

减振器橡胶节点刚度对铁道车辆垂向振动特性的影响

熊聪,梁松康,王建斌

(西南交通大学 牵引动力国家重点实验室,四川 成都 610000)

摘 要:橡胶件由于其良好的减振、耐磨、隔音等性能在铁道车辆中具有不可或缺的作用,但由于易蠕变、老化和温变特性导致其存在一定缺陷。考虑到减振器两端橡胶节点的刚度变化对铁道车辆振动水平的影响,建立考虑垂向减振器橡胶节点刚度的 Ruzicka 系统数学模型。研究表明:橡胶节点刚度对减振器作用影响较大,橡胶节点刚度应不小于弹性元件刚度;橡胶节点刚度较大时,实现减振器阻尼的最佳匹配原则优化结果能有效改善构架和车体的振动状态。

关键词:橡胶节点刚度;两级 Ruzicka 系统;拉普拉斯变换;振动传递;阻尼参数优化

中图分类号:U260.331⁺.5 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2023)01-0007-04

Effect of Stiffness of Rubber Joint of Shock Absorber on Vertical Vibration Characteristics of Railway Vehicles

XIONG Cong, LIANG Songkang, WANG Jianbin

(State Key Laboratory of Traction Power, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610000, China)

Abstract: Despite of their indispensable role in railway vehicles owing to their good performance of vibration reduction, wear resistance and sound insulation, rubber parts have certain defects due to creep, aging and temperature change characteristics. In light of the influence of the stiffness changes of rubber joints at both ends of shock absorbers on the vibration level of railway vehicles, a two-stage Ruzicka system mathematical model was established in consideration of the rubber joint stiffness at both ends of shock absorbers. The research shows that the rubber joint stiffness has great influence over the effect of the shock absorber, hence the stiffness of the rubber joint should not be less than the stiffness of the elastic element. When the rubber joint stiffness is large, the optimized results of shock absorber damping with optimal matching principle can effectively improve the vibration states of frame and car body.

Keywords: rubber joint stiffness; two-stage Ruzicka system; Laplace transform; vibration transfer; damping parameter optimization

0 引言

在铁道车辆系统中,液压减振器的两端分别加有橡胶弹簧节点,其作用一方面是提高系统的减振能力,另一方面是使减振器两端物体在其他方向的振动不至于影响减振器使其破坏,实现减振器的无磨损安装。这种减振系统常用的悬挂力学模型为 Ruzicka 模型。Ruzicka 模型可用于模拟弹性元件的动态非线性特性,诸多学者对于该模型进行了试验研究^[1-5]。但是,对于两级隔振系统,部分研究只是考虑了其中一级为 Ruzicka 模型的情况^[6-7],没有考虑两级都是 Ruzicka 隔振模型的情况。而实际的轨道车辆是一个刚柔耦合的大系统,一系、二系减振器两端橡胶节点的变化对车辆各部件动力学性能具有不容忽视的影响。因此,对考虑橡胶节点刚度变化的两级系统进行分析很有必要。

本文通过建立带有两级 Ruzicka 模型的 1/2 动车数值模型,以车体和构架对基础激励的振动加速度传递率为参考指标,考虑减振器两端的橡胶节点刚度变化^[8-10]对铁道车辆垂向振动特性的影响。为了得到最优的减振器阻尼参数,仍以车体和构架的振动传递率作为目标函数,采用多目标优化遗传算法得到优化的阻尼参数。经验证,优化后的阻尼参数能有效改善目标的振动水平。

1 客车系统数值仿真

在实际车辆系统中,减振器两端都有弹簧橡胶节点,但对于本次研究橡胶节点变化对车辆系统垂向振动的影响,可以把“弹簧-阻尼-弹簧”的模型简化为“弹簧-阻尼”的模型,如图 1 所示。图中, c_1 、 c_2 为一系阻尼、二系阻尼; k_1 、 k_2 为一系、二系刚度; k_{c1} 、 k_{c2} 为一系、二系橡胶节点刚度; x_1 、 x_2 为质量 m_1 、 m_2 的位移; x 为输入激励。

基金项目:国家自然科学基金资助项目(11790282)

第一作者简介:熊聪(1997—),男,江西丰城人,硕士研究生,研究方向为车辆系统动力学和振动疲劳分析。

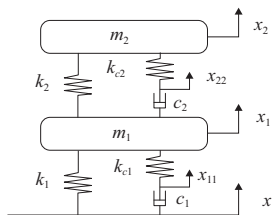


图1 两级Ruzicka模型

数学描述为:

$$\begin{cases} m_2 \ddot{x}_2 = k_2(x_1 - x_2) + k_{c2}(x_{22} - x_2) \\ k_{c2}(x_{22} - x_2) = c_2(\dot{x}_1 - \dot{x}_{22}) \\ m_1 \ddot{x}_1 + k_2(x_1 - x_2) + k_{c2}(x_{22} - x_2) = k_{c1}(x_{11} - x_1) + k_1(x - x_1) \\ k_{c1}(x_{11} - x_1) = c_1(\dot{x} - \dot{x}_{11}) \end{cases} \quad (1)$$

令 $\frac{k_{c2}}{k_2} = N_2$, $\frac{k_{c1}}{k_1} = N_1$, 并对上式进行拉氏变换并化简后得到 x 到 x_1 、 x_2 的传递率分别为:

$$\begin{aligned} X_1(s)/X(s) &= [(N_1 k_1 c_1 s)/(s c_1 + N_1 k_1) + k_1] / (m_2 N_2 k_2 s^2 + N_2 k_2^2 + m_2 c_2 s^3 + k_2 c_2 s + N_2 k_2 c_2 s) / \{ [m_1 s^2 + N_1 k_1 + k_1 + k_2 - (N_1 k_1)^2 / (c_1 s + N_1 k_1)] (m_2 N_2 k_2 s^2 + N_2 k_2^2 + m_2 c_2 s^3 + k_2 c_2 s + N_2 k_2 c_2 s) + [N_2 k_2 c_2 s^3 (m_2 N_2 k_2 + m_2 c_2 s)] / (c_2 s + N_2 k_2) - (N_2 k_2^2 c_2 s + N_2 k_2^3 + k_2^2 c_2 s) \} \\ X_2(s)/X(s) &= [(N_1 k_1 c_1 s)/(s c_1 + N_1 k_1) + k_1] (N_2 k_2 c_2 s + N_2 k_2^2 + k_2 c_2 s) / \{ [m_1 s^2 + N_1 k_1 + k_1 + k_2 - (N_1 k_1)^2 / (c_1 s + N_1 k_1)] (m_2 N_2 k_2 s^2 + N_2 k_2^2 + m_2 c_2 s^3 + k_2 c_2 s + N_2 k_2 c_2 s) + [N_2 k_2 c_2 s^3 (m_2 N_2 k_2 + m_2 c_2 s)] / (c_2 s + N_2 k_2) - (N_2 k_2^2 c_2 s + N_2 k_2^3 + k_2^2 c_2 s) \} \end{aligned} \quad (2)$$

以一辆铁道客车为例,把客车考虑为多刚体系统,主要考虑车体、构架、轮对、一系悬挂和二系悬挂,建立考虑一系、二系减振器两端橡胶节点刚度的数学模型。实际列车运行过程中受到特别多的激扰作用,本文旨在揭示橡胶节点刚度对客车垂向方向振动的影响,因此对于一些不重要的激扰因素不予考虑。动车组主要参数如表1所示。

表1 动车组基本物理参数

物理参数	数值
车体质量 M_c/kg	32 000
构架质量 M_b/kg	2 615
一系刚度 $K_p/(\text{kN} \cdot \text{mm}^{-1})$	4.88×10^6
二系刚度 $K_s/(\text{kN} \cdot \text{mm}^{-1})$	8.6×10^5
一系阻尼比 ζ_1	0.25
二系阻尼比 ζ_2	0.12

通常情况下,串联刚度大于等于弹簧本身刚度,即 $k_{c2}/k_2 = N_2 \geq 1$, $k_{c1}/k_1 = N_1 \geq 1$ 。如图2所示是节点刚度 k_{c2} 变化时构架和车体的位移及加速度传递率的变化情况,节点刚度 k_{c1} 变化情况类似。由此可知,当 N_1 、 N_2 非常小时,因为节点刚度很小,导致 x_{11} 、 x_{22} 位移量过大,此时阻尼不起作用,类似于无阻尼系统;当 N_1 、 N_2 非常大时,节点刚度

过大,类似于传统两自由度系统。当串联刚度大于或等于弹簧本身刚度时,构架和车体的位移和加速度传递率都很明显得到了衰减(本刊为黑白印刷,有疑问请咨询作者)。

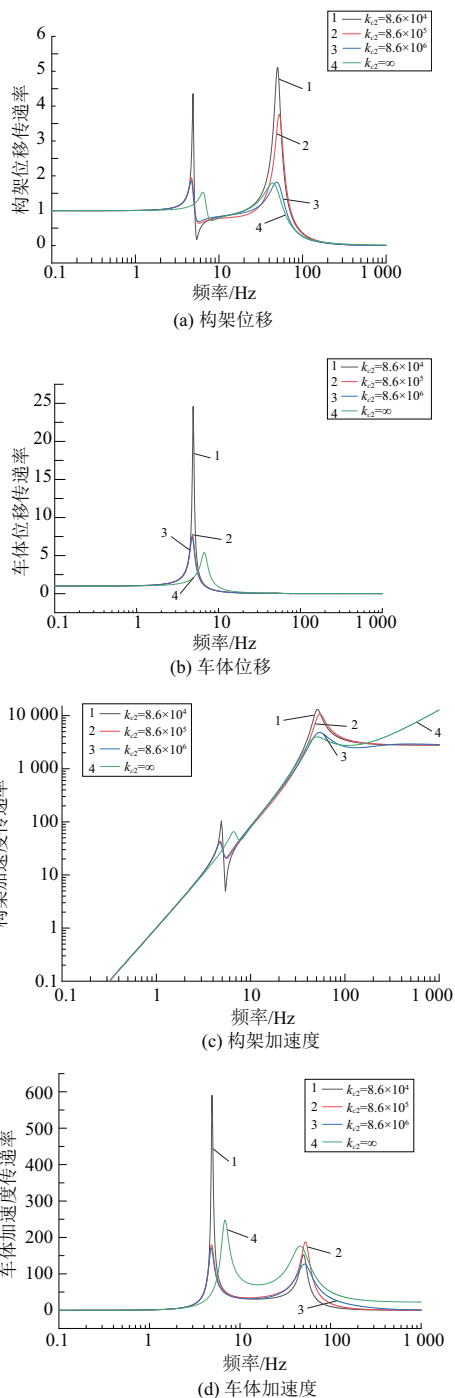


图2 二系节点刚度变化影响情况

为进一步了解不同节点刚度下,阻尼比变化对车体和构架的振动传递变化规律,本文对不同刚度比值下的阻尼比变化进行分析。如图3所示,节点刚度过小容易导致阻尼的失效;随着二系节点刚度的增加,构架和车体的低频和中高频振动得到了不同程度的衰减;二系节点刚度较高时,随着二系阻尼比的增加,中高频振动传递放大效果明显。可理解为减振器和两端的橡胶节点线性程度增强,振动能量大部分没有被减振器吸收而是直接传递给车体和构架。

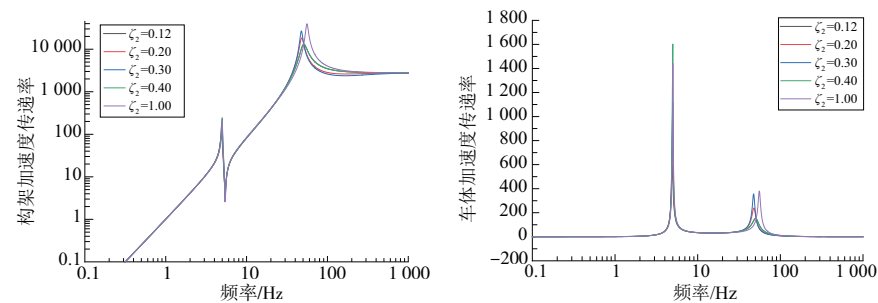
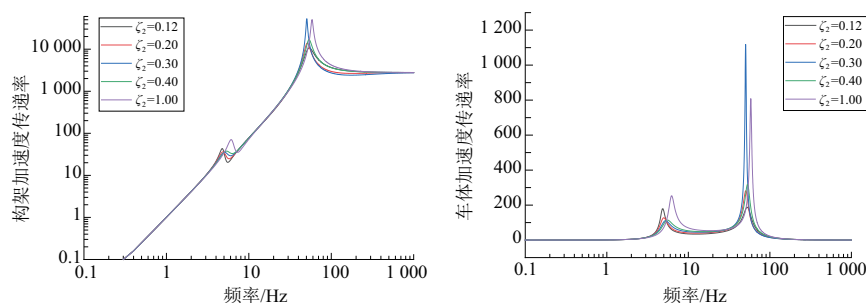
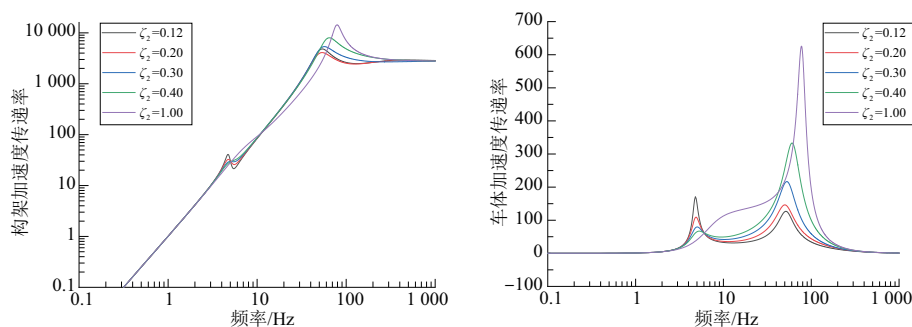
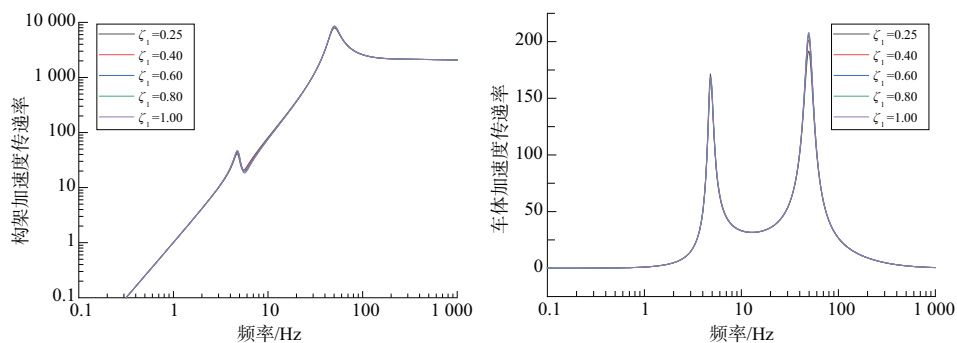
(a) $k_{c2}/k_2=0.1$ (b) $k_{c2}/k_2=1$ (c) $k_{c2}/k_2=10$

图3 第二级 Ruzicka 参数变化影响情况

图4为 $k_{c2}/k_2=10$ 不变, k_{c1}/k_1 及一系阻尼比变化时,构架及车体的加速度振动传递变化情况。一系减振器的节点刚度过小导致一系阻尼失效,如图4(a)所示。一系节点刚度对构架的频率影响范围更加广泛,对于激励频率带更大的线路,建议采用更软的节点刚度。对于较为平稳

的线路,则建议采用刚度更大的橡胶节点。一系节点刚度对车体的低频振动影响不大,但对于车体的高频振动影响较大,表现为一系节点刚度越大,车体加速度衰减程度越明显;且一系阻尼表现出适应性或匹配性,表现为一系节点刚度不同,车体加速度在不同阻尼下达到最小水平。

(a) $k_{c1}/k_1=0.1$

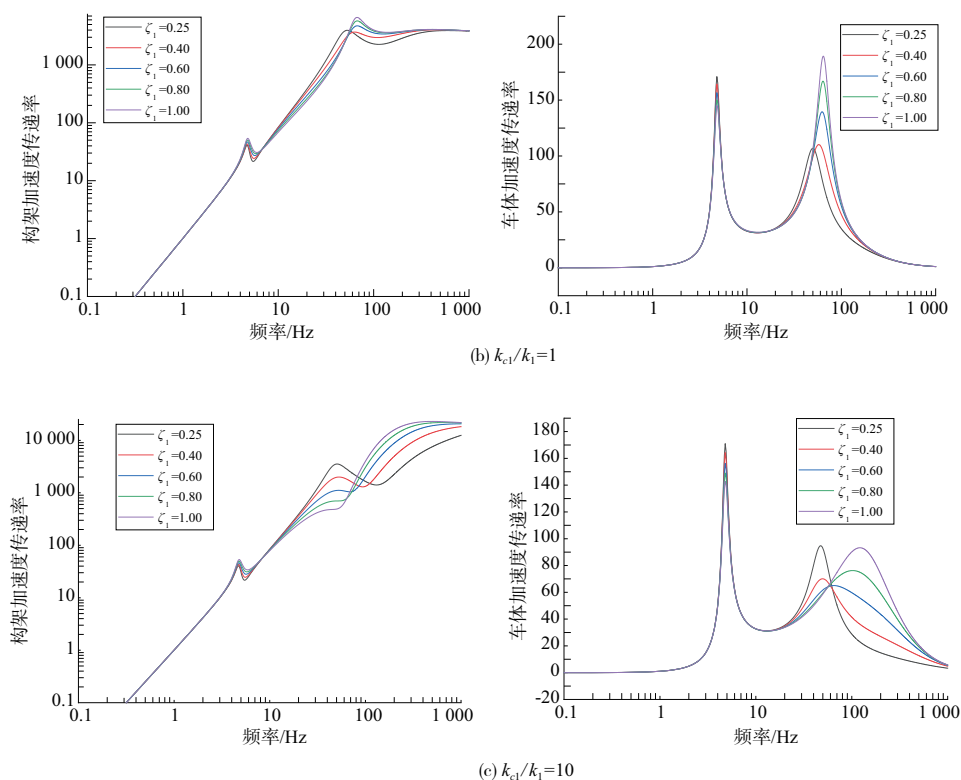


图4 第一级 Ruzicka 参数变化影响情况

2 垂向减振器阻尼参数优化

一系、二系垂向减振器对动车组的垂向运行平稳性起着决定性的作用。然而,受减振器两端橡胶节点刚度及实际线路激励等各方面因素的影响,如何选取最优或较优的阻尼参数是个难题。文献[11]采用多目标遗传算法,对构架垂向振动加速度方均根值、二系悬挂垂向位移方均根值、一系悬挂垂向位移方均根值及车体垂向振动加速度方均根值等多个优化目标函数采用加权的方式简化为单目标函数,得到优化后的阻尼。加权的方式简化了算法的求解过程,但加权系数却受人为主观的判断,对于目标函数数量级相差较大的情况,可能得不出理想的优化结果。

本文采用车体和构架的垂向振动加速度传递率作为优化目标函数,由于两级悬挂的作用,车体和构架的振动水平相差较大,不适用加权的方式进行优化。因此,这里直接采用多目标遗传算法,其中,最优个体系数 0.3,种群大小 200,进化代数 200。

图5所示是优化后的结果,横轴为构架振动加速度的传递率,纵轴为车体振动加速度的传递率。图中参考线为没优化前的结果, β_1 、 β_2 越小,优化效果越好,但一般两者很难同时达到最优,即某一个达到最优必然损失另一个的优化效果。因此,只能取得相对最优解。

为了验证优化的结果,分别得到优化前后的构架和车体的垂向振动加速度功率谱密度图并进行对比。图6(a)、图6(b)分别为构架和车体优化前后的加速度功率谱密度(PSD)对比图。经过 PSD 对比可知,构架和车

体的垂向振动水平分别得到了不同程度的优化效果。

在考虑减振器橡胶节点变化等情况时,本文建立的多目标遗传优化算法相较于传统优化算法能同时兼顾优化构架和车体的振动,进一步改善列车运行品质;相较于加权优化算法能获得更为准确的阻尼参数范围,节省优化成本。

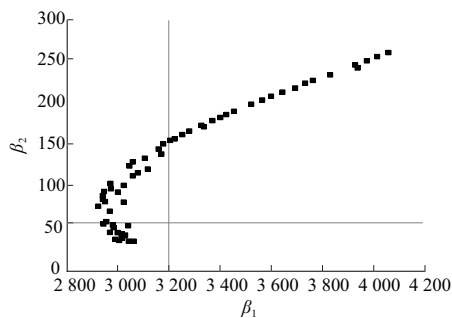
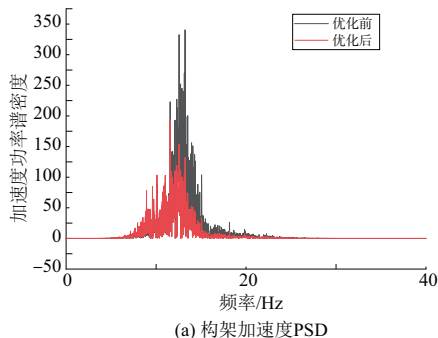


图5 优化结果图



(a) 构架加速度PSD

(下转第21页)

- Proceedings of 2016 2nd International Conference on Mechanical, Electronic and Information Technology Engineering(ICMITE 2016), 2016;49-52.
- [6] 赵小波,姬长英,周伟,等. 装用永磁式涡流缓速器车辆制动性能研究[J]. 汽车技术,2009(6):37-39,58.
- [7] 叶乐志,李德胜,王跃宗. 先进汽车缓速器理论与试验[M]. 北京:机械工业出版社,2013.
- [8] 何富君,仲于海,张瑞杰,等. 永磁涡流耦合传动特性研究[J]. 机械工程学报,2016,52(8):23-28.
- [9] 张雨婷. 聚磁式汽车永磁缓速器关键技术研究[D]. 大庆:东北石油大学,2020.
- [10] 王晶. 分级式永磁缓速器结构设计方法研究[D]. 镇江:江苏大学,2014.

- [11] 赵小波. 永磁式涡流缓速器电磁特性与制动性能研究[D]. 南京:南京农业大学,2009.
- [12] 刘凯. 轴向移动式汽车永磁无级缓速器的关键技术研究[D]. 大庆:东北石油大学,2019.
- [13] YI F, HE R, LUO Z. Parameter optimization design model of permanent magnet retarder based on artificial neural network algorithm[J]. Chemical Engineering Transactions, 2015, 46: 229-234.
- [14] YE L Z, LI D S, JIAO B F. Three-dimensional electromagnetic analysis and design of permanent magnet retarder[J]. Frontiers of Mechanical Engineering in China, 2010, 5(4):438-441.

收稿日期:2021-09-14

(上接第10页)

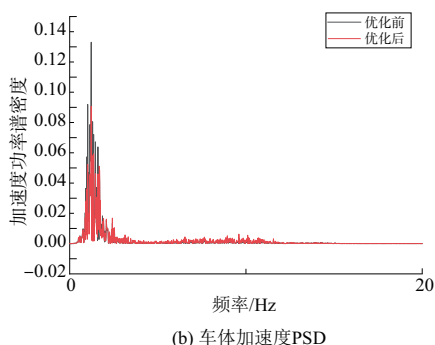


图6 优化前后功率谱密度对比图

3 结语

忽略次要因素,对考虑一系、二系垂向减振器两端橡胶节点刚度的两级客车 Ruzicka 模型分析,得出以下结论。

橡胶节点刚度对减振器的作用影响较大:节点刚度过小易导致减振器失效;过大会导致节点与减振器串联的线性程度变高,节点失效。

二系节点刚度的增大能有效衰减构架和车体的振动;一系节点刚度对构架的中低频振动影响起衰减作用,但对构架的高频起到了放大作用,对车体的低频振动影响甚微,对高频振动衰减效果显著。

一系、二系节点刚度处于合理区间时,一系、二系阻尼表现出对各自节点刚度的匹配性和适应性,一系阻尼的匹配程度要明显高于二系。二系节点刚度进一步增加,二系阻尼逐渐失去对节点刚度的匹配性,进一步表现为阻尼越

小,对车体的衰减效果越显著。

参考文献:

- [1] 曾京,郭平波. 减振器橡胶节点刚度对铁道客车系统临界速度的影响[J]. 中国铁道科学,2008,29(2):94-98.
- [2] CUI D B, LI L, JIN X S, et al. Influence of vehicle parameters on critical hunting speed based on Ruzicka model[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2012, 25(3):536-542.
- [3] CUI D B, LI L, JIN X S, et al. Influence of vehicle parameters on critical hunting speed based on Ruzicka model[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2012, 25(3):536-542.
- [4] 邵永生,祁玉梅,李成. 基于广义 Ruzicka 隔振系统的轨道车辆运行平稳性分析[J]. 机械设计与制造工程,2019,48(9):8-13.
- [5] 宋学谦. 广义 Ruzicka 隔振系统的简谐振动隔离研究[J]. 机械强度,2003,25(4):466-469.
- [6] 陈新良,陈龙珠,叶贵如. 带 Ruzicka 隔振器的双层隔振系统参数优化[J]. 浙江大学学报(自然科学版),1996,30(2):204-210.
- [7] 赵至善,顾致平,于渊博,等. 多级隔振系统的优化设计[J]. 重庆工学院学报(自然科学版),2008,22(6):79-81,86.
- [8] 何灼餘. 高速动车组转向架一系橡胶节点频率—刚度特性及其影响研究[D]. 成都:西南交通大学,2012.
- [9] 谭富星,石怀龙,王玮,等. 转向架橡胶件动态参数的高低温特性[J]. 交通运输工程学报,2019,19(4):104-114.
- [10] 李密,郭平波,王玮,等. 轴箱转臂定位节点温变特性对车辆动力学性能的影响[J]. 噪声与振动控制,2018,38(4):111-115.
- [11] 于曰伟,周长城,赵雷雷. 高速列车垂向随机振动及减振器阻尼参数优化[J]. 铁道学报,2019,41(9):34-42.

收稿日期:2021-08-30