枢轴轴承的结构稳定性设计研究

盛誉
核工业理化工程研究院 天津 300180

摘 要 为了满足新型专用装备中针形轴承的设计需求，需要开展针形轴承设计方法研究。本文采用了三维有限元仿真方法对轴承的结构稳定性开展了理论分析研究，结果表明，通过优化轴承接触面结构参数可增加径向约束能力，从而提高轴承的结构稳定性；采用模拟转子搭载不同方案轴承验证了理论分析的正确性。此外，本文采用二维解析计算的方法分析了轴承结构稳定性与结构参数之间的量化关系，建立了结构稳定性能的数学表达式，形成了轴承结构稳定性设计方法。该设计方法可应用于新型专用装备的轴承设计中。

关键词 针形轴承；结构稳定性；结构参数；试验验证；设计方法

Research on Structural Stability Design of Pivot Bearings

Sheng Yu
Institute of Physical and Chemical Engineering of Nuclear Industry, Tianjin 300180, China

Abstract To meet the design requirements of needle roller bearings in new special-purpose equipment, research on the design methodology for such bearings is essential. In this paper, a three-dimensional finite element simulation method is employed to conduct theoretical analysis and research on the structural stability of the bearings. The results indicate that optimizing the structural parameters of the bearing contact surfaces can enhance radial constraint capability, thereby improving structural stability. The correctness of the theoretical analysis is validated through the testing of simulated rotors equipped with different bearing configurations. Furthermore, a two-dimensional analytical calculation method is used to examine the quantitative relationship between bearing structural stability and its design parameters, leading to the formulation of a mathematical expression for structural stability performance. Consequently, a design methodology for bearing structural stability is established. This design approach can be applied to the bearing design of new special-purpose equipment.

Key words Needle bearings; structural stability; structural parameters; experimental verification; design method

枢轴轴承是储能飞轮、陀螺仪等旋转设备的重要支承部件。这类旋转设备在工作状态下需要具备较高的系统稳定性和较长的使用寿命。枢轴轴承作为唯一的动静接触件，对设备的稳定性和可靠性起到决定性作用。轴承的结构稳定性直接决定整个系统的运行状况，因此设计过程中，需要确保枢轴轴承具备足够的结构稳定性裕度。

国内外在建筑、桥梁等设计行业的结构稳定性研究较多，但目前未调研到该概念应用在轴承上的相关研究以及由于结构稳定性裕度不足导致轴承失效的相关案例。其原因在于传统的旋转设备对轴承刚度的要求较低，不易引发结构稳定性问题。但随着承载需求的提升，旋转设备对轴承刚度的要求日益增高，在原有的结构设计体系下，较高的轴承刚度将引起严重的结构稳定性问题[1]。因此，面向新一代高性能旋转设备，需要开展枢轴轴承的结构稳定性研究，为轴承的结构优选设计提供理论支撑和设计依据。

本文首先通过理论分析计算的方式，对比了不同轴承方案、不同转子径向振幅条件下的轴承接触面状态，并通过试验得到了不同轴承方案的振动响应数据，验证了理论分析的正确性。进一步构建了轴承结构稳定性与轴承接触面结构参数之间的关系，建立了轴承结构稳定性设计方法，为轴承性能的全面设计提供了关键支撑，也为旋转设备性能的升级迭代积累了重要的技术储备。

1 枢轴轴承结构概述

专用装备轴承系统由针形轴和轴窝组成，专用装备正常工作时，针形轴处于旋转状态，其上端连接具有一定不平衡质量的转子，而轴窝处于静止状态。

2 轴承的结构稳定性理论分析

在专用装备工作状态下，针形轴端部球面与轴窝之间的相互作用属于摩擦接触问题。由于转子具有不平衡质量，因此在工作状态下存在一定的径向振幅，使针形轴出现弯曲回转。

本文采用基于Workbench的有限元方法，对存在径向振幅情况下的轴承摩擦接触问题进行三维数值仿真研究。首先进行三维模型建立，将真实转子以直径远大于针形轴直径的圆盘表示，在圆盘上端施加一轴向力作为转子重力，在圆盘侧面与底面施加代表转子下端振幅的径向位移约束。轴窝底面定义为固定约束，针形轴端部球面和轴窝内表面分别定义为接触面和目标面。在计算方法方面，引入了非线性接触算法，求解包含非线性接触力的静力学方程[2]。轴承刚度和结构参数的具体方案如表1所示。

表1 多方案针形轴结构参数

轴承方案序号	针形轴刚度（N/m）	针形轴半径（mm）	轴窝内圆半径（mm）	针形轴有效长度（mm）
①	10 000	1.0	2.5	20.0
②	48 500	1.0	2.5	11.8
③	48 500	2.2	2.5	20.0

方案①和方案②的对比计算中，针形轴刚度分别为10 000 N/m和48 500 N/m，针形轴半径相等，不同刚度通过针形轴有效长度的区别来实现。对以上两种方案进行轴承摩擦接触问题的计算，得到了如下规律：在振幅较小时，针形轴端部球面与轴窝处于全周接触状态。在振幅较大时，方案①针形轴端部与轴窝仍然能保持全周接触状态，而方案②针形轴端部与轴窝在转子振幅大于100 μm的情况下开始发生脱离。说明针形轴与轴窝之间的作用力大小直接影响轴承接触状态。

方案②和方案③的对比计算中，两种方案的针形轴刚度均为48 500 N/m，相比方案②，方案③增大了针形轴半径。对两种方案的轴承接触状态进行了计算，转子振幅为100 μm的情况下，方案②针形轴端部与轴窝发生了脱离，方案③针形轴端部与轴窝之间未发生脱离，与方案②相比，轴承接触面积明显增加，提高了针形轴端部与轴窝的连接稳定性。说明在针形轴与轴窝之间作用力大小相同的情况下，轴承接触面的结构参数决定了其径向约束能力，是影响轴承结构稳定性的关键因素[3]。

3 轴承的结构稳定性试验分析

为了对上述理论分析过程进行验证，采用不同径向承载的模拟转子分别搭载不同方案轴承进行试验考核。模拟转子的径向承载分别是50 μm、100 μm和150 μm，轴承方案分别为表1中方案①～方案③，转子逐渐升速至工作转速，待系统稳定后对模拟转子的振动响应进行监测，记录其主振幅、进动频率、进动振幅等数据。

轴承方案①分别搭载模拟转子径向承载50 μm、100 μm和150 μm的试验组合为试验组A中，结果表明，当针形轴刚度为10 000 N/m、模拟转子径向承载在50～150 μm的范围内时，系统运行正常，主振幅与模拟转子径向承载一致。

轴承方案②分别搭载模拟转子径向承载50 μm、100 μm和150 μm的试验组合为试验组B中，结果表明，当针形轴刚度为48 500 N/m时，模拟转子振动响应发生了显著变化：模拟转子径向承载为100 μm，系统出现了频率范围3～5 Hz、振幅10 μm的低频进动异常现象；当模拟转子径向承载为150 μm时，升速过程中模拟转子振动发散，已无法正常升速至工作转速。

轴承方案③分别搭载模拟转子径向承载50 μm、100 μm和150 μm的试验组合为试验组C中，模拟转子恢复为同步正进动，未出现低频进动的异常现象，该结果说明轴承接触面的结构参数优化后，轴承结构稳定性得到了提升，并在模拟转子的振动响应中得到了体现[4]。

以上对比试验结果表明，本文对针形轴承接触面结构参数与结构稳定性之间关系的理论分析过程是正确的。当轴承的结构稳定性不足时，模拟转子的能量无法有效地通过轴承传递给阻尼系统，因此系统运行过程中出现了低频进动的异常现象。

4 轴承的结构稳定性设计方法

将真实的三维模型简化为二维模型进行分析有助于获得更多的量化规律，进一步可建立轴承的结构稳定性设计方法。转子存在径向承载情况下，针形轴弯曲形态如图所示。随着径向承载力的增加，针形轴与轴窝的接触状态由图1a过渡到图1b，而图1b所示的单侧点接触表明出现了轴承结构失稳现象。

对图1a中所示，可得到径向与轴向平衡方程，如式（1）所示：

$$\begin{cases} W_2\cos\theta - W_1\cos\theta = F_x \\ W_1\sin\theta + W_2\sin\theta = F_y \end{cases} \quad (1)$$

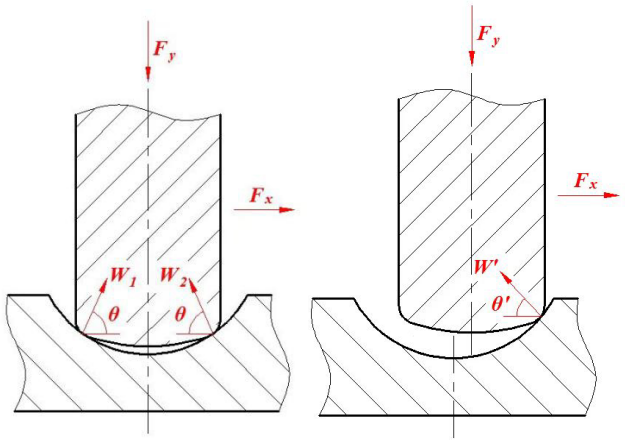
得到式（2）：

$$\begin{cases} W_1 = \dfrac{F_y\cos\theta - F_x\sin\theta}{2\sin\theta\cos\theta} \\ W_2 = \dfrac{F_y\cos\theta + F_x\sin\theta}{2\sin\theta\cos\theta} \end{cases} \quad (2)$$

通过推导枢轴轴承结构的几何关系，最终可得到结论：为满足轴承的结构稳定性设计要求，轴承接触面的几何参数应满足式（3）：

$$\frac{F_y}{F_x} > \frac{\sqrt{(R_4-R_3)^2-(R_1-R_3)^2}}{R_1-R_3} \quad (3)$$

式中，F_x—转子径向承载力（N）；F_y—轴承轴向承载力（N）；W_1、W_2—二维简化模型下xOz平面中针形轴端部所受的两侧法向力（N）；θ—针形轴端部与轴窝接触点法向力与水平面的夹角（°）。



a—xOz平面全周线接触受力分析　b—xOz平面单侧点接触受力分析

图1　轴承受力分析示意图（由a和b组成）

5　结束语

本文开展了专用装备针形轴承的结构稳定性理论研究，得到了结构稳定性与轴承接触面结构参数之间的量化关系式，并形成了相应的设计方法，结论如下：

1.通过三维有限元分析方法，完成了轴承接触问题和结构稳定性的分析计算，得到了轴承结构稳定性与轴承刚度、接触面结构参数之间的影响关系[5]。

2.采用不同径向承载的模拟转子搭载不同方案轴承的形式开展了验证试验，根据不同试验组的模拟转子振动响应情况，证明了轴承刚度和接触面结构参数影响轴承的结构稳定性能，且轴承结构失稳体现为系统中出现低频进动现象[6]。

3.对轴承结构稳定性与结构参数的关系进行了定量分析计算，结合轴承结构稳定性设计要求，形成了定量的结构参数设计方法。本文所形成的设计方法可应用于新型专用装备轴承设计中。

参考文献

[1]温诗铸,黄平,田煜,等.摩擦学原理[M].5版.北京:清华大学出版社,2018.

[2]蒋书运.新型高速化枢轴宝石轴承结构优选设计[J].中国机械工程,2004,15(5):428-431.

[3]刘华,李志9强.基于有限元法的枢轴宝石轴承结构优选设计[J].精密制造与自动化,2003(2):25-28

[4]刘波,张明,王磊.基于有限元法的滚动轴承动态特性与稳定性分析[J].机械工程学报,2020,56(5):112-120.

[5]黄庆学,王建梅.高速精密轴承转子系统动力学[M].北京:科学出版社,2015:75-82.

[6]JONES A B, BROWN C D.Stability analysis of pivot bearings in high-speed rotating machinery[J].Tribology International,2019(138):432-439.

（本文编辑　曹　阳）

