第 34 卷　第 1 期　　石家庄铁道大学学报(自然科学版)　　Vol. 34　No. 1
2021 年 3 月　Journal of Shijiazhuang Tiedao University(Natural Science Edition)　Mar. 2021

轮对-曲线轨道非线性接触系统垂向振动分析

许贵满[1]，　韩海娅[1]，　吴亚平[2]，　魏云鹏[2]

(1. 黔南民族职业技术学院 建筑工程与设计系，贵州 都匀　558000；2. 兰州交通大学 土木工程学院，甘肃 兰州　730070)

摘要：轨道超高是高速列车曲线行驶的主要参数之一，直接影响到车辆的安全性和轨道的耐久性。为研究轮轨垂向振动状态下曲线轨道超高的影响规律，基于动力学理论建立轮轨三维实体非线性接触的有限元模型，采用瞬态动力学分析方法，在曲线轨道高低不平顺激励下研究曲线轨道超高对轮对-曲线轨道非线性接触系统的动力影响。研究结果：低速在较大超高的轨道上行驶会增大车体横向振动，不同超高的舒适速度为 190 km/h；车体垂向振动随着速度的增大受超高的影响逐渐减小；倾覆系数随着速度的增大呈非线性增大，内外侧轮轨脱轨系数差异在低速较大超高轨道中最大，且随着超高的增大差异逐渐减小；速度超过 160 km/h 时，轨距动态扩大量会迅速增大，超高会增加轨距动态扩大量，建议采取拉杆等措施予以加固；钢轨、轨枕及道床垂向振动随着车速增大而增大，超高影响较小，可忽略；超高引起内外侧轮轨接触应力完全不一致，法向接触应力以内侧轮轨较大，切向接触应力以外侧轮轨较大；速度超过 160 km/h 时，轮轨接触斑动态总滑动量会迅速增大，轨道超高会引起内侧轮轨接触斑动态滑动量大于外侧，其差值随着超高的增大而增大。

关键词：轨道超高；轮对-轨道接触；接触应力；轮轨；非线性

中图分类号：U211.5　　文献标志码：A　　文章编号：2095－0373(2021)01－0029－08

高速列车通过曲线轨道时，轨道超高直接影响着列车的舒适性和平稳性以及轨道结构的稳定性和承载能力，在车辆-轨道耦合动力学的理论[1]中，轨道超高在高速列车曲线行驶中起到非常重要的作用。列车与轨道结构的联系来自于轮轨之间的作用，轮轨接触区域虽然只有几百平方毫米[2]，但是却是十分复杂的，除了应力大对材料的影响，还存在接触区域事前未知且动力作用过程中是变化的问题，它是三维高度非线性的问题。需要注意的是，车辆在高低不平顺的激励状态下，轮轨非线性接触是一直存在的，尤其是在曲线轨道行驶中，轨道超高的大小直接影响到轮轨之间的非线性接触，进而对列车及轨道结构振动速度和加速度造成很大影响。因此，研究高低不平顺状态下曲线轨道超高对车辆-轨道耦合动力学及轮轨非线性接触理论具有十分重要的意义。

目前，国内外研究者普遍接受利用有限元模型进行瞬态动力学的方法，针对车辆-轨道耦合振动问题，开展了一系列的研究。肖乾等[3]利用 UM 建立多体动力学数值模型，并对轮轨振动行为下的高速轮轨直线滚动接触瞬态特征进行分析；孙文静等[4]在频域建立车辆-轨道垂向耦合动力学模型，引入轮轨接触线性化刚度，分析比较传统刚性轨道、弹性轨道与 Timoshenko 梁轨道模型的耦合系统动态响应；徐鹏[5]建立列车-双块式无砟轨道动力学模型，采用赫兹非线性接触理论确定轮轨法向力，通过仿真计算结果确定需要调整超高的曲线；何发礼等[6]以 32 m 薄壁曲线简支梁为例研究曲率和超高对曲线车桥耦合振动的影响；杨光等[7]建立考虑轮对旋转运动的车辆系统动力学弹性模型，研究车辆系统通过速度、线路不平顺激扰幅值等对轮轨接触特性的影响；吴亚平等[8-9]建立三维实体非线性轮轨有限元模型，在轨道不平顺激励力的作用下研究地基刚度对轮轨接触特性的影响；魏云鹏等[10]研究了轮轨-地基系统的三维有限元模

收稿日期：2019－12－02　　责任编辑：车轩玉　　DOI：10.13319/j.cnki.sjztddxxbzrb.20190207

基金项目：国家自然科学基金(51236003)

作者简介：许贵满(1986－)，男，讲师，研究方向为轮轨研究。E-mail：xgmfxy@163.com

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

许贵满，韩海娅，吴亚平，等. 轮对-曲线轨道非线性接触系统垂向振动分析[J]. 石家庄铁道大学学报(自然科学版)，2021，34(1)：29-36.

型,分析在轨道不平顺激励下轮轨系统竖向振动特性沿轨道长度方向的变化规律;曾勇等[11]利用SIMPACK建立重载铁路曲线地段车辆/线路系统动力学仿真模型,分析不同曲线半径下的系统动力学特性,并探索曲线半径对车线系统动力学的影响规律。以上研究在轮轨振动的特性方面取得了一定的成绩,同时也存在一些问题,首先,大多数研究将轮轨高度非线性接触行为简化为赫兹接触理论或线性弹簧来联系,难以实现轮轨动态非线性接触特征的仿真;其次,二维平面模型或三维单轮有限元模型中,不区分内轨和外轨的区别,对曲线轨道来说,是与实际情况不相符的;最后,轮对-轨道系统是一个整体,单独研究不能实现轮对-轨道的相互作用,从而影响计算精度,而过分关注轮轨非线性接触问题,就难以实现轮对-轨道系统的完整性。

鉴于以上原因,本文利用有限元软件ANSYS,建立考虑轮轨非线性接触问题的车辆系统和轨道系统整体有限元模型,即轮对-轨道非线性接触系统,并结合曲线轨道高低不平顺的激励,在一次计算过程中实现三维轮轨非线性接触振动,轮轨之间的振动在车辆系统和轨道系统中传播至各部件,研究在曲线超高的轨道上,不同速度对车辆系统、轨道系统及轮轨非线性接触特性的影响规律。

1 轮对-轨道非线性接触系统模型

轮对-轨道非线性接触系统主要由车辆系统、轨道系统及轮轨非线性接触系统3部分组成,如图1所示。车辆系统包括刚性车体、刚性转向架、一系悬挂、二系悬挂及弹塑性轮对,对刚体采用MPC184刚性梁单元进行模拟,其模型参数[1]如表1所示。轨道系统包括弹塑性钢轨、弹性胶垫扣件、弹性轨枕、弹性道床及弹性路基,采用3层离散点支承梁模型进行模拟,其模型参数[1]如表2所示。轮轨非线性接触系统由车轮踏面和轨道顶面组成,以TB锥形踏面与CHN60钢轨为研究对象,因轮轨接触区域较小,且应力较为集中,故网格尺寸大小为1 mm×1 mm×1 mm,且为20节点SOLID186单元,如图2所示,选用双线性随动强化材料模型[2]。为减小其他区域节点,实体采用8节点SOLID185,利用MPC技术装配,选用PCG求解器以实现快速数值计算。

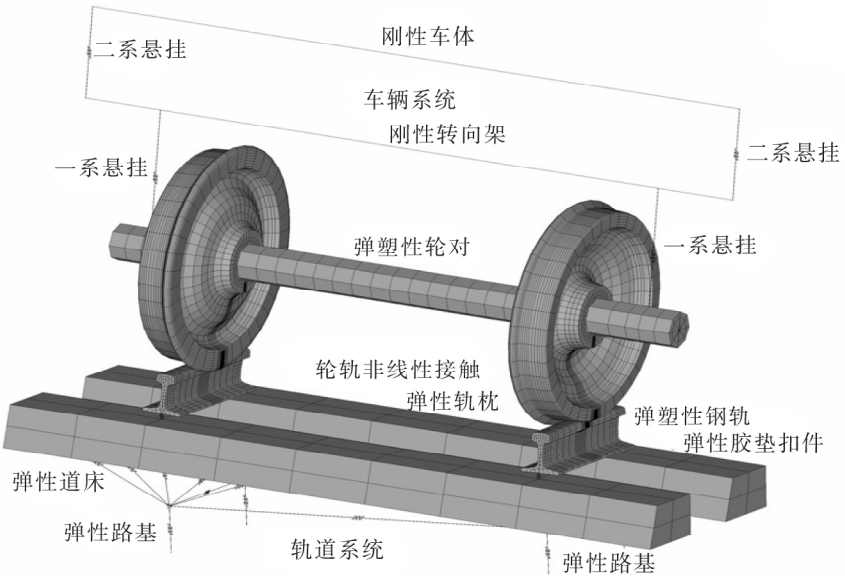

图1 轮对-轨道非线性接触系统有限元模型

表1 车辆系统模型参数

1/4车体质量/kg	1/2转向架质量/kg	轮对质量/kg	一系悬挂刚度/(MN·m^{-1})		一系悬挂阻尼/(kN·s·m^{-1})	二系悬挂刚度/(MN·m^{-1})		二系悬挂阻尼/(kN·s·m^{-1})	
			横向	垂向		横向	垂向	横向	垂向
8 500	1 500	1 400	5	0.55	6(垂向)	0.15	0.4	60	80

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 2　轨道系统模型参数

道床参振质量/kg	路基支承刚度/(MN·m^{-1})	路基阻尼/(kN·s·m^{-1})	道床刚度/(MN·m^{-1})		道床阻尼/(kN·s·m^{-1})	
			支承	剪切	支承	剪切
490	189.9	100	224.8	78.4	60	80

轨下胶垫刚度/(MN·m^{-1})	轨下胶垫阻尼/(kN·s·m^{-1})	扣件横向刚度/(MN·m^{-1})	扣件横向阻尼/(kN·s·m^{-1})	轨枕弹性模量/GPa	泊松比
60	75	30	60	36	0.2

求解系统模型动力学响应的关键是轮轨非线性接触问题，其中涉及法向和切向接触。轮轨法向接触问题选用扩展拉格朗日算法，其结合了纯拉格朗日乘子法和罚函数法，该方法在迭代开始时采用罚函数法，即是基于罚函数的接触刚度达到接触协调，一旦达到平衡条件就检查侵入容差，若发现侵入大于侵入容差，则修正法向接触刚度，即增加接触力与拉格朗日乘子之积的数值，并继续迭代，直至满足侵入容差为止，目的是为了找一个满足一定精度的法向接触力。轮轨切向接触采用库仑摩擦模型，其定义了一个极限剪应力，当界面上等效剪应力小于极限剪应力，则接触单元处于黏合状态，否则处于滑动状态。

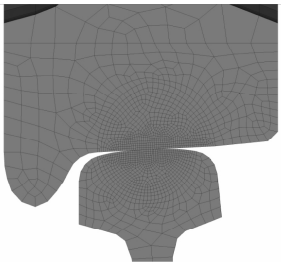

图 2　轮轨非线性接触系统

2　曲线轨道高低不平顺激励加速度

假如存在理想平顺的轨道，车辆在轨道上行驶就不存在上下的振动，正因为轨道存在各种不平顺等原因造成轮轨力变化的产生，由文献[9]知，在直线轨道上高低不平顺的激励力参照英国轨道几何不平顺的管理值，其车轮的激励加速度函数为

$$A = \sum_{i=1}^{3} a_i w_i^2 \sin(w_i t) \tag{1}$$

式中，a_i 为各个条件的矢高；w_i 为不同波长的圆频率，$w_i = 2\pi v / L_i$，v 为列车行驶速度，L_i 为各个条件下的波长。

与直线轨道不同，由于超高、轨底坡等原因使得内外轨道的曲线半径是不一样的，为简化，取轨道曲线平均半径 R，曲线轨道上运行的车辆还需要考虑向心加速度的作用，且由于设置不同的超高，即存在轨道超高倾斜角度 θ，两者叠加即为车轮在曲线轨道高低不平顺的激励加速度。

$$\begin{cases} A_x = \left(\sum_{i=1}^{3} a_i w_i^2 \sin(w_i t)\right) \sin\theta - (v^2/R)\cos\theta \\ A_y = \left(\sum_{i=1}^{3} a_i w_i^2 \sin(w_i t)\right) \cos\theta + (v^2/R)\sin\theta \end{cases} \tag{2}$$

为研究该系统的垂向振动特性，即假设曲线行驶车辆的向心加速度由本身质量的横向分量提供，即

$$mg\sin\theta = mv^2/R = mgh/s \tag{3}$$

式中，h 为轨道超高；s 为内外轨道中心间距。

将式(3)代入式(2)中，得到由行车速度和曲线轨道超高表示的曲线轨道高低不平顺的激励加速度。

$$\begin{cases} A_x = \left(\sum_{i=1}^{3} a_i w_i^2 \sin(w_i t)\right) \sin\theta - (gh/s)\cos\theta \\ A_y = \left(\sum_{i=1}^{3} a_i w_i^2 \sin(w_i t)\right) \cos\theta + (gh/s)\sin\theta \end{cases} \tag{4}$$

由于列车在轨道不平顺的影响下，引起车体、转向架及轮对垂向振动，振动力的幅值取决于物体的质量和其加速度，在有限元模型中，对各个部件赋予质量并在轮对上施加加速度时程，引起轮对振动从而导致其他部件振动。

3　计算结果分析

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

假设车体离心力与车体重力的合力作用于轨道的中心点上，采用曲线轨道高低不平顺激励加速度作

为轮对的激励模型,对轮对-轨道非线性接触系统进行瞬态动力学分析,采用不同车速、不同超高求解整体系统的动态响应,分析其影响规律。

3.1 车辆系统的影响

图3给出了不同超高的轨道车体横向振动加速度随速度的变化关系曲线,从图3可以看出,在无轨道超高时,车体横向振动加速度与行驶速度无关,而存在超高后,车体横向振动加速度与行驶速度之间的关系呈非线性,并在速度为190 km/h下达到最优,速度太大或太小均会增大车体横向振动,尤其是在以较低速度行驶在较大超高的曲线轨道下,对车体横向振动的影响就更大,对行车的舒适性非常不利。

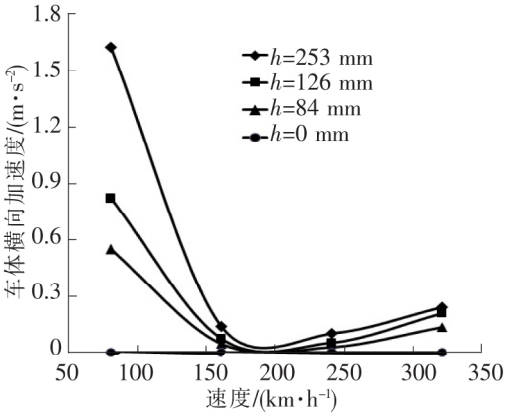

图3 车体横向振动加速度

图4给出了车体垂向振动加速度的变化情况,在80 km/h速度下行驶,曲线轨道超高越大,引起的车体垂向振动也越大,且明显不是线性关系。而随着车速的逐渐增大,不同曲线轨道超高的车体垂向振动加速度与直线(无轨道超高)轨道相靠近,到达240 km/h的速度时,几乎一致,说明随着车速的不断提高,悬挂的减震效果逐渐显现,使得车体垂向振动加速度受轨道超高的影响逐渐减小。

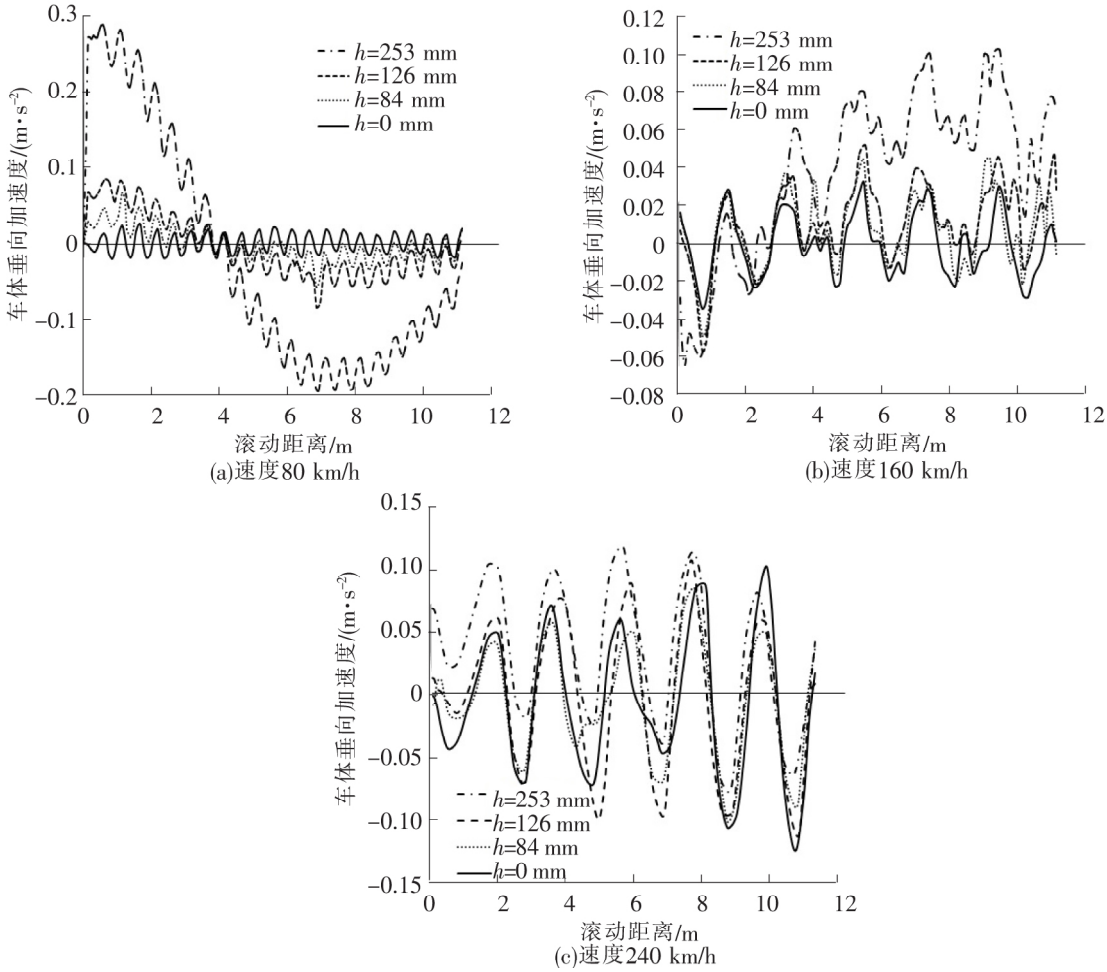

图4 车体垂向振动加速度

倾覆系数和脱轨系数分别是评价车辆运行安全的重要指标,图5和图6分别给出了轨道超高、曲线超高及速度对这2个指标的影响规律。在图5中可以看出,在低于240 km/h的速度时,轨道超高对倾覆系数影响不大,当速度超过240 km/h,随着速度的提高,倾覆系数逐渐提高,并超过规范对倾覆系数低于0.8

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

的规定[1],存在车辆发生倾覆的危险,内侧和外侧轮轨的倾覆系数在轨道超高较小时几乎一致,随着超高的增大,外侧轮轨的倾覆系数稍大于内侧轮轨。在图 6 可以看出,低于 240 km/h 时,外侧与内侧轮轨的脱轨系数随着轨道超高的影响是完全不一样的,且两侧轮轨的脱轨系数差异随着轨道超高的增大而增大,随着车速的提高,脱轨系数逐渐增大,当车速达到 240 km/h 时,内外侧轮轨的脱轨系数几乎一样,说明低速行驶在超高轨道上,内外侧轮轨受力是有区别的,当高速行驶时,内外侧轮轨的受力几乎一致。

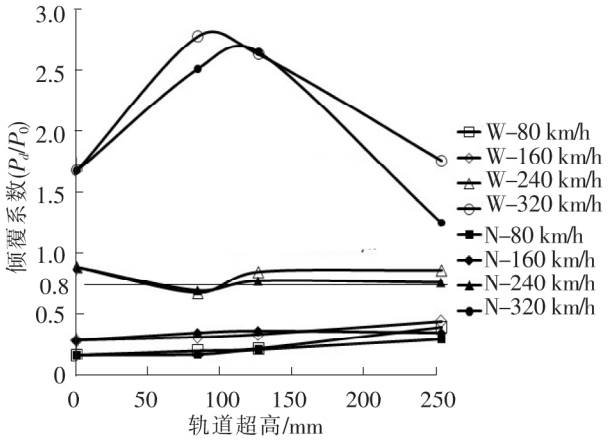

图 5　倾覆系数(W-外轮,N-内轮)

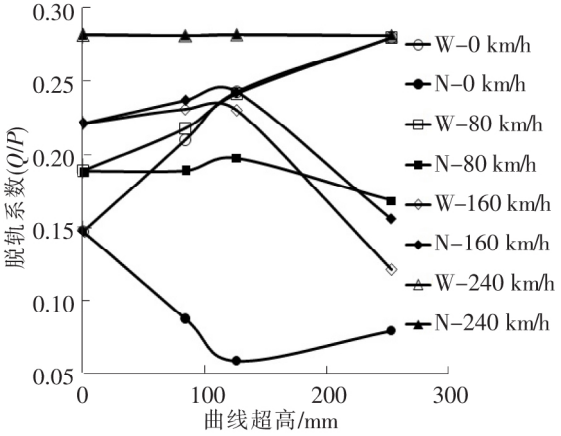

图 6　脱轨系数(W-外轮,N-内轮)

3.2　轨道系统的影响

图 7 给出了不同轨道超高,轨距动态扩大量随车速的影响。由图 7 可知,当车速超过 160 km/h,轨距动态扩大量会迅速增大,轨道超高会增大轨距扩大量,对轨道结构不利,相对直线轨道而言,126 mm 超高增加 93%的轨距动态扩大量,应注意采取拉杆等措施以加固钢轨防止轨距扩大,而低于 160 km/h 的速度,因车辆倾斜,对轨道结构的荷载有所减小,相对无超高轨道而言,轨道超高对轨距动态扩大量有减小的作用。

图 8～图 10 分别给出了钢轨、轨枕及道床的垂向振动加速度的影响规律,垂向振动最为激烈的是车轮在激励作用下,对钢轨顶面的振动作用,随着振动逐渐向胶垫、扣件、轨枕及道床的传播,其三者的数值是逐渐减小的。钢轨的垂向振动加速度随着速度的增大而增大,在超高小于 126 mm 时,内侧与外侧钢轨的垂向振动几乎一样,超高大于 126 mm,内外侧钢轨的垂向振动加速度出现的差异也逐渐扩大,外侧钢轨垂向振动明显大于内侧钢轨;轨枕和道床的垂向振动加速度随着速度的增大呈现非线性的增大,且轨道超高增大了轨枕及道床的垂向振动的影响。

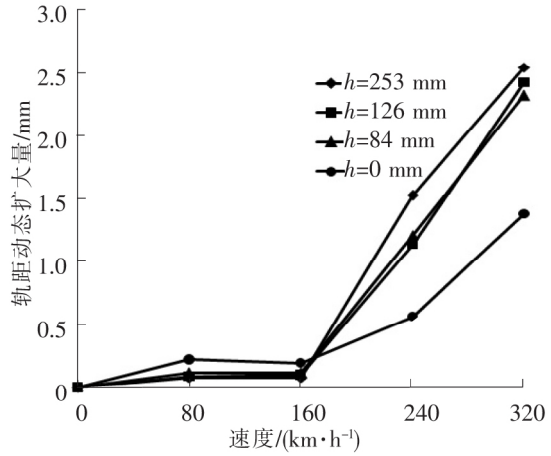

图 7　轨距动态扩大量

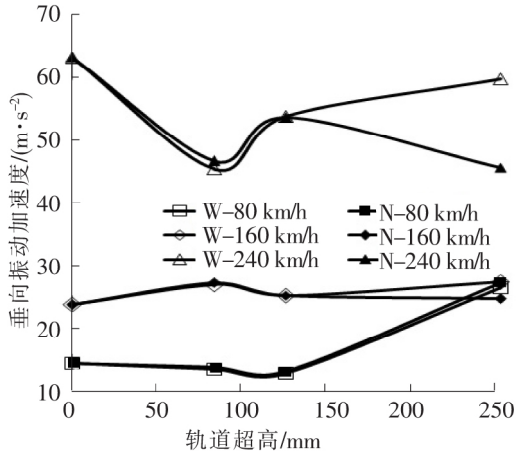

图 8　钢轨垂向振动加速度(W-外轨,N-内轨)

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

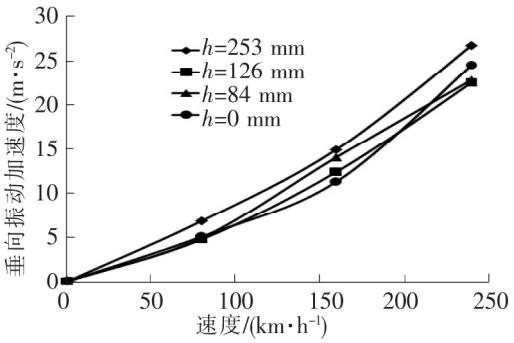

图9 轨枕垂向振动加速度

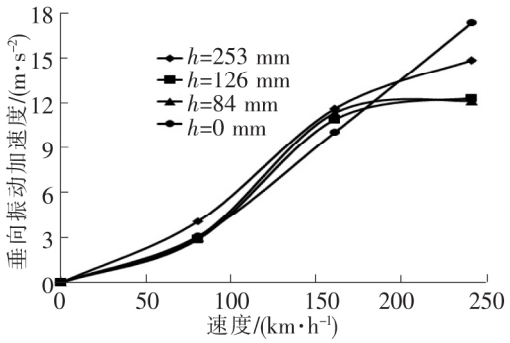

图10 道床垂向振动加速度

3.3 轮轨非线性接触系统的影响

图11和图12分别给出了内外侧轮轨的法向和切向接触应力随超高和速度的影响规律。在轮轨法向接触应力中,随着速度的提高应力随之提高,无轨道超高的情况下,内外侧轮轨接触应力基本一致,而存在超高以后,内侧轮轨法向接触应力普遍比外侧大,在速度低于160 km/h,内侧法向接触应力基本在1 400 MPa上下,悬殊较小,且以253 mm超高的应力最大,而外侧法向接触应力随着超高的增大而减小;速度超过160 km/h时,外侧法向接触应力迅速提高,与内侧差异逐步减小。在轮轨切向接触应力中,与法向接触应力相同的是无超高的情况下,内外侧轮轨切向接触应力基本一致,而存在超高时,外侧的切向接触应力比内侧切向接触应力大,且随着超高增大,内外侧的差值也越大,在速度不断提高的过程中,这种差异逐渐得以减小,并在低于240 km/h的速度下,超高小于126 mm的基本与直线轨道相同。通过以上分析可以得出,在行车速度较低时,内侧轮轨法向接触应力较大,外侧轮轨切向接触应力较大,容易造成内侧曲线钢轨压溃和外侧曲线轨道磨损,与实际轮轨滚动接触疲劳破坏现象一致[1]。

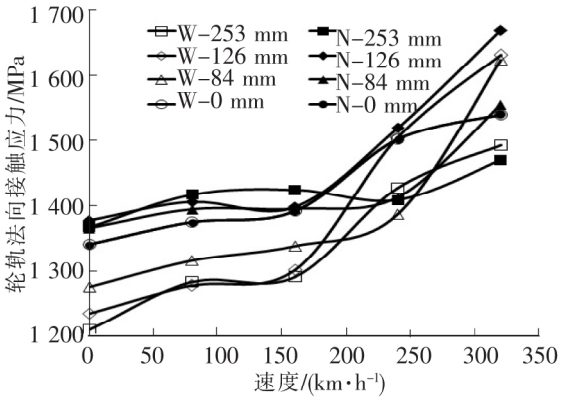

图11 轮轨法向接触应力(W-外轮轨,N-内轮轨)

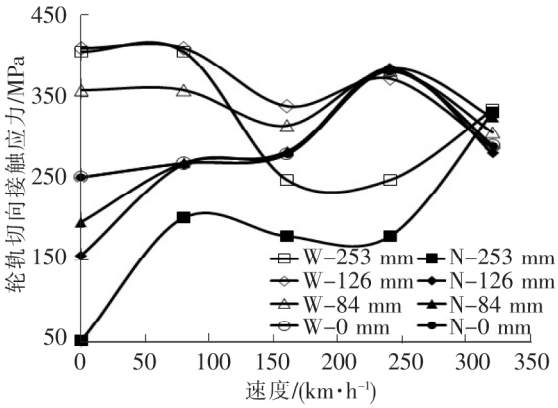

图12 轮轨切向接触应力(W-外轮轨,N-内轮轨)

图13和图14分别给出内外侧轮轨接触斑的动态滑动量与相对滑动量差值的变化关系。从图中明显看出160 km/h的速度之下,接触斑的动态滑动量较小,当速度超过160 km/h后,接触斑的动态滑动量迅速提高,而超过300 km/h的速度后,动态滑动量保持在某一数值上,且以无超高的轨道最大,存在超高时,内外侧轮轨接触斑动态滑动量又不一样,以内侧轮轨动态滑动量相对较大,两侧轮轨动态滑动量的差值变化规律如图13所示。从图13可以看出,在低于160 km/h的速度下,轨道超高的影响很小,而超过160 km/h的速度后,内外侧轮轨接触斑动态滑动量的差值逐渐增大,超高越大,差异越大,当达到某个速度后,内外侧轮轨动态滑动量差值维持在某个数值之下。

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

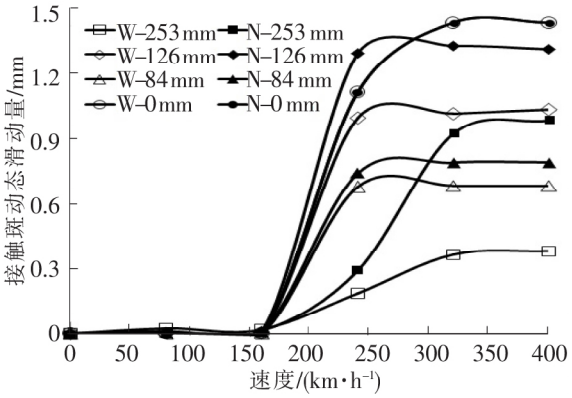

图 13　轮轨接触斑动态滑动量(W-外轮轨，N-内轮轨)

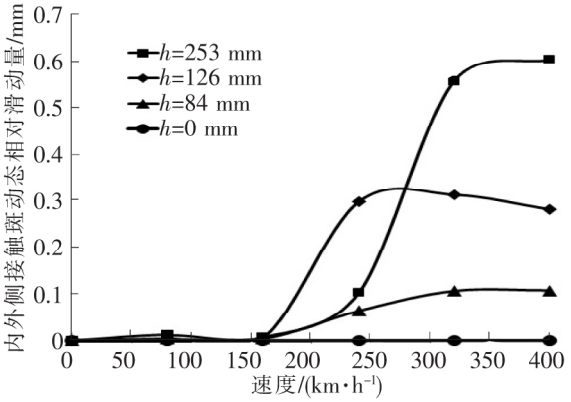

图 14　内外侧轮轨接触斑动态相对滑动量

4　结论

利用有限元软件 ANSYS 建立了轮对-轨道非线性接触系统，假设车辆离心力与自身重力的合力作用线通过轨道的中心点，采用高低不平顺的激励模型，研究速度及超高对车辆系统、轨道系统及轮轨非线性接触系统的影响，得到了以下结论：

(1)在车辆系统中，低速在较大超高的轨道上行驶会增大车体横向振动，为提高乘坐舒适性，最优速度为 190 km/h；车体垂向振动随着速度的增大受超高的影响逐渐减小；倾覆系数随着车速增大呈现非线性增大，且外侧轮轨略大于内侧；内外侧车轮脱轨系数在低速较大超高轨道中差异较大，随着车速的提高，内外侧差异逐渐减小。

(2)在轨道系统中，160 km/h 速度之下，轨距动态扩大量影响不大，超高有利于减小轨距动态扩大量；速度超过 160 km/h，轨距动态扩大量会迅速增大，尤其在存在超高的情况下，会加剧轨距扩大量的增大，建议采取拉杆等措施予以加固；钢轨、轨枕及道床垂向振动随着车速增大而增大，超高会增大其振动，但影响较小，可以忽略不计。

(3)轮轨非线性接触系统中，超高引起内外侧轮轨接触应力完全不一致，法向接触应力以内侧轮轨较大，是引起压溃破坏的原因之一，切向接触应力以外侧轮轨较大，是引起磨损破坏的原因之一，随着速度的提高，内外侧轮轨接触应力趋于一致；速度低于 160 km/h 时，轮轨接触斑动态滑动量基本不受速度和超高的影响，超过 160 km/h 后，轮轨接触斑动态滑动量会迅速增大到某个值，轨道超高会引起内外侧轮轨接触斑动态滑动量不一致，相对而言内侧较大，且两侧相对滑动量差值随着超高的增大而增大。

参　考　文　献

[1]翟婉明. 车辆-轨道耦合动力学[M]. 4 版. 北京：科学出版社，2015.

[2]许贵满，吴亚平，段志东，等. 轮轨非线性静态接触应力及其影响因素分析[J]. 兰州交通大学学报，2013，32(2)：66-72.

[3]肖乾，昌超，王立乾，等. 轮轨振动行为下高速轮轨滚动接触瞬态特性分析[J]. 中国铁道科学，2017，38(3)：63-69.

[4]孙文静，周劲松，宫岛. 基于 Timoshenko 梁模型的车辆-轨道耦合系统垂向随机振动分析[J]. 机械工程学报，2014，50(18)：134-141.

[5]徐鹏. 大西客专无砟轨道曲线超高设计调整的动力学分析[J]. 铁道建筑，2016(6)：133-136.

[6]何发礼，李乔. 曲率和超高对曲线梁桥车桥耦合振动的影响[J]. 桥梁建设，1999(3)：5-7.

[7]杨光，任尊松. 基于弹性模型的高速列车曲线通过时轮轨接触特性研究[J]. 机械工程学报，2018，54(4)：132-141.

[8]Wu Yaping, Wei Yunpeng, Xu Guiman, et al. Dynamic characteristics of vehicle-wheel/rail nonlinear contact-foundation system[J]. Journal of Vibroengineering, 2014(8)：4126-4136.

[9]吴亚平，许贵满，段志东，等. 地基刚度对三维非线性轮轨接触的动力影响[J]. 铁道工程学报，2014(5)：28-34.

[10]魏云鹏，吴亚平，段志东，等. 单轮荷载对轮轨系统变形及应力影响范围分析[J]. 兰州交通大学学报，2014，33(6)：

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

72-76.
[11]曾勇,许佑顶,易思蓉,等. 重载铁路最小曲线半径动力学分析[J]. 铁道工程学报, 2016(1): 42-45.

Vertical Vibration Analysis of Wheel-Curved Track Nonlinear Contact System

Xu Guiman[1], **Han Haiya**[1], **Wu Yaping**[2], **Wei Yunpeng**[2]

(1. Department of Construction Engineering and Design, Qiannan Polytechnic for Nationalities, Duyun 558000, China;
2. School of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: Superelevation is one of the main parameters of the high-speed train running on the curved track, which directly affects the safety of the vehicle and the durability of the track. In order to study the influences of superelevation on the wheel-rail contact system, a 3-D finite element model of wheel-rail contact was established based on the dynamic theory. The dynamic influences of superelevation on the wheel-curved track nonlinear contact system under the excitation of curved track irregularities were researched by the method of transient dynamics. The results indicate that when the train runs at low speed on curved track with large superelevation, the lateral vibration of train body becomes violently, and the most comfortable running speed is 190 km/h under different superelevation conditions. The influences of superelevation on the vertical vibration of train body descend gradually with the increasing of speeds. The overturn factors increase nonlinearly with the speeds, and the differences of the derailment coefficients of both inner and outer wheel-rail are the largest at low speed on large superelevation track, and these differences gradually decrease with the growth of superelevation. When the speed exceeds 160 km/h, the dynamic expansion of track gauge increases rapidly, and the superelevation also ascends the dynamic expansion of track gauge, therefore the rods is suggested to use for enhancing the track. The vertical vibrations of rails, sleepers and track beds increase with the vehicle speed, and the influences of superelevation on them are not obvious and can be ignored. At different superelevation, the contact stress between the inner and outer wheel-rails is completely inconsistent, and the normal contact stress of the inner wheel-rail is greater than that of the outer wheel-rail, and the difference of tangential contact stress is exactly the opposite. When the speed exceeds 160 km/h, the dynamic total slippage of the wheel-rail contact patch increases quickly, and the dynamic total slippage of inner contact patch is larger than that of outer contact patch, the differences between dynamic total slippages of inner and outer contact patch ascend with the increasing of superelevation.

Key words: track superelevation; wheel-track contact; contact stress; wheel-rail; nonlinear

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net