

文章编号: 0258-2724(2010)01-0028-06 DOI: 10.3969/j.issn.0258-2724.2010.01.005

高速铁路道岔设计关键技术

王平, 陈嵘, 陈小平

(西南交通大学土木工程学院, 四川 成都 610031)

摘要: 基于道岔轮轨多点接触关系,建立了高速道岔动力分析理论,并设计出适合我国高速道岔的相离式半切尖轨平面线型、心轨水平藏尖结构、尖轨短过渡顶面轮廓和弹性均匀的岔区轨道刚度.为解决无缝道岔转换卡阻问题,在考虑长大轨件纵横向协调变形的基础上,研发了适应大伸缩量的转换锁闭机构.既可有效传递纵向力又可保持道岔平顺性的尖轨及心轨跟端结构和适用于有砟和无砟轨道基础的扣件系统.为控制长大轨件转换不足位移,确保道岔的高平顺性和锁闭可靠性,运用有限单元法进行长大轨件及双肢弹性可弯心轨结构的转换设计,研制出新型辊轮滑床台,并优化了转换牵引点布置及其动程设计.

关键词: 高速铁路;道岔;耦合动力分析;平面线型;动测试验

中图分类号: U213.6 **文献标识码:** A

Key Technologies in High-Speed Railway Turnout Design

WANG Ping, CHEN Rong, CHEN Xiaoping

(School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: Based on the wheel/rail multi-point contact in turnout zone, a dynamic design theory for high-speed railway turnout was established and several creative designs were made, such as separated semi-tangent switch plane linetype, horizontal hidden nose structure of turnout frog, short transitional top surface figure of the switch rail, and track stiffness of turnout with even elasticity. With the harmony between vertical and lateral deformation of long rail components taken into account, a transition locking structure for large expansion volume, an ending structure of the switch, a nose rail that both transfers longitudinal force efficiently and maintains turnout regularity, and a fastener system suitable for both ballast and ballastless track were developed to solve the transition choking problem of jointless turnout. In order to control the insufficient transition displacement of the long rail components to ensure the high regularity of turnout and its locking reliability, a transition design method for long rail components and double limb elastically bendable turnout frog structure was established using the finite element method (FEM), a new roller sliding platform was developed, and the transition traction point layout and stroke design were optimized.

Key words: high-speed railway; turnout; coupling dynamics; plane linetype; dynamic test

道岔是实现列车转线运行的铁路轨道主要结构,也是铁路轨道的薄弱环节及限制列车通过速度的关键设施.因其结构复杂、技术难度大,与动车组、列车控制并列为我国高速铁路三大核心技术.

根据我国中长期铁路网规划,到2020年,我国将建成 18×10^3 km的客运专线,所需高速道岔超过7 000组,总投资达250多亿.然而,在1996年以前我国铁路干线的最高运行速度仅达到120 km/h,

收稿日期: 2009-10-10

基金项目: 国家863计划资助项目(2007AA11Z129);铁道部科技开发计划资助项目(2006G017-A)

作者简介: 王平(1969-),男,教授,博士,研究方向为高速重载轨道结构及轨道动力学,电话: 13608007071,

E-mail: wping@home.swjtu.edu.cn

即便在历经从1996~2007年先后进行的6次大提速后,高速道岔相关技术仍属空白,国内仅在200 km/h及以下区段上铺设提速道岔。提速道岔在实际使用中,存在病害较多、养护维修量大、列车运行的平稳性及舒适性较区间线路差等问题。与国外高速道岔相比,在设计理念及方法、结构及转换设计、工电配合、制造及铺设、系统集成等诸多方面均存在较大差距。

目前,道岔在使用过程中常出现大幅度尖轨转换不足位移、尖轨及心轨卡阻、滑床台空吊等诸多问题,造成对列车运营速度的限制。为适应我国复杂的运营特征,满足又好又快建设客运专线的需要,自2005年起,由西南交通大学牵头组成客运专线道岔自主研发联合攻关组,开展250 km/h和350 km/h高速铁路系列道岔的研究。

为满足动车组高速过岔时的安全性和平稳性要求,高速道岔必须具有高平顺性、高精度和高可靠性。因此,在设计、制作、运输、铺设和维护过程中

需解决以下关键技术问题^[1]:(1)设计与我国运营条件相适应的高速道岔平面线型;(2)设计满足动车组安全、平稳运行的岔区轮轨关系;(3)设计满足动车组行车舒适性的岔区轨道刚度的合理匹配及均匀化;(4)设计满足高速道岔高平顺性要求的长大轨件及双臂弹性可弯心轨结构;(5)适应跨区间无缝线路的无缝道岔优化设计;(6)设计提高道岔可靠性与稳定性的工电一体化系统;(7)制订满足高平顺要求的高速道岔设计、制造、组装、运输、铺设和维护成套技术标准。

1 高速车辆-道岔耦合动力分析理论

高速车辆-道岔动力分析理论的基本思想是将机车车辆系统和道岔系统视为相互作用、相互耦合的总体大系统,考虑岔区轮轨间复杂的多点接触关系,综合研究列车通过道岔时的动态行为及对道岔区轨道结构的动力作用^[2],总体研究框架如图1所示。

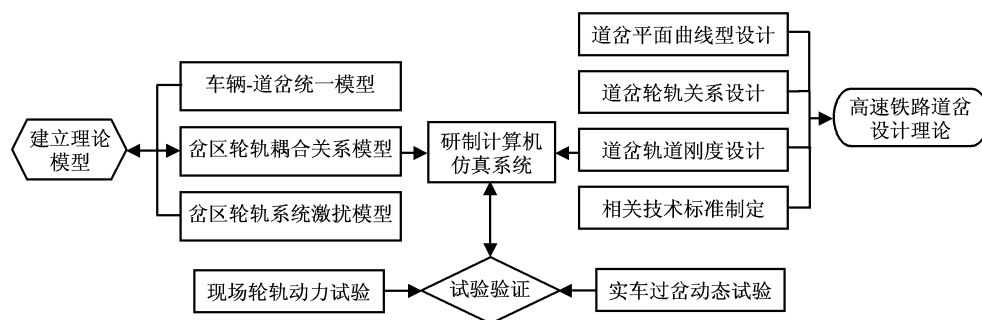


图1 车辆-道岔耦合动力分析理论总体研究框架

Fig.1 Overall framework of coupled vehicle-turnout dynamic analysis theory

在分析总结高速道岔结构特点的基础上,建立高速车辆-道岔耦合振动模型,包括各种典型客车、货车、有砟轨道道岔、无砟轨道道岔及动态轮轨耦合关系,其中车辆模型为由悬挂弹簧和阻尼联接起来的7个刚体(1个车体、2个构架、4个轮对)振动系统,共有35个自由度。道岔模型包含转辙器、连接部分和辙叉3个部分的完整模型。模型中综合考虑了钢轨截面型式变化、顶铁接触传力、间隔铁高强联结、滑床台非线性支承等因素。

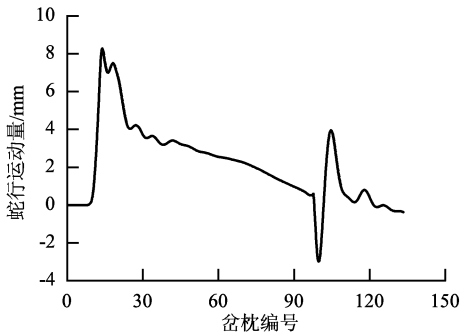
有两方面因素导致车辆-道岔耦合关系比区间高速车辆-轨道接触关系复杂:(1)车辆过岔时,为实现轮载过渡,车轮从一根钢轨滚动到另一根钢轨上(如直向过岔的车轮从曲基本轨滚动到直尖轨);(2)道岔自身结构复杂,存在护轨轮缘槽、心轨与翼轨轮缘槽等,导致轮背可能与护轨、翼轨发生接触,可能的轮轨接触方式有1点接触、2点接

触及3点接触等6种情形。

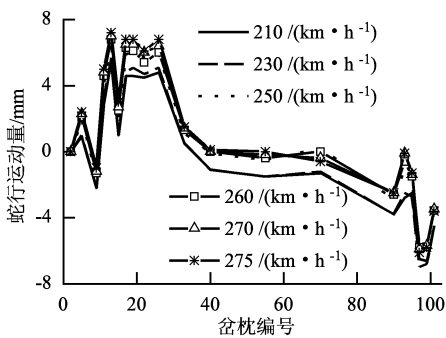
采用Hertz非线性弹性接触理论求解轮轨法向力,并考虑轮载在多根钢轨上的分配;根据Kalker线性蠕滑理论计算轮轨蠕滑力并用沈氏理论进行非线性修正^[3]。道岔区轨道不平顺是高速车辆-道岔耦合振动系统的主要激振源,可将其分为5类:轮轨接触磨损引发的钢轨波磨;轨道几何尺寸误差引起的轨道几何不平顺;扣件失效、道床板结引起的动态不平顺;道岔结构型式决定的结构不平顺;道岔刚度特殊性引起的纵向支承刚度不平顺。前3类不平顺在区间轨道上也会出现,并且在运营过程中逐渐发展,属于线路病害的范畴;后2类不平顺是高速道岔特有的,不平顺的幅度及变化方式由高速道岔自身的结构型式决定^[4]。

根据机车车辆-道岔耦合动力分析模型,研制出道岔动态仿真系统(DCFZ),并通过多次现场试

验测得的轮载分布、道岔位移、振动加速度、轮对横移等全套岔区轮轨动力相互作用数据,验证高速车辆-道岔耦合动力分析理论.轮对横移对比如图2所示,由图2可知,理论计算与试验结果吻合较好^[5,6].



(a) 250 km/h 仿真结果



(b) 试验测试结果

图2 CRH2 动车组直向过岔时轮对横移的对比
Fig.2 Comparison of wheelset lateral displacement when CRH2 EMUs (Electric Multiple Units) pass the main line of turnout

2 高速道岔设计关键技术体系

2.1 平面线型设计

根据用途将高速道岔划为3类:侧向低速行车的车站咽喉道岔,直向与区间等速,侧向低速进站停车,要求速度为80 km/h;用于列车上行和下行换线行驶的区间渡线道岔,直向与区间等速,侧向中速换线,要求速度为160 km/h;用于上下两高速线的联络线道岔,直向与区间等速,侧向高速换线,要求速度为220 km/h.

基于我国铁路客货共线运行的特点,提出采用相离式半切线尖轨平面线型(尖轨与基本轨切线相距12 mm),该设计增加了尖轨的粗壮度,提高尖轨的耐磨性.通过对轮载在尖轨与基本轨、心轨与翼轨间过渡规律的研究,发现转辙器部分的轮轨关系是影响动车组过岔平稳性的主要因素,缩短轮载

过渡范围能提高动车组的过岔平稳性.辙叉部分的轮轨关系是影响动车组过岔安全性的主要因素,减缓该处竖向和横向不平顺能确保动车组过岔安全性.为此,确定了尖轨及心轨顶面合理的降低值并设计出心轨水平藏尖结构,提出尖轨、心轨允许跳动限值和顶宽20~50 mm断面范围内降低值的制造、组装、养护维修允许误差标准^[1].

考虑车辆长度的影响对车辆通过道岔时的未被平衡离心加速度、未被平衡离心加速度变化率进行评价.应用车辆-道岔空间耦合动力分析仿真系统对侧向速度80 km/h的18号道岔、侧向速度160 km/h的6种道岔平面设计方案、侧向速度220 km/h的7种道岔平面设计方案进行了动力性能优化评估,分析了不同夹直线长度(线间距)对行车安全性和舒适性的影响.设计出导曲线 $R=1\ 200$ m圆曲线的18号车站咽喉道岔、导曲线 $R=5\ 000$ m圆曲线加缓和曲线的42号渡线道岔、导曲线 $R=8\ 200$ m圆曲线加缓和曲线的62号联络线道岔,从而形成了我国18, 30, 42和62号客运专线道岔系列.

2.2 轨道刚度设计

应用道岔动力分析理论,提出了有砟轨道、无砟轨道道岔区合理轨道刚度设计值及扣件双层弹性“上硬下软”的设计原则.通过对道岔区轨道整体刚度沿线路纵向分布规律及各部件对轨道刚度影响规律的研究,建议客运专线道岔不同部位扣件系统刚度设计值:250 km/h有砟道岔扣件系统竖向刚度为50~60 kN/mm;无砟道岔扣件系统竖向刚度为45~55 kN/mm;350 km/h无砟道岔扣件系统竖向刚度按22.5~27.5 kN/mm.同时,开展了高速道岔区轨道刚度均匀化研究,道岔轨道刚度均匀化前后效果对比如图3所示^[7].

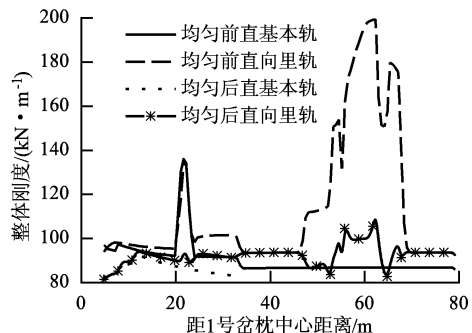


图3 道岔刚度均匀化效果

Fig.3 Homogenization effect of track stiffness

根据道岔前后轨道刚度过渡段对列车运行平

稳性的影响规律,提出了过渡段的长度及轨道刚度过渡设计方案如图 4 所示^[8].研制了道岔范围内轨距和高低可调、全弹性化的新型扣件系统,并采用

分块式橡胶垫层及整体硫化技术,动力学试验及运营实践表明该技术能有效地保持道岔的良好几何状态,保证了列车高速运行时的平稳性.

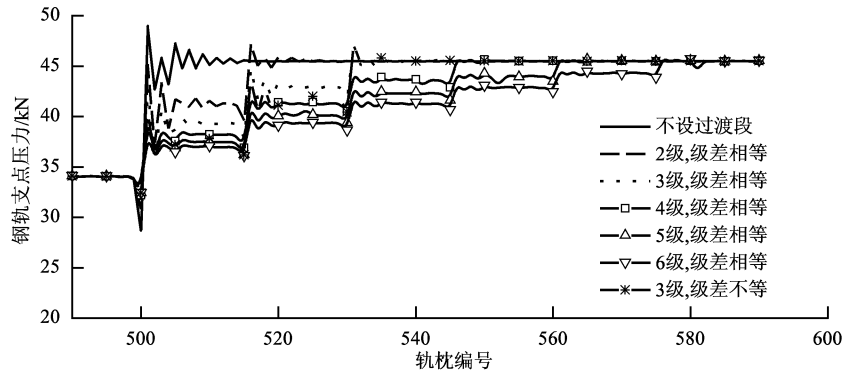


图 4 轨道刚度的分级过渡方案

Fig. 4 Grading scheme for track stiffness transition

2.3 无缝化设计

建立无缝道岔设计计算理论并开发了无缝道岔计算软件(WFDC),通过在有砟及无砟轨道基础上无缝道岔纵向力传递机理及横向胀轨规律的比较分析^[9],提出在辙叉跟端应用可承受 1 000 kN 的长大间隔铁结构.根据不同的铺设地区年轨温差,在转辙器跟端设置限位器、间隔铁等传力结构,且扣件纵向阻力应达到 10kN/组以上.为保证道岔几何状态良好(在纵向力集中处不出现碎弯),满足行车平稳性的要求,提出传力部件的设置应保证纵向力集中处道岔胀轨引起的轨距、方向不平顺变化率小于 1/2 000,转辙器和辙叉锁闭机构应能允许一定的尖轨、心轨伸缩量,密贴检查器应能保证尖轨的自由伸缩等设计要求.

2.4 转换设计

运用有限单元法开展了高速铁路道岔转换计算理论研究,根据尖轨及心轨牵引点布置、滑床板摩擦因数、牵引点动程等因素对转换力及不足位移的影响进行分析,提出尖轨及心轨宜采用水平惯性矩较小的 60D40 钢轨,18 号道岔尖轨设置 3 个牵引点,心轨设置 2 个牵引点.42 号道岔尖轨设置 6 个牵引点、心轨设置 3 个牵引点,将尖轨转换由滑动摩擦转为滚动摩擦,以降低摩擦阻力.为此,在道岔转辙器部分设置了辊轮机构,使尖轨在转换过程中置于辊轮上,摩擦因数降低至 0.07 左右.通过预设一定的反拱和缩短牵引点间距来减缓转换不足位移.反拱设置见图 5.试验表明,这些措施可大幅降低道岔转辙器及辙叉部分结构转换阻力,长大尖轨及心轨的转换不足位移可控制在 1 mm 左右.

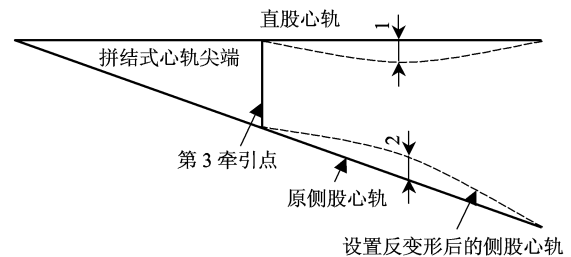


图 5 反拱设置

Fig. 5 Inverted arch design

2.5 工电一体化设计

道岔工电部分是不可分割的整体系统,其结构设计应保证各部分的疲劳强度在允许限度内.从系统设计的理念出发,提出心轨一动处工电新型配合结构,如图 6 所示,新型配合结构解决了该处检查失效的技术难题.将道岔区轮轨系统动力仿真结果作为道岔各关键零部件的设计动荷载,对特种断面翼轨轨底切削部、心轨轨底切削部和心轨牵引点处锁钩强度等进行了检算,为零部件的结构设计优化提供依据.

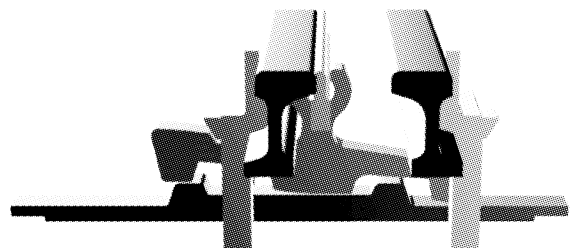


图 6 心轨一动处工电结构

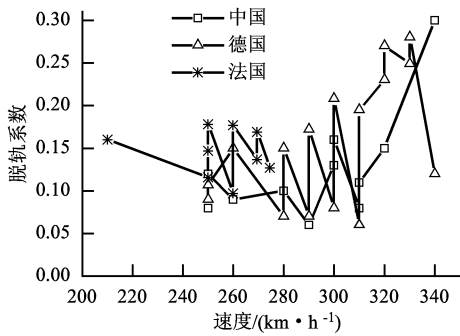
Fig. 6 Mechanical-electrical structure of the first traction point of nose rail

2.6 动测试验评定

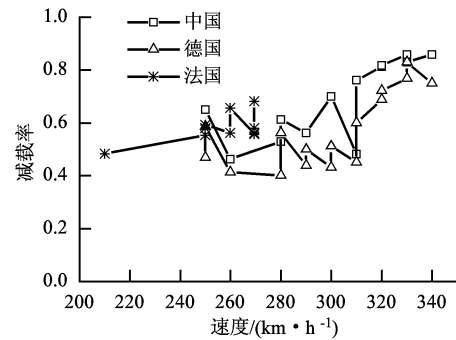
以与德、法两国道岔实车试验结果的对比评定我国高速道岔的设计理论水平. 中、德、法三国高速道岔分别在胶济、京津、武广、合宁等客运专线上进行了实车试验, 直向最高通过速度分别为347.5, 347.1, 277.0 km/h, 侧向最高通过速度均为90.0 km/h, 三国高速道岔安全对比如图7所示.

由图7可知, 动车组直向过岔时, 中国与德国

道岔脱轨系数和减载率相当, 均在允许限度内, 法国道岔因测试速度低, 各项指标略小. 动车组侧向过岔时, 中国与法国道岔脱轨系数、减载率相当, 均在允许限度内, 德国道岔明显偏大. 表1为动车组过岔钢轨件横向位移的最大值. 表1的对比结果表明, 中国与法国道岔部件的横向稳定性明显要优于德国道岔^[10,11].



(a) 脱轨系数



(b) 减载率

图7 中、德、法高速道岔安全指标对比

Fig. 7 Comparison of high speed turnout safety indexes among China, Germany and France

表1 动车组过岔钢轨件横向位移最大值

Tab. 1 Maximal lateral displacement of rail when EMUs pass the turnout mm

直向或侧向	武广试验段中国道岔		武广试验段德国道岔		法国道岔	
	基本轨	翼轨	基本轨	翼轨	基本轨	翼轨
直向	0.36	0.48	0.71	0.97	0.69	0.43
侧向	0.52	0.96	0.95	1.42	0.78	0.91

三国轨道岔区刚度对比如图8所示. 由图8可知, 法国道岔轨道刚度偏大, 德国道岔轨道刚度明显不均匀, 中国道岔刚度分布优于德、法两国. 三国轮载过渡范围对比如图9所示. 由图9可知, 动车

组250 km/h直向过岔时, 三国道岔的垂向平稳性相当, 中国与德国道岔的轮载过渡范围明显要小于法国道岔, 因而车体横向平稳性优于法国道岔.

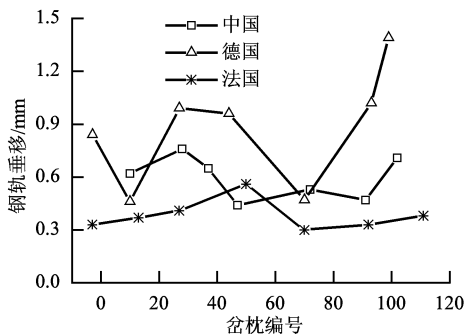


图8 轨道刚度对比

Fig. 8 Comparison of track stiffness

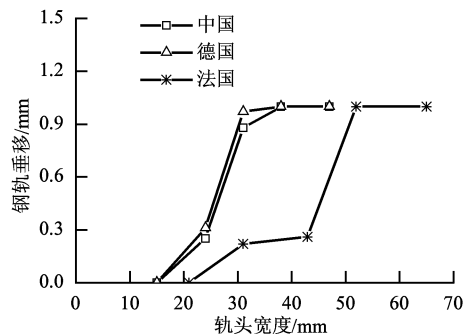


图9 轮载过渡范围对比

Fig. 9 Comparison of wheel-load transitional range

3 结论

历经调查分析、理论研究、系统设计、结构比选、标准制订、厂内试制、组装验收、现场试铺、动态测试、批量生产、运营考核、养护维修等阶段,指导完成了我国 250 km/h 客运专线 18 号有砟及无砟道岔、350 km/h 客运专线 18 号无砟道岔、42 号无砟道岔(侧向时速 160 km/h)的研制,生产的高速道岔已在我国铁路第 6 次提速和客运专线建设中得到了广泛应用。

综上所述,可得到以下几点主要结论:

(1) 尖轨与基本轨切线相距 12 mm 的平面线型、心轨水平藏尖结构、尖轨短过渡顶面轮廓、弹性均匀的岔区轨道刚度等技术,保证了高速列车过岔的安全性和舒适性. 建议 250 km/h 客运专线有砟道岔扣件系统竖向刚度按 50 ~ 60 kN/mm、无砟道岔扣件系统竖向刚度按 45 ~ 55, 350 km/h 无砟道岔扣件系统竖向刚度按 22.5 ~ 27.5 kN/mm 进行设计。

(2) 应在辙叉跟端采用可承受 1 000 kN 的长大间隔铁结构,转辙器跟端宜根据不同的铺设地区年轨温差,设置限位器、间隔铁等传力结构,且扣件纵向阻力应达到 10 kN/组以上. 同时,传力部件的设置应保证纵向力集中处道岔胀轨引起的轨距、方向不平顺变化率小于 1/2 000. 转辙器和辙叉锁闭机构应能允许一定的尖轨、心轨伸缩量,密贴检查器应能保证尖轨的自由伸缩等设计要求。

(3) 尖轨、心轨宜采用水平惯性矩较小的 60D40 钢轨,转换牵引点布置优化方案为:18 号道岔尖轨设 3 个牵引点、心轨设 2 个牵引点;42 号道岔尖轨设 6 个牵引点、心轨设 3 个牵引点. 在道岔转辙器部分设置辊轮机构将转换摩擦因数降低至 0.07 左右,可将长大尖轨及心轨的转换不足位移控制在 1 mm 左右。

(4) 仿真系统 DCFZ 结果与客运专线上的实车试验结果对比,证明可将基于道岔轮轨多点接触关系的机车车辆-道岔耦合动力分析理论应用于高速道岔的设计和动力性能评估。

致谢:西南交通大学创新团队培育计划资助项目(2007IRT06)。

参考文献:

- [1] 王平. 高速铁路道岔设计理论及应用研究[R]. 成都:西南交通大学土木工程学院,2008.
- [2] 王平. 道岔区轮轨系统动力学研究[D]. 成都:西南交通大学土木工程学院,1997.
- [3] 翟婉明. 车辆-轨道耦合动力学[M]. 3 版. 北京:科学出版社,2007: 71-84.
- [4] 陈小平,王平,陈嵘,等. 高速车辆与道岔空间耦合振动特性[J]. 西南交通大学学报,2008,43(4): 453-458.
CHEN Xiaoping, WANG Ping, CHEN Rong, et al. Spatial coupling vibration properties of high-speed vehicle-turnout [J]. Journal Southwest Jiaotong University, 2008, 43(4): 453-458.
- [5] WANG Ping, CHEN Rong, CHEN Xiaoping. Wheel/rail relationship optimization of switch zone in high-speed railway turnout[C]// Proceedings of International Conference on Transportation Engineering. Reston: ASCE, 2009: 2833-2838.
- [6] GUO Likang, WANG Ping, CHEN Rong, et al. Wheel/rail contact irregularity of high-speed railway frog [C]// Proceedings of International Conference on Transportation Engineering. Reston: ASCE, 2009: 2827-2832.
- [7] 陈小平,王平. 无砟道岔轨道刚度分布规律及均匀化[J]. 西南交通大学学报,2006,41(4): 446-451.
CHEN Xiaoping, WANG Ping. Distribution regularity and homogenization of track rigidity for ballastless turnout[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2006, 41(4): 446-451.
- [8] 陈小平. 高速道岔轨道刚度理论及应用研究[D]. 成都:西南交通大学土木工程学院,1997.
- [9] 王平. 不同结构无缝道岔的纵向力传递机理[J]. 西南交通大学学报,2003,38(4): 371-374.
WANG Ping. Mechanism of longitudinal force transmission of welded turnouts with different structures [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2003, 38(4): 371-374.
- [10] 西南交通大学. 武广客运专线时速 350 km 无砟道岔试验报告[R]. 成都:西南交通大学,2009.
- [11] 西南交通大学. 合宁客运专线时速 350 公里无砟道岔试验报告[R]. 成都:西南交通大学,2008.

(中文编辑:秦瑜 英文编辑:兰俊思)