

“车-货”耦合的高速货运动车组动力学性能分析

徐士恒¹,王勇¹,石俊杰²

(1. 西南交通大学 牵引动力国家重点实验室,四川 成都 610031;

2. 中车唐山机车车辆有限公司 技术研究中心,河北 唐山 063035)

摘要:针对货运动车组的特点,在传统多刚体仿真模型的基础上,综合考虑集装箱的结构、布置和安装方式,在SIMPACK动力学仿真软件中建立更接近实际的考虑货运动车组车厢和集装箱货物的装载加固关系的“车-货”耦合动力学仿真模型。仿真计算了耦合模型在不同速度下的运动稳定性、运行平稳性及曲线通过性能。结果表明,各项动力学指标均符合要求,满足最高运行速度250 km/h的运行要求。前后端集装箱的振动加速度比车体地板的加速度大,因此研究运行速度250 km/h以上货运动车组的动力学性能以及对所运送货物的完整性、安全性进行评估时需要考虑车体和集装箱的耦合关系。

关键词:货运动车组;耦合仿真模型;动力学性能

中图分类号:TP391.9 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2021)02-0022-03

Analysis of the Coupling Dynamics Performance between Vehicle-body and Container of High-speed Freight EMU

XU Shiheng¹, WANG Yong¹, SHI Junjie²

(1. Key State Laboratory of Traction Power, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

2. P&T Research Center, CRRC Tangshan Co., Ltd., Tangshan 063035, China)

Abstract: According to the characteristics of freight EMU, a coupling simulation model better related with the reality of consolidation method of container and vehicle body was established by SIMPACK on the basis of the traditional multi rigid body simulation model and with regard to comprehensive consideration of the type, the installation way and the arrangement of container. With the model, the running stability, curve negotiating performance and riding quality of the model was calculated. The results show that all the indicators meet the requirements which can guarantee the operation of 250 km/h and that the vibration acceleration of the front and rear end container is higher than that of the vehicle floor. Therefore, it is necessary to consider the coupling relationship between the car body and the container when studying the dynamic performance of the freight EMU and evaluating the integrity and safety of the transported goods.

Keywords: freight EMU; coupling simulation model; dynamic performance

0 引言

交通运输和物流业是我国经济社会发展的基础性、战略性和服务性产业。近年来随着经济和电子商务的发展,货物快运市场规模持续快速增长,潜力巨大,然而既有的铁路快运份额很低^[1],加速铁路快速货物运输发展,不仅可以满足货主对高附加值货物的高时效性要求,更对提高高铁线路利用率、创造良好的社会效益和经济效益具有重要意义。在货车上加装集装箱的模式在国外已有大量实际应用^[2-3]。集装箱具备运输效率高、容易联运、对货物种类要求低的优点,结合高速货运动车组的快速、平稳性强等特点,势必成为未来铁路货运的主流方式。

在以往的货车模型中,往往都是将货物与车体的连接视作刚性连接,忽略了其中的连接关系而考虑成一个整

体。在高速运行的货车模型中,货物的振动愈发明显^[4],其与车体的装载加固关系使车体和货物的振动特征耦合。货物与车体的振动相互作用、相互影响,对整车的动力学性能会产生一定的影响。本文对装载集装箱的高速货运动车组进行分析,通过SIMPACK动力学仿真软件建立“车-货”耦合的高速货运动车组模型,分析其运动稳定性、运行平稳性及曲线通过性能。对不同运行速度下的车辆系统动力学性能和货物的振动响应进行校核计算与分析。

1 车-货耦合的高速货运动车组特点

一般的多刚体模型,车体与货物均考虑为一个刚体,忽略了货物与车体的相互作用,本文基于时速250 km/h以上的货运动车组模型,结合集装箱的布置和安装方式,

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2017YFB1201304)

第一作者简介:徐士恒(1995—),男,浙江丽水人,硕士研究生,研究方向为车辆系统动力学。

在所建立的多刚体货运动车组模型基础上,将每个集装箱均考虑成单独的刚体,综合考虑集装箱与车厢的连接,建立更接近实际的考虑集装箱货物与车体间的装载加固关系的“车-货”耦合动力学仿真模型,从而考虑“车-货”耦合的货运动车组在不同运行速度下的动力学性能,用动力学评价指标进行分析对比。

2 车-货耦合的动力学模型

2.1 动力学模型建立

传统的车辆系统模型是一个复杂的非线性多刚体模型,本文采用了经典的车辆动力学模型^[5],在模型建立中充分考虑了轮轨接触几何关系、轮轨相互作用力及悬挂元件特性等非线性因素^[6],保证模型的研究内容符合实际情况。为了更好地模拟货运动车组的运行性能,建模时考虑了将车辆横向运动和垂向运动耦合起来的数学模型。多刚体货运动车组拖车由1个车体、2个构架、4个轮对和8个转臂组成。各刚体自由度(以轨道为参考坐标系)由表1所示,每节车共50个自由度。

表1 车辆系统自由度

自由度名称	车体	构架×2	轮对×4	转臂×8
纵向	√	√	√	—
横向	√	√	√	—
垂向	√	√	√	—
侧滚	√	√	√	—
点头	√	√	√	√
摇头	√	√	√	—

另外,考虑了承载20个集装箱,其结构外形示意图如图1所示^[7]。集装箱每个自重163 kg,每个载重625 kg,集装箱容积5.8 m³。集装箱沿车体长度方向并排布置,每个集装箱均为6个自由度的刚体,其与车体的紧固装置由底部的刚性支撑及横向、纵向的限位抓钩组成。

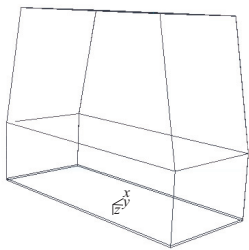


图1 集装箱结构外形示意图

集装箱与车体固定的限位抓钩结构示意图如图2所示。其安装和布置方式为每个集装箱的左右两侧各有3个横向限位抓钩,具有2 mm的间隙,在模型中以非线性弹簧-阻尼力元模拟,设置较大刚度参数以模拟非线性止挡特性;中间18个集装箱纵向每侧有2个抓钩,和集装箱外壁通过橡胶块接触,采用分段线性弹簧-阻尼力元模拟,在小位移范围内为橡胶块刚度,之外为大刚度;前后端部

2个集装箱内侧各有2个抓钩,连接方式与中间集装箱的纵向抓钩力元一致,外侧抓钩和集装箱刚性接触,直接以大刚度力元模拟。

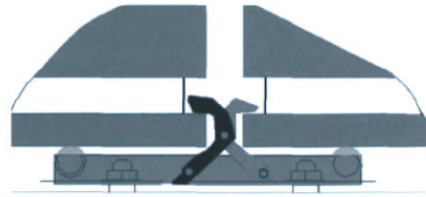


图2 限位抓钩结构示意图

考虑集装箱及货物与车体连接关系的“车-货”耦合货运动车组动力学仿真模型如图3所示。

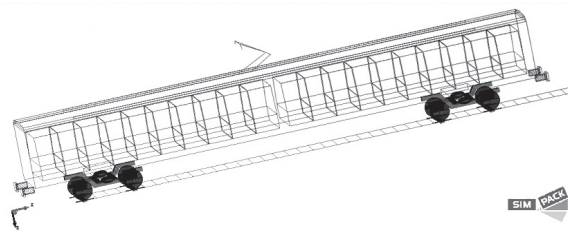


图3 “车-货”耦合模型

2.2 仿真工况设置

高速货运动车组的仿真计算工况分为直线工况与曲线工况,对设计时速为250 km/h的动车组在不同速度下的动力学性能进行分析。

工况1:前段直线轨道采用武广谱为激励,后段为理想平直的轨道,运行速度为100 km/h~600 km/h,计算车辆蛇行失稳临界速度。

工况2:全程采用武广谱的直线轨道和R7 000 m半径曲线轨道,运行速度为100 km/h~400 km/h,计算车辆运行平稳性和曲线通过安全性。

3 动力学性能分析

3.1 运动稳定性

本文用轮对横向运动的极限环幅值来分析货运动车组的运动稳定性,当极限环幅值超过1 mm,即判定系统出现蛇行运动失稳。由图4可见,正常工况下新轮货运动车组拖车在600 km/h速度范围内轮对横移无谐波,在激励消失后轮对稳定在平衡位置,其临界速度超过600 km/h,满足最高运行速度250 km/h的要求,且有较大的安全裕量。

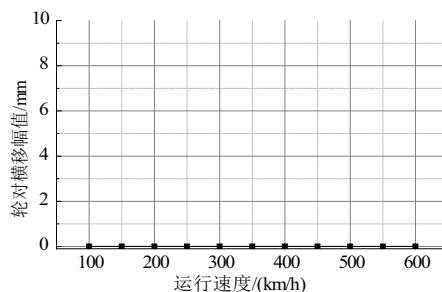


图4 极限环幅值

3.2 运行平稳性

货运动车组车辆的运行平稳性数据的采样、处理和分析方法及平稳性指标计算方法根据《高速动车组整车试验规范》进行,对单节货运动车组拖车前后测点的振动响应和平稳性指标进行校核。由于在动车组运行过程中,货物的振动、冲击随着车辆运行速度加快而愈发剧烈,本节对车厢中前、中、后3个集装箱的振动加速度也进行了对比计算分析。由图5和图6(本刊黑白印刷,相关疑问咨询作者)可以看出车辆的运行平稳性指标随着速度升高呈现增大的趋势,但在400 km/h的运行速度下,平稳性指标仍然 <2.5 ,为优级。前后端部的集装箱测点横向振动加速度明显大于车体地板对应位置测点的结果,垂向振动加速度也比车体地板位置的大,说明在货运动车组高速运行时考虑集装箱及货物与车体耦合的动力学模型更趋近实际情况,并可更准确地对所运送货物的完整性和安全性进行评估。

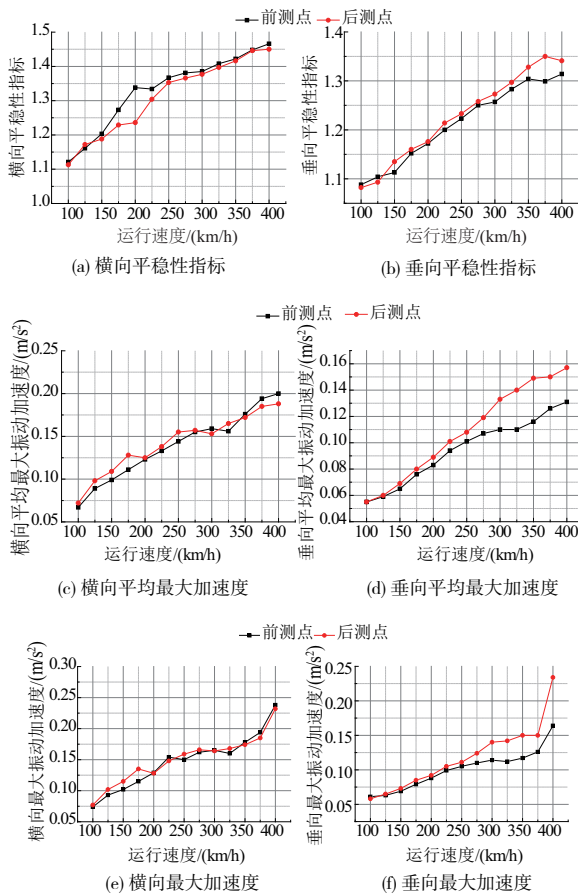


图5 车体测点的平稳性指标和振动加速度

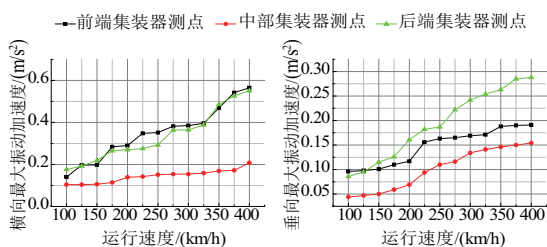


图6 集装箱最大加速度

3.3 曲线通过性能

本节采用脱轨系数、轮重减载率、倾覆系数、轮轴横向力、轮轨垂向力及磨损指数等指标,对考虑“车-货”耦合模型货运动车组拖车的曲线通过性能进行校核。由图7结果可见,所计算的速度通过7000 m半径曲线时货运动车组拖车的脱轨系数、轮重减载率、倾覆系数、轮轴横向力等指标均小于规范规定的安全限度,说明时速250 km/h以上货运动车组可以在7000 m半径曲线上以400 km/h以内的速度安全运行。

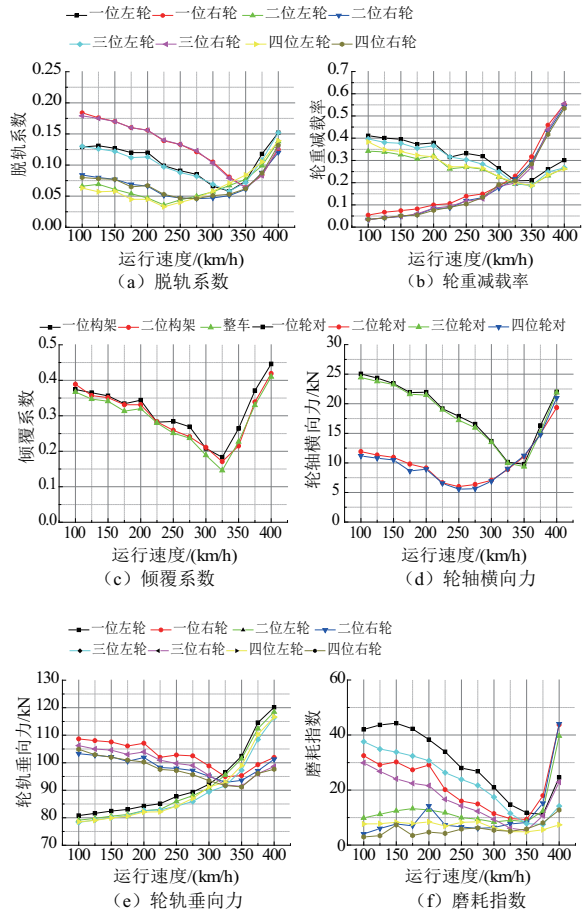


图7 曲线通过性能

4 结语

在传统高速货运动车组多刚体模型的基础上考虑了集装箱的装载加固及排列方式,对集装箱及货物和车辆进行了耦合振动特征动力学建模,并对该“车-货”耦合模型进行了动力学仿真分析。通过计算可知,“车-货”耦合的动力学模型更贴近实际情况。动车组拖车的临界速度在600 km/h以上,满足最高运行速度为250 km/h的设计要求,并且留有足够的安全裕量;车体的运行平稳性在400 km/h范围内都符合标准优级要求,耦合模型下集装箱的横向、垂向振动加速度总体上比车体大,更符合实际情况,也利于真实评估货物的完整性和安全性;在曲线通

(下转第28页)

吸油接近尾声时,配流口与进油腔逐渐分离,通流面积开始减小,但远大于减振槽处的通流面积,同时柱塞运动接近上止点附近,泵腔容积基本恒定,不会再产生较大的真空度。此时配流口和泵腔内压力略有下降,但仍高于油液的空化压力,因而不会再出现空化气体。当工作时间为0.06 s时,转套相对于吸油起始位置转过180°,柱塞越过上止点开始向下运动进行排油。由于吸油过程中配流口和泵腔内存在空化现象,导致部分容积被空化气体所占据,当配流口与排油腔接通时会出现油液的倒灌,高压油由排油腔回流至配流口和泵腔中引起压力上升;此外减振槽处通流面积较小,柱塞下移起始阶段配流口排油困难,使得配流口连同泵腔内压力上升,在两方面共同作用下导致吸油向排油过渡阶段配流口和泵腔压力均高于出口负载出现压力超调。配流口中最大压力为12.87 MPa,泵腔中最大值为13.02 MPa。随着转套继续转动,通流面积逐渐增大,配流口和泵腔内压力降低并趋于外部负载,配流口连续稳定输出高压油液。

排油接近尾声时,柱塞运动接近于下止点,泵腔与配流口之间通流面积很小,泵腔中残存的少量高压油液几乎不流入配流口中,泵腔出现排油困难,造成泵腔内压力突然上升,出现瞬间的压力尖角,最大压力为13.26 MPa;而配流口直接与排油腔负载压力接通,使其几乎不受泵腔高压油流入的影响,基本与负载压力相一致。因而在排油向吸油过程转换时配流口压力略有上升,但无明显压力超调。当工作时间为0.12 s时,转套相对于吸油起始位置转过360°,柱塞通过下止点,泵腔重新开始吸油,配流口和泵腔内压力迅速降低,进入新的工作循环。

4 结语

1) 空化气泡的群体性溃灭释放出巨大能量给泵腔和配流口同时带来压力波动,使二者内部出现压力尖角。

2) 配流口直接与进排油腔接通,且本身容积不发生变化,所以其压力尖角的峰值与泵腔压力尖角的峰值相比之下较低。

3) 配流口由于连通进出油腔,相对压力能保持得更平稳,所以出现压力变化后能够比泵腔更快平复波动。

参考文献:

- [1] 张洪信,程联军,张铁柱,等. 往复柱塞泵转套式配流系统的结构原理[J]. 流体机械,2015,43(8):48-51.
- [2] 徐威. 往复柱塞泵转套式配流系统性能仿真与结构优化研究[D]. 青岛:青岛大学,2016.
- [3] 徐威,张洪信,张铁柱,等. 转套式配流系统凸轮槽型线及其运动学特性研究[J]. 机械强度,2017,39(4):882-886.
- [4] 张延君,张洪信,赵清海,等. 往复柱塞泵转套式配流系统泵腔流场仿真研究[J]. 液压与气动,2016(11):31-35.
- [5] 张延君,张洪信,赵清海,等. 基于湍动能的转套式配流系统流场特性分析[J]. 青岛大学学报(工程技术版),2018,33(4):93-97.
- [6] 张延君,张洪信,赵清海,等. 转套式配流系统闭死角对工作脉动的影响研究[J]. 青岛大学学报(工程技术版),2018,33(1):102-106.
- [7] 张延君,张洪信,赵清海,等. 转套式配流系统三角减振槽结构及其对流场影响[J]. 机械科学与技术,2018,37(6):834-838.
- [8] 张延君,张洪信,赵清海,等. 转套式配流系统配流口结构及对工作脉动的影响[J]. 流体机械,2017,45(11):52-57.
- [9] 姜晓天,张洪信,赵清海,等. 转套式配流系统U型减振槽结构设计优化[J]. 机械科学与技术,2019,38(1):23-29.
- [10] 程前昌,张洪信,赵清海,等. 转套式配流系统与阀式配流系统性能对比研究[J]. 机械制造与自动化,2019,48(2):29-32.
- [11] 程前昌,张洪信,赵清海,等. 转套式配流系统凸轮槽型线及其运动学特性再研究[J]. 机械强度,2020,42(1):154-160.
- [12] WEN F F, CHENG Y G, YOU J F, et al. Cavitation pressure fluctuation characteristics of a prototype pump-turbine analysed by using CFD [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2019, 240:072035.
- [13] 孙龙刚,郭鹏程,罗兴铸. 水轮机尾水管涡带压力脉动同步及非同步特性研究[J]. 农业机械学报,2019,50(9):122-129.
- [14] LAH R. Prevent cavitation to minimize control valve damage [J]. Opflow, 2019, 45(7):18-20.
- [15] 秦杨,易文俊,管军. 超空泡射弹高速倾斜入水的空化流动数值模拟[J]. 兵器装备工程学报,2019,40(7):99-104.
- [16] 张军辉. 面向轴向柱塞泵降噪的配流盘及配流方法研究[D]. 杭州:浙江大学,2013.

收稿日期:2020-06-12

(上接第24页)

过安全性方面,在7000 m半径曲线上和400 km/h运行速度范围以内,各项评价指标均符合标准规定的安全限度要求,具有良好的曲线通过性能。综上所述,“车-货”耦合的高速货运动车组能够满足250 km/h范围内的安全平稳运行要求。

参考文献:

- [1] 乔珂,社会谦,赵鹏,等. 高速货运动车组关键技术研究[J]. 综合运输,2018,40(12):88-92.
- [2] 吴云云. 国外高速铁路货运发展[J]. 中国铁路,2010(9):72-74.

- [3] 薛蕊,任尊松,徐宁,等. 货运动车组车体-集装箱耦合振动特性研究[J]. 机械工程学报,2019,55(20):198-204.
- [4] 丁立脚,熊力,梁永廷,等. 高速货运动车组的研制[J]. 中国铁路,2017(11):91-98.
- [5] 翟婉明. 车辆-轨道耦合动力学[M]. 第4版. 北京:科学出版社,2015.
- [6] 高云鹤. 快速货车动力学性能分析及参数优化[D]. 成都:西南交通大学,2010.
- [7] 杨帅,王伟,庞学苗,等. 货运动车组关键技术研究[J]. 铁路采购与物流,2014,9(12):33-34.

收稿日期:2020-03-17