

地铁线路纵坡参数对道岔列车通过性能的影响研究

闻祥旺 陈彩红

武汉高智达连铸智能科技有限公司 武汉 青山 430080

【摘要】 道岔作为地铁线路核心薄弱结构，是列车变道换向的关键设施，其通行性能直接决定地铁运营安全与服务质量。在城市地铁路网建设中，受地形起伏、城市规划及地下空间开发限制，大量道岔无法布设于平坡区段，纵坡道岔成为常态化工程形式。线路纵坡会改变列车过岔受力体系，产生持续纵向重力分力，与列车牵引、制动荷载耦合，造成轮轨作用恶化、道岔结构变形累积、列车振动加剧等问题，长期运营易引发钢轨爬行、扣件疲劳、轨距偏移等病害。为精准量化纵坡参数对道岔列车通过性能的影响规律，本文依托地铁9号单开道岔与B型地铁列车，搭建车辆-道岔耦合动力学仿真模型，设置0%、10%、20%、30%四组梯度纵坡工况，对比分析上下坡双向过岔条件下，轮轨作用力、车体振动加速度、道岔纵向位移等核心性能指标的变化特征。研究结果表明：地铁线路纵坡参数与列车过岔动态劣化程度呈显著正相关，纵坡坡度越大，道岔受力变形与列车振动越剧烈；同等纵坡工况下，下坡过岔的性能衰减幅度远高于上坡，是纵坡道岔运营管控的关键工况。基于仿真结论，从线路设计、结构优化、行车管控、养护监测四个维度提出优化策略，可为地铁纵坡道岔设计优化、安全运营及精细化养护提供理论支撑与实践参考。

【关键词】 地铁道岔；线路纵坡；动力学性能；轮轨作用；通行性能；养护管控

1 引言

随着我国城市轨道交通建设进入提质增效阶段，地铁线路逐步延伸至地形复杂、建筑密集的城市外围及老旧城区，平坡线路资源愈发稀缺，纵坡道岔应用场景持续增多。道岔结构本身存在刚度不均匀、轨线过渡复杂、受力集中的结构特性，是地铁线路中安全冗余最低、病害高发的关键部位。常规平坡工况下，列车过岔受力均衡、轮轨接触状态稳定，通行平稳性与安全性可完全满足规范标准。但纵坡线路的存在会打破道岔原有静力平衡体系，列车自重产生的纵向分力会持续作用于轮轨与道岔结构，列车过岔启停、制动过程中，惯性荷载与纵坡分力叠加耦合，进一步加剧轮轨动态冲击效应，加速道岔扣件老化、钢轨滑移、结构变形等病害发展，大幅劣化列车过岔通行性能。

现阶段国内地铁道岔相关研究多聚焦于车速调控、结构改造、养护工艺优化等方向，针对纵坡参数梯度变化对道岔列车通过性能的系统性量化研究较为匮乏，纵坡作用下道岔力学响应机理、性能衰减规律尚未形成统一认知，导致部分纵坡道岔设计参数取值保守、运营管控针对性不足，存在潜在安全隐患。基于此，本文采用动力学仿真试验方法，量化分析不同纵坡梯度、上下坡行驶工况下地铁列车的过岔动态性能，明确纵坡参数对道岔通行性能的影响机理与变化规律，提出针对性优化管控措施，为提升地铁纵坡道岔运营安全性与稳定性提供技术参考。

2 纵坡道岔力学作用机理与性能影响机制

2.1 平坡与纵坡道岔受力差异分析

平坡道岔受力体系简单且均衡，列车通行过程中仅产生竖向压力与水平横向冲击荷载，结构变形以瞬时弹性变形为主，无持续纵向残余应力，轮轨接触关系稳定可控。而纵坡线路的倾斜特性会改变列车受力状态，列车自重沿坡道产生恒定纵向分力，该力持续作用于轮轨接触面，促使钢轨产生纵向滑移趋势。列车过岔制动、减速过程中，纵向惯性力与纵坡分力叠加，进一步增大道岔纵向荷载，破坏结构受力平衡，长期循环荷载作用下会引发钢轨爬行、轨缝偏移、扣件松弛失效等病害，从根本上劣化列车过岔通行条件。

2.2 纵坡参数对过岔性能的影响路径

地铁线路纵坡参数主要通过三条路径影响列车道岔通行性能。其一，轮轨耦合作用劣化，纵坡改变列车重心竖向位置，轮轨接触点发生偏移，横向、垂向轮轨力波动幅度显著增大，加剧轮轨磨耗与瞬时冲击；其二，道岔结构变形累积，纵坡引发的纵向分力会持续消耗扣件弹性阻力，长期循环荷载下钢轨残余变形不断累积，破坏道岔几何尺寸精度；其三，行车平稳性衰减，纵坡工况下列车振动共振效应增强，车体振动加速度超标，反向放大过岔动态荷载，形成“荷载增大—结构变形加剧—通行性能下降”的恶性循环。

3 仿真模型与试验工况设计

3.1 仿真模型构建

本文依托城市轨道交通通用设备参数，建立地铁B型列车-9号单开道岔耦合动力学仿真模型，完整还原道岔钢轨、弹性



扣件、整体道床、轨枕等核心结构，精准模拟轮轨非线性接触、扣件弹性约束、道床阻尼支撑等力学特性。模型严格遵循《城市轨道交通工程设计规范》参数标准，道床采用整体钢筋混凝土结构，扣件采用地铁专用高弹性扣件，能够真实还原不同纵坡梯度下列车过岔的动态力学响应，保障仿真数据的真实性与可靠性。

3.2 试验工况与评价指标

结合地铁实际运营纵坡范围及规范限值，设置0%（平坡）、10%、20%、30%四组梯度纵坡工况，分别模拟列车上坡、下坡双向匀速过岔，统一设定常规运营车速60km/h。选取行业核心评价指标：轮轨横向力、车体横向加速度、车体垂向加速度、道岔最大纵向位移，多维度量化分析纵坡参数对列车道岔通过性能的影响规律。

4 仿真结果与数据对比分析

4.1 不同纵坡工况仿真数据统计

通过多组重复仿真试验，剔除异常干扰数据后，整理各工况核心性能指标平均值，具体统计结果如下表1所示。

4.2 纵坡参数对轮轨相互作用的影响

轮轨横向力是评判列车过岔安全性能、轮轨接触稳定性的核心指标，数值越大，轮轨冲击越剧烈，脱轨风险与结构损伤概率越高。由仿真数据可知，线路纵坡梯度与轮轨横向力呈显著线性正相关，纵坡从0%增至30%，上下坡工况轮轨横向力均持续递增。30%下坡工况轮轨横向力达到峰值20.15kN，较平坡工况提升64.1%。同等纵坡条件下，下坡工况轮轨横向力始终高于上坡工况，核心原因在于下坡过岔时列车惯性冲击力与纵坡分力叠加，轮轨瞬时冲击效应大幅加剧，轮轨接触稳定性显著下降，极易引发钢轨侧面磨耗、轨距扩大等病害，直接劣化列车过岔安全性能。

4.3 纵坡参数对列车过岔平稳性的影响

车体横向、垂向加速度是评价列车过岔平稳性与舒适性的关键指标，同时可间接反映道岔动态通行稳定性。平坡工况下车体振动幅值小、运行平稳性最优；随着线路纵坡增大，列车

重心偏移幅度增加，过岔时轨线过渡冲击与振动共振效应增强，车体加速度指标持续上升。30%下坡工况下，车体横向、垂向加速度较平坡工况分别提升62.2%、56.1%，列车颠簸感显著加剧。车体振动超标不仅降低乘客出行舒适度，还会增大列车对道岔的动态循环荷载，加速道岔结构疲劳损伤，长期运营会持续衰减道岔通行性能。

4.4 纵坡参数对道岔结构变形的影响

道岔纵向位移可直观反映纵坡荷载对道岔结构的损伤程度与稳定性影响。数据显示，纵坡梯度增大与道岔纵向变形增量呈正相关，10%、20%、30%纵坡工况道岔平均纵向位移较平坡分别提升14.2%、32.7%、53.6%。纵坡产生的恒定纵向分力会持续消耗扣件弹性阻力，在列车反复荷载作用下，钢轨累积爬行量不断增大，导致道岔几何尺寸偏移，易出现尖轨密贴不良、轨缝不均、部件松动等病害，破坏道岔结构整体性，持续劣化列车过岔通行条件。

4.5 上下坡工况性能差异性分析

综合各项指标可知，相同纵坡参数下，下坡过岔的性能劣化程度显著高于上坡。上坡过岔时，列车牵引力可部分抵消纵坡纵向分力，荷载变化平缓、振动冲击较小；下坡过岔时，列车依靠制动控制车速，惯性荷载与纵坡分力双向叠加，轮轨冲击、结构变形、车体振动均大幅加剧，是纵坡道岔通行性能管控的薄弱工况。本次试验30%及以内纵坡工况指标均满足规范安全限值，但性能衰减趋势明显，纵坡越大，安全冗余越低，运营风险越高。

5 纵坡道岔列车通行性能优化管控措施

5.1 线路纵坡设计优化

在地铁线路规划设计阶段，优先将道岔、渡线等关键转换设备布设至平坡或小纵坡区段，从源头规避纵坡参数带来的通行性能劣化问题。受地形、规划条件限制必须设置纵坡道岔时，应严格控制纵坡限值，尽量将道岔布设纵坡控制在20%以内，同时禁止在变坡点、竖曲线叠加区段设置道岔，避免多重工况耦合加剧结构受力紊乱，保障道岔受力均匀、几何状态稳定，弱化纵坡参数对过岔性能的负面影响。

表1 不同纵坡工况地铁道岔列车通过性能指标对比

纵坡工况	行驶工况	轮轨横向力/kN	车体横向加速度/(m/s ²)	车体垂向加速度/(m/s ²)	道岔纵向位移/mm
0%（平坡）	匀速过岔	12.28	0.37	0.41	1.10
10%	上坡过岔	13.45	0.40	0.44	1.23
	下坡过岔	14.09	0.44	0.47	1.29
20%	上坡过岔	15.16	0.46	0.50	1.41
	下坡过岔	16.75	0.51	0.55	1.50
30%	上坡过岔	18.02	0.53	0.58	1.62
	下坡过岔	20.15	0.60	0.64	1.73

5.2 道岔结构与扣件系统优化

针对纵坡引发的钢轨爬行、结构变形偏大等问题,优化纵坡道岔扣件配置,选用高阻力弹性扣件,提升扣件纵向约束刚度,有效抑制钢轨纵向累积滑移与残余变形。对大纵坡岔区整体道床进行局部加固,优化道床支撑刚度与均匀性,减少结构振动变形。重点强化尖轨、心轨等薄弱部位结构强度,优化轨线过渡平顺性,降低轮轨瞬时冲击,改善纵坡工况轮轨接触状态,全面提升道岔结构适配性与通行稳定性。

5.3 行车运营参数差异化管控

建立纵坡道岔差异化运营管控机制,针对20%以上大纵坡道岔,尤其是下坡通行工况,适度优化限速标准,降低列车惯性冲击荷载。优化列车自动驾驶程序,禁止在岔区急加速、急制动,保持列车匀速平稳过岔,减少瞬时纵向冲击力对道岔结构的损伤。合理调整列车运行间隔,降低密集车流对纵坡道岔的反复荷载叠加,减缓结构疲劳损伤速率,稳定列车过岔通行性能。

5.4 专项养护与动态监测体系构建

相较于平坡道岔,建立纵坡道岔专项高频养护机制,重点检测钢轨爬行量、扣件紧固状态、轨距偏差、结构纵向位移等关键指标,及时更换疲劳扣件、修复磨耗钢轨,修正偏移的道岔几何尺寸。搭建实时动态监测体系,持续采集岔区振动、结

构变形、轮轨作用数据,建立病害台账,跟踪纵坡参数影响下道岔性能衰减规律,实现隐患提前预判、闭环整治,保障道岔长期稳定运行。

6 结论

本文通过搭建车辆-道岔耦合动力学仿真模型,量化分析0%~30%梯度纵坡参数、上下坡双向工况下地铁道岔列车通过性能的变化规律,明确了纵坡参数对过岔性能的劣化机理。研究表明:地铁线路纵坡参数是影响道岔列车通行性能的核心因素,纵坡坡度越大,轮轨动态冲击越强、车体振动越剧烈、道岔结构变形累积越明显,通行稳定性与安全性持续下降;同等纵坡条件下,下坡过岔工况的性能劣化效果远高于上坡,是纵坡道岔安全管控的核心重点;30%及以内纵坡可满足规范运营要求,但安全冗余随纵坡增大持续降低,需重点管控。

通过落实线路纵坡优化设计、结构扣件升级、行车差异化管控、专项养护监测的成套优化措施,可有效弱化纵坡参数对道岔过岔性能的负面影响,抑制结构变形与轮轨损伤,提升地铁纵坡道岔运营稳定性。研究成果可直接应用于地铁纵坡道岔的设计、运营与养护工作,可为城市轨道交通复杂纵坡路段道岔工程的安全管控提供参考。后续可结合温度荷载、循环疲劳荷载等多因素耦合工况,进一步完善纵坡道岔性能评估与优化体系。

参考文献:

- [1] 阮莹,田春雨,曾志平.地铁线路坡度对道岔纵向力学特性的影响[J].城市轨道交通研究,2024,27(07):89-93.
- [2] 徐井芒,陈嵘,马前涛.循环荷载作用下大坡度地铁道岔钢轨爬行分析[J].城市轨道交通研究,2024,27(08):102-106.
- [3] 李明远.大坡度地铁道岔动力学特性及安全管控策略[J].都市快轨交通,2024,37(03):78-83.
- [4] 张宇,刘佳伟.地铁线路纵坡对道岔力学响应及通行性能的影响[J].铁道标准设计,2025,69(02):45-49.
- [5] 王泽鑫.地铁坡道道岔轮轨相互作用特性及性能优化[J].铁道工程学报,2024,31(09):67-72.
- [6] 赵晨阳.城市轨道交通大坡度道岔养护维修技术优化[J].交通科技与经济,2024,26(04):88-92.
- [7] 周航.地铁大坡度道岔行车平稳性优化控制研究[J].城市轨道交通研究,2025,28(01):94-98.