

文章编号: 1674—8247(2021)05—0036—05

DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2021.05.007

400 km/h 条件下现行路基过渡段设计标准适应性研究

周和祥¹ 李安洪¹ 周 成¹ 李 宁^{1,2} 罗 强²

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

摘 要:本文针对现行路基过渡段设计标准(适用于 350 km/h 高速铁路)在 400 km/h 条件下的适应性问题,构建了过渡段车辆-轨道-路基耦合动力学模型,考虑轨面折角、路基刚度变化、列车运行方向等因素,分别在 350 km/h 与 400 km/h 条件下开展了动力学仿真分析。结果表明:路基支撑刚度变化对过渡段动力学性能影响不大,轨面不平顺对过渡段动力学性能影响显著,当列车运行速度由 350 km/h 提升至 400 km/h 时,其加速度、轮轨力、轮重减载率三项动力学指标均增大,但均未超过控制阈值。因此,现行路基过渡段设计标准适用于 400 km/h。研究结果可为今后 400 km/h 及更高速度高速铁路过渡段的设计提供参考。

关键词:高速铁路; 400 km/h; 设计标准; 过渡段; 加速度; 轮轨力; 轮重减载率

中图分类号:U213.1

文献标志码:A

Study on Adaptability of Current Design Standard for Transition Sections of Earthworks at Speed of 400 km/h

ZHOU Hexiang¹ LI Anhong¹ ZHOU Cheng¹ LI Ning^{1,2} LUO Qiang²

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

2. Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: In consideration of the adaptability of the current design standard for transition sections of earthworks (which is applicable to 350 km/h high-speed railway) at speed of 400 km/h, this paper constructs the vehicle-track-earthworks coupling dynamic model for transition sections, and takes into account the factors such as the angle of track surface, the change of earthworks stiffness and the running direction of trains, and carries out dynamic simulation analysis at speed of 350 km/h and 400 km/h respectively. The results show that the change of earthworks support stiffness has little impact on the dynamic performance of the transition section, while the irregularity of the rail surface has a significant impact on the dynamic performance of the transition section. When the train speed increases from 350 km/h to 400 km/h, three dynamic indexes including acceleration, wheel-rail force, and the rate of wheel load reduction all increase, but they do not exceed the control threshold. Therefore, the current design standard for transition sections of earthworks is applicable for 400 km/h. The research results can provide a reference for the design of transition sections of 400 km/h and higher-speed high-speed railways in the future.

Key words: high-speed railway; 400 km/h; design standards; transition section; acceleration; wheel-rail force; rate of wheel load reduction

收稿日期:2021-03-01

作者简介:周和祥(1991-),男,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(KSNQ202060)

引文格式:周和祥,李安洪,周成,等. 400 km/h 条件下现行路基过渡段设计标准适应性研究[J]. 高速铁路技术,2021,12(5):36-40.

ZHOU Hexiang, LI Anhong, ZHOU Cheng, et al. Study on Adaptability of Current Design Standard for Transition Sections of Earthworks at Speed of 400 km/h [J]. High Speed Railway Technology, 2021, 12(5):36-40.

近年来,随着高速铁路技术的迅猛发展,高速化已成为当今铁路发展的主要方向之一^[1-2],为铁路运输行业注入了新的动力。中国拥有目前世界上规模最大、运营速度最快的高速铁路网,截至 2019 年 12 月,运营总里程达 3.5 万 km,最高运营速度达 350 km/h。积极开展 400 km/h 高速铁路相关研究,对我国高速铁路发展重要意义。

当列车运行速度提高至 400 km/h 后,轨面不平顺所引起的动力作用更大,并向上传导至车辆系统,向下传递至线下结构,作为轨道结构基础的路基基床的动力作用也相应被放大。同时,动力作用加大又会影响轨道结构部件疲劳破坏和线路变形累积,加剧轨道几何状态的恶化。在列车荷载长期作用下,路基与相邻结构的刚度差异使路基过渡段更易产生差异沉降,并通过轨道结构映射到钢轨,形成轨面几何不平顺,动力作用更为明显。

现行 TB 10621 - 2014《高速铁路设计规范》对过渡段的相关规定适用于 350 km/h 的高速铁路,其在 400 km/h 技术条件下的适应性还有待研究。本文以沪渝蓉高速铁路重庆至成都段为依托,构建了车辆 - 轨道 - 路基耦合动力学模型,对 400 km/h 条件下的列车动力学性能开展研究,同时重点分析了轨面折角、路基刚度、列车运行方向等因素对列车动力学性能的影响,并对现行过渡段设计标准在 400 km/h 条件下的适用性进行了初判,研究成果可为今后 400 km/h 及更高速高速铁路过渡段的设计提供有益参考。

1 动力学计算模型

1.1 模型参数

列车在轨道结构上运行,车辆系统、轨道系统与路基系统之间的动力影响与荷载作用是一个动态耦合的过程。轨面几何不平顺与轨下结构支承刚度变化引起的轮轨接触力是整个耦合系统产生振动的激励源,并向上传导至车辆系统,向下传导至轨道系统与路基系统^[3]。传统拟静力路基结构设计方法与相应的动力系数限值应当与车辆 - 轨道 - 路基耦合系统的动态响应相适应,符合车辆 - 轨道 - 路基耦合动力学原理。随着列车运行速度的加快,耦合系统动力更加明显,在列车运行速度高达 400 km/h 的技术条件下,有必要对路基过渡段性能进行动力学评估。因此,本文采用车辆 - 轨道 - 路基耦合动力方法,建立大系统耦合模型,仿真分析车辆系统、轨道系统、路基系统的动力作用特点,分析路基过渡段结构动力响应,评价现有规范标准下的路基过渡段在 400 km/h 技术条件下的动力学

性能。

基于耦合动力学原理,建立了车辆 - 板式无砟轨道 - 路基耦合动力学垂向模型。其中,车辆系统基于多刚体动力学抽象为多刚体弹簧阻尼系统^[4],考虑到 CR450 高速铁路动车组尚在研发中,相关动力学参数还不明确,车辆采用 CRH380A 车;钢轨考虑其周期离散支承特点,抽象为离散支承 Euler 梁;针对 CRTS III 型轨道板结构形式特点,将其抽象为连续支承条件下的单向自由板。

1.2 动力学计算方案

根据 TB 10621 - 2014《高速铁路设计规范》^[5]和 TB 10001 - 2016《铁路路基设计规范》^[6]要求,高速铁路无砟轨道过渡段长度不小于 20 m。当过渡段长度较长时,过渡段材料与结构过渡会更加平缓,考虑最不利情况,过渡段长度取 20 m。

路基过渡段差异沉降直接影响轨道的几何形位,进而导致轨面产生几何不平顺,以轨面高低不平顺为主,这种高低不平顺可采用轨面平折角来表示。

根据 TB 10621 - 2014《高速铁路设计规范》和 TB 10001 - 2016《铁路路基设计规范》要求,不均匀沉降造成的轨面平折角不应大于 1/1 000。

另外,耦合系统中的车辆系统考虑了向下重力作用的影响,此时“上坡”形式平折角与“下坡”形式平折角的动力作用分布形态与峰值点的出现位置存在明显差异,如图 1、图 2 所示。因此,两种情况应分别加以考虑。

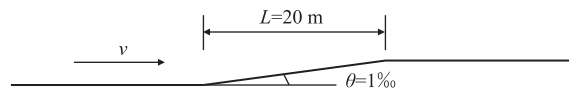


图 1 上坡平折角轨面不平顺示意图

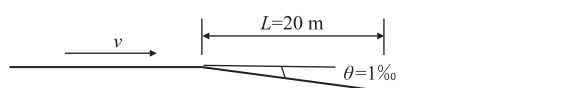


图 2 下坡平折角轨面不平顺示意图

线路纵向不同结构因材料性质与结构特点造成的刚度差异是产生过渡段问题的原因之一。刚度差异的影响主要体现在两个方面,一是在列车荷载长期反复作用下,线路纵向会产生沉降差异,映射至钢轨,产生轨面几何不平顺;二是在列车运行中直接影响车辆 - 轨道 - 路基耦合系统的动力响应。

路基基床结构常采用地基系数 K_{30} 控制,根据 TB 10621 - 2014《高速铁路设计规范》及 TB 10001 - 2016《铁路路基设计规范》中关于高速铁路无砟轨道路基压实控制指标的相关规定,基床表层地基系数

$K_{30} \geq 190$ MPa;基床底层采用粗砾土、碎石类土时,地基系数 $K_{30} \geq 150$ MPa,采用砂类土(粉砂除外)、细砾土时地基系数 $K_{30} \geq 130$ MPa;基床以下路堤采用粗砾土、碎石类土时,地基系数 $K_{30} \geq 130$ MPa,采用砂类土、细砾土时,地基系数 $K_{30} \geq 110$ MPa。一般认为基床结构的弹性模量与地基系数 K_{30} 在数值上大致相当^[7]。

$$E/(\text{MPa}) = K_{30}/(\text{MPa/m}) \tag{1}$$

由此可知,路基结构与混凝土结构在模量相差约两个数量级,即支撑刚度相差约 100 倍。考虑过渡段范围内,路基支撑刚度线性过渡,即当路基向其他结构物过渡时,路基刚度在刚度过渡区间内由 K_f 线性增加至 $100K_f$ (如图 3 所示),而其他结构物向路基过渡时,路基刚度在刚度过渡区间内由 $100K_f$ 线性减小至 K_f (如图 4 所示)。

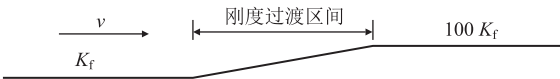


图 3 路基 - 其他结构支撑刚度过渡示意图

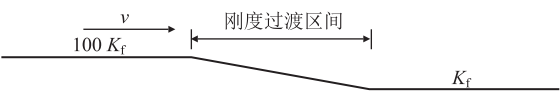


图 4 其他结构 - 路基支撑刚度过渡示意图

过渡段处车辆 - 轨道 - 路基耦合系统动力学响应受到列车运行速度、轨面平折角、路基支撑刚度及行车方向等因素的综合影响,车辆 - 轨道 - 路基耦合动力学计算分析时应充分考虑这些因素。

过渡段长 20 m 时,对列车运行速度 400 km/h 与 350 km/h、轨面平折角考虑 0‰与 1‰、路基相邻结构与路基支撑刚度倍数考虑 1 倍(即路基支撑刚度不变)与 100 倍、列车运行方向考虑“上坡”与“下坡”等工况进行合理组合,共考虑 12 种计算工况,其中工况 1-1 ~ 工况 1-6 为列车运行速度 350 km/h 条件下不同轨面平折角、支撑刚度比与行车方向的组合,工况 2-1 ~ 工况 2-6 为列车运行速度 400 km/h 条件下不同轨面平折角、支撑刚度比与运行方向的组合,如表 1 所示。

表 1 过渡段耦合动力学计算方案表

工况	运行速度 (km/h)	轨面平折角 /‰	支撑刚度比	运行方向
1-1、1-2	350	0	1、100	—
1-3、1-4		1	1	上坡、下坡
1-5、1-6		1	100	上坡、下坡
2-1、2-2	400	0	1、100	—
2-3、2-4		1	1	上坡、下坡
2-5、2-6		1	100	上坡、下坡

注:过渡段长度均取 20 m

2 动力学性能评价指标与仿真结果

2.1 动力学性能评价指标

从车辆运行安全性、车辆运行平稳性、车辆与轨道动态作用性能三方面评价各计算工况下车辆 - 轨道 - 路基耦合系统的动力学性能^[8]。

(1) 安全性评价标准

根据铁运[2008]28 号关于印发《高速动车组整车试验规范》的通知^[9]要求,对于最高运行速度 200 km/h 及以上的电力动车组,其轮重减载率执行标准为:

$$\begin{cases} \Delta P/\bar{P} \leq 0.60 (\text{静态}) \\ \Delta P/\bar{P} \leq 0.65 (\text{准静态}) \\ (\Delta P/\bar{P})_{\text{dyn}} \leq 0.8 (\text{动态}) \end{cases} \tag{2}$$

(2) 车辆运行平稳性评价标准

TG/GW 115 - 2012《高速铁路无砟轨道线路维修规则》^[10]按照不同速度等级及养护维修标准将轨道动态不平顺管理值偏差等级划分为 I ~ IV 级,并对相应的线路轨道动态质量容许偏差管理值进行了规定,对于 350 km/h 的无砟轨道线路,在经常保养水平下(即偏差等级为 I 级),车体垂向加速度的容许偏差管理值为 1 m/s²。

(3) 车辆与轨道动态作用性能评价标准

《高速动车组整车试验规范》规定最高运行速度 200 km/h 以上的电动车组,其轮轨垂向力最大限制值为 170 kN。

2.2 动力学仿真计算结果

对 400 km/h 运行速度条件下不同轨面平折角、不同支撑刚度比与不同行车方向的 6 个工况分别进行耦合动力学仿真分析,重点分析不同工况条件下车体垂向加速度 a_c 、轮轨力 P 及轮重减载率 $\Delta P/\bar{P}$ 的变化特点,同时分析不同因素影响下,上述三项动力学指标的变化规律。

(1) 速度因素影响

相比 350 km/h 运行速度,当列车运行速度提升至 400 km/h 时,大部分工况的车体垂向加速度、轮轨力、轮重减载率等指标均有所增加,表明动力作用增大,如表 2 所示。其中工况 1-1、2-1、1-2、2-2 因未设置轨面平折角,其动力学指标相对其他工况均较小,因此增幅有减小或较大的情况,而在其他工况中,车体垂向加速度增幅为 7.4% ~ 8.6%,轮轨力增幅为 4.9% ~ 5.8%,轮重减载率增幅为 11.1% ~ 12.2%,轮重减载率的增幅最大。

表 2 350 km/h 与 400 km/h 条件下动力学指标增幅表

工况	车体垂向加速度/(m/s ²)			轮轨力/kN			轮重减载率		
	350 km/h	400 km/h	增幅/%	350 km/h	400 km/h	增幅/%	350 km/h	400 km/h	增幅/%
1-1、2-1	-0.009 67	-0.009 71	0.4	71.46	70.02	-2.1	0.009 97	0.009 40	-6.1
1-2、2-2	-0.012 14	-0.012 63	3.9	70.16	70.30	0.2	0.009 37	0.010 43	10.2
1-3、2-3	-0.262 99	-0.283 86	7.4	106.11	111.60	4.9	0.440 46	0.500 00	11.9
1-4、2-4	0.244 65	0.264 69	7.6	103.90	109.37	5.0	0.468 14	0.533 34	12.2
1-5、2-5	-0.265 34	-0.286 99	7.5	106.41	112.16	5.1	0.435 12	0.490 36	11.3
1-6、2-6	0.245 59	0.268 73	8.6	104.27	110.71	5.8	0.461 31	0.519 02	11.1

(2)刚度因素影响

不同路基支撑刚度情况下的动力学指标增幅如表 3所示。

从表 3 可以看出,路基支撑刚度变化对动力学计算指标影响很小,其中工况 1-1、工况 2-1、工况 1-2、工况 2-2因未设置轨面不平顺,其动力学指标相对其他工况均较小,因此增幅有减小或较大的情况,而在其他工况中,车体垂向加速度增幅为 0.4% ~ 1.5% ,轮轨力增幅为 0 ~ 0.5% ,轮重减载率增幅为 - 2.8% ~ - 1.2% ,

车体垂向加速度与轮轨力均增加,轮重减载率减小,轮重减载率的变化幅度最大,但仍未超过 3%。工程中,一般认为 5% 为是否存在影响的界限,因此可认为是否存在长度为 20 m 的刚度由 K_f 线性变为 $100K_f$ 或由 K_f 线性变为 $100K_f$ 的刚度渐变段对垂体垂向加速度、轮轨力、轮重减载率影响均不大。

(3)折角不平顺及列车运行方向因素影响

不同轨面不平顺条件下的动力学指标如表 4 所示。

表 3 路基支撑刚度倍数 k 变化的动力学指标增幅表

工况	车体垂向加速度/(m/s ²)			轮轨力/kN			轮重减载率		
	$k = 1$	$k = 100$	增幅/%	$k = 1$	$k = 100$	增幅/%	$k = 1$	$k = 100$	增幅/%
1-1、1-2	-0.009 67	-0.012 14	20.3	71.46	70.16	-1.9	0.009 97	0.009 37	-6.4
1-3、1-5	-0.262 99	-0.265 34	0.9	106.11	106.41	0.3	0.440 46	0.435 12	-1.2
1-4、1-6	0.244 65	0.245 59	0.4	103.9	104.27	0.4	0.468 14	0.461 31	-1.5
2-1、2-2	-0.009 71	-0.012 63	23.1	70.02	70.30	0.4	0.009 40	0.010 43	9.9
2-3、2-5	-0.283 86	-0.286 99	1.1	111.60	112.16	0.5	0.500 0	0.490 36	-2.0
2-4、2-6	0.264 69	0.268 73	1.5	109.37	109.37	0.0	0.533 34	0.519 02	-2.8

表 4 不同轨面不平顺条件下的动力学指标表

工况编号	车体垂向加速度/(m/s ²)			轮轨力/kN			轮重减载率		
	未设置	1‰上坡	1‰下坡	未设置	1‰上坡	1‰下坡	未设置	1‰上坡	1‰下坡
1-1、1-3、1-4	-0.009 67	-0.262 99	0.244 65	71.46	106.11	103.90	0.009 97	0.440 46	0.468 14
1-2、1-5、1-6	-0.012 14	-0.265 34	0.245 59	70.16	106.41	104.27	0.009 37	0.435 12	0.461 31
2-1、2-3、2-4	-0.009 71	-0.283 86	0.264 69	70.02	111.60	109.37	0.009 40	0.500 00	0.533 34
2-2、2-5、2-6	-0.012 63	-0.286 99	0.267 3	70.30	112.16	109.37	0.010 43	0.490 36	0.519 02

从表 4 可以看出,是否设置轨面折角不平顺对系统的动力学性能影响显著,折角不平顺设置为上坡型或下坡型对动力响应也有影响,但影响程度不及是否设置轨面折角不平顺明显。未设置轨面不平顺的车体垂向加速度约为 0.01 m/s²,设置 1‰上坡平折角不平顺的车体垂向加速度在 0.26 ~ 0.28 m/s² 之间,较设置 1‰下坡平折角不平顺的车体垂向加速度(在 0.24 ~ 0.26 m/s² 之间)大,两者相差约 0.02 m/s²,约为 8.2%。未设置轨面不平顺的轮轨力约为 70 kN,设置 1‰上坡平折角不平顺的轮轨力在 106 ~ 112 kN 之

间,较设置 1‰下坡平折角不平顺的轮轨力(在 103 ~ 109 之间)大,两者相差约 2 kN,约为 1.9%。未设置轨面不平顺的轮重减载率约为 0.01,设置 1‰上坡平折角不平顺的轮重减载率在 0.43 ~ 0.50 之间,较设置 1‰下坡平折角不平顺的轮重减载率小,两者相差约 0.03,约为 6.9%。

2.3 动力学性能对比评价

当列车运行速度由 350 km/h 提升至 400 km/h 时,三项动力学指标均增大,但都未超过限制值,现有路基过渡段结构在 400 km/h 条件下仍具有适应性。

在车体垂向加速度、轮轨力、轮重减载率三项控制指标中,轮重减载率最接近控制值,其次是轮轨力,车体垂向加速度远小于控制值,如表 5 所示。

表 5 不同时速条件下动力学评价指标对照表

项目	350 km/h		400 km/h		控制值
	评价值	限值比	评价值	限值比	
垂向加速度/(m/s ²)	-0.265	27%	-0.287	29%	1
轮轨力/kN	106.41	63%	112.16	66%	170
轮重减载率	0.468	72%	0.533	82%	0.65

3 结论

本文针对现行路基过渡段设计标准在 400 km/h 条件下的适应性问题,开展了动力学仿真分析,得出以下主要结论:

(1)过渡段支撑刚度变化对过渡段动力学性能影响不大;轨面不平顺对过渡段动力学性能影响显著。在设计施工过程中,当过渡段差异沉降不能满足轨面平折角控制指标要求时,应采取必要的工程措施以确保列车安全、平稳通过。

(2)当列车运行速度由 350 km/h 提升至 400 km/h时,三项动力学指标均增大,但均未超过限值,现有路基过渡段结构在 400 km/h 条件下仍具有适应性。在车体垂向加速度、轮轨力、轮重减载率三项控制指标中,轮重减载率最接近控制值,其次是轮轨力,车体垂向加速度远小于控制值。

(3)短路基平顺过渡是目前铁路路基设计与施工面临的重点问题,后续还应进一步开展短路基过渡段的研究。

参考文献:

[1] 梁成谷. 聚焦中国铁路大提速[J]. 中国铁路, 2007(4): 35 - 38.
LIANG Chenggu. Focusing on China's Railway Speed Increase [J]. Chinese Railways, 2007(4): 35 - 38.
[2] 渡边清一, 彭惠民. 日本新干线高速化技术的前景与技术课题 [J]. 中国铁路, 2005(6): 62 - 64.

DU Bianqingyi, PENG Huimin. Prospects and Technical Topics of High-speed Technology for Shinkansen in Japan [J]. Chinese Railways, 2005(6): 62 - 64.
[3] 翟婉明. 车辆-轨道耦合动力学[M]. 3 版. 北京: 科学出版社, 2007.
ZHAI Wanming. Vehicle-Track Coupling Dynamics [M]. Beijing: Science Press, 2007.
[4] 任娟娟, 赵华卫, 李潇, 等. 减振 CRTS III 型板式无砟轨道路隧过渡段动力分析[J]. 西南交通大学学报, 2016, 51(6): 1047 - 1054.
REN Juanjuan, ZHAO Huawei, LI Xiao, et al. Dynamic Performances of CRTS III Prefabricated Slab Track with Anti-Vibration Structure in Subgrade-Tunnel Transition Section [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2016, 51(6): 1047 - 1054.
[5] TB 10621 - 2014 高速铁路设计规范[S].
TB 10621 - 2014 Code for Design of High Speed Railway [S].
[6] TB 10001 - 2016 铁路路基设计规范[S].
TB 10001 - 2016 Code for Design of Railway Earth Structure [S].
[7] 朱浩波, 曲宏略, 张顶立. 高速铁路路基质量检测指标 K₃₀、E_{v2}、E_{vd}的相关性分析[J]. 北京交通大学学报, 2011, 35(1): 49 - 53.
ZHU Haobo, QU Honglue, ZHANG Dingli. Correlation Analysis of Quality Testing Indexes K₃₀, E_{v2}, E_{vd} of High Speed Railway Roadbed[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2011, 35(1): 49 - 53.
[8] 高芒芒, 郑晓龙, 杨飞. 30t 轴重重载铁路路桥过渡段动力性能研究[J]. 高速铁路技术, 2016, 7(5): 71 - 74.
GAO Mangmang, ZHENG Xiaolong, YANG Fei. Dynamic Performance Study of Track-Bridge Transition Section for 30 t Axle Load Heavy Haul Railway [J]. High Speed Railway Technology, 2016, 7(5): 71 - 74.
[9] 铁运[2008]28 号,关于印发《高速动车组整车试验规范》的通知 [S].
TIE Yun[2008] No. 28, Notice on Issuing the Specifications for Complete Vehicle Test of High-speed Electric Multiple-units[S].
[10] TG/GW 115 - 2012 高速铁路无砟轨道线路维修规则(试行) [S].
TG/GW 115 - 2012 Maintenance Rules for Ballastless Track of High Speed Railway (Trial) [S].