

文章编号: 1674—8247(2024)01—0035—06

DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2024.01.007

# 既有 350 km/h 铁路运行更高速铁路线路平面参数适应性分析

张逸飞

(中铁第四勘察设计院集团有限公司, 武汉 430000)

**摘要:**通过采用车线动力学分析方法,基于建立的动力学仿真模型,对某既有设计速度目标值为 350 km/h 的铁路曲线段进行了 400 km/h 运行的线路平面参数适应性研究。结果表明:(1)当列车速度提升至 400 km/h 后,多项动力学指标较 350 km/h 时增加较为明显,安全性与舒适性均有所下降;(2)尽管列车的安全性可以得到保障,但乘坐舒适度下降,存在一定的舒适度隐患,适应性有待进一步提高;(3)建议在可能的情况下,适当增大曲线半径与夹直线的长度,以保证旅客乘坐的安全性与舒适度。

**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

## Adaptability Analysis of Line Planar Parameters for Existing 350 km/h High-speed Railways Operating at Higher Speeds

ZHANG Yifei

(China Railway Siyuan Survey and Design Group Co., Ltd., Wuhan 430000, China)

**Abstract:** Using vehicle-track dynamics analysis methods and based on a dynamic simulation model, this study investigated the adaptability of line planar parameters on an existing railway curve section designed for 350 km/h when operating at 400 km/h. The results show that: (1) When the train speed is increased to 400 km/h, various dynamic indicators of the train significantly increase compared to those at 350 km/h, resulting in reduced safety and comfort. (2) Although train safety can be ensured, ride comfort is compromised, posing a certain risk to comfort levels, and adaptability needs further improvement. (3) It is recommended that, where possible, the radius of curves and the length of intermediate straight line should be increased appropriately to ensure passenger safety and comfort.

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

随着高速铁路运营速度的不断提高,更高速轮轨铁路发展迅速。更高速列车与线路之间的动力作用显著增强,列车的行车安全性、运行平稳性、旅客乘坐舒适度受线路参数的影响更加突出,最小曲线半径、超高、缓和曲线长度等将直接影响行车的动力学性能。传统 350 km/h 线路平、纵断面参数设计规范

将受到挑战,参数适用性有待进一步研究。

国内外学者针对高速铁路线路参数进行了大量研究。Miyagaki<sup>[1]</sup>等介绍了不同类型缓和曲线对车轨动力响应的影响,提出了新的缓和曲线线型;ZBOINSKI K<sup>[2]</sup>研究了线路参数对列车的动力响应;杨星光<sup>[3]</sup>等采用 UM 建立耦合动力学模型,给出了运行

收稿日期:2023-07-18

作者简介:张逸飞(1997-),男,助理工程师。

引文格式:张逸飞. 既有 350 km/h 铁路运行更高速铁路线路平面参数适应性分析[J]. 高速铁路技术,2024,15(1):35-40.

ZHANG Yifei. Adaptability Analysis of Line Planar Parameters for Existing 350 km/h High-speed Railways Operating at Higher Speeds [J]. High Speed Railway Technology, 2024, 15(1):35-40.

速度 250 km/h 与 350 km/h 共线高速铁路线路的最小曲线半径建议值;朱颖<sup>[4]</sup>等归纳了国内外高速列车的平面曲线半径的设计经验,研究了高速铁路曲线段线路参数与动力响应之间的关系;易思蓉<sup>[5]</sup>等通过车线动力学分析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最小值;时瑾<sup>[6]</sup>等从列车运行安全性、舒适性指标出发,对更高速度下超高和平面曲线半径的关系进行了匹配研究。综上所述,当前大多数高速铁路线型参数的探讨主要针对 350 km/h 及以下速度线路<sup>[7-9]</sup>,而对于更高速的线路平面参数设计研究较少。

本文运用车-线动力学模型,对某既有设计速度目标值为 350 km/h 的铁路曲线段进行 400 km/h 运行的线路平面参数适应性研究,从安全性、平稳性、旅客乘坐舒适度方面比较分析,对线路平面参数进行改进。研究成果可为更高速铁路运行平面参数设计工作提供参考。

1 动力学模型及行车性能评价标准

1.1 动力学模型

构建某型客车模型,共 3 节:首节车、中车、尾车。每部分车体由 4 组轮对、前后转向架、一系、二系悬挂和车体等组成。转向架为构架式结构,轮对采用 LM 型车轮踏面,钢轨采用 60D 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;轮对则有 3 个自由度,分别为横向、垂向、摇头<sup>[10]</sup>。该模型单节车体有 30 个自由度,模型 3 节车体,共 90 个自由度。

为模拟车辆通过曲线段真实状况,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。

1.2 动力响应评价标准

提取前后转向架中心偏向车体一侧对角的垂向加速度与横向加速度<sup>[11]</sup>、轮轨横向力与垂向力,并对数据处理得到其他评价指标。同时,对站姿进行舒适性指标评价。评价指标及其限值要求如表 1 所示。

2 既有 350 km/h 铁路运行更高速铁路线路平面参数适应性分析

2.1 既有350 km/h铁路线路条件

选取某设计速度目标值为 350 km/h 的既有高速铁路进行客车运行模拟,具体线路条件如表 2 所示。

该局部线路共 5 处平面曲线,最小超高为 120 mm,最大超高为 170 mm,竖曲线半径均为 32 000 m,

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/kN	170
车体振动加速度/(m/s <sup>2</sup> )	2.5
Sperling 平稳性指标	优<2.50
	良2.50~2.75
	合格2.75~3.00
EN12299 舒适度值	非常舒适<1.5
	舒适1.5~2.5
	中等2.5~3.5
	不舒适3.5~4.5
	非常不舒适>4.5

表 2 线路条件表

线型	长度/m	曲率半径/m	超高/mm
直线段 1	410.82	∞	0
缓和曲线	560	∞~7 500	0~150
圆曲线 1	1 950.70	7 500	150
缓和曲线	560	7 500~∞	150~0
直线段 2	821.95	∞	0
缓和曲线	520	∞~10 000	0~120
圆曲线 2	2 164.13	10 000	120
缓和曲线	520	10 000~∞	120~0
直线段 3	408.45	∞	0
缓和曲线	580	∞~8 000	0~170
圆曲线 3	2 216.38	8 000	170
缓和曲线	580	8 000~∞	170~0
直线段 4	414.36	∞	0
缓和曲线	600	∞~10 000	0~120
圆曲线 4	2 185.75	10 000	120
缓和曲线	600	10 000~∞	120~0
直线段 5	1 311.6	∞	0
缓和曲线	480	∞~11 000	0~120
圆曲线 5	4 220.45	11 000	120
缓和曲线	480	11 000~∞	120~0
直线段 6	883.97	∞	0

最大坡度为 9‰,最小坡段长度 900 m,曲线偏角依次为 10° 37′ 25″、9° 25′ 15″、20° 42′ 25″、19° 42′ 25″、4° 23′ 48″,均为右偏曲线。

2.2 线路动力学分析及舒适度评估

运用 SIMPACK 对线路进行动力学仿真,首先以设计速度目标值 350 km/h 运行,再以 400 km/h 的速度运行,得到的动力学响应如图 1~图 4 所示。

由图 1~图 4 可知,列车以 350 km/h 与 400 km/h 运行后,轮轨横向力、轮轨垂向力、脱轨系数和轮重

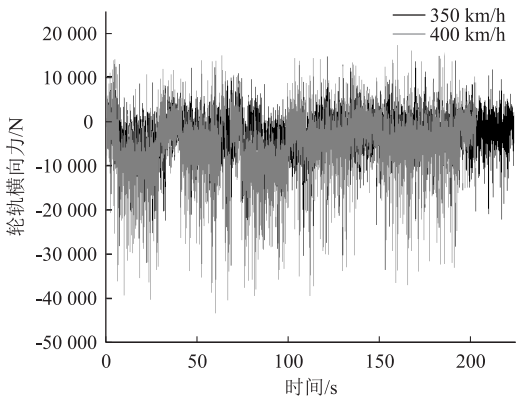


图 1 线路轮轨横向力图

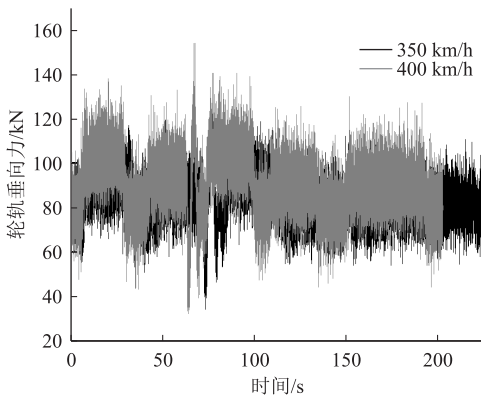


图 2 线路轮轨垂向力图

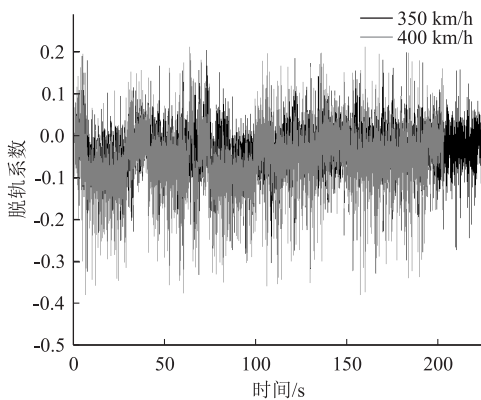


图 3 线路脱轨系数结果图

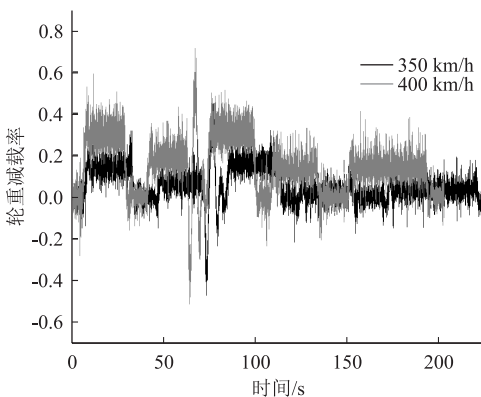


图 4 线路轮重减载率图

减载率指标均符合规定限值,满足安全性要求。在 400 km/h 速度时的各指标值明显大于 350 km/h 速度时的指标值;在每段曲线的缓和曲线段上,各指标值波动情况较明显,列车运行于第一、第二段曲线时,各指标值较大。列车以 400 km/h 运行时,脱轨系数值在第一段曲线的缓和曲线上出现了最大值。由第二段曲线向第三段曲线通过时,各指标值均出现较大波动,列车运行不稳定。轮轨横向力、轮轨垂向力与轮重减载率在 350 km/h 与 400 km/h 运行时均出现最大值,脱轨系数在 350 km/h 运行时出现最大值。列车通过第三段曲线时,各指标值均呈现变大趋势,进入第四、第五段曲线时,各指标值开始下降,并趋于较小值,列车运行较为平稳。

列车运行时动力学指标峰值如表 3 所示。

表 3 安全性评价结果表

评价指标	速度/(km/h)	仿真结果	评价结论
轮轨横向力	350	33 758. 6 < 64 000 N	安全
	400	43 179. 6 < 64 000 N	安全
轮轨垂向力	350	140. 251 < 170 kN	安全
	400	154. 088 < 170 kN	安全
脱轨系数	350	0. 329 7 < 0. 8	安全
	400	0. 401 8 < 0. 8	安全
轮重减载率	350	0. 445 485 < 0. 8	安全
	400	0. 715 27 < 0. 8	安全

由表 3 可知,列车以 400 km/h 运行时,各峰值均符合安全限值要求。轮轨垂向力与轮重减载率接近限值,但均未超限。

列车以 350 km/h 和 400 km/h 速度通过该线路时,车体横向、垂向振动加速度如图 5、图 6 所示。列车以 400 km/h 速度运行时,横向振动加速度较 350 km/h 明显要大,垂向振动加速度则稍大于 350 km/h 速度;列车的横向振动加速度值与垂向振动加速度值在通过缓和曲线段附近时均存在大量突变值;列车由第二段曲线向第三段曲线运行时,曲线半径由 10 000 m 变为 8 000 m,突变值出现最大值。

列车以 400 km/h 速度运行时,多个横向振动加速度值在该段较大,接近  $2.5\text{ m/s}^2$  的限值要求。该段线路为连续曲线,考虑到夹直线长度与曲线半径条件,列车从前一段缓和曲线经圆曲线进入后一段缓和曲线过程中,车体的横向振动及加速度变化尤为显著。高速铁路线路不平顺将会被放大,进而降低旅客乘坐舒适度与列车平稳性。经分析,原因是该段线路夹直线长度不足,以及下一段曲线的半径过小。

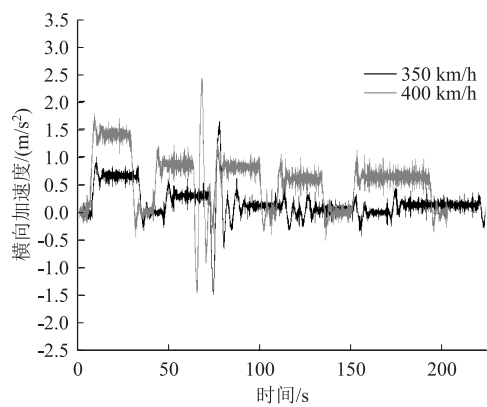


图 5 线路横向振动加速度图

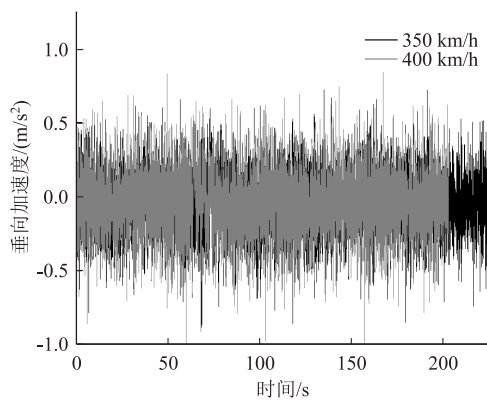


图 6 线路垂向振动加速度图

列车运行时舒适度评价指标峰值如表 4 所示。

表 4 舒适性评价结果表

评价指标	速度/(km/h)	仿真结果	评价结论
横向振动加速度	350	$1.648\ 82 < 2.5\ \text{m/s}^2$	安全
	400	$2.419\ 73 > 2.5\ \text{m/s}^2$	安全
垂向振动加速度	350	$0.831\ 98 < 2.5\ \text{m/s}^2$	安全
	400	$0.720\ 03 < 2.5\ \text{m/s}^2$	安全
横向平稳性	350	2.14	优
	400	2.20	优
垂向平稳性	350	1.73	优
	400	1.75	优
EN12299	350	1.806 64	舒适
	400	2.495 55	中等

由图 5、图 6 可知,列车以 400 km/h 速度运行时,横向振动加速度接近限值要求,垂向振动加速度值较小,均符合限值要求;横向平稳性指标与垂向平稳性指标均满足优秀的评价标准。舒适度指标在 350 km/h 时满足舒适的标准,400 km/h 时为中等。

综上所述,该 350 km/h 铁路以 400 km/h 速度运行时,动力指标基本处于安全状况。然而,在考虑舒适度的情况下,列车的横向振动加速度接近限值,

EN12299 舒适度指标也降为中等,乘坐舒适性有所下降。结合列车动力响应可知,大部分指标峰值出现在列车由第二段曲线向第三段曲线通过时。因此,在以 400 km/h 速度运行时,列车由较大曲线半径向较小曲线半径线路运行时,应注意舒适度与安全性。在可能的情况下,曲线半径以及夹直线长度可适当增大,以保证旅客乘坐的安全性及舒适度。参考京沪高速铁路提速至 400 km/h 适应性研究结果,列车安全性与舒适性在更高速度情况下虽能得到一定保障,但是在长期运营情况下有待进一步研究。

改造列车由第二段曲线向第三段曲线通过夹直线长度后的车体横向振动加速度如图 7 所示,其中夹直线长度由 408.45 m 增长为 780 m。可以看出,增大夹直线长度后,车体横向振动加速度在进入第三段圆曲线后明显减小,最大横向振动加速度也变小,乘坐舒适度得到了提升。

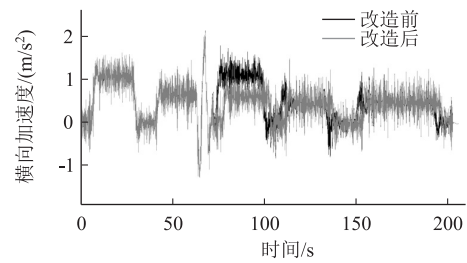


图 7 夹直线长度更改前后车体横向加速度图

2.3 频数统计分析

为了更全面地评价该铁路运行 400 km/h 速度列车时的线路参数,对动力学响应指标进行频数统计,结果如图 8 所示。

由图 8 可知,列车从 350 km/h 提升到 400 km/h 后,动力学响应指标较大值部分频次均得到了提升。轮轨横向力所占百分比在提速前后大部分集中在 1 000 N 以内;在 5 000 N 以内的部分,提速前 350 km/h 所占百分比明显大于提速后的 400 km/h,分别为 92.16%和 57.67%;自 5 000 N 以后,400 km/h 轮轨横向力所占百分比开始大于 350 km/h,提速后轮轨横向力在 5 000 N 以上的部分较 350 km/h 时总体提升了 34.49%。提速前后的轮轨垂向力主要集中在 100 kN,所占百分比分别为 56.51%和 51.64%;自 120 kN 开始,提速后所占百分比明显大于提速前的 350 km/h;120 kN 及以上的轮轨垂向力占比提速后较提速前增加了 19.03%。脱轨系数在提速前后大部分位于 0.01 以内,占比分别为 60.12%和 40.92%;自 0.04 开始,提速后所占百分比开始大于



提速前;0.04及以上脱轨系数占比提速后较提速前增加了44.02%。轮重减载率在提速前后主要集中在0.05以内,占比分别为56.16%和27.78%;从0.15

开始,提速后所占百分比开始大于提速前,轮重减载率在0.15及以上部分所占百分比提速后较提速前增加了35.91%,增幅明显。

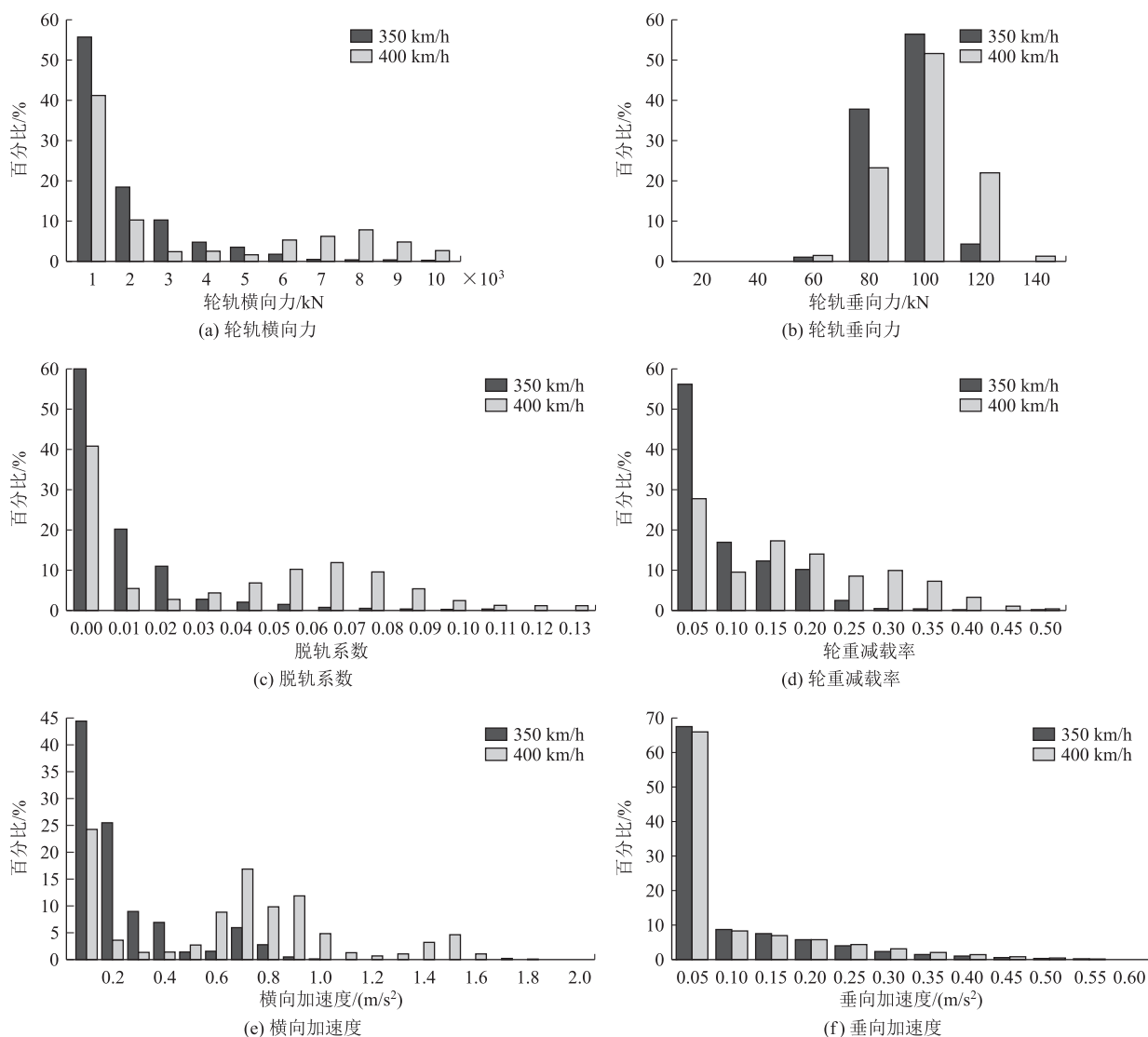


图8 动力学特性指标频数统计分析图

车体的横向、垂向振动加速度与乘坐舒适度密切相关。由图8可知,提速前后的车体横向振动加速度主要集中在 $0.1 \text{ m/s}^2$ 以内,提速前后占比分别为44.40%和24.38%;横向振动加速度自 $0.5 \text{ m/s}^2$ 及以上,提速前占比为13.91%,提速后为68.46%,提升了54.49%,增幅较为显著。车体垂向振动加速度主要集中于 $0.05 \text{ m/s}^2$ 以内,提速前后占比分别为67.48%和65.87%;自 $0.2 \text{ m/s}^2$ 及以上,提速前占比为16.24%,提速后为18.89%,提升了2.65%,增幅较小。

### 3 结论

本文选取某既有速度目标值为350 km/h的铁路

曲线地段,采用数值模拟对列车以400 km/h运行时的线路参数适应性进行分析,得到主要结论如下:

(1)当列车速度提升至400 km/h后,列车的多项动力学指标响应值较350 km/h时显著增加,安全性与舒适性均有所降低,特别是当列车由较大曲线半径向较小曲线半径线路运行时。

(2)列车速度提升至400 km/h后,列车的安全性可得到保证,动力响应峰值均评价为安全,但是列车的舒适性指标,特别是横向振动加速度在某个小段出现了接近限值的情况,舒适度也下降为中等水平。

(3)为提高高速铁路线路在400 km/h速度下的适应性,可以适当增大曲线半径以及夹直线长度。

(4)铁路轨道应该加强日常养护中的平顺性控

制,在曲线段、缓圆点等特殊地段进行重点监测与养护,对运行平稳性以及车内噪声等环节进行控制,降低运行阻力,车体本身也可以进行进一步的提升改造,减小整车质量,以提升旅客乘坐的安全性与舒适度体验。

参考文献:

[1] Miyagaki K, Adachi M, Sato Y. Analytical Study on Effects of Form in Transition Curve[J]. Vehicle System Dynamic, 2004, 41(Suppl): 657 – 666.

[2] ZBOINSKI K. Dynamical Investigation of Railway Vehicles on a Curved Track [J]. European Journal of Mechanics – A/Solids, 1998, 17(6): 1001 – 1020.

[3] 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.

[4] 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.

[5] 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.

[6] 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.

[7] 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.

[8] 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.

[9] 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 Jiaotong University, 2021.

[10] 翟婉明,姚力,孙立,等. 基于车辆 – 轨道耦合动力学的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.

[11] 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].