

文章编号: 1001-4632 (2026) 04-0001-25

引用格式: 王同军, 江成, 王峰, 等. 时速 400 km 高速铁路线路基础设施关键技术研究综述[J]. 中国铁道科学, 2026, 47(4): 1-25.

Citation: Wang Tongjun, Jiang Cheng, Wang Feng, et al. Review on key technologies of railway infrastructure for 400 km · h⁻¹ high-speed railway[J]. China Railway Science, 2026, 47(4): 1-25.

时速 400 km 高速铁路线路基础设施 关键技术研究综述

王同军¹, 江 成^{2, 3}, 王 峰⁴, 王树国^{2, 3}

(1. 中国铁道学会, 北京 100844;

2. 中国铁道科学研究院集团有限公司 铁道建筑研究所, 北京 100081;

3. 中国铁道科学研究院集团有限公司 高速铁路轨道系统全国重点实验室, 北京 100081;

4. 中国国家铁路集团有限公司 科技和信息化部, 北京 100844)

摘 要: 针对时速 400 km 高速铁路线路基础设施面临的轮轨动力冲击加剧、多源噪声问题凸显、隧道空气动力学效应激化等核心技术挑战, 从关键科学问题、核心技术和设备、评价指标和控制方法等方面进行系统性梳理和综合评述, 全面分析时速 400 km 高速铁路线路基础设施的国内外研究进展和技术发展现状。在既有时速 350 km 高速铁路线路基础设施成套技术体系基础上, 系统构建线路基础设施多尺度空间精细化仿真模型, 形成时速 400 km 高速铁路线路基础设施力学行为表征机理和关键设计参数体系; 研发适应时速 400 km 高速铁路的扣件系统、道岔结构、强化基床表层的新型路基结构和新型桩板过渡段结构, 以及超高预应力体系 40 m 简支梁和 2.8 m 梁高 32 m 简支梁等成套关键技术和核心设备; 提出时速 400 km 高速铁路轨道几何平顺性评价指标和管理标准, 并构建该速度下的高速铁路线路基础设施技术标准体系, 形成线路、桥梁、隧道与振动噪声的成套关键技术。结果表明: 提出的时速 400 km 高速铁路线路基础设施关键技术有效解决了速度提升所产生的系统动力学和气动效应等不利影响, 轨道综合动力性能提升 5%, 减振降噪效果提升 10% 以上, 隧道气动效应缓解效果提升 15% 以上, 有力地支撑了我国高速铁路技术可持续发展。

关键词: 高速铁路; 时速 400 km; 线路基础设施; 关键技术; 综述

中图分类号: U238 **文献标识码:** A

doi: 10.3969/j.issn.1001-4632.2026.04.01

立足国家交通强国战略与铁路发展顶层设计, 我国高速铁路已完成从“规模扩张”到“提质增效”的关键转型。截至 2025 年底, 我国高速铁路营业里程突破 5 万 km, “八纵八横”高速铁路主通道基本贯通, 形成世界规模最大、技术水平领先的现代化高速铁路网, 构建了时速 350 km 高速铁路基础设施成套技术体系。“十四五”以来, 中国铁路持续深化高速铁路科技创新工程, 加快推进时速 400 km 高速铁路关键技术攻关。面向“十五五”铁路高质量发展规划, 更高速度高速铁路的研发已

成为培育铁路新质生产力、实现科技自立自强的重要工作, 更是巩固我国高速铁路技术国际领跑地位的战略核心。

速度等级的提升不仅标志着高速铁路技术代际的跨越, 更是对行业基础研究与工程能力的综合检验。当前, 高速铁路技术的国际竞争日趋白热化, 日、法、德等传统高铁强国均在既有运营速度基础上加速布局新一轮技术升级。中国作为运营里程最长、速度等级最高、运用场景最丰富的国家, 推动高速铁路的提速发展是保持技术领跑的战略需要。

收稿日期: 2026-04-30; 修订日期: 2026-07-24

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2022YFB2603400)

第一作者: 王同军 (1964—), 男, 山西阳高人, 正高级工程师。E-mail: 18801383030@163.com

通讯作者: 江 成 (1965—), 男, 安徽怀宁人, 研究员。E-mail: jch@rails.cn

为持续引领高速铁路最高运营速度,结合更高速度移动装备研制,中国铁路开展了一系列更高速度等级的科学试验^[1],系统分析了更高速度移动装备和基础设施匹配性、适应性。结果表明更高列车运行速度下的线路基础设施面临轮轨力冲击作用加剧、振动噪声增加、隧道空气动力学效应增强等问题^[2-5]。

本文面向更高速度的线路基础设施建造技术需求,从基础设施响应机理与力学特性、关键结构优化与设备性能提升、线路平顺性评价指标与控制方法等方面综述当前国内外时速400 km高速铁路线路基础设施关键技术。同时,面向世界高速铁路技术竞争前沿,以自主创新驱动更高速度核心技术突破,从机理分析、技术研发、体系建立、应用验证等层面开展系统研究,为助力重大工程建设,推进我国高速铁路在更高速度核心技术领域的科技创新与持续领跑,提供重要技术支撑。

1 时速400 km高速铁路线路基础设施关键科学问题

随着我国高速铁路向时速400 km及更高速度等级发展,列车车辆与线路基础设施之间的动态相互作用将发生显著变化,轮轨系统动力学响应、多源噪声辐射以及隧道空气动力学效应等关键力学行为呈现更为复杂的演化规律和多物理场耦合特征,导致轨道、路基、桥梁、隧道等基础设施面临更为严苛的服役环境与性能挑战^[5]。

从物理本质看,列车运行速度提升至时速400 km后,轮轨接触应力、激扰频率、气动荷载强度均呈非线性增长^[6],轮轨动力相互作用的高频动态特征进一步凸显,轮轨激励向更高频段拓展,列车与基础设施系统的耦合振动效应加剧^[7],更易诱发车辆与轨道关键部件的共振伤损,严重影响行车安全性与结构长期耐久性^[8-9];同时,轮轨振动与气动效应叠加诱发的多源噪声问题更为突出^[10],特别是空气动力噪声功率与运行速度的高次方成正比^[11],使得噪声控制成为制约时速400 km高速铁路沿线声环境与列车乘坐舒适性的关键技术瓶颈;此外,列车高速穿越隧道时产生的压缩波在隧道内非线性传播、急剧累积激化,在隧道洞口形成的微气压波问题更为突出,极易引发“音爆”现象,带来的环境影响与危害程度远超时速350 km

水平,成为长大隧道设计与运营安全的重要制约因素^[12-13]。

针对时速400 km高速铁路线路基础设施面临的系统性挑战,聚焦高速轮轨动力相互作用与线路基础设施力学响应机理、多源噪声的形成机理和影响机制以及隧道压缩波传播机制和洞口微气压波特性的3个关键科学问题,通过系统梳理国内外研究进展,阐明时速400 km运行速度下高速铁路面临的新现象、新问题和新的挑战,凝练前沿研究中的关键认识和亟待突破的技术难点,并在此基础上重点呈现本研究团队在时速400 km高速铁路线路基础设施关键技术领域取得的最新研究成果和创新进展。

1.1 高速轮轨动力相互作用与线路基础设施力学响应机理

高速铁路轮轨系统作为列车与线路基础设施动态交互的核心载体,其动力学行为本质上是随机、非线性的。随着运营速度向时速400 km及更高等级迈进,轮轨耦合作用机制将发生不可预知的变化,特别是在随机不平顺激励、结构参数变异性、复杂运行环境等多源随机因素的作用下,轮轨系统的动态相互作用变得尤为复杂,同时也对线路基础设施的力学行为与长期服役性能提出了前所未有的严苛挑战,成为制约更高速度高速铁路安全长效运营的核心技术瓶颈。

近年来,为探索更高速度轮轨系统关键技术,国内外学者围绕轮轨动力相互作用和线路基础设施力学响应机理,开展了大量理论分析、数值仿真、室内试验和现场测试研究,形成了一系列研究成果。

在轮轨滚动接触理论方面,Kalker提出的线性滚动接触理论—Kalker线性理论^[14]和非线性滚动接触理论—CONTACT算法^[15],已成为轮轨接触力学领域的里程碑式成果,特别是CONTACT算法能够精确求解任意给定轮轨型面下的接触斑形状、法向与切向应力分布、蠕滑力等关键参数,被世界各国铁路领域广泛应用于轮轨滚动接触行为分析。随着数值计算方法和技术的不断发展,国内外学者致力于将经典轮轨滚动接触理论向更高速度、更复杂工况拓展。常崇义等^[16-17]基于全尺寸高速轮轨关系试验台研究了时速400 km下不同制动蠕滑控制模式和水介质条件对轮轨黏着特性的影响,分析了更高速度条件下的制动大蠕滑黏着行为特点,为更高速度轮轨动力学模型的构建提供了关键参数支撑。随着运行速度提升至时速400 km,轮

轨滚动接触疲劳呈现出新的特征和挑战^[18],车速提升后轮轨接触斑内的法向应力和切向应力分布发生显著变化,接触斑边界可能出现“剥离”现象,传统的赫兹接触假设面临挑战。Yang等^[19]对比研究了赫兹模型、非赫兹模型和CONTACT算法在变摩擦条件下的车辆-轨道相互作用及车轮踏面磨损演化中的应用,发现非赫兹模型相比赫兹模型具有更高的轮轨接触求解精度,但赫兹模型的计算效率更高。Liu等^[20]系统综述了共形轮轨滚动接触建模方法,重点关注了精度与计算效率之间的权衡问题,提出了共形接触算法面临的若干挑战与未来研究方向,为更高速度高速铁路轮轨接触模型的进一步优化提供了参考。Jin^[21]则重点探讨了近年来高速轮轨关系研究领域取得的研究成果、应用现状和未来发展方向,并全面梳理了高速轮轨关系研究中仍存在且尚未解决的挑战性问题,为更高速度轮轨系统动力学分析、力学响应机理揭示和运维策略制定指明了研究路径。

随着轮轨动力分析向车线耦合系统整体动力学方向进一步延伸,相关理论模型与数值方法也随之不断完善,成为研究时速400 km及更高速度等级线路基础设施力学响应的重要基础。翟婉明^[22]创新性地提出了全面、系统的车辆-轨道耦合动力学理论,为研究铁路轮轨系统的动力行为提供了重要工具和理论支撑。在此基础上,国内外学者针对不同的分析需求,建立了繁简不一的列车车辆-轨道(下部基础)结构动力相互作用模型^[23]。对于更高速度等级的研究,Zhang等^[24]基于有限元法和多体动力学理论,建立了完整的车-轨-路基空间刚柔耦合动力学模型,分析了时速400 km高速列车在路基不均匀沉降条件下的动态响应,研究认为现有时速350 km高速铁路的路基沉降控制标准适用于时速400 km运营条件;高建敏等^[25]基于CR400型动车组构建了考虑车辆牵引和制动特性的高速铁路车线耦合动力学模型,并对时速400 km高速列车的曲线通过性能进行了分析;Nsabimana等^[26]基于临界速度视角建立了包括车辆、轨道和地下土壤的有限元模型,计算了更高速度下无砟轨道的位移、应力路径和应变能的动态响应;Lei等^[27]建立了三维车辆-轨道空间非线性耦合系统刚柔结合动力学模型,提出的“Trace method”交叉迭代算法显著提升了计算效率,验证了将我国现有CRTS II型高速铁路的运行速度提升至时速400 km是可行的,列车和轨道结构相应的动力响应指标均能满

足安全运行限值要求;胡晓依等^[28]聚焦轮轨短波不平顺激励,通过精细化车-轨耦合模型量化了时速400 km工况下轮轨高频冲击向下传递对钢轨、扣件及轨道板的动态影响,明确了短波不平顺是诱发基础设施高频共振和疲劳损伤的关键因素。

随着轮轨界面的高频激励和瞬态冲击进一步向下传递并激发轨道及其下部基础设施的动力响应,越来越多国内外学者开始关注线路基础设施力学响应机理方面的研究。Zhai等^[29]在系统回顾车辆-轨道耦合动力学理论及其在工程应用的研究中指出,基础设施劣化问题与列车-轨道动态相互作用之间存在复杂的耦合关系,这种耦合在更高速度条件下将更为突出。在轨道结构力学行为方面,Cui等^[30]建立车辆-轨道实时协同仿真模型,采用多时间步显式-隐式求解方法分析不同空间位置的结构振动和层间接触状态演化,研究发现严重温度梯度会降低P2共振模态频率,使轮轨耦合共振临界速度前移至时速400 km附近,同时在偏心轮载激励下加剧动态相互作用,为时速400 km高速铁路无砟轨道系统的动态设计和损伤控制提供了理论依据。在桥梁结构力学行为方面,Zhou等^[31]针对24, 32和40 m这3种典型跨度桥梁建立了精细化车辆-轨道-桥梁耦合模型,系统分析了时速400 km列车荷载作用下多层轨道-桥梁结构的振动传递特性,其中40 m跨度桥梁所受轮轨垂向力接近允许限值,但现有轨道-桥梁结构均能满足时速400 km运行需求;Yazdani等^[32]基于精细化有限元模型完成了324次时程动力分析,系统评估了27种高速铁路列车模型(涵盖亚洲和欧洲高速铁路列车)在时速150~400 km范围内的动力响应,从不同桥梁类型和跨度视角,为时速400 km条件下桥梁结构的动力响应特征和适应性评估提供了重要参考。在路基土体力学行为方面,针对更高速度条件下路基土体非线性特性的影响,Rackwitz等^[33]建立了考虑轨道和地基材料的非线性精细化列车-轨道-地基相互作用模型,系统开展了时速400 km下列车-轨道-地基系统动力行为研究,重点探讨了软土层的非弹性和孔隙弹性行为、高速列车引发的地基振动能量局部化分布和传播规律、导致共振条件和响应放大的临界速度,以及高速列车荷载下共振状态土体特性的变化规律,为理解时速400 km及以上速度等级软土地区路基的动力响应机制提供了重要理论支撑;Mandhaniya等^[34]进一步研究了土工合成材料加筋路堤在高速列车移动荷载作用下的

动力响应特性,研究表明时速400 km条件下采用土工合成材料结合挡土墙结构可使地基振动加速度降低约50%,单纯依靠路堤填土不足以抵抗高速行驶列车引发的剧烈振动,为时速400 km高速铁路路基结构的设计和优化提供了参考。在隧道和环境振动方面,张鑫浩等^[35]基于复兴号列车和高速铁路地下线隧道土体参数建立了列车-轨道-隧道-环境土体精细化仿真模型,系统分析了时速400 km运行下地下线振源特性和环境振动传播规律,该研究系统揭示了时速400 km条件下轨道-隧道结构振动向周围土体传播的完整规律,为高速铁路地下线的振动评估提供了重要理论依据。

综上所述,国内外学者围绕时速400 km高速铁路轮轨动力相互作用和线路基础设施力学响应机理,在轮轨接触理论、车辆-轨道-基础设施系统耦合动力学模型、轨道-桥梁/路基/隧道结构动力响应影响机制等方面取得了显著进展。然而,现有研究仍存在以下不足:一是对时速400 km条件下轮轨界面的强非线性、频变性特征缺乏系统表征,关键部件(如扣件弹性垫层)的高频特性尚不明确;二是多尺度、多物理场耦合仿真模型的精度与效率难以兼顾,缺乏综合考虑系统多源随机因素的精细化仿真分析平台;三是基础设施关键设计参数的取值仍主要依赖时速350 km经验外推,缺少针对时速400 km的系统性试验验证和理论优化。因此,亟须开展面向更高速度等级的线路基础设施力学行为表征、仿真方法及关键参数体系研究。

基于上述需求,建立线路基础设施多尺度空间精细化仿真模型,以科学表征时速400 km条件下强非线性和频变性关键仿真参数,实现力学行为精细模拟、荷载传递的高效解析,明确关键参数和运行速度对车-轨-基础系统力学行为的影响规律,形成时速400 km高速铁路线路基础设施力学行为表征机理和关键设计参数体系。

1) 基础设施力学行为仿真分析方法

基于高频动刚度测试、频响法等试验,科学表征扣件弹性垫层等强非线性和频变性的关键部件参数,获得高频激励下的扣件系统动刚度和阻尼。根据更高速度下的线路基础设施综合试验结果,结合室内试验确定线路基础设施层间界面接触关系,利用实尺轮轨滚动试验台开展不同速度等级试验,提出了时速400 km速度级轮轨接触强非线性试验参数,优化了更高速度等级下的轮轨接触关系,在此基础上建立时速400 km高速铁路车辆-轨道-路基/

隧道/桥梁线路基础设施多尺度空间精细化仿真分析模型,如图1所示。

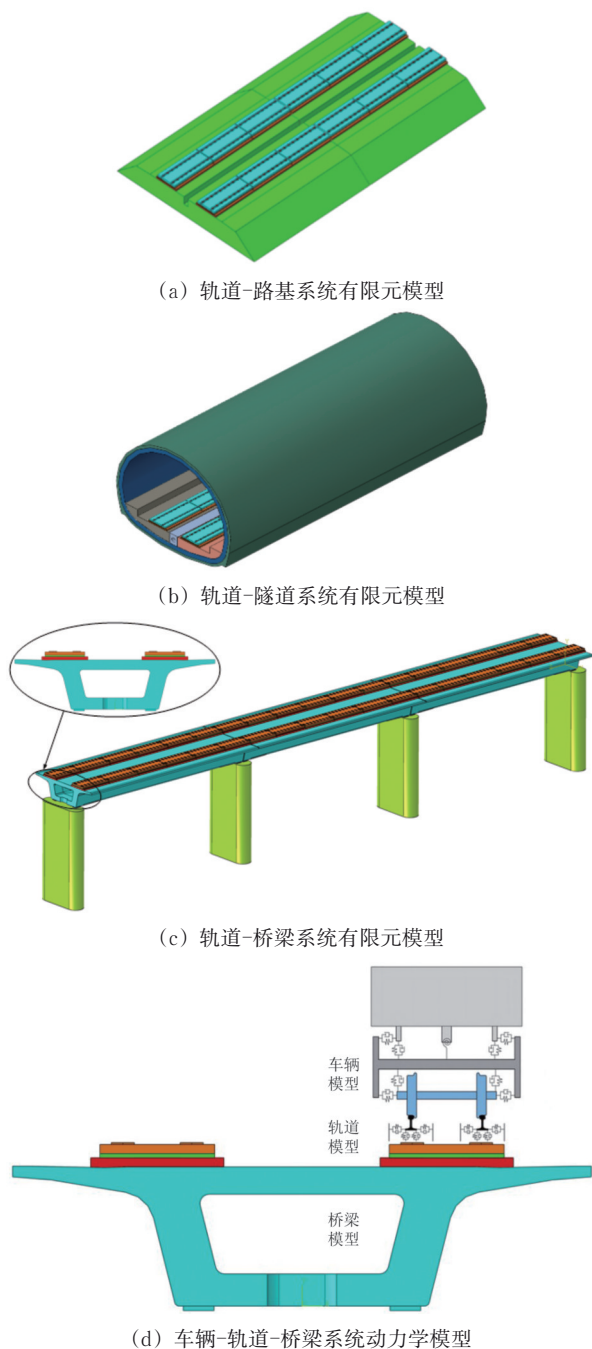
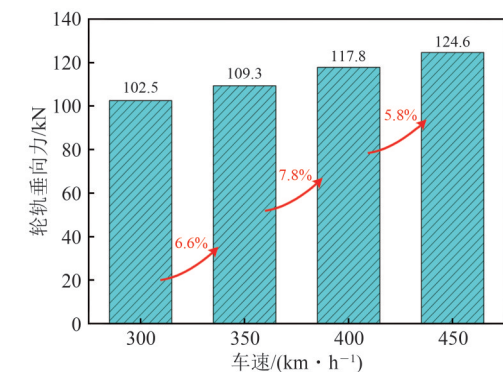


图1 时速400 km车辆-轨道-路基/桥梁/隧道线路基础设施多尺度空间精细化仿真分析模型

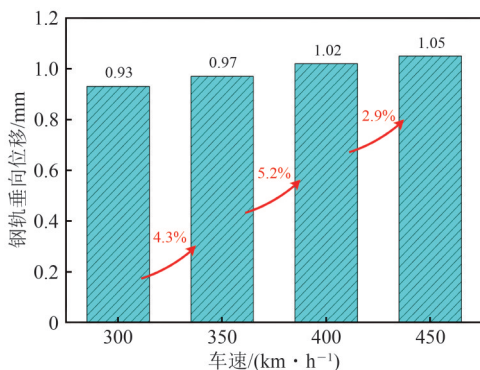
2) 基础设施力学响应机理

通过仿真分析线路基础设施荷载振动响应的时频域特征,揭示时速400 km轨道、路基、桥梁、隧道等结构的荷载和振动传递规律及其时空分布特征。在此基础上,深度融合高速综合试验测试数据,掌握了时速400 km条件下轨道不平顺、扣件刚度、扣件阻尼、轨道板模量以及下部基础刚度等

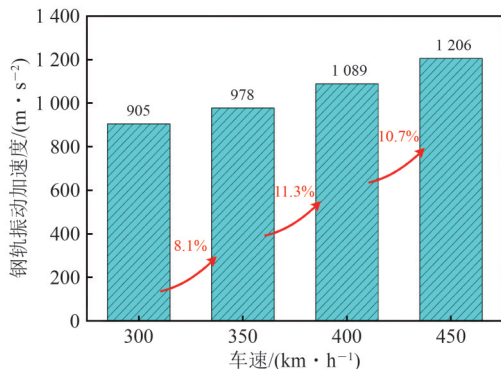
关键参数对线路基础设施力学行为的影响规律, 探明了不同行车速度条件下线路基础设施力学行为^[36-37]。时速400 km轨道结构振动响应及车致能量分布传递特征如图2所示。



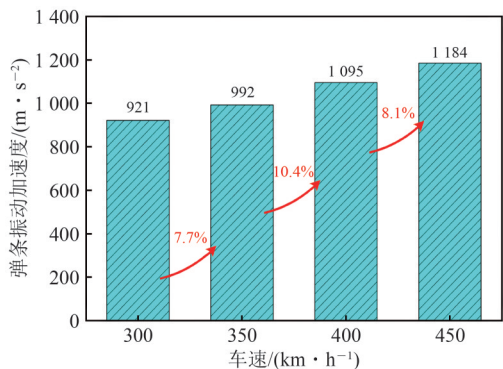
(a) 轮轨垂向力



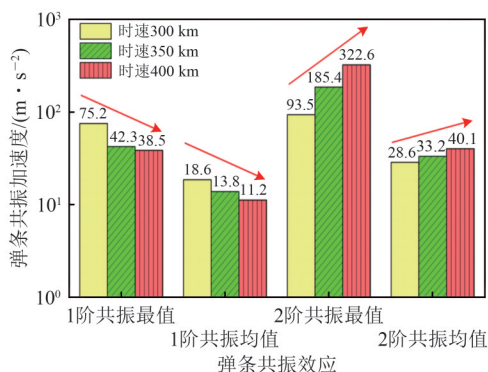
(b) 钢轨垂向位移



(c) 钢轨振动加速度



(d) 扣件弹条振动加速度



(e) 扣件弹条共振效应

图2 时速400 km轨道结构振动响应及车致能量分布传递特征

从图2可以看出: 列车从时速350 km提升至时速400 km后, 轨道结构荷载变形和振动响应的各项指标增加约为5%~10%, 且结构振动响应对速度的敏感性要大于荷载变形, 特别是弹条2阶共振效应明显, 极易诱发弹条疲劳伤损, 为时速400 km扣件弹条的研发设计提供了关键理论依据和支撑。

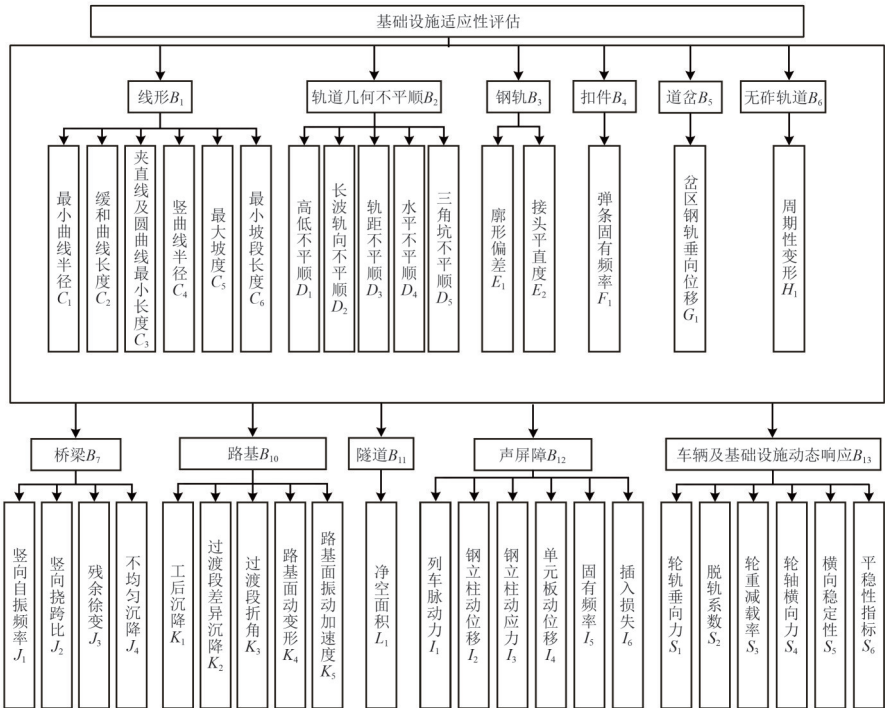
3) 基础设施关键参数及取值

随着速度的提升, 在维持高舒适度标准的要求下, 线路参数的取值区间更趋严格。通过围绕最小曲线半径、缓和曲线长度、线间距等关键指标开展分析计算, 提出适应时速400 km的高速铁路平面曲线半径、缓和曲线长度、竖曲线半径等线路平纵断面核心参数及取值, 形成时速400 km高速铁路线形舒适性精细化评估方法^[38-39], 如图3所示。

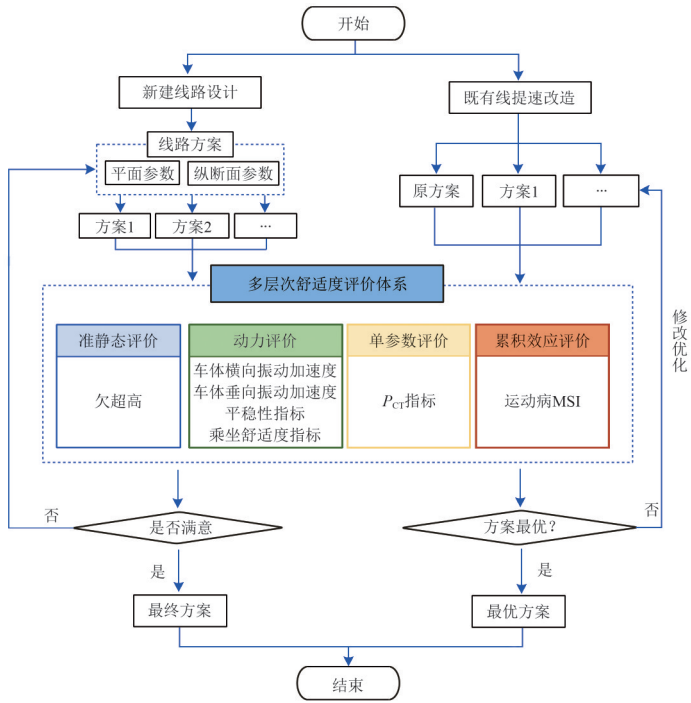
与时速350 km速度级相比, 时速400 km高铁线路在轨道短波不平顺、高频动力响应及隧道气动效应等方面表现出更高的速度敏感性, 轨道几何平顺性管理频带范围更广, 桥梁和路基结构的整体承载能力和动力响应在既有技术体系下仍具有一定安全裕度。通过综合试验测试及仿真计算, 分析了时速400 km高速铁路轨道不平顺敏感波长, 并提出基础设施关键参数取值建议, 详见表1和表2。

1.2 高速铁路多源噪声形成机理和影响机制

高速铁路噪声源具有高速运动、多源复合、宽频影响的作用特征, 其产生机制与轮轨关系、弓网关系和流固耦合作用等密切相关, 涉及车辆动力学、轨道动力学、空气动力学和声学等多学科、多专业交叉融合。国内外研究经验表明, 高速铁路噪声源主要包括轮轨噪声和气动噪声, 声源主要分布在车头、车体表面、轮轨接触区域、转向架和受电



(a) 线形精细化评估指标示意图



(b) 线形精细化评估流程

图 3 时速 400 km 高速铁路线形舒适性精细化评估方法

表 1 时速 400 km 高速铁路轨道不平顺敏感波长（对比不同速度等级）

m

时速/km	CR400AF 车型敏感波长		CR400BF 车型敏感波长	
	高低不平顺	轨向不平顺	高低不平顺	轨向不平顺
350	120	90	130	70
400	140	90	150	80
450	160	100	180	90

表 2 时速 400 km 高速铁路基础设施关键参数取值建议（对比时速 350 km）

线路等级	焊接接头平直度/ (mm·m ⁻¹)	扣件弹性垫板刚度/ (kN·mm ⁻¹)	隧道净空面积/ m ²	附属设施气动荷载/ kPa	隧道洞口微气压波/ Pa
新建时速 400 km	0~0.20	23±3	100	正压 6.1, 负压 10.21	洞口最近栅栏处不超过 60
既有时速 350 km	固定闪光焊、铝热焊 0.1~0.3, 移动闪光焊 0~0.2	23±3	100	正压 5.9, 负压 8.9	距洞口 20 m 处不超过 50

弓等部位^[40]。速度是影响高速铁路噪声源的重要因素，时速 300 km 以下时以轮轨作用噪声为主，总声功率与列车速度呈 2~3 次方关系变化；时速 300 km 以上时以气动噪声影响逐渐成为主导，总声功率与列车速度近似呈 4 次方关系变化^[41]。基于此，探明高速铁路多源噪声形成机理和影响机制是针对性开展减振降噪设计的先决条件，国内外学者围绕轮轨噪声和气动噪声 2 大核心声源，在形成机理、预测方法和声源识别等方面开展了系统研究。

轮轨噪声研究方面，Remington^[42]率先基于轮轨耦合作用，理论分析了轮轨噪声的产生机理，提出轮轨粗糙度是诱发噪声的主要原因，在忽略整车质量以及其他部件对轮轨动力作用影响的前提下，提出了简化预测模型。Thompson 和 Kitagawa 等^[43-44]进一步完善了轮轨噪声理论分析模型，将分析对象扩展至轨下部件，并与欧洲铁路研究共同研发了轮轨噪声预测软件 TWINS。我国科研人员基于轮轨动力学理论和声辐射理论，持续深化研究轮轨噪声预测方法，围绕轮轨噪声形成机理以及辐射和传播特性开展了大量研究工作。圣小珍等^[45]建立了考虑轮对旋转效应的车轮声辐射分析模型，发现旋转轮对存在共振频率的分叉现象；李小珍等^[46]基于列车-轨道-桥梁耦合振动理论和边界元法，建立高速铁路 32 m 简支箱梁结构噪声预测模型，评估了桥梁二次结构噪声辐射影响。同时，针对丰富的应用场景，研究人员从移动装备、运行速度、轨道结构、桥梁结构、外部环境等方面，开展了多场景轮轨噪声特性的影响研究^[47]。

气动噪声研究方面，一般采用仿真分析、现场测试和风洞试验等方法开展高速列车气动噪声形成机理研究。结合 FW-H 方程和流场模拟，Zhu 等^[48]分析了高速列车气动噪声源及其传播特性，认为高速运行时车体表面局部涡流在车身和突出部件周围形成的脉动压力是产生气动噪声的主要原因。Nagakura^[49]采用声反射镜测量新干线列车 1/5 模型，分离出车头、受电弓、转向架、车厢连接处

等气动声源对距线路 25 m 处的噪声贡献量。Noh^[50]对时速 390 km 运行工况下高速列车开展声源识别试验，确定了车厢连接处、车轮和受电弓等主要气动噪声源发声部位。基于高速列车各个关键区域气动噪声特征，研究人员通过结构优化设计改善流固耦合作用，提出了转向架区域外设裙板与增加吸声结构、受电弓气动优化与导流设计、车厢连接区域平滑封闭设计、车体流线型设计等系列降噪措施。

运行速度以及各系统间匹配关系是影响高速铁路噪声的重要因素，关键区域多源噪声混叠现象制约制定精细化噪声控制措施，需结合新一代动车组研制开展研究。基于此，构建精细化宽频气动噪声仿真模型和基于高速旋转柔性轮对的轮轨噪声分析模型，实现了关键发声部位混叠噪声分离，得到不同速度下噪声声压级的分布特征如图 4 所示。从图 4 可以看出：时速由 350 km 提升至时速 400 km 后，气动、轮轨和总噪声分别增加 1.8，1.4 和 1.8 dB，主要发声部位无变化，下部区域噪声贡献占比由 79% 降为 73%。

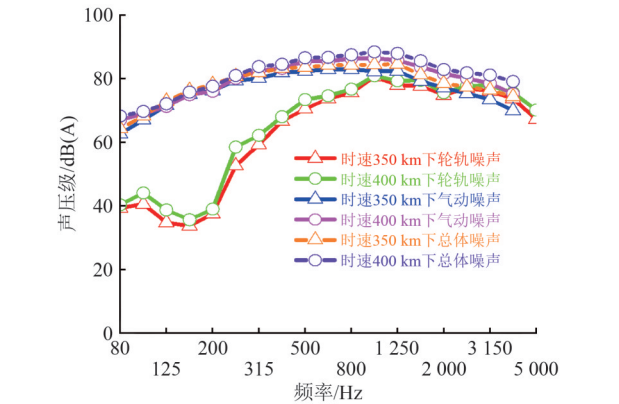


图 4 时速 400 km 高速铁路噪声声压级分布特征

在此基础上，基于声屏障声学 and 动力响应仿真分析模型及现场试验数据，明确了既有声屏障服役性能变化特征，提出了时速 400 km 高速铁路声屏障关键设计参数取值建议，研发出优化 I 型声屏障、顶端降噪结构、减载式声屏障，并完成了室内试验。其中，优化 I 型声屏障降噪系数 0.90、计

权隔声量 32 dB, 动力响应降低 10%~30%; 顶端降噪结构附加降噪效果约为 2 dB (A), 通过风洞试验和抗疲劳试验验证结构可靠性; 减载式声屏障降噪系数 0.95、计权隔声量 26 dB, 完成了减载效应缩尺动模型试验, 动力响应降低 20%~30%。

1.3 高速铁路隧道压缩波传播机制及洞口微气压波特性

空气动力学效应是制约动车组更高速、更安全发展的关键科学问题之一。隧道作为高速铁路的关键基础设施, 当动车组以更高速在隧道内通过、交会时, 列车、空气与隧道壁间的压力波交互作用显著增强。

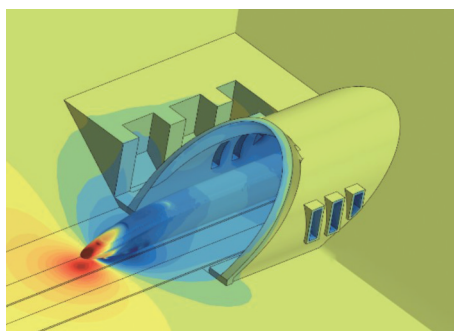
国外在隧道空气动力学基础理论和试验研究方面开展较早, Hara^[51]总结了高速铁路空气动力学主要面临的7个方面问题, 包括车内外压力、耳压舒适度、附加气动阻力、隧道内气动荷载等, 同时基于理论分析推导得出了隧道内压力波的计算方法。Aoki等^[52]结合现场试验和动模型试验的方法, 分析了压缩波在隧道内的传播发展过程, Fukuoka隧道(水力直径9 m, 长8 500 m)试验结果表明, 当动车组以时速200 km速度驶入, 初始压缩波传播距离由100 m增大至7 900 m后, 压力波峰值逐渐减小, 波形逐渐变陡且波前梯度逐渐增大。Mashimo等^[53-54]分别选取了4座新干线隧道及2种不同鼻长和车体截面积的动车组开展了通过试验, 通过对比分析隧道长度、轨道型式和动车组对压缩波传播特性的影响发现, 车体截面积更大的动车组通过相同隧道时, 产生的初始压缩波气动峰值更大。

我国依托武广、京沪空气动力学专项试验, 开展了系统性空气动力学研究。马伟斌等^[55]基于现场试验、模型试验和数值模拟分析, 揭示了隧道洞口微气压波产生机理, 明确了隧道长度、动车组车型、洞口空间立体角等因素对微气压波峰值的影响规律。Liu等^[56]基于实车试验, 分析了不同隧道内气动压力峰值的空间分布规律, 同时探讨了动车组车型对气动压力峰值的影响。实测结果发现动车组通过不同隧道时, 短隧道对应压力波的衰减系数更大。除现场试验外, 国内学者同步开展了大量动模型试验和数值仿真模拟研究。Zhang等^[57-58]研究了时速350 km速度级条件下, 斜切式缓冲结构设计参数(如斜切率、开孔率)对隧道内压力波和洞口微气压波峰值的影响, 分析结果表明斜切式缓冲结构增设2处顶部开孔后, 压力梯度和微气压波

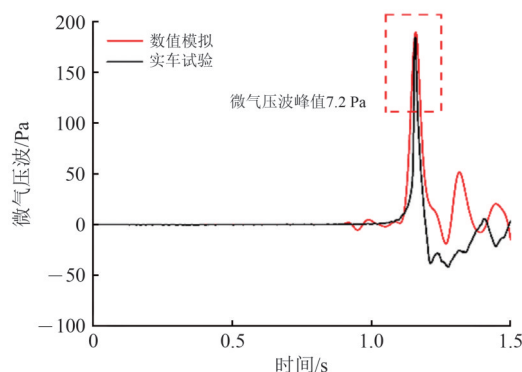
峰值缓解率分别可达到47%和48.1%。Wang等^[59]探讨了长大隧道内非线性效应下的压缩波激化现象, 基于理论分析定义了临界隧道长度并提出了其计算方法。Li等^[60]则分析了局部变截面激扰条件下隧道内压力波的突变规律, 量化分析了局部变截面长度、厚度等参数对隧道内气动压力和洞口微气压波峰值的影响。

当动车组提速至时速400 km后, 空气动力学效应进一步加剧, 长大隧道内压缩波激化、洞口微气压波超限问题更加突出。对此, 国内外学者针对时速400 km高铁隧道空气动力学效应问题开展了大量前沿性探索, 但主要以动模型试验和数值仿真分析为主, 且研究局限于有限场景及工况, 不能满足实际工程的场景需求, 在理论研究方面尚待进一步深化分析。

基于此, 开展时速400 km速度级隧道空气动力学理论研究。通过现场试验对仿真计算模型进行了优化, 实现了时速400 km及更高速度条件下隧道空气动力学参数仿真精度达到90%及以上, 如图5所示。



(a) 时速400 km条件下气动效应仿真计算模型



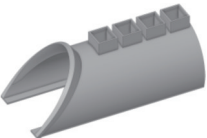
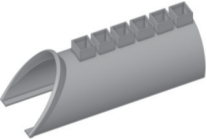
(b) 仿真计算模型精度验证(测点: 洞外20 m, 时速400 km)

图5 时速400 km条件下数值仿真计算模型及精度验证

进一步开展时速400 km隧道压力波及洞口微气压波传播发展特性研究, 基于空气动力学角度提出时速400 km高速铁路隧道合理净空面积可取值

100 m²，并分析隧道内压力波空间内传播发展规律，明确该速度级下通过工况和交会工况下高速铁路隧道轨旁设备气动荷载建议值分别为 4.4，—6.6 kPa 和 6.2，—10.3 kPa；评估了斜切式、等截面接长明洞等既有缓冲结构的缓解效果，并针对性提出缓冲结构参数优化建议及含斜切式扩大断面缓冲结构在内的集中较优型式，实现了时速 400 km 速度条件下气动缓解性能提升 15% 及以上。时速 400 km 条件下隧道洞口缓冲结构型式及对应微气压波缓解率详见表 3。

表 3 时速 400 km 条件下隧道洞口缓冲结构型式及微气压波缓解率

缓冲结构型式	结构示意图	微气压波缓解率/%
等截面斜切式+顶部 4 孔		75.1
等截面斜切式+顶部 6 孔		77.0
扩大截面斜切式+侧部 3 孔		68.7

2 时速 400 km 高速铁路线路基础设施关键技术及核心设备

时速 400 km 高速铁路对线路基础设施的平顺性、稳定性、耐久性提出了更高的要求。因此，围绕关键装备研发、结构优化设计、服役性能提升等核心方向，结合国内外研究进展，系统阐述为适应更高运行速度、更严苛动力环境所必须突破的轨道、路基、桥梁等关键基础设施的性能瓶颈和技术升级路径。在此背景下，实现关键轨道装备、路基结构、桥梁体系的性能升级与技术突破，为构建时速 400 km 高速铁路基础设施成套技术提供支撑。

2.1 轨道关键装备

2.1.1 钢轨

高速铁路钢轨关键技术研究主要围绕钢轨制造和服役标准、轨面平顺性控制、焊接接头质量控制、钢轨廓形优化以及钢轨打磨等方面展开。

国外高速铁路发展较早，已形成较为完善的钢

轨技术体系。欧洲以 EN 13674-1，EN 14587-1 和 EN 13231-2 等标准^[61-63]为代表，分别对钢轨产品性能、焊接接头质量和打磨验收作出系统规定，其技术思路主要是通过高平顺性制造、严格的焊接整修及周期性修理，控制轮轨冲击和服役劣化。我国现行 TB/T 2344.1 和 TB/T 1632.1 等标准^[64-65]已对高速铁路钢轨母材及焊接接头的平直度、焊接质量和检测方法形成了较完备的技术要求，整体控制水平已与国际先进标准接轨。

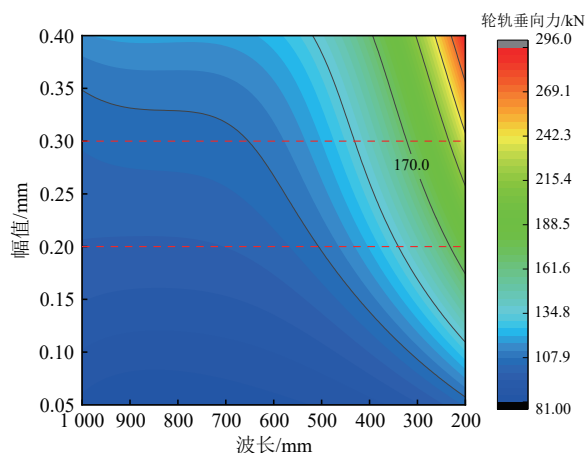
我国高速铁路钢轨技术经过长期工程应用和持续优化，已逐步形成以轮轨匹配为主线、以廓形优化和预防性打磨为抓手的技术体系。围绕高速动车组轮轨关系优化需求，我国铁路在借鉴欧洲 60E1 和 60E2 钢轨型面经验的基础上，形成了 60D 预打磨设计廓形和 60N 新廓形，并通过试验研究、现场跟踪和动力学分析验证了其在改善轮轨接触点分布、控制等效锥度和降低异常振动风险方面的有效性。

国内围绕钢轨打磨偏差、轨面波磨、焊接接头动态响应及轮轨耦合振动模态等方面开展了大量研究，揭示了钢轨几何状态与车辆运行品质、轮轨力和接触损伤之间的关联机制^[66]，研究表明 60N 廓形钢轨与 LM_A 和 LM_B 型踏面高速车轮具有较好的匹配适应性，可在较大范围内将轮轨接触点控制于轨头踏面中心附近，并维持相对合理的等效锥度^[67]。同时，预打磨策略、预防性打磨周期、打磨质量评估方法和异常振动区段整治技术也逐步发展成熟^[68-70]，钢轨状态控制已从“满足几何验收”转向“面向动力学性能和服役行为的精细化控制”。

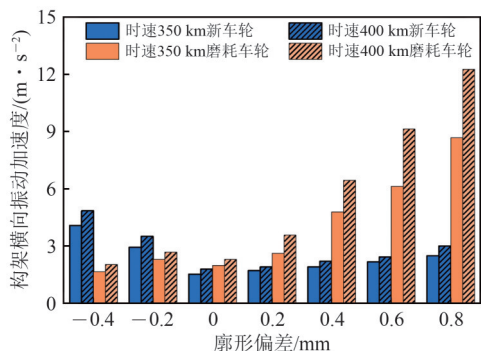
面向时速 400 km 高速铁路，钢轨技术面临的新要求主要集中在平顺性和廓形 2 个方面。首先，随着速度提高，轮轨系统对钢轨轨端、焊接接头及局部短波不平顺的敏感性显著增强，钢轨几何状态的微小变化即可引起轮轨垂向力、轮重减载率和车辆振动响应的明显放大^[71]；其次，钢轨廓形控制目标已不再局限于满足静态偏差限值，而是需要在服役演化过程中持续维持合理的轮轨匹配关系，尤其是负偏差过大时，轮轨接触几何关系和等效锥度会发生不利变化，从而加剧车辆横向振动和运行品质劣化。因此，时速 400 km 条件下钢轨技术的迭代方向，应在更严格的轨面平顺性限值框架下，兼顾钢轨廓形容差、打磨偏差和长期服役演化规律，实现母材、焊接接头与廓形状态的一体化控制^[72]。

针对时速 400 km 运行条件下高速铁路钢轨适

应性、轨面平顺性控制要求及不平顺合理限值进行系统分析,结果如图6所示。从图6可以看出:钢轨不平顺对速度提升具有显著敏感性,其影响主要体现为轮轨垂向力和轮重减载率的持续增大,平直度幅值 0.2 mm 可视为关键控制节点,超过该值后轮轨动力学指标随速度增长呈加速恶化趋势;钢轨廓形偏差对速度的提升也具有显著敏感性,在时速 400 km 条件下,新车轮与 -0.2 mm 以上偏差钢轨廓形匹配、磨耗车轮与 $+0.2\text{ mm}$ 以上偏差廓形匹配时,构架横向振动加速度持续增大。



(a) 时速 400 km 条件下轮轨垂向力与钢轨波长-幅值关系



(b) 钢轨廓形偏差对动车组构架横向振动加速度影响

图6 $400\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 高速铁路钢轨适应性分析

研究表明,既有高速铁路钢轨平顺性基本能够适应更高等级运行要求,但垂向平顺性控制标准仍需进一步提高,关键控制部位主要集中于钢轨轨端顶面和焊接接头轨顶面,综合现场测试与仿真分析,时速 400 km 区段钢轨母材轨端不平顺宜控制在 $0.3\text{ mm}\cdot\text{m}^{-1}$ 以内,现场焊接接头顶面平直度宜控制在 $0\sim+0.2\text{ mm}\cdot\text{m}^{-1}$ 以内;综合实测廓形、打磨偏差和轮轨动力学分析结果,时速 400 km 区段钢轨廓形偏差宜控制在 $\pm 0.2\text{ mm}$ 范围内,并通过廓形优化与精准打磨维持良好的轮轨匹配状态,实现了轨道综合动力性能提升 5% 。

2.1.2 扣件

扣件系统作为高速铁路轨道结构的关键组成部分,其性能直接关系到列车运行的安全性、平稳性和舒适性。当前,我国已形成较为完善的高速铁路扣件技术体系,自主研发了高速铁路有砟轨道用弹条Ⅳ型扣件、弹条Ⅴ型扣件及无砟轨道用WJ-7型扣件和WJ-8型扣件,在我国大部分高铁线路及印尼雅万高铁等得到了广泛应用,时速 350 km 及以下高速铁路技术扣件体系日趋完善。国外方面,日本、欧洲等国家和地区正研制时速 400 km 动车组,并计划将运营速度提升至时速 360 km ,但针对时速 400 km 速度级扣件系统的研究相对较少,相关资料公开较少^[73]。

随着运营速度的提高,扣件系统面临的主要挑战包括:①轮轨作用加剧,轮轨间的相互作用力尤其是高频相互作用力随速度的提高而增大^[74-75];②轮轨周期性磨耗问题凸显,现场数据统计分析表明,既有时速 350 km 高速铁路轮轨周期性磨耗条件下的轮轨激励频率相对固定,集中在 $500\sim 650\text{ Hz}$,既有轮轨周期性磨耗条件下速度提高至时速 400 km ,轮轨激励频率将提高,与既有扣件弹条固有频率接近,易产生弹条共振伤损^[76-77];③螺旋道钉松退问题在异常锤击作用下可能更加突出^[78]。

针对上述挑战进行研究,结果表明:配套既有WJ-8型扣件系统,动车组以时速 $350\sim 450\text{ km}$ 通过线路时,各项动力学指标均未超出相应标准限值;但当既有时速 350 km 线路存在激励频率为 $500\sim 650\text{ Hz}$ 的轮轨周期性磨耗,列车速度提高至时速 400 km 时,根据轮轨激励频率与速度成正比的关系,轮轨激励频率 f 将提高至 $571\sim 743\text{ Hz}$ ($f=400/350\times(500\sim 650)\text{ Hz}$),与既有高速铁路无砟轨道扣件W1型弹条(1阶频率 655 Hz ,2阶频率 787 Hz)和SKL 15型弹条(1阶频率 493 Hz ,2阶频率 568 Hz)的固有频率接近,易产生弹条共振伤损。因此,通过系统优化时速 400 km 扣件系统可实现弹条固有频率、螺旋道钉抗松退性能、钢轨位置调整能力等关键性能提升,为时速 400 km 高速铁路安全运营提供了可靠保障。研发的时速 400 km 高速铁路扣件系统如图7所示。

具体成果如下:①明确了无砟轨道扣件垫板静刚度 $23\pm 3\text{ kN}\cdot\text{mm}^{-1}$ 可满足运行时速 400 km 动车组的需要;②提出了高自频弹条优化设计方案,通过优化弹条线形提升其固有频率;③提出新型螺旋

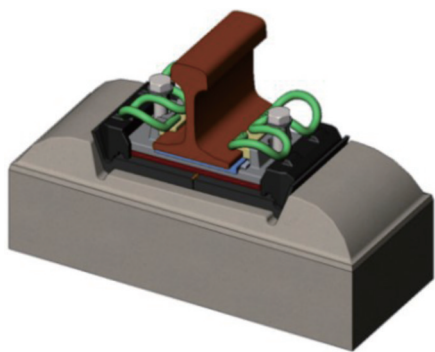


图7 时速400 km高速铁路扣件系统

道钉结构,提升螺纹摩擦系数,优化了螺旋道钉抗松退性能;④通过优化轨距挡板、预埋套管、轨下垫板等关键部件,提高了扣件系统的整体性能。

2.1.3 道岔

道岔结构复杂、部件繁多、状态多变,是高速铁路基础设施的重要组成部分。目前世界上拥有自主研发高速道岔的国家有日本、法国、德国和中国。日本于20世纪60年代开始研制18号高速道岔,90年代研制了直向过岔速度为时速240 km的38号道岔,且在后续的发展中逐渐完善了这2种道岔。法国和德国已分别于20世纪70年代和80年代展开对高速道岔的研究,迄今为止法国已拥有4代高速道岔,德国高速道岔也发展至第3代^[79-80]。自2005年起,我国开始进行高速铁路系列道岔的自主研发,形成了18号、42号和62号系列高速道岔以满足不同速度等级和不同道岔号码的需求,构建了设计研发、制造加工、系统试验和运营维护为一体的高速道岔技术体系。目前我国高速道岔总量约1.5万组,最高运营时速为350 km,经过多年的运营实践,总体服役状态良好。但长期服役后一些典型问题也逐渐出现,如道岔区晃车、钢轨伤损、轨件磨损及岔区几何尺寸超限等^[81-82]。

面向时速400 km高速铁路发展需求,道岔区存在焊接接头、轮载过渡、刚度不均匀等固有不平顺,随着列车过岔速度的提升,轮轨冲击作用将进一步增强,影响行车平稳性并降低道岔部件使用寿命。围绕更高速度等级道岔关键技术,王树国^[82]系统分析了我国既有高速道岔的技术体系与运营实际中存在的问题,提出了高速道岔未来发展要点,为时速400 km道岔优化升级提供基础。王平等^[83-84]通过建立车辆-道岔耦合模型和高速道岔转换计算模型,分析了既有18号高速道岔对时速400 km高速列车的适应性,指出了可采用改善轮

轨关系、尖轨跟端传力结构和牵引点动程设计优化等方法提升高速道岔行车平顺性。王璞等^[85-86]分析了尖轨不足位移和心轨翼轨离缝等道岔病害对岔区钢轨件磨损及行车性能影响,指出既有高速道岔提速限制因素,并提出了时速400 km高速道岔号码选型和结构优化方法。胡红军等^[87]开展了更高等速度等级技术研究,从道岔选型、站场布置、工程投资、铁路运营效率及道岔实际应用效果等方面,对道岔号数选取及侧向过岔速度建议值开展分析。

整体来看,目前国内外对时速400 km速度级的高速道岔系统技术研究较少。既有时速350 km高速道岔运用实践中与平顺性相关的主要问题包括:钢轨不足位移、辙叉区轮载冲击较大、岔区刚度不均匀及弹性垫板劣化等^[88-90]。因此,为进一步提升道岔平顺性,适应时速400 km速度级高速列车的运营需求,系统开展了时速400 km高速道岔结构设计,从道岔号码与线型、转辙器结构、辙叉结构以及扣件系统等方面开展研究,研发的时速400 km高速铁路道岔结构,如图8所示。

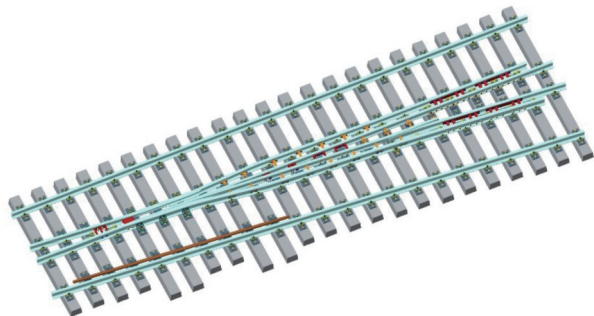


图8 时速400 km高速铁路道岔结构

具体成果如下。

(1) 高速道岔号码与线型匹配。既有尖轨-基本轨匹配关系能够满足时速400 km运营要求,在考虑与既有时速350 km高速道岔轨下基础通用的条件下,时速400 km高速道岔仍沿用既有时速350 km客运专线18号高速道岔尖轨-基本轨降低值设计。

(2) 尖轨不足位移控制。为有效控制尖轨不足位移,通过减小尖轨可动段长度和优化牵引转换动程控制尖轨不足位移。优化后尖轨不足位移最大值不大于3 mm,转换力和最小轮缘槽宽度满足要求,道岔结构稳定性和强度满足要求。

(3) 辙叉区心轨翼轨匹配优化。为降低辙叉区轮载冲击作用,消除车辆通过时轮对质心的下降趋势,优化翼轨心轨匹配关系,有效地降低列车高速

通过辙叉时的轮对质心波动、轮轨动力冲击及轮对振动水平。为降低心轨转换扳动力,基于转换过程中长、短心轨的实际弹性变形状态,对连接部件尺寸进行优化,进而减小辙叉结构系统内部相互作用力,降低辙叉组装难度,减小转换力。

(4) 盆区刚度优化。为进一步提高道岔区平顺性,对岔区扣件系统开展优化设计,以实现与区间刚度一致,匹配时速400 km高速客车轻量化设计,且刚度均匀化标准进一步提高,同时对岔区弹性铁垫板结构进行优化,提高其耐久性。

2.2 路基关键技术

随着高速铁路运行速度进一步提升,路基作为轨道结构的承载基础,其动力响应特性、变形控制标准及长期服役性能面临更为严苛的要求。速度的提升不仅显著放大了轮轨动态相互作用,还使路基不均匀沉降、局部刚度突变等传统平顺性控制问题呈现出非线性放大效应。在此背景下,既有基于时速350 km速度级建立的路基设计参数与沉降控制标准是否仍适用于时速400 km更高速度,已成为制约高速铁路提速工程应用的关键技术问题。

对于时速350 km速度级,TB 10621—2014《高速铁路设计规范》^[91]明确规定无砟轨道路基工后沉降限值为15 mm,不均匀沉降折角不得大于1‰。相关研究结果表明^[92-93]:时速350 km高速铁路现行路基沉降控制标准对时速400 km高速列车具备适用性。当列车速度从时速350 km提升至时速400 km时,轮轨动力响应虽显著增大,但轮轨作用力未超出规范限值,脱轨系数远低于规范最大限值,轮重减载率虽超出准静态限值,但动态指标仍满足要求,且各稳定性指标均保留充足安全裕量。在此基础上,为应对时速400 km速度下更为严苛的动力环境与长期服役要求,路基结构的强化与性能提升成为国内外技术发展的重点。

全断面沥青混凝土封闭结构作为路基防水与动力性能优化的核心技术,相关学者已开展多维度深入研究。Ye等^[94]研发了0.1 m沥青混凝土+0.3 m级配碎石的复合表层结构,通过全断面封闭实现防水和刚度强化的双重目标,试验验证表明温度变化对沥青混凝土层模量影响显著(−20~60℃范围内模量变化达3~5倍),需在设计中引入季节折减系数。Cai等^[95]建立了考虑温度应力与列车荷载耦合的拉伸损伤判据,为结构优化设计提供了理论支撑。Ding等^[96]通过优化沥青混合料级配和压实工艺,使结构动阻尼比提升40%,有效降低轮轨

振动荷载的传递。

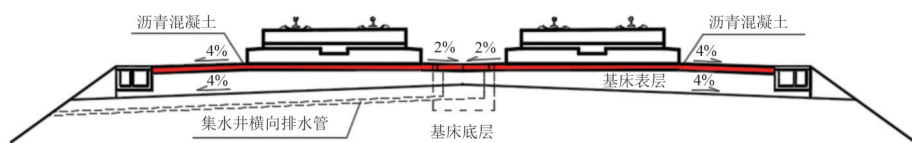
路桥过渡段作为路基平顺性控制的薄弱环节,传统过渡段多采用级配碎石填料实现模量过渡,岩石地基适用纯级配碎石,土质地基则采用级配碎石+5%水泥方案。针对时速400 km的更高技术要求,工程技术人员围绕刚度渐变设计开展持续深化研究^[97-98],提出了“桩板+倒梯形”组合结构,通过增设高桩板强化台背刚度,使差异变形降低约10%。通过仿真分析表明,在1‰极限折角条件下,该结构可使车体竖向振动加速度降低近50%,显著提升过渡段行车安全性与舒适性;通过现场试验验证,该新型结构在时速400~450 km速度级下,沿线路纵向20 m范围内动力分布更均匀,动力响应幅值显著低于传统过渡段。

对于时速400 km速度级,轨道短波不平顺的速度敏感性显著提升,路基沉降变形对行车性能的影响呈非线性放大,线路平顺性控制面临更严苛的技术要求。研究表明^[99],列车通过路基差异沉降区域时,车体横向稳定性受速度提升的影响大于竖向稳定性,钢轨垂向位移接近安全限值,轮重减载率平均增幅达17.4%,虽未超出动态限值,但已接近准静态临界值,对路基平顺性控制精度提出更高要求。另一方面,时速400 km下高速列车产生的4.5~5.0 Hz振动频率,易导致沥青层与级配碎石层界面脱黏,在温度与荷载耦合作用下进一步加剧材料疲劳损伤,即路基结构防水与减振性能的长期稳定性面临挑战;同时,列车动载引起的路基动应力幅值达17~23 kPa,台背差异沉降引发的轮轨动力作用显著增大,传统的过渡段刚度渐变设计已无法满足变形协调要求^[100]。

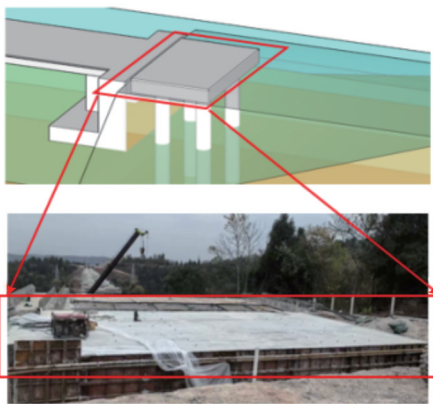
基于此,建立“波长-幅值-速度”三维控制体系,针对敏感波长区段,提出路基差异沉降条件下的控制标准,重点控制沉降中心区域轨道结构变形,通过强化局部刚度实现动态响应优化,研发了时速400 km高速铁路新型路基结构和路桥过渡段结构,如图9所示。

具体成果如下。

(1) 优化沥青封闭结构。采用高模量改性沥青材料,提升−20~60℃温度区间的模量稳定性;优化复合结构界面设计,增设抗剪嵌锁层防止层间滑移;通过调整沥青混合料级配,进一步提升结构阻尼比,强化减振降噪效果。针对时速400 km列车的高频振动特性,优化沥青混凝土层厚度与压实工艺,增强结构抗疲劳性能。



(a) 考虑强化基床表层的新型高速铁路路基结构型式



(b) “桩板+倒梯形”过渡段结构

图9 时速400 km高速铁路新型路基结构和路桥过渡段结构

(2) 优化“桩板+倒梯形”结构参数。通过调整桩长与桩间距优化纵向刚度梯度,使台背差异变形进一步降低至10%以上;结合BIM数字化建模技术,实现过渡段与桥梁、轨道结构的协同设计,提升刚度匹配精度。

(3) 敏感波长控制要求。明确了时速400 km路基平顺性的量化控制标准,工后沉降限值维持15 mm不变,但新增敏感波长控制要求,规定路基沉降波长不宜小于30 m;建立了变形波长与幅值的耦合控制图谱,划分超限区、过渡区和稳定区,为施工质量控制提供可视化依据。

(4) 工程应用验证。在成渝中线高速铁路增设了全断面沥青混凝土路基试验段,并建立了结构温度-荷载耦合设计方法,提出不同气候分区的沥青混合料配合比方案,在-20℃低温环境下结构抗拉强度提升25%,60℃高温下变形量控制在允许范围内。前期试验和仿真结果表明,该结构可使路基振动加速度降低40%,轮轨噪声减少3~5 dB,实现防水与减振降噪的协同优化。

同时,完成150处新型桩板过渡段施工图设计和工程应用,仿真结果表明:该结构可使台背差异变形平均降低12.7%;沿线路纵向20 m范围内,动力响应峰值降幅15%,刚度渐变更趋平缓。

2.3 桥梁关键技术

我国高铁建设采用以桥代路模式,桥梁平均占线路比例50%以上,其中基于预制架设的标准梁式桥在桥梁中占比超过95%,前期跨度以24和32

m简支箱梁为主。基于理论分析、动力仿真计算和试验验证等方法,并结合多年的应用实践经验,我国铁路科研人员明确了ZK荷载图式、简支梁基频、挠跨比、梁端转角、残余徐变变形等高铁桥梁设计荷载和关键设计参数,形成了基于变形控制与梁轨协同作用的高速铁路标准梁成套技术参数和结构设计方法,构建了高速铁路桥梁成套技术体系^[101]。

随着既有线铁路提速和高速铁路大规模建设,我国铁路桥梁设计、建造技术快速发展。科研和设计人员广泛吸收、总结国外高速铁路和秦沈客运专线整孔箱梁在设计、施工方面的实践经验,根据应用需求将标准简支箱梁跨度提升至32 m,明确了简支梁桥基频、刚度、变形等技术指标,研究确定了整孔简支箱梁的结构型式、结构尺寸、预应力束布置等,配套研制了900 t级箱梁运架设备^[102-103]。综合考虑车桥动力性能、运架条件、梁体受力特点以及构造布置要求,提出了基于制运架的40 m简支箱梁设计方法^[104-106],研发了高速铁路40 m简支箱梁,开创了国内外铁路预制架设简支箱梁的最大跨度,相比既有32 m简支箱梁每延米的重量降低6%。采用预制架设技术的标准简支箱梁结构刚度大、承载能力强、稳定性好,并且施工速度快、质量易于控制、受外界环境影响小、养护维修成本低,实现了铁路桥梁建设的标准化和工厂化,为我国高速铁路桥梁建设做出了贡献。

随着材料技术和设计技术的发展,项目组率先

开展了2 200 MPa及以上超高强度预应力钢绞线、配套夹片式锚固体系以及大吨位预应力锚固体系的研发和应用^[107],掌握了强度2 200~2 400 MPa超高强度预应力体系的材料、生产工艺和大吨位锚固区设计等核心技术,实现了预应力体系的重大技术升级,引领我国各行业预应力强度等级大幅突破2 200 MPa,解决了长期以来预应力构造尺寸控制简支梁结构设计的难题,为结构设计技术的提升创造了有利条件。

基于高速铁路40 m简支箱梁技术创新实践,我国科研人员系统完成了高速铁路32 m及以下跨度简支箱梁整体构造、局部设计和预应力体系的优化提升^[108],大幅节省了混凝土、普通钢筋和预应力筋等材料用量,降低了工程造价,形成了更加经济适用的20, 24, 32和40 m谱系化简支箱梁结构。以高速铁路32 m梁为例,梁重降低11.8%,混凝土、普通钢筋和预应力筋用量减少8%~13%,梁部造价降低显著,经济效益巨大。

列车速度提升后,对桥上轨道平顺性提出更高要求。在时速400 km高速铁路桥梁关键参数研究方面,李小珍等^[109]、宋晓东等^[110]、徐昕宇等^[111]分析了莫喀高铁常用跨度简支梁在时速400 km条件下的动力响应,提出了简支箱梁竖向频率限值;庞志强等^[112]基于实测轨道平顺性数据,给出了不同荷载组合工况下时速400 km连续梁桥徐变变形阈值;李国龙等^[113]基于60 m中点弦测法给出了时速400 km高速铁路大跨度桥梁轨道静态长波不平顺控制标准。在既有高速铁路桥梁提速适应性研究方面,王巍^[114]、班新林等^[115]、蔡超勋等^[116]的研究表明既有设计时速350 km高速铁路简支梁桥在提速条件下的运营性能指标均满足规范要求,既有简支梁桥能够适应时速400 km运营条件。李克冰等^[117-118]进一步研究了ZK荷载图式对时速400 km高速铁路的适应性,并通过仿真分析和现场试验验证了既有时速350 km高速铁路112 m系杆拱桥能够适应时速400 km运营需求。目前,高速铁路桥梁对时速400 km运行条件的适应性研究主要集中简支梁桥。大跨度铁路桥梁结构类型多样,包括斜拉桥、拱桥等形式,在时速400 km条件下的动力性能及适应性研究较少。

面向日趋广泛的更高速度高速铁路建设场景,围绕高速铁路桥梁技术经济性能提升需求与行车安全舒适性能合理匹配的技术难点,系统研究了新建时速400 km高铁梁式桥的设计荷载、基频和变形

变位等关键技术参数,分析了既有高铁梁式桥的时速400 km运营适应性,建立了高铁桥梁适应时速400 km的技术参数体系,相关成果在福厦、武宜高铁得到全面验证;在成渝中线高速铁路首次应用采用2 200 MPa预应力体系的40 m简支梁(如图10所示)和2.8 m高的32 m简支梁,推广应用先进材料技术;提出了既有高铁简支桥梁提速至时速400 km适应性评估方法,包含状态普查、活载效应对比、理论仿真、试验测试、工务运维分析5个部分,研究提出的评估方法可指导类似的工程实践。

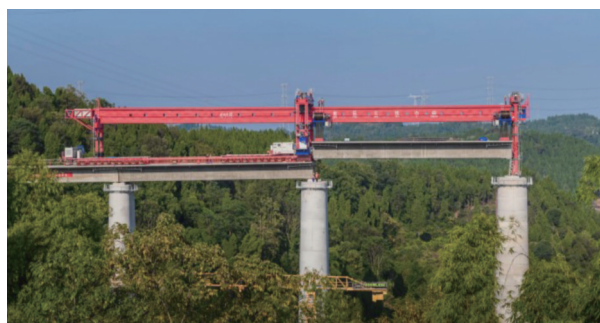


图10 成渝中线高铁40 m简支梁架设

3 时速400 km高速铁路线路平顺性评价与控制技术

轨道不平顺是列车-轨道系统振动与脱轨风险的核心诱因,日本、德国、法国等国家的高速铁路起步较早,也较早开展了轨道平顺性评价和管理的相关研究,欧盟和ISO近几年也对轨道不平顺管理标准进行了修订。通过对比可知:国外高速铁路最高运营速度达到时速320 km,目前欧盟EN的高速铁路轨道不平顺管理标准的最高速度等级设定为时速360 km。各国轨道不平顺的评价项目基本一致,但不同国家轨道不平顺管理波长/弦长、幅值有所区别,不同的运营速度对应不同的不平顺管理频段。

国内外高速铁路国家均依据不同波长范围制定各自相应的轨道不平顺管理幅值。我国轨道不平顺管理波长范围分别为1.5~42 m(全速度级)、1.5~70 m(200~250 km·h⁻¹速度级)及1.5~120 m(250~350 km·h⁻¹速度级);欧盟EN标准分为3~25, 25~70和70~150 m(200 m)共3段;日本分为10和40 m弦;法国以高低不平顺31 m弦(前端12.2 m)和轨向不平顺33 m弦(前端10 m)分别管理中短波及长波轨道不平顺;德国管理波长采用6 m弦(前端2.6 m)和6 m弦(前端4 m)不

等弦。从国内外管理波长对比分析可知,我国高速铁路“250~350 km·h⁻¹”速度等级的轨道不平顺管理标准整体严于法国、德国及欧盟EN标准,与日本新干线接近。我国以截止波长42 m控制中短波轨道不平顺相较欧盟EN截止波长25 m及德国不等弦25 m管理波长范围均较宽,轨道短波不平顺对于行车安全性指标影响较为明显,且时速400 km运行条件将更加放大轨道短波不平顺对于行车安全性指标的影响程度。

因此,应结合不同波段的轨道不平顺分布特征,通过建立车辆-轨道耦合动力学仿真模型,揭示不同速度条件下的轨道不平顺几何参数与车辆动力学性能的相互映射关系,依据轨道不平顺对安全性指标的影响程度细化管理波长区间范围,达到既能全方位无死角确保安全、又能防止“过度维修”的目的。

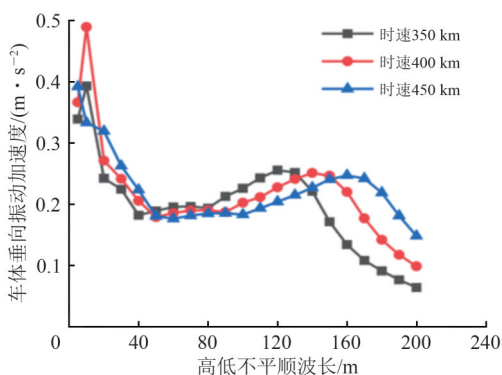
3.1 轨道几何平顺性评价指标与管理标准

3.1.1 适应时速400 km的轨道不平顺合理截止波长

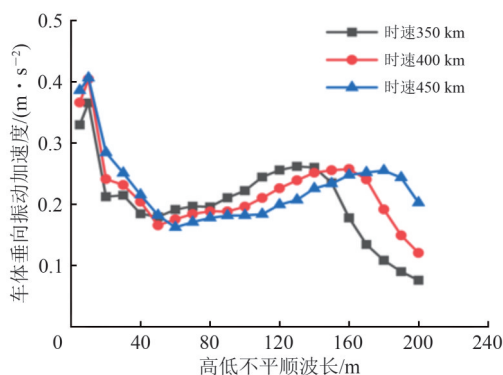
目前,我国既有高速铁路对于轨道动态几何管理值的规定^[119]是按1.5~42 m和1.5~120 m这两个波长范围对高低、轨向不平顺进行评判。为提升动车组运行平稳性的需求,采用更长的波长区段评价轨道不平顺,但伴随新建或提速至时速400 km的发展趋势,既有标准中的长波截止波长是否能适应速度提升到时速400 km的要求,尚需要开展相应的理论分析。

采用数值仿真分析高低、轨向不平顺随着速度增加敏感波长的变化特征。不平顺样本采用离散余弦简谐激励,波长范围取10~200 m、幅值统一取6 mm,考察车体振动加速度随波长的变化趋势,得到不同速度下高低不平顺波长对车体垂向振动加速度峰值的影响规律如图11所示。

从图11可以看出:CR400AF型动车组在时速



(a) CR400AF 型动车组



(b) CR400BF-J 型动车组

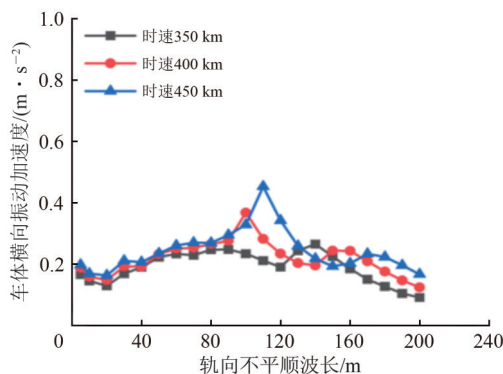
图11 不同车型在不同速度下运行时高低不平顺波长对车体垂向振动加速度峰值影响

350, 400 和 450 km 条件下对应的高低不平顺长波敏感波长分别为 120, 140 和 160 m; CR400BF-J 型动车组在时速 350, 400 和 450 km 条件下运行时对应的高低不平顺长波敏感波长分别为 130, 150 和 180 m。

速度提升导致长波敏感波长存在增大趋势,2 种车型对应的敏感波长均已超出目前 120 m 截止波长的限值范围。通过仿真分析 2 种类型动车组通过设置有不同波长轨向不平顺激励工况下的车体横向振动加速度分布规律,得到影响运行平稳性的轨向不平顺敏感波长数值如图 12 所示。

从图 12 可以看出: CR400AF 型动车组在时速 350, 400 和 450 km 条件下运行时对应的轨向不平顺长波主要敏感波长分别为 90, 90 和 100 m, 次要敏感波长分别为 140, 150 和 170 m; CR400BF-J 型动车组在时速 350, 400 和 450 km 条件下运行时对应的轨向不平顺长波敏感波长分别为 70, 80 和 90 m。

综上,建议时速 400 km 高速铁路的轨道几何检测系统的长波高低不平顺、长波轨向不平顺截止波长建议统一调整为 150 m。



(a) CR400AF 型动车组

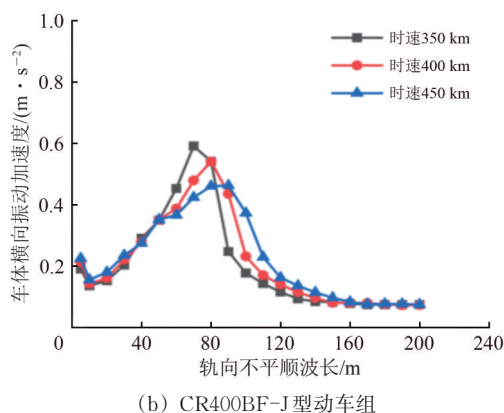


图12 不同车型在不同速度下运行时轨向不平顺波长对车体横向振动加速度峰值影响

3.1.2 适应时速400 km的动态偏差管理限值

基于车辆动力学仿真分析,考察既有TG/GW 115—2023《高速铁路线路维修规则》^[119]中“250~350 km·h⁻¹线路轨道动态质量容许偏差分级管理值”能否满足时速400 km运营及动态验收安全性、平稳性的要求。

充分考虑不利边界条件的影响,按直线区段(总长1 000 m)与最小半径曲线区段(总长2 500 m)组合情况考虑,并施加中国高速铁路无砟轨道不平顺谱作为随机不平顺。参考Q/CR 9621—2023《成渝中线高速铁路设计暂行规范》^[120]中“最小平面曲线半径7 500 m”和TJ/CL 591—2022《CR450动车组总体技术条件(暂行)》^[121]中“最大超高175 mm,最大欠超高允许值90 mm”,即对应最小平面曲线半径7 500 m的规定,平面曲线选取最小曲线半径7 500 m为研究对象,缓和曲线长度为630 m、超高175 mm,时速400 km条件下未被平衡离心加速度为0.05g(g 为重力加速度)。仿真工况设置如图13所示,预设典型波长、不同类型的余弦型轨道不平顺,并将不平顺峰值布置在平面曲线圆缓点位置。此外,1.5~42 m波段高低和轨向不平顺还需要检算连续多波条件下的适应性。

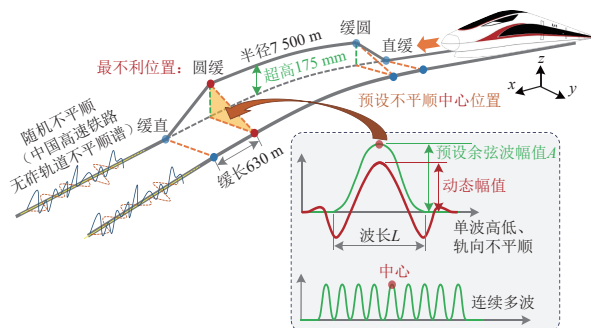


图13 仿真工况

通过仿真分析时速400 km运行条件下各单项轨道几何不平顺幅值变化对安全性、平稳性的影响规律,结果表明:高低、轨向(中短波)、水平、大轨距、小轨距、三角坑、复合不平顺等的动态局部容许偏差管理值均可继续沿用既有规定;1.5~150 m长波轨向不平顺Ⅰ、Ⅱ和Ⅲ级管理限值建议应提高相应控制标准,Ⅳ级管理限值可保持既有12 mm不变。

3.2 无砟轨道变形控制技术

无砟轨道是沿线路纵向分布的超长带状结构,受轨道自身结构特征、环境作用等影响,多条高速铁路均检测出与无砟轨道结构单元长度相关的周期性不平顺,对列车运行舒适性产生了一定影响^[122-123]。随着列车运行速度增加,轮轨冲击进一步加剧,时速400 km高速铁路对无砟轨道周期性变形控制提出了更高要求。

我国时速350 km以上高速铁路均采用无砟轨道,针对更高速度列车运行下的无砟轨道平顺性控制难题,在自主化CRTSⅢ型板式无砟轨道技术体系基础上^[124-125],建立了考虑温度变化的无砟轨道仿真分析模型,明确了时速400 km高速铁路无砟轨道周期性不平顺机理及影响规律。考虑轨道结构设计参数、轨道板制造、无砟轨道铺设等结构变形关键影响因素,创新了双向先张预应力轨道板智能制造技术,制造精度达到亚毫米级,提出被动限位优化方案并开展了自密实混凝土灌注等关键工序工艺性试验验证,形成时速400 km无砟轨道周期性变形控制技术方案,如图14所示。



图14 无砟轨道变形控制技术

通过无砟轨道变形控制技术的实践应用,实现了无砟轨道周期性变形幅值小于1.5 mm(每5 m),进一步提升了轨道结构平顺性。

4 结论及展望

时速400 km高速铁路基础设施关键技术研究

主要包括以下几个方面的研究成果。

(1) 系统综述了国内外时速400 km高速铁路线路基础设施的关键技术研究进展,依托高速铁路科技创新工程实践,结合既有时速350 km技术体系,基本形成时速400 km高速铁路线路基础设施的力学机理、关键参数、设计方法,理论体系趋于完善,实现轨道综合动力性能提升5%,减振降噪效果提升10%以上,隧道气动效应缓解效果提升15%以上。

(2) 阐明了更高速度下的关键科学问题与响应机理。研究揭示了时速400 km条件下轮轨动力作用的非线性增长与高频特征,量化了多源噪声随速度的演化规律,明确了隧道压缩波激化与微气压波控制的核心机制,为更高速度高速铁路技术攻关奠定了理论基础。

(3) 构建了高精度的仿真分析方法与参数设计体系。建立了车辆-轨道-基础设施多尺度精细化耦合模型,科学表征了强非线性部件特性,形成了涵盖轨道、路基、桥梁、隧道的时速400 km关键设计参数体系,突破了经验外推的设计局限。

(4) 突破了轨道关键设备的性能瓶颈。提出了时速400 km钢轨平顺性与廓形的精细化控制指标,研发了高自频弹条扣件系统以规避共振风险,优化了道岔结构平顺性与刚度均匀性,显著提升了轮轨系统的高速服役稳定性。

(5) 创新了线下基础结构以适应严苛动力环境。发展了全断面沥青混凝土强化基床路基结构与新型“桩板+倒梯形”路桥过渡段技术,建立了路基沉降“波长-幅值-速度”三维控制体系,明确了时速350 km高速铁路现行路基沉降控制标准对时速400 km速度级具备适用性;验证并推广了超高强预应力简支梁谱系,确保时速400 km线下结构的长期平顺与安全。

(6) 建立了面向时速400 km的轨道平顺性评价与标准体系。将轨道不平顺管理波长扩展至150 m,制定了适应更高速度的动静态评价指标与管理标准,构建了从设计、建造到运维的全流程技术标准框架,支撑了工程实践的有序推进。

时速400 km高速铁路已从技术储备迈入工程验证的关键阶段。展望未来,应重点深化多物理场耦合机理研究,发展更高速度“车-轨-路/桥/隧-气”多系统耦合动力学模型;推进智能建造与智能运维技术,建立全生命周期健康监测与预警系统;依托成渝中线高速铁路等高速试验段,开展长期跟踪试验验证;探索轻质高强材料、减振降噪超材料等新结构应用;完善覆盖设计、施工、验收、运维全过程的时速400 km技术标准体系。在此基础上,进一步向超高速轮轨关系极限探索、基础设施智能化与数字孪生运维、绿色低碳长寿命结构等方向深化,持续引领世界高速铁路技术发展。

参 考 文 献

- [1] 张可新,龚增进,王峰,等.我国400 km/h高速铁路综合试验综述[J].中国铁路,2025(6):10-14.
Zhang Kexin, Gong Zengjin, Wang Feng, et al. Overview of comprehensive tests on 400 km/h HSR in China[J]. China Railway, 2025(6): 10-14.
- [2] 江成,王峰,刘伟斌,等.400 km/h条件下既有无砟轨道结构适应性评估[J].中国铁路,2025(6):26-33.
Jiang Cheng, Wang Feng, Liu Weibin, et al. Adaptability assessment of existing ballastless track structures at 400 km/h[J]. China Railway, 2025(6): 26-33.
- [3] 韩嘉强,马伟斌,田经纬,等.400 km/h既有高铁隧道空气动力学特性及其适应性分析[J].中国铁路,2025(6):78-86.
Han Jiaqiang, Ma Weibin, Tian Jingwei, et al. Analysis on aerodynamic characteristics and adaptability analysis of existing 400 km/h HSR tunnels[J]. China Railway, 2025(6): 78-86.
- [4] 陈兴,张毅超,陈迎庆,等.我国高速铁路声屏障气动效应研究与探索[J].中国铁道科学,2023,44(4):84-91.
Chen Xing, Zhang Yichao, Chen Yingqing, et al. Research and exploration of aerodynamic effects of high-speed railway sound barrier in China[J]. China Railway Science, 2023, 44(4): 84-91.
- [5] 王同军,江成.400 km/h高速铁路线路基础设施关键技术研究[J].中国铁路,2025(6):1-9.
Wang Tongjun, Jiang Cheng. Research on key technologies 400 km/h HSR line infrastructure[J]. China Railway, 2025(6): 1-9.
- [6] He Hong, Diao Lingyi, Yang Weichao, et al. Abrupt changing aerodynamic loads resulting in diminished ride comfort when two high-speed trains intersect in a tunnel[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2025, 156: 106232.

- [7] Shi Yixuan, Mao Qingzhou, Dai Huanyun, et al. Research on abnormal vibration of high-speed train based on wheel-rail coupling modal analysis[J]. *Vehicle System Dynamics*, 2025, 63(3): 457-474.
- [8] Chen Jiayin, Chen Rong, Wang Ping, et al. Wheel-rail impact and vibration characteristic frequencies at high-speed railway turnouts[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2024, 218: 111537.
- [9] Gao Yuan, Wang Shuguo, Yi Qiang. Vibration fatigue failure analysis and life prediction of high-speed turnout point rails[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2025, 176: 109658.
- [10] Liu Yanong, Zhang Jun, Yi Sitong. Numerical simulation and prediction of aerodynamic noise of high-speed trains[J]. *Noise & Vibration Worldwide*, 2024, 55(1/2): 16-32.
- [11] Thompson D. *Railway noise and vibration: mechanisms, modelling and means of control*[M]. Oxford; Amsterdam: Elsevier, 2009.
- [12] Lei Liu, Gengjie Sun, Ziwei Zhang, et al. Study on the influence factors of HST running in the tunnels at 400 km/h[J]. *Railway Sciences*, 2025, 4(2): 213-230.
- [13] Wei Kang, Mei Yuanguai, Sun Qi, et al. Propagation characteristics of initial compression wave induced by 400 km/h high-speed trains passing through very long tunnels[J]. *Applied Sciences*, 2024, 14(13): 5946.
- [14] Kalker, J J. On the rolling contact of two elastic bodies in the presence of dry friction[D]. Doctoral Dissertation. Delft: Delft University of Technology, 1967.
- [15] Kalker, J J. Three-dimensional elastic bodies in rolling contact[M]. Massachusetts: Kluwer Academic Publishers, 1990.
- [16] 常崇义,陈波,蔡园武,等.时速400 km轮轨制动大蠕滑黏着试验研究(一)——水介质条件下黏着特性[J]. *中国铁道科学*, 2022, 43(2): 96-103.
- Chang Chongyi, Chen Bo, Cai Yuanwu, et al. Experimental study on large creepage adhesion of wheel/rail braking at 400 km · h⁻¹ (I)—adhesion characteristics under water medium conditions[J]. *China Railway Science*, 2022, 43(2): 96-103.
- [17] 常崇义,陈波,蔡园武,等.时速400 km轮轨制动大蠕滑黏着试验研究(二)——水介质条件下纵向蠕滑控制模式对黏着特性影响[J]. *中国铁道科学*, 2022, 43(2): 96-103.
- Chang Chongyi, Chen Bo, Cai Yuanwu, et al. Experimental study on large creepage adhesion of wheel/rail braking at 400 km · h⁻¹ (II)—effects of longitudinal creepage control modes on adhesion characteristics under water medium conditions[J]. *China Railway Science*, 2022, 43(2): 96-103.
- [18] 赵鑫,温泽峰,王衡禹,等.中国轨道交通轮轨滚动接触疲劳研究进展[J]. *交通运输工程学报*, 2021, 21(1): 1-35.
- Zhao Xin, Wen Zefeng, Wang Hengyu, et al. Research progress on wheel/rail rolling contact fatigue of rail transit in China [J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2021, 21(1): 1-35.
- [19] Yang Yunfan, Wang Ruichen, Wang Jiacheng, et al. Comparison of wheel/rail contact modelling in prediction of wheel tread wear under changeable friction conditions[J]. *Vehicle System Dynamics*, 2026, 64(1): 125-154.
- [20] Liu Binbin, Vollebregt E, Bruni S. Review of conformal wheel/rail contact modelling approaches: towards the application in rail vehicle dynamics simulation[J]. *Vehicle System Dynamics*, 2024, 62(6): 1355-1379.
- [21] Jin Xuesong. Research progress of high-speed wheel-rail relationship[J]. *Lubricants*, 2022, 10(10): 248.
- [22] 翟婉明. 车辆-轨道耦合动力学[M]. 4版. 北京: 科学出版社, 2015.
- Zhai Wanming. *Vehicle-track coupled dynamics*[M]. 4th ed. Beijing: Science Press, 2015.
- [23] Zhai Wanming, Han Zhaoling, Chen Zhaowei, et al. Train-track-bridge dynamic interaction: a state-of-the-art review[J]. *Vehicle System Dynamics*, 2019, 57(7): 984-1027.
- [24] Zhang Keping, Zhang Xiaohui, Zhou Shunhua. Analysis on dynamic behavior of 400 km/h high-speed train system under differential settlement of subgrade[J]. *Engineering Structures*, 2023, 278: 115521.
- [25] 高建敏,梁浩,杨吉忠,等.400 km/h高速铁路车辆曲线通过安全性能分析[J]. *高速铁路技术*, 2021, 12(2): 56-61, 67.
- Gao Jianmin, Liang Hao, Yang Jizhong, et al. Safety performance analysis of 400 km/h high-speed railway vehicles passing curves at 400 km/h[J]. *High-Speed Railway Technology*, 2021, 12(2): 56-61, 67.
- [26] Nsabimana E, Jung Y H. Dynamic subsoil responses of a stiff concrete slab track subjected to various train speeds: a critical velocity perspective[J]. *Computers and Geotechnics*, 2015, 69: 7-21.
- [27] Lei Xiaoyan, Wang Wei, Luo Kun. Analysis on dynamics performance of the existing wheel-rail high-speed railway raising to 400 km/h operation[J]. *Journal of Vibration and Control*, 2026, 32(9/10): 2210-2227.
- [28] 胡晓依,成棣,孟凡迪,等.时速400公里高速铁路轮轨周期性短波不平顺的安全限值研究[J]. *西南交通大学学报*, 2025,

- 60(6):1581-1592.
- Hu Xiaoyi, Cheng Di, Meng Fandi, et al. Safety limit for periodic short-wave irregularity of wheel and rail for high-speed railways at 400 km/h[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2025, 60(6): 1581-1592.
- [29] Zhai Wanming, Stichel S, Ling Liang. Train-track coupled dynamics problems in heavy-haul rail transportation[J]. Vehicle System Dynamics, 2025, 63(7): 1187-1240.
- [30] Cui Weitao, Gao Liang, Xiao Hong, et al. Temperature effect of CRTS III slab track in natural environments and its influence on vehicle-track dynamic interaction at 400 km/h[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2026, 200: 109759.
- [31] Zhou Rui, Yang Fuyan, Liu Hanlin, et al. Vibration transmission of ballastless track-bridge with different span lengths under updated high-speed trains[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2024, 28(9): 3913-3927.
- [32] Yazdani M, Azimi P. Assessment of railway plain concrete arch bridges subjected to high-speed trains[J]. Structures, 2020, 27: 174-193.
- [33] Rackwitz F, Zhou Shunhua. System dynamic behavior of high-speed railway infrastructure on multilayered soils considering soil nonlinearities[R]. Berlin: Technische Universität Berlin, 2023.
- [34] Mandhaniya P, Shahu J T, Chandra S. Numerical analysis on combinations of geosynthetically reinforced earth foundations for high-speed rail transportation[J]. Structures, 2022, 43: 738-751.
- [35] 张鑫浩,赵才友,雷佳鑫,等.高速铁路地下线振源特性及环境振动传播规律研究[J].中国铁道科学,2025,46(4):12-21.
- Zhang Xinhao, Zhao Caiyou, Lei Jiaxin, et al. Study on vibration source characteristics and propagation law of environmental vibration in underground high-speed railway underground lines[J]. China Railway Science, 2025, 46(4): 12-21.
- [36] 马登科,闫子权,时瑾,等.基于实测参数的400 km·h⁻¹车辆-轨道-桥梁耦合动力分析模型[J].中南大学学报(自然科学版),2026,57(1):452-463.
- Ma Dengke, Yan Ziquan, Shi Jin, et al. Dynamic analysis model of vehicle-track-bridge system at 400 km/h based on measured parameters[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2026, 57(1): 452-463.
- [37] 闫子权,马登科,梁晨,等.400 km/h高速铁路轨道结构力学行为研究[J].中国铁路,2025(6):34-41.
- Yan Ziquan, Ma Dengke, Liang Chen, et al. Research on mechanical behavior of 400 km/h HSR track structure[J]. China Railway, 2025(6): 34-41.
- [38] 梁晨.400 km/h高速铁路最小曲线半径取值研究[J].铁道工程学报,2022,39(5):20-25,64.
- Liang Chen. Research on the minimum curve radius of high-speed railway with design speed of 400 km/h[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2022, 39(5): 20-25, 64.
- [39] 梁晨,刘浩,王峰.面向线形设计的高速铁路多层次舒适度评价及应用[J].铁道学报,2025,47(5):178-186.
- Liang Chen, Liu Hao, Wang Feng. Multi-level comfort evaluation and application for high-speed railway for alignment design[J]. Journal of the China Railway Society, 2025, 47(5): 178-186.
- [40] Li Muxiao, Zhong Shuoqiao, Deng Tiesong, et al. Analysis of source contribution to pass-by noise for a moving high-speed train based on microphone array measurement[J]. Measurement, 2021, 174: 109058.
- [41] 刘兰华,李志强,周铁军,等.中国高速铁路噪声控制研究进展[J].科技导报,2024,42(20):60-69.
- Liu Lanhua, Li Zhiqiang, Zhou Tiejun, et al. Research and prospect on noise control of high-speed railway in China[J]. Science & Technology Review, 2024, 42(20): 60-69.
- [42] Remington P J. Wheel/rail rolling noise, I : theoretical analysis[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1987, 81(6): 1805-1823.
- [43] Thompson D J. Wheel-rail noise generation, part I : introduction and interaction model[J]. Journal of Sound and Vibration, 1993, 161(3): 387-400.
- [44] Kitagawa T, Thompson D J. Comparison of wheel/rail noise radiation on Japanese railways using the TWINS model and microphone array measurements[J]. Journal of Sound and Vibration, 2006, 293(3/4/5): 496-509.
- [45] 圣小珍.高速旋转车轮的高频振动[J].南昌工程学院学报,2018,37(6):1-13.
- Sheng Xiaozhen. High frequency vibrations of train wheel in fast rotation[J]. Journal of Nanchang Institute of Technology, 2018, 37(6): 1-13.
- [46] 李小珍,张迅,李亚东.高速铁路简支箱梁结构噪声的边界元方法[J].土木工程学报,2011,44(增刊1):95-101,185.
- Li Xiaozhen, Zhang Xun, Li Yadong. Application of boundary element method in study of noise from simply-supported box

- girder in high-speed railway[J]. China Civil Engineering Journal, 2011, 44(S1): 95-101, 185.
- [47] Gu Yiwei, Nie Xin, Yan Aiguo, et al. Experimental and numerical study on vibration and structure-borne noise of high-speed railway composite bridge[J]. Applied Acoustics, 2022, 192: 108757.
- [48] Zhu Chunli, Hemida H, Flynn D, et al. Numerical simulation of the slipstream and aeroacoustic field around a high-speed train[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2017, 231(6): 740-756.
- [49] Nagakura K. Localization of aerodynamic noise sources of Shinkansen trains[J]. Journal of Sound and Vibration, 2006, 293(3/4/5): 547-556.
- [50] Noh H M. Noise-source identification of a high-speed train by noise source level analysis[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2017, 231(6): 717-728.
- [51] Hara T. Aerodynamic force acting on a high-speed train at tunnel entrance[J]. Bulletin of JSME, 1961, 4(15): 547-553.
- [52] Aoki T, Matsuo K, Hidaka H, et al. Attenuation and distortion of propagating compression waves in a high-speed railway model and in real tunnels[C/OL]//Shock Waves @ Marseille III, 1995: 347-352. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-78835-2_60#citeas.
- [53] Mashimo S, Nakatsu E, Aoki T, et al. Entry compression wave generated by a high-speed train entering a tunnel[J]. Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers Series B, 1995, 61(590): 3720-3727.
- [54] Mashimo S, Nakatsu E, Aoki T, et al. Attenuation and distortion of a compression wave propagating in a high-speed railway tunnel[J]. SME International Journal, Series B, 1997, 40(1): 51-57.
- [55] 马伟斌,张千里,程爱君,等.高速铁路隧道洞口微气压波影响因素与变化规律研究[J].铁道学报,2013,35(5):97-102.
Ma Weibin, Zhang Qianli, Cheng Aijun, et al. Study on influence factors and changing law of micro-pressure waves at tunnel portals of high-speed railways[J]. Journal of the China Railway Society, 2013, 35(5): 97-102.
- [56] Liu Feng, Yao Song, Zhang Jie, et al. Field measurements of aerodynamic pressures in high-speed railway tunnels[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2018, 72: 97-106.
- [57] Zhang Lei, Liu Hui, Stoll N, et al. Influence of tunnel aerodynamic effects by slope of equal-transect ring oblique tunnel portal[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2017, 169: 106-116.
- [58] Zhang Lei, Yang Mingzhi, Liang Xifeng, et al. Oblique tunnel portal effects on train and tunnel aerodynamics based on moving model tests[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2017, 167: 128-139.
- [59] Wang Honglin, Lei Bo, Bi Haiquan, et al. Wavefront evolution of compression waves propagating in high-speed railway tunnels[J]. Journal of Sound and Vibration, 2018, 431: 105-121.
- [60] Li Wenhui, Liu Tanghong, Huo Xiaoshuai, et al. Influence of the enlarged portal length on pressure waves in railway tunnels with cross-section expansion[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2019, 190: 10-22.
- [61] EN 13674-1:2011+A1:2017 Railway applications-track-rail-part 1: vignole railway rails 46 kg/m and above[S].
- [62] EN 14587-1:2018 Railway applications-infrastructure-flash butt welding of new rails-part 1: R220, R260, R260Mn, R320Cr, R350HT, R350LHT, R370CrHT and R400HT grade rails in a fixed plant[S].
- [63] EN 13231-2:2020 Railway applications-track-acceptance of works-part 2: acceptance of reprofiling rails in plain line, switches, crossings and expansion devices[S].
- [64] TB/T 2344.1—2020 钢轨 第1部分:43 kg/m~75 kg/m钢轨[S].
TB/T 2344.1—2020 Rail-part 1: 43 kg/m-75 kg/m rails[S].
- [65] TB/T 1632.1—2014 钢轨焊接 第1部分:通用技术条件[S].
TB/T 1632.1—2014 Welding of rails-part 1: general specification[S].
- [66] Ma Chaozhi, Gao Liang, Wang Pu, et al. Vibration characteristics of ballastless track and its effect on wheel-rail broadband dynamic interaction[J]. Journal of Zhejiang University: Science A, 2025, 26(6): 585-604.
- [67] 刘丰收,杨光,陈朝阳,等.我国高速铁路钢轨现状及技术展望[J].高速铁路新材料,2022,1(2):1-6.
Liu Fengshou, Yang Guang, Chen Zhaoyang, et al. Present situation and technical prospect of high-speed railway rail in China[J]. Advanced Materials of High-Speed Railway, 2022, 1(2): 1-6.
- [68] 杨光,李晨光,成棣,等.动车组异常振动区段钢轨打磨整治策略及应用效果[J].高速铁路新材料,2023,2(3):60-65.
Yang Guang, Li Chenguang, Cheng Di, et al. Strategies and application effects of rail grinding in the abnormal vibration of EMU[J]. Advanced Materials of High-Speed Railway, 2023, 2(3): 60-65.
- [69] 周清跃,田常海,张银花,等.高速铁路钢轨打磨关键技术研究[J].中国铁道科学,2012,33(2):66-70.

- Zhou Qingyue, Tian Changhai, Zhang Yinhua, et al. Research on key technology of rail grinding for high-speed railway [J]. China Railway Science, 2012, 33(2): 66-70.
- [70] 金学松,杜星,郭俊,等.钢轨打磨技术研究进展[J].西南交通大学学报,2010,45(1):1-11.
Jin Xuesong, Du Xing, Guo Jun, et al. State-of-the-arts of research on rail grinding[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2010, 45(1): 1-11.
- [71] 安博伦,杨光,李英奇,等.时速400 km高速铁路钢轨不平顺合理限值[J].铁道建筑,2023,63(5):17-20.
An Bolun, Yang Guang, Li Yingqi, et al. Reasonable limit for rail irregularities in high-speed railway with speed of 400 km/h[J]. Railway Engineering, 2023, 63(5): 17-20.
- [72] 杨光,刘丰收,张银花,等.400 km·h⁻¹速度条件下高速铁路钢轨适应性研究[J].中国铁道科学,2025,46(4):1-11.
Yang Guang, Liu Fengshou, Zhang Yinhua, et al. Research on adaptability of high-speed railway rails under 400 km·h⁻¹ conditions[J]. China Railway Science, 2025, 46(4): 1-11.
- [73] 张可新,徐宁,白鑫.国外400 km·h⁻¹以上高速铁路综合试验研究[J].中国铁路,2024(2):20-30.
Zhang Kexin, Xu Ning, Bai Xin. High-speed railway comprehensive tests with speed above 400 km/h in foreign countries [J]. China Railway, 2024(2): 20-30.
- [74] 孙林林,闫子权,崔树坤,等.400 km·h⁻¹高速铁路扣件系统适应性分析[J].中国铁路,2025(4):7-12.
Sun Linlin, Yan Ziquan, Cui Shukun, et al. Analysis on adaptability of fastening system for 400 km/h HSR[J]. China Railway, 2025(4): 7-12.
- [75] 肖俊恒,闫子权,涂英辉,等.轮轨振动对高铁扣件伤损的影响分析[J].中国铁路,2017(11):10-14.
Xiao Junheng, Yan Ziquan, Tu Yinghui, et al. On impact of wheel-rail vibration on HSR fastener damage[J]. China Railway, 2017(11): 10-14.
- [76] 闫子权,肖俊恒,方杭玮,等.高速铁路扣件弹条共振断裂损伤机理研究[J].中国铁路,2021(11):31-36,50.
Yan Ziquan, Xiao Junheng, Fang Hangwei, et al. Research on resonant fracture damage mechanism of high speed railway fastening bar-spring clips[J]. China Railway, 2021(11): 31-36, 50.
- [77] Sun Linlin, Yan Ziquan, Xiao Junheng, et al. Experimental analysis of the modal characteristics of rail fastening clips[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2020, 234(2): 134-141.
- [78] 于毫勇,肖俊恒,刘长溪,等.WJ-8型扣件螺旋道钉防松退性能改进措施[J].铁道建筑,2024,64(11):54-57.
Yu Haoyong, Xiao Junheng, Liu Changxi, et al. Improvement measures for anti-loosening performance of WJ-8 type fastener screw spike[J]. Railway Engineering, 2024, 64(11): 54-57.
- [79] 王平,陈嵘,徐井芒,等.高速铁路道岔系统理论与工程实践研究综述[J].西南交通大学学报,2016,51(2):357-372.
Wang Ping, Chen Rong, Xu Jingmang, et al. Theories and engineering practices of high-speed railway turnout system: survey and review[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2016, 51(2): 357-372.
- [80] Wang Ping, Xu Jingmang, Wang Shuguo, et al. A review of research on design theory and engineering practice of high-speed railway turnout[J]. Intelligent Transportation Infrastructure, 2022, 1: liac004.
- [81] 王璞.高速铁路道岔钢轨磨耗发展规律的试验研究[J].铁道建筑,2019,59(7):109-112.
Wang Pu. Experimental study on laws of rail wear development of high speed turnout[J]. Railway Engineering, 2019, 59(7): 109-112.
- [82] 王树国.我国铁路道岔现状与发展[J].铁道建筑,2015(10):42-46.
Wang Shuguo. Current status and future development trend of railway turnouts in China[J]. Railway Engineering, 2015(10): 42-46.
- [83] 王平,徐井芒,郝超江,等.时速400 km高速道岔设计关键技术[J].中国铁路,2022(8):1-7.
Wang Ping, Xu Jingmang, Hao Chaojiang, et al. Key factors for 400 km/h high-speed turnout technology[J]. China Railway, 2022(8): 1-7.
- [84] 王平,徐井芒,刘大园,等.时速400 km宽轨距高速铁路道岔设计关键技术[J].高速铁路技术,2019,10(1):14-22.
Wang Ping, Xu Jingmang, Liu Dayuan, et al. Key technologies of 400 km/h broad gauge turnout design for high-speed railway turnout[J]. High-Speed Railway Technology, 2019, 10(1): 14-22.
- [85] 王璞,王树国,杨东升,等.钢轨件磨耗状态下高速道岔达速运行适应性研究[J].振动与冲击,2021,40(19):12-17.
Wang Pu, Wang Shuguo, Yang Dongsheng, et al. Adaptability analysis of high-speed turnout operation to reach speed under rail wear condition[J]. Journal of Vibration and Shock, 2021, 40(19): 12-17.

- [86] 王璞,王树国,王猛,等.400 km·h⁻¹高速道岔号码选型与结构优化[J].交通运输工程学报,2023,23(3):114-126.
Wang Pu, Wang Shuguo, Wang Meng, et al. Number selection and structural optimization of 400 km·h⁻¹ high-speed turnout[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2023, 23(3): 114-126.
- [87] 胡红军,徐井芒.400 km/h高速铁路道岔选型探讨[J].高速铁路技术,2021,12(2):79-85.
Hu Hongjun, Xu Jingmang. Discussion on selection of 400 km/h high-speed turnout[J]. High-Speed Railway Technology, 2021, 12(2): 79-85.
- [88] 王璞,赵振华,马俊琦,等.高速道岔转辙器结构及牵引动程优化研究[J].铁道学报,2024,46(11):137-144.
Wang Pu, Zhao Zhenhua, Ma Junqi, et al. Study on optimization of structure and traction range of high-speed railway turnout switches[J]. Journal of the China Railway Society, 2024, 46(11): 137-144.
- [89] Wang Pu, Wang Shuguo, Wei Xiaohua, et al. Research on dynamic analysis and maintenance strategy for hard bending of high-speed turnout switch rail[J]. Engineering Failure Analysis, 2025, 167: 109076.
- [90] 赵振华,王璞,高原,等.可动心轨辙叉转换位移计算及设计优化[J].西南交通大学学报,2025,60(2):356-363,461.
Zhao Zhenhua, Wang Pu, Gao Yuan, et al. Calculations for transition displacement and design optimization for movable point frog[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2025, 60(2): 356-363, 461.
- [91] TB 10621—2014 高速铁路设计规范[S].
TB 10621—2014 Code for design of high-speed railway[S].
- [92] 张克平,张晓辉,周顺华.时速400 km·h⁻¹高速列车在路基差异沉降下的动态响应分析[J].工程结构,2023,278: 115521.
Zhang Keping, Zhang Xiaohui, Zhou Shunhua. Dynamic response analysis of 400 km·h⁻¹ high-speed train under differential subgrade settlement[J]. Engineering Structures, 2023, 278: 115521.
- [93] 李泰澧.时速400 km高速铁路路基-地基工后沉降变形映射关系及控制标准[J].铁道建筑,2023,63(8):107-112.
Li Taifeng. Mapping relationship and control standard of post-construction settlement deformation of subgrade and ground of 400 km/h high-speed railway[J]. Railway Engineering, 2023, 63(8): 107-112.
- [94] Ye Yangsheng, Lou Liangwei, Cai Degou, et al. Mechanical properties of track-asphalt concrete-subgrade bed structure system under both temperature and train loading[J]. Construction and Building Materials, 2022, 340: 127556.
- [95] Cai Degou, Chen Peipei, Shi Yuefeng, et al. Analytical calculation method for passive tensile damage of asphalt concrete waterproof sealing structure of ballastless track subgrade[J]. Construction and Building Materials, 2022, 320: 126158.
- [96] Ding Yu, Zhang Jiasheng, Chen Xiaobin, et al. Experimental investigation on static and dynamic characteristics of granulated rubber-sand mixtures as a new railway subgrade filler[J]. Construction and Building Materials, 2021, 273: 121955.
- [97] 李宁,周川江,张红伟,等.路桥过渡差异变形对400 km/h高铁行车性能影响研究[J].铁道工程学报,2025,42(8):1-6.
Li Ning, Zhou Chuanjiang, Zhang Hongwei, et al. Research on influence of settlement of subgrade-bridge transition section on running performance of 400 km/h high-speed train[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2025, 42(8): 1-6.
- [98] 刘振宇,赵有明,李泰澧,等.更高速度条件下高速铁路路基动力响应及长期动力稳定性研究[J].铁道学报,2023, 45(4):127-138.
Liu Zhenyu, Zhao Youming, Li Taifeng, et al. Study on dynamic response and long-term dynamic stability of high-speed railway subgrade under higher speed conditions[J]. Journal of the China Railway Society, 2023, 45(4): 127-138.
- [99] 毕宗琦,叶阳升,蔡德钧,等.基于耗散能的高速铁路路基填料动力安定临界阈值研究[J].铁道学报,2024,46(3): 99-111.
Bi Zongqi, Ye Yangsheng, Cai Degou, et al. Research on dynamic shakedown critical threshold of high-speed rail subgrade filler based on dissipated energy[J]. Journal of the China Railway Society, 2024, 46(3): 99-111.
- [100] 叶阳升,蔡德钧,魏少伟,等.高速铁路无砟轨道路基动力分布特征及解析算法[J].中国铁道科学,2020,41(6):1-9.
Ye Yangsheng, Cai Degou, Wei Shaowei, et al. Dynamic stress distribution characteristics and analytical method of dynamic stress on subgrade of ballastless track for high-speed railway[J]. China Railway Science, 2020, 41(6): 1-9.
- [101] 胡所亭,苏永华,班新林,等.高速铁路标准梁式桥技术创新与发展[J].铁道建筑,2020,60(4):23-27,41.
Hu Suoting, Su Yonghua, Ban Xinlin, et al. Technological innovation and development of high-speed railway standard girder bridge[J]. Railway Engineering, 2020, 60(4): 23-27, 41.
- [102] 杨鹏健,周勇政,高策,等.铁路常用跨度标准梁技术发展与创新[J].铁道标准设计,2020,64(11):51-56.

- Yang Pengjian, Zhou Yongzheng, Gao Ce, et al. Technical development and innovation of railway standard span beams [J]. *Railway Standard Design*, 2020, 64(11): 51-56.
- [103] 陈良江,周勇政.我国高速铁路桥梁技术的发展与实践[J].*高速铁路技术*,2020,11(2):27-32.
- Chen Liangjiang, Zhou Yongzheng. Development and practice of high-speed railway bridge technology in China[J]. *High-Speed Railway Technology*, 2020, 11(2): 27-32.
- [104] 叶阳升,魏峰,胡所亭,等.高速铁路跨度40 m预制简支箱梁建造技术研究[J].*中国铁路*,2016(10):5-10.
- Ye Yangsheng, Wei Feng, Hu Suoting, et al. Research on construction technology of 40 m span precast simply supported box girder for high-speed railway[J]. *China Railway*, 2016(10): 5-10.
- [105] 苏永华,石龙,胡所亭,等.时速350 km高速铁路40 m跨度预应力混凝土简支箱梁徐变上拱控制设计研究[J].*铁道建筑*,2018,58(11):26-31.
- Su Yonghua, Shi Long, Hu Suoting, et al. Design research on creep camber control for 40 m span prestressed concrete simply supported box girder on 350 km/h high-speed railway[J]. *Railway Engineering*, 2018, 58(11): 26-31.
- [106] 石龙,苏永华,班新林.高速铁路跨度40 m简支箱梁全预应力体系与部分预应力体系对比分析[J].*铁道建筑*,2019, 59(3):1-5.
- Shi Long, Su Yonghua, Ban Xinlin. Comparison analysis on full-prestressed and part-prestressed systems of 40 m span simply supported box girder on high-speed railway[J]. *Railway Engineering*, 2019, 59(3): 1-5.
- [107] 李清池,石龙,苏永华,等.应用高强预应力体系的简支箱梁结构设计及影响分析[J].*铁道建筑*,2024,64(7):62-66.
- Li Qingchi, Shi Long, Su Yonghua, et al. Analysis on influence of structural optimization design of simply supported box girder with high strength prestressed system[J]. *Railway Engineering*, 2024, 64(7): 62-66.
- [108] 陈海涛,邓运清,徐升桥.高速铁路常用跨度32 m预应力混凝土简支箱梁优化设计研究[J].*铁道标准设计*,2023, 67(9):76-82.
- Chen Haitao, Deng Yunqing, Xu Shengqiao. Study on optimal design of simply-supported box beam with 32 m span in high-speed railway[J]. *Railway Standard Design*, 2023, 67(9): 76-82.
- [109] 李小珍,邱晓为,刘德军,等.时速400 km/h铁路常用跨度预应力混凝土简支梁竖向频基限值研究[J].*工程力学*,2018, 35(5):204-213.
- Li Xiaozhen, Qiu Xiaowei, Liu Dejun, et al. Research on the basic frequency limit of railway common span prestressed concrete simply supported beam with 400 km/h[J]. *Engineering Mechanics*, 2018, 35(5): 204-213.
- [110] 宋晓东,邱晓为,李小珍,等.莫-喀高速铁路简支箱梁竖向下限频基研究[J].*西南交通大学学报*,2019,54(4):709-714.
- Song Xiaodong, Qiu Xiaowei, Li Xiaozhen, et al. Lower vertical frequency limit for simply supported box-girder on Moscow-Kazan High-Speed Railway line[J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2019, 54(4): 709-714.
- [111] 徐昕宇,郑晓龙,陈列.400 km·h⁻¹高速铁路两种简支梁桥竖向频率限值对比研究[J].*铁道建筑*,2019,59(4):22-25,47.
- Xu Xinyu, Zheng Xiaolong, Chen Lie. Comparative study on limit value for basic vertical frequency limits of two types of simply-supported girder bridge for high speed railway with speed of 400 km/h[J]. *Railway Engineering*, 2019, 59(4): 22-25, 47.
- [112] 庞志强,李国龙,高芒芒,等.基于长波平顺性的400 km·h⁻¹高速铁路连续梁桥徐变变形控制[J].*中国铁道科学*, 2024,45(4):77-88.
- Pang Zhiqiang, Li Guolong, Gao Mangmang, et al. Research on creep deformation control of continuous girder bridge of 400 km·h⁻¹ high-speed railway based on long-wave track regularity[J]. *China Railway Science*, 2024, 45(4): 77-88.
- [113] 李国龙,高芒芒,杨飞,等.400 km/h高速铁路大跨度桥梁轨道静态长波不平顺验收标准研究[J].*铁道科学与工程学报*,2023,20(5):1902-1916.
- Li Guolong, Gao Mangmang, Yang Fei, et al. Acceptance standard for track static geometric long-wave irregularity of long-span railway bridge under 400 km/h[J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2023, 20(5): 1902-1916.
- [114] 王巍.350 km/h高铁32 m简支箱梁提速至400 km/h适应性分析[J].*铁道工程学报*,2022,39(7):50-54.
- Wang Wei. Analysis of adaptability of the 32 m simply-supported box beam used in the 350 km/h high-speed railway with speed increasing to 400 km/h[J]. *Journal of Railway Engineering Society*, 2022, 39(7): 50-54.
- [115] 班新林,苏永华,石龙,等.时速400 km高速铁路简支梁桥建造技术[J].*中国铁路*,2021(9):118-123.
- Ban Xinlin, Su Yonghua, Shi Long, et al. Construction technologies of simply-supported beam bridge for 400 km/h high-speed railway[J]. *China Railway*, 2021(9): 118-123.

- [116] 蔡超勋, 卢春房, 李克冰. 既有高速铁路简支梁桥提速适应性研究与技术发展展望[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2024, 54(4): 799-806.
Cai Chaoxun, Lu Chunfang, Li Keping. Study on speed-up adaptability and prospects for technological development of simply supported beam bridge of existing high-speed railway[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2024, 54(4): 799-806.
- [117] 李克冰, 王丽, 班新林, 等. ZK荷载图式对时速400公里高速铁路适应性研究[J]. 铁道工程学报, 2023, 40(7): 33-39.
Li Keping, Wang Li, Ban Xinlin, et al. Research on the adaptability of ZK load schema to high-speed railway with the velocity of 400 km/h[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2023, 40(7): 33-39.
- [118] 李克冰, 班新林, 董振升. 400 km/h条件下高速铁路112 m系杆拱桥运营适应性研究[J]. 中国铁路, 2025(4): 1-6.
Li Keping, Ban Xinlin, Dong Zhensheng. Operation adaptability of 112 m tied arch bridge for 400 km/h HSR[J]. China Railway, 2025(4): 1-6.
- [119] TG/GW 115—2023 高速铁路线路维修规则[S].
TG/GW 115—2023 Code for maintenance of high-speed railway tracks[S].
- [120] Q/CR 9621—2023 成渝中线高速铁路设计暂行规范[S].
Q/CR 9621—2023 Provisional code for design of the Chengdu-Chongqing Middle Route High-Speed Railway[S].
- [121] TJ/CL 591—2022 CR450动车组总体技术条件(暂行)[S].
TJ/CL 591—2022 General technical specifications for CR450 EMU (interim)[S].
- [122] 赵磊, 杨国涛, 刘伟斌, 等. 单元式无砟轨道周期性变形敏感因素分析[J]. 铁道工程学报, 2024, 41(1): 26-31, 38.
Zhao Lei, Yang Guotao, Liu Weibin, et al. Analysis of the sensitive factors of periodic deformation of unit slab ballastless track[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2024, 41(1): 26-31, 38.
- [123] 杨飞, 孙宪夫, 尤明熙, 等. 考虑周期性不平顺的高速铁路各型无砟轨道谱拟合与反演方法[J]. 铁道学报, 2023, 45(9): 114-122.
Yang Fei, Sun Xianfu, You Mingxi, et al. Track spectrum fitting and inversion method of various types of high-speed railway ballastless track considering periodic irregularity[J]. Journal of the China Railway Society, 2023, 45(9): 114-122.
- [124] 王同军, 王继军, 王梦. CRTSⅢ型板式无砟轨道结构创新及雅万高速铁路工程应用[J]. 铁道学报, 2024, 46(12): 1-7.
Wang Tongjun, Wang Jijun, Wang Meng. Innovation of CRTS Ⅲ slab track structure and its application in Jakarta-Bandung High-Speed Railway[J]. Journal of the China Railway Society, 2024, 46(12): 1-7.
- [125] Wang Jijun, Zhang Huanxin, Shi Cheng, et al. Effect of temperature gradient-induced periodic deformation of CRTS Ⅲ slab track on dynamic responses of the train-track system[J]. Railway Sciences, 2024, 3(4): 437-452.

Review on key technologies of railway infrastructure for 400 km · h⁻¹ high-speed railway

Wang Tongjun¹, Jiang Cheng^{2,3}, Wang Feng⁴, Wang Shuguo^{2,3}

(1. China Railway Society, Beijing 100844, China;

2. Railway Architecture Research Institute, China Academy of Railway Sciences Corporation Limited, Beijing 100081, China;

3. State Key Laboratory of High-Speed Railway Track System, China Academy of Railway Sciences Corporation Limited, Beijing 100081, China;

4. Department of Science, Technology and Information Technology, China State Railway Group Co., Ltd., Beijing 100844, China)

Abstract: Addressing the core technical challenges faced by railway infrastructure for 400 km · h⁻¹ high-speed railways, such as intensified wheel-rail dynamic impact, prominent multi-source noise issues, and aggravated tunnel aerodynamic effects, a systematic review is conducted on key scientific problems, core technologies and equipment, evaluation indicators, and control methods. This paper comprehensively analyzes the domestic and international research progress and technical status of railway infrastructure for 400 km · h⁻¹ high-speed

railways. Building upon the existing complete technology system for $350 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ high-speed railway infrastructure, a multi-scale spatial refined simulation model for railway infrastructure was systematically developed. This led to the establishment of a mechanical behavior characterization mechanism and a key design parameter system for $400 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ high-speed railway infrastructure. A suite of key technologies and core equipment were developed, including a fastening system, a turnout structure, a novel subgrade structure with a reinforced bed surface layer, a novel structural configuration of pile-slab transition segment, as well as a 40 m simply-supported girder with an ultra-high prestressing system and a 32 m simply-supported girder with a 2.8 m girder height adapted for $400 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ operation. Evaluation indicators and management standards for track geometric regularity of $400 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ high-speed railways were proposed, and a technical standard system for the infrastructure was constructed. The results show that the proposed key technologies for $400 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ high-speed railway infrastructure effectively resolve the two types of technical challenges, namely, power matching and aerodynamic effects, resulting from speed enhancement, achieving a 5% improvement in overall track dynamic performance, over 10% improvement in vibration and noise reduction, and over 15% improvement in tunnel aerodynamic effect mitigation, thus strongly supporting the sustainable development of China's high-speed railway technology.

Key words: High-speed railway; $400 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$; Railway infrastructure; Key technology; Review

(责任编辑 张 琪)