

DOI:10.19344/j. cnki. issn1671-5276.2024.02.043

低地板有轨电车平稳性影响要素分析

刘帅,李振乾,梁树林,周亚波,池茂儒

(西南交通大学 牵引动力国家重点实验室,四川 成都 610031)

摘要:针对某低地板有轨电车在车辆设计阶段平稳性指标超标的问题,从车辆参数和轨道激励两个方面进行原因探析。通过对车辆关键参数的优化分析可知:降低二系刚度和阻尼能够适当地改善车辆的运行平稳性,但过小的刚度和阻尼在工程应用中难以实现。通过对美国五级谱和德国高干扰谱进行时频域特征分析可知:轨道谱短波高频振动能量较大是有轨电车平稳性超标的原因,建议定期对钢轨进行打磨,以此来控制轨道短波的振动能量。

关键词:有轨电车;平稳性超标;车辆参数优化;轨道谱激励;时频域分析

中图分类号:U270.1⁺1 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2024)02-0203-06

Analysis of Factors Affecting the Smoothness of Low-floor Trams

LIU Shuai, LI Zhenqian, LIANG Shulin, ZHOU Yabo, CHI Maoru

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

Abstract:In terms of both vehicle parameters and track excitatio, this paper explores the causes for exceedance index of low-floor tram smoothness in vehicle design phase. The optimization analysis of the key vehicle parameters shows that the reduction of the second system stiffness and damping can improve the smoothness of the vehicle appropriately, but excessive small stiffness and damping hinder the improvement in engineering applications. The analysis of the time and frequency domain characteristics of the U. S. five-level spectrum and the German high interference spectrum shows that the high frequency vibration energy of the short wave of the track spectrum is the reason for the exceedance index of tram smoothness. It is proposed that periodical rail grinding be carried out for controlling the vibration energy of track short wave.

Keywords:tram;smoothness exceedance;vehicle parameter optimization;track spectrum excitation;time-frequency domain analysis

0 引言

有轨电车是一种运量介于公共汽车和地铁之间的低运量轨道交通系统,其线路、轨道、车站及设备要求远低于地铁,可以与汽车共用道路,拆迁量少,对城市其他建筑物影响较小。因此,有轨电车以其灵活方便、适应性强、建设周期短、单位综合造价和运营成本较低等优势受到欢迎,在国内外各类城市得到广泛应用^[1]。据中国城市轨道交通协会统计信息显示,截至 2021 年末,北京、南京、苏州、上海等共计 20 个城市开通了有轨电车并投入运营,运营里程达 503.33 km(较 2020 年新增 38.73 km)。

随着有轨电车应用越来越多,人们也开始更加注重乘坐的舒适性以及乘车的体验感,这对车辆的运行性能无疑提出了更高的要求。平稳性指标是评价车辆运行品质的重要指标之一,无论是国际还是国内的试验规范几乎都要求对铁道车辆

的运行平稳性进行测量并给出评价^[2]。列车运行平稳性与舒适度的优劣主要与列车状况、线路状况等因素相关^[3-5]。车辆悬挂装置作为车辆系统中重要的减振装置之一,其动力学参数的选取直接关系到车辆的运行平稳性以及乘坐的舒适性,故而合理设定悬挂装置的动力学参数尤为重要^[6]。轨道不平顺是机车车辆/轨道系统的激励函数,是使运行中的机车车辆产生振动的主要根源,直接影响轮轨相互作用及列车运行的安全性和平稳舒适性^[7]。

某有轨电车在设计过程中,经初步动力学核算,平稳性指标总是超标,为找出平稳性超标的原因并提出相应的改进措施,本文从车辆参数和轨道激励两方面展开深入分析,以便为有轨电车的设计提供依据。

1 有轨电车动力学模型建立

有轨电车通常采用接触网供电并以固定的编

基金项目:国家自然科学基金区域联合基金项目(U21A20168)

第一作者简介:刘帅(1996-),男,河南漯河人,硕士研究生,研究方向为车辆系统动力学,3213871706@qq.com。

组单元运行,几个固定牵引单元可以连挂形成更长的编组以适应高峰期大客流量的需求^[8]。某西部地区的有轨电车采用70%低地板结构,车辆系统模型是一个复杂的非线性多刚体模型,列车由2个3模块编组而成。每个车体配置1台转向架,1、3、4、6车为动车,2、5车为拖车,轮对均为传统轮对结构。该有轨电车3模块编组结构,示意图如图1所示,拓扑关系如图2所示,使用SIMPACK软件建立3模块编组有轨电车动力学模型如图3所示。

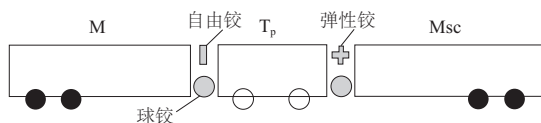


图1 3模块编组结构示意图

图1中,Msc表示带有简易司机室和1台动力转向架的车辆模块; T_p 表示带有1台无动力转向架及受电弓的车辆模块;M表示带有1台动力转向架的车辆模块。其中,Msc车与 T_p 车通过下部的球铰与上部的弹性铰相连,弹性铰限制了两车体 x 、 y 方向的运动,保留了摇头自由度以便于通过曲线; T_p 车与M车通过下部的球铰与上部的自由铰相连,自由铰限制了 y 方向的自由度。因此两车不仅可以摇头,还可以点头。

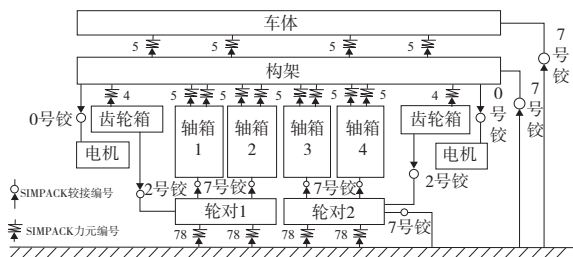


图2 拓扑关系图

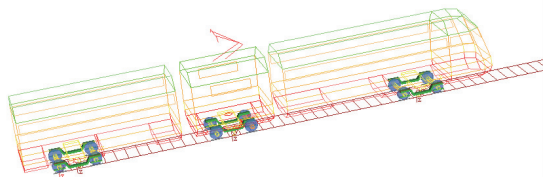


图3 3模块编组动力学模型

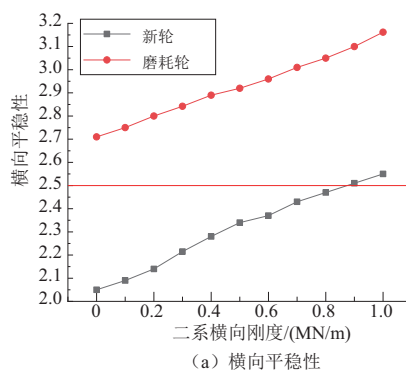
2 关键参数对车辆平稳性的影响分析

车辆的悬挂装置作为车辆系统中重要的减振装置之一,其动力学参数的选取直接关系到车辆

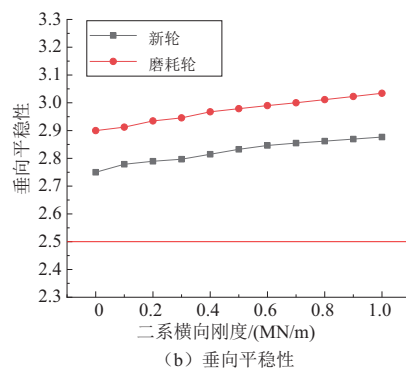
运行的平稳性以及乘坐的舒适度。常见的悬挂参数主要有:一系悬挂刚度、二系悬挂刚度、二系悬挂阻尼、横向减振器阻尼、垂向减振器阻尼与车间减振器阻尼以及旁承摩擦因数等。鉴于二系悬挂刚度和阻尼对列车运行的平稳性影响较大,因此主要对二系悬挂刚度和阻尼等参数进行优化分析。设置新轮(等效锥度为0.08)、磨耗轮(等效锥度为0.35)两种工况,计算列车以最高运行速度80 km/h通过施加美国五级谱激励的直线线路时有轨电车的运行平稳性。

2.1 二系横向刚度和阻尼的影响分析

优化二系横向刚度时,按照在动车原始参数0.32 MN/m的基础上乘一个比例系数来进行优化,列车运行的平稳性如图4所示。



(a) 横向平稳性



(b) 垂向平稳性

图4 二系横向刚度对车辆平稳性的影响

由图4可知:随着二系横向刚度的减小,列车运行的横向平稳性得到了改善,但二系横向刚度即使降低到原始值的50%,也无法满足磨耗轮横/垂向平稳性的要求,且过小的刚度在工程中无法实现。所以建议动拖车二系横向刚度仍取原始值,二系横向刚度对垂向平稳性的影响则较小。

优化二系横向阻尼时,按照在动车原始参数 $20 \text{ kN} \cdot \text{s/m}$ 的基础上乘一个比例系数来进行优化,列车运行的平稳性如图5所示。

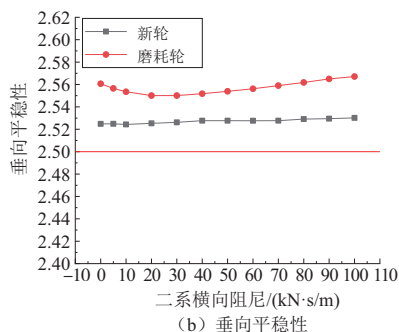
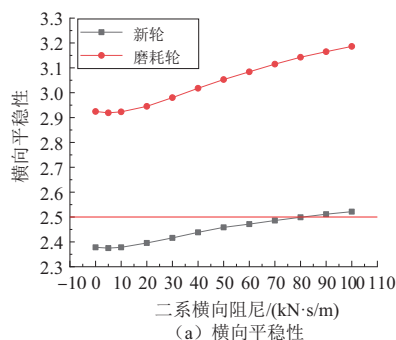


图5 二系横向阻尼对车辆平稳性的影响

由图5可知:随着二系横向阻尼的减小,列车运行的横向平稳性得到了改善,二系横向阻尼对垂向平稳性的影响则较小。为使车辆具有较优的运行平稳性,需将二系横向阻尼取较小值,但无论二系横向阻尼如何优化,始终无法满足磨耗轮横/垂向平稳性的要求。

2.2 二系垂向刚度和阻尼的影响分析

优化二系垂向刚度时,按照在动车原始参数 0.41 MN/m 的基础上乘一个比例系数来进行优化,列车运行的平稳性如图6所示。

由图6可知:二系垂向刚度对横向平稳性的影响很小,对垂向平稳性的影响则较大;二系垂向刚度越小,对列车的垂向平稳性越有利,但二系垂向刚度即使降低到原始值的75%,也无法满足新轮与磨耗轮运行平稳性的要求。建议动拖车二系垂向刚度仍取原始值。

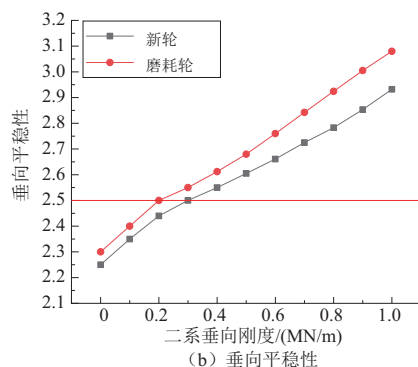
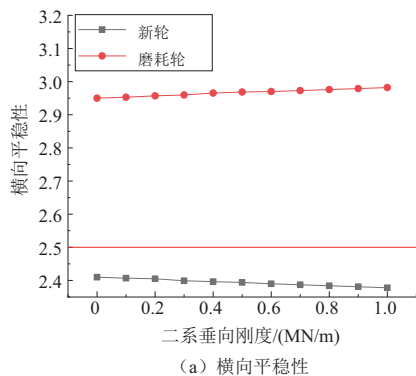


图6 二系垂向刚度对车辆平稳性的影响

优化二系垂向阻尼时,按照在动车原始参数 $30 \text{ kN} \cdot \text{s/m}$ 的基础上乘一个比例系数来进行优化,列车运行的平稳性如图7所示。

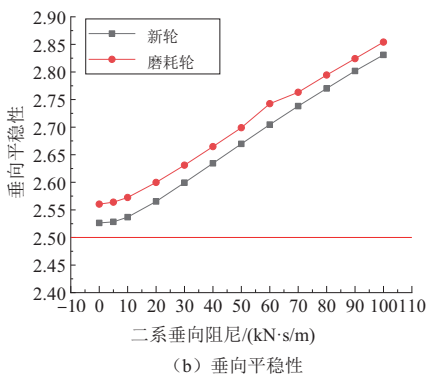
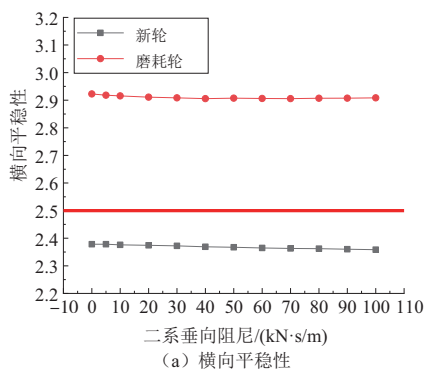


图7 二系垂向阻尼对车辆平稳性的影响

由图7可知:二系垂向阻尼对横向平稳性的影响很小,对垂向平稳性的影响较大;随着二系垂向阻尼的减小,列车的垂向平稳性得到了改善,但无论二系垂向阻尼如何优化,始终无法满足磨耗轮横/垂向平稳性的要求。

2.3 旁承摩擦因数的影响分析

旁承摩擦因数原始值为0.1,对旁承摩擦因数进行优化,其对列车运行平稳性的影响如图8所示。

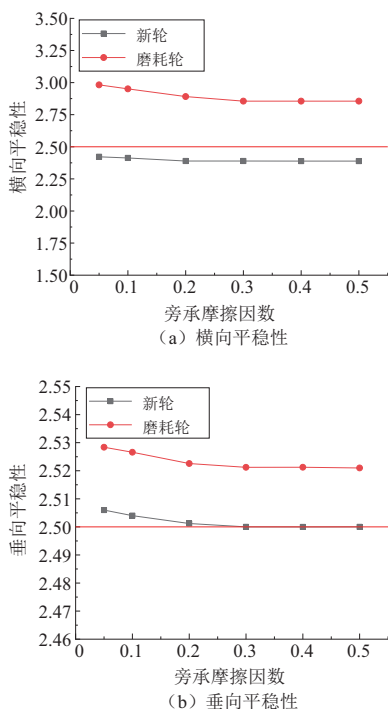


图8 旁承摩擦因数对车辆平稳性的影响

由图8可知:适当提高旁承摩擦因数能够改善列车的运行平稳性,但旁承摩擦因数大于0.2后对平稳性的影响不大。建议旁承摩擦因数仍取原始值0.1。

此外,通过对有轨电车其他的悬挂参数进行优化分析发现:一系定位刚度、横向减振器阻尼、垂向减振器阻尼与车间减振器阻尼等参数对车辆运行平稳性的影响较小。由于篇幅限制在此不再列出,故通过悬挂参数优化无法彻底解决有轨电车运行平稳性超标的问题。

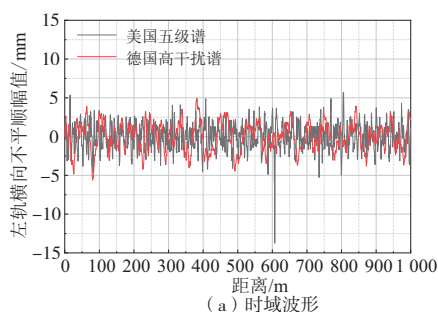
3 轨道激励对车辆平稳性的影响分析

轨道不平顺是因轮轨动态相互作用力影响轮对运动,从而引起车辆系统振动的。研究表明^[9-11],轨道不平顺是一个随机过程,其对车辆动力学响应影响显著。描述轨道不平顺只能用统计的方法,从时空域、频域、幅值域等方面来描述不平顺的幅值特征、波长结构以及是否包含周期性。轨道不平顺的幅值和波长对车辆动力学的影响显著,功率谱密度恰好能从幅值和波长两方面来描述,以揭示某段轨道不平顺的统计特征和规律。所以常用功率谱密度来描述轨道随机不平顺的谱特征^[12]。

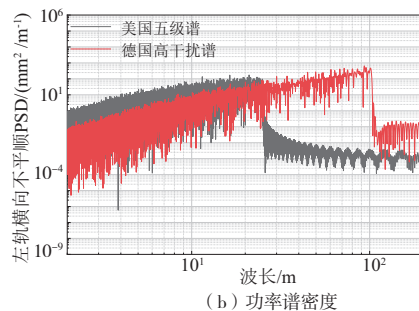
该低地板有轨电车的最高运行速度为80 km/h,在这个速度等级下,一般常用的轨道谱有美国五级谱和德国高干扰谱,本节主要对这两种轨道谱的时域和频域特征进行分析。

3.1 不同轨道谱的时频域特征对比分析

由于轨道不平顺的频率坐标范围比较大,而短波对动力学的影响比较大,为了表现清晰,轨道不平顺的功率谱图常用双对数坐标。美国五级谱、德国高干扰谱的左轨横向不平顺的时域波形和功率谱密度(PSD)如图9所示,左轨垂向不平顺的时域波形和功率谱密度(PSD)如图10所示,右轨横向不平顺的时域波形和功率谱密度(PSD)如图11所示,右轨垂向不平顺的时域波形和功率谱密度如图12所示(本刊黑白印刷,相关疑问咨询作者)。

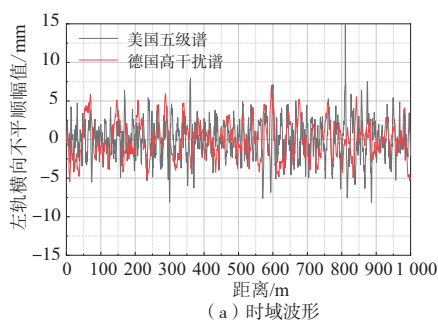


(a) 时域波形

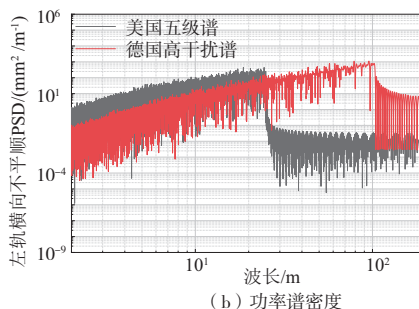


(b) 功率谱密度

图9 左轨横向不平顺时频域特征



(a) 时域波形



(b) 功率谱密度

图10 左轨垂向不平顺时频域特征

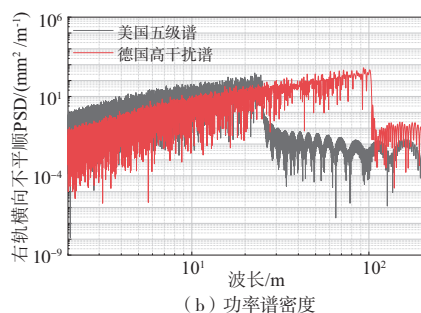
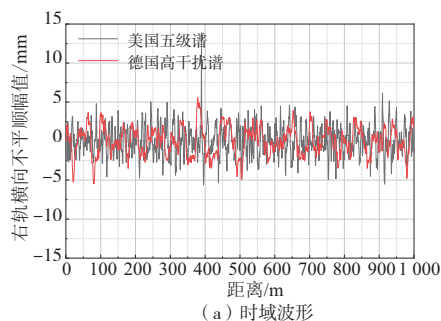


图 11 右轨横向不平顺时频域特征

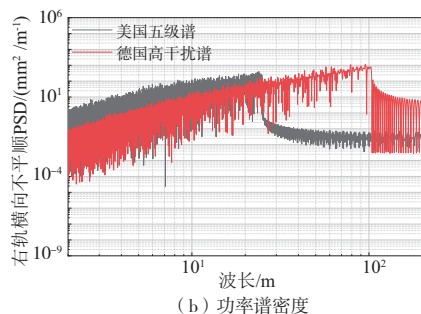
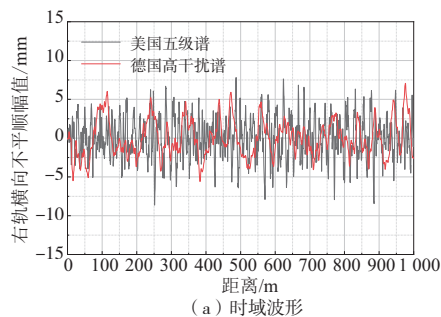


图 12 右轨垂向不平顺时频域特征

由图 9(a)、图 10(a)、图 11(a)和图 12(a)对两种轨道谱的时域特征进行分析可知:美国五级谱和德国高干扰谱的时域幅值基本在同一水平。

由图 9(b)、图 10(b)、图 11(b)和图 12(b)对两种轨道谱的频域特征进行分析可知:当波长小于 25 m 时,美国五级谱在短波高频范围内的振动幅值明显高于德国高干扰谱,即美国五级谱在短波高频下的振动能量较高;当波长大于 25 m 时,

德国高干扰谱在长波低频范围内的振动幅值明显高于美国五级谱,即德国高干扰谱在长波低频下的振动能量较高。

3.2 不同轨道谱对车辆平稳性的影响分析

低地板车辆一般运行在无砟轨道以及连续支撑的环境下,从低地板车辆的运行条件来看,要求轨道谱短波高频成分幅值较小。美国五级谱短波高频范围内的幅值过大,实际上不符合低地板车辆的运行环境,而德国高干扰谱的短波幅值更加接近低地板车辆的运行环境。

对该低地板有轨电车分别施加美国五级谱和德国高干扰谱激励,计算列车在新轮和磨耗轮两种工况下直线运行时的平稳性,进行动力学性能验证如图 13 和图 14 所示。

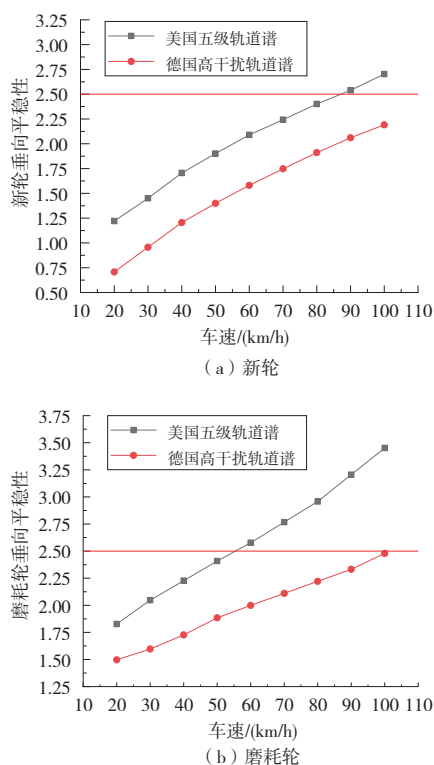
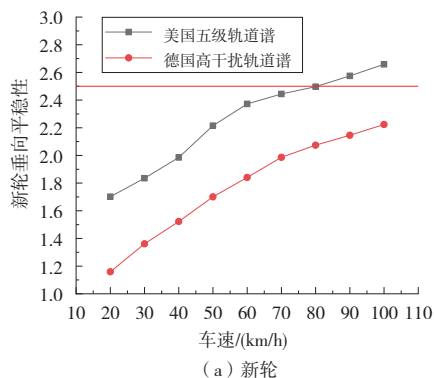


图 13 不同轨道谱对车辆横向平稳性的影响分析



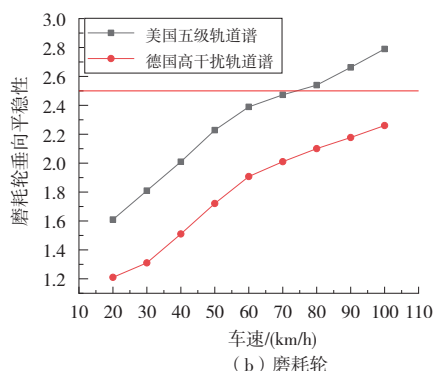


图 14 不同轨道谱对车辆垂向平稳性的影响分析

由图 13 和图 14 可知:当有轨电车以最高运行速度 80 km/h 通过施加美国五级谱激励的直线线路时,磨耗轮的运行平稳性指标不满足要求;当施加德国高干扰谱激励时,有轨电车的运行平稳性指标在新轮和磨耗轮两种工况下均在限值以内,能够解决车辆运行平稳性指标超标的问题。

综上所述:美国五级谱短波高频振动能量高,长波低频振动能量低;德国高干扰谱短波高频振动能量低,长波低频振动能量高。但有轨电车在德国高干扰谱的激励下却具有较优的运行品质。因此,在轨道谱中不是长波低频的振动能量引起的平稳性超标,而是短波高频的振动能量较大引起的平稳性超标。建议定期对钢轨进行打磨,以此来控制轨道短波的振动能量,以便车辆能够安全平稳地运行。

4 结语

针对某有轨电车在车辆设计阶段平稳性指标总是超标的问题,从车辆参数和轨道激励两个方面进行原因分析,得出结论如下。

1) 当列车以最高运行速度 80 km/h 通过施加美国五级谱激励的直线线路时,通过对车辆关键参数进行优化分析可知,降低二系刚度和阻尼能够适当改善车辆运行平稳性与舒适度,但过小的刚度和阻尼在工程应用中难以实现,且车辆的其他参数对平稳性的影响均较小,故通过车辆参数优化无法彻底解决平稳性超标的问题。

2) 通过对有轨电车常用的美国五级谱、德国

高干扰谱的时频域特征进行分析可知,轨道谱激励输入不当是导致车辆运行平稳性超标的原因。轨道谱中,不是长波低频的振动能量引起的平稳性超标,而是短波高频的振动能量大引起的平稳性超标。因此,建议定期对钢轨进行打磨,以此来控制轨道短波的振动能量,以便车辆能够安全平稳地运行。

3) 德国高干扰谱由于具有短波高频成分幅值较小的特点,其更加适合有轨电车的运行环境,同时验证了在该轨道谱激励下低地板有轨电车具有较优的运行品质。

参考文献:

- [1] 苗彦英. 低地板有轨电车车辆技术特征[J]. 城市交通, 2013, 11(4): 39-43.
- [2] 赵明, 郭涛, 安超. 动车组乘坐舒适度的优化研究[J]. 铁道机车车辆, 2016, 36(3): 46-50.
- [3] 付彬, 罗世辉, 马卫华, 等. 转向架关键参数对地铁车辆提速设计的动力学分析[J]. 机械设计与制造, 2018(1): 12-14, 18.
- [4] 魏云鹏, 吴亚平, 段志东, 等. 列车蛇形运动状态下轮轨接触特性分析[J]. 铁道标准设计, 2015, 59(3): 37-40.
- [5] 米立柱, 封全保. SS7E 型电力机车平稳性问题的原因分析及改善[J]. 铁道机车车辆, 2007, 27(增刊 1): 21-23.
- [6] 陈志辉, 翟婉明, 吕凯凯, 等. 悬挂式单轨车辆悬挂参数对运行平稳性的影响研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2018, 15(10): 2647-2653.
- [7] 王开云, 翟婉明, 蔡成标. 左右轨道不平顺功率谱转换中心线功率谱的方法[J]. 交通运输工程学报, 2002, 2(3): 27-29, 67.
- [8] 罗世辉. 大连低地板有轨电车的动力学性能[J]. 机车电传动, 2001(3): 28-31.
- [9] 陈果, 翟婉明. 铁路轨道不平顺随机过程的数值模拟[J]. 西南交通大学学报, 1999, 34(2): 138-142.
- [10] 罗林. 轨道随机干扰函数[J]. 中国铁道科学, 1982, 3(2): 74-111.
- [11] 佚名. 关于机车车辆/轨道系统随机激励函数的研究[J]. 长沙铁道学院学报, 1985, 3(2): 1-38.
- [12] 罗仁, 石怀龙. 高速列车系统动力学[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2019.

收稿日期: 2022-06-23