

文章编号: 1001-4632 (2023) 05-0169-11

引用格式: 高原, 司道林, 王树国, 等. 道岔区轮轨廓形演变对接触几何关系的影响 [J]. 中国铁道科学, 2023, 44 (5):169-179.

Citation: GAO Yuan, SI Daolin, WANG Shuguo, et al. Influence of Wheel-Rail Profile Evolution on Contact Geometric Relationship in Turnout [J]. China Railway Science, 2023, 44 (5):169-179.

道岔区轮轨廓形演变对接触几何关系的影响

高 原, 司道林, 王树国, 杨东升

(中国铁道科学研究院集团有限公司 铁道建筑研究所, 北京 100081)

摘 要: 为揭示轮轨廓形演变对道岔区轮轨接触几何关系的影响, 结合迹线法和基于先进经验的窗口放缩搜索法, 构建道岔区轮轨多点接触几何模型, 并利用传统迹线法和成熟商业软件对比验证几何模型计算的精确性; 在测试长期服役过程中真实车轮型面和道岔变截面钢轨廓形的基础上, 研究不同服役阶段下轮轨廓形演变对接触点分布、滚动圆半径差和侧滚角的影响, 进而分析轮轨接触几何关系和轮轨力过渡特性。结果表明: 随着道岔通过总重的增加, 轮轨接触点从基本轨提前迁移至尖轨; 磨耗会导致轮轨接触点发生跳跃、分布不连续, 从而显著增加轮轨间动态相互作用; 随着磨耗进一步加剧, 轮对侧滚角最大值从 0.04 mrad 逐渐减小至 0 mrad 并最终出现负值; 轮轨垂向力和车体加速度从 86.643 kN 和 0.032 m·s⁻² 分别升至 101.466 kN 和 0.038 m·s⁻² 后, 脱轨系数和轮重减载率对应从 0.433 和 0.215 分别升至 0.505 和 0.247, 显著降低了列车行车平稳性和安全性。

关键词: 高速道岔; 多点接触算法; 廓形演变; 轮轨接触关系; 窗口放缩搜索法

中图分类号: U213.6 文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.1001-4632.2023.05.17

道岔是实现列车转线或跨线运行必不可少的基础设备, 是铁路成网的关键节点, 因其结构复杂、状态多变、病害繁多, 是高速铁路线路的薄弱环节及养护维修的重点和难点^[1]。轮轨接触几何关系是反映轮轨动态相互作用和轮轨接触力学的重要指标之一^[2], 受道岔区钢轨变截面特性及多点接触的影响, 且长期服役条件下道岔区钢轨组合廓形会同时演变, 致使轮轨接触几何关系复杂多变, 加剧了轮轨间动态相互作用, 并显著影响道岔钢轨服役寿命和行车安全性, 导致铁路运营和养护维修成本显著提升^[3-5]。

针对道岔区复杂的轮轨接触几何关系, 国内外学者开展了大量相关研究, 提出多种数值分析方法, 并经历了车轮型面从锥形或圆弧形过渡至任意形状、轮轨接触从二维过渡至三维的过程^[6-7]。王平等考虑了真实道岔结构特征, 提出了可用于分析车轮磨耗对轮轨接触关系影响的方法^[8]; 任尊松等在迹线法的基础上, 引入轮轨多点接触准则, 提出了可计算道岔区轮轨多点接触的理论方法, 避开了

复杂的赫兹或非赫兹接触计算过程^[9-10]; 钱瑶和罗燕等提出了考虑道岔变截面钢轨廓形特性的法向切割法, 能准确探明不同轮对横移量和摇头角下的道岔区轮轨接触几何关系^[11-12]; 秦航远等针对道岔区复杂的轮轨接触几何关系, 结合轮轨多点判定准则, 利用曲面轮廓投影方法对变截面和非变截面钢轨与车轮的空间接触几何关系进行了分析^[13]; Shu 等编制了可精确求解道岔轮轨接触行为的软件 NUCARS, 详细分析了车轮滚动通过道岔过程中的轮轨接触几何关系^[14]。上述文献针对道岔区轮轨接触几何关系开展了深入研究, 但仅分析钢轨廓形或车轮型面单独发生演变时道岔区轮轨多点接触分布规律, 未全面揭示道岔实际服役中复杂的接触关系。

本文通过对不同服役阶段道岔和过岔列车的轮轨真实廓形开展长期跟踪测试, 结合多点接触算法评估不同服役阶段下道岔钢轨和车轮型面的轮轨接触关系, 全面考虑道岔钢轨廓形演变过程中与不同服役阶段车轮磨耗型面相互作用时的轮轨接触几何, 揭示道岔区轮轨接触几何关系随通过总重的演

第44卷,第5期
2023年9月

中 国 铁 道 科 学
CHINA RAILWAY SCIENCE

Vol. 44 No. 5
September, 2023

收稿日期: 2022-09-26; 修订日期: 2023-06-15

基金项目: 中国国家铁路集团有限公司科技研究开发计划课题(K2021G026); 中国铁道科学研究院集团有限公司院基金课题(2020YJ208)

第一作者: 高原(1994—), 男, 湖北宜昌人, 助理研究员, 博士。E-mail: 563021287@qq.com

变规律, 探明长期服役条件下轮轨廓形演变对道岔区轮轨接触几何关系的影响。

1 道岔区轮轨多点接触几何模型

在考虑车轮和道岔真实接触几何廓形的影响下, 结合二分法搜索左右股车轮和钢轨同时接触时的姿态, 随后构建移动窗, 结合先进经验的分析方法对道岔区轮轨潜在接触点进行分析, 进而构建道岔区轮轨多点接触几何模型。

1.1 模型建立

1.1.1 轮轨接触迹线的确定

道岔区轮轨接触点位置及坐标系示意图如图1所示。图中: $O_r X_r Y_r Z_r$ 和 $O_w X_w Y_w Z_w$ 分别为轨道坐标系和轮对坐标系, 其中轮对坐标系原点 O_w 为质心, X_w 为轮对前进方向, 因此侧滚角 θ 为 $O_w Y_w$ 和 $X_r O_r Y_r$ 平面间的夹角, 摇头角 δ 为 $O_w Y_w$ 和 $X_r O_r Z_r$ 平面间的夹角; d_w 为轮对横移量。

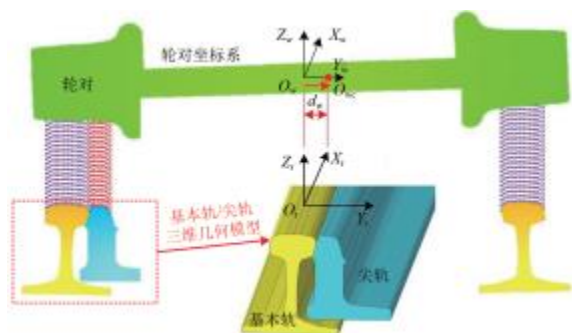


图1 道岔区轮轨接触点位置及坐标系示意图

车轮型面对应的旋转曲面可视为一系列以轮轨中心线为轴的滚动圆, 该滚动圆上轮轨接触点组成的空间曲线为轮轨接触迹线, 该迹线在 YOZ 平面上的投影可视为平面接触迹线。将车轮投影至车轮坐标系 $X_w = 0$ 平面上的曲线视为车轮初始轮廓线, 其中 $O_{wc} = (0 \quad d_w \quad 0)$, 可视为轮对横移后车轴中心线上的滚动圆中心; 由于轮对摇头角影响, 每个滚动圆上与钢轨可能发生潜在接触点 O_c 通常不位于最低点, 会存在一定的超前或滞后角度 δ , 因此滚动圆上任意轮廓线上点 i 在轮对坐标系中的坐标

x_{wi} , y_{wi} 和 z_{wi} 可表示为

$$\begin{pmatrix} x_{wi} \\ y_{wi} \\ z_{wi} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & \sin \delta_i \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \cos \delta_i \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ y_0 \\ z_0 \end{pmatrix} \pm \begin{pmatrix} 0 \\ d_w \\ 0 \end{pmatrix} \quad (1)$$

$i = 1, 2, \dots, n-1$

式中: y_0 和 z_0 分别为初始轮廓线上节点的横向、垂

向坐标。

对于道岔钢轨, 沿线路纵向的廓形会发生变化, 因此需要采用合适的数值方法获得可靠的钢轨廓形。将实测的道岔区关键控制断面处钢轨廓形进行离散处理, 采用分段三次多项式将离散钢轨进行插值拟合, 获得道岔非控制断面处钢轨潜在接触区段的坐标信息, 并将获得的坐标信息用于道岔区轮轨接触几何关系计算。

进行插值拟合时采用的分段三次多项式为

$$f_i(y) = a_i + b_i(y - y_i) + c_i(y - y_i)^2 + d_i(y - y_i)^3 \quad (2)$$

式中: $f_i(y)$ 为轮轨接触区坐标函数; a_i , b_i , c_i 和 d_i 均为多项式系数; y 和 y_i 分别为拟合节点和关键断面节点上的横向坐标。

若分析对象为磨耗或打磨后钢轨廓形, 则需要采用廓形测量仪每隔 1 段距离测量 1 次钢轨廓形, 尤其是磨耗严重区域, 测量距离越短则拟合得到的磨耗道岔钢轨型面信息越接近真实。

当利用分段三次多项式进行插值拟合时, 需要采用迹线法将空间曲面的面-面接触问题转化为曲线间的线-面接触问题, 转化过程主要考虑以下基本假设得到: 首先, 假设轮对为刚体, 且车轮型面上任意点位置均可通过轮对坐标系表征; 其次, 车轮型面通过轮对中心线为轴的曲面旋转而成, 且钢轨假定为道岔区该截面的拉伸体, 在已知摇头角 δ 和横移量 d_w 的条件下, 当上述假设成立时, 通过车轮型面与道岔钢轨廓形信息及它们的相对位置关系, 结合迹线法计算出车轮型面上的接触迹线; 最后, 利用“最小距离法”搜索接触迹线与对应钢轨距离最小的点, 用于确定轮轨接触点位置及相应的接触几何参数。

潜在接触点 O_c 在轨道坐标系中可表示为

$$O_c = \begin{pmatrix} \cos \delta \cos \theta & -\sin \delta \cos \theta & \sin \delta \sin \theta \\ \sin \delta \cos \theta & \cos \delta \cos \theta & \sin \delta \cos \theta \\ 0 & \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} y_{wi} \\ z_{wi} \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} d_w \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (3)$$

接触点法向量 n_{oc} 在总体坐标系中可表征为

$$\mathbf{n}_{oc} = \mathbf{n}_w \mathbf{n}_R \mathbf{k}_c \quad (4)$$

其中

$$\mathbf{h}^w = \begin{pmatrix} \cos \delta & -\sin \delta \cos \theta & \sin \delta \sin \theta \\ \sin \delta & \cos \delta \cos \theta & \cos \delta \sin \theta \\ 0 & \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{n}_R = \begin{pmatrix} \cos \delta & \sin \beta \sin \delta & \cos \beta \sin \delta \\ 0 & \cos \beta & \sin \beta \\ \sin \delta & \sin \beta \cos \delta & \cos \beta \cos \delta \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{k} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

式中： β 为轮轨接触角。

将侧滚角 θ 代入式 (3) 确定潜在接触点，通过调整横向位移 d_w 即可确定轮轨接触轨迹，所得轮轨接触轨迹可用于后续接触几何参数的计算。

1.1.2 轮轨接触点的计算

确定轮轨接触迹线后，可将轮轨空间曲面接触问题转化为空间曲线与曲面的接触问题，此时求解轮轨接触几何状态时可分为 2 类：当不考虑轮对摇头角时，可采用刚性约束模型，假设轮轨均为刚体且接触过程中不存在渗透，根据左右轮轨接触迹线与钢轨截面曲线之间的最小垂向距离之差接近零确定接触点位置，而受刚性约束下轮对横移、侧滚和垂向位移等因素不独立的影响，需要将轮对横移作为自变量求解轮轨接触点和侧滚角；当考虑轮对摇头角时，需要采用基于几何渗透的接触方法，该方法假定轮轨相互作用过程中轮轨接触迹线与钢轨截面发生渗透或脱离，但不存在变形。因此，基于几何渗透的接触方法可考虑轮轨接触过程中的 6 个独立自由度，并能高效模拟爬轨、跳轨和脱轨等特殊状态，并将渗透量最大对应的节点作为轮轨接触点。

利用几何渗透接触方法求解的具体步骤如下。

(1) 给定初始车轮垂向位移范围 $[\Delta h_s, \Delta h_L]$ ，并取两者的中值 $h = (\Delta h_s + \Delta h_L)/2$ 作为初始轮对垂向位置，保证接触迹线随之一起移动。

(2) 在已知轮对横移量和摇头角的条件下，通过经验值判断并搜索给定轮轨接触的侧滚角 θ 范围 $[\Delta \theta_s, \Delta \theta_L]$ ，基于最小距离法求取左右侧轮轨间最小距离差 $f(\theta) = \Delta d = d_{L, \min} - d_{R, \min}$ ($d_{L, \min}$ 和 $d_{R, \min}$ 分别为左侧和右侧轮轨间的距离)，若 $\Delta d = 0$ ，则判定轮轨发生接触；若 $\Delta d \neq 0$ ，该侧滚角条件下轮轨未发生接触，需要缩小侧滚角范围，若 $f(\theta)f(\Delta \theta_s) < 0$ ，则 $\Delta \theta_L = \theta$ 且侧滚角范围缩小至 $[\Delta \theta_s, \theta]$ ，反之，则 $\Delta \theta_s = \theta$ 且侧滚角范围缩小至 $[\theta, \Delta \theta_L]$ 。

通过反复循环迭代调整轮对侧滚角，使得 Δd 数值接近 0，满足左侧最小距离与右侧最小距离相等的要求，进而可确定此时的轮对姿态和轮轨接触

点位置，通过窗口放缩逐渐逼近真实侧滚角，可显著提升程序计算效率。

(3) 保持轮对姿态不变，将道岔区基本轨与尖轨的轨头廓形分开计算，分别求解基本轨和尖轨与车轮型面的最小距离 d_{st} 和 d_{sw} ，同时获取两者间垂向距离差 $\Delta d_{st-sw} = d_{st} - d_{sw}$ 。

(4) 当列车进入道岔后，会发生多点接触，因此，可根据轮轨接触迹线的 1 阶和 2 阶导数找寻道岔钢轨上潜在的多点接触区域。

$$\begin{cases} f(d_w) = 0 \\ f''(d_w) \geq 0 \end{cases} \quad (5)$$

(5) 结合上述计算内容，确定多个轮轨接触点处的渗透量和接触刚度^[17]，结合 ANALYN 法向力计算模型，求解潜在轮轨接触点处的垂向作用力。

$$F_{st} = \left(\frac{\delta_{sw}}{\delta_{sw}(1)} \right)^{\frac{3}{2}} \quad (6)$$

$$F_{sw} = \left(\frac{\delta_{st}}{\delta_{st}(1)} \right)^{\frac{3}{2}} \quad (7)$$

式中： F_{st} 和 F_{sw} 分别为基本轨和尖轨处的潜在接触力； $\delta_{st}(1)$ 为单位法向力作用下车轮与基本轨间的法向刚体穿透量； $\delta_{sw}(1)$ 为单位法向力作用下车轮与尖轨之间的法向刚体穿透量； δ_{st} 为基本轨承受车轮荷载时的垂向刚体位移； δ_{sw} 为尖轨承受车轮荷载时的垂向刚体位移； d_{st} 和 d_{sw} 分别为基本轨和尖轨与车轮型面的最小距离。

ANALYN 法向力计算模型属于虚拟穿透原理方法的一种，该模型仿真计算精度高^[17]。

(6) 针对轮轨潜在接触点的位置，再结合尖轨和基本轨受力状态，在考虑尖轨/基本轨相对运动的基础上，基于车轮与尖轨、基本轨渗透量和相对垂向刚体位移等参数判断多点接触状态是否发生，即：

$$\begin{cases} \Delta d_{st-sw} > \sigma_{st} + \delta_{st} & \text{单点接触} \\ -\delta_{sw} \leq \Delta d_{st-sw} \leq \sigma_{st} + \delta_{st} & \text{多点接触} \\ \Delta d_{st-sw} < -\delta_{sw} & \text{单点接触} \end{cases} \quad (8)$$

式中： Δd_{st-sw} 为尖轨与基本轨上接触点之间的垂向距离差； σ_{st} 为基本轨完全承受车轮荷载时的垂向刚体位移； σ_{sw} 为尖轨完全承受车轮荷载时的垂向刚体位移。

1.2 模型验证

以 LM_A 车轮型面和 18 号高速道岔尖轨顶宽 15 mm 断面为例，将其导入至道岔区轮轨多点接触

几何模型中进行计算,在考虑摇头角的情况下,基于道岔区轮轨多点接触几何模型的计算结果分别与迹线法和商业软件 SIMPACK 的计算结果进行对

比,验证本文方法的正确性。

考虑轮对摇头角的情况下,基于本文模型和迹线法结果如图2所示

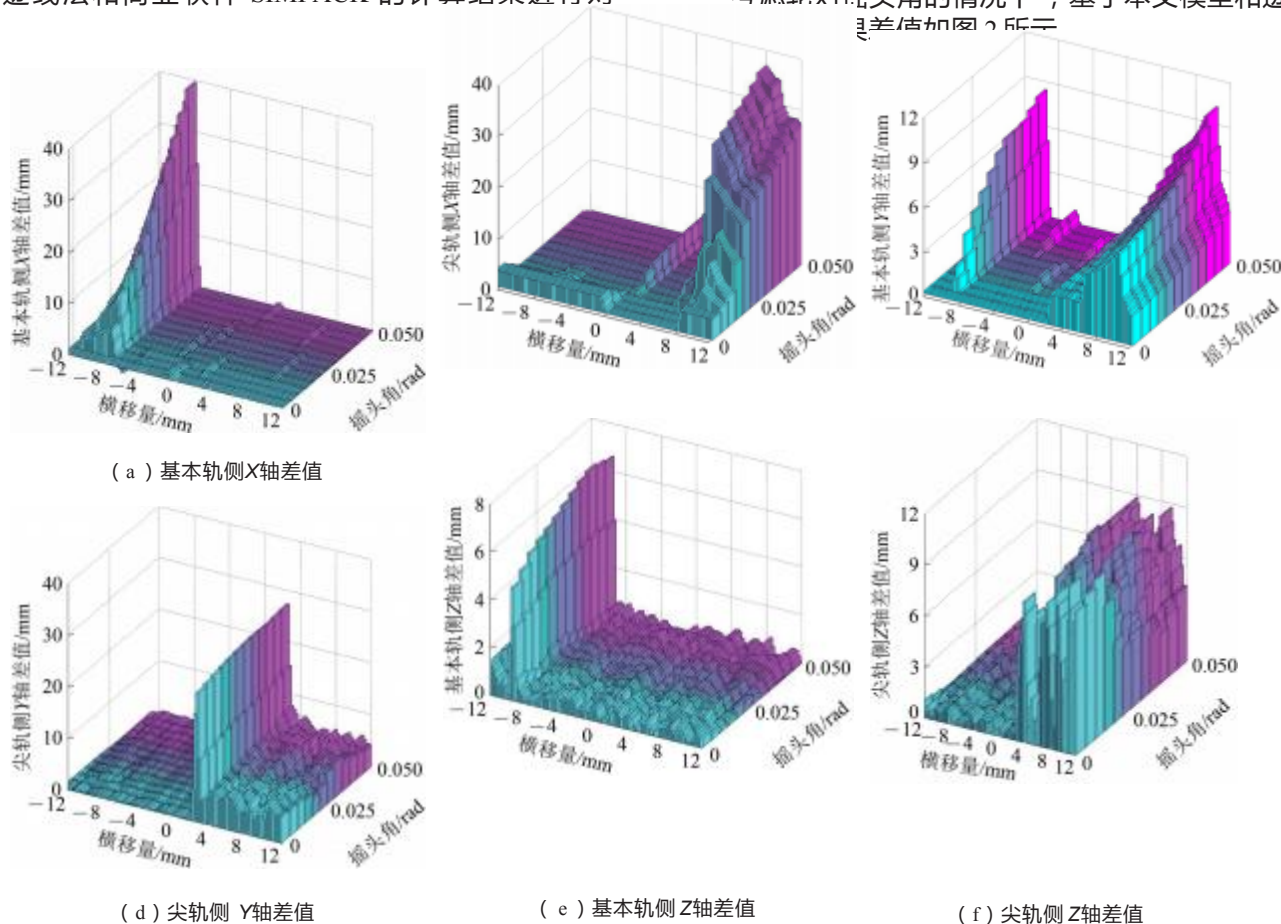


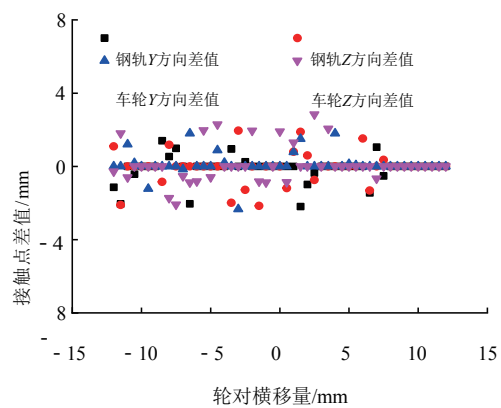
图2 基于道岔区轮轨多点接触几何模型和迹线法计算结果差值(考虑摇头角)

考虑轮对摇头角时,接触点所组成的轮轨接触迹线会偏离主轮廓线对应的道岔钢轨,运用迹线法所得结果与本文方法计算结果偏差较大,尖轨和基本轨上接触点的坐标差值最大可达40 mm。受道岔变截面钢轨廓形和轮轨不对称激励的影响,轮对在道岔中必然存在一定的摇头角,加之迹线法未曾考虑道岔区多点接触等特殊状况,因此传统迹线法不再适用道岔轮轨接触几何的计算,也无法考虑轮轨廓形演变对接触几何关系的影响。

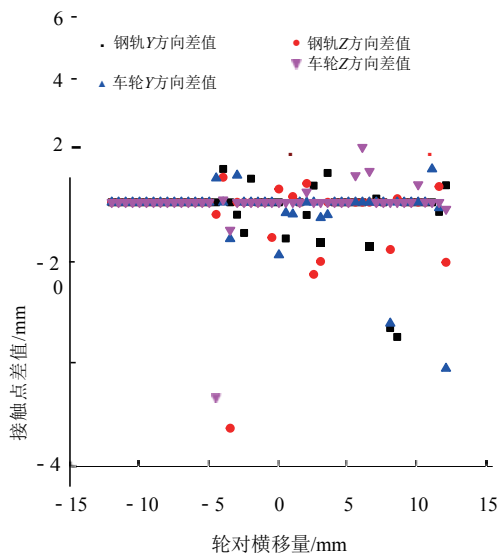
为进一步验证程序计算结果的精确性,当轮对存在摇头角时,利用轮轨接触几何程序与动力学软件 SIMPACK 的计算结果差值如图3所示。由图3可以看出:2种计算结果中轮轨接触点在尖轨和基本轨上的分布区域大致相近,基本集中于0附近,但部分结果存在较小偏差,位于基本轨和尖轨上的接触点最大偏差值分别为3.8和2.1 mm,该偏差值远小于接触斑尺寸,可从一定程度上验证程序计算结果的精确性。

2 轮轨廓形演变条件下轮轨接触几何计算

基于道岔区轮轨多点接触几何模型,以车轮 LM_A 型踏面与对应的18号高速道岔钢轨廓形为研究目标,分别测试不同磨损阶段轮轨的真实几何廓形,揭示轮轨廓形动态演变对接触点分布和接触几何参数(滚动圆半径差、侧滚角等)的影响。



(a) 基本轨差值



(b) 尖轨差值

图3 基于道岔区轮轨多点接触几何模型与动力学软件计算结果差值 (考虑摇头角)

2.1 轮轨真实廓形的测试

为揭示道岔钢轨廓形演变过程中与不同服役阶段车轮磨损型面相互作用时的轮轨接触几何，需准确获取不同服役时刻下轮轨真实几何廓形，以沪宁城际高速铁路镇江站高速道岔作为研究目标，建立钢轨廓形跟踪测试试验段，该试验线路日通过总重为 48 t，过岔列车日均 80 次，平均运营速度为 $250 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 。采用轮轨廓形测量仪 Miniprof 定期对高速道岔钢轨廓形及相关车轮型面进行跟踪测试，测试仪器和现场情况如图 4 所示。测试钢轨廓形时，关键断面尽量选用道岔设计生产过程中的控制断面，并每隔 0.2 m 取 1 个测试断面，在提升测试精度的同时保证所测廓形变化量能够反映道岔钢



(a) 测试仪器 Miniprof

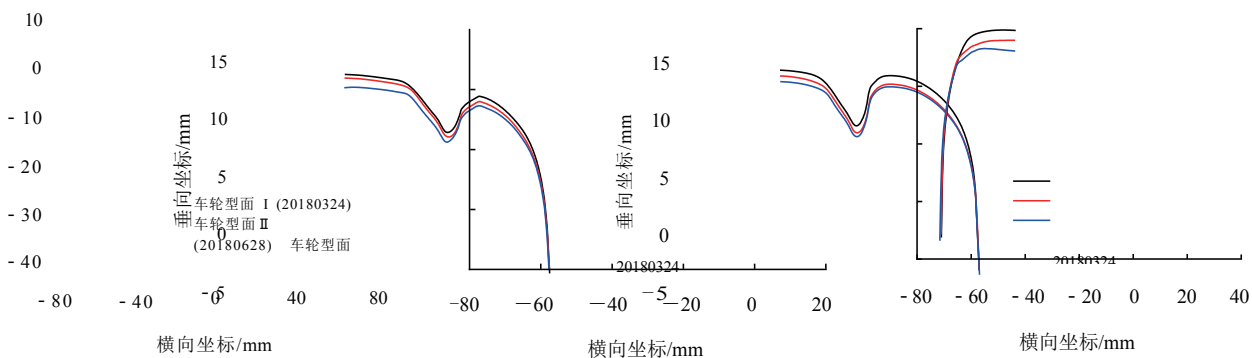
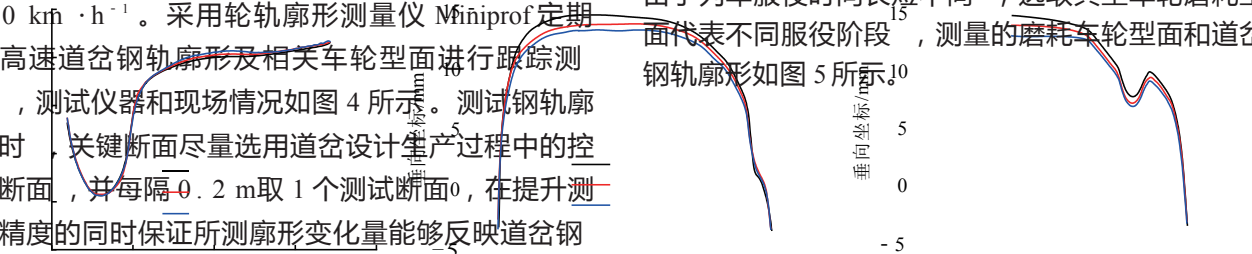


(b) 35 mm 尖轨断面廓形测试

图4 测试仪器和现场情况

轨廓形的纵向变化特征。

选取 2018 年 3 月—2018 年 10 月的测试结果，其中道岔区钢轨组合廓形选取顶宽分别为 5，20，35 和 50 mm 的关键断面。车轮共测量 200 个型面，由于列车服役时间长短不同，选取典型车轮磨损型面代表不同服役阶段，测量的磨损车轮型面和道岔钢轨廓形如图 5 所示。



(a) 车轮型面

(b) 顶宽 5 mm 钢轨廓形

(c) 道岔 20 mm 钢轨廓形

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/997016065031006101>