

# 上海轨道交通高架区段列车打滑问题研究

魏然之

(上海地铁维护保障有限公司通号分公司, 200235, 上海)

**摘要** [目的] 上海轨道交通高架区段多次出现列车打滑现象。列车打滑时车载信号设备会中断列车信号模式输出, 需要司机手动驾驶列车慢速前进, 以重新建立可用的信号模式。这对各线路运营服务质量影响较大, 因此有必要深入研究打滑原因, 并提出相应的措施。[方法] 通过收集比对列车打滑事件的相关数据, 对列车打滑时所处的季节、温度、天气、时段, 以及信号系统对打滑逻辑的判定、线路坡度及弯道、列车制动方式等因素的影响进行详细分析, 归纳了列车在高架区段出现打滑现象的不利因素, 并针对性地制定了预防措施和改善方案。[结果及结论] 雨雪天气、低温季节、频繁制动、高架线路的大坡度和急弯道, 以及列车盘式制动方式等因素为高架区段列车打滑的不利因素。各不利因素的叠加影响易导致高架区段列车打滑。通过提前设置湿轨模式及特别限速, 能稍微减少列车打滑事件的发生, 但会使列车旅行速度变慢, 应酌情使用。9 号线实际情况表明, 信号系统车载软件算法优化能有效减小列车打滑造成的影响。

**关键词** 城市轨道交通; 高架区段; 列车打滑

**中图分类号** U284.48; U233

**DOI**: 10.16037/j.1007-869x.2024.11.013

## Train Slipping Issues in Elevated Section of Shanghai Rail Transit

WEI Ranzhi

(Telecom & Signal Branch, Shanghai Metro Maintenance Support Co., Ltd., 200235, Shanghai, China)

**Abstract** [Objective] Train slipping incident frequently occurs in elevated sections of Shanghai rail transit. When the train slips, the onboard signaling equipment will interrupt the train signal pattern output, then drivers need to manually operate the train at a slow speed to re-establish a usable signal pattern. This significantly affects the operational quality of various lines, making it necessary to thoroughly investigate the causes of train slipping and propose corresponding measures. [Method] By gathering and comparing data related to train slipping events, a detailed analysis is conducted on factors such as season, temperature, weather, time period, signaling system logic for detecting train slipping, track gradients and curves, and train braking methods. Adverse factors contributing to train slipping incidents in elevated sections are summa-

rized, and targeted prevention measures and improvement plans are formulated. [Result & Conclusion] Adverse factors leading to train slipping in elevated sections include rainy and snowy weather, cold seasons, frequent braking, steep gradients and sharp curves on elevated lines, as well as train disc braking methods. The cumulative impact of these factors can easily cause train slipping in elevated sections. Implementing wet track mode and special speed limits in advance can slightly reduce the occurrence of train slipping, but may slow down the train travel speed and should be used judiciously. The actual situation on Line 9 indicates that optimizing the signaling system onboard software algorithm can effectively mitigate the impact of train slipping.

**Key words** urban rail transit; elevated section; train slipping

在上海轨道交通高架区段, 多次出现列车打滑现象。一旦列车 VOBC (车载控制器) 检测到轮对打滑, 就会根据安全防护逻辑将列车信号模式输出中断, 进而造成同一计轴区段内后续所有列车的 VOBC 设备信号模式不可用 (既列车失去了信号系统的保护), 需要司机手动驾驶列车慢速前进, 并重新建立可用的信号模式<sup>[1-2]</sup>。这就会影响正线高峰时段运营的准点率、清客及 5 min 晚点发生率。随着上海轨道交通对运能和故障恢复时间要求的不断提高, 有必要对全路网高架区段发生的列车打滑问题展开研究。本文将分析打滑的影响因素, 加强预防机制和管控措施以减少打滑出现频次, 优化因打滑造成的列车模式不可用判断机制, 以期减少列车打滑对正线运营的影响。

## 1 全路网列车打滑情况及影响

### 1.1 列车打滑情况

根据信号系统 ATS (列车自动监控系统) 的告警记录, 列车信号模式不可用时都会有“列车打滑”“高速度差异”等告警信息出现。进一步统计可以发现, 整个路网的列车打滑基本都发生在高架区

段,其中上海轨道交通 5、9、11 号线的打滑次数较多,约占全路网列车打滑总数的 90%。

## 1.2 列车打滑影响

当列车正常运行时,VOBC 将测速系统检测到的车头和车尾位置,以及测速系统测量误差形成的位置不确定值报告给 ZC(区域控制器),ZC 据此加上列车时速及时延等信息生成列车包络。列车包络与 NCO(非通信障碍物)示意图如图 1。丢失定位的列车将作为 NCO。NCO 区段是基于其占用的计轴区段而确定的,若要出清 NCO 区段,则需要该列车以 RMF(人工限速向前)模式重新建立定位。一旦有列车成为 NCO,同一计轴区段内后续的正常列车也将受 NCO 影响,其信号模式变为不可用并触发 EB(紧急制动),进而导致受故障影响区域扩大,也影响了正线运营效率。这也正是亟须解决列车打滑问题的主要原因之一。

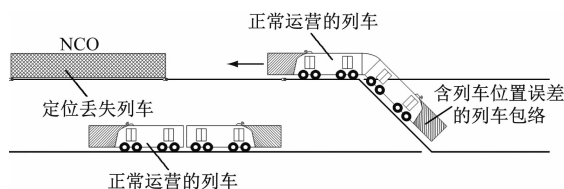


图 1 列车包络与 NCO 示意图

Fig. 1 Diagram of train envelope with NCO (non-communication obstruction)

## 2 列车打滑的因素

### 2.1 信号系统打滑判定逻辑与处理反应

在车载信号系统中,速度传感器和加速度计等列车测速系统的外围设备均与打滑相关。列车速度传感器安装在列车的非牵引轴(1 轴和 4 轴),通过霍尔效应来感应齿轮的转动;加速度计水平安装在列车车厢地板位置,将列车纵向加速度通过电压信号方式输出给 VOBC。VOBC 基于速度传感器和加速度计的数据以测速定位算法对列车位置、速度和加速度进行计算。轨旁 ZC 根据列车汇报位置或计轴检测的位置对列车进行跟踪,并提供进路和间隔防护。

在列车运行过程中,若 VOBC 检测到加速度变化量  $\geq 0.5 \text{ m/s}^2$  或大于最大坡道加速度,或者列车运行速度低于  $5 \text{ km/h}$  时的速度变化量  $\geq 2 \text{ km/h}$ ,或者列车运行速度高于  $5 \text{ km/h}$  时的速度变化量  $\geq 4 \text{ km/h}$ ,即判定为打滑。此时,VOBC 会通过加速度计值的变化来对速度进行补偿。若 VOBC 检测

到打滑持续时间超过  $10 \text{ s}$ (双轮打滑)或  $15 \text{ s}$ (单轮打滑),或相对上一对检测到的信标位置累计误差超过  $20 \text{ m}$  时,则速度补偿超出了加速度计的补偿范围,列车会因打滑而触发 EB,丢失定位信息<sup>[3]</sup>。

总之,VOBC 会根据实时采集的传感器信息,并通过识别模型实时判断列车是否打滑,并判断是对车辆打滑进行调控补偿,还是需要采取导向安全的操作。

### 2.2 列车打滑同天气及时段的关系

由相关统计数据可见:几乎所有的高架段列车打滑故障都是在雨雪天气下发生的,而在非雨雪天气的信号控车过程中未发现明显的列车打滑现象;几乎所有的打滑故障都是发生于气温较低的冬季(当年 11 月至次年 3 月期间)。上海轨道交通部分线路高架区段冬季与其他季节列车打滑次数统计结果见表 1。在雨雪天气下,车轮与轨道黏着力变小是客观存在的,此时列车在制动过程中发生打滑几乎是无法避免的。此外,上海冬季室外湿度较大,轨道表面易形成薄冰与霜冻,这进一步恶化了轨面状况。

表 1 上海轨道交通部分线路高架区段冬季与其他季节列车打滑次数统计结果

Tab. 1 Statistical results of train slipping events in elevated sections of some Shanghai rail transit lines during winter and other seasons

线路	冬季打滑次数占比/%	其他季节打滑次数占比/%
5 号线	99	1
9 号线	100	0
11 号线	93	7

根据对打滑发生时段的统计,雨雪天列车打滑基本集中发生于早晚高峰时段,即高架区段行车间隔最小、行车密度最高的时段。从打滑区域与发生时段来看,在高架区间和地下区间的过渡区域,以及早晚高峰时段,列车的制动动作较频繁。尤其是 9 号线,作为早晚高峰时段行车间隔最小的线路之一,其区间行车密度大,列车积压的情况时常发生。高峰时段 9 号线高架区段的列车分布示意图如图 2 所示。由图 2 可见,9 号线列车间隔很小,若前车有其他问题出现 EB,则会造成后车进路回撤,从而迫使后车减速,进而使得后续列车频繁进行非预期制动,增大列车打滑的概率。而正常情况下,列车在区间运行过程中仅须进站停车制动一次即可。

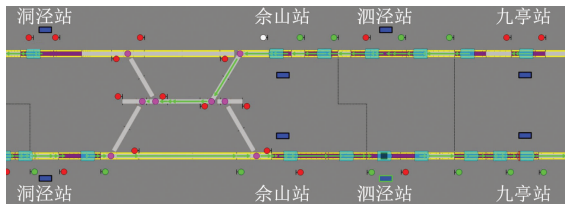


图2 高峰时段9号线高架区段的列车分布示意图

Fig. 2 Diagram of train distribution in elevated section of Line 9 during peak hours

表2 典型线路列车打滑次数与打滑最多处坡度的统计结果

Tab. 2 Statistical results of train slipping events and most occurrence section slopes on typical lines

线路	打滑发生的区间	打滑最多处坡度/%	区间打滑次数占该线路总打滑次数的比例/%
5 号线	颛桥站—北桥站	12,20	50
5 号线	银都路站—颛桥站	9,12	6
9 号线	泗泾站—九亭站	12,27	42
11 号线	陈翔公路站—桃浦新村站	19	40

## 2.4 列车打滑与列车制动方式的关系

根据统计,5 号线打滑列车大多为 05C01 型列车,9 号线的打滑列车中 90% 以上为 09A03 型列车。结合列车频繁的非预期制动更易导致打滑这一结论,推测各车型的制动方式可能会对列车打滑产生影响。

在 5、9 号线,05C01 型列车和 09A03 型列车采用盘式制动,其余车型均为踏面制动。在盘式制动下,车轮踏面没有闸瓦磨刮,不利于改善轮轨黏着条件,因此在轨面湿滑的情况下,更易出现车轮打滑的情况。在踏面制动下,在制动施加过程中的闸瓦摩擦能随时清除车轮踏面的水分和杂物,有利于改善轮轨黏着。可见,盘式制动方式是导致 05C01 型列车和 09A03 型列车更易发生打滑故障的重要原因<sup>[4-5]</sup>。

## 3 列车打滑预防措施及改善方案

由列车打滑原因分析可判定,雨雪天气、低温季节、频繁制动、高架线路的大坡度和急弯道,以及列车盘式制动方式等因素为高架区段列车打滑的不利因素,各因素的叠加影响易导致高架区段列车打滑。对此,本文提出一系列列车打滑预防措施及改善方案。

### 3.1 提前设置湿轨模式及特别限速的预防措施

1) 对于易发生列车打滑的高架区段,维护人员一旦发现轨道湿滑或者有下雨趋势,则应及时通知指挥中心,申请切换至湿轨模式。湿轨模式下,列

### 2.3 列车打滑同轨道坡度及曲线半径的关系

由打滑发生位置的统计可见,列车在高架下坡处更易发生打滑。5、9 及 11 号线等典型线路列车打滑次数与打滑最多处坡度的统计结果如表 2 所示。此外高架上的弯道处也是比较容易发生列车打滑的地点。例如,9 号线泗泾站至余山站下行方向进站前曲线半径仅为 600 m,为急弯道。列车在此发生打滑的次数约占该线路总打滑次数的 30%。

车制动力输出降低,列车制动减速度减小<sup>[6]</sup>。

2) 如果在高架区段行驶的个别列车在湿轨模式下仍发生打滑,则申请该列车在该区段切换至 ATPM(带信号防护的人工驾驶模式),并提醒司机驾驶时注意提前制动,避免急加速、急减速。这可以在一定程度上缓解轮对打滑,防止造成列车信号模式不可用。

3) 针对 9 号线高架区段早晚高峰列车密集、列车打滑发生概率高的情况,为尽量避免受列车打滑影响导致的同一区段内多车晚点,应在大下坡前或进站前等列车打滑常发生区域附近设置特别限速(比如 40 km/h),通过将列车降速点提前使得列车制动更平缓,从而减少打滑概率。

这 3 项措施虽能稍减小打滑发生的次数,但增加了列车的区间运行时间,使列车旅行速度变慢,容易使列车晚点 1~2 min,须根据具体情况斟酌使用。

### 3.2 信号系统车载软件算法优化的改善方案

针对列车打滑后信号模式不可用造成运营影响的情况,对打滑过程中信号系统车载软件算法的防护逻辑进行优化。优化后,在打滑持续 10 s(双轮打滑)或 15 s(单轮打滑)后,出于安全防护的需要,列车会触发 EB,但防护逻辑优化后的列车不会丢失定位信息,并在适当限速后仍能保持 ATPM,仅 ATO 模式不可用。这意味着列车不需要额外花费时间用 RMF 模式寻找定位,缩短了列车重新恢复所需时间。



正常列车与打滑列车的包络对比如图 3 所示。相较于正常列车,打滑列车的位置安全包络范围会扩大。这一扩大安全包络范围由 GEBR(最不利条件下的紧急制动率)计算出的列车最不利位置来确定。在列车发生打滑后,允许其在扩大安全包络范围保护下继续向前移动,并寻找下一个信标重新精确定位,使得相邻的后续正常列车不会因进入其 NCO 区段而导致模式不可用,减小故障发生后的影响。

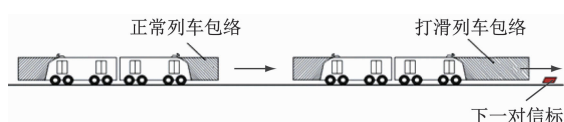


图 3 正常列车与打滑列车的包络对比

Fig. 3 Envelope comparison between normal and slipping trains

在对打滑次数较多和影响比较严重的 9 号线,优化信号系统车载软件。截至 2023 年底,所有优化后列车在 VOBC 检测到列车打滑的情况下,都仅触发 EB 且 ATO 模式不可用,而仍保留了 ATPM 且限速 40 km/h;在列车经过下一对定位信标后立刻恢复了 ATO 模式。由此可见,对信号系统车载软件算法进行优化能大幅缩短列车重新恢复定位所需时间,能有效减小故障影响。优化后,9 号线未发生过由列车打滑引起的 5 min 晚点事件。

## 4 结语

本文通过对上海轨道交通高架区段列车打滑事件的相关数据进行统计分析发现,高架区段列车打滑是在天气、温度、坡道及列车制动方式等综合因素的叠加影响下发生的。通过提前设置湿轨模式及特别限速,能稍微减少列车打滑事件的发生,但会使列车旅行速度变慢,应酌情使用。9 号线的应用情况表明,信号系统车载软件算法优化能有效减小列车打滑造成的影响。未来可在同类项目上推广使用。

## 参考文献

[1] 蔡建峰. 城市轨道交通车辆打滑对信号系统的影响[J]. 城市

轨道交通研究, 2017, 20(增刊 1): 74.

CAI Jianfeng. Impact of train slips on urban rail transit signaling system[J]. Urban Mass Transit, 2017, 20(S1): 74.

[2] 李卫娟, 徐烨. 城市轨道交通列车打滑对 CBTC 信号系统的影响[J]. 城市轨道交通研究, 2015, 18(4): 24.

LI Weijuan, XU Ye. Effect of vehicle slipping on CBTC signaling system[J]. Urban Mass Transit, 2015, 18(4): 24.

[3] 罗载荣. 城市轨道交通 CBTC 信号系统速度浅析[J]. 铁道通信信号, 2014, 50(2): 34.

LUO Zairong. Discussion of urban rail transit CBTC signaling system running speed[J]. Railway Signalling & Communication, 2014, 50(2): 34.

[4] 刘海东, 苏梅, 彭宏勤, 等. 城市轨道交通列车制动问题研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2011, 11(6): 93.

LIU Haidong, SU Mei, PENG Hongqin, et al. Braking performances of urban rail trains[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2011, 11(6): 93.

[5] 王竣, 王开云, 刘建新. 雨雪天气的粘着系数对机车安全性能影响分析[J]. 重庆理工大学学报(自然科学版), 2013, 27(9): 17.

WANG Jun, WANG Kaiyun, LIU Jianxin. Analysis of the influence of adhesion coefficient of rain and snow on locomotive safety performance[J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2013, 27(9): 17.

[6] 刘婧婧, 曲睿. 湿轨可保证紧急制动率值对信号系统安全制动距离的影响[J]. 城市轨道交通研究, 2016, 19(7): 151.

LIU Jingjing, QU Rui. Impact of wet rail GEBR value on safety breaking distance of signal system[J]. Urban Mass Transit, 2016, 19(7): 151.

[7] 张兴旺, 刘佳玲, 闫晓庚, 等. 城市轨道交通车辆防滑保护控制技术[J]. 城市轨道交通研究, 2024, 27(2): 207.

ZHANG Xingwang, LIU Jialing, YAN Xiaogeng, et al. Control technology for anti-skid protection in urban rail transit vehicles[J]. Urban Mass Transit, 2024, 27(2): 207.

· 收稿日期:2024-04-24 修回日期:2024-05-16 出版日期:2024-11-10

Received:2024-04-24 Revised:2024-05-16 Published:2024-11-10

· 通信作者:魏然之,工程师,181672631@qq.com

· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议

© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

欢迎访问《城市轨道交通研究》网站

www.umt 1998.tongji.edu.cn