

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2413191

轴承径向跳动气压驱动精密测量方法研究*

王峻峰, 赵文辉, 王飞, 陈久旭, 毛力
(沈阳工业大学 沈阳 110870)

摘要:为实现 P4/P2 级角接触球轴承外圈径向跳动的在线自动测量,提出了相对法气压驱动精密测量方法,并研制了测量装置。采用有限元分析计算了电机驱动和气压驱动对测量精度的影响,结果显示采用气压驱动方式对测量精度的影响小于电机连续驱动方式,确定了以气压驱动作为测量装置的驱动方式。基于三角函数变换的测量误差与轴线偏差之间的几何关系,建立了轴承轴向垂直偏差角、偏移量和径向垂直偏差角与测量误差的非线性数学模型。数值分析结果显示轴向垂直偏差角在 $0^\circ \sim 0.1^\circ$, 偏移量在 $0 \sim 0.1$ mm, 径向垂直偏差角在 $0^\circ \sim 0.1^\circ$ 时,综合测量误差的最大值为外圈径向跳动量的 7.5×10^{-6} 倍。最后,以 2 组 7008C/P4 级角接触球轴承(出厂检定外圈径向跳动为 $2, 3 \mu\text{m}$)进行精度验证。结果表明:测量重复精度为 $0.3 \mu\text{m}$ 。

关键词: 径向跳动; 气压驱动; 相对测量法; 光栅位移传感器; 精度验证试验

中图分类号: TH133 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 460.40

Research on precision measurement method of pneumatic drive for radial run-out of bearing

Wang Junfeng, Zhao Wenhui, Wang Fei, Chen Jiuxu, Mao Li
(Shenyang University of Technology, Shenyang 110000, China)

Abstract: In order to achieve the online automatic measurement of the radial runout of the outer ring of P4/P2 angular contact ball bearings, we proposed a relative Pneumatic driven precision measurement method and have developed an accompanying measuring device. Through finite element analysis, we assessed the influence of both motor drive and pneumatic drive on the measurement accuracy. The results show that pneumatic drive exerts a lesser influence on accuracy compared to continuous motor drive, leading us to adopt pneumatic actuation for our device. A nonlinear mathematical model of the axial vertical deviation angle, offset and radial vertical deviation angle of the bearing, as well as the measurement error, is established based on the geometric relationship between the aforementioned variables and the axis deviation of the trigonometric function transformation. The results of the numerical analysis demonstrate that when the axial vertical deviation angle is within the range of $0^\circ \sim 0.1^\circ$, the offset is within the range of $0 \sim 0.1$ mm, and the radial vertical deviation angle is also within the aforementioned range. The maximum value of comprehensive measurement error is 7.5×10^{-6} times the radial runout of the outer ring. Finally, two groups of 7008C/P4 angular contact ball bearings (factory-verified outer ring radial run-out of $2, 3 \mu\text{m}$) were employed for accuracy verification. The results indicate that the measurement repeatability is $0.3 \mu\text{m}$.

Keywords: radial runout; pneumatic drive; relative measurement method; raster displacement sensor; accuracy verification test

0 引言

轴承外圈径向跳动是指外圈外表面在外圈不同的角位置相对内圈任一固定点间的最大与最小径向距离

之差^[1-2],是轴承精度等级划分的重要依据之一。径向跳动会导致轴承表面受力分布不均匀,从而引起噪声、振动,甚至损坏^[3-6]。在一些高精度、高转速的设备中,轴承的旋转精度对设备中轴的旋转性能起着重要的作用^[7-9]。

收稿日期:2024-08-20 Received Date: 2024-08-20

* 基金项目:国家自然科学基金(51975386)项目资助

对于轴承径向跳动的测量,国内外的专家、学者做了大量的研究。Okamoto等^[10]设计了一种轴承径向跳动测量装置,该装置以精确模拟轴承外圈圆度误差为目标,并通过机械式主轴对轴承进行测试。余永健^[11]设计了一种圆柱滚子轴承旋转精度的测量装置和方法。在无需人工干预的情况下,对轴承内圈在径向平面内的跳动进行等角度的自动采样,完整地记录和分析圆柱滚子轴承的跳动过程。此外,该装置还可用于精确测量轴承内圈的径向跳动、运动轨迹以及跳动量,测量数据与预测数据的误差为13%。孟艳艳等^[12]依据手动压力机的原理,设计了一种压力可调式轴向跳动测量仪,用于外径80~400 mm的轴承的测量,重复测量精度为1 μm。郝大庆等^[13]设计了一种用来检测角接触球轴承外圈跳动的专用仪器,可用于测量外径为19~110 mm的角接触球轴承,外圈径向跳动测量的重复测量精度为1 μm,轴向跳动测量的重复测量精度为1.5 μm。

为进一步提升轴承外圈径向跳动测量精度并实现在线测量,提出了一种气压驱动精密测量方法,用于P4/P2级轴承外圈径向跳动的测量。

1 轴承外圈径向跳动测量方法

轴承外圈径向跳动的测量原理如图1所示。在内圈固定的被测轴承外圈基准端面上施加中心轴向载荷 F 以确保滚动体与滚道之间的充分接触^[14-15]。外圈在旋转一圈的过程中读取外圈外表面中部的测量值。指示仪表所记录数据的最大值与最小值之差,即为轴承外圈的径向跳动值^[16]。

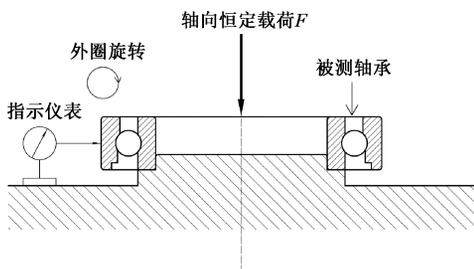


图1 轴承外圈径向跳动测量原理

Fig. 1 Measurement principle of radial runout of bearing outer ring

基于上述轴承外圈径向跳动测量原理,本文提出了轴承外圈径向跳动的测量方法,并研制了测量装置,其结构如图2所示。

1.1 轴承内圈的定位与固定

测量装置采用轴承内圈定位与夹紧结构实现轴承的升降、定位与固定。该结构主要包括升降气缸、气缸固定

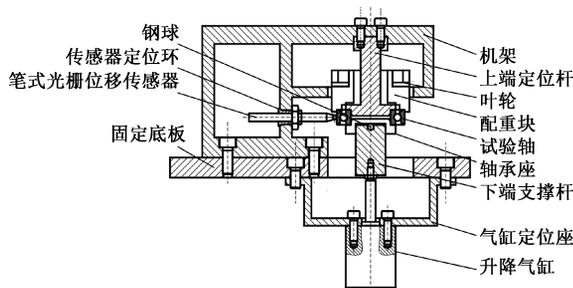


图2 轴承外圈径向跳动测量装置结构

Fig. 2 Structural diagram of the radial runout measurement device of bearing outer ring

座、下端支撑杆、固定底板、试验轴承、轴承座、钢球、上端定位杆以及机架。

轴承内圈采用平面与外圆柱面组合的定位方式对轴承内圈进行定位,限制了轴承内圈的5个自由度,通过升降气缸对内圈加载,实现了对轴承内圈的夹紧。为确保定位的准确性,该结构选择上端定位杆的端面和外圆柱表面作为轴承内圈定位的基准,并在下端支撑杆中装入一个直径为5 mm的钢球。在下端支撑杆与轴承座的装配中,钢球与轴承座底部接触,凸出下端支撑杆上端面1 mm,以适应上端定位杆作为定位基准对轴承内圈进行定位。通过气缸将活塞杆伸出,推动轴承向上移动,轴承内圈端面与上端定位杆端面接触,实现对轴承内圈的自动夹紧。另外,可以通过更换不同尺寸的上端定位杆和轴承座,实现对内径为30~60 mm的轴承外圈进行径向跳动的测量。

1.2 轴承外圈的加载

为确保滚动体与滚道充分接触,轴承外圈加载采用在轴承外圈施加轴向静态载荷的方式,常用的静载加载方式包括了重力加载、气压加载、液压加载和机械力加载。由于所需的加载力是恒定不变的,因此本装置采用配重块的重力载荷作为加载方式,且加载力的方向满足“阿贝原则”,即载荷沿着轴承轴线方向施加。另外,本装置可根据不同大小轴承的外圈尺寸来分别设计不同重量的配重块,以满足不同轴承的载荷要求。

1.3 轴承外圈的驱动

轴承外圈在转动中应保证平稳,以减小对测量结果的影响。同时,为实现在线测量,轴承外圈的转动可通过电机驱动和气压驱动的方式来实现。通过对两种驱动方式分别进行有限元仿真分析,确定轴承外圈的驱动方式,以提高测量装置的测量精度。

1) 电机驱动分析

当采用步进电机作为驱动源时,电机在转动过程中,会产生激励载荷,此时测量装置和笔式光栅位移传感器会产生不同程度的被迫振动,导致测量结果受到影响,因

而应分析电机振动对传感器测头的影响。由于电机产生的振动为简谐振动,采用谐响应分析计算测量装置在简谐激励作用下的稳态响应。

在试验中,电机是在低频低转速下实现的,且在轴承径向跳动的方向上产生的最大位移为 $10\ \mu\text{m}$ 。在谐响应分析中,对电机施加振动位移,其最大幅值为 $10\ \mu\text{m}$,激励频率 $0\sim 100\ \text{Hz}$,并对机架施加固定约束,求解电机振动对于传感器测头的影响。

谐响应分析结果如图 3 所示,电机振动造成位移传感器测头在轴承径向跳动方向上的振动位移量最大为 $1.4\ \mu\text{m}$ 。

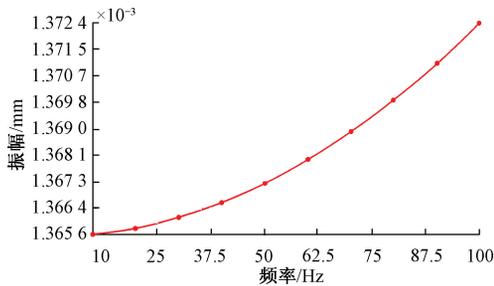


图 3 电机驱动下传感器测头在径向跳动方向的频谱曲线

Fig. 3 Spectral curve of the sensor probe in the radial runout direction driven by motor

2) 气压驱动分析

气压驱动相比较于电机驱动,可以消除振动对于测量精度的影响,但其驱动工作压力较低,无法满足于一些大型轴承的测量。因此,针对精度等级低的大型轴承的测量,选择电机驱动,精度等级高的小型轴承的测量,选择气压驱动。

当气压驱动叶轮转动达到稳定状态后,关闭气源,此时叶轮、测量载荷与轴承外圈会在惯性作用下继续转动。但因叶轮位于轴承上方,当气体驱动叶轮旋转时会导致轴承从静止到开始旋转过程中产生轻微晃动,对测量结果产生影响,因而需要验证气压驱动方式下测量装置对测量结果的影响。

利用有限元分析气压驱动下测量装置对测量结果的影响,该有限元模型不考虑测量装置及被测轴承的装配与制造等误差,即两者为理论状态。采用动力学算法模拟在气体吹动下叶轮的旋转过程。考虑到仿真计算量,本分析仅计算轴承旋转 $4\ \text{s}$ 时长,考察轴承外圈形心在径向上的位移变化,即传感器测头在其轴线方向上的位移变化,如图 4 所示。

从上图计算结果中可以看出,在施加气压载荷过程中(外圈转动角度约 330°),轴承从静止到转动时产生轻微的振动,外圈形心径向最大位移量可达 $0.82\ \mu\text{m}$,当气压载荷移除后,轴承旋转趋于平稳,外圈形心径向位移减

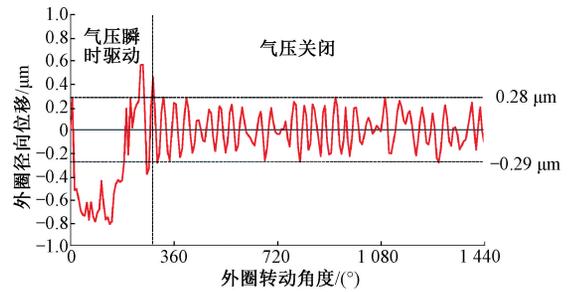


图 4 气压驱动下传感器测头在其轴线方向上的位移变化结果

Fig. 4 Displacement result of the sensor probe in the axis direction under pneumatic driven

小,其最大位移量为 $0.29\ \mu\text{m}$,此时对测量精度影响较小,且小于电机连续驱动方式对测量精度的影响。

根据上述分析结果,本测量装置采用气压驱动方式,即压缩空气瞬时驱动叶轮转动,通过配重块与轴承外圈之间的摩擦力带动轴承外圈的转动,当轴承外圈处在稳定转动状态时,轴承外圈会在惯性作用下继续转动,此时记录测量数据。相比较于常见的采用电机驱动轴承外圈转动的方式,气压驱动方式会降低振动对测量结果的影响,使得测量精度更高。

1.4 径向跳动量的测量

轴承径向跳动量的测量采用的是笔式光栅位移传感器,在径向跳动测量装置中横向安装。该传感器量程为 $12\ \text{mm}$,测量精度为 $1\ \mu\text{m}$,分辨率为 $0.1\ \mu\text{m}$,其工作原理如图 5 所示,气压为 $0.05\sim 0.07\ \text{MPa}$ 的压缩空气压力使测头伸出与被测物表面接触,并随着被测物表面的变化而伸缩。传感器内部的 LED 光源透过绝对值玻璃刻度尺,形成明暗相间的莫尔条纹,CMOS 高速拍摄莫尔条纹获得测量值^[17-18]。测量时,将笔式光栅位移传感器合金测头与轴承外圈表面接触,在轴承外圈旋转过程中通过求取测头在不同位置下的测量值之差,即采用相对测量法来获得轴承的径向跳动量。

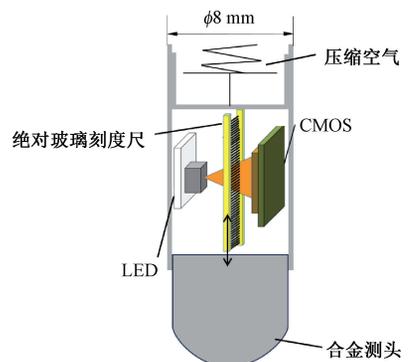


图 5 笔式光栅位移传感器测量原理

Fig. 5 Measurement principle of grating displacement sensor

2 装配精度与误差分析

由于加工中不可避免的出现加工及装配误差因素,对测量结果产生一定的影响,因而需要分析加工精度和装配精度对轴承径向跳动测量结果的影响。该测量装置关键零件加工与装配精度要求如图6所示。本文从笔式光栅位移传感器球头接触点的变化、传感器轴线与轴承外圈轴向垂直偏差以及传感器轴线未通过轴承中心线3个加工与装配误差因素对装置测量精度的影响进行分析。

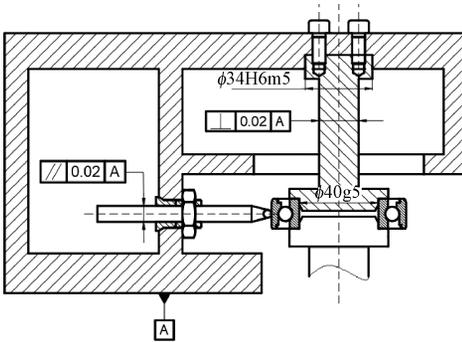


图6 加工精度与装配精度

Fig. 6 Machining and assembly accuracy

1) 笔式光栅位移传感器球头接触点变化引起的误差分析

所选用的笔式光栅位移传感器球头直径为2 mm,受零件加工与装配精度的影响,传感器与轴承外圈存在垂直度偏差,导致轴承外圈与传感器球头的接触点发生变化,垂直度偏差为 δ 时,单点的测量误差为 $\left(\frac{2}{\cos \delta} - 2\right)$ mm,外圈径向跳动是指外圈转动一圈,跳动量的最大值与最小值之差,在此过程中,传感器球头的接触点是不发生变化的。在计算外圈径向跳动时,单点的测量误差会被抵消。传感器球头的接触点对于最终径向跳动结果没有影响,因而下面的分析中不再考虑球头接触点的位置,仅对外圈与传感器轴线的关系进行分析。

2) 传感器轴线与轴承外圈轴向垂直偏差引起的误差分析

如图6所示,传感器轴线与基准平面A的平行度为0.02 mm,其最大偏转角度记为 α ,则:

$$\alpha = \tan^{-1}\left(\frac{0.02}{l}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{0.02}{75}\right) \approx 0.015^\circ \quad (2)$$

式中: l 为传感器定位孔到轴承外圈测量点的距离。

如图6所示,上端定位杆轴线与基准平面的垂直度为0.02 mm,其最大偏转角度记为 β ,则:

$$\beta = \tan^{-1}\left(\frac{0.02}{h}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{0.02}{66}\right) \approx 0.017^\circ \quad (3)$$

式中: h 为定位杆长度。

传感器轴线与轴承外圈的轴向垂直偏差角记为 δ ,如图7所示。

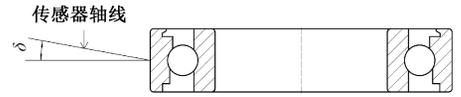


图7 传感器轴线与轴承外圈的轴向垂直偏差角

Fig. 7 The vertical deviation angle between the axis of the sensor and the outer ring of the bearings

传感器轴线与轴承外圈的轴向垂直偏差角同轴承外圈径向跳动测量值误差的关系见式(4)。轴承外圈转动一圈,传感器记录的最大值为 L_{\max} ,最小值记为 L_{\min} ,测量值误差记为 T_0 。

$$T_0 = \frac{1 - \cos \delta}{\cos \delta} \times (L_{\max} - L_{\min}) \quad (4)$$

令 $k_0 = \frac{1 - \cos \delta}{\cos \delta}$,式(4)可以改写成:

$$T_0 = k_0 \times (L_{\max} - L_{\min}) \quad (5)$$

k_0 与轴向垂直偏差角 δ 的关系如图8所示。

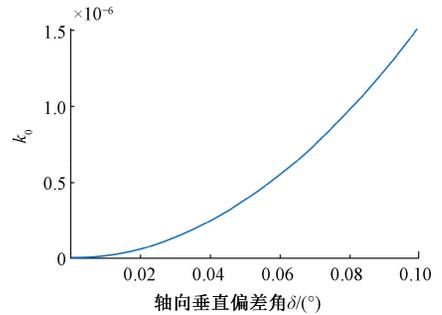


图8 k_0 与轴向垂直偏差角 δ 的关系

Fig. 8 The relationship between k_0 and vertical axial deviation angle δ

根据图8中 k_0 与轴向垂直偏差角 δ 的关系可知,测量值误差 T_0 与轴向垂直偏差角 δ 表现为非线性相关,且随着垂直度偏差角的增大,测量值误差的增速也在加快。当轴向垂直偏差角 δ 在 $0^\circ \sim 0.1^\circ$ 之间时, k_0 最大值为 1.5×10^{-6} 。

3) 传感器轴线未通过轴承中心线引起的误差分析

假设传感器轴线与轴承中心线之间的偏移量为 b ,径向垂直偏差角为 η ,如图9所示。

通过偏移量 b ,转化为偏移角度 θ ,则

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{b}{R}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{b}{34}\right) \quad (6)$$

式中: R 为被测轴承外径。

将偏移量为 b 时的测量值误差记为 T'_1 ,则:

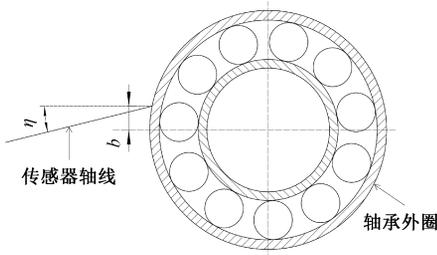


图 9 传感器轴线未通过轴承中心线

Fig. 9 Sensor axis not passing through bearings centerline

$$T'_1 = \frac{1 - \cos\theta}{\cos\theta} \times (L_{\max} - L_{\min}) \quad (7)$$

将式(6)代入到(7)中,通过三角函数关系进行化简可得:

$$T'_1 = \left(\sqrt{\left(\frac{b}{34}\right)^2 + 1} - 1 \right) \times (L_{\max} - L_{\min}) \quad (8)$$

令 $k'_1 = \left(\sqrt{\left(\frac{b}{34}\right)^2 + 1} - 1 \right)$, 式(8)可改写成:

$$T'_1 = k'_1 \times (L_{\max} - L_{\min}) \quad (9)$$

将径向垂直偏差角为 η 时的测量值误差记为 T''_1 , 则:

$$T''_1 = \frac{1 - \cos\eta}{\cos\eta} \times (L_{\max} - L_{\min}) \quad (10)$$

令 $k''_1 = \frac{1 - \cos\eta}{\cos\eta}$, 式(10)可改写成:

$$T''_1 = k''_1 \times (L_{\max} - L_{\min}) \quad (11)$$

将偏移量为 b , 径向垂直偏差角为 η 时的综合测量误差记为 T_1 , 则:

$$T_1 = T'_1 + T''_1 = (k'_1 + k''_1) \times (L_{\max} - L_{\min}) \quad (12)$$

$$k_1 = k'_1 + k''_1 = \left(\sqrt{\left(\frac{b}{34}\right)^2 + 1} - 1 \right) + \frac{1 - \cos\eta}{\cos\eta},$$

式(12)可改写成:

$$T_1 = k_1 \times (L_{\max} - L_{\min}) \quad (13)$$

k_1 与偏移量 b 以及径向垂直偏差角 η 的关系如图 10 所示。

根据上图 k_1 与偏移量 b 和径向垂直偏差角 η 的关系可知, 测量值误差 T_1 与偏移量 b 和径向垂直偏差角 η 均表现为非线性相关, 随着偏移量 b 和径向垂直偏差角 η 的增大, 测量值误差 T_1 的增速也在加快。当偏移量 b 在 $0 \sim 0.1$ mm 范围内, 径向垂直偏差角 η 在 $0^\circ \sim 0.1^\circ$ 范围内时, k_1 的最大值为 6×10^{-6} 。

4) 综合误差分析

在实际测量中, 受到各零件的加工与装配精度的影响, 轴向垂直偏差角 δ 、偏移量 b 、径向垂直偏差角 η 是同时存在的。通过测量误差与三者之间的关系可知, 当轴

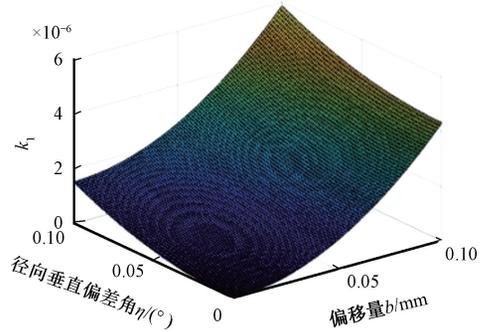


图 10 k_1 与偏移量 b 和径向垂直偏差角 η 的关系

Fig. 10 The relationship between k_1 with offset b and radial vertical deviation angle η

向垂直偏差角 δ 在 $0^\circ \sim 0.1^\circ$, 偏移量 b 在 $0 \sim 0.1$ mm, 径向垂直偏差角 η 在 $0^\circ \sim 0.1^\circ$ 时, 综合测量误差的最大值为外圈径向跳动值的 7.5×10^{-6} 倍。

3 测量装置精度验证试验

轴承外圈径向跳动测量试验装置如图 11 所示。

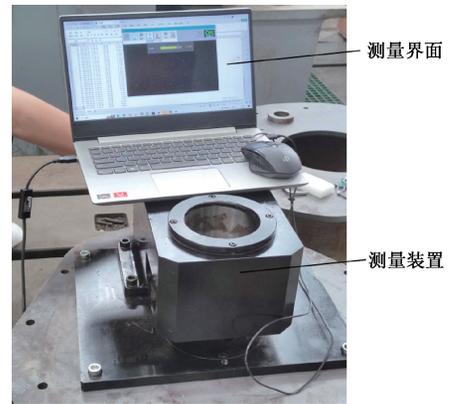


图 11 轴承外圈径向跳动测量试验装置

Fig. 11 Measuring and testing device for radial runout of bearing outer ring

试验轴承为随机抽取的 2 个型号为 7008C-2RZ/P4 的角接触球轴承, 并标记为试验轴承 1 和 2。其出厂检测的外圈径向跳动量为 2 和 3 μm 。

使用本文测量装置进行测量的试验数据记录如图 12 所示(图中为部分测量数据)。从图中可以看出, 试验过程分为两个阶段。第 1 阶段为加速转动阶段, 打开气源吹动叶轮, 带动轴承加速转动, 叶轮与配重块同时受到切向压力和径向压力的影响, 导致轴承外圈转速在增加的同时也会伴随有轻微振动, 此时所测量的外圈径向跳动值是不稳定的。第 2 阶段为稳定转动阶段, 轴承外圈转速达到一定稳定状态后关闭气源, 轴承停止加速

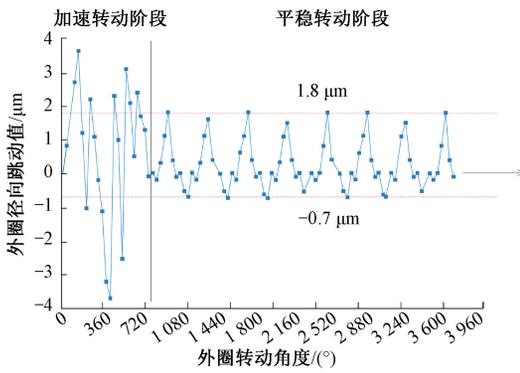


图 12 轴承外圈径向跳动值曲线

Fig. 12 Curve of radial runout value of bearing outer ring

并保持平稳转动,此阶段数据可作为轴承外圈径向跳动测量的有效测量数据。

为了验证测量结果的准确性与可靠性,对两个试验轴承分别进行了 10 次试验,所记录数据如表 1 和 2 所示。表中的测量有效数据为笔式光栅位移传感器测得的轴承外圈径向位移值,其径向跳动量为传感器记录的最大值 L_{max} 与最小值 L_{min} 之差。

对上述测量数据进行处理,计算其算术平均值 \bar{r} 、样本标准差 δ 、算术平均值的标准误差 S 、算术平均值的测量数据极限误差 $\delta_{lim(r)}$ 以及极差 $R^{[19-20]}$, 计算结果分别如表 3、4 所示。

表 1 试验轴承 1 外圈径向跳动测量数据

Table 1 Measurement data of radial runout of outer ring of test bearing 1

(μm)

组别	测量有效数据										跳动量
1	0.8	0.7	0.4	-0.4	-0.2	-0.5	0	-0.8	-1.4	0.5	2.2
2	0.1	-0.7	-1.1	-1.0	-1.6	-1.8	-2.1	-1.5	-0.8	0	2.2
3	0.5	0.2	-0.5	-0.3	-0.8	-1.6	-1.9	-0.9	-0.4	0.4	2.4
4	-0.8	-0.7	-0.1	0	-1.1	-1.3	-1	-0.2	0.9	0	2.2
5	0	-0.3	-0.6	-1.2	-1.8	-0.9	0.2	0.6	0.5	0.1	2.4
6	-0.4	-0.9	-1	-1.4	-0.9	0.4	-1.3	-1.5	-1.7	-0.5	2.1
7	-0.1	0.3	0.7	1.5	0.6	0.7	0.1	-0.9	-0.5	0.3	2.4
8	0.5	-0.1	-0.6	-0.3	-0.9	-1	-0.7	-1.6	-0.8	0.1	2.1
9	-0.8	-0.2	-0.9	-1.3	-1.8	-1.5	-0.2	0.4	-0.4	-0.7	2.2
10	0.3	-0.1	0.7	-0.6	-0.3	-0.8	-1.1	-1.6	0	0.3	2.3

表 2 试验轴承 2 外圈径向跳动测量数据

Table 2 Measurement data of radial runout of outer ring of test bearing 2

(μm)

组别	测量有效数据										跳动量
1	0.9	0.5	0.3	-0.4	-0.2	-0.7	-1.2	-1.5	-0.8	0.7	2.4
2	0.4	-0.3	-1.3	-1	-0.6	-1.6	-2.1	-1.3	-0.6	0.3	2.5
3	0.6	0.2	-0.4	-0.7	-1.5	-1.3	-1.9	-1.1	-0.4	0.3	2.5
4	0.3	-0.2	-0.7	-0.3	-1.1	-1.6	-1.0	-0.2	0.3	0.7	2.3
5	0.5	-0.3	-0.6	-1.2	-1.6	-0.9	0.2	0.8	0.5	0.4	2.4
6	0.7	-0.3	-1.3	-1.1	-0.6	-0.4	-1.3	-1.9	-1.1	0.3	2.6
7	0.1	0.7	0.9	-0.5	-0.9	-1.3	-1.6	-1.1	-0.5	0.3	2.5
8	0.7	-0.1	-0.6	-0.3	-0.9	-1.4	-1.8	-1.3	-0.4	0.5	2.5
9	0.4	-0.2	-0.6	-1.3	-1.9	-1.5	-0.2	0.6	0.3	0.7	2.6
10	0.6	-0.1	-0.7	-1.2	-1.9	-0.8	-1.1	-0.5	0	0.4	2.5

对出厂检定外圈径向跳动量为 2 和 3 μm 的 7008C/P4 级角接触球轴承进行测量并对数据处理与分析可知,外圈径向跳动值为 $2.25 \pm 0.11 \mu\text{m}$ 的试验轴承 1 的置信

度为 99.7%,外圈径向跳动值为 $2.48 \pm 0.09 \mu\text{m}$ 的试验轴承 2 的置信度为 99.7%,因而本装置的测量重复性精度为 0.3 μm 。

表 3 试验轴承 1 外圈径向跳动测量数据计算结果

Table 3 Calculation results of radial runout measurement data for the outer ring of bearing 1 (μm)

r	δ	S	$\delta_{\text{lim}(r)}$	R
2.25	0.12	0.04	± 0.11	0.3

表 4 试验轴承 2 外圈径向跳动测量数据计算结果

Table 4 Calculation results of radial runout measurement data for the outer ring of test bearing 2 (μm)

r	δ	S	$\delta_{\text{lim}(r)}$	R
2.48	0.09	0.03	± 0.09	0.3

4 结 论

本文提出了一种轴承外圈径向跳动气压驱动精密测量方法,并研制了基于该测量方法的测量装置。

在设计过程中,通过有限元仿真分析方法对比了电机连续驱动和压缩空气瞬时驱动对测量精度的影响,结果显示电机连续驱动对测量精度的影响为 $1.4 \mu\text{m}$,压缩空气瞬时驱动在轴承外圈稳定转动状态下测量装置对测量精度的影响为 $0.29 \mu\text{m}$,小于电机连续驱动对测量精度的影响,为测量装置驱动形式的确定提供了依据。

基于三角函数变换的测量误差与轴线偏差之间的几何关系,建立了数学模型,分析了轴向垂直偏差角、偏移量和径向垂直偏差角与测量误差的关系。结果显示轴向垂直偏差角在 $0^\circ \sim 0.1^\circ$,偏移量在 $0 \sim 0.1 \text{ mm}$,径向垂直偏差角在 $0^\circ \sim 0.1^\circ$ 时,最大综合测量误差为外圈径向跳动值的 7.5×10^{-6} 倍,此误差可忽略不计。

最后,以本文提出的测量方法和装置对 2 个 7008C/P4 级角接触球轴承(出厂检定外圈径向跳动为 2 和 $3 \mu\text{m}$)进行了外圈径向跳动测量精度验证试验。结果表明,试验轴承 1 外圈径向跳动值为 $2.25 \pm 0.11 \mu\text{m}$,其置信度为 99.7%;试验轴承 2 外圈径向跳动值为 $2.48 \pm 0.09 \mu\text{m}$,其置信度为 99.7%,此测量装置的测量重复性精度为 $0.3 \mu\text{m}$ 。

参考文献

[1] 季晔,郑昊天,王东峰,等. 无装配条件下角接触球轴承旋转精度测量方法研究[J]. 制造技术与机床, 2023(2):175-180.
JI Y, ZHENG H T, WANG D F, et al. Study on the measurement method of rotation accuracy of angle contact ball bearing under no assembly condition[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2023(2): 175-180.

[2] 曹正,康梓秦,樊中鼎,等. 基于动力学模型的滚动轴承磨损特性分析[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(8): 218-227.
CAO ZH, KANG Z Q, FAN ZH D, et al. Analysis of the wear characteristics of rolling bearings based on the kinetic model[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(8): 218-227.

[3] TU W, YU W, SHAO Y, et al. Anonlinear dynamic vibration model of cylindrical roller bearing considering skidding[J]. Nonlinear Dynamics, 2021, 103: 2299-2313.

[4] 王亚涛,邱明,张家铭,等. 四点接触球轴承钢球-沟道多点接触成因分析[J]. 中国机械工程, 2023, 34(23):2794-2804.
WANG Y T, QIU M, ZHANG J M, et al. Cause analysis on multi-point contact between steel ball and raceway of four-point contact ball bearings[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2023,34(23): 2794-2804.

[5] 程立,夏新涛,马文锁. 滚动轴承的振动性能退化过程与保持可靠性研究[J]. 计量学报, 2021, 42(10): 1307-1315.
CHENG L, XIA X T, MA W S. Research on degradation process and continuity reliability of rolling bearing vibration performance[J]. Acta Metrologica Sinica, 2021, 42(10): 1307-1315.

[6] HAN Q K, LI X L, CHU F L. Skidding behavior of cylindrical roller bearings under time variable load conditions[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2018, 135: 203-214.

[7] LIU Y G, LI J SH, SHI W X, et al. An algorithm to prediction the radial runout of cylindrical roller bearings[J]. Information Engineering for Mechanics and Materials Science, 2011,540-544.

[8] 刘小峰,顾军,柏林. 滚动球轴承局部故障引起滚珠负载振荡性分析[J]. 电子测量与仪器学报, 2024, 38(3):23-31.
LIU X F, GU J, BAI L. Analysis of ball load oscillability caused by local fault of rolling ball bearings[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2024, 38(3): 23-31.

[9] 栾孝驰,赵俊豪,沙云东,等. 基于循环提取有效信息的主轴承故障特征增强方法[J]. 仪器仪表学报, 2024,45(3):251-262.
LUAN X CH, ZHAO J H, SHA Y D, et al. A main bearing fault feature enhancement method based on cyclical information extraction[J]. Journal of instrumenta-

- tion[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024, 45(3): 251-262.
- [10] OKAMOTO J, OHMORI T, KITAHAR T. Study on run-out of ball bearings-relation between unroundness of race and locus of shaft in rotation[J]. Japanese Journal of Tribology, 2001, 46(7): 578-584.
- [11] 余永健. 圆柱滚子轴承旋转精度预测研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2019.
YU Y J. Research on the prediction of rotation accuracy of cylindrical roller bearings[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2019.
- [12] 孟艳艳, 孙斌, 赵景周, 等. 压力可调式大型轴承轴向跳动测量仪[J]. 轴承, 2019(9): 53-55.
MENG Y Y, SUN B, ZHAO J ZH, et al. Axial runout measuring instrument with adjustable pressure for large size bearings[J]. Bearing, 2019(9): 53-55.
- [13] 郝大庆, 李副来, 张炜, 等. 轴承外圈跳动量测量仪[J]. 轴承, 2014(5): 57-58.
HAO D Q, LI F L, ZHANG W, et al. Measurement instrument for runout of bearing outer rings[J]. Bearing, 2014(5): 57-58.
- [14] 陈月, 邱明, 杜辉, 等. 机器人用四点接触球轴承旋转精度影响因素[J]. 中国机械工程, 2020, 31(14): 1678-1685, 1692.
CHEN Y, QIU M, DU H, et al. Factors influencing rotation accuracy of four-point contact ball bearings for robots[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2020, 31(14): 1678-1685, 1692.
- [15] 司卓一. 载荷条件下轴承外圈滚道圆度误差对轴承旋转精度的影响[D]. 河南: 河南科技大学, 2017.
SI ZH Y. The effect of roundness error of outer raceway on rotational accuracy in bearing under load[D]. Henan: Henan University of Science and Technology, 2017.
- [16] 陈振强, 薛玉君, 余永健, 等. 滚子直径误差及排布对轴承径向跳动的影响[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2016(10): 78-82.
CHEN ZH Q, XUE Y J, YU Y J, et al. Effect of rollers diameter error and rollers distribution on the radial runout of bearing[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2016(10): 78-82.
- [17] 赵文辉, 张浩, 魏喆. 角接触球轴承凸出量光学精密测量方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(11): 22-29.
ZHAO W H, ZHANG H, WEI ZH. Study on the optical precision measurement method of angular contact ball bearing protrusion[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(11): 22-29.
- [18] 胡利稳, 蒋品群, 宋树祥, 等. 基于 CMOS 传输门的带通-带阻可重构 N 通道滤波器[J]. 国外电子测量技术, 2022, 41(9): 60-65.
HU L W, JIANG P Q, SONG SH X, et al. Band-pass and band-stop reconfigurable N-path filter based on CMOS[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2022, 41(9): 60-65.
- [19] 吴仲伟, 夏金兵, 时惜今. 等离子体焊接除尘装置设计与数值模拟[J]. 中国机械工程, 2019, 30(23): 2862-2869.
WU ZH W, XIA J B, SHI X J. Design and numerical simulation of plasma welding fume removal devices[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2019, 30(23): 2862-2869.
- [20] 李云雁, 胡传荣. 试验设计与数据处理[M]. 化学工业出版社, 2008.
LI Y Y, HU CH R. Trial design and data processing[M]. Chemical Industry Press, 2008.

作者简介



王峻峰, 2004 年于沈阳工业大学获得学士学位, 2011 年于沈阳工业大学获得硕士学位, 现为沈阳工业大学工程实训指导教师, 主要研究方向为精密测量与有限元仿真。

E-mail: wjf0508@1126.com

Wang Junfeng received his B.Sc. degree from Shenyang University of Technology in 2004, received his M.Sc. degree from Shenyang University of Technology in 2011. He is currently an Engineering practical training instructor at Shenyang University of Technology. His main research interests are precision measurement and CAE.



赵文辉(通信作者), 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 (Corresponding author) 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 a professor and a Ph.D. advisor at Shenyang University of Technology. His main research interests include complex surface precision measurement and CNC machining.