

文章编号:1006-2106(2014)05-0028-07

## 地基刚度对三维非线性轮轨接触的动力影响<sup>\*</sup>

吴亚平<sup>\*\*</sup> 许贵满 段志东 王良璧 车鸿博

(兰州交通大学, 兰州 730070)

**摘要:**研究目的:为了进一步探明地基刚度对轮轨接触的影响,以轮轨接触三维实体非线性有限元模型为研究对象,采用瞬态动力学分析方法,在轨道不平顺的条件下研究地基刚度对轮轨接触的动力影响。

**研究结论:**结果表明:(1)车轮的总位移主要是地基的弹性变形,在不平顺激励力的作用下,地基刚度对轮轨的位移、应力等影响较大,选取合理的地基刚度可以降低轮轨之间的应力;(2)通过分析列车速度和轮重对轮轨竖向位移、接触应力以及加速度的影响,得出合理的地基刚度为 600~1 000 MPa/m;(3)本文所总结的轨道不平顺条件对轮轨接触的影响规律,以及车速、轮重、地基刚度对轮轨振动的影响规律对高速列车的地基和轮轨接触设计具有参考作用。

**关键词:**轨道不平顺;地基刚度;非线性;轮轨;接触应力

中图分类号:U211.5 文献标识码:A

## Dynamic Effect of Foundation Stiffness on Three - dimensional Nonlinear Wheel - rail Contact

WU Ya - ping, XU Gui - man, DUAN Zhi - dong, WANG Liang - bi, CHE Hong - bo

(Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou, Gansu 730070, China)

**Abstract: Research purposes:** In order to further proven the effect of foundation stiffness on wheel - rail contact, this paper used three - dimensional solid nonlinear finite element model of the wheel - rail contact as the object of study, adopts the transient dynamic analysis method, researches the dynamic response of foundation stiffness on wheel - rail contact under the condition of track irregularity.

**Research conclusions:** The total displacement of the wheel is mainly the elastic deformation of the foundation, under the action of exciting force which is irregularity, foundation stiffness has greater impact on wheel - rail displacement, stress, etc. The stress between wheel and rail can be reduced through selecting the rational foundation stiffness. By analyzing the effect of the train speed and the wheel weight on vertical displacement of wheel - rail, contact stress and acceleration, a reasonable foundation stiffness 600 MPa/m ~ 1 000 MPa/m was proposed. The laws of this paper summed, which includes the influence of track irregularity on wheel - rail contact conditions, and the influence of the vehicle speed, wheel weight, and foundation stiffness on wheel - rail vibration, can provide reference for the design of the foundation and wheel - rail contact of high - speed trains.

**Key words:** track irregularity; foundation stiffness; nonlinear; wheel - rail; contact stress

21 世纪以来,为了满足国民经济和社会发展的交通运输需要,铁路作为陆地上运输主力,提升高速列车

<sup>\*</sup> 收稿日期:2013-11-15

基金项目:国家自然科学基金重点项目(51236003)

<sup>\*\*</sup> 作者简介:吴亚平,1958 年出生,男,教授。

运行的可靠性、安全性及降低成本能够取得举世瞩目的成就。车轮作为高速列车运行的执行部件,其与轨道的接触力学行为牵扯着高速列车的运营安全,地基支承刚度作为轨道的基础,必然对轮轨接触应力有影响,结合地基刚度和轮轨接触,对基础刚度的正确选择,采用合理的计算模型尽可能与实际相符合,从而提高列车速度是非常有必要的。近年来,西南交通大学的金学松等<sup>[1-2]</sup>、大连交通大学的王生武等<sup>[3]</sup>以及 Mehmet<sup>[4]</sup>等分别就轮轨接触机理及影响进行了理论和数值上研究,得到了有意义的结论。在地基刚度的研究中,魏永幸等<sup>[5]</sup>通过列车-轨道-线下基础耦合动力分析方法,研究路基刚度对轨道结构的动力影响,宫全美等<sup>[6]</sup>在基床的模型上,研究不同地基刚度对轮底动应力的影响,提出了地基刚度的合理范围,而以上研究都没有分析地基刚度对轮轨接触应力的影响,张新等<sup>[7]</sup>采用了轨道和弹簧系统采用 Hertz 理论定义研究了轨距不平顺下列车的动力响应,忽视了轮轨接触的非线性,而轮轨接触作为一个复杂体系,以往的研究分离了轨道和轮轨的接触,这种方法虽然简化计算的复杂,但是无法考虑轮轨之间的非线性影响。许贵满等<sup>[8]</sup>考虑了轮轨非线性接触,地基刚度对轮轨静态接触应力影响做了分析,但是得到影响结果较小,事实上,轮轨接触是处于高速运行的状态,存在轨道的高低不平顺,静态分析得到的结论具有一定的局限性。因此,有必要更深入的探明地基刚度对轮轨三维非线性接触的影响。

本文为研究地基刚度对轮轨三维非线性接触应力的动力影响,利用有限元软件 ANSYS 的瞬态动力学分析方法,建立三维实体轮轨接触模型,利用弹簧单元模拟弹性地基(文克尔地基),通过输入轨道的不平顺激励荷载,变化轮重和车速,进行瞬态动力学分析,研究地基刚度对轮轨接触的影响,本文所总结的轨道不平顺条件对轮轨接触的影响规律,以及车速、轮重、地基刚度对轮轨振动的影响规律对高速列车的地基和轮轨接触设计具参考作用。

## 1 结构动力反应数值方法

根据结构动力学数值分析,轮轨和弹性地基组成的一个系统,系统的动力学方程为:

$$[M]\ddot{U} + [C]\dot{U} + [K]U = F(t) \quad (1)$$

式中  $[M]$ ——系统的质量矩阵;

$[C]$ ——系统阻尼矩阵;

$[K]$ ——系统的刚度矩阵;

$U$ ——位移列矩阵;

$F(t)$ ——外界激励。

瞬态动力学分析<sup>[9]</sup>包括直接积分法和模态叠加法。由于轮轨整个系统是高度非线性问题,其中包含材料、几何以及接触状态非线性,所以 ANSYS 的瞬态动力学分析中选用完整法求解,才能得到随时间任意变化的荷载作用下结构响应。ANSYS 采用 New - mark 逐步积分格式的直接积分法进行时间积分,其基本思想:在求解的时间域 $[0, t]$ 上连续变化的时间离散为 $t_1, t_2, \dots, t_n$ ,每个时间间隔的位移、速度和加速度按线性规律变化,而且每个时间点满足动力学方程公式(1),从初始条件到 $t$ 时刻,逐步进行数值积分计算出各时刻的位移响应,从而得到速度、加速度、应力及应变等响应。

## 2 三维实体非线性轮轨有限元模型

### 2.1 轮轨有限元模型

以高速铁路的轮轨接触作为研究对象,采用有限元分析软件 ANSYS<sup>[9]</sup>建立具有弹性地基的三维实体轮轨非线性接触有限元模型,该模型的机车车轮踏面为 TB 锥形踏面,车轮轮径为 915 mm,钢轨为 CHN60,车轮的名义半径和钢轨的中心重合,轨底坡设置为 1:20,锥形踏面车轮和钢轨的有限元模型如图 1 所示。

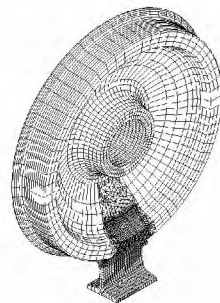


图1 有限元模型

在轮轨接触的有限元模型中,使用 20 节点 SOILD95 三维结构实体单元模拟钢轨和车轮;轮轨作为一个接触对,接触单元 CONTA174 模拟车轮 TB 踏面,选用目标单元 TARGE170 单元模拟钢轨,接触算法选用扩展拉格朗日算法,接触区域由于应力较为集中,单元网格划分较细,单元大小为  $2 \text{ mm} \times 2 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$  的六面体,如图 2 所示。

弹性地基采用文克尔地基模型,基本假定:地基每单位面积上所受的壓力与相应的地基沉降量成正比,即: $p(x) = kx$ ,其中  $k$  为钢轨支座刚度,量纲为:力/长度; $x$  为地基沉降量,计算模型如图 3 所示。弹性地基刚度  $k_0$  一般根据土性确定,定义为使轨底顶面产生单位下沉时所需施加于轨底面的单位面积上的压力,量纲为力/长度<sup>3</sup>。两者关系: $k = k_0 A$ ,  $A$  为轨底面积。

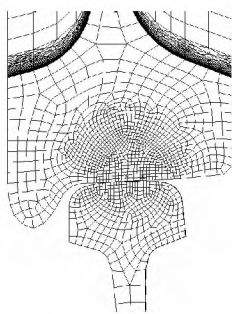


图 2 接触区域

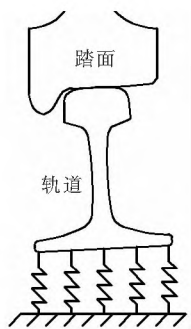


图 3 弹性地基模型

2.2 非线性材料模型

由于轮轨接触不可避免的出现塑形变形<sup>[8]</sup>,故选用非线性材料模型,对轮轨材料的本构模型采用双线性随动强化模型,材料的应力应变曲线如图 4<sup>[10]</sup>所示,珀松比为 0.3,材料密度为 7 800 kg/m<sup>3</sup>。材料屈服选用 von - Mises 屈服准则:

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 = 2[\sigma_s]^2 \tag{2}$$

式中  $[\sigma_s]$ ——材料单向拉伸时的许用屈服应力, $\sigma_i(i=1,2,3)$ 为主应力。

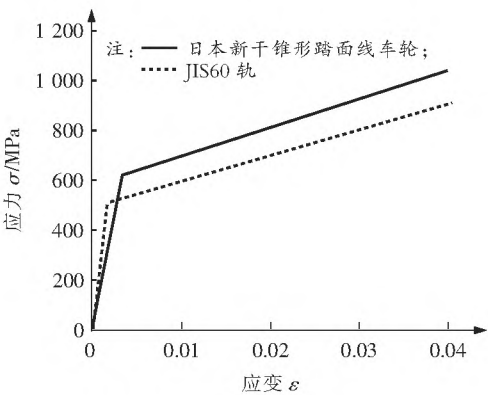


图 4 材料非线性模型

2.3 轨道不平顺激励力的荷载模型

根据英国铁路技术中心多年的研究,产生竖向轮

轨力的主要原因是由于各种不平顺及轮周局部扁癍等造成的。激励力参照英国轨道几何不平顺的管理值<sup>[11]</sup>,如表 1 所示。

表 1 轨道几何不平顺管理值

控制条件	波长/m	正矢/mm
按行车平稳性(Ⅰ)	50	16
	20	9
	10	5
按作用到路线上的动力附加荷载(Ⅱ)	5	2.5
	2	0.6
	1	0.3
波形磨耗(Ⅲ)	0.5	0.1
	0.05	0.005

采用不平顺、附加动载效应的激振力函数来模拟竖向荷载,即轮轨激励力为:

$$F(t) = P_0 + P_1 \sin \omega_1 t + P_2 \sin \omega_2 t + P_3 \sin \omega_3 t \tag{3}$$

式中  $P_0$ ——车轮静载;  
 $P_1, P_2$  和  $P_3$ ——分别对应表 1 中的Ⅰ、Ⅱ和Ⅲ的三种控制条件中某一典型值的振动荷载,其值为:

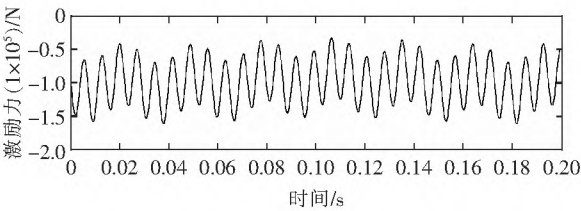
$$P_i = M a_i w_i^2 \tag{4}$$

式中  $M$ ——簧下质量,取单边车轮计算,则为 750 kg;  
 $a_i$ ——各个条件下的矢高;  
 $w_i$ ——不同波长下的圆频率。

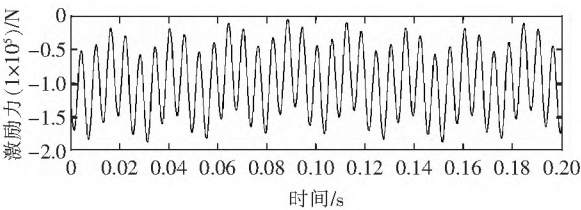
$$w_i = 2\pi v / L_i \tag{5}$$

式中  $v$ ——列车的速度;  
 $L_i$ ——不同条件下的波长。

对于Ⅰ、Ⅱ和Ⅲ三种条件分别取波长和矢高为:  
 $L_1 = 10 \text{ m}, a_1 = 3.5 \text{ mm}, L_2 = 2 \text{ m}, a_2 = 0.4 \text{ mm}, L_3 = 0.5 \text{ m}, a_3 = 0.08 \text{ mm}$ ,采用不同速度的轮轨不平顺激励力荷载,其参数如表 2 所示,加载曲线如图 5 所示,计算各速度的前 0.2 s 激励力进行动力计算。



(a) v=250 km/h



(b) v=300 km/h

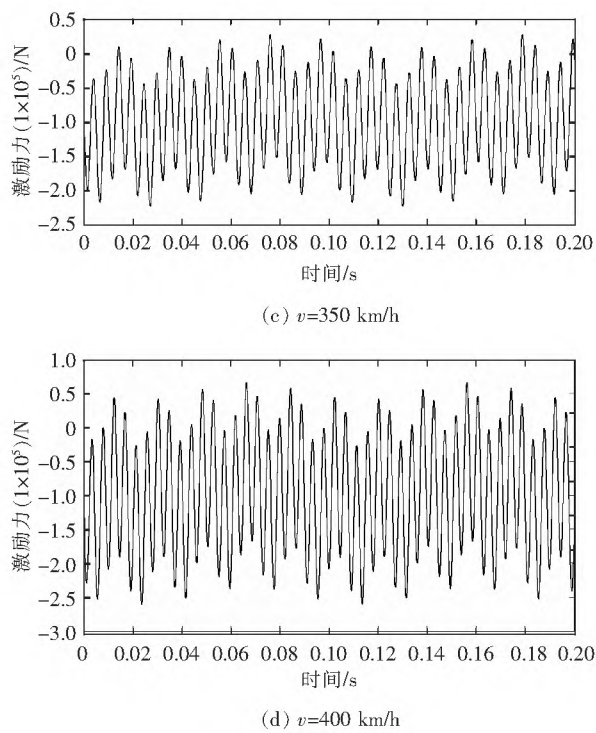


图5 激励力加载曲线

根据文献[12]知,300系高速列车、轴重为11.3 t,

TGV-A轴重为17 t,ICE轴重为19.5 t,本文采用车轮静载分别60 kN、80 kN以及105 kN进行动力分析。

3 动力分析结果

在轨道不平顺条件下,根据轮轨接触有限元模型,考虑轮轨动力分析的主要影响因素,选取不同车速( $v=250\text{ km/h}$ ,  $v=300\text{ km/h}$ ,  $v=350\text{ km/h}$ ,  $v=400\text{ km/h}$ )、不同地基刚度( $k=100\text{ MPa/m}$ ,  $k=500\text{ MPa/m}$ ,  $k=1\,000\text{ MPa/m}$ ,  $k=1\,500\text{ MPa/m}$ )以及轮重( $F=60\text{ kN}$ ,  $F=80\text{ kN}$ ,  $F=105\text{ kN}$ )主要指标在0.2 s前分析轮轨接触的动力影响规律。

3.1 轮轨—地基振动传递分析

对于三维非线性轮轨模型而言,车轮接触斑处的总竖向动力响应 $U_z$ 可以表示为:

$$U_z = U_d + U_c + U_g \tag{6}$$

式中  $U_d$ ——地基的弹性变形;  
 $U_c$ ——车轮的弹塑性变形;  
 $U_g$ ——钢轨的弹塑性变形。

选取列车速度为300 km/h,轮重为105 kN的数据进行轮轨—地基不平顺振动传递分析。

表2 激励力相关参数

序号	$V/(\text{km/h})$	$M_0/\text{kg}$	$\omega_1/\text{Hz}$	$\omega_2/\text{Hz}$	$\omega_3/\text{Hz}$	$P_1/\text{N}$	$P_2/\text{N}$	$P_3/\text{N}$
1	250	750	43.63	218.17	872.66	4 996.89	14 279.44	45 692.13
2	300	750	52.36	261.80	1 047.20	7 196.62	20 561.77	65 797.67
3	350	750	61.09	305.43	1 221.73	9 796.47	27 986.25	89 557.45
4	400	750	69.82	349.06	1 396.25	12 796.44	36 552.87	116 970.84

图6给出了地基刚度为500 MPa/m的竖向总位移以及各个部件的竖向位移时程曲线。从图中可以看出, $U_d$ 是轮轨竖向总位移的主要组成部分,约占98.5%, $U_c$ 和 $U_g$ 分别占0.35%和1.15%。所以轮轨系统的总竖向位移取决于地基刚度,而轮轨的弹塑性变形基本可以忽略。

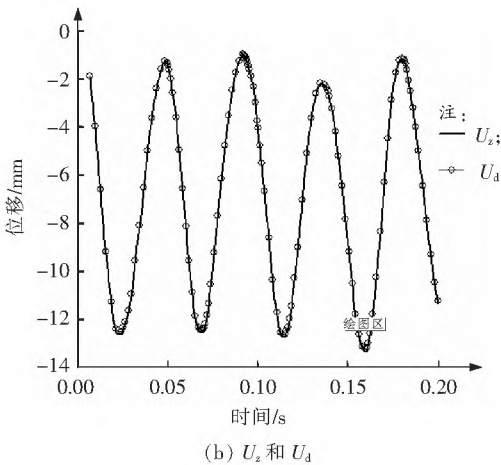
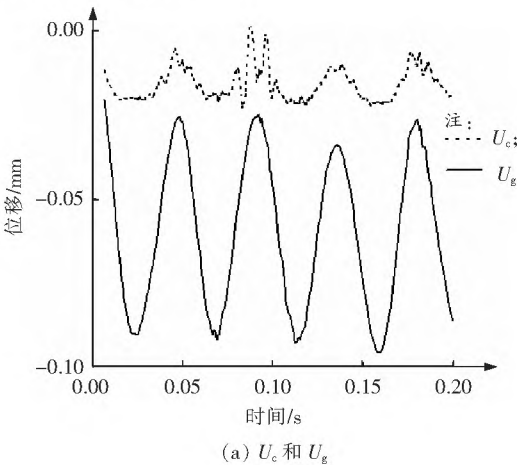


图6 轮轨竖向位移时程曲线

图7给出了不同地基刚度下的轮轨总竖向位移的时程曲线。从图中可以看出,随着地基刚度的减小,车轮的竖向总位移逐渐增大,同时过小的地基刚度会产生过大的地基变形,从而再次引起轨道的高低不平顺



的激励,地基刚度对轮轨的竖向总位移的影响较大,当地基刚度大于 500 MPa/m 时,动力响应的竖向总位移基本保持在 12 mm 以下。

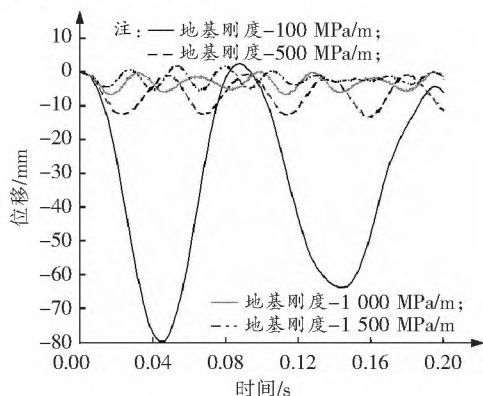


图7 不同地基刚度下的轮轨总竖向位移时程曲线

图8为不同地基刚度的轮轨之间法向接触应力的时程曲线,从图可以看出,地基刚度分别在100 MPa/m和1500 MPa/m时,轮轨之间出现了接触应力为零,说明了轮轨之间出现了短暂的脱离,而且随着地基刚度的增加,轮轨之间的接触应力在单位时间内循环次数随着地基刚度的增加而增多,从而导致车轮工作寿命减少。

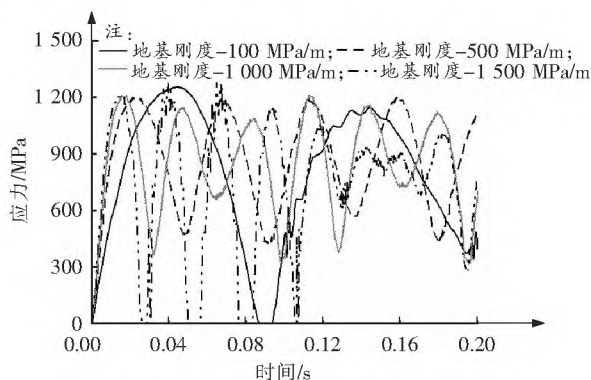


图8 不同地基刚度下的轮轨接触应力时程曲线

图9为不同地基刚度的轨道底的动应力时程曲线,轨底动应力随着地基刚度的增加单位时间内 Mises 动应力循环次数也增多,而且不合适的地基刚度下,也会明显增大,从而也会导致钢轨及相关扣件的工作寿命减少。

图10为不同地基刚度的车轮竖向速度时程曲线,可以明显看到,不同的地基刚度下,车轮的速度改变频率不同,受地基刚度的影响较大,从而对列车运行的舒适性也产生了不利。

综上所述,可以看出,地基刚度对轮轨的竖向变形、轮轨接触应力以及车轮竖向加速度的影响不容忽

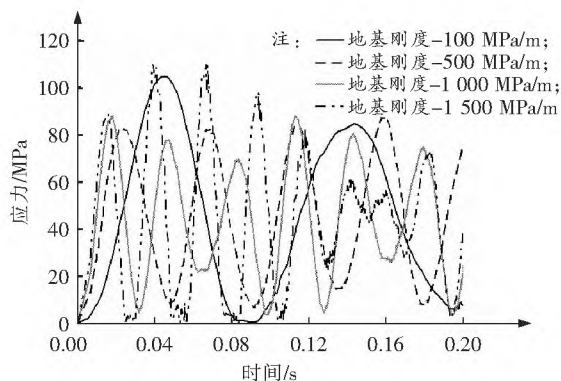


图9 不同地基刚度下的轨底 Mises 动应力时程曲线

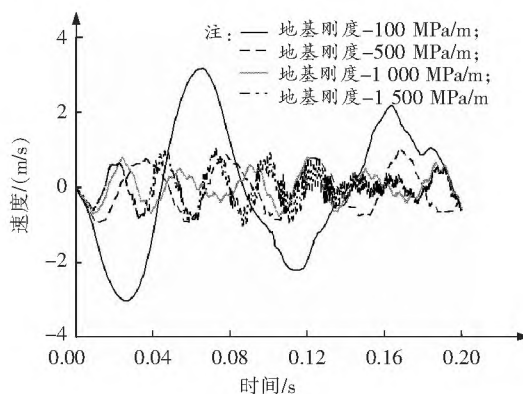


图10 不同地基刚度下的车轮竖向速度时程曲线

视,合理的地基刚度能够一定程度上改善轮轨恶劣的工作环境,提高其寿命。所以需要对其影响规律进行深度分析研究。

### 3.2 轮轨竖向总位移的影响

轮轨竖向总位移如图11所示。

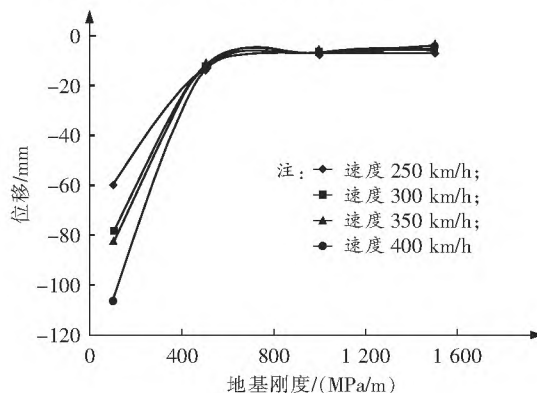


图11 最大竖向位移随地基刚度的变化

由图11的最大竖向总位移随地基刚度的变化可以看出,随着地基刚度的增加,竖向总位移逐渐减小,当地基刚度增到600 MPa/m以上,轮轨的竖向总位移基本趋于稳定,保持在10 mm的范围以内,而且在不

同的速度下,对轮轨的竖向总位移影响很小。

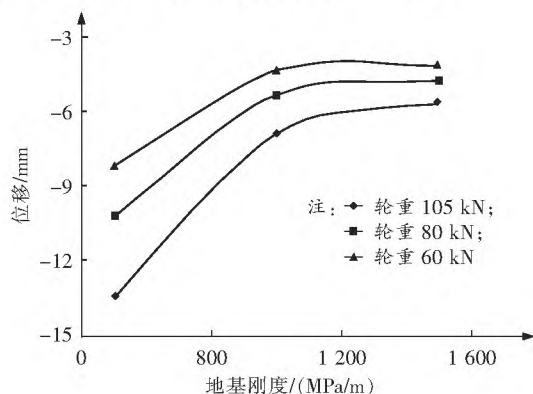


图12 最大竖向位移随轮重的变化

由图12知,最大竖向总位移随着轮重的增加而增加,随着地基刚度刚度的增加而减小,而且随着地基刚度的增加,不同轮重的最大竖向位移差距逐渐缩小。

通过对轮轨竖向总位移的分析,可以知道,影响轮轨竖向总位移的主要因素为轮重和地基刚度,在地基刚度达到某一界限值时,最大竖向位移保持不变,这一界限地基刚度大致在600 MPa/m附近。增大地基刚度或减小轮重可以降低轮轨竖向总位移的变形,从而降低机车车辆的振动。

### 3.3 轮轨接触应力的影响

在轮轨-地基竖向振动激励下,轮轨之间的最大接触应力如图13所示。在速度速度为250 km/h时,轮轨最大法向接触应力随着地基刚度的增加而增加的。当速度为300~350 km/h时,地基刚度小于600 MPa/m,轮轨最大接触应力随着地基刚度的减小而增大,这主要是由于较小的地基刚度产生了较大的地基变形,从而引起轮轨振动,导致轮轨作用力增大;地基刚度大于600 MPa/m,轮轨最大接触应力又随着地基刚度增大而增大。当速度为400 km/h时,随着地基刚度的增大而减小。最大接触应力随着轮重的变化如图14所示,当地基刚度超过1000 MPa/m,最大接触应力明显增大,且随着轮重的增加而增加。

通过以上的分析,可以得到,对于一定速度的列车,需要采用合适的地基刚度能够适当的降低轮轨最大接触应力;地基刚度并不是越大越好,过大地基刚度会使轮轨接触应力明显增大,如图14所示。经过比较,发现合理的地基刚度范围为600~1000 MPa/m。

### 3.4 车轮竖向加速度的影响

车轮竖向加速度如图15所示。

由图15可以看出,在较低的地基刚度下,车轮最大加速度基本不变,当地基刚度到达一定的值后,加速度会突然增大,导致列车舒适性降低,该地基刚度的值随

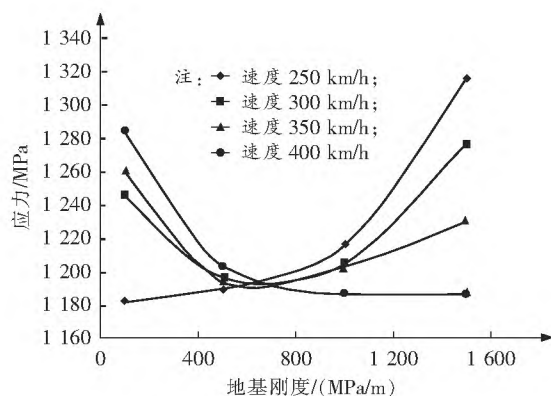


图13 最大接触应力随地基刚度的变化

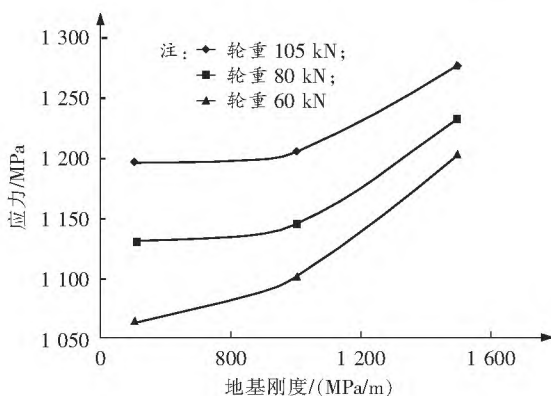


图14 最大接触应力随轮重的变化

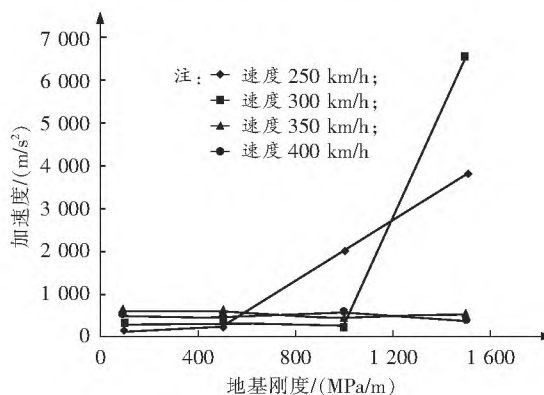


图15 车轮竖向最大加速度

着速度的增加而增加。在地基刚度为600~1000 MPa/m时,能够保证速度在250~400 km/h时的车轮的竖向加速度小于220g。

## 4 结论

通过轮轨三维非线性有限元模型,利用轨道竖向不平顺的激励模型进行了瞬态动力分析。对不同的轮重、列车速度及地基刚度的结果分析,可以得到以下结论:

(1) 轮轨的竖向总位移主要成份是地基的弹性变形,地基刚度对轮轨之间的动应力频率影响较为明显,从而影响到轮轨的寿命。较大或较小的地基刚度都会使轮轨接触应力、轨底应力增加,从而需要探索合适的地基刚度使得应力达到最小。

(2) 在不平顺激励下,当地基刚度小于 600 MPa/m,车轮的竖向最大位移明显增大;当地基刚度大于 600 MPa/m,车轮的竖向最大位移几乎不受速度的影响,且几乎保持不变。说明地基刚度最小临界值为 600 MPa/m。适当的提高地基刚度和降低轮重能够减小轮轨的最大竖向总位移。

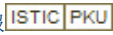
(3) 通过地基刚度对轮轨接触应力以及车轮竖向加速度的影响比较,最大接触应力随着地基刚度的增大而增大,随着轮重的增大而增大。当超过某一地基刚度,最大接触应力明显增大,该地基刚度为 1 000 MPa/m。

(5) 车轮的最大竖向加速度在一个界限的地基刚度下,竖向最大加速度不受地基刚度的影响,当超过该地基刚度后,竖向最大加速度会突然增大,影响列车舒适性,该界限的地基刚度又是随着列车速度的增大而增大。

通过以上动力分析研究,在列车速度为 250~400 km/m,轮重在 60 kN 至 105 kN,考虑到轮轨的竖向位移、法向接触应力以及加速度等因素,综合考虑建议地基刚度取值为 600~1 000 MPa/m 的范围。

## 参考文献:

- [1] 金学松,温泽峰,张卫华. 轮对运动状态对轮轨滚动接触应力的影响[J]. 工程力学,2004(1):165-172.  
Jin Xuesong, Wen Zefeng, Zhang Weihua. Effect of Wheelset Motions on the Rolling Contact Stresses of Wheel and Rail[J]. Engineering Mechanics, 2004(1): 165-172.
- [2] 郭俊,温泽峰,金学松,等. 钢轨三维弹塑性滚动接触应力[J]. 西南交通大学学报,2007(3):262-268.  
Guo Jun, Wen Zefeng, Jin Xuesong, etc. Three-dimensional Elastic-plastic Rolling Contact Stresses in Rail[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2007(3):262-268.
- [3] 王生武,于洋,高震天,等. 轮轨垂向接触刚度分析[J]. 中国科技信息,2013(7):54-55.  
Wang Shengwu, Yu Yang, Gao Zhentian, etc. The Analysis of Contact Stiffness of Wheel/Rail[J]. China Science and Technology Information, 2013(7):54-55.
- [4] Mehmet Ali Arslan, Oguz Kayabasi. 3-D Rail-Wheel Contact Analysis Using FEA [J]. Advances in Engineering Software, 2012(45):325-331.
- [5] 魏永幸,邱延峻. 高速铁路无砟轨道路基面支承刚度研究[J]. 铁道工程学报,2010(7):15-19.  
Wei Yongxing, Qiu Yanjun. Research on the Subgrade Surface Stiffness of Ballastless Track of High-speed Railway[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2010(7):15-19.
- [6] 宫全美,张达石. 高速铁路地基刚度的合理取值范围[J]. 同济大学学报:自然科学版,2004(10):1390-1393.  
Gong Quanmei, Zhang Dashi. Reasonable Foundation Stiffness Range of High Speed Railway[J]. Journal of Tongji University(Natural Science), 2004(10):1390-1393.
- [7] 张新,李向国,王海云,等. 轨距不平顺激励下高速列车动力响应研究[J]. 石家庄铁道大学学报(自然科学版),2011(1):69-72.  
Zhang Xin, Li Xiangguo, Wang Haiyun, etc. Study on Dynamic Response of High Speed Train Excited by Irregularity of Rail Gauge[J]. Journal of Shijiazhuang Tiedao University(Natural Science), 2011(1):69-72.
- [8] 许贵满,吴亚平,段志东,等. 轮轨三维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(4):66-71.  
Xu Guiman, Wu Yaping, Duan Zhidong, etc. The Analysis of Dimensional Nonlinear Static Wheel-rail Contact Stress and Its Influential Factors[J]. Journal of Lanzhou Jiaotong University, 2013(4):66-71.
- [9] 杨永谦,肖金生,等. 实用有限元分析技术-ANSYS 专题与技巧[M]. 北京:机械工业出版社,2010.  
Yang Yongqian, Xiao Jinsheng. Practical Finite Element Analysis Technology-ANSYS Topics and Techniques [M]. Beijing:China Machine Press, 2010.
- [10] 常崇义. 有限元轮轨滚动接触理论机器应用研究[D]. 北京:中国铁道科学研究院,2010:108.  
Chang Chongyi. A Study on Wheel/Rail Rolling Contact Theory Based on Finite Element Method and Its Applying [D]. Beijing: China Academy of Railway Sciences, 2010:108.
- [11] 梁波,蔡英. 不平顺条件下高速铁路路基的动力分析[J]. 铁道学报,1999(2):1-10.  
Liang Bo, Cai Ying. Dynamic Analysis on Subgrade of High Speed Railways in Geometric Irregular Condition [J]. Journal of the China Railway Society, 1999(2):1-10.
- [12] 傅小日. 日本新干线高速客运(二)[J]. 国外铁道车辆,1998(4):7-15.  
Fu Xiaori. High Speed Passenger in Japanese Shinkansen (Two) [J]. Foreign Railway Vehicles, 1998(4):7-15.

作者: [吴亚平](#), [许贵满](#), [段志东](#), [王良璧](#), [车鸿博](#), [WU Ya-ping](#), [XU Gui-man](#), [DUAN Zhi-dong](#), [WANG Liang-bi](#), [CHE Hong-bo](#)  
作者单位: [兰州交通大学](#), [兰州](#), [730070](#)  
刊名: [铁道工程学报](#)   
英文刊名: [Journal of Railway Engineering Society](#)  
年, 卷(期): [2014\(5\)](#)

## 参考文献(12条)

1. [金学松;温泽峰;张卫华](#) [轮对运动状态对轮轨滚动接触应力的影响](#) 2004(01)
2. [郭俊;温泽峰;金学松](#) [钢轨三维弹塑性滚动接触应力](#) 2007(03)
3. [王生武;于洋;高震天](#) [轮轨垂向接触刚度分析](#) 2013(07)
4. [Mehmet Ali Arslan;Oguz Kayabasi](#) [3-D Rail-Wheel Contact Analysis Using FEA](#) 2012(45)
5. [魏永幸;邱延峻](#) [高速铁路无砟轨道路基面支承刚度研究](#) 2010(07)
6. [宫全美;张达石](#) [高速铁路地基刚度的合理取值范围](#) 2004(10)
7. [张新;李向国;王海云](#) [轨距不平顺激励下高速列车动力响应研究](#) 2011(01)
8. [许贵满;吴亚平;段志东](#) [轮轨三维非线性静态接触应力及其影响因素分析](#) 2013(04)
9. [杨永谦;肖金生](#) [实用有限元分析技术-ANSYS专题与技巧](#) 2010
10. [常崇义](#) [有限元轮轨滚动接触理论机器应用研究](#) 2010
11. [梁波;蔡英](#) [不平顺条件下高速铁路路基的动力分析](#) 1999(02)
12. [傅小日](#) [日本新干线高速客运\(二\)](#) 1998(04)

引用本文格式: [吴亚平](#). [许贵满](#). [段志东](#). [王良璧](#). [车鸿博](#). [WU Ya-ping](#). [XU Gui-man](#). [DUAN Zhi-dong](#). [WANG Liang-bi](#). [CHE Hong-bo](#) [地基刚度对三维非线性轮轨接触的动力影响](#)[期刊论文]-[铁道工程学报](#) 2014(5)