

文章编号:1006-1355(2021)03-0163-06

# 地铁受电弓碳滑板结构减振阻尼措施试验研究

王金朝, 杨巧云, 王志强, 尹绪超, 秦俊飞, 段勇奇

(中国船舶集团公司第七二五研究所, 洛阳双瑞橡塑科技有限公司, 河南 洛阳 471000)

**摘要:**针对地铁受电弓碳滑板的异常振动问题,结合碳滑板的结构特点,分别设计颗粒阻尼和约束阻尼两种减振方案,研究不同阻尼措施下碳滑板的振动抑制效果。首先通过模态实验确定原结构的振动形态,采用两种阻尼措施处理后,进一步对比分析垂向激励和横向激励条件下碳滑板的振动特点及阻尼减振效果。结果表明:两种阻尼措施均能有效抑制碳滑板的振动幅值,缩短振动衰减时间。总体上看,在垂向激励下表面敷设约束阻尼层比灌装颗粒阻尼的振动抑制效果更好,而在横向激励下表面敷设约束阻尼的减振效果变差,没有灌装颗粒阻尼的振动抑制作用强。研究结果可为碳滑板的阻尼减振方案设计提供重要参考。

**关键词:**振动与波;碳滑板;颗粒阻尼;约束阻尼;减振效果

中图分类号:TB535<sup>+</sup>.1

文献标志码:A

DOI编码:10.3969/j.issn.1006-1355.2021.03.028

## Experimental Research of Vibration Damping Measures on Subway Pantograph Carbon Sliders

WANG Jinzhao, YANG Qiaoyun, WANG Zhiqiang,  
YIN Xuchao, QIN Junfei, DUAN Yongqi

(Luoyang Ship Material Research Institute, Luoyang Sunrui Rubber and Plastic Technology Co., Ltd.,  
Luoyang 471000, Henan China)

**Abstract:** The problem of abnormal vibration of subway pantograph carbon sliders was studied. Considering the structural characteristics of the pantograph carbon sliders, two damping schemes, particle damping and constrained damping, were prepared to study the vibration suppression effects of different damping measures on the carbon sliders. Firstly, vibration shape of the original structure was determined through the modal experiment. After treatment with the two damping measures, vibration characteristics and damping effect of the carbon slider under vertical excitation and lateral excitation were further analyzed and compared. The results show that the two damping measures can effectively suppress the vibration amplitude of the carbon slider and shorten the vibration attenuation time. On the whole, the constrained layer damping under the vertical excitation has a better vibration suppression effect than the filling particle damping, while the vibration absorption effect of the surface constrained layer damping under the lateral excitation is worse than that of the filling particle damping. The research results may provide an important reference for the vibration damping schemes design of the pantograph carbon sliders.

**Key words:** vibration and wave; carbon slider; particle damping; constrained damping; damping effect

受电弓是高速电力机车上的关键设备,用于将接触网的电能传递给车内高压设备,实现电能的集

取与传输。滑板直接与接触线接触,在列车运行时从接触网设备取流。受电弓安装在车体顶部,服役过程中由于线路轨道的不平顺以及空气冲击等影响,会承受各种振动冲击,由此引起受电弓结构振动噪声过大甚至损伤。对于地铁受电弓,运行过程中出现问题较多<sup>[1-3]</sup>,主要为滑板异常磨耗及受电弓部件的疲劳断裂等问题。疲劳的出现往往会给受电弓部件带来不可逆的破坏性后果,严重情况下甚至会导致线路段弓网系统的损毁,影响整条线路的正常运营。因此,对受电弓滑板进行减振降噪研究,保证其良好的受流状态,对列车安全稳定运行具有重要

收稿日期:2020-06-11

**作者简介:**王金朝(1992-),男,河南省洛阳市人,硕士,工程师,主要研究方向为减振降噪材料研发、结构振动噪声分析。

E-mail: wjinzha08@163.com

**通信作者:**杨巧云(1980-),女,河南省洛阳市人,硕士,高级工程师,主要研究方向为减振降噪材料研发、结构振动噪声分析。

E-mail: zongshiban12@163.com

的现实意义。

理论方面,德国的 Link 教授<sup>[4]</sup>建立了有限元模型,该模型结合接触网振动频率,推导出弓网结合部的力与移动距离公式,利用迭代法推导出接触网的固有频率,通过叠加法取得响应。Lee 和 Chung<sup>[5]</sup>采用带有吊弦支撑的张紧梁模拟弓网接触系统,使用有限元和广义  $\alpha$  积分法计算了吊弦模型的动态接触力和位移响应。Cho 等<sup>[6]</sup>采用一种具有时变刚度的改进单自由度系统,研究了接触网刚度、吊弦是否卸载内力等因素对弓网受流质量的影响。根据 Wickens<sup>[7]</sup>的磨损轮轨稳定分析理论,若考虑轮轨接触趋于近线性关系,忽略车轮自旋力偶,则轮轨表面磨损功仅包含纵向与横向两个主要成份,因此车轮正常踏面磨损轮轨磨损和弓网磨损两者无相关性。张卫华<sup>[8]</sup>基于弓网理论模型,采用模态叠加法求解受电弓/接触网半实物半虚拟混合模拟系统,并建立了弓网混合模拟试验台。

受电弓异常方面,王新宇等<sup>[9]</sup>根据正线弓网测试及实验室测试数据研究分析,明确了深圳地铁 5 号线受电弓弓头结构及特殊路段振动加速度较大是弓头裂纹出现的原因,为受电弓的维修提供依据。刘国良<sup>[10]</sup>分析了广州地铁二号线列车受电弓碳滑板出现异常磨损问题(见图 1)的原因,主要影响因素包括:接触网布置的均匀性及受电弓弓头结构、升弓保持力等。实际上,弓网受流过程中,受电弓与接触网通过接触力相互作用,由于接触网的柔性特征导致弹性波在接触网内部来回传播,引起接触力的震荡。

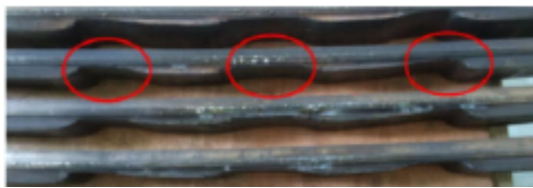


图 1 碳滑板“三凹坑”异常磨损现象

阻尼减振降噪技术在军事工程的带动下迅速发展,并广泛应用于航空航天、船舶、轨道交通等领域中<sup>[11-12]</sup>。其中,颗粒阻尼是在结构附加封闭空间或原有空腔内填充微小颗粒,当结构受外力振动时,利用空间内颗粒体的摩擦和碰撞来耗损振动能量。约束阻尼减振是在结构表面敷设阻尼层和约束层,通过阻尼层的拉伸压缩变形和剪切变形,将部分机械能转化为内能,达到减振目的。虽然阻尼减振措施在列车振动控制中已有应用,但针对局部组件的振动试验研究还相对欠缺。

针对地铁受电弓碳滑板的异常振动问题,本文结合碳滑板的结构特点,分别采用颗粒阻尼和约束阻尼两种减振措施,研究不同阻尼处理对碳滑板的

振动抑制效果。首先通过模态实验确定原结构的振动形态,采用两种阻尼措施处理后,进一步对比分析垂向激励和横向激励条件下碳滑板的振动特点及阻尼减振效果,为碳滑板的阻尼减振方案提供合理指导,也可为后期地铁受电弓的整体减振设计及验证提供重要的参考。

## 1 试验设计

### 1.1 频域分析方法

频率响应函数表征了测试系统对给定频率下的稳态输出与输入的关系,是振动试验分析的基础。若线性系统的输入和输出分别为  $x(t)$ 、 $y(t)$ ,则频响函数定义为输出信号的傅里叶变换  $S_y(f)$  与输入信号的傅里叶变换  $S_x(f)$  之比。也可以利用输出与输入信号的互功率谱  $P_{xy}(f)$  与输入的自功率谱之比得到函数  $H_{xy}(f)$ ,其数学定义为

$$H_{xy}(f) = \frac{S_y(f)}{S_x(f)} = \frac{P_{xy}(f)}{P_{xx}(f)} \quad (1)$$

阻尼比是评价结构在振动过程中能量耗散的常用指标。试验测试阻尼比的方法有半功率带宽法和时域衰减法等。半功率带宽法是通过识别被测件在共振时的共振频率和相应带宽来确定结构阻尼比,其计算公式如下:

$$\xi_i = \frac{\omega_b - \omega_a}{2\omega_i} \quad (2)$$

式中:  $\xi_i$  为结构阻尼比,  $\omega_i$  为共振频率,  $\omega_b$  与  $\omega_a$  分别为频率增加时振幅下降 3 dB 的频率和频率减小时振幅下降 3 dB 的频率。

### 1.2 碳滑板减振效果试验

某地铁线路采用摩根新材料公司的 M258A2 型碳滑板,平均万公里磨耗大约为 1.4 mm,碳滑板更换前可使用厚度为 10 mm。该型号受电弓属气囊式受电弓,具有重量轻、结构简单、承受电流大、使用维护方便等特点,具有更好的弓网跟随性及集电稳定性。典型受电弓及其碳滑板的安装效果如图 2 所示。



图 2 地铁受电弓及碳滑板结构

碳滑板主要由碳条本体、托架、粘接层组成。托架截面近似为梯形结构,包含3个独立空腔,长度约1m。本文设计了托架内灌装颗粒阻尼和表面敷设约束阻尼两种方案对碳滑板的减振特性进行对比研究,阻尼措施处理见示意图3。评价结构阻尼处理的效果,主要是系统增加单位重量取得的减振效果及其工作性能的稳定程度。为了便于体现碳滑板采取不同减振降噪措施后的振动特性,试验中控制颗粒阻尼和约束阻尼层的质量,均为1 280 g。具体试验方案见表1。其中,颗粒阻尼灌装于托架下部的3个空腔中,填充颗粒选为均质铁球,颗粒直径2 mm,相应的堆积密度为6 000 kg/m<sup>3</sup>,填充率接近90%。约束阻尼层粘贴在托架下表面,阻尼层选用橡胶材料,设计厚度8 mm,约束层使用1.5 mm不锈钢板。

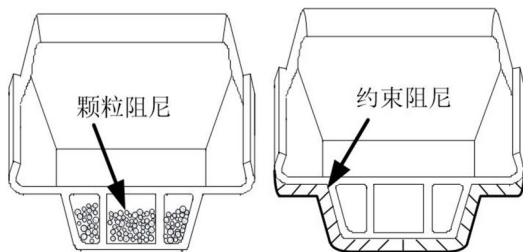


图3 颗粒阻尼和约束阻尼措施示意图

表1 试验内容表

方案	内容	重量增加/g
1	碳滑板	-
2	碳滑板+颗粒阻尼	1 280
3	碳滑板+约束阻尼	1 280

采用增加颗粒阻尼和约束阻尼层处理后的碳滑板振动响应测试如图4所示。试验中碳滑板两端用细长软绳悬空吊挂在固定台架上模拟自由边界,输入采用力锤敲击,得到瞬态脉冲激励。锤头选用尼龙头,试验在室温下进行。为使试验结果具有可比性,每种减振方案中选取相同位置的两处测点,其中测点A位于碳滑板中间位置,测点B靠近碳滑板端部1/4处。为考虑碳滑板垂向和横向激励的影响,激励点选择为两个不同方向的单点激励。其中垂向激励点在碳滑板本体上表面,横向激励点选择在碳滑板本体侧面位置,振动响应点布置与激励点相同位置,获取加速度原点导纳数据。为了获得最优的动态特性,试验中激励范围与分析带宽一致。在进行连续多次敲击测试后,选取有效数据,截取每种减振方案下的输入力相同的测试结果进行对比分析。输出数据选择为传递函数,即输出与输入的比值。

模态测试条件与振动响应测试一致。为保证测试具有较高的精度,这里采用多点激励多点响应(MIMO)的锤击方法对未加阻尼处理的碳滑板进行



图4 碳滑板锤击实验

模态实验,敲击点选择尽量避开各阶模态振型的节点,参数识别得到其固有频率、阻尼及振型。

整个测试系统的实验设备主要有:INV 3062C多通道数据采集仪,美国PCB力锤和加速度传感器,连接线若干。

## 2 试验测试与结果分析

### 2.1 模态测试结果

经过DASP软件采集测量信号并分析生成频响函数后,进行模态分析。通过后处理模块对试验数据进行处理,以动画的形式表现出碳滑板的振型。图5、图6列出了自由边界条件下碳滑板的前几阶振型。

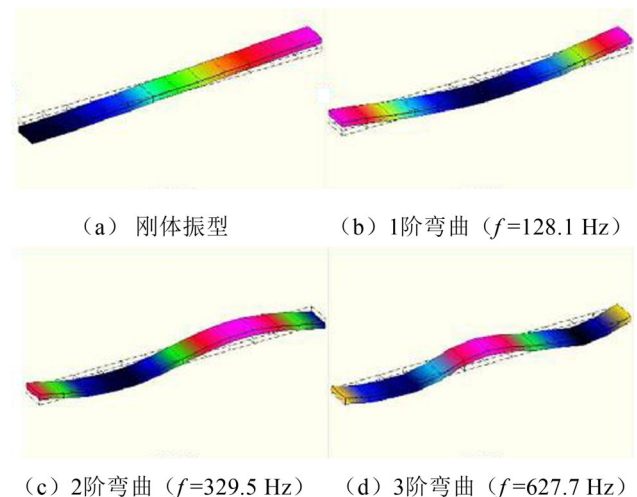


图5 碳滑板垂向振型

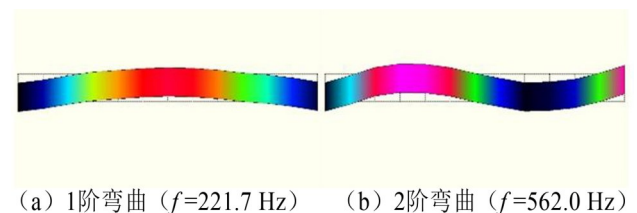


图6 碳滑板横向振型

可以看出,由于碳滑板尺寸较长,在力锤激励下表现为自由梁结构的固有振动特性,排除刚体振型,试验频段内的振型全部表现为弯曲振动。其中1阶



弯曲振型关于碳滑板的中间位置对称,中点振幅最大。2阶弯曲振型关于碳滑板中间位置反对称,左右两端响应点的振动相位相反。随着频率的升高,振型更加复杂。垂向2、3阶弯曲振型波峰、波谷位置会引起弓网之间的接触力增大,这种高频振动与轨道交通弓网中常见的“二凹坑”和“三凹坑”异常磨损现象密切相关。

两种阻尼减振措施下的前6阶固有频率和阻尼比计算结果如表2所示。其中, $f$ 为固有频率, $\xi$ 为结构阻尼比。由于试验中用丝绳所悬挂模拟自由边界条件,对低频振动有较大影响,故舍弃第1阶刚体运动。可以看出,对比未加处理的碳滑板,两种阻尼措施均显著增加了系统的阻尼比,可达1个量级以上。增加颗粒阻尼后碳滑板的固有频率变化较小,而敷设约束阻尼层后碳滑板的固有频率明显发生改变。

## 2.2 垂向激励结果分析

如图7所示。比较垂向激励下3种测试工况的自由振动衰减曲线,无阻尼方案振动加速度最大振幅值衰减90%需要时间0.4 s,而添加颗粒阻尼后仅需0.03 s即可达到相同条件,同时最大振幅值降低了约28%。敷设约束阻尼的最大振幅衰减量最大,达到40%。结合表2可以看出,两种阻尼措施均显著增加了系统的阻尼比,在外部激励作用时,两种阻尼措施均能够有效抑制碳滑板的振动水平,且相比未加阻尼处理的碳滑板,外部激励消失后振动衰减时间极大缩短。

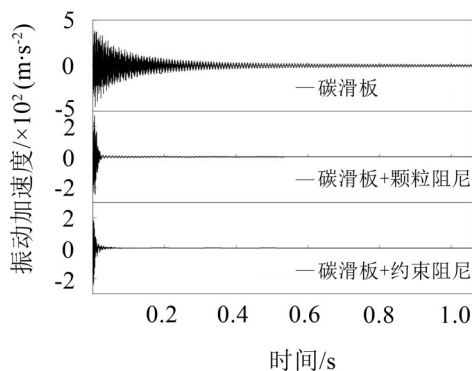


图7 垂向振动衰减曲线图

图8、图9中可以看出,碳滑板结构由于本身阻尼较小,在固有频率处出现了明显的共振峰。采用相同质量的颗粒阻尼和约束阻尼处理后,振动幅值均显著降低。

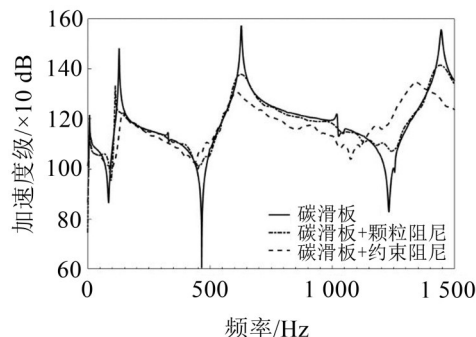


图8 测点A的垂向加速度导纳曲线

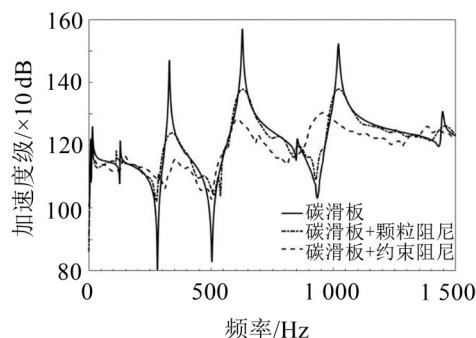


图9 测点B的垂向加速度导纳曲线

碳滑板托架灌装颗粒阻尼后,两个测点位置在共振频段的加速度峰值明显降低,非共振频段对应的加速度幅值降低不明显,这种现象说明加颗粒阻尼并不改变系统的固有频率,只影响系统的振幅,加颗粒阻尼对于碳滑板共振频段有显著的抑制效果。在碳滑板结构的共振频段,系统的振动响应幅值最大,腔体中的颗粒表现出某种形态的流动特征,颗粒的相互碰撞和摩擦及颗粒和壁面间的碰撞达到最大值,此时颗粒阻尼减振效果急剧增加到最大值。

碳滑板托架表面敷设约束层后,截面尺寸略有增加。与未加阻尼处理对比,碳滑板敷设约束阻尼层后的共振峰受到明显抑制,中高频响应峰值降低达10 dB以上,共振频率向低频方向偏移,说明表面

表2 碳滑板模态实验结果对比

碳滑板			碳滑板+颗粒阻尼		碳滑板+约束阻尼	
振型	$f/\text{Hz}$	$\xi/(\%)$	$f/\text{Hz}$	$\xi/(\%)$	$f/\text{Hz}$	$\xi/(\%)$
垂向	128.1	0.26	113.3	0.54	138.0	8.41
横向	221.7	0.14	217.0	8.60	211.5	3.50
垂向	329.5	0.14	339.1	8.40	352.0	7.31
横向	562.0	0.22	561.1	5.81	522.0	1.92
垂向	627.7	0.19	627.0	4.31	608.5	4.50
横向	848.9	0.16	841.5	3.40	686.1	0.86

约束阻尼处理降低振动幅值的同时也会改变系统固有频率。整体上使用约束阻尼处理后的频响函数曲线更平缓,减振效果明显。

地铁列车运行时,受线路情况(如接触线不顺)等影响,受电弓与接触线相互激励形成高频振动波,弓网垂向接触力也会随之剧烈变化,导致碳滑板踏面的异常磨损。因此,使用两种阻尼措施有效降低了碳滑板的振动水平,垂向2、3阶振动峰值可降低10 dB以上,这对抑制碳滑板高频振动引起的磨损非常有利。

### 2.3 横向激励结果分析

图10为横向激励下3种测试工况的碳滑板自由振动衰减曲线,无阻尼方案振动加速度最大振动幅值衰减90%需要时间0.5 s,而采用颗粒阻尼和约束阻尼处理后分别需要0.05 s和0.06 s即可达到相同条件。与未加阻尼措施的碳滑板相比,内部灌装颗粒阻尼后的最大振幅降低了约46%,托架表面敷设约束阻尼后最大振幅降低了约44%。可以看出,横向激励下采用颗粒阻尼减振措施具有更好的效果,这与垂向激励下的情况略有不同。从振型图(图5和图6)上可以看出,碳滑板的振动模式均表现为弯曲振型,而碳滑板的厚度较宽度尺寸小,因此在板表面敷设约束阻尼材料对横向振动的抑制作用不如垂向效果好。总体上,横向激励下颗粒阻尼处理比表面敷设约束阻尼的振动抑制效果更好。结合表2,比较横向振动下两种阻尼方案的结构阻尼比,碳滑板使用颗粒阻尼处理后的阻尼比均大于使用约束阻尼措施,也验证了这一点。

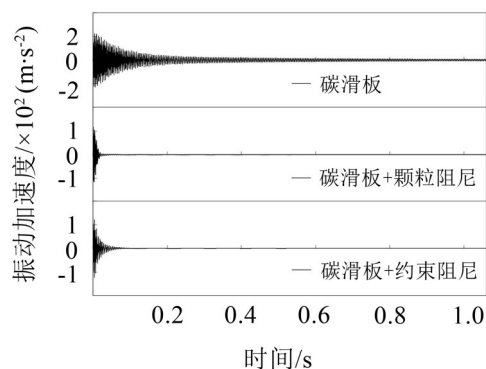


图10 横向振动衰减曲线图

从图11、图12的频响函数曲线可以看出,横向激励下的频响函数曲线与垂向激励情况相似,碳滑板在固有频率位置出现明显的共振峰值,采用相同质量的颗粒阻尼和约束阻尼处理后,振动峰值降低约5 dB~20 dB。

碳滑板使用颗粒阻尼处理后,两个测点位置在共振频段的加速度峰值都明显降低,非共振频段的

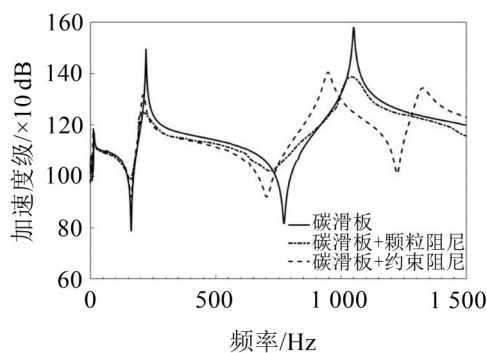


图11 测点A的横向加速度导纳曲线

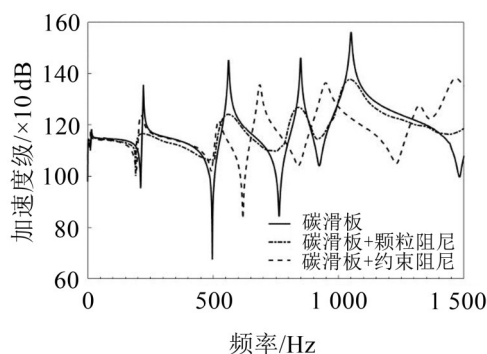


图12 测点B的横向加速度导纳曲线

加速度幅值基本无变化,这与垂向激励下的情况一致。说明加颗粒阻尼并不改变系统的固有频率,只影响系统的振幅,加颗粒阻尼对于碳滑板共振频段有显著的抑制效果,在固有频率处减振效果达到最大值。

碳滑板使用约束阻尼处理后,结构的低频响应曲线变化不大,522 Hz以上的共振频率向低频明显偏移,振动峰值有所降低。由于约束阻尼层增加了结构的阻尼,频响函数曲线相对处理前平缓,达到了降低振动的效果,但整体减振效果比使用颗粒阻尼效果差一些。进一步说明了采用约束阻尼方法也会改变原结构的固有频率。

## 3 结语

本文针对地铁受电弓碳滑板的异常振动问题,结合碳滑板的结构特点,设计了颗粒阻尼和约束阻尼两种减振措施并进行试验,研究了垂向和横向激励条件下碳滑板的振动特点及阻尼减振效果,得到以下结论:

- (1) 碳滑板的垂向2、3阶弯曲振型与轨道交通中常见的碳滑板异常磨损现象密切相关。使用颗粒阻尼和约束阻尼两种减振措施,均显著增加了系统的阻尼比,可达1个量级以上。
- (2) 两种阻尼处理措施均能抑制碳滑板的振动水平,缩短振动衰减时间。与未加阻尼措施的碳滑

板相比,垂向激励下内部灌装颗粒阻尼后的最大振幅值降低了约28%,敷设约束阻尼的最大振幅衰减量达到40%;横向激励下,使用颗粒阻尼处理后的最大振幅降低了约46%,使用约束阻尼处理后的最大振幅降低了约44%。颗粒阻尼并不改变系统的固有频率,只影响系统的振幅,加颗粒阻尼对于碳滑板共振频段有显著的抑制效果。约束阻尼措施抑制中高频振动峰值的效果达10 dB以上,降低振动幅值的同时会使系统共振频率向低频方向偏移。

(3) 评价结构阻尼措施的处理效果,主要是系统增加单位重量得到的减振效果。总体上,垂向激励下表面敷设约束阻尼比灌装颗粒阻尼的振动抑制效果更好,而横向激励下表面敷设约束的减振效果变差,没有灌装颗粒阻尼的振动抑制作用强。

#### 参考文献:

- [1] 关金发. 受电弓与刚性接触网动力相互作用研究[D]. 成都:西南交通大学,2016.
- [2] 黄思俊,刘青林,王悦东. 高速动车组受电弓结构随机振动疲劳分析[J]. 大连交通大学学报,2019,40(2):20-23.
- [3] 徐彦,于若飞,李江涛. 城市轨道交通车辆受电弓接触压力与碳滑板磨耗关系研究[J]. 铁道机车车辆,2019,39(3):67-71.
- [4] LINK M. Zur berechnung von fahrleitungsschwingungen mit hilfe frequenzabhängiger finiter elemente[J]. Ingenieur Archiv, 1981, 51(1-2): 45-60.
- [5] LEE K, CHUNG J. Dynamic analysis of a hanger-supported beam with a moving oscillator[J]. Journal of Sound and Vibration, 2013, 332(13): 3177-3189.
- [6] CHO Y H, LEE K, PARK Y, et al. Influence of contact wire pre-sag on the dynamics of pantograph-railway catenary[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2010, 52(11): 1471-1490.
- [7] WICKENS A H. Fundamentals of rail vehicle dynamics: guidance and stability[M]. Swets and Zeitlinger Publishers, 2004.
- [8] 张卫华. 受电弓-接触网系统动态特性的研究[D]. 成都:西南交通大学,1989.
- [9] 王新宇,余洪昇,廖锦艺. 深圳地铁5号线车辆受电弓裂纹故障分析[J]. 电力机车与城轨车辆,2017,40(4):66-70+77.
- [10] 刘国良. 广州地铁二号线列车受电弓碳滑板异常磨耗分析[J]. 电力机车与城轨车辆,2008(2):55-56.
- [11] 邓琳蔚,陈照波,王林玉,等. 基于颗粒阻尼的车轮声辐射特性分析[J]. 噪声与振动控制,2019,39(2):53-56.
- [12] 周云. 黏弹性阻尼减震结构设[M]. 武汉:武汉理工大学出版社,2006.
- [6] 刘浩然,侯东晓,时培明,等. 轧机辊系滞后非线性垂直振动系统的振动特性[J]. 机械工程学报,2011,47(13):65-71.
- [7] MOSAYEBI M, ZARRINKOLAH F, FARMANESH K. Calculation of stiffness parameters and vibration analysis of a cold rolling mill stand[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 91: 4359-4369.
- [8] 凌启辉,闫晓强,张义方. 热连轧机非线性水平振动抑制研究[J]. 长安大学学报(自然科学版),2015,35(6):145-151.
- [9] 曾令强,臧勇,郜志英,等. 轧机整体耦合建模问题研究[J]. 机械工程学报,2015,51(14):46-53.
- [10] 凌启辉,闫晓强,张清东,等. 双动力源驱动下的热连轧机振动特征[J]. 振动、测试与诊断,2014,34(3):534-538+594.
- [11] 凌启辉,赵前程,王宪,等. 热连轧机工作辊水平-垂直非线性振动特性及抑制[J]. 中国机械工程,2017,28(16):1943-1950+2007.
- [12] KIM Y, PARK H, LEE S S, et al. Development of a mathematical model for the prediction of vibration in a cold rolling mill including the driving system[J]. Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan, 2012, 52(6): 1135-1144.
- [13] 侯东晓,彭荣荣,刘浩然. 变摩擦力下板带轧机辊系垂直-水平耦合振动特性[J]. 东北大学学报(自然科学版),2013,34(11):1615-1619.
- [14] LU X, SUN J, LI G, et al. Stability analysis of a nonlinear coupled vibration model in a tandem cold rolling mill[J]. Shock and Vibration, 2019, 2019(PT.2): 1-14.
- [15] HEIDARI A, FOROUZAN M R, NIROOMAND M R. Development and evaluation of friction models for chatter simulation in cold strip rolling[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 96: 2055-2075.
- [16] 刘延柱,陈立群. 非线性振动[M]. 北京:高等教育出版社,2001:73-83.

(上接第60页)