

文章编号: 1674—8247(2021)02—0001—10
DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2021.02.001

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

翟婉明¹ 姚 力² 孙 立³ 王开云¹ 朱胜阳¹

(1. 西南交通大学牵引动力国家重点实验室, 成都 610031;
2. 中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031; 3. 中铁第四勘察设计院集团有限公司, 武汉 430063)

摘 要:为推进我国 400 km/h 等级高速铁路的规划建设和创新发展, 本文基于车辆—轨道耦合动力学理论, 开展了既有 350 km/h 高速铁路曲线设计参数适应性分析和 400 km/h 高速铁路线路平面参数设计方法研究, 揭示了平面参数匹配关系对系统动力学性能的影响规律。研究结果表明: 当曲线半径小于 7 000 m 时, 既有规范的曲线设计参数不再适用; 在满足动力学指标和欠/过超高限值要求的条件下, 并考虑留有一定的安全裕量, 建议 400 km/h 高速铁路曲线半径不应小于 7 500 m; 相比于既有欠/过超高设计要求, 综合考虑车轨系统动力学性能指标来设计曲线超高具有更宽的合理设置范围。本文通过系统的动力学分析, 提出 400 km/h 条件下曲线线路平面参数匹配建议值, 并评估了其安全裕量, 研究成果可为 400 km/h 高速铁路线路平面设计提供理论参考。

关键词:400 km/h 高速铁路; 线路平面参数; 车辆—轨道耦合动力学; 安全平稳性

中图分类号:U212.33+2.1; U238 **文献标志码:**A

1

Research on Route Plan Design Parameters of 400 km/h High-speed Railway Based on Vehicle-track Coupling Dynamics

ZHAI Wanming¹ YAO Li² SUN Li³ WANG Kaiyun¹ ZHU Shengyang¹

(1. State Key Laboratory of Traction Power, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;
2. China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, China;
3. China Railway Siyuan Survey and Design Group Co., Ltd., Wuhan 430063, China)

Abstract: In order to promote the planning, construction and innovative development of the 400 km/h high-speed railway in China, this paper analyzes the adaptability of curve design parameters of the existing 350 km/h high-speed railway and studies the route plan parameters design method of the 400 km/h high-speed railway based on the vehicle-track coupling dynamics theory, and reveals the influence of plan parameters matching relation on the system dynamics performance. The research results show that when the curve radius is less than 7 000 m, the curve design parameters of the current codes are no longer applicable; under the condition of meeting the requirements of dynamics indexes and deficient/surplus superelevation limits, and in consideration of a certain safety margin, it is suggested that the curve radius of 400 km/h high-speed railway should not be less than 7 500 m; compared with the existing design requirements for under/over superelevation, the design of curve superelevation has a wider reasonable setting range in comprehensive consideration of the dynamic performance indicators of the vehicle-track system. Through the dynamic analysis, this

收稿日期: 2021-03-01

作者简介: 翟婉明(1963-), 男, 中国科学院院士, 美国国家工程院外籍院士。

基金项目: 国家自然科学基金(11790283, 51978587), 四川省科技计划项目(2021YFH0073)

引文格式: 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.

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.

paper puts forward the recommended value of the plan parameters matching of curve track under the condition of 400 km/h, and evaluates the safety margin. The research results can provide theoretical reference for the route plan design of 400 km/h high-speed railway.

Key words: 400 km/h high-speed railway; route plan parameters; vehicle-track coupling dynamics; safety and riding comfort

1 研究背景

强化前沿关键科技研发,深入400 km/h高速铁路技术研究,是新时代国家建设“交通强国”的重大需要^[1],也是高速铁路发展的重要趋势和现阶段面临的重大课题^[2-5]。在更高的速度等级下,车辆-轨道系统动力相互作用加剧,列车的行车安全性、运行平稳性及乘坐舒适度受轨道结构参数的影响更加突出^[6],尤其在曲线线路这一铁路薄弱环节上,线路平面参数即超高、曲线半径和缓和曲线长度等的设置将直接影响行车的动力学性能^[7-8],既有350 km/h及以下线路平面参数设计规范的适应性势必会受到影响。因此针对400 km/h高速铁路,分析既有规范的适应能力,并开展曲线设置参数的合理匹配研究,对推动高速铁路向更高速度发展具有重大意义。

目前,针对高速铁路线路平面参数已有不少研究。高速列车与线路的动力相互作用问题,并非机车车辆或轨道单一系统的孤立问题,对此,翟婉明率先提出车辆-轨道耦合动力学理论,并成功应用于一系列与铁路发展密切相关的关键动力学问题的研究之中^[9-11]。王开云等人针对提速和高速铁路,开展了曲线线路轮轨动态相互作用性能匹配研究,制定了主要动力性能指标的评价标准。徐鹏等人^[12]通过建立列车-轨道动力学分析模型,确定了既有试验线开行速度385 km/h时的曲线超高调整方案。梁晨等人^[13]通过理论计算与车辆动力学模型仿真检算相结合,分析最小曲线半径值的控制要素及取值,结果表明:400 km/h与350 km/h及以下时速匹配时,最小曲线半径取值仅由设计时速控制,而与匹配速差无关,推荐困难条件下400 km/h的最小半径值为7 500 m。刘磊等人^[14]通过理论分析,对400 km/h高速铁路的最大超高、欠超高以及单列车与高低速共线运行时的最小曲线半径进行研究,并取曲线设置超高值为175 mm,对车辆通过不同曲线半径地段进行仿真分析,结果表明:400 km/h高速铁路的最大设置超高、欠过超高之和等超高参数可沿用既有350 km/h的规范取值。时瑾等人^[15]从安全性、舒适性角度分析了不同时速下的最小曲线半径取值以及小半径值对应的最佳超高值,认为适当欠超高更有利于优化行车性能。

由此可见,目前大多数高速铁路线路平面参数设计的研究是针对350 km/h及以下速度^[16-18]的。对400 km/h线路平面参数的研究主要集中在基于静力学和车辆动力学理念,分析曲线半径最小值、最大超高值等关键参数的取值上,对曲线半径超高匹配问题未深入研究,且动力学分析未考虑曲线通过时随机不平顺激励对车辆-轨道系统动态特性的影响,与实际情况差距较大。有学者采用商业软件开展曲线半径、超高与时速的匹配性研究,但研究过程中多采用固定超高值或固定曲线半径值的单一变量分析方法,忽略了不同半径曲线与不同超高匹配时的特殊性,具有一定的局限性。而为充分研究400 km/h条件下曲线参数的匹配关系,应细致考虑各参数对车辆-轨道系统动力学特性的影响。因此针对400 km/h高速铁路线路平面参数尚待开展深入系统的理论研究。

鉴于此,本文基于车辆-轨道空间耦合动力学,建立可反映400 km/h行车条件及曲线线路状态下轮轨动态相互作用关系的动力学仿真模型。以随机轨道不平顺作为模型激励,计算列车动态通过不同曲线半径和超高平纵断面时的动力学性能,以开展既有线路平面参数设计规范的适应性分析与400 km/h线路平面参数设计研究,为400 km/h高速铁路基础设施设计,提供理论依据和科学参考。

2 动力学模型及研究技术路线

2.1 动力学研究模型

在更高时速条件下,列车曲线通过时的轮轨相互作用问题突出,动力学研究不能简单从车辆或线路本身进行考察,而应将车辆与线路视为整体系统进行研究。为此,本文依据车辆-轨道耦合动力学理论^[19],建立了高速铁路车辆-轨道空间耦合动力学仿真模型。

高速铁路车辆-轨道空间耦合动力学分析模型如图1所示。车辆采用整车多刚体模型,考虑车体、前后构架及轮对的沉浮、横移、侧滚、点头、摇头,共35个自由度。轨道以无砟轨道为对象,采用钢轨-轨道板-底座板-路基结构组成的弹簧阻尼振动模型进行模拟。其中,钢轨视为连续弹性离散点支承的Euler梁模型,轨道板和底座板横向视为刚体运动,垂向视为弹

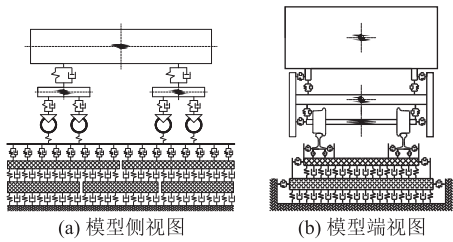


图 1 车辆-轨道空间耦合动力学模型图

性地基上四边自由的弹性薄板模型。在轮轨关系中,轮轨法向力由赫兹非线性弹性接触理论确定,轮轨蠕滑力依据 kalker 线性蠕滑理论进行计算,并按沈氏蠕滑理论进行非线性修正。车辆-轨道空间耦合动力学模型的振动方程和数值积分方法详见文献[19]。

为实现对车辆通过完整曲线路段的模拟,曲线通过工况仿真采用由直线段、缓和曲线段和圆曲线段构成的曲线线路尺寸。轨道不平顺是车辆运行中系统振

动的主要根源,仿真过程充分考虑随机不平顺的激励影响,采用 2~200 m 波长范围的中国高速谱拟合不平顺样本作为轮轨激励,如图 2 所示。

2.2 适应性分析技术路线

TB/T 10621-2014《高速铁路设计规范》^[20]给出了 350 km/h 及以下线路平面参数设计的合理参数值,如表 1 所示。当采用表中数值间的曲线半径时,相应的缓和曲线长度采用线性内插得到。为分析规范对 400 km/h 曲线线路的适应性,本文取规范给定的最高设计时速(350 km/h)对应的曲线参数,进行不同时速条件下的仿真分析。技术线路为:(1)由超高时变率定义,理论计算表 1 所列 350 km/h 曲线线路的超高值;(2)仿真计算 350 km/h、400 km/h 条件下各曲线线路的各项动力学特性指标;(3)结合指标规定限值,分析时速变化对动力学性能的影响规律及线路参数对 400 km/h 的适应性。

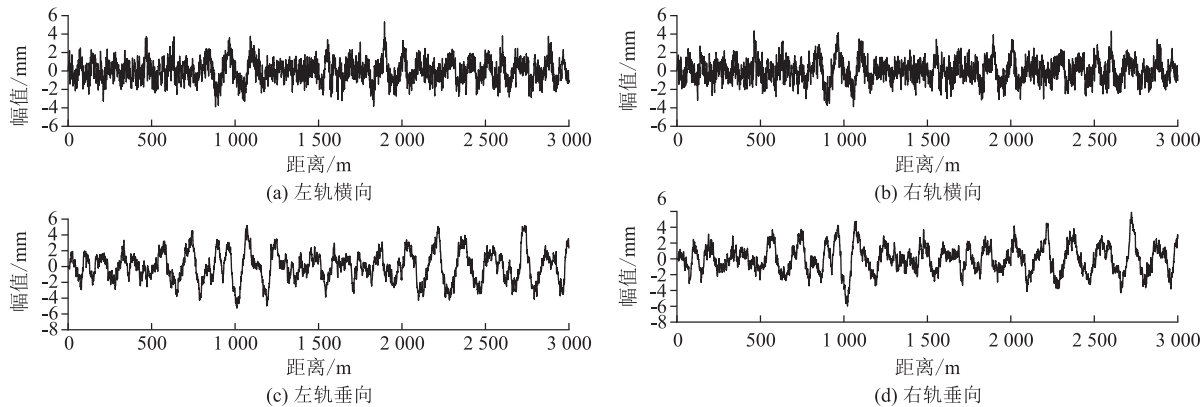


图 2 轨道随机几何不平顺图

表 1 350 km/h 及以下曲线线路缓和曲线长度表

| 曲线半径/m | 350 km/h | | | 300 km/h | | |
|--------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| | 超高时变率 $f=25\text{ mm/s}$ | 超高时变率 $f=28\text{ mm/s}$ | 超高时变率 $f=31\text{ mm/s}$ | 超高时变率 $f=25\text{ mm/s}$ | 超高时变率 $f=28\text{ mm/s}$ | 超高时变率 $f=31\text{ mm/s}$ |
| 12 000 | 370 | 330 | 300 | 220 | 200 | 180 |
| 11 000 | 410 | 370 | 330 | 240 | 210 | 190 |
| 10 000 | 470 | 420 | 380 | 273 | 240 | 220 |
| 9 000 | 530 | 470 | 430 | 300 | 270 | 250 |
| 8 000 | 590 | 530 | 470 | 340 | 300 | 270 |
| 7 000 | 670 | 590 | 540 | 390 | 350 | 310 |
| | 680 * | 610 * | 550 * | | | |
| 6 000 | 670 | 590 | 540 | 450 | 410 | 370 |
| | 680 * | 610 * | 550 * | | | |
| 5 500 | 670 | 590 | 540 | 490 | 440 | 390 |
| | 680 * | 610 * | 550 * | | | |
| 5 000 | — | — | — | 540 | 480 | 430 |
| 4 500 | — | — | — | 570 | 510 | 460 |
| | — | — | — | 585 * | 520 * | 470 * |
| 4 000 | — | — | — | 570 | 510 | 460 |
| | — | — | — | 585 * | 520 * | 470 * |

注: * 表示曲线设计超高 175 mm 时的取值

2.3 设计分析技术路线

在 400 km/h 线路平面参数动力学设计分析中,结合线路关键参数特点,充分考虑 400 km/h 条件下可能的曲线线路,全面考察轨道随机不平顺激励条件下车辆曲线通过的安全性、平稳性以及系统动态相互作用性能等动力学评价指标,研究曲线半径、超高及超高时变率等关键线路参数对系统动态相互作用关系的影响规律,综合分析得出 400 km/h 曲线线路关键参数的推荐值。

设计分析技术线路如图 3 所示,其中 400 km/h 条件下的合理曲线半径范围由理论计算和动力学检算得到。仿真提取响应包括车体心盘处的垂向与横向加速度、轮轨垂向力与横向力,并进一步求解车辆运行安全性评价指标(脱轨系数、轮重减载率)、平稳性评价指标(垂向、横向 Sperling 指标)以及车辆轨道动态作用评价指标(轮轴横向力),各项性能指标限值规定如表 2 所示^[21]。

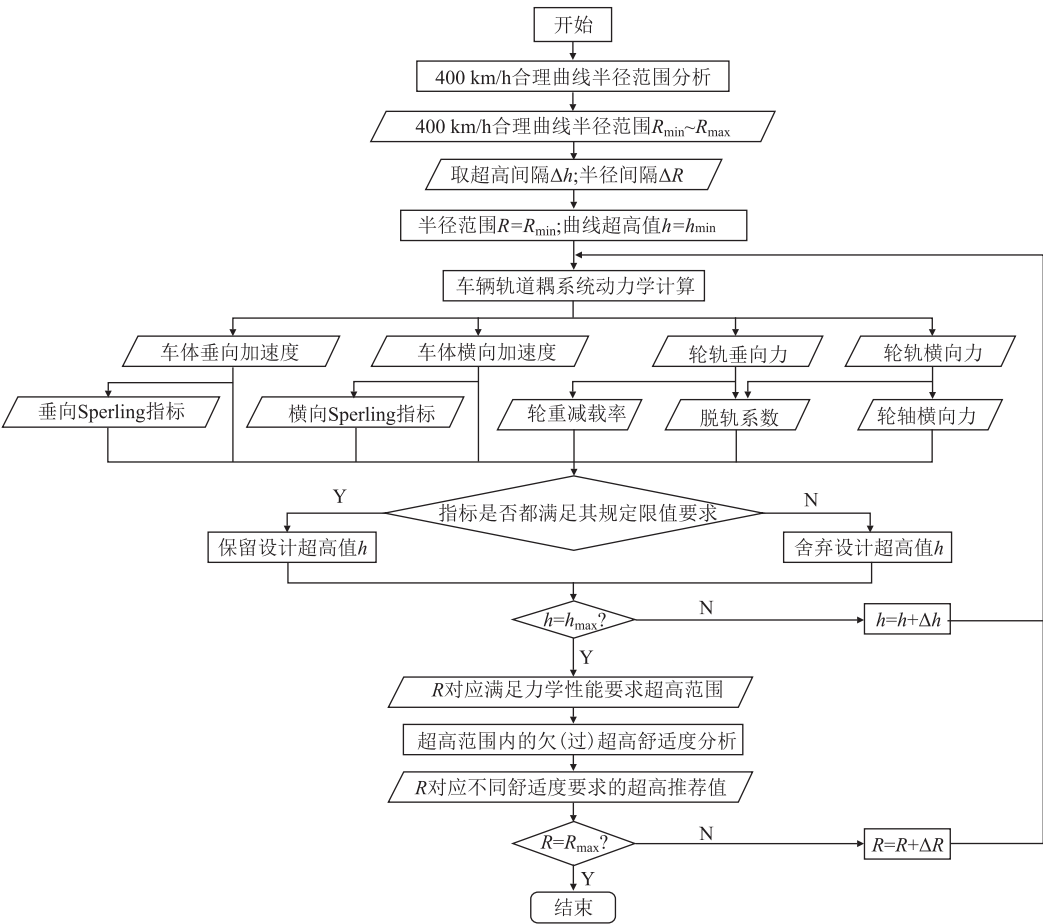


图 3 400 km/h 线路平面参数设计动力学分析技术线路图

表 2 评价指标及限值表

| 评价指标 | 限值 |
|-----------------------------|--------------------------------|
| 脱轨系数 | 0.8 |
| 轮重减载率 | 0.8 |
| 轮重横向力/kN | 15 + P ₀ /3 (53.26) |
| 车体振动加速度/(m/s ²) | 2.50 |
| 平稳性指标 | 优 <2.50 |
| | 良 2.50 ~ 2.75 |
| | 合格 2.75 ~ 3.00 |

3 高速铁路线路平纵断面参数分析

3.1 最大设置超高

铁路线路实设最大超高允许值须满足稳定性要

求,保证行车安全,避免车辆通过时发生向内倾覆。为此最大超高允许值的取值^[22]:

$$h_{\max} \leq \frac{S_1^2}{2nH} \tag{1}$$

式中:S₁——两轨头中心距(mm);

H——车体重心至轨顶面高(mm);

N——稳定系数,当 n 小于 1 时车辆丧失稳定而倾覆,根据国内外铁路运营经验,n 值不应小于 3。

标准轨距 S₁ 为 1 500 mm,复兴号动车车体重心至轨顶面高 H 为 1 670 mm,计算得最大超高值为

225 mm。此外,曲线最大实设超高还应考虑列车在曲线上停车时,乘客处于倾斜车体中的舒适度反应。综合考虑各种因素,高速铁路实设超高最大允许值为170~180 mm。因此,建议400 km/h 最大设计超高为175 mm。

3.2 欠(过)超高允许值

若通过设置外轨超高产生的向心加速度正好平衡列车以速度 V 做曲线运动的离心加速度,则列车处于最理想的运动状态。此时的实设超高为速度 V 对应的均衡超高。根据平衡关系,均衡超高的计算式为:

$$\bar{h} = \frac{S_1}{g \times R} \left(\frac{V}{3.6} \right)^2 \tag{2}$$

对于标准轨距:

$$\bar{h} = 11.8 \frac{V^2}{R} \tag{3}$$

式中: S_1 ——两轨头中心距;

G ——重力加速度, $g=9.8 \text{ m/s}^2$;

R ——曲线半径(m);

V ——车辆速度(km/h)。

设计超高 h 大于或小于均衡超高值时,均存在未平衡超高度 Δh ,过超高 h_g 和欠超高 h_q 的计算式为:

$$h_g = h - \bar{h} = h - 11.8 \frac{V^2}{R} \tag{4}$$

$$h_q = \bar{h} - h = 11.8 \frac{V^2}{R} - h \tag{5}$$

未平衡超高受乘客舒适度要求限制。根据平衡原理,未平衡超高 Δh 与车体未被平衡加速度 α 关系为:

$$\Delta h = \frac{S_1}{g} \alpha \tag{6}$$

对于标准轨距:

$$\Delta h = 153 \alpha \tag{7}$$

我国在制定高速铁路技术标准^[23]时,分别按 $\alpha = 0.26 \text{ m/s}^2$ 、 0.39 m/s^2 、 0.59 m/s^2 选定了三级欠/过超

高最大允许值,如表3所示。

表3 高速铁路欠/过超高最大允许值表(mm)

| 舒适度条件 | 优秀 | 良好 | 一般 |
|--------------------------|----|----|----|
| 欠/过超高允许值 h_{qy}/h_{gy} | 40 | 60 | 90 |

3.3 最大曲线半径

最大曲线半径与线路铺设、养护、维修的要求精度有关,曲率过小时,维修难度加大,曲线平顺性不易保证。综合国内外的工程实践经验和科研成果,我国速度300~350 km/h 高速铁路的最大圆曲线半径取值为12 000 m^[23]。考虑技术经济条件,400 km/h 线路可沿用350 km/h 的最大曲线半径值。

3.4 最小曲线半径

最小曲线半径应满足乘客的舒适度要求,保证曲线通过时,欠超高 h_q 不超过其允许值 h_{qy} 。文献[13]的研究结果表明,400 km/h 线路最小曲线半径主要由设计时速控制,而与匹配速差无关,因此400 km/h 线路的最小曲线半径按单一高速列车条件计算:

$$R_{\min} = \frac{11.8 V_{\max}^2}{h_{\max} + h_{qy}} \tag{8}$$

取最大设置超高 $h_{\max} = 175 \text{ mm}$,欠超高允许值 $h_{qy} = 90 \text{ mm}$,则400 km/h 最小曲线半径理论分析值 $R_{\min} = 7\,124 \text{ m}$ 。

4 既有曲线参数适应性分析

根据缓和曲线长度、曲线半径和超高时变率的关系,可得表1所列33段曲线线路的主要参数如表4所示,其中缓和曲线长度按10 mm进整。对33段线路依次进行350 km/h 和400 km/h 的车辆曲线通过仿真分析,第33段线路工况对应的车体右侧前心盘处车体加速度和一位轮对处轮轨力在不同时速下的时程响应分别如图4和图5所示。图中左、右侧分别表示曲线线路外侧和内侧。

表4 既有规范推荐设计速度350 km/h 的曲线参数表

| 超高时变率 $f=25 \text{ mm/s}$ | | | | 超高时变率 $f=28 \text{ mm/s}$ | | | | 超高时变率 $f=31 \text{ mm/s}$ | | | |
|---------------------------|--------|--------|----------|---------------------------|--------|--------|----------|---------------------------|--------|--------|----------|
| 序号 | 半径/m | 超高值/mm | 缓和曲线长度/m | 序号 | 半径/m | 超高值/mm | 缓和曲线长度/m | 序号 | 半径/m | 超高值/mm | 缓和曲线长度/m |
| 1 | 12 000 | 95 | 370 | 12 | 12 000 | 95 | 330 | 23 | 12 000 | 95 | 300 |
| 2 | 11 000 | 105 | 410 | 13 | 11 000 | 105 | 370 | 24 | 11 000 | 105 | 330 |
| 3 | 10 000 | 120 | 470 | 14 | 10 000 | 120 | 420 | 25 | 10 000 | 120 | 380 |
| 4 | 9 000 | 135 | 530 | 15 | 9 000 | 135 | 470 | 26 | 9 000 | 135 | 430 |
| 5 | 8 000 | 150 | 590 | 16 | 8 000 | 150 | 530 | 27 | 8 000 | 150 | 470 |
| 6 | 7 000 | 170 | 670 | 17 | 7 000 | 170 | 590 | 28 | 7 000 | 170 | 540 |
| 7 | 7 000 | 175 | 680 | 18 | 7 000 | 175 | 610 | 29 | 7 000 | 175 | 550 |
| 8 | 6 000 | 170 | 670 | 19 | 6 000 | 170 | 590 | 30 | 6 000 | 170 | 540 |
| 9 | 6 000 | 175 | 680 | 20 | 6 000 | 175 | 610 | 31 | 6 000 | 175 | 550 |
| 10 | 5 500 | 170 | 670 | 21 | 5 500 | 170 | 590 | 32 | 5 500 | 170 | 540 |
| 11 | 5 500 | 175 | 680 | 22 | 5 500 | 175 | 610 | 33 | 5 500 | 175 | 550 |

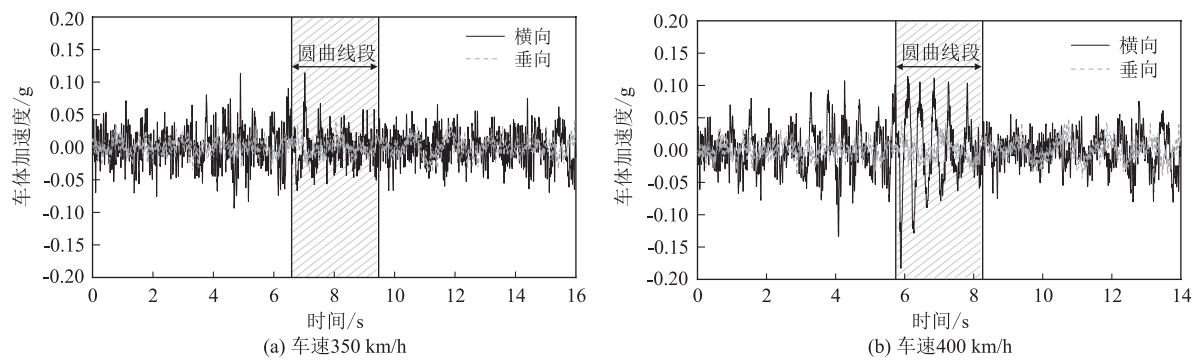


图4 通过第33段曲线时车体心盘处加速度响应图

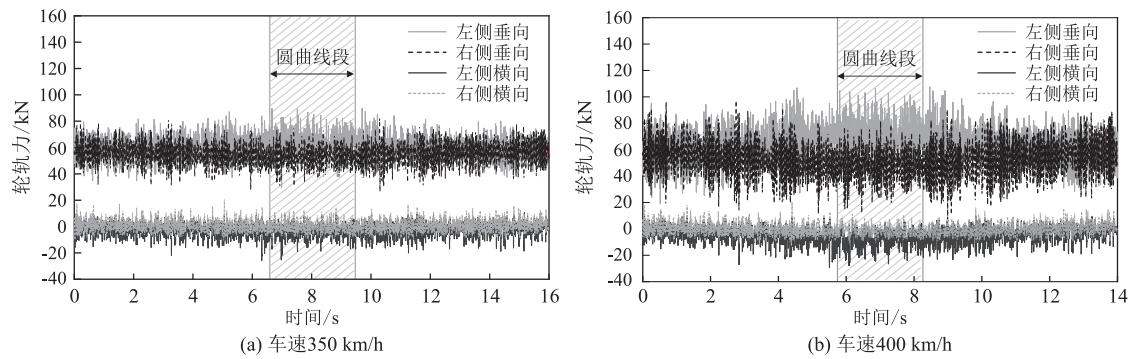


图5 通过第33段曲线时轮轨力响应图

从图4、图5可以看出,车辆通过曲线时,车体横向加速度最大幅值明显大于车体垂向加速度最大幅值,前者约为后者的2~3倍,两者最大振幅出现的位置也不相同。对于同一曲线线路,当车辆速度从350 km/h提高到400 km/h时,车体垂向加速度和横向加速度均出现不同程度的振幅增大。曲线通过时,轮轨横向力在0附近变化,垂向力在静轮重(58.56 kN)附近变化。由于既有标准均按欠超高设计,因此车辆通过曲线时外侧钢轨的轮轨作用力幅值大于内侧。各曲线工况下,速度提升时轮轨力幅值增大明显。以第33段曲线工况为例,速度350 km/h与速度400 km/h对应的轮轨横向力最大幅值分别为25.9 kN、29.4 kN,增幅为13.5%;轮轨垂向力最大幅

值分别为89.8 kN、107.5 kN,增幅为19.7%。由此可见,速度提高后系统动力相互作用更加剧烈。因此,对于设计速度400 km/h的线路,采用既有针对设计速度350 km/h及以下的线路平面参数设计规范,存在动力学性能指标超限风险,需进一步分析400 km/h车辆通过既有规范给定线路的动力学性能。在33组线路工况下,以350 km/h通过各段曲线的车辆运行Sperling平稳性指标和车辆-轨道动态作用评价指标如表5所示,以400 km/h通过各段曲线的各项动力学指标如表6、表7所示。各表中,超限工况以加粗字体标出,Sperling指标分别以白色、浅灰色和深灰色3种不同灰度背景表示优(<2.5)、良(2.5~2.75)和合格(2.75~3.0)等级。

表5 以350 km/h通过各段曲线的车辆运行Sperling平稳性指标和车辆-轨道动态作用评价指标表

| 曲线半径 /m | 超高 /mm | 横向 Sperling 指标≤2.5(优) | | | 垂向 Sperling 指标≤2.5(优) | | | 轮轴横向力≤53.26 kN | | |
|------------|-----------|-----------------------|---------|---------|-----------------------|---------|---------|----------------|---------|---------|
| | | 25 mm/s | 28 mm/s | 31 mm/s | 25 mm/s | 28 mm/s | 31 mm/s | 25 mm/s | 28 mm/s | 31 mm/s |
| 12 000 | 95 | 2.208 1 | 2.262 9 | 2.265 4 | 1.645 0 | 1.651 8 | 1.612 6 | 35.65 | 45.99 | 35.88 |
| 11 000 | 105 | 2.355 4 | 2.231 4 | 2.263 3 | 1.720 6 | 1.648 3 | 1.652 5 | 34.98 | 33.06 | 45.54 |
| 10 000 | 120 | 2.291 5 | 2.434 4 | 2.319 1 | 1.689 7 | 1.707 5 | 1.631 8 | 35.49 | 33.18 | 36.05 |
| 9 000 | 135 | 2.270 8 | 2.362 6 | 2.409 9 | 1.649 8 | 1.684 3 | 1.702 9 | 35.48 | 35.84 | 34.20 |
| 8 000 | 150 | 2.359 6 | 2.274 7 | 2.324 8 | 1.638 3 | 1.642 8 | 1.684 7 | 35.10 | 35.73 | 37.72 |
| 7 000 | 170 | 2.372 5 | 2.439 0 | 2.272 1 | 1.610 7 | 1.646 2 | 1.643 7 | 39.86 | 39.15 | 43.42 |
| 7 000 | 175 | 2.321 8 | 2.370 1 | 2.288 0 | 1.602 5 | 1.633 3 | 1.638 9 | 40.89 | 39.25 | 34.94 |
| 6 000 | 170 | 2.338 9 | 2.358 8 | 2.323 2 | 1.601 9 | 1.640 6 | 1.641 4 | 41.53 | 37.96 | 39.19 |
| 6 000 | 175 | 2.371 4 | 2.372 8 | 2.337 0 | 1.601 2 | 1.638 4 | 1.643 1 | 41.55 | 36.35 | 38.88 |
| 5 500 | 170 | 2.333 3 | 2.360 1 | 2.276 7 | 1.600 5 | 1.639 7 | 1.637 8 | 40.63 | 40.36 | 41.83 |
| 5 500 | 175 | 2.318 6 | 2.369 0 | 2.300 7 | 1.600 8 | 1.641 0 | 1.641 8 | 40.02 | 39.60 | 41.08 |

表 6 以 400 km/h 通过各段曲线的车辆运行 Sperling 平稳性指标和车辆-轨道动态作用评价指标表

| 曲线半径 /m | 超高 mm | 横向 Sperling 指标≤2.5(优) | | | 垂向 Sperling 指标≤2.5(优) | | | 轮轴横向力≤53.26 kN | | |
|------------|----------|-----------------------|---------|---------|-----------------------|---------|---------|----------------|---------|---------|
| | | 25 mm/s | 28 mm/s | 31 mm/s | 25 mm/s | 28 mm/s | 31 mm/s | 25 mm/s | 28 mm/s | 31 mm/s |
| 12 000 | 95 | 2.3833 | 2.764 4 | 2.551 7 | 1.674 1 | 1.731 5 | 1.667 5 | 38.04 | 38.34 | 38.64 |
| 11 000 | 105 | 2.604 8 | 2.553 5 | 2.533 5 | 1.708 3 | 1.678 3 | 1.713 1 | 40.82 | 40.64 | 38.56 |
| 10 000 | 120 | 2.400 1 | 2.596 3 | 2.459 5 | 1.667 0 | 1.712 9 | 1.675 0 | 42.51 | 41.53 | 39.08 |
| 9 000 | 135 | 2.531 8 | 2.390 1 | 2.413 0 | 1.753 3 | 1.668 0 | 1.688 6 | 41.82 | 43.53 | 42.51 |
| 8 000 | 150 | 2.648 6 | 2.519 0 | 2.410 1 | 1.765 0 | 1.750 9 | 1.665 0 | 44.11 | 42.61 | 42.39 |
| 7 000 | 170 | 2.508 6 | 2.651 0 | 2.513 7 | 1.721 6 | 1.770 0 | 1.743 7 | 44.53 | 38.53 | 44.93 |
| 7 000 | 175 | 2.503 1 | 2.734 9 | 2.526 9 | 1.729 4 | 1.753 8 | 1.757 0 | 44.17 | 45.00 | 46.28 |
| 6 000 | 170 | 2.645 7 | 2.830 6 | 2.511 1 | 1.729 2 | 1.784 9 | 1.743 3 | 44.89 | 43.79 | 49.93 |
| 6 000 | 175 | 2.526 3 | 2.800 3 | 2.519 2 | 1.724 6 | 1.767 4 | 1.759 4 | 43.27 | 43.48 | 50.17 |
| 5 500 | 170 | 2.504 2 | 2.707 3 | 2.704 1 | 1.717 8 | 1.771 7 | 1.755 5 | 56.52 | 56.80 | 49.29 |
| 5 500 | 175 | 2.670 2 | 2.723 8 | 2.685 4 | 1.726 1 | 1.754 1 | 1.771 7 | 54.87 | 50.33 | 46.13 |

表 7 以 400 km/h 通过各段曲线的车辆运行安全性指标表

| 曲线半径/m | 超高/mm | 轮重减载率≤0.8 | | | 脱轨系数≤0.8 | | |
|--------|-------|-----------|---------|---------|----------|---------|---------|
| | | 25 mm/s | 28 mm/s | 31 mm/s | 25 mm/s | 28 mm/s | 31 mm/s |
| 12 000 | 95 | 0.649 8 | 0.655 4 | 0.660 9 | 0.360 4 | 0.430 8 | 0.396 7 |
| 11 000 | 105 | 0.647 9 | 0.652 6 | 0.658 8 | 0.417 0 | 0.418 2 | 0.369 6 |
| 10 000 | 120 | 0.657 9 | 0.649 1 | 0.651 5 | 0.436 1 | 0.416 8 | 0.391 9 |
| 9 000 | 135 | 0.692 7 | 0.663 6 | 0.650 8 | 0.423 7 | 0.446 8 | 0.432 0 |
| 8 000 | 150 | 0.722 3 | 0.704 5 | 0.676 4 | 0.442 6 | 0.425 5 | 0.431 5 |
| 7 000 | 170 | 0.733 8 | 0.739 9 | 0.725 9 | 0.451 1 | 0.382 2 | 0.455 8 |
| 7 000 | 175 | 0.724 9 | 0.731 0 | 0.725 1 | 0.444 0 | 0.456 4 | 0.474 5 |
| 6 000 | 170 | 0.798 0 | 0.796 0 | 0.779 9 | 0.521 2 | 0.513 8 | 0.499 1 |
| 6 000 | 175 | 0.786 0 | 0.794 9 | 0.778 6 | 0.398 9 | 0.458 8 | 0.497 6 |
| 5 500 | 170 | 0.829 6 | 0.841 7 | 0.814 7 | 0.491 4 | 0.485 5 | 0.525 5 |
| 5 500 | 175 | 0.822 1 | 0.832 7 | 0.813 9 | 0.455 2 | 0.497 0 | 0.569 5 |

从表 5 ~ 表 7 可以看出:(1)350 km/h 条件下各线路工况均满足限值要求,且 Sperling 指标均达到“优”等级,表明规范对 350 km/h 线路的适应性良好;(2)400 km/h 条件下,车体垂向与横向加速度、垂向与横向 Sperling 指标均未超限,垂向 Sperling 指标均为“优”等级,横向 Sperling 指标较 350 km/h 均有所增大,且大多工况处于“良”等级,少数工况处于“优”或“合格”等级;(3)400 km/h 条件下,小半径曲线工况对应的安全性指标偏于“危险”,半径 6 000 m 及以下工况的轮重减载率均大于 0.75,且半径 5 500 m 对应各组工况的轮重减载率均超限,半径 5 500 m 时轮轴横向力有 3 组超限工况;(4)在相同半径、超高匹配条件下,3 种常用超高时变率对应的动力学指标相差小,且大小次序随机,可见常用超高时变率的选择对动力学性能指标的影响不明显。

综合各项指标结果,并考虑预留一定的安全裕量,对于 400 km/h 的线路,既有标准在 5 500 ~ 7 000 m 半径范围内不再适用,在 >7000 m 半径范围内具有一定

的适应能力。

5 400 km/h 超高设计建议值分析

5.1 曲线半径合理设置范围

从动力学角度对公式(8)计算得到的 400 km/h 线路最小半径值($R_{\min}=7\,124\text{ m}$)进行检算分析。检算中,半径分析范围为 5 500 ~ 7 500 m,间隔 100 m;超高分析范围为 0 ~ 300 mm,间隔 10 mm;因超高时变率变化对动力学性能的影响不明显,故均取 25 mm/s。为综合比较参数变化对各项指标的影响规律,对各仿真工况计算结果按指标最大值比指标限值进行归一化处理,部分数据结果如图 6、图 7 所示。图中平稳性指标展示了按“优”、“良”等级的归一化结果。

从图 6、图 7 可以看出,曲线半径与超高匹配关系变化时,垂向平稳性指标、车体垂向加速度和车体横向加速度基本满足限值要求,脱轨系数、轮重减载率、轮轴横向力以及横向平稳性指标较易发生超限。半径较小时(如 $R=5\,500\text{ m}$),在 $0\sim h_{\max}$ ($h_{\max}=175\text{ mm}$) 超

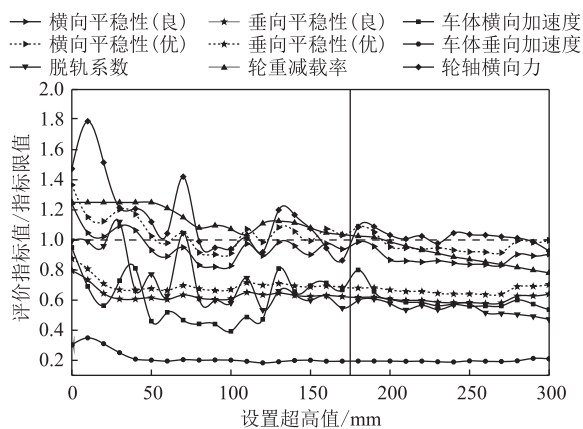


图6 半径5500m指标归一化值变化曲线图

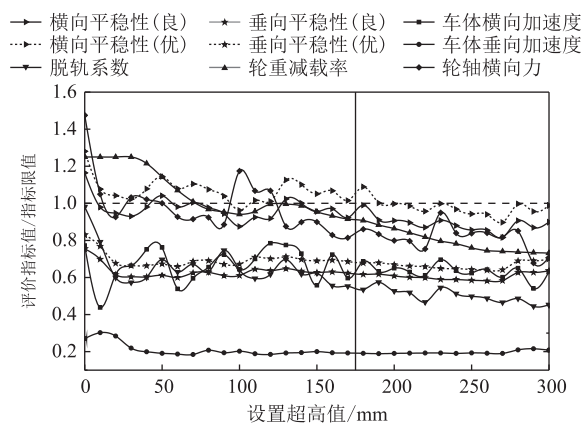


图7 半径7000m指标归一化值变化曲线图

高范围内动力学性能无法满足限值要求。当半径增大到6000m,在0~175mm范围内开始存在满足动力学性能要求的区间。区间超高值上限为175mm,以半径7000m为例,当超高值大于175mm时,仍可满足动力学性能指标要求,这是因为半径7000m对应的均衡超高为270mm,稍大于175mm的超高值更接近与均衡状态,因此必要时适当放宽最大超高值限值是可取的。

区间下限由性能指标综合评定,不同半径对应的未超限的区间下限值如图8所示。

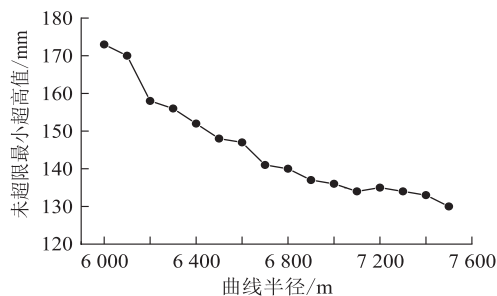


图8 满足限值区间下界值随半径增大变化规律图

从图8可以看出,随着半径的增大,未超限区间的下限值减小,半径6000m、7500m对应的未超限最小超高值分别为173mm、130mm,表明当半径值大于6000m时开始存在满足动力学要求的超高区间。随着半径的增大,满足限值的超高区间也扩大,半径7000m和7500m对应的区间分别为136~175mm、130~175mm。故式(8)计算得到的最小半径值($R_{\min}=7124\text{m}$)在一定超高范围内可满足动力学指标要求,且具有一定的安全裕量。对该值以500m进整,建议400km/h高速铁路最小半径取7500m。

5.2 线路平面参数设置建议值

基于车辆-轨道空间耦合系统动力学,在适应400km/h曲线半径范围内,开展设置超高合理取值的研究。半径分析范围为7500~12000m,间隔取曲线半径进整值500m;考虑最大设置超高值为175mm,超高分析范围取为0~180mm,间隔10mm;超高时变率仍均取25mm/s。采用指标评价与归一化方法,并进一步根据表3所列舒适度等级和欠/过超高关系式(式(4)和式(5)),得出满足不同舒适度等级要求的超高范围,部分结果如图9所示。图中 \bar{h} 表示按式(2)计算得到的均衡超高值; $h_{q1} \sim h_{q3}$ 分别为按“优秀”、“良好”、“一般”3种欠超高舒适度要求计算得到的超高允许范围; h_g 为0~ h_{\max} 范围内过超高“优秀”等级舒适度允许值所确定的超高允许范围。

从图9可以看出,当半径为7500m时,均衡超高为251mm,按“优秀”、“良好”、“一般”3种等级确定的最小超高值分别为211mm、191mm和161mm,在0~ h_{\max} 的超高范围内,欠/过超高舒适度最佳能达到“一般”等级,其对应超高范围为160~175mm;当半径增大至8500m时,舒适度最佳可满足“良好”等级;当半径增大至9000m时,0~ h_{\max} 内可设置3种舒适度要求的超高值;当半径为12000m时,3种等级对应的最小超高值分别为117mm、97mm和67mm,此时均衡超高值为157mm,在0~ h_{\max} 超高范围内存在过超高设计。曲线半径通常按欠超高状态进行设计,而上述结果表明,当线路曲线半径较大时,适当采用过超高形式设计也是合理的。

对动力学性能综合分析可得,当半径为7500m时,在未超限超高区间基础上留有安全裕量的安全超高范围为140~175mm,在该范围内横向平稳性指标均满足“良好”等级,接近“优秀”等级,表明既有欠/过超高要求的超高范围(160~175mm)具有20mm的安全裕量;当半径为12000m时,安全超高范围为55~175mm,在该范围内横向平稳性指标均可达“良好”等

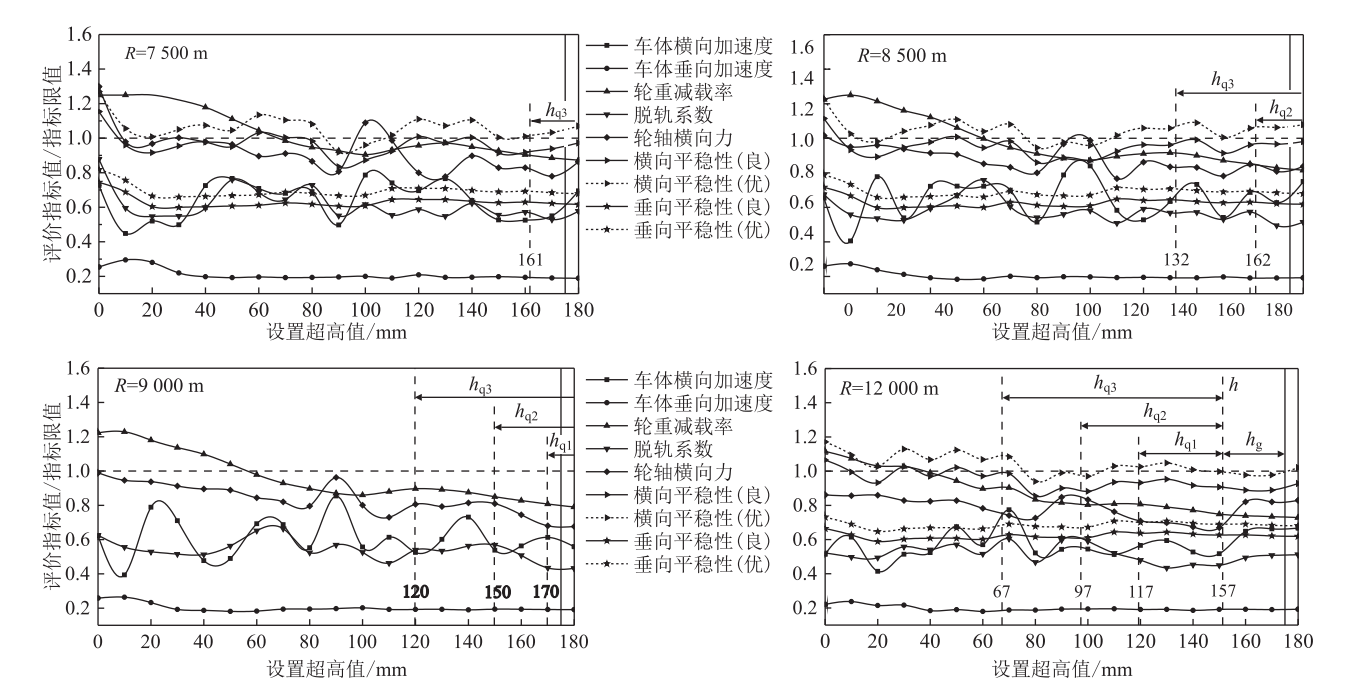


图 9 不同曲线半径时动力学性能随超高变化曲线图

级,部分达到“优秀”等级,表明既有欠/过超高要求的超高范围(65~175 mm)具有 10 mm 的安全裕量。由此可见,既有标准对不同曲线半径的欠/过超高要求具有一定的安全裕量,欠/过超高要求相比动力学性能指标更为严格。

综合动力学性能分析与欠/过超高舒适度分析,得出满足动力学性能要求条件下,各曲线半径对应不同舒适度条件的超高推荐值如表 8 所示,对应缓和曲线长度推荐值如表 9 所示。进一步评估推荐超高值安全裕量并汇总,如表 10 所示。其中安全最小超高值为动力学性能指标所确定安全超高区间的区间下限值。

表 8 400 km/h 曲线超高设置推荐值表 (mm)

| 曲线半径/m | 舒适度条件 | | |
|--------|-----------|-----------|-----------|
| | 一般 | 良好 | 优秀 |
| 7 500 | 160 ~ 175 | — | — |
| 8 000 | 145 ~ 175 | — | — |
| 8 500 | 130 ~ 160 | 160 ~ 175 | — |
| 9 000 | 120 ~ 150 | 150 ~ 170 | 170 ~ 175 |
| 9 500 | 110 ~ 140 | 140 ~ 160 | 160 ~ 175 |
| 10 000 | 100 ~ 130 | 130 ~ 150 | 150 ~ 175 |
| 10 500 | 90 ~ 120 | 120 ~ 140 | 140 ~ 175 |
| 11 000 | 80 ~ 110 | 110 ~ 130 | 130 ~ 175 |
| 11 500 | 75 ~ 105 | 105 ~ 125 | 125 ~ 175 |
| 12 000 | 65 ~ 95 | 95 ~ 115 | 115 ~ 175 |

表 9 400 km/h 曲线线路缓和曲线长度推荐值 (m)

| 曲线半径/m | 舒适度条件 | | | | | | | | |
|--------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| | 一般 | | | 良好 | | | 优秀 | | |
| | 超高时变率为 $f=25\text{ mm/s}$ | 超高时变率为 $f=28\text{ mm/s}$ | 超高时变率为 $f=31\text{ mm/s}$ | 超高时变率为 $f=25\text{ mm/s}$ | 超高时变率为 $f=28\text{ mm/s}$ | 超高时变率为 $f=31\text{ mm/s}$ | 超高时变率为 $f=25\text{ mm/s}$ | 超高时变率为 $f=28\text{ mm/s}$ | 超高时变率为 $f=31\text{ mm/s}$ |
| 7 500 | 710 ~ 780 | 630 ~ 690 | 570 ~ 630 | — | — | — | — | — | — |
| 8 000 | 640 ~ 780 | 580 ~ 690 | 520 ~ 630 | — | — | — | — | — | — |
| 8 500 | 580 ~ 710 | 520 ~ 630 | 470 ~ 570 | 710 ~ 780 | 630 ~ 690 | 570 ~ 630 | — | — | — |
| 9 000 | 530 ~ 670 | 480 ~ 600 | 430 ~ 540 | 670 ~ 760 | 600 ~ 670 | 540 ~ 610 | 760 ~ 780 | 670 ~ 690 | 610 ~ 630 |
| 9 500 | 490 ~ 620 | 440 ~ 560 | 390 ~ 500 | 620 ~ 710 | 560 ~ 630 | 500 ~ 570 | 710 ~ 780 | 630 ~ 690 | 570 ~ 630 |
| 10 000 | 440 ~ 580 | 400 ~ 520 | 360 ~ 470 | 580 ~ 670 | 520 ~ 600 | 470 ~ 540 | 670 ~ 780 | 600 ~ 690 | 540 ~ 630 |
| 10 500 | 400 ~ 530 | 360 ~ 480 | 320 ~ 430 | 530 ~ 620 | 480 ~ 560 | 430 ~ 500 | 620 ~ 780 | 560 ~ 690 | 500 ~ 630 |
| 11 000 | 360 ~ 490 | 320 ~ 440 | 290 ~ 390 | 490 ~ 580 | 440 ~ 520 | 390 ~ 470 | 580 ~ 780 | 520 ~ 690 | 470 ~ 630 |
| 11 500 | 330 ~ 480 | 300 ~ 420 | 270 ~ 380 | 480 ~ 560 | 420 ~ 500 | 380 ~ 450 | 560 ~ 780 | 500 ~ 690 | 450 ~ 630 |
| 12 000 | 290 ~ 420 | 260 ~ 380 | 230 ~ 340 | 420 ~ 510 | 380 ~ 460 | 340 ~ 410 | 510 ~ 780 | 460 ~ 690 | 410 ~ 630 |

6 结论

本文建立了高速车辆-轨道空间耦合动力学模

型,围绕 400 km/h 高速铁路线路平面参数设计,系统性地开展了既有规范适应性分析与线路平面参数合理匹配研究,为我国 400 km/h 等级高速铁路设计提供重

表 10 既有欠/过超高舒适度要求最小超高的安全裕量表

| 曲线半径 (m) | 欠/过超高要求 最小超高值 /mm | 安全最小超高值 /mm | 舒适度要求值 安全裕量/mm |
|-------------|-------------------------|----------------|-------------------|
| 7 500 | 160 | 140 | 20 |
| 8 000 | 145 | 120 | 25 |
| 8 500 | 130 | 110 | 20 |
| 9 000 | 120 | 100 | 20 |
| 9 500 | 110 | 80 | 30 |
| 10 000 | 100 | 75 | 25 |
| 10 500 | 90 | 70 | 20 |
| 11 000 | 80 | 60 | 20 |
| 11 500 | 75 | 60 | 15 |
| 12 000 | 65 | 55 | 10 |

要理论支撑,主要研究结论如下:

(1) 列车速度从 350 km/h 提高到 400 km/h,车辆-轨道系统动力相互作用加剧,既有规范适应性发生变化。当曲线半径在 7 000 m 及以下时,会出现动力学指标超限或安全裕量小的现象,表明既有规范不再适应于 400 km/h 的线路设计,但对 7 000 m 以上的曲线半径仍具备一定的适应能力。

(2) 对于 400 km/h 高速铁路,当曲线半径大于 6 000 m 时,便存在满足动力学指标限值要求的超高区间,且半径越大区间范围越大。考虑同时满足动力学指标和欠/过超高限值要求,并留有一定的安全裕量,本文建议 400 km/h 高速铁路曲线半径不应小于 7 500 m。

(3) 相比于既有欠/过超高设计要求,综合考虑车轨系统动力学性能指标来设计曲线超高具有更宽的合理设置范围。本文提出了 400 km/h 条件下线路平面设计参数推荐值,并评估了其安全裕量,可供不同线路条件和工程要求选用。

参考文献:

[1] 傅志寰,孙永福,翁孟勇,等. 交通强国战略研究[M]. 北京:人民交通出版社,2019.
FU Zhihuan, SUN Yongfu, WENG Mengyong, et al. Strategic Research on Transportation Power [M]. Beijing: People's Communications Publishing House, 2019.

[2] 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[J]. High Speed Railway Technology, 2019, 10(1): 14-22.

[3] 徐银光,李艳. 成渝中线 400 km/h 轮轨动车组技术指标研究[J]. 高速铁路技术, 2020, 11(3): 7-11.
XU Yinguang, LI Yan. Research on Technical Indexes of 400 km/h Wheel-Rail EMU for Chengdu-Chongqing Middle Line [J]. High

Speed Railway Technology, 2020, 11(3): 7-11.

[4] 耿放,安迪,杨静伟. 400 km/h 高速铁路不同速度等级列车匹配研究[J]. 铁道运输与经济, 2021, 43(1): 56-64.
GENG Fang, AN Di, YANG Jingwei. Matching of Trains Operating at Different Speeds on 400 km/h High-Speed Railway [J]. Railway Transport and Economy, 2021, 43(1): 56-64.

[5] GU Gunmo, YANG Fuheng. Dynamic Response of High Speed Train Moving on Consecutive Bridges [J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2019, 23(9): 4047-4062.

[6] 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.

[7] 宣言,万家,王澜. 高速铁路曲线线路车线耦合系统动力学性能仿真分析[J]. 中国铁道科学, 2008, 29(1): 7-12.
XUAN Yan, WAN Jia, WANG Lan. Simulation Research on the Dynamic Characteristics of Vehicle-Track Coupling System on the Curved Track of High-Speed Railway [J]. China Railway Science, 2008, 29(1): 7-12.

[8] 丁奥,王勇,吴佳佳,等. 基于 SIMPACK 的铁道车辆曲线通过能力研究[J]. 机械, 2019, 46(4): 37-41.
DING Ao, WANG Yong, WU Jiajia, et al. The Research on Railway Vehicle Curve Passing Capacity Based on SIMPACK [J]. Machinery, 2019, 46(4): 37-41.

[9] 翟婉明. 机车车辆与线路最佳匹配设计原理、方法及工程实践 [J]. 中国铁道科学, 2006, 27(2): 60-65.
ZHAI Wanming. Optimum Matching Design between Railway Vehicles and Tracks: Principle, Method and Engineering Practice [J]. China Railway Science, 2006, 27(2): 60-65.

[10] 翟婉明,蔡成标,王开云. 高速铁路线路平纵断面设计的动力学评估方法[J]. 高速铁路技术, 2010, 1(1): 1-5.
ZHAI Wanming, CAI Chengbiao, WANG Kaiyun. Dynamics Assessment Method for Design of High Speed Railway Plan and Profile [J]. High Speed Railway Technology, 2010, 1(1): 1-5.

[11] 翟婉明. 车辆-轨道耦合动力学研究的新进展[J]. 中国铁道科学, 2002, 23(2): 1-14.
ZHAI Wanming. New Advance in Vehicle-Track Coupling Dynamics [J]. China Railway Science, 2002, 23(2): 1-14.

[12] 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.

[13] 梁晨,司道林,徐玉坡. 时速 400/380km 高速铁路最小曲线半径取值研究[J]. 铁道建筑, 2016, 56(1): 63-66.
LIANG Chen, SI Daolin, XU Yupu. Research of Minimum Curve Radius Value for High Speed Railway at 400/380 Km/H [J]. Railway Engineering, 2016, 56(1): 63-66.

动速度 $\times 0.7$)接近,具有一定可靠性。

4 结束语

400 km/h 高速铁路接触网系统代表全球高速铁路接触网研究的最高水准,是建立成套400 km/h 高速铁路理论体系的重要一环,需要把能代表中国最高水平的新材料、新技术、新工艺、新工法、新体系等最新成果展现出来。本文总结了350 km/h 高速铁路接触网技术的成果及短板,探讨了仿真手段对400 km/h 的适应性并对其评价标准提出了建议。对于400 km/h 高速接触网系统,今后还需进一步健全其理论体系,形成400 m/h 高速铁路的中国标准,进一步探讨现有弓网仿真方法对400 km/h 的适应性,并结合400 km/h 运行速度的高速高频特点,进一步研究新的接触力评价标准。

参考文献:

- [1] F. Kiessling. Contact Lines for Electric Railways: Planning, Design, Implementation, Maintenance[M]. Erlangen: Publicis, 2009.
- [2] BS EN 50119-2020 Railway Applications. Fixed Installations. Electric Traction Overhead ContactLines [S].
- [3] TB 10009-2016 铁路电力牵引供电设计规范[S].
TB 10009-2016 Code for Design of Railway Traction Power Supply [S].
- [4] TB 10621-2014 高速铁路设计规范[S].
TB 10621-2014 Code for Design of High Speed Railway[S].

(上接第10页)

- [14] 刘磊. 时速400km 高速铁路曲线超高研究[J]. 铁道建筑, 2017, 57(4): 91-94.
LIU Lei. Study on Curve Superelevation of 400km/h High Speed Railway[J]. Railway Engineering, 2017, 57(4): 91-94.
- [15] 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.
- [16] 张旭久. 高速铁路轨道不平顺限值及曲线通过关键动力参数取值研究[D]. 长沙: 中南大学, 2009.
ZHANG Xujiu. Research on the Limits of Track Irregularities of High-speed Railways and the Values of Key Dynamic Parameters for Curve Negotiation. Changsha: Central South University, 2009.
- [17] 孙文峰. 既有线提速平面曲线半径与曲线实设超高关系的分析[J]. 铁道标准设计, 2005, 49(4): 12-14.
SUN Wenfeng. Studying the Independence of Radius of Plane Curve to Actual Elevation of Curve for Speed-Raising on Existing Line[J].

- [5] BS EN 50367-2012 Railway Applications. Current Collection Systems. Technical Criteria for the Interaction between Pantograph and Overhead Line[S].
- [6] 王婧. 基于层次分析法的接触网区段质量评价影响因素权重确定研究[J]. 中国铁路, 2019(4): 60-64.
WANG Jing. Weight Study of Influential Factors for Assessment of OCS Section Quality Using Analytic Hierarchy Process[J]. China Railway, 2019(4): 60-64.
- [7] 张文轩, 王婧, 杨志鹏, 等. 接触网质量评价方法与评价体系[J]. 中国铁路, 2019(1): 21-25.
ZHANG Wenxuan, WANG Jing, YANG Zhipeng, et al. The Quality Assessment Method and Assessment System of Overhead Contact Line System[J]. China Railway, 2019(1): 21-25.
- [8] TJ/GD 026-2018 高速铁路简化接触网装备暂行技术条件[S].
TJ/GD 026-2018 Temporary Technical Conditions for Simplified Overhead Contact System Equipment of High-speed Railways[S].
- [9] SHABANA A A. Definition of ANCF Finite Elements[J]. Journal of Computational and Nonlinear Dynamics, 2015, 10(5): 054-506. DOI:10.1115/1.4030369.
- [10] SONG Yang, RÖNNQUIST 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.
- [11] 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.
- [12] BS EN 50318-2018 Railway Applications. Current Collection Systems. Validation of Simulation of the Dynamic Interaction between Pantograph and Overhead Contact Line[S].
- [13] Railway Standard Design, 2005, 49(4): 12-14.
- [18] 陈修平. 高速铁路曲线超高设计的研究[J]. 铁道勘察, 2010, 36(5): 80-81.
CHEN Xiuping. Super-Elevation Design on Curves of High Speed Railway[J]. Railway Investigation and Surveying, 2010, 36(5): 80-81.
- [19] 翟婉明. 车辆-轨道耦合动力学(第四版)上册[M]. 北京: 科学出版社, 2015.
ZHAI Wanming. Vehicle-Track Coupled Dynamics(4 Edition)[M]. Beijing: Science Publishing House, 2015.
- [20] TB/T 10621-2014 高速铁路设计规范[S].
TB/T 10621-2014 Code for Design of High Speed Railway[S].
- [21] GB/T 5599-2019 机车车辆动力学性能评定及试验鉴定规范[S].
GB/T 5599-2019 Specification for Dynamic Performance Assessment and Testing Verification of Rolling Stock[S].
- [22] 易思蓉. 铁路选线设计[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2017.
YI Sirong. Principle of Railway Location and Design[M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Publishing House, 2017.
- [23] TB 10621-2014 高速铁路设计规范(条文说明)[S].
TB 10621-2014 Code for Design of High Speed Railway (Clause Explanation)[S].