

文章编号: 1674—8247(2021)05—0068—05

DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2021.05.013

400 km/h 高速铁路路基设计主要技术标准探讨

付铭川 周 成 李安洪 周和祥

(中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031)

摘 要:本文结合成渝中线高速铁路(预留 400 km/h 提速条件)设计研究,通过对列车动应力影响范围的理论分析,从路基面宽度、基床结构、材质及压实标准、荷载大小及分布模式、工后变形控制标准、过渡段、路肩支挡工程等方面论述了 400 km/h 条件下的路基主要技术标准,分析了 350 km/h 高速铁路与 400 km/h 高速铁路路基设计的迥异点。结果表明:在路基面宽度、基床厚度和沉降标准等方面,两者设计标准基本一致;而在动应力影响下,两者在路基面荷载大小及分布模式、基床结构及材质、过渡段和路肩支挡工程等方面存在差异。

关键词:400 km/h 高速铁路;路基;技术标准

中图分类号:U213.1

文献标志码:A

Discussion on Main Technical Standards for Earthworks Design of 400 km/h High-speed Railway

FU Mingchuan ZHOU Cheng LI Anhong ZHOU Hexiang

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

Abstract: Based on the design research of the Second Chengdu-Chongqing High-speed Railway (400 km/h speed-up condition is reserved), this paper elaborates on the main technical standards of earthworks at speed of 400 km/h by using the theoretical analysis of the scope of the impact of train's dynamic stress from the aspects of the width of track formation, the structure of the base course and subbase course, material and compaction standard, load size and distribution mode, post-construction deformation control standard, transition section, and shoulder supporting, and analyzes the differences of the earthworks design between the 350 km/h high-speed railway and the 400 km/h high-speed railway. The results show that the design standards for both speeds are basically the same in terms of the width of track formation, the thickness of the base course and subbase course, and settlement standards. However, under the impact of dynamic stress, there are differences in the size and distribution pattern of earthworks surface load, the structure and materials of the base course and subbase course, transition section and shoulder supporting, etc.

Key words: 400 km/h high-speed railway; subgrade; technical standard

高速铁路路基是承受轨道结构和列车荷载的基础,是铁路工程的重要组成部分,除应具备铁路路基的基本功能外,还应满足列车高速运行的要求,具有足够

的强度、刚度、稳定性和耐久性。目前,国内铁路路基设计技术标准仅适用于 350 km/h 及以下速度的高速铁路,尚无 400 km/h 高速铁路路基系统全面的研究。

收稿日期:2021-03-01

作者简介:付铭川(1987-),男,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项目(KSNQ202060)

引文格式:付铭川,周成,李安洪,等. 400 km/h 高速铁路路基设计主要技术标准探讨[J]. 高速铁路技术,2021,12(5):68-72.

FU Mingchuan, ZHOU Cheng, LI Anhong, et al. Discussion on Main Technical Standards for Earthworks Design of 400 km/h High-speed Railway [J]. High Speed Railway Technology, 2021, 12(5):68-72.

中国铁路设计集团有限公司与中国铁道科学研究院集团有限公司对现有高速铁路线下基础能否满足 400 km/h 高速列车的运营条件进行了初步论证;西南交通大学在京沪高速铁路试验段上开展了 420 km/h 条件下的现场实测,积累了部分实测数据;中铁二院工程集团有限责任公司依托俄罗斯莫喀高速铁路对 400 km/h 高速铁路路基基床结构、填料、过渡段、地基处理及监测等开展了研究,但研究侧重于低温严寒环境下的路基结构性能。

基于此,本文结合成渝中线高速铁路(预留 400 km/h 提速条件)的设计研究,通过论述 400 km/h 高速铁路路基的设计重点,对比分析 350 km/h 与 400 km/h 高速铁路路基设计的迥异点,阐述 400 km/h 高速铁路路基存在的问题,为更高速度铁路路基的设计提供指导。

1 路基面宽度

路基横断面宽度根据线间距、路肩宽度、接触网支柱及基础类型等因素计算确定,并综合考虑路基稳定性及路基面防排水问题。世界各国路基面宽度主要参数如表 1 所示。

表 1 世界各国路基面宽度主要参数表^[1]

参数	法国	德国	日本	中国
速度/(km/h)	300	230 ~ 300	200 ~ 300	300 ~ 350
断面宽度/m	13.9	13.7 ~ 14.0	11.4	13.6(13.8)
线间距/m	4.5	4.7	4.3	5.0
距接触网距离/m	3.1	3.65	2.68 ~ 5.05 *	3.00(3.10)
路肩宽度/m	2.00	1.65 ~ 1.90	1.00 ~ 1.40	1.40

注: * 为日本新干线最小、最大值,分别为山阳和东北新干线;()内为中国有砟轨道设计参数

线间距指相邻两股道线路中心线之间的最小距离,是无砟轨道路基面宽度受速度影响的主要因素,主要受列车交会运行时的气动力作用和列车宽度控制。结合国内外高速铁路线间距、列车交汇相邻侧壁净间距和列车运行速度的关系,350 km/h 无砟轨道线间距为 5.0 m。当列车速度为 400 km/h,线间距为 3 m 和 6 m 时,车体头尾部的压力分布基本一致,这说明线间距变化对 400 km/h 列车车体上的压力分布影响很小^[2]。因此,400 km/h 高速铁路采用 5.0 m 线间距满足设计要求,从而确定 400 km/h 高速铁路路基面宽度为 13.6 m。

2 路基基床结构及压实标准

路基基床是指路基上部受列车动力作用和水文气候变化影响最大的土层,其状态直接影响列车运行的

速度和平稳性,分为基床表层和基床底层两个部分。基床表层作为线路的基础,直接承受列车剧烈的动力作用,是路基最重要的部分。现行规范^[3]对 350 km/h 及以下速度高速铁路的路基基床厚度及其压实标准等作出了规定,对于 400 km/h 高速铁路尚无明确规定。

2.1 路基基床控制标准

路基基床结构设计对列车荷载作用下的基床强度、变形和应变控制准则进行了规定。

基床结构层动应力满足强度要求,其计算式为:

σ ≤ R / K (1)

式中:σ——基床结构层动应力(kPa);

R——基床结构层动强度(kPa);

K——安全系数。

基床结构动变形满足变形要求,其计算式为:

ω ≤ Cω (2)

式中:Ω——计算变形值(mm);

Cω——动变形限制值(mm),无砟轨道取 0.22 mm(轨道结构外侧边缘位置)。

基床结构动应变满足长期稳定变形要求,其计算式为:

ε ≤ Cε (3)

式中:E——计算动应变;

Cε——临界应变。

400 km/h 高速铁路基床控制标准参照 350 km/h 无砟轨道制定,采用动应力、动变形和动应变控制,保证基床结构在列车荷载的作用下不发生强度破坏、动应变不超过规定限值,基床填料处于快速稳定状态,从而持久保持路基的长期服役性能。

2.2 路基面荷载分布模式及大小

基床结构不同深度处的动应力 σ 可根据路基面荷载分布模式,按 Boussinesq 理论计算。在一个转向架的双轴荷载作用下,路基面承受的列车荷载可简化为纵向梯形、横向均匀的分布模式。因此,高速铁路无砟轨道路基面车辆荷载可简化为梯形荷载分布模式^[4],如图 1 所示。

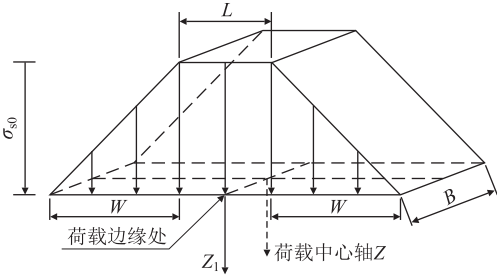


图 1 路基面荷载分布模式图

路基面动应力 σ_{s0} 计算式为:

$$\sigma_{s0} = \frac{2\phi_k P}{B(W + L)} \tag{4}$$

式中: ϕ_k ——动力系数;
 P ——车辆轴重(kN);
 B ——支承层或底座宽度(m);
 W ——路基面上单轴载纵向影响范围的一半(m);
 L ——转向架固定轴距(m)。

动力系数分极限荷载动力系数 ϕ_{k1} 和常遇荷载动力系数 ϕ_{k2} 。极限荷载动力系数 ϕ_{k1} 对路基结构产生极限动力作用,适用于路基结构强度控制设计;常遇荷载动力系数 ϕ_{k2} 对路基结构的长期服役性能产生影响,适用于路基结构动变形和动应变设计。建立车-轨-路耦合动力学模型,采用 99% 分位数不平顺谱^[5],分析列车在 400 km/h 和 5 km/h 速度条件下的基床动应力比值,可得极限动力系数 $\phi_{k1} = 2.146$;采用 70% 分位数不平顺谱,可得常遇荷载动力系数 $\phi_{k2} = 1.491$ 。

2.3 基床厚度

400 km/h 无砟轨道高速铁路中列车荷载引起的累积变形效应区域定义为路基基床,控制基床以下路基填料的循环应变不超过填料快速稳定状态应变阈值。基床动应力采用前述梯形荷载分布模式,取满载轴重 $P = 17\text{ t}$,底座宽度 $B = 3.1\text{ m}$, $W = 3.5\text{ m}$, $L = 2.5\text{ m}$,验算路基动应力沿深度分布规律,基于 Boussinessq 理论计算列车荷载下的路基极限动应力和常遇动应力,路基动静应力沿深度分布规律如图 2 所示。

基床厚度不仅与列车动荷载相关,还取决于基床以下路基填料的地基系数 K_{30} 值。因此,对于 400 km/h 高速铁路无砟轨道的基床结构设计,采用结构强度控制和应变控制分析其基床以下路基填料的地基系数,当基床厚度分别为 2.3 m、2.7 m、3.0 m 时,基

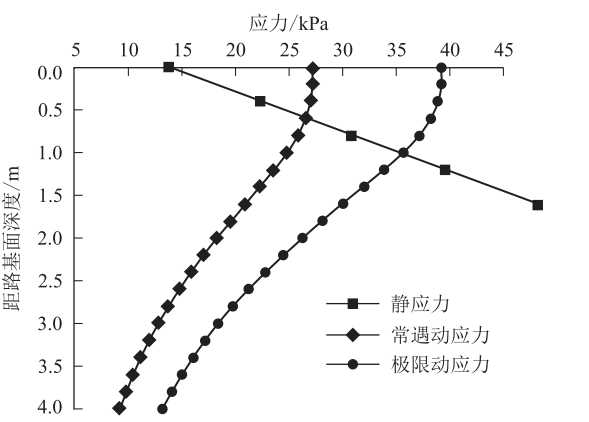


图 2 400 km/h 动静应力随深度变化图

床以下路基填料的 K_{30} 值分别为 100 MPa/m、90 MPa/m 和 80 MPa/m。综合考虑现行规范要求及成渝中线高速铁路填料料源性质,选取基床厚度为 2.7 m,基床以下路基填料 K_{30} 值不小于 90 MPa/m。

2.4 400 km/h 条件下路基基床结构设计标准

采用动力仿真及基床结构分析方法,得出列车荷载作用下 400 km/h 高速铁路的基床结构设计标准^[6]。

(1)路基基床结构表层采用级配碎石、底层采用 A、B 组填料的 结构型式时,相对 350 km/h 无砟轨道高速铁路,在 400 km/h 条件下,路基基床动应力增大,基床底层地基系数应满足 $K_{30} \geq 150\text{ MPa/m}$,基床结构应满足的标准如表 2 所示。

(2)结合成渝中线高速铁路区域地质、气象特点,对全断面沥青混凝土强化表层基床在 400 km/h 条件下的适应性和设计参数进行分析研究。采用 0.1 m 沥青混凝土强化基床表层的结构型式时,400 km/h 基床结构为 0.1 m 沥青混凝土 + 0.3 m 级配碎石层 + 2.3 m 基床底层,基床底层地基系数应满足 $K_{30} \geq 145\text{ MPa/m}$,全断面沥青混凝土表层强化基床结构设计标准如表 3 所示。

表 2 400 km/h 条件下基床结构设计标准表(一)

基床厚度 /m	结构层	结构层厚度 /m	K_{30} 建议值 /(MPa/m)	压实系数	填料类型
2.7	基床表层	0.4	≥ 190	≥ 0.97	级配碎石
	基床底层	2.3	≥ 150	≥ 0.95	砾石类、砂类土中的 A、B 组填料

表 3 400 km/h 条件下基床结构设计标准表(二)

基床厚度 /m	结构层	结构层厚度 /m	K_{30} 建议值 /(MPa/m)	压实系数	填料类型
2.7	沥青层	0.1	-	-	-
	级配碎石表层	0.3	≥ 190	≥ 0.97	级配碎石
	基床底层	2.3	≥ 145	≥ 0.95	砾石类、砂类土中的 A、B 组填料

因此,成渝中线高速铁路基床结构采用表层 0.4 m 厚级配碎石 + 底层 2.3 m 厚 A、B 组填料的 结构

型式,选取局部段落进行 0.1 m 厚全断面沥青混凝土强化基床表层的试验研究。

3 工后变形控制标准

工后变形是指铺轨完成、验收合格后路基自身以及地基产生的变形量。从变形来源分析,主要有列车作用下基床自身变形、路基本体在自重作用下的固结变形和地基在列车与路基作用下的固结变形。

350 km/h 无砟轨道路基地段工后沉降应满足扣件调整和线路竖曲线圆顺的要求,扣除施工引起的误差和列车动载引起的动变形^[7],工后沉降一般不应超过 15 mm;沉降比较均匀路基工后沉降的限制为 30 mm,且调整轨面高程后的竖曲线半径应满足:

$$R_{sh} \geq 0.4\nu_{sj}^2 \quad (5)$$

式中: R ——轨面圆顺的竖曲线半径;

ν_{sj} ——最高设计速度。

差异沉降不应大于 5 mm,不均匀沉降造成的折角不应大于 1/1 000。

根据路基基床控制标准,基床结构动应变需满足在列车循环荷载作用下基床填料处于快速稳定状态,即在列车循环荷载作用下基床不发生长期累积变形。在此前提下,列车时速提升引起的列车动力作用增加不会对路基工后沉降造成影响,因此 400 km/h 工后沉降控制标准可沿用 350 km/h 的设计标准,即工后沉降一般地段不应大于 15 mm,路桥、路隧、路涵交界处的差异沉降不应大于 5 mm,不均匀沉降造成的折角不应大于 1/1 000。

4 过渡段形式

路基与其他构筑物、不同路基结构、不同地基处理形式间可能存在变形或刚度差异时均需设置过渡段。

4.1 现行规范标准

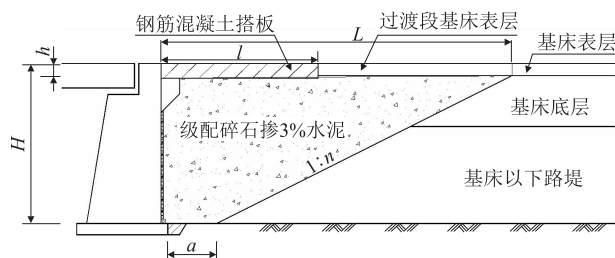
根据 TB 10621-2014《高速铁路设计规范》设计要求,350 km/h 无砟轨道高速铁路一般采用倒梯形过渡段,填料采用级配碎石掺 3% 水泥填筑,压实标准按压实系数 $K \geq 0.95$ 、地基系数 $K_{30} \geq 150$ MPa/m、动态变形模量 $E_{vd} \geq 50$ Mpa 控制。路桥分界处沉降差异造成的错台不大于 5 mm,不均匀沉降造成的折角不大于 1/1 000,桥台台背过渡段梯形底部沿线路方向长 5.0 m。

4.2 400 km/h 过渡段设计标准

过渡段支撑刚度变化对过渡段动力学性能影响不大,过渡段工后沉降差引起的轨面弯折变形对行车的影响十分显著,是影响平顺性的主要控制因素^[8-9]。

现有过渡段在桥台台背处无法进行大型机械碾压施工,采用小型机械夯实又难以满足标准要求,易出现沉降控制指标超限(不满足差异沉降折角不得大于 1/1 000 要求)。

当列车运行速度提高至 400 km/h 时,轨面不平顺所引起的动力作用更大。为避免路桥分界处产生差异沉降,减小不均匀沉降造成的折角,可在桥台台后设置钢筋混凝土搭板,如图 3 所示。CRTSⅢ型轨道板搭板的优选值为 9.872 m。



L —过渡段长度; H —桥台路堤高度; h —基床表层厚度; a —过渡段梯形底部沿线路方向长度,取 5.0 m; n —常数,不小于 2; l —两块轨道板结构的长度

图3 桥路过渡段设计图

除桥路过渡段外,400 km/h 高速铁路其他过渡段设计原则与 350 km/h 一致。

4.3 短路基设计

“遂渝线两桥(隧)之间短路基设计参数试验研究”指出:250~300 km/h 高速铁路两桥(隧)之间短路基长度小于 60 m 时,应按全长等刚度刚性路基设计^[10]。动力学仿真计算结果显示,400 km/h 条件下,短路基车体垂向加速度、轮轨力和轮重减载率 3 个控制指标均有所增大,但未超过限制值。因此,400 km/h 高速铁路桥桥(隧)之间路基应控制差异沉降,减小刚度变化,避免桥桥(隧)频繁过渡,设计措施可采用级配碎石、混凝土填筑或桩板结构加固等方式。

5 路肩支挡工程

路肩支挡工程结构在各种荷载组合作用下应满足强度、稳定性和耐久性的要求,结构类型的选择及设置位置的确定应安全可靠、经济合理,便于施工、维修、养护^[11]。2019 年颁布的《铁路路基支挡设计规范》取消了速度目标值和铁路等级的限制,但路肩支挡结构适用范围为速度 350 km/h 及以下高速铁路。

5.1 路肩挡墙控制标准

TB 10025-2019《铁路路基支挡结构设计规范》采用总安全系数法设计挡土墙,期抗滑动稳定性和抗倾覆稳定性控制条件为:

$$K_c = \frac{R}{T}$$

(6)

$$K_0 = \frac{M_y}{M_0}$$

(7)

式中: K_c ——抗滑动安全系数;
 R ——总抗滑力(kN);
 T ——总滑动力(kN);
 K_0 ——抗滑动安全系数;
 M_y ——总的抗倾覆力矩(kN·m);
 M_0 ——总的倾覆力矩(kN·m)。挡土墙稳定性安全系数如表4所示。

表4 挡土墙稳定性安全系数表

项目名称	一般及常水位工况	洪水位工况	地震工况	临时工况
抗滑动安全系数 K_c	1.3	1.2	1.1	1.1
抗倾覆安全系数 K_0	1.6	1.4	1.3	1.2

注:高速铁路路堤地段重力式挡土墙可适当提高安全系数,滑动安全系数1.5,抗倾覆安全系数1.8

5.2 400 km/h 路肩挡土墙适应性研究

400 km/h 列车荷载作用下,路肩挡土墙墙背土压力增大,挡土墙侧向变形引起的路基面附加沉降变形相应增加。为判定现行高速铁路路肩挡土墙设计标准在 400 km/h 条件下的适用性,利用 FLAC3D 有限差分软件,以 6 m 重力式路肩挡土墙为例,梯形双轴荷载作用模式为设计工况,以梯形双轴荷载纵向中心处沿路基横断面方向平面为对称面,建立有限差分对称模型进行计算分析。

列车荷载作用下,挡土墙滑动或绕墙趾转动引起轨道结构外侧边缘和轨道结构中心对应位置处路基基床跟随变形。以 0.22 mm 变形限值为控制标准,分析 400 km/h 条件下挡土墙抗滑动安全系数、抗倾覆安全系数与基床动变形的关系,得到以下结论:双线重力式路肩挡土墙抗滑移安全系数为 1.30;抗倾覆安全系数为 1.6~1.7。

400 km/h 条件下,重力式路肩挡土墙抗倾覆安全系数大于现行规范正文要求,但满足条文说明的规定。因此,400 km/h 高速铁路重力式路肩挡墙抗滑移安全系数取 1.5,抗倾覆安全系数取 1.8。

6 路桥类型设计原则

传统认知认为桥梁比路基工程投资高,铁路以路基方案通过为选线首选原则。然而,随着经济的发展,土地资源保护意识和自然环境保护逐步增强,对铁路桥路工程投资的理解也在发生改变。

以成渝中线高速铁路 6.0 m 填高的路堤为例,因

填料匮乏,价购合格 AB 组填料的综合单价为 266 元/m³,级配碎石的综合单价为 420 元/m³,用地的综合单价为 25.4 万元/亩。区间路基双线路堤用地指标 68.1 亩/km,桥梁用地指标 27.5 亩/km,路桥投资对比分析如表 5 所示。

表5 路桥投资对比分析表

投资	路基/万元	桥梁/万元
静态指标	5 200	6 300
用地	1 700	700
静态指标+用地	6 900	7 000

注:路基静态指标包括区间正线土石方、边坡防护、地基加固和附属工程投资,不含站后工程

路基静态投资的主要影响因素为土石方,填料单价直接影响路基公里指标。

结合过渡段设计标准,成渝中线高速铁路路桥划分原则为:(1)400 km/h 高速铁路轨道平顺性要求更高,宜减少桥桥(隧)之间频繁过渡;(2)差异沉降较大或不均匀沉降造成折角不满足要求的地段,原则上以桥代路;(3)基底地质情况良好地段,桥路分界高度一般为 8.0 m,城市附近为 6.0 m,软土、松软土地段桥路分界高度一般为 6 m,深厚软基难以控制沉降地段原则上以桥通过;(4)考虑用地影响因素,填方地段宜以桥梁工程通过。

7 结论

本文通过对 400 km/h 路基基床、过渡段、支挡结构等主要技术标准进行探讨,得出以下主要结论:

(1)400 km/h 高速铁路采用 5.0 m 线间距可满足设计要求,此时其路基面宽度为 13.6 m。

(2)400 km/h 条件下,若基床采用表层 0.4 m 厚级配碎石+底层 2.3 m 厚 A、B 组填料的结构型式,基床底层 $K_{30} \geq 150$ MPa/m;若基床表层采用 0.1 m 沥青混凝土+0.3 m 级配碎石层+2.3 m 基床底层的结构型式,基床底层 $K_{30} \geq 145$ MPa/m。

(3)400 km/h 高速铁路过渡段以控制差异沉降为主,桥路过渡段宜设置钢筋混凝土搭板,其他过渡段设计与 350 km/h 高速铁路一致。短路基可采用 C25 混凝土填筑或桩板结构加固,以消除差异沉降。

(4)400 km/h 条件下,路肩挡土墙抗滑移安全系数取 1.5,抗倾覆安全系数取 1.8。

(5)综合考虑线路平顺性和投资等因素,土地资源匮乏且需远运优质填料的山区高速铁路,填方地段宜以桥梁通过为主。

(下转第 78 页)

参考文献:

[1] 金学松,吴越,梁树林,等. 车轮非圆化磨耗问题研究进展[J]. 西南交通大学学报, 2018, 53(1): 1-14.
JIN Xuesong, WU Yue, LIANG Shulin, et al. Mechanisms and Countermeasures of Out-of-Roundness Wear on Railway Vehicle Wheels[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2018, 53(1): 1-14.

[2] 罗仁,曾京,邹平波,等. 高速列车车轮不圆顺磨耗仿真及分析[J]. 铁道学报, 2010, 32(5): 30-35.
LUO Ren, ZENG Jing, WU Pingbo, et al. Simulation and Analysis of Wheel Out-of-Roundness Wear of High-speed Train[J]. Journal of the China Railway Society, 2010, 32(5): 30-35.

[3] 张雪珊,肖新标,金学松. 高速车轮椭圆化问题及其对车辆横向稳定性的影响[J]. 机械工程学报, 2008, 44(3): 50-56.
Zhang Xueshan, Xiao Xinbiao, Jin Xuesong. Influence of High Speed Railway Wheels Ovalization on Vehicle Lateral Stability[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2008, 44(3): 50-56.

[4] WU Xingwen, CHI Maoru, WU Pingbo. Influence of Polygonal Wear of Railway Wheels on the Wheel Set Axle Stress[J]. Vehicle System Dynamics, 2015, 53(11): 1535-1554.

[5] 李玲. 车轮多边形化对直线电机车辆动力学行为的影响[D]. 成

都: 西南交通大学, 2010.
LI Ling. Influence of Polygonal Wheels on Dynamic Behavior of Linear Motor Vehicles[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2010.

[6] 吴磊,钟硕乔,金学松,等. 车轮多边形化对车辆运行安全性能的影响[J]. 交通运输工程学报, 2011, 11(3): 47-54.
WU Lei, ZHONG Shuoqiao, JIN Xuesong, et al. Influence of Polygonal Wheel on Running Safety of Vehicle[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2011, 11(3): 47-54.

[7] 尹振坤,吴越,韩健. 高速列车车轮多边形磨耗对轮轨垂向力的影响[J]. 铁道学报, 2017, 39(10): 26-32.
YIN Zhenkun, WU Yue, HAN Jian. Effect of Polygonal Wear of High-speed Train Wheels on Vertical Force between Wheel and Rail[J]. Journal of the China Railway Society, 2017, 39(10): 26-32.

[8] 王继军,王梦,刘伟斌,等. CRTSⅢ型板式无砟轨道系统技术[J]. 中国铁路, 2017(8): 11-15.
WANG Jijun, WANG Meng, LIU Weibin, et al. Technology of CRTSⅢ Ballastless Track System[J]. China Railway, 2017(8): 11-15.

[9] 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 Coupled Dynamics (Fourth Edition) [M]. Beijing: Science Publishing House, 2015.

(上接第 72 页)

参考文献:

[1] 孙红林,李丹. 京沪高速铁路路基工程主要技术标准研究[J]. 铁道建筑, 2009, 49(7): 5-10.
SUN Honglin, LI Dan. Study on Main Technical Standards of Earthworks of Beijing-Shanghai High-speed Railway [J]. Railway Engineering, 2009, 49(7): 5-10.

[2] 王进,高敦升,李斌. 高速列车同向并行运动时线间距仿真研究[J]. 铁路计算机应用, 2012, 21(11): 12-13.
WANG Jin, GAO Dunsheng, LI Bin. Simulation Study on Distance between Centre of Tracks to High-speed Train at Parallel Movement of Same Direction[J]. Railway Computer Application, 2012, 21(11): 12-13.

[3] TB 10001-2016 铁路路基设计规范[S].
TB 10001-2016 Code for Design of Railway Earth Structure [S].

[4] 周波,张良,付正道. 高速铁路无砟轨道软岩路堑基床换填厚度研究[J]. 高速铁路技术, 2019, 10(3): 73-77.
ZHOU Bo, ZHANG Liang, FU Zhengdao. Research on Replacement Thickness of Soft Rock Cutting Subgrade Bed of High-speed Railway with Ballastless Track[J]. High Speed Railway Technology, 2019, 10(3): 73-77.

[5] 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].

[6] 张东卿,李安洪,薛元,等. 400 km/h 高速铁路基床结构研究[J]. 高速铁路技术, 2021, 12(2): 108-114.
ZHANG Dongqing, LI Anhong, XUE Yuan, et al. Study on Subgrade Bed Structure of 400 km/h High-speed Railway [J]. High Speed Railway Technology, 2021, 12(2): 108-114.

[7] 李丹. 京沪高速铁路路基工程沉降控制设计技术[J]. 路基工程, 2010(3): 195-197.
LI Dan. Control Technique of Subgrade Engineering Settlement in Beijing-Shanghai High-speed Railway [J]. Subgrade Engineering, 2010(3): 195-197.

[8] 罗强. 高速铁路路桥过渡段动力学特性分析及工程试验研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2003.
LUO Qiang. Dynamic Performance Analyses and Experiment Study on Bridge/Approach Embankment of High-speed Railway [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2003.

[9] 罗强,谢宏伟,李安洪,等. 无砟轨道底座板离缝对路桥过渡段动力学性能影响分析[J]. 高速铁路技术, 2021, 12(2): 33-38.
LUO Qiang, XIE Hongwei, LI Anhong, et al. Analysis on the Impact of Ballastless Track Base Slab Disjoint on the Dynamic Performance of Subgrade-bridge Transition Section [J]. High Speed Railway Technology, 2021, 12(2): 33-38.

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

[11] TB 10025-2019 铁路路基支挡结构设计规范[S].
TB 10025-2019 Code for Design of Retaining Structures of Railway Earthworks[S].