DOI: 10.3901/JME.2020.12.124

轮轨高频动力作用模拟中接触模型的影响分析*

张鹏 赵鑫 凌亮 陶功权 温泽峰
(西南交通大学牵引动力国家重点实验室 成都 610031)

摘要: 轮轨高频动力分析模型目前多沿用了传统的赫兹接触模型, 其在高速轮轨系统上的适用性尚未得到验证。针对赫兹接触工况, 建立基于多体动力学的车轮-轨道耦合动力学和车辆动力学模型, 其中轮轨法向接触由赫兹弹簧表征, 作为对比也建立基于显式有限元的三维高速轮轨瞬态滚动接触有限元模型, 采用可考虑三维接触几何的“面-面”接触算法精确求解轮轨接触。对比 150~500 km/h 速度范围内典型钢轨短波波磨(波长 20~140 mm、波深 0.01~0.20 mm)激励下的高频轮轨力结果, 发现三种模型预测的幅值存在显著差异, 但未发生轮轨脱离时(波磨尚浅), 三种模型预测的幅值均与波深线性正相关。具体而言, 相较于瞬态滚动接触模型, 车轮-轨道耦合动力学和车辆动力学模型预测的垂向轮轨力更大, 其特征幅值的最大差值分别为静轮重的 39.2%和 88.4%, 三种模型预测波长 30 mm 波磨的临界波深(恰好发生轮轨脱离)相应地高于 0.2 mm、0.14 mm 和 0.05 mm。开展高速、高频轮轨动力分析时, 传统的赫兹接触弹簧会带来不可忽略的计算误差。

关键词: 轮轨高频动力作用; 显式有限元法; 面-面接触算法; 多体动力学; Hertz 弹簧; 钢轨波磨

中图分类号: U211

Influence of Contact Modeling on Numerical Analyses of High Frequency Wheel-rail Interactions

ZHANG Peng ZHAO Xin LING Liang TAO Gongquan WEN Zefeng
(State Key Laboratory of Traction Power, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031)

Abstract: Hertzian spring is widely used today in many dynamics models of high frequency wheel-rail interaction, but its applicability to high speed railways has not been validated. For cases of Hertz contact, two multi-body dynamics based models, a wheel-track coupled dynamics model and a vehicle dynamics model, are developed, in which Hertzian springs are employed to represent the normal contact. Meanwhile, a 3-D transient rolling contact model is developed for reference using the explicit finite element method, in which the rolling contact is solved by a surface-to-surface algorithm in the consideration of actual contact geometries. High-frequency normal contact forces calculated at 150-500 km/h and in the presence of typical corrugation (wavelength 20-140 mm and depth 0.01-0.20 mm) show that significant difference exists among the contact forces predicted by the three models, but for relatively shallow corrugation (no contact loss occur) a linear relationship has been obtained between the corrugation depth and the amplitude of the contact force by all three models. In detail, the normal contact forces predicted by the wheel-track coupled dynamics and the vehicle dynamics models are significantly higher than those by the transient rolling contact model, their maximum over-estimations are 39.2% and 88.4% of the static load, respectively, and the obtained critical depths, at which wheel and rail lose contact during rolling, deviate significantly with the employed models, being greater than 0.2 mm, 0.14 mm and 0.05 mm for the three model, respectively, when the wavelength of 30 mm is taken. In a word, significant errors exist in predictions of high-speed and high frequency wheel-rail interactions if the traditional Hertzian spring is employed.

Key words: high-frequency wheel-rail dynamic interaction; explicit finite element method; surface-to-surface contact algorithm; multi-body dynamics; hertz spring; rail corrugation

0 前言

在当下最先进的高速铁路中, 车轮不圆、擦伤、

钢轨波磨及滚动接触疲劳等伤损依然存在, 且以短波长或高通过频率者为甚。相较于普速铁路, 高速轮轨系统对上述短波伤损更加敏感, 需要更及时的维修^[1-5]。容易想象, 精确预测高速条件下轮轨在短波伤损处的高频动力作用和瞬态滚滑行为是研究其萌生理和抑制/维修策略的关键。

* 国家自然科学基金(51675444, 51775455)和四川省国际科技合作与交流研发(2017HH0038)资助项目。20191107 收到初稿, 20200329 收到修改稿

针对轮轨动力相互作用问题, 传统上多采用基于多体动力学的车辆动力学或车辆-轨道耦合动力学模型, 车轮通常被视为刚体, 轮轨法向接触由 Hertz 弹簧模拟, 而切向接触常采用基于 Hertz 理论的 FASTSIM 和沈氏理论等。两类模型的不同在于, 车辆动力学模型将钢轨假设为刚体, 不考虑轨道弹性, 而在车辆-轨道耦合动力学模型中, 钢轨由铁木辛柯梁或欧拉梁模拟, 并考虑轨下离散支撑, 轨道振动的影响包含其中^[6-7]。

近年来, 各国学者从不同方面改进了传统动力学模型。FAYOS 等^[8-9]引入了柔性轮对并考虑了与车轮旋转相关的惯性效应及多普勒效应。万鹏等^[10]利用 SIMPACK 与 ANSYS 联合仿真, 研究了轮对柔性对轮轨动力行为的影响。罗仁等^[11]考虑了轮轨非线性接触几何和非线性蠕滑率以及轮对一阶弯曲、扭转, 用以研究非圆车轮条件下的轮轨相互作用。ZHONG 等^[12]引入了由轮轴弹性变形引起的车轮平动、侧滚和摇头等, 系统分析了其对轮轨动力作用的影响。

为更精确地预测轮轨高频动力作用, LI 等^[13-16]建立了基于显式有限元法的三维高速轮轨瞬态滚动接触有限元模型(以下简称“瞬态滚动接触模型”), 于时域内重现了高速轮轨间瞬态滚滑, 接触非线性和有限接触斑通过弹性轮轨间的面-面接触算法引入式中, 车辆和轨道的高频结构振动、轮轨连续体振动、轮轨三维几何、材料非线性、摩擦非线性和接触面任意三维不平顺等细节均考虑在内, 自旋蠕滑率和陀螺仪效应等也都自动引入其中。相较传统动力学模型, 其缺点是计算成本过高^[17], 很难应用于大批量或实时分析。

本文旨在系统地分析车辆动力学模型、车辆-轨道耦合动力学模型及瞬态滚动接触模型在预测滚动接触体间高频动力作用方面的差异, 为更好地利用其各自优点奠定基础。

1 模型介绍

本文聚焦接触模型, 建模过程中尽量简化了与滚动接触无关的结构与部件(下面建立的三个模型均如此), 既降低了计算成本, 也避免了复杂结构及其振动行为对滚动接触结果的干扰, 有利于对比不同接触模型的预测效果。高频激励均假设为连续周期性激励, 即采用理想化的余弦型钢轨短波磨激励。需要说明的是, 某一短波波磨激励存在于车轮或钢轨表面, 就本文结果而言, 并无本质差异, 即所施激励也可理解为车轮高阶多边形磨耗。

1.1 瞬态滚动接触模型

图1显示了本文采用 ANSYS/Ls-dyna 建立的瞬态滚动接触模型。建模方法与文献[13-16]相同, 但车轮被简化为半径 430 mm、厚 135 mm 的圆柱体, 忽略了轮轴、车轮复杂截面和真实踏面廓型以及一系悬挂作用点与车轮中心的偏差等。轨道子模型仅考虑了平直线路, 且钢轨简化为半径 300 mm、弦高 176 mm 的部分圆柱体, 钢轨支撑由厚 150 mm 的连续弹性层(与钢轨之间采用连续网格)提供, 忽略了其离散支撑、轨底坡等结构细节。总之, 此模型在尽可能摒弃/简化车辆-轨道系统结构的同时, 模拟了严格意义上的 Hertz 型接触(即动力学模型中 Hertz 弹簧严格适用的工况), 零载荷时的初始接触点位于钢轨最顶端。需要指出的是, 引入上述钢轨支撑层旨在尽快消除初始条件的影响, 其支撑刚度取我国某高速线路的等效值(即保证加载时钢轨挠度一致)。

图1 三维高速轮轨瞬态滚动接触有限元模型

为方便表述, 建立了如图1所示的笛卡儿坐标系 oxy , 原点在 0 时刻的初始接触点上, x 、 y 、 z 轴分别沿纵、横和垂向, 模拟由以下两步组成。

(1) 用隐式时间积分算法求得上述轮轨系统在重力下的静态位移场。

(2) 以上述静态位移场进行初始化, 采用显式时间积分法求解轮轨瞬态滚动接触。

车轮由初始位置 A 开始, 以指定的前进和旋转速度(初始条件设置)沿钢轨滚动, 经过动态松弛区 AB 后, 近似稳态地滚入分析区 BC 。根据文献[17], 本文采用两种不同的 AB 段长度, 对于 300 km/h 及以下速度, 取值 0.6 m, 更高速度采用 1.6 m 长度。任一时刻的轮轨瞬态接触由基于罚函数法的“面-面”接触算法求解。边界条件具体为钢轨支撑层底面固结, 钢轨和支撑层纵向两端施加对称边界条件(模拟其无限长特征), 车轮两侧面轮轴对应位置及簧上质量均施加了横向约束。

轮、轨和钢轨支撑层均采用 8 节点 6 面体恒应力单元离散, 一系悬挂用弹簧和阻尼单元模拟, 并与由质量单元表征的簧上质量相连。为保证计算精度并控制模型规模, 采用尺寸 1 mm 的细密网格离散轮轨接触区域, 而其他区域采用尽可能稀疏的网格, 模型总节点和单元数分别为 188.2 万和 170.7 万。轮、轨和钢轨支撑层的材料阻尼均以 Rayleigh 阻尼(c_m)的形式引入控制方程

$$c_m = \beta k \quad (1)$$

式中, β 是与刚度 k 相关的阻尼常数^[18]。表 1 列出了模型所涉及主要参数的取值。

表 1 有限元模型涉及参数取值

参数		数值
簧上质量/kg		7 390
一系悬挂	刚度系数/(MN/m)	0.66
	阻尼/(kN · s/m)	3
簧下质量	车轮/kg	610
车轮、钢轨材料	弹性模量/GPa	205.9
	密度/(kg/m ³)	7 790
	泊松比	0.3
	阻尼常数 β /s	1.0×10^{-4}
支撑层	弹性模量/MPa	6
	密度/(kg/m ³)	2 400
	泊松比	0.25
	阻尼常数 β /s	0.2

钢轨波磨通过修改接触面上相关节点坐标的方式施加于分析区 BC ^[16]。考虑到现场钢轨短波波磨的典型尺寸^[19-21], 波磨波长和波深分别在 20~40 mm 和 0.01~0.20 mm 的范围内变化, 波磨宽度均取恒值 80 mm(足够宽, 可保证与动力学模型的可比性), 波磨深度沿滚动方向呈余弦型, 沿横向呈抛物线型。图 2 展示了波长和波深分别为 30 和 0.04 mm 的波磨几何(以下简称波磨 D)。

1.2 车轮-轨道耦合动力学模型

采用文献[7, 22]中车辆-轨道耦合动力学建模方

图 2 瞬态滚动接触模型中施加的波长 30 mm、波深 0.04 mm 和宽 80 mm 波磨几何

法, 建立了车轮-轨道耦合动力学模型, 其中包含的构件及其参数、几何等均与瞬态滚动接触模型完全一致(其模型示意图与图 1a 一致), 也约束了模型的横向自由度, 以保证两模型的可比性。模型中车轮表征为刚性体, 钢轨为铁木辛柯梁, 其几何和材料参数均与瞬态滚动接触模型保持一致, 但忽略材料阻尼, 一系悬挂取值也与瞬态滚动接触模型保持一致, 轨下连续支撑合理取值, 保证其与瞬态滚动接触模型中连续支撑层等效。模型主要参数如表 2 所示。

轮轨接触采用“非线性 Hertz 弹簧”模拟^[7], 具体公式如下

$$F_N = \left\{ \frac{1}{G} [y_w - y_r - y_g] \right\}^{\frac{3}{2}} \quad (2)$$

式中, y_w 和 y_r 分别为车轮和钢轨的垂向位移; y_g 为轮轨接触表面的几何不平顺; G 为轮轨接触常数, 其值由下式确定

$$G = 3.86R^{-0.115} \times 10^{-8} \quad (3)$$

式中, R 为车轮滚动半径。

由于动力学模型中接触斑退化成接触点, 故无

法将波磨三维几何考虑在内。具体分析中，为保证模型结果的可比性，将瞬态滚动接触模型中的三维波磨按如下原则退化为动力学模型中使用的二维波磨，即在任一纵向位置上，取三维波磨横向上的最大深度设为二维波磨在该位置上的深度，忽略波磨的波宽，但波长和波深特征保持不变。

表 2 车轮-轨道耦合动力学模型参数

参数		数值
簧上质量/kg		7 390
一系悬挂	刚度系数/(MN/m)	0.66
	阻尼/(kN · s/m)	3
	质量/kg	610
车轮	弹性模量/GPa	205.9
	密度/(kg/m ³)	7 790
	泊松比	0.3
	绕 x 轴转动惯量/(kg/m ²)	29.166
	绕 y 轴转动惯量/(kg/m ²)	56.476
	绕 z 轴转动惯量/(kg/m ²)	29.166
	弹性模量/GPa	205.9
	密度/(kg/m ³)	7 790
	泊松比	0.3
	横截面积/m ²	0.069 15
钢轨	钢轨横截面绕 y 轴惯性矩/m ⁴	1.490×10 ⁻⁴
	钢轨横截面绕 z 轴惯性矩/m ⁴	1.135×10 ⁻³
	横向剪切因子	0.884 0
连续支撑层	垂向剪切因子	0.650 2
	垂向刚度/(kN/mm/m)	20.22
	垂向阻尼/(kN · s/m/m)	275

1.3 车辆动力学模型

采用 Simpack 建立了如图 3 所示的车辆动力学模型，仅包含 1 个轮对、2 个质量块，轮轨与质量块间由一系悬挂相连，而轨道仅由刚性平直钢轨表征，即完全忽略了轨道弹性。轮轨几何形状和接触表面廓形以及材料参数等均与瞬态滚动接触模型一致，忽略横向自由度，即模型共有 15 个自由度。模型具体参数如表 3 所示(坐标系方向与图 1a 一致)。

图 3 只考虑轮对的车辆动力学模型示意图

表 3 只考虑轮对的车辆动力学模型参数

参数		数值
簧上质量/kg		14 780
一系悬挂 (单边)	刚度系数/(MN/m)	0.66
	阻尼/(kN · s/m)	3
	质量/kg	1 220
轮对	弹性模量/GPa	205.9
	密度/(kg/m ³)	7 790
	泊松比	0.3
	绕 x 轴转动惯量/(kg/m ²)	689.81
	绕 y 轴转动惯量/(kg/m ²)	80.88
	绕 z 轴转动惯量/(kg/m ²)	689.81
	质量/kg	3 695
簧上质量 (单边)	绕 x 轴转动惯量/(kg/m ²)	36.02
	绕 y 轴转动惯量/(kg/m ²)	29.87
	绕 z 轴转动惯量/(kg/m ²)	21.96

轮轨接触采用文献[23]中的 Hertz 弹簧表征，模拟时，两侧钢轨施加了同相位的二维波磨，以尽量减少相互干扰。试算表明，就本文工况而言，左右轮轨力的差异小于静载的 0.1%，下文分析中只取右侧轮轨力。

2 三种模型的结果对比分析

2.1 计算成本对比

利用瞬态滚动接触模型计算车轮以 250 km/h 速度沿钢轨滚动 1.3 m(即时长 0.018 7 s)，需 49.5 小时计算时间(使用个人工作站，Inter(R) Xeon(R) CPU E5-2680 v2 @ 2.80 GHz 处理器，64 GB 内存)，且计算成本随着速度的降低而线性增加。对于车轮-轨道耦合动力学和车辆动力学模型，车轮以 250 km/h 速度通过 100 m 长直轨道(时长 1.44 s)，在同一工作站上分别耗时 3.5 min 与 1.5 min。可见，瞬态滚动接触模型在计算成本上的劣势非常明显。

2.2 时、频域轮轨力结果对比

车轮以 250 km/h 速度滚过波磨 D 时，利用上述三个模型得到的轮轨力时、频域结果分别如图 4、5 所示。图 4 中横轴是车轮滚过的距离，即不同时刻下轮轨接触斑中心或接触点的 x 坐标，无波磨光滑接触表面条件下的相应结果也包含其中以方便对比。需要指出的是，光滑表面下，动力学模型的轮轨力结果均保持恒定不变，而瞬态滚动接触模型的结果却呈现出小幅波动。这是因为在基于显式时间积分的瞬态滚动接触模拟中，车轮无法建立起绝对的轮轨稳态滚动，尤其在滚动距离很短时。考虑到此波动的幅值较波磨引起的波动要小得多，不对

本研究造成重要影响,不再做一步深究。

由图4可知,三种模型的轮轨力结果均在波磨起始位置($x=0.6$ m)之后的一段时间内呈现与后面稳态结果显著不同的波动,意味着在起始段发生了较复杂瞬态振动,之后逐渐进入近似稳态的受迫振动状态。对于包含轨道弹性的瞬态滚动接触和车轮-轨道耦合动力学模型,在滚过 $0.3\sim 0.4$ m 之后进入近似的稳态受迫振动(图4a和图4b),而缺乏轨道弹性的车辆动力学模型进入近似稳态受迫振动需要滚过约 2.0 m(图4c)。

(a) 瞬态滚动接触模型

(b) 车轮-轨道耦合动力学模型

(c) 车辆动力学模型

图4 车轮以 250 km/h 速度滚过波磨 D 的轮轨力时域结果

从图5所示的轮轨力频谱特性可见,波磨起始段激起了两个频率成分的振动,一个是在波磨段持续存在的频率为波磨通过频率($2\ 314$ Hz)的受迫振动,另一个是很快就衰减掉的较低频结构共振,其频率在瞬态滚动接触结果中为 302 Hz,在车轮-轨道耦合和车辆动力学结果中分别为 314 Hz 和 320 Hz。

图5 车轮以 250 km/h 速度滚过波磨 D 的轮轨力频谱图

本文聚焦接触模型,下文对比分析中仅针对近似稳态段波磨受迫振动下的轮轨力。具体轮轨力结果的提取方法如下。

(1) 因为光滑工况下的瞬态滚动接触结果中存在小幅波动(图4a),所以必须模拟相同速度下光滑和带波磨钢轨两类工况,带波磨工况的轮轨力结果减去相应光滑工况的结果,可得到波磨引起的轮轨力波动;对于两个动力学模型,只需模拟带波磨的工况,然后在其轮轨力结果中减去静重(图4b和图4c)即可。

(2) 对上面得到的轮轨力结果施加波磨通过频率附近的带通滤波(图4所示工况的带通取为 $2\ 150\sim 2\ 450$ Hz,其他工况相应变化),用以去除波磨起始段复杂瞬态振动的影响。采用如此方法得到的图4中工况的最终轮轨力结果如图6所示。

图6 速度 250 km/h 下波磨 D 引起的动态轮轨力

为清晰起见,图6中仅展示了起始段之后两个波长范围内的结果,具体选取位置在三个模型中均不相同,在图中均假设其纵向相对位置从零开始。

由图6可知,三个模型计算的轮轨力峰值均出现在波磨波峰之前(相位差异不大),但其幅值存在显著差异,分别为13.42 kN、31.88 kN和60.8 kN。相对而言,传统动力学模型预测的轮轨高频动态相互作用明显强于瞬态滚动接触模型的预测。需要说明的是,经上述方法得到轮轨力幅值在不同波磨周期内依然存在一些细微波动,下文取其平均值作为动态轮轨力的特征幅值(简称动态轮轨力幅值),用以进一步分析。瞬态滚动接触、车轮-轨道耦合动力学和车辆动力学三个模型计算的动态轮轨力特征幅值分别由 A_{RC} 、 A_{WT} 和 A_{VD} 表征。另外,定义车轮-轨道耦合动力学和车辆动力学模型相对于瞬态滚动接触模型的高估量(A_{O-WT} 和 A_{O-VD})如下

$$A_{O-WT} = A_{WT} - A_{RC} \quad (4)$$

$$A_{O-VD} = A_{VD} - A_{RC} \quad (5)$$

由图6结果可以想象,发生轮轨脱离(即轮轨力为0)时的临界波深会因模型而异,动力学模拟的临界波深会明显小于瞬态滚动接触模型。轮轨脱离一旦发生,会使轮轨接触变得更加复杂,导致轮轨力峰值在不同波磨周期内出现剧烈波动。如图7所示,当车轮以250 km/h时速通过波深0.05 mm、波长30 mm的波磨时,车辆动力学模型预测轮轨开始在波谷之前的位置发生分离,但分离时间短,其轮轨力幅值的波动不大,但当波深进一步增至0.20 mm时,长时间的轮轨分离会造成严重的轮轨力幅值波动。就250 km/h速度和波长30 mm波磨的工况而言,车轮-轨道耦合动力学模型预测发生轮轨脱离的临界波深为0.14 mm,而瞬态滚动接触模型预测轮轨不会在本文研究的波深范围内(最大0.2 mm)发生脱离。需要指出的是,为对比分析,下文中对于发生轮轨脱离的工况也采取上述相同方法来提取轮轨力结果。

2.3 波深的影响

保持波长30 mm和波宽80 mm不变,利用上述三种模型分析了时速250 km/h下波深在0.01~0.20 mm范围内变化时的系列工况,轮轨力特征幅值结果如图8所示。可见,当波深小于0.16 mm时,同一工况的瞬态滚动接触、车轮-轨道耦合动力学和车辆动力学模型预测的轮轨力特征幅值依次增大,表明了轮轨接触建模对轮轨力结果的巨大影响。进一步发现,就浅波深而言(未发生轮轨脱离之前),三个模型预测的轮轨力特征幅值均与波深呈线性关

图7 车轮以250 km/h速度滚过波长30 mm、不同波深的波磨工况的车辆动力学模型预测结果

系,而待波深增大至发生轮轨脱离以后,动态轮轨力特征幅值随波深变化的斜率逐渐降低。

图8 不同波深波磨激励的动态轮轨力特征幅值

由图9中两个动力学模型的轮轨力高估量进一步发现,车轮-轨道耦合动力学模型的高估量随波深增大而单调增加,而车辆动力学模型的轮轨力高估量在波深0.08 mm达到最大值64.9 kN(静轮重的82.7%)。需要指出的是,下文中展示高估量时,均在其后的括号内备注了相对静轮重的比值。

图9 不同波深波磨激励下动力学模型的轮轨力高估量

2.4 波长的影响

保持波深0.04 mm和波宽80 mm不变,利用

上述三种模型分析时速 250 km/h 下波长在 20~140 mm 范围内变化时的系列工况, 轮轨力特征幅值结果如图 10 所示。可见, 就分析的波长范围内, 瞬态滚动接触模型预测的轮轨力随波长的增大而单调增加; 车轮-轨道耦合动力学模型预测的轮轨力随波长的增大基本呈上升趋势, 但其中有反复; 而车辆动力学模型的预测在 60~70 mm 波长附近达到最小值。需要说明的是, 此图中所展示的趋势与考虑真实轮轨和多层轨道弹性的一般模拟结果并不相同。

图 10 不同波长波磨激励的动态轮轨力特征幅值

图 11 进一步展示了两个动力学模型预测轮轨力的高估量。考虑到车轮-轨道耦合动力学预测结果的反复, 其高估量大致在波长 80 mm 时达到最小值 10 kN(12.7%), 在波长 120 mm 有最大值 30.8 kN(39.2%); 而车辆动力学模型高估量在波长 20 mm 时有最大值 60.2 kN(76.7%), 在波长 90 mm 左右达到极小值 30.7 kN(39.1%), 更大波长时又呈上升趋势。

图 11 不同波长波磨激励下动力学模型轮轨力高估量

2.5 速度的影响

保持波长 30 mm、波深 0.04 mm 和波宽 80 mm 不变, 利用上述三种模型分析了速度在 150~500 km/h 范围内变化时的系列工况, 轮轨力特征幅

值结果如图 12 所示。由图 12 可见, 在分析的速度范围内, 瞬态滚动接触模型与车轮-轨道耦合动力学模型预测的轮轨力特征幅值随速度的增大基本稳定, 波动量分别为 1.5 kN(1.9%)与 5.0 kN(6.4%), 但车辆动力学模型的预测结果随速度单调增加。这充分展示了轨道弹性对高频轮轨动力作用的重要影响。

图 12 不同速度波磨激励的动态轮轨力特征幅值

由图 13 中两个动力学模型预测轮轨力的高估量发现, 车轮-轨道耦合动力学模型的轮轨力高估量在速度 200 km/h 时有极大值 20.7 kN(26.4%), 而车辆动力学模型的轮轨力高估量随速度增大而单调增加, 在 500 km/h 时达 69.4 kN(88.4%), 而 150 km/h 时为 39.2 kN(49.9%)。

图 13 不同速度波磨激励下动力学模型轮轨力高估量

2.6 讨论

文中所提出的动力学模型预测结果高估量, 仅为对照滚动接触模型结果的相对量, 目前尚无直接证据能证明滚动接触模型的预测结果即为真实值。但由于滚动接触模型更充分地考虑了接触几何、滚滑行为和系统弹性等因素, 其结果更加可信。另外, 出于本文研究目的, 建模中对轮轨系统进行了大量的简化, 这使得所展示计算结果的趋势可能与文献

中考考虑真实轮轨和多层轨道弹性的一般模拟结果不同。

3 结论

传统车轮-轨道耦合动力学和车辆动力学模型采用赫兹弹簧表征轮轨法向接触, 而瞬态滚动接触模型利用“面-面”接触算法精确求解轮轨接触。针对赫兹接触工况, 利用三种模型分别计算了 150~500 km/h 下典型钢轨短波波磨(波长 20~140 mm、波深 0.01~0.20 mm)所激励的高频轮轨力, 得出如下结论。

(1) 三种模型的轮轨力预测幅值存在显著差异。相较于瞬态滚动接触模型, 车轮-轨道耦合动力学和车辆动力学模型预测的轮轨力更高, 其特征幅值的最大差值分别达静轮重的 39.2% 和 88.4%。

(2) 就不发生轮轨脱离的浅波磨而言, 三种模型的预测幅值均与波深线性正相关。

(3) 瞬态滚动接触模型预测轮轨力幅值随波长单调增加, 耦合动力学模型预测也大致增加, 但稍有反复, 而车辆动力学模型预测在 60~70 mm 波长附近有最小值。

(4) 瞬态滚动接触与耦合动力学模型预测轮轨力特征幅值随速度增大基本稳定, 但车辆动力学预测单调增加。

总之, 开展高速、高频轮轨动力分析时, 传统的赫兹接触弹簧会带来不可忽略的计算误差。

参 考 文 献

- [1] 郭俊. 轮轨滚动接触疲劳损伤机理研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2006.
GUO Jun. Study on mechanism of wheel-rail rolling contact fatigue and damage[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2006.
- [2] 蔡武, 温泽峰, 金学松. 钢轨接头轨缝对轮轨接触应力的影响[J]. 工程力学, 2006, 23(9): 173-178.
CAI Wu, WEN Zefeng, JIN Xuesong. Effects of rail gap on wheel-rail contact stresses[J]. Engineering Mechanics, 2006, 23(9): 173-178.
- [3] 刘超, 赵鑫, 安博洋, 等. 钢轨短波长波磨处的高速滚动接触分析[J]. 润滑与密封, 2015, 40(8): 40-46.
LIU Chao, ZHAO Xin, AN Boyang, et al. Study on high-speed wheel-rail contact on short-pitch rail corrugation[J]. Lubrication Engineering, 2015, 40(8): 40-46.
- [4] 温泽峰, 金学松, 张卫华. 钢轨轨缝接触-冲击的有限元分析[J]. 摩擦学学报, 2003, 23(3): 73-77.
WEN Zefeng, JIN Xuesong, ZHANG Weihua. Finite element analysis of contact-impact of wheel/rail at rail gap[J]. Tribology, 2003, 23(3): 73-77.
- [5] 李霞, 温泽峰, 金学松. 重载铁路车轮磨耗和滚动接触疲劳研究[J]. 铁道学报, 2011, 33(3): 28-34.
LI Xia, WEN Zefeng, JIN Xuesong. Investigation into wheel wear and fatigue of heavy-haul railways[J]. Journal of the China Railway Society, 2011, 33(3): 28-34.
- [6] ZHAI W M. Two simple fast integration methods for large-scale dynamic problems in engineering [J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2015, 39(24): 4199-4214.
- [7] 翟婉明. 车辆-轨道耦合动力学[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
ZHAI Wanming. Vehicle-track coupled dynamics[M]. Beijing: Science Press, 2007.
- [8] FAYOS J, BAEZA L, DENIA F D, et al. An Eulerian coordinate-based method for analysing the structural vibrations of a solid of revolution rotating about its main axis[J]. Journal of Sound & Vibration, 2007, 306(3): 618-635.
- [9] BAEZA L, FAYOS J, RODA A, et al. High frequency railway vehicle-track dynamics through flexible rotating wheelsets[J]. Vehicle System Dynamics, 2008, 46(7): 647-659.
- [10] 万鹏, 翟婉明, 王开云. 考虑轮对弹性时车辆运动稳定性分析[J]. 铁道车辆, 2008, 46(6): 8-10.
WAN Peng, ZHAI Wanming, WANG Kaiyun. Analysis of running stability of vehicles with the consideration of wheelset elasticity[J]. Rolling Stock, 2008, 46(6): 8-10.
- [11] 罗仁, 曾京, 郭平波, 等. 高速列车车轮不圆顺磨耗仿真及分析[J]. 铁道学报, 2010, 32(5): 30-35.
LUO Ren, ZENG Jing, WU Pingbo, et al. Simulation and analysis of wheel out-of-roundness wear of high-speed train[J]. Journal of the China Railway Society, 2010, 32(5): 30-35.
- [12] ZHONG S Q, XIONG J Y, XIAO X B, et al. Effect of the first two wheelset bending modes on wheel-rail contact behavior[J]. Journal of Zhejiang University-Science A, 2014, 15(12): 984-1001.
- [13] LI Z, ZHAO X, ESVELD C, et al. An investigation into the causes of squats correlation analysis and numerical modeling[J]. Wear, 2008, 265(9): 1349-1355.
- [14] ZHAO X, LI Z. The solution of frictional wheel-rail rolling contact with a 3D transient finite element model:

- Validation and error analysis[J]. *Wear*, 2011, 271(1): 444-452.
- [15] ZHAO X. Dynamic wheel/rail rolling contact at singular defects with application to squats[D]. Delft: Delft University of Technology, 2012.
- [16] 赵鑫, 温泽峰, 王衡禹, 等. 三维高速轮轨瞬态滚动接触有限元模型及其应用[J]. *机械工程学报*, 2013, 49(18): 1-7.
- ZHAO Xin, WEN Zefeng, WANG Hengyu, et al. A 3-D transient finite element model for high-speed wheel-rail rolling contact and its application[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2013, 49(18): 1-7.
- [17] ZHAO X, WEN Z, WANG H, et al. Modeling of high-speed wheel-rail rolling contact on a corrugated rail and corrugation development[J]. *Journal of Zhejiang University*, 2014, 15(12): 946-963.
- [18] KAZYMYROVYCH V, BERGSTRÖM J, THUVANDER F. Local stresses and material damping in very high cycle fatigue[J]. *International Journal of Fatigue*, 2010, 32(10): 1669-1674.
- [19] 温泽峰. 钢轨波浪形磨损研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2006.
- WEN Zefeng. Study on rail corrugation[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2006.
- [20] 李伟. 地铁钢轨波磨成因及其对车辆/轨道行为的影响[D]. 成都: 西南交通大学, 2015.
- LI Wei. Study on root cause of metro rail corrugation and its influence on behavior of vehicle-track system[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2015.
- [21] 金学松, 李霞, 李伟, 等. 铁路钢轨波浪形磨损研究进展[J]. *西南交通大学学报*, 2016, 51(2): 264-273.
- JIN Xuesong, LI Xia, LI Wei, et al. Review of rail corrugation progress[J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2016, 51(2): 264-273.
- [22] LING L, HAN J, XIAO X, et al. Dynamic behavior of an embedded rail track coupled with a tram vehicle[J]. *Journal of Vibration & Control*, 2015, 23(14): 2355-2372.
- [23] JOHNSON K L. Contact mechanics[M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1987.
-
- 作者简介: 张鹏, 男, 1994 年出生, 硕士研究生。主要研究方向为轮轨关系。
E-mail: zpswjtu@foxmail.com
- 赵鑫(通信作者), 男, 1981 年出生, 博士, 副研究员。主要研究方向为轮轨滚动接触力学和损伤。
E-mail: xinzhaoh@home.swjtu.edu.cn