

# 车轮多边形对地铁转向架的影响研究

金 伟 徐步震 任 明

(中车南京浦镇车辆有限公司, 210031, 南京)

**摘 要** [目的] 研究车轮多边形对地铁转向架的影响, 从而加强车轮多边形的管控要求, 提升转向架的运行品质及安全性能。[方法] 在介绍车轮多边形概念及多边形的数学表达式的基础上, 采用车轮不圆度测试、模态测试、振动测试和应力测试等方法对某型地铁转向架进行对比测试。[结果及结论] 根据测试数据可知: 车轮多边形会引起轴箱位置的主频振动; 车轮多边形会放大轴箱振动量级, 含明显车轮多边形的试验对象产生的轴箱振动增加 18%; 当车轮的多边形激励频率与结构模态频率接近时, 其结构应力会大幅增加, 且关键测点应力增大 2 倍以上, 车轮多边形对结构强度有着较大的影响。

**关键词** 地铁车辆; 车轮多边形; 振动; 结构强度

**中图分类号** U270.33

**DOI:**10.16037/j.1007-869x.2024.05.003

## Research on the Impact of Wheel Polygonalization on Metro Bogies

JIN Wei, XU Buzhen, REN Ming

(CRRC Nanjing Puzhen Co., Ltd., 210031, Nanjing, China)

**Abstract** [Objective] The objective is to investigate the impact of wheel polygonalization on metro bogies, thereby strengthening the control requirements for wheel polygonalization, and enhancing the operational quality and safety performance of bogies. [Method] Based on the introduction of the concept of wheel polygonalization and the mathematical expression of polygonalization using methods such as wheel off roundness testing, modal testing, vibration testing, and stress testing, type of metro is comparatively tested. [Result & Conclusion] According to the test data: wheel polygonalization can cause main frequency vibration of the axle box position; wheel polygonalization can amplify the magnitude of axle box vibration, with the test object containing obvious wheel polygonalization resulting in an 18% increase in axle box vibration; when the excitation frequency of wheel polygonalization is close to the structural modal frequency, the structural stress will increase significantly, with the stress at key measuring points increasing by more than twice, indicating that wheel polygonalization has a significant impact on structural strength.

**Key words** metro vehicle; wheel polygonalization; vibration; structural strength

新车车轮断面为规则的圆形截面, 但随着车轮运行磨损, 车轮沿圆周方向出现规则且周期性的波浪形磨耗, 断面逐渐失去规则圆形, 呈现多边形截面。车轮多边形是地铁车辆车轮损伤的一种普遍现象, 是车轮失圆的一种形式, 会对地铁轨道和车辆部件产生不利影响, 如增加了钢轨断裂、轨枕裂纹、车轮和车轴的高周疲劳及轴承断裂的风险<sup>[1]</sup>。目前, 车轮失圆状况主要由两个概念来量化: 一是车轮径跳值, 二是车轮不圆度。车轮径跳值是车轮在径向方向上的最大值与最小值的差; 车轮多边形是指车辆在运营过程中出现车轮沿圆周方向的多边形磨耗现象。目前绝大部分的地铁车辆在车轮状态控制策略上, 主要采取控制车轮径跳的方法。对车轮多边形的管控在高铁上已广泛得到应用, 但在地铁领域尚无相应的研究。随着地铁建设的不断推进, 不同形式的扣件及轨道减振方式的大量应用, 车轮服役环境日趋复杂, 地铁车轮多边形的现象也普遍发生, 车轮的多边形加剧了车辆系统的振动, 由此引起的异常振动时有发生, 给车辆正常运行造成了很大的影响。

## 1 车轮多边形振动主频特性

车轮多边形磨耗是一种车轮圆周上径跳的周期性表现形式, 车轮径跳沿一整圆周的波数或者边数成为多边形的阶数, 通常阶数在 1 ~ 30 之间。对于理想的多边形可以用下式表示<sup>[2]</sup>:

$$\begin{cases} \Delta r = A \sin(n\beta + \beta_0) \\ r(\beta) = R - \Delta r \end{cases} \quad (1)$$

式中:

- $\beta_0$ ——初始相位角;
- $\beta$ ——车轮转过的角度;
- $\Delta r$ ——车轮圆周不圆顺的轮径差;
- $A$ ——不圆顺的幅值, 即波深;
- $r$ ——不圆顺车轮的实际半径, 其与  $\beta$  有关;
- $R$ ——车轮滚动圆名义半径;

$n$ ——车轮多边形化的阶数,即车轮滚动一周  $360^\circ$  内车轮实际半径  $r$  与车辆名义半径  $R$  之差所形成的谐波周期数。

对于低阶多边形,描述上较为直观。1 阶车轮多边形又称为车轮偏心,2 阶车轮多边形又称为车轮椭圆化。对于高阶多边形,几何表述上并不直观。不同阶数对应的车轮多边形波长见下式:

$$\lambda_n = \frac{2\pi R}{n} \quad (2)$$

式中:

$\lambda_n$ ——多边形波长,单位 mm。

列车运行时,由车轮多边形引起的振动频率如下式:

$$f_n = nf_0 = \frac{nv}{3.6\pi D} \quad (3)$$

式中:

$f_n$ ——多边形车轮振动频率,单位 Hz;

$f_0$ ——车轮滚动频率,单位 Hz;

$D$ ——车轮滚动圆直径,单位 mm;

$v$ ——列车运行速度,单位 km/h。

为进一步直观地研究车轮多边形状态及多边形对转向架振动模态应力的影响,可通过下面试验方法进行测试。

## 2 试验测试方法

### 2.1 车轮不圆度测试

地铁车轮多边形几何型面往往不是单一的某个阶数的多边形,而是多个不同阶数的多边形的组合。因此,需要对车轮多边形实测轮廓数据进行分析和处理才能得到不同阶数的多边形组成<sup>[3]</sup>。

车轮多边形的检测仪器(即不圆度测量仪)主要分为机械接触式和非接触式。本文采用接触式测量方法进行测试,测试仪器的磁性轮贴靠轮对圆周滚动,通过滚轮测量过程中产生的偏角实现对车轮圆周方向数据的采集。

车轮不圆度的测试点如图 1 所示,测试点在车轮名义滚动圆处。

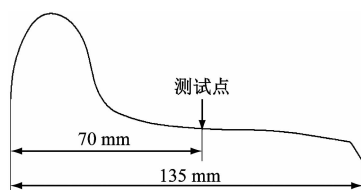


图 1 车轮不圆度测试点位置

Fig. 1 Wheel off-roundness test point location

通过专用工装,将轮对从轴箱体正下方顶起,用车轮不圆度测量仪沿车轮名义滚动圆周向测量车轮不圆度情况(见图 2)。



图 2 车轮不圆度现场测试照片

Fig. 2 Wheel off-roundness field test photo

### 2.2 构架模态测试

地铁车辆转向架构架是车辆系统的关键承载部件,其自下而上或自上而下地传递各类激励载荷。构架自身振动响应对车辆系统各类附属零部件等具有较大影响,因此构架模态是车辆系统的关键参数。

本文采用脉冲激励(力锤激励)法测试构架模态,传感器通过强力磁座连接在构架上,加速度传感器位置见图 3 a),力锤激励点位置见图 3 b)。

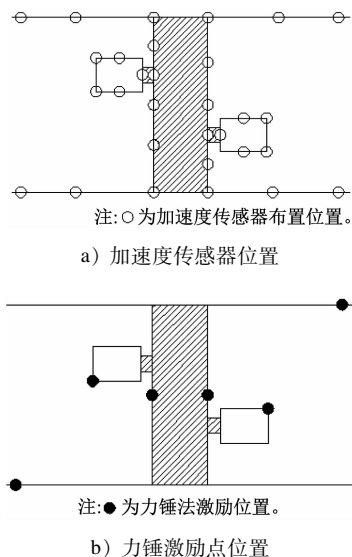


图 3 模态测试的加速度传感器位置及力锤法激励位置

Fig. 3 Accelerometer position and force hammer method excitation position of modal testing

### 2.3 振动及应力测试

车辆在运行过程中受到不同的载荷作用,为掌握转向架的振动应力响应,需进行振动和应力测试。本文试验在构架疲劳关键部位布置了 4 个动

应力测点,均位于构架主要的疲劳关键部位,并采用电阻应变片牢固地粘贴在试件的被测测点上,具体应变片安装位置实景图位置见图4。

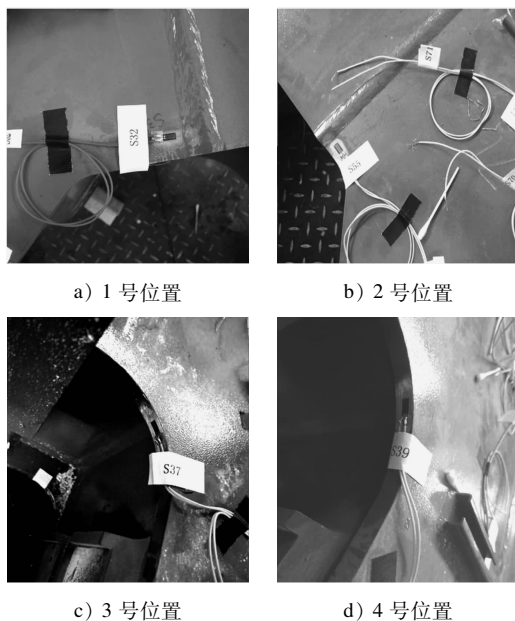


图4 应变片安装位置实景图

Fig.4 Photos of strain gauge installation location

振动测试通过布置加速度传感器来获取结构的振动响应,加速度传感器的安装见图5。

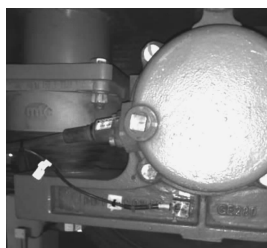


图5 加速度传感器安装位置实景图

Fig.5 Photo of the accelerometer installation position

### 3 车轮多边形对轴箱振动的影响

为分析多边形对轴箱振动的影响,选取不同多边形状态的车轮进行振动测试。采用不圆度仪对某地铁车轮的多边形状态进行测量,并分别选取多边形状态明显的车轮和多边形状态不明显的车轮进行对比验证。

图6为1个转向架的车轮多边形测试结果,表1为车轮径向跳动值。本文将该转向架定义为1号转向架,其中3位车轮存在明显的5阶、6阶多边形的状态,粗糙度幅值超过30 dB(A)。

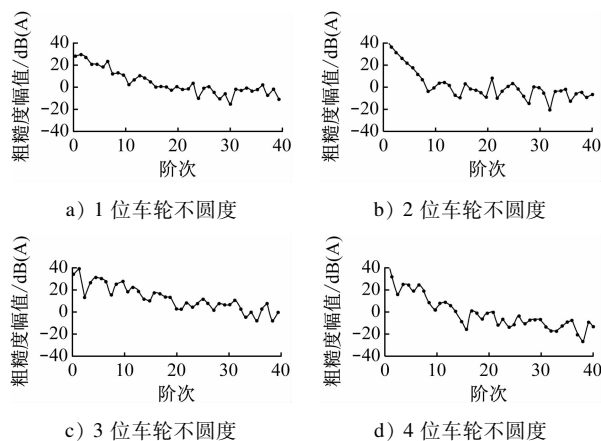


图6 1号转向架车轮不圆度

Fig.6 Wheel off-roundness of bogie No. 1

表1 1号转向架车轮径向跳动值

Tab.1 Wheel radial runout value of bogie No. 1

车轮位别	1位	2位	3位	4位
径跳值/mm	0.226	0.549	0.526	0.640

在1号转向架的4个轴箱位置安装加速度传感器,并进行线路振动测试。通过测试发现,3位轴箱的振动存在明显的37 Hz、44 Hz主频,且振动幅值较大,其他几个位别没有存在该振动主频。1号转向架的4个轴箱的振动幅值频域谱见图7。

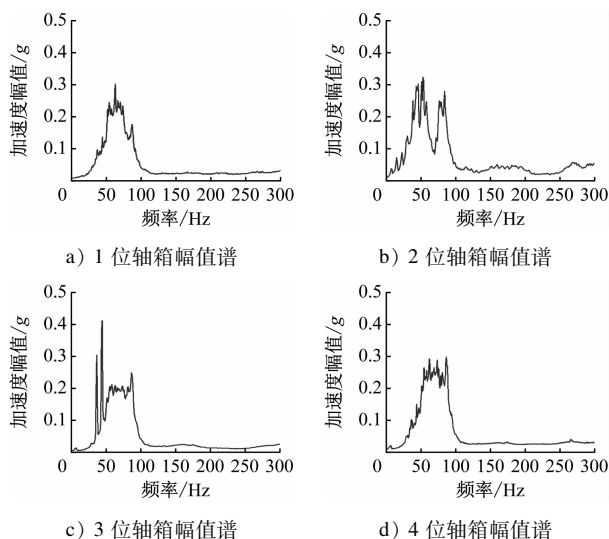


图7 1号转向架4个轴箱振动频域谱

Fig.7 Vibration frequency domain spectrum of four axle boxes of Bogie 1

试验时车轮直径为830 mm,运行速度为70 km/h,5阶多边形对应的频率是37.3 Hz,6阶多边形对应的频率是44.7 Hz,车轮多边形频率与轴箱位置的振动频率一致。这说明于车轮多边形会引

起轴箱位置的主频振动。

按上文分析,选取径跳最大的 4 位轴箱和振动较大的 3 位轴箱,再从时域谱上分析。由图 8 和图 9 轴箱振动时域谱可以看出:4 号轮位对应的轴箱振动加速度最大值为  $20.00g$ ,均方根值为  $1.47g$ ;3 号轮位对应的轴箱振动加速度最大值为  $25.00g$ ,均方根值为  $1.74g$ ;3 号车轮相对于 4 号车轮对应的轴箱振动均方根增大了 18%。

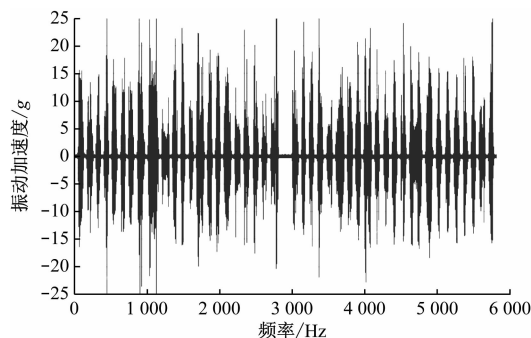


图 8 1 号转向架 3 位轴箱振动时域谱

Fig. 8 Vibration time domain spectrum of axle box No. 3 in Bogie 1

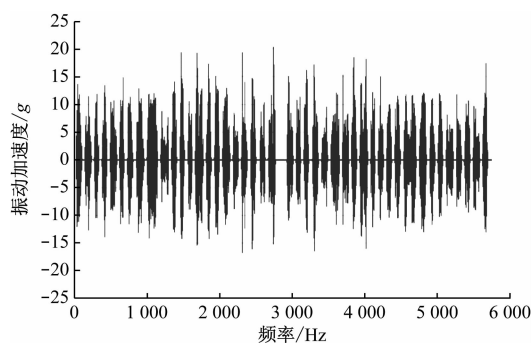


图 9 1 号转向架 4 位轴箱振动时域谱

Fig. 9 Vibration time domain spectrum of axle box No. 4 in Bogie 1

因此,车轮径跳值最大的 4 位轴箱的时域振动幅值并不是最大,而多边形明显的 3 位轴箱的时域振动幅值更大。

#### 4 车轮多边形对构架应力的影响

对地铁车辆系统而言,转向架是轴箱激励的直接承受载体,其在车轮出现多边形后,会引起轴箱的主频振动,进而引起转向架的主频振动。因此,车轮多边形会直接影响转向架结构件的振动水平和结构强度。

为对比车轮多边形对构架结构应力的影响,针

对一款转向架构架进行对比试验。选取某转向架构架进行模态测试,结构模态测试结果显示构架 1 阶模态频率为  $38.4\text{ Hz}$ ,为构架侧梁的反向扭转振型,具体模态振型见图 10。

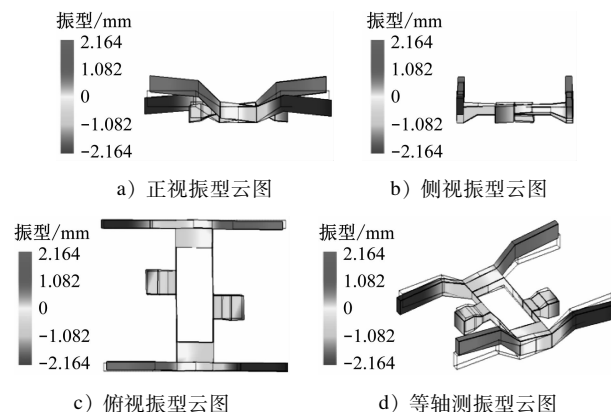


图 10 侧梁反向扭转振型云图截图

Fig. 10 Screenshot of side beam reverse torsional vibration mode nephogram

选取 1 号转向架(3 位车轮存在 5 阶多边形,振动幅值为  $30\text{ dB(A)}$ )和 2 号转向架(5 阶多边形振动幅值在  $20\text{ dB(A)}$  以下,总体上以 1 阶偏心为主)进行应力的对比测试。1 号转向架平均径跳值为  $0.485\text{ mm}$ ,最大径跳值均在  $0.640\text{ mm}$  左右;2 号转向架平均径跳值为  $0.523\text{ mm}$ ,最大径跳值为  $0.631\text{ mm}$ ,2 个转向架的车轮径跳值总体相当,具体值见表 2。

表 2 2 个转向架的车轮径跳值

Tab. 2 Wheel radial runout value of two bogies

车轮位别	径跳值/mm	
	1 号转向架	2 号转向架
1 位	0.226	0.533
2 位	0.549	0.471
3 位	0.526	0.455
4 位	0.640	0.631
平均值	0.485	0.523

2 号转向架的车轮多边形状态如图 11 所示,该转向架的 4 个车轮均无明显的多边形。

对 2 个转向架在同 1 条线路上进行构架动应力测试。试验车辆按照相同的运行模式在同 1 条线路上运行,构架 4 个关键部位(见图 4)的等效应力测试结果见表 3。



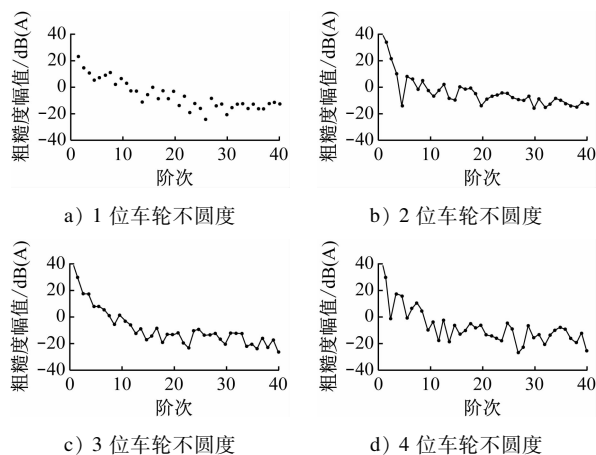


图 11 2号转向架4个车轮不圆度

Fig. 11 Off-roundness of four wheels in Bogie 2

表 3 等效应力测试结果

Tab. 3 Equivalent stress test results

测试转向架	关键部位的等效应力/MPa			
	1号位置	2号位置	3号位置	4号位置
1号转向架	91	68	93	120
2号转向架	34	33	47	48

由表3的测试结果可知:1号、2号转向架在1号、2号、3号、4号位置的等效应力之比分别为2.7倍、2.1倍、2.0倍和2.5倍。因此,当车轮的多边形激励与结构模态接近时,结构应力会大幅增加,其将增大为原来2.0~2.7倍。结构应力的增加会指数级地降低结构疲劳寿命,车轮多边形对转向架结构强度有着较大的影响。

为避免车轮多边形形成的主频振动对结构造成过大的影响,需要考虑转向架构架的结构模态主频与激励主频的分离,由于结构模态是结构的特征属性,产品服役运用后无法改变,因此需对车轮的多边形磨损进行管控,避免发生车轮多边形与结构模态耦合共振现象。

## 5 结语

通过车轮状态测试、振动测试和应力测试及结果的对比分析可知:

1) 车轮多边形会产生轴箱的特定主频的振动,振动主频与车速、轮径和多边形阶次有关。

2) 在相同的测试条件下,车轮多边形会加剧轴箱振动,含明显车轮多边形的试验对象产生的轴箱振动比不含车轮多边形的试验对象振动增加18%。

3) 当车轮的多边形激励频率与结构模态频率接近时,结构应力会大幅增加,试验构架的关键测点应力增大2倍以上,多边形对结构强度有着较大的影响。

4) 车轮多边形是轮轨关系研究的难题之一,其形成和发展机理尚未明确,主动控制车轮失圆的措施不多,目前减缓车轮不圆顺危害的途径只能通过车轮镟修。高速铁路对于车轮不圆的现象已经纳入日常管控,而在地铁领域尚无管控体系,因此在地铁领域针对车轮多边形问题进行深入的研究有着重要的工程意义。

## 参考文献

- [1] 刘道远. 铁路车轮非圆化对车辆-轨道系统动力学行为的影响[D]. 成都: 西南交通大学, 2012.  
LIU Xiaoyuan. Influence of out-of-round railway wheel on vehicle-track system dynamic behaviour[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2012.
- [2] 陈伟. 高速列车车轮多边形问题研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2014.  
CHEN Wei. Research on wheel polygonization of high-speed train[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2014.
- [3] 付彬. 地铁车辆车轮多边形形成机理探究[D]. 成都: 西南交通大学, 2017.  
FU Bin. Study into mechanism of wheel polygonalization of metro vehicle[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017.

· 收稿日期:2023-11-20 修回日期:2023-12-30 出版日期:2024-05-10

Received:2023-11-20 Revised:2023-12-30 Published:2024-05-10

· 通信作者:金伟,正高级工程师,njpczj@163.com

· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议

© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

欢迎投稿《城市轨道交通研究》

投稿网址:tougao. umt1998. com