

某地铁列车追尾事故引发的一些思考

杨艳艳¹, 任迎钱²

¹北京城市轨道交通咨询有限公司, 北京

²北京城建设计发展集团股份有限公司, 北京

收稿日期: 2025年8月23日; 录用日期: 2025年9月13日; 发布日期: 2025年9月25日

摘要

某地铁事故调查显示, 雪天轨道湿滑导致前车信号系统降级并紧急制动停车, 后车因处于下坡区段且在雨天条件下出现制动失效, 最终与前车发生追尾。本文基于事故调查报告, 系统分析了极端恶劣天气对城市轨道交通地面及高架线路运营安全的影响机制, 重点研究了前车信号降级情况下系统响应机制、运营调度措施以及后车制动效能等关键因素对事故链发展的影响。研究结果凸显了在极端气象条件下强化轨道交通系统安全风险评估与防控措施的必要性。

关键词

车辆系统关键参数, 信号系统设计, 湿轨模式, 运营规则

Some Reflections on a Subway Train Rear-End Accident

Yanyan Yang¹, Yingqian Ren²

¹Beijing Metro Consultancy Co., Ltd., Beijing

²Beijing Urban Construction Design & Development Group Co., Ltd., Beijing

Received: August 23, 2025; accepted: September 13, 2025; published: September 25, 2025

Abstract

The subway accident investigation revealed that snowy weather caused track slipperiness, leading to signal system degradation and emergency braking of the leading train. The following train, located on a downhill section with failed braking under rainy day conditions, eventually collided with the leading train. Based on the accident investigation report, this paper systematically analyzes the impact mechanisms of extreme weather on the operational safety of urban rail transit ground and elevated lines. It particularly examines how key factors, including system response mechanisms

during leading train signal degradation, operational dispatching measures, and braking effectiveness of following trains - influence accident chain development. The findings highlight the necessity of strengthening safety risk assessment and prevention measures for rail transit systems under extreme meteorological conditions.

Keywords

The Key Parameters of Vehicle System, Signal System Design, Wet Rail Mode, Operation Rules

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 事故背景与原因

某地铁列车追尾事故中, 雪天导致轨道湿滑是关键因素。前车因信号降级紧急制动停车, 而后车位于下坡地段, 受雪天影响滑行, 未能有效制动, 与前车发生追尾。

2. 安全风险分析

城市轨道交通地面和高架线路的运营安全在极端恶劣气象条件下受到严重影响。事故中, 前车信号降级后, 系统和运营对后车的处理方式及后车的响应有效性成为关键因素。此外, 列车速度、制动系统性能以及轨道条件等也对事故有重要影响。

3. 应对措施与建议

3.1. 限速值设定

运营公司应根据天气预警情况(如红色、橙色、黄色预警)或具体降雨量/降雪量设定不同的限速值。在雪天等恶劣天气下, 应适时延长制动距离、降低列车运行速度, 确保行车安全。同时, 采用轨道加热装置、融雪剂等清理轨道, 定时巡查轨道交通设施设备, 增加安全防护。

3.2. 可保证的紧急制动减速率 GEBR

为保证区间追踪列车的行车安全, 必须研究最不利条件下的紧急制动减速率, 即系统保证在最坏情况下实施最小减速度的紧急制动。当遭遇极端雨雪天气时, 行车轨轨面湿滑、轮轨粘着系数下降, 实际粘着系数小于制动所需要的计算粘着时, 车辆发生打滑, 制动系统的防滑功能将会介入。一旦介入, 防滑功能会逐渐减少列车的制动力, 直到制动力合力小于等于粘着力, 恢复轮轨间的粘着状态为止。在这一过程中, 列车的制动距离和最小紧急制动率无法达到计算预期要求, 因此无法保证列车在正常制动距离内停车[1]。部分车辆厂家采用轨面上增加润滑油, 恶劣天气情况下试验线列车现场测试等措施来验证在轨面的粘着系数下降情况下, 车辆关键参数的确定。

需经过充分实验数据和实践验证得出 GEBR 的最小定值, 以保证数据准确性和系统安全性。在雨雪模式下, 若 GEBR 值不满足设定标准(如 0.6 m/s^2), 信号系统不保证安全, 全自动运行系统应转为人工驾驶。

根据官方调查报告, 发生事故时车辆的平均紧急制动减速度下降到 0.459 m/s^2 , 此时的安全不能由信号系统保证。如果系统的安全由信号来保证, 则车辆输入给信号的此值应该经过充分的验证才能确定输

出, 最终满足极端天气下追踪列车之间的安全间隔。根据某次低粘着条件下的模拟湿滑轨道试验[2], 当制动速度为 61.25 km/h 时, 平均减速度仅为 0.32 m/s²。因此需充分考虑低粘着工况车辆可能达到的最小减速度, 制动粘着与车速成反比, 事发路段最高运行速度达到 80 km/h 以上, 显然是存在很大安全风险的。

列车在干湿轨道上, 理论上平均减速度最大值 $a = \mu g$, 其中 g 取 9.81, μ 为轨道粘着系数。

在城市轨道交通车辆的技术标准中, 粘着系数 μ 的常规取值范围通常设定为 0.14 至 0.16。当该系数值降至 0.13 以下时, 轮轨系统易出现滑移现象。为避免此类异常工况, 行业主流制动系统制造商普遍要求将防滑控制系统的效能维持在 85% 以上的水平, 以此确保制动过程的动态稳定性与运行安全性。对于恶劣工况下, 可以估算出对应的瞬时减速度值。不同的粘着系数对应的减速度值详见表 1。

Table 1. Adhesion coefficient and deceleration value

表 1. 粘着系数与减速度值

粘着系数	制动系统正常瞬时减速度(m/s ²)	粘着分类
0.12	$0.12 * g * 85\% = 1.00$	潮湿轨面
0.10	$0.1 * g * 85\% = 0.83$	潮湿轨面
0.08	$0.08 * g * 85\% = 0.66$	低粘着
0.06	$0.06 * g * 85\% = 0.50$	较低粘着
0.04	$0.04 * g * 85\% = 0.33$	很低粘着

列车安全环路断开时触发紧急制动, 列车响应紧急制动到完全停下来, 对应的平均减速度公式为 $a = v^2/2s$ 。同样速度情况下, 制动距离与减速度值成反比。

信号车载 ATP 子系统与车辆采用继电器接口, 继电器特性及其应用符合中国有关规定, 车载 ATP 设备实现与车辆制动装置的可靠接口, 保证安全和对列车实施连续有效的控制。信号系统确保列车间具有适当的距离, 以保证列车始终能够在地面 ATP 提供的移动授权范围内停下来。

3.3. 牵引和制动限制

进入雨雪模式的列车, 雨雪模式下信号系统采用一种特殊的控车策略, 除了限速、GEBR 值下降, 还限制最大牵引和最大制动不超过 60% (可设定) 的输出。可见如果区间运行的高速列车没有限制最大牵引和最大制动的输出, 将是很危险的事情, 我们是一定要避免这种情况的发生。

采用紧急制动平均减速度计算的列车运行速度必然高于采用 GEBR 值计算的, 在这种设计下, 无法保证整个线路的旅行速度。且某行调工作细则中规定: 组织列车运行图的实施, 遇列车偏离运行图时, 及时调整列车运行, 尽快恢复正点。

雨雪模式下, 信号系统应限制列车的最大牵引和最大制动输出, 确保安全。限速的设定需综合考虑对全线列车旅行速度的影响, 运营公司应制定区别于日常运营的行车间隔。

3.4. FAO 系统雨雪模式提示条件

某工程线路规定: 3 分钟以内, 超过 40% (可设定) 的正线运营车辆, 在不同区域(两个及以上站间, 上下行算不同区域)多次出现转向架空转和滑行状态。事故调查报告中显示“车载信号系统日志表明, 事发当日 17 时至事故发生前, 运行经过西二旗站至生命科学园站上行区间的 35 辆列车中, 12 辆列车出现打滑现象。”[3]按照 40% 列车计算, 还没有达到系统自动进入雨雪模式的限制值。

系统应设置合理的触发条件(如空滑车辆占比),以便及时提示行调员启动雨雪模式。设计方和运营方应优化触发条件的设定值,确保系统对列车打滑或降级运行情况的足够重视。

3.5. 系统设计

轨道交通信号系统和车辆系统在设计时是安全导向的,极端天气是否超过了设计时的能力与条件。即便存在下坡地段、雪天路滑的客观因素,也应在前期进行审慎评估和考虑,尽量采取有效措施避免多重不利因素叠加,导致可能的事故发生。

信号系统应增加更多最不利情况下的场景模拟,设置不同的制动参数。列车紧急制动干预曲线输入信息包括列车车重、空转及打滑、满载率、最坏情况的列车反应时间、系统检测到超速的情况下列车可能的最大加速度、当前列车的即时速度、速度测量的最大误差、列车位置的不确定性、坡度等信息,考虑增加湿滑轨信息、弯道、列车轮径、车辆尾风、冰雪重量等关键线路和车辆参数值,使制动距离更精确。结合当地气候条件、线路敷设方式、线路曲线坡度、列车运行速度等因素分级设置湿轨模式[4] [5]。

根据 TB-T1407-2018《列车牵引计算》标准中的定义如下公式。

单位坡度阻力计算:

单位坡道附加阻力 ω_i 与坡度千分数 i 的数值相等,即:

$$\omega_i = i \quad (\text{单位: N/kN})$$

其中 i 为坡度千分数(如 8‰对应 $i = 8$),上坡时为正值,下坡时为负值。

总坡度阻力计算:

$$W_i = \omega_i * G = i * G \quad (\text{单位: kN})$$

其中各项参数的具体说明如下: G 为列车总重量(单位: kN); ω_i 的单位为 N/kN。

坡道阻力 W_i : 这是我们需要计算的目标值,表示列车在坡道上行驶时所受到的阻力,单位为牛顿(N), (下坡时 $W_i < 0$)。

$$F_{\text{总}} = F_{\text{制动}} + W_i$$

减速度由合力引起,满足牛顿第二定律:

$$a = F_{\text{总}} / M$$

后车下坡时, $W_i < 0$ 实际有效制动力减少,导致减速度不足,制动距离增大。

另外,雨雪模式可以考虑采用点式列车间隔追踪,发车间隔增大,沿线公交将加大运力接驳。发车间隔适当拉大有助于保障车辆运营安全,但雨雪天气下地面交通不便,人们出行的真实需求却要求在这样的天气里加大大地铁频次,民众的地铁出行需求原本就会更多,这又形成了一个矛盾。城市规划和轨道交通建设的问题中,找到发车间隔和极端天气两者的最佳平衡点。

调查报告提到,行调市交通委关于做好轨道交通应对强降雪运输服务保障工作中明确:“积极排查,消除隐患:行车安全方面,在首列车出现打滑情况后,司机立即上报行车调度员,行车调度员第一时间安排后车司机转换手动驾驶模式通过易打滑区段,降低打滑风险”。[3]列车区间运行出现打滑情况时,信号和车辆的人机显示终端上有报警提示,ATS 应能显示线路区段湿轨模式设置状态,以便行调人员采取及时通知司机手动驾驶模式低速通过易打滑区段的具体措施。另外,系统应能根据车辆打滑情况,判断达到启动条件后自动提示,经人工确认进入湿轨模式,还应支持人工操作进入湿轨模式[4]。

3.6. 运营规则与应急预案

某行车调度工作细则明确:“当运行线路发生堵塞时,行车调度(或通知车站综控员)及时采取扣车措

施, 迫停同一站间区间列车数量不得超过图定数量的 2 列”。[3]调度人员需要严格根据规章制度对列车执行扣车和放行操作, 从人工干预的角度保证列车的运行安全间隔。

运营方应增加二次防护对区间临时停车的管理, 确保列车运行安全间隔。地铁调度指挥中心应针对极端天气制定相应的应急预案, 包括设置临时限速、提升安全等级等措施。

某线路列车操作规程中明确“列车在地面线(含高架线)区段运行, 遇极端天气时, 司机应停止使用自动驾驶模式, 加强瞭望, 提前制动, 适当延长制动距离防止行车事故的发生”。[3]

列车出现打滑情况时, 司机应立即上报并采取手动驾驶模式通过易打滑区段。

极端恶劣天气对城市轨道交通运营安全构成严重威胁。加强安全风险分析、优化系统和运营规则、制定应急预案是防止类似事故再次发生的关键。未来应继续深入研究极端天气下的列车运行安全问题, 提升城市轨道交通系统的整体安全性能。

本文主要从系统层技术角度和运营管理方面考虑了避免追尾事故的防护防范措施和建议。

参考文献

- [1] 邓洁. CBTC 系统安全制动模型中的可保证紧急制动率确定方法研究[J]. 铁道通信信号, 2021, 57(9): 64-69.
- [2] 段继超, 高小波, 王伟波. 城轨车辆低粘着条件下紧急制动减速率研究[J]. 机车电传动, 2015(5): 50-52.
- [3] 北京地铁昌平线“12·14”列车追尾事故调查报告[EB/OL].
<https://yjglj.beijing.gov.cn/attach/0/%E5%8C%97%E4%BA%AC%E5%9C%B0%E9%93%81%E6%98%8C%E5%B9%B3%E7%BA%BF%E2%80%9C12%C2%B714%E2%80%9D%E5%88%97%E8%BD%A6%E8%BF%BD%E5%B0%BE%E4%BA%8B%E6%95%85%E8%B0%83%E6%9F%A5%E6%8A%A5%E5%91%8A.pdf>, 2025-06-15.
- [4] 国家铁路局. TB/T 3598.2-2024《市域(郊)铁路列控系统技术要求》第 2 部分: CBTC 系统[EB/OL].
<https://hbba.sacinfo.org.cn/stdDetail/68c27b43dd367dd891603ab37878d44672880b128d835545726619bd16ec77e4>, 2024-07-04.
- [5] 交办运[2024]70 号 城市轨道交通全自动运行系统运营技术和管理规范[EB/OL].
https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202501/content_6996681.htm, 2024-12-26.