

文章编号: 1674—8247(2021)05—0001—07

DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2021.05.001

400 km/h 高速铁路平竖重合地段线路方案动力学评估

谢 毅¹ 时 瑾² 林晓龙¹ 余浩伟¹

(1. 中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031; 2. 北京交通大学, 北京 100044)

摘 要:文章针对我国新建沪渝蓉高速铁路重庆至成都段线路设计需求,建立中国标准动车组车辆-线路动力学分析模型,对项目某平竖重合段线路方案采用动力学方法进行评估及分析,研究表明:(1)在平曲线与竖曲线重叠设置时,设计速度 400 km/h 高速铁路最小平面曲线半径在一般和困难条件下宜分别取 9 500 m 和 8 000 m;(2)设计速度 400 km/h、曲线半径为 8 200 m 的平竖重合区段符合运行舒适性和行车安全控制标准;(3)各项动力学指标的频数统计可反映不同车速条件下轮轨作用的强弱程度;(4)基于动力学的 PCT 评价方法考虑了列车运行过程中车体跟随轨道面的不同步性,可较为客观地反映乘客的舒适性。

关键词:400 km/h 高速铁路; 动力学仿真; 线路参数; 平竖重合

中图分类号:U212.3

文献标志码:A

Dynamic Evaluation of Railway Alignment in Horizontal and Vertical Overlapping Section of 400 km/h High-speed Railway

XIE Yi¹ SHI Jin² LIN Xiaolong¹ YU Haowei¹

(1. China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, China;

2. Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: According to the railway line design requirements of Chongqing-Chengdu section of the newly-built Shanghai-Chongqing-Chengdu High-speed railway in China, this paper establishes the vehicle-line dynamic analysis model of China's standard multiple units, and evaluates and analyzes the railway line scheme of a horizontal and vertical overlapping section of the project by dynamic method. The research shows that: (1) When the horizontal curve and vertical curve overlap, the minimum plane curve radius should be 9500 m and 8000 m respectively under general and difficult conditions. (2) The horizontal and vertical overlapping sections with a design speed of 400 km/h and a curve radius of 8200 m meet the control standards of running comfort and driving safety. (3) The frequency statistics of each dynamic index can reflect the strength of wheel-rail interaction under different vehicle speeds. (4) PCT evaluation method based on dynamics takes into account the asynchrony of the car body following the track surface during the train running, which can objectively reflect the passenger comfort.

Key words: 400 km/h high-speed railway; dynamic simulation; line parameters; horizontal and vertical overlapping

随着高速列车运营速度的不断提高,线路线形对 乘坐舒适性和行车安全性的影响更为显著,更高速度

收稿日期:2021-03-01

作者简介:谢毅(1975-),男,教授级高级工程师。

基金项目:中铁二院工程集团有限责任公司科技开发计划(KNSQ202051)

引文格式:谢毅,时瑾,林晓龙,等. 400 km/h 高速铁路平竖重合地段线路方案动力学评估[J]. 高速铁路技术,2021,12(5):1-7.

XIE Yi, SHI Jin, LIN Xiaolong, et al. Dynamic Evaluation of Railway Alignment in Horizontal and Vertical Overlapping Section of 400 km/h High-speed Railway[J]. High Speed Railway Technology, 2021, 12(5):1-7.

下的线路线形设计也更为复杂。因此,高速铁路线路方案行车动力性能评价研究具有重要的应用价值和理论意义^[1]。

国内外学者针对更高速度下的线路动力学和线路参数进行了大量的试验和理论研究,翟婉明^[2]等提出了机车车辆与线路最佳匹配设计理论;Kardas^[3]针对乘车平稳性及安全性,研究了铁路车辆乘坐舒适性指标;龙许友^[4]等从乘坐舒适性角度对高速铁路线形进行动力学评估;梁晨^[5]等依据车线动力学原理,对 400 km/h、380 km/h 速度的曲线进行计算,提出最小曲线半径的合理取值;刘磊^[6]通过对曲线半径及超高的关系进行分析计算,提出了 400 km/h 高速铁路超高的建议值;时瑾^[7]对现行高速铁路 350 km/h 线路技术条件下运营 400 km/h 高速列车的适应性进行了研究;Kufver^[8]对铁路曲线上关键线路长度参数与乘坐舒适度的关系做了详细研究。值得指出的是,现行研究中,动力学评价指标还不能全面反映线形引起的舒适性贡献程度,缺乏对 400 km/h 高速铁路线路设计问题的专题研究。

本文以我国新建沪渝蓉高速铁路重庆至成都段某平竖重合区段线路方案为研究背景,建立中国标准动车组车—线动力学模型,综合运用车体振动和行车安全性指标统计频数、曲线舒适性指标(P_{CT})等对线路方案进行动力学评估,为更高速度下的高速铁路线路设计工作提供参考。

1 平竖重合地段参数计算方法

TB 10621—2014《高速铁路设计规范》^[9]对我国高速铁路超高舒适度标准进行了规定,如表 1 所示。

表 1 中国高速铁路舒适度标准表(mm)

舒适度条件	优秀	良好	一般
欠超高允许值	40	60	90
设计超高与欠超高之和允许值	210	235	265

根据行驶动力学原理,当需要竖曲线与圆曲线重叠设置时,列车通过凸形竖曲线会产生微量的当量欠超高(Δh_{qe}),影响到欠超高水平。在我国“八五”科技攻关成果中,平竖重合地段上的合成超高为^[10]:

$$h_c = \left[\frac{(2Hh_{jh})}{S} + \left(\frac{gv^2}{R_{sh}g} \right) \right] / \left\{ \left(\frac{2H}{S} \right) \left[1 - \frac{v^2}{R_{sh}g} \right] \right\} \tag{1}$$

式中: h_c ——合成超高(mm);

h_{jh} ——平曲线均衡超高(mm);

H ——在弹簧作用下车体的重心高度(m);

S ——左右轮轨接触点间距(一般取 1.5 m);

R_{sh} ——竖曲线半径(m)。

通过计算分析,竖曲线半径取 20 000 ~ 30 000 m 对当量欠超高影响不大,平面半径变化对当量欠超高值影响较大。合成后欠超高及设计超高与合成欠超高之和(如表 2 所示)与超高参数标准表 1 进行对比,根据 $[h_q]/[h+h_q]$ 按照一般不大于 60/220 mm、困难不大于 80/250 mm 的要求,建议设计速度 400 km/h 高速铁路在平曲线与竖曲线重叠设置时,最小曲线半径一般条件下不宜小于 9 500 m,困难条件下不应小于 8 000 m。

表 2 合成后的欠超高及设计超高与合成欠超高之和计算表

平面曲线半径 R/m	竖曲线半径 R/m	合成欠超高 $h_q + \Delta h_{qe}/mm$	设计超高与合成 欠超高之和 $h + h_q + \Delta h_{qe}/mm$
9 500	25 000	35	210
9 000	25 000	47	222
8 500	25 000	60	235
8 000	25 000	74	249
7 500	25 000	91	266
9 500	30 000	33	208
9 000	30 000	45	220
8 500	30 000	57	232
8 000	30 000	72	247
7 500	30 000	89	264

2 线路方案动力学评估方法

2.1 车线动力学模型

本文建立了三维车辆与线路动力学模型,如图 1 所示。选用中国标准动车组参数,车辆模型考虑为多刚体系统,将车体、转向架、轮对结构简化为刚体,车辆各结构通过一、二系悬挂连接,其中一、二系悬挂系统简化为弹簧、阻尼元件。钢轨简化为离散弹性点支承基础上的连续 Euler 梁,考虑其横向、垂向和扭转振动。采用 Hertz 线性接触理论求解轮轨法向力,沈志云—Hedrick—Elkins 理论求解蠕滑力,结合新型两步数值积分方法^[11]求解车辆—轨道耦合动力学方程。关于车辆—轨道耦合模型的详细描述可参见文献[12]。

2.2 仿真模型验证

本文建立了中国标准动车组仿真模型,为验证模型的准确性,选取某高速铁路区段实测轨道不平顺及对应的车体响应进行对比分析,轨道高低不平顺可见高低幅值在 4 mm 左右,如图 2 所示。

仿真计算了动车组以 242 km/h 速度通过该区段

时的车辆动力响应,仿真计算结果与轨检列车实测响

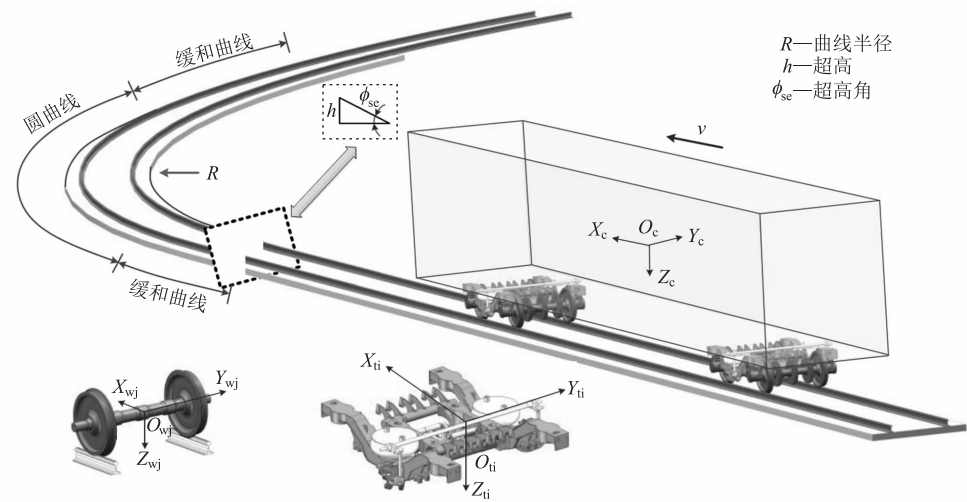


图 1 车辆 - 轨道耦合模型图

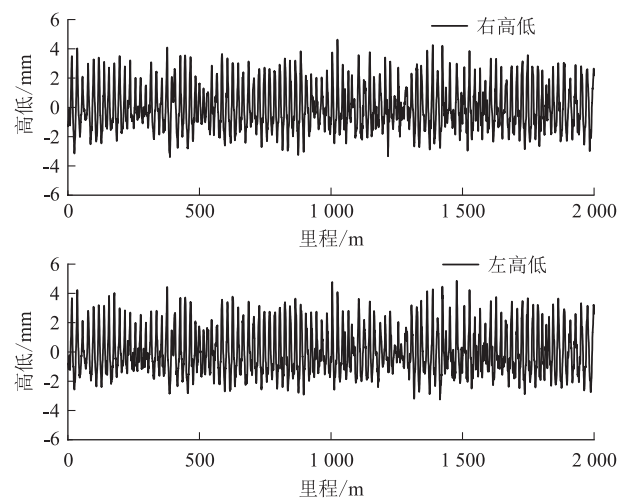


图 2 轨道高低不平顺图

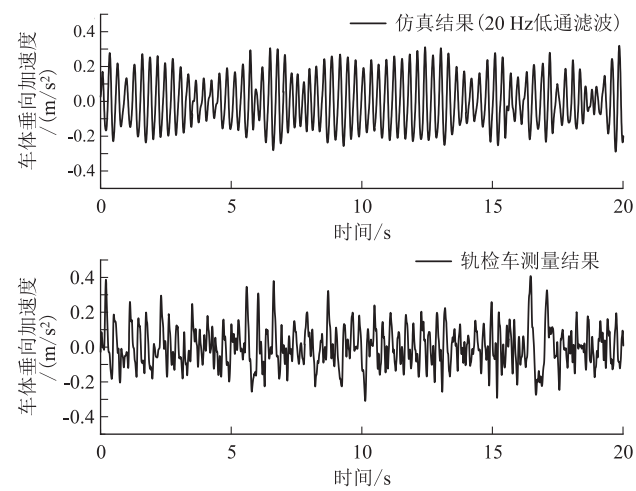


图 3 车体垂向振动加速度时域波形对比图

应结果的时域对比如图 3 所示。从图 3 可以看出,两者的车体响应幅值及变化规律大致相同,垂向振动加速度峰值均在 0.4 m/s^2 左右。仿真与实测结果垂向加速度的频谱特性对比如图 4 所示。从图 4 可以看出,在频率 3.3 Hz 、 6.7 Hz 和 13.4 Hz 处有明显主峰,且每个主峰处的频率与幅值对应良好。由此可见,本文所建立的中国标准动车组模型可较为真实可靠地反映实际车辆与线路之间的动态相互作用。

2.3 评价指标

2.3.1 常规评价方法

车辆通过平竖曲线重叠地段的动力学仿真评估需选用合适的评价指标。常规动力学评价指标参考 TB 10621 - 2014《高速铁路设计规范》、GB 5599 - 2019《铁道车辆动力学性能评定和试验鉴定规范》等相关

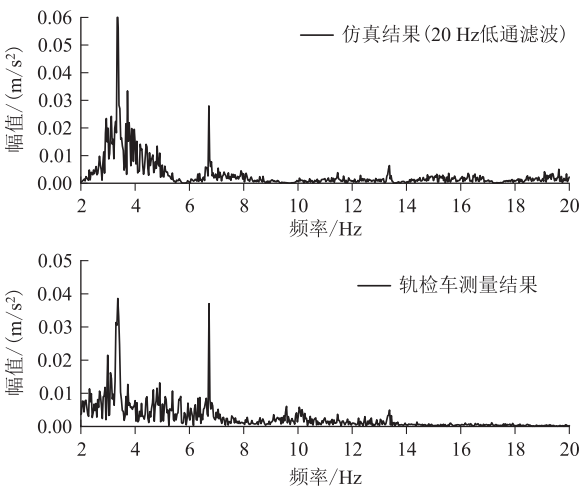


图 4 车体垂向振动加速度频域波形对比图

规定,常采用车体振动加速度、脱轨系数、轮重减载率、

轮轴横向力等作为运行舒适和行车安全的评价指标,具体限值如表 3 所示。

表 3 动力学评价指标及其限值表

动力学评价指标	限值	
舒适性指标	横向振动加速度/g	0.10
	垂向振动加速度/g	0.13
	车体未被平衡加速度/(m/s ²)	0.784
安全性指标	脱轨系数	0.8
	轮重减载率	0.6(速度低于 350 km/h) 0.8(速度高于 350 km/h)
	轮轴横向力/kN	10 + P _w /3(57.84)

2.3.2 曲线舒适度评价方法

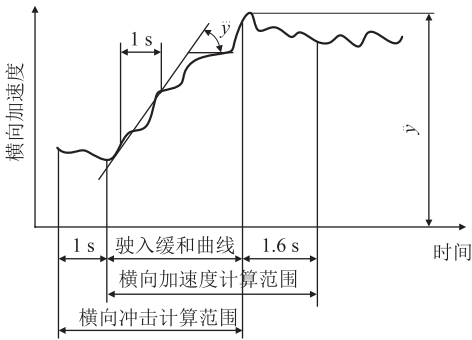
为全面反映曲线线形对舒适性的影响,本文采用缓和曲线舒适度方法 P_{CT} 对乘客舒适度进行对比分析,此方法较为全面地考虑了车辆在稳态时的车体振动响应。 P_{CT} 针对站姿乘客和坐姿乘客有不同的定义表达式,为更好地反映乘客的舒适度规律,本文只关注站姿乘客 P_{CT} ,其定义为:

$$P_{CT} = \max(28.54\ddot{y} + 20.69\ddot{\dot{y}} - 11.1, 0) + 0.185(\dot{\theta})^{2.283}$$

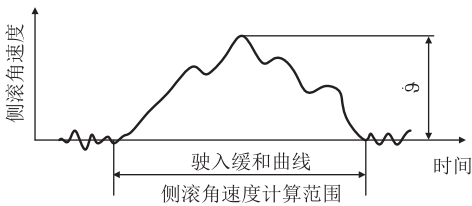
(2)

式中: \ddot{y} ——车体横向加速度的最大绝对值;
 $\ddot{\dot{y}}$ ——车体横向冲击的最大绝对值;
 $\dot{\theta}$ ——车体侧滚角速度的最大绝对值。

式(2)中各参数振动量定义如图 5 所示。车体横向加速度一般取列车进入缓和曲线到出缓和曲线 1.6 s 时间段内最大绝对值;车体横向冲击取列车进入缓和曲线前 1.0 s 到列车通过缓和曲线时间段内最大绝对值;侧滚角速度取列车进入缓和曲线到离开缓和



(a) P_{CT} 中 \ddot{y} 和 $\ddot{\dot{y}}$ 的定义



(b) P_{CT} 中侧滚角速度 $\dot{\theta}$ 的定义

图 5 P_{CT} 中振动量定义图

曲线时间段内最大绝对值。

P_{CT} 单位为百分数(%),该值越大,舒适性越低。式(1)和式(2)适用于驶入缓和曲线及反向缓和曲线,而不适用于驶出缓和曲线。

车辆在曲线地段同时受到离心加速度和重力加速度,受悬挂系统影响,车体并不能完全跟随轨道面,因此存在平行于轨道面的横向加速度和平行于车体低板的横向加速度,如图 6 所示。

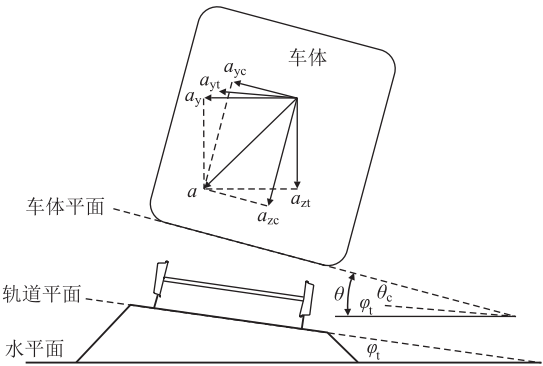


图 6 车体与轨道运动关系图

根据 P_{CT} 原理,平行于车体低板的横向加速度直接影响车厢内部乘客的舒适性,由加速度分解原理,得到站姿乘客 P_{CT} 的表达式为:

$$P_{CT} = \max \{ 28.54\ddot{y} + 20.69\ddot{\dot{y}} - 11.1, 0 \} + 0.185(\dot{\theta})^{2.283} = \max \left\{ \left(28.54 + 20.69 \frac{v}{L_t} \right) \left[\frac{v^2}{R} \cos(\varphi_t + \theta_c) - g \sin(\varphi_t + \theta_c) \right] - 11.1, 0 \right\} + 0.185 \left[(\varphi_t + \theta_c) \frac{v}{L_t} \right]^{2.283}$$

(3)

式中: v ——车辆的运行速度(m/s);
 R ——曲线半径(m);
 φ_t ——超高角;
 θ_c ——车体相对于轨道面的倾斜角(rad)。

3 案例分析

3.1 线路方案概况

新建沪渝蓉高速铁路重庆至成都段位于重庆市和四川省境内。线路引入成都段(DK 262 + 000 ~ DK 267 + 200)受规划五环路与成洛简大道互通、重要厂矿拆迁、天然气井、龙泉山隧道等因素控制,采用 8 200 m 半径,实设超高 175 mm,桥长约 4.3 km,同时纵断面设置半径为 30 000 m 的竖曲线,为平竖曲线重叠地段,平纵断面设置相对复杂,具体如图 7 所示。

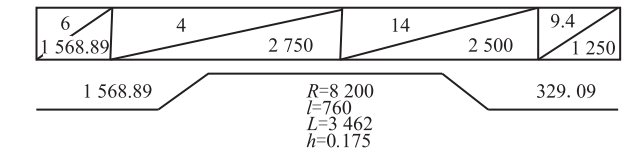


图 7 检算地段平纵断面示意图

线路平纵面设计参数如表 4 和表 5 所示,选取其中平竖重合区段进行仿真。

表 4 线路平面参数表

线路起点	线型	长度/m	半径/m
DK 22 + 7.77	直线	2 148.32	—
DK 24 + 156.08	缓和曲线	760	—
	曲线	3 462	8 200
	缓和曲线	760	—
DK 29 + 37.74	直线	329.09	—

表 5 线路纵断面参数表

线路起点	坡长/m	坡度/‰	竖曲线半径/m
DK 22 + 431.11	1 568.89	6	—
DK 24 + 000	2 750	4	30 000
DK 26 + 750	2 500	14	30 000
DK 29 + 250	1 250	9.4	30 000

3.2 线路方案动力学评估

3.2.1 时程分析及评估

本文计算了高速列车分别以 350 km/h 和 400 km/h 速度通过上述平竖重合区段线路的车辆动力学响应,各项动力学指标峰值评价结果如表 6 所示,部分动力响应时程曲线如图 8 所示。

表 6 线路方案动力响应峰值表

评价指标	速度/(km/h)	计算结果	评价结论
车体横向加速度	350	0.022g < [0.1g]	满足要求
	400	0.027g < [0.1g]	满足要求
车体垂向加速度	350	0.063g < [0.13g]	满足要求
	400	0.079g < [0.13g]	满足要求
车体未被平衡加速度/(m/s ²)	350	0.235 < [0.784]	满足要求
	400	0.699 < [0.784]	满足要求
脱轨系数	350	0.09 < [0.8]	满足要求
	400	0.14 < [0.8]	满足要求
轮重减载率	350	0.52 < [0.8]	满足要求
	400	0.70 < [0.8]	满足要求
轮轴横向力/kN	350	13.38 < [57.84]	满足要求
	400	21.78 < [57.84]	满足要求

从表 6 及图 8 可以看出,行车安全性和舒适性指标远小于控制限值,且当车速由 350 km/h 增至 400 km/h 时,各项评价指标峰值均有所增长。其中,轮重减载率峰值在 400 km/h 时达到 0.70,接近安全限值。

3.2.2 频数统计分析

由车体动力时程响应对比可知,车速由 350 km/h

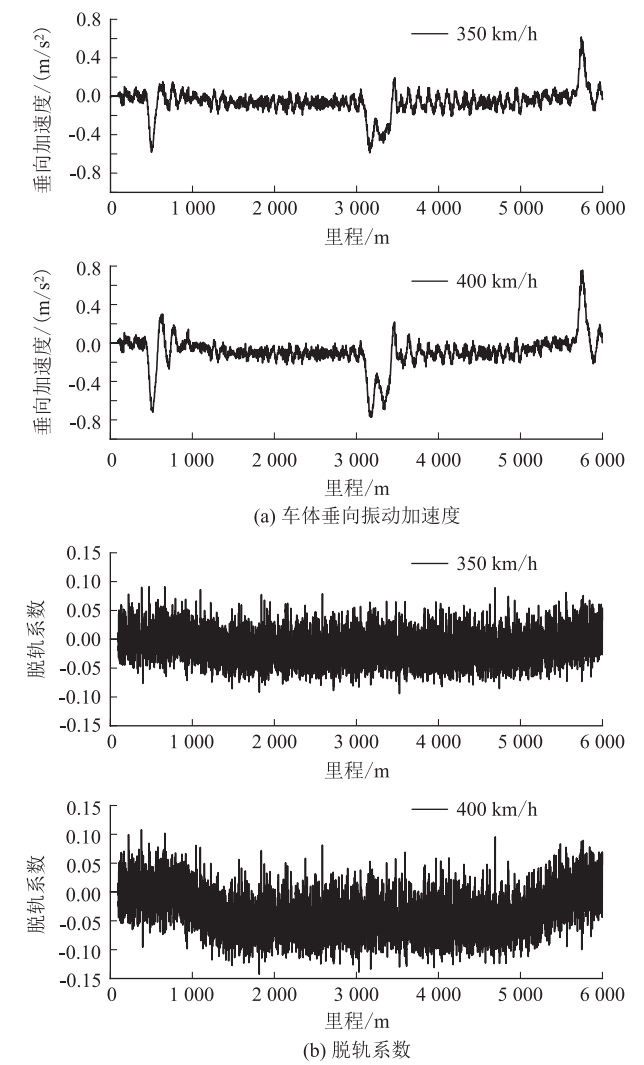


图 8 动力响应时程曲线图

提高至 400 km/h,车体各响应峰值均有所提高,但轨道不平顺减弱了车速对线路方案的影响,故仅从响应峰值的分析中很难对线路方案进行更加全面的评判。因此,本文从频数统计的角度来分析车速提高对车体动力响应的影响。

350 km/h 和 400 km/h 车速下车体动态响应的频数统计分析如图 9 所示。从图 9 可以看出,当车速增大时,由于车身对轨道线路的动态响应增强,各参数较大值的频数均明显增大。在舒适性方面,车体横向加速度的频数比例在提速前集中在 0 ~ 0.1 m/s² 范围内,提速后则集中在 0.1 ~ 0.3 m/s² 范围内,提高了 8.3%。车体垂直加速度在提速后集中在 0.1 ~ 0.8 m/s² 范围内,比提速前增大了 18%。在安全性方面,脱轨系数提速后集中在 0.05 ~ 0.15 范围内,比提速前增加了 32%。轮重减载率集中在 0.1 ~ 0.8 范围内,比提速前增加了 30%;轮轴横向力集中在 5 ~

25 kN范围内,比提速前增加 29.3%。

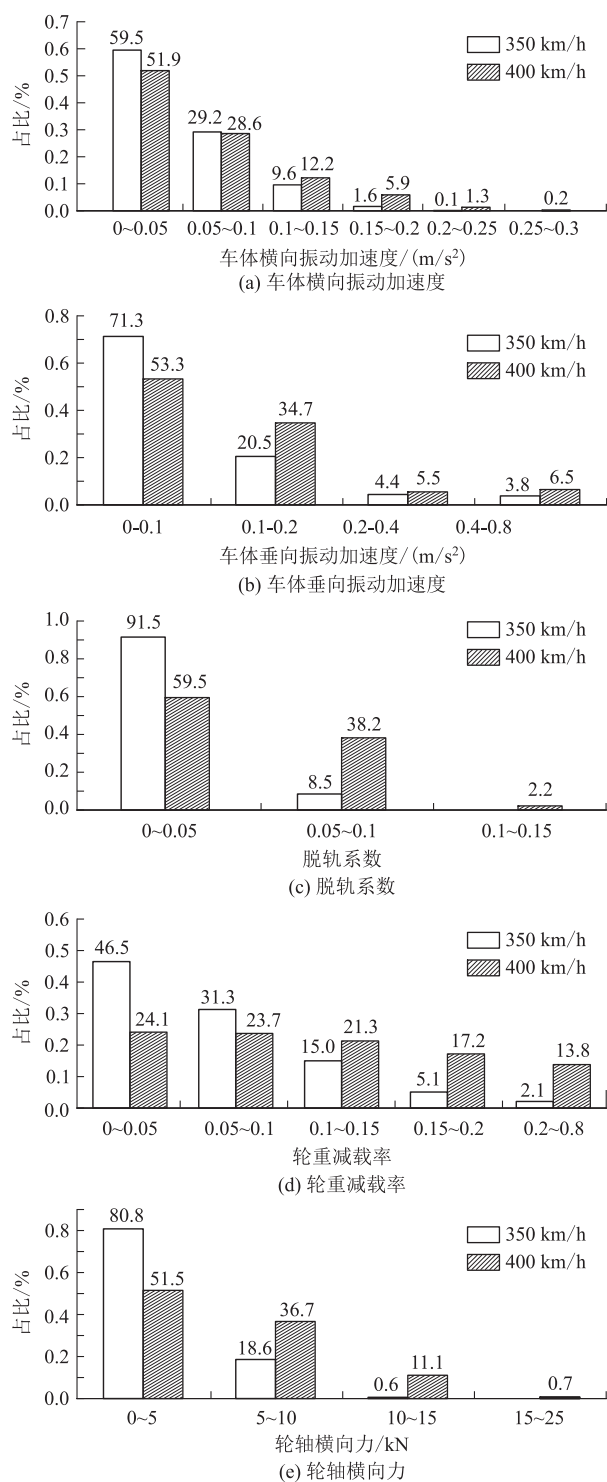


图9 线路方案整体动力学指标统计结果图

3.2.3 曲线 P_{CT} 评估

从上述平竖重合检算区段线路的时程和统计分析可知,车速由 350 km/h 增至 400 km/h,各个行车性能指标评价结果均有所下降,但仍满足车辆运行的舒适性标准和安全性要求。上述舒适性评价方法并未完全体现线形引起的低频振动量,应进一步采用曲线 P_{CT}

评价方法来对比 350 km/h 和 400 km/h 运行速度下的舒适性。

此线路方案在 350 km/h 和 400 km/h 运行速度下的曲线舒适度 P_{CT} 如图 10 所示。

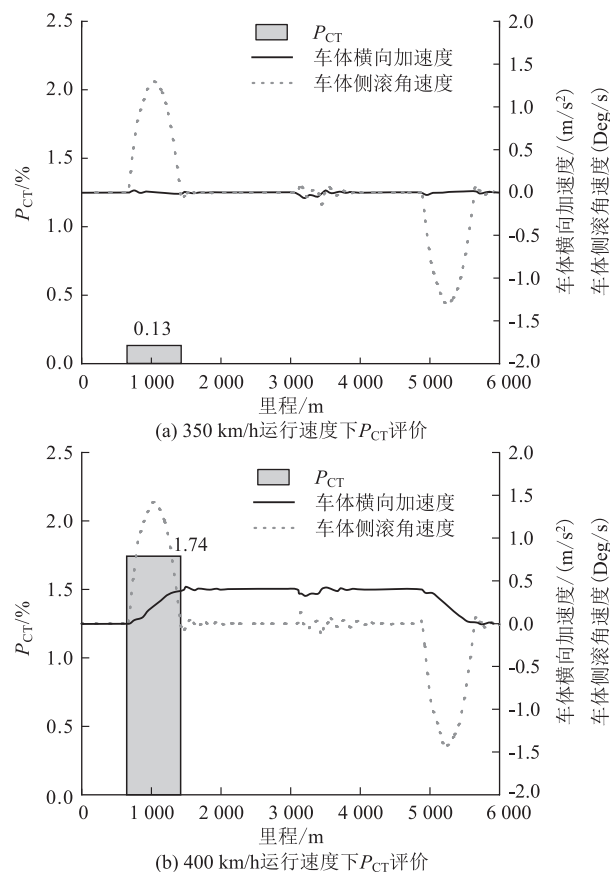


图10 线路方案 P_{CT} 评价图

该图包含了 P_{CT} 值、车体横向加速度及车体侧滚角速度。从图 10 中可以看出,350 km/h 运行速度下 P_{CT} 为 0.13%,400 km/h 运行速度下 P_{CT} 为 1.74%,提升较大,这是因为列车在 350 km/h 运行速度下,实设超高与均衡超高较为接近,车体横向加速度较小,横向冲击并不明显,因此 350 km/h 运行速度下的 P_{CT} 较小;而列车在 400 km/h 运行速度下,存在较大的欠超高,车体存在未被平衡的加速度,车体横向冲击较为明显,因此 400 km/h 运行速度下的 P_{CT} 相对较大,但整体 P_{CT} 值并不大,说明不舒适的乘客占比依然较小,满足舒适性要求。

4 结论

本文以我国新建沪渝蓉高速铁路重庆至成都段中某平竖重合段线路方案为研究背景,综合考虑行车安全性和运行舒适性,对此区段 350 km/h 和 400 km/h 运行速度的线路方案进行动力学评估,得出主要研究

结论如下:

- (1)依据行驶动力学,建议设计速度 400 km/h 高速铁路在平曲线与竖曲线重叠设置时,最小曲线半径一般条件下不宜小于 9 500 m,困难条件下不应小于 8 000 m。
- (2)依据车线动力学原理,建立车辆 – 轨道耦合动力学模型,并对新建沪渝蓉高速铁路重庆至成都段某平曲线半径为 8 200 m 的平竖重合段进行动力学仿真分析,仿真结果满足现有运行舒适性及行车安全性的控制标准。
- (3)各项动力学指标的频数统计分析可更有效地反映不同车速条件下轮轨作用的强弱程度,可用于评估不同线路方案在运营中的效果。
- (4)基于动力学的 P_{CT} 评价方法考虑了列车运行过程中车体跟随轨道面的不同步性,可较为客观反映乘客舒适性。

参考文献:

[1] 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.

[2] 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.

[3] KARDAS-CINAL E. Comparative Study of Running Safety and Ride Comfort of Railway Vehicle[EB/OL].

[4] 龙许友,时瑾,王英杰,等. 高速铁路线路线形动力仿真及乘坐舒适度评价[J]. 铁道科学与工程学报, 2012, 9(3): 26 – 33.
LONG Xuyou, SHI Jin, WANG Yingjie, et al. Dynamic Simulation

and Ride Comfort Evaluation of Track Alignment for High Speed Railway[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2012, 9(3): 26 – 33.

[5] 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/h [J]. Railway Engineering, 2016, 56(1): 63 – 66.

[6] 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.
LIU Lei. Study on Curve Superelevation of 400 km/h High Speed Railway[J]. Railway Engineering, 2017, 57(4): 91 – 94.

[7] 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.

[8] Kufver B. Optimisation of Horizontal Alignments for Railways Procedures Involving Evaluation of Dynamic Vehicle Response[J]. TRITA-FKT, 2000.

[9] TB 10621 – 2014 高速铁路设计规范[S].
TB 10621 – 2014 Code for Design of High Speed Railway [S].

[10] 白宝英. 高速铁路线路纵断面设计标准及其应用研究[J]. 铁道标准设计, 2010, 54(7): 4 – 7.
BAI Baoying. Research on Design Standard and Application of Longitudinal Section of High-speed Railway [J]. Railway Standard Design, 2010, 54(7): 4 – 7.

[11] GAO Ya, SHI Jin, LU Chenxu. A Two-Step Composite Time Integration Scheme for Vehicle-Track Interaction Analysis Considering Contact Separation[J]. Shock and Vibration, 2019, 2019: 1 – 13.

[12] SHI Jin, GAO Ya, LONG Xuyou, et al. Optimizing Rail Profiles to Improve Metro Vehicle-Rail Dynamic Performance Considering Worn Wheel Profiles and Curved Tracks [J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2021, 63(1): 419 – 438.