

基于 SIMPACK 的车辆系统动力学性能分析

肖襄雨

(西南交通大学 牵引动力国家重点实验室, 四川 成都 610031)

摘要: 针对列车行驶的安全性、舒适性及可靠性问题, 基于某地铁的动力学参数进行建模, 运用 SIMPACK 动力学软件完成模型的建立与分析。结合列车实际运营时遇到的线路不平顺、重载、曲线半径过小等问题, 分析其动力学性能。试验中根据脱轨系数、轮重减载率、轮轴横向力等指标参数, 对列车运行的平稳性及稳定性进行评估。

关键词: SIMPACK; 平稳性; 安全性; 直线运行; 曲线通过

中图分类号: U270 **文献标志码:** B **文章编号:** 1671-5276(2022)05-0095-03

Analysis of Vehicle System Dynamics Performance Based on SIMPACK

XIAO Xiangyu

(Traction Power State Key Laboratory, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: With regard to the safety, comfort and reliability of trains in operation, the dynamic parameters of a certain subway are applied to build and analyze the model by SIMPACK dynamics software. The dynamic performance of the train in actual operation with the problems like uneven line, heavy load, over small curve radius, etc. is analyzed. And the smoothness and stability of the train operation are evaluated based on the index parameters such as derailment coefficient, wheel load reduction rate, and axle lateral force.

Keywords: SIMPACK; stationarity; safety; straight line operation; curve passing

0 引言

随着城市轨道交通的发展, 地铁车辆已经在轨道交通中有了不可替代的地位, 但由于列车运行速度的提高, 列车的安全性、舒适性及可靠性等问题显得尤为重要^[1-2]。

鄢平波等^[3]将车辆速度视为时间的慢变参数, 提出了一种近似计算线性临界速度、非线性临界速度和极限环的数值方法。以一高速客车为应用实例, 对其线性临界速度和非线性临界速度进行了参数研究。为改善车辆的乘坐舒适性, 池茂儒等^[4]研究了车辆的振动响应特性, 建立了车辆系统动力学模型, 计算了转向架蛇行运动模态和车体固有振动模态的频域模态参数与车辆在不同速度下的时域平稳性指标。付秀通等^[5]建立了一个多自由度的非线性车辆模型, 以实测的轨道方向不平顺作为输入数据, 通过仿真研究了车辆非线性曲线通过动态性能和非线性直线横向响应。英国学者 J. R. Mitchell 等认为目前对铁路机车车辆曲线通过性能给出了一定解释, 并建立了不少相关的理论, 但是还没有一种完善合理的理论去精准预测所有情况下的轮轨力以及其位置, 因此还需进行更多相关的研究^[6]。周素霞等^[7]为了减轻地铁运行中的轮轨磨损, 提高车辆的运行安全性和舒适性, 基于车辆动力学理论, 通过动力学软件 SIMPACK 建立轮轨关系模型, 针对 4 种地铁线路缓和曲线线型进行研究, 分析了各线型下的轮轨横向力、轮轨垂向力、脱轨系数、磨损功率、轮重减载率

和倾覆系数 6 个动力学参数在列车运行中的变化规律。

本论文通过仿真车辆直线运行工况及不同半径曲线工况, 对比试验测试结果分析地铁车辆通过线路时稳定性、平稳性等性能指标, 得出列车在经过有激励的直线线路时的安全性能, 并对列车如何安全运行提出相关建议。

1 车辆动力学模型简介

1.1 模型简介

简化车辆结构建模包括: 车体、轮对、轴箱、一系弹簧悬挂装置、构架、二系弹簧悬挂装置、驱动装置及基础制动装置^[8]。轨道车辆具有自行导向、低运行阻力、成列运行及严格的外形尺寸限制等特点。运用表 1 的参数进行车辆建模, 如图 1 所示。

表 1 车辆基本参数

车辆基本参数	数值
轮对质量/kg	1 180
车轮滚动圆直径/mm	840
滚动圆横向跨距/mm	1 493
钢轨/(kg/m)	60
构架质量/kg	2 600
车体质量/kg	23 235
轨距/m	1 435

基金项目: 国家自然科学基金项目(52002344)

作者简介: 肖襄雨(1997—), 女, 湖北襄阳人, 本科, 研究方向为轮对耐久性试验。



图 1 动力学模型

1.2 车辆动力学性能及主要评价指标

列车运行时,由于线路、轮对构造、车辆振动等因素会影响列车动力学性能。线路中会出现钢轨中的接头、钢轨变形及轨道不平顺、列车通过小半径曲线、重载等问题。所以,需要在设计制造车辆时考虑到轮轨间互相的作用力以及运行时各部件间力的传递。

车辆动力学性能及主要评价指标如表 2 所示。

表 2 车辆动力学性能及主要评价指标

平稳性	稳定性	安全性
乘坐指标 (Sperling 指标、ISO 标准、车体振动加速度)	临界速度、脱轨系数、轮重减载率、倾覆系数	轮轨垂向力、轮轴横向力、磨损指数

根据国家标准《GB 5599 铁道车辆动力学性能评定和试验鉴定规范》,采用 Sperling 平稳性指标等级进行判断,通过列车本身情况衡量运行品质,舒适度不仅需要考虑列车本身情况,还需要考虑旅客对乘坐环境的敏感度。

运行品质合格时,乘坐舒适度不一定合格,是由于有与振动频率有关的修正系数的影响。客车运行平稳性指标与等级如表 3 所示,安全性指标如表 4 所示。

表 3 客车运行平稳性指标与等级

平稳性等级	评定	客车平稳性指标与等级
1	优	<2.50
2	良好	2.50~2.75
3	合格	2.75~3.0

表 4 安全性指标

指标	GB 5599		95J01-L
	第一限度	第二限度	
脱轨系数	≤1.2	≤1.0	≤0.8
轮重减载率	≤0.65	≤0.6	≤0.6
倾覆系数	≤0.8		
车辆倾覆系数	≤1.0		

2 车辆直线运行平稳性分析

列车编组形式为六节编组,如图 2 所示(黑点●表示测力轮对)。

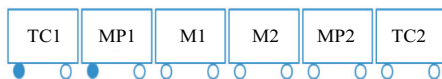


图 2 试验车编组图

运行平稳性测试为车体地板的振动加速度。参照执行标准分别计算横、垂平稳性指标。车体振动加速度采用加速度传感器测定,测点位于 TC1 与 MP1 车前转向架中心上方左侧/右侧处车体地板。空车工况下直线运行的平稳性指标如图 3、图 4 所示。

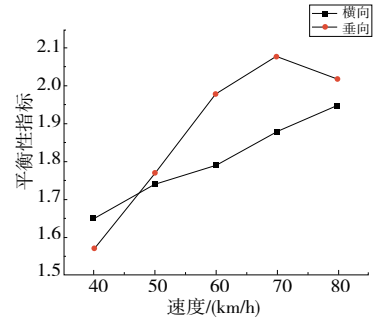


图 3 TC1 空车工况下平稳性指标平均值

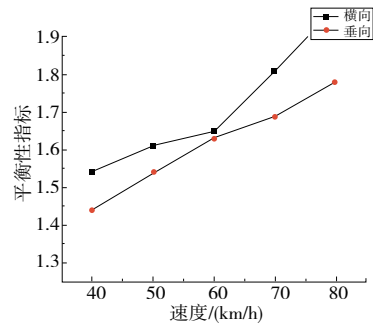


图 4 MP1 空车工况下平稳性指标平均值

根据建模后的离线分析结果,分别计算各运行速度下的 W_y 、 W_z 、 N_{MV} 、 $M\alpha_{cy}$ 、 $M\alpha_{cz}$ 、 $S\alpha_{cy}$ 及 $S\alpha_{cz}$,并根据所得数据进行绘图,如图 5、图 6 所示。

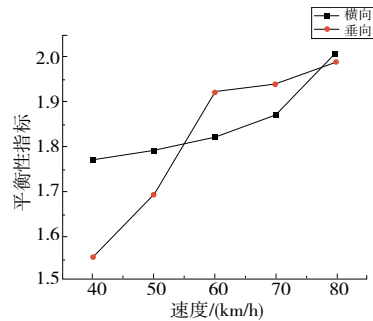


图 5 TC1 空车工况下平稳性指标平均值(建模)

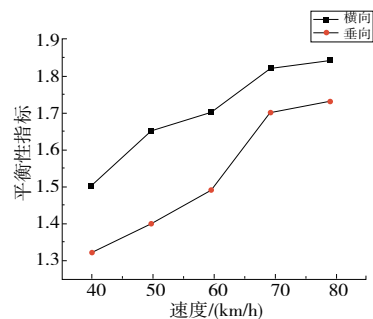


图 6 MP1 空车工况下平稳性指标平均值(建模)

MP1 垂向平稳性指标在运行时优于横向平稳性指标; TC1 横向平稳性指标在车辆运行较大时优于垂向平稳性指标。随着列车运行速度增大,平稳性指标和舒适度指标都在增大,运行品质降低,但指标均合格。车辆运行可以适当提速,既满足乘客速度需求,也可以满足其乘坐的舒适度。

3 车辆运行稳定性分析

采用测力轮对法获取轮轨横向、垂向力,计算脱轨系数、轮重减载率等进行脱轨安全性评估。测力轮对共计 2 条,分别装于被试车车辆的 1 轴,如图 7 所示。轮轨力信号传输采用集流环装置。

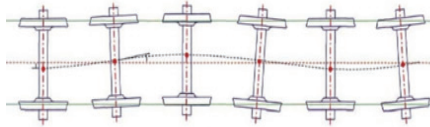


图 7 轮对的蛇行运动

试验载荷工况包括:空车、重载。

列车在行使过程中会出现蛇行运动的现象。蛇行运动为非线性自激振动。它是由蠕滑力和轮轨几何关系引起的,与运动稳定性密切相关,决定了列车运行的最高速度。轮对在线路上运动时,会受到不同形式的激扰^[9]。

运用建好的模型及现场参数设定,将模型以 0~80 km/h 速度运行,在 SIMPACK 后处理平台提取出脱轨系数及轮重减载率等。

车辆在空载下直线运行,测试运行速度为 0~80 km/h 范围内列车的稳定性。试验分析得出车辆运行速度为 70 km/h 时,TC1 和 MP1 车辆的脱轨系数和轮重减载率(图 8)都达到最大,分别为 0.36、0.18 和 0.28、0.31。

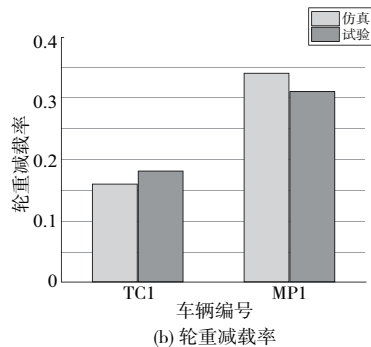
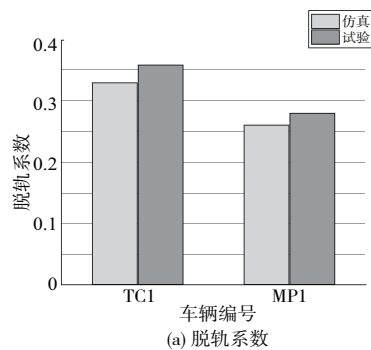


图 8 空车状态下直线运行

得出 TC1 车辆运行速度为 50 km/h 时,脱轨系数达到最大 0.18;MP1 运行速度为 60 km/h 时,车辆的脱轨系数为 0.14; TC1 车辆运行速度为 60 km/h 时,轮重减载率达到最大 0.44; MP1 运行速度为 50 km/h 时,车辆的轮重减载率为 0.29。

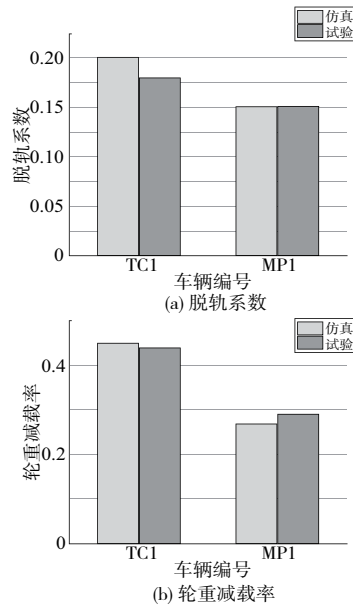


图 9 重载状态下直线运行

线路曲线最小半径与列车运行速度有直接关系:曲线半径越小,钢轨间的磨损越大,列车运行条件越糟糕。

图 10 为车辆在空载下曲线运行,测试运行速度为 0~80 km/h 范围内列车稳定性仿真与试验结果,分析得出车辆运行速度为 40 km/h 时,通过半径 $R=350$ m 曲线,TC1 脱轨系数为 0.62;通过半径 $R=460$ m 曲线 MP1 脱轨系数为 0.77。车辆运行速度为 40 km/h 时,通过半径 $R=350$ m 曲线 TC1 和 MP1 车辆的轮重减载率都达到最大,分别为 0.44 和 0.43。

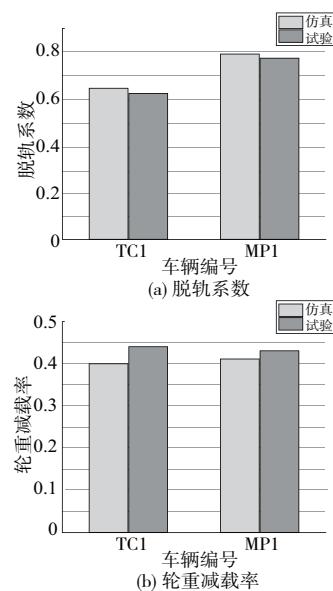


图 10 空车状态下曲线运行

图 9 为车辆在重载下直线运行的仿真及试验结果,分析

(下转第 122 页)

试验结果验证了该智能刀环系统的性能,得出可以将其用于铣削加工振动信号监测且监测效果良好。

5 结语

本文开发的数控铣削加工在线监测系统由硬件采集设备和基于 LabVIEW 开发的上位人机交互软件组成,应用实例验证了系统铣削振动在线监测的有效性和实用性,同时也说明这种在线监测的利用有利于实现加工过程自动化,降低生产成本和生产时间,提高产品质量,因此开展对数控铣削加工实时监测系统的研究具有重要意义。

参考文献:

[1] JIAO F, ZHAO L, YAO C L, et al. Research on milling deformation in ultrasonic vibration assisted end milling of titanium alloy thin-walled parts [J]. Key Engineering Materials, 2018, 764: 174-183.

[2] 马旭. 数控机床刀具磨损监测数据处理方法[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2009(7): 69-71, 85.

[3] 吴迪, 黄民. 振动信号监测在刀具磨损故障诊断中的应用[J]. 机械工程与自动化, 2014(2): 121-122, 125.

[4] YI S, LI J J, ZHU J H, et al. Investigation of machining Ti-6 Al-4 V with graphene oxide nanofluids: tool wear, cutting forces and cutting vibration [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2020, 49: 35-49.

[5] ARENDRA A, HERIANTO. Pre-processing for vibration signals features extraction and selection in real time investigating of CNC tool wear [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2020, 1569(3): 032060.

[6] TIAN Y J, ZOU P, KANG D, et al. Study on tool wear in longitudinal-torsional composite ultrasonic vibration-assisted drilling of Ti-6 Al-4 V alloy [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021, 113 (7/8): 1989-2002.

[7] 郭月龙. 用于刀具管理的智能刀柄系统研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2018.

[8] 刘海军. 面向铣削过程的无线测振刀柄的关键技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.

[9] 韩风华, 谢峰. 基于多参数指标的刀具磨损状态在线监测[J]. 制造技术与机床, 2018(2): 141-146.

收稿日期: 2021-05-24

(上接第 97 页)

图 11 为车辆在重载下曲线运行的仿真及试验结果,分析得出车辆运行速度为 40 km/h 时, TC1 通过半径 R=350 m 曲线,脱轨系数达到最大 0.58; MP1 通过半径 R=360 m 曲线,脱轨系数为 0.75。车辆运行速度为 68 km/h 时, TC1 通过半径 R=360 m 曲线,轮重减载率达到最大 0.36; MP1 通过半径 R=350 m 曲线,轮重减载率达到最大 0.36。

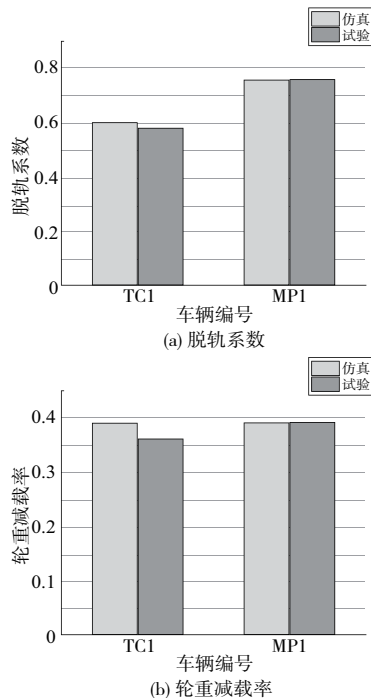


图 11 重载状态下曲线运行

综上所述,在空车、重载工况下, TC1 车及 MP1 车的脱轨系数、轮重减载率等指标符合评定标准的要求。

4 结语

通过运用 SIMPACK 对某地铁车辆参数进行简化建模。以列车的运行品质及乘客乘坐舒适度分析其平稳性,还需要考虑横向振动加速度及垂向振动加速度。通过设置传感器实测后,离线分析得出这些列车运行参数。结果表明:数据在安全范围内,试验列车性能较好,在其规定运营速度范围内,乘客舒适性评定为优。针对列车实际运营时常出现的超载、曲线半径过小等问题,分析其动力学性能,并测试列车直线运行及曲线运行时的各项参数值,与仿真结果进行对比验证。试验验证结果表明:直线运行下蛇行运动是无法避免的,但在超载状态下,列车的安全性依然可以得到保证。

参考文献:

[1] 国家发展改革委. 发改基础[2016]1536号关于印发《中长期铁路网规划》的通知[Z]. 北京: 国家发展改革委, 2016.

[2] 邢朋凯. 我国高铁网络的形成及发展演化[J]. 当代经济, 2017(3): 28-30.

[3] 邹平波, 曾京. 确定车辆系统线性与非线性临界速度的新方法[J]. 铁道车辆, 2000, 38(5): 1-4.

[4] 池茂儒, 张卫华, 曾京, 等. 铁道车辆振动响应特性[J]. 交通运输工程学报, 2007, 7(5): 6-11.

[5] 付秀通, 詹斐生. 机车非线性动态曲线通过及直线横向响应性能分析[J]. 中国铁道科学, 1995, 16(3): 32-40.

[6] J. R. Mitchell, 詹斐生. 铁路机车车辆的曲线通过[J]. 中国铁道科学, 1982, 3(1): 41-49.

[7] 周素霞, 薛蕊. 缓和曲线线型对地铁车辆动力学参数的影响[J]. 北京交通大学学报, 2015, 39(3): 24-29.

[8] 商跃进, 董雅宏. 动车组车辆构造与设计[M]. 2版. 成都: 西南交通大学出版社, 2019.

[9] 罗仁. 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.

收稿日期: 2021-05-21