

# 地浸采铀工艺中电潜泵内流场数值模拟研究

张 翀<sup>1,2</sup>, 贾 皓<sup>1,2</sup>, 朱建军<sup>3</sup>, 李沁慈<sup>1,2</sup>, 张晓程<sup>3</sup>, 李学忠<sup>4</sup>, 余卓华<sup>4</sup>

(1. 核工业北京化工冶金研究院, 北京 101149;

2. 中核矿业科技集团有限公司, 北京 101149;

3. 中国石油大学(北京) 机械与储运工程学院, 北京 102249;

4. 南方泵业股份有限公司, 杭州 311100)

**摘要:**电潜泵是我国地浸采铀工艺中实现浸出液有效提升的主要装备,但目前针对介质举升状态下电潜泵水力部件内部流场作用机制的研究较少。试验以叶轮-导叶内部结构为研究对象,应用 CFD 方法对介质流动特性开展非定常分析,研究了叶轮和叶轮出口段内部的压力脉动变化规律,并利用瞬态流场数据对叶轮截面压力流场进行动模态分解(DMD)与压力流场重构,揭示了介质举升状态下由动静干涉引起的压力脉动周期性变化规律与动静部件距离对动静干涉强度的影响规律。结果表明,叶片通过频率值与快速傅里叶变换(FFT)频率值基本一致。试验结果可对减少由压力脉动引发的泵体无效震动、优化电潜泵水力部件结构参数和提升系统效率提供一定理论参考。

**关键词:**地浸采铀;电潜泵;动模态分解;流场重构;数据分析

**中图分类号:**TF803.21;TL212 **文献标识码:**A **文章编号:**1009-2617(2024)03-0333-08

**DOI:**10.13355/j.cnki.sfyj.2024.03.017

天然铀是国家的特殊战略资源,据世界核协会(WNA)统计数据显示,我国天然铀年均需求量将在 2035 年达 3.6 万 t,约占全球总需求量的 40%~44%<sup>[1-3]</sup>。目前全球主流的天然铀开采技术是原地浸出采铀工艺(简称“地浸采铀”)<sup>[4-8]</sup>,据统计,截至 2021 年,全球地浸采铀产量已占铀生产总量的 66%,截至 2023 年底,中国地浸年产铀量已占据国内铀生产总量的 90%以上<sup>[9]</sup>。

地浸采铀过程中含铀浸出液的举升能力直接决定了地浸铀矿山的实际产量高低,电潜泵因具有提升效率高、流量稳定和能耗低等优势,逐渐成为国内地浸采铀行业中用量最大、资金投入最多且依赖度最强的化工机械<sup>[10-11]</sup>。目前,国内学者对地浸采铀电潜泵举升设备的改进方向仅停留在故障类型统计、故障原因判断等表面现象<sup>[12-13]</sup>,而关于电潜泵对浸出液进行举升时其内部流场作用机制尚未见深入探究报道。针对砂岩

铀矿赋存地层的水文地质条件复杂,浸出液化学性质对电潜泵性能的影响也尚不明确等问题,试验对现有电潜泵模型进行调整,并基于地浸采铀的实际工况设置计算条件,采用计算流体力学方法(CFD)对电潜泵举升设备的内部流场进行数值模拟,并分析优化地浸采铀工艺中相关电潜泵关键部件的水力性能,以期地为地浸采铀专用装备的进一步研制提供理论参考。

## 1 流场模型与数值模拟方法

电潜泵不同于常见的蜗壳式离心泵,受限于工作条件,其直径更小,一般为导叶式设计且为多级结构。电潜泵内介质流动呈三维非定常状态,这是由于叶轮-导叶间规律性周期转动引起了动静干涉。一般而言,动静干涉被认为是电潜泵级间压力脉动的主要影响因素<sup>[14-16]</sup>。理论上,压力脉动表征了流体压力周期性波动。当压力脉动幅值

收稿日期:2024-01-25

基金项目:中核集团全产业链“卡脖子”攻关科研项目([2022]331);中核集团青年英才项目([2022]291)。

第一作者简介:张翀(1988—),男,博士,高级工程师,主要研究方向为地浸采铀工艺及装备。

较大时,机械设备会产生不规则振动。在实际工况中,更少的振动往往决定了电潜泵在井下安全稳定运行。

### 1.1 电潜泵计算域与网格划分

试验用电潜泵水力部件的计算域在 Ansys Design Modeler 中构建,计算域几何模型由第一级叶轮、第一级导叶、第二级叶轮和出口段等 4 部分组成,其中第一、二级叶轮叶片数均为 7,一级导叶叶片数为 8,出口段包含 8 个流体出口。采用多分块技术(multi-block)在 Ansys ICEM 中生成六面体结构化网格,电潜泵计算域网格及压力检测点/面设置如图 1 所示。

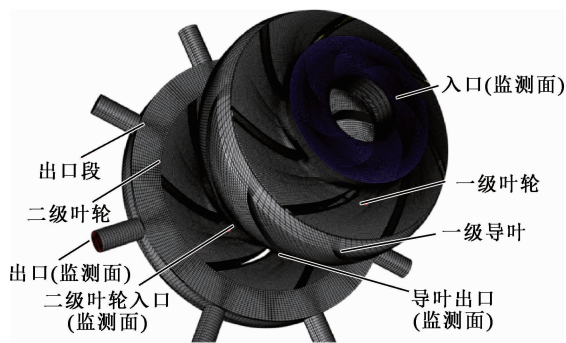


图 1 电潜泵计算域网格及压力检测点/面设置

### 1.2 压力监测点及监测面

为监测电潜泵瞬态模拟数据和叶轮流道压力脉动特性,设置一系列监测面和监测点(图 1)。其中,监测面分别为第一级叶轮进口、第一级导叶出口、第二级叶轮进口和出口段的出口。为研究电潜泵叶轮流道区域内的压力脉动特性,在叶轮出口处叶片的首段、中间段和尾段取 3 个压力监测点,而监测点 4 则设置在出口段入口,目的是为了分析第二级叶轮出口段对电潜泵压力脉动的影响。

### 1.3 湍流模型设置

为保证模拟结果的可靠性,在 Ansys Fluent 求解器中,采用 Realizable  $k-\epsilon$  湍流模型对电潜泵内液体流动进行 CFD 模拟,Realizable  $k-\epsilon$  湍流模型在由湍流动能和耗散率求解湍流黏度时,充分考虑流场自身的应变和旋转效应,比例系数不再取常数,该模型在模拟含高旋剪切流及边界层分离等更为复杂的流体运动时具有较高精度,与电潜泵真实运行条件更为契合。模型控制方程和闭

合关系式见 Ansys Fluent 用户手册。

### 1.4 边界条件设置

完整的计算域包括第一级叶轮和导叶、第二级叶轮及出口段。为充分考虑电潜泵内流场动静干涉效应,在动静流域交界面采用滑移网格,实现旋转部件(叶轮)和静止部件(导叶和出口段)的相互作用,由此 CFD 模拟过程会自动生成 3 个动静交界面。

模拟选取液态水为工作介质,在流域入口处采用中等湍流强度的等质量流量边界,具体设置为 0.48 kg/s,在流域出口处设置总压边界为 68.95 kPa (10 psi)。所有壁面均假定为光滑、无滑移,其中近壁面设置可扩展壁面函数用于考虑近壁面流场边界层。叶轮转速设置为 900 r/min。为保证瞬态计算结果可靠性,瞬态模拟总时间设定为电潜泵叶轮旋转 6 圈的总时长。叶轮旋转一周的时间为 0.066 67 s,6 圈共计 0.4 s。以叶轮旋转  $1^\circ$  为 1 个瞬态模拟步长,旋转一周则包含 360 个时间步,6 圈共计 2 160 个时间步。为保证瞬态数值计算的稳定性,在模拟输出结果呈周期稳定后,选取 6 个旋转周期内的模拟结果进行动模态分解(DMD)分析。

### 1.5 网格无关性验证

为确保网格无关性,降低计算时间并提高效率,需确定最佳网格划分方案。本试验考虑流场特性、计算资源、时间约束及准确性需求等多种因素后,对比 100 万~300 万网格数区间内 6 种不同网格,记录级间增压和电潜泵水力效率,得出不同网格数量对电潜泵水力性能的影响,结果如图 2 所示。可以看出,网格数达 200 万后,电潜泵增压及水力效率基本不变。因此,为保证计算精度,使计算资源得到充分利用,最终选定网格数 200 万的计算域网格进行所有瞬态模拟。最终选定计算域网格数见表 1。

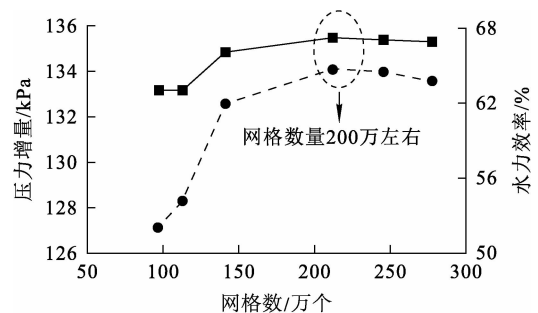


图 2 网格无关性验证

表 1 计算域网格数

计算域	网格数/个
一级叶轮	794 752
导叶	395 848
二级叶轮	794 752
出口段	140 448
总计	2 125 800

1.6 出厂水力性能曲线验证

图 3 为电潜泵瞬态 CFD 模拟所得级间增压与电潜泵出厂水力性能曲线对比。可以看出:电潜泵数值模拟结果与出厂水力性能曲线吻合较好;模拟曲线附近,平均差异在 8% 以内,属于合理范围,说明试验所用数值模型及方法较为准确。

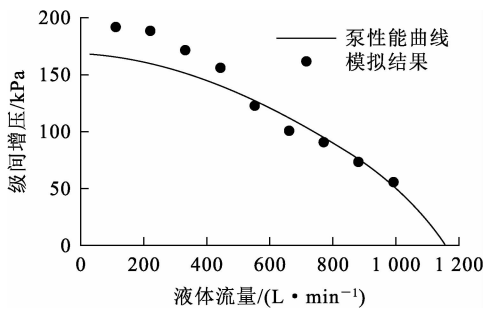


图 3 瞬态 CFD 模拟级间增压与泵性能曲线对比

2 电潜泵内部压力脉动分析

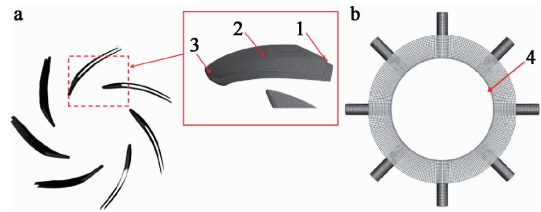
2.1 电潜泵内部压力脉动监测点设置

通过对设置的 3 个压力监测点进行分析,研究电潜泵叶轮流道区域内的压力脉动特性,具体位置如图 4(a) 所示。通过监测点 4 对电潜泵压力脉动的影响进行监测,位置如图 4(b) 所示。在瞬态计算过程中,对内部非定常流动进行频谱分析,获取电潜泵内部非定常流动的特征频率。为避免环境压力、速度及密度对压力脉动的影响,引入无量纲压力系数  $C_p$ ,用以阐述 3 个压力监测点的压力脉动特性<sup>[17]</sup>, $C_p$  表达式如下:

$$C_p = \frac{p_i - p_{ave}}{\frac{1}{2}\rho u_2^2} \quad (1)$$

式中: $u_2$ —叶轮出口处的圆周速度,m/s; $\rho$ —密度, $kg/m^3$ ;  $p_{ave}$ —电潜泵叶轮旋转一整周期内的静压

时均值,Pa;  $p_i$ —监测点在某时刻的瞬时静压值,Pa。

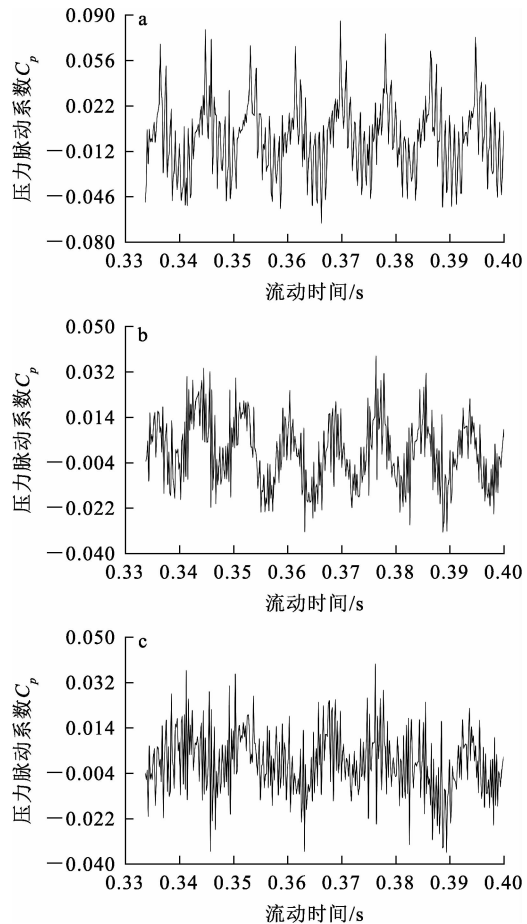


a—监测点 1、2、3;b—监测点 4。

图 4 压力监测点的设置

2.2 电潜泵叶轮流道内压力脉动特性

在 1 个旋转周期内,电潜泵叶轮流道区域内 3 个监测点压力脉动特性如图 5 所示。



a—监测点 1;b—监测点 2;c—监测点 3。

图 5 不同压力监测点的压力脉动时域变化

由图 5(a) 看出,转速 900 r/min 工况下,在 1 个旋转周期内,叶轮流道区域内叶片首段监测点

静压值周期变化显著:在流动时间 0.33~0.40 s 这一完整旋转周期内,监测点 1 处的压力脉动系数呈现高度规律性,即分别出现 8 个波谷和波峰。此周期性变化规律与出口段的 8 个出口数完全一致,说明叶轮叶片的旋转对叶轮流道内压力的影响具有明显周期性特征。

从叶轮出口到流域出口,存在叶轮叶片和出口段壳体相对运动产生的非定常时序性动静干涉,也存在由叶轮叶片尾迹冲击出口段壳体形成的尾迹干涉,这两者是电潜泵内部高剪切流场强干涉产生的本质原因。这些干涉特性引起了电潜泵内部的压力脉动,对泵的能量特性和稳定性有很大影响。在叶轮 1 个旋转周期内,叶片掠过 8 个出口会伴随 8 次动静干涉,表现为压力脉动时域图的 8 个波峰和波谷。

对比图 5(a)~(c) 看出:随动静部件之间距离增大,叶片首段监测点的 8 个波峰波谷分布规律清晰明显,叶片中段监测点的波峰波谷规律性逐渐减弱,而尾段监测点的规律性几乎丧失;同时,首段监测点的压力脉动系数值明显大于中部和尾部监测点。说明随压力监测点远离叶轮出口段,压力脉动系数值逐渐减小,证明动静干涉强度与动静部件间距离负相关,即间距越大,动静干涉强度越小。

压力脉动时域图具有明显的周期性,通过快速傅里叶变换(FFT)可将压力脉动的时域特性转化为频域特性,并得到电潜泵叶轮流道压力脉动频域图。根据不同频率下压力脉动的分布情况,可识别并分析系统中的频率成分。对于旋转泵来说,压力脉动的频率可通过叶轮转速和其结构参数获得<sup>[17]</sup>,压力脉动频率可通过式(2)得到:

$$f = \frac{nZ}{60} \quad (2)$$

式中: $n$ —叶轮旋转速度, r/min;  $Z$ —叶轮叶片数, 个。叶轮旋转速度为 900 r/min, 叶轮叶片数量为 7, 可得到该工况下叶轮叶片转动频率为 15 Hz, 叶轮通过频率为 105 Hz。

图 6 为叶轮流道内压力面处 3 个监测点位置的的压力脉动频域图。可以看出,受动静干涉影响,叶轮叶片尾部至头部的压力脉动幅值增大。随流体在叶轮中流动,旋转叶片与静止部件之间的相互作用导致压力脉动规律性变化;

但在叶轮出口处逐渐明显的尾迹干涉效应与周围流场相互影响,进一步增强了压力脉动。叶轮入口处未观察到高频压力脉动,而叶轮出口处频域图显示存在 1 200 Hz 的高频脉动成分。表明叶轮出口的不稳定流动是导致高频压力脉动产生的主要原因。对叶轮叶片的 3 个监测点进行分析,结果表明,压力脉动的最大幅值均出现在频率 120 Hz 处,这与文献[15]得出的蜗壳式离心泵叶轮流道压力脉动的最大幅值出现在叶轮通过频率及其倍频处的结论不一致。存在这种差异的原因可能是蜗壳式离心泵与本研究的对象(叶轮-导叶式电潜泵)的出口段结构不同,电潜泵的出口段包含 8 个出口,叶片与每个出口均存在动静干涉作用,因此导致压力脉动的主频率不是 7 倍叶轮转动频率,而是 8 倍叶轮转动频率,即 120 Hz。

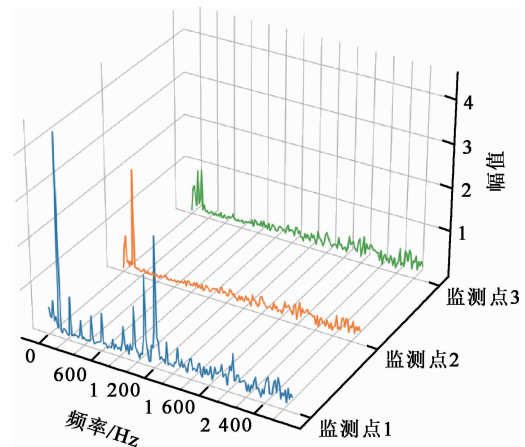


图 6 压力监测点 1~3 对应的频域

### 2.3 电潜泵出口段流道内压力脉动特性

图 7(a)、(b) 分别为转速 900 r/min 工况下电潜泵出口段流道内的压力脉动时域和频域图。由图 7(a) 看出:在 1 个电潜泵旋转周期内,监测点 4 的压力脉动系数分别出现 7 个波峰和波谷。由图 7(b) 看出:监测点 4 处压力脉动的最大幅值出现在 1 倍叶轮通过频率,即 105 Hz,与文献[18]得出的蜗壳式离心泵的蜗壳流道压力脉动分析结论相吻合。结合图 6 结果,说明叶轮流道内的压力脉动主要来自于出口段对叶轮的动静干涉,而出口段流道内压力脉动主要来自于叶轮对出口段处的动静干涉。

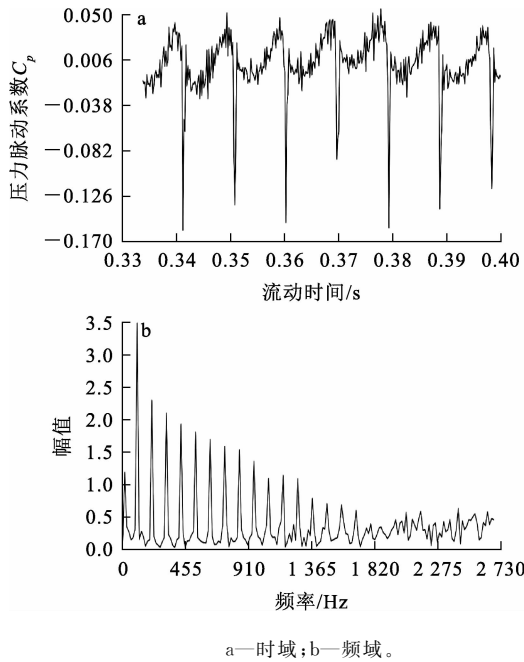


图 7 监测点 4 压力脉动分析结果

### 3 基于 DMD 的电潜泵内部流场数值研究

#### 3.1 DMD 方法原理

DMD 是一种数据驱动型流场分析算法,由 Schmid 在 2010 年首次提出<sup>[19]</sup>。为了更好地对电潜泵内流场进行数据分析和信息提取,采用 DMD 方法对流场进行瞬时快照处理,提取流动中模态信息,从而准确描述压力、含气率、速度、密度等流场中起主导影响的结构<sup>[20]</sup>。研究采用的流场分析方法的基本概念和计算方法如下。

DMD 分析须先将数值模拟得到的流场数据预处理成时间步长恒定的连续快照矩阵  $\mathbf{X}_N$ ,  $\mathbf{X}_N$  包含 1 到  $N$  时刻的快照序列,结构为  $\{x_1, x_2, x_3, \dots, x_N\}$ ,  $N$  是快照总数,假设连续流场快照  $x_i$  与下一时刻流场  $x_{i+1}$  间存在线性映射:

$$x_{i+1} = \mathbf{A}x_i \quad (3)$$

按照线性系统映射关系,每个 DMD 模态对应  $\mathbf{A}$  的 1 个特征值。从初始快照矩阵  $\mathbf{X}_N$  可获得 2 个快照矩阵:  $\mathbf{X} = [x_1, x_2, x_3, \dots, x_{N-1}]$  和  $\mathbf{Y} = [x_2, x_3, x_4, \dots, x_N]$ ,结合式(3)可知:

$$\begin{aligned} \mathbf{Y} &= [x_2, x_3, x_4, \dots, x_N] = \\ [Ax_1, Ax_2, Ax_3, \dots, Ax_{N-1}] &= \mathbf{A}\mathbf{X} \end{aligned} \quad (4)$$

对  $\mathbf{X}$  做奇异值分解可求出:

$$\mathbf{X} = \mathbf{U}\mathbf{\Sigma}\mathbf{V}^H; \quad (5)$$

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

奇异值分解后的矩阵为对角矩阵,对角线上元素即为  $r$  个奇异值。为减少数据集中数值噪声的影响,只保留前  $r$  个主要奇异值。分解得到的酉矩阵  $\mathbf{U}$  和  $\mathbf{V}$  满足  $\mathbf{U}^H\mathbf{U} = \mathbf{I}$  和  $\mathbf{V}^H\mathbf{V} = \mathbf{I}$ ,可将  $\mathbf{A}$  近似为:

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

矩阵  $\tilde{\mathbf{A}}$  是  $\mathbf{A}$  的相似变换, $\tilde{\mathbf{A}}$  包含了  $\mathbf{A}$  的主要特征值。 $\tilde{\mathbf{A}}$  的第  $j$  个特征值为  $\mu_j$ ,特征向量为  $w_j$ ,则第  $j$  个 DMD 模态为:

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

各模态对应的增长率和频率公式定义如下:

$$g_i = \frac{Re \times \lg \lambda_i}{\Delta t}; \quad (9)$$

$$\omega_i = \frac{Im \times \lg \lambda_i}{\Delta t} \quad (10)$$

根据降阶矩阵  $\tilde{\mathbf{A}}$  可估计流场内部结构随时间的演化过程。通过奇异值分解式(4),高维系统  $x_i$  可映射到子空间  $z_i$  上,令  $\mathbf{W}$  为特征向量  $w_i$  的矩阵, $\mathbf{A}$  为包含  $\tilde{\mathbf{A}}$  相应特征值的对角阵, $\tilde{\mathbf{A}}$  的特征分解为:

$$\tilde{\mathbf{A}} = \mathbf{W}\mathbf{A}\mathbf{W}^{-1}, \mathbf{A} = \text{diag}(\mu_1, \dots, \mu_r) \quad (11)$$

任意时刻快照可写为:

$$x_i = \mathbf{A}x_{i-1} = \mathbf{U}\tilde{\mathbf{A}}\mathbf{U}^Hx_{i-1} = \mathbf{U}\mathbf{W}\mathbf{A}^{i-1}\mathbf{W}^{-1}\mathbf{U}^Hx_1 \quad (12)$$

定义模态振幅  $\alpha$  为:

$$\tilde{\mathbf{A}} = \mathbf{W}\mathbf{A}\mathbf{W}^{-1}, \mathbf{A} = \text{diag}(\mu_1, \dots, \mu_r) \quad (13)$$

$\alpha_i$  为第  $i$  个模态振幅,大小对应的是模态对初始快照的影响。根据式(13)对所有时刻的流场快照进行预测:

$$x_i = \mathbf{\Phi}\mathbf{A}^{i-1}\alpha = \sum_{j=1}^r \Phi_j (\mu_j)^{i-1} \alpha_j \quad (14)$$

快照序列  $\mathbf{X}$  为:

$$\begin{aligned} \mathbf{X} &= [x_1, x_2, x_3, \dots, x_{N-1}] = \mathbf{\Phi}\mathbf{D}_\alpha\mathbf{V}_{\text{and}} = \\ [\Phi_1, \dots, \Phi_r] &\begin{bmatrix} \alpha_1 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & \alpha_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & \mu_1 & \dots & \mu_1^{N-2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & \mu_r & \dots & \mu_r^{N-2} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (15)$$

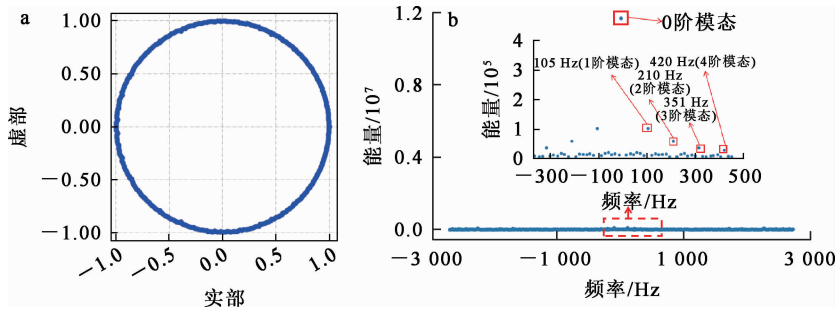
#### 3.2 电潜泵叶轮流道内流场 DMD 分析

运用 DMD 方法分析电潜泵叶轮内部压力场分布特性方法如下:首先,取稳定旋转后的 1 个旋转周期作为初始时刻数据,设置叶轮每旋转  $1^\circ$  自动记录 1 次流场数据;其次,选取叶轮流道区域中间截面作为流场数据输出区域,并汇总该区域所有时刻流场数据,采集不同时刻的流场快照数据形成初始快照矩阵;最后,通过 Python 中的

Pydmd库对数据矩阵进行 DMD 分解。

图 8(a)为电潜泵叶轮流道中截面压力流场的特征单位圆图。可以看出:大部分特征值位于特征单位圆上,表明该特征值对应的模态是稳定的;最大模态特征值为实数,相应频率为零(不存在虚部),其余特征值都是复数,除主模态外的特征值都成对出现。图 8(b)为按照模态能量排序

得到的能量频谱图。可以看出:第 2、3、4 阶模态频率分别与图 7(b)中 FFT 所得 1、2、3 倍的叶轮通过频率相同,说明叶轮压力流场压力脉动频率可通过 DMD 方法准确捕捉。由图 8 整体分析认为,高能量模态对应的特征值均在单位圆内证明它们是流场的主导结构,而低能量模态可能代表流场中的次要、随时间变化的非稳定流动。



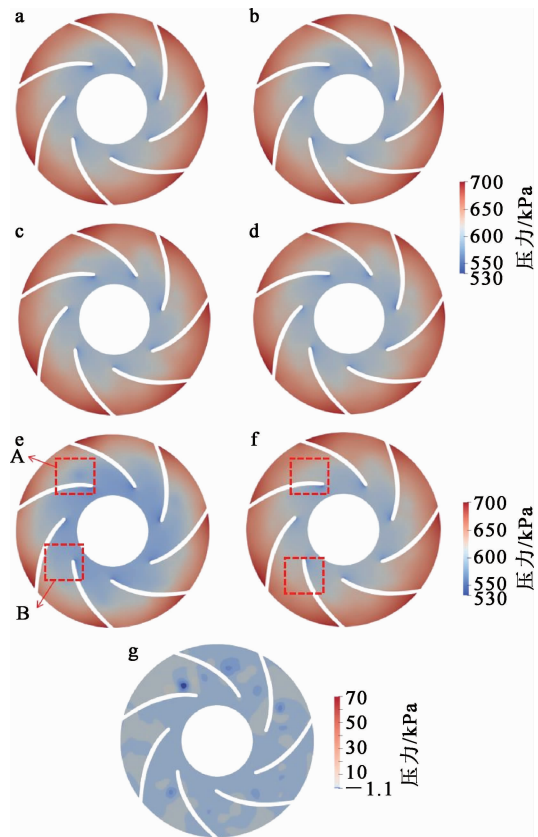
a—电潜泵叶轮流道中截面压力流场的特征单位圆图;b—按照模态能量排序得到的能量频谱图。

图 8 DMD 计算结果

### 3.3 电潜泵叶轮流道内压力场重构

根据标准 DMD 方法可知模态振幅代表该模态对初始快照的贡献,即该模态对初始流场的影响大小。利用 DMD 所得幅值最高的前几阶模态对非定常流场进行重构,前 1 阶模态重构、前 2 阶模态重构、前 4 阶模态重构和前 6 阶模态重构的电潜泵叶轮截面压力云图如图 9(a)~(d)所示,原始流场压力云图、前 6 阶模态重构与压力流场云图对比、前 6 阶模态重构与压力流场云图的差值如图 9(e)~(g)所示。由图 9 看出:随降阶重构采用模态数的增加,前 2 阶模态重构结果逐渐趋于准确;前 4 阶模态重构结果能大致还原压力流场的基本特征;前 6 阶模态重构结果能更准确地还原初始流场的主要特征,仅在某些局部低压区域,如 A 和 B 区域,其特征不能被精确地捕捉。

因此,可以认为 DMD 方法在降阶重构时,按能量排序后模态数应用越多,流场重构结果越准确。如要识别流场主要特征,提取流场干扰的大致结构,则无须使用过多的模态数进行重构,以节省计算资源。前 4 阶模态重构结果的误差分析结果表明,重建数据与原始数据吻合度较好,降阶数据能反映主要的波动特征。



a—前 1 阶重构;b 前 2 阶重构;c—前 4 阶重构;d—前 6 阶重构; e—原始流场;f—前 6 阶重构与原始流场对比;g—重构误差。

图 9 基于 DMD 方法的流场重构结果

## 4 结论

通过对地浸采铀领域的电潜泵关键水力部件内部流动进行数值模拟,并分别监测电潜泵叶轮流道区域与出口段区域的压力脉动,得出以下结论:

1)在电潜泵实际运行中,叶轮在通过导叶及出口段处相同位置时,所引起的压力脉动值大小相同,引起电潜泵叶轮流道区域内压力脉动的最关键因素是叶轮叶片与导叶及出口段之间的动静干涉。

2)电潜泵内叶轮流道中,位于叶片上 3 个监测点处的压力脉动最大幅值均为 8 倍叶轮通过频率,而电潜泵出口处流道内压力脉动的最大幅值却是 7 倍叶轮通过频率,说明叶轮流道内压力脉动主要来自于出口段对叶轮的动静干涉,而出口段流道内压力脉动主要来自于叶轮对出口段的动静干涉。

3)DMD 分析得到的第二阶模态与 FFT 得到的 1 倍叶轮通过频率相同、第三阶模态与 FFT 得到的 2 倍叶轮通过频率相同、第四阶模态的频率与 FFT 所得到的 3 倍叶轮通过频率相同,表明叶轮中截面压力流场中存在压力脉动频率,且 DMD 方法可对该特征频率进行精确分析。

4)与初始压力流场相比,DMD 重构流场结果的还原度较高,压力流场分布基本一致,未准确重构区域的流场数据误差不超过 10%,证明降阶后的数据可以反映原始流场的主要波动特征。

5)叶轮叶片动静部件的间距离越大,动静干涉强度越小;间距离越小,动静干涉强度越大。建议在地浸采铀专用电潜泵装备的研发中,可适当减小导叶及出口段与叶轮的间距,并在一定程度上减小压力脉动幅值,更有利于提升装备的系统稳定性。

6)研究所得出的电潜泵叶轮与出口段间距对动静干涉强度的影响规律,可准确指导适用地浸现场工况的装备制造工作,应进一步开展实际尺寸参数优化等相关研究。

## 参考文献:

[1] 世界核协会发布最新版核燃料报告[J]. 辐射防护通讯, 2021,41(3):38-41.  
 [2] 李文,许虹,王秋舒. 全球铀矿开发现状及投资建议[J]. 中国矿业,2017,26(3):9-14.  
 [3] 陈元初,赵声贵,梁毅. 我国核电工业及铀资源供应对策

[J]. 中国矿业,2011,20(1):19-22.  
 [4] 张晓文,周耀辉,刘耀池,等. 我国铀矿冶工业与技术进步[J]. 中国矿业,2003,12(12):4-6.  
 [5] CUNEY M, BRUNETON P, FAIRCLOUGH M, et al. Geological classification of uranium deposits and description of selected examples; IAEA-TECDOC-1842 [R]. Vienna: IAEA, 2018. DOI:10.13140/RG.2.2.36449.56162.  
 [6] SU X B, LIU Z B, YAO Y X, et al. Petrology, mineralogy, and ore leaching of sandstone-hosted uranium deposits in the Ordos Basin, North China[J]. Ore Geology Reviews, 2020,127. DOI:10.1016/j.oregeorev.2020.103768.  
 [7] 姜岩,姚益轩,廖文胜,等. 地浸采铀作业过程地层伤害原因分析[C]//中国核学会. 中国核学会 2009 年学术年会论文集:第一卷. 北京:中国原子能出版社,2009:752-762.  
 [8] SEREDKIN M, ZABOLOTSKY A, JEFFRESS G. In-situ recovery, an alternative to conventional methods of mining: exploration, resource estimation, environmental issues, project evaluation and economics[J]. Ore Geology Reviews, 2016,79:500-514.  
 [9] GRANCEA L, MIHALASKY M, FAIRCLOUGH M. Uranium 2020: resources, production and demand 2020 [M]. Red Book. Vienna: OECD-NEA & IAEA, 2020.  
 [10] 王亚安,苏学斌,张翀,等. 在地浸采铀钻孔中检测潜水泵性能[J]. 铀矿冶,2022,41(4):454-458.  
 [11] 赵明,曹俊鹏,杨少武,等. 提高地浸铀山潜水泵使用周期的方法[J]. 铀矿冶,2021,40(2):148-151.  
 [12] 季扬威,孙祥,张渤,等. 地浸采铀潜水泵提升装置存在的问题和改进建议[C]//中国核学会. 中国核科学技术进展报告(第六卷):中国核学会 2019 年学术年会论文集第 2 册(铀矿地质分卷(下)、铀矿冶分卷). 北京:中国原子能出版社,2019:5.  
 [13] 盖家进. 关于潜水泵选型的研究分析[C]//中国核学会. 中国核科学技术进展报告(第五卷):中国核学会 2017 年学术年会论文集第 2 册(铀矿地质分卷(下)、铀矿冶分卷). 北京:中国原子能出版社,2017:280-287.  
 [14] 刘阳,袁寿其,袁建平. 离心泵的压力脉动研究进展[J]. 流体机械,2008,36(9):33-37.  
 [15] 王玉川,谭磊,曹树良,等. 离心泵叶轮区瞬态流动及压力脉动特性[J]. 机械工程学报,2014,50(10):163-169.  
 [16] 蒋俊贤. 离心泵动静叶内复杂流场演化及干涉特性研究[D]. 镇江:江苏大学,2022.  
 [17] 何昌鸿. 基于动力学模态分解的离心泵内部流场流动特征数值研究[D]. 兰州:兰州理工大学,2019.  
 [18] 孟根其其格,谭磊,曹树良,等. 离心泵蜗壳内非定常流动特性的数值模拟及分析[J]. 机械工程学报,2015,51(22):183-190.  
 [19] SCHMID P. Dynamic mode decomposition of numerical and experimental data[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2010,656:5-28.  
 [20] 寇家庆,张伟伟. 动力学模态分解及其在流体力学中的应用[J]. 空气动力学学报,2018,36(2):163-179.

## Numerical Simulation on Internal Flow Field of Electric Submersible Pump in In-situ Leaching of Uranium

ZHANG Chong<sup>1,2</sup>, JIA Hao<sup>1,2</sup>, ZHU Jianjun<sup>3</sup>, LI Qinci<sup>1,2</sup>, ZHANG Xiaocheng<sup>3</sup>,

LI Xuezhong<sup>4</sup>, YU Zhuohua<sup>4</sup>

(1. *Beijing Research Institute of Chemical Engineering and Metallurgy, CNNC, Beijing 101149, China;*

2. *China Nuclear Mining Science and Technology Corporation, CNNC, Beijing 101149, China;*

3. *College of Mechanical and Transportation Engineering, China University of Petroleum(Beijing), Beijing 102249, China;*

4. *Nanfang Pump Industry Co., Ltd., Hangzhou 311100, China)*

**Abstract:** The electric submersible pump (ESP) is the main equipment for the in-situ leaching uranium industry in China, effectively increasing the production of leaching fluid. However, few studies on the internal flow field subject to rotating-stationary-parts interactions are available in literature. With the internal structure of impeller-guide vane as the research object, CFD method was applied to carry out unsteady analysis on the flow characteristics of the medium, and the variation mechanism of pressure pulsation inside the impeller and the outlet section of the impeller was studied. Moreover, the transient flow field data were used to analyze the pressure flow field in the section of the impeller through the action mode decomposition (DMD) and pressure flow field reconstruction. The periodic variation mechanism of pressure pulsation caused by static and dynamic interference and the influence of distance between static and dynamic components on the intensity of static and dynamic interference are revealed. The results indicate that the frequency values of the blades are basically consistent with those of the Fast Fourier Transform (FFT). These findings offer valuable theoretical underpinnings for mitigating undesirable pump vibrations induced by pressure pulsations, optimizing ESP hydraulic component parameters, and ultimately improving system efficiency.

**Key words:** in-situ leaching of uranium; electrical submersible pump(ESP); dynamic mode decomposition(DMD); flow field reconstruction; data analytics