

# 动叶轮叶片数对多相混输泵水力性能的影响

史广泰<sup>1,2</sup>, 姚鑫<sup>1,2</sup>, 陶思佳<sup>1,2</sup>, 孙国栋<sup>1,2</sup>

(1. 西华大学能源与动力工程学院, 四川 成都 610039; 2. 西华大学流体及动力机械教育部重点实验室, 四川 成都 610039)

**摘要:** 为了探究动叶轮叶片数对多相混输泵外特性、做功性能和水力特性的影响规律, 基于欧拉非均质流模型, 利用 CFX 软件对不同动叶轮叶片数下的多相混输泵在多种流量工况、入口含气率 10% 的条件下进行数值计算。研究发现: 流量在 90 m<sup>3</sup>/h 及以下时, 动叶轮叶片数对扬程和效率的变化趋势影响相对较小, 而随着流量的增加, 四叶片动叶轮会使混输泵扬程和效率的下降程度增大; 当动叶轮叶片数为 3 时, 多相混输泵的外特性、叶片表面静压分布、载荷分布和水力特性等均优于动叶轮叶片数为 4 时的性能。本文的研究结果可为多相混输泵动叶轮叶片数的选择提供参考。

**关键词:** 多相混输泵; 动叶轮; 叶片数; 水力性能

中图分类号: TH313 文献标志码: A 文章编号: 1673-159X(2023)02-0039-06

doi:10.12198/j.issn.1673-159X.4334

## Effects of the Number of Impeller Blades on Hydraulic Performance in a Multiphase Pump

SHI Guangtai<sup>1,2</sup>, YAO Xin<sup>1,2</sup>, TAO Sijia<sup>1,2</sup>, SUN Guodong<sup>1,2</sup>

(1. School of Energy and Power Engineering, Xihua University, Chengdu 610039 China;

2. Key Laboratory of Fluid and Power Machinery, Ministry of Education, Xihua University, Chengdu 610039 China)

**Abstract:** In order to investigate the effect of impeller blades number on the external characteristics, working and hydraulic performance in a multiphase pump, based on the Eulerian heterogeneous flow model, CFX software was used to carry out numerical calculation of multiphase pump with different number of impeller blades under diverse flow conditions and the inlet gas void fraction was 10%. The present study shows that the impeller blades have a petite effect on the decrease trend of head and efficiency when the flow rate is below 90 m<sup>3</sup>/h. When the flow rate increases gradually, four impeller blades lead to an increase in the descending gradient of head and efficiency, the external characteristics, static pressure distribution on the blade surface, load distribution and hydraulic characteristics of the multi-phase pump were better when the impeller blades is 3 than 4. The results of the study can provide reference for the selection of the im-

收稿日期: 2022-03-20

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFB0905200); 清华大学水沙科学与水利水电工程国家重点实验室开放基金(sklhse-2021-E-03); 中国博士后科学基金特别资助(2017T100077); 四川省教育厅科研项目资助(重点项目)(17ZA0366); 西华大学重点科研基金资助(Z1510417); 西华大学流体及动力机械教育部重点实验室开放课题资助(LTDL2020-008)。

第一作者: 史广泰(1985—), 男, 副教授, 博士, 硕士生导师, 主要研究方向为多相流流动理论及机制。

ORCID: 0000-0003-0150-8490

E-mail: shiguangtai\_19885@126.com

引用格式: 史广泰, 姚鑫, 陶思佳, 等. 动叶轮叶片数对多相混输泵水力性能的影响[J]. 西华大学学报(自然科学版), 2023, 42(2): 39-44.

SHI Guangtai, YAO Xin, TAO Sijia, et al. Effects of the Number of Impeller Blades on Hydraulic Performance in a Multiphase Pump[J]. Journal of Xihua University(Natural Science Edition), 2023, 42(2): 39-44.

PELLER BLADES OF MULTIPHASE PUMP.

**Keywords:** multiphase pump; impeller; blade number; hydraulic performance

随着全球经济的快速发展,石油资源消耗日益增加,深海油气资源开采逐渐加剧<sup>[1-4]</sup>。多相混输泵兼具泵和压缩机两种功能,其因可输送含有少量杂质的油气资源,能节省大约 35% 的油田开发费用而备受人们关注<sup>[5-6]</sup>。动叶轮与静叶轮作为混输泵的核心做功部件,共同组成一个增压单元,其中动叶轮主要起到将能量转换为介质压力能的作用,是多相混输泵的核心部件<sup>[7-9]</sup>。

目前,关于常规泵叶轮方面的研究国内外已有很多报道。在内流场变化方面,Zhong 等<sup>[10]</sup>通过对离心泵添加复合叶片进行模拟,发现泵的扬程和效率提高,性能曲线向大流量区域移动。Zhu 等<sup>[11]</sup>对混流泵的叶轮和导叶叶片角进行优化,优化后叶轮内流动更均匀,轴功率和能耗降低。张金亚等<sup>[12]</sup>采用正交设计法优化混输泵的动叶轮,优化后泵增压提高了约 14.97%,效率增加约 8.07%。Jiang 等<sup>[13]</sup>通过对比多相混输泵中动叶轮和静叶轮内的流动,发现动叶轮内的流动比静叶轮内的流动更均匀。张文武等<sup>[14]</sup>通过对混输泵的全流道分析,发现含气率不同会导致气体聚集程度和聚集位置不同。杨敏等<sup>[15]</sup>通过正交试验优化了并用潜水泵叶轮和导叶的参数,结果表明泵的效率提高了 4.87%,单级扬程提高了 2.8 m。

在叶轮做功性能方面,马希金等<sup>[16]</sup>研究了油气混输泵的不同翼型前缘半径动叶轮模型,发现增大翼型前缘半径可降低能量损失提升动叶轮增压能力。李清平等<sup>[17]</sup>通过实验研究对多相泵叶轮进行优化,发现适当增大出口角、减小进口冲角有利于改善混输泵增压性能。Shi 等<sup>[18]</sup>研究了叶轮包角对混输泵能量特性的影响,发现当叶片包角大于 60°时,能量转换能力退化、压力面能量传递性能下降。文献<sup>[19]</sup>研究了不同含气率和不同流量下多相泵叶轮叶片静压和压力负荷的变化规律。Wang 等<sup>[20]</sup>还研究发现空化对叶片压力载荷影响也较大。

由以上研究现状可知,目前改变叶轮结构参数研究混输泵增压性能变化已有大量文献报道,但在

不同流量下研究动叶轮叶片数对多相混输泵水力性能影响的文章较少。鉴于此,本文在不同流量下改变动叶轮叶片数,研究其对混输泵内流特性、做功性能以及水动力特性的影响,对提高多相混输泵水力性能具有参考意义。

## 1 研究对象

选用动叶轮叶片数为 3 和 4,静叶轮叶片数为 7 的多相混输泵增压单元作为研究对象,主要性能参数如表 1 所示。

表 1 多相混输泵主要性能参数  
Tab. 1 Main parameters of multiphase pump

性能参数	符号	数值	单位
设计流量	$Q_d$	100	m <sup>3</sup> /h
设计转速	$n$	3000	r/min
轮毂比	$d$	0.7	—
进口直径	$D$	113	mm
扬程	$H$	14	m

为确保进出口流动充分,利用 UG 软件设置进出口延长段,其中进口延长段长度为动叶轮轴向长度的两倍,出口延长段长度为动叶轮轴向长度的 6 倍,控制计算变量只有动叶轮叶片数。整个计算域模型由进口延长段、动叶轮、静叶轮及出口延长段组成,如图 1 所示。

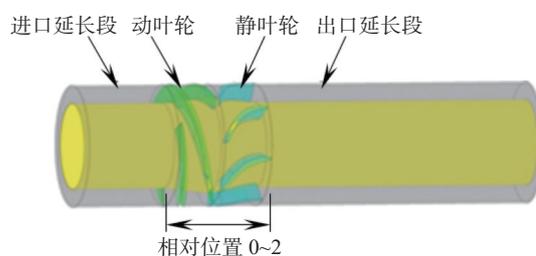


图 1 计算模型

Fig. 1 Calculation model

## 2 数值计算方法

### 2.1 计算域网格及无关性验证

采用 Turbogrid 软件对动静叶轮进行单流道结

构化网格划分,利用ICEM软件对进出口延长段进行结构化网格划分。为保证计算准确性,控制四叶片动叶轮的网格数稍大于三叶片动叶轮。最后,在CFX的前处理文件中将增压单元单流道旋转阵列成全流道,与进出口延长段网格整体组装成多相混输泵的计算域网格。三叶片、四叶片动叶轮网格分别如图2(a)、(b)所示,静叶轮网格如图2(c)所示。

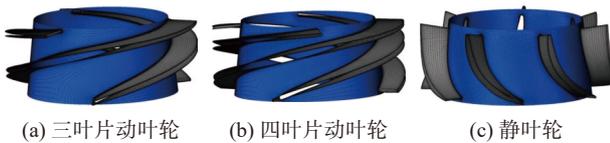


图2 计算域网格  
Fig. 2 Compute domain grid

由于网格质量决定数值模拟的求解精度,故在流量为 $100\text{ m}^3/\text{h}$ 的纯水设计工况下,划分了从210万到330万(网格1到网格5)的5套网格用于无关性检验。图3为网格数量对水力效率的影响结果。可知随着网格数量的增加,计算域水力效率逐步增长并趋于稳定,当网格数量超过300万时,水力效率基本保持不变。为使计算结果获得较好收敛解,选取进口段网格数为291060,出口段网格数为693576,静叶轮网格数为998816,三叶片、四叶片动叶轮网格数分别为1059030、1221280,网格总数控制在330万左右的网格, $y^+$ 值控制在80以内,符合 $k-\omega$  SST湍流模型对 $y^+$ 值的要求。

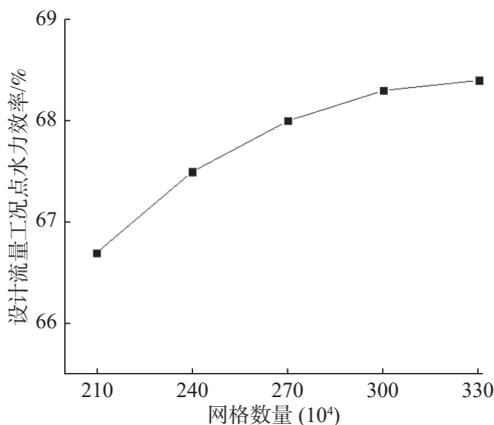


图3 网格无关性验证  
Fig. 3 Grid independence verification

## 2.2 边界条件设置

基于欧拉非均质流模型,采用CFX软件对多相混输泵的内部流动进行数值模拟。其中液相选

用 $k-\omega$  SST湍流模型,气相选用零方程来对N-S方程进行封闭,叶轮转速为 $3000\text{ r/min}$ ,叶轮绕流动方向逆时针旋转,采用速度进口压力出口,进口速度由进口流量换算而来,出口压力恒为 $7\text{ atm}$ ,选用“RMS”方案收敛,收敛精度为 $10^{-5}$ 。

## 3 计算结果及分析

### 3.1 动叶轮叶片数对外特性的影响

图4为含气率10%、动叶轮叶片数分别为3和4的混输泵在不同流量下的扬程和效率曲线。由图4可知,流量在 $90\text{ m}^3/\text{h}$ 以下时,三叶片效率逐渐增加、扬程微降,四叶片效率先微增后再急剧下降、扬程逐渐下降但下降程度大于三叶片。由图还可以看出:随着流量的增加,动叶轮叶片数对混输泵效率变化趋势和扬程下降程度的影响越来越大,特别是 $90\text{ m}^3/\text{h}$ 后,三、四叶片的效率和扬程均呈急剧下降趋势,且四叶片的效率下降幅度显著大于三叶片。

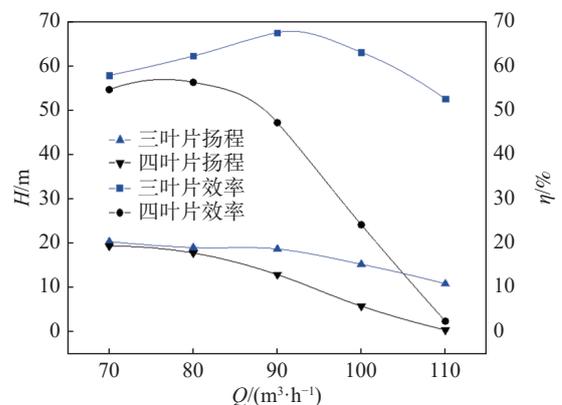


图4 外特性曲线  
Fig. 4 External characteristic curve

### 3.2 动叶轮叶片数对做功性能的影响

图5为含气率10%、动叶轮叶片数分别为3和4的多相混输泵增压单元在各流量下的增压曲线。相对位置0~2对应动叶轮进口到静叶轮出口,如图1所示。由图5可知,随着流量的增加,四叶片进口压力随流量增加而发生明显降低,使得四叶片压差变化大于三叶片。

不同流量下,三叶片和四叶片的动叶轮仍是主要增压区,增压区间基本一致,均对应0.25到0.75处。可见,动叶轮叶片数越多,多相混输泵在较大流量下的增压性能影响更大。整体而言,动叶

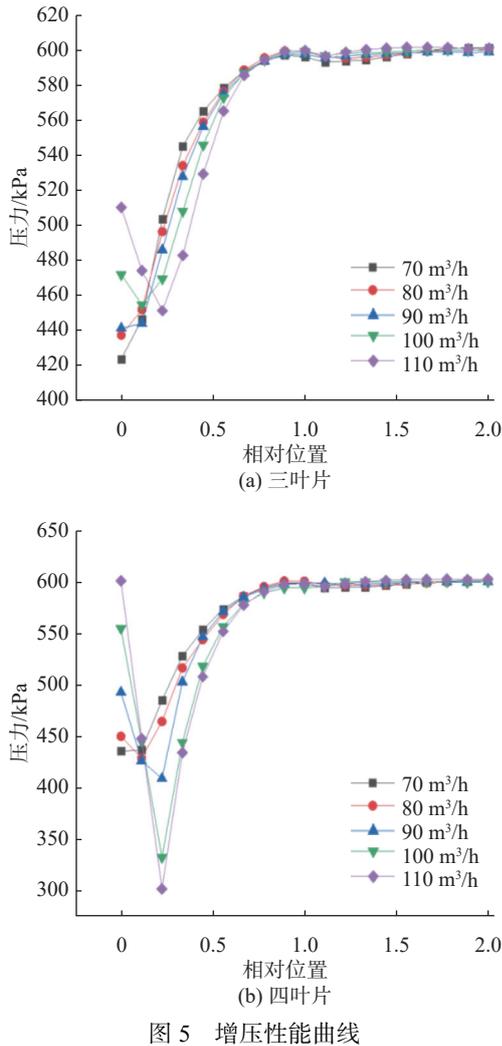


图5 增压性能曲线

轮叶片数和流量对静叶轮内的压力基本没有影响。

由于在同一工况下相同叶片数的动叶轮静压和压力载荷随叶高的变化非常小,故选择0.5倍叶高处进行重点分析,0.5倍叶高处的静压分布如图6所示。由图6可知,流量在 $90\text{ m}^3/\text{h}$ 及以下时,三、四叶片时泵叶片压力面曲线与吸力面曲线之间的最大静压压差均出现在相对位置0.2附近,与叶片设计时最大受压部位即动叶轮叶片进口 $1/3$ 处相符,故增加动叶轮叶片数对静压分布规律影响不大。随着流量增加,动叶轮叶片数对最大静压压差出现的相对位置发生显著影响,由相对位置0.4处向进口0.2处发生转移。值得注意的是,在 $110\text{ m}^3/\text{h}$ 工况下,三、四叶片时在动叶轮进口 $1/3$ 处均出现叶片吸力面大于压力面静压的情况,不利于多相混输泵做功,而且在该相对位置0~0.2区间上四叶片泵叶片上的静压差值比三叶片

的要大。整体而言,在 $110\text{ m}^3/\text{h}$ 流量下,四叶片的静压波动幅度要大于三叶片,即三叶片下动叶轮内静压分布更稳定。

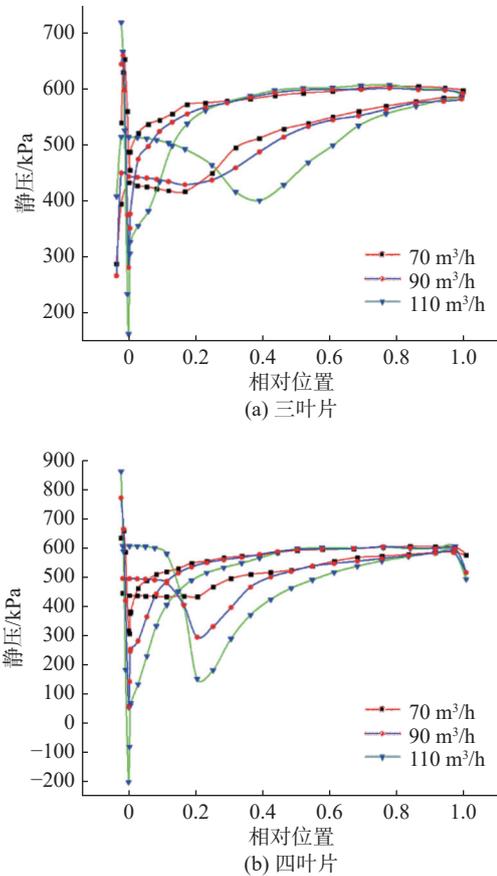


图6 0.5倍叶高处静压分布

动叶轮叶片压力面和吸力面的静压差值称为动叶轮叶片压力载荷,该指标的正负与分布是衡量叶片做功能力的关键因素,如图7所示。由图7可知:流量在 $90\text{ m}^3/\text{h}$ 及以下时,动叶轮叶片数为3时的最大压力载荷明显大于叶片数为4时;随着流量的增加,当流量等于 $90\text{ m}^3/\text{h}$ 时,三叶片下的最大正载荷和负载荷均小于四叶片下的对应值;随着流量的继续增加,三叶片下的最大正载荷和负载荷与四叶片下的对应值相比较更小,且正载荷峰值由相对位置0.4向进口0.2附近发生转移。可见,在 $110\text{ m}^3/\text{h}$ 流量下,当动叶轮叶片数为4时具有较大的压力载荷,但是负的最大压力载荷大于正压力载荷,而三叶片数下的压力载荷变化较为平缓。由图7还可以看出,在不同流量下,动叶轮进口区域均存在压力降低情况,且偏大流量时四叶片数下的压

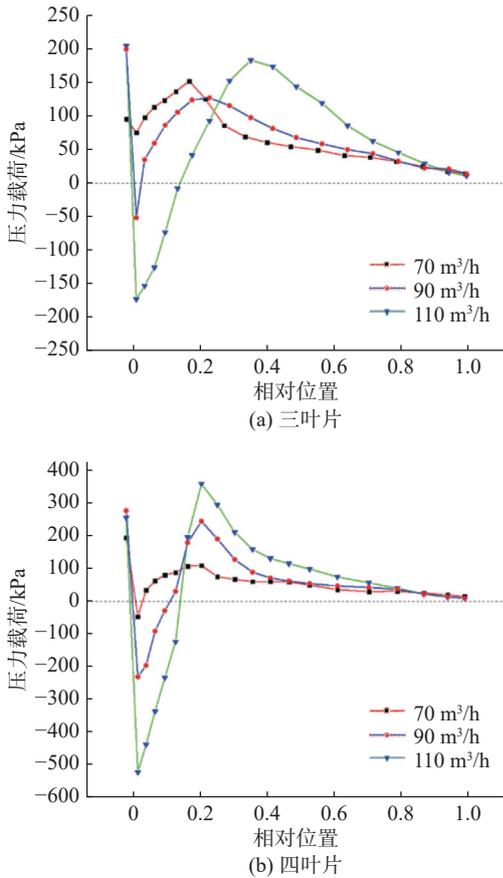


图 7 0.5 倍叶高处压力载荷分布  
Fig. 7 Pressure load distribution at 0.5 blade height

升速率大于三叶片数下的压升速率,即整体而言三叶片数下的叶轮做功性能更优。

### 3.3 动叶轮叶片数对叶轮轴向力和径向力的影响

图 8 为动叶轮叶片数对混输泵的动叶轮轴向力和径向力影响分布。由图 8 可知,流量在  $90 \text{ m}^3/\text{h}$  及以下时,三叶片动叶轮轴向力始终保持为负值指向泵的进口方向,而四叶片轴向力由负值向正值快速增加,方向由泵的进口侧指向泵的后腔;三叶片动叶轮径向力匀速递增,而四叶片径向力却快速减小。随着流量增加,三、四叶片动叶轮轴向力均增加较大;而两种叶片数下的径向力相对变化趋势较小,仅三叶片数下径向力反而呈现减小态势。整体而言,在设计工况附近,当叶片数为 4 时的动叶轮轴向力和径向力均大于叶片数为 3 时的轴向力和径向力。

图 9 为动叶轮叶片数对混输泵静叶轮轴向力和径向力的影响分布。由图 9 可知:流量在  $90 \text{ m}^3/\text{h}$  及以下时,动叶轮叶片数对静叶轮轴向力影响不大,而随着流量的增加,动叶轮叶片数对静叶轮

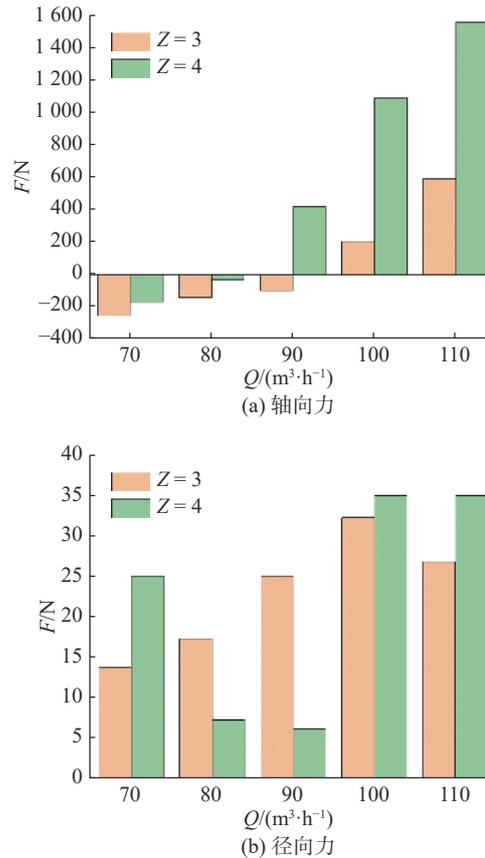


图 8 0.5 倍叶高处动叶轮轴向力和径向力分布  
Fig. 8 Distribution of axial and radial forces of impeller at 0.5 blade height

轴向力的影响变大;静叶轮径向力在不同动叶轮叶片数下呈现不同的变化规律,当叶片数为 3 时,随着流量的增加,径向力先增加后减小,当叶片数为 4 时在小流量和大流量下的径向力较大,且大于叶片数为 3 时的径向力。整体而言,在设计工况附近,当叶片数为 4 时的静叶轮轴向力和径向力均大于叶片数为 3 时的轴向力和径向力。

## 4 结论

1)随着流量增加,动叶轮叶片数对混输泵效率变化趋势和扬程下降程度的影响增大,特别是  $90 \text{ m}^3/\text{h}$  后,三、四叶片的效率和扬程均呈急剧下降趋势。

2)动叶轮叶片数越多,对多相混输泵在较大流量下动叶轮增压性能的影响更大,而动叶轮叶片数和流量对静叶轮内的压力基本没有影响,但在流量为  $110 \text{ m}^3/\text{h}$  时,动叶轮叶片数越多,动叶轮内的静压和载荷分布波动越频繁。

3)在设计工况附近,当叶片数为 4 时的动叶

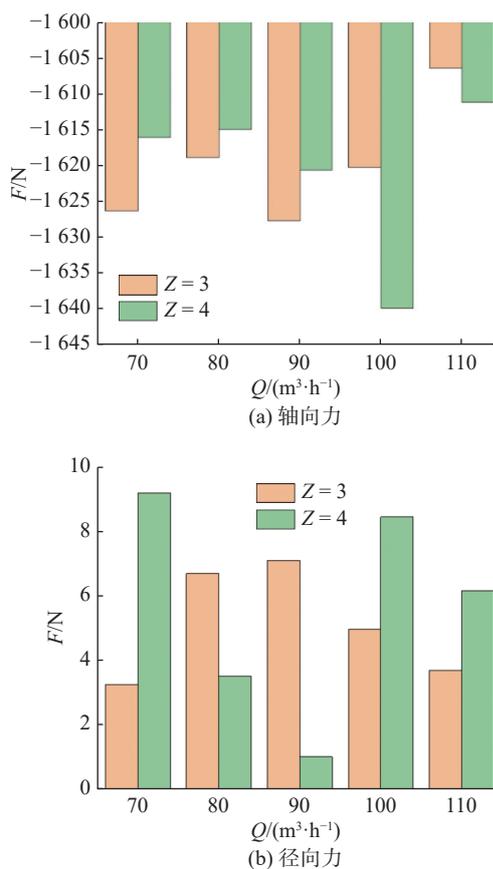


图9 0.5倍叶高处静叶轮轴轴向力和径向力分布

Fig. 9 Distribution of axial and radial forces of diffuser at 0.5 blade height

轮、静叶轮轴向力和径向力均分别大于叶片数为3时的轴向力和径向力。

整体来说,当动叶轮叶片数为3时多相混输泵的外特性、叶片表面静压分布、载荷分布和力特性等均优于动叶轮叶片数为4时。

### 参 考 文 献

[1] ESFANDI S, BALOOCHZADEH S, ASAYESH M, et al. Energy, exergy, economic, and exergoenvironmental analyses of a novel hybrid system to produce electricity, cooling, and syngas[J]. *Energies*, 2020(13): 6453 – 6480.

[2] GAO C K, NA H M, SONG K H, et al. Environmental impact analysis of power generation from biomass and wind farms in different locations [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2019, 102: 307 – 317.

[3] CHEN S A, ZHOU G I, MIAO C X. Green and renewable bio-diesel produce from oil hydrodeoxygenation: Strategies for catalyst development and mechanism[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2019(101):

568 – 589.

[4] ZERESHKIAN S, MANSOURY D. A study on the feasibility of using solar radiation energy and ocean thermal energy conversion to supply electricity for offshore oil and gas fields in the Caspian Sea[J]. *Renewable Energy*, 2021, 163: 66 – 67.

[5] 于邦廷, 王文祥, 徐海波, 等. 影响海上平台混输泵应用的关键因素分析 [J]. *水泵技术*, 2015 (2): 1 – 5.

YU B T, WANG W X, XU H B, et al. Analysis of the key factors affecting the application of mixed transport pump in offshore platform[J]. *Pump Technology*, 2015 (2): 1 – 5.

[6] 史广泰, 舒则奎, 王彬鑫, 等. 颗粒体积分数对天然气水合物多相混输泵内流特性的影响 [J]. *热能动力工程*, 2021, 36 (11): 27 – 33.

SHI G T, SHU Z K, WANG B X, et al. Effect of particle volume fraction on internal flow characteristics of natural gas hydrate multiphase mixed pump[J]. *Journal of Engineering for Thermal Energy and Power*, 2021, 36 (11): 27 – 33.

[7] LIU Y B, TAN L. Method of T shape tip on energy improvement of a hydrofoil with tip clearance in tidal energy[J]. *Renewable Energy*, 2020, 149: 42 – 54.

[8] SHI Y, ZHU H W, YIN B B, et al. Numerical investigation of two-phase flow characteristics in multiphase pump with split vane impellers[J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2019, 33(4): 1 – 11.

[9] SHU Z K, SHI G T, TAO S J, et al. Three-dimensional spatial evolution and dynamics of the tip leakage vortex in an oil-gas multiphase pump[J]. *Physics of Fluids*, 2021, 33(113320): 1 – 18.

[10] ZHONG W Q, ZHOU J, ZHOU X P. The effects of different splitter blades number on characteristics of miniature super-low specific speed centrifugal pump[J]. *Earth and Environmental Science*, 2021, 772(1): 1 – 5.

[11] ZHU D, TAO R, XIAO R F, et al. Optimization design of hydraulic performance in vaned mixed-flow pump [J]. *Power and Energy*, 2020, 234(7): 934 – 946.

[12] 张金亚, 朱宏武, 李艳, 等. 基于正交设计方法的混输泵叶轮优化设计 [J]. *中国石油大学学报*, 2009, 33(6): 106 – 110.

ZHANG J Y, ZHU H W, LI Y, et al. Optimization design of multiphase pump impeller based on orthogonal design method[J]. *Journal of China University of Petroleum*, 2009, 33(6): 106 – 110.

(下转第 52 页)