第 30 卷　第 3 期　石家庄铁道大学学报(自然科学版)　Vol. 30　No. 3
2017 年 9 月　Journal of Shijiazhuang Tiedao University(Natural Science Edition)　Sep. 2017

高速列车刚柔耦合动力学仿真分析

赵义伟[1]，　刘永强[1]，　廖英英[2]

(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 土木工程学院，河北 石家庄　050043)

摘要：研究了高速列车弹性车体对整车动力学性能的影响。为分析弹性车体对列车运行的影响，首先建立了车体有限元模型，计算了车体的模态，并生成模态中性文件将其导入 VI-Rail 软件，然后将柔性车体和前、后转向架子系统组装成刚柔耦合整车模型，分析了其对运动稳定性、运行平稳性、运行安全性的影响。通过与刚性车体动力学模型仿真结果的对比表明：弹性车体模型会使整车各项动力学性能指标略大于刚性车体模型。

关键词：高速列车；刚柔耦合；VI-Rail；动力学仿真

中图分类号：U270.1　文献标志码：A　文章编号：2095-0373(2017)03-0043-05

0　引言

一直以来，人们在对列车进行动力学仿真分析时，传统的方法是将车体等大型构件考虑成刚体，但是，随着机车车辆运行速度提高，作用于机车车辆与轨道结构之间的动态作用力增大，使系统动力学性态愈来愈复杂，这些现象是由于部件的大范围运动与构件的弹性变形耦合引起的，为更好地分析部件的动力学特性，更贴合实际，有必要从柔性体的角度来研究。在车辆动力学仿真研究中，刚柔耦合是具有广泛应用前景的发展方向之一。文献[1-4]建立了刚柔耦合模型并进行了动力学仿真，与刚性车进行了对比。文献[5-7]将刚性车体柔性化并进行模态分析，了解了车体固有频率及振型。文献[8]建立了柔性体，并分析了其对列车运行品质的影响。本文先建立柔性车体，并了解其振动特征，然后建立刚柔耦合模型，与刚性体对比分析其对动力学性能的影响。

1　车体模态分析

首先用 Solidworks 软件，建立了车体三维模型，然后将车体模型以中性文件的格式保存并导入 ANSYS/workbench 中，并赋予材料属性，生成网格，对其进行自由状态下的模态分析。对车体模态进行分析时取前 20 阶模态，前 6 阶模态为刚体模态，不予考虑，可将其略去。表 1 为车体前 7～15 阶模态计算结果，其中 7～10 阶振型如图 1 所示。

表 1　柔性车体 7～15 阶模态

模态阶数	模态频率/Hz	模态振型
7	14.241 6	一阶菱形
8	18.754 8	一阶呼吸
9	22.026 8	一阶垂向
10	28.510 6	一阶横向
11	30.583 5	二阶菱形
12	34.757 7	二阶呼吸＋地板
13	37.893 0	二阶横向＋地板
14	41.087 9	一阶扭转
15	42.205 8	二阶垂向

收稿日期：2016-06-03　责任编辑：车轩玉　DOI：10.13319/j.cnki.sjztddxxbzrb.2017.03.09

基金项目：国家自然科学基金(11227201；11472179；U1534204；11572206；11302137；11172182；11372199；11372197)；河北省自然科学基金(A2015210005)；河北省教育厅项目(YQ2014028)

作者简介：赵义伟(1992-)男，硕士研究生，主要从事车辆动力学与控制的研究。E-mail：1240012363@qq.com

赵义伟，刘永强，廖英英. 高速列车刚柔耦合动力学仿真分析[J]. 石家庄铁道大学学报：自然科学版，2017，30(3)：43-47.

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

(a) 一阶菱形 (b) 一阶呼吸 (c) 一阶垂向 (d) 一阶横向

图1 车体7～10阶模态振型图

2 刚柔耦合车辆模型的建立

在有限元软件中生成车体的MNF模态中性文件,节点数为257 218个,并将其导入VI-Rail软件中建立车体模板,并生成子系统,如图2所示。参照CRH2系动车组参数建立转向架模板,生成前、后转向架子系统,如图3所示。

车辆模型悬挂系统的主要参数如表2所示。

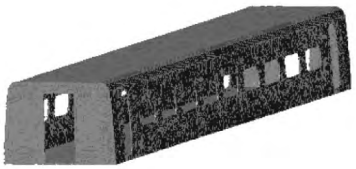

图2 柔性车体模板

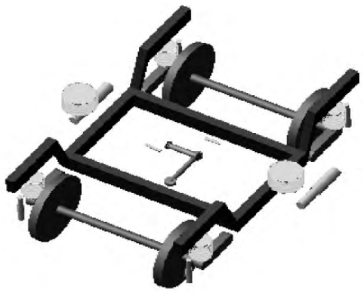

图3 转向架模板

表2 悬挂系统主要参数

悬挂参数	一系横向刚度/(kN·m^{-1})	一系纵向刚度/(kN·m^{-1})	一系垂向刚度/(kN·m^{-1})	一系垂向阻尼/(kN·s·m^{-1})	轴箱定位横向刚度/(kN·m^{-1})	轴箱定位垂向刚度/(kN·m^{-1})	轴箱定位纵向刚度/(kN·m^{-1})
数值	980	980	1 176	19.6	6 500	3 267	14 700
悬挂参数	二系横向刚度/(kN·m^{-1})	二系纵向刚度/(kN·m^{-1})	二系垂向刚度/(kN·m^{-1})	二系垂向阻尼系数/(kN·s·m^{-1})	横向减振器阻尼系数/(kN·s·m^{-1})	抗蛇行减振器阻尼系数/(kN·s·m^{-1})	抗蛇行减振器刚度/(kN·m^{-1})
数值	166.6	166.6	176.4	9.8	58.8	13.2	8 820

最后,将车体和前、后转向架子系统组装成刚柔耦合整车模型,如图4所示。

3 动力学仿真分析对比

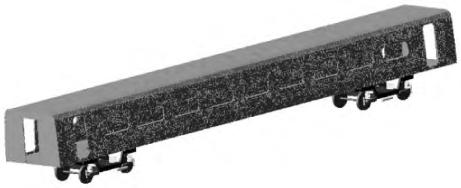

图4 刚柔耦合模型

对刚柔耦合车辆模型进行动力学仿真分析,将仿真出的各项指标与车体为刚性的车辆模型仿真出的进行对比。在进行运动稳定性分析时,采用直线轨道;而进行运行平稳性分析和安全性分析时则采用曲线轨道。车辆首先经过950 m的直线区间,240 m的缓和曲线区间,然后在曲线半径为7 000 m,轨道超高为150 mm的曲线上行驶1 440 m,接着进入260 m的缓和曲线区间,最后在直线区间段行驶至4 000 m处。轨道不平顺激励采用德国低干扰谱。

3.1 运动稳定性分析

列车在某一速度范围内运行,车体、转向架构架、轮对的蛇行运动各振型的振幅,随着时间的延续其幅值会不断地衰减,而当列车运行速度超过某一临界数值时,车辆将产生一种不稳定的蛇行运动,其表现形式为它们的振幅会随着时间的延续而不断扩大,不会衰减,这种情况即为失稳,因此,将过渡到不稳定

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

运动时的速度称为车辆的临界速度。

在进行铁道车辆运动稳定性分析[9]时,最直接的评价指标是列车的临界速度。仿真曲线如图 5、图 6 所示。

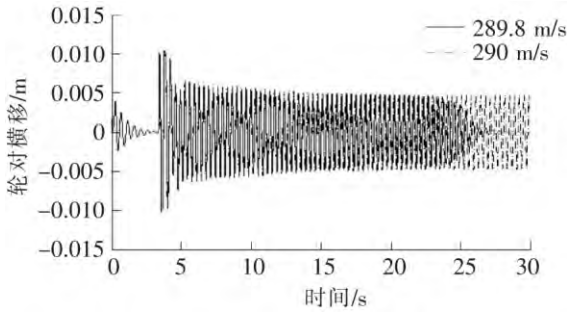

图 5　刚性整车模型的轮对模移量

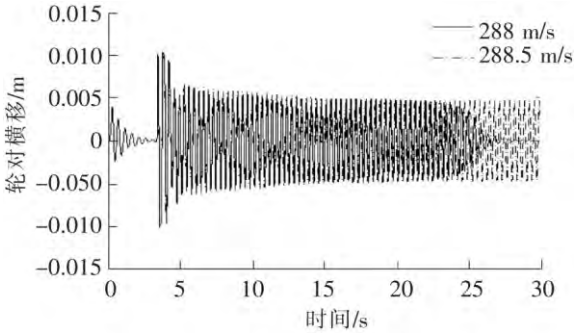

图 6　刚柔耦合整车模型的轮对横移量

由图 5 和图 6 可以看出,车体为刚性车体时的车辆临界速度为 289.8 m/s,车体为柔性车体时的临界速度为 288.5 m/s,比前者略低。之所以会出现这种现象,是由于车体结构的弹性变形使得车辆在运行中横向运动的收敛性变差所致。

3.2　运行平稳性分析

评价车辆运行平稳性最直接的指标就是车体加速度。此外,为了更准确地进行评价,不仅要考虑加速度的大小,还要考虑加速度振动频率的影响。当采用考虑频率的车体加速度来评定时,各国有着不同的评价指标。现采用在国际上应用比较广泛的 Sperling 指标,且只考虑了车体横向的振动加速度。仿真速度为 220 km/h、240 km/h、260 km/h、280 km/h、300 km/h 共 5 个速度等级。两种车体横向加速度对比曲线如图 7 所示。计算出的平稳性指标如表 3 所示。

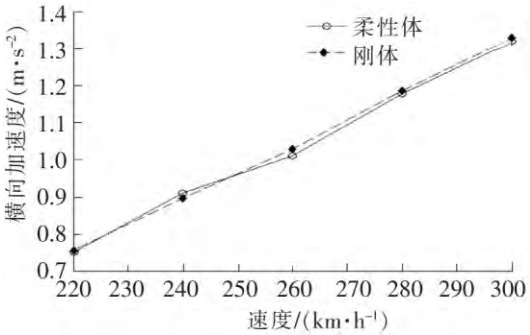

图 7　车体横向加速度

表 3　横向平稳性指标 W_y

速度/(km · h^{-1})	柔性体	刚体
220	2.024 7	2.024 8
240	2.199 3	2.198 9
260	2.359 3	2.360 0
280	2.521 8	2.522 1
300	2.664 0	2.665 1

根据表格和曲线可知,刚柔耦合模型仿真出的横向加速度及 W_y 略低于刚性车体模型,其中在 240 km/h 时的横向加速度及 W_y 略高于刚性车体模型,原因可能是与在此速度等级下弹性车体的振动变形有关。

3.3　运行安全性分析

对刚性体和柔性体模型进行安全性仿真,分析对比了 5 个速度等级下的脱轨系数、轮重减载率、轮轨垂向力、轮轴横向力这 4 项评价指标[10]的最大值。如图 8～图 11 所示。

由曲线图可知,通过 5 个不同速度等级的动力学仿真对比,柔性体在 220 km/h 和 300 km/h 时的脱轨系数要略小于刚性体,其余速度上大于刚性体;柔性体的轮重减载率要比刚性体大;在轮轨垂向力方面,除了速度为 240 km/h 时刚性体比柔性体大,其余速度上刚性体的要小;轮轴横向力方面,柔性体的比刚性体的略大。总的来说,柔性体的安全性要低于刚性体的安全性。

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

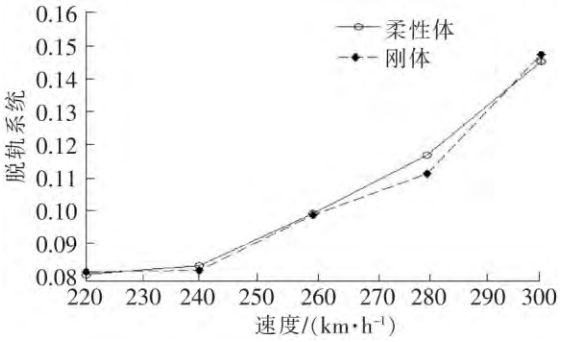

图8 脱轨系数最大值

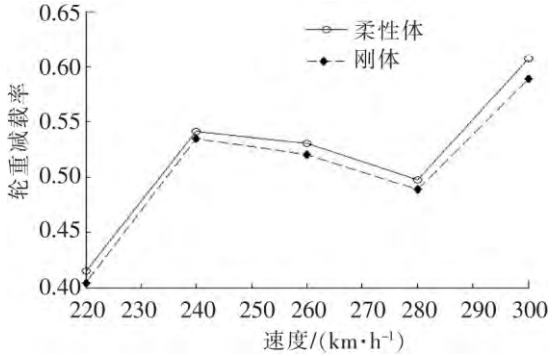

图9 轮重减载率最大值

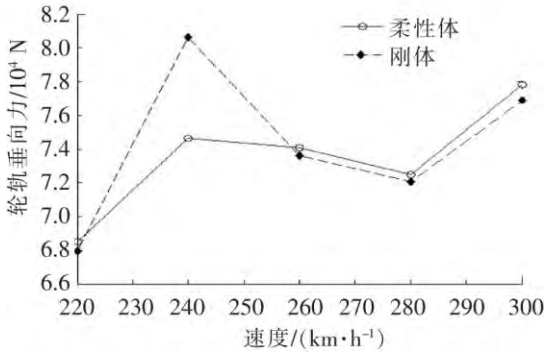

图10 轮轨垂向力最大值

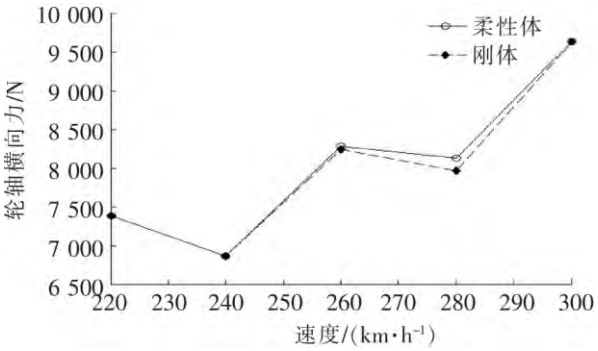

图11 轮轴横向力最大值

4 结论

将铁道车辆中的一些部件考虑成弹性体并与其它部件组装在一起而组成刚柔耦合的动力学分析模型是今后动力学分析的方向。对此进行探索研究,在同样的工况条件下,将车辆模型中的刚性车体处理成弹性体并进行动力学仿真,结果显示:柔性车体的车辆临界速度要低,运行平稳性与刚性体相比相差不大,脱轨系数、轮重减载率、轮轨垂向力和轮轴横向力的最大值与刚性车体的最大值相比有所增加或相差不大,这是由于车体结构变形带来的影响。对刚柔耦合模型进行动力学仿真分析,这将为后续的研究奠定理论基础。

参 考 文 献

[1]姜雪娇,齐双强,齐双峰,等. 基于刚柔耦合模型的C80B型敞车动力学性能研究[J]. 起重运输机械,2012,25(5):25-28.

[2]李笑 ,卜继玲, 黄运华,等. SIMPACK中的柔性体动力学仿真分析研究[J]. 信息技术,2010,39(1):91-94.

[3]李奇,吴定俊,邵长宇. 考虑车体柔性的车桥耦合系统建模与分析方法[J]. 振动工程学报,2011,24 (1):41-47.

[4]刘楠. 基于柔性车体的平车动力学性能仿真分析[D]. 成都:西南交通大学,2013.

[5]曲天威,王惠玉. 机车车体和转向架模态分析研究[J]. 铁道机车车辆,2012,32(3): 5-8.

[6]汤礼鹏,刘国伟. 30 t轴重浴盆式敞车车体模态分析[J]. 设计与研究,2010,11(3): 3-5.

[7]芦旭. 基于刚柔耦合的CRH3车体振动疲劳强度分析[D]. 大连:大连交通大学,2010.

[8]Zhou J,Goodall R,Ren L. Influences of car body vertical flexibility on ridequality of passenger railway vehicles[J]. Rail and Rapid Transit,2009,223(5):461-471.

[9]廖英英,刘永强,杨绍普,等. 高速铁道车辆天棚阻尼悬挂系统时滞稳定性分析[J]. 石家庄铁道大学学报:自然科学版,2012, 25(4): 66-71.

[10]刘永强,廖英英,杨绍普,等. 一种抗蛇行减振器控制系统在高速动车组中的仿真应用[J]. 石家庄铁道大学学报:自然科学版, 2015,28(2) : 68-72.

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

Dynamic Simulation Analysis of Rigid Flexible Coupling Model of High Speed Train

Zhao Yiwei[1], **Liu Yongqiang**[1], **Liao Yingying**[2]

(1. School of Mechanical Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China;
2. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

Abstract: The effect of the high speed train elastic body on the dynamic performance of the vehicle is studied. To analyze the influence of elastic body, first of all , the FEM model of the body is established, the modal of the body is calculated, then the modal neutral file generated by ANSYS is imported into the VI-Rail software. The flexible body, the front and rear bogie frame subsystems are assembled and rigid flexible coupling vehicle model is built, and its influence is analyzed on motion stability, stable operation and operation safety. By comparing with the rigid multi-body dynamics model, the simulation results show that vehicle with flexible body has better dynamic performances than with rigid body.

Key words: high speed train; rigid flexible coupling; VI-Rail; dynamic simulation

(上接第 32 页)

[12] Yonghua Jiang, Baoping Tang, Yi Qin. Feature extraction method of wind turbine based on adaptive Morlet wavelet and SVD[J]. Renewable Energy, 2011, 46(36): 2146-2153.

[13] 耿宇斌, 赵学智. 基于奇异值能量谱的 Morlet 小波尺度优化[J]. 振动与冲击, 2015, 34(15): 133-139.

Sound Signal Testing of Rolling Bearing Based on Adaptive Morlet Wavelet

Li Jingjiao, **Chen Enli**, **Liu Yongqiang**

(School of Mechanical Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

Abstract: Diagnosis of rolling bearing faults based on sound signal testing and analysis is a new method, a feature extraction method of sound signal of rolling bearing is raise based on adaptive Morlet wavelet. Firstly, minimum Shannon entropy is used to optimize the Morlet wavelet shape factor in order to match with the impact component. Then, an abrupt information detection method based on the transitional stage of singular curve of wavelet coefficient matrix is used to choose the appropriate scale for the wavelet transformation. Finally, the fault feature of the signal can be extracted using this method. The experimental results shows that the method can extract sound signal fault feature more effectively.

Key words: sound signal; wavelet transform; shannon entropy; fault diagnosis

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net