

DOI: 10.3901/JME.2020.02.184

轮轨力连续测试方法及 1 : 5 试验台验证*

官 雪^{1,2} 任尊松¹ 范童柏¹ 李俊杰¹

(1. 北京交通大学机械与电子控制工程学院 北京 100044;
2. 四川省成都市经济技术开发区口岸和物流局 成都 610100)

摘要: 轮轨力是轮轨关系的重要基础,是车辆运行安全检测的重要指标。轮轨力连续测量是车辆动力学理论与实践的重要环节,也是轨道车辆领域研究的难点之一。通过轨道车辆轮对上载荷、弯矩及应变三者之间关系,提出一种轮轨力连续测试方法。该方法包括车轮有限元模型建立并计算车轮辐板应力,依据应力分布特征确定车轮辐板内外侧及内外圈应变计粘贴位置和数量,确定车轴截面测试位置、应变计测试电桥组桥方式、轮轨力标定方法和误差控制等。轮轨力标定包括轮轨垂向载荷和横向载荷标定、载荷-应变系数确定。误差控制包括选择准确贴片位置、标定系数回归以及车轮和车轴测点联合运用等。制作了 1 : 5 实物测力轮对,并在 1 : 5 转向架试验台上测试并获得该测力轮对的轮轨力。结果表明,提出的轮轨力连续方法具有较高的精度,实现轮轨力连续测试。

关键词: 轮轨力; 测量方法; 1 : 5 测力轮对; 台架试验; 精度

中图分类号: U270

Research on Continuous Measurement Method for Wheel-rail Forces and Validation with 1 : 5 Scale Roller Rig Test

GONG Xue^{1,2} REN Zunsong¹ FAN Tongbai¹ LI Junjie¹

(1. School of Mechanical Electronic and Control Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044;
2. Port and Logistics Bureau of Chengdu Economy and Technological Development Zone, Chengdu 610100)

Abstract: Wheel/rail force is the basis of the wheel rail relationship study, and it is the most important index to determine the vehicle operation safety. Furthermore, wheel/rail forces continuously measuring method is one of the complicate problems needed to be investigated, and it is the primary strategy to study on the vehicle system dynamics. Based on the relationship between the loads and strain of the wheels and axle, a continuous wheel/rail force measuring method is presented after strain gauges signal output derivation and wheel finite element calculation. The method includes the number and location of the strain gauges on the wheel rims and axle. Test bridges of the strain gauges are offered to get the signals of the strains. A 1 : 5 scale force measuring wheelset is manufactured. The strain gauges are fixed on the scaled wheelset and the test bridges are developed according to method presented. Wheel/rail lateral and vertical force are calibrated, and the relationship matrix between the loads and the strains are obtained. The methods, such as optimal location of strain gauges, numerical regression of calibration data and strain gauges joint application of wheels and axle, are introduced to minimize the error. An experiment is carried out to measure the wheel/rail forces with the scaled wheelset and a 1 : 5 scale roller rig. The test results show that the wheel/rail force continuously measuring method is effective and accurate to obtain the wheel/rail loads.

Key words: wheel/rail force; measurement method; 1 : 5 scale wheelset; roller rig test; accuracy

0 前言

轮轨力对车辆/轨道系统的运行安全性具有十分重要的作用,也是确认列车运行安全的重要指标。如在国内外现行轨道车辆运行安全性标准或规范

中,脱轨系数和轮重减载率作为确定列车运行安全的两个重要指标,均是通过轮轨横向力和垂向力获得。但是,列车运行过程中轮对为滚动体,车轮与钢轨之间的接触位置不断发生变化。因此,准确和连续测试轮轨间作用力存在较大困难。目前,轮轨力测试方法主要有测力钢轨法和测力轮对法。

测力钢轨法是通过测量钢轨的受力来确定轮轨载荷^[1]。该方法是将应变传感器粘贴在钢轨上,测

* 国家重点研发计划(2016YFB1200506-21)和国家自然科学基金(11790281)资助项目。20181205 收到初稿,20191025 收到修改稿

量任意车辆经过该轨道位置时的轮轨力。这种方法能够测量不同车辆在测量位置的轮轨力,但不能够连续测量同一车轮的轮轨力,也不能测量任意轨道位置的轮轨力。此外,该方法需要改造轨道,轨道改造越密集所需要的投资越大。目前,该轮轨力测试方法主要用于监控货车通过时的运行状态^[2]。

测力轮对法是在列车车轮辐板和/或车轴上布置应变计^[3],通过测量列车运行时车轮或车轴的应变来获得轮轨力。或者说,测力轮对法通过改造车轮或车轴,在车轮或车轴上施加应变传感器来连续测试车轮全程受力状态。测力轮对轮轨力测试法成本相对较低,主要用于车辆性能和轨道状态评估以及脱轨机理研究等。此外,测力轮对可以对轮轨作用力实现实时监测,因此目前测量轮轨力多采用测力轮对法。

测试轮轨力方法经历了多个发展阶段,由间接测量到直接测量,由相对测量到绝对测量,由间断测量到连续测量等^[4]。与间接和相对的构架测量法相比,轮对连续测量法对高速列车运行安全监控和车辆动力学理论研究有更大的帮助和促进作用,但是车轮旋转和轮轨接触点交变使得轮轨力直接和连续测量变得更加困难。随着列车运行速度提高,不断有列车脱轨事故发生,国内外对轮轨力连续和高精度测量也越来越关注和重视。但是,受测试方法限制,目前轮轨力测试的连续性和准确性有待进一步提升。

德国联邦铁路专注研究和开发在车轴上布置应变计方式的测力轮对,即通过测量车轴应变等来确定轮轨力^[5]。该方法优点是设备简便、成本较低,缺点是测量频带较窄、测量误差较大、操作困难等。英国国家铁路公司对辐条式测力轮对开展了大量研究,用辐条代替辐板并通过检测辐条受力来获得轮轨力^[2]。此方法可以获得较高精度的轮轨力,但该方法需要改变轮对结构,不适用于直/曲辐板式轮对,实际应用中存在局限性。美国铁路联邦中心 TTCI、ENSCO 公司以及美国通用汽车公司等均对测力轮对技术进行了研究,实现了轮轨作用力在三个方向上的识别和轮轨接触点位置识别,并进行了产品开发和工程应用^[1]。西班牙 Cetest 公司测力轮对技术的特点是采用光纤遥测技术进行信号传输,法国 Alstom 公司也开发了类似的测力轮对产品。意大利 Lucchini RS 公司联合罗马大学和米兰理工大学等高校研发出了新一代测力轮对技术^[6]。事实上,出于技术保密等原因,目前可供参阅的国外测力轮对文献少,尤其是理论和技术均较为成熟的新一代测力轮对技术资料更为少见。

近年来,国内开展了轮轨力测量方法研究。陈建政^[7]研究了轮轨横向力和垂向力引起的弯矩作用下车轮辐板应变分布规律,提出了测试电桥消除高次谐波影响方案,并建立了轮轨横向力、垂向力、弯矩以及辐板应变的方程组,提出了轮轨力测试方法。任利惠等^[8]提出在车轮辐板内外侧靠近轮轨处分别粘贴 8 个应变计的轮轨力连续测试方法,并在 1:5 滚动试验台上进行了验证。洪溢飏^[9]提出了一种在既有线路上通过贴片、标定以及后期数据处理的轮轨力测试方法。黄辉^[10]在建立钢轨有限元模型并在分析钢轨轨腰和轴应变的基础上,确定了应变计粘贴位置和测试桥路组桥方案,提出了通过钢轨测试轮轨垂向力方法。侯卫星等^[11]提出了车轮辐板应变计相位角差 60° 并通过应变计组桥桥路连续测量轮轨动态作用力的方法。刘尚举等^[12]在采用应变计测量轮轨力的基础上,提出了如何提高测力轮对的灵敏度以及降低噪声的方法,从而提高信噪比和测量精度,其核心之一是在测力轮对上采用更大阻值的应变计诸如 $350\ \Omega$ 的应变计代替阻值 $120\ \Omega$ 的应变计,以增大应变计接触面积和改善散热条件。吴铎等^[13]提出了一种测力轮对轮轨力数据处理迭代方法。曾宇清等^[14]提出将谐波分析法运用到测力轮对桥路测量中,通过滤波器设计降低应变计布置位置对桥路输出的影响,从而提出一种轮轨力连续测量方法,其实质是通过选取合适的应变计布置位置和布置方案,在保证单桥路输出逼近余弦波形的情况下,其平方和数据与车轮的旋转角度无关,以实现测力轮对的连续测量。

从上述研究来看,如何连续测试轮轨力并获得准确的测试结果,仍有待改进和提升。鉴于目前国内可参阅的测力轮对技术资料有限,且国内拟实际线路测试轮轨力、车轴弯矩以及车轴转矩等,用以获得轮轨载荷分布规律、评估车轮和车轴的结构可靠性等。因此,本文研究具有更高精度的轮轨力连续测量方法,并在制作 1:5 测力轮对的基础上,通过 1:5 转向架试验台轮轨力测试,验证该轮轨力连续测试方法的可行性和有效性。

1 轮轨力连续测量理论方法

由材料力学理论可知,任一截面承受弯矩后必然产生应变。通过测试这些应变,即可获得这些截面的弯矩,并进而获得对应的各种载荷。

图 1 所示,在竖直平面内假设轮对上作用的载荷有右侧轮轨垂向力 P_1 、横向力 Q_1 ,左侧轮轨垂向力 P_2 和 Q_2 ,以及右侧和左侧一系悬挂垂向力 P'_1

和 P'_2 , 那么车轴上任一截面的弯矩可由这些载荷和相关距离获得。如在图1所示的6个截面A、C、G、H、D、F中, 其弯矩如式(1)所示

$$\begin{cases} M_A = P'_1(l_5 - l_4) \\ M_C = P'_1(l_5 - l_2) - P_1(l_1 - l_2) + Q_1 r_l \\ M_G = P'_1(l_5 - l_1) - P_1(l_1 - l_1) + Q_1 r_l \\ M_H = P'_2(l_5 - l_1) - P_2(l_r - l_1) + Q_2 r_r \\ M_D = P'_2(l_5 - l_2) - P_2(l_r - l_2) + Q_2 r_r \\ M_F = P'_2(l_5 - l_4) \end{cases} \quad (1)$$

式中, r_l 、 r_r 分别为左、右侧车轮的滚动圆半径。

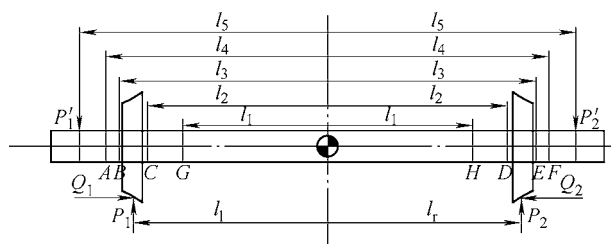


图1 轮对载荷与车轴截面

车轴上弯矩可由截面应力和截面抗弯模量得到。因此, 作用在轮对上的载荷可由截面弯矩和结构参数获得, 包括左右侧车轮的轮轨力。即通过测试车轴上六个截面的应变, 可得到作用在车轮上的轮轨力。需要指出的是, 该方法需要四个截面位于两个车轮之间, 另外两个截面分别在左右车轮外侧方能实现。

但是, 完全借助车轴弹性变形来获得轮轨力, 将导致轮轨力的高频成分不能得到充分体现。此外, 轮轨力直接作用在车轮再传递至车轴, 因此应尽可能在车轮上测试并获得轮轨力。

为此, 本文提出一种轮轨力连续测试并提高测试精度的方法。该方法中, 轮轨垂向力主要通过车轮上应变获得, 轮轨横向力主要通过车轴上应变和车轮上应变相互校核获得。其核心是在车轮上粘贴应变计并组桥测试轮轨垂向力的方式, 不能完全消除轮轨横向力的影响, 需要结合车轴应变测试, 从中提取出轮轨横向力载荷信号, 并依据车轴上轮轨横向力应变信号进行联合标定确定。

1.1 车轮辐板应变计布置

为使得更多的测点分布于车轮圆周且不大幅度地增加布片工作量(图2), 应变计分布在车轮内侧和外侧辐板的外圈和内圈上。即在靠近轮座和轮缘附近的圆周上, 分别布置8个应变计, 相邻两应变计之间相位角差 45° , 每一应变计的电阻值为 $350\ \Omega$, 车轮内外侧应变计位置完全对称。因此, 车轮辐板内侧和外侧各有16个应变计。将这些应变计组成如图3所示的电桥, 即可获得连续轮轨力应变信号,

基本原理如式(2)~(4)所示。

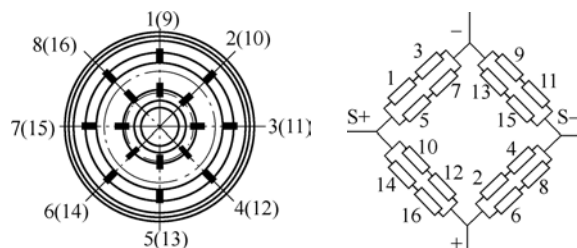


图2 车轮辐板布片位置 图3 车轮辐板应变计组桥方式

由图2可知, 每个应变片的应变变化, 都是以 2π 为周期的函数。将每一个应变 $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_{15}, \varepsilon_{16}$ 进行傅里叶变换, 可得

$$\varepsilon_i = -\varepsilon_{i+8} = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos[n(\theta - (i-1)\pi/4)] + b_n \sin[n(\theta - (i-1)\pi)]) \quad (2)$$

式中, $1 \leq i \leq 8$ 。

由如图3所示的测试桥路可知, 每一桥路的总输出应变为

$$\varepsilon = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \dots + \varepsilon_8 - \varepsilon_9 - \varepsilon_{10} - \dots - \varepsilon_{16}}{8} \quad (3)$$

将式(2)代入式(3)中, 即可得桥路总输出电压为

$$U_A = \frac{U_g K (\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 + \varepsilon_4 + \varepsilon_5 + \varepsilon_6 + \varepsilon_7 + \varepsilon_8)}{4} = 2a_0 U_g K \quad (4)$$

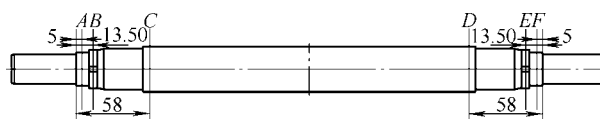
式中, U_g 是每四个应变计桥路的输入电压(图3), K 是电桥灵敏系数。

采用该种布片和组桥方式后, 测力轮对车轮辐板桥路的输出信号为一常数。需要说明的是, 车轮辐板内侧和外侧同一相位角对应的应变片, 需要选择合理的位置使得两者的应力状态完全相反, 方能通过组桥达到如式(4)所示的应变输出增强的效果。

1.2 车轴截面应变计布置

为获得作用在车轴上的弯矩并与车轮上载荷测试点形成良好的校核关系, 如图4a所示, 在车轴6个关键截面(A-F)上粘贴应变计。每一截面每隔 90° 粘贴两个应变计, 且相隔 180° 的2个为一组, 因此每一截面有8个应变计, 组成2个惠斯通全桥测试桥路(如图4b中的A1、A2), 其位置相互正交, 作为测量作用在车轴截面上弯矩的两种正交分量。图2b中的最右侧图, 给出了其中一个测试桥路的组桥方式。

由此可见, 通过在车轮辐板粘贴多个应变计、联合车轮辐板轮轨力测试以及轮轴轮轨力测试的方法, 可实现轮轨力连续测试并提高测试精度。



(a) 轴上应变计布置断面

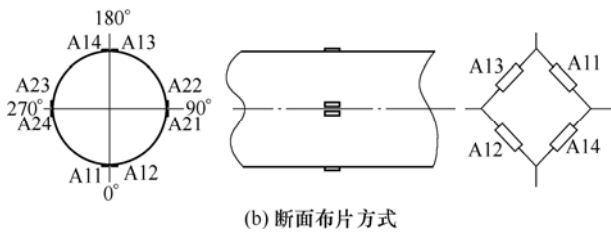


图 4 1:5 车轴轮轨力测试

2 车轮辐板载荷识别点位置确定

测力轮对主要是测试车轮和车轴上应变来获得轮对受到的轮轨力, 不同的应变计粘贴位置有不同的应变信号, 因此应变计的布置位置, 尤其是车轮上应变计的布置位置对测试结果有十分重要的影响。选择应变测点位置主要遵循两个原则: ① 测点应有足够大的应变输出; ② 测点的输出信号应尽可能实现轮轨横向力和轮轨垂向力解耦, 以利于应变-载荷系数求解。

本文通过建立 1:5 车轮有限元模型、施加载荷并计算车轮辐板应变, 确定应变计在车轮辐板上的最佳粘贴位置。

2.1 车轮有限元模型

如图 5 所示, 首先采用 SolidWorks 软件建立 1:5 车轮三维模型, 然后导入 Hypermesh 软件中进行网格划分。网格单元为六面体单元, 单元类型为 Solid185, 共生成 47 040 个节点, 40 480 个单元。车轮材质密度为 $7.8 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 、弹性模量为 210 GPa、泊松比为 0.3。



图 5 车轮有限元模型

2.2 载荷与约束

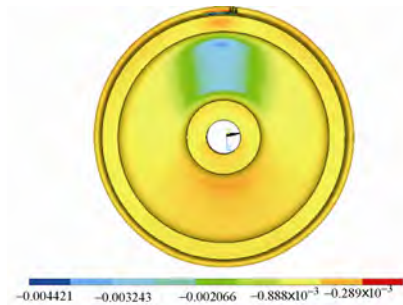
为获得轮轨载荷作用下车轮辐板的应变特征, 需要首先确定作用在车轮上的标准载荷。依据相关标准、轮对及 1:5 试验台构架质量, 分别在车轮名义直径位置和轮缘位置施加垂向载荷和横向载荷。这两种载荷工况为: ① 垂向载荷 $F_z = 1000 \text{ N}$, 横向载荷 $F_y = 0$; ② 垂向载荷 $F_z = 0$, 横向载荷 $F_y = 500 \text{ N}$ 。

将划分好网格的车轮有限元模型导入 ANSYS,

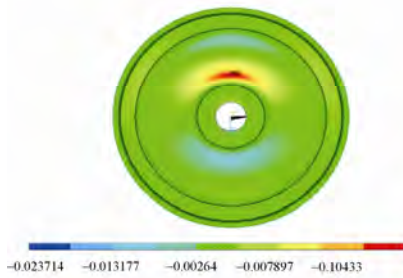
并在车轮轮毂与车轴的接触面施加约束, 轮轨接触位置分别施加垂向载荷和横向载荷, 然后进行有限元计算, 寻找垂向力和横向力相互干扰最小且应变明显的位置作为应变计粘贴点, 即载荷识别点。

2.3 有限元计算结果

垂向载荷和横向载荷分别作用时, 车轮辐板沿径向的节点位移分布如图 6 所示。由此可知, 当施加垂向力时, 辐板两侧相对位置点的节点位移/变形几乎相等; 当施加横向力时, 辐板左右两侧相对位置的节点位移/变形几乎相等, 符号相反。



(a) 垂向力节点位移



(b) 横向力节点位移

图 6 车轮辐板节点位移(mm)

2.4 车轮辐板贴片位置确定

图 7 给出了车轮辐板不同半径位置的应力值。该图直观显示了车轮辐板应力随车轮半径的变化规律。根据载荷识别点对单一载荷系是强响应且对其他载荷系响应较低的选取原则(图 7), 选取该 1:5 车轮辐板半径 35 mm 为内圈贴片位置、半径 56 mm 为外圈贴片位置(垂直细虚线对应位置)。在相应半径位置, 辐板内外侧均从 0° 开始, 每隔 45° 沿径

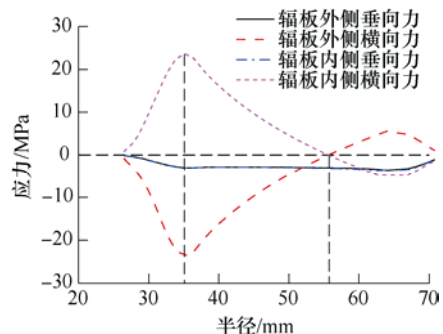


图 7 贴片方向应变值沿半径方向分布

向粘贴应变计直至 360° ，每侧共 16 个应变计(图 2)。这些应变计的测试组桥方式如图 3 所示。

车轴上应变计粘贴截面位置如图 4a 所示，这主要是考虑到载荷识别的可行性、有效性以及车轴截面的重要性等因素确定。如为了识别一系悬挂载荷，需要在轴颈位置(图 4a 中 A 和 F 截面)粘贴应变计，该截面也是车轴强度相对较弱位置。

表 1 给出了本次轮轨力和轮轴弯矩测试通道及测点位置分布。由此可见，测试通道共计 16 个，其中，P、Q、R、S 四个为车轮测试通道，其他 12 个为轮轴测试通道。

表 1 轮轨力及弯矩测试截面

通道	位置	通道	位置
A1	车轴 A 截面 $0^\circ \sim 180^\circ$	E1	车轴 E 截面 $0^\circ \sim 180^\circ$
A2	车轴 A 截面 $90^\circ \sim 270^\circ$	E2	车轴 E 截面 $90^\circ \sim 270^\circ$
B1	车轴 B 截面 $0^\circ \sim 180^\circ$	F1	车轴 F 截面 $0^\circ \sim 180^\circ$
B2	车轴 B 截面 $90^\circ \sim 270^\circ$	F2	车轴 F 截面 $90^\circ \sim 270^\circ$
C1	车轴 C 截面 $0^\circ \sim 180^\circ$	P	左侧车轮半径 35 mm
C2	车轴 C 截面 $90^\circ \sim 270^\circ$	Q	左侧车轮半径 56 mm
D1	车轴 D 截面 $0^\circ \sim 180^\circ$	R	右侧车轮半径 35 mm
D2	车轴 D 截面 $90^\circ \sim 270^\circ$	S	右侧车轮半径 56 mm

3 测力轮对制作及标定

3.1 测力轮对制作

按照上述方案制作 1:5 测力轮对。制作步骤包括车轮辐板及车轴划线、应变片粘贴、组桥以及测点调试等。制作的 1:5 测力轮对实物如图 8 所示。



图 8 1:5 测力轮对

需要说明的是，车轮运行时旋转速度较高，合理布置电缆线有利于降低车轮旋转产生的离心力对电缆线的损伤。由于 1:5 车轮辐板空间有限，而测试电缆线较多且应尽可能不让线路交叉，因此需要设计合理的走线方式。

为获得轮轨载荷与测点应变之间关系，需要对制作的测力轮对进行标定。标定分垂向载荷标定和横向载荷标定两种工况。鉴于车轴上同一截面两个测试通道对应的载荷-应变系数完全一致，因此只需零标定车轴每一测试截面上其中一个信号即可。即

只需标定 4 个轮轨力信号和 6 个轮轴截面弯矩信号，共计 10 个信号。这里的标定信号通道为 P、Q、R、S 及 A1、B1、C1、D1、E1、F1。

3.2 垂向载荷标定

轮对垂向标定方案如图 9 所示。设置合理的工装并固定轮对横向移动后，在轮轴中部施加垂向载荷。标定时，首先将车轮 0° 位置确定为最低面，垂直载荷从 0 开始，每次增加 100 N 并逐步加载到最大值 1 000 N，然后每次减少 100 N 并逐步降低到零。完成上述标定后，再分别对 45° 、 90° 、 135° 、 180° 、 225° 、 270° 、 315° 位置时进行加载，记录各通道的应变响应输出。

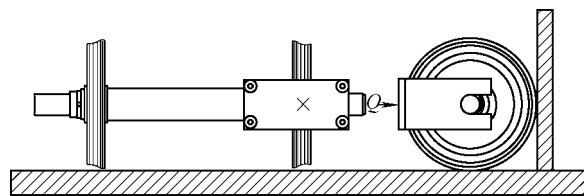


图 9 垂向载荷标定方案

3.3 横向载荷标定

轮对横向标定方案如图 10 所示。测力轮对横向载荷试验时，采用横向载荷加载器对测力轮对按照每次增加 50 N 的方式逐级加载，最大横向载荷为 500 N，完成后再逐级减小至 0，标定过程中全程采集各通道测试信号。同样地，需要测试和记录 0° 、 45° 、 90° 、 135° 、 180° 、 225° 、 270° 、 315° 位置时各通道的应变响应。

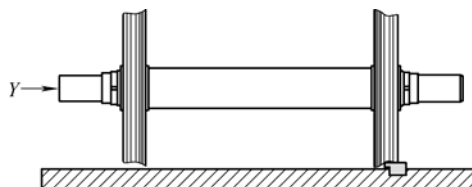
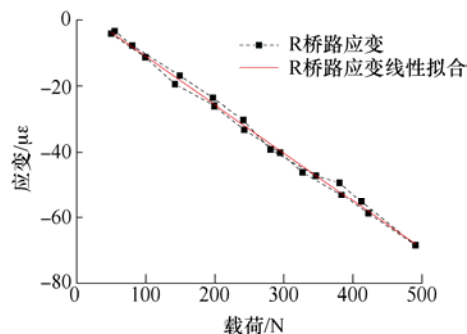


图 10 横向载荷标定方案

完成载荷-应变标定后，需要对测试数据进行回归处理，以获得每一测试通道的载荷-应变系数。

图 11 给出了车轮辐板零刻度位置 R、S 桥路标定载荷与应变之间关系。由此可见，由于该测力轮



(a) 轮轨垂向力-应变

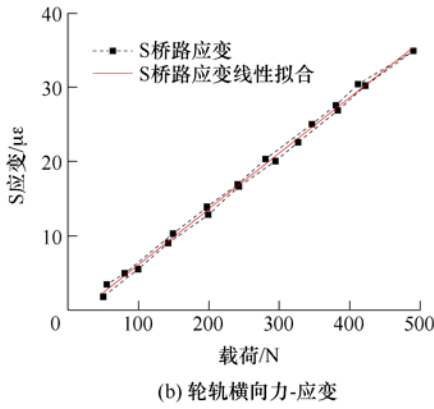


图 11 初始位置轮轨力标定拟合

$$\mathbf{K} = \begin{pmatrix} K_{RVP} & K_{LVP} & K_{RLP} & K_{LLP} \\ K_{RVQ} & K_{LVQ} & K_{RLQ} & K_{LLQ} \\ K_{RVR} & K_{LVR} & K_{RLR} & K_{LLR} \\ K_{RVS} & K_{LVS} & K_{RLS} & K_{LLS} \\ K_{RVA} & K_{LVA} & K_{RLA} & K_{LLA} \\ K_{RVB} & K_{LVB} & K_{RLB} & K_{LLB} \\ K_{RVC} & K_{LVC} & K_{RLC} & K_{LLC} \\ K_{RVD} & K_{LVD} & K_{RLD} & K_{LLD} \\ K_{RVE} & K_{LVE} & K_{RLE} & K_{LLE} \\ K_{RVF} & K_{LVF} & K_{RLF} & K_{LLF} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0.003\ 061 & 0 & -0.139\ 964 \\ 0 & 0.010\ 204 & 0 & 0.079\ 258 \\ 0.003\ 061 & 0 & -0.146\ 827 & 0 \\ 0.011\ 224 & 0 & 0.076\ 172 & 0 \\ 0 & 0.079\ 592 & 0.087\ 155 & 0.010\ 854 \\ 0 & 0.076\ 531 & 0.054\ 006 & 0.013\ 23 \\ 0.002\ 041 & 0.029\ 08 & 0.038\ 996 & 0.152\ 455 \\ 0.030\ 612 & 0.003\ 061 & 0.155\ 586 & 0.040\ 153 \\ 0.073\ 98 & 0 & 0.012\ 513 & 0.055\ 246 \\ 0.077\ 551 & 0 & 0.011\ 185 & 0.084\ 534 \end{pmatrix} \quad (6)$$

式中, K_{IJK} 为矩阵因数, $IJ=RV, LV, RL, LL$; RV 表示右轮加载垂向力; LV 表示左轮加载垂向力; RL 表示右轮加载横向力; LL 表示左轮加载

对制作质量较高, 载荷与应变之间有良好的线性关系。为减小测量误差, 本文采用最小二乘法拟合获得各桥路载荷-应变系数。

3.4 载荷-应变系数确定

在标定载荷作用下, 假设轮对应变在线弹性范围内, 且 \mathbf{F} 为标定载荷矩阵, \mathbf{K} 为载荷-应变关系矩阵, $\boldsymbol{\varepsilon}$ 为测点应变矩阵。那么有

$$\mathbf{F} = \mathbf{K} \boldsymbol{\varepsilon} \quad (5)$$

对上述标定数据进行处理和分析, 得到的标定系数矩阵如式(6)所示。

横向力; $K=P, Q, R, S, A, B, C, D, E, F$ 表示桥路通道。

进一步, 可获得式(6)的逆阵为

$$\mathbf{U} = \mathbf{K}^{-1} = \begin{pmatrix} 2.917 & -1.419 & 1.861 & 0.38 & 0.413 & 0.652 & -2.741 & 0.823 & 6.511 & 6.302 \\ 1.71 & 0.222 & 2.924 & -1.268 & 6.13 & 6.448 & 0.65 & -2.538 & 0.64 & 0.442 \\ 0.086 & -0.281 & -3.106 & 1.477 & 0.26 & -0.376 & 0.069 & 2.835 & -0.571 & -0.667 \\ -3.079 & 1.624 & 0.09 & -0.308 & -0.653 & -0.536 & 2.946 & 0.057 & -0.32 & 0.246 \end{pmatrix} \quad (7)$$

对于轮轨力有

$$\mathbf{F}_i = \begin{pmatrix} F_{RVi} \\ F_{LVi} \\ F_{RLi} \\ F_{LLi} \end{pmatrix} = \mathbf{U} \times \boldsymbol{\varepsilon}_i \quad (8)$$

由式(7)、(8), 即可得到与轮轨力相关的载荷-应变系数矩阵^[15]。需要说明的是, 由于式(6)表示的矩阵不是方阵, 因而不能直接求解其逆阵, 只能求解其伪逆阵。本文采用在 Matlab 中调用 pinv 函数, 获得了这一伪逆阵, 即式(7)。这一伪逆阵满足精度要求。

4 台架试验及验证

1:5 轨道车辆转向架试验台包括转向架系统、滚轮系统、电机驱动系统、外部定位与防护系统。

转向架系统主要包括构架、轮对、一系轴箱定位装置等。滚轮系统主要包括滚轮对及滚轮对防护装置。电机驱动系统主要包括三相异步电机、电机控制装置及 V 型带传动装置。外部定位与防护系统主要包括试验台架和转向架定位装置。试验台整体结构如图 12 所示。系统中滚轮代替轨道, 电机提供动力,

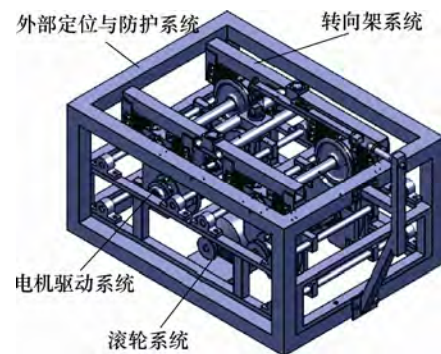


图 12 1:5 转向架试验台

通过 V 带驱使滚轮转动,滚轮带动转向架轮对转动,实现车辆运动状态模拟。

将测力轮对应变桥接入采集设备,并将安装好数采设备的测力轮对与构架弹性悬挂联结并放置在 1:5 试验台架上,数据采集设备随着车轴旋转同步转动(图 13)。为了实时采集并观测各通道应变数据,试验过程中采用了无线遥测系统。

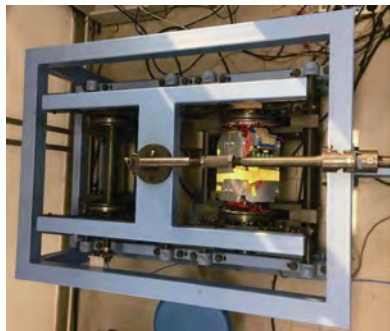


图 13 测试设备及试验台

这里对轮对多个速度等级下的轮轨力进行了连续测试。测试采样频率为 500 Hz,即每一通道每一秒采集 500 个测试信号。对测试信号进行数据处理并利用前面得到的载荷-应变系数将其转换为载荷信号后,即可获得轮轨力。这里以速度 10 km/h 和 20 km/h 为例,下面给出了试验台轮轨力测试结果。

图 14 和图 15 分别给出了车轮速度为 10 km/h 和 20 km/h 工况下,测力轮对左右侧车轮的轮轨横向力和垂向力。由此可见,本文测试方法获得了较为满意的测试结果。主要体现在:① 轮对左右侧轮轨垂向力均值为 135 N,这与通过试验台构架质量和轮对质量换算得到的静态轮轨力完全一致,且左右侧轮轨垂向力最大值和最小值基本一致;② 左右侧车轮轮轨横向力的均值和峰值基本一致,且相位相反。③ 试验台转向架失稳速度高于 40 km/h,这两种速度下轮轨力时间历程波形基本一致。

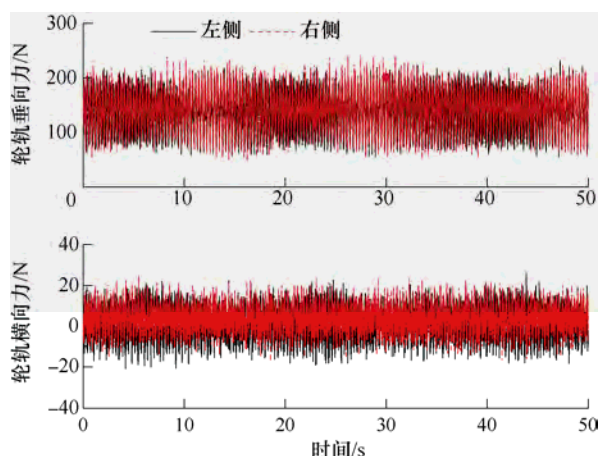
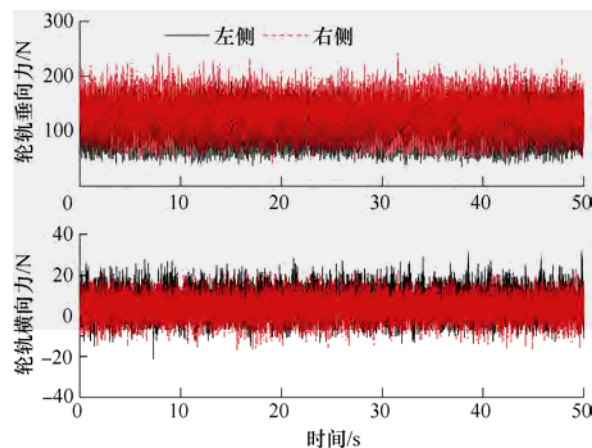
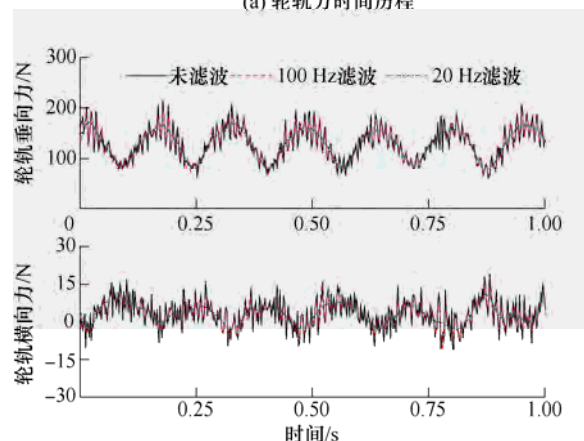


图 14 轮轨力测试结果(10 km/h)



(a) 轮轨力时间历程



(b) 轮轨力时间历程局部放大图示

图 15 20 km/h 速度下轮轨力时间历程

将图 15a 中右侧车轮的轮轨垂向力和横向力,采用 100 Hz 和 20 Hz 滤波并局部放大后的信号如图 15b 所示。由此可见,测试信号反映了滚动轮带动下轮轨力的变化特征。

需要说明的是,由于这里的构架和轮对质量较小,因此测试结果中信噪比相对较低。在实际高速动车组轮对上,可得到理想的信噪比测试结果。

5 结论

(1) 在车轮幅板外侧和内侧及车轴上粘贴多个应变计,实现了轮轨力连续测试。车轮幅板和车轴上应变计布置位置,可通过有限元数值计算结果确定。

(2) 车轮幅板和轮轴联合测试方法,可以提高轮轨力测试精度。载荷-应变系数对获得准确的轮轨力具有重要的影响,该系数通过试验标定获得。

(3) 试验测试结果表明,本文提出的测试方法具有较高的精度,满足轮轨力连续测试和精度要求。

参 考 文 献

- [1] STRATMAN B, LIU Y M, MAHADEVAN S. Structural health monitoring of railroad wheels using wheel impact

- load detectors[J]. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 2007, 7(3): 218-225.
- [2] REMENNIKOV A M, KAEWUNRUEN S. A review of loading conditions for railway track structures due to train and track vertical interaction[J]. *Structural Control and Health Monitoring*, 2008, 15(2): 207-234.
- [3] KATLEHARA H, FUJIOKA T. Measuring rail/wheel contact points of running railway vehicles[J]. *Wear*, 2002, 253(2): 275.
- [4] 陈建政, 王志强. 轮轨接触点的在线连续测量[J]. *中国铁道科学*, 2007, 28(5): 15-18.
CHEN Jianzheng, WANG Zhiqiang. On rail continuous measurement of wheel/rail contact point[J]. *Journal of China Railway Sciences*, 2007, 28(5): 15-18.
- [5] GOMEZ E, GIMÉNEZ J G, ALONSO A. Method for the reduction of measurement errors associated to the wheel rotation in railway dynamometric wheelsets[J]. *Mechanical Systems & Signal Processing*, 2011, 25(8): 3062-3077.
- [6] DIANA G, RESTA F, BRAGHIN F, et al. Design of a new full scale test-rig for the calibration of instrumented wheelsets[C]// 9th World Congress on Railway Research, Lille, France, May 22-26, 2011.
- [7] 陈建政. 轮轨作用力和接触点在线测量理论研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2008.
CHEN Jianzheng. Study on onboard measurement of wheel and rail forces[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2008.
- [8] 任利惠, 黄磊, 周劲松, 等. 1:5滚动实验台轮轨力连续测量系统[J]. *同济大学学报*, 2011, 39(6): 895-900.
REN Lihui, HUANG Lei, ZHOU Jingsong, et al. Wheel/rail interaction forces continuously measuring system for 1:5th scale roller rig[J]. *Journal of Tongji University*, 2011, 39(6): 895-900.
- [9] 洪溢飏. 地面连续测量轮轨力方法研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2012.
HONG Yiyang. Research on continuously testing wheel-rail force on the ground[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2012.
- [10] 黄辉. 轮轨垂向力连续测量方法研究[D]. 南昌: 华东交通大学, 2016.
HUANG Hui. Research on continuous measurement method for vertical wheel-rail force[D]. Nanchang: East China Jiaotong University, 2016.
- [11] 侯卫星, 王卫东, 曾宇清. 高精度高速连续测量轮轨动态作用力的研究[J]. *铁道学报*, 2010, 32(1): 24-29.
HOU Weixing, WANG Weidong, ZENG Yuqing. Research on high precision, high-speed and continuously measured dynamic wheel-rail forces[J]. *Journal of the China railway Society*, 2010, 32(1): 24-29.
- [12] 刘尚举, 金学松, 张立民. 提高测力轮对测量精度的研究[J]. *铁道车辆*, 1998(2): 32-34.
LIU Shangju, JIN Xuesong, ZHANG Limin. Improving precision of the wheel-rail force measurement[J]. *Rolling Stock*, 1998(2): 32-34.
- [13] 吴铎, 王景林, 罗鸿逵. 测力轮对轮/轨力数据处理的迭代方法[J]. *中国铁道科学*, 1995(3): 49-55.
WU Duo, WANG Jinglin, LUO Hongkui. Using iterative method to process the data measured by instrument wheelset[J]. *Journal of China Railway Sciences*, 1995(3): 49-55.
- [14] 曾宇清, 王卫东, 甘敦文. 测力轮对连续测量的理论与实践[J]. *铁道学报*, 1998, 20(6): 28-34.
ZENG Yuqing, WANG Weidong, GAN Dunwen. Theory of high accuracy load measuring wheelset[J]. *Journal of the China Railway Society*, 1998, 20(6): 28-34.
- [15] 宫雪. 轮轴结合法测力轮对研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2017.
GONG Xue. Research on the wheel-axle combination method for instrument wheelset[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2017.

作者简介: 宫雪, 女, 1990年出生。主要研究方向为振动与测试。

E-mail: 14121369@sjtu.edu.cn

任尊松(通信作者), 男, 1969年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为车辆系统动力学及结构强度。

E-mail: zsrren@bjtu.edu.cn