

基于组合校正的城市轨道交通列车轮轨黏着控制方法研究^{*}

张佳波 马法运 刘天宇 高 瀚 夏 猛

(中车青岛四方车辆研究所有限公司, 266111, 青岛//第一作者, 工程师)

摘 要 为提高城市轨道交通列车轮轨黏着力的控制, 针对传统组合校正法存在的缺点, 对参考速度进行延时补偿、筛选及步长限制, 尽可能保证参考速度的准确性; 对加速度提取采用低通加高通滤波器的方法, 以降低噪声影响; 黏着控制过程中, 根据设定周期时间内速度差估算当前轨面黏着情况, 实时调整下一周期判据阈值; 根据上一调节周期触发空转时刻锁存转矩和当前加速度, 以及转速差采用分段斜率的方法进行转矩调节。试验结果表明: 上述控制方法转矩波动小, 列车运行平稳, 黏着利用率得到有效提高。

关键词 城市轨道交通; 列车牵引转矩; 轮轨黏着力控制; 组合校正法

中图分类号 U260.13⁺8

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2020.03.032

Wheel/Rail Adhesion Control of Urban Rail Transit Vehicle Based on Combined Correction Method

ZHANG Jiabo, MA Fayun, LIU Tianyu, GAO Han, XIA Meng

Abstract To improve the wheel/rail adhesion control of urban rail transit vehicle, the shortcomings of traditional combined correction method are pointed out. Through reference speed delay compensation, screening and limiting the step size, the accuracy of the reference speed is ensured as much as possible. Then, the low-pass+high-pass filter method is adopted for the acceleration extraction to reduce the influence of noise. In the process of adhesion control, the current rail surface adhesion is estimated according to the velocity difference within the set cycle time, and the criterion threshold of the next period is adjusted in real time. According to the torque latched at the trigger idle time of the last regulation cycle, the current acceleration and speed difference, the sectional slope method is used to adjust the torque. The test results show that the control strategy discussed in this paper has the advantages of small torque

fluctuation, stable train running and effective adhesion utilization rate improvement.

Key words urban rail transit; vehicle traction torque; wheel/rail adhesion control; combined correction method

Author's address CRRC Qingdao Sifang Rolling Stock Research Institute Co., Ltd., 266111, Qingdao, China

露天城市轨道交通列车不可避免地会受到雨、雪、霜、雾、落叶等外界条件的影响, 且在 ATO(列车自动运行)模式下, 车辆加、减速过程通常处于较大级位, 所需轮轨黏着力较大。如果轮轨最大可用黏着力小于列车需求牵引/制动力时, 若调节不及时将引起空转/滑行现象发生, 使轮轨间的黏着作用遭到破坏^[1], 导致轮轨擦伤、使用寿命减小, 甚至引起冲标等安全问题。因此, 对于城市轨道交通列车高效、安全运营而言, 列车必须具备可靠的防空转/防滑黏着控制功能。

随着技术的发展, 目前研究轮轨黏着控制的理论方法有组合校正法、蠕滑速度法、黏着斜率法、模型控制法及模糊控制法等。

除组合校正法外, 其他几种方法实现复杂且难于工程化应用。组合校正法通过速度差、轴加速度、轴加速度微分等对转矩进行实时调节^[2,8]。其计算结构简单、反应速度快、安全可靠、易于工程化实现, 在目前及未来一段时间仍将被广泛应用于列车黏着控制。传统方法在参考速度的选取上存在一定误差且加速度的提取存在噪声, 易导致防空转/防滑动作不及时或误动作。在防空转/防滑试验后固化一组合适的参数, 但是列车在实际运营中, 轮轨黏着关系受外界影响实时变化, 固化参数难以满足后续运营需求, 会大幅度降低牵引转矩来进行调节空转/滑行, 使得乘坐舒适度及黏着利用

^{*} 国家重点研发计划项目(2017YFB1200900)

率进一步降低。加速度微分法虽然理论上可使防空转/滑行调节更及时,但该信号包含大量噪声,工程上很难准确提取。

因此,本文针对传统组合校正法存在的问题,重点介绍了参考速度及加速度的准确提取;提出了一种根据当前轨面情况,实时调整判据阈值,根据空转时刻锁存转矩、加速度及速度差对输出转矩采用不同斜率进行调节的方法;通过试验验证了该方法的可行性。

由于空转和滑行时的黏着控制方法基本相同,为简化分析,本文后续的分析 and 试验均针对防空转黏着控制进行展开。

1 轮轨黏着原理

车轮与钢轨接触处在压力作用下产生弹性形变,形成椭圆形的接触面,如图1所示。当轮轨间有牵引/制动力时,接触区域出现微小滑动,即蠕滑。椭圆形的接触区被分成两部分,轮轨间产生相对滑动区域称作滑行区,另一部分则称作黏着区。这两个区域的占比随着作用力的变化而变化,在相同轨面条件下,滑行区与作用力成正比关系,黏着区与作用力成反比关系^[3,5-6]。当作用力超过一定极限时,整个接触区全为滑行区,黏着区减小到零,出现相对滑动,轮轨间的黏着关系被破坏,进而出现空转/滑行。

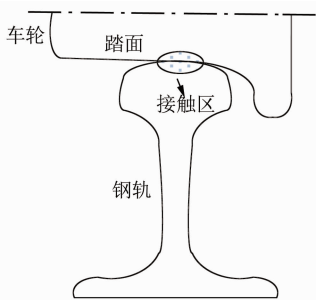


图1 轮轨接触面示意图

蠕滑是产生轮轨粘着力力的必要条件,轮速与车速之差值被称作蠕滑速度 Δv , Δv 与车速的比值被定义为蠕滑率 ξ 。轮轨黏着特性关系可以由非线性函数来表示,如图2所示。当 ξ 增大时,黏着系数 μ 逐渐增大;但当 μ 增大到 μ_{\max} 后,随着 ξ 继续增大, μ 反而下降,峰值黏着系数对应的 ξ 为最佳蠕滑率。图2中, μ_{\max} 左侧区域为微滑区,右侧为空滑区,由于空滑区的 μ 随 ξ 的增加而减小,此区域系统不稳定,所以黏着利用应保证在微滑区^[4,7]。同时为了

保证黏着利用率,目标黏着系数应处于蠕滑区接近 μ_{\max} 附近区域。

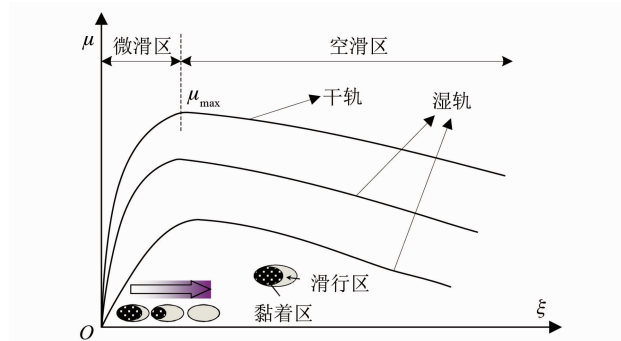


图2 不同路况下的轮轨黏着特性关系曲线

2 判据提取

2.1 速度差判据

轮速和车速的差值即为速度差,其可以直观反映列车当前的最大蠕滑情况。速度差具有较强的可信度,尤其能检测出一些缓慢空转^[8]。轮速可以直接采集得到,但是现代列车车速通常需从网络获取。即使网络会在牵引及制动模型下尽可能选取合适的轴速作为参考速度,但传输延时是不可避免的,这样牵引接收到的参考车速有一定滞后性,列车加速度越大,速度滞后越严重。而且当所有轴同时空转或由于外界原因导致网络参考速度错误时,网络参考速度就不能真实反应列车速度。对有拖轴存在的列车,牵引模式下一般不会出现同时空转,但在制动模式下,由于有空气制动参与,所有轴极有可能同时滑行。上述两个问题都会引起速度差判据失准,引起误判断或动作不及时。

针对参考速度延时问题,本文采用一种在线实时校准网络参考速度的方法。试验前期在干燥轨面上,列车以大级位牵引,在线实测轮速 v_n 与接收到的网络参考速度 v_{ms} ,并确定传输延时时间 t_d 。

由于在不同加速度下传输延时固定,所以可根据当前列车加速度 a_v 去实时校准参考速度,可由式(1)表示。

$$v_s = v_{\text{ms}} + a_v \cdot t_d \quad (1)$$

式中:

v_s ——校准后的参考车速。

由于速度采集存在一定噪声,因此,本文对所采集的轮速信号进行低通滤波处理。针对参考速度失准问题,对校准后的参考速度及滤波后的轮速进行筛选并同时限制速度变化步长,尽可能保证列

车参考速度的准确性。

在牵引模式下,选取网络参考速度与所有轴速最小值作为参考速度,制动模式则相反。根据列车可能的最大加速度,确定两次采样间隔内车速最大变化量,对初次筛选的参考速度进行增减量步长限制。

2.2 加速度判据

加速度为轮速对时间的微分值,当发生空转时,轮速势必突然增大,加速度值也相应增大。加速度判据只与本轴有关,与其他轴无关^[8]。因此,可弥补参考速度不准导致速度差判据不准,即使所有轴同时发生空转,仍然可检测出空转现象。

传统加速度计算采用速度微分加 LPF 的方法。此种方法虽然可快速提取加速度,但是采集到的速度信息自身含有许多杂波,微小的速度波动就能激起较大的加速度波动,所提取的加速度含有一定噪声量,在进行防空转判断时很容易造成误触发。

微分器的传递函数 G_D 及一阶高通滤波器 (HPF) 的传递函数 G_{HPF} 如下:

$$\begin{cases} G_D(s) |_{s=j\omega_e} = j\omega_e/\omega_c \\ G_{HPF}(s) |_{s=j\omega_e} = j\omega_e/(j\omega_e + \omega_c) \end{cases} \quad (2)$$

式中:

s ——复数频率;

ω_e ——输入信号频率。

ω_c ——截止频率;

当 ω_e 远远低于 ω_c 时, $G_D(s)$ 与 $G_{HPF}(s)$ 近似相等,特性相当,即对于低频衰减特性,两者非常类似。但是,对于频率远高于 ω_c 的信号,在“高通”特性上,两者有本质的区别,高频信号可以直接通过 HPF,而微分器对高频信号有放大效果。虽然信号经过 HPF 后并未将高频信号滤掉,但也并未将高频信号放大。轮速信号经过低截止频率的 LPF 后,部分高频噪声已滤掉,信号经过 HPF 后所提取的加速度上的噪声已很微弱。由于轮速为一个低频变量,因此,本文采用 LPF 加 HPF 的方法对加速度进行提取,如图 3 所示。



图 3 加速度提取示意图

由 HPF 的传递函数可知,所提取的加速度幅值有一定程度衰减,应进行幅值补偿,补偿后的实际

加速度 a_0 可以表示为:

$$a_0 = v_n \cdot G_{HPF}(t) \cdot \omega_c \quad (3)$$

3 防空转控制

3.1 判据阈值确定

由于轨面条件多变且难以预测,固定的速度差判据阈值难以适应不同的轨面条件。针对此问题,本文根据调节过程中周期 T_p 内的有效速度差,对当前轨面黏着进行预估,实时调整下一周期的判据阈值,经过几个周期调节逐渐接近可用黏着,如图 4 所示。

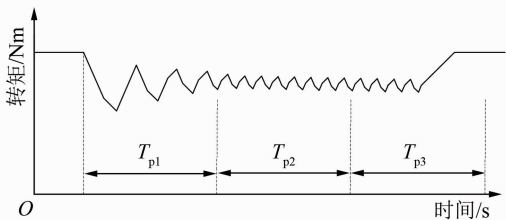


图 4 阈值调整示意图

在周期时间内,防空转调节时输出的有效蠕滑速度为:

$$\Delta v_e = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta v_i}{n} \quad (4)$$

式中:

Δv_e ——有效蠕滑速度;

Δv_i ——采样时刻速度差;

n ——采样周期内的采样个数。

根据上一个周期内计算所得的蠕滑速度有效值及平均车速可预估当前轨面黏着下的有效蠕滑率 ξ_e :

$$\xi_e = \Delta v_e / v_{ave} \quad (5)$$

式中:

v_{ave} ——周期内平均车速。

则下一个周期内,速度差判据阈值可根据当前车速及上一周期所预估的蠕滑率进行实时调整,如式(6)所示:

$$\Delta v_{th} = k \cdot \xi_e \cdot v_{ref} \quad (6)$$

式中:

Δv_{th} ——速度差阈值;

v_{ref} ——筛选后的参考速度;

k ——阈值系数,为了保证系统的稳定性, $k < 1$ 。

3.2 转矩调节

牵引系统在防空转调节过程中,实际输出转矩

反复下降、上升去逐渐接近可用黏着力。当轨面黏着降低时,本文采用锁存当前触发空转时刻转矩值的方法,根据轮加速度及速度差值采用快降、慢降两步进行降力。通常加速度判断超前于速度差判断,为了防止空转加重,加速度恢复过程转矩采用快降模式。速度差变化相对较慢,为了防止转矩损失太多应采用慢降模式。

当加速度、速度差均恢复到阈值后,为了尽快恢复转矩,根据上一触发空转时刻锁存转矩 M_{lock} ,转矩上升可采用快升、慢升两种方式。在转矩上升到 $\gamma \cdot M_{\text{lock}}$ (γ 为转矩上升系数, $\gamma < 1$) 之前,由于此时与可用黏着转矩差值相对较大,处于相对安全区域,可采用快升模式。当转矩继续上升超过 $\gamma \cdot M_{\text{lock}}$ 而接近可用黏着转矩时,为避免再次触发空转,可采用慢升模式,如图 5 所示。当黏着恢复到需求值时,转矩逐渐上升至目标值。

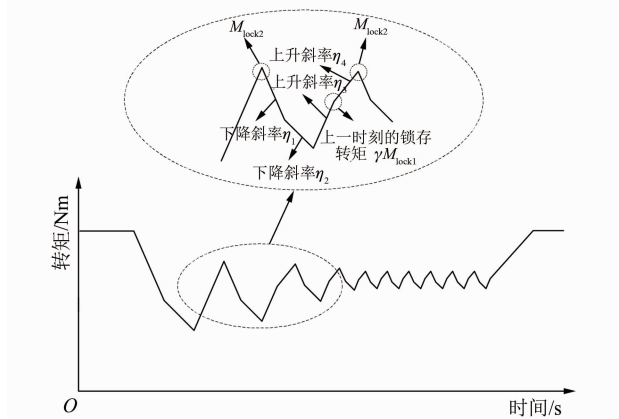


图5 防空转控制转矩调节示意图

锁存触发空转时刻转矩对下一个调节周期起预判作用,根据锁存转矩及实时采集到的加速度及速度差,采用分段斜率调节,可以有效减小转矩损失及波动。

4 试验验证

将上述黏着控制方法在济南 R1 线牵引系统上进行验证。试验过程中,列车以最大牵引级位运行至 100 km/h,同时在轨道上撒乙二醇与水的混合润滑液。试验波形如图 6 所示。

当轨面黏着降低到需求黏着以下时,牵引系统检测到空转,同时进行防空转调节,输出转矩降低到目标转矩以下。当黏着恢复后,输出转矩跟随上目标转矩,退出防空转调节。整个调节过程中,反馈转矩实时跟随输出转矩,转矩波动较小,电机电流平滑,防空

转控制时列车的运行平稳、舒适度较好。

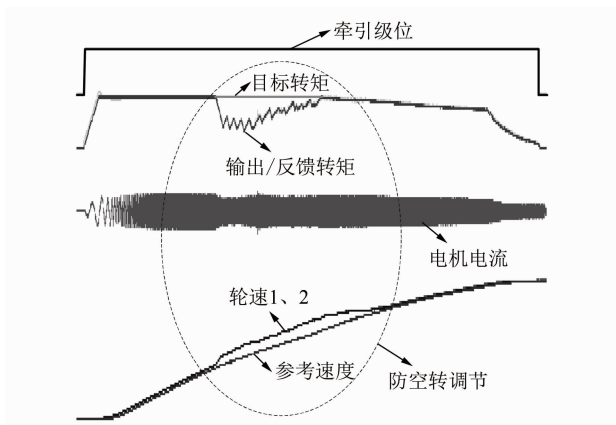


图6 防空转控制试验波形图

对于黏着利用率计算采用如下方法:调节过程中转矩峰值对应的黏着力可认为当前轨面最大可用黏着力,将转矩峰值点连接在一起组成最大可用黏着转矩包络线,如图 7 所示。

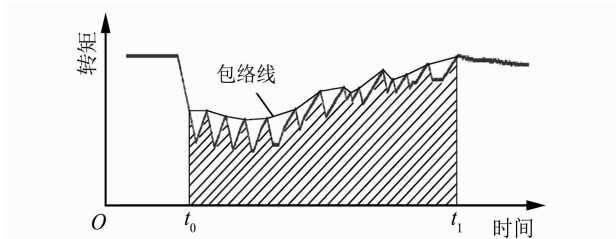


图7 黏着利用率计算图

对调节过程中实际输出转矩(图 7 阴影部分)及转矩包络线分别积分,二者积分值比值即为防空转控制黏着利用率,如式(7)所示。

$$\begin{cases} B = \int_{t_0}^{t_1} M_c dt \\ A = \int_{t_0}^{t_1} M_{\max} dt \\ \lambda = \frac{B}{A} \times 100\% \end{cases} \quad (7)$$

式中:

M_c ——实际输出转矩,对应积分面积为 B ;

M_{\max} ——包络线转矩,对应积分面积为 A ;

λ ——计算黏着效率。

按照上述方法对图 6 的试验数据进行黏着效率计算,计算结果为 89.1%,大于 85% 的规定要求。

5 结语

综上所述,本文所提出的黏着控制方法有如下特点:

(下转第 147 页)

表 7 大、中修库用地面积

大修列位数	编组模块数	车体检修区 面积/m ²	大、中修 线面积/m ²	转向架检修区 面积/m ²	其它检修区 面积/m ²	大、中修库 建议面积/m ²
2	4	1 984	2 216	2 500	2 610	9 310
2	6	2 468	2 700	2 500	2 610	10 278
3	4	2 580	2 880	2 500	2 610	10 570
3	6	3 272	3 510	2 500	2 610	11 892
4	4	3 208	3 120	2 500	2 610	11 438
4	6	4 076	4 680	2 500	2 610	13 866
5	4	3 992	3 900	3 750	2 810	14 452
5	6	5 620	5 850	3 750	2 810	18 030
6	4	4 512	4 680	3 750	2 810	15 752
6	6	6 400	7 020	3 750	2 810	19 980

中修基地。同时为控制有轨电车用地面积,并为大修库房用地面积提供参考依据,大修库占地面积可在 9 310~19 980 m² 之间合理取值。

参考文献

[1] 中华人民共和国住房和城乡建设部.城市公共交通分类标准: CJJ/T 114—2007[S].北京:中国建筑工业出版社,2007.

[2] 徐正和.现代有轨电车的崛起与探索[J].现代城市轨道交通, 2005(2): 12.

[3] 牛悦丞,李芾,杨阳,等.国外新一代 100%低地板有轨电车技术特征及发展趋势[J]铁道标准设计,2018, 62: 144.

[4] 霍凯宇.现代有轨电车项目建设可行性研究及技术方案[D].成都:西南交通大学,2014.

[5] 罗美清,袁立祥.广州海珠线储能式现代有轨电车维保工艺探讨[J].电力机车与城轨车辆,2015(4): 88.

[6] 索建国,邓谊柏,杨颖,等.储能式现代有轨电车概述[J].电力机车与城轨车辆,2015(4): 1.

[7] 中华人民共和国住房和城乡建设部.低地板有轨电车车辆通用技术条件: CJ/T 417—2012[S].北京:中国标准出版社,2012.

[8] 杨晓.浅谈现代有轨电车车辆段的布置[J].交通企业管理, 2014(2): 74.

(收稿日期:2019-02-14)

(上接第 143 页)

1) 对参考速度进行筛选校准,尽可能反映真实车速;对加速度进行低通加高通滤波提取,减小噪声影响。

2) 根据当前轨面情况,在线实时调整判据阈值,以防止转矩动作超前或滞后。

3) 锁存当前触发空转时刻转矩,采用快降、慢降、快升、慢升 4 步进行转矩调节,以减小转矩波动。

4) 试验结果表明列车运行平稳,乘客舒适度较高,黏着利用率大于需求,控制性能优越。

黏着控制只能尽可能提高黏着利用率,当在恶劣天气轨面黏着较差的工况下,制动距离仍会较正常工况长。因此列车在恶劣天气运营时,建议采用司机手动驾驶模式或 ATO 驾驶时设置特殊控车模式,制动时应预留足够的停车距离,避免冲标。

参考文献

[1] 冯晓云.电力牵引交流传动及其控制系统[M].北京:高等教

育出版社,2009.

[2] 高翔,张波.电力机车黏着控制分析[J].铁道机车车辆,2011(3): 22.

[3] 李江红,胡云卿,彭辉水,等.轨道交通粘着利用控制的关键技术与方法[J].机电传动,2014(6): 1.

[4] NAKAZAWA S. Development of a new wheel slide protection system using a new detection algorithm[J].Quarterly Report of RTRI,2011(3): 136.

[5] 王广凯,李培曙.浅谈制动粘着系数的定义、影响因素及测试方法[J].铁道车辆,2004(9): 23.

[6] 崔虎山,陈磊,刘中华,等.地铁车辆制动防滑控制故障分析[J].城市轨道交通研究,2019(4): 17.

[7] 何小兵.轨道交通车辆防空转和滑行控制策略研究[J].电力机车与城轨车辆,2015(3): 59.

[8] 李云峰.基于最优蠕滑率的粘着控制方法研究[D].成都:西南交通大学,2011.

[9] 姚远,张红军,罗赞,等.基于虚拟样机的机车黏着控制研究[J].铁道学报,2010(6): 96.

(收稿日期:2019-05-29)