

结构参数对 LNG 潜液泵诱导轮性能影响的数值分析

匡海云, 张师帅, 智博文, 王 钰

(华中科技大学能源与动力工程学院, 武汉 430074)

摘要: 利用 ANSYS CFX 软件, 同时采用 SST 湍流模型和 Rayleigh-Plesset 汽蚀模型, 对不同修圆半径和不同叶顶间隙的液化天然气 (liquid nature gas, LNG) 潜液泵诱导轮进行数值分析, 分别研究两种结构参数对诱导轮水力性能和汽蚀性能的影响规律。结果表明, 随着修圆半径的增加, 诱导轮出口静压降低, 吸力面气泡体积分数减小, 使得诱导轮水力性能下降, 汽蚀性能增强; 随着叶顶间隙的增加, 诱导轮出口静压降低, 吸力面气泡体积分数增大, 使得诱导轮水力性能下降, 汽蚀性能减弱。研究结果可为 LNG 潜液泵诱导轮的设计和结构优化提供理论依据。

关键词: 流动机械工程及流体动力工程; 诱导轮; 水力性能; 汽蚀性能

中图分类号: TH311 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-2850(2017)14-1571-09

Numerical simulation for effects of structural parameters on the performance of LNG submersible pump inducer

KUANG Haiyun, ZHANG Shishuai, ZHI Bowen, WANG Yu

(School of Energy and Power Engineering, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: Numerical simulation has been done for liquid nature gas (LNG) submersible pump inducer with different trimming circle radiuses and tip clearances by ANSYS CFX software as well as SST turbulence model and Rayleigh-Plesset cavitation model. Respectively, influence laws of two structural parameters on hydraulic performance and cavitation performance were studied. The results show that with the increase of trimming circle radius, static pressure at the outlet of inducer decreases and bubble volume fraction on suction surface reduces, which leads to degradation of hydraulic performance and enhancement of cavitation performance. With the increase of tip clearance, static pressure at outlet of inducer decreases and bubble volume fraction on suction surface increases, which leads to degradations of hydraulic performance and cavitation performance. The results provide the theoretical basis for design and structural optimization of LNG submersible pump inducer.

Key words: flow mechanical engineering and fluid power engineering; inducer; hydraulic performance; cavitation performance

0 引言

LNG 低温潜液泵是 LNG 产业链中的重要设备, 应用非常广泛。目前, LNG 低温潜液泵正向着大流量、高压力、高效率的方向发展, 而我国在这方面暂时还未掌握核心技术, 由此可见自主研发的重要

基金项目: 工信部高技术船舶科研项目 (2013-411-09)

作者简介: 匡海云 (1991—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 流体机械及流体工程

通信联系人: 张师帅, 副教授, 主要研究方向: 流体机械及流体工程. E-mail: shishuai@hust.edu.cn

意义^[1]。

由于被输送的 LNG 在饱和温度附近，很小的温升或压降即可造成 LNG 气化，进而造成 LNG 潜液泵汽蚀。对于 LNG 低温潜液泵的汽蚀问题，最好的解决方案是在叶轮前部加装诱导轮装置^[2]。

作为 LNG 低温潜液泵的诱导轮，既要求其本身具有良好的汽蚀性能，同时也要求能够产生足够高的扬程，以保证潜液泵叶轮进口的能量要求^[3]。目前，国内外众多学者针对诱导轮结构参数对性能的影响以及诱导轮与泵叶轮的匹配等问题做了大量的研究工作^[4-6]。然而，很少有学者对诱导轮的进口修圆形式和叶顶间隙大小对其性能的影响进行分析。

研究利用 ANSYS CFX 软件，对不同修圆半径和叶顶间隙的诱导轮进行数值计算，研究两种结构参数对诱导轮水力性能和汽蚀性能的影响规律，为诱导轮的结构设计提供理论依据。

1 几何模型

本文针对流量为 550 m³/h、扬程为 120 m、转速为 2 245 r/min 的 LNG 低温潜液泵设计了一种诱导轮。诱导轮叶片厚度的变化规律采用前苏联杜莫夫的经验公式^[7]，主要结构参数如表 1 所示，诱导轮模型如图 1 所示。

表 1 诱导轮的主要结构参数

Tab. 1 Main structural parameters of inducer

叶片数 z	轮毂直径 D_h/mm	叶尖直径 D_t/mm	前缘冲角 $\alpha/\text{°}$	轴向长度 L/mm	叶尖包角 $\theta/\text{°}$
3	59	236	3	118	314.5

2 数值模拟

2.1 模型网格

考虑到进出口效应对诱导轮内部流场的影响，本文在诱导轮的进出口均增加了 3 倍直径长度的延长段。采用 ANSYS CFX 软件中的 TurboGrid 模块进行网格划分，并采用六面体网格，网格总数约为 100 万，如图 2 所示。

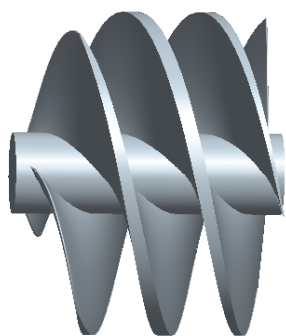


图 1 诱导轮 3D 模型

Fig. 1 3D model of inducer

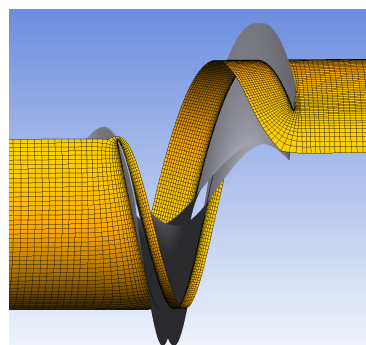


图 2 诱导轮 3D 网格

Fig. 2 3D meshes of inducer

2.2 流体介质

本文流体介质为 0.1 MPa 压力、-162℃ 温度下饱和状态的 LNG，其物理参数与相同条件下的甲烷 (CH₄) 类似，主要物理参数如表 2 所示。

表 2 LNG 气液两相相关物理参数

Tab. 2 Gas-liquid two-phase related physical parameters of LNG

介质	密度 ρ /(kg/m ³)	动力黏度 μ /(N·s/m ²)	饱和蒸汽压 p_{sat} /Pa
LNG 液体	423.11	$1.180\ 72 \times 10^{-4}$	97 100
LNG 气体	1.746 5	$4.314\ 42 \times 10^{-6}$	97 100

2.3 求解计算

由于 SST $k-\omega$ 剪切应力运输模型考虑了湍流剪切应力，对逆压梯度引起的流动分离有较好的模拟精度^[8]，因此本文湍流模型采用 SST $k-\omega$ 剪切应力运输模型。

汽蚀模型采用 Rayleigh-Plesset 模型，其控制气、液两相之间质量传递的表达式^[9]为

$$R \frac{d^2 R}{dt^2} + \frac{3}{2} \left(\frac{dR}{dt} \right)^2 + \frac{2\sigma}{\rho R} = \frac{p_v - p}{\rho}, \tag{1}$$

其中， R 为气泡半径 (m)； σ 为气液两相间的表面张力系数 (N/m)； ρ 为液体密度 (kg/m³)； p_v 为液体在某一温度的饱和蒸汽压力 (Pa)； p 为气泡周围液体的压力 (Pa)。

计算流域分为进口段、诱导轮段和出口段，其中诱导轮段设置为旋转域，转速为 2 245 r/min. 进口边界条件为总压进口，出口边界条件为质量流量出口。

3 结果与分析

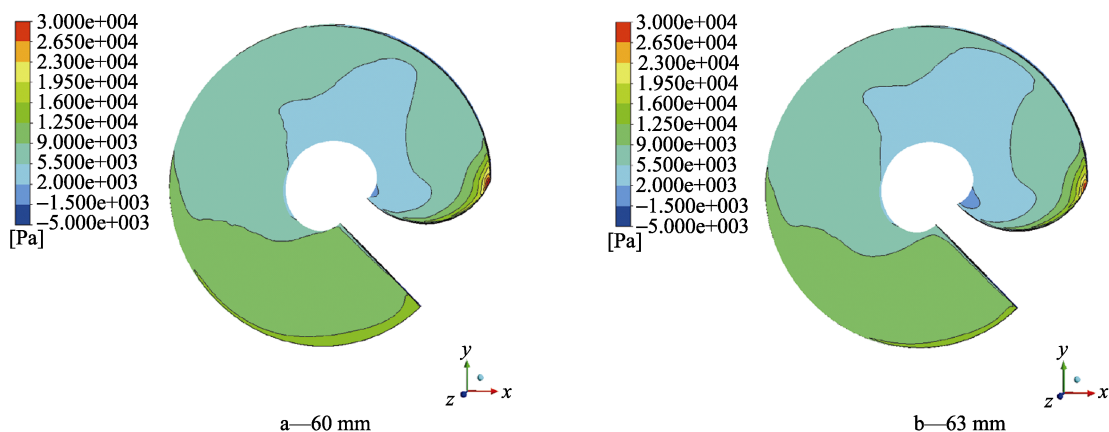
3.1 修圆半径对诱导轮性能的影响

以 LNG 低温潜液泵诱导轮为研究对象，对修圆半径分别为 60，63，65，68 mm 4 种情况下的诱导轮水力性能和汽蚀性能进行研究，探寻修圆半径对诱导轮综合性能的影响规律。

3.1.1 修圆半径对诱导轮水力性能的影响

对 4 种不同修圆半径下的 LNG 低温潜液泵诱导轮模型进行数值模拟计算，研究修圆半径对诱导轮水力性能的影响规律，结果如下。

图 3 为 4 种不同修圆半径下诱导轮压力面的静压分布云图。可以看出，诱导轮压力面的头部和尾部压力较高，中部区域压力较低。尾部高压区面积随着修圆半径的增加而减小，这主要是因为修圆半径增大后，诱导轮头部进口区域延长，导致流道阻力增大，使诱导轮尾部出口处压力下降。



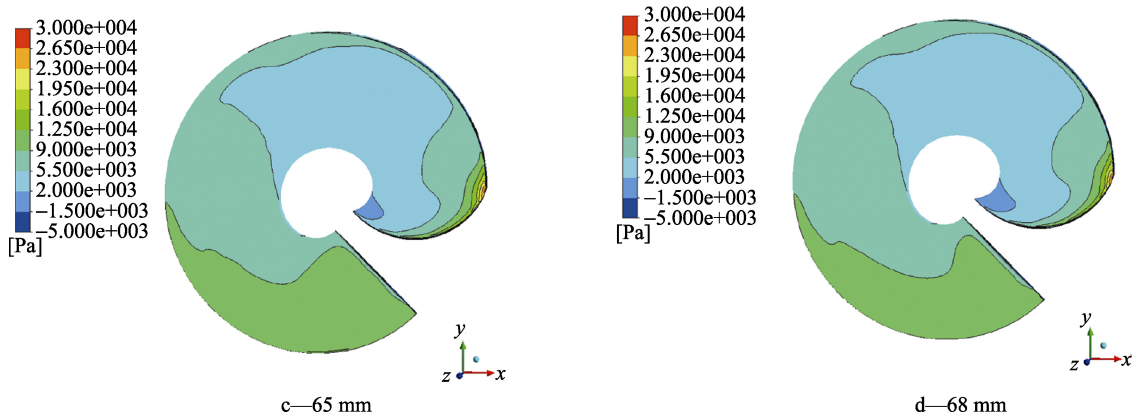


图3 4种不同修圆半径下诱导轮压力面的静压分布云图

Fig. 3 Static pressure distribution contours of the inducer pressure surface with four different radiuses

表3为4种不同修圆半径下诱导轮的出口静压。可以看出，随着修圆半径的增加，诱导轮出口静压逐渐下降。由此可知，诱导轮修圆半径越小，诱导轮的水力性能越好。

表3 4种不同修圆半径下的诱导轮出口静压

Tab. 3 Static pressure of inducer outlet with four different radiuses

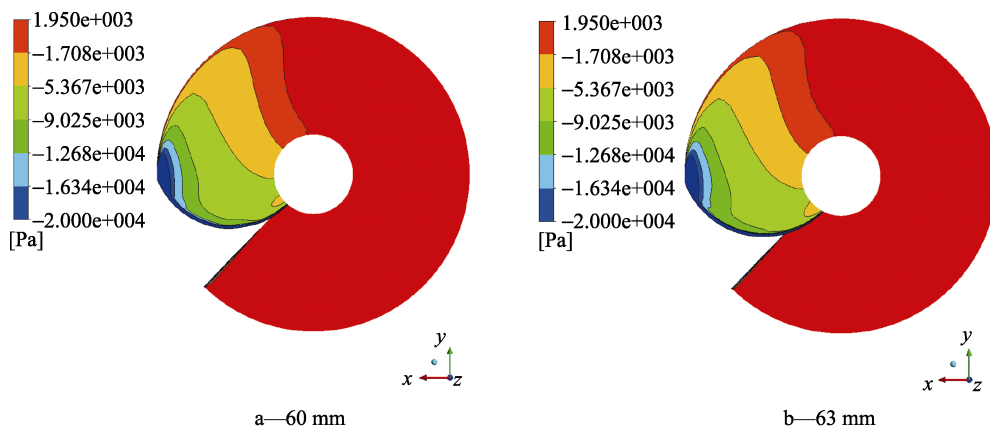
修圆半径/mm	诱导轮出口静压/Pa
60	11 599
63	11 011
65	10 371
68	10 183

3.1.2 修圆半径对诱导轮汽蚀性能的影响

对4种不同修圆半径下的LNG低温潜液泵诱导轮模型进行数值模拟计算，研究修圆半径对诱导轮汽蚀性能的影响规律，结果如下。

图4为4种不同修圆半径下诱导轮吸力面的静压分布云图。可以看出，诱导轮前缘靠近叶顶处的压力较低，同时该区域沿着前缘向轮毂侧延伸。随着修圆半径的增大，该低压区面积逐渐减小。诱导轮前缘靠近轮毂处存在一高压区，当修圆半径增加时，高压区面积增加，这主要是因为随着修圆半径的增加，诱导轮前缘靠近轮毂处向进口延伸，使流体较早接受叶片的作用，压力升高并沿着前缘向后延伸，使高压区面积增加、低压区面积减小。

图5是汽蚀余量 (net positive suction head, NPSH) 为2 m时4种不同修圆半径下诱导轮吸力面的气泡分布云图。可以看出，气泡沿着周向狭长分布，前缘靠近轮毂侧的气泡分布宽度较窄，沿前缘方向宽度逐渐增加，并在前缘与叶顶交界处达到最大，最后沿着周向逐渐变窄直至消失。4种不同修圆半径下，对应的诱导轮吸力面的气泡体积分数分别为9.53%、8.92%、8.75%、8.17%。说明随着修圆半径的增大，诱导轮叶片吸力面的汽蚀区域逐渐减小。



a—60 mm

b—63 mm

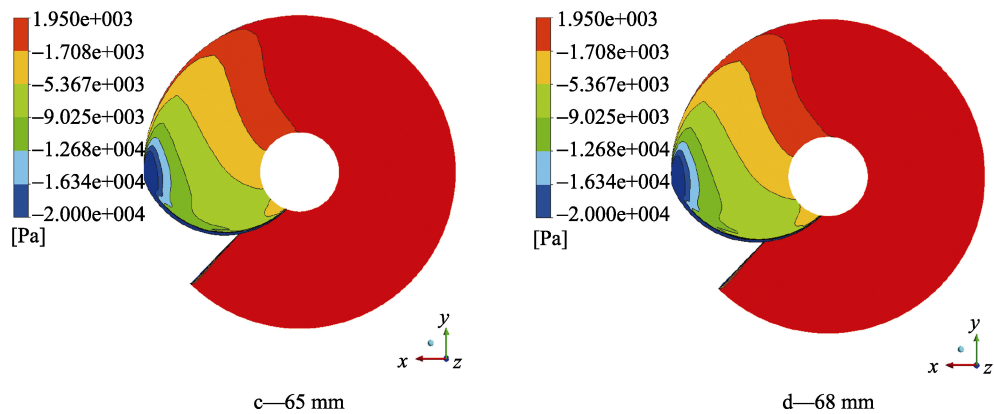


图 4 4 种不同修圆半径下诱导轮吸力面的静压分布云图

Fig. 4 Static pressure distribution contours of the inducer suction surface with four different radiuses

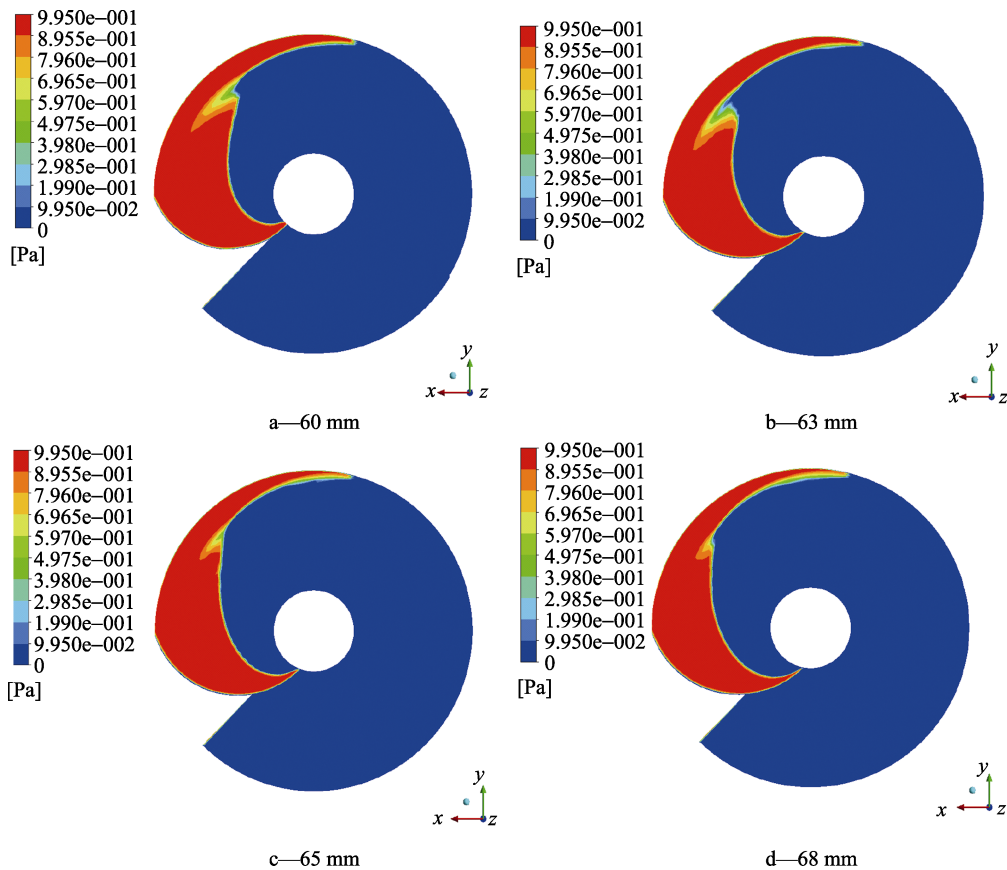


图 5 NPSH=2 m 时 4 种不同修圆半径下的诱导轮吸力面气泡分布云图

Fig. 5 Bubble distribution contours of the inducer suction surface with four different radiuses at NPSH=2 m

图 6 为 4 种不同修圆半径下的诱导轮汽蚀性能曲线。可以看出，随着汽蚀余量的减小，诱导轮的扬程缓慢下降，当达到某一临界值时，扬程出现陡降现象^[10]，此时诱导轮已经无法正常工作。4 种不同修圆半径下的诱导轮扬程陡降点对应的汽蚀余量分别为 1.80，1.65，1.59，1.55 m，说明修圆半径越大，诱导轮的汽蚀性能越好。

3.2 叶顶间隙对诱导轮性能的影响

以 LNG 低温潜液泵诱导轮为研究对象，对叶顶间隙分别为 1.475, 1.770, 2.065, 2.360 mm 4 种情况下的诱导轮水力性能和汽蚀性能进行研究，探寻叶顶间隙对诱导轮综合性能的影响规律。

3.2.1 叶顶间隙对诱导轮水力性能的影响

对 4 种不同叶顶间隙下的 LNG 低温潜液泵诱导轮模型进行数值模拟计算，研究叶顶间隙对诱导轮水力性能的影响规律，结果如下。

图 7 为 4 种不同叶顶间隙下诱导轮压力面的静压分布云图。可以看出，随着叶顶间隙的增加，中部靠近轮毂区域的低压区逐渐向叶顶和尾部扩展，同时压力面前缘和尾部的高压区面积也逐渐减小。由此可知，叶顶间隙的增加将使诱导轮压力面的压力普遍下降。

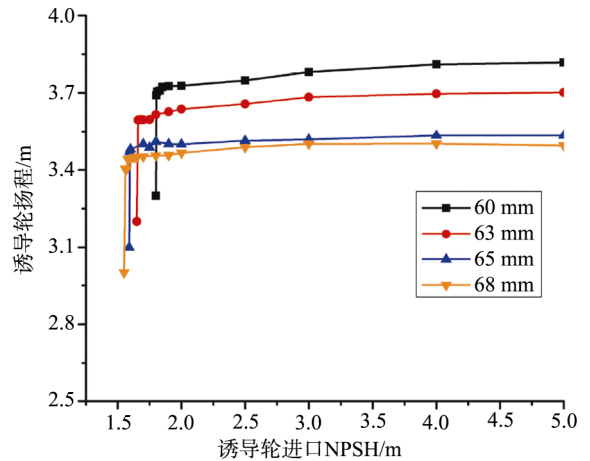


图 6 4 种不同修圆半径下的诱导轮汽蚀性能曲线
Fig. 6 Cavitation performance curves of inducer with four different radiuses

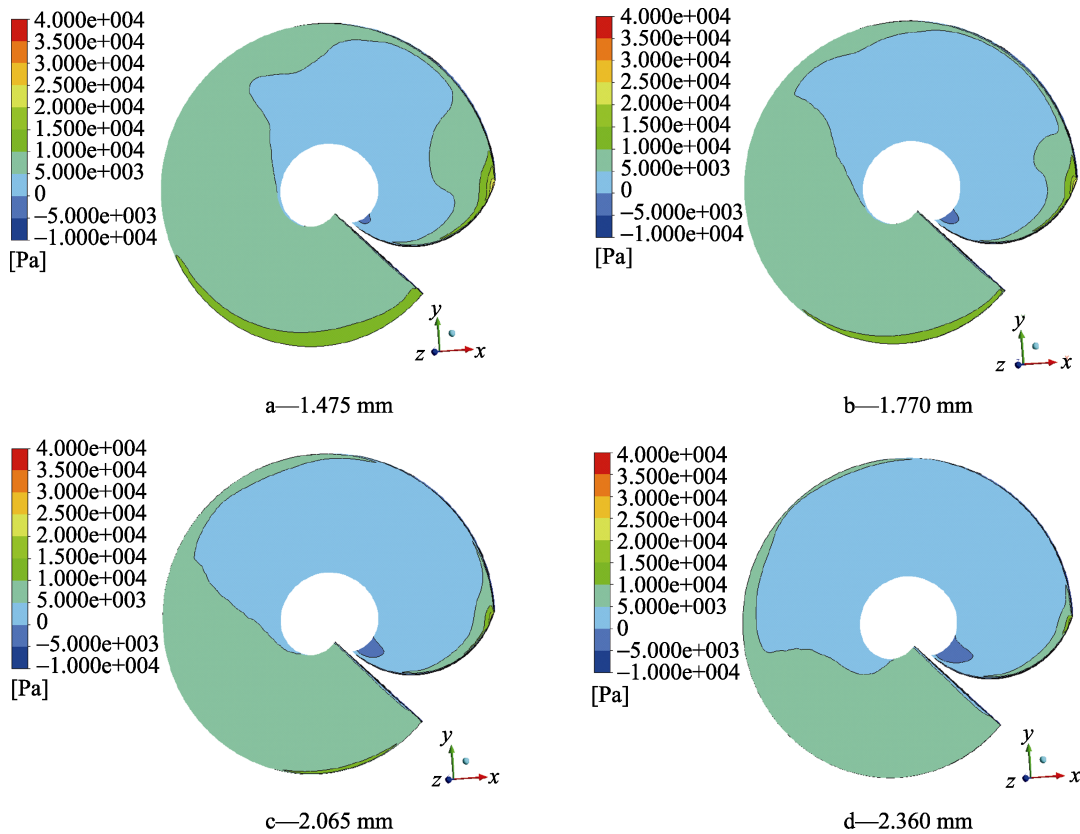


图 7 4 种不同叶顶间隙下诱导轮压力面的静压分布云图
Fig. 7 Static pressure distribution contours of the inducer pressure surface with four different tip clearances

表 4 为 4 种不同叶顶间隙下诱导轮的出口静压。可以看出，随着叶顶间隙的增加，诱导轮出口静压逐渐下降。由此可知，诱导轮叶顶间隙越小，诱导轮的水力性能越好。

3.2.2 叶顶间隙对诱导轮汽蚀性能的影响

对 4 种不同叶顶间隙下的 LNG 低温潜液泵诱导轮模型进行数值模拟计算，研究叶顶间隙对诱导轮汽蚀性能的影响规律，结果如下。

图 8 为 4 种不同叶顶间隙下诱导轮吸力面的静压分布云图。可以看出，诱导轮前缘靠近叶顶的低压区随着叶顶间隙的增加而逐渐减小，同时诱导轮尾部的高压区域面积也逐渐减小。

表 4 4 种不同叶顶间隙下的诱导轮出口静压

Tab. 4 Static pressures of the inducer outlet with four different top clearances

叶顶间隙/mm	诱导轮出口静压/Pa
1.475	9 663
1.770	8 922
2.065	8 123
2.360	7 281

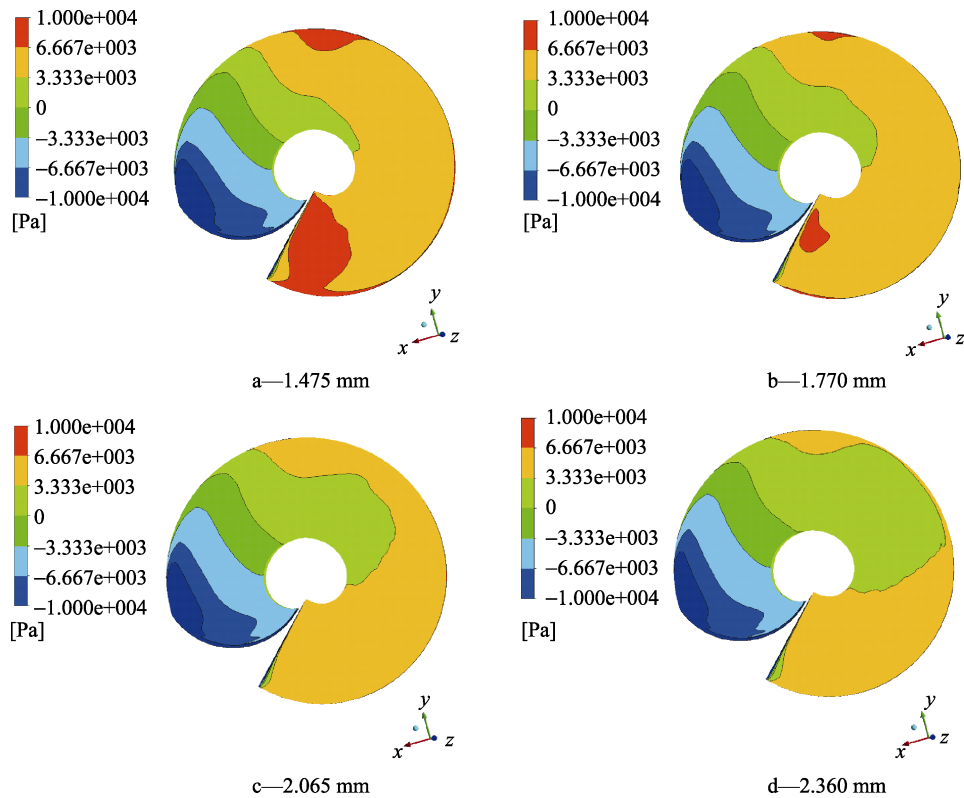
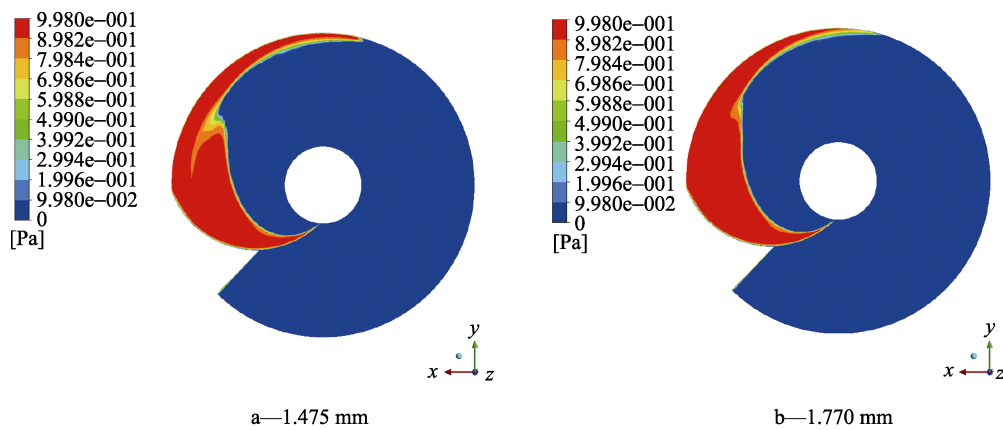


图 8 4 种不同叶顶间隙下诱导轮吸力面的静压分布云图

Fig. 8 Static pressure distribution contours of the inducer suction surface with four different tip clearances

图 9 为 NPSH=2.0 m 时 4 种不同叶顶间隙下诱导轮吸力面的气泡分布云图。可以看出，随着叶顶



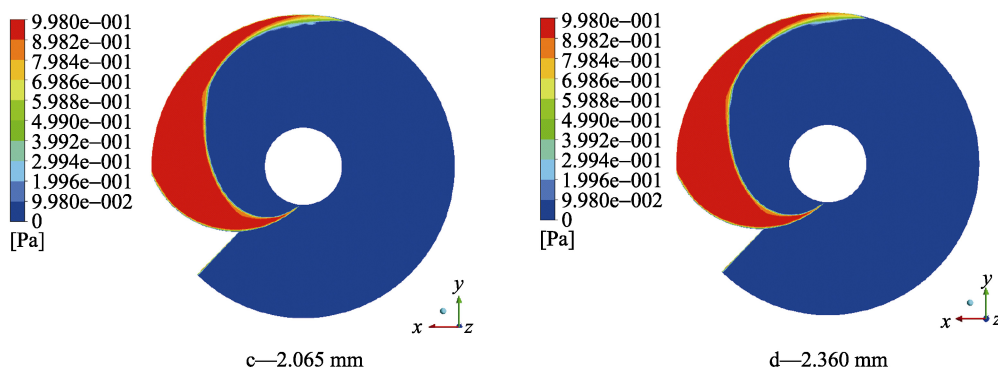


图9 当NPSH=2.0 m时4种不同叶顶间隙下诱导轮吸力面的气泡分布云图

Fig. 9 Bubble distribution contours of the inducer suction surface with four different tip clearances at NPSH=2.0 m

间隙的增加，叶片表面的气泡体积分数增加，相应的气泡体积分数分别为7.63%、7.91%、8.13%和8.16%。这主要是因为叶顶间隙的增加使间隙处的流体泄漏量增大，诱导轮中后部压力随着泄漏量的增加而减小，使气泡向后扩展更加容易。

图10为4种不同叶顶间隙下的诱导轮汽蚀性能曲线。可以看出，随着叶顶间隙的增加，诱导轮NPSH值随之增加，对应的NPSH值分别为1.60，1.65，1.76，1.87 m。这说明增加诱导轮叶顶间隙不利于提高其汽蚀性能。

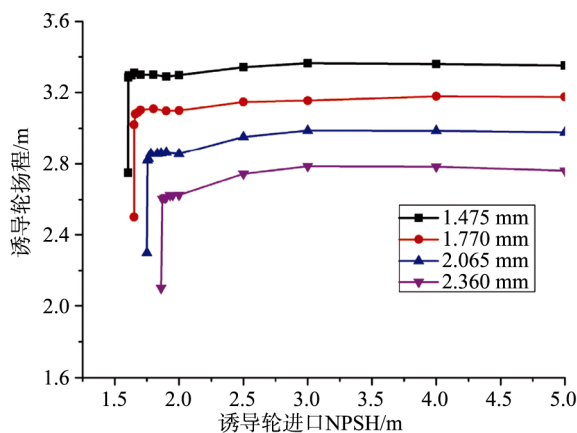


图10 4种不同叶顶间隙下的诱导轮汽蚀性能曲线

Fig. 10 Cavitation performance curves of the inducer with four different tip clearances

4 结论

利用ANSYS CFX软件，同时采用SST湍流模型和Rayleigh-Plesset汽蚀模型对4种不同修圆半径和4种不同叶顶间隙的诱导轮进行了数值模拟计算。通过分析诱导轮出口静压值、叶片压力面静压分布，得出关于2种结构参数变化对诱导轮水力性能的影响规律；通过分析诱导轮吸力面静压分布、吸力面气泡分布及汽蚀性能曲线，得出2种结构参数变化对诱导轮汽蚀性能的影响规律，结论如下：

- 1) 随着修圆半径的增加，诱导轮出口静压降低，水力性能下降，汽蚀性能增强；
- 2) 随着叶顶间隙的增加，诱导轮出口静压降低，水力性能下降，汽蚀性能减弱；
- 3) 研究结果可为LNG潜液泵诱导轮的设计和结构优化提供理论依据。

[参考文献] (References)

- [1] 罗资琴, 任永平, 陈叔平, 等. LNG低温潜液泵结构及设计分析[J]. 低温与超导, 2012, 40(7): 13-16.
LUO Z Q, REN Y P, CHEN S P, et al. Structure and design analysis of submerged LNG cryopump[J]. Cryogenics, 2012, 40(7): 13-16. (in Chinese)
- [2] 谭宏博, 厉彦忠, 梁骞, 等. 液化天然气潜液泵关键技术及研发方案[J]. 现代化工, 2007, 27(12): 52-54.
TAN H B, LI Y Z, LIANG Q, et al. Key technologies and research schemes for submerged pumps for liquefied natural gas[J]. Modern Chemical Industry, 2007, 27(12): 52-54. (in Chinese)
- [3] 侯杰, 于海力, 杨敏. 低汽蚀余量高速泵诱导轮研究[J]. 火箭推进, 2014, 40(6): 19-23.
HOU J, YU H L, YANG M. Study of inducers for low-NPSHr high-speed pumps[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2014,

- 40(6): 19-23. (in Chinese)
- [4] CHAN W K, WONG Y W, ONG W, et al. Numerical investigation of the effects of the clearance gap between the inducer and impeller of an axial blood pump[J]. *Artificial Organs*, 2005, 29(3): 250-258.
- [5] GUO X M, ZHU L H, ZHU Z C, et al. Numerical and experimental investigations on the cavitation characteristics of a high-speed centrifugal pump with a splitter-blade inducer[J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2015, 29(1): 259-267.
- [6] 郭晓梅, 朱祖超, 崔宝玲, 等. 诱导轮内流场数值计算及汽蚀特性分析[J]. *机械工程学报*, 2010, 46 (4): 122-128.
GUO X M, ZHU Z C, CUI B L, et al. Analysis of cavitation and flow computation of inducer[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2010, 46(4): 122-128. (in Chinese)
- [7] 关醒凡. 现代泵技术手册[M]. 北京: 北京宇航出版社, 1995.
GUAN X F. Modern technical manual of pumps[M]. Beijing: Beijing Aerospace University Press, 1995. (in Chinese)
- [8] 崔宝玲, 朱祖超, 林勇刚. 等螺距诱导轮内部流动的数值模拟[J]. *机械工程学报*, 2010, 46 (6): 158-163.
CUI B L, ZHU Z C, LIN Y G. Numerical simulation of inner flow in equal-pitch inducer[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2010, 46(6): 158-163. (in Chinese)
- [9] 刘建瑞, 高振军, 郭晨旭, 等. 50IB-32 型离心泵汽蚀性能的数值模拟与试验[J]. *排灌机械工程学报*, 2013, 31 (6): 475-478.
LIU J R, GAO Z J, GUO C X, et al. Numerical simulation and experimental investigations of 50IB-32 centrifugal pump's cavitation[J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2013, 31(6): 475-478. (in Chinese)
- [10] 陈晖, 李斌, 张恩昭, 等. 诱导轮空化流动数值模拟[J]. *流体机械*, 2007, 35 (1): 21-24.
CHEN H, LI B, ZHANG E Z, et al. Numerical simulation of cavitating flows in inducers[J]. *Fluid Machinery*, 2007, 35(1): 21-24. (in Chinese)