

双吸泵作液力透平叶轮内非定常流动 DMD 分析

苗森春 刘乐琪 王晓晖 杨军虎 吴江波

(兰州理工大学能源与动力工程学院, 兰州 730050)

摘要: 为了精确分析双吸泵作液力透平叶轮内的非定常流动特性,采用 SST $k-\omega$ 湍流模型在设计工况下进行数值模拟。对一个周期的非定常速度场进行动态模式分解(DMD),并结合 Q 准则,得到前4阶主要模式及其相应的时空信息。分析结果表明:DMD方法将叶轮内复杂的流场特征分解为动静干扰模式、基本模式和耗散模式。其中动静干扰模式占主导地位,频率为叶轮旋转频率,反映出叶轮内流动受静止部件干扰的流动特征,涡结构主要为点状涡和不连续的管状涡;基本模式频率为0 Hz,反映出叶片流道几何特征引起的稳态流场特征,涡结构主要为连续的管状涡;3阶及4阶模式为耗散模式,反映出叶轮内流动受静止部件干扰,在叶片上产生的流动分离及不稳定涡结构脱落的特征,以片状涡和不连续的管状涡为主。在特定频率下DMD方法可以对叶轮流场结构进行分解,能够清楚地分析双吸泵作液力透平叶轮内复杂流场的非定常特性。

关键词: 双吸泵作液力透平; 非定常流动; 动态模式分解; 相干结构; Q 准则

中图分类号: TH311

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2024)06-0150-09

OSID:



DMD Analysis of Unsteady Flow of Impeller in Double-suction Centrifugal Pump as Turbine

MIAO Senchun LIU Leqi WANG Xiaohui YANG Junhu WU Jiangbo

(College of Energy and Power Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: In order to accurately analyze the unsteady flow characteristics in the impeller of a double-suction pump as a hydraulic turbine, the SST $k-\omega$ turbulence model was used for numerical simulation under design conditions. The dynamic mode decomposition (DMD) of a periodic unsteady velocity field was carried out, and the first four main modes and their corresponding spatio-temporal information were obtained by combining the Q criterion. The analysis results showed that the DMD method decomposed the complex flow field characteristics in the impeller into dynamic and static interference modes, basic modes and dissipative modes. Among them, the dynamic and static interference modes were dominant, and the frequency was the rotation frequency of the impeller, which reflected the flow characteristics of the flow in the impeller disturbed by the static components. The vortex structure was mainly point vortex and discontinuous tubular vortex. The basic modal frequency was zero, which reflected the steady-state flow field characteristics caused by the geometric characteristics of the blade flow channel. The vortex structure was mainly continuous tubular vortex. The third-order and fourth-order modes were dissipative modes, which reflected the characteristics of flow separation and unstable vortex structure shedding on the blade caused by the interference of static components in the impeller, mainly sheet vortex and discontinuous tubular vortex. The DMD method can decompose the flow field structure of the impeller at a specific frequency, and can clearly analyze the unsteady characteristics of the complex flow field in the impeller of the double-suction pump as a hydraulic turbine.

Key words: double-suction centrifugal pump as turbine; unsteady flow; dynamic mode decomposition (DMD); coherent structure; Q criterion

收稿日期: 2023-11-28 修回日期: 2024-02-07

基金项目: 甘肃省教育厅高校科研创新平台重大培育项目(2024CXPT-09)、甘肃省自然科学基金项目(23JRRA750、22JR5RA249)、甘肃省教育厅“双一流”重点项目(GCJ2022-38)和甘肃省高等学校创新基金项目(2022A2022)

作者简介: 苗森春(1988—),男,副教授,主要从事液体余压能量回收液力透平研究,E-mail: miaose88@126.com

通信作者: 王晓晖(1986—),男,副教授,主要从事液力透平理论与设计研究,E-mail: 13919306787@163.com

0 引言

我国正积极稳妥推进“碳达峰、碳中和”的战略目标^[1]。泵作液力透平是一种液体余压能回收设备,由于其具有结构简单、维护方便和成本低等优点,被广泛应用于农业灌溉^[2]、水力发电^[3]和城市供水^[4]等系统中进行能源利用。双吸离心泵作液力透平(简称:双吸透平)可用于回收大功率(大流量、高压头)的液体余压能,同时由于其具有对称叶轮结构,两侧的轴向力理论上互相抵消,具有良好的平衡性,结构安全、可靠性高。但泵反转作液力透平时,其内部流动并非是泵内的流体按原轨迹的反向运动,流动规律发生了较大的变化。所以,对双吸透平时内部流动机理的进一步研究和探索具有重要意义。

对液力透平内部流动机理的研究,可以更好地理解流体在透平内的运动规律,揭示其中的物理机制,对液力透平的设计理论和高效率运行的发展具有重要的意义。基于此,国内外学者对其进行了大量的研究。文献[5]对一台低比转数泵作透平的13种方案进行了数值模拟和试验。文献[6]对两级径流式液力透平进行了熵产分析和Omega涡识别。文献[7]利用 Q 准则对径流式液力透平的尾涡结构进行了识别和提取,并对其速度场进行了分析。文献[8]通过试验对泵作透平的冲蚀磨损与泥沙冲蚀失效机理进行了相关研究。文献[9]对不同叶片进口后掠角的前弯叶轮在泵作透平时的性能和非定常流动特性进行了数值模拟研究。文献[10]通过数值模拟研究了配水管网中叶轮几何参数对液力透平高效工作范围的影响。文献[11]改变正导叶的几何参数,研究了两级径向导叶离心泵作透平。文献[12]对泵作透平时的叶片载荷分布进行了数值模拟研究。文献[13]通过数值模拟对离心泵在透平最佳工况点下的瞬态流动特性进行了分析。

从上述文献中可以看出,国内外学者对液力透平内部流动做了大量有价值的研究,研究主要集中在整体流场的测量和分析上,但液力透平内部的流场非常复杂,并且存在多尺度的流动特性。然而,目前对于液力透平非定常流动以及不同频率对应的流场结构特征和物理机理的研究较少。

动态模态分解(Dynamic mode decomposition, DMD)方法在处理不同频率对应的流动结构问题上具有明显的优势。与其他已用于流体机械中的方法相比,动态模态分解方法基于模态分析理论,将非定常流动分解为多个模态,可以将特定频率对应的模态提取出来,每个模态的振幅、频率和相位都可以独

立地进行分析和研究,且可以得到非定常流动下不同模态对流场的影响程度,还可以对流场进行稳定性分析;动态模态分解方法同样是基于数值模拟、试验数据来进行分析,可以与其他方法相结合,综合分析非定常流动的机制和特性。

DMD方法已被成功应用于水力机械中。在泵方面:文献[14]将DMD方法用于研究螺旋轴流式油气混输泵导叶内非定常流动的分析,文献[15]使用DMD方法对混流泵作透平在泵工况下的叶顶泄漏涡进行了分解和重构,文献[16]将DMD方法应用于三级混输泵内气液两相流动特性的研究,文献[17]采用DMD方法对结构复杂的立式两级船用离心泵的非定常流动特性进行了研究,文献[18]基于DMD方法分析了离心泵叶轮内的非定常流动特性,文献[19]采用DMD方法对导叶式离心泵非定常流动进行了解耦和重构。在水轮机方面:文献[20]采用DMD方法对混流式水轮机转轮进行了流场分解,提取了不同工况下流道内主要频率分量对应的相干结构,分析了重建流场与预测流场的相对误差。文献[21]采用DMD方法对模型水泵水轮机的初生空化和临界空化进行了研究。文献[22]使用DMD方法对混流式水轮机尾水管内旋涡流动诱发的超低频压力振荡进行了研究。文献[23]使用DMD方法与数值模拟和试验相结合,对混流式水轮机叶道涡的非定常流场进行了解耦,并得到相干结构。文献[24]结合快速傅里叶变换和动态模态分解对Savonius型水轮机近尾迹区中的速度波动频率分布和动态模态进行了深入分析。

目前的研究表明,DMD方法在泵和水轮机方面均取得了一定的进展,但基于DMD方法分析双吸泵作透平方面鲜有报道。本文基于双吸离心泵作透平内流场的数值计算结果,采用DMD方法对双吸透平叶轮内流场进行动态模态分解,揭示透平内部流动动态特性和机理,以掌握液力透平内部非定常流场演化规律和动态响应,为液力透平性能优化和故障诊断提供依据。

1 数值计算

1.1 数值计算模型

选取一台双吸离心泵作液力透平为研究对象,其主要参数如表1所示。

在Pro/Engineer中进行双吸透平三维建模,模型由进口延伸段(4倍蜗壳进口管径长度)、蜗壳、叶轮、尾水室和出口延伸段(4倍尾水室出口管径长度)5部分组成,如图1a所示。利用ANSYS-ICEM软件划分双吸透平各过流部件非结构化四面体网

格,如图1b所示。

表1 双吸透平参数

Tab.1 Parameters of double-suction PAT

参数	数值
蜗壳进口直径 D_d /mm	200
蜗壳基圆直径 D_3 /mm	345
叶轮出口直径 D_j /mm	163.8
叶轮外径 D_2 /mm	315
叶轮轮毂直径 d_h /mm	88.2
叶轮进口宽度 b_2 /mm	27.1
叶片数 Z	6
尾水室出口直径 D_4 /mm	250
流量 $Q/(m^3 \cdot h^{-1})$	875
压头 H/m	133.4
转速 $n/(r \cdot min^{-1})$	2980
功率 P/kW	287.3

流场,采用滑移网格模型 (Sliding mesh model, SMM) 进行非定常模拟,时间步长为 $0.0001677852s$,即每 3° 进行一次计算,监测进出口的压力作为辅助收敛条件。

模型的网格疏密程度会对数值模拟产生一定的影响,因此需要进行网格无关性验证。根据不同的网格尺度,生成了6套网格方案,详细网格数如表2所示。从图2可以看出:当网格数为2634088时,水力效率变化幅度在0.05%以内,综合考虑计算资源、时间成本和准确度后,网格方案4最为合适。

表2 模型网格方案

Tab.2 Model grid scheme

方案 序号	网格数					合计
	进口段	蜗壳	叶轮	尾水室	出口段	
1	97920	145212	127895	160559	182400	713986
2	319464	337277	323532	390895	371245	1742413
3	319464	475800	410914	513191	371245	2090614
4	319464	708934	521800	712645	371245	2634088
5	319464	1445326	884000	1472478	371245	4492513
6	319464	1914571	1432172	1836257	371245	5873790

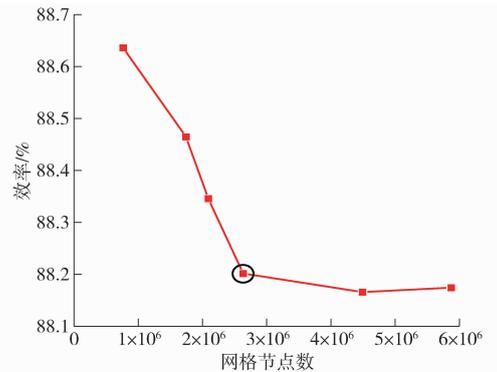


图2 网格无关性验证

Fig.2 Grid independence verification

合适的 y^+ 值对于近壁区真实流场的模拟至关重要,不同的湍流模型对 y^+ 的要求不同,采用 SST $k-\omega$ 湍流模型,黏性底层的 $y^+ < 5$,对数律层的 y^+ 值范围较宽,下限一般在 $11 \sim 60$ 之间^[25],对比现有采用 SST $k-\omega$ 湍流模型的双吸离心泵数值模拟研究的 y^+ 数值^[26],主要过流部件的 y^+ 平均值如表3所示,所有过流部件 y^+ 值均在合理范围内。此外,对于叶轮叶片、前缘和尾缘、蜗壳隔舌、尾水室挡板和倒圆角区域进行了局部加密,最终网格总数为7959203。

表3 主要部件的 y^+ 值

Tab.3 The y^+ value of main components

模型类别	尾水室	叶轮	蜗壳
本文	4.84	11.26	7.02
文献[26]	23.64	21.28	12.96

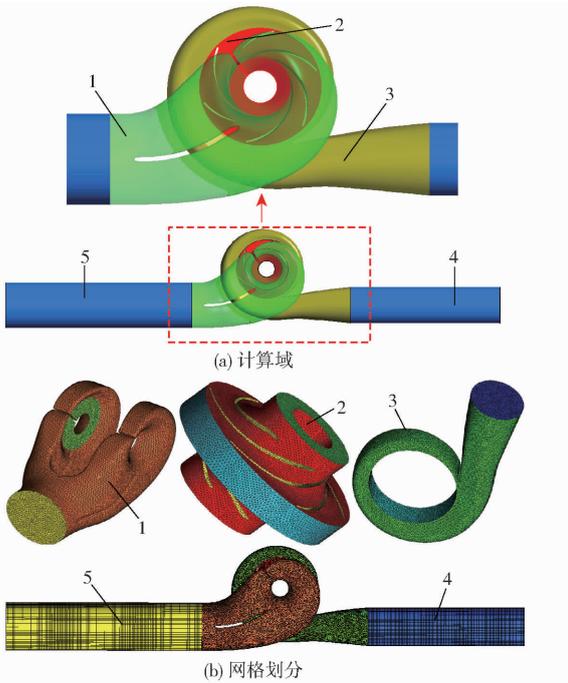


图1 双吸透平计算域和网格

Fig.1 Computational domain and unstructured meshes of double-suction PAT

1. 尾水室 2. 叶轮 3. 蜗壳 4. 进口延伸段 5. 出口延伸段

1.2 模型边界条件设置

使用 ANSYS Fluent 对双吸透平的水体域进行数值模拟,湍流模型选择 SST $k-\omega$,双吸透平的进口段、蜗壳、尾水室和出口段为静止状态,叶轮域为旋转状态,边界条件设置为速度进口和压力出口,除了交界面以外的其他区域均设置为壁面,壁面粗糙度为 $0.025mm$,壁面条件设定为无滑移壁面。使用 SIMPLEC 算法来耦合压力和速度场,残差收敛精度设置为 10^{-4} ,动量方程的离散格式采用边界二阶中心差分格式。稳态计算采用多参考系模型 (Multiple reference frame, MRF),以定常模拟的结果作为初始

2 模型验证试验

2.1 试验台

图 3 为双吸透平试验台,表 4 为相关试验仪器的参数,试验台主要由增压泵、电机、液力透平和消能泵等组成。图 4 为双吸透平的具体工作原理,电机驱动增压泵产生高压液体,这些高压液体通过电磁流量计后进入双吸透平,驱动双吸透平工作,并带动消能泵运转,最后,低压液体会回流到水池中。为了实时监测双吸透平的运行状况,进口和出口压力通过压力传感器测量,扭矩和转速通过数字扭矩/转

速传感器测量,流量通过电磁流量计测量。



图 3 双吸透平试验台

Fig. 3 Double-suction PAT test bench

表 4 试验仪器参数

Tab. 4 Experimental instrument parameters

被测量参数	仪器	型号	量程	精度
压力 p	压力传感器	MIK - P300	- 0.1 ~ 60 MPa	0.5 级
流量 Q	电磁流量计	LDG - MIK	0 ~ 1 573.03 m ³ /h	± 0.05 %
扭矩 T	扭矩传感器	DYN - 20	± 10 000 N·m	± 0.20 %
转速 n	转速传感器	DYN - 20	0 ~ 10 000 r/min	± 0.025 %

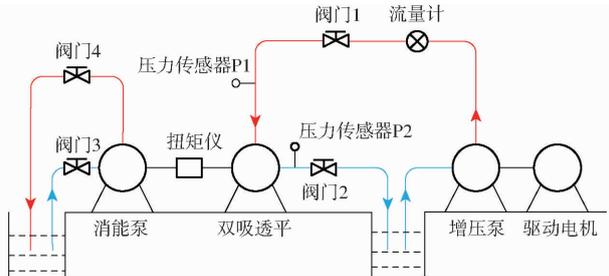


图 4 双吸透平试验原理图

Fig. 4 Schematic of double-suction PAT test

2.2 数值预测结果与试验结果对比

图 5 为双吸透平数值模拟结果与试验结果对比。通过比较压头、效率和功率在不同流量下的变化,可以发现试验结果与数值模拟结果的变化趋势是一致的。尤其在设计工况附近,试验结果与数值模拟结果的吻合程度最高。然而,对于效率而言,数值模拟得到的效率高于试验结果。这主要是因为数值模拟过程中,忽略了轴承、密封以及容积损失等

机械损失的影响。总体而言,数值模拟在最优工况点附近的预测相对准确,试验压头、效率和功率与数值模拟结果的相对误差分别为 4.04%、3.64% 和 5.93%。综上所述,双吸透平数值模拟策略是合理且可行的。

3 动态模态分解

通过试验或数值仿真得到的 N 个时刻的快照可以写成快照序列矩阵 X 和 Y ,且任意两个快照之间的时间间隔均为 Δt ,即

$$X = [v_1 \ v_2 \ \dots \ v_{N-1}] \quad (1)$$

$$Y = [v_2 \ v_3 \ \dots \ v_N] \quad (2)$$

假设流场 v_{i+1} 可以通过线性映射 $A \in \mathbf{R}^{M \times M}$ 与流场 v_i 表示,即

$$v_{i+1} = Av_i \quad (3)$$

式(3)中的假设对于任何一个时刻的快照都成立。由于存在式(3)的假定,因此有

$$Y = [Av_1 \ Av_2 \ \dots \ Av_{N-1}] = AX \quad (4)$$

对于秩为 r 的矩阵 X ,DMD 算法要求寻找矩阵 \tilde{A} 来代替高维矩阵 A ,这种替代可通过 X 的奇异值分解得到,即

$$X = U\Sigma W^H \quad (5)$$

$$A = U\tilde{A}U^H \quad (6)$$

式中 Σ ——对角阵,对角元素从上到下为奇异值从大到小

U 、 W ——奇异值分解得到的酉矩阵,满足

$$U^H U = I \text{ 和 } W^H W = I, I \text{ 为单位矩阵}$$

因此可将 A 近似为

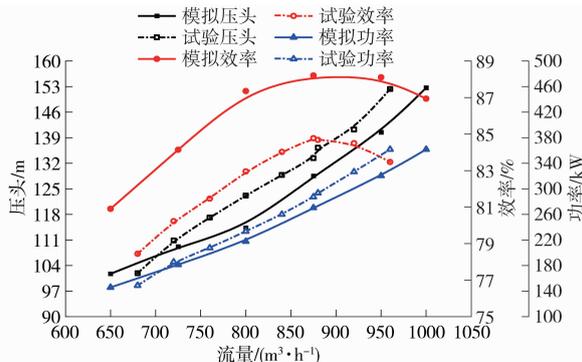


图 5 双吸透平数值模拟结果与试验结果对比

Fig. 5 Comparison of numerical simulation results and experimental results for double-suction PAT

$$\mathbf{A} \approx \tilde{\mathbf{A}} = \mathbf{U}^H \mathbf{Y} \mathbf{W} \mathbf{\Sigma}^{-1} \quad (7)$$

式中矩阵 $\tilde{\mathbf{A}}$ 的特征分解得到的特征值是 \mathbf{A} 的一部分,即 Ritz 特征值。定义第 j 个模式的 Ritz 特征值为 μ_j ,则可通过该特征值的对数形式得到流动的增长率 $g_j = \text{Re}(\lg \mu_j) / \Delta t$ 和频率 $\omega_j = \text{Im}(\lg \mu_j) / \Delta t$ 。定义动态模态为

$$\Phi_j = \mathbf{U} \mathbf{z}_j \quad (8)$$

式中 \mathbf{z}_j ——矩阵 $\tilde{\mathbf{A}}$ 第 j 个特征值对应的特征向量为表达该模态对流场的贡献,定义模态振幅 $\alpha_j = \mathbf{z}_j^{-1} \mathbf{U}^H \mathbf{v}_1$ 。对于标准 DMD 算法,DMD 模态按照该振幅进行排序。

通过上述 DMD 方法,可提取出流场动态模态。

4 结果与分析

对于双吸泵作液力透平叶轮内非定常流动特性,首先基于 DMD 方法,分析液力透平流场相干结构的能量分布、稳定性和时间演化;其次对提取的前 4 阶模态速度及涡量进行分析,最后采用 Q 准则对前 4 阶模态涡结构进行更直观的分析。

4.1 相干结构的能量分布及稳定性分析

湍流中存在着一些确定的流动结构,被称为相干结构或拟序结构。尽管湍流被认为是一种高度不确定的流动状态,但在其中仍然存在一些有序的模式和结构,这些相干结构可以是旋涡、涡团或其他形态,它们在湍流中稳定存在并相互作用。

选取设计工况下非定常数值模拟得到的最后一个周期的流场快照,流场快照数共 120 个。对双吸透平叶轮速度场进行 DMD 分析,得到该区域模态能量分布和特征值分布,如图 6、7 所示。

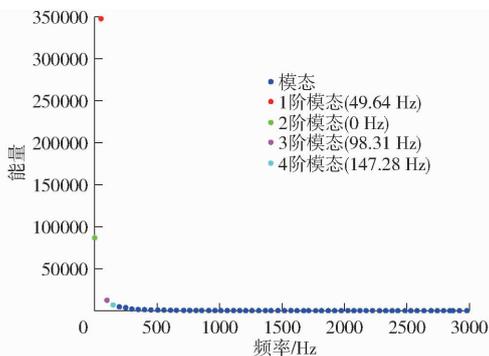


图 6 速度场 DMD 模态能量分布

Fig. 6 Energy distribution of DMD modes in velocity fields

图 6 为各阶模态能量分布,选取能量较高的前 4 阶模态进行研究,按能量由高到低排序称之为 1~4 阶模态,其对应频率分别为 49.64、0、98.31、147.28 Hz。本文中双吸透平额定转速为 2 980 r/min,故叶轮转动频率 f_n 计算公式为

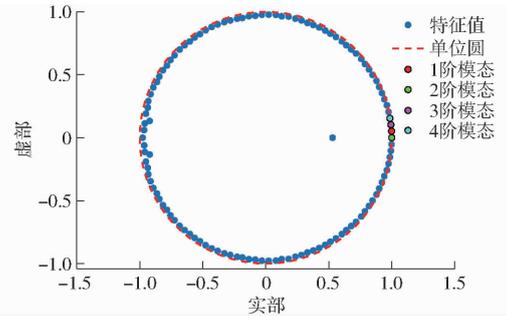


图 7 速度场 DMD 模态特征值分布

Fig. 7 Eigenvalue distribution of DMD modes in velocity field

$$f_n = \frac{n}{60} = \frac{2\,980}{60} = 49.67 \text{ Hz}$$

叶轮叶片数 Z 为 6,故叶片通过频率 f_{BPF} 为

$$f_{BPF} = Z f_n = 298 \text{ Hz}$$

可以发现叶轮中速度场占据整个流场能量较高的前 4 阶 DMD 模态对应的单一频率约为叶轮转频整数倍,分别为 f_n 、0、 $2f_n$ 、 $3f_n$ 且均为低频(小于 f_{BPF})。

从图 6 中可以看出,设计工况下速度场前 4 阶模态中,频率为 0 Hz 的模态能量占比为全场第 2,频率为 0 Hz 表明该流动结构是时均的,代表了非定常流场的基本稳态结构,双吸透平非定常流场都可以看作是在这个基本结构上叠加了不同频率的振荡模态而形成的。通常情况下,频率为 0 Hz 的模态对应于系统的平稳或恒定行为,其能量应该是最高的,如果频率为 0 Hz 的模态的能量不是最高的,这表示系统中存在其他重要的非定常行为或模态。本文中 1 倍叶频的模态能量在整个流场中最高,这是由于双吸透平的非定常流场数据包含了振荡性变化,因此其能量高于频率为 0 Hz 的模态。这意味着系统中 1 倍叶频的模态的非定常行为占主导地位,它对流场的动态特性和能量变化具有更显著的影响。3 阶、4 阶模态能量急剧减小,4 阶之后的模态能量再次减小,这表明这些模态对整个流场的贡献微乎其微。

图 7 为各阶模态特征值分布,从图 7 中可以看出大多数点基本上位于单位圆附近。若某个特征值位于单位圆上,则说明该特征值对应的流场结构处于稳定状态;若特征值位于单位圆内,表示其特征值对应的流场结构处于收敛状态;若特征值位于单位圆外,则其对应的流场结构处于逐渐发散状态,因此双吸透平叶轮内速度场 DMD 模态基本为稳定模态。由于特征值为复数且共轭成对出现,所以共轭的模态实际上是一个模态,具有相同的动力学特征,因此各模态的特征值关于虚部等于 0 上下对称分布。前 4 阶模态已在图中标记,其中 2 阶模态即基

本模态,实部为 1,虚部为 0。

4.2 相干结构的时间演化

为进一步研究和分析流场特性,对流场影响最大的前 4 阶模态进行分析,其模态系数如图 8 所示。

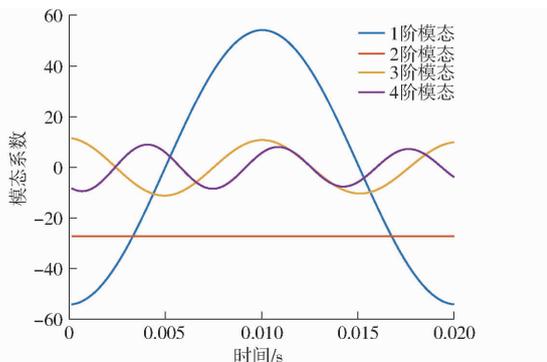


图 8 前 4 阶模态系数随时间变化曲线

Fig. 8 Law of change of the first four order mode coefficient over time

从图 8 中可以看出,各阶模态的模态系数频率和幅值是不同的,同时它们之间存在明显的相位差。这表明在双吸透平叶轮内,不同频率的流动呈现出不同的相干结构运动模式,它们的运动状态并不完全同步。然而,这些不同频率的模态运动都呈现出良好的周期性变化,对流场产生稳定的周期性影响。1 阶模态呈现周期性,占据了整个流动周期,且幅值最大,能量占比最大,占整个流场能量的 70.6%,对整个流场影响最大;2 阶模态不随时间变化,为基本模态,能量占比为 17.7%;3 阶和 4 阶模态也呈现周期性,3 阶模态的能量高于 4 阶模态,但二者幅值变化都较小,对整个流场影响也较小,二者的能量占比分别为 2.6% 和 1.4%;剩余各阶模态能量占比非常小,占比仅为 7.7%,对流场的影响也非常小。前 4 阶模态信息见表 5。

表 5 前 4 阶模态信息

Tab. 5 The first four order mode information

模态	特征值	频率/Hz	能量	能量占比/%
1 阶	$0.9986 \pm 0.0523i$	49.64	347 875.03	70.6
2 阶	$1.0000 \pm 0.0000i$	0	87 080.88	17.7
3 阶	$0.9934 \pm 0.1033i$	98.31	12 805.01	2.6
4 阶	$0.9853 \pm 0.1542i$	147.28	7 076.99	1.4

在图 7 中有一个模态位于单位圆内部且最靠近圆心,表明其对应的流场结构是收敛的,其特征值为 $0.5304 \pm 0.0000i$ 。为更好表示其对流场的贡献,绘制其模态系数随时间的变化规律,如图 9 所示,可以看出,其幅值不断振荡衰减,表示其对流场的贡献起初较大,甚至超过了 3 阶与 4 阶模态,之后逐渐减小直至消失,也可以看出其流场最终收敛趋于定值,这说明对流场进行非定常计算最后是收敛的。

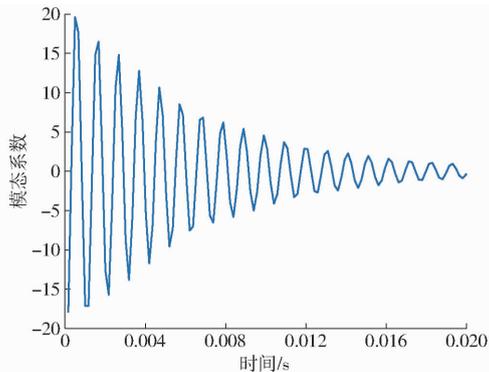


图 9 特殊点模态系数随时间变化曲线

Fig. 9 Variation of modal coefficients of special points with time

4.3 前 4 阶 DMD 模态速度及流量分析

对双吸透平叶轮内流场贡献最大的前 4 阶模态进行分析。叶轮旋转轴为 Z 轴,沿 Z 轴正向分别取 3 个不同截面进行流场对比分析,如图 10 所示。Span 值为前盖板至后盖板的无量纲距离,Span 值 0.1 位于叶轮对称面附近;Span 值 0.5 位于单侧叶轮的中间截面;Span 值 0.9 位于前盖板附近。叶轮前缘、尾缘、压力侧、吸力侧位置如图 11 所示。

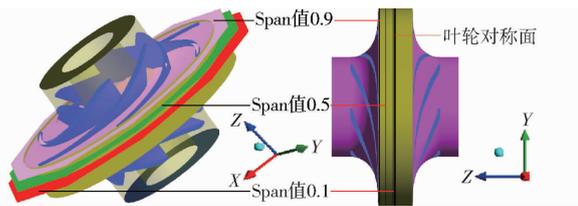


图 10 叶轮不同切面

Fig. 10 Different sections of impeller

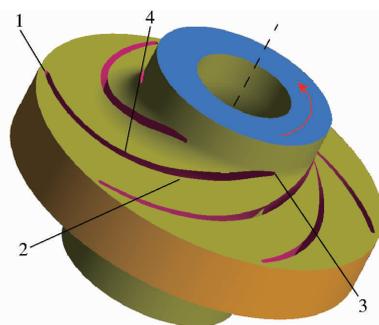


图 11 叶轮前缘、尾缘、压力侧、吸力侧位置

Fig. 11 Position of leading edge, tail edge, pressure side, suction side of impeller

1. 前缘 2. 压力侧 3. 尾缘 4. 吸力侧

前 4 阶 DMD 模态速度云图如图 12 所示,其中 1 阶模态频率与叶轮旋转频率一致,在各阶模态中所占能量最高,速度云图和涡量云图如图 12a 所示,可以看出 1 阶模态速度场流动结构相对于旋转中心对称,由内向外速度逐渐增大,在叶轮中心形成了低速流体团,叶片中段形成了中速流体团,叶轮外围形成了高速流体团。原因主要与叶轮的

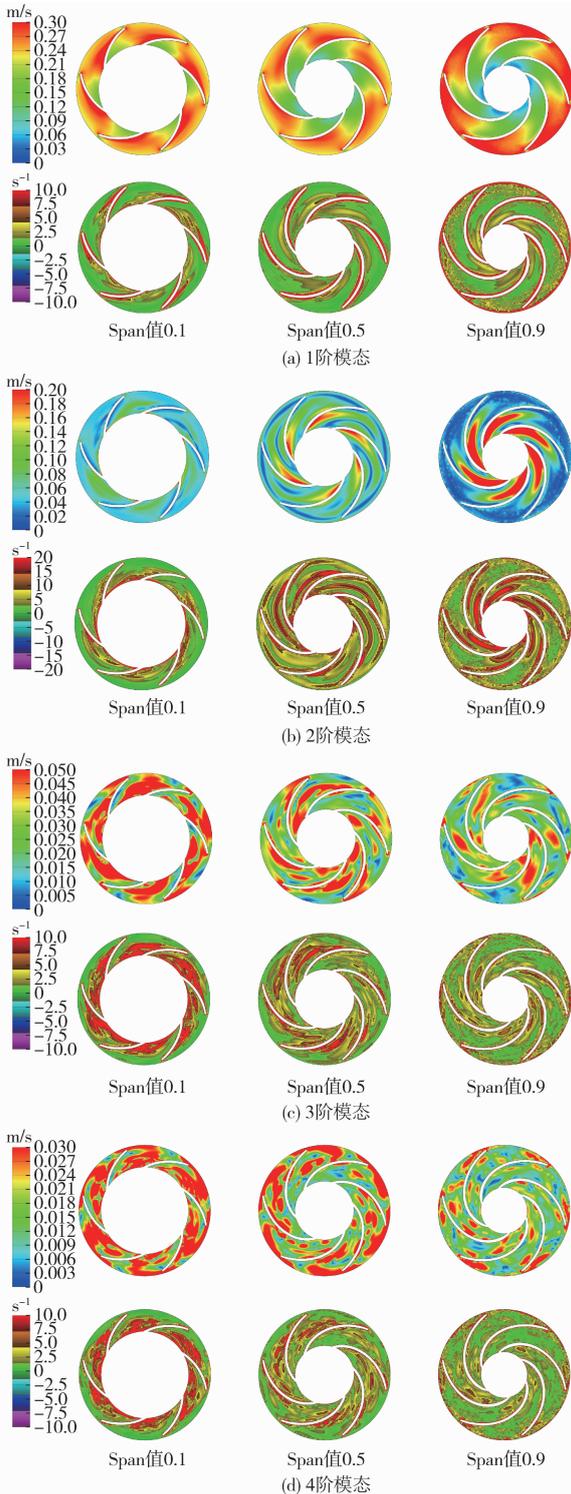


图 12 前 4 阶 DMD 模式速度和涡量云图

Fig. 12 The first four order DMD mode velocity and vorticity cloud diagrams

几何形状、叶片的受力、干涉效应和涡流结构有关,叶轮中心由于与尾水室形成动静干涉,流体在该区域受到限制,流速较低,从而形成低速流体团。叶片中段所处的位置受到叶片形状、流体的相互作用和涡流结构的影响形成中速流体团。叶轮外围与蜗壳形成动静干涉并受涡流结构的影响,使得该区域形成高速流体团。结合模式系数

可以看出 1 阶模态为动静干扰模态。

1 阶模态在 Span 值 0.9 叶轮前盖板附近的流体团速度较大,1 阶模态的涡量从 Span 值 0.1 截面到 Span 值 0.9 截面逐渐布满整个叶片流道,且主要集中在叶轮中心,从 Span 值 0.9 截面还可以看出在叶轮前盖板散布着许多点状涡。

2 阶模态为基本模态,其频率为 0 Hz,代表了非定常流场的基本稳态结构,在各阶模态中能量占比第 2,反映出由叶轮流道几何形状引起的稳态流场特征。速度云图和涡量云图如图 12b 所示,可以看出叶轮的速度场流动结构相对于旋转中心对称且由内向外逐渐减小,在靠近尾缘的吸力侧速度最大。涡结构连续,涡量在叶轮的中间最大,从 Span 值 0.1 截面到 Span 值 0.9 截面逐渐布满整个叶片流道。非定常流场的其他结构是在这个基本结构上叠加了不同模态而形成的。

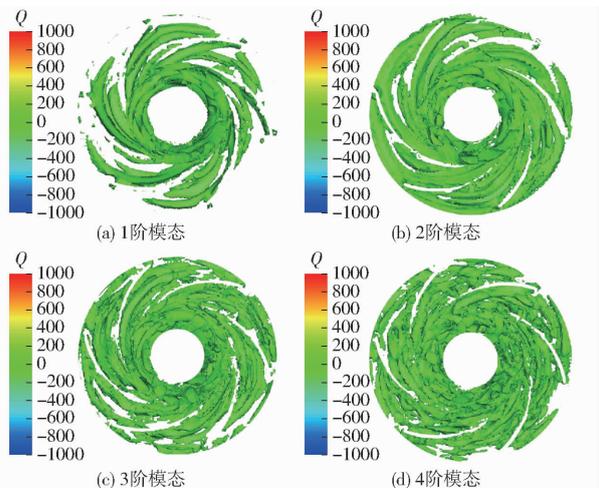
图 12c 和图 12d 为 3 阶及 4 阶模态速度与涡量云图,其频率分别为叶轮旋转频率的 2 倍与 3 倍。3 阶与 4 阶模态的尺度依次减小,同时流道内高能流体团数量依次增加,不断交替产生逐渐拉伸、脱落的高、低速流体团。涡结构主要以片状涡为主,逐渐破碎并耗散。3 阶和 4 阶模态是动静干扰模态的高次谐波行为,这些模态的存在表明叶轮旋转和静止部件干扰导致了叶片不稳定涡结构的分离和脱落,从而产生了特定的流场特征。

4.4 Q 准则涡结构分析

为更好地呈现前 4 阶模态的涡结构,采用 Q 准则进行涡识别, Q 正值表示流场中涡量占主导的区域,负值表示应变速率或粘性应力占主导的区域。设置 Q 为 0.01 得到 1~4 阶模态的 Q 准则云图,如图 13 所示。可以看出整体上涡结构呈现弧状涡旋结构,1 阶模态以管状涡为主但不够连续,在叶轮外围分布着许多点状涡,在叶轮的中心涡结构最为明显;2 阶模态同样以管状涡为主,但较 1 阶模态更为连续,且在叶轮的中心和外围涡结构更明显;3 阶模态和 4 阶模态的涡结构逐渐破碎并耗散,以片状涡和不连续的管状涡为主,尤其 4 阶模态的特征最为明显。可以看出 Q 准则的涡结构识别与涡量云图的结果一致。

5 结论

(1) 双吸透平叶轮内非定常流场可被 DMD 分解为具有不同能量和频率的流场特征。这些特征包括基本模态特征、动静干扰模态特征以及高次谐波行为流场特征。基本模态特征可以反映叶片流道几何特征引起的稳态流场特征。动静干扰模

图13 前4阶DMD模态 Q 准则云图Fig. 13 The first four order DMD mode Q criterion cloud charts

态特征能反映出叶轮和静止部件间的干扰所引起的流动扰动特征。高次谐波行为流场特征,它们是基于基本模态和动静干扰模态的非线性相互作用产生的。

(2) 双吸透平叶轮内非定常流动速度场起主导作用的模态为1倍叶频所对应的流动结构,能量占比最大,为70.6%,对流场的影响最大;能量占比第2的模态为频率为0 Hz所对应的流动结构,能量占比为17.7%;2倍和3倍叶频对应的模态能量占比分别为2.6%和1.4%。

(3) 1倍叶频所对应的流动结构,涡结构主要为点状涡和不连续的管状涡;频率为0 Hz所对应的流动结构,涡结构主要为连续的管状涡;2倍和3倍叶频对应的流动结构,涡结构逐渐破碎并耗散,以片状涡和不连续的管状涡为主。

参 考 文 献

- [1] 徐永胜. 深入学习贯彻党的二十大精神 以公共机构绿色低碳转型助力碳达峰碳中和[J]. 中国行政管理, 2022(12): 12-13.
- [2] ALGIERI A, ZEMA A D, NICOTRA A, et al. Potential energy exploitation in collective irrigation systems using pumps as turbines: a case study in Calabria (Southern Italy) [J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 257: 120538.
- [3] NASIR A, DRIBSSA E, GIRMA M, et al. Selection and performance prediction of a pump as a turbine for power generation applications [J]. Energies, 2023, 16(13): 5036.
- [4] SAMUELE S, MOSE R, GABRIELE C, et al. Energy recovery in gravity adduction pipelines of a water supply system (WSS) for urban areas using pumps-as-turbines (PaTs) [J]. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2021, 45: 101040.
- [5] 杨军虎, 马琦航, 罗钰铜, 等. 液力透平几何参数对压头-流量曲线的影响 [J]. 农业机械学报, 2019, 50(5): 167-172. YANG Junhu, MA Qihang, LUO Yutong, et al. Influence of geometric parameters on head-flow curve of pump as turbine [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(5): 167-172. (in Chinese)
- [6] 王晓晖, 蒋虎忠, 苗森春, 等. 基于熵产理论的多级液力透平能量耗散机理分析 [J]. 农业机械学报, 2024, 55(3): 162-172. WANG Xiaohui, JIANG Huzhong, MIAO Senchun, et al. Analysis of energy dissipation mechanism of multistage hydraulic turbine based on entropy production theory [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(3): 162-172. (in Chinese)
- [7] 王晓晖, 杨浩, 苗森春, 等. 径流式液力透平尾涡流动机理分析 [J]. 水力发电学报, 2023, 42(6): 65-72. WANG Xiaohui, YANG Hao, MIAO Senchun, et al. Theoretical analysis of tail vortices in radial-flow hydraulic turbine [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2023, 42(6): 65-72. (in Chinese)
- [8] TANDEL R R, PATEL R N, JAIN S V. Correlation development of erosive wear and silt erosion failure mechanisms for pump as turbine [J]. Engineering Failure Analysis, 2023, 153: 107610.
- [9] WANG T, YU H, XIANG R, et al. Performance and unsteady flow characteristic of forward-curved impeller with different blade inlet swept angles in a pump as turbine [J]. Energy, 2023, 282: 128890.
- [10] HASSAN M S, SALMAN S. Studying the impact of impeller geometrical parameters on the high-efficiency working range of pump as turbine (PAT) installed in the water distribution network [J]. Renewable Energy, 2023, 216: 119060.
- [11] 王世成, 杨军虎, 徐国斌. 不同正导叶几何参数下多级泵作透平功率-流量曲线研究 [J]. 农业机械学报, 2023, 54(12): 166-172. WANG Shicheng, YANG Junhu, XU Guobin. Influence of positive guide vane geometric parameters on power-flow curves of multistage pump as turbine [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(12): 166-172. (in Chinese)
- [12] BAI Xiaobang, YANG Junhu, WANG Xiaohui, et al. Numerical investigation on the blade load distribution in a pump as turbine [J]. Frontiers in Energy Research, 2023, 11: 1220395.
- [13] 林通, 李俊晓, 朱祖超, 等. 离心泵作透平最佳工况点下的瞬态流动特性分析 [J]. 机械工程学报, 2021, 57(22): 395-405. LIN Tong, LI Xiaojun, ZHU Zuchao, et al. Analysis of the unsteady flow characteristics of chemical centrifugal pump as turbine at the best efficiency point condition [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(22): 395-405. (in Chinese)
- [14] 张人会, 王少华, OSMAN JUMA S A. 螺旋轴流式油气混输泵导叶内非定常流动DMD分析 [J]. 农业机械学报, 2020,

51(9): 118 - 126.

ZHANG Renhui, WANG Shaohua, OSMAN JUMA S A. Transient gas-liquid flow in helical axial pump diffuser and its DMD analysis[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(9): 118 - 126. (in Chinese)

- [15] HAN Y, TAN L. Dynamic mode decomposition and reconstruction of tip leakage vortex in a mixed flow pump as turbine at pump mode[J]. Renewable Energy, 2020, 155: 725 - 734.
- [16] LIU M, TAN L, CAO S. Method of dynamic mode decomposition and reconstruction with application to a three-stage multiphase pump[J]. Energy, 2020, 208: 118343.
- [17] ZHANG S, CHEN H, MA Z, et al. Unsteady flow and pressure pulsation characteristics in centrifugal pump based on dynamic mode decomposition method[J]. Physics of Fluids, 2022, 34(11): 112014.
- [18] 陈学炳, 张人会, 蒋利杰, 等. 离心泵叶轮内非定常流动的动态模态分解分析[J]. 振动与冲击, 2022, 41(14): 33 - 40, 57.
CHEN Xuebing, ZHANG Renhui, JIANG Lijie, et al. DMD analysis on the unsteady flow in a centrifugal pump impeller[J]. Journal of Vibration and Shock, 2022, 41(14): 33 - 40, 57. (in Chinese)
- [19] YU T, SHUAI Z J, WANG X, et al. Mechanism of the rotor-stator interaction in a centrifugal pump with guided vanes based on dynamic mode decomposition[J]. Physics of Fluids, 2022, 34(8): 087103.
- [20] JIANG B, SUN G Y, WANG Y C, et al. Coherent structures decomposition of the flow field in Francis turbine runner under different working conditions[J]. Renewable Energy, 2022, 186: 717 - 729.
- [21] WU Y Z, ZHU D, TAO R, et al. Analysis of two-phase flow in cavitation condition of pump-turbine based on dynamic mode decomposition method in turbine mode[J]. Journal of Energy Storage, 2022, 56: 106107.
- [22] GENG C, LI Y, YOSHINOBU T, et al. Pressure oscillations with ultra-low frequency induced by vortical flow inside Francis turbine draft tubes[J]. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2022, 51: 101908.
- [23] 童哲铭, 辛佳格, 童水光. 基于动态模态分解的叶道涡非定常解耦与重构[J]. 中国机械工程, 2022, 33(7): 769 - 776.
TONG Zheming, XIN Jiage, TONG Shuiguang. Decoupling and reconstruction of unsteady flow field of inter-blade vortices based on DMD[J]. China Mechanical Engineering, 2022, 33(7): 769 - 776. (in Chinese)
- [24] WU Y Z, GUANG W L, TAO R, et al. Dynamic mode structure analysis of the near-wake region of a Savonius-type hydrokinetic turbine[J]. Ocean Engineering, 2023, 282: 114965.
- [25] 王福军. 流体机械旋转湍流计算模型研究进展[J]. 农业机械学报, 2016, 47(2): 1 - 14.
WANG Fujun. Research progress of computational model for rotating turbulent flow in fluid machinery[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(2): 1 - 14. (in Chinese)
- [26] GUAN H Y, JIANG W, YANG J G, et al. Energy loss analysis of the double-suction centrifugal pump under different flow rates based on entropy production theory[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2020, 234(20): 4009 - 4023.

(上接第 132 页)

- [28] 柯曙东. 基于种子特性的气力式滚筒排种器虚拟样机研究[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2023.
KE Shudong. Research on virtual prototype of pneumatic drum seed metering device based on seed characteristics[D]. Hangzhou: Zhejiang Sci-Tech University, 2023. (in Chinese)
- [29] 心男. 基于 EDEM - FLUENT 耦合的气吹式排种器工作过程仿真分析[D]. 长春: 吉林大学, 2013.
XIN Nan. Simulation analysis of working process of air-blowing seed-metering device based on coupled EDEM - FLUENT[D]. Changchun: Jilin University, 2013. (in Chinese)
- [30] 刘瑞, 刘忠军, 刘立晶, 等. 玉米扰动辅助种高速气吸式排种器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(9): 50 - 59.
LIU Rui, LIU Zhongjun, LIU Lijing, et al. Design and experiment of corn high speed air suction seed metering device with disturbance assisted seed-filling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(9): 50 - 59. (in Chinese)
- [31] 余参参. 气吸式微型马铃薯排种器的设计与试验研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2021.
YU Shenshen. Design and experiment study of pneumatic metering device for potato minituber[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2021 (in Chinese)
- [32] 史嵩, 周纪磊, 刘虎, 等. 驱导辅助种气吸式精量排种器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(5): 61 - 70.
SHI Song, ZHOU Jilei, LIU Hu, et al. Design and experiment of pneumatic precision seed-metering device with guided assistant seed-filling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(5): 61 - 70. (in Chinese)