

文章编号: 2095-2163(2021)12-0116-06

中图分类号: TP319

文献标志码: B

# PUMPLINX 与 FLUENT 在轴承润滑性能计算中的比较分析

钱仲楷

(上海工程技术大学 机械与汽车工程学院, 上海 201620)

**摘要:** 径向轴承润滑性能的 CFD 分析是当前的研究热点之一。本文以 Riedel 径向轴承为对象, 分别使用 PUMPLINX 和 FLUENT 软件建立了轴承的润滑模型, 并通过试验结果验证了模型的正确性。在此基础上, 从网格处理、求解收敛性、气穴处理等多个方面, 系统的比较了两款软件在轴承润滑计算中的差异性。此外, 还计算获取了不同偏心率下轴承的润滑性能参数。结果显示, PUMPLINX 软件在网格处理方面比 FLUENT 软件更加简便, 且网格依赖性较低, 气穴区域更接近实验结果; 不同偏心率下两款软件计算结果的变化趋势基本一致, 但 FLUENT 软件计算的承载力、摩擦功耗偏大, 而泄漏量则偏小; 不同长度比下, 两款软件计算结果的变化趋势基本一致, 但 FLUENT 软件计算的承载力、摩擦功耗偏大, 而泄漏量则偏小。

**关键词:** 计算流体力学; 滑动轴承; 轴承润滑

## Comparison and analysis of PUMPLINX and FLUENT in the calculation of bearing lubrication performance

QIAN Zhongkai

(College of Mechanical and Automotive Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

**[Abstract]** CFD analysis of the lubrication performance of radial bearings is one of the current research hot topics. The paper takes Riedel radial bearings as the object, uses PUMPLINX and FLUENT to establish the lubrication model of the bearing, and verifies the validity of the model through the test results. On this basis, the differences between the two software in bearing lubrication calculations are systematically compared from the aspects of grid processing, solution convergence, and cavitation processing. In addition, the lubrication performance parameters of the bearing under different eccentricity are calculated. The results show that it is more convenient for PUMPLINX than FLUENT in grid processing where the grid dependence is lower, and the cavitation area is closer to the experimental results. The change trend of the two software calculation results under different eccentricities are basically the same, but the bearing capacity and friction power consumption calculated by the FLUENT are larger while the leakage is less. The change trend of the two software calculation results under different length diameter ratio are basically the same, but the bearing capacity and friction power consumption calculated by the FLUENT are larger, while the leakage is less.

**[Key words]** CFD; sliding bearing; bearing lubrication

## 0 引言

径向滑动轴承广泛应用于各种旋转机械中, 其润滑性能的好坏直接影响整机运行的可靠性。传统的径向轴承润滑性能分析基于 Reynolds 方程。该方程源于 N-S 方程, 但推导过程中由于引入了许多假设, 如层流、忽略体积力和惯性力作用等, 且通常无法保证气穴区域的质量守恒。因此, 求解精度存在误差, 使用范围也受到一定限制。近年来, 各种旋转机械设计要求提高, 轴承工作环境变得越来越恶劣, 在这种情况下, 通过直接求解 N-S 方程 (即 CFD 分析) 获取更为准确的轴承润滑性能变得非常迫切。

关于轴承的 CFD 分析, 国内外许多学者已经开展了相关研究。Chen 等<sup>[1]</sup>采用 CFD 方法分析了滑动轴承间隙对油膜阻尼性能的影响。GUO 等<sup>[2]</sup>使用

FLUENT 软件开展了滑动轴承和挤压油膜阻尼器的静动态特性研究。Gertzos 等<sup>[3]</sup>同样使用 FLUENT 软件分析了径向滑动轴承的润滑性能。Hu 等<sup>[4]</sup>使用 CFD 方法对具有微造型结构的滑动径向轴承进行了研究。孙雅洲等<sup>[5]</sup>利用 FLUENT 软件分析了多孔质静压径向轴承中气体的压力变化和轴承承载能力, 并求出了轴承的静态刚度数值。吕真等<sup>[6]</sup>利用 CFD 软件分析了瓦间间隙及瓦块相互之间的流场静特性, 发现瓦间间隙对流场的影响不容忽视。庞晓平等<sup>[7]</sup>利用 FLUENT 和 Comsol 软件, 通过比对圆弧轴承与非圆弧轴承的动压特性, 验证了通用膜厚方程的正确性。齐焯等<sup>[8]</sup>利用 CFD 软件分析了织构化轴承的承载性能, 得出了织构面密度与油膜承载力之间的关系曲线。苏华等<sup>[9]</sup>利用 CFD 软件分析沟槽-织构复合型滑动轴承性能, 为进一步提高轴承承载力满足大功

作者简介: 钱仲楷 (1996-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 轴承润滑性能计算。

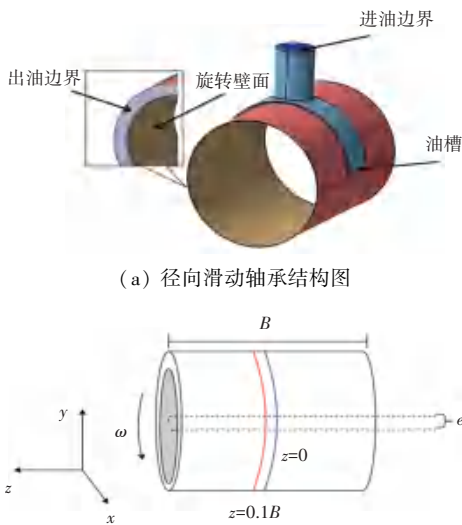
收稿日期: 2021-05-28

率滑动轴承提供了设计优化方案。卢黎明等<sup>[10]</sup>利用 FLUENT 分析了不同滑移区域下、转速与粘度对轴承承载力及气穴分布的影响。

目前,CFD 方面的研究主要基于 FLUENT 软件和 CFX 软件开展<sup>[11]</sup>,这两款软件网格处理较为复杂、气穴模型单一(目前主要为 Schnerr-Sauer 模型、Zwart-Gerber-Belamm 模型以及 Singhal 全空化模型)。PUMPLINX 作为运动机械 CFD 计算软件被广泛应用于间隙流动、泵阀甚至系统级(如润滑油系统)的 CFD 仿真中。该软件提供了大量模板网格以及多种气穴模型,从而为轴承润滑性能的 CFD 研究提供了便利。本文以径向滑动轴承为对象,系统的介绍了使用 PUMPLINX 开展轴承润滑计算的步骤,对比了 PUMPLINX 软件与 FLUENT 软件在轴承润滑计算中的差异性,为使用 PUMPLINX 软件在轴承润滑分析方面提供参考。

## 1 物理模型

选取 Riedel 径向滑动轴承为研究对象<sup>[12]</sup>,其结构如图 1 所示。该轴承为周向油槽结构,主要参数见表 1。



(a) 径向滑动轴承结构图

(b) 仿真模型的边界组成

图 1 物理模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of physical model

表 1 轴承参数

Tab. 1 Bearing parameters

轴承参数	数值
轴承半径 $R/\text{mm}$	50.146
半径间隙 $C/\mu\text{m}$	72
油槽分布周向范围/ $^\circ$	-90~90
润滑油密度 $\rho/(\text{kg}/\text{m}^3)$	840
润滑油动力粘度 $\eta/\text{Pa}\cdot\text{S}$	0.012 684

模型边界条件主要包括进油边界、出油边界、旋转壁面边界,具体设置见表 2。

表 2 边界条件设置

Tab. 2 Bearing parameters

名称	边界类型	数值
进油边界	体积流量边界	计算公式如(1)
出油边界	压力出口边界	1bar
油膜内壁	旋转壁面	
气穴压力	压力边界	$2\times 10^4\text{Pa}$

表中流量入口计算如式(1)所示:

$$Q_0 = \frac{1}{2}BH_0U \quad (1)$$

## 2 径向滑动轴承的 CFD 建模

### 2.1 控制方程

忽略温度对轴承润滑性能的影响,考虑湍流效应,轴承内的润滑油流动满足 Navier-Stokes 方程,其在直角坐标系下可表示为:

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} &= f_x - \frac{\partial P}{\partial x} + \mu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \\ \rho \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} &= f_y - \frac{\partial P}{\partial y} + \mu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \\ \rho \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} &= f_z - \frac{\partial P}{\partial z} + \mu \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

式中,  $\rho$  是润滑油密度;  $P$  是压力;  $u, w, v$  分别表示某时刻流体在某处 3 个方向上的速度分量;  $f$  是流体单位体积上所受的外力;  $\mu$  是流体的动力粘度。

### 2.2 气穴模型

在轴承工作时,油膜发散区域会出现负压,这将导致油膜破裂,从而出现气穴现象。气穴对于轴承润滑性能分析至关重要<sup>[13]</sup>,因此本研究考虑气穴效应。

PUMPLINX 软件中提供了多种气穴模型,如固定气体质量分数模型、变气体质量分数模型、溶解气体模型及全气穴模型等。根据文献[14],其中变气体质量分数模型对于轴承润滑问题最为适用。本文选用该模型模拟气穴效应,其具体表达式如下:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega(t)} \rho f_v d\Omega + \int_{\sigma} \rho ((\vec{v} - \vec{v}_\sigma) \cdot \vec{n}) f_v d\sigma = \int_{\sigma} \frac{\partial}{\partial t} D_f + \frac{\mu_l \ddot{\Omega}}{\sigma_f \varphi} \cdot (\vec{N}_{f_v} \cdot \vec{n}) d\sigma + \int_{\Omega} (R_e - R_c) d\Omega \quad (3)$$

$$R_e = C_e \rho_l \rho_v \left( \frac{2}{3} \frac{(P - P_v)}{\rho_l} \right)^{\frac{1}{2}} (1 - f_v - g_f)$$

$$R_c = C_c \rho_l \rho_v \left( \frac{2}{3} \frac{(P - P_v)}{\rho_l} \right)^{\frac{1}{2}} f_v$$

式中,  $D_f$  为蒸汽扩散系数;  $\rho_l, \rho_v$  为润滑油和气体密度;  $\vec{v}$  和  $\vec{v}_\sigma$  为速度矢量和单元控制体积速度矢量;  $g_f$  为气体质量分数;  $C_e$  和  $C_c$  分别为空化生成率和凝结率(固定常数);  $f_v$  为蒸气质量分数;  $R_e$  和  $R_c$  分别为蒸汽生成和破裂的输送源项;  $P_v$  是修正后气体饱和压力。

LUENT 软件中提供了 Schnerr-Sauer 模型、Zwart-Gerber-Belamm 模型及 Singhal 全空化模型<sup>[14]</sup>。本研究选用 Schnerr-Sauer 模型模拟气穴效应,其具体表达式如下:

$$R_e = \frac{\rho_l \rho_v}{\rho_m} \alpha (1 - \alpha) \frac{3}{R_B} \left( \frac{2}{3} \frac{P_v - P}{\rho_l} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

$$R_c = \frac{\rho_l \rho_v}{\rho_m} \alpha (1 - \alpha) \frac{3}{R_B} \left( \frac{2}{3} \frac{P - P_v}{\rho_l} \right)^{\frac{1}{2}}$$

式中,  $v$  为蒸汽相;  $\alpha$  为蒸汽体积比;  $\rho_v$  为蒸汽密度;  $R_e$  和  $R_c$  分别为蒸汽生成和破裂的输送源项;  $\rho_m$  为流体混合物的平均密度;  $\rho_l, \rho_v$  为液相与气相密度;  $P_v$  是修正后气体饱和压力。

2.3 网格划分

本文采用 PUMPLINX 软件提供的通用网格模块 (General Mesh) 和模板网格模块 (Template mesh) 对轴承几何模型进行网格划分。其中通用网格模块用于进油管路和油槽部分流体模型,而模板网格模块则用于间隙流体模型。PUMPLINX 提供的模板网格模块具有强大的间隙网格生成能力,操作时只需设置内外半径、偏心距和宽度,即可自动生成高质量间隙网格,过程简单快捷。

对于轴承几何模型,在 FLUENT 软件中,本文采用 ICEM 处理网格,其中网格类型选用 O 型网格。网格划分时,要经过几何模型 O 型剖分、网格与几何模型贴合、设定网格边界个数等一系列复杂操作才能完成,过程较繁琐。此外,网格划分质量还受个人经验的影响。

两款软件生成的轴承网格模型如图 2 所示。



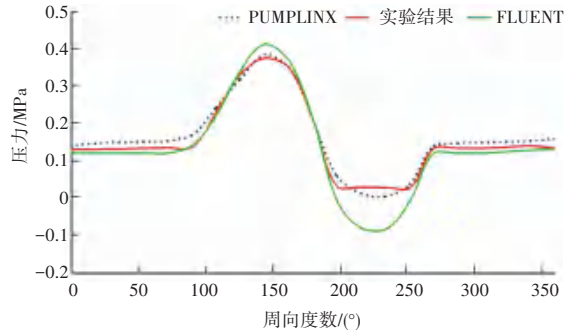
(a) PUMPLINX 软件建立的网格模型 (b) FLUENT 软件建立的网格模型

图 2 两款软件网格模型对比

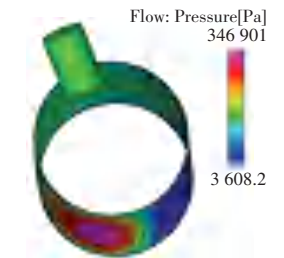
Fig. 2 Comparison of grid models of two software

2.4 模型验证

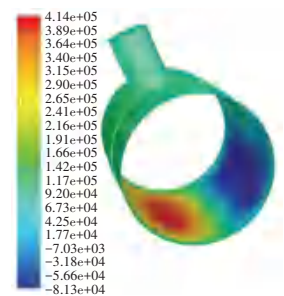
本文通过与 Riedel 轴承的实验结果对比,验证模型的准确性,结果如图 3 所示。由图可见,两款软件计算得到的油膜压力曲线及实验结果基本一致,最大油膜压力与实验结果的偏差均小于 10%,证明了本文模型的建模方法以及相关条件设置的正确性。相对于 FLUENT 软件,PUMPLINX 软件的计算结果与试验值更接近,特别是在气穴区域,表明了用变气体质量分数模型模拟气穴效应更准确。



(a) 两款软件与实验结果的油膜压力曲线对比



(b) PUMPLINX 计算所得云图



(c) FLUENT 计算所得云图

图 3 两款软件仿真结果对比

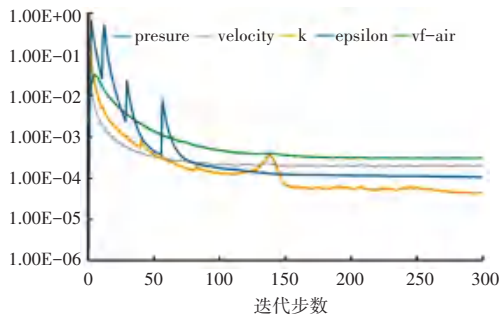
Fig. 3 Comparison of simulation results of two software

本文通过与 Riedel 轴承的实验结果对比,验证模型的准确性,结果如图 3 所示。由图可见,两款软件计算得到的油膜压力曲线及实验结果基本一致,最大油膜压力与实验结果的偏差均小于 10%,证明了本文模型的建模方法以及相关条件设置的正确性。相对于 FLUENT 软件,PUMPLINX 软件的计算结果与试验值更接近,特别是在气穴区域,表明了用变气体质量分数模型模拟气穴效应更准确。

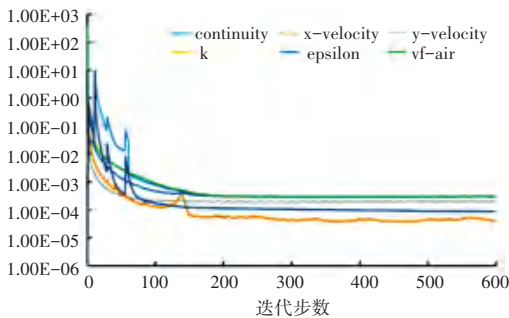
### 3 结果分析

#### 3.1 收敛性比较

FLUENT 与 PUMPLINX 软件均采用有限容积法求解 N-S 方程,其收敛精度均设置为  $10^{-4}$ 。两款软件计算收敛性曲线如图 4 所示。



(a) PUMPLINX 收敛曲线



(b) FLUENT 收敛曲线

图 4 两款软件计算收敛曲线

Fig. 4 Calculation convergence curve of two software

由图可知,两款软件都表现出较好的计算收敛性。相比于 FLUENT 软件,PUMPLINX 软件的计算收敛速度更快,这主要是由于网格处理及求解策略不同所致。

#### 3.2 网格依赖性比较

网格密度对仿真计算结果具有较大的影响,有必要对网格依赖性进行研究。表 3 为轴承参数(偏心率为 0.6、转速  $n$  为 450 r/min)、边界条件及求解

方法设置相同时,不同网格数下最大油膜压力的计算结果。从表 3 可知,FLUENT 软件对网格的依赖性较强。当周向网格小于 400 时,计算出现不收敛;而当网格数达到  $600 \times 60 \times 15$  时,计算结果才趋于定值。相对而言,PUMPLINX 软件对网格的依赖性较小,不同网格数下计算结果相差不大,与试验值比误差都在 1.03% 以内。PUMPLINX 软件针对于间隙提供了相应的模板网格及高效求解算法,进而使得其求解轴承润滑问题更加简便有效。

后续分析中,FLUENT 的网格密度设置为  $600 \times 40 \times 15$ ,而 PUMPLINX 的网格密度则设置为  $300 \times 30 \times 5$ 。

表 3 周向网格灵敏度分析

Tab. 3 Circumferential grid sensitivity analysis

网格数 ( $x, y, z$ )	$P_{\max} / 10^5 \text{ Pa}$		Dif. / %	
	FLUENT	PUMPLINX	FLUENT	PUMPLINX
(300, 30, 5)	不收敛	3.82	—	0.78
(300, 40, 5)	3.01	3.81	21.8	1.03
(300, 50, 5)	3.28	3.81	14.8	1.03
(300, 60, 5)	3.36	3.81	12.7	1.03
(300, 30, 10)	不收敛	3.82	—	0.78
(300, 30, 20)	不收敛	3.81	—	1.03
(400, 40, 5)	4.26	3.83	8.12	0.56
(500, 50, 10)	4.16	3.82	8.05	1.03
(600, 60, 15)	4.08	3.82	5.97	0.78
(700, 70, 25)	4.06	3.83	5.45	0.56
(750, 70, 30)	4.06	3.81	5.45	1.03

#### 3.3 气穴结果比较

采用文献[13]中的相同参数(气穴饱和压力为 20 kPa),两款软件计算获取的油膜气穴云图如图 5 所示。从图 5 可知,两款软件计算出的气穴结果与实验结果基本一致,但 PUMPLINX 软件所得的气穴分布及形状则更接近实验结果。气穴分布的实验结果为  $203^\circ \sim 250^\circ$ , PUMPLINX 软件所得的结果为  $210^\circ \sim 248^\circ$ ,而 FLUENT 软件所得结果则为  $200^\circ \sim 254^\circ$ 。PUMPLINX 软件计算出的气体最大体积分数是 0.245,而 FLUENT 软件计算出的气体最大体积分数则为 0.82,这与两款软件选用的空化模型不同有关。

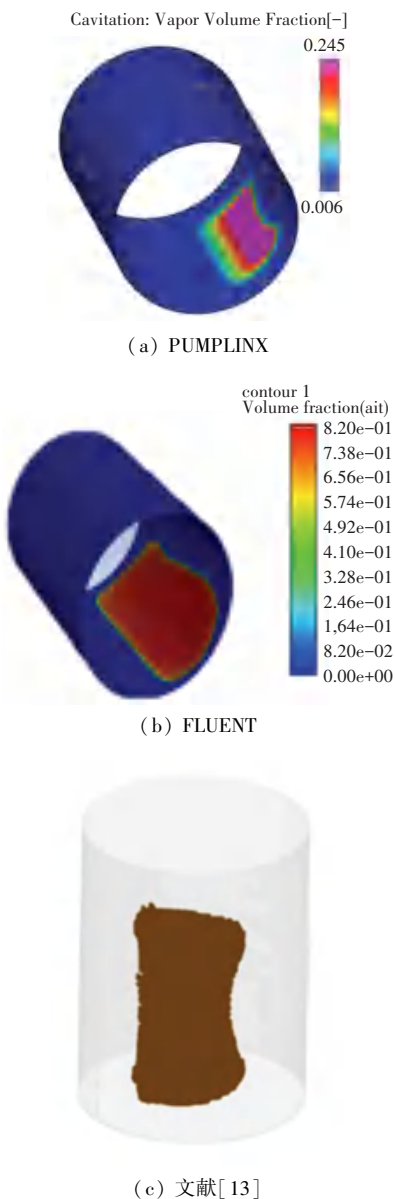
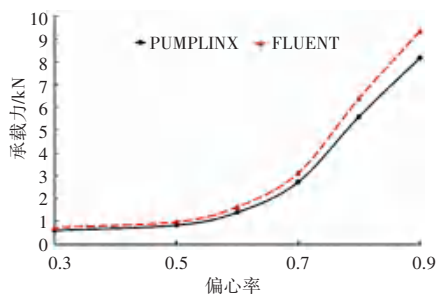


图 5 气穴分布云图

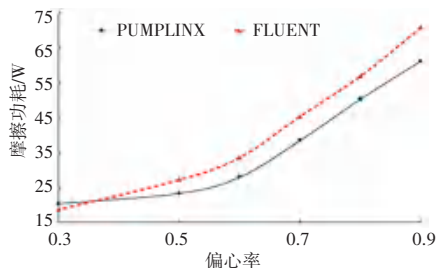
Fig. 5 Cavitation distribution cloud map

### 3.4 不同偏心率下轴承性能参数计算结果比较

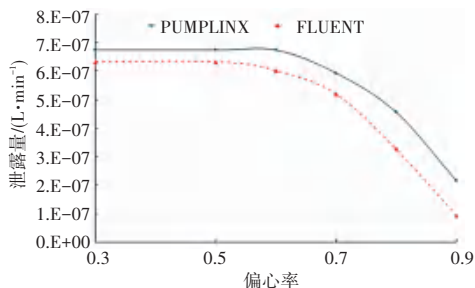
不同偏心率下,两款软件计算得到的承载力、摩擦功耗及泄露量等性能参数如图 6 所示。FLUENT 软件与 PUMPLINX 软件计算所得的所有性能参数变化趋势基本一致。在相同偏心率下,相比于 PUMPLINX 软件,FLUENT 软件计算所得的承载力、摩擦功耗偏大,而泄露量则偏小。在不同偏心率下,FLUENT 软件计算结果随偏心率的变化更明显。此外,PUMPLINX 软件与 FLUENT 软件在偏心率较低时,计算结果基本一致,而在偏心率较高时,计算结果差异较为明显。该结果产生原因可能为两款软件在计算求解时,气穴模型设置以及求解器设置的差异所造成的。



(a) 承载力随偏心率的变化



(b) 摩擦功耗随偏心率的变化



(c) 泄露量随偏心率的变化

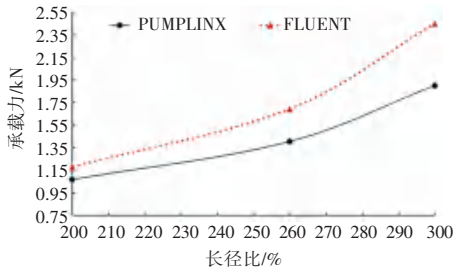
图 6 不同偏心率工况下轴承润滑性能参数

Fig. 6 Bearing lubrication performance parameters under different eccentricity conditions

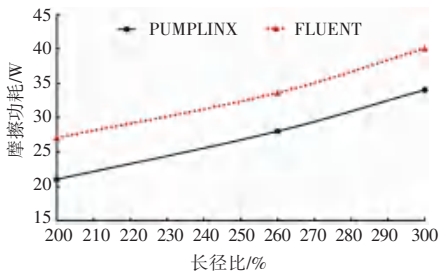
### 3.5 不同长径比下轴承性能参数计算结果比较

PUMPLINX 软件与 FLUENT 软件在不同长径比下的计算结果如图 7 所示。两款软件结果趋势与文献[15]一致。FLUENT 软件与 PUMPLINX 软件计算所得的最大油膜压力与承载力均随长径比  $L/D$  的增大而增大。但相对于 FLUENT, PUMPLINX 软件计算所得的承载力结果偏小,并随着长径比  $L/D$  的增大,两种软件的差值也逐渐增大。二者计算所得的摩擦功耗也随着长径比  $L/D$  的增大而近似线性增大,但相比于 PUMPLINX, FLUENT 软件计算所得摩擦功耗随长径比  $L/D$  的增大,其增大速率更小一些。当长径比  $L/D$  达到 300 时,两者计算所得的摩擦功耗差值达到最小。FLUENT 软件与 PUMPLINX 软件计算所得的泄露量均随长径比  $L/D$  的增大而近似指数性降低。相比于 FLUENT, PUMPLINX 软件计算所得的泄露量略高,但下降速率基本相同。该结果的产生是因为 PUMPLINX 软

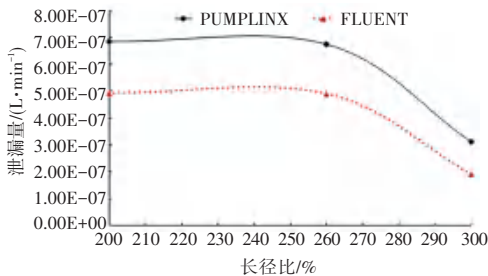
件与 FLUENT 软件在计算求解时气穴模型选择的差异以及选择的求解器不同造成的。由上述各参数曲线图可知, PUMPLINX 软件与 FLUENT 软件在长径比较高时, 计算结果基本一致, 在长径比较低时, 计算结果差异较为明显。



(a) 承载力随长径比的变化



(b) 摩擦功耗随长径比的变化



(c) 泄露量随长径比的变化

图 7 不同长径比工况下轴承润滑性能参数

Fig. 7 Bearing lubrication performance parameters under different length-diameter ratios

## 4 结束语

本文采用 PUMPLINX 和 FLUENT 两款软件研究了轴承润滑问题, 并从网格处理、求解收敛性、气穴处理等多个方面, 系统比较了两款软件的差异性, 得到结论如下:

(1) PUMPLINX 软件在网格处理方面比 FLUENT 软件更加简便, 且对网格依赖性较低;

(2) 相比较 FLUENT 软件中提供的气穴模型, PUMPLINX 软件中的变质量气体分数模型获取的气穴结果更接近实验;

(3) 两款软件计算所得的性能参数结果变化趋势基本一致, FLUENT 软件计算所得的承载力、摩擦功耗偏大, 而泄漏量则偏小。

## 参考文献

- [1] CHEN P Y P, HAHN E J. Side clearance effects on squeeze film damper performance [J]. Tribology International, 2000, 33 (3-4): 161-165.
- [2] GUO ZENGLIN, HIRANO, TOSHIO, et al. Application of CFD Analysis for Rotating Machinery—Part I: Hydrodynamic, Hydrostatic Bearings and Squeeze Film Damper [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines & Power, 2005, 127(2): 445-451.
- [3] GERTZOS K P, NIKOLAKOPOULOS P G, PAPADOPOULOS C A. CFD analysis of journal bearing hydrodynamic lubrication by Bingham lubricant [J]. Tribology International, 2008, 41 (12): 1190-1204.
- [4] YONG H, BALENDRA R. CFD analysis on the lubrication behaviours of journal bearing with dimples [C]// International Conference on Mechatronics & Automation. IEEE, 2009.
- [5] 孙雅洲, 卢泽生, 饶河清. 基于 FLUENT 软件的多孔质静压轴承静态特性的仿真与实验研究 [J]. 机床与液压, 2007 (3): 170-172.
- [6] 吕真, 张继革, 顾卫国. 基于 CFD 的可倾瓦轴承静动特性研究 [J]. 机械传动, 2012, 36(9): 1-3.
- [7] 庞晓平, 牛坤, 魏思远. 用 CFD 方法研究具有通用膜厚方程径向轴承的动压特性 [J]. 中国机械工程, 2012, 23(21): 2521-2524.
- [8] 齐焯, 常秋英, 李慧婷, 等. 织构化径向轴承的承载性能研究 [J]. 润滑与密封, 2012, 37(12): 36-38, 42.
- [9] 苏华, 余志雄. 基于 CFD 的沟槽-织构复合型滑动轴承性能分析 [J]. 润滑与密封, 2017, 42(7): 19-25.
- [10] 卢黎明, 谷开. 基于两相流的径向滑动轴承界面滑移分析 [J]. 润滑与密封, 2019, 44(6): 25-30.
- [11] 毛宁宁, 雷中舵, 孙雅洲. 基于 CFD 的气体静压高推力轴承仿真研究 [J]. 计算机仿真, 2020, 37(7): 219-223.
- [12] RIEDEL M, SCHMIDT M, STÜCKE P. Numerical investigation of cavitation flow in journal bearing geometry [C]. EPJ Web of Conferences, 2013; 45.
- [13] 孟凡明, 高贵响, 陈志伟, 等. 气穴对滑动轴承摩擦学性能影响的 CFD 分析 [J]. 重庆大学学报, 2013, 36(7): 6-11.
- [14] 孟凡明, 陈原培, 杨涛. CFX 和 Fluent 在径向滑动轴承润滑计算中的异同探讨 [J]. 重庆大学学报, 2013, 36(1): 7-14, 28.
- [15] 聂涛, 刘振明, 刘楠, 等. 内燃机径向滑动轴承润滑特性及影响因素研究 [J]. 计算机仿真, 2019, 36(1): 263-267.