

轨道车辆轮轨作用力DIC检测方法研究

杜雨露¹, 卢萍^{2*}, 崔大宾¹

¹西南交通大学机械工程学院, 四川 成都

²成都工业职业技术学院轨道交通学院, 四川 成都

收稿日期: 2026年5月8日; 录用日期: 2026年6月1日; 发布日期: 2026年6月8日

摘要

针对传统轮轨力接触式测量方法在服役状态连续检测和无损监测方面存在的不足, 本文采用三维数字图像相关法(3D-DIC)开展轨道车辆轮轨力非接触检测研究。获取了深盆形车轮在静态加载工况下观测区域的位移场, 分析了单一载荷与复合载荷作用下的位移响应特征, 并提取观测区域Y方向和Z方向的空间平均位移作为识别特征量。基于单一载荷标定试验, 建立了轮轨力识别模型, 并在复合工况下进行了验证。结果表明: 所建立的轮轨力试验解耦方法能够较好实现轮轨力的非接触识别, 在当前静态台架试验条件下, 垂向力和横向力识别的平均相对误差分别为4.49%和5.96%。研究结果验证了在室温静态台架条件下3D-DIC用于轮轨力非接触识别的工程可行性, 可为轮轨作用状态监测提供方法提供参考。

关键词

轮轨力, 数字图像相关, 非接触式测量

Research on a DIC-Based Measurement Method for Wheel-Rail Forces of Railway Vehicles

Yulu Du¹, Ping Lu^{2*}, Dabin Cui¹

¹School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu Sichuan

²Rail Transit College, Chengdu Vocational & Technical College of Industry, Chengdu Sichuan

Received: May 8, 2026; accepted: June 1, 2026; published: June 8, 2026

Abstract

To address the limitations of traditional contact-based wheel-rail force measurement methods in

*通讯作者。

continuous in-service measurement and non-destructive monitoring, a non-contact measurement method for wheel-rail forces of railway vehicles based on three-dimensional digital image correlation (3D-DIC) was investigated. The displacement field of the observation region on a deep-dish wheel under static loading conditions was obtained, and the displacement response characteristics under single and combined loading conditions were analyzed. The spatial average displacements in the Y and Z directions of the observation region were extracted as identification features. Based on single-load calibration tests, a wheel-rail force decoupling model was established and validated under combined loading conditions. The results show that the proposed decoupling method can effectively realize non-contact identification of wheel-rail forces. Under the current static bench test conditions, the average relative errors of the identified vertical and lateral forces are 4.49% and 5.96%, respectively. These results verify the engineering feasibility of applying 3D-DIC to the non-contact identification of wheel-rail forces and provide methodological support for monitoring wheel-rail interaction states.

Keywords

Wheel-Rail Force, Digital Image Correlation, Non-Contact Measurement

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

随着我国铁路运输向高速化、重载化发展,轮轨之间的相互作用不断增强,直接影响车辆运行的安全性和稳定性[1][2]。其中,轮轨垂向力和横向力的异常变化与车辆蛇行失稳、超偏载运行、轮轨冲击加剧以及相关零部件磨损演化密切相关[3]。因此,准确获取轮轨力对于车辆状态监测、运行安全评估及检修维护具有重要意义。目前,轮轨力检测方法主要分为地面检测法[4]和车载检测法[5]。地面检测法能够检测固定测试区段内所有车辆的轮轨力,但难以反映列车在全线路运行过程中的连续响应特征;车载检测法能够获取车辆沿整条线路运行过程中的连续轮轨力信息,但测量系统布设复杂,且部分方案涉及车轮打孔等结构改动,使其难以应用于运营载客的车辆。针对传统轮轨力接触式测量方法在服役状态连续检测和无损监测方面存在的不足,有必要探索一种轮轨力非接触检测方法。

数字图像相关法(Digital Image Correlation, DIC)是一种非接触式光学测量方法[6][7],当被测物体发生变形时其表面散斑图像也会随之改变,通过采集处理变形前后的散斑图像,可以提取相应的变形信息[8]。由于其具备非接触、全场测量及测量精度高等优势, DIC 已在实验力学领域得到广泛应用[9]。近年来, DIC 也已在铁路相关结构裂纹监测与轨道变形评估等研究中得到应用[10][11],显示出其在铁路运输领域非接触测量中的应用潜力。本文以深盆形车轮为研究对象,采用三维数字图像相关(3D-DIC)技术对轮轨力检测试验展开了研究。通过静态加载试验获取车轮辐板观测区域的三维位移场,提取区域空间平均位移作为特征量,建立轮轨力识别模型,并验证该方法的可行性。

2. 试验概况

2.1. 试验系统与边界约束

试验以深盆形车轮作为研究对象,构建了由静态加载装置和双目视觉测量装置组成的轮轨力检测系统。静态加载装置主要由异高承载立柱支撑工装、机械螺旋千斤顶、分离式液压千斤顶、传力转接工装

及压力传感器组成。为减小静态加载过程中台架自身变形对 DIC 测量结果的影响, 试验台架整体固定于重型刚性铸铁平台上, 底座通过 T 型槽和高强螺栓进行约束。考虑到深盆形车轮安装面与外侧轮缘面之间存在轴向高度差, 同时需要预留车轮固定和加载作业空间, 试验中采用异高双立柱支撑工装。被测车轮采用倒扣反置安装, 轮毂孔通过螺栓与主承载立柱法兰盘连接, 从而对车轮内侧轮毂区域形成稳定支承。该安装方式可近似等效车轴对车轮内侧的物理约束边界, 试验台架结构如图 1 所示。

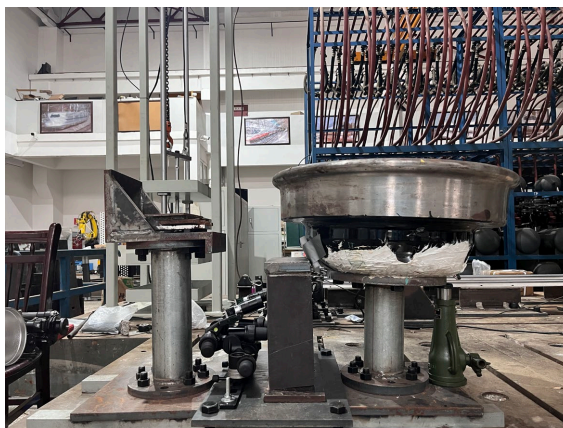


Figure 1. Structure of the test bench
图 1. 试验台架结构图

垂向载荷加载时, 机械螺旋千斤顶沿车轮径向方向作用于车轮踏面预设模拟轮轨接触基准位置, 用于等效轮轨垂向力, 压力传感器布置于千斤顶底座与支撑平台之间, 用于实时记录加载过程中的实际施加载荷。横向载荷加载时, 为避免加载装置遮挡双目相机观测视线, 采用分离式液压千斤顶配合传力转接工装施加横向载荷。加载前调整传力转接工装位置, 使横向载荷作用点与车轮踏面预设模拟接触位置处于同一等效径向高度, 并保证横向载荷加载方向与车轮轴向一致。压力传感器布置于液压千斤顶输出端与传力转接工装之间, 用于直接获取横向施加载荷, 避免仅通过液压力换算载荷引入误差。现场加载方式如图 2 所示。

双目视觉测量装置主要由两台工业相机、镜头、LED 照明灯、相机支架及计算机组成。在稳定的照明条件下, 将两台面阵相机固定于多自由度三维云台上, 调节两台相机光轴的相对夹角保持在 $20^{\circ}\sim 30^{\circ}$ 之间, 确保双目公共视场能够稳定覆盖的散斑观测区, 再通过调节双目镜头的对焦环与光圈, 直至被测区域散斑图像成像清晰。



Figure 2. Experimental setup: (a) vertical loading; (b) lateral loading
图 2. 现场试验图: (a) 垂向载荷加载; (b) 横向载荷加载

2.2. 散斑制备

根据有限元分析结果,选取车轮外侧辐板靠近轮毂的平缓区作为观测区域,定义Y方向为车轮轴向,Z方向为车轮径向。散斑设计时将颗粒尺寸控制在3~5 pixels,散斑密度约为50%;综合视场范围和计算效率,散斑尺寸设置为约65 mm×45 mm,以满足数字图像相关测量对散斑质量的要求。在粘贴散斑前,先对车轮观测区域表面进行打磨处理,并喷涂哑光白漆作为底层,通过水转印方式将散斑均匀贴合于观测区域表面,图3为左右相机拍摄观测区散斑图像。试验前,利用圆点标定板对双目视觉系统进行姿态标定,获得相机内外参数并完成镜头畸变校正。

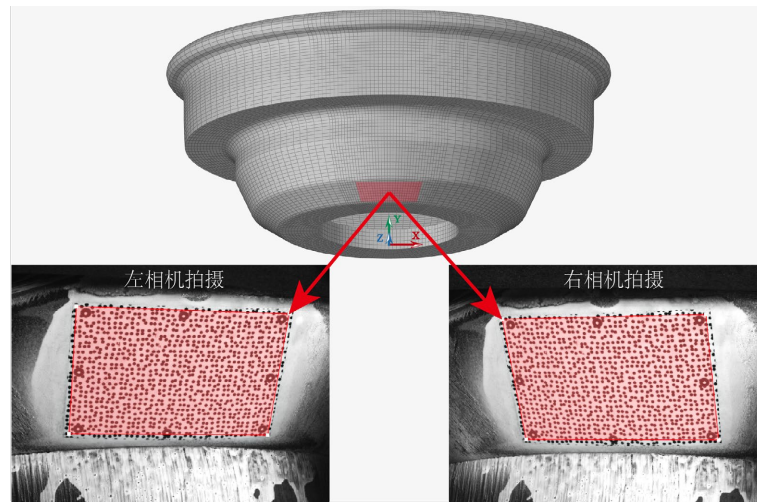


Figure 3. Speckle images captured by the left and right cameras
图3. 左右相机拍摄的散斑图

2.3. 试验工况与图像采集

试验加载分为垂向载荷标定、横向载荷标定和复合验证三个阶段。垂向载荷标定和横向载荷标定均以10 kN为步长逐级加载至50 kN;复合验证阶段设置5组不同脱轨系数特征的组合载荷工况,如表1所示。图像采集采用同步触发方式进行,采集帧率为60 fps。各载荷级稳定后连续采集1 s图像序列,每级获得60帧散斑图像。试验过程中同步记录压力传感器实测载荷,后续分析中以其作为实际加载值。

Table 1. Settings of experimental loading conditions

表1. 试验工况设置

试验阶段	工况编号	垂向载荷 F_y (kN)	横向载荷 F_x (kN)
垂向载荷标定	V1~V5	0, 10, 20, 30, 40, 50	0
横向载荷标定	L1~L5	0	0, 10, 20, 30, 40, 50
复合验证	C1	50	10
	C2	45	5
	C3	40	20
	C4	30	10
	C5	20	15

3. 试验结果与分析

3.1. 位移场分布特征

以 0 kN 无载荷状态作为参考, 对各工况下采集的散斑图像进行逐帧相关计算、三维重建、稳定阶段时域平均及零载荷基准修正, 得到垂向载荷和横向载荷作用下观测区域不同方向的平均位移云图, 如图 4 和图 5 所示。

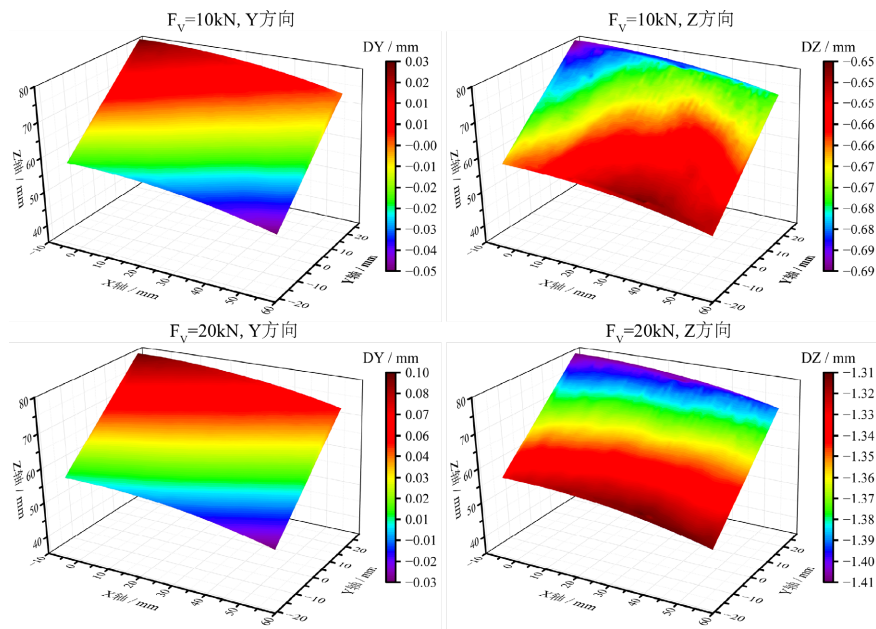


Figure 4. Displacement contour map under vertical load

图 4. 垂向载荷作用下位移云图

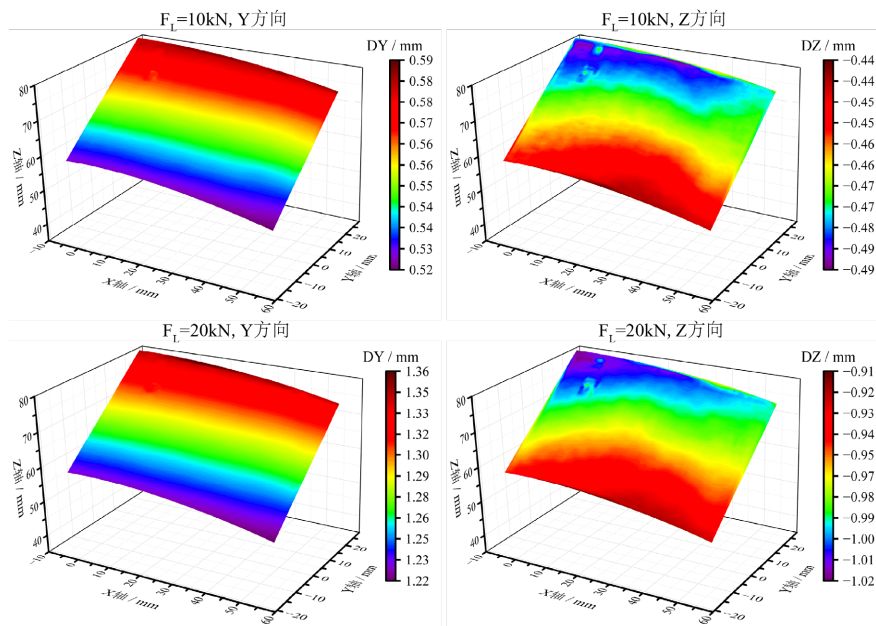


Figure 5. Displacement contour map under lateral load

图 5. 横向载荷作用下位移云图

在垂向加载工况下，Y 方向位移场整体呈连续平顺的带状分布，随载荷增大主要表现为位移幅值递增，而分布形态基本保持一致；Z 方向位移场则表现为沿径向负方向的整体压缩响应，其绝对值随载荷增加持续增大。值得注意的是，10 kN 时 Z 方向位移场等值带仍存在一定起伏，而 20 kN 后梯度特征明显增强，整体分布趋于平滑，表明低载阶段局部接触非线性和连接间隙压实对位移场存在一定影响。

在横向加载工况下，Y 方向位移场主要体现为沿轴向正方向的整体侧移，且不同载荷级下空间分布格局基本不变；Z 方向位移场则呈现一定的弯扭耦合特征，表现为弧形带状分布及局部非对称起伏。综合来看，观测区域在单向载荷作用下具有较好的位移场连续性与响应稳定性，能够较可靠地反映载荷变化规律。

3.2. 试验解耦方程

为建立轨轮力识别关系，进一步提取了各级单向载荷作用下观测区域内所有有效测点的空间平均位移，图 6 给出了不同方向平均位移与施加载荷之间的拟合关系。

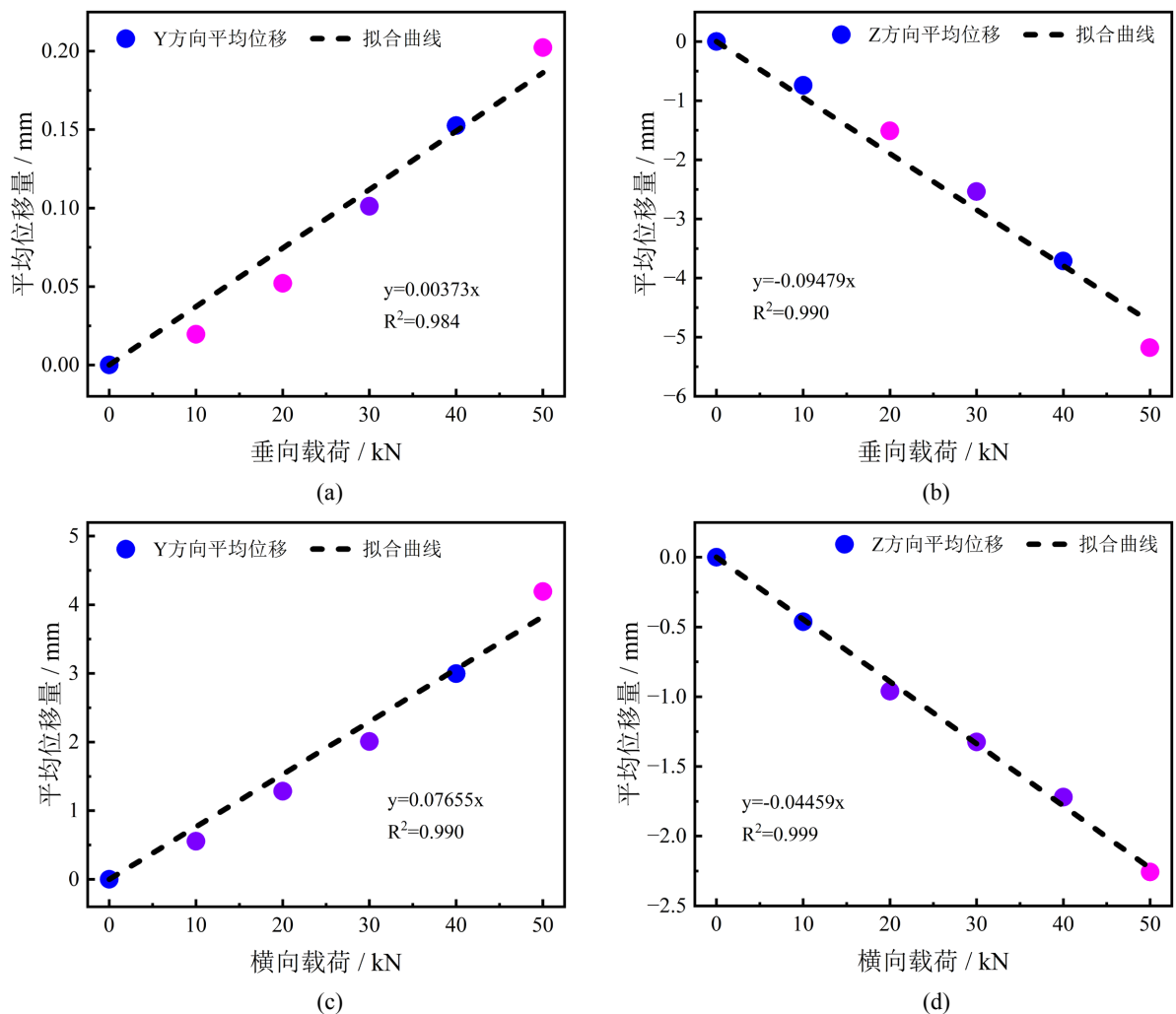


Figure 6. Fitting curves of mean displacement within the ROI versus applied load: (a) vertical load vs. Y-displacement; (b) vertical load vs. Z-displacement; (c) lateral load vs. Y-displacement; (d) lateral load vs. Z-displacement.

图 6. 观测区域内平均位移与载荷拟合曲线图：(a) 垂向载荷 - Y 方向位移；(b) 垂向载荷 - Z 方向位移；(c) 横向载荷 - Y 方向位移；(d) 横向载荷 - Z 方向位移

由图可知,在 0~50 kN 标定范围内,观测区域平均位移与载荷整体呈现较好的线性对应关系。其中,Z 方向平均位移对垂向载荷的响应最为显著,Y 方向平均位移对横向载荷的响应最为明显,分别构成对应载荷分量的主响应特征;与此同时,非主响应方向上的平均位移也随载荷变化呈现稳定的线性变化,说明垂向力与横向力对观测区域位移响应存在客观耦合作用。由此表明,采用观测区域空间平均位移作为轮轨力识别特征量具有可行性。

图 6 中各拟合曲线的斜率可视为相应载荷分量对对应方向平均位移的灵敏度系数,其物理意义为单位载荷对应的平均位移变化量。根据单向载荷标定结果,可进一步建立观测区域平均位移与轮轨力之间的正向耦合关系:

$$\begin{bmatrix} \bar{U}_Z \\ \bar{U}_Y \end{bmatrix} = [C] \begin{bmatrix} F_V \\ F_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.09479 & -0.04459 \\ 0.00373 & 0.07655 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_V \\ F_L \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中, \bar{U}_Z 和 \bar{U}_Y 分别为观测区域 Z 方向和 Y 方向空间平均位移, F_V 和 F_L 分别为轮轨垂向力和横向力。式(1)表明,观测区域两方向平均位移均受到垂向力和横向力的共同影响,因此需要进一步建立解耦关系以实现轮轨力反演。

对式(1)中的灵敏度矩阵 $[C]$ 求逆,可得到基于观测区域平均位移特征量的轮轨力试验解耦方程:

$$\begin{bmatrix} F_V \\ F_L \end{bmatrix} = [C]^{-1} \begin{bmatrix} \bar{U}_Z \\ \bar{U}_Y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -10.7971 & -6.2893 \\ 0.5261 & 13.3698 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{U}_Z \\ \bar{U}_Y \end{bmatrix} \quad (2)$$

式(2)即为本文用于复合工况轮轨力识别的试验解耦方程,基于该方程,可将观测区域平均位移特征量直接映射为轮轨垂向力和横向力,为后续复合工况下轮轨力的非接触识别提供计算基础。

3.3. 复合工况识别结果

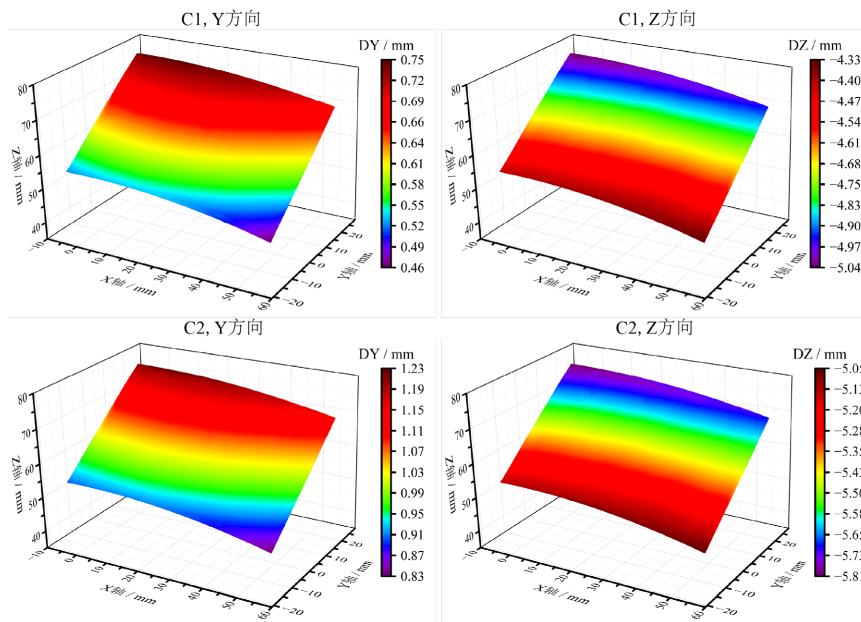


Figure 7. Displacement contour map of the ROI under combined loading conditions
图 7. 复合工况下观测区域的位移云图

对复合工况 C1~C5 下采集的散斑图像进行同样的数据处理,可获得不同复合工况下观测区域的平均位移云图。图 7 为复合工况 C1 与 C2 下观测区域的 Y 方向和 Z 方向平均位移云图,由图可知,不同复合

工况下位移场分布基本一致，等值带走向及整体梯度方向未发生明显改变，不同复合工况之间的差异主要体现在位移响应幅度大小的变化，而非位移场整体形态的突变。说明在垂向和横向载荷共同作用下，观测区域位移场仍具有较好的稳定性和可辨识性，可为后续载荷识别提供可靠的位移特征基础。

在各复合工况下的平均位移云图中提取的 Z 方向和 Y 方向平均位移特征量 \bar{U}_z 和 \bar{U}_y 代入式(2)解耦方程中，可得到对应工况下的垂向轮轨力与横向轮轨力。表 2 为复合工况下解耦计算结果及误差统计。

Table 2. Decoupled identification results of wheel-rail forces under combined loading conditions

表 2. 复合工况下轮轨力解耦识别结果

复合工况	施加垂向力 F_v (kN)	施加横向力 F_L (kN)	解耦计算垂向力 F'_v (kN)	解耦计算横向力 F'_L (kN)	垂向力误差(%)	横向力误差(%)
C1	49.87	10.54	52.17	11.17	4.61	5.96
C2	44.62	5.57	46.78	5.96	4.84	6.97
C3	40.03	20.29	41.29	21.33	3.14	5.14
C4	30.41	10.36	31.90	10.99	4.90	6.07
C5	19.83	15.37	20.82	16.24	4.98	5.64

由表 2 可知，在 5 组复合工况下，解耦计算结果与实际施加载荷总体保持较好一致性。其中，垂向轮轨力相对误差分布在 3.14%~4.98%之间，平均相对误差为 4.49%；横向轮轨力相对误差分布在 5.14%~6.97%之间，平均相对误差为 5.96%。横向力误差略高于垂向力，主要与横向载荷幅值较小以及垂横向耦合作用更为敏感有关，但总体误差水平表明该方法能够实现静态条件下轮轨力的有效识别。

3.4. 误差来源及适用条件分析

复合工况识别误差受 DIC 测量误差、加载边界误差及环境因素共同影响。相机标定误差会影响双目三维重建精度，散斑图像质量会影响相关匹配稳定性，加载过程中的工装对位偏差及局部接触状态变化也可能改变观测区域位移响应与施加载荷之间的对应关系。为提高位移测量与特征提取的稳定性，本文采用双目立体标定、镜头畸变校正、散斑质量控制及多帧图像平均等措施，以降低相机成像、图像相关计算及随机噪声对识别结果的影响。

本文单向载荷标定工况与复合载荷验证工况均在相同的室温静态台架条件下开展，并以 0 kN 无载荷状态作为参考进行位移计算和基准修正，解耦模型的建立与验证具有一致的试验环境。对于制动温升、长期运行或存在明显温度梯度的实际服役工况，车轮踏面及辐板区域可能发生热膨胀变形，使 DIC 测得的观测区域位移不仅反映载荷作用下的结构响应，还可能包含温度变化引起的附加位移。若直接采用室温静态条件下建立的解耦关系进行反演，该附加位移可能被纳入轮轨力识别计算过程，从而引入额外误差。因此，本文方法主要适用于温度变化较小的室温静态或准静态加载条件；面向制动温升等复杂服役工况的应用，仍需进一步结合温度监测、温度补偿或热致位移修正方法，对温度变化引起的附加位移进行分离和修正。

4. 结论

本文采用三维数字图像相关技术对深盆形车轮轮轨力静态识别过程进行了试验研究，围绕观测区域位移场响应、平均位移特征提取及复合工况识别结果分析，可得到如下结论：

- 1) 分别在垂向载荷和横向载荷作用下，车轮辐板观测区域的位移场均随载荷增大呈现稳定变化规律。

经各载荷级阶段多帧平均与 0 kN 基准修正后, 观测区域 Y 方向和 Z 方向平均位移能够较好表征该区域的变形响应。

2) 以观测区域 Y 方向和 Z 方向平均位移为特征量建立的轮轨力解耦关系具有较好的线性特征。在 0~50 kN 标定范围内, 平均位移与垂向力、横向力之间均表现出良好的线性对应关系, 可用于轮轨力的非接触识别。

3) 通过标定试验得到的解耦方程可在复合工况下实现轮轨垂向力与横向力的解耦。在当前室温静态台架条件下, 垂向力和横向力的平均相对误差分别为 4.49% 和 5.96%, 验证了基于 3D-DIC 的轮轨力识别方法在当前静态台架试验条件下的可行性。

基金项目

本研究得到了国家自然科学基金项目[52475137]、四川省科技计划项目[2024YFHZ0280]和四川省自然科学基金创新研究群体项目[2023NSFSC1975]的支持。

参考文献

- [1] 宋韦哲, 任尊松, 魏雪, 等. 标准动车组轮轨载荷特征及影响因素研究[J]. 动力学与控制学报, 2020, 18(3): 5-15.
- [2] Jing, L., Wang, K. and Zhai, W. (2021) Impact Vibration Behavior of Railway Vehicles: A State-of-the-Art Overview. *Acta Mechanica Sinica*, **37**, 1193-1221. <https://doi.org/10.1007/s10409-021-01140-9>
- [3] 冯毅杰, 张格明. 车辆运行状态地面安全监测系统研究的新进展[J]. 中国铁道科学, 2002(3): 140-144.
- [4] 王安吉, 张兵, 刘晓曼. 轮轨垂向力制动台连续测量系统[J]. 中国测试, 2018, 44(4): 75-79+85.
- [5] Peng, X., Zeng, J., Wang, J., Wang, Q., Li, D. and Liang, S. (2022) Wayside Wheel-Rail Vertical Contact Force Continuous Detecting Method and Its Application. *Measurement*, **193**, Article 110975. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2022.110975>
- [6] Yamaguchi, I. (1981) A Laser-Speckle Strain Gauge. *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, **14**, 1270-1273. <https://doi.org/10.1088/0022-3735/14/11/012>
- [7] Peters, W.H. and Ranson, W.F. (1982) Digital Imaging Techniques in Experimental Stress Analysis. *Optical Engineering*, **21**, Article 213427. <https://doi.org/10.1117/12.7972925>
- [8] Xiong, C., Gao, Y., Huang, Y. and Zhu, F. (2023) Specular Surface Deformation Measurement Based on Projected-Speckle Deflectometry with Digital Image Correlation. *Optics and Lasers in Engineering*, **170**, Article 107776. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2023.107776>
- [9] 李彦豪. 数字图像相关方法(DIC)在材料力学实验中的应用研究[D]: [硕士学位论文]. 厦门: 厦门大学, 2019.
- [10] Omondi, B., Aggelis, D.G., Sol, H. and Sitters, C. (2016) Improved Crack Monitoring in Structural Concrete by Combined Acoustic Emission and Digital Image Correlation Techniques. *Structural Health Monitoring*, **15**, 359-378. <https://doi.org/10.1177/1475921716636806>
- [11] Sabato, A. and Niezrecki, C. (2017) Feasibility of Digital Image Correlation for Railroad Tie Inspection and Ballast Support Assessment. *Measurement*, **103**, 93-105. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2017.02.024>