

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2026.03.025

基于 CFD 方法的混合喷油润滑球轴承热流耦合仿真分析

黄天龙, 陆凤霞

(南京航空航天大学 机电学院, 江苏 南京 210016)

摘 要:以某型航空发动机用轴流压气机的支承轴承为研究对象,应用 CFD 方法建立其在混合喷油润滑方式下的热流耦合模型。基于 VOF 多相流模型、RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型以及 MRF 模型,仿真计算轴承内部的滑油分布及内外圈壁面的温度分布;分析附加喷油嘴对滑油及温度分布的影响,以及在双侧喷油情况下轴承转速及喷油速度对滑油及温度分布的影响。研究结果为轴流压气机支承轴承的润滑设计及参数选取提供了参考依据,具有一定的工程应用价值。

关键词:航空发动机;角接触球轴承;喷油润滑;计算流体动力学;热流耦合

中图分类号:TH133.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2026)03-0129-05

Simulation Analysis of Heat-flow Coupling for Ball Bearing with Mixed Spray Oil Lubrication Based on CFD Method

HUANG Tianlong, LU Fengxia

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: This research, taking the supporting bearing of an axial flow compressor for aeroengine as the target, establishes the heat-flow coupling model under mixed injection lubrication by using CFD method, simulates and calculates the oil distribution inside the bearing and the temperature distribution on the bearing wall based on the VOF multiphase flow model, RNG $k-\varepsilon$ turbulence model and MRF mode. This research also analyzes the influence of additional oil injection nozzle on oil and temperature distribution, and that of bearing rotation speed and oil injection velocity on oil and temperature distribution under double sides injection condition. The research results provide a reference for the design of lubrication system and the selection of lubrication parameters of the supporting bearing of axial flow compressors for aeroengine, and thus provide practical engineering values.

Keywords: aeroengine; angular contact ball bearing; oil injection lubrication; computational fluid dynamics; heat-flow coupling

0 引言

航空发动机用轴流压气机的支承轴承通常在高速、高温和重载工况下工作,产热严重,通常采用喷油方式对其进行润滑冷却。考虑到保持架与套圈间的间隙较小,从单侧喷油时滑油较难进入轴承内部,会导致冷却效果不佳甚至使其面临丧失散热性能、温升过高的问题。由此,某型航发用轴流压气机对其支承轴承增加一个喷油嘴,从另一侧将滑油喷射至与轴承内圈接触且同步旋转的摩擦环外表面,进而反射飞溅进入轴承内部对其进行补充润滑及冷却,弥补单侧喷油可能带来的轴承润滑冷却不足、温升过高的问题。一侧喷油直接进入轴承而另一侧喷油并反射飞溅进入轴承的润滑方式,即本文所述的混合喷油润滑方式。

国内外学者在轴承热流耦合仿真模拟方面已

经开展了一系列广而深的研究。翟强等^[1]建立了轴承的热流耦合模型,对高速角接触球轴承的温度场进行了仿真计算,研究了轴承内部流体域和固体域间的传热特性,同时也研究了轴承的结构和工况参数等因素对轴承温度分布的影响规律。鲁勇帅^[2]基于 Fluent 软件分别建立了在喷油润滑和环下润滑两种润滑方式下 SKF7210 角接触球轴承的热流耦合模型,采用多相流模型(volume of fluid, VOF)和湍流模型(renormalization group, RNG) $k-\varepsilon$ 仿真计算得到了不同工况下轴承内部的油气两相流场及轴承固体的温度场。徐让书等^[3]以某航空发动机的主轴轴承为研究对象,采用 VOF 模型和滑移网格技术追踪油气两相的界面并获得轴承固体的温度场以及油液体积分数随轴承转速和润滑油进口流量等工作参数的变化规律。侯潇男^[4]采用 CLSVOF 模型和多参考系模

基金项目:国家科技重大专项项目(J2019-III-0023-0067)

第一作者简介:黄天龙(1998—),男,江苏南通人,硕士研究生,研究方向为滚动轴承动力学以及热流耦合研究,tlhuang320684@163.com。

型(multiple reference frame, MRF)方法建立了环下润滑角接触球轴承的热流耦合模型,计算得到了轴承内部的油液分布及轴承固体的温度分布,并分析了不同轴承转速及环下喷嘴喷油速度对油液分布及温度分布的影响规律。LI等^[5]基于VOF多相流模型和MRF方法建立了双列圆锥滚子轴承的热流耦合模型,分析了失油状态下轴承内部的流场和套圈温度分布的演变规律。龚金科等^[6]建立了涡轮增压器轴承的热流耦合模型,仿真计算得到流场、换热系数及温度场,并分析了轴承内部的耦合流动及传热特性。牛鹏等^[7]基于Fluent软件采用VOF多相流模型及标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型,仿真计算得到了喷油润滑滚动轴承的不同出口直径圆柱形喷嘴内部的油气两相速度分布。

针对某型航发用轴流压气机的支承轴承在双侧混合喷油润滑方式下内部的流动及传热特性定性和定量分析需求,本文应用流体仿真软件Fluent,采用VOF多相流模型、RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型以及MRF模型,建立轴承的热流耦合模型,计算轴承内部的滑油分布及内外圈壁面的温度分布;分析了附加喷油嘴对轴承润滑及冷却性能的提升效果,且在双侧混合喷油润滑情况下分析了轴承转速及喷油速度对滑油及温度分布的影响规律。

1 混合喷油润滑球轴承热流耦合模型建立

1.1 几何模型建立与网格划分

本文所研究的某型航发用轴流压气机的支承轴承为一个双半内圈角接触球轴承,其基本的尺寸参数如表1所示。采用SolidWorks软件建立该轴承在左右双侧混合喷油润滑方式下的几何模型,如图1所示。inlet1和inlet2分别为滑油从左侧和右侧进入轴承的入口,其中inlet2即为所述附加喷油嘴,outlet1、outlet2和outlet3分别为轴承内部油气两相流体的3个出口。

表1 轴承尺寸参数

参数	数值
内径/mm	25
外径/mm	62
宽度/mm	17
滚珠直径/mm	10
滚珠个数/个	11

将三维模型去除圆角、倒角等对计算结果影

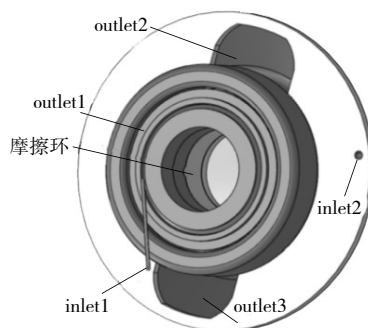
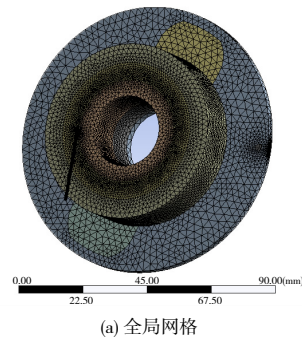
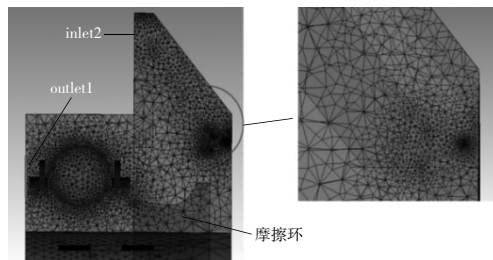


图1 双侧混合喷油润滑球轴承三维模型

响不大的结构后,导入至ANSYS Workbench中的DesignModeler模块进行布尔运算,抽取轴承内部的流体域。应用网格划分模块Mesh对固体及流体划分网格,考虑到非结构化四面体网格对复杂结构的适应性较强,选用四面体网格进行网格划分。因滚珠与滚道之间的间隙极小,为保证网格质量,对滚珠表面进行网格加密,且滑油入口处的湍动能较大,故对该区域亦进行局部细化,得到的网格模型如图2所示。网格最大偏度为0.749 96,网格质量满足要求。



(a) 全局网格



(b) 滚珠表面及滑油入口处网格细化示意图

图2 网格模型

1.2 CFD理论及模型选取

轴承内部流体域内,流体流动与传热始终满足3大控制方程,分别为质量、动量及能量守恒方程^[8],表达如下

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{V}) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho v_i)}{\partial t} + \nabla(\rho v_i \mathbf{V}) = \nabla(\mu \cdot \text{grad}(v_i)) - \frac{\partial p}{\partial x_i} + S_i \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho T)}{\partial t} + \text{div}(\rho T \mathbf{V}) = \text{div}\left(\frac{k}{c_p} \text{grad}(T)\right) + S_T \quad (3)$$

式中: ρ 、 k 、 c_p 分别为流体的密度、导热系数和比热容; T 为温度; $\mathbf{V}$ 为速度矢量; S_T 为源项。

喷油润滑轴承内部的流体为油气两相混合流体,采用VOF多相流模型模拟油气两相流清晰的相间交界面。运动形式复杂、速度极高的滚珠和保持架的存在会对轴承内部的流场产生极强的干扰,需选用合适的湍流模型来描述轴承内部的流体流动,RNG $k-\varepsilon$ 模型的基本方程相比其它 $k-\varepsilon$ 模型考虑更多的影响因素,准确性较高,且其与VOF模型的适配性也较高^[9],故选用RNG $k-\varepsilon$ 模型来描述轴承内部油气两相流的高湍流强度流动。轴承内外圈、滚珠和保持架的运动形式及速度都不相同,采用MRF模型来体现各部件间运动形式及速度的差异^[10]。

1.3 边界条件设置

仿真模型中,流体为空气和润滑油,润滑油选用4050航空合成润滑油;固体为轴承实体,其内外圈和滚珠材料为GCr15,保持架材料为40CrNiMoA,流体和固体材料的热物理性能参数分别如表2、表3所示。

表2 流体热物理性能参数

参数	流体	
	空气	4050航空合成润滑油
黏度/(Pa·s)	1.789×10^{-5}	0.044
密度/(kg/m ³)	1.225	880
比热容/(J/(kg·K))	1 006	1 880
导热系数/(W/(m·K))	0.024 2	0.115 7

表3 固体热物理性能参数

材料名称	密度/(kg/m ³)	比热容/(J/(kg·K))	导热系数/(W/(m·K))
GCr15	7 810	600	40.0
40CrNiMoA	7 850	460	42.7

inlet1和inlet2均为速度入口,设置入口油温为50℃;outlet1、outlet2和outlet3均为压力出口,出口压力值设置为1个标准大气压(1 atm = 101 325 Pa)。对流体域和固体域的交界面采用Coupled热边界条件,耦合轴承实体内部的热传导和流体与轴承

实体之间的热对流。内圈、滚珠和保持架壁面设置为运动壁面,转速关系按式(4)所示,外圈壁面设置为静止壁面。轴承外壁面与空气发生自然对流,对流换热系数为50 W/(m²·K),并设置轴承环境温度为26.85℃。

$$n_b = \frac{1}{2}n \cdot \left(1 - \frac{D \cdot \cos\alpha^0}{d_m}\right) \quad (4)$$

式中: n_b 为滚珠及保持架的公转速度; n 为轴承内圈转速,r/min。

采用局部生热法计算轴承的产热量并以体热源的形式平均施加给摩擦生热表面,即总热源的一半分给滚珠面,内圈与滚珠间生热的一半分给内滚道,外圈与滚珠间生热的一半分给外滚道,保持架与滚珠间摩擦生热的一半分给保持架兜孔面,如式(5)所示,为考虑固体内部的法向导热,设置固体发热壁厚为0.01 mm。

$$\begin{aligned} H_i &= H_{ib}/2 \\ H_o &= H_{ob}/2 \\ H_c &= H_{cb}/2 \\ H_b &= (H_{ib} + H_{ob} + H_{cb})/2 \end{aligned} \quad (5)$$

式中 H_b 、 H_i 、 H_o 、 H_c 分别为滚珠面、内滚道、外滚道、保持架兜孔面的产热量,W。

2 仿真计算结果与分析

2.1 附加喷油嘴对滑油及温度分布的影响

在轴承转速为10 000 r/min、inlet1喷油速度为6 m/s的情况下,分别令附加喷油嘴inlet2的喷油速度为0 m/s和1 m/s,轴承内部的滑油及温度分布结果对比如图3、图4和图5所示(本均为黑白印刷,如有疑问请咨询作者)。

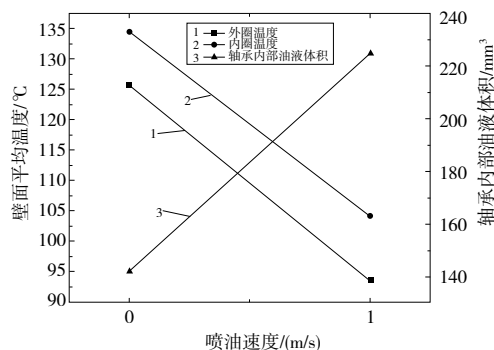


图3 轴承内部油液体积及内外圈壁面平均温度

由图3、图4和图5可以看出,附加喷油嘴可使得轴承内部滑油的含量有明显的增加,从142.03 mm³增加到了225.05 mm³,轴承内部平均

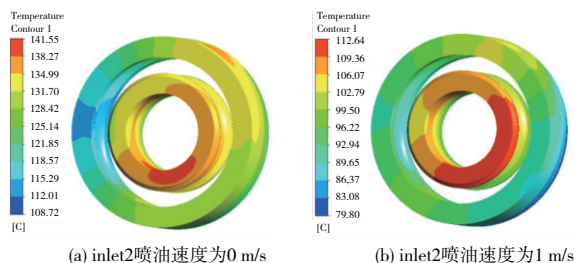


图4 轴承内外圈壁面温度分布对比

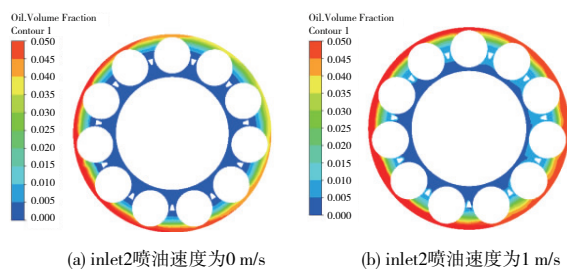


图5 轴承中截面滑油分布对比

油液体积分数有明显的升高,滑油沿轴承周向的分布更为均匀;轴承内、外圈壁面的温度均有较大幅度的降低,以壁面平均温度来计,内圈从134.51 °C降低到了104.31 °C,外圈从125.70 °C降低到了93.65 °C。附加喷油嘴可以改善轴承内部的润滑及冷却状况,提高轴承的散热性能,这是因为附加喷油嘴从另一侧对轴承进行补充喷射润滑,相比没有附加喷油嘴情况下,轴承内部滑油含量明显增多。

2.2 轴承转速对滑油及温度分布的影响

在inlet1、inlet2的喷油速度分别为6 m/s和1 m/s的情况下,分别令轴承转速为6 000 r/min、8 000 r/min、10 000 r/min、12 000 r/min和14 000 r/min,轴承内部的滑油及温度分布结果对比如图6、图7和图8所示。

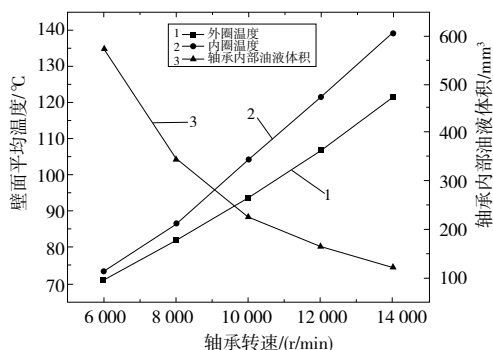


图6 轴承内部油液体积及内外圈壁面平均温度

由图6、图7和图8可以看出,随着轴承转速

的升高,轴承内部滑油的含量逐渐减少,轴承内部平均油液体积分数逐渐降低,轴承内、外圈壁面的温度均逐渐上升。这是因为转速越高,滑油受到的离心力越大进而甩向轴承外圈并从轴承两端面甩离轴承,故而轴承内部滑油含量减少,从而导致冷却散热性能变差,并且转速越高轴承产热也越严重,这两种效果综合作用会使得轴承更容易产生热失效。

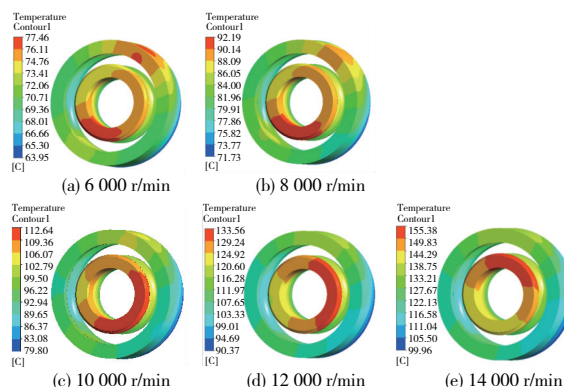


图7 轴承内外圈壁面温度分布对比

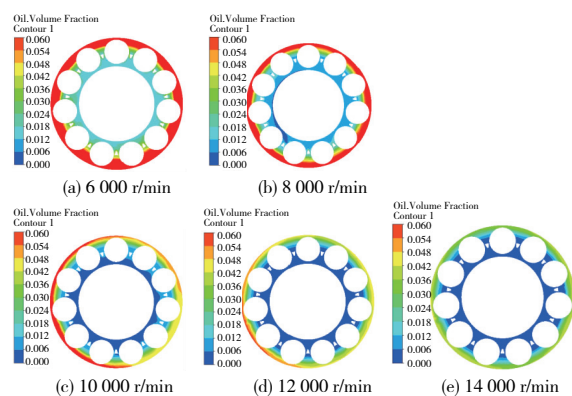


图8 轴承中截面滑油分布对比

2.3 喷油速度对滑油及温度分布的影响

在轴承转速为10 000 r/min、inlet1的喷油速度为6 m/s的情况下,分别令inlet2的喷油速度为1 m/s、2 m/s、3 m/s、4 m/s和5 m/s,轴承内部的滑油及温度分布结果对比如图9、图10和图11所示。

由图9、图10和图11可以看出,随着inlet2的喷油速度的增加,轴承内部滑油的含量逐渐增多,轴承内部平均油液体积分数逐渐升高,轴承内、外圈壁面的温度均逐渐下降。这是因为在inlet2喷嘴孔径不变的情况下,喷油速度越大,喷油流量就越大,在轴承转速一定的情况下,会有更多含量的滑油贮存在轴承内部,从而增强对轴承

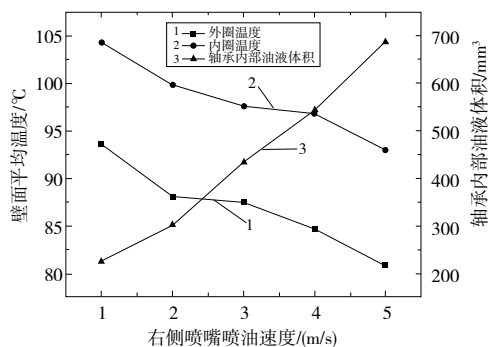


图9 轴承内部油液体积及内外圈壁面平均温度

的润滑冷却效果,提高轴承的散热性能。

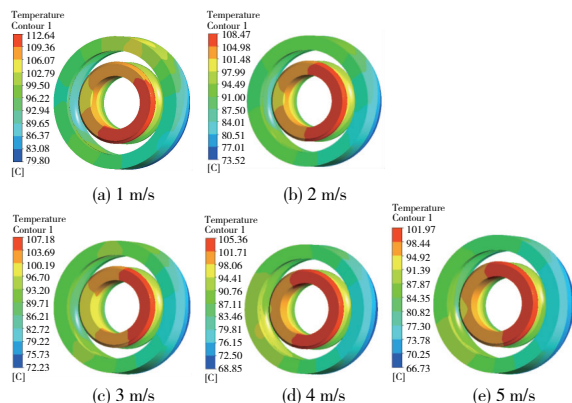


图10 轴承内外圈壁面温度分布对比

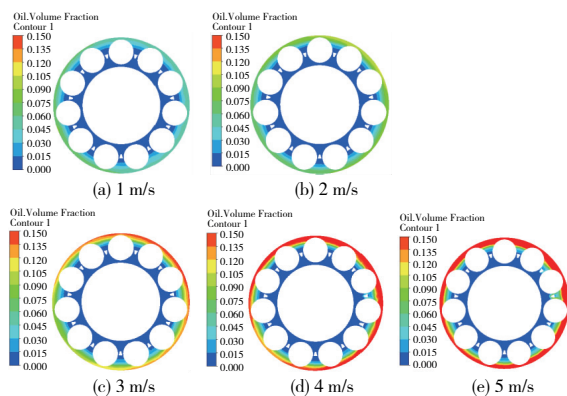


图11 轴承中截面滑油分布对比

3 结语

本文基于VOF多相流模型、RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型以及MRF模型,建立了左右双侧混合喷油润滑球轴承的热流耦合模型,采用CFD软件Fluent计

算得到了轴承内部的滑油分布及内外圈壁面的温度分布,并分析了附加喷油嘴、轴承转速及喷油速度对滑油及温度分布的影响规律,具体结论如下:

1) 附加喷油嘴可以改善轴承内部的润滑及冷却状况,提高轴承的散热性能,降低轴承内、外圈壁面的温度。

2) 轴承转速越高,产热越严重并且冷却散热性能较差,轴承内、外圈壁面的温度越高,更容易使得轴承产生热失效。

3) 在一定范围内,喷嘴喷油速度越大,对轴承的润滑冷却效果越强,可以提高轴承的散热性能,轴承内、外圈壁面的温度越低。

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.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 侯潇男. 球轴承环下润滑油气两相流动及换热特性研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2021.
- [5] LI M, LU F X, BAI X Q, et al. Heat-flow coupling variation in double-row tapered-roller bearings during the loss of lubrication process[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2022, 236(13): 7500-7510.
- [6] 龚金科,田应华,贾国海,等. 涡轮增压器轴承体耦合传热的数值仿真[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2015,42(4):7-12.
- [7] 牛鹏,孙启国,吕洪波. 基于Fluent的油气两相射流仿真分析[J]. 机械制造与自动化,2013,42(2):91-93.
- [8] 王福军. 计算流体动力学分析——CFD软件原理与应用[M]. 北京:清华大学出版社,2004.
- [9] 江帆,黄鹏. Fluent高级应用与实例分析[M]. 北京:清华大学出版社,2008:9-11.
- [10] 王孟. 直升机中减飞溅润滑两相流动及传热研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2021.

收稿日期:2024-01-29