

宁波轨道交通1号线二期列车滑行故障分析及制动防滑控制软件优化

田凯阳 胡利江 范浩彪 周楠杰 蒲安会

(宁波市轨道交通集团有限公司智慧运营分公司,315101,宁波//第一作者,助理工程师)

摘要 针对宁波轨道交通1号线二期列车在制动过程中的滑行故障数据进行分析,介绍了牵引防滑、电制动防滑和气制动防滑的原理,研究了防滑保护启用后,列车制动距离较长的问题。基于优化后的制动系统软件提高了防滑效率,并最终获得了符合制动距离要求的最优防滑控制软件版本。

关键词 宁波轨道交通;列车制动系统;防滑保护;防滑效率

中图分类号 U260.13⁺8

DOI:10.16037/j.1007-869x.2022.09.023

Skidding Failure Analysis and Braking Anti-skid Control Software Optimization of Ningbo Rail Transit Line 1 Phase II Train

TIAN Kaiyang, HU Lijiang, FAN Haobiao, ZHOU Nanjie, PU Anhui

Abstract The data of Ningbo Rail Transit Line 1 phase II train skidding failure during braking process is analyzed, and the principle of traction anti-skid, electric braking anti-skid and air braking anti-skid is introduced. The problem of long braking distance after anti-skid protection being enabled is studied. Braking system software improves anti-skid efficiency after optimization, and the optimal anti-skid control software version applicable to braking distance requirement is finally obtained.

Key words Ningbo rail transit; train braking system; anti-skid protection; anti-skid efficiency

Author's address Intelligent Operation Branch of Ningbo Rail Transit Group Co., Ltd., 315101, Ningbo, China

制动系统作为城市轨道交通(以下简称“城轨”)车辆系统中的重要组成部分,对城轨的安全运营起到关键作用。制动系统故障是城轨车辆系统中常见的故障,如不明原因紧急制动、制动无法缓解等。分析制动系统故障及其改进处理方法一直是城轨车辆研究的难点。本研究通过对010XX车回库途中的故障情况进行分析,阐述了牵引及制动

系统的防滑原理,并基于优化后的制动系统软件提高防滑效率,为列车的安全运行提供理论基础。

1 故障现象

2019年1月,宁波轨道交通1号线二期010XX列车在存车线回库途中,当列车接近信号机时,司机施加常用制动,车辆发生滑行现象,随后司机按下紧急停车按钮,列车仍未能及时停车,制动距离远大于正常制动距离,导致列车挤岔后停车。回库检查后发现,轮对有轻微擦伤。该车当日作为正线备用车存放于存车线,为首列回库车。回库线路为露天环境,路段为35‰下坡道。回库当日有小雨,晚上回库途中发生上述现象。

2 制动控制逻辑分析

2.1 牵引系统数据分析

列车处于ATO(列车自动运行)模式下,ATC(列车自动控制)于22:01:39发出制动指令,车辆于22:02:23开始滑行,22:02:27结束滑行。随后,车辆恢复黏着系数,ATC制动指令也自动消失。经过计算,ATC认为列车还需加速方可到达目的地,随后ATC发出牵引指令,车辆跟随良好。经过安全导向计算,ATC于22:02:28开始施加制动,由于天气及线路原因,制动系统防滑保护启用,此时列车速度为42.7 km/h,最后列车于22:03:03停车。

列车施加的紧急制动为纯空气制动,于22:02:28开始施加,但列车制动装置并未按紧急制动的标准施加气缸压力,其制动单元气缸压力于22:02:55才开始趋于最大值。根据紧急制动施加标准:制动装置气缸压力需达到紧急制动满负荷压力的90%(动作响应时间加上增压时间 ≤ 1.5 s)方可施加紧急制动。

2.2 制动系统数据分析

制动系统数据显示列车于22:02:32施加快速

制动,随后施加紧急制动,紧急制动减速度为 1.38 m/s^2 。由于轨面湿滑,司机此时施加快速制动,列车制动系统启动防滑保护,频繁通过制动缸的充排气来恢复轮轨的黏着系数。但由于列车各车轴的参考速度并不相同,导致列车不断进行防滑保护。若列车的紧急制动减速度较大,启动紧急制动时将会擦伤轮对。因此,为恢复踏面与轨道的黏着系数,当防滑保护启动后,制动距离变长。防滑保护属车辆正常反应。

3 防滑保护原理说明

3.1 列车防滑保护

防滑保护功能的启用条件有3个:速度差保护、加/减速度保护以及蠕滑速度保护。

1) 速度差保护:比较同一节车的动车(带动力的车)轮对间最大速度差值,根据该差值调整电机黏着力矩设定值,使其在发生空转和滑行时能够迅速恢复轮轨间的正常黏着状态。

2) 加/减速度保护:加速度保护控制是通过检测轮对的加/减速度 a 是否超出设定阈值 a_0 ,并在轮对加速度超出 a_0 时,根据加速度的大小降低电机黏着力矩设定值,以抑制空转和滑行现象。

3) 蠕滑速度保护:通过计算获得本节动车的参考蠕滑速度与当前真实蠕滑速度的差值,根据该差值调整电机黏着力矩设定值,使其在发生空转和滑行时能够迅速恢复轮轨间的正常黏着状态。

4) 典型的防空转/滑行保护曲线:当出现明显的空转/滑行时,防空转/滑行保护将产生作用,输出的典型黏着力矩曲线如图1所示(t_i 为时间, $i=1, 2, 3, 4$)。

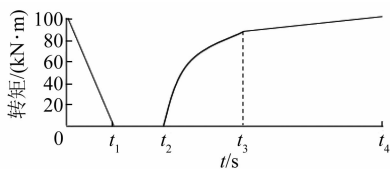


图1 防空转/滑行保护曲线

Fig. 1 Anti-idling/slide protection curve

防空转/滑行保护过程如下:

阶段1:对应图1中的 $0 \sim t_1$ 过程,当检测到加速度或速度差等速度类指标超过阈值后,以较大斜率减载电机转矩;

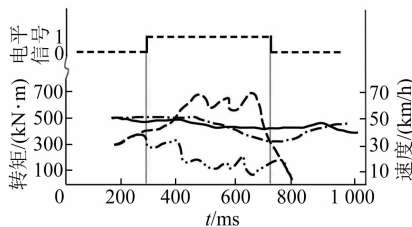
阶段2:对应图1中的 $t_1 \sim t_2$ 过程,相应指标趋于稳定后,维持一段时间的电机转矩恒定不变;

阶段3:对应图1中的 $t_2 \sim t_3$ 过程,当确认相应指标稳定后,开始以指数函数形式恢复电机转矩,呈现出先快速恢复、后慢速恢复的特征;

阶段4:对应图1中的 $t_3 \sim t_4$ 过程,电机转矩恢复到减载前的90%时,开始以非常缓慢的直线斜率方式继续恢复剩余的10%电机转矩。

3.2 列车防滑数据分析

牵引系统记录到的22:02左右的列车滑行数据波形如图2所示。动车速度和列车实际速度之差(即蠕滑速度)超过 3.0 km/h (动车速度为 44.4 km/h ,列车速度为 47.6 km/h),该差值已经超过软件设定的蠕滑保护阈值。通过牵引系统软件对逻辑给定力矩进行调整,使黏着实际力矩小于逻辑给定力矩,同时上报列车处于滑行状态。



注: --- 滑行标志; -.- 列车速度;
—— 本车速度; - - - 逻辑给定转矩;
- - - 黏着实际转矩。

图2 22:02 列车滑行数据波形图

Fig. 2 Waveform diagram of train sliding data at 22:02

4 制动距离计算说明

4.1 制动数据分析

制动维护终端软件中的距离计算有两种,根据轴速脉冲累计数的距离计算方法和对参考速度积分的计算方法。当没有制动滑行时,这两种方法的计算结果基本上是相同的;当有制动滑行时,由于轴速信号及参考速度均可能低于实际列车运行速度,两种依赖轴速传感器信号的距离计算都会发生偏差。010XX 列车制动滑行数据分析及计算结果如图3所示。由图3可知,由两种方法获得的制动

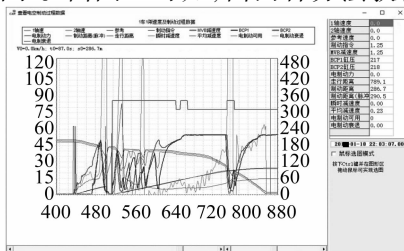


图3 制动数据分析及计算结果截图

Fig. 3 Screenshot of braking data analysis and calculation results

距离分别为 286.7 m 和 290.5 m。

为减小制动滑行对制动距离计算的影响,采用复化梯形软件对记录数据进行分析处理,计算结果如图 4 所示。其中,修正速度为根据各转向架的参考速度最大值并向前反向平滑修正后的数值,修正原则为车辆在制动期间实际车速为减速过程。由图 4 可知,对比修正前后的参考速度,修正后的参考速度曲线已经比较平滑,与实际列车运行速度较为接近。

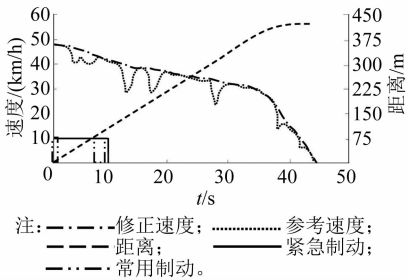


图 4 参考速度及制动距离计算修正

Fig. 4 Reference speed and braking distance calculation correction

不同修正速度的制动时间与制动距离如表 1 所示。由表 1 可知,紧急制动距离为 305.5 m,比修正前计算的制动距离增加了 15.0 m。结合图 3 中的速度曲线可知,这一数据已经很接近实际制动距离了,初步估计距离偏差不会超过±5.0 m。此外,从初始制动到触发紧急制动,列车大约走行了 115.0 m。其中,约有 0.5 s 是没有制动指令的,期间走行了约 16.0 m。

表 1 不同修正速度的制动时间与制动距离
Tab. 1 Braking time and braking distance at different correction speeds

修正速度/ (km/h)	参考速度/ (km/h)	制动时间/s	制动 距离/m	紧急制动 (电平信号)	常用制动 (电平信号)
48.27	48.18	0.6	8.1	1	1
48.28	48.20	0.7	9.4	1	0
42.51	40.19	7.9	100.8	1	0
42.46	40.59	8.0	102.0	1	1
41.96	41.95	9.3	117.0	1	1
42.03	42.03	9.4	118.4	1	0
41.98	41.95	9.8	123.0	1	0
42.02	41.85	9.9	124.2	0	0
0.45	0.22	45.5	428.5	0	0
0.22	0	45.6	428.5	0	0
0	0	45.7	428.5	0	0

4.2 滑行数据分析

从制动记录数据上看,在实施常用制动时,当设定制动减速度增加至约 0.40 m/s² 时,开启电制

动防滑,说明当时的黏着条件已无法满足 0.40 m/s² 的减速度要求,根据当时的列车减速度来估算制动初始黏着系数约为 0.06 以下。

1) Tc1 车(第 1 辆拖车)1 架的滑行数据分析:为防止参考速度出现偏差,Tc1 车 1 轴在连续滑行时采用了延迟恢复制动力措施,虽然损失了部分可用黏着制动力,但有助于 1 轴的速度恢复。由图 5 所示的 Tc1 车 1 架的部分滑行数据可知,Tc1 车 1 轴的速度在滑行后可以基本恢复到列车速度,在黏着恢复阶段,轴速恢复到车辆速度的累积时间约为 5.6 s,所占时间比例大约为 70%。若滑行时的黏着利用率按 100% 计算,黏着恢复阶段的黏着利用率按 60% 计算,则 Tc1 车 1 轴的黏着利用率约为 72%。在恢复 Tc1 车 1 轴制动力过程中,Tc1 车 1 轴的制动气压力还未恢复到 60 kPa 就又开始滑行,制动缸的复位压力(出闸压力)约为 20 kPa,最大常用制动压力取为 220 kPa,由此可估计出 Tc1 车 1 轴的黏着系数在某些时候可能低于 0.02。Tc1 车 2 轴在 8 s 时间内,大部分轴速均低于列车速度,即大部分时间的黏着利用率为 100%,只有约 0.4 s 时间内的轴速接近列车速度。这段时间是制动缸压力较高的一段时间,其黏着利用取为 80%,则 Tc1 车 2 轴的黏着利用为 99%。Tc1 车 1 架的平均黏着利用率按两根轴的平均值计算,则大约为 86%。

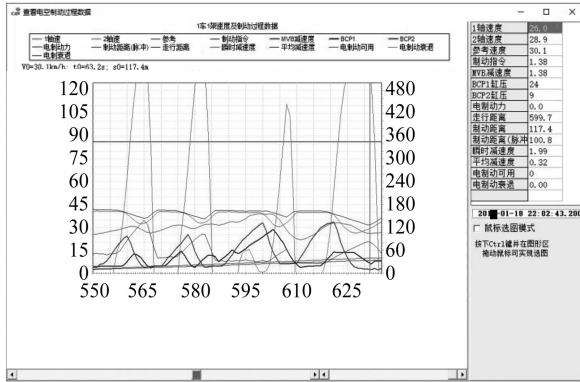


图 5 Tc1 车第 1 个转向架部分滑行数据分析截图
Fig. 5 Screenshot of data analysis of Tc1 vehicle first bogie partial sliding data

2) Tc1 车 2 架的滑行数据分析:若 CAN(控制局域网)网段内轴速最高的车轴被检测到滑行,则优先对 1 轴排风以恢复 1 轴速度。通过查看 Tc1 车 2 架的部分滑行数据,计算出 Tc1 车 2 架的平均黏着利用率约为 98%。

3) Mp1 车(第 1 辆动车)1 架滑行数据分析:通过查看 Mp1 车 1 架的部分滑行数据,计算出该转向架的平均黏着利用率约为 97.5%。

4) 后部车辆滑行数据分析:后部车辆的黏着条件明显优于前部车辆,故在此不进行分析展开。

当实际线路的轮轨黏着低于制动计算时的黏着系数时,制动距离主要由线路的黏着条件及防滑性能决定。从上述滑行数据分析而言,本次制动初始黏着系数低于 0.06,局部短时黏着系数可能降至 0.03 以下,而本次制动过程中的黏着利用率较高,防滑系统的防滑效率在型式试验中亦满足要求。因此,本次制动距离过大主要是由黏着条件差和线路 35‰坡道导致的。当车辆在超出设计的低黏着条件下运用时,还需要从应用管理上采取必要的措施来保证安全。

5 制动防滑控制软件优化

通过对制动防滑控制软件进行优化减小滑行深度,并减少防滑中的充排风频次。制动防滑控制软件优化的内容有:①参照 CAN 网内其他车参考速度的滑行检测,由参考 1 根轴速度改为参考 2 根轴速度;②为使用 CAN 网内其他车的参考速度,优化 CAN 网的通信软件,并增加对其他车参考速度的有效性检查;③为减小充排风频次,增加了根据减速度变化率对停止排风进行保压的控制,同时适当降低慢充风的充风速度。

制动系统软件模拟测试结果验证了所提优化措施对滑行深度减小有明显的效果。优化后的软件于 1 月 30 日和 1 月 31 日在天童庄动调线进行了防滑验证试验。首先,采用直接在轨面上涂抹未稀释减磨液(纯洗涤灵)方式来产生较低的黏着系数,列车各轴均出现了滑行。本次试验中,防滑软件主要对滑行深度进行检测,并利用列车速度对防滑控制逻辑进行优化。

现有软件(V2.5)滑行记录数据如图 6 所示。现有软件版本主要存在以下 3 个问题:①每个架只有第 2 轴会直接利用列车速度进行滑行检测和防滑控制,两个轴同时滑行时,1 轴需要在 2 轴速度恢复后才能检测到滑行;②滑行深度过大,特别是出现 1 个架的 2 个轴同时滑行时,1 轴的速度明显偏低,滑行深度明显比 2 轴要大一些;③速度恢复时充风速度过快,反复滑行和反复充排风量较大。

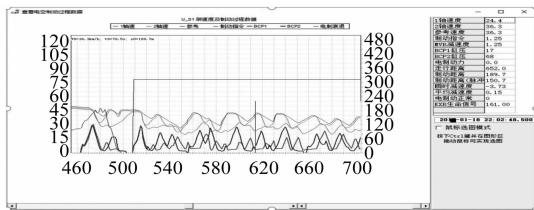


图 6 现有软件(V2.5)滑行记录数据截图

Fig.6 Screenshot of sliding record data in current software (V2.5)

优化软件(V2.9)防滑试验数据如图 7 所示。

从图 7 中可以看出,当 1 个架的 2 个轴同时滑行时,轴速差异明显,较图 6 中的有所减少。在 1 轴和 2 轴连续滑行一段时间后,1 轴和 2 轴的速度几乎同时有一个较大的排风和明显的轴速恢复过程,这是利用制动 CAN 网段内其他几个转向架速度进行滑行检测和防滑控制的结果。由此可见,优化后的软件基本上解决了 V2.5 版本的前两个问题。

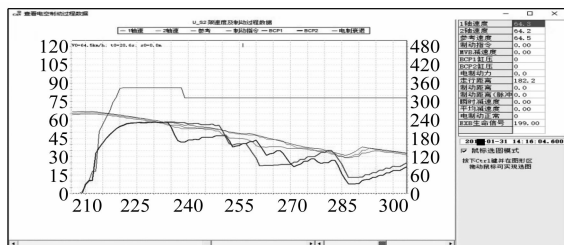


图 7 优化软件(V2.9)防滑试验数据截图

Fig.7 Screenshot of anti-skid test data in optimized software (V2.9)

6 结语

宁波轨道交通 1 号线二期已运营 5 年多,从实际情况看,制动系统基本运营良好。但随着车辆运营里程的增加,制动系统陆续出现一些新故障,这为车辆制动系统故障的分析与处理带来了新的挑战。本文分析了某一列车的滑行故障,对制动控制软件进行了优化设计,为类似制动系统软件的优化和分析提供了一种新思路,具有重要的实践指导意义。

参考文献

- [1] 李江红,陈国华,胡照文,等. 高效抑制机车空转和滑行的卸载新算法[J]. 机电传动,2015(6):6.
LI Jianghong, CHEN Guohua, HU Zhaowen, et al. Deloading algorithm for highly effective suppressing locomotive slip and slide[J]. Electric Drive for Locomotives,2015(6):6.
- [2] 王晓东. 广州地铁 4 号线地铁车辆制动系统[J]. 铁道车辆,2010(11):18.
WANG Xiaodong. The braking system on metro cars for Guangzhou Metro No.4 Line[J]. Rolling Stock,2010(11):18.

(收稿日期:2020-08-03)