

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2022.03.015

角接触球轴承沟道磨削加工表面谐波分析*

王毅鹏, 薛进学*, 赵国强, 吕宽宽
(河南科技大学 机电工程学院, 河南 洛阳 471039)

摘要:在角接触球轴承沟道磨削加工过程中,为了对其表面谐波源问题进行辨识,提出了一种基于小波分解和重构与功率谱密度法(PSD)、相关性分析的频谱分析方法。首先,采用表面轮廓仪采集了磨削试验中的 7006C 球轴承内沟的实际截面轮廓信息,再用小波分解的“db5”小波基对其进行了 5 层分解,并根据圆度误差、波纹度和表面粗糙度的分界指标,将经过小波分解后得到的 5 层信号重构为低频、中频和高频信号;然后,采用功率谱密度法(PSD)分析了重构信号的各项段信号,并对主要谐波源频率特性进行了辨识;最后,提取了其误差源频率,分析了误差源与加工表面谐波的关联度。研究表明:相比于电机转子不平衡、油膜半速涡动和电磁无心夹具调整不当等因素,在磨削试验加工的 7006C 内沟表面,由砂轮主轴振动导致的谐波占比大;该方法可以作为寻找角接触球轴承沟道磨削表面谐波源和比较谐波源关联度原有方法的一种补充。

关键词:角接触球轴承;轴承沟道;沟道磨削;表面谐波;小波分析;功率谱密度

中图分类号:TH133.33;TG580.6

文献标识码:A

文章编号:1001-4551(2022)03-0382-06

Surface harmonic in raceway grinding of angular contact ball bearing

WANG Yi-peng, XUE Jin-xue, ZHAO Guo-qiang, LV Kuan-kuan

(School of Mechatronics Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471039, China)

Abstract: In order to identify the harmonic source of grinding surface of angular contact ball bearing raceway, a spectrum analysis method based on wavelet decomposition and reconstruction was proposed, which was combined with the power spectral density (PSD) and correlation analysis. Firstly, the actual profile information of 7006C inner raceway in grinding test was collected by using surface profilometer based on wavelet decomposition and decomposed into 5 layers using “db5” wavelet basis, according to the roundness error, waviness and surface roughness demarcation index, the 5 layers of decomposition signals were reconstructed into low, medium and high frequency signals. Then, the reconstructed frequency bands were analyzed by the Power Spectral Density method (PSD), and the frequency characteristics of the main harmonic sources were identified. Finally, the frequency of error source was extracted, and the correlation between error source and machined surface harmonic was analyzed. The results show that, comparing with the unbalance of the motor rotor, the half-speed vortex of the oil film and the improper adjustment of the electromagnetic centerless fixture, the vibration of the grinding wheel spindle account for a larger proportion of the surface harmonics of the 7006C inner raceway processed by the grinding test. This method can be used as a supplement to the method of finding harmonic sources and comparing the correlation degree of harmonic sources in raceway grinding of angular contact ball bearings.

Key words: angular contact ball bearings; bearing raceway; raceway grinding; surface harmonic; wavelet analysis; power spectral density (PSD)

0 引言

为实现精密机床主轴轴承的批量生产制造,需严

格保证轴承表面的加工质量。而在球轴承表面质量中,轴承沟道表面加工质量很重要,它直接影响轴承表面的质量,间接影响机床主轴的回转精度。

收稿日期:2021-09-25

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2018YFB2000502)

作者简介:王毅鹏(1996-),男,河南洛阳人,硕士研究生,主要从事轴承磨削加工方面的研究。E-mail:1225209595@qq.com

通信联系人:薛进学,男,副教授,硕士生导师。E-mail:xjx@haust.edu.cn

李献会等人^[1]分析了磨削角接触球轴承内沟的4种加工方法的加工原理、加工特点和生产效率,并采用试验的方式,验证了不同轴承需采取的适合加工方法。李彦等人^[2]分析了造成球轴承外沟表面波纹度的影响因素,通过改进和优化加工工艺降低了轴承使用过程中的振动和噪声。关佳亮等人^[3]采用正交试验的方法,探究了 ELID 磨削滚道时的最优加工参数,并通过 ELID 切入式磨削加工试验,对该最优加工参数的合理性进行了验证。刘宏业等人^[4]建立了球轴承滚动表面的圆度误差谐波控制线,设计了工艺,实现了对轴承磨削表面谐波的实时诊断和控制。迟玉伦等人^[5]为了实现高效磨削加工轴承套圈,提出了一种依据工件表面问题来找到相应的影响因素,继而再对其进行优化的方法。王晓菲等人^[6]基于误差流理论,采用版参数模型,分析了制造轴承套圈时上道工序的加工误差,以及其对本道工序加工误差的影响。帅超钰等人^[7]提出了一种成形砂轮廓形参数的在线检测新方法,并通过试验证明,砂轮廓形可以反映工件加工精度。谭兴强等人^[8]分析了磨床故障谱特性,并结合测得的振动信号谱特征,通过故障分级,找出了其故障误差源,还提出了相应的解决方法。田欣利等人^[9]分析了混合陶瓷轴承套圈磨削及超精加工中产生误差的原因,并通过分析改进了相应的工艺,提高了混合陶瓷轴承套圈磨削加工精度。

国外有学者采用传感器收集了磨削加工的信号,确定了误差源,并以此来调整控制参数,对工件质量进行了预测^[10];同时,采用神经网络模型估计了砂轮的磨损状况,并采集了声发射信号和功率信号,对磨削智能控制系统进行了改进,降低了磨削加工时砂轮的磨损状况^[11]。MAHATA S 等人^[12]利用 Hilbert-Huang 变换和支持向量机,对磨削时砂轮的磨损状况进行了实时识别,并通过试验对该方法的可行性进行了验证。MAHATA S 等人^[13]利用经验模态分解法,对传感器采集到的外圆磨床信号进行了特征提取,并结合梯度提升算法,预测了工件的表面质量。VIITALA R 等人^[14]研究了各种误差源对轴承内圈圆度轮廓谐波分量检测振幅和相位整体不确定度的影响,并且证明,相较于圆度测量法,采用四点圆度测量法可以获得更好的效果。

目前,针对轴承磨削领域的研究主要集中在磨削参数优化、磨削方法选择、砂轮修整等方面,而对于结合误差源与频谱,以此来对误差源与加工表面谐波关联度进行研究,则较为缺乏。

在轴承沟道磨削加工过程中,加工参数和加工过程中各种动态误差对加工表面谐波影响程度不同;在

频域中,则表现为误差源频率在沟道表面最终空间频率占比不同。

因此,为研究各误差源与加工表面谐波关联度,笔者首先分析沟道加工误差源因素,然后对采集的 7006C 轴承沟道表面轮廓信息进行频谱分析,提取其误差源频率,分析误差源与加工表面谐波的关联度,以改进加工工艺,提高轴承沟道磨削加工的质量。

1 轴承沟道加工误差分析

1.1 沟道加工过程

轴承沟道磨削^[15]多数采用电磁无心夹具夹紧工件,定位方式为支沟磨沟,磨削方式为切入式定程法磨削,加工时砂轮做高速回转运动。

支沟磨沟示意图如图 1 所示。

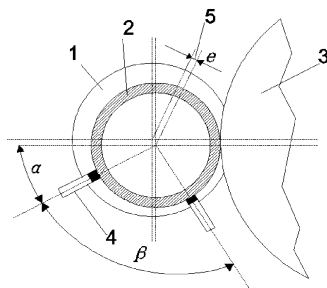


图1 支沟磨沟示意图

1—磁极;2—工件;3—砂轮;4—支承;5—偏心量; α —支沟角; β —支沟夹角; θ —偏心量

内沟的实况加工如图 2 所示。

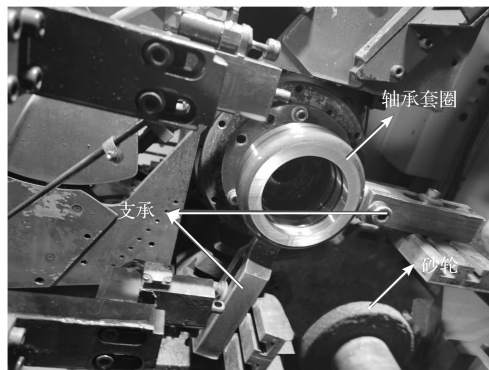


图2 内沟加工实况图

1.2 表面形貌分类

在角接触球轴承内沟磨削加工过程中,会受到各种误差源(如砂轮磨损、系统振动、磨削参数选择不当)的影响。不同的误差源可能相互叠加,也可能相互抵消,最后反映在内沟表面上,形成加工误差。其中,圆度误差为低频信号、波纹度为中频信号、表面粗糙度为高频信号。

笔者将测得的沟道表面总轮廓信号用 $F(x)$ 表示,圆度误差用 $F_1(x)$ 表示,波纹度用 $F_2(x)$,表面粗糙度

用 $F_3(x)$ 表示。

表面形貌的数学模型^[16]为:

$$F(X) = F_1(x) + F_2(x) + F_3(x) \quad (1)$$

1.3 影响表面谐波因素及频率段

磨削加工^[17]后,球轴承^[18]的沟道表面波形由不同频率尺度的波组成,各个误差源对应不同频率,综合而成沟道表面轮廓。

球轴承沟道磨削前存在原始形状误差,将其在电磁无心夹具上定位时,又会产生定位误差,因此,磨削时会产生误差复映现象。

在轴承沟道磨削时,磨削时间、砂轮转速和工件转速、偏心量和支承夹角等加工参数都对轴承沟道质量有影响,且影响程度不同^[19]。套圈装夹变形和电磁无心夹具调整不当时,对工件表面低频段频率幅值产生影响。

现有研究表明,在轴承沟道磨削加工过程中,磨床振动主要集中在砂轮主轴部分^[20]。砂轮质量不平衡将引起砂轮振动,这种振动会随着主轴高速旋转,周期性地作用在沟道表面,频率与旋转频率一致。砂轮主轴振动主要影响沟道波纹度和表面粗糙度,代表了其中的中高频信息。

当电动机转子存在动不平衡时,会产生振动,影响沟道加工表面谐波组成。电动机转速为主轴转速,转子频率为主轴旋转频率。

用表面轮廓仪测量沟道截面轮廓时,周围环境噪声和工件与主轴中心偏差引起的主轴回转误差都会对测量结果产生影响,其中噪声为高频信号,主轴回转误差为准直流周期信号。

2 磨削加工试验

磨削加工试验采用 7006C 轴承,材料为 GCr15 轴承钢。笔者采集内圈沟道表面轮廓作为其原始信号。

轴承加工设备为 3MGK135 磨床,采用切入式定程法成型磨削加工。

磨削内沟的砂轮主轴转速为 1 440 r/min,套圈转速为 390 r/min。采用电磁无心夹具夹紧套圈。

笔者用 Taylor Hobson 表面轮廓仪采集 7006C 沟道表面轮廓原始信号,采样长度 0.5 mm,采样频率 0.5 Hz,采集表面轮廓点数为 1 024 个点。

去噪后,球轴承内沟表面的综合形貌和频域如图 3 所示。

在轴承沟道磨削试验过程中,砂轮主轴的转速为 1 440 r/min,则计算旋转频率为:

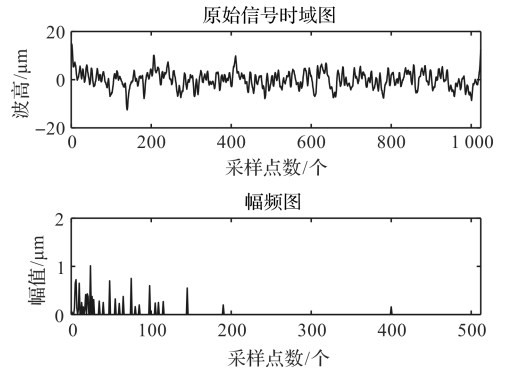


图 3 内沟表面的综合形貌和频域

$$f = \frac{1\ 440}{60} \text{ Hz} = 24 \text{ Hz} \quad (2)$$

由于基频为 24 Hz,笔者计算出了砂轮主轴的旋转频率,如表 1 所示。

表 1 砂轮主轴的旋转频率(单位:Hz)

基频	2 倍频	3 倍频	4 倍频
24	48	72	96

砂轮转动依赖于砂轮驱动电机带动。当电机转子存在不平衡振动时,振动通过多楔带传递到砂轮主轴上,最终反映在内沟表面轮廓上,电机失衡在内沟磨床上尤为严重。

砂轮传递系统示意图如图 4 所示。

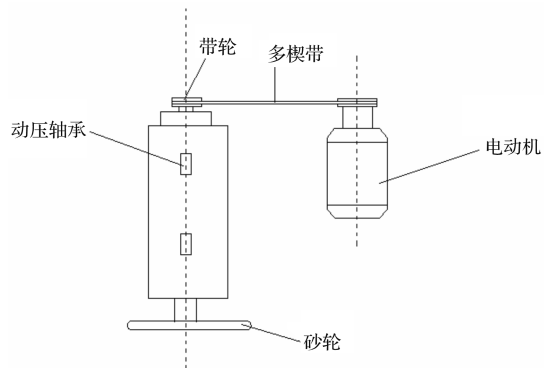


图 4 砂轮传递系统示意图

电机转子不平衡时的频率计算公式为:

$$f_1 = f_2 \left(1 + \left(\frac{1-s}{p/2} \right) \right) = f \pm f_2 \quad (3)$$

式中: f_2 —电源基频; f —电机基频即砂轮主轴旋转频率; s —电机转差率; p —电机级数。

由式(3)得到电机的偏心频率为 26 Hz、74 Hz。

当电机存在电磁力不平衡时,也会对磨削加工产生干扰,且频率为电源频率的整数倍。通常电源频率为 50 Hz。

为减小主轴弯曲变形,通常采用滑动轴承支承主轴。在磨削加工时,主轴在滑动轴承内高速转动,受外力作用绕某一平衡中心作公转运动,产生涡动。

涡动频率为主轴旋转频率的一半,即:

$$f_{\text{涡}} = 0.5 \cdot f \quad (4)$$

油膜有一定阻尼,因此半速涡动频率固定且幅值较小。实际的涡动频率约为:

$$f_{\text{涡}} = (0.42 \sim 0.48) \cdot f \quad (5)$$

3 频谱分析

3.1 小波分解

小波分析能将复杂频率的混合信号分解为不同频段分信号。笔者将原始轮廓信号进行小波 N 层分解后,得到各层的近似系数和细节系数;根据形状误差、波纹度和表面粗糙度的截止波长,对近似系数和细节系数重构,将原始轮廓信号分解为低频形状误差、中频波纹度和高频表面粗糙度。

Daubechies 系小波满足工程应用上紧支撑、正交性和连续的要求,所以笔者选取 Daubechies 小波分解沟道原始轮廓信号,一般记作 db N , N 为小波分解的尺度,取值范围为 2,3,4, …10。

笔者对去噪后的原始轮廓信号用 db5 小波基进行 5 层分解与重构,得到细节系数和近似系数,如图 5 所示。

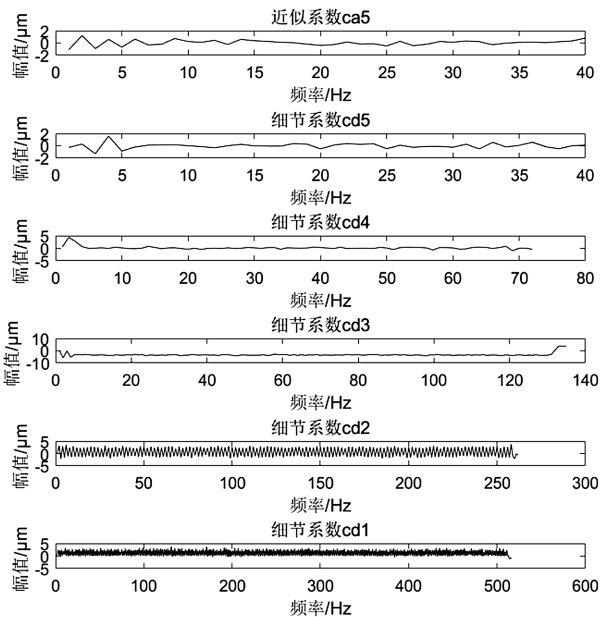


图5 小波分解

形状误差与波纹度的截止波长为 λ_f , 波纹度和表面粗糙度的截止波长分别为 λ_c 。

ISO4287-1997 给出了 λ_f 、 λ_c 值,如表 2 所示。

笔者根据截止波长,并利用小波重构技术重构分解出的细节系数和近似系数,得到形状误差、波纹度和表面粗糙度的波形图,如图 6 所示。

表 2 截止波长

λ_f/mm	λ_c/mm	λ_c/λ_f
/	0.08	30
2.5	0.25	100
/	0.8	/
8	2.5	300
25	8	/

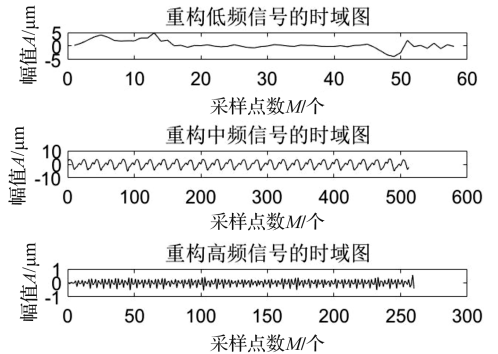


图 6 小波重构各频段信号

在图 6 中的小波重构各频段信号中,从上往下依次为:低频形状误差、中频波纹度和高频表面粗糙度的重构波形图。

3.2 功率谱密度分析

由于轴承套圈磨削过程复杂,影响因素众多,各个影响因素对沟道的影响程度也不同,造成的结果全部都混叠在时域信号中,很难从采集到的信号中找出有用的信息。

在频域中,各误差源对沟道加工表面谐波都有特定的频率范围,分别形成形状误差、波纹度和表面粗糙度;不同因素的影响程度在单位频率内有不同的能量。

功率谱密度(PSD)能分析随机信号的能量,描述能量随频率的分布特征,确定单位频带内的主频率。笔者利用 PSD 分析小波重构的各频段信号,提取其中对各频段影响程度大的频率值,结合误差源对应的频率值,确定频率值的来源。

笔者通过对内沟表面轮廓重构低频信号进行 PSD 进行分析,得到重构低频信号的功率谱密度,如图 7 所示。

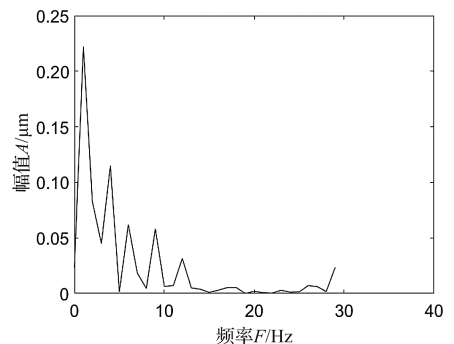


图 7 重构低频信号的功率谱密度

由图 7 可知:低频段信号在 1 Hz 附近幅值较高,这是由于测量内沟轮廓时,工件中心与轮廓仪旋转轴的偏心量引起的;

9 Hz ~ 11 Hz 附近的幅值较高,说明工件呈多边形,这是因电磁无心夹具参数调整不当引起的,即偏心量 e 、支承夹角 β 、支承角 α 调整不当;

在低频段存在较大幅值,原因为磨削加工参数选取不当,可以调整加工参数和电磁无心夹具,以消除该段误差。

笔者对内沟表面轮廓重构中频信号进行 PSD 分析,得到重构中频信号的功率谱密度,如图 8 所示。

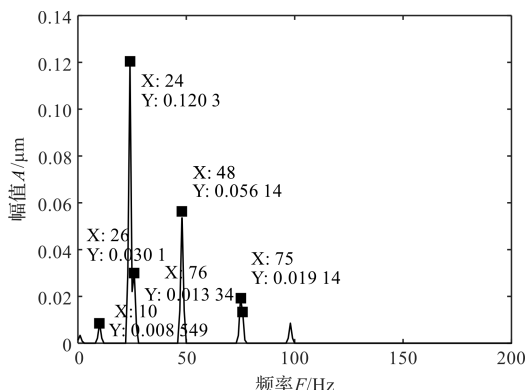


图 8 重构中频信号的功率谱密度

图 8 中,通过分析功率谱密度,并提取砂轮主轴系统的对应频率,能够明显看出有较高幅值的频率为 24 Hz,为砂轮主轴的旋转频率 f ,并且存在主轴多倍频;其中,10 Hz 为滑动轴承自激振动产生半速涡动频率,但其幅值较小,说明对工件加工质量影响较小;

图 8 中,在 26 Hz、75 Hz、76 Hz 位置,其幅值比涡动幅值大,有对应电机转子不平衡旋转频率误差源。由此可见,砂轮主轴不平衡在中频段误差占比最大,电机转子不平衡次之,油膜半速涡动影响较小可忽略不计。

笔者对内沟表面轮廓重构高频信号进行 PSD 分析,得到重构高频信号的功率谱密度,如图 9 所示。

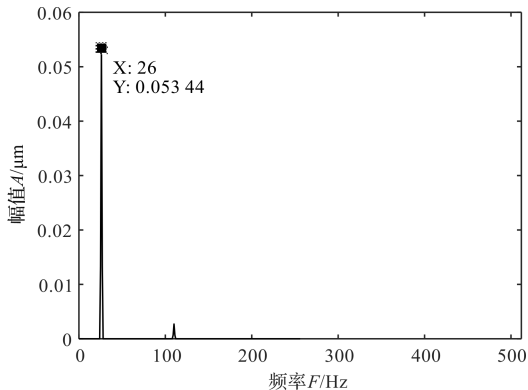


图 9 重构高频信号的功率谱密度

图 9 中,功率谱密度存在接近于砂轮旋转基频的频率,说明砂轮主轴振动对高频信号误差也产生了影响。

3.3 相关性分析

相关函数可用来判断各个误差源与加工精度的关联度。相关函数包含自相关函数和互相关函数。相关系数的取值范围在 0 ~ 1 之间,越接近 1 相关性越大,反之,相关性越小。

自相关函数的表达式为:

$$R_{xx}(t) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \cdot x(n+1) \quad (6)$$

互相关函数的表达式为:

$$R_{xy}(t) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \cdot y(n+1) \quad (7)$$

相关系数的表达式为:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^{2n-1} R(m)R_{xx}(m)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{2n-1} R^2(m) \sum_{i=1}^{2n-1} R_{xx}^2(m)}} \quad (8)$$

式中: n —采样点数; m —重构的低频、中频和高频分量信号。

笔者运用互相关函数分析重构的低频、中频、高频信号与重构原始信号的关联度,判断各频段关联度的大小,并结合各频带内的主要误差源频率,判断对加工表面质量影响最大的误差源,从而优化工艺,提高加工质量。

笔者通过计算得到了各频带的相关因子,如表 3 所示。

表 3 各频带相关因子

频带	低频	中频	高频
相关因子	0.126	0.604	0.092

从表 3 中看出:

(1) 中频的相关因子远大于低频和高频的相关因子,低频相关因子最小;

(2) 在此试验中,7006C 轴承内沟加工表面谐波中的砂轮主轴振动占比最大,电机旋转不平衡次之,油膜半速涡动、电磁无心夹具的偏心量 e 和支承夹角 β 和支承角 α 的占比较小。

4 结束语

通过分析角接触球轴承沟道加工表面谐波的影响因素,笔者采集了加工试验的 7006C 轴承内沟表面轮廓信息,并采用小波分析和功率谱密度 (PSD) 相结合的方法,从各频段的功率谱密度中找出了影响加工表

面谐波的主要频率特性,最后进行了相关性分析,以得到各频段的相关因子。

研究结论如下:

(1)砂轮主轴误差在加工表面谐波关联度大,电机旋转不平衡次之;油膜半速涡动、电磁无心夹具的偏心量 e 、支承夹角 β 和支承角 α 的调整误差与加工表面谐波关联度小;

(2)采用PSD对重构的各频段信号进行分析,提取出了各频段主要误差源频率特性,即低频段误差为电磁无心夹具参数调整不当;中频段主要为砂轮主轴振动,存在电机转子不平衡谐波误差和可忽略的油膜半速涡动谐波误差;高频段只存在砂轮主轴振动谐波误差;

(3)采用相关性分析方法,确定中频段信号与加工表面谐波的相关性较大;该方法为确定谐波误差源关联度提供了一种新方法。

笔者后续的研究方向为:通过对其他的内沟磨削误差源进行分析,建立其误差传递模型;结合试验数据,分析误差源在表面谐波中的表现形式,并辨识其他误差源。

参考文献(References):

- [1] 李献会,敖正红,周海波,等.精密角接触球轴承内圈沟道磨削方法的分析[J].轴承,2017(1):15-19.
- [2] 李彦,张旭,杨柳.影响角接触球轴承沟道表面波纹度的因素分析[J].轴承,2015(7):29-30.
- [3] 关佳亮,胡志远,柳一鸣,等.基于ELID磨削技术的轴承滚道切入式磨削加工工艺研究[J].制造技术与机床,2019(7):100-104.
- [4] 刘宏业,夏新涛,李旭东.轴承磨削表面圆度误差的诊断与控制[J].轴承,2005(3):14-16.
- [5] 迟玉伦,顾佳健.精密轴承磨削金刚滚轮修整工艺优化研究[J].表面技术,2021,50(3):366-375.
- [6] 王晓菲,李航,彭程,等.轴承套圈磨削加工误差传递半参数模型及分析[J].河南科技大学学报(自然科学版),2021,42(5):5,19-24,31.
- [7] 师超钰,朱建辉,孙冠男,等.成形磨砂轮圆弧廓形关键参

数在位检测方法及其试验研究[J].中国测试,2021,47(3):36-42.

- [8] 谭兴强,陈新德.精密轧辊磨床故障振动分析及消除[J].机床与液压,2014,42(10):64-67,199.
- [9] 田欣利,许森,姚巨坤,等.高速精密混合陶瓷轴承套圈加工误差产生原因及工艺改进方法[J].装甲兵工程学院学报,2010,24(4):65-68.
- [10] TAGHI T. Developments in grinding process monitoring and evaluation of results[J]. *Int. J. of Mechatronics and Manufacturing Systems*,2008,1(4):307-320.
- [11] MAURICIO E N. Evaluation of neural models to estimate the roughness of advanced ceramics in surface grinding[J]. *Int. J. of Machining and Machinability of Materials*,2015,17(5):454-479.
- [12] MAHATA S, SHAKYA P, BABU N R. A robust condition monitoring methodology for grinding wheel wear identification using Hilbert Huang transform[J]. *Precision Engineering*,2021,70:77-91.
- [13] MAHATA S, SHAKYA P, BABU N R, et al. In-process characterization of surface finish in cylindrical grinding process using vibration and power signals[J]. *Procedia CIRP*,2020,88:335-340.
- [14] VIITALA R, WIDMAIER T, HEMMING B, et al. Uncertainty analysis of phase and amplitude of harmonic components of bearing inner ring four-point roundness measurement[J]. *Precision Engineering*,2018,54:118-130.
- [15] 夏新涛,马伟,颀谭成.滚动轴承制造工艺学[M].北京:机械工业出版社,2007.
- [16] 王中宇,孟浩,付继华.表面综合形貌误差的灰色分离方法[J].仪器仪表学报,2008(9):1810-1815.
- [17] 刘福军,刘孟奇,苏怡然,等.曲线磨削受力模型建模研究[J].机械制造,2021,59(9):6.
- [18] 李聪,王德伦.深沟球轴承回转误差建模与分析[J].机电工程技术,2022,51(1):29-33,138.
- [19] 申庆贺.轴承滚道无心磨削工艺参数对精度和表面质量的影响[D].大连:大连工业大学机械工程与自动化学院,2017.
- [20] 柯晓龙,黄海滨,刘建春.基于精密磨削的振动监测技术研究与应用.重庆理工大学学报:自然学科,2013,7(12):77-81.

[编辑:雷敏]

本文引用格式:

王毅鹏,薛进学,赵国强,等.角接触球轴承沟道磨削加工表面谐波分析[J].机电工程,2022,39(3):382-387.

WANG Yi-peng, XUE Jin-xue, ZHAO Guo-qiang, et al. Surface harmonic in raceway grinding of angular contact ball bearing[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2022,39(3):382-387.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>