

食品包装

印刷包装设备常用深沟球轴承参数对性能的影响

武吉梅, 张嘉玲, 王砚, 史明利
(西安理工大学, 西安 710048)

摘要: **目的** 为轴承设计和公差选用提供理论依据与指导, 有效解决轴承精密公差的选用问题。**方法** 以高速糊盒机中 6300 型号的深沟球轴承为具体分析实例, 建立深沟球轴承的数学模型, 分析轴承参数微量变化带来的影响及其变化规律, 并通过软件进行仿真分析与验证。**结果** 深沟球轴承的疲劳寿命、刚度与滚子数量、直径及其内外圈曲率半径有着密切联系, 其中轴承疲劳寿命对滚子数量和滚子直径变化表现敏感, 寿命的增加量达到 77.78%, 轴承径向刚度对轴承滚子数量的变化很敏感, 刚度的增加量为 23.08%, 而轴承轴向刚度对滚子直径和套圈曲率半径的变化较为明显, 刚度的增加量分别为 38.29% 和 15.1%。**结论** 在一定范围内应尽量选取和设计滚子数量较多、直径较大、内外圈曲率半径较小的深沟球轴承, 使其疲劳寿命与刚度性能达到最优。

关键词: 深沟球轴承; 疲劳寿命; 刚度; 有限元分析; 印刷包装设备

中图分类号: TS803.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2017)07-0001-05

The Effects of Commonly Used Deep Groove Ball Bearing Parameters of the Printing and Packaging Equipment on the Performance

WU Ji-mei, ZHANG Jia-ling, WANG Yan, SHI Ming-li
(Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

ABSTRACT: The work aims to provide theoretical basis and guidance for the bearing design and tolerance selection, so as to effectively solve the problem regarding the selection of bearing precision tolerance. By taking 6300 deep groove ball bearing in the high-speed box pasting machine as a specific analytical example, a mathematical model of deep groove ball bearing was established, and the influences brought by micro variation of bearing parameters and their change law were analyzed. Moreover, the simulation analysis and verification concerned were conducted through software. The research showed that the fatigue life, stiffness, number of rollers and diameter of deep groove ball bearing and the curvature radii of its inner and outer rings were closely related to one another. The bearing fatigue life was sensitive to the change in the number of rollers and roller diameter, with the change of fatigue life up to 77.78%. Bearing radial stiffness was sensitive to the change in the number of bearing rollers, with the variation of 23.08%. However, bearing axial stiffness was more sensitive to the change in roller diameter and curvature radius of bearing ring, with the variations of respectively 38.29% and 15.1%. In a certain range, deep groove ball bearing with more rollers, larger diameter and smaller curvature radii of inner and outer rings should be preferably selected and designed, so as to achieve the optimal fatigue life and stiffness performance.

KEY WORDS: deep groove ball bearing; fatigue life; stiffness; finite element analysis; printing and packaging equipment

深沟球轴承作为印刷包装设备中重要的零部件, 其性能直接影响着机器整体的工作性能和使用性能。文中对印刷包装设备中高速糊盒机的深沟球轴承进

行研究, 当糊盒机高速运转生产药盒时, 其工作效率能达到 6 万盒/h, 深沟球轴承内部结构简单, 但其内部各个构件的运动关系及载荷分布相对复杂。为保证

收稿日期: 2016-12-28

基金项目: 国家自然科学基金 (11272253, 11202159, 51305341); 陕西省自然科学基金 (2016JM5023, 2016JQ5038)

作者简介: 武吉梅 (1963—), 女, 博士, 西安理工大学教授、博导, 主要研究方向为印刷包装结构设计及机械结构动力学。

轴承在最佳状态下工作,文中主要研究深沟球轴承的性能。据研究,轴承的主要性能参数有旋滚比、刚度、振动及噪声,这些参数对轴承有重要的影响^[1-2]。基于此,文中将对影响深沟球轴承结构性能的参数进行研究,为开发设计高性能的轴承提供理论依据与指导,从而提高印刷包装设备的工作效率。

近年来,众多专家和学者对轴承性能的探索从未停止。侯予和赖天伟^[3]等研究了双层鼓泡型薄片轴承,发现了其单边间隙和支承刚度对轴承性能的影响规律。Lee 和 Sim^[4-5]等建立了波箔型薄片轴承的气热弹耦合理论模型,研究了热效应对轴承性能的影响规律。Paouris 和 Bompos^[6]等通过有限元法和计算流体力学(CFD)耦合求解薄片气体轴承静态特性,为薄片轴承的性能计算提供了新的思路。莫霍克创新科技公司的 Heshmat^[7]结合悬臂型和波箔型薄片轴承的优点,提出了一种新型结构形式的悬臂型薄片轴承,有效地提高了轴承的性能。HERTZ 理论建立了理想弹性体之间相互无摩擦接触基础,为滚动轴承静力学分析奠定基础^[8]。武吉梅等对印刷机中的偏心轴承接触应力与滚子静、动态变形进行了研究^[9]。

1 轴承参数分析

1.1 疲劳寿命

对于滚动轴承的疲劳寿命计算应用最多的是将一批轴承中的 10%在一定转速下发生疲劳破坏时所工作的时长,称其为基本额定寿命,记为 L 。Warda 等用半空间法和有限元法预测 L ^[10-11]。轴承主要失效形式是循环反复作用的应力引起的滚动表面的疲劳剥落,即接触疲劳。轴承的基本额定寿命^[12]为:

$$L = (L_i^{-w} + L_e^{-w})^{-1/w}$$

式中: w 为韦布尔分布的斜率参数,轴承为球轴承时 w 取 10/9; L_i 为旋转套圈的疲劳寿命; L_e 为非旋转套圈的疲劳寿命。

$$L_i = \left(\frac{C_i}{P_i} \right)^3, L_e = \left(\frac{C_e}{P_e} \right)^3$$

式中: C_i 为旋转套圈轴承的基本额定动载荷; C_e 为非旋转套圈的轴承基本额定动载荷; P_i 为作用载荷旋转套圈当量载荷; P_e 为作用载荷静止的非旋转套圈当量载荷。

1.2 刚度

基于 HERTZ 理论的静力学计算方法^[13-14]建立深沟轴承刚度所运动的位移与所受载荷之间的关系。静力学方法综合考虑滚道的内外圈曲率半径以及滚子的直径、数目和接触角等因素对深沟球轴承变形的影响^[15]。根据轴承移动的方向,主要可分为轴向刚度、

径向刚度,并且轴承的刚度由接触刚度与油膜刚度串联组成,滚动轴承径向刚度和轴向刚度的计算为:

$$K_{tj} = \frac{K_{ctj} K_{ryj}}{K_{ctj} + K_{ryj}}$$

$$K_{aj} = \frac{K_{caj} K_{ayj}}{K_{caj} + K_{ayj}}$$

$$K_r = \sum_{j=1}^Z K_{tj} \cos \varphi$$

$$K_a = \sum_{j=1}^Z K_{aj}$$

式中: K_{tj} , K_{aj} 分别为第 j 个球的径向、轴向刚度; K_r , K_a 分别为串联后轴承的径向、轴向刚度; K_{ryj} , K_{ayj} 分别为第 j 个滚动球与滚道接触处的径向、轴向油膜刚度; K_{ctj} , K_{caj} 分别为第 j 个滚动球与滚道套圈接触处的径向、轴向接触刚度; φ 为球的位置角; Z 为球的数量。

2 工作性能

印刷包装设备中深沟球轴承的应用十分广泛,尤其是在高速运转的糊盒机中的作用尤为突出,该算例以糊盒机中的深沟球轴承 6300 型号为例,其外径为 35 mm,内径为 10 mm,宽度为 11 mm,滚子直径为 6.35 mm,内圈曲率半径为 3.27 mm,外圈曲率半径为 3.33 mm,滚子数量为 7 个,轴承钢材料的弹性模量为 207 GPa,泊松比为 0.3。在计算中分析某一参数对疲劳寿命的影响时,其余参数保持不变。

2.1 疲劳寿命

文中研究滚子数量、直径及内外套圈曲率半径变化对深沟球轴承疲劳寿命的影响。以上文理论分析为基础,用 Matlab 语言编写相应的计算机程序。由轴承寿命与滚子数量的关系曲线可知,滚子数量与轴承寿命呈线性关系,增加滚子数量会提高轴承寿命,寿命增加量为 77.78%。由轴承寿命与滚子直径的关系曲线可知,滚子直径与轴承的寿命成正比关系,但并非非线性关系,滚子直径增加 1%的变化可引起轴承的寿命增加 1 倍。由轴承寿命与内圈曲率半径的关系曲线可知,轴承寿命与内套圈曲率半径成反比关系,但并非非线性关系,轴承内套圈曲率半径在 1%内变化可引起的寿命减少量为 40.04%。由轴承寿命与外圈曲率半径的关系曲线可知,轴承寿命与外套圈曲率半径成反比关系,轴承外套圈曲率半径在 1%内变化可引起的寿命减少量为 12.69%。

2.2 刚度

文中研究滚子数量、直径及内外套圈曲率半径变化对深沟球轴承刚度的影响。以上文理论分析为基

础，用 Matlab 语言编写相应的计算机程序。

刚度与滚子数量、滚子直径、内圈曲率半径、外圈曲率半径的分析结果见表 1，可知，轴承径向刚度对轴承滚子数量的变化很敏感，而轴承轴向刚度对内、外圈曲率半径和滚子直径的变化较为敏感。

参数变化	径向刚度		轴向刚度	
	变化趋势	变化量/%	变化趋势	变化量/%
增大滚子数量	增大	23.08	增大	5.32
增大滚子直径 (1%内变化)	减小	5.49	增大	38.29
增大内圈曲率半径 (1%内变化)	增大	3.52	减小	14.81
增大外圈曲率半径 (1%内变化)	增大	3.22	减小	15.10

3 深沟球轴承的仿真分析

应用 Ansys 软件对 6300 深沟球轴承的接触应力进行仿真，将仿真的有限元结果与 HERTZ 理论结果进行对比分析。

3.1 建立模型

以上文所述的糊盒机中的深沟球轴承 6300 型号为例，建立三维实体模型。为简化计算建立网格划分后的滚动轴承简化模型，见图 1，并对形成的剖面处施加对称约束。

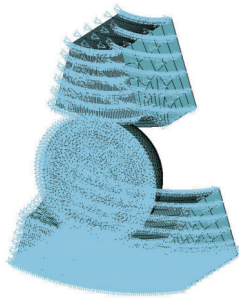


图 1 施加约束的轴承简化模型
Fig.1 Bearing simplified model on constraint

3.2 仿真分析

以上文建立的有限元模型为基础，通过 Ansys 进行求解得到轴承内套圈最大接触应力为 3990 MPa，轴承外套圈最大接触应力为 3348 MPa，比较有限元解与 HERTZ 理论解，内、外套圈最大接触应力误差分别为 0.758%和 2.13%。轴承的内、外套圈最大接触应力误差的允许范围为 7%，因此，可以认为文中的有限元解与 HERTZ 理论解相一致。轴承内、外套圈等效应力见图 2，且最大等效应力出现在接触表面下方某一位置，并非接触表面，这与理论分析相符合。

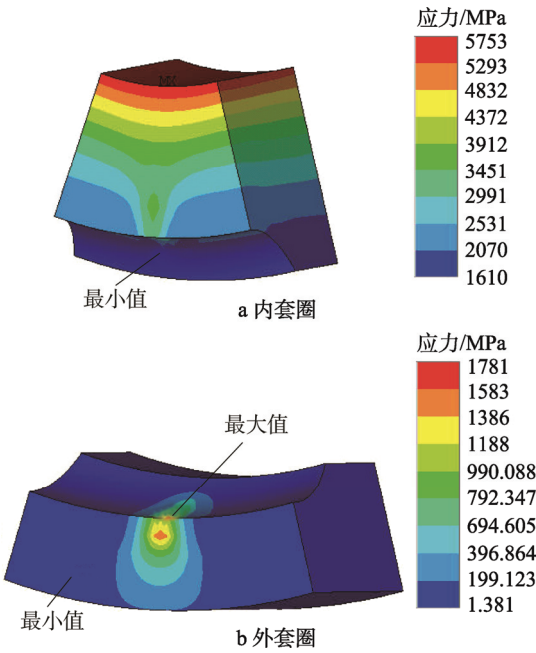


图 2 轴承内套圈和外套圈的等效应力
Fig.2 Bearing rings inside and outside equivalent stress

综合考虑轴承滚子直径、滚子数量等轴承参数的影响，分析这些因素对轴承接触应力的影响情况，并将有限元计算结果与 HERTZ 理论计算结果进行比较，为理论分析轴承参数对轴承性能的影响提供实验依据^[16—17]。

内、外套圈接触应力与轴承滚子直径的关系曲线见图 3。HERTZ 理论解与有限元解都表现出轴承内、外套圈接触应力随滚子直径的增大而减小，所得结果误差小于 2%。这主要是因为轴承滚子直径的增大，使整体承载能力随之增大。

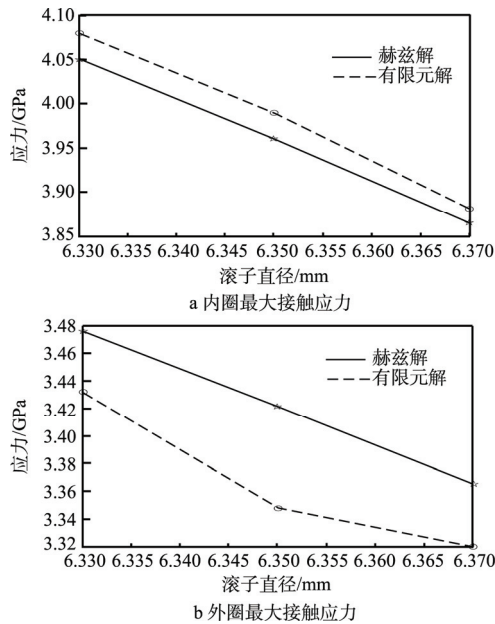


图 3 接触应力与滚子直径的关系曲线
Fig.3 Relationship curves between contact stress and roller diameter

内、外套圈的接触应力与滚子数量的关系曲线见图 4。HERTZ 理论解与有限元解都表现出内、外套圈接触应力随滚子数量的增大而减小, 所得结果误差小于 5%。这主要是因为深沟球轴承滚子数量的增加, 相当于每个滚子所承载的载荷减小。

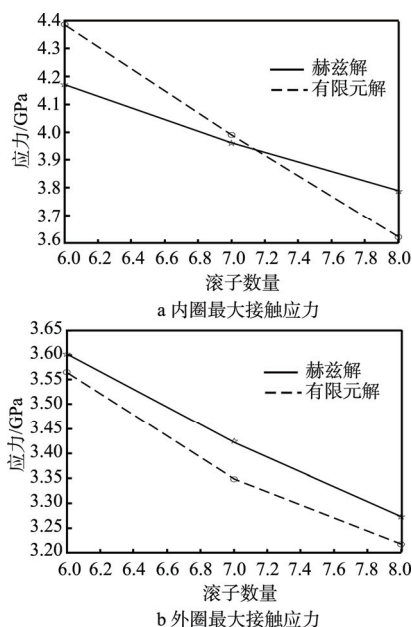


图 4 接触应力与滚子数量的关系曲线

Fig.4 Relationship curves between contact stress and the number of roller

4 结语

糊盒机中有数以千计的深沟球轴承, 在其高速运转下, 轴承性能对设备的性能和生产效率尤为重要, 因此, 文中对深沟球轴承的疲劳寿命、刚度与滚子数量、滚子直径、内套圈曲率半径以及外套圈曲率半径的变化规律进行了详细研究, 并通过对深沟球轴承的仿真分析, 对以 HERTZ 理论为基础的理论数据与仿真结果进行对比验证, 得出以下结论。

1) 深沟球轴承的寿命与滚子数量、直径成正比关系, 而与内圈曲率半径、外圈曲率半径成反比关系。滚子数量变化引起的寿命变化量为 77.78%, 滚子直径在 1% 内变化时, 轴承寿命增加了 1 倍, 因此轴承疲劳寿命对滚子数量和滚子直径变化表现敏感。

2) 深沟球轴承径向刚度对轴承滚子数量变化更为敏感, 而轴承轴向刚度对滚子直径、内套圈曲率半径以及外套圈曲率半径变化更加敏感。滚子数量变化引起的径向刚度变化量为 23.08%。

3) 仿真结果与理论计算结果较为接近, 说明文中所建模型相对合理, 可将实验所得结论应用于实际生产中。

参考文献:

[1] 仲丛华. 曲率半径对深沟球轴承接触特性的影响[J].

机械传动, 2016(4): 134.

ZHONG Cong-hua. Influence of the Curvature Radius on Contact Characteristic of Deep Groove Ball Bearing [J]. Mechanical Transmission, 2016(4): 134.

[2] 王砚, 田振, 武吉梅, 等. 基于解析法的非均匀张力作用下运动薄膜的稳定性[J]. 包装工程, 2016, 37(15): 111—112.

WANG Yan, TIAN Zhen, WU Ji-mei, et al. Stability for Moving Membrane under the Non-uniform Tension Based on Analytical Method[J]. Packaging Engineering, 2016, 37(15): 111—112.

[3] LAI T W, CHEN S T, MA B, et al. Effects of Bearing Clearance and Supporting Stiffness on Performances of Rotor-bearing System with Multi-decked Protuberant Gas Foil Journal Bearing[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology, 2014(7): 780—788.

[4] LEE D, KIM D. Thermohydrodynamic Analyses of Bump Air Foil Bearings With Detailed Thermal Model of Foil Structures and Rotor[J]. Journal of Tribology, 2010, 132(2): 16—22.

[5] SIM K, KIM T H. Thermohydrodynamic Analysis of Bump-type Gas Foil Bearings Using Bump Thermal Contact and Inlet Flow Mixing Models[J]. Tribology International, 2012(8): 137—148.

[6] PAOURIS L I, BOMPOS D A, NIKOLAKOPOULOS P G. Simulation of Static Performance of Air Foil Bearings Using Coupled FEM and CFD Techniques[C]// ASME Turbo Expo 2013: Turbine Technical Conference and Exposition. American Society of Mechanical Engineers, 2013.

[7] HESHMAT H, TOMASSZEWSKI M J. Foil Journal Bearing Applicable to High Speed Machining Center: US, 13/441807[P]. 2012-08-11.

[8] 刘辞英. 滚动体参数及曲率系数对深沟球轴承疲劳寿命的影响[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2010.

LIU Ci-ying. Effects of Rolling Parameters and Curvature Coefficient on Fatigue Life for Deep Groove Ball Bearings[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2010.

[9] 章佳丽, 武吉梅, 高波, 等. 印刷机偏心滚子轴承接触应力与变形仿真分析[J]. 包装工程, 2015, 36(19): 97—98.

ZHANG Jia-li, WU Ji-mei, GAO Bo, et al. Simulation Analysis of Contact Stress and Deformation for the Eccentric Roller Bearing in Printing Press[J]. Packaging Engineering, 2015, 36(19): 97—98.

[10] 周夕维, 徐华, 熊显智, 等. 引入滚动体尺寸偏差的球轴承寿命模型[J]. 机械科学与技术, 2015(4): 372.

WU Xi-wei, XU Hua, XIONG Xian-zhi, et al. The Life Model for Bearing Considering the Ball Size Deviation[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2015(4): 372.

[11] BOGDAN W, AGNIESZKA C. Effect of Ring Misa-

- lignment on the Fatigue Life of the Radial Cylindrical Roller Bearing[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2016(1): 6.
- [12] 罗继伟, 罗天宇. 滚动轴承分析计算与应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.
- LUO Ji-wei, LUO Tian-yu. Analysis and Application of Rolling Bearing[M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2009.
- [13] 张宇, 谢里阳, 钱文学, 等. 深沟球轴承的载荷分布与刚度特征研究[J]. 机械设计, 2012, 29(3): 45.
- ZHANG Yu, XIE Li-yang, QIAN Wen-xue, et al. Analysis of Load Distribution and Characteristics of Deep Groove Ball Bearing[J]. Machine Design, 2012, 29(3): 45.
- [14] 王天哲, 张刚, 梁松, 等. 深沟球轴承径向载荷分布与刚度参数的研究[J]. 机械设计与制造, 2013(9): 75.
- WANG Tian-zhe, ZHANG Gang, LIANG Song, et al. Analysis of Deep Load Distribution and Stiffness Characteristics of Deep Groove Ball Bearing[J]. Machinery Design & Manufacture, 2013(9): 75.
- [15] 何芝仙, 刘喆. 滚动轴承支承刚度计算[J]. 机械设计, 2016(9): 46—50.
- HE Zhi-xian, LIU Zhe. Supporting Stiffness Calculation of the Rolling Bearing[J]. Journal of Machine Design, 2016(9): 46—50.
- [16] 裴兴林, 刘书岩. 基于 Ansys 的深沟球轴承接触应力有限元分析[J]. 新技术新工艺, 2010(8): 5—7.
- PEI Xing-lin, LIU Shu-yan. Contact Stress FEM of Deep Groove Bearing Based on Ansys[J]. New Technology & New Process, 2010(8): 5—7.
- [17] 李有堂, 刘辞英, 刘书岩, 等. 深沟球轴承内、外沟曲率系数对接触应力和变形的影响[J]. 兰州理工大学学报, 2010, 36(5): 31—33.
- LI You-tang, LIU Ci-ying, LIU Shu-yan, et al. Effects of Curvature Coefficient of Inner and Outer Race on Contact Stress and Deformation of Deep Groove Ball Bearing[J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2010, 36(5): 31—33.