第 34 卷　第 3 期　石家庄铁道大学学报(自然科学版)　Vol. 34　No. 3
2021 年 9 月　Journal of Shijiazhuang Tiedao University(Natural Science Edition)　Sep. 2021

重载货车刚柔耦合模型的轮轨接触及振动传递规律研究

刘红军[1]，　刘鹏飞[2]，　张凯龙[1]

(1. 石家庄铁道大学 机械工程学院，河北 石家庄　050043；
2. 石家庄铁道大学 省部共建交通工程结构力学行为与系统安全国家重点实验室，河北 石家庄　050043)

摘要：为研究重载货车振动特性，以我国轴重最大的某型 30 t 轴重重载货车为研究对象。首先采用有限元方法建立了轮对的弹性模型，进而在 UM 软件中进行总体集成，建立了考虑与不考虑轮对弹性的货车刚体模型以及刚柔耦合振动模型，给出了柔性体轮对的自由振动模态，以及柔性轮对的建模方法，对比分析了轮轨接触关系以及 2 种模型不同位置的振动加速度。结果显示，柔性轮对的弹性结构不仅能缓和轮轨之间的刚性作用，而且还缓和了中央悬挂以下的刚性振动，由于中央悬挂发挥了较好的隔振性能，故轮对柔性建模对车体、摇枕的振动影响较小。因此开展轮对柔性振动研究及其动态影响对于重载铁路车辆装备设计具有重要意义。

关键词：柔性轮对；重载货车；动力学；频率

中图分类号：U270.1　文献标志码：A　文章编号：2095－0373(2021)03－0044－07

一般在传统车辆系统动力学研究中只把车辆结构简化为刚性体，输出特性响应作为研究对象。但随着重载货车速度的提升以及载重的加大，将车辆部件简化成刚体模型来分析车辆系统动力学的传统做法已不能满足要求[1]，因此需要引入柔性多体动力学理论将车辆系统的某一部件考虑为柔性体后分析对车辆系统的动力学性能响应，这样做可以更深入了解车辆部件的弹性效应对车辆系统各项动力学性能指标的影响，使仿真分析更加贴合实际，结果更加准确[2-3]。将轮对考虑为柔性体正是在这种大背景下提出来的。

文献[4]将轮对考虑成弹性体，建立了车辆刚柔耦合系统模型，通过仿真分析得到轮轨之间的相互作用力。结果表明，弹性体轮对的轮轨力在较低频率激扰下增幅不明显，而在中高频率激励时增幅显著。文献[5]建立了包含弹性轮对的地铁车辆模型，研究发现轮对的一阶弯曲振动模态是车轮多边形磨耗的主要原因之一。

上述相关研究对象以高速列车和城轨车辆为主，对重载铁路车辆的轮对弹性振动问题鲜有涉及，鉴于此将 30 t 重载货车的轮对考虑成柔性体，利用有限元分析软件对其进行柔性体建模，进而同多刚体整车模型的轮轨接触以及振动传递进行对比分析，旨在对比出 2 种建模方式下车辆动态响应的异同，深入挖掘轮对弹性振动对车辆振动传递特性的影响，为重载货车动力学仿真精细化建模提供参考。

1　柔性轮对的动力学建模方法

1.1　柔性体的运动学描述

图 1 所示为某重载货车轮对模型，其绝对参考系设为 $X_0Y_0Z_0$。在描述轮对柔性旋转运动中，引入相

收稿日期：2021－02－03　责任编辑：车轩玉　DOI：10.13319/j.cnki.sjztddxxbzrb.20210021
基金项目：国家自然科学基金(52072249，11790282)；省部共建交通工程结构力学行为与系统安全国家重点实验室自主课题(ZZ2021-10)
作者简介：刘红军(1991—)，男，硕士研究生，研究方向为车辆动力学。E-mail：570716717@qq.com
刘红军，刘鹏飞，张凯龙. 重载货车刚柔耦合模型的轮轨接触及振动传递规律研究[J]. 石家庄铁道大学学报(自然科学版)，2021，34(3)：44-50.

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

对参考系 $X_1Y_1Z_1$，该坐标系与车轮的运动状态相同，但与绝对坐标系（地面坐标系）始终保持平行，并且相对坐标系 $X_1Y_1Z_1$ 的坐标原点始终在轮对质心处。

如图 1 所示弹性轮对，若 2 个参考系原点的相对位置为 r，弹性体上任一点 P 在绝对坐标系 $X_0Y_0Z_0$ 的位置向量为 $\boldsymbol{r}_p$，在相对坐标系 $X_1Y_1Z_1$ 的位置向量为 $\boldsymbol{u}+\boldsymbol{u}'$，则它们的关系可表示为

$$\boldsymbol{r}_p=\boldsymbol{r}+\boldsymbol{A}_{01}(\boldsymbol{u}+\boldsymbol{u}') \tag{1}$$

式中，$\boldsymbol{u}$ 为未变形状态下 P 点的恒定半径矢量；$\boldsymbol{u}'$ 为 P 点变形后位移矢量；$\boldsymbol{A}_{01}$ 为相对参考系发生转动而产生的坐标变换矩阵，一般形式为

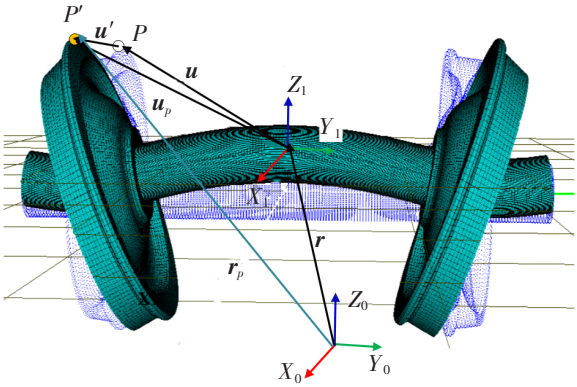


图 1　柔性体空间描述

$$\boldsymbol{A}_{01}=\begin{bmatrix}1-2\theta_2^2-2\theta_3^2 & 2(\theta_1\theta_2-\theta_0\theta_3) & 2(\theta_1\theta_3+\theta_0\theta_2)\\ 2(\theta_1\theta_2+\theta_0\theta_3) & 1-2\theta_1^2-2\theta_3^2 & 2(\theta_2\theta_3-\theta_0\theta_1)\\ 2(\theta_1\theta_3-\theta_0\theta_2) & 2(\theta_2\theta_3+\theta_0\theta_1) & 1-2\theta_1^2-2\theta_2^2\end{bmatrix} \tag{2}$$

式中，$\theta_{0\sim3}$ 为欧拉四元数，由相对坐标系的旋转位置确定，设轮对在相对坐标系绕定轴做有限转动，转动角度为 φ，该轴的单位向量为 $\vec{u}$，则参数定义为：$\theta_0=\cos\varphi$；$\vec{\theta}=\vec{u}\sin\varphi$。其中，$\vec{\theta}$ 的 3 个分量 $\boldsymbol{\theta}^{\mathrm{T}}=(\theta_1,\theta_2,\theta_3)$，即可确定相应的转换矩阵。

用模态振型叠加表示 P 点微小的弹性位移

$$\boldsymbol{u}'=\boldsymbol{H}_p q_{(t)} \tag{3}$$

式中，$\boldsymbol{H}_p$ 为在模态集中提取出与 P 点相关的模态矩阵，$\boldsymbol{H}_p\in R^{N\times H}$，$N$ 为有限元模型自由度的个数，H 为所选模态阶数；$q(t)$ 为模态坐标，$q(t)\in R^{H\times1}$。

1.2　轮对柔性体的有限元建模

以某重载货车车辆为分析对象，在有限元软件 ANSYS 中建立轮对的有限元模型见图 2。从柔性体的角度研究车辆的动力性能，以更好地反映轨道车辆的实际运行状况。图 3 给出了柔性轮对通过 Solidworks、HyperMesh、ANSYS 等软件进行建模的总体流程[6]。

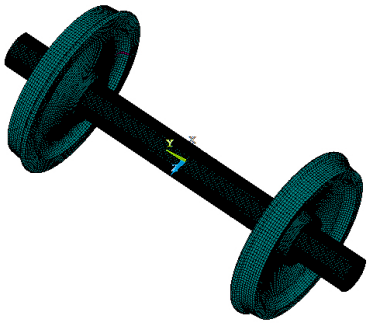


图 2　轮对有限元模型

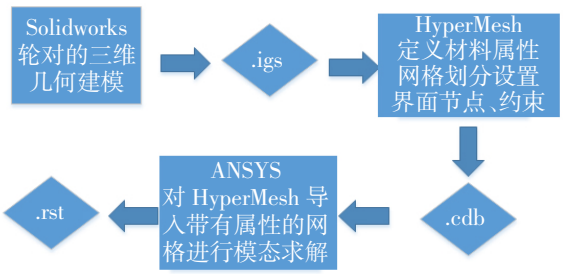


图 3　柔性体轮对的建模流程

为更好地反映出轮对的动力学响应情况，按照图 3 的流程建立柔性体轮对模型：由于轮对形状的不规则性，应用 Solidworks 绘制出轮对的三维实体模型，导入 HyperMesh 对其进行网格划分，共有 312 845 个节点，299 376 个单元，轮对采用 Solid185 三维实体单元，材料的泊松比为 0.3，弹性模量为 210 GPa，密度为 7 800 kg/m^3。导入到有限元分析软件 ANSYS 中做柔性化处理。

1.3　刚柔耦合动力学模型的集成

对于重载货车而言，将轮对有限元模型导入后，遵循体、铰、力元的规则。柔性体轮对用等效力元模拟轮对与轴箱的连接，其次建立 2 个 6 自由度侧架，侧架与轮对之间采用可以模拟具有线性和非线性特性的柔性铰 Bushing 力元建立连接[7]。摇枕与侧架之间的二系弹簧支撑可选择 Viscous-elastic 类型的线性

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

力元来表示。该力元通过定义刚度和阻尼矩阵可用于模拟弹簧的各方向刚度和扭转刚度,如图 4 所示。

其他部件的连接根据简化结构做出模型的物理学模型及拓扑图,明确各构件的运动、受力及传力状态,构成动力学系统。车体同转向架各部件间的拓扑关系如图 5 所示[8]。需要指出的是,对于轮轨高频振动,轨道的弹性作用不容忽视,因此在模型中将轨道应用传统的三大干线轨道不平顺,并在其基础上进一步叠加了 0.1～1 m 波长的短波不平顺成分,以此代表干线及重载专线的轨道随机不平顺状态,以此模拟轮轨高频相互作用[9]。

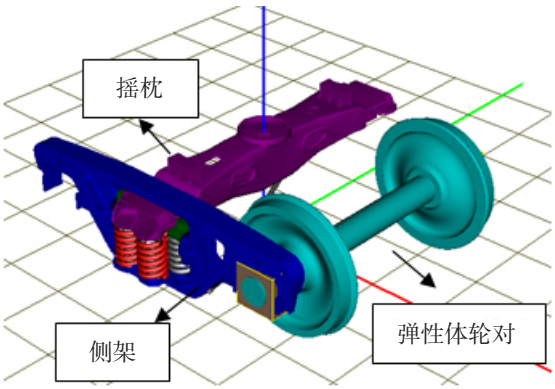


图 4 货车转向架建模

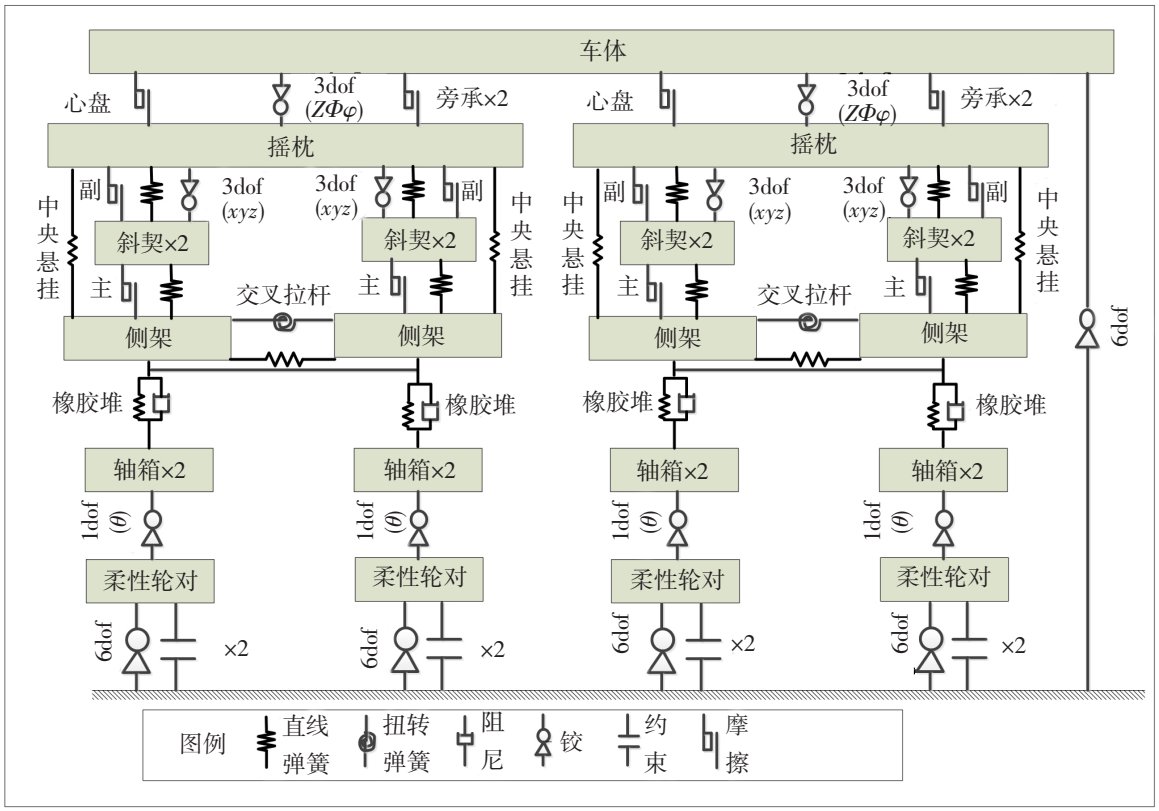


图 5 整车拓扑关系

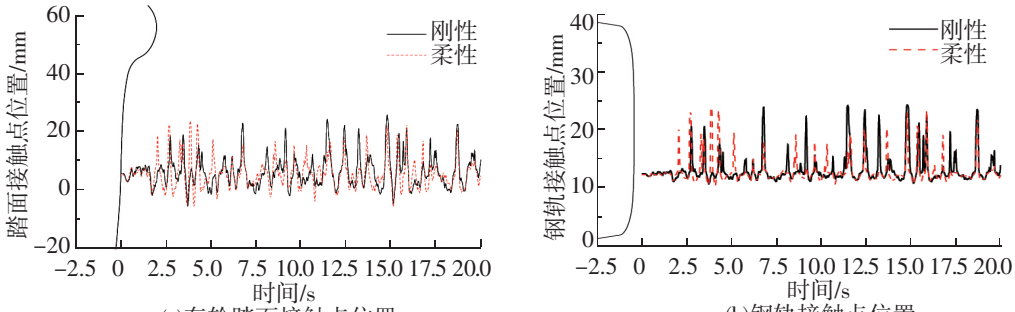
2 轮对刚柔建模的轮轨接触及振动响应比较

为了研究轮对的弹性结构对车辆运行的影响,本节将对采用刚性轮对的多刚体模型以及采用柔性轮对的刚柔耦合模型做仿真分析,以轮对的接触关系以及轮对、侧架、摇枕、车体的横、垂振动加速度振动响应作为考核指标,进行时域和频域的对比分析,获得轮对刚柔建模对车辆系统垂向振动传递规律的影响。仿真条件:名义运行速度 80 km/h,无坡道、直线轨道,采用 LM 型踏面和 CN75 轨。

2.1 轮对刚柔建模的轮轨接触关系比较

图 6 给出了轮对 2 种结构的一位轮对处踏面接触点位置对比图。从图 6 可知,由于轮对的弹性结构被激发,柔性轮对的踏面接触点带宽大体在 −5～18 mm,与刚性轮对模型最大相差一半,钢轨踏面接触点位置与车轮的大致相同。这是由于轮对弹性结构振动变形缓和了轮轨的刚性振动,但柔性轮对的踏面接触点带宽变窄,会加重车轮与钢轨的局部磨耗,造成车轮多边形的形成。

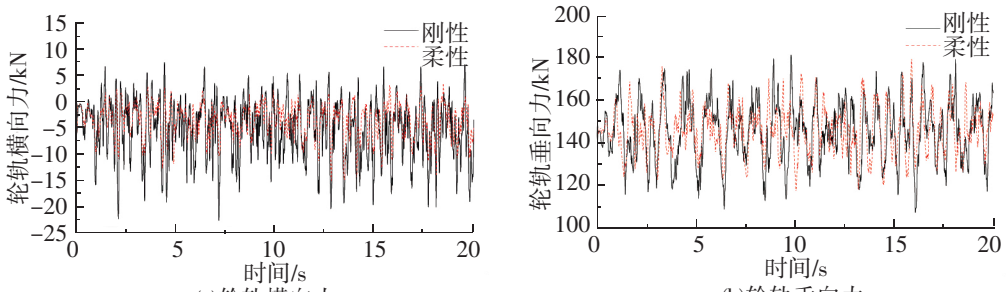
(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net



(a)车轮踏面接触点位置　　(b)钢轨接触点位置

图 6　轮对刚柔结构的踏面、钢轨接触点位置对比

图 7 给出了多刚体模型和刚柔耦合模型一位左轮的轮轨横向力和轮轨垂向力,从时程特性曲线可知,刚性轮对模型的轮轨横向力总体在 5～20 kN 范围内波动,柔性轮对模型波动范围只为刚性轮对模型的 1/2,所以轮对的柔性结构较大程度上影响了轮轨横向力;通过图 7(b)可知,2 种模型的垂向动态作用力与横向作用力趋势大致相同。轮轨动态作用力是衡量车辆对轨道动态作用的重要指标,轮轨横向力会导致轨排横移、轨距扩大,所以只把轮对考虑成刚性结构建模会过高评价轮轨的动态作用,较高地评估轮轨的破坏程度,增加维修工作量。

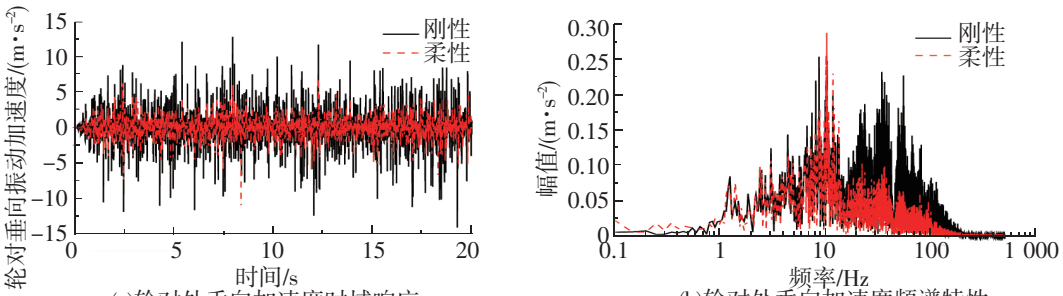


(a)轮轨横向力　　(b)轮轨垂向力

图 7　轮对刚柔结构的轮轨作用力对比

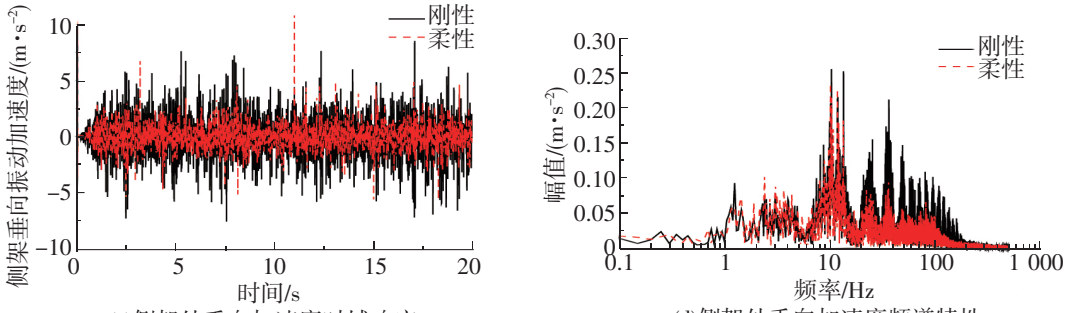
2.2　轮对刚柔建模对车辆系统垂向振动的影响

图 8 给出了 2 种模型轮对、侧架处的垂向振动加速度时域图和频谱特性图,从时域图中可以看出刚性体的振动更明显,多刚体模型振动波动范围是刚柔耦合模型的 1 倍左右,说明轮对的弹性结构在一定程度上缓和了车辆运行带来的刚性振动。从图 8(b)、图 8(d)可以看出,频率在 0～10 Hz 时,轮对为弹性体建模和刚性体建模的垂向加速度频率幅值大体一致,并且在 10 Hz 时 2 种模型都出现了振幅较大的尖点,在大于 10 Hz 时刚性体模型同柔性体模型的主频产生较大差别,轮对为刚性体模型的主频集中在 25、35、50 Hz 左右,柔性体模型的主频同样也是在这几个频率处,但是幅值却仅是刚性体模型的一半,说明了轮对的弹性结构变形会对垂向振动有一定缓和和衰减作用。



(a)轮对处垂向加速度时域响应　　(b)轮对处垂向加速度频谱特性

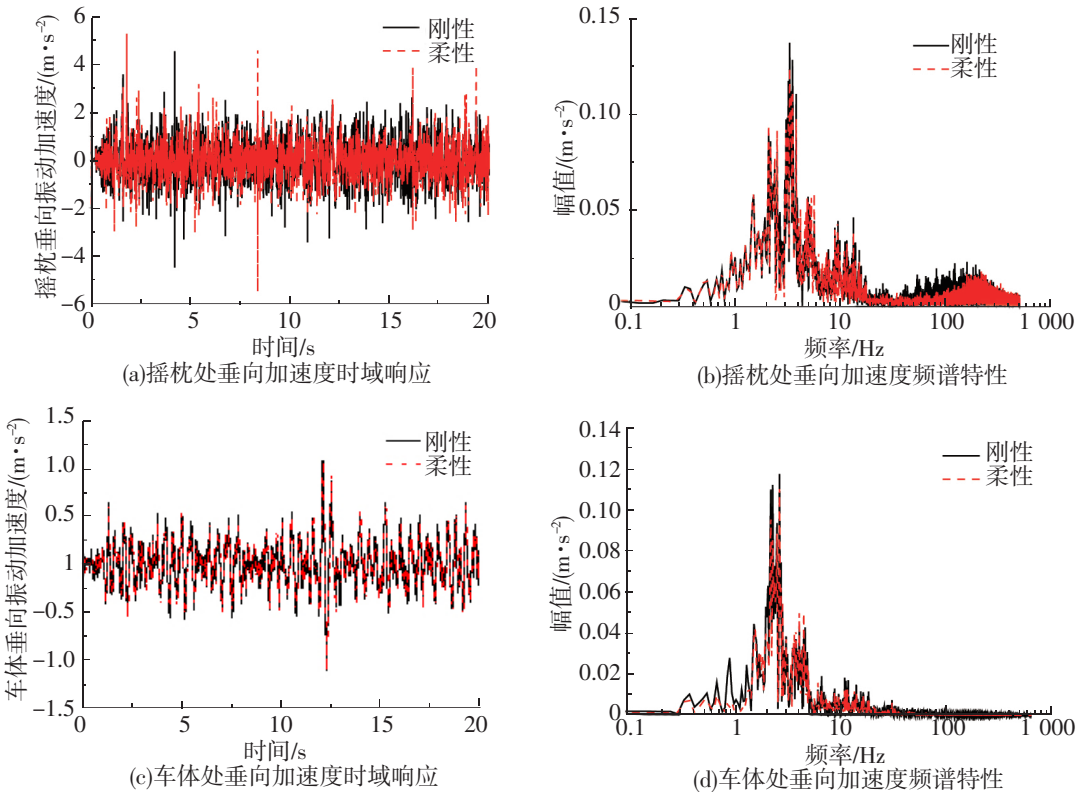
(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net



(c)侧架处垂向加速度时域响应 (d)侧架处垂向加速度频谱特性

图 8 轮对、侧架处垂向加速度时域响应和频谱特性

图 9 给出了摇枕、车体的振动响应。由于中央悬挂对振动的衰减作用,摇枕、车体处的振动加速度要小于轮对与侧架的加速度数值。从图 9(a)可知,无论是多刚体模型还是刚柔耦合模型,振动加速度都出现一定程度的冲击,这与车体-摇枕间存在刚性连接而易产生冲击有关。从图 9(b)看出,2 种建模方式下摇枕的垂向振动能量都集中在 1～10 Hz 间,体现了车体的沉浮、点头等形式的刚体振动能量;在 30～200 Hz 的频区出现差异,2 种模型相差 1 倍左右。总体来看,轮对的结构振动变形经二系悬挂衰减后,到摇枕的表现形式主要以中低频为主。比较图 9(c),较之于车辆走行部件,车体加速度波动范围要小很多,从轮对处振幅±7.5 m/s² 衰减到约±0.5 m/s² 之间,产生了数量级上的衰减,这说明车体相比较其他部件振动较小。从图 9(d)看出,2 种模型的差别不是很大,波动范围基本相同,这也就意味着轮对的弹性振动结构并没有对车体的垂向振动产生较大影响。



(a)摇枕处垂向加速度时域响应 (b)摇枕处垂向加速度频谱特性

(c)车体处垂向加速度时域响应 (d)车体处垂向加速度频谱特性

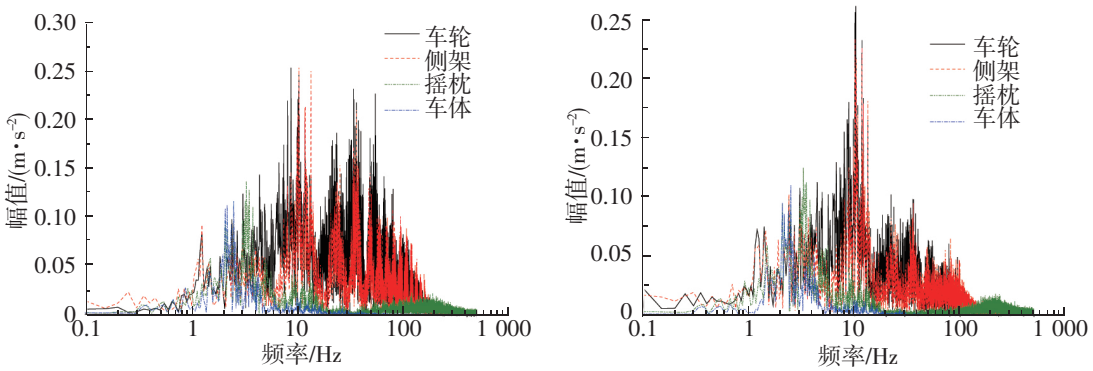
图 9 摇枕、车体处垂向加速度时域响应和频谱特性

2.3 轮对刚柔建模下的车辆系统振动传递规律比较

综合 30 t 重载车辆各部分振动加速度数据,从频谱角度对比研究轮对刚、柔建模方式对 30 t 重载车辆系统振动传递规律的影响。

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

以轮对、侧架、摇枕及车体处的垂向频谱特性为对比指标，图 10 比较了采用刚性、柔性轮对建模时的频谱成分及对应幅值差异。从图 10(a)可知，多刚体模型在轮对处幅值略大于侧架处的，主要是一系橡胶垫起到了缓冲作用，并且由于存在中央悬挂，摇枕、车体处幅值相比较轮对、侧架处衰减了 10 多倍。而摇枕在 200 Hz 处出现一个主频主要是车体与摇枕的刚性冲击。对比图 10 中 2 种模型轮对处、侧架处的振动幅值可知，多刚体模型的垂向振动幅值大于刚柔耦合的，主要是弹性轮对的弹性结构变形缓和了车辆的振动冲击。相比较 2 种模型的摇枕与车体垂向振动幅值区别不大，主要是因为中央悬挂缓和了轮对的弹性结构振动。



(a)多刚体模型频谱特性　　(b)刚柔耦合模型频谱特性

图 10　不同模型垂向振动传递频谱特性

3　结论

本文建立了考虑轮对刚性和柔性的重载货车动力学模型，并从时频分析角度，对 2 种模型的轮轨接触关系和振动传递规律进行了比较，结论如下：

(1)轮对采用弹性体建模不仅能反映轮对自身丰富的振型，轮对弹性结构振动还有助于缓和轮轨间的冲击作用，所以轮对建模时应该把轮对考虑成柔性结构，以免过高评价轮轨的动态作用。

(2)相对刚性轮对而言，弹性结构振动造成了轮对处和侧架处垂向振动加速度的差别，最大相差 1 倍多，说明轮对的柔性结构能够缓和车辆运行过程中的刚性振动。

(3)中央悬挂发挥了较好的隔振性能，可较大程度地衰减轮对弹性引起的高频振动，故轮对刚柔建模对车体、摇枕的振动影响较小。

参　考　文　献

[1]钟硕乔. 车辆轨道耦合系统中的旋转弹性轮对建模研究[D]. 成都：西南交通大学，2017.

[2]Peng B，Iwnicki S，Shackleton P，et al. The influence of wheelset flexibility on polygonal wear of locomotive wheels[J]. Wear，2019，432/433：1-11.

[3]Guiral A，Alonso A，Giménez J G. Vehicle-track interaction at high frequencies-modelling of a flexible rotating wheelset in non-inertial reference frames[J]. Journal of Sound and Vibration，2015，355：284-304.

[4]Chaar N，Berg M. Vehicle-track dynamic simulation of a locomotive considering wheelset structural flexibility and comparison with measurements[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers，Part F：Joumal of Rail and Rapid Transit，2005，219(4)：225-238.

[5]黄江伟. 考虑轮对柔性的轮轨动力行为研究[D]. 成都：西南交通大学，2012.

[6] 高国川，张建超，郭文武. 基于刚柔耦合模型的动车组齿轮箱箱体振动特性研究[J]. 石家庄铁道大学学报(自然科学版)，2020，33(2)：73-80.

[7]李国芳，岳鹏，丁旺才，等. 轮对柔性对车辆动态曲线通过性能的影响研究[J]. 铁道标准设计，2019，63(9)：173-179.

[8]郭训，郑树彬，柴晓冬，等. 基于柔性轮对的轨道车辆动力学仿真分析[J]. 测控技术，2018，37(8)：150-153.

[9]刘鹏飞，曹云强，张凯龙，等. 不均衡闸瓦压力下重载机车曲线通过动态行为[J]. 石家庄铁道大学学报(自然科学版)，2020，33(2)：57-63.

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

Study on Wheel Rail Contact and Vibration Transfer Law of Rigid-flexible Coupling Modeling for Heavy-haul Freight Wagon

Liu Hongjun[1], **Liu Pengfei**[2], **Zhang Kailong**[1]

(1. School of Mechanical Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China;
2. State Key Laboratory of Mechanical Behavior and System Safety of Traffic Engineering Structures, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

Abstract: In order to study the vibration characteristics of heavy-haul freight wagon, a type of 30 t heavy-duty truck with the largest axle load in China was taken as the research object. Firstly, the finite element method was used to establish the elastic model of the wheelset, and then the overall integration was carried out in the UM software. The rigid body model and the rigid-flexible coupled vibration model of the freight car with and without the wheelset elasticity were established, and the free vibration mode of the flexible wheelset and the modeling method of the flexible wheelset were given. The wheel-rail contact relationship and the vibration accelerations at different positions of the two models were compared and analyzed. The results show that the elastic structure of the flexible wheelset can not only alleviate the rigidity between the wheel and rail, but also alleviate the rigid vibration between the central suspension and the bottom. Because the central suspension has a better vibration isolation performance, the flexible modeling of the wheelset has little influence on the vibration of the car body and the pillow. Therefore, it is of great significance to study the flexible vibration of wheelset and its dynamic influence on the equipment design of heavy-duty railway vehicles.

Key words: flexible wheelset; heavy-haul freight wagon; dynamics; frequency

(上接第 21 页)

Study on the Effect of CFRP External Energy Dissipation Steel Bar Composite Reinforcement for Prefabricated Concrete Pier with Grouting Sleeve Connection

Dong Yexu[1,2], **Xu Weibing**[1,2], **Wang Jin**[1], **Chen Yanjiang**[1], **Xin Guangtao**[1]

(1. Beijing Key Laboratory of Engineering Earthquake Resistance and Structural Diagnosis and Treatment, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;
2. Ministry of Transport Road Research Institute, Beijing 100191, China)

Abstract: The prefabricated concrete pier connected by grouting sleeve is the common lower component form of prefabricated bridge in medium and low intensity area. At present, the seismic reinforcement method of this type of prefabricated bridge pier is lack. Therefore, the prefabricated concrete pier connected by grouting sleeve is taken as the research object, and its 1/6 scale model is designed and made. Based on its seismic damage characteristics, a combined reinforcement method of CFRP external energy dissipation reinforcement was proposed, and the shaking table tests of the pier specimens before and after reinforcement under the same excitation conditions were carried out. The results show that: pier cracking, concrete spalling, crushing and pier bottom joint opening and closing are the main seismic damage modes of grouting sleeve connection prefabricated concrete pier; the combined reinforcement can effectively increase the stiffness of the prefabricated specimen after the earthquake, reduce the horizontal displacement of the pier top, and improve the ductility and energy dissipation capacity of the strengthened specimen.

Key words: assembled pier; CFRP; reinforcement; shaking table test

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net