

DOI: 10.3901/JME.2023.01.123

三点接触球轴承打滑动力学分析与验证^{*}

彭 城¹ 曹宏瑞^{1,2} 朱玉彬¹ 陈雪峰^{1,2}

(1. 西安交通大学机械工程学院 西安 710049;
2. 西安交通大学机械系统与振动国家重点实验室 西安 710049)

摘要: 三点接触球轴承是航空发动机中的关键基础件。目前对三点接触球轴承的仿真分析多基于拟静力学模型,对于打滑、擦伤等特殊行为缺乏解释,而滚球打滑易引起滚道磨损、蹭伤等故障。在对轴承元件进行受力分析的基础上,引入滚球与左右半内圈的接触状态判断条件,采用动力学方法对三点接触球轴承进行了打滑分析。然后,分析了设计接触角及运行参数对轴承打滑率的影响。最后,通过实验研究了滚球通过内圈频率及滚球公转速随轴向载荷及内圈转速的变化规律,并与动力学模型仿真值进行对比验证了方法的有效性。研究表明:轴向载荷越小或转速越高,打滑率越大;在转速和载荷工况条件相同的情况下,轴承打滑率随着设计接触角的增加而增加;而在不同转速工况下,轴承发生打滑的轴向载荷临界值不同,其数值随转速的升高而增加。

关键词: 三点接触球轴承;动力学模型;打滑率;轴向载荷

中图分类号: TH133

Dynamic Analysis and Verification on Skidding Behavior of Three-Point Contact Ball Bearings

PENG Cheng¹ CAO Hongrui^{1,2} ZHU Yubin¹ CHEN Xuefeng^{1,2}

(1. School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiao Tong University, Xi'an 710049;
2. State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiao Tong University, Xi'an 710049)

Abstract: Three-point contact ball bearings are key basic components in aeroengine. At present, the analysis of simulation of three-point contact ball bearings were based on quasi-static model and the explanations of skidding and scratching in bearings were rare reported while the skidding of balls are prone to induce wear and scratching defects. By introducing the condition for judging the contact state between the ball and the left and right half inner rings, skidding behaviour analysis of three-point contact bearings was conducted using dynamic method on the basis of force analysis on bearing elements. Then, the influence of contact angle and operating conditions on skidding rate was discussed. Finally, the validation of proposed method was verified by experiment on the mechanism of ball pass frequency of inner race and orbital speed of ball with varied axial load and shaft speed. The results suggest that the smaller the axial load or the higher the speed, the greater the slip rate. The skidding rate increased with the contact angle under the identical condition of shaft speed and axial load, and the critical axial load of skidding increased with shaft speed as the critical axial load varies with shaft speed.

Key words: three-point contact ball bearings; dynamic model; skidding rate; axial load

0 前言

三点接触球轴承具有结构紧凑、安装方便、承

载能力高、轴向窜动小等优点,广泛地应用于航空发动机中。航空发动机主轴承承受的载荷大小和方向随着运行工况变化而变化。例如,军用斯贝发动机 4 号轴承在高压转速为最大转速 85% 时轴向载荷变向^[1]。轴向载荷变向将使三点接触球轴承处于高速轻载状态,滚球受到轴承空腔内的油气混合物的

^{*} 国家重点研发计划(2020YFB2007700)和国家自然科学基金优秀青年基金(51922084)资助项目。20220429 收到初稿,20220915 收到修改稿

阻力作用发生打滑,诱发套圈和滚球表面的磨损,严重影响轴承的运行安全。周向磨损条带和猫眼圈等磨损,均和三点接触球轴承实际工况和特殊结构有关^[2],目前尚没有较为完善的轴承模型对上述现象进行描述和解释。因此,考虑轴承内部相互作用及真实运行状态,建立三点接触球轴承模型,研究其运动特性及打滑状态,对于轴承设计参数优化和服役性能提升具有重要作用。

国内外学者在滚动轴承动力学建模方面已开展了大量的研究工作^[3-4]。特别的,在轴承打滑研究方面,李峰^[5]对频繁摆动工况下的球轴承打滑特性进行了研究。WANG^[6]建立了高速条件下角接触球轴承动力学模型,对打滑行为进行了分析。涂文兵^[7]建立了滚动体打滑动力学模型,分析了滚动体在轴承运转过程中的打滑机理及工况参数对滚动体打滑的影响机理。GAO^[8]建立了考虑润滑剂温度效应大尺寸工业级角接触球轴承的动力学模型,研究了润滑剂流量、载荷及转速等因素对保持架转速的作用机理,并分析了轴承的过打滑现象。LIU^[9]建立了考虑保持架柔性的打滑动力学模型,认为提高保持架刚性有助于减轻打滑程度。

国内外学者对三点接触球轴承特性进行了大量研究工作,但针对轴承打滑方面的研究较少。REZMIRE^[10]应用几何分析方法建立了球轴承的通用拟静力学模型,该模型可对两点、三点、四点接触球轴承进行计算分析。LEBLANC^[11]基于库伦摩擦模型,建立了考虑离心力及陀螺力矩的球轴承拟静力学模型,可实现对两点、三点及四点接触球轴承的分析。近年来国内也开展了对双半内圈球轴承模型的建模研究,邓四二^[12]考虑弹性支承体与轴承外圈、轴承座之间的刚柔耦合特性,建立了弹性支承下的双半内圈角接触球轴承非线性动力学微分方程,对弹性体支承的双半内圈角接触球轴承振动特性进行了理论分析。YAO^[13]建立了薄壁四点接触球轴承的多体动力学模型,采用 ADAMAS 求解器进行求解,对不同载荷条件下的接触力及运动稳定性进行了分析。李杰^[14]应用数值方法和有限元方法研究了轴向力、径向力、转速等工况参数对三点接触球轴承刚度的影响规律,并着重分析了轴承在三点接触时刚度的变化规律。王廷剑^[15]基于正交试验法建立了三点接触球轴承基本额定寿命的参数优化模型。李胜远^[16]研究了脉冲爆震载荷对双半内圈轴承疲劳寿命的影响。CAO^[17]建立了双半内圈角接触球轴承动力学模型,并对异常接触状态进行了分析。

现阶段对三点接触球轴承模型的分析多基于拟

静力学模型,该类模型对于轴承元件往往有不同程度的运动约束,无法考虑多种因素对轴承打滑的影响。基于动力学模型的打滑分析放弃了滚道控制假设,实现对滚动体三维空间内的运动仿真。本文考虑双半内圈的特殊接触状态,建立三点接触球轴承动力学模型。应用该模型计算得到轴承滚球公转转速及滚球通过内圈频率(Ball pass frequency of the inner race, BPFI)并进行实验验证。在此基础上,研究轴承转速和轴向载荷对打滑的影响规律,并计算不同转速下预防轴承打滑的轴向载荷。

1 三点接触球轴承打滑的动力学计算

轴承在实际运行过程中,滚球受力情况复杂,为对轴承的打滑进行分析,需建立动力学模型对其运动特性进行精确仿真。作者引入三点接触球轴承左、右半内圈与滚球接触状态判定条件,建立了三点接触球轴承的动力学模型^[17]。其建模及求解过程如下。

首先,根据轴承参数及工况参数应用球轴承拟静力学模型计算得到轴承各元件位移、速度作为积分计算的初始值,以便轴承动力学模型计算快速收敛。

其次,由轴承各元件位移矢量及赫兹接触理论计算得到轴承各元件的法向接触载荷。根据各部件速度矢量及弹流润滑理论计算轴承各元件间的切向牵引力,根据轴承滚球公转速度及边界层理论计算得到滚球承受来自轴承空腔内油气混合物的运动阻力,计算得到各元件所受力和力矩。滚球与左、右半内圈的接触状态可由文献[17]中的判断条件确定。

然后,对轴承元件进行受力分析,本文主要针对滚球进行受力分析,如图 1 所示。对于滚球,其受到套圈对滚球的接触力及牵引力,保持架兜孔对滚球的接触力及切向摩擦力,润滑剂阻力,离心力及陀螺力矩的作用。为方便起见,图中符号下标均省略滚球序号 j 。

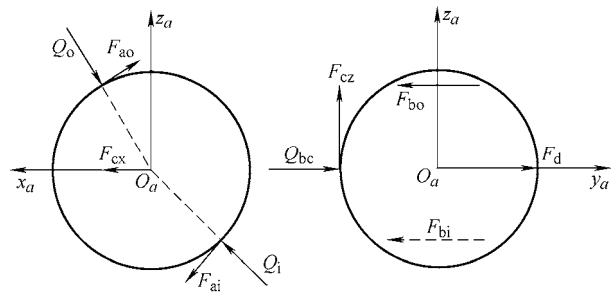


图 1 滚球受力分析

图 1 中, $O_a x_a y_a z_a$ 为滚球方位坐标系, 原点 O_a 位于滚球几何中心, x_a 轴与轴承中心轴线平行, y_a 轴垂直相交于轴承中心轴线。 \mathbf{Q}_i 与 \mathbf{Q}_o 分别表示滚球与内圈和外圈的接触力; \mathbf{F}_{ai} 和 \mathbf{F}_{ao} 分别表示牵引力在接触椭圆长轴上的分量; \mathbf{F}_{bi} 和 \mathbf{F}_{bo} 分别表示牵引力在接触椭圆短轴上的分量; \mathbf{Q}_{bc} 表示保持架对滚球的接触力; \mathbf{F}_{cx} 和 \mathbf{F}_{cz} 分别表示保持架对滚球的摩擦力在 x_a 轴和 z_a 轴上的分量; \mathbf{F}_d 表示润滑剂对滚球的阻力。

其运动微分方程可表示为

$$m_b \ddot{\mathbf{r}}_b = \mathbf{F}_{bir} + \mathbf{F}_{bor} + \mathbf{F}_{bc} + \mathbf{F}_d \quad (1)$$

$$\frac{d\mathbf{L}_o}{dt} + \boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{L}_o = \mathbf{M}_{bir} + \mathbf{M}_{bor} + \mathbf{M}_{bc} \quad (2)$$

其中

$$\mathbf{F}_{bir} = \mathbf{Q}_i + \mathbf{F}_{ai} + \mathbf{F}_{bi} \quad (3)$$

$$\mathbf{F}_{bor} = \mathbf{Q}_o + \mathbf{F}_{ao} + \mathbf{F}_{bo} \quad (4)$$

$$\mathbf{F}_{bc} = \mathbf{Q}_{bc} + \mathbf{F}_{cx} + \mathbf{F}_{cz} \quad (5)$$

式中, $\ddot{\mathbf{r}}_b$ 为滚球质心加速度矢量; $\boldsymbol{\Omega}$ 为滚球惯性主轴角速度; \mathbf{L}_o 为滚球对质心的动量矩; \mathbf{F}_{bir} 表示内圈对滚球的作用力, 包括法向接触力和切向摩擦力; \mathbf{F}_{bor} 表示外圈对滚球的作用力, 包括法向接触力和切向摩擦力; \mathbf{F}_{bc} 表示保持架对滚球的作用力, 包括法向接触力和切向摩擦力; \mathbf{M}_{bir} , \mathbf{M}_{bor} 及 \mathbf{M}_{bc} 分别代表作用力 \mathbf{F}_{bir} , \mathbf{F}_{bor} 及 \mathbf{F}_{bc} 对滚球产生的作用力矩。其余轴承元件的运动微分方程均可按此方法列出。

最后, 由上述所得各元件受力求得各元件的加速度, 应用变步长四阶龙格-库塔-费尔伯格法迭代算法计算下一时刻轴承元件的运动速度和位移矢量, 重复上述步骤直至计算达到指定时刻。

三点接触球轴承通常用于承受轴向载荷的场合, 所以滚球的公转转速即为保持架的转速^[18], 通过对滚球公转转速进行计算即可推导出轴承的打滑程度。采用滚球公转转速与内圈转速之比对打滑进行描述, 则三点接触球轴承打滑率可表示为

$$\zeta = \left(1 - \frac{A'}{A}\right) \times 100\% \quad (6)$$

式中, A' 为实际打滑时滚球公转转速与内圈转速之比, 可由滚球通过内圈频率推导, 公式如下

$$A' = 1 - \frac{f_{bpf_i}}{zf_r} \quad (7)$$

式中, f_{bpf_i} 为滚球通过内圈频率; z 为滚球个数; f_r 为内圈转频。

A 为纯滚动条件下滚球公转转速与内圈转速之比, 可以表示为

$$A = 1 - \frac{1}{2} \left(1 + \frac{d}{D_m} \cos \alpha\right) \quad (8)$$

式中, d 为滚球直径; D_m 轴承节径; α 为接触角。

2 三点接触球轴承打滑仿真分析

轴承的结构参数及运行工况参数均会对轴承的打滑产生影响。下面进一步分析接触角, 运行转速及载荷对轴承打滑的影响规律, 仿真轴承参数如表 1 所示。

表 1 轴承参数

参数	数值
滚动体个数 z	11
轴承宽度 B/mm	15
滚动体直径 d/mm	7.85
轴承内径 D_i/mm	25
轴承外径 D_o/mm	52
节圆直径 D_m/mm	38.5
轴承初始接触角 $\alpha_o/(\circ)$	30
内圈曲率因子 f_i	0.51
外圈曲率因子 f_o	0.525
滚动体、内外圈和转子材料泊松比 μ	0.3
滚动体密度 $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	7 850
滚动体、内外圈材料弹性模量 E/GPa	210

2.1 轴承结构参数分析

包括接触角在内的结构参数对于轴承动态性能有较大影响, 改变结构参数将使轴承接触载荷改变从而对轴承打滑产生影响。

图 2 为轴承转速 12 200 r/min, 轴向载荷 450 N 工况下, 不同设计接触角轴承滚球公转转速与内圈转速的比值的变化规律。由图 2 可得滚球公转转速与内圈转速之比的理论值随接触角的增加而缓慢增加, 动力学模型仿真值在接触角在小于 20° 与理论值相同, 在接触角为 22° 及更大时滚球公转转速与内圈转速之比明显下降且随设计接触角的增加而降低。

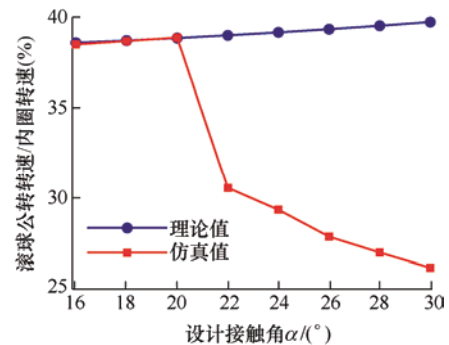


图 2 滚球公转转速随接触角变化规律

如图 3 所示,在相同工况下对滚球套圈接触力进行分析可得,轴向载荷固定时滚球和套圈沟道接触载荷随着轴承设计接触角的增加而降低。所以当设计接触角增加导致滚道接触载荷降低时,滚道对滚球的拖动作用也同时降低,在降低到特定值时滚球由于油气混合物的阻力作用发生打滑,且随着接触角的增加滚球载荷减小打滑现象进一步加剧。

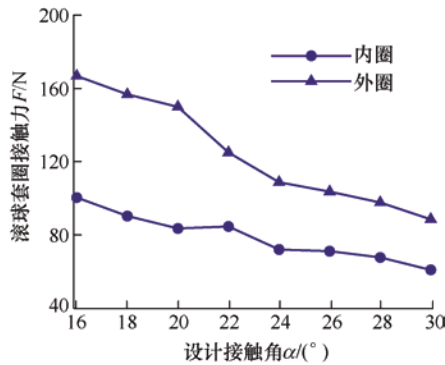


图 3 滚球与内外圈载荷随接触角变化规律

2.2 轴承运行参数分析

载荷和转速等运行工况参数对于轴承动态性能有较大影响。图 4 为轴承在不同转速工况下打滑率随轴向载荷变化情况。观察可得,在转速相对较低时打滑率随轴向载荷变化不明显,而当转速进一步升高时,轴向载荷将会出现某一临界值,轴向载荷小于该临界值时对应打滑率会急剧升高,轴承发生严重打滑。进一步观察可得上述轴向载荷临界值会随着转速的升高而升高,即发生打滑的临界载荷升高。实际工程中往往通过预加载荷来解决轴承轻载打滑的问题,所以当给定打滑率限定值后,对于不同最高转速的应用场景需要预加的轴向载荷不同。

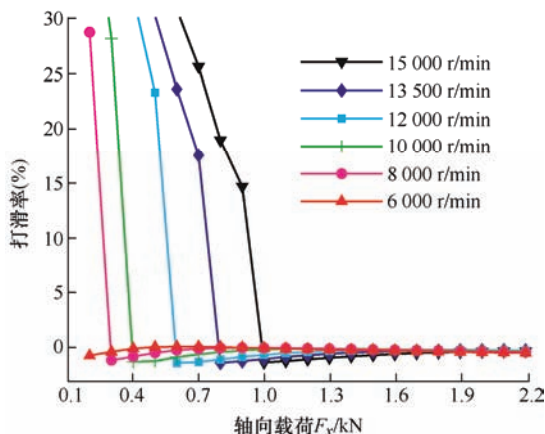


图 4 不同转速下打滑率随轴向载荷及预防打滑轴向预紧变化规律

若要求球轴承打滑率应小于 10%，则当轴承最高转速为 8 000 r/min 时,防止轴承打滑轴向载荷临

界值约为 300 N;而当轴承最高转速为 15 000 r/min 时轴向载荷临界值约为 1 000 N,防止打滑的轴向载荷临界值与轴承实际工况中运行转速呈正相关关系。所以在实际应用中,对于限定打滑率的最低轴向预加载荷需要根据实际工况中工作转速来确定,上述由仿真所得结论对于实际工程具有较大应用价值。

3 三点接触球轴承打滑实验

由于直接测量三点接触球轴承的滚球公转速度可靠性不高。本实验通过对含预制损伤的三点接触球轴承在不同转速和轴向载荷加载工况下轴承振动响应进行分析,得到轴承运行时滚球通过内圈频率,结合式(7)得到滚球公转转速,再代入式(6)即可得到轴承实际打滑率。通过与动力学模型仿真结果对比验证球轴承动力学模型的准确性,其中轴承内圈损伤为宽 0.2 mm 的贯穿性损伤,轴承及预制损伤套圈实物如图 5 所示。

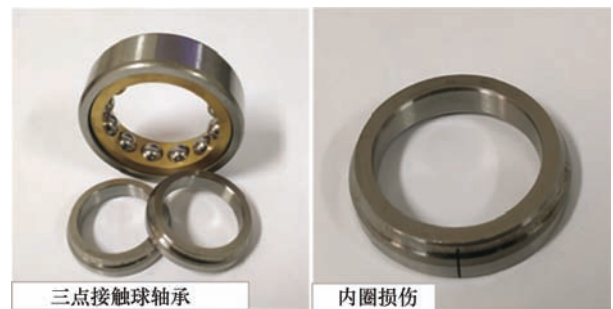


图 5 三点接触球轴承及预制损伤

3.1 实验方案

图 6 和图 7 分别为实验测试系统和轴系实物图。转子左端为带损伤的三点接触球轴承,其基本几何参数如表 1 所示,右端为 7205AC 角接触球轴承,电机通过挠性联轴器驱动转子旋转,转速调节范围为 500~8 000 r/min,由于力传感器量程即轴向加载加载范围为 0~800 N。实验中采用奇石乐 8702B100M1 型加速度传感器,灵敏度为 50 mV/g,量程为 ±100 g,响应带宽为 54.0 kHz,满足本实验需求。实验中加速度传感器正交安装于带损伤轴承所在轴承座上,测量轴承在径向方向上的振动响应。

利用该实验系统进行了转速以 600 r/min 间隔从 600 r/min 升至 3 000 r/min、轴向载荷 100 N 为间隔从 100 N 升至 800 N 不同工况下共 40 组内圈故障轴承振动响应实验。为了研究较高转速下轴承滚球公转转速等工作状态,进行了轴向载荷为 250 N、400 N、550 N 时转速从 1 200 r/min 升至 5 400 r/min 等不同工况下共 24 组内圈故障轴承振动响应实验。

实验中数据采集系统为亿恒数采仪，采样频率 f_s 为 10 240 Hz，有效采样时间为 50 s，频率分辨率为 0.02 Hz。应用小波包分解取出实验采集振动信号中的冲击振荡成分，并通过包络谱分析技术得到轴承滚球通过内圈频率。

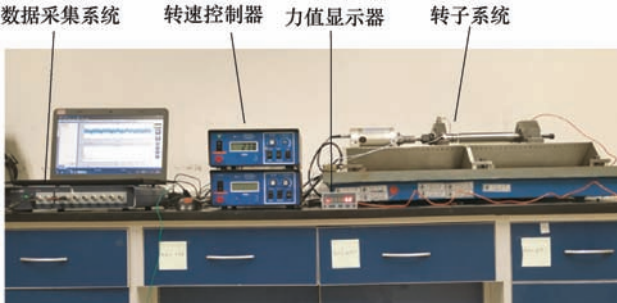


图 6 实验测试系统

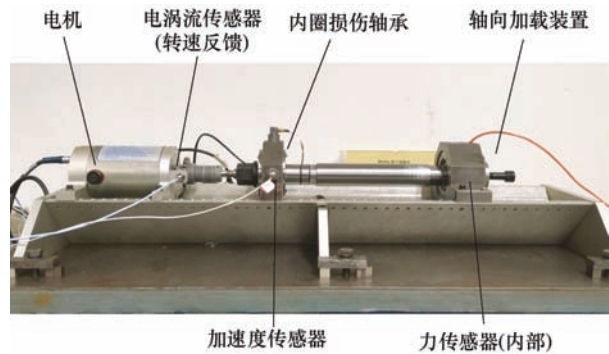


图 7 实验转子

3.2 实验结果

图 8、图 9 分别为转子在转速为 600 r/min，轴向载荷为 600 N 工况下振动信号的时域图和包络谱图，由图 8 中时域信号可明显观察到振动冲击成分，并且在图 9 包络谱分析图中可以得到内圈转频 f_r 及其倍频和滚球通过内圈频率 f_{bpf} 及其倍频。所得滚球通过内圈频率数值与理论计算数值 64.72 Hz 偏差在 0.5% 以内。且从表 2 中观察可得转速为 600 r/min 时，不同轴向载荷情况下滚球通过内圈频率仅仅变化了 0.3 Hz，说明低转速下轴承滚球打滑率较小可忽略，即滚球的公转运动基本上符合纯滚动假设。

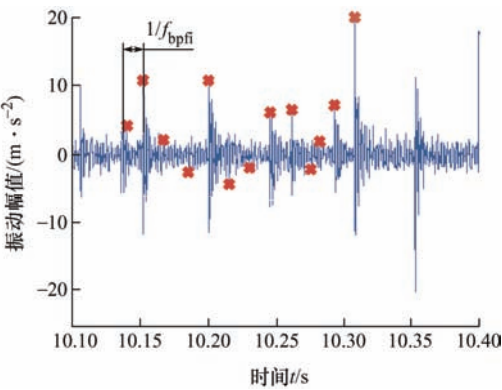


图 8 转速 600 r/min 轴向载荷 600 N 时轴承振动时域图

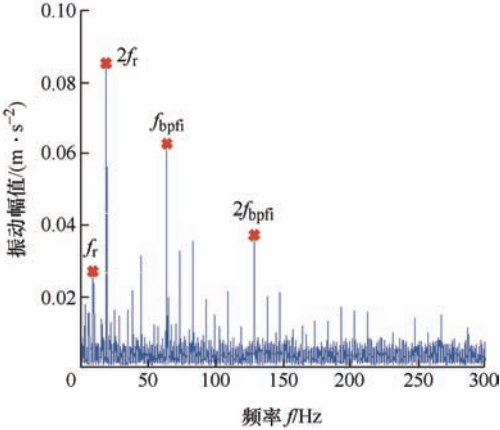


图 9 转速 600 r/min 轴向载荷 600 N 时轴承振动包络谱图

表 2 转速 600 r/min 不同轴向载荷工况下转频与滚球通过内圈频率测量值

轴向载荷 F_x/N	转频 f_r/Hz	滚球通过内圈频率 f_{bpf}/Hz
100	10.02	64.8
200	10.02	64.8
300	10.02	64.7
400	9.98	64.7
500	9.98	64.6
600	9.98	64.6
700	9.98	64.6
800	9.96	64.5

但是当轴承在较高转速下运行时规律有所不同，不同轴向载荷工况下滚球通过内圈频率相差较大。由表 3 数据可以看出在轴向载荷小于 300 N 时滚球通过内圈频率明显随轴向载荷增加而减小，大于 300 N 时变化不大。对于上述滚球通过内圈频率变化规律的产生原因作如下分析，当轴向载荷较小时，滚球通过内圈频率随轴向载荷降低而升高，同时由式(7)分析可得，当滚球通过内圈频率升高时，对应的轴承滚球平均公转转速降低。滚球公转转速降低的原因为：轴承滚球在轴向载荷减小的情况下，受到套圈的拖动力降低，而轴承空腔内润滑油和空气混合物的阻力作用阻碍滚球的周向圆周运动，滚球达到新的受力平衡时滚球公转转速有一定幅度的降低，也就是发生轴承打滑现象。

表 3 转速 3 000 r/min 不同轴向载荷工况下转频与滚球通过内圈频率测量值

轴向载荷 F_x/N	转频 f_r/Hz	滚球通过内圈频率 f_{bpf}/Hz
50	50.94	331.3
100	50.88	330.9
200	50.98	330.6
300	50.92	329.3
400	50.82	328.7
500	50.82	328.6
600	50.82	328.5
700	50.84	328.7
800	50.82	328.6

图 10 为打滑率实验值和仿真值的对比,其变化规律相同,说明该模型对于轴承打滑现象的仿真能力,验证模型的有效性。在此需要说明的是,对于图 10 中打滑率出现负值的情况,是由轴承振动实验误差或接触角、轴承节径在内轴承几何参数的不准确导致以纯滚动为假设的计算理论值出现偏差造成。

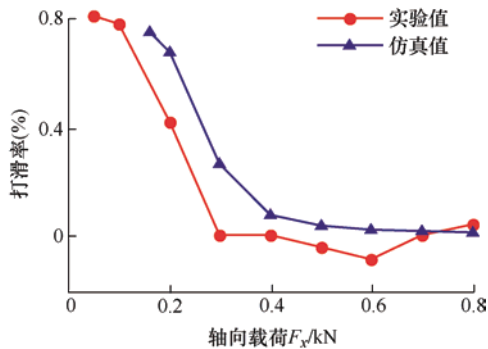


图 10 打滑率随轴向载荷变化规律

由上述实验仿真对比结果可以得出,在考虑轴承各部件运动和润滑的轴承模型中引入的油气混合物的阻力模型可以有效地计算仿真球轴承的打滑现象。

不同转速下滚球公转转速与内圈转速比值随轴向载荷的变化规律如图 11 所示。可以看出不同转速下滚球公转转速均随着轴向载荷的增加而增加,即随着轴向载荷的增加轴承打滑现象减轻。在轴向载

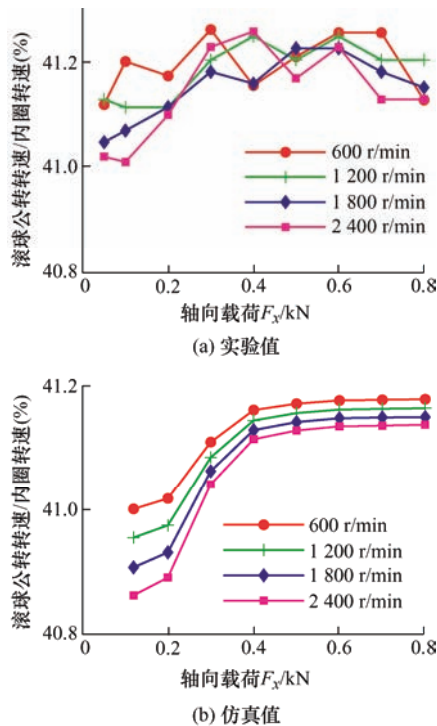


图 11 不同转速下滚球公转转速随轴向加载变化规律

荷相同时,转速越高滚球公转转速与内圈转速之比越低也即打滑越严重。且在轴向载荷较小时该比值随轴转速的变化较大,即转速对轴承打滑影响较大。可以看出仿真计算和实验结果中滚球公转转速与内圈转速之比具有相同的变化规律,进一步验证了模型的有效性。

对于转速和轴向载荷均较低时实验结果和仿真结果数值上有一定差异,产生上述差异的原因是对该轴承模型中润滑模型和阻力模型无法直接得到真实物理模型方程,而是应用较为简化的模型且关于润滑剂和油气混合物的相关参数使用相关实验统计值,本文也是应用简化模型其中相关参数均来自于相关文献[19,20],并且实验具有一定随机因素,所以在模型计算时数值上未能完全反应真实工况,但是本文模型从结果上看基本符合实验所得规律。

由图 12 中不同轴向载荷下滚球公转转速与内圈转速之比随转速变化规律的实验和仿真结果,可以更为直观地看出轴向载荷较小时滚球公转转速与内圈转速之比随转速升高而降低得较为严重,也即轴承滚球打滑更加严重,其轴向载荷为 250 N 时打滑明显比轴向载荷为 400 N 和 550 N 时更为严重,这说明在轴向载荷低于某值时打滑率将较快地增加,这和图 11 所得部分结论一致,其实验和仿真结果在变化规律上较为一致,数值差异同样存在,其产生原因亦如前文所述。

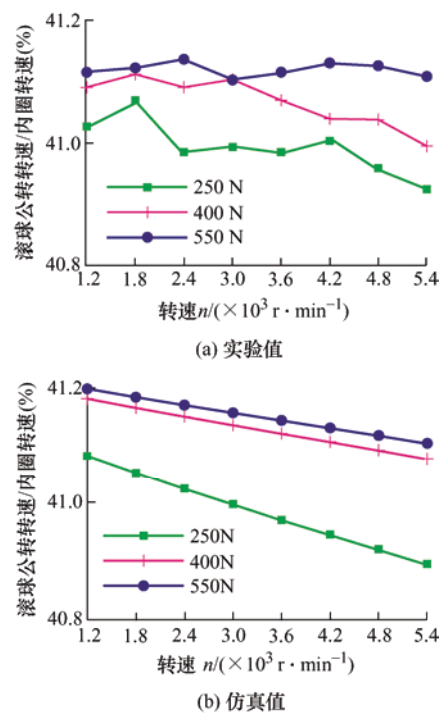


图 12 不同轴向载荷下滚球公转转速随转子转速变化规律

4 结论

(1) 在转速和载荷工况条件相同的情况下三点接触球轴承打滑率随着设计接触角的增加而增加。由于动力学模型考虑了润滑剂阻力对滚动体的影响, 当设计接触角大于 20° 时动力学模型仿真值与理论值有较大差异。通过本文所提出的仿真计算模型, 可在特定使用工况下, 对轴承接触角的选择提供参考。

(2) 三点接触球轴承在轻载工况下发生打滑, 轴向载荷越小或转速越高, 打滑率越大。当轴向载荷小于特定临界值时, 轴承滚球公转转速急剧下降, 轴承发生严重打滑。

(3) 不同转速工况下, 轴承发生打滑的轴向载荷临界值不同, 其数值随转速的升高而增加。基于所提出的计算模型, 根据给定的打滑率, 可通过动态仿真对轴承运行工况参数进行合理选取, 为服役过程中的装备安全运行提供保障。

参 考 文 献

- [1] 洪杰, 马艳红, 张大义. 航空燃气轮机总体结构设计 with 动力学分析[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2014.
HONG Jie, MA Yanhong, ZHANG Dayi. Structural design and dynamics analysis of aviation gas turbine [M]. Beijing: Beihang University Press, 2014.
- [2] 王斌, 樊照远. 航空发动机主轴轴承滑蹭故障分析[J]. 哈尔滨轴承, 2017, 38 (1): 15-18.
WANG Bin, FAN Zhaoyuan. Fault analysis of aircraft engine spindle bearing skidding damage[J]. Journal of Harbin Bearing, 2017, 38(1): 15-18.
- [3] CAO H, NIU L, XI S, et al. Mechanical model development of rolling bearing-rotor systems: A review[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2018, 102: 37-58.
- [4] LIU J, SHAO Y. Overview of dynamic modelling and analysis of rolling element bearings with localized and distributed faults[J]. Nonlinear Dynamics, 2018, 93 (4): 1765-1798.
- [5] 李峰, 邓四二, 张文虎. 频繁摆动工况下球轴承打滑特性研究[J]. 机械工程学报, 2021, 57 (1): 168-178.
LI Feng, DENG Sier, ZHANG Wenhui. Skidding characteristics of ball bearings withstanding a frequent oscillating condition[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57 (1): 168-178.
- [6] WANG Y, WANG W, ZHANG S, et al. Investigation of skidding in angular contact ball bearings under high speed[J]. Tribology International, 2015, 92: 404-417.
- [7] 涂文兵, 何海斌, 罗丫, 等. 滚动轴承稳定工况下的滚动体打滑动力学分析[J]. 振动与冲击, 2019, 38 (06): 94-99.
TU Wenbing, HE Haibin, LUO Ya, et al. Dynamic skidding behavior of rolling elements under bearing steady working conditions[J]. Journal of Vibration and Shock, 2019, 38 (06): 94-99.
- [8] GAO S, CHATTERTON S, NALDI L, et al. Ball bearing skidding and over-skidding in large-scale angular contact ball bearings: Nonlinear dynamic model with thermal effects and experimental results[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2021, 147: 107120.
- [9] LIU Y, CHEN Z, TANG L, et al. Skidding dynamic performance of rolling bearing with cage flexibility under accelerating conditions[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2021, 150: 107257.
- [10] REZMIRES D, RACOCCEA C, RACOCCEA C. Solution to describe the internal kinematics in ball bearings with 2, 3 or 4 contact points[J]. Annals of Dunarea de Jos University of Galati, Fascicle VIII-Tribology, 2005: 107-111.
- [11] LEBLANC A, NELIAS D. Analysis of ball bearings with 2, 3 or 4 contact points[J]. Tribology Transactions, 2008, 51 (3): 372-380.
- [12] 邓四二, 闫亚超, 王燕霜, 等. 弹性支承下的双半内圈角接触球轴承振动分析[J]. 航空动力学报, 2013, 28 (2): 241-251.
DENG Sier, YAN Yachao, WANG Yanshuang, et al. Vibration analysis of two-piece inner ring angular contact ball bearing with elastic support[J]. Journal of Aerospace Power, 2013, 28 (2): 241-251.
- [13] YAO T Q, WANG L H, LIU X B, et al. Multibody dynamics simulation of thin-walled four-point contact ball bearing with interactions of balls, ring raceways and crown-type cage [J]. Multibody System Dynamics, 2020, 48 (3): 337-372.
- [14] 李杰, 田拥胜, 张华良, 等. 考虑轴向力影响的三点接触球轴承刚度特性研究[J]. 推进技术, 2018, 39 (2): 419-425.
LI Jie, TIAN Yongsheng, ZHANG Hualiang, et al. Research on stiffness behavior of three point contact ball bearing in consideration of axial load[J]. Journal of Propulsion Technology, 2018, 39 (2): 419-425.
- [15] 王廷剑, 张静静, 王黎钦, 等. 基于正交试验法的三点

- 接触球轴承结构参数优化设计[J]. 轴承, 2020(12): 12-15.
- WANG Tingjian, ZHANG Jingjing, WANG Liqin, et al. Optimal design of structure parameters for three point contact ball bearing based on orthogonal test[J]. Bearing, 2020 (12): 12-15.
- [16] 李胜远, 郑龙席. 脉冲爆震轴向载荷对双半内圈球轴承疲劳寿命的影响[J]. 推进技术, 2021, 42(10): 2349-2357.
- LI Shengyuan, ZHENG Longxi. Effects of pulse detonation axial load on fatigue life of split inner ring ball bearing[J]. Journal of Propulsion Technology, 2021, 42(10): 2349-2357.
- [17] CAO H, WANG D, ZHU Y, et al. Dynamic modeling and abnormal contact analysis of rolling ball bearings with double half-inner rings[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2021, 147: 107075.
- [18] 崔立, 王黎钦, 郑德志, 等. 高速球轴承打滑的临界负荷研究[J]. 航空动力学报, 2007, 22(11): 1971-1976.
- CUI Li, WANG Liqin, ZHENG Dezhi, et al. Study on critical load of skidding on high speed ball bearing[J]. Journal of Aerospace Power, 2007, 22(11): 1971-1976.
- [19] GUPTA P K. Advanced dynamics of rolling elements[M]. New York: Springer, 2012.
- [20] SCHLICHTING H, GERSTEN K. Boundary-layer theory[M]. Berlin: Springer, 2016.
-
- 作者简介: 彭城, 男, 1992 年出生, 博士研究生。主要研究方向为滚动轴承动力学。
- E-mail: pcheng@stu.xjtu.edu.cn
- 曹宏瑞(通信作者), 男, 1982 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为航空发动机转子系统动力学分析与故障诊断。
- E-mail: chr@mail.xjtu.edu.cn