

DOI: 10.16285/j.rsm.2017.2474

重载铁路路基面动应力峰值随机分布特征研究

梅慧浩¹, 冷伍明^{1,2}, 聂如松^{1,2}, 刘文劼^{1,3}, 伍晓伟⁴

(1. 中南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410075; 2. 中南大学 高速铁路建造技术国家工程实验室, 湖南 长沙 410075;
3. 湖南省交通科学研究院, 湖南 长沙 410015; 4. 广西交通规划勘察设计研究院有限公司, 广西 南宁 530000)

摘 要: 掌握列车移动荷载作用下路基的动应力响应特性可为路基沉降预测、状态评估提供依据。建立重载铁路车辆-轨道-路基三维动力有限元模型, 并在钢轨轨面引入中国三大干线不平顺轨道谱以实现轨道不平顺的模拟。通过数值计算, 分析了轨道高低不平顺对路基面动应力分布的影响, 统计了 4 种列车轴重下路基面 3 个位置 (钢轨下方, 线路中心) 处的动应力峰值沿线路纵向的分布, 对路基面动应力峰值的随机分布形式进行了正态性检验, 对动应力峰值的最大值进行了预测。结果表明: 轨道不平顺导致路基面动应力沿路基面中心不对称, 路基面动应力峰值沿线路纵向服从正态分布。随着轴重的增大, 动应力峰值离散程度增大, 动应力峰值分布曲线变陡。动应力峰值的预测值和现场实测值相吻合, 证明了有限元模型及统计分析方法的正确性。研究结果对路基动变形及累积沉降的可靠性分析提供依据。

关 键 词: 动应力峰值; 重载铁路; 三维动力有限元模型; 轨道不平顺; 随机分布

中图分类号: TU 431

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2019) 04-1603-11

Random distribution characteristics of peak dynamic stress on subgrade surface of heavy haul railway

MEI Hui-hao¹, LENG Wu-ming^{1,2}, NIE Ru-song^{1,2}, LIU Wen-jie^{1,3}, WU Xiao-wei⁴

(1. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha, Hunan 410075, China; 2. National Engineering Laboratory for High Speed Railway Construction, Central South University, Changsha, Hunan 410075, China; 3. Hunan Communications Research Institute, Changsha, Hunan 410015, China;
4. Guangxi Communications Planning Surveying and Designing Institute Co., Ltd., Nanning, Guangxi 530000, China)

Abstract: The dynamic stress response of subgrade under moving train loads provides information on subgrade settlement prediction and condition evaluation. In this paper, a 3D dynamic finite element (FE) model, which considered the interaction of wagon-track-subgrade, was firstly built. And then, the vertical irregularity track spectra of China's three major lines were applied to simulate the track irregularity. Through numerical calculation, the influence of vertical track irregularity on dynamic stress at the subgrade surface was investigated. The distributions of peak dynamic stresses at three locations of subgrade surface (beneath the rails and at the track center) along the track under the passage of the trains with various axle loads were statistically acquired. The normal distributions of peak dynamic stresses on subgrade surface were verified. The maximums of peak dynamic stresses were forecasted. The results indicated that dynamic stresses on the subgrade surface were asymmetric along the center of subgrade surface, attributed by the random distribution of track irregularity. The peak dynamic stresses were found to follow the normal distribution along the track. The dispersion of peak dynamic stresses gradually increased, and the distribution curve of peak dynamic stresses became steeper with the increase of axle load. The computing peak dynamic stresses were consistent with field test data, indicating that the 3D dynamic FE model and statistical analysis method were reasonable. The research results provide the basis for the reliability analysis of the dynamic deformation and accumulated settlement of subgrade.

Keywords: peak dynamic stress; heavy haul railway; 3D dynamic finite element model; track irregularity; random distribution

1 引 言

重载铁路货运能力大, 具有良好的社会和经济

效益, 提高重载铁路的工作性能和耐久性是世界铁路运输的研究热点。路基在重载铁路线路长度的占比一般超过 70%, 其对保障线路运营安全起着关键

收稿日期: 2017-12-12

基金项目: 中国神华集团科研专项(No. SHGF-14-55); 国家自然科学基金(No. 51408613, No. 51678572); 中南大学研究生创新项目(No. 2017zzts156)。This work was supported by Special Scientific Research Fund of China's Shenhua Group Corp (SHGF-14-55), the National Natural Science Foundation of China (51408613, 51678572) and the Postgraduate Scientific Innovation Project of Central South University (2017zzts156).

第一作者简介: 梅慧浩, 男, 1988 年生, 博士研究生, 主要从事铁路路基动力响应特性研究。E-mail: meihuihao@csu.edu.cn

通讯作者: 聂如松, 男, 1980 年生, 博士, 副教授, 主要从事地基基础方面的教学、科研工作。E-mail: nierusong97@csu.edu.cn

作用。

掌握列车荷载作用下路基的动应力响应特征是进行路基强度与变形稳定性分析的基础。许多因素包括列车速度^[1-2]、轴重^[2]和轨道不平顺^[3]等对路基的动应力响应特征有显著影响。对于重载铁路,列车速度比高速列车慢,通常小于 120 km/h。另外两个因素对路基的动应力分布有更大的影响。

早期,对路基动应力响应特性的研究主要采用两种方法:现场试验^[2,4-7]和模型试验^[8-16],采用这两种方法可直接获得路基内动应力的测试数据,但试验成本很高,且可控的影响因素有限。随着数值分析技术的发展,数值计算成为了研究列车荷载作用下路基动力响应特性的有效手段。铁路路基数值仿真分析模型主要有两种:轨道-路基模型和列车-轨道-路基模型。前者^[17-20]将列车动荷载进行了一定地简化,因不能考虑轮轨间的动态作用而应用受限。

车辆-轨道耦合动力学理论^[21-22]的发展为建立完整的车辆-轨道相互作用模型奠定了基础,该理论在轮轨接触的动力分析中获得了广泛应用。随后,Zhu 等^[23-24]逐渐建立了车辆-轨道-路基耦合模型来分析路基的动应力响应特性。目前,对车辆-轨道-路基的数值仿真分析主要针对高速铁路,对于重载铁路路基动应力响应特性的研究较少。

依据相关学者的研究成果^[25],路基内动应力沿深度的衰减规律可按布式解进行计算。因此,只要确定了路基面动应力的分布,便可掌握路基内部的动应力分布特征。董亮等^[26]通过数值模拟和试验研究发现,路基内动应力沿横断面方向呈抛物线分布。Zhu 等^[23]利用列车-轨道-路基动力耦合程序研究青藏铁路多年冻土地地区路基的动力响应特性。结果表明,路基面的动压应力峰值沿横截面方向呈马鞍形分布。目前,对动应力沿路基面横截面方向的分布规律研究较多,但对路基面动应力沿线路纵向分布规律的研究还不多见。

目前,由于轨道不平顺常被忽略,普遍认为路基的动力响应特性沿线路纵向是稳定不变的。然而,实际中轨道不平顺普遍存在,并沿线路纵向随机分布,其对轮轨接触作用有显著影响。研究轨道不平顺对轨道和路基动力响应的影响至关重要。已有部分学者对不平顺条件下轮轨动荷载、路基动应力的响应特征开展了研究。刘扬^[27]通过建立列车-轨道仿真模型,发现轮轨动荷载沿线路方向服从正态分布。陈仁鹏^[28]、张石友^[29]等利用 ABAQUS 软件建立了高速列车-无砟轨道-路基三维动力有限元模型,分析了轨道不平顺条件下路基面中心处动应力

在不同列车速度下的概率分布特征及随深度的衰减规律。

但目前还未有学者考虑左右轨高低不平顺差异对路基面动应力分布的影响,同时不同轴重下重载铁路路基面动应力峰值沿线路方向的随机分布规律也未开展分析。因此,本文利用 ABAQUS 软件建立重载列车-有砟轨道-路基三维有限元模型,在模型中引入中国三大干线不平顺轨道谱以实现轨道不平顺的模拟,并考虑左右轨高低不平顺的差异,对不同轴重列车作用下路基的动力响应进行数值计算。统计分析了路基面不同位置处(钢轨下方、线路中心)动应力峰值沿线路方向的分布规律,采用柯尔莫哥洛夫检验方法,证明了轨道不平顺下路基面动应力峰值沿线路方向服从正态分布,利用三倍标准差原理,对路基面动应力峰值的最大值进行了预测。

2 车辆-轨道-路基三维动力有限元模型

2.1 车辆模型

车辆采用具有两系悬挂的整车模型来模拟,模型中车辆、转向架及轮对均视为刚体。整车模型可反映轮对间振动的叠加,更符合实际情况。车辆与转向架由一系悬挂连接,转向架与轮对由二系悬挂连接,悬挂系统均采用弹簧-阻尼单元来模拟。

翟婉明^[22]指出,当研究重点为垂向动力响应且车辆垂向与横向运动相互作用不明显,可以不考虑横向运动。本文重点研究列车移动荷载作用下垂向动应力在路基面的分布情况,故只考虑车辆的沉浮、点头振动位移,转向架的沉浮、点头振动位移及轮对的沉浮振动位移,建立的 10 个自由度的车辆模型见图 1。

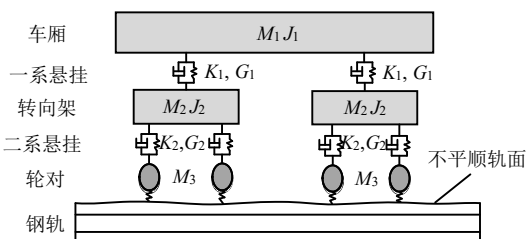


图 1 具有二系悬挂的车辆模型

Fig.1 Wagon model with double suspension systems

目前,中国重载铁路主要运营的敞车为 C_{80B} 敞车、27 t 通用敞车、C₉₆ 敞车,列车轴重分别为 25、27、30 t。提高轴重是中国重载铁路运输的发展方向,为了初步探讨大轴重列车作用下路基的动力响

应特性，本文中列车轴重选择为 25、27、30、35 t。不同的车型尺寸参数不同，见表 1。其中 35 t 轴重列车采用 C₉₆ 敞车来模拟，C₈₀ 敞车的结构参数如图 2 所示。

表 1 列车车型参数

Table 1 Parameters of wagons

列车轴重 /t	车型	转向架轴距 /mm	车辆定距 /mm	邻轴距 /mm	车长 /mm
25	C _{80B}	1 830	8 200	1 970	12 000
27	27 t 敞车	1 860	10 730	2 290	14 880
30	C ₉₆	1 860	9 926	1 940	13 726
35	C ₉₆	1 860	9 926	1 940	13 726

2.2 轨道-路基模型

轨道-路基系统主要由钢轨、垫板、扣件、轨枕、

道砟、路基、地基组成。在有限元动力模型中，连接钢轨和轨枕的扣件和垫板采用弹簧-阻尼单元来模拟，竖向刚度为 100 MN/m，竖向阻尼为 $6 \times 10^4 \text{ N} \cdot \text{s/m}$ 。扣件间距为 0.55 m，采用 8 节点实体单元来模拟轨枕及其以下的其他结构。路基土体的本构模型为摩尔-库仑模型，路基主要基床表层、基床底层、路基本体 3 层结构组成，不同结构层的材料特性不同。道砟及地基视为线弹性体。不同结构层之间（如道砟与基床表层之间）采用 tie 约束进行连接。轨道路基结构的材料参数如表 2 所示。

为减小模型空间尺寸，有限元模型采用单线轨道。轨道-路基模型依据朔黄重载铁路 K361+784~904 区段重车线路建立，轨道路基模型的几何参数如表 3 所示。

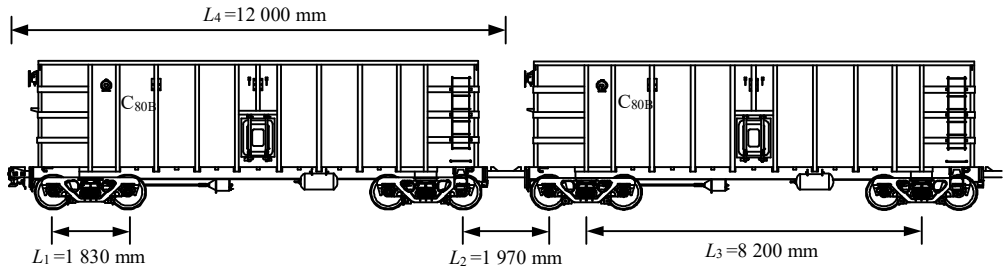


图 2 C_{80B} 敞车结构参数

Fig.2 The geometrical specification of wagon C_{80B}

表 2 轨道路基模型的材料参数

Table 2 Material properties of track and subgrade model

结构名称	动弹性模量 E/MPa	泊松比 ν	密度 $\rho/(\text{kg/m}^3)$	内摩擦角 $\varphi/(^{\circ})$	黏聚力 c/kPa	阻尼比 D
钢轨	2.1×10^5	0.25	7 850			
轨枕	30 000	0.20	2 500			
道砟	200	0.25	2 400			0.05
基床表层	90	0.30	2 300	33	58	0.10
基床底层	70	0.30	2 200	31	45	0.10
路基本体	50	0.35	1 800	17	30	0.15
地基	40	0.35	1 700	15	25	0.15

表 3 轨道路基模型的几何参数

Table 3 Geometrical parameters of track subgrade model

钢轨重量 /(kg/m)	轨枕类型	轨枕间距 /m	道床顶面宽度 /m	道床厚度 /m	路基面宽度 /m	路基边坡 坡度	路基高度 /m	基床表层厚度 /m	基床底层厚度 /m
75	III型钢筋 混凝土枕	0.55	3	0.5	7.25	1:1.5	10	0.6	1.9

2.3 轮轨接触关系

车辆模型与轨道路基模型的运动方程通过轮轨关系进行耦合求解。因此，准确地定义轮轨接触关系是有限元模型进行动力分析的关键。赫兹非线性接触理论是定义轮轨接触关系的主要方法，具有较高的计算精度，本文依据赫兹非线性接触理论来定义轮轨接触关系。

对于轮轨切向接触作用，采用 ABAQUS 软件中的罚函数摩擦公式，罚函数值为 0.2。而轮轨垂向作用则由赫兹非线性弹性接触理论确定^[22]：

$$P(t) = \left[\frac{1}{G} \delta z(t) \right]^{3/2} \quad (1)$$

式中： $P(t)$ 为轮轨垂向作用力（N）； $\delta z(t)$ 为轮轨间垂向弹性压缩量（m）； G 为轮轨接触常数（ $\text{m/N}^{2/3}$ ）。

对于磨耗型踏面车轮, 轮轨接触常数 G 的取值如下:

$$G = 3.86R^{-0.115} \times 10^{-8} (\text{m}/\text{N}^{2/3}) \quad (2)$$

式中: R 为车轮半径 (m)。

本文不考虑车轮的垂向不平顺, 以单节车厢为研究对象, 则轮轨垂向作用力 $P_j(t)$ ($j=1\sim 4$) 可表示为

$$P_j(t) = \begin{cases} \left\{ \frac{1}{G} [Z_{wj}(t) - Z_r(x_{wj}, t) - Z_0(t)] \right\}^{3/2} \\ 0 \quad (\text{轮轨脱离时}) \end{cases} \quad (3)$$

式中: $Z_{wj}(t)$ 为 t 时刻第 j 个车轮的垂向位移 (m); $Z_r(x_{wj}, t)$ 为 t 时刻第 j 个车轮下方钢轨的位移 (m); $Z_0(t)$ 为第 j 个车轮下的轨面垂向不平顺幅值 (m)。由此可以得出一个车厢四个轮对的轮轨垂向作用力。

本文采用 ABAQUS 中软接触模式中的 Tabular 模式对上述法向轮轨接触进行模拟, 该模式需要预先设定接触面的过盈量与接触力的关系, 如图 3 所示。

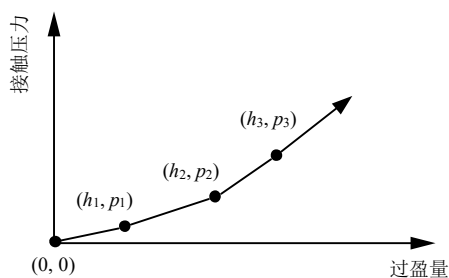


图3 Tabular 接触模式示意图
Fig.3 Schematic diagram of wheel-rail contact force in Tabular mode

2.4 轨道不平顺

轨道不平顺引起的轮轨系统激励是引起车辆-轨道系统耦合振动的主要根源, 也是导致轮轨接触力随机变化的重要因素。因此, 轨道不平顺在有限元模型中的准确实现是开展路基动应力分布特性分析的前提。轨道不平顺按位置方位主要分为: 高低不平顺、水平不平顺、轨向不平顺、轨距不平顺。刘晓敏^[30]指出, 高低不平顺和水平不平顺对车辆-轨道系统的垂向作用影响最为明显, 而水平不平顺由轨道高低不平顺所派生。因此, 本文仅模拟轨道高低不平顺。

目前, 中国尚未形成描述重载铁路轨道不平顺状态的高低不平顺轨道谱标准。中国三大干线高低不平顺轨道谱整体上介于美国五级、六级轨道谱之

间, 适用于 160 km/h 以下车速的普通线路, 也适用于中国重载铁路。因此, 本文采用该轨道谱来模拟钢轨的高低不平顺。中国 3 大干线高低不平顺轨道谱的不平顺功率谱密度如下式所示:

$$S(f) = \frac{A(f^2 + Bf + C)}{f^4 + Df^3 + Ef^2 + Ff + G} \quad (4)$$

式中: $S(f)$ 为不平顺功率谱密度 ($\text{mm}^2/(\text{1/m})$); f 为空间频率 ($1/\text{m}$); $A\sim G$ 为轨道不平顺功率谱密度的特征参数, 具体参数值见表 4。

表4 中国 3 大干线高低不平顺轨道谱的特征参数
Table 4 Characteristic parameters of vertical irregularity track spectrum of China's three major lines

位置	A	B	C	D	E	F	G
左轨	1.102 9	-1.470 9	0.594 1	0.848 0	3.801 6	-0.250 0	0.011 2
右轨	0.858 1	-1.460 7	0.584 8	0.040 7	2.842 8	-0.198 9	0.009 4

利用 MATLAB 软件采用基于频域功率谱等效法可以将不平顺轨道谱转化为不平顺幅值沿线路纵向的空间分布, 如图 4 所示。其中, 行车速度 $v=100 \text{ km/h}$ 。由图可知, 轨道不平顺幅值沿线路方向随机分布。

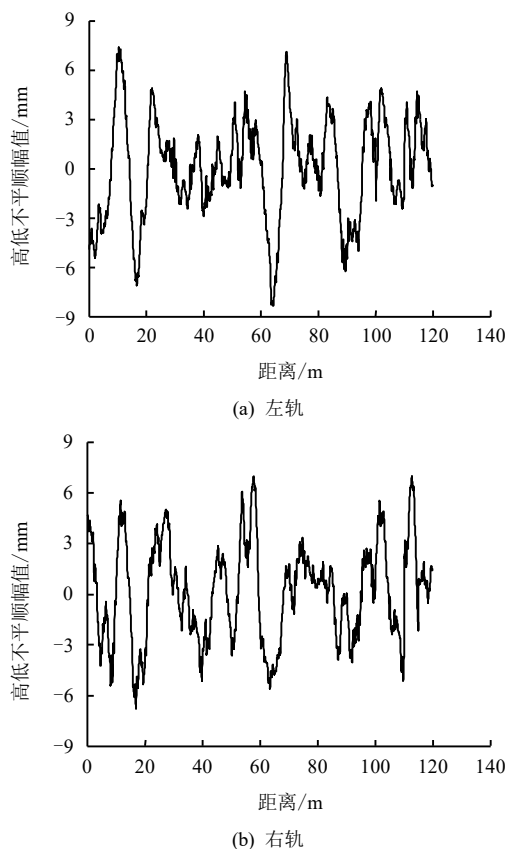


图4 高低不平顺轨道谱沿线路纵向的分布
Fig.4 Distributions of track vertical irregularity spectra along the track

假定模型中轨道不平顺仅存在钢轨轨面上。在有限元模型中实现轨道不平顺的方法为:首先从Input文件中导出平顺钢轨轨面的节点坐标矩阵,然后利用MATLAB软件,修改轨面节点的垂直方向坐标,形成带有轨道不平顺的轨面节点坐标矩阵,然后将其重新导入Input文件中进行轨面二次建模。在钢轨轨面实现高低不平顺的效果如图5所示。

模型纵向长度为120 m,地基横向宽度为111.75 m,车厢数量为2个,整体模型如图6所示。

建立笛卡尔坐标系, X 轴方向代表线路横断面方向, Y 轴代表垂直向上, Z 轴代表线路纵向。

3 路基面动应力峰值概率分析

未经特别指出,本文中的动应力均指竖直方向的动应力,以竖直向下为正。根据文献[16],路基面动应力峰值沿横截面方向呈W形分布,钢轨正下方动应力峰值最大。因此,本文主要分析路基面3个关键位置的动应力峰值,如图7所示,其中 S_1 和 S_3 为钢轨下方、 S_2 为路基面中心。

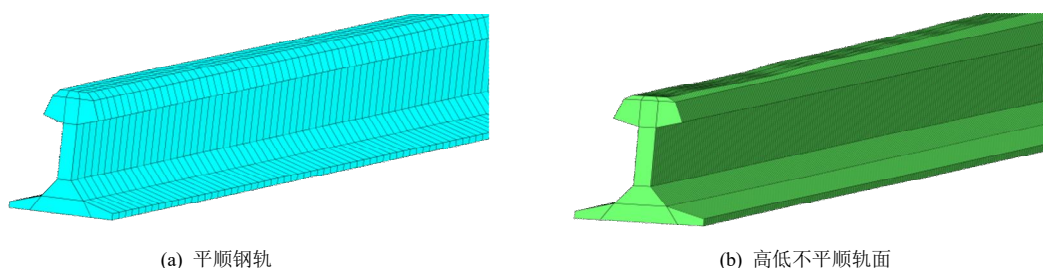


图5 平顺钢轨轨面与高低不平顺钢轨
Fig.5 Smooth rail surface and uneven rail surface with vertical irregularity

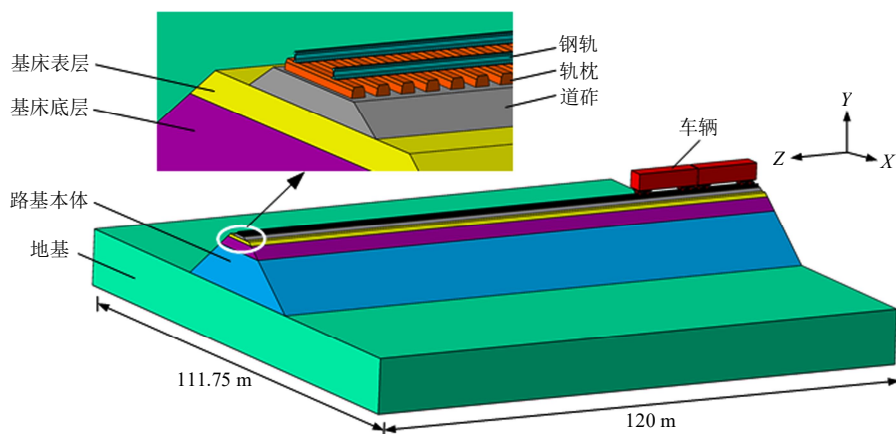


图6 车辆-轨道-路基三维动力有限元模型
Fig.6 Wagon-track-subgrade 3D dynamic finite element model

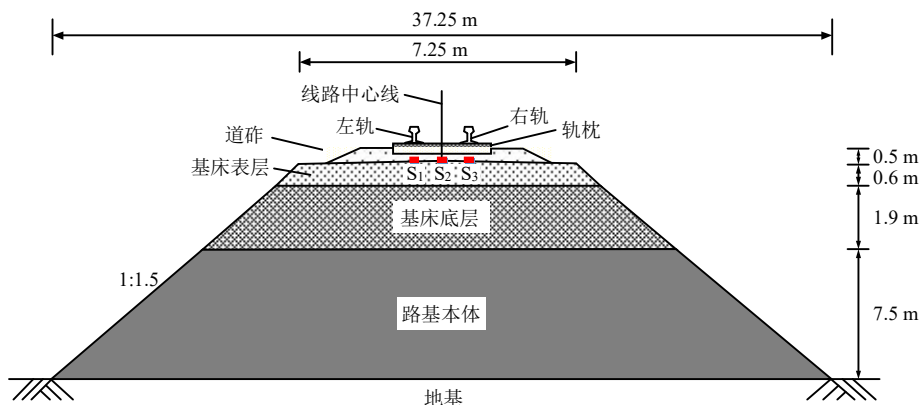


图7 路基面动应力峰值分析位置
Fig.7 Three positions on subgrade surface for analysis of dynamic stress

3.1 动应力时程分析

以 $Z=60\text{ m}$ 横截面（三维有限元模型沿线路纵向中间截面）为研究对象，不同列车运行条件下，路基面三个位置 S_1 、 S_2 、 S_3 的动应力时程曲线如图 8 所示。

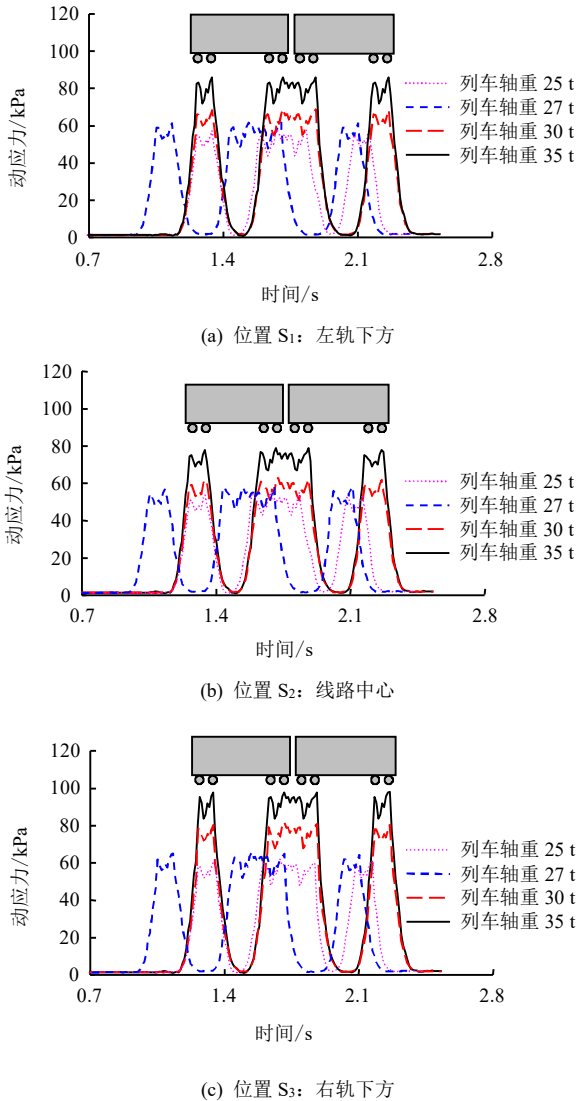


图 8 路基面动应力时程曲线

Fig.8 Time-history curves of dynamic stresses on subgrade surface

图 8 中的上部的两节车厢为 C_{96} 敞车，由图可知，一个转向架的两个轮对作用产生的动应力具有叠加效应，后轮产生的动应力稍大于前轮产生的动应力。相邻两节车厢的两个转向架（前车厢后转向架与后车厢前转向架）作用时，动应力时程曲线呈梯形，因此，可将该两个转向架视为一个加载单元。一个转向架作用时的动应力峰值与两个转向架共同作用时的动应力峰值相接近。动应力峰值随列车轴重的增大而增大。

轨道不平顺沿线路方向随机分布（见图 4），在路基任一横截面，左右轨的不平顺幅值并不相等。在 $Z=60\text{ m}$ 横截面，左轨下方的动应力峰值与右轨下方的动应力峰值不相等（见图 8）， $Z=60\text{ m}$ 横截面动应力峰值在路基内的横向分布如图 9 所示，列车轴重为 30 t 。

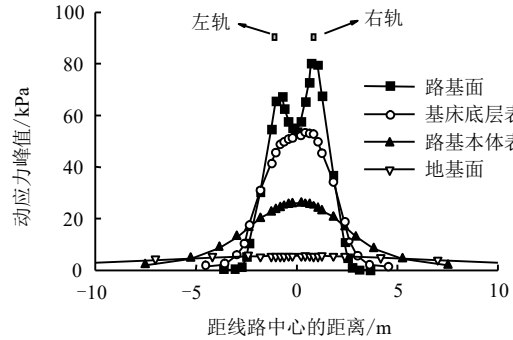


图 9 动应力峰值在路基内的横向分布

Fig.9 Transverse distribution of peak dynamic stress in subgrade

由图 9 可知，路基面动应力峰值沿横向呈马鞍形分布，钢轨下方的动应力峰值最大。右轨下方的动应力峰值明显大于左轨下方的动应力峰值。随着路基深度的增加，左右轨下方的动应力峰值差异逐渐减小。在基床底层表面处，动应力峰值沿横断面方向分布更加均匀，左右轨下方的动应力峰值差异已十分微小。在路基本体表层和地基表层，动应力峰值沿线路中心对称分布。因此，轨道不平顺对基床表层的动应力峰值有显著影响，随着路基深度的增加，轨道不平顺的影响可忽略不计。

由于轨道不平顺的存在，增大了轮轨荷载的复杂性和不确定性，从而导致轮轨动荷载沿线路纵向是随机的。而列车动荷载通过扣件由轨面传递到轨道结构，然后再传递到路基土体。因此，传递到路基面的动荷载亦是随机的。且由于扣件是间隔一定距离设置的，轨枕下方路基内的动荷载将大于未设置轨枕处路基内的动荷载。综合以上两个因素，路基面动应力峰值沿线路纵向随机分布。不同时刻路基面的应力云图如图 10 所示（列车轴重为 35 t ）。

由图 10 可知，由于左右轨的不平顺幅值沿线路中心不对称，沿任一横截面，路基面的动应力沿路基面中心也是不对称的。沿着线路方向，路基面动应力动态变化，并不是稳定的定值。

路基面 3 个位置 S_1 、 S_2 、 S_3 的动应力峰值沿线路纵向的分布曲线如图 11 所示。

由图可知，路基面动应力峰值沿线路纵向随机

分布,在一定的区间内波动,具有明显的离散性。轴重越大,离散性越明显。

3.2 动应力峰值的正态性检验

目前常用的概率分布函数有瑞利(Rayleigh)分布、 γ 分布、 β 分布、正态分布、对数正态分布等。刘扬^[27]指出,轮载的分布近似于正态分布。因此,本文对路基面动应力峰值进行正态性检验。本文采用柯尔莫哥洛夫检验方法^[27],具体步骤如下:

2.62 总体 X 的分布函数为 $F(x)$, $(X_1, X_2, \dots, X_n)$ 为取自总体 X 的样本, $F_n(x)$ 为根据上述样本求出的经验分布函数。 $F_0(x)$ 为正态分布函数。提出如下两个相互对立的假设:

$$H_0: F(x)=F_0(x); H_1: F(x) \neq F_0(x)$$

(2) 为此,构造检验统计量:

$$D_n = \max_{-\infty < x < +\infty} |F_n(x) - F_0(x)| \quad (5)$$

当 D_n 的观测值较小时,认为 H_0 成立,反之,则认为 H_0 不成立。对于显著性水平 α ,临界值 $D_{n,\alpha}$ 可由查表得到,当 $D_n < D_{n,\alpha}$,认为 $F_n(x)=F_0(x)$ 。

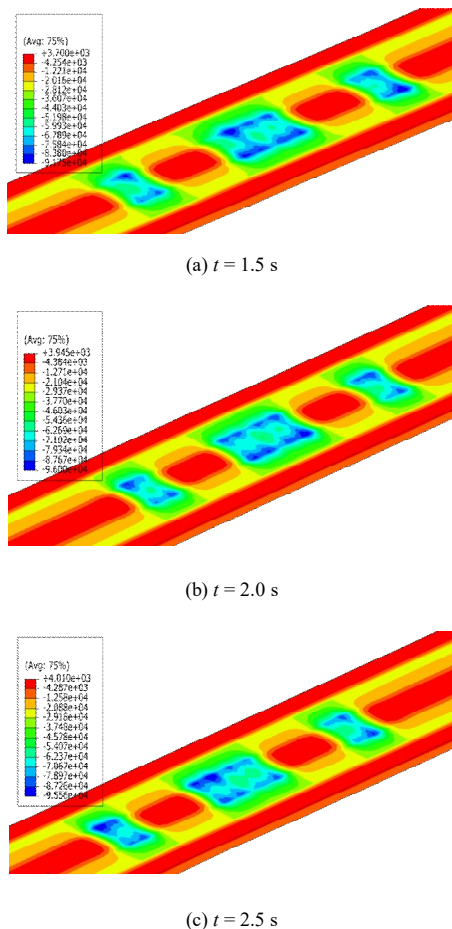


图 10 不同时刻路基面应力云图

Fig.10 Stress nephograms on subgrade surface at different time

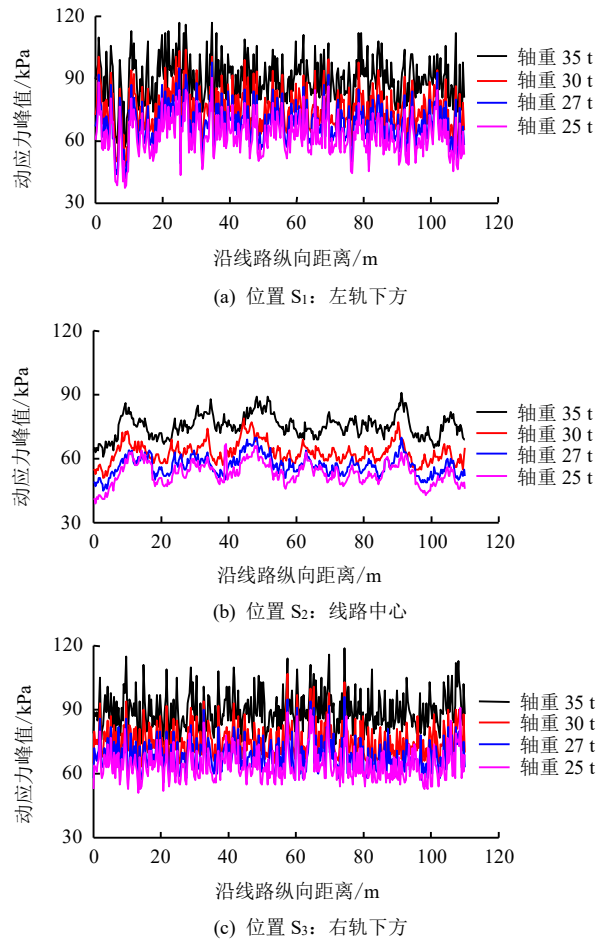


图 11 路基面动应力峰值沿线路纵向的分布曲线

Fig.11 Distributions curves of peak dynamic stresses on subgrade surface along the track

(3) 在计算过程中,由于 $F_n(x)$ 为非降函数,式(5)可简化为

$$D_n = \max_{0 \leq i < n} |F_n(x_i) - F_0(x_i)| \quad (6)$$

$(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 为次序统计量 $(X_1, X_2, \dots, X_n)$ 的观测值, μ 为观测值的均值, $\mu = \bar{x}$, σ 为标准差, $\sigma = s^*$ 。

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (7)$$

$$s^* = \left\{ \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

$$F_n(x_i) = i/n \quad (9)$$

$$F_0(x) = \Phi \left(\frac{x - \bar{x}}{s^*} \right) \quad (10)$$

以 30 t 轴重列车荷载作用下 S_1 位置处的动应力峰值为例,详细介绍正态性检验的方法。

对 340 个动应力峰值数据进行统计,可得 $\mu = \bar{x} = 76$, $\sigma = s^* = 10$, 假设 X 服从正态分布,即

$X \sim N(76, 10^2)$ 。经过线性变换, 可得 $U = \frac{X - 76}{10} \sim$

$N(0, 1)$ 。 $x_{\min} = 48$, $x_{\max} = 104$, 将 340 个数据分为 12 个区间, 见表 5。

由表可知, $D_n = 0.058$ 。查柯尔莫哥洛夫检验的

临界值表可知, 相应于显著性水平 $\alpha = 0.05$ 、 0.01 的临界值 $D_{n, \alpha}$ 分别为 0.074、0.088。由此可知, $D_n < D_{n, \alpha}$, 因此, 可认为在显著性水平 $\alpha = 0.05$ 、 0.01 下, 30 t 轴重列车荷载作用下, S_1 位置处的动应力峰值服从正态分布, 其分布直方图如图 12 所示。

表 5 正态性检验分析表
Table 5 Analysis sheet of normality test

区间	频数	频率	$U = (X - 76)/10$	经验分布函数值 $F_n(x_i)$	理论分布函数值 $F_0(x_i)$	$ F_n(x_i) - F_0(x_i) $
[45, 50]	3	0.009	-2.60	0.009	0.004 7	0.004
[51, 55]	4	0.012	-2.10	0.021	0.017 9	0.003
[56, 60]	10	0.029	-1.60	0.050	0.054 8	0.005
[61, 65]	29	0.085	-1.10	0.135	0.135 7	0.000
[66, 70]	61	0.179	-0.60	0.315	0.274 3	0.041
[71, 75]	69	0.203	-0.10	0.518	0.460 2	0.058
[76, 80]	65	0.191	0.40	0.709	0.655 4	0.054
[81, 85]	48	0.141	0.90	0.850	0.815 9	0.034
[86, 90]	21	0.062	1.40	0.912	0.919 2	0.007
[91, 95]	21	0.062	1.90	0.974	0.971 3	0.002
[96, 100]	4	0.012	2.40	0.985	0.991 8	0.006
[101, 105]	5	0.015	2.90	1.000	0.998 1	0.001

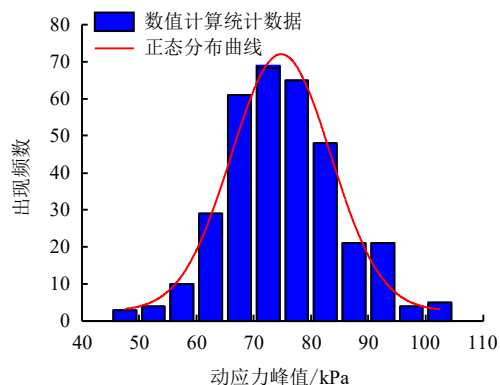


图 12 左轨下方路基面动应力峰值分布直方图
Fig.12 Distribution histogram of peak dynamic stresses at location S_1

采用相同的方法, 对不同列车轴重、不同位置处的动应力峰值进行正态分析, 汇总的 D_n 值见表 6。

表 6 路基面动应力峰值正态性检验统计表
Table 6 Statistical table of normality test of peak dynamic stresses on subgrade surface

列车轴重 /t	D_n			临界值 $D_{n, \alpha}$	
	左轨下方	线路中心	右轨下方	$\alpha = 0.05$	$\alpha = 0.01$
25	0.053	0.035	0.062	0.073	0.088
27	0.055	0.038	0.065	0.073	0.088
30	0.058	0.040	0.067	0.073	0.088
35	0.060	0.042	0.069	0.073	0.088

由表 6 可知, 不同轴重、不同位置处动应力峰

值的统计值 D_n 均小于 $D_{n, \alpha}$, 因此, 可认为路基面不同位置处动应力峰值沿线路方向均服从正态分布。在此基础上, 可得不同条件下路基面动应力峰值的正态分布特征参数, 见表 7。

表 7 路基面动应力峰值的正态分布特征参数
Table 7 Characteristic parameters of normal distribution of peak dynamic stresses on subgrade surface

位置	轴重/t	变异系数/%	峰度系数	偏度系数
左轨下方	25	11.74	0.14	0.14
	27	13.23	0.26	0.13
	30	13.96	0.33	-0.14
	35	14.60	0.42	0.16
轨道中心	25	7.18	0.08	0.06
	27	7.75	0.11	-0.07
	30	8.20	0.17	-0.10
	35	9.95	0.28	0.09
右轨下方	25	10.18	0.10	0.11
	27	11.75	0.18	0.09
	30	12.90	0.29	-0.04
	35	13.58	0.38	0.13

由表可知, 不同位置处动应力峰值的变异系数、峰度系数均随轴重的增大而增大, 变异系数是反映数据离散程度的参数, 可见轴重越大, 路基面动应力峰值离散程度越高。峰度系数反映分布曲线顶端尖峭或扁平程度, 可见轴重越大, 分布曲线越陡。偏度系数则随轴重的增大呈现无规律变化。偏度系数反映分布曲线是否左右对称, 当分布曲线左右对

称时, 偏度系数为 0。当偏度系数大于 0 时, 则分布曲线右偏。当偏度系数小于 0 时, 则分布曲线左偏。可见, 随着轴重的增大, 分布曲线在正态分布中心线左右两侧随机移动。

3.3 动应力峰值的最大值预测

根据正态分布的 3σ 原则, 若 $X \sim N(\mu, \sigma^2)$, 则:

$$P(|X - \mu| \geq 3\sigma) = 1 - P(|X - \mu| < 3\sigma) = 1 - 0.9973 = 0.0027 < 0.003 \quad (11)$$

由此可知, X 落在 $(\mu - 3\sigma, \mu + 3\sigma)$ 以外的概率小于 0.003, 统计学上通常把区间 $(\mu - 3\sigma, \mu + 3\sigma)$ 作为 X 实际可能的取值区间, 这一原理被称为三倍标准差原理。因此, 在认为动应力峰值服从正态分布的基础上, 可推断 $\mu + 3\sigma$ 为路基面动应力峰值可能出现的最大值, 表 8 为动应力峰值最大值的推断结果。

将推断的最大值与已开展的现场实测数据进行对比, 如表 9 所示。可以看出, 不同学者开展的现场测试结果并不相同。一方面, 不同的线路和区段存在钢轨及下部结构的差异; 另一方面, 由于现场试验是在选定的几个横断面上开展, 采集的数据样

本有限, 测量数据存在离散性。这些因素导致测试结果差异较大。本文以朔黄铁路为工程背景, 模型参数均依据朔黄铁路实际轨道情况进行选择, 数值计算结果与文献[33–35]在朔黄铁路的现场测试结果相接近。本文采用统计方法考虑了轨道不平顺及数据离散性, 因而计算结果更准确, 更具有全面性。

表 8 路基面动应力峰值的最大值统计结果
Table 8 Maximums of peak dynamic stresses on subgrade surface

位置	轴重 /t	动应力峰值 期望值/kPa	动应力峰值 标准差/kPa	最大值 /kPa
左轨 下方	25	64	9	91
	27	69	10	99
	30	76	10	106
	35	90	11	123
轨道 中心	25	53	5	68
	27	57	5	72
	30	63	5	78
	35	75	5	90
右轨 下方	25	64	7	85
	27	69	7	90
	30	76	8	100
	35	90	9	117

表 9 计算结果与实测结果对比

Table 9 Comparison between numerical calculations and test results

线路	钢轨重量 /(kg/m)	轨枕型号	道床厚度 /cm	路基填料		路基面动应力峰值的最大值/kPa	
				基底层	路基本体	25 t 轴重	30 t 轴重
大秦铁路 ^[31–32]	75	II	45			40~45	
朔黄铁路 ^[33]	75	III	>50	低液限粉土	低液限粉土	105	123
朔黄铁路 ^[34]	75	III	>50			110	
朔黄铁路 ^[35]	75	III	>50	粉质黏土	粉质黏土	93~107	100
数值模型	75	III	50	粉质黏土	粉质黏土	91	123

4 结 论

本文通过建立列车-轨道-路基三维动力有限元模型, 并在轨面引入中国 3 大干线谱实现了轨道不平顺的准确模拟。通过数值计算, 获得了列车运行条件下路基面 3 个位置 (钢轨下方, 线路中心) 处的动应力峰值沿线路方向的分布, 并得到以下结论:

(1) 由于轨道不平顺的随机性, 路基面动应力峰值沿线路方向随机分布, 并不是确定的定值。且由于左右轨高低不平顺的差异, 路基面动应力峰值沿路基面中心不对称。

(2) 不同轴重列车作用下路基面不同位置处的动应力峰值沿线路方向均服从正态分布。

(3) 随着列车轴重的增大, 路基面动应力峰值

离散程度变大, 动应力峰值分布曲线变陡, 并在正态分布中心线左右侧小范围内随机变化。

(4) 根据正态分布的 3σ 原则, 对路基面动应力峰值沿线路方向的最大值进行了预测, 预测值与现场实测结果相接近, 证明了有限元模型和统计方法的正确性。

参 考 文 献

- [1] YANG L A, POWRIE W, PRIEST J. Dynamic stress analysis of a ballasted railway track bed during train passage[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2009, 135(5): 680–689.
- [2] LAMAS-LOPEZ F, CUI Y J, CALON N, et al. Track-bed

- mechanical behaviour under the impact of train at different speeds[J]. **Soils & Foundations**, 2016, 56(4): 627—639.
- [3] YAO H, HU Z, LU Z, et al. Analytical model to predict dynamic responses of railway subgrade due to high-speed trains considering wheel-track interaction[J]. **International Journal of Geomechanics**, 2016, 16(2): 737—756.
- [4] KEMPFERT H, HU Y. Measured dynamic loading of railway underground[C]//Proceedings of the 11th Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. [S. l.]: International Society for Soil Mechanics, 1999: 843—847.
- [5] GRÄBE P J, SHAW F J, CLAYTON C R I. Deformation measurement on a heavy haul track formation[C]//International Heavy Haul Conference. [S. l.]: [s. n.], 2005: 287—295.
- [6] 詹永祥, 蒋关鲁, 胡安华, 等. 遂渝线无碴轨道桩板结构路基动力响应现场试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(3): 832—835.
- ZHAN Yong-xiang, JIANG Guan-lu, HU An-hua, et al. Study of dynamic response of pile-plank embankment of ballastless track based on field test in Suining-Chongqing High-speed Railway[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(3): 832—835.
- [7] 徐鹏, 蒋关鲁, 任世杰, 等. 红层泥岩及其改良填料路基动力响应试验研究[J]. 岩土力学, 2019, 40(2): 1—7.
- XU Peng, JIANG Guan-lu, REN Shi-jie, et al. Test study on dynamic response of subgrade with red mudstone and improved red mudstone[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2019, 40(2): 1—7.
- [8] SHAER A A, DUHAMEL D, SAB K, et al. Experimental settlement and dynamic behavior of a portion of ballasted railway track under high speed trains[J]. **Journal of Sound & Vibration**, 2008, 316(1): 211—233.
- [9] BIAN X, JIANG H, CHENG C, et al. Full-scale model testing on a ballastless high-speed railway under simulated train moving loads[J]. **Soil Dynamics & Earthquake Engineering**, 2014, 66: 368—384.
- [10] CHEN R, ZHAO X, WANG Z, et al. Experimental study on dynamic load magnification factor for ballastless track-subgrade of high-speed railway[J]. **Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering**, 2013, 5(4): 306—311.
- [11] TATSUYA ISHIKAWA, ETSUO SEKINE, SEIICHI MIURA. Cyclic deformation of granular material subjected to moving-wheel loads[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 2011, 48(5): 691—703.
- [12] 边学成, 蒋红光, 金皖锋, 等. 板式轨道-路基相互作用及荷载传递规律的物理模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(8): 1488—1495.
- BIAN Xue-cheng, JIANG Hong-guang, JIN Wan-feng, et al. Full-scale model tests on slab track-subgrade interaction and load transfer in track system[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2012, 34(8): 1488—1495.
- [13] 董云, 阎宗岭. 土石混填路基沉降变形特征的二维力学模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(6): 943—947.
- DONG Yun, YAN Zong-ling. 2D mechanical model tests on settlement of rock-soil filled roadbed[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2007, 29(6): 943—947.
- [14] 陈爱云, 郭建湖. 武广客运专线软岩填筑路基的模型试验研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(10): 2882—2886.
- CHEN Ai-yun, GUO Jian-hu. Research on model test of soft rock roadbed in special passenger railway line of Wuhan-Guangzhou[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(10): 2882—2886.
- [15] 詹永祥, 蒋关鲁. 无碴轨道路基基床动力特性的研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(2): 392—396.
- ZHAN Yong-xiang, JIANG Guan-lu. Study of dynamic characteristics of soil subgrade bed for ballastless track[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(2): 392—396.
- [16] 杨琪, 张友谊, 刘华强, 等. 一种气泡轻质土路基受载-破坏模型试验[J]. 岩土力学, 2018, 39(9): 1001—1009.
- YANG Qi, ZHANG You-yi, LIU Hua-qiang, et al. Model test study on load-failure of a foamed lightweight soil subgrade[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2018, 39(9): 1001—1009.
- [17] SAYEED M A, SHAHIN M A. Three-dimensional numerical modelling of ballasted railway track foundations for high-speed trains with special reference to critical speed[J]. **Transportation Geotechnics**, 2016, 6: 55—65.
- [18] CORREIA A G, CUNHA J. Analysis of nonlinear soil modelling in the subgrade and rail track responses under HST[J]. **Transportation Geotechnics**, 2014, 1(4): 147—156.
- [19] TAKEMIYA H. Substructure simulation of

- inhomogeneous track and layered ground dynamic interaction under train passage[J]. **Journal of Engineering Mechanics**, 2005, 131(7): 699—711.
- [20] YAO S, ALBERS B, SAVIDIS S A. Influence of different transition zones on the dynamic response of track-subgrade systems[J]. **Computers & Geotechnics**, 2013, 48: 21—28.
- [21] 翟婉明. 车辆-轨道垂向系统的统一模型及其耦合动力学原理[J]. 铁道学报, 1992, 14(3): 10—21.
- ZHAI Wan-ming. The vertical model of vehicle-track system and its coupling dynamics[J]. **Journal of the China Railway Society**, 1992, 14(3): 10—21.
- [22] 翟婉明. 车辆-轨道耦合动力学[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- ZHAI Wan-ming. Vehicle-track coupled dynamics[M]. Beijing: Science Press, 2007.
- [23] ZHU Z Y, LING X Z, CHEN S J, et al. Analysis of dynamic compressive stress induced by passing trains in permafrost subgrade along Qinghai-Tibet Railway[J]. **Cold Regions Science & Technology**, 2011, 65(3): 465—473.
- [24] SHAN Y, SHU Y, ZHOU S. Finite-infinite element coupled analysis on the influence of material parameters on the dynamic properties of transition zones[J]. **Construction & Building Materials**, 2017, 148: 548—558.
- [25] CHEN R P, CHEN J M, WANG H L, et al. Recent research on the track-subgrade of high-speed railways[J]. **Journal of Zhejiang University Science**, 2014, 15(12): 1034—1038.
- [26] 董亮, 赵成刚, 蔡德钧, 等. 高速铁路无砟轨道路基动力特性数值模拟和试验研究[J]. 土木工程学报, 2008, 41(10): 81—86.
- DONG Liang, ZHAO Cheng-gang, CAI De-gou, et al. Experimental validation of a numerical model for prediction of the dynamic response of ballastless subgrade of high-speed railways[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2008, 41(10): 81—86.
- [27] 刘扬. 有砟轨道沉降的概率预测模型[D]. 上海: 同济大学, 2007.
- LIU Yang. Probability predicting model of ballasted track[D]. Shanghai: Tongji University, 2007.
- [28] 陈仁朋, 江朋, 段翔, 等. 高速铁路板式无砟轨道不平顺下路基动应力的概率分布特征[J]. 铁道学报, 2016, 38(9): 86—91.
- CHEN Ren-peng, JIANG Peng, DUAN Xiang, et al. Probability distribution of dynamic stress of high-speed subgrade under slab track irregularity[J]. **Journal of the China Railway Society**, 2016, 38(9): 86—91.
- [29] 张石友, 孙海建, 陈艳国. 高速铁路双线路基动应力的特性研究[J]. 振动与冲击, 2016, 35(17): 165—170.
- ZHANG Shi-you. SUN Hai-jian, CHEN Yan-guo. Dynamic stress distribution of high-speed railway double-subgrade[J]. **Journal of Vibration and Shock**, 2016, 35(17): 165—170.
- [30] 刘晓敏. 典型轨道谱的仿真分析研究[D]. 长春: 吉林大学, 2009.
- LIU Xiao-min. Research on simulation and analysis of typical track spectrum[D]. Changchun: Jilin University, 2009.
- [31] 康高亮, 刘丙强, 柯在田. 大秦线2万t货物列车条件下线桥设备试验研究[J]. 中国铁道科学, 2008, 29(6): 35—40.
- KANG Gao-liang, LIU Bing-qiang, KE Zai-tian. Test study on track bridge and subgrade equipment of Datong-Qinhuangdao railway under 20 000 t freight trains[J]. **China Railway Science**, 2008, 29(6): 35—40.
- [32] 王立军. 重载铁路路基评估的试验研究[D]. 北京: 中国铁道科学研究院, 2005.
- WANG Li-jun. Test research of subgrade assessment of heavy load railway[D]. Beijing: China Academy of Railway Sciences, 2005.
- [33] 贾晋中. 重载铁路路基动荷载特征[J]. 铁道建筑, 2014(7): 89—91.
- JIA Jin-zhong. Dynamical load characteristic of heavy haul railway subgrade[J]. **Railway Engineering**, 2014(7): 89—91.
- [34] 薛继连. 重载铁路路基状态检测与强化技术[M]. 北京: 科学出版社, 2014.
- XUE Ji-lian. State detection and strengthen technology of heavy haul railway subgrade[M]. Beijing: Science Press, 2014.
- [35] 苗雷强, 冯怀平, 岳祖润, 等. 大轴重条件下重载铁路路基变形特性研究[J]. 路基工程, 2015(3): 35—37.
- MIAO Lei-qiang, FENG Huai-ping, YUE Zu-run, et al. On deformation characteristics of heavy-haul railways subgrade under heavy axle load[J]. **Subgrade Engineering**, 2015(3): 35—37.