

轨道交通横向轮轨滚动振动实验台的研制与应用

高利君

(山西铁道职业技术学院, 山西 太原 034300)

摘要: 为研究轨道车辆轮轨间的力学变化特征设计了一种轨道交通横向轮轨滚动振动实验台, 包括Solidworks 三维建模、机械结构设计、标准件选型、非标准件制造、工厂加工及装配应用。根据实际车轮和钢轨的几何尺寸和共振频率进行等比例缩小设计并进行模态分析与力学计算, 设计轮轨模拟装置。在此基础上设计相应的轴重模拟装置、轴向驱动约束装置、轮轨角度调节装置、整体框架支撑装置, 并在工厂进行制造与装配, 经调试后进行轮轨横向蠕滑力特性曲线研究, 发现轴重的增加可以抑制轮轨间的横向蠕滑进而减少轮轨损伤。

关键词: 滚动振动; 轮轨关系; 三维设计; 机械设计

中图分类号: U270.1

文献标识码: A

Development and Application of Transverse Wheel-rail Rolling Vibration Test Rig in Rail Transit

GAO Lijun

(Shanxi Railway Vocational and Technical College, Taiyuan034300, Shanxi, China)

Abstract: A wheel-rail rolling vibration test rig was designed and manufactured for studying the mechanical changes in the wheel-rail system. The test rig includes Solidworks 3D modeling, mechanical structure design, selection of standard parts, manufacturing of non-standard parts, factory processing and assembly. The wheel-rail simulator was designed and analyzed based on the actual geometric dimensions and resonance frequencies of the wheel and rail. The corresponding axle load simulator, axial drive and constraint device, wheel-rail angle adjustment device, and overall frame support device were designed and manufactured in the factory. After the adjustment, the longitudinal creep sliding force characteristics curve of the wheel and rail was studied, and it was found that the increase in axle weight can suppress the lateral creep sliding between the wheel and rail and reduce wheel and rail damage.

Key words: rolling vibration; wheel-rail relationship; three-dimensional design; mechanical design

在轨道交通运输中, 机车牵引力是通过轮轨间的黏着力和蠕滑力来传递的, 因此, 轮轨间的滚动振动关系直接影响车辆的运行性能^[1]。轮轨间的滚动振动关系一直受到轨道交通学者的关注, 他们设计了大量轮轨关系实验台在实验室完成轮轨间滚动振动关系的模拟。Wen J^[2]采用全尺/缩尺试验台, 对轮轨接触相关问题进行了比较深入的研究, 该实验台具有易操作和可控制的优点, 灵活度高, 能够适用于特定的轮轨系统研

究。王志强^[3]设计的缩尺双盘实验装置, 可实现轮轨接触问题的模拟, 诸如凹坑、扁疤、波磨等。吴越^[4]使用全尺寸轮轨滚动实验台进行轮轨实验, 该实验台为全尺寸1:1可用于轮轨黏着、蠕滑、磨耗、滚动接触疲劳性能及轮轨几何参数优化等试验研究与检验。翟宇波^[5]针对由轮轨接触饱和和蠕滑率引起的高频振动造成钢轨损伤问题, 提出了一种小比例环形轮轨接触实验台动态模拟方法。其采用环形轨道模拟轮轨持续接触运

收稿日期: 2024-05-29

作者简介: 高利君, 助教, 硕士, 研究方向为轨道交通车辆轮轨滚动振动关系

行工况。

以上学者关于轮轨滚动振动实验台的研究大多停留在宏观层面,由于车辆类型和轨道线路的不同,实验台实验结果难有说服力。本实验台从微观角度进行设计,即重点关注轮轨接触区域的滚动振动关系变化。而且,以上研究大多是关于轮轨间纵向的滚动振动实验台研究,对于轮轨间横向的滚动振动研究很少,然而横向的滚动振动对于列车的横向稳定、过弯道、过道岔及脱轨问题都影响很大,故本设计重点研究轮轨间横向的滚动振动关系变化。

1 实验台整体设计思路及三维建模

本实验台通过模拟轨道车辆轮轨间的力学变化特征来研究轮轨间的滚动振动力学关系。即通过控制电动机的转速、丝杠加载力、模拟轮间的角度变化来模拟车辆速度、车辆轴重、车辆过弯道等不同工况下轮轨间横向力及纵向力的变化特征,如研究轨道车辆过弯道时横向蠕滑力的变化特征、轴重与轮轨间最大静摩擦力的关系等。实验台按照实际轮轨 1:5 的比例进行设计,实验台机械装置结构由 6 个装置组成:轮轨模拟装置模拟轮轨间的滚动振动,轴重模拟装置模拟车辆轴重的变化,轴向驱动约束装置模拟车辆的速度,角度调节装置模拟车辆过弯道角度变化,传感器装置测量轮轨间的纵、横向力数值,整体框架支撑装置保证实验台的稳定。

设计思路为:①通过车轮材料及外形轮廓、钢轨的材料、几何参数及力学参数确定滚动轮与钢轨轮的 Solidworks 三维模型(见图 1),结合有限元力学分析结果完成轮轨模拟装置的建模。其中,滚动轮与钢轨轮的精确尺寸及外形轮廓应用有限元分析法选取最优值。根据车辆实际轴重的变化范围对应得到实验对纵向加载力的要求,选取相应的弹簧和滚珠丝杠,完成轴重模拟装置的设计。②根据确定的钢轨轮,应用有限元分析法计算其轴孔直径,根据计算结果选取相应的主动轴、轴承座、推力球轴承和圆柱滚子轴承。根据地铁列车的速度变化范围及主动轮的最大扭矩力选择合适的电动机及相应的变频器,完成轴向驱动约束机构的设计。③根据车辆转弯轮轨间的角度范围设计角度调节装置,在以上装置基础上完成整体框架支撑装置的设计,保证实验台在实验过程中的稳定(见图 2、图 3)。

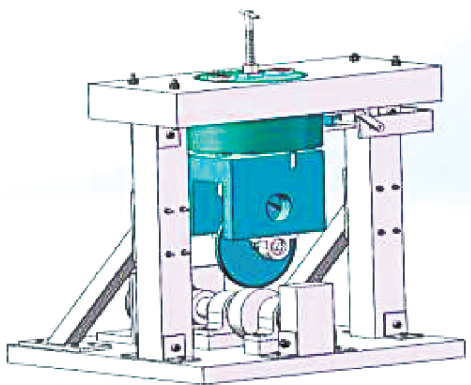


图 1 Solidworks 设计图

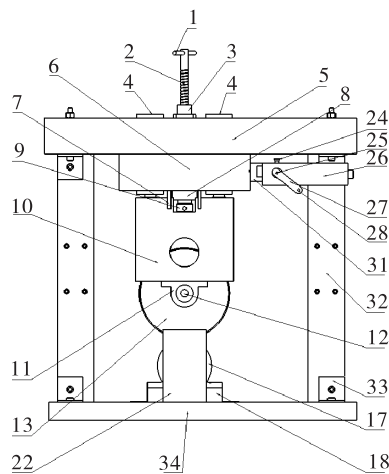


图 2 实验台的正视图

1—滚珠丝杠驱动杆;2—滚珠丝杠;3—滚珠丝杆螺母;4—法兰直线轴承;5—顶板;6—上端盖;7—支撑杆;8—传感器垫片;9—垂向传感器;10—下端盖;11—深沟球轴承;12—从动轴;13—为滚动轮;14—斜方钢;15—电动机;16—十字联轴器;17—钢轨轮;18—圆柱滚子轴承座;19—圆柱滚子轴承;20—推力球轴承;21—轴向传感器;22—传感器座;23—斜方刚垫片;24—转动杆;25—角度调节丝杆轴承;26—角度调节支撑板;27—角度调节摇臂;28—角度调节手把;29—主动轴;30—角度调节丝杆;31—角度调节耳板;32—框架支撑方刚;33—T形垫片;34—底板

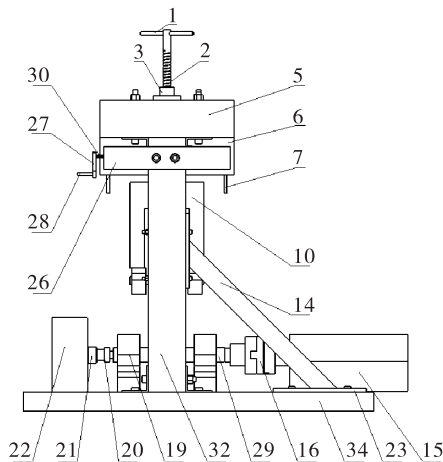


图 3 实验台的侧视图

2 三维零件设计选型

2.1 弹簧设计选型

轮轨间的垂向力通过滚珠丝杠压缩弹簧来模拟，根据轴重的变化范围选取弹簧并设计相应的上端盖弹簧孔径。经计算，弹簧选择的外径为 64 mm，根据标准导套与弹簧外径的间隙值表，间隙为 5 ~ 7 mm，所以上端盖的弹簧孔径设计为 69 mm。

2.2 滚珠丝杠的选型

实验台通过转动滚珠丝杠实现垂向力的加载，考虑到垂向最大需要 2 000 N 的加载力，选用具有高效率、高精度、可逆性的 SFU2505 滚珠丝杠，且其具有自锁功能，实验过程中垂向加载力始终为恒值。经计算，推杆丝杠和丝杠的最大垂向屈服强度允许载荷大于实际最大垂向载荷，满足实验要求。

2.3 模拟轮的模态分析

为精确模拟轮轨滚动振动关系并得到轮对模态参数，在 Ansys 软件中进行有限元力学分析及优化。轨道交通车辆直径为 840 mm，模态大约在 350 Hz 左右，粘滑振动频率一般在 150 Hz 左右，故按照车轮频率在 350 Hz 进行计算。将 Solidworks 的轨道车辆轮对三维模型导入 Hypermesh 中进行画分网格分析。由于本实验台采用单轮对模拟，故仅考虑单轮对的扭转自由度和弯曲自由度扭转自由度，仅分析单轮轨的扭转模态和弯曲模态。如图 4 所示，求得一阶扭转振动，其固有频率为 75 Hz，扭转刚度为 4 MN/m；一阶弯曲振动，固有频率为 90 Hz，弯曲刚度为 3.8 MN/m；二阶弯曲振动频率为 175 Hz。

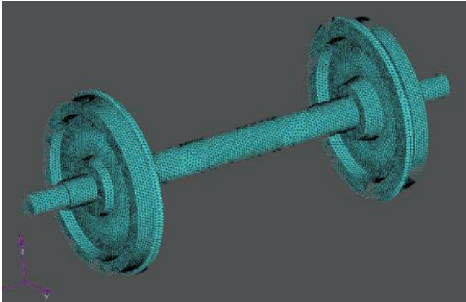


图 4 轮对的有限元离散模型

对不同直径及厚度的滚动轮进行分析得到其模态参数，最终优化结果如图 5 所示，即滚动轮直径为 250 mm，腹板厚度为 3 mm，轴孔直径为 20 mm。在此工况下滚动轮频率为 360.08 Hz。为

防止从动轮共振频率太高，腹板厚度不能太后，结合 Ansys 分析结果及加工的工艺难度，轮缘取 15 mm。在滚动参数的基础上设计钢轨轮参数，最终轮轨优化应力云图及应变如图 6、图 7 所示。

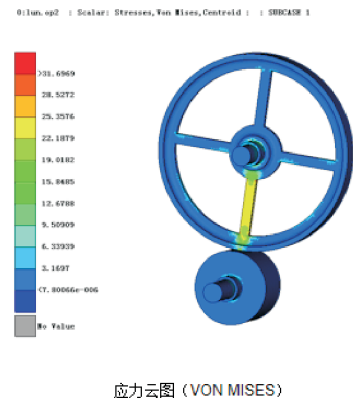


图 5 滚动轮模态优化结果

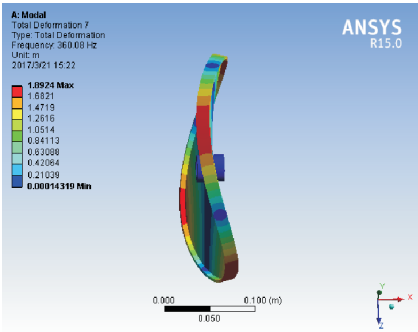


图 6 轮轨优化应力云图

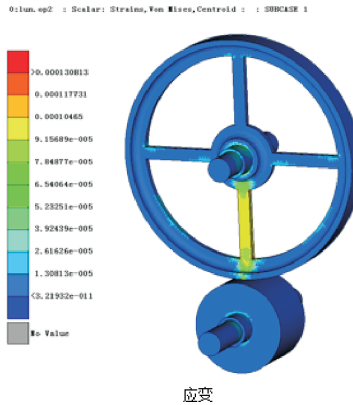


图 7 轮轨优化应变

2.4 电机选型

根据地铁车辆最大速度 80 km/h 以及主动轮直径为 840 mm，得出主动轴需达到的最大转数为 450 rad/min，根据电机厂家所提供型号参数作出以下选型：减速电机选用三相卧式齿轮电机，型号为 22 轴径，减速比为 1/3，输出 473 rad/min。当主动轮直径为 840 mm，转数为 473 r/min，主动轮速度为 74.9 km/h。满足实验要求。

2.5 材料选型

为了更加精确模拟轨道车辆轮轨间的滚动振动关系,滚动轮与钢轨轮采用进口辗钢轮材料,并分别进行模态分析,使其滚动振动关系更加接近实际工况。为保证后续实验过程中整个装置的稳定性及实验数据的准确性,除上端盖、下端盖、顶板、标准件外,其余零件均由工厂采用45号钢加工制造。由于实验中上、下端盖需频繁旋转,需做到轻量化,同时考虑到加工费用,上、下端盖采用铝合金材料。

2.6 标准件的选型

根据定位轴及上、下端盖尺寸选择型号为LMF30的法兰直线轴承及相应卡环,根据主动轴直径选择型号为SN308圆柱滚子轴承,根据从动轴直径选择型号为P51408的滚珠球轴承。

2.7 联轴器选型及改进

按照主动轴直径和电动机的出力轴直径选择型号为SL100的十字联轴器,满足实验台的机械传动,但实验过程中需精确测量轮轨间的横向蠕滑力,而SL100的十字联轴器左右两半通过橡胶弹性连接为整体,联轴器就会吸收一部分横向蠕滑力,使得横向蠕滑力不能完整传递到横向传感器,导致实验数据出现偏差。由于市面上没有满足实验台要求的联轴器,所以在SL100的十字联轴器的基础上完成以下修改,修改后联轴器即能轴向移动又能传递横向扭矩保证实验精度。如图8所示,弹簧定位器2将滚动体3顶于滚道5,在外力作用下SL100型标准联轴器的左、右两半联轴器1、4可相对移动。当轮轨横向力作用于联轴器时,左、右两半联轴器1、4在弹簧定位器2的作用下会相对运动,将横向力矩传至动态传感器,保证实验数据的准确性,使实验台所做实验更加具有说服力。改进后的联轴器能消除轴向力对轴向设备的损耗,提升整个实验台的使用寿命。

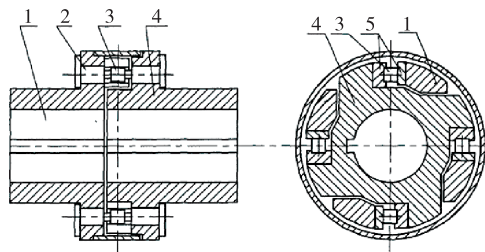


图8 基于SL100型联轴器的改进

1—左半联轴器；2—弹簧定位器；3—滚动体；4—右半联轴器；5—滚道

3 实验台装置具体设计说明

3.1 轴重模拟装置

轴重模拟装置如图所示,通过滚珠丝杠压缩弹簧模拟车辆轴重,完成车辆轴重的模拟。根据车辆轴重、垂向加载装置本身重力及实验台设计比例,垂向力加载力需达到2 000 N,在此要求下,选择满足几何尺寸、加载力及安装位置的弹簧。

根据确定的模拟轮机械结构设计其支架即下端盖,保证模拟轮在垂向上固定,在横向上可与钢轨轮相对转动。根据传感器机械结构在下端盖顶面设计相应安装位置,保证垂向的同轴度,使测量数据更加精确。根据下端盖的设计模型,结合整个轴重模拟装置在横向上转动的顺畅性与准确率,上端盖设计为凸台结构,既能约束其垂向位置,也能在横向实现转动。

考虑到上端盖与顶板需在横向上能相对转动、垂向上相互约束、实验台的振动及整个轴重模拟装置在横向转动的顺畅性,结合仿真结果及机械手册标准,上端盖与顶板垂向间应留有相对运动的余量,如图9所示,设计6 mm的间隙。为满足轴重模拟装置在垂向上的移动,在上端盖安装定位轴及法兰轴承,实验时,上端盖通过滚珠沿定位轴上下运动,最大运动量为6 mm,完成垂向力的加载,同时由于顶板与上端盖的分离,消除了相互的摩擦力,使得加载装置横向旋转更加顺畅。

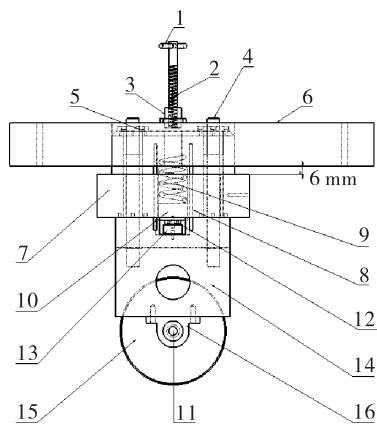


图9 轴重模拟装置

1—滚珠丝杠驱动杆；2—滚珠丝杠；3—滚珠丝杠螺母；4—定位轴；5—法兰直线轴承；6—顶板；7—上端盖；8—支撑杆；9—弹簧；10—传感器垫片；11—从动轴；12—传感器转换座；13—垂向传感器；14—下端盖；15—滚动轮；16—深沟球轴承

3.2 轴向驱动约束装置

根据钢轨的几何参数、力学参数、有限元仿真结果、实验台比例确定钢轨轮的直径、长度、材料,根据垂向加载力及轮轨最大静摩擦力得到最大横向力及最大扭矩力,由此选择合适功率的电动机、圆柱滚子轴承、推力球轴承、十字联轴器,如图 10 所示。主动轴分别与圆柱滚子轴承内圈、十字联轴器右端、推力球轴承过盈配合。考虑到轴孔间隙振动对实验的影响,结合机械手册要求,装配时轴孔配合均采用过盈配合,圆柱滚子轴承选择轴面无约束型,减小横向力的传动损失,保证传感器测量数据的精确性。

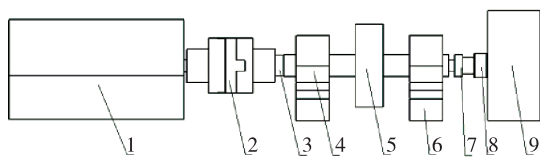


图 10 轴向驱动约束装置

1—电动机；2—十字联轴器；3—主动轴；4—圆柱滚子轴承；
5—钢轨轮；6—圆柱滚子轴承座；7—推力球轴承；8—轴向传
感器；9—传感器座

3.3 角度调节装置

图 11 为角度调节器示意图,调心轴承内圈通过顶丝与丝杆固定,外圈与调心轴承座连接在固定架上。在实验中通过摇臂的旋转运动转化为丝杆的直线运动,丝杆带动推杆、耳板、上端盖、下端盖、滚动轮做旋转运动,使滚动轮与钢轨轮形成角度,从而完成角度调节。为保护设备及令角度调节顺畅,在旋转接触面涂油脂,角度调节需在无垂向加载力即弹簧无预警力时完成。

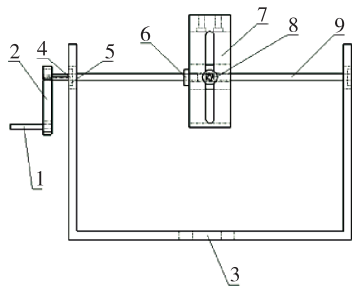


图 11 角度调节器

1—手把；2—摇臂；3—固定架；4—调心轴承；5—轴承座；6—丝杆螺母；7—耳板；8—推杆；9—丝杆

3.4 整体框架支撑装置

图 12 为整体框架支撑装置, 考虑到实验过程中整个装置在垂向及横向上的振动, 设计目标是保证其他装置在空间中的稳定性及实验数据的准确性。通过底板固定轴向驱动装置位置; 通过

顶板约束垂向加载装置的空间位置,保证垂向加载装置在横向上的旋转运动及垂向的直线运动;通过角度调节固定架保证角度调节的稳定顺畅。斜方钢从侧面对实验台进行加固。结合有限元优化结果,底板厚度设计为6 cm,考虑到经济性支撑柱全部采用空心成品方钢。考虑到工厂加工难度,顶板设计为9 cm厚且材质为铝合金。通过以上设计能有效减少实验过程中实验台的振动与晃动,从而在保证实验数据准确的同时延长设备的使用寿命。

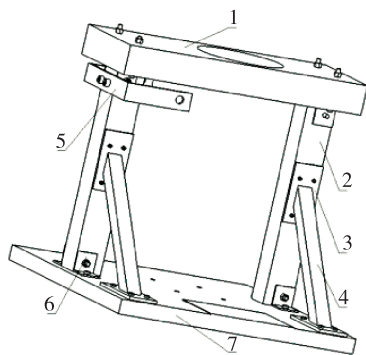


图 12 整体框架支撑装置

1—顶板; 2—方钢; 3—斜方钢垫片; 4—斜方钢; 5—角度调节
固定架; 6—T形垫片; 7—底板

3.5 数据采集装置

在垂向加载装置和轴向驱动约束装置上分别安装动态传感器采集数据，数据经过采集仪处理后呈现波形图，用滤波器将振动、噪音等干扰波形滤掉，再应用 **MATLAB** 对全部数据点计算处理，得到相关实验数据。

4 基于实验台的轮轨横向蠕滑力特性曲线研究

通过模拟不同车辆轴重、速度、转弯角度，实验台可用于研究轮轨间横向蠕滑力的变化特征：通过改变电机频率模拟车辆速度变化，通过滚珠丝杆加载模拟车辆轴重变化，通过转动摇杆模拟车辆过弯道。利用变量控制法，在车辆速度一致、不同轴重工况下研究不同轮轨角度下的横向蠕滑力变化特征。

根据图 13 实验结果可知,图中横轴为轮轨偏角,纵轴为横向蠕滑力,图中显示了 3 条在不同轴重工况下的蠕滑力与轮轨偏角的变化曲线。由实验结果知,当车辆经过小半径曲线轨道时,随着轴重的增大,曲线负斜率减小,峰值点有明显的右移,即轴重越大越难达到轮轨蠕滑状态,进而抑制轮轨间的横向滑动,可减少轮轨损伤、

(下转第 72 页)

可依托信息技术、AR、VR 等开发虚拟化、智能化实践教学平台和实训资源,突破传统技能实训场所限制,为学生提供仿真实训场景。第二,大力推进颗粒化课程资源建设,通过颗粒化知识点和技能点资源,提高学习的灵活性。

(3) 完成“智慧化”教学模式建设。第一,高职院校应把握职业教育改革方向,紧跟行业企业技术发展趋势,深入推进三教改革,探索“智慧化”教学模式。第二,通过数字化、智能化等技术手段赋能职业教育人才培养,探索个性化、精品化的学习方案,推广线上线下混合式、虚实结合式、翻转课堂式的教学方法,构建全过程数据采集的评价体系,提升人才培养质量。

参考文献:

- [1] 中国城市轨道交通协会. 城市轨道交通 2023 年度统计和分析报告 [R/OL]. (2024-03-29) [2024-04-16]. <https://www.camet.org.cn/tjxx/14894>.
- [2] RT 轨道交通. 2023 年城轨智能化发展总结 (含城轨云/智能运维中标统计) [EB/OL]. (2024-01-28) [2024-04-16] <https://mp.weixin.qq.com/s/U1tiXH9ru98nv3iYXUsDTg>.
- [3] RT 轨道交通. 2022 年城市轨道交通智能化发展总结 [EB/OL]. (2023-01-14) [2024-04-16] <https://mp.weixin.qq.com/s/t0M5rzv81y7PNeP7R1EwIA>.
- [4] RT 轨道交通. 2021 年城市轨道交通智能化发展总结 [EB/OL]. (2022-01-24) [2024-04-16] <https://mp.weixin.qq.com/s/ljT05IsKIDPgaEbaQeNcKA>.
- [5] 城市轨道交通运营企业人力资源 2022 年统计分析报告 [J]. 城市轨道交通, 2024(01): 18-25.
- [6] 莫坚, 张莹, 李彦坤. 轨道交通装备制造行业人才需求与职业院校专业设置匹配分析 [J]. 中国职业技术教育, 2022(30): 20-29.
- [7] 傅凯, 毛云江. 智慧城轨背景下城市轨道交通运营专业人才培养改革研究 [J]. 时代汽车, 2022(05): 90-92, 95.
- [8] 么欣卉, 杜学元, 胡光忠. 新时代职业教育高质量发展路径研究 [J]. 现代职业教育, 2024(12): 141-144.
- [9] 韦方政. 基于全自动运行线路需求的一专多能人才模式探讨 [J]. 铁道运营技术, 2023, 29(04): 52-54.
- [10] 谭丽娜, 白冰. “双高”建设背景下高职城市轨道交通专业群课程体系构建研究 [J]. 产业与科技论坛, 2022, 21(08): 251-252.
- [11] 韩宜轩. 城市轨道交通运营新模式背景下专业课程教学改革研究 [J]. 陕西教育 (高教), 2023(11): 73-75.

(上接第 51 页)

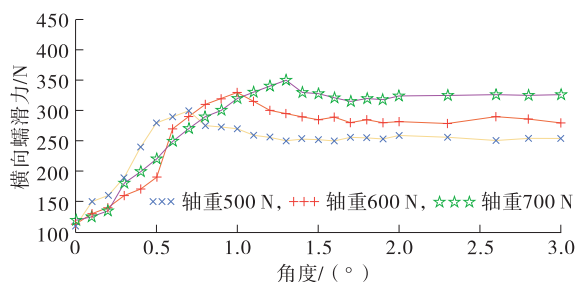


图 13 不同正压力工况下的横向蠕滑力特性曲线

防止波磨产生及防止列车脱轨。通过轴重规律性的变化,在实验台滚动轮及钢轨轮出现波浪形磨耗,在室内实验台再现波磨,进而在此基础上研究钢轨波磨产生的机理。

4 结语

本文介绍了一种轨道交通横向轮轨滚动振动实验台的设计与制造,包括实验台的机械结构设计、Solidworks 三维建模及工厂制造及装配。该实验台可利用不同轴重工况下轮轨间角度的变化,模拟车辆通过小半径曲线轨道时轮轨间横向蠕滑力的变化规律。实验结果表明,车辆轴重的增大可抑制轮轨间的横向蠕滑,减少轮轨损伤、

防止波磨产生及防止列车脱轨。实验台还可模拟钢轨波磨的产生进而解释波磨机理,通过在轮轨间添加水、油、沙子等可以模拟在雨雪天气等不同环境下轮轨间的力学特征变化,为列车的安全运行提供依据。

参考文献:

- [1] 闫硕. 小曲线半径轨道钢轨波磨产生机理及抑制措施研究 [D]. 成都:西南交通大学, 2018.
- [2] WENJ, MARTEAU J, BOUVIER S, et al. Comparison of microstructure changes induced in two pearlitic rail steels subjected to a full-scale wheel/rail contact rig test [J]. Wear, 2020, 456-457.
- [3] 王志强, 雷震宇. 基于缩尺模型试验的波磨形成机制及发展特性 [J]. 天津大学学报 (自然科学与工程技术版), 2024, 57(6): 595-601.
- [4] 吴越, 胡晓依, 王佳诺, 等. 基于全尺寸轮轨滚动试验台的高速车轮多边形磨耗再现试验研究 [J/OL]. 机械工程学报, 1-11 [2024-10-16]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2187.th.20240425.1754.012.html>.
- [5] 翟宇波, 尧辉明, 董庆仑. 小比例环形轮轨接触试验台可行性仿真研究 [J]. 城市轨道交通研究, 2023, 26(3): 104-107.