文章编号：1006-1355(2018)04-0111-05

轴箱转臂定位节点温变特性对车辆动力学性能的影响

李 密[1]，邬平波[1]，王 玮[1]，李明星[2]

（1. 西南交通大学 牵引动力国家重点实验室，成都 610031；
2. 中车青岛四方机车车辆股份有限公司 技术中心，山东 青岛 266111）

摘 要：为了研究轴箱转臂定位橡胶节点的温变特性以及对车辆动力学性能的影响，对我国某高速动车组轴箱转臂定位橡胶节点进行高低温试验以及动力学仿真。试验结果表明，在固定振动频率与振动幅值条件下，橡胶节点的动态刚度与动态阻尼随温度的上升而下降。橡胶节点刚度与阻尼的变化会造成轨道车辆系统动力学性能的改变，仿真结果表明，蛇行临界速度随环境温度的上升先上升后下降，随着温度的上升，其它动力学性能如平稳性与安全性等指标变化相对复杂。

关键词：振动与波；橡胶节点；温变特性；动态刚度；临界速度；车辆动力学性能

中图分类号：O422.6 **文献标志码**：A **DOI编码**：10.3969/j.issn.1006-1355.2018.04.022

Influence of Temperature Varying Characteristic of Axle-box Tumbler Rubber Nodes on Vehicle's Dynamics Performance

LI Mi[1], *WU Pingbo*[1], *WANG Wei*[1], *LI Mingxing*[2]

(1. State Key Laboratory of Traction Power, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;
2. R&D Center, CRRC Qingdao Sifang Co. Ltd., Qingdao 266111, Shandong China)

Abstract : In order to study the influence of temperature varying characteristic of axle-box tumbler rubber nodes on vehicle's dynamics performance, a series of test and dynamics simulation was accomplished. The experimental results show that the dynamic damping and dynamic stiffness of the rubber nodes decrease with the increase of ambient temperature. Changes in the stiffness and damping of the rubber nodes will result in changes of the dynamic performance of the rail-vehicle system. The simulation results show that the critical speed of the snake crawl rises first and then decreases with the ambient temperature rising. Other dynamic properties, such as stability and safety indexes, change complicatedly with the temperature rising.

Keywords : vibration and wave; axle-box tumbler rubber node; temperature varying characteristic; dynamic stiffness; critical speed; vehicle's dynamic performance

橡胶材料具有优良的减振性能，能够吸收高频振动，被广泛应用于我国轨道交通车辆中。我国铁路运行状况复杂，京广线在一个运行里程中会同时经历高低温变化，温度变化会改变橡胶弹性元件的力学性能进而影响车辆动力学性能，对橡胶弹性元件的温特变性研究具有实际意义，其能为轨道车辆动力学软件仿真提供更为精确的参数，并模拟预测在实际线路上可能出现的各种动力学问题[1]。

何灼馀[2]对橡胶材料的本构模型进行了分析，采用有限元法描述了橡胶节点在工程应用中的动态力学行为。穆龙海、丁智平等利用多种本构模型拟合不同温度下橡胶元件单轴拉伸试验数据，发现Ogden 3阶模型和Ogden 4阶模型的拟合精度较高[3]。王少纯、邓宗全对月球着陆器用金属橡胶高低温力学性能进行了试验[4]。侯军芳、白鸿柏等对金属橡胶试件在不同环境温度条件下的力学和阻尼性能进行试验，发现金属橡胶材料动态刚度随温度升高

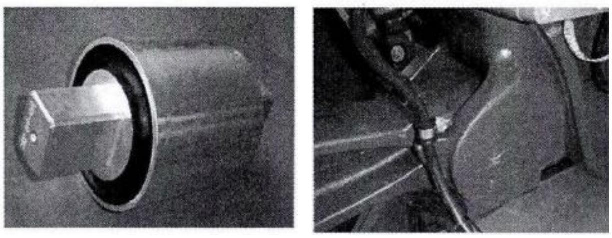
收稿日期：2018-01-08
基金项目：国家重点研发计划资助项目（2016YFB1200505）；
中国铁路总公司资助项目（2016J001-B）；
山东省科技重大专项资助项目（2015ZDXX0102A01）
作者简介：李密（1991-），男，四川省南充市人，硕士研究生，主要研究方向为车辆强度与动力学。
E-mail: 414083172@ qq.com

而缓慢下降，阻尼损耗因子保持稳定[5]。孟政对橡胶弹簧频变刚度特性及其对地铁车辆动力学性能的影响进行了分析研究[6]。张隶新、魏来、王勇等对变刚度转臂节点车辆动力学性能进行了研究，发现增大转向架一系定位刚度可以提高蛇行运动稳定性[7]。

本文研究温度对轴箱转臂定位橡胶节点动态刚度与阻尼的影响以及随之产生的动态特性对车辆动力学性能的影响。首先基于试验对我国某高速动车组轴箱转臂定位橡胶节点(后简称橡胶节点)进行高低温试验，对比分析橡胶节点在不同温度下的动态刚度、动态阻尼，从而得到环境温度对橡胶节点动态特性影响结果。最后基于动力学软件SIMPACK建立高速列车动力学计算模型，分析温度引起的刚度、阻尼变化对列车动力学性能的影响。

1 橡胶弹性元件温变试验

受温度影响，橡胶材料宏观上表现为玻璃态、橡胶态和黏流态。当温度降低到某种程度时，橡胶材料处于玻璃态，大分子链处于冻结状态，橡胶材料表现为虎克弹性行为，具有很高的模量。随着温度的升高，分子链开始解冻，橡胶分子的流动性会增加，橡胶材料进入橡胶态，开始出现链段运动，橡胶材料的模量减小，橡胶材料开始表现出阻尼特性。当温度升高到某种程度，橡胶材料进入黏流态，分子链的运动更加自由，进而不断改变其构像[3]。



(a) 橡胶节点 (b) 安装位置

图1 橡胶节点组成与安装

橡胶弹性元件动态力学性能试验包括静力学性能试验、动力学性能试验、疲劳性能试验等[1]。通过动态力学性能实验可以得到橡胶弹性元件的动刚度、动阻尼以及动态损耗角正切等数值。为研究高速列车橡胶节点温变特性，在西南交通大学轨道交通国家实验室高低温试验台上对我国某高速列车橡胶节点进行测试，主要参考标准为《TB/T 2843-2015机车车辆橡胶弹性元件通用技术条件》[8]与《EN 13913:2003铁路应用橡胶悬挂元件-弹性体机械部件》[9]。

高低温试验为特殊环境试验，试验前应进行环境调节，在规定的环境箱中调节时间一般应不少于12 h[8]。本次试验主要研究不同温度对橡胶节点动态特性的影响，每次试验前，将节点放置于高低温变温箱中搁置12 h以上。橡胶节点高低温试验台为动态试验台，如图2所示。

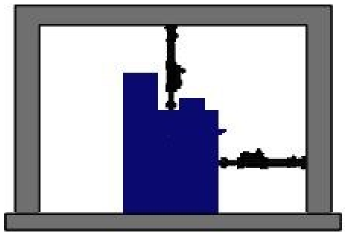


图2 橡胶节点高低温试验台

采用MTS电液伺服试验机，液压闭环控制，控制系统为MTS测试系统Damper测试模块，不同方向上通过作动器施加不同幅值的位移激励。

2 橡胶节点轴向温变特性

为了研究不同温度下橡胶节点呈现出的动态刚度与阻尼特性差异，分别在−60 ℃、−50 ℃、−40 ℃、−30 ℃、−20 ℃、−10 ℃、0、23 ℃、35 ℃、50 ℃、60 ℃下分方向进行了节点动态刚度与阻尼试验，加载频率变化范围达到12 Hz。在确定幅值、不同频率情况下轴向动态刚度、阻尼随温度变化如图3、图4所示。

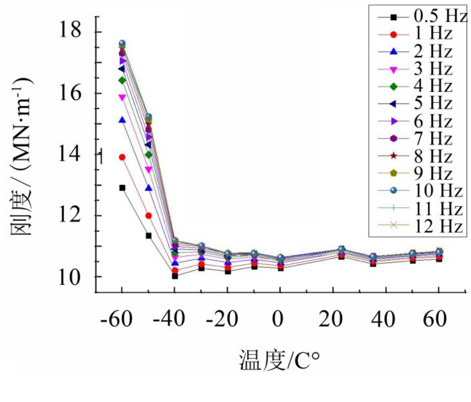


图3 动态刚度随温度的变化曲线(幅值为1mm)

由图3可以看出，加载频率越大，刚度越大，阻尼越小，随着温度上升，轴向动态刚度呈下降趋势，−40 ℃以下下降趋势明显，在加载幅值为1 mm时其变化幅值高达6.75 MN/m。当温度在−40 ℃以上时，刚度变化幅度减小，下降趋于平缓。在图4中，随着温度上升，轴向阻尼同样呈下降趋势，同样以−40 ℃为界线，在其以下橡胶呈玻璃态，随温度升高，阻尼下降幅值最高达到812.9 kN·S/m。当温度在−40 ℃以上时，阻尼变化幅度减小。

3 橡胶节点径向温变特性

同温度对轴向刚度与阻尼的影响一样，随着温度上升，径向刚度与阻尼同样呈现下降趋势。如图5所示：在加载幅值为1 mm、温度在−60 ℃～40 ℃

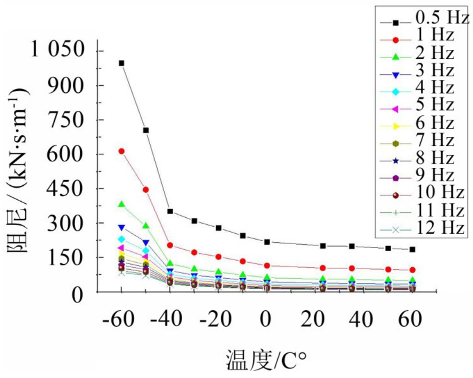


图4 动态阻尼随温度的变化曲线(幅值为1 mm)

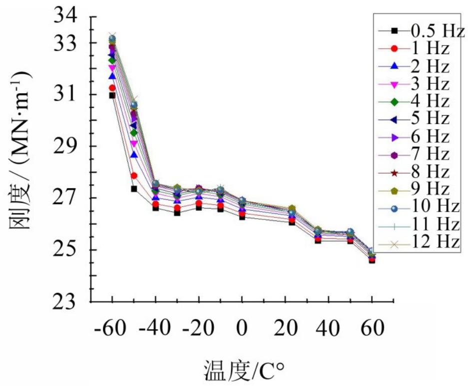


图5 动态刚度随温度的变化曲线(幅值为1 mm)

时,刚度变化幅值最高达到5.69 MN/m。当温度在−40 ℃以上时,刚度变化幅度减小,变化幅值在2.65 MN/m左右,相比轴向刚度而言变化范围更大。

由图6可以看出,径向阻尼随着温度上升总体呈下降趋势并有小幅波动。

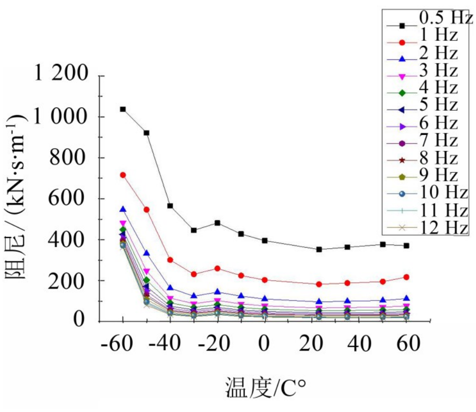


图6 动态阻尼随温度的变化曲线(幅值为1 mm)

4 橡胶节点温变特性对车辆动力学性能的影响

轴箱转臂式定位方式将轴箱与定位拉杆结合组成转臂结构,转臂与构架之间通过转臂一端的橡胶节点连接。作为一系悬挂组成部分的橡胶节点能够提供轴箱定位纵向刚度,并与一系弹簧共同提供一系横向刚度、传递轮对与构架间纵向及横向力[10]。由于转臂式轴箱定位结构简单,安装维护方便,被广泛应用于城市轻轨、地铁与高速动车组中。本文接下来主要就温度对车辆动力学性能影响进行分析。采用动力学软件SIMPACK建立我国某高速列车整车动力学模型如图7所示。

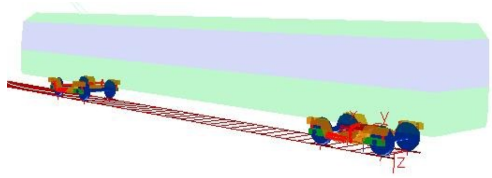


图7 高速列车动力学模型

表1 车辆部分参数表

参数名称	数值
车体质量/kg	36 833
构架质量/kg	2 439
轮对质量/kg	1 713
轴箱转臂质量/kg	84
车辆半径/m	0.46
车辆定距/m	17.8
轴距/m	2.5
车体重心高/m	1.795

轴箱转臂部分考虑点头及摇头自由度,橡胶节点刚度与阻尼值按照温变动态试验所测数值进行设定。

4.1 橡胶节点温变特性对蛇行稳定性影响

蛇行运动为轨道车辆系统存在的固有属性,蛇行运动稳定性影响车辆最高运行速度。为研究温度对蛇行稳定的影响,此处对不同温度下的非线性临界速度(后简称临界速度)进行仿真,主要通过给定一段有限长的实际轨道随机不平顺激扰样本函数,让车辆运行在不平顺轨道上并激发其振动,然后让车辆运行在理想光滑轨道上,观察系统能否恢复到平衡位置,进而判断系统是否失稳。

随节点横向刚度的增加,临界速度会下降;随节点纵向刚度的增加,临界速度会先增大后减小[7]。在图8中,低温相比高温对临界速度影响更大,在−60～23 ℃区间,纵向刚度相比横向刚度对临界速度影响更大,使临界速度升高;23 ℃温度条件下纵向刚度为26 MN/m,处于临界刚度,临界速度达到最大值,之后纵向刚度与横向刚度共同引起临界速度缓慢减小。

4.2 橡胶节点温变特性对车辆平稳性影响

车辆运行平稳性涉及旅客乘坐舒适性和货物完整性,评价轨道车辆平稳性最直接的指标是车体振动加速度,本文提取前后转向架中心位置上方横向

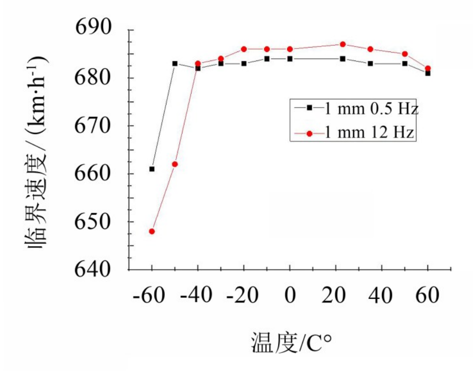


图8 橡胶节点温变特性对临界速度的影响

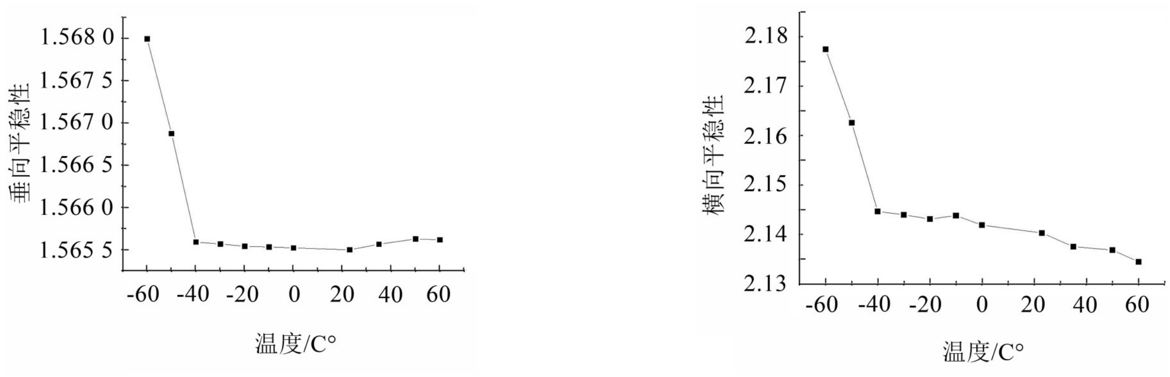
1 m处地板面的加速度值，利用Sperling指标对温度影响下的车体平稳性指标进行计算[11]。温度变化引起橡胶节点力学性能改变，进而影响车辆平稳性。

由图9可以看出，随温度上升车辆垂向平稳性指标先减小后增加，23 ℃时达到最小值；横向平稳性指标随温度的增加则一直呈下降趋势。总体来说，车辆平稳性处于一个比较良好的状态，随温度变化各项指标变化趋势略有差异，应注意低温时车辆稳定性指标变差的趋势。

4.3 橡胶节点温变特性对车辆安全性影响

列车安全性主要通过轮轴横向力、轮轨垂向力、轮重减载率、脱轨系数等指标进行评估。其中，轮轴横向力、轮轨垂向力主要考察轮轨之间的动力作用，过大的轮轨力会对钢轨、扣件等造成损伤与破坏，严重时甚至会危及行车安全。轮重减载率、脱轨系数指标则主要评估车辆的脱轨安全性，高速运行的列车轮重减载率与脱轨系数指标应小于0.8[12]。

车辆安全性指标受温度影响变化情况复杂，其中轮轴横向力随温度增加先增大后减小，于−30 ℃附近取得最大值，如图10所示；轮轨垂向力随温度增加先增大后减小再增大，分别于−30 ℃与0 ℃达到极大值117.27 kN、极小值115.61 kN，见图11；脱轨系数随温度增高先减小后增加，于−20 ℃附近取得最小值，如图12所示。如图13所示，随温度的升高，在温度变化的影响下，轮重减载率先减小后增加再减小，当温度在−60 ℃附近，此时轮重减载率最大值达到0.657，低温时列车的安全性需要特别加以关注。



（a）橡胶节点温变特性对垂向平稳性的影响

（b）橡胶节点温变特性对横向平稳性的影响

图9 节点温变特性对车体平稳性的影响

5 结 语

（1）温度的变化会对一系橡胶节点刚度与阻尼产生比较大的影响，在−60～60 ℃区间，其随着温度的不断升高，呈不断下降的趋势。−40 ℃之前降幅较大，之后降幅减小，同时在不同方向上的刚度、阻尼变化趋势相同但具体数值差异较大。

（2）幅值、频率同样会对橡胶节点产生影响，随着频率的增加，橡胶节点刚度会相应增加，阻尼则随之减小，同时温度越低其对频率变化越敏感。

（3）节点刚度、阻尼随温度的变化会引起车辆动力学性能的变化，随节点横向刚度的增加，临界速度会下降；随节点纵向刚度的增加，临界速度先增大后减小。−60～60 ℃区间，车辆系统临界速度先快速增加后缓慢减小，以23 ℃为界限。

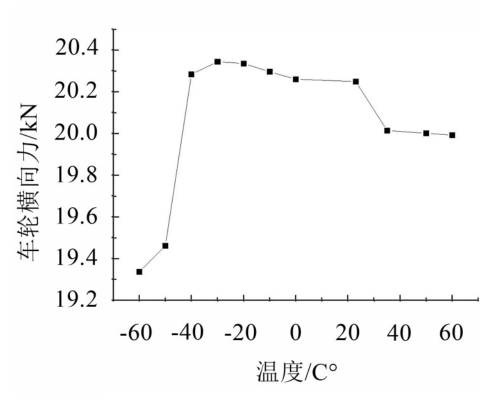


图10 橡胶节点温变特性对轮轴横向力的影响

（4）随着温度的上升车辆垂向平稳性指标先减小后增加，23 ℃时达到最小值；横向平稳性指标随温度的增加一直呈下降趋势。

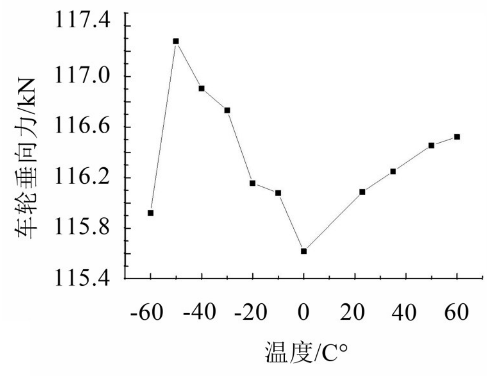


图 11 橡胶节点温变特性对轮轨垂向力的影响

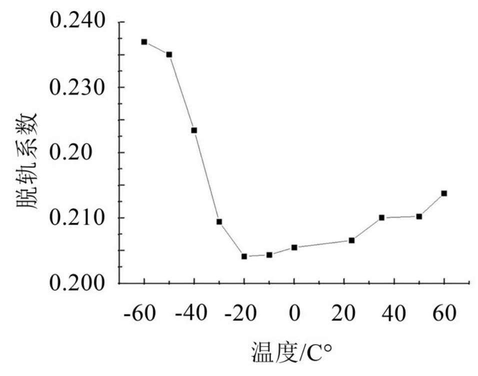


图 12 橡胶节点温变特性对脱轨系数的影响

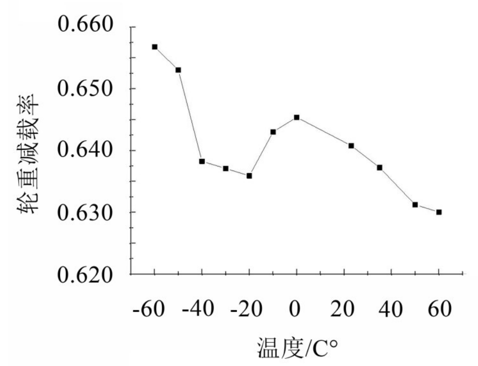


图 13 橡胶节点温变特性对轮重减载率的影响

（5）温度对车辆安全性影响较为复杂，轮轴横向力随温度升高先增大后减小，脱轨系数随温度升高先减小后增大，轮轨垂向力随温度升高先增大后减小再增大，轮重减载率则相反，呈先减小后增加再减小趋势。温度过低或过高时应关注车辆安全性变化。

参考文献：

[1] 杨俊. 橡胶弹簧动态特性研究[D]. 成都：西南交通大学，2015.

[2] 何馀. 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.

[3] 穆龙海，丁智平，黄友剑，等. 橡胶弹性元件低温刚度预测方法[J]. **湖南工业大学学报**，2016，30(1)：11-16.

[4] 王少纯，邓宗全，高海波，等. 月球着陆器用金属橡胶高低温力学性能试验研究[J]. **航空材料学报**，2004，(2)：27-31.

[5] 侯军芳. 环境温度对金属橡胶材料力学特性和阻尼性能的影响研究[A]. 中国材料研究学会，2006年材料科学与工程新进展—“2006北京国际材料周”论文集[C]. 中国材料研究学会，2006：5.

[6] 孟政. 橡胶弹簧频变刚度特性及其对地铁车辆动力学性能的影响研究[D]. 成都：西南交通大学，2011.

[7] 张隶新，魏来，王勇. 变刚度转臂定位节点对车辆动力学性能的影响[J]. **铁道车辆**，2016，54(12)：1-4+49.

[8] 中国铁路总公司. TB/T2843 2015机车车辆橡胶弹性元件通用技术条件[S]. 北京：中国铁道出版社，2015.

[9] 英国：标准政策与策划委员会. CEN/TC. EN13913 2003铁路应用橡胶悬挂元件-弹性体机械部件[S]. 2003.

[10] 姚远，张红军，罗赟. 转臂轴箱定位节点位置对机车动力学性能影响分析[J]. **机车电传动**，2007，(3)：27-29.

[11] 中华人民共和国铁道部. GB5599-1985 铁道车辆动力学性能评定和试验鉴定规范[S]. 北京：中国铁道出版社，1985.

[12] 中华人民共和国铁道部. 高速动车组整车试验规范[S]. 北京：中国铁道出版社，2008.

（上接第90页）

[10] 陈沛，沈火明，张捷，等. 温度对敷有阻尼层的铝型材声学性能的影响[J]. **噪声与振动控制**，2017，37(2)：121-126.

[11] HETNARSKI R B, ESLAMI M R, GLADWELL G M L. Thermal stresses: advanced theory and applications[M]. New York: Springer, 2009.

[12] LIU Y, LI Y. Vibration and acoustic response of rectangular sandwich plate under thermal environment[J]. **Shock and Vibration**, 2013, 20(5): 1011-1030.

[13] LI X, YU K. Vibration and acoustic responses of composite and sandwich panels under thermal environment[J]. **Composite Structures**, 2015, 131: 1040-1049.