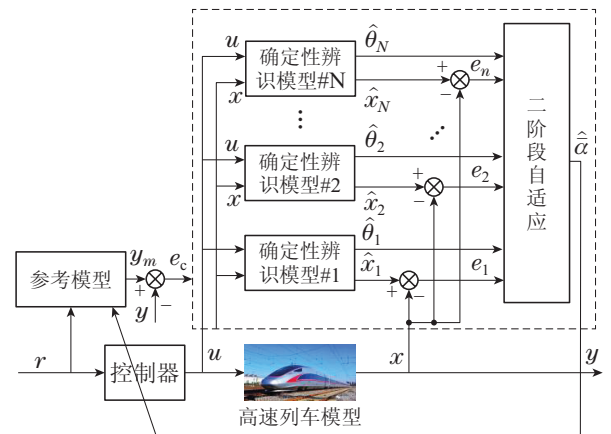


图2 基于确定性模型的二阶段自适应控制器结构框图

Fig. 2 Structure of the second level adaptive controller with fixed models

3.1 参考模型

为了实现列车对目标曲线的跟踪控制, 首先需要选取驾驶经验丰富的列车司机驾驶的速度和位移曲线作为目标曲线, 并根据列车控制系统特性和控制目

标选定一个稳定的参考模型如下:

$$\dot{x}_m(t) = A_m x_m(t) + B_m r(t), \quad (9)$$

其中: $x_m(t) = [x_{m1}(t) \ x_{m2}(t)]^T$ 为参考模型的状态变量, $x_{m1}(t)$, $x_{m2}(t)$ 为列车的参考位移和参考速度.

$$A_m = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ a_{m1} & a_{m2} \end{bmatrix}, \quad B_m = [0 \ b_m]^T,$$

且 $a_{m1} < 0$, $a_{m2} < 0$ 和 $b_m > 0$ 可根据实际的列车型号和状况选取; $r(t) \in \mathbb{R}$ 为有界的参考输入信号, 可根据目标速度曲线和选定的参考模型计算得出.

注 2 此处使用的参考模型和传统的模型参考自适应控制方法中的参考模型不同, 参考模型的外部输入信号 $r(t)$ 不是直接选定的, 而是通过给定参考速度和位移曲线 $x_m(t)$ 和参考模型 (A_m, B_m) , 从式(9)中计算得到的. 同时, 在选择参考曲线 $x_m(t)$ 时还应有一些限制, 比如参考速度 $x_{m2}(t)$ 在一段时间后应该为零, 意味着列车到达了下一个站, 这同时也保证了参考位移 $x_{m1}(t)$ 是有界的.

3.2 参数化模型

由于状态反馈状态跟踪设计方式有结构简单、易于实现和控制器简单等优点^[27-29], 故本文采用状态反馈状态跟踪方式设计控制器. 为了进行状态反馈状态跟踪控制设计, 使 $x(t)$ 渐近跟踪参考模型的状态向量 $x_m(t)$, 须满足如下基本的匹配方程.

引理 1 存在常值向量 $k_1^* \in \mathbb{R}^2$ 和 $k_2^* \in \mathbb{R}$, 使得下述等式成立:

$$A + Bk_1^{*T} = A_m, \quad Bk_2^* = B_m. \quad (10)$$

当参考模型被选定时, 向量 k_1^* 和 k_2^* 可通过式(10)计算得出, 如下式:

$$k_1^{*T} = [a_{m1} \ a_{m2}]^T, \quad k_2^* = b_m.$$

为了得到基于输入信号 $u(t)$ 和状态向量 $x(t)$ 的辨识模型, 需要对列车系统模型进行参数化. 根据匹配方程(10)和式(8)可得参数化模型如下:

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) = & A_m x(t) - B_m k_1^{*T} k_2^{*-1} x(t) + \\ & B_m k_2^{*-1} [\phi_G \theta_G u(t) + \phi_Z^T(t) \theta_Z]. \end{aligned} \quad (11)$$

参数化的系统模型(11)在自适应控制设计中对于构造参数辨识模型是非常必要的. 在模型参考自适应控制中, 为了设计自适应控制器, 首先会考虑假设列车模型参数全部已知的情况, 在这种情况下设计的控制器称为标称控制器. 假设列车模型中所有未知参数已知时, 由参数化模型(11)可以设计高速列车速度跟踪系统的标称控制器为

$$u(t) = k_2^* G^{-1} \left(\frac{k_1^{*T}}{k_2^*} x(t) + r(t) - \frac{1}{k_2^*} Z(t) \right). \quad (12)$$

将设计的标称控制器(12)作用于列车中时具有如下理想的稳定和跟踪性能:

定理 1 高速列车模型(8), 存在标称控制器(12), 使得所有闭环信号有界, 及 $\lim_{t \rightarrow \infty} (x(t) - x_m(t)) = 0$.

证 将标称控制器作用于高速列车模型(8)中, 即将标称控制器作用于参数化后的模型(11)中, 有

$$\dot{x}(t) = A_m x(t) + B_m r(t), \quad (13)$$

定义状态跟踪误差为

$$e(t) = x(t) - x_m(t), \quad (14)$$

则根据参考模型(9)(13), 可以得到

$$\dot{e}(t) = A_m e(t). \quad (15)$$

因为参考模型是一个稳定的系统, 其中 A_m 的所有特征值均在左半复平面, 则根据式(15)可知, 上述跟踪误差 $e(t)$ 、状态向量 $x(t)$ 均有界, 且

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (x(t) - x_m(t)) = 0.$$

上述过程表明, 当列车模型参数已知, 设计的标称控制器可使列车实现对目标速度和位移曲线渐近跟踪. 但由于 G 和 $Z(t)$ 中含有的系统参数 $\theta = [\theta_G \ \theta_Z]$ 未知, 导致上述标称控制器不能直接使用, 故下一节将采用辨识模型对系统参数进行估计. 证毕.

3.3 确定性辨识模型集

上一小节中对列车模型进行了参数化, 从而得到了其参数化模型. 为了实现对列车系统中含有的未知参数进行估计以及设计二阶段自适应控制器, 下面将采用多模型的思想构建确定性辨识模型集.

引理 2 集合 $\Omega_m \in \mathbb{R}^n$, 令 $\text{cov} \Omega_m$ 为 Ω_m 的凸包, 则 $\text{cov} \Omega_m$ 中所有的点均可用 Ω_m 中至多 $n + 1$ 个点的线性凸组合表示^[18].

由引理2可知, 确定性辨识模型集中辨识模型的数量取决于列车模型中未知参数向量的维度, 若列车模型的不确定性为 N 维, 则只需 $N + 1$ 个辨识模型即可实现对列车模型中的未知参数实现凸包含.

在多模型的设计上, 列车模型中含有的未知参数向量 $\theta \in \mathbb{R}^4$, 即列车模型的不确定性为4维, 故建立5个并行的确定性辨识模型 $\{I_k\}_{k=1}^5$ 并根据先验知识选定5组辨识模型的初始值实现对列车模型中含有的未知参数凸包含. 设 $\hat{\theta}_k(t) = [\hat{\theta}_{Gk}(t) \ \hat{\theta}_{Zk}(t)]$, $\hat{G}_k(t)$ 和 $\hat{Z}_k(t)$, $k = 1, 2, \dots, 5$, 分别为5组 θ , G 和 Z 的估计值, 那么将 $\hat{Z}_k(t)$ 和 $\hat{G}_k(t)$ 写成如下形式:

$$\begin{cases} \hat{G}_k(t) = \phi_G \hat{\theta}_{Gk}(t), \\ \hat{Z}_k(t) = \phi_Z^T \hat{\theta}_{Zk}(t). \end{cases} \quad (16)$$

由此建立5个确定性辨识模型 $\{I_k\}_{k=1}^5$ 如下:

$$\begin{aligned} I_k : \dot{\hat{x}}_k(t) = & A_m \hat{x}_k(t) - B_m k_1^{*T} k_2^{*-1} x(t) \\ & + B_m k_2^{*-1} [\hat{G}_k u(t) + \hat{Z}_k(t)], \end{aligned} \quad (17)$$

其中 $k = 1, 2, \dots, 5$, 从而得到了5组 $x(t)$ 的估计值

$\hat{x}_k(t)$, $k = 1, 2, \dots, 5$. 不同辨识模型具有完全相同的结构, 但具有不同未知参数初始值 $\{\theta_k(0)\}$, $k = 1, 2, \dots, 5$.

定义状态估计误差为 $e_k(t) = \hat{x}_k(t) - x(t)$, 其中, $k = 1, 2, \dots, 5$. 根据式(8)(17)得辨识误差模型如下:

$$\dot{e}_k(t) = A_m e_k(t) + B_m k_2^{*-1} [(\hat{G}_k - G)u(t) + (\hat{Z}_k(t) - Z(t))], \quad k = 1, 2, \dots, 5. \quad (18)$$

注3 确定性辨识模型的初始值是固定不变的, 不会随时间自适应地收敛, 即在系统运行过程中, 5个辨识模型集中的参数始终等于初始值. 因此只需更新凸组合系数, 极大地简化了控制器设计和加快了控制器的响应速度.

注4 高速列车系统是一类非线性和高复杂度的系统, 其在运行过程中往往面临不确定的气动阻力, 外部扰动以及未知的执行器故障等情况, 这些情况都将导致列车系统参数发生突变. 多模型二阶段自适应控制方法采用自适应辨识模型, 随着其辨识模型中的参数逐渐收敛到特定值(不一定是列车模型中未知参数的真值), 这将导致辨识模型参数组成的凸区域会逐渐缩小, 若此时列车模型中的未知参数发生突变导致新的未知参数不在辨识模型参数组成的凸区域内, 将由于辨识模型参数收敛而导致多模型退化, 不能实现提升系统瞬态响应的预期要求. 而由于确定性辨识模型参数固定不变且覆盖列车模型中未知参数的区域范围, 故即使列车模型中的未知参数发生突变, 其仍然在确定性辨识模型参数组成的凸区域内, 可有效地克服多模型退化问题. 由此可见, 基于确定性模型的二阶段自适应控制方法更适合用于高速列车的速度跟踪控制研究中.

3.4 二阶段自适应控制器设计

本文设计的高速列车二阶段自适应控制器设计步骤为: 首先对5个确定性辨识模型中含有的5组估计值进行加权, 这里的加权系数被称为凸组合系数; 然后采用加权后的5组未知参数设计控制器, 并利用5个辨识模型提供的辨识误差和跟踪误差信息更新凸组合系数, 从而实现对目标曲线的跟踪.

根据先验知识, 选取5组辨识模型参数初始值 $\{\hat{\theta}_k(0), k = 1, 2, \dots, 5\}$ 构成的凸区域可以包含列车模型未知参数的不确定域, 则由引理2可知, 存在凸组合系数 $\{\alpha_k, k = 1, 2, \dots, 5\}$, 使得

$$\begin{cases} \alpha_k > 0, \\ \sum_{k=1}^5 \alpha_k = 1, \\ \theta(0) = \sum_{k=1}^5 \alpha_k \hat{\theta}_k(0). \end{cases} \quad (19)$$

引理3 如果辨识模型集的初始参数满足式(19), 则有

$$\sum_{k=1}^5 \alpha_k e_k(t) = 0. \quad (20)$$

引理3表明, 当辨识模型参数初始值满足式(19)时, 列车中含有的未知参数将始终包含在5组估计值构成的凸区域内. 则根据式(20), 可采用传统自适应估计方法对凸组合系数进行估计, 这个过程也被称为第二阶段自适应.

首先定义 $E = [e_1 - e_5 \ e_2 - e_5 \ e_3 - e_5 \ e_4 - e_5]$, $h(t) = -e_5(t)$, $\bar{\alpha} = [\alpha_1 \ \alpha_2 \ \alpha_3 \ \alpha_4]^T$, 其中 E 为辨识误差矩阵, 那么式(20)可写成如下形式:

$$E(t)\bar{\alpha}(t) = h(t). \quad (21)$$

然后设 $\hat{\alpha}(t)$ 为 $\bar{\alpha}$ 的估计值, 则 $\hat{\alpha}_k(t)$ 为 α_k 的估计值, 其中 $k = 1, 2, \dots, 5$, 采用传统自适应参数辨识方法得出凸组合系数的估计模型如下:

$$E(t)\hat{\alpha}(t) = \hat{h}(t), \quad (22)$$

其中 $\hat{h}(t)$ 为 $h(t)$ 的估计值, 该模型为线性回归模型.

注5 根据上述分析可知, 凸组合系数的估计依赖于线性回归模型(22). 相对于基于微分方程的参数估计, 基于线性回归模型的参数估计更为简单. 由于高速列车在运行过程中其系统参数易发生突变, 需要能快速响应的控制器, 这在一定程度上奠定了基于确定性辨识模型的多模型二阶自适应控制方法应用于高速列车自动驾驶研究中的优势.

采用传统自适应控制方法可得出凸组合系数更新率如下:

$$\begin{aligned} \dot{\hat{\alpha}}(t) &= -E^T(t)E(t)\hat{\alpha}(t) + E^T(t)h(t) - \\ &= -E^T(t)\tilde{h}(t), \end{aligned} \quad (23)$$

其中 $\tilde{h}(t) = \hat{h}(t) - h(t)$.

根据式(12)(19)-(20)可得二阶自适应控制器为

$$\begin{aligned} u(t) &= k_2^* \left(\sum_{k=1}^5 \hat{\alpha}_k(t) \hat{G}_k \right)^{-1} \left(\frac{k_1^{*T}}{k_2^*} x(t) + \right. \\ & \left. r(t) - \frac{1}{k_2^*} \sum_{k=1}^5 \hat{\alpha}_k(t) \hat{Z}_k(t) \right). \end{aligned} \quad (24)$$

为了确保控制器中 $\sum_{k=1}^5 \hat{\alpha}_k(t) \hat{G}_k$ 在参数更新过程中不等于0, 需将凸组合系数更新率进行如下投影:

$$\dot{\hat{\alpha}} = \begin{cases} \dot{\hat{\alpha}}, & \sum_{k=1}^5 \hat{\alpha}_k(t) \hat{G}_k > 0, \\ 0, & \text{其他.} \end{cases} \quad (25)$$

3.5 稳定性分析

接下来对本文设计的控制器进行稳定性分析. 根据第3.3节和第3.4节中对辨识模型集和控制器的分析和设计, 本文设计的高速列车多模型二阶段自适应控制系统应具有如下期望的系统性能:

定理2 针对高速列车模型(8), 设计具有凸组合系数更新率(23)的控制器(24), 使所有闭环信号有界的, 且 $\lim_{t \rightarrow \infty} (x(t) - x_m(t)) = 0$.

证 由于本文采用的是确定性辨识模型, 其参

数不随时间自适应变化,导致辨识模型的辨识误差不会趋于0,故基于单个辨识模型误差的稳定性分析方法不再适用.然而根据多模型二阶段自适应相关理论,各辨识模型的辨识误差凸组合具有趋于0的性质.下面分两步证明定理1.

步骤1 针对二阶段自适应过程选取李雅普诺夫函数如下:

$$V_s = \tilde{\alpha}^T \tilde{\alpha}, \quad (26)$$

其中 $\tilde{\alpha}(t) = \hat{\alpha}(t) - \bar{\alpha}$.

将式(23)求导可得

$$\begin{aligned} \dot{V}_s &= 2\tilde{\alpha}^T(t)\dot{\tilde{\alpha}}(t) = 2\tilde{\alpha}^T(t)\dot{\hat{\alpha}}(t) = \\ &2\tilde{\alpha}^T(t)(-E^T(t)E(t)\hat{\alpha}(t) + \\ &E^T(t)E(t)\bar{\alpha}(t)) = -2\tilde{h}^2(t) \leq 0, \quad (27) \end{aligned}$$

其中 $\tilde{h}(t) = \hat{h}(t) - h(t)$,式(24)意味着 $\tilde{\alpha} \in L^2 \cap L^\infty$,保证了 $\tilde{\alpha}$ 可以渐近收敛到0.

步骤2 设计如下李雅普诺夫函数综合分析系统的稳定性:

$$\begin{aligned} V &= (\hat{\alpha}_1 e_1 + \hat{\alpha}_2 e_2 + \cdots + \hat{\alpha}_5 e_5)^T P \\ &(\hat{\alpha}_1 e_1 + \hat{\alpha}_2 e_2 + \cdots + \hat{\alpha}_5 e_5) + \tilde{\alpha}^T \tilde{\alpha} = \\ &(E\tilde{\alpha})^T P (E\tilde{\alpha}) + \tilde{\alpha}^T \tilde{\alpha}. \quad (28) \end{aligned}$$

其中: $P \in \mathbb{R}^{2 \times 2}$ 是一个常值正定矩阵, $P = P^T > 0$,且满足 $PA_m + A_m P = -Q$, $Q = Q^T > 0$, $Q \in \mathbb{R}^{2 \times 2}$ 是一个待设计的正定矩阵,则对式(25)求导并根据式(24)有

$$\begin{aligned} \dot{V} &= 2(E\tilde{\alpha})^T (\dot{E}\tilde{\alpha} + E\dot{\tilde{\alpha}}) - 2\tilde{h}^2(t) = \\ &2(E\tilde{\alpha})^T \dot{E}\tilde{\alpha} + 2(E\tilde{\alpha})^T E\dot{\tilde{\alpha}} - 2\tilde{h}^2 = \\ &2(E\tilde{\alpha})^T \dot{E}\tilde{\alpha} - 2(E\tilde{\alpha})^T E E^T E\tilde{\alpha} - 2\tilde{h}^2 = \\ &-(E\tilde{\alpha})^T Q E\tilde{\alpha} - 2(E\tilde{\alpha})^T E E^T E\tilde{\alpha} - 2\tilde{h}^2 < 0. \quad (29) \end{aligned}$$

式(29)意味着 $\hat{\alpha}_1 e_1 + \hat{\alpha}_2 e_2 + \cdots + \hat{\alpha}_5 e_5 \in L^2$,保证了状态跟踪误差可以渐近收敛到0,即定理2中 $\lim_{t \rightarrow \infty} (x(t) - x_m(t)) = 0$ 成立.

由此可知,被控对象中所有信号都是有界的,而且辨识误差的凸组合可以收敛到任意小的区域,高速列车的速度和位移可以渐近跟踪理想的速度,以及位移曲线. 证毕

4 仿真实验

本文的仿真实验分为2个部分,第1部分选择CRH-380AL型动车组作为本文的仿真实验对象,采用本文设计的控制器进行数值仿真,第2部分在列车模型中含有的未知参数发生突变的情况下将本文设计的控制器控制效果分别于与基于切换的多模型自适应控制器控制效果,传统加权多模型自适应控制器控制效果以及基于自适应模型的多模型二阶段自适应控制

器控制效果进行对比分析.

4.1 仿真数据

CRH380AL型动车组仿真参数见表1.

本文选取的目标曲线为CRH380AL型动车组由济南到徐州的真实速度与位移曲线,列车运行过程中共有3种工况:牵引、制动和匀速.如图3(a)所示,列车运行总时长为3160 s,运行里程为228 km.目标速度曲线如图3(b)所示,最高运行速度为310 km/h.

表1 CRH380AL型动车组仿真参数

Table 1 Simulation parameters of CRH380AL

参数	数值
基本编组	8辆编组(6M2T)
编组质量/t	442
运行阻力/(N/t)	$5.6 + 0.036v + 0.00121v^2$
车轮直径/(mm)	860
坡度	12‰
曲度	0.35

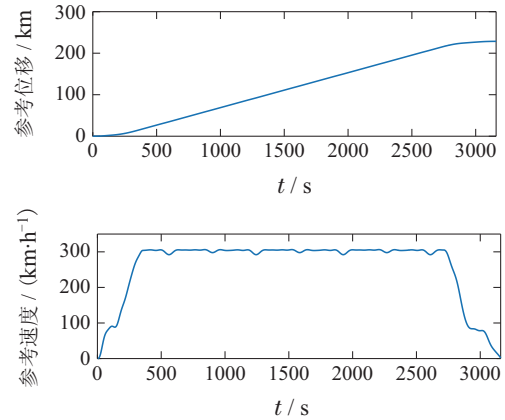


图3 目标位移与速度曲线

Fig. 3 Desired displacement and speed curve

参考模型中的参数首先应使得参考模型是一个稳定的系统,其次在选择的过程中应考虑所选列车型号以及线路特点,最后在大量的仿真实验中确定为: $a_{m1} = -0.1$, $a_{m2} = -0.1$ 和 $b_m = 1$,则外部输入信号可以通过选定的参考模型和目标曲线计算获得.列车模型中未知参数估计值的初始值的选择,首先应根据所选列车和运行线路的先验知识确定列车模型中含有的未知参数的取值范围,然后选择的5组参数估计值的初始值应尽可能地包含未知参数的取值范围.令列车模型、参考模型和确定性辨识模型的初始状态均为 $x(t_0) = [0 \ 0]^T$,即处于停车状态.

4.2 高速列车二阶段自适应控制系统仿真

采用第4.1节中选定的仿真数据,根据第3节中的控制器设计流程进行仿真实验.仿真实验得到的结果如图4和图5所示,分别为位移跟踪及误差曲线与速度跟踪及误差曲线.

根据图4和图5可知, 本文方法设计的控制器具有良好的跟踪性能, 速度和位移跟踪曲线紧密贴合目标曲线, 瞬态响应好, 误差峰值小且在初始时刻能够快速收敛, 稳态误差控制在0.02 km/h以内, 远低于平均速度的1%, 能够达到稳定性要求和无静差追踪.

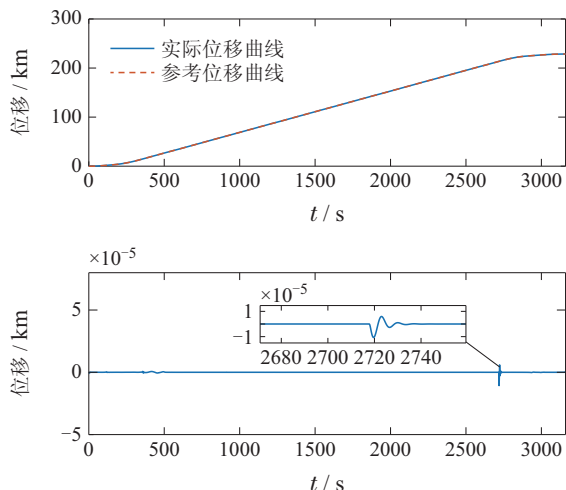


图 4 列车位移跟踪和误差曲线

Fig. 4 Displacement tracking and error curve of the train

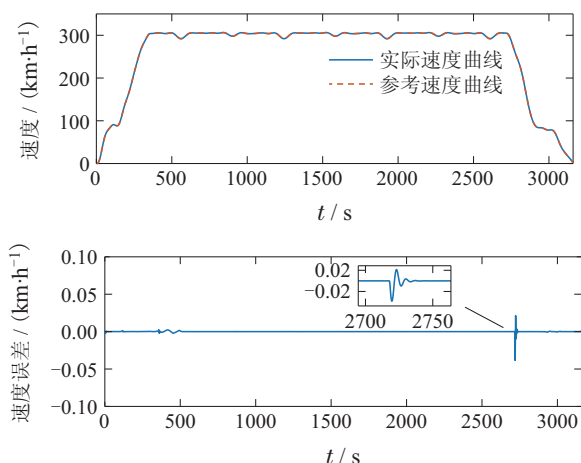


图 5 列车速度跟踪和误差曲线

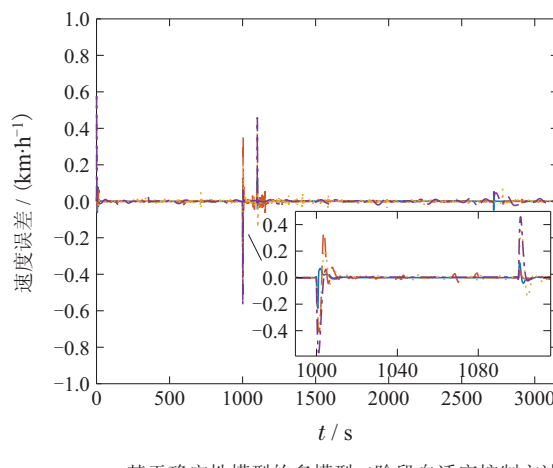
Fig. 5 Speed tracking and error curve of the train

4.3 高速列车速度跟踪控制仿真对比

为了清晰地展示本文方法设计的控制器在参数收敛速度方面的优势, 下面分别与基于切换的多模型自适应控制器控制效果, 基于自适应辨识模型的二阶段自适应控制器控制效果以及经典加权多模型控制器控制效果进行对比. 为了不失公平性, 4种多模型自适应控制方法采用的辨识模型均为5个且辨识模型参数的初始值相同.

高速列车运行环境复杂, 往往面临着不确定的气动阻力、外部扰动以及未知的执行器故障等情况, 这些情况都将导致列车参数发生突变. 由于传统自适应控制方法受到参数辨识算法收敛速度的制约, 会因模型参数发生突变而产生较大的暂态误差. 为了验证本

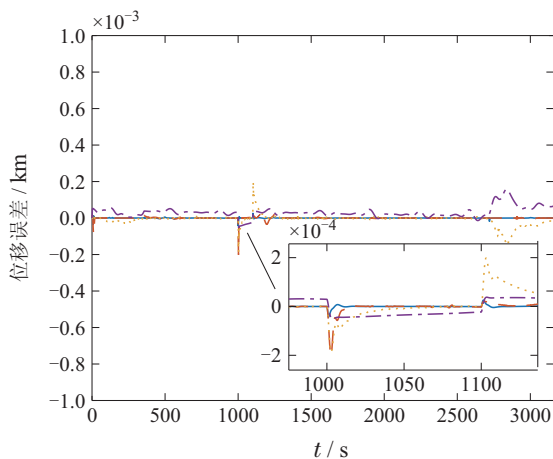
文所设计的控制器应对列车模型参数发生突变的能力, 故在下面的对比仿真实验中, 选择了一段轨道坡度发生变化的高速列车运行场景, 从而使得列车模型参数发生突变, 即在 $t = 1000 \sim 1100$ s时轨道坡度为30%, 列车的运行环境参数发生突变. 4种控制方法设计的控制器控制效果如图6和图7所示, 图6为列车位移跟踪误差对比, 图7为列车速度跟踪误差对比.



— 基于确定性模型的多模型二阶段自适应控制方法
- - 基于自适应模型的多模型二阶段自适应控制方法
... 基于切换的多模型自适应控制方法
- · - 经典加权多模型自适应控制方法

图 6 列车速度跟踪误差

Fig. 6 Speed tracking errors of the train



— 基于确定性模型的多模型二阶段自适应控制方法
- - 基于自适应模型的多模型二阶段自适应控制方法
... 基于切换的多模型自适应控制方法
- · - 经典加权多模型自适应控制方法

图 7 列车位移跟踪误差

Fig. 7 Displacement tracking errors of the train

从对比图中可以看出在仿真参数和辨识模型数量相同的情况下, 基于确定性模型的多模型二阶段自适应控制方法设计的控制器在瞬态响应、稳态响应以及抗干扰性等各方面均优于其他3种算法. 3种控制方法中基于切换的多模型自适应控制器控制效果较差, 追踪精度较低, 这是因为3种多模型控制方法辨识模型集中的辨识模型均为5个, 而基于切换的多模型自适

应控制器需要一个庞大的辨识模型集才能够达到理想的控制效果. 由于在初始时刻经典加权多模型自适应控制方法各个控制器的加权系数相同且加权系数的计算和更新较为复杂, 需要一定的时间计算和调整加权系数, 故其在初始时刻的误差较大, 以及模型参数发生变化时, 本文设计的控制器瞬态响应优于经典加权多模型自适应控制器.

两种多模型二阶段自适应控制方法设计的控制器在初始阶段的输出具有相似的性能, 然而在 $t = 1000 \sim 1100$ s时, 由于轨道坡度变化导致列车模型参数发生突变, 本文设计的控制器控制效果在响应速度和控制精度方面要优于基于自适应模型的多模型二阶段自适应控制器的控制效果. 这是因为基于自适应模型的多模型二阶段自适应控制方法设计的控制器随着其辨识模型中的参数逐渐收敛, 辨识模型参数组成的凸区域会逐渐缩小, 当轨道坡度改变导致列车模型参数发生突变, 新的列车模型参数将不再包含在辨识模型参数收敛后组成的凸区域内, 从而导致多模型退化, 不能实现提升系统瞬态响应的预期要求. 而本文方法的辨识模型集中辨识模型的参数固定, 可以很好地避免因列车模型参数发生突变而导致的多模型退化问题, 继续保证多模型二阶段自适应控制方法响应迅速的优点, 有效地改善因列车模型参数发生突变而产生的暂态误差问题, 从而保障列车安全、可靠和平稳的运行.

5 结论

本文针对传统自适应控制器瞬态响应差、抗干扰能力弱和跟踪精度低的问题, 设计了基于确定性模型的多模型二阶段自适应列车速度跟踪控制器. 该控制器设计简单, 跟踪精度高, 抗干扰能力强, 即使在列车模型参数因不确定的气动阻力、外部扰动以及未知的执行器故障等情况发生突变时, 也能够保证多模型二阶段自适应控制方法响应快的特点. 仿真实验结果表明, 该方法能够实现高速列车渐近跟踪给定速度和位移曲线, 达到高速列车自动驾驶的运行要求.

参考文献:

- [1] WANG Tongjun. Study on the development strategy of china intelligent high speed railway. *China Railway*, 2019, 679(1): 9 – 14. (王同军. 中国智能高铁发展战略研究. 中国铁路, 2019, 679(1): 9 – 14.)
- [2] XIE Guo, JIN Yongze, HEI Xinhong, et al. Adaptive identification of time-varying environmental parameters in train dynamics model. *Acta Automatica Sinica*, 2019, 45(12): 2268 – 2280. (谢国, 金永泽, 黑新宏, 等. 列车动力学模型时变环境参数自适应辨识. 自动化学报, 2019, 45(12): 2268 – 2280.)
- [3] TAN C, TAO G, YANG H, et al. Adaptive actuator failure compensation for multivariable systems using a multiple-model design. *Proceedings of the 12th Asian Control Conference*. Kitakyushu, Japan: IEEE, 2019, 12: 1340 – 1345.
- [4] WEN Liyan, TAO Gang, JIANG Bin, et al. A multiple-model based adaptive actuator failure compensation scheme for nonlinear systems with dynamic mutations. *Acta Automatica Sinica*, 2022, 48(1): 207 – 222. (文利燕, 陶钢, 姜斌, 等. 非线性动态突变系统的多模型自适应执行器故障补偿设计. 自动化学报, 2022, 48(1): 207 – 222.)
- [5] YANG Yanfei, CUI Ke, LÜ Xinjun. Combined sliding mode and PID control of automatic train operation system. *Journal of the China Railway Society*, 2014, 36(6): 61 – 67. (杨艳飞, 崔科, 吕新军. 列车自动驾驶系统的滑模PID组合控制. 铁道学报, 2014, 36(6): 61 – 67.)
- [6] YANG Jie, CHEN Yuqi, WANG Panpan. Design of active disturbance rejection controller for train speed tracking based on improved particle swarm optimization. *Journal of the China Railway Society*, 2021, 43(7): 40 – 46. (杨杰, 陈昱圻, 王盼盼. 基于改进粒子群算法的列车速度跟踪自抗扰控制器设计. 铁道学报, 2021, 43(7): 40 – 46.)
- [7] SONG Qi, GU Qing, LIU Feng, et al. Adaptive positioning and velocity control of high speed train systems. *Control Engineering of China*, 2010, 17(S1): 35 – 37. (宋琦, 顾青, 刘峰, 等. 高速列车的自适应速度及位置控制. 控制工程, 2010, 17(S1): 35 – 37.)
- [8] MAO Z H, YAN X G, JIANG B, et al. Adaptive fault-tolerant sliding-mode control for high-speed trains with actuator faults and uncertainties. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2020, 21(6): 2449 – 2460.
- [9] TAN Chang, LI Yiqing, YANG Hui. Adaptive braking control for high-speed trains with disturbances and time delays. *Journal of East China Jiaotong University*, 2021, 38(4): 64 – 71. (谭畅, 李毅清, 杨辉. 存在扰动和时滞的高速列车自适应制动控制. 华东交通大学学报, 2021, 38(4): 64 – 71.)
- [10] KUIPERS M, IOANNOU P. Multiple model adaptive control with mixing. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2010, 55(8): 1822 – 1836.
- [11] NARENDRA K S, BALAKRISHNAN N J. Improving transient response of adaptive control system using multiple models and switching. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1994, 39(9): 1861 – 1866.
- [12] MA Z X, WANG Z Y, GUO Y F, et al. Nonlinear multiple models adaptive secondary voltage control of microgrids. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2021, 12(1): 227 – 238.
- [13] HUANG M, WANG X, LU Z M, et al. Multiple model adaptive control for a class of nonlinear systems with unknown control directions. *International Journal of Control*, 2019, 92(9): 2064 – 2076.
- [14] ZHANG K P, JIANG B, CHEN F Y. Multiple-model-based diagnosis of multiple faults with high-speed train applications using second-level adaptation. *IEEE Transactions on Industrial Electronic*, 2021, 68(7): 6257 – 6266.
- [15] CHEN J, CHEN W, SUN J. Smooth controller design for non-linear systems using multiple fixed models. *IET Control Theory & Applications*, 2017, 11(9): 1467 – 1473.
- [16] HAN Z, NARENDRA K S. Second level adaptation using multiple models. *Proceeding of the 2011 American Control Conference*. San Francisco, CA, USA: IEEE, 2011: 2350 – 2355.
- [17] NARENDRA K S, HAN Z. A new approach to adaptive control using multiple models. *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, 2012: 26(8), 778 – 799.
- [18] HAN Z, NARENDRA K S. New concepts in adaptive control using multiple models. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2012: 57(1), 78 – 89.
- [19] WU Wei, WANG Xin, WANG Zhenlei. Design of multiple-model second level adaptive controller for a class of asymmetric saturation actuators nonlinear system. *Control Theory & Applications*, 2020,

- 37(5): 1166 – 1177.
(吴伟, 王昕, 王振雷. 输入饱和的非线性系统多模型二阶段自适应控制器设计. 控制理论与应用, 2020, 37(5): 1166 – 1177.)
- [20] WANG Yan, WANG Xin, WANG Zhenlei. Multiple models second level adaptive control of multivariable periodic systems. *Control Theory & Applications*, 2021, 38(3): 391 – 397.
(王岩, 王昕, 王振雷. 多变量周期系统的多模型二阶段自适应控制. 控制理论与应用, 2021, 38(3): 391 – 397.)
- [21] LAKSSHMI D, DUSHMANTA K D. Adaptive model predictive control design using multiple model second level adaptation for parameter estimation of two-degree freedom of helicopter model. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 2021, 31(8): 3248 – 3278.
- [22] ZHOU Y H, ZHANG Z L. High-speed train control based on multiple-model adaptive control with second-level adaptation. *Vehicle System Dynamics*, 2014, 52(5): 637 – 652.
- [23] YAO X M, LI S H, LI X F. Composite adaptive anti-disturbance fault tolerant control of high-speed trains with multiple disturbances. *IEEE Transaction on Intelligent Transportation Systems*, 2022, 23(11): 21799 – 21809.
- [24] XU Chuanfang. Finite-time fault-tolerant tracking control for high-speed trains. *Journal of the China Railway Society*, 2021, 43(11): 69 – 77.
(徐传芳. 高速列车的有限时间容错跟踪控制. 铁道学报, 2021, 43(11): 69 – 77.)
- [25] AREMA L M D. *Manual Railway Eng.* Chicago: American Railway Engineering and Maintenance-of-Way Association, 1999.
- [26] GARG V K, DUKKIPATI R V. *Dynamics of Railway Vehicle Systems.* San Diego: Academic, 1984.
- [27] NARENDRA K S, ANNASWAMY A M. *Stable Adaptive Systems.* New York: Dover, 1989.
- [28] IOANNOU P, SUN J. *Robust Adaptive Control.* Upper Saddle River: Prentice Hall, 1996.
- [29] TAO G. *Adaptive Control Design and Analysis.* New York: John Wiley and Sons, 2003.

作者简介:

谭 畅 副教授, 目前研究方向为轨道交通运行优化控制,
E-mail: lovetanchang@163.com;

姜 坤 硕士研究生, 目前研究方向为多模型自适应控制,
E-mail: 435438020@qq.com;

陈馨玥 本科生, 目前研究方向为多模型自适应控制, E-mail:
1282484468@qq.com.