

# 摩擦学学报

TRIBOLOGY



## 面向轴承润滑增效的内圈表面沟槽引流可视化仿真与试验研究

阎贝, 郭金道, 任乔睿, 闫柯

### Visual Simulation and Experimental Study on Groove Structure of Inner Ring Surface for Bearing Lubrication Enhancement

YAN Bei, GUO Jindao, REN Qiaorui, YAN Ke

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16078/j.tribology.2022214>

#### 您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

##### 高速球铣加工表面微沟槽形貌形成方法及其减摩性能研究

Surface Micro-Groove Topography Generation Method and Anti-Friction Performance for High Speed Ball-End Milling

摩擦学学报. 2021, 41(5): 731 <https://doi.org/10.16078/j.tribology.2020198>

##### 织构深度对不锈钢表面油润滑条件下摩擦学性能影响的试验和仿真研究

Experiment and Simulation Study on the Effect of Texture Depth on Tribological Properties of Stainless Steel Surface under Oil Lubricating Condition

摩擦学学报. 2019, 39(2): 181 <https://doi.org/10.16078/j.tribology.2018143>

##### 下游泵送螺旋槽密封空化试验及性能分析

Cavitation Experiment and Performance Analysis of Downstream Pumping Spiral Groove Seals

摩擦学学报. 2017, 37(6): 743 <https://doi.org/10.16078/j.tribology.2017.06.005>

##### 基于润滑特性仿真的燃油泵滑动轴承优化设计

Optimization Design of Fuel Pump Sliding Bearing Based on the Analysis of Lubrication Characteristics

摩擦学学报. 2018, 38(5): 512 <https://doi.org/10.16078/j.tribology.2018.05.003>

##### 三角沟槽形织构化硬质合金工作表面动压润滑及减摩特性

Dynamic Pressure Lubrication and Anti-friction Characteristics of the Working Surface of the Cemented Carbide With Triangular Grooved Microtexture

摩擦学学报. 2018, 38(5): 537 <https://doi.org/10.16078/j.tribology.2018.05.006>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

阎贝, 郭金道, 任乔睿, 闫柯. 面向轴承润滑增效的内圈表面沟槽引流可视化仿真与试验研究[J]. 摩擦学学报(中英文), 2024, 44(5): 677-685. YAN Bei, GUO Jindao, REN Qiaorui, YAN Ke. Visual Simulation and Experimental Study on Groove Structure of Inner Ring Surface for Bearing Lubrication Enhancement[J]. Tribology, 2024, 44(5): 677-685. DOI: [10.16078/j.tribology.2022214](https://doi.org/10.16078/j.tribology.2022214)

# 面向轴承润滑增效的内圈表面沟槽引流可视化仿真与试验研究

阎贝<sup>1,2</sup>, 郭金道<sup>2,3</sup>, 任乔睿<sup>2</sup>, 闫柯<sup>2\*</sup>

(1. 长安大学 工程机械学院, 陕西 西安 710064;

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, 陕西 西安 710049;

3. 沈阳航空航天大学 航空发动机学院, 辽宁 沈阳 110136)

**摘要:** 高速轴承套圈表面添加沟槽是提升轴承润滑效率的有效手段. 针对高速旋转套圈表面沟槽对润滑油流动的引导机理和影响规律研究, 本文中通过可视化仿真和试验研究, 监测对比了润滑油在轴承光滑内圈和带沟槽内圈表面的流动行为, 基于内圈滚道内润滑油流量评估沟槽结构对润滑油的导向效果, 最后通过轴承乏油状态下的温升试验验证了分析结果的合理性. 结果表明, 与光滑内圈相比, 具有不同凹槽结构的内圈可能会增强/减弱润滑介质流动, 合理/不合理的沟槽设计存在提高/降低轴承润滑效率的可能.

**关键词:** 高速轴承; 沟槽结构; 润滑增效; 可视化试验; 数值仿真

中图分类号: TH145; TH117.1

文献标志码: A

文章编号: 1004-0595(2024)05-0677-09

## Visual Simulation and Experimental Study on Groove Structure of Inner Ring Surface for Bearing Lubrication Enhancement

YAN Bei<sup>1,2</sup>, GUO Jindao<sup>2,3</sup>, REN Qiaorui<sup>2</sup>, YAN Ke<sup>2\*</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Chang'an University, Shaanxi Xi'an 710064, China;

2. Key Laboratory of Education Ministry for Modern Design and Rotor-Bearing System, Xi'an Jiaotong University, Shaanxi Xi'an 710049, China;

3. School of Aero-engine, Shenyang Aerospace University, Liaoning Shenyang 110136, China)

**Abstract:** Lubrication efficiency is a key factor affecting the service performance of rolling bearings. For oil and gas lubrication or oil injection lubrication, analysis shows that when the lubricating oil is injected into the bearing cavity by high pressure, it is difficult to directly inject into the contact area between the rolling element and the ring due to the influence of high speed air flow inside the bearing cavity, which leads to the reduction of bearing lubrication efficiency. In this regard, scholars have confirmed the influence of high-speed air curtain phenomenon on bearing lubrication efficiency through visualization experiments and simulation of bearing internal flow field. In order to improve the utilization efficiency of the lubricating oil in the bearing cavity at high speed, the Qingdao University of Technology team added guiding fibers on the basis of traditional side nozzles to improve the utilization rate of lubricating oil. On the basis of the optimal design of the nozzle, engineers try to further improve the lubrication performance of the bearing by

Received 8 October 2022, revised 1 July 2023, accepted 3 July 2023, available online 26 October 2023.

\*Corresponding author. E-mail: [yanke@mail.xjtu.edu.cn](mailto:yanke@mail.xjtu.edu.cn), Tel: +86-18192060675.

This project was supported by the National Natural Science Foundation of China (52105242).

国家自然科学基金项目(52105242)资助.

changing the oil supply position, such as the oil supply unit installed in the inner ring, the outer ring and other different positions, in order to weaken the influence of the air curtain phenomenon on the flow of lubricating oil. By optimizing the nozzle structure and changing the oil supply position, the lubrication efficiency of the bearing has been significantly improved, but it also leads to new problems. In recent years, the team from Xi'an Jiaotong University has made use of the guiding effect of groove structure on fluid flow, and proposed to add axial groove in the non-contact area of the surface of the bearing rotating ring. In view of this emerging technology direction, the team discussed the action mechanism of grooves on lubricating oil flow guidance, and discussed the drainage effect of grooves under different working conditions. The above work mainly carried out the analysis of the flow and temperature rise inside the grooved bearing based on CFD method. Affected by the complexity of the internal component structure and relative movement of the rolling bearing, the research on the flow field distribution inside the bearing and the overall temperature rise of the bearing analyzed the change law of the bearing performance from a macro level. However, due to the lack of grooves for in-depth analysis of the flow process of the lubricating medium on the bearing ring surface, it was not yet possible to understand the flow law of grooves on bearing surface lubrication media, which was not enough to guide the groove optimization design in engineering applications, and it was not possible to evaluate the effect of different groove structures on the bearing lubrication performance. In this regard, this paper compared the flow behavior of lubricating oil on the surface of smooth bearing inner ring and grooved inner ring through visual simulation and experimental technology, and evaluated the guiding effect of groove structure on lubricating oil based on the flow rate of lubricating oil in the raceway of the inner ring, and provided theoretical support for groove design and engineering application oriented to bearing lubrication efficiency. Aiming at the research on the guiding mechanism and influence rule of the grooves on the lubricating oil flow on the surface of the high-speed rotating ring, this paper monitored and compared the flow behavior of lubricating oil on the surface of the smooth bearing inner ring and the grooved inner ring through visual simulation and experimental research, and evaluated the guiding effect of the groove structure on the lubricating oil based on the flow rate of lubricating oil in the raceway of the inner ring. Finally, the rationality of the analysis results was verified by the temperature rise experiment under the condition of bearing spent oil. The results showed that, compared with smooth inner rings, the inner rings with different groove structure might enhance/weaken the lubrication medium flow, and reasonable/unreasonable groove design might improve/reduce the bearing lubrication efficiency.

**Key words:** high-speed bearing; groove structure; lubrication performance enhancement; visual experiment; numerical simulation

润滑效率是影响轴承服役性能的关键因素,国内外学者探究了不同条件下轴承内部油气两相分布并分析轴承润滑机理<sup>[1-3]</sup>。胡纪滨等<sup>[4]</sup>基于滑移网格技术建立了高速轴承内油气两相流仿真模型,获得了完整轴承内部的两相流流场,分析了喷嘴数量、供油量以及转速对腔内润滑油分布状况和轴承温度分布的影响,并搭建试验台实现了对轴承腔内润滑介质流动行为和流场的监测。徐让书等<sup>[5]</sup>利用流体体积法(Volume of fluid, VOF)捕捉润滑油相界面,实现了对油膜分布和运动的追踪,并分析了转速和供油量对轴承流场特性和润滑油分数的影响规律。牛鹏<sup>[6]</sup>在忽略保持架结构的前提下对油气润滑轴承内部温度场进行了分析,结果表明,轴承发热量、温升和空气的对流换热系数与轴承转速关系较大,与喷嘴直径关系较小。张丽秀等<sup>[7]</sup>利用COMSOL软件对轴承的二维流场模型展开分析,获得轴承关键位置气相流速和压力,并发现提高气流速度能够促进润滑油在轴承腔内的扩散。王保民等<sup>[8]</sup>通过结合VOF模型和多重坐标系方法,对不同引

导方式下轴承腔内不同的滚动体轴向平面的流型进行分析,发现轴承腔内间隙较大的地方容易出现较强的气帘现象,李潇潇等<sup>[9]</sup>发现内圈附近高速的气流运动致使腔内润滑油发生周向偏转,且内圈转速升高将加剧气流作用进而恶化球与保持架兜孔和内外圈滚道间的润滑状态。综上,轴承内部流场的可视化仿真与试验研究表明<sup>[10-11]</sup>,高速下的气帘现象是制约轴承润滑效率的主要原因之一。对此,国内外学者通过优化喷嘴结构以及改变供油位置等方式提升轴承的润滑效率。例如青岛理工大学<sup>[12]</sup>在传统侧向喷嘴的基础上增加导向纤维,提升润滑油的利用率。在喷嘴优化设计的基础上,国内外企业通过改变供油位置,试图进一步提升轴承的润滑性能,例如日本企业<sup>[13]</sup>提出了安装于内圈和外圈等不同位置的供油单元,以减弱气帘的影响。通过上述优化喷嘴结构以及改变供油位置等方式,轴承的润滑效率得到了显著改善,但也导致新的问题,例如,新型供油装置需要对轴承的结构进行较大的调整,安装困难。近年来,西安交通大学闫柯

等<sup>[14]</sup>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,借助沟槽对润滑油的流动引导作用提升润滑效率.针对这一新兴技术方向,西安交通大学团队探讨了沟槽对润滑油流动引导的作用机理<sup>[15]</sup>,探讨了不同工况下沟槽的引流效果<sup>[16]</sup>.上述工作主要基于计算流体力学(Computational fluid dynamics, CFD)方法开展了带沟槽轴承内部的流动与温升分析,受滚动轴承内部组件结构、相对运动等复杂性影响,轴承内部的流场分布和轴承整体温升的研究从宏观上分析了轴承性能的变化规律,但由于缺乏沟槽对轴承套圈表面润滑介质流动过程的深入分析,尚无法了解沟槽对轴承表面润滑介质的流动影响规律,进而不足以指导工程应用中的沟槽优化设计,也无法评估不同沟槽结构对轴承润滑性能的提升/削弱作用.对此,本文中通过可视化仿真和试验技术,对比润滑油在轴承光滑内圈和带沟槽内圈表面的流动行为,基于内圈滚道内润滑油流量评估沟槽结构对润滑油的导向效果,为面向轴承润滑增效的沟槽设计与工程应用提供理论支撑.

## 1 可视化仿真

### 1.1 几何模型

本文中以H7006C角接触球轴承为研究对象.在真实服役条件下,滚动轴承内部组件间的相对运动及接触关系复杂.当轴承转动时,内圈和保持架以各自的速度绕共同轴线公转,同时,滚珠在绕共同轴线公转的同时围绕自身轴线自转.本文中在针对轴承内圈表面的流动过程分析时,轴承复杂结构和运动导致难以对其内部润滑油流动进行清晰的观察和影响因素的单因素分析.特别是本文中主要考察内圈表面非接

触区的润滑油流动过程,轴承保持架、外圈和滚动体等对内圈表面非接触区的润滑油流动影响较小.因此,本文中首先对角接触球轴承进行了模型简化,忽略轴承外圈、保持架和滚动体,重点研究润滑油在内圈表面的流动行为.内圈几何模型如图1(a)所示,数值模型主要包括喷嘴和内圈.如图1(b)所示,喷嘴固定在内圈表面与滚道交线1 mm处,喷嘴直径为0.5 mm.计算区域采用ICEM软件中的非结构化网格方法划分,如图1(c)所示,网格单元总数约为130万.在分析过程中,设定内圈以不同转速绕自身轴线回转运动,喷嘴以不同的供油量以及供油速度向内圈供给润滑油.

### 1.2 边界条件

基于计算模型中,轴承的运动设定为内圈转速为 $n$ .如图1(c)所示,喷嘴设置为静止壁,内环设置为旋转壁.内圈表面压力设定为大气压,内圈表面的气流因马赫数小而被视为不可压缩.为明确油气流动界面,采用VOF模型求解油气两相流.压力速度耦合采用SIMPLE算法<sup>[16]</sup>.动量和压力采用二阶迎风格式模拟,模拟收敛精度设置为 $1 \times 10^{-4}$ .仿真时选用32#汽轮机润滑油,油品参数为润滑油密度 $\rho=876 \text{ kg/m}^3$ ,黏度 $\eta=0.058 \text{ kg/(m}\cdot\text{s)}$ <sup>[16]</sup>.

### 1.3 沟槽结构参数

在喷射润滑中,润滑油随内圈表面流入滚道.因此,为了引导油液流入滚道,在内圈表面喷嘴与滚道之间的区域添加沟槽结构.如图2所示,沟槽的横截面形状均为半椭圆形(此处的横截面是指垂直于内圈轴线的平面),椭圆焦点在轴向, $a$ 表示长半轴的长度,数值为0.5 mm; $b$ 表示短半轴的长度,数值为0.2 mm. S1、S2和S3分别表示半圆形截面槽、半椭圆截面槽和圆角半椭圆截面槽. S3的截面形状与S2相似,只是在S3中,在椭圆与内圈表面的交线上增加了1个过渡圆角, $r$

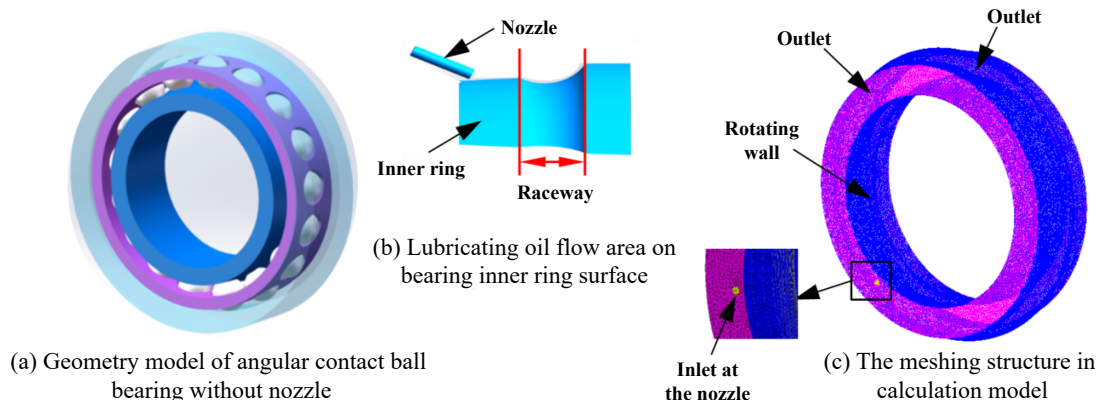


Fig. 1 Visual simulation model of lubricating oil flow on bearing inner ring surface

图1 轴承内圈滚道表面润滑油流动可视化仿真模型



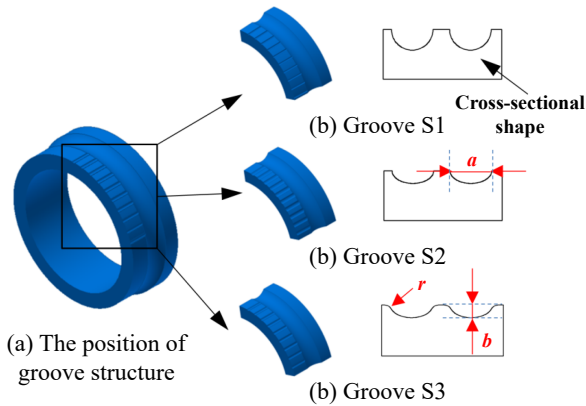


Fig. 2 The groove structure on bearing inner ring surface  
图 2 轴承内圈滚道表面的沟槽结构

示圆角的半径. 为了提高模型的分析精度, 在模型的沟槽区域进行了网格细化.

## 2 可视化试验

### 2.1 试验原理与试验平台

由于轴承内圈高速旋转以及润滑油飞溅后难以捕捉等问题, 目前尚无法在试验中准确测量流过轴承内圈表面既定位置的润滑油流量. 为了验证本文中利用沟槽强化润滑油轴向流动能力的可行性, 同时为了间接验证本文中的仿真模型的合理性, 图3所示为轴承内圈表面润滑油流动可视化试验示意图, 通过轴承油气润滑系统将润滑介质喷射到旋转的轴承内圈表面, 结合高速摄像技术实现润滑油流动过程的捕捉和分析. 高速摄像机系统由高速摄像机、补偿光源和计算机组成. 使用Phantom Miro M310高速相机, 配合尼克尔微距镜头, 拍摄不同工况下内圈润滑油流动的图像. 在

1280×800全分辨率下, 每秒拍摄图像超过3 200 帧(fps), 可支持捕捉润滑油的流动. 虚拟相机控制软件 Phantom Camera Control (PCC)用于控制高速摄像机, 图像处理软件用于获取润滑油的流动轨迹. 旋转系统由电主轴、机械主轴、润滑和冷却系统组成. 机械主轴作为试验轴系并由电主轴驱动, 主轴的转速通过变频器控制.

润滑系统包括喷嘴和夹紧装置, 如图4所示. 喷嘴由夹紧装置固定, 喷嘴的工作参数(喷嘴角度 $\theta$ 和位置等)可以通过夹紧装置进行调整, 润滑油从喷嘴喷射到内圈表面. 与可视化仿真相对应, 润滑油为32#透平油<sup>[16]</sup>. 在试验过程中, 润滑油被染成红色以便于拍摄追踪.

### 2.2 试验对象

为了快速比较不同凹槽结构的导向效果, 采用3D打印技术制备带有不同凹槽的轴承内圈. 图5所示为3D打印制作的轴承内圈, 包括无沟槽的光滑内圈以及3种带沟槽内圈(沟槽截面分别为S1、S2、S3).

## 3 结果与讨论

### 3.1 转速对套圈表面润滑油流动的影响

图6所示为通过模拟和试验获得的润滑油在内圈表面流动行为. 可以看出, 润滑油从喷嘴喷出流入内圈表面后, 一部分润滑油沿着内圈表面流入滚道, 另一部分受离心力影响随着滚道高速旋转被甩出. 被甩出的润滑油没有直接参与轴承接触区润滑, 可能造成滚道与球接触区油量不足, 降低轴承润滑效率, 导致摩擦发热和温度升高. 进一步分析可知, 转速( $n$ )和凹槽截面结构都是影响滚道内润滑油流动特性的因素.

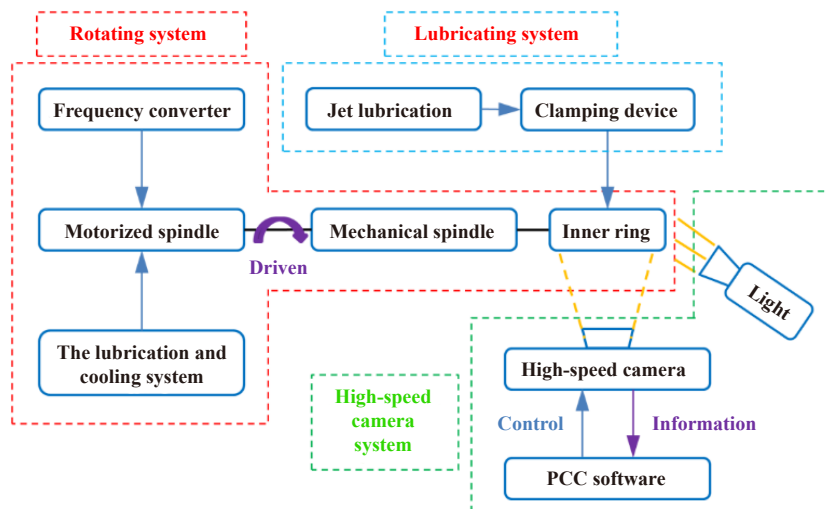


Fig. 3 Visual experimental study of lubricating oil flow on bearing inner ring surface  
图 3 轴承内圈滚道表面润滑油流动可视化试验研究

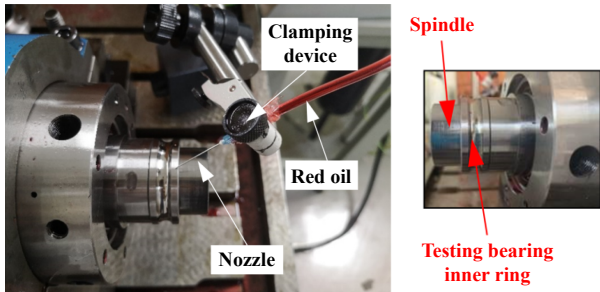


Fig. 4 Bearing inner ring and lubricating nozzle during experiment

图 4 试验过程中的轴承内圈和喷嘴布置

因此, 下文中通过模拟和试验2种方法讨论上述因素对内圈表面润滑油流动行为的影响.

润滑油在内圈高速旋转时被甩出, 影响了接触区的润滑性能. 对比光滑套圈在不同转速下表面油相体积分数云图, 如图6(a~b)所示, 图6中不同颜色代表润滑油体积分数比例(Oil volume fraction). 润滑油体积分数比例为0的蓝色区域, 代表着此区域没有润滑油分布; 润滑油体积分数比例为0.5的绿色区域, 代表着此区域润滑油体积占比50%; 润滑油体积分数比例为1的红色区域, 代表着此区域充满润滑油. 从图6中可

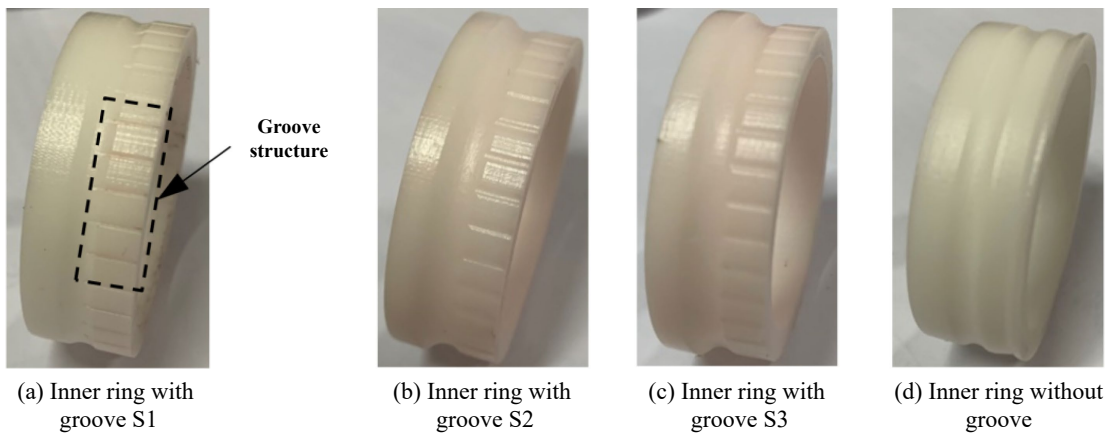


Fig. 5 Bearing inner ring with different groove structure

图 5 不同沟槽结构的内圈结构

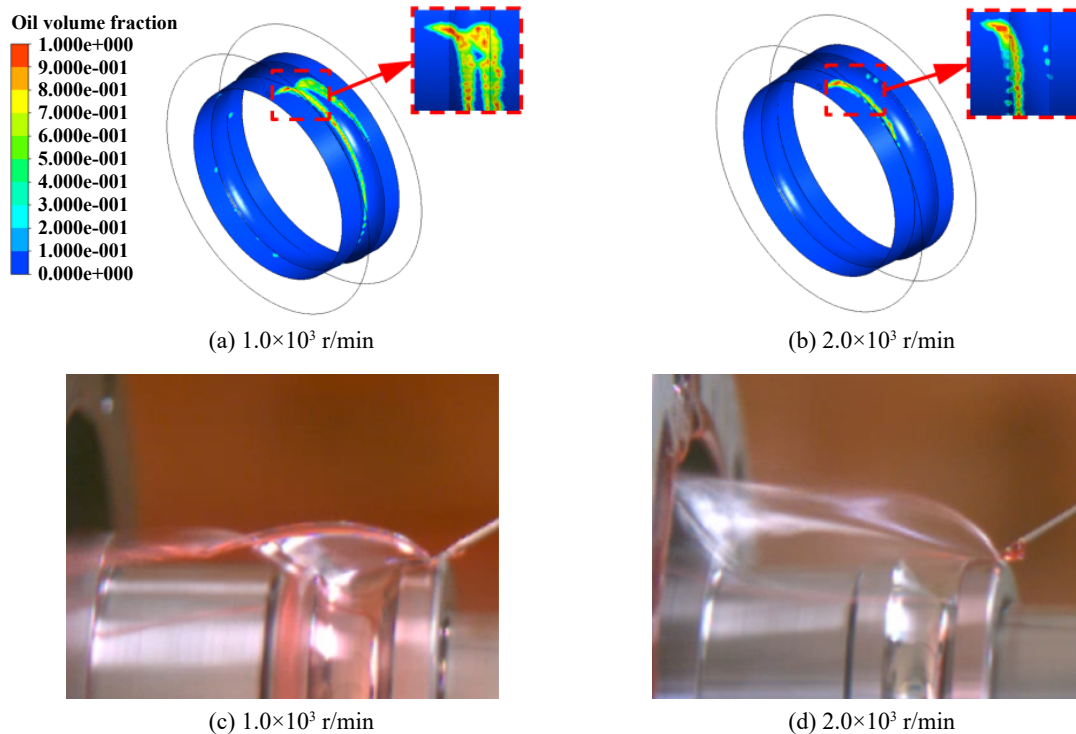


Fig. 6 Lubricating oil flow behavior on bearing inner ring surface by simulation and experiment

图 6 仿真和试验获得的润滑油在内圈表面流动行为

以看出, 当内圈以 $1.0 \times 10^3$  r/min 旋转时, 大部分润滑油可以直接流入滚道. 但当转速增加到 $2.0 \times 10^3$  r/min 时, 只有少部分油流入滚道, 大部分油因离心力而被甩出. 图6(c~d)所示为2种转速下内圈表面流动的试验结果. 在 $1.0 \times 10^3$  r/min 的转速下, 整个滚道形成油膜. 当转速为 $2.0 \times 10^3$  r/min 时, 滚道内几乎没有积油. 试验结果验证了仿真分析的正确性与可靠性.

### 3.2 沟槽对套圈表面润滑油流动的影响

在套圈表面添加沟槽的目的是引导更多的润滑油流入滚道. 因此, 在转速为 $1.0 \times 10^3$  r/min 时讨论不同沟槽结构对润滑油流动的影响, 沟槽结构见图2. 图7所示为不同沟槽内圈表面油相体积分数的等效曲面图. 在S1沟槽内圈上, 润滑油与内圈表面接触时溅射出, 从而阻碍了润滑油流入滚道. 分析其原因, 是由于沟槽截面半圆部分与平面部分的过渡过于尖锐, 对旋转方向的润滑油流动有影响, 从而导致润滑油脱离内圈表面而被甩飞. 在S2沟槽内圈上, 润滑油被甩出的现象略有改善. 是由于椭圆部分和平面部分之间的过渡处的锐度减小. 对于S2沟槽内圈, 由于在椭圆与平面之间的过渡处添加了圆角, 因此润滑油几乎不会溅出, 如图7(c)所示, 大部分润滑油流入滚道. 综合以上分析可以发现, 在内圈表面上不同类型的沟槽结构对润滑油流动行为的影响是不同的. 对比图6(a)和图7(a)可

以看出, 相比于光滑内圈, 不合适的沟槽结构可能进一步阻碍润滑介质在内圈滚道内的流动.

图8所示为不同沟槽润滑油在内圈表面流动行为的试验图像, 试验轴上同时安装光滑内圈以及带沟槽内圈. 可以看出, 在相同速度下, 光滑套圈沟道内的润滑油较少, 而带有沟槽的S2和S3结构的内圈表面, 润滑油明显流过了滚道表面. 与前2种沟槽相比, 带有S3沟槽的内圈滚道内油膜积累最明显. 模拟和试验结果相吻合, 证明了仿真方法和仿真结果的可靠性, 也表明沟槽S3对内圈表面润滑油的引导效果更好.

### 3.3 不同转速下沟槽对套圈表面润滑油流动的影响

上文中通过仿真和试验对比了较低转速下有无沟槽结构时, 轴承内圈表面润滑油的流动过程, 验证了仿真方法和结构的可靠性. 受高速拍摄等条件限制, 本节中仅通过仿真方法分析轴承内圈在较高转速时沟槽结构对润滑油流动的引导作用. 图9所示为不同转速下带沟槽S3的内圈油相体积分数云图. 可以发现, 在转速升高至5 000~20 000 r/min 工况下, 带有沟槽S3结构的内圈滚道内, 润滑油的流动积累情况明显好于图6中光滑滚道内润滑油的积累情况, 再次证明了沟槽结构对内圈表面润滑油流动的引导效果. 为了直观比较, 计算了2个内圈滚道的积油量, 如图10所示, 绿色为带沟槽内圈滚道内的润滑油流量, 黄色为

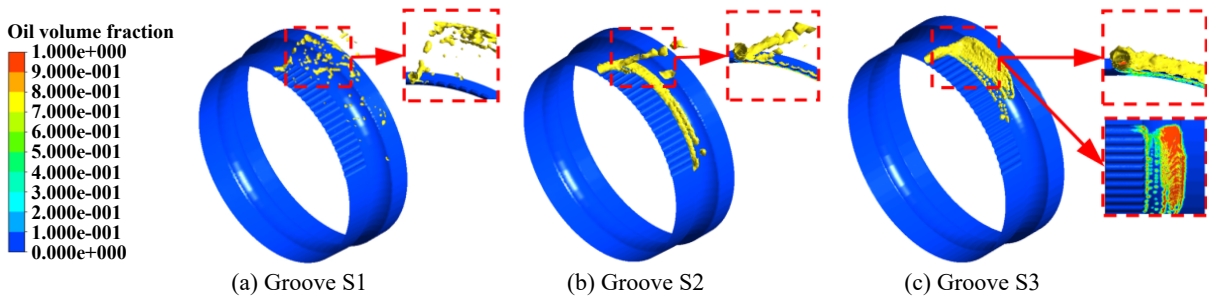


Fig. 7 Lubricating oil flow behavior on bearing inner ring surface with different groove structure (by simulation)

图 7 不同沟槽时润滑油在内圈表面流动行为(仿真)

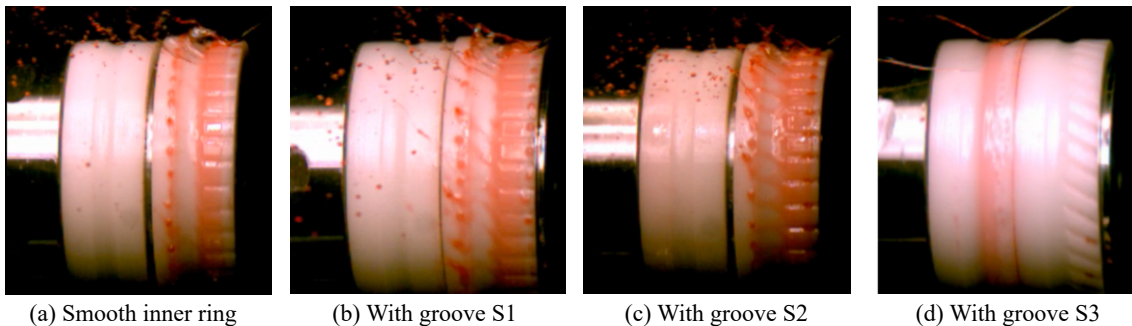


Fig. 8 Lubricating oil flow behavior on bearing inner ring surface with different groove structure (by experiment)

图 8 不同沟槽时润滑油在内圈表面流动行为(试验)



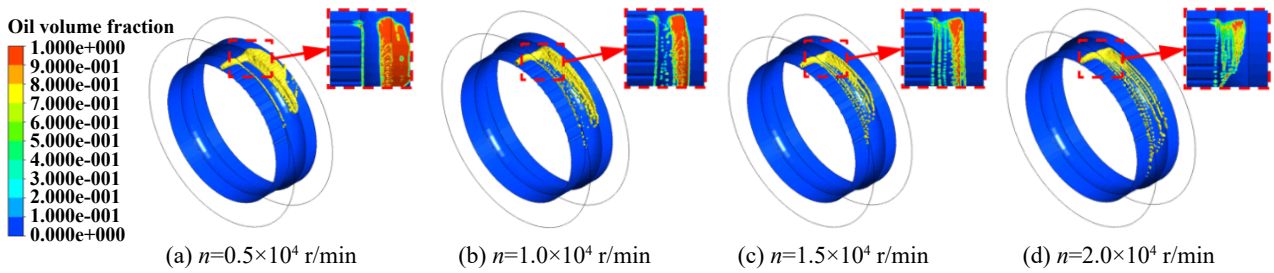


Fig. 9 Lubricating oil flow behavior on bearing inner ring surface with different rotation speed

图 9 不同转速下内圈表面润滑油流动情况

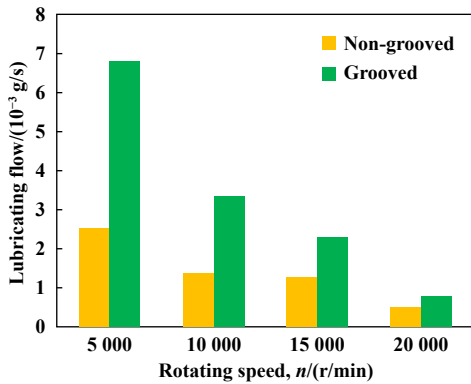


Fig. 10 Lubricating oil flow amount on bearing inner ring surface with different rotation speed

图 10 不同转速下内圈滚道润滑油流量

光滑内圈滚道内润滑油流量. 分析发现, 随着转速的升高, 内圈滚道内润滑油流动减小, 说明沟槽结构对润滑油的引导效果随着转速升高而削弱.

### 3.4 带沟槽轴承润滑流动仿真及试验

以上分析了单个内圈组件在有无沟槽时滚道内润滑油的流动情况. 研究表明, 沟槽结构可以显著提升润滑油在内圈轴向流动能力, 增加流入滚道的润滑油流量, 对于乏油工况下改善轴承的润滑性能具有重要作用. 本节中从仿真和试验角度, 开展完整轴承的润滑流场仿真和温升试验, 进一步验证沟槽结构对轴承润滑性能的影响.

#### 3.4.1 完整轴承内部流场仿真

分别建立光滑内圈和沟槽内圈的完整轴承仿真模型. 通过仿真对比可以看出, 与光滑轴承不同的是, 带沟槽内圈表面有更多的油沿着轴向流动, 导致更多的润滑油进入滚道. 球与接触区域附近的滚道之间的润滑状态是轴承润滑的关键区域, 对轴承润滑有重要影响. 因此, 润滑油在靠近接触区域的球和滚道上的分布情况对于轴承润滑效果的分析是极其重要的. 2种模型接触区域附近球和滚道上润滑油的分布如图11所示. 对于光滑的内滚道, 可以看到润滑油进入轴承

腔后, 主要沿旋转方向流动. 而润滑油则积聚在球和滚道表面, 在轴承润滑中起着主要作用. 对于有凹槽的内圈, 可以看出润滑油在滚道上的轴向流动距离更远, 说明在沟槽结构的引导作用下, 油的轴向流动能力增强. 同时, 内圈带沟槽结构的轴承, 其滚球和滚道上的润滑油量明显多于光滑轴承的润滑油量.

#### 3.4.2 完整轴承温升试验

轴承外圈温度是反映轴承润滑性能的重要指标, 因此通过外圈温度来判断乏油工况下沟槽结构对轴承润滑性能的影响. 在试验中对比普通轴承以及内圈带有沟槽S3结构的轴承, 如图12(a)所示. 通过轴承座上的3个径向通孔安装3个温度传感器并与外圈接触, 采用PT100温度传感器和MX100数据采集系统监测并读取轴承外圈温度, 如图12(b)所示, 另外在试验基座上安装温度传感器用于试验环境温度测试. 试验中针对轴承不同沟槽的试验, 在确保轴承装配轻预载要求下, 没有轴径向的额外加载. 为了模拟乏油环境, 试验中轴承的润滑油为正常供油量的1/3 (0.12 mL/h).

在一定转速下, 当轴承外圈在40 min内温升小于0.5 °C时, 认为其达到热平衡. 图13所示为3种不同转速时内圈有无沟槽轴承的温升情况. 可以看出, 在不同转速下, 带沟槽轴承的外圈温升始终低于普通轴承. 这是因为在乏油工况下, 沟槽结构能够引导更多的润滑油流入滚道, 从而改善轴承接触区的润滑性能, 降低摩擦生热和轴承温升. 在转速为3 000 r/min时, 带沟槽轴承的温升仅比普通轴承低2 °C左右; 但当转速达到9 000 r/min时, 带沟槽轴承的温度比普通轴承降低约9 °C. 这是由于随着转速的增加, 喷嘴喷出的润滑油受离心效应的影响, 难以直接流入内圈滚道, 导致接触区乏油状态进一步恶化, 轴承温升增大. 而对于内圈带有沟槽结构的轴承, 由于其沟槽结构可以引导润滑油流入滚道, 从而显著改善轴承接触区的润滑状态, 降低了接触摩擦生热, 有利于提升轴承的润滑性能.



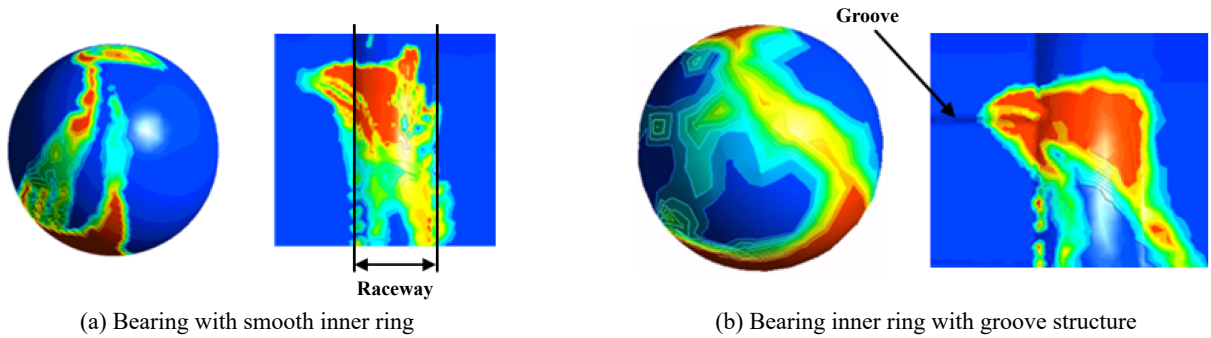
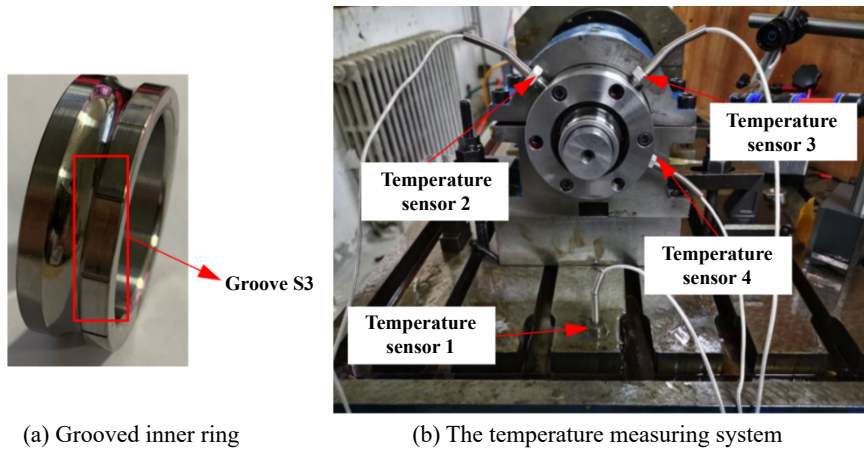
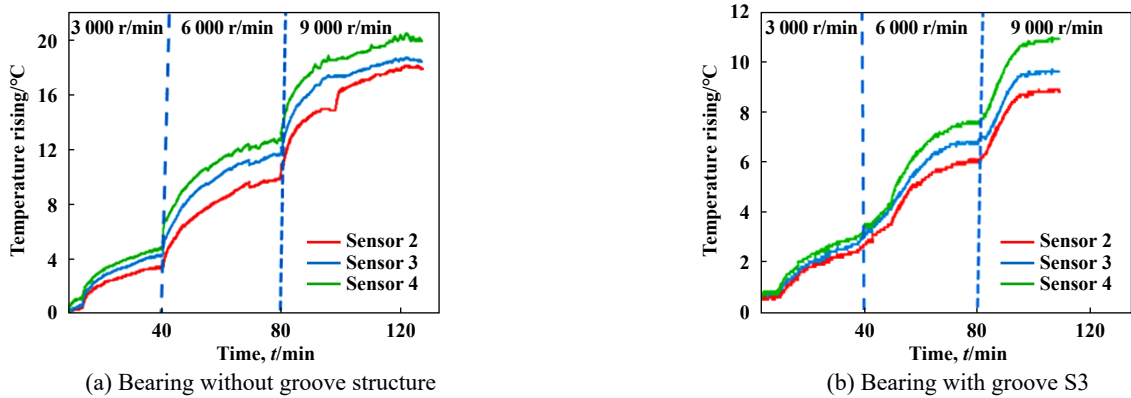


Fig. 11 Lubricating oil flow on ball's surface and inner raceway  
图 11 轴承滚动体和内圈滚道上润滑油流动



(a) Grooved inner ring (b) The temperature measuring system  
Fig. 12 Bearing temperature experiment with and without inner ring groove structure  
图 12 内圈有无沟槽时轴承的温升试验



(a) Bearing without groove structure (b) Bearing with groove S3  
Fig. 13 Bearing temperature data with and without inner ring groove structure  
图 13 内圈有无沟槽时轴承的温升数据

### 4 结论

a. 基于可视化仿真和试验方法, 系统研究了带沟槽内圈表面润滑介质的流动过程, 发现沟槽结构可能促进/阻碍润滑油轴向流动能力。

b. 对比了转速和不同沟槽截面形状对润滑油轴向流动过程的影响, 获得了有利于润滑介质流入内圈滚道的沟槽结构。

c. 通过整轴承仿真和温升试验, 证实了所得设计沟槽在轴承润滑增效方面的作用。

### 参考文献

[ 1 ] Zhang Guotao, Shi Yingkang, Tong Baohong, et al. Analysis of oil supply behavior and self-lubrication mechanism of oil-bearing surface[J]. Tribology, 2022, 42(5): 1063–1070 (in Chinese) [张国涛, 史英康, 童宝宏, 等. 含油轴承表面供油行为与自润滑机理分

- 析[J]. 摩擦学学报, 2022, 42(5): 1063–1070. doi: [10.16078/j.tribology.2021177](https://doi.org/10.16078/j.tribology.2021177).
- [2] Fan Zhihan, Zhao Ziqiang, Liang He, et al. Lubricating oil distribution in a rolling bearing using laser induced fluorescence method[J]. Tribology, 2022, 42(2): 234–241 (in Chinese) [范志涵, 赵自强, 梁鹤, 等. 基于荧光法的滚动轴承内部润滑油层分布研究[J]. 摩擦学学报, 2022, 42(2): 234–241]. doi: [10.16078/j.tribology.2021046](https://doi.org/10.16078/j.tribology.2021046).
- [3] Liang He, Zhang Yu, Wang Wenzhong. Experimental observation and investigation of oil distribution and replenishment in a rolling bearing model[J]. Tribology, 2020, 40(4): 450–456 (in Chinese) [梁鹤, 张宇, 王文中. 轴承内部润滑油分布及回流的试验观察与研究[J]. 摩擦学学报, 2020, 40(4): 450–456]. doi: [10.16078/j.tribology.2019180](https://doi.org/10.16078/j.tribology.2019180).
- [4] Hu Jibin, Wu Wei, Wu Mingxing, et al. Numerical investigation of the air-oil two-phase flow inside an oil-jet lubricated ball bearing[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2014, 68: 85–93. doi: [10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.09.013](https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.09.013).
- [5] Xu Rangshu, Li Jun, Niu Ling, et al. Numerical simulation of oil-air two-phase flow and temperature field inside the aero-engine rolling bearing[J]. Lubrication Engineering, 2014, 39(3): 91–95 (in Chinese) [徐让书, 李骏, 牛玲, 等. 航空发动机滚动轴承内油气两相流动与温度场的数值模拟[J]. 润滑与密封, 2014, 39(3): 91–95]. doi: [10.3969/j.issn.0254-0150.2014.03.020](https://doi.org/10.3969/j.issn.0254-0150.2014.03.020).
- [6] Niu Peng. Study on lubrication characteristics of oil-gas two-phase flow in rolling bearings[D]. Beijing: North China University of Technology, 2012 (in Chinese) [牛鹏. 滚动轴承油气两相流润滑特性研究[D]. 北京: 北方工业大学, 2012].
- [7] Zhang Lixiu, Qu Xin, Wu Yuhou, et al. Analysis of multi-phase flow characteristics in bearing cavity of motorized spindle under oil-gas lubrication[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2020, 48(15): 149–155 (in Chinese) [张丽秀, 屈鑫, 吴玉厚, 等. 油气润滑条件下电主轴轴承腔内多相流特性分析[J]. 机床与液压, 2020, 48(15): 149–155]. doi: [10.3969/j.issn.1001-3881.2020.15.032](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-3881.2020.15.032).
- [8] Wang Baomin, Wang Zong. Numerical analysis of air pressure distribution inside the chamber of oil-air lubricated angular contact ball bearings[J]. Lubrication Engineering, 2020, 45(3): 7–11,32 (in Chinese) [王保民, 王综. 油气润滑角接触球轴承腔内空气压力分布数值分析[J]. 润滑与密封, 2020, 45(3): 7–11,32]. doi: [10.3969/j.issn.0254-0150.2020.03.002](https://doi.org/10.3969/j.issn.0254-0150.2020.03.002).
- [9] 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 (in Chinese) [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]. doi: [10.7652/xjtub201912003](https://doi.org/10.7652/xjtub201912003).
- [10] 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. doi: [10.1016/j.triboint.2018.01.035](https://doi.org/10.1016/j.triboint.2018.01.035).
- [11] 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. doi: [10.1016/j.triboint.2021.106950](https://doi.org/10.1016/j.triboint.2021.106950).
- [12] Liu Muyuan, Guo Feng, Jiao Yihang, et al. A Novel guide-type nozzle for oil-air lubrications[J]. China Mechanical Engineering, 2018, 29(11): 1284–1288 (in Chinese) [刘牧原, 郭峰, 焦一航, 等. 一种新型导流式油气润滑喷嘴[J]. 中国机械工程, 2018, 29(11): 1284–1288]. doi: [10.3969/j.issn.1004-132X.2018.11.005](https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-132X.2018.11.005).
- [13] Akamatsu Y, Mori M. Minimizing lubricant supply in an air-oil lubrication system[R]. NTN Technical Review, 2014, 72: 12–19.
- [14] Zheng Junhao. Research on the effect of surface groove guide structure on the internal flow field and lubrication performance of high speed bearings[D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 2020 (in Chinese) [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].
- [15] Ge Linfeng. Study on jet lubrication efficiency enhancement method of rolling bearing based on groove structure[D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 2021 (in Chinese) [葛临风. 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].
- [16] Wang Chao. Multiple parameters analysis and optimization of groove structure on bearing inner ring surface used for bearing lubrication efficiency enhancement[D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 2022 (in Chinese) [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].