



西南交通大学学报
Journal of Southwest Jiaotong University
ISSN 0258-2724, CN 51-1277/U

《西南交通大学学报》网络首发论文

题目：大功率永磁直驱架悬式机车的重建黏着性能分析
作者：马群，易兴利，姚远，乔金闯，钟文生
收稿日期：2024-12-12
网络首发日期：2025-04-25
引用格式：马群，易兴利，姚远，乔金闯，钟文生. 大功率永磁直驱架悬式机车的重建黏着性能分析[J/OL]. 西南交通大学学报.
<https://link.cnki.net/urlid/51.1277.u.20250425.1006.002>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

大功率永磁直驱架悬式机车重建黏着性能分析

马群¹， 易兴利²， 姚远¹， 乔金闯¹， 钟文生¹

(1. 西南交通大学 轨道交通运载系统全国重点实验室, 四川 成都 610031; 2. 株洲电力机车有限公司 重载快捷大功率电力机车全国重点实验室, 湖南 株洲 412001)

摘要: 本文针对大功率架悬式永磁直驱驱动系统, 研究了轮对驱动系统悬挂参数对机车重建黏着性能的影响。首先, 基于平均滑移率和动态滑移率, 分析了机车黏滑振动机理, 建立了轮对驱动系统扭转振动的简化模型, 明确了悬挂参数匹配的原则; 然后, 搭建了某机车多体动力学仿真模型, 以启动工况为例, 探讨了轮对驱动系统悬挂参数对机车重建黏着性能的影响。仿真结果表明, 较小的轮对驱动系统悬挂刚度增大了机车发生黏滑振动的风险, 提高膜片式联轴器扭转刚度和一系纵向刚度能有效增强机车重建黏着性能, 将联轴器扭转刚度从 1 MNm/rad 增加到 5 MNm/rad 时, 机车重建黏着性能提升了约 12%。此外, 不合理的悬挂参数匹配可能导致轮对纵向-旋转振动共振, 不仅加剧了轮对驱动系统结构的振动, 而且极大削弱机车重建黏着性能。因此, 合理匹配轮对驱动系统悬挂参数对于提高机车重建黏着性能至关重要。

关键词: 重载机车; 永磁直驱; 架悬; 重建黏着性能; 黏滑振动

文献标识码: A

Re-adhesion Performance of High-Power Permanent-Magnet Direct-Drive Bogie-Suspended Locomotives

MA Qun¹, YI Xingli², YAO Yuan¹, QIAO Jinchuang¹, ZHONG Wensheng¹

(1. State Key Laboratory of Traction Power, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China; 2. State Key Laboratory of Heavy-duty and Express High-power Electric Locomotive CRRC Zhuzhou Electric Locomotive Co. Ltd., Zhuzhou 412001, China)

Abstract: This paper investigates the impact of suspension parameters of the wheelset drive system on the re-adhesion performance of high-power bogie frame suspended permanent magnet direct drive systems. First, based on average slip rate and dynamic slip rate, the stick-slip vibration mechanism of the locomotive is analyzed, and a simplified torsional vibration model of the wheelset drive system is established, clarifying the principles of suspension parameter matching. Subsequently, a multi-body dynamics simulation model of a specific locomotive is constructed, focusing on the startup condition to explore the influence of wheelset drive system suspension parameters on the locomotive's re-adhesion performance. Simulation results show that a lower suspension stiffness of the wheelset drive system increases the risk of stick-slip vibration in the locomotive. Increasing the torsional stiffness of the flexible plate coupling and the primary longitudinal stiffness can effectively enhance the locomotive's re-adhesion performance. For example, increasing the coupling torsional stiffness from 1 MNm/rad to 5 MNm/rad improves the locomotive's re-adhesion performance by approximately 12%. Additionally, unreasonable matching of suspension parameters may lead to longitudinal-rotational vibration resonance of the wheelset, which not only exacerbates the vibration of the wheelset drive system but also significantly weakens the locomotive's re-adhesion performance. Therefore, proper matching of the wheelset drive system suspension parameters is crucial for

收稿日期: 2024-12-12 修回日期: 2025-04-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(52372403, U2268211); 四川省自然科学基金项目(2022NSFSC0034); 中国国家铁路集团有限公司科研开发计划课题(N2023J071); 轨道交通运载系统全国重点实验室自主研究课题(2022TPL-T02); 西南交通大学-兰州交通大学联合创新基金项目(2682023TZ001)

作者简介: 马群(1999—), 男, 博士研究生, 研究方向为车辆系统动力学, E-mail: maqun416@163.com

通信作者: 姚远(1983—), 男, 研究员, 博士, 研究方向为机车车辆设计理论和车辆系统动力学, E-mail: yyuan8848@163.com

improving the locomotive's re-adhesion performance.

Key words: Heavy-Haul Locomotive; Permanent Magnet Direct Drive; Bogie frame suspended; Re-adhesion Performance; Stick-Slip Vibration

随着中国重载铁路技术的显著进步, 对于运营成本、能源节约及环境保护的要求也日益提高。永磁直驱技术因其高效、低噪、节能和环保等多重优势, 成为满足这些需求的理想解决方案^[1]。

当前国内轨道交通中, 永磁直驱技术呈现出“城轨成熟、货运待拓”的发展态势。学界针对该技术的工程化应用已取得系列突破: 文献[2,3]总结了轨道车辆永磁直驱技术的发展现状与结构特点, 分析了其设计优化、控制技术和应用案例, 并讨论了技术难点及解决方案, 展望了未来发展趋势。罗湘萍等^[4]研究了不同悬挂模式下永磁同步直驱电机对轮轨垂向作用力的影响, 通过非线性有限元模型对比了架悬和轴悬两种模式在不同速度下的性能。马晓光等^[5]分析了架悬式永磁直驱转向架的动力学性能, 介绍了其技术方案和结构特点, 探讨了电机吊挂参数对机车动力学性能的影响, 并通过仿真和试验验证了其符合标准要求。徐艳晖^[6]研究了车轮多边形对永磁直驱机车动态特性的影响, 分析了多边形阶数、波深和相对对振动特性的影响, 并提出了关于车轮多边形磨耗的安全建议。

上述的研究为永磁直驱技术在重载货运领域的应用奠定了理论和实践基础。然而, 重载机车在启动和上坡过程中需要强大的牵引力, 这往往使得轮轨黏着力接近其极限值。由于黏着力负斜率特性, 轮轨黏着力很难保持在峰值, 容易进入滑动区域。此外, 当轨道表面存在如雨水、雪、树叶、油等第三介质, 黏着系数会进一步降低^[7,8], 使得机车更容易进入滑动区域, 从而引发机车驱动系统的复杂动态行为。此时, 若机车驱动系统结构以及参数设计不合理, 在电机机械特性作用下, 轮对驱动系统发生不稳定的自激振动^[9], 轮轨接触状态在黏着与滑动之间交替变化, 这种情况不仅可能引起钢轨波状磨损和车轮多边形磨耗^[10-12], 还可能导致车轮踏面剥离^[13], 甚至因车轴扭转共振而造成车轴断裂事故。这些问题给机车车辆的制造和现场运营带来了显著挑战。

针对上述挑战, 近年来, 国内外学者通过仿真与实验方法对机车驱动系统的动力学特性开展了系统性研究。例如, Polach^[14]考虑了负斜率特性和各种钢轨附着条件, 开发了轮轨力的快速计算方法。Spiryagin等^[15,16]为了提高仿真结果的精度和效率, 建立了包括机械系统、牵引电机和牵引算法的

联合仿真模型, 研究并验证了各种牵引力控制策略。实验方面, Lata^[17]通过实验研究了打滑和粘着恢复期间驱动系统的扭转振动, 揭示了轮对旋转与齿轮箱点头的耦合。Collina等^[18]通过动力学仿真研究了重载机车在粘着极限下运行时轮轨蠕滑负斜率特性导致传动系统的扭转振动。Fröhling等^[19]讨论了黏着饱和件下的自激粘滑振动以及交流牵引电机谐波和间谐波导致的强迫振动引起车轴扭转振动是产生多边形磨耗的主要原因。国内学者的研究亦取得重要进展: 孙翔^[20,21]建立了机车万向轴驱动系统动力学计算的通用方程, 透彻地分析了万向轴驱动机车的黏着机理。吴永芳^[22]把电气系统和机械作为一个完整的系统来研究机车驱动装置的动态特性, 考虑了电机磁饱和、轮轨间力的非线性耦合, 模拟了黏着极限附近的黏滑振动。姚远等^[23-25]以轴悬式机车为研究对象, 创新性地提出了平均滑移率和动态滑移率的概念, 并阐明了机车驱动系统黏滑振动机理, 强调了合理匹配一系纵向刚度和电机悬挂刚度的重要性, 以避免在驱动系统发生黏滑振动时产生共振。

很明显, 尽管现有研究极大丰富了机车驱动动力学领域的理论体系, 但针对永磁直驱架悬式机车的黏着性能优化仍存在显著空白。值得注意的是, 虽然采用驱动系统架悬虽然可以通过减小簧下质量改善轮轨作用力, 但由于采用六连杆空心轴传动等大量弹性关节, 导致架悬驱动系统扭转刚度远低于抱轴式半悬挂驱动系统。这一缺陷使得机车在运行时动态滑动率变化范围显著扩大, 尤其在黏着极限附近运行或轨面黏着条件突变时, 更易因低扭转刚度引发黏滑振动, 从而加剧复杂动力学行为, 这对机车重建黏着性能极为不利。为此, 本文以永磁直驱架悬式驱动系统的重载机车为研究对象, 深入解析机车黏滑振动机理, 建立了轮对驱动系统扭转振动的简化模型, 明确了悬挂参数匹配的原则。此外, 根据实际参数建立机车动力学仿真模型, 研究机车悬挂参数对机车重黏着性能的影响; 进一步从避免驱动系统共振角度出发, 提出一系纵向刚度与六连杆空心轴联轴器扭转刚度的匹配建议, 这对于提高机车对黏着力变化的适应性和改善驱动系统的稳定性, 确保安全可靠的铁路运输至关重要。

1 机车黏滑振动机理

从物理的意义上描述滑移, 机车驱动动力学中的滑移定义如下:

$$s = \frac{\omega_w r - v_w}{\omega_w r} = 1 - \frac{v_{w0} + \dot{x}_w}{(\omega_{w0} + \dot{\theta}_w) r} \quad (1)$$

式中: ω_w 和 ω_{w0} 分别为轮对瞬时角速度和轮对平均角速度, v_w 和 v_{w0} 分别为轮对瞬时前进速度和轮对平均前进速度, r 为车轮滚动圆半径。

在机车运行过程中, 滑动率是一个动态变量, 可以表示为:

$$s = s_0 + ds \quad (2)$$

式中: s_0 和 ds 分别为平均滑移和动态滑移。

s_0 不仅取决于制动或牵引, 还取决于轮轨附着条件。 ds 的大小被认为与振动能量以及轮对驱动系统结构内弹性连接的刚度和阻尼特性相关。

轮对驱动系统黏滑振动稳定性机理如图 1 所示, 其中红色实线表示电机的机械特性曲线, 黑色实线“ T ”表示干燥条件下的轮轨蠕滑曲线, 而黑色实线“ II ”则表示潮湿条件下的轮轨蠕滑曲线。当机车在 A 点(电机机械特性曲线与轮轨蠕滑曲线“ T ”的交点)运行时, 若某一时刻轨面黏着条件恶化, 蠕滑曲线从“ T ”转变为“ II ”, 此时电机机械特性曲线与新的轮轨蠕滑曲线“ II ”交于 B 点。值得注意的是, B 点位于蠕滑曲线的滑动区内, 这导致车轮加速滑动, 驱动机构内的弹性应力随之释放。由于车轮的惯性和驱动机构的弹性特性, 当驱动系统的刚度和阻尼较小时, 动态滑动率(图中阴影部分所示)的变化范围会同时涵盖轮轨蠕滑曲线的黏着区和滑动区, 从而引发轮对驱动系统的黏滑振动, 对应图中的 d 状态。宏观上, 此状态表现为轮对驱动系统振动的加剧; 微观上, 则表现为轮轨接触区在黏着状态与滑动状态之间的交替变化。黏滑振动状态是一个过渡状态, 其最终演化为稳定的黏着状态或是持续的滑动状态, 取决于系统的具体状况。特别是在轮轨黏着恢复的过程中, 如果驱动系统的刚度和阻尼较低, 系统则更易于从滑动状态(图中的 c 状态)演变为黏滑振动状态(图中的 b 状态)。相比于状态 a , 状态 a' 因系统结构的刚度和阻尼较小, 故动态滑动率的变化范围更为广泛, 这使得系统更容易从黏着状态过渡到黏滑振动状态, 导致系统振动能量增加, 进而更快地进入滑动状态。此外, 这也意味着在机车恢复黏着的过程中, 轮轨间从滑动状态恢复至黏着状态所需的时间将延长[26]。

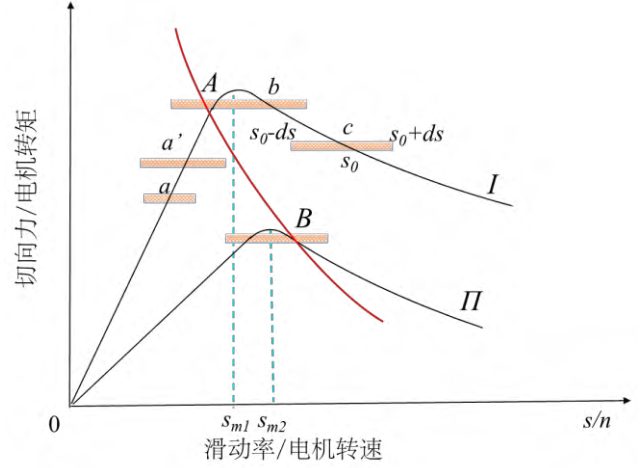


图 1 黏滑振动稳定性机理分析

Fig. 1 Analysis of stick-slip vibration stability mechanism

永磁直驱架悬驱动系统采用六连杆空心轴传动装置, 其中大量弹性关节的存在, 使得该系统的扭转刚度远低于传统抱轴式悬挂驱动系统。这导致了更大的动态滑动率变化范围, 增加了轮对空心轴架悬驱动系统机车发生黏滑振动的可能性。特别是在重载货运机车进行坡道启动时, 需要极大的牵引力, 轮轨间的黏着力几乎达到极限。如果驱动系统参数设置不当, 可能会加剧振动, 甚至引发打滑, 导致机车无法成功启动。因此, 优化这类驱动系统的悬挂参数, 对于保证机车的安全稳定运行至关重要。

2 架悬式永磁直驱轮驱系统

永磁直驱架悬驱动系统结构如图 2 所示, 图中: m_w , m_d , m_r 及 m_a 分别为轮对质量, 电机定子质量, 电机转子质量及空心轴质量; I_w , I_d , I_r 及 I_a 分别为轮对的点头惯量, 电机定子点头惯量, 电机转子点头惯量及空心轴惯量; l_1 和 l_2 分别为电机吊杆和电机吊座轮对中心纵向距离; θ_w , θ_d 及 θ_r 分别为轮对的旋转角度, 电机点头角度及电机转子旋转角度。此外, 牵引电机采用弹性架悬方式, 一侧采用压装橡胶关节的吊挂座与构架连接, 另一侧用两根压装橡胶关节的长吊杆悬挂于构架端梁, 其垂向刚度分别为 k_{zc} 和 k_{za} 。采用挠性板联轴器传递牵引力矩, 同时以适应轮对与电机之间各向位移, 其扭转刚度为 k_β 。图中各符号代表的物理意义与设计值见表 1。齿轮传动时变啮合刚度会导致系统内部激励的变化, 从而影响系统的动态响应和稳定性; 而轴系弯曲振动则可能会引入额外的动态耦合效应, 进一步复杂化系统的动力学行为。然而, 鉴于本文主要聚焦于驱动系统悬挂参数的刚度对机车重建黏着性能的影响, 在建立轮对驱动系统扭转振动模型

时, 我们做出了如下简化假设。这些假设旨在突出主要变量的作用, 以便更清晰地分析悬挂参数刚度对机车重建黏着性能的具体影响。

- 1) 系统各部件简化为集中质量 (惯量);
- 2) 系统中弹性连接简化为集中刚度和集中阻尼形式;
- 3) 不考虑齿轮传动系统的时变啮合刚度的影响;
- 4) 不考虑系统中轴系弯曲振动影响
- 5) 不考虑轮对扭转弹性。

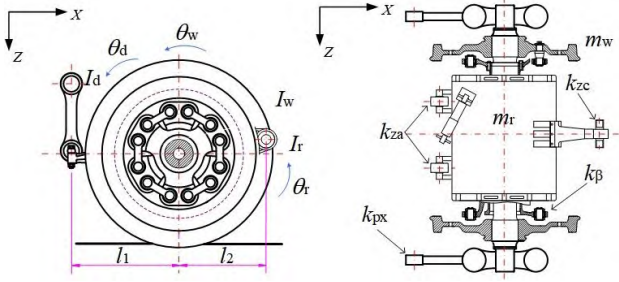


图2 架悬永磁直驱轮驱系统

Fig. 2: Bogie frame suspended permanent magnet direct drive wheel system

3 驱动系统简化模型

对于永磁直驱架悬驱动系统, 根据牵引力矩传递路径, 电机定子、转子、轮对为串联结构, 其扭转振动模型如图3所示。图中 $k_{d\theta}$ 为电机点头刚度, 由电机吊杆关节垂向刚度 k_{za} 、电机吊杆距轮对中心纵向距离 l_1 、电机吊挂座关节垂向刚度 k_{zc} 、电机吊挂座距轮对中心纵向距离 l_2 按式(3)计算得到。

$$k_{d\theta} = 2k_{za} \cdot l_1^2 + k_{zc} \cdot l_2^2 \quad (3)$$

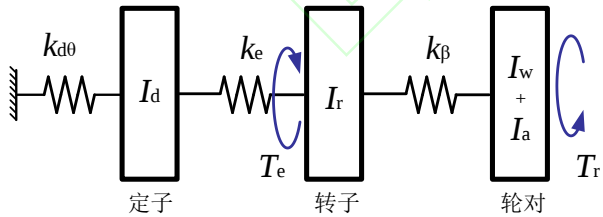


图3 架悬永磁直驱轮驱系统扭转振动模型

Fig. 3 Torsional vibration model of permanent magnet direct drive wheel drive system with suspension

轮对纵向振动固有频率可由下式得到^[25]

$$f_{wx} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{2 \cdot k_{px}}{M_x}} \quad (4)$$

$$M_x = m_w + m_d \quad (5)$$

将实际参数代入式(4)得轮对的纵向振动固有频率为 18.9 Hz。

当机车起动加速运行时, 需要牵引电机提供很大的力矩, 启动电流较正常运行时大得多, 扭转电磁刚度对电机转子的约束作用比较强^[27,28]。由于本文研究主要工况是启动工况, 因此将电机定子与转子在扭转电磁刚度作用下考虑为一整体, 得到永磁直驱架悬驱动系统理论简化如图4所示。

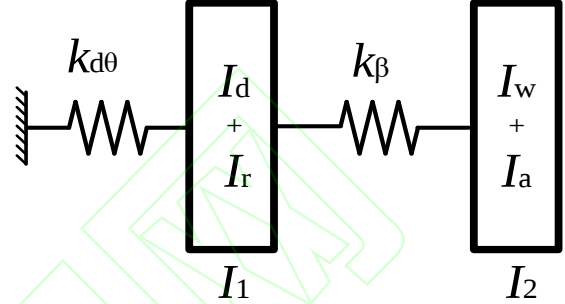


图4 驱动系统理论简化模型

Fig. 4 The simplified model of drive system theory

多自由度系统振动微分方程可以写成:

$$Ma + Cv + Kx = 0 \quad (6)$$

式中: M 、 C 和 K 分别为系统的质量、阻尼、刚度矩阵; a 、 v 和 x 分别为加速度、速度和位移矢量。

根据永磁直驱架悬驱动系统设计参数, 求解方程的特征值与特征向量, 可以得到系统固有振动频率及振型。轮对旋转振动对应的振型为一阶固有振动频率 w_1 。结合式(4)得到如图5为驱动系统共振时一系列纵向刚度对应的联轴器扭转刚度。黑线为轮对旋转振动固有频率与纵向固有振动频率相等的临界曲线。原参数一系列纵向刚度设计为 23 kN/mm, 相应的六连杆空心轴扭转刚度设计时需要避开 7 MNm/rad, 以避免共振导致的振动加剧和稳定性下降。因此, 设计时需调整参数, 使组合点远离该曲线, 确保驱动系统稳定。

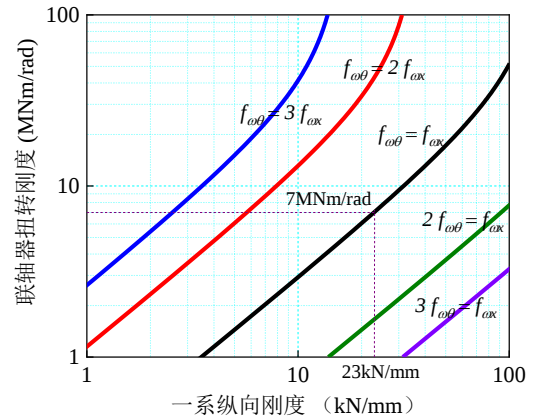


图5 一系列纵向刚度与联轴器扭转刚度共振曲线

Fig. 5 Resonance curve of primary longitudinal stiffness and torsional stiffness of coupling

4 架悬式永磁直驱机车模型

根据机车实际参数, 利用多体动力学仿真软件 SIMPACK 建立了如图 6 所示的机车动力学模型。机车转向架采用 C₀ 轴式, 轴重为 25 t, 一系悬挂采用双螺旋钢弹簧和单轴箱拉杆结构, 端轴配备了一系垂向减振器。二系悬挂采用高挠钢簧, 每侧布置了三个圆弹簧, 二系横向减振器靠近构架端梁布置。牵引装置采用向车体中部布置的端梁斜拉杆。永磁直驱电机采用弹性悬挂方式, 通过一侧的橡胶节点和另一侧的两个吊杆悬挂于构架下方, 并在摆杆一侧安装了电机横向减振器。电机扭矩通过空心轴膜片联轴器直接驱动轮对, 膜片联轴器的空心轴一端通过传力盘与转子连接, 另一端通过传力盘与车轮连接。联轴器在轮周方向具有较大的扭转刚度, 而在其他运动方向上的约束刚度较小, 允许偏转和横移运动。在本研究中, 动力学模型采用了 JM3 磨耗型车轮踏面和标准 60 kg/m 轨道形状, 能够准确模拟机车牵引运行的实际动态过程。

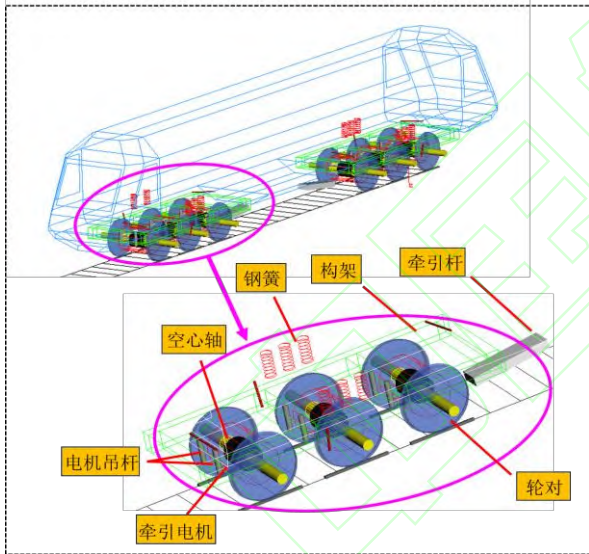


图 6 机车动力学模型

Fig. 6 Locomotive dynamic model

4.1 轮轨黏着特性

轮轨接触界面黏着条件对轮轨法向接触影响较小, 但对轮轨摩擦特性以及切向相互作用影响显著。Polach^[5]提出了一种在机车驱动动力学中广泛使用的摩擦模型。相应的公式如下:

$$\mu = \mu_0 \left[(1-A)e^{-Bs_{wr}} + A \right] \quad (7)$$

式中: μ_0 为滑动速度为 0 时的最大摩擦系数, s_{wr} 为轮轨总的相对滑动速度大小, A 为滑动速度无穷大时的摩擦系数 μ_∞ 与最大摩擦系数 μ_0 之比, B 为摩擦力衰减系数。

不同轮轨黏着状态下参数见表 1。

表 1 不同轮轨黏着状态参数

Tab.1 Parameters of different wheel-rail adhesion states

参数	轮轨黏着状态		
	干燥	湿润	油态
μ_0	0.55	0.30	0.20
A	0.40	0.40	0.50
B	0.60	0.20	0.10

4.2 仿真工况

列车以较低的速度运行在光滑的直线轨道上, 为了使机车黏滑振动现象更加明显, 不考虑轨道激励。根据机车牵引特性曲线, 机车起动牵引力为 588 kN。通过恒转矩控制, 电机转矩保持恒定, 保证机车牵引力和阻力保持平衡, 此时列车将匀速运行。本文设置机车刚开始在干燥的钢轨上匀速运行, 在 8.6s 经过一段潮湿路段, 在潮湿路段运行 4 s 后进入正常钢轨, 为了更好的让机车黏着恢复, 此时机车采用撒沙使得轮轨接触摩擦系数上升。很多研究表明^[8,29-31], 干燥的钢轨表面摩擦系数通常在 0.35~0.5 范围内, 雨雪等潮湿轨面摩擦系数可降至 0.15~0.25。此外, 干燥轨面机车施行撒沙措施后, 轨道平均摩擦系数在 0.5~0.6^[32,33]。因此本文在钢轨表面设置如下: 正常运行状态下钢轨表面摩擦系数为设置为 0.4, 潮湿状态和撒砂措施效果时分别为 0.2 和 0.5。该摩擦系数的设置与已发表文献^[23, 24]中的设置方式一致。图 7 为轨面摩擦系数的设定, 横轴是时间, 纵轴是轨道的摩擦系数。应该注意的是, 车轮与轨道的黏着性是借助于驱动系统的刚度和阻尼来恢复的, 黏着控制算法没有考虑在内。

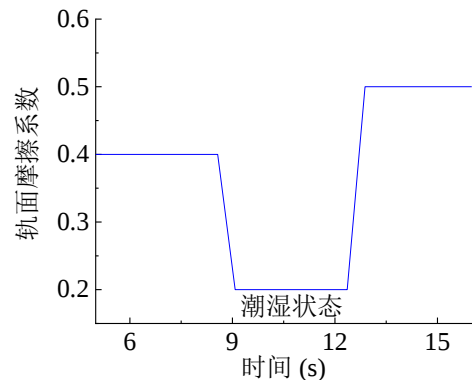


图 7 轨面摩擦系数的设置

Fig. 7 Setting of friction coefficient of rail surface

4.3 仿真结果

图 8 是不同联轴器扭转刚度和一系纵向刚度对应的轮对纵向加速度和旋转加速度的最大值分布,

图 8 (a)、(b) 的波动趋势高度一致。以图 8 (a) 为例, 当空心轴联轴器扭转刚度的增大时, 轮对纵向和旋转振动加速度最大值呈现出先降低、再增大、再降低的非单调变化规律。这一现象的物理机制可从机车起动过程的动力学行为中解释: 电机施加力矩, 轮轨间由于摩擦产生前进方向的切向力, 该切向力驱动轮对前进的同时, 驱动机构的弹性势能逐渐积累。当切向力达到黏着极限时, 由于车轮的惯性和驱动机构的弹性以及轨面黏着特性, 在轮轨间出现黏滑振动现象。此时, 悬挂刚度对系统振动的调控作用显著: 轮轨间粘着状态被破坏时, 系统匹配较大的联轴器扭转刚度和一系纵向刚度较大时, 驱动系统结构振动时会受到较大刚度的限制, 从而抑制了振动幅值的增长。反之, 当悬挂刚度较小时, 驱动系统能量释放的过程中没有受到较大刚度限值, 轮轨粘着界面的负阻尼效应会加剧系统的振动能量积累, 导致轮对驱动系统的振动极为剧烈。

然而, 在某些联轴器扭转范围内, 上述规律不适用。例如, 当空心轴联轴器的扭转刚度为 5 MNm/rad 时, 轮对的旋转加速度和纵向加速度最大值分别为 35.89 m/s² 和 4.02 m/s²; 当扭转刚度为 7 MNm/rad 时, 最大值分别增加到 50.70 m/s² 和 11.90 m/s²。与 5 MNm/rad 相比, 7 MNm/rad 时的旋转加速度和纵向加速度分别增加了 41.3% 和 196.2%。这一现象的主要原因将在 4.3 节进行详细讨论。

以上分析表明, 除了联轴器扭转刚度和一系纵向刚度较小时, 轮对驱动系统在轮轨黏着极限状态下振动极为剧烈之外, 悬挂参数刚度在某些特定的范围内, 驱动系统在仍有可能处于不稳定状态。

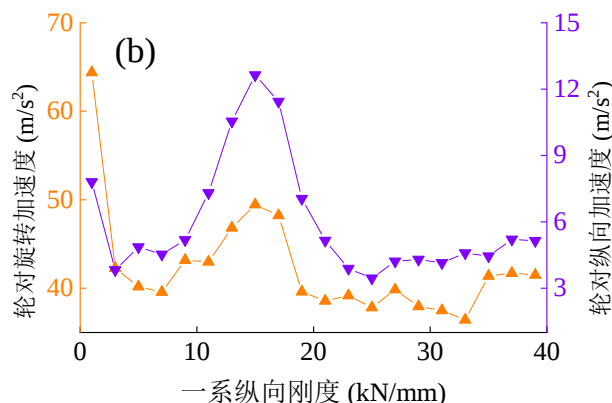
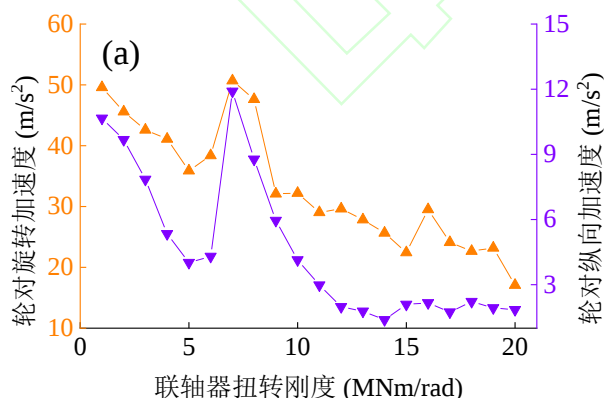


图 8 轮对角加速度和纵向加速度的最大值

Fig. 8 Maximum rotation speed and longitudinal acceleration of wheelset

4.4 驱动系统共振分析

由于轮轨黏着特性曲线负阻尼特性使得振动系统能量增大, 激发了振动系统的固有频率^[26]。针对 4.2 节分析到的特殊情况, 进一步提取轮对旋转加速度和纵向加速度频谱如图 9 所示, 橙色曲线表示轮对旋转加速度频谱, 紫色曲线表示轮对纵向加速度频谱。其中轮对纵向振动固有频率为 18.8 Hz, 这与公式 (2) 计算得到的 18.9 Hz 十分接近。

在黏着极限状态下, 轮对纵向加速度频谱和轮对旋转加速度频谱的主要成分一致, 均为轮对纵向振动固有频率、轮对旋转振动固有频率及其倍频成分。联轴器扭转刚度为 5 MNm/rad 和 9 MNm/rad 对应的轮对旋转振动固有频率分别为 16 Hz 和 20.9 Hz, 避开了轮对纵向振动固有频率 18.8 Hz。然而, 当联轴器扭转刚度为 7 MNm/rad 时, 轮对旋转振动固有频率为 19 Hz, 轮对的纵向振动固有频率与旋转振动固有频率相近, 这导致轮轨黏着极限状态下, 轮对的纵向振动与旋转振动在轮轨切向力的作用下产生耦合效应, 引发轮对纵向-旋转耦合共振, 这种共振显著放大了振动能量。这一结论也在图 8 (a) 的数据中得到了体现, 即轮对纵向和旋转加速度在联轴器扭转刚度为 7 MNm/rad 时呈现出明显的峰值, 反映了该条件下轮对驱动系统振动强度的显著增加。因此, 设计时需严格规避联轴器扭转刚度在 6~8 MNm/rad 的危险区间, 并将一系纵向刚度 (23 kN/mm) 与联轴器扭转刚度进行协同优化, 以阻断共振耦合发生, 抑制黏着极限状态下的振动加剧现象。

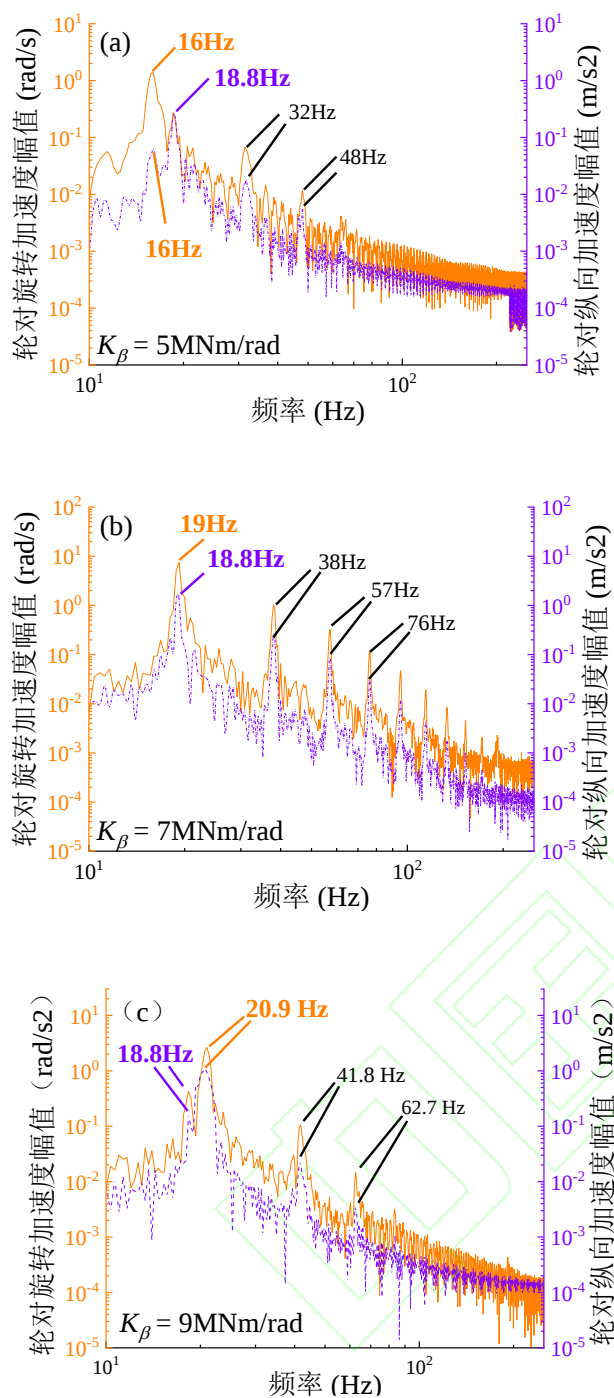


图9 轮对纵向及旋转加速度频谱

Fig. 9 Spectrum of longitudinal and rotational acceleration of wheelset

4.5 机车重建黏着性能分析

本文基于机车重建黏着恢复时间和纵向蠕滑率最大值两个指标,探讨联轴器扭转刚度对机车重建黏着性能的影响。其中,重建黏着恢复时间定义为从轮轨黏着开始恢复至纵向蠕滑率恢复正常所需的时间。图10为不同空心轴联轴器扭转刚度下机车第一轮对纵向蠕滑率的时域曲线。可以看出,

轮轨黏着状态开始恢复之后,机车表现出显著的黏滑振动特征。

当联轴器扭转刚度较小(如1 MNm/rad)时,轮轨黏着恢复过程中因负阻尼效应导致振动能量累积,引发黏滑振动加剧,此时重建黏着恢复时间达1.96 s,纵向蠕滑率峰值为0.47。随着提升至5 MNm/rad时,机车的重建黏着恢复时间缩短12.8%至1.71s,蠕滑率的峰值降低14.5%至0.4。整体改善幅度至少达到12%

然而,当联轴器的扭转刚度为7 MNm/rad时,轮对驱动系统发生了共振,导致机车的重建黏着恢复时间延长至1.90 s,纵向蠕滑率上升至0.44。与5 MNm/rad条件下相比,重建黏着时间增长了11.1%,纵向蠕滑率增加了10%。这表明联轴器扭转刚度需与一系纵向刚度合理匹配,避免共振区间,以实现黏着恢复效率与振动抑制的平衡,这对优化机车运行性能至关重要。

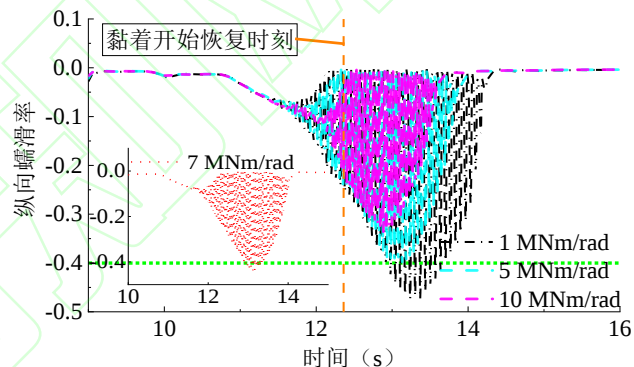


图10 不同空心轴联轴器扭转刚度对应的纵向蠕滑率

Fig. 10 Longitudinal creep rate corresponding to different torsional stiffness of hollow shaft couplings

5 结论

1) 本文建立了一个永磁直驱架悬驱动系统扭转振动的简化理论模型,并从避免共振的角度出发,研究了不同一系纵向刚度下联轴器扭转刚度的合理匹配范围。结果表明,当一系纵向刚度为23 kN/mm时,联轴器扭转刚度应避免7 MNm/rad,以防止轮对纵向-旋转共振的发生。

2) 驱动系统悬挂刚度显著影响机车重建黏着性能。适当增加联轴器扭转刚度和一系纵向刚度可以显著改善机车重建黏着性能。仿真结果显示,将联轴器扭转刚度从1 MNm/rad增加到5 MNm/rad时,机车整体重建黏着性能增大12%。

3) 仿真分析表明,当联轴器扭转刚度设置为7 MNm/rad时,轮对纵向振动固有频率(18.8 Hz)与旋转振动固有频率(19 Hz)发生耦合,导致轮对纵向-旋转共振现象。这不仅使轮对振动加速度峰值激增41.3%以上,还延长了重建黏着恢复时间,

显著恶化了机车的重建黏着性能。

参考文献:

- [1] 李华祥, 张志和, 刘鹏, 等. 大功率永磁直驱技术优势及技术难点的深入研究 [J]. 铁道机车车辆, 2020, 40(4): 50-53+93.
LI Huxiang, ZHANG Zhihe, LIU Peng, et al. In-depth study on technical advantages and technical difficulties of high power permanent magnet direct drive[J]. Railway Locomotive & Car, 2020, 40(4): 50-53+93.
- [2] 马光同, 孙振耀, 徐帅, 等. 轨道车辆永磁直驱技术综述[J]. 交通运输工程学报, 2021, 21(1):217-232.
MA Guangtong, SUN Zhenyao, XU Shuai, et al. Review on permanent magnet direct drive technology of railway vehicles[J]. Journal of traffic and transportation engineering, 2021, 21(1):217-232.
- [3] 黄志辉, 许峻峰. 直驱转向架结构特点与应用展望[J]. 机车电传动, 2013(4):67-69.
HUANG Zhihui, XU Junfeng. Structure feature and forecast of bogie driven directly[J]. Electric drive for locomotives, 2013(4):67-69.
- [4] 罗湘萍, 张文超, 吴凯桦. 永磁同步直驱电机悬挂模式研究[J]. 城市轨道交通研究, 2018, 21(4):5-7.
LUO Xiangping, ZHANG Wenchao, WU Kaihua. On the suspension type of permanent magnet synchronous motor[J]. Urban mass transit, 2018, 21(4):5-7.
- [5] 马晓光, 杨陈, 肖遥, 等. 架悬式永磁直驱转向架的动力学性能研究[J]. 铁道机车车辆, 2023, 43(5):143-150.
MA Xiaoguang, YANG Chen, XIAO Yao, et al. Study on dynamic performance of frame-mounted permanent magnet direct-drive bogie[J]. Railway locomotive & car, 2023, 43(5):143-150.
- [6] 徐艳晖. 车轮多边形对永磁直驱机车动态特性的影响研究[J]. 铁道车辆, 2024, 62(4):54-60.
XU Yanhui. Study on the impact of the wheel polygon on the dynamic characteristics of the locomotive directly driven by permanent magnet[J]. Rolling stock, 2024, 62(4):54-60.
- [7] OLOFSSON U, SUNDVALL K. Influence of leaf, humidity and applied lubrication on friction in the wheel-rail contact: Pin-on-disc experiments[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2004, 218(3): 235-242.
- [8] WANG W, SHEN P, SONG J, et al. Experimental study on adhesion behavior of wheel/rail under dry and water conditions[J]. Wear, 2011, 271(9-10):2699-2705.
- [9] 姚远, 张红军, 罗赟, 等. 黏滑振动理论及其在铁路机车中的应用[J]. 机械工程学报, 2010, 46(24): 75-82.
YAO Yuan, ZHANG Hongjun, LUO Yun, et al. Theory of stick-slip vibration and its application in locomotive[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(24): 75-82.
- [10] 崔晓璐, 唐传平, 包鹏羽, 等. 高速列车制动区段钢轨波磨抑制方法[J]. 西南交通大学学报, 2023, 58(3): 656-664.
CUI Xiaolu, TANG Chuanping, BAO Pengyu. Rail corrugation suppressing method on braking sections of high-speed trains[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2023, 58(3): 656-664.
- [11] 董雅宏, 曹树谦. 车轮高阶多边形磨耗发生与演化特征分析[J]. 西南交通大学学报, 2023, 58(3):665-676.
DONG Yahong, CAO Shuqian. Analysis of generation and evolution characteristics of wheel high-order polygonal wear[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2023, 58(3): 665-676.
- [12] 张波, 杨云帆, 凌亮, 等. 车轮多边形对重载机车轮轨相互作用及接触损伤的影响分析[J]. 西南交通大学学报, 2023, 58(6): 1339-1346.
ZHANG Bo, YANG Yunfan, LING Liang, et al. Wheel-rail interaction and rolling fatigue damage of heavy-haul locomotive subjected to wheel polygonal wear[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2023, 58(6): 1339-1346.
- [13] 张斌, 付秀琴. 铁路车轮、轮箍踏面剥离的类型及形成机理[J]. 中国铁道科学, 2001, 22(2): 73-78.
ZHANG Bin, FU Xiuqin. Type and formation mechanism of railway wheel and tire tread spall [J]. China Railway Science, 2001, 22(2): 73-78.
- [14] POLACH O. Creep forces in simulations of traction vehicles running on adhesion limit[J]. Wear, 2005, 258: 992-1000.
- [15] SPIRYAGIN M, WOLFS P, SZANTO F, et al. Simplified and advanced modelling of traction control systems of heavy-haul locomotives. Vehicle system dynamics. 2015;53(5):672-691.
- [16] SPIRYAGIN M, WOLFS P, COLE C, et al. Influence of AC system design on the realisation of tractive efforts by high adhesion locomotives. Vehicle system dynamics. 2017;55(8):1241-1264.
- [17] LATA M, VOLTR P. Identification of transient phenomena occurring at the initiation and termination of wheelset sliding. Transport. 2012, 27(1): 86-91.

- [18] COLLINA A, PRONE L, RUSPINI E, et al. Study of torsional vibrations in the powertrain of diesel locomotive during manoeuvring by means of a multi-body model. *International Journal of Heavy Vehicle Systems*. 2013, 20(2):120-143.
- [19] FRHLING R, SPANGENBERG U, REITMANN E. Root cause analysis of locomotive wheel tread polygonisation. *Wear*, 2019, 432-433:102911.
- [20] 孙翔. 高粘着利用机车的系统设计[J]. 西南交通大学学报, 1994,(3): 235-248.
- SUN Xiang. The system design of locomotives for high adhesion utilization[J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 1994,(3): 235-248.
- [21] 孙翔. 机车的传动、驱动、控制与粘着[J]. 铁道学报, 1994,(S1): 8-16.
- SUN Xiang. Relation of adhesion to power transmission, driving and system control for locomotives[J]. *Journal of the China Railway Society*, 1994,(S1): 8-16.
- [22] 吴永芳. 架悬式驱动系统振动稳定性分析[J]. 铁道学报, 1992,(2): 1-8.
- WU Yongfang. Stability analysis of the vibration of the frame-mounted motor driving system[J]. *Journal of the China Railway Society*, 1992,(2): 1-8.
- [23] YAO Yuan, ZHANG Hongjun, LI Yeming, et al. The dynamics study of locomotives under saturated adhesion. *Vehicle system dynamics*. 2011,49(8): 1321-1338.
- [24] YAO Yuan, ZHANG Hongjun, LUO Shihui. An analysis of resonance effects in locomotive drive systems experiencing wheel/rail saturation adhesion[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 2014,228(1): 4-15.
- [25] YAO Yuan, ZHAO Shiyin, XIAO Feixiong, et al. The effects of suspension parameters of wheelset driving system on the re-adhesion performance of locomotives. *Vehicle system dynamics*. 2015, 53(12):1935-1951.
- [26] 姚远, 张红军, 罗世辉. 机车黏着极限态驱动装置结构共振研究[J]. 铁道学报, 2011,33(11): 16-22.
- YAO Yuan, ZHANG Hongjun, LUO Shihui. Analysis on resonance of locomotive drive system under wheel-rail saturated adhesion[J]. *Journal of the China Railway Society*, 2011,33(11): 16-22.
- [27] 于蓬, 章桐, 孙玲, 等. 集中驱动式纯电动车动力传动系统扭转振动研究[J]. 振动与冲击, 2015, 34(10): 121-127.
- YU Peng, ZHANG Tong, SUN Ling, et al. Powertrain torsional vibration of a central-driven pure EV[J]. *Journal of vibration and shock*, 2015, 34(10): 121-127
- [28] 陈星. 车用机电复合传动系统机电耦合非线性振动研究 [D]. 北京: 北京理工大学, 2015.
- [29] S.KUMAR ,钱立新 .轮轨接触参数的实验室模拟及轮轨冲角、蛇行运动、油水污染、真实接触面积对粘着一蠕滑性能的影响[J]. 中国铁道科学, 1984, (1): 12-35.
- S.KUMAR, QIAN Lixin, Laboratory simulation of wheel and rail contact related parameters and influence of contact area, angles of attack, kinematic oscillation and water, oil contamination on wheel rail adhesion. *China railway science*, 1984, (1): 12-35.
- [30] 师陆冰, 李群, 郭俊, 等. 不同工况下轮轨黏着-蠕滑曲线特性[J]. 机械工程学报, 2019, 55(10):151-157.
- SHI Lubing, Liqun, GUO Jun, et al. adhesion-creep curve characteristics of wheel/Rail under various conditions[J]. *Journal of mechanical engineering*, 2019, 55(10):151-157.
- [31] 常崇义, 陈波, 蔡园武, 等. 基于全尺寸试验台的水介质条件下高速轮轨黏着特性试验研究[J]. 中国铁道科学, 2019,40(2):25-32.
- CHANG Zongyi, CHEN Bo, CAI Yuanwu, et al. Experimental study on adhesion property of high speed wheel and rail in wet condition by full scale roller rig[J]. *China railway science*, 2019,40(2):25-32.
- [32] 王文健, 岳子恒, 向鹏程, 等. 列车轮轨增黏撒砂过程试验模拟与撒砂效果研究[J]. 机械工程学报, 2023, 59(22):424-432.
- WANG Wenjian, YUE Ziheng, XIANG Pengcheng, et al. Study on experimental simulation of sanding process for train wheel-rail improving adhesion and sanding effect[J]. *Journal of mechanical engineering*, 2023, 59(22):424-432.
- [33] 申鹏, 王文健, 张鸿斐, 等. 撒砂对轮轨粘着特性的影响[J]. 机械工程学报, 2010,46(16):74-78.
- SHEN Peng, WANG Wenjian, ZHANG Hongfei, et al. Effect of spraying sand on adhesion characteristic of wheel/rail[J]. *Journal of mechanical engineering*, 2010, 46(16):74-78