

文章编号:1005-0523(2021)04-0064-08



存在扰动和时滞的高速列车自适应制动控制

谭畅^{1,2},李毅清^{1,2},杨辉^{1,2}

(1. 华东交通大学电气与自动化工程学院,江西 南昌 330013;

2. 华东交通大学江西省先进控制与优化重点实验室,江西 南昌 330013)

摘要:为了保障高速列车的安全可靠运行,文章以存在未知扰动和输入时滞的高速列车制动系统为被控对象,设计了新的高速列车制动系统模型参考自适应控制策略,实现了对给定速度曲线的渐近跟踪。首先,通过分析高速列车制动系统的原理和动态特性,建立了存在扰动和时滞的高速列车制动系统状态空间模型;其次,充分利用模型参考自适应控制善于处理系统不确定性和外界扰动的能力,结合状态预测,设计了状态反馈控制器,使其在存在未知扰动和输入时滞时仍能实现对给定速度曲线的渐近跟踪;最后基于CRH380AL型高速列车在济南—青岛段的数据开展仿真验证,仿真结果表明文章设计的高速列车制动控制系统具有理想的稳定和渐近跟踪特性,能克服未知参数和有界扰动的影响,具有良好的鲁棒性。

关键词:高速列车;制动系统;输入时滞;未知扰动;模型参考自适应控制;渐近跟踪

中图分类号:U268;TP273

文献标志码:A

本文引用格式: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[J]. 华东交通大学学报,2021,38(4):64-71.

DOI:10.16749/j.cnki.jecjtu.2021.04.008

Adaptive Braking Control for High-Speed Trains with Disturbances and Time Delays

Tan Chang^{1,2}, Li Yiqing^{1,2}, Yang Hui^{1,2}

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

2. Key Laboratory of Advanced Control and Optimization of Jiangxi Province, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: To ensure the safe and reliable operation of high-speed trains, this paper develops a new adaptive control scheme for the braking system of high-speed trains with unknown disturbances and input time delays, which realizes the asymptotic tracking of given speed curve. By analyzing the principle and dynamic characteristics of braking systems, a state space model of high-speed trains with disturbances and input time delays is established. A state feedback control law is designed based on state prediction and the capacity of model reference adaptive control to deal with system uncertainties and disturbances, thus realizing the asymptotic tracking of given speed curve in presence of unknown disturbances and input time delays. The data in Jinan-Qingdao section of CRH380AL type of high-speed trains are used for simulation study. Simulation results show the desired stability, tracking performance, and robustness in dealing with unknown parameters and bounded disturbance.

Key words: high-speed trains; braking system; input time delays; unknown disturbances; model reference adaptive control; asymptotic tracking

Citation format: TAN C, LI Y Q, YANG H. Adaptive braking control for high-speed trains with disturbances and time delays[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2021, 38(4): 64-71.

收稿日期:2021-07-01

基金项目:国家自然科学基金资助项目(62003138, U2034211);江西省自然科学基金项目(20202BAB202021);江西省研究生创

新专项资金项目(YC2020-S305) Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>.

作者简介:谭畅(1982—),女,副教授,博士,研究方向为轨道交通运行优化控制。E-mail:lovetanhang@163.com。

通信作者:杨辉(1965—),男,教授,博士,研究方向为轨道交通运行优化控制、复杂系统建模与控制。E-mail:yhshuo@263.net。

铁路系统是攸关旅客生命及财产安全的大型地面运输系统。近年来,高速列车发展尤为迅速,已成为广大群众外出远行的重要交通工具,其安全运行至关重要^[1-3]。列车制动系统的性能是实现运行安全的前提和基础,提高高速列车的制动性能,保障列车安全、平稳运行日益成为各国研究高铁的焦点问题^[4]。研究高速列车制动过程的建模与控制,对提高列车的制动性能和运行安全性具有重要的现实意义。

当前,主要研究方向是高速列车制动过程的建模和控制。针对高速列车制动过程中的建模问题,师黎^[5]基于动力学分析,建立了高速列车制动过程中的机理模型。该模型假定列车制动时基本阻力恒定,在建模精度上与列车实际的制动模型存在差异。袁海军等^[6]通过单质点模型建立了特征模型,提出了最优PID控制器。连文博等^[7]在单质点模型的基础上建立了高速列车的状态空间方程,通过对传统PID控制器的改进,设计了自抗扰控制器。刘晓宇等^[8]通过分析高速列车具体的制动控制过程,建立了传递函数模型,该模型反映了列车制动控制力产生的动态过程。Liu等^[9]和Tong等^[10]将非线性模型表示为T-S模糊模型,并基于状态观测器及自适应、鲁棒等策略设计了分布式模糊控制器。

针对高速列车制动过程中的控制问题,Mao等^[11]考虑了高速列车的时变系统参数和未建模干扰,提出了对时变参数进行参数化的方法,设计了自适应故障补偿器。耿睿等^[12]通过分析列车的牵引-制动系统,考虑到列车运行过程中空气阻力、未知干扰等非线性因素,将实际输出与线性模型输出的误差描述为未建模动态,设计了多变量非线性广义预测控制器。罗恒钰等^[13]构建基于增广误差的自适应控制系统,实现了制动系统的速度跟踪控制。当前控制器设计很大程度上依赖参数已知的模型。自适应控制善于解决参数未知系统,本文针对参数未知的系统,采用模型参考自适应控制(MRAC)策略进行高速列车制动控制。

此外,由于延时会影响列车安全运行,当前已有研究人员针对时滞系统进行了相关研究。Zhou等^[14]针对具有未知时滞和输入饱和的非线性系统,采用模糊逻辑方法逼近系统的未知函数解决自适应输出跟踪控制问题。Xi等^[15]研究了具有不匹配非

结构非线性和未知时滞的高阶严格反馈系统的自适应渐近跟踪控制问题,利用自适应机制和投影算子估计未知时滞。罗仁士等^[16]基于Pade和自适应方法处理制动模型中的时滞及外部扰动。目前多数学者在处理延时问题时将延时近似处理,忽略其所带来的影响,因此处理列车制动延时问题十分有必要。

列车在实际制动过程中存在一定的干扰,在此方面国内外学者已进行了相关的研究。刘晓宇^[17]通过分析高速列车停车控制过程,在外部阻力干扰已知的情况下,将MPC引入到列车停车控制问题中,设计了高速列车精确停车预测控制算法。张梦楠等^[18]基于Krasovskii泛函算子,设计了鲁棒制动控制器,以消除模型中非线性、时滞及有界扰动的影响,并分析了系统的稳定性。

本文充分利用模型参考自适应控制处理系统不确定性和外界扰动的能力,设计了新的高速列车制动系统自适应控制策略,使其在存在未知扰动和输入延时的情况下,仍能保证系统稳定和实现对给定速度曲线的渐近跟踪,保障高速列车的安全、可靠运行。

1 问题提出

为了使高速列车制动系统在存在扰动和时滞的情况下仍能保持系统稳定和实现对给定速度曲线的渐近跟踪,本文充分运用模型参考自适应控制方法的优势,研究其建模和控制问题。本节首先通过分析高速列车制动系统的原理和动态特性,建立存在扰动和时滞的高速列车制动系统状态空间模型,并提出其自适应控制问题。

1.1 存在扰动和时滞的高速列车制动系统模型

为了建立高速列车在存在扰动和时滞情况下的制动系统模型,首先对其制动系统原理和动态特性进行分析。

高速列车的制动指令不直接作用于其动力执行单元,而是通过微制动控制单元(MBCU)接收司机或者列车自动驾驶子系统(ATO)发出的制动信号,并结合车辆的载重量和车速等信息,计算所需的制动力及减速度,从而实现对高速列车运行状态的控制。根据制动系统原理,可将高速列车制动系统表示为图1。图1中, m 为载重量,kg; $u(t)$ 为制动力指令,N; τ 为高速列车延时时间,也称为空走时间,s; $u(t-\tau)$ 为存在延时的制动力指令; $v(t)$ 为高速

列车的实际速度, km/h; $a(t)$ 为高速列车的实际制动减速度, m/s^2 。此外, 在列车运行过程中由于受到外界扰动会对实际的制动减速度产生影响。

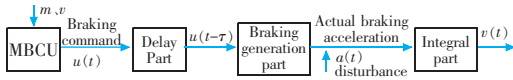


图1 列车制动系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of braking system of train

根据高速列车制动系统原理, 可将制动过程大体分为接收信号、延时、制动力生成、扰动和积分5个环节。

1) 接收信号环节。高速列车的制动过程首先由MBCU接收司机或ATO发出的制动信号, 并计算当前所需的制动力 $u(t)$ 。

2) 延时环节。因为信号传输和机械传导等原因, MBCU计算的制动力指令 $u(t)$ 需经过一定的延时才能作用于执行机构。将延时环节表示为

$$u_1(t) = u(t - \tau) \quad (1)$$

其中: τ 为延时时间, s ; $u_1(t)$ 存在延时的制动力指令, N 。

注释1: 在实际制动系统中, 无论是电气制动装置还是空气制动装置, 均存在延时环节^[4]。

3) 制动力生成环节。高速列车的制动力 $u_1(t)$ 与其产生的 $a_1(t)$ 的关系可近似为线性关系^[2], 基于比例系数 K 将其描述为

$$a_1(t) = K u_1(t) = K u(t - \tau) \quad (2)$$

制动控制装置通过“反馈”作用实现实际制动减速度 $a(t)$ 与目标制动减速度 $a_1(t)$ 的跟踪控制^[9], 动态过程由一阶惯性环节表示

$$\dot{a}(t) = \frac{1}{T} [a_1(t) - a(t)] \quad (3)$$

其中: T 为制动系统时间常数。

4) 扰动环节。高速列车在制动过程中, 受到外界扰动影响, 将对减速度产生影响。为了进行高速列车制动系统建模与控制研究, 我们将外界扰动 $d(t)$ 表示为

$$d(t) = d_0 + \sum_{l=1}^{n_l} d_l f_l(t) \quad (4)$$

其中: d_0 和 d_l 为未知常数; $f_l(t)$ 为已知基函数; n_l 为基函数的个数。可以通过选取适当形式和个数的基

函数 $f_l(t)$ 逼近实际扰动, 当 n_l 足够大时, 扰动模型可以逼近任何实际的外界扰动。

此时, 实际制动减速度 $a_2(t)$ 表示为如下形式

$$a_2(t) = a(t) + d(t) \quad (5)$$

5) 积分环节。高速列车的实际速度 $v(t)$ 由其实际制动减速度 $a_2(t)$ 通过积分环节得到

$$\dot{v}(t) = a_2(t) \quad (6)$$

根据上述分析, 可将高速列车制动系统模型框图表示为图2。图2中, T 为制动系统时间常数; s 为拉氏变换算子; $u(t)$ 为制动力指令, N ; τ 为列车延时时间, 也称为空走时间, s ; $u_1(t)$ 为延时后的制动力指令, N ; K 为比例系数; $a_1(t)$ 为目标加速度, m/s^2 ; $a(t)$ 为控制加速度, m/s^2 ; $d(t)$ 表示由于受到干扰而使高速列车产生的附加加速度, m/s^2 ; $a_2(t)$ 为实际制动加速度, m/s^2 ; $v(t)$ 为列车实际速度, km/h 。

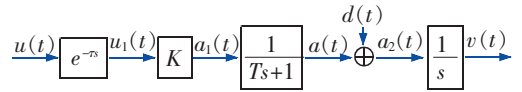


图2 高速动车组制动系统模型框图

Fig.2 Model diagram of braking system for high-speed EMU

根据式(1)~式(5)得到存在扰动和延时的高速列车制动系统动力学模型为

$$\begin{cases} \dot{v}(t) = a(t) + d(t) \\ \dot{a}(t) = -\frac{1}{T} a(t) + \frac{K}{T} u(t - \tau) \end{cases} \quad (7)$$

定义状态变量: $\mathbf{x} = [x_1, x_2]^T = [v, a]^T$, 则存在扰动和延时的高速列车制动系统状态空间模型为

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}u(t - \tau) + \mathbf{D}d(t) \quad (8)$$

其中: $\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -\frac{1}{T} \end{bmatrix}$, $\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{K}{T} \end{bmatrix}$, $\mathbf{D} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$ 。进一步地可将式(8)表示为紧凑形式

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}\mathbf{z}(t) \quad (9)$$

其中: $\mathbf{B}_1 = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ \frac{K}{T} & -\frac{K}{T} \end{bmatrix}$, $\mathbf{z}(t) = \begin{bmatrix} u(t - \tau) + d(t) \\ d(t) \end{bmatrix}$ 。

1.2 高速列车制动系统自适应控制问题

鉴于自适应控制在处理系统不确定性的优势,

考虑到高速列车运行环境复杂多变,且制动系统存在大量不确定性和扰动,本文针对存在扰动和时滞的高速列车制动系统(8),采用模型参考自适应方法设计制动控制器,实现其对给定速度曲线的渐近跟踪,以保障高速列车的安全正点运行。

因此,本文的控制目标为:基于模型参考自适应方法设计状态反馈状态跟踪高速列车制动控制器 $u(t)$,保证所有闭环信号有界,且其速度和加速度 $\dot{x}(t)$ 渐近地跟踪给定的信号 $x_m(t)=[v_m, a_m]^T$ 。

2 自适应制动控制器设计

为了实现 1.2 节中提出的控制目标,本文设计的高速列车模型参考自适应控制系统框图如图 3 所示。高速列车自适应制动控制器的设计步骤为:首先根据系统特性和控制目标选取稳定的参考模型 $x_m(t)$;其次基于匹配方程对高速列车制动系统模型进行系统参数化,并基于参数化模型,设计标称控制器;最后基于标称控制器设计自适应控制器,作用于存在扰动和延时的高速列车制动控制系统。

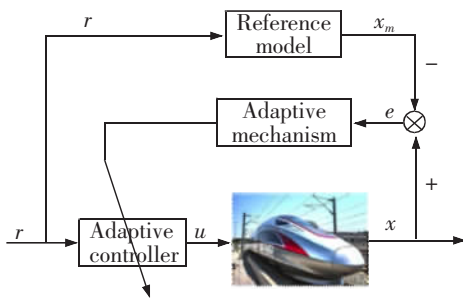


图 3 高速列车模型参考自适应控制系统框图

Fig.3 MRAC diagram of high-speed train

2.1 参考模型

为了设计高速列车制动系统模型参考自适应控制器,首先应选择适合的参考模型。本文根据熟练司机的驾驶经验得到给定的速度曲线作为参考模型的输出,即 $x_m(t)=[v_m, a_m]^T$,并根据控制目标和制动系统结构,选择稳定的参考模型

$$\dot{x}_m(t)=A_m x_m(t)+B_m r(t) \quad (10)$$

其中: $r(t)=[r_1, r_2]^T \in R^2$ 为有界的外部输入信号;

$B_m \in R^{n \times n}, A_m \in R^{n \times n}$ 为稳定的矩阵。

注释 2:与传统的模型参考自适应方法首先选择有界的外部输入信号 $r(t)$,再根据式(10)得到参

考模型的输出 $x_m(t)$ 不同,本文基于给定参考模型的输出 $x_m(t)$ (即给定的速度曲线)和选定的参考模型系统矩阵 (A_m, B_m) ,根据式(10)计算得到外部输入信号 $r(t)$,并将其作为制动控制信号的一部分,将给定速度曲线信息用于控制器设计。

2.2 系统参数化

为了设计状态反馈控制器 $u(t)$,使 $x(t)$ 渐近地跟踪参考模型的输出 $x_m(t)$,须满足如下匹配方程。

命题 1 存在常值向量 $g_1^* \in R^{n \times n}$ 和 $g_2^* \in R^{n \times n}$,使得下列匹配方程成立

$$A+Bg_1^{*T}=A_m, Bg_2^*=B_m \quad (11)$$

当参考模型参数 A_m, B_m 被选定且系统参数 A 和 B 已知时,常值矩阵 $g_1^*=[g_{11}^*, g_{12}^*; g_{13}^*, g_{14}^*]$ 和 $g_2^*=[g_{21}^*, g_{22}^*; g_{23}^*, g_{24}^*]$ 可以通过式(11)计算得到。

为了设计自适应控制器,须对高速列车制动系统进行参数化,其系统参数可表示为

$$A=A_m-B_m g_2^{*-1} g_1^{*T}, B=B_m g_2^{*-1} \quad (12)$$

将式(12)带入式(8)有

$$\dot{x}(t)=A_m x(t)+B_m[-g_2^{*-1} g_1^{*T} x(t)+g_2^{*-1} z(t)] \quad (13)$$

因此有

$$z(t)=g_1^{*T} x(t)+g_2^* r(t) \quad (14)$$

进一步地

$$u(t)=k_1^{*T} x(t+\tau)+k_2^* r(t+\tau)-d(t+\tau) \quad (15)$$

其中: $k_1^*=[g_{11}, g_{12}]^T \in R^2, k_2^*=[g_{21}, g_{22}]^T \in R^2$ 。由式(4)和式(15)可得高速列车制动系统控制器形式为

$$u(t)=k_1^{*T} x(t+\tau)+k_2^* r(t+\tau)-\sum_{l=1}^n d f_l(t+\tau)-d_0 \quad (16)$$

将式(16)表示为如下形式

$$u(t)=k_1^{*T} x(t+\tau)+k_2^* r(t+\tau)-k_3^{*T} \psi(t+\tau)-k_4^* \quad (17)$$

其中: $k_3^*=[d_1, \dots, d_n]^T \in R^n, \psi(t)=[f_1(t), \dots, f_n(t)]^T \in R^n, k_4^*=d_0$ 。

2.3 状态预测

由于高速列车制动控制器(17)中含有未来的状态变量 $x(t+\tau)$,因此需使用状态预测的方法对状态 $x(t+\tau)$ 进行预测。

引理 1^[20] 考虑连续时间线性时不变系统 $\dot{x}=Ax+Bu$,其状态运动规律为同时作用有初始状态和输入的状态方程的解,具体表达式为

$$x(t)=e^{A(t-t_0)} x_0 + \int_{t_0}^t e^{A(t-\tau)} B u(\tau) d\tau, t \geq t_0 \quad (18)$$

根据式(18)以及黎曼积分法,通过变量替换可求解

$x(t+\tau)$, 即

$$x(t+\tau) \approx e^{A\tau}x(t) - \sum_{i=1}^m \frac{\delta_i \tau}{m} e^{A \times \frac{\tau \times i}{m}} B z(t - \frac{\tau \times i}{m}) \quad (19)$$

其中: δ_i 为可调参数。

根据式(7)和式(15)~式(17), 得到预测后的控制器结构为

$$u(t) = k_1^{*\tau} e^{A\tau} x(t) + k_2^{*\tau} r(t+\tau) - k_3^{*\tau} \psi(t+\tau) - k_4^* - k_1^{*\tau} \sum_{i=1}^m \frac{\delta_i \tau}{m} e^{A \times \frac{\tau \times i}{m}} [Bu(t - \frac{\tau \times i}{m}) + Dd(t - \frac{\tau \times i}{m})] \quad (20)$$

2.4 标称控制器

标称控制器为系统参数已知的情况下, 为实现期望的控制目标设计的控制器, 因此本文设计的高速列车制动系统标称控制器为

$$u(t) = \phi_1^{*\tau} x(t) + \phi_2^{*\tau} r(t+\tau) - \phi_3^{*\tau} \psi(t+\tau) - \phi_4^* - \phi_5^{*\tau} \Theta(t) - \phi_6^{*\tau} \Phi(t) \quad (21)$$

其中: $\phi_1^* = (e^{A\tau})^T k_1^*$; $\phi_2^* = k_2^*$; $\phi_3^* = k_3^*$; $\phi_4^* = k_4^*$;

$$\phi_5^* = \left[\frac{\delta_1 \tau}{m} k_1^{*\tau} e^{A \times \frac{\tau \times i}{m}} B, \dots, \frac{\delta_m \tau}{m} k_1^{*\tau} e^{A \times \frac{\tau \times i}{m}} B \right]^T \in R^m;$$

$$\phi_6^* = \left[\frac{\delta_1 \tau}{m} k_1^{*\tau} e^{A \times \frac{\tau \times i}{m}} D, \dots, \frac{\delta_m \tau}{m} k_1^{*\tau} e^{A \times \frac{\tau \times i}{m}} D \right]^T \in R^m;$$

$$\Theta(t) = \left[u(t - \frac{\tau \times 1}{m}), \dots, u(t - \frac{\tau \times m}{m}) \right]^T \in R^m;$$

$$\Phi(t) = \left[d(t - \frac{\tau \times 1}{m}), \dots, d(t - \frac{\tau \times m}{m}) \right]^T \in R^m.$$

定理 1^[21] 标称控制器(21)使存在扰动和时滞的高速列车制动系统(7)中所有的闭环信号有界, 且其速度和加速度渐近地跟踪给定的速度 $x(t)$ 和加速度 $x_m(t)$ 。

证明 将标称控制器(21)带入闭环系统(7)

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + B[\phi_1^{*\tau} x(t-\tau) + \phi_2^{*\tau} r(t) - \phi_3^{*\tau} \psi(t) - \phi_4^* - \phi_5^{*\tau} \Theta(t-\tau) - \phi_6^{*\tau} \Phi(t-\tau)] + Dd(t) = A_m x(t) + B_m x(t) \quad (22)$$

定义跟踪误差信号

$$e(t) = x(t) - x_m(t) \quad (23)$$

基于式(10)和式(23), 有

$$\dot{e}(t) = A_m e(t) \quad (24)$$

因此, 跟踪误差 $e(t)$ 、状态向量 $x(t)$ 和控制输入 $u(t)$ 均有界, 且 $\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = 0$ 。

2.5 自适应控制器

虽然标称控制器可使闭环系统具有理想的系

统性能, 然而在实际制动过程中, 制动系统的参数 A 和 B 未知, 因此控制器参数 $\phi_1^*, \phi_2^*, \phi_3^*, \phi_4^*, \phi_5^*, \phi_6^*$ 未知, 需设计自适应控制器。根据理想控制器的形式, 设计高速列车制动自适应控制器为

$$u(t) = \phi_1^T(t)x(t) + \phi_2^T(t)r(t+\tau) - \phi_3^T(t)\psi(t+\tau) - \phi_4 - \phi_5^T(t)\Theta(t) - \phi_6^T(t)\Phi(t) \quad (25)$$

其中: $\phi_1(t), \phi_2(t), \phi_3(t), \phi_4(t), \phi_5(t), \phi_6(t)$ 为 $\phi_1^*, \phi_2^*, \phi_3^*, \phi_4^*, \phi_5^*, \phi_6^*$ 的估计值。

为了更新参数 $\phi_1(t), \phi_2(t), \phi_3(t), \phi_4(t), \phi_5(t), \phi_6(t)$, 我们基于跟踪误差(23), 设计自适应律

$$\begin{cases} \dot{\phi}_1(t) = \Gamma_1 x(t) e^T(t) PB \\ \dot{\phi}_2(t) = \Gamma_2 r(t+\tau) e^T(t) PB \\ \dot{\phi}_3(t) = -\Gamma_3 \psi(t+\tau) e^T(t) PB \\ \dot{\phi}_4(t) = -\Gamma_4 e^T(t) PB \\ \dot{\phi}_5(t) = -\Gamma_5 \Theta(t) e^T(t) PB \\ \dot{\phi}_6(t) = -\Gamma_6 \Phi(t) e^T(t) PB \end{cases} \quad (26)$$

其中: $\Gamma_1 \in R^{n \times n}$; $\Gamma_2 \in R^{n \times n}$; $\Gamma_3 \in R^{n \times n}$; $\Gamma_4 \in R$; $\Gamma_5 \in R^{m \times m}$; $\Gamma_6 \in R^{m \times m}$ 为自适应增益; $\Gamma_i = \Gamma_i^T > 0, i=1, 2, 3, 4, 5, 6$; $P \in R^{n \times n} = P^T > 0$, 满足: $PA_m + A_m^T P = -Q$, 其中 $Q = Q^T > 0$ 。

为了分析自适应律的性质, 定义参数误差

$$\begin{aligned} \tilde{\phi}_1(t) &= \phi_1(t) - \phi_1^*, \tilde{\phi}_2(t) = \phi_2(t) - \phi_2^*, \tilde{\phi}_3(t) = \phi_3(t) - \phi_3^*, \\ \tilde{\phi}_4(t) &= \phi_4(t) - \phi_4^*, \tilde{\phi}_5(t) = \phi_5(t) - \phi_5^*, \tilde{\phi}_6(t) = \phi_6(t) - \phi_6^* \end{aligned} \text{以及正定函数}$$

$$V(e, \tilde{\phi}_1, \tilde{\phi}_2, \tilde{\phi}_3, \tilde{\phi}_4, \tilde{\phi}_5, \tilde{\phi}_6) = e^T P e + \tilde{\phi}_1^T \Gamma_1^{-1} \tilde{\phi}_1 + \tilde{\phi}_2^T \Gamma_2^{-1} \tilde{\phi}_2 + \tilde{\phi}_3^T \Gamma_3^{-1} \tilde{\phi}_3 + \tilde{\phi}_4^T \Gamma_4^{-1} \tilde{\phi}_4 + \tilde{\phi}_5^T \Gamma_5^{-1} \tilde{\phi}_5 + \tilde{\phi}_6^T \Gamma_6^{-1} \tilde{\phi}_6 \quad (27)$$

$$\begin{aligned} \dot{V} &= 2e^T(t-\tau) P \dot{e}(t-\tau) + 2\tilde{\phi}_1^T(t-\tau) \Gamma_1^{-1} \dot{\tilde{\phi}}_1(t-\tau) + \\ & 2\tilde{\phi}_2^T(t-\tau) \Gamma_2^{-1} \dot{\tilde{\phi}}_2(t-\tau) + 2\tilde{\phi}_3^T(t-\tau) \Gamma_3^{-1} \dot{\tilde{\phi}}_3(t-\tau) + \\ & 2\tilde{\phi}_4^T(t-\tau) \Gamma_4^{-1} \dot{\tilde{\phi}}_4(t-\tau) + 2\tilde{\phi}_5^T(t-\tau) \Gamma_5^{-1} \dot{\tilde{\phi}}_5(t-\tau) + \\ & 2\tilde{\phi}_6^T(t-\tau) \Gamma_6^{-1} \dot{\tilde{\phi}}_6(t-\tau) \\ & = -e^T(t-\tau) Q e(t-\tau) \leq 0 \end{aligned}$$

因此, $\phi_1(t-\tau), \phi_2(t-\tau), \phi_3(t-\tau), \phi_4(t-\tau), \phi_5(t-\tau), \phi_6(t-\tau)$ 有界, 即 $\phi_1(t) \in L^\infty; \phi_2(t) \in L^\infty; \phi_3(t) \in L^\infty; \phi_4(t) \in L^\infty; \phi_5(t) \in L^\infty; \phi_6(t) \in L^\infty$ 。

2.6 稳定性分析

本文设计的存在时滞和未知扰动的高速列车自适应制动控制系统有如下系统性能。

引理 2^[21] $\dot{e}(t) \in L^\infty, e(t) \in L^2$, 则 $\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = 0$ 。

定理 2 针对具有未知扰动和已知时滞的高速列车制动系统(7),设计基于(26)的自适应制动控制器(25),使得所有闭环系统信号有界,且 $\lim_{t \rightarrow \infty} (x(t) - x_m(t)) = 0$ 。

证明 由式(26)和式(27)导数可知 $e(t), e(t-\tau), \dot{e}(t), \dot{e}(t-\tau), \phi_1(t), \phi_2(t), \phi_3(t), \phi_4(t), \phi_5(t), \phi_6(t)$ 有界,有 $e(t) \in L^\infty \cap L^2$;根据式(23)有状态信号 $x(t)$ 有界,因此式(26)中 $u(t)$ 有界,闭环系统(7)稳定。再由引理 2 和式(23)可知 $\lim_{t \rightarrow \infty} (x(t) - x_m(t)) = 0$ 。

3 仿真实证

为了验证本文设计的存在扰动和时滞的高速列车制动系统自适应控制器的有效性,本节以 CRH380AL 型高速列车制动系统为被控对象进行仿真实验研究。

3.1 仿真实验数据

我们首先采集济南—青岛段 CRH380AL 型高速列车制动过程的 360 组真实速度数据(单位为 km/h)进行曲线拟合,得到给定的速度曲线(见图 4 中的目标速度曲线)。

其次,系统模型动力学方程如式(7)所示,制动系统时间常数 $T=0.4$ s,式(2)中比例系数 $K=0.9$,制动系统时滞 $\tau=0.2$ s。根据设计要求选择参考模型

$$(20) \text{ 中的参数 } A_m = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ -1 & -2 \end{bmatrix}, B_m = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}。$$

最后,选择状态预测时式(19)中参数取值: $m=10, \delta_i=(i-0.5)(i=1, 2, \dots, m)$ 。选取合适的状态初值: $x(0)=[304, 0], x_m(0)=[303.8, -0.326 4]$;参数估计初值与其真值之间的关系为: $\phi_1(0)=85\% \phi_1^*, \phi_2(0)=78\% \phi_2^*, \phi_3(0)=88.9\% \phi_3^*, \phi_4(0)=85\% \phi_4^*, \phi_5(0)=90\% \phi_5^*, \phi_6(0)=85\% \phi_6^*$;自适应增益设计为: $\Gamma_1=5I, \Gamma_2=0.075I, \Gamma_3=0.095I, \Gamma_4=0.01I, \Gamma_5=0.35 \times 10^{-4}I, \Gamma_6=0.01I$ 。

3.2 仿真实验结果

基于 3.1 中选定的设计数据,根据第 2 节中的设计过程,设计高速列车自适应制动控制系统,进行仿真实验。实验得到的仿真结果如图 4~图 6 所示,分别为高速列车制动系统速度、加速度位移跟踪曲线和误差曲线。

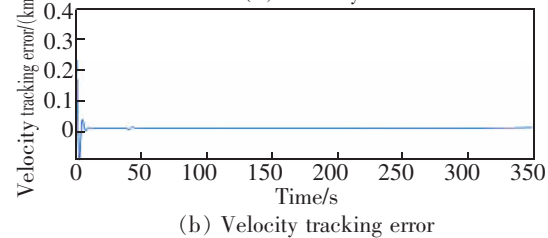
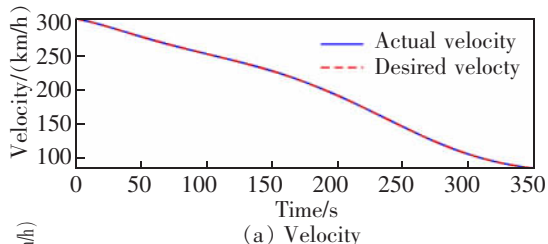


图 4 列车速度跟踪及误差

Fig.4 Train speed tracking and error

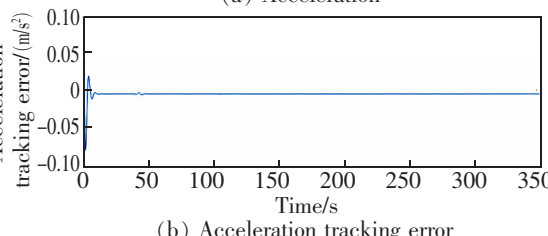
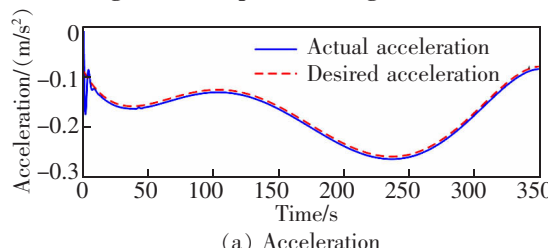


图 5 列车加速度跟踪及误差

Fig.5 Train acceleration tracking and error

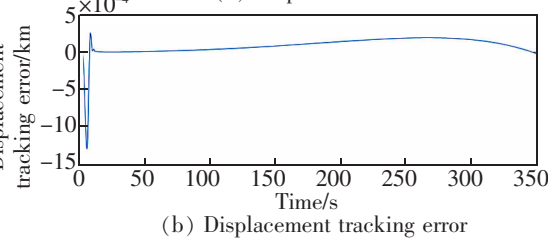
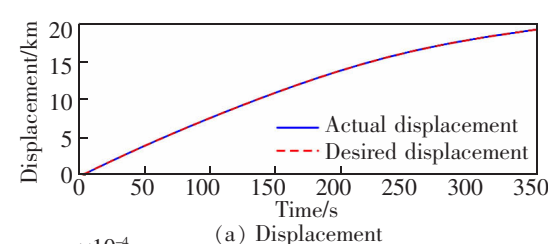


图 6 列车位移跟踪及误差

Fig.6 Train displacement tracking and error

由图 4~图 6 可知,虽然制动系统存在时滞和未知扰动,但本文设计的高速列车制动系统自适应控

制器仍能保证所有闭环信号有界,速度、位移和加速度最大跟踪误差分别为 0.3 km/h, 1.29 m 和 0.09 m/s^2 , 均在系统运行的范围内,且在 15 s 内实现了速度和加速度误差渐近收敛于原点附近的邻域,位移误差趋近于 0,实现了控制目标,且跟踪精度高,系统的制动性能理想。此外,通过仿真图 5 可知,列车制动加速度曲线平缓,变化缓慢,保障了列车的安全制动,也提高了列车制动时的平稳性。由此可见,该控制器能够克服未知参数和有界扰动的影响,虽然速度和加速度存在一定的稳态误差,但跟踪的精度较高,系统的制动性能较理想,该控制器的鲁棒性较强。

4 结论

本文以存在未知扰动和已知时滞的高速列车制动过程为研究对象,研究了其建模和控制方法,得出以下结论:

1) 对于存在已知时滞的高速列车制动过程,基于模型参考自适应控制方法设计的制动控制器能保证系统稳定,实现对给定速度曲线的渐近跟踪,从而保障高速列车的安全可靠运行。

2) 在系统存在外界干扰和未知系统参数,该控制器能够克服未知参数和有界扰动的影响,具有良好的鲁棒性。

3) 本文设计的控制系统考虑了扰动、延时等环节,提高了高速列车制动模型的精度,且制动性能较理性,制动过程平稳性强,确保了高速列车安全可靠平稳运行。

参考文献:

- [1] 宋琦. 高速列车的鲁棒自适应及容错控制[D]. 北京:北京交通大学,2014.
SONG Q. Robust adaptive and fault tolerant control for high speed trains[D]. Beijing:Beijing Jiaotong University,2014.
- [2] 李中奇,杨辉,刘明杰,等. 高速动车组制动过程的建模及跟踪控制[J]. 中国铁道科学,2016,37(5):80-86.
LI Z Q,YANG H,LIU M J,et al. Modeling and tracking control of braking process of high-speed EMU[J]. China Railway Science,2016,37(5):80-86.
- [3] 杨辉,童英赫,付雅婷,等. 基于模型补偿的高速列车状态反馈预测控制[J]. 铁道科学与工程学报,2020,17(10):2460-2468.
YANG H,TONG Y H,FU Y T,et al. State feedback predictive control of high speed train based on model compensation[J]. Journal of Railway Science and Engineering,2020,17(10):2460-2468.
- [4] 张梦楠. 动车组列车自动停车控制[D]. 北京:北京交通大学,2015.
ZHANG M N. Automatic stop control of EMU train[D]. Beijing:Beijing Jiaotong University,2015.
- [5] 师黎. 模糊预测-PID 复合控制在高速列车制动中的应用[J]. 计算机工程与应用,2010,46(31):228-231.
SHI L. Application of fuzzy prediction-PID compound control in high-speed train braking[J]. Computer Engineering and Application,2010,46(31):228-231.
- [6] 袁海军,赵志刚. 高速列车模型参数辨识及控制研究[J]. 铁道机车车辆,2019,39(6):5-9.
YUAN H J,ZHAO Z G. Research on parameter identification and control of high-speed train model[J]. Railway Locomotive Vehicle,2019,39(6):5-9.
- [7] 连文博,刘伯鸿,李婉婉,等. 基于自抗扰控制的高速列车自动驾驶速度控制[J]. 铁道学报,2020,42(1):76-81.
LIAN W B,LIU B H,LI W W,et al. Automatic driving speed control of high-speed train based on ADRC[J]. Journal of Railway,2020,42(1):76-81.
- [8] 刘晓宇,荀径,高士根,等. 高速列车精确停车的鲁棒自触发预测控制[EB/OL]. (2020-06-28)[2021-04-20]. https://doi.org/10.16383/j aas.c200039.
LIU X Y,GOU J,GAO S G,et al. Robust self-triggering predictive control for accurate stopping of high speed trains [EB/OL]. (2020-06-28)[2021-04-20]. https://doi.org/10.16383/j aas.c200039.
- [9] LIU Y J,TONG S C,CHEN P. Adaptive fuzzy control via observer design for uncertain nonlinear systems with unmodeled dynamic[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems,2013,21(2):275-288.
- [10] TONG S C,HUO B Y,LI Y M. Observer-based adaptive decentralized fuzzy fault-tolerant control of nonlinear large-scale systems with actuator failures[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems,2014,22(1):1-15.
- [11] MAO Z H,TAO G,JIANG B,et al. Adaptive actuator compensation of position tracking for high-speed trains with disturbances[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology,2018,67(7):5706-5717.
- [12] 耿睿,李中奇,杨辉. 动车组的多变量非线性预测控制研究[J]. 华东交通大学学报,2021,38(2):61-66+142.
GENG R,LI Z Q,YANG H. Research on multivariable nonlinear predictive Control for EMU[J]. Journal of East

- China Jiaotong University, 2021, 38(2):61-66+142.
- [13] 罗恒钰,徐洪泽. 基于参考模型的ATO自适应控制算法研究[J]. 铁道学报, 2013, 35(7):68-73.
LUO H Y, XU H Z. Research on ATO adaptive control algorithm based on reference model[J]. Journal of Railway, 2013, 35(7):68-73.
- [14] ZHOU Q, WU C Y, SHI P. Observer-based adaptive fuzzy tracking control of nonlinear systems with time delay and input saturation[J]. Fuzzy Sets and Systems, 2016, 316:49-68.
- [15] XI C, DONG J. Adaptive asymptotic tracking control of uncertain nonlinear time-delay systems depended on delay estimation information[J]. Applied Mathematics and Computation, 2021, 391:125662.
- [16] 罗仁士,王义惠,于振宇,等. 城轨列车自适应精确停车控制算法研究[J]. 铁道学报, 2012, 34(4):64-68.
LUO R S, WANG Y H, YU Z Y, et al. Adaptive stopping control of urban rail vehicle[J]. Journal of China Railway Society, 2012, 34(4):64-68.
- [17] 刘晓宇. 基于模型预测控制的高速列车精确停车方法研究[D]. 北京:北京交通大学, 2020.
LIU X Y. Research on accurate stopping Method of high speed train based on model Predictive Control[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2020.
- [18] 张梦楠,徐洪泽. 基于Krasovskii泛函的城轨列车制动控制器设计[J]. 吉林大学学报(工学版), 2015, 45(1):104-111.
ZHANG M N, XU H Z. Design of urban rail brake controller based on krasovskii functional[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2015, 45(1):104-111.
- [19] 郭红戈,谢克明. 动车组列车制动系统的Hammerstein模型及其参数辨识方法[J]. 铁道学报, 2014, 36(4):48-53.
GUO H G, XIE K M. Hammerstein model of EMU train braking system and its parameter identification method[J]. Journal of Railway, 2014, 36(4):48-53.
- [20] 胡沁春,刘刚利,高燕. 信号与系统[M]. 重庆:重庆大学出版社, 2015:262.
HU Q C, LIU G L, GAO Y. Signal and System[M]. Chongqing: Chongqing University Press, 2015:262.
- [21] 陈复扬. 自适应控制[M]. 北京:科学出版社, 2015.
CHEN F Y. Adaptive Control[M]. Beijing: Science Press, 2015.

(责任编辑:熊玲玲 姜红贵)



特约专家徐长节:男,二级教授,博士生导师。现任华东交通大学党委副书记、副校长(主持行政工作),教育部“长江学者”特聘教授,国家杰出青年基金获得者,“万人计划”科技领军人才,国家百千万人才工程入选者,国务院特殊津贴获得者。主持及参与国家及省部级科研项目 10 余项、工程项目 100 余项。获国家科技进步二等奖等。



特约专家陈梦成:男,二级教授,博士生导师。现任华东交通大学党委委员、副校长,江西省先进工作者,中国优秀留学回归人员,赣鄱英才 555 工程领军人才,江西省优势科技创新团队学术带头人。主持完成及在研国家 973、国家自然科学基金江西省等各类科研项目 30 余项;发表学术论文 400 余篇。获省部级奖项 5 项等。



特约专家刘林芽:男,二级教授,博士生导师。现任华东交通大学副校长,国家百千万人才工程国家级人选,教育部新世纪优秀人才,享受国务院特殊津贴专家,赣鄱英才 555 工程领军人才,主持国家自然科学基金、教育部等各类科研项目 50 余项。获国家科技进步二等奖,江西省自然科学一等奖等奖项 11 项。



特约专家杨辉:男,二级教授,博士生导师。新世纪百千万人才工程国家级人选,赣鄱英才 555 工程领军人才,江西省优势科技创新团队领军人才,获国务院特殊津贴、江西省突出贡献人才等荣誉,现任华东交通大学副校长,江西省人大常委。获江西省自然科学奖一等奖、江西省技术发明一等奖等省部级奖项 7 项。



特约专家罗文俊:女,教授,博士生导师。现任华东交通大学副校长,防灾减灾研究所所长。教育部青年长江学者,江西省主要学科学术及技术带头人,首批江西省青年井岗学者,享受国务院特殊津贴专家。主持国家自然科学基金 4 项,省部级科研课题 10 余项。获教育部科技进步二等奖 2 项,江西省科技进步一等奖等。



特约专家刘燕德:女,二级教授,博士生导师。现任华东交通大学首席教授,华东交通大学首批天佑学者,智能机电装备创新研究院院长,第三批国家“万人计划”领军人才,科技部重点领域创新团队负责人,江西省光电检测工程技术中心主任等。获江西省科技进步一等奖、江西省自然科学二等奖等省部级奖项 8 项。



特约专家宋立军:男,教授,博士生导师,智能激光制造湖南省重点实验室主任。研究方向:激光智能制造(3D 打印、超快激光微纳制造)、激光光谱学、激光制造材料科学、传感及控制。主持及参与多项国家自然科学基金、湖南省等各类科研项目。获中国机械工业联合会和中国机械工程学会一等奖等。



特约专家肖乾:男,教授,博士生导师。现任华东交通大学机电与车辆工程学院院长,华东交通大学天佑拔尖人才,江西省百千万人才工程入选,获全国詹天佑铁道科学技术奖青年奖、茅以升铁道科学技术奖、江西省科技进步一等奖等。近 5 年来,主持国家自然科学基金 3 项,省部级科研课题多项以及企业横向课题等近 20 项。