

文章编号: 1674-8190(2024)06-086-11

航空发动机主轴轴承高效润滑冷却技术研究进展

刘振侠¹, 朱泽韬¹, 姜乐^{1,2}, 吕亚国¹, 覃经文³

(1. 西北工业大学 动力与能源学院, 西安 710129)

(2. 中国航发四川燃气涡轮研究院, 成都 610500)

(3. 中国航发湖南动力机械研究所, 株洲 412002)

摘要: 滚动轴承作为航空发动机的关键部件, 必须依靠高效润滑冷却技术保障其在高速、高温和重载的严苛工作环境下稳定运转。与传统喷射润滑相比, 环下润滑技术具有诸多优势, 已成为现代发动机主轴轴承的主流润滑方式。本文围绕航空发动机主轴轴承的高效润滑冷却技术, 对比了典型润滑方式, 系统梳理并总结了环下润滑技术的发展现状, 讨论了环下润滑轴承的润滑冷却效果, 对航空发动机主轴高速轴承润滑冷却技术的未来发展趋势进行了展望, 为航空轴承高效润滑冷却和精细化热管理提供参考。

关键词: 航空发动机; 主轴轴承; 喷射润滑; 环下润滑; 两相流; 润滑与冷却

中图分类号: V233.4

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2024.06.08

Research progress on high-efficiency lubrication and cooling technology for aircraft engine main spindle bearings

LIU Zhenxia¹, ZHU Zetao¹, JIANG Le^{1,2}, LYU Yaguo¹, QIN Jingwen³

(1. School of Power and Energy, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710129, China)

(2. AECC Sichuan Gas Turbine Establishment, Chengdu 610500, China)

(3. AECC Hunan Aviation Powerplant Research Institute, Zhuzhou 412002, China)

Abstract: Rolling bearings are the critical components of aircraft engines, which require the efficient lubrication and cooling technologies to ensure stable operation under the harsh conditions of high speed, high temperature, and heavy load. Compared to traditional jet lubrication, the under-race lubrication because of numerous advantages has become the mainstream lubrication method for modern engine main shaft bearings. According to the efficient lubrication and cooling technology for aircraft engine main shaft bearings, the typical lubrication methods are compared. The current development status of under-race lubrication technology is systematically reviewed and summarized, and the lubrication and cooling effects of under-race lubricated bearings are discussed. The future development trends in lubrication and cooling technology for high-speed bearings in aircraft engines are explored, which can provide the reference for efficient lubrication, cooling, and refined thermal management of aviation bearings.

Key words: aircraft engine; main spindle bearings; jet lubrication; under-race lubrication; two-phase flow; lubrication and cooling

收稿日期: 2024-06-11; 修回日期: 2024-07-01

基金项目: 国家科技重大专项(J2019-III-0023-0067); 国家自然科学基金(12302390)

通信作者: 刘振侠(1963-), 男, 博士, 教授。E-mail: zlxliu@nwpu.edu.cn

引用格式: 刘振侠, 朱泽韬, 姜乐, 等. 航空发动机主轴轴承高效润滑冷却技术研究进展[J]. 航空工程进展, 2024, 15(6): 86-96.

LIU Zhenxia, ZHU Zetao, JIANG Le, et al. Research progress on high-efficiency lubrication and cooling technology for aircraft engine main spindle bearings[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2024, 15(6): 86-96. (in Chinese)

0 引言

航空发动机主轴轴承是支承并引导发动机转子精确转动,提供良好定位精度和足够支承刚性的重要部件^[1-2]。随着发动机性能不断发展,主轴轴承的 DN 值(内径与转速的乘积)甚至达到 $3 \times 10^6 \text{ mm} \cdot \text{r}/\text{min}$ 以上,工作温度也达到 220°C ,且接触应力达到了 $2\,000 \text{ MPa}$ ^[3]。在高速、高温和高载荷的复杂环境下,轴承内部热量若不能及时被滑油带走,轴承即会受到蠕变损伤与疲劳损伤,甚至因热膨胀变形出现过盈“抱死”的情况。同时,在高温环境下,滑油也可能发生结焦和碳化,严重影响到航空发动机的安全可靠运行^[4]。

主轴轴承的良好热管理是其稳定可靠工作的前提,而热管理必须通过适当的润滑和冷却来实现,合理的润滑方式及相应的结构设计则是润滑冷却效果最佳化的重要基础。因此,需要突破高效润滑冷却技术,以提高轴承润滑效率、降低工作温度并减小蠕变损伤的影响,进而实现轴承的长寿命和高可靠运行。

早期发动机常采用喷射润滑对主轴轴承进行润滑与冷却,随着发动机转速和热负荷的不断提高,喷射润滑已不能满足主轴高速轴承的润滑冷却需求,而环下润滑成为解决轴承高温问题最有效的技术手段。

本文对航空发动机主轴轴承润滑技术进行综述,从结构演变与内部流动两个方面梳理环下润滑技术的发展脉络,讨论环下轴承润滑冷却特性的研究现状,并对航空轴承环下润滑技术的未来研究方向进行展望。

1 航空主轴轴承润滑技术概述

受工作环境与空间所限,航空发动机主轴轴承常采用喷射润滑或/和环下润滑对轴承元件进行有效润滑和冷却^[5]。

1.1 喷射润滑

喷射润滑利用供油泵将滑油增压,通过管路或特制的油孔将滑油输送至供油喷嘴处,经喷孔加速并喷射至轴承内环(或外环)与保持架内(或外)表面间的径向间隙,对轴承实施润滑^[6],如图1所示。

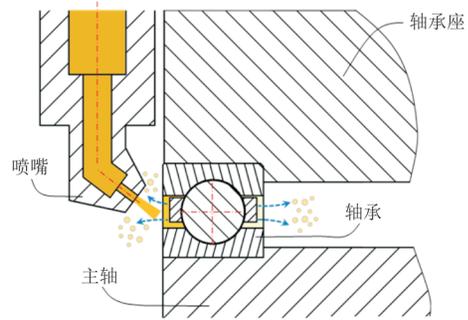
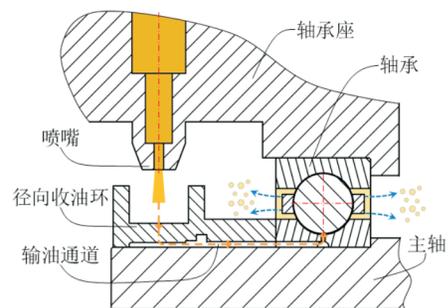


图1 喷射润滑示意

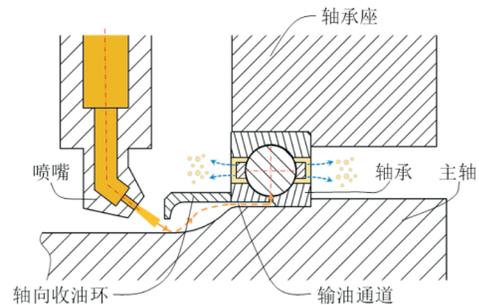
Fig. 1 Schematic of jet lubrication

1.2 环下润滑

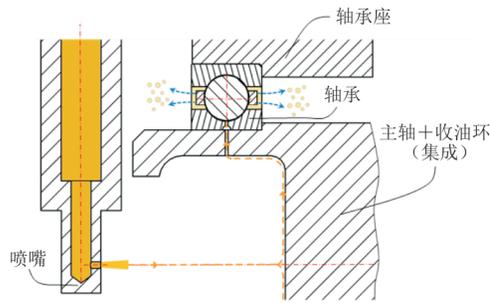
与喷射润滑相比,环下润滑中喷嘴不直接对准轴承供油,滑油首先被收油结构捕获,然后沿输油通道流动至轴承内圈处,最后在高速旋转离心作用下沿供油孔甩入轴承内部,包括“喷油、收油、输油和润滑冷却”四个阶段,环下润滑可以使滑油直接进入有效润滑区,在高速高温环境下具有良好的润滑冷却效果。典型环下润滑结构示意图如图2所示,按照收油环结构分为径向(如图2(a)所示)和轴向形式(如图2(b)所示),此外根据轴承布置位置特点,也有轴心环下润滑结构(如图2(c)所示)与中介轴承环下润滑结构(如图2(d)所示)。



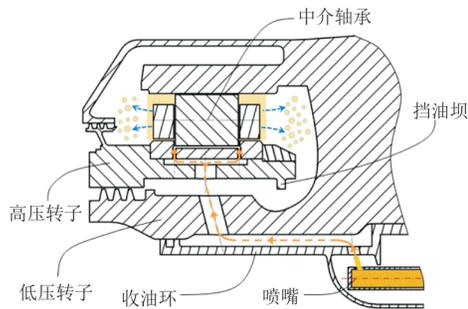
(a) 径向环下润滑结构



(b) 轴向环下润滑结构



(c) 轴端轴承轴向(轴心)环下润滑结构



(d) 中介轴承环下润滑结构

图 2 环下润滑示意

Fig. 2 Schematic of under-race lubrication

喷射润滑结构简单、易于控制,在 DN 值较低时有着良好润滑效果。但 DN 值较高时,滑油难以穿透高速旋转气流进入轴承^[7],导致润滑冷却效果下降。在环下润滑中,滑油直接通过供油孔进入轴承,有效避免了上述问题,轴承内部油气分布更加均匀,在高 DN 值下轴承润滑冷却效果更好^[8]。因此除喷射润滑外,环下润滑也成为航空主轴轴承常用的润滑方式^[9-10],并在斯贝、RB211、RB199、AL-31F、PW4000、PW2040、CFM56 等多个型号航空发动机上得到应用,不同润滑技术的特点及适用范围如表 1 所示。本文重点围绕航空发动机主轴轴承环下润滑技术开展讨论。

表 1 润滑方式特点对比

Table 1 Comparison of lubrication methods characteristics

润滑方式	优势	不足	适用范围
喷射润滑	结构简单,可根据发动机需求布置喷嘴位置及数量	高 DN 值下滑油难以进入轴承,润滑效果下降	低、中 DN 值轴承 (通常小于 $1 \times 10^6 \text{ mm} \cdot \text{r}/\text{min}$)
环下润滑	轴承内部油气分布均匀,润滑冷却效果好,具有一定抗断油性 ^[11]	结构复杂,滑油存在一定飞溅损失	高 DN 值轴承 (通常大于 $3 \times 10^6 \text{ mm} \cdot \text{r}/\text{min}$)

2 环下润滑技术研究现状

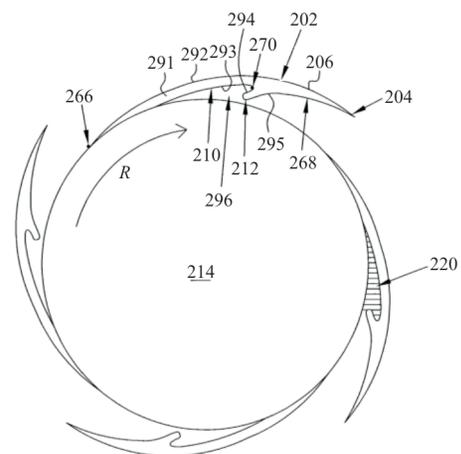
2.1 环下润滑结构发展

环下润滑的早期研究始于 20 世纪六七十年代,1966 年 Bernard 等^[12]和 1967 年 Pabst 等^[13]公开了轴向收油环和径向收油环的雏形,此后国内外研究者对收油环结构进行了一系列的改进设计。

2.1.1 径向收油结构演变

径向收油环通常由多个收油叶片构成,工作时,叶片高速旋转并对滑油射流进行切割收集,输油通道再将滑油输送至轴承。Kovaleski^[14]于 1987 年提出包含四个收油叶片的早期径向收油环,叶片内表面设有防止滑油向外甩出的挡油坝结构;2002 年, Fisher 等^[15]提出了包含三个收油叶片的径向收油环,通过改变输油通道尺寸将滑油按比例分配至各轴承,进一步提出了同时向双轴承供油的径向收油环^[16]。

除了改变收油环叶片数量,径向收油环的设计也聚焦于叶片叶型优化,以降低叶片切割滑油时产生的破碎飞溅,提高收油能力。目前,国外研究者所提出的径向收油环叶片主要存在倾斜叶片^[17]、带凸台叶片^[18](如图 3 所示)、并列式双收油环^[19]等,同时与周向集油环槽、螺旋输油槽、长短油孔等结构一体化设计^[20],提高了结构紧凑性并减轻了系统质量。

图 3 叶片带挡油凸台的径向收油环^[18]Fig. 3 Radial oil scoop with blade-damming^[18]

在国内研究中,2021 年覃经文等^[21]公开了一种收油环及环下供油润滑装置,收油叶片内表面的滑油相对速度方向与叶片切线方向一致,减少

了滑油从叶片内表面飞出的比例;沈洁阳等^[22]对收油叶片外表面的螺旋线和光滑内凹曲线进行了设计优化;刘振侠等^[23]、姜乐等^[24]对收油叶片进行如下优化设计:1)在收油通道处增加挡油叶片,2)在收油叶片叶尖布设挡片或在内表面增设阶梯结构,3)将收油叶片分为三层构成收油叶片组(如图4所示)。此外,在带有螺旋角的输油槽两端设有周向连通的前、后集油环槽,可以提高滑油流通能力,将滑油沿周向均匀输送至轴承^[25]。

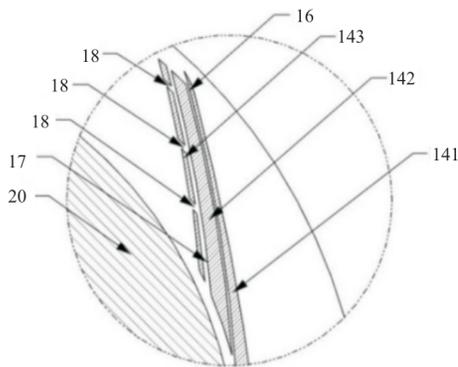


图4 多层收油叶片组^[24]

Fig. 4 Multi-layer oil scoop blade assembly^[24]

2.1.2 轴向收油结构演变

20世纪90年代,Atkinson等^[26]和Daiber等^[27]阐述了输油通道、集油环槽和轴承内环油孔的结构形式及布设细节。此后,轴向环收油环结构研究多聚焦于集成设计,在高效收油的前提下提高空间利用率,对多点位轴承进行合理供油。

Ciokajlo等^[28]提出了包含两个同轴布设的轴向收油环的环下润滑结构,能够同时满足多个组件的润滑冷却需求;Jewess等^[29]提出了分别向前、后并列轴承提供滑油的轴向环下润滑结构。此外,轴向收油环主要通过双层结构^[30]、布设倾斜油孔^[31]、收油环主轴耦合设计^[32]的手段以有效利用发动机内部空间。

国内相关的研究中,2017年,闫众等^[33]给出了一种双层环下润滑结构,解决了双排滚动轴承供油不均的问题;朱加赞等^[34]提出了一种用于发动机中央传动齿轮支承轴承的环下润滑结构,简化了中央传动壳体的结构,降低了壳体的制造和装配难度;吕亚国等^[35]通过改变收油环几何参数和输油通道尺寸的方式提升轴向收油环的滑油流通能力。

2.2 环下润滑内部流动与收油特性研究现状

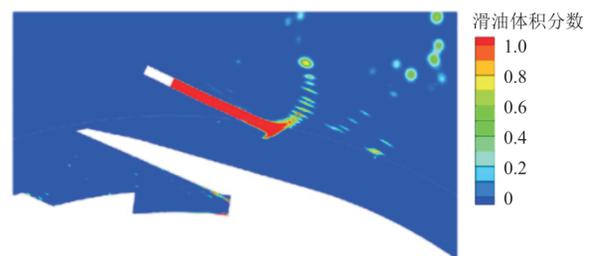
由于空间和结构的限制,收油过程中滑油不可避免地会由于反弹飞溅而造成损失,导致收油环无法将供油喷嘴喷出的滑油全部收集,因此通过收油效率量化表征环下润滑收油结构的收油能力,即一定时间间隔内进入轴承的滑油量与滑油喷嘴的供油量之比^[36]。轴承的润滑冷却特性与环下润滑结构的收油性能紧密相关,因而需结合油气两相流动行为,评估不同结构与工况参数组合对收油性能的综合影响。

2.2.1 径向收油环内部两相流动

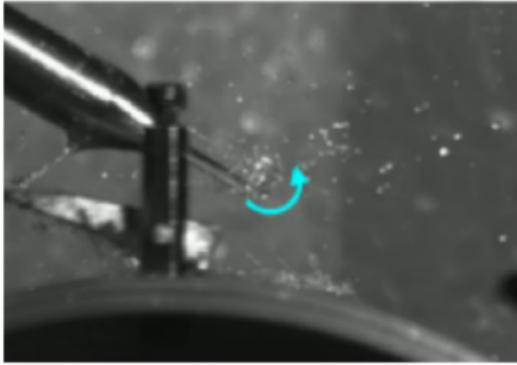
国外,英国诺丁汉大学G2TRC(Gas Turbine and Transmissions Research Center)研究团队搭建了径向收油环收油试验平台,针对转速、滑油流量、收油环轴向宽度和外径等因素对收油效率的影响规律开展研究^[37],捕捉了收油过程中的碰撞飞溅和滑油破碎现象^[38],此外发现,当滑油冲击收油叶片外轮廓后侧时收油效率将有所提高^[39]。

Prabhakar等^[40]发现滑油损失与滑油射流冲击收油叶片的位置有关,冲击点越靠近收油叶片的叶尖,滑油损失量越大;Kruisbrink等^[41]在文献^[40]的研究基础上引入飞溅准则和捕获准则,对滑油射流冲击叶片的最佳位置开展探究。

在国内,西北工业大学的姜乐等^[42]在计算高速收油环空气场的基础上,探究了主轴转速、供油流量、喷嘴数量以及供油喷嘴角度、收油环外径、收油叶片数量、供油喷嘴与收油叶片间距离等因素对收油效率的影响^[43-45]。通过VOF(流体体积)方法计算模拟的滑油飞溅现象如图5所示,数值计算结果与实验观测现象一致。



(a) 数值计算



(b) 实验现象

图 5 收油环附近的液滴飞溅^[44]Fig. 5 Droplet splashing near the oil scoop^[44]

姜乐等^[46-47]结合收油性能和收油量变化特征,对收油环结构开展了优化设计,通过叶片叶根圆弧过渡、叶根延伸、增加阶梯结构等优化设计使得收油效率最大可提升接近 5.0%^[48]。此外通过构建高精度代理模型,以收油效率和供油相对误差作为目标函数,对收油性能进行了多目标优化研究,为环下润滑结构的优化设计提供了有效的解决方案^[49]。

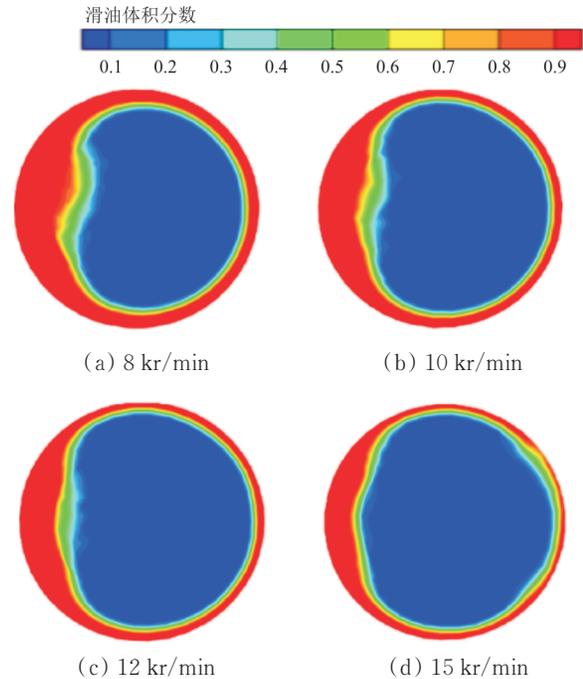
2.2.2 轴向收油环内部两相流动

通常情况下,轴向环下润滑结构收油效率较高,通常可达 90% 以上^[50]。Krug 等^[51]研究了转速、供油流量、喷孔直径和喷射角对收油效率的影响,发现提高滑油流速可以降低高速气流的影响;覃经文等^[50]对轴向环下润滑结构收油效率开展了试验研究,指出设计轴向环下润滑结构时,应尽量保证滑油喷射点位于收油环挡油坝内侧。

姜乐等^[52]对轴向收油环的收油效率开展试验和数值仿真研究,分析了喷嘴距离、转速、供油压差、喷射角度的影响,并对最大收油流量开展了预测;朱泽韬等^[53]发现供油孔内滑油呈月牙形分布,如图 6 所示,在此基础上研究了双排供油孔的滑油分配特性,建立了临界孔径比的无量纲关联式^[54];强轲等^[55-56]分析了中介轴承环下润滑结构内部流场和滑油运动规律,发现部分滑油未被收集并被收油结构中的流动涡带至篦齿,进而导致收油效率降低。

在环下润滑收油性能方面,国内外研究者借助 CFD 技术与试验掌握了工况及结构参数对收油效率的影响规律,但多参数耦合关系造成单参数研究不能完整反映参数间的相关关系,因此,需要

综合评估单参数和不同参数组合对收油性能的影响,力求获得最佳收油性能及其对应的最佳参数组合方案。

图 6 不同转速下供油孔内滑油分布^[53]Fig. 6 Distribution of oil in the radial hole at different rotational speed^[53]

3 环下润滑轴承润滑冷却特性研究现状

滑油被收油环捕获后进入高速轴承内部,对其进行润滑与冷却,在阐述环下润滑技术的基础上,本文对环下润滑轴承的内部流动、生热、传热及温度场分布研究现状进行讨论。

3.1 轴承内部流动及摩擦产热研究现状

相比于喷射润滑,环下润滑供油方式的改变会对轴承动力学状态、冷却换热状态、流体作用力以及轴承产热造成显著影响,从而影响整个轴承的热力学状态。因此,探究环下润滑轴承内部的两相流动状态是进行轴承润滑冷却特性分析的基础。

Adeniyi 等^[57]利用 CLSVOF(耦合的水平集—流体体积)方法发现环下润滑方式下,滑油进入轴承后在保持架内表面向两侧铺展,轴承内滑油形态分为片状滑油和离散油滴;Jiang L 等^[58]对包含输油通道的环下润滑轴承进行了研究,发现轴承

元件表面未完全被润滑油覆盖,轴承外环、保持架、滚珠和内环表面上的润滑油扩散程度依次降低,通

过调整油孔结构可优化轴承内部的润滑油体积分数,如图 7 所示。

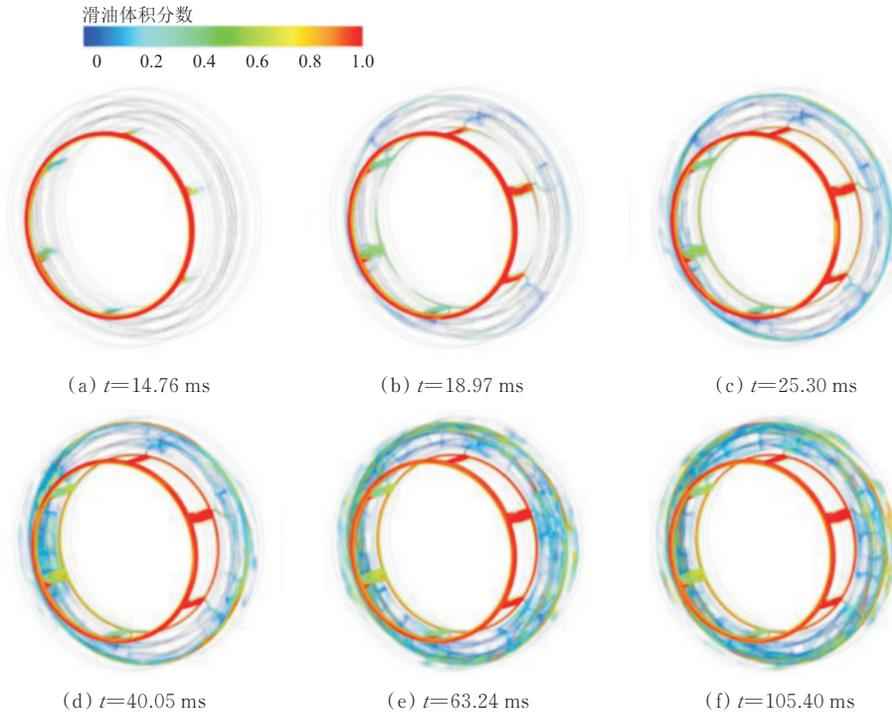


图 7 不同时刻轴承内润滑油分布^[58]

Fig. 7 Oil distribution inside the bearing at different time^[58]

鲁勇帅^[59]发现环下润滑比喷射润滑轴承内部两相分布更加均匀,冷却效果相对更优;王赵蕊佳等^[60-61]发现轴承滚珠自转加强了润滑油穿透间隙的能力;公平等^[62]发现增加供油孔孔径可以增加引导间隙内润滑油含量,改善轴承内润滑油流场,有利于对保持架的润滑。

环下润滑轴承运转时,内部的流体黏性摩擦造成的拖曳损失和搅拌损失是轴承总功率损失的重要来源,准确计算流体黏性摩擦损失在轴承总功率损失的建模中起着重要作用。Palmgren^[63]总结了中低转速下轴承流体黏性摩擦力矩的计算方法;Astridge 等^[64]通过实验对上述方法进行改进,提出了高速滚子轴承总功率损失的计算公式;SKF 公司为了精确计算滚子轴承的产热特性,将轴承产热划分为四部分,包括滚动摩擦、滑动摩擦、密封件摩擦以及润滑油造成的拖曳摩擦^[65]。

围绕轴承黏性摩擦损失中的拖曳阻力及涡动力矩,国内外研究者也开展了相关研究。Harris 等^[66]将流体力学中单个球体绕流模型应用于球滚动体拖曳阻力研究中,并将二维无限长圆柱绕流模型引入圆柱滚子轴承滚动体拖曳阻力问题的研

究^[67];Gao W J 等^[68-69]研究了圆柱滚子轴承中圆柱滚动体受到的拖曳阻力,并将涡动力矩分为自转诱导和平动诱导两部分^[70]。

3.2 轴承温度场研究现状

目前滚动轴承产热分析方法主要包含整体法与局部法两种。整体法主要通过轴承的总体功率损失经验关系式进行轴承产热的快速预估,计算简单高效。局部法是基于轴承内部力学及运动关系建立的分布式产热分析模型,可以更真实精确地反映轴承的产热机理,是目前滚动轴承热分析的主要研究方法。

在轴承内部生热和传热特性研究的基础上,评估轴承温度场可有效对其工作寿命进行预测,进而保障轴承的安全可靠运转。Flouros^[71]发现,采用外环冷却可控制轴承的温升,能够大幅减少环下润滑的供油量与搅拌损失;Gloeckner^[72]对环下润滑角接触球轴承开展了试验研究,发现滚道较大的曲率比可显著降低轴承温度和功率损耗;Winer 等^[73]将轴承座对轴承温度场的影响中加入了热网络模型,成功地预测了轴承瞬态温度分布;

Pouly 等^[74]研究了载荷、转速、滑油对滚动轴承温度的影响,并提出一种高速轴承功率损失模型的新方法。

在国内,高文君等^[75]提出一种多节点热网络法,提高了轴承温度场热分析的可靠性;Li J N 等^[76]考虑了轴承中的打滑现象,分析了高速轻载工况下的轴承二维温度场;王黎钦等^[77]将滚子与套圈滚道摩擦生热视为移动热源,建立了高速圆柱滚子轴承温度场计算模型;靳岚等^[78]考虑了热诱导载荷的影响,分析了球轴承的温度分布,发现热诱导载荷与产热均会影响轴承温度场。

综上,目前研究已基本厘清了工况参数及轴承部件运动对轴承产热、传热、温升等特性的影响,但仍存在如热网络法节点划分粗糙,在分布式热源精确加载等引起的轴承热力学特性分析误差。此外,在进行边界条件选取时,流动及热边界条件的选取和确定目前仍主要依靠经验简化,与实际物理情况仍有一定差异。

因此,针对环下润滑高速轴承,结合收油性能实现轴承内部油气分布和黏性摩擦损失的准确预测是提升轴承润滑与冷却效果的重要方向,同时环下润滑主轴轴承产热、传热及温度场分布的精细化分析作为有效评估主轴轴承性能的关键,仍需进一步深入研究。

4 航空发动机环下润滑技术展望

环下润滑技术已成为现代航空发动机主轴轴承主要采用的润滑方式,在环下润滑结构优化设计、收油性能提升以及主轴轴承润滑冷却特性方面取得了一定进展。然而,环下润滑技术本身的复杂性使得实际工程应用层面仍面临着挑战。

环下润滑结构内部油气两相流动复杂,收油效率同时受多个设计参数的影响,结构设计及制造加工难度较大。同时,环下润滑包含多个工作过程,收油环与轴承在结构、流体流动及热量传递方面均存在复杂的耦合关系,仍需要针对以下问题开展系统的深入研究。

4.1 环下润滑收油与轴承滑油需求量的耦合研究

以径向收油结构为例进行说明,收油环的收油能力直接影响进入轴承的滑油量,而轴承所需

滑油量与实际供油量间的匹配关系则会影响轴承工作性能:供油量不足时轴承内部热量难以及时被带走;滑油过量则会增强滑油与轴承内部运动部件的流体黏性摩擦作用,搅拌生热量增加,导致发动机功率消耗更高。环下润滑与轴承耦合关系如图 8 所示。

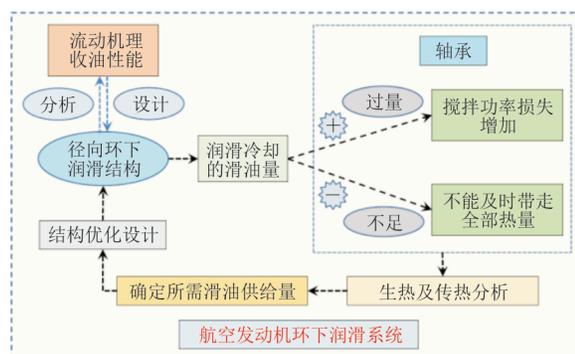


图 8 环下润滑与轴承耦合关系

Fig. 8 Coupling relationship of the under-race lubrication and bearing

为保证轴承良好的润滑冷却效果,需要通过轴承生热及传热分析,精确确定环下润滑轴承的滑油供给量,再根据实际结构开展优化设计,而收油环结构的内部收油及流动性能又是开展轴承润滑冷却设计的基础。因此,有必要对环下润滑系统的全过程开展流热固耦合研究,同时对收油性能和轴承的润滑冷却特性进行精细评估。

4.2 环下润滑轴承与轴承腔流动及换热的耦合研究

轴承热管理伴随着油气两相流动,是一个多部件间相互产热与传热共存的多进程、强耦合过程。主轴轴承的润滑冷却不仅是简单的供油散热问题,更与轴承腔和回油管间的流动换热存在深度的关联。

环下润滑—轴承/轴承腔—回油/通风结构之间的相互联系如图 9 所示,可以看出:环下润滑收油结构为轴承提供供油入口条件,轴承热分析也依赖环下润滑的流动与热边界。滑油甩出轴承后,为轴承腔的两相流动及换热分析提供了甩油条件与热源,并对通风/回油结构的流动换热产生影响。而整个轴承腔的流动换热特性又会影响环下润滑及轴承的运转情况。此外,润滑系统与通

风/空气系统及相关的外部冷却设计等也存在关联(如短舱冷却等)。

因此,为实现对轴承及轴承腔“热问题”的高效热管理,需要对环下润滑结构—轴承—轴承腔的多过程油气两相流动开展耦合研究,确定合理的系统边界,提高多部件间流动、产热及传热的耦合分析能力。

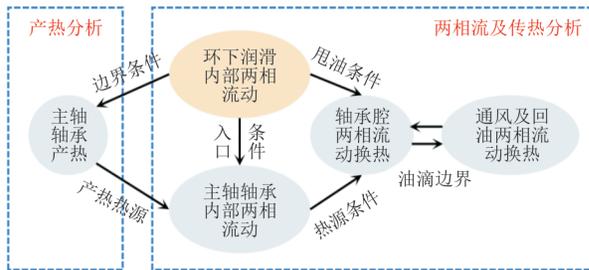


图9 环下润滑与轴承腔热分析耦合

Fig. 9 Coupling analysis process of the bearing lubrication

在先进航空发动机精细化研制的迫切需求牵引之下,必将促进环下润滑高速轴承获得新的突破。针对环下润滑轴承及其关联部件深入开展耦合研究,使轴承在最佳供油量下稳定运行,有利于实现有效热管理的同时降低系统滑油循环量;此外,这也可以提升滑油系统的供回油匹配能力,实现系统的精准调控;同时合理的环下润滑结构设计更利于发动机减重,提高发动机效率。

5 结束语

环下润滑高速轴承多层次相互影响需要通过不断迭代对复杂系统进行优化。未来,应立足于上述系统性的耦合研究,进一步厘清环下润滑结构—轴承/轴承腔—滑油系统的耦合关系,综合、全面考虑相关因素,不断完善航空发动机主轴轴承高性能润滑研究体系,以期实现高速轴承、滑油系统乃至航空发动机的长寿命与高可靠性工作,助力高性能航空发动机迈向更高水平。

参考文献

- [1] 许春生. 燃气涡轮发动机[M]. 北京: 兵器工业出版社, 2006.
- [2] XU Chunsheng. Gas turbine engine[M]. Beijing: Ordnance Industry Press, 2006. (in Chinese)
- [3] 林基恕. 航空发动机主轴滚动轴承的技术进展[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2003, 16(4): 52-56.
- [4] LIN Jishu. Technical advance in rolling bearing of aero-engine shaft[J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2003, 16(4): 52-56. (in Chinese)
- [5] 刘朋, 王黎钦, 张传伟, 等. 航空发动机主轴轴承状态监测研究现状与发展趋势[J]. 航空动力学报, 2022, 37(2): 330-343.
- [6] LIU Peng, WANG Liqin, ZHANG Chuanwei, et al. Research status and development trend of condition monitoring on main-shaft bearings used in aircraft engines[J]. Journal of Aerospace Power, 2022, 37(2): 330-343. (in Chinese)
- [7] 李坤, 高文君, 李宛蓉, 等. 锥形轴承腔油气两相流动与换热数值研究[J]. 推进技术, 2022, 43(11): 251-259.
- [8] LI Kun, GAO Wenjun, LI Wanrong, et al. Numerical study of oil-air two-phase flow and heat transfer in tapered bearing chamber[J]. Journal of Propulsion Technology, 2022, 43(11): 251-259. (in Chinese)
- [9] PINEL S I, SIGNER H R, ZARETSKY E V. Comparison between oil-mist and oil-jet lubrication of high-speed, small-bore, angular-contact ball bearings[J]. Tribology Transactions, 2001, 44(3): 327-338.
- [10] ZARETSKY E, SCHULLER F, COE H. Lubrication and performance of high-speed rolling-element bearings[J]. Lubrication Engineering, 1985, 41(12): 725-732.
- [11] 刘红彬, 张磊, 史永生, 等. 高速滚动轴承环间气流特性数值模拟[J]. 机械设计, 2016, 33(6): 61-66.
- [12] LIU Hongbin, ZHANG Lei, SHI Yongsheng, et al. Numerical simulation of airflow characteristics between rings of the high-speed rolling bearing[J]. Journal of Machine Design, 2016, 33(6): 61-66. (in Chinese)
- [13] 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.
- [14] 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. (in Chinese)
- [15] PALEO CAGEAO P, SIMMONS K, PRABHAKAR A, et al. Assessment of the oil scoop capture efficiency in high speed rotors[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2019, 141(1): 012401.
- [16] LEE C W, JOHNSON G R, PALMA P C, et al. Factors affecting the behaviour and efficiency of a targeted jet delivery oil to a bearing lubrication system[C]// ASME Turbo Expo 2004: Power for Land, Sea, and Air. US: ASME, 2008: 191-199.
- [17] 许冬冬, 张金焕, 郭绍鹏. 环下供油轴承的断油试验[J]. 轴承, 2005(5): 26-27.
- [18] XU Dongdong, ZHANG Jinhuan, GUO Shaopeng. Oil cut-off test of oil supply bearing under ring[J]. Bearing, 2005(5): 26-27. (in Chinese)
- [19] BERNARD D, ROBERT R N, HENRY W W. Bearing assembly: US3269786[P]. 1966-03-25.

- [13] PABST R H, SILAY W J. Shaft sealing and cooling means: US3325232[P]. 1967-06-13.
- [14] KOVALESKI S K. Radial scoop construction: US4648485 [P]. 1987-03-10.
- [15] FISHER K L, DEMEL H F, HAZELEY R. Methods and apparatus for supplying oil to bearing assemblies: US64094-64[P]. 2002-06-25.
- [16] FISHER K L, ISHIGA K. Bi-directional oil scoop for bearing lubrication: US20030039421[P]. 2003-02-27.
- [17] MCDONAGH S T. Liquid-capturing shaft: US201600691-86[P]. 2016-03-10.
- [18] SCHWENDENMANN A. Circumferential lubricant scoop: US20170234222[P]. 2017-08-17.
- [19] DAVIS T A, SABINO G E. Dual radial scoop oil delivery system: US20200291818[P]. 2020-09-17.
- [20] WOTZAK M G. Oil scoop manifold: US20130283758[P]. 2013-10-31.
- [21] 覃经文, 郭晖, 周琳, 等. 收油环及环下供油润滑装置: CN111878237B[P]. 2021-11-16.
QIN Jingwen, GUO Hui, ZHOU Lin, et al. Oil collecting ring and under-ring oil supply lubricating device: CN111878 237B[P]. 2021-11-16. (in Chinese)
- [22] 沈洁阳, 李佳琪, 占锐, 等. 一种航空发动机的轴承组件及航空发动机: CN112648295B[P]. 2022-07-08.
SHEN Jieyang, LI Jiaqi, ZHAN Rui, et al. Bearing assembly of aero-engine and aero-engine: CN112648295B [P]. 2022-07-08. (in Chinese)
- [23] 刘振侠, 姜乐, 吕亚国, 等. 一种径向收油环、航空发动机轴承的环下润滑装置及方法: CN110748418B[P]. 2021-06-29.
LIU Zhenxia, JIANG Le, LYU Yaguo, et al. Radial oil collecting ring and under-ring lubricating device and method of aero-engine bearing: CN110748418B[P]. 2021-06-29. (in Chinese)
- [24] 姜乐, 吕亚国, 胡剑平, 等. 一种径向收油环和航空发动机主轴承环下润滑装置及方法: CN110578605B[P]. 2021-06-29.
JIANG Le, LYU Yaguo, HU Jianping, et al. Radial oil collection ring and aero-engine main bearing ring down lubricating device and method: CN110578605B[P]. 2021-06-29. (in Chinese)
- [25] 胡剑平, 刘振侠, 吕亚国, 等. 一种径向收油环、环下供油润滑装置及方法: CN110714987B[P]. 2021-05-11.
HU Jianping, LIU Zhenxia, LYU Yaguo, et al. Radial oil collecting ring and under-ring oil supply lubricating device and method: CN110714987B [P]. 2021-05-11. (in Chinese)
- [26] ATKINSON E, SALAMA E E. Multi-plane lubricated bearing assembly: US5106209[P]. 1992-04-21.
- [27] DAIBER P C, GREENWOOD A P, BAILEY T E. Lubricated bearing assembly: US5183342[P]. 1993-02-02.
- [28] CIOKAJLO J J, HAUSER A A, DAVISON S H. Gas turbine engine lubrication system: US5272868[P]. 1993-12-28.
- [29] JEWESS G F, SHATZ M N, JONES A C, et al. Under race bearing lubrication system for gas turbine engines: US20080135336[P]. 2008-06-12.
- [30] LUCAS J L. Concentric axial oil scoop: US10047649[P]. 2018-08-14.
- [31] MUNSON J. Lubricant scoop: US8464835[P]. 2013-06-18.
- [32] DEMITRASZEK A, MESSERSCHMIDT D E. Axial oil scoop for a gas turbine engine: US20140241851[P]. 2014-08-28.
- [33] 闫众, 孔令骏, 安浩俊, 等. 一种高速航空轴承试验器双层环下润滑结构: CN205895926U[P]. 2017-01-18.
YAN Zhong, KONG Lingjun, AN Haojun, et al. Double-deck ring of high-speed aircraft bearing tester is lubricating structure down: CN205895926U[P]. 2017-01-18. (in Chinese)
- [34] 朱加赞, 王宪良, 黄宏亮, 等. 一种高速轴承环下供油结构: CN206439380U[P]. 2017-08-25.
ZHU Jiazan, WANG Xianliang, HUANG Hongliang, et al. Speed bearing ring is oil supplying structure down: CN206439380U[P]. 2017-08-25. (in Chinese)
- [35] 吕亚国, 姜乐, 刘振侠, 等. 一种轴向收油环和航空发动机主轴承环下润滑装置及方法: CN110748419B[P]. 2021-06-29.
LYU Yaguo, JIANG Le, LIU Zhenxia, et al. Radial oil collection ring and aero-engine main bearing ring down lubricating device and method: CN110748419B[P]. 2021-06-29. (in Chinese)
- [36] 徐从儒. 航空发动机主轴轴承润滑冷却的设计与试验研究[J]. 航空发动机, 1999, 25(3): 8-14.
XU Congru. Design and experimental study on lubrication and cooling of aero-engine spindle bearing[J]. Aeroengine, 1999, 25(3): 8-14. (in Chinese)
- [37] PRASAD S K, SANGLI P, BUYUKISIK O, et al. Prediction of gas turbine oil scoop capture efficiency [C] // ASME 2014 Gas Turbine India Conference. US: ASME, 2015: 1-10.
- [38] KORSUKOVA E, KRUISBRINK A, MORVAN H, et al. Oil scoop simulation and analysis using CFD and SPH [C] // ASME Turbo Expo 2016: Turbomachinery Technical Conference and Exposition. US: ASME, 2016: 1-9.
- [39] KORSUKOVA E, MORVAN H. Computational fluid dynamics study of oil behavior in a scoop, and factors affecting scoop capture efficiency[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2020, 142(5): 051008.
- [40] PRABHAKAR A, ABAKR Y A, SIMMONS K. Numerical investigations to assess the impact of shaft speed on the performance of scoop devices [C] // ASME Turbo Expo

- 2018: Turbomachinery Technical Conference and Exposition. US: ASME, 2018: 1-8.
- [41] KRUISBRINK A, PALEO CAGEAO P, MORVAN H P, et al. Operating under jet splashing conditions can increase the capture efficiency of scoops[J]. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2019, 76: 296-308.
- [42] 姜乐, 刘振侠, 吕亚国. 环下润滑内部空气场流动特性数值计算研究[C]//中国航天第三专业信息网第四十届技术交流会暨第四届空天动力联合会议. 昆明: 中国航天第三专业信息网, 2019: 42-51.
- JIANG Le, LIU Zhenxia, LYU Yaguo. Numerical study and analysis the effect of oil scoop blade tip shape on oil capture efficiency for an under-race lubrication system [C]//Gold Coast: Asia Pacific International Symposium on Aerospace Technology. Kunming: Aerospace Propulsion Technology Society, 2019: 42-51. (in Chinese)
- [43] LYU Y, LE J, LIU Z, et al. Simulation and analysis of oil scoop capture efficiency[C]//Proceedings of ASME Turbo Expo 2018: Turbomachinery Technical Conference and Exposition. US: ASME, 2018: 1-6.
- [44] 姜乐, 刘振侠, 吕亚国. 环下润滑结构对径向收油环收油效率影响的数值计算研究[J]. *推进技术*, 2020, 41(6): 1387-1395.
- JIANG Le, LIU Zhenxia, LYU Yaguo. Numerical investigation for effects of under-race lubrication structure on oil capture efficiency of radial oil scoop[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2020, 41(6): 1387-1395. (in Chinese)
- [45] JIANG Le, LIU Zhenxia, LYU Yaguo, et al. Numerical simulation on the oil capture performance of the oil scoop in the under-race lubrication system[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, 2021, 235(15): 2258-2273.
- [46] 吕亚国, 姜乐, 高晓果, 等. 高速轴承环下润滑收油叶片结构参数与工况参数间的匹配关系[J]. *航空学报*, 2022, 43(12): 559-573.
- LYU Yaguo, JIANG Le, GAO Xiaoguo, et al. Matching relationship between structural parameters and operating parameters of oil scoop blade for high-speed bearing with under-race lubrication[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2022, 43(12): 559-573. (in Chinese)
- [47] 姜乐, 刘振侠, 吕亚国, 等. 环下润滑结构内部流动分析和收油叶片结构优化研究[J]. *推进技术*, 2022, 43(1): 135-143.
- JIANG Le, LIU Zhenxia, LYU Yaguo, et al. Internal flow field analysis and optimization structure of oil scoop blade in under-race lubrication structure [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2022, 43(1): 135-143. (in Chinese)
- [48] JIANG Le, LIU Zhenxia, HUANG Weina, et al. Sensitivity analysis and optimization on oil capture performance of under-race lubrication system for high-speed bearings[J]. *Tribology International*, 2024, 195: 109598.
- [49] 曹逸韬, 吕亚国, 朱泽韬, 等. 双支点对转轴承腔两相流动及换热特性的数值研究[J]. *推进技术*, 2024, 45(7): 176-186.
- CAO Yitao, LYU Yaguo, ZHU Zetao, et al. Numerical study of two-phase flow and heat transfer characteristics of double fulcrum counter-rotating bearing chamber [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2024, 45(7): 176-186. (in Chinese)
- [50] 覃经文, 曾广乐, 郭晖, 等. 某涡轴发动机轴承环下润滑结构试验研究[J]. *润滑与密封*, 2019, 44(7): 138-142.
- QIN Jingwen, ZENG Guangle, GUO Hui, et al. Experimental research on under-race lubrication of bearing for a turboshaft aeroengine [J]. *Lubrication Engineering*, 2019, 44(7): 138-142. (in Chinese)
- [51] KRUG M B, PEDUTO D, KURZ W, et al. Experimental investigation into the efficiency of an aero-engine oil jet supply system[J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2015, 137(1): 011505.
- [52] JIANG L, LYU Y G, LIU Z X. Investigation on two-phase flow characteristics and oil capture performance of axial oil scoop in aero-engine[J]. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2023, 49: 103259.
- [53] 朱泽韬, 吕亚国, 朱鹏飞, 等. 轴心射流收油环内部油气流动特性的数值模拟研究[J]. *推进技术*, 2024, 45(2): 68-77.
- ZHU Zetao, LYU Yaguo, ZHU Pengfei, et al. Numerical simulation study of oil-air flow characteristics in axis jet oil receiving scoop [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2024, 45(2): 68-77. (in Chinese)
- [54] 朱泽韬, 吕亚国, 朱鹏飞, 等. 环下润滑供油通道流量分配特性的数值研究[J/OL]. *航空动力学报*: 1-11 [2024-06-11]. <https://doi.org/10.13224/j.cnki.jasp.20230255>.
- ZHU Zetao, LYU Yaguo, ZHU Pengfei, et al. Numerical study of the flow distribution characteristics of under-race lubrication oil passage [J/OL]. *Journal of Aerospace Power*: 1-11 [2024-06-11]. <https://doi.org/10.13224/j.cnki.jasp.20230255>. (in Chinese)
- [55] 强轲. 航空发动机轴间轴承内油一气两相流动与传热特性研究[D]. 沈阳: 沈阳航空航天大学, 2020.
- QIANG Ke. Study on oil-gas two-phase flow and heat transfer characteristics of aeroengine bearings [D]. Shenyang: Shenyang Aerospace University, 2020. (in Chinese)
- [56] 强轲, 徐让书, 戴海宁, 等. 某型航空发动机轴间轴承集油结构内的两相流动数值计算[J]. *润滑与密封*, 2020, 45(11): 118-124, 129.
- QIANG Ke, XU Rangshu, DAI Haining, et al. Numerical calculation of two-phase flow in the oil-collecting structure of an aero-engine intershaft bearing [J]. *Lubrication Engineering*, 2020, 45(11): 118-124, 129. (in Chinese)
- [57] ADENIYI A A, MORVAN H, SIMMONS K. Oil-air flow between the cage and inner race of an aeroengine bearing

- [C]// ASME Turbo Expo 2016: Turbomachinery Technical Conference and Exposition. US: ASME, 2016: 1-7.
- [58] JIANG L, LYU Y G, GAO W J, et al. Numerical investigation of the oil-air distribution inside ball bearings with under-race lubrication[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology, 2022, 236(3): 499-513.
- [59] 鲁勇帅. 高速球轴承喷油润滑与环下润滑的数值模拟[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2018.
- LU Yongshuai. Numerical simulation of oil-jet lubrication and under-race lubrication for high speed ball bearings[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2018. (in Chinese)
- [60] 王赵蕊佳, 张小彬, 鲁勇帅, 等. 滚珠自转对高速球轴承环下润滑内部流动的影响[J]. 推进技术, 2022, 43(9): 319-327.
- WANG Zhaoruijia, ZHANG Xiaobin, LU Yongshuai, et al. Effects of ball rotation on internal flow of under-race lubrication of high speed ball bearing[J]. Journal of Propulsion Technology, 2022, 43(9): 319-327. (in Chinese)
- [61] 王赵蕊佳. 高速球轴承环下润滑两相流及耦合传热分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2020.
- WANG Zhaoruijia. Analysis of two-phase flow and coupled heat transfer of high speed ball bearing under race lubrication[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2020. (in Chinese)
- [62] 公平, 陈雪骑, 于庆杰, 等. 航空发动机中介轴承流场与润滑影响因素分析[J]. 轴承, 2021(8): 16-21.
- GONG Ping, CHEN Xueqi, YU Qingjie, et al. Analysis on flow field and influencing factors of lubrication for aero-engine intermediate bearing[J]. Bearing, 2021(8): 16-21. (in Chinese)
- [63] PALMGREN M. Ball and roller design engineering[M]. 3rd ed. Burbank: SAE, 1959: 34-41.
- [64] ASTRIDGE D G, SMITH C F. Heat generation in high-speed cylindrical roller bearings[C]// 1972 Elasto-hydrodynamic Lubrication 1972 Symposium. Leeds: IEEE, 1973: 83-94.
- [65] SKF Group. Rolling bearings 6000 EN[R]. Sweden: SKF Group, 2013.
- [66] HARRIS T A, MINDEL M H. Rolling element bearing dynamics[J]. Wear, 1973, 23(3): 311-337.
- [67] HARRIS T A. Rolling bearing analysis[M]. 4th ed. New York: Wiley, 2001.
- [68] GAO W J, NELIAS D, LIU Z X, et al. Numerical investigation of flow around one finite circular cylinder with two free ends[J]. Ocean Engineering, 2018, 156: 373-380.
- [69] GAO W J, NELIAS D, LYU Y G, et al. Numerical investigations on drag coefficient of circular cylinder with two free ends in roller bearings[J]. Tribology International, 2018, 123: 43-49.
- [70] GAO W J, NELIAS D, BOISSON N, et al. Model formulation of churning losses in cylindrical roller bearings based on numerical simulation[J]. Tribology International, 2018, 121: 420-434.
- [71] FLOUROS M. Reduction of power losses in bearing chambers using porous screens surrounding a ball bearing[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2006, 128(1): 178-182.
- [72] GLOECKNER P. The influence of the raceway curvature ratio on power loss and temperature of a high-speed jet engine ball bearing[J]. Tribology Transactions, 2013, 56(1): 27-32.
- [73] WINER W O, BAIR S, GECIM B. Thermal resistance of a tapered roller bearing[J]. ASLE Transactions, 1986, 29(4): 539-547.
- [74] POULY F, CHANGENET C, VILLE F, et al. Power loss predictions in high-speed rolling element bearings using thermal networks[J]. Tribology Transactions, 2010, 53(6): 957-967.
- [75] 高文君, 刘振侠, 朱鹏飞, 等. 基于多节点热网络法的航空发动机主轴轴承温度场分析[J]. 推进技术, 2019, 40(2): 382-388.
- GAO Wenjun, LIU Zhenxia, ZHU Pengfei, et al. Steady thermal analysis of main-shaft roller bearing for aero-engine based on multi-nodes thermal network methods[J]. Journal of Propulsion Technology, 2019, 40(2): 382-388. (in Chinese)
- [76] LI J N, XUE J F, MA Z T. Study on the thermal distribution characteristics of high-speed and light-load rolling bearing considering skidding[J]. Applied Sciences, 2018, 8(9): 1593.
- [77] 王黎钦, 陈观慈, 古乐, 等. 高速圆柱滚子轴承工作温度研究[J]. 航空动力学报, 2008, 23(1): 179-183.
- WANG Liqin, CHEN Guanci, GU Le, et al. Study on operating temperature of high-speed cylindrical roller bearings[J]. Journal of Aerospace Power, 2008, 23(1): 179-183. (in Chinese)
- [78] 靳岚, 蒋海元, 卢世奇, 等. 考虑热诱导载荷和摩擦生热交互影响的高速角接触球轴承温度场分析[J]. 轴承, 2023(4): 32-37.
- JIN Lan, JIANG Haiyuan, LU Shiqi, et al. Analysis on temperature field of high speed angular contact ball bearings considering interaction between thermally induced load and friction heat generation[J]. Bearing, 2023(4): 32-37. (in Chinese)

(编辑:丛艳娟)