

文章编号:1004-2954(2026)10-0010-09

既有 250 km/h 高速铁路提速的线路技术条件与速度限值研究

钱科元, 林红松, 蔡文锋, 余浩伟, 代丰
(中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031)

摘要:【目的】为了探明制约车辆在既有 250 km/h 高速铁路曲线路段基础设施上提速的控制因素, 提出既有 250 km/h 基础设施的提速改造建议。【方法】基于随机振动与多体动力学理论, 建立车-轨耦合动力学模型。【结果】(1) 在现行技术标准要求下, 车辆在既有 250 km/h 铁路基础设施上提速空间有限, 车辆最高运行速度不能达到 300 km/h; (2) 现行标准中最大设计超高值制约了车辆进一步提速的空间, 建议将最大设计超高值提高至 200 mm; (3) 欠超高指标对圆曲线路段车辆动力学性能具有决定性作用, 现行标准中 90 mm 的最大欠超高值较为苛刻, 建议将其逐步调整至 100~105 mm; (4) 一定变化范围内的夹曲线长、超高时变率对车辆动力学运行性能影响较小, 建议将夹曲线最小长度由 0.6V 逐步降至 0.4V (V 为设计速度)、最大超高时变率由 31 mm/s 逐步增至 45 mm/s, 便于既有基础设施的夹曲线长和缓和曲线长度满足车辆提速后运行要求; (5) 线路超高调整至 200 mm 后, 曲线半径 $R=2\ 800, 3\ 200, 3\ 500$ m 三种工况下, 车辆最高运行速度分别可达 272, 288, 303 km/h。【结论】揭示了平面曲线参数内在联动关系, 探明了欠超高、夹曲线长、超高时变率等指标对车辆动力学性能的影响, 分析得到不同线路超高下的车辆运行速度限值。研究方法及成果可为同类研究提供指导与借鉴。

关键词: 高速铁路; 提速限值; 动力学; 线路参数; 技术条件

中图分类号: U238; U232 **文献标识码:** A **DOI:** 10.13238/j.issn.1004-2954.202504160001

Research on Technical Conditions and Speed Limits for Speed Increase on Existing 250 km/h High-speed Railway Lines

QIAN Keyuan, LIN Hongsong, CAI Wenfeng, YU Haowei, DAI Feng
(China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, China)

Abstract: [Objective] This study aims to identify the controlling factors restricting speed increases on curved sections of existing 250 km/h high-speed railway infrastructure, and to propose upgrading recommendations for speed increase on such infrastructure. [Methods] Based on stochastic vibration and multibody dynamics theories, a vehicle-track coupled dynamics model was established. [Results] (1) Under the requirements of current technical standards, the potential for increasing vehicle speed on existing 250 km/h railway infrastructure was limited, and the maximum operating speed of vehicles cannot reach 300 km/h. (2) The maximum design superelevation specified in current standards restricted further vehicle speed increases. Increasing the maximum design superelevation to 200 mm was recommended. (3) The cant deficiency played a decisive role in the vehicle dynamic performance on circular curve sections, and the maximum cant deficiency of 90 mm specified in current standards was relatively stringent. It was recommended that this value be gradually increased to 100~105 mm. (4)

Within a certain range of variation, the intermediate circular curve length and rate of change of superelevation had limited effects on vehicle dynamic performance. It was recommended that the minimum intermediate circular curve length be gradually reduced from

收稿日期: 2025-04-16; 修回日期: 2025-06-10; 网络首发日期: 2025-06-25

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFB4302506-02); 四川省科技计划项目(2024YFHZ0221); 中铁二院工程集团有限责任公司科学计划项目(KSNQ243022, KSNQ243002)

作者简介: 钱科元(1993—), 男, 工程师, 2018年毕业于西南交通大学车辆工程专业, 工学硕士, 主要从事新制式交通车辆、轨道工程勘察、设计、科研工作, E-mail: qiankeyuan06@163.com。

0.6V to 0.4V (V represents the design speed), and the maximum rate of change of superelevation be gradually increased from 31 mm/s to 45 mm/s, so that the intermediate circular curve length and transition curve length of existing infrastructure can meet the operating requirements after speed increase.

(5) After the track superelevation was adjusted to 200 mm, the maximum operating speeds under the three curve radii of $R=2\ 800$, 3 200, and 3 500 m can reach 272, 288, and 303 km/h, respectively.

[**Conclusion**] The intrinsic interrelationships among plane curve parameters are revealed. The effects of cant deficiency, intermediate circular curve length, and rate of change of superelevation on vehicle dynamic performance are clarified. The speed limits of vehicle operation under different track superelevation conditions are obtained through analysis. The research methods and findings can provide guidance and reference for similar studies.

Key words: high-speed railway; speed increase limit; dynamics; track parameters; technical conditions

引言

开展高速铁路提速,对提高主轴通道能力和技术水平,挖掘既有高铁线网的运输潜力、提升高铁线网效能、高铁运输品质,更好地服务沿线经济社会发展和人民群众出行,具有重要意义^[1]。

在国外,通过既有高速铁路提速来提升运输效率和效益,提高铁路竞争力和影响力,取得丰富成果和成功经验。以日本为例,新干线开通运营半个多世纪以来,一直致力于提高运营速度。7 条新干线中的 4 条新干线经历过提速^[2]:东海道新干线经 5 次提速由 200 km/h 逐级提至 285 km/h,山阳新干线经 6 次提速由 210 km/h 逐级提至 300 km/h,东北新干线经 5 次提速由 210 km/h 逐级提至 320 km/h,上越新干线经 3 次提速由 210 km/h 逐级提至 275 km/h。截至 2024 年年底,我国高速铁路总里程达 4.8×10^4 km,已拥有京沪、京津、成渝、京张、京广高铁 5 条运行时速 350 km 的干线铁路通道,但我国西部地区部分主干道的最高运行速度仍为 250 km/h,如西成/成贵高铁。据不完全统计,我国设计速度 250 km/h 高速铁路共有 60 条,总里程达约 1.5×10^4 km^[3],占总里程 31.3%。因此,我国铁路仍存在较大的提速市场前景。2024 年 9 月,何华武院士在中国铁道学会勘察设计委员会全体会议暨第一届二次学术交流会议上,强调有必要参考我国铁路第五次、第六次大提速的经验做法,对既有 250 km/h 高速铁路开展提速技术研究和试验。可见,对既有高铁提速是我国铁路未来发展的方向。在此背景下,有必要对“既有 250 km/h 高速铁路基础设施能否适应提速、瓶颈是什么?提速目标速度为多少合适?要适应提速线路应采用何种技术条件?”等系列问题进行研究与论证,并提出相关建议。

在高速铁路提速研究领域国内已开展相关研究。史俊玲等^[2]对日本新干线多年的运营经验和教训进

行归纳总结,分析影响提速的因素,并提出对策措施。梁延科^[1]针对有砟、无砟轨道类型、轨道设计超高 3 个方面的适应性开展研究,并提出时速 250 km 高铁提速轨道技术条件。邓捷航等^[3]对国内外高速铁路线路标准情况进行对比分析,提出放宽允许欠超高、超高时变率等线路参数指标的建议。在高速铁路平面参数研究方面也取得较为丰硕的成果,翟婉明等^[4-6]认为列车与轨道线路相互耦合,并不是相互独立的动力学问题,建立车辆-轨道耦合动力学理论,并应用于车-线匹配设计、平纵断面设计的动力学评估等领域。王开云等^[7]开展曲线轨道轮轨动态相互作用性能匹配研究,并制定车轨耦合评价标准体系。易思蓉等^[8]建立车-线动力学性能与曲线参数之间的关系模型,给出高速客运专线最小曲线半径标准建议。王艺飞等^[9]建立车-线动力学性能与缓和曲线参数间的关系模型,给出满足安全性和舒适性标准要求的市域快线最小缓和曲线长度建议值。王仲林等^[10]建立横向加速度与欠超高关系模型,给出市域快线最小曲线半径标准建议。徐鹏^[11]基于列车-双块式无砟轨道动力学模型,分析大西客专提速后曲线路段超高设置方案。翟婉明等^[12]基于车辆-轨道耦合动力学理论,分析线路平面参数对时速 400 km 高速铁路系统动力学性能的影响,并给出曲线半径、超高等关键参数的取值建议。时瑾等^[13]基于车线动力学理论,分析现行 350 km/h 高铁技术条件运营 400 km/h 高速列车的可行性,并给出 400 km/h 高速铁路线路参数设计的建议。

由此可见,运用车-线耦合动力学理论,开展铁路线路技术条件研究是目前较为主流的方法^[14-16],将该理论应用于本文所要研究的问题具有很好的适用性。但目前关于维持既有线形不变的前提下,既有 250 km/h 高铁是否能够提速研究较少,大多数研究均基于现有的技术标准要求开展。

鉴于此,本文基于车-线耦合动力学理论,建立高

速动车组-轨道耦合动力学模型和轨道随机不平顺模型,在分析既有 250 km/h 高铁线路平面参数类型特点与内在联系基础上,研究欠超高、夹曲线长、超高时变率对车辆运行动力学性能作用规律并开展不同线路超高工况下的提速限值研究。最终提出具有更好提速适应性的线路技术条件,为既有 250 km/h 高速铁路提速改造设计提供理论依据和科学参考。

1 高铁提速线路参数分析

本节重点对曲线路段超高、欠/过超高、曲线半径、缓和曲线长度、夹曲(直)线长度进行逐一分析,并梳理各指标参数的内在联系。

1.1 最大设计超高 $h_{\max}$

线路超高是铁路线路曲线路段重要的线形参数,外轨最大设计超高由安全性条件和舒适性条件两方面决定。按照 TB10082—2017《铁路轨道设计规范》规定,最大设计超高满足式(1)。式中稳定系数 n 的定义:两轨头中心线距离之半 $S/2$ 与合力偏心距 e 之比,不应小于 3。 S 为内外两股钢轨轨头中心距, H 为车体重心至轨面高度。

$$h_{\max} = \frac{S^2}{2H \cdot n} \quad (1)$$

根据式(1),外轨最大设计超高 $h_{\max}$ 与内外轨跨距 S 的二次方成正比,与车体重心至轨面高度 H 、稳定系数 n 成反比。车体重心至轨面高度 H 参数与车辆类型有关,如我国客货共线铁路所用运载装备该参数为 2 220 mm,而 CRH 系列动车组该参数为 1 520 mm。标准轨距跨距 S 为 1 500 mm,将上述参数代入式(1),可计算出客货共线铁路理论最大超高理论值为 168.9 mm,而运用 CRH 系列动车组铁路线路最大超高理论值为 246.7 mm。

另外 1978 年 10 月中国铁道科学院开展车辆临界倾覆超高试验,该试验研究表明当超高超过 200 mm,大部分旅客会出现行走困难,头晕不适的症状,因此按照舒适性条件最大超高不宜超过 200 mm^[17]。

我国现行标准 TB10621—2014《高速铁路设计规范》规定,设计时速 250 km 无砟轨道线路设计最大允许超高值为 175 mm,有砟轨道线路设计最大超高为 170 mm。

1.2 曲线半径 $R_{\max}$ 、 $R_{\min}$

我国高速铁路线路最大曲线半径 $R_{\max}$ 的规定主要综合考虑了线路测设与轨道检测精度等因素。由于曲线半径太大将很难保证测量所得的线路极小正矢值的准确性,我国规范规定最大曲线半径为 12 000 m。

铁路线路最小曲线半径 $R_{\min}$ 越小,选线将更为灵

活,但同等运行速度 V 及线路超高 h 下,车体所受离心力、轮轨横向力、轮重减载率等动力学性能将越大,且能够对轨道产生较大磨耗。因此,综合多方面因素,最终规定设计时速 250 km 的高速铁路线路最小曲线半径为 2 800~3 500 m。

1.3 欠(过)超高允许值 h_q (h_g)

将高速列车通过圆曲线路段,视为质点做圆周运动,通过受力分析,均衡超高 $\bar{h}$ 的计算公式如式(2)所示。

$$\bar{h} = \frac{S}{g \cdot R} \cdot \left(\frac{V}{3.6} \right)^2 \quad (2)$$

式中, S 为内外轨跨距,mm; h 为曲线路段线路实设超高,实设超高不大于最大设计超高 $h_{\max}$,mm; g 为重力加速度, m/s^2 ; R 为曲线半径,m; V 为运行速度,km/h。

当车辆运行速度 V 小于均衡运行速度时,此时为过超高状态,过超高 h_g 计算公式见式(3);当车辆运行速度 V 大于均衡运行速度时,此时为欠超高状态,欠超高 h_q 计算公式见式(4)。

$$h_g = h - \bar{h} \quad (3)$$

$$h_q = \bar{h} - h \quad (4)$$

由式(2)~(4)可知,欠(过)超高参数受轨距、实设超高、曲线半径、车辆运行速度等众多参数的影响。

目前我国规范将欠(过)超高划分为优秀、良好、一般三个等级,每个等级对应的允许值分别为 40,60,90 mm,然而法国时速 250 km 等级铁路欠超高可达到 130 mm。

1.4 缓和曲线长度

缓和曲线长度确定需保证安全性(缓和曲线上车轮不致脱轨)、平稳性(轮对升高或降低速度不致旅客不适)、舒适性(欠超高时变率不超过允许值),其计算方法如式(5)所示。

$$l = \left\lceil \max \left\{ \frac{h}{i_{\max}}, \frac{V \cdot h}{3.6[f]}, \frac{V \cdot h}{3.6[b]} \right\} \right\rceil_{10} \quad (5)$$

式中, $\lceil \cdot \rceil_{10}$ 表示按 10 m 长度向上取整; $i_{\max}$ 、 $[f]$ 、 $[b]$ 分别为最大超高顺坡坡度、超高时变率允许值、欠超高时变率允许值。我国 TB10621—2014《高速铁路设计规范》规定最大超高顺坡率不大于 2‰,超高时变率限值分别为 25,28,31 mm/s,欠超高时变率限值为 23,38 mm/s。

1.5 夹曲(直)线长

高速铁路线路线形常采用直线-缓和曲线-圆曲线-缓和曲线-直线线形组合方式,一般认为车辆通过缓圆点和缓直点时,车辆会发生振动,为避免振动相叠加,通过设置夹曲(直)线避开此问题。我国时速 200 km/h 以上铁路线路夹曲(直)线一般条件采用

0.8V、困难条件采用 0.6V,而国际联盟 UIC 规定的建议值一般条件为 0.6V,困难条件为 0.4V。

1.6 线间距

我国铁路标准对不同速度等级的高速铁路线间距有不同规定,250、300 km/h 速度等级铁路线路最小线间距分别为 4.6、4.8 m,工程设计时根据项目条件直接选用。在欧洲,欧盟互通性技术规范^[18](TSI)中对不同速度等级铁路的最小名义线间距(综合考虑了空气动力学效应)进行了说明,其中 250~300 km/h 速度等级铁路最小名义线间距为 4.2 m、速度大于 300 km/h 等级铁路最小名义线间距为 4.5 m。最小名义值通常会大于按照限界方法计算出来的线间距(不考虑额外裕量)。工程设计时线路线间距由限界方法计算结果(考虑额外裕量)同 TSI 规定值对比,选取较大值确定。

1.7 各参数内在关系分析

根据上述各指标的定义与限值规定,欠超高指标综合考虑轨距、设计超高、曲线半径等众多影响行车动力性能的因素,同缓和曲线长度、夹曲线长度一样,均会受到车辆运行速度的影响。因此,车辆在既有 250 km/h 高速铁路基础设施上提速后,许多参数指标均有可能超过现行技术标准要求。分析发现:①从安全性和舒适性两方面考虑,目前我国既有标准中对最大允许超高值 $h_{\max}$ 的规定偏保守,若能将最大线路超高调整到 200 mm,提速后欠超高指标超过标准限值的问题可能会被解决;②与此同时,我国现行标准中欠超高限值同国外情况相比较为严格,能否结合我国现有车辆曲线通过性能对欠超高值做进一步修正放大,使得提速后欠超高值不被超限;③缓和曲线长度通常由运行速度、实设超高、超高时变率限值决定,若提速后的运行速度与实设超高乘积与超高时变率限值允许值能够做到均按同比系数 k 增大,将对缓和曲线长度没有影响。换言之,若超高时变率增大至 $k \cdot [f]$ (k 为提速后与提速前运行速度和超高值乘积的比值, $[f]$ 为现行标准中超高时变率允许值)对车辆行驶动力学性能影响较小,则提速前后缓和曲线长度不需做调整;④夹曲线长度与车辆运行速度有关,我国现行标准夹曲线长度要求高于国际联盟 UIC 规定要求,能否通过仿真分析,研究现有车辆在 0.4V 长(甚至更短)的夹曲线长上是否会出现振动叠加恶化动力学性能的情况,对该限值进行修正降低。若可行,则提速前后夹曲线长可不作调整。

除此之外,我国既有 250 km/h 铁路最小线间距相对欧盟 TSI 规范中 250~300 km/h 等级铁路,仍存在不小于 0.4 m 的额外裕量,具有一定的提速空间。

通过上述分析,有必要建立车辆-轨道耦合模型,仿真分析欠超高、超高时变率、夹直线长对车辆运行动力学性能的影响,分析评估只调整线路轨道超高提速改造技术方案的可行性与提速限值,提出具有更好提速适应性的线路技术条件。

2 车辆动力学及线路不平顺模型

2.1 车-线耦合模型

目前我国 250 km/h 等级高速铁路运营线上采用 CRH380A、CRH380D、CRH3A、CRH2A 等多种型号动车组,本文结合 CRH380A 动车组部件运动特点,基于车辆-轨道耦合动力学理论^[19],构建动车组-轨道空间耦合模型,该模型见图 1。其中 M 、 I 分别表示刚体的质量和转动惯量; K 、 C 分别表示刚度和阻尼,下标 c 、 b 、 w 、 r 分别表示车体、构架、轮对、轨道,下标 x 、 y 、 z 分别表示纵向、横向、垂向自由度,下标 Φ 、 β 、 ψ 分别表示侧滚、点头、摇头自由度,下标 r 、 p 、 s 分别表示轨道、一系、二系处的悬挂;因此, M_c 、 I_{cx} 、 Φ_c 、 K_{cx} 、 C_{cx} 分别表示车体质量、车体侧滚转动惯量、车体侧滚位移、车辆

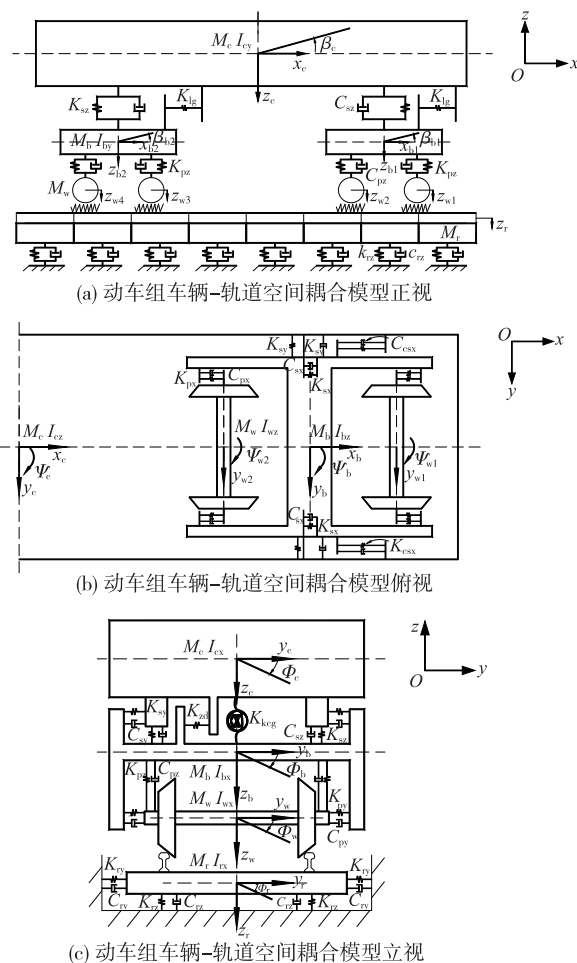


图 1 动车组车辆-轨道空间耦合模型

Fig. 1 Spatial coupled vehicle-track model for an electric multiple unit

二系悬挂纵向刚度、车辆二系悬挂纵向阻尼,同理可确定其他符号的含义。相对传统的车辆-轨道空间耦合模型,本文模型还考虑牵引拉杆刚度 K_{lg} 、抗侧滚扭杆刚度 K_{kcg} 、抗蛇行减振器刚度 K_{csx} 、抗蛇行减振器阻尼 C_{csx} 、二系止挡刚度 K_{zd} 。

本模型将动车组车辆视为车体、转向架构架、轮对组成的多刚体振动系统,考虑车体和转向架纵向、横向、垂向、侧滚、点头、摇头振动,考虑轮对的垂向、横向、侧滚振动。该车辆模型共计 30 个自由度,考虑轮轨接触、抗蛇行减振器、一系垂向减振器、二系空簧、止挡等非线性环节。轮对采用 LMA 型踏面,钢轨采用 60 kg/m 钢轨,轮轨接触计算采用经典的 FASTSIM 算法。另外本文将轨道及其线下基础设施视为离散黏弹性点支撑模型,并将与轮对接触部分的轨道视为跟随轮对运动的刚体,因此与轮对接触的每个轨道部分拥有 3 个自由度,整个参与仿真计算的轨道部件共计 12 个自由度。

2.2 轨道不平顺模型

轨道不平顺会恶化车辆运行品质,是评估车辆运行状态不可忽略的激励源。本文仿真采用由铁科院通过现场测量并数据拟合得到的轨道不平顺功率谱密度函数,见式(6)。该轨道谱采用分段幂函数形式对轨道不平顺谱进行拟合,每段函数 A 、 k 取值参考文献[20]获取,并基于三角级数法近似模拟方法^[21],通过数值运算,获取轨道不平顺沿线路里程分布样本,见图 2。

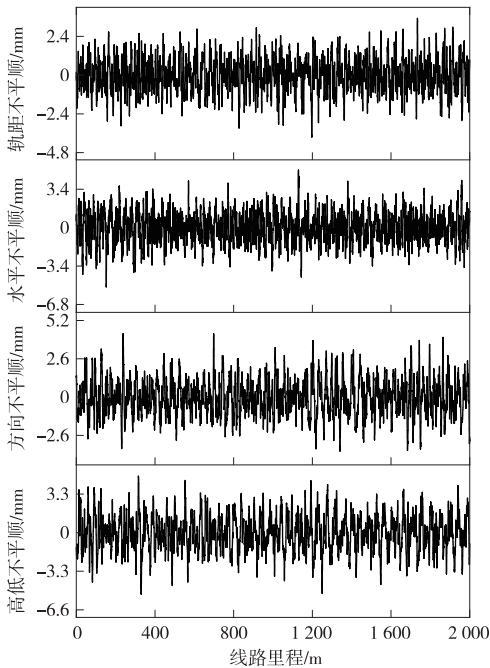


图 2 轨道不平顺沿线路里程分布样本

Fig. 2 Sample distribution of track irregularity along line mileage

$$S(f) = \frac{A}{f^k} \tag{6}$$

3 欠超高对车辆动力学性能影响研究

鉴于欠超高指标综合考虑线路曲线半径、设计超高、车辆运行速度等因素,是平面线路参数中最能综合反映圆曲线段车-线耦合的指标,本节重点分析线形参数对车辆运行性能的影响,因此,仿真时暂不考虑线路随机不平顺。

结合国内标准关于既有 250 km/h 高铁圆曲线参数规定情况,设计 25 种仿真工况,每种工况下车辆运行速度如表 1 所示。

表 1 不同工况下动车组的运行速度 km/h
Tab. 1 Operating speeds of electric multiple unit under different conditions

欠超高 /mm	圆曲线半径参数				
	2 800 m	3 200 m	3 500 m	4 000 m	4 500 m
40	223	239	250	267	283
60	234	250	261	279	296
90	248	266	278	297	315
110	258	276	288	308	327
130	267	285	298	319	338

不同欠超高等级下,车辆运行轮轨垂向力、轮轨横向力、脱轨系数、轮重减载率等动力学性能变化规律分别见图 3~图 9。可发现,在相同欠超高等级下,轮轨垂向力、脱轨系数、轮重减载率、轮轴横向力指标存在随着曲线路段曲线半径越大变小的趋势;在欠超高 40,60,90 mm 等级下,轮轨横向力指标存在随着曲线路段曲线半径增大逐渐变小的趋势,而在欠超高 110,130 mm,轮轨横向力指标存在随着曲线半径增大先减小后增大的趋势;在欠超高 40,60,90,110 mm 等级下,横向平稳性指标随着曲线路段曲线半径增大无明显的变化趋势,但基本维持在 0.4~0.5,而在欠超高 130 mm 等级下,车辆运行的平稳性变化明显,波动范围变为 0.55~0.65;在相同欠超高等级下,横向加速度指标

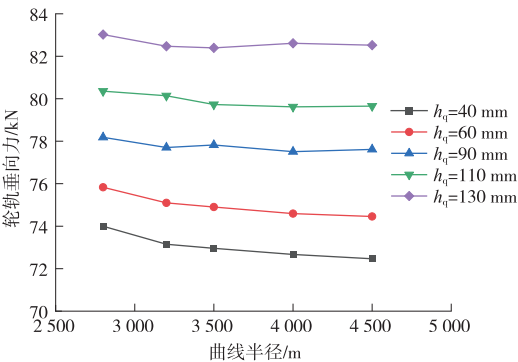


图 3 轮轨垂向力变化规律

Fig. 3 Variation patterns of wheel-rail vertical force

随着曲线路段曲线半径增大,存在逐步增大的趋势。

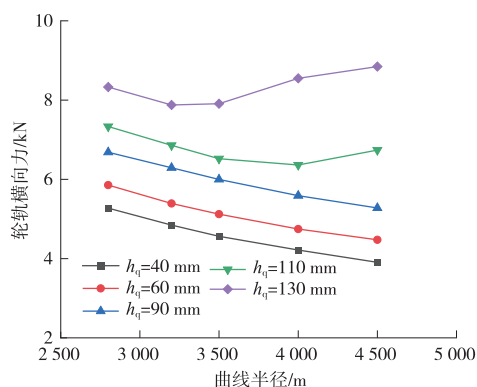


图 4 轮轨横向力变化规律

Fig. 4 Variation patterns of wheel-rail lateral force

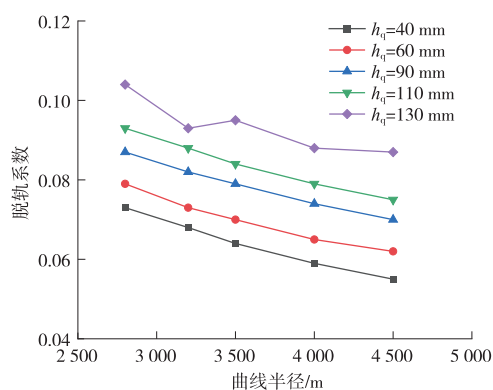


图 5 脱轨系数变化规律

Fig. 5 Variation patterns of derailment coefficient

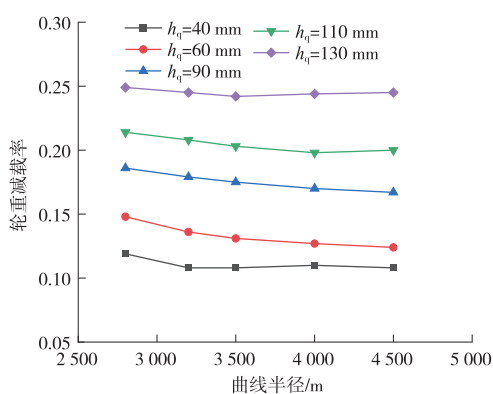


图 6 轮重减载率变化规律

Fig. 6 Variation patterns of wheel unloading ratio

从表 1 和图 3~图 9 可发现:运行速度和曲线半径即使存在较大差异,但只要欠超高指标一致,像轮轨垂向力、轮重减载率、横向加速度等动力学性能仅存在较小变化。整体上看,欠超高指标对车辆动力学性能具有决定性作用,欠超高等级越高,动力学性能相对越差。相同欠超高等级下,不同曲线半径下,各动力学性能指标相差并不大。欠超高指标等级变

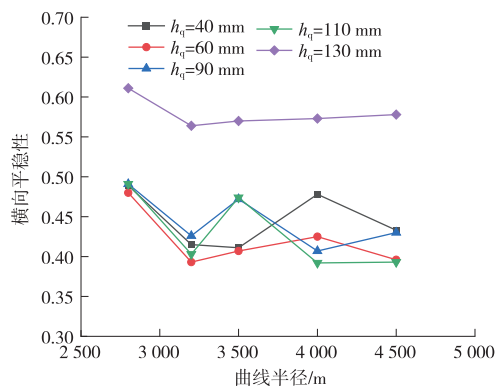


图 7 横向平稳性变化规律

Fig. 7 Variation patterns of lateral ride quality

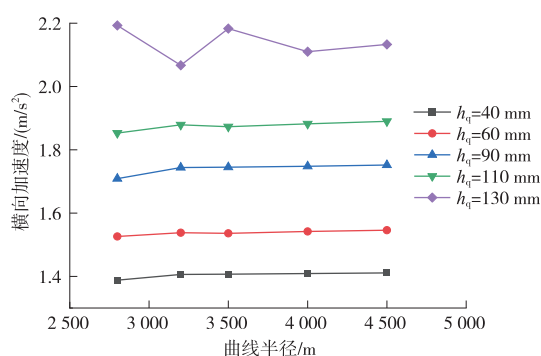


图 8 横向加速度变化规律

Fig. 8 Variation patterns of lateral acceleration

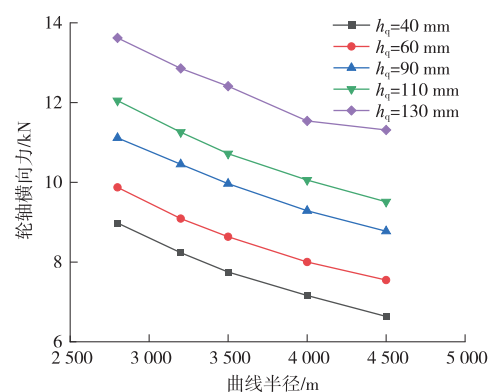


图 9 轮轴横向力变化规律

Fig. 9 Variation patterns of wheelset lateral force

化对车辆的横向稳定性以及横向加速度指标(运行品质)具有较为明显影响,在未计入轨道不平顺影响的情况下,欠超高指标过高,横向加速度指标就接近标准限值 2.5 m/s^2 。

4 夹曲线长对车辆动力学性能影响研究

提高按照 $0.4V$ 、 $0.6V$ 、 $0.8V$ (V 为设计速度) 3 种工况设置夹曲(直)线长度,仿真工况如表 2 所示。研究夹曲线长对动力学性能的影响。

表 2 仿真工况
Tab.2 Simulation conditions

工况	曲线半径 /m	圆曲线长度 /m	超高 /mm	运行速度 /(km/h)
一		120		
二	4 500	180	170	300
三		244		

不同夹曲线长度下,车辆动力学性能指标仿真结果如表 3 所示。可见,不同夹曲线长度下,车辆动力学性能指标几乎一致,没有明显差异。以轮轨垂向力变化规律为例,轮轨垂向力-运行里程曲线见图 10,可以发现车辆通过直缓点、缓圆点、圆缓点、缓直点时轮轨垂向力均发生波动,但均未产生叠加。这说明按照国外 0.4V 设置夹曲线长度,从车辆动力学性能角度是可行的。建议进一步开展现场试验,论证 0.4V 夹曲线长度的可行性。

表 3 车辆动力学性能指标
Tab.3 Vehicle dynamic performance indicators

性能指标	工况一	工况二	工况三
轮轨垂向力/kN	74.96	75.15	76.04
轮轨横向力/kN	4.55	4.55	4.55
脱轨系数	0.06	0.06	0.06
轮重减载率	0.13	0.14	0.13
横向平稳性	0.52	0.47	0.46
横向加速度/(m/s ²)	1.58	1.58	1.58
轮轴横向力/kN	7.63	7.63	7.63

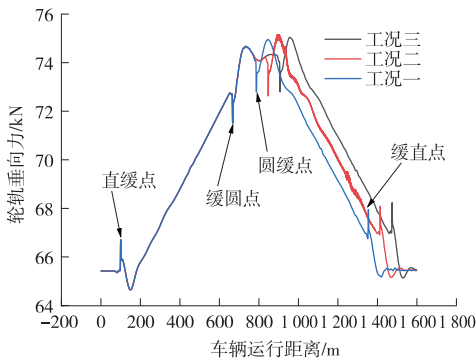


图 10 轮轨垂向力-运行里程规律

Fig. 10 Variation patterns of wheel-rail vertical force with line mileage

5 250 km/h 等级铁路线路提速限值分析

从上节仿真结果可知,圆曲线线形参数(曲线半径、设计超高、欠超高)变化,横向加速度(运行品质)指标变化较为明显,更接近动力学运行品质评价指标 2.5 m/s² 的限值,而轮重减载率、脱轨系数、轮轴横向力等安全性动力学性能指标均远远低于标准规定的限值要求。并且欠超高参数和车辆动力学性能存在负相

关关系,同等运行速度下,超高越大,欠(过)超高就越小(大),因此动力学性能将更好(差)。对于小曲线线路条件,车辆高速运行时,常是欠超高状态,因此提高曲线路段超高有利于提高车辆运行速度。

因此,本小节曲线线路仿真超高设置按两种工况考虑:(1)既有标准中有砟轨道最大设计超高 170 mm;(2)本文通过线路参数分析得出的超高限值 200 mm。按照《高速铁路设计规范》中线路平面参数的要求,既有 250 km/h 设计速度的高铁线路最小曲线半径范围为 2 800~3 500 m,设计速度 300 km/h 线路最小曲线半径不小于 4 000 m。因此结合既有规范要求,本文分别考虑 R=2 800,3 200,3 500,4 000 m 四种不同曲线半径,每种仿真工况均添加线路轨道的不平顺,并基于车辆运行品质指标响应情况,研究两种工况下车辆提速运行限值。

5.1 最大设计超高 170 mm 工况(既有线路情况)

不同圆曲线半径线路条件下,车辆以不同运行速度运行,其运行品质指标响应情况见图 11。以运行品质不大于 2.5 m/s² 为基准,R=2 800,3 200,3 500,4 000 m 四种曲线半径条件下(设计超高 h=170 mm),车辆提速限值分别为 258,278,287,309 km/h。此时欠超高分别达到 110,112,107,111 mm。

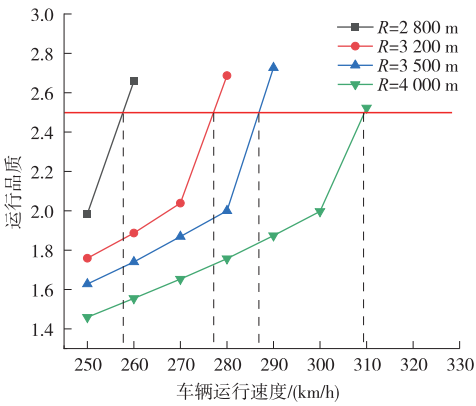


图 11 最大设计超高 170 mm 工况下运行速度-运行品质对应关系

Fig. 11 Relationship between operating speed and ride quality under maximum design superelevation of 170 mm

当线路最大设计超高按现有技术标准要求设置,线路曲线半径 2 800,3 200,3 500 m 均不能提速至 300 km/h,进一步提速空间仅分别有 3%、10.6%、14.6%。另外,当运行品质达到标准限值时,线路曲线半径 2 800,3 200,3 500 m 三种工况下的欠超高值均超过标准所规定的 90 mm,均不小于 105 mm,可见目前我国标准中最大欠超高值规定较为苛刻。

5.2 最大设计超高 200 mm 工况

不同圆曲线半径线路条件下,车辆以不同的运行速度运行,其运行品质指标响应情况见图 12。以运行品质不大于 2.5 m/s^2 为基准, $R=2\,800,3\,200,3\,500,4\,000\text{ m}$ 四种曲线半径条件下(设计超高 $h=200\text{ mm}$),车辆提速限值分别为 272,288,303,324 km/h。此时欠超高分别达到 111,105,109,109 mm。

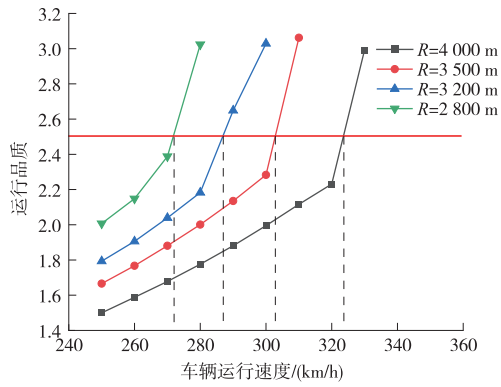


图 12 最大设计超高 200 mm 工况下运行速度-运行品质对应关系

Fig. 12 Relationship between operating speed and ride quality under maximum design superelevation of 200 mm

当线路最大设计超高增大调整至 200 mm 时,线路曲线半径 2 800,3 200,3 500 m 三种工况下提速空间增至 8.8%、15.2%、21.2%,其线路能够适应更高的运行速度,其中曲线半径 3 500 m 以上路段能提速至 300 km/h,并且欠超高值也都超过标准规定值,并均不小于 105 mm。

通过本小节的研究发现,超高增大高铁线路曲线路段的设计超高,有助于提高高速铁路动车组曲线通过速度,提升既有 250 km/h 高铁线路提速适应能力,建议将我国高铁线路最大设计超高值由 170 mm 调整至 200 mm(甚至更高),并且既有标准中欠超高最大 90 mm 较为苛刻,建议将其逐步放宽至 100~105 mm。

6 超高时变率对车辆动力学性能影响

从上节仿真分析发现,线路超高由 170 mm 调整至 200 mm,曲线半径 3 500 m 线路条件下,车辆运行速度可由 250 km/h 提升至 300 km/h。在维持既有线路缓和曲线长度不变的情况下,由于运行速度的提高以及线路超高的调整,超高时变率将发生变化。本节分别按照既有线路超高时变率 $f=18,25,28,31\text{ mm/s}$ 设置 4 种仿真工况,如表 4 所示。提速前后各项动力学性能分别如表 5、表 6 所示。

表 4 仿真工况

Tab. 4 Simulation conditions							
工况	L/m	提速前			提速后		
		$f/(\text{mm/s})$	$V/(\text{km/h})$	h/mm	$f/(\text{mm/s})$	$V/(\text{km/h})$	h/mm
一	670	18	250	170	25	300	200
二	480	25	250	170	35	300	200
三	430	28	250	170	40	300	200
四	380	31	250	170	45	300	200

表 5 车辆动力学性能指标(提速前)

Tab. 5 Vehicle dynamic performance indicators (before speed increase)					
性能指标	工况一	工况二	工况三	工况四	
轮轨垂向力/kN	73.22	73.47	73.63	73.84	
轮轨横向力/kN	4.52	4.55	4.56	4.61	
脱轨系数	0.06	0.06	0.06	0.06	
轮重减载率	0.10	0.11	0.11	0.11	
横向平稳性	0.13	0.13	0.09	0.07	
横向加速度/ (m/s^2)	1.39	1.39	1.40	1.40	
轮轴横向力/kN	7.63	7.72	7.76	7.85	

表 6 车辆动力学性能指标(提速后)

Tab. 6 Vehicle dynamic performance indicators (after speed increase)					
性能指标	工况一	工况二	工况三	工况四	
轮轨垂向力/kN	79.49	79.41	79.32	79.71	
轮轨横向力/kN	6.25	6.19	6.41	6.46	
脱轨系数	0.08	0.08	0.08	0.08	
轮重减载率	0.18	0.18	0.18	0.18	
横向平稳性	0.19	0.18	0.11	0.12	
横向加速度/ (m/s^2)	2.02	2.03	2.01	2.01	
轮轴横向力/kN	10.30	10.52	10.60	10.71	

从表 5、表 6 仿真结果发现,相同运行速度和线路条件下,超高时变率对车辆动力学性能存在一定影响,时变率变大,车辆动力学性能存在变差趋势,但影响不大。提速后,超高时变率最大增至 45 mm/s,动力学性能仍满足要求。

7 结论

(1)在现有技术条件下,既有 250 km/h 高速铁路难以提速至 300 km/h。

(2)本文通过对高铁提速线路参数内在联系分析,假定线间距满足提速要求的前提下,提出一种维持既有线形不变(曲线半径、缓和曲线长度、夹曲线长度不变),只改变线路最大设计超高的既有 250 km/h 高速铁路提速改造建议。将线路最大超高调整为 200 mm 后,既有 250 km/h 高速线路部分路段可以提速至 300 km/h。

(3)欠超高指标对于车辆曲线路段上动力学性能具有决定性作用,将线路最大设计超高由 170 mm 调

高至 200 mm,有助于提高车辆的运行速度限值。

(4)按照国外 0.4V 夹曲线长限值设置夹曲线,车辆以 300 km/h 运行速度通过曲线,车辆振动未产生叠加,因此夹曲线按照国外 0.4V 要求设计可行。

(5)相同车辆运行速度、曲线半径、线路超高工况下,超高时变率变化对车辆的动力学性能影响有限,并不明显。既有缓和曲线长度工况下,提速至 300 km/h 后,超高时变率增至 45 mm/s,动力学性能仍满足要求。

(6)本文所提到的线路最大超高调整至 200 mm,主要是基于 1978 年车辆临界超高倾覆试验所确定的超高限值。由于现有运载装备与几十年前装备大不相同,建议结合我国最新车辆装备重新开展车辆临界超高倾覆试验,确定更合理的最大线路设计超高值。另外,线间距也是控制能否提速的关键指标,建议下阶段根据欧盟互通性技术规范对不同速度等级下线间距裕量开展量化研究。

(7)此种提速改造方法,对线位、桥梁、路基等设施几乎不存在影响,改造成本相对较低,具有一定推广前景。本文所提出的线路技术条件,还需进一步通过现场试验进行验证,以期对我国既有 250 km/h 高铁提速改造提供参考。

利益冲突声明/Conflict of Interests:

所有作者声明不存在利益冲突。

作者贡献/Authors' Contributions:

钱科元、林红松、蔡文锋、余浩伟参与了研究设计,钱科元、代丰参与了论文的写作和修改。所有作者均阅读并同意最终稿件的提交。

参考文献:

- [1] 王子健. 格库铁路扩能改造需求与对策研究[J]. 铁道勘察, 2024, 50(3): 115-121.
- [2] 史俊玲, 荆晓霞, 刘坦, 等. 日本新干线速度等级影响因素及提速对策分析[J]. 铁道运输与经济, 2022, 44(8): 137-144.
SHI Junling, JING Xiaoxia, LIU Tan, et al. Analysis of Factors Influencing Shinkansen Speed Grades and Speed-up Measures [J]. Railway Transport and Economy, 2022, 44(8): 137-144.
- [3] 邓捷航, 孙耿杰, 冯乾旭. 250 km/h 高速铁路线路提速适应性研究及优化[J]. 铁道标准设计, 2024, 68(11): 25-29.
DENG Jiehang, SUN Gengjie, FENG Qianxu. Research and Optimization of Speed Increase Adaptability for 250 km/h high-speed Railway Lines[J]. Railway Standard Design, 2024, 68(11): 25-29.
- [4] SHABANA A A. Definition of ANCF Finite Elements[J]. Journal of Computational and Nonlinear Dynamics, 2015, 10(5): 054506.
- [5] BRUNI S, AMBROSIO J, CARNICERO A, et al. The Results of the Pantograph-Catenary Interaction Benchmark[J]. Vehicle System Dynamics, 2015, 53(3): 412-435.
- [6] SONG Y, RØNNQUIST A, NÅVIK P. Assessment of the High-frequency Response in Railway Pantograph-catenary Interaction Based on Numerical Simulation[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020, 69(10): 10596-10605.
- [7] 王开云, 翟婉明. 提速和高速铁路曲线轨道轮轨动态相互作用性能匹配研究[J]. 中国铁道科学, 2014, 35(1): 142-144.
WANG Kaiyun, ZHAI Wanming. Study on Performance Matching of Wheel-rail Dynamic Interaction on Curved Track of Speed-raised and High-speed Railways [J]. China Railway Science, 2014, 35(1): 142-144.
- [8] 易思蓉, 聂良涛, 秦方方. 基于动力学分析的高速铁路最小曲线半径研究[J]. 西南交通大学学报, 2013, 48(1): 16-20, 35.
YI Sirong, NIE Liangtao, QIN Fangfang. Study on Minimum Curve Radius of High-speed Railway Based on Dynamics Analysis[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2013, 48(1): 16-20, 35.
- [9] 王艺飞, 易思蓉. 基于动力学分析的 160 km/h 级市域快线最小缓和曲线长度研究[J]. 铁道标准设计, 2019, 63(3): 21-25, 33.
WANG Yifei, YI Sirong. Study on the Minimum Transition Curve Length of 160 km/h Urban Rapid Rail Based on Dynamic Analysis [J]. Railway Standard Design, 2019, 63(3): 21-25, 33.
- [10] 王仲林, 易思蓉, 王艺飞. 快慢速列车共线运行的 160 km/h 级市域快线最小曲线半径研究[J]. 铁道标准设计, 2018, 62(10): 24-30.
WANG Zhonglin, YI Sirong, WANG Yifei. Study on the Minimum Radius for Shared 160 km/h Urban Rail Transit [J]. Railway Standard Design, 2018, 62(10): 24-30.
- [11] 徐鹏. 大西客专无砟轨道曲线超高设计调整的动力学分析[J]. 铁道建筑, 2016, 56(6): 133-136.
XU Peng. Dynamic Analysis on Adjustment of Ballastless Track Curve Superelevation Design for Datong-Xi'an Passenger Dedicated Railway [J]. Railway Engineering, 2016, 56(6): 133-136.
- [12] 翟婉明, 姚力, 孙立, 等. 基于车辆-轨道耦合动力学的 400 km/h 高速铁路线路平面参数设计研究[J]. 高速铁路技术, 2021, 12(2): 1-10, 16.
ZHAI Wanming, YAO Li, SUN Li, et al. Research on Route Plan Design Parameters of 400 km/h High-speed Railway Based on Vehicle-track Coupling Dynamics [J]. High-speed Railway Technology, 2021, 12(2): 1-10, 16.
- [13] 时瑾, 孙征南, 孙宪夫, 等. 现行 350 km/h 高铁线路技术条件运营 400 km/h 高速列车适应性研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2020, 17(9): 2171-2180.
SHI Jin, SUN Zhengnan, SUN Xianfu, et al. Research on the Adaptability of High-speed Train Running at 400 km/h Under Current 350 km/h High-speed Railway Technical Conditions [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2020, 17(9): 2171-2180.
- [14] LONG X Y, WEI Q C, ZHENG F Y. Dynamic Analysis of Railway Transition Curves[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2010, 224(1): 1-14.
- [15] 龙许友, 时瑾, 王英杰, 等. 高速铁路线路线形动力仿真及乘坐舒适度评价[J]. 铁道科学与工程学报, 2012, 9(3): 26-33.
LONG Xuyou, SHI Jin, WANG Yingjie, et al. Dynamic Simulation and Ride Comfort Evaluation of Track Alignment for High-speed Railway [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2012, 9(3): 26-33.

(下转第 49 页)

- tics and Protection Design of Tuyu Tunnel Rockfall on Zhangjiajie-Jishou-Huaihua Railway [J]. Railway Standard Design, 2023, 67 (11): 126-133.
- [18] 赵秋林. 兰渝铁路范家坪隧道出口危岩落石分析及防护设计[J]. 铁道标准设计, 2017, 61(10): 137-140.
ZHAO Qiulin. Analysis and Protection Design of Fanjiaping Tunnel Exit Rockfall on Lanzhou-Chongqing Railway [J]. Railway Standard Design, 2017, 61(10): 137-140.
- [19] 付伟. 西安至十堰铁路危岩落石发育特征及防护措施[J]. 铁道工程学报, 2021, 38(4): 22-27.
FU Wei. Development Characteristics and Protective Measures of Dangerous Rock Fall on Xi'an-Shiyan Railway [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2021, 38(4): 22-27.
- [20] 李恭晨. 高速铁路浅埋隧道入口危岩落石分析及防护设计[J]. 铁道勘察, 2022, 48(6): 83-88.
LI Gongchen. Protection Design of High-speed Railway Shallow Buried Tunnel Entrance for Dangerous Rock Fall [J]. Railway Investigation and Surveying, 2022, 48(6): 83-88.
- [21] 郭书云. 石太线路基边坡危岩落石整治方案研究[J]. 铁道标准设计, 2014, 58(2): 4-7.
GUO Shuyun. Research on Treatment Scheme of Perilous Rocks and Falling Rocks for Protecting Subgrade Slope of Shijiazhuang-Taiyuan Railway [J]. Railway Standard Design, 2014, 58(2): 4-7.
- [22] 王栋, 蒋良文, 张广泽, 等. 无人机三维影像技术在铁路勘察中的应用[J]. 铁道工程学报, 2016, 33(10): 21-24.
WANG Dong, JIANG Liangwen, ZHANG Guangze, et al. Application of Unmanned Aerial Vehicle 3D Imaging Technology in Railway Survey [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2016, 33(10): 21-24.
- [23] 黎尤, 何坤, 胡卸文, 等. 震裂山体崩塌形成特征及运动学三维模拟: 以汶川县三官庙村崩塌为例 [J]. 工程地质学报, 2022, 30(2): 542-552.
LI You, HE Kun, HU Xiewen, et al. Formation Characteristics and Kinematics 3-D Simulation of Rockfall Evolved from Shattered Mountain: Case Study of Sanguanmiao Village Rockfall in Wenchuan County [J]. Journal of Engineering Geology, 2022, 30(2): 542-552.
- [24] 王忠福, 罗干, 杨晓洁. 基于 RocPro3D 的大华桥水电站危岩体数值模拟研究 [J]. 华北水利水电大学学报 (自然科学版), 2025, 46(1): 152-160.
WANG Zhongfu, LUO Gan, YANG Xiaojie. Rockfall Numerical Simulation at Dahuaqiao Hydropower Station Using RocPro3D [J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2025, 46(1): 152-160.
- [25] 邹辉. 主、被动防护网在水利工程边坡处理中的应用 [J]. 中国水能及电气化, 2015(8): 14-17.
ZOU Hui. Application of Active and Passive Protective Screenings in Water Conservancy Engineering Slope Treatment [J]. China Water Power and Electrification, 2015(8): 14-17.

(编辑: 夏梦然)

(上接第 18 页)

- [16] 龙许友, 时瑾, 王英杰. 重载铁路线路平纵断面关键参数研究 [J]. 铁道工程学报, 2016, 33(1): 30-35.
LONG Xuyou, SHI Jin, WANG Yingjie. Research on the Key Parameters of Plane and Profile for Heavy Haul Railway [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2016, 33(1): 30-35.
- [17] 易思蓉. 铁道工程 [M]. 3 版. 北京: 中国铁道出版社, 2015: 82-83.
- [18] 王文博, 李俊岭. 欧盟技术标准铁路线间距计算方法研究 [J]. 铁道工程学报, 2024, 41(12): 17-22.
WANG Wenbo, LI Junling. Research on the Calculation Method of Railway Gauges in EU Technical Standard System [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2024, 41(12): 17-22.
- [19] 翟婉明. 车辆-轨道耦合动力学 [M]. 4 版. 北京: 科学出版社, 2020: 44-51.
- [20] 康熊, 刘秀波, 李红艳, 等. 高速铁路无砟轨道不平顺谱 [J]. 中国科学: 技术科学, 2014, 44(7): 687-696.
KANG Xiong, LIU Xiubo, LI Hongyan, et al. PSD of Ballastless Track Irregularities of High-speed Railway [J]. Scientia Sinica (Technologica), 2014, 44(7): 687-696.
- [21] 雷晓燕. 高速铁路轨道动力学-模型、算法与应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2021: 116-118.

(编辑: 王婷)