

城市  
轨道  
车辆

# 广州地铁三北线国产牵引列车 粘着控制逻辑分析

樊嘉峰, 何文乐, 赵仁龙

(广州市地下铁道总公司 运营三中心, 广东 广州 510000)



**摘要:** 主要介绍广州地铁三北线时速 120 km 国产牵引地铁列车粘着控制逻辑的应用特点, 并与西门子列车粘着控制逻辑进行对比, 突出了国产牵引列车粘着控制的安全性和严密性。结合地铁车辆轮轨间的粘着特性, 重点对列车防滑控制逻辑进行分析, 包括滑行检测逻辑和力矩减载恢复逻辑。试验表明, 应用于该项目的防滑控制逻辑能有效检测到滑行现象, 及时对力矩进行调整, 有效提高了粘着控制性能。

**关键词:** 广州地铁三北线; 国产牵引列车; 120 km/h 地铁列车; 粘着控制

**中图分类号:** U231; U260.11<sup>+</sup>5   **文献标识码:** A   **文章编号:** 1000-128X(2015)06-0076-04  
**doi:** 10.13890/j.issn.1000-128x.2015.06.020

## Adhesion Control Logic Analysis of Domestic Traction Trains in Guangzhou Metro Third-northern Line

FAN Jiafeng, HE Wenle, ZHAO Renlong

(The Third Operation Center, Guangzhou Metro Corporation, Guangzhou, Guangdong 510000, China)

**Abstract:** The application characteristics of adhesion control logic in 120 km/h domestic traction metro trains of Guangzhou metro third-northern line were introduced. Compared with the Siemens train, domestic traction train adhesion control was more outstanding in safety and rigor. Based on wheel-track adhesion characteristics, train antiskid control logic was analyzed emphatically, including skid detection and moment unloading/recovery logic. Test shows that the train antiskid control logic of the project can detect the skid phenomenon effectively and adjust the moment in time, which improves adhesion control performance greatly.

**Keywords:** Guangzhou metro third-northern line; domestic traction train; 120 km/h metro vehicle; adhesion control

### 0 引言

列车牵引系统的粘着控制功能能够有效地调节列车轮对的空转和滑行状态, 从而在有效的粘着力条件下最大地发挥牵引制动力的作用, 保证列车运行的安全性和平稳性。广州地铁三北线国产牵引列车是国内首列时速达 120 km 具有完全自主知识产权的地铁列车, 采用广州市地下铁道总公司联合株洲南车时代电气股份有限公司、南车株洲电机有限公司及广州南车时代电气技术有限公司共同研制开发的自主知识产权 120 km 地铁列车电气牵引系统。由于国产牵引列车最初设计的防滑控制逻辑还有待进一步完善, 无法准确监控列车的滑行现象、有效防止滑行现象的产生, 经过多次试验并进行总结后, 制定了较好的防滑控制逻辑,

成功将该防滑控制逻辑应用于国产牵引列车电气牵引系统的粘着控制程序中。国产牵引列车已顺利通过上线载客前的专家评审, 并成功投入载客试运营。

### 1 主要原理

广州地铁三北线国产牵引列车的粘着控制功能由牵引系统(DCU)和制动系统共同完成, 这里主要介绍牵引系统粘着控制逻辑。

列车速度传感器对轮对转速进行实时监测, 将速度反馈给制动系统和牵引系统。牵引系统通过校验过的列车轮径值实时计算列车每个轴的转速及加速度, 从而为列车监测空转、滑行现象提供数据基础。当列车监测到轮对的空转、滑行时, 牵引系统能够主动调节电机力矩, 从而达到调节粘着性能的目的。如果电制动力不能满足制动减速度和制动距离要求, 继续调节电制动力则会损伤轮对, 因此牵引系统会发出切除

电制动力的命令。

准确地检测轮对粘着状况是粘着控制的关键，国产牵引列车主要通过以下方式满足检测要求：

①当轮对加、减速度大小超过一定门槛值，判定发生空转、滑行现象；

②当轮对蠕滑速度（动轮与非动轮之间的速度差值）大小超过一定门槛值时，判定发生空转、滑行现象；

③当一节动车的动轮之间的速度差超过一定门槛值时，判定发生空转、滑行现象。

粘着控制同样需要考虑粘着效率的利用，粘着系数及粘着效率的计算公式如下：

粘着系数 =  $\frac{\text{牵引或制动力矩}}{\text{单节车轴重}}$  (1)

粘着效率 =  $\frac{\int_{\text{BeginTime}}^{\text{EndTime}} \text{实际加速度瞬时值}}{\int_{\text{BeginTime}}^{\text{EndTime}} \text{理想加速度瞬时值}} \times 100\%$  (2)

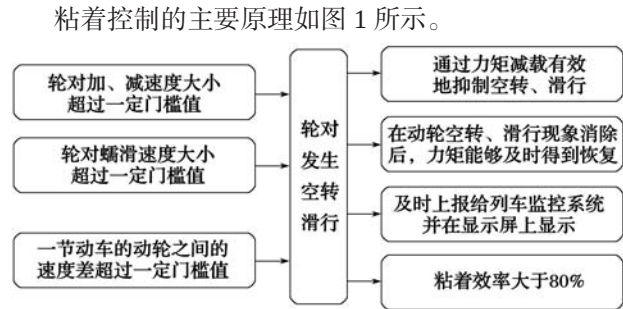


图 1 粘着控制原理图

2 主要逻辑

2.1 加、减速度保护

通过采集轮对速度并计算得到轮对加、减速度，然后利用轮对加、减速度与设定的加、减速度保护门槛值（即阈值）进行比较，再通过力矩减载算法对力矩进行减载。加、减速度保护的逻辑框图如图 2 所示。

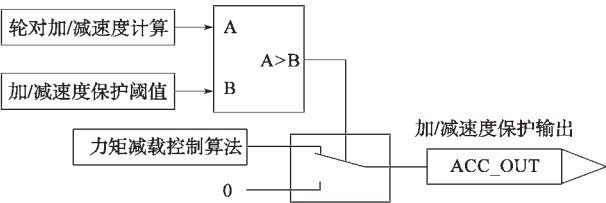


图 2 加、减速度保护逻辑框图

2.2 蠕滑速度保护

通过采集轮对速度并获得车辆的拖车速度，然后取动轮轮对速度与拖车速度的差值即得到蠕滑速度，利用蠕滑速度与设定的蠕滑速度保护门槛值（即阈值）进行比较，再通过力矩减载算法对力矩进行减载。蠕滑速度保护逻辑框图如图 3 所示。

2.3 轮对速度差保护

轮对速度差保护采集单节车的各个轮对速度，取

轮对速度之间的最大差值得到轮对速度差，利用轮对速度差与设定的轮对速度差保护门槛值（即阈值）进行比较，再通过力矩减载算法对力矩进行减载。轮对速度差保护逻辑框图如图 4 所示。

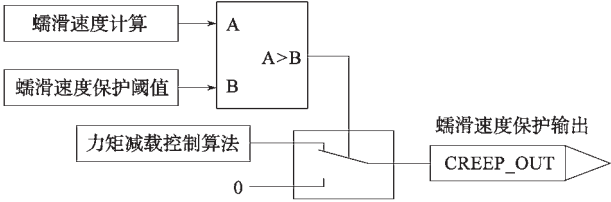


图 3 蠕滑速度保护逻辑框图

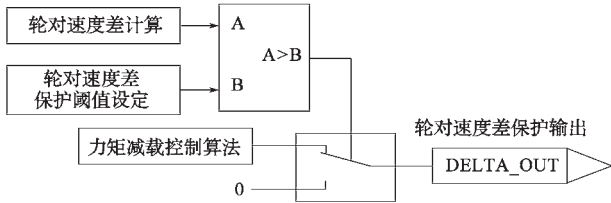


图 4 轮对速度差保护逻辑框图

通过力矩进行相应的调整，使得轮对加/减速度、蠕滑速度及轮对之间的速度差控制在合理的范围内，使得空转 / 滑行后的轮对重新进入再粘着状态。

3 控制效果

3.1 调试试验效果

通过上述逻辑控制，列车在不同载荷下进行了干轨道和湿轨道的调试试验。当列车为 AW0(空载)工况时，在干轨条件下，不同速度等级的牵引和制动均未出现力矩减载；在湿轨（洒清水）条件下，不同速度等级的牵引和制动力矩发挥比较平稳，电制动力未被切除；在洒水和洗洁精混合物的条件下，不同速度等级的牵引和制动力矩发挥比较平稳，由于列车的粘着控制是由牵引系统和制动系统共同完成，在洒混合物条件下粘着系数较低，列车出现了电制动力减载较多的情况，这是由于列车制动系统切除电制动而导致的。

当列车为 AW3（满载）工况时，在干轨条件下，不同速度等级的牵引和制动均未出现力矩减载；在湿滑（洒水和洗洁精混合物）条件下不同速度等级的牵引和制动力矩发挥比较平稳，但同样出现了电制动力减载较多而被制动系统切除的现象。

3.2 试验波形及波形分析

列车在 AW3 工况，120 km/h 速度下干轨道试验波形如图 5、图 6 所示，湿轨道试验波形如图 7、图 8 所示。

从图 7~ 图 8 中可以看出，由于湿滑轨面条件下粘着系数低，可用的粘着力小，如果继续增加电机力矩，则会使轮对出现严重的空转 / 滑行现象，造成轮轨擦伤或列车失去控制。此时如果电制动力不能满足制动减速和制动距离要求，则会出现电制动力被切除的情况。

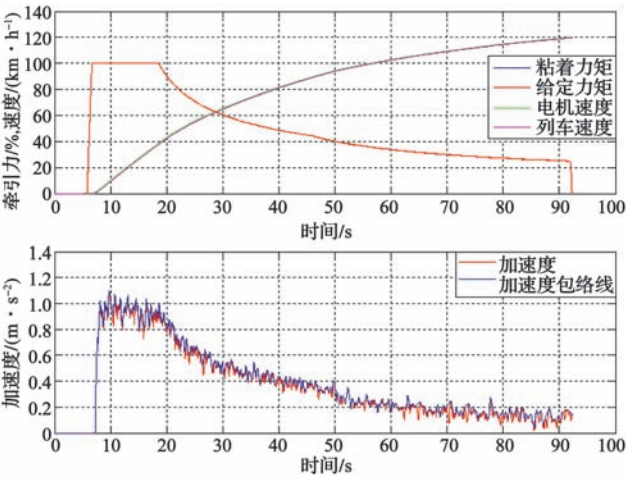


图 5 120 km/h 牵引工况下干轨波形

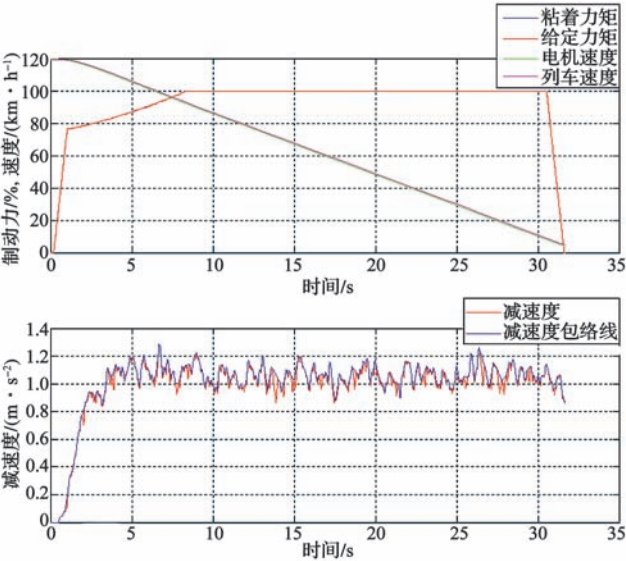


图 6 120 km/h 制动工况下干轨波形

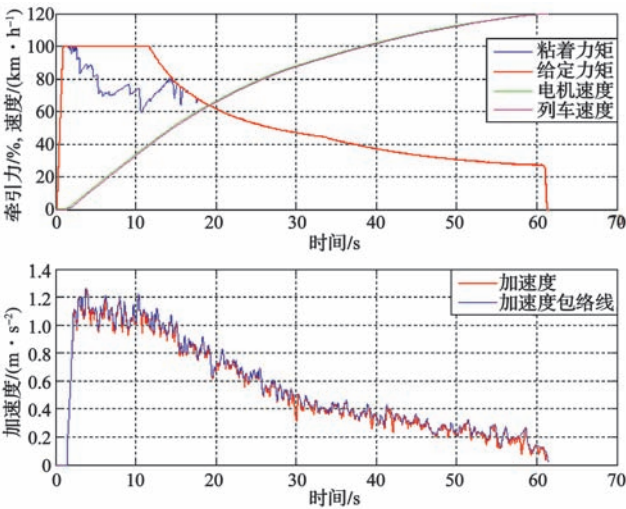


图 7 120 km/h 牵引工况下湿轨波形

根据采集的数据，由式（1）可以对干轨道和湿轨道的粘着状况做粗略的估算，如表 1、表 2 所示。

表 1 干轨道下的粘着计算

| 工况 | 设计粘着系数 | 平均估算粘着系数 | 恒力矩区估算粘着系数 |
|----|--------|----------|------------|
| 牵引 | 0.170  | 0.074    | 0.147      |
| 制动 | 0.165  | 0.138    | 0.143      |

表 2 湿轨道下的粘着计算

| 工况 | 设计粘着系数 | 平均估算粘着系数 | 恒力矩区估算粘着系数 |
|----|--------|----------|------------|
| 牵引 | 0.170  | 0.074    | 0.12       |
| 制动 | 0.165  | 0.098    | 0.08       |

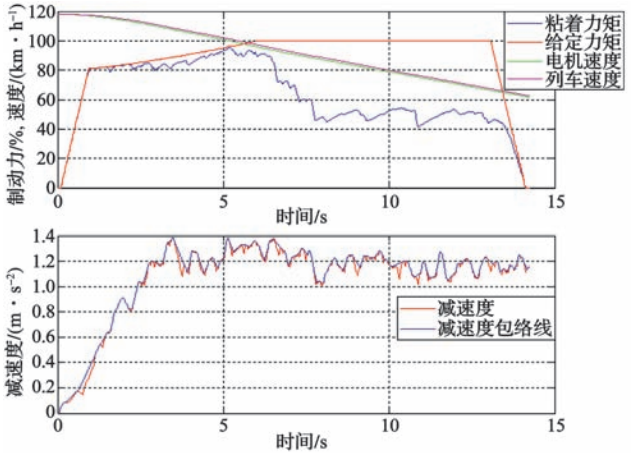


图 8 120 km/h 制动工况下湿轨波形

由表 1、表 2 可知，列车在干、湿轨道下的粘着控制能够满足列车牵引制动下的粘着系数要求。

同样可以通过采集的数据并通过式（2）粗略计算粘着效率：120 km/h 干轨条件下牵引和制动的粘着效率分别为 96.7% 和 97.9%，120 km/h 湿轨条件下牵引和制动的粘着效率分别为 88.4% 和 82.6%，粘着效率均大于 80%。

由上述计算分析可知，国产牵引列车的粘着控制能够满足时速为 120 km 列车在不同工况下的运行要求，有效改善列车空转、滑行的轮对粘着情况。

4 西门子粘着控制逻辑比较

西门子对于列车轮对的空转和滑行检测手段相对单一，主要通过实际轮对速度和轮对空转、滑动的限定速度进行比较，从而得出列车车轮在空转、滑行时所应减少的力矩，如图 9 所示。轮对空转、滑行的限定速度是通过基于估算的列车速度由线性关系计算得到的值。此时需要用到轮对空转、滑行限定比，该比值计算公式如下：

轮对空转、滑行速度限定比=  $\frac{\text{轮对空转滑行限定速度}}{\text{列车估算速度}}$  (3)

空转、滑行速度比通常在 4%~10% 之间，由于力矩的调节主要是基于估算的列车速度值，和国产牵引列车基于实时监控数据的计算相比，精确度较差，不能够有效地调节电机力矩。

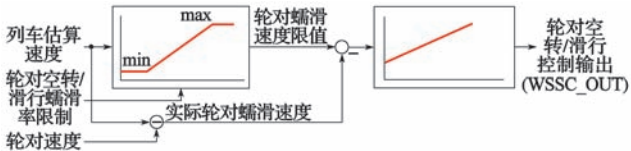


图 9 西门子列车轮对空转、滑行控制逻辑图

但西门子列车除了针对轮对空转、滑行的情况进行粘着控制，还考虑了列车出现速度漂移、轮对加速、

低速运行时的情况。

当列车出现速度传感器失效或者速度信息获取失败的情况, 列车轮对会相对于其他轮对出现速度漂移, 此时漂移保护会使输出力矩减小, 从而保证轮对速度回到列车限定的速度值。

轮对加速度的限定值来源于实际力矩下列车预期的加速度值, 如果实际加速度大于限定值, 牵引系统同样会使输出力矩减小。如果列车检测到轮对的空转滑行, 则轮对加速度控制模式会被屏蔽。

当列车处于低速运行时, 一旦轮对速度低于一个门槛值, 列车平滑保护系统会输出一个减小的力矩, 该逻辑如图 10 所示。

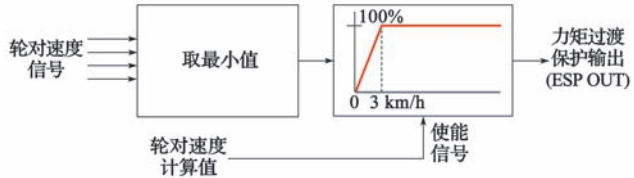


图 10 flat-spot 保护逻辑图

考虑到上述几种情况, 西门子列车粘着控制最终的输出力矩由以上几部分的力矩计算得到, 如图 11 所示。

国产牵引列车相对于西门子列车具有控制精度高等特点, 但考虑的粘着情况较少, 这也是国产牵引列车需要进行改进的地方。

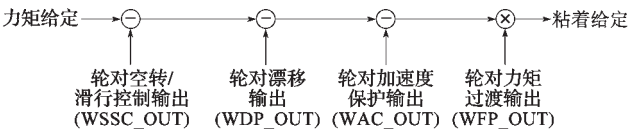


图 11 力矩计算逻辑图

5 结语

国产牵引列车粘着具有控制精度高的优点, 通过相对简单的计算改善了列车的粘着性能, 从而满足列车在 120 km/h 的速度时不同工况下的运行需求。

国产牵引列车粘着控制逻辑最初存在的某些问题, 例如速度传感器参数设置问题、滑行时逆变器过流导致牵引封锁等情况, 通过现场多次调试, 该控制逻辑已得到较大完善, 逻辑的严密性和安全性得到了验证, 已经能够满足广州地铁三北线粘着控制的要求。

参考文献:

[1] 西门子(中国)有限公司.SIBAS-G-Reader 逻辑功能描述[M]. 北京: 西门子(中国)有限公司, 2010.

[2] 朱士友, 吕劲松. 车辆检修工[M]. 北京: 中国劳动社会保障出版社, 2009.

[3] 朱翔, 肖向前. 广州地铁 3 号线列车 EP2002 制动系统及故障分析[J]. 机车电传动, 2008(3).

(上接第 75 页)

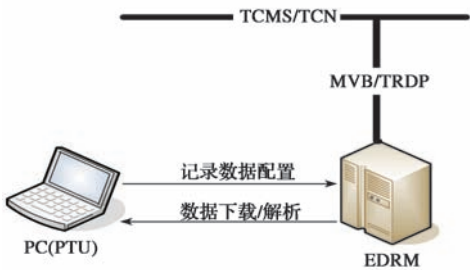


图 4 PTU 与 EDRM 关系图

便携式维护工具 PTU 具有以下特点:

①诊断数据以易理解的图表或图形显示。

②为了编制文件需要, 可对每个故障加以说明。这样, 如果以前发生过类似的故障, 就可提供参考意见, 故障数据可用来对每个部件给出故障统计数据。

③数据可存档。

④为便于向各种应用级别提供数据, 系统设定了相应的选择准则。比如, 可以根据指定的环境参数和指定的时间段选择相应的数据。

⑤对所获诊断数据的分析可采用搜索、分类和统计等功能。

⑥为了给不同用户级别提供数据, 本系统备有选择准则, 可产生相应部件和子部件的故障统计数据。

4 结语

首列采用自主电气牵引系统的广州地铁 3 号线时速 120 km 列车于 2013 年 12 月装车后进行库内静态调试和出厂调试, 2014 年 3 月至 2014 年 8 月在广州地铁 3 号线正线上完成列车线路型式试验, 试验效果良好。TCMS 系统在软件设计上与采用进口控制与诊断系统的列车保持一致, 在司机的操作习惯、运行状态的监视、控制功能的实现、列车运行各项参数等方面, 广州地铁 3 号列车自主牵引系统的 TCMS 能完全取代进口牵引列车的控制与诊断系统。

参考文献:

[1] 曾嵘, 杨卫峰, 刘军. 列车分布式网络通信与控制系统[J]. 机车电传动, 2009(3): 17-19.

[2] 朱俊, 李芳, 王丽芳. MVB 总线网络动态性能的研究[J]. 机车电传动, 2013(1): 35-38.

[3] 朱翔, 肖向前. 广州地铁 3 号线列车 EP2002 制动系统及故障分析[J]. 机车电传动, 2008(3): 58-59.