

# 轮轨接触点位置变化对测力轮对 测量影响及其补偿方法<sup>\*</sup>

陈春俊<sup>1,2</sup> 邓倩<sup>1</sup>

(1. 西南交通大学机械工程学院, 610031, 成都; 2. 轨道交通运维技术与装备四川省重点实验室, 610031, 成都)

**摘要** [目的] 列车运行过程中, 轮对存在随机振动, 导致轮轨接触点位置发生变化, 进而影响轮轨力的测量结果。为了解决该问题, 提出一种测量补偿方法。[方法] 介绍了轮轨接触点位置变化对测力轮的影响; 介绍了轮轨接触点位置变化后, 轮轨力测量的补偿方案; 通过仿真分析, 验证考虑轮轨接触点位置变化的轮轨力测量补偿方案的有效性。[结果及结论] 添加美国五级轨道不平顺谱激励后, 轮轨接触点位置最大偏移量为 17.53 mm, 垂向力最大相对误差达到了 22.85%; 采用所提测量补偿方法后, 轮轨垂向力最大相对误差为 8.02%, 测量精度明显提高。叠加尖弯不平顺谱后, 脱轨系数最大达到了 1.016 8, 超过允许限度; 采用无偏移标定系数计算出的脱轨系数为 0.347 7, 采用所提补偿方法计算出的脱轨系数为 0.962 2, 说明该方法能够更准确地反映出列车的运行安全状态。

**关键词** 地铁; 测力轮对; 轮轨接触点; 轮轨力测量补偿方法

**中图分类号** U211.5

**DOI:**10.16037/j.1007-869x.2024.12.019

## Influence of Wheel-Rail Contact Point Changes on Force-Measuring Wheelset Measurement and the Compensation Method

CHEN Chunjun<sup>1,2</sup>, DENG Qian<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical Engineering of Southwest Jiaotong University, 610031, Chengdu, China; 2. Sichuan Provincial Key Laboratory of Rail Transit Operation and Maintenance Technology and Equipment, 610031, Chengdu, China)

**Abstract** [Objective] During train operation, there is random vibration in the wheelset, which causes position changes of the wheel-rail contact point, thereby affecting the measurement results of the wheel-rail force. To solve this problem, a measurement compensation method is proposed. [Method] The influence of wheel-rail contact point position changes on the force-measuring wheel, and the compensation scheme for wheel-rail force measurement after wheel-rail contact point po-

sition change are introduced. The validity of the wheel-rail force measurement compensation scheme considering wheel-rail contact point position changes is verified through simulation analysis. [Result & Conclusion] After adding the U. S Grade V track irregularity spectrum excitation, the maximum offset of the wheel-rail contact point position is 17.53 mm, and the maximum relative error of the vertical force reaches 22.85%; after adopting the proposed measuring compensation method, the maximum relative error of the wheel-rail vertical force decreases to 8.02%, and the measurement accuracy is significantly improved. After superimposing the sharp bend irregularity spectrum, the maximum derailment coefficient reaches 1.016 8, exceeding the allowable limit; the derailment coefficient calculated by the non-offset calibration coefficient is 0.347 7, and the derailment coefficient calculated with the proposed compensation method is 0.962 2, indicating that this method can accurately reflect better the train running safety status.

**Key words** subway; force-measuring wheelset; wheel-rail contact point; wheel-rail force measurement compensation method

轮轨力是列车安全性评估与动力学性能测试中的重要物理量。为提高测力轮对在轮轨接触点变化情况下轮轨力测量的准确性, 国内外学者进行了大量的研究。文献[1]证明了轮轨接触点位置变化情况下, 轮轨垂向力作用轮对会产生一个弯矩, 弯矩的大小与垂向力偏移中心接触点的位移成正比, 轮轨力的测量结果会受到弯矩影响, 进而导致测量结果不准确。文献[2-3]提出分别布置横向桥、垂向桥和作用点位置桥来解耦横向力和垂向力, 但由于组桥数量较多且涉及到打孔问题, 其在一定程度上会影响轮对的安全性。文献[4]利用回归分析寻找轮轨力与接触点位置偏移量之间的相

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金项目(51975487, U2034210); 四川省自然科学基金项目(2022NSFSC0395)

关系,将原来的 3 个方程构建成为只包含轮轨横向力和垂向力两个未知量的方程,但轮轨力标定系数没有完全模拟标定试验,其系数存在一定的不准确性。文献[5]验证了用轮轨横向相对位移近似替代轮轨接触点位移的可行性,并提出一种脱轨监测方案,但在测量轮轨力实际工程中尚未获得应用。以上文献对轮轨力测量影响因素及测量方法进行了研究,但没有针对由于轮轨接触点偏移产生弯矩而对轮轨力测量造成的影响问题提出补偿方法。

在列车运行过程中,由于轮对与钢轨会发生相对横向偏移,轮轨接触点位置的变化将会影响轮轨力测量结果的准确性。基于此,本文分析了轮轨力在作用点位置变化下的影响及测量补偿方法,并通过仿真试验,验证所提补偿方法的有效性。

## 1 轮轨接触点位置变化对测力轮对的影响

### 1.1 测力轮对连续测量法原理

GB/T 5599—2019《机车车辆动力学性能评定及试验鉴定规范》对测力轮对连续测量方法进行了介绍。横向桥连续测量方案示意图如图 1 所示。在辐板外侧布置两组桥(编号为 1~8 及 1'~8'),两组桥相位差为 90°,每个桥由 8 个应变片组成。应变片在辐板外侧 45°径向均匀贴片布置。

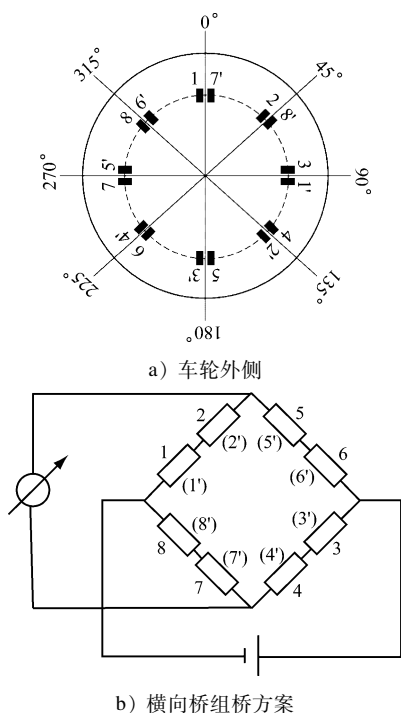


图 1 横向桥连续测量方案示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the lateral bridge continuous measurement scheme

垂向桥连续测量方案示意图如图 2 所示。在辐板外侧同样布置两组桥,两组桥相位差为 45°,每个桥由 8 个应变片组成。应变片在辐板内外侧 45°径向均匀贴片布置。

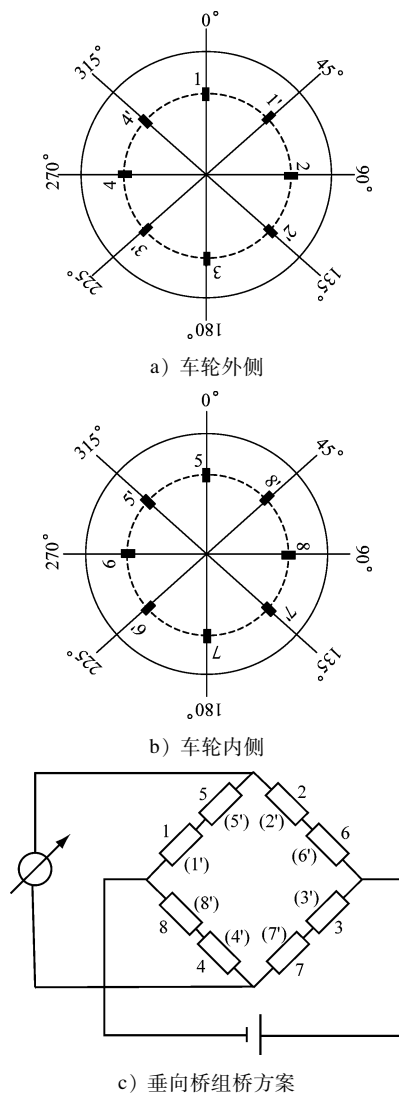


图 2 垂向桥连续测量方案示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the vertical bridge continuous measurement scheme

### 1.2 轮轨接触点位置变化对轮轨力测量影响

轮对在轨道不平顺等扰动下,轮轨接触点位置会发生横向偏移,接触点的轮轨接触面会发生旋转,轮轨接触角也会发生变化<sup>[6]</sup>。

当轮轨接触点位置由 A 变化至 B 时,轮对受到的附加弯矩  $M$  可以表示为:

$$M = P_A x \quad (1)$$

式中:

$P_A$ ——A 点的轮轨垂向力;

$x$ ——轮轨接触点横向偏移量。

轮对辐板上的应变是受轮轨力、附加弯矩和轮对转角综合影响的函数,当辐板上相同半径的应变片组成测量电桥后,电桥的输出也为轮轨力、附加弯矩和轮对转角的函数。电桥输出值  $U_{out}$  可以表示为:

$$U_{out} = (Q, P, M, \theta) = K_Q(\theta, x)Q + K_P(\theta, x)P + K_M(\theta, x)M \quad (2)$$

式中:

$Q$ ——横向力;

$P$ ——垂向力;

$\theta$ ——轮对转角;

$K_Q, K_P, K_M$ ——单位大小的横向力、垂向力、力矩在单独作用时的应变系数。

将式(1)代入式(2)可得:

$$U_{out} = K_Q(\theta, x)Q + K_P(\theta, x)P + K_M(\theta, x)Px = K_Q(\theta, x)Q + [K_P(\theta, x) + K_M(\theta, x)x]P = K_Q(\theta, x)Q + K_{PM}(\theta, x)P \quad (3)$$

$$K_{PM}(\theta, x) = K_P(\theta, x) + K_M(\theta, x)x \quad (4)$$

由式(3)可知,在列车运行过程中,当轮轨接触点位置变化时,附加弯矩也会影响轮轨力测量结果。此时,若标定系数仍为在踏面滚动圆处所得到的计算标定系数,则测量得到的轮轨力就会产生误差。

## 2 补偿方案

### 2.1 补偿方案思路

针对轮轨接触点位置变化对轮轨力测量造成影响的问题,补偿方案流程为:①对测力轮对进行标定,以获得不同偏移点的标定系数(包括垂向力比例系数、横向力比例系数、垂向力对横向桥影响系数、横向力对垂向桥影响系数);②在列车运行过程中,获取轨道方向不平顺和轴箱横向振动加速度;③利用轨道方向不平顺和轴箱横向位移加速度,获得轮轨横向相对位移;④根据轮轨横向相对位移和偏移点标定系数,获得实际标定系数;⑤根据轮轨横向相对位移和实际标定系数获得补偿后的轮轨力。

### 2.2 基于轮轨相对位移估计轮轨接触点位置

列车实际运行过程中,钢轨存在轨道不平顺进而会对轮对运动产生激扰,且轮对作为旋转部件,轮轨的接触点位置一般难以精确测量。为了贴合

实际工程需求,需研究能够表征轮轨接触几何关系且容易测量的指标。文献[5]的研究结果表明,可用轮轨相对位移近似代替轮轨接触位移。轮轨横向相对位移  $y$  可以表示为<sup>[5]</sup>:

$$y = y_w - y_r \quad (5)$$

式中:

$y_w$ ——车轮横向位移;

$y_r$ ——轨道方向不平顺幅值。

轴箱通过轴承直接与轮对连接,轴箱的振动状态能较好地反映轮对的振动状态,因此可用轴箱振动位移表征轮对振动位移,轨道不平顺可使用轨道不平顺检测装置测量获得。列车行驶时,可测量轴箱的横向振动,利用频域积分获得车轮横向位移<sup>[7]</sup>。

### 2.3 考虑作用点位置自适应标定系数

通过测力轮对测量轮轨力是一种准静态方法,需要对轮对进行标定试验,按照连续测量法进行贴片和组桥。载荷加载示意图如图3所示,其中: $P_1$ 、 $P_2$ 为加载的垂向力; $Q_1$ 、 $Q_2$ 为加载的横向力。

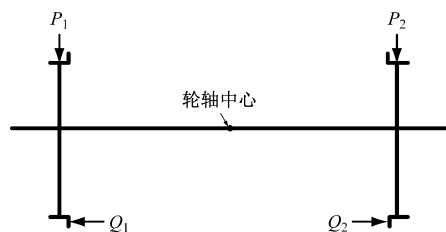


图3 载荷加载示意图

Fig. 3 Load loading schematic diagram

垂向力、横向力分别逐级加载,计算  $K_P$ 、 $K_Q$  (垂向力、横向力标定时,垂向桥、横向桥输出应变与加载力比值),以及相互影响系数  $E_{QP}$  和  $E_{PQ}$  (垂向力、横向力标定时,横向桥、垂向桥受到影响的输出应变与加载力比值)。

在进行标定试验时,通常垂向载荷是在车轮踏面的滚动圆处施加。考虑列车实际运行过程中轮轨接触点位置的变化,车辆轮对与钢轨的作用点位置一般在名义滚动圆附近 20 mm 以内摆动<sup>[8]</sup>。因此,改变垂向载荷施加位置,在距离滚动圆半径  $\pm 20$  mm 范围内,每隔 2 mm 施加垂向载荷,分别计算不同轮轨接触点位置的应变标定系数。根据式(5)计算接触点相对位移,对于不在标定测量结果中的接触点相对位移进行插值计算,进而根据轮轨接触点位置对应自适应标定计算数据,以提高轮轨力测量

精度。

### 3 仿真分析

#### 3.1 仿真数据获取

为验证考虑轮轨接触点位置变化的轮轨力测量补偿方法的有效性,基于地铁列车的实际参数,采用多体动力学软件 Simpack 建立地铁 B 型车模型(见图 4),模拟动态线路试验。建模时,考虑轮轨结构非线性接触、减振器与横向止挡等悬挂结构的非线性特性,车轮采用 S1002 踏面,钢轨采用 60 kg 标准型钢轨,并对地铁列车模型的前轮对进行柔性化处理。以列车运行速度为 60 km/h 为例进行仿真分析,轨道不平顺谱采用美国五级谱。仿真时间为 8 s,采样频率为 2 000 Hz。

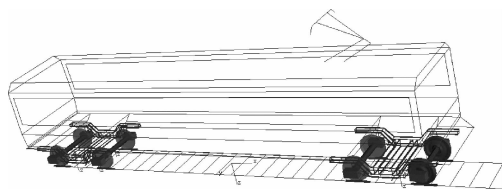


图 4 地铁 B 型车多体动力学模型

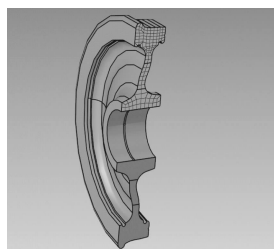
Fig. 4 Multi-body dynamics model of B-type subway car

仿真轮对采用曲辐板、S1002 踏面,通过 Hypermesh 软件对轮对划分网格。划分的单元为六面体单元,单元类型为 Solid185,共 343 107 个节点,324 800 个单元。轮对密度为  $7\,850\text{ kg/m}^3$ ,弹性模量为  $2.1 \times 10^{11}\text{ Pa}$ ,泊松比为 0.3。轮对有限元模型如图 5 所示。利用有限元软件 ANSYS Workbench 模拟测力轮对静态标定试验,按照组桥“自扰大、串扰小”原则,同时根据仿真结果,选择距离轮轴中心 180 mm 位置处布置横向桥,280 mm 位置处布置垂向桥。

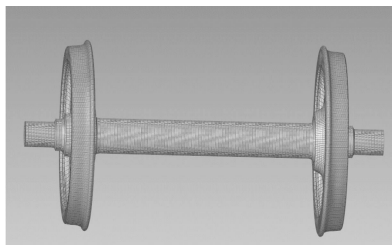
应变片一般组成惠斯通全桥,测量电桥的输出与电桥电源电压成正比,相对桥臂应变相加,相邻桥臂应变相减,按照图 1 及图 2 所示的组桥贴片方案进行组桥。

#### 3.2 接触点位置变化影响

对轴箱的横向振动加速度进行频域积分获得轮对横向位移,频域积分后的轮对横向位移与软件导出的轮对横向位移随时间的变化关系如图 6 所示。由图 6 可知:对轴箱横向振动加速度进行频域积分能够获得较为准确的轮对横向位移,最大峰值误差为 1.908 mm。



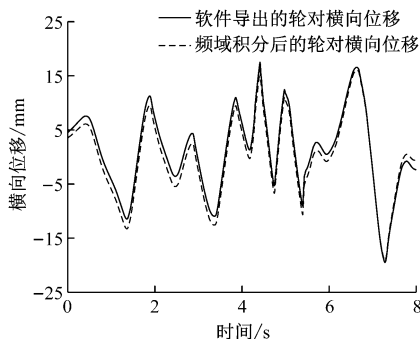
a) 车轮剖面图



b) 轮对

图 5 轮对有限元模型

Fig. 5 Wheelset finite element model



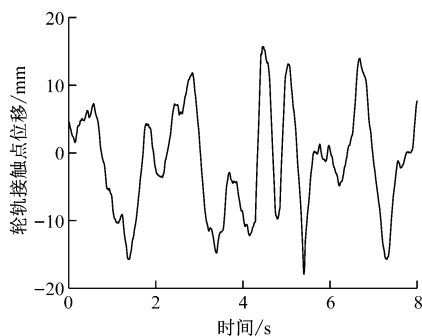
注:轮对横向位移以轮对中心线为基准,指向轮对外侧为正,指向轮对内侧为负。

图 6 频域积分后的轮对横向位移与软件导出的轮对横向位移随时间的变化关系

Fig. 6 Change relationship between wheelset lateral displacement after frequency domain integration and that derived by the software over time

将通过频域积分估计得到的轮对横向位移与输入的方向不平顺按式(5)进行计算,轮轨接触点位移随时间的变化关系,如图 7 所示。

参考测力轮对静态标定设计仿真工况,垂向载荷由 30 ~ 80 kN 逐级加载,横向载荷由 10 ~ 60 kN 逐级加载,分别测试  $0^\circ \sim 360^\circ$  范围内,每间隔  $45^\circ$  位置时,垂向桥和横向桥的输出应变值。以右轮数据为例进行计算分析,横向载荷下的  $K_Q = 8.225\,7$ ,  $E_{QP} = 0.430\,6$ ,接触点位置变化后的  $K_P$  与  $E_{PQ}$  如表 1 所示。



注:轮轨接触点位移以偏移滚动圆中心外侧为正,以偏移滚动圆中心内侧为负。

图 7 轮轨接触点位移随时间的变化关系

Fig. 7 Change relationship of wheel-rail contact point displacement over time

表 1 接触点位置变化后的  $K_p$  与  $E_{PQ}$

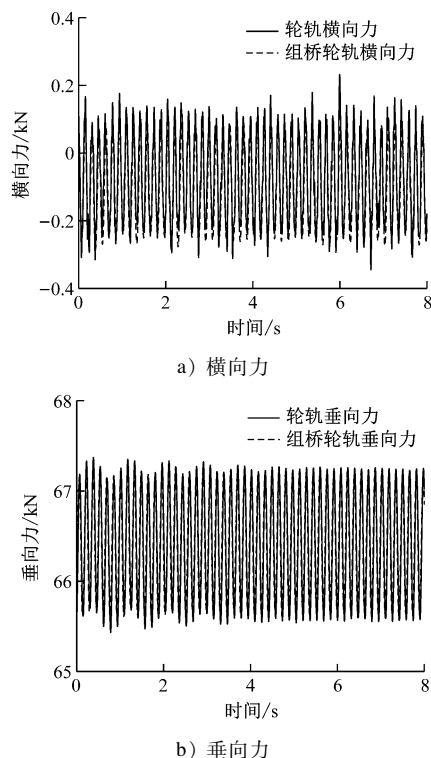
Tab. 1  $K_p$  and  $E_{PQ}$  after contact point position changes

横向偏移量/mm	$E_{PQ}$	$K_p$
-20	-0.458 1	1.258 4
-18	-0.424 0	1.365 7
-16	-0.367 8	1.658 5
-14	-0.351 2	1.266 4
-12	0.040 2	0.288 7
-10	-0.036 8	-0.224 4
-8	0.114 9	0.455 5
-6	0.120 5	-0.844 7
-4	0.225 8	-1.454 1
-2	0.252 2	-1.748 5
0	0.262 6	-2.075 3
2	0.262 7	-1.525 8
4	0.230 0	-1.654 8
6	0.221 0	-1.125 4
8	0.184 7	-0.654 8
10	0.101 0	0.254 5
12	-0.251 0	-0.786 8
14	-0.268 0	0.859 5
16	0.032 7	1.414 7
18	-0.219 6	0.945 2
20	-0.344 2	2.215 2

### 3.3 补偿方法验证

不考虑轨道不平顺激励时,轮轨接触点位置基本在踏面滚动圆的左、右侧微小变动,将偏移滚动圆位置为 0 的标定系数代入式(3)进行计算,组桥轮轨力和多体动力学仿真轮轨力随时间的变化关

系如图 8 所示。由图 8 可知:组桥轮轨力与仿真轮轨力基本接近,横向力绝对误差最大值为 0.138 1 kN,垂向力绝对误差最大值为 0.406 2 kN。由此可知,通过应变片组桥计算出的轮轨力较为准确。



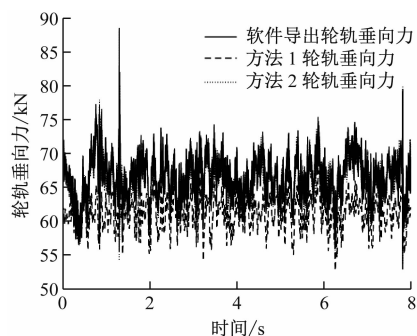
注:横向力以指向轮对外侧为正,以指向轮对内侧为负。

图 8 组桥轮轨力和多体动力学仿真轮轨力随时间的变化关系

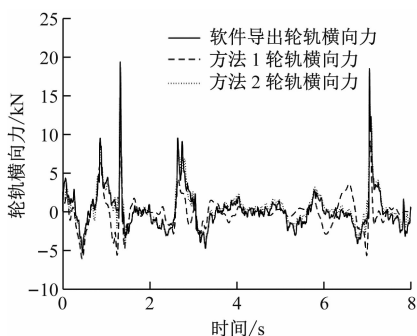
Fig. 8 Change relationship between bridge wheel-rail force and multi-body dynamics simulation of wheel-rail force over time

添加美国五级谱的轨道不平顺激励进行动力学仿真试验,此时轮轨接触点位置横向最大偏移值为 17.53 mm。通过 Simpack 仿真软件直接导出轮轨力,同时将计算方法分为利用不考虑运行过程接触点变化的标定系数得到的轮轨力(方法 1),以及利用补偿方法后得到的轮轨力(方法 2)。轨道不平顺激励下,3 种轮轨力对比如图 9 所示。轮轨横向力的绝对误差最大值为 11.501 7 kN,轮轨垂向力的绝对误差最大值为 20.454 9 kN,轮轨垂向力相对误差达到了 22.85%。将由式(5)得到的轮轨横向相对位移作为轮轨接触点位置变化量,更新实际标定系数补偿后,轮轨横向力的绝对误差最大值为 3.815 5 kN,轮轨垂向力的绝对误差最大值为 6.163 5 kN,轮轨垂向力相对误差为 8.02%,轮轨力

测量精度获得了显著提高。



a) 轮轨垂向力



b) 轮轨横向力

图9 轨道不平顺激励下的3种轮轨力对比

Fig.9 Comparison of three wheel-rail forces under track irregularity disturbance

有缝线路接头区、无缝线路缓冲区的不平顺可用尖弯不平顺近似模拟<sup>[9]</sup>,在第4 s处叠加如图10所示的尖弯不平顺谱后,通过Simpack 仿真软件直接导出脱轨系数,同时将计算方法分为利用不考虑运行过程接触点变化的标定系数得到的脱轨系数(方法3)、采用补偿方法后得到的脱轨系数(方法4)。3种脱轨系数随时间的变化关系如图11所示。在尖弯不平顺处,Simpack 软件导出的脱轨系数增至1.016 8,直线线路的脱轨系数安全值应不超过

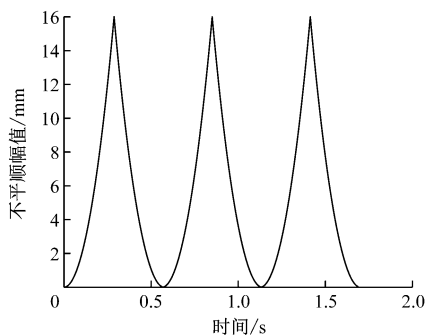


图10 尖弯不平顺谱

Fig.10 Sharp bend irregularity spectrum

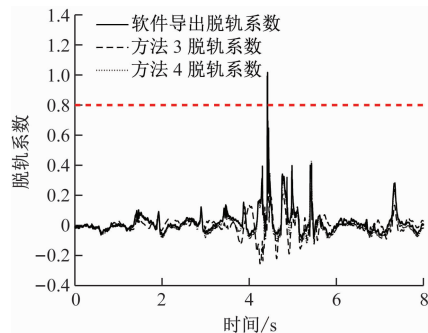


图11 3种脱轨系数随时间的变化关系

Fig.11 Change relationship of three derailment coefficients over time

0.8;方法3的脱轨系数为0.347 7,远小于此时的脱轨系数;方法4的标定系数为0.962 2,更能够准确反映列车的运行安全状态。

## 4 结论

1) 没有施加轨道不平顺激励时,轮轨接触点位置变化较小,使用接触点位置无偏移时的标定系数计算出的组桥轮轨力与多体动力学轮轨力仿真结果相差较小。在添加美国五级谱轨道不平顺后,轮轨接触点位置出现了偏移,使用无偏移的标定系数计算时,横向力绝对误差最大值达到了11.501 7 kN、垂向力绝对误差最大值达到了20.454 9 kN。采用补偿方法后,横向力绝对误差最大值为3.815 5 kN、垂向力绝对误差最大值为6.163 5 kN,轮轨力测量精度显著提高。

2) 叠加尖弯不平顺后,脱轨系数增至1.016 8,无偏移标定系数计算出的脱轨系数为0.347 7,远小于此时的脱轨系数;考虑补偿方法后,计算出的标定系数为0.962 2,能够准确反映列车的运行安全状态。

## 参考文献

- [1] 郭辉. 直辐板测力轮对在线连续测量方法研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2020.  
GUO Hui. Research on on-line continuous measurement method of wheel set with straight spoke plate[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2020.
- [2] 陈建政. 轮轨作用力和接触点位置在线测量理论研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2008.  
CHEN Jianzheng. Theoretical study on on-line measurement of wheel-rail force and contact point position[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2008.

(下转第126页)

的交通小区内高饱和停车场泊位数占比;当 O 端交通小区位于核心区时,目的地停车场拥挤程度的最佳度量指标为经距离折减的交通小区内高饱和停车场个数占比。道路拥挤程度的最佳度量指标为起、终点交通小区间途经的交通小区拥挤度加权的拥挤道路总延长。

3) 当 O 端交通小区位于郊区时,道路拥挤程度对交通小区间全日城轨分担率的影响程度大于目的地停车场拥挤程度;当 O 端交通小区位于市区和核心区时,目的地停车场拥挤程度对交通小区间全日城轨分担率的影响程度大于道路拥挤程度。

## 参考文献

- [1] 胡章浩. 城市轨道交通走廊交通方式分担率预测研究[D]. 西安: 长安大学, 2019.  
HU Zhanghao. Study on prediction of traffic mode sharing rate in urban rail transit corridor[D]. Xi'an: Chang'an University, 2019.
- [2] DUNCAN M. To park or to develop: trade-off in rail transit passenger demand[J]. Journal of Planning Education and Research, 2010, 30(2): 162.
- [3] CHOI J, LEE Y J, KIM T, et al. An analysis of metro ridership at the station-to-station level in Seoul[J]. Transportation, 2012, 39(3): 705.
- [4] ZHAO J, DENG W, SONG Y, et al. Analysis of metro ridership at station level and station-to-station level in Nanjing: an approach based on direct demand models[J]. Transportation, 2014, 41(1): 133.
- [5] YANG J, CHEN S, QIN P, et al. The effect of subway expansions on vehicle congestion: evidence from Beijing[J]. Journal of Environmental Economics and Management, 2018, 88: 114.
- [6] ADLER M W, VAN OMMEREN J N. Does public transit reduce car travel externalities? Quasi-natural experiments' evidence from transit strikes[J]. Journal of Urban Economics, 2016, 92: 106.
- [7] CHENG Y, YE X, WANG Z. A forecasting model of the proportion of peak-period boardings for urban mass transit system: a case study of Osaka prefecture [C] // 2016 TRB Annual Meeting. Washington, D. C., USA: Transportation Research Board, 2016: 10.
- 收稿日期:2022-10-17 修回日期:2022-11-14 出版日期:2024-12-10  
Received:2022-10-17 Revised:2022-11-14 Published:2024-12-10  
• 通信作者:潘轲,助理工程师,601677183@qq.com  
• ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议  
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license
- [1] 胡章浩. 城市轨道交通走廊交通方式分担率预测研究[D]. 西安: 长安大学, 2019.  
HU Zhanghao. Study on prediction of traffic mode sharing rate in urban rail transit corridor[D]. Xi'an: Chang'an University, 2019.
- [2] DUNCAN M. To park or to develop: trade-off in rail transit passenger demand[J]. Journal of Planning Education and Research, 2010, 30(2): 162.
- [3] CHOI J, LEE Y J, KIM T, et al. An analysis of metro ridership at the station-to-station level in Seoul[J]. Transportation, 2012, 39(3): 705.
- [4] ZHAO J, DENG W, SONG Y, et al. Analysis of metro ridership at station level and station-to-station level in Nanjing: an approach based on direct demand models[J]. Transportation, 2014, 41(1): 133.
- [5] YANG J, CHEN S, QIN P, et al. The effect of subway expansions on vehicle congestion: evidence from Beijing[J]. Journal of Environmental Economics and Management, 2018, 88: 114.
- [6] ADLER M W, VAN OMMEREN J N. Does public transit reduce car travel externalities? Quasi-natural experiments' evidence from transit strikes[J]. Journal of Urban Economics, 2016, 92: 106.
- [7] CHENG Y, YE X, WANG Z. A forecasting model of the proportion of peak-period boardings for urban mass transit system: a case study of Osaka prefecture [C] // 2016 TRB Annual Meeting. Washington, D. C., USA: Transportation Research Board, 2016: 10.
- 收稿日期:2022-10-17 修回日期:2022-11-14 出版日期:2024-12-10  
Received:2022-10-17 Revised:2022-11-14 Published:2024-12-10  
• 通信作者:潘轲,助理工程师,601677183@qq.com  
• ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议  
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license
- (上接第 118 页)
- [3] 金新灿, 孙守光, 李强. 高速车辆运行过程中轮轨接触点的测试研究[J]. 铁道学报, 2019, 41(4): 41.  
JIN Xincan, SUN Shouguang, LI Qiang. Research on measuring rail-wheel contact points during operation of high-speed rolling stocks[J]. Journal of the China Railway Society, 2019, 41(4): 41.
- [4] 李洲. 轮轨接触点位置对轮轨力测量的影响研究[D]. 湘潭: 湘潭大学, 2016.  
LI Zhou. Study on the influence of wheel-rail contact point position on wheel-rail force measurement[D]. Xiangtan: Xiangtan University, 2016.
- [5] 艾永军, 陈春俊, 熊仕勇, 等. 高速列车脱轨监测关键算法研究[J]. 中国测试, 2019, 45(10): 109.  
AI Yongjun, CHEN Chunjun, XIONG Shiyong, et al. Research on key algorithms for derailment monitoring of high speed trains [J]. China Measurement & Test, 2019, 45(10): 109.
- [6] 王振, 陈照波, 焦映厚, 等. 车轮阻尼及接触点位置对轮轨接触过程稳定性的影响[J]. 振动工程学报, 2012, 25(6): 619.  
WANG Zhen, CHEN Zhaobo, JIAO Yinghou, et al. Influence of wheel damping and contact position on the stability of wheel-rail contact system[J]. Journal of Vibration Engineering, 2012, 25(6): 619.
- [7] 谢素超, 王进, 谭鸿创. 基于频域积分的车体变形量间接获取方法及应用[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2022, 53(2): 727.  
XIE Suchao, WANG Jin, TAN Hongchuang. Indirect acquisition method and application of vehicle body deformation based on frequency domain integration[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2022, 53(2): 727.
- [8] 任愈. 轮轨接触状态在线检测关键技术研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2012.  
REN Yu. Research on key technology of on-line detection of wheel-rail contact state[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2012.
- [9] 罗林. 轮轨系统轨道平顺状态的控制[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2006.  
LUO Lin. Control of track smoothness of wheel-rail system[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2006.
- 收稿日期:2022-10-14 修回日期:2022-12-05 出版日期:2024-12-10  
Received:2022-10-14 Revised:2022-12-05 Published:2024-12-10  
• 通信作者:陈春俊,教授,953492807@qq.com  
• ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议  
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license