

柔性构架对车辆振动性能及运行安全性的影响研究

张天周¹,肖守讷¹,阳光武¹,张国平²,曹晓宁²,李广全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. 中车青岛四方机车车辆股份有限公司 技术中心,山东 青岛 266111)

摘要:为了研究柔性构架对车辆运行安全性的影响,以某型号动车组为研究对象,建立其构架的有限元模型。分别建立多刚体模型和构架刚柔耦合模型,通过观察相关测点的振动响应,研究柔性构架对车辆振动性能的影响;通过对比两种模型同一轮对上的轮轨力、脱轨系数、轮重减载率等安全性指标的变化,研究柔性构架对车辆运行安全性的影响。结果表明:在进行车辆振动及运行安全性分析时,有必要考虑车体柔性,以保证计算结果更接近实际情况。

关键词:刚柔耦合;柔性构架;振动性能;运行安全性

中图分类号:U266.2 文献标志码:B 文章编号:1671-5276(2023)03-0218-04

Study on Influence of Flexible Frame on Vehicle Vibration Performance and Operational Safety

ZHANG Tianzhou¹, XIAO Shoune¹, YANG Guangwu¹, ZHANG Guoping², CAO Xiaoning², LI Guangquan²

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

2. Technology Center, CRRC Qingdao Sifang Co., Ltd., Qingdao 266111, China)

Abstract: In order to study the influence of the flexible frame on the safety of vehicle operation, the finite element model of the frame was established with a certain type of EMU as the research object. The multi-rigid body model and the frame rigid-flexible coupling model were built respectively. The influence of the flexible frame on the vehicle vibration performance is studied by observing the vibration response of the selected measuring points. Comparison on the changes in safety indicators such as wheel-rail force, derailment coefficient, and wheel load reduction rate on the same wheel set of the two models is made to study the influence of the flexible frame on the safety of vehicle operation. The results show that it is necessary to consider vehicle body flexibility when analyzing vehicle vibration performance and operational safety, ensuring that the calculation results are closer to the actual situation.

Keywords: rigid-flexible coupling; flexible frame; vibration performance; operational safety

0 引言

随着我国高速动车的不断发展,高速、轻量化早已成为铁道车辆发展的主题,同时也对车辆系统动力学性能的各项指标提出更严格的要求^[1]。对于车辆系统而言,车速的提高和轻量化设计,使作用于车辆与轨道结构之间的动态作用力增大,从而使车辆中各部件之间振动加剧,严重影响着转向架的动力学性能。

在以往的研究中通常将构架视为刚体结构,但是随着动力系统高速度、高稳定性要求的不断提高,构架弹性变形及结构振动就不可忽略^[2]。因此,有必要将构架考虑为弹性体,深入研究柔性构架对车辆的振动响应,分析各种动力学现象和问题,保证高速列车在整个生命周期中具有足够的安全性^[3]。

本文以国内某型号的动车组构架为研究对象,借助有限元软件建立其柔性体模型,揭示刚性构架与柔性构架在车辆运行中对车辆振动性能及运行安全性的影响,使仿真结果更加贴合实际。

1 车辆-轨道动力学模型

1.1 多刚体模型

根据国内某型号动车组的结构参数,在 Simpack 中建立车辆刚体动力学模型。该模型主要包括 1 个车体、2 个构架、4 个轮对和 8 个轴箱,共计 50 个自由度。

1.2 构架刚柔耦合模型

首先根据转向架三维模型建立其有限元模型,对其进行合理的网格划分,可得构架的有限元模型如图 1 所示。

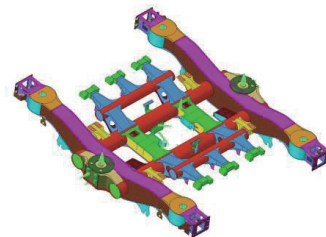


图 1 构架有限元模型

基金项目:中国铁路总公司科技研究开发计划资助项目(P2018J001)

第一作者简介:张天周(1998—),男,河北定州人,硕士研究生,研究方向为车辆系统动力学。

随后对其进行结构分析,由于有限元模型中存在大量的自由度会导致动力学求解时间消耗严重,为了在 Simpack 中实现快速的动力学计算,所以有限元模型需要在 ANSYS 中采用 Guyan 缩减方法^[4]降低其总体自由度,形成缩减自由度子结构模型。ANSYS 软件中主自由度的缩减方法有手工选取和自动选取两种方式^[5],本文采用两者结合的方法,整个构架共选取 567 个节点,3 402 个自

由度。

对缩减后的模型进行模态求解,要求缩减模态与全自由度模态结果误差许用范围在 5% 以内。缩减模态前 12 阶对比结果如表 1 所示,对比发现,动车组构架全模态频率和振型与缩减模态十分相近,相对误差也控制在合理范围之内,从而保证了刚柔耦合模型的分析精度。最后建立如图 2、图 3 所示的多刚体模型与构架刚柔耦合模型。

表 1 构架模态缩减前后对比

| 阶数 | 振型 | 全模型模态频率/Hz | 缩减模型模态频率/Hz | 相对误差/% |
|----|------------|------------|-------------|--------|
| 1 | 一阶扭转 | 25.777 | 25.790 | 0.050 |
| 2 | 侧梁前端八字形 | 38.673 | 38.707 | 0.088 |
| 3 | 侧梁前端横向同向弯曲 | 45.218 | 45.268 | 0.111 |
| 4 | 横梁一阶弯曲 | 49.538 | 49.573 | 0.071 |
| 5 | 侧梁前端垂向弯曲 | 52.221 | 52.261 | 0.077 |
| 6 | 侧梁后端八字形 | 56.209 | 56.254 | 0.080 |
| 7 | 侧梁后端横向同向弯曲 | 60.606 | 60.692 | 0.142 |
| 8 | 右侧侧梁扭转 | 69.952 | 70.120 | 0.240 |
| 9 | 左侧侧梁扭转 | 77.810 | 77.939 | 0.166 |
| 10 | 侧梁前端垂向反向扭转 | 88.964 | 89.076 | 0.126 |
| 11 | 侧梁相对弯曲 | 90.041 | 90.149 | 0.120 |
| 12 | 侧梁垂向同向弯曲 | 92.671 | 92.828 | 0.169 |

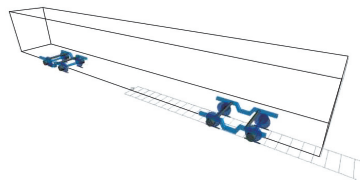


图 2 多刚体模型

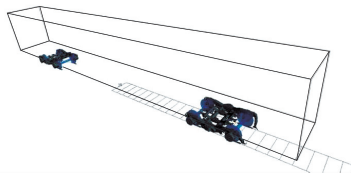


图 3 构架刚柔耦合模型

况,根据相关文献^[6-7]设置曲线工况:630 m 直线+720 m 缓和和曲线+300 m 圆曲线+720 m 缓和和曲线+630 m 直线,其中,圆曲线半径为 8 000 m,曲线设置超高为 175 mm。在轨道激励设置方面,本文采用武广线路轨道随机不平顺作为线路激励。

2 刚性、柔性构架振动响应比较

为了研究此高速列车多刚体模型与构架刚柔耦合模型的振动性能差异,首先对两种模型的构架振动加速度时域及频域响应进行对比分析。为了充分考虑构架的柔性振动特性,选取前转向架左后钢簧上方构架、转臂座上方构架以及空气弹簧下方构架 3 个测点作为参考点表征构架的振动特性,3 个测点横、垂向振动加速度时域、频域动态响应如图 4—图 13 所示。其中,由于时域变化曲线较为密集,所以本文每 1 s 选取一个时间节点,对其进行全局三次样条插值,得到相应指标的变化结果,并且频域变化曲线中的频率范围设置在 300 Hz 以内^[8]。

1.3 轨道模型

为了考察车辆系统曲线通过时安全性指标的变化情

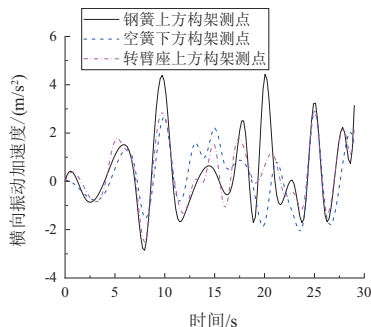


图 4 多刚体 3 个测点横向加速度时域变化

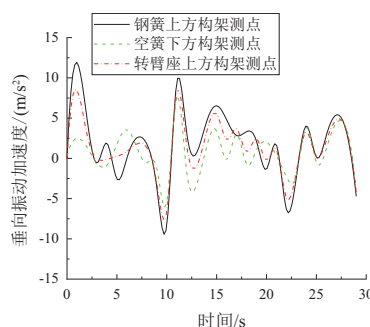


图 5 多刚体 3 个测点垂向加速度时域变化

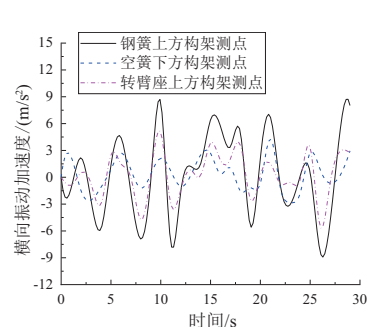


图 6 刚柔耦合 3 个测点横向加速度时域变化

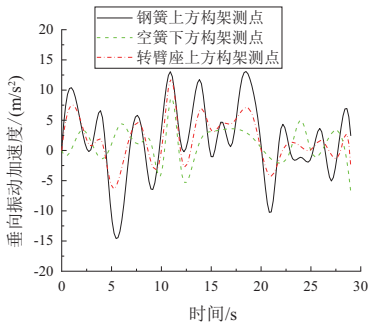


图7 刚柔耦合3个测点垂向加速度时域变化

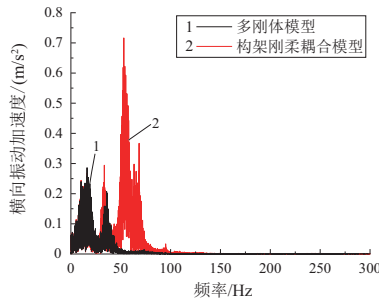


图8 钢簧上方测点横向加速度频域变化

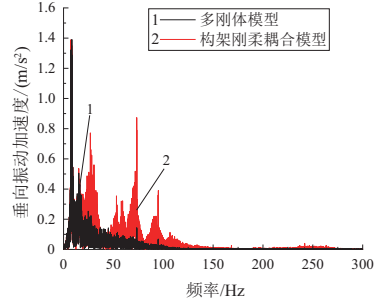


图9 钢簧上方测点垂向加速度频域变化

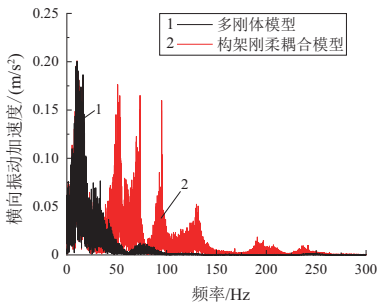


图10 空簧下方测点横向加速度频域变化

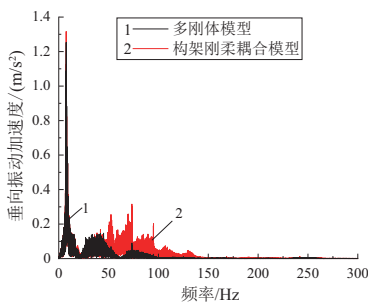


图11 空簧下方测点垂向加速度频域变化

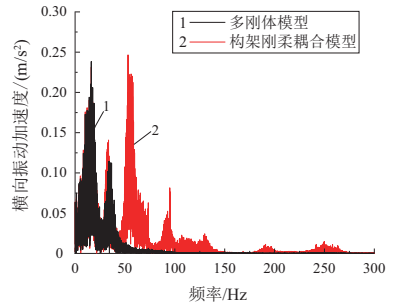


图12 转臂座上方测点横向加速度频域变化

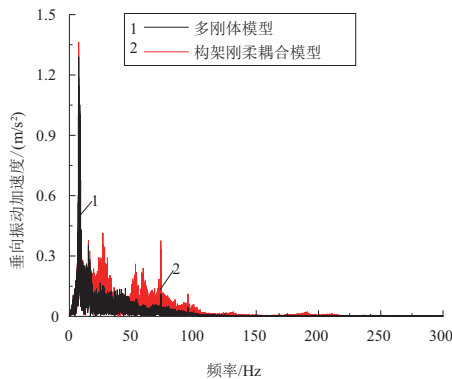


图13 转臂座上方测点垂向加速度频域变化

从图4—图13中构架振动加速度时域变化曲线可知,构架刚柔耦合模型的横向、垂向振动加速度幅值大于多刚体模型,这也是车辆在运行过程中激发结构弹性变形导致的结果。除此之外,3个位置测点的振动加速度响应存在较大差异,位于钢簧上方构架测点的振动加速度幅值最大,转臂座上方构架测点次之,位于空气弹簧下方构架测点最小,这种差异的主要原因在于构架的几何结构特征以及悬挂系统的作用位置不同。

从两种模型构架振动加速度频域对比可知,弹性构架和刚性构架振动频率在25 Hz之前分布相似,是因为在此频率范围内没有激发出构架的结构模态。通过图8—图13可知,3个测点的横向振动加速度在7 Hz~19 Hz存在加速度峰值,此频率范围对应构架的浮沉、摇头、侧滚、点头等悬挂模态。在25 Hz以上的振动频率中,不同位置测点处构架的振动响应与其结构模态密切相关。经观察,3

个测点的横向、垂向振动加速度频率峰值在35 Hz、59 Hz、75 Hz和91 Hz左右处出现,以上频率范围对应的模态振型依次是侧梁前端八字形、后端横向同向弯曲、侧梁扭转及垂向同向弯曲。正是由于弹性构架存在结构模态,其振动加速度频率范围、振幅都要高于刚性构架。

除此之外,构架刚柔耦合模型3个测点在200 Hz以内的振动频域响应中均有明显的振幅,而对于200 Hz~300 Hz之中的高频响应中,则只有部分体现,说明200 Hz以内的构架振动响应对于高速列车的运行稳定性、平稳性和安全性有着重要的作用,而200 Hz以上的高频振动则主要影响构架疲劳寿命以及轮轨系统磨损^[8-9]。

综合以上分析,构架的柔性变形对构架的振动响应影响十分显著,因此考虑构架柔性振动的刚柔耦合模型相对于多刚体模型更加精确和合理。

3 构架柔性振动对高速列车运行安全性的影响

上一节的分析结果表明构架的柔性振动对其振动响应有着十分重要的影响,那么构架的柔性振动是否能够通过一系悬挂传递至轮对,从而影响轮轨的动态作用以及列车的运行安全性呢?

为了阐明上述问题,将以上两种模型所计算的同一轮对左右车轮的轮轨横向力和垂向力的时域响应整理如图14、图15所示(本刊为黑白印刷,如有疑问请咨询作者)。同样为了便于观察曲线在时域中的变化情况,将间隔的时间节点调整为1 s,并对相应指标值进行三次样条插值,得到轮轨横、垂向力的变化曲线。

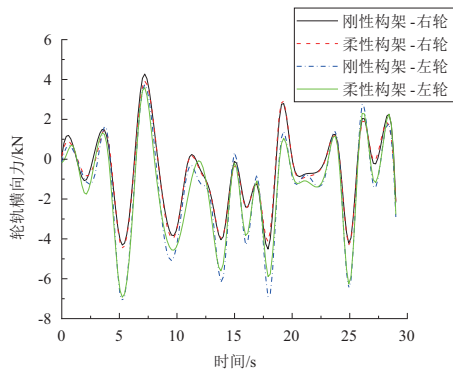


图 14 两种模型同一轮对轮轨横向力时域变化

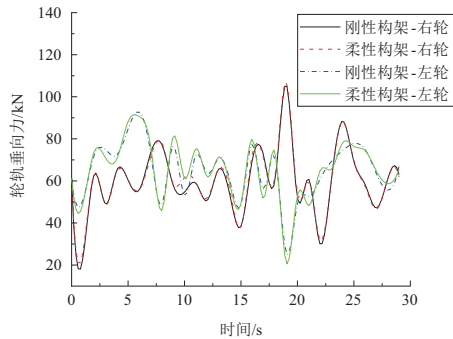


图 15 两种模型同一轮对轮轨垂向力时域变化

由图 14、图 15 可知,两种动力学模型在同一轮对轮轨横向力、垂向力的变化趋势及幅值基本一致,对于通过曲线时轮轨横向力、垂向力的最大值响应,构架刚柔耦合模型的计算结果比多刚体模型略小。造成这种差异的原因在于构架的结构变形使得转向架系统的扭转刚度降低、车辆的曲线通过能力略有提高。除此之外,图 16、图 17 给出了两种动力学模型脱轨系数、轮重减载率等安全性指标最大值的仿真结果,由图可知两种模型计算结果的差异并不明显。

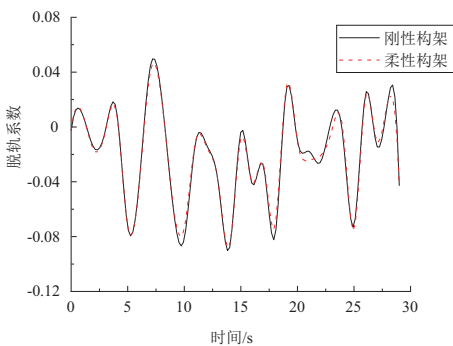


图 16 两种模型脱轨系数对比

进一步给出两种动力学模型前转向架前后轮对轮轨横向力、垂向力差值的时域、频域响应结果如图 18、图 19 所示。由图可知,轮轨垂向力的差值明显大于横向力的差值,两种动力学模型轮轨横向力的差异主要体现在 4 Hz~40 Hz 范围内,而轮轨垂向力的差异则主要集中在 7 Hz~103 Hz 和 225 Hz~263 Hz 频带内,尤其在 25 Hz 左右的频

带内差异更为明显。这表明构架的横向弯曲、扭转等柔性变形对轮轨力的动态响应有着重要的作用。

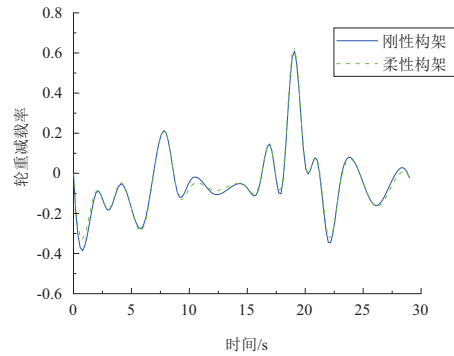


图 17 两种模型轮重减载率对比

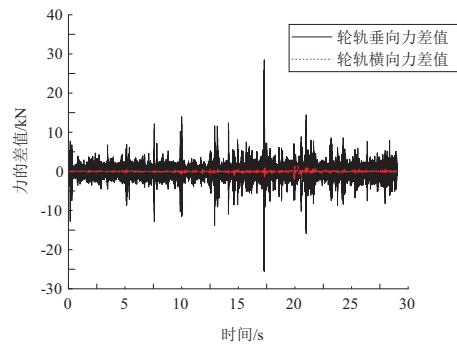


图 18 两种模型轮轨力的时域变化

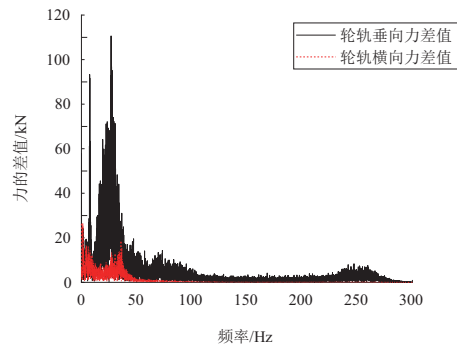


图 19 两种模型轮轨力的频域变化

综合以上分析,多刚体模型以及构架刚柔耦合模型在同一轮对上轮轨力的幅值、变化趋势基本一致,并且脱轨系数、轮重减载率等安全性指标差异也微乎其微,说明柔性构架对车辆运行安全性影响不大。随后根据比较轮轨横向力、垂向力差值的时域、频域响应结果,可知由构架的垂向弯曲、扭转等柔性变形为主要作用下会导致轮轨垂向力差异更大。由此可进一步推论,以多刚体模型为准则评估高速列车曲线通过安全性时,可能会高估安全性指标的数值,从而低估高速列车实际的安全性能。

4 结语

- 1) 在研究多刚体模型与构架刚柔耦合模型的振动性
(下转第 244 页)

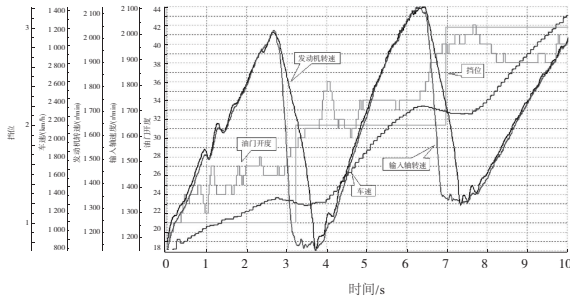


图 10 无换挡循环

由图 9 可知,车辆换挡从一档提升至三挡后,直接下降为二挡,之后再重新升到三挡,从而形成换挡循环。从图 10 中可以发现,车辆从一档升至三挡后车速依旧保持不变进行行驶,挡位没有下降。

综合分析可知,基于车辆质量估算方式,通过以上提出的车辆挡位控制策略可以有效解决车辆频繁换挡问题,说明此策略可行。

4 结语

综上所述,本文提出的基于牵引力与行驶阻力的挡位决策控制策略具备可行性和有效性,可在商用车 AMT 变速器领域进行大力推广和应用。实验结果表明,采用基于动能定理的质量估算方法可以十分准确地对 AMT 车辆质量进行估算,误差控制在 5% 左右,估算结果十分接近真实数据。同时对提出的挡位控制策略进行实验分析后发现,采用此控制策略能够有效避免车辆挡位变换时的循环换挡问题,提升了驾驶员的安全性和舒适性。然而,由于实验条件限制,此次试验只考虑了正常温度和路况,均在正常环境下进行实验,实验结果较为片面,未来将在高温和高原山地等复杂路段进行实验,以提升 AMT 挡位控制策略的稳定性。

(上接第 221 页)

能方面,构架刚柔耦合模型 3 个测点处横向、垂向振动加速度幅值和频率范围大于多刚体模型,并且 3 个测点振动加速度响应从高到低依次是位于簧簧上方构架测点、转臂座上方构架测点、空气弹簧下方构架测点。

2) 在所述 3 个测点振动加速度频域范围内,25 Hz 之前的频率范围内,两种动力学模型的振动响应基本一致;在 25 Hz 之后的振动频率中,不同位置测点处构架的振动响应会随着其结构模态振动频率的不同而发生着变化,所以柔性构架的存在能够更好地反映构架的横向、垂向弯曲振型,使理论研究更加符合实际情况。

3) 在研究多刚体模型与构架刚柔耦合模型运行安全性方面,二者在同一轮对上轮轨力、安全性指标变化的幅值、趋势基本一致,说明柔性构架对车辆运行安全性影响不大。但是由轮轨力差值的时域、频域响应结果对比可知,构架的横向弯曲、扭转等结构模态会导致轮轨垂向力差异更大,所以在进行车辆运行安全性分析时,有必要考虑车体柔性,以保证计算结果更接近实际情况。

参考文献:

- [1] 刘文光,毕善汕,徐畅. 纯电动汽车两挡 AMT 换挡策略研究[J]. 重庆理工大学学报(自然科学),2021,35(1):41-49.
- [2] 高子茵,杜明刚,李慎龙,等. 基于遗传算法优化和模糊控制动态优化的自动变速器换挡规律设计[J]. 兵工学报,2021,42(4):684-696.
- [3] 祁炳楠,杨刘权,郭晓斌,等. 无离合器机械式自动变速器换挡过程的扭矩控制[J]. 动力学与控制学报,2021,19(3):53-59.
- [4] 林洋,龙永红,王建忠. 商用车 AMT 电磁式中间轴制动器的设计[J]. 电子产品世界,2021,28(2):56-60.
- [5] 邓涛,邓彪. 基于正弦曲线的纯电动汽车两挡 AMT 升降扭控制[J]. 汽车技术,2021(3):39-44.
- [6] 宋强,孙丹婷,章伟. 纯电动车机械式自动变速器换挡非线性建模及控制[J]. 吉林大学学报(工学版),2021,51(3):810-819.
- [7] 张东东,宗子淳,冯金芝. 基于 NSGA-II 算法的两挡 AMT 换挡规律多目标优化[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版),2021,40(7):128-135.
- [8] 范珊珊,马渊,孙文军,等. 商用车 AMT 选换挡执行机构设计[J]. 机械工程与自动化,2021(4):103-105,107.
- [9] 靳光盈,李明清,朱宝全. 基于模型的纯电动客车 AMT 最优换挡规律设计[J]. 机械传动,2021,45(9):105-111.
- [10] 张会群,李涛,刘祥环. 电动乘用车电控两挡 AMT 换挡策略研究[J]. 汽车工艺师,2020(5):58-62.
- [11] 刘成强,徐海港,张建武,等. 基于模糊控制的电驱动 2AMT 换挡控制策略[J]. 山东科学,2020,33(4):101-109.
- [12] 邱煜,韩同群. 基于 Cruise 的装备 AMT 重型商用车经济性联合仿真计算[J]. 湖北汽车工业学院学报,2020,34(3):26-30.
- [13] 杜豫川,都州扬,师钰鹏,等. 路侧感知车辆轨迹数据质量智能评估方法[J]. 中国公路学报,2021,34(7):164-176.
- [14] 周瑜,寇纲,白杨,等. 基于变点-算术失效强度减的设备维修质量评估[J]. 系统工程学报,2021,36(2):247-255,263.
- [15] 汪星华,杨军永,宋海英,等. 基于质量屋的轨道车辆设计流程研究与分析[J]. 计算机仿真,2020,37(4):113-117.

收稿日期:2021-12-20

参考文献:

- [1] 黄彩虹,曾京,邬平波,等. 铁道客车车体弹性振动减振研究[J]. 工程力学,2010,27(12):250-256.
- [2] 梁禹迪,戴焕云. 等效锥度对高速动车组蛇行运动的影响[J]. 机械制造与自动化,2021,50(5):183-186.
- [3] 姜培斌,凌亮,丁鑫,等. 考虑车体刚柔耦合振动的高速铁路轨道不平顺敏感波长研究[J]. 振动与冲击,2021,40(15):79-89.
- [4] 张波,罗光兵,蒋忠城,等. 柔性结构对车辆运动稳定性的影响[J]. 技术与市场,2019,26(6):5-8.
- [5] 汪群生. 高速列车车下悬吊系统振动行为研究[D]. 成都:西南交通大学,2018.
- [6] TB 10621—2014 高速铁路设计规范[S].
- [7] 时瑾,孙征南,孙宪夫,等. 现行 350 km/h 高铁线路技术条件运营 400 km/h 高速列车适应性研究[J]. 铁道科学与工程学报,2020,17(9):2171-2180.
- [8] 岳鹏,马森,李国芳,等. 考虑不同轮轨耦合作用的高速列车动力学响应分析[J]. 兰州交通大学学报,2020,39(4):97-105.
- [9] 安琪. 高速动车组转向架柔性构架动态特性研究[D]. 成都:西南交通大学,2013.

收稿日期:2021-12-10