

公铁联运多功能运输车动力学性能分析

车瑞娟¹,王勇¹,吴荣坤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. 中车齐齐哈尔车辆有限公司 大连研发中心,辽宁 大连 116052)

摘 要:考虑轮轨接触几何关系、轮轨相互作用力和悬挂装置等非线性因素,利用动力学仿真软件,建立了公铁联运多功能运输车动力学模型,仿真分析了车辆系统的运动稳定性、曲线通过安全性和运行平稳性。研究表明:在新车和磨耗状态下,公铁联运多功能运输车空车、重车载荷工况的临界速度具有一定的速度裕量,曲线通过安全性指标均满足 GB/T 5599-1985 的限度要求,垂向和横向平稳性指标均<4.0 良级标准,动力学性能良好,能够保证以 120 km/h 速度正常运行。

关键词:公铁联运多功能运输车;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(2020)06-0138-04

Dynamic Performance Analysis of Rail-road Intermodal Transport Multi-function Vehicle

CHE Ruijuan¹, WANG Yong¹, WU Rongkun²

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

2. Dalian Research and Development Center of CRRC Qiqihar Rolling Stock Co., Ltd., Dalian 116052, China)

Abstract: In consideration of the nonlinearities resulting from wheel-rail contact geometry, wheel-rail interaction force and suspension characteristics, the dynamic model of rail-road intermodal transport multi-function vehicle is established by using dynamic simulation software, and the running stability, curve negotiating performance and riding quality of the vehicle system are simulated and analyzed. The results show that under the new car and wear condition, the vehicle runs at enough high hunting critical speed, its safety indices of the curve negotiation meet the limit requirement of GB/T 5599-1985, the vertical and lateral ride quality indices are less than 4.0. And the good dynamic performance can guarantee the normal operation speed of 120 km/h.

Keywords: rail-road intermodal transport multi-function vehicle; simulation model; dynamic performance

0 引言

随着社会经济的发展,运输企业以追求高效率、便捷、低成本的运输方式为目标,公铁联运的发展成为必然。公铁联运主要有集装箱运输、驮背运输等多种方式,在欧、美运输体系中发挥着重要作用^[1-2]。基于公路和铁路的优点,公铁联运可提供全程一站式物流^[3],实现快速便捷的“门到门”服务,具有高效、环保等优势。中国对公铁联运的关键技术及装备的可行性也进行了大量的研究,其中,对于驮背运输的建模仿真已有相关的研究^[4]。公铁联运多功能运输车在运输过程中,考虑到重载货物运输的安全性,需要保证车辆良好的运输状态,因此对公铁联运多功能运输车的动力学性能研究是必要的。

本文对公铁联运多功能运输车的结构特点进行分析,利用动力学仿真软件建立了车辆系统动力学模型,对新车和磨耗状态下空、重车的运动稳定性、曲线通过安全性和运行平稳性进行仿真分析。

1 公铁联运多功能运输车结构特点

公铁联运多功能运输车为 2 辆 1 组,用于运输公路

半挂车,兼顾多规格集装箱运输。车组两端分别布置手制动装置和车钩缓冲装置,车组中部采用关节连接器连接,凹底车体承载结构,车上设有液压和电气系统。主要结构由车体、液压系统、电气控制系统、空气制动装置、手制动装置、转 K6 型转向架(集成制动)、车钩缓冲装置等组成。

该车辆采用的转 K6 型转向架在“三大件”转向架基础上增设了弹性交叉支撑杆,增大了转向架的抗菱形变形能力,从而提高了临界速度。在车体和转向架之间的连接采用心盘和常接触双作用式弹性滚子旁承联合承载方式,增大了车体的回转定位力矩;车组中部采用的关节连接器为铰接式,具有水平、垂向、侧向转动功能,能够满足车辆正常运行和凹底架旋转、升降的作业要求。

2 车辆系统动力学模型

2.1 动力学模型建立

车辆系统动力学主要研究载荷与系统之间的关系,利用

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFB1201303)

第一作者简介:车瑞娟(1994—),女,甘肃会宁人,硕士研究生,研究方向为车辆系统动力学。

数值积分方法建立并求解系统的微分方程组或代数方程组^[5],车辆建模中考虑了系统横向运动和垂向运动的耦合模型。公铁联运多功能运输车整车系统由2个车体、1个中部底架、4个摇枕、8个侧架和8个轮对共计23个刚体组成,各刚体的自由度数如表1所示,共计103个自由度。

表1 车辆系统自由度

自由度	纵向	横向	垂向	侧滚	点头	摇头
车体($i=1\sim 2$)		y_c	z_c	Φ_c	θ_c	Ψ_c
中部底架		y_m	z_m	Φ_m	θ_m	Ψ_m
侧架($j=1\sim 8$)	x_{sfi}	y_{sfi}	z_{sfi}	—	θ_{sfi}	Ψ_{sfi}
轮对($k=1\sim 8$)		y_{wj}	z_{wj}	Φ_{wj}	—	Ψ_{wj}
摇枕($l=1\sim 4$)		y_{lk}	z_{lk}	Φ_{lk}	—	Ψ_{lk}

在建立公铁联运多功能运输车系统数学模型时作出如下假定:轮对、侧架、摇枕、中部底架和车体等部件的弹性比悬挂系统的弹性要小得多,均视为刚体,即忽略各部件的弹性变形。

在模型中充分考虑了轮轨接触几何关系、轮轨间蠕滑力/蠕滑率的非线性因素,以及各种间隙、止档、斜楔减振器、心盘及旁承的摩擦力和力矩等的非线性特性。

2.2 装载工况

公铁联运多功能运输车主要结构如图1所示,空车动力学仿真模型如图2所示。该车辆在空车和重车状态下最高运行速度为120 km/h。在计算时考虑了公铁联运多功能运输车的7种装载工况。

工况1:车组空车

工况2:车组重车(装载49 t公路货车)

工况3:车组重车(装载2个20 ft箱,总重57 t)

工况4:车组重车(装载长度为14 600 mm、总质量35 t的公路半挂车)

工况5:车组1空1重(装载49 t公路货车)

工况6:车组1空1重(装载2个20 ft箱,总重57 t)

工况7:车组1空1重(装载长度14 600 mm、总质量35 t的公路半挂车)



图1 公铁联运多功能运输车结构

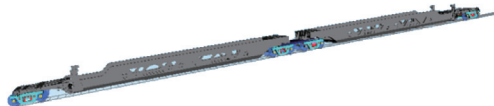


图2 公铁联运多功能运输车动力学仿真模型

3 动力学性能分析

3.1 蛇行运动稳定性

公铁联运多功能运输车的蛇行运动稳定性是系统本

身的固有属性,是决定车辆能否高速运行的关键因素。通过实际临界速度(文中简称临界速度)的计算方法判定车辆系统运动稳定性^[6],看刚体振动位移和速度是否逐渐衰减到平衡位置。车辆以正常速度运行时,应尽可能避免蛇行失稳现象的出现,要求车辆系统的蛇行失稳临界速度高于其设计制造速度一定裕量。在计算仿真过程中,选用一段为1 000 m的美国五级谱作为轨道不平顺的输入,对新车和磨耗状态下公铁联运多功能运输车各工况的临界速度进行对比分析。

根据仿真分析可得到公铁联运多功能运输车在新车和磨耗状态下各不同装载工况的蛇行失稳临界速度,如表2所示。可见在新车和磨耗状态下,公铁联运多功能运输车各种工况下蛇行失稳临界速度均超过132 km/h,能够满足空车、重车不同装载工况120 km/h设计速度的要求,并具有一定的速度裕量。

表2 公铁联运多功能运输车蛇行失稳临界速度

单位:km/h

状态	工况1	工况2	工况3	工况4	工况5	工况6	工况7
新车状态	160.2	178.4	184.8	172.3	167.7	169.8	163.5
磨耗状态	134.6	157.7	160.2	145.4	144.7	148.9	141.2

3.2 曲线通过安全性分析

车辆系统运行在曲线线路上时,除受到线路不平顺的激扰以外,还要受到曲线曲率变化、超高变化、离心力等因素的影响^[7]。因此,车辆系统通过有限长度曲线时的响应是一个动态过程。结合线路条件,计算公铁联运多功能运输车以不同速度分别通过不同半径的曲线线路,计算过程中采用美国五级线路谱,考虑轨道的随机不平顺激扰,分析该车辆的轮轴横向力、脱轨系数、轮重减载率等曲线通过安全性指标。

在新车和车轮磨耗状态下,以曲线半径为300 m,线路超高为120 mm的工况4车组为例,给出公铁联运多功能运输车以不同的速度通过该曲线时,一位轮对的最大轮轴横向力、脱轨系数和轮重减载率的计算结果,如图3所示。由计算结果可知轮轴横向力最大值为49.769 kN、脱轨系数最大值为0.411、轮重减载率最大值为0.375,均满足标准规定的安全限度要求,说明公铁联运多功能运输车能在曲线上安全运行。

本文选用的磨耗后车轮踏面等效锥度在0.4左右,较大的等效锥度使车辆在通过小半径曲线时轮轨安全性指标相比新轮有所降低,而在通过较大半径曲线和直线时轮轨作用力和脱轨系数、轮重减载率等指标则有所增大,但均满足安全限度要求。

3.3 运行平稳性分析

本文对公铁联运多功能运输车分别在新车和磨耗状态下直线线路上动态响应进行了计算,空车、重车不同装载工况的计算速度均为40 km/h~132 km/h。新车和磨耗状态下的平稳性计算结果如图4~图7所示。由图4~图7

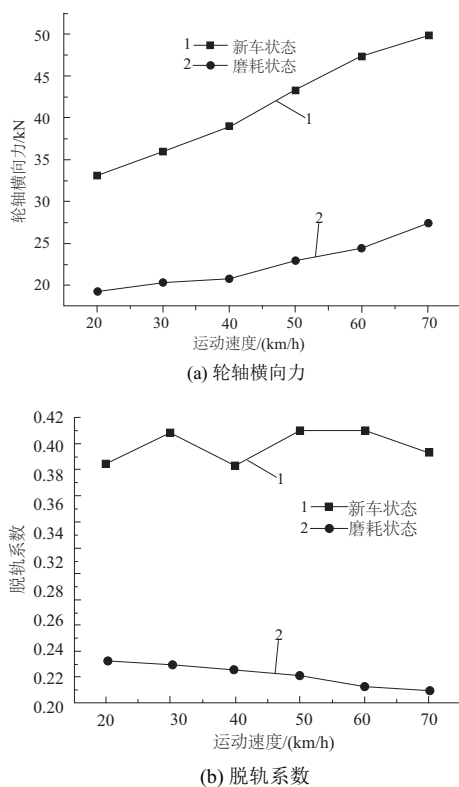


图3 R300 m 半径曲线通过安全性指标

发现,随着速度的提高,车辆系统的平稳性指标基本呈增大的趋势。在新车和磨损状态下,空车、重车不同装载工况的运行平稳性指标在 132 km/h 速度范围内均满足良级标准(本刊为黑白印刷,如有疑问请咨询作者)。

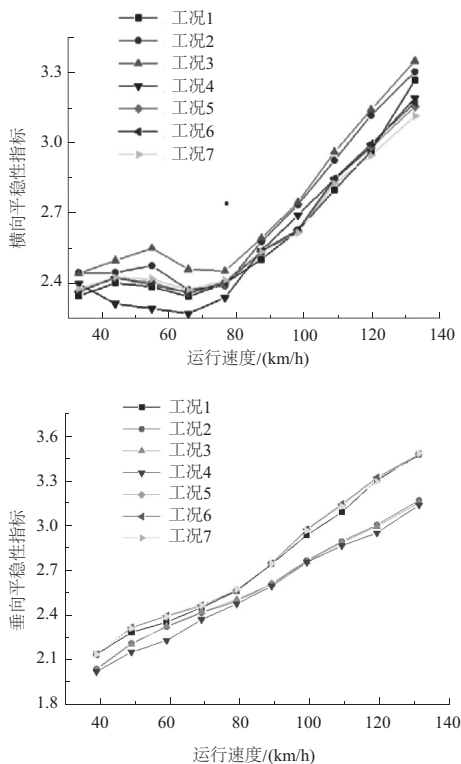


图4 新车状态下平稳性指标计算结果(前车)

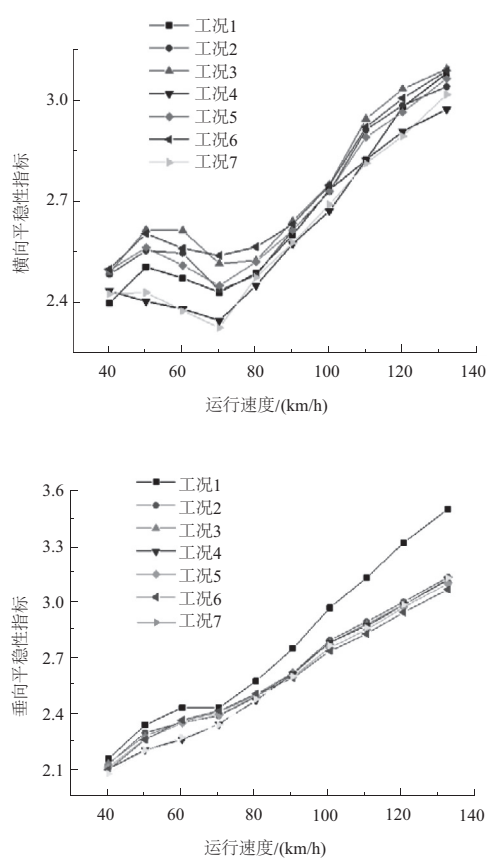


图5 新车状态下平稳性指标计算结果(后车)

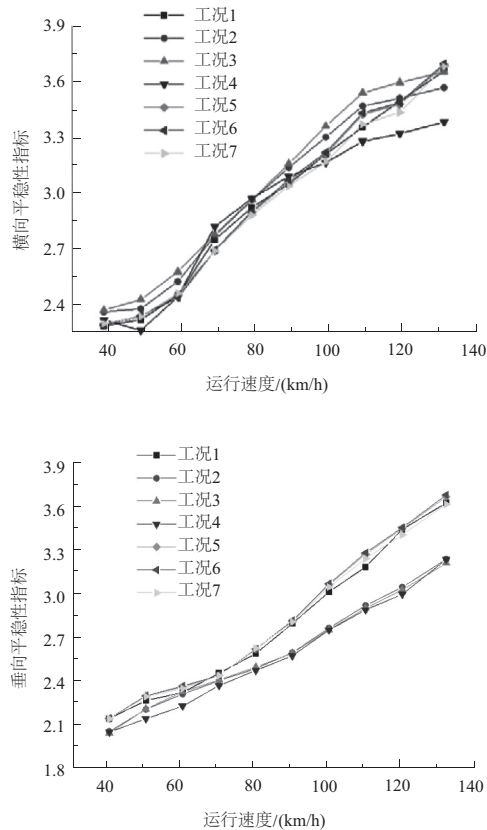


图6 磨损状态下平稳性指标计算结果(前车)

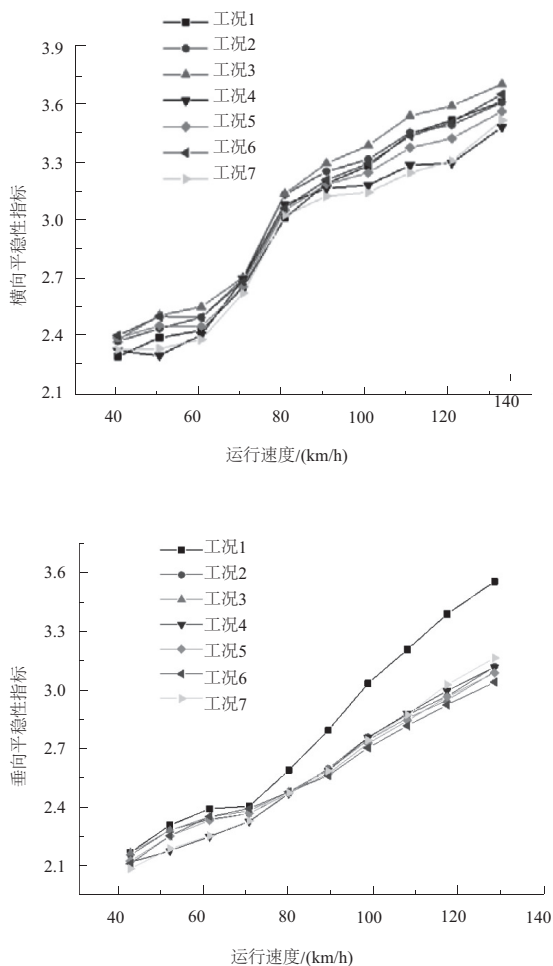


图7 磨损状态下平稳性指标计算结果(后车)

4 结语

基于多体系统动力学理论,建立了公铁联运多功能运输车两节车组仿真模型,对该车组进行了动力学性能仿真。由计算结果可知,在新车和车轮磨损状态下,空车、重车不同装载工况的临界速度均 $>132\text{ km/h}$,能够满足空车、重车不同装载工况车辆 120 km/h 设计速度的要求,并具有一定的速度裕量;曲线通过安全性各指标均满足标准规定的安全限度要求,车辆可以在曲线和直线上安全运行;空车、重车不同装载工况的运行平稳性指标满足GB/T 5599-1985的良级标准要求,能保证空车、重车不同装载工况车辆在 120 km/h 设计速度范围内平稳运行。

参考文献:

- [1] 吴荣坤,李华,于跃斌,等.我国发展驮背运输技术的思考[J].铁道车辆,2016,54(11):4,9-12.
- [2] 吴荣坤,李华,郑和平,等.QT_(1(2))型驮背运输车研制[J].铁道车辆,2019(9):4-5,25-27.
- [3] 石海龙,李拓.铁路发展多式联运和货物快捷运输技术国内外发展情况浅析[J].技术与市场,2017,24(8):102-103.
- [4] HE Yinchuan,ZHANG Qingping,LIN Wu,et al. Simulation analysis of the affect of running speed on the piggyback-transportation safety[J]. Springer International Publishing,2018(5):347-354.
- [5] 罗仁,石怀龙.铁道车辆系统动力学及应用[M].成都:西南交通大学出版社,2018:57-82.
- [6] 王勇,曾京,鄢平波.两联关节式集装箱平车动力学仿真模型[J].交通运输工程学报,2008(1):1-4.
- [7] 刘闯.30 t轴重货车动力学性能研究[D].成都:西南交通大学,2016.

收稿日期:2019-11-11

(上接第112页)

由表8可以看出,作为目标值的前6阶频率平均误差为0.18%,最大误差为0.70%,精度非常高。

2 结语

本文给出了完全参数化建模的定义,并通过GARTEUR飞机仿真算例和试验算例对完全参数化建模的有效性进行了验证,得到结论如下。

1) 采用完全参数化思想建立的GARTEUR飞机模型修正后能够以较高的精度复现修正频段内的模态频率,并对修正频段外的频率准确地进行预示,验证了完全参数化建模的有效性。

2) 对于非完全参数化模型相比于完全参数化模型所缺失的是能反映结构误差的参数,若灵敏度低,则对模型修正影响不大,修正后仍能得到较为精确的有限元模型;若灵敏度高,则可能对模型修正造成很大的影响,不仅增加了迭代次数,而且修正后不会得到精确的结果,甚至产生更大的误差。

3) 建立初始有限元模型时,只有全面且准确地定位

误差,采取正确的参数模拟,严格控制其取值范围,才能得到准确的初始有限元模型并在修正后得出质量较高的修正结果。

参考文献:

- [1] 张权,史治宇.加权方法在基于灵敏度分析的模型修正中的应用[J].机械制造与自动化,2018,47(6):85-88.
- [2] SCHEDLINSKI C. Computational model updating of large scale finite element models. proceedings of IMAC 2000, San Antonio, USA.
- [3] ZHANG Q W, CHANG C C, CHANG T Y P. Finite element model updating for structures with parametric constraints[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2000, 29(7): 927-944.
- [4] LINK M, FRISWELL M. Working group 1: generation of validated structural dynamic models—results GARIEUR SM-AG19 test-bed[J]. Mechanical Systems and Signal Processing. 2003, 17(1): 9-20.
- [5] 秦仙蓉. 基于灵敏度分析的结构计算模型修正技术及相关问题研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2001.

收稿日期:2019-10-10