

# 高速列车牵引传动优化黏着控制方法研究

胡亮,杨中平,林飞

(北京交通大学 电气工程学院,北京 100044)

**摘要:** 为充分利用轮轨间黏着能力,保障高速列车牵引/制动性能发挥,提出了一种新的力矩反馈式优化黏着控制方法。当轮轨黏着条件变恶劣时,该方法可利用电机转矩、转速等信息,构建轮轨切向力系数全维状态观测器,并结合最小二乘法求得黏着蠕滑斜率,进而实施力矩反馈控制,动态调节电机转矩指令,实现复杂路况下轮轨间高黏着利用运行。随后,运用Matlab/Simulink搭建了基于CRH2型高速列车牵引传动黏着控制系统仿真模型。仿真结果验证了该方法的可行性。

**关键词:** 优化黏着控制;切向力系数;黏着蠕滑斜率;黏着性能;牵引/制动性能;高速列车

**中图分类号:** TP273

**文献标识码:** A

## Research of Optimal Adhesion Control Method for High-speed Train Traction

HU Liang, YANG Zhong-ping, LIN Fei

(School of Electrical Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

**Abstract:** To make full use of the adhesion force between wheel and rail and gain good traction/braking performance of high-speed trains, a novel torque feedback optimal adhesion control for high-speed trains was proposed. When adhesion condition between wheel and rail turned worse, the tangential force coefficient between wheel and rail was observed by the established full order observer. Meanwhile, the slope of adhesion-slip curve was forecasted by the recursive least squares method with forgetting factor. Then, a torque feedback control function based on the quantization factors reflecting wheel-rail adhesion conditions—the tangential force coefficient and the slope of adhesion-creep curve was built. Through the function the motor torque is adjusted appropriately to achieve high adhesion performance between wheel and rail under variable complex road conditions. Afterwards, the simulation study of the proposed adhesion control by the Matlab/Simulink was carried out based on the traction control system model of CRH2 high-speed trains. The simulation results confirm the feasibility of proposed optimal adhesion control method.

**Key words:** optimal adhesion control; tangential force coefficient; slope of adhesion; adhesion performance; traction/braking performance; high-speed train

## 1 引言

轮轨黏着是影响高速列车牵引/制动性能的正常发挥的重要因素之一。轮轨间的黏着力受路面黏着能力限制。当施加在车轮上的牵引/制动转矩超过了轮轨间可提供的最大黏着力时,车轮便会发生空转/滑行现象。这种现象会导致乘客舒适度下降、轮轨擦伤、列车牵引/制动性能下降等不良影响<sup>[1]</sup>。为此,高速列车都装有黏着控制装置来抑

制空转/滑行的发生,以保证列车正常运行。

目前,在高速列车的黏着控制研究中,最主要的方式仍然是采用逻辑门限值控制如速度差、蠕滑率、加(减)速度阈值,但该种方式是一种空转/滑行时的“事后动作”控制,不能获得最佳黏着利用,且受路面条件的影响;文献[2-3]基于零阶观测器,提出一种空转/滑行检测触发的新力矩调整控制算法,其控制效果较好,但黏着利用率仍有待提高;文献[4-6]则提出了基于零阶观测器

**基金项目:** 国家“973”重点基础研究发展计划(2011CB711106)

**作者简介:** 胡亮(1989-),男,硕士研究生,Email:hxy2012bjtu@sina.com

的模糊黏着控制方法并都取得很好的效果,但由于模糊逻辑复杂、编程困难,实际运用仍存在一定局限性。文献[7]重点分析了全维观测器对再黏着优化控制系统的性能影响。文献[8]提出了基于零阶观测器的力矩反馈黏着控制方法,其在黏着蠕滑的稳定区内的控制是有效的,但在非稳定区其控制则会失效。文献[9]则提出构建降维观测器,通过在文献[8]的控制中增加  $C(t)$  函数,解决了文献[8]在黏着蠕滑的非稳定区控制的失效问题,但  $C(t)$  函数引入导致黏着利用率的降低。

为抑制列车空转/滑行发生,同时获得更好的黏着利用,本文提出一种优化黏着控制新算法。该方法通过构建轮轨切向力系数  $u$  的全维观测和黏着一蠕滑斜率  $du/dv_s$  的最小二乘法 (recursive least squares) 估计,实施力矩反馈型优化黏着控制,其控制函数:  $T_A=K_1 \cdot du/dt+K_2 \cdot u$ ,以快速实现在复杂路况下列车轮轨运行于黏着峰值点附近,并保持轮轨间的高黏着性能目标。

## 2 高速列车单轴动力学模型

### 2.1 轮轨黏着一蠕滑特性

高速列车轮轨间的黏着一蠕滑现象本质表现为一种轮轨间的弹性接触作用。在车轴载荷  $Wg$  下,轮轨间在接触面部位发生弹性形变,形成椭圆形的接触区。当车轮在驱动力矩  $T$  的作用下向前滚动时,由于车轮相对于钢轨有相对运动或相对运动趋势,轮轨间会产生切向力,该切向力使得轮轨接触面介质发生运动,此时车轮前进速度将会比纯滚动时小,这一现象称为蠕滑。轮轨黏着一蠕滑现象见图1。

为了衡量轮轨蠕滑程度和产生的切向力大小,定义蠕滑速度和切向力系数:

$$v_s = \omega_w \cdot R - v_l \quad (1)$$

$$u = F_u / Wg \quad (2)$$

式中:  $R$  为车轮半径;  $\omega_w$  为车轮圆周速度;  $v_l$  为列车速度;  $W$  为平均轴重;  $g$  为重力加速度;  $F_u$  为黏着力。

大量的分析与试验结果表明,轮轨间黏着一蠕滑特性可用切向力系数与蠕滑速度的关系表达。图2给出典型的正常、不良条件下黏着一蠕滑特性曲线。由图2可知,虽然不同路面条件下黏着一蠕滑特性曲线差异较大,但其主要有两点相似之处:各自均存在相应的黏着峰值点 ( $u_{max}$ ,  $v_{sopt}$ ),峰值点处的切向力系数称为黏着系数  $u_{max}$ ,  $v_{sopt}$  称为最优蠕滑速度;以  $v_{sopt}$  为界,存在稳定区与非

稳定区,稳定区表现黏着蠕滑正特性 ( $du/dv_s \geq 0$ ),非稳定区域表现为黏着蠕滑负特性 ( $du/dv_s < 0$ )。

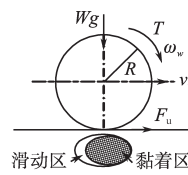


图1 轮轨黏着一蠕滑现象  
Fig.1 Phenomenon of adhesion-creeping between wheel rail

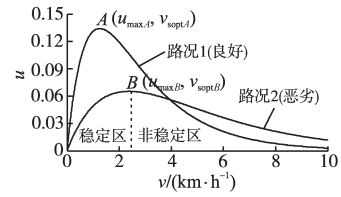


图2 轮轨黏着一蠕滑特性  
Fig.2 Adhesion-creeping characteristic curves

当轮轨运行于黏着非稳定区间时,列车极易出现空转/滑行等不良现象。为避免列车空转/滑行,同时最大限度地利用轮轨间的黏着力,优化黏着控制必须能够实现在复杂路面条件下轮轨运行于黏着稳定区且靠近峰值点处(A点或B点),在此处轮轨将保持高黏着利用率。

### 2.2 列车单轴动力学模型

由于列车运行时的复杂动力学特征,以及高速列车通常采取很难建立考虑各种因素的复杂动力学模型。本文主要针对图3简化的单轴动力学模型开展黏着控制研究。

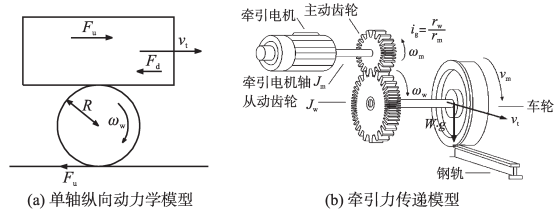


图3 简化列车单轴纵向动力学及牵引力传递模型  
Fig.3 Simplified longitudinal dynamicstrain model and traction force transferring model for single axle

根据轮轨黏着特性、齿轮传动特性及对车轮、车体的动力学分析可得方程组:

$$\begin{cases} T_m - T_{wm} - B_m \cdot \omega_m = J_m \frac{d\omega_m}{dt} \\ i_g = \frac{r_{g2}}{r_{g1}} \\ T_{mw} = \eta_{gear} \cdot i_g \cdot T_{wm} \\ T_{mw} - F_u \cdot R - B_w \cdot \omega_w = J_w \frac{d\omega_w}{dt} \\ F_u - F_d(v_l) = \frac{M}{N_M} \frac{dv_l}{dt} \\ F_u = u(v_s) \cdot Wg \\ F_d(v_l) = \frac{M}{N_M} \cdot (a + bv_l + cv_l^2) \end{cases} \quad (3)$$

由式(3)可得到牵引电机输出侧等效方程:

$$T_m - \frac{R}{i_g \cdot \eta_{gear}} \cdot F_u - (B_m + \frac{B_w}{i_g^2 \cdot \eta_{gear}}) \cdot \omega_m = \frac{d\omega_m}{dt} (J_m + \frac{J_w}{i_g^2 \cdot \eta_{gear}}) \quad (4)$$

令  $J_{equ} = J_m + J_w / (i_g^2 \cdot \eta_{gear})$ ,  $T_L = R / (i_g \cdot \eta_{gear}) \cdot F_u$  并忽略  $B_m, B_w$ , 式(4)可表示为

$$T_m - T_L = \frac{d\omega_m}{dt} J_{equ} \quad (5)$$

式中:  $M$  为列车质量;  $N_M$  为动轴数;  $J_m$  为牵引电机转子转动惯量;  $T_{wm}$  为从动轴通过齿轮箱对电机轴施加的转矩;  $T_{mw}$  为电机轴通过齿轮箱对从动轴施加的转矩;  $J_w$  为从动轴转动惯量;  $i_g$  为齿轮传动比;  $\eta_{gear}$  为齿轮传动效率;  $R$  为轮对半径;  $B_m, B_w$  为主、从动轴转动粘滞系数;  $T_m$  为牵引电机转矩;  $\omega_m$  为电机转速;  $\omega_w$  为轮对转速;  $F_d$  为列车基本阻力。

### 3 优化黏着控制方法

#### 3.1 控制方法实现原理

文献[8-9]提出了一种基于切向力系数  $u$  及其微分  $du/dt$  的力矩反馈型优化黏着控制方法,其控制函数为  $T_A = K_1 \cdot du/dt + K_2 \cdot u$ , 这种控制方法仅在轮轨黏着蠕滑稳定区域有效,在轮轨已经处于黏着非稳定区域时控制则会失效。结合图2所示的黏着一蠕滑特性来看,文献[8-9]所提出方法在黏着非稳定区域的控制失效问题根源在于:在黏着非稳定区域,  $du/dt$  无法反映轮轨黏着蠕滑负特性状态。

然而,通过对轮轨黏着特性分析可知,  $(u, du/dv_s)$  可真实、全面地反映当前轮轨黏着状态。据此,本文在文献[8-9]的基础上,将  $du/dv_s$  替代  $du/dt$ , 提出基于切向力系数  $u$  与黏着蠕滑斜率  $du/dv_s$  观测的力矩反馈型优化黏着控制,其新的力矩反馈函数为  $T_A = K_1 \cdot du/dv_s + K_2 \cdot u$ 。图4为本文所提出的新优化黏着控制算法实现框图。

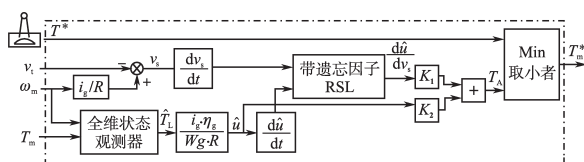


图4 高速列车优化黏着控制算法框图

Fig.4 The diagram of optimal adhesion control algorithm for high-speed train

图4中的输入量有: 司机手柄指令  $T^*$ 、车体速

度  $v_s$ 、电机转速  $\omega_m$  和电机转矩  $T_m$ 。输出量为电机转矩给定  $T_m^*$ 。通过状态观测器获取电机负载转矩  $T_L$ , 结合式(2)、式(3)进而求得轮轨间的切向力系数  $u$  及微分值  $du/dt$ ; 蠕滑速度  $v_s$  由式(1)得到, 求出微分值  $dv_s/dt$ , 并与  $du/dt$  输入到最小二乘法求解模块, 此模块输出  $du/dv_s$  的估计值。最后按照所设计力矩反馈函数输出黏着控制转矩调节值  $T_A$ , 将其与  $T^*$  比较并取小者, 最终输出电机矢量控制转矩指令值  $T_m^*$ 。

#### 3.2 切向力系数的观测

在轮轨驱动系统数学模型中, 令

$$T_L = F_u \cdot \frac{R}{\eta_{gear} \cdot i_g} \quad (6)$$

由于  $T_L$  实际过程中无法测量, 需构造  $T_L$  的观测器。结合式(4)和式(5), 列写状态空间方程<sup>[10-11]</sup>如下:

$$\begin{bmatrix} \dot{\omega}_m \\ \dot{T}_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{B}{J_{equ}} & -\frac{1}{J_{equ}} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_m \\ T_L \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{J_{equ}} \\ 0 \end{bmatrix} T_m \quad (7)$$

其中  $\omega_m = [1 \ 0] \cdot \begin{bmatrix} \omega_m \\ T_L \end{bmatrix}$

基于式(7), 构造  $T_L$  全维渐近闭环状态观测器<sup>[7-11]</sup>如下:

$$\begin{bmatrix} \dot{\hat{\omega}}_m \\ \dot{\hat{T}}_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_1 + p_2 & -\frac{1}{J_{equ}} \\ J_{equ} p_1 p_2 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\omega}_m \\ \hat{T}_L \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -(p_1 + p_2) - \frac{B}{J_{equ}} & 0 \\ -J_{equ} p_1 p_2 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_m \\ T_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{J_{equ}} \\ 0 \end{bmatrix} T_m \quad (8)$$

由上式可得到  $\hat{T}_L = \int J_m p_1 p_2 (\hat{\omega}_m - \omega_m) dt$ , 再根据式(3)、式(6)得到切向力系数的观测值。式中参数  $p_1, p_2$  为全维状态观测器的极点。

#### 3.3 $du/dv_s$ 的最小二乘法估计

对黏着一蠕滑特性曲线进行微分即可得黏着蠕滑斜率  $\beta$ :

$$\beta = \frac{du}{dv_s} = \frac{du/dt}{dv_s/dt} \quad (9)$$

当切向力系数接近于峰值点时  $\beta \approx 0$ ,  $du/dt$  与  $dv_s/dt$  均接近零, 另外由于  $du/dt, dv_s/dt$  都会带有噪声, 因此采用带遗忘因子  $\kappa$  的最小二乘法估计理论实现黏着蠕滑斜率的观测, 其估计原理如下式<sup>[12]</sup>所示:

$$\begin{cases} y[k] = \hat{\theta}^T[k] \phi[k] \\ \hat{\theta}[k] = \hat{\theta}[k-1] - \frac{P[k-1] \phi[k]}{1 + \phi^T[k] P[k-1] \phi[k]} \cdot (\hat{\theta}[k-1] \phi[k] - y[k]) \\ P[k] = \frac{1}{\kappa} [P[k-1] - \frac{P[k-1] \phi[k] \phi^T[k] P[k-1]}{1 + \phi^T[k] P[k-1] \phi[k]}] \\ \kappa = \frac{1}{1 + \gamma \phi^T[k] \phi[k]} \end{cases} \quad (10)$$

式中:  $\gamma$ 为指数加权因子;  $P$ 为误差协方差矩阵。

令  $y[k] = du/dt$ ,  $\hat{\theta}[k] = du/dv_s$ ,  $\phi[k] = dv_s/dt$  从而准确估计出黏着蠕滑斜率  $\beta = \hat{\theta}[k]$ 。

### 4 Matlab/Simulink 仿真验证

#### 4.1 黏着控制系统仿真模型及参数设置

为验证本文提出的方法的正确性,本文搭建了基于CRH2型车参数的高速列车牵引传动黏着控制系统(单轴)仿真模型,如图5所示。

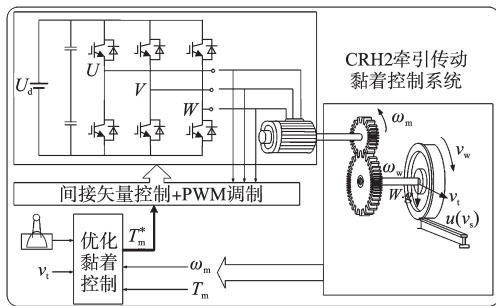


图5 高速列车牵引传动优化黏着控制系统框图  
Fig.5 Diagram of optimal adhesion control system within the traction drive control system of high-speed trains

模型部分参数设置参考CRH2车辆参数为:列车质量  $M=408.5$  t, 动轴数  $N_M=16$ , 电机等效转动惯量  $J_{equ}=15.1316$   $kg \cdot m^2$ , 轴重  $W=13.5$  t, 轮对半径  $R=410$  mm, 传动比  $i_g=3.036$ , 重力加速度  $g=9.8$   $m/s^2$ 。

#### 4.2 仿真结果分析

为验证所提出的黏着控制方法的有效性,拟设计如图6所示3种不同路况下黏着—蠕滑特性  $u(v_s)$  [13-14] 曲线。

仿真条件设置如图7所示。仿真持续20 s,司机手柄指令给定1450 N·m,列车牵引运行;在5 s时,路况由1(良好)突变到恶劣路况2,持续5 s;在10 s时,路况进一步恶化,由路况2突变到路况3(恶劣),持续5 s,随后,路况恢复为良好路况1。

从图7可知,列车牵引工况下,在路况变恶劣时,轮速未急剧增大,列车的空转因黏着控制器

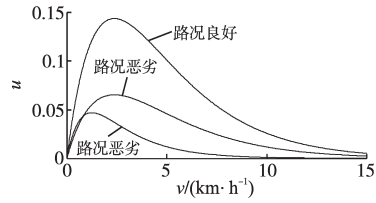


图6 不同路况下的黏着—蠕滑特性  
Fig.6 Adhesion-creep characteristic curves under different road conditions

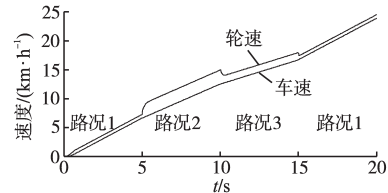


图7 车速及轮速变化

Fig.7 The changing of train speed and wheel speed

快速动作而得以有效避免。进一步分析,得到电机转矩、黏着状态等反映列车运行时状态的变量变化如图8~图11所示。

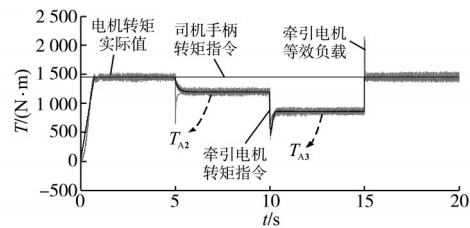


图8 转矩指令及实际值

Fig.8 The command torque and actual torque value

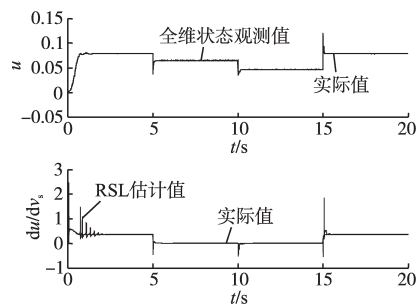


图9  $u$  和  $du/dv_s$  的观测效果

Fig.9 The observed value of  $u$  and  $du/dv_s$ .

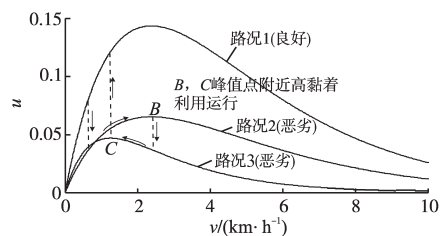


图10  $u-v_s$  实际运行状态轨迹

Fig.10 The actual running track of  $u-v_s$ .



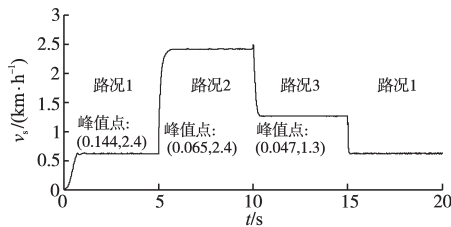
图11 实际运行中 $v_s$ 变化情况Fig.11 The changing of  $v_s$ .

图8为转矩指令和转矩实际值。由图8可知,当路况变恶劣时,由于路面黏着系数较低,轮轨无法实现司机给定的黏着能力目标,此时黏着控制器迅速动作,牵引电机转矩指令调整为 $T_m^* = T_A$ ,以适应当前路面黏着状态,避免空转/滑行的发生;同时,在应对不同恶劣路况变化下(路况2,路况3),黏着控制器也能实现快速调整牵引电机转矩指令 $T_m^*$ (如图8所示, $T_{A2}=1180\text{ N}\cdot\text{m}$ , $T_{A3}=850\text{ N}\cdot\text{m}$ ),以上两种路况突变下,其控制器的平均响应速度约为300ms,动态性能良好。

图9为切向力系数 $u$ 的全维观测及黏着蠕滑 $du/dv_s$ 最小二乘法估计,由图9可知,其观测效果较好。

与图7、图8从转矩角度来验证黏着控制性能不同,图10、图11则主要从列车实际运行中轮轨间黏着一蠕滑状态来评价。图10主要描述 $u$ 和 $v_s$ 实际运行状态轨迹,由图10可知,无论在恶劣路况2或路况3下,轮轨都能实现运行于各自低黏着路况下的峰值点附近(B,C)。

另外,由图11可知,列车牵引时,在10s处由恶劣路况2突变到更严重低黏着路况3时,过大的蠕滑速度 $v_{s2}=2.6\text{ km/h}$ ( $v_{s2}$ 接近于 $v_{\text{sopt}2}$ )都能够得到迅速抑制,并下降到 $v_{s3}=1.2\text{ km/h}$ 接近于峰值点处的 $v_{\text{sopt}3}$ 处( $v_{\text{sopt}3}<v_{\text{sopt}2}$ ),由此表明所提出的黏着控制方法即便轮轨已处于黏着非稳定区域时,黏着控制也有效。

## 5 结论

本文首先简要介绍轮轨黏着特性,建立基于CRH2车型高速列车单轴动力学数学模型。其次,本文通过对切向力系数 $u$ 全维观测和黏着一蠕滑斜率 $du/dv_s$ 的RSL估计,提出了一种新型的力矩反馈式优化黏着控制方法。从Matlab/Simulink的仿真结果可知,本文所提的黏着控制方法可实现在恶劣黏着路况和不同恶劣黏着路况突变条件下,轮轨稳定运行于黏着峰值点附近,并在黏着蠕滑的非稳定区域其黏着控制仍有效。仿真结果验证了该方法的可行性。

## 参考文献

- [1] 李江红,马健,彭辉水.机车粘着控制的基本原理和方法[J].机车电传动,2002(6):4-8.
- [2] Kadowaki S, Ohishi K, Miyashita I, et al. Re-adhesion Control of Electric Motor Coach Based on Disturbance Observer and Sensor-less Vector Control[C]//Power Conversion Conference, PCC-Osaka 2002. Proceedings of the. IEEE, 2002, 3: 1020-1025.
- [3] Kadowaki S, Ohishi K, Hata T, et al. Antislip Readhesion Control Based on Speed-sensorless Vector Control and Disturbance Observer for Electric Commuter Train-series 205-5000 of the East Japan Railway Company[J]. IEEE.Transaction on Industrial Electronics, 2007(54):2001-2008.
- [4] Kwon S K, Huh U Y, Kim H I, et al. Re-adhesion Control with Estimated Adhesion Force Coefficient for Wheeled Robot Using Fuzzy Logic[C]//Busan, Korea : 30th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 2004,3: 2530-2535.
- [5] Spiryagin M, Lee K S, Yoo H H. Control System for Maximum Use of Adhesive Forces of a Railway Vehicle in a Tractive Mode[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2008, 22(3): 709-720.
- [6] 陈哲明,曾京,罗仁.列车牵引粘着控制及其仿真[J].现代制造工程,2009(6):8-12.
- [7] Lin Wenli, Zhao Leitong, Dong Kan. Performance Analysis of Re-adhesion Optimization Control Based on Full-dimension State Observer[J]. Procedia Engineering, 2011(23): 531-536.
- [8] Ohishi K, Nakano K, Miyashita I, et al. Anti-slip Control of Electric Motor Coach Based on Disturbance Observer[C]//Japan: AMC, 1998:580-585.
- [9] Ohishi K, Ogawa Y, Miyashita I, et al. Anti-slip Re-adhesion Control of Electric Motor Coach Based on Force Control Using Disturbance Observer[C]//Italy, Rome : Industry Applications Conference, 2000, 2: 1001-1007.
- [10] Lin Wenli, Liu Zhigang, Diao Lijun, et al. Maximum Adhesion Force Control Simulated Model of Electric Locomotive[C]//China: International Conference on Automation and Logistics, 2007:1704-1708.
- [11] 林文立,刘志刚,方攸同.地铁列车牵引传动再粘着优化控制策略[J].西南交通大学学报,2012, 47(3): 465-470.
- [12] Sado H, Sakai S, Hori Y. Road Condition Estimation for Traction Control in Electric Vehicle[C]//ISIE, 1999, 2: 973-978.
- [13] Ishikawa Y, Kawamura A. Maximum Adhesive Force Control in Super High Speed Train[C]//Nagaoka: IEEE Power Conversion Conference, 1997, 2: 951-954.
- [14] Cao M, Takeuchi K, Furuya T, et al. Adhesion Control in Low-speed Region and Experiment Verification with Considering Low-resolution Pulse Generator[C]//Osaka: IEEE Power Conversion Conference, 2002, 2: 873-878.

收稿日期:2014-03-27

修改稿日期:2014-10-10