

变工况下高速轴承表面沟槽润滑增效设计

阎贝^{1,2}, 朱赞霏¹, 王超^{2,3}, 马帅军², 闫柯²

(1. 长安大学道路施工技术与装备教育部重点实验室, 710064, 西安; 2. 西安交通大学现代设计及转子轴承系统教育部重点实验室, 710049, 西安; 3. 中国核动力研究设计院, 610213, 成都)

摘要: 针对滚动轴承在高速高压气帘影响下供油不足的问题,提出了基于表面沟槽结构的轴承润滑增效方法。首先,建立了考虑轴承真实结构、组件内部运动的轴承润滑仿真模型,利用沟槽的引流作用增强润滑油轴向流动能力,进而提升轴承润滑效率;其次,考虑轴承变工况服役特点,研究了供油量、转速、沟槽尺寸、喷嘴直径等因素对轴承润滑性能的影响规律,结合正交设计获得了影响沟槽润滑增效的多因素敏感性排序,基于参数归一化方法构建了适用于变工况的最优沟槽宽度预测公式。搭建了高速轴承润滑实验台,对比分析了不同宽度沟槽在轴承变工况下的润滑增效作用,结果表明,当轴承转速超过 6 000 r/min 时,所提方法获得的最优沟槽结构使得轴承接触区润滑油流量提升 5 倍以上,显著提升了轴承的润滑效率。

关键词: 高速轴承; 油气润滑; 正交设计; 润滑增效; 沟槽结构

中图分类号: TG156 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202304015 **文章编号:** 0253-987X(2023)04-0142-10

Lubrication Efficiency Enhancement Design for Surface Grooves of High-Speed Bearings under Variable Working Conditions

YAN Bei^{1,2}, ZHU Zanfei¹, WANG Chao^{2,3}, MA Shuaijun², YAN Ke²

(1. Key Laboratory of Education Ministry for Road Construction Technology and Equipment, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 2. Key Laboratory of Education Ministry for Modern Design and Rotor-Bearing System, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 3. Nuclear Power Institute of China, Chengdu 610213, China)

Abstract: To solve the problem of insufficient oil supply for rolling bearings under the influence of high-speed and high-pressure air curtain, a bearing lubrication efficiency enhancement method based on surface groove structure was proposed. Firstly, the bearing lubrication simulation model considering the real structure of the bearing and the internal movement of the components was established. The guiding effect of the grooves was used to enhance the axial flow ability of the lubricating oil to improve the bearing lubrication efficiency. Secondly, the influence law of oil supply, speed, groove size, nozzle diameter and other factors on bearing lubrication performance was studied based on the service characteristics of bearings under variable working conditions. Combined with the orthogonal design, the multi-factor sensitivity ranking affecting groove lubrication efficiency was obtained. Based on the parameter normalization method, the optimal groove width prediction formula was established for variable working conditions. A high-speed bearing lubrication

tion test platform was built, and the lubricating efficiency enhancement effects of different width grooves were compared and analyzed under variable bearing working conditions. The results show that when the bearings rotate speed exceeds 6 000 r/min, the optimal grooves structure obtained by the proposed method can increase the lubricating oil flow in the bearing's contact area by more than 5 times, which significantly improves the bearing lubrication efficiency.

Keywords: high speed bearing; oil-air lubrication; orthogonal design; lubrication efficiency enhancement; groove structure

润滑是制约滚动轴承高速性能的核心因素。在油气润滑条件下,轴承组件公转、自转以及自旋等运动效应对润滑介质流动的影响随着转速升高而凸显^[1],导致轴承润滑效率降低,接触区摩擦生热加剧,轴承温度升高^[2]。研究表明,通过设计新型油气喷嘴结构、改变供油位置、采用微量润滑等方式,可有效改善轴承的润滑效率,降低轴承温升,从而提升轴承的高速性能(在高速下,轴承温度每降低 10℃,其高速性能 DmN 值约提升 $0.8\times10^6\sim1\times10^6\text{ mm}\cdot\text{r/min}$ ^[3])。

针对轴承的润滑效率提升问题,国内外企业及学者们主要从油气喷嘴结构、油气供给方式、油滴尺度控制等方面开展了系统的研究工作。在油气供给方式方面,主要包含侧向供油、外圈供油以及内圈环下供油 3 种方式。朱卫兵等^[4]对比分析了传统侧向供油和内圈环下供油时轴承的润滑性能,Yan 等^[5]结合可视化技术开展了 3 种不同供油方式下轴承内部气相流动、油气两相分布以及轴承关键接触区域的润滑油含量等。在润滑参数、油滴尺度等方面,国内外学者基于正交实验法,系统分析了不同供油量、供油间隔、供气压力、润滑油黏度以及管道长度等对轴承润滑性能的影响^[6-11],巩彬彬等^[12]研究了供油量与对轴承润滑以及外圈温升的影响;李志恒^[13]研究了供气气压与供油量变化对轴承润滑性能的影响。针对油滴尺度控制,轴承企业 SKF 和青岛理工大学郭峰教授团队提出了面向轴承润滑效率提升的微量润滑方法^[14]。SKF 通过高精度流动控制喷嘴设计,实现高速轴承供油量的准确控制,青岛理工团队通过导流式喷嘴控制润滑油滴的尺寸和体积,进一步实现了轴承腔内润滑介质的高效利用,提升了轴承的润滑效率。然而,上述面向轴承润滑效率的研究中,微量控制喷嘴结构较为复杂,成本较高,而外圈供油方式下喷嘴安装困难,因此以上方法主要用于滚动轴承在超高速工况下(轴承运行 DmN 值大于 $2.0\times10^6\text{ mm}\cdot\text{r/min}$)的润滑保障。针对常规运行转速的滚动轴承,现有的研究主要围绕传统侧

向供油条件下的喷嘴结构优化设计,国内外学者主要通过实验轴承外圈温度评估喷嘴直径、喷嘴数、喷嘴周向布局等对轴承润滑性能的影响^[15]。然而,轴承转速升高导致的气帘效应,是制约轴承润滑性能的根本原因。因此,在优化喷嘴结构的前提下,传统的侧向供油方式面临轴承内部气帘效应的影响,成为制约轴承润滑效率的瓶颈。

近年来,轴承企业 NTN 通过在轴承套圈表面添加周向凹槽,实验发现轴承套圈表面的流动形态发生了明显改变。对此,西安交通大学团队利用沟槽结构对流体流动的引导效应,提出了在轴承旋转套圈表面非接触区域添加轴向沟槽并利用沟槽实现轴承套圈表面润滑介质流动的引导和辅助作用,借以加强轴承内部润滑油的利用效率,从而达到提升轴承润滑性能的目的^[16-22]。针对这一方向,郑君豪^[23]结合高速摄像技术证实了旋转套圈表面沟槽对润滑油的引导效果,葛临风^[24]基于多物理场仿真探讨了沟槽对润滑油流动引导的作用机理,有、无沟槽时内圈表面润滑油流动过程如图 1 所示,被限制在沟槽底部的底层润滑油带,是沟槽结构引导润滑油轴向流动的关键。在此基础上,王超等^[25-26]研究了在轴承旋转套圈、静止套圈添加不同形态沟槽的引流效果。通过对比发现,高速下圆弧形沟槽结构相较于三角形沟槽和矩形沟槽,其对润滑介质的引导作用更为显著。

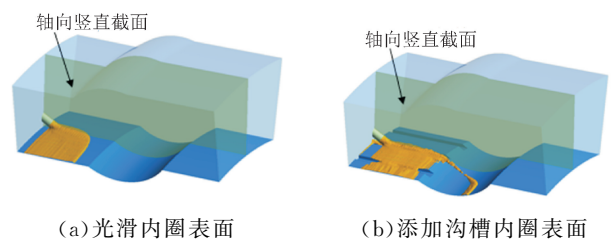


图 1 有、无沟槽时内圈表面润滑油流动过程
Fig. 1 Lubricating oil flow distribution on inner ring surface and bottom layer with and without groove structure

然而,上述的研究主要通过仿真、实验对比有、无沟槽下套圈表面润滑介质的流动过程和润滑油分布,重点侧重特定转速和供油量下轴承表面沟槽对润滑介质的引导效果,分析对象主要以单套圈为主,忽略了轴承内部结构以及轴承的变工况特点。在实际服役环境中,轴承保持架和滚动体运动、轴承内圈公转、供油参数、喷嘴位置等都存在变化,从而影响了沟槽对润滑油的流动引导效果。因此,有必要面向轴承的变工况需求,研究轴承工况参数对沟槽结构引导效应的影响规律,进而开展跨工况下轴承表面沟槽结构的尺寸参数寻优,获得具备较优工况适应性的滚动轴承内圈表面沟槽结构,实现面向变转速工况的滚动轴承表面沟槽设计。

本文以 H7006C 角接触球轴承为研究对象,首先建立考虑轴承内部组件几何结构与运动特征的流动分析模型,研究不同工况参数下沟槽对轴承内圈表面润滑介质流动的影响规律,结合正交方法获得沟槽引流影响因素的敏感性排序。在此基础上,研究多因素联合影响下的内圈表面沟槽对润滑油流动的影响程度,通过无量纲分析推导面向变工况润滑引导的最优沟槽参数关系式。最后,开展轴承变转速工况实验,基于轴承外圈温度评估不同宽度沟槽对轴承润滑增效的变工况适应能力,为推进轴承沟槽结构润滑增效技术的工程应用提供参考。

1 变工况多因素影响分析

1.1 带沟槽轴承润滑流动仿真模型

根据 H7006C 轴承几何特征,建立内圈喷射润滑条件下的轴承几何模型,具体结构参数见文献[5,11],轴承腔内润滑介质流动模型如图 2 所示。由于 H7006C 轴承内含有 17 个滚动体,且各个滚动体、轴承保持架、内圈和外圈在周向呈现周期性分布特点。为了能够进行周期化处理,在内圈非接触区表面添加与滚球分布特点相似的 17 个轴向沟槽结构。对轴承进行周期性处理以及轴承流域的提取,得到喷嘴附近的轴承流域计算模型。采用 ICEM CFD 中的非结构化网格划分方法对轴承流域计算模型进行网格划分。因球与滚道接触区之间尺寸较小,同时沟槽结构对润滑油在轴承内圈表面的流动过程具有重要影响,为进一步提升网格质量,提高计算的准确性,对轴承内外圈接触区以及沟槽附近的网格进行细化。

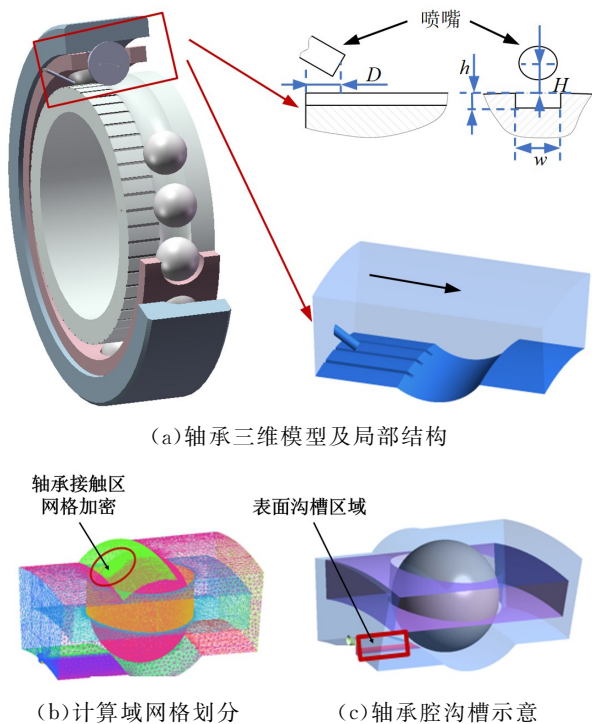


图 2 轴承腔内润滑介质流动模型

Fig. 2 Lubrication medium flow model in bearing cavity

1.2 网格无关性验证

由于沟槽附近为跨尺度网格,网格大小将对数值计算结果将产生较大影响,需在数值计算前进行网格无关性验证,确定最佳局部加密网格单元大小,以在确保数值计算结果准确性的前提下最大限度提升计算效率。针对本研究主题,沟槽对润滑油的流动强化作用越明显,进入滚道的润滑油量越多,因此将进入内圈滚道的润滑油流量作为轴承润滑状态的评价指标。本文选定的进入内滚道的润滑油量的统计方式如图 3 所示。当润滑油喷射至内圈表面时,部分润滑油因离心力被甩出,无法进入接触区形成润滑油膜。因此,在利用 VOF 模型进行 CFD 求解时,每个单元网格内两相体积分数和为 1,当 $\alpha_o = \alpha_a = 0.5$ 时,此处网格单元可表示为润滑油与空气的交界。因此在进行流量统计时,将滚道入口径向界面上 $\alpha_o \geq 0.5$ 的区域视为有效润滑油的统计区域。

根据不同的局部加密网格单元尺度,得到不同网格单元数量的数值计算模型。进入滚道润滑油量随网格单元数量变化的曲线图如图 4 所示。结果表明,当网格数量达到 150 万时,进入滚道润滑油质量流量基本不再随网格数量的增加而变化,实现网格的无关性。计算模型网格尺度如下:轴承腔内流域网格尺寸

为 4×10^{-4} m,轴承非接触区表面及滚道表面为 6×10^{-5} m,轴承沟槽壁面和喷嘴入口为 4×10^{-5} m。

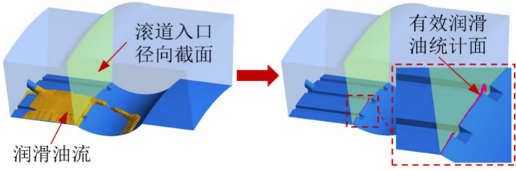


图3 进入滚道润滑油质量流量统计方式
Fig. 3 Statistical method of mass flow of lubricating oil entering raceway

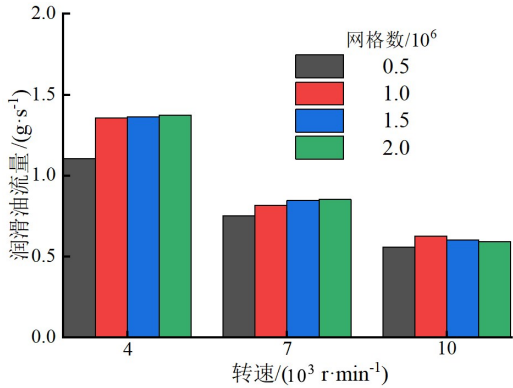


图4 仿真模型的网格无关性验证结果
Fig. 4 The grid independence verification results of the simulation model

1.3 沟槽强化流动单因素影响分析

1.3.1 转速对沟槽流动强化能力的影响

不同转速下润滑油进入滚道的流量统计图如图5所示。结果表明,进入轴承内圈滚道的润滑油质量流量与沟槽内底层润滑油带分布范围均随着转速的升高而减小。这是因为转速的升高使得沟槽内润滑油倾向于沿轴承的周向流动,使得沟槽内底层润滑油带在形成时沿轴向的流动距离变短。底层润滑油带的缩短使得上层润滑油在流动过程中所受减阻效果降低,在沟槽上方的轴向流动距离缩短,并较早地偏转至非接触区表面,由于较大的固液流动阻力,润滑油动能进一步损失,因此进入滚道的润滑油量降低。由图5可以看出,底层润滑油带分布范围变化趋势与沟槽对润滑油轴向流动能力强化作用变化趋势相似,说明基于底层润滑油带作为沟槽对润滑油流动强化能力评价指标的合理性。此外,转速对底层润滑油带的分布范围具有明显影响,是影响沟槽对润滑油流动强化能力的重要因素。

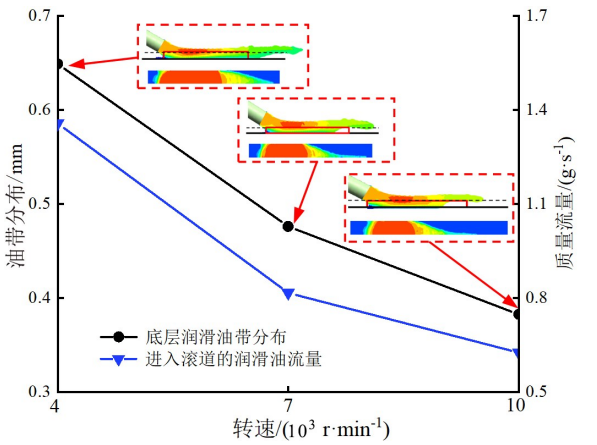


图5 进入滚道润滑油量和底层润滑油带分布与轴承公转转速的关系曲线图
Fig. 5 Curve of the relationship between the amount of lubricating oil entering raceway and the distribution of bottom lubricating oil belt and the bearing revolution speed

1.3.2 供油量对沟槽流动强化能力的影响

仿真分析了内圈转速为4 000 r/min时轴承在供油量为2、4、6 mL/s条件下内圈表面润滑油流动分布特性。结果表明,随着供油量增加,进入滚道润滑油流量增加。进入滚道润滑油量以及底层润滑油带分布范围与供油量的分布关系曲线图如图6所示,可知底层润滑油带分布范围随着供油量的升高而增大。这是由于当喷嘴直径一定时,供油量增大,从喷嘴喷出的润滑油具有更高的流速以及更大的动能,润滑油更容易流入沟槽内,润滑油在沟槽内轴向流动距离增大,底层润滑油带分布范围增大,提升了对上层润滑油的减阻作用。

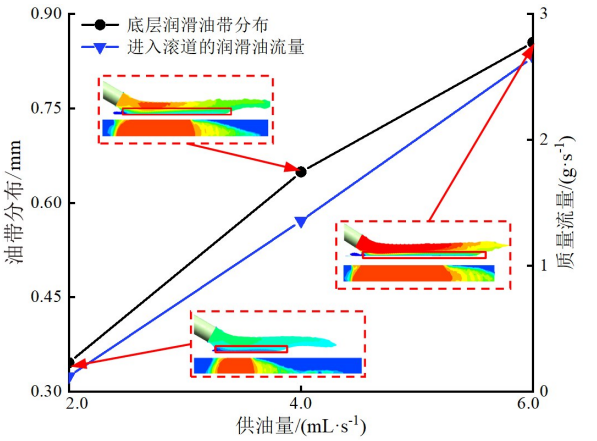


图6 进入滚道润滑油量和底层润滑油带分布与轴承供油量的关系曲线图
Fig. 6 Curve of the relationship between the amount of lubricating oil entering raceway and the distribution of bottom lubricating oil belt and the bearing oil supply

1.3.3 沟槽尺寸对沟槽流动强化能力的影响

在轴承内圈转速为 4 000 r/min 时,对比分析了润滑油在沟槽宽度为 0.4、0.5、0.6 mm 条件下的润滑油流型。对比发现沟槽宽度 0.6 mm 时内圈滚道内润滑油积累量最多,说明该宽度的沟槽对润滑油的轴向流动强化能力较其他更优。进入滚道润滑油质量流量以及底层润滑油带分布与沟槽宽度变化的关系曲线图如图 7 所示。

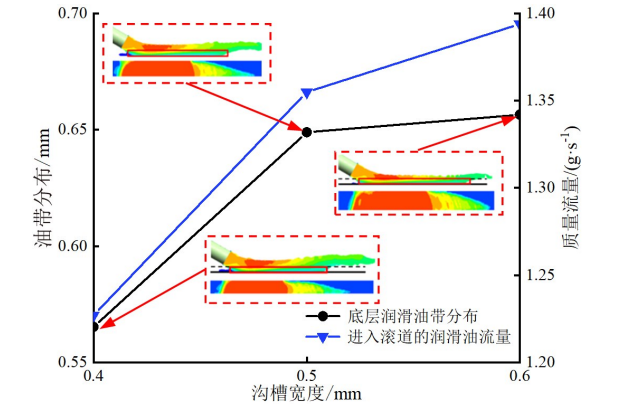


图 7 进入滚道润滑油量和底层润滑油带分布与轴承沟槽宽度的关系曲线图

Fig. 7 Curve of the relationship between the amount of lubricating oil entering raceway and the distribution of bottom lubricating oil belt and the groove width

底层润滑油带分布范围表明,宽度为 0.5、0.6 mm 的沟槽的底层润滑油带轴向分布宽度较宽度为 0.4 mm 的沟槽长。

1.4 多因素影响下的沟槽强化流动分析

1.4.1 多因素对沟槽流动强化能力的正交分析

在上述单因素分析的基础上,为探究转速、供油量、喷嘴直径以及沟槽宽度 4 个主要因素的影响程度,设计了四因素三水平正交仿真表,所构建的正交表及正交结果如表 1 所示。通过 k 值差异可以看出,当喷嘴直径为 0.4、0.5、0.6 mm 水平时,其对应的仿真指标总和 k_1 、 k_2 、 k_3 分别为 1.073、1.083 和 1.001,三者差异较小,说明该因素对轴承滚道内润滑油流量的影响不够敏感。当供油量为 2、4、6 mL/s 这 3 个水平时,其对应的指标总和分别为 0.136、0.881 和 2.139,差异显著,说明供油量对轴承滚道内润滑油流量的影响十分敏感。结合极差分析结果表明,4 种影响因素对沟槽对润滑油流动强化能力的影响程度由强到弱排列顺序为:供油量、转速、沟槽尺寸、喷嘴直径。该规律为后续多因素影响下沟槽对润滑油流动强化能力分析提供分析依据。

表 1 四因素三水平正交仿真结果

Table 1 Four factors and three levels orthogonal simulation results

分组	喷嘴直径/mm	沟槽宽度/mm	供油量/(mL·s ⁻¹)	转速/(10 ³ r·min ⁻¹)	流量/(g·s ⁻¹)
组 1	0.4	0.4	2	4	0.409
组 2	0.5	0.4	6	7	1.891
组 3	0.6	0.4	4	10	0.546
组 4	0.4	0.5	6	10	2.069
组 5	0.5	0.5	4	4	1.357
组 6	0.6	0.5	2	7	0
组 7	0.4	0.6	4	7	0.740
组 8	0.5	0.6	2	10	0
组 9	0.6	0.6	6	4	2.457

1.4.2 供油量、转速以及沟槽宽度联合影响

供油量是沟槽对润滑油轴向流动强化能力的最主要影响因素,对比不同供油量下的仿真结果表明,对于任意转速下不同宽度的沟槽结构,增加供油量均可提升进入滚道的润滑油量。这是因为当供油量提高时,从喷嘴喷出的润滑油具有更高的动能,轴向流动能力更强,进而有更多的润滑油进入沟槽内,形成的底层润滑油带更长,减阻效果更优。内圈不同转速和供油量时不同沟槽宽度下润滑油量随供油量的变化图如图 8 所示。通过润滑油量的上升趋势可

看出,对于一定转速,随着供油量和沟槽宽度的增大润滑油的轴向流动能力增强。对比不同供油量下底层润滑油带的分布范围指标,结果表明随着供油量增大,各宽度沟槽内底层润滑油带的分布范围增大。当供油量为 4 mL/s 时,轴承沟槽内底层润滑油带主要存在于宽度 0.3~0.4 mm 沟槽;当供油量为 8 mL/s 时,轴承沟槽内底层润滑油带在宽度 0.3~0.7 mm 沟槽内均有体现。相同转速下各沟槽内底层润滑油带分布范围的差异增大,当供油量从 4 mL/s 增大到 6、8 mL/s 时,宽度为 0.5、0.6、0.7 mm 沟槽内底

层润滑油带以及润滑油流量的差异随之增大。当供油量为 8 mL/s 时,相较于 0.3、0.4 mm 的沟槽,宽度为 0.5 mm 沟槽内的底层润滑油带在各转速下的分布范围更广,该现象再次说明了底层润滑油带的分布情况可以反映沟槽的流动强化能力。

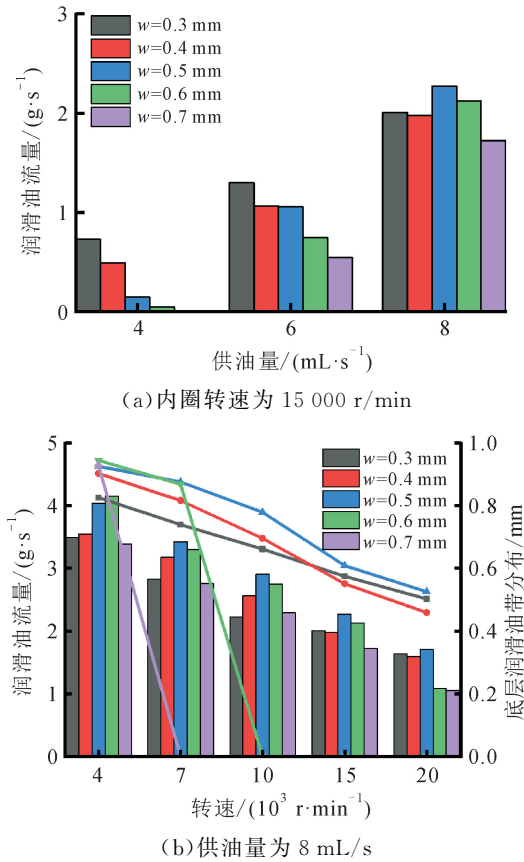


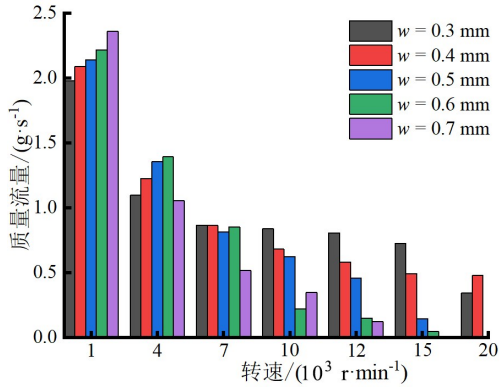
图 8 供油量、转速及沟槽宽度对润滑油流动的影响
Fig. 8 Influence of oil supply, speed and groove width on lubricating oil flow

1.4.3 喷嘴位置、转速及沟槽宽度的耦合影响

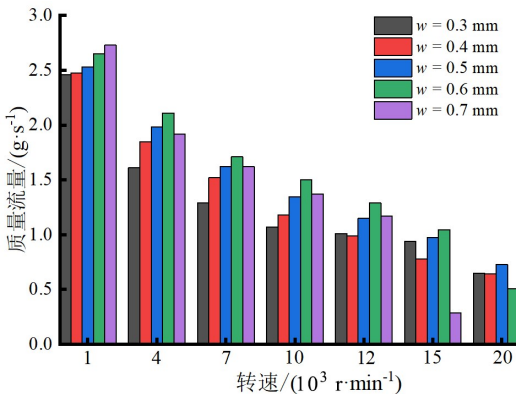
考虑到真实服役环境下轴承油气喷嘴的安装空间问题,喷嘴出口到轴承接触区的距离可能随之改变。因此,建立具有不同喷嘴位置的内圈表面润滑油流动分析模型,其中喷嘴中心与滚道入口的水平距离 L 分别为 4.0、3.5、3.0 以及 2.5 mm,喷嘴越深入轴承腔, L 越小。不同喷嘴位置时进入滚道润滑油量随转速的变化规律如图 9 所示。结果表明,当喷嘴与滚道入口之间距离缩短,润滑油在内圈非接触区表面的流动距离也将缩短,致使进入滚道的润滑油量增大。对比图 9(a)、(b)可以看出,随着喷嘴不断深入轴承腔,在转速 7 000~20 000 r/min 时,宽度为 0.3 mm 沟槽在两种喷嘴距离下流入滚道的润滑油流量差异较小,而宽度为 0.5 mm 沟槽

在两种喷嘴距离下,流入滚道的润滑油流量差异更为显著。在转速为 15 000 r/min 的条件下,当喷嘴位置 $L=4.0$ mm 时,沟槽最优宽度为 0.3 mm,但当 L 缩短至 2.5 mm 时,0.5、0.6 mm 宽度的沟槽对润滑油流动强化能力更强。针对一定转速范围 12 000~15 000 r/min,喷嘴位置 $L=4$ mm 时变工况下最优沟槽宽度为 0.4 mm,而喷嘴位置 $L=2.5$ mm 时变工况下最优沟槽宽度为 0.5 mm。因此,对于给定的转速,沟槽的最优宽度随喷嘴在轴承腔内的深入而增大。

由于轴承旋转运动的作用,沟槽越宽,底层润滑油带的稳定性越差,分布范围越小,造成喷嘴离滚道较远时,沟槽流动强化能力较差。随着喷嘴朝轴承腔内的移动,底层润滑油带分布和滚道之间的距离减小,一定程度上补偿了宽沟槽分布范围小的缺点。同时,随着沟槽宽度的增大,单位长度底层润滑油带的减阻面积增大,提升了宽沟槽的流动强化能力。喷嘴深入将缩短润滑油的轴向流动距离,润滑油受轴承转动偏转作用降低,致使进入滚道的润滑油量均增加。因此,随着喷嘴在轴承腔内的深入,沟槽宽度越大,沟槽对润滑油轴向流动强化能力越明显。



(a) $L=4.0$ mm 时润滑油量随转速变化曲线



(b) $L=2.5$ mm 时润滑油量随转速变化曲线

图 9 不同喷嘴位置下转速对润滑油流动能力的影响
Fig. 9 Influence of rotational speed on lubricating oil flow capacity at different nozzle positions

2 变工况下轴承套圈沟槽设计

2.1 变工况下沟槽最优宽度拟合公式

根据上述仿真分析,一定转速下沟槽的最优宽度随供油量 M 、喷嘴直径 D 的增加而增大,随喷嘴、滚道距离 L 的减小而增大。前文的仿真分析表明,随轴承转速增大,最优沟槽宽度呈现出一定的减小趋势。通过分析本文的研究对象,在轴承内圈结构参数中,非接触区半径会导致轴承内圈表面线速度增大,同样造成沟槽对润滑油流动引导能力的减弱。为反映沟槽的最优宽度随工况的变化情况,定义无量纲参数 W 为

$$W = \frac{D^m M^o}{n^p L^q R^s} \quad (1)$$

式中: D 为喷嘴直径, mm; M 为供油量, $\text{mL} \cdot \text{s}^{-1}$; n 为轴承转速; L 为喷嘴与滚道的水平距离, mm; R 为非接触区半径, mm; m, o, p, q, s 为每个因素的指数。为使 W 无量纲化,需要对式(1)分子与分母的单位进行统一。

为了减小计算的复杂性,将各因素的指数视为自然数,取 $m=o=p=1$ 。因此,当喷嘴与滚道水平距离 L 的指数 q 与非接触区半径 R 的指数 s 满足 $q+s=4$ 时,参数 W 得到无量纲化表示

$$W = \frac{60\,000DM}{nL^q R^s} \quad (2)$$

结合线性回归思想,对各工况下沟槽的最优宽度的取值进行分析。为提升线性回归结果的可信度,建立沟槽宽度为 0.35、0.45、0.55、0.65、0.75 mm 的轴承润滑流动分析模型,并开展润滑油的流动仿真计算。在此基础上,对无量纲参数 W 进行自然对数求取,并利用线性回归方法求解 4 种指数分配情况下沟槽最优宽度与 $\ln W$ 的关系式。对比分析表明,当喷嘴与滚道的水平距离的指数 q 为 3、4 时,线性回归的各统计量值完全相同,两种情况下 R^2 统计量最接近 1,误差方差最小,且两者最优宽度与 $\ln W$ 的拟合曲线斜率相同,表明这两种指数分配情况下沟槽的最优宽度与 $\ln W$ 的线性关系最好。进一步分析发现,由于 q 为 4 时拟合公式无法反映内圈径向尺寸的影响,与工程实际不符。因此,选取滚道的水平距离的指数 q 为 3、内圈非接触区直径指数 s 为 1 为最终拟合公式参量,此时仿真分析的最优宽度数据与 $\ln W$ 的拟合曲线如图 10 所示。沟槽最优宽度与无量纲参数 W 的关系式为

$$w^* = 0.134\,3 + 0.117\,4 \ln W \quad (3)$$

考虑到式(3)中高次方运算较为复杂,为了便于工程计算,采用多元线性回归的方法,针对 H7006C 轴承,对已仿真的所有工况下获得的最优宽度数值进行拟合,并将轴承转速 n 、喷嘴直径 D 、供油量 M 以及水平距离 L 作为自变量,将式(3)进一步简化如下

$$w' = 0.777\,6 + 0.026\,8M - 0.111\,4L + 0.3D - 0.016n \quad (4)$$

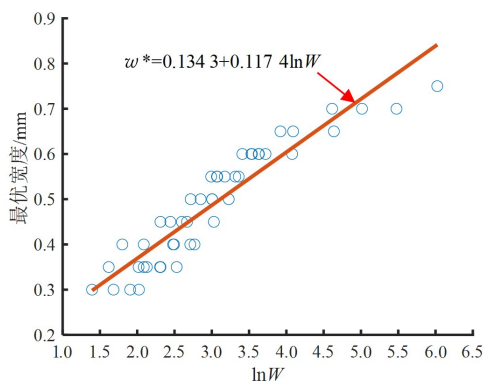


图 10 沟槽最佳宽度与 $\ln W$ 的线性回归结果对比

Fig. 10 The linear regression result of the relation between optimum groove width and $\ln W$

2.2 拟合公式适用性验证

随着轴承内圈半径变化,内圈表面线速度随之变化,致使内圈表面沟槽对润滑油的流动强化能力可能出现差异。因此,在相同的工况下,针对不同型号轴承套圈表面的沟槽最优宽度可能不同。本节模型仿真 7008C、7004C 轴承不同工况下内圈表面的沟槽最优宽度,并与上文基于 7006C 仿真数据的拟合公式预测结果进行对比,如表 3 所示,从而验证上述拟合公式在不同对象、不同工况下的适用性。建立内圈带沟槽的 7008C、7004C 轴承润滑介质流动模型,喷嘴供油量 M 为 4 mL/s。根据式(4)预测此工况下沟槽的最优宽度,并与仿真值进行对比,结果如表 2 所示。可以看出,在转速区间为 1 000~15 000 r/min 时,拟合公式实现了对不同型号轴承的沟槽最优宽度的有效预测,与仿真分析结果误差在 10% 左右。当轴承转速达到 20 000 r/min 时,拟合公式获得的最优沟槽宽度为 0.3 mm,而仿真模拟的最优结果为 0.4 mm,存在一定差异,但差异相对较小。总体来看,本文所提拟合公式能够对不同型号轴承的内圈表面沟槽最优宽度进行较为准确的预测。

表 2 7008C 表面沟槽宽度拟合与仿真结果对比
Table 2 Comparison of 7008C surface groove width fitting and simulation results

转速/ (10 ³ r · min ⁻¹)	拟合宽度/ mm	仿真宽度/ mm	误差/ %
1	0.65	0.7	7.69
4	0.48	0.5	4.17
7	0.42	0.4	4.76
10	0.38	0.4	5.26
15	0.33	0.3	9.09
20	0.30	0.4	33.33

表 3 7004C 表面沟槽宽度拟合与仿真结果对比
Table 3 Comparison of 7004C surface groove width fitting and simulation results

转速 /(10 ³ r · min ⁻¹)	拟合宽度/ mm	仿真宽度/ mm	误差/%
1	0.59	0.6	1.69
4	0.55	0.6	9.09
7	0.50	0.5	0
10	0.45	0.5	11.11
15	0.37	0.4	8.10
20	0.29	0.4	37.93

3 变工况下轴承表面沟槽润滑增效实验验证

3.1 实验台与实验方案

为了验证变转速下表面沟槽对轴承润滑性能的影响,搭建 H7006C 轴承润滑效率评估实验台。实验电主轴为 100MD75Y3.2,通过柔性连接与机械轴后端相连。实验使用轴承为型号 H7006C/P4 球轴承,利用激光加工技术在轴承内圈表面制备了 17 个轴向均布的沟槽结构。两个带沟槽轴承的沟槽宽度分别为 0.4、0.6 mm,激光加工制备的轴承内圈沟槽结构如图 11 所示。实验选用 A 级 PT100 温度传感器测试轴承外圈温升,用以评估轴承的润滑性能,所测数据由温度数据采集系统 MX100 实时采集和记录。本实验旨在验证变工况下轴承表面沟槽对润滑介质的引导能力,在实验中通过控制轴承供油量,实验模拟乏油状态下的轴承运行过程。在乏油条件下,沟槽结构如果能够引导更多的润滑油进入滚道,则轴承外圈温度相对较低。结合 H7006C 角接触球轴承几何参数及所推荐的供油量(4~8 mL/h),实

验选取供油量 $Q=0.12$ mL/h 模拟轴承乏油工况。
实验初始转速为 2 000 r/min,并以 1 000 r/min 的转速逐步升高,实验中轴承在每个转速下运转时间约为 1 h。对照实验,开展了 3 种轴承在上述工况下的润滑油能量仿真。

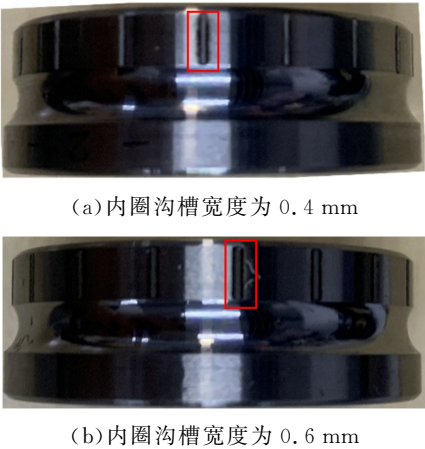


图 11 激光加工制备的轴承内圈沟槽结构
Fig. 11 The groove structure of bearing inner ring prepared by laser processing

3.2 实验结果对比分析

无沟槽轴承和内圈带沟槽轴承在不同转速下的温升对比如图 12 所示。可知无沟槽轴承在任一转速下的温升均高于内圈表面添加沟槽结构的轴承温升。3 种工况下轴承内圈滚道润滑油流量如表 4 所示,可知在低速时无沟槽轴承滚道内具有一定的润滑油流量,随着转速上升,滚道内润滑油流量急剧减小,从而导致轴承温升较高。

由图 12 可以看出,当轴承转速为 2 000、3 000 r/min 时,两种不同宽度沟槽的轴承温升数据类似。这是由于轴承转速较低时,摩擦产热较少,流入轴承润滑区域的润滑油量虽略有差异,但均能满足轴承的润滑需求。随着转速的提升,两种宽度沟槽轴承温升差距逐渐明显。当轴承转速为 6 000 r/min 时,沟槽宽度为 0.4 mm 的轴承温升相较于沟槽宽度为 0.6 mm 的轴承高 0.7 ℃,此时 0.6 mm 沟槽对润滑油引导效果较好,其对轴承的润滑增效效果相对较优。随着转速的进一步升高,两者之间的差值逐步缩小。当转速为 9 000 r/min 时,沟槽宽度 0.6 mm 的轴承温升值超过沟槽宽度 0.4 mm 的轴承温升值。当转速升至 10 000 r/min 后,两个轴承温差进一步增大。相应地,此时 0.6 mm 沟槽轴承滚道内润滑油流量显著降低,表明高速下 0.4 mm 宽度的沟槽对变转速工况的适应性更优,这与前文的仿真

分析、表 2 中拟合公式预测结果以及表 4 中轴承滚道内润滑油流量数据相吻合,验证了本文研究工作的正确性与可靠性。

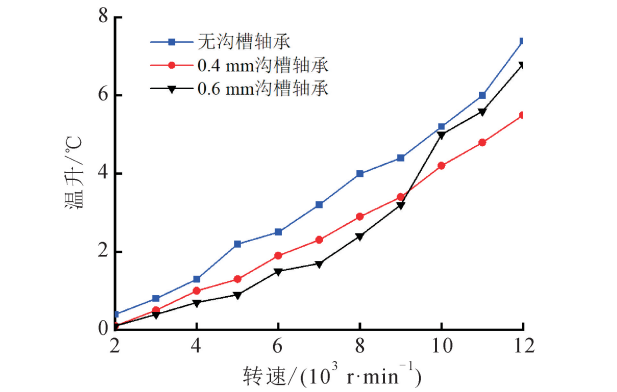


图 12 具有不同内圈沟槽结构的轴承温升实验结果
Fig. 12 Experimental results of temperature rise of bearings with different inner ring groove structures

表 4 3 种工况下轴承内圈滚道润滑油流量
Table 4 Lubricating oil flow in the raceway of bearing inner ring under three working conditions

转速/ ($10^3 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$)	流量/($\text{mg} \cdot \text{s}^{-1}$)		
	无沟槽 轴承	0.4 mm 沟槽轴承	0.6 mm 沟槽轴承
2	0.46	0.57	0.63
4	0.21	0.56	0.57
6	0.08	0.43	0.49
8	0.06	0.40	0.41
10	0.01	0.38	0.19
12	0.01	0.30	0.15

4 结 论

针对侧向供油条件下滚动轴承油气介质受气帘限制导致轴承润滑效率降低的问题,本文综合考虑轴承真实结构与运动、变工况等特征,开展了多因素耦合影响下轴承润滑增效沟槽的优化设计,并进行了相应的实验验证,得到如下结论:

(1)基于轴承全局坐标系,建立了考虑轴承真实结构、轴承组件内部运动特征的轴承润滑流动仿真模型,研究了转速、供油量等因素对沟槽结构底层润滑油带以及润增效作用的影响规律;

(2)结合正交设计揭示了影响沟槽润滑增效的各个敏感因素,分析了多因素联合影响下的沟槽引

流及润滑增效效果,并给出了适用于工程化应用的最优沟槽宽度计算公式;

(3)搭建了高速轴承润滑实验台,对比分析了不同宽度沟槽在轴承变转速工况下的润滑增效作用,验证了本文分析方法、结果的可靠性。

参考文献:

[1] 翟强, 闫柯, 张优云, 等. 高速角接触球轴承腔内气相流动与传热特性研究 [J]. 西安交通大学学报, 2014, 48(12): 29-33, 40.
ZHAI Qiang, YAN Ke, ZHANG Youyun, et al. Investigation of air flow pattern and heat transfer efficiency inside cavity of high-speed angular contact ball bearing [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2014, 48(12): 29-33, 40.

[2] LI Miaomiao, WANG Yu, CHEN Weifang, et al. Temperature rise characteristics for angular-contact ball bearings with oil-air lubrication based on fluid-solid conjugate heat transfer [J]. Advances in Mechanical Engineering, 2021, 13(1): 1687814021990927.

[3] 王煜, 闫柯, 张进华. 我国高性能滚动轴承基础研究进展 [J]. 中国基础科学, 2015, 17(6): 10-19.
WANG Yu, YAN Ke, ZHANG Jinhua. Progress of the 973 Project-Basic research on high performance rolling bearing [J]. China Basic Science, 2015, 17(6): 10-19.

[4] 朱卫兵, 张小彬, 鲁勇帅, 等. 润滑方式对球轴承润滑性能影响的数值研究 [J]. 推进技术, 2019, 40(4): 892-901.
ZHU Weibing, ZHANG Xiaobin, LU Yongshuai, et al. Numerical study for influence of lubrication methods on lubrication performance of ball bearing [J]. Journal of Propulsion Technology, 2019, 40(4): 892-901.

[5] YAN Ke, DONG Lei, ZHENG Junhao, et al. Flow performance analysis of different air supply methods for high speed and low friction ball bearing [J]. Tribology International, 2018, 121: 94-107.

[6] WU C H, KUNG Y T. A parametric study on oil/air lubrication of a high-speed spindle [J]. Precision Engineering, 2005, 29(2): 162-167.

[7] 李潇潇, 闫柯, 葛临风, 等. 高速球轴承喷油润滑流场特性研究 [J]. 西安交通大学学报, 2019, 53(12): 17-24.
LI Xiaoxiao, YAN Ke, GE Linfeng, et al. Research on flow field characteristics of oil injection lubrication for high-speed ball bearings [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2019, 53(12): 17-24.

- [8] WU Wei, HU Chenhui, HU Jibin, et al. Jet cooling for rolling bearings: flow visualization and temperature distribution [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2016, 105: 217-224.
- [9] WU Wei, HU Chenhui, HU Jibin, et al. Jet cooling characteristics for ball bearings using the VOF multi-phase model [J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2017, 116: 150-158.
- [10] WANG Yunlong, WANG Wenzhong, LI Yulong, et al. Lubrication and thermal failure mechanism analysis in high-speed angular contact ball bearing [J]. *Journal of Tribology*, 2018, 140(3): 031503.
- [11] PARK S J, HWANG Y K, LEE C M. An experimental study on the determination of optimal lubrication conditions in a high-speed spindle [J]. *Journal of Machine Engineering*, 2009, 9(2): 106-113.
- [12] 巩彬彬, 张俊国, 王建文, 等. 油气进口位置和进气量对油气润滑滚动轴承性能影响的研究 [J]. *润滑与密封*, 2006(11): 165-167.
- GONG Binbin, ZHANG Junguo, WANG Jianwen, et al. Study on the influences of the air flow rate and feeding position on the Lubrication of rolling bearing [J]. *Lubrication Engineering*, 2006(11): 165-167.
- [13] 李志恒. 油气润滑工作参数对滚动轴承润滑性能的影响 [D]. 青岛: 青岛理工大学, 2016: 24-28.
- [14] 李桂枝, 白清华, 栗心明, 等. 定量供油下球-环/球-盘接触形式润滑特性对比 [J]. *摩擦学学报*, 2022, 42(4): 700-708.
- LI Guizhi, BAI Qinghua, LI Xinming, et al. Comparison on lubrication characteristics of ball-on-ring/ball-on-disk contact configuration [J]. *Tribology*, 2022, 42(4): 700-708.
- [15] WU Wei, WEI Chunhui, YUAN Shihua. Numerical simulation of ball bearing flow field using the moving particle semi-implicit method [J]. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 2022, 16(1): 215-228.
- [16] GE Linfeng, WANG Chao, YAN Ke, et al. Design of groove structures for bearing lubrication enhancement based on the flow mechanism analysis [J]. *Tribology International*, 2021, 158: 106950.
- [17] CHEN Chao, WANG Xiaojing, SHEN Yifan, et al. Experimental investigation for vibration reduction of surface-textured journal bearings [J]. *Industrial Lubrication and Tribology*, 2019, 71(2): 232-241.
- [18] 郑文斌, 裴世源, 洪军. 表面微织构对滑动轴承支撑主轴稳定性的影响 [J]. *西安交通大学学报*, 2018, 52(5): 88-93.
- ZHENG Wenbin, PEI Shiyuan, HONG Jun. Influence of surface texture on the stability of spindle supported by sliding bearing [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2018, 52(5): 88-93.
- [19] 赵兴堂. 仿生微织构对滑动轴承摩擦磨损性能的影响研究 [D]. 青岛: 山东科技大学, 2020: 12-23.
- [20] 杨丁槐. 微沟槽特性对不锈钢织构化表面摩擦特性影响研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019: 11-15.
- [21] JIAO Yunlong, LIU Xiaojun, LIU Kun. Wettability of laser textured surface: a parametric study based on numerical simulation and experimentation [J]. *Industrial Lubrication and Tribology*, 2018, 70(6): 977-983.
- [22] YUAN Sihuan, HUANG Wei, WANG Xiaolei. Orientation effects of micro-grooves on sliding surfaces [J]. *Tribology International*, 2011, 44(9): 1047-1054.
- [23] 郑君豪. 表面沟槽引导结构对高速轴承内部流场及润滑性能的影响研究 [D]. 西安: 西安交通大学, 2020: 28-44.
- [24] 葛临凤. 基于沟槽结构的滚动轴承喷射润滑增效方法研究 [D]. 西安: 西安交通大学, 2021: 32-49.
- [25] 王超. 面向轴承润滑增效的套圈沟槽结构多因素分析及优化 [D]. 西安: 西安交通大学, 2022: 26-58.
- [26] 刘红彬, 刘公平, 郝金华, 等. 不同轴承壁面沟槽诱导油液穿透机理 [J]. *航空动力学报*, 2019, 34(5): 1127-1136.
- LIU Hongbin, LIU Gongping, HAO Jinhua, et al. Oil penetration mechanism induced by different bearing wall grooves [J]. *Journal of Aerospace Power*, 2019, 34(5): 1127-1136.

(编辑 赵炜 刘杨)