

DOI:10.11918/201905041

# 高速铁路双块式无砟轨道车辆荷载动态传递特征

张鲁顺<sup>1,3</sup>, 赵国堂<sup>1,2</sup>

(1.北京交通大学 土木建筑工程学院,北京 100044;2.中国国家铁路集团有限公司,北京 100844;  
3.中铁工程设计咨询集团有限公司,北京 100020)

**摘要:**为研究车辆荷载在无砟轨道中的传递特征,建立车辆-双块式无砟轨道耦合动力学模型,对车辆荷载在无砟轨道主体结构内的动应力和振动加速度传递规律进行研究,并对行车速度、结构尺寸及层间接触状态等影响因素进行分析.结果表明:车辆荷载的主承载区分布在道床板内,垂向动应力峰值在0.1 m深度之内衰减73%;车辆荷载的主振动区主要分布在道床板内并传递至支承层,垂向加速度峰值在0.1 m深度之内衰减89%;轨道结构动态受力及振动响应均随行车速度的增加而增大;适当减少轨道结构宽度,对其受力和振动特性影响较小.无砟轨道结构层间插入隔离层,可减小轮轨动力响应及轨道结构动态受力,但结构层间垂向加速度明显增大,插入弹性层,可减小钢轨垂向加速度,但对轮轨动力响应、道床板和支承层动态受力及振动特性影响较小.所得结论可为无砟轨道设计和优化提供理论参考.

**关键词:**高速铁路;双块式无砟轨道;荷载动态传递;结构尺寸优化;层间接触状态

中图分类号:U213.2

文献标志码:A

文章编号:0367-6234(2020)09-0008-09

## Dynamic transfer characteristics of vehicle load on double-block ballastless track of high-speed railway

ZHANG Lushun<sup>1,3</sup>, ZHAO Guotang<sup>1,2</sup>

(1.School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 2. China State Railway Group Co., Ltd., Beijing 100844, China; 3. Railway Engineering Consulting Group Co., Ltd., Beijing 100020, China)

**Abstract:** To study the transfer characteristics of vehicle load on ballastless track, a vehicle-double-block ballastless track coupling dynamic model was established. The transfer law of dynamic stress and vibration acceleration of vehicle load in the ballastless track was investigated, and the influencing factors were analyzed, such as driving speed, structural size, and interlayer contact state. Results show that the main load-bearing area of the vehicle load was distributed in the bed slab, and the peak value of vertical dynamic stress was attenuated by 73% within the depth of 0.1 m. The main vibration area of the vehicle load was mainly distributed in the bed slab and transmitted to the supporting layer, and the peak value of vertical acceleration was attenuated by 89% within the depth of 0.1 m. The dynamic force and vibration response of the track structure both increased with increasing driving speed. When the width of the track structure was appropriately reduced, the force and vibration characteristics were less affected. By inserting the isolation layer between the structural layers, the dynamic response of the wheel-rail and the dynamic force of the track structure were reduced, but the vertical acceleration between the structural layers was obviously increased. Inserting the elastic layer could reduce the vertical acceleration of the rail, but the dynamic response of the wheel-rail and the stress and vibration characteristics of the bed slab and supporting layer were less affected. The results can provide theoretical reference for the design and optimization of ballastless track.

**Keywords:** high-speed railway; double-block ballastless track; dynamic load transfer; structural size optimization; interlayer contact state

随着复兴号动车组上线以及高铁运营时速恢复350 km,高速密集地车辆运行对无砟轨道的动力性能提出了新的要求,既要确保行车安全性和舒适性,又要保证无砟轨道结构的耐久性、经济性和适用性。

因此,对于高速铁路无砟轨道车辆荷载动态传递规律的研究,可以为无砟轨道结构设计及优化提供理论参考。

高速铁路无砟轨道动力学理论的研究,目前大多采用车辆-轨道耦合动力学模型,建立车辆和轨道各部分动力学方程,通过数值积分得到车辆-轨道动力学各响应指标<sup>[1]</sup>,该理论广泛应用于无砟轨道设计中,例如无砟轨道过渡段设计、轮重设计、无砟轨道合理刚度的确定、路基不均匀沉降限值的确

收稿日期:2019-05-08

基金项目:中国铁路总公司科技研究开发计划(2015G001-J)

作者简介:张鲁顺(1989—),男,博士研究生;

赵国堂(1964—),男,研究员,博士生导师

通信作者:赵国堂,jhzhao2011@qq.com

定和无砟轨道结构伤损行为等. 无砟轨道振动特性传递研究方面,在随机不平顺激励下,无砟轨道结构振动加速度自上而下递减<sup>[2]</sup>,并得到轨道振动特性传递函数和轨道临界速度<sup>[3]</sup>,通过分析不同扣件刚度,轨道板弹模、CA 砂浆刚度阻尼、底座板弹模及地基弹性系数等无砟轨道垂向动力特性影响因素<sup>[4-5]</sup>,得到各项参数的合理范围. 无砟轨道动应力传递的研究,大多集中在路基动应力分布及砂浆层动应力测试方面<sup>[6-8]</sup>,针对无砟轨道主体结构动应力的研究,主要在轨下、轨道板中心等特殊位置处的动应力时程变化规律,对轨道结构动应力和振动特性整体分布情况研究较少.

为得到车辆荷载在无砟轨道中精准的动力传递分布规律,本文选择结构层次简单的双块式无砟轨道,建立了车辆-双块式无砟轨道耦合动力学模型,对车辆荷载在无砟轨道主体结构内的动应力传递规律和振动特性传递规律进行研究,并对轨道结构尺寸优化及层间接触状态对轮轨动力响应的影响进行分析.

## 1 车辆荷载动态传递模型

### 1.1 计算模型及参数

轮轨系统动力学计算模型,如图1所示,模型采用空间精细化分析方法,模型边界条件及计算参数接近实际运营工况. 双块式无砟轨道为纵向连续配筋混凝土结构,模型纵向长度为100 m,由钢轨、扣件、道床板、支承层等组成. 道床板采用C40混凝土现场浇注,支承层为HGT水硬性材料,相关参数见表1. 道床板与支承层间采用共用节点接触,支承层和基床间设置为可分离接触,切向摩擦系数为0.5,路基垂向刚度取76 MPa/m. 钢轨、道床板和支承层均采用空间实体单元模拟,扣件采用三向弹簧-阻尼单元模拟.

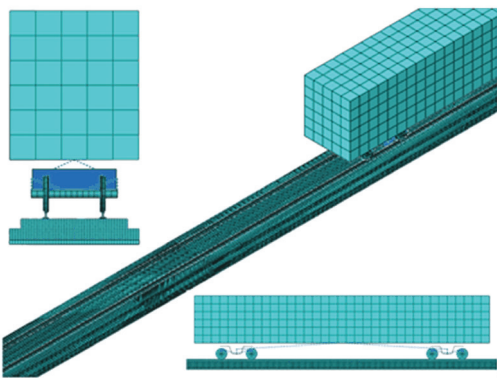


图1 轮轨系统动力学计算模型

Fig.1 Dynamic calculation model of wheel-rail system

表1 轨道模型中的基本参数

Tab.1 Basic parameters in the track model

部件	参数	数值
钢轨	弹性模量	210 GPa
	密度	7 800 kg · m <sup>-3</sup>
	泊松比	0.3
扣件	垂向动刚度	50 kN · mm <sup>-1</sup>
	横向动刚度	45 kN · mm <sup>-1</sup>
	间距	650 mm
道床板	弹性模量	32.5 GPa
	密度	2 500 kg · m <sup>-3</sup>
	泊松比	0.167
支承层	宽度×厚度	2 800 mm×260 mm
	弹性模量	15 GPa
	密度	2 500 kg · m <sup>-3</sup>
	泊松比	0.167
	宽度×厚度	3 400 mm×300 mm

车辆模型采用中国高速铁路 CRH380A 统型动车组,定距为2.5 m,轴距为17.5 m,轴重取15 t. 车辆按刚体考虑由车体、转向架和轮对及两系悬挂构成,根据车辆的振动特性,考虑车体和两个转向架的浮沉、侧滚、点头、横移和摇头运动,考虑轮对的浮沉、侧滚、横移和摇头运动<sup>[1]</sup>. 轮轨间法向作用力由赫兹非线性弹性接触理论确定,切向蠕滑力由蠕滑理论确定. CRH380A 统型车辆力学参数见表2.

表2 CRH380A 统型车辆力学参数

Tab.2 Mechanical parameters of CRH380A EMU

部件	参数	数值
车体	质量	37.48 t
	侧滚转动惯量	121 400 kg · m <sup>2</sup>
	点头转动惯量	1 836 500 kg · m <sup>2</sup>
	摇头转动惯量	1 733 100 kg · m <sup>2</sup>
转向架	质量	3.3 t
	侧滚转动惯量	2 673 kg · m <sup>2</sup>
	点头转动惯量	1 807 kg · m <sup>2</sup>
	摇头转动惯量	3 300 kg · m <sup>2</sup>
轮对	质量	1.78 t
	侧滚转动惯量	949 kg · m <sup>2</sup>
	点头转动惯量	118 kg · m <sup>2</sup>
	摇头转动惯量	967 kg · m <sup>2</sup>
一系悬挂	每轴箱纵向刚度	980 kN · m <sup>-1</sup>
	每轴箱横向刚度	980 kN · m <sup>-1</sup>
	每轴箱垂向刚度	1 176 kN · m <sup>-1</sup>
	每轴箱垂向阻尼	9.8 kN · s · m <sup>-1</sup>
二系悬挂	每簧纵向刚度	169 kN · m <sup>-1</sup>
	每簧横向刚度	169 kN · m <sup>-1</sup>
	每簧垂向刚度	183 kN · m <sup>-1</sup>
	横向阻尼	39.2 kN · s · m <sup>-1</sup>
	垂向阻尼	18.9 kN · s · m <sup>-1</sup>

轨道不平顺选用《高速铁路无砟轨道不平顺谱》<sup>[9]</sup>推荐的随机不平顺作为轮轨系统的激励,生成已包含波长为2~200 m的不平顺序列,如图2所

示,通过改变钢轨节点横向和垂向位置,反映无砟轨道不平顺.

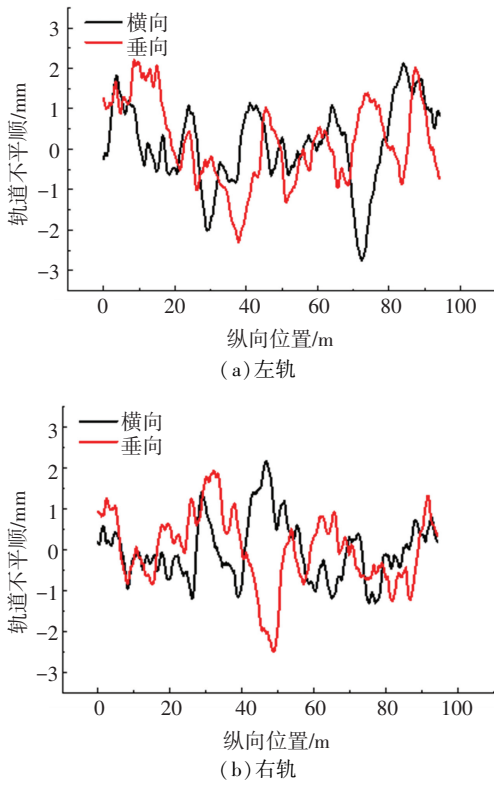


图 2 左右轨随机不平顺

Fig.2 Random irregularities of left and right rails

### 1.2 模型合理性验证

将车辆荷载动态传递分析模型理论计算结果与武汉综合试验段无砟轨道系统实车试验结果<sup>[10]</sup>对比见表 3. 表中实车试验结果为不同车速下测得的最大值汇总,理论计算结果为各项响应指标的最大值. 可见理论计算结果与实车试验结果各个指标范围差别不大,验证了动力学模型的合理性.

表 3 动力学模型验证

Tab.3 Verification of the dynamic model

轮轨动力响应	理论计算结果	实车试验结果
脱轨系数	0.085	0.05~0.39
轮重减载率	0.405	0.08~0.45
轮轴横向力	3.1 kN	0.1~25.7 kN
轮轨横向力	7.1 kN	5.3~20.9 kN
轮轨垂向力	114 kN	62.3~99.9 kN

## 2 轮轨系统动力响应分析

为研究轮轨系统动力响应,选取行车速度分别为 250、300、350 km/h 的计算结果进行分析. 车辆各动力响应指标峰值随行车速度变化规律如图 3 所示,可以看出,车辆动力响应指标峰值均随车速的增加而增大,车速由 250 km/h 增加到 350 km/h 轮重减载率、轮轴横向力及轮轨横向力分别增加 56%、82%和 42%,受速度影响较大. 3 种车速下轮轨垂向

力动力系数分别为 1.23、1.25 和 1.52,300 km/h 以上时动力系数增加明显,车体横向、垂向振动加速度增量较小. 由轨道不平顺激励产生的各项动力响应指标均处于规范<sup>[11-13]</sup>规定的限值内,满足行车安全性和舒适性的要求,并与限值有较大的差距,因此,行车速度对轮轨动力响应有一定的影响,车速 350 km/h 以内时对其影响不大.

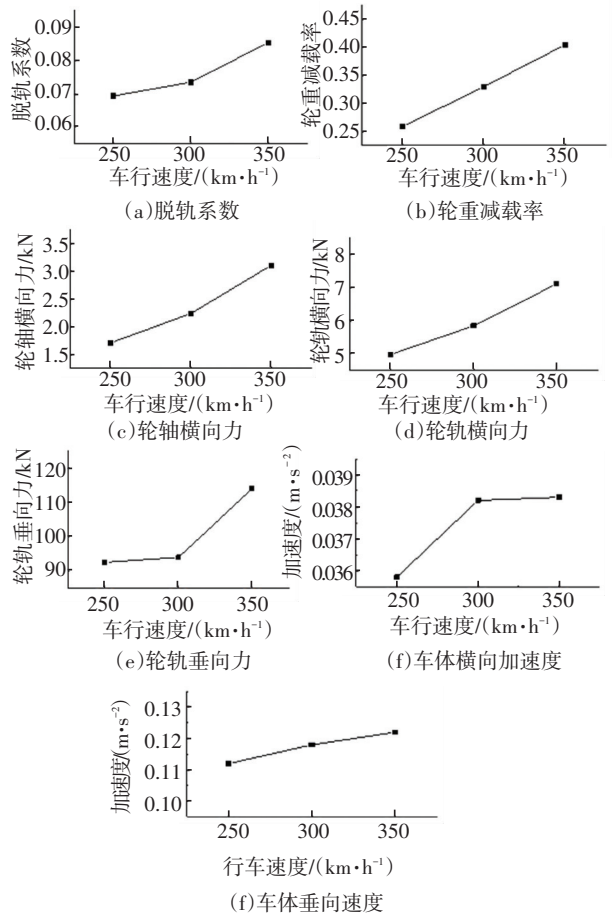


图 3 车辆动力响应指标峰值随行车速度变化规律

Fig.3 Variation of peak values of vehicle dynamic response indexes with driving speed

## 3 轨道结构动力响应分析

### 3.1 轨道结构动态受力分析

车辆通过时无砟轨道垂向动应力峰值纵横向分布图,如图 4 所示. 承轨台荷载集中处垂向压应力峰值达到 3 MPa 左右,取其 10%,即垂向动应力峰值大于 0.3 MPa 的区域,作为车辆动态荷载传递的主承载区. 由于轨道不平顺不同位置处的激励大小不同,纵向上不同位置处承轨台下主承载区分布范围有所差异,横向分布为 0.4 m 左右,纵向分布为 0.3 m 左右,深度分布为 0.1~0.2 m. 因此,主承载区主要分布在道床板内,且纵横向分布范围受轨道不平顺影响较小,深度分布范围影响较大.

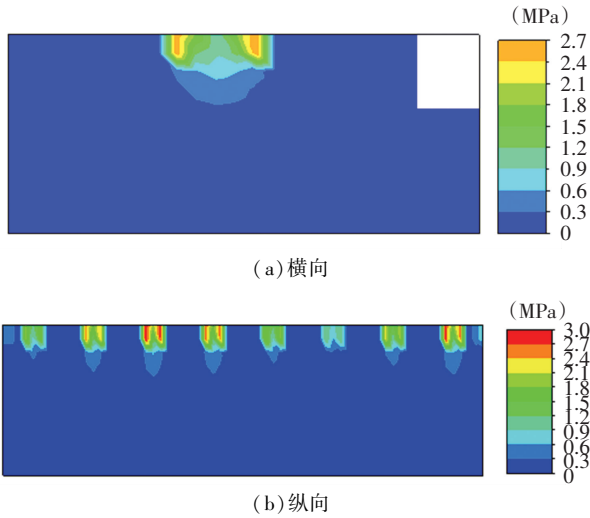


图4 无砟轨道垂向动应力峰值分布图

Fig.4 Peak value distribution of vertical dynamic stress of ballastless track

无砟轨道各结构层垂向动应力峰值分布规律,如图5所示,横向位置0 m处为轨道结构横向中心处.道床板顶部由于弹簧扣件荷载集中中出现双峰值,继续往下传递荷载集中影响减弱.荷载沿无砟轨道深度方向传递,自上而下影响范围逐渐扩大.承轨台下道床板顶部应力峰值明显;传递至道床板底部时,道床板底部外侧与支承层尺寸差异,横向边界处应力峰值略微增大;传递至支承层底部时应力峰值与承轨台范围外的应力峰值差异较小,其荷载分布已较为均匀.同时可以看出,车辆荷载下无砟轨道横向两钢轨间应力叠加影响不明显,纵向相邻扣件间传递至道床板底部时有0.04 MPa左右的叠加.

无砟轨道垂向动应力峰值随深度变化规律,如图6所示.垂向压应力峰值随深度的增加指数衰减,在距道床板表面深度0.1 m之内衰减73%,此深度范围设置强度及承载能力更大的轨枕块,提高轨道结构整体承载性能;在0.1~0.2 m之间衰减17%;在0.2~0.3 m之间衰减6%,衰减量随深度的增加而减小.荷载传递至0.3 m以下时动应力峰值逐步稳定.

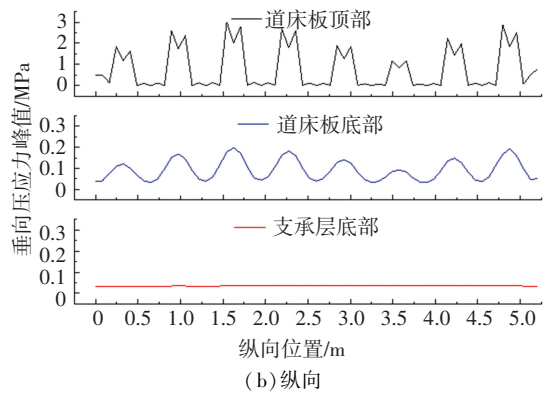
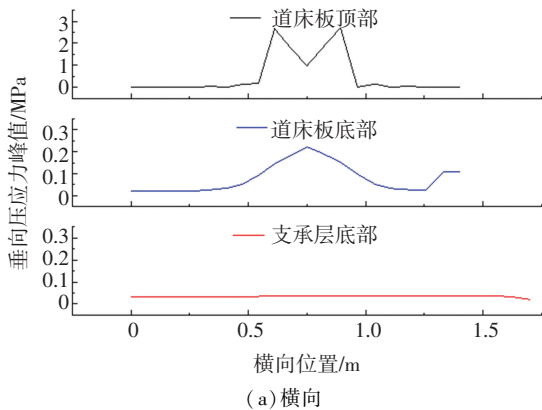


图5 无砟轨道各结构层垂向动应力峰值分布规律  
Fig.5 Peak value distribution of vertical dynamic stress of each structural layer in ballastless track

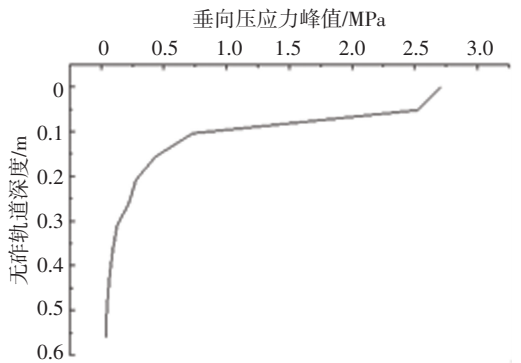


图6 无砟轨道垂向动应力峰值随深度变化规律  
Fig.6 Variation of peak values of vertical dynamic stress of ballastless track with depth

### 3.2 轨道结构振动特性分析

无砟轨道垂向加速度峰值分布图,如图7所示,根据《高速铁路工程动态验收技术规范》(TB 10716—2013)<sup>[14]</sup>规定,道床板振动加速度限值为300 m/s<sup>2</sup>,承轨台荷载集中处垂向加速度峰值达到1 400 m/s<sup>2</sup>,垂向加速度大于300 m/s<sup>2</sup>的深度范围为0.036~0.086 m,除去轨枕块设置范围以外,道床板内垂向加速度峰值均未达到限值.另取道床板垂向加速度限值的10%,即垂向加速度峰值大于30 m/s<sup>2</sup>的区域作为车辆振动传递的主振动区.可以看出,主振动区范围主要包括承轨台以下轨道结构上部区域、承轨台下支承层与基床交界处.主振动区深度范围为0.2~0.4 m,主要分布在道床板内,并传递至支承层.

无砟轨道各结构层垂向加速度峰值分布规律,如图8所示,道床板顶部垂向加速度峰值明显,纵横向两承轨台间叠加效果不明显;道床板底部垂向加速度峰值明显降低,加速度峰值与承轨台范围外波动幅值较小,横向两轨间及纵向两扣件间有叠加;支承层底部由于与路基面交界处的接触状态,其垂向加速度峰值变化规律及加速度值与道床板底部相

似,外侧边界处垂向加速度增大.纵向上由于轨道不平顺激励,道床板顶部、道床板底部和支承层底部垂向加速度峰值变化范围分别为 590~1 389、26~35、21~34  $m/s^2$ .

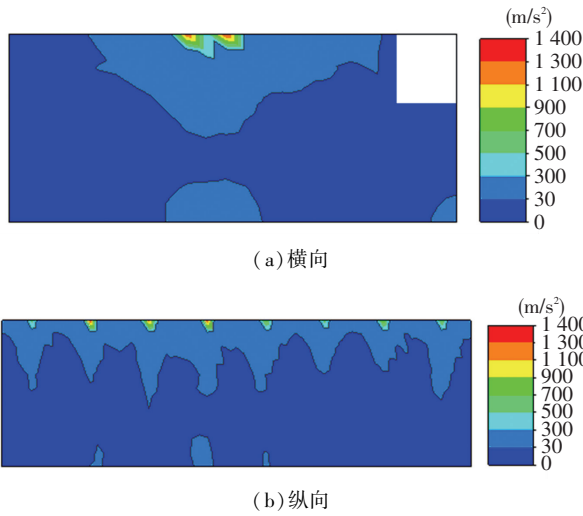


图 7 无砟轨道垂向加速度峰值分布图

Fig. 7 Peak value distribution of vertical acceleration of ballastless track

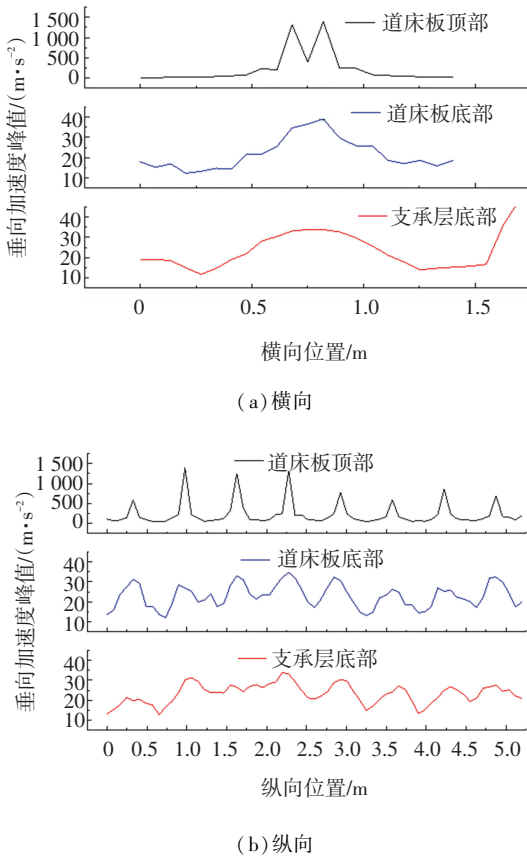


图 8 无砟轨道各结构层垂向加速度峰值分布规律

Fig. 8 Peak value distribution of vertical acceleration of each structural layer in ballastless track

无砟轨道垂向加速度峰值随深度变化规律,如图 9 所示,可以看出,垂向加速度峰值随深度的增加

指数衰减.在距道床板表面深度 0.1 m 之内衰减 89%,在 0.1~0.2 m 之间衰减 8%;在 0.2~0.3 m 之间衰减 1%,衰减量随深度的增加而减小,荷载传递至 0.3 m 以下时垂向加速度峰值逐步稳定.在道床板 0.13 m 左右设置枕块,可有效降低道床板实际垂向加速度.

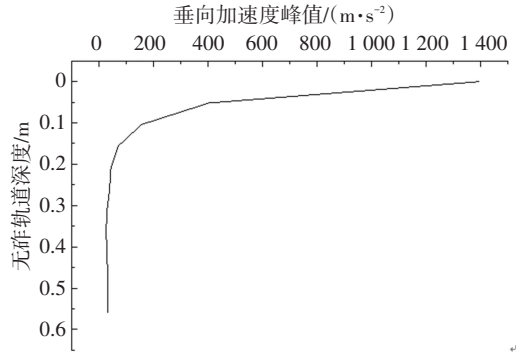


图 9 无砟轨道垂向加速度峰值随深度变化规律

Fig. 9 Variation of peak values of vertical acceleration of ballastless track with depth

### 3.3 行车速度的影响

为研究行车速度对轨道结构动态受力及振动特性的影响规律,选取车速分别为 250、300、350 km/h 的计算结果进行分析.钢轨轨下单元沿线路纵向取其纵向拉应力峰值,钢轨轨面单元沿线路纵向取其垂向加速度峰值.钢轨动弯应力峰值及钢轨轨面垂向加速度峰值随行车速度变化规律分别如图 10、11 所示.可以看出,钢轨动弯应力峰值及钢轨垂向加速度峰值均随行车速度的增加而显著增大.车速为 300 km/h 和 350 km/h 较 250 km/h 时钢轨动弯应力分别增加 5% 和 17%;钢轨垂向加速度分别增加 27% 和 57%.其中,车速为 350 km/h 时,钢轨垂向加速度峰值为 4 688  $m/s^2$ ,较为接近《高速铁路工程动态验收技术规范》(TB 10716—2013)<sup>[14]</sup>规定的钢轨振动加速度限值 5 000  $m/s^2$ ,随着行车速度的继续增加,可能超过此限值.

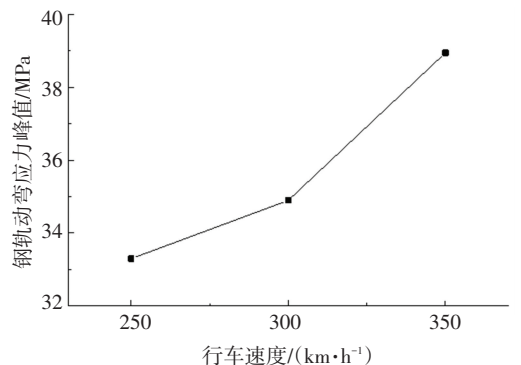


图 10 钢轨动弯应力峰值随行车速度变化规律

Fig. 10 Variation of peak values of dynamic bending stress of rail with driving speed

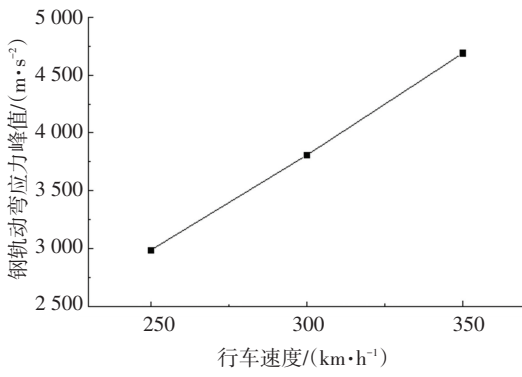


图 11 钢轨轨面垂向加速度峰值随行车速度变化规律

Fig.11 Variation of peak values of vertical acceleration of rail surface with driving speed

无砟轨道各结构层垂向动应力峰值随行车速度变化规律如图 12 所示,可以看出,各层垂向动应力峰值均随行车速度的增加而增大,车速为 250~350 km/h 时道床板顶部、底部和支承层底部垂向动应力峰值变化范围分别为 210、27、4 kPa,因此,道床板顶部垂向动应力峰值受车速影响较大,随着荷载向轨道深度方向传递,其影响逐渐减弱。道床板垂向压应力限值为 27 MPa,行车荷载产生的垂向应力仅为限值的 10% 左右,可见,行车荷载本身不会对轨道结构产生垂向破坏。

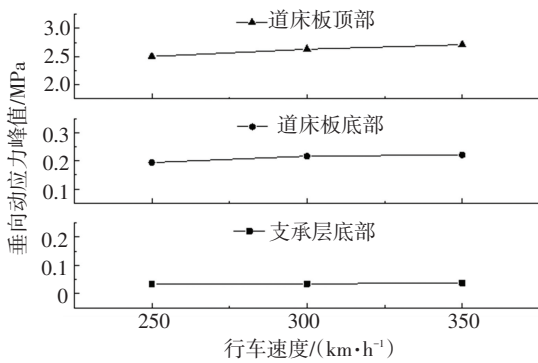


图 12 无砟轨道各层垂向动应力峰值随行车速度变化规律

Fig.12 Variation of peak values of vertical dynamic stress of each structural layer in ballastless track with driving speed

无砟轨道各结构层垂向加速度峰值随行车速度变化规律,如图 13 所示,可以看出,各层垂向加速度峰值随行车速度的增加而增大,其中道床板顶部垂向加速度峰值增加最为显著,车速为 300 km/h 和 350 km/h 较 250 km/h 时分别增加 529 m/s<sup>2</sup> 和 619 m/s<sup>2</sup>,道床板底部和支承层底部增加较为平稳。

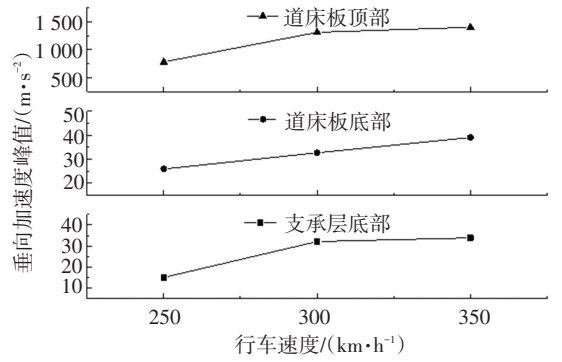


图 13 无砟轨道各层垂向加速度峰值随行车速度变化规律

Fig.13 Variation of peak values of vertical acceleration of each structural layer in ballastless track with driving speed

### 4 结构尺寸对车辆荷载动态传递规律的影响

车辆荷载静力学传递规律的研究中得出,轮载在无砟轨道结构中的传递分为两部分,道床板内为荷载扩展区,支承层内为荷载均化区。荷载扩展区横向影响范围为道床板宽度的 50% 左右,荷载均化区随下部基础刚度的增加,横向分布范围逐渐减小,当下部基础为隧道时,横向影响范围为支承层宽度的 90% 左右。另外,本文图 4 也可以看出荷载主承载区横向分布范围不到道床板宽度的 30%。因此,从轨道结构受力的角度来看,可以适当优化轨道结构宽度来提高无砟轨道的合理性和经济性。为研究无砟轨道结构宽度优化对轨道结构动力学特性的影响,选取下部基础结构为隧道,行车速度为 350 km/h,计算工况分别为:工况一,标准尺寸;工况二,道床板宽度减少 75 mm;工况三,道床板宽度减少 150 mm;工况四,支承层宽度减少 72 mm;工况五,支承层宽度减少 144 mm。

图 14 为车辆动力响应指标峰值随结构宽度变化规律,可以看出,适当减小道床板宽度,对车辆动力响应各指标影响较小。减小支承层宽度,轮轴横向力和轮轨受力降低,而脱轨系数、轮重减载率和车体振动加速度增大。

图 15、16 分别为钢轨动弯应力峰值和钢轨垂向加速度峰值随结构宽度变化规律,可以看出,工况二道床板宽度减少 75 mm 时,钢轨动弯应力峰值和垂向加速度峰值最小,分别较标准结构尺寸减少 1 MPa 和 613 m/s<sup>2</sup>,其他工况数值变化不大。因此,适度减小结构宽度对钢轨受力及振动影响不大,且适当减少道床板宽度还有利于减少钢轨受力和振动。

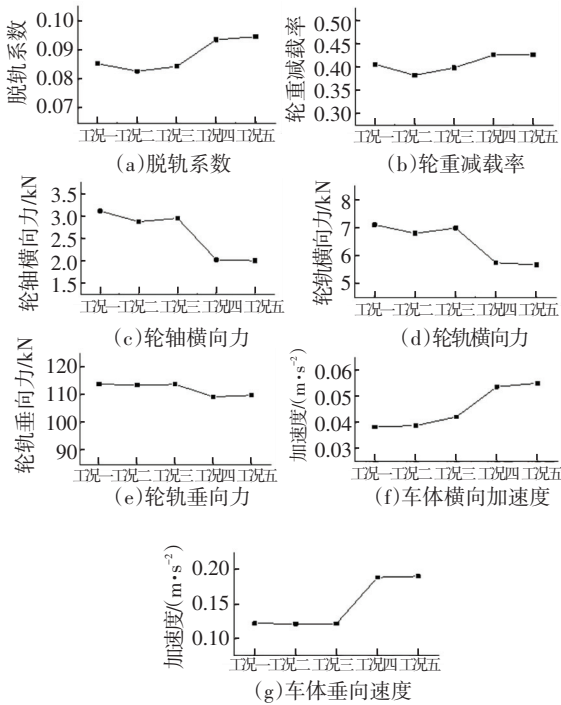


图 14 车辆动力响应指标峰值随结构宽度变化规律

Fig.14 Variation of peak values of vehicle dynamic response indexes with structural width

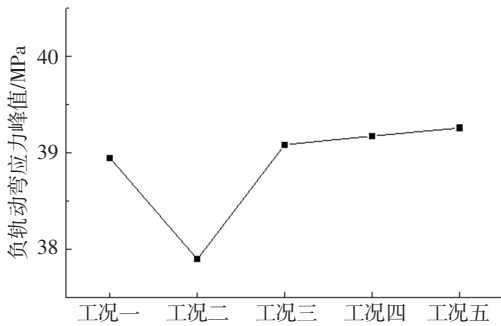


图 15 钢轨动弯应力峰值随结构宽度变化规律

Fig.15 Variation of peak values of dynamic bending stress of rail with structural width

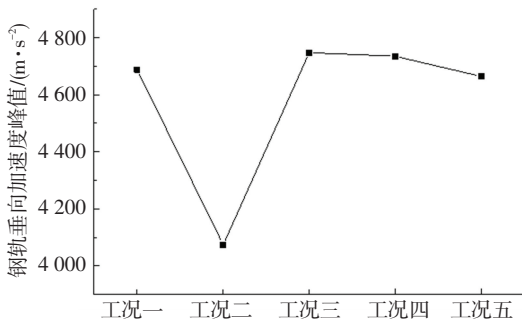


图 16 钢轨垂向加速度峰值随结构宽度变化规律

Fig.16 Variation of peak values of vertical acceleration of rail with structural width

图 17 为无砟轨道各层垂向动应力峰值随结构宽度变化规律,可以看出,道床板宽度减少,各层垂向动应力峰值减小,支承层宽度减少,垂向动应力峰值增大,但量值变化较小。

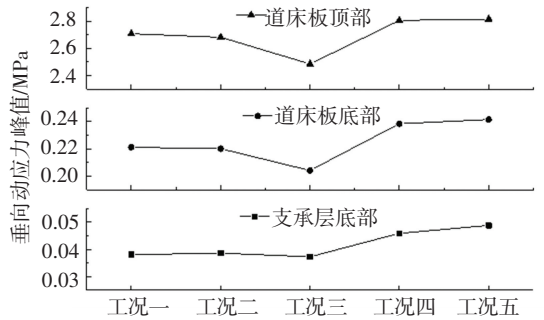


图 17 无砟轨道各层垂向动应力峰值随结构宽度变化规律  
Fig.17 Variation of peak values of vertical dynamic stress of each structural layer in ballastless track with structural width

图 18 为无砟轨道各层垂向加速度峰值随结构宽度变化规律,可以看出,道床板、支承层宽度减少,垂向加速度峰值减小,支承层宽度减少时,垂向加速度峰值变化更为显著. 因此,适当减少结构宽度对无砟轨道各层受力及振动特性影响不大。

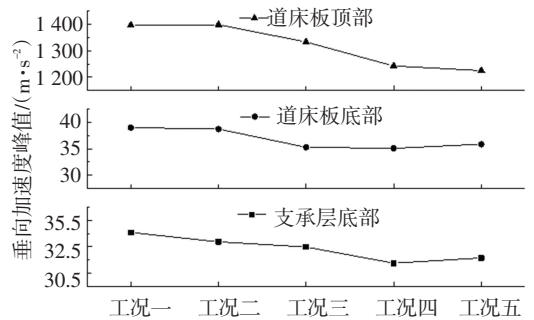


图 18 无砟轨道各层垂向加速度峰值随结构宽度变化规律  
Fig.18 Variation of peak values of vertical acceleration of each structural layer in ballastless track with structural width

### 5 层间接触状态对车辆荷载动态传递规律的影响

车辆荷载静力学传递规律的研究中得出,轨道结构层间插入隔离层或弹性层对荷载传递的路径及分布范围都有较大的影响,弹性层主要起缓冲动荷载作用,隔离层主要起隔离变形作用. 为分析无砟轨道结构层间接触状态对车辆荷载动态传递规律的影响,将层间接触状态分为 3 种工况:工况 A,结构层间不分离共用节点;工况 B,结构层间插入隔离层可分离;工况 C,结构层间插入弹性层. 图 19 为车辆动力响应指标峰值随层间接触状态变化规律,可以看出,插入隔离层后脱轨系数、轮重减载率、轮轴横向力、轮轨横向力和轮轨垂向力等车辆动力响应指标均明显减小,插入弹性层后以上指标略有降低. 插入隔离层后车体振动变化明显,车体横向加速度增大,车体垂向加速度减小. 插入弹性层后车体振动变化不大。

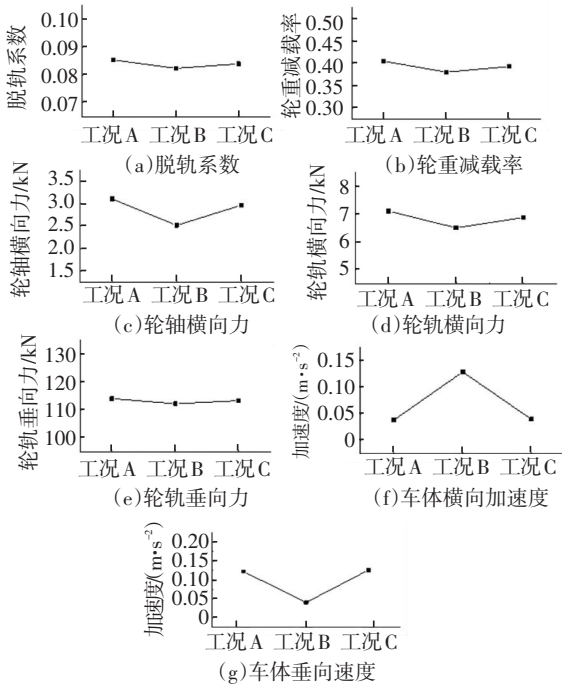


图 19 车辆动力响应指标峰值随层间接触状态变化规律

Fig.19 Variation of peak values of vehicle dynamic response indexes with contact state of interlayer

图 20、21 分别为钢轨动弯应力峰值和钢轨垂向加速度峰值随层间接触状态变化规律,可以看出,插入隔离层和弹性层,钢轨动弯应力峰值和垂向加速度峰值均减小,其中,插入隔离层更有利于减少钢轨动态受力和振动.

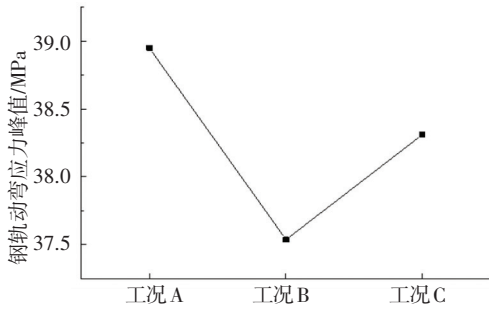


图 20 钢轨动弯应力峰值随层间接触状态变化规律

Fig.20 Variation of peak values of dynamic bending stress of rail with contact state of interlayer

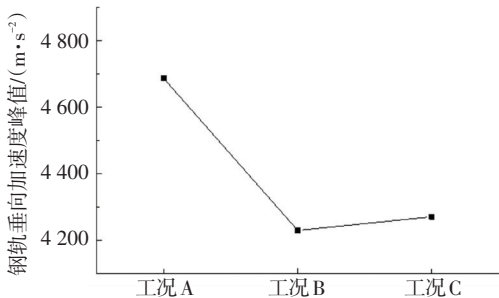


图 21 钢轨垂向加速度峰值随层间接触状态变化规律

Fig.21 Variation of peak values of vertical acceleration of rail with contact state of interlayer

图 22 为无砟轨道各层垂向动应力峰值随层间接触状态变化规律,可以看出,插入隔离层和弹性层对轨道结构受力影响不大,道床板顶、道床板底及支承层底变化分别为 0.114、0.012、0.004 MPa.

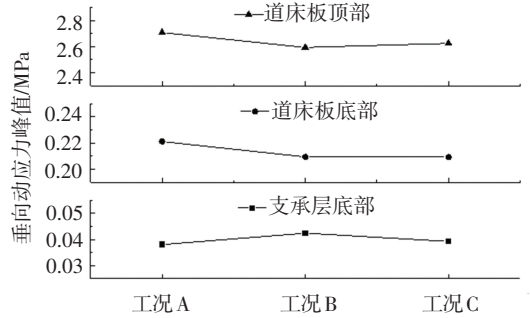


图 22 无砟轨道各层垂向动应力峰值随层间接触状态变化规律

Fig.22 Variation of peak values of vertical dynamic stress of each structural layer in ballastless track with contact state of interlayer

图 23 为无砟轨道各层垂向加速度峰值随层间接触状态变化规律,可以看出,插入隔离层后由于层间可分离,道床板底部垂向加速度峰值明显增大.插入隔离层或弹性层后道床板顶部垂向加速度峰值减小,支承层底部垂向加速度峰值变化范围较小.

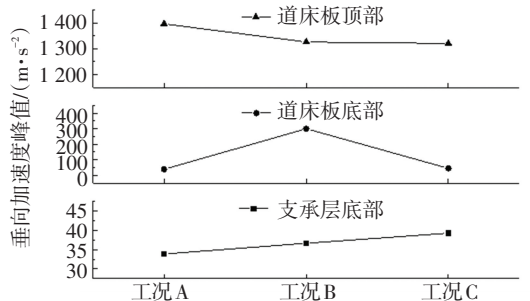


图 23 无砟轨道各层垂向加速度峰值随层间接触状态变化规律

Fig.23 Variation of peak values of vertical acceleration of each structural layer in ballastless track with contact state of interlayer

## 6 结 论

1) 轮轨系统动力响应各项指标随车速度的增加而增大,行车速度不超过 350 km/h 时各项指标均未超过规范规定的限值.

2) 车辆荷载动态传递的主承载区主要分布在道床板内,横向、纵向及深度方向的分布分别在 0.4 m 左右、0.3 m 左右和 0.1~0.2 m 之间.垂向动应力峰值随深度的增加而衰减,在距道床板表面 0.1 m 之内衰减 73%.轨道结构动态受力随车速度的增加而增大.

3) 车辆荷载动态传递的主振动区主要分布在

道床板内并传递至支承层,深度在 0.2~0.4 m 之间.垂向加速度峰值随深度的增加而衰减,在距道床板表面 0.1 m 之内衰减 89%,0.3 m 以下时垂向加速度峰值逐步稳定.轨道结构振动响应随车速度的增加而增大.

4)适当减少轨道主体结构宽度对无砟轨道动态受力及振动特性影响不大,轮轨动力响应指标也远小于限值.其中,适当减少道床板宽度,可减小轨道结构动态受力;适当减少支承层宽度,可减小轨道结构垂向振动.

5)无砟轨道结构层间插入隔离层,可减小轮轨动力响应及轨道结构动态受力,但结构层间垂向加速度明显增大.无砟轨道结构层间插入弹性层,可减小钢轨垂向加速度,对轮轨动力响应、道床板和支承层动态受力及振动特性影响较小.

## 参考文献

- [1] 翟婉明. 车辆-轨道耦合动力学[M]. 4 版. 北京: 科学出版社, 2014  
ZHA I Wanming. Vehicle-track coupling dynamics[M]. 4th ed. Beijing: Science Press, 2014
- [2] 罗震. 高速铁路无砟轨道结构受力及轮轨动力作用分析[D]. 成都: 西南交通大学, 2008  
LUO Zhen. Analysis of structure mechanics and wheel/rail dynamic interaction of ballastless track in high-speed railway[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2008
- [3] 李成辉. 轨道结构振动理论及应用研究[D]. 成都: 西南交通大学, 1996  
LI Chenghui. Vibration theory and application research of track structure[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 1996
- [4] 程俊杰. 土质路基 CRTS I 型板式无砟轨道垂向动力学分析及参数研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2012  
CHENG Junjie. Vertical dynamics analysis and parameter study of CRTS I slab ballastless track on soil formation [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2012
- [5] 田仲初, 李攀. 京沪高速铁路板式无砟轨道竖向振动分析[J]. 长沙理工大学学报, 2011, 8(2): 28  
TIAN Zhongchu, LI Pan. Vertical vibration of ballastless track slab on Beijing-Shanghai high-speed railway[J]. Journal of Changsha University of Science and Technology, 2011, 8(2): 28. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9331.2011.02.006
- [6] 隋孝民, 陆征然. 列车荷载在高速铁路路基中传递规律研究[J]. 铁道工程学报, 2012, 161(2): 25  
SUI Xiaomin, LU Zhengran. Study on transmission laws of train load in subgrade of high-speed railway [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2012, 161(2): 25. DOI: 10.3969/j.issn.1006-2106.2012.02.006
- [7] 刘钢, 罗强, 张良, 等. 列车荷载作用下无砟轨道路基应力特性分析[J]. 铁道学报, 2013, 35(9): 86  
LIU Gang, LUO Qiang, ZHANG Liang, et al. Analysis on the dynamic stress characteristics of the unballasted track subgrade under train loading[J]. Journal of the China Railway Society, 2013, 35(9): 86. DOI: 10.3969/j.issn.1001-8360.2013.09.014
- [8] 相颖慧, 罗强, 魏永幸. 遂渝铁路无砟轨道涵洞附近 CA 砂浆层动应力测试分析[J]. 铁道工程学报, 2008, 117(6): 43  
XIANG Yinghui, LUO Qiang, WEI Yongxing. Test and analysis of the dynamic stress of CA mortar near culvert on the Sui-Yu ballastless track railway [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2008, 117(6): 43. DOI: 10.3969/j.issn.1006-2106.2008.06.011
- [9] 高速铁路无砟轨道不平顺谱: TB/T 3352—2014[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2015  
PSD of ballastless track irregularities of high-speed railway: TB/T 3352—2014[S]. Beijing: China Railway Press, 2015
- [10] 中国铁道科学研究院. 武广客运专线武汉综合试验段综合试验研究报告[R]. 北京: 中国铁道科学研究院, 2009  
China Academy of Railway Sciences. Report of comprehensive test research on Wuhan comprehensive test section of Wuhan-Guangzhou passenger line [R]. Beijing: China Academy of Railway Sciences, 2009
- [11] 铁道车辆动力学性能评定和试验鉴定规范: GB 5599—85[S]. 北京: 中国标准出版社, 1986  
Railway vehicles—Specification for evaluation the dynamic performance and accreditation test: GB 5599—85 [S]. Beijing: China Standard Press, 1986
- [12] 高速试验列车动力学车强度及动力学性能规范: 95J01—L[S]. 北京: 中国标准出版社, 1995  
High-speed test train power car strength and dynamic performance specifications: 95J01—L[S]. Beijing: China Standard Press, 1995
- [13] 高速试验列车客车强度及动力学性能规范: 95J01—M[S]. 北京: 中国标准出版社, 1995  
High-speed test train passenger car strength and dynamic performance specifications: 95J01—M[S]. Beijing: China Standard Press, 1995
- [14] 高速铁路工程动态验收技术规范: TB 10716—2013[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2013  
Technical regulations for dynamic acceptance for high-speed railways construction: TB 10716—2013[S]. Beijing: China Railway Press, 2013

(编辑 魏希柱)