

熔盐泵空间导叶与叶轮的径向安装间隙对泵性能影响研究

夏添,操松林,刘广兵,赵以奎

(合肥通用机械研究院有限公司,安徽 合肥 230031)

摘要:为了探究空间导叶和叶轮之间的径向安装间隙对泵性能影响规律,选择某VS1型太阳能高温熔盐泵首级部分作为研究对象,在其他几何参数不变的前提下,以原导叶和叶轮径向间隙值为基础,通过沿径向逐次改变导叶进口和叶轮之间的相对位置,共设计了6组不同间隙下的导叶-叶轮组合方案,基于CFD方法对6种间隙方案(1.5~6.5 mm),进行了全流场数值模拟,并试验验证了数值算法的可靠性。研究表明:导叶与叶轮径向安装间隙对泵扬程和效率在不同工况下的影响具有显著差异性,存在较优间隙使泵性能整体最佳,间隙过大、过小时都会致使其性能劣化;与原间隙2.5 mm时相比,合适的间隙可使叶轮出口和腔体间隙处的主频压力脉动幅值分别降低20.6%和36.4%,泵内介质流动稳定性提升;导叶内流道压力梯度和腔体涡核心分布随间隙改变呈不同变化态势,间隙为4.5 mm时,导叶内流道压力梯度变化更为均匀有序,腔体内涡的范围和强度较其它方案削弱明显,泵内流态最优。

关键词:熔盐泵;径向安装间隙;外特性;压力脉动;内流场

中图分类号:TK221

文献标识码:A

DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2023.08.002

[引用本文格式]夏添,操松林,刘广兵,等.熔盐泵空间导叶与叶轮的径向安装间隙对泵性能影响研究[J].热能动力工程,2023,38(8):13-20. XIA Tian, CAO Song-lin, LIU Guang-bing, et al. Research on the influence of radial installation clearance between spatial guide vane and impeller of molten salt pump on the performance of pump[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2023, 38(8):13-20.

Research on the Influence of Radial Installation Clearance between Spatial Guide Vane and Impeller of Molten Salt Pump on the Performance of Pump

XIA Tian, CAO Song-lin, LIU Guang-bing, ZHAO Yi-kui

(Hefei General Machinery Research Institute Co., Ltd., Hefei, China, Post Code: 230031)

Abstract: In order to explore the influence of the radial installation clearance between spatial guide vane and impeller on the pump performance, the first-stage part of VS1 solar high temperature molten salt pump was selected as the research object. On the premise of other geometrical parameters unchanged, based on radial installation clearance of original guide vane and impeller, through successively changing the relative location between the radial guide vane inlet and impeller, a total of 6 combination schemes of guide vane and impeller with different clearance were designed for comparative analysis. Full flow field numerical simulation ranging from 1.5 to 6.5 mm in six clearance schemes was carried out using CFD

收稿日期:2022-09-13; 修订日期:2022-10-10

基金项目:国机集团重大专项(2018011592);合肥通用机械研究院有限公司青年基金(2021010524)

Fund-supported Project: Major Special Project of SINOMACH Group (2018011592); Youth Fund Project of Hefei General Machinery Research Institute Co., Ltd. (2021010524)

作者简介:夏添(1994-),男,合肥通用机械研究院有限公司助理工程师。

method, and the reliability of numerical algorithms was validated through experimental testing. The results show that the influence of the radial installation clearance between guide vane and impeller on pump head and efficiency is significantly different under different working conditions. A better clearance leads to the best overall pump performance, while too large or too small clearance will lead to deterioration of pump performance; compared to the original clearance of 2.5 mm, an appropriate clearance can reduce the amplitudes of the main frequency pressure pulsation at the impeller outlet and cavity clearance position by 20.6% and 36.4%, which increases the stability of the fluid flow within the pump; the pressure gradient in the guide vane internal passage and the distribution of the vortex core in the cavity exhibit different change trends with the change of clearance. When the clearance is 4.5 mm, the pressure gradient in the guide vane internal passage changes more uniformly and orderly, and the range and intensity of the vortices in the cavity are significantly reduced compared to other schemes, leading to the optimal flow state in the pump.

Key words: molten salt pump, radial installation clearance, external performance, pressure pulsation, internal flow field

引 言

太阳能高温熔盐泵^[1-3]是光热发电站储热系统的核心设备,其主要作用是输送高温熔融盐。空间导叶作为该类泵重要过流部件,对泵性能具有重要影响。

杨敏官等人^[4]通过在导叶内部添加分流叶片的方式来研究其对泵性能的影响,结果表明,设计点下分流式导叶内部速度分布更为均匀,导叶背面二次流、旋涡明显减少,模型泵效率得以提高。邴浩等人^[5]研究叶轮叶片数和导叶叶片数之间的组合对泵性能的影响发现,导叶叶片数比叶轮叶片数多1时能有效减少泵内水力损失,提高泵效率。马希金等人^[6]通过改变导叶叶片进口安放角发现,导叶进口安放角的大小对泵内流动影响较大,并验证了当进口安放角60°时泵性能最优。张人会等人^[7]通过CFD方法模拟计算不同包角下的空间导叶叶型与泵的水力效率之间的关系,优化结果表明,在不改变导叶其它参数的前提下存在使泵效率最高的最优包角。程效锐等人^[8]通过研究叶片出口位置对井用潜水泵性能的影响,得出导叶出口边位置适当向轴向延伸时可改变液流在导叶出口处的流态,减小下级叶轮进口处的水力损失。顾延东等人^[9]对比了8个不同导叶安装位置对泵水力性能、压力脉动强度的影响,结果表明,存在最佳安装位置使得泵整体性能最优。程效锐等人^[10]研究了导叶3种周向布置位置对核主泵压力脉动的影响,结果表明,导叶周向

位置对导叶下游的内部流动影响较大,合适的周向位置可有效降低泵的振动。综上,当前针对空间导叶对泵性能的影响研究大多集中在导叶自身几何参数的改变,或导叶安装方位的变化。此类研究在一定程度上较为清晰地表明了导叶对泵性能的影响规律,但较少考虑导叶和叶轮之间的径向安装距离变化会对泵性能的影响。该参数选取在实际工程应用中也常凭设计人员经验选取,缺乏理论计算,且相关研究较少。

本文以某VS1型太阳能高温熔盐首级部分为研究对象,通过CFD数值模拟方法对导叶-叶轮径向安装间隙如何影响泵的性能进行了全面分析,并试验验证了数值算法的可靠性,其结果以期能够为后续相关类型的泵设计提供一定参考。

1 几何模型及设计方案

1.1 几何模型

以某VS1型高温太阳能熔盐泵为研究对象,该泵在结构形式上为三级立式悬吊泵。由于该泵每级结构相似,故选择了泵首级过流段进行分析。泵相关设计参数为:流量 $Q = 830 \text{ m}^3/\text{h}$,单级扬程 $H = 25 \text{ m}$,转速 $n = 1480 \text{ r/min}$,介质密度 1725 kg/m^3 。

首级叶轮和导叶的主要几何参数为:叶轮进口直径 $D_1 = 265 \text{ mm}$,叶轮出口直径 $D_2 = 315 \text{ mm}$,叶片进口安放角 $\beta_1 = 22^\circ$,叶片出口安放角 $\beta_2 = 27.5^\circ$,叶片出口宽度 $b_2 = 59 \text{ mm}$,叶片数 $z = 6$ 。导叶内流线最大直径 $D_3 = 345 \text{ mm}$,导叶外流线最大直径 $D_4 = 375 \text{ mm}$,导叶长度 $L = 250 \text{ mm}$,导叶进口角

$\alpha_3 = 22.5^\circ$, 导叶出口角 $\alpha_4 = 85^\circ$, 叶片包角 $\varphi = 80^\circ$ 。为了能够准确反映泵首级过流段内的流动状态,对首级过流段进行了全流场建模,主要为过流部件,包括首级叶轮、导叶、前后口环和腔体等,如图 1 所示。

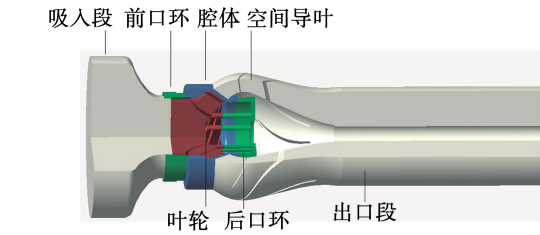


图 1 研究模型全流场三维建模

Fig. 1 3D modeling of full flow field for research model

1.2 方案设计

图 2 为熔盐泵首级过流段,其中 δ 是叶轮与导叶之间的径向安装间隙,该值为叶轮前盖板直径与导叶外流线进口水平段直径的差值。

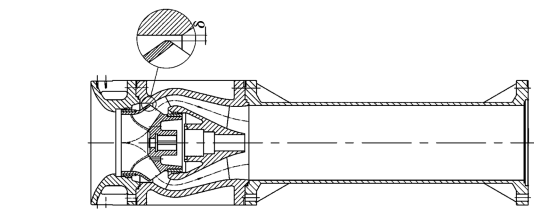


图 2 叶轮与导叶径向安装间隙示意图

Fig. 2 Schematic diagram of radial installation clearance between impeller and guide vane

为了研究不同间隙值对泵性能影响,在其它因素不变的情况下,设计了方案 1 ~ 方案 6 种不同径向间隙取值方案,每种方案对应的间隙值 δ 分别为 1.5, 2.5, 3.5, 4.5, 5.5 和 6.5 mm。其中,方案 2 为原熔盐泵首级过流段间隙取值,该值依据工程设计经验选取。

2 数值计算

2.1 网格划分及无关性分析

利用相关软件对泵首级过流段的所有过流部件进行了网格划分,并对前后口环最小间隙位置进行了网格加密,确保最小几何尺寸位置处的网格层数大于 5 层。主要过流部件的网格划分,如图 3 所示。

为了确定最佳网格数目,节省计算资源,采用了不同的网格单元尺度对研究模型进行了网格划分,并形成了 5 种网格划分方案,如表 1 所示。对表 1 中各方案进行数值计算,以设计工况下的首级过流

段扬程值作为比较对象,网格无关性验证结果,如图 4 所示。

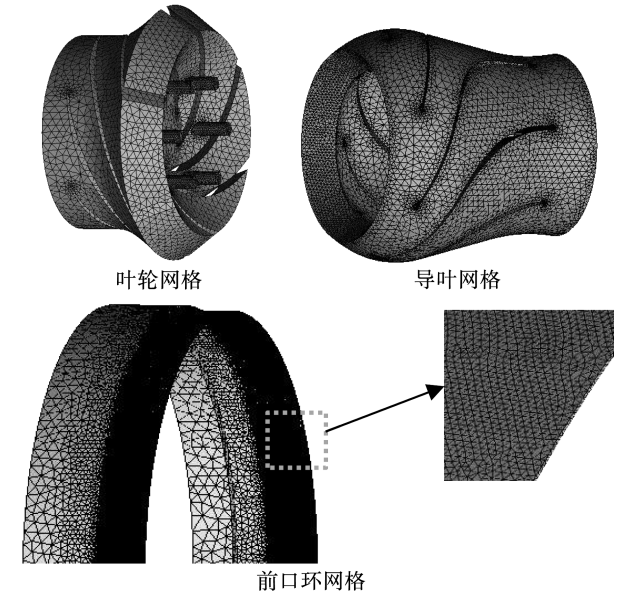


图 3 主要过流部件网格划分

Fig. 3 Meshing of main flow parts

表 1 网格划分方案

Tab. 1 Schemes of mesh division

方 案	网格数
1	1 835 254
2	2 300 241
3	3 050 781
4	3 952 410
5	4 436 584

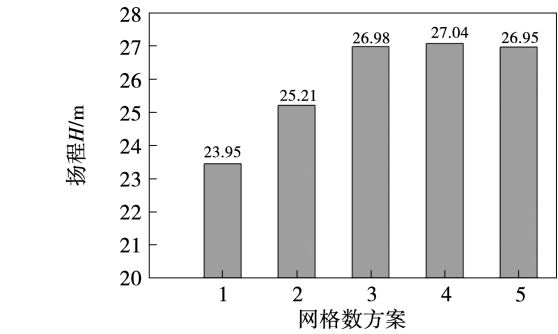


图 4 网格无关性计算结果

Fig. 4 Mesh independence calculation results

2.2 数值模拟方法

利用商用 CFD 软件进行数值模拟,湍流模型采用 SST $k-\omega$ 湍流模型。该模型考虑了湍流剪切应力的传输,可以准确预测流动开始和负压力梯度条件下流体的分离量^[11-12]。进口边界条件采用质量

流量进口,出口边界条件为自由出流,固壁面边界设置为无滑移壁面条件。非定常计算时,动静交界面设置为瞬态冻结转子,定义叶轮每旋转 6° 为 1 个时间步长,其值为 $0.000\ 676\ \text{s}$;叶轮共旋转 4 周,其总时长为 $0.162\ 2\ \text{s}$,取最后 1 周计算结果进行非定常特性分析。

熔盐泵首级过流段扬程计算公式为:

$$H = \frac{p_2 - p_1}{\rho g} + Z \tag{1}$$

效率计算公式为:

$$\eta = \frac{\rho g Q H}{M \omega} \times 100\% \tag{2}$$

式中: p_2 —首级过流段出口总压,Pa; p_1 —首级过流段入口总压,Pa; Z —进出口中心线高差,m; ρ —介质密度, kg/m^3 ; g —重力加速度, m/s^2 ; Q —介质流量, m^3/s ; H —扬程,m; η —效率,%; M —扭矩, $\text{N}\cdot\text{m}$; ω —角速度, rad/s 。

3 计算结果及分析

3.1 外特性分析

为了对比不同方案下的泵外特性差异,分别计算了每种方案在 $0.6Q \sim 1.3Q$ 工况下研究模型的扬程值和效率,其结果如图 5 所示。其中,对于效率值的计算未考虑轴封及导轴承处摩擦损失。

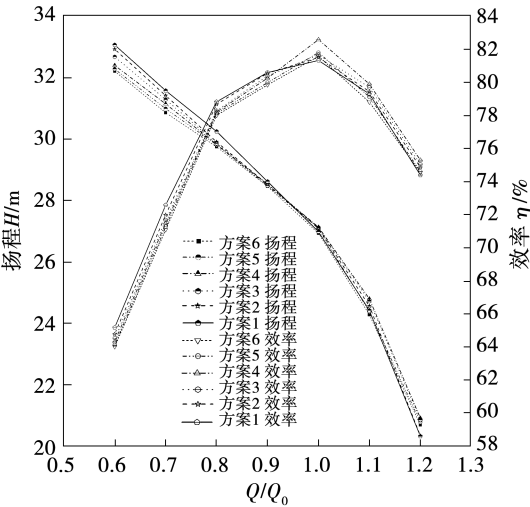


图 5 不同方案下的泵性能曲线

Fig. 5 Pump performance curves in different schemes

由图 5 可知,研究模型的扬程和效率随径向安装间隙 δ 的变化规律基本一致。在小流量工况下,泵首级扬程和效率随径向安装间隙 δ 增加呈现微弱减小趋势;在设计工况和大流量工况下,模型扬程和

效率随径向安装间隙增加先增大后减小,且均在 $\delta = 4.5\ \text{mm}$ 时取得最大值。这是因为在小流量工况下,叶轮出口流速较低,较小的安装间隙会使流过间隙处的介质能量损失增大,前腔体内介质压力降低,最终导致泵前口环泄漏量减小,从而形成良好的节流效应,在泵外特性上就表现为扬程和效率值较高。随着泵流量增大,叶轮出口处流速也相应增加,压力降低,间隙上下游压差减小,间隙节流效应减弱,过小的间隙会导致叶轮和导叶过渡段流动产生紊乱,水力损失增大。适当增加间隙后,介质通流能力提高,泵内紊流程度降低,流动均匀性得以改善。随着间隙进一步加大,间隙节流能力极大减弱,叶轮出口处大量高压流体介质流入腔体内,从而导致叶轮口环泄漏量增大,在外特性上表现为泵扬程和效率反而降低。

为了定量分析不同径向安装间隙下的变化规律,选择了 $0.6Q$ 、 $1.0Q$ 和 $1.3Q$ 工况进行对比,结果如图 6 所示。

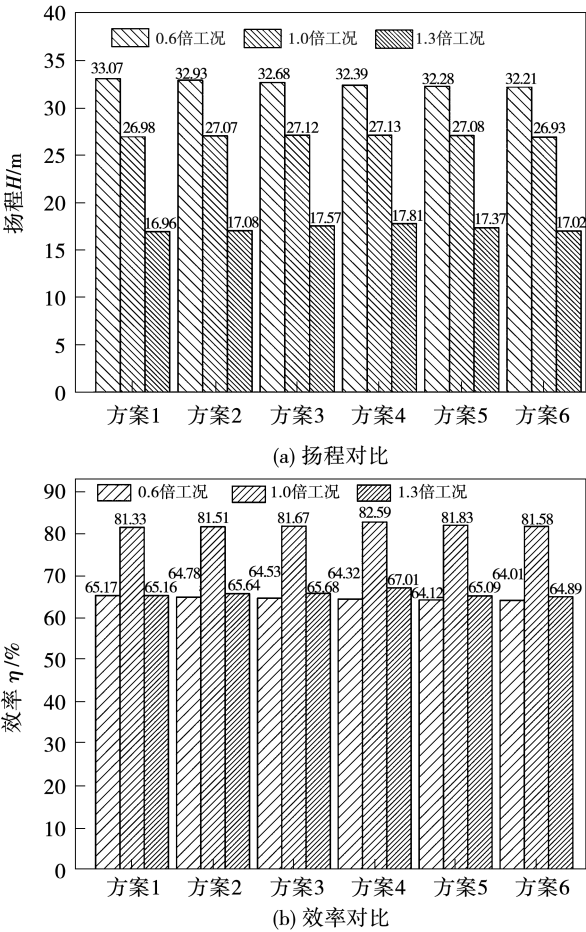


图 6 不同间隙方案下各工况外特性值对比

Fig. 6 Comparisons of external performance under each condition in different schemes

从图 6 可以看出,0.6*Q* 工况下,模型在最小间隙为 33.07 m 时扬程随着间隙增加逐渐降低,当间隙达到最大时扬程最小,为 32.21 m,二者相差 2.6%;模型效率在 0.6*Q* 工况下的变化趋势与扬程一致,最大间隙和最小间隙下的效率差值为 1.16%。

1.0*Q* 工况和 1.6*Q* 大流量工况下,研究模型的扬程和效率均在 $\delta=4.5$ mm 时最优,且随间隙的增大而减小,二者均呈现不同程度的降低。与原方案 2 相比,方案 4 在设计工况下的扬程值提升幅较小,效率提高了 1.08%。1.6*Q* 工况下,方案 4 的扬程和效率值均较原方案 2 有较大提升,扬程提高了 4.27%,效率提高了 1.37%。泵在大流量工况下性能改善明显。

综上,导叶径向安装间隙对泵外特性具有一定程度影响,且在不同工况下的影响规律和程度各异,但存在合适的径向安装间隙使得泵性能整体较优。

3.2 非定常特性分析

为了对比不同径向安装间隙对泵非定常特性影响规律,选择了方案 2、方案 4 和方案 6 进行泵内瞬态特性研究,并在叶轮出口、导叶进口、径向间隙以及前腔体处设置了 4 个压力监测点 p_1, p_2, p_3 和 p_4 ,各监测点具体位置如图 7 所示。

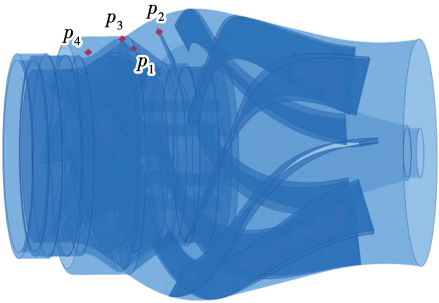


图 7 泵内压力监测点分布

Fig. 7 Distribution of pressure monitoring point in pump

3.2.1 不同方案下泵内压力脉动时域分析

图 8 所示为 3 种径向安装间隙下的泵内监测点压力值在设计工况下的瞬时变化情况。由图 8 可知,泵内各监测点的压力随时间变化具有明显周期性,叶轮旋转 1 周内,各点压力波动了 6 次,与叶轮叶片数对应。这说明泵内压力波动主要是叶轮叶片旋转引起的,其波动周期主要由叶片数决定。

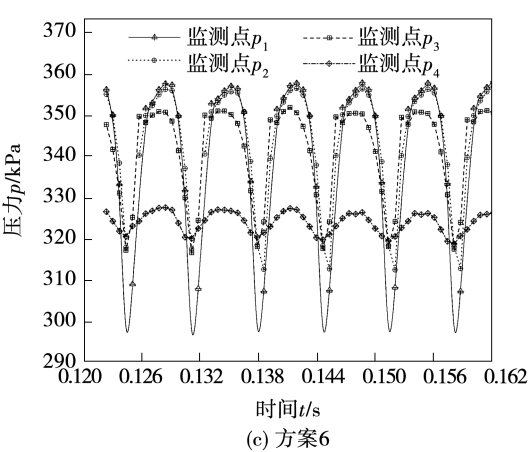
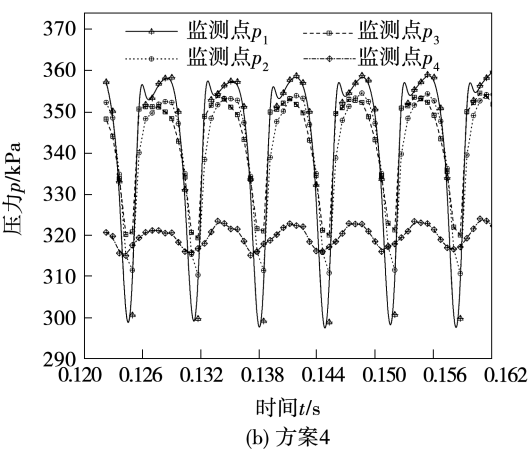
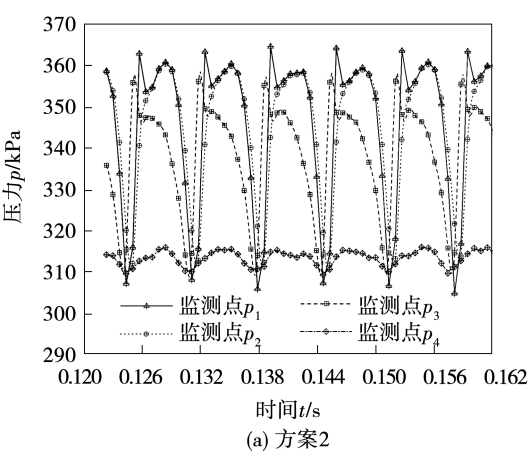


图 8 不同方案下泵内监测点压力脉动时域分布

Fig. 8 Time domain distribution of pressure pulsation at monitoring point in pump in different schemes

同时,不同方案下泵内各监测点压力波动状态具有显著差异性。对于叶轮出口监测点 p_1 ,各方案下压力波动存在明显双峰现象,且波动幅度随径向安装间隙增大呈先下降后微弱上升趋势。在 $\delta=4.5$ mm 时, p_1 点压力波动幅度最小,波峰与波谷最大差值为 58 509 Pa。对于导叶进口监测点 p_2 和前

腔体监测点 p_4 处的压力波动来说,各方案下两点压力波动都较为平稳,在 $\delta = 4.5$ mm 时 p_2 和 p_4 监测点处压力波动幅度最小。对于径向间隙处监测点 p_3 来说,在 $\delta = 2.5$ 和 6.5 mm 时其压力波动峰值存在主峰和次峰,并在 $\delta = 4.5$ mm 时次峰消失、呈单峰脉动现象。

上述现象说明,导叶径向安装间隙对泵内介质流动稳定性具有不同影响,过大或过小的间隙都会导致泵内流动紊乱,从而造成压力波动幅度增大。合适的安装间隙能够增加导叶与叶轮匹配程度,改善腔体内部流动状态,增加流动稳定性,从而降低由水力激励引起的壳体振动。

3.2.2 不同方案下的泵内压力脉动频域分析

为了分析各个监测点压力脉动周期波动特性,此处引入无量纲化参数即压力系数 C_p 作为评价指标,其定义为:

$$C_p = (p - \bar{p}) / \frac{1}{2} \rho u_2^2 \quad (3)$$

$$u_2 = \pi D n / 60 \quad (4)$$

式中: C_p —压力系数; p —监测点瞬态压力, Pa; $\bar{p}$ —时均压力, Pa; u_2 —叶轮出口速度, m/s; D —叶轮外径, m; n —转速, r/min。

选取叶轮最后 1 个旋转周期的计算结果进行分析,将方案 2、方案 4 和方案 6 下各监测点压力系数进行傅里叶变换,得到各方案下泵内监测点压力脉动频域分布如图 9 所示。

由图 9 可知,3 种不同间隙方案下的泵内监测点的压力脉动幅值主频均为 148 Hz,对应叶轮旋转次频为 2 倍叶频,频率值为 296 Hz。各方案下,叶轮出口处的压力脉动幅度最大、径向间隙及导叶进口处的压力脉动幅度次之,而腔体处压力脉动则较为平缓。

这是由于造成泵内压力脉动的主要原因是叶轮与静止过流部件之间的相对运动,继而产生动静干涉引起的,旋转的叶片是主要扰动源,距离叶轮越近,其干涉作用越强烈,由于 p_4 点位于流动远场,动静干涉作用已极大减弱,导致该点的压力脉动程度远小于其它位置;其次,叶轮出口介质在流向导叶时,其流线轨迹并非完全平滑过渡,存在流动分离现象,二者相互叠加,从而导致其它位置处的压力脉动程度强于腔体位置。

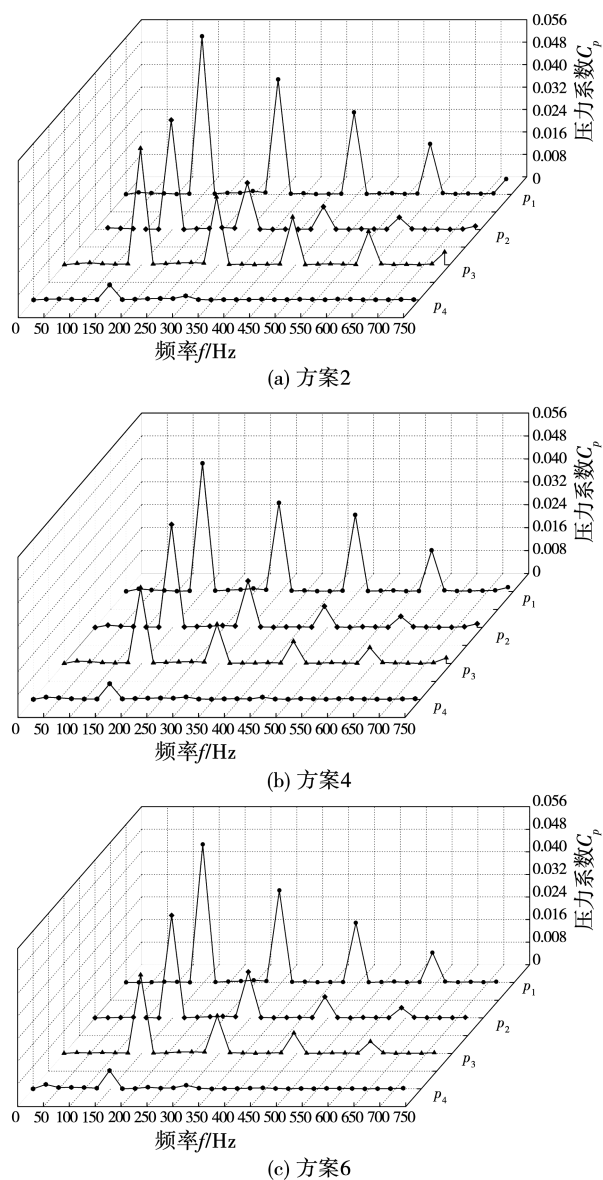


图 9 不同方案下泵内监测点压力脉动频域分布
Fig.9 Frequency domain distribution of pressure pulsation at monitoring point in pump in different schemes

图 10 所示为不同方案下泵内各个监测点压力脉动主频幅值对比。由图可知,对于叶轮出口处监测点 p_1 来说,其压力脉动主频幅值随径向安装间隙不同呈现先减小后增大趋势,方案 4 下该点压力脉动幅值最小,与原方案 2 相比其主频脉动幅值降低了 20.6%,下降幅度明显。对于径向安装间隙处监测点 p_3 来说,其压力脉动主频幅值对间隙变化最为敏感,原方案 2 该点的压力脉动幅值明显高于方案 4 和方案 6,其与后两者之间分别相差 36.4% 和 33.1%,主频脉动峰值大。这是因为在小间隙下,叶轮出口高压介质在流过间隙时其流速会急剧变化,

导致间隙处流动稳定性遭到破坏,从而加剧了该点处的压力脉动。此外,对于导叶进口和腔体处监测点 p_2, p_4 来说,其压力脉动主频幅值主要由动静干涉决定,故不同间隙下的压力脉动幅值基本接近,无明显差距。

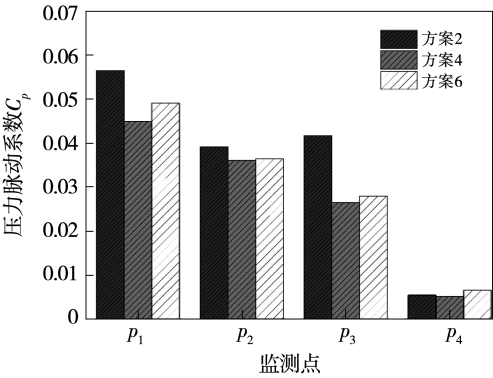


图 10 不同方案下各监测点压力脉动主频幅值
Fig. 10 Main frequency amplitude of pressure pulsation at each monitoring point in different schemes

3.3 内流场分析

为了分析导叶径向安装间隙变化对泵内流动影响,对比了 0.5 倍叶高处的导叶周向静压分布,如图 11 所示。由图 11 可以看出,不同方案下导叶内部静压分布规律基本一致,导叶内部静压值随其轴向距离增加而逐渐增大,并在导叶出口位置处达到最大。方案 4 导叶进口低压区范围要稍小于方案 2 和方案 6,压力梯度变化更为平缓,在导叶叶片工作面和出口位置处,高压区范围广,其内部流动更为合理有序,动静压能转化效率也更高。这说明,径向安装间隙会对导叶内部流动分布产生影响,合适的间隙能够改善导叶内部流态,从而降低其过流损失。

图 12 是采用 Q 准则判定得出的导叶内部涡核心分布,其等值面取值为 0.5。由图 12 可知,不同间隙方案下泵腔体内部旋涡分布状态相似,基本集中在叶轮与导叶过渡段、腔体间隙及前腔体内部处,大量涡的出现会增加泵内能量损失,降低介质流动稳定性,从而致使泵性能劣化。方案 4 下泵腔体内旋涡分布区域和强度较方案 2 和方案 6 均有不同程度的削弱,仅在叶轮与导叶过渡段和腔体间隙处存在零星涡,泵前腔体内部涡基本消失,其内部流态和流动稳定性得以有效改善。

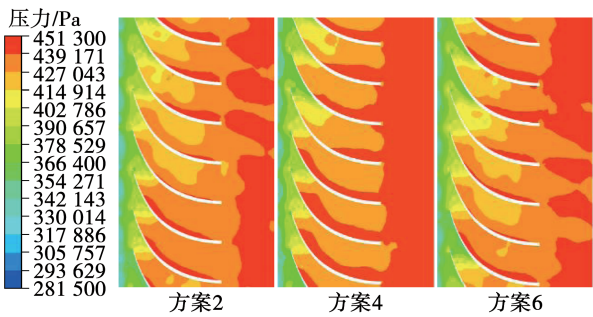


图 11 不同方案下 0.5 倍叶高导叶周向压力分布
Fig. 11 Circumferential pressure distribution of guide vane in 0.5 span in different schemes

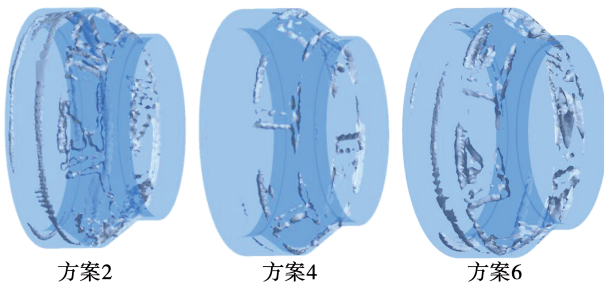


图 12 不同方案下腔体内部涡核心分布
Fig. 12 Distributions of vortex core in cavity in different schemes

4 试验对比和验证

为了验证数值计算的准确性,选择方案 2 进行熔盐泵样机整机试验。试验方法依据 GB/T 3216 – 2016《回转动力泵水力性能验收试验 1 级、2 级和 3 级》标准,通过改变泵出口阀开度从而获得不同流量下对应的泵扬程和轴功率。采用 LDG – 350 型电磁流量计测量泵出口流量,其精度等级为 0.5 级;采用 YB – 150 型压力表进行压力测量,其精度等级为 0.4 级;采用电测法进行功率测量,功率计型号为 PW3360 – 30,其精度等级为 0.2 级;采用 SZG – 441C 型数字转速表进行转速测量,其精度等级为 0.1 级,熔盐泵样机性能测试装置如图 13 所示。

将试验获得的不同流量工况下泵总扬程测量值,换算成泵单级扬程值,泵首级过流段效率按整泵效率处理,并与模拟计算值对比,结果如图 14 所示。

由图 14 可知,在整个流量工况范围内泵扬程和效率模拟值与试验值保持较好的一致性,各工况下模拟结果要略高于试验结果。这是因为数值模拟时忽略了导轴承及轴封处的机械损失,其次未考虑泵

内沿程水头损失和级间损失,从而造成试验换算值要偏小于模拟值。设计工况下,试验扬程值为 26.6 m,模拟值为 27.1 m,其相对误差为 1.87%;效率试验值为 79.8%,模拟值为 81.5%,二者相对误差为 2.01%,均在工程应用接受范围内。因此,针对研究泵首级过流段的外特性数值模拟方法可靠。

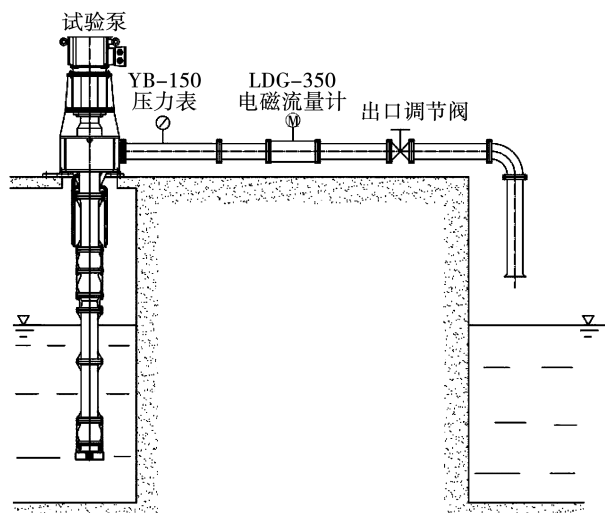


图 13 模型泵性能测试装置

Fig. 13 Model pump performance testing device

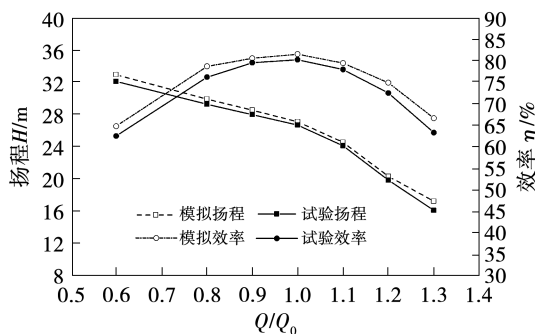


图 14 模型泵性能试验值与模拟值对比

Fig. 14 Comparison of experimental and simulated values of the performance of a model pump

5 结 论

通过分析 6 种不同径向安装间隙对泵性能影响特性,得出结论:

(1) 叶轮与导叶之间的径向安装间隙会对泵的效率 and 扬程产生相应影响,其影响规律在不同流量工况下存在特异性;在设计工况和大流量工况下,与原方案间隙 2.5 mm 相比,间隙为 4.5 mm 时,泵效

率最大提升 1.37%,扬程最高提升 4.27%,泵内流态改善明显,整体性能最优。

(2) 设计工况下,泵内瞬态特性在不同间隙时具有一定差异,在原方案间隙 2.5 mm 时,间隙处和导叶-叶轮过渡处的流速会产生突变,从而破坏泵内流动稳定性;当间隙为 4.5 mm 时,叶轮和径向间隙处的主频脉动幅值与原方案相比分别削弱了 20.6% 和 36.4%,泵内流动稳定性得以提高,并有效降低了壳体水力激振。

(3) 针对熔盐泵首级过流段的全流场模拟计算精度较高,其相对误差最高不超过 3%,数值模拟方法可靠,具有较好地适用性。

参考文献:

- [1] 操松林,呼核升,操瑞嘉,等. 熔盐泵现状与展望[J]. 流体机械,2019,47(11):49-55.
CAO Song-lin, HU He-sheng, CAO Rui-jia, et al. The present situation and prospect of molten salt pump[J]. Fluid Machinery, 2019, 47(11): 49-55.
- [2] 汪 琦,俞红啸,张慧芬. 太阳能光热熔盐发电技术的研究与开发[J]. 上海化工,2016,41(11):34-37.
WANG Qi, YU Hong-xiao, ZHANG Hui-fen. Research and development of molten salt solar thermal power generation technology[J]. Shanghai Chemical Industry, 2016, 41(11): 34-37.
- [3] 刘 磊,王 强. 太阳能热发电领域高温熔盐泵的选择与应用[J]. 通用机械,2018(12):14-15.
LIU Lei, WANG Qiang. Selection and application of high temperature molten salt pump in solar thermal power generation field[J]. General Machinery, 2018(12): 14-15.
- [4] 杨敏官,邵 腾,高 波,等. 熔盐泵分流式空间导叶内部流动及其非定常特性[J]. 排灌机械工程学报,2015,33(4):306-310.
YANG Min-guan, SHAO Teng, GAO Bo, et al. Interior flow and unsteady performance of molten salt pump with splitter spatial guide vane[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2015, 33(4): 306-310.
- [5] 邴 浩,谭 磊,曹树良. 叶片数及叶片厚度对混流泵性能的影响[J]. 水力发电学报,2013,32(6):250-255.
BING Hao, TAN Lei, CAO Shu-liang. Effects of blade number and thickness on performance of mixed-flow pumps[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2013, 32(6): 250-255.
- [6] 马希金,顾生琴,李新凯,等. 导叶叶片出口安放角对混输泵性能的影响[J]. 兰州理工大学学报,2013,39(3):52-56.
MA Xi-jin, GU Sheng-qin, LI Xin-kai, et al. Effect of exit setting angle of guide vane on performance of multiphase pump[J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2013, 39(3): 52-56.