

轴承腔油气两相介质流动与热分析

李炎军^{1,2}, 杨 富², 刘振侠¹, 张朝阳², 吕亚国¹

(1. 西北工业大学 动力与能源学院, 西安 710129;
2. 中国航空发动机集团有限公司 四川燃气涡轮研究院, 成都 610500)

摘 要: 为获得轴承腔油气两相介质流动与热分析计算方法,探究轴承腔油气两相介质流动换热规律。以某发动机轴承腔结构为对象,运用 CFD 方法分析轴承腔中两相介质流动速度、温度分布、体积分数和传热系数分布。基于试验获取轴承腔内外不同位置局部温度,利用温度梯度法计算热流获得传热系数。结果表明:两相介质的流动速度随径向高度增大呈现先增大后减小趋势,在无量纲径向高度为 0.6 时流速最大。轴承腔中转子及壁面之间的区域两相介质的温度随径向坐标增大呈现先减小后增大趋势。轴承腔内滑油主要分布在回油池及轴承腔外壁面上,回油池旁边其剪力分量和重力方向一致区域的油膜较薄,局部传热系数较小,其方向相反区域的油膜较厚,局部传热系数较大。

关 键 词: 轴承腔; 油气两相介质; 油膜; 流动分析; 换热分析; 传热系数
中图分类号: V233.4 **文献标志码:** A

Flow and thermal analysis of oil air two-phase medium in bearing chamber

LI Yanjun^{1,2}, YANG Fu², LIU Zhenxia¹,
ZHANG Chaoyang², LÜ Yaguo¹

(1. School of Power and Energy,
Northwestern Polytechnical University, Xi' an 710129, China;
2. Sichuan Gas Turbine Establishment,
Aero Engine Corporation of China, Chengdu 610500, China)

Abstract: To obtain the flow and thermal analysis methods of oil air two-phase medium in bearing chamber, and find out the rule of flow and heat transfer in oil air two-phase medium, the flow velocity, temperature distribution, volume fraction and heat transfer coefficient distribution of two-phase medium in the engine bearing chamber were analyzed by CFD methods. Based on the local temperature in different positions of the bearing chamber, the heat transfer coefficient was obtained by calculating the heat flow under the temperature gradient method. The results showed that: the flow velocity of two-phase medium increased first then decreased with the increase of radial height, its maximum appeared when the dimensionless radial height was 0.6. The temperature of two-phase medium in the area between the rotor and the wall in the bearing chamber decreased first and then increased during the increase of radial coordinates. The oil in the bearing chamber was mainly distributed on the oil scavenger structure and the outer wall of the bearing chamber. The oil film in the area of the

收稿日期: 2020-07-08
作者简介: 李炎军(1984—),男,研究员,博士生,主要从事航空发动机滑油系统技术研究。

引用格式: 李炎军,杨富,刘振侠,等. 轴承腔油气两相介质流动与热分析[J]. 航空动力学报,2021,36(3):606-615. LI Yanjun, YANG Fu, LIU Zhenxia, et al. Flow and thermal analysis of oil air two-phase medium in bearing chamber[J]. Journal of Aerospace Power, 2021, 36(3): 606-615.

same shear component and gravity direction nearby the oil scavenger structure was thinner, the local heat transfer coefficient was smaller; the oil film in the area at opposite direction was thicker, and the local heat transfer coefficient was larger.

Key words: bearing chamber; oil air two-phase medium; oil film; flow analysis; heat transfer analysis; heat transfer coefficient

日益增加的推质比、可靠性、维修性以及寿命和经济效益等严苛需求下,航空发动机需要具有更高的压比和涡轮进口燃气温度、更高的轴承与齿轮转速和更少的冷却空气流量。发动机轴承腔作为发动机润滑系统和支承系统的重要组成部分,其优良的润滑和换热性能对提升润滑系统的效能,保证轴承支承及传动系统的工作安全有着非常重要的作用。发动机轴承腔的结构和工作状态非常特殊,其腔内润滑油和空气形成复杂的油气两相流动状态,轴承腔内油气两相介质流动状态的科学处理影响到轴承腔润滑与换热设计的正确性和有效性^[1-2]。因此国内外工程界和学术界在轴承腔油膜厚度分布、油膜运动和两相介质流动换热等方面开展了大量的研究。

德国卡尔斯鲁厄大学 Wittig 等^[3]最早利用试验装置开展了轴承腔油气两相介质流动研究,应用超声波技术对轴承腔内油膜厚度进行测量,分析了一定工况条件下油膜厚度分布。Glahn 等对油膜流动状态进行分析得到油膜流动速度和厚度的理论公式,应用激光多普勒测速仪(LDV)对油膜流动速度和厚度进行测量,与理论值进行比较得到油膜运动状态规律^[4],开展了油膜传热的初步分析^[5]。Davide 等^[6]采用 VOF(volumn of fluid)方法和 $k-\epsilon$ RNG(renormalization group)湍流模型,分析了两相交界面处理方法,捕捉了发动机轴承腔内油膜与空气的交界面,得到在腔壁与回油管道中滑油流动状态。Farrall 等^[7]以数值分析手段模拟油滴运动、碰撞以及沉积为油膜的过程,分析油膜的分布和流动特征。Matthias 等^[8]利用数值仿真和试验研究相结合的手段,对某试验件典型结构轴承腔内的两相介质流动和不同的回油结构对回油效率的影响进行了研究。在轴承腔传热系数研究方面 Wittig 等^[3]利用有限元法和温度梯度法对两种不同宽高比轴承腔结构的传热系数进行计算,得到轴承腔轴向上传热系数相对误差的分布状态。Busam 等^[9]研究了轴承腔结构对传热系数的影响,运用温度梯度法测量了热通量和传热系数。

国内西北工业大学的陈国定、陈薄等^[10-13],任

国哲、吕亚国等^[14-15]以及四川燃气涡轮研究院的李炎军等^[16]对轴承腔流动仿真数值计算模型、轴承腔油滴运动沉积规律等进行较为系统的研究,探究典型结构轴承腔油滴及油膜运动规律,获得腔内两相流场特性及内壁面油膜厚度、周向速度分布。南京航空航天大学的汪友勇等^[17]结合数值仿真和模型试验,研究了不同工况对轴承腔通风口排气比例和回油口滑油温升的影响规律。西北工业大学的胡剑平等^[18]对发动机轴承腔内壁换热模拟试验件开展试验与数值模拟研究,得到了滑油油膜对轴承腔内壁换热的影响规律。

基于前人研究结果发现,部分数值仿真模型过于简化,部分研究工作聚焦于轴承腔局部,从而使其分析方法在工程中的应用受到了较大的局限性。另外关于轴承腔油气两相介质流动的研究主要集中在典型结构的模型试验件上,而对于真实轴承腔结构以及腔内滑油/空气混合物的换热规律等特征如何应用到实际的轴承腔仿真中,并在有限的计算资源下如何快速得到工程适用的计算结果,相关工作开展比较缺乏。

本文以某发动机轴承腔结构为研究对象,构建一种腔内油气与壁面油膜耦合流动换热分析模型,在典型工况条件下对某型轴承腔中两相介质的流动换热进行了数值分析,结合典型发动机轴承腔壁面换热试验研究,一定程度验证了轴承腔内部两相介质流动及换热分析方法的有效性,获得了油膜与壁面传热系数分布规律。

1 研究对象介绍

本文研究的轴承腔为一种典型的单支点支撑轴承腔结构,其结构简图如图 1 所示。有关该轴承腔分析中使用到的结构参数如表 1 所示,分析的工况条件如表 2 所示。

该轴承腔由一个圆柱滚子轴承支撑,分为轴承前腔和轴承后腔。在轴承座和涡轮转子之间采用石墨密封进行封严,前腔和后腔之间通过一圈周向分布的圆形通道将通过密封泄漏进轴承腔的空气和供往前腔的滑油排到后腔,与后腔的油气汇合后经由通风管和回油管排出。

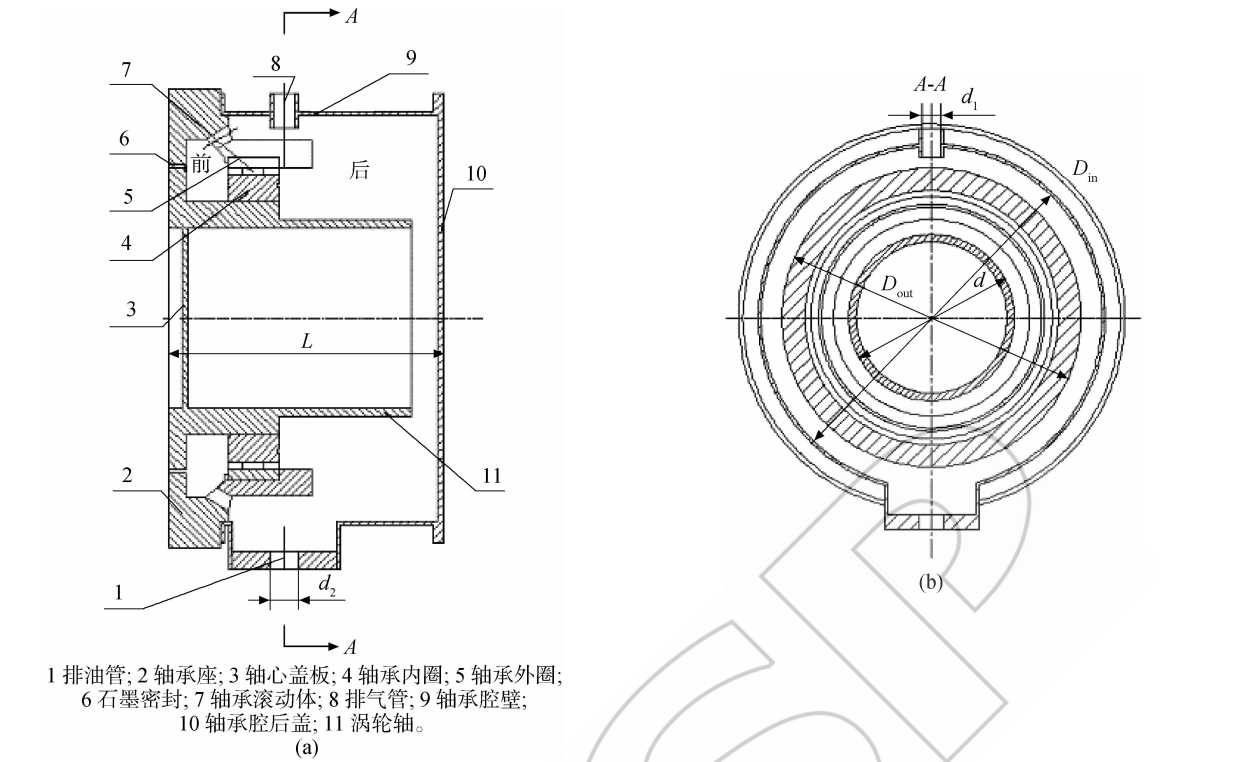


图 1 轴承腔简图

Fig. 1 Schematic diagram of bearing chamber

表 1 某轴承腔的结构参数

Table 1 Structural parameters of a bearing chamber

参数	数值	参数	数值
转子外径 d_s/mm	156	排油管直径 d_2/mm	40
轴承腔内径 D_{in}/mm	226	轴承腔轴向长度 L/mm	150
轴承座外径 D_{out}/mm	198	轴承腔高度 H_b/mm	58
排气管直径 d_1/mm	18	轴承腔宽度 b/mm	116

表 2 某发动机的工况条件

Table 2 Working conditions of an aero-engine

工况	转子转速/(r/min)	进气量/(g/s)	进油量/(g/s)	进气温度/K	进油温度/K
1	11 800	0.4	89	541.0	390.0
2	12 520	0.4	89	559.8	384.3
3	13 283	0.4	89	600.4	371.0
4	14 016	0.4	89	647.8	361.7
5	14 352	0.4	89	673.6	358.3
6	14 688	0.4	89	699.0	357.4

2 试验方案介绍

根据腔内的两相流体的主要分布,取轴承腔的两个截面并简化,设置温度测点分布,如图 2。

由内置的热电偶测量离散的局部温度:壁面温度、气相温度、油相温度。为了考虑轴承腔内热流分布的三维性,分别选取轴承腔同一轴向截面的四个方向的不同位置(位置 1~位置 4)测量圆周方

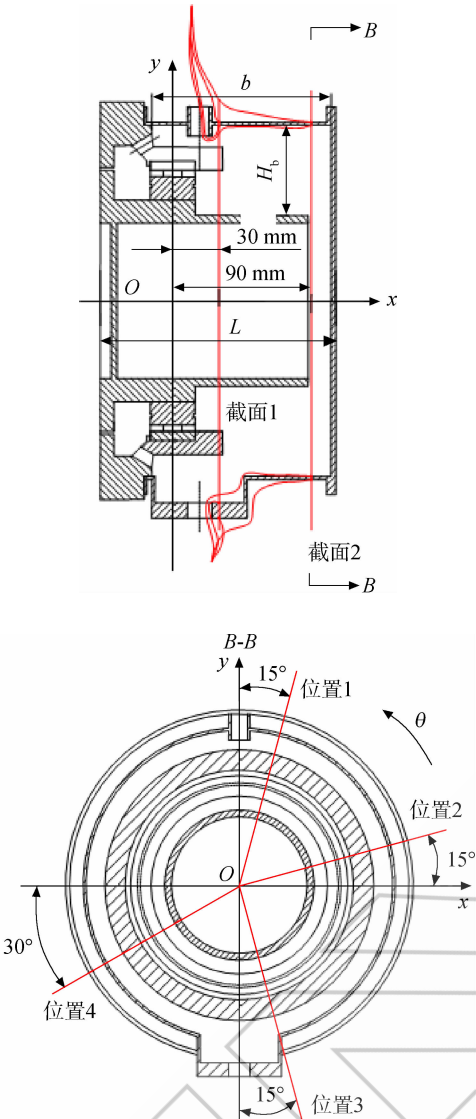


图 2 截面选取及测点布置
Fig. 2 Section and measuring point arrangement

向上的温度分布。腔体通风管和回油管布置测点,分别测量通风和回油介质温度;在轴承腔外围设置了测点以测量轴承座外围腔温度。

利用温度梯度法来测量热流获得传热系数^[18]。按照傅里叶定律,外部对腔体的交换热量为

$$dQ_1 = -\lambda_w \frac{\partial T_w}{\partial y} dA_1 \quad (1)$$

式中 dQ_1 为微元沿 y 方向的热流量; $\partial T_w / \partial y$ 为腔体壳体温度 T_w 沿 y 方向的变化率; λ_w 为壁面材料导热系数; dA_1 为腔壁换热表面单元面积。

由 $dQ_1 = dQ_2$ 与 $dA_1 = dA_2$, 通过使用牛顿冷却公式, 确定腔内油膜和壁面的传热系数如下:

$$k = \frac{dQ_2}{\Delta T dA_2} \quad (2)$$

式中 dQ_2 为对流传热量; k 为滑油与轴承腔内壁

面之间的局部平均传热系数; ΔT 为滑油与轴承腔内壁面之间的温差; dA_2 为油膜与壁面接触表面单元面积。

本文研究过程中, 沿轴向布置了两个不同的截面(截面 1 和截面 2), 通过提取两个截面上的特征参数来表征轴承腔不同位置的温度分布和传热关系。

某发动机的六种工况条件见表 2。

本文研究中的空气密度 ρ_g 为 2.92 kg/m^3 , 比热容 c_g 为 $1004.4 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$, 动力黏度 μ_g 为 $1.84 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$, 导热系数 λ_g 为 $0.0261 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$ 。滑油密度 ρ_l 为 971 kg/m^3 , 比热容 c_l 为 $2000 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$, 动力黏度 μ_l 为 $0.0485 \text{ Pa} \cdot \text{s}$, 导热系数 λ_l 为 $0.1358 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$ 。

3 数值计算模型及计算流程

对计算区域进行网格划分, 如图 3 所示。本文采用的轴承腔中滑油/空气两相介质流动分析的计算流程见图 4。

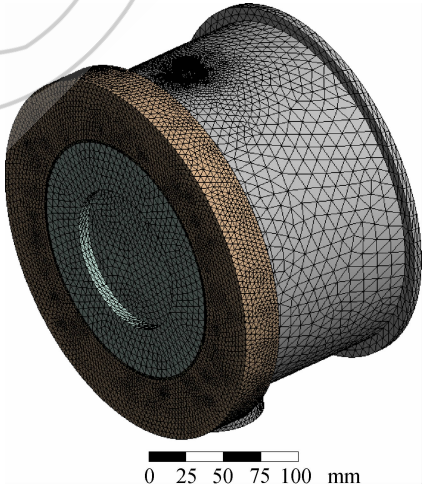


图 3 计算域网格模型
Fig. 3 Grid model of computational domain

3.1 沉积油膜初始平均厚度和流动速度计算

本文通过油滴运动分析、碰撞分析和沉积分析后, 获得油滴沉积质量和动量转移量, 经过计算处理后得到壁面油膜初始平均厚度和流动速度。

根据单根油矢沉积质量 m_c 及滑油密度 ρ_l , 计算单根油矢的沉积体积为

$$V_c = \frac{m_c}{\rho_l} \quad (3)$$

假设沉积油膜均匀分布在轴承腔内表面, 那么单根油矢在轴承腔内表面中覆盖的面积为

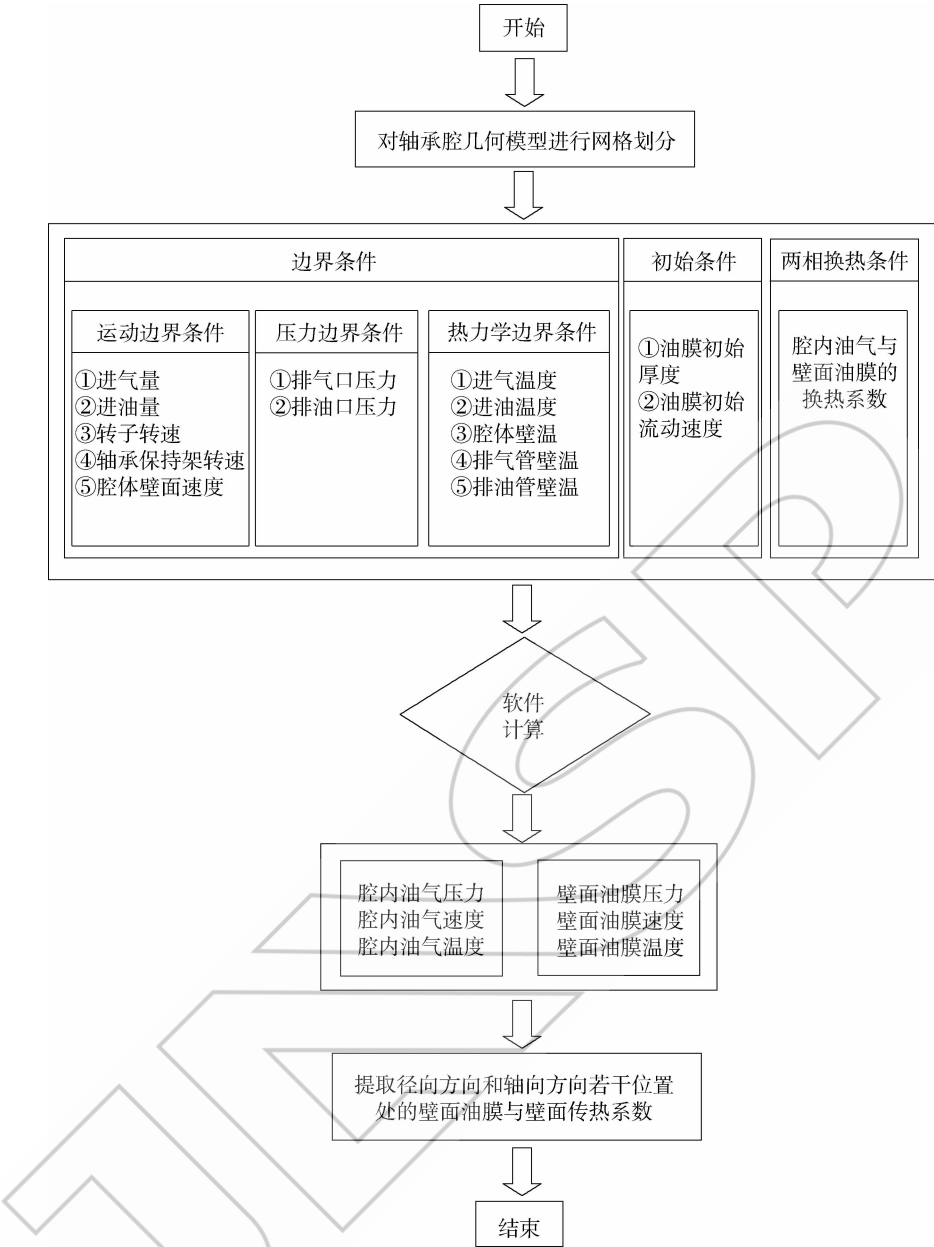


图 4 流动分析计算框图

Fig. 4 Computational block diagram for flow analysis

$$S' = \frac{2\pi r'b}{n_1} \tag{4}$$

式中 r' 是轴承腔半径, $r' = r_s + H_b$, r_s 是转子半径, H_b 是轴承腔高度; b 是轴承腔宽度, n_1 是油矢根数。

油矢根数 n_1 和转子转速 n_s 相关, 参照文献 [19] 中的油矢根数, 拟合出对应润滑油物理参数下转子直径的油矢根数与转子转速之间关系式为

$$n_1 = 0.0407n_s + 35.7 \tag{5}$$

壁面油膜厚度 H_f 为

$$H_f = \frac{V_c}{S'} \tag{6}$$

由动量守恒可知, 沉积油膜动量转移量 P_c

在数值上等于油膜流动速度 u_f 和 m_c 的乘积。因此, u_f 的表达式为

$$u_f = \frac{P_c}{m_c} \tag{7}$$

式(6)和式(7)提供了壁面油膜流动的平均状态, 是轴承腔油气两相流动分析的初始条件。

3.2 滚动轴承摩擦热的计算

滚动轴承因滚动体高速旋转而产生摩擦热的计算公式为^[20]

$$Q_{bfr} = CZ_b\rho_l l^2 u_{bc}^3 (1.17 - 1.7H_x) \tag{8}$$

式中 Z_b 为滚动体数量; l 为滚子长度; u_{bc} 为轴承保持架圆周速度, 其计算公式为式(9); C 为总阻

力系数; H_x 为轴承径向游隙。

$$u_{bc} = \frac{\pi(D_m - D_r)}{120} n_s \tag{9}$$

式中 D_m 为轴承节圆直径; D_r 为滚子直径; n_s 为转子转速。

3.3 腔内油气与壁面油膜之间的传热系数计算

在进行某型轴承腔换热分析时, 为确定轴承腔壁面与壁面油膜之间的传热系数, 需要先给定腔内油气与壁面油膜之间的传热系数。根据文献 [21] 的研究, 等效选取腔内油气与壁面油膜传热系数为

$$h_{\text{eff},1} = 0.023 \varphi_{\text{eff}} \varphi_l \frac{\lambda_l}{l_{\text{eff},1}} Re_l^{0.8} Pr_l^{0.4} \left(1 + \frac{u_{\text{eff}}}{u_l}\right)^{0.25} \tag{10}$$

式中 φ_{eff} 、 φ_l 分别为腔内油气介质和滑油在控制体中的体积分数; $l_{\text{eff},1}$ 为界面长度; λ_l 为滑油的导热系数; Re_l 为滑油雷诺数, $Re_l = \frac{\rho_l u_l H_l}{\mu_l}$; Pr_l 为滑油普朗特数, $Pr_l = \frac{h_{p,l} \mu_l}{\lambda_l}$; u_{eff} 为腔内油气介质流动速度。

4 计算结果及讨论

4.1 滑油/空气两相介质流动的速度分布

图 5(a) 和图 5(b) 以及图 5(c) 和图 5(d) 分别为慢车(工况 1)和设计点(工况 6)某型轴承腔中两个轴向截面上的四个圆周方位两相介质速度 (v) 随无量纲径向位置 (r^*) 的变化关系。四个圆周方位分别是过位置 1、位置 2、位置 3、位置 4 的四条线段。

从图 5 可以看出, 截面 1 及截面 2 有两条直线两相介质的流动速度表现出先增长后降低的趋

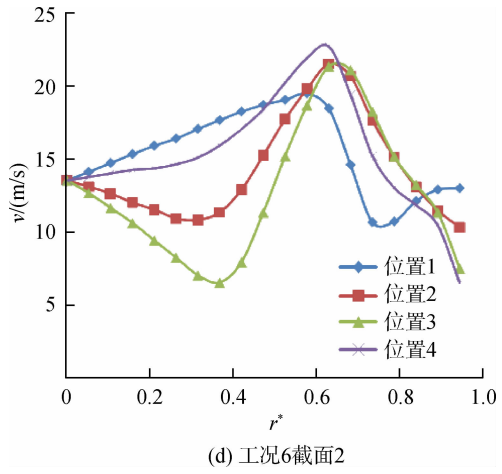
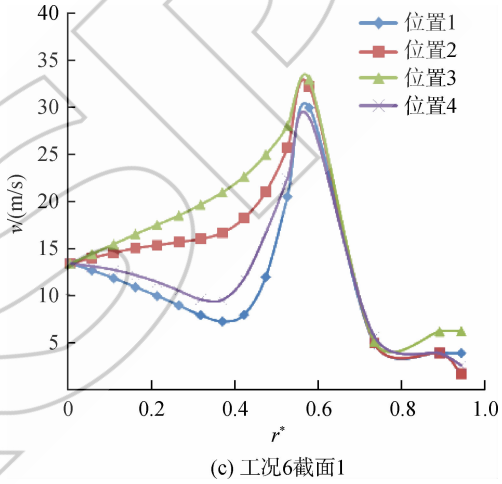
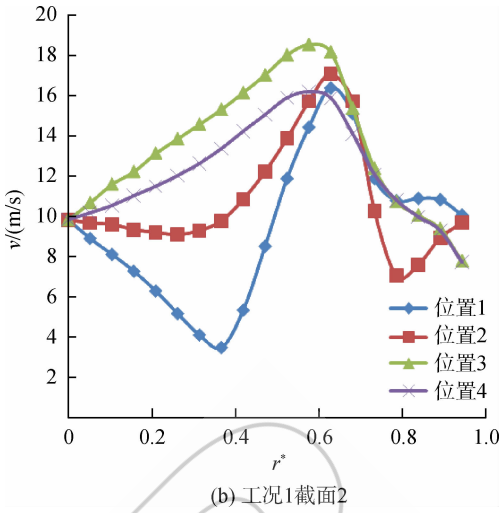
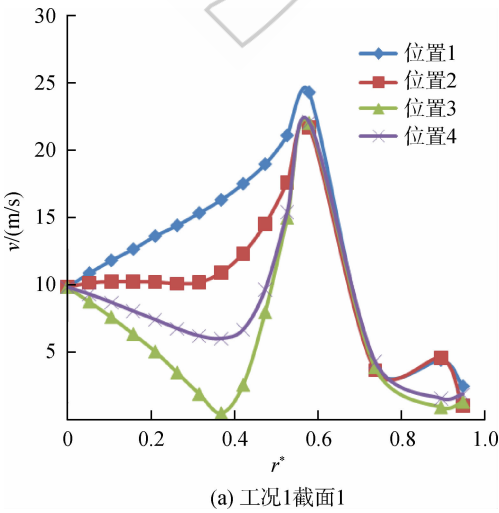


图 5 某型轴承腔两相介质速度与径向位置的关系
Fig. 5 Relationship between velocity of two-phase medium and radial coordinates in a bearing chamber

势, 在无量纲径向位置为 0.6 时, 由于接近转子表面故而流速最大, 若无量纲径向位置继续增大则两相介质流动速度不断降低, 这是由于两相介质远离转子表面靠近轴承腔壁面(静止壁面)的缘

故; 截面上的其余两条直线则表现出先降低后增大然后再降低的变化规律。四条曲线流速的变化规律差异在于有两条曲线在无量纲径向位置在 $0 \sim 0.6$ 范围内两相介质流速出现了下降, 这是由于转子高速旋转时在空心转子内部产生了旋涡, 旋涡的出现导致两相介质流速降低。

同时对比不同工况的两相介质流速随着无量纲径向位置的变化规律, 可以看出慢车状态截面 1 的位置 3 及位置 4 处于轴心旋涡中, 而截面 2 的位置 1 及位置 2 处于轴心旋涡中; 设计状态截面 1 的位置 1 及位置 4 处于轴心旋涡中而截面 2 的位置 2 及位置 3 处于轴心旋涡中。故而分析认为随着转子转速的增大, 轴心旋涡发生了一定程度的移动。

对比两个截面的两相介质流速径向分布来看, 截面 1 的两相介质流速最大值要明显高于截面 2。这是由于截面 1 穿过了转子而截面 2 并未穿过, 故而截面 2 受转子的搅动作用影响较小, 故而速度峰值要略低于截面 1。

4.2 滑油/空气两相介质流动的温度分布

从两相介质的温度随径向位置的变化情况来看, 轴承腔转子内部温度分布比较均匀并无较大的差异, 但轴承腔中转子及壁面之间的区域两相介质的温度随着径向坐标的增大先减小后增大, 如图 6 所示。这是因为轴心区域无滑油流动使得该区域两相介质无较大的热量交换故而温度较高且分布差异不大; 轴承腔中介于转子外表面及轴承腔静止壁面之间的区域, 由于存在滑油的冷却作用故而两相介质的温度存在一定程度的降低, 同时受到高温壁面的加热作用使得近壁面区域两相介质的温度有一定程度的上升。随着转子转速的增大, 转子内部的温度不断增大, 这与发动机状态增大, 其轴心区域壁面周边环境温度升高且从

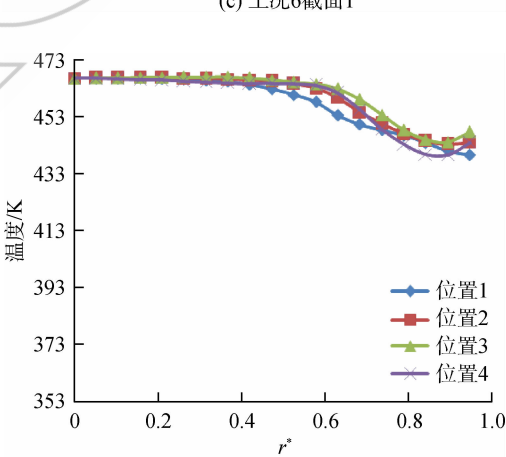
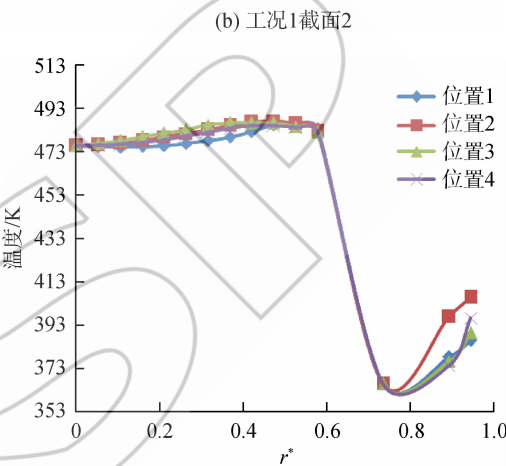
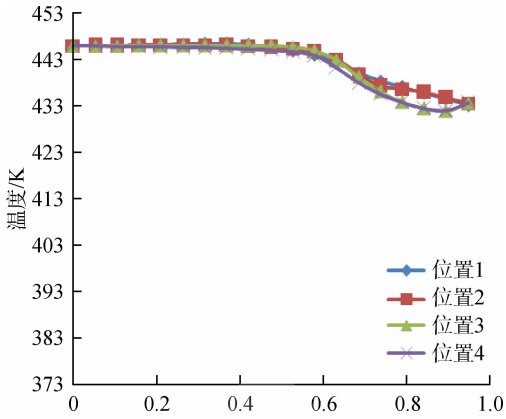
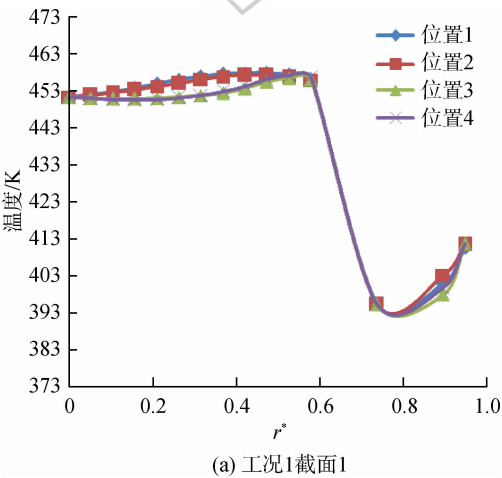


图 6 某型轴承腔中两相介质温度与径向位置的关系
Fig. 6 Relationship between the temperature of two-phase medium and radial coordinates in a bearing chamber

密封处泄漏进轴承腔内部气体温度增大有关。

4.3 两相介质中滑油相在腔内的分布状态

图 7 给出轴承腔内不同位置处滑油体积分数 (φ_{li}) 的分布。滑油在轴承腔中分布不均匀, 受转子离心力及滑油泵的抽吸作用, 轴承腔内的滑油主要分布在回油池及轴承腔外壁面上。前腔中滑

油的分布相对后腔较多,这是因为前腔的滑油需经由轴承座上的一排椭圆形回油孔流到后腔,从而从回油口排出。回油孔的节流作用,导致滑油在前腔有部分堆积。

通过在圆周方向上的滑油分布可以看出,在回油池左侧滑油的堆积量明显高于右侧(见图 7(b))。由于转子顺时针旋转致使滑油流动过程中受到空气剪力及重力的双重作用,在回油池左侧滑油重力与空气剪力作用相反使滑油流速降低进而滑油堆积严重,而回油池右侧滑油受到的空气剪力及重力方向一致使得滑油堆积量明显减少。

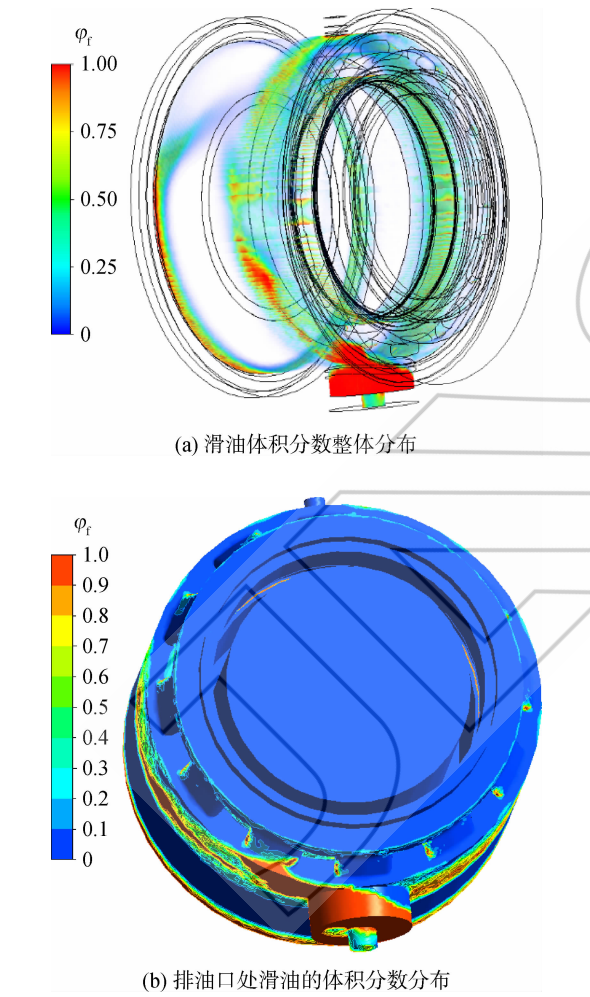
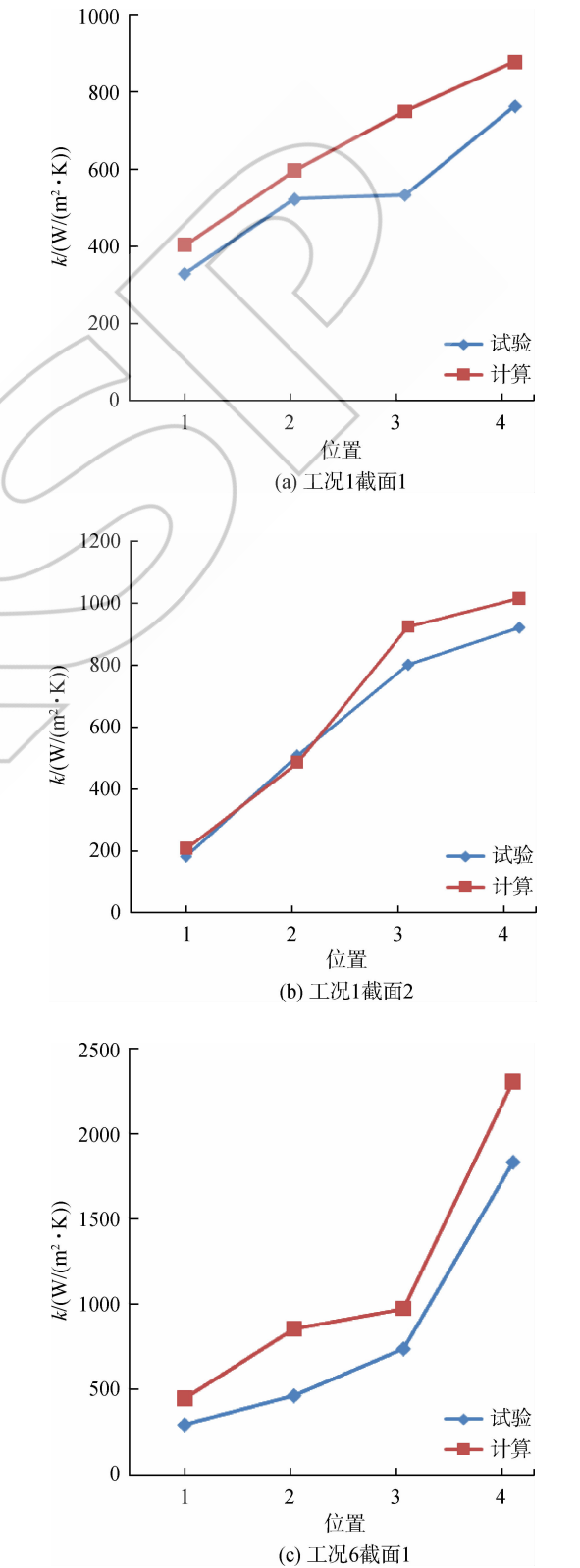


图 7 轴承腔内不同位置处滑油的体积分数的分布
Fig. 7 Distribution of lubricating oil volume fractions at different positions in bearing chamber

4.4 腔内壁面油膜传热系数的分布

通过仿真软件对轴承腔壁面截面 1 和截面 2 上四个位置处的传热系数进行了提取并且按照式(2)通过试验获得的传热系数进行了对比,对比情况见图 8。

图 8 呈现出仿真和试验结果趋势走向基本一致,仿真和试验结果吻合性较好,验证了本文仿真分析方法的正确性。可以看出,伴随发动机状态的增大,在同一个径向截面位置平均传热系数增大,因为发动机状态的增大,轴承腔外围环境温度升高,导致轴承腔内外温差增大,同时发动机状态



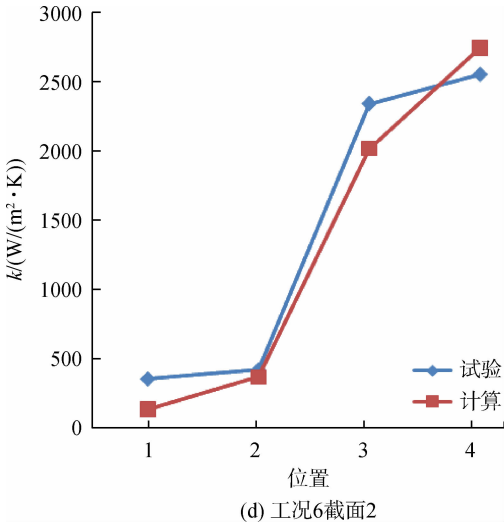


图 8 壁面传热系数计算值与试验值的对比

Fig. 8 Comparison between calculation and test results for averaged heat transfer coefficients

的增大, 主轴转速升高, 滑油运动并沉积到壁面形成的油膜运动速度增大, 油膜流速及轴承腔内外温差增大致使传热系数增大。从不同轴向截面位置的平均传热系数分析也可以看出, 位置 1 和位置 2 的平均传热系数相对较小, 位置 4 的平均传热系数最大。这是因为在轴承腔流场中位置 1 和位置 2 的滑油沉积和流动情况相对较弱, 而在位置 3 和位置 4 的滑油流动和沉积效果明显, 从而换热能力显著增强。这也一定程度上验证了第 4.3 节流场分析结果的正确性。

5 结 论

本文研究获得了轴承腔内部两相介质流动分析和壁面传热系数的分析方法, 可以较为快速地获得轴承腔内部的传热系数, 且通过和试验结果对比验证了分析方法的正确性, 为工程实际开展轴承腔流动换热分析提供了依据。同时通过对典型轴承腔内部两相介质流动和壁面传热系数仿真分析获得以下结论:

1) 轴承腔内两相介质的速度从轴心流动至转子表面时呈增长趋势, 远离转子表面接近轴承腔壁面时流速呈下降趋势, 空心轴内部存在旋涡导致部分区域气相介质的速度从轴心流动至转子表面时呈先减小后增大的趋势。

2) 滑油在轴承腔中分布不均匀, 轴承腔内的滑油主要分布在回油池及轴承腔外壁面上。受到空气剪力及重力的双重作用, 回油池附近剪力分量及重力方向一致的区域油膜较薄, 说明该区域的换热相对较弱; 剪力分量及重力方向相反的区域

油膜较厚, 说明在该区域的换热相对较强。

3) 随着发动机状态的增大, 由于油膜厚度的分布及油膜滞留轴承腔时间长短的影响, 在同一个径向截面位置平均传热系数增大, 环境温度对腔内滑油温度的影响更加显著。

参考文献:

[1] KLINGSPORN M. Advanced transmission and oil system concepts for modern aero-engines[R]. ASME Paper GT2004-53578, 2004.

[2] 李国权. 航空发动机滑油系统的现状及未来发展[J]. 航空发动机, 2011, 37(6): 49-62.

LI Guoquan. Present and future of aeroengine oil system [J]. Aeroengine, 2011, 37(6): 49-62. (in Chinese)

[3] WITTIG S, GLAHN A, HIMMELSBACH J. Influence of high rotational speeds on heat transfer and oil film thickness in aero-engine bearing chamber[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 1994, 116(4): 395-401.

[4] GLAHN A, WITTIG S. Two-phase air/oil flow in aero engine bearing chambers; characterization of oil film flow[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 1996, 118(7): 578-583.

[5] GLAHN A, WITTIG S. Two-phase air/oil flow in aero-engine bearing chambers; assessment of an analytical prediction method for the internal wall heat transfer[J]. International Journal of Rotating Machinery, 1999, 5(3): 155-165.

[6] DAVIDE P, MORVAN H, DULLENKOPF K, et al. Modelling of an aero engine bearing chamber using enhanced CFD technique[R]. ASME Paper GT2011-45635, 2011.

[7] FARRALL M, HIBBERD S, SIMMONS K, et al. Prediction of air/oil exit flows in a commercial aero-engine bearing chamber[J]. Journal of Aerospace Engineering, 2006, 220(3): 197-202.

[8] MATTHIAS B K, CORINA H, HANS J B, et al. Evaluation of the volume-of-fluid method for the numerical modelling of an aero engine bearing chamber[R]. ISABE-2015-21248, 2015.

[9] BUSAM S, GLAHN A, WITTIG S. Internal bearing chamber wall heat transfer as a function of operating conditions and chamber geometry[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2000, 122(4): 314-320.

[10] 陈国定, 陈薄, 刘亚军, 等. 航空发动机轴承腔含油滴油气两相介质的流动模拟[J]. 西北工业大学学报, 2011, 29(1): 62-67.

CHEN Guoding, CHEN Bo, LIU Yajun, et al. Exploring through numerical simulation lubrication flow inside an aeroengine bearing chamber with film/droplet/air interactions taken into consideration[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2011, 29(1): 62-67. (in Chinese)

[11] 陈国定, 陈薄, 王军, 等. 轴承腔中油滴尺寸分布和沉积特性[J]. 机械工程学报, 2011, 47(10): 139-144.

CHEN Guoding, CHEN Bo, WANG Jun, et al. Oil droplet size distribution and deposition properties in bearing chamber[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(10): 139-144. (in Chinese)

[12] 陈薄, 陈国定, 王涛. 考虑油滴变形和二次油滴效应的轴承腔壁面油膜流动分析[J]. 航空学报, 2013, 34(8): 1980-1989.

CHEN Bo, CHEN Guoding, WANG Tao. Flow characteristics analysis of wall oil film with consideration of oil droplet deformation and secondary oil droplet deposition in aeroengine bearing chamber[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2013, 34(8): 1980-1989. (in Chinese)

[13] 孙恒超, 陈国定, 陈薄. 泛结构条件下轴承腔油气两相流动的模化方法[J]. 航空动力学报, 2014, 29(8): 1987-1995.

SUN Hengchao, CHEN Guoding, CHEN Bo. Modeling method of bearing chamber oil/air two-phase flow under multi-geometrical conditions [J]. Journal of Aerospace Power, 2014, 29(8): 1987-1995. (in Chinese)

[14] 任国哲, 刘振侠, 赵静宇, 等. 基于 DPM 与 VOF 方法轴承腔内滑油瞬态特性对比[J]. 航空计算技术, 2016, 46(1): 11-15.

REN Guozhe, LIU Zhenxia, ZHAO Jingyu, et al. Motion of wall oil film with consideration of oil-air coupled heat and mass transfer in bearing chamber[J]. Aeronautical Computing Technique, 2016, 46(1): 11-15. (in Chinese)

[15] 吕亚国, 张美华, 刘振侠, 等. 航空发动机轴承腔油气两相流动数值研究及验证[J]. 航空动力学报, 2014, 29(11): 2751-2757.

LÜ Yaguo, ZHANG Meihua, LIU Zhenxia, et al. Numerical study and validation for two-phase flow of oil and gas in aero engine bearing cavity [J]. Journal of Aerospace Power, 2014, 29(11): 2751-2757. (in Chinese)

[16] 李炎军, 陈博, 张朝阳. 轴承腔润滑油沉积特性分析[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2015, 28(6): 14-20.

LI Yanjun, CHEN Bo, ZHANG Chaoyang. Analysis of oil deposition characteristic in an aero-engine bearing chamber [J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2015, 28(6): 14-20. (in Chinese)

[17] 汪友勇, 王锁芳, 艾俊峰, 等. 轴承腔油气两相流数值模拟的试验验证[J]. 航空动力学报, 2013, 28(3): 629-635.

WANG Youyong, WANG Suofang, AI Junfeng, et al. Experimental verification of numerical simulation of oil-air two-phase flow in bearing chamber[J]. Journal of Aerospace Power, 2013, 28(3): 629-635. (in Chinese)

[18] 胡剑平, 任国哲, 易军, 等. 轴承腔内壁与油膜换热的数值模拟与试验[J]. 航空学报, 2017, 38(9): 521013. 1-521013. 11.

HU Jianping, REN Guozhe, YI Jun, et al. Numerical simulation and experiment for heat transfer between oil film and inner wall of bearing chamber[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2017, 38(9): 521013. 1-521013. 11. (in Chinese)

[19] GLAHN A, BUSAM S, BLAIR M F, et al. Droplet generation by disintegration of oil films at the rim of a rotating disk[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2002, 124(1): 117-124.

[20] 李健, 刘志全, 袁培益. 航空发动机轴承腔热状态分析模型及温度场计算[J]. 航空动力学报, 1999, 14(3): 242-246.

LI Jian, LIU Zhiquan, YUAN Peiyi. Thermal analysis models and temperature field calculation of bearing oil cavity in an aeroengine [J]. Journal of Aerospace Power, 1999, 14(3): 242-246. (in Chinese)

[21] MAQABLEH A, SIMMONS K, HIBBERD S, et al. CFD modeling of three-component air oil flow and heat transfer in a rotating annulus[C]//Proceedings of the 11th Annual Conference of the CFD Society of Canada. Vancouver, Canada; CFD Society of Canada, 2003: 256-263.

(编辑: 陈 越)