

轴承预紧力对转子系统静动态特性的影响*

赵耿 刘保国[†] 冯伟 王攀

(河南工业大学 机电工程学院, 郑州 450000)

摘要 轴承预紧力的大小直接影响到滚动轴承-转子系统的静动态特性. 综合考虑离心力和陀螺力矩效应, 在 Romax 软件中建立了 5 自由度轴承-转子系统动力学模型, 分析了预紧力对轴承刚度、工作接触角以及工作寿命的影响, 并搭建了轴承-转子系统试验台做验证试验. 在不同轴承预紧力下, 分别研究了轴承刚度、工作接触角、工作寿命、静载荷作用下轴承-转子系统的静变形以及动不平衡载荷作用下主轴系统的振动响应等, 并在轴承-转子试验台上进行试验验证, 得到了轴承预紧力与这些因素的关系曲线. 在此基础上, 研究了预紧力对转子系统固有频率的影响, 结果表明加大预紧力有助于提高系统的固有频率. 研究结果可为轴承-转子系统的设计与分析提供理论参考.

关键词 预紧力, 角接触球轴承, 轴承-转子系统, 静动态特性, Romax

DOI: 10.6052/1672-6553-2018-044

引言

精密角接触球轴承因其旋转精度高、承载能力强等特点而广泛应用于各类机床主轴以及精密旋转机构中. 对于角接触球轴承, 常采用轴向预紧的方式来提高其支撑刚度, 合适的预紧力不仅能够提高轴承支撑刚度, 对改善轴承-转子系统的性能也十分有利^[1,2].

角接触球轴承的动力学特性分析一直都是众多研究人员的研究热点, Jones^[3]、Harris^[4] 最早建立了角接触球轴承的五自由度分析模型, 并考虑了轴承高速运转时滚珠离心力和陀螺力矩的影响. Houperit^[5]、Hernot^[6] 提出了角接触球轴承的五自由刚度矩阵形式, 这使得借助有限元方法来解决轴承-转子系统的耦合问题成为可能. 曹宏瑞^[7]、Cao^[8]、王保民^[9]、黄伟迪^[10] 等在拟静力学模型基础上建立了角接触球轴承的五自由度刚度计算模型, 分析了预紧力对轴承刚度的影响. Jedrzejewski^[11] 通过建立轴承-转子模型研究了主轴转速以及轴承的预加载对轴承刚度所产生的影响. 饶成晨^[12]、支汉立^[13] 等通过建立轴承-转子系统的有限元模型, 针对影响电主轴工作性能的轴承-转子系统静动态特

性进行了专门分析.

目前基于轴承理论模型先后开发了 CYBEAN、ADORE 等多款专门的分析软件, 然而, 采用计算程序分析角接触球轴承动力学特性, 存在使用复杂、计算效率低等问题^[14]. Romax 软件不仅能够详尽分析角接触球轴承的刚度、寿命以及其内部载荷、接触应力等, 也能够对轴承-转子系统进行动力学特性分析, 包括振型分析、临界转速分析以及不平衡响应分析等. 本文基于 Romax 软件建立了 5 自由度轴承-转子系统动力学模型, 研究了角接触球轴承刚度、工作接触角以及寿命等在轴承预紧力作用下的变化规律, 并分析了预紧力对轴承-转子系统静变形以及振动响应的影响, 可为轴承-转子系统的设计分析提供参考.

1 分析模型建立

对轴承进行动力学特性分析时将轴承-转子系统一起研究, 能够更加真实可靠地反映轴承的工作性能^[15]. 在 Romax 环境中对轴承-转子系统进行静动态特性分析不仅能够研究转子系统的动力学问题, 也能够研究支撑轴承的动力学问题, 分析更加符合工程实际. Romax 中对轴承模型的建立需要输

2018-05-06 收到第 1 稿, 2018-06-07 收到修改稿.

* NSFC-河南联合基金重点支持项目 (U1604254)

[†] 通讯作者 E-mail: bgliu1978@sina.com

入轴承的结构参数对其进行实体建模,而后将轴承模型导入到转子系统建立完整的轴承-转子分析模

型,系统模型结构如图 1 所示.

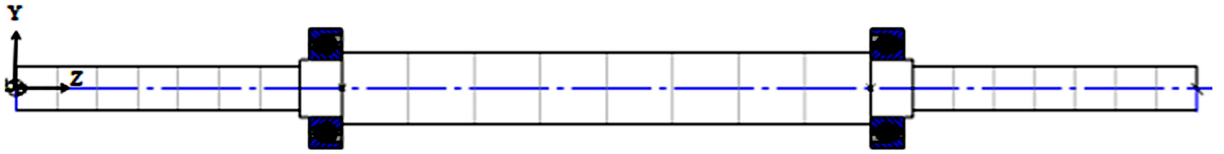


图 1 Romax 中轴承-转子系统二维模型

Fig.1 2D model of bearing-rotor system in Romax

在 Romax 中可以考虑轴承 5 个方向的自由度,并能对轴承-转子系统在不同工况下的静动态特性进行分析.图 2 给出了轴承在外载荷作用下五个方向的相对位移示意图.本文以 SKF 公司角接触球轴承 7004CD/P4DB 为例进行研究,轴承主要结构参数如表 1 所示.

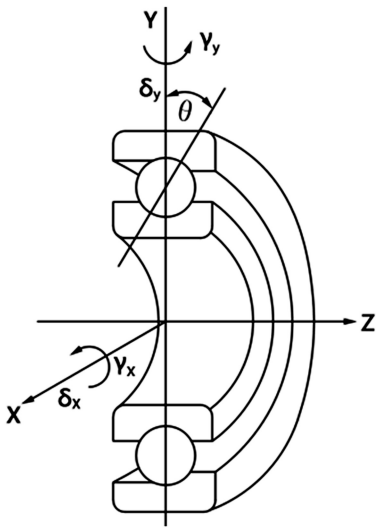


图 2 轴承受力后内外圈五个方向相对位移示意图

Fig.2 Diagram of relative displacement in five directions of inner and outer rings under loading force

表 1 7004CD/P4DB 轴承主要参数

Table 1 Main parameters of SKF 7004CD/P4DB

Bearing model	7004CD/P4DB
Outside diameter/mm	42
Inner diameter/mm	20
Width/mm	12
Contact angle/°	15
Radius of curvature of outer raceway/mm	3.12
Radius of curvature of inner raceway/mm	3.12
Number of balls	12
Ball diameter	6

2 预紧力对球轴承特性的影响

以 SKF 公司角接触球轴承 7004CD/P4DB 为例在 Romax 软件建立轴承-转子模型,研究主轴工作转速为 12000r/min 时,预紧力对角接触球轴承支撑刚度以及工作接触角的影响规律,并分析在动不平衡载荷作用下预紧力对轴承工作寿命的影响.

2.1 预紧力对角接触球轴承刚度的影响

图 3 给出了角接触球轴承径向刚度、轴向刚度以及角刚度随轴承预紧力的变化曲线.随着轴承预紧力的增大,轴承径向、轴向以及角刚度均是增加的,表明增加预紧力对提升轴承支撑刚度是有利的.

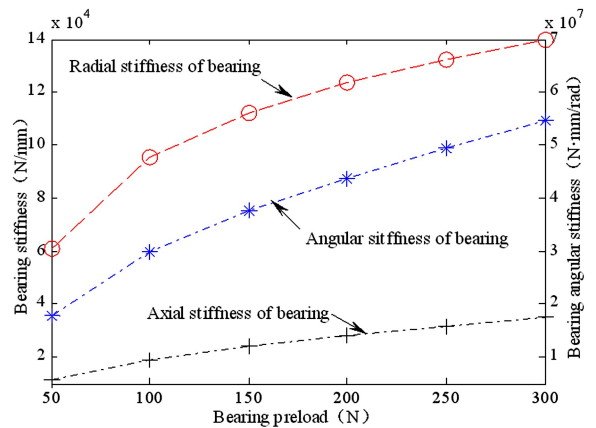


图 3 轴承刚度随轴承预紧力的变化曲线

Fig.3 Variation curve of the bearing stiffness with bearing preload

2.2 预紧力对角接触球轴承工作接触角的影响

图 4、图 5 给出了轴承内外圈的工作接触角随轴承预紧力的变化曲线.随着轴承预紧力的增大,轴承内外圈的工作接触角均增大.从图中可以看出,轴承内外圈的工作接触角在轴承滚道内随着滚珠位置角的变化呈现出正弦变化趋势,产生原因为

在滚动轴承运转过程中因径向载荷作用引起滚珠产生周期性振动^[16];在预紧力一定情况下,轴承内圈的工作接触角要大于其外圈的实际工作接触角.

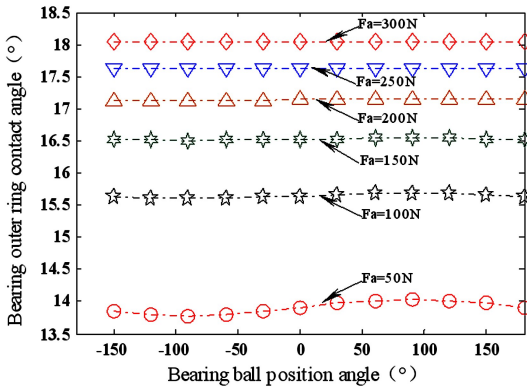


图4 轴承外圈接触角随轴承预紧力的变化曲线

Fig.4 Variation curve of contact angle of the bearing outer ring with bearing preload

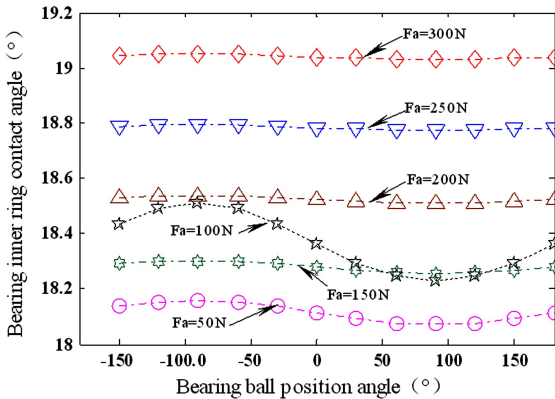


图5 轴承内圈接触角随轴承预紧力的变化曲线

Fig.5 Variation curve of contact angle of the bearing inner ring with bearing preload

2.3 预紧力对角接触球轴承工作寿命的影响

在 Romax 中,轴承寿命包括模拟寿命和修正寿命,对应两种计算公式:一种是基于 ISO 的标准轴承寿命计算(模拟寿命),假设轴承中无内部间隙、轴承位置完全校准和一定比例的轴向和径向载荷等;另一种是基于真实工况的轴承寿命计算(修正寿命),考虑了轴承内部的间隙、轴承位置的错位误差和轴向及径向误差等.

图6给出了轴承工作寿命随轴承预紧力的变化曲线.随着轴承预紧力的增大,轴承的工作寿命明显减小,且轴承的修正寿命要大于其模拟寿命,轴承的修正寿命更接近于其实际寿命^[14].

从以上分析可以得出:增加预紧力虽然能够提

升轴承支撑刚度,但会导致轴承寿命的减小.故在实际工程中不能为提升轴承支撑刚度而一味增大其预紧力,应综合考虑选择合适的轴承预紧力.

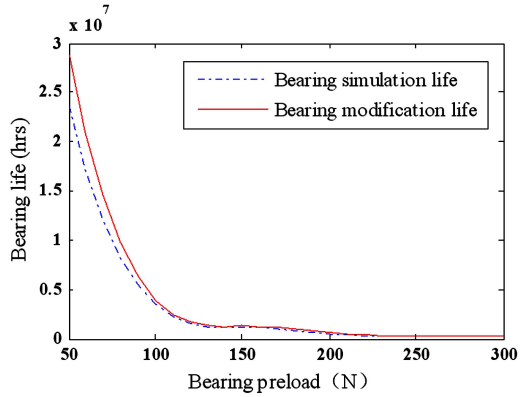


图6 轴承寿命随轴承预紧力的变化曲线

Fig.6 Variation curve of the bearing life with bearing preload

3 轴承-转子系统静动态特性分析

图7所示为搭建的轴承-转子测试试验台,信号采集装置为电涡流位移传感器系统.结合本试验台研究了轴承预紧力对转子系统静刚度、固有频率的影响以及在动不平衡载荷作用下,转子系统在不用预紧力下的振动响应情况.

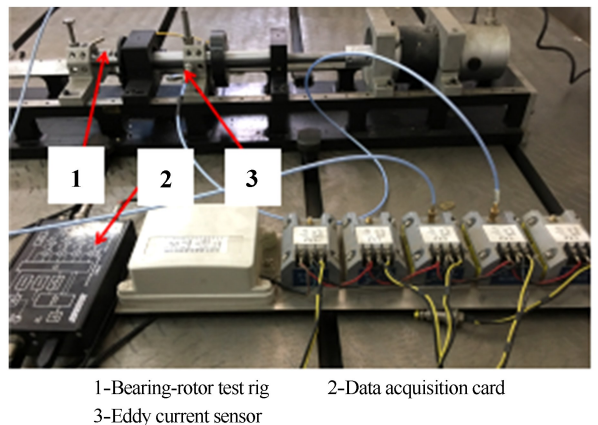


图7 轴承-转子测试试验台

Fig.7 Test bench for bearing-rotor testing

该试验台通过螺栓紧固轴承端盖对轴承施加轴向预紧力,预紧装置如图8所示.综合考虑预紧装置空间结构尺寸、装置的简易性以及操作的便捷性等,轴承预紧力通过标定好的压力传感器来确定,具体步骤为:当紧固螺钉时,用万用表测出安装在轴承端盖与隔套接触端面间的压力传感器的电阻值,然后对比其标定曲线确定对应的压力值.

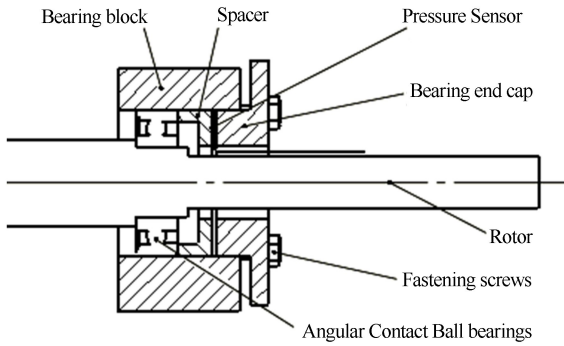


图 8 轴承预紧结构示意图
Fig.8 Bearing preload structure

3.1 预紧力对轴承-转子系统静刚度影响

在径向加载力为 100N 时,转子系统在不同预紧力作用下轴端静变形量的变化曲线如图 9 所示.随着轴承预紧力的增大,轴端变形量减小,转子系统静刚度增大;轴端变形的仿真结果和试验结果存在一定误差,误差范围在 13% 以内(包含试验台零部件的加工误差和装配误差等),表明仿真结果是可靠的.

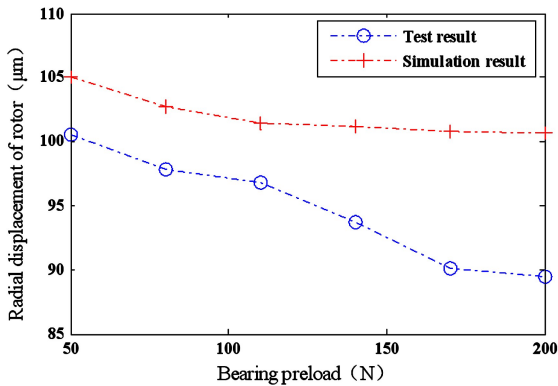


图 9 转子系统轴端静变形量随轴承预紧力的变化曲线
Fig.9 Variation curve of the static deformation of the shaft end of the rotor system with bearing preload

3.2 预紧力对轴承-转子系统振动响应影响

图 10 给出了转速为 3000r/min 时,不同预紧力作用下转子振动响应幅值随预紧力的变化曲线.随着轴承预紧力的增大,转子的径向响应幅值呈减小趋势,表明增大轴承预紧力能够提高转子系统动刚度.从图中看出,测试结果与仿真结果能够很好地匹配,误差范围在 15% 以内,表明所建模型的模拟仿真结果是可靠的.

3.3 预紧力对轴承-转子系统固有频率影响

图 11 给出了用 Romax 计算的轴承-转子系统

固有频率随轴承预紧力的变化曲线.如图所示,随着预紧力的增大,系统的 1 阶固有频率变化很小,2 阶固有频率增幅较小,3 阶固有频率有明显增大趋势.结果表明,增加预紧力有利于提升转子系统的固有频率,这对于其动态性能的提升是有利的.

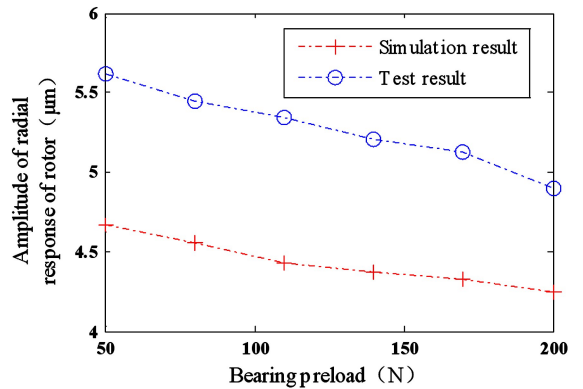


图 10 转子系统径向响应幅值随轴承预紧力的变化曲线
Fig.10 Variation curve of radial response amplitude of the rotor system with bearing preload

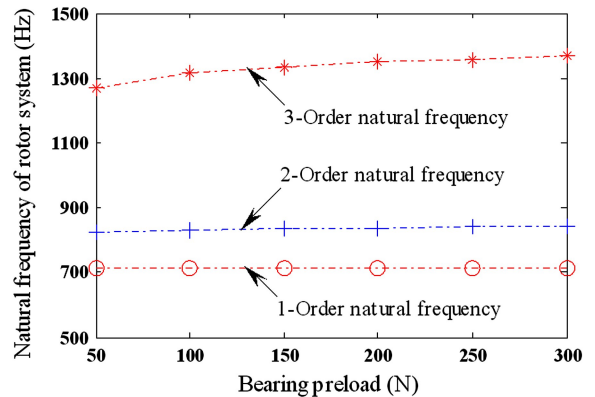


图 11 轴承-转子系统固有频率随轴承预紧力的变化曲线
Fig.11 Variation curve of natural frequency of the bearing-rotor system with bearing preload

4 结论

本文基于 Romax 建立了 5 自由度轴承-转子系统动力学模型,研究了轴承预紧力对角接触球轴承动力学特性的影响;结合所搭建的轴承-转子测试试验台,研究了轴承预紧力对轴承-转子系统静动态特性的影响,得到如下结论:

1) 随着预紧力的增大,轴承的轴向刚度、径向刚度以及角刚度均显著增加,但其工作寿命急剧减少.所以在对轴承预紧时,应在保证其工作寿命的情况下施加预紧力,以达到刚度和寿命的兼顾平

衡;

2) 预紧力对轴承的工作接触角影响十分明显, 内外圈的工作接触角均随着预紧力的增加而增大; 轴承内圈的实际工作接触角要大于外圈的实际工作接触角;

3) 在径向静载荷作用下, 随着轴承预紧力的增大, 转子系统的轴端静变形量均呈减小趋势, 且仿真结果和试验结果误差在 13% 以内;

4) 在动不平衡载荷作用下, 轴承-转子系统的振动响应幅值随着预紧力的增加而减小, 且仿真结果和试验结果的误差在 15% 以内; 增加轴承预紧力有利于提高系统的固有频率, 且阶数越高其增幅越大;

通过本文研究, 表明 Romax 能够很好地解决轴承-转子系统的耦合问题, 为轴承-转子系统的耦合问题研究提供参考。

参 考 文 献

- 1 罗天宇, 罗继伟. 角接触球轴承预紧与刚度. 轴承, 2015(6):1~4 (Luo T Y, Luo J W. Preload and rigidity of angular contact ball bearings. *Bearing*, 2015(6):1~4 (in Chinese))
- 2 邓四二, 王燕霜, 李新宁. 轴承预紧力与系统固有频率关系的实验. 航空动力学报, 2010, 25(8):1883~1887 (Deng S E, Wang Y S, Li X L. Experimental study on the relationship between bearing preload and system natural frequency. *Journal of Aerospace Power*, 2010, 25(8):1883~1887 (in Chinese))
- 3 Jones A B. A general theory for elastically constrained ball and radial roller bearings under arbitrary load and speed conditions. *Journal of Fluids Engineering*, 1960, 82(2):309~320
- 4 Harris T A. Rolling bearing analysis. John Wiley and Sons, Inc.(United States), 2001
- 5 Houpert L. A uniform analytical approach for ball and roller bearings calculations. *Journal of Tribology*, 1997, 119:851~858
- 6 Hernot X, Sartor M, Guillot J. Calculation of the stiffness matrix of angular contact ball bearings by using the analytical approach. *Journal of Mechanical Design*, 2000, 122(1):83~90
- 7 曹宏瑞, 李亚敏, 何正嘉等. 高速滚动轴承-转子系统时变轴承刚度及振动响应分析. 机械工程学报, 2014, 15(8):73~81 (Cao H R, Li Y M, He Z J, et al. Time varying bearing stiffness and vibration response analysis of high speed rolling bearing-rotor systems. *Journal of Mechanical Engineering*, 2014, 15(8):73~81 (in Chinese))
- 8 Cao Y Z, Altintas Y. A general method for the modeling of spindle-bearing systems. *Journal of Mechanical Design*, 2004, 126(6):557~566
- 9 王保民, 梅雪松, 胡赤兵等. 预紧高速角接触球轴承动力学特性分析. 轴承, 2010(5):1~4 (Wang B M, Mei X S, Hu C B, et al. Analysis on dynamic characteristics of preloaded high-speed angular contact ball bearings. *Bearing*, 2010(5):1~4 (in Chinese))
- 10 黄伟迪, 甘春标, 杨世锡等. 高速电主轴角接触球轴承刚度及其对电主轴临界转速的影响分析. 振动与冲击, 2017, 36(10):19~25 (Huang W D, Gan C B, Yang S X, et al. Analysis on the stiffness of angular contact ball bearings and its effect on the critical speed of a high speed motorized spindle. *Journal of Vibration and Shock*, 2017, 36(10):19~25 (in Chinese))
- 11 Jedrzejewski J, Kwasny W. Modelling of angular contact ball bearings and axial displacements for high-speed spindles. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 2010, 59(1):377~382
- 12 饶成晨, 陈涛. 高速陶瓷电主轴结构设计及静动态特性分析. 精密制造与自动化, 2015(4):32~37 (Rao C C, Chen T. Structural design and static and dynamic analysis of high-speed ceramic motor spindle. *Precise Manufacturing & Automation*, 2015(4):32~37 (in Chinese))
- 13 支汉立, 张钢, 姜笑颖等. 高速精密电主轴轴承的动态特性分析与试验. 机械制造与自动化, 2015, 44(6):49~54 (Zhi H L, Zhang G, Jiang X Y, et al. Dynamic analysis and testing for high-speed precision spindle bearings. *Machine Building & Automation*, 2015, 44(6):49~54 (in Chinese))
- 14 黄伟斌, 唐传俊, 崔立. 基于 ROMAX 的球轴承转子系统动态性能分析. 机械设计与制造, 2011(9):173~175 (Huang W B, Tang C J, Cui L. Ball Bearing the rotor system dynamic performance analysis and optimization on the base of ROMAX. *Machinery Design & Manufacture*, 2011(9):173~175 (in Chinese))
- 15 刘保国, 孟华. 滚动轴承动力学模型研究进展. 轴承, 2014(2):1~4 (Liu B G, Meng H. Research progress on dynamics models for rolling bearings. *Bearing*, 2014(2):1~4 (in Chinese))

16 罗忠,郭健,唐瑞等. 转子轴承系统中滚动球轴承的非线性动力学相似特性研究. 动力学与控制学报, 2016, 14(3):223~228 (Luo Z, Guo J, Tang R, et al. Similar-

ity research on the nonlinear dynamic characteristics of rolling bearing in rotor-bearing system. *Journal of Dynamics Control*, 2016, 14(3):223~228 (in Chinese))

INFLUENCE OF BEARING PRELOAD ON STATIC AND DYNAMIC CHARACTERISTICS OF A ROTOR SYSTEM*

Zhao Geng Liu Baoguo[†] Feng Wei Wang Pan

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou 450000, China)

Abstract Bearing preload has a direct influence on the static and dynamic characteristics of rolling bearing-rotor systems. Considering the effect of centrifugal force and gyro moment, the dynamic model of 5 degrees of freedom bearing-rotor system was established in Romax software, and the influence of preload on bearing stiffness, working contact angle, and working life was studied. Additionally, an experimental test bench of the bearing-rotor system was built to evaluate the bearing stiffness, working contact angle, working life, static deformation by static load and vibration response of the spindle system by dynamic unbalanced load, under different bearing preloads. As a result, the relationship curves between the preload and these parameters were obtained. Finally, the effect of preload on natural frequencies of the bearing-rotor system was studied, and the result shows that increasing preload is helpful to increase the natural frequencies of the bearing-rotor system.

Key words preload, angular contact ball bearing, bearing-rotor system, static and dynamic characteristics, Romax