

文章编号: 1000-8055(2013)03-0629-07

轴承腔油气两相流数值模拟的试验验证

汪友勇, 王锁芳, 艾俊峰, 李 斌

(南京航空航天大学 能源与动力学院, 南京 210016)

摘 要: 为探索一种适于模拟轴承腔油气两相流流动特性的数值计算模型, 建立了一套简化结构的轴承腔试验装置, 通过试验研究获得了不同工况对轴承腔通风口出气比例和回油口滑油温升的影响规律. 应用 Fluent 软件, 采用 Mixture 多相流模型和 Eulerian 多相流模型分别搭配标准 $k-\epsilon$ 湍流模型和 RNG (renormalization group) $k-\epsilon$ 湍流模型对选定试验工况进行数值模拟. 对比结果表明: 当转速为 2200 r/min 时, 使用 Mixture 多相流模型搭配 RNG $k-\epsilon$ 湍流模型计算的滑油温升与试验值的相对误差仅为 2.72%, 体现了该计算模型在高转速时的精确性, 并在此基础上获得了油气两相流速度场、压力场和温度场的分布特征.

关 键 词: 轴承腔; 油气两相流; 数值模拟; 试验验证; 多相流模型; 湍流模型

中图分类号: V233.4

文献标志码: A

Experimental verification of numerical simulation of oil-air two-phase flow in bearing chamber

WANG You-yong, WANG Suo-fang, AI Jun-feng, LI Bin

(College of Energy and Power Engineering,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: In order to search a reasonable numerical model to simulate the flowing characteristic of the oil-air two-phase flow in a bearing chamber, a simplified test rig was set up. Various rules of air flow proportion at the vent and oil temperature rise at the scavenger under different operating conditions were obtained through this experimental investigation. Based on Mixture multiphase model and Eulerian multiphase model with standard $k-\epsilon$ turbulence model and RNG (renormalization group) $k-\epsilon$ turbulence model respectively, the universal computational fluid dynamics software Fluent was used to simulate the two-phase flow in a bearing chamber under some given operating conditions. The comparison shows that the relative error of oil temperature rise between the test result and the computational result under Mixture multiphase model with RNG $k-\epsilon$ turbulence model is only 2.72 percent when rotate speed is 2200 r/min. Therefore, this computational model is accurate at high speed, based on which the distribution characteristics of oil-air two-phase flow velocity field, pressure field and temperature field are acquired.

Key words: bearing chamber; oil-air two-phase flow; numerical simulation; experimental verification; multiphase model; turbulence model

收稿日期: 2012-03-28

网络出版地址: http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2297.V.20130326.1743.201303.629_022.html

作者简介: 汪友勇 (1989—), 男, 安徽马鞍山人, 硕士生, 主要从事航空发动机轴承腔热分析研究.

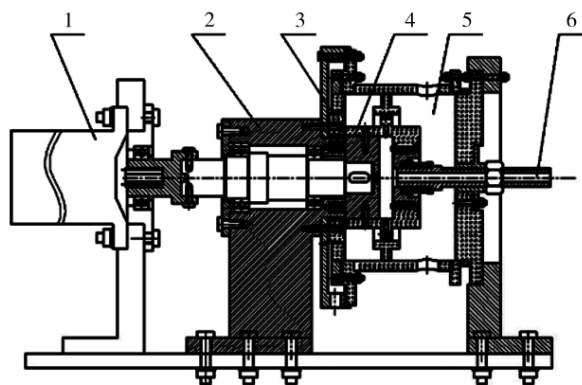
航空发动机的轴承腔是指包容发动机主支点轴承的容腔^[1],通常由承力机匣、密封装置、供油管路、回油管路、通气管路及附件功率提取轴等部件组成,其主要功能是保证轴承润滑后滑油不会外泄至其他高温区引发着火现象,从而确保主支点轴承能正常稳定的工作。

现代航空发动机一般采取环下供油方式对轴承进行冷却和润滑^[2],滑油润滑完轴承后会在自身离心力的作用下甩入轴承腔内,从而与密封处泄露至腔内的空气形成复杂的旋转油气两相流。对于涡轮附近的轴承腔而言,由于其所处环境温度较高,腔内不恰当的油气体积比会导致油气两相流形成稳态或过渡态的易燃混合物,容易出现轴承腔过热甚至腔内着火事故^[3],直接影响着发动机的安全可靠。因此,开展轴承腔油气两相流的研究工作,分析其流动换热特性,对轴承腔工作性能的改善和航空发动机润滑效率的提高有着重大意义。

国外关于轴承腔油气两相流的研究工作主要围绕着腔内油滴的产生与运动、油膜的厚度与速度等微观方向展开^[4-5],很少从宏观流域角度进行分析。Glahn等^[6-8]先后对油滴从旋转圆盘边缘、旋转圆柱体径向孔和旋转圆柱体轴向通道甩出的现象进行了试验研究,循序渐进地讨论了不同工作条件下油滴自轴承部件甩入腔内的运动特征。Farrall等^[9-10]从薄油膜假设理论出发,建立了油膜运动的控制方程,并在此基础上研究了腔内油滴与油膜的相互作用过程,提出了油滴油膜之间质量传递和动量传递的计算模型。国内的研究尚处于起步阶段,应伟等^[11]利用人工神经网络和DNA(deoxyribonucleic acid)编码技术对轴承腔油气两相润滑介质的流动状态进行辨识研究。李斌等^[12-13]则从多相流数值模拟的角度出发,计算分析了轴承腔油气两相流的流动换热特性。

本文以某型发动机后支点轴承腔为原型,在不违背两相流形成机理的基础上,对腔内轴承、腔体结构和供油供气系统等方面进行了适当简化,建立了轴承腔两相流旋转试验台,如图1所示。试验研究了转速、供气量和供油量对通风口出气比例(指通风口出气流量与进气流量之比)及回油口滑油温升(指回油口滑油温度与进油温度之差)的影响规律,并采用不同的多相流模型和湍流模型对选定试验工况进行了数值模拟,分析比较计算结果和试验结果,最终选取一种合理的计算模型对轴承腔内油气两相流的速度场、压力场和温度

场的分布特征进行了讨论分析。



1 电动机; 2 主支座; 3 进气装置; 4 转子;
5 轴承腔; 6 供油管

图1 试验台结构示意图

Fig. 1 Configuration of test rig

1 试验

1.1 试验系统和原理

目前,国内针对轴承腔油气两相流的流动换热特性研究工作主要集中在理论分析方面,试验研究尚鲜见于著。本文开展的试验研究旨在验证、确立数值模拟的计算模型,为后续复杂结构的轴承腔油气两相流研究工作奠定重要的经验指导基础。试验系统主要由旋转试验台、供气系统、供油系统、加热系统和测量系统构成。图2为腔内油气两相流形成原理的示意图,从图中可见,密封处泄露至腔内的气体由离心式空气压缩机提供,经过管道、进气阀和流量计等从腔体左端进入轴承腔内。润滑油从油箱经过供油泵、管道和流量计等由

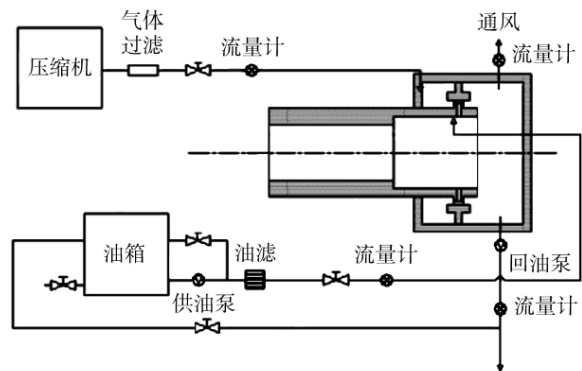


图2 油气两相流形成原理示意图

Fig. 2 Formation principle of the oil-air two-phase flow

腔体右端的中间管道供至“轴承内圈”下方,再从“轴承”上开设的12个三通小孔在自身离心力作用下甩入轴承腔内,从而与泄露气体交汇形成旋转的油气两相流。

1.2 试验结果与分析

1.2.1 主要试验工况

根据现有试验设备,试验过程中主轴转速控制在800~2700 r/min范围内,进气量为7~15 m³/h,供油量为8.5~11.5 L/min,腔内壁采用康铜加热膜通电加热,热流密度为4000 W/m²。试验主要工况如表1所示。

表1 主要试验工况

Table 1 Main operating conditions

工况	范围
转速/(r/min)	800~2700
供气量/(m ³ /h)	7~15
供油量/(L/min)	8.5~11.5
壁面热流密度/(W/m ²)	4000

1.2.2 通风口出气比例的变化规律

图3显示了几种典型工况下通风口出气比例随转速变化的影响规律。从图中可以看出,随着转速的增加,通风口出气比例明显增加。这是因为腔内气体在高转速情况下更易被甩向壁面,虽然部分气体会经回油口流出,但由于回油口处滑油阻力作用相对较大,气体更多从通风口排出。

图3(a)表明在相同供气量下,随着供油量的增加,通风口出气比例呈上升趋势。这是因为增加

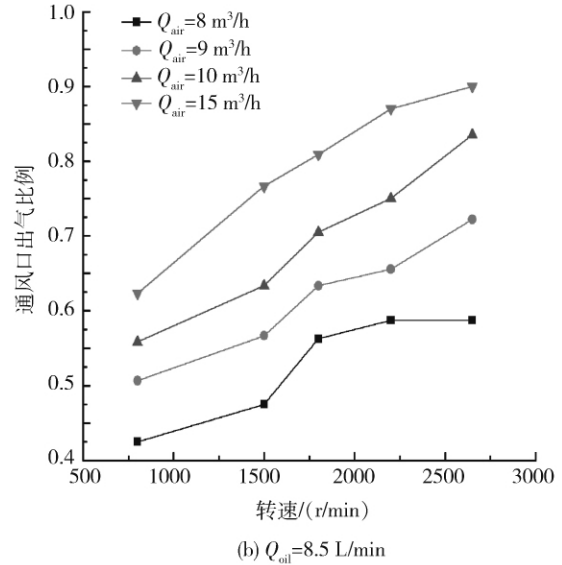
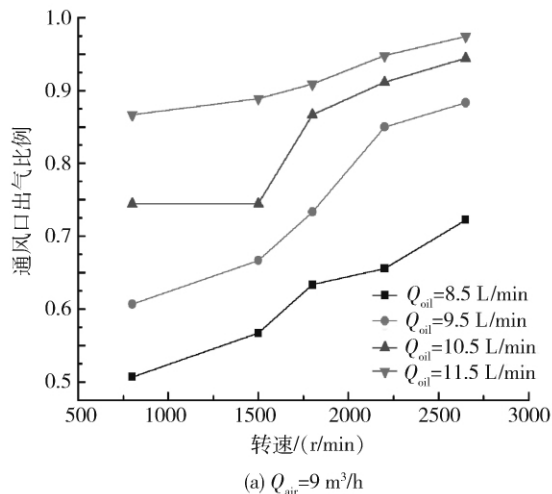


图3 通风口出气比例随转速变化曲线

Fig. 3 Variation in the proportion of air flow at the vent with rotational speed

的滑油会增加回油口处气体流动的阻力,且增大了腔体内外压差,使得气体从通风口流出的比例有所增加。图3(b)表明在相同供油量的情况下,通风口出气比例随供气量的增加而增加。这也是由于空气在回油口处流阻较大的原因,回油口主要用来回油,这里流出的空气量有限,故当进气流量增大时,从通风口流出的气体流量也会相应增大。

1.2.3 回油口滑油温升的变化规律

图4显示了几种典型工况下回油口滑油温升随转速变化的影响规律。从图中可见,随着转速的增加,回油口滑油温升明显增加。这是因为转速升高时,滑油在离心力的作用下会破碎成更细小的液滴,从而增加了其与腔壁的接触面积和接触时间,使得滑油在离开回油口前能够接受更多的壁面加热量。

图4(a)表明在相同供气量下,供油量越大,回油口滑油温升越小。这是由于在壁面加热量一定的情况下,滑油量的增加会导致单位质量滑油吸收的热量减少,进而导致滑油温升下降。图4(b)表明在相同供油量下,供气量越大,回油口滑油温升也越小。这是因为气体流量的增加会减少滑油与加热壁面接触的机会,同时气体流量的增加会带走更多的壁面热量,从而使得滑油的加热量相应减少。

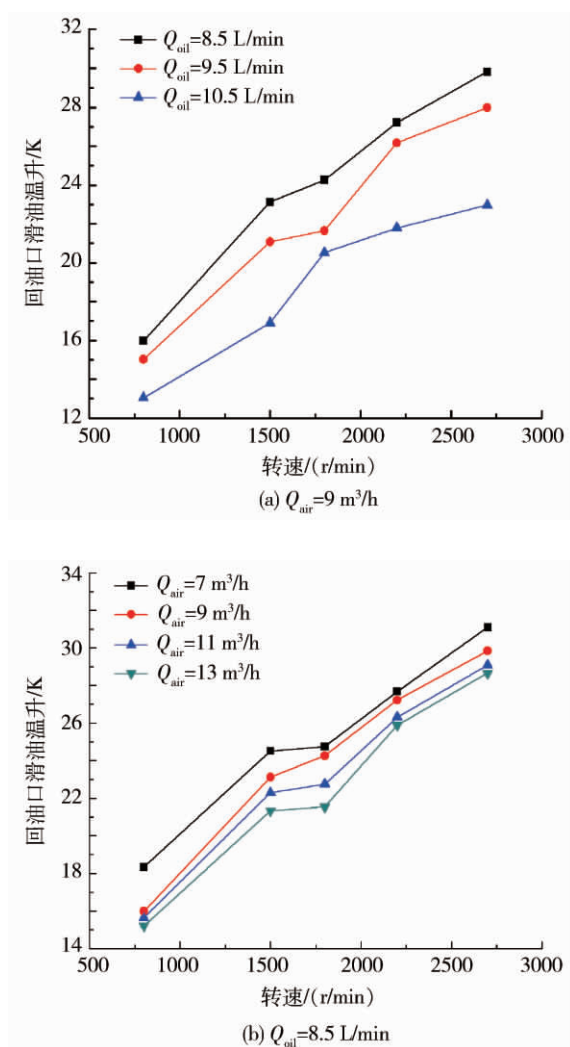


图4 回油口滑油温升随转速变化曲线

Fig. 4 Variation in the temperature raise of oil at the scavenge with rotational speed

2 数值计算模型的验证

2.1 多相流数值计算模型

Fluent 中基于经典连续介质力学方法的多相流模型^[14-15]有: Mixture 模型、Eulerian 模型、DPM(dispersed phase model)及 VOF(volume of fluid)模型. 其中 DPM 不考虑离散相对连续流体相运动的影响, 只适用于离散相体积分数小于 10% 的情况, 而 VOF 模型则主要是用于求解存在分层或自由界面的多相流. 由于轴承腔内的油气两相流流动情况复杂, 无法事先估算出自由界面存在的位置和离散相的体积分数, 因此这两种模型均不适用.

Eulerian 模型将离散相与连续流体相均看作连续介质, 分别对各相进行单独计算, 每相都有单独的守恒方程, 求解精度高, 适用性强. 但代价是

计算量大, 稳定性差, 易出现收敛困难问题. Mixture 模型其实是 Eulerian 模型的一种折中模型, 适用于求解离散相分布较广或界面规律未知的多相流. 此模型考虑了离散相与连续流体相的速度差, 连续性、动量及能量方程中的物性参数采用的是各相的平均值, 它比 Eulerian 模型少解一部分方程, 具有易收敛和计算量小等优点. 本文采用 Eulerian 模型和 Mixture 模型分别搭配标准 $k-\epsilon$ 湍流模型及 RNG(renormalization group) $k-\epsilon$ 湍流模型对试验中的选定工况进行数值模拟.

2.2 计算工况和计算网格

2.2.1 计算工况

为了减少计算量, 在所有试验工况中仅针对供气量为 $9 \text{ m}^3/\text{h}$, 供油量为 9.5 L/min 展开数值计算, 具体计算工况如表 2 所示. 把计算结果与相应工况下的试验结果进行分析比较, 便可得出适宜的计算模型.

表2 计算工况

Table 2 Computational conditions

工况	范围
转速/(r/min)	800~2700
供气量/(m^3/h)	9
供油量/(L/min)	9.5
壁面热流密度/(W/m^2)	4000

2.2.2 计算网格

轴承腔结构虽已做适当简化, 但某些区域仍相对复杂, 本文采用结构化网格与非结构化网格相结合的方式对计算域进行网格生成, 并对靠近壁面处的网格进行了局部加密, 图 5 所示为左腔室壁面网格加密示意图. 经过网格独立性验证, 轴承腔总网格数约为 90 万左右.

2.3 验证结果与分析

一般情况下, 对于旋转的多相流问题, 计算和试验都难以得出精确稳定的结果. 又由于测量过程中测量仪表准确度、测量环境及测量方法等因素限制, 测量值与真值之间难免会存在一定的误差. 因此, 本文只针对计算值与试验值对比曲线的增长趋势进行相关定性分析, 图 6(a)、图 6(b)分别为 4 种计算模型下的通风口出气比例和回油口滑油温升与相应试验数据的对比曲线.

从图 6 中可见 4 种计算模型的计算结果均与

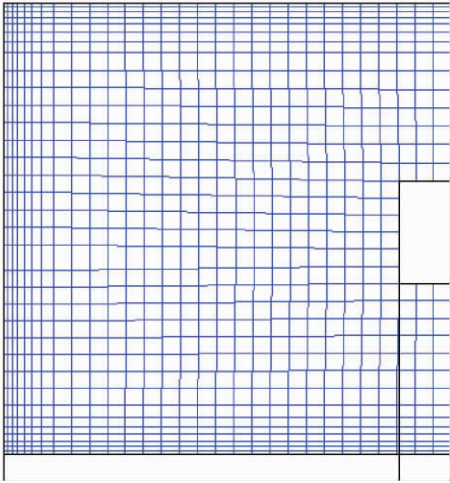


图 5 左腔室壁面网格加密图
Fig. 5 Grid near the left chamber wall

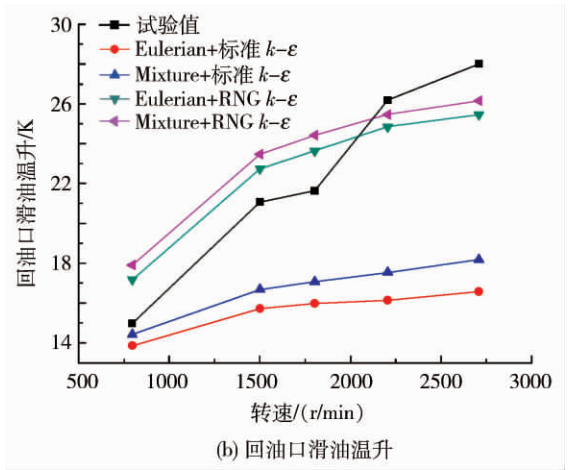
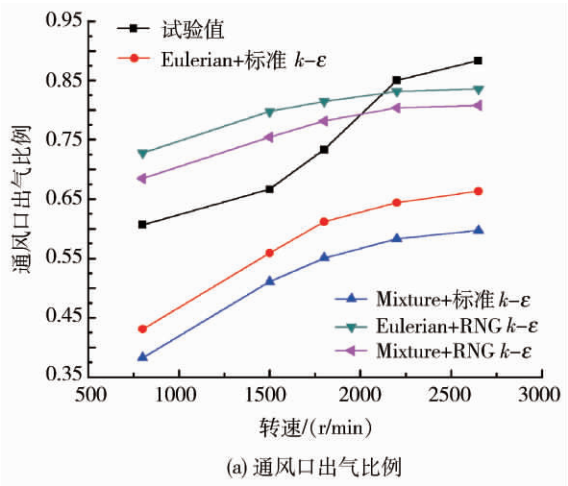


图 6 计算值与试验值的对比曲线
Fig. 6 Comparison between simulation and experimentation

试验结果增长趋势较为一致.但是,容易发现在高转速工况下 RNG $k-\epsilon$ 湍流模型的计算结果与试验结果吻合度更高一些,这是由于 RNG $k-\epsilon$ 湍流模型能较好的模拟高转速时腔内出现的强旋流现象,而发动机实际工作过程中一般都处于较高转速状态.表 3 列出了转速为 2 200 r/min 时各模型下的计算值相对试验值的误差.

从图 6 中还可发现,Mixture 模型和 Eulerian 模型的计算结果比较接近,但 Mixture 模型比 Eulerian 模型计算得到的回油口滑油温升稍高,这在指导轴承腔工程设计时可以给出更大的安全域度.另外,Eulerian 模型求解方程较多且复杂,收敛速度慢,计算工作量大.综上,采用 Mixture 模型搭配 RNG $k-\epsilon$ 湍流模型对轴承腔内旋转两相流进行数值模拟更为合理.

表 3 相对误差
Table 3 Relative error

计算模型	出气比例/%	滑油温升比/%
Eulerian+标准 $k-\epsilon$	24.26	38.18
Mixture+标准 $k-\epsilon$	31.43	32.88
Eulerian+RNG $k-\epsilon$	2.17	5.04
Mixture+RNG $k-\epsilon$	5.45	2.72

3 油气两相流特征分析

依据上述数值模拟的试验验证结果,本文获得了 Mixture 模型搭配 RNG $k-\epsilon$ 湍流模型下转速为 2 700 r/min 时腔内油气两相混合平均量的速度场、温度场和压力场,如图 7 所示.并分别对其分布特征展开相关分析.

图 7(a)为速度场的轴承腔中间垂直截面云图,从图中可见,左腔室的平均速度相对右腔室的平均速度较大,这是由于空气是从腔体左端进入腔体,此处的两相流相对右腔室有着较高的轴向速度,使得整体速度也较高.从图中还可看出,主轴上方的流体速度沿径向呈变小趋势,这是由于沿径向不同流体层通过黏性作用形成旋转库特流动,主轴的转动带动相邻流体层运动,与主轴最近的流体层速度越大.

图 7(b)为压力场的轴承腔中间垂直截面云图,从图中可见,混合流体的静压沿径向逐层升高,这是因为主轴高速旋转时,混合流体受到较大的离心力作用,从而向轴承腔壁面处逐渐堆积.从

图中还可看出流体在左腔室和右腔室的静压分布区别不大,这是由于腔体结构设计时在“轴承座”上开了 4 个扇形的减质孔,对左右腔室起了连通作用。

图 7(c) 为温度场的轴承腔中间垂直截面云图,从图中可见,滑油自“轴承”上 12 个三通小孔甩入腔内与泄漏气体混合后,温度有所上升,这是由于泄露气体温度较高,对滑油具有加热作用。从图中还可看出,腔内整体的两相流温度分布比较均匀,没有出现较大温度梯度,说明轴承腔内各处换热特性相当。右腔室中心的流体温度略高,原因在于该部分流体在腔内停留时间较长,换热比较充分。

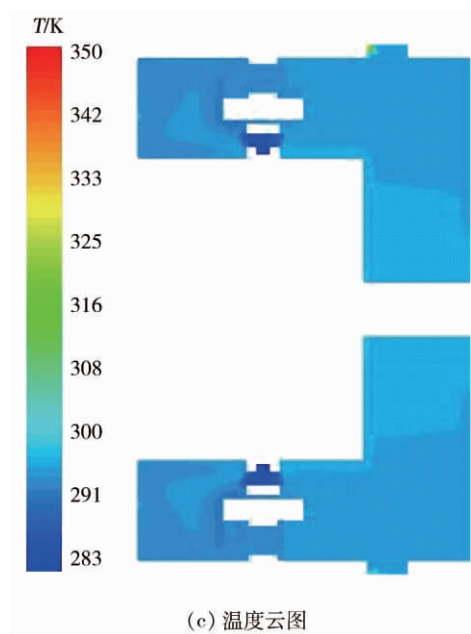
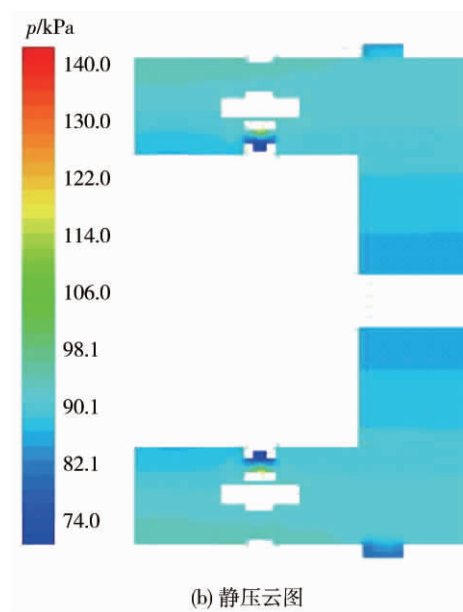
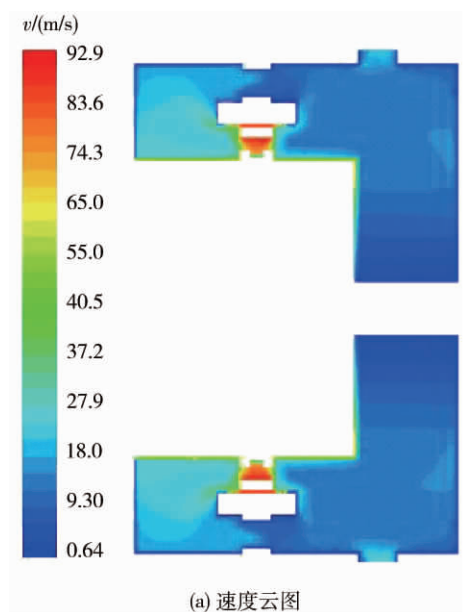


图 7 主要物理场分布云图

Fig. 7 Distribution of main physical field

4 结 论

本文设计搭建了简化的轴承腔试验系统,试验研究了不同工况对通风口出气比例和回油口滑油温升的影响规律。采用 Fluent 软件对选定试验工况进行数值模拟,分析比较计算结果与试验结果,最终选取一种较合理的计算模型对腔内油气两相流的主要物理场分布特征进行了讨论分析,得出以下主要结论:

- 1) 试验结果表明:供油量与供气量保持不变时,通风口出气比例随转速增加明显增加;转速与供油量不变时,通风口出气比例随供气量增加而增加;转速与供气量不变时,通风口出气比例随供油量增加也增加。
- 2) 试验结果表明:供油量与供气量保持不变时,回油口滑油温升随转速增加逐渐升高,一般保持在 10~30 K 范围内。转速与供油量不变时,回油口滑油温升随供气量增加而降低;转速与供气量不变时,回油口滑油温升随供油量增加也降低。
- 3) 分析比较计算值与试验值发现:高转速工况下 Mixture 多相流模型搭配 RNG $k-\epsilon$ 湍流模型在求解轴承腔内的旋转两相流时能给出与试验结果比较吻合的计算结果,且计算量较为合理。
- 4) 获得了转速为 2 700 r/min 时 Mixture 多相流模型搭配 RNG $k-\epsilon$ 湍流模型下轴承腔内油气两相混合平均量的速度场、压力场和温度场,并对各自的分布特征进行了分析总结。

参考文献:

- [1] 林基恕,常春江.航空发动机设计手册(第12册):传动及润滑系统[M].北京:航空工业出版社,2002.
- [2] 陈观慈.航空发动机主轴高速滚动轴承热分析[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2008.
CHEN Guanci. Thermal analysis of high-speed rolling bearing used in main shaft of aeroengine[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2008. (in Chinese)
- [3] 林基恕,张振波.21世纪航空发动机动力传输系统的展望[J].航空动力学报,2001,16(2):108-114,118.
LIN Jishu, ZHANG Zhenbo. Prospects of aeroengine power transmission system in the 21st century[J]. Journal of Aerospace Power, 2001, 16(2): 108-114, 118. (in Chinese)
- [4] Gorse P, Busam S, Dullenkopf K. Influence of operating condition and geometry on the oil film thickness in aero-engine bearing chambers[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2006, 128(1): 103-110.
- [5] Williams J. Thin film rimming flow subject to droplet impact at the surface[D]. United Kingdom: The University of Nottingham, 2008.
- [6] Glahn A, Busam S, Blair M F. Droplet generation by disintegration of oil films at the rim of rotating disk[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2002, 124(1): 117-124.
- [7] Glahn A, Busam S, Blair M F. Disintegration of oil films emerging from radial holes in a rotating cylinder[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2003, 125(4): 1011-1020.
- [8] Glahn A, Busam S, Blair M F. Disintegration of oil jets emerging from axial passages at the face of a rotating cylinder[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2003, 125(4): 1003-1010.
- [9] Farrall M, Simmons K, Hibberd S. A numerical model for oil film flow in an aeroengine bearing chamber and comparison to experimental data[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2006, 128(1): 111-117.
- [10] Farrall M, Hibberd S, Simmons K. The effect of initial injection conditions on the oil droplet motion in a simplified bearing chamber[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2008, 130(1): 1-7.
- [11] 应伟,冯艳,王锁芳.基于小波和神经网络的流型辨识研究[J].机床与液压,2008,36(10):61-62.
YING Wei, FENG Yan, WANG Suofang. Research on discrimination gas-liquid two phase flow patterns based on wavelets and BP neural networks[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2008, 36(10): 61-62. (in Chinese)
- [12] 李斌,王锁芳,刘勇.轴承腔内油气两相流动与换热的数值模拟[J].重庆理工大学学报:自然科学版,2010,24(11):38-43.
LI Bin, WANG Suofang, LIU Yong. Numerical simulation of air-oil two phase flow and heat transfer in a bearing chamber[J]. Journal of Chongqing University of Technology: Natural Science, 2010, 24(11): 38-43. (in Chinese)
- [13] 李斌,王锁芳,刘勇.轴承腔综合分析平台与两相流数值模拟[C]//中国航空学会第二届航空发动机数值仿真与数字化设计学术交流会论文集.北京:中国航空学会动力专业分会,2011:130-135.
- [14] 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.
- [15] 张凯,王瑞金,王刚. Fluent 技术基础与应用实例[M].北京:清华大学出版社,2010.