

# 广州地铁直线电机列车防滑控制系统 研究及改进

韩永春, 唐 宋

(广州地铁集团有限公司 运营事业总部, 广东 广州 510000)

**摘要:** 通过对广州地铁5号线直线电机列车2种类型的制动系统防滑保护功能的设计进行对比分析, 针对自主知识产权列车防滑控制软件设计缺陷, 提出取消直机电制动、惰行工况下防滑保护功能, 制定标准对列车各轴“同速度”进行考核的优化建议, 保证直线电机列车防滑控制系统发挥良好的效果。

**关键词:** 直线电机; 防滑控制系统; 广州地铁

**中图分类号:** U231; U260.11<sup>+</sup>5 **文献标识码:** B  
**doi:** 10.13890/j.issn.1000-128x.2016.04.105

广州地铁4、5、6号线是国内首批批量采用直线电机牵引技术的地铁车辆。直线电机无联轴节和减速齿轮箱等装置, 依靠电机和感应板之间的电磁力进行驱动和电制动, 不受轮轨之间粘着限制, 具有爬坡能力强、转弯半径小的优势。列车最高运行速度90 km/h, 依靠直机电制动可减速至6 km/h左右, 电制动过程列车不会出现轮对滑行等问题(轴箱机械卡滞除外), 列车速度降至6 km/h以下气制动介入, 此时轮对存在滑行可能。防滑控制系统不仅能防止车轮失稳、打滑, 还能充分利用轮轨粘着, 在不擦伤轮对的前提下进行有效的制动控制, 因而直线电机列车同样需要在低速气制动阶段具备防滑保护功能。

本文针对广州地铁5号线自主知识产权列车(采用TKQ601W制动系统)防滑控制系统故障实例, 对控制软件存在的问题进行深入剖析, 并与非自主知识产权列车(采用EP2002制动系统)防滑控制系统进行对比, 提出针对直线电机列车防滑控制软件设计的优化改进建议。

## 1 防滑控制系统逻辑对比分析

广州地铁5号线自主知识产权列车采用TKQ601W

制动系统, 为车控式制动系统, 每节车配备1个制动控制单元(以下简称BCU)箱, 每个BCU箱包含电动控制单元(以下简称EBCU)和气动控制单元(以下简称PBCU)2部分, 每节车的BCU单独组网, 通过MVB总线和列车硬线2种形式完成本单元的气制动控制、主风压力检测、防滑保护, 并与列车控制与管理系统(以下简称TCMS)、牵引系统及其他车辆的BCU进行信息通信。BCU内防滑控制单元(以下简称WSP)完成防滑保护的 control 与管理, 并通过轴端速度传感器、测速齿轮获取列车轮对速度, 进而控制防滑阀(有充风、保压、排风3种状态)、基础制动单元等完成整个防滑保护功能。

广州地铁5号线非自主知识产权列车采用EP2002制动系统, 为架控式制动系统, 每个架配备1个EP2002阀, 包含网关阀(以下简称G阀)、智能阀(以下简称S阀)2种, 每2节车构成1个控制单元, 并随机定义一个G阀作为主G阀, 完成本单元车的气制动控制(从G阀作为备份), 并与列车控制与管理系统、牵引系统及其他车辆的主G阀进行信息通信, 同时控制每个架的从G阀或S阀完成本架气制动控制、主风压力检测、防滑保护等功能。EP2002阀内部已集成WSP防滑控制单元、防滑动作执行阀体等器件, 完成防滑保护的 control 与执行, 并与轴端速度传感器、测速齿轮、供风管路、基础制动单元等器件完成整个防滑保护功能。

TKQ601W制动系统与EP2002制动系统在防滑控制原理上大致相同, WSP通过不同的总线通信形式获取各轴制动速度传感器速度值, 并通过减速度、速度差等判断逻辑对轮对滑情况进行实时监控, 若某根轴出现滑行, 则通过降低对应轴的基础制动单元的气制动力, 从而恢复轮对粘着力, 完成滑行轴的防滑保护功能, 避免擦伤轮对, 但因2种制动系统集成化程度不一, 因而在控制软件逻辑、硬件实现等方面有所区别。防滑控制设计各有特点, 详见表1。

表 1 TKQ601W 与 EP2002 防滑控制系统对比表

项目	TKQ601W 制动系统	EP2002 制动系统
制动控制	车控	架控
防滑控制	轴控	轴控
控制单元	BCU 控制	EP2002 阀 (G/S 阀) 控制
防滑执行单元	制动管路加装防滑阀	直接集成于 EP2002 阀内部
参考速度	一个单元车内 4 根轴速最大值	一个单元车内 8 根轴速最大值
滑行判断 (速差)	轴速低于参考速度大于 2 km/h	轴速低于参考速度超过 15%
滑行判断 (减速度)	常用: 1.89 m/s <sup>2</sup> ; 紧急: 2.28 m/s <sup>2</sup>	约 2.0 m/s <sup>2</sup>
防滑系统故障的应对逻辑	累计排风超过 5 s 后仍未恢复粘着, 则报“防滑系统故障、防滑阀故障”不放弃防滑	累计排风 4 s 或保压 8 s 后仍未恢复粘着, 则放弃防滑以保障安全制动距离

## 2 故障实例剖析

### 2.1 故障调查

广州地铁 5 号线 121122 车正线多次出现“BCU 防滑控制系统故障、BCU 3 轴防滑阀故障”, 检查 05B122 车防滑功能正常, 轮对踏面无擦伤、剥离等异常磨损情况。先后更换该车 3 轴防滑阀、防滑控制 WSP 核心板卡、速度传感器, 并校核涉及硬线连接电路, 故障并未解决。121122 车在平直干燥轨道进行动车试验, 发现列车各轴轴速不一致, 速度差一直存在, 且列车速度越高, 轴速差越大, 当速度超过 80 km/h 左右时, 列车 BCU 启动防滑保护, 如图 1 所示。

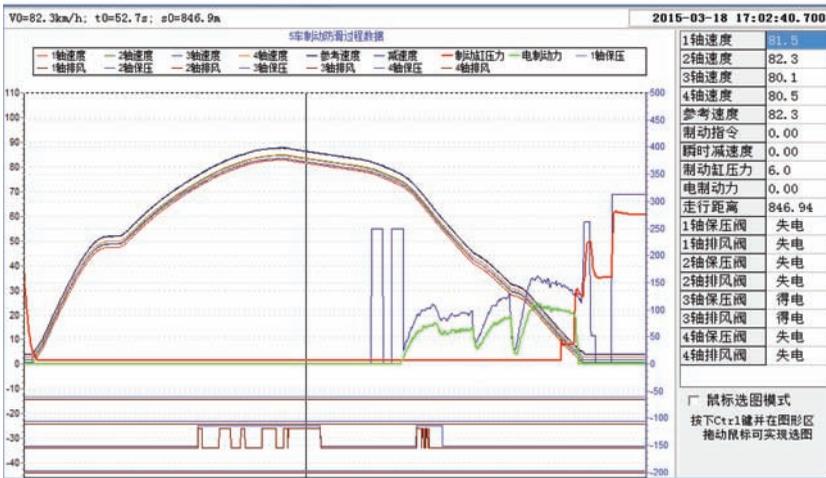


图 1 PTU 维护终端采集的各轴速度曲线图

### 2.2 故障原因分析

列车防滑系统数据表明, 故障时刻 05B122 车 3 轴实际速度为 80.1 km/h, 2 轴实际速度为各轴最大值 82.3 km/h, 因而 BCU 将 2 轴速度作为参考速度。根据防滑控制逻辑, 3 轴速度与参考速度差值为 2.2 km/h, 满足滑行判据, BCU 判断 3 轴发生滑行, 并控制该轴防滑阀执行保压、排风动作, 根据防滑系统故障判断逻辑, 当 BCU 防滑阀排风累计超过 5 s 后, 若仍无法恢复粘着, 则 BCU 判定为列车防滑系统故障、3 轴防滑阀故障, 并由列车 TCMS 对司机进行相应故障警示, 因而 121122 车出现 BCU 防滑控制系统、BCU 3 轴防滑阀故障。

根据制动系统防滑控制软件设计要求, 列车轮对

镟修后, 每节车需输入第 1 轴的实际轮径值作为该节车的参考轮径值。121122 车的轮对镟修后, 将 05B122 车 1 轴镟床测量的实际轮径数据 709 mm 输入 TCMS 并导入制动系统, BCU 根据参考轮径结合该轴角速度, 计算出第 1 轴线速度为 81.5 km/h (以图 1 故障时刻为例), 并经后续试车线调试、正线运行, BCU 根据校准逻辑多次校准同车其余各轴速度, 如表 2 所示。

表 2 05B122 车轮径值及 BCU 各轴速度值

项目	第 1 轴 (参考值)	第 2 轴	第 3 轴	第 4 轴	最大偏差
实际轮径值 /mm	709	703	721	719	18
BCU 各轴轴速 / (km·h <sup>-1</sup> )	81.5	82.3	80.1	80.5	2.2

根据 BCU 防滑软件设计要求, BCU 应具备防滑保护功能, 其中就包括根据参考轮径值, 对各轴线速度进行实时校准。但从表 2 可以看出, 实际上 05B122 车轮对速度并未有效校准, 各轴线速度存在 2.2 km/h 的偏差, 因此怀疑因轮对速度未能有效校准, 且速度差必然长时间存在, 最终引起出现防滑系统故障。

### 2.3 轮对速度自校准功能未落实的论证

根据防滑控制轮对速度自校准设计逻辑, 现自定义触发防滑动作的轴速差阈值为  $V_f$ , 列车参考速度为  $V_c$ , 输入系统参考轮径值为  $L_c$ , 同节车最大轮径为  $L_{max}$ , 最小轮径值为  $L_{min}$ , 假设制动系统未按照参考轮径值的大小对该节车 4 根轴的速度进行校准, 则当列车实际速度超过某一值时, 必然引起轮径差较大的 2 个轮对速度差超过防滑动作触发阈值  $V_f$ , 则应存在下述关系:

$$\left(\frac{V_c}{L_{min}} \times L_c - \frac{V_c}{L_{max}} \times L_c\right) \geq V_f$$

即

$$V_c \geq \frac{V_f \times L_{max} \times L_{min}}{L_c \times (L_{max} - L_{min})}$$

将表 2 所述镟轮数据、TCMS 参考轮径值、防滑动作触发阈值  $V_f=2$  km/h 代入公式可得:

$V_c \geq 79.43 \text{ km/h}$

也即,当列车速度超过 79.43 km/h 后,05B122 车必然出现 3 轴速度与参考速度的差值超过 2 km/h 的情况,引起防滑控制系统误以为 3 轴发生滑行,并启动防滑保护,且该现象将持续超过 5 s,最终引起误报“防滑控制系统故障、3 轴防滑阀故障”。经核查 121122 车多次故障数据,05B122 车启动防滑保护时,列车速度均约 80 km/h,从而验证了上述假设的正确性。

为进一步求证,与 EP2002 制动系统进行对比研究,检查轮对镟修后各轴的速度自校准情况,列车以不低于 20 km/h 的速度连续惰行 30 s 后,BCU 即可将各轴速度差由最大 1.92 km/h 缩校准至 0.05 km/h,后续速度差基本稳定在 0.05 km/h 以内,各轴速度趋于一致,速度自校准功能正常,从而进一步说明 TKQ601W 制动系统轮对速度自校准功能未真正发挥应有的作用,如图 2 所示。

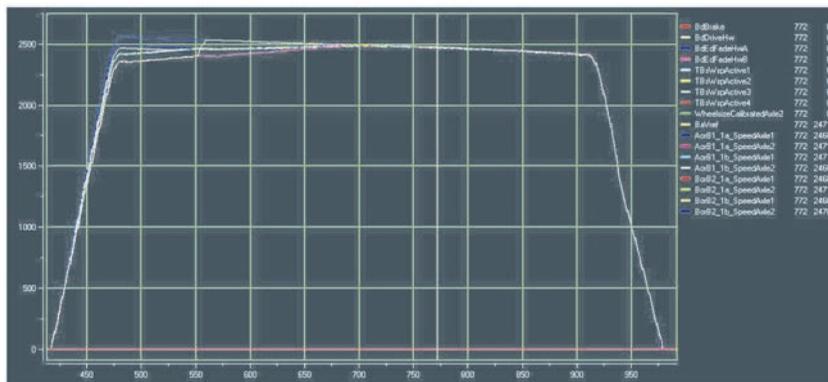


图 2 EP2002 轮对速度自校准

## 2.4 故障改进措施

由以上验证可知,TKQ601W 制动系统软件设计方面存在 2 处缺陷:①直线电机高速电制动阶段轮对应无滑行可能,而 TKQ601W 制动系统在高速电制动阶段,仍启动防滑保护功能,控制防滑阀进行保压、排风动作泄压,此时由于无气制动,正常情况下列车不会出现轮对滑行等问题(轴箱机械卡滞除外),启动防滑保护动作,实则无任何实际意义;② TKQ601W 制动系统轮对速度自校准功能未实现。L 型车在轮对运用标准上有严格要求,同一转向架轮径差不超过 10 mm,同一节车不超过 20 mm,因而结合轮对运用标准设计合理的自校准逻辑是具备可操作性的。BCU 应能根据轮对镟修后的参考轮径值,对各轴线速度进行实时校准,

实际并未真正实现这一功能。因此 TKQ601W 制动系统在轮对速度自校准方面存在设计缺陷。

将上述要求反馈 TKQ601W 制动系统提供商后,经过软件工程师对防滑软件进行修改,装车测试,列车以 35 km/h 的初速度惰行 20 s 后,各轴速度最大差值缩减至 0.05 km/h,自校准效果大有改善,详见图 3。

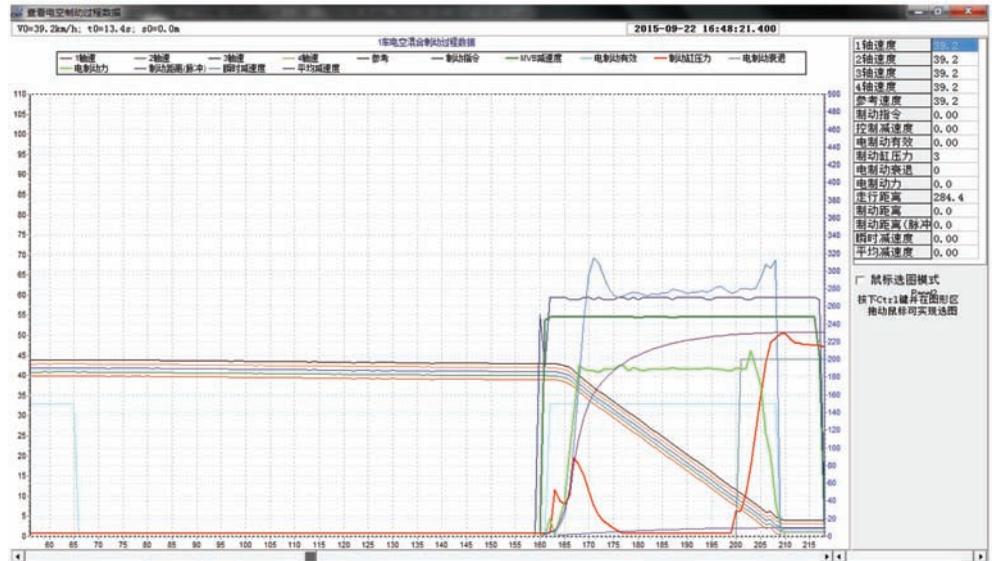


图 3 软件修改后轮对速度

## 3 结语

本文针对直线电机列车高速电制动阶段凭借直线电机与感应板间的电磁力进行电制动,无需依靠轮轨粘着的特性,从广州地铁 5 号线有自主知识产权的 TKQ601W 制动系统防滑软件设计缺陷出发,对直线电机列车防滑控制软件设计逻辑提出如下改进建议:

①直线电机列车高速电制动、惰行工况下,轮对不会产生滑行,防滑控制软件设计时,应取消防滑检测、控制功能,针对轮对机械卡滞等异常情况,可通过 TCMS 对司机进行故障警示,保证车辆

运用安全;

②车辆设计阶段,应根据既有线路轮对运用标准,对制动系统提出明确要求——直线电机列车低速气制动阶段须具有防滑保护功能,防滑系统设计时应充分考虑轮对运用标准,由 BCU 对轮对速度进行有效校准,使得列车各轴线速度保持高度一致。在此基础上进行防滑逻辑设计,同时可以制定相应标准对各轴“同速度”进行考核,保证列车防滑控制系统发挥良好的效果。

## 参考文献:

- [1] 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,2009:207-211.
- [2] 罗庆.广州地铁四号线制动系统防滑保护的应用[J].铁道机车车辆工人,2011(4):1-2.