

doi:10.16112/j.cnki.53-1223/n.2026.01.202503100002

引用格式:关文清,毛文元,孙雪剑,等.螺旋槽干气密封数值计算精度及效率分析[J].昆明理工大学学报(自然科学版),2026,51(1):191-199.

Citation:GUAN Wenqing,MAO Wenyuan,SUN Xuejian,et al.Accuracy and Efficiency Analysis of Numerical Calculation of Spiral Groove Dry Gas Seal[J].Journal of Kunming University of Science and Technology(Natural Science),2026,51(1):191-199.

螺旋槽干气密封数值计算精度及效率分析

关文清,毛文元*,孙雪剑,许恒杰,邓强国
(昆明理工大学 化学工程学院,云南 昆明 650500)

摘要:在干气密封数值计算中,网格数量和收敛精度是决定计算精度与效率的关键参数.为系统研究二者对计算精度与效率的影响规律,本文以螺旋槽干气密封为对象,采用有限差分法求解考虑实际气体效应的稳态气膜压力方程,考察了2.03、3.05、5.08 μm 三种膜厚下,不同网格数量与收敛准则(相对收敛精度 1×10^{-5} 、 1×10^{-6} 、 1×10^{-7} 及绝对收敛精度 1×10^{-15})对计算精度和效率的影响.研究表明:当采用相对判断收敛准则时,网格数量与收敛标准呈正相关,膜厚与收敛标准呈负相关;同一膜厚和相对收敛精度下,计算时间随网格数量近似线性增长;在网格数 $41 \times 79 \sim 151 \times 293$ 范围内,采用绝对收敛精度 1×10^{-15} 可在不同膜厚下实现计算精度与效率的平衡;此外,在网格数 $41 \times 79 \sim 71 \times 137$ 范围内,四种收敛精度下开启力与泄漏率的相对误差均小于5%.综合考虑计算精度与效率,推荐采用相对收敛精度 1×10^{-5} .本研究为该类密封结构的数值模拟提供了网格与收敛准则设置的参考依据.

关键词:干气密封;螺旋槽;数值计算;计算精度;计算效率

中图分类号:TH136 文献标识码:A 文章编号:1007-855X(2026)01-0191-09

Accuracy and Efficiency Analysis of Numerical Calculation of Spiral Groove Dry Gas Seal

GUAN Wenqing, MAO Wenyuan*, SUN Xuejian, XU Hengjie, DENG Qiangguo
(Faculty of Chemical Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China)

Abstract: In the numerical simulation of dry gas seals, the grid number and convergence accuracy are key parameters determining computational accuracy and efficiency. To systematically investigate the influence of these two factors on calculation accuracy and efficiency, this study focuses on spiral groove dry gas seals. The steady-state gas film pressure equation accounting for real gas effects is solved using the finite difference method. The impact of different grid numbers and convergence criteria (relative convergence accuracies of 1×10^{-5} , 1×10^{-6} , and 1×10^{-7} , and an absolute convergence accuracy of 1×10^{-15}) on computational accuracy and efficiency is examined under three film thicknesses: 2.03, 3.05, and 5.08 μm . The findings indicate that when a relative convergence criterion is adopted, the grid number shows a positive correlation with the convergence accuracy, while the film thickness exhibits a negative correlation with it. Under the same film thickness and relative convergence accuracy, computational time increases approximately linearly with grid number. Within the grid range of 41×79 to 151×293 , using an absolute convergence accuracy of 1×10^{-15} can balance computational accuracy and effi-

收稿日期:2025-03-10. 基金项目:国家自然科学基金项目(52105189);云南省科技厅基础研究专项-面上项目(202401AT070404);云南省教育厅科学研究基金项目(2024J0075).

作者简介:关文清(1999-),男,硕士研究生.主要研究方向:流体密封技术. E-mail:981873679@qq.com

通信作者:毛文元(1984-),男,博士,高级实验师.主要研究方向:流体密封技术. E-mail:maowenyuanyn@qq.com

ciency across different film thicknesses. Furthermore, within the grid range of 41×79 to 71×137 , the relative errors in opening force and leakage rate remain below 5% for all four convergence accuracies. Considering both accuracy and efficiency, a relative convergence accuracy of 1×10^{-5} is recommended. This study provides a reference for configuring grid and convergence criteria in numerical simulations of such seal structures.

Keywords: dry gas seal; spiral groove; numerical calculation; computational accuracy; computational efficiency

0 引言

螺旋槽干气密封凭借其非接触运行、低磨损、长寿命以及高可靠性等优势,在石油化工、航空航天、能源电力等工业领域得到了广泛应用^[1-3]. 在干气密封理论研究中,数值计算和 CFD 数值模拟是两种重要的研究手段. 与 CFD 数值模拟相比,数值计算方法因其灵活性高、计算资源需求低、易于实现特定算法优化等特点,而受到 Xu 等^[4-5]、Zhang 等^[6]、于辰等^[7]、Wu 等^[8]等众多研究人员的青睐. 然而,数值计算的精度和效率与网格数量和收敛精度等因素密切相关,这些因素直接决定了计算结果的可靠性和实用性.

网格无关性检验是数值计算和 CFD 数值模拟中的关键步骤,其目的是通过确定合适的网格数量,在计算精度和效率之间取得平衡. 王衍等^[9]、胡琼等^[10]、邓成香等^[11]基于 CFD 开展了干气密封数值模拟研究,探讨了网格密度和网格层数对计算结果的影响,并给出了合理的建议. 朱芝等^[12]采用有限差分法对气膜压力方程进行离散和编程求解,结果表明,当收敛精度取 1×10^{-6} ,径向、周向网格节点数分别取 136、73 时,开启力随网格节点数变化的相对误差在 0.05% 以内. 江锦波等^[13]采用有限体积法离散和编程求解获得了油气密封介质流场分布,结果表明,收敛精度 1×10^{-3} 下,径向、周向网格数分别选用 200、120 时,开启力和泄漏率相对误差都能控制在 1% 以内. 此外,江锦波等^[14]采用有限差分法求解了考虑轴向力平衡的干气密封热动力润滑仿真模型,结果表明,收敛精度 1×10^{-5} 下,径向、周向网格节点数均取 100 时,开启力相对误差始终小于 0.05%. 上述研究中所选取的收敛精度与合理网格数均不一致,且未考虑收敛精度对计算精度和效率的影响. 而当网格数较大时,收敛精度应随网格数的增加而提高^[15]. 目前,在干气密封数值计算中,关于合理网格数和收敛精度的标准尚未统一,而网格数和收敛精度的合理取值也缺乏明确一致的结论.

本文以经典的螺旋槽为研究对象,针对三种不同的膜厚条件,采用有限差分法对二维柱坐标雷诺方程进行离散求解. 通过探讨不同膜厚和网格数下收敛精度的合理选择,分析网格数和收敛精度对计算精度和效率的影响,以期对干气密封的数值计算提供理论参考.

1 理论模型

1.1 几何模型

图 1 为螺旋槽干气密封的端面结构示意图. 图中, r_o 、 r_g 、 r_i 分别为密封端面的外径、槽根半径、内径; α 为螺旋角; p_o 、 p_i 分别为介质的进口压力、出口压力; θ_1 和 θ_2 分别为单个周期内螺旋槽区和密封堰在外径处的周向夹角, θ_s 为整根螺旋线的展开角.

1.2 数学模型

1.2.1 实际气体状态方程

本文用压缩因子 Z 表示实际气体形为偏离理想气体行为的程度,其表达式为:

$$Z = pV / (R_g T) = p / (\rho R_g T) \quad (1)$$

式中: Z 为压缩因子; p 为气体压力; V 为气体体积; ρ 为气体密度; R_g 为气体常数; T 为气体温度.

1.2.2 压力控制方程

假定密封间隙的流动状态为层流,气体与密封端面无滑移,气体压力沿膜厚方向不变,忽略惯性力和离心力的影响,不考虑密封环端面变形的影响. 密封端面间的稳态气膜压力控制方程可由二维柱坐标稳态

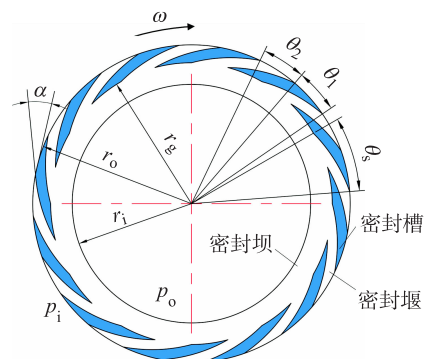


图 1 螺旋槽干气密封端面结构示意图
Fig. 1 Schematic diagram of end face structure of spiral groove dry gas seal

Reynolds 方程表示^[16-18],如下:

$$\frac{\partial}{\partial r}\left(\rho r h^3 \frac{\partial p}{\partial r}\right) + \frac{\partial}{r \partial \theta}\left(\rho h^3 \frac{\partial p}{\partial \theta}\right) = 6\eta\omega r \frac{\partial(\rho h)}{\partial \theta} \quad (2)$$

式中: η 为气体黏度; ω 为旋转角速度; r 和 θ 分别为极坐标中的半径和角度; h 为气膜厚度,其中,非槽区 $h = h_0$,槽区 $h = h_0 + h_g$, h_0 为非槽区气膜厚度, h_g 为槽深。

1.2.3 压力边界条件

强制性边界条件:

$$p|_{r=r_o/r_r} = p_o \quad p|_{r=r_i/r_r} = p_i \quad (3)$$

周期性边界条件:

$$p|_{\theta=0} = p|_{\theta=2\pi/N_g} \quad (4)$$

式中, N_g 为密封环槽数。

1.2.4 密封性能参数计算

采用有限差分法对考虑实际气体效应的稳态膜压控制方程进行数值求解,获得密封端面间的压力分布。其中,不同压力和温度下密封端面各点处润滑气体的压缩因子和黏度等物性参数,均由物性数据库软件 REFPROP 获得。开启力 F 和泄漏率 Q 的计算公式如式(5)和(6):

$$F = \int_0^{2\pi} \int_{r_i}^{r_o} p r dr d\theta \quad (5)$$

$$Q = \int_0^{2\pi} \frac{\rho r h^3}{12\eta} \frac{\partial p}{\partial r} d\theta \quad (6)$$

2 网格划分方法

考虑到螺旋槽在密封端面呈周期性分布,取 $1/N_g$ 个周期作为计算域以提高计算效率。对计算域进行网格划分时,先沿周向将计算域均匀划分成 M 等分,然后根据周向网格数和螺旋线特征进行径向网格划分。径向网格节点数与周向网格节点数的关系为:

$$n = \left\lfloor \frac{r_g - r_i}{r_g \left(\exp\left(\frac{2\pi \tan \alpha}{N_g(m-1)}\right) - 1 \right)} \right\rfloor + \left\lfloor \frac{N_g(m-1) \ln\left(\frac{r_o}{r_g}\right)}{2\pi \tan \alpha} \right\rfloor + 2 \quad (7)$$

式中: m 和 n 分别为周向和径向网格节点数, $m = M + 1$, M 为周向网格数; $\lfloor \cdot \rfloor$ 表示对该数值向下取整。

3 迭代收敛条件

数值计算中判定迭代是否收敛,通常采用两类准则:相对精度判断准则和绝对精度判断准则^[19]。其中,相对收敛准则在实际应用中更为常见^[20-21],其表达式如式(8):

$$\frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n |p_{i,j}^{k+1} - p_{i,j}^k|}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n |p_{i,j}^{k+1}|} \leq \varepsilon_{rel} \quad (8)$$

式中: ε_{rel} 为相对收敛精度; $p_{i,j}^k$ 和 $p_{i,j}^{k+1}$ 分别为第 k 次和第 $k+1$ 次迭代时节点 (i,j) 上的气膜压力值。该判据的物理意义为:当相邻迭代步间压力场变化的相对量级小于相对收敛精度时,迭代终止。

绝对精度判定准则的表达式为:

$$|p_{i,j}^{k+1} - p_{i,j}^k| \leq \varepsilon_{abs} \quad (9)$$

式中: ε_{abs} 为绝对收敛精度。该判据的物理意义为:当相邻迭代步间压力场变化的绝对值小于绝对收敛精度时,停止迭代。

为提高计算效率,本文采用了一种基于局部监视的收敛判断策略:选取螺旋槽槽根处节点作为监视

点,当该节点在相邻迭代步间的压力差值小于设定的绝对收敛精度时即终止计算,从而避免全域残差评估带来的计算开销.为确定兼顾可靠性与效率的绝对收敛精度值,选取不同绝对收敛精度($\varepsilon_{\text{abs}} = 1 \times 10^{-10} \sim 1 \times 10^{-18}$)和三种不同网格数(51×98 、 101×196 、 151×293)进行了系统验证.结果表明,当 ε_{abs} 达到 1×10^{-15} 后,继续提高精度对开启力计算结果已无影响,说明该精度已足以保证数值稳定性.因此,本文最终选取 $\varepsilon_{\text{abs}} = 1 \times 10^{-15}$ 作为收敛判据,可在保证计算结果准确性的前提下,最大限度降低不必要的迭代计算开销,实现精度与效率的最佳平衡.

4 结果与讨论

本文选用氨气(NH_3)作为润滑介质,如无特殊说明,本文计算所采用的结构参数和工况参数如表 1 所示.

以开启力相对变化率 η 和泄漏率相对变化率 β 描述网格数对数值解的影响程度,如式(10)和式(11):

$$\eta = |F_1 - F_2| / F_2 \times 100\% \quad (10)$$

$$\beta = |Q_1 - Q_2| / Q_2 \times 100\% \quad (11)$$

式中: F_1 、 F_2 分别表示网格数 $m_1 \times n_1$ 、 $m_2 \times n_2$ 下的开启力数值解; Q_1 、 Q_2 分别表示网格数 $m_1 \times n_1$ 、 $m_2 \times n_2$ 下的泄漏率数值解.

以开启力相对误差 E_F 和泄漏率相对误差 E_Q 描述数值解与精确解的差异程度,如式(12)和式(13):

$$E_F = \frac{|F_{\text{ns}} - F_{\text{es}}|}{F_{\text{es}}} \times 100\% \quad (12)$$

$$E_Q = \frac{|Q_{\text{ns}} - Q_{\text{es}}|}{Q_{\text{es}}} \times 100\% \quad (13)$$

式中: F_{ns} 、 Q_{ns} 分别表示某一网格数和收敛精度下的开启力和泄漏率的数值解; F_{es} 、 Q_{es} 分别为开启力和泄漏率的精确解.

4.1 不同收敛精度下网格数对计算精度的影响

针对螺旋槽干气密封常见的 2.03 、 3.05 、 $5.08 \mu\text{m}$ 三种膜厚,分别选取相对收敛精度($\varepsilon_{\text{rel}} = 1 \times 10^{-5}$ 、 1×10^{-6} 、 1×10^{-7})与绝对收敛精度($\varepsilon_{\text{abs}} = 1 \times 10^{-15}$)四种收敛精度,分别记为 $\varepsilon_{\text{rel},1}$ 、 $\varepsilon_{\text{rel},2}$ 、 $\varepsilon_{\text{rel},3}$ 、 ε_{abs} ,开展不同收敛精度下网格数对计算精度的影响研究.

图 2 和图 3 分别为不同收敛精度下网格数对开启力和泄漏率的影响.由图可知,对于三种膜厚而言,不同收敛精度下网格数对密封性能的影响规律一致,表现在:在网格数 $11 \times 20 \sim 41 \times 79$ 的范围内,四种收敛精度下的计算结果在同一网格数时表现出一致性.然而,在网格数 $51 \times 98 \sim 151 \times 293$ 范围内,随着网格数的增加,相对收敛精度 $\varepsilon_{\text{rel},1}$ 下的开启力和泄漏率均显著下降,且与其他三种收敛精度下的计算结果差异逐渐扩大.其主要原因在于采用较大的相对收敛精度(即较低的收敛标准)会导致迭代过程过早终止,从而使数值解过于粗糙或未能充分收敛.而由表 2 可知,对于同一膜厚而言,随着网格数量的增加,流场稳定时所需的理论相对收敛精度值逐渐减小,即收敛标准也随之提高.若实际采用的相对收敛精度(如 $\varepsilon_{\text{rel},1} = 1 \times 10^{-5}$)与理论相对收敛精度值偏差越大,则计算结果与精确解的偏差也越大,而其他三种收敛精度下的计算结果非常接近于精确解,因此呈现出上述的现象和规律.

进一步分析表明,在网格数 $11 \times 20 \sim 151 \times 293$ 的范围内,同一网格数时,绝对收敛精度 ε_{abs} 与相对收敛精度 $\varepsilon_{\text{rel},3}$ 下的计算结果完全一致;而相对收敛精度 $\varepsilon_{\text{rel},2}$ 仅在网格数较大时与上述两种收敛精度的计算结果存在微小差异,但差异幅度非常有限.此外,随着网格数的增大,这三种收敛精度下的开启力逐渐增大,泄漏率则逐渐降低,并最终趋于稳定.这一规律表明,在网格数较大的情况下,采用更高的收敛标准(即更小的相对收敛精度)能够有效地保证计算结果的准确性和一致性,从而避免因迭代过程过早终止而

表 1 干气密封计算参数

Tab. 1 Calculation parameters of dry gas seal

参数	数值	参数	数值
内径 r_i/mm	58.42	螺旋角 $\alpha/(\circ)$	15
槽根半径 r_g/mm	69	槽台比 δ	1
外径 r_o/mm	77.78	进口温度 T/K	405
槽数 N_g	12	进口压力 p_o/MPa	10
槽深 $h_g/\mu\text{m}$	5	环境压力 p_i/MPa	0.1
转速 $N/(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	10 000		

导致的数值解失真问题。

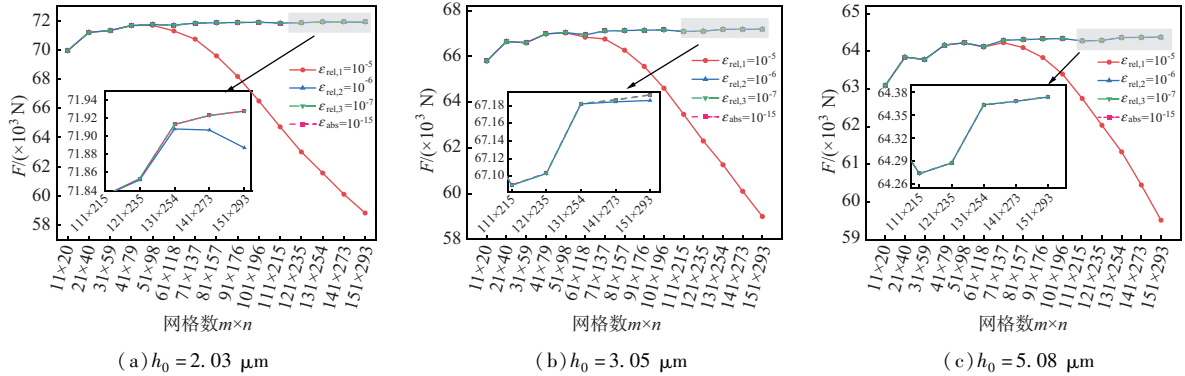


图 2 不同收敛精度下网格数对开启力的影响

Fig. 2 Effect of grid number on opening force under different convergence accuracies

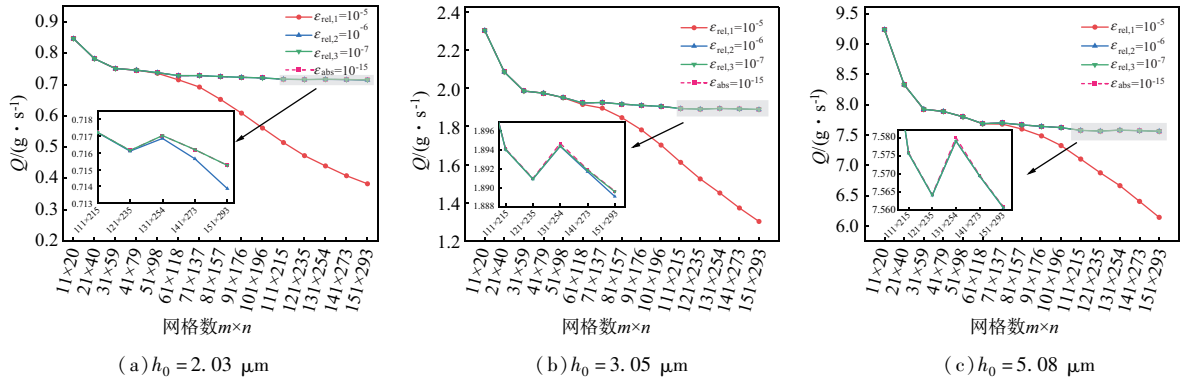


图 3 不同收敛精度下网格数对泄漏率的影响

Fig. 3 Effect of grid number on leakage rate under different convergence accuracies

图 4 和图 5 分别展出了不同收敛精度下网格数对开启力相对变化率 η 和泄漏率相对变化率 β 的影响. 从图中可以看出,对于三种膜厚而言,不同收敛标准下网格数对相对变化率的影响规律基本一致. 具体表现为:网格数为 41×79 时,四种收敛精度下的相对变化率均满足 $\eta \leq 0.60\%$ 和 $\beta \leq 0.67\%$. 而在网格数 $51 \times 98 \sim 151 \times 293$ 范围内,相对收敛精度 $\epsilon_{rel,1}$ 下的相对变化率波动较大,其中 β 的最大值可达 9.03% ,其余三种收敛精度下的结果则较为稳定,均满足 $\eta \leq 0.26\%$ 和 $\beta \leq 1.48\%$. 尤其在网格数达到 151×293 时,相对收敛精度 $\epsilon_{rel,3}$ 和绝对收敛精度 ϵ_{abs} 下的 η 和 β 均控制在 0.13% 以内. 这表明在此网格数下,两种收敛准则所得结果已高度一致,可将其视为数值意义上的精确解,用于后续分析与比较. 上述结果表明,本文选取螺旋槽的槽根处节点作为监视点,并以该节点相邻迭代步间的压力差小于绝对收敛精度 ($\epsilon_{abs} = 1 \times 10^{-15}$) 作为判断收敛的依据具有合理性.

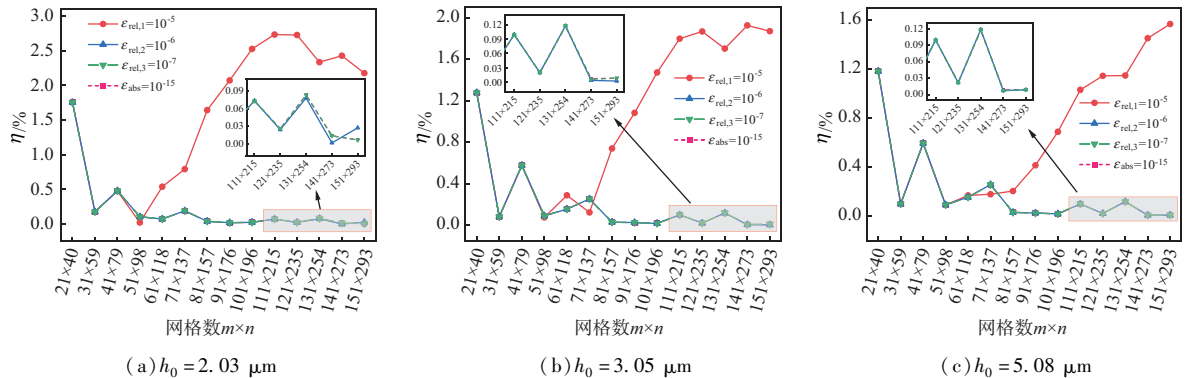


图 4 不同收敛精度下网格数对开启力相对变化率的影响

Fig. 4 Effect of grid number on relative change rate of opening force under different convergence accuracies

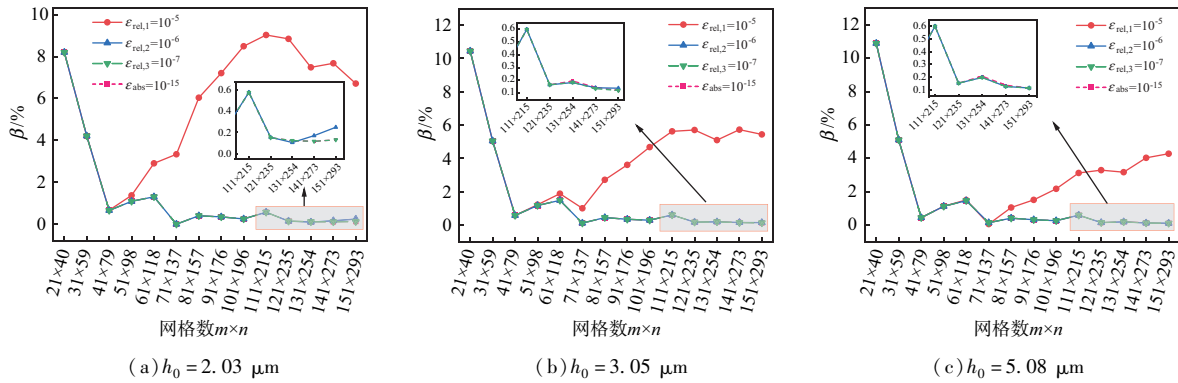


图 5 不同收敛精度下网格数对泄漏率相对变化率的影响

Fig. 5 Effect of grid number on relative change rate of leakage rate under different convergence accuracies

基于上述精确解,结合式(12)和(13),分别计算不同条件下的开启力相对误差 E_F 和泄漏率相对误差 E_Q ,结果分别如图 6 和 7 所示. 结果表明:对于相对收敛精度 $\epsilon_{rel,1}$ 而言,随着网格逐渐加密,三种膜厚下的 E_F 和 E_Q 均呈现出先减小后增大的变化趋势. 网格数 $41 \times 79 \sim 71 \times 137$ 范围内,三种膜厚下的 E_F 和 E_Q 均控制在 5% 以内. 网格数为 11×20 时,三种膜厚下的 E_Q 分别为 18.44%、21.94%、22.15%. 而网格数为 151×293 时,三种膜厚下的 E_Q 分别为 46.46%、31.12%、18.75%. 这说明当采用较大的相对收敛精度时,网格数的选择存在一个最优区间,过度稀疏或过度致密均会导致计算精度降低,因此需要优化网格划分策略.

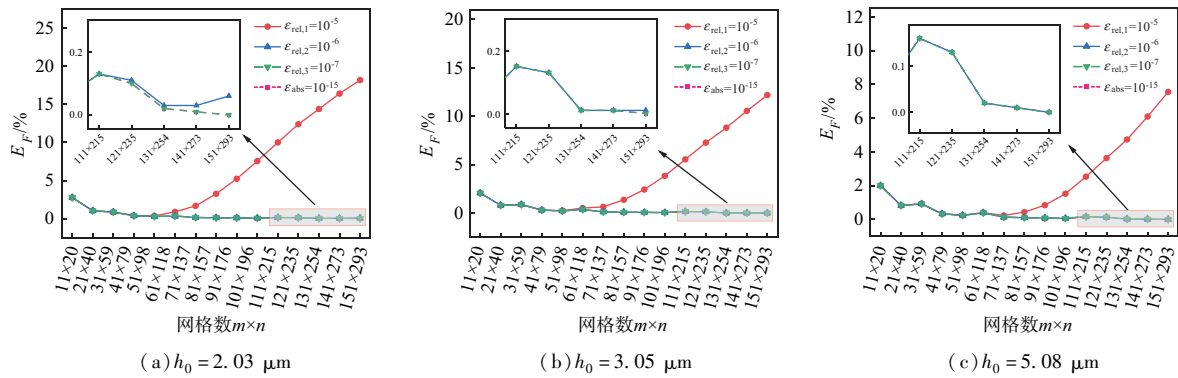


图 6 不同收敛精度下网格数对开启力相对误差的影响

Fig. 6 Effect of grid number on relative error of opening force under different convergence accuracies

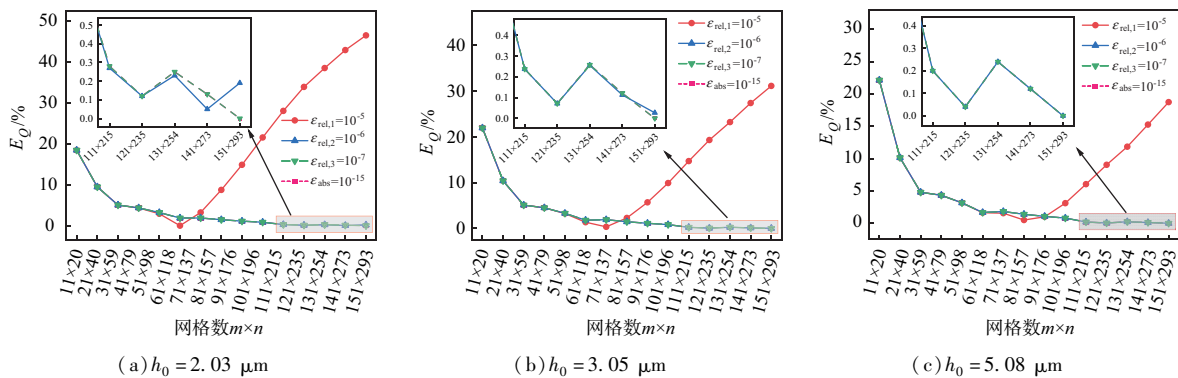


图 7 不同收敛精度下网格数对泄漏率相对误差的影响

Fig. 7 Effect of grid number on relative error of leakage rate under different convergence accuracies

对于相对收敛精度 $\epsilon_{rel,2}$ 、 $\epsilon_{rel,3}$ 和绝对收敛精度 ϵ_{abs} 而言,随着网格数的增大,三种膜厚下的 E_F 和 E_Q 基本呈现出逐渐减小的变化趋势. 其中,在网格数 $41 \times 79 \sim 151 \times 293$ 范围内,三种膜厚下的相对误差均满足 $E_F \leq 0.37\%$ 和 $E_Q \leq 4.51\%$. 而在网格数 $101 \times 193 \sim 151 \times 293$ 范围内,三种膜厚下的 E_F 和 E_Q 均控制在

0.86% 以内. 这说明当选取较小的相对收敛精度时,采用相对稀疏的网格即可达到满意的计算精度. 然而,若需进一步提升计算精度,则必须对网格进行加密处理.

4.2 不同网格数和膜厚下的理论相对收敛精度值

为了确定不同膜厚和网格数下流场稳定时对应的理论相对收敛精度值,本研究采用绝对收敛判断准则 ($\varepsilon_{\text{abs}} = 1 \times 10^{-15}$),并基于式(8)计算相邻迭代步间的气膜压力相对误差. 当迭代收敛时,所得气膜压力相对误差即为流场稳定所对应的理论相对收敛精度值.

由表 2 可知,随着网格数的增加,流场稳定时所需的理论相对收敛精度值逐渐减小,这意味着对收敛标准的要求更为严格. 此外,不同网格数和膜厚下的理论相对收敛精度值均大于 1×10^{-7} ,说明当相对收敛精度取 1×10^{-7} 时,可确保流场完全稳定,计算结果可靠. 同时,膜厚越大,流场稳定对应的理论相对收敛精度值也越大. 这主要是因为膜厚增大会导致开启力下降,计算域内各节点的稳态气膜压力也相应减小. 由于初始流场中各节点的压力均设定为 0.1 MPa,在迭代过程中节点压力逐渐升高;当稳态压力水平较低时,流场更易收敛,所需迭代步数减少,因此其理论相对收敛精度值更大.

4.3 不同收敛精度下网格数对计算效率的影响

为了方便叙述,将 $\varepsilon_{\text{rel},1}$ 、 $\varepsilon_{\text{rel},2}$ 、 $\varepsilon_{\text{rel},3}$ 、 ε_{abs} 四种收敛精度下的计算时间 t 分别记为 t_1 、 t_2 、 t_3 、 t_4 .

图 8 显示了不同网格数下收敛精度对计算时间的影响. 其中横坐标为周向网格数 m 与径向网格数 n 的乘积. 由图可知,在同一膜厚条件下,随网格数的增加,三种相对收敛精度下的计算时间呈现出近似线性增长的趋势,而绝对收敛精度下的计算时间呈现指数增长的趋势. 此外,同一膜厚和收敛精度时,网格数越大,则计算时间越长. 同一膜厚和网格数时,四种收敛精度下的计算时间关系为: $t_3 > t_2 > t_1$,且 $t_3 > t_4$. 对上述的现象解释如下:随着网格数的增加,离散方程的规模呈线性增长,导致每次迭代所需的计算量显著增加. 同时,过高的收敛标准会导致迭代次数增加,即使流场已达到稳定状态,迭代过程仍会持续进行,从而导致计算时间随网格数的增大和收敛精度的提高而显著增加.

表 2 不同膜厚下网格数与理论相对收敛精度值的对应关系
Tab. 2 Corresponding relationship between grid number and theoretical relative convergence accuracy under different film thicknesses

网格数	理论相对收敛精度值/ 10^{-6}		
	$h_0 = 2.03 \mu\text{m}$	$h_0 = 3.05 \mu\text{m}$	$h_0 = 5.08 \mu\text{m}$
11 × 20	56.30	69.62	96.51
21 × 40	13.49	16.52	23.38
31 × 59	5.95	7.36	10.56
41 × 79	3.43	4.22	6.09
51 × 98	2.25	2.75	3.96
61 × 118	1.54	1.90	2.76
71 × 137	1.16	1.44	2.66
81 × 157	0.90	1.10	1.59
91 × 176	0.72	0.88	1.28
101 × 196	0.58	0.72	1.04
111 × 215	0.48	0.60	0.83
121 × 235	0.41	0.50	0.73
131 × 254	0.35	0.43	0.63
141 × 273	0.30	0.37	0.55
151 × 293	0.26	0.33	0.48

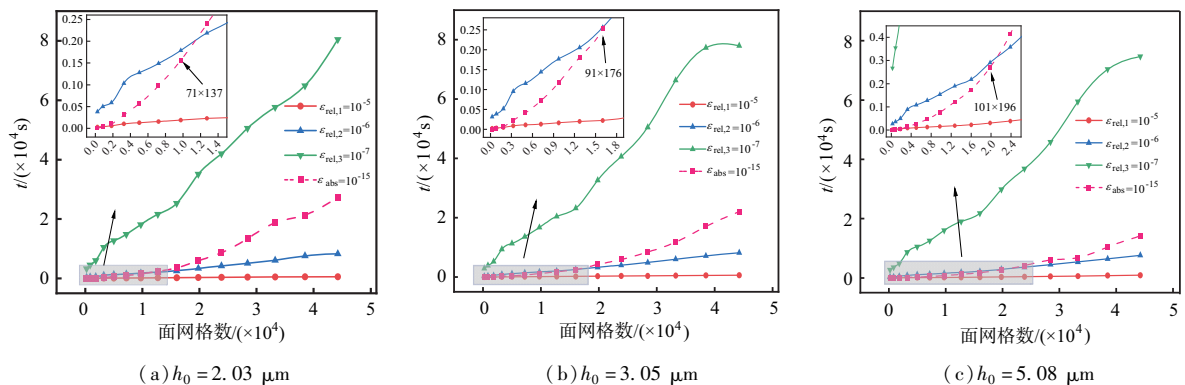


图 8 不同收敛精度下网格数对计算时间的影响

Fig. 8 Effect of grid number on computation time under different convergence accuracies

从图 8(a)、图 8(b)和图 8(c)可以看出, t_4 与 t_2 的大小关系受到一个临界网格数的影响。对于膜厚 2.03、3.05、5.08 μm 而言, 该临界网格数分别为 71×137 、 81×157 、 101×196 。三种膜厚下均呈现一致的规律: 当网格数不超过该临界值时, $t_4 < t_2$; 而网格数超过该临界值时, $t_4 > t_2$ 。产生该现象的原因在于, 本研究中采用理论相对收敛精度值计算得到的时间即为绝对收敛时间 t_4 , 且对于同一膜厚和网格数, 采用的相对收敛精度值越小, 计算时间越长。结合表 2 数据可知, 同一膜厚下, 当网格数不超过临界值时, 其对应的理论相对收敛精度值均大于 $\varepsilon_{\text{rel},2}(1 \times 10^{-6})$, 则有 $t_4 < t_2$; 反之, 当网格数超过临界值时, 其对应的理论相对收敛精度值小于 $\varepsilon_{\text{rel},2}$, 故 $t_4 > t_2$ 。以上分析清晰地阐明了 t_4 与 t_2 的关系在临界网格数处发生转变的内在原因。

进一步对比不同网格数和收敛精度对计算效率的影响。以膜厚 2.03 μm 为例, $\varepsilon_{\text{rel},1}$ 、 $\varepsilon_{\text{rel},2}$ 、 $\varepsilon_{\text{rel},3}$ 、 ε_{abs} 四种收敛精度下, 网格数 41×79 下的计算效率比网格数 151×293 提升了 4.67、7.00、6.66、97.62 倍。当网格数为 41×79 时, 与相对收敛精度 $\varepsilon_{\text{rel},2}$ 和 $\varepsilon_{\text{rel},3}$ 相比, 采用相对收敛精度 $\varepsilon_{\text{rel},1}$ 的计算效率分别提升了 8.76 倍和 97.78 倍, 而采用绝对收敛精度 ε_{abs} 的计算效率则分别提升了 2.39 倍和 33.37 倍。这说明在保证计算精度的前提下, 采用较小的网格数和较大的相对收敛精度可以有效地提升计算效率。

5 结论

通过开展螺旋槽干气密封数值计算精度与效率研究, 得出以下结论:

1) 相对收敛判断准则下, 网格数与收敛标准呈正相关, 膜厚与收敛标准呈负相关。相同膜厚和相对收敛精度下, 计算时间与网格数近似呈线性关系。增加网格数或提高收敛标准可提升计算精度, 但会牺牲计算效率。然而, 当网格数超过一定规模或收敛标准达到合理范围后, 进一步增大网格数或提高收敛标准对计算精度改善有限, 反而会显著降低计算效率。

2) 与相对收敛判断准则相比, 采用绝对收敛判断准则($\varepsilon_{\text{abs}} = 1 \times 10^{-15}$)可以满足不同膜厚和网格数下计算收敛和流场稳定, 同时兼具较高的计算精度和效率, 适用性更广。

3) 在保证计算精度的前提下, 适当降低网格数和收敛标准可显著提升计算效率。本文在网格数 $41 \times 79 \sim 71 \times 137$ 范围内, 采用相对收敛精度($\varepsilon_{\text{rel},1} = 1 \times 10^{-5}$)可实现计算精度和效率的较优平衡。

参考文献:

- [1] CHEN Y, ZHUO Z Y, LI Y T, et al. Prediction of spiral groove dry gas seal performance and intelligent optimization of structural parameters[J]. Tribology International, 2024, 193: 109439.
- [2] 张帅, 丁雪兴, 王世鹏, 等. 改进 DenseNet 的干气密封摩擦润滑状态识别研究[J]. 振动与冲击, 2025, 44(4): 313–321. ZHANG S, DING X X, WANG S P, et al. Study of dry gas seal friction lubrication state identification with improved DenseNet[J]. Journal of Vibration and Shock, 2025, 44(4): 313–321.
- [3] HU F M, HE Q, YIN Y, et al. Wear monitoring of dry gas seals through seal face structure design[J]. Tribology Transactions, 2025, 68(4): 768–783.
- [4] XU H J, SONG P Y, MAO W Y, et al. The performance of spiral groove dry gas seal under choked flow condition considering the real gas effect[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology, 2020, 234(4): 554–566.
- [5] XU H J, YUE Y G, SONG P Y, et al. Analysis on the dynamic characteristics of spiral groove dry gas seal based on the gas film adaptive adjustment model[J]. Industrial Lubrication and Tribology, 2023, 75(4): 406–414.
- [6] ZHANG L X, DING X X, WANG S P, et al. Lubrication characteristics of dry-gas seals with spiral grooves[J]. Machines, 2024, 12(9): 610.
- [7] 于辰, 江锦波, 赵文静, 等. 基于微段组合的干气密封端面型槽结构模型及其参数影响[J]. 化工学报, 2021, 72(10): 5294–5309. YU C, JIANG J B, ZHAO W J, et al. Geometrical model of surface groove based on micro-segment combination for dry gas seal and its parameter influence[J]. CIESC Journal, 2021, 72(10): 5294–5309.
- [8] WU F, JIANG J B, PENG X D, et al. Influence of natural gas composition and operating conditions on the phase change of dry

- gas seals for pipeline compressors[J]. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2025, 115: 109832.
- [9] 王衍,王达,胡琼,等. 基于 CFD 的 T 形槽气膜密封网格无关性分析[J]. *润滑与密封*, 2018, 43(11): 70 - 73 + 113.
WANG Y, WANG D, HU Q, et al. Grid independence analysis of model T - groove gas film seal based on CFD[J]. *Lubrication Engineering*, 2018, 43(11): 70 - 73 + 113.
- [10] 胡琼,张子繁,王衍,等. 螺旋槽干气密封仿真计算网格高质高效划分方法[J]. *液压气动与密封*, 2020, 40(5): 7 - 10.
HU Q, ZHANG Z F, WANG Y, et al. High quality and efficient mesh generation method for simulation of spiral groove dry gas seal[J]. *Hydraulics Pneumatics & Seals*, 2020, 40(5): 7 - 10.
- [11] 邓成香,宋鹏云. 螺旋槽干气密封数值模拟网格独立性分析[J]. *润滑与密封*, 2016, 41(7): 86 - 90 + 101.
DENG C X, SONG P Y. Mesh independence analysis of numerical simulation in spiral groove dry gas seal[J]. *Lubrication Engineering*, 2016, 41(7): 86 - 90 + 101.
- [12] 朱芝,许恒杰,陈维,等. 超临界二氧化碳螺旋槽干气密封热流耦合润滑临界阻塞特性研究[J]. *化工学报*, 2024, 75(2): 604 - 615.
ZHU Z, XU H J, CHEN W, et al. Study on critical choked characteristics of supercritical carbon dioxide spiral groove dry gas seal under thermal - fluid coupling lubrication[J]. *CIESC Journal*, 2024, 75(2): 604 - 615.
- [13] 江锦波,彭新,许文炬,等. 泵外型螺旋槽油气密封泄漏特性及参数影响研究[J]. *化工学报*, 2023, 74(6): 2538 - 2554.
JIANG J B, PENG X, XU W X, et al. Study on leakage characteristics and parameter influence of pump - out spiral groove oil - gas seal[J]. *CIESC Journal*, 2023, 74(6): 2538 - 2554.
- [14] 江锦波,陈竹鑫,肖洋溢,等. 运行工况对超临界 CO₂ 干气密封端面热力学过程及稳态性能影响研究[J]. *化工学报*, 2025, 76(6): 2913 - 2928.
JIANG J B, CHEN Z X, XIAO Y Y, et al. Study on influence of operating conditions on thermodynamic process and steady state performance of supercritical CO₂ dry gas seal[J]. *CIESC Journal*, 2025, 76(6): 2913 - 2928.
- [15] 王群. 网格数对有限差分法解雷诺方程的影响[J]. *润滑与密封*, 2020, 45(4): 125 - 129.
WANG Q. Influence of mesh number on solving Reynolds equation by FDM[J]. *Lubrication Engineering*, 2020, 45(4): 125 - 129.
- [16] SI H Y, CAO L H, CHEN D C. Dynamic characteristics of supercritical carbon dioxide (SCO₂) seal influenced by multiple factors[J]. *Tribology International*, 2021, 162: 107131.
- [17] 陈维,宋鹏云,许恒杰,等. 含杂质二氧化碳实际气体干气密封性能研究[J]. *化工学报*, 2020, 71(5): 2215 - 2229.
CHEN W, SONG P Y, XU H J, et al. Effects of the real - gas characteristics of carbon dioxide with impurities on the dry gas seal performance[J]. *CIESC Journal*, 2020, 71(5): 2215 - 2229.
- [18] SU H, RAHMANI R, RAHNEJAT H. Thermohydrodynamics of bidirectional groove dry gas seals with slip flow[J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2016, 110: 270 - 284.
- [19] 黄平. 润滑数值计算方法[M]. 北京:高等教育出版社, 2012.
HUANG P. *Lubrication numerical calculation methods*[M]. Beijing: Higher Education Press, 2012.
- [20] 章聪,彭旭东,江锦波,等. 实际气体、阻塞和湍流效应对超临界 CO₂ 干气密封性能的影响[J]. *中国电机工程学报*, 2022, 42(20): 7563 - 7574.
ZHANG C, PENG X D, JIANG J B, et al. Influence of real gas, choked flow, and turbulence effect on performance of supercritical CO₂ dry gas seals[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2022, 42(20): 7563 - 7574.
- [21] 江锦波,陈源,徐奇超,等. 干气密封螺旋槽衍生结构演变规律与工况适用性[J]. *摩擦学学报*, 2018, 38(3): 264 - 273.
JIANG J B, CHEN Y, XU Q C, et al. Evolution rule and working applicability of typical derived structures of spiral groove dry gas seal[J]. *Tribology*, 2018, 38(3): 264 - 273.

(编辑:朱银周)