

三体颗粒对轮胎制动摩擦力时变特性的影响

丁逸宁^{1,2}, 鄢晓宇^{1,2}, 郑瑜煌^{1,2}, 孙浩斌^{1,2}

(1. 福建省智能加工技术及装备重点实验室, 福建 福州 350118;

2. 福建理工大学机械与汽车工程学院, 福建 福州 350118)

摘要: 为探究三体颗粒对轮胎材料-硬质路面制动摩擦力时变特性的影响, 设计了具有弹簧-金属滑块-橡胶传送带结构的三体摩擦试验机, 分析不同载荷与速度下滑块-传送带之间摩擦力的时域与频域特征。结果表明: 摩擦力在传送带速度较大时稳定性更好。低速低载荷时, 三体颗粒介入会导致摩擦力信号频域分布在低频区, 受颗粒影响的滑块在摩擦行为后, 表面粗糙度明显增大。该研究可为三体颗粒影响下的轮胎-路面制动力预测提供参考。

关键词: 摩擦力特性; 颗粒入侵; 制动系统; 摩擦振动

中图分类号: TH117

文献标志码: A

文章编号: 2097-3853(2024)03-0286-05

Influence of three-body particles on time-varying characteristics of tire braking friction force

DING Yining^{1,2}, YAN Xiaoyu^{1,2}, ZHENG Yuhuang^{1,2}, SUN Haobin^{1,2}

(1. Fujian Key Laboratory of Intelligent Machining Technology and Equipment, Fuzhou 350118, China;

2. School of Mechanical and Automotive Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China)

Abstract: In order to explore the effects of three-body particles on the time-varying characteristics of braking friction between tire materials and hard road surfaces, a three-body friction testing machine with a spring-metal slider-rubber conveyor belt structure was designed to analyze the time and frequency domain characteristics of friction between slider and conveyor belt under different loads and speeds. Results show that friction is more stable at higher belt speed. At low speed and low load, the intervention of three-body particles will cause the friction signal frequency domain to be distributed in the low frequency region, and the surface roughness of the slider affected by the particles will increase significantly after the friction behavior. This study can provide reference for tire-road braking force prediction under the influence of three-body particles.

Keywords: friction force characteristics; particle intrusion; braking system; frictional vibration

摩擦副中的三体颗粒主要是摩擦界面产生接触的污染颗粒或磨损颗粒, 三体颗粒如灰尘、泥土等会附着在轮胎表面, 影响轮胎与道路之间的摩擦系数, 导致制动稳定性变差。三体颗粒亦会在轮胎制动时诱发尖锐的摩擦噪声并伴随不稳定车体振动, 导致驾驶安全性变差, 行车舒适性降低, 因此有必要开展三体颗粒对轮胎-路面摩擦力影响的研究。

汤洁等^[1]研究了橡胶减摩抗磨改性方法。施文斌等^[2]对软材料表面“黏-滑”摩擦行为研究, 发现沟槽织构可有效抑制软材料表面“黏-

滑”行为, 降低界面摩擦阻力。Lin 等^[3]设计了摩擦盘-摩擦块结构的试验机并搭建对应的模型, 研究了干摩擦、湿润环境、沙水环境对制动系统非线性行为的影响。Piyush 等^[4]利用销盘试验机研究了高温环境对制动材料摩擦磨损性能的影响。鄢晓宇等^[5]基于制动片切向振动模型引入受限颗粒体摩擦模型, 发现受限颗粒体会引发制动片切向非线性振动。Hichri 等^[6]研究橡胶垫和金属板摩擦界面的侵入效应, 揭示三体颗粒引起的摩擦力不稳定性。以上研究表明, 由于颗粒受限于两表面粗糙峰之间而不是形成较厚的颗粒

收稿日期: 2023-11-08

基金项目: 福建省自然科学基金(2022J05181)

第一作者简介: 丁逸宁(2000—), 男, 江苏苏州人, 硕士研究生, 研究方向: 机械摩擦、摩擦噪声。

通信作者: 鄢晓宇(1994—), 男, 福建南平人, 讲师, 博士, 研究方向: 摩擦学、机械动力学。

层,其接触机制难以被离散元工具预测。与模拟厚颗粒层的摩擦行为相比,三体颗粒在摩擦副中的行为研究更需要准确可靠的实验作为依据。

本文拟探究三体颗粒对轮胎-路面制动摩擦力时变特性的影响。利用并改造传统的弹簧-滑块试验机,通过用滚筒压制的方式将三体颗粒引入摩擦界面,分析其对摩擦力时变特性的影响,为轮胎路面摩擦力特性研究提供实验依据。

1 实验部分

1.1 实验原理与设备

依据弹簧滑块模型,搭建了弹簧-滑块-传送带实验平台,传送带结构在实验中可以实现稳定的单方向摩擦运动。橡胶轮行程有限,故采用橡胶传送带来模拟橡胶轮。

弹簧-滑块-传送带试验机平台包含了传送带、滑块、弹簧连接器、传感器、稳压直流电源、直流电机、直流电机调速器以及数据采集系统,如图1所示。滑块材料为铝块,其硬度与路面硬度相同,尺寸为 $50\text{ mm}\times 50\text{ mm}\times 40\text{ mm}$,抛光至 $R_a=(0.732\pm 0.2)\mu\text{m}$ 。传送带材料由天然橡胶与合成橡胶组成,与汽车轮胎的材料相同。

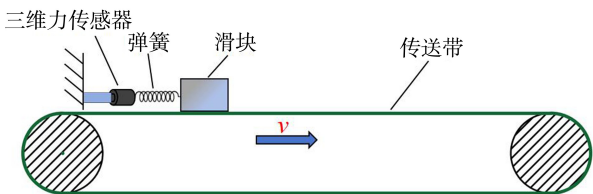


图1 弹簧-滑块-传送带试验机平台原理图

Fig.1 Schematic diagram of spring-slider-conveyor belt testing machine platform

三体颗粒材料为户外道路旁采集的泥土,粒径约 0.25 mm ,成分如表1所示。

1.2 实验方案

在引入三体颗粒的条件下保持室温进行实验,时间为 2 min ,在每组实验前用滚棒压制泥土颗粒到滑块与传送带接触的表面。实验开始时,将传送带以一定的速度运行 3 s 以上,通过和下料口连接的力传感器检测到弹簧伸缩导致的拉压力,得到摩擦力的时变信号。在滑块中心用砝码加载($2, 4\text{ N}$),减小滑块的倾斜程度。实验分别在 $0, 2$ 和 4 N 的载荷下进行,传送带速度分别为 $0.050, 0.125$ 和 0.200 m/s 。在不同载荷下的不同速度测3组实验数据。

表1 泥土主要化学成分

Tab.1 Main chemical components of soil

主要成分	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO
含量/(g·kg ⁻¹)	645	130	67	12
主要成分	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅
含量/(g·kg ⁻¹)	9.8	9.5	5.1	1.1

2 结果与讨论

2.1 三体颗粒介入对摩擦力时频特性的影响

图2为不同载荷下速度与摩擦力的关系,由图可见,随着载荷的增加,摩擦力呈明显的增加趋势,当传送带速度不断增大时,摩擦力呈现出先减小后增大的趋势。误差棒设为每种条件下的3组实验求得的最大平均摩擦力和最小平均摩擦力之差的一半。误差棒的长度随速度增加而减小,可见其在高速作用下摩擦力的稳定性较好。

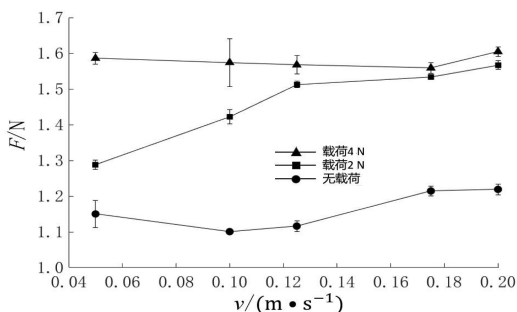


图2 不同载荷下速度与摩擦力的关系

Fig.2 Relationship between velocity and friction force under different loads

图3为无载荷、三体颗粒存在时摩擦力与速度的时变信号图和频谱图,由图3(a1~a3)可见,随着速度的增加,摩擦力信号波动更加剧烈。此外,从图3(b1~b3)中可观察到,主峰频率在 0 Hz 附近的低频范围内,据学者研究^[7],此主频峰值是由滑动方向上刚度所贡献。次峰频率约在 $15\sim 20\text{ Hz}$,由图3(b2~b3)可看出,其存在一些宽频特性,宽频特性会随着速度的增加而增强。

图4为载荷 2 N 、存在三体颗粒时不同速度与摩擦力的时变信号图和频谱图,由图4(a1~a3)可见,随着速度的不断增加,时变信号的波动更为剧烈;且在图4(b1~b3)中,观察到主峰频率约在 0 Hz 附近的低频范围内,次峰频率基本上在 $10\sim 20\text{ Hz}$ 的范围内。从图4(b2)(b3)中可以

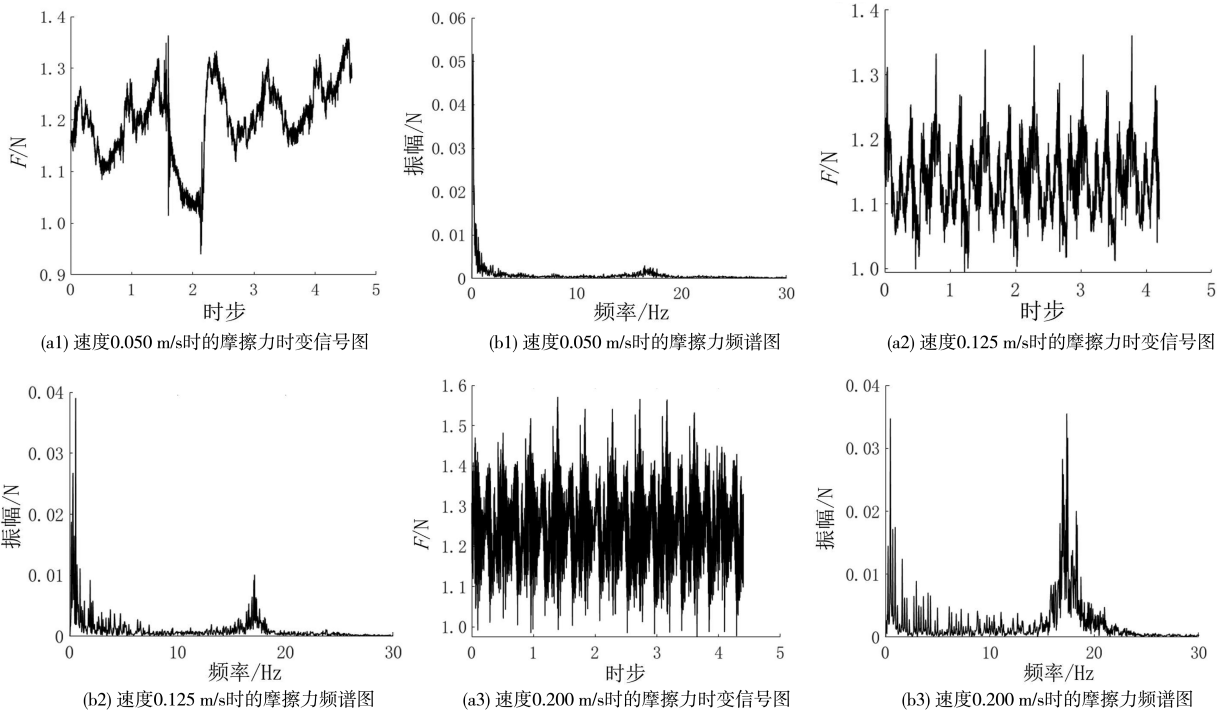


图 3 无载荷、三体颗粒存在时摩擦力与速度的时变信号图和频谱图

Fig.3 Time-varying signal and frequency spectrum of friction force and velocity in the presence of three-body particles without load

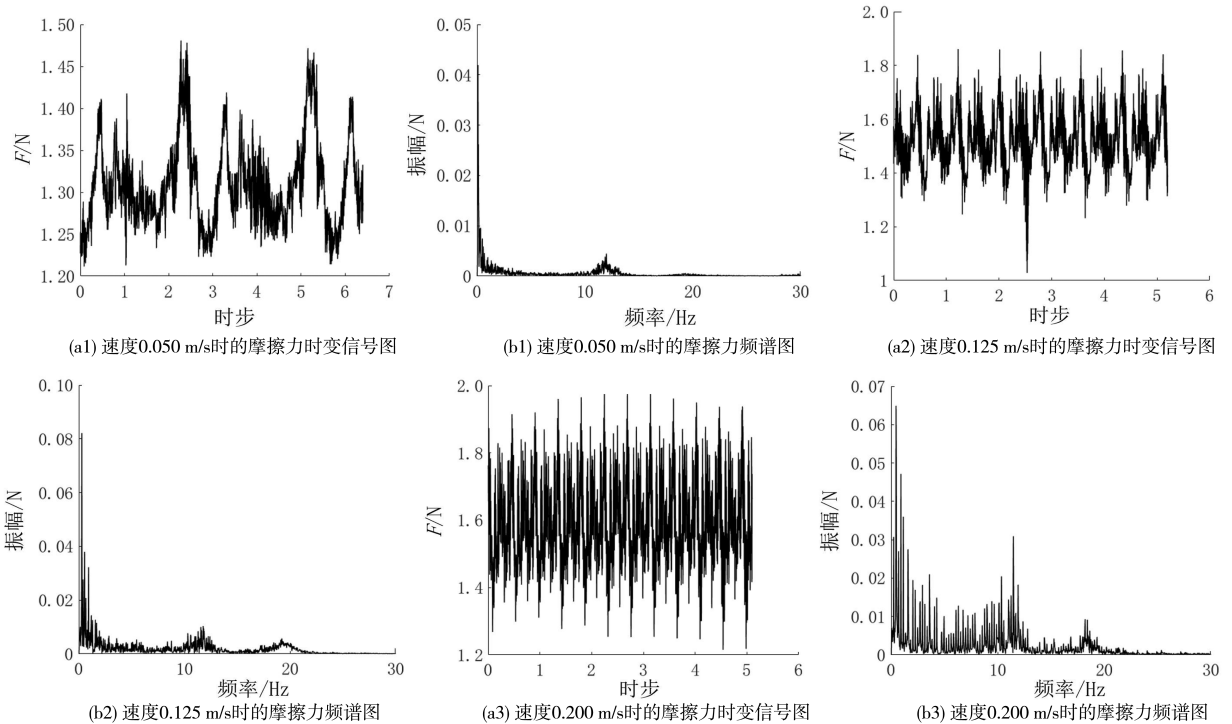


图 4 载荷 2 N、三体颗粒存在时摩擦力与速度的时变信号图和频谱图

Fig.4 Time-varying signal and frequency spectrum of friction force and velocity in the presence of three-body particles and a load of 2 N

发现,随着速度的增大宽频特性也增强,此现象由机械振动所引起^[8]。

图 5 为载荷 4 N、存在三体颗粒时不同速度与摩擦力的时变信号图和频谱图,由图 5(a1 ~

a3) 可以发现,随着速度的不断增加,时变信号的波动也更为剧烈。由图 5(b1 ~b3) 观察到,较低速的主峰频率出现在 0 Hz 附近的低频范围内,次峰频率出现在约 10 Hz 附近。

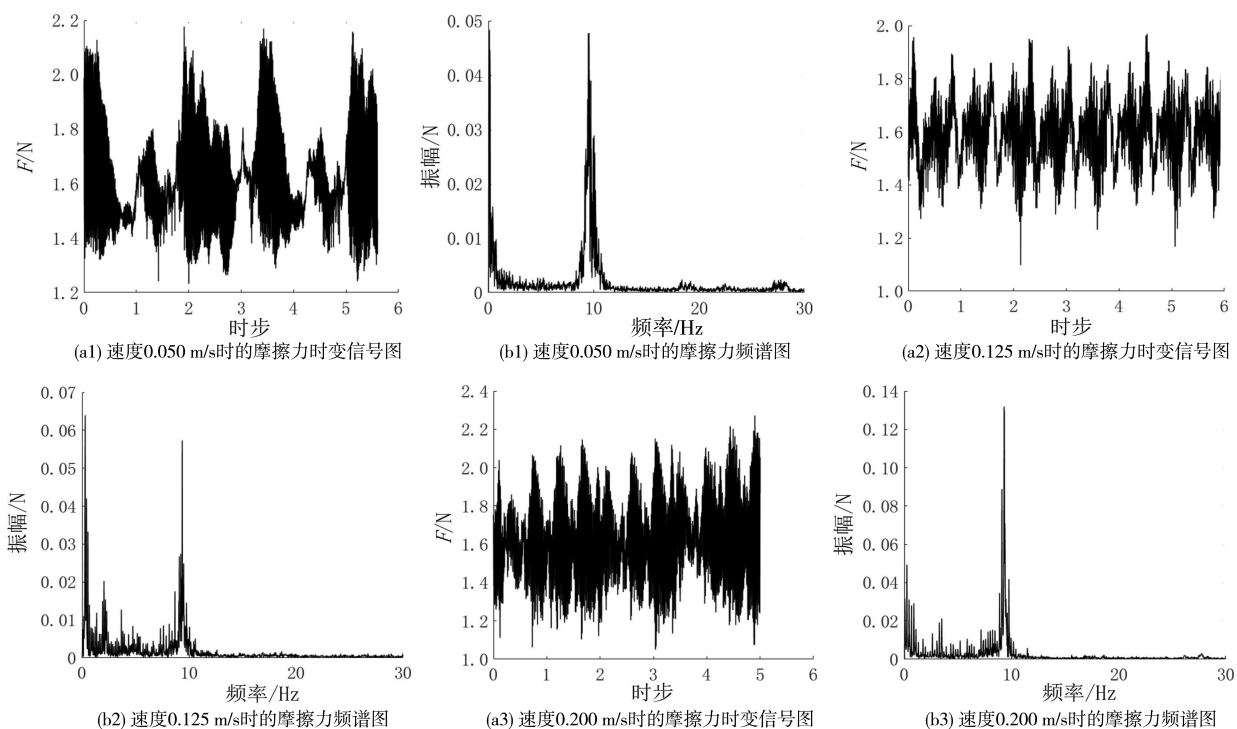


图 5 载荷 4 N、三体颗粒存在时摩擦力与速度的时变信号图和频谱图

Fig.5 Time-varying signal and frequency spectrum of friction force and velocity in the presence of three-body particles and a load of 4 N

2.2 三体颗粒对摩擦特征影响机理分析

三体颗粒在不同转速下的形貌如图 6 所示,图 6(a)为三体颗粒在初始状态下的颗粒形貌,图 6(b)(c)分别为 0.05、0.20 m/s 速度下的三体颗

粒形貌。在转速较低时,颗粒的磨损相对较小,随着转速的增大,三体颗粒的摩擦会增多,当转速变快时,颗粒会被磨损的更细更薄。

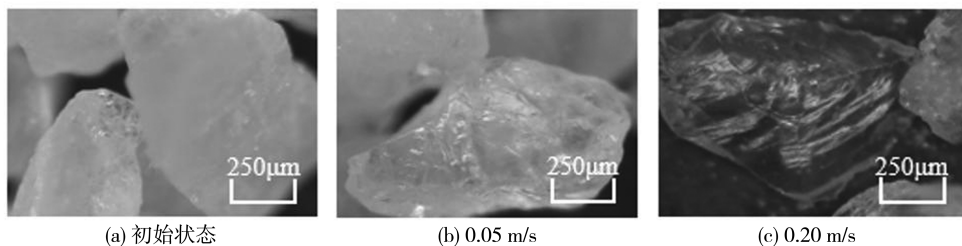


图 6 不同转速下硬质二氧化硅颗粒形貌

Fig.6 Morphology of hard silica particles at different rotational speeds

图 7(a)为无三体颗粒滑块表面的粗糙度曲线图,可以发现滑块表面较为光滑未产生明显的犁沟;图 7(b)为三体颗粒存在时滑块表面粗糙度曲线图,可以发现滑块表面存在大量的沟壑,三体

颗粒会随机填满细小沟壑使得磨损较为严重。对比图 7(a)与图 7(b)可以发现,在三体颗粒介入时滑块表面磨损更为严重,这说明在三体颗粒介入时摩擦更不稳定,易引发低频振动。

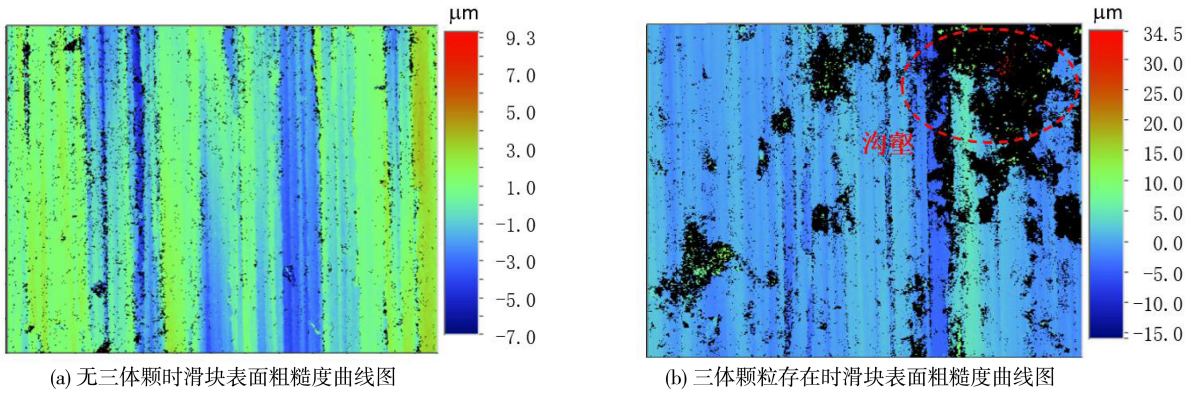


图 7 滑块表面粗糙度图

Fig.7 Surface roughness diagram of slider

3 结论

1) 在三体颗粒引入弹簧-滑块-传送带结构的摩擦实验中,摩擦力时变信号在较高速度下波动更为剧烈,摩擦力会随着传送带速度的增加而增大,摩擦速度较高情况下,滑块与传送带之间的相对速度远大于黏滑发生的临界速度^[9],所以实验中摩擦力黏滑运动的成分较低,信号更为稳定。三体颗粒入侵时,在较低速度下摩擦力时变信号的频率主要集中在低频范围,由于试验机质量较大,在有明显安装刚度情况下,试验机自身会产生低频振动,随着三体颗粒的入侵会导致低频振动增大,在汽车运动中,随着路面环境的变化也会有

三体颗粒的介入,从而导致汽车产生低频振动。可见三体颗粒的介入对轮胎-地面摩擦副会造成低频振动,形成共振现象从而导致结构的疲劳与损坏。

2) 在转速较低时,颗粒的磨损相对较小,随着转速的增大,三体颗粒的摩擦会增大,当转速增加时,颗粒会磨损的更细更薄,摩擦力会呈现出先增大后减小的趋势,从粗糙度测量仪测得的无颗粒滑块表征图和三体颗粒滑块表征图可以得出,三体颗粒随机填满了滑块表面上的细小沟壑。三体颗粒存在时的滑块表面粗糙度大于无三体颗粒的滑块表面粗糙度。

参考文献:

- [1] 汤洁, 张丽慧, 周春宇, 等. 橡胶减摩抗磨改性研究进展[J]. 摩擦学学报(中英文), 2024, 44(3): 1-17.
- [2] 施文斌, 肖汉, 崔坤杰, 等. 微沟槽结构设计对 PDMS 表面黏-滑摩擦学行为的影响[J]. 摩擦学学报(中英文), 2024, 44(1): 70-77.
- [3] LIN D D, YAN X Y, CHEN B S, et al. Analysis of key brake pad parameters on brake system stability[J]. Industrial Lubrication and Tribology, 2023, 75(10): 1089-1104.
- [4] VERMA P C, CIUDIN R, BONFANTI A, et al. Role of the friction layer in the high-temperature pin-on-disc study of a brake material[J]. Wear, 2016, 346-347: 56-65.
- [5] 鄢晓宇, 刘小君, 魏道高, 等. 受限颗粒体对制动系统非线性振动的影响[J]. 摩擦学学报, 2022, 42(3): 580-587.
- [6] HICHR I Y, CERESO V, DO M T. Modeling of the surface coverage and application to the calculation of friction on surfaces contaminated by particles[J]. Wear, 2019, 426-427: 1082-1093.
- [7] WANG X, HUANG B, WANG R, et al. Friction-induced stick-slip vibration and its experimental validation [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2020, 142: 106705.
- [8] 陈水生, 赵辉, 李锦华, 等. 特重车各轮相干桥面激励对斜拉桥随机振动的影响[J]. 振动工程学报, 2022, 35(2): 318-330.
- [9] 朱伟伟. 汽车制动系统低速颤振的稳定性、分岔和混沌动力学分析[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2016.

(责任编辑: 陈雯)