

信号系统中车载ATP湿轨模式的实现方法研究

杨迪飞 吴 亮

通号城市轨道交通技术有限公司 北京 100160

摘 要：针对地铁露天路段雨雪天气下轨面摩擦系数降低引发的行车安全问题，本文研究信号系统中车载ATP湿轨模式实现方法。设计湿轨一档与湿轨二档两级参数，明确与原轨道限速“取低”逻辑；构建ZC与MMI双路径指令输入机制，制定指令优先级判定规则，确立列车停稳后模式生效机制。通过仿真验证，该方法可准确适配不同天气下轨面状态，保障列车运行安全，为露天路段地铁信号系统优化提供技术参考。

关键词：车载ATP；湿轨模式；信号系统；限速控制；指令判定

引言

城市轨道交通露天路段在雨雪天气中，轨面摩擦系数会大幅下降，导致列车制动力传导延迟，易引发车辆超速、刹车不及时等安全隐患。车载ATP作为保障列车安全运行的核心系统，传统模式下无法动态适配湿轨环境参数，难以满足特殊天气下的安全防护需求。地铁因露天路段占比高，受此类问题影响尤为明显^[1]。基于此，本文以为研究对象，探索车载ATP湿轨模式的实现路径，通过优化指令输入、判定及生效机制，提升湿轨条件下列车运行的安全性与稳定性，填补现有信号系统在湿轨环境适配方面的技术空白。

1 车载ATP湿轨模式的核心实现方法

1.1 湿轨模式指令输入机制

车载ATP湿轨模式的指令输入设计为双路径并行架构，分别通过区域控制器（ZC）与司机人机交互界面（MMI）完成指令传输，两种输入方式各有明确的操作流程与功能定位以保障指令传输的完整性与可靠性^[2]。

ZC作为轨道区域管理的核心设备，与车载ATP通过车地网络建立实时通信连接，能够根据轨面天气状况动态发送湿轨指令。在实际操作中，ZC会持续采集露天路段的天气相关数据，结合预设的判断标准生成对应的湿轨指令，这些指令具体分为无湿轨、湿轨一级、湿轨二级三类，每类指令都承载着不同天气条件下对列车运行参数的调整需求。生成的指令会以固定的报文格式通过网络实时发送至车载ATP，ATP在接收报文后会先进行解析操作，若解析结果符合规范则将ZC发送的湿轨指令准确记录至系统内部存储模块，为后续模式判定提供数据支撑。司机人机交互界面（MMI）则作为手动输入路径，为司机提供直接操作的接口以应对特殊天气情况或设备异常场景。MMI界面上设置有专门的湿轨模式操作区域，包含湿轨一级、湿轨二级、取消湿轨三种指令选

项，覆盖了列车在不同湿轨状态下的操作需求。

1.2 湿轨模式指令优先级判定逻辑

车载ATP在获取ZC与MMI发送的湿轨指令后，会按照预设的判定逻辑对两类指令进行综合分析，最终确定系统采用的湿轨模式，整个判定过程严格遵循安全优先原则，同时充分考虑指令的时效性与合理性。当系统仅接收到ZC发送的指令而无MMI指令时，会直接将ZC指令作为最终的湿轨模式依据。这种情况常见于轨道旁监测设备正常运行、天气状况能够被准确监测且覆盖范围较广的场景，此时依赖ZC的自动指令能够实现对湿轨模式的及时调整，无需司机额外介入操作。若系统仅接收到MMI发送的有效指令，且不存在ZC指令输入时，则以MMI指令作为最终的湿轨模式判定结果^[3]。该情况多发生在ZC设备出现故障无法正常发送指令，或局部路段出现特殊天气变化而未被整体监测系统捕捉到的场景，司机通过现场观察手动输入指令，能够及时弥补自动监测系统的不足，保障列车在特殊情况下仍能按照合适的湿轨模式运行。

当ZC和MMI均出现湿轨指令时，取二者中限速更严格的一方作为最终湿轨的限速。同时，ZC和MMI的湿轨指令是相互独立的，任意一方取消或输入湿轨模式时，不影响另一方的湿轨状态。

1.3 湿轨模式生效触发与状态切换机制

车载ATP确定最终的湿轨模式（假设为A模式）后，并不会立即执行模式切换操作，而是需要等待列车停稳这一特定条件满足后，最新设置的湿轨模式A才会正式生效，这种生效机制能够有效避免列车在运行过程中因模式突然切换导致的运行状态不稳定问题。当车辆前一时未进入湿轨模式，且在运行过程中设定了湿轨A模式时，系统会在人机MMI界面显示“预进入湿轨模式”的提示信息，此时列车仍按照当前的非湿轨模式参数运

行,司机能够通过界面提示提前了解即将到来的模式变化,做好相应的操作准备^[4]。当列车运行至站点或其他位置停稳后,系统会立即执行模式切换操作,使列车进入A模式,同时在MMI界面更新显示列车当前所处的“A模式”状态,让司机能够清晰掌握列车的运行模式信息。

2 车载 ATP 湿轨模式功能验证与效果分析

2.1 仿真验证环境搭建

为全面检验车载ATP湿轨模式实现方法的实际运行效果,搭建的仿真验证环境需完整复现地铁露天路段的轨道特性、列车运行参数及信号系统交互逻辑。环境核心模块包含轨道仿真单元、列车仿真单元、信号系统仿真单元与数据采集单元,各单元通过专用通信接口实现数据实时交互。轨道仿真单元依据露天路段实际工程数据,模拟包含最高限速80km/h区间的线路场景。列车仿真单元基于现役列车的性能参数,还原列车在不同模式下的速度控制、制动响应特性,确保仿真过程中列车的加速、减速曲线与实际运营状态一致。信号系统仿真单元则分别搭建ZC仿真模块与MMI仿真界面,ZC仿真模块可模拟不同天气条件下的指令生成与发送流程,MMI仿真界面完全复刻实际列车上司机操作的界面布局与交互逻辑。数据采集单元会实时记录仿真过程中的关键数据,包括ATP接收指令的时间、模式判定结果、列车实际运行速度、减速度及MMI界面显示状态,为后续验证结果分析提供完整的数据支撑。

2.2 关键场景验证与结果分析

在搭建好的仿真验证环境中,针对实际运营中可能遇到的典型场景设计验证方案,每个场景均重复测试3次以确保结果的稳定性。

仿真工况介绍:

对于图1:车辆行驶在限速80km/h的区段,20s时ZC因天气原因,向ATP输入了湿轨二档模式,但是车辆在行驶过程中未停车,所以限速没有立刻发生变化,等到30s后,车辆停车,限速变为湿轨二档,人机界面显示黄色雪花,如图1所示。限速变为72km/h。车辆再次启动时,加速度变成 0.4m/s^2 ,如图3所示;



图1 湿轨二档,人机显示黄色雪花

对于图2:车辆行驶在限速80km/h的区段,20s时ZC因天气原因,向ATP输入了湿轨二档模式,但是司机接到了最新指令,由于ZC湿轨模式设置异常,无法修改湿轨模式,因此由人机MMI设置湿轨一档模式,但是车辆在行驶过程中未停车,所以限速没有立刻发生变化,等到30s后,车辆停车,人机界面显示红色雪花,如图2所示。限速变为47km/h。车辆再次启动时,加速度变成 0.4m/s^2 ,如图3所示;



图2 湿轨一档,人机显示宏色雪花

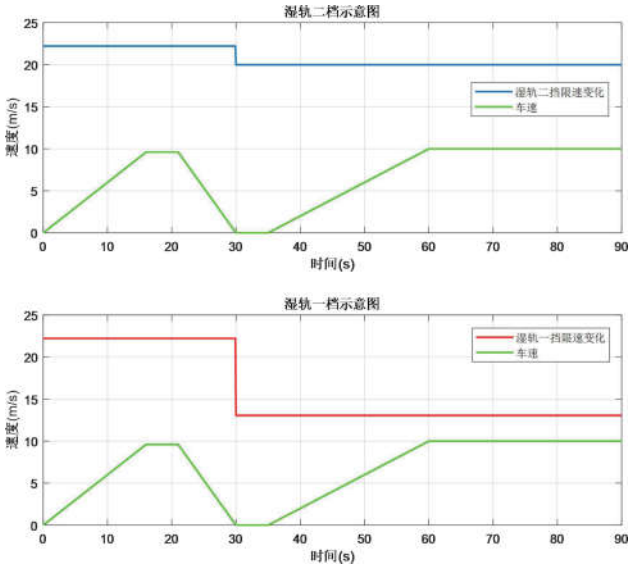


图3 湿轨状态示意图

验证了误操作防护机制的有效性以及湿轨模式处理的正确性^[5]。

2.3 安全性与可靠性评估

从安全性角度评估,湿轨模式在仿真验证中展现出多层防护能力。当列车处于湿轨模式运行时,若因异常情况导致实际速度超出轨道最终限速时,ATP会立即触发紧急制动,能够有效规避超速风险。在指令通信可靠性方面,通过ZC与人机MMI双输入模式,增加了湿轨模式对于特殊情况的应急方案。当ZC指令出现异常时,地面会引导司机介入控制,保障指令传输的正确性。此外,对仿真过程中记录的100次指令传输数据进行分析,ATP对ZC指令与MMI指令的解析成功率均达到100%,模式判

定结果与预设逻辑的一致性也达到100%，未出现判定错误或模式切换异常的情况，表明该湿轨模式实现方法在实际运营中能够为列车安全运行提供稳定可靠的技术支撑。

3 车载 ATP 湿轨模式优化方向探讨

3.1 未来发展方向

当前车载ATP湿轨模式主要依赖人工根据天气变化判断是否进入湿轨模式，尚未实现轨面状态的自动感知与动态适配，未来可从以下两方面推动技术升级：

一是构建轨面摩擦系数自动监测与指令下发体系。计划在ZC系统中集成轨面摩擦系数监测模块，通过轨道旁部署的激光传感器、压力传感器等设备，实时采集露天路段轨面摩擦系数数据，替代当前“天气-模式”的间接判断逻辑。监测模块会将采集到的摩擦系数数据与预设阈值进行比对，自动生成对应的湿轨指令（如摩擦系数 < 0.25 时触发湿轨二档、 $0.25-0.35$ 时触发湿轨一档），并通过车地通信实时下发至车载ATP，无需人工介入即可完成模式切换准备，大幅减少人为判断的延迟与误差，提升指令响应的及时性与精准性。

二是建立自适应限速参数体系。突破当前两级固定参数的局限，基于轨面摩擦系数与列车制动性能的关联模型，构建“摩擦系数-顶棚速度-减速度”的动态映射关系。例如，当摩擦系数从 0.3 降至 0.2 时，顶棚速度可通过插值算法从 72km/h 平滑调整至 47km/h ，减速度也可根据摩擦系数变化进行微调，避免固定参数导致的“过度限速”或“防护不足”问题。该体系可实现限速参数随轨面状态的实时适配，在保障安全的同时最大化列车运行效率，尤其适用于雨雪强度波动较大的复杂场景。

3.2 功能优化建议

针对现有局限性可从三方面提出优化建议。在指令预判能力提升上，可在ZC系统中加入基于历史气象数据与实时卫星云图的天气预测模块，通过分析过往3年露天路段的雨雪天气变化规律，建立短时间尺度（10-15分钟）的天气突变预测模型，当模型判定即将出现强降雨、暴雪等极端天气时，提前向ATP发送“预湿轨指

令”，使系统在天气实际影响轨面前进入准备状态，缩短响应延迟至1分钟内。在司机交互体验优化上，可对MMI界面进行升级，增加声光双重提示功能，当湿轨模式状态变化时，除文字显示外，同步触发低频蜂鸣与界面背光颜色变化（如湿轨模式生效时背光变为黄色），并在倒计时剩余10秒时增加闪烁提示，避免司机因繁忙错过操作。在模式参数动态调整上，通过插值拟合的方式，将限速变为随着轨道摩擦系数变化而动态变化，既保证运行效率，也能保证行驶安全性。

结论

本文围绕地铁车载ATP湿轨模式实现展开研究，形成一套完整的技术方案。通过设计两级湿轨参数体系，解决不同雨雪强度下轨面摩擦系数与列车控制参数的适配问题；双路径指令输入机制与优先级判定规则，确保指令传输的可靠性与模式选择的安全性；列车停稳后生效机制，避免运行中参数突变引发的风险。仿真验证结果表明，该方案可实现湿轨模式的精准控制，指令解析成功率与模式判定一致性均达100%，能有效规避湿轨条件下的行车安全隐患。后续可通过完善天气预判功能与动态参数调整，进一步提升系统适配性，为城市轨道交通露天路段信号系统升级提供实践依据。

参考文献

- [1]嵇道君,付金,黄轩滔.基于车载信号系统的重载列车自动驾驶技术研究与实践[J].电力机车与城轨车辆,2025,48(01):95-102.
- [2]罗运真,朱志伟.城轨信号系统更新工程中车载设备改造技术方案研究[J].铁道通信信号,2025,61(01):85-91.
- [3]倪智豪.适用于列车自主运行系统的信号系统全冗余车载架构[J].城市轨道交通研究,2024,27(11):129-132.
- [4]弓行,佟通,王玉和.地铁信号系统车载B系列欧标继电器的故障分析及优化维修策略探讨[J].机电信息,2023,(10):72-75.
- [5]戴卫超.市域铁路车载信号系统正线调试方案研究[J].铁道建筑技术,2023,(01):113-