

基于内圈滚道廓形的圆柱滚子轴承旋转精度

余永健¹, 李济顺², 陈国定¹, 刘永刚³, 薛玉君³, 宋 飞²

(1. 西北工业大学 机电学院, 西安 710072;

2. 河南科技大学 河南省机械设计及传动系统重点实验室, 河南 洛阳 471003;

3. 河南科技大学 机电工程学院, 河南 洛阳 471003)

摘 要: 在轴承几何关系和运动关系分析基础上,建立了考虑内圈滚道廓形的圆柱滚子轴承径向跳动数学模型,分析了内圈滚道圆度误差幅值、谐波阶次、滚子个数以及径向游隙对轴承旋转精度的影响规律,并验证了模型的正确性.结果表明:内圈滚道的圆度误差对轴承旋转精度的影响较大,内圈滚道圆度误差幅值对轴承旋转精度影响较大,内圈滚道低阶谐波对轴承旋转精度的影响较高阶谐波显著;当内圈滚道谐波阶次为滚子个数的整数倍时,轴承旋转精度显著下降;减小内圈滚道圆度误差幅值能有效提高圆柱滚子轴承的旋转精度.

关 键 词: 圆柱滚子轴承; 旋转精度; 内圈滚道廓形; 圆度误差; 滚子个数

中图分类号: V23; TH133

文献标志码: A

Rotational accuracy of the cylindrical roller bearing based on inner raceway profile

YU Yong-jian¹, LI Ji-shun², CHEN Guo-ding¹, LIU Yong-gang³,
XUE Yu-jun³, SONG Fei²

(1. School of Mechanical Engineering,

Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

2. Henan Key Laboratory for Machinery Design and Transmission System,
Henan University of Science and Technology, Luoyang Henan, 471003, China;

3. School of Mechatronics and Engineering,
Henan University of Science and Technology, Luoyang Henan, 471003, China)

Abstract: Based on analysis of the geometric relation and motion relation of bearing, a mathematical model for radial runout of cylindrical roller bearing in consideration of inner raceway profile was developed to investigate the influence of inner raceway roundness error (i. e., amplitude, order), the roller number and radial clearance on rotational accuracy. The model was validated to be reasonable by specific spot way. The results indicate that inner raceway roundness error has a significant influence on rotational accuracy of cylindrical roller bearings. The rotational accuracy of cylindrical roller bearings drops sharply with increasing the amplitude of inner raceway roundness error. The effect of low-order harmonic on the rotational accuracy is greater than high-order harmonic. When harmonic order is an integral

收稿日期: 2015-04-24

基金项目: 国家自然科学基金(51375148); 河南省基础与前沿技术研究计划项目(142300413217);

河南省高等学校重点科研项目(15A460022); 河南省高校科技创新团队支持计划(15IRTSTHN008)

作者简介: 余永健(1979—),男,讲师,博士生,主要研究方向为滚动轴承性能分析及理论研究.

引用格式: 余永健,李济顺,陈国定,等. 基于内圈滚道廓形的圆柱滚子轴承旋转精度[J]. 航空动力学报,2017,32(1):155-161. YU Yongjian, LI Jishun, CHEN Guoding, et al. Rotational accuracy of the cylindrical roller bearing based on inner raceway profile[J]. Journal of Aerospace Power, 2017, 32(1): 155-161.

multiple of the roller number, the rotation accuracy of cylindrical roller bearings significantly reduces. The rotational accuracy of cylindrical roller bearings could be improved by reducing the amplitude of inner raceway roundness error.

Key words: cylindrical roller bearing; rotational accuracy; inner raceway profile; roundness error; roller number

滚动轴承作为旋转支承件广泛应用于航空航天、精密机床和磁盘等复杂精密机械系统中,滚动轴承性能往往直接影响着机械系统的动态性能^[1-3],而滚动轴承的精度等级又是衡量轴承性能的重要指标,其精度等级直接决定了复杂机械系统的精度.目前,由于国内对轴承元件误差与轴承旋转误差的关系研究不足,尚未掌握轴承元件精度分配及成品轴承精度设计理论和技术.因此,开展对滚动轴承旋转精度预测理论及方法的研究,提升高精度滚动轴承的设计水平和研究能力,具有极其重要的现实意义.

有关球轴承旋转精度的研究,国外学者已做了大量的研究工作. Okamoto 等采用数值模拟与试验相结合分析了球轴承元件形状误差及钢球间尺寸差对轴心轨迹的影响,获得了不同沟道形状误差、钢球直径差和球数对轴心轨迹大小和形状的影响规律^[4]. Noguchi 等对球轴承非重复性跳动做了大量的研究工作,文献[5-6]建立了考虑轴承形状误差的球轴承旋转精度计算模型,分析了轴承内外圈沟道、钢球形状误差、钢球个数、钢球直径差对球轴承非重复性跳动的影响规律.文献[7]运用试验分析了润滑类型及钢球材料对磁盘驱动器球轴承非重复跳动的影响.文献[8]分析了钢球直径差及其排布对球轴承保持器非重复性跳动的影响.文献[9]用理论和试验相结合的方法研究了不同位置钢球缺失对球轴承保持器非重复性跳动的影响规律.文献[10-11]运用理论和试验研究了不同钢球直径差及其排布对球轴承保持器非重复性的影响.文献[12]研究了电流对球轴承保持器非重复性跳动的影响规律. Tada 等建立了角接触球轴承旋转精度计算模型,研究了轴承内外圈沟道及钢球波纹度对轴承非重复性跳动的影响^[13].国内在这方面的研究起步较晚,相关的研究成果也较少.李传顺等建立了深沟球轴承非重复性跳动的五自由度静力学模型,分析了钢球直径误差分布、套圈沟道的圆度误差对深沟球轴承非重复性跳动的影响^[14].留剑等建立了高速精密角接触球轴承旋转精度的五自由度拟静力学模型,分析了轴承元件波纹度对角接触球轴承非重

复性跳动的影响规律^[15].

滚子轴承有别于球轴承,其接触形式为线接触,不同于球轴承的点接触.因此,滚子轴承的旋转精度影响因素较球轴承复杂得多.关于滚子轴承旋转精度的研究,部分学者也做了一些研究. Bhateja 等采用数值仿真研究了空心圆柱滚子内外径尺寸精度及滚子圆周间隙对无保持器空心圆柱滚子轴承旋转精度的影响规律,但没有考虑轴承元件的圆度误差^[16]. 王宝坤等建立了圆柱滚子轴承几何精度分析模型,获得了滚子直径尺寸误差、滚道几何误差对轴承几何精度的影响规律^[17].前期研究工作主要分析了内外圈滚道廓形对轴承旋转精度的影响,建立了考虑轴承外圈滚道圆度误差的轴承旋转精度数学模型,分析了外圈滚道圆度误差阶次及幅值对轴承旋转精度的影响^[18].建立了基于轴承内圈滚道圆度误差的轴承旋转精度计算模型,研究了内圈滚道圆度误差对轴承旋转中心跳动历程的影响规律^[19].

由以上研究成果可以看出,对圆柱滚子轴承旋转精度的研究取得了一定的成果,但由于滚子轴承结构的复杂性,对于圆柱滚子轴承旋转精度仍有很多研究工作需要开展,如圆柱滚子轴承内圈滚道圆度误差、滚子个数及径向游隙对轴承旋转精度的影响还有待进一步的研究.本文以圆柱滚子轴承为研究对象,根据轴承零件的几何及运动关系,建立基于内圈滚道形状误差的圆柱滚子轴承旋转精度预测模型,分析了内圈滚道圆度误差幅值、谐波阶次、滚子个数以及径向游隙对轴承旋转精度的影响规律,并验证了程序的正确性.

1 圆柱滚子轴承径向跳动数学模型

轴承外圈固定,内圈按设定的步长绕轴承轴线转动,内圈每转动一个角度,内圈滚道廓形曲线方程和滚子圆心坐标都随之改变,通过平移内圈,计算每个平移步长下滚子与内圈滚道接触个数,找出内圈处于稳定状态下的旋转中心坐标,进而获得内圈旋转中心外圈圆心的距离,即为轴承径向跳动值.本文提出的轴承径向跳动数学模型基于以下基本假设:

1) 外圈固定, 内圈旋转, 滚子与外圈滚道接触, 只考虑轴承下方的滚子对轴承旋转精度的影响;

2) 不考虑轴承弹流润滑的影响, 滚子与套圈之间不存在相对滑动;

3) 不考虑外圈滚道和滚子形状误差对旋转精度的影响;

4) 轴承整体坐标系 XOY 固定于外圈圆心处, XY 平面与轴承外滚道中心平面重合, 内圈坐标系 $x_iO_iy_i$ 固定于内圈旋转中心处, 且随内圈转动, x_iy_i 平面与轴承内滚道中心平面重合。

1.1 滚动轴承内圈滚道廓形方程

滚动轴承内圈滚道廓形由理想圆和圆度误差叠加而成, 在内圈坐标系 $x_iO_iy_i$ 中, 内圈滚道形状如图 1 所示, 其极坐标方程为

$$S(\theta) = r_i + R(\theta) \quad (1)$$

式中 r_i 为内圈滚道的理想圆半径; θ 为内圈滚道轮廓任一点的位置角; $R(\theta)$ 为在 θ 角处内圈滚道圆度误差, 用傅里叶级数表示为

$$R(\theta) = \sum_{n=2}^{\infty} A_n \sin(n\theta + \beta_n) \quad (2)$$

式中 n 为谐波阶次; A_n 为圆度误差幅值, 由式(3)计算; β_n 为相位角, 由式(4)计算。

$$A_n = \sqrt{B_{sn}^2 + B_{cn}^2} \quad (3)$$

$$\beta_n = \arctan \frac{B_{cn}}{B_{sn}} \quad (4)$$

式中 B_{cn} , B_{sn} 分别为第 n 阶谐波分量的余弦项系数和正弦项系数。

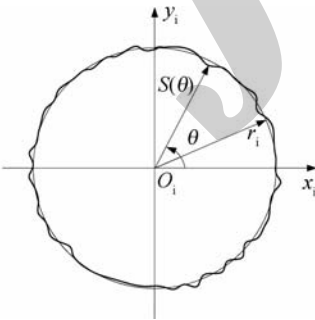


图1 内圈滚道廓形示意图

Fig. 1 Sketch map of the inner raceway profile

内圈旋转一定角度后, 在整体坐标系 XOY 中, 内圈滚道廓形曲线的坐标方程为

$$\begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \phi & -\sin \phi \\ \sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_r \\ y_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \delta_x \\ \delta_y \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中 X_i , Y_i 分别为轴承内圈滚道廓形任一点的

X , Y 坐标值; δ_x , δ_y 分别为轴承内圈在 X , Y 方向上的移动量; x_i , y_i 分别为轴承内圈滚道上任一点在内圈坐标系 $x_iO_iy_i$ 下的坐标值; ϕ 为轴承内圈转过的角度。

1.2 滚子圆心坐标的计算

在整体坐标系 XOY 下, 滚子随着内圈的转动而公转至新的位置. 当内圈转动 ϕ 时, 轴承下方第 j 个滚子与外圈滚道接触时的圆心坐标值为 (X_{rj}, Y_{rj}) , 如图 2 所示。

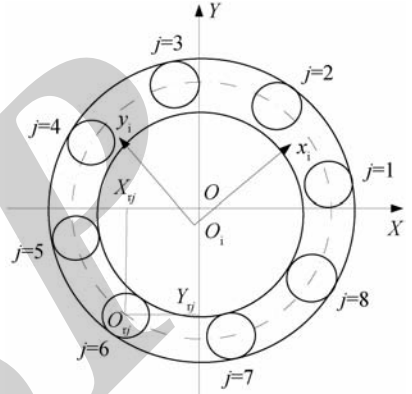


图2 滚子圆心坐标

Fig. 2 Coordinate of the center of the roller

第 j 个滚子圆心坐标为

$$\begin{cases} X_{rj} = \frac{d_m}{2} \cos \left[\alpha + \frac{2\pi}{N}(j-1) \right] \\ Y_{rj} = \frac{d_m}{2} \sin \left[\alpha + \frac{2\pi}{N}(j-1) \right] \end{cases} \quad (6)$$

式中 d_m 为轴承节圆直径; N 为滚子个数; α 为滚子公转角度, $\alpha = (d_m - D_w) \phi / (2d_m)$, 其中 D_w 为滚子直径。

1.3 滚子有效接触判据

当内圈转动某一角度时, 内圈滚道的不规则导致轴承承载区内只有部分滚子与内圈滚道接触, 这部分滚子直接决定轴承内圈位置. 因此, 需要计算与内圈滚道有效接触的滚子个数。

通过滚子圆心到内圈滚道的最短距离判断滚子与内圈滚道是否接触, 若第 j 个滚子与内圈滚道接触, 则有

$$|D_j - D_w/2| < \epsilon \quad (7)$$

式中 D_j 为第 j 个滚子到内圈滚道的最短距离, $D_j = \sqrt{(X_{rj} - X_i)^2 + (Y_{rj} - Y_i)^2}$; ϵ 为允许误差。

若第 j 个滚子与内圈滚道接触, 同时第 $j-1$ 和 $j+1$ 个滚子与内圈滚道不干涉, 即认为第 j 个滚子为有效接触, 依次判断每个滚子的接触情况,

统计滚子有效接触个数.

1.4 内圈旋转中心坐标的确定

内圈旋转中心随着内圈的转动而变化,内圈在某一转动角度下,将滚子沿径向移动直至外圈滚道接触位置,计算滚子圆心坐标,同时计算内圈滚道曲线在整体坐标系下的曲线方程;在 XY 平面内平移内圈,计算每个内圈位置处滚子有效接触个数,至少各有一个接触滚子位于 Y 轴两侧才能使内圈处于稳定状态,满足此条件可能有一个或若干个内圈位置.当有多个内圈位置时,需要比较滚子有效接触个数,找出滚子有效接触个数最多的内圈位置,从而获得内圈旋转中心坐标,即为内圈最优的旋转中心坐标.若多个内圈位置处滚子有效接触个数相等,则计算每个有效接触滚子圆心到整体坐标系中心的斜率,如图 3 所示.有效接触滚子圆心斜率之和和绝对值最小的内圈稳定状态所对应的内圈旋转中心坐标,即为内圈最优的旋转中心坐标.

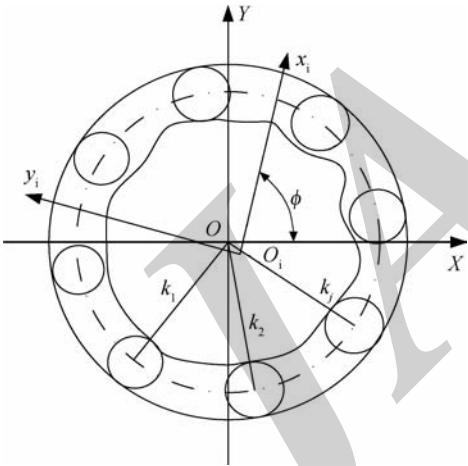


图 3 内圈稳定状态示意图
Fig.3 Steady state of the inner ring

1.5 轴承旋转精度预测模型验证

选用 NU212 圆柱滚子轴承验证本文提出的轴承径向跳动数学模型的正确性,其结构参数如表 1 所示,将其内圈滚道圆度误差谐波阶次设为 2,即内圈滚道形状为椭圆,分别取内圈旋转至 $0^{\circ}, 90^{\circ}, 180^{\circ}, 270^{\circ}$ 位置,运用轴承径向跳动数学模型进行数值仿真,并将仿真结果与理论计算结果进行对比,如表 2 所示.

由表 2 可知,内圈径向跳动值仿真结果与理论计算结果的相对误差都小于 4%,这表明本文所提出的轴承旋转精度预测模型是合理的,可用

于圆柱滚子轴承旋转精度的预测仿真.

表 1 NU212 圆柱滚子轴承参数
Table 1 Parameters of NU212 cylindrical roller bearing

参数	数值
外圈滚道直径/mm	97.06
内圈滚道直径/mm	73
滚子直径/mm	12
径向游隙/mm	0.06
滚子个数	10

表 2 径向跳动值数值仿真与理论计算结果比较
Table 2 Comparisons of radial runout value between the numerical simulation results and the theoretical analysis results

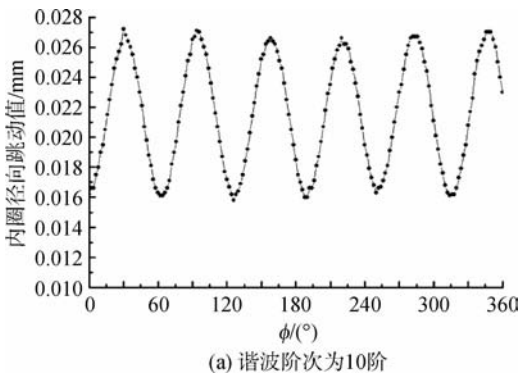
$\phi/(^{\circ})$	仿真结果/mm	理论结果/mm	相对误差/%
0	0.0445	0.0433	2.69
90	0.0192	0.0188	2.08
180	0.0450	0.0433	3.78
270	0.0191	0.0188	1.57

2 计算结果及分析

2.1 谐波阶次对轴承旋转精度的影响

图 4 为内圈滚道谐波阶次为 10 阶和 42 阶时轴承内圈旋转一周其径向跳动历程,其中,圆度误差幅值为 0.010 mm,径向游隙为 0.040 mm,滚子个数为 10.可以看出,随着谐波阶次的增大,内圈径向跳动历程的周期减小,径向跳动极值点增加,内圈径向跳动值的幅值明显减小,由此可以看出谐波阶次对旋转精度影响较大.

图 5 为谐波阶次对内圈最大径向跳动值的影响.可以看出,随着谐波阶次的增大,内圈最大径向跳动值呈周期性变化;当谐波阶次为滚子个数



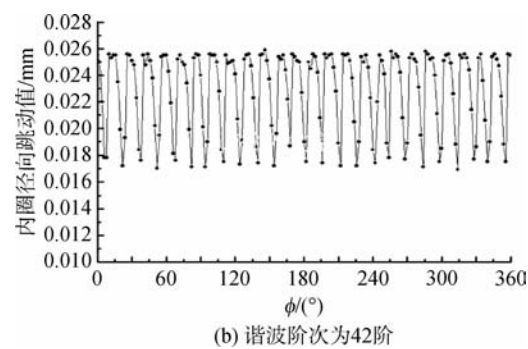


图 4 谐波阶次对内圈径向跳动值的影响
Fig. 4 Influence of harmonic order on radial runout value of inner ring

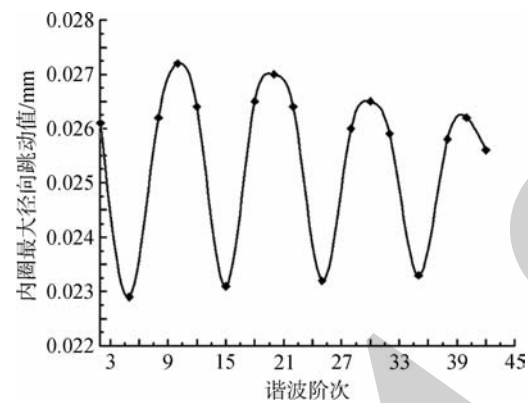


图 5 谐波阶次对内圈最大径向跳动值的影响
Fig. 5 Influence of harmonic order on maximum radial runout value of inner ring

的整数倍时,内圈最大径向跳动值为极大值;内圈最大径向跳动值的极大值随谐波阶次的增大呈现出递减的趋势.由此可以看出,低阶谐波对旋转精度的影响较大,高阶谐波对旋转精度的影响较小.这是由于具有低阶谐波的滚道轮廓,其谐波节距大于滚子直径,使滚子能从低阶谐波的波峰滚动至波谷,将低阶谐波的整个波形复现于内圈径向跳动历程中,而对于具有高阶谐波的滚道轮廓,其谐波节距小于滚子直径,使滚子只能接触到谐波的波峰部分而不能触及波谷,从而导致低阶谐波较高阶谐波对轴承旋转精度的影响大.

2.2 圆度误差幅值对轴承旋转精度的影响

图 6 为圆度误差幅值为 0.020 mm 和 0.060 mm 时内圈旋转一周其径向跳动历程,其中径向游隙为 0.060 mm,滚子个数为 10,谐波阶次为 2.可以看出,随着圆度误差幅值的增大,内圈径向跳动值及其变化幅值都明显增大,轴承旋转精度也随之降低.

图 7 为圆度误差幅值对内圈最大径向跳动值的影响.可以看出,随着内圈滚道圆度误差幅值的增大,内圈最大径向跳动值呈现出明显上升的趋势,这也反映出内圈滚道圆度误差幅值是影响轴承旋转精度的主要因素之一.

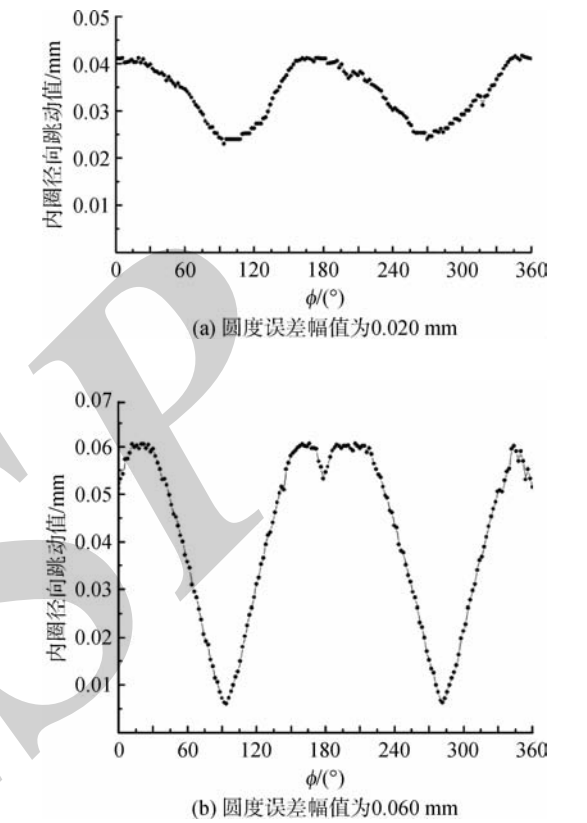


图 6 圆度误差幅值对内圈径向值的影响
Fig. 6 Influence of amplitude of roundness error on radial runout value of inner ring

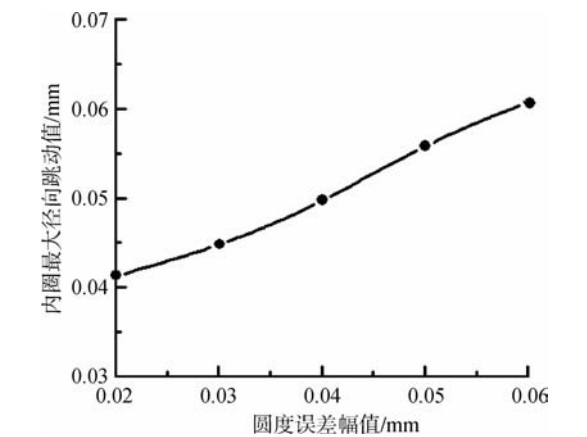


图 7 圆度误差幅值对内圈最大径向跳动值的影响
Fig. 7 Influence of amplitude of roundness error on maximum radial runout value of inner ring

2.3 滚子个数对轴承旋转精度的影响

图 8 为滚子个数为 8 和 14 时内圈旋转一周其径向跳动历程,其中圆度误差幅值为 0.010 mm,径向游隙为 0.040 mm,谐波阶次为 2.可以看出,随着滚子个数的增加,内圈径向跳动历程的周期及其幅值都有所减小.

图 9 为滚子个数对内圈最大径向跳动值的影响.可以看出,内圈最大径向跳动值随滚子个数的增多而逐渐降低,且变化趋势越来越平缓,这表明

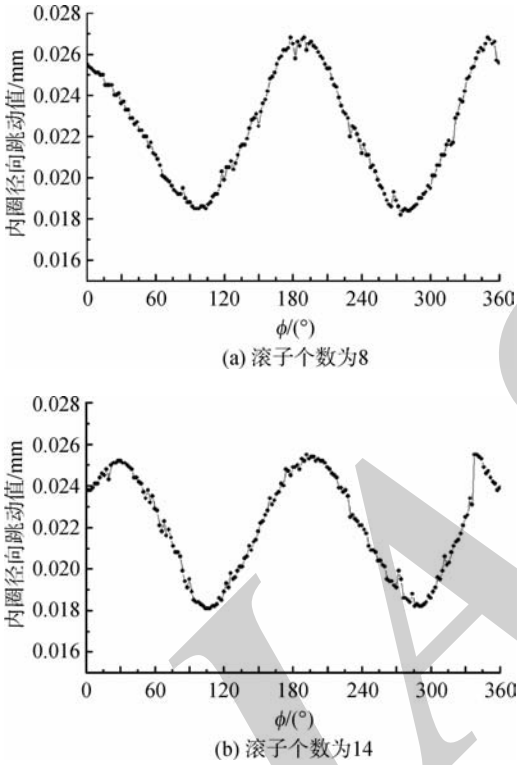


图 8 滚子数对内圈径向跳动值的影响
Fig. 8 Influence of roller number on radial runout value of inner ring

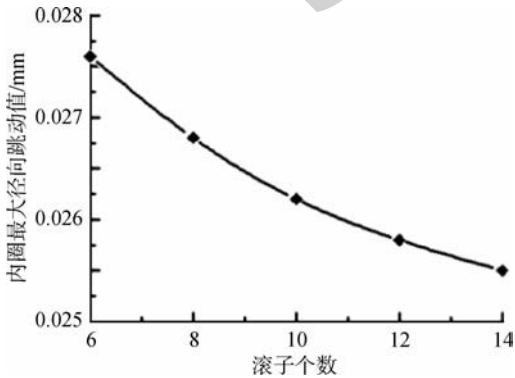


图 9 滚子个数对内圈最大径向跳动值的影响
Fig. 9 Influence of roller number on maximum radial runout value of inner ring

对于滚子个数较少的轴承,增加滚子个数可以提高轴承的旋转精度.这是由于增加滚子个数使相邻滚子间跨度减小,同时与内外圈滚道接触的滚子个数增多的缘故.

2.4 径向游隙对轴承旋转精度的影响

图 10 为径向游隙为 0.02 mm 和 0.06 mm 时内圈旋转一周其径向跳动历程,其中圆度误差幅值为 0.010 mm,谐波阶次为 2,滚子个数为 10.可以看出,随着径向游隙的增大,内圈径向跳动历程的周期和幅值无明显变化.

图 11 为径向游隙对内圈最大径向跳动值的影响.可以看出,内圈径向最大跳动值随径向游隙的增大而增大,近似呈线性上升的趋势.

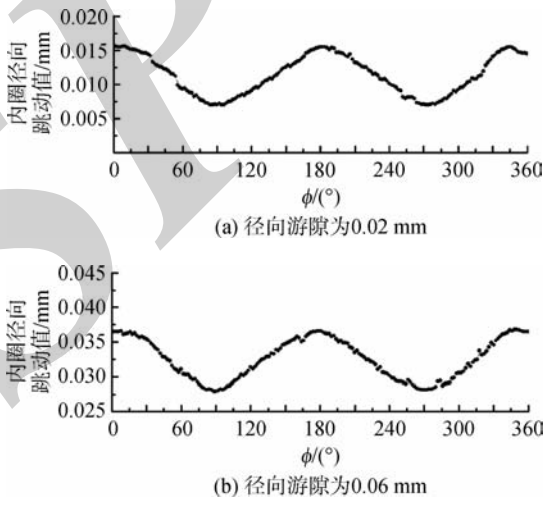


图 10 径向游隙对内圈径向跳动值的影响
Fig. 10 Influence of radial clearance on radial runout value of inner ring

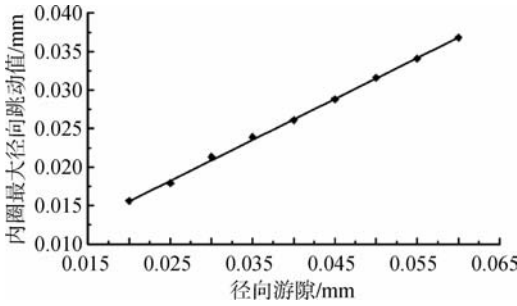


图 11 径向游隙对内圈最大径向跳动值的影响
Fig. 11 Influence of radial clearance on maximum radial runout value of inner ring

3 结 论

1) 随着谐波阶次的增大,内圈径向跳动值的幅值减小;内圈最大径向跳动值呈现出递减的趋

势;当谐波阶次为滚子个数的整数倍时,内圈最大径向跳动值达到极大值。

2) 随着圆度误差幅值的增大,内圈径向跳动值及其幅值都明显增大,内圈最大径向跳动值呈现出明显上升的趋势,这表明内圈滚道圆度误差幅值是影响轴承旋转精度的主要因素之一。

3) 当轴承滚子个数较少时,内圈径向跳动值的幅值随着滚子个数的增加而减小,内圈最大径向跳动值随着滚子个数的增加而逐渐减小,且变化趋势趋于平缓。

4) 随着径向游隙的增大,径向游隙对轴承旋转精度影响很小,只是使内圈径向跳动值增大,内圈最大径向跳动值近似呈线性增大趋势。

参考文献:

- [1] 邓四二,付金辉,王燕霜,等.航空发动机滚动轴承-双转子系统动态特性分析[J].航空动力学报,2013,28(1):195-204.
DENG Sier, FU Jinhu, WANG Yanshuang, et al. Analysis on dynamic characteristics of aero-engine rolling bearing/dual-rotor system[J]. Journal of Aerospace Power, 2013, 28(1):195-204. (in Chinese)
- [2] HU Qinghua, DENG Sier, TENG Hongfei. A 5-DOF model for aeroengine spindle dual-rotor system analysis[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2011, 24(2):224-234.
- [3] 邓四二,腾弘飞,周彦伟,等.航空发动机主轴轴承滚道表面光饰强化处理[J].航空动力学报,2006,21(3):545-549.
DENG Sier, TENG Hongfei, ZHOU Yanwei, et al. Luster polish strengthening for race surface of the mainshaft bearings of aeroengine[J]. Journal of Aerospace Power, 2006, 21(3):545-549. (in Chinese)
- [4] Okamoto J, Ohmori T, Kitahara 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.
- [5] Noguchi S, Tanaka K, Ono K. Theoretical analysis of a ball bearing used in HDD spindle motors for reduction of NRRO[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1999, 35(2):845-850.
- [6] Noguchi S, Ono K. Reduction of NRRO in ball bearings for HDD spindle motors[J]. Precision Engineering, 2004, 28(4):409-418.
- [7] Noguchi S, Kanada T. Effect of grease lubrication on the nonrepetitive runout (NRRO) in ball bearing[J]. Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, 2008, 2(5):887-895.
- [8] Noguchi S, Hiruma K, Kawa H. The influence of location of balls and ball diameter difference in rolling bearings on the non-repetitive runout (NRRO) of retainer revolution [J]. Precision Engineering, 2005, 29(1):11-18.
- [9] Noguchi S, Obinata S. Influence of the unequal orbital intervals of balls on the NRRO of rotational frequency of the cage in a ball bearing[J]. Japanese Journal of Tribology, 2005, 50(1):90-96.
- [10] Noguchi S, Hiruma K. Experimental analysis of the NRRO of the components of retainer rotation in consideration of disposition of balls in a ball bearing[J]. Japanese Journal of Tribology, 2003, 48(8):673-678.
- [11] Noguchi S, Hiruma K. Theoretical analysis of the NRRO of the components of retainer rotation in consideration of diameter difference and disposition of balls in a ball bearing [J]. Japanese Journal of Tribology, 2003, 48(4):315-320.
- [12] Noguchi S, Ayusawa T. The influence of turning on electricity on the NRRO of rotational frequency of the cage in a ball bearing[J]. Japanese Journal of Tribology, 2005, 50(5):571-578.
- [13] Tada S. Three-dimensional analysis of non-repeatable runout (NRRO) in ball bearing [J]. Koyo Engineering Journal English Edition, 2002, 161E:31-37.
- [14] 李传顺,毛范海.深沟球轴承元件几何误差对非重复性跳动影响[J].组合机床与自动化加工技术,2013(11):9-13.
LI Chuanshun, MAO Fanhai. The impact of geometrical errors of deep-groove ball bearings on non-repetitive run-out[J]. Modular Machine Tool and Automatic Manufacturing Technique, 2013(11):9-13. (in Chinese)
- [15] 留剑,洪军,杨朝晖,等.高速精密角接触球轴承旋转精度创成机理研究[J].西安交通大学学报,2011,45(11):72-78.
LIU Jian, HONG Jun, YANG Zhaohui, et al. Running accuracy of high speed precision angular contact ball bearings [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2011, 45(11):72-78. (in Chinese)
- [16] Bhateja C P, Pine R D. The rotational accuracy characteristics of the preloaded hollow roller[J]. Journal of Lubrication Technology, 1981, 103(1):6-12.
- [17] 王宝坤.圆柱滚子轴承元件几何误差对轴承性能的影响[D].大连:大连理工大学,2013.
WANG Baokun. Effect of geometric error of elements on mechanical performance in cylindrical roller bearing [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2013. (in Chinese)
- [18] 史文祥,李济顺,刘永刚.圆柱滚子轴承旋转精度的预测仿真[J].机械科学与技术,2012,31(4):612-615.
SHI Wenxiang, LI Jishun, LIU Yonggang. Forecast and simulation of rotational accuracy of cylindrical roller bearing[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2012, 31(4):612-615. (in Chinese)
- [19] 宋飞,李济顺,刘永刚.圆柱滚子轴承滚道圆度误差对旋转精度的影响[J].轴承,2011(5):1-4.
SONG Fei, LI Jishun, LIU Yonggang. Influence of raceway roundness error on running accuracy of cylindrical roller bearings[J]. Bearing, 2011(5):1-4. (in Chinese)