

文章编号:1005-0523(2023)02-0079-08



# 基于牵引制动性能的轮轨接触行为研究

牟明慧<sup>1,2</sup>,赵龙志<sup>3</sup>,陈道云<sup>4</sup>

(1. 华东交通大学交通运输工程学院,江西 南昌 330013; 2. 华东交通大学网络信息中心,江西 南昌 330013; 3. 华东交通大学材料科学与工程学院,江西 南昌 330013; 4. 华东交通大学轨道交通基础设施性能监测与保障国家重点实验室,江西 南昌 330013)

**摘要:** 为了探明在牵引工况和制动工况下的列车轮轨滚动接触行为,从而为今后轮轨损伤机理的研究提供理论基础,以CRH2-300型动车组轮轨为研究对象,通过有限元仿真研究了基于牵引制动性能摩擦系数模型的轮轨接触力学行为,结果表明:基于经验模型的摩擦系数显著大于基于牵引、制动模型的摩擦系数及新干线模型的摩擦系数,新干线模型的摩擦系数与基于牵引制动性能模型的摩擦系数较为接近;牵引工况下的切向力云图呈现两点接触形态,且沿运行方向前端的点接触切向力明显大于运行方向后端,而在制动工况下,切向力在起始时刻为单点接触,随后变为两点接触;在轮轨接触点处,车轮S23切应力呈圆弧形且走势与车轮角速度方向一致,钢轨与车轮S23切应力圆弧走势对称。

**关键词:** 轮轨关系;摩擦系数;接触力学;有限元分析

中图分类号:U270.12

文献标志码:A

本文引用格式:牟明慧,赵龙志,陈道云. 基于牵引制动性能的轮轨接触行为研究[J]. 华东交通大学学报,2023,40(2):79-86.

DOI:10.16749/j.cnki.jecjtu.20230330.009

## Research on Wheel-Rail Contact Behavior Based on Traction and Braking Performance

Mou Minghui<sup>1,2</sup>, Zhao Longzhi<sup>3</sup>, Chen Daoyun<sup>4</sup>

(1. School of Transportation Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China; 2. Network & Information Center, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China; 3. School of Materials Science and Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China; 4. State Key Laboratory of Performance Monitoring and Protecting of Rail Transit Infrastructure, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

**Abstract:** In order to find out the wheel-rail rolling contact behavior of the train under traction and braking conditions, so as to provide a theoretical basis for the research on wheel-rail damage mechanism in the future, taking CRH2-300 EMU wheel-rail as the research object, the wheel-rail contact mechanical behavior based on traction and braking performance adhesion coefficient model is studied by finite element simulation. The results show that the friction coefficient based on empirical model is significantly greater than that based on traction and braking model and Shinkansen model. The friction coefficient of Shinkansen model is close to that based on traction braking performance model. Under the traction condition, the tangential force image shows the form of two-point contact, and the point-contact tangential force at the front end along the running direction is significantly greater than that at the rear end of the running direction. Under the braking condition, the tangential force is of single point contact at the beginning and then a two-point contact. At the wheel rail contact point, the shear stress of the wheel S23 is in a circular arc shape, and the circular arc trend is consistent with the direction of

收稿日期:2022-10-31

基金项目:国家自然科学基金项目(52202468);江西省自然科学基金项目(20202BABL214028);江西省教育厅科技项目(GJJ190346);轨道交通基础设施性能监测与保障国家重点实验室自主课题(T2021102)

the wheel angular velocity. The circular arc trend of the shear stress of the rail and the wheel S23 is symmetrical.

**Key words:** wheel-rail relationship; friction coefficient; contact mechanics; finite element analysis

**Citation format:** MOU M H, ZHAO L Z, CHEN D Y. Research on wheel-rail contact behavior based on traction and braking performance[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2023, 40(2): 79-86.

轮轨关系是动车组九大关系之首, 轮轨间的接触力学行为直接影响轮轨匹配关系, 正确揭示轮轨间的接触力学行为对于保障列车安全运行意义重大<sup>[1-7]</sup>。在列车轴重保持恒定的情况下, 轮轨摩擦系数将直接影响轮轨接触的力学行为, 因此合理的轮轨摩擦系数模型成为研究轮轨接触力学行为的关键。

朱文良<sup>[8]</sup>针对轨道车辆制动工况下的低黏着特性分析了防滑控制作用下制动力调节引起轮轨间黏着变化和改善的原因, 基于滑动功率和滑动能对 Polach 黏着模型进行了改进, 给出了适用于制动工况下的轮轨低黏着模型。师陆冰<sup>[9]</sup>研究了不同工况下的轮轨黏着-蠕滑曲线特性, 结果表明水、油工况导致摩擦系数明显降低, 撒砂可有效提高摩擦系数。赵小罡<sup>[10]</sup>分析了轮轨滚滑作用下裂纹面之间的瞬态法、切向接触和裂尖动态应力场强度因子, 结果表明滚滑状态下的轮轨法、切向接触力不随轮轨摩擦系数的增加而变化, 但裂纹面间的最大法、切向接触力却随摩擦系数的增加而不断减小。焦琬晴<sup>[11]</sup>建立了一种轮轨界面存在水介质时的黏着特性三维数值模型, 讨论了速度、表面粗糙度和边界摩擦系数对摩擦系数的影响, 结果表明, 温升情况下摩擦系数高于等温情况下摩擦系数, 速度和表面粗糙度对摩擦系数影响较大且界面温升会使摩擦系数增加。胡雅婷<sup>[12]</sup>在不同介质工况下进行了轮轨横向黏着特性试验, 结果表明在干态与水介质下横向摩擦系数随着速度的增大而降低, 而在油介质下横向摩擦系数随着速度的增大而增大。Hua<sup>[13]</sup>基于双盘滚动试验机改进了轮轨摩擦系数的预测方法, 发现摩擦系数随行驶速度增加而降低, 最终结果与日本新干线车辆的试验结果保持了良好的一致性。Keropyan<sup>[14]</sup>对露天矿机车工作面与钢轨的相互作用条件进行了理论和实践研究, 确定了合理的轮轨摩擦系数值, 以缩短轮轨的磨合期。Shu<sup>[15]</sup>研究了动态风沙环境对不同滑移率下轮轨磨损和损伤行为的影响, 结果表明在戈壁、沙漠和干旱三种条件下, 摩擦系数随滑

移率的变化趋势并不完全相同, 随着滑移率的增加, 轮轨的疲劳磨损逐渐加剧。吴萌岭<sup>[16]</sup>研究了水介质工况下制动过程的轮轨摩擦系数动态变化规律, 发现摩擦系数随着滑移率增大呈现先上升后饱和下降再上升的趋势。

可见, 研究者从服役工况、轮轨接触介质等角度以仿真和试验的方式研究了轮轨摩擦系数的动态变化, 但是当前动车组轮轨摩擦系数模型多采用经验模型<sup>[17-19]</sup>, 该模型将列车运行速度纳入摩擦系数的影响因素中, 虽适用性广但缺乏严格的科学依据, 未突出不同车型的摩擦系数差异。本文在轮轨间黏着力提供列车牵引力与制动力的基本事实基础上, 建立了 CRH2-300 列车牵引及制动性能摩擦系数模型, 同时以轮轨摩擦系数的经验模型作为参照, 通过三维轮轨接触有限元仿真模拟了启动和制动工况下的轮轨滚滑接触力学行为, 分析了两种摩擦系数模型间的异同。

## 1 轮轨摩擦系数模型

轮轨间的摩擦系数直接影响列车的牵引力与制动力水平, 我国当前普遍采用的轮轨摩擦系数模型是基于以往测试积累的经验得到的, 具体公式如下<sup>[20]</sup>

$$\mu=0.04+\frac{13.7}{120+v} \quad (1)$$

式中:  $v$  为列车运行速度。

事实上, 轮轨间的摩擦系数会随着牵引力、牵引黏着质量、制动力、制动黏着质量等参数的不同而改变, 基于列车牵引与制动过程的基本事实, 构造轮轨牵引摩擦系数  $\mu_T$  和制动摩擦系数  $\mu_B$  如下

$$\mu_T=\frac{F}{M_T g} \quad (2)$$

式中:  $F$  为牵引力;  $M_T$  为牵引黏着质量;  $g$  为重力加速度。

$$\mu_B=\frac{B}{M_B g} \quad (3)$$

式中:  $B$  为制动力;  $M_B$  为制动黏着质量。

本文以 CRH2-300 型动车组为研究对象,其牵引与制动性能的具体参数如图 1 所示,结合本文建立的牵引摩擦系数和制动摩擦系数模型可求解出轮轨摩擦系数值,将计算结果与经验模型及日本新干线模型进行对比,如图 2 和图 3 所示,可见,基于经验模型的摩擦系数显著大于基于牵引、制动模型

的摩擦系数及新干线模型的摩擦系数,新干线模型的摩擦系数与基于牵引制动性能模型的摩擦系数较为接近。

## 2 轮轨接触有限元模型

### 2.1 模型基本参数及计算工况设置

轮轨接触有限元模型基于 CRH2-300 型动车组轮轨参数建立,由 8 节点六面体单元离散。在模型的求解区,接触属性设置为基于罚函数法的“面-面”接触,为尽可能减少模型的计算规模而又不损失解的精度,划分轮轨时采用不均匀网格。接触带处最细密(单元尺寸约为 1 mm),用以求解轮轨接触,越远离接触带,网格越粗大。考虑到轮轨瞬态接触是与时间相关的非线性问题,网格划分采用 Lagrangian 描述,共离散为 367 536 个单元和 445 126 个节点。轮轨接触模型考虑弹性滑动,表面特征尺寸百分比设定为建议值 0.005。最终得到的轮轨接触有限元模型如图 4 所示。

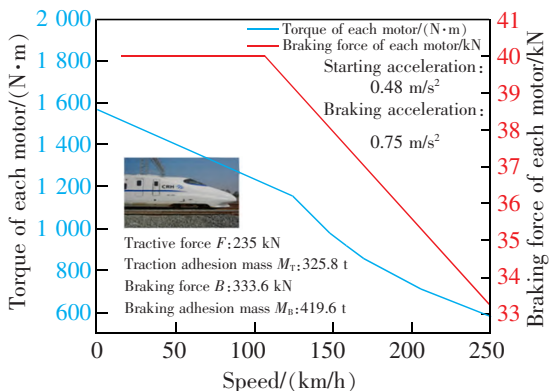


图 1 CRH2-300 列车牵引与制动性能参数

Fig.1 Traction and braking performance parameters of CRH2-300

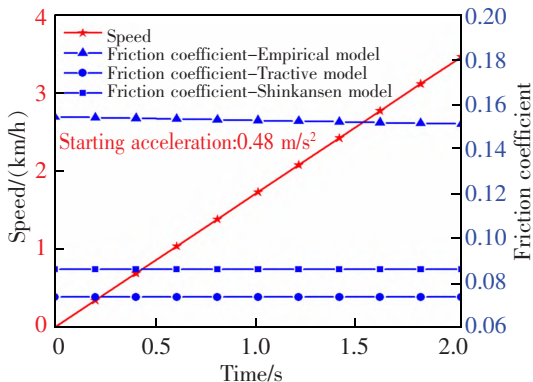


图 2 牵引工况下的摩擦系数

Fig.2 Friction coefficient under traction condition

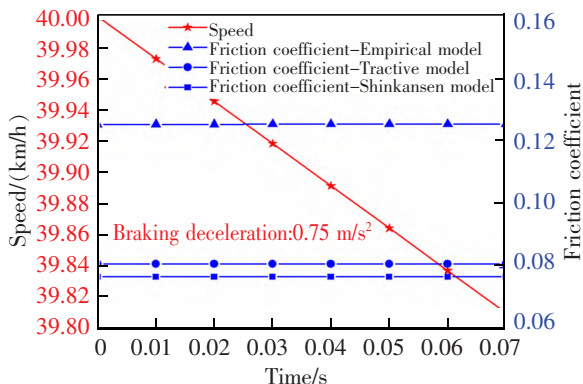


图 3 制动工况下的摩擦系数

Fig.3 Friction coefficient under braking conditions

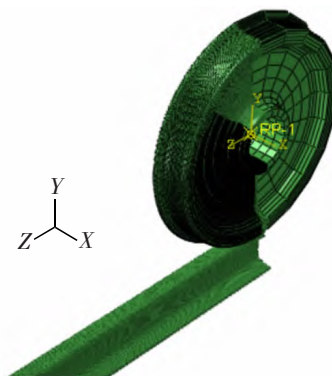


图 4 轮轨三维有限元模型

Fig.4 The wheel-rail 3D finite element model

在启动牵引工况下,为了建立稳定收敛的计算模型,在 ABAQUS 中建立了 3 个分析步,其中第 1 分析步为初始分析步,第 2 分析步为静态接触分析步,第 3 分析步为动态隐式分析步,第 2 和第 3 分析步时间分别定为 1 s 和 2 s,同时激活几何非线性属性。在制动工况下,建立了 4 个分析步,其中第 1 分析步为初始分析步,第 2 分析步为静态接触分析步,共 1 s 时长,第 3 分析步为动态隐式分析步对车轮进行加速,共 0.1 s 时长,第 4 分析步为动态隐式分析步对车轮实施制动减速,共 0.07 s 时长。

在计算工况中,轮轨材料属性均设置为线弹性材料,其中车轮材料为 ER8,弹性模量为 206 000 MPa,

泊松比为 0.3; 钢轨材料为 PD3, 弹性模量为 184 000 MPa, 泊松比为 0.3。在静态载荷步和动态载荷步中, 钢轨底部均定义为全约束; 在静态载荷步中, 车轮只有垂直方向的约束被放开, 而在动态载荷步中, 车轮垂向、纵向及转动轴旋转方向的约束均被放开。采用罚函数法定义轮轨接触面间的切向力行为, 其中, 方向性为各向同性, 摩擦系数基于牵引及制动性能计算出的摩擦系数值而定义, 轮轨法向压力过盈设置为“硬”接触, 约束执行方法为罚函数, 允许接触后分离, 接触刚度定义为线性, 刚度比例因子为 1, 不考虑轨面不平顺。

在静态接触分析步中, 为了模拟 CRH2-300 型动车组在定员工况下的轴重, 将轴重换算为载荷施加到车轮中心耦合点处, 数值为 51 450 N, 方向为  $y$  轴负方向(竖直向下); 在动态隐式分析步的计算中, 根据 CRH2-300 型动车组的启动和制动性能参数, 将车轮的启动加速度和制动加速度(常用制动)数值分别设定为  $0.48 \text{ m/s}^2$  和  $0.75 \text{ m/s}^2$ , 启动加速度和制动加速度的施加位置均位于车轮旋转中心的耦合点, 其中启动加速度方向沿  $z$  轴正方向, 制动加速度方向沿  $z$  轴负方向。

## 2.2 有限元模型准确性验证

以下通过轮轨接触应力的经典公式计算出轮轨最大接触应力, 将得到的解析解与静态接触仿真的结果进行对比, 验证所建立模型的准确性。

参考谢红太<sup>[21]</sup>的计算结果, CRH2-300 型动车组轮轨接触的接触区域长半轴和短半轴数值解分别为  $a=7.517 \text{ mm}$  和  $b=4.695 \text{ mm}$ , 轴重载荷为 51 450 N, 根据式(4)可计算得到轮轨最大接触应力的解析解为 696.4 MPa。

$$P_{\max} = \frac{3P}{2\pi ab} \quad (4)$$

式中:  $P$  为轴重分配于车轮的载荷;  $a$  为接触区椭圆长半轴;  $b$  为接触区椭圆短半轴。

单独对轮轨静态接触工况进行计算, 分析轮轨接触斑的最大接触应力及接触椭圆长半轴和短半轴长度(如图 5 所示), 将仿真计算结果与公式计算的解析解进行对比, 如表 1 所示。可见, 公式计算的解析解与仿真解在最大接触应力、接触椭圆长半轴长度和短半轴长度等方面的相对误差较小, 均不超过 4%, 证明所建立的论文模型具有较好的准确性, 可进一步进行后续的分析。

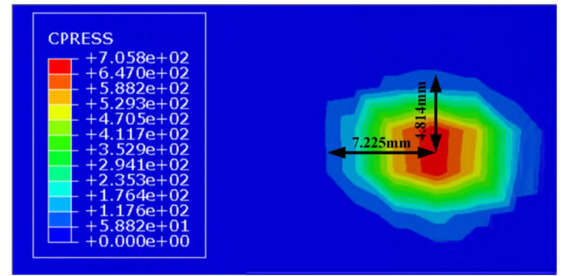


图 5 轮轨静态接触应力状态

Fig.5 Stress state of wheel-rail static contact

表 1 解析解与仿真解对比分析

Tab.1 Comparison between analytical solution and simulation solution

Relevant parameters	Analytical solution	Simulation solution/%	Relative error
Maximum contact stress/MPa	696.4	705.8	1.35
Elliptic long semi-axis/mm	7.517	7.225	3.88
Elliptic short semi-axis/mm	4.695	4.814	2.53

## 3 有限元仿真结果分析

### 3.1 接触面力学参数

#### 3.1.1 接触面法向及切向力

图 6 及图 7 所示分别为牵引和制动工况下的轮轨接触面法向力动态变化, 由图可见, 在牵引工况下, 轮轨接触面法向力在列车刚启动的 0.25 s 内呈现迅速衰减的特征, 这是因为在牵引工况前施加了 1 s 时长的静态接触力工况, 存在较大的接触振动, 当进入牵引工况后, 轮轨间的法向接触得到了持续衰减, 而制动工况下的前一分析步是加速工况, 因此静态接触力已经过有效衰减, 因此不存在制动开始阶段的力衰减情况。随后, 两种工况下的接触面法向力在较小振幅内围绕 10 kN 左右的均值呈现稳定的振动形态, 基于经验模型和牵引制动性能模型的接触面法向力振动均值基本保持一致, 这表明不同模型造成的摩擦系数改变未对轮轨接触面法向力造成显著影响。进一步观察牵引及制动过程中 4 个时刻下的接触面法向力云图, 发现不同时刻牵引和制动工况下的云图形貌基本一致, 为单点接触且接触区椭圆形由中心向外放射。

由于考虑计算时间成本的原因, 模型在静态及动态接触计算的时长偏短。在静态载荷步中, 轮轨接触的一瞬间将产生较大幅值的接触载荷振动, 这种振动会随着时间的推移而逐渐减弱, 由于后续动

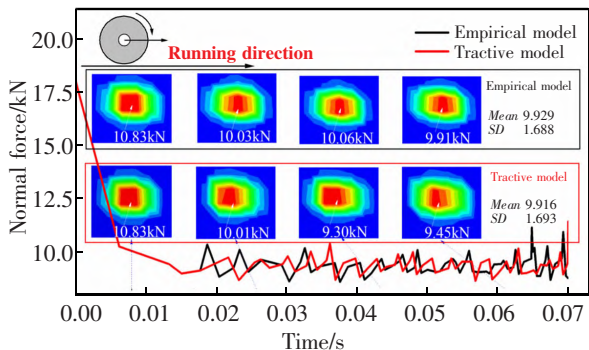


图 6 牵引工况下的轮轨接触面法向力动态变化图

Fig.6 Dynamic variation diagram of normal force on wheel-rail contact surface under traction condition

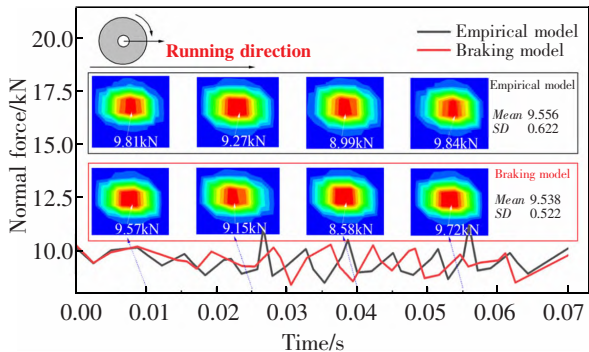


图 7 制动工况下的轮轨接触面法向力动态变化图

Fig.7 Dynamic variation diagram of normal force on wheel rail contact surface under braking condition

态分析步给定的时间较短,因此前述衰减振动没有完全消失,最终导致了接触力计算结果存在小幅波动。

通过分析图 8 和图 9 可知,在牵引和制动过程中的绝大部分时刻存在经验模型的接触面切向力大于牵引及制动模型接触面切向力的现象,其中,在牵引工况下,经验模型及牵引性能模型在起始时刻处的切向力达到最大值,随后便缓慢降低至 0.3 kN 左右的均值并小幅振动;在制动工况下,经验模型及制动性能模型在起始时刻处的切向力达到最大值且该最大值明显高于牵引工况下的最大值,随后切向力迅速衰减至 0.5 kN 左右的均值并小幅振动,由此可见稳定振动后的制动工况切向力均值高于牵引工况切向力均值。进一步分析切向力云图可知,牵引工况下的经验模型和牵引性能模型切向力云图均呈现“两点”接触形态,且沿运行方向前端的点接触切向力明显大于运行方向后端的点接触切向力;在制动工况下,经验模型和制动性能模型的切向力在起始时刻呈现“单点”接触,此时轮轨接触面间处于全滑动状态,随后轮轨间呈现“两点”接

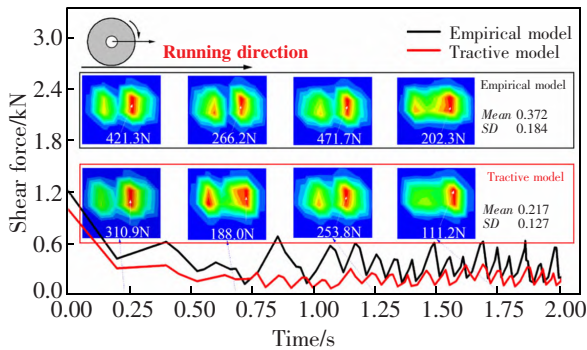


图 8 牵引工况下的轮轨接触面切向力动态变化图

Fig.8 Dynamic variation diagram of tangential force on wheel-rail contact surface under traction condition

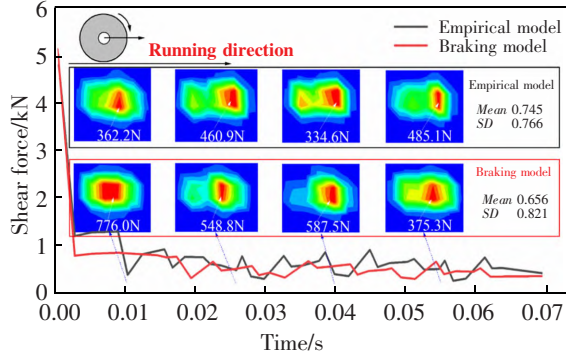


图 9 制动工况下的轮轨接触面切向力动态变化图

Fig.9 Dynamic variation diagram of tangential force on wheel rail contact surface under braking condition

状态,轮轨间恢复黏着接触状态。

### 3.1.2 接触压力

当接触过程稳定后,轮轨间的接触压力保持稳定,其中,牵引工况下的经验模型与牵引性能模型接触压力水平基本一致,制动工况下的经验模型与制动性能模型接触压力水平基本一致。进一步分析可知,两种工况下经验模型与牵引制动性能模型的接触压力云图均呈现椭圆形,如图 10 和图 11 所示。

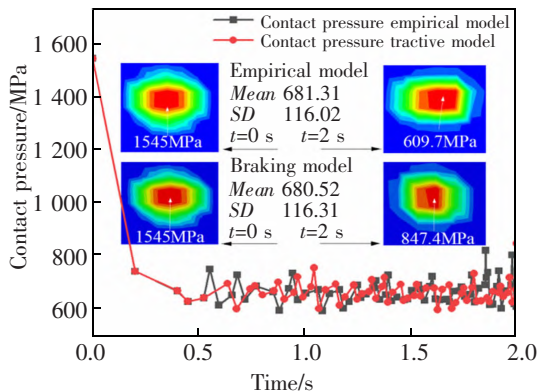


图 10 牵引工况下的轮轨接触压力动态变化图

Fig.10 Dynamic variation diagram of wheel-rail contact pressure under traction condition

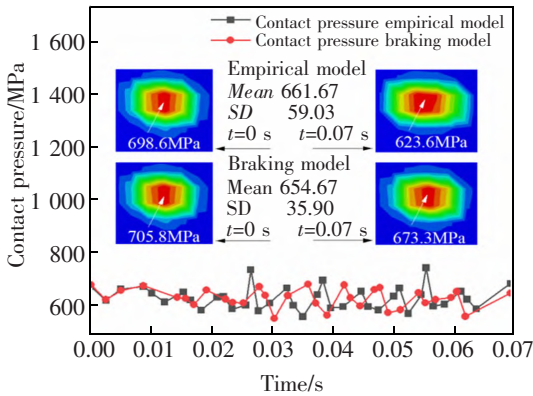


图 11 制动工况下的轮轨接触压力动态变化图  
Fig.11 Dynamic change diagram of wheel-rail contact pressure under braking condition

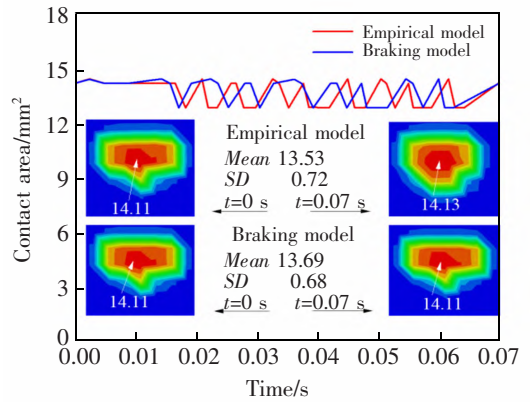


图 13 制动工况下的轮轨节点接触面积动态变化图  
Fig.13 Dynamic change diagram of wheel-rail node contact area under braking condition

### 3.1.3 接触节点面积

在轮轨接触中,每个节点的接触面积由以下公式表示

$$A_i = \sum_{j=1}^{n_{cont-i}} |c_{ij}| A_j \quad (5)$$

式中: $n_{cont-i}$ 为包含节点*i*的潜在接触约束数量; $c_{ij}$ 为接触约束系数; $A_j$ 为约束*j*的面积。

图 12 所示为牵引工况下的轮轨节点接触面积动态变化图,可见在牵引过程中经验模型与牵引性能模型的节点接触面积呈现稳定的趋势,虽有波动但振幅较小且相对恒定,轮轨间始终保持接触,未出现分离。根据节点接触面积云图可知,牵引的起始时刻尚未施加转矩,接触面积云图呈现圆形分布,在施加转矩并开始转动后,接触面积云图呈现细长的椭圆形分布形态。

根据图 13 所示的制动工况下轮轨节点接触面

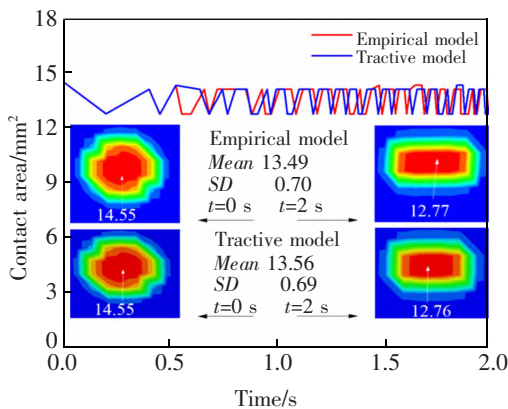


图 12 牵引工况下的轮轨节点接触面积动态变化图  
Fig.12 Dynamic change diagram of wheel-rail node contact area under traction condition

积动态变化图可知,制动过程中的经验模型与牵引性能模型节点接触面积也呈现稳定的趋势,以小振幅波动,在制动全过程中的节点接触面积云图均呈现近似椭圆形分布,此外,在接触区域的横向可见小面积的节点接触。

### 3.2 轮轨内应力

#### 3.2.1 VonMises 等效应力

图 14 和图 15 所示分别为轮轨在牵引和制动工况下的 VonMises 等效应力动态变化图,可见在两种工况下,经验模型的等效应力变化趋势与牵引及制动模型的等效应力变化趋势保持一致,经验模型的等效应力极值在整体上略高于牵引及制动模型的等效应力。通过等效应力云图分析可以发现,同一时刻轮轨接触时的最大等效应力发生于轨道接触面以下的次表层,车轮本身的等效应力最大值位于踏面以下次表层。

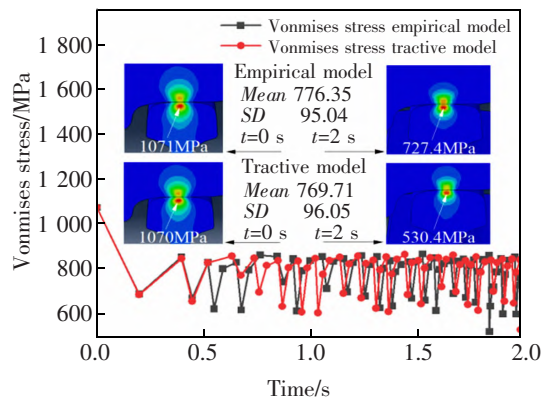


图 14 牵引工况下的轮轨 Mises 应力动态变化图  
Fig.14 Dynamic variation diagram of wheel-rail Mises stress under traction condition

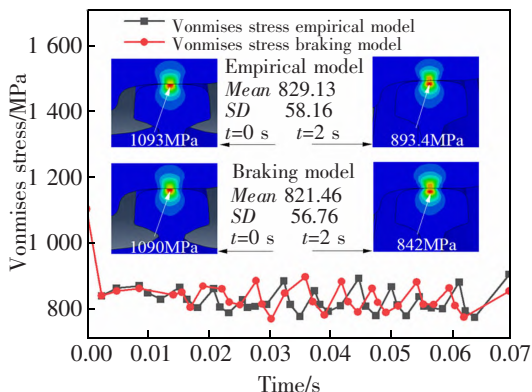


图 15 制动工况下的轮轨 Mises 应力动态变化图  
Fig.15 Dynamic variation diagram of wheel-rail Mises stress under braking condition

### 3.2.2 S23 切应力

在牵引和制动工况下,由经验模型及牵引制动模型计算的轮轨纵向剖面 S23 切应力动态变化如图 16 和图 17 所示,由图可见,在两种计算工况下,不同摩擦系数模型计算的 S23 切应力均值并未有明显差异,S23 切应力云图均呈现出类似的分布形态且钢轨在 S23 正方向和负方向的切应力最大值

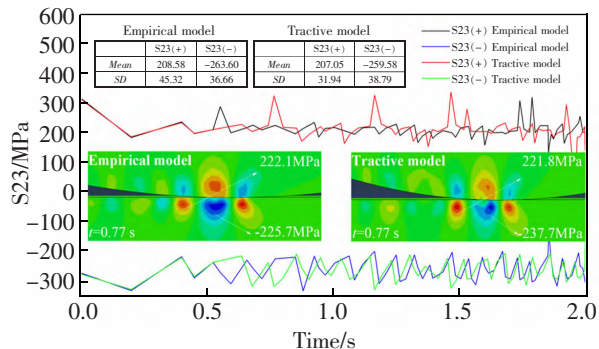


图 16 牵引工况下轮轨 S23 切应力动态变化图  
Fig.16 Dynamic variation diagram of wheel-rail S23 shear stress under traction condition

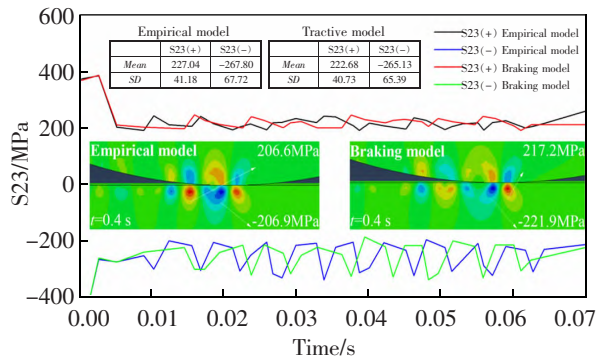


图 17 制动工况下轮轨 S23 切应力动态变化图  
Fig.17 Dynamic variation diagram of wheel-rail S23 shear stress under braking condition

均大于车轮,其中,在轮轨接触点处,车轮 S23 切应力呈现圆弧状形态且圆弧走势与车轮角速度方向一致,钢轨 S23 切应力也呈现圆弧状形态且圆弧走势与车轮 S23 切应力圆弧走势对称;在轮轨接触点两侧,车轮和钢轨分别出现了与接触点位置处 S23 切应力正负方向相反的 S23 切应力;在轮轨接触点远离运行方向的材料后侧区域,可见有正负交替出现的小幅值 S23 切应力出现。

## 4 结论

1) 基于经验模型的摩擦系数显著大于基于牵引、制动模型的摩擦系数及新干线模型的摩擦系数,新干线模型的摩擦系数与基于牵引制动性能模型的摩擦系数较为接近。

2) 经验模型的接触面切向力大于牵引及制动模型,在牵引工况下,经验模型及牵引性能模型在起始时刻处的切向力达到最大值,随后缓慢降至 0.3 kN 左右的均值并小幅振动,而在制动工况下,经验模型及制动性能模型在起始时刻处的切向力最大值明显高于牵引工况,随后迅速衰减至 0.5 kN 左右的均值并小幅振动。

3) 经验模型与牵引及制动模型的等效应力变化趋势保持一致,轮轨接触的最大等效应力位于接触面以下的次表层。钢轨在 S23 正方向和负方向的切应力最大值均大于车轮,在轮轨接触点处,车轮 S23 切应力呈圆弧形且圆弧走势与车轮角速度方向一致,钢轨与车轮 S23 切应力圆弧走势对称。

### 参考文献:

[1] 康熙,陈光雄,杨普森,等. 高速列车车轮偏心磨耗的形成机理与发展规律[J]. 交通运输工程学报,2022,22(1): 168-176.  
KANG X, CHEN G X, YANG P M, et al. Formation mechanism and progression pattern of eccentric wear of high-speed train wheels[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2022, 22(1): 168-176.  
[2] 沈明学,容彬,秦涛,等. 频繁启停工况下轮轨滚动接触磨损行为与磨屑颗粒排放特性研究[J]. 机械工程学报, 2022, 58(3): 194-202.  
SHEN M X, RONG B, QIN T, et al. Study on wear behavior and debris particles emission characteristics induced by wheel-rail rolling contact under frequent start-stop conditions[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(3): 194-202.  
[3] 肖乾,王丹红,陈道云,等. 高速列车轮轨激励作用机理及其影响综述[J]. 交通运输工程学报,2021,21(3): 93-109.  
XIAO Q, WANG D H, CHEN D Y, et al. Review on mechanism and influence of wheel-rail excitation of high-speed

- train[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2021, 21(3):93-109.
- [4] 沈明学,秦涛,李圣鑫,等. 宽温域下高速轮轨界面粘着与车轮表面损伤行为[J]. 交通运输工程学报, 2021, 21(3): 269-278.  
SHEN M X, QIN T, LI S X, et al. High-speed wheel-rail interfacial adhesion and surface damage behavior of wheel in wide temperature range[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2021, 21(3): 269-278.
- [5] 昌超,凌亮,孙宇,等. 新型全自动轨道巡检车动力学性能[J]. 交通运输工程学报, 2021, 21(6): 194-208.  
CHANG C, LING L, SUN Y, et al. Dynamics performance of new type of fully automatic track inspection vehicle[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2021, 21(6): 194-208.
- [6] ZHOU L, WANG W J, HU Y, et al. Study on the wear and damage behaviors of hypereutectoid rail steel in low temperature environment[J]. Wear, 2020, 456/457: 203365.
- [7] YANG F, WEI Z L, SUN X F, et al. Wheel-rail rolling contact behavior induced by both rail surface irregularity and sleeper hanging defects on a high-speed railway line [J]. Engineering Failure Analysis, 2021, 128: 105604.
- [8] 朱文良,郑树彬,吴娜,等. 适用于制动工况下的轮轨低黏着改进模型[J]. 铁道学报, 2021, 43(3): 34-41.  
ZHU W L, ZHENG S B, WU N, et al. Improved model for degraded wheel-rail adhesion under braking conditions[J]. Journal of the China Railway Society, 2021, 43(3): 34-41.
- [9] 师陆冰,李群,郭俊,等. 不同工况下轮轨黏着-蠕滑曲线特性[J]. 机械工程学报, 2019, 55(10): 151-157.  
SHI L B, LI Q, GUO J, et al. Adhesion-creep curve characteristics of wheel/rail under various conditions[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(10): 151-157.
- [10] 赵小罡,赵鑫,温泽峰,等. 轮轨摩擦系数对钢轨直裂纹瞬态扩展行为的影响[J]. 工程力学, 2018, 35(5): 239-245.  
ZHAO X G, ZHAO X, WEN Z F, et al. Influence of wheel-rail friction coefficient on transient propagation of a vertical rail crack[J]. Engineering Mechanics, 2018, 35(5): 239-245.
- [11] 焦琬晴,吴涛,吴志豪,等. 一种求解高速轮轨黏着问题的简化数值模型[J]. 机械设计与制造工程, 2020, 49(10): 91-96.  
JIAO W Q, WU T, WU Z H, et al. A simplified numerical model for solving the problem of high-speed wheel-rail adhesion[J]. Machine Design and Manufacturing Engineering, 2020, 49(10): 91-96.
- [12] 胡雅婷,张淑华,尧辉明. 基于横向蠕滑特性的轮轨黏着试验研究[J]. 润滑与密封, 2020, 45(9): 78-82.  
HU Y T, ZHANG S H, YAO H M. Adhesion test of wheel-rail based on lateral creep characteristics[J]. Lubrication Engineering, 2020, 45(9): 78-82.
- [13] HUA C, ISHIDA M, NAMURA A, et al. Estimation of wheel/rail friction coefficient under wet condition with measured boundary friction coefficient and real contact area[J]. Wear, 2011, 271(1-2): 32-39.
- [14] KEROPYAN A, GORBATYUK S. Impact of roughness of interacting surfaces of the wheel-rail pair on the coefficient of friction in their contact area[J]. Procedia Engineering, 2016, 150: 406-410.
- [15] SHU K, DING H H, MAZZU A, et al. Effect of dynamic windblown sand environments on the wear and damage of wheel-rail under different slip ratios[J]. Wear, 2022, 500-501: 204349.
- [16] 吴萌岭,周嘉俊,马天和,等. 水介质下轮轨制动黏着试验研究[J]. 铁道机车车辆, 2021, 41(5): 139-143.  
WU M L, ZHOU J J, MA T H, et al. Experimental study on wheel-rail brake adhesion under water condition[J]. Railway Locomotive & Car, 2021, 41(5): 139-143.
- [17] 肖乾,张海,王成国,等. 函数型摩擦系数条件下轮轨滚动和滑动接触的热机耦合分析[J]. 中国铁道科学, 2013, 34(4): 60-65.  
XIAO Q, ZHANG H, WANG C G, et al. Thermal mechanical coupling analysis of wheel rail rolling and sliding contacts under functional friction coefficient [J]. China Railway Science, 2013, 34(4): 60-65.
- [18] 杨广雪,赵方伟,李秋泽,等. 高速列车轮轨接触几何参数对轮轨磨损的影响研究[J]. 铁道学报, 2019, 41(2): 50-56.  
YANG G X, ZHAO F W, LI Q Z, et al. Study of influences of high-speed train wheel-rail contact geometric parameters on wheel-rail wear[J]. Journal of the China Railway Society, 2019, 41(2): 50-56.
- [19] 蔡园武,常崇义,陈波,等. 基于 ALE 方法的高速轮轨黏着特性仿真及试验验证[J]. 中国铁道科学, 2018, 39(5): 33-41.  
CAI Y W, CHANG C Y, CHEN B, et al. Simulation and experimental validation of high speed wheel-rail adhesion characteristics based on ALE method[J]. China Railway Science, 2018, 39(5): 33-41.
- [20] 黄向盈. 铁道轮轨摩擦系数[J]. 铁道机车车辆, 2010, 30(5): 17-33.  
HUANG W Y. Railway wheel-rail Friction coefficient[J]. Railway Locomotive & Car, 2010, 30(5): 17-33.
- [21] 谢红太. CRH2 型动车组轮轨接触计算及车轮强度 CAE 分析[J]. 宁夏工程技术, 2017, 16(4): 344-347.  
XIE H T. CRH2 EMU wheel rail contact calculation and wheel strength CAE analysis[J]. Ningxia Engineering Technology, 2017, 16(4): 344-347.



第一作者: 牟明慧(1988—),女,工程师,研究方向为载运工具强度与可靠性。E-mail: 8563@ecjtu.edu.cn。



通信作者: 陈道云(1988—),男,讲师,博士,研究方向为结构强度与可靠性。E-mail: chendaoyun@ecjtu.edu.cn。

(责任编辑:李根)