

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J1905839

机车车轮踏面轮廓镟修在机测量与评价^{*}

刘 飞¹, 梁 霖^{1,3}, 王建民², 赵 斌¹, 徐光华^{1,4}

(1. 西安交通大学机械工程学院 西安 710049; 2. 青海华鼎重型机床有限责任公司 西宁 810100;
3. 西安交通大学 现代设计及转子轴承系统教育部重点实验室 西安 710049;
4. 西安交通大学 机械制造系统工程国家重点实验室 西安 710054)

摘 要:轨道机车车轮轮廓非圆化是影响机车高速安全运行的重要因素。针对机车车轮踏面形貌的在线镟修及测量,结合新型国产不落轮对镟修机床研发,研究机车车轮踏面轮廓在机测量与评价方法,并开发基于机床数控系统的嵌入式车轮踏面轮廓在机测量系统。就车轮踏面在机测量方法、数据处理方法、车轮中心定位以及评价分析方法等进行重点探讨。研究车轮踏面轮廓动态提取与分离方法,以提升测量装置的在线测量精度。通过阶次细化分析方法增强低数阶物理分辨率及评价准确性,以达到提高非圆化评价精度的目的。最终通过实验验证了在机测量系统重复测量精度达到微米级,研究可有效改善机车车轮轮廓的在机测量与评价,同时可进一步提升不落轮对镟修机床的加工性能。

关键词: 轨道机车; 车轮轮廓; 非圆化; 不落轮对镟修机床; 在机测量

中图分类号: TH70 TG87 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.4030

On-machine measurement and evaluation for the wheel profile of rail locomotive

Liu Fei¹, Liang Lin^{1,3}, Wang Jianmin², Zhao Bin¹, Xu Guanghua^{1,4}

(1.School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2.Qinghai Huading Heavy Machine Tool Co., Ltd., Xining 810100, China; 3.Key Laboratory of Education Ministry for Modern Design and Rotor-Bearing System, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 4.State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710054, China)

Abstract: Out-of-round of wheel profile is an important factor affecting the high-speed running of rail locomotives. Combing with the design of late-model underfloor wheelset lathe, this study focuses on the on-line turning and measuring profile of wheel tread. An on-machine measurement and evaluation method for the out-of-round of the wheel profile is studied, and an embedded on-machine measurement system based on the numerical control system is developed. In this work, the measurement model of the wheel tread, data processing, wheel center positioning, and evaluation methods are discussed. The dynamic extraction and separation method of the wheel profile is also proposed to strengthen the on-machine measuring accuracy of measurement device. In addition, the order refinement analysis method is used to solve the physical resolution and measurement accuracy of the low-order polygon, which can improve the evaluation accuracy of the out-of-round of the wheel profile. Finally, experiments verify that the repeatability of the on-machine measuring has reached micron level. This work can effectively improve the measurement and evaluation of the locomotive wheel profile, and it can also promote the work performance of the underfloor wheelset lathe.

Keywords: rail locomotive; wheel profile; out-of-round; underfloor wheelset lathe; on-machine measurement

收稿日期: 2019-11-21 Received Date: 2019-11-21

^{*} 基金项目: 国家重点研发计划(2018YFB2000202)、国家自然科学基金(51775423)、中国博士后科学基金特别项目(2018T111046)、中国博士后科学基金(2017M623159)、陕西省博士后科学基金(2017BSHEDZZ68)、西安交通大学基本科研业务(XJJ2018047)项目资助

0 引言

随着我国铁路里程的不断增加,轨道机车车轮轮廓非圆化问题日渐突出。车轮轮廓非圆化是影响机车高速运行性能的重要因素,也是产生轮-轨磨损以及机车噪声、振动的根源,严重时将威胁到机车运行稳定性和行驶安全。车轮轮廓非圆化现象是轨道车辆普遍存在的问题^[1],其形成机理复杂,成因至今尚不明确,这导致车轮轮廓非圆化相关研究成为关注的重点。

解决车轮轮廓非圆化主要通过镟修工艺来恢复踏面的几何形状,形貌测量作为必不可少的环节在镟修过程中起到重要的作用。目前测量车轮轮廓非圆化多以离线式专用设备为主,这使得测量和镟修效率降低,同时造成测量与加工基准不统一,难以保障踏面加工精度和镟修后踏面的几何廓形。随着铁路机车高速化趋势的发展,国内外一些学者^[1-13]近年来已经重视到这一相关问题。王捷等^[2]探讨了利用系统传递函数直接反映系统自身特性获取车轮不圆度的数据,以提高车轮测量精度的方法。Gao等^[3]提出了基于激光传感器的车轮直径测量方法,进一步提高激光位移传感器测量车轮的精度。Chen等^[4]实现了动态环境下对机车车轮踏面损耗的测量。另外,董孝卿等^[5]对高速列车LMD车轮外形直径镟修量影响因素进行了系统分析。另外,文献[6-13]对镟修机床结构设计及在机测量提供了有利的理论支持。

将车轮轮廓失圆形貌测量与镟修加工相结合,可有效提升轮对加工精度和机床工作效率。然而这种结合就在机测量和数据处理方法来说,还未形成完善的理论作为支持,这势必给机床及测量系统设计带来困难。本文结合国产不落轮对镟修机床独特的机械结构,研究机车车轮踏面轮廓镟修在机测量与评价方法,基于机床数控系统开发嵌入式车轮踏面非圆化在机测量系统。针对车轮非圆化在机测量中存在的问题,提出轮廓误差抑制与分离、测量中心定位、多边形细化评价等方法,并将研究方法融入机床及数控系统形成车轮轮廓的在机测量系统,进一步提升车轮轮廓形貌在机测量的精度与效率。本文研究的开展将有助于改善国产不落轮对镟修机床的加工能力及车轮轮廓的在机测量效率。

1 测量方式及测量系统

车轮轮廓失圆形貌在机测量系统的测量方式、测头结构以及数据处理方法不同于离线式测量系统。在机测量必须满足高速、准确、可靠的特点,测量方式应与机床结构相匹配,测头结构具有良好的抗干扰性,数据处理方

法符合在线实时测量需求。而对于机床设计来说,利用机床自身运动部件位置信号及数控系统内的参数信号可提升整个在机测量过程的准确性。

1.1 在机测量系统构成

车轮轮廓失圆形貌在机测量系统以机床作为本体,以机床数控系统为信息处理单元,测量数据主要来源于测头位移数据、数控机床运动部件位置数据以及系统总线信息。同时,利用数控系统的位置控制信息,实现对机床执行部件的控制,以保障测量位置的准确性,系统架构如图1所示。

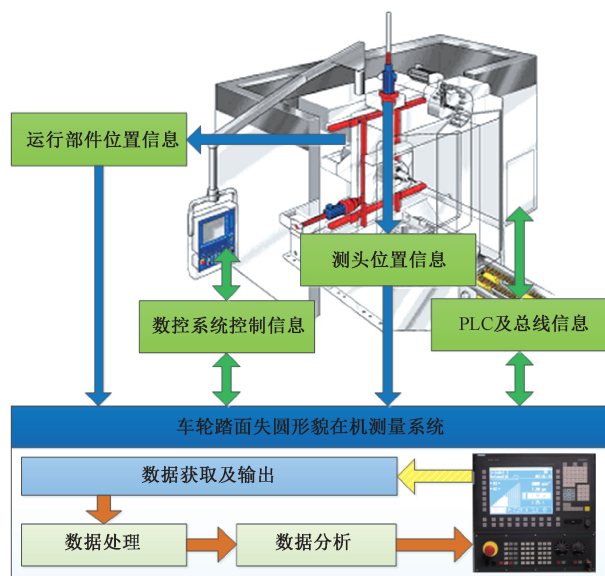


图1 车轮轮廓非圆化在机测量系统

Fig.1 On-machine measurement system for the out-of-round of wheel profile

1.2 在机测量方式及测头结构

测量方式是实现在机测量的关键,首先考虑测量系统结构的稳定性,利用机床Z轴作为基准轴,将刀架作为测量系统的辅助支撑。Z轴在测量过程中,位置信号作为轴向定位信号,可隔离机床振动对测量系统的影响,同时利用Z轴的刚度可提升测量系统的稳定性。其次考虑在机测量的准确性,采用触动式测头结构,测头包括相对触动式位移测量和回转测量两部分。相对触动式位移测量将车轮轮廓的径向跳动通过测头的浮动支撑,把动态位移量经机械桥接方式传递给后置位移测量单元,机械桥接方式可放大动态位移量,保障测量精度达到 $1\mu\text{m}$ 。回转测量通过测头的角度偏移量获得车轮轮廓的相对回转弧长,通过弧长计算取被测车轮的直径。在机测量系统的测头结构如图2所示。将触动式测头位移信号与机床Z轴的位置信号并联使用,可提升测量系统的稳定性及系统测量精度。

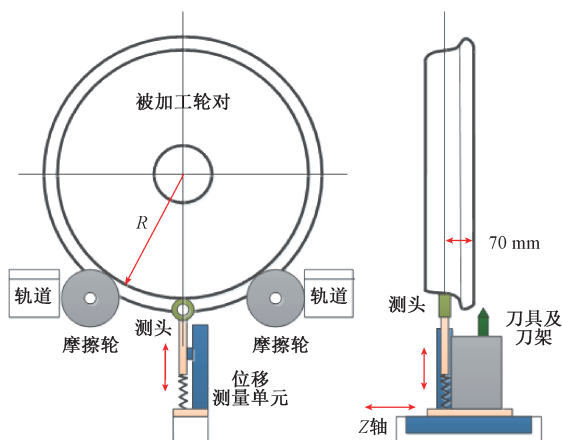
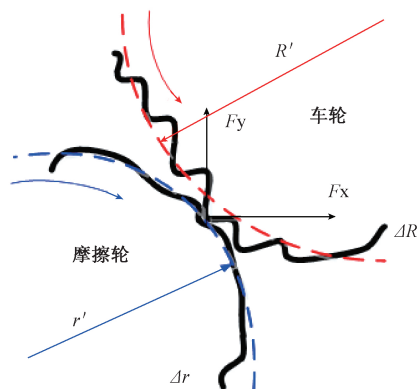


图2 车轮轮廓在机测量测头结构

Fig.2 Probe structure for measuring wheel profile



(b) 摩擦轮与车轮轮廓接触模型

(b) Contact model of friction wheel and wheel

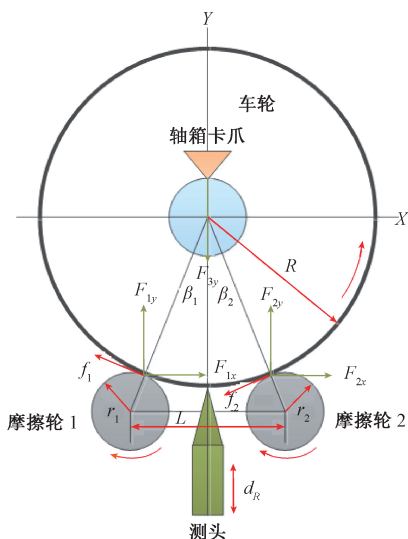
图3 车轮支撑结构与轮廓接触模型

Fig.3 Support structure and contact model of wheel

2 车轮轮廓失圆形貌在机测量方法

2.1 车轮轮廓在机测量误差模型

触动式测头与车轮踏面接触线相接触实现车轮轮廓的测量,测头接触线中心与刀具中心线平行,接触测量具有较强的抗环境干扰能力。测量过程中,两个摩擦轮形成向上的支撑,机床轴箱卡爪产生向下的压力,形成三角支撑结构将车轮卡死。摩擦轮带动车轮产生回转,测头处于车轮下方测量车轮轮廓。影响测量结果的主要因素包括轴承游隙、车轮踏面轮廓、摩擦轮轮廓。由于三角支撑结构,轴承游隙受压后可忽略不计,因此测头的动态位移量主要由摩擦轮和车轮的轮廓偏差构成,车轮支撑结构如图3所示。



(a) 车轮测量支撑结构

(a) Support structure for wheel profile measurement

设摩擦轮半径为:

$$r_i = r'_i + \Delta r_i, \quad i = 1, 2 \quad (1)$$

式中: r_i 为摩擦轮半径; r'_i 为摩擦轮基准半径; Δr_i 为摩擦轮轮廓。

车轮轮廓可由半径表示为:

$$R = R' + \Delta R \quad (2)$$

式中: R 为车轮半径; R' 为车轮基准半径; ΔR 为车轮轮廓。

设测头位置为0点,车轮前进方向为正向, L 为两个摩擦轮之间的距离,那么测头的动态移动量 d_R 为:

$$\begin{cases} d_R = \Delta R(0) + \sum_{i=1}^2 \cos(\beta_i) \left(\Delta R(\beta_i) + \Delta r_i \left(\frac{R}{r_i} \beta_i \right) \right) \\ \beta_i = \arcsin \frac{L}{2(R + r_i)} \end{cases}, \quad i = 1, 2 \quad (3)$$

由于摩擦轮和车轮轮廓的耦合作用,在驱动力的作用下 β_1 的角度误差小于 β_2 。同时,摩擦轮轮廓形状误差和表面粗糙度均低于被加工车轮形状误差并且可控,因此 Δr 通常小于被测车轮轮廓 ΔR 。在动态测量过程中,轮廓耦合产生的 β 角误差对车轮半径影响较小,计算中可认为 $\beta_1 = \beta_2$, 且 Δr_i 可由摩擦轮圆度误差 E_{ri} 替代, N 为车轮轮廓一周的采样点数。因此,整周长内测头动态移动量中车轮轮廓为:

$$\begin{cases} \Delta R(0) = d_R - \cos(\beta) (E_{r1} + E_{r2} + \Delta R(-n) + \Delta R(n)) \\ n = \left[\frac{\beta}{360} N \right] \end{cases} \quad (4)$$

2.2 车轮轮廓中心及圆度误差

为了准确获得车轮轮廓中心坐标,采用文献[14-15]中的二次闭合曲线模型作为车轮轮廓形状模型。该模型

计算轮廓中心位置不受车轮半径大小的限制,这降低了在线测量轮心对测量基准的要求。在整周长车轮轮廓上采集 N 个数据点,在 $\Delta R(0)$ 处获得各采样点坐标为 $P_i(\theta_i, r_i), i=0, 1, \dots, N-1, N \geq 5$ 。将 P_i 的极坐标转化为直角坐标,转化后采样点坐标为 $P_i(x_i, y_i), i=0, 1, \dots, N-1$ 。设轮廓曲线方程为:

$$F(x_i, y_i) = C_1 x_i^2 + C_2 x_i y_i + C_3 y_i^2 + x_i + C_4 y_i + C_5 \quad (5)$$

式中: C_1, C_2, C_3, C_4, C_5 是轮廓曲线方程中的各项系数。当测量曲线为封闭测量路径时,有:

$$F(x_i, y_i) = \Delta$$

式中: Δ 为无穷小量, $F(x_i, y_i) = 0$ 。为了提高计算精度,将式(5)中一次项 x 的常数项设置为 1。分别把各采样点坐标 $P_i(x_i, y_i)$ 代入式(5),可获构成关于各项系数的一次函数式组 E_i 。

$$E_i = f(C_{1i}, C_{2i}, C_{3i}, C_{4i}, C_{5i}) \quad (6)$$

式中: $i=0, 1, \dots, N-1$ 。

令:

$$\mathbf{V} = (C_5, C_1, C_2, C_3, C_4);$$

$$\mathbf{W} = (N, \sum x_i^2, \sum x_i y_i, \sum y_i^2, \sum y_i);$$

$$\mathbf{U} = (\sum x_i, \sum x_i^3, \sum x_i^2 y_i, \sum x_i y_i^2, \sum x_i y_i);$$

求解矩阵:

$$\hat{\mathbf{V}} = (\mathbf{W}^T \mathbf{W})^{-1} \mathbf{U}^T \quad (7)$$

可获得测量方程常数 C_1, C_2, C_3, C_4, C_5 的值。

最后得到轮廓曲线的最小二乘中心坐标 $O(x_o, y_o)$ 。

$$\begin{cases} x_o = (C_4 C_2 - 2C_3) / (4C_1 C_3 - C_2^2) \\ y_o = (C_2 - 2C_1 C_4) / (4C_1 C_3 - C_2^2) \end{cases} \quad (8)$$

车轮轮廓的圆度误差为:

$$R_e = \max(R_i) - \min(R_i) \quad (9)$$

$$\text{其中: } R_i = \sqrt{(x_i - x_o)^2 + (y_i - y_o)^2}.$$

2.3 测量数据异常点识别

测量过程中踏面损伤会使测头偏移踏面接触线导致测量数据发生异常,同时被加工轮对受轴向摆动力作用也会产生数据异常,这是动态测量中不可避免的现象。因此在处理测量数据前需对异常数据进行辨识,并将异常数据剔除。

由 $\Delta R(0)$ 获得各采样点极坐标为 $P_i(\theta_i, r_i), i=0, 1, \dots, N-1$ 。以极坐标建立轮廓坐标分布函数,设分布方程为:

$$d_i = A + B\theta_i \quad (10)$$

式中: A, B 为分布方程的参数。将各采样点的极坐标值代入分布方程式(10),利用最小二乘法获得 A, B 。

设:

$$e_i = d_i - A - B\theta_i \quad (11)$$

各测点的剩余标准差 S_E 为:

$$S_E = \frac{\sqrt{\sum_{i=0}^{N-1} (d_i - \bar{d})^2 - B \sum_{i=0}^{N-1} (\theta_i - \bar{\theta})(d_i - \bar{d})}}{N-2} \quad (12)$$

因此各测点的残差的标准偏差为:

$$S_i = S_E \sqrt{1 - \frac{1}{N} - \frac{(d_i - \bar{d})^2}{\sum_{i=0}^{N-1} (d_i - \bar{d})^2}} \quad (13)$$

各测点的标准化残差为:

$$T_i = \frac{e_i}{S_i} \quad (14)$$

取各点标准化残差绝对值的最大值 $\max(\text{abs}(T_i))$ 与准化残差绝对值的临界值 $T_{a,f}$ 进行比较(显著性水平 α 取 0.05, 自由度 $f=N-2$)。如果 $\max(\text{abs}(T_i)) > T_{a,f}$ 则对应的 d_i 为异常点。然后将异常点坐标替换为 $(\theta_i, A + B\theta_i)$, 以替换点坐标为新的数据集重新计算分布方程,直到最终满足无异常点条件。

2.4 车轮轮廓非圆化评价及阶次细化分析

车轮轮廓非圆化评价是利用各阶次对应的幅值计算噪声强度,这是评价车轮轮廓形貌优劣程度的指标。按照阶次幅值的定义,可得:

$$L_k = 20 \lg \left(\frac{A_k}{0.001} \right) \quad (15)$$

式中: L_k 是 k 阶次对应的分贝值,单位为 dB; A_k 是阶次频谱中 k 阶次对应的幅值,单位为 mm。若 $A_k = 0.001$ mm, 则对应的分贝值为 0 dB, 若 $A_k = 0.010$ mm, 对应的分贝值为 20 dB。式(15)所示为按被测车轮轮廓非圆化程度的幅值相对量计量噪声强度等级。

数据处理中滤波或数据基准计算会使低阶分辨率受到影响。为提高低数阶的准确性及物理分辨率,将细化谱分析 ZoomFFT 应用于车轮轮廓的非圆化评价中。首先确定好细化分析的阶次范围 $f_1 \sim f_2$ 。然后计算出中心阶次 $f_c = (f_1 + f_2) / 2$, 以 $e^{-j\omega f_d}$ 对采样点序列 $r(i)$ 进行复调制处理,将细化中心阶次移到零点,再通过降采样的方法将零阶次点附近的阶次降低到 N/D 。 N 为整车轮周长的采样点数量, D 为细化倍数。用低通滤波器滤除细化阶次段以外的成分,并以细化倍数为间隔进行重采样,最后对降采样后的数据序列进行移频变换,得到细化阶次谱,其阶次分辨率 $\Delta f' = f_s / ND = \Delta f / D$, 即分辨率提高了 D 倍。

利用 ZoomFFT 对某组轮对左车轮轮廓测量数据进行阶次校正与细化分析。车轮整周长采样量 $N = 1883$ 点,需要分析的阶次谱为 0~30 阶,利用 FFT 与 ZoomFFT 分别获得的阶次幅值谱线如图 4 所示。图 4 中 ZoomFFT 细化倍数设置为 8, 获得车轮轮廓细化后的主要特征阶次为 1、5、14 阶,通过 FFT 计算获得的主要特征阶次也为

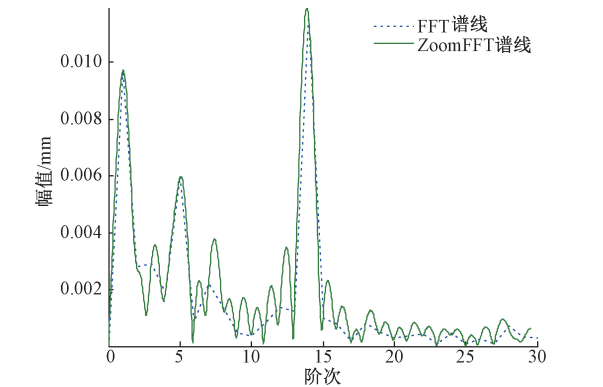


图 4 FFT 与 Zoom FFT 获得的阶次谱

Fig.4 Order spectrum obtained by FFT and Zoom FFT

1、5、14 阶。ZoomFFT 对 0~30 阶幅值进行细化,并进行幅值校正及归一化处理,细化后的阶次谱定位精度明显高于 FFT。说明在未改变主要特征阶次的情况下,利用 ZoomFFT 对阶次成分进行细化可对存在于 FFT 中分辨率低的特征分量进行增强,获得更为准确的阶次分量和低阶信息。

2.5 车轮轮廓采样点数量

车轮轮廓采样点数量的选择对测量结果具有直接影响。较少的采样点数会降低阶次定位和幅值评价的准确性,增加采样点数又会降低机床及测量系统的工作效率,因此选择合理的采样点数量尤为重要。为了满足阶次评价要求,保障处理后数据仍可准确恢复其原测量信号,采样点数 N 应大于需要分析的最高阶次 S_n 的 2 倍,即 $N \geq 2S_n$ 。考虑到滤波器不可能有理想的截止频率,在其截止频率之后总有一定的过渡带,故采样点数常选为 $N \geq 4S_n$ 。在实际测量中,采样点数量的选择范围为:

$$4S_n \leq N \leq [\pi, D]$$

(16)

式中: D 是需要被测量车轮的直径,单位为 mm。假设需要分析车轮轮廓前 30 阶的测量结果,那么车轮周长轮廓采样点数量的最小值为 120。

3 车轮轮廓在机测量及应用

为验证车轮轮廓在机测量系统及测量数据处理方法的有效性,结合国产不落轮对镟修机床进行在机测试与实际应用。

3.1 实验测试

车轮轮廓失圆形貌测量现场如图 5 所示。机床首先对被测量车轮轮廓进行镟修,然后利用所开发的在机车车轮轮廓形貌测量系统对加工后的轮廓进行测量,被测量轮对左、右轮的基本直径约为 1 115 mm。测量过程中利用被加工车轮的测量数据对测头行程及测量零位进行匹配,设置车轮整周长采样点数为 2 000。

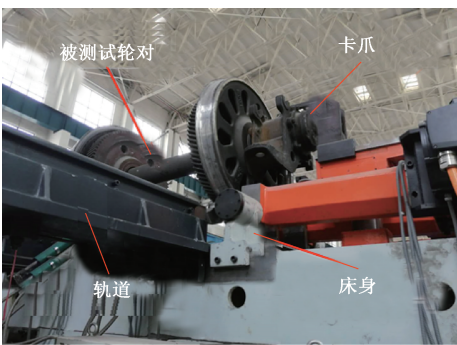


图 5 车轮轮廓在机测试与测量现场

Fig.5 Testing and measuring site of wheel profile

由在机测量系统获得的被测轮对左、右车轮轮廓几何形态测量结果如表 1 所示。动态在线测量最后获得的左、右车轮有效测量点数分别为 1 892 和 1 900,周长分别为 1 114. 878 和 1 116. 689 mm。被测轮对左、右车轮轮廓 1~30 阶非圆化阶次谱如图 6 所示。在机测量应将阶次评价结果与圆度误差结果相结合,通过车轮几何误差、轮心位置和阶次幅值结果综合判定机床加工及车轮轮廓的镟修质量。

表 1 左、右车轮轮廓几何形态测量结果

Table 1 Test results of out-of-round geometrical morphology for left and right wheels

参数	左轮	右轮
数据长度/点	1 892	1 900
直径/mm	1 114. 878 014	1 116. 688 756
周长/mm	3 502. 492 519	3 508. 181 132
圆心坐标/mm	$x=-0. 008\ 617$ $y=0. 004\ 529$	$x=0. 011\ 054$ $y=0. 003\ 642$
圆度误差/mm	0. 091 301	0. 119 058

图 6 中两个车轮均存在对应幅值超过 10 dB 的特征阶次,左轮的特征阶次是 1、5、14 阶,右轮特征阶次是 1、2、14 阶。换算成对应径向跳动的幅值,左轮 1 阶幅值 19. 77 dB,5 阶幅值 15. 52 dB,14 阶幅值 21. 29 dB;右轮 1 阶幅值 21. 32 dB, 2 阶幅值 13. 36 dB, 14 阶幅值 20. 91 dB。1 阶幅值主要是反映不落轮对镟修机床的装夹及加工方式造成镟修后的车轮轮廓形状中心存在偏移,其偏移量约为 10 μm ,这与圆心坐标测量结果一致。右轮 2 阶幅值说明车轮轮廓形状存在椭圆化现象,这是由于轮径差造成镟修过程中车轮轮廓椭圆化,右轮圆度误差测量结果也说明被测车轮轮廓接触线存在形状误差。14 阶幅值可能与加工机床结构振动及装夹方式有直接的联系,其主要体现了加工机床的动态特性对被加工车轮轮廓几何形状的影响。另外,被加工的左、右车轮

轮廓 15~30 阶对应的噪声水平均处于良好水平,说明高阶非圆化现象在被加工车轮轮廓形上不存在。

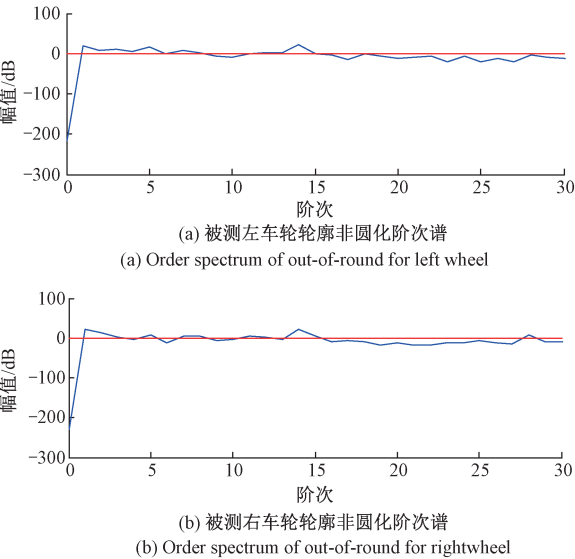


图 6 被测轮对左、右车轮轮廓非圆化阶次谱(1~30 阶)
Fig.6 Order spectrum of out-of-round for left and right wheels (1st~30th orders)

通过测量结果的对比分析可知,所研发的国产不落轮对镟修机床达到了良好的设计性能和工作精度,其所加工的车轮轮廓精度能够满足并适应高速机车运行的需求。同时,对同一被测轮对进行多次测量,获得的重复测量误差小于 1 μm,基本与测量系统的分辨率相一致,验证了车轮轮廓失圆形貌在机测量系统的稳定性与准确性。

3.2 实际应用

目前车轮轮廓失圆形貌在机测量系统已在铁路牵引机车车轮踏面镟修中得到应用,测量精度优于离线测量方式,并且测量系统的稳定性也得到进一步验证。如图 7 所示,在机测量系统正在对 SS7D 型机车车轮轮廓进行测量,其测量结果如表 2 所示。

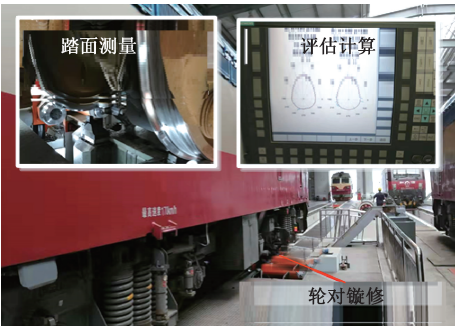


图 7 轨道机车车轮轮廓在机测量与评价实际应用
Fig.7 Application for the on-machine measurement and evaluation of wheel profile

表 2 SS7D 机车左、右车轮轮廓几何形态测量结果
Table 2 Test results of out-of-round geometrical morphology for the left and right wheels of SS7D

参数	左轮	右轮
数据长度/点	1 838	1 886
直径/mm	1 207. 754 026	1 207. 465 214
周长/mm	3 794. 271 112	3 793. 363 781
圆心坐标/mm	$x=0.004\ 262$ $y=0.002\ 071$	$x=-0.002\ 314$ $y=0.001\ 012$
圆度误差/mm	0.033 028	0.028 154

在机测量与评价系统通过数控系统和 HMI 平台完成误差评价、阶次计算、轮对参数测量等分析功能。以被测轮对中左轮为例对测量结果进行说明。左轮实际有效测量点数为 1 838 个,左轮加工后圆度误差为 33 μm。获得左轮低阶 1~15 阶范围最大阶次为 6 阶,幅值 14.75 dB;高阶 15~50 阶最大阶次 19 阶,幅值 11.62 dB。被测车轮轮廓的半径分布、径向跳动分布及圆度误差、以及阶次谱如图 8 所示。

为检验在机测量方式和数据处理方法在实际应用中的准确性与合理性。架起轮对利用高精度位移传感器离线对车轮踏面接触线轮廓进行重复测量。采用涡流传感器的分辨率为 7.87 mV/μm,为更精确地获得车轮的轮廓形貌,被测接触线整个周长上采样点数 N 设置为 59 720 个。对比在机测量与评价系统的测量结果,利用位移传感器获得的左车轮轮廓表面形貌被细化。但获得的圆度误差和阶次评价结果并无实质性的变化。获得被测左轮 1~15 阶内最大阶次为 6 阶,幅值 13.79 dB;15~50 阶内最大阶次 19 阶,幅值 10.76 dB,其余阶次的分布也相同,并无实质性异常出现。对比两者之间的误差均小于 1 dB,这也验证了在机测量与评价系统的测量精度达到 μm 级。为了综合验证在机测量与评价系统的评价精度,对每个车轮轮廓分别测量 6 次,获得的左、右车轮轮廓圆度误差分别为 33.5 ± 0.2 和 $28.2\pm0.6\ \mu\text{m}$,这与在机测量系统所获得的计算结果一致,这证明车轮轮廓失圆形貌在机测量系统及其数据处理方法具有较好的准确性,且不落轮对加工机床也达到了设计要求,具备良好的加工精度。基于数控系统的嵌入式车轮轮廓失圆形貌在机测量与评价可进一步提升国产高端不落轮对镟修机床的工作性能,目前已将一组轮对的加工及测量时间压缩到 15 min 以内。该在机测量系统在实际工作中的应用,不仅实现了不落轮对镟修机床自动加工与测量的结合,而且较大地提升了机床的工作效率。

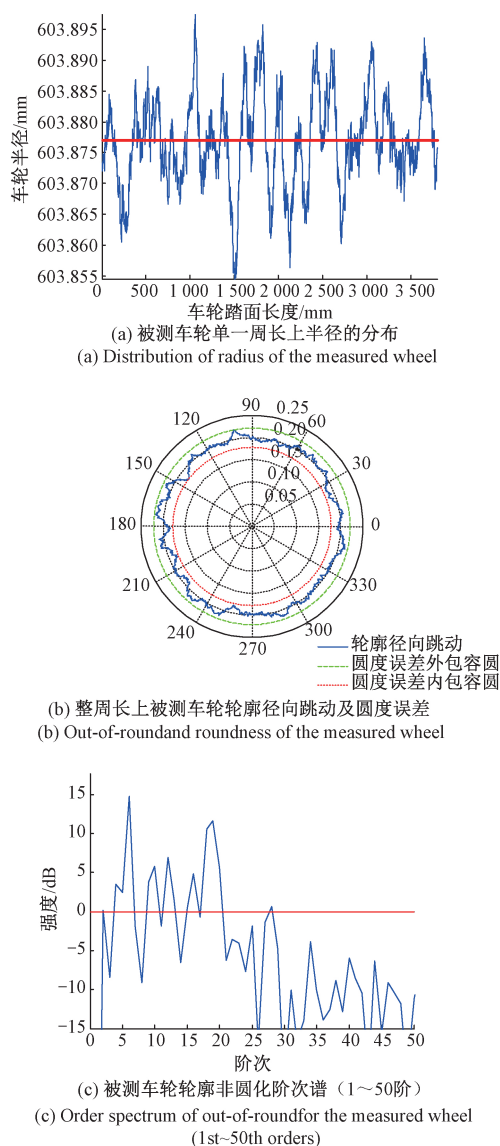


图8 被测车轮轮廓的表面形貌

Fig.8 Surface form of the measured wheel profile

4 结 论

本文针对机车车轮对在线镟修及车轮踏面形貌测量,结合国产不落轮对镟修机床,提出轨道机车车轮轮廓失圆形貌在机测量与评价方法,并开发了基于机床数控系统的嵌入式在机测量系统。为满足在线测量实时性和准确性的要求,结合车轮特殊的支撑结构,建立车轮轮廓动态误差模型。本文根据该误差模型,提出一种车轮轮廓中心计算方法,快速获取轮对回转中心坐标位置以形成轮廓形状误差评价基准。另外,为了提高在线测量车轮轮廓低数阶的准确性及物理分辨率,本文提出阶次校正及细化分析方法。通过在机测量系统在镟修机床中的测

试以及实际中的应用,验证了车轮轮廓失圆形貌在机测量系统的稳定性与准确性。本文研究成果对提升镟修机床的加工性能具有重要的意义,同时也可以应用于地铁、轻轨及有轨电车等轨道交通工具的车轮镟修中,这对我国轨道加工装备技术的发展具有积极的推动作用。

参考文献

- [1] 张雪珊,肖新标,金学松. 高速车轮椭圆化问题及其对车辆横向稳定性的影响[J]. 机械工程学报, 2008, 44(3): 50-56.
ZHANG X SH, XIAO X B, JIN X S. Influence of high speed railway wheels ovalization on vehicle lateral stability[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2008, 44(3): 50-56.
- [2] 王捷,钟晓波,沈钢. 车轮不圆度测量方法研究[J]. 铁道车辆, 2012, 50(12): 12-21.
WANG J, ZHONG X B, SHEN G. Research on the method for measurement of out-of-round wheels [J]. Rolling Stock, 2012, 50(12): 12-21.
- [3] GAO Y, FENG Q, CUI J. A simple method for dynamically measuring the diameters of train wheels using a one-dimensional laser displacement transducer [J]. Optics & Lasers in Engineering, 2014, 53(7): 158-163.
- [4] CHEN X, SUN J, LIU Z, et al. Dynamic tread wear measurement method for train wheels against vibrations [J]. Applied Optics, 2015, 54 (17): 5270-5280.
- [5] 董孝卿,朱韶光,钱卿,等. LMD 车轮外形的直径旋修量影响因素及对应措施研究[J]. 铁道机车车辆, 2017, 37(5): 12-16.
DONG X Q, ZHU SH G, QIAN Q, et al. Analysis of reprofiling strategy for the LMD wheel tread profile[J]. Railway Locomotive & Car, 2017, 37(5): 12-16.
- [6] 崔大宾,梁树林,宋春元,等. 高速车轮非圆化现象及其对轮轨行为的影响[J]. 机械工程学报, 2013, 49(18): 8-16.
CUI D B, LIANG SH L, SONG CH Y, et al. Out of round high-speed wheel and its influence on wheel/rail behavior[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(18): 8-16.
- [7] 温士明,李伟,朱强强,等. 地铁车轮多边形磨损对浮置板轨道振动特性的影响[J]. 噪声与振动控制, 2018, 38(4): 116-122.
WEN SH M, LI W, ZHU Q Q, et al. Influence of polygonal wear of metro wheels on vibration characteristics of floating slab tracks[J]. Noise and Vibration Control, 2018, 38(4): 116-122.
- [8] 韩光旭,张捷,肖新标,等. 高速动车组车内异常振动噪声特性与车轮非圆化关系研究[J]. 机械工程学报,

- 2014, 50(22):113-121.
- HAN G X, ZHANG J, XIAO X B, et al. Study on high-speed train abnormal interior vibration and noise related to wheel roughness [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(22):113-121.
- [9] 张凯轩, 周劲松, 宫岛, 等. 车轮非圆化对地铁车辆振动的影响研究[J]. 机械设计与制造工程, 2018, 47(4):82-86.
- ZHANG K X, ZHOU J S, GONG D, et al. Analysis on the influence of wheel non-roundness to the vibration of metro vehicle [J]. Machine Design and Manufacturing Engineering, 2018, 47(4):82-86.
- [10] 冯其波, 陈士谦, 崔建英, 等. 轮对几何参数动态测量系统[J]. 中国铁道科学, 2008, 29(5):138-144.
- FENG Q B, CHEN SH Q, CUI J Y, et al. A system for dynamically measuring the geometric parameters of wheelset[J]. China Railway Science, 2008, 29(5):138-144.
- [11] 李文涛, 王培俊, 陈亚东, 等. 钢轨全轮廓线结构光双目视觉测量系统标定[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(3):203-211.
- LI W T, WANG P J, CHEN Y D, et al. Calibration of binocular vision measurement system by line structured light for rail full profile[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(3):203-211.
- [12] 占栋景, 德炎, 吴命利, 等. 钢轨轮廓测量基准对齐和重采样方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(2):149-158.
- ZHAN D J, DE Y, WU M L, et al. study on datum alignment and resampling method of rail profile measurement [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(2):149-158.
- [13] 曾维棋, 马上, 黄秋, 等. 提高测量分辨率的改进 Dither 方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(8):40-45.
- ZENG W Q, MA SH, HUANG Q, et al. Measurement resolution enhancement by improved Dither method[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2019, 33(8):40-45.
- [14] LIU F, XU G, LIANG L, et al. Intersecting chord method for minimum zone evaluation of roundness deviation using cartesian coordinate data [J]. Precision Engineering-Journal of the International Societies for Precision Engineering and Nanotechnology, 2015, 42(5):242-252.
- [15] LIU F, XU G, LIANG L, et al. Minimum circumscribed reference circle and maximum inscribed reference circle of roundness deviation evaluation with intersecting chord method [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2016, 65(12):2787-2796.

作者简介



刘飞(通信作者), 2001 年于西安理工大学获得学士学位, 2008 年于河南科技大学获得硕士学位, 2016 年于西安交通大学获得博士学位, 现为西安交通大学助理研究员, 主要研究方向为机械装备动态性能检测及几何量精密测量技术。

E-mail: fayelau@xjtu.edu.cn

Liu Fei (Corresponding author) received his B.Sc. degree from Xi'an University of Technology in 2001, received his M. Sc. degree from Henan University of Science and Technology in 2008, and received his Ph. D. degree from Xi'an Jiaotong University in 2016. He is currently a research associate at Xi'an Jiaotong University. His main research interests include precision measurement technology and dynamic performance detection technology of mechanical equipment.



梁霖, 1996 年, 2001 年和 2007 年于西安交通大学获得学士学位、硕士学位和博士学位, 现为西安交通大学副教授, 主要研究方向为机械故障检测与诊断技术。

E-mail: lianglin@mail.xjtu.edu.cn

Liang Lin received his B. Sc. degree, M. Sc. degree, and Ph. D. degree all from Xi'an Jiaotong University in 1996, 2001, and 2007, respectively. He is currently an associate professor at Xi'an Jiaotong University. His main research interests include mechanical fault detection and diagnosis technologies.