

文章编号: 1674—8247(2023)06—0039—07

DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2023.06.008

基于动力学分析的更高速度轮轨高速铁路线路平面参数研究

张逸飞 王保成

(兰州交通大学, 兰州 730070)

摘 要: 基于建立的动力学仿真模型, 采用车线动力学分析方法探讨了速度为 400 km/h、450 km/h 和 500 km/h 轮轨高速铁路的主要线型指标, 确定了满足安全性、舒适性和轮轨动力性能条件下, 平面曲线半径以及超高与行车速度的匹配关系。结果表明: (1) 行车速度为 400 km/h 时, 最小曲线半径一般情况可取 8 500 m, 困难情况取 7 500 m; 450 km/h 时, 最小曲线半径一般情况可取 11 500 m, 困难情况取 9 500 m; 500 km/h 时, 最小曲线半径困难情况取 12 000 m; (2) 400 km/h 与 450 km/h 速度条件下, 越接近均衡超高, 行车的安全性指标与横向舒适度评价结果越好, 适当的欠超高情况下, 行车的轮轨动力响应评价结果更优。

关键词: 高速铁路; 车线模型; 线路平面参数; 安全平稳性

中图分类号: U212.3 ; U238

文献标志码: A

A Study on the Planar Parameters of Higher-speed Wheel-rail High-speed Railway Based on Dynamic Analysis

ZHANG Yifei WANG Baocheng

(Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: Based on the dynamic simulation model established in this paper, vehicle-track dynamic analysis was employed to investigate the main alignment indicators of wheel-rail high-speed railways with speeds of 400 km/h, 450 km/h, and 500 km/h. The matching relationship between the planar curve radius and super-elevation under the conditions of safety, comfort, and wheel-rail dynamic performance was determined. The results show that: (1) When the running speed is 400 km/h, the minimum curve radius can be 8 500 m under general conditions, and 7 500 m under difficult conditions; when the running speed is 450 km/h, the minimum curve radius can be 11 500 m under general conditions, and 9 500 m under difficult conditions; and when the running speed is 500 km/h, the minimum curve radius is 12 000 m under difficult conditions. (2) When the running speed is 400 km/h or 450 km/h, the closer the actual superelevation is to the equilibrium value, the better the safety index and lateral comfort evaluation results are. Under the appropriate deficient superelevation, the evaluation results of wheel-rail dynamic response are superior during train operation.

Key words: high-speed railway; vehicle-track model; line planar parameters; safety and stability

1 概况

随着我国高速铁路的全面发展以及全国大面积

高速铁路的正式启用, 人们愈发追求舒适便捷的出行体验。我国铁路旅客运输面临着航空、公路等主流客运行业激烈的市场竞争, 列车运行速度受到挑战, 既

收稿日期: 2022-10-26

作者简介: 张逸飞(1997-), 男, 硕士研究生。

基金项目: 国家自然科学基金(51568037)

引文格式: 张逸飞, 王保成. 基于动力学分析的更高速度轮轨高速铁路线路平面参数研究[J]. 高速铁路技术, 2023, 14(6): 39-45.

ZHANG Yifei, WANG Baocheng. A Study on the Planar Parameters of Higher-speed Wheel-rail High-speed Railway Based on Dynamic Analysis[J]. High Speed Railway Technology, 2023, 14(6): 39-45.

有线型参数设计规范的适应性也有待研究。提升高速列车速度,深入 400 km/h、450 km/h 及更高速度轮轨高速铁路的线型参数适用性和合理匹配研究,是高速铁路发展的重要方向和未来趋势^[1-4]。

目前,国内外学者针对高速列车平面线型参数进行了大量研究。Lindahl M^[5]等分析了铁路曲线段超高和曲线半径对列车运行稳定性的影响,给出了运行速度为 200~350 km/h 时高速铁路平、纵断面参数合理值;Cherkashin Y M^[6]等采用 UM 研究了超高、轨道不平顺、轨距等因素对列车通过曲线段安全性能的影响;易思蓉^[7]等通过车线动力学分析途径,给出了基于舒适度与安全性标准的曲线线路参数允许值,提出了高速客运专线曲线半径建议最小值;梁晨^[8]等借助仿真分析和理论计算,提出了运行速度为 380 km/h 与 400 km/h 时列车的最小曲线半径推荐值;时瑾^[9]等从列车运行安全性、舒适性指标出发,对更高速度下超高与平面曲线半径间的关系进行了匹配研究,并对 400 km/h 列车在既有 350 km/h 线路条件下运行可行性进行了研究;朱颖^[10]等归纳了国内外对于高速列车运行条件下平面曲线半径探究的经验,对高速铁路曲线段线路参数与动力响应之间的关系进行了研究总结;杨星光^[11]等采用 UM 建立车辆-耦合动力学模型,对运行速度 250 km/h 与 350 km/h 共线高速铁路线路的最小曲线半径取值给予了建议。可以看出,当前大多数高速铁路线型参数探讨主要针对 350 km/h 及以下速度线路^[12-15],而对于在 400 km/h、450 km/h 及以上更高速度情况下线路平面设计参数对车辆动力学性能的研究较少;对不同速度等级下,最小曲线半径、超高及缓和曲线等的匹配问题尚未深入研究;针对设计速度 400 km/h 及以上更高速度轮轨高速铁路的线型参数探讨刚刚起步,需深挖线路参数与列车运行舒适度、安全性之间的内在关联。

本文在车辆-轨道空间耦合动力学的基础上建立了车-线动力学模型^[16],依据现行线路设计规范,设置具有不同平面曲线半径以及超高的线路,让列车高速通过并对其动力学性能进行分析,研究其间的匹配关系,以此来为 400 km/h、450 km/h 及更高速度轮轨高速铁路的线路设计工作提供合理参考,并对现有规范适用性进行分析。

2 动力学模型及行车性能评价标准

2.1 动力学模型

本文运用 SIMPACK 构建某型客车模型,由 4 组轮对、前后转向架、一系、二系悬挂和车体等组成^[17]。

转向架为构架式结构,轮对采用 LM 型车轮踏面,钢轨采用 CHN60 廓形。车体及构架均有 6 个自由度,即横向、纵向、垂向、侧滚、摇头、点头^[17];轮对则有 3 个自由度,分别为横向、垂向以及摇头;该模型共有 30 个自由度。

本文主要研究曲线线路参数对列车动力响应的影响,因此并未考虑轨道以及基础结构等的影响。采用列车运行通过完整曲线段的工况,包括圆曲线、缓和曲线以及直线部分^[18]。更高速度情况下,车辆运行受轨道不平顺谱的影响更大,本次研究对比了传统德国低干扰谱与中国无砟轨道谱不平顺的激扰影响。中国无砟轨道谱平顺性明显优于德国低干扰谱,且德国低干扰谱高低不平顺样本幅值明显高于中国无砟轨道谱幅值。在旅客乘坐舒适度方面,中国无砟轨道谱的舒适性也要更优。因此,考虑到更高速度情况列车运行安全性、平稳性及舒适性,为了实现车辆通过曲线段更真实的状况,采用中国高速铁路无砟轨道不平顺谱作为轨道不平顺激励。

2.2 动力响应评价标准

提取轮轨横向力与垂向力、前后转向架中心偏向车体一侧对角提取的垂向加速度与横向加速度^[19],对提取数据处理得到其他评价指标,评价指标以及其限值要求如表 1 所示。

表 1 动力特性评价指标及限值表

评价指标	限值
脱轨系数	0.8
轮重减载率	0.8
轮轨横向力	0.4 倍轴重(64 kN)
轮轨垂向力	170 kN
车体振动加速度	2.5 m/s ²
Sperling 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研究

3.1 超高

曲线超高是指曲线外轨与内轨顶面的水平高度之差,超高计算公式为:

$$h = 11.8 \frac{v^2}{R} \tag{1}$$

式中: v ——车体运行速度(km/h);

R ——圆曲线半径(m)。

我国高速铁路设计规范最大设计超高允许值采用 175 mm,建议最大欠超高允许值不超过 90 mm;一般认为,过超高与欠超高对旅客乘坐舒适度具有同等

的影响,取过超高允许值与欠超高允许值一致^[20]。

3.2 平面曲线半径

最小平面曲线半径大小由最高设计速度与不同速度匹配条件来决定,考虑单一最高设计速度下平面曲线半径的取值:

R_min = 11.8 * (v_max^2 / [h + h_q]) (2)

式中: v_max——设计最高速度(km/h);
[h + h_q]——设计超高与欠超高之和允许值(mm)。

不同最高速度下最小曲线半径如表2所示。

表2 不同设计速度时最小曲线半径表

适用条件	[h + h_q]/mm	设计速度/(km·h ⁻¹)			
		350	400	450	500
优	210	6 883	8 990	11 379	14 048
良	235	6 151	8 034	10 168	12 553
一般	265	5 456	7 125	9 017	11 132

3.3 缓和曲线

经比较与计算分析得,高速铁路多按乘坐舒适度允许的车体倾斜角速度(即超高时变率)要求的缓和曲线长度L₃来决定其值大小:

L_3 ≥ (V_c / 3.6) * (h / [f]) (3)

式中: V_c——设计速度(km/h);
[f]——超高时变率允许值(优秀条件取25 mm/s,一般条件取28 mm/s,困难条件下取31 mm/s);
h——圆曲线设置超高(mm)。

计算得到的更高速度情况下缓和曲线与平面曲线半径匹配情况及其均衡超高与设计超高,如表3、表4所示。

表3 400 km/h 缓和曲线表

曲线半径/m	均衡超高/mm	设计超高/mm	优	良	一般
12 000	157	160	720	640	580
11 000	172	175	780	700	630
10 000	189	175	780	700	630
9 000	210	175	780	700	630
8 000	236	175	780	700	630
7 500	252	175	780	700	630

表4 450 km/h 缓和曲线表

曲线半径/m	均衡超高/mm	设计超高/mm	优	良	一般
12 000	200	175	880	790	710
11 000	218	175	880	790	710
10 000	239	175	880	790	710
9 000	266	175	880	790	710

4 最小平面曲线半径建议值检算

建立列车模型进行动力仿真,考察曲线半径对于车辆动力响应的影响,加入既有350 km/h运行车辆组作为对照,车速分别设置为350 km/h、400 km/h、450 km/h、500 km/h;考虑到列车运行速度以及规范要求,将超高统一设置为175 mm。

4.1 曲线半径对安全性的影响

脱轨系数、轮重减载率在平面曲线半径改变时的变化规律如图1所示,其值均采用峰值大小。

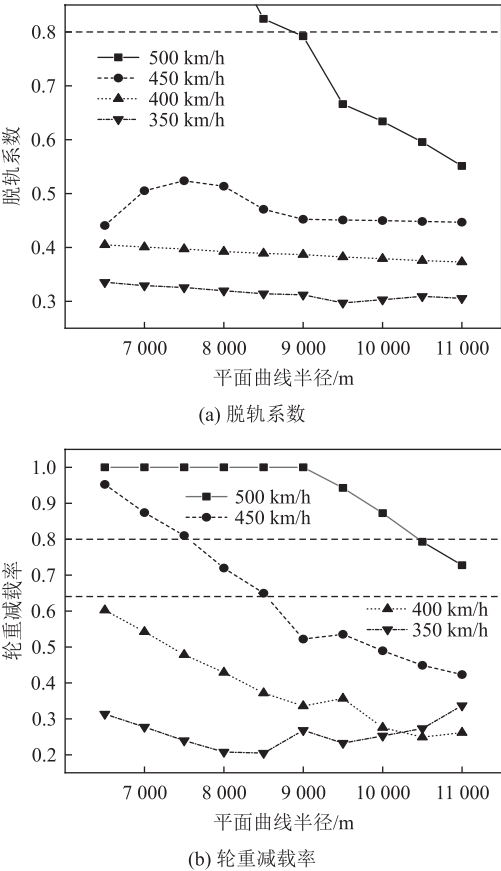


图1 脱轨系数与轮重减载率受半径变化的影响图

由图1可知:

- (1) 列车以350 km/h运行时,当半径由6 500 m增大至8 500 m时,脱轨系数与轮重减载率的值一直在降低;由8 500 m增大至11 000 m时,轮重减载率开始增加,即随着过超高的出现与增大,轮重减载率也开始增大。
- (2) 400 km/h与450 km/h速度条件下,轮重减载率随平面曲线半径增大而逐渐减小;但在半径为9 500 m时,轮重减载率较半径为9 000 m时出现了一定程度的增大;450 km/h条件下,半径大小由6 500 m增大至7 500 m时,脱轨系数增大,之后随半径大小的

增大,列车运行安全性提高,指标开始递减并逐渐趋于稳定值0.445左右;半径小于7 500 m时,轮重减载率超出限值要求(0.8),不符合规定。

(3)500 km/h速度条件下,脱轨系数在半径小于9 000 m时超出限值,轮重减载率在曲线半径小于10 500 m时超出限值。

(4)考虑安全性指标轮重减载率与脱轨系数,450 km/h速度条件下,平面曲线半径应大于7 500 m;500 km/h速度条件下,平面曲线半径应大于10 500 m。

4.2 曲线半径对舒适性的影响

在曲线超高设置为175 mm情况下,分别研究车速在350 km/h、400 km/h、450 km/h、500 km/h条件下车体横、纵向加速度的变化,结果如图2所示。加速度测点对角布置于前、后转向架中心偏向车体一侧1 000 mm处,计算横纵向加速度时,车体垂向加速度采用20 Hz低通滤波,I、II、III、IV级限值分别为 1.0 m/s^2 、 1.5 m/s^2 、 2.0 m/s^2 、 2.5 m/s^2 。车体横向加速度采用III、IV级标准下10 Hz低通滤波处理的值进行评判,I、II、III、IV级限值分别为 0.6 m/s^2 、 0.9 m/s^2 、 1.5 m/s^2 、 2.0 m/s^2 。

由图2可知,随着平面曲线半径的增加,400 km/h、450 km/h、500 km/h速度下的横向加速度峰值均呈现递减趋势;当曲线半径大小由6 500 m增大到11 000 m时,350 km/h和400 km/h速度下,横向加速度值均处于 2.5 m/s^2 的评定限值内;350 km/h与400 km/h速度下,横向加速度峰值随曲线半径先减小后增大,350 km/h时在8 000 m附近达到最小值,400 km/h时在10 500 m附近达到最小值,在所取半径条件下,均衡超高正好与实设超高175 mm相近;随着曲线半径继续增大,超高后横向加速度峰值也开始增大,即横向稳定性开始下降。

为了满足列车运行时的舒适度,400 km/h情况下,半径大于等于8 500 m时,横向加速度大小满足III级评价标准 1.5 m/s^2 ,半径不小于7 500 m时,横向加速度大小满足IV级评价标准 2.0 m/s^2 。在450 km/h情况下,半径小于8 000 m时,横向加速度值超出限值,不合格,半径不小于9 500 m时,横向加速度大小满足IV级标准,半径不小于11 500 m时,横向加速度等级满足III级标准。500 km/h情况下,半径小于10 500 m时,横向平稳性较差,最大值变化趋势在曲线半径为9 000 m至10 500 m出现一定的随机性,且均超出了限值,不合格;半径增大至12 000 m时,横向加速度满足IV级标准;考虑到舒适度要求,建议500 km/h速度时,半径可在规范限值12 000 m的基础上适当增大。

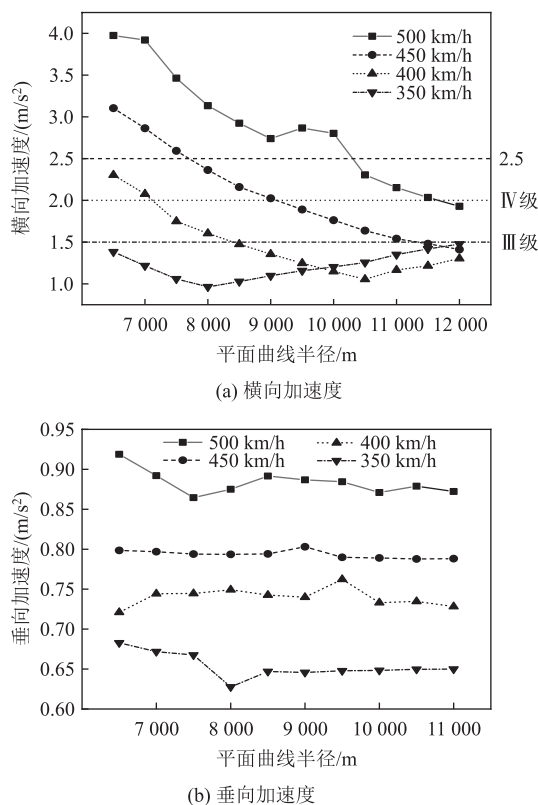


图2 车体加速度受半径变化的影响图

不同车体速度状况下,随着平面曲线半径的增加,车体垂向加速度大小变化在 0.05 m/s^2 之内,最大值变化趋势具有一定的随机性,变化比较小,垂向加速度大小满足I级标准 1 m/s^2 。固定超高与速度的情况下,列车垂向振动加速度受曲线半径的影响较小。

4.3 曲线半径对轮轨动力性能的影响

轮轨横向、垂向力的大小受平面曲线半径的影响如图3所示。当列车以350 km/h、400 km/h速度条件运行时,轮轨横向力均处于限值0.4倍轴重(64 kN)以内。350 km/h速度条件时,曲线半径由8 500 m增大至11 000 m过程中,实设超高大于均衡超高,过超高逐渐提升,轮轨横向力随之逐渐增大至29.13 kN。时速400 km/h条件下,欠超高随着曲线半径由6 500 m增大至11 000 m,而后逐渐降低,轮轨横向力也呈减小趋势,在半径大于9 000 m时,下降开始趋于平稳;半径11 000 m左右时,此时实设超高与均衡超高相近,轮轨横向力达到最小值34.11 kN。450 km/h速度条件时,半径为6 500 m与8 000 m时,轮轨横向力超出限值,之后随半径的增大,横向轮轨力逐渐递减。500 km/h运行条件下,曲线半径由6 500 m增大至8 500 m时,轮轨横向力下降显著,但都超出限值要求;当曲线半径进一步由9 000 m增大至11 000 m时,

轮轨横向力由 58.01 kN 降低至 50.58 kN,都处于限值要求内。

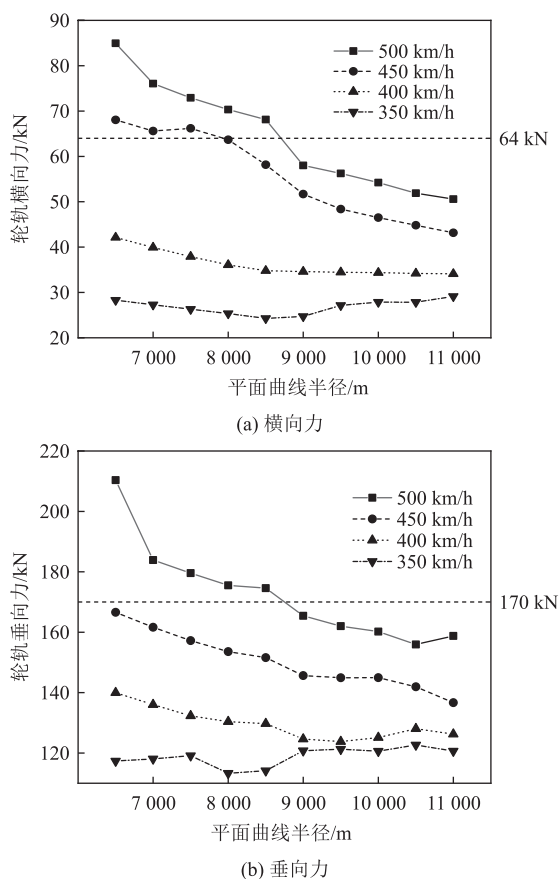


图3 轮轨力受半径变化的影响图

平面曲线半径由 6 500 m 增大至 11 000 m 时, 350 km/h 速度条件下,随着曲线半径的增加,轮轨垂向力峰值有增有减,都处于限值内,变化范围较小,整体在 120 kN 上下浮动;在半径为 8 000 m 左右时,此时实设超高与均衡超高相近,轮轨横向力达到最小值。400 km/h 和 450 km/h 条件下,当曲线半径大小由 6 500 m 增大至 11 000 m 时,轮轨垂向力呈递减趋势,均处于限值内,轮轨垂向力下降幅度较为稳定。当列车运行速度为 500 km/h 时,曲线半径小于 9 000 m 时,轮轨垂向力均大于限值要求,不合格;当曲线半径由 9 000 m 继续增大至 11 000 m 时,轮轨垂向力稳步下降,且均符合限值要求。

综上所述,固定超高为 175 mm,行车速度为 400 km/h 时,最小平面曲线半径一般情况可取 8 500 m,困难情况取 7 500 m;行车速度 450 km/h 时,最小平面曲线半径一般情况可取 11 500 m,困难情况取 9 500 m;行车速度 500 km/h 时,最小平面曲线半径困难情况可取 12 000 m。

5 超高建议值检算

考虑采用合理的平面曲线半径值,研究不同车速时超高对车辆动力学性能的影响。将曲线半径固定为 9 500 m,设立 400 km/h 与 450 km/h 两种速度条件,分别对应 198.74 mm 和 251.53 mm 的均衡超高,结果如图 4 所示。

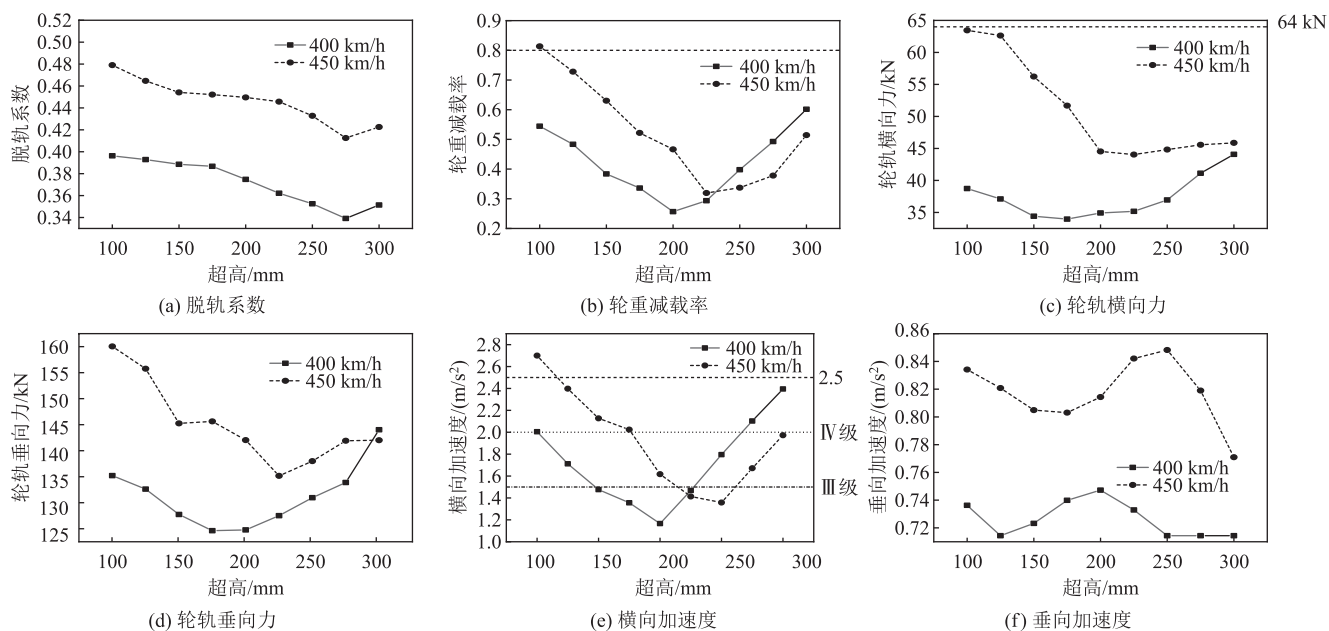


图4 动力学特性指标受超高变化的影响图

由图 4 可知:

(1) 曲线半径为 9 500 m, 列车以 400 km/h 和

450 km/h 运行,当超高从 100 mm 增大至 300 mm 过程中,安全性指标、轮轨作用力与横向加速度都呈现先减小后增大的趋势;除轮重减载率在速度为 450 km/h,超高 100 mm 时超出限值外,其余指标均处于限值要求内。

(2)脱轨系数随超高的增大整体呈现递减趋势,但在过超高过大情况下,脱轨系数也开始转为增大趋势;轮重减载率分别在超高为 200 mm 与 225 mm 附近取得最小值,此时超高与均衡超高相近,超高值的变化对安全性指标轮重减载率的影响很大。

(3)400 km/h 速度时,轮轨垂向力与横向力在超高为 175 mm 左右时达到最小值;450 km/h 速度时,轮轨横向力与垂向力在超高为 225 mm 左右时达到最小值;考虑到均衡超高的,即认为欠超高 20 mm 左右的情况下,行车的轮轨动力响应评价更优;400 km/h 与 450 km/h 速度下,横向加速度分别在超高为 200 mm 与 250 mm 附近处达到最小值,且符合Ⅲ级标准,此时超高与均衡超高近似相等。

(4)400 km/h 时,当超高最少大于 100 mm,横向加速度符合Ⅳ级标准;450 km/h 时,超高最少大于 175 mm 时,横向加速度符合Ⅳ级标准。速度为 400 km/h,超高从 100 mm 增加至 200 mm 时,横向加速度从 2.00 m/s^2 减小为 1.17 m/s^2 ,速度为 450 km/h 时,超高从 100 mm 增加至 250 mm 时,横向加速度从 2.70 m/s^2 减小为 1.36 m/s^2 ,其变化范围较大。车体横向舒适度的值受超高变化的影响比较大;400 km/h 与 450 km/h 速度情况下,垂向加速度最大值随超高的增大呈现先减小后增大再减小的趋势,受超高变化的影响较小。

(5)综上所述,400 km/h 时超高建议值大于 100 mm,450 km/h 时超高建议值取 175 mm 或更大;越接近均衡超高情况下,行车的安全性指标与横向舒适度评价结果更好,但在适当的欠超高情况下,行车的轮轨动力响应评价结果更优。

6 结论

(1)更高速度情况下,高速铁路平面曲线半径在一定范围内对安全性指标、车体横向振动加速度、轮轨作用力、车体横向平稳性的影响较大;车体的垂向平稳性与垂向振动加速度受其影响较低。评价指标的变化程度,会随着曲线半径的增大而减弱。

(2)为了满足列车运行安全性、舒适性与轮轨动力响应要求,行车速度为 400 km/h 时,最小平面曲线半径一般情况可取 8 500 m,困难情况取 7 500 m;行

车速度 450 km/h 时,最小平面曲线半径一般情况可取 11 500 m,困难情况取 9 500 m;行车速度 500 km/h 时,最小平面曲线半径困难情况下可取 12 000 m;考虑到更优舒适度情况下,半径可在规范限值 12 000 m 情况下适当增大。

(3)400 km/h 与 450 km/h 速度条件下,固定半径为 9 500 m 时,建议 400 km/h 时超高取值大于 100 mm,450 km/h 时超高取值为 175 mm 或更大;改变超高范围从 100 mm 至 300 mm 过程中,除车体垂向振动加速度外,其余安全性指标、轮轨动力响应指标与车体横向振动加速度总体呈现先增大后减小的趋势;越接近均衡超高情况下,行车的安全性指标与横向舒适度评价结果更好,适当的欠超高情况下,行车的轮轨动力响应评价结果更优。

参考文献:

- [1] 刘磊. 时速 400 km 高速铁路曲线超高研究[J]. 铁道建筑, 2017, 57(4): 91-94, 101.
LIU Lei. Study on Curve Superelevation of 400 km/h High Speed Railway [J]. Railway Engineering, 2017, 57(4): 91-94, 101.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 朱颖. 严寒地区 400 km/h 高速铁路线下基础关键技术[C]//高寒地区高速铁路技术研讨会论文集. 哈尔滨, 2017: 46-51.
ZHU Ying. Key Technologies of 400 km/h high-speed Railway below the Line in Cold Region [C] // Proceedings of the Symposium on High-speed Railway Technology in Cold Region. Harbin, 2017: 46-51.
- [5] Lindahl M. Track Geometry for High Speed Railway [R]. TRITA FKT Report, 2001: 54.
- [6] Cherkashin Y M, Pogorelov D Y, Simonov V A. Influence of Rolling Stock and Track Parameters on Train Traffic Safety [J]. Vestnik VNIIZhT, 2010: 1120.
- [7] 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.
- [8] 梁晨,司道林,徐玉坡. 时速 400/380 km 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 [J]. Railway Engineering, 2016, 56(1): 63–66.
- [9] 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.
- [10] 朱颖,易思蓉. 高速铁路曲线参数动力学分析理论与方法[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2011.
- ZHU Ying, YI Sirong. Theory and Method of Dynamic Analysis of Curve Parameters of High-speed Railway [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2011.
- [11] 杨星光,刘永孝. 时速 350/250 km 共线高速铁路曲线半径动力特性研究[J]. 铁道标准设计, 2017, 61(10): 28–32.
- YANG Xingguang, LIU Yongxiao. On Dynamic Characteristics of Curve Radius of Shared 350/250 km/h High-speed Railway [J]. Railway Standard Design, 2017, 61(10): 28–32.
- [12] 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]. Railway Standard Design, 2005, 49(4): 12–14.
- [13] 罗绛豪,郭向荣,许三平,等. 既有时速 350 km 高速铁路运营时速 400 km 常规跨度桥梁列车走行性研究[J]. 铁道标准设计, 2020, 64(S1): 45–50.
- LUO Jianghao, GUO Xiangrong, XU Sanping, et al. Research on Performances of Train Running at 400 km/h on the Existing 350 km/h High-speed Railway with Conventional Span Bridges [J]. Railway Standard Design, 2020, 64(S1): 45–50.
- [14] 何华武,刘增杰,刁晓明,等. 既有线提速 200 km/h 平纵断面技术标准研究与验证[J]. 铁道学报, 2007, 29(2): 64–70.
- HE Huawu, LIU Zengjie, DIAO Xiaoming, et al. Study and Validation of the Technical Standard for the Plane and Profile Sections of Existing Lines with 200 km/h Speed-raising [J]. Journal of the China Railway Society, 2007, 29(2): 64–70.
- [15] 孙林林,崔树坤,闫子权,等. 京沪高速铁路提速至 400 km/h 曲线超高适应性研究[J]. 铁道建筑, 2021, 61(11): 96–99.
- SUN Linlin, CUI Shukun, YAN Ziquan, et al. Study on Adaptability of Curve Superelevation with Speed of Beijing-Shanghai High Speed Railway Being Increased to 400 km/h [J]. Railway Engineering, 2021, 61(11): 96–99.
- [16] 翟婉明. 车辆-轨道耦合动力学—上册, [M]. 4 版. 北京: 科学出版社, 2015.
- ZHAI Wanming. Vehicle-track Coupled Dynamics-Volume 1 [M]. 4th ed. Beijing: Science Press, 2015.
- [17] 王鹏然. 基于动力学的线路方案 BIM 化优选方法研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2021.
- WANG Pengran. Research on BIM Optimization Method of Railway Route Scheme Based on Dynamics [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiatong University, 2021.
- [18] 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.
- [19] 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 Test Verification of Rolling Stock [S].
- [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].