文章编号：0253-374X(2025)10-1606-10
DOI：10.11908/j.issn.0253-374x.24159

车下设备橡胶元件热氧老化对高速列车车体模态的影响

孙维光[1,2,3]，宫　岛[1,2]，周劲松[1,2]，邓　新[1,2]，刘广宇[1,2]
（1. 同济大学 交通学院，上海 201804；2. 同济大学 上海市轨道交通结构耐久与系统安全重点实验室，上海 201804；3. 中车青岛四方机车车辆股份有限公司，山东 青岛 266114）

摘要：通过加速老化试验和动态力学性能试验，分析橡胶动态力学性能参数的变化规律。引入形状系数，提出V型橡胶减振元件的三向动刚度计算方法，采用非线性最小二乘法对橡胶元件动力性能试验数据进行拟合，获得橡胶粘弹性本构模型参数。结合橡胶粘弹性本构模型，以橡胶减振元件的动刚度为老化指标，建立橡胶减振元件动刚度性能演变模型。建立高速列车车体及吊挂设备耦合有限元模型，吊挂设备与车体间连接刚度采用所建立的动刚度性能演变模型，探究外部环境温度、激励频率以及热氧老化对车体与车下设备振动模态的动态发展影响。结果表明：低阶模态频率随动刚度的增大，均会有不同程度的增大。其中对一阶低频垂弯和一阶高频垂弯的影响较为明显。当减振元件动刚度值增大时，一阶低频垂弯模态频率向无吊挂设备时一阶垂弯频率靠近，同时其对应的幅值增大；一阶高频垂弯模态频率向更高频方向移动，其所对应的幅值下降。研究结果可为高速列车橡胶隔振元件的工程应用提供参考。

关键词：高速列车；车下设备；橡胶减振元件；热氧老化；老化性能预测；模态频率
中图分类号：U270　　**文献标志码**：A

Influence of Thermal Oxygen Aging of Rubber Components of Suspended Equipment on the Mode of High-Speed Train Body

SUN Weiguang[1,2,3], *GONG Dao*[1,2], *ZHOU Jinsong*[1,2], *DENG Xin*[1,2], *LIU Guangyu*[1,2]
(1. College of Transportation, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Shanghai Key Laboratory of Rail Infrastructure Durability and System Safety, Shanghai 201804, China; 3. CRRC Qingdao Sifang Co., Ltd., Qingdao 266114, China)

Abstract: The variation law of dynamic mechanical performance parameters of rubber was analyzed through accelerated aging test and dynamic mechanical performance evaluations. The parameters of viscoelastic constitutive model of rubber were obtained by non-linear least squares fitting. A method for calculating the three-dimensional dynamic stiffness of V-shaped rubber damping elements was proposed by introducing shape coefficients. Using the dynamic stiffness of rubber damping components as the aging index, a dynamic stiffness performance evolution model was developed for rubber damping components. A finite element model of the high-speed train body and under vehicle equipment, as well as a rigid flexible coupling dynamic model of the high-speed train was developed to explore the effects of external environmental temperature, excitation frequency, and thermal oxygen aging on modal frequency, coupled vibration of the body and under vehicle equipment. The results show that the low-order modal frequencies will increase to varying degrees with the increase of dynamic stiffness. The impact on first-order low-frequency vertical bending and first-order high-frequency vertical bending is more significant. When the dynamic stiffness value of the damping element increases, the first-order low-frequency vertical bending mode frequency approaches the first-order vertical bending frequency without the suspended equipment, and its corresponding amplitude increases. The first-order high-frequency vertical bending mode frequency shifts towards higher frequencies, and its corresponding amplitude decreases. The research results can provide reference for the engineering application of rubber vibration isolation components in high-speed trains.

收稿日期：2024-05-04
基金项目：国家自然科学基金面上项目（52375115），中央高校基本科研业务费专项资金资助项目（22120240338），中国中车股份有限公司科技研究开发计划项目重点项目（2024CTB080）
第一作者：孙维光，正高级工程师，主要研究方向为高速动车组振动模态匹配设计。E-mail：sunweiguang.sf@crrcgc.cc
通信作者：宫　岛，长聘副教授，博士生导师，工学博士，主要研究方向为车辆系统动力学与控制。E-mail：gongdao@tongji.edu.cn

论文拓展介绍

Keywords: high-speed trains; under vehicle equipment; rubber damping components; thermal oxygen aging; aging performance prediction; modal frequency

高速动车组部分车下设备箱体质量较大，若车下设备减振设计效果不佳，则会对车体局部振动和整车振动造成不利影响[1-2]。为了达到减振目的，车下设备悬挂系统通常采取橡胶元件吊挂方式[3]。其中橡胶金属复合减振元件使用广泛，与金属弹簧相比，复合减振元件不仅可以减轻重量，简化悬挂系统的设计结构，同时还能够提供X、Y、Z三个方向的刚度，更好地吸收、衰减噪声和振动。然而，橡胶会随着时间的推移发生性能老化，由其制成的橡胶减振元件的减振性能也会随之发生变化，甚至丧失其使用价值，这对高速列车的综合运营性能提出了严峻的考验。因此，准确评估与预测高速列车橡胶元件老化，明确橡胶老化对高速列车车体模态的影响就显得尤为重要。

刘巧斌等[4-6]基于分散系数最小化法和改进的粒子群优化算法（modified particle swarm optimization，MPSO）老化加速因子识别法对橡胶的自然环境退化做了预测。分数导数方法已被广泛使用于橡胶等粘弹性本构模型的建立之中[7]。Bauer等[8]通过测量橡胶轮胎热氧老化后的动力学性能以选择最优的老化加速条件。Wu等[9]基于有限元模型和热氧老化试验发现橡胶老化导致其密封性能明显下降。Soltani等[10-11]建立了汽车悬挂系统中弹性元件的老化模型，且研究了元件老化对车辆整体动力学性能的影响。Gong等[12]研究了橡胶元件温变特性影响下的车体与车下设备耦合振动机理，探究了车下设备与车体模态振动能量的发展规律。

然而，采用橡胶元件吊挂的车下设备与车体构成了复杂的耦合系统，温度、激励频率和老化对高速列车车体与车下设备的影响是动态发展的。为此，本文将综合考虑吊挂橡胶元件与温度、振动频率的相关性，建立橡胶元件热氧老化预测模型，研究橡胶元件热氧老化对高速列车车体与车下设备振动模态的动态影响，为吊挂橡胶元件老化特性限制规范的制定提供参考。

1　橡胶热氧老化及动态力学性能试验

选择中国某型高速动车组车下设备所用的V型橡胶减振元件作为试验对象，每个减振元件有两个长方形橡胶垫组成，橡胶材质为天然橡胶，金属骨架采用球墨铸铁QT550，其外型如图1所示。

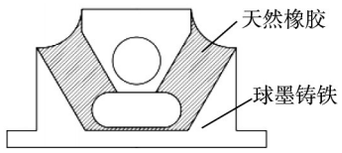


图1　V型橡胶减振元件结构示意图

Fig. 1　Schematic diagram of V-shaped rubber vibration damping element structure

采用老化试验箱进行热氧加速老化试验，该试验箱温度控制范围为20 ℃～250 ℃，温度控制精度为0.5 ℃。本文参考GB/3512—2014《硫化橡胶或热塑性像胶热空气加速老化和耐热试验》[13]和TB/T2843—2015《机车车辆用橡胶弹性元件通用技术条件》[14]设计橡胶减振元件的热氧加速老化试验。试验箱的温度设置为70 ℃，预热试验箱，完成老化试验后取出试样，并进行动态热机械分析试验。采用DMA-Q800动态热机械分析仪测量V型橡胶减振元件的橡胶部分在振动载荷下的动态力学性能参数随温度、频率的变化关系。裁剪V型橡胶减振元件的橡胶部分，制作成长度60 mm、宽度10 mm、厚度4 mm的长方形试验样条。基于橡胶元件应用场景及高速列车弹性体振动特性，本文主要关注20 Hz以内橡胶元件及车体振动特性[12]。

（1）动态温度扫描试验（温度谱试验）扫描范围设置为－80 ℃～80 ℃，恒定试验加载频率分别设置为2、10、15、20 Hz，测定橡胶的动态力学性能随温度的变化规律。

（2）动态频率扫描试验（频率谱试验）扫描范围设置为0.1～20 Hz，恒定试验温度分别设置为－10 ℃、0 ℃、10 ℃、20 ℃，测定在不同恒定温度下，橡胶的动态力学性能随载荷频率的变化规律。

在交变应力的作用下，橡胶的弹性模量可以用复模量进行表示，定义为应力σ与应变ε的比值，即：

$$E^{*}=\frac{\sigma}{\varepsilon}=\frac{\sigma_0 e^{j(\omega t+\varphi)}}{\varepsilon_0 e^{j\omega t}}=E_1+jE_2 \tag{1}$$

式中：σ_0和ε_0分别是应力与应变初始值；E_1为储能模量，反映橡胶的弹性成分，主要体现为在交变应力的作用下橡胶由于弹性形变而贮存能量的能力，具体表征为材料的刚度；E_2为耗能模量，反映橡胶的粘性成分，主要体现为由于阻尼的作用而以热能形式损耗能量的能力，具体表征材料的阻尼，其对应的应力应变存在$\pi/2$的相位差；j为虚数单位；ω为圆频率。

根据复模量展开，E_1和E_2分别可用式（2）和式

(3)计算:

$$E_1=\frac{\sigma_0}{\varepsilon_0}\cos\varphi \tag{2}$$

$$E_2=\frac{\sigma_0}{\varepsilon_0}\sin\varphi \tag{3}$$

根据式(2)和式(3),可以得到损耗因子$\tan\varphi$为

$$\tan\varphi=\frac{E_2}{E_1} \tag{4}$$

通过试验获得橡胶加速老化前后储能模量E_1、耗能模量E_2以及损耗因子$\tan\varphi$的温度谱与频率谱结果对比如图2、图3所示。储能模量随温度升高而逐渐减小,且减小趋势变缓;耗能模量和损耗因子的变化趋势相同,在玻璃化转变温度[15]前增大,在其之后减小。橡胶老化会使得材料的储能模量、耗能模量和损耗因子增大。

2 橡胶老化性能预测

2.1 V型橡胶减振元件三向动刚度计算

为分析V型橡胶减振元件动刚度特性,需首先明确简单的长方体橡胶元件刚度。图4所示为长方体橡胶元件示意图,假设橡胶元件在z轴方向受到拉压外力F,x轴和y轴不受力。计算沿z轴方向的静刚度,z轴方向的应变处于橡胶元件总高度的10 %至20 %的范围内,符合小变形线性弹性假设的范畴,则拉压外力F同位移呈线性关系,z轴方向的刚度可以表示为式(5):

$$K_z=\frac{F}{\Delta x}=\frac{ES}{h}\cdot m_z \tag{5}$$

式中:S为截面积,$S=a\times b$;h为橡胶元件的高度;m_z为z轴的形状系数;E为弹性模量。

对于x轴和y轴,刚度如式(6)所示:

$$\begin{cases}K_x=\dfrac{GS}{h}m_x\\[2ex] K_y=\dfrac{GS}{h}m_y\end{cases} \tag{6}$$

式中:m_x和m_y分别为x轴y轴的形状系数;G为剪切模量。橡胶元件的弹性模量和储能模量、耗能模量的关系满足:

$$E=\sqrt{{E_1}^2+{E_2}^2} \tag{7}$$

根据橡胶减振元件结构特征,其可近似看成两个长方体形状的橡胶元件拼接而成,如图5所示。橡胶元件刚度计算为式(8)。本文中V型橡胶减振元件的x轴、y轴和z轴方向与高速列车车体方向相同。

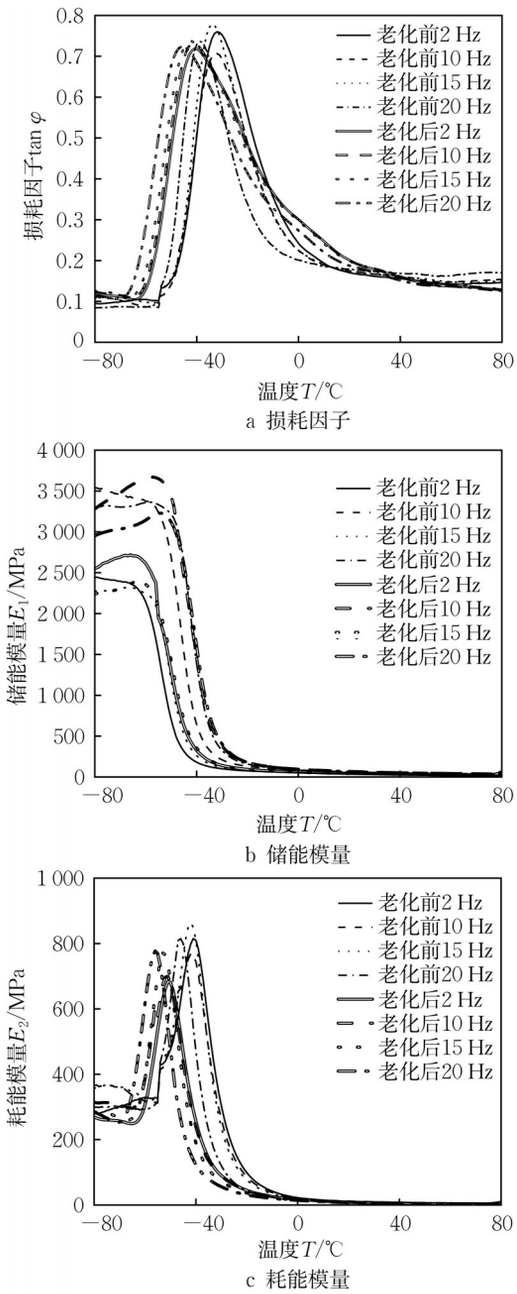


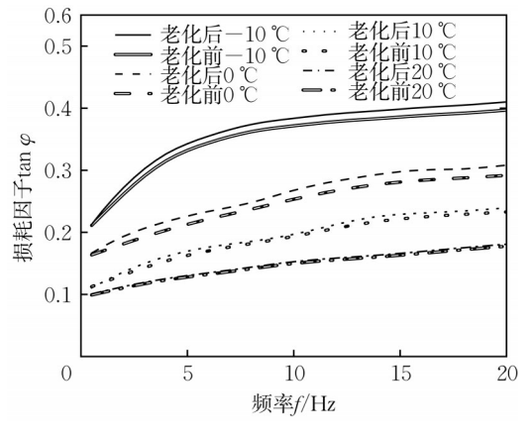
图2 橡胶老化前后温度谱

Fig. 2 Temperature spectrum of rubber before and after accelerated aging of rubber

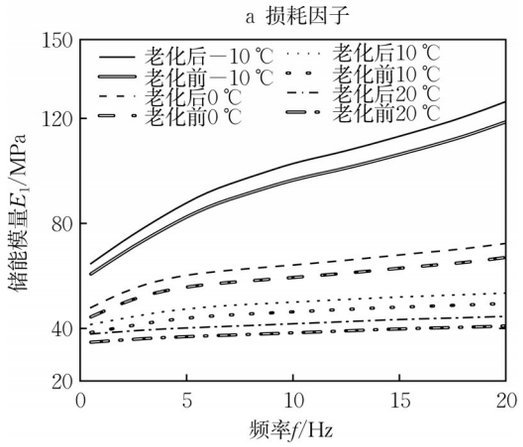
$$\begin{cases}K_x=2\left(K_{x_1}\cos^2\theta+K_{z_1}\sin^2\theta\right)\\ K_y=2K_{y_1}\\ K_z=2\left(K_{x_1}\sin^2\theta+K_{z_1}\cos^2\theta\right)\end{cases} \tag{8}$$

式中:K_{x_1}、K_{y_1}、K_{z_1}分别为按近似于长方体形状橡胶元件计算所得到的刚度;θ为V型橡胶减振元件的z_1轴和z轴夹角。本文所分析的V型橡胶减振元件的相关形状参数为$a=b=50$ mm,$h=30$ mm,$\theta=60°$。

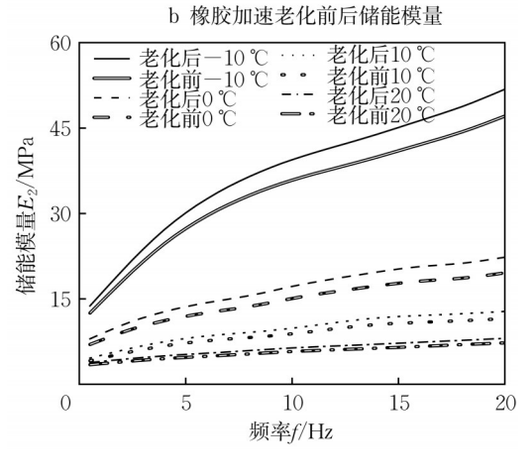
参考《机械设计手册》[16],V型橡胶减振元件的三向形状系数分别为$m_z=1.38$,$m_x=m_y=0.91$。依



a 损耗因子



b 橡胶加速老化前后储能模量



c 橡胶加速老化前后耗能模量

图3　橡胶加速老化前后频率谱

Fig. 3　Frequency spectrum of rubber before and after accelerated aging

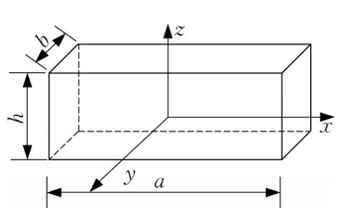


图4　长方体橡胶元件示意图

Fig. 4　Schematic diagram of rectangular rubber components

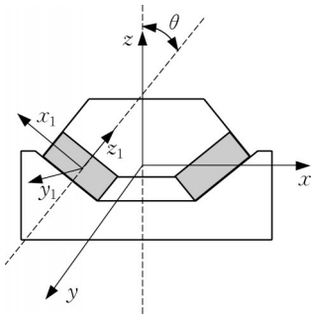


图5　V型橡胶减振元件简易示意图

Fig. 5　Simplified schematic diagram of V-shaped rubber damping element

据式(8),则三向动刚度分别为

$$\begin{cases} K_x = 185E \\ K_y = 50E \\ K_z = 95E \end{cases} \tag{9}$$

2.2　橡胶粘弹性本构模型参数拟合

经典粘弹性本构模型存在一定局限性,使用四参数三元件分数导数FZM模型(fractional zener model),可以在较宽频率范围内对材料的复模量进行高质量拟合。FZM模型由一个线性弹簧和一个分数导数Kelvin模型串联而成,如图6所示。图中,α为本构系数,η为粘性系数。

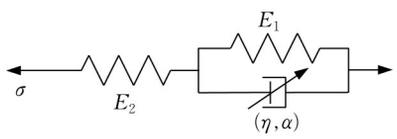


图6　分数导数模型

Fig. 6　Fractional zener model

FZM模型的应力–应变关系满足式(10):

$$\sigma(t)+p_1D^\alpha\sigma(t)=q_0\varepsilon(t)+q_1D^\alpha\varepsilon(t) \tag{10}$$

式中:p_1、q_0、q_1、α为本构系数。对式(10)两端进行傅里叶变换,引入等式$\mathrm{j}^\alpha=\cos(\alpha\pi/2)+\mathrm{j}\sin(\alpha\pi/2)$,并对复模量$E^*(\omega)$分解得到模型的储能模量、耗能模量、损耗因子分别为式(11)—(13):

$$E_1(\omega)=\frac{q_0+p_1q_0\omega^\alpha\cos(\alpha\pi/2)+q_1\omega^\alpha\cos(\alpha\pi/2)+q_1p_1\omega^{2\alpha}}{1+2p_1\omega^\alpha\cos(\alpha\pi/2)+(p_1\omega)^2} \tag{11}$$

$$E_2(\omega)=\frac{q_1\omega^\alpha\sin(\alpha\pi/2)-p_1q_0\omega^\alpha\sin(\alpha\pi/2)}{1+2p_1\omega^\alpha\cos(\alpha\pi/2)+(p_1\omega)^2} \tag{12}$$

$$\tan\varphi=\frac{q_1\omega^\alpha\sin(\alpha\pi/2)-p_1q_0\omega^\alpha\sin(\alpha\pi/2)}{q_0+p_1q_0\omega^\alpha\cos(\alpha\pi/2)+q_1\omega^\alpha\cos(\alpha\pi/2)+q_1p_1\omega^{2\alpha}} \tag{13}$$

结合储能模量、耗能模量的频率谱试验数据,采

用多目标非线性最小二乘法拟合,模型参数如表1所示。拟合结果如图7所示,可以发现,拟合值与实测数据吻合较好。

表1 不同恒定温度下拟合的模型参数

Tab. 1 Model parameters fitted at different constant temperatures

温度/℃	p_1	α	q_0	q_1
−10	0.087 1	0.58	52.76	22.97
0	4.39×10^{-10}	0.42	36.23	12.13
10	2.88×10^{-11}	0.39	33.72	6.23
20	1.53×10^{-12}	0.39	30.63	3.99

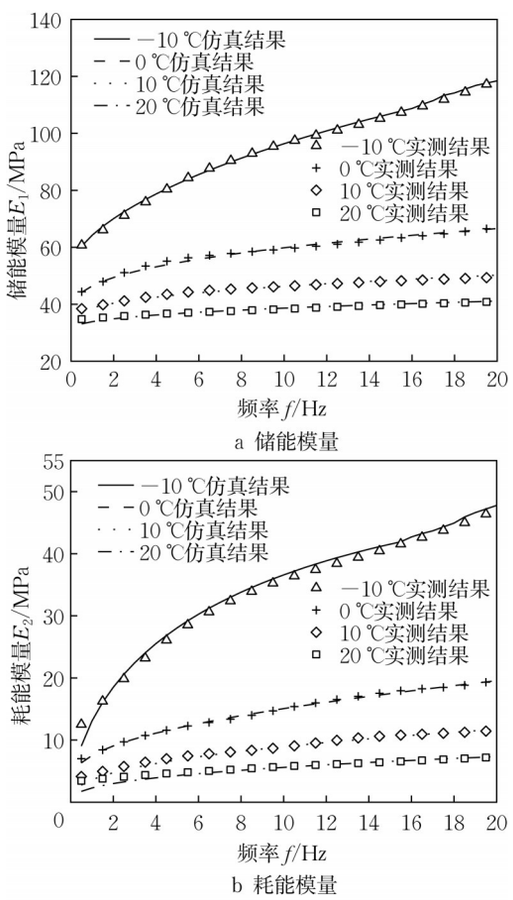


图7 拟合结果

Fig. 7 Fitting results

2.3 老化时间对橡胶减振元件动态力学性能影响

根据车下设备的振动特性,这里将车体至车下设备的振动传递设计为消极隔振,设备至车体的振动传递设计为积极隔振。根据消极隔振理论,不论阻尼比多大,要达到隔振目的,车体模态频率与吊挂系统固有频率比值必须满足大于$\sqrt{2}$的条件。如果确实由于其他原因只能将该频率比值设计在小于$\sqrt{2}$的区域,那也要使其低于0.4,由于静挠度是车下设备吊挂橡胶件刚度、橡胶件个数选择的重要设计依据,因此,结合工程实际,在后续分析中以吊挂静挠度为参数,动静刚度比仍选取为1.4。那么,车下设备自振频率f_n与吊挂元件刚度k_d关系为

$$f_n=\frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{k_d}{m_{eq}}} \tag{14}$$

式中:m_{eq}为设备质量。动态力学性能老化程度$f(p)$随老化时间t的变化关系满足:

$$f(p)=A\mathrm{e}^{\Delta kt^{\beta}} \tag{15}$$

式中:A为试验常数,取1;t为老化时间,d;k为热氧老化反应速率,取0.072;β为常数,$0\leqslant\beta\leqslant1$;$\Delta$为符号因子,当老化程度$f(p)$随老化时间$t$增加而增加时,取为"+"号,否则取为"−"号。对式(15)两边取对数,即得:

$$\ln f(p)=\ln A+\Delta kt^{\beta} \tag{16}$$

令式(16)中$\eta=\ln A$,$\mu=\Delta k$,即化简为

$$\ln f(p)=\eta+\mu t^{\beta} \tag{17}$$

式中:η、μ、β均为待求参数。

式(17)为p-t二元数学模型。引入Arrhenius方程,可建立橡胶元件的粘弹性动态力学性能的变化p与老化温度T和老化时间t之间的p-T-t三元数学模型。以动刚度变化率γ来表示橡胶的老化程度,即:

$$f(p)=1-\gamma \tag{18}$$

任意老化时间的动刚度变化率γ可以表示为

$$\gamma=\frac{K'-K}{K} \tag{19}$$

式中:K为橡胶老化前的初始动刚度;K'为橡胶老化后的动刚度。则可以推算出刚度和老化程度$f(p)$之间的关系为

$$K'=K(2-A\mathrm{e}^{\Delta kt^{\beta}}) \tag{20}$$

70 ℃恒定温度加速老化下的1~7 d的老化程度计算结果见表2。

表2 70 ℃加速老化下橡胶动刚度老化程度的计算结果

Tab. 2 Calculation results of the degree of dynamic stiffness aging of rubber under accelerated aging at 70 ℃

老化时间t / d	老化程度$f(p)$	老化程度的对数$\ln f(p)$
0	1	0
2	0.903	−0.101
4	0.865	−0.144
7	0.826	−0.190

根据Maxwell本构模型所描述的应力-应变关系[17-18],式中符号因子Δ取"−"号,对表2数据进行非线性最小二乘法拟合,式(17)中的系数拟合结果如表3所示。

由此可得,动刚度的老化程度$f(p)$表达式为

表3　系数拟合结果

Tab. 3　Fitting coefficients of thermal oxygen aging reaction rate

拟合参数	拟合参数值
η	$1.702\,6\times10^{-4}$
μ	−0.072
β	0.45

$$f(p)=\mathrm{e}^{-0.072t^{0.45}} \tag{21}$$

Arrhenius方程[13]即变化为

$$k=\mathrm{e}^{-\frac{1\,337}{T}} \tag{22}$$

下吊设备主要受垂向激励影响较大，本文以橡胶元件垂向刚度为研究对象，根据式(21)和式(22)，推算出不同温度下的橡胶动刚度K和使用时间的关系，以10 ℃和20 ℃为例，其性能演变规律分别如式(23)和(24)所示。本研究将减振元件刚度变化率的上限浮动值设为25 %[19]，推算出10 ℃与20 ℃该橡胶减振元件使用年限分别约为6.5年和5.6年，如图8所示。目前，该高速列车橡胶减振元件的更换周期约为6年，与推算结果基本一致。

$$K=96-48\mathrm{e}^{-0.008\,4t^{0.45}} \tag{23}$$

$$K=80-40\mathrm{e}^{-0.009\,9t^{0.45}} \tag{24}$$

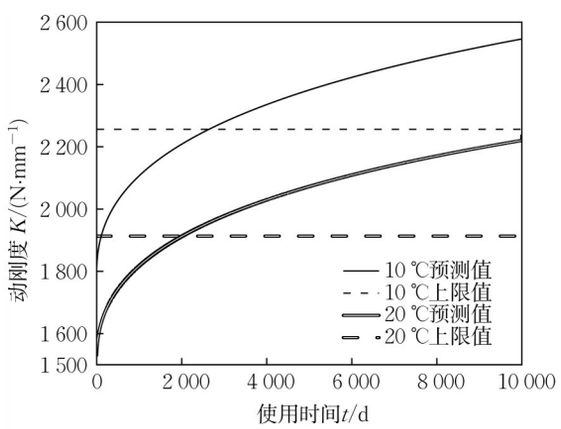


图8　10 ℃与20 ℃下橡胶减振元件动刚度使用寿命

Fig. 8　Dynamic stiffness service life of rubber vibration damping components at 10 ℃ and 20 ℃

3　橡胶热氧老化对高速列车车体模态的影响

3.1　高速列车车体有限元模型

采用Hypermesh建立所研究的高速列车车体有限元模型，车体质量为30.85 t，模型共有150 438个节点，212 042个单元，如图9所示。

图9　高速列车车体的有限元模型

Fig. 9　Finite element model of high-speed train body

车体低阶振型通常表现为整体变形，而高阶振型一般表现为车体局部变形[20]。通过有限元模型可计算得到车体在无吊挂设备状态下的典型低阶弹性体模态。此外，进行了车体模态试验测试，沿车体长度方向选取15个截面布置振动加速度传感器，每个截面均匀布置12个测点，采集横向和垂直振动加速度，采样频率为1 024 Hz，两台激振器分别在车底对角的边梁位置施加随机猝发激励，采用PolyMAX识别车体模态。表4所示为有限元模型仿真结果与车体模态试验结果对比，可以看到二者模态结果吻合较好，表明所建有限元模型是有效的。

表4　模态计算结果对比

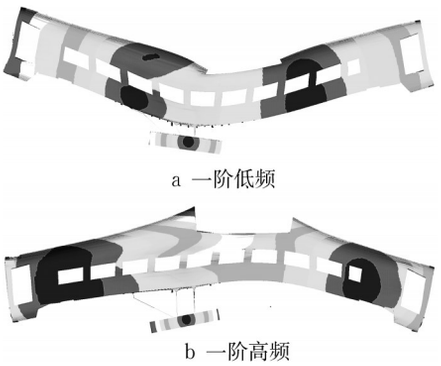
Tab. 4　Comparison of modal calculation results

模态	模态频率 试验结果 / Hz	模态频率 仿真结果 / Hz	相对误差 / %
一阶扭转	6.36	6.12	−3.8
一阶垂弯	10.52	10.29	−2.2
一阶菱形	11.51	11.03	−4.2
一阶横弯	13.89	14.05	1.2
一阶呼吸	15.39	14.72	−4.4

基于所建立的车体有限元模型通过在下吊设备的质心位置建立质量点，以模拟下吊设备的质量。车下大型设备和车体之间的V型橡胶减振元件弹性连接，并设置三向动刚度和阻尼。本文所分析的设备质量为8 000 kg，采用六点弹性吊挂方式与车体连接。图10所示为车体与车下设备耦合模态计算结果。可以看到，当车体和车下设备之间使用弹性橡胶减振元件后，车体产生了2个垂弯模态。在低频的垂弯模态中，车体和车下设备振动同相，称之为一阶低频垂弯，较高频的垂弯模态中，车体和车下设备振动反相，称之为一阶高频垂弯。通常，一阶低频垂弯模态是由于设备的固有频率而致使列车车体产生垂向的弯曲运动；而一阶高频垂弯模态则主要由于车体的垂弯固有模态和车下设备之间产生的相互耦合作用[21]。

3.2　温度对模态频率的影响分析

对包含吊挂设备的车体进行有限元仿真，在不考虑极端天气的情况下，分析在外部激励恒定的条件下，温度对于车体模态频率和振型的影响。



a 一阶低频

b 一阶高频

图10 车体一阶垂弯模态

Fig. 10 First order vertical bending mode of train body

图11所示为车体模态频率随温度变化关系。老化和温度对于高速列车的一阶扭转的影响均不是很明显。由于分析的高速列车工作温度区间在玻璃化转变温度之后,故随着环境温度升高,V型橡胶减振元件的三向刚度会随之减小,进而会导致下吊设备的自振频率减小,一阶典型模态振型所对应的模态固有频率均有所下降,影响较大的为一阶低频垂弯、一阶横弯、一阶呼吸、一阶高频垂弯、一阶菱形。对比分析橡胶加速老化前后同温度下模态频率的变化情况,可以发现橡胶元件的老化使得各振型所对应的模态固有频率上升,影响较大的为一阶低频垂弯、一阶横弯、一阶呼吸、一阶高频垂弯、一阶菱形。

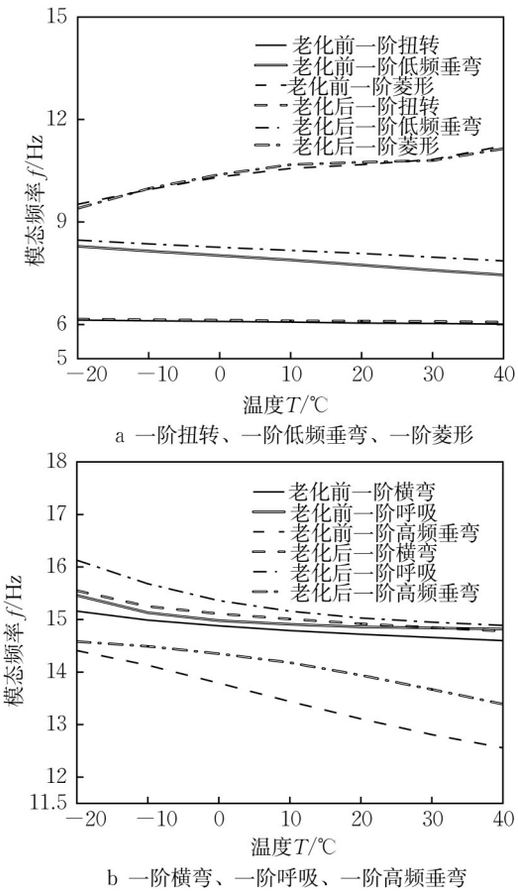
3.3 外部激励频率对模态频率的影响分析

对包含吊挂设备的车体进行有限元仿真,假设外部温度恒定,重点分析老化和0～20 Hz的外部激励对带有车下设备的车体模态频率的影响。

图12所示为车体模态频率与外部激励频率变化关系。老化和外部激励频率对于高速列车车体的一阶菱形的影响不是很明显。随着外部激励频率的逐渐地升高,V型橡胶减振元件的三向动刚度会随之逐渐增大,进而会导致下吊设备的自振频率增大,一阶典型模态振型所对应的模态固有频率均有所增大,影响较大的为一阶低频垂弯、一阶横弯、一阶呼吸、一阶高频垂弯。此外,对比分析橡胶加速老化前后的同外部激励频率下车体模态频率的变化情况,可以发现橡胶元件的老化使得各振型所对应的模态固有频率上升,影响较大的为一阶扭转、一阶低频垂弯、一阶横弯、一阶呼吸、一阶高频垂弯。

3.4 恒定温度下橡胶老化对模态和振动特性的影响

根据2.3节中得出的橡胶减振元件的动刚度在外部温度10 ℃以及低频外部激励下的性能演变公式,重点分析0～20年之间的动刚度变化对于车体模态频率的影响。



a 一阶扭转、一阶低频垂弯、一阶菱形

b 一阶横弯、一阶呼吸、一阶高频垂弯

图11 不同模态随温度变化规律

Fig. 11 Variation of different modes with temperature

图13所示为车体模态频率与橡胶老化时间的关系。可以发现,V型橡胶减振元件的老化时间对于高速列车车体的一阶扭转和一阶菱形的影响不是很明显。橡胶减振元件的老化时间对低阶模态中的一阶低频垂弯、一阶横弯、一阶呼吸、一阶高频垂弯影响较大,且都随着老化时间的增加,这四阶模态频率均有所增大,且变化速率均有所变缓慢,变化趋势和橡胶动刚度的变化趋势基本相同。

根据车体与转向架的装配关系,在车体的4个空簧的位置处加载0.1～25 Hz的恒定单位激励力,单位激励频率的计算间隔设置为0.1 Hz,使用模态法求车体中部位置响应。恒定温度下,不同老化时间的垂向频响曲线如图14所示。

随着老化时间的增加,一阶低频垂弯所对应的共振峰值逐渐增加。乘客的垂向敏感频率主要集中在低频范围内(4～8 Hz)[22],一阶低频垂弯模态频率处于这个频段范围。可以看出,在该频段附近,随着橡胶老化时间的增加,车下设备和车体间的耦合

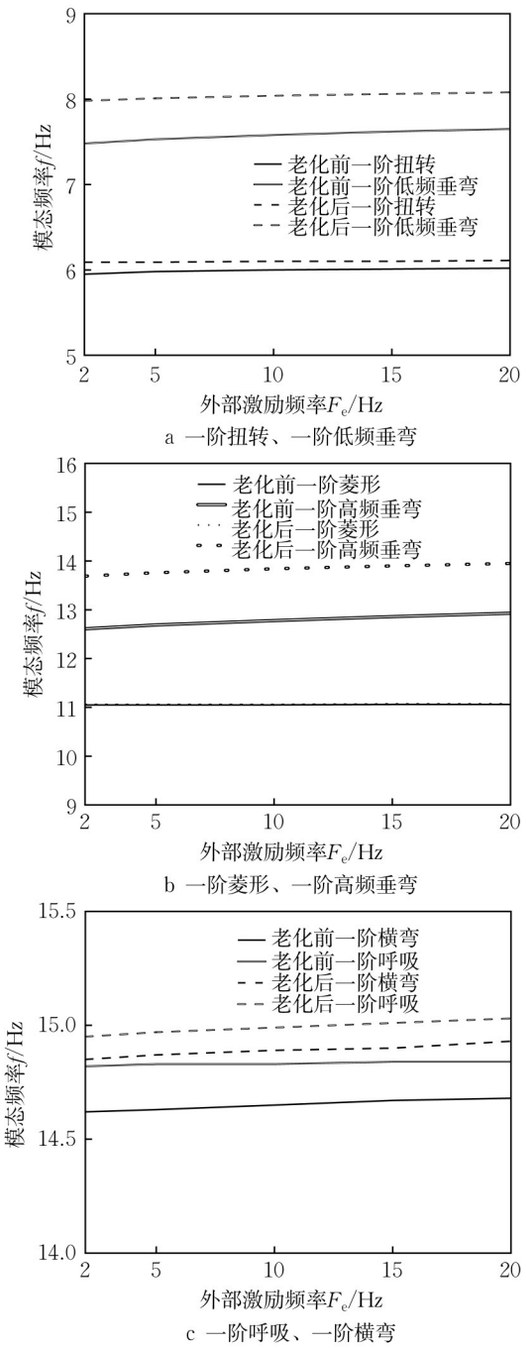


图 12　车体模态频率与外部激励频率变化关系

Fig. 12　Relationship between train body modal frequencies and external excitation frequency variations

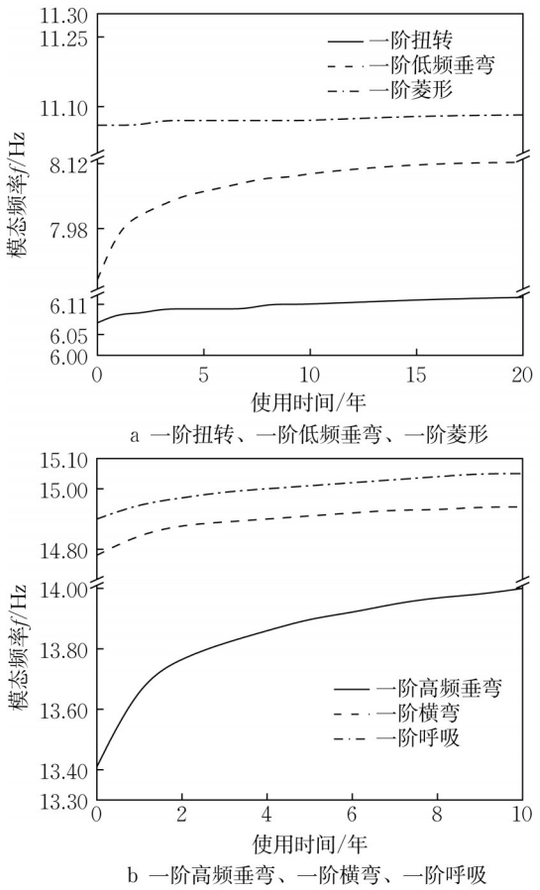


图 13　不同车体模态频率与橡胶老化时间的关系

Fig. 13　Relationship between different train body modal frequencies and rubber aging time

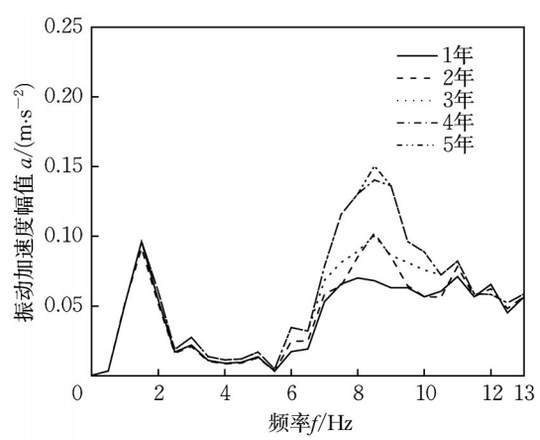


图 14　频响曲线(0 ～ 5 年)

Fig. 14　Frequency response function curve (0-5 years)

振动明显加剧，使得车体的振动发生恶化。

4　结论

(1)橡胶减振元件的加速热氧老化试验和动态热机械试验结果表明，储能模量随温度升高而逐渐减小，且减小趋势变缓；耗能模量和损耗因子的变化趋势相同，在玻璃化转变温度前增大，在其之后减小。橡胶老化会使得材料的储能模量、耗能模量和损耗因子增大。

(2)所建立的低频段内橡胶减振元件使用寿命预测模型推算出 10 ℃下与 20 ℃下橡胶减振元件使用年

限分别约为6.5年和5.6年,这与该型高速动车组橡胶减振元件的更换周期约6年的实际情况一致。

(3)由于列车工作温度区间在玻璃化转变温度之后,故随着温度升高,V型橡胶减振元件的三向刚度会随之减小,导致下吊设备的自振频率降低,典型一阶模态固有频率均有所下降;随着外部激励频率升高,V型橡胶减振元件的三向刚度随之增大,导致下吊设备的自振频率增大,一阶典型模态振型所对应的模态固有频率均有所增大。

(4)V型橡胶减振元件的老化时间对车体低阶模态中的一阶低频垂弯、一阶横弯、一阶呼吸和一阶高频垂弯影响较大,且模态频率都随着老化时间的增加有所提高,但变化速率均有所变缓,变化趋势和橡胶动刚度的变化趋势基本相同;由于车下大型设备和车体之间的耦合作用,使得在原无吊挂设备下的一阶垂弯模态(10.29 Hz)的两侧产生了两个共振峰值,分别与一阶低频垂弯(约8 Hz)和一阶高频垂弯(约14 Hz)相对应。随着老化时间的增加,一阶低频垂弯所对应的共振峰值逐渐增加,而一阶高频垂弯所对应的峰值逐渐减小。

作者贡献声明:

孙维光:文献查阅,软件操作,试验分析,稿件撰写。

宫　岛:基金资助,理论指导。

周劲松:理论指导。

邓　新:软件操作,稿件修改。

刘广宇:试验分析。

参考文献:

[1] 李凡松,邬平波,曾京. 车下设备承载结构疲劳试验载荷谱编制方法[J]. 机械工程学报. 2016, 52(24): 99.
LI Fansong, WU Pingbo, ZENG Jing. Compilation method of fatigue test load spectrum for underfloor equipment bearing structure [J]. Journal of Mechanical Engineering. 2016, 52(24): 99.

[2] 宫岛,马梦林,邓海,等. 动车组车辆地板振动问题及其优化[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2017, 45(8): 1174.
GONG Dao, MA Menglin, DENG Hai, *et al*. Vibration issue and its optimization of the floor structure in electrie multiple unit trains [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2017, 45(8): 1174.

[3] 尤泰文,周劲松,孙维光,等. 多重动力吸振器对高速列车地板振动的控制[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2020, 48(4): 583.
YOU Taiwen, ZHOU Jinsong, SUN Weiguang, *et al*. Floor local vibration control of high speed trains by using multiple dynamic vibration absorbers [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2020, 48(4): 583.

[4] 刘巧斌,史文库,刘鹤龙,等. 基于步进应力加速老化和改进Arrhenius模型的橡胶贮存寿命预测[J]. 国防科技大学学报, 2019, 41(5): 56.
LIU Qiaobin, SHI Wenku, LIU Helong, *et al*. Rubber storage life prediction based on step stress accelerated test and a modified Arrhenius model [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2019, 41(5): 56.

[5] 刘巧斌,史文库,陈志勇,等. 基于插值和时温叠加原理的橡胶老化寿命预测方法[J]. 工程科学与技术, 2019, 51(4): 217.
LIU Qiaobin, SHI Wenku, CHEN Zhiyong, *et al*. Rubber aging life prediction method based on time-temperature superposition principle and interpolation [J]. Advanced Engineering Science, 2019, 51(4): 217.

[6] 刘巧斌,史文库,高承明,等. 采用灰色Savitzky-Golay滤波的商用车推力杆橡胶球铰非对称迟滞建模[J]. 西安交通大学学报,2019,53(5):82.
LIU Qiaobin, SHI Wenku, GAO Chengming, *et al*. Asymmetrical hysteresis modelling based on grey savitzky-golay filter for rubber hinge on thrust rod of commercial vehicle [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University,2019,53(5):82.

[7] SUN L, CHEN L. Free vibrations of a taut cable with a general viscoelastic damper modeled by fractional derivatives [J]. Journal of Sound and Vibration, 2015, 335: 19.

[8] BAUER D R, BALEWIN J M, Ellwood K R. Rubber aging in tires. Part 2: Accelerated oven aging tests [J]. Polymer Degradation and Stability, 2007, 92(1): 110.

[9] WU J, DONG J, WANG Y, *et al*. Thermal oxidation ageing effects on silicone rubber sealing performance [J]. Polymer Degradation and Stability, 2017, 135: 43.

[10] SOLTANI P, PINNA C, WAGG D J, *et al*. Ageing simulation of a hydraulic engine mount: A data informed finite element approach [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part D, Journal of Automobile Engineering, 2019, 233(10): 2432.

[11] SOLTANI P, WAGG D, PINNA C, *et al*. Dynamic Modelling of a Hydraulic Engine Mount Including the Effects of Elastomer Ageing [J]. SAE International Journal of Engines, 2021, 14(1): 99.

[12] GONG D, DUAN Y, WANG K, *et al*. Modelling rubber dynamic stiffness for numerical predictions of the effects of temperature and speed on the vibration of a railway vehicle car body[J]. Journal of Sound and Vibration. 2019, 449: 121.

[13] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局、中国国家标准化管理委员会. 硫化橡胶或热塑性橡胶 热空气加速老化和耐热试验: GB/T 3512—2014[S]. 北京:中国标准出版社, 2014.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China (AQSIQ) and Standardization Administration of the People's Republic of China (SAC). Rubber, vulcanized or thermoplastic—Accelerated ageing and heat resistance tests—Air-oven

method：GB/T 3512—2014 [S]. Beijing：China Standards Press，2014

[14] 国家铁路局. 机车车辆用橡胶弹性元件通用技术条件：TB/T 2843—2015[S]. 北京：中国铁道出版社，2015.
National Railway Administration of the People's Republic of China (NRA). General technical requirement for rolling stock rubber to metal parts：TB/T 2843—2015[S]. Beijing：China Railway Publishing House，2015.

[15] 刘巧斌. 加速试验方法与智能算法在车用橡胶可靠性评估中的应用研究[D]. 长春：吉林大学，2020.
LIU Qiaobin. Reliability evaluation of rubber for vehicles by accelerated test method and intelligent algorithm [D]. Changchun：Jilin University，2020.

[16] 成大先，王德夫，姬奎生，等. 机械设计手册：机械振动·机架设计[M]. 北京：化学工业出版社，2010.
CHENG Daxian，WANG Defu，JI Kuisheng，*et al*. Mechanical design manual：Mechanical vibration frame design [M]. Beijing：Chemical Industry Press，2010

[17] 王银龙，李钊，李子然，等. 未硫化橡胶黏弹塑性本构模型及有限元实现[J]. 上海交通大学学报，2023，57(8)：1086.
WANG Yinlong，LI Zhao，LI Ziran，*et al*. A visco-elastoplastic constitutive model of uncured rubber and its finite element implementation [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University，2023，57(8)：1086.

[18] 王启好，蔡小培，常文浩，等. 基于隔振垫超弹性本构模型的橡胶浮置板轨道动力仿真[J]. 中国铁道科学，2023，44(1)：87.
WANG Qihao，CAI Xiaopei，CHANG Wenhao，*et al*. Dynamic simulation of rubber floating slab track based on the hyperelastic constitutive model of vibration isolation pad [J]. China Railway Science，2023，44(1)：87.

[19] 卜继玲，黄友剑. 轨道车辆橡胶弹性元件设计计算方法[M]. 北京：中国铁道出版社，2010.
BU Jiling，HUANG Youjian. Design and calculation method for rubber elastic components of rail vehicles [M]. Beijing：China Railway Publishing House，2010.

[20] 罗光兵. 高速列车车体及车下设备耦合振动研究[D]. 成都：西南交通大学，2014.
LUO Guangbing. Study on coupled vibrations of carbody and suspended equipments for high speed trains [D]. Chengdu：Southwest Jiaotong University，2014.

[21] 宫岛，周劲松，杜帅妹，等. 高速动车组车下设备对车体振动传递与模态频率的影响机理研究[J]. 机械工程学报，2016，52(18)：126.
GONG Dao，ZHOU Jinsong，DU Shuaimei，*et al*. Study on the effect of the underframe equipment on vibration transmissibility and modal frequency of the car body for high-speed EMU trains [J]. Journal of Mechanical Engineering，2016，52(18)：126.

[22] 宫岛，周劲松，孙文静，等. 高速列车弹性车体垂向振动控制[J]. 机械工程学报，2011，47(20)：159.
GONG Dao，ZHOU Jinsong，SUN Wenjing，*et al*. Vertical vibration control of flexible high-speed railway car body [J]. Journal of Mechanical Engineering，2011，47(20)：159.