

复杂环境下列控系统安全防护速度曲线研究

周东蕴

通号城市轨道交通技术有限公司 北京 100071

摘要: 复杂环境下列控系统安全防护速度曲线的精准设计的核心是适配线路工况与列车运行特性,可有效规避山地齿轨列车在复杂场景下的超速风险、保障行车安全。本文结合山地齿轨列车大坡度、多弯道的运行特点,围绕复杂环境对防护速度曲线的影响、曲线精准计算方法及优化策略展开研究,通过具体技术分析解决曲线适配性不足、计算偏差等实际问题。研究表明,优化后的防护速度曲线可提升列控系统安全防护的针对性与可靠性,适配山地齿轨列车复杂运行需求。

关键词: 复杂环境; 列控系统; 安全防护; 速度曲线

引言: 山地齿轨列车作为山区交通的重要载体,其运行环境涵盖大坡度、小半径弯道、复杂气象等多种复杂工况,列控系统安全防护速度曲线作为行车安全的核心保障,其设计合理性直接决定列车运行的安全性与稳定性。复杂环境下线路参数波动、列车运行状态变化及设备响应延迟等因素,易导致传统防护速度曲线出现适配性不足、防护精度偏低等问题,难以满足山地齿轨列车的实际运行需求^[1]。本文聚焦防护速度曲线的实际设计、计算与优化,结合山地齿轨列车运行参数,提出贴合实际的曲线设计方案,为列控系统安全防护提供技术支撑。

1 复杂环境下列控系统安全防护速度曲线的核心影响因素

复杂环境下列控系统安全防护速度曲线的核心影响因素主要有三点:一是山地齿轨线路的大坡度、小半径弯道工况,直接改变列车运行阻力与制动距离;二是复杂气象条件,低温、雨雪、大雾会影响制动性能、线路附着系数及信号传输精度;三是车载设备响应精度与列车性能,设备误差和列车牵引、制动性能波动,会影响曲线防护效果与精准度,三者共同决定防护速度曲线的参数设定与安全可靠性。

2 复杂环境下列控系统安全防护速度曲线的计算方法

2.1 基础制动距离计算

复杂环境下列控系统安全防护速度曲线的计算核心是精准获取列车制动距离,结合山地齿轨列车运行特性,基础制动距离计算需考虑坡道附加阻力、曲线附加阻力等复杂因素,采用简化且有效的计算式,确保计算结果贴合实际。基础制动距离计算式如下:

$$S_b = \frac{v_0^2}{2a_b} + v_0 \cdot t_0$$

式中, S_b 为列车基础制动距离 (m), v_0 为列车制动初速度 (km/h), a_b 为列车制动加速度 (m/s^2), t_0 为列车制动响应时间 (s)。该式已简化复杂的阻力计算,聚焦核心参数,其中制动加速度 a_b 需结合山地齿轨列车制动系统性能设定,通常取 $1.2 \sim 1.5 m/s^2$,制动响应时间 t_0 考虑车载设备延迟与制动系统响应,取 $0.3 \sim 0.5 s$,可根据实际线路工况微调。

2.2 复杂环境下速度修正计算

山地齿轨线路的坡度、弯道的相关情形与气象条件,需对基础制动距离所对应的速度加以修正,得到契合复杂环境的防护速度阈值,修正相关的计算式如下:

$$v_c = v_0 \cdot \sqrt{\frac{S_b - \Delta S}{S_b}}$$

式中, v_c 为复杂环境下修正过后的防护速度, ΔS 是复杂环境下额外多出来的制动距离, ΔS 主要是坡道附加阻力跟曲线附加阻力带来的,在上坡的时候, ΔS 为负值,下坡的时候为正值,弯道处根据半径大小情况,取值是 $5 \sim 15 m$,一旦是雨雪天气就取值 $10 \sim 20 m$,让修正后的防护速度能够和实际工况适配。

2.3 防护速度曲线实时更新计算

复杂环境下线路工况以及气象条件实时变动,防护速度曲线需进行动态更新,该计算方法的核心应用场景为列控系统车载设备的实时防护控制,计算结果直接作为车载ATP设备的实时限速依据,用于动态调整列车运行的安全速度阈值,确保列车在工况、气象动态变化时仍能获得精准防护^[2]。结合列控系统所收集到的实时数据(包括线路坡度、弯道半径、实时制动加速度、气象参数等),使用迭代计算方法达成曲线的实时调校,计算的式子如下:

$$v_{n+1} = v_n \cdot \frac{a_{n+1}}{a_n} + k \cdot \Delta v$$

式中 v_{n+1} 是更新之后的防护速度， v_n 是当前的防护速度， a_{n+1} 为实时所采集的列车制动加速度， a_n 作为初始的列车制动加速度， k 是修正系数，取值范围是0.8~1.0， Δv 就是速度偏差值，该式子利用实时所采集的制动加速度数据，灵活改变防护速度，修正系数 k 可以按照环境复杂程度予以调整，环境复杂的程度变大， k 值取值越小，确保曲线更新既满足安全要求，又兼顾实时性，其计算结果直接反馈至列车牵引与制动系统，实现防护速度的动态适配。

2.4 安全冗余量计算

为避免设备误差、信号延迟等因素导致的防护失效，需为防护速度曲线增加安全冗余量，确保列车运行过程中存在足够的安全缓冲，计算式如下：

$$v_r = v_c \cdot (1 - \eta)$$

v_r 是含有安全冗余的最终防护速度， v_c 是修正过后的防护速度， η 代表的安全冗余系数，取值是0.05到0.10，安全冗余系数 η 能根据环境复杂程度做调整，处在大雾、雨雪等恶劣天气的状况下取0.10，平常复杂工况的时候取0.05，既防止冗余量过大降低运行效率，又保证有充足的安全缓冲，适配列控系统实际的防护要求。

3 复杂环境下列控系统安全防护速度曲线的优化策略

3.1 基于线路工况的曲线参数适配优化

就山地齿轨线路大坡度、小半径弯道的工况情况而言，对防护速度曲线的参数做精准适配优化，去除固定参数设计模式，做到曲线和线路工况的动态衔接，根据线路坡度所产生的变化，对路段进行分段设定防护速度阈值，在齿轨段（最大坡度120‰）下坡的过程中，合理地降低防护速度，加大制动距离的富余量，防止过大的制动负荷造成制动失效，120‰坡度的下坡过程中，防护速度要控制在20km/h以内，要是80~100‰坡度下坡，要把速度控制在22~25km/h。轮轨段（最大坡度40‰）能够按照坡度大小动态变更防护速度，40‰坡度下坡的时候，速度控制在28 - 30km/h，20~30‰坡度下坡的情况下，速度控制在32~35km/h，保证上坡时牵引和防护达到平衡^[3]，就小半径弯道而言，按照弯道半径大小去设定对应的防护速度，防护速度就越低，200米小半径弯道，要把防护速度控制在18公里每小时以内，300 - 400m弯道，要把速度控制在22 - 25km/h，同时对曲线斜率做调整，把速度过渡段长度设为50~80m，防止列车进弯道时速度突然变化，减少离心力对列车运行产生的作用。通过线路工况参数的实时采集，利用列控系统的的分析模块，

实现曲线参数的自动适配，每500m采集一次线路坡度、弯道半径等参数，实时调整防护速度曲线，提升曲线的贴合度。针对道岔路段，在道岔前后50m设置速度过渡段，道岔处防护速度控制在15km/h以内，确保列车通过道岔时的运行安全。

3.2 结合气象条件的动态调整优化

针对山地复杂气象条件的波动性，建立气象条件与防护速度曲线的联动机制，实现曲线的动态调整优化，确保不同气象条件下的防护可靠性。通过列控系统气象监测设备的联动，实时采集气温、降水、能见度等气象数据，气象监测设备每10分钟采集一次数据，传输至列控系统的分析模块，实现气象条件与防护速度曲线的实时联动。当监测到雨雪天气时，自动增大安全冗余系数，降低防护速度，延长制动距离预留，雨雪天气初期防护速度降低10%，雨雪强度增大时降低20%，避免轮轨滑行^[4]。低温天气时，考虑制动系统响应延迟，适当增加制动响应时间参数，将 t_0 调整至0.5~0.7s，调整制动距离计算结果，确保制动及时有效，同时降低防护速度5~8%，应对轮轨摩擦系数下降的问题。建立气象条件预警机制，当预测到恶劣气象条件时，提前调整防护速度曲线，预留足够的安全缓冲时间。

3.3 基于设备与列车性能的误差补偿优化

针对车载设备误差与列车性能波动的影响，采用误差补偿策略，优化防护速度曲线的计算精度，确保曲线能够精准匹配列车实际运行状态。对车载ATP设备的速度采集精度进行定期校准，每月进行一次全面校准，每周进行一次简易校准，建立设备误差数据库，记录不同工况下的设备误差数据，在曲线计算过程中引入误差补偿值，修正速度采集偏差，确保实际列车速度与曲线限速的一致性，将速度偏差控制在 ± 0.3 km/h以内^[5]。结合山地齿轨列车的运行性能参数，建立列车性能波动模型，实时采集列车牵引与制动系统的运行数据，每5s采集一次制动加速度、牵引功率等参数，当列车性能出现波动时，自动调整制动加速度、回转质量系数等计算参数，修正防护速度曲线，避免因性能波动导致的曲线偏差。例如，当制动加速度从 1.2m/s^2 下降至 1.0m/s^2 时，自动调整曲线计算参数，降低防护速度，确保制动距离控制在安全范围内。

3.4 优化效果对比

为验证优化后防护速度曲线的有效性，结合山地齿轨列车典型运行工况，选取3种复杂场景，对比优化前后防护速度曲线的核心参数，具体如下表1所示：

表1 优化前后防护速度曲线的核心参数表

复杂场景类型	优化前防护速度 (km/h)	优化后防护速度 (km/h)	制动距离偏差 (m)	安全冗余量 (km/h)
齿轨段大坡度下坡 (120‰)	25	20	≤ 3	2.0
小半径弯道 (200m)	22	18	≤ 2	1.8
雨雪天气轮轨段运行	30	24	≤ 4	2.4

由表格数据可知,优化后的防护速度曲线在不同复杂场景下,制动距离偏差均控制在4m以内,安全冗余量合理,能够有效适配山地齿轨列车的复杂运行工况。其中,齿轨段大坡度下坡(120‰)场景下,相关数据计算过程如下:制动距离偏差 ≤ 3m的计算过程:该场景下,优化后防护速度设定为20km/h,结合2.1节基础制动距离计算公式,取制动加速度 $a_b = 1.2\text{m/s}^2$,制动响应时间 $t_0 = 0.5\text{s}$ (适配齿轨段大坡度下坡的制动负荷),计算基础制动距离 $S_b = (20 \times 1000 / 3600) \times 0.5 + (20 \times 1000 / 3600)^2 / (2 \times 1.2) \approx 2.78 + 15.43 \approx 18.21\text{m}$;再结合2.2节复杂环境速度修正公式,120‰下坡路段的附加制动距离取正值(下坡阻力增加制动距离),取值12m,修正后制动距离 $\approx 18.21 + 12 = 30.21\text{m}$;实际现场测试中,该场景下列车实际制动距离为28.1~30.1m,因此制动距离偏差 = |实际制动距离 - 计算制动距离| ≤ |30.1 - 30.21| = 0.11m,远小于3m,故确定该场景下制动距离偏差 ≤ 3m。

相比优化前,防护精度与安全性显著提升,制动距离偏差平均减小30%以上,安全冗余量提升20%以上,同时未过度降低运行效率,贴合实际工程应用需求。优化

后的防护速度曲线能够有效规避列车超速、制动不及时等安全隐患,列控系统的防护可靠性提升40%以上,可直接应用于山地齿轨列车列控系统的现场调试与运行。

结语

本文围绕复杂环境下列控系统安全防护速度曲线展开研究,结合山地齿轨列车的实际运行场景,分析线路工况、气象条件、设备与列车性能三大核心影响因素,提出贴合实际的曲线计算方法。研究表明,优化后的防护速度曲线能够精准适配复杂环境的动态变化,有效提升列控系统安全防护的可靠性与针对性,解决传统曲线适配性不足、计算偏差等实际问题。本文为山地齿轨列车列控系统安全防护速度曲线的设计与优化提供实用技术参考,后续可进一步结合更多复杂工况完善曲线优化模型。

参考文献

- [1]吴庆华.列控系统网络安全防护体系构建与运营管理模式研究[J].铁道通信信号,2024,60(12):61-70.
- [2]赵小军,黄天天,马金鑫.列控系统信息安全风险分析与防护技术探讨[J].铁路通信信号工程技术,2022,19(9):46-50.
- [3]刘贞,何跃鹰,丁欢.轨道交通列控系统网络安全风险和防护对策研究[J].铁路通信信号工程技术,2020,17(12):1-7.
- [4]王文斌,侯冶,赵颖,等.重载列车运行环境车地协同安全防护系统[J].中国铁路,2025(1):85-91.
- [5]屈毅,张卫军,唐力.列车数字无线调度通信系统安全防护方案设计[J].铁道通信信号,2025,61(9):31-38.