

DOI: 10.3901/JME.2015.04.185

# 时序效应对导叶式离心泵内部 压力脉动影响的数值分析\*

王文杰 袁寿其 裴吉 张金凤 袁建平  
(江苏大学国家水泵及系统工程技术研究中心 镇江 212013)

**摘要:** 为了研究时序效应对导叶式离心泵内部非定常压力脉动的影响,基于雷诺时均(Reynolds averaged Navier-Stokes, RANS)方程,在  $0.6Q_d$ 、 $1.62Q_d$  两个非设计工况下,应用 SST  $k-\omega$  湍流模型对导叶在一个栅距内的 5 个不同时序位置下泵内部流动进行三维非定常数值计算,得到导叶和蜗壳流道内压力脉动强度分布随不同导叶时序位置的变化规律,结果表明,导叶时序效应对叶轮与导叶的动静干涉引起的压力脉动强度影响较明显;在导叶靠近进口的吸力面区域和导叶喉部区域存在着较大的压力脉动强度;压力脉动强度沿着导叶流道向下游传播并逐渐减弱;导叶时序效应对蜗壳平面的压力脉动强度影响非常明显,压力脉动强度呈现不规律分布;当在小流量  $0.6Q_d$  工况时,当导叶时序位置为 C3 时,导叶内压力脉动强度最大值为 0.44,而当导叶时序位置为 C2 和 C4 时,压力脉动强度最大值分别为 0.24 和 0.22;当在大流量  $1.62Q_d$  工况时,当时序位置为 C2 时,压力脉动强度最大值为 0.87,而当时序位置为 C1 和 C4 时,压力脉动强度最大值为分别为 0.72 和 0.77;在非设计工况下,蜗壳内的压力脉动强度相对导叶的压力脉强度较弱。C4 时序位置能减小余热排出泵运行中的压力脉动强度,从而提高泵的稳定性,为导叶的安装位置提供参考。

**关键词:** 离心泵; 时序效应; 压力脉动强度; 动静干涉; 导叶

**中图分类号:** TH311

## Numerical Analysis of the Clocking Effect on the Pressure Fluctuation in the Centrifugal Pump with Vaned Diffuser

WANG Wenjie YUAN Shouqi PEI Ji ZHANG Jinfeng YUAN Jianping  
(National Research Center of Pumps, Jiangsu University, Zhenjiang 212013)

**Abstract:** In order to study the clocking effect on the unsteady pressure fluctuations in the centrifugal pump with a vaned diffuser, the three-dimensional unsteady numerical simulations are undertaken to analyze the inner flow characteristics with 5 different positions of diffuser by solving the RANS equations with SST  $k-\omega$  turbulence model under 60% and 162% of the design conditions. The pressure fluctuation intensity distributions caused by the clocking effect in the diffuser and the volute are obtained. The results show that the clocking effect of diffuser on pressure fluctuation intensity due to the rotor-stator interaction is obvious. In the diffuser, the highest pressure fluctuation intensities occur at the throat area and the pressure side near the leading edge. The pressure fluctuation intensity propagates and weakens along the diffuser passage. Pressure fluctuation intensity distribution due to the clocking effect is irregular significantly. Under the partload condition in the diffuser, when the diffuser position is C3, the maximum value of the pressure fluctuation intensity is 0.44; when the diffuser positions are C2 and C4, the maximum values are 0.24 and 0.22, respectively. Under the overload condition in the diffuser, when the diffuser position is C2, the maximum value of the pressure fluctuation intensity is 0.87; when the diffuser positions are C1 and C4, the maximum values are 0.72 and 0.77, respectively. The pressure fluctuation intensity is much smaller than that in the diffuser under the partload and overload operating conditions. The relative position C4 can decrease the pressure fluctuation intensity and the result can provide a reference to the setting relative position of the diffuser to the volute.

**Key words:** centrifugal pump; clocking effect; pressure fluctuation intensity; rotor-stator interaction; diffuser

\* 国家自然科学基金(51349004, 51409123)、江苏省自然科学基金青年基金(BK20140554)、中国博士后科学基金面上(2014M560402)和江苏高校优势学科建设工程(PAPD)资助项目。20140220 收到初稿, 20141220 收到修改稿

## 0 前言

时序效应即改变叶栅(动叶与动叶或静叶与静叶)之间周向相对位置对叶轮机械机组性能的影响。时序效应的研究起初于涡轮机械,近年来,国内外学者在涡轮、压缩机等领域对时序效应进行了大量研究。ARNONE 等<sup>[1]</sup>采用准三维方法研究了时序效应对低压透平性能及非定常流动的影响,对静叶进口边的非定常压力分析,指出了最优的时序位置。MAILACH 等<sup>[2]</sup>应用时序效应对一低速四级压缩机的第 3 级静叶进行了非定常压力分布测量,结果清晰地反映了尾流与势流共同的作用在第 3 级静叶上的非定常压力分布。BEHR 等<sup>[3]</sup>采用试验和数值计算方法针对一高压透平研究的动叶与动叶和静叶与静叶的时序效应进行了研究,结果表明时序效应对效率有一定的影响。BOHN 等<sup>[4]</sup>采用数值模拟方法对一两级轴流透平的第二个静叶时序位置进行了优化,得到了一个效率最高的静叶时序位置。SCHENNACH 等<sup>[5]</sup>针对 1.5 级接近声速的透平,采用激光多普勒测速仪(Laser Doppler velocimetry, LDV)测量方法研究前静叶与后静叶之间不同相对角度对后静叶流场的影响。JIA 等<sup>[6]</sup>以低速轴流压缩机为研究对象,研究了在设计工况与非设计工况下不同进口静叶对压缩机内的压力分布及叶片受力情况。任晓栋等<sup>[7]</sup>研究了 1.5 级跨声压气机的静叶与出口导叶之间的时序效应,表明时序效应对压气机性能影响较大。王俭等<sup>[8]</sup>对 1.5 级轴流透平前后级静叶的周向定位方案,并利用 Numeca 软件进行了数值模拟验证,结果表明时序定位方法有一定的参考价值。姜华等<sup>[9]</sup>采用 X 热线热膜技术研究了不同导叶预旋角的时序效应对离心压缩机内部非定常流场的影响,指出不同导叶预旋角的时序效应对流场的影响不同。

泵内部的非定常流动是影响泵安全运行的一个重要因素,动静干涉这一现象最为明显,引起泵内压力脉动进而影响振动、噪声等,严重缩短泵的使用寿命。国内外学者对动静干涉引起的压力脉动进行了大量的数值与试验研究<sup>[10-17]</sup>。然而仅少数学者<sup>[18]</sup>研究了时序效应对泵内部流动的影响。本文以导叶式离心泵(余热排出泵)为研究对象,采用计算流体力学(Computational fluid dynamics, CFD)方法研究了在  $0.6Q_d$  和  $1.62Q_d$  两个非设计工况下导叶 5 个不同时序位置对导叶式离心泵内部压力脉动强度

的影响,并且以降低泵内部的压力脉动强度为出发点,为确定导叶的最优时序位置提供理论基础。

## 1 计算模型与数值模拟

### 1.1 计算模型

导叶式离心泵是由扭曲叶轮、径向导叶和环形蜗壳组成。主要设计几何和性能参数如表 1 所示。导叶式离心泵三维模型如图 1 所示,在实际安装中,导叶是通过螺栓固定在泵体上。

表 1 导叶式离心泵主要设计参数

参数	数值	参数	数值
叶轮进口直径 $D_1$ /mm	270	导叶出口宽度 $b_4$ /mm	84
叶轮出口直径 $D_2$ /mm	511	导叶进口安放角 $\alpha_3$ (°)	8.5
叶片出口宽度 $b_2$ /mm	49	导叶叶片数 $Z_{di}$	7
叶轮叶片数 $Z_m$	5	蜗壳进口直径 $D_3$ /mm	840
叶轮叶片出口安放角 $\beta_2$ (°)	23	蜗壳进口宽度 $b_3$ /mm	250
叶轮叶片包角 $\varphi$ (°)	115	设计流量 $Q_d$ ( $m^3/h$ )	910
导叶进口直径 $D_3$ /mm	515	设计扬程 $H_d$ /m	77
导叶出口直径 $D_4$ /mm	718	转速 $n$ (r/min)	1 490
导叶进口宽度 $b_3$ /mm	55	比速数 $n_s$	104.5

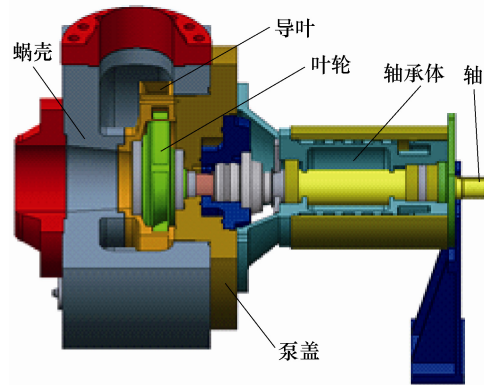
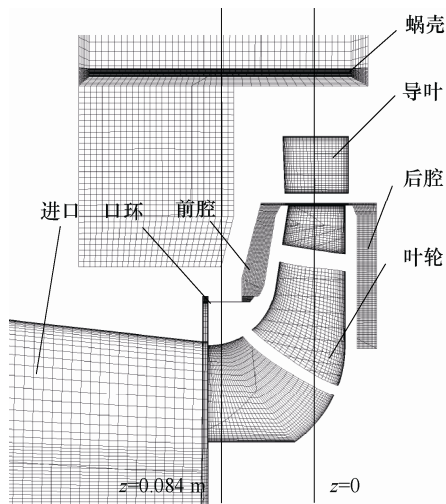


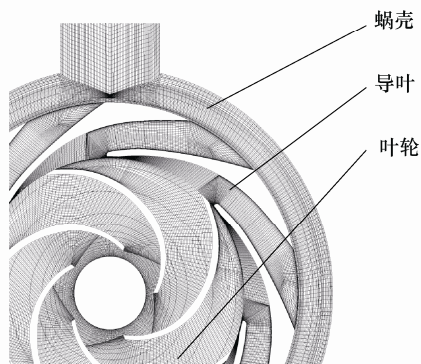
图 1 导叶式离心泵三维模型图

### 1.2 网格与数值模拟设置

网格划分在计算流体力学数值模拟计算中是关键的一步,网格的质量的好坏直接影响着计算精度。相比非结构网格,结构化网格生成速度快,质量高,有利于提高计算精度以及缩短计算时间,因此本文采用 Icem 软件对导叶式离心泵进行全流场六面体结构网格划分,并对壁面进行边界层加密,如图 2 所示。对数值模拟进行网格无关性检查,如图 3 所示,最终确定网格数约为 550 万。采用 Determinant  $3 \times 3 \times 3$  来评价网格质量的好坏,其表示的是最小雅可比矩阵与最大雅可比矩阵行列式的比值,其值越接近 1,说明网格质量越好,各计算域网格数及质量如表 2 所示。



(a) 轴面截面网格



(b) z=0 截面网格

图 2 计算域网格

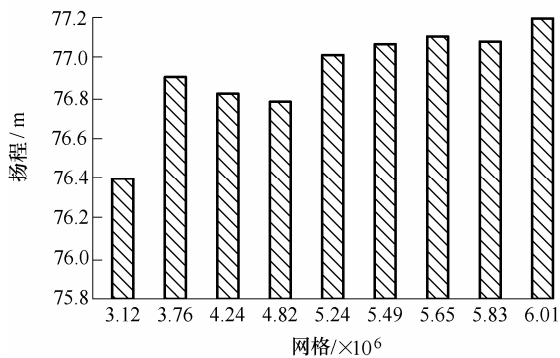


图 3 网格无关性分析

表 2 结构网格数量及质量

计算域	进口	口环	前腔	叶轮	导叶	蜗壳	后腔
网格数/ $\times 10^4$	58	35	22	127	126	157	24
Determinant $3 \times 3 \times 3$	0.75	0.75	0.75	0.7	0.78	0.68	0.75

在 2 个非设计工况下对导叶不同位置进行三维非定常数值模拟，采用 SST  $k-\omega$  湍流模型求解非定常雷诺时均方程，边界条件设置为总压进口和质量流量出口，参考压设为 0 Pa，采用自动壁面函数，并且固体壁面采用无滑移边界条件，叶轮和导叶叶片表面粗糙度为 0.012 5 mm，其他固体壁面粗糙度

为 0.025 mm，将叶轮与进口、叶轮与导叶交接面设置为瞬态冻结转子。时间步设置为  $3.355 7 \times 10^{-4}$  s，即叶轮每旋转  $3^\circ$ 。总时间设为 0.322 15 s，即叶轮旋转 5 圈，取叶轮最后一圈作为分析结果。

### 1.3 导叶时序位置与周期性非定常流动

以叶轮旋转轴为原点，建立了如图 4 所示的  $Oxy$  直角坐标系，定义导叶 A 叶片工作面出口边与  $x$  轴的夹角  $\theta$  为导叶与蜗壳不同的相对时序位置，定义  $\theta=110.4^\circ$  为时序位置 C1，即图 4 所示的导叶位置，顺时针方向依次旋转  $10.28^\circ$  为下一个时序位置，当旋转  $41.12^\circ$  为时序位置 C5。为分析导叶进口处的压力脉动强度分布，定义  $\varphi$  为导叶进口边节点与  $x$  轴的夹角。

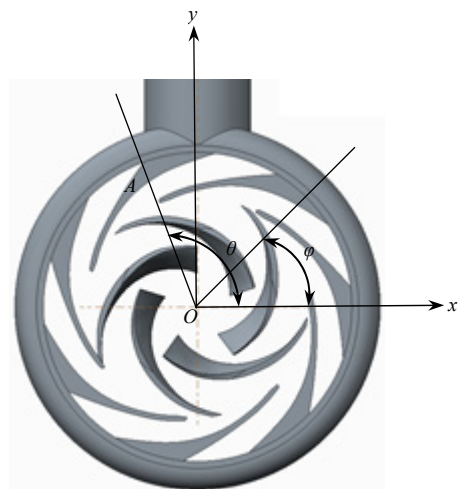


图 4 导叶时序位置及坐标系

根据上述求解的湍流模型，得到的是每个节点的相平均值，而没考虑随机性瞬时压力脉动量，因为瞬时压力脉动量与相平均值相比影响较小，为了全面准确定量地分析泵内部非定常流动现象，采用统计学分析方法定义了压力脉动强度，定义网格中一个节点在某一时间  $t$  的压力  $p(x, y, z, t)$ ，将压力转化成量纲一压力系数  $C_p = p/0.5\rho u_2^2$ ，其中  $u_2$  为叶轮出口圆周速度。设叶轮旋转周期为  $T$ ，那么在一个周期内的平均压力系数值和压力脉动强度<sup>[18]</sup>分别如式(1)、(2)所示

$$\overline{C_p} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N C_p \left( x, y, z, \frac{n}{120} T \right) \quad N=120 \quad (1)$$

$$C_p^* = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \left( C_p \left( x, y, z, \frac{n}{120} T \right) - \overline{C_p} \right)^2} \quad N=120 \quad (2)$$

## 2 试验验证

为验证数值计算的可靠性，对导叶式离心泵的

0.7 倍模型进行了外特性试验, 导叶的时序位置为 C3 位置。所用试验台为开式试验台, 试验满足 II 级精度, 如图 5 所示。采用上海威尔泰仪器仪表有限公司生产的 WT200 智能压力变送器测量泵进出口压力, 进口处的压力变送器的测量范围  $-0.1 \sim 0.1$  MPa, 出口处的压力变送器的测量范围  $0 \sim 1.6$  MPa 测量精度均为 0.1 级; 上海自仪九仪表有限公司生产的 LWGY-200A 型涡轮流量计测量流量, 工作压力为 1.6 MPa, 测量精度为 0.5 级。通过调节球阀改变泵运行流量, 测得从关死点到最大流量工况下的扬程, 同时通过数值模拟得到了从  $0.13Q_d$  到  $1.62Q_d$  共 11 个工况点的扬程对比如图 6 所示。



图 5 开式试验台

从图 6 中可以看出  $0.4Q_d \sim 1.62Q_d$  定常数值计算结果与试验结果在趋势上有很高的一致性, 扬程预测值在此范围内均比试验值较为接近, 但是在其他小流量工况下与试验值相差较大, 由此可见该定常计算方法能在较大的流量范围内比较准确地预测泵的外特性, 同时对比定常计算结果和非定常计算

结果, 可以发现计算的扬程相差很小。因此可用来进一步反映  $0.6Q_d$  和  $1.62Q_d$  两个非设计工况下泵内流场特征, 并为第 3 节的分析导叶序时效应对泵内部非定常流动特性的研究提供了指导。

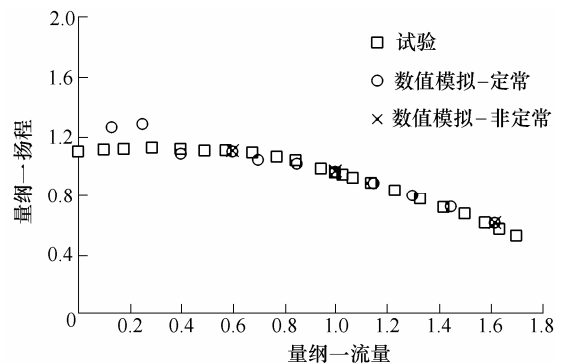


图 6 试验结果与模拟结果对比

### 3 结果与讨论

#### 3.1 $Q=0.6Q_d$ 泵内部压力脉动

$Q=0.6Q_d$  导叶进口圆周的压力脉动强度分布如图 7 所示。从图 7 中可以看出, 压力脉动强度最大出现在靠近导叶背面的进口边区域, 而且每个导叶进口边位置处的压力脉动强度分布均略有不同; 当导叶从 C1 位置变化到 C5 位置时, 压力脉动强度分布出现了明显的变化, 且最大压力脉动强度的区域发生了转移, 说明导叶时序效应对叶轮与导叶的动静干涉有一定的影响; 当导叶在 C4 位置时, 压力脉动强度最大的区域明显比其他 4 个时序位置的小。

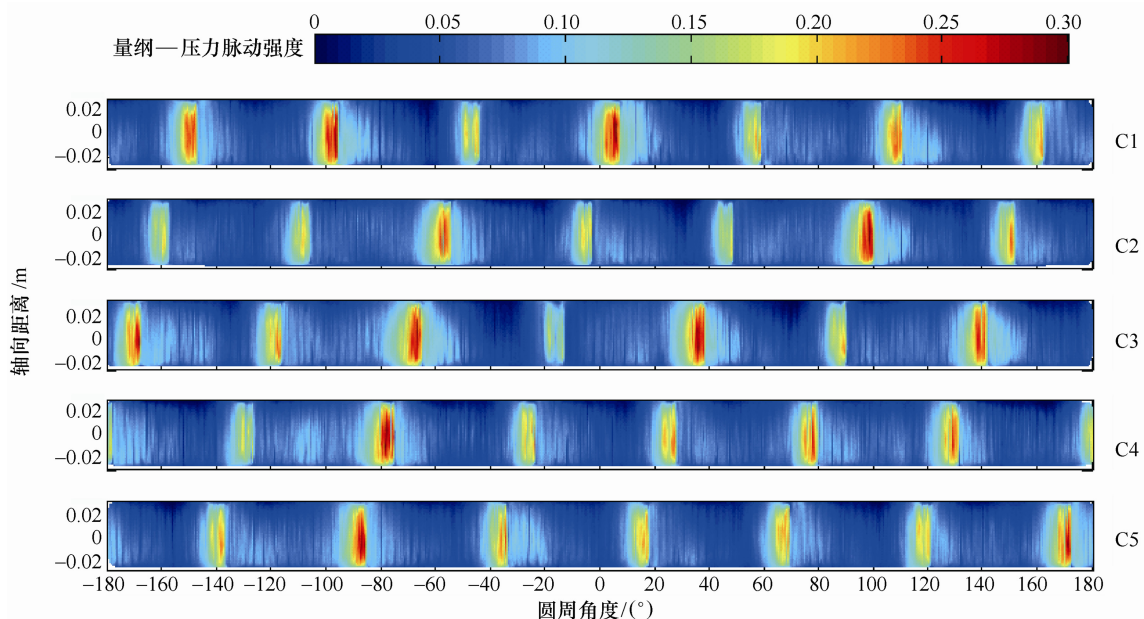


图 7  $Q=0.6Q_d$  导叶进口圆周面压力脉动强度分布

图 8 所示的是  $Q=0.6Q_d$  时导叶内部压力脉动强度分布情况，从图 8a 中可以看出，从导叶进口到出口，压力脉动强度逐渐减弱，其中在导叶进口边局部区域的压力脉动强度最大；从图 8b~8e 可以看出，随导叶不同相对位置的变化，在导叶喉部处的压力脉动变化较明显，而在导叶靠近出口边流道压力脉动强度几乎无明显变化。当导叶在时序位置 C4 时，导叶喉部处的同等压力脉动强度区域相对其他

四种位置的脉动强度较小；同样，从图 9 可以看出，导叶内最大压力脉动强度值随导叶不同时序位置发生了变化，当时序位置为 C3 时，压力脉动强度最大值为 0.44，而当时序位置为 C2 和 C4 时，压力脉动强度最大值分别为 0.24 和 0.22。说明了在小流量工况下，时序位置 C2 和 C4 有利于减小导叶内压力脉动强度。

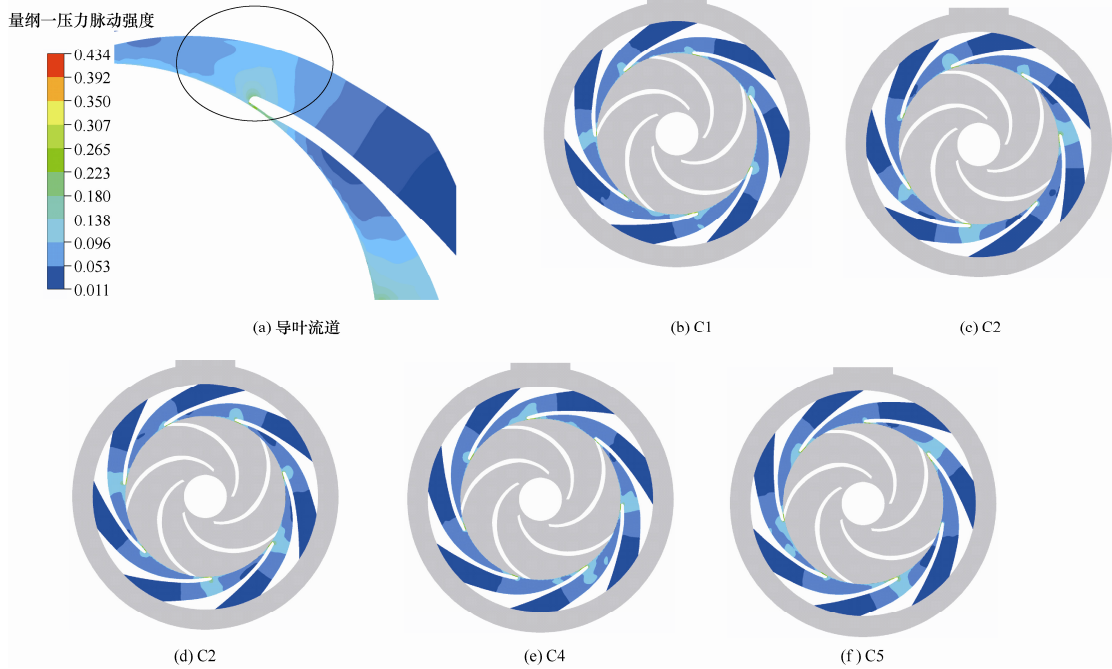


图 8  $Q=0.6Q_d$  导叶  $z=0$  平面的压力脉动强度分布

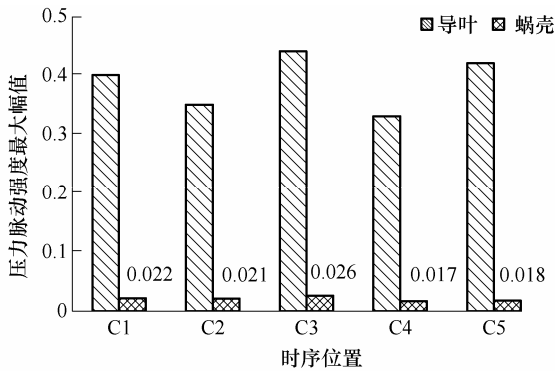


图 9  $Q=0.6Q_d$  最大压力脉动强度与时序位置的关系

图 10 所示的是  $Q=0.6Q_d$  时蜗壳  $z=0.084\text{ m}$  平面的压力脉动强度分布。从图 10 中可以看出导叶时序效应对蜗壳平面的压力脉动强度影响非常明显，呈现不规则分布，当导叶在 C3 时序位置时，最大压力脉动强度发生在蜗壳出口右侧处。而当导叶时序位置在 C4、C5 时，蜗壳内压力脉动强度较小，说明能有效地减小蜗壳内的压力脉动强度。从图 9 中可以看出，蜗壳内的压力脉动强度远小于导叶内的压力脉动强度，当时序位置为 C3 时，蜗壳内最大压力脉动强度值为 0.026，当时序位置为 C2 和 C4

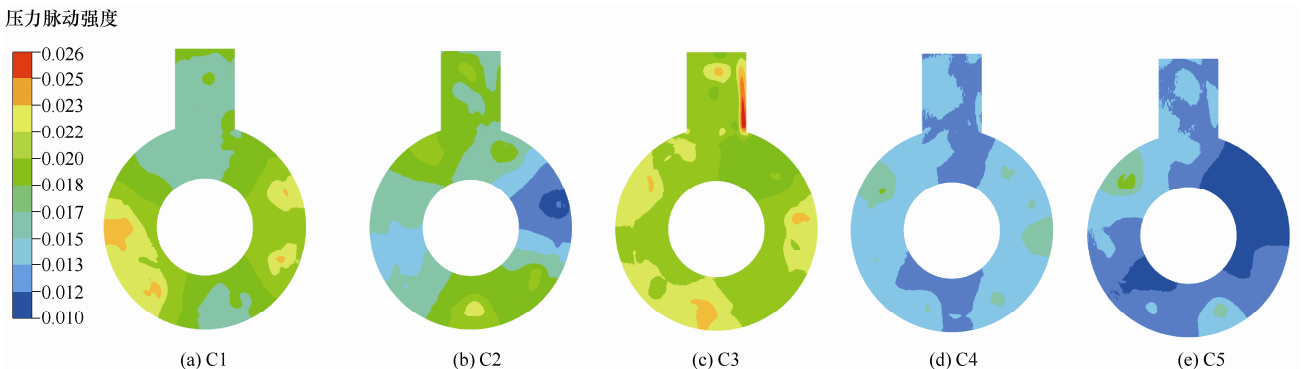


图 10  $Q=0.6Q_d$  蜗壳  $z=0.084\text{ m}$  平面的压力脉动强度分布

时, 蜗壳内最大压力脉动强度值分别为 0.018 和 0.017。

### 3.2 $Q=1.62Q_d$ 泵内部压力脉动

图 11 所示的是  $Q=1.62Q_d$  导叶进口圆周面压力脉动强度分布情况, 从图 11 中可以看出, 导叶进口圆周面存在明显的动静干涉现象, 压力脉动强度最

大的区域出现在导叶的背面靠近进口边区域, 且比图 7 中小流量工况下的导叶进口圆周面的最大压力脉动强度值大, 说明在大流量工况下, 泵内部存在更强的压力脉动; 在导叶进口流道压力脉动强度较弱, 说明叶轮与导叶的动静干涉作用对进口流道影响较小。

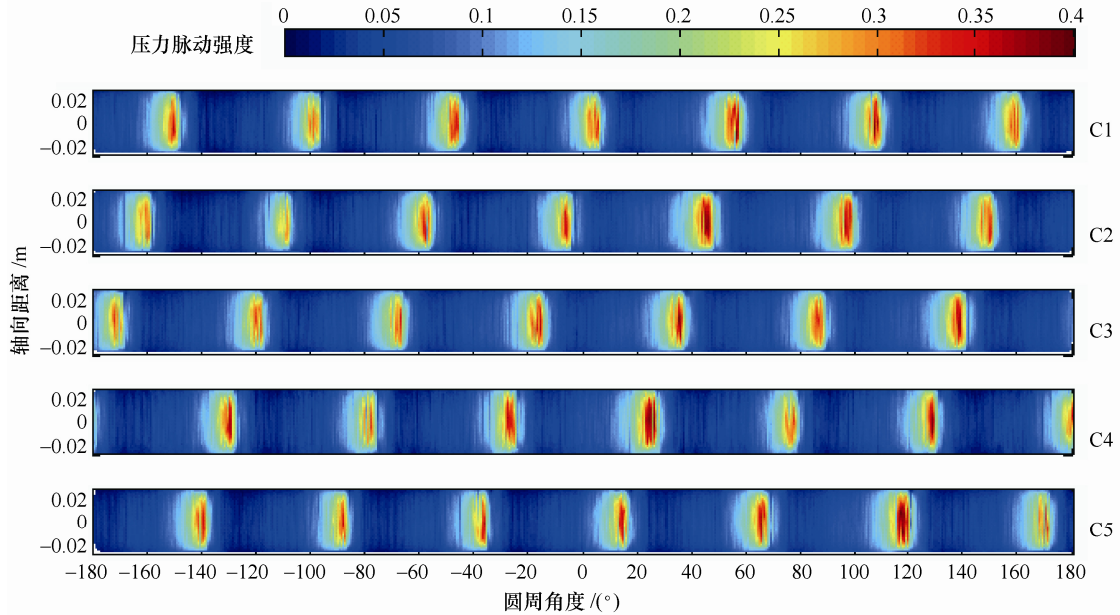


图 11  $Q=1.62Q_d$  导叶进口圆周面压力脉动强度分布

图 12 所示的是  $Q=1.62Q_d$  导叶  $z=0$  平面的压力脉动强度分布情况, 从图 12 中可以看出, 在导叶靠近进口

的吸力面区域和导叶喉部区域存在着较强的压力脉动。在导叶流道中游和下游, 压力脉动强度

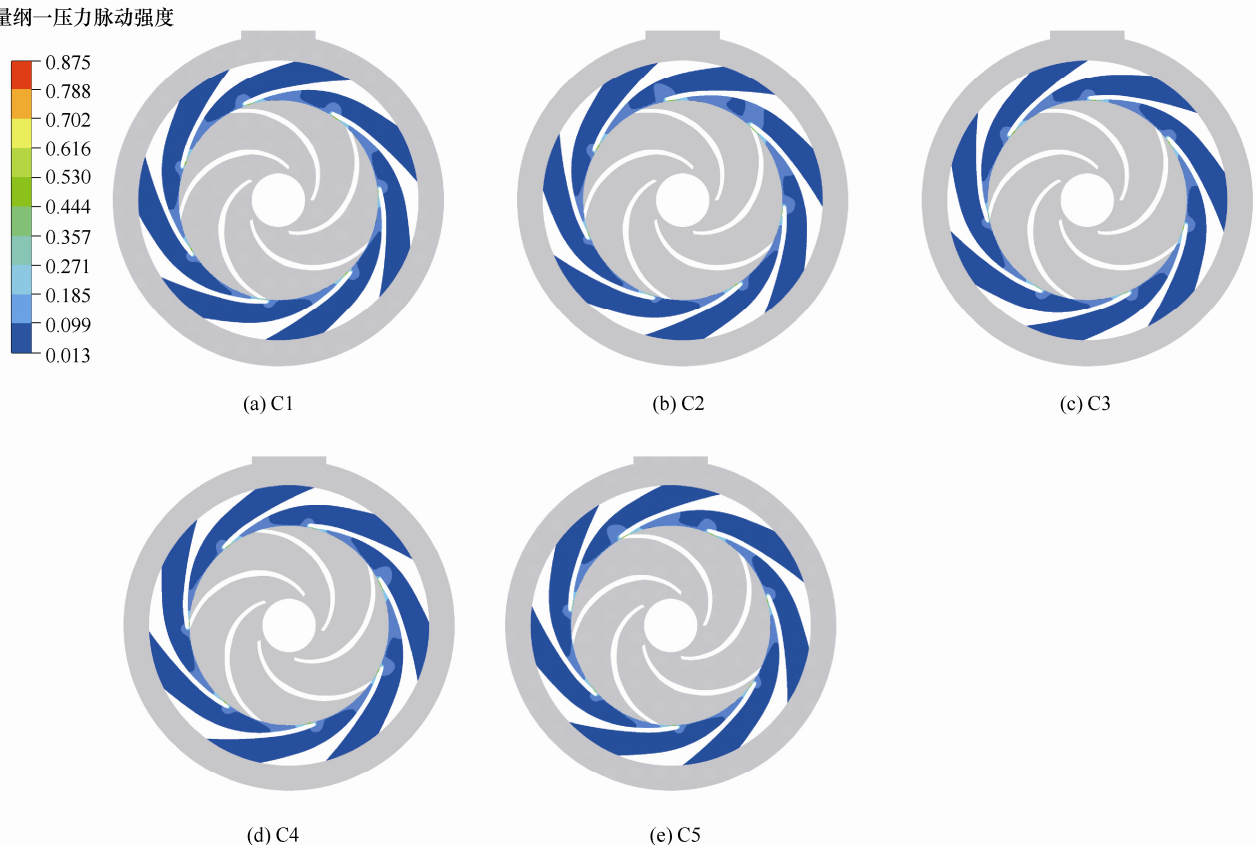


图 12  $Q=1.62Q_d$  导叶  $z=0$  平面的压力脉动强度分布

逐渐减弱，说明了压力脉动强度沿着导叶流道向下游传播并减弱；当导叶时序位置在 C2 位置时，导叶喉部处的同等压力脉动强度区域比其他 4 个时序位置的大，而在其他 4 个时序位置处的区域均相差不大。导叶内最大压力脉动强度值随导叶不同时序位置变化而变化。从图 13 中可以看出当时序位置为 C2 时，压力脉动强度最大值为 0.87，而当时序位置为 C1 和 C4 时，压力脉动强度最大值为分别为 0.72 和 0.77。说明在大流量工况下，时序位置 C1 和 C4 均能减小导叶内的压力脉动强度。

图 14 所示为  $Q=1.62Q_d$  蜗壳  $z=0.084$  m 平面的压力脉动强度分布，从图 14 中可以看出导叶时序效应对蜗壳平面的压力脉动强度影响非常明显，呈现不规则分布，当导叶在 C2 时序位置时，最大压力

量纲一压力脉动强度

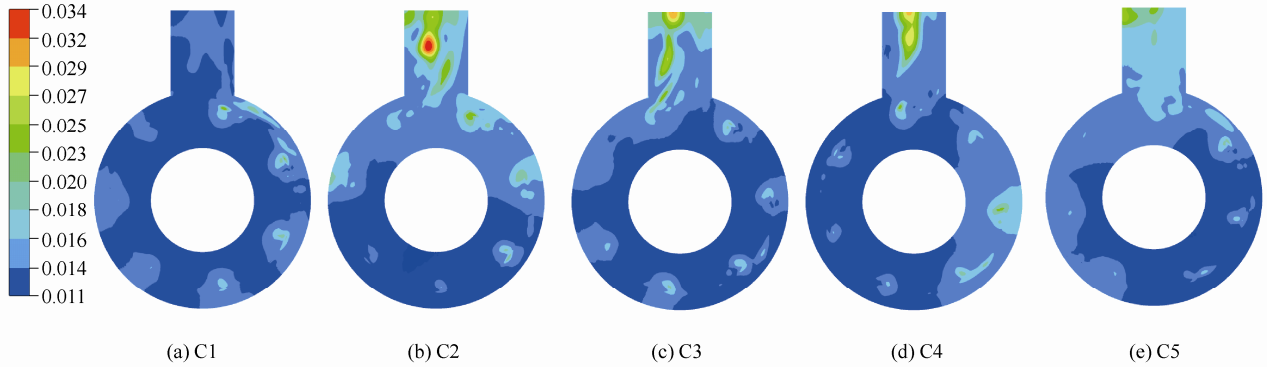


图 14  $Q=1.62Q_d$  蜗壳  $z=0.084$  m 平面的压力脉动强度分布

### 4 结论

对核电用导叶式余热排出泵进行了全流场数值模拟，分析了导叶时序效应对导叶式离心泵内部压力脉动强度的影响，结论如下。

(1) 在小流量  $0.6Q_d$  工况时，导叶进口圆周的压力脉动强度最大出现在靠近导叶背面的进口边区域，当导叶从 C1 位置变化到 C5 位置时，压力脉动强度分布出现了明显的变化，且最大压力脉动强度的区域发生了转移，从导叶进口到出口，压力脉动强度逐渐减弱，蜗壳内的压力脉动强度呈现不规则分布，蜗壳内的压力脉动强度远小于导叶内的压力脉动强度；当时序位置为 C3 时，导叶内压力脉动强度最大值为 0.44，蜗壳内最大压力脉动强度值为 0.026，而当时序位置为 C2 和 C4 时，导叶内压力脉动强度最大值分别为 0.24 和 0.22，蜗壳内最大压力脉动强度值分别为 0.018 和 0.017。

(2) 在大流量  $1.62Q_d$  工况时，当导叶时序位置在 C2 位置时，导叶喉部处的同等压力脉动强度区

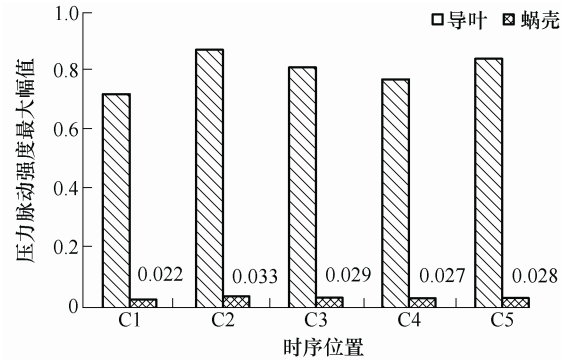


图 13  $Q=1.62Q_d$  最大压力脉动强度与时序位置的关系

域比其他 4 个时序位置的大，而在其他 4 个时序位置处的区域均相差不大，当时序位置为 C2 时，压力脉动强度最大值为 0.87，蜗壳内最大压力脉动强度值为 0.033，而当时序位置为 C1 和 C4 时，压力脉动强度最大值为分别为 0.72 和 0.77，蜗壳内最大压力脉动强度值分别为 0.022 和 0.027。

域比其他 4 个时序位置的大，而在其他 4 个时序位置处的区域均相差不大，当时序位置为 C2 时，压力脉动强度最大值为 0.87，蜗壳内最大压力脉动强度值为 0.033，而当时序位置为 C1 和 C4 时，压力脉动强度最大值为分别为 0.72 和 0.77，蜗壳内最大压力脉动强度值分别为 0.022 和 0.027。

(3) 综合考虑不同时序位置对两个流量下的压力脉动强度的影响，时序位置为 C4 时，余热排出泵运行中的压力脉动强度较小，从而提高泵的稳定性的，为导叶的安装位置提供了参考。

### 参 考 文 献

[1] ARNONE A, MARCONCINI M, DEL GRECO A S, et al. Numerical investigation of three-dimensional clocking effects in a low pressure turbine[C]//ASME Turbo Expo 2003, collocated with the 2003 International Joint Power Generation Conference. American Society of Mechanical Engineers, 2003; 245-254.

[2] MAILACH R, VOGELER K. Rotor-stator interactions in a four-stage low-speed axial compressor-part I: Unsteady profile pressures and the effect of clocking[J]. Journal of

- Turbochinery, 2004, 126: 507-518
- [3] BEHR T, PORRECA L, MOKULYS T, et al. Multistage aspects and unsteady effects of stator and rotor clocking in an axial turbine with low aspect ratio blading[J]. Transactions-American Society of Mechanical Engineers Journal of Turbomachinery, 2006, 128(1): 11-22.
- [4] BOHN D, AUSMEIER S, REN J. Investigation of the optimum clocking position in a two-stage axial turbine[J]. International Journal of Rotating Machinery, 2005, 2005(3): 202-210.
- [5] SCHENNACH O, WOISETCHLAGER J, MARN A, et al. Laser-Doppler-velocimetry measurements in a one and a half stage transonic test turbine with different angular stator-stator positions[J]. Experiments in Fluids, 2007, 43(2-3): 385-393.
- [6] JIA H X, XI G, MULLER L, et al. Effect of clocking on unsteady rotor blade loading in a low-speed axial compressor at design and off-design operating conditions[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering, 2008, 222(6): 895-906.
- [7] 任晓栋, 顾春伟. 1.5 级跨声压气机中时序效应的研究[J]. 航空动力学报, 2010, 25(4): 891-896.  
REN Xiaodong, GU Chunwei. Investigation on clocking effect of 1.5-stage transonic compressor[J]. Journal of Aerospace Power, 2010, 25(4): 891-896.
- [8] 王俭, 杨波, 谷传纲. 轴流透平时序定位方法的探讨[J]. 航空动力学报, 2010, 25(10): 2333-2339.  
WANG Jian, YANG Bo, GU Chuangang. Optimization of axial turbine design by using stator clocking effect[J]. Journal of Aerospace Power, 2010, 25(10): 2333-2339.
- [9] 姜华, 席光, 宫武旗. 不同导叶预旋角下离心压缩机的时序效应[J]. 西安交通大学学报, 2010, 44(7): 120-124.  
JIANG Hua, XI Guang, GONG Wuqi. Clocking effect under different inlet guide vanes prewhirl angles in a centrifugal compressor[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2010, 44(7): 120-124.
- [10] 司乔瑞, 袁寿其, 袁建平, 等. 基于 CFD/CA 的离心泵流动诱导噪声数值预测[J]. 机械工程学报, 2013, 49(22): 177-184.  
SI Qiaorui, YUAN Shouqi, YUAN Jianping, et al. Flow-induced noise calculation of centrifugal pumps based on CFD/CA method[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(22): 177-184.
- [11] 张宁, 杨敏官, 李忠, 等. 侧壁式压水室离心泵的压力脉动特性[J]. 机械工程学报, 2012, 48(14): 164-168.  
ZHANG Ning, YANG Minguan, LI Zhong, et al. Pressure pulsation of centrifugal pump with tilt volute[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(14): 164-168.
- [12] OZTURK A, AYDIN K, SABIN B, et al. Effect of impeller-diffuser radial gap ratio in a centrifugal pump[J]. Journal of Scientific and Industrial Research, 2009, 68(3): 203-213.
- [13] FENG J, BENRA F K, DOHMEN H J. Unsteady flow visualization at part-load conditions of a radial diffuser pump: By PIV and CFD[J]. Journal of Visualization, 2009, 12(1): 65-72.
- [14] RAN H, LUO X, ZHU L, et al. Experimental study of the pressure fluctuations in a pump turbine at large partial flow conditions[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2012, 25(6): 1205-1209.
- [15] SUN H, XIAO R, LIU W, et al. Analysis of S characteristics and pressure pulsations in a pump-turbine with Misaligned guide vanes[J]. Journal of Fluids Engineering, 2013, 135(5): 051101.
- [16] 姚志峰, 王福军, 杨敏, 等. 叶轮形式对双吸离心泵压力脉动特性影响试验研究[J]. 机械工程学报, 2011, 47(12): 133-137.  
YAO Zhifeng, WANG Fujun, YANG Min, et al. Effects of impeller type on pressure fluctuations in double-suction centrifugal pump[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(12): 133-137.
- [17] 江伟, 李国君, 张新盛. 离心泵叶片出口边倾斜角对压力脉动的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2013, 31(5): 369-372.  
JIANG Wei, LI Guojun, ZHANG Xinsheng. Effect of oblique angle trailing edge on pressure fluctuation in centrifugal pump[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2013, 31(5): 369-372.
- [18] 刘厚林, 崔建保, 谈明高, 等. 离心泵内部流动时序效应的 CFD 计算[J]. 农业工程学报, 2013, 29(14): 67-73.  
LIU Houlin, CUI Jianbao, TAN Minggao, et al. CFD calculation of clocking effect on centrifugal pump[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(14): 67-73.
- [19] PEI Ji, YUAN Shouqi, BENRA F K, et al. Numerical prediction of unsteady pressure field within the whole flow passage of a radial single-blade pump[J]. ASME Journal of Fluids Engineering, 2012, 134: 101103.

作者简介: 王文杰, 男, 1990 年出生, 博士研究生。主要研究方向为流体机械水力优化设计及内部不稳定流动。

E-mail: wenjie.wang815@gmail.com

袁寿其(通信作者), 男, 1963 年出生, 研究员, 博士研究生导师。主要研究方向为流体机械及排灌机械。

E-mail: shouqi@ujs.edu.cn

裴吉, 男, 1984 年出生, 助理研究员。主要研究方向为离心泵非定常流动特性及流固耦合机理。

E-mail: jpei@ujs.edu.cn