

# 蜗壳断面形状对大型双吸泵性能影响的数值模拟

赵万勇,潘江龙,胡炳彤,张宇翔,于 帅

(兰州理工大学能源与动力工程学院,甘肃 兰州 730050)

**摘要:**为研究蜗壳不同断面形状对大型双吸离心泵性能的影响,在确保其他因素不变的条件下,设计3种不同的蜗壳方案进行瞬态数值模拟。结果表明:3种蜗壳断面方案在设计工况下,圆形蜗壳的效率最高为90.7%,其次是梨形蜗壳,效率为90.2%,矩形蜗壳的效率最低为88.9%,且圆形蜗壳的高效区有所扩大;在各流量工况下圆形蜗壳能量损失率均为最少,在设计工况时圆形蜗壳的能量损失率为0.3%,矩形蜗壳的能量损失率为1.1%;在大流量和设计流量下,圆形蜗壳的叶轮所受径向力均最小,梨形蜗壳次之,矩形蜗壳最大;在设计工况下,3种蜗壳方案对蜗壳上的压力脉动均呈现周期性变化,圆形蜗壳在各检测点处压力脉动的振幅幅度均为最小。

**关键词:**双吸离心泵;蜗壳断面形状;径向力;能量损失;压力脉动

**中图分类号:**TH312

**文献标识码:**A

**DOI:**10.12396/znsd.231979

赵万勇,潘江龙,胡炳彤,等.蜗壳断面形状对大型双吸泵性能影响的数值模拟[J].中国农村水利水电,2024(7):262-269. DOI:10.12396/znsd.231979.

ZHAO W Y, PAN J L, HU B T, et al. Numerical simulation of the influence of volute section shape on the radial force of large double suction pump[J]. China Rural Water and Hydropower, 2024(7):262-269. DOI:10.12396/znsd.231979.

## Numerical Simulation of the Influence of Volute Section Shape on the Radial Force of Large Double Suction Pump

ZHAO Wan-yong, PAN Jiang-long, HU Bing-tong, ZHANG Yu-xiang, YU Shuai

(School of Energy and Power Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, Gansu Province, China)

**Abstract:** In order to study the influence of different cross-section shapes of volute on the performance of large double-suction centrifugal pump, in this paper, three different volute schemes are designed for transient numerical simulation, keeping other factors remain unchanged. The results show that under the design working conditions, the efficiency of the circular volute is the highest, which is 90.7%, followed by the pear-shaped volute, which is 90.2%, and the efficiency of the rectangular volute is the lowest, which is 88.9%. And the high-efficiency area of the circular volute has been expanded. The energy loss rate of the circular volute is the least under each flow condition. The energy loss rate of the circular volute is 0.3% and the energy loss rate of the rectangular volute is 1.1% under the design condition. Under large flow and design flow, the radial force of the impeller with circular volute is the smallest, followed by the pear-shaped volute, and the rectangular volute is the largest. Under the design conditions, the three volute schemes show periodic changes in the pressure pulsation on the volute, and the amplitude of the pressure pulsation at each detection point of the circular volute is the smallest.

**Key words:** double suction centrifugal pump; the cross-section shape of the volute; radial force; energy loss; pressure pulsation

收稿日期:2023-12-14

接受日期:2024-03-04

基金项目:甘肃省科技重点研发计划(20YF3GA019)。

作者简介:赵万勇(1962-),男,教授,主要从事流体机械方面的研究。E-mail:zhaowy@lut.com。

通讯作者:潘江龙(1998-),男,硕士研究生,从事流体机械研究。E-mail:1214246375@qq.com。

## 0 引言

单级双吸离心泵具备流量大、扬程高、运行稳定等特点,被广泛应用在生产生活的各个方面<sup>[1]</sup>。蜗壳作为双吸离心泵的主要过流部件之一,对双吸泵的性能具有重要影响,在双吸泵运行时旋转部件叶轮与蜗壳之间的动静干涉将使其内部流体运动发生变化,对作用在叶轮上的径向力造成影响<sup>[2]</sup>。叶轮径向力会造成轴振动,影响泵运行过程的稳定性,当径向力过大时将会导致泵轴和密封环损坏。

国内泵行业在大型双吸离心泵的结构方面发展的比较完善,水力性能也达到了一个较高的水平。螺旋形蜗壳作为应用最广泛的压水室,在传统设计上,其多为梨形断面,一些小型的双吸泵上也有使用矩形断面形状。黄河流域提灌工程使用了大量的大型双吸离心泵<sup>[3]</sup>,在新一轮黄河提灌泵的技术改造中,中标的某外企在蜗壳设计中采用了圆形断面。从离心泵蜗壳的制造和安装等方面来说,矩形蜗壳的制造较为容易方便,而圆形蜗壳和梨形蜗壳的制造难度差别不大。

有关不同蜗壳断面形状对泵性能影响的科学研究较为鲜见,只对单级单吸离心泵有少量的文献分析,但对蜗壳断面形状对大型双吸离心泵性能影响分析的研究成果较为缺乏。郭鹏程等人<sup>[4]</sup>研究分析了不同断面型式蜗壳对单级单吸离心泵的性能影响;朱迪等人<sup>[5]</sup>双吸离心泵蜗壳面积比对水力性能的影响研究;牟介刚等人<sup>[6]</sup>分析了不同蜗壳断面形状的单蜗壳和双蜗壳对单级单吸悬臂式化工离心泵的径向力影响;江伟等人<sup>[2]</sup>通过改变蜗壳进口宽度对离心泵径向力的影响进行数值模拟;牛茂升等<sup>[7]</sup>研究发现双蜗壳的隔板起始位置对大型双吸泵的水力性能和径向力有所影响;肖若富等<sup>[8]</sup>分析了双蜗壳泵隔板结构对径向力的影响;高波等<sup>[9]</sup>对非设计工况下单级蜗壳式离心泵的压力脉动特性进行了研究;陈建芳等<sup>[10]</sup>研究了叶片进口边位置对单叶片离心泵蜗壳内压力脉动的影响;KHALIFA等<sup>[11]</sup>研究了双蜗壳泵内压力脉动特性;SPENCE等<sup>[12]</sup>通过分析泵内不同位置的压力脉动数据,对蜗壳上压力脉动监测点的位置选择提出了建议;DALY等<sup>[13]</sup>采用CFX软件对单叶片离心泵内瞬态压力进行了数值模拟;AL-QUTUB等<sup>[14]</sup>研究了蜗壳与隔舌的径向间隙和叶片出口形状对泵压力脉动的影响;WANG等<sup>[15]</sup>采用试验方法研究了流量和转速对双吸离心泵压力脉动的影响。

综上所述,本文采用已用于黄河提灌工程的大型双吸离心泵为研究对象,在原模型泵的梨形断面蜗壳基础上依据蜗壳设计原则<sup>[16]</sup>,设计出圆形断面和矩形断面的蜗壳,通过数值模拟计算,分析对比三种蜗壳方案对大型双吸离心泵的性能等方面的影响,为当前大型双吸离心泵蜗壳的设计思路提供理论和实践参考。

## 1 模型几何参数及设计方案

选取单级双吸离心泵作为研究对象,性能参数为:扬程 $H=57.98$  m,设计流量 $Q=3.19$  m<sup>3</sup>/s,转速 $r=600$  r/min。叶轮几何参数:叶轮进口直径 $D_1=730$  mm,叶轮轮毂直径 $d_h=296$  mm,出口直径 $D_2=1\ 150$  mm,出口宽度 $b_2=224$  mm,叶片数 $Z=6$ ;蜗壳进口宽度 $b_3=345.23$  mm。

所选双吸泵模型的蜗壳断面形状为梨形断面,在此基础上,设计出圆形断面和矩形断面,为确保蜗壳断面形状为唯一变量,设计遵循以下控制原则:①蜗壳基圆直径不变;②蜗壳进口宽度不变;③蜗壳各截面面积不变。3种不同蜗壳断面形状结构如图1所示。

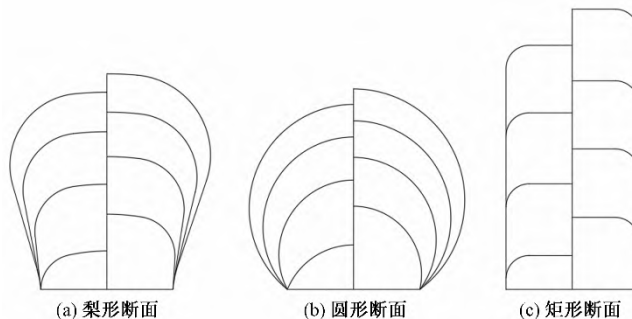


图1 3种不同蜗壳断面形状

Fig.1 Three different volute cross-section shapes

## 2 数值模拟

### 2.1 模型建立及网格划分

单级双吸泵的模型计算域共有5部分,分别为进口延长段、吸水室、叶轮、压水室和出口延长段,本研究使用Creo软件进行三维水体的建模和ICEM软件对模型计算域进行非结构四面体网格划分,最终计算域网格划分结果如图2所示。

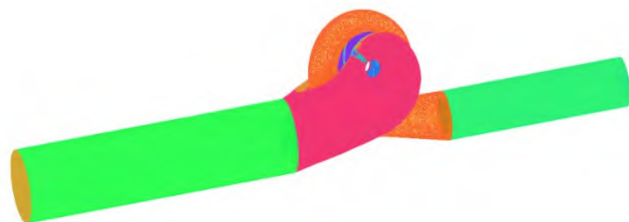


图2 计算域网格划分结果

Fig.2 Meshing results of computational domain

本文湍流模型选取 $k-\epsilon$ 湍流模型,其对近壁区网格的 $Y^+$ 值要求应处在 $30 < Y^+ < 300$ ,能够基本满足对近壁区网格质量要求<sup>[10]</sup>。图3为模型泵近壁区网格 $Y^+$ 值,由图3可知模型的 $Y^+$ 值满足 $k-\epsilon$ 湍流模型允许范围,保证近壁区网格质量。

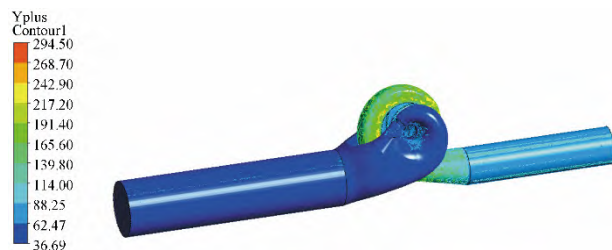


图3 模型泵近壁区网格 $Y^+$ 值

Fig.3 Grid  $Y^+$  values in the near wall area of the model pump

在设计工况下,以清水为介质,对单级双吸泵的网格模型进行网格无关性验证。在网格数处于 $7 \times 10^6$ 附近时,模拟结果的误差在可接受范围内,符合网格无关性要求,因此本文选用网格数为758万的网格模型进行模拟研究。并且其他设计方案

的模型网格数量也保持在750万左右。图4为在清水介质下,双吸泵模型的外特性曲线的模拟值以及提供的实验值对比曲线,当忽略机械损失、摩擦等外界因素时,单级双吸离心泵的模拟扬程值和模拟效率值与实验结果的最大误差分别为1.65%和3.07%,误差均在5%以内,故数值模拟计算的结果是可靠的。

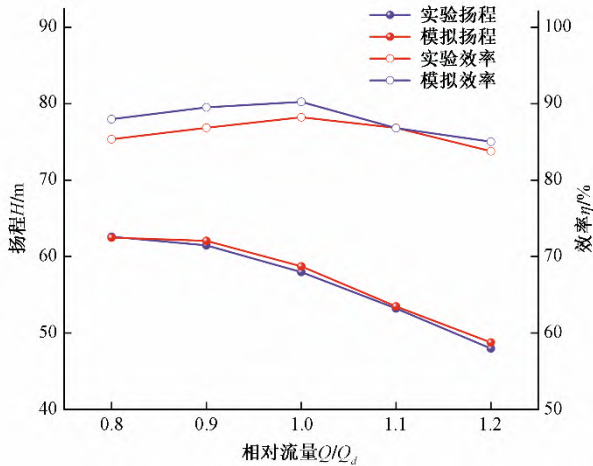


图4 双吸泵模型模拟值与实验值外特性曲线对比

Fig.4 Comparison of the external characteristic curves of the simulated and experimental values of the double-suction pump model

## 2.2 数值模拟计算设置

研究采用CFX 2022软件进行模拟计算,定常模拟计算选用k-ε湍流模型,进口边界类型为压力进口,出口边界类型为质量流量出口,壁面条件为无滑移壁面。以定常模拟计算结果作为非定常模拟的初始值,并将时间步长确定为 $\Delta t=0.000\ 833\ 34\ \text{s}$ ,即叶轮旋转每 $3^\circ$ 计算一步。

时间步长对瞬态问题的计算精度和计算效率都有直接影响,在不考虑模型误差,且计算稳定的前提下,时间步长的选取存在一个恰当值。本文通过库朗数对时间步长的取值是否合理进行验证,对于一个稳定、高效的CFD计算,在瞬态特性比较强的绝大部分计算域内库朗数应该不超过20~40,图5为模型泵库朗数分布图,由图5可知,库朗数不超过20~40,说明时间步长的取值是合理的。



图5 模型泵库朗数分布

Fig.5 Distribution of model pump Coulomb number

## 3 数值模拟计算结果及分析

### 3.1 蜗壳断面形状对双吸泵水力性能的影响

图6为不同蜗壳断面形状泵的外特性曲线。由图6可知,3种方案的泵扬程曲线的变化趋势基本一致,随着流量的增大扬程降低;各流量工况下,扬程曲线也较接近,扬程相差最大处为

$1.1Q_d$ 流量下,圆形蜗壳扬程与矩形蜗壳扬程的差值为1.09 m。在 $1.0Q_d$ 流量,矩形蜗壳的扬程最低,圆形蜗壳与梨形蜗壳扬程接近;在 $0.8Q_d$ 小流量工况下,梨形蜗壳扬程相较于圆形蜗壳扬程高0.61 m,矩形蜗壳扬程和圆形蜗壳扬程较为相近。可知,圆形蜗壳方案扬程在设计工况和大流量下,较梨形蜗壳与矩形蜗壳扬程高,在小流量下比另两种蜗壳的扬程低。

随流量增大,3种蜗壳方案的泵效率均呈现先增后减的趋势。在设计工况点及大流量工况区,圆形蜗壳的效率最高,在 $1.0Q_d$ 流量工况时,圆形蜗壳效率比最低的矩形蜗壳效率高1.74%,圆形蜗壳效率曲线的变化较平坦。而在小流量区,圆形蜗壳的效率低于梨形蜗壳和矩形蜗壳,效率曲线变化趋势陡峭。矩形蜗壳的效率曲线在小流量区上升缓慢,在大流量区域下降快速,梨形蜗壳效率曲线在圆形蜗壳和矩形蜗壳的效率曲线之间。在 $1.1Q_d$ 大流量工况下,3种蜗壳断面形状的效率相差最大,圆形蜗壳效率较矩形蜗壳效率高3.66%,比梨形蜗壳效率高2.05%,扩大了高效区域。说明不同蜗壳断面形状对双吸泵的扬程有不同影响,对双吸泵的效率有较明显的影响,圆形蜗壳泵效率在大流量下有所提高,高效区也有所扩大。

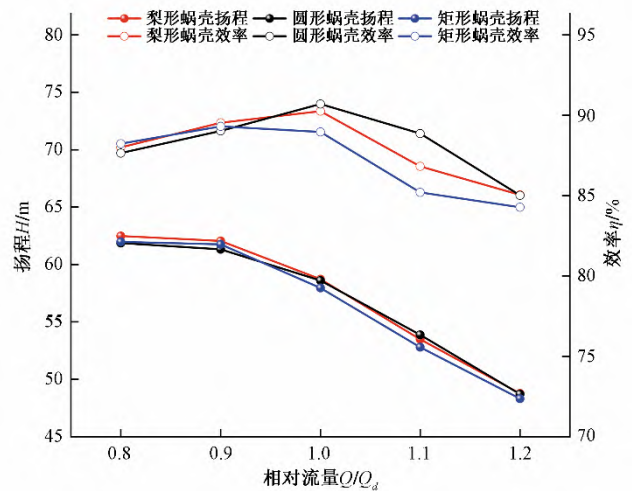


图6 3种蜗壳方案的泵外特性曲线对比

Fig.6 Comparison of pump external characteristic curves of three volute schemes

### 3.2 不同断面形状蜗壳的能量损失分析

3种断面形状蜗壳对双吸离心泵水力性能有着不同的影响,唯一变量为蜗壳部位的能量损失不同,故定义一个能量损失率 $\delta$ 分析不同蜗壳断面的能量变化:

$$\delta = \frac{E_{in} - E_{out}}{E_{in}} \times 100\% \quad (1)$$

式中: $E_{in}$ 和 $E_{out}$ 为蜗壳进出口处的能量。

选取瞬态计算的最后一圈模拟数据,计算 $0.8Q_d$ 、 $1.0Q_d$ 和 $1.2Q_d$ 三种工况中蜗壳的能量损失率,计算结果如图7所示。在叶轮旋转一圈中,圆形蜗壳的损失率在3种工况下均较其他形状蜗壳能量损失率低;在设计流量工况下,3种设计方案的蜗壳损失率比偏工况下低,矩形蜗壳的损失率较圆形蜗壳和梨形蜗壳能量损失率高,值为1.1%,梨形蜗壳和圆形蜗壳损失率几乎没有区别;在 $0.8Q_d$ 流量区域,损失率从大到小分别是矩形蜗

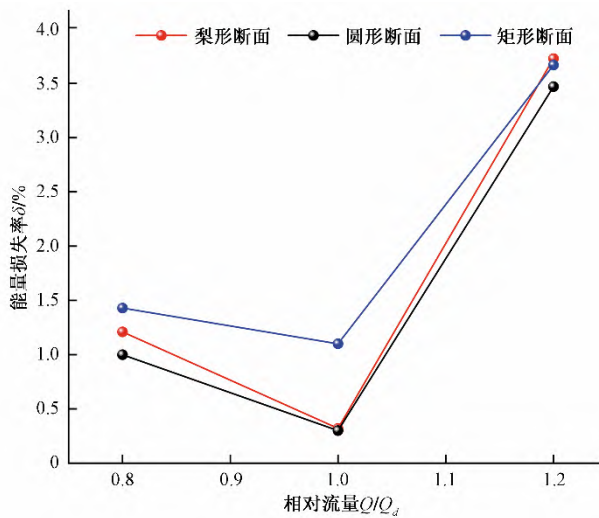


图7 蜗壳部位的能量损失率  
Fig.7 Energy loss rate of volute part

壳、梨形蜗壳和圆形蜗壳,圆形蜗壳比矩形蜗壳的损失率低了0.43%;在 $1.2Q_d$ 工况点,梨形蜗壳和矩形蜗壳的损失率相差不多,均高于圆形蜗壳,最大差值为0.26%。可见不同断面形状的蜗壳对双吸泵的水力损失有影响,圆形蜗壳的水力损失与其他

两种蜗壳相比损失更小,从而使得圆形蜗壳的泵效率优于其他两种蜗壳方案。

### 3.3 不同蜗壳断面形状对叶轮径向力的影响

径向力会使得离心泵产生振动、噪音、轴弯甚至发生断轴等问题,从而影响离心泵运行的安全稳定。不同的蜗壳断面形状会引起双吸泵在运行过程中叶轮周围静压分布的不同,导致作用在叶轮上的径向力发生改变。因此探究不同蜗壳断面形状对离心泵作用在叶轮上径向力的影响是很有意义的<sup>[17]</sup>。

图8所示为不同工况下,不同蜗壳断面形状的离心泵作用在叶轮上的径向力的分布图。图8中为选取在 $0.8Q_d$ 、 $1.0Q_d$ 和 $1.2Q_d$ 流量工况下瞬态计算的最后一个周期内的变化情况。由图8可知,在叶轮一个旋转周期内,不同工况下叶轮所受到的径向力明显呈现出规律的周期分布,即花形分布,且其径向力的大小和方向随时间变化而改变,由此可证明不同的蜗壳断面形状对作用在叶轮上的径向力分布有一定的影响。在 $1.0Q_d$ 流量和 $1.2Q_d$ 流量下,圆形蜗壳方案的泵叶轮所受径向力最小,其次是梨形蜗壳,矩形蜗壳对叶轮作用的径向力最大;而在小流量工况时圆形蜗壳作用在叶轮的径向力最大,其次是梨形蜗壳,矩形蜗壳的最小。3种蜗壳方案作用在叶轮上的径向力规律和3种方案的泵水力性能变化规律相似。

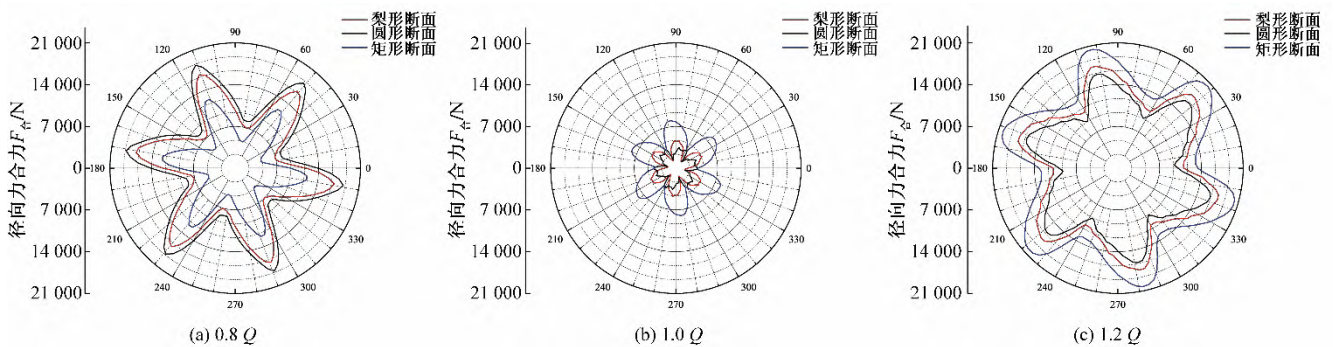


图8 瞬态下叶轮所受径向力分布图  
Fig.8 Radial force distribution of impeller under transient condition

图9为3种工况下叶轮旋转一周时所受径向力随时间的变化曲线图。从图9中可知,叶轮所受径向力呈周期性脉动。叶轮所受径向力在设计工况 $1.0Q_d$ 时是最小的,而在偏工况下所受径向力为设计工况时的2倍到3倍多。说明在设计工况下,泵内叶轮与蜗壳内的流体流动情况较好,流场稳定。蜗壳断面为圆形时,在 $1.0Q_d$ 和 $1.2Q_d$ 流量下叶轮所受的径向力是三种模

型中最小的,而在 $0.8Q_d$ 小流量工况时却是最大的,由此说明圆形断面蜗壳在设计工况和大流量工况下运行时作用在叶轮上的径向力较小。

对径向力进行无量纲化,并进行傅里叶级数变换,得到各工况下叶轮上径向力的脉动振幅随频率变化曲线图,如图10所示,其中叶轮叶频 $f_n$ 为60 Hz。3种方案的径向力振幅趋势在各

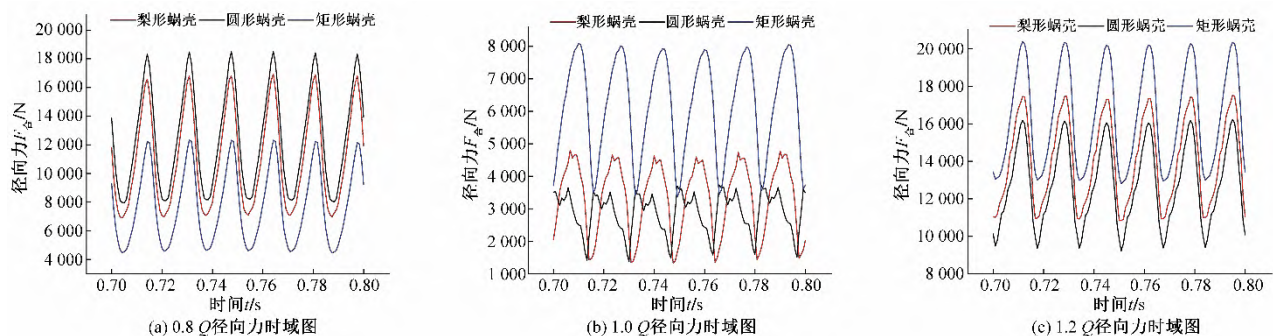


图9 瞬态下叶轮所受径向力时域图  
Fig.9 The time domain diagram of radial force on impeller under transient condition

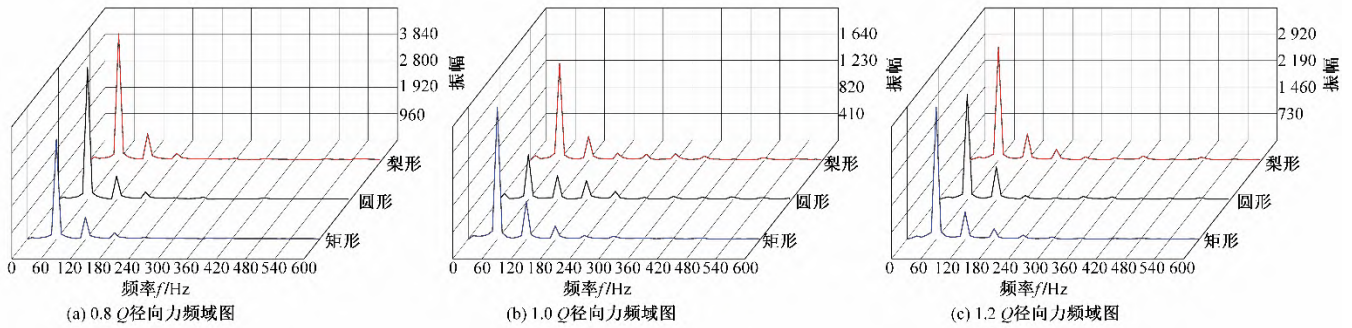


图10 瞬态下叶轮所受径向力频域图

Fig.10 The frequency domain diagram of radial force on impeller under transient condition

工况下相同均呈逐渐降低,且在主频处(1倍叶频处)脉动振幅最大。双吸泵径向力脉动振幅幅值在 $1.0Q_d$ 工况下,圆形蜗壳的径向力振幅幅值在主频处小于其他形状蜗壳,幅值在410左右;在 $1.2Q_d$ 工况下,圆形蜗壳的径向力振幅在主频处峰值小于梨形蜗壳和矩形蜗壳,在3倍叶频处的峰值明显小于其他两种方案;在 $0.8Q_d$ 工况下,矩形蜗壳的径向力在主频处振幅峰值小于其他蜗壳,圆形蜗壳和梨形蜗壳在主频处振幅相差不大。说明采用圆形蜗壳可以使叶轮上径向力的脉动情况变得更好。

### 3.4 不同断面形状蜗壳的压力脉动分析

选择蜗壳中心截面,在蜗壳各截面的壁面位置处以及隔舌附近位置设置监测点,如图11所示。

对设计工况下,各监测点处进行压力脉动分析。为了便于瞬态压力计算结果更好的量化,引入压力系数公式 $C_p$ 将压力值进行转化<sup>[17]</sup>。

$$C_p = \frac{\Delta p}{0.5 \rho u_2^2} \quad (2)$$

式中: $\Delta p$ 为监测点处瞬时压力与平均压力之差; $\rho$ 为介质密度;

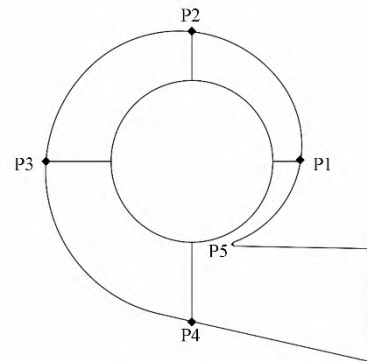


图11 压力脉动监测点分布位置

Fig.11 Distribution position of pressure pulsation monitoring points

$u_2$ 为叶轮出口的圆周速度。在叶轮旋转一周的过程中,各监测点处的压力脉动随时间和频率的变化曲线如图12和图13所示。

从图12中可以看出,在一个旋转周期内,蜗壳内的压力脉动呈现明显的周期性变化,3种蜗壳方案的压力脉动周期均为6

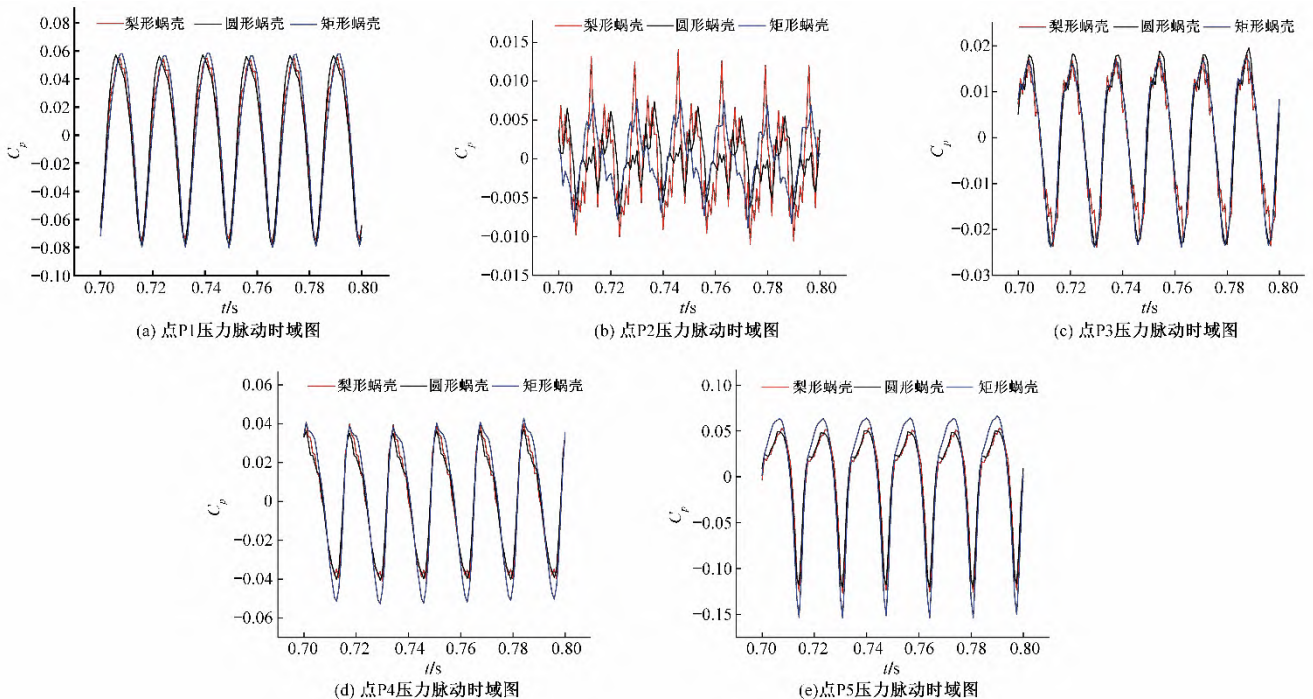


图12 各监测点处的压力脉动时域图

Fig.12 Time domain diagram of pressure fluctuation at each monitoring point

个,其与叶轮叶片数目相等。在点P5即隔舌位置处,压力系数值和变化范围最大,原因是此处的压力同时受到叶轮和蜗壳的影响,动静干涉作用较大,同时矩形蜗壳较其他两种蜗壳的系数值和变化范围更大。点P2和点P3所在位置远离隔舌处,其动静干涉作用较弱,压力系数值低且变化范围较小。

由图13监测点压力脉动频域图可知,3种蜗壳方案在各检测点的压力主频均在1倍叶轮叶频处,且压力脉动振幅较大处的频率值都相差无几。在各检测点处,圆形蜗壳的压力脉动主频振幅是3种蜗壳断面形状中最小的,而且圆形蜗壳在高频区域的振幅比较稳定和振幅幅度较小。

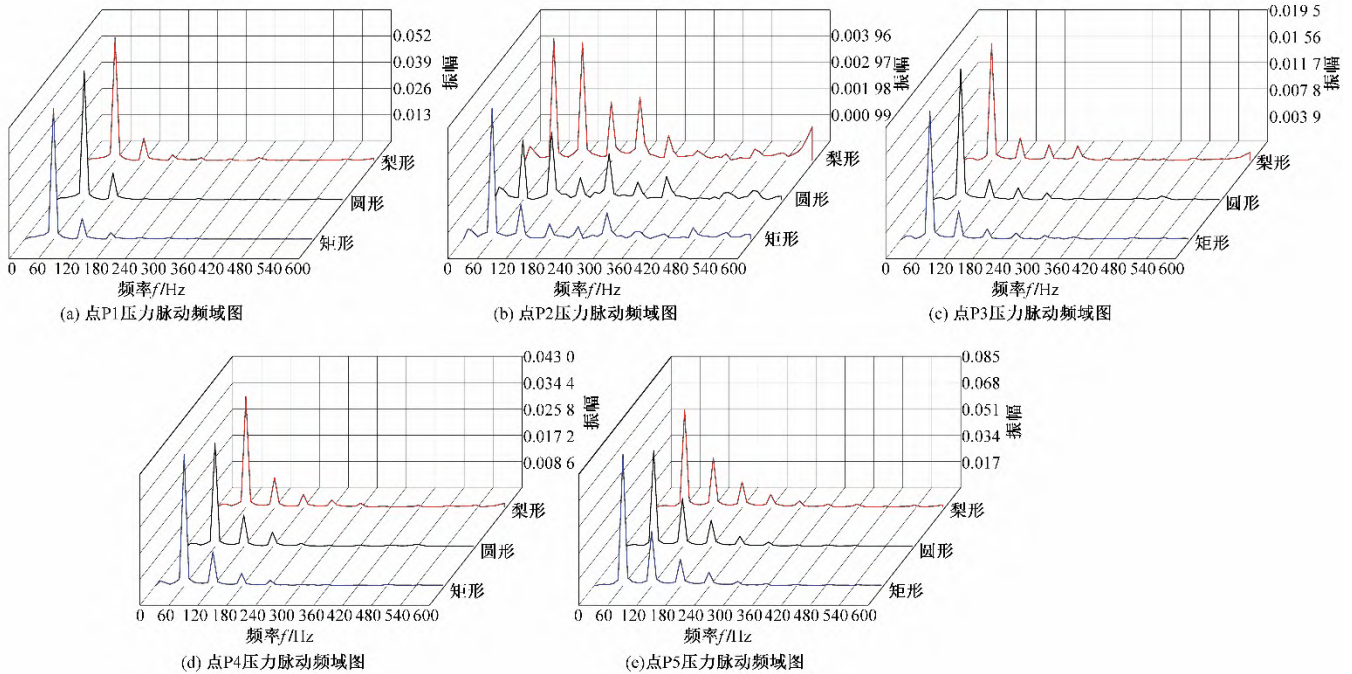


图13 各监测点处的压力脉动频域图

Fig.13 Time domain diagram of pressure fluctuation at each monitoring point

图14为蜗壳壁面监测点P1~P5在叶轮最后一圈的压力脉动小波谱,各子图的右侧图例为小波强度,从小波谱中可以观察到压力脉动的视频特征。从图14中可以看出,矩形蜗壳在各个监测点处的小波强度均比圆形蜗壳和梨形蜗壳大;在监测点P2和P4处,圆形蜗壳的小波强度明显小于梨形蜗壳和矩形蜗壳,梨形蜗壳在监测点P2高频段的小波强度最大。在监测点P1和P3低频段处圆形蜗壳的小波强度与梨形蜗壳的小波强度相差不大,在高频段圆形蜗壳的小波响应低于梨形蜗壳,在隔舌部位的监测点P5,其小波强度的范围最广,在中频段的小波强度最低,小波响应最少。

## 4 结论

(1)蜗壳断面形状对双吸泵的扬程有一定影响,对效率有较明显的影响。在设计工况点时,圆形蜗壳泵的扬程和梨形蜗壳泵扬程大小接近,圆形蜗壳泵扬程略低于梨形蜗壳的,矩形蜗壳泵扬程最小;在设计流量和大流量区,圆形蜗壳泵的效率最高,较效率最低的矩形蜗壳泵高1.74%;在 $1.1Q_d$ 大流量工况下,圆形蜗壳效率较矩形蜗壳效率高3.66%,比梨形蜗壳效率高2.05%,扩大了高效区域。

(2)对不同断面形状的双吸泵蜗壳部位的能量损失计算得出,在3种工况下,圆形蜗壳的能量损失率均较其他形状蜗

壳能量损失率低的;在设计流量工况,矩形蜗壳的能量损失率最大,数值为1.1%,梨形蜗壳和圆形蜗壳损失率相差不大;在 $0.8Q_d$ 流量区域,损失率从大到小分别是矩形蜗壳、梨形蜗壳和圆形蜗壳,圆形蜗壳比矩形蜗壳的损失率低0.43%;在 $1.2Q_d$ 工况点,梨形蜗壳和矩形蜗壳的损失率相差不大,均高于圆形蜗壳,最大差值为0.26%。

(3)通过对3种蜗壳方案进行瞬态径向力对比发现,蜗壳断面形状对作用在叶轮上的径向力影响也较为显著。设计工况和大流量工况下,采用圆形蜗壳时叶轮所受径向力最小,其次是梨形蜗壳,矩形蜗壳对叶轮作用的径向力最大;圆形蜗壳泵叶轮所受的径向力脉动振幅幅度较梨形和矩形蜗壳都小,使得泵内径向力脉动情况更好。矩形蜗壳在 $0.8Q_d$ 流量下作用在叶轮上的径向力值较小,且脉动振幅最小,但在设计工况和大流量下,作用在叶轮上的径向力和脉动振幅情况最大。

(4)不同断面形状蜗壳对蜗壳壁面上的压力脉动影响较小,对压力脉动振幅幅度有一些影响。3种断面形状的蜗壳其压力脉动均呈现周期性变化,周期个数与叶轮叶片数目相同;在隔舌处的压力受叶轮与隔舌的动静干涉影响较大,故压力系数数值最大,离隔舌距离越远,所受动静干涉影响越小,压力系数数值越小;在各监测点处,压力脉动主频振幅的位置大致相同,在1倍叶频左右。圆形蜗壳在各监测点处的压力脉动振幅幅度是3种方案中最小的。

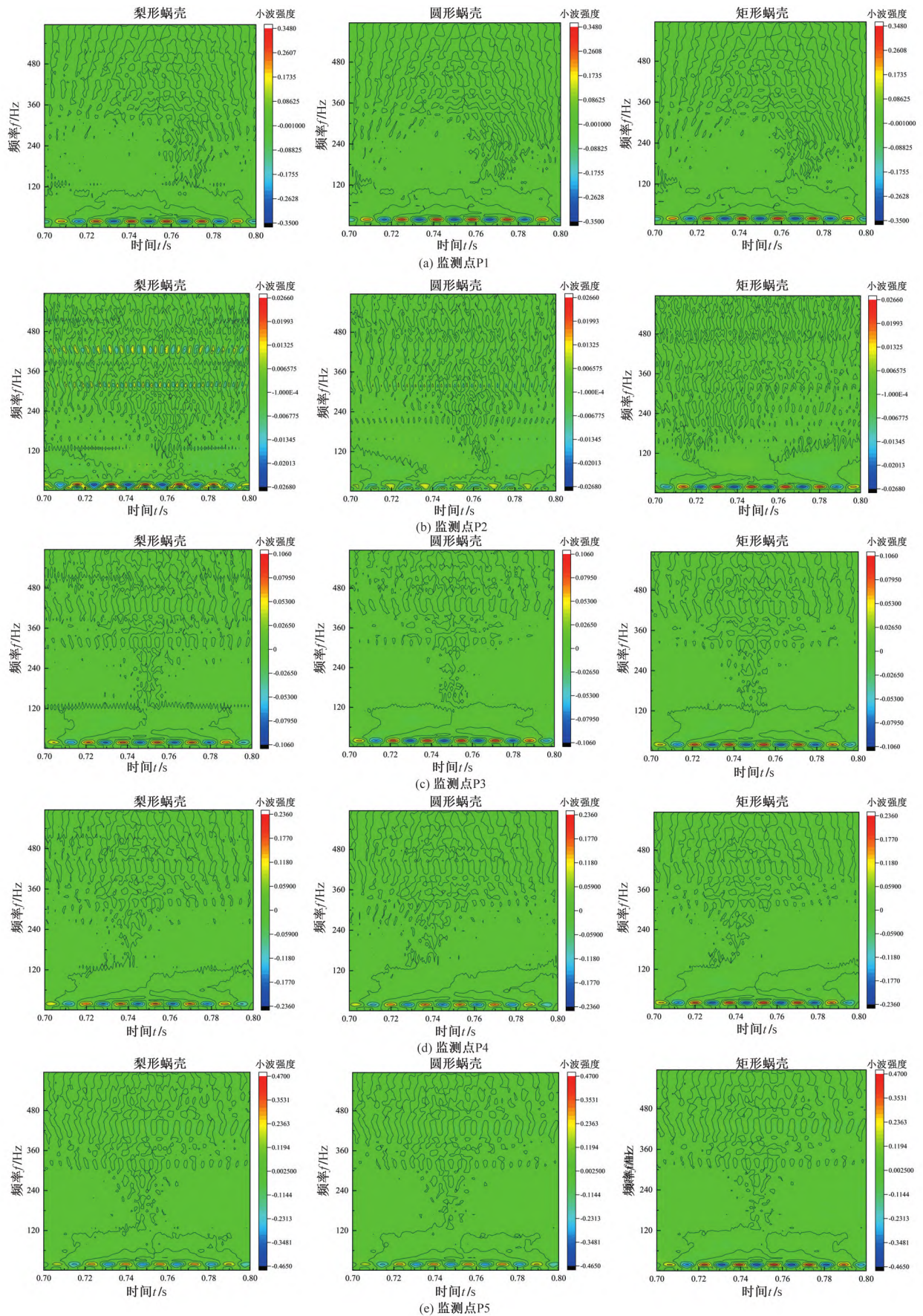


图14 各监测点的压力脉动小波时频图

Fig.14 Wavelet time-frequency diagram of pressure fluctuation at each monitoring point

## 参考文献:

- [1] 田浩. 单级双吸离心泵气蚀的原因及防治措施[J]. 南方农机, 2022, 53(11): 170-172. (TIAN H. Cavitation erosion causes and prevention measures of single-stage double-suction centrifugal pump [J]. China Southern Agricultural Machinery, 2022, 53(11): 170-172.)
- [2] 江伟, 李国君, 张新盛, 等. 离心泵蜗壳进口边对叶轮径向力影响的数值模拟[J]. 水利学报, 2014, 45(2): 248-252. (JIANG W, LI J G, ZHANG X S, et al. Numerical simulation of influence of volute inlet edge on radial force of impeller in centrifugal pump [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 45(2): 248-252.)
- [3] 李峰生. 黄河上游提灌工程高扬程泵站耗能分析及节能策略[J]. 甘肃科技, 2020, 36(16): 1-2+18. (LI F S. Energy consumption analysis and energy saving strategy of high lift pumping station in the upper reaches of the Yellow River [J]. Gansu Science and Technology, 2020, 36(16): 1-2+18.)
- [4] 郭鹏程, 罗兴铸, 周鹏, 等. 不同断面型式蜗壳对离心泵性能影响的数值模拟[J]. 排灌机械工程学报, 2010, 28(4): 300-304. (GUO P C, LUO X Q, ZHOU P, et al. Numerical simulation of the influence of different section types of volute on the performance of centrifugal pump [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2010, 28(4): 300-304.)
- [5] 朱迪, 肖若富, 田芳. 双吸离心泵蜗壳面积比水力性能的影响研究[J]. 农业机械学报, 2018, 49(1): 123-129. (ZHU D, XIAO R F, TIAN F. Influence of double suction centrifugal pump volute area ratio on hydraulic performance [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(1): 123-129.)
- [6] 牟介刚, 施瀚昱, 郑水华, 等. 蜗壳断面形状对泵径向力平衡影响的研究与探讨[J]. 水泵技术, 2013(3): 7-10. (MU J G, SHI H Y, ZHENG S H, et al. Research and discussion on the influence of volute section shape on pump radial force balance [J]. Pump Technology, 2013(3): 7-10.)
- [7] 牛茂升, 朱强, 芦洪钟, 等. 隔板起始位置对大型双蜗壳双吸泵径向力和压力脉动的影响[J]. 农业工程学报, 2021, 37(12): 20-27. (NIU M S, ZHU Q, LU H Z, et al. The influence of the initial position of the baffle on the radial force and pressure pulsation of the large double volute double suction pump [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(12): 20-27.)
- [8] 肖若富, 吕腾飞, 王福军. 双蜗壳式双吸泵隔板结构对叶轮径向力的影响[J]. 农业机械学报, 2011, 42(9): 85-88. (XIAO R F, LV T F, WANG F J. The influence of baffle structure of double volute double suction pump on the radial force of impeller [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(9): 85-88.)
- [9] 高波, 王兴宁, 李忠, 等. 离心泵非设计工况内部流动特性研究[J]. 工程热物理学报, 2015, 36(12): 2 624-2 628. (GAO B, WANG X N, LI Z, et al. Study on internal flow characteristics of centrifugal pump under off-design conditions [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2015, 36(12): 2 624-2 628.)
- [10] 陈建芳, 施卫东, 张德胜, 等. 叶片进口边位置对单叶片离心泵蜗壳内压力脉动的影响[J]. 振动与冲击, 2021, 23, 032. (CHEN J F, SHI W D, ZHANG D S, et al. Effects of blade inlet edge position on pressure pulsation in volute of a single blade centrifugal pump [J]. Journal of Vibration and Shock, 2021, 23, 032.)
- [11] KHALIFA A E, AL-QUTUB A M, BEN-MANSOUR R. Study of pressure fluctuations and induced vibration at blade-passing frequencies of a double volute pump [J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2011, 36(7): 1 333-1 345.
- [12] RSPENCE, AMARAL-TEIXEIRA J. Investigation into pressure fluctuations in a centrifugal pump using numerical methods supported by industrial tests [J]. Computers & Fluids, 2008, 37(6): 690-704.
- [13] DALY J, DE SOUZA B, NIVEN A, et al. Numerical simulation and analysis of the transient flow and head distribution through a single blade centrifugal pump impeller [J]. WSEAS Transactions on Fluid Mechanics, 2006, 1(6): 678-685.
- [14] AL-QUTUB A, KHALIFA A, KHULIEF Y. Experimental investigation of the effect of radial gap and impeller blade exit on flow-induced vibration at the blade-passing frequency in a centrifugal pump [J]. International Journal of Rotating Machinery, 2009: 704 845.
- [15] WANG Z Y, QIAN Z D, LU J, et al. Effects of flow rate and rotational speed on pressure fluctuations in double-suction centrifugal pump [J]. Energy, 2019, 170: 212-227.
- [16] 关醒凡. 现代泵理论与设计[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2011.
- [17] 赵万勇, 陈帅, 赵强, 等. 叶片布置方式对双吸离心泵径向力的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2021, 39(4): 331-337. (ZHAO W Y, CHEN S, ZHAO Q, et al. Influence of blade arrangement on radial force of double-suction centrifugal pump [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2021, 39(4): 331-337.)

## (上接第261页)

- [14] 郭森, 王大为, 张绍伟, 等. 自适应粒子群优化的HMM故障诊断方法及应用[J]. 振动与冲击, 2021, 40(20): 264-270. (GUO S, WANG D W, ZHANG S W, et al. A fault diagnosis method with application of HMM Based on adaptive particle swarm optimization [J]. Journal of Vibration and Shock, 2021, 40(20): 264-270.)
- [15] SOLEIMANI M, FELICIAN C, DANIEL N. Integration of Hidden Markov Modelling and Bayesian Network for fault detection and prediction of complex engineered systems [J]. Reliability Engineering & System Safety, 2021, 215(4): 107 808.
- [16] 张瑞成, 崔凯鑫, 梁卫征. 基于改进HMM的带钢热连轧精轧过程故障检测[J]. 锻压技术, 2023, 48(3): 126-131. (ZHANG R C, CUI K X, LIANG W Z. Fault detection of finish rolling process for hot strip rolling based on improved HMM [J]. Forging & Stamping Technology, 2023, 48(3): 126-131.)