DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2311565

角接触球轴承凸出量光学精密测量方法研究*

赵文辉,张 浩,魏 喆
(沈阳工业大学机械工程学院 沈阳 110000)

摘 要:角接触球轴承凸出量是轴向预载荷作用下轴承内外圈同一端面的距离,是精密角接触球轴承配对使用的依据。为实现角接触球轴承凸出量快速精密测量,提出了一种光学精密测量方法并研制了测量装置。通过更换不同尺寸轴承定位爪,可实现7208C、7208AC、7308B、7408B 轴承凸出量的测量。分析了轴承套圈和滚子之间的赫兹接触,揭示了轴承凸出量变化量与轴向载荷之间的关系,轴承凸出量变化趋势随轴向载荷增加而变缓,逐渐趋向于线性相关。基于有限单元法对测量装置的机架和内圈驱动分别进行变形分析和简谐振动分析,优化后传感器测头振动幅值减小到 0.029 μm。以 7008C(P2)为试验轴承,进行轴承凸出量测量试验。验证结果表明,其测量精度达到 0.5 μm,实测样件偏差小于 0.2 μm。

关键词: 角接触球轴承;凸出量测量;误差分析;光栅传感器
中图分类号: TH133 TH71 **文献标识码**: A **国家标准学科分类代码**: 460.40

Research on optical precision measurement method of angular contact ball bearings protrusion

Zhao Wenhui, Zhang Hao, Wei Zhe
(*School of Mechanical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110000, China*)

Abstract: The protrusion of angular contact ball bearings is the distance of the same end face of the inner and outer rings under the axial preload, which is the basis for pairing precision angular contact ball bearing. To realize the rapid and precise measurement of the protrusion, an optical precision measurement method is proposed and a measuring device is developed. By replacing the bearing positioning claws of different sizes, the protrusion amount of the 7208C, 7208AC, 7308B, and 7408B bearings can be measured. The Hertz contact between bearing ring and roller is analyzed, and the relationship between bearing protrusion and axial load is revealed. The change trend of the bearing protrusion slows down as the axial load increases, and gradually tends to linear correlation. Based on the finite element method, the deformation analysis and simple harmonic vibration analysis of the frame and inner ring drive of the measuring device are carried out. The vibration amplitude of the sensor probe is reduced to 0.029 μm after optimization. The 7008C (P2) angular contact ball bearings protrusion is measured. The verification results show that the measurement accuracy reaches 0.5 μm, and the measurement deviation of the sample is less than 0.2 μm.

Keywords: angular contact ball bearings; protrusion measurement; error analysis; optical grating sensor

0 引 言

角接触球轴承在同时承受径向载荷及轴向载荷方面比较优越,广泛应用于复杂的精密机械中,如航空发动机,精密机床等。单列角接触球轴承只能承受一个方向的轴向载荷,且在承受径向载荷时,会引起附加轴向力。因此,角接触球轴承一般成对使用。双列角接触球轴承依据轴承的凸出量进行组配,凸出量精度直接影响装配的质量,在一些高精度、高速旋转场合,对角接触球轴承凸出量的精度更高,也影响轴承的使用寿命[1-3]。

针对角接触球轴承凸出量测量,徐滨献等[4]根据轴承不同的组配要求与载荷要求,提出了气动加压测量,杠杆加压测量与代用仪器测量 3 种测量方法,为轴承凸出量测量提供了多种选择,但并未对测量方法进行试验验证。姜丽华[5]研制了机械杠杆式预加载荷的测量仪,可

收稿日期:2023-06-18 Received Date: 2023-06-18
*基金项目:国家自然科学基金(51975386)项目资助

在同一仪器上同时测出轴承的凸出量和凹进量,但只是对测量仪器进行了设计,没有进行具体的实验验证。为解决重载荷复杂结构双列角接触球轴承凸出量的测量,曲红利等[6]根据 M804 液压凸出量测量仪的测量原理及被测轴承的结构特征,设计专用测量装置,但该测量方法只能针对重载荷轴承凸出量进行测量,难以实现精密角接触球轴承凸出量测量。刘武发等[7]对轴承生产过程中内圈参数的自动化检测进行了研究,分析了检测装置误差对测量参数的影响,并通过试验验证了仿真模型的准确性,为轴承内圈自动化检测装置的研发提供了理论支持。

因此,本文提出一种微米级光学精密测量方法,适用于 P4/P2 级角接触球轴承凸出量的在线检测。

1　角接触球轴承凸出量测量方法

1.1　轴承凸出量

角接触球轴承凸出量是指轴承在一个套圈端面固定,另一个套圈端面施加预载荷 F 后,两个套圈同一端面的相对距离,如图 1 所示。凸出时,凸出量为“+”值;凹进时,凸出量“-”值。轴承凸出量值与轴承自身尺寸精度相关,包括内外套圈、内外圈滚道、滚动体尺寸。中心轴向载荷的大小与轴承凸出量的变化量有关。预载荷 $F=0$,两个套圈与滚珠刚好接触,同一端面的相对距离为 δ_0。在轴向载荷作用下,内圈相对外圈的偏移量为 δ_a,则角接触球轴承的凸出量[8-10]为:

$$\delta = \delta_0 + \delta_a \tag{1}$$

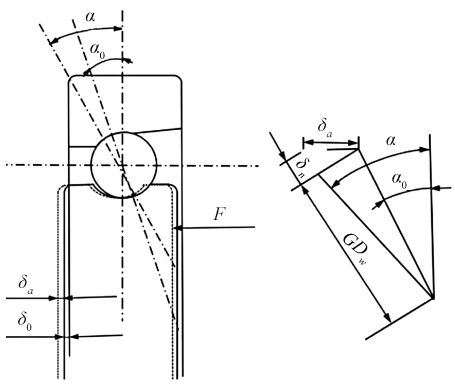


图 1　预载荷作用下角接触球轴承

Fig. 1　Angular contact ball bearings under preload

角接触球轴承在纯轴向载荷作用下,各滚动体的接触载荷为:

$$Q = \frac{F}{Z\sin a} \tag{2}$$

式中:Z 为滚动体个数,a 为实际接触角。

$$(GD_w + \delta_n)\sin a = GD_w \sin a_0 \tag{3}$$

$$G = f_i + f_e - 1 \tag{4}$$

式中:G 为总曲率,f_i、f_e 表示为内外沟槽曲率半径系数,D_w 为滚动体直径。

根据赫兹接触理论,角接触球轴承的接触载荷和接触弹性变形之间关系为:

$$Q = K_n \delta_n^{1.5} \tag{5}$$

由式(2)、(3)、(5)得:

$$\frac{F}{K_n Z (GD_w)^{1.5}} = \sin a \left(\frac{\cos a_0}{\cos a} - 1 \right)^{1.5} \tag{6}$$

$$K_n = \frac{K D_w^{0.5}}{G^{1.5}} \tag{7}$$

式中:K_n 为实际接触角和轴承内部几何参数的函数,轴向载荷-位移常数 K 与 G 的关系如图 2 所示。

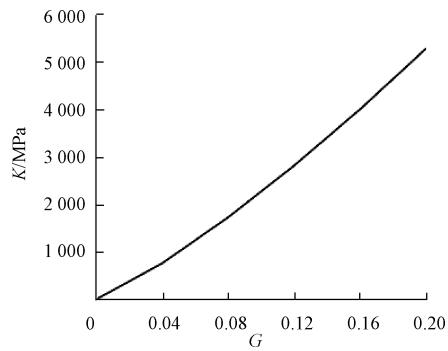


图 2　常数 K 与 G 的关系

Fig. 2　Relationship between constants K and G

将式(7)代入式(6)得:

$$\frac{F}{KZD_w^2} = \sin a \left(\frac{\cos a_0}{\cos a} - 1 \right)^{1.5} \tag{8}$$

在进行轴承实例计算时,根据图 2 中的 G 查出 K 值,通过 *Newton-Raphson* 法对式(8)编程进行数值求解,得到轴承的实际接触角 a。由于 K 值需要根据 G 查图 2 才能获得,将图 2 所述 K 和 G 的关系图进行 5 次多项式拟合,结果为:

$$K = -4.541\,2 \times 10^6 G^5 + 2.925 \times 10^6 G^4 - 7.526\,3 \times 10^5 G^3 + 1.272\,2 \times 10^5 G^2 + 148\,77G + 6.503\,7 \tag{9}$$

将式(9)代入式(8),对式(8)通过编程进行数值求解,得到实际接触角 a,将 a 代入式(3),便可求得法向位移 δ_n。

由图 1 可知,轴向位移 δ_a 和法向位移 δ_n 的关系:

$$\delta_a = (GD_w + \delta_n)\sin a - GD_w \sin a_0 \tag{10}$$

以 7008C 角接触球轴承为例,轴承在承受轴向载荷时,内外圈产生相对位移,轴承凸出量会发生变化,轴向载荷范围(0~300 N)内,施加轴向载荷作用于角接触球

轴承内圈,轴向载荷与凸出量变化量的关系曲线如图 3 所示,轴承凸出量变化趋势随轴向载荷增加逐渐变缓。

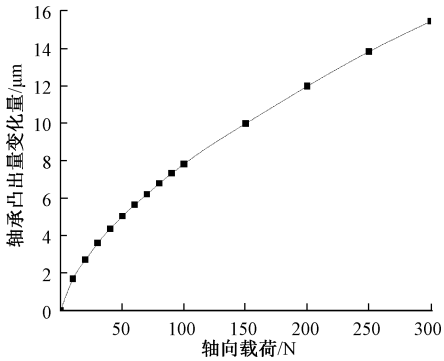


图 3 轴向载荷与轴承凸出量变化量关系曲线

Fig. 3 The relation curve between axial load and bearing protrusion change

1.2 角接触球轴承凸出量测量方法

角接触球轴承凸出量测量原理如图 4 所示,被测轴承内圈装入心轴,使轴承内圈下表面与心轴上表面充分接触,保证轴承内圈端面水平且定位正确,对轴承内圈施加规定的预载荷,转动轴承内圈,使轴承内圈与外圈的沟槽与滚动体处于稳定的接触状态,采用仪表指针对轴承外圈背端面和轴承内圈端面进行测量,通过测量轴承外圈背端面与轴承内圈端面的高度差值,即可测得某点的凸出量,对多点的凸出量进行测量,通过计算求得轴承的平均凸出量。

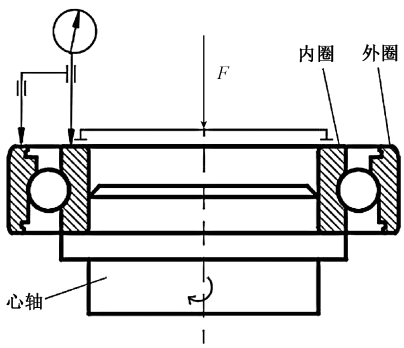


图 4 轴承凸出量测量原理

Fig. 4 Principle of bearing protrusion measurement

基于上述分析,本文研制的角接触球轴承凸出量测量装置如图 5 所示。整个测量装置安装在不锈钢的工作平台上,平台支架脚设有缓冲垫,整体设备具有较好的稳定性。测量装置分为轴承定位夹紧模块、轴承内圈驱动模块和轴承凸出量测量模块。轴承定位夹紧模块采用柔性支承方式,使轴承外圈定位夹紧固定,轴承内圈采用弹性载荷与负载夹紧定位;轴承内圈驱动模块电机作为动力源,驱动轴承内圈转动以满足快速、高精度测量的需求;轴承凸出量测量模块包括传感器的校准与轴承凸出量的测量[11-13]。

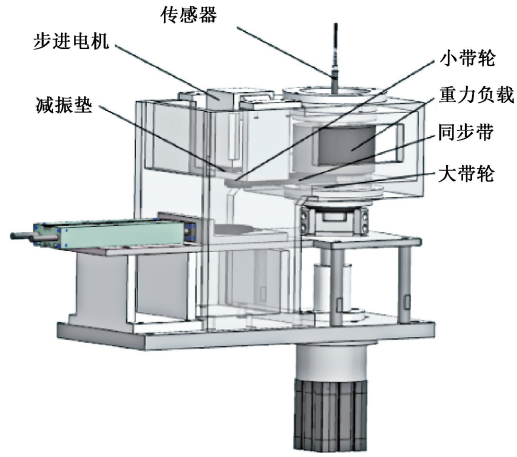


图 5 角接触球轴承凸出量测量装置

Fig. 5 Protrusion measuring device of angular contact ball bearings

1)轴承定位夹紧模块

轴承定位夹紧模块[14-15]用于轴承外圈夹紧固定,对轴承内圈施加预载荷,使被测轴承达到测量所需预载荷,如图 6 所示。

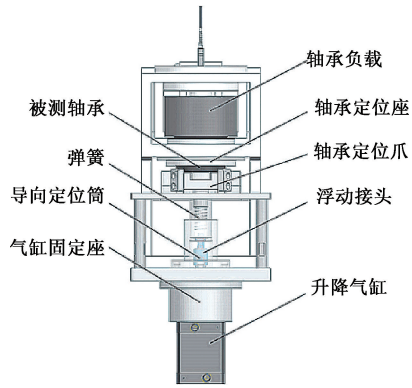


图 6 轴承定位夹紧模块

Fig. 6 Bearing force applying and tightening module

角接触球轴承外圈采用平面定位以及外圆柱表面定位,主要包括轴承定位爪和轴承定位座,轴承定位爪和轴承定位座均采用三角的定位原理,确保轴承定位爪中心 O' 和轴承定位座中心 O'' 轴承外圈中心 O 在一条直线上。轴承外圈通过一端固定一端加载的方式对轴承外圈夹紧固定,轴承定位座与机架固定连接,轴承定位爪与升降气缸活塞杆连接,通过升降气缸做功,推动轴承定位爪,对轴承外圈夹紧固定。可通过更换不同尺寸轴承定位爪,以实现对 7208C、7208AC、7308B、7408B 轴承外圈的夹紧定位。当升降气缸加载力通过轴承作用在机架上,机架产生形变,端面发生倾斜。为避免机架形变对测量产生的影响,气缸活塞杆与轴承定位爪采用浮动接头

连接,轴承外圈跟随机架整体倾斜,确保轴承测量的准确。

轴承内圈采用平面定位和圆柱孔定位,轴承内圈上端施加轴承负载,确保轴承转动的平稳性,下底端施加弹性载荷,使轴承内圈和轴承外圈与滚动体发生赫兹接触,产生相对位移。

轴承内圈加载示意图如图 7 所示。轴承加载前,弹簧在弹簧座内产生 $x_1=4$ mm 的压缩量。轴承加载后,为产生达到测量所需预载荷,轴承内圈进一步对弹簧压缩,产生的 x_2 压缩量。为方便对弹簧的选取,需对加载装置进行设计,x_2 长度控制在 1 mm,当弹簧对轴承压缩时,轴承内外圈端面重合,正好对轴承内圈产生 60 N 预载荷,即所选 $k=24$ N/mm。而由于内外圈端面不平等因素的影响,轴承内圈与外圈会产生几微米的高度差,依据本文所选弹簧系数,会产生微小的加载力,对测量精度忽略不计。

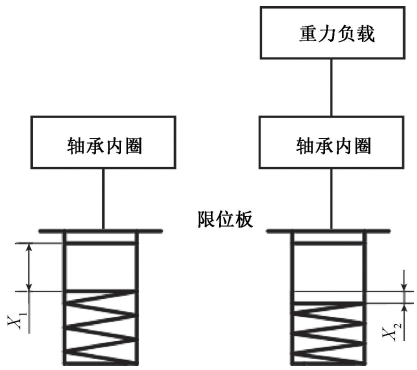


图 7　轴承内圈加载示意图

Fig. 7　Diagram of bearing inner ring loading

2)轴承内圈驱动模块

轴承内圈驱动模块如图 8 所示,主要由小带轮、减振垫、步进电机、同步带、重力负载、大带轮、电机固定架组成。步进电机通过电机固定架安装于机架上面,大带轮安装于轴承负载上,电机驱动小带轮通过同步带带动大带轮转动。重力负载在对轴承内圈施加重力,依靠重力负载与轴承内圈间的静摩擦力实现轴承内圈旋转。

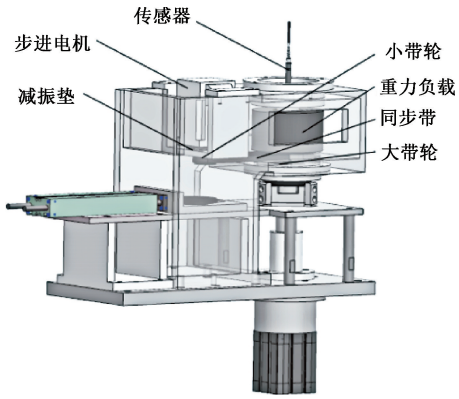


图 8　轴承内圈驱动模块

Fig. 8　Bearing inner ring drive module

3)轴承凸出量测量模块

轴承凸出量测量模块主要包括传感器校准和轴承凸出量测量两部分,如图 9 所示。

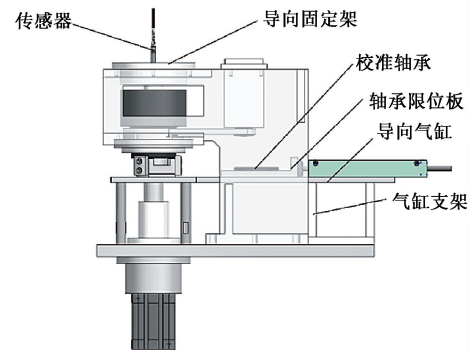


图 9　轴承凸出量测量模块

Fig. 9　Bearing protrusion measurement module

传感器采用光栅刻度尺脉冲位移传感器,测量原理如图 10 所示,采用发光二极管(lighting emitting diode,LED)光源点进行照射,避免了亮度不均的问题。光源透过绝对值玻璃刻度尺照射到超清晰互补金属氧化物半导体(complementary metal-oride-semiconductor,CMOS)上,摄像元件可高敏感度接收 LED 光。通过 I-Processor 算法,实现了对超清晰 CMOS 传感器发出的输出信号的高速、高分辨率计算处理,测量精度达到 1 μm,分辨率为 0.1 μm[16]。

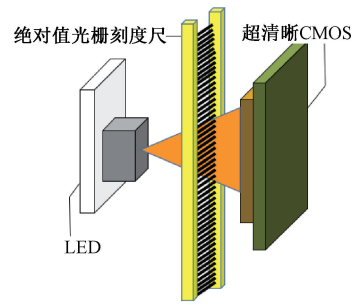


图 10　光栅位移传感器原理

Fig. 10　Principle of the grating displacement sensor

采用相对测量法对被测轴承进行测量[17],测量前对测量装置进行传感器校准,校准轴承为内外圈端面平行的圆环。校准轴承放置于轴承限位板内,由导向气缸推动限位板,使校准轴承准确到达轴承检测位置,测量装置对校准轴承夹紧固定,对传感器进行校准,记录传感器数值为标准值,对被测轴承进行测量,求取平均数即为被测轴承平均凸出量。

2 测量装置精度分析

影响测量装置精度的因素主要包括:传感器的测量精度和分辨率、轴承外圈的夹紧力、电机振动引起机架的简谐振动。

角接触球轴承凸出量精密测量过程需气缸和负载对轴承进行夹紧定位。夹紧力过大,机架和角接触球轴承外圈发生形变,夹紧力过小,轴承外圈不能与机架充分接触,从而影响轴承凸出量测量精度,需要选择合适的夹紧力,轴承测量驱动装置采用步进电机驱动,需对电机振动产生的影响进行分析[18-19]。

2.1 夹紧力计算

根据轴承测量原理,需要对轴承外圈夹紧固定,为保证轴承外圈与定位机架充分接触以及减小电机振动对测量精度的影响。采用 500 N 加载力对轴承外圈进行夹紧固定,加载力会使轴承与机架产生微弱的变形,由此也会产生一定的测量误差,需经过有限元计算,保证夹紧及测量的准确性。

机架底端采用固定约束,被测轴承下端承受 $F=500$ N 的气缸负载,机架模型为四面体网格,机架材料属性如表 1 所示,其网格模型的单元为 125 948 个,节点为 222 070 个。

表 1 机架材料属性

Table 1 Frame material properties

材料	密度 $\rho/(\mathrm{kg\cdot m^{-3}})$	弹性模量 E/GPa	泊松比 ν
Q235	7 860	210	0.29

机架应变分布如图 11 所示,在轴向加载力的作用下,机架端面产生 9.81 μm 的变形,采用浮动接头连接升降气缸与定位轴承爪,使被测轴承测量时与机架一起发生倾斜,避免机架形变对测量精度产生影响。

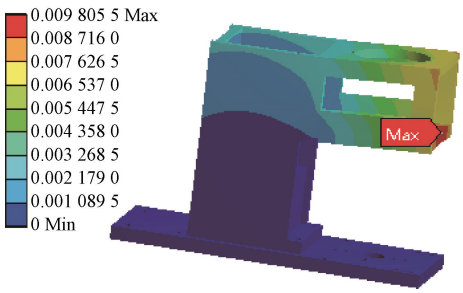


图 11 机架应变分布图

Fig. 11 Frame strain distribution diagram

2.2 机架简谐振动分析

角接触球轴承凸出量精密测量采用步进电机作为驱动源,轴承测量需要进行低速驱动,步进电机由于低频特性和自身精度误差,电机转动[18]产生振动会对机架和传感器造成精度影响,需对电机振动进行有限元仿真,步进电机产生沿 Z 轴方向上下简谐振动 $x(t)$。

$$x(t)=A\sin(\omega t+\phi) \tag{11}$$

式中:$x(t)$为振动位移,A 为振幅,ω 为圆频率,ϕ 为初相位。

电机简谐振动约束条件如图 12 所示,对测量装置底侧进行固定约束,以步进电机作为简谐振动激励源,经步进电机产品说明书查,电机产生沿 Z 轴方向上下 10 μm 振动位移,为减小电机简谐振动对测量精度的影响,电机与机架采用减振垫连接。仿真前,对测量装置进行预处理,装置采用 Q235 材料,减振垫为橡胶材料,材料属性如表 2 所示,把电机振动当做固定激振源,进行简谐振动分析,由于角接触球轴承凸出量在低速低频下进行测量,选取 0~100 Hz 激励频率。分析电机振动对传感器测头产生的影响。

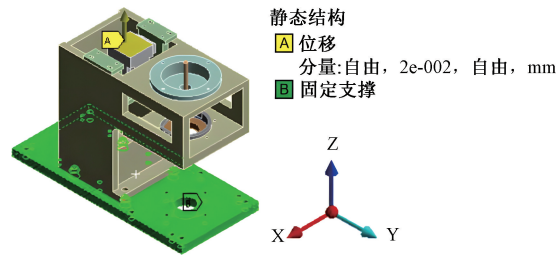


图 12 测量装置固定约束与激励载荷分布图

Fig. 12 Distribution of fixed restraint and excitation load of the measuring device

表 2 减震垫橡胶材料属性

Table 2 Rubber material properties of shock absorbing pad

材料	密度 $\rho/(\mathrm{kg\cdot m^{-3}})$	弹性模量 E/GPa	泊松比 ν
橡胶	0.94	0.007 8	0.48

传感器测头沿 Z 轴频谱曲线如图 13 所示。传感器测头为节点,进行频率响应,在 0~100 Hz 传感器侧头振动幅值减小到 0.029 μm。

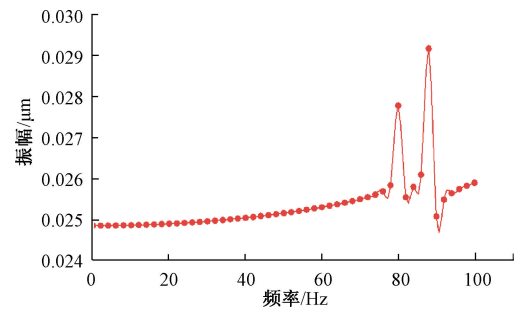


图 13 传感器测头 Z 轴方向频谱曲线

Fig. 13 Sensor side head Z-axis direction spectrum curve

3　精度验证试验

3.1　测量装置精度验证

随机抽取一套尺寸为 φ40×φ68×15 mm 的 7008C-2RZ/P2.01 型角接触球轴承作为被测轴承,其凸出量数值分别为+7 μm 和−7 μm,利用本文所提出的角接触球轴承凸出量测量方法对角接触球轴承进行测量,测量试验平台如图 14 所示。测量前,需对传感器进行校准,角接触球轴承旋转两圈测量数值如图 15 所示。

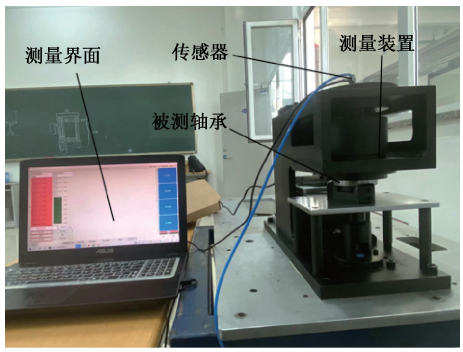
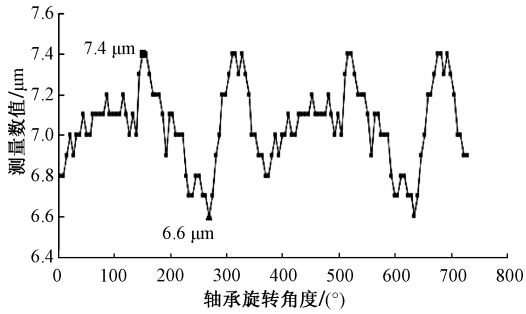


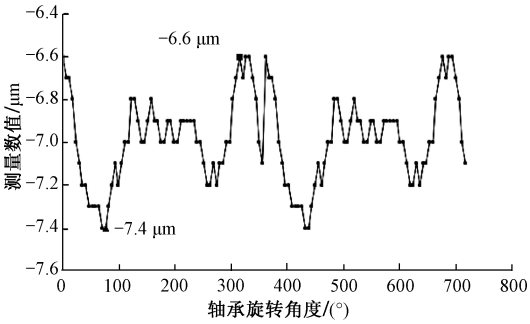
图 14　角接触球轴承凸出量测量装置

Fig. 14　Measuring device for angular contact ball bearings protrusion



(a) +7 μm角接触球轴承测量数值

(a) +7 μm angular contact ball bearings measurement values



(b) −7 μm 角接触球轴承测量数值

(b) −7 μm angular contact ball bearings measurement values

图 15　±7 μm 角接触球轴承测量数值

Fig. 15　±7 μm angular contact ball bearings measurement values

由图 15 可知,+7 μm 角接触球轴承测量数值与−7 μm 角接触球轴承测量数值单次时,瞬时量值与单次测量平均值相差小于 0.4 μm,测量精度满足 0.5 μm 的需求。

3.2　测量装置可靠性验证

为验证测量装置可靠性,分别在 0°、120°、240°。对+7 μm 和−7 μm 角接触球轴承进行 10 次测量,每次测量求取算数平均值,所得测量数据如表 3、4 所示。

表 3　+7 μm 角接触球轴承测量数据

Table 3　+7 μm angular contact ball bearings measurement data

序号	0°测试值	120°测试值	240°测试值
1	7.2	6.7	6.7
2	7.0	7.1	7.0
3	7.0	6.8	6.6
4	6.9	7.1	6.8
5	6.6	6.6	7.1
6	7.0	7.2	7.2
7	6.9	6.8	6.8
8	7.1	7.0	7.1
9	7.1	7.1	7.0
10	6.8	7.0	7.1

表 4　−7 μm 角接触球轴承测量数据

Table 4　−7 μm angular contact ball bearings measurement data

序号	0°测试值	120°测试值	240°测试值
1	−7.3	−7.1	−6.7
2	−7.2	−7.0	−6.8
3	−7.1	−6.9	−6.8
4	−7.0	−6.6	−7.0
5	−6.9	−6.7	−6.9
6	−7.0	−6.9	−6.8
7	−6.9	−6.9	−6.9
8	−6.9	−7.0	−6.8
9	−6.9	−6.6	−7.1
10	−7.0	−6.8	−7.0

对于直接测得的角接触球轴承凸出量数据,由于符合正态分布的原则,因此采用算术平均值、剩余误差、样本标准差以及算术平均值的标准误差对测量数据进行处理,计算结果如表 5 所示。

表 5 ±7 μm 角接触球轴承测量数据计算结果

Table 5 ±7 μm angular contact ball bearings measurement data calculation results

型号	R	$\hat{a}$	S	$\delta_{\lim(R)}$
+7 μm	6.94	0.20	0.04	±0.11
−7 μm	−6.92	0.16	0.03	±0.09

对于轴承凸出量测量数据 $\{r_i\}$,其样本数据的算术平均值 R 为:

$$R = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} r_i \tag{12}$$

计算样本数据的剩余误差:

$$l_i = r_i - R \tag{13}$$

计算样本数据的标准差:

$$\hat{a} = \sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n} l_i^2} \tag{14}$$

计算样本数据的算术平均值误差:

$$S = \frac{\hat{a}}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)}\sum_{i=1}^{n} l_i^2} \tag{15}$$

算术平均值的测量数据极限误差:

$$\delta_{\lim(R)} = \pm 3S \tag{16}$$

由于样本数据总体成正态分布,进而得到以下结论。

$r = R \pm \delta_{\lim(R)}$,置信度为 99.7%。 (17)

从±7 μm 的角接触球轴承中,选取了 10 组组配的轴承,通过试验测得平均数值分别为 6.94 和−6.92 μm,偏差小于 0.2 μm。

4 结 论

本文提出了一种角接触球轴承凸出量光学精密测量方法,并研制了测量装置。适用于 7008C、7008AC 轴承凸出量的测量,通过更换不同尺寸轴承定位爪,可实现对 7208C、7208AC、7308B、7408B 等内圈直径为 40 mm的角接触球轴承凸出量的测量。轴承外圈定位夹紧,内圈施加恒定预载荷,使轴承内外圈与滚动体发生赫兹接触。电机通过同步带驱动内圈旋转,COMS 传感器实时记录轴承凸出量数值。分析了轴承套圈和滚子之间的赫兹接触,揭示轴承凸出量变化量与轴向载荷之间的关系。基于有限单元法分别对测量装置的机架和内圈驱动进行变形分析和简谐振动分析,对测量装置进行优化,优化后传感器测头振动幅值减小到 0.029 μm。利用本文测量方法和装置进行 7008C(P2)轴承凸出量测量试验,验证结果显示,测量精度达到 0.5 μm,实测样件偏差小于 0.2 μm。

参考文献

[1] 刘文英. 精密和超精密加工机床的现状与发展[J]. 设备管理与维修, 2017(11): 108-109.
LIU W Y. Current situation and development of precision and ultra-precision machining machine tools [J]. Equipment Management and Maintenance, 2017(11): 108-109.

[2] CHEN Y, WU X Z, WANG X Y, et al. Clearance-induced contact trajectory uncertainty of angular contact ball bearing under coupling operating condition [J]. Meccanica, 2022, 58(1).

[3] 李红涛, 张振强, 张伟, 等. 组配角接触球轴承的预紧力及刚度[J]. 轴承, 2021(10): 20-23.
LI H T, ZHANG ZH Q, ZHANG W, et al. Preload force and stiffness of contact ball bearing [J]. Journal of Bearing, 2021(10): 20-23.

[4] 徐滨献, 胡平, 刘昊扬. 角接触球轴承组配与凸出量测量方法[J]. 哈尔滨轴承, 2014, 35(2): 58-60.
XU B X, HU P, LIU H Y. Combination and protrusion measurement method of angular contact ball bearing[J]. Harbin Bearing, 2014, 35(2): 58-60.

[5] 姜丽华. 角接触球轴承凸出量测量仪[J]. 轴承, 2008(11): 33-35.
JIANG L H. Angle contact ball bearing protrusion measuring instrument[J]. Bearing, 2008(11): 33-35.

[6] 曲红利, 刘辉军, 闫继山, 等. 重载荷复杂结构双列角接触球轴承凸出量的测量[J]. 轴承, 2015(11): 54-56.
QU H L, LIU H J, YAN J SH, et al. Measurement of protrusion of double row angular contact ball bearing with heavy load complex structure[J]. Bearing, 2015(11): 54-56.

[7] 刘武发, 李 攀, 王福荣, 等. 基于 ADAMS 的轴承内圈内径形位公差检测装置研究[J]. 机械设计与制造, 2021(1): 197-201.
LIU W F, LI P, WANG F R, et al. Research on tolerance detection device of bearing inner diameter based on ADAMS [J]. Machinery Design & Manufacture, 2021 (1): 197-201.

[8] 刘胜超, 徐海利, 刘志恒, 等. 轴向载荷作用下角接触球轴承轴向位移分析[J]. 轴承 2016:(1)5-8.
LIU SH CH, XU H L, LIU ZH H, et al. Analysis of axial displacement of angular contact ball bearing under axial load[J]. Bearing, 2016:(1) 5-8.

[9] LI K Y, TANG W CH. Load-displacement relatio-nship model and measurement of deep groove ball bearing and 4-point contact ball bearing[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2021, 35(7): 3045-3058.

[10] AYDIN G, JASON T. DREYER, et al. Effect of bearing preloads on the modal characteristics of a shaft-bearing assembly: Experiments on double row angular contact ball bearings[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2012, 31:176-195.

[11] 杜建建, 潘贤德, 刘天一. 航空发动机角接触球轴承轴向力间接测量方法[J]. 航空学报, 2022, 43(9): 184-191.
DU J J, PAN X D, LIU T Y. Indirect measure-ment of axial force of angular contact ball bearing in aeroengine[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2022, 43(9):184-191.

[12] 任同群, 秦波, 刘指柔, 等. 动压气浮马达轴承间隙测量设备[J]. 光学 精密工程, 2018, 26(11): 2714-2722.
REN T Q, QIN B, LIU ZH R, et al. Measuring equipment for bearing clearance of dynamic pneumatic floating motor[J]. Optical Precision Engineering, 2018, 26(11): 2714-2722.

[13] 胡鹏浩, 胡毅, 党学明, 等. 精密角接触球轴承综合参数测量仪[J]. 光学 精密工程, 2018, 26(11): 3038-3842.
HU P H, HU Y, DANG X M, et al. Precision angular contact ball bearing comprehensive parameter measuring instrument[J]. Optical Precision Engineering, 2018, 26(11): 3038-3842.

[14] 郝大庆, 李副来, 张炜, 等. 轴承外圈跳动测量仪[J]. 轴承 2014(5): 57-58.
HAO D Q, LI F L, ZHANG W, et al. Bearing outer race runout tester[J]. Bearing, 2014(5): 57-58.

[15] 张智敏, 李涛, 张跃, 等. 高准确度微小扭矩标准装置研究[J]. 计量学报, 2018,39(2):155-158.
ZHANG ZH M, LI T, ZHANG Y, et al. Research on high accuracy micro torque standard device[J]. Journal of Metrology, 2018,39(2):155-158.

[16] 张利胜, 王坤, 郑世强. 磁轴承用新型自感位移传感器设计与实验研究[J]. 仪器仪表学报,2018,39(1): 100-109.
ZHANG L SH, WANG K, ZHENG SH Q. Design and experimental study of a new self-sensing displacement sensor for magnetic bearing[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument,2018,39(1):100-109.

[17] 李兵, 程凯, 孙彬, 等. 基于光幕的偏心轴轴径自动测量装置及测量方法[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(6):1-10.
LI B, CHENG K, SUN B, et al. Automatic measuring device and measuring method of eccentric shaft diameter based on light curtain[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument,2018,39(6):1-10.

[18] 周丰, 赵浩. 复合式罩极电机扭转振动检测与分析[J]. 计量学报, 2021, 42(11):1482-1487.
ZHOU F, ZHAO H. Torsional vibration detection of composite shaded pole motor and analysis[J]. Journal of Metrology, 2021, 42(11): 1482-1487.

[19] 王世佳, 王世博, 刘万里. 采煤机截割高度测量模型与测量误差分析[J]. 仪器仪表学报,2021,42(4): 140-149.
WANG SH J, WANG SH B, LIU W L. Cutting height measurement model and error analysis of shearer[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021,42(4): 140-149.

作者简介

赵文辉,1996 年于东北大学获得学士学位,2003 年于东北大学获得硕士学位,2008 年于日本八户工业大学获得博士学位,现为沈阳工业大学副教授、博士生导师,主要研究方向为复杂曲面精密测量与数控加工。

E-mail: zhaowenhui@ sut. edu. cn

Zhao Wenhui received his B. Sc. degree from Northeastern University in 1996, received his M. Sc. degree from Northeastern University in 2003, and received his Ph. D. degree from Hachinohe Institute of Technology in 2008. He is currently an associate professor and a Ph. D. advisor at Shenyang University of Technology. His main research interests include complex surface precision measurement and CNC machining.

张浩(通信作者),2019 年于青岛科技大学获得学士学位,现为沈阳工业大学硕士研究生,主要研究方向为机械设计及其自动化。

E-mail: 1301176085@ qq. com

Zhang Hao (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Qingdao University of Science and Technology in 2019. He is currently a master student at Shenyang University of Technology. His main research interests include mechanical design and automation.