doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.02.014

气液两相条件下进口含气率对离心泵相似定律的影响

司乔瑞　崔强磊　袁寿其　张克玉　曹　睿　唐苑峰
(江苏大学流体机械工程技术研究中心, 镇江 212013)

摘要: 为了研究气液两相条件下离心泵相似定律的适用性,选用 NKG65 - 50 - 140 型直联式单级单吸离心泵,基于试验和数值模拟方法对其进行研究。首先搭建了气液两相流开式试验台,进行了 3 种转速、不同进口含气率条件下模型泵性能试验;然后采用 Eulerian - Eulerian 非均相流模型、由空气和水作为工作介质进行了数值模拟,得到了 3 种转速、不同进口含气率条件下叶轮内的流动情况和气相分布情况。研究结果表明:进口含气率通过影响气体在叶轮内的分布而影响旋转叶轮与液体能量交换能力,从而影响气液两相流相似定律的适用性;同一流量系数时进口含气率越大,相似定律的适用性就越差;随着转速的降低,气体分布呈现从叶片顶尖、叶轮流道中部和蜗壳隔舌处移动的趋势,特别是进口含气率大于 0.03 后,气体更易堵塞流道。最后通过对比试验结果和数值模拟结果,验证了低进口含气率下所采用的计算模型和方法基本可靠,为泵设计提供了理论指导。

关键词: 离心泵; 气液两相流; 相似定律; 数值模拟; Eulerian - Eulerian 非均相流模型
中图分类号: TH311; O359⁺.1　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2018)02-0107-06

Influence of Inlet Gas Volume Fraction on Similarity Law in Centrifugal Pumps under Gas - Liquid Two-phase Condition

SI Qiaorui　CUI Qianglei　YUAN Shouqi　ZHANG Keyu　CAO Rui　TANG Yuanfeng
(*Research Center of Fluid Machinery Engineering and Technology*, *Jiangsu University*, *Zhenjiang* 212013, *China*)

Abstract: In order to study the applicability of the similarity law under the condition of gas - liquid two-phase flow in centrifugal pumps, the NKG65 - 50 - 140 direct-type single-stage and single-suction centrifugal pump was chosen, based on experimental and numerical simulation to study. Firstly, the performance tests of model pump under the condition of three different speeds and different inlet gas volume fractions (IGVF) were carried out at open test rig of gas-liquid two-phase flow. And then numerical simulation used the water and air as the working medium, based on the Eulerian - Eulerian inhomogeneous model, the flow condition and gas distribution were got in the impeller at different speeds and IGVF. The comparisons between the experimental and simulated results showed that the IGVF had a significant effect on the similarity law of gas - liquid two-phase flow because the IGVF affected the energy exchange capacity between impeller and liquid. For the same flow coefficient, the greater of IGVF was, the worse of the applicability to the similarity law was. With the decrease of rotational speeds, the gas distribution was moving from the tip of impeller blade to the middle of the impeller channel and the volute-tongue, which would plug the flow more easily especially when the IGVF was more than 0.03. Finally, the reliability of mathematical model and calculation methods under low IGVF was confirmed by comparing the experimental results with simulated results, which had a significant theoretical guidance for pump design.

Key words: centrifugal pumps; gas - liquid two-phase flow; similarity law; numerical simulation; Eulerian - Eulerian inhomogeneous model

收稿日期: 2017 - 06 - 21　修回日期: 2017 - 08 - 30
基金项目: 国家自然科学基金项目(51509108、51609164、51779107)、江苏省自然科学基金项目(BK20150516、BK20160574)、江苏大学高级人才基金项目(15JDG048)和中国博士后科学基金特别项目(2015M581735、2016T90422)
作者简介: 司乔瑞(1986—),男,副研究员,主要从事离心泵内部流动研究,E-mail: siqiaorui@ujs.edu.cn
通信作者: 袁寿其(1963—),男,研究员,博士生导师,主要从事流体机械基础理论研究,E-mail: shouqiy@ujs.edu.cn

0 引言

离心泵作为一种重要的能量转换装置和液体传输设备,在工程中经常遇到离心泵气液两相流问题。然而由于工程实际条件限制,有的实型泵尺寸较大或转速较高,设计阶段只能用模型泵代替,并且泵在实际运行时经常通过变频方式进行节能,所以要在相似理论的指导下进行模型换算[1-2],因此对离心泵气液两相条件下相似定律的适用性进行研究具有实际意义。

泵内气液两相流问题一向是研究的热点和难点。近年来,MATSUSHITA 等[3-4]通过试验研究了气液两相条件下叶轮直径、叶片高度和旋转速度的相似定律,发现了叶片高度对气液两相流相似定律有显著影响,在实际设计中需要多加考虑。随着计算流体力学的快速发展,国内外众多学者开始使用数值模拟方法对离心泵气液两相条件下内部流动情况进行研究[5-9]。CARIDAD 等[10-11]通过 CFD 数值模拟对不同含气率和气泡直径下电动潜水泵输送气液两相流问题进行了性能研究,得到泵扬程特性随其变化规律。潘兵辉等[12]采用 Mixture 模型研究了气液两相流对离心泵扬程和效率的影响。袁建平等[13]采用非均相流模型对离心泵气液两相流内部流动进行了数值研究,发现气液两相条件下内部流动的基本规律。然而结合试验和数值模拟对不同转速、不同进口含气率条件下离心泵气液两相流相似定律的研究还较少。

本文首先在离心泵气液两相流开式试验台上研究气液两相条件下不同转速、不同进口含气率时相似定律的适用性;然后基于 Eulerian - Eulerian 非均相流模型对气液两相流内部流动进行数值模拟,试验结果为数值模拟提供初始边界条件;最后结合试验和数值模拟结果对相似定律的适用性进行分析,为泵设计提供理论指导。

1 气液两相条件下离心泵性能试验

1.1 试验台搭建和试验方法

为了研究离心泵在气液两相条件下同一流量系数不同进口含气率时相似定律的适用性,进行 3 种转速、不同进口含气率的外特性试验,试验在江苏大学国家水泵及系统工程技术研究中心气液两相流开式试验台进行(图 1)。模型泵选用 NKG65 - 50 - 140 型直联式单级单吸离心泵,设计工况为:流量 Q_d = 50.6 m^3/h,扬程 H = 20.2 m,额定转速 n = 2 910 r/min,比转数 n_s = 132.2。泵进口直径 D_s = 65 mm,泵出口直径 D_d = 50 mm,叶轮进口直径 D_1 = 79 mm,叶轮出口直径 D_2 = 140 mm,蜗壳基圆 D_3 = 149 mm,叶片出口宽度 b_2 = 15.5 mm,叶片数 Z = 6。

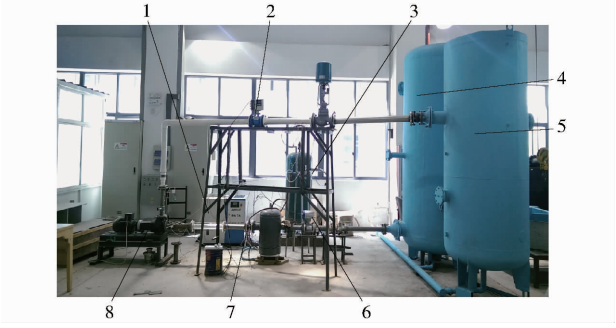


图 1 试验台

Fig. 1 Test rig

1. 压缩机 2、6. 电磁流量计 3. 气体流量计 4、5. 储水箱 7. 气液混合装置 8. 试验泵

试验装置和仪器满足 GB/T 3216.2005 中的Ⅱ级精度要求,含气率误差在 ±0.01 范围内。试验原理是保证液体流量在某一恒定值,通过气体控制开关来控制气体流量得到不同含气率的气液混合物,从而进行试验泵的气液混输试验。试验时,先开启试验泵一段时间,并通过排气罐排除管道内残留气体,这样可排除试验的干扰,提高试验精确性。储水箱 4 中的水通过电磁流量计 6 后在气液混合装置中与压缩机产生的空气混合均匀进入试验泵,泵输出的气液混合物经过电动调节阀和电磁流量计 2 后最终流入储水箱 5,储水箱 4 和 5 上方均开口并且是连通的,这样能使气体有效排出并保证进入管道内的水不再含有空气,提高试验精度。

1.2 试验结果分析

通过此开式试验台进行 3 种转速、不同进口含气率离心泵外特性试验研究。

为了便于比较分析气液两相条件下 3 种转速、不同进口含气率的试验结果,选用流量系数 φ 和扬程系数 ψ 分别表征其变化规律[14],即

$$\varphi = \frac{Q_{water}}{2\pi R_2 b_2 u_2} \tag{1}$$

$$\psi = \frac{gH}{u_2^2} \tag{2}$$

式中 Q_{water}——体积流量 R_2——叶轮半径

u_2——叶轮出口速度 g——重力加速度

得到了如图 2 所示的 3 种性能曲线(ψ_0表示纯水时的扬程系数)。由图 2 可知,进口含气率对气液两相条件下相似定律的适用性有明显影响。在同一流量系数时,随着进口含气率的增大,各转速对应曲线与相似定律偏差增大,而在单相纯水工况时(图 3),各转速对应曲线与相似定律相吻合。由图 2 可知,当

φ =0.077(转速 n =2 910 r/min,流量 Q_d =50.6 m^3/h),进口含气率小于 0.03 时,相似定律适用性较好;当进口含气率大于 0.03 时,相似定律适用性较差,并且含气率越大,偏差就越明显。

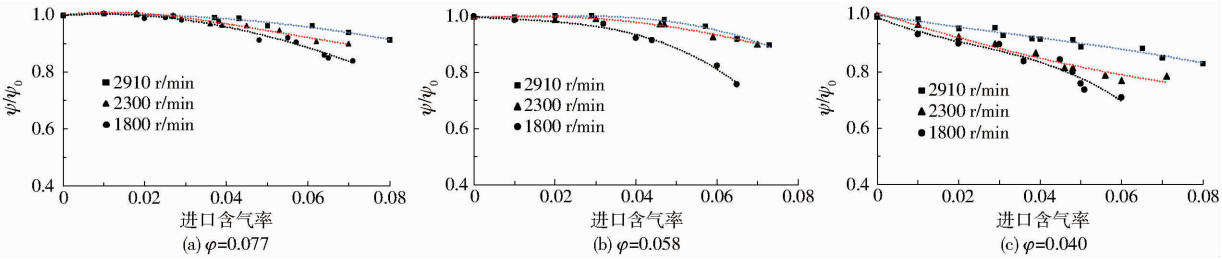


图 2　3 种流量系数泵性能曲线

Fig. 2　Pump performance curves at three different flow coefficients

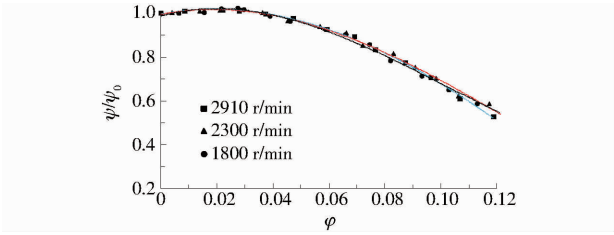


图 3　纯水工况不同转速扬程曲线

Fig. 3　Head curves of various speeds at pure water condition

2　数值模拟计算方法

2.1　控制方程

连续性方程和动量方程[13-14]为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_k\rho_k)+\nabla\cdot(\alpha_k\rho_k\boldsymbol{w}_k)=0 \tag{3}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_k\rho_k\boldsymbol{w}_k)+\nabla\cdot(\alpha_k\rho_k\boldsymbol{w}_k\otimes\boldsymbol{w}_k)=-\alpha_k\nabla p_k+\nabla\cdot(\alpha_k\mu_k(\nabla\boldsymbol{w}_k+(\nabla\boldsymbol{w}_k)^{\mathrm{T}}))+\boldsymbol{M}_k+\alpha_k\rho_k\boldsymbol{f}_k \tag{4}$$

式中　k——任意相(l 代表液体,g 代表气体)

ρ_k——k 相密度　　p_k——k 相压力

α_k——k 相体积分数

μ_k——k 相动力粘度

$\boldsymbol{w}_k$——k 相流体相对速度

$\boldsymbol{M}_k$——k 相所受相间作用力

$\boldsymbol{f}_k$——与叶轮旋转有关的质量力

气体和液体满足关系

$$\alpha_g+\alpha_l=1 \tag{5}$$

其中

$$\alpha_g=\frac{Q_g}{Q_g+Q_l} \tag{6}$$

式中　α_g——进口含气率　　α_l——进口含液率

Q_g——气体体积流量

Q_l——液体体积流量

2.2　几何建模与网格划分

采用 Pro/E 5.0 分别对叶轮、蜗壳、进出口进行三维建模,考虑到进、出口可能存在的回流现象,对进、出口水体进行适当延长,以便使其更好的收敛,增加计算的准确性。其整体计算域分为如图 4 所示的 5 部分,即泵进口水体、口环水体、叶轮水体、蜗壳水体和泵腔水体。

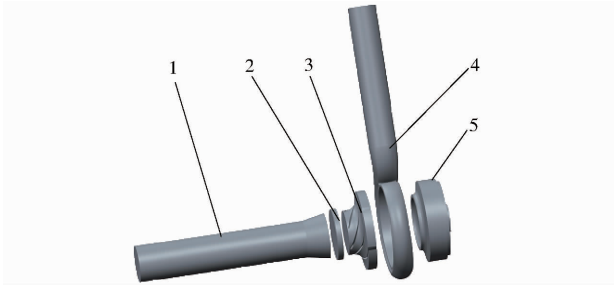


图 4　模型泵三维模型

Fig. 4　Three dimensional model of model pump

1. 进口水体　2. 口环水体　3. 叶轮水体　4. 蜗壳水体　5. 泵腔水体

采用 ICEM 进行网格划分,网格划分采用六面体结构化网格,对蜗壳隔舌局部加密后在蜗壳壁面添加边界层网格,如图 5 所示。选取最后扬程变化小于 3% 作为网格无关性标准,最终网格数及节点数如表 1 所示。通过计算检查,壁面的 Y^+(第 1 层网格节点与壁面间距的无量纲量)分布小于 80,能够满足泵内部流场计算时选择 $k-\varepsilon$ 湍流模型的需要。



图 5　叶轮和蜗壳网格

Fig. 5　Meshes of impeller and volute

2.3　边界条件设置

本文采用 Eulerian－Eulerian 非均相流模型,不考虑温度场,液相为连续相,采用 $k-\varepsilon$ 湍流模型;气相为离散相,采用零方程理论模型,相间传递单元采

用 Particle 模型。根据试验结果认为无空化现象发生,满足质量和动量守恒[15-16]。在计算域的入口,认为含气率均匀分布,并设置两相入口速度相同且为均匀泡状流,气相为直径 0.2 mm 的球形气泡。边界条件的设置对计算结果的影响至关重要,本文边界条件的设置如下:

(1)进口边界条件:考虑到试验要求,按试验实际测量得到的压力进行设置,并在进口处通入一定量的气体,湍流强度按照中等湍流密度给定。

(2)出口边界条件:对于单相模拟,出口设置为质量流量速率;对于气液两相模拟,出口设置为总质量流量速率。

(3)壁面条件:流体边界采用无滑移固壁条件,气体边界采用自由滑移固壁条件。

表 1 模型泵最终网格数

Tab.1 Final meshes of model pump

计算域	网格数	节点数
泵腔	433 656	493 164
进口	422 604	432 500
口环	42 240	53 285
蜗壳	926 439	951 576
叶轮	950 976	1 014 475
总计	2 775 915	2 945 000

3 数值模拟结果分析

3.1 中间截面含气率分布

为了探究当流量系数 $\varphi=0.077$,进口含气率大于 0.03 相似定律适用性较差的原因,将转速为 2 910、2 300、1 800 r/min 的模拟结果进行后处理,得到图 6 所示的泵中间截面含气率分布结果。从图中可看出,当进口含气率大于 0.03,转速为 2 910 r/min 时,气体主要聚集在叶片顶尖和叶轮流道内;转速为 2 300 r/min 时,气体主要聚集在叶轮流道内,并且逐渐向叶轮流道的吸力面移动;转速为 1 800 r/min 时,气体从叶轮流道逐渐向蜗壳隔舌聚集并主要聚集在蜗壳隔舌处。由此得出,随着转速的变化气体在叶轮内的流动分布情况发生变化,并且随着转速

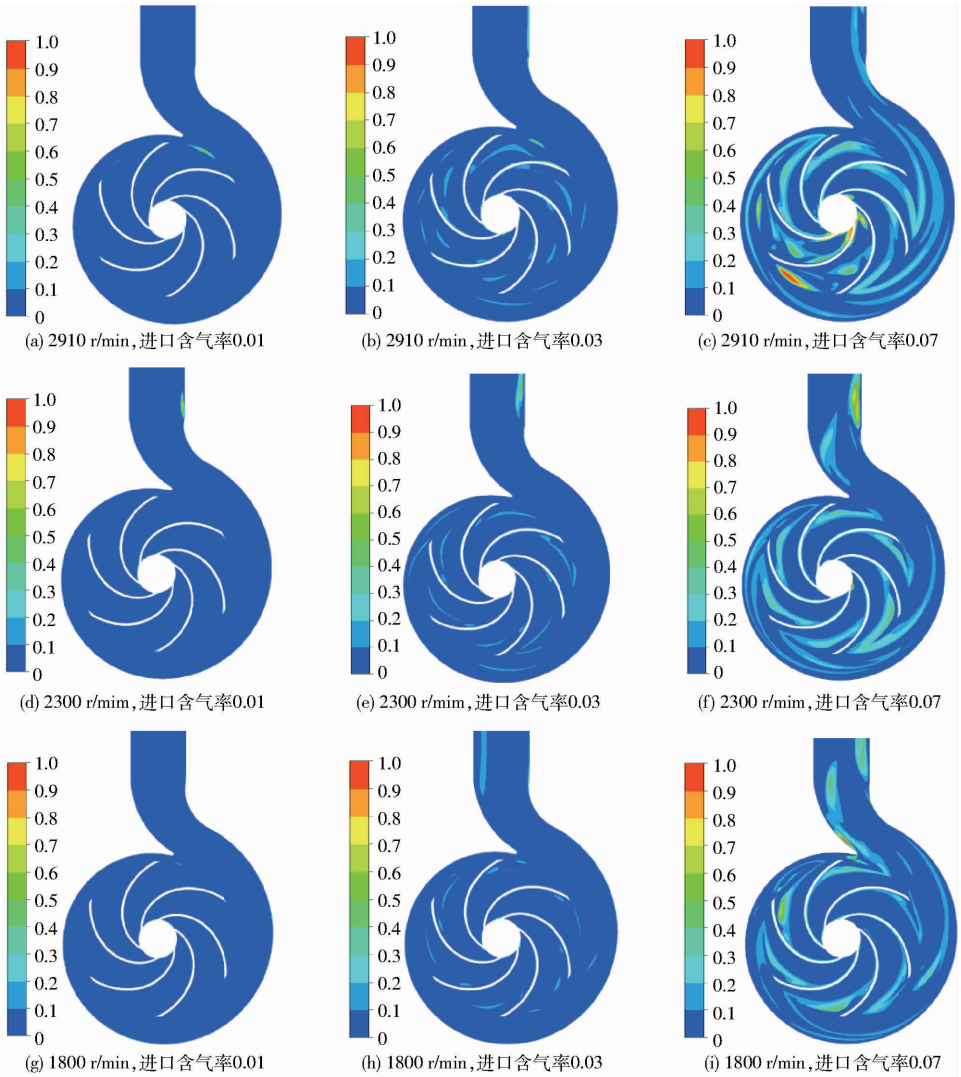


图 6 流量系数 $\varphi=0.077$ 时泵中间截面含气率分布

Fig. 6 Gas distributions in middle section when φ was 0.077

的降低，气体分布呈现从叶片顶尖、叶轮流道中部和蜗壳隔舌处移动的趋势，会不同程度影响气体堵塞叶轮流道[17-18]，进而导致离心泵性能发生剧烈变化而影响相似定律的适用性。从图 6 还可以看出，同一含气率时，转速越大叶轮流道内的含气率也越高（与文献[19]观察结果一致），导致离心泵内部压力差别较大，影响了液体在流道内的正常流动而发生堵塞现象；而在低转速时（1 800 r/min），气体主要聚集在蜗壳隔舌及出口，导致液体被堵塞在叶轮流道内，影响液体与叶轮能量交换的输出，导致泵扬程下降较快，与试验所得结果一致。

3.2　叶轮流道气相空间分布

为了便于进一步分析气相在流道内的空间分布情况，图 7 给出了叶轮流道内含气率为 0.2 时气相在流道内的空间分布情况。从图中可以更明显地看出，工作面含气率明显多于背面；在进口含气率为 0.01 时，气相主要分布在靠近叶片工作面的叶轮空间部位；进口含气率为 0.03 时，气相已向叶轮流道中间的空间部位移动，并且气相明显增多；进口含气率为 0.07 时，气相主要分布在叶轮流道空间部位，并且已占据叶轮流道内的大部分区域，最终将会堵塞叶轮流道，严重影响旋转叶轮与液体能量交换的能力[20-21]，导致离心泵性能下降而影响相似定律的适用性。

4　试验验证

为了验证数值模拟的可靠性，在开式试验台上进行了不同进口含气率下的外特性试验。图 8（图中 η 表示泵效率）是转速为 2 910 r/min 模型泵纯水工况下的模拟值与试验值的对比图，从图中可以看出，数值模拟与试验结果在整个流量范围内保持较好的一致性。在小流量工况点，两者吻合度较好，在大流量工况点，模拟与试验结果存在一定偏差，扬程系数最大误差为 5.9%，效率最大误差为 1.8%，两者吻合性较好，能满足分析的需要。

图 9 为进口含气率为 0.05 时试验泵扬程数值模拟与试验结果对比。从图中可知，除了较小流量下试验值与模拟值有较大偏差外，其余各点试验值与模拟值都比较接近，在允许的相对误差范围内。进口含气率大于 0.05、小流量工况下存在较大偏差一方面是由于该工况下流动比较复杂，现有的两相

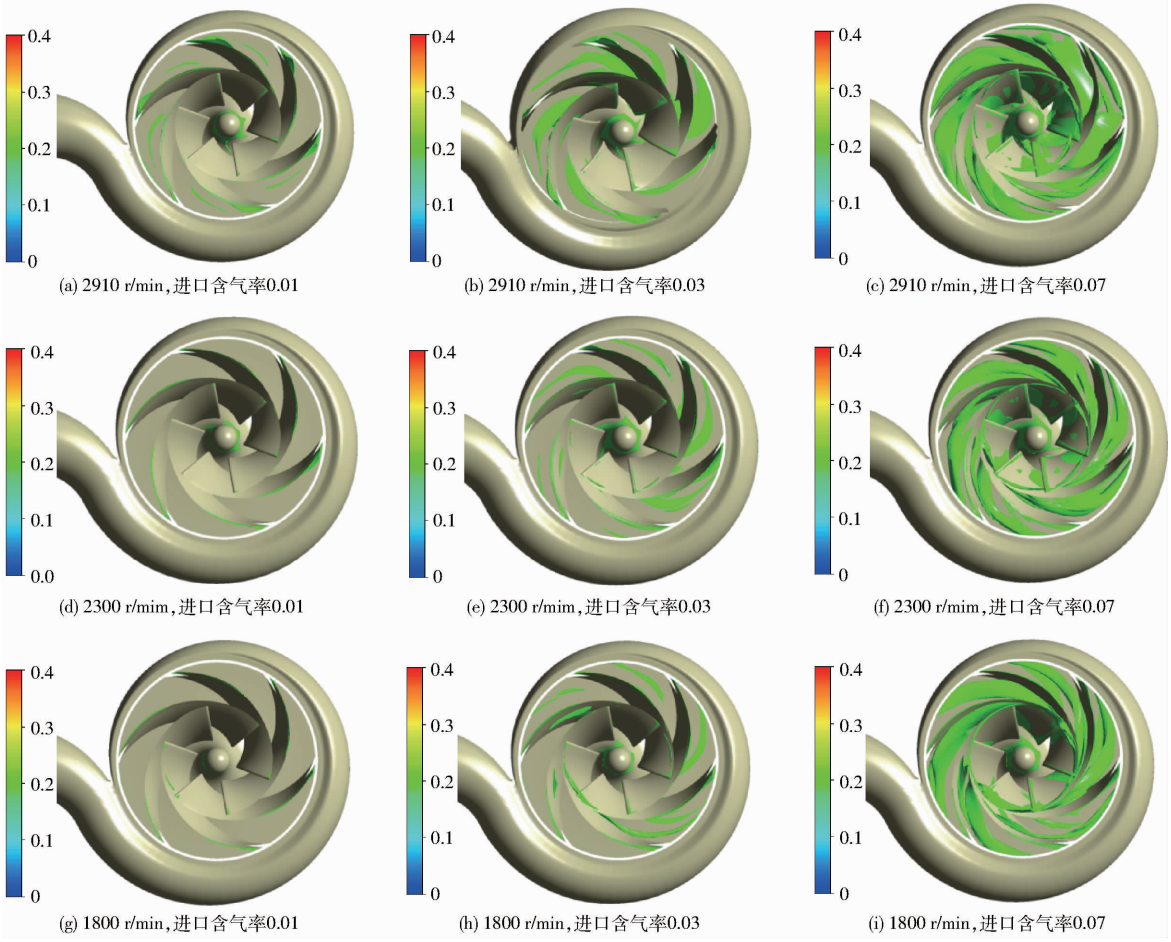


图 7　流量系数 $\varphi=0.077$ 且流道内含气率为 0.2 时气相空间分布云图

Fig. 7　Gas distribution counter in impeller when φ was 0.077 and gas volume fraction was equal to 0.2

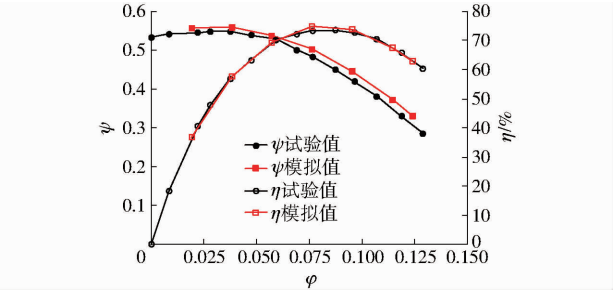


图 8 $n=2\,910$ r/min 纯水工况数值模拟与试验结果对比

Fig. 8 Comparisons between simulated and experimental results at pure water condition when n was 2 910 r/min

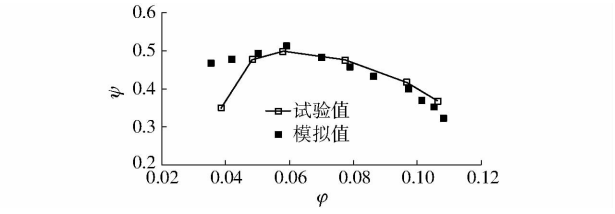


图 9 $n=2\,910$ r/min 进口含气率为 0.05 时数值模拟与试验结果对比

Fig. 9 Comparisons between simulated and experimental results at IGVF was 0.05 when n was 2910 r/min

流模型和湍流模型还有待改进,另一方面可能是由气泡直径设置不合适造成的。

5 结论

(1)通过 3 种不同转速、不同进口含气率的外特性试验结果可知,进口含气率对气液两相条件下离心泵相似定律的适用性有明显影响,同一流量系数,进口含气率越大,相似定律的适用性就越差。

(2)通过试验和数值模拟结果可知,对于流量系数 $\varphi=0.077$、进口含气率大于 0.03 相似定律适用性较差的原因主要是转速和含气率的变化导致气体在叶轮内流动分布情况发生较大变化。随着转速的降低,气体分布呈现从叶片顶尖、叶轮流道中部和蜗壳隔舌处移动的趋势,使得气体不同程度堵塞叶轮流道。通过叶轮流道气相空间分布可知,当进口含气率大于 0.03 时,气相占据叶轮流道大部分区域,使得旋转叶轮与液体能量交换能力下降,导致离心泵性能发生剧烈变化,影响了相似定律的适用性。

(3)通过对比试验和数值模拟所获得的外特性结果,验证了低进口含气率下所采用的 Eulerian - Eulerian 两相流模型和数值模拟方法基本上是可靠的。而进口含气率大于 0.05 时,小流量工况下由于流动比较复杂或气泡直径设置问题,计算误差较大。

参 考 文 献

1 袁寿其,施卫东,刘厚林,等. 泵理论与技术[M]. 北京:机械工业出版社,2014.

2 MINEMURA K,UCHIYAMA T. Three-dimensional calculation of air-water two-phase flow in centrifugal pump impeller based on a bubbly flow model[J]. ASME Journal of Fluids Engineering,1993,115(4):766 - 771.

3 MATSUSHITA N,WATANABE S,OKUMA K,et al. Similarity law of air-water two-phase flow performance of centrifugal pump[C]// Proceedings of FEDSM 2007 5th Joint ASME/JSME Fluids Engineering Conference,2007:915 - 920.

4 MATSUSHITA N,FURUKAWA A,WATANABE S,et al. Study on design of air-water two-phase flow centrifugal pump based on similarity law[J]. International Journal of Fluid Machinery & Systems,2009,2(2):499 - 506.

5 卢金铃,席光,祁大同. 离心泵叶轮内气液两相三维流动数值研究[J]. 工程热物理学报,2003,4(2):237 - 240.
LU Jinling,XI Guang,QI Datong. Numerical study on the gas - liquid two-phase 3-D flow in the impeller of a centrifugal pump[J]. Journal of Engineering Thermophysics,2003,24(2):237 - 240. (in Chinese)

6 周水清,孔繁余,王志强,等. 基于结构化网格的低比转数离心泵性能数值模拟[J]. 农业机械学报,2011,42(7): 66 - 69.
ZHOU Shuiqing,KONG Fanyu,WANG Zhiqiang,et al. Numerical simulation of low specific-speed centrifugal pump with structured grid[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2011,42(7):66 - 69. (in Chinese)

7 BARRIOS L,PRADO M G. Modeling two phase flow inside an electrical submersible pump stage[J]. Journal of Energy Resources Technology,2009,133(4):227 - 231.

8 MÜLLER T,LIMBACH P,SKODA R. Numerical 3D RANS simulation of gas - liquid flow in a centrifugal pump with an Euler - Euler two-phase model and a dispersed phase distribution[C]// Proceedings of 11th European Conference on Turbomachinery Fluid Dynamics & Thermodynamics,2015:760 - 772.

9 CAMPO A,CHISELY E A. Experimental characterization of two-phase flow centrifugal pumps[J]. Journal of Bacteriology,2010,176(24):7524 - 7531.

10 CARIDAD J,KENYERY F. CFD analysis of electric submersible pumps (ESP) handling two-phase mixtures[J]. Journal of Energy Resources Technology,2004,126(2):99 - 104.

11 CARIDAD J,ASUAJE M,KENYERY F,et al. Characterization of a centrifugal pump impeller under two-phase flow conditions [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering,2008,63(1 - 4):18 - 22.

12 潘兵辉,王万荣,江伟. 离心泵气液两相流数值分析[J]. 石油化工应用,2011,30(12):101 - 104.
PAN Binghui, WANG Wanrong, JIANG Wei. Gas - liquid two-phase flow numerical simulation of centrifugal pump [J]. Petrochemical Industry Application,2011,30(12):101 - 104. (in Chinese)

(下转第 268 页)

26 李登科,范建忠,权文婷. 陕西省植被退化及其驱动因素分析[J]. 生态学杂志,2015,34(10):2907 - 2913.
LI Dengke, FAN Jianzhong, QUAN Wenting. Analysis of vegetation degradation and its driving factors in Shaanxi Province[J]. Chinese Journal of Ecology, 2015,34(10):2907 - 2913. (in Chinese)

27 李登科,郭铌,何慧娟. 陕北长城沿线风沙区植被指数变化及其与气候的关系[J]. 生态学报,2007,27(11):4620 - 4629.
LI Dengke, GUO Ni, HE Huijuan. Vegetation change and its relationship with climate in the region along the Great Wall in Northern Shaanxi[J]. Journal of Natural Resources, 2007,27(11):4620 - 4629. (in Chinese)

28 FENG X M, FU B J, LÜ N, et al. How ecological restoration alters ecosystem services: an analysis of carbon sequestration in China's Loess Plateau[J]. Scientific Reports, 2013, 3, Article number: 2846.

29 信忠保,余新晓,甘敬,等. 黄河中游河龙区间植被覆盖变化与径流输沙关系研究[J]. 北京林业大学学报,2009,31(5):1 - 7.
XIN Zhongbao, YU Xinxiao, GAN Jing, et al. Vegetation restoration andits effects on runoff and sediment yield in Hekouzhen - Longmen Section of the middle reaches of Yellow River[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2009, 31(5): 1 - 7. (in Chinese)

30 范建忠,李登科,董金芳. 陕西省重点生态建设工程区植被恢复状况遥感监测[J]. 农业工程学报,2012,28(7):228 - 234.
FAN Jianzhong, LI Dengke, DONG Jinfang. Remote sensing analysis of vegetation restoration in key ecological construction areas of Shaanxi Province[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(7):228 - 234. (in Chinese)

31 张翀,任志远. 陕北地区土地生态系统固碳释氧价值量动态测评[J]. 地理研究,2015,34(8):1522 - 1534.
ZHANG Chong, REN Zhiyuan. Dynamic evaluation of the value of carbon fixation and oxygen release based on land ecosystem in Northern Shaanxi[J]. Geographical Research, 2015,34(8):1522 - 1534. (in Chinese)

32 刘晓燕,刘昌明,杨胜天,等. 基于遥感的黄土高原林草植被变化对河川径流的影响分析[J]. 地理学报,2014,69(11):1595 - 1603.
LIU Xiaoyan, LIU Changming, YANG Shengtian, et al. Influences of shrubs-herbs-arbor vegetation coverage on the runoff based on the remote sensing data in Loess Plateau[J]. Acta Geographica Sinica, 2014,69(11):1595 - 1603. (in Chinese)

33 吴喜军,李怀恩,董颖,等. 陕北地区煤炭开采等人类活动对河道径流影响的定量识别[J]. 环境科学学报,2014,34(3):772 - 780.
WU Xijun, LI Huaien, DONG Ying, et al. Quantitative identification of coal mining and other human activities on river runoff in Northern Shannxi region [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2014,34(3):772 - 780. (in Chinese)

(上接第 112 页)

13 袁建平,张克玉,司乔瑞,等. 基于非均相流模型的离心泵气液两相流动数值研究[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(1):89 - 95. http://www.j-csam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no = 20170112&flag = 1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.01.012.
YUAN Jianping, ZHANG Keyu, SI Qiaorui, et al. Numerical investigation of gas - liquid two-phase flow in centrifugal pumps based on inhomogeneous model[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017,48(1):89 - 95. (in Chinese)

14 陈次昌,刘正英,刘天宝,等. 两相流泵的理论与设计[M]. 北京:兵器工业出版社,1993.

15 余志毅,刘影. 叶片式混输泵气液两相非定常流动特性分析[J/OL]. 农业机械学报,2013,44(5):66 - 69. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no = 20130513&flag = 1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.05.013.
YU Zhiyi, LIU Ying. Characteristic analysis of unsteady gas - liquid two-phase flow in a multiphase rotodynamic pump[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013,44(5):66 - 69. (in Chinese)

16 张余亚,蔡淑杰,朱宏武,等. 三级螺旋轴流式混输泵可压缩流场数值模拟[J/OL]. 农业机械学报,2014,45(9):89 - 95. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no = 20140915&flag = 1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.09.015.
ZHANG Yuya, CAI Shujie, ZHU Hongwu, et al. Numerical investigation of compressible flow in a three-stage helico-axial multiphase pump[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014,45(9):89 - 95. (in Chinese)

17 SATO S, FURUKAWA A, TAKAMATSU Y, et al. Air-water two-phase flow performance of centrifugal pump impeller with various blade angles[J]. The Japanese Society of Mechanical Engineers, 1996,39(2):223 - 229.

18 MINEMURA K, UCHIYAMA T. Three-dimensional calculation of air-water two-phase flow in a centrifugal pump based on a bubbly flow model with fixed cavity[J]. JSME International Journal, Series B: Fluids & Thermal Engineering, 1994,37(4):726 - 735.

19 PINEDA H, BIAZUSSI J, LÓPEZ L, et al. Phase distribution analysis in an electrical submersible pump (ESP) inlet handling water-air two-phase flow using computational fluid dynamics (CFD)[J]. Journal of Petroleum Science & Engineering, 2016,139:49 - 61.

20 FURUKAWA A, SHIRASU S I, SATO S. Experiments on air-water two-phase flow pump impeller with rotating-stationary circular cascades and recirculating flow holes[J]. The Japanese Society of Mechanical Engineers, 1996,39(3):575 - 582.

21 SATO S, FURUKAWA A. Air-water two-phase flow performances of centrifugal pump with movable blade impeller and effects of installing diffuservanes[J]. International Journal of Fluid Machinery & Systems, 2010,3(3):245 - 252.