

全行驶状态下虚拟轨道列车的动载及道路友好特性

王承萍¹, 张济民¹, 周和超¹, 薛兆¹, 梅名苏¹, 陆海英²

(1. 同济大学铁道与城市轨道交通研究院, 上海 201800; 2. 中车长客股份国家轨道客车工程研究中心 转向架研发部, 吉林 长春 130062)

摘要: 为分析虚拟轨道列车在站间全行驶状态下(牵引、匀速、制动)的动载特性和道路友好性, 基于车辆动力学、轮胎动力学、非线性动力学等理论, 构建了随机路面激励下的虚拟轨道列车动力学模型, 该模型考虑了车辆之间的耦合作用和轮胎-路面的相互作用, 并对该动力学模型进行了验证。通过理论分析和数值计算, 对虚拟轨道列车在站间全行驶状态下的动载特性和道路友好性进行了探究, 同时分析了运行速度、路面等级和加/减速度的影响。结果表明: 全行驶状态下的各轮纵向力趋于稳定值, 牵引和制动状态下大小相等, 方向相反, 匀速状态下趋于零。牵引状态下车辆 1 前轴垂向动载荷均方根值最大, 而制动状态下车辆 3 后轴最大。相较于牵引和制动状态, 匀速状态下的道路友好性更优。垂向动载荷均方根值和道路友好性均与运行速度、加/减速度均呈正相关, 与路面等级呈负相关。研究内容能够为虚拟轨道列车的运行模式提供建议以提高运行效率, 同时, 能够为沥青路面的选型提供指导以减缓道路损坏。

关键词: 虚拟轨道列车; 全行驶状态; 动载特性; 道路友好性
中图分类号: U271; U461 **文献标志码:** A

Dynamic Load Characteristics and Road Friendliness of Virtual Track Train in Full Running Conditions

WANG Chengping¹, ZHANG Jimin¹, ZHOU Hechao¹,
XUE Zhao¹, MEI Mingsu¹, LU Haiying²

(1. Institute of Rail Transit, Tongji University, Shanghai 201800, China; 2. China Railway Rolling Stock (CRRC) Changchun Rail Bus Co., Ltd., Jilin 130062, Changchun, China)

Abstract: A dynamics model of the virtual track train was developed based on the theories of vehicle, tire and nonlinear dynamics. The coupling between vehicles and the tire-road interaction were also considered in the virtual track train dynamics model. Meanwhile, the correctness of the dynamics

model was verified by field tests. The dynamic load characteristics and road friendliness of the virtual track train in full running conditions between stations were investigated through theoretical analysis and numerical calculations. In addition, the effects of running speed, road grade and acceleration/deceleration were also analyzed. The results indicate that the longitudinal force of each tire in the full running condition is constant. The longitudinal force is equal in magnitude and opposite in direction in the traction and braking conditions, and is zero in the uniform condition. In the traction condition, the root means square (RMS) of the vertical dynamic load on the front axle of Vehicle 1 is the largest, while in the braking condition, the rear axle of Vehicle 3 is the largest. The road friendliness is better in the uniform condition compared with that in the traction condition and braking condition. The RMS of vertical dynamic load and road friendliness are all positively correlated with running speed, acceleration/deceleration, and negatively correlated with road grade. This paper can provide recommendations for the operation mode of the virtual track train to improve operation efficiency, and can provide guidance for the selection of asphalt pavement to reduce road damage.

Key words: virtual track train; full running conditions; dynamic load characteristics; road friendliness

虚拟轨道列车作为一种新型的城市轨道交通工具, 兼具轨道车辆和道路车辆的双重属性, 能够在一定程度上缓解因城市道路的饱和及居民生活水平要求的提高而导致的城市交通系统压力^[1-3]。

学者们为探究车辆在不同运行状态下的振动特性和道路友好性开展了大量研究。Yin 等^[4]构建了列车的三维动力学模型, 评估了匀速、牵引和制动状

收稿日期: 2021-07-14

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFB1201603-08)

第一作者: 王承萍(1993—), 女, 博士生, 主要研究方向为车辆动力学、道路动力学。

E-mail: wangchengping@tongji.edu.cn

通信作者: 张济民(1969—), 男, 教授, 工学博士, 主要研究方向为车辆动力学、机电一体化、道路工程。

E-mail: zjm2011@tongji.edu.cn



论文
拓展
介绍

态下的车辆振动特性。为探究城市重型公共汽车在匀速状态下的加速度振动特性,进而分析舒适性指标,Nguyen等^[5]在Matlab/Simulink中开发了多自由度的汽车动力学模型,评估了路面等级对加速度振动特性的影响。李金辉等^[6]构建了三轴带平衡悬架的汽车动力学模型和路面非平稳随机激励时域模型,对牵引和制动状态下重型汽车轮胎的动载特性进行分析。Zhou等^[7]开发了一种半主动空气悬架系统的半挂汽车动力学模型,对匀速状态下的动载特性进行了分析。Nguyen等^[8]提出了重型卡车的非线性动力学模型,以评估匀速行驶状态下重型卡车平顺性和道路友好性。刘祥银等^[9]集成了一个双轮辙激励的空间域路面车辆动力学模型,对车辆轮胎的动载变化规律进行了计算和分析。刘大维等^[10]创建了三维随机路面激励下的重型车辆动力学模型,以探究在三维空间域路面激励下的道路友好性。He等^[11]利用Adams建立了半主动空气悬架车辆动力学模型来研究匀速状态下的道路友好性。

上述研究中,大部分研究是针对车辆在某一运行状态(匀速、牵引、制动)下的车辆振动特性或道路友好性进行研究,然而,将车辆运行状态与道路特点相结合来分析车辆振动特性和道路友好性的研究较少,且对运行状态的分析较为单一。为便于分析,将车辆在站间所历经的三种运行状态定义为全行驶状态,第一阶段为牵引阶段,以恒定的加速度使速度由零达到某一速度;第二阶段为匀速阶段;第三阶段为制动阶段,以恒定的减速度使速度减到零。由于虚拟轨道列车在固定的道路上单向运行,且车站间距较短,导致列车在站间运行时需要频繁的牵引、匀速、制动,即虚拟轨道列车在站间的各个运行状态与道路之间保持一一对应的关系。因此,对虚拟轨道列车在全行驶状态下的动载特性和道路友好性进行研究具有重要意义。

本文将运行道路和对应的运行状态相结合,对虚拟轨道列车在站间全行驶状态下的动载特性和道路友好性进行研究。基于动力学理论和达朗贝尔原理,在考虑轮胎-路面之间的相互作用和车辆之间的耦合作用基础上,构建了随机路面激励下的虚拟轨道列车动力学模型,并对动力学模型进行了验证。通过数值计算,对牵引、匀速、制动状态下的动载特性和道路友好性进行分析,并探究运行速度、路面等级和加/减速度对动载特性和道路友好性的影响。

1 虚拟轨道列车三维动力学模型

为分析虚拟轨道列车在全行驶状态下的动载特性和道路友好性。基于车辆动力学理论、轮胎动力学理论及非线性动力学理论,考虑轮胎-道路之间的相互作用及车辆之间的耦合作用,搭建了三节编组的虚拟轨道列车动力学模型,如图1所示。该动力学模型由三节车辆铰接而成,车辆之间通过具有刚度和阻尼的车钩装置连接;每辆车由车体和4个轮胎构成,车辆和相应的轮胎之间通过具有刚度和阻尼的独立悬架装置连接;橡胶轮胎选取魔术公式模型^[12]以描述其动态特性;为实现整车的全轮驱动,每个轮胎均安装有电机控制器。车辆沿着速度方向编号,分别命名为车辆1、车辆2、车辆3。车辆1的左侧轮胎编号为轮胎11和轮胎13,右侧轮胎编号为轮胎12和轮胎14,其余车辆和对应轮胎的编号方式相同。

图1中, X_c 、 Y_c 、 Z_c 、 ϕ_c 、 φ_c 、 β_c 分别表示车辆的纵向、横向、垂向、侧滚、摇头和点头; X_w 、 Y_w 、 Z_w 、 β_w 分别表示车轮的纵向、横向、垂向和点头; M_c 、 M_w 分别表示车辆和车轮的质量; I_{cx} 、 I_{cy} 、 I_{cz} 分别表示车辆绕X、Y和Z轴的转动惯量; I_{wy} 表示轮胎绕Y轴的转动惯量; K_{sr} 、 K_{sy} 、 K_{sz} 分别表示独立悬架装置的纵向、横向和垂向刚度; C_{sr} 、 C_{sy} 、 C_{sz} 分别表示独立悬架装置的纵向、横向和垂向阻尼; K_{cr} 、 K_{cy} 、 K_{cz} 分别表示车钩装置的纵向、横向和垂向刚度; C_{cr} 、 C_{cy} 、 C_{cz} 分别表示车钩装置的纵向、横向和垂向阻尼; H 为车辆质心与轮胎质心之间的垂向距离; B_w 为车辆质心与轮胎质心之间的横向距离; L 为轮距的一半; L_{cc} 为相邻车辆质心的纵向距离; v 为行驶速度。 i 表示车体编号,为1,2,3; j 表示车轮编号,为1,2,3,4。

虚拟轨道列车共有15个刚体,其中,车体具有纵向、横向、垂向、侧滚、摇头和点头6个自由度,车轮具有纵向、横向、垂向和点头4个自由度,因此,虚拟轨道列车动力学模型具备66个自由度,如表1所示。虚拟轨道列车的具体参数由项目合作方提供(见表2)。

根据达朗贝尔原理,车辆的动力学方程由式(1)~(6)给出。

$$M_c \ddot{X}_{ci} = F_{xwci1} + F_{xwci2} + F_{xwci3} + F_{xwci4} + F_{xcai(i+1)} \quad (1)$$

$$M_c \ddot{Y}_{ci} = F_{ywci1} + F_{ywci2} + F_{ywci3} + F_{ywci4} + F_{ycai(i+1)} \quad (2)$$

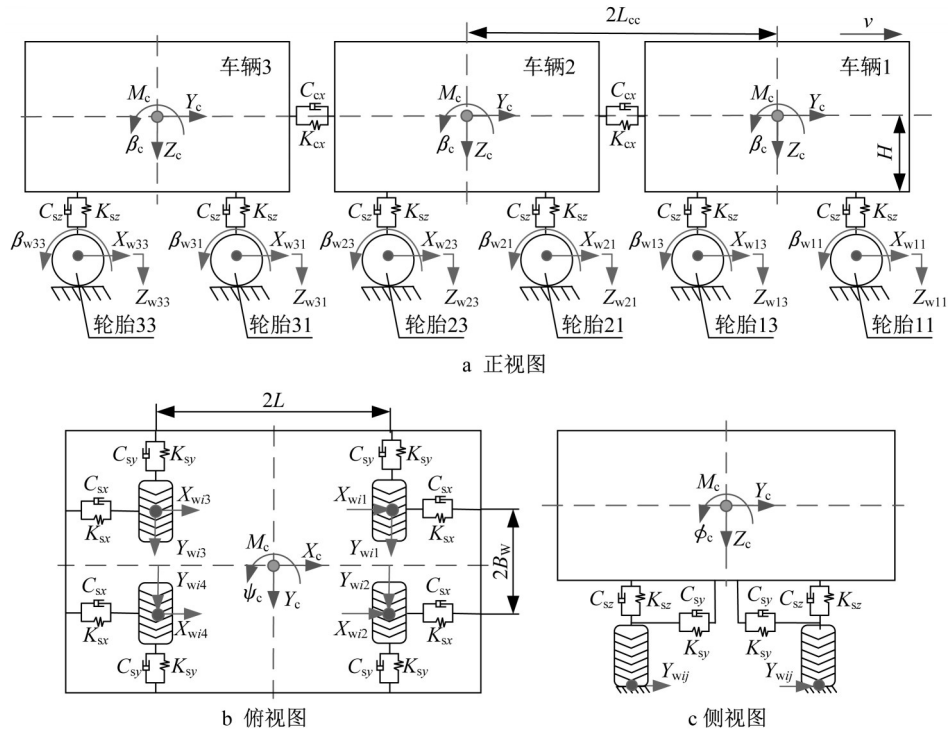


图 1 虚拟轨道列车动力学模型

Fig. 1 Virtual track train dynamics model

表 1 虚拟轨道列车动力学模型的自由度

Tab. 1 Degrees of freedom of virtual track train dynamics model

组成部分	纵向	横向	垂向	侧滚	点头	摇头
车体	X_{ci}	Y_{ci}	Z_{ci}	ϕ_{ci}	β_{ci}	ψ_{ci}
车轮	X_{wij}	Y_{wij}	Z_{wij}		β_{wij}	

$$M_c \ddot{Z}_{ci} = -F_{zwc1} - F_{zwc2} - F_{zwc3} - F_{zwc4} + M_c g + F_{zca(i+1)} \quad (3)$$

$$I_{cx} \ddot{\phi}_{ci} = -(F_{ywc1} + F_{ywc2} + F_{ywc3} + F_{ywc4})H + (-F_{zwc1} + F_{zwc2} - F_{zwc3} + F_{zwc4})B_w \quad (4)$$

$$I_{cy} \ddot{\beta}_{ci} = (-F_{zwc1} - F_{zwc2} + F_{zwc3} + F_{zwc4})L + F_{zca(i+1)}L_{cc} - (F_{xwc1} + F_{xwc2} + F_{xwc3} + F_{xwc4})H \quad (5)$$

$$I_{cc} \ddot{\psi}_{ci} = (F_{ywc1} + F_{ywc2} - F_{ywc3} - F_{ywc4})L + F_{yca(i+1)}L_{cc} + (F_{xwc1} - F_{xwc2} + F_{xwc3} - F_{xwc4})B_w \quad (6)$$

车轮的动力学方程由式(7)–(10)给出。

$$M_w \ddot{X}_{cij} = -F_{xcw} - F_{xrw} \quad (7)$$

$$M_w \ddot{Y}_{cij} = -F_{ycw} + F_{yrw} \quad (8)$$

$$M_w \ddot{Z}_{cij} = -F_{zwc} + F_{zrw} + M_w g \quad (9)$$

$$I_{wy} \ddot{\beta}_{wij} = T_y - T_r + F_{xrw} R \quad (10)$$

式(1)–(10)中: F_{xca} 、 F_{yca} 、 F_{zca} 分别为车辆之间的纵

表 2 虚拟轨道列车参数

Tab. 2 Parameters of virtual track train

参数	数值	参数	数值
M_c/kg	9 660	M_w/kg	75
$I_{cx}/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	85 930	$I_{wx}/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	6
$I_{cy}/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	177 992	$I_{wy}/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	11
$I_{cz}/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	122 940	$I_{wz}/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	6
$K_{sx}/(\text{N}\cdot\text{m}^{-1})$	3×10^5	$K_{cx}/(\text{N}\cdot\text{m}^{-1})$	1×10^7
$K_{sy}/(\text{N}\cdot\text{m}^{-1})$	3×10^5	$K_{cy}/(\text{N}\cdot\text{m}^{-1})$	1×10^7
$K_{sz}/(\text{N}\cdot\text{m}^{-1})$	7×10^5	$K_{cz}/(\text{N}\cdot\text{m}^{-1})$	5×10^6
$C_{sx}/(\text{Ns}\cdot\text{m}^{-1})$	1 500	$C_{cx}/(\text{Ns}\cdot\text{m}^{-1})$	5×10^5
$C_{sy}/(\text{Ns}\cdot\text{m}^{-1})$	1 500	$C_{cy}/(\text{Ns}\cdot\text{m}^{-1})$	5×10^5
$C_{sz}/(\text{Ns}\cdot\text{m}^{-1})$	3 500	$C_{cz}/(\text{Ns}\cdot\text{m}^{-1})$	5×10^5
B/m	5.2	L_{cc}/m	4.85
L/m	2.65	H/m	0.35
轮胎规格		385/65 R22.5	

向力、横向力和垂向力; F_{xwc} 、 F_{ywc} 、 F_{zwc} 分别为车辆与轮胎之间的纵向力、横向力和垂向力; F_{xrw} 、 F_{yrw} 、 F_{zrw} 分别为车体对车轮纵向力、横向力、垂向力;

F_{xrw} 、 $F_{y rw}$ 、 $F_{z rw}$ 分别为道路对车轮纵向力、横向力、垂向力; T_r 为道路对车轮的阻力矩; T_y 为牵引或制动转矩。

2 考虑轮辙相干性的路面不平度

路面不平度通常采用功率谱密度函数来描述其统计特性,中国标准^[13]将路面不平度分为A至H级,共8个等级。车辆运行时受到路面激励所产生的频率为 $f=vn$, n 为路面不平度的空间频率。根据轮胎与路面激励的时间频率范围 (f_1, f_2) , 得到路面不平度功率谱密度的有效空间频率范围 (n_1, n_2) 。路面不平度功率谱密度函数表达式如下:

$$G_q(n) = \begin{cases} G_q(n_0) \left(\frac{n}{n_0}\right)^{-W}, & n \in (n_1, n_2) \\ 0, & n \notin (n_1, n_2) \end{cases} \quad (11)$$

式中: n 为空间频率,为波长的倒数; n_0 为参考空间频率,取 $n_0=0.1 \text{ m}^{-1}$; $G_q(n_0)$ 为参考空间频率 n_0 下的路面功率谱密度值,称为路面不平度系数; W 为频率指数,一般取 $W=2$; $G_q(n)$ 为功率谱密度。

文献[14]指出傅里叶逆变换法的速度更快、适应性更强、理论推导更为严谨,被认为是一种较为理想的模拟方法。因此,本文采用傅里叶逆变换法来模拟随机路面不平度,在此基础上,将左、右侧车轮相位角的相干性^[15-16]纳入考虑,模拟路面不平度。图2为B级左、右侧路面不平度。图3为B级左、右侧功率谱密度函数与标准功率谱密度函数的对比(横纵坐标均为对数表达)。综上,路面不平度的模拟值与标准值拟合效果较好,验证了随机路面不平度模型的正确性。其他路面等级均可得到相同的结论。

3 模型验证

采用无线加速度传感器对虚拟轨道列车的车辆1的垂向加速度进行测试,无线加速度传感器安装位置如图4所示。运行速度和路面不平度分别设为 $30 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 和B级以确保仿真计算与实际运行工况的一致性。

图5给出了仿真和试验的垂向加速度时域响应。仿真与试验加速度的幅值变化范围均在 $-1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2} \sim +1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ 。图6为仿真与试验的垂向加速度功率谱分析(横、纵坐标均取对数)。仿真与试验的垂

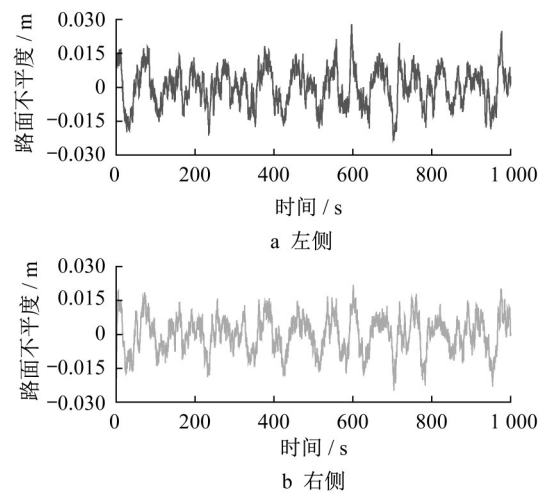


图2 B级路面不平度

Fig. 2 B-grade pavement

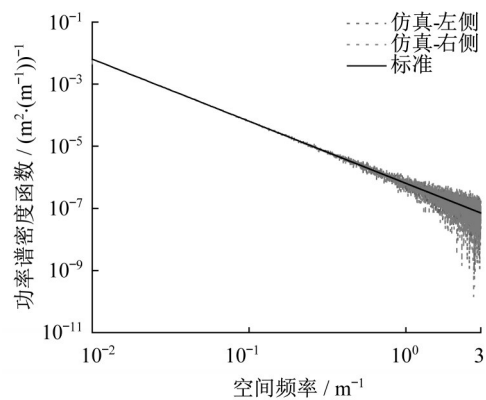


图3 B级路面功率谱密度

Fig. 3 Power spectral density of B-grade pavement

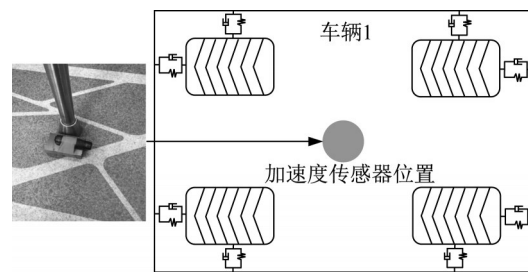


图4 加速度传感器安装位置

Fig. 4 Position of accelerometers

向加速度振动频率主要集中在 10 Hz 以内的低频范围内,且两者均在频率为 1.996 Hz 处出现能量峰值;高频区的数据主要是由于数值计算中引入的噪声数据,其能量很小,可以忽略不计。此外,由于仿真与试验的路面不平度存在差异,导致仿真结果与试验结果不完全一致。但仿真与试验的垂向加速度变化趋势吻合较好。由上述分析可知,无论是在时域还是在频域,仿真与试验垂向加速度总体变化趋势都

拟合得较好。因此,从现场试验的角度验证了所建立的虚拟轨道列车动力学模型的正确性。

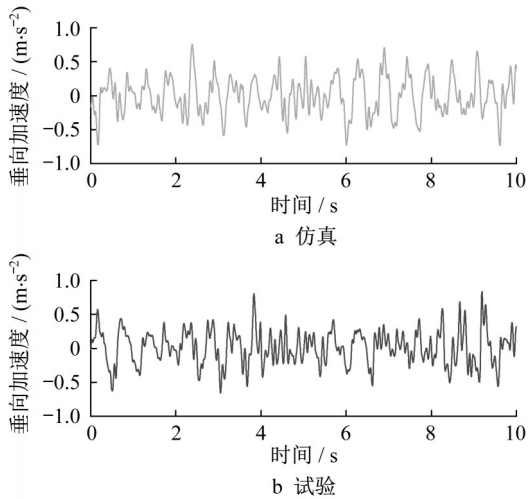


图5 试验与仿真的加速度时域曲线

Fig. 5 Vertical acceleration time-domain curve of test and simulation

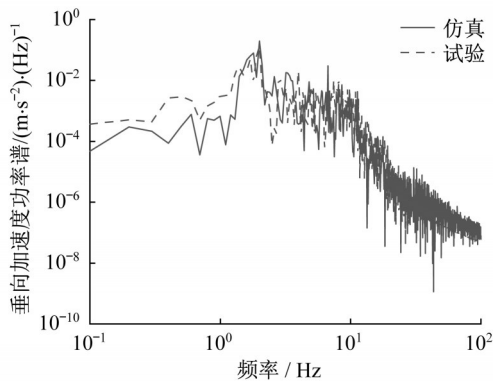


图6 仿真与试验的加速度功率谱

Fig. 6 Vertical acceleration power spectral density for test and simulation

4 结果分析

动载特性主要选取各轮胎的垂向动载和纵向动载。道路友好性是指轮胎在路面上运行时,轮胎动载荷所导致的路面损伤程度。Cole和Cebon^[17]在四次幂定律的基础上,考虑轮胎动载荷的空间重复性,提出95百分位四次幂和力来评估路面损伤程度,并将其定义为道路损伤系数 J 。道路损伤系数 J 的计算公式如下:

$$J = 1 + \frac{1.65\sigma_{F_w^4}}{m_{F_w^4}} \quad (12)$$

式中: F_w^4 为车轮动载荷的四次幂和力; $\sigma_{F_w^4}$ 为 F_w^4 的

标准差; $m_{F_w^4}$ 为 F_w^4 的均值。

4.1 全行驶状态

站间全行驶状态主要包括三个状态(按顺序描述):第一阶段为牵引阶段,加速度为 $+2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$,速度从0加速到 $70 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$;第二阶段为匀速阶段,速度为 $70 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$;第三阶段为制动阶段,减速度为 $-2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$,速度从 $70 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 减速到0。路面等级设置为B级,路面滚动阻力系数和地面附着力系数的设置见文献[18]。轮胎动载荷是轮胎垂向载荷减去其均值得到。为便于分析,均选取右侧轮胎进行分析,左侧轮胎变化趋势类似。

从图7可知,车辆在0~9.44 s内由0匀加速到 $70 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$;在9.44~19.44 s内保持 $70 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 的速度匀速运行;在19.44~28.88 s内由 $70 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 匀减速到0。由于虚拟轨道列车采用全轮驱动的方式,在各运行状态下,各个轮胎的纵向力趋于定值。其中,牵引与制动状态下的纵向力大小相等,方向相反,绝对值为8.3 kN,匀速状态下纵向力趋近于零。

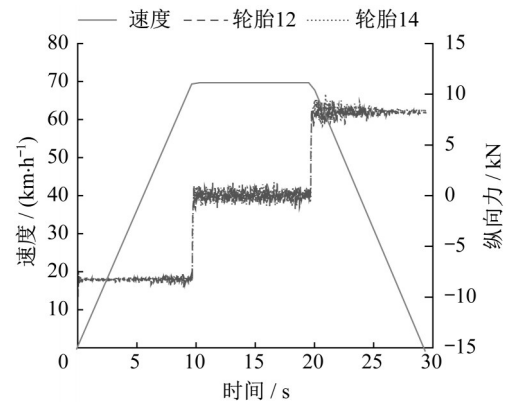


图7 全行驶状态下的纵向力

Fig. 7 Longitudinal force in full running conditions

全行驶状态下各轮胎的垂向动载荷均方根值如表3所示。在列车惯性作用下,牵引状态下,轮胎12的垂向动载荷均方根值最大,制动状态下,轮胎34的垂向动载荷均方根值最大。除轮胎12和轮胎34外,垂向动载荷均方根值在匀速状态大于牵引、制动状态,牵引和制动状态差异不明显。

图8表明了整车在全行驶状态下的道路损伤系数。其中,相较于牵引与制动状态,匀速状态下的道路损伤系数更小,牵引与制动状态下的道路损伤系数差异较小。由此表明,匀速状态下的道路友好性优于牵引状态和制动状态,而牵引和制动状态的道路友好性相似。

表3 全行驶状态的垂向动载荷均方根值

Tab. 3 Root mean square of vertical force in full running conditions

轮胎编号	牵引	匀速	制动
轮胎12	2.02	1.57	1.76
轮胎14	1.63	1.71	1.60
轮胎22	1.47	1.58	1.42
轮胎24	1.59	1.60	1.60
轮胎32	1.51	1.68	1.51
轮胎34	1.76	1.56	1.98

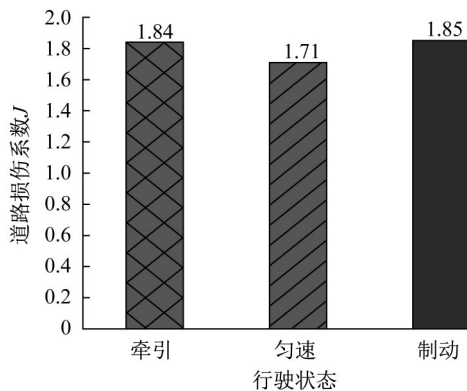


图8 全行驶状态下的道路损伤系数

Fig. 8 Road damage coefficient in full running conditions

4.2 匀速状态

虚拟轨道列车在匀速状态下的动载特性和道路友好性同运行速度、路面等级密切相关。探究运行速度的影响时,运行速度分别设置为10、30、50、70 $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$,路面等级为B级;探究路面等级的影响时,路面等级分别设置为A级、B级、C级,运行速度为70 $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ 。

由图9可以看出,运行速度的增加将诱发车辆各部件的剧烈振动,使得轮胎垂向力的增加,从而导致垂向动载荷均方根值增大。当运行速度由10 $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ 增加到70 $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ 时,垂向动载荷均方根值最大增大了2.4倍。由图10可以看出,路面等级的降低代表路面扰动的增大,使车辆各部件振动加剧,进而导致垂向动载荷均方根值增大。当路面等级由A级降低到C级时,垂向动载荷均方根值最大增大了6.8倍。此外,结合图9和图10可知,轮胎12和轮胎34垂向动载荷均方根相差较小,与此变化趋势类似的还有轮胎14和轮胎32、轮胎22和轮胎24,垂向动载荷的均方根值在匀速状态下关于列车中心呈对称分布的现象。由于车辆1和车辆3在纵向方向几何中心与重心之间存在偏差,且重心位置靠近轮胎12和轮胎34,各轮的垂向动载荷均方根值的分布规律有:

轮胎14和轮胎32最大,轮胎22和轮胎24次之,轮胎12和轮胎34最小。

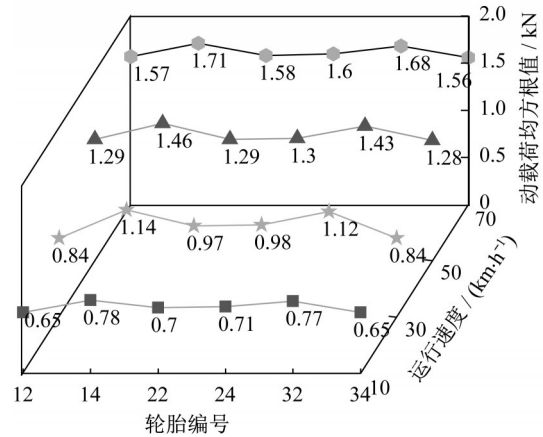


图9 匀速状态下运行速度对垂向动载荷均方根值的影响

Fig. 9 Effect of running speed on the RMS of vertical dynamic load in uniform condition

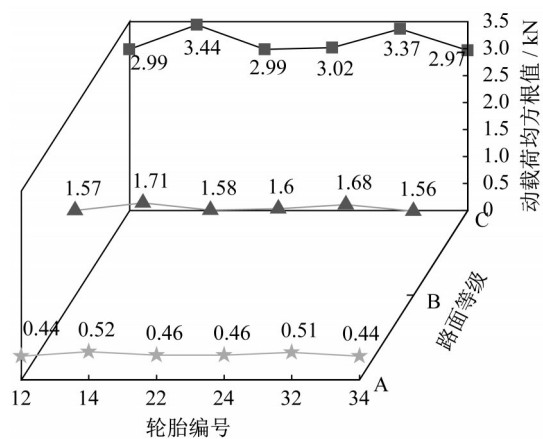


图10 匀速状态下路面等级对动载荷均方根值的影响

Fig. 10 Effect of road grade on the RMS of vertical dynamic load in uniform condition

图11表明了匀速状态下运行速度和路面等级对道路损伤系数的关系。路面等级的降低和运行速度的增加将导致道路损伤系数的增大。当运行速度为70 $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ 时,路面等级由A级下降到C级,道路损伤系数从1.65增加到1.86,增加了12%。当路面等级为C级时,道路损伤系数在70 $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ 时相较于10 $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ 时增大8%。

4.3 牵引/制动状态

根据4.1节的结果可知牵引与制动状态下的动载特性和道路友好性比较相似。以牵引状态为例,探究加速度的影响时,加速度分别设置为1、2、3、4 $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$,路面等级为B级;探究路面等级的影响时,路面等级分别设置为A级、B级、C级,加速度为2 $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ 。

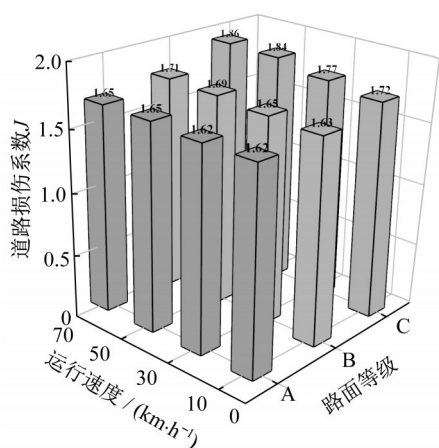


图 11 匀速状态下运行速度和路面等级对道路损伤系数的影响

Fig. 11 Effect of running speed and road grade on road damage coefficient in uniform condition

牵引状态下加速度与垂向动载荷的关系如图 12 所示,垂向动载荷均方根值随着牵引加速度的增加而增大,4 m·s⁻²下的动载荷均方根值比 1 m·s⁻²下的增加约 2 倍。路面等级与垂向动载荷均方根值的关系如图 13 所示,垂向动载荷均方根值随着路面等级的降低而增大,C 级路面激励下的动载荷均方根值比 A 级路面激励下的增加约 5 倍。此外,由于相邻车辆在纵向方向的相互耦合作用,致使垂向动载荷均方根值在各轮的分布规律与匀速状态有所区别,具体表现在:轮胎 12 和轮胎 34 最大,轮胎 14 和轮胎 32、轮胎 22 和轮胎 24 较为接近。

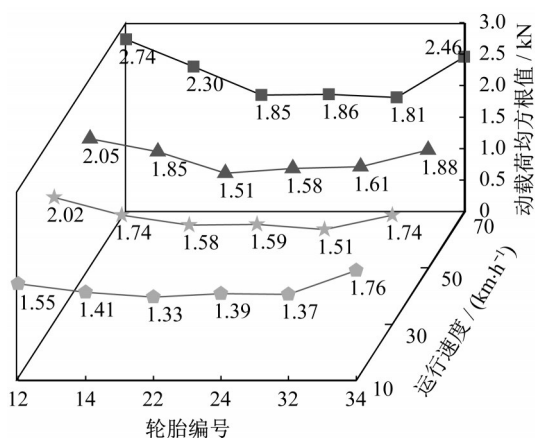


图 12 牵引状态下加速度对垂向动载荷均方根值的影响

图 14 显示了牵引状态下加速度、路面等级与道路损伤系数的关系。道路损伤系数与加速度呈现正相关,即道路损伤系数随着加速度的增加而增加。

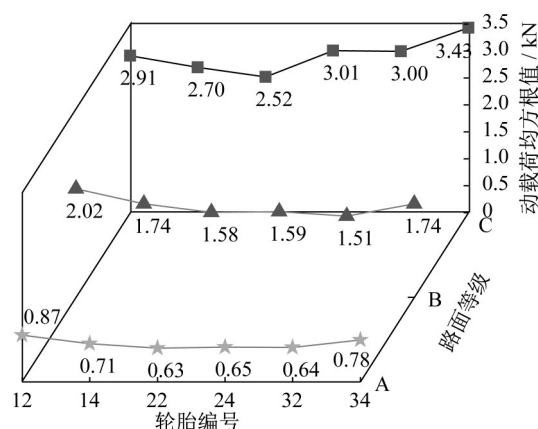


图 13 牵引状态下路面等级对垂向动载荷均方根值的影响

其中,路面等级为 C 级时,加速度由 1 m·s⁻² 增加到 4 m·s⁻² 时,道路损伤系数增长 25%。道路损伤系数与路面等级呈现负相关,即道路损伤系数随着路面等级的降低而增加。当加速度为 4 m·s⁻² 时,C 级相较于 A 级,道路损伤系数增加了 11%。

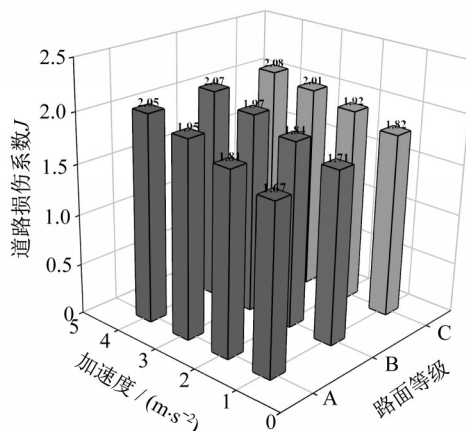


图 14 牵引加速度和路面等级对道路损伤系数的影响

5 结论

本文对全行驶状态(牵引、匀速、制动)下的虚拟轨道列车的动载特性和道路友好性进行探究,根据理论分析和数值推导,构建了虚拟轨道列车动力学模型,并对该动力学模型进行了验证,并评估了关键因素对动载特性和道路友好性影响。结论如下:

- (1) 车轮纵向力在牵引与制动状态下大小相等,方向相反,在匀速状态下趋于零。由于列车的惯性作用,牵引时,车辆 1 前轴的垂向动载荷均方根值最大,而制

动时车辆3后轴的最大。

(2)道路友好性在匀速状态下明显优于牵引和制动状态,牵引和制动状态下的差异较小。运行速度和加速度/减速度的增加、道路等级的降低均会使道路友好性变差。

(3)运行速度和加/减速度的增加、路面等级的降低均会导致列车更加剧烈的振动,使垂向动载荷增大。垂向动载荷均方根值与运行速度、加/减速度均呈正相关,与路面等级呈负相关。

(4)匀速状态下各轴的垂向动载荷均方根值关于列车中心对称,且变化规律为轮胎14和轮胎32最大,轮胎22和轮胎24次之,轮胎12和轮胎34最小。

作者贡献声明:

王承萍:文献综述,方程推导,模型构建,论文写作。
张济民:研究内容设定,方程推导,论文写作与修改。
周和超:研究内容设定,论文修改。
薛兆:方程推导,论文写作与修改。
梅明苏:论文修改,文献总结。
陆海英:模型构建。

参考文献:

- [1] SU Y S, LIU X, LI X J. Research on traffic congestion based on system dynamics: the case of Chongqing, China [J]. Complexity, 2020, 2020: 1.
- [2] 张玉娇. 中运量城市轨道交通系统及其在我国的适用性研究[D]. 北京:北京交通大学, 2020.
ZHANG Yujiao. Research on the urban mass transit system and its applicability in my country [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2020.
- [3] 王承萍,张济民,周和超,等. 虚拟轨道列车作用下黏弹性路面响应及变形分析[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2021, 49(1): 60.
WANG Chengping, ZHANG Jimin, ZHOU Hechao. Analysis of viscoelastic pavement response and deformation under the action of virtual rail train [J]. Journal of Tongji University (Natural Science Edition), 2021, 49(1): 60.
- [4] YIN Z H, Zhang J Y, LU H Y, *et al.* Dynamics modeling and analysis of a four-wheel independent motor-drive virtual-track train [J]. Journal of Multi-body Dynamics, 2021, 235(1): 134.
- [5] NGUYEN T, SWOLANA P, LECHNER B, *et al.* An experimental comparison of mathematical heavy-duty city bus models to evaluate passenger ride comfort induced by road roughness [J]. Mathematical and Computer Modelling of Dynamical Systems, 2021, 27(1): 203.
- [6] 李金辉,徐立友,张柯柯. 非平稳行驶条件下重型汽车轮胎动载特性分析[J]. 振动与冲击, 2020, 39(1): 109.
LI Jinhui, XU Liyou, ZHANG Keke. Analysis of dynamic load characteristics of heavy-duty vehicle tires under non-steady driving conditions [J]. Vibration and Shock, 2020, 39(1): 109.
- [7] ZHOU H X, WU X Y, WANG P L. Control of the air suspension system of semi-trailer trucks to enhance the road friendliness[J]. Vibroengineering Procedia, 2020, 35: 13.
- [8] NGUYEN V L, NGUYEN K T. Evaluating the effect of the working conditions on the ride comfort and road friendliness of the heavy truck [J]. Vibroengineering Procedia, 2018, 21(6):83.
- [9] 刘祥银,陈洋,高攀,等. 双轮辙激励下多轴重型车辆动载特性仿真分析[J]. 振动与冲击, 2015, 34(13): 48.
LIU Xiangyin, CHEN Yang, GAO Pan, *et al.* Simulation analysis of dynamic load characteristics of multi-axle heavy vehicles under double wheel rutting excitation [J]. Vibration and Shock, 2015, 34(13): 48.
- [10] 刘大维,蒋荣超,陈焕明,等. 重型车辆三维随机路面道路友好性仿真[J]. 农业机械学报, 2012, 43(12): 16.
LIU Dawei, JIANG Rongchao, CHEN Huanming, *et al.* Three-dimensional random pavement road friendliness simulation of heavy vehicles [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2012, 43(12): 16.
- [11] HE Feng, ZHAO Jing, WANG Haoyu. Study on control strategies of semi-active air suspension for heavy vehicles based on road-friendliness[J]. Advanced Materials Research, 2012, 452/453: 328.
- [12] PACEJKA H B, BAKKER E. The magic formula tyre model [J]. Vehicle System Dynamics, 1992, 21(S1): 1.
- [13] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 机械振动 道路路面不平度测量数据报告:GB T 7031—2005[S]. 北京:中国标准出版社,2005.
The General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Mechanical vibration road surface roughness measurement data report: GB T 7031—2005 [S]. Beijing: China Standard Press, 2005.
- [14] 彭佳,何杰,李旭宏,等. 路面不平度随机激励时域模型的仿真比较与评价[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2009, 10(1): 77.
PENG Jia, HE Jie, LI Xuhong, *et al.* Simulation comparison and evaluation of random excitation time domain model of road roughness [J]. Journal of PLA University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2009, 10(1): 77.
- [15] 刘献栋,邓志党,高峰. 基于逆变换的路面不平度仿真研究[J]. 中国公路学报, 2005(1): 126.
LIU Xindong, DENG Zhidang, GAO Feng. Research on Road Roughness Simulation Based on Inverse Transformation [J]. China Journal of Highway and Transport, 2005(1): 126.
- [16] BOGSJÖ K. Coherence of road roughness in left and right wheel-path [J]. Vehicle System Dynamics, 2008, 46(S1): 599.
- [17] COLE D J, CEBON D. Truck suspension design to minimize road damage [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 1996, 210(2): 95.
- [18] WONG J Y. The theory of ground vehicles-4th edition [M]. New Jersey: John Wiley & Sons Inc., 2008.