

doi:10.3969/j.issn.1672-4348.2015.06.002

固定辙叉区轮轨静态接触几何关系计算

赵卫华^{1,2}

(1. 福建工程学院 土木工程学院, 福建 福州 350118; 2. 福建省土木工程新技术与信息化重点实验室, 福建 福州 350118)

摘要: 针对固定辙叉特殊的轨线布置及复杂的轮轨接触关系,建立固定辙叉区轮轨接触几何关系算法,分析固定辙叉区沿辙叉走行方向主要接触参数的变化规律以及各关键断面轮轨接触点变化情况。结果表明:在辙叉轮载过渡段轮轨接触参数变化规律复杂,结构不平顺变化幅值最大且波长较短;轮对横移量增加,轮轨接触几何参数增大,轮轨动力作用增强;辙叉咽喉区和轮载过渡段辙叉侧轮轨接触点变化存在突变。提出应合理设计辙叉区轮载过渡段结构参数,优化轮轨接触几何关系,进而改善列车通过时辙叉的受力性能。

关键词: 固定辙叉; 轮轨接触关系; 结构不平顺; 等效锥度

中图分类号: U213.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-4348(2015)06-0520-06

Calculation of wheel/rail contact geometry in rigid frog zone

Zhao Weihua^{1,2}

(1. College of Civil Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China;
2. Fujian Provincial Key Laboratory of Advanced Technology and Informationization in Civil Engineering, Fuzhou 350118, China)

Abstract: Based on special layout of rail lines and complex wheel/rail contact relationship in rigid frog zone, a calculation method of the wheel/rail contact geometry was proposed and the changing regularity of the main contact parameters along the track line and wheel/rail contact points of key cross sections were analysed via the method. The results show that in rigid frog wheel-load transition zone, the changing regularity of wheel/rail contact parameters is complex, and the changing magnitude of structure irregularity is the highest with rather short wavelength; the higher/larger the wheel-set lateral displacement is, the higher the wheel/rail contact geometric parameters are with stronger wheel/rail dynamic interaction; sudden change occurs along the longitudinal direction of frog throat area and wheel-load transition zone. It suggests that the structure parameters of wheel-load transition zone in frog be reasonably designed, the wheel/rail contact geometry relationship be optimized to improve the force performance of train passing through the frog.

Keywords: rigid frog; wheel/rail contact relationship; structure irregularity; equivalent conicity

固定辙叉作为铁路道岔的重要结构,其复杂的轨线布置、线路转换以及心轨、翼轨轨头外形的连续不规则变化造成辙叉区轮轨接触关系复杂,

自身存在结构不平顺,严重限制列车速度的提高。各国学者对轮轨接触关系的研究都非常重视,对区间线路轮轨接触关系问题提出了多种计算模型

收稿日期: 2015-10-04

基金项目: 国家自然科学基金项目(51508098);福建省教育厅中青年教师教育科研项目(JA15327);福建工程学院校科研启动基金(GY-Z15003)

作者简介: 赵卫华(1984-),女,山西朔州人,讲师,博士,研究方向:轨道结构及轨道动力学。

和方法^[1-5]。近几年来对复杂的道岔区轮轨接触关系及动力相互作用的研究也越来越多^[6-12]。文献[6]提出了一种计算道岔转辙器部分轮轨两点接触的数值方法,并分析了车轮踏面廓形对轮轨两点接触的影响;文献[7-8]建立了可动心道岔转辙器和辙叉区轮轨接触的算法,并进一步确定了轮轨力在基本轨与尖轨、翼轨与心轨之间的转移和分配特性。本文针对固定辙叉不规则的钢轨廓形变化,建立了固定辙叉轮轨接触几何关系算法,以 60 kg/m 钢轨 12 号道岔固定辙叉为例,研究磨耗型踏面(LM)车轮通过时沿辙叉走行方向和各关键断面处的轮轨接触参数的变化规律,明确固定辙叉区轮轨接触特性。

1 轮轨接触关系算法基本原理

1.1 轮轨廓形数据生成

固定辙叉轨头廓形不规则变化及有害空间的存在使其轮轨接触关系较区间线路复杂,因此标准的辙叉区轨头截面廓形对分析轮轨接触关系是十分必要的。借助绘图软件从标准设计图中提取轮轨横截面廓形,并将车轮踏面和钢轨轨头截面离散,最后利用三次样条函数拟合出轮轨廓形。

由于固定辙叉心轨、翼轨轨头相分离,为方便数据拟合和截面插值,将同一横截面处心轨和翼轨坐标点合并为一个廓形数据文件参与求解。标准辙叉设计图只提供辙叉关键部位钢轨截面,为获得沿线路方向任意钢轨截面廓形,可由两侧相邻的关键截面线性插值生成,如图1所示。

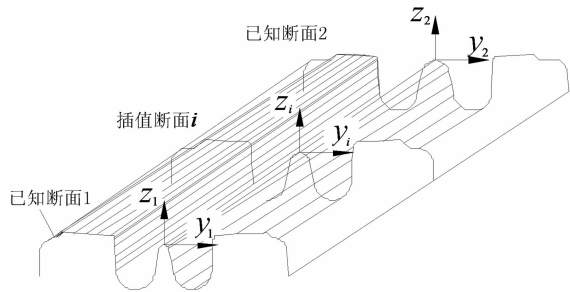


图 1 固定辙叉任意截面外形插值

Fig.1 Profile interpolation of arbitrary crosssection in rigid frog

1.2 固定辙叉结构特点

60 kg/m 钢轨 12 号提速道岔固定辙叉是我国使用范围较广的辙叉类型,本文以整铸辙叉为

例分析轮轨接触几何关系,为辙叉结构优化设计提供指导。当车轮沿翼轨向叉心方向滚动时,随着翼轨向不同方向对称偏离辙叉中心线,固定辙叉有害空间逐渐加宽,轮轨接触点向远离轮缘侧移动,直至车轮与心轨接触时,轮轨接触点发生突变。心轨、翼轨在关键截面的相对位置如图2所示。从心轨理论尖端至心轨顶宽71mm范围内,心轨高度逐渐变化,实现了轮载在翼轨与心轨间的平顺过渡。心轨顶面轮廓还随着车轮的移动逐渐加宽和升高,翼轨顶面轮廓及方向也逐渐改变。需要说明的是,本文主要进行轮轨静态接触几何关系计算,所以轮轨接触可假定为刚性接触,车轮踏面与心轨、翼轨同时接触的可能性极小,所以在同一辙叉横截面上一侧钢轨只考虑单点接触。

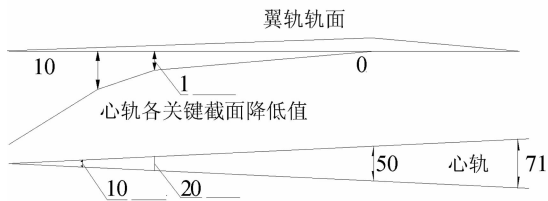


图2 心轨顶宽与轨顶降低值关系(单位:mm)

Fig. 2 The relationship between the width and depth of nose railhead (unit:mm)

1.3 固定辙叉结构不平顺

不考虑固定辙叉的几何形状、空间位置及尺寸相对其正常状态的偏差,即不存在轨道几何不平顺时,由于翼轨、心轨截面宽度及高度不断变化,轮轨接触点既可能在翼轨上,也可能在心轨上,接触点位置随截面位置不同而改变,于是产生了轮轨接触点在横向及竖向的变化。接触点位置的这种变化规律,与区间线路钢轨存在轨道几何不平顺时的变化规律一致,是辙叉的结构特点所决定的,因此是该结构的固有属性,称为辙叉“结构不平顺”。它是引起列车振动、轮轨动作用力及轮对蛇形运动的根源。若不平顺过大,会使轮轨作用力在心轨薄弱断面处骤增,或造成轮对蛇形运动产生爬轨危险。

根据列车过岔的激扰作用方向,结构不平顺分为横向和竖向不平顺。计算方法如图3所示。

以轨距测量点为坐标原点,设无轮对横移时辙叉趾端轮轨接触点距轨距测量点的横向距离为 Y_0 ,竖向距离为 Z_0 ,该接触点称为理论接触点,则

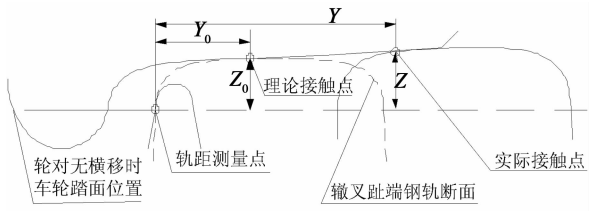


图 3 结构不平顺求解示意图

Fig. 3 Illustration of solution to structure irregularity

轮对在辙叉其他部位任意可能的实际接触点在该坐标系中的位置可表示为 (Y,Z) , 所对应的辙叉横向不平顺 Y_L 和竖向不平顺 Z_v 分别为

$$\begin{cases} Y_L = Y - Y_0 \\ Z_v = Z - Z_0 \end{cases} \quad (1)$$

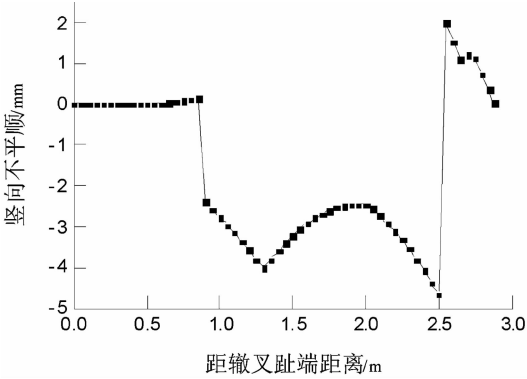
式(1)反映了横向不平顺以实际接触点至坐标原点的横向距离较理论接触点远为正, 竖向不平顺也是以实际接触点至坐标原点的竖向距离较理论接触点远为正; 反之则为负。

2 轮轨接触几何关系计算分析

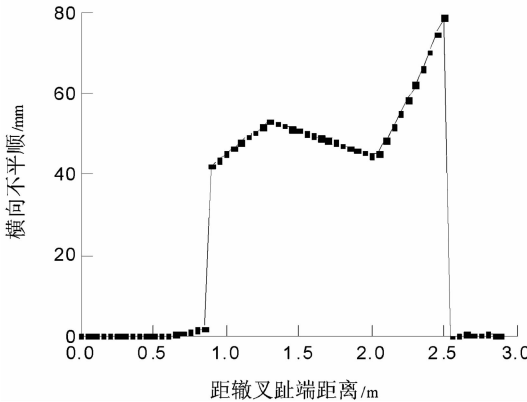
2.1 轮对无横移时轮轨接触几何关系

由于固定辙叉的特殊廓形, 车轮逆向通过辙叉时, 即使轮对无横移, 辙叉区的轮轨接触几何关系也会发生变化, 且沿着辙叉纵向不断变化。本节主要分析 LM 磨耗型踏面轮对通过辙叉时的轮轨接触几何参数沿辙叉走行方向的变化规律。图 4~6 反映了磨耗型踏面车轮轮对在轮对无横移时通过 60 kg/m 钢轨 12 号固定辙叉时辙叉自身的横竖向结构不平顺、基本轨侧横竖向结构不平顺以及各项接触参数的变化规律。

由图 4 可知, 固定辙叉区横向不平顺幅值为 78.8 mm, 竖向不平顺幅值为 4.65 mm, 相对较小; 从辙叉趾端开始至心轨顶宽 71mm 断面辙叉长度范围内, 横向不平顺均为正, 竖向不平顺在趾端部分(0~0.85 m 范围内)和心轨顶宽 40 mm 断面(即距趾端 2.55 m 处)以后为正, 咽喉区及心轨顶宽 40 mm 断面之前为负。表明从趾端开始 0.85 m 长度范围内, 轮轨接触点有略微的降低; 从 0.85~1.30 m (咽喉前) 范围内, 竖向负不平顺和横向不平顺逐渐均匀增大, 表明轮轨接触点逐渐向翼轨非工作边侧偏移, 是由于该范围内翼轨不断加宽的缘故; 在辙叉咽喉区, 竖向负不平顺和横向不平顺逐渐减小, 表明轮轨接触点向翼



(a) 竖向不平顺



(b) 横向不平顺

图 4 辙叉区结构不平顺

Fig. 4 Structure irregularity in frog zone

轨顶面内侧偏移, 这是由于翼轨向外侧偏离轨距线造成的; 在心轨、翼轨轮载过渡段内, 由于翼轨轨头加高和心轨轨头降低值的存在, 该范围内轮轨接触点发生从翼轨向心轨的转移转变。由于不考虑两点接触及轮轨弹性变形, 这里接触点的转移为突变, 即在车轮运动至某一截面, 接触点突然从翼轨转移至心轨。所以接触点在转移前, 翼轨轨头加高使得竖向负不平顺和横向不平顺迅速增大, 在接触点转移至心轨上时, 竖向不平顺突变为正值, 横向不平顺急剧减小。

由于固定辙叉结构不平顺的存在, 即使轮对不横移, 也会产生侧滚角随翼轨和心轨廓形、翼轨方向的变化而改变, 如图 5 所示。侧滚角越大, 表明列车通过时的平稳性越差, 在辙叉咽喉及叉心范围内, 由于翼轨外偏和心轨降低使得轮对顺时针旋转, 所以侧滚角为负值, 但侧滚角量值均较小。侧滚角的最大值出现在轮轨接触点发生突变的轮载过渡截面处, 为 0.001 44 rad。从图 6 可

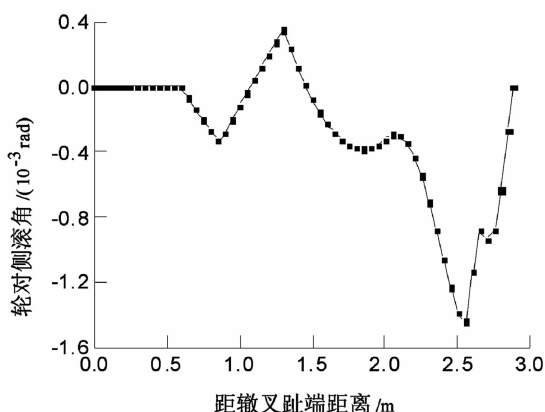


图5 轮对侧滚角

Fig. 5 Wheelset rolling angle

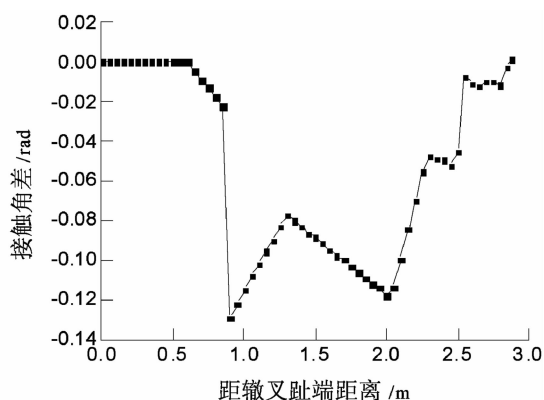


图6 接触角差

Fig. 6 Contact angle difference between wheel and rail

知,随辙叉纵向轮轨接触角差不断变化,在距趾端 0.9 m 位置附近达到最大值 0.129 rad,在不平顺较大的心轨翼轨轮载过渡段则较小,表明该范围内基本轨侧与辙叉侧轮轨力的分配较趾端附近均匀,对基本轨和辙叉区钢轨磨损相当。

2.2 轮对横移时轮轨接触几何关系

由于固定辙叉不同位置处的钢轨顶面廓形是沿线路方向变化的,而车轮踏面与心轨、翼轨的相对位置是随轮对横移量而变化的,因此辙叉区内的轮轨接触几何关系分布是随线路位置、轮对横移量而变化的空间曲面。分析结果表明:在轮对横移量较大,车轮轮缘与钢轨轨距角贴靠时,踏面等效锥度等接触几何参数出现急剧变化。在轮载过渡区内,由于心轨顶宽沿线路方向变化速度较快,且翼轨加高,导致各项接触几何参数变化规律较辙叉趾端附近(沿辙叉纵向 0~0.8 m 范围内)复杂得多。从辙叉咽喉到心轨顶宽 20 mm 断面

之前,车轮完全与翼轨接触,由于翼轨在该范围内逐渐向轨距线外侧偏移,因此即使轮对向翼轨方向的横移量较大,也不会发生轮缘接触,表现为各项接触几何参数在该范围内量值较小,均未出现大的突变。

在轮对横移量较大,车轮轮缘与钢轨轨距角贴靠时,等效锥度和侧滚角出现急剧变化。在轮载过渡区内,由于心轨顶宽沿线路方向变化速度较快,且翼轨加高,导致各项接触几何参数变化规律较辙叉趾端附近(沿辙叉纵向 0~0.8 m 范围内)复杂得多。从辙叉咽喉到心轨顶宽 20 mm 断面之前,车轮完全与翼轨接触,由于翼轨在该范围内逐渐向轨距线外侧偏移,因此轮对向翼轨方向横移量较大时,也不会发生轮缘接触,表现为各项接触几何参数在该范围内量值较小,均未出现大的突变。

此外,轮对横移量越大,产生的竖向及横向结构不平顺越大。在轮载过渡段,当轮对向心轨方向横移量较大,出现轮缘接触时,不平顺量值较大,这样会加大轮轨系统振动。因此应尽可能控制列车通过辙叉的平稳性、减少轮对横移量,以确保列车通过时的安全性与平稳性。

2.3 辙叉各关键断面轮轨接触特征

由上述分析可知,固定辙叉区影响轮轨接触关系的最不利部位为辙叉咽喉区和心轨翼轨轮载过渡区,这两部分的横竖向结构不平顺幅值大,是影响列车过岔运行性能的关键部分。

对各关键断面的轮轨接触范围分析表明,基本轨侧钢轨上接触点位置 and 变化规律在各关键断面处基本相同。当轮对处于对中位置时,钢轨上接触点位置在距轨距测量点 11 mm 附近;当轮对相对于对中位置向右横移时,基本轨上接触点逐渐远离轨距测量点,在横移量约为 7.5 mm 时,接触点位置发生突变,距轨距测量点距离突增为 35.43 mm,说明此时接触点位于轨头外侧;当轮对相对于对中位置向左横移时,接触点位置逐渐靠近轨距测量点,在横移量为 -9.5 mm 时,接触点位置发生突变,表现为轮缘接触。同理,基本轨侧车轮上接触点位置 and 变化规律在各关键断面也基本相同,而且与钢轨上接触点变化规律一致。当轮对处于对中位置时,车轮上接触点位置在距轮背 52.05 mm 附近,轮对横移量 -9~7 mm 范围内时,接触点位于车轮踏面上,超出这个范围

时,接触点位置则发生突变。比较轮对向左和向右横移轮轨接触点发生突变时在钢轨和车轮上的位置变化,可以看出,向右横移发生突变时,接触点在钢轨和车轮上的位置变化最大,说明钢轨轨头和车轮踏面轮轨接触区存在较大的不连续,对轮轨均匀磨损和保持轮轨廓形不利,因此有待于进一步优化轮轨接触关系。

图 7~9 分别为轮对逐渐向左右两侧横移(最大横移量为 12 mm)且无摇头角时,各关键断面(辙叉咽喉、心轨 20 mm 断面和心轨 50 mm 断面)钢轨轨头上轮轨接触点变化情况。其中,轨头接触点位置是相对于轨头内侧轨顶面下 16 mm(轨距测量点)进行测量。

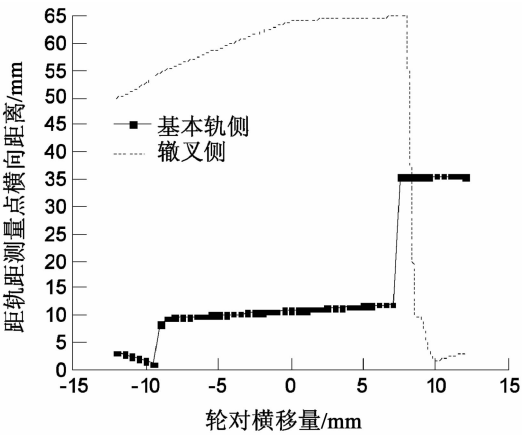


图 7 辙叉咽喉始端
Fig.7 Frog throat

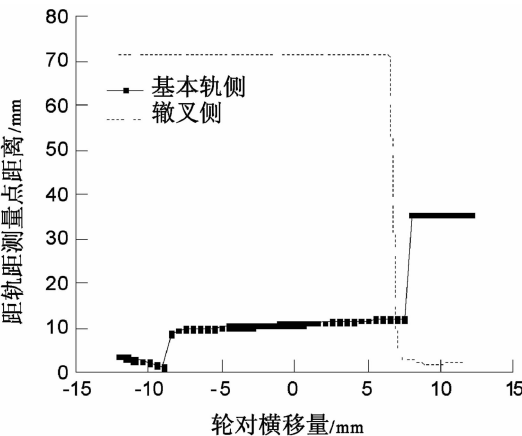


图 8 心轨顶宽 20 mm 断面

Fig.8 20 mm wide crossection of nose railhead

由于翼轨、心轨廓形与基本轨廓形区别较大,导致轮轨接触点变化规律更加复杂。图 7 为轮对

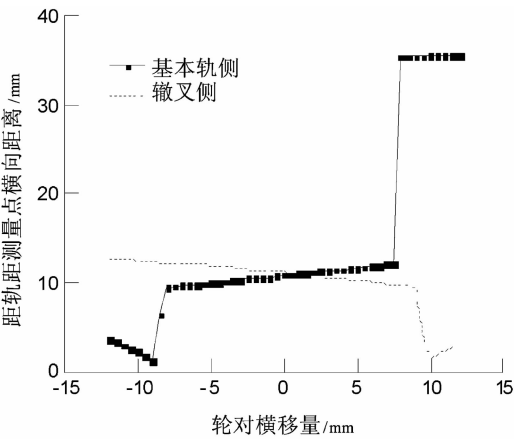


图 9 心轨顶宽 50 mm 断面

Fig.9 50 mm wide crossection of nose railhead

向右横移量小于 8 mm 时,右侧翼轨轮轨接触点位置坐标随轮对从左向右横移量的增大而呈线性变化。当向右的横移量大于 8 mm 时,车轮轮缘与翼轨接触,接触点坐标位置急剧减小,轮轨易发生两点接触,使车轮轮缘与翼轨顶部内侧磨损加速,而且轮对发生蛇形运动时,轮轨动力学行为容易发生突变。图 8 为心轨顶宽 20 mm 处中右侧轮轨接触点位置在轮对向右的横移量小于 6.5 mm 时,右侧钢轨上接触点位置不随轮对横移量的变化而变化;当向右的横移量大于 6.5 mm 时,发生轮缘接触。图 9 为心轨顶宽 50 mm 断面处接触点位置情况,其中,右侧轮轨接触点位置变化规律和幅值几乎相同,在向右的横移量小于 9 mm 时,接触点位置呈线性变化趋势,大于 9 mm 时,发生轮缘接触。总之,在心轨顶宽 50 mm 以后,车轮踏面不再与翼轨接触,不同横移量下轮轨接触点均位于心轨顶面一侧,且分布较均匀。

通过对基本轨侧和辙叉侧钢轨上轮轨接触点变化规律的分析,可以看出辙叉侧轮轨接触点位置分布特点在各关键断面处差别较大,而基本轨侧几乎不变。由于受到辙叉侧轮轨接触关系的影响,基本轨侧轮轨接触点位置分布较区间线路更靠近轨距测量点。

3 结论

运用静态轮轨接触几何关系算法,研究了固定辙叉区轮轨接触几何关系,模拟计算固定辙叉区轮轨接触几何参数的变化规律,包括轮对无横移量和摇头时,沿辙叉纵向的轮轨接触情况;轮对

在不同横移量情况下,各关键断面处的轮轨接触特点;轮对在不同横移量下,沿辙叉纵向的轮轨接触参数变化情况。主要结论如下:

1)在心轨翼轨轮载过渡范围内,辙叉结构不平顺变化幅值最大且波长较短,因此应通过合理设计心轨关键断面降低值、翼轨加高值来有效降低辙叉区轮轨竖向冲击作用、降低轮轨磨耗,进而提高列车通过时的安全性和平稳性。

2)轮对横移量越大,轮轨接触几何参数变化越大,导致轮轨动力相互作用加剧,轮缘和钢轨轨距角侧的磨耗增大。因此要严格控制固定辙叉结构设计参数,避免产生大的横向位移,以减小轮轨

系统振动。

3)辙叉咽喉区和心轨翼轨轮载过渡区的辙叉侧轮轨接触点位置分布特点在各关键断面处差别较大,是固定辙叉轮轨接触关系最复杂的区域。由于受到辙叉侧轮轨接触关系的影响,基本轨侧轮轨接触点位置分布较区间线路更靠近轨距测量点。

通过分析比较固定辙叉区轮轨接触参数的变化特点,可以初步了解固定辙叉区轮轨接触特性,为辙叉区结构优化方案比选以及计算轮轨动态接触关系提供了指导依据。

参考文献:

- [1] 王开文. 车轮接触点迹线及轮轨接触几何参数的计算[J]. 西南交通大学学报, 1984, 19(1): 89-99.
- [2] Piotrowski J, Chollet H. Wheel-rail contact models for vehicle system dynamics including multi-point contact [J]. Vehicle System Dynamics, 2005, 43(6/7): 455-483.
- [3] 任尊松. 轮轨多点接触计算方法研究[J]. 铁道学报, 2011, 33(1): 25-30.
- [4] 任尊松. 车辆动力学基础[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2009: 23-24.
- [5] Ricki I S. 车辆-轨道相互作用研究方法的新进展[J]. 漆晖, 译. 国外铁道车辆, 2010, 47(5): 1-5.
- [6] Hiroyuki S, Yoshimitsu T, Ryosuke M. Analysis of wheel/rail contact geometry on railroad turnout using longitudinal interpolation of rail profiles[J]. Journal of Computational and Nonlinear Dynamics, 2011, 6(4): 1-5.
- [7] 任尊松, 翟婉明, 王其昌. 轮轨接触几何关系在道岔系统动力学中的应用[J]. 铁道学报, 2001, 23(5): 11-15.
- [8] 任尊松, 何小河. 道岔区轮轨力转移与分配特性研究[J]. 中国铁道科学, 2008, 29(1): 1-6.
- [9] Eassa E, Andersson C, Nielsen J C O. Simulation of dynamic interaction between train and railway turnout[J]. Vehicle System Dynamics, 2006, 44(3): 247-258.
- [10] 张军, 王春艳, 孙传喜, 等. 轮对与道岔接触问题的有限元分析[J]. 铁道学报, 2009, 31(3): 26-30.
- [11] Sun Y Q, Cole C, Mcclanachan M. The calculation of wheel impact force due to the interaction between vehicle and a turnout[J]. Journal of Rail and Rapid Transit, 2010, 224(Part F): 391-403.
- [12] 闻方宇, 任尊松, 孙守光, 等. 基于 ANSYS/DYNA 软件的高速车轮通过道岔的轮轨动力研究[J]. 铁道学报, 2014, 36(3): 14-18.

(责任编辑: 陈雯)