

海水泵站流道非对称引水流态特性数值模拟分析

张娜¹, 杨克凡^{1,2}, 邹国良³, 金越睿¹

(1. 天津城建大学天津市软土特性与工程环境重点实验室, 天津 300384; 2. 河北省水利水电勘测设计研究院集团有限公司, 天津 300221; 3. 南京水利科学研究院河流海岸研究所, 江苏 南京 210024)

摘要:为探讨海水泵站流道非对称引水流态特性, 基于 OpenFOAM 建立了某液化天然气接收站海水泵站流道数值模型, 在利用实测数据验证的基础上, 模拟计算与分析了对称和非对称引水时, 流道内流速与紊动动能分布特征。模拟结果表明: 海水泵站非对称引水时, 水流进入前池后流速较大, 在低水位下水流无法充分扩散, 在流道入口处形成偏流, 行进至海水泵前断面水流分布已基本均匀; 非对称引水时, 海水泵所在进水池各断面均匀性指数平均值高于对称引水工况, 且各海水泵进水池的紊动动能平均值也小于对称引水工况; 从过水断面流速分布均匀性以及紊动量级来看, 非对称引水对水泵运行更有利。

关键词:海水泵站; 非对称引水; 紊动动能; 数值模拟; OpenFOAM

中图分类号: TV136⁺.2

文献标志码: A

文章编号: 1006-7647(2024)03-0057-07

Numerical simulation analysis of asymmetric diversion flow characteristics in flow channel of a seawater pump station//ZHANG Na¹, YANG Kefan^{1,2}, ZOU Guoliang³, JIN Yuerui¹ (1. Tianjin Key Laboratory of Soft Soil Characteristics & Engineering Environment, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China; 2. Hebei Institute of Investigation & Design of Water Conservancy & Hydropower Group Co., Ltd., Tianjin 300221, China; 3. River Harbor Engineering Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China)

Abstract: In order to discuss the characteristics of asymmetric inlet flow in a seawater pumping station, a numerical model of inlet flow passage in a liquefied natural gas receiving station was established using OpenFOAM. Based on the measured data, the distribution characteristics of flow velocity and turbulent energy in the inlet flow channel were simulated and analyzed. The simulation results show that when the seawater pumping station is asymmetric, the flow velocity entering the forebay is high, and the flow cannot be fully diffused at a low water level. The flow is biased at the entrance of the flow channel, and is basically uniform in front of the seawater pump. In the asymmetric water diversion condition, the average uniformity index of each section is higher than that of the symmetrical condition, and the average turbulent energy of each water pump is also lower than that of the symmetrical condition. From the perspective of flow velocity uniformity and turbulence magnitude, the asymmetric water diversion is more beneficial to the operation of the pump.

Key words: seawater pump station; asymmetric water diversion; turbulent kinetic energy; numerical simulation; OpenFOAM

液化天然气(LNG)接收站取海水工程所取海水主要用作液化天然气的加热介质, 如何安全、高效、稳定地取到满足气化器要求的海水, 关系到气化装置能否正常运行^[1], 同时也是液化天然气接收站取海水工程的核心设计点^[2]。泵站作为取海水工程中的重要建筑物, 其运行状况直接关系到取水效率与经济效益, 为了给水泵运行创造良好的水力条件, 要选择合适的引水方式。

物理模型试验作为解决实际工程问题的重要手段, 通过试验开展取水流态分析^[3-4]并提出水力优化措施^[5-8]等, 为泵站的取水安全及合理运行提供了设计依据。但物理模型受试验场地和模型建造时间的限制, 往往造价昂贵、耗时长, 且当所有控制力不可能按同一比例缩小时, 按照相似准则构建物理模型会发生缩尺效应^[9]。随着计算流体力学(computational fluid dynamics, CFD)的迅速发展, 人们对湍流现象

基金项目:国家自然科学基金项目(51509177); 水利部泥沙科学与北方河流治理重点实验室 2022 年度开放研究基金项目(IWHR-SEDI-2022-03)

作者简介:张娜(1978—), 女, 教授, 博士, 主要从事流体力学数值模拟研究。E-mail: cheungna@126.com

通信作者:邹国良(1983—), 男, 高级工程师, 博士, 主要从事流体与结构物相互作用数值模拟研究。E-mail: glzou@nhri.cn

的认识更加接近本质,数值模拟被广泛应用于实际工程领域^[10-11],尤其是泵站流道研究领域^[12-17]。非对称布置的流道由于结构复杂,在运行中易出现流态不良的现象^[18-21];而当流道结构对称,水泵非对称开启时主流会发生明显偏流,产生回流区,从而造成泥沙淤积^[22-23]。以往对于流道结构对称且水泵对称开启时非对称的引水方式对流道内水流影响的研究较少,且认为循环系统中的钟形进水流道在非对称引水的情况下极易引起吸水室中的水流恶化,导致泵装置性能下降^[24]。但实际液化天然气接收站在运行时,为满足经济效益同时兼顾前池淤积分布形态,会涉及非对称引水运行工况。因此,采用CFD数值模拟方法对海水泵站流道非对称引水流态特性进行深入研究,可为液化天然气接收站取水工况优化提供科学依据。为此,本文采用开源软件OpenFOAM中的 $k-\omega$ SST湍流模型建立某液化天然气接收站海水泵站流道数值模型,对比分析非对称和对称引水工况下流道内的流态分布及水力特性,以期作为泵站流道进水方式评估及结构设计优化提供参考。

1 研究方法

1.1 数值模型

数值模拟采用开源软件OpenFOAM,求解器选用两相流非定常求解器interFOAM,自由界面捕捉使用流体体积(volume of fluid,VOF)法,空间离散采用有限体积法(finite volume method,FVM)^[14],速度、压力耦合采用PIMPLE算法^[25]。由于低水位下的流道中水流湍急,湍流模型选取剪切应力输运 $k-\omega$ 模型($k-\omega$ SST),其能较好地模拟泵站内低水位下的水流流态、漩涡分布等物理现象^[26]。

在求解控制方程时,求解器首先建立一个预测的速度场,然后使用PISO(pressure implicit with splitting of operators)算法^[27]对压力场和速度场进行反复校正,以使两个物理场同时满足连续性方程和动量方程的要求。

1.2 评价指标

为定量分析过水断面流态的优劣,引入均匀性指数 γ ^[28],其计算公式为

$$\gamma = 1 - \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n \frac{\sqrt{(v_i - \bar{v})^2}}{\bar{v}} \quad (1)$$

式中: $\bar{v}$ 为测量断面平均流速; v_i 为测量断面上第*i*个测点的轴向流速计算平均值;*n*为断面上的测点数。 γ 取0~1,越大则流动均匀性越好。

考虑到每个特征断面都涉及多个测点,只计算单点的误差不足以代表整个断面的对比效果,因此

采用一致性指数(concordance index)^[29]来更好地评估每个断面的平均流速计算值与实测值的吻合程度,计算公式如下:

$$I = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (v_i - v'_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|v_i - \bar{v}| + |v'_i - \bar{v}|)^2} \quad (2)$$

式中:*I*为一致性指数; v'_i 为测量断面上第*i*个测点的流速基准值。 $I \leq 0.5$ 说明流速计算值与基准值不吻合; $0.5 < I \leq 0.7$ 说明流速计算值与基准值吻合度较低; $0.7 < I \leq 0.9$ 说明流速计算值与基准值吻合度较高; $I > 0.9$ 说明流速计算值与基准值吻合度极高。

为定量分析流速计算值与基准值间的误差,引入流速相对误差 η ^[28]:

$$\eta = \frac{|v - v'|}{v'} \times 100\% \quad (3)$$

2 模型建立与验证

2.1 海水泵站结构布置

本文选取的海水泵站如图1所示,泵站前池总长5.05 m,前端净宽22.00 m,末端净宽25.50 m,末端对应钢闸门及4孔流道,钢闸门距泵站底板0.60 m;每孔流道对应2台海水泵,流道长26.20 m,最窄处2.00 m,最宽处6.50 m,并设有2台应急消防泵,消防泵管道进水口距泵站底板1.93 m,引水管喇叭口入口平面距泵站底板0.90 m。泵站自海向岸设置1根DN1000和2根DN1800引水管,根据后方运行需求采用不同的引水管组合方式引水。流道采用完全对称的结构布置,3根引水管为非对称布置。

配套的水力特性物理模型^[30]由有机玻璃制作,几何比尺为1:7.5。模型试验测定了1%低水位(-2.27 m)条件下,在2根DN1800引水管引水、7台海水泵取水的远期工况下各特征断面的流速分布。各特征断面分别布置在流道进口(1号断面)、过滤池(旋转滤网)进口(2号断面)、进水池渐扩段(3号断面)以及海水泵中心上游1.5*D*处(4号断面,*D*为吸水喇叭口直径,*D*=1.00 m)。各个测点的间距为1/5流道宽,测点位置及各分断面(1A~1D、2A~2H、3A~3D、4A~4H)位置如图1(a)所示。

2.2 网格划分

将计算域模型导入单个网格均为正六面体的长方体背景网格中,使用snappyHexMesh网格生成工具生成非结构化网格。因本案例实际工程结构复杂,为了得到更好的贴体效果,局部曲率细化角为30°,在计算域边壁附近、钢闸门附近以及管道附近

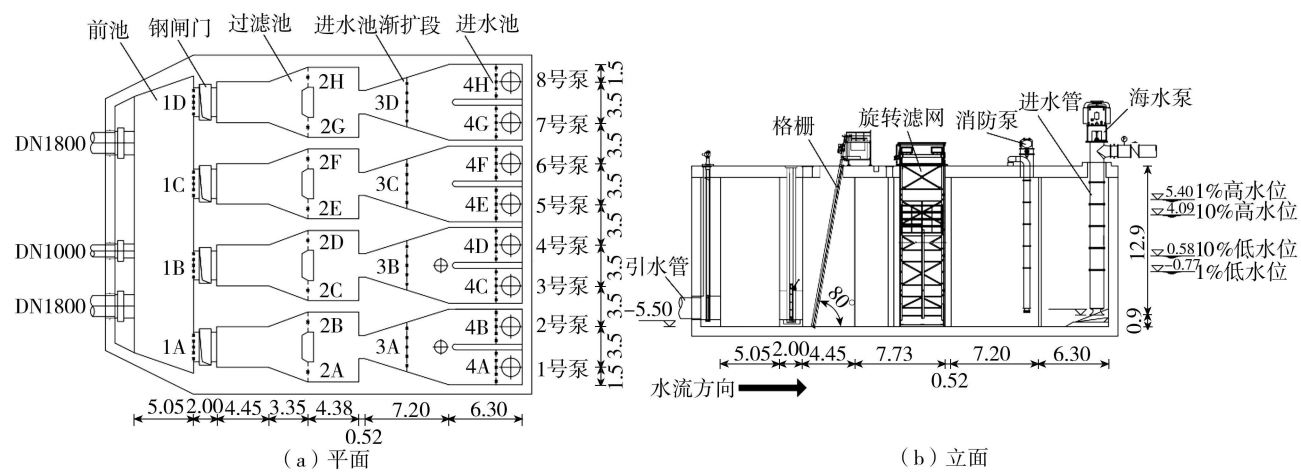


图1 泵站结构示意图(单位:m)

处加密,细化等级为1级,加密网格与未加密网格间设置一层过渡层。

通过改变背景网格的疏密度,预设7组网格进行网格数量敏感性分析,网格详细参数见表1。引入总水头损失作为评价指标,判断总水头损失与网格数量的敏感性。总水头损失计算公式为

$$h_i = \frac{P_{in} - P_{out}}{\rho g} \quad (4)$$

式中: h_i 为第*i*组网格的总水头损失; P_{in} 为入口断面总压强; P_{out} 为出口断面总压强; ρ 为水的密度,取 1 t/m^3 ; g 为重力加速度,取 9.81 m/s^2 。不同网格数下的总水头损失计算结果如图2所示。

表1 预设网格参数

编号	总网格数	最大网格边长/m	最小网格边长/m
1	424 486	0.400	0.200
2	682 688	0.333	0.167
3	969 244	0.286	0.143
4	1 345 305	0.250	0.125
5	1 834 120	0.222	0.111
6	2 276 534	0.200	0.100
7	2 946 034	0.182	0.091

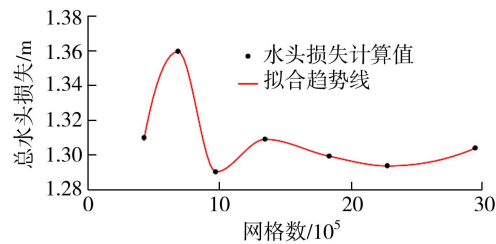


图2 不同网格数下的总水头损失

从图2可以看出,总水头损失随着网格数的增多而逐渐趋于稳定,当网格数为96万时,总水头损失达到最小,但网格精度还不足以描绘细节;当网格数超过150万后网格精度满足要求,总水头损失基本不变,相差不超过5%,满足网格数敏感性分析的要求,最终选取网格数为1 834 120,对应背景网格剖

分为 $180 \times 135 \times 90$,未加密处网格水平、垂向尺寸均为 0.222 m ,闸门附近、边壁附近、管道口和管道内加密后网格水平、垂向尺寸均为 0.111 m ,网格划分结果如图3所示。

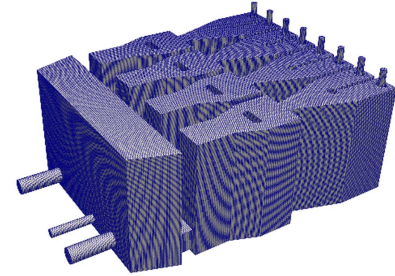


图3 计算域网格

2.3 边界条件及模型参数

入口引水管采用体积流量入口边界,出口边界在进水管顶部,采用体积流量出口边界,顶部大气边界采用压力进出口边界,流道中所有边壁基于壁面函数法处理,无滑移,自由表面基于流体体积法处理。

采用恒定流边界条件对海水泵站非对称和对称引水工况进行计算,即模型进、出口流速恒定。此外,模型壁面边界设置为光滑边界。模型参数如下:最大计算时间步长为 0.01 s ,最大库朗数为1,入口紊动动能为 $0.0001\text{ m}^2/\text{s}^2$,特征湍流耗散率为 0.003 s^{-1} ,自由面压强为 0 Pa ,模拟时长为 2000 s 。

2.4 计算时长敏感性分析

受限于计算机负载与运算耗时,共模拟 2000 s 。为了判断 400 s 后不同时间间隔的平均流速是否有差异,采用一致性指数作为评价指标分别分析 $400 \sim 450$ 、 $400 \sim 500$ 、 $400 \sim 600$ 、 $1200 \sim 1400$ 、 $1400 \sim 1600$ 、 $1800 \sim 1850$ 、 $1800 \sim 1900\text{ s}$ 与基准值 $1800 \sim 2000\text{ s}$ 平均流速的差异,一致性指数计算结果如表2所示,可见取模拟 400 s 后 50 s 内及以上时段的平

表 2 一致性指数计算结果

时段/s	不同特征断面的一致性指数														
	1A	1B	1C	1D	3A	3B	3C	3D	4B	4C	4D	4E	4F	4G	4H
400 ~ 450	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.98	1.00	0.86	1.00	1.00	0.97	0.84	0.97
400 ~ 500	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99	1.00	0.98	1.00	1.00	0.98	0.90	0.99
400 ~ 600	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.97	1.00	1.00	0.95	0.95	1.00
1 200 ~ 1 400	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99	1.00	1.00	1.00	0.99	0.90	1.00	1.00	0.86	0.95	1.00
1 400 ~ 1 600	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99	1.00	1.00	0.97	0.86	1.00
1 800 ~ 1 850	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.92	1.00	1.00	0.77	0.96	1.00
1 800 ~ 1 900	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.93	1.00	1.00	0.92	1.00	1.00

均流速即可代表流道内流速情况。

2.5 模型验证

特征断面(测点布置见图 1)垂向平均流速的计算值与基准值的对比结果如图 4 所示(流速方向向下为正),基准值为物理模型流速实测值。1~4 号断面计算值与实测值相对误差分别不超过 8.7%、7.2%、6.3%和 5.9%,符合泵站流道流动计算规范要求。图 4 中各断面流速计算值趋势与实测值相同,数值模拟与物理模型试验结果保持一致,其中 1 号断面中 4 个分断面受主流冲击,流速均偏向其中一侧,单条流道内 2 号断面偏流方向与 1 号断面保持一致,直至 3 号断面偏流方向发生改变。整体来看,本文所建立的海水泵站流道数值模型计算得到的各断面垂向平均流速与实测值较为接近,能较好地反映出各个特征断面的流速分布,可进一步支撑泵站流道水流流态评估的研究。

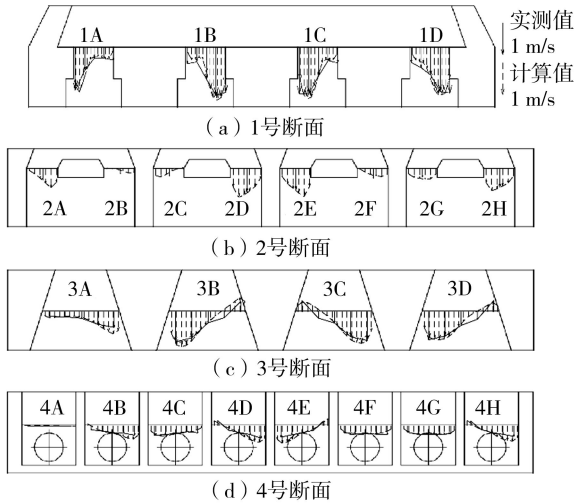


图 4 垂向平均流速计算值与实测值对比

3 非对称引水流态特性研究

该海水泵站 4 台汽化器同时工作时,需要开启 2 根引水管同时引水才能满足取水需求。对称引水工况为引水管开启 2 根 DN1800,海水泵开启 1 号、2 号、7 号和 8 号;非对称引水工况为引水管开启 1 根 DN1800 与 1 根 DN1000,海水泵开启 1 号、2 号、7 号和 8 号。为了探究非对称引水时流道中的水流

特性,选取 1% 低水位下开启 1 根 DN1800 和 1 根 DN1000 引水的工况进行模拟,对应组合开启 1 号、2 号、7 号和 8 号 4 台海水泵,每台出水流量为 $2.11\text{ m}^3/\text{s}$,总出水流量为 $8.44\text{ m}^3/\text{s}$ 。

图 5 为流道闸门顶部平面(高程-2.40 m)、闸门中部平面(高程-3.50 m)和进水管喇叭口平面(高程-4.60 m)的流迹线及速度分布。从流流量级分布可以看出,两种引水工况下进水管喇叭口平面和闸门中部平面各位置的流速普遍比进水管顶部平面流速大。其中,非对称引水时,前池区域最大流速达到 2 m/s 以上,泵站近端 1 号和 2 号泵所在流道过滤池最大流速约为 1.6 m/s ,进水池最大流速约为 1.2 m/s ;泵站远端 7 号和 8 号泵所在流道最大流速约为 1.2 m/s ;对称引水时,前池最大流速为 1.8 m/s 左右,过滤池最大流速为 1.4 m/s 左右,进水池最大流速为 1 m/s 左右。

从流态上看,两种引水工况前池水流均无法均匀扩散,在各垂向位置所在平面上均有明显的回流区,进而流道入口处偏流严重。偏流从流道进口开始一直持续到进水池渐扩段,到进水池 4 号断面流态才基本均匀,进水池内进水管喇叭口平面已无回流区。其中,闸门顶部平面回流现象较闸门中部和进水管喇叭口平面严重。

两种引水工况下水流流态还有以下差异:图 5(f) DN1800 引水管中的水流在前池扩散遇到壁面后向泵站两端运动, DN1000 中的水流一部分直接流入第二条流道,另一部分流向进水池远端,2 股水流中间有较明显的回流,且在闸门中部平面上该回流仍然存在;图 5(c)前池 2 根引水管之间存在 2 个宽度约为 4 m 的回流区,一直延伸到闸门顶部平面。两种引水工况下海水泵站近端流道(1 号和 2 号泵所在流道)的流态分布较为接近。区别在于,非对称引水时,进水池 2 号泵前水流扩散均匀,而对称引水时进水池 2 号泵前流迹线并不完全顺直。此外,非对称引水时,泵站远端 7 号和 8 号泵所在流道入口因距离前池引水管较远,池内流速分布比较均匀,未出现如其他流道中的大面积回流区,图 5(e)尤为

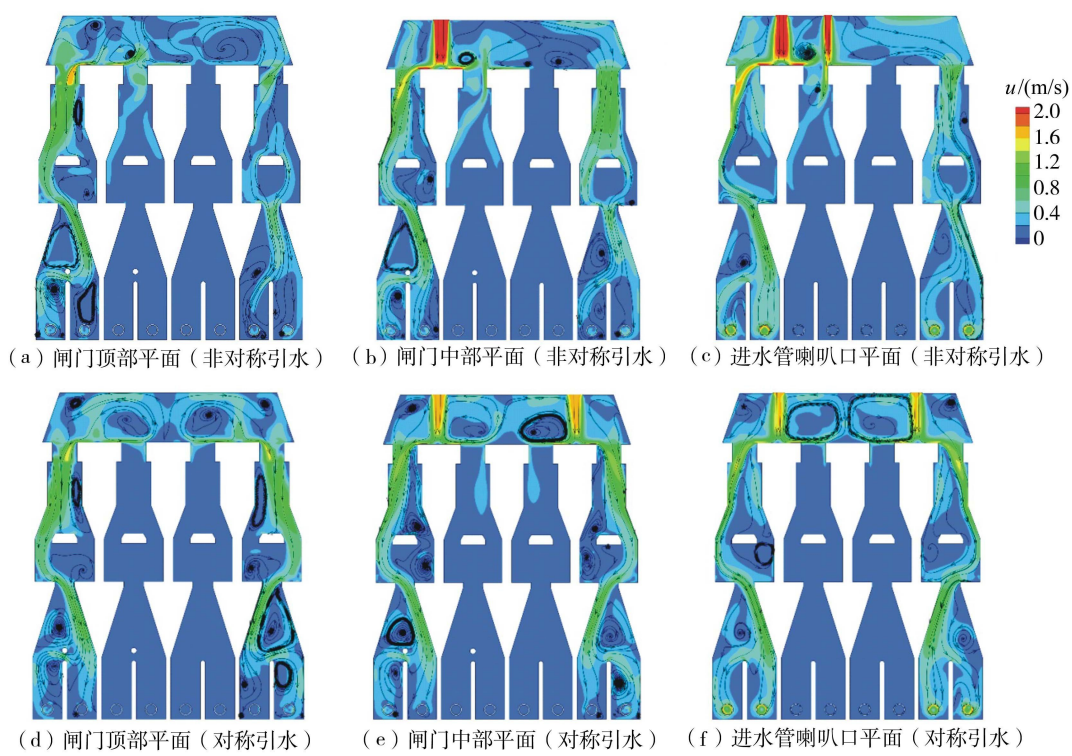


图5 两种引水工况下流迹线分布及流速云图

明显,但在进水池渐扩段仍存在一定偏流。两种引水工况流道的进水池渐扩段在喇叭口平面及闸门顶部平面均存在回流现象,这也是3号断面出现逆向水流的主要原因,对下游进水池流速均匀扩散的影响较大。

进一步地,为了对比4台汽化器工作时两种引水工况流道中各关键断面水流分布均匀程度的差异,对各个断面的流速均匀度进行了对比分析,结果见表3。由表3可知:水流从泵前 $2.5D$ 断面流至 $1.5D$ 断面整体呈现均匀性指数逐渐增大的趋势,即进水池内越靠近海水泵断面水流越均匀。统计的各海水泵所在进水池断面中,非对称引水时有一半断面的均匀性指数高于对称引水。其中,1号泵前两种引水工况下的均匀性指数较为接近,均不超过

0.65;2号和8号泵前非对称引水整体优于对称引水;7号泵前距进水管越近,两种引水工况下的均匀性指数差距越小。非对称引水时的均匀性指数平均值为0.71,高于对称引水时的0.66。此外,非对称引水时,2条流道中远端泵前流速均匀性普遍更高,且针对2号泵而言,非对称引水时,因DN1000的启用,2号泵前各断面流速均匀性得到了明显的提高。图6为两种引水工况下2号和8号泵进水喇叭口附近剖面流迹线对比,可以看出,进水管喇叭口在吸入水流时均未发现有吸入涡产生,流迹线进入管道后保持垂直向上。

表3 进水池断面流速均匀性指数

泵序号	断面位置	均匀性指数	
		非对称引水	对称引水
1号	$2.5D$	0.40	0.49
	$2.0D$	0.51	0.57
	$1.5D$	0.60	0.65
2号	$2.5D$	0.84	0.67
	$2.0D$	0.85	0.70
	$1.5D$	0.89	0.75
7号	$2.5D$	0.66	0.89
	$2.0D$	0.68	0.87
	$1.5D$	0.73	0.87
8号	$2.5D$	0.81	0.41
	$2.0D$	0.81	0.48
	$1.5D$	0.80	0.59

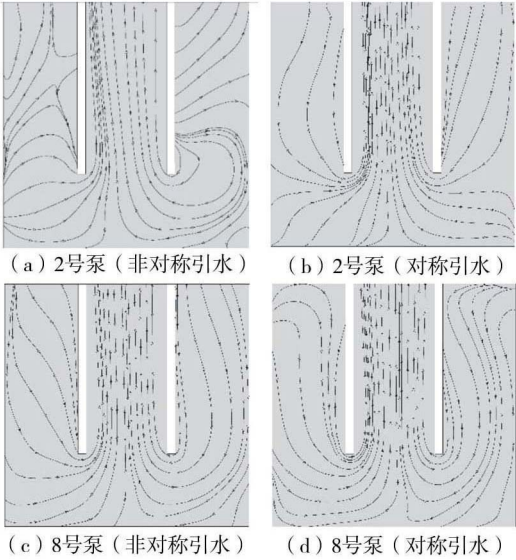


图6 进水喇叭口附近剖面流迹线

紊动动能可以反映出水流的紊动能量分布以及强弱。图 7 给出了两种引水工况下海水泵喇叭口平面(高程-4.60 m)的紊动动能分布。根据紊动动能分布可知,非对称引水时,由于 2 根引水管流速较大且距离近,2 股水流在前池壁面受阻相遇后,在前池进水区紊动特性增强,表现为该区域的紊动动能在海水泵站整个平面中达到最大,超过 $0.15\text{ m}^2/\text{s}^2$ 。与之相比,对称引水时,前池内紊动动能分布相对均匀,且数值均不大,最大约为 $0.06\text{ m}^2/\text{s}^2$ (前池 2 根引水管中部)。水流由前池进入过滤池后,非对称引水时,由于 1 号和 2 号泵所在流道内偏流较对称引水时严重,因此在过滤池内(隔墩前)紊动动能较对称引水时更大,约为 $0.12\text{ m}^2/\text{s}^2$,但 7 号和 8 号泵所在流道过滤池内最大值仅为 $0.03\text{ m}^2/\text{s}^2$,优于对称引水工况。通过过滤池进入渐扩段后,水流进一步调整发展,紊动动能逐渐减小。表 4 为两种引水工况下 4 个海水泵所在的进水池紊动动能平均值统计结果。由表 4 可见,海水泵所在进水池的紊动动能最小值出现在非对称引水时的 8 号泵,最大值出现在对称引水时的 8 号泵。非对称引水和对称引水时各进水池紊动动能总平均值分别为 $0.0083\text{ m}^2/\text{s}^2$ 和 $0.0102\text{ m}^2/\text{s}^2$ 。除 1 号泵进水池外,其余海水泵所在进水池在非对称引水时的紊动动能平均值均小于对称引水工况。结合均匀性指数及紊动动能分布可知,非对称引水时 7 号和 8 号泵所在流道非对称引水比对称引水水流分布更均匀,更有利于海水泵运行。

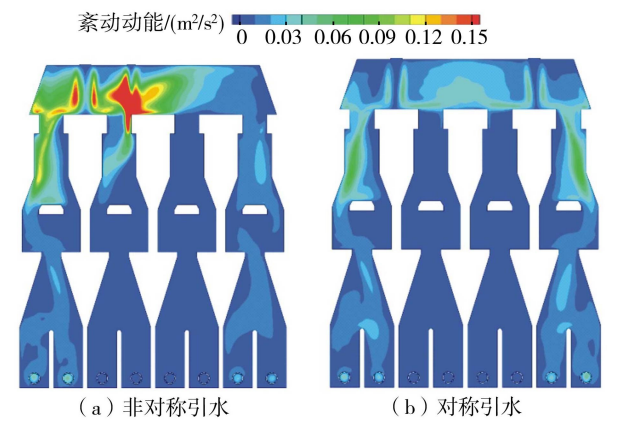


图 7 进水管喇叭口平面紊动动能分布

表 4 泵前进水池区域紊动动能平均值

引水工况	紊动动能平均值/(m^2/s^2)				
	1 号泵	2 号泵	7 号泵	8 号泵	平均
非对称引水	0.009 6	0.008 8	0.009 0	0.005 7	0.008 3
对称引水	0.008 6	0.010 2	0.010 0	0.012 1	0.010 2

4 结 论

a. 基于 OpenFOAM 软件,采用 $k-\omega$ SST 湍流模

型建立了某液化天然气接收站海水泵站流道数值模型。网格数敏感性检验表明,网格数超过 150 万后水头损失变动不超过 5%,且网格精度满足要求,选取的网格数满足网格数敏感性分析的要求。此外,各断面平均流速的统计值随计算时长变化差异较小,断面一致性指数表明流道内流动在 400 s 后达到恒定,且选取不小于 50 s 的平均流速即可表示流道内流动情况。

b. 利用实测断面流速对数值模拟结果进行了验证,结果表明各特征断面平均流速计算值与实测值相对误差不超过 8.7%,表明所建立的模型能较好地反映出各个特征断面的流速分布。

c. 海水泵站非对称引水时,水流进入前池后流速较大,在低水位下水流无法充分扩散,在流道入口处形成偏流,至海水泵前断面水流分布已基本均匀。

d. 非对称引水时各海水泵进水池断面均匀性指数平均值均高于对称引水工况;各海水泵进水池紊动动能平均值均小于对称引水工况。因此,从流速分布均匀性以及紊动动能量级来看,非对称引水对水泵运行更有利。

参考文献:

[1] 郭雅琼,马进荣,邹国良,等. 舟山 LNG 取水流道泥沙淤积试验研究 [J]. 海洋工程, 2021, 39 (2): 90-97. (GUO Yaqiong, MA Jinrong, ZOU Guoliang, et al. Sedimentation experiment on flow passage of water intake pumping station of Zhoushan LNG [J]. The Ocean Engineering, 2021, 39 (2): 90-97. (in Chinese))

[2] 仇德朋,陈景生. LNG 接收站中工艺海水泵系统分析 [J]. 水泵技术, 2022 (6): 14-18. (QIU Depeng, CHEN Jingsheng. Analysis of seawater pump system for vapourisation in LNG termina [J]. Pump Technology, 2022 (6): 14-18. (in Chinese))

[3] 张成波,唐泽润,郭佳栋,等. 基于 PIV 的泵站进水池模型速度场测量及结构优化 [J]. 中国农村水利水电, 2020 (9): 16-24. (ZHANG Chengbo, TANG Zerun, GUO Jiadong, et al. Velocity field measurement and structure optimization of pump sump model base on PIV [J]. China Rural Water and Hydropower, 2020 (9): 16-24. (in Chinese))

[4] 竺晓程,赵岩,杜朝辉. PDA 和 PIV 在旋转叶轮测量中的周向定位 [J]. 流体机械, 2003, 31 (4): 1-3. (ZHU Xiaocheng, ZHAO Yan, DU Zhaohui. Circumference orientation in the rotary flow measurement using PDA and PIV system [J]. Fluid Machinery, 2003, 31 (4): 1-3. (in Chinese))

[5] 陆林广,冷豫,吴开平,等. 泵站进水流道内部流态模型试验方法研究 [J]. 排灌机械, 2005, 23 (3): 17-19. (LU

- Linguang, LENG Yu, WU Kaiping, et al. Study on method for model test of flow pattern in suction box of pumping station[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2005, 23(3): 17-19. (in Chinese)
- [6] 刘红宇, 邱锦春. 莲湖泵站进水流道试验与分析[J]. 中国农村水利水电, 2003(9): 11-13. (LIU Hongyu, QIU Jinchun. Suction channel experimentation and analyse of Lianhu pumping station[J]. China Rural Water and Hydropower, 2003(9): 11-13. (in Chinese))
- [7] 罗海军, 张睿, 徐辉. 改善城市排水泵站进水流态的试验研究[J]. 中国农村水利水电, 2019(1): 176-179. (LUO Haijun, ZHANG Rui, XU Hui. Experimental research on the improvement in the inflow pattern of an urban drainage pumping station[J]. China Rural Water and Hydropower, 2019(1): 176-179. (in Chinese))
- [8] 徐辉, 张喆鑫, 张睿, 等. 城市雨水泵站侧向出水箱涵整流措施模型试验[J]. 水利水电科技进展, 2022, 42(2): 1-5. (XU Hui, ZHANG Zhixin, ZHANG Rui, et al. Model test on rectification measures of lateral outlet box culvert in an urban rainwater pumping station[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022, 42(2): 1-5. (in Chinese))
- [9] 张磊, 吴楠, 张倩. 基于 OpenFOAM 的离心压气机流场数值研究[J]. 电力科学与工程, 2020, 36(4): 50-58. (ZHANG Lei, WU Nan, ZHANG Qian. Numerical study on flow field of centrifugal compressor based on OpenFOAM[J]. Electric Power Science and Engineering, 2020, 36(4): 50-58. (in Chinese))
- [10] 卫志军, 申利敏, 关晖, 等. 拓扑优化技术在抑制流体晃动中的数值模拟研究[J]. 应用数学和力学, 2021, 42(1): 49-57. (WEI Zhijun, SHEN Limin, GUAN Hui, et al. Numerical simulation of topology optimization technique for tank sloshing suppression[J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2021, 42(1): 49-57. (in Chinese))
- [11] 王沛, 王坤坤, 许昌, 等. 抽水蓄能电站高地下厂房气流试验与数值模拟[J]. 水利水电科技进展, 2020, 40(1): 71-80. (WANG Pei, WANG Kunkun, XU Chang, et al. Experimental and numerical simulation of air flow in a large underground powerhouse of a pumped storage power station[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2020, 40(1): 71-80. (in Chinese))
- [12] 刘志泉, 成立, 卜舸, 等. 泵站正向进水前池“V”形导流墩整流数值模拟[J]. 中国农村水利水电, 2022(3): 183-188. (LIU Zhiquan, CHENG Li, BU Ge, et al. Numerical simulation of V-shaped diversion pier for improving the flow pattern in forward inlet forebay of the pumping station[J]. China Rural Water and Hydropower, 2022(3): 183-188. (in Chinese))
- [13] 周珊珊, 金燕, 王彬宇, 等. 弯道入流进水池流态分析与整流措施研究[J]. 水电能源科学, 2021, 39(5): 135-138. (ZHOU Shanshan, JIN Yan, WANG Binyu, et al. Study on flow pattern analysis and rectification measures of intake pool with bend inflow[J]. Water Resources and Power, 2021, 39(5): 135-138. (in Chinese))
- [14] KIM J, KIM D, CHOI H. An immersed-boundary finite-volume method for simulations of flow in complex geometries[J]. Journal of Computational Physics, 2001, 171(1): 132-150.
- [15] 陈曜辉, 徐辉, 冯建刚, 等. 断面形状对虹吸式出水流道水力特性的影响[J]. 水利水电科技进展, 2022, 42(1): 47-52. (CHEN Yaohui, XU Hui, FENG Jiangang, et al. Effect of section forms on hydraulic characteristics of a siphon outlet passage[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022, 42(1): 47-52. (in Chinese))
- [16] 罗灿, 雷帅浩, 陈锋, 等. 泵站进水池翼型导流板整流特性数值模拟[J]. 水利水电科技进展, 2021, 41(4): 53-59. (LUO Can, LEI Shuaihao, CHEN Feng, et al. Numerical simulation of rectifying characteristics of the airfoil deflectors in the sump of pumping station[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021, 41(4): 53-59. (in Chinese))
- [17] 王为术, 甄娟, 郭嘉伟, 等. 并联循环泵站前池及吸水室整流优化[J]. 排灌机械工程学报, 2023, 41(11): 1119-1126. (WANG Weishu, ZHENG Juan, GUO Jiawei, et al. Optimization of rectification for forebay and suction chamber of parallel circulation pump station[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2023, 41(11): 1119-1126. (in Chinese))
- [18] 徐波, 张从从, 夏辉, 等. 非对称式闸站结合式泵站前池流态模型试验研究[J]. 水电能源科学, 2018, 36(7): 160-162. (XU Bo, ZHANG Congcong, XIA Hui, et al. A test research on the flow condition model in forebay of pumping station for asymmetric combined sluice-pump station project[J]. Water Resources and Power, 2018, 36(7): 160-162. (in Chinese))
- [19] 赵苗苗, 贾君德, 秦景洪, 等. 闸站结合泵站前池导流墩整流模拟[J]. 中国农村水利水电, 2018(4): 125-130. (ZHAO Miaomiao, JIA Junde, QIN Jinghong, et al. Numerical simulation of division pier rectifying flow in forebay of combined sluice-pump station[J]. China Rural Water and Hydropower, 2018(4): 125-130. (in Chinese))
- [20] 温国栋, 温洪海. 非对称式闸站工程导流墩结构设计方案优化[J]. 水利技术监督, 2019(5): 254-256. (WEN Guodong, WEN Honghai. Structural design optimization of diversion pier for asymmetric gate station project[J]. Technical Supervision in Water Resources, 2019(5): 254-256. (in Chinese))

(下转第 94 页)

- (12):2258-2264. (SHENG Mingqiang, QIAN Zengzhen, YANG Wenzhi, et al. Field compression and uplift tests on micropiles in collapsible loess under completely-soaked and saturated conditions [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(12):2258-2264. (in Chinese))
- [16] 曾季才, 查元源, 杨金忠. 基于 Richards 方程切换的土壤水流及溶质运移数值模拟[J]. 水利学报, 2018, 49(7): 840-848. (ZENG Jicai, ZHA Yuanyuan, YANG Jinzhong. Numerical modeling of soil water flow and solute transport based on Richards' Equation switching [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2018, 49(7): 840-848. (in Chinese))
- [17] MUALEM Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media [J]. Water Resources Research, 1976, 12(3): 513-522.
- [18] 周桂云. 饱和-非饱和和非稳定渗流有限元分析方法的改进[J]. 水利水电科技进展, 2009, 29(1): 5-7. (ZHOU Guiyun. Improvement of finite element analysis of unstable saturated-unsaturated seepage [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2009, 29(1): 5-7. (in Chinese))
- [19] VAN GENUCHTEN M T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils [J]. Soil Science Society of America Journal, 1980, 44(5): 892-898.
- [20] 洪勇, 邵珠山, 石广斌, 等. 基于三维极限分析法的 GIM 和 SRM 边坡安全系数计算结果对比[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2022, 50(4): 112-120. (HONG Yong, SHAO Zhushan, SHI Guangbin, et al. Comparison of GIM and SRM calculated slope safety factor based on three-dimensional limit analysis method [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2022, 50(4): 112-120. (in Chinese))
- [21] 洪文岗, 王尉, 高学成. 库区水位下降对库岸边坡稳定性的影响[J]. 武汉大学学报(工学版), 2019, 52(1): 21-26. (ZHANG Wengang, WANG Wei, GAO Xuecheng. Influences of reservoirs water level drawdown on slope stability [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2019, 52(1): 21-26. (in Chinese))
- (收稿日期: 2023-05-12 编辑: 俞云利)
-
- (上接第 63 页)
- [21] 张校文, 刘超, 荣迎春, 等. 多机组泵站正向进水阵列式隔板整流模拟及试验验证[J]. 排灌机械工程学报, 2022, 40(4): 378-384. (ZHANG Xiaowen, LIU Chao, RONG Yingchun, et al. Numerical simulation and experimental verification of forward feed array diaphragm rectifier for multi-unit pumping station [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2022, 40(4): 378-384. (in Chinese))
- [22] 徐存东, 李嘉明, 王荣荣, 等. 开机组合对泵站前池水沙流场特性的影响[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2022, 50(2): 11-16. (XU Cundong, LI Jiaming, WANG Rongrong, et al. Study on the influence of the start-up combinations on the characteristics of the water-sediment flow field in forebay of pumping station [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2022, 50(2): 1-16. (in Chinese))
- [23] 冯建刚, 曹亚萍, 王晓升, 等. 深层隧道进流式泵站前池流态及整流措施研究[J]. 水利水电科技进展, 2024, 44(2): 1-6. (FENG Jiangang, CAO Yaping, WANG Xiaosheng, et al. Study on flow pattern and rectification measures in forebay of deep tunnel inflow pumping station [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2024, 44(2): 1-6. (in Chinese))
- [24] 李彦军, 颜红勤, 严登丰, 等. 非对称入流工况下钟形进水流道数值模拟试验研究[J]. 中国农村水利水电, 2008(2): 70-73. (LI Yanjun, YAN Hongqin, YAN Dengfeng, et al. Numerical simulation and experimental study on bell-shaped suction box under non-symmetric inflow conditions [J]. China Rural Water and Hydropower, 2008(2): 70-73. (in Chinese))
- [25] CHEN L F, ZANG J, HILLIS A J, et al. Numerical investigation of wave-structure interaction using OpenFOAM [J]. Ocean Engineering, 2014, 88: 91-109.
- [26] GARGIONI G T, ZDANSKI P S B, VAZ M. Heat transfer enhancement in flow past triangular turbulence promoters in closed channels [J]. Numerical Heat Transfer: Part A: Applications, 2019, 75(5): 309-326.
- [27] ISSA R I. Solution of the implicitly discretised fluid flow equations by operator-splitting [J]. Journal of Computational Physics, 1986, 62(1): 40-65.
- [28] 李坦, 靳世平, 黄素逸, 等. 流场速度分布均匀性评价指标比较与应用研究[J]. 热力发电, 2013, 42(11): 60-63. (LI Tan, JIN Shiping, HUANG Suyi, et al. Evaluation indices of flow velocity distribution uniformity: comparison and application [J]. Thermal Power Generation, 2013, 42(11): 60-63. (in Chinese))
- [29] 何春明, 尹航, 唐健, 等. 基于 SEER 数据库的老年肺癌术后患者预后模型构建与内部验证[J]. 上海交通大学学报(医学版), 2020, 40(11): 1554-1561. (HE Chunming, YIN Hang, TANG Jian, et al. Establishment and internal validation of a prognostic model for elderly patients after lung cancer surgery based on SEER [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University (Medical Science), 2020, 40(11): 1554-1561. (in Chinese))
- [30] 辜晋德. 浙江舟山 LNG 取水泵房流道水力特性试验报告[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2016. (收稿日期: 2023-04-21 编辑: 熊水斌)