

文章编号: 1674—8247(2023)06—0062—06

DOI: 10. 12098/j. issn. 1674 - 8247. 2023. 06. 012

基于 FASTSIM 和 TRIAL 算法的轮轨切向接触模型研究

陈爽¹ 陈雨^{2,3} 潘自立⁴ 莫宏愿⁴ 安博洋^{2,3} 王平^{2,3}

(1. 成都工业职业技术学院, 成都 610213; 2. 西南交通大学高速铁路线路工程教育部重点实验室, 成都 610031;
3. 西南交通大学, 成都 610031; 4. 中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031)

摘要:为简化轮轨接触切向计算,基于 FASTSIM 算法和 TRIAL 算法提出了一种新的非赫兹切向算法。考虑到 FASTSIM 算法中不真实的抛物线边界,提出的算法采用椭圆接触边界,显著提高了切应力的计算精度,解决了非赫兹接触条件下蠕滑力不饱和的问题。以 CONTACT 模型为参考,通过大量轮轨接触工况,验证了提出模型的计算精度、效率与稳健性。该模型可以被进一步应用于车辆-轨道动力学与轮轨损伤计算中。

关键词:轮轨切向接触; FASTSIM; 非赫兹算法; 计算精度; 计算稳定性

中图分类号: U211.5 文献标志码: A

A Study on Tangential Wheel-rail Contact Model Based on FASTSIM and TRIAL Algorithms

CHEN Shuang¹ CHEN Yu^{2, 3} PAN Zili⁴ MO Hongyuan⁴ AN Boyang^{2, 3} WANG Ping^{2, 3}

(1. Chengdu Vocational & Technical College of Industry, Chengdu 610213, China;
2. MOE Key Laboratory of High-speed Railway Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China; 3. Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;
4. China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, China)

Abstract: To simplify the tangential calculation of wheel-rail contact, a new non-Hertzian tangential algorithm was proposed based on the FASTSIM and TRIAL algorithms. Considering the unrealistic parabolic boundary in the FASTSIM algorithm, the proposed algorithm adopted an elliptic contact boundary, significantly improving the computational accuracy of the shear stress and solving the non-saturation of creep force under non-Hertzian contact conditions. By using the CONTACT model as a reference and through numerous wheel-rail contact scenarios, the computational accuracy, efficiency, and robustness of the proposed model were validated. This model can be further applied in vehicle-track dynamics calculations and wheel-rail damage computations.

Key words: tangential wheel-rail contact; FASTSIM; non-Hertzian algorithm; computational accuracy; computational stability

轮轨切向接触对于车辆与轨道动力学与轮轨损伤分析是十分重要的。在车辆-轨道动力学仿真分

析中,每一个积分步都需要应用轮轨切向接触模型计算蠕滑力^[1];在计算轮轨磨耗与接触疲劳时,需要切

收稿日期: 2022-11-11

作者简介: 陈爽(1982-),女,高级工程师。

基金项目: 中铁二院工程集团有限责任公司科技开发计划(KNSQ202054)

引文格式: 陈爽,陈雨,潘自立,等. 基于 FASTSIM 和 TRIAL 算法的轮轨切向接触模型研究[J]. 高速铁路技术, 2023, 14(6): 62-67.

CHEN Shuang, CHEN Yu, PAN Zili, et al. A Study on Tangential Wheel-rail Contact Model Based on FASTSIM and TRIAL Algorithms [J]. High Speed Railway Technology, 2023, 14(6): 62-67.

向接触模型计算接触斑内的切应力、黏滑分布与相对滑动速度^[2]。

针对切向接触模型,学者提出了一系列以 Hertz 接触理论为基础的轮轨切向接触理论,包括 Johnson-Vermeulen 三维滚动接触理论^[3]、Kalker 线性蠕滑理论^[4]、沈氏理论^[5]及 Kalker 简化理论 FASTSIM^[6]。其中沈氏理论、FASTSIM 因计算简便被广泛应用于车辆-轨道动力学中^[7]。

轮轨损伤预测需要精确求解接触斑内的接触应力。当轮轨磨耗后,接触斑内两接触物体的曲率半径不再为常数, Hertz 假设条件已不满足,因此采用非赫兹切向接触模型是有必要的。有限元模型是最精确的接触模型^[8],能考虑任意接触几何、轮轨弹塑性等因素。然而,有限元模型需要将轮轨型面划分为数量巨大的网格,计算速度慢,无法应用于大规模轮轨接触。CONTACT^[9]是公认的计算精度高的边界元接触模型,但是其计算速度仍然不能满足动力学仿真的要求。因此需要发展快速的非赫兹切向接触模型,相关学者提出了几个基于 FASTSIM 的简化算法^[10-12]。FASTSIM 基于椭圆接触斑,将非赫兹接触斑等效为一个或者多个椭圆接触斑,然后修正 FASTSIM 的柔度系数。STRIPES^[13]提出的局部等效椭圆方法将接触斑划分为多个平行条带,每个条带等效为一个椭圆,分别计算每个条带的柔度系数,得到的结果更接近于真实的轮轨接触。

目前,切向接触模型的部分问题尚未被完全解决。一方面,由于非真实的椭圆牵引边界和黏着区切应力线性增长的错误假设, FASTSIM 求解的精确性会被影响;另一方面,求解每个条带等效椭圆时采用轮轨型面曲率,计算稳定性较差。基于此,本文基于 FASTSIM 算法提出了一种新的切向接触算法,其切向应力假定遵循椭圆接触牵引边界,随后采用安博洋和王平提出的 TRIAL 算法^[14],高效稳定地确定非赫兹接触斑每一条带对应的等效椭圆。

1 基于 FASTSIM 的非赫兹切向接触模型

1.1 Kalker 简化理论在非赫兹接触中的应用

建立接触点坐标系, O 为接触点, x 轴指向车轮滚动方向, z 轴垂直与接触平面向下, y 轴遵循右手法则。将接触斑划分为与 x 轴平行的多个条带,如图 1 所示。

假设接触斑尺寸远小于接触点附近的接触体尺寸,即满足平面半空间假设。自旋在整个接触面内保持恒定,从接触斑前缘估计切应力为:

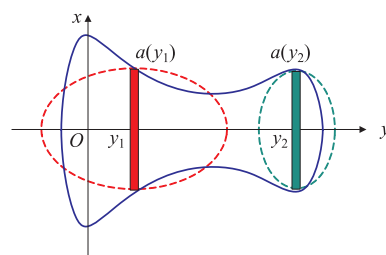


图1 非赫兹局部椭圆等效示意图

$$\left. \begin{aligned} q'_x(x, y) &= q_x(x + \delta x, y) + \left(\frac{v_x}{L_x(y)} - \frac{v_\varphi}{L_\varphi(y)} y \right) \times \delta x \\ q'_y(x, y) &= q_y(x + \delta x, y) + \left(\frac{v_y}{L_x(y)} + \frac{v_\varphi}{L_\varphi(y)} x \right) \times \delta x \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: v_x 、 v_y 和 v_φ ——纵横向蠕滑率与自旋;

q'_x 、 q'_y ——由接触斑前缘计算得到的 (x, y) 位置处的纵向和横向切应力;

L_x 、 L_y 和 L_φ ——沿着 y 方向每个条带的 Kalker 柔度系数,由式(2)求解。

$$\left. \begin{aligned} L_x(y) &= \frac{8a(y)}{3GC_{11}(y) \times k(y)} \\ L_y(y) &= \frac{8a(y)}{3GC_{22}(y) \times k(y)} \\ L_\varphi(y) &= \frac{\pi a(y) \sqrt{a(y)/b(y)}}{4GC_{23}(y) \times k(y)} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

$$k(y) = a(y)/a_0$$

式中: C_{11} 、 C_{22} 和 C_{23} ——与局部椭圆半轴比率相关的 Kalker 蠕滑系数;

G ——剪切模量;

a_0 —— $y = 0$ 时的接触斑纵半轴。

接触斑内的切应力为:

(1) 黏着区,即切应力小于摩擦边界:

$$q_{x,y}(x, y) = q'_{x,y}(x, y) \quad (3)$$

(2) 滑动区,即切应力大于摩擦边界:

$$q_{x,y}(x, y) = \frac{q'_{x,y}(x, y)}{[q'_{x,y}(x, y)]} \times g_p(x, y) \quad (4)$$

假定每个条带的最大法向应力已知,为 $p_0(y)$,则抛物线摩擦边界为:

$$g_p(x, y) = \frac{4}{3} \mu p_0(y) \times k(y) \times \left[1 - \left(\frac{x}{a(y)} \right)^2 \right] \quad (5)$$

式中: g_p —— (x, y) 位置处的摩擦边界;

μ ——摩擦系数(0.4)。

式(5)中,“4/3”是一个转换系数,代表由 FASTSIM 假定的非真实法向应力与其他接触模型得到的法向应力之间的差异; $k(y)$ 用于转换 Kalker 简化理论和其他模型中抛物线牵引边界和摩擦边界的

差异。横移量为 6 mm 时采用 Hertz 和非 Hertz 法向接触模型得到的法向应力计算两种牵引边界的差异,如图 2 所示。牵引边界 $\mu_{p0}(y)$ 是已知的,因为法向应力作为已知条件。为了使用 FASTSIM,抛物线边界采用式(5)。

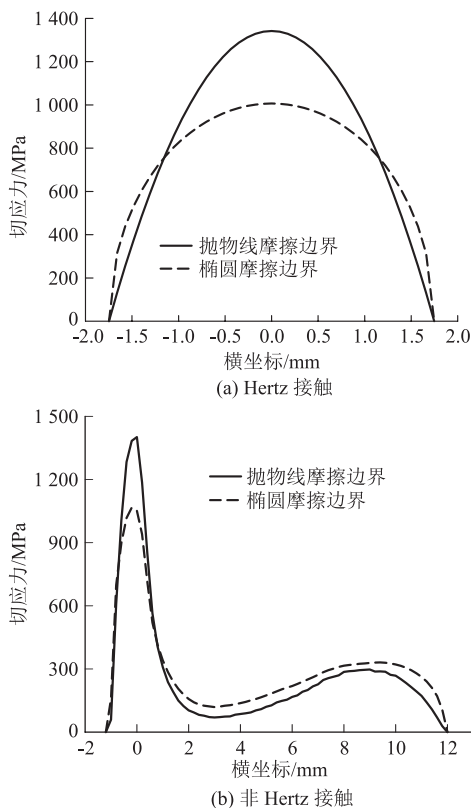


图2 横移量为 6 mm 在 $x=0$ 时两种牵引边界的对比图

相对滑动速度为:

$$\left. \begin{aligned} s_x(x, y) &= v_x - v_\varphi y - \frac{L_x(y)}{\partial x} [q_x(x + \delta x, y) - q_x(x, y)] \\ s_y(x, y) &= v_y + v_\varphi x - \frac{L_y(y)}{\partial x} [q_y(x + \delta x, y) - q_y(x, y)] \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式中: s_x 、 s_y ——纵向和横向的轮轨相对滑动速度。

1.2 切应力修正

虽然 Kalker 的 FASTSIM 可获得令人满意的蠕滑力结果,但其在黏着区采用切应力线性增长的假设会降低局部接触解的精度,本文提出了一个修正方法以提高 FASTSIM 算法精确性。

FASTSIM 算法得到的黏滑分布相对准确,因此仍然采用,但是在每个条带上采用椭圆接触边界修正切应力。对于滑动区域,假设椭圆的切应力边界为:

$$g_e(x, y) = \mu p_0(y) \times \sqrt{1 - \left(\frac{x}{a(y)}\right)^2} \quad (7)$$

式中: g_e —— (x, y) 位置处椭圆的切应力边界。

修正后的切应力为:

$$q_{x,y}(x, y) \leftarrow \frac{q_{x,y}(x, y)}{[q_{x,y}(x, y)]} \times g_e(x, y) = r_{x,y}(x, y) \times g_e(x, y) \quad (8)$$

在黏着区,引入一种假设进行修正:

$$q_{x,y}(x, y) \leftarrow g_e(x, y) \times r_{x,y}(x, y) \times \left[1 - \frac{\Delta q_{x,y}(x, y)}{g_p(x, y) \times r_{x,y}(x, y)}\right] \quad (9)$$

$$\Delta q_{x,y}(x, y) = g_p(x, y) \times r_{x,y}(x, y) - q_{x,y}(x, y) \quad (10)$$

式(9)使用 $\Delta q_{x,y}(x, y)$ 比上抛物线边界来校准未饱和的切应力,因此黏着区的切应力为非线性增长。注意到公式(8)和(9)修正的切应力接近椭圆牵引边界,因此蠕滑力在赫兹与非赫兹接触工况下均会饱和。为了表述简便,修正后的 FASTSIM 在下文称为 FASTSIM_c。

1.3 基于TRIAL算法的局部等效椭圆确定

利用 FASTSIM_c 时需要确定等效局部椭圆的短半轴 $b(y)$,进而求解 Kalker 蠕滑系数。本文采用安博洋和王平提出的 TRIAL 算法确定等效局部椭圆,该方法依据法向结果进行求解。相比于同类方法,TRIAL 算法可以保证解的唯一性,不依赖于平滑方法和平滑点数的选择。

2 结果

将所提出的 FASTSIM_c 模型应用于轮轨的非赫兹滚动接触。模型采用标准轮轨组合 LMb-CHN60, 倾角 1:40, 轮径 460 mm。规定的接触力 F_n 设置为 83.3 kN。为了包含横向蠕滑,轮对摇头角定义为横向位移的 1.2 倍。在每个接触情况下,蠕滑率和自旋由式(11)计算。

$$\left. \begin{aligned} v_x &= \left(1 - \frac{R}{R_0}\right) \cos \psi \\ v_y &= -\sin \psi \cos(\varphi + \delta) \\ v_\varphi &= -\frac{\sin \delta}{R_0} \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

式中: ψ 、 φ 和 δ ——轮对摇头角、侧滚角和接触角;

R 、 R_0 ——滚动圆半径与名义半径。

FASTSIM 应用于非赫兹工况时,需要将接触斑每个条带等效为局部椭圆,本文采用安博洋和王平近期提出的 TRIAL 算法进行等效。

2.1 典型接触工况对比分析

轮对横移量设置为 -3 mm、0 mm 和 6 mm, 对比分析 3 种典型接触工况下的切应力。CONTACT、TRIAL + FASTSIM 与 TRIL + FASTSIM_c 3 种接触模型得到的切应力分布和黏滑区划分,如图 3 所示。由图 3 可知,FASTSIM 的结果在黏滑划分和切向接触

应力方向方面与 CONTACT 一致,这是开发修正后的 FASTSIM 的基础。

$y=0$ 处沿 x 方向的条带切应力如图 4 所示。与 FASTSIM 相比,校正后的 FASTSIM_c 提高了计

算精度,成功模拟了黏着区域中切应力的非线性分布。此外,所采用的椭圆牵引界使滑移区的应力与 CONTACT 吻合。修正后的 FASTSIM_c 的偏差主要受滑动区长度被低估的影响。

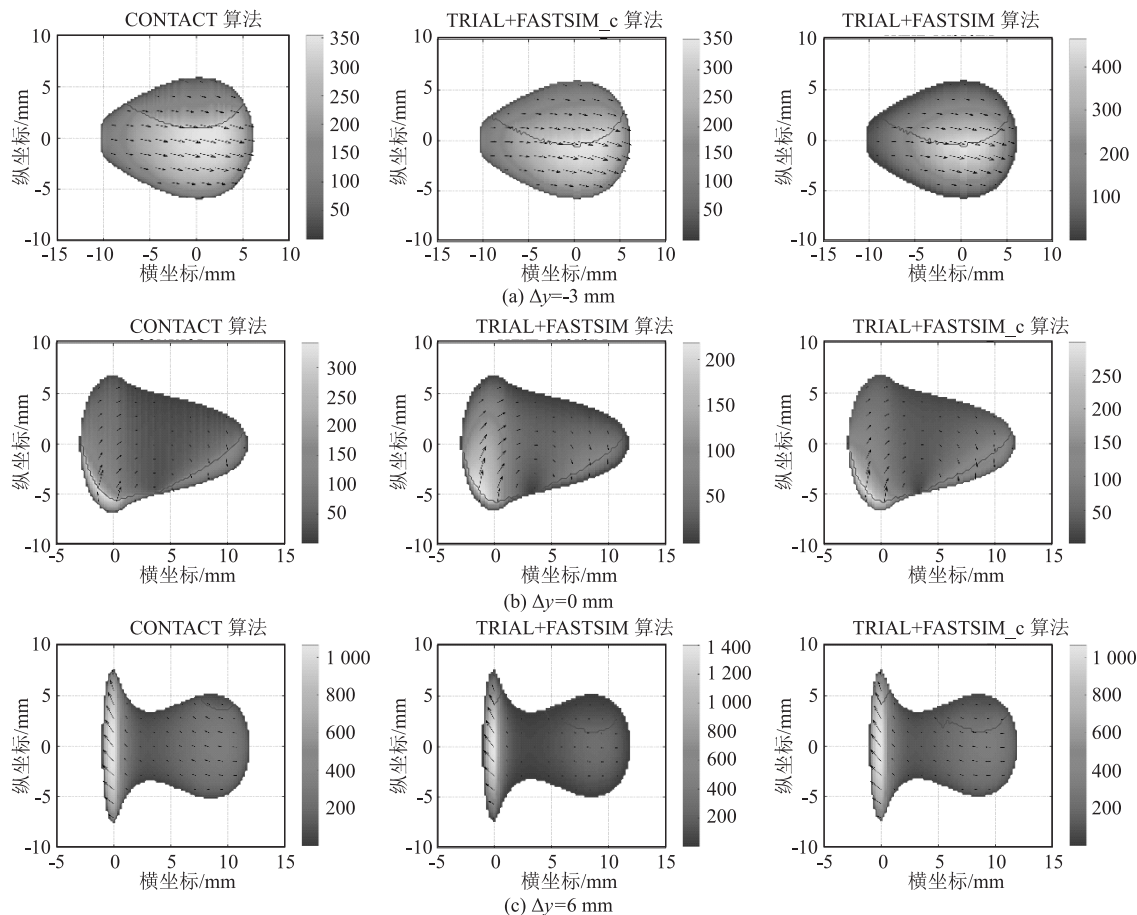


图3 不同横移量下3种接触模型得到的切应力与黏滑分布对比图(MPa)

3种接触模型计算得到的纯纵向蠕滑率的蠕滑力,即横向蠕滑率与自旋为0,如图5所示。修正后的 FASTSIM 显著提高了 FASTSIM 的精度,与 CONTACT 非常吻合。此外,FASTSIM 在后两种情况下低估了蠕滑力,原因是 FASTSIM 在非赫兹接触情况下采用的抛物线牵引边界不等于饱和牵引界限(摩擦和法向接触压力的乘积)。修正后的 FASTSIM 采用椭圆牵引边界补偿了不足的蠕滑力。

2.2 计算精度与效率对比分析

选用不同横移量下的接触结果测试提出的 FASTSIM_c 模型的精度与效率。轮对横移量从 -5 mm 变化到 8 mm,步长 0.1 mm。

在轮对不同横移量下,FASTSIM_c 与 CONTACT 得到的滑动区域形状与切应力分布吻合较好。

选取了不同横移量下的滑动区域面积比率、最大切应力与蠕滑力结果,如图6所示。由图6(a)可

知,与 CONTACT 相比,FASTSIM_c 低估了滑移面积。由图6(b)可知,对于横向位移从 -1 到 1 mm 的小蠕滑工况,FASTSIM 低估了切向接触应力,因为使用了抛物线牵引边界,与大蠕滑工况相反;校正后的 FASTSIM 与参考一致。由图6(c)、图6(d)可知,FASTSIM 与 FASTSIM_c 得到的纵横向蠕滑力均与 CONTACT 结果吻合较好。

采用 CONTACT 和 FASTSIM_c 计算时间如表1所示。由表1可知,FASTSIM_c 可显著提高计算效率,且网格尺寸越小,计算优势越明显。因此,该模型可以应用于动力学计算与损伤预测。

3 结论

本文基于 Kalker 的 FASTSIM 算法提出了一种可应用于非赫兹工况的修正算法 FASTSIM_c,其修正的核心是改变 FASTSIM 的剪应力,使其沿滚动方向遵

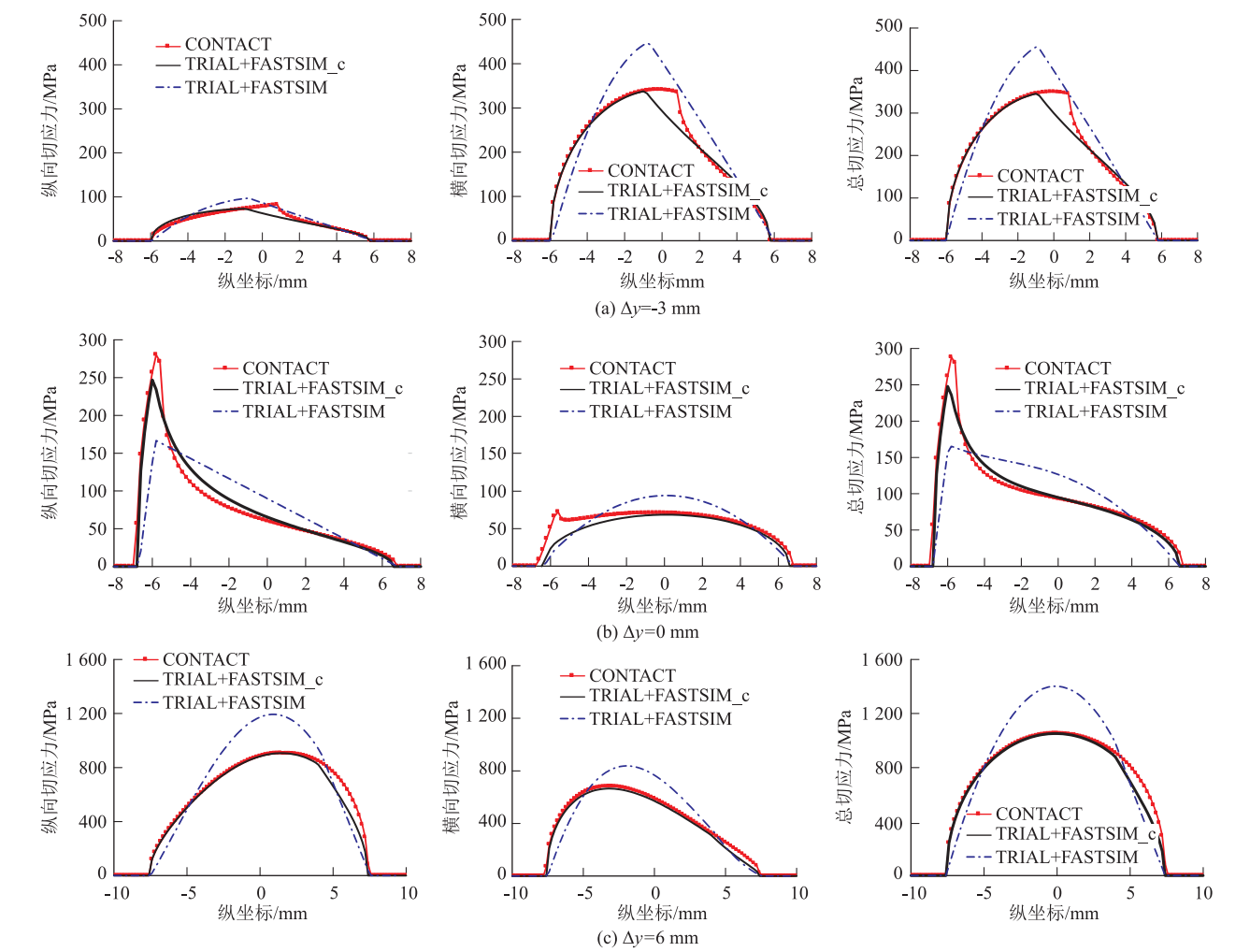


图4 在条带 $y=0$ 处3种模型得到的纵横向切应力与总切应力的对比图

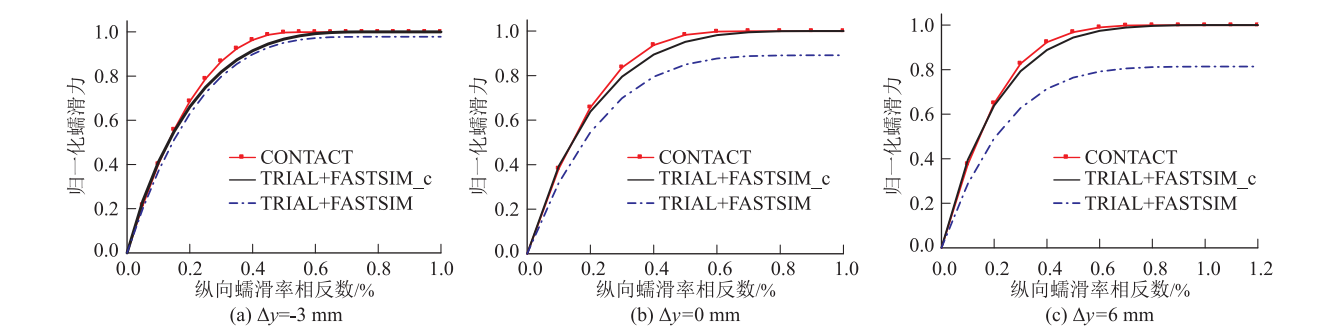


图5 不同横移量下蠕滑率曲线对比图

表1 计算时间对比表			
接触斑网格数量划分	FASTSIM_c	CONTACT (SteadyGS求解器)	加速倍数
31 × 31	4.0E-3	45E-3	11.3
51 × 51	6.4E-3	157E-3	24.5
81 × 81	9.7E-3	608E-3	62.7
101 × 101	12.2E-3	915E-3	75

循的椭圆牵引边界。

通过典型接触工况可知,与 FASTSIM 相比,修正算法 FASTSIM_c 不仅提高了切应力精度,并且补偿了非赫兹接触中蠕滑力不足的问题。通过大量工况计算证实了新接触模型的精度与效率。本模型可为车辆动力学以及轮轨损坏预测的切向接触模型选择提供参考。此外,该模型在估计滑移区长度方面仍有改

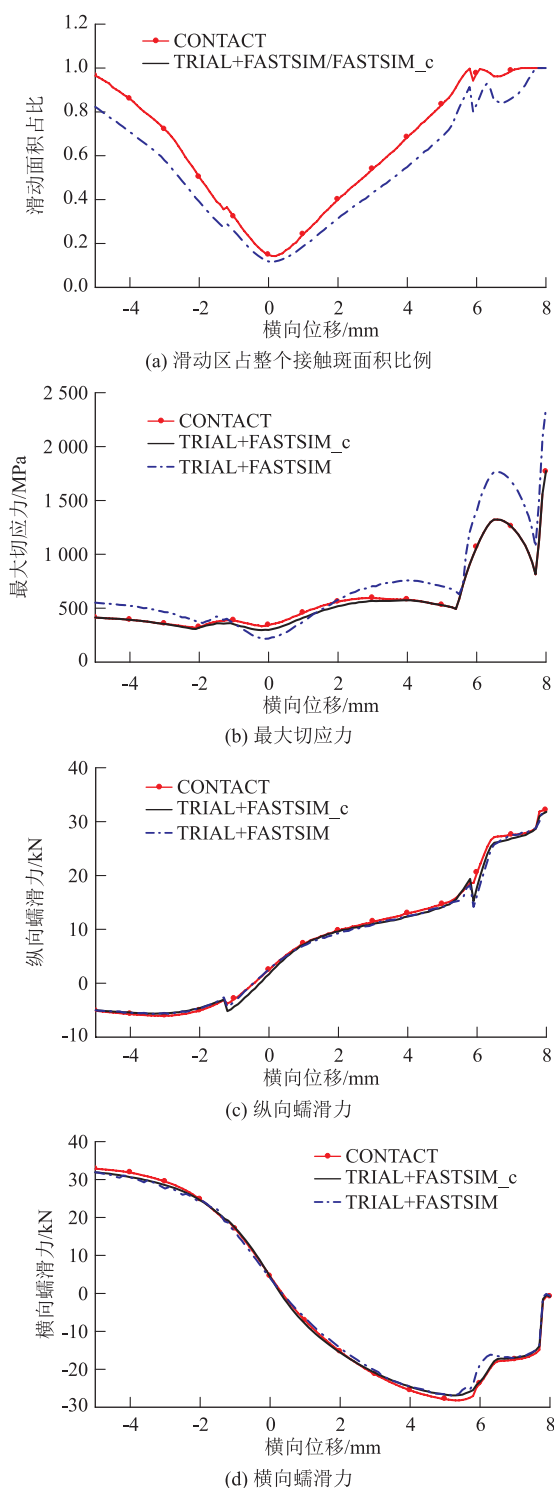


图6 不同横移量下3种接触模型得到的切向接触结果对比图

进空间,将于下一步进行研究。

参考文献:

- [1] 翟婉明. 车辆-轨道耦合动力学理论的发展与工程实践[J]. 科学通报, 2022, 67(32): 3794-3807, 3793.

ZHAI Wanming. Development of Vehicle-track Coupled Dynamics Theory and Engineering Practice [J]. Chinese Science Bulletin, 2022, 67(32): 3794-3807, 3793.

- [2] 牛江,池茂儒,李大柱,等. 基于半赫兹接触的车轮磨损预测分析[J]. 中国机械工程, 2023, 34(7): 859-865, 874.
- NIU Jiang, CHI Maoru, LI Dazhu, et al. Predictive Analysis of Wheel Wear Based on Semi-Hertzian Contact [J]. China Mechanical Engineering, 2023, 34(7): 859-865, 874.
- [3] VERMEULEN P J, JOHNSON K L. Contact of Nonspherical Elastic Bodies Transmitting Tangential Forces [J]. Journal of Applied Mechanics, 1964, 31(2): 338-340.
- [4] KALKER J J. On the Rolling Contact of Two Elastic Bodies in the Presence of Dry Friction [J]. Delft University of Technology, Netherland, 1967.
- [5] SHEN Z Y, HEDRICK J K, ELKINS J A. A Comparison of Alternative Creep Force Models for Rail Vehicle Dynamic Analysis [J]. Vehicle System Dynamics, 1983, 12(1/2/3): 79-83.
- [6] KALKER J J. A Fast Algorithm for the Simplified Theory of Rolling Contact [J]. Vehicle System Dynamics, 1982, 11(1): 1-13.
- [7] 翟婉明. 车辆-轨道耦合动力学—上册[M]. 4版. 北京: 科学出版社, 2015.
- ZHAI Wanming. Vehicle-track Coupled Dynamics-Volume 1 [M]. 4th ed. Beijing: Science Press, 2015.
- [8] 竺春海,张军,尹芳臣. 轮轨共形接触的有限元分析[J]. 大连交通大学学报, 2008, 29(3): 9-13.
- ZHU Chunhai, ZHANG Jun, YIN Fangchen. Finite Element Analysis of the Conformal Contact Problem of Wheel/Rail [J]. Journal of Dalian Jiaotong University, 2008, 29(3): 9-13.
- [9] KALKER J J. Review [M] // Three-dimensional Elastic Bodies in Rolling Contact. Dordrecht: Springer, 1990: 47-97.
- [10] ALONSO A, GIMÉNEZ J G. Tangential Problem Solution for Non-elliptical Contact Areas with the FastSim Algorithm [J]. Vehicle System Dynamics, 2007, 45(4): 341-357.
- [11] AYASSE J B, CHOLLET H. Determination of the Wheel Rail Contact Patch in Semi-Hertzian Conditions [J]. Vehicle System Dynamics, 2005, 43(3): 161-172.
- [12] PIOTROWSKI J, KIK W. A Simplified Model of Wheel/Rail Contact Mechanics for Non-Hertzian Problems and Its Application in Rail Vehicle Dynamic Simulations [J]. Vehicle System Dynamics, 2008, 46(1/2): 27-48.
- [13] AYASSE J B, CHOLLET H. Determination of the Wheel Rail Contact Patch in Semi-Hertzian Conditions [J]. Vehicle System Dynamics, 2005, 43(3): 161-172.
- [14] 安博洋. 轮轨滚动接触行为的数值研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2020.
- AN Boyang. Numerical Study of Wheel-rail Rolling Contact [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2020.