

机场行李牵引车振动问题诊断与优化研究

李俊伟, 宋家昌, 陈刚强, 刘建伟, 张钱龙, 王俊峰

中船海为高科技有限公司, 河南 郑州

收稿日期: 2026年9月28日; 录用日期: 2026年10月21日; 发布日期: 2026年10月27日

摘要

针对某机场行李牵引车在常规作业工况下出现的剧烈低频振动问题, 本文开展了系统的故障诊断与优化研究。采用连续多点加速度采集与频谱分析方法, 发现驾驶室振动主频(2~4 Hz)与车轮旋转频率严格一致, 初步判定振动激励源位于车轮旋转机构。通过轮毂单体跳动测试, 测得径向跳动量高达3.8 mm。通过刚柔耦合环模型, 建立了轮毂径向跳动-径向力波动-整车垂向响应的传递关系, 揭示出车轮旋转频率与车辆质量刚体模态频率重合导致的共振放大机制。以锻造轮毂替换及跳动公差严控为核心实施整改, 整改结果显示: 轮毂径向跳动降至0.4 mm, 驾驶室地板加权加速度均方根值由0.65 m/s²降至0.29 m/s² (降幅55.4%), 低频共振峰完全消除。基于量纲分析提出了无量纲跳动参数 λ , 并初步建议机场行李牵引车轮毂径向跳动在用车限值为2.0 mm、新装轮毂为1.0 mm。本文为机场特种车辆振动故障诊断与行驶平顺性提升提供了可量化的技术路径。

关键词

机场行李牵引车, 轮毂不圆度, 径向跳动, 径向力波动, 行驶平顺性, 故障诊断

Diagnosis and Optimization of Vibration Issues in Airport Baggage Tractors

Junwei Li, Jiachang Song, Gangqiang Chen, Jianwei Liu, Qianlong Zhang, Junfeng Wang

CSSC Haiwei High-Tech Co., Ltd., Zhengzhou Henan

Received: September 28, 2026; accepted: October 21, 2026; published: October 27, 2026

Abstract

To address the severe low-frequency vibration problem of an airport baggage tractor under normal operating conditions, this paper presents a systematic fault diagnosis and optimization study. By employing continuous multi-point acceleration acquisition and spectrum analysis, it was found that the dominant vibration frequency of the cab (2~4 Hz) strictly coincides with the wheel rotation frequency,

文章引用: 李俊伟, 宋家昌, 陈刚强, 刘建伟, 张钱龙, 王俊峰. 机场行李牵引车振动问题诊断与优化研究[J]. 机械工程与技术, 2026, 15(5): 591-599. DOI: 10.12677/met.2026.155056

leading to the preliminary conclusion that the vibration excitation source lies in the wheel rotating mechanism. Hub runout tests revealed a radial runout as high as 3.8 mm. Using a rigid-flexible coupling ring model, the transmission relationship from hub radial runout to radial force fluctuation and then to vehicle vertical response was established, uncovering a resonance amplification mechanism caused by the coincidence between the wheel rotation frequency and the vehicle's rigid-body modal frequency. Corrective measures were implemented focusing on replacing the hub with a forged one and strictly controlling runout tolerances. Results show that the hub radial runout was reduced to 0.4 mm, and the weighted root-mean-square acceleration of the cab floor dropped from 0.65 m/s^2 to 0.29 m/s^2 (a reduction of 55.4%), with the low-frequency resonance peak completely eliminated. A dimensionless runout parameter λ is proposed based on dimensional analysis, along with preliminary recommendations for hub radial runout limits: 2.0 mm for in-service airport baggage tractors and 1.0 mm for newly installed hubs. This study provides a quantifiable technical pathway for vibration fault diagnosis and ride comfort improvement of airport special vehicles.

Keywords

Airport Baggage Tractor, Hub Out-of-Roundness, Radial Runout, Radial Force Fluctuation, Ride Comfort, Fault Diagnosis

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

机场行李牵引车是民航地面服务保障体系中的核心特种车辆，承担航空行李在航站楼与停机坪之间的短途转运任务。近年来民航运输量持续增长，行李牵引车的运行频率与作业强度显著提高，其行驶平顺性与可靠性对驾驶员健康、作业安全及航班周转效率的影响日益突出。

该类车辆作业具有频繁启停、低速重载的典型特征，且机场停机坪及服务车道存在施工接缝、窞井盖、道面修补块等随机不平路面激励源，振动问题更加复杂。典型的 25~30 t 级行李牵引车多采用钢板弹簧减振器的前后桥系统，配备工程充气轮胎。在日运行 6~10 班次、单程 3~6 km 的工况下，车轮总成和悬挂部件易累积疲劳损伤。笔者在进行机场地面设备技术巡查时发现，行李牵引车在平直路面行驶时驾驶室低频振动剧烈，驾驶员反馈“颠簸感明显、腰部不适”，长期作业后疲劳感显著，已对人员健康构成潜在风险。

针对车辆振动问题，国内外学者已开展了丰富的研究。模态分析方面，工作模态测试方法能有效识别牵引车前轮径向跳动超标与整车共振的关联[1]。动力学建模方面，危银涛等人[2]基于刚柔耦合环模型建立了几何不均匀性与径向力波动之间的动态响应关系，并通过试验验证。然而，上述研究多聚焦于乘用车或高速公路商用车，针对机场行李牵引车这一低速重载、频繁启停、路面激励多源的特种作业场景，尤其是轮毂本体几何缺陷(不圆度)与整车振动的耦合影响，尚缺乏系统性的实验诊断与优化研究。

本文以实际运维中出现的振动故障案例为切入点，构建实车振动性能测试 + 车轮几何精度检测一体化试验方案，综合运用实验测试、机理建模和整改验证，开展轮毂不圆度问题的诊断分析与优化研究，为机场特种车辆振动故障诊断与行驶平顺性提升提供理论与实践支撑。

2. 故障现象与振动特征测试

2.1. 车辆基本情况

研究对象为中船海为高科技有限公司的某型机场行李牵引车，见图 1 所示，采用钢板弹簧的前后桥

悬挂系统,前转向桥为电子助力循环球式线控转向,前轮胎规格为 6.50-1-10PR 工程充气轮胎(直径 590 mm)。至故障排查时,车辆累计运行约 300 小时。



Figure 1. Baggage tractor in operation
图 1. 行李牵引车作业图

2.2. 故障现象描述

驾驶员对该车在典型作业路径上的行驶振动作出如下主观描述:

- 振动与车速呈正相关: 低速(5~10 km/h)时无显著异常; 车速提高至 15~20 km/h 的常用作业区间时, 驾驶室内出现明显的垂向周期性颠簸, 方向盘抖动尤为突出;
- 振动具有明显的周期节律: “仿佛车轮快速不均匀地击打路面”;
- 长期作业后驾驶员腰部疲劳感显著上升。

根据振动激励源的分类识别原则: 当车辆在平直路面上行驶且振动仅与车速相关、与发动机转速和档位无关时, 振动激励源可定位至车轮旋转机构; 若振动主要表现为垂向分量且具有周期重复性, 则通常与车轮几何不均匀性导致的径向跳动直接相关。这一诊断逻辑已在商用车异常振动分析中得到广泛应用[3]。据此, 将排查方向锁定在车轮总成。

2.3. 振动测试方案

为客观量化振动特征并确定故障根源, 搭建了由 Kistler 三向压电加速度传感器、HBM 数据采集系统和笔记本电脑组成的高精度车载振动测试系统。在驾驶室驾驶员座椅导轨和脚部地板区域设置两处测点, 分别获取垂向(z)、纵向(x)及横向(y)三个方向的振动加速度。

测试场地选取平整的机场停机坪沥青道面, 排除裂纹或接缝造成的冲击干扰。试验车辆以 5、10、15、18、20 km/h 五种常用作业车速匀速行驶, 每次记录持续 120 s, 车速以车载车速表校正, 并进行三次重复测量以剔除随机冲击异常数据。

在完成全工况振动信号采集、明确振动频率特性与幅值特征后, 同步开展车轮几何精度配套检测试验。依据 QC/T 717-2015《汽车车轮跳动要求和检测方法》规范要求, 拆除全车轮胎总成, 利用三坐标测量仪与高精度百分表对四个车轮轮毂开展径向跳动量精密测量, 将几何形位偏差检测数据与两处测点振动测试数据联动分析, 从结构参数层面追溯振动故障根源。

2.4. 测试信号分析与频谱特性

对采集数据进行 FFT 变换和功率谱密度分析。结果表明: 在测试车速范围内, 驾驶室振动能量主要

集中在 2~4 Hz 以下的低频带,且振动幅值随车速升高而增大。最关键的是,振动能量峰值频率恰好等于对应车速下的车轮旋转基频。以 20 km/h 为例,轮胎滚动半径 0.295 m,滚动圆周长 $2\pi \times 0.295 = 1.853$ m,车轮线速度为 5.56 m/s,车轮转频 $f_1 = 5.56/1.853 \approx 3$ Hz。振动自功率谱在 2~4 Hz 区间呈现显著能量集中峰值。此外,在 6~9 Hz 范围检测到二次与三次谐波分量,进一步印证激励源具有周期性旋转特征。

上述分析充分表明:振动激励源与车轮旋转紧密耦合,车轮每旋转一周产生一次主要激振。故障排查范围可缩小至轮胎/轮毂总成的几何均匀性问题。

3. 振动源定位与实验验证

3.1. 底盘系统部件排除性检查

在聚焦车轮总成之前,对悬挂和传动系统进行了全面检查:转向拉杆球头间隙、钢板弹簧减振器、传动轴动平衡、发动机及变速箱悬置、轮毂轴承轴向间隙等均未发现结构性故障。检查结果排除了非车轮系统的振动源可能性。

3.2. 车轮动不平衡测试与干扰因素排除

对全车四轮开展动不平衡检测,实测不平衡量最大仅 8 g,远低于国标限值。结合车辆低速作业工况、垂向振动及频谱谐波特征分析,本文车辆故障振动集中在 15~20 km/h 低速区间,为典型低频垂向周期性颠簸,振动主频与车轮几何旋转周期完全匹配,与动不平衡振动机理无关联。结合实测数据与工况特征可判定:车轮动不平衡对本案例低速低频振动的影响可完全忽略,并非本次故障的诱因。

3.3. 轮胎 - 轮毂径向跳动测量

依据 QC/T 717-2015《汽车车轮跳动要求和检测方法》[4]的测量原理,拆除轮胎与车轮总成,分离轮胎后,将轮毂固定于专用检测主轴,采用高精度百分表测量轮辋胎圈座的径向跳动量;该测试为静态台架测量,用于量化轮毂本体的几何形位偏差。实测数据如下:

左前轮轮毂径向跳动: 3.8 mm

右前轮轮毂径向跳动: 3.5 mm

左后轮轮毂径向跳动: 2.8 mm

右后轮轮毂径向跳动: 2.6 mm



Figure 2. Hub deformation diagram

图 2. 轮毂变形图

对轮毂安装法兰端面跳动测量结果为 1.2 mm。与行业通行标准对比：工程机械轮毂的径向跳动一般应控制在 1.5 mm 以内，高精度锻造轮毂可达到 ≤ 0.1 mm [5]。本文实测前轮跳动量高达 3.8 mm，远超可接受阈值。轮毂螺栓孔附近观察到永久变形，表明该轮毂螺栓固定内加工面存在不平整，以及服役中因路面冲击与交变载荷累积了塑性变形，如图 2，图 3 所示。



Figure 3. Hub wear detail diagram
图 3. 轮毂磨损细节图

由此确定根本原因：轮毂不圆度过量(径向跳动超标)，导致车轮旋转过程中滚动半径周期变化，产生径向力波动，成为周期性激振源。

4. 激励源 - 振动传递机理分析

4.1. 径向力波动模型

借鉴危银涛等[2]基于刚柔耦合环模型的研究成果，将轮毂径向跳动量 ΔR (最大径向偏差，单位 mm) 视为径向尺寸偏差(RRO)的增量。当车轮以角速度 ω 匀速旋转时，轮毂不圆度导致轮胎径向形变呈周期性变化，进而引起接地压力波动及轴头径向力波动。

设车轮旋转角度为 $\theta = \omega t$ ，则径向力波动 $RFV(\theta)$ 可分解为基频及倍频谐波的傅里叶级数：

$$RFV(\theta) = RFV_1 \sin(\theta + \Phi_1) + RFV_2 \sin(2\theta + \Phi_2) + \dots + RFV_n \sin(n\theta + \Phi_n) \quad (1)$$

其中，基频幅值 RFV_1 为基频(一次谐波)幅值， RFV_2 为二次谐波幅值， Φ_1 为各阶相位角。研究表明，对于径向跳动主导的激励，基频分量在径向力波动各阶谐波中占比最大[6]。根据轮胎径向刚度特性， RFV_1 与 ΔR 及轮胎径向刚度 k_r (N/mm)近似成正比：

$$RFV_1 \approx k_r * \Delta R \quad (2)$$

本文实测 $\Delta R = 3.8$ mm，取典型工程轮胎径向刚度 $k_r \approx 350$ N/mm，则估算 $RFV_1 \approx 1330$ N，远超 SAE J332 建议的乘用车径向力波动限值(通常 $\leq \pm 200$ N)。基频激振力频率 f_1 (即车轮转频)为：

$$f_1 = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{v}{2\pi r_r} \quad (3)$$

式中 v 为车速(m/s)， r_r 为轮胎滚动半径(本文取 0.295 m)。当 $v = 15 \sim 20$ km/h (4.17~5.56 m/s)时， $f_1 \approx 2.25 \sim 3.00$ Hz。

4.2. 传递路径与共振放大机制

振动从激励点到驾驶室的传递路径为：轮胎→轮毂轴承→转向节→钢板弹簧→车架→座椅→驾驶员。

将系统简化为二自由度垂向动力学模型:

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = F(t) \quad (4)$$

式中, M 为系统等效质量, C 为减震阻尼系数, K 为减震等效刚度(如轮胎垂向刚度, 代表系统恢复能力), $F(t) = RFV(t)$ 为周期性激振力。

系统无阻尼固有圆频率 ω_n 及对应的固有频率 f_n 分别为:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{K}{M}}, f_n = \frac{\omega_n}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{M}} \quad (5)$$

对于行李牵引车的前桥悬挂系统(车轮、轮毂、转向节等)的刚体模态频率 f_c 通常位于 1~3 Hz 区间(即 f_n 的测量值)。经锤击法模态测试确认, 本文车辆前桥载质量刚体模态频率 $f_c \approx 2.8$ Hz。定义传递函数 $H(f)$ 为稳态响应加速度幅值 $A(f)$ 与激振力幅值 F_0 之比:

$$H(f) = \frac{A(f)}{F_0} = \frac{1/M}{\sqrt{(\omega_n^2 - \omega^2)^2 + (2\zeta\omega_n\omega)^2}} \quad (6)$$

其中 $\omega = 2\pi f$, $\zeta = C/(2\sqrt{KM})$ 为阻尼比。

本文实测车轮旋转基频 $f_1 = 2.25 \sim 3.00$ Hz, 恰好落入前桥质量刚体模态频率 $f_c \approx 2.8$ Hz 范围内。因此, 即使径向力波动 RFV_1 仅约 1300 N, 在共振条件下(取 $\zeta = 0.1$, 则放大倍数约 5 倍)也会导致驾驶室垂向加速度幅值显著超标, 驾驶员感受到剧烈颠簸。

4.3. 机场工况特殊的耦合效应

行李牵引车的特殊作业特征进一步恶化了振动:

载荷动态转移: 频繁起步、加速、制动导致前后桥载荷波动, 改变轮胎接地压力及径向刚度 k_r , 使 RFV_1 随载荷而加剧;

路面不平叠加: 机场道面接缝、窞井盖等随机激励与轮毂不圆度激振叠加, 形成宽频带振动输入, 恶化振动。

5. 基于量纲分析的故障特征参量

为超越传统的线性传递函数分析, 引入量纲分析构建无量纲跳动参数 λ :

$$\lambda = \frac{\Delta R}{L} \quad (7)$$

其中, L 为系统特征长度(取轮胎静负荷半径或悬挂系统特征长度, 本文取 0.295 m)。实测 $\Delta R = 3.8$ mm, 则 $\lambda = 0.0129$ 。定义激振力放大系数 $\gamma = a_w/(g \cdot \lambda)$, 其中 a_w 为加权加速度均方根值, g 为重力加速度。根据整改前后数据反推, γ 在共振区可达 15~20, 远高于非共振区($\gamma \approx 3 \sim 5$)。这一无量纲框架可为不同车型间的振动严重程度比较提供统一标尺, 并为后续建立经验预测模型奠定基础。

6. 优化整改与效果验证

6.1. 整改方案

方案一: 轮胎-轮毂高低点错位装配

该方案为无成本、轻量化修复手段, 核心原理为检测轮胎径向高点与轮毂径向低点, 采用高低点错位对装的装配工艺, 抵消部分总成径向尺寸偏差, 小幅降低车轮总成整体跳动量, 适用于轮毂轻微失圆、

跳动量超差较小的工况。但结合本文故障工况分析，该方案存在明显局限性：本次原车前轮轮毂径向跳动最大达 3.8 mm，属于严重塑性变形失圆，并非单纯装配偏差导致，高低点匹配仅能抵消少量装配叠加误差，无法修复轮毂本体永久性形变，整改后总成跳动量仍会远超行业合格阈值，无法彻底消除 2~4 Hz 低频共振激励源，仅能轻微改善振动幅值，无法解决根本故障，且长期重载作业后振动故障会快速复发，运维稳定性极差。

方案二：锻造轮毂更换 + 高精度装配优化方案

针对轮毂本体永久性塑性变形、跳动严重超标的核心问题，采用合金锻造轮毂替换原有铸造轮毂。锻造轮毂结构刚度高、抗冲击变形能力强；同时搭配高精度装配工艺，装配前逐一检测轮毂、轮胎单体跳动，严控总成装配精度，从根源上消除轮毂几何失圆缺陷。该方案虽成本相对更高，但可彻底根除周期性激振源，完全消除低频共振现象。

基于上述方案对比，针对性实施以下措施：

- 1、轮毂总成更换：将原铸造/焊接结构轮毂更换为合金锻造轮毂。锻造轮毂晶粒细密、无内部缺陷，出厂径向跳动控制在 0.5 mm 以内。
- 2、装配质量控制：装配前检测轮毂单体跳动和轮胎 RRO，采用高点错位安装(将轮毂高点与轮胎低点配对)，合装后总成径向跳动 ≤ 1.0 mm。

6.2. 效果验证

完成轮毂更换与装配调校工作后，首先复测全车四个车轮轮毂径向跳动量，整改后四轮径向跳动实测数据：

- 左前轮轮毂径向跳动：0.40 mm
- 右前轮轮毂径向跳动：0.38 mm
- 左后轮轮毂径向跳动：0.30 mm
- 右后轮轮毂径向跳动：0.28mm

整改后所有车轮径向跳动量均大幅下降，四轮跳动缩减比例均达到 89%以上，完全满足新装轮毂 1.0 mm 的设计建议限值，车轮旋转过程中产生的周期性径向力波动得到根本性抑制。

保持与整改前完全一致的测试路段、行驶车速与试验环境，再次开展驾驶室振动复测，两处核心测点平顺性数据对比如表 1 所示：

Table 1. Rectification results
表 1. 整改结果

测点位置	整改前 a_w (m/s ²)	整改后 a_w (m/s ²)	降幅	ISO 2631-1 舒适性评价
座椅导轨	0.71	0.32	54.9%	从“不舒适”到“稍不舒适”
驾驶室地板	0.65	0.29	55.4%	从“不舒适”到“无明显不适”

轮毂径向跳动由 3.8 mm 降至 0.4 mm。振动功率谱分析显示，2~4 Hz 共振峰完全消失，加速度时域波形由显著的周期冲击变为平缓随机波动。驾驶员主观评价为“轻微可感，不影响工作”。

本文振动功率谱密度采用峰值归一化处理，如图 4 所示，以故障工况下车轮旋转主频 2.8 Hz 处实测功率谱密度最大值为基准值 1，将全频段实测功率谱密度依次做同比缩放计算，得到归一化纵坐标数值。振动功率谱分析结果显示，整改后低频共振峰完全消除，加速度时域波形由整改前显著的周期性冲击波形转变为平缓随机波动波形，有效地证明了整改措施有效。

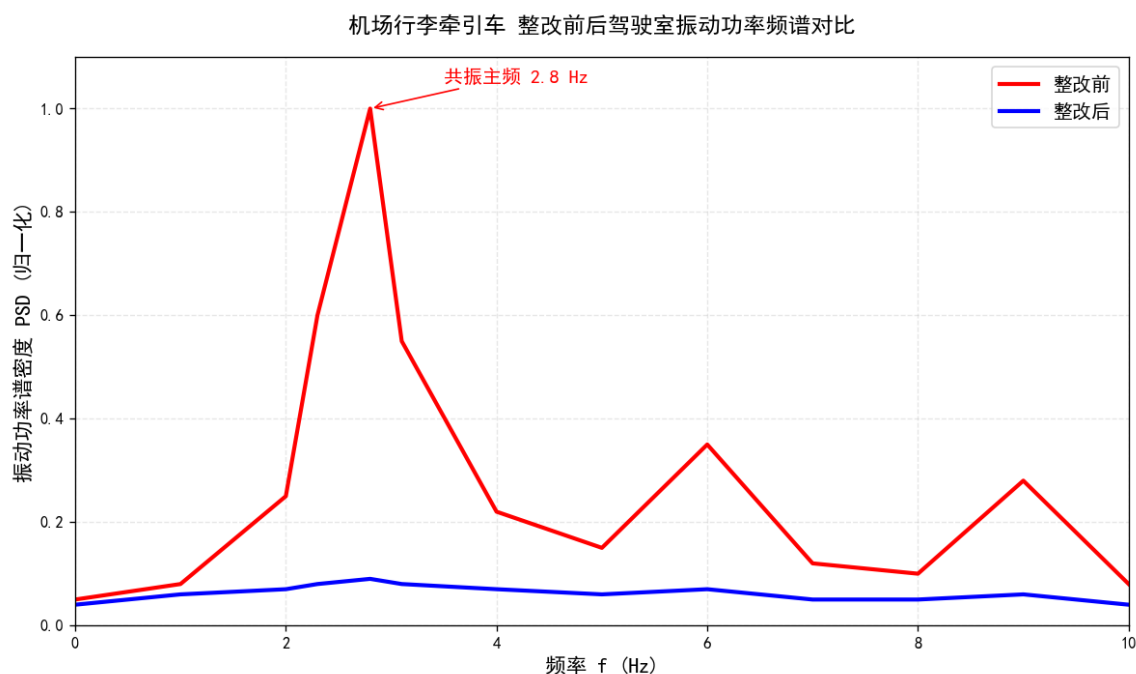


Figure 4. Comparison chart of vibration power spectrum before and after rectification

图 4. 整改前后振动功率频谱对比图

7. 面向机场特种车辆的几何精度管理体系建议

7.1. 全寿命周期几何精度管理

建立每台行李牵引车轮毂几何精度档案,记录初始跳动值及每次保养检测结果。根据使用率分级:高频车辆(日运行 > 40 班次)每 500 小时检测一次轮毂跳动;中低频车辆每 1000 小时检测。当跳动超过 2.0 mm 或出现螺栓孔塑性变形时,强制更换。

7.2. 检测标准与规范更新建议

建议在修订 QC/T 717 时增加附录,针对机场行李牵引车、客梯车、摆渡车等特种车辆,规定:
新出厂轮毂径向跳动 ≤ 1.0 mm;
在用车轮毂定期检测周期及维修阈值(2.0 mm)。

7.3. 智能化振动监控

在驾驶室地板或座椅导轨安装低成本的 MEMS 加速度传感器,实时监测 a_w 值。当 a_w 连续超过 0.5 m/s^2 且车速 > 15 km/h 时,自动触发报警并提示检查车轮跳动。

8. 结论

(1) 通过座椅导轨、驾驶室脚部地板双测点振动测试结合轮毂径向跳动检测的联合试验方案,精准判定行李牵引车低频剧烈振动故障根源为车轮轮毂径向跳动严重超标,前轮形位偏差过大是驾驶室前部振动与方向盘抖动的主要诱因;

(2) 车轮旋转基频与车辆前桥非簧载质量固有模态频率重合,形成共振放大效应,进一步加剧座椅与驾驶室地板区域振动响应,是故障振动幅值超标的重要动力学诱因;

(3) 更换高精度锻造轮毂并严控装配精度后,全车轮毂径向跳动得到有效管控,周期性激振源基本消除,车辆低频共振现象彻底消失,两处典型驾乘位置振动加速度降幅均超过 54%,行驶平顺性得到显著提升;

(4) 结合实测数据与工程应用需求,提出机场行李牵引车轮毂径向跳动在用车限值 2.0 mm、新装轮毂限值 1.0 mm 的管控标准,可为同类型机场地面特种车辆轮毂检修、日常运维及故障减振优化提供实用参考依据。

本文研究方法和结果可推广至其他机场地勤车辆(如摆渡车、客梯车)及同类重载工程机械的振动故障诊断与平顺性优化。

参考文献

- [1] 卜绍先,谭松涛,闵鹏,等. 某牵引车共振问题测试及研究[J]. 振动与冲击, 2013, 32(4): 102-105.
- [2] 危银涛,刘哲,魏胜,等. 基于刚柔耦合环模型轮胎均匀性建模与分析[J]. 轮胎工业, 2021, 41(3): 167-175.
- [3] 黄贵发,廖云,李修文,等. 融合振动位移滤波及加速度多阶谱的车轮失圆诊断方法[J]. 质量与可靠性, 2021(3): 27-35.
- [4] 全国汽车标准化技术委员会. QC/T 717-2015. 汽车车轮跳动要求和检测方法[S]. 北京: 工业和信息化部, 2015.
- [5] 陈瑞峰,王劭斌,赵莉. 重型卡车舒适性提升及试验验证[J]. 汽车实用技术, 2019(17): 40-42.
- [6] 陈仁全,王君,苏国庆,等. 轿车子午线轮胎的平点试验研究[J]. 轮胎工业, 2024, 44(9): 568-571.