

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2006164

城轨列车减速度反馈制动力闭环控制方法*

马天和, 吴萌岭, 田 春

(同济大学铁道与城市轨道交通研究院 上海 201804)

摘要:针对城轨列车在目前理论减速度开环控制模式下,实际制动减速度精度较低的问题,提出一种基于参数估计的制动力闭环控制方法。将列车运行于坡道、弯道等路段产生的附加运行阻力和摩擦副摩擦系数变化等导致的实际制动力偏差等效为列车在制动过程中所受的总扰动,以列车减速度和制动缸压力等作为输入,通过梯度估计方式对该扰动进行求解。根据总扰动的估计值对列车制动力控制目标进行在线修正以实现城轨列车制动力闭环控制。为便于在实际的制动系统电子制动控制单元中进行编程,将上述控制算法进行了离散化。仿真和硬件在环试验结果表明:参数估计算法能够对恒定扰动和变扰动进行估计,估计值的收敛速度与估计器系数呈正相关,但当估计器系数大于1之后,收敛速度趋于饱和。制动力闭环控制算法能够提高列车实际减速度对其目标值的跟随性,当坡道坡度呈正弦变化且实际摩擦系数同时随速度变化时,闭环控制的减速度偏差由开环时的 0.36 m/s^2 降至 0.08 m/s^2 。并且当制动过程中发生滑行时,防滑控制与制动力闭环控制仍能较好兼容,滑行轴速度、制动缸压力及列车实际减速度的变化满足预期。

关键词:制动力控制;减速度控制;参数估计;制动系统;城轨列车

中图分类号: U270.35 TH-39 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 580.30

Deceleration-feedback braking force closed-loop control method for urban rail train

Ma Tianhe, Wu Mengling, Tian Chun

(Institute of Rail Transit, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: Aiming at the problem that the accuracy of the actual braking deceleration of the urban rail train is low under current theoretical deceleration open-loop control mode, a closed-loop braking control method is proposed based on parameter estimation. The actual braking force deviations caused by the additional running resistance when the train is running on ramps and curves and the change of friction coefficient of friction pair are taken as an equivalent total disturbance suffered by the train during braking. Then, taking the train deceleration and braking cylinder pressure as the inputs, the gradient estimation approach is adopted to solve the total disturbance. According to the estimated value of the total disturbance, the control target of train braking force is modified online to realize the closed-loop control of the urban rail train braking force. In order to facilitate the programming in the actual electronic braking control unit of the braking system, the above control algorithm is discretized. The simulation and hardware-in-the-loop test results show that the parameter estimation algorithm can estimate both constant disturbance and variable disturbance, and the convergence rate of the estimated value is positively correlated with the estimator coefficient. However, when the coefficient increases to greater than 1, the convergence rate tends to saturation. This braking force closed-loop control algorithm can improve the tracking performance of the actual train deceleration to the target value. When the slope of the ramp changes according to sinusoidal law and at the same time the actual friction coefficient changes with the velocity, the deceleration deviation of the closed-loop control decreases from 0.36 m/s^2 to 0.08 m/s^2 . Moreover, when sliding occurs during braking, anti-skid control and braking force closed-loop control still can be compatible well, and the changes of the sliding axle speed, brake cylinder pressure and actual train deceleration meet the expectations.

Keywords: braking force control; deceleration control; parameter estimation; braking system; urban rail train

收稿日期: 2020-03-07 Received Date: 2020-03-07

* 基金项目: 国家自然科学基金(52072266, U1534205)项目资助

0 引言

城市轨道交通的发展和列车制动技术的进步对城轨列车制动系统的控制性能提出了更高的要求^[1]。制动控制性能的核心指标是列车制动减速度,减速度控制精度不足将直接影响列车速度和位置控制的精度,进而降低列车停站时的对门准确性,过大或过小的减速度会导致意外的滑行,降低乘客舒适度^[2-3]和列车运营效率。

制动减速度的精确控制要通过对列车制动力的精确控制实现。城轨列车制动力构成包括电制动力和摩擦制动力,其中电制动力由列车牵引系统控制牵引电机产生反向力矩施加,摩擦制动力则一般由空气制动系统通过电空转换阀(electro-pneumatic valve, EP valve)控制制动单元的制动缸压力来施加。由于制动单元存在内部机械阻力导致其输出闸瓦压力不准确^[4],且摩擦副摩擦系数受温度、材质、接触面状态、速度等因素影响具有不确定性^[5-6],从而导致实际摩擦制动力矩不准确。同时,列车运行于坡道、弯道、隧道等路段时,会产生附加运行阻力。摩擦制动力矩和运行阻力的不确定性会导致列车综合制动力的不确定性,但目前实际工程运用的城轨列车制动系统未能充分考虑这些影响,制动力控制在实际减速度层面是开环的,其安全性通过减速度设计值的较高安全裕量保证,而精确性不足,故近年来国内外均开始研究列车制动力的闭环控制。

较早就列车制动减速度精度问题开展研究的有文献^[7-9],其通过列车信息管理系统(train information management system, TIMS)对整列车的制动力进行统一管理,采用基于Smith预估器的PI(proportional integral)控制方法,基于实际减速度和目标减速度的偏差对列车目标制动力进行修正,提高了实际减速度精度。但该研究对造成列车减速度偏差的真正原因没有进行识别,只是基于跟踪误差对列车制动力进行调节,容易造成实际减速度的振荡。

因此,文献^[10-11]对列车制动过程中载重偏差、摩擦系数和坡道等参数的不确定性进行分析,提出通过多参数估计修正列车目标制动力的方法,使列车制动力的修正有了依据。但该参数估计器以列车速度作为输入,而目前列车速度一般通过对多轴速度的综合测量来间接获取,故滑行工况下列车速度的准确性不足,限制了该方法在滑行工况下的运用。因此本文采用列车减速度作为输入,在滑行工况下能与滑行轴的防滑控制相兼容,同时以单参数估计方式降低运算复杂度,并给出了适用于工程化的离散表达形式。

此外也有采用基于反推技术和Krasovskii泛函算子设计鲁棒制动控制器的方法^[12-13]。但该方法收敛较慢、

理论复杂,工程实现难度大。另外,在列车运行控制^[14-15],汽车减速度控制^[16]、自动泊车^[17]以及轧机液压伺服控制^[18-19]等领域中,也有类似的研究。李中奇等^[14]采用多变量广义预测控制方法进行动力分散式高速动车组各单元的制动力控制,实现动车组对给定速度曲线的跟踪。王龙达等^[15]针对列车运行全过程的节能、准时等需求设计了改进的多目标鲨鱼优化算法,对指导列车操纵方式具有一定理论意义。Nie等^[16]进行了电动汽车的主动减速度控制研究,提出了运行阻力前馈加减速度反馈PI控制的方案对制动压力进行补偿。侯忠生等^[17]针对汽车自动泊车系统提出无模型自适应控制方案,通过参数估计、参数重置和坐标补偿实现车身对期望轨迹的跟踪。方一鸣等^[18]采用自适应反步滑模控制方法,解决轧机液压伺服位置系统非线性、参数不确定和控制输入不确定的问题。邵彭真等^[19]针对轧机液压伺服系统的负载跳变问题,采用自适应反步控制和公共李雅普诺夫函数方法实现多模型切换控制策略,鲁棒性较强。这些其他领域的研究具有一定借鉴意义。

本文提出参数估计算法,以减速度和制动缸压力等作为输入,对制动过程中的干扰参数进行在线估计,基于参数估计值对城轨列车编组制动力的控制目标进行实时修正,实现制动力的闭环控制。通过仿真分析了估计器系数取值对参数估计效果的影响,并基于硬件在环试验台架进行了制动和防滑工况下的验证。

1 城轨列车制动原理

城轨列车制动时,根据司机或自动驾驶系统下发的制动指令,制动系统进行制动力的管理和施加。制动力管理模式一般可分为单车控制和多车控制。单车控制又称均衡制动控制,各车辆施加的制动力与其载荷成正比,各车辆减速度基本一致,但此模式下电制动能力无法得到充分利用,故目前基本不采用。多车控制包括单元控制和编组控制。其中,编组控制是一种列车级的制动力管理模式,编组制动力统一管理,一般遵从摩擦制动滞后的原则,编组内动车的电制动力优先施加,当电制动力不足时摩擦制动进行补充。单元控制模式下,城轨列车各单元独立进行制动力管理,单元间的控制实质上是均衡制动控制,单元内的控制与编组控制相同。所以多车控制模式下,各车辆间制动力分布并不均匀。目前城轨列车基本采用由2个单元组成的电动车组,其单元之间一般采用密接式半动车钩连接,单元内各车辆间一般采用半永久牵引杆连接,当各车辆制动力分布不均匀或者所处线路坡度或所受其他干扰不一致时,前后部车辆间仍紧密连接并处于稳定的受拉/受压状态。因此各车辆减速度与列车整体减速度基本保持一致,通过控制列车

总制动力即可控制列车减速度。

2 控制器设计

列车在制动过程中除受到由制动/牵引系统根据理论目标减速度 a_t 主动施加的制动力(图1中摩擦制动力矩和电制动力矩)之外,还受运行阻力、摩擦副摩擦系数

不确定性扰动等影响。由于运行阻力和摩擦系数不确定性扰动难以直接测量或预知,无法直接前馈补偿,故如图1所示设计控制器,将运行阻力和摩擦系数不确定性扰动以及未建模动态等效为一个总扰动 F_ξ ,采用参数估计方法对该扰动量进行在线估计,然后根据估计得到的扰动量 \hat{F}_ξ 对列车目标制动力 F_t 进行修正,实现列车制动力闭环控制。

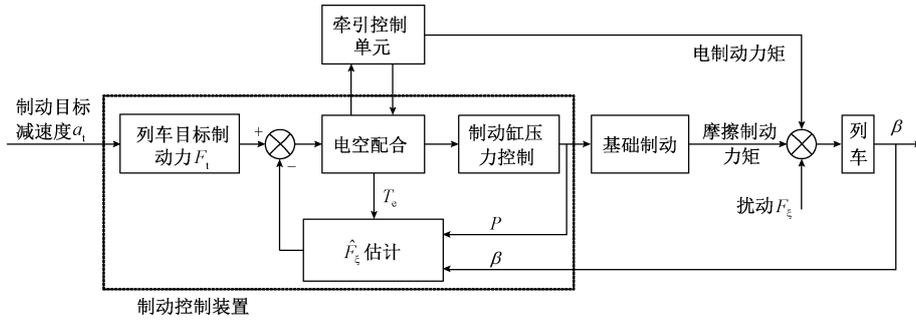


图1 制动力闭环控制原理

Fig. 1 Braking force closed-loop control principle

2.1 参数估计器

制动过程中的列车内部各部件间动力学作用较为复杂,但列车制动减速度只与列车总体受力情况有关,可将列车运动学方程简化表示为:

$$M\dot{v} + \sum_{j=1}^n f(P_j A - F_s) \lambda \eta + \sum_{k=1}^m \frac{T_{ek}}{r} + Mg \sin(\arctan \theta) + F_r + F' = 0 \quad (1)$$

式中: M 为列车质量; v 为列车速度; f 为制动副摩擦系数; P 为制动缸压力(下标 j 表示第 j 个); A 为制动缸活塞有效作用面积; F_s 为制动活塞复位弹簧力; λ 为杠杆倍率; η 为机械效率; T_{ek} 为牵引电机反向制动力矩(下标 k 表示第 k 个); r 为电制动力等效作用半径; g 为重力加速度项; θ 为坡道坡度; F_r 为列车基本运行阻力; F' 为未建模动态。

令列车减速度 $\beta = -\dot{v}$, 并将式(1)中坡道阻力、基本运行阻力和未建模动态等效为一总扰动 F_ξ , 整理得:

$$\beta = \frac{\sum_{j=1}^n f(P_j A - F_s) \lambda \eta}{M} + \frac{\sum_{k=1}^m \frac{T_{ek}}{r}}{M} + \frac{F_\xi}{M} \quad (2)$$

式(2)中 $F_\xi = Mg \sin(\arctan \theta) + F_r + F'$, 则 β 的估计值可用 \hat{F}_ξ 的估计值表示为:

$$\hat{\beta} = \frac{\sum_{j=1}^n f(P_j A - F_s) \lambda \eta}{M} + \frac{\sum_{k=1}^m \frac{T_{ek}}{r}}{M} + \frac{\hat{F}_\xi}{M} \quad (3)$$

对 β 的估计误差为:

$$e = \hat{\beta} - \beta = \frac{1}{M} \hat{F}_\xi - \frac{1}{M} F_\xi \quad (4)$$

取误差性能指标:

$$J(\hat{F}_\xi) = \frac{1}{2} e^2 \quad (5)$$

为了使 J 取极小值,采用梯度估计法^[20],令 \hat{F}_ξ 沿 J 的负梯度方向变化,则随着 \hat{F}_ξ 的变化, J 将收敛于极小值。由此可得:

$$\dot{\hat{F}}_\xi = -\gamma \frac{\partial J}{\partial \hat{F}_\xi} = -\gamma \frac{\partial J}{\partial e} \frac{\partial e}{\partial \hat{F}_\xi} = -\gamma \frac{1}{M} e \quad (6)$$

式中: γ 为估计器增益, $\gamma > 0$ 。

则总扰动的估计值 \hat{F}_ξ 可通过对式(6)微分方程进行求解得到。

2.2 估计器稳定性分析

为分析所提出估计器的稳定性,定义参数估计误差为:

$$\tilde{a} = \hat{F}_\xi - F_\xi \quad (7)$$

取李雅普诺夫函数

$$V = \frac{1}{2} \tilde{a}^2 \quad (8)$$

则其导数为:

$$\dot{V} = \tilde{a} \dot{\tilde{a}} = (\hat{F}_\xi - F_\xi) \cdot \dot{\hat{F}}_\xi \quad (9)$$

将式(6)和式(2)~(4)代入式(9)得:

$$\dot{V} = -\frac{\gamma}{M^2} (\hat{F}_\xi - F_\xi)^2 \quad (10)$$

由于式(10)中估计器增益 $\gamma > 0$, 则 $\dot{V} \leq 0$, 且当 $\hat{F}_\xi - F_\xi \neq 0$ 时, $\dot{V} < 0$, 当 $\hat{F}_\xi - F_\xi \rightarrow \infty$ 时, $V \rightarrow \infty$, 因此该估

计器为李雅普诺夫意义下大范围渐进稳定^[21]。

2.3 离散化

为了对城轨列车制动力进行闭环控制,需要根据式(6)解得的制动过程总扰动的估计值 \hat{F}_ξ 对列车制动力进行在线修正,这一过程需要在制动系统微控制器,即电子制动控制单元(electronic brake control unit, EBCU)中实现。由于微控制器编程是离散形式的,无法直接对微分方程进行求解,故对式(6)进行离散化,以 \hat{F}_ξ 的一阶向后差分对其微分 \dot{F}_ξ 进行近似。

$$\dot{\hat{F}}_\xi(t) = \frac{\hat{F}_\xi(i) - \hat{F}_\xi(i-1)}{\Delta T} = -\gamma \frac{1}{M} e(i) \quad (11)$$

式中: ΔT 为差分步长,即微控制器的运算周期; i 为运算步数。

将式(2)~(4)代入式(11)得:

$$\hat{F}_\xi(i) = \frac{\hat{F}_\xi(i-1) - p \left[\sum_{j=1}^n f(P_j A - F_s) \lambda \eta + \sum_{k=1}^m \frac{T_{ek}}{r} \right] + p M B(i)}{1 + p} \quad (12)$$

式中: $p = \frac{\gamma \Delta T}{M^2}$; $\hat{F}_\xi(0) = 0$ 。

则扰动估计值 $\hat{F}_\xi(i)$ 可根据列车减速度测量值和电空制动力进行迭代计算得到。

近年来关于列车减速度的测量已经取得较大进展。文献[22]提出通过减速度传感器采集列车纵向减速度。文献[23]介绍了一种新型制动控制装置,其内置减速度传感器可对列车制动减速度进行测量。因此采集列车减速度作为控制输入是可行的。

在EBCU嵌入式控制软件中根据式(12)进行实时运算,即可在线更新 \hat{F}_ξ ,从而对目标制动力 F_1 进行更新。

$$F_1(i+1) = M a_i(i+1) - \hat{F}_\xi(i) \quad (13)$$

因此,如图1所示,以制动缸压力、电制动力矩和列车减速度这些可测量量作为反馈输入,在制动控制装置软件中根据式(12)求解扰动估计值,然后代入式(13)修正列车目标制动力,即可实现列车制动力闭环控制。

3 估计器仿真分析

在MATLAB/Simulink环境下建立上述运动学模型和参数估计器模型,设置不同扰动值进行仿真,以验证参数估计效果。仿真所用参数有:车辆质量 M 为68 t,制动初速为80 km/h,微控制器的运算周期 ΔT 为10 ms。对4种工况进行了仿真:

1) 恒定摩擦系数干扰:计算摩擦系数=0.3,实际摩

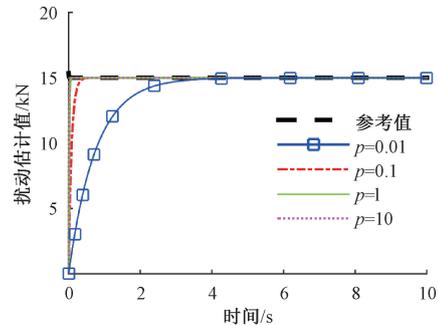
擦系数=0.4;

2) 变摩擦系数干扰:计算摩擦系数=0.3,实际摩擦系数=0.4-0.0015× v , v 为列车速度(km/h);

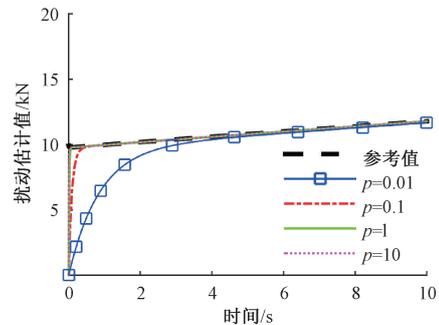
3) 恒定坡道干扰:坡道坡度=30‰(上坡);

4) 变坡道干扰:坡道坡度=0.02·sin(2π/10· t) (上坡为正,下坡为负),即坡度呈幅值为0.02,周期为10s的正弦波变化,对应的线路实际地形为先上坡后下坡。

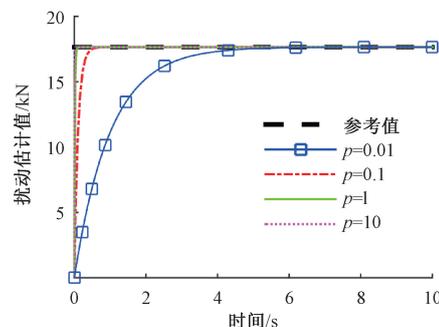
式(12)中估计器系数 p 的取值影响估计值的收敛速度,故对 p 取不同的值进行仿真,结果如图2所示。在4种仿真工况下,当 $p=0.01$ 时,由于增益过小,扰动估计值未能及时收敛; p 取值从0.01增大至0.1、1时,扰动估计值的收敛速度明显加快;但当 p 从1继续增大至10时,扰动估计值的收敛速度仅略有增大,估计值已基本与参考值重合。可见,当参数 p 取值小于1时,随着 p 的增大,估计器收敛速度加快,但当 p 大于1之后,估计器的收敛速度已趋于饱和。



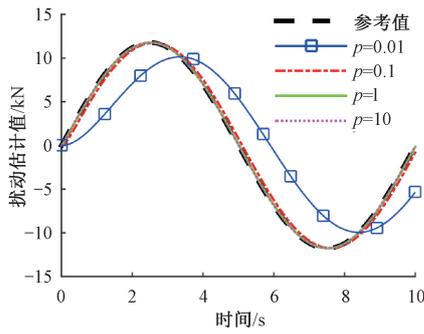
(a) 恒定摩擦系数干扰
(a) Disturbance caused by constant friction coefficient



(b) 变摩擦系数干扰
(b) Disturbance caused by variable friction coefficient



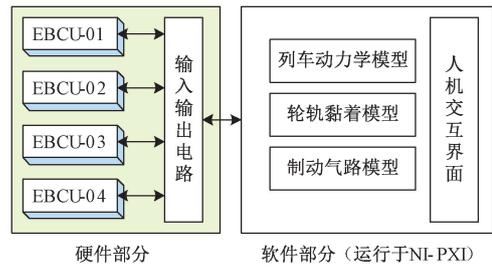
(c) 恒定坡道干扰
(c) Disturbance caused by constant slope ramp



(d) 变坡道干扰
(d) Disturbance caused by variable slope ramp

图 2 估计器仿真结果

Fig. 2 Estimator simulation results



(b) 硬件在环架构
(b) Hardware-in-the-loop architecture

图 3 试验环境

Fig. 3 Test environment

4 硬件在环试验验证

为进一步验证本文提出的基于减速度反馈参数估计的列车制动力闭环控制方法,基于硬件在环台架进行试验验证。如图 3(a)、(b)所示,硬件在环试验台架的硬件部分主要包括作为 2 辆编组(1 动 1 拖)列车架控式 EBCU 的 4 台微控制器硬件、NI-PXI 仿真计算机、输入输出电路等;软件部分运行于 NI-PXI 仿真计算机,主要包括列车动力学模型、轮轨黏着模型、制动气路模型以及人机交互界面。4 台 EBCU 通过输入/输出接口与软件模型进行数据交互,试验参数设置、试验操作及结果查看通过人机交互界面实现。将本文提出的控制方法编程实现后集成于 EBCU 硬件,通过软件部分提供虚拟的列车、运行环境及制动气路, EBCU 通过输入/输出接口接收列车模型提供的减速度信号,采集制动缸压力信号,控制 EP 阀模型实现制动缸压力控制。本文提出的制动力控制算法是对列车总制动力进行闭环控制,在电空复合制动工况和纯电制动/纯空气制动工况都适用。但由于实车电制动力的施加由牵引控制单元直接控制,故此不对其进行模拟,试验只针对纯空气制动工况,列车制动力全部由空气制动系统承担。



(a) 嵌入式控制器和试验台架
(a) Embedded controller and test bench

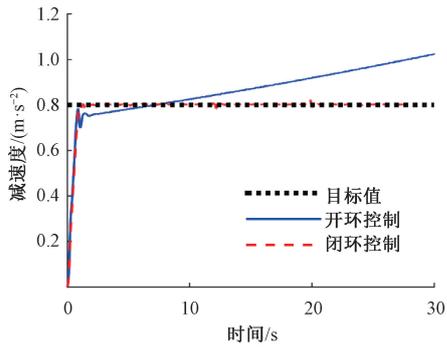
4.1 制动工况试验验证

试验中制动目标减速度为 0.8 m/s^2 , 制动初速为 80 km/h , 轴重为 17 t 。干扰参数有以下 4 种:

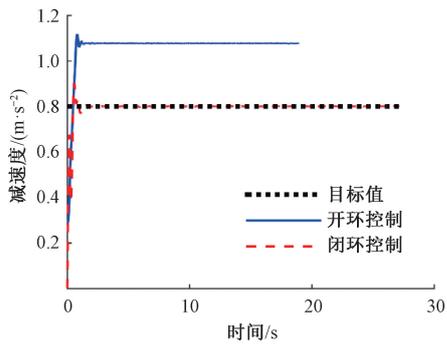
- 1) 变摩擦系数干扰: 计算摩擦系数取 0.3 , 实际摩擦系数 $= 0.4 - 0.0015 \times v$;
- 2) 恒定坡道干扰: 坡道坡度 $= 30\%$ (上坡);
- 3) 变坡道干扰: 坡道坡度 $= 0.02 \cdot \sin(2\pi/10 \cdot t)$;
- 4) 复合干扰: 计算摩擦系数 $= 0.3$, 实际摩擦系数 $= 0.4 - 0.0015 \times v$, 坡道坡度 $= 0.02 \cdot \sin(2\pi/10 \cdot t)$ 。

试验结果如图 4、5 所示, 其中图 4 为制动过程中列车减速度的变化情况, 图 5 为制动过程中制动缸压力的变化情况。图 4(a) 显示了变摩擦系数干扰下开环控制和闭环控制时列车实际减速度跟随目标减速度的情况。由图 4、5 中可知, 开环控制(即目前实际运用的不进行制动力补偿的控制方式)时, 制动初始时刻, 实际摩擦系数小于计算摩擦系数, 而制动缸压力不进行调节(图 5(a)), 导致实际制动力偏小, 引起实际减速度偏小; 当列车速度降至 67 km/h 附近时, 实际摩擦系数等于计算摩擦系数, 实际减速度的曲线与目标减速度的曲线相交; 随着列车速度继续降低, 实际摩擦系数逐渐升高, 大于计算摩擦系数, 因而实际减速度逐渐增大。闭环控制(即基于减速度反馈参数估计值对制动力进行补偿)时, 如图 5(a) 所示, 制动开始后, 制动缸压力首先上升至略大于开环值, 以抵消实际摩擦系数偏小引起的制动力不足, 之后随着实际摩擦系数的上升, 制动缸压力逐渐下降, 控制列车制动减速度保持基本恒定。在制动过程中, 制动缸压力建立之后, 闭环控制的减速度偏差小于 0.03 m/s^2 , 而开环控制的减速度偏差最大可达 0.24 m/s^2 。

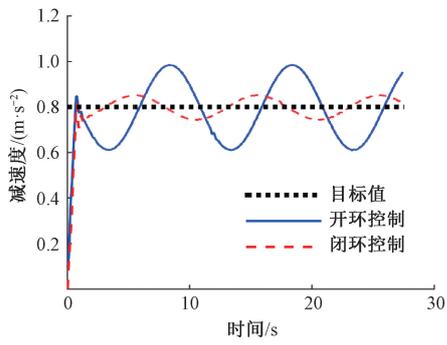
图 4(b) 为列车在 30% 上坡道进行制动时的减速度曲线。由于坡道干扰恒定, 因而开环控制时, 列车实际减速度与目标值的偏差基本稳定于 0.32 m/s^2 ; 闭环控制时, 基于对坡道干扰的估计, 控制制动缸压力降低如图 5(b) 所示, 除制动缸压力上升阶段出现约 0.1 m/s^2 的超调外, 制动过程中实际减速度与目标值基本重合。



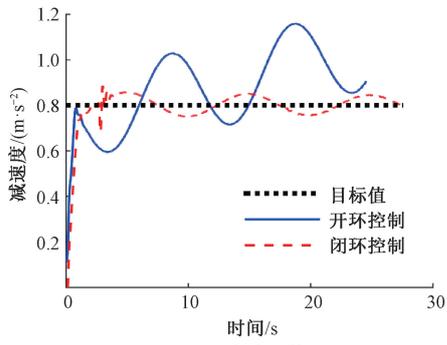
(a) 变摩擦系数干扰
(a) Disturbance caused by variable friction coefficient



(b) 恒定坡道干扰
(b) Disturbance caused by constant slope ramp

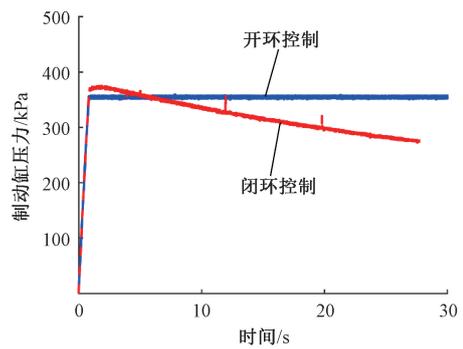


(c) 变坡道干扰
(c) Disturbance caused by variable slope ramp

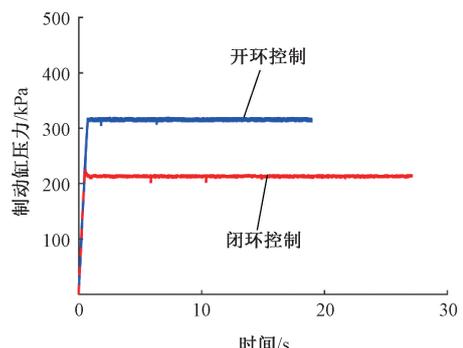


(d) 复合干扰
(d) Composite disturbances

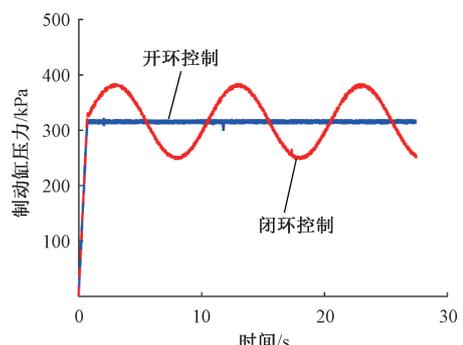
图4 不同干扰作用下的减速度曲线
Fig. 4 The deceleration curves under different disturbances



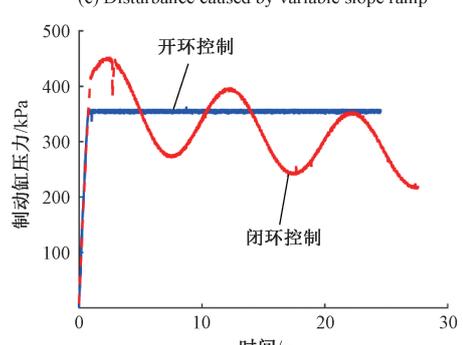
(a) 变摩擦系数干扰
(a) Disturbance caused by variable friction coefficient



(b) 恒定坡道干扰
(b) Disturbance caused by constant slope ramp



(c) 变坡道干扰
(c) Disturbance caused by variable slope ramp



(d) 复合干扰
(d) Composite disturbances

图5 不同干扰作用下的制动缸压力曲线
Fig. 5 The brake cylinder pressure curves under different disturbances

图 4(c)反映了列车运行于上下坡交替出现的路段时的减速度情况,通过使坡道坡度呈正弦函数变化模拟上下坡的坡度,闭环控制时的最大减速度偏差为 0.05 m/s^2 明显小于开环控制的最大减速度偏差(0.19 m/s^2)。但闭环控制时偏差仍未能完全消除,因为压力空气的作用具有一定惯性和时滞,当干扰变化较快时,虽然可以对制动力进行修正,如图 5(c)所示,制动缸压力也呈正弦状调整,但仍然无法实现完全补偿。

同样,由图 4(d)可知,实际摩擦系数和坡道坡度同时存在干扰且干扰大小不断变化时,开环控制时,实际减速度的最大偏差为 0.36 m/s^2 ,采用闭环控制之后,减速度偏差降至 0.08 m/s^2 。

4.2 防滑工况试验验证

城轨列车基本采用黏着制动方式,其制动力大小受轮轨间黏着系数^[24-25]的限制,当轨面黏着条件恶化,轮轨间黏着系数不足时,列车将发生滑行。对于空气制动而言,当电子制动控制单元检测到滑行时,将控制滑行轴的防滑阀^[26]进行排气,从而在制动气路的下游主动地改变滑行轴的制动力。故需要针对此特殊工况,验证本文提出的减速度反馈制动力闭环控制算法在防滑过程中的适用性。防滑工况试验中制动目标减速度为 0.8 m/s^2 ,制动初速为 80 km/h ,轴重为 17 t 。设置 1 轴黏着系数为 0.05 以模拟低黏着条件,其他轴黏着系数设为 0.4 。采用的防滑控制策略为当速度差大于 5 km/h 时即控制该轴制动缸排气,当速度差恢复到小于 1 km/h 时即恢复充气,速度差是指滑行轴旋转线速度与列车速度之差。

轴速及车速曲线如图 6 所示,开环控制和闭环控制下滑行轴 1 轴的速度曲线都呈周期性变化,无明显差别。由图 7 可看出,采用基于减速度反馈参数估计的列车制动力闭环控制模式之后,当列车某一轴出现滑行时,防滑控制过程中该轴制动缸压力的变化情况与在开环控制模式下基本相同。即制动力的闭环控制在滑行时不会过度增大制动力从而导致滑行程度加深或引起其他轴的滑

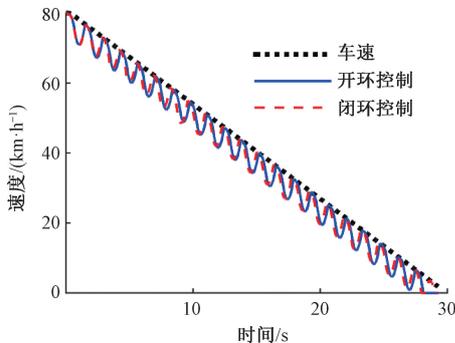


图 6 防滑过程滑行轴速度对比

Fig. 6 Comparison of the skidding axle speeds during anti-skidding process

行。如图 8 所示,滑行过程中列车减速度随着防滑过程而不断变化,其变化情况在开环控制和闭环控制模式下无明显区别。因此防滑控制时采用制动力闭环控制不会增大列车减速度的振荡,也不会引起制动缸压力的异常充排,效果满足预期。

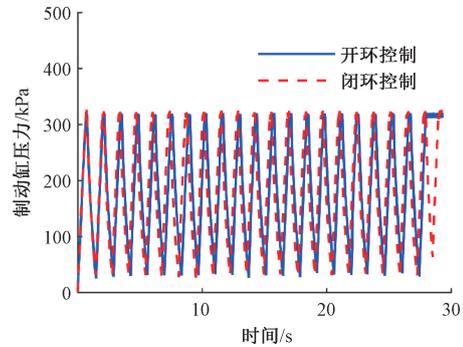


图 7 防滑过程制动缸压力对比

Fig. 7 Comparison of the brake cylinder pressures during anti-skidding process

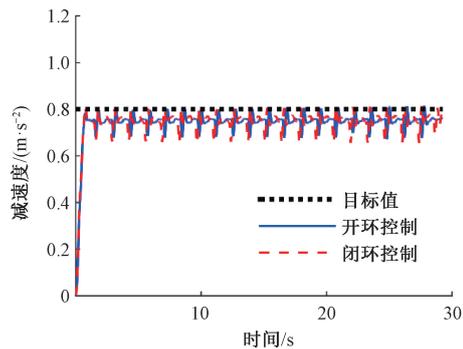


图 8 防滑过程列车减速度对比

Fig. 8 Comparison of the vehicle decelerations during anti-skidding process

5 结 论

本文提出城轨列车减速度反馈制动力闭环控制方法,以列车减速度作为参数估计器输入,在线估计扰动参数并对列车总制动力进行修正,提高了制动过程中的实际减速度精度。将制动过程中所受的运行阻力、摩擦系数变化等干扰等效为一总扰动,简化了运算复杂度,且通过离散化求解方式降低了本方法在制动系统微控制器中软件实现的难度。对参数估计器的收敛特性进行了仿真分析,得到了估计器系数的取值规律,为后续工程化运用中参数整定提供参考。同时,在轮轨黏着条件较差引起滑行时,可保证防滑控制与列车制动力闭环控制能较好兼容,滑行轴速度、制动缸压力及列车实际减速度变化情

况满足预期,提高了工程实用价值。

参考文献

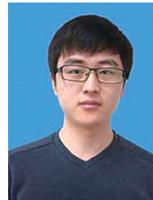
- [1] 吴萌岭,马天和,田春,等. 列车制动技术发展趋势探讨[J]. 中国铁道科学,2019,40(1):134-144.
WU M L, MA T H, TIAN CH, et al. Discussion on development trend of train braking technology[J]. China Railway Science, 2019,40(1):134-144.
- [2] CANTONI C, CESARINI R, MASTINU G, et al. Brake comfort-a review[J]. Vehicle System Dynamics, 2009, 47(8): 901-947.
- [3] MIURA T, IZUMI T. A Study on quantitative evaluation of relationship between longitudinal shock and ride comfort by train braking [C]. AHFE International Conference on Human Factors in Transportation, Los Angeles: Springer, 2017: 998-1009.
- [4] 纪铅磊,王超恒,孙全涛. 城轨车辆踏面制动单元内部摩擦力对制动系统性能的影响[J]. 机车电传动, 2019, (1):114-116.
JI Q L, WANG CH H, SUN Q T. Influence of internal friction force of urban rail vehicles tread brake unit on brake system performance [J]. Electric Drive for Locomotives, 2019, (1):114-116.
- [5] LEE N, KANG C. The effect of a variable disc pad friction coefficient for the mechanical brake system of a railway vehicle [J]. PloS One, 2015, 10 (8): e0135459.
- [6] SAWCZUK W. Analytical model coefficient of friction (COF) of rail disc brake on the basis of multi-phase stationary tests [J]. Eksploatacja I Niezawodnosć-Maintenance and Reliability, 2018, 20(1):57-67.
- [7] NANKYO M, ISHIHARA T, INOOKA H. Feedback control of brake system on railway vehicle considering non-Linear property and dead time [C]. International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Washington, D. C. : ASME, 2003: 99-104.
- [8] NANKYO M, ISHIHARA T, INOOKA H. Feedback control of braking deceleration on railway vehicle [J]. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 2006, 128(2): 244-250.
- [9] NANKYO M, NAKAZAWA S, NONAKA T, et al. Development of a braking system equipment with deceleration feedback control [J]. RTRI Report, 2009, 23(4):41-46.
- [10] 吴萌岭, 罗卓军. 基于自适应参数估计的列车制动减速度控制[J]. 铁道学报, 2015, 37(8): 8-16.
WU M L, LUO ZH J. Study on train braking deceleration feedback control based on adaptive parameter estimation [J]. Journal of the China Railway Society, 2015, 37 (8): 8-16.
- [11] 罗卓军. 基于数理模型的列车直通式电空制动系统闭环鲁棒控制 [D]. 上海: 同济大学, 2016.
LUO ZH J. Robust control study on a direct-acting electro-pneumatic train brake system based on mathematical models [D]. Shanghai: Tongji University, 2016.
- [12] 张梦楠, 徐洪泽. 城轨列车反推自动停车控制算法 [J]. 西安交通大学学报, 2014, 48(9): 136-142.
ZHANG M N, XU H Z. Backstepping automatic stop control of urban rail vehicles [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2014, 48(9): 136-142.
- [13] 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 vehicle brake controller based on Krasovskii functionals [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2015, 45(1): 104-111.
- [14] 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 ZH Q, YANG H, LIU M J, et al. Modeling and tracking control for braking process of high speed electric multiple unit [J]. China Railway Science, 2016, 37(5):80-86.
- [15] 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.
- [16] NIE Y, LIU Y, CHENG S, et al. Unified brake service by a hierarchical controller for active deceleration control in an electric and automated vehicle [J]. Energies, 2017, 10(12): 2052.
- [17] 侯忠生, 董航瑞, 金尚泰. 基于坐标补偿的自动泊车系统无模型自适应控制 [J]. 自动化学报, 2015, 41(4): 823-831.
HOU ZH SH, DONG H R, JIN SH T. Model-free adaptive control with coordinates compensation for automatic car parking systems [J]. Acta Automatica Sinica, 2015, 41(4): 823-831.
- [18] 方一鸣, 焦宗夏, 王文宾, 等. 轧机液压伺服位置系统的自适应反步滑模控制 [J]. 电机与控制学报, 2011, 15(10): 95-100.

- FANG Y M, JIAO Z X, WANG W B, et al. Adaptive backstepping sliding mode control for rolling mill hydraulic servo position system [J]. *Electric Machines and Control*, 2011, 15(10): 95-100.
- [19] 邵彭真, 方一鸣, 王文宾, 等. 轧机液压伺服系统多模型切换自适应反步控制[J]. *北京科技大学学报*, 2012, 34(11): 1346-1351.
- SHAO P ZH, FANG Y M, WANG W B, et al. Adaptive backstepping control of multi-model switching for the hydraulic servo position system of a rolling mill [J]. *Journal of University of Science and Technology Beijing*, 2012, 34(11): 1346-1351.
- [20] 吴萌岭, 彭顺, 李小平. 列车轮轨黏着力在线估测计算方法[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2018, 46(3): 354-358, 388.
- WU M L, PENG SH, LI X P. Online estimation algorithm of adhesive force for train wheel track [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2018, 46(3): 354-358, 388.
- [21] SLOTINE J J E, LI W. *Applied nonlinear control* [M]. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1991.
- [22] 吴萌岭, 程光华, 王孝延, 等. 列车制动减速度控制问题的探讨[J]. *铁道学报*, 2009, 31(1): 94-97.
- WU M L, CHENG G H, WANG X Y, et al. Discussion of braking deceleration control of railway vehicles [J]. *Journal of the China Railway Society*, 2009, 31(1): 94-97.
- [23] 赵建飞. 基于减速度控制的新一代地铁车辆制动控制技术[J]. *现代城市轨道交通*, 2019, 16(11): 39-46.
- ZHAO J F. Braking control technology of new generation metro vehicle based on deceleration control [J]. *Modern Urban Transit*, 2019, 16(11): 39-46.
- [24] POLACH O. Creep forces in simulations of traction vehicles running on adhesion limit [J]. *Wear*, 2005, 258(7-8): 992-1000.
- [25] SPIRYAGIN M, POLACH O, COLE C. Creep force modelling for rail traction vehicles based on the Fastsim algorithm [J]. *Vehicle System Dynamics*, 2013, 51(11): 1765-1783.
- [26] 胡晓峰, 闫富菊, 郭斌, 等. 高速机车防滑阀动特性

仿真及测试方法研究[J]. *仪器仪表学报*, 2019, 40(11): 250-259.

HU X F, YAN F J, GUO B, et al. Dynamic characteristics simulation and test method for the highspeed locomotive anti-skid valve [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2019, 40(11): 250-259.

作者简介



马天和, 2014年于同济大学获得学士学位, 现为同济大学博士研究生, 主要研究方向为列车制动系统与控制。

E-mail: math@tongji.edu.cn

Ma Tianhe received his B. Sc. degree in 2014 from Tongji University. Now, he is a Ph. D. candidate in Tongji University. His main research interest includes train braking system and control.



吴萌岭, 分别在1981年和1988年于原上海铁道学院(现同济大学)获得学士、硕士学位, 2006年于同济大学获得博士学位, 现为同济大学教授, 主要研究方向为列车制动与安全。

E-mail: wuml_sh@163.com

Wu Mengling received his B. Sc. degree in 1981 and M. Sc. degree in 1988 both from former Shanghai Railway College (now Tongji University), and received his Ph. D. degree in 2006 from Tongji University. Now, he is a professor in Tongji University. His main research interest includes train braking and safety.



田春(通信作者), 分别在1999年和2002年于南京航空航天大学获得学士、硕士学位, 2007年于上海交通大学获得博士学位, 现为同济大学副教授, 主要研究方向为列车制动与安全、列车空气动力学。

E-mail: chtian@tongji.edu.cn

Tian Chun (Corresponding author) received her B. Sc. degree in 1999 and M. Sc. degree in 2002 both from Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, and received her Ph. D. degree in 2007 from Shanghai Jiao Tong University. Now, she is an associate professor in Tongji University. Her main research interest includes train braking and safety, train aerodynamics.