

城市轨道交通轮轨力间接测量法仿真验证

刘畅¹, 张胜龙^{2,3}, 张昀青¹, 王文斌^{2,3}, 罗鹏^{2,3}

(1. 石家庄铁道大学 道路与铁道工程安全保障省部共建教育部重点实验室, 河北 石家庄 050043;

2. 铁科院(北京)工程咨询有限公司, 北京 100081;

3. 中国铁道科学研究院集团有限公司 城市轨道交通中心, 北京 100081)

摘要:针对现有传统轮轨力直接测量法测力轮对安装复杂、前期贴片与标定操作难度较大且成本较高等问题,以现有的相关研究为基础,以城市轨道交通列车为研究对象,利用 Simpack 动力学软件对轮轨力间接测量法进行仿真验证。推导出轮轨力间接测量法的理论公式,利用 Simpack 软件,建立车辆-轨道动力学仿真模型,通过运算得出直线段轮轴横向力与轮轨垂向力两者在不同工况下误差的 50%、75%、90% 与最大值。结果表明,间接测量法具有较高的测量精度,为城市轨道交通轮轨力测量提供可选方案。

关键词:城市轨道交通;间接测量法;轮轨垂向力;轮轴横向力

中图分类号:U270.1 **文献标志码:**A **文章编号:**2095-0373(2024)02-0086-06

近年来中国城市轨道交通发展迅猛,截至 2022 年 12 月 31 日,中国内地累计有 55 个城市投运城轨交通线路超过 10 000 km^[1]。为了能够准确对城市轨道交通车辆运行安全性进行评估,精确获得轮轨力显得尤为重要。目前主流的轮轨力测量方法为测力轮对法,此方法在车辐板上进行钻孔改造,破坏轮对总体结构,测力轮对生产周期长、成本高,安装复杂^[2-3]。许多学者对利用间接测量法测得轮轨力进行了广泛研究。高纯友等^[4]根据 70% 低地板轻轨车辆的一系悬挂开发了一种新的轮轨力测量技术,通过标定好的轴箱测力弹簧,获得轮轨间的相互作用力。魏来等^[5-6]建立了轮对的横向平衡方程和滚动平衡方程,推导出了计算轮轴侧向力和轮轨垂直力的公式,提出了一种利用轴箱加速度、主悬架相对位移和摆臂应变进行轮轨力间接测量的方法,对轮轨力进行反演识别。ZENG et al^[7]推导出悬架轮对的平衡方程,从测量的悬架力和惯性力中获得轮轨力,得到一种改进的间接轮轨力测量方法。

鉴于以上分析,目前大部分学者在轮轨力间接测量法上,主要研究其理论计算及轨道动力学车辆模型搭建与结果分析,而利用仿真进行针对不同动力学计算方法的对比却鲜有提及。因此,本文采用间接测量法,通过 Simpack 建立轨道动力学模型,得到轮轴横向力于轮轨垂向力的间接测量法计算值与直接输出值,并进行不同时速与线性工况的结果对比分析,验证其轮轨力间接测量法的合理性,为后期实车实验提供方法支撑。

1 间接测量法理论分析

1.1 轮轴横向力

在间接测量法动力学模拟试验中,获取轮轨力的方法是通过在一系弹簧与节点处分别设置位移传感器和加速度传感器,在一系垂向减振器中设置速度传感器,测得列车在运行过程中弹簧与节点的位移值、减振器的相对速度、轮对加速度,利用结构动力学方法进行反演运算,得到轮轨垂向力与轮轴横

收稿日期:2023-12-04 责任编辑:车轩玉 DOI:10.13319/j.cnki.sjztdxxb.20230334

基金项目:铁科院院基金(2023YJ092);铁科院所基金(2022ZXJ001)

作者简介:刘畅(1999—),男,硕士研究生,研究方向为道路与铁道工程。E-mail:505932217@qq.com

刘畅,张胜龙,张昀青,等.城市轨道交通轮轨力间接测量法仿真验证[J].石家庄铁道大学学报(自然科学版),2024,37(2):86-91.

向力^[5-6]。

由图 1 轮对一系悬挂受力分析图的一系悬挂系统的横向受力分析可知,轮轴横向力的受力平衡方程式为

$$ma_y + F_y + H = 0 \quad (1)$$

$$F_y = F_{sy1} + F_{jy1} + F_{sy2} + F_{jy2} \quad (2)$$

式中, a_y 为轮对的横向加速度; m 为轮对质量; H 为左右轮轨横向力之和,由 y 方向的轮对惯性力和悬挂力共同决定, y 方向的惯性力由 m 以及 a_y 确定; F_y 为悬挂力, 主要与左右两侧一系弹簧力 F_{sy1} 与 F_{sy2} 以及两侧节点横向力 F_{jy1} 与 F_{jy2} 有关

$$F_{syi} = K_{syi}d_{syi} \quad (3)$$

$$F_{jyi} = K_{jyi}d_{jyi} \quad (4)$$

式中, K_{sy} 、 d_{sy} 分别为一系弹簧横向刚度、位移; K_{jy} 、 d_{jy} 分别为一系节点横向刚度、位移; i 取 1 代表左侧, 取 2 代表右侧。

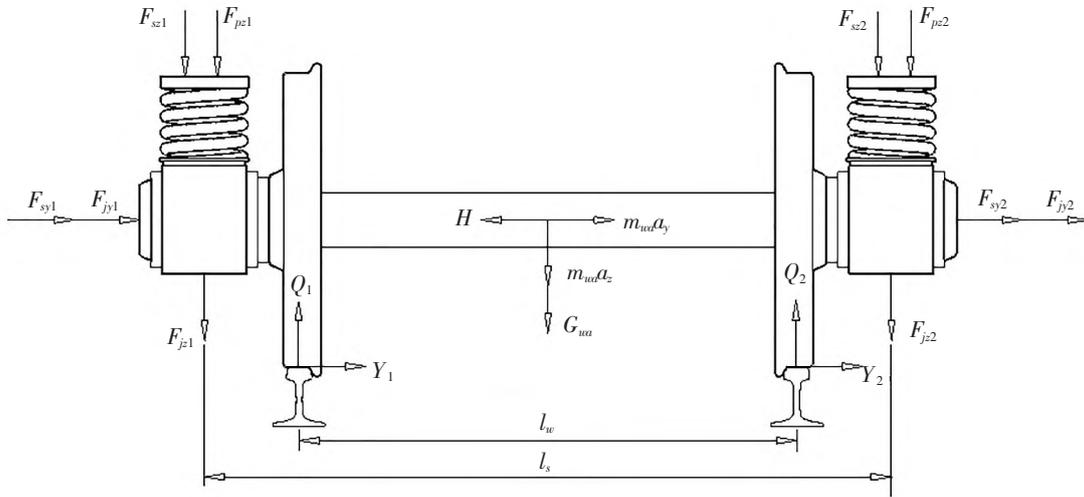


图 1 轮对一系悬挂受力分析图

1.2 轮轨垂向力

根据图 1 可知,方向的悬挂力由轮对重力 G 、左右两侧一系弹簧力 F_{sc1} 与 F_{sc2} 、左右两侧节点的垂向力 F_{jc1} 与 F_{jc2} 和左右两侧垂向减振器力 F_{pc1} 与 F_{pc2} 相关,惯性力由轮对的质量 m 以及轮对的垂向加速度 a_z 确定。在不考虑轮轨作用点的位置变化,以及忽略由于列车蛇形运动引起的侧滚角加速度前提下,建立关于左右轮轨接触点的力矩平衡方程式为

$$\frac{(G + ma_z)l_w}{2} + F_{z1}l_1 - F_{z2}l_2 - Q_1l_w + HR = 0 \quad (5)$$

$$\frac{(G + ma_z)l_w}{2} + F_{z2}l_1 - F_{z1}l_2 - Q_2l_w - HR = 0 \quad (6)$$

式中

$$F_{zi} = F_{sci} + F_{jci} + F_{pci} = K_{sci}d_{sci} + K_{jci}d_{jci} + c_p v_p \quad (7)$$

$$l_1 = \frac{l_s}{2} + \frac{l_w}{2} \quad (8)$$

$$l_2 = \frac{l_s}{2} - \frac{l_w}{2} \quad (9)$$

$$Q_1 = \frac{(F_{sc1} + F_{pc1} + F_{jc1})(\frac{l_s}{2} + \frac{l_w}{2})}{l_w} - \frac{(F_{sc2} + F_{pc2} + F_{jc2})(\frac{l_s}{2} - \frac{l_w}{2})}{l_w} + \frac{G + ma_z}{2} + \frac{HR}{l_w} \quad (10)$$

$$Q_2 = \frac{(F_{sc2} + F_{pc2} + F_{jc2})\left(\frac{l_s}{2} + \frac{l_w}{2}\right) - (F_{sc1} + F_{pc1} + F_{jc1})\left(\frac{l_s}{2} - \frac{l_w}{2}\right)}{l_w} + \frac{G + ma_z}{2} - \frac{HR}{l_w} \quad (11)$$

式中, K_{sc} 、 d_{sc} 分别为一系弹簧垂向刚度、位移; K_{jc} 、 d_{jc} 分别为一系节点垂向刚度、位移; c_p 为一系垂向减振器阻尼; v_p 为一系垂向减振器相对速度; i 取 1 代表左侧, 取 2 代表右侧; a_z 为轮对的垂向加速度; l_w 为轮对名义滚动圆跨距; l_s 为左右一系弹簧跨距; R 为车轮名义滚动圆直径; Q_1 、 Q_2 为左右轮轨垂向力。

2 间接测量法仿真分析

2.1 仿真模型

客车动力学模型由轮对、车体、构架、轴箱、一系悬挂、二系悬挂等组成, 建模所涉及的模型均为刚体^[8], 基本参数如表 1—表 4 所示, 图 2 为建立的城市轨道列车的动力学模型, 本次建模车体、构架和轮对有 6 个自由度(伸缩、横移、浮沉、侧滚、点头及摇头), 轴箱只有 1 个点头自由度。因此, 仿真模型共有 50 个自由度^[9]。

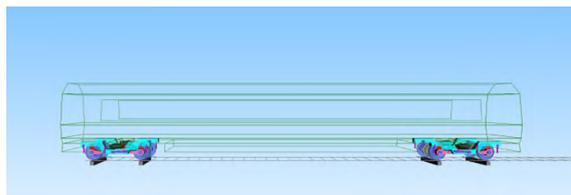


图 2 城市轨道交通列车动力学模型

表 1 模型轮对基本参数

| 质量/t | 侧滚转动惯量/ ($t \cdot m^2$) | 点头转动惯量/ ($t \cdot m^2$) | 摇头侧滚转动惯量/ ($t \cdot m^2$) | 滚动圆 横向跨距/m | 名义滚动 圆直径/m | 轴距/m | 轮对 内侧距/m |
|------|------------------------------|------------------------------|--------------------------------|---------------|---------------|------|-------------|
| 1 | 1 | 0.1 | 1 | 1.493 | 0.92 | 2.5 | 1.353 |

表 2 模型构架基本参数

| 质量/t | 侧滚转动惯量/ ($t \cdot m^2$) | 点头转动惯量/ ($t \cdot m^2$) | 摇头侧滚转动惯量/ ($t \cdot m^2$) | 重心相对于轨面高度/m |
|------|------------------------------|------------------------------|--------------------------------|-------------|
| 3 | 1.5 | 2.5 | 2.8 | 0.6 |

表 3 模型轴箱基本参数

| 质量/kg | 侧滚转动惯量/ ($kg \cdot m^2$) | 点头转动惯量/ ($kg \cdot m^2$) | 摇头侧滚转动惯量/ ($kg \cdot m^2$) |
|-------|-------------------------------|-------------------------------|---------------------------------|
| 212 | 1.1 | 4.5 | 4.6 |

表 4 模型车体基本参数

| 质量/t | 侧滚转动惯量/ ($t \cdot m^2$) | 点头转动惯量/ ($t \cdot m^2$) | 摇头侧滚转动惯量/ ($t \cdot m^2$) | 重心相对于轨面高度/m |
|------|------------------------------|------------------------------|--------------------------------|-------------|
| 32 | 560 | 2 000 | 2 000 | 1.8 |

2.2 轮轨接触非线性模型

在建模过程中, 详细考虑了非线性的轮轨接触几何关系。车辆轮对模型采用 LM 踏面, 根据轮轨接触的非线性几何关系, 其踏面的等效锥度如图 3 所示, 一般取轮对横移量为 3 mm 时的锥度值作为该踏面的等效锥度, 所用踏面的等效锥度在 0.1 左右^[10]。对于轮轨接触力计算, 对法向接触力的计算采用 Hertz 非线性接触模型, 对于切向接触力(蠕滑力)在动力学计算中采用最常用的 Kalker 的 FASTSIM 算法。

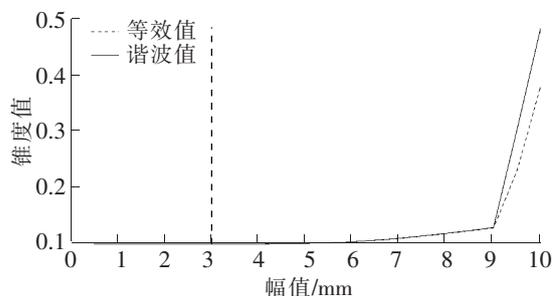


图 3 LM踏面的等效锥度

2.3 非临界线性速度

临界速度则是评判车辆稳定性的指标, 是车辆系统稳定和不稳定的速度分界点, 临界速度分为线性临界速度和非线性临界速度。对于城市轨道交通这样的强非线性系统, 通常采用非线性临界速度评价车

辆蛇行稳定性。如图 4 所示,车辆模型的非临界线性速度为 52.6 m/s,城市轨道交通列车速度均低于该速度且留有足够的安全余量。

2.4 计算工况

基于建立的车辆系统动力学模型,根据实际城市轨道交通列车运行情况,参考文献[11],以速度 40、60、80、100 km/h 4 种工况进行动力学仿真模拟,工况如表 5 所示。

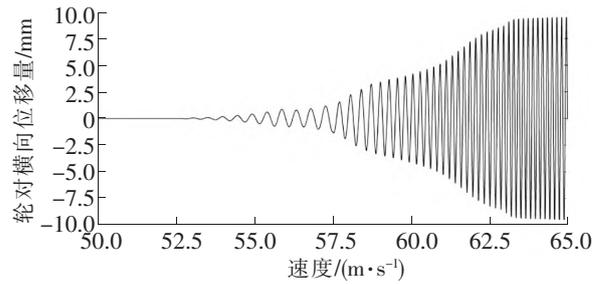


图 4 车辆速度-轮对横移量

表 5 仿真线型设计工况

| 速度/(km·h ⁻¹) | 直线长度/m | 缓和曲线长度/m | 圆曲线长度/m | 圆曲线半径/m | 曲线超高/m |
|--------------------------|--------|----------|---------|---------|--------|
| 40 | 100 | 25 | 100 | 300 | 0.065 |
| 60 | 150 | 40 | 150 | 450 | 0.095 |
| 80 | 200 | 70 | 200 | 600 | 0.012 |
| 100 | 250 | 85 | 250 | 1 000 | 0.120 |

3 结果分析

图 5—图 8 分别为上述工况的间接测量法计算值与 Simpack 直接输出值的趋势结果对比。轮轴横向力的间接测量法计算值与 Simpack 输出值结果基本保持一致。而轮轨垂向力在列车进入弯道时,由于间接测量法忽略轮轨作用点的位置变化及轮对侧滚角加速度,故导致左侧(外轨)间接测量法计算值低于其直接输出值,而右侧(内轨)间接测量法计算值高于其直接输出值。

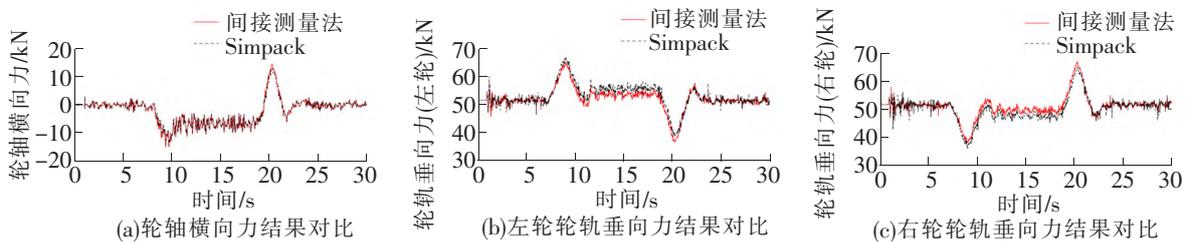


图 5 速度 40 km/h 结果对比

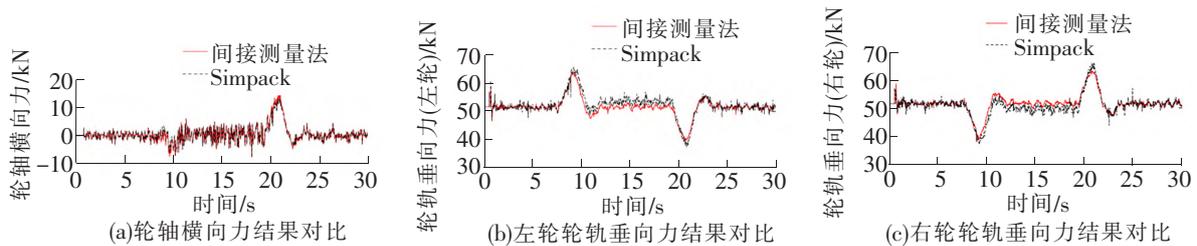


图 6 速度 60 km/h 结果对比

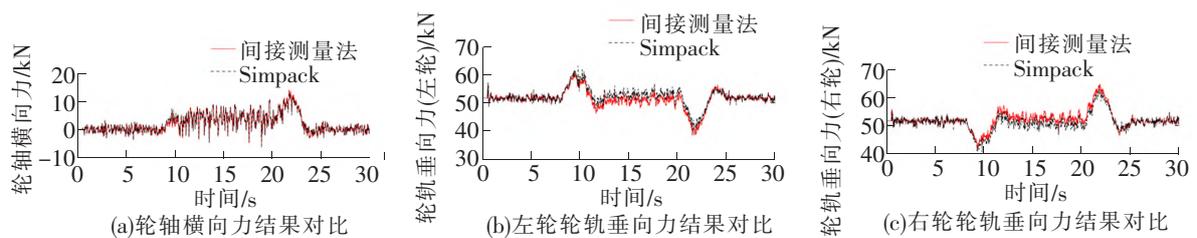


图 7 速度 80 km/h 结果对比

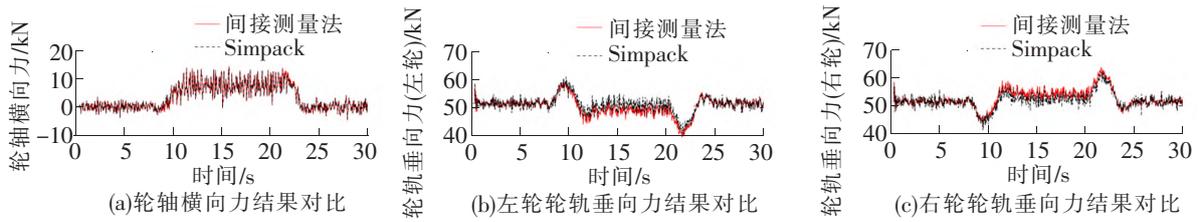


图 8 速度 100 km/h 结果对比

各工况通过间接测量法计算得到的轮轴横向力各自 Simpack 输出值的绝对误差值的 50%、75%、90% 与最大值直线段如图 9 所示、曲线段如图 10 所示。通过运算得出直线段轮轴横向力与轮轨垂向力两者在不同工况下最大差值的平均值分别为 0.13、1.14 kN, 曲线段分别为 3.57、5.30 kN。

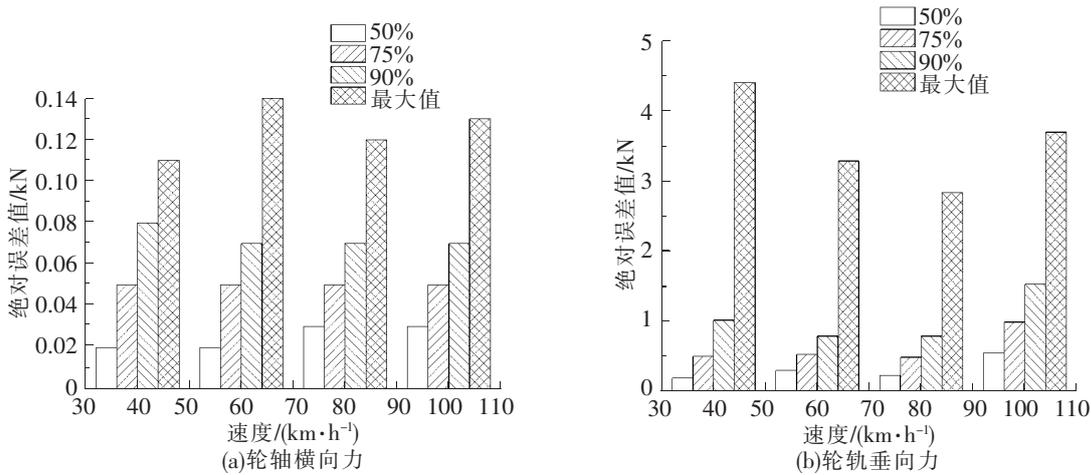


图 9 直线段绝对误差值

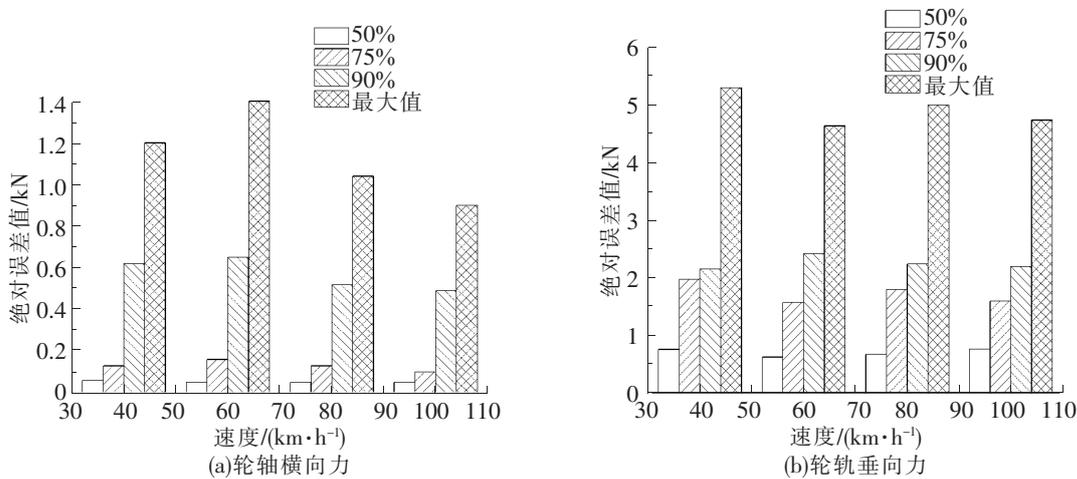


图 10 曲线段绝对误差值

4 结论

通过建立 Simpack 动力学仿真车辆模型,在不同速度工况下,利用轮轨力的间接测量法计算出列车的轮轴横向力与轮轨横向力,与直接输出值进行了对比,并进行了误差分析,得出以下结论:

(1) 轮轴横向力的间接测量法计算值与 Simpack 输出值吻合度较高,具有很高的 consistency。

(2) 轮轨垂向力的间接测量法计算值与 Simpack 输出值基本吻合。由于间接测量法忽略轮轨作用点的位置变化及轮对侧滚角加速度,故导致左侧(外轨)间接测量法计算值低于其直接输出值,而右侧(内

轨)间接测量法计算值高于其直接输出值。

(3)在不同速度与线性工况下,间接测量法计算值与 Simpack 输出值的轮轴横向力与轮轨垂向力的误差均在合理范围之内,验证了其间接测量法在城市轨道列车上轮轨力测量的合理性与可行性。

参 考 文 献

- [1]中国城市轨道交通协会. 2022 年中国内地城轨交通线路概况[J]. 城市轨道交通, 2023(1):10-11.
- [2]张胜龙,王文斌,沈凯明,等. 中国城市轨道交通轮轨力检测技术研究综述[J]. 科技和产业, 2023, 23(4):247-253.
- [3]周扬,丁军君,李芾,等. 轮轨作用力测试方法的研究进展[J]. 铁道标准设计, 2019, 63(3):38-44.
- [4]高纯友,陆海英,任利惠. 70%低地板轻轨车辆轮轨力测试研究[J]. 城市轨道交通研究, 2012, 15(10):43-45.
- [5]魏来,曾京,邬平波,等. 基于轮对模型的铁道车辆脱轨安全性评估[J]. 铁道学报, 2015, 37(9):25-31.
- [6]魏来. 高速列车相关运行安全性问题研究[D]. 成都:西南交通大学, 2017.
- [7]ZENG Jing, WEI Lai, WU Pingbo. Safety evaluation for railway vehicles using an improved indirect measurement method of wheel-rail forces[J]. Journal of Modern Transportation, 2016, 24:114-123.
- [8]杨茜茜. 基于 SIMPACK 的轨道工程车辆动力学仿真及优化分析[J]. 铁道机车车辆, 2020, 40(6):49-52.
- [9]周游,冯毅杰,柴雪松,等. 轨道整体刚度对车辆和轨道动力性能的影响[J]. 铁道建筑, 2017, 57(7):116-118.
- [10]高国臣,马战国,潘振. 30 t 轴重条件下轨道几何不平顺限速管理值研究[J]. 铁道建筑, 2018, 58(11):129-134.
- [11]北京市规划委员会. 地铁设计规范(附条文说明):GB 50157—2013[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2013.

Simulation Verification of Indirect Measurement Method for Wheel Rail Force in Urban Rail Transit

LIU Chang¹, ZHANG Shenglong^{2,3}, ZHANG Yunqing¹, WANG Wenbin^{2,3}, LUO Peng^{2,3}

(1. Key Laboratory of the Ministry of Education for Road and Railway Engineering Safety Assurance, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China;

2. Academy of Railway Sciences(Beijing) Engineering Consult Corporation Limited, Beijing 100081, China;

3. Urban Rail Transit Center, China Academy of Railway Sciences Corporation Limited, Beijing 100081, China)

Abstract: In response to the complex installation of traditional wheel rail force direct measurement methods for measuring force on wheelsets, the difficulty of early patch and calibration operations, and the high cost, based on existing relevant research, taking urban rail transit trains as the research object, Simpack dynamics software is used to simulate and verify the theory of wheel rail force indirect measurement method. Firstly, the theoretical formula of the wheel rail force measurement method is derived. Using Simpack software, a vehicle track dynamics simulation model is established. Through calculation, the 50%, 75%, 90% and maximum errors of the lateral force of the straight section wheel axle and the vertical force of the wheel rail under different working conditions are obtained. The results indicate that the indirect measurement method has high measurement accuracy and provides an optional solution to measuring wheel rail forces in urban rail transit.

Key words: urban rail transit; indirect measurement; wheel rail vertical force; wheel axle lateral force