路基冻胀作用下车辆的动力响应变化规律

舒承兴
中铁九局集团第一建设有限公司，江苏 苏州 215299

[摘要]路基冻胀作用下无砟轨道产生不平顺和损害失稳，导致运行车辆产生消极的动力响应，严重影响列车的平稳运行。基于路基冻胀数值分析模型研究路基冻胀作用下车辆动力响应的影响，研究结果表明：（1）轮轨最大垂向作用力随冻胀量的增大而指数增大，车体垂向振动加速度也逐渐增大，车体垂向稳定性指标由 1.70 指数增大至 2.56；（2）随着冻胀波长增加，车辆轮轨的最大垂向作用力、车体垂向振动加速度和车体垂向稳定性指标均逐渐降低；（3）冻胀波数对轮轨垂向作用力不产生影响，车体垂向加速度先增加后保持不变，车体垂向稳定性指标随冻胀波数增加而指数关系增大。

[关键词]高速铁路；路基冻胀；动力响应；数值模拟
DOI：10.33142/ec.v7i9.13375　　中图分类号：U213.3　　文献标识码：A

Dynamic Response Changes of Vehicles under the Action of Roadbed Frost Heave

SHU Chengxing
First Construction Co., Ltd. of China Railway No. 9 Group, Suzhou, Jiangsu, 215299, China

Abstract: Under the effect of roadbed frost heave, ballastless tracks produce unevenness and damage instability, leading to negative dynamic response of running vehicles and seriously affecting the smooth operation of trains. Based on the numerical analysis model of roadbed frost heave, the influence of vehicle dynamic response under roadbed frost heave is studied. Based on the numerical analysis model of subgrade frost heave, the effect of vehicle dynamic response on subgrade frost heave is studied. The results show that: (1) The maximum vertical force of wheel-rail increases exponentially with the increase of frost heave, the vertical vibration acceleration of vehicle body also increases gradually, and the vertical stability index of vehicle body increases from 1.70 index to 2.56 index; (2) With the increase of frost heave wavelength, the maximum vertical force of wheel and rail, the vertical vibration acceleration of vehicle body and the vertical stability index of vehicle body gradually decrease; (3) Frost heave wave number has no effect on the vertical force of wheel and rail, the vertical acceleration of car body increases first and then remains unchanged, and the vertical stability index of car body increases exponentially with the increase of frost heave wave number.

Keywords: high-speed railway; subgrade frost heave; dynamic response; numerical simulation

引言

随着我国高速铁路建设逐渐向复杂地质环境区域发展，由此伴随着高速发展的同时也面临许多工程问题[1]。路基是承担高速铁路载荷的重要设施，在寒区高速铁路运行过程中，由于温度变化引起的路基冻胀作用对列车的平稳运行产生消极影响，路基冻胀作用引起无砟轨道的不平顺和列车动力响应[2]。针对路基冻胀作用下列车响应特征，蒙富佳等[3]构建了列车-轨道-路基的多元耦合数值分析模型，分析了路基不均匀冻胀作用对车辆和结构的动力学响应特征，路基冻胀作用引起高速车辆与轨道结构的互相影响；徐新玉和崔建荣[4]基于构建的无砟轨道与路基的数值分析模型，重点分析了不同冻胀位置、冻胀波长和幅值等冻胀条件，对轨道产生的力学响应和变形特征；林士财[5]为分析路基冻胀作用产生的融沉循环对轨道结构的影响，通过考虑混凝土塑性损伤模型建立路基冻胀作用有限元模型，分析路基冻胀作用产生引起轨道不平顺特征；张鲁顺和赵国堂[6]构建了车辆-轨道-路基冻胀耦合动力学模型，研究了不同冻胀幅值、冻胀位置和列车速度条件下轮轨结构耦合动力响应特征；徐浩等[7]构建了 CRTSⅢ型板式无砟轨道-路基数值分析模型，主要研究了不同冻胀波长和冻胀幅值条件下结构的受力与变形特征；向俊等[8]建立了考虑混凝土塑性损伤的无砟轨道有限元数值分析模型，讨论了路基冻胀—融沉条件下轨道结构的整体力学响应与变形特征；高建敏等[9]通过建立高速列车与轨道结构的耦合动力学数值模型，重点讨论了路基不均匀冻胀变形对高速列车与轨道结构的耦合动力响应特征；杨国涛等[10]通过建立高速列车-轨道结构-路基的多场耦合数值分析模型，研究了路基冻胀作用下高速列车与轨道结构的耦合动力响应。

本文以路基冻胀作用下车辆动力响应为研究对象，通过建立路基热力耦合数值分析模型，分析不同冻胀波长、冻胀量和冻胀波数对车辆动力响应的影响，从而能够为研究路基冻胀作用下高速列车稳定性控制提供基础依据。

1 路基冻胀数值分析模型

1.1 数值模型

路基冻胀数值分析模型以 CRTSⅢ型板式无砟轨道为

Copyright © 2024 by authors and Viser Technology Pte. Ltd.

研究对象，路基为无砟轨道双线路堤，根据《高速铁路设计规范》相关规定，无砟轨道双线路堤的距离为 5.0m，路基面整体宽度为 13.60m，路基边坡坡度为 1∶1.5。高速铁路路基冻胀数值分析模型主要包括路堤和基床，竖直方向模型尺寸为 5.0m，其中路堤厚度为 2.30m、基床底层厚度为 2.30m 和基床表层厚度为 0.40m。车辆系统由车体、转向架、轮对、一系悬挂以及二系悬挂组成，为多刚体系统，一系二系悬挂采用非线性弹簧进行模拟。

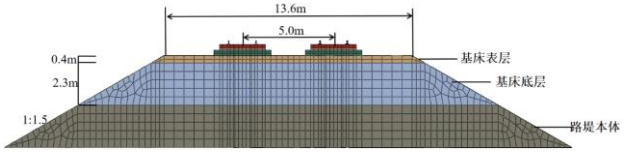


图 1 路基冻胀数值模型

路堤弹性模量为 70MPa、泊松比为 0.35、材料密度为 1900kg·m^{-3}，基床底层弹性模量为 67MPa、泊松比为 0.3、材料密度为 2300kg·m^{-3}，基床表层弹性模量为 500MPa、泊松比为 0.30、材料密度为 1780kg·m^{-3}。

路基冻胀数值分析模型的温度边界条件设置是分析关键，模型下部温度边界设置为 9℃恒温边界，模型上部边界设置为随着时间演化不断变化的温度边界，温度演化公式为：

$$T(t)=T_0+\delta(t)+\delta\cdot sin\left(\frac{2\pi}{360}t+\frac{13\pi}{12}\right)$$

式中：T_0 为高速铁路所在区域的年平均气温，$\delta(t)$ 为考虑气候变暖的环境温度升高幅度，取值 0.05℃/年，δ 日平均气温变化幅度，t 时间。

1.2 车辆动力响应指标

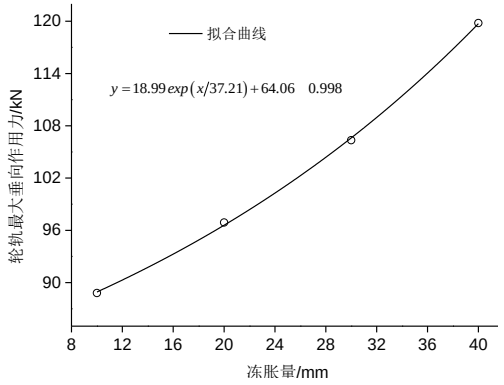
车辆动力响应指标主要包括轮轨作用力、车体振动加速度和稳定性指标，轮轨作用力主要是指列车车轮作用于轨道的垂向力，极限值为 170N，车体振动加速度主要包括垂向和横向加速度，重点分析车辆垂向振动加速度的变化特征，稳定性指标主要采用平稳性 Sperling 评价指标，极限值一般为 3.0。

2 车辆动力响应规律

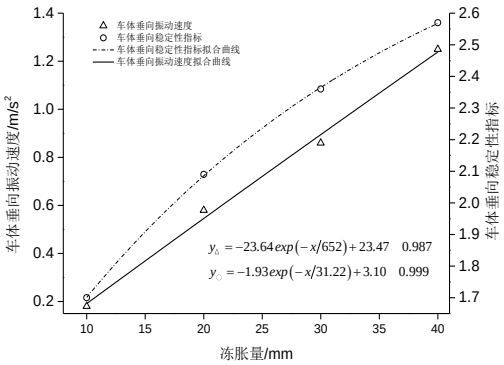
2.1 不同冻胀量的车辆动力响应

对于不同冻胀量的车辆动力响应，主要分析工况设置冻胀量分别为 10mm、20mm、30mm 和 40mm，分析不同冻胀量对轮轨作用力、车体振动加速度和稳定性指标的影响。由于路基冻胀作用导致轨道结构出现不平顺，高速列车进入轨道不平顺轮轨时，轮轨作用力显著增大，当冻胀量由 10mm 增大至 40mm 时，车辆轮轨的最大垂向作用力由 88.80kN 增加至 119.80kN，通过数据拟合得到车辆轮轨的最大垂向作用力与冻胀量之间的定量关系，如图 2（a）所示，符合指数增大变化关系。

随着冻胀量的逐渐增大，车体垂向振动加速度也逐渐增大，当冻胀量由 10mm 增大至 40mm 时，车体垂向振动加速度最大值由 0.18m/s^2 增加至 1.25m/s^2。对于车体垂向稳定性指标变化特征，随着冻胀量的逐渐增大，车体垂向稳定性指标也逐渐增大，当冻胀量由 10mm 增大至 40mm 时，车体垂向稳定性指标由 1.70 增加至 2.56，均小于稳定性指标极限值 3.0。通过数据拟合得到车辆轮轨的最大垂向作用力与冻胀量之间的定量关系，如图 2（b）所示，符合指数增大变化关系。分析结果表明随着冻胀量对列车的平稳运行产生不利影响，冻胀量越大，高速列车的运行稳定性越差。



（a）轮轨的最大垂向作用力



（b）车体垂向振动速度和稳定性指标

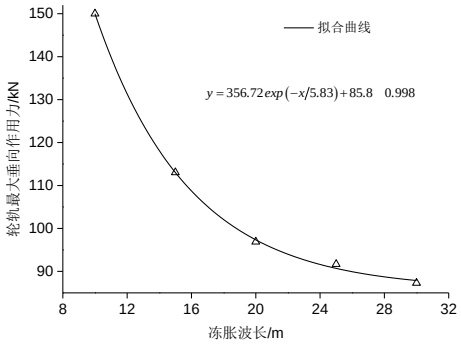
图 2 不同冻胀量的车辆动力响应指标变化规律

2.2 不同冻胀波长的车辆动力响应

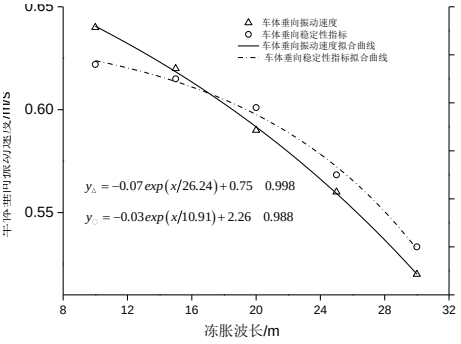
对于不同冻胀波长的车辆动力响应，主要分析工况设置冻胀波长分别为 10m、15m、20m、25m 和 30m，分析不同冻胀波长对轮轨作用力、车体振动加速度和稳定性指标的影响。与不同冻胀量的车辆动力响应指标变化规律相反，随着冻胀波长的不断增大，轮轨作用力、车体振动加速度和稳定性指标均不断减小。当冻胀波长由 10m 增加至 30m 时，车辆轮轨的最大垂向作用力由 150.0kN 减小至 87.30kN，车体垂向振动加速度最大值由 0.65m/s^2 减小至 0.52m/s^2，车体垂向稳定性指标由 2.18 减小至 1.80，均小于稳定性指标极限值 3.0。

通过数据拟合得到车辆轮轨作用力、车体振动加速度和稳定性指标与冻胀波长之间的定量关系，如图 3 所示，均符合指数降低变化关系。

Copyright © 2024 by authors and Viser Technology Pte. Ltd.



（a）轮轨的最大垂向作用力



（b）车体垂向振动速度和稳定性指标

图 3 不同冻胀波长的车辆动力响应指标变化规律

2.3 不同冻胀波数的车辆动力响应

考虑到实际路基冻胀作用均为多波冻胀，因此，对于不同冻胀波数的车辆动力响应，主要分析工况设置冻胀波数分别为 1、2、3、4 和 5，分析不同冻胀波数对轮轨作用力、车体振动加速度和稳定性指标的影响。根据不同冻胀波数的车辆动力响应结果，可以得到冻胀波数对轮轨垂向作用力变化趋势基本不产生影响，而对于车体最大垂向加速度，随着冻胀波数的增加，车体最大垂向加速度先增加后保持不变，冻胀波数由 1 增加到 2 时，车体最大垂向加速度由 0.58m/s^{2}增大至 1.04m/s^2，冻胀波数继续增大对车体最大垂向加速度不再产生影响。随着冻胀波数的增加，车体垂向稳定性指标也逐渐增大，当冻胀波数由 1 增大至 5 时，车体垂向稳定性指标由 2.21 增加至 2.90，均小于稳定性指标极限值 3.0。通过数据拟合得到车体垂向稳定性指标与冻胀波数之间的定量关系，如图 4 所示，符合指数增大变化关系。

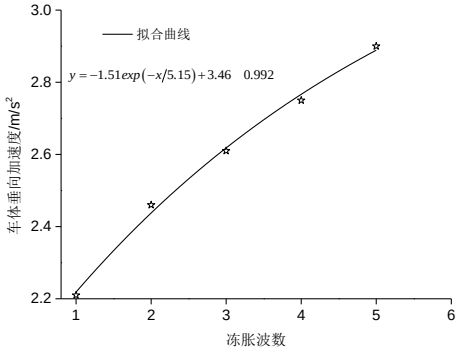


图 4 不同冻胀波长的车辆动力响应指标变化规律

3 结论

基于 CRTSⅢ型板式无砟轨道热力耦合数值分析模型，研究不同冻胀波长、冻胀量和冻胀波数对车辆动力响应的影响，主要研究结论包括：（1）随着冻胀量的增大，车辆轮轨的最大垂向作用力线性增大，车体垂向振动加速度也逐渐增大，车体垂向稳定性指标由 1.70 指数增大至 2.56，但均小于稳定性指标极限值 3.0，冻胀量越大，高速列车的运行稳定性越差。（2）当冻胀波长由 10m 增加至 30m 时，车辆轮轨的最大垂向作用力由 150.0kN 减小至 87.30kN，车体垂向振动加速度最大值由 0.65m/s^{2}减小至 0.52m/s^2，车体垂向稳定性指标由 2.18 减小至 1.80，均小于稳定性指标极限值 3.0。（3）冻胀波数对轮轨垂向作用力变化趋势基本不产生影响，车体最大垂向加速度先增加后保持不变，冻胀波数＞2 时，冻胀波数继续增大对车体最大垂向加速度不再产生影响。车体垂向稳定性指标随冻胀波数增加而增大。

[参考文献]

[1]张青波,张正义,曹太平.建设期与运营期铁路路基冻胀的特征[J].铁道建筑,2020,60(11):93-97.
[2]李宁,徐彬,陈飞熊.冻土路基温度场、变形场和应力场的耦合分析[J].中国公路学报,2006(3):1-7.
[3]蒙富佳,唐先习,刘博,等.路基冻胀对高速列车-轨道耦合系统动力特性的影响[J].科学技术与工程,2021,21(8):3310-3317.
[4]徐新玉,崔建荣.路基冻胀对 CRTSⅢ型板式无砟轨道受力和变形的影响研究[J].铁道标准设计,2020,64(11):36-39.
[5]林士财.路基冻胀-融化-沉降循环作用下高速铁路板式无砟轨道伤损演化与变形分析[J].铁道标准设计,2020,64(8):20-26.
[6]张鲁顺,赵国堂.基于高速铁路路基冻胀的轮轨动力响应研究[J].振动与冲击,2020,39(1):8-14.
[7]徐浩,蔡文锋,王平.路基冻胀对 CRTSⅢ型板式轨道变形的影响研究[J].铁道工程学报,2019,36(10):27-32.
[8]向俊,林士财,余翠英,等.路基冻胀—融化——沉降循环作用下板式无砟轨道受力与变形分析[J].中南大学学报(自然科学版),2019,50(8):2043-2052.
[9]高建敏,郭毅,郭宇.高速铁路路基不均匀冻胀变形对轮轨系统的动力影响研究[J].铁道学报,2019,41(9):94-102.
[10]杨国涛,高亮,刘秀波,等.基于动力分析的 CRTSⅢ板式无砟轨道路基冻胀控制标准研究[J].铁道学报,2017,39(10):110-117.

作者简介：舒承兴（1979—），男，本科，2015 年毕业于西南交通大学，现任副高级工程师，公司总经济师，主要从事隧道与地下工程施工方面研究工作。

Copyright © 2024 by authors and Viser Technology Pte. Ltd.