

# 城市轨道交通车辆牵引系统黏着控制 优化方法及其应用

葛洪勇<sup>1</sup> 刘承波<sup>2</sup> 马法运<sup>1</sup> 张佳波<sup>1</sup>

(1. 中车青岛四方车辆研究所有限公司, 266111, 青岛;

2. 中国铁路济南局集团有限公司青岛机车车辆监造项目部, 266111, 青岛//第一作者, 高级工程师)

**摘 要** 对列车发生空转或滑行的机理进行了详细分析。基于车辆黏着控制技术的研究应用现状, 提出了一种消除空转或滑行与保持空转或滑行相结合的优化黏着控制方法。详细阐述了该控制方法的控制原理及实现方法, 并进行了试验验证。试验结果表明: 该控制方法结构简单、易于实现, 能够充分利用黏着, 使转矩波动较小、列车运行平稳, 能有效提高乘坐舒适度。

**关键词** 城市轨道交通; 牵引系统; 黏着控制

**中图分类号** U260.11<sup>+</sup>5

**DOI**: 10.16037/j.1007-869x.2020.08.019

## Optimization and Application of Adhesion Control for Urban Rail Vehicle Traction System

GE Hongyong, LIU Chengbo, MA Fayun, ZHANG Jiabo

**Abstract** In this paper, the mechanism of vehicle slip and slide is analyzed in detail. Based on the research and application status of vehicle adhesion control technology, an optimal adhesion control method is proposed by combining the slip/slide elimination with the slip/slide state maintenance. The principle and implementation of the control method are described and verified through experiment. The results show that the structure of the control method is simple and easy to implement, it can make full use of adhesion, reduce the torque fluctuation, keep the train running smoothly, and thus improving the ride comfort effectively.

**Key words** urban rail transit; traction system; adhesion control

**First-author's address** CRRC Qingdao Sifang Rolling Stock Research Institute Co., Ltd., 266111, Qingdao, China

城市轨道交通线路地面段多为露天铺设, 当遇到雨雪霜雾等恶劣天气时, 列车极易发生空转或滑行现象, 若不能及时调节, 则将引起轮轨剧烈摩擦,

造成轮对及轨面的磨损, 甚至发生冲标, 对运营造成较大的影响。因此, 在城市轨道交通车辆牵引技术国产化的进程中, 黏着利用、防空转或滑行控制技术是不可回避的技术问题。

目前, 理论研究的黏着控制方法有组合校正法、蠕滑速度法、黏着斜率法及模型控制法等<sup>[1]</sup>。但由于实现方式复杂及难以工程化应用等原因, 实际应用仍以组合校正法及其衍生方法为主。传统方法有保持空转或滑行方法, 以及消除空转或滑行方法<sup>[2-3]</sup>。当采用保持空转或滑行方法时, 虽然转矩波动较小, 理论黏着利用率高, 但状态判断滞后; 当采用消除空转或滑行方法时, 虽然可迅速识别空转或滑行状态并进行调节, 但转矩波动较大, 黏着利用率较低。

本文详细分析黏着机理, 并针对上述方法的优缺点, 提出了一种消除空转或滑行与保持空转或滑行相结合的方法, 不仅可快速识别空转或滑行状态及时动作, 而且转矩波动小、黏着利用高。

## 1 黏着机理

列车的牵引力和制动力的施加是通过轮轨之间的黏着作用来完成的。在轨面条件一定的情况下, 黏着系数 $\mu$ 与轮轨之间的蠕滑有着对应的关系。轮轨黏着通常可理解为轮轨之间的摩擦。当牵引电机通过齿轮箱将转矩 $T$ 作用在车辆轮对时, 由于黏着作用, 在钢轨和轮对的接触点处产生水平方向的切向力 $F$ , 从而使车轮滚动前进。此时的车轮受力如图1所示。轮轨间能传递的最大水平切向力 $F_{\max}$ 与垂向黏着重力 $G$ 的比值为轮轨最大黏着系数 $\mu_{\max}$ <sup>[4]</sup>:

$$\mu_{\max} = F_{\max} / G \quad (1)$$

其中,  $G = P_{\mu}g$ ,  $P_{\mu}$  为垂向黏着质量,  $g$  为重力加速度。

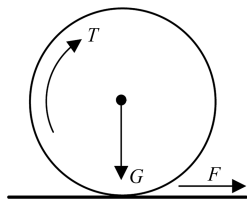


图1 车轮受力分析图

在动轮正压力的作用下,轮轨接触处会产生弹性变形,形成椭圆形的接触面。从微观上看,轮轨接触面是粗糙不平的。在  $F$  的作用下,当动轮在钢轨上滚动时,轮轨间的粗糙接触面会出现微量的滑动,即蠕滑。只有通过蠕滑产生的摩擦力,轮轨间才能传递切向力。在研究黏着作用和车轮滑行时,轮速与车速的差值同车速的比值为蠕滑率:

$$\xi = \frac{|\omega \cdot R - v|}{v} \times 100\% \quad (2)$$

式中:

$\xi$ ——蠕滑率;

$R$ ——车轮半径;

$\omega$ ——车轮角速度;

$v$ ——车速。

大量研究及试验表明,当轨面情况一定时,轮轨间可利用的最大黏着力随着蠕滑率的增加而增大;但是当蠕滑率增加到某一数值后,黏着力会急剧下降。这种关系称为轮轨黏着特性<sup>[4-5]</sup>。不同黏着情况下,同一蠕滑率对应的黏着系数是不同的,典型的干燥和潮湿轨面的黏着特性曲线如图2所示。当最大黏着系数对应的黏着力小于车辆的需求牵引力或制动力时,车辆就会发生空转或滑行。因此,车辆在黏着系数较低的潮湿轨面下运行时,其可靠的防空转或滑行控制尤为重要。

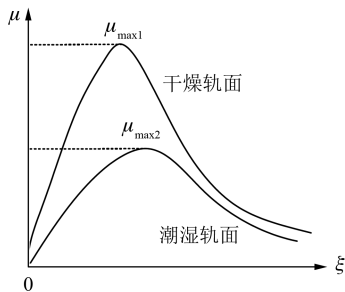


图2 黏着特性曲线示意图

## 2 黏着控制方法

城市轨道交通车辆黏着控制方式以轮轨黏着特性作为理论基础,可分为保持空转或滑行、消除空转或滑行两大类。

保持空转或滑行的黏着控制方式又称为蠕滑率控制。列车在行进过程中实时进行蠕滑率计算<sup>[6]</sup>,当蠕滑率超过一定值时,控制系统将根据蠕滑率自动适时调整列车的牵引或制动力,使列车保持最佳的黏着利用状态。该方法虽在理论上可以最大程度地利用黏着,但如检测到速度差,则说明已经发生了深度空转或滑行。由此可知,该方法的响应速度较慢,初始动作不及时。

消除空转或滑行的黏着控制方式通过检测各轮与参考速度之间的速度差及各轮自身加速度来进行空转或滑行状态判断。根据加速度,还可进行预判作用、提前动作。一旦加速度超过阈值,则快速进行牵引力或制动力的消减,使黏着快速恢复,然后再迅速恢复牵引力或制动力,待恢复到空转前的值时,再缓慢增长。该方法响应快、实现简单,但是黏着利用率较低,并且在轨面可用黏着较差时,会出现连续的空转或滑行—降力—黏着恢复—升力—再空转或滑行的现象,列车纵向冲动较大。

本文根据上述两种控制方法的特点,并依据实际应用经验提出了一种将消除空转或滑行与保持空转或滑行相结合的控制方法,在保证高黏着利用率的情况下,提高响应速度的同时改善列车纵向冲动。该控制方法主要通过快速控制模块及蠕滑控制模块来实现。

### 2.1 快速控制模块

牵引系统进行车辆空转或滑行状态判断的常用依据为速度差、加速度、蠕滑率、冲击率(加速度微分)。判断时选择其中的一个或几个进行组合并选择标准值,作为判据标准,以在轨面黏着较差时能及时识别空转或滑行状态,并充分利用轮轨黏着。判据标准的选择,一方面要考虑控制系统的结构,当黏着控制方法不同时,判据标准也会有差异;另一方面也要考虑判据标准的灵敏度及工程上的提取难易度,如灵敏度过高、准确度低则会导致误触发动作,反之控制效果会降低。因此,本文选用相对易于提取的加速度及蠕滑率作为判据标准。

在进行轮轨蠕滑率计算时,参考速度通常来自于网络的筛选或牵引系统的自身采集。网络筛选

参考速度通常采用的方法为:在牵引工况下选取所有轮速的第二小值,在制动工况下选取所有轮速的第二大值。但是,网络传输会存在一定延时,进而导致计算蠕滑率不准确,因此,需对网络参考速度进行延时补偿,以尽可能得到真实参考车速。直接采集拖轴速度虽然可以避免延时问题,但是在制动工况下,由于制动系统施加制动力,拖轴也会出现滑行。当拖轴滑行时,其速度并不能真实反映列车参考速度。因此,拖轴参考速度需根据相应减速度进行步长限制。

当检测到车辆运行状况达到判据标准时,牵引系统快速控制模块动作,对牵引力或制动力指令进行迅速调整。如图 3 所示,控制过程为快降 a、慢降 b、保持 c、快升 d 及慢升 e 等 5 步骤。

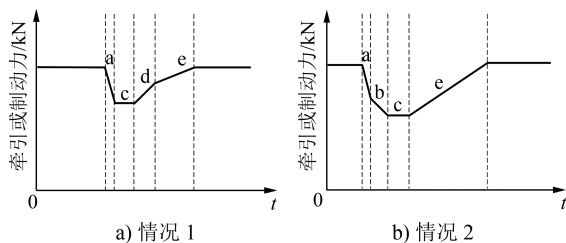


图 3 牵引力/制动力指令曲线

根据空转或滑行程度不同,控制步骤分为图 3 所示两种情况。情况 1:如图 3 a) 所示,如果转矩快降后黏着恢复,则保持一段时间后再迅速恢复转矩,当转矩恢复到空转或滑行前的 80%~90% 时,再以缓慢斜率上升。情况 2:如图 3 b) 所示,如果转矩快降后,黏着仍未恢复,则以较小斜率继续降低转矩(慢降),直到黏着恢复;保持一段时间后,转矩直接以缓慢斜率上升,寻找最佳黏着点。如果控制模块在转矩快速消减之后仍执行继续消减,则说明目前轮轨黏着系数较低。这种情况下,如果待黏着恢复后以较大斜率恢复转矩,则黏着极易破坏,容易再次发生空转或滑行。当检测速度差或加速度达到判据标准时,牵引系统快速消减转矩。根据现场经验,转矩消减到空转或滑行前的 75%~85% 即可。

图 4 为牵引系统仅采用快速控制模块进行防空转试验的波形。其中,  $I_T$  为输出转矩电流,  $V_{ref}$  为列车参考速度,  $V_l$  为轮速, flag1 为快速控制模块输出第 1 个标志位。由图 4 可知,当转矩快速恢复时,如再次发生空转,则会出现连续空转现象,导致转矩进一步快速下降。这样不但导致黏着利用低而且

车辆抖动严重,乘坐舒适度降低。

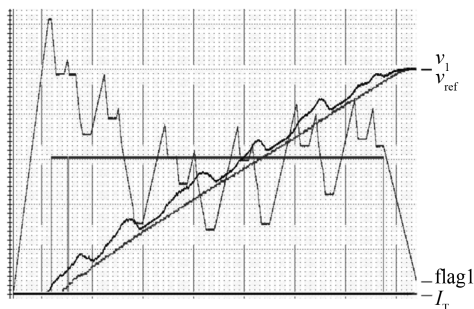


图 4 仅采用快速控制模块防空转试验波形(截图)

## 2.2 蠕滑控制模块

针对快速控制模块在防空转调节过程中的持续动作,本文采用了快速控制与蠕滑控制相结合的方法。蠕滑控制模块是快速控制模块的补偿,其判据只有蠕滑率。其模块结构如图 5 所示。当蠕滑率满足判据标准时,牵引系统根据当前的蠕滑率通过 PI(比例-积分)调节器实时调节输出转矩指令,使车辆保持在相对稳定的黏着状态。

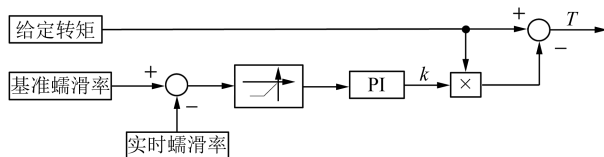


图 5 蠕滑控制模块结构

快速控制模块与蠕滑控制模块相结合的结构控制流程图如图 6 所示。一般情况下,快速控制模块优先级高于蠕滑控制模块。在快速控制模块力矩恢复的步骤中,蠕滑控制模块接替快速控制模块进行防空转或滑行调节。

## 3 试验验证

将上述黏着控制方法应用到北京地铁 13 号线的牵引系统中,并进行现场试验验证。该牵引系统采用架控方式,1 台牵引逆变器并联 2 台牵引电机。因此,2 台牵引电机所在轮对同时参与判据的计算,当检测到其中 1 个轮对发生空转或滑行时,逆变器随即开始进行牵引电机输出转矩的调节。

根据现场试验效果,快速控制模块的空转判据阈值设置为:①加速度大于 1.6 倍的最大设计加速度;②加速度大于 1.3 倍的最大设计加速度且蠕滑率大于 3.5%;③蠕滑率大于 7%。

触发上述任一条判据即判断空转或滑行有效,进行黏着调节。具体控制参数设置为:第一步,快

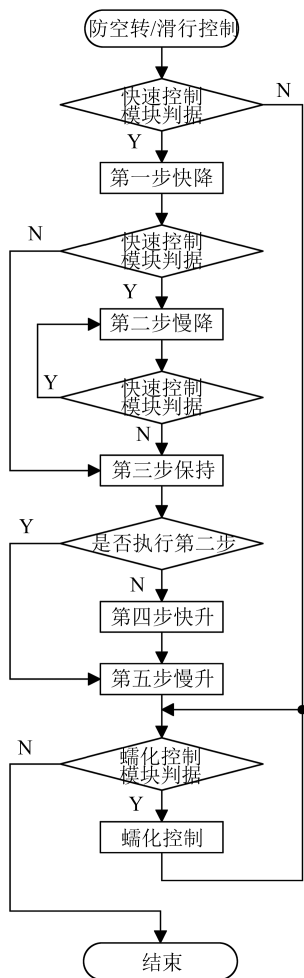


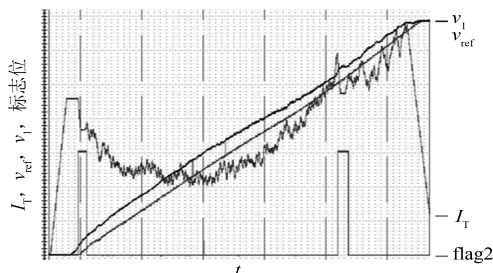
图 6 防空转或滑行控制流程图

降斜率为 400 A/s, 下降到给定值的 83%; 第二步, 慢降斜率为 200 A/s; 第三步, 保持时间为 0.3 s; 第四步, 快升斜率为 250 A/s, 上升到目标值的 90%; 第五步, 慢升斜率为 130 A/s。

异步电机矢量控制技术转矩电流与转矩成正比, 为了便于计算, 本文采用直接调节转矩电流的方式进行防空转或滑行调节。

蠕滑控制模块判据阈值为: 蠕滑率大于 5%。其上升、下降斜率均为 150 A/s。

试验过程: 列车以最大级位牵引加速; 同时, 在最前端的两个动轮下撒乙二醇与水混合液, 使轨面黏着随之降低; 牵引系统进行防空转控制。由图 7 所示的试验波形图可知: 在列车加速过程中发生了空转; 牵引系统快速控制模块动作 2 次 (flag2 标志位变高); 在慢升过程中, 蠕滑控制模块启动, 对牵引转矩进行微调控制, 随着黏着逐渐恢复, 牵引转矩也逐渐恢复。在整个列车运行过程中, 牵引转矩没有发生剧烈变化, 转矩损失较少, 乘坐舒适度得



注: flag2 为快速控制模块第 2 个标志位

图 7 防空转试验波形

到有效提高, 并且黏着得到有效利用。

制动工况与牵引工况类似, 本文不再阐述。

## 4 结语

黏着控制只能尽可能提高黏着利用率。在恶劣天气、轨面黏着较差的工况下, 在黏着控制下, 制动距离仍会较正常工况长。因此, 列车在恶劣天气运营时, 在采用司机手动驾驶模式或 ATO (列车自动运行) 模式驾驶时, 信号系统应针对恶劣天气设置特殊控车模式, 并在制动时预留足够的停车距离, 以避免列车冲标。

本文通过对黏着机理及当前黏着控制方法的分析, 提出了一种优化的防空转或滑行控制方法, 并详细描述了整个控制过程的执行方法。采用此方法对北京地铁 13 号线的牵引系统进行了相关试验, 试验结果表明: 该控制方法能够充分利用黏着, 转矩波动较小, 车辆运行平稳, 有效提高了乘坐舒适度。控制参数的设定要充分考虑运行线路条件、运行速度范围及车轮的磨耗等因素。因此, 不同的项目应用中要根据实际试验结果进行调整。

## 参考文献

- [1] 庞红燕. 基于蠕滑加速度的高速列车黏着控制研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2014.
- [2] 余接任, 钱华, 夏帅, 等. 城轨车辆制动防滑检测与保护[J]. 机车电传动, 2015(2): 96.
- [3] 康成伟, 赵志强. 动车组防空转、防滑控制技术策略选取浅析[J]. 铁道车辆, 2013(7): 33.
- [4] 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.
- [5] NAKAZAWA S I. Development of a new wheel slide protection system using a new detection algorithm[J]. Quarterly Report of RTRI, 2011(3): 136.
- [6] 陈军华, 胡铁军, 陈希隽. 广州地铁 1 号线车辆防空转/防滑系统[J]. 机车电传动, 2002(1): 1.

(收稿日期: 2019-11-30)