

文章编号: 1674—8247(2021)05—0084—06
DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2021.05.016

400 km/h + 高速铁路 CRTSⅢ型板式无砟轨道动力分析

何 宁 苏乾坤 刘大园 庞 玲 王育恒

(中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031)

摘 要:本文针对既有 CRTSⅢ型板式无砟轨道能否满足 400 km/h 及以上速度列车正常运行的问题,基于有限元方法建立了 CRTSⅢ型板式无砟轨道的车辆-轨道耦合动力学模型,分析了列车以 400~600 km/h 速度正常通过桥梁与路基基础直线地段时车辆与轨道的动力特性,并参考《高速铁路工程动态验收技术规范》的规定限值,对各项动力性能指标进行评判。研究表明:(1)CRTSⅢ型板式无砟轨道结构与技术标准满足 400 km/h + 高速列车的正常运行条件,随着列车速度的增大,轮重减载率有较明显的增大;(2)列车舒适性与平稳性均处于较优状态,无砟轨道各动力性能指标均未超过最大允许值;(3)相较于桥梁基础,路基基础上的列车轮重减载率较小,轨道板垂向位移偏大,为确保 400 km/h 及以上速度列车的长期运营安全,路基基础刚度不宜过低。

关键词:CRTSⅢ型;板式无砟轨道;400km/h+;有限元;车辆-轨道耦合动力学;动力特性

中图分类号:U213.2⁺44 **文献标志码:**A

Dynamic Analysis of CRTSⅢ Slab-type Ballastless Track of 400 km/h + High-speed Railway

HE Ning SU Qiankun LIU Dayuan PANG Ling WANG Yuheng

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

Abstract: Aiming at the problem whether the existing CRTSⅢ slab-type ballastless track can meet the normal operation of trains at 400 km/h and above, this paper establishes the vehicle-track coupling dynamic model for CRTSⅢ slab-type ballastless track based on finite element method, analyzes the dynamic characteristics of the vehicle and track when the train normally passes through the straight section of bridge and subgrade foundation at the speed of 400~600 km/h, and evaluate each dynamic performance index with reference to the specified limits of Technical Regulations for Dynamic Acceptance for High-speed Railways Construction. The results show that: (1) The structure and technical standards of CRTSⅢ slab-type ballastless track meet the normal operating conditions of 400 km/h + high-speed trains, and with the increase of train speed, the rate of wheel load reduction increases significantly. (2) The comfort and smoothness of trains are in a good state, and the dynamic performance indexes of ballastless track do not exceed the maximum allowable values. (3) Compared with the bridge foundation, the rate of wheel load reduction of the train on the subgrade foundation is smaller, and the vertical displacement of the track slab is larger. In order to ensure the long-term operation safety of trains with speeds of 400 km/h and above, the stiffness of the subgrade foundation should not be too low.

收稿日期:2021-03-01

作者简介:何宁(1995-),男,助理工程师。

基金项目:中铁二院工程集团有限责任公司科技开发计划(KNSQ202059)

引文格式:何宁,苏乾坤,刘大园,等. 400 km/h + 高速铁路 CRTSⅢ型板式无砟轨道动力分析[J]. 高速铁路技术,2021,12(5):84-89.

HE Ning, SU Qiankun, LIU Dayuan, et al. Dynamic Analysis of CRTSⅢ Slab-type Ballastless Track of 400 km/h + High-speed Railway[J]. High Speed Railway Technology, 2021, 12(5):84-89.

Key words: CRTS Ⅲ; slab-type ballastless track; 400 + km/h; finite element; vehicle-track coupling dynamics; dynamic characteristics

为实现相邻大中城市间的 1~4 h 交通圈,城市群内的 0.5~2 h 交通圈,我国高速铁路对更高的运行速度和安全度提出了需求。目前,我国对 300~350 km/h 高速铁路已开展了大量的理论与实车试验,积累了丰富的数据与经验^[1-2],但针对 400 km/h 及以上速度高速铁路的研究较少,亟需开展多方面的技术研究。

本文基于有限元方法建立了桥梁与路基基础上 CRTSⅢ型板式无砟轨道的车辆-轨道耦合动力学模型,针对不平顺激励作用下的列车正常运行情况,分析 400~600 km/h 速度条件下车辆与轨道结构的动力响应特征,对各动力性能指标进行评判^[3]。

1 车辆-轨道耦合动力学模型

1.1 模型建立

车辆采用中国标准动车组“复兴号”CR400AF 车型,速度 400 km/h 级列车轴重建议采用 16 t^[4]。建立车辆模型时,将单节车辆视为多刚体系统,分别考虑车体、2 个构架、4 个轮对的横移、沉浮、点头、摇头、侧滚共 35 个自由度,车辆动力学方程参见文献^[5]。车体、构架、轮对之间分别通过二系悬挂、一系悬挂进行连接,均采用三向非线性弹簧-阻尼单元进行模拟。

CRTSⅢ型板式无砟轨道系统自上而下由钢轨、扣件、预制轨道板、自密实混凝土层、设置限位凹槽的钢筋混凝土底座等组成。其中,预制板与自密实混凝土通过门型钢筋形成复合单元板结构,自密实混凝土下凸台与底座凹槽形成结构限位机制,复合轨道板与底座之间设置隔离层,结构如图 1 所示。

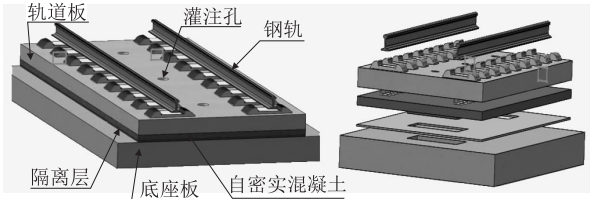


图 1 CRTSⅢ型板式无砟轨道结构图

CRTSⅢ型板式无砟轨道模型中,钢轨规格为 60 kg/m,采用实体单元进行建模,扣件选用 WJ-8B 型,动刚度取 40 kN/mm,扣件节点间距 0.63 m,采用三向弹簧-阻尼单元进行模拟,轨道板、自密实混凝土、底座均采用实体单元进行建模。为便于建模与计算,对轨道板承轨台细部结构进行了简化,无砟轨道各部件结构尺寸及部分参数如表 1 所示,混凝土材料物

理参数参见 GB 50010-2010《混凝土结构设计规范》^[6]。

表 1 无砟轨道结构尺寸及参数表

部件	参数	量值
钢轨	密度/(kg/m ³)	7 850
	弹性模量/MPa	206 000
	泊松比	0.3
轨道板	混凝土强度等级	C60
	长度/m	5.6
	宽度/m	2.5
	厚度/m	0.2
自密实混凝土	混凝土强度等级	C40
	宽度/m	2.5
	厚度/m	0.09
	凸台长度/m	1
	凸台宽度/m	0.7
底座板	混凝土强度等级	C40
	宽度/m	2.9
	厚度/m	0.2
桥梁基础	面刚度/(MPa/m)	1 000
路基基础	面刚度/(MPa/m)	76

轨道板与自密实混凝土之间通过门型钢筋连接形成复合板结构,模型中采用共节点绑定约束模拟轨道板与自密实混凝土间的接触关系;自密实混凝土与底座板之间设置隔离层,模型中法向上采用硬接触、切向上引入摩擦系数模拟层间接触关系;通过设置法向接触刚度模拟自密实凸台与底座板凹槽之间的弹性缓冲垫层。为尽量减小模型边界效应的影响,共建立 20 块单元板模型,模型总长 113.4 m,车辆-轨道垂向耦合关系应用 Hertz 非线性弹性接触理论。

1.2 轨道不平顺激励输入

目前,我国尚无针对 400 km/h 及以上速度高速铁路的轨道不平顺数据,既有的 TB/T 3352-2014《高速铁路无砟轨道不平顺谱》^[7]也仅适用于 300~350 km/h 运营速度的不平顺分析,但从我国高速轨道谱与德国低干扰高速谱的对比结果来看^[8-9],我国高速铁路无砟轨道的高低、轨向、水平不平顺谱状态较好,在大部分波段内均优于德国轨道不平顺谱。因此,目前仍可借鉴《高速铁路无砟轨道不平顺谱》推荐的轨道不平顺作为 400 km/h 及以上速度高速铁路的轮轨激励,对应的轨道不平顺波长范围为 2~200 m 将通过数值分析方法由不平顺谱获取的轨道不平顺时域样本输入到车辆-轨道耦合系统中^[10]。

2 车辆动力学响应分析

基于所建立的车辆-轨道耦合动力学模型,对列

车以 400 ~ 600 km/h 速度正常运行情况下的车辆动力响应进行计算,分析不同运行速度下轮轨垂向力、轮重减载率、车体加速度、列车平稳性等动力性能指标的变化情况。

2.1 轮轨垂向力与轮重减载率

根据 TB 10761 - 2013《高速铁路工程动态验收技术规范》^[11],无砟轨道轮轨垂向力的最大允许值为 170 kN,轮重减载率不得大于 0.65。轮重减载率可表示为 $\Delta P/\bar{P}$,其中 \bar{P} 为平均静轮重, ΔP 为轮轨垂向力相对于平均静轮重的减载量。

以列车在桥梁上以 400 km/h 速度运行为例,轮轨垂向力与轮重减载率的时程曲线分别如图 2、图 3 所示。桥梁和路基基础上不同速度下的轮轨垂向力峰值与轮重减载率峰值如表 2 所示。

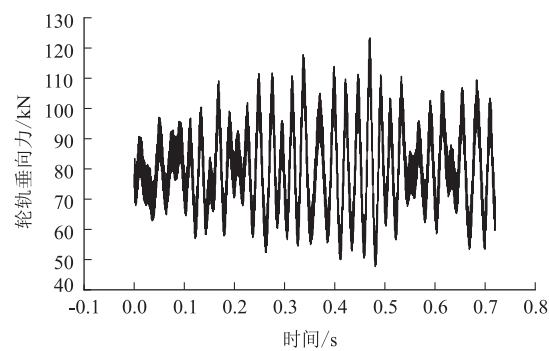


图2 400 km/h 轮轨垂向力时程图

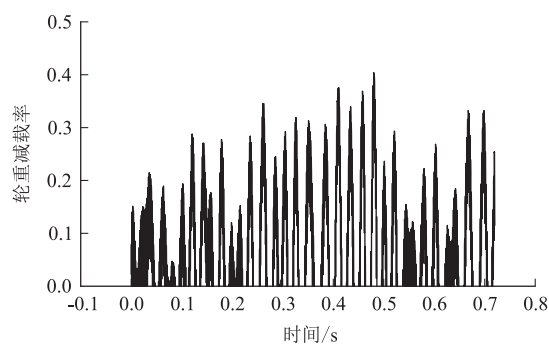


图3 400 km/h 轮重减载率时程图

表2 轮轨垂向力与轮重减载率峰值表

列车速度 (km/h)	轮轨垂向力/kN		轮重减载率	
	桥梁	路基	桥梁	路基
400	123.35	118.71	0.404	0.358
450	124.02	112.33	0.449	0.331
500	127.94	119.64	0.531	0.432
550	135.26	124.52	0.554	0.438
600	135.64	124.86	0.623	0.471

从表 2 可以看出,随着列车速度的增大,轮轨垂向

力峰值与轮重减载率峰值均呈增大趋势,速度由 400 km/h 增大至 600 km/h 时,桥梁和路基基础上的轮轨垂向力峰值分别增大了 9.96% 和 5.18%,轮重减载率峰值分别增大了 54.2% 和 31.56%。相同速度下,路基基础上的轮轨垂向力峰值与轮重减载率峰值均低于桥梁基础上,这说明基础刚度较低对轮轨接触关系更有利。不同列车运行速度下,轮轨垂向力与轮重减载率峰值均未超过规范规定的最大允许值,但当速度提高至 600 km/h 时,桥梁基础上的最大轮重减载率为 0.623,达到最大允许值的 95.84%,此时的安全储备量较低,在线路状态不良或有其他扰动因素的情况下,易发生轮重减载率指标超限,不利于列车安全运行。

2.2 列车舒适性与平稳性指标

我国列车舒适性可通过车体振动加速度进行评判,列车舒适性指标限值可取为:垂向振动加速度 0.13g,横向振动加速度 0.1g^[12]。列车平稳性指标可参照文献[13]进行计算,评判标准如表 3 所示。

表3 列车平稳性指标评判标准表

平稳性状态	指标量值范围
优	≤2.5
良好	2.5 ~ 2.75
合格	2.75 ~ 3.0

列车以 400 ~ 600 km/h 速度正常运行情况下,车体的加速度峰值及列车平稳性指标分别如表 4、表 5 所示。

表4 车体加速度表

列车速度 (km/h)	垂向加速度/(m/s ²)		横向加速度/(m/s ²)	
	桥梁	路基	桥梁	路基
400	0.196	0.209	0.207	0.197
450	0.203	0.212	0.218	0.291
500	0.204	0.210	0.2	0.202
550	0.203	0.210	0.281	0.287
600	0.202	0.209	0.178	0.211

表5 列车平稳性指标表

列车速度 (km/h)	垂向列车平稳性指标		横向列车平稳性指标	
	桥梁	路基	桥梁	路基
400	1.744	1.774	1.305	1.221
450	1.775	1.806	1.354	1.392
500	1.793	1.824	1.252	1.289
550	1.804	1.830	1.225	1.281
600	1.816	1.838	1.234	1.246

从表 4、表 5 可以看出,列车以 400 ~ 600 km/h 速度正常运行情况下,列车运行速度对车体垂向加速度峰值的变化影响较小;垂向列车平稳性指标随列车运行速度的提高而增大,但增大量值较小,当列车速度由 400 km/h 提高至 600 km/h 时,桥梁基础与路基基础

上的垂向列车平稳性指标分别只增大了 4.13% 和 3.61%;相同列车速度下,路基基础上的垂向列车平稳性指标略高于桥梁基础。车体横向加速度峰值波动变化较明显,横向列车平稳性指标也随列车速度的提高呈现出先增大后减小的变化,列车速度为 450 km/h 时,桥梁与路基基础上的横向平稳性指标最大达到 1.354 和 1.392。造成以上波动变化的原因在于:轮轨激励频率是影响列车振动加速度与列车平稳性的主要因素,对于相同的轨道不平顺,当列车运行速度不同时,轮轨激励频率也不相同。当线路的主要激励频率接近车体的固有频率时,易引起车体的共振,造成车体加速度增大,列车平稳性指标增大;当线路主要激励频率远离车体的固有频率时,车体振动加速度减小,车体平稳性指标相应也有所减小。当局部轮轨激励频率接近车体固有频率时,可能导致车体局部加速度峰值较大,但对列车平稳性影响较小。

总体上来看,列车以 400~600 km/h 速度运行时,车体的垂、横向加速均远小于列车舒适性指标限值,垂、横向列车平稳性指标也均小于 2.5,平稳性优,说明我国高速铁路无砟轨道的不平顺状态较好,能够适应 400 km/h 甚至更高速度的列车运行。

3 无砟轨道动力特性分析

参照文献[11]的轨道结构动力性能指标检测方法,选取 3 个轨道检测断面,通过提取钢轨、轨道板的位移与振动加速度,复合板与底座板的动应力等无砟轨道动力性能指标,分析列车以 400~600 km/h 速度正常运行情况下无砟轨道的动力特性,各动力性能指标的最大允许值如表 6 所示。

表 6 无砟轨道结构动力性能指标最大允许值表	
动力性能指标	最大允许值
钢轨垂向位移/mm	2
钢轨振动加速度/(m/s ²)	5 000
轨道板垂向位移/mm	0.3(板中)/0.5(板端)
轨道板振动加速度/(m/s ²)	300

3.1 钢轨垂向位移与振动加速度

以列车在桥梁基础上以 400 km/h 速度运行为例,某一检测断面的钢轨垂向位移与振动加速度时程响应曲线如图 4 所示。

从图 4 可以看出,列车速度为 400 km/h 时,该断面处的钢轨最大垂向位移为 1.206 mm,低于 2 mm 的最大允许值;钢轨最大振动加速度为 866.83 m/s²,远小于 5 000 m/s² 的最大允许值。不同列车运行速度下的钢轨动力响应峰值如表 7 所示。

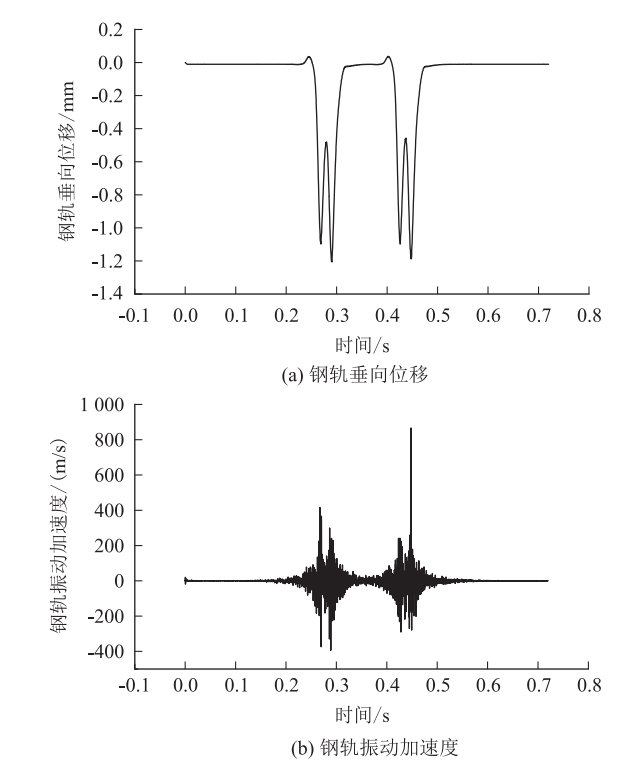


图 4 400 km/h 钢轨动力响应时程曲线图

列车速度 /(km/h)	钢轨垂向位移/mm		钢轨振动加速度/(m/s ²)	
	桥梁	路基	桥梁	路基
400	0.92	1.15	468.02	460.25
450	0.84	1.04	916.96	547.05
500	0.88	1.0	663.93	619.35
550	0.83	1.04	615.91	614.8
600	0.72	1.05	777.82	647.23

从表 7 可以看出,正常运行情况下,列车速度从 400 km/h 提高到 600 km/h 时,钢轨垂向位移峰值有一定的减小,相较于 400 km/h 时,600 km/h 速度下桥梁和路基基础上的垂向位移峰值分别减小了 21.74%、8.7%,相同速度下,路基基础上的钢轨垂向位移略大于桥梁基础。钢轨垂向位移峰值减小的可能原因在于:列车速度越高,该检测断面处的轮重减载率相对越高,实际轮轨作用力相对较小,从而导致钢轨垂向位移较小。受不同列车速度下轮轨激励频率不同的影响,钢轨振动加速度峰值的随机性较大,但不同车速下钢轨振动加速度峰值水平基本接近,且远小于最大允许值,说明 400~600 km/h 列车运行速度下钢轨的动力性能良好,满足规范要求。

3.2 轨道板垂向位移与振动加速度

桥梁与路基基础上不同列车速度正常运行下的轨道板动力响应峰值如表 8 所示。

表 8 轨道板动力响应峰值表

列车速度 /(km/h)	轨道板垂向位移/mm		轨道板振动加速度/(m/s ²)	
	桥梁	路基	桥梁	路基
400	0.03	0.30	24.15	21.11
450	0.02	0.30	24.23	20.66
500	0.02	0.29	25.04	22.16
550	0.02	0.30	24.11	21.44
600	0.02	0.27	21.66	20.30

从表 8 可以看出,列车以 400 ~ 600 km/h 速度正常运行情况下,速度的提高对轨道板的垂向位移峰值与振动加速度峰值基本不产生影响。桥梁基础上轨道板两项动力性能指标均远低于最大允许值,说明轨道板的动力性能良好,满足正常运行要求。由于路基基础刚度较低,路基基础上轨道板的垂向位移峰值远大于桥梁基础,最大垂向位移已达到 0.3 mm,路基基础上的轨道板振动加速度则略低于桥梁基础。

3.3 复合板与底座板应力

为检验 400 ~ 600 km/h 高速列车正常运行下轨道结构的混凝土是否会开裂,分别提取不同车速钢轨位置下自密实混凝土(复合板受拉面)与底座板的动应力峰值,如表 9 所示。自密实混凝土层与底座板的混凝土强度等级均为 C40,因此以 C40 混凝土的轴心抗拉强度标准值(2.39 MPa)作为复合板与底座板防开裂的拉应力最大允许值。

表 9 动应力峰值表

列车速度 /(km/h)	复合板应力/MPa		底座板应力/MPa	
	桥梁	路基	桥梁	路基
400	0.082	0.288	0.025	0.149
450	0.071	0.223	0.022	0.172
500	0.079	0.205	0.040	0.178
550	0.067	0.327	0.039	0.196
600	0.065	0.307	0.036	0.159

由表 9 可知,仅考虑列车动载,列车以 400 ~ 600 km/h速度正常运行时,相同基础条件下车速对复合板与底座板的动应力峰值影响较小,应力水平较低,由于路基基础刚度较小,其复合板与底座板的动应力较桥梁基础更大。桥梁与路基基础上的复合板应力峰值最大分别为 0.082 MPa 和 0.327 MPa,均远低于混凝土的轴心抗拉强度,说明轨道结构混凝土不易开裂,具有较好的稳定性与安全性。

4 动力性能指标及无砟轨道适应性评判

综合不同列车运行速度下车辆动力性能指标与无砟轨道动力性能指标的分析结果,对各动力性能指标以及 CRTSⅢ型板式无砟轨道能否满足 400 km/h 及以

上高速列车的正常运行进行评判,结果如表 10、表 11 所示。

表 10 桥梁基础上动力性能指标评判表

列车速度/(km/h)		400	450	500	550	600
车辆动力性能指标	轮轨力	✓	✓	✓	✓	✓
	轮重减载率	✓	✓	○	○	○
	舒适性	✓	✓	✓	✓	✓
	平稳性	✓	✓	✓	✓	✓
无砟轨道动力性能指标	钢轨垂向位移	✓	✓	✓	✓	✓
	钢轨振动加速度	✓	✓	✓	✓	✓
	轨道板垂向位移	✓	✓	✓	✓	✓
	轨道板振动加速度	✓	✓	✓	✓	✓
	复合板应力	✓	✓	✓	✓	✓
	底座板应力	✓	✓	✓	✓	✓

注：“✓”表示该项指标量值不超过最大允许值的 80%,具有足够的安全储备;“○”表示该项指标量值超过最大允许值的 80%但未超过最大允许值;“×”表示该项指标量值超过最大允许值

表 11 路基基础上动力性能指标评判表

列车速度/(km/h)		400	450	500	550	600
车辆动力性能指标	轮轨力	✓	✓	✓	✓	✓
	轮重减载率	✓	✓	✓	✓	✓
	舒适性	✓	✓	✓	✓	✓
	平稳性	✓	✓	✓	✓	✓
无砟轨道动力性能指标	钢轨垂向位移	✓	✓	✓	✓	✓
	钢轨振动加速度	✓	✓	✓	✓	✓
	轨道板垂向位移	○	○	○	○	○
	轨道板振动加速度	✓	✓	✓	✓	✓
	复合板应力	✓	✓	✓	✓	✓
	底座板应力	✓	✓	✓	✓	✓

注：其中“✓”表示该项指标量值不超过最大允许值的 80%,具有足够的安全储备;“○”表示该项指标量值超过最大允许值的 80%但未超过最大允许值;“×”表示该项指标量值超过最大允许值

从表 10、表 11 可以看出,列车以 400 ~ 600 km/h 速度正常运行情况下,桥梁基础与路基基础上车辆与无砟轨道的各动力性能指标均未超过规范规定的最大允许值,说明我国 CRTSⅢ型板式无砟轨道结构与技术标准满足 400 km/h + 高速列车的正常运行条件。值得注意的是,在桥梁基础上,当列车速度达到 500 km/h及以上时,轮重减载率偏大,此时安全储备量较小,为保证列车运行安全,建议针对桥梁基础上 500 km/h 以上高速列车的轮轨关系进行进一步研究;路基基础刚度较低,轨道板的垂向动位移偏大,为保证 400 km/h及以上速度列车的长期安全运营,路基地段的基础刚度不宜过低。

5 结论与建议

本文针对既有 CRTSⅢ型板式无砟轨道能否满足 400 km/h 及以上高速列车的正常运行问题开展了相关研究,得出以下主要结论:

(1)列车以 400 ~ 600 km/h 速度正常运行情况下,随着列车速度的增大,轮轨垂向力峰值与轮重减载

率峰值呈增大趋势,但均低于最大允许值;我国高速铁路无砟轨道的不平顺状态较好,列车舒适性与平稳性均处于较优状态,垂向列车平稳性指标随列车运行速度的提高而增大,但增量值较小。

(2)不同列车速度对无砟轨道结构动力性能指标的影响较小,列车以 400 ~ 600 km/h 速度正常运行情况下,不同基础条件下无砟轨道的各项动力性能指标均未超过最大允许值,轨道结构具有较好的稳定性与安全性。

(3)CRTSⅢ型板式无砟轨道结构与技术标准满足 400 km/h + 高速列车的正常运行条件。为确保 400 km/h + 高速列车的长期安全运营,路基地段的基础刚度不宜过低,桥梁基础上列车速度达到 500 km/h 及以上时,建议针对高速列车轮轨关系进行进一步研究。

参考文献:

- [1] 干佳薇. 中国高速铁路的发展历程与展望[J]. 经济研究导刊, 2014(17): 31 - 32.
GAN Jiawei. Development and Prospect of China High-speed Railway [J]. Economic Research Guide, 2014(17): 31 - 32.
- [2] 孙建晖. 浅议中国高速铁路发展对区域经济的促进作用[J]. 现代商业, 2019(7): 67 - 68.
SUN Jianhui. Discussion on the Promotion of China's High Speed Railway Development to Regional Economy [J]. Modern Business, 2019(7): 67 - 68.
- [3] 王继军, 姚力, 王梦. 中国高速铁路无砟轨道的发展及应用[J]. 高速铁路技术, 2020, 11(4): 33 - 35.
WANG Jijun, YAO Li, WANG Meng. Development and Application of Ballastless Track of High-speed Railway in China[J]. High Speed Railway Technology, 2020, 11(4): 33 - 35.
- [4] 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.
- [5] 翟婉明. 车辆-轨道耦合动力学(第四版)[M]. 北京: 科学出版社, 2015.
ZHAI Wanming. Vehicle-Track Coupling Dynamics (Fourth Edition) [M]. Beijing: Science Publishing, 2015.
- [6] GB 50010 - 2010 混凝土结构设计规范[S].
GB 50010 - 2010 Code for Design of Concrete Structures [S].
- [7] TB/T 3352 - 2014 高速铁路无砟轨道不平顺谱[S].
TB/T 3352 - 2014 PSD of Ballastless Track Irregularities of High-speed Railway[S].
- [8] 高建敏. 高速铁路无砟轨道不平顺谱的比较分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2015, 12(4): 715 - 723.
GAO Jianmin. Comparative Analysis of Power Spectrum Density of Ballastless Track Irregularities of Chinese High-speed Railway [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2015, 12(4): 715 - 723.
- [9] 宁迎智. 国内外高速铁路轨道不平顺谱对比与思考[J]. 铁道技术监督, 2016, 44(4): 11 - 15.
NING Yingzhi. Comparison and Reflection on Track Irregularities PSD in Domestic and Foreign High Speed Railways [J]. Railway Quality Control, 2016, 44(4): 11 - 15.
- [10] 陈果, 翟婉明. 铁路轨道不平顺随机过程的数值模拟[J]. 西南交通大学学报, 1999, 34(2): 138 - 142.
CHEN Guo, ZHAI Wanming. Numerical Simulation of the Stochastic Process of Railway Track Irregularities [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 1999, 34(2): 138 - 142.
- [11] TB 10761 - 2013 高速铁路工程动态验收技术规范[S].
TB 10761 - 2013 Technical Regulations for Dynamic Acceptance for High-speed Railway Construction[S].
- [12] 魏家沛. 高速车辆振动及平稳性分析[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2013.
WEI Jiawei. Vibration Characteristics and Ride Quality Analysis of High Speed Cars [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiatong University, 2013.
- [13] 马思群, 王猛, 王晓杰, 等. 高速列车平稳性与乘坐舒适度测试及评价[J]. 大连交通大学学报, 2015, 36(S1): 66 - 68.
MA Siqun, WANG Meng, WANG Xiaojie, et al. Evaluation and Measurement of High Speed Train by Ride Comfort and Ride Index [J]. Journal of Dalian Jiaotong University, 2015, 36(S1): 66 - 68.