

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbqk.2022.0098

翟文琳, 管光华, 朱哲立, 等. 输配水系统封闭式进水池水力响应三维仿真: 以滇中引水二期工程龙泉泵站为例[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2022, 20(5): 988-998. ZHAI W L, GUAN G H, ZHU Z L, et al. 3D simulation of closed sump for hydraulic response in water distribution system: A case study of Longquan pump station in the phase II project of the Central Yunnan Water Diversion Project[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2022, 20(5): 988-998. (in Chinese)

输配水系统封闭式进水池水力响应三维仿真

——以滇中引水二期工程龙泉泵站为例

翟文琳¹, 管光华¹, 朱哲立¹, 陈刚², 顾世祥²

(1. 武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 武汉 430072; 2. 云南省水利水电勘测设计研究院, 昆明 650021)

摘要:以滇中引水二期工程龙泉分水口泵站进水池为例, 采用 Flow-3D 软件建立封闭式进水池三维仿真模型, 选取泵站正常运行及水泵瞬时启闭等典型工况, 分析其过渡过程中进水池的水力响应特性。结果表明: 泵站按设计流量正常运行时, 进水池水位与总干渠水位相比略有降低; 水泵的瞬时启闭会导致进水池水位在短时间内出现骤降或骤升, 初步设计预留的 1.5 m 超高可以满足安全运行的水位要求; 封闭式进水池具有抑制水力过渡过程中水位波动的优势, 在最不利工况下, 池内水位骤降及骤升不会导致水泵吸上真空高度过大或前池顶穿等情况, 进水池初步设计方案可行。研究结果可为龙泉分水口泵站进水池的设计运行提供重要依据, 亦可为其他类似工程设计及运行调度提供参考。

关键词:滇中引水二期工程; 泵站进水池; 三维数值模拟; 水力响应; Flow-3D

中图分类号: TV675 文献标志码: A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



滇中引水工程^[1]一、二期衔接的关键节点是位于昆明市盘龙区的龙泉分水口, 受地形条件的制约, 两期工程之间只能通过泵站的形式衔接。目前该进水池结构采用封闭式设计, 运行过程中的水力过渡过程较为复杂, 可能出现明满流交替现象。在难以进行物模试验的情况下, 封闭式进水池内三维水力响应特性无法准确预知, 初步设计方案的可靠性和安全性有待验证。

泵站进水池的设计关系到泵站运行的可靠性, 多年来一直受到国内外研究学者的密切关注, 研究方法主要分为物模试验、流场测量和数值模拟 3 类。目前物模试验方法应用广泛^[2-5], 流场测量^[6-8]领域也出现了更多愈加精确的测量新技术, 但物模试验和流场测量两种方法的时间和经济成本较高, 且有时

会受到试验条件的限制无法应用。由于计算机技术和计算流体力学的不断发展, 数值模拟以其计算的准确性和快捷性得到广泛应用^[9]。特别是针对一些试验研究代价过高或传统方法处理起来较为复杂的流动问题, 数值模拟方法被证明非常有效^[10]。高传昌等^[11]使用 Fluent 软件, 通过对底坎、挑流坎、压水板等整流措施的模拟, 对泵站前池流态进行了改善; 张聪聪等^[12]在验证 CFX 软件数值模拟结果值得信赖的基础上, 研究了 Y 形导流墩不同几何参数对侧向进水泵站前池流态的改善程度; 施伟等^[13]运用 CFX 软件, 对泵站预沉曝气池及前池水流流态进行了优化改善; 初长虹等^[14]通过数值模拟研究分析了泵站进水口的旋涡特性及淹没深度对旋涡的影响; 刘跃飞等^[15]建立了轴流泵机组的全流道三维

收稿日期: 2022-03-18 修回日期: 2022-07-10 网络出版时间: 2022-07-15

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1430.TV.20220714.1524.004.html>

基金项目: 国家自然科学基金项目(51979202; 51439006; 51009108); 国家重点研发计划项目(2016YFC0401810)

作者简介: 翟文琳(1998—), 女, 新疆阿克苏人, 主要从事灌排自动化研究。E-mail: 2017301580299@whu.edu.cn

通信作者: 管光华(1979—), 男, 江苏阜宁人, 副教授, 硕士生导师, 主要从事灌排自动化及量水理论研究。E-mail: GGH@whu.edu.cn

模型,采用 Fluent 软件,利用动网格技术对快速闸门断流的轴流泵起动过程进行了三维数值模拟分析。本研究所采用的三维计算流体力学软件 Flow-3D 以其独特的精确液面捕捉方法,已经被更多的学者运用到了水利工程领域,并且在泵站进水池及流道^[16]、闸下消能池^[17]、短喉槽量水^[18]、无坝引水口^[19]、桥梁壅水^[20]等研究方向上得到了较好的三维流场结果。从研究内容来看,目前国内外泵站进水池的研究主要集中在开敞式进水池上,而对于封闭式进水池的研究相对较少^[9]。

以滇中引水工程二期工程龙泉分水口泵站进水池为主要研究对象,运用 Flow-3D 软件建立其 1:1 的三维模型,选取 4 种典型工况对泵站封闭式进水池过渡过程三维特性进行研究,探究过渡过程中进水池内水位、流态能否保证泵站的安全运行,为泵站进水池设计提供参考依据。

1 工程概况

滇中引水工程是解决滇中地区水资源短缺的最优方案,工程建设任务以解决城镇生活与工业供水为主,兼顾农业灌溉和河湖生态补水,沿线经过丽江市、大理州、楚雄州、昆明市、玉溪市、红河州的 35 个县(市)、区。该工程共分为一、二两期建设,分别为输水总干渠及干渠至各配水节点之间的输水工程。位于昆明市盘龙区的龙泉一级泵站属于

滇中引水工程二期骨干工程,泵站能否安全稳定运行直接影响二期工程供水系统的安全可靠性、影响市民生活和工农业生产,所以对于该泵站封闭式进水池的研究十分必要。

滇中二期工程在龙泉分水口处通过提水泵站的形式衔接,受地形条件、场地大小等限制,进水池形状设计较为特殊,其工程布置见图 1。龙泉一级提水泵站主泵房尺寸为 $87\text{ m}\times 27\text{ m}\times 19.24\text{ m}$,封闭式进水池的尺寸为 $84\text{ m}\times 6\text{ m}\times 19.233\text{ m}$,底板高程为 $1\ 889.1\text{ m}$,水泵进口轴线高程为 $1\ 893\text{ m}$ 。顺水流向共布置 8 台机组,其中:4 台机组(3 主 1 备)提水至昆明市 7 水厂,设计提水扬程 16 m ,3 台常用机组设计提水流量 $7.3\text{ m}^3/\text{s}$,装机为 $4\times 560\text{ kW}$;另外 4 台机组(3 主 1 备)提水至昆明市 1、2、4、5、6 水厂,设计提水扬程 81 m ,3 台常用机组设计提水流量 $9.2\text{ m}^3/\text{s}$,装机为 $4\times 3\ 550\text{ kW}$ 。龙泉分水口设计流量为 $16.5\text{ m}^3/\text{s}$,设计水位选用 70% 设计流量对应的闸前最低水位,为 $1\ 901.534\text{ m}$;闸前最高水位为 $1\ 906.833\text{ m}$ 。根据工程需要,龙泉分水口仅起连通总干渠与泵站进水池的作用,不需设置工作闸控制分水流量,为便于检修,仅在联通闸室中设置 1 个潜孔式检修闸,闸室尺寸为 $5\text{ m}\times 4\text{ m}$,闸底板高程为 $1\ 891.500\text{ m}$ 。龙泉一级泵站采用地下式布置形式,封闭式进水池高度由池内最高水位决定,为保证流态稳定,预留 1.5 m 的净空高度。

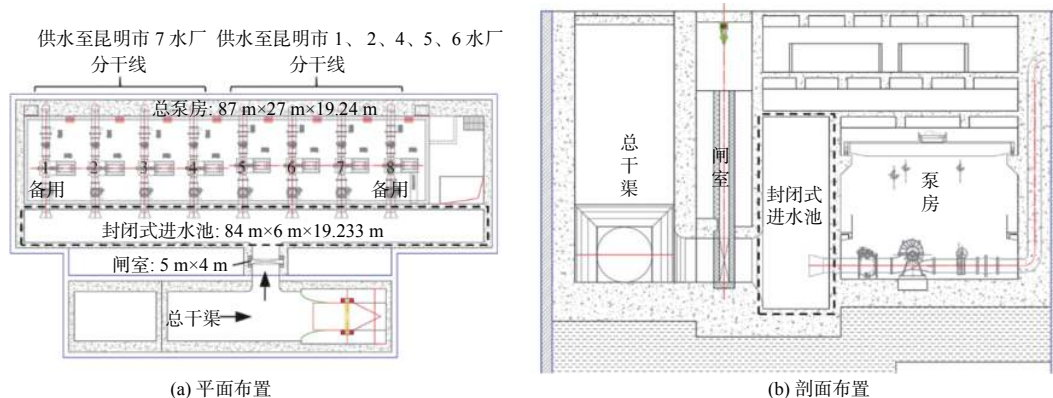


图 1 龙泉分水口工程布置

Fig. 1 Longquan water outlet project layout

目前该泵站封闭式进水池结构尺寸已经初步设计完成,根据《泵站设计规范》(GB 50265—2010),泵站进水池的设计要求为池内流态良好,满足水泵进水要求,且便于清淤和管理维护。同时泵站在某些不利工况下也会出现流量迅速变化的情况,这种流量的迅速变化会引起进水池内水位的骤降或骤

升,为了保证工程的安全运行,进水池内的水深需要有一定的限制。根据设计资料,进水池内的水深限制范围由水泵进水口安装高程与池高控制,为 $5.000\sim 19.233\text{ m}$ 。进水池内最低水深不能低于水泵的进水口(5.000 m),更不能在运行过程中出现进水池内水干的情况;进水池内最高水深不能高至池顶

(19.233 m), 使进水池顶板受压、出现明满流交替现象。

2 基于 Flow-3D 的三维仿真建模

2.1 三维建模

2.1.1 理论模型

进水池内流体运动视为不可压缩黏性流体运动, 在 Flow-3D 软件中使用 Navier-Stokes(N-S) 方程描述。Flow-3D 软件独特的 FAVOR 技术将面积分数和体积分数的影响考虑在内, 其控制方程为

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (u_i A_i) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left(u_j A_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial P}{\partial x_i} \right) + G_i + f_i \quad (2)$$

式中: $i, j = 1, 2, 3$; x_1, x_2, x_3 为 x, y, z 方向; u_1, u_2, u_3 为计算单元 x, y, z 方向的速度, m/s; A_1, A_2, A_3 为 x, y, z 方向的面积分数; V_F 为各计算单元内流体的体积分数; ρ 为流体密度, kg/m^3 ; P 为压强, N/m^2 ; G_i 为重力加速度, m/s^2 ; f_i 为黏滞力加速度, m/s^2 。

在 Flow-3D 软件中, 有多种紊流模型可供选择, 本文采用 RNG $k-\varepsilon$ 模型, 方程表达式为

$$\frac{\partial k_T}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left(u_i A_i \frac{\partial k_T}{\partial x_i} \right) = P_T + G_T + D_T - \varepsilon_T \quad (3)$$

$$\frac{\partial \varepsilon_T}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left(u_i A_i \frac{\partial \varepsilon_T}{\partial x_i} \right) = \frac{C_1 \varepsilon_T}{k_T} (P_T + C_3 G_T) + D_\varepsilon - C_2 \frac{\varepsilon_T^2}{k_T} \quad (4)$$

式中: k_T 为紊动能, m^2/s^2 ; P_T 为由平均速度梯度引起的紊动能产生项; G_T 为由浮力引起的紊动能产生项; ε_T 为紊动能耗散率, $\text{kg}\cdot\text{m}^2/\text{s}^3$; D_T, D_ε 表示紊动扩散项; C_1, C_2, C_3 均为经验常数。

2.1.2 龙泉分水口三维建模

龙泉分水口由总干渠段、闸室段、进水池段及泵站进水口 4 部分组成, 建立 1:1 等比例三维仿真模型见图 2。总干渠段模型总长为 38 m, 包括闸室段上游 20 m 及下游 10 m, 具体模型尺寸见图 3。模型糙率 n 取 0.014, 由式 (5) 计算得到 Flow-3D 软件中的 Surface Roughness 系数 k_s 为 0.002 17^[21]。

$$k_s = \left(\frac{n}{0.0389} \right)^6 \quad (5)$$

式中: k_s 为 Flow-3D 软件中的 Surface Roughness 系数; n 为糙率。

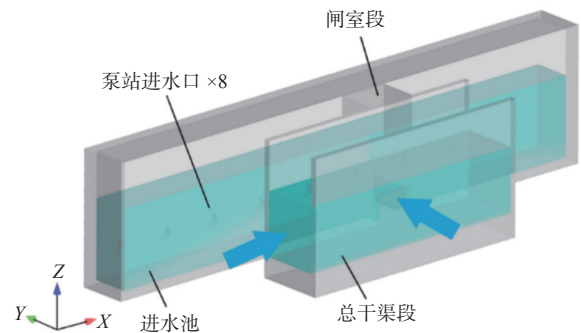
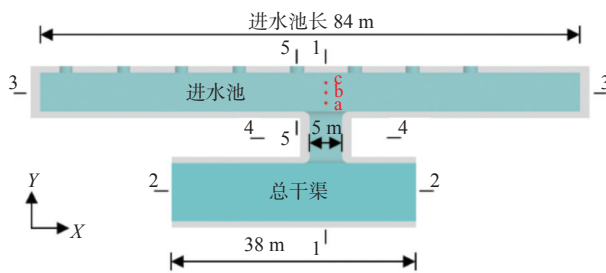
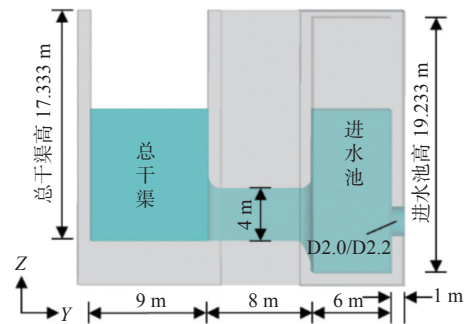


图 2 三维模型透视图
Fig. 2 3D model perspective



(a) 模型俯视图



(b) 模型剖视图

图 3 三维模型尺寸

Fig. 3 Dimension of 3D model

2.1.3 网格划分及边界条件

由于模型各部分结构及边界条件较为复杂难以使用单一网格实现模拟, 故需采用多块拼接网格 (multi-block patched gride)^[22] 对计算域进行划分。模型共设置了 11 个网格块, 各网格块彼此相连, 网格块的划分及编号见图 4。网格类型选用计算稳定性好且计算精度、效率高的正六面体结构化网格^[23],

各网格块内网格尺寸均保持一致。

Flow-3D 软件在每个网格块的 6 个方向上都可以设置边界条件, 使用对称边界(S)进行各网格块之间的连接, 边壁采用无滑移的壁面边界(W); 网格块 II 顶部自由液面设置压力为 0 的压力边界(P), 模型入口网格块 II 上下游设置固定水位的压力边界(P), 模型出口网格块③~⑩设置固定流量边界(Vfr)。

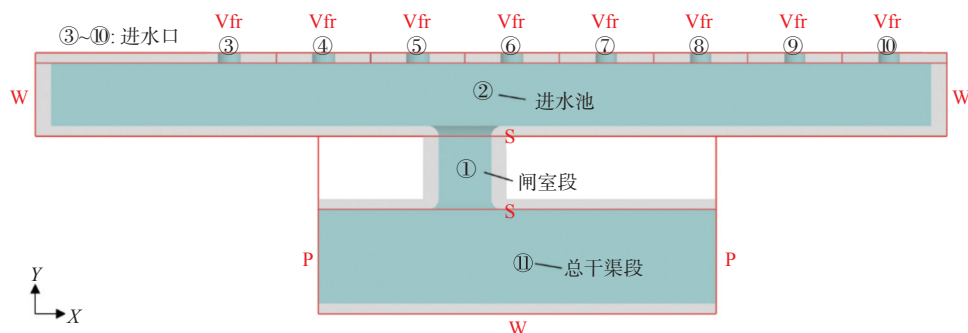


图4 网格块划分示意图

Fig. 4 Grid block partition diagram

2.2 模型验证

2.2.1 网格无关性验证

网格尺寸直接影响计算结果的精确性、稳定性及计算效率^[24]。本研究主要关注龙泉分水口进水池内的水位、流态变化,因此选择仿真稳定后的进水池水深作为评判网格划分质量的依据。由图3(a)可以看出,在模型中部、进水池内水深变化最为剧烈的1-1断面上,选取3个点分别命名为关键点a、

b、c。通过调整网格尺寸,观察稳定后各关键点水深结果及仿真时长,选取合适的网格大小。由表1可以看出,网格尺寸减小至0.20 m时,继续加密网格关键点的稳定水深相对误差变化较小,而运行所需时间呈指数递增,时间成本过大。因此,决定选用0.20 m的网格尺寸,此时仿真结果较为精确且运行时间较短。

表1 网格敏感性分析

Tab. 1 Grid sensitivity analysis table

网格尺寸/ m	总网格数/ 万个	稳定时间/ s	运行 所需时间	关键点a 稳定水深/m	与仿真4相比 变化百分数/%	关键点b 稳定水深/m	与仿真4相比 变化百分数/%	关键点c 稳定水深/m	与仿真4相比 变化百分数/%
1.00	2.8	747	4 min	12.396	0.121	12.395	0.089	12.155	2.110
0.50	22.5	746	27 min	12.397	0.113	12.395	0.089	12.406	0.089
0.20	352.0	572	12 h 27 min	12.408	0.024	12.403	0.024	12.412	0.040
0.16	689.0	944	2 d 20 h	12.411	0	12.406	0	12.417	0

2.2.2 局部水头损失系数计算

通过水力学方法,运用模型仿真数据,计算得到的水流在流入、流出闸室段时的局部水头损失系数平均值为1.014 466,与《水工隧洞设计规范》(SL 279—2016)中的规范数值1.1相比误差为7.78%。由于规范中的局部水头损失系数一般是根据模型试验确定或经验总结得出的,为经验性数值,在不同的工程中数值也会有所差别^[25]。因此,认为仿真计算出的局部水头损失系数数值较为合理,符合水力学基本原理,模型仿真结果较为可靠。

3 典型工况下进水池三维水力响应特性仿真

3.1 封闭式进水池最不利工况分析

针对龙泉一级泵站封闭式进水池,结合工程设计及运行人员的考虑,对潜在的危险事故及其影响

因素进行分析,得到当前初步设计阶段主要关注的泵站运行风险如下。

进水池内水位降至水泵安装高程以下,导致水泵进气或汽蚀,甚至出现水位骤降、进水池抽空的情况。该情况一旦发生,就会引起水泵性能急剧下降,同时伴随强烈的振动和噪声,甚至出现断流。

进水池内水位壅高至池顶,导致进水池出现有压流状态,影响进水池的流态稳定,影响泵房的结构安全,甚至导致封闭式进水池顶穿等事故。

进水池形状尺寸设计不合理,导致泵站在运行过程中池内流态紊乱,出现较为严重的旋涡和回流,降低水泵的工作效率。

其影响因素主要包括:进水池的形状和尺寸,总干渠水位及泵站运行流量的不断波动,下游用水需求较为复杂多变等。

3.2 工况设置

由于进水池具有一定的流态及水深限制 (5.000 ~ 19.233 m) 要求, 为保证工程的安全运行、验证进水池

初步设计的合理性, 综合考虑各方面因素, 共设置 4 种典型工况进行仿真计算。各工况边界条件设置见表 2。

表 2 典型工况设置

Tab. 2 Typical working conditions

仿真工况	上游边界(总干渠水位)	下游边界(水泵抽水流量)	重点关注结果	
正常运行工况	工况1	1 901.534 m	开6个泵16.50 m ³ /s	稳定后水深
	工况2	1 906.833 m	开6个泵16.50 m ³ /s	稳定后水深
最不利工况	工况3	1 901.534 m	开1个泵2.43 m ³ /s至开6个泵16.50 m ³ /s	仿真过程中最低水深
	工况4	1 906.833 m	开6个泵16.50 m ³ /s至开1个泵2.43 m ³ /s	仿真过程中最高水深

工况 1、工况 2 分别为总干渠在最低、最高运行水位下的恒定流工况, 以此研究泵站进水池在正常运行工况下的流态及总干渠与泵站进水池的水位对应关系。工况 3 和工况 4 为非恒定流最不利工况, 用来模拟工程运行过程中突然出现的流量迅速变化情况, 在仿真中通过修改流量边界来模拟 5 个水泵的瞬态启闭 (其中单泵运行状态仅开启位于进水池中部的 4 号水泵)。工况 3 设置总干渠保持恒定最低水位, 瞬间增大泵站取水流量, 研究该工况下进水池水位是否会骤降, 甚至降至水泵安装高程

以下、出现水泵吸上真空高度过大等情况。工况 4 设置总干渠保持恒定最高水位, 瞬间减小泵站取水流量, 研究该工况下进水池水位是否会骤升, 甚至壅高至池顶、导致封闭式进水池顶穿等事故。

3.3 正常运行工况流态及水深结果

工况 1 和工况 2 仿真稳定后的三维流线见图 5。由图 5 可以看出: 在正常工况下, 进水池两侧的水流流线较为平顺; 而在进水池中部, 由于总干渠水流的汇入、泵站的持续取水, 进水池中上部局部回流较为明显。

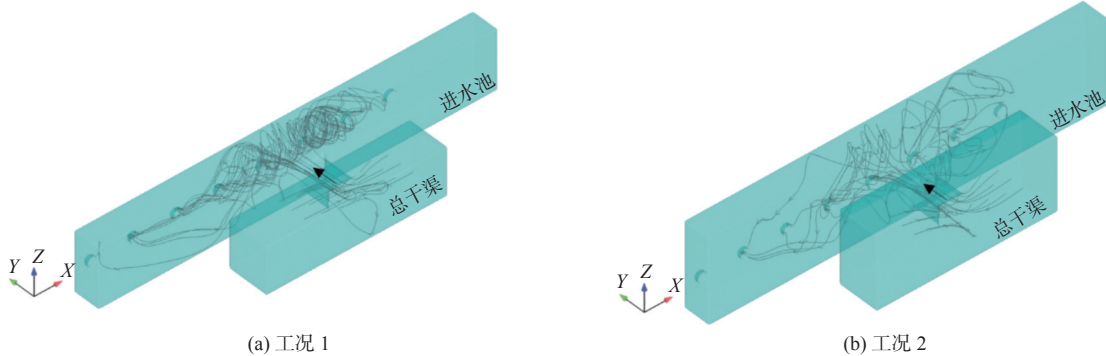


图 5 三维流线

Fig. 5 3D streamline diagram

工况 1 和工况 2 仿真稳定后的三维流速分布见图 6。为了便于观察, 将图中总干渠段隐藏, 只显示从闸室至泵站进水口这一部分的三维流速分布情

况。此外如图 3(a) 所示, 选取 3-3、5-5 和 1-1 这 3 个典型断面进行流速分析, 工况 1 和工况 2 仿真稳定后的典型断面流速分布见图 7。

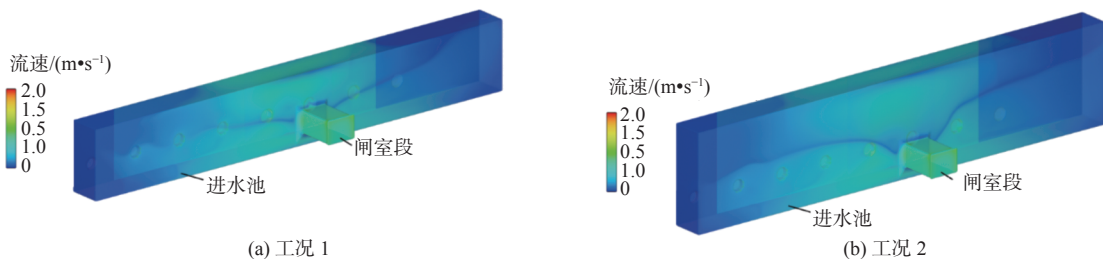


图 6 三维流速分布

Fig. 6 3D flow velocity distribution map

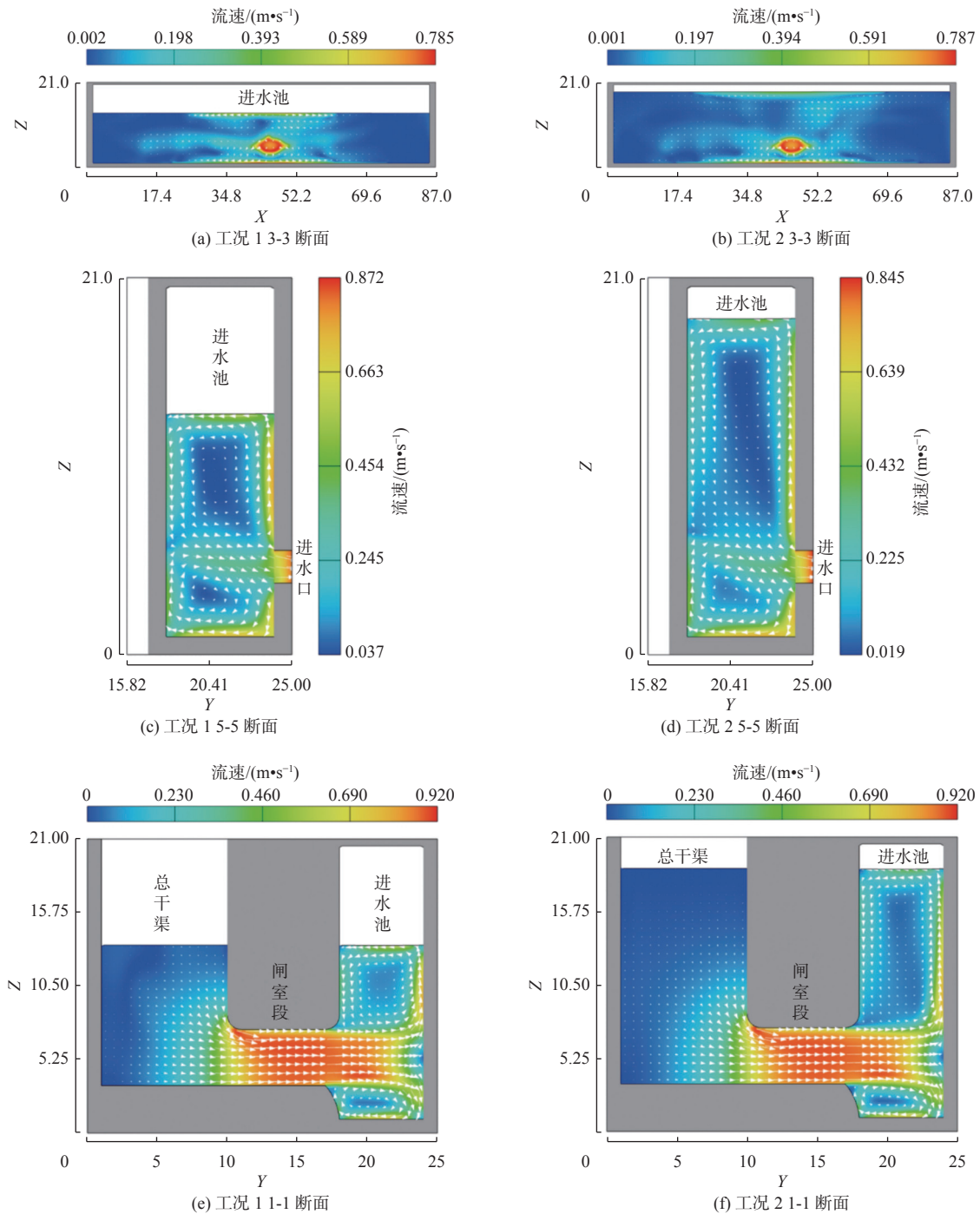


图7 典型断面流速分布

Fig. 7 Typical cross-section flow velocity distribution

从图6、图7可以看出,工况1和工况2这两种恒定流工况仿真稳定后得到的三维流速分布规律类似。整体来看,模型内水流流速较小,水流在通过闸室段和泵站进水口时流速稍大,约为0.8~0.9 m/s。在进水池内部,水流在靠近闸室段和泵站进水口的中部位置流速较大;而在进水池两侧,靠近备用水泵(未开启)的位置流速很小,有些地方流速几乎为0。

分析图7(a)、7(b)可知,在进水池中部的断面上:沿进水池长度的X方向上看,进水池左右两侧

流速分布基本对称,进水池中部流速较大而两侧流速较小,靠近闸室处由于总干渠水流的流入使流速达到最大,约为0.79 m/s;沿进水池高度的Z方向上看,进水池在中部、表面及底部的流速较大,其原因在于进水池在上、下部分别形成了回流旋涡。分析图7(c)、7(d)可知,水流在通过泵站进水口处流速较大,约为0.86 m/s;同时结合图7(e)、7(f)也可观察到进水池在上、下部分别形成了回流旋涡,且进水池内水量越少,中上部旋涡越明显。分析图7(e)、7(f)可

知,水流经闸室流入进水池时,由于跌坎的设置,进水池中下部产生了局部回流。由于断面 1-1 无泵站进水口,在靠近进水池末端流速分布呈半球形,表明水流流经此处时主要向上下流动或扩散进入两侧相邻的进水口。

工况 1 和工况 2 仿真稳定后的进水池水深分布俯视图见图 8。可以看到泵站运行过程中,由于闸室段及水泵布置的不对称性,池内水深在进水池左右两侧的分布是不对称的,但总体来看左右两侧水深差别不大。沿进水池长度的 X 方向上看,进水池

在靠近中部位置水深较大,该位置由于总干渠水流的流入,水面波动也最为剧烈。沿着水流流入的 Y 方向对进水池中部进行分析,水深在靠近闸室段及靠近水泵位置处水深较大,同时靠近水泵位置处水深稍大于靠近闸室段位置处水深,而在池中附近水深稍小。因此,从整体来看,正常工况下进水池内最低水深一般出现在进水池的两侧,而进水池内最高水深一般出现在进水池中部靠近水泵位置处,该位置的水深值得重点关注。

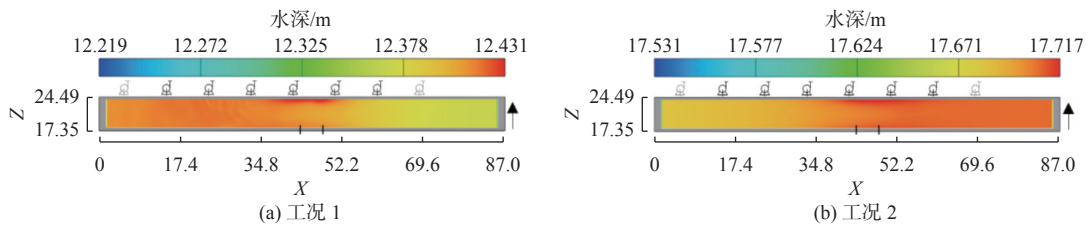


图 8 进水池水深分布俯视

Fig. 8 Top view of water depth distribution in the pump sump

针对典型工况,运用 Flow-3D 软件提取出仿真过程中各时间节点上的三维水深结果,绘制池内水

深变化过程线。工况 1 和工况 2 为恒定流工况,仿真结果见图 9。

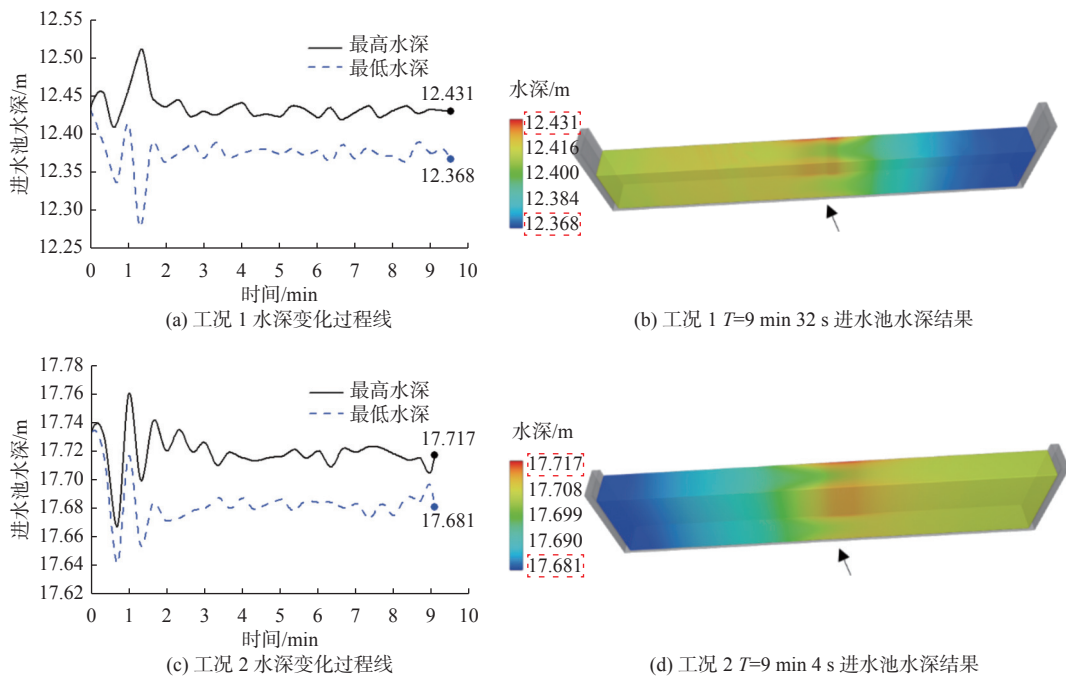


图 9 正常运行工况进水池水深结果

Fig. 9 Results of water depth of pump sump under normal operation condition

前 5 min 为仿真计算逐步收敛的过程,重点关注仿真稳定后的池内水深以及与总干渠水位的对应关系。工况 1 仿真结果见图 9(a)、9(b),仿真经过 9 min 32 s 后稳定,池内水深在 12.368 ~ 12.431 m,对应水位为 1 901.468 ~ 1 901.531 m,

比总干渠水位低 0.003 ~ 0.066 m。工况 2 仿真结果见图 9(c)、9(d),仿真经过 9 min 4 s 后稳定,池内水深在 17.681 ~ 17.717 m,对应水位为 1 906.781 ~ 1 906.817 m,比总干渠水位低 0.016 ~ 0.052 m。

针对正常运行工况 1 和工况 2,对其稳定后

三维水深结果进行分析,得到泵站按设计流量正常运行时,进水池内的水深结果及与总干渠水位的对应关系:进水池内水深为 12.368 ~ 12.431 m,池内水位较总干渠水位略低,水位差为 0.003 ~ 0.066 m。

3.4 最不利工况水力响应特性分析

工况 3 和工况 4 为最不利非恒定流工况,通过瞬时开启或关闭 5 个水泵模拟工程运行过程中的流量迅速变化情形,重点关注进水池内的水位波动过程,仿真结果见图 10。

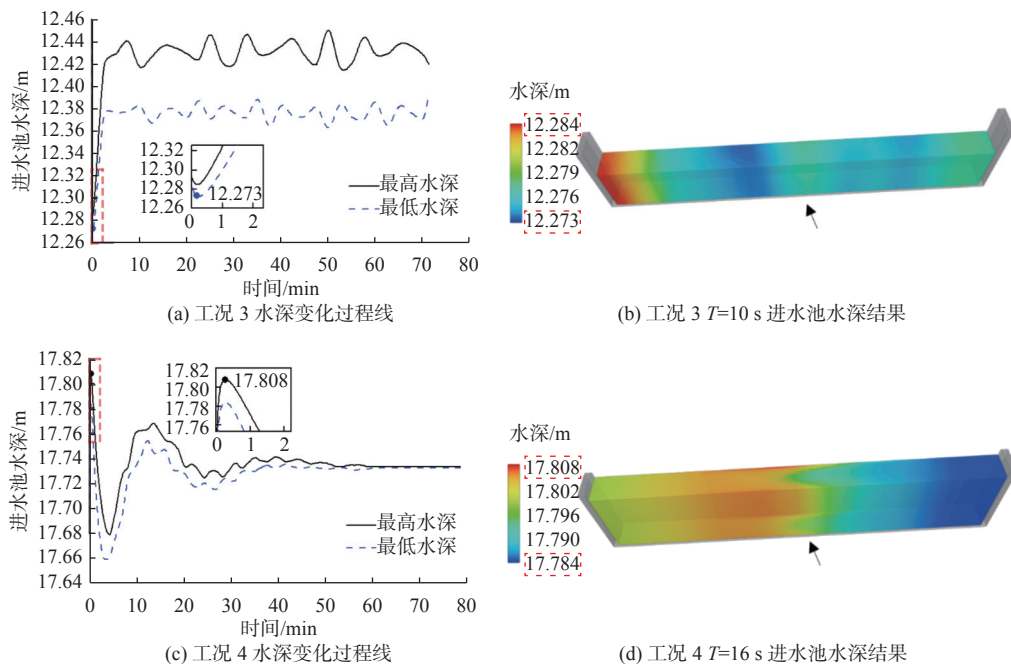


图 10 最不利工况进水池水深结果

Fig. 10 Results of water depth of pump sump in the most unfavorable conditions

工况 3 仿真结果见图 10(a)、10(b),水泵瞬间由 1 个开启至 6 个后,进水池内水深在 10 s 内骤降约 0.16 m,而后经过约 71 min 水深逐渐稳定。此工况重点关注整个仿真过程中的最低水深:出现在仿真开始后的第 10 s,为 12.273 m,对应水位为 1901.373 m,比总干渠最低水位低 0.161 m。仿真得到的进水池内最低水深为 12.273 m,仍满足泵站抽水淹没水深(5 m)的要求,可以保证水泵持续抽水,同时进水池内也没有出现水干的情况。通过分析可以得知,水泵的突然开启会造成进水池内短暂的水位下降,但当水泵的抽水能力小于渠道对进水池的供水能力时,进水池的水位波动幅度不大,故认为渠道与进水池通过无闸门的闸室相连仍可以保证进水池的供水。计算仿真过程中的水位降落速度,最大值为 10 s 内降落 0.161 m,满足 24 h 内降落不超过 0.3 m 的水位降速要求。

工况 4 仿真结果见图 10(c)、10(d),水泵瞬间由 6 个关闭至 1 个后,进水池内水深在 16 s 内骤降约 0.1 m,而后经过约 79 min 水深逐渐稳定。此工况重点关注整个仿真过程中的最高水深:出现在仿

真开始后的第 16 s,为 17.808 m,对应水位为 1906.908 m,比总干渠最高水位高 0.075 m,小于预留的净空高度(1.5 m)。仿真得到的进水池内最高水深为 17.808 m,没有到达池顶(19.233 m),不会发生进水池顶板受压、封闭式进水池顶穿的现象。计算仿真过程中的水位降落速度,最大值为 160 s 内降落 0.148 m,满足 24 h 内降落不超过 0.3 m 的水位降速要求。

针对不利工况 3 和工况 4,对其整个仿真过程的三维水深结果进行分析,结果表明:在最不利工况下,该进水池不会发生水位骤降导致水泵吸上真空高度过大或水位骤升导致进水池顶板承压等情况。因此,认为龙泉分水口衔接段封闭式进水池设计方案可行,在池内最高水位的基础上预留 1.5 m 的净空高度可以满足工程安全运行的水位要求且留有一定的水位安全裕量。同时从计算结果来看,整个进水池内水位波动很小,这是采用封闭式进水池的优势所在。在此类输配水系统中,封闭式进水池可以起到类似于调压室的作用,抑制进水池在水力过渡过程中的水位波动。

4 结论

以滇中引水二期工程龙泉分水口泵站进水池为主要研究对象,针对封闭式进水池的复杂水力响应及过渡过程问题,采用三维数值仿真的方法,研究了正常运行和最不利工况下进水池的水位及流态三维水力响应特性,得出如下结论:

泵站按设计流量正常运行时,由于渠-池之间通过闸室联通且长度不长,进水池水位与总干渠水位相比略有降低但并不显著。龙泉分水口正常运行时进水池水位较总干渠水位略低,水位差范围为0.003~0.066 m。

以滇中二期龙泉分水口为例,泵站在最不利工况下,封闭式进水池水位相对设计水位在-0.16~+0.10 m内变化,整个进水池内水位波动很小,封闭式进水池具有抑制水力过渡过程中水位波动的优势。水位骤降及骤升不会导致水泵吸上真空高度过大或封闭式前池顶穿等情况发生,故认为该封闭式进水池设计方案可行。该工程在池内最高水位的基础上预留1.5 m的净空高度可以满足安全运行的水位要求且有一定的安全裕量,此超高可供其他类似工程设计参考。

输配水系统渠-池衔接段设计时,联通闸室与泵站进水口高度设置应尽量匹配,保证水流平稳,避免旋涡、回流的出现。渠-池衔接处跌坎的设置会导致池内中下部产生局部回流,而渠池中上部出现的回流旋涡会随着水量的减少而更加明显。水流在通过闸孔和泵站进水口处流速稍大,进水池中部水深较大且波动变化明显,池内最高水深一般出现在进水池中部靠近水泵位置处。因此,此类输配水系统的设计还应保证衔接处的光滑平顺,从而控制进水池流态以满足泵站的高效运行。

本研究对于滇中引水二期工程龙泉分水口泵站进水池的设计及运行具有一定的实际工程意义,可为其他类似工程的规划设计提供一定的参考。

参考文献(References):

- [1] 刘加喜. 倾尽全力超常规推进滇中引水工程建设[J]. *水利建设与管理*, 2021, 41(8): 8-10. (LIU J X. Make every effort to push forward the construction of the Central Yunnan Water Diversion Project[J]. *Water Conservancy Construction and Management*, 2021, 41(8): 8-10. (in Chinese)) DOI: 10.16616/j.cnki.11-4446/TV.2021.08.03.
- [2] 杲东彦, 陆林广. 泵站水泵蜗形进水池的试验研究[J]. *水力发电学报*, 2006, 25(6): 145-148. (GAO D Y, LU L G. Experimental investigation on volute intake sump of pumping stations[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2006, 25(6): 145-148. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1003-1243.2006.06.023.
- [3] 郭佳栋. 基于PIV模型试验及数值模拟的泵站进水池流态优化[D]. 武汉: 武汉大学, 2019. (GUO J D. The flow pattern optimization of pumps tation intake sump based on PIV experiment and numerical simulation[D]. Wuhan: Wuhan University, 2019. (in Chinese))
- [4] 罗灿, 钱均, 刘超, 等. 非对称式闸站结合式泵站前池导流墩整流模拟及试验验证[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(7): 100-108. (LUO C, QIAN J, LIU C, et al. Numerical simulation and test verification on diversion pier rectifying flow in forebay of pumping station for asymmetric combined sluice-pump station project[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(7): 100-108. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1002-6819.2015.07.015.
- [5] 张雪, 周济人, 梁金栋, 等. 侧向进水泵站前池流态试验研究[J]. *南水北调与水利科技*, 2016, 14(3): 101-105. (ZHANG X, ZHOU J R, LIANG J D, et al. Experimental research on flow pattern of forebay of side-inlet pumping station[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2016, 14(3): 101-105. (in Chinese)) DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2016.03.018.
- [6] 陈钊, 郭永彩, 高潮. 三维PIV原理及其实现方法[J]. *实验流体力学*, 2006, 20(4): 77-82, 105. (CHEN Z, GUO Y C, GAO C. Principle and technology of three-dimensional PIV[J]. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, 2006, 20(4): 77-82, 105. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1672-9897.2006.04.015.
- [7] 盛森芝, 徐月亭, 袁辉靖. 近十年来流动测量技术的新发展[J]. *力学与实践*, 2002, 24(5): 1-14. (SHENG S Z, XU Y T, YUAN H J. New development in the technology of flow measurement over the last decade[J]. *Mechanics in Engineering*, 2002, 24(5): 1-14. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-0879.2002.05.001.
- [8] 张波涛, 李永, 李小明, 等. 应用PIV技术测量封闭式水泵吸水池内部流场[J]. *水泵技术*, 2001(6): 7-10, 37. (ZHANG B T, LI Y, LI X M, et al. Measurement of internal flow field in a closed model water-pump intake sump using PIV technology[J]. *Pump Technology*, 2001(6): 7-10, 37. (in Chinese))
- [9] 王逸行. 封闭式进水池几何参数水力优化CFD研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2016. (WANG Y X. Hydraulic optimization of geometric parameters on closed sump by CFD method[J]. Yangzhou: Yangzhou University, 2016. (in Chinese))
- [10] 梁雪杰. 泵站复杂进水池的数值模拟分析和研

- 究[D]. 上海: 上海大学, 2009. (LIANG X J. Numerical simulation analysis and research on complex intake system of pumping station[D]. Shanghai: Shanghai University, 2009. (in Chinese))
- [11] 高传昌, 刘新阳, 石礼文, 等. 泵站前池与进水池整流方案数值模拟[J]. 水力发电学报, 2011, 30(2): 54-59. (GAO C C, LIU X Y, SHI L W, et al. Numerical simulation of flow pattern modification schemes for the forebay and suction sump of pumping station[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2011, 30(2): 54-59. (in Chinese))
- [12] 张聪聪, 周春峰, 周艳霞, 等. “Y”形导流墩几何参数对侧向进水泵站前池流态影响[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2020, 18(3): 192-200. (ZHANG C C, ZHOU C F, ZHOU Y X, et al. Analysis of geometric parameters of Y-shaped diversion piers on flow pattern in the forebay of the side-intake pump station[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2020, 18(3): 192-200. (in Chinese)) DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2020.0064.
- [13] 施伟, 成立. 水源区取水泵站水流流态数值模拟与改善[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2020, 18(2): 159-176. (SHI W, CHENG L. Numerical simulation and improvement of flow pattern of water intake pumping station in water source area[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2020, 18(2): 159-176. (in Chinese)) DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2020.0039.
- [14] 初长虹, 刘超, 孙玉民, 等. 泵站进水口淹没深度对漩涡的影响[J]. 南水北调与水利科技, 2019, 17(6): 178-186. (CHU C H, LIU C, SUN Y M, et al. The influence of submerged depth of pump station inlet on vortex[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2019, 17(6): 178-186. (in Chinese)) DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2019.0149.
- [15] 刘跃飞, 周大庆, 郑源, 等. 快速闸门断流的轴流泵起动过程三维数值模拟[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(1): 167-172. (LIU Y F, ZHOU D Q, ZHENG Y, et al. Numerical simulation of starting process of axial flow pump with quick-stop gate[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2017, 15(1): 167-172. (in Chinese)) DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2017.01.028.
- [16] 韩晓维, 刘云, 孟金波, 等. 基于流道进流指标分析的大型泵站进水池优化调度研究[J]. 中国农村水利水电, 2019(2): 177-181, 186. (HAN X W, LIU Y, MENG J B, et al. Research on the optimal operation of large pump station based on inlet condition index[J]. China Rural Water and Hydropower, 2019(2): 177-181, 186. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1007-2284.2019.02.037.
- [17] 王月华, 包中进, 王斌. 基于Flow-3D软件的消能池三维水流数值模拟[J]. 武汉大学学报(工学版), 2012, 45(4): 454-457, 476. (WANG Y H, BAO Z J, WANG B. Three-dimensional numerical simulation of flow in stilling basin based on Flow-3D[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2012, 45(4): 454-457, 476. (in Chinese))
- [18] 肖苡辘, 王文娥, 胡笑涛. 基于Flow-3D的田间便携式短喉槽水力性能数值模拟[J]. 农业工程学报, 2016, 32(3): 55-61. (XIAO Y Z, WANG W E, HU X T. Numerical simulation of hydraulic performance for portable short-throat flume in field based on Flow-3D[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(3): 55-61. (in Chinese)) DOI: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.03.009.
- [19] 田守霞. 无坝渠首侧向引水的三维水力特性研究[D]. 天津: 天津大学, 2010. (TIAN S X. Three-dimensional hydraulic characteristics of lateral diversion of canal head without dam[J]. Tianjin: Tianjin University, 2010. (in Chinese))
- [20] 蒋卫威, 鱼京善, 陈寅生, 等. 基于Flow-3D的梅溪洪澜段桥梁雍水三维数值模拟[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2021, 19(4): 776-785. (JIANG W W, YU J S, CHEN Y S, et al. Numerical simulation of Meixi River bridge backwater based on 3D hydrodynamic model Flow-3D in Honglai Town[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2021, 19(4): 776-785. (in Chinese)) DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2021.0081.
- [21] YEN B C. Channel flow resistance: Centennial of Manning's formula[M]. Water Resources Publication, 1992.
- [22] 周天孝, 白文. CFD多块网格生成新进展[J]. 力学进展, 1999, 29(3): 344-368. (ZHOU T X, BAI W. Recent progress in multi-block grid generation[J]. Advances in Mechanics, 1999, 29(3): 344-368. (in Chinese)) DOI: 10.6052/1000-0992-1999-3-J1998-088.
- [23] 阎超, 于剑, 徐晶磊, 等. CFD模拟方法的发展成就与展望[J]. 力学进展, 2011, 41(5): 562-589. (YAN C, YU J, XU J L, et al. On the achievements and prospects for the methods of computational fluid dynamics[J]. Advances in Mechanics, 2011, 41(5): 562-589. (in Chinese)) DOI: 10.6052/1000-0992-2011-5-lxjzJ2010-082.
- [24] 冯静安, 唐小琦, 王卫兵, 等. 基于网格无关性与时间独立性的数值模拟可靠性的验证方法[J]. 石河子大学学报(自然科学版), 2017, 35(1): 52-56. (FENG J A, TANG X Q, WANG W B, et al. Reliability verification method of numerical simulation based on grid independence and time independence[J]. Journal of Shihezi University (Natural Science), 2017, 35(1): 52-56. (in Chinese)) DOI: 10.13880/j.cnki.65-1174/n.2017.01.009.
- [25] 陈朝. 常见管道局部水头损失的数值模拟[D]. 天津: 天津大学, 2008. (CHEN C. The numerical simulation of local head losses in common pipes[D]. Tianjin: Tianjin University, 2008. (in Chinese))

3D simulation of closed sump for hydraulic response in water distribution system: A case study of Longquan pump station in the phase II project of the Central Yunnan Water Diversion Project

ZHAI Wenlin¹, GUAN Guanghua¹, ZHU Zheli¹, CHEN Gang², GU Shixiang²

(1. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. Yunnan Institute of Water & Hydropower Engineering Investigation, Design and Research, Kunming 650021, China)

Abstract: Flow patterns in the closed sump can be very complicated. A sudden start-up or shut-down procedure will drain or flood the closed sump. Longquan pump station belongs to the phase II project of the Central Yunnan Water Diversion Project. The safety and stability of the pumping station operation directly affect the water supply system of the phase II project and further affect the public life and industrial and agricultural production in Kunming. Therefore, it is of great significance to study the closed sump of the pumping station.

A three-dimensional (3D) simulation model of closed sump was established by computational fluid dynamics software (Flow-3D) to simulate and analyze the typical hydraulic response of Longquan closed sump. During operation of a pump station, the water level in the closed sump should be within the limit of 5 ~ 19.233 m with a stable flow pattern. To ensure the safe operation of the project and verify the rationality of the preliminary design of the closed sump, it is necessary to set up typical working conditions for simulation considering various factors. Four typical working conditions were chosen for analysis, including the sudden start-up and shut-down of the extreme working conditions of the pump. The focus was on whether the sudden drop of water level leads to excessive suction vacuum lift of the pump or whether the sudden surge of water level leads to the top penetration of the closed pump.

The simulation results showed that the water level of the closed sump is slightly lower than that of the main canal under design conditions, and the water level difference ranged between 0.003 m to 0.066 m. Under the most unfavorable working conditions, sudden start-up and shut-down of the pump caused the water level to deviate -0.16 ~ +0.10 m according to the designed level. In the water distribution system, the design of the channel-sump connection section affected the flow pattern in the closed sump and the operation efficiency of the pump station. The height setting of the connecting gate chamber and the pump sump must be matched as far as possible to ensure a smooth connection.

Based on the analysis following conclusions are made: (1) Because the channel-sump is connected by a short gate chamber, the water level of the closed sump is slightly lower than that of the main channel under design conditions. (2) A sudden start-up and shut-down of the pump caused the water level of the closed sump to drop or surge sharply in a short time. To ensure the super-elevation of closed sump meet the design requirements, the influence of the sudden start-up and shut-down of the pump must be considered in the design. A 1.5 m super-elevation reserved in the preliminary design could meet the requirements of safe operation, which could be used as a reference for other similar engineering designs. (3) In a water distribution system, the closed sump could be used as a surge chamber, which might suppress the water level fluctuation during the hydraulic transition process. Under the most unfavorable working conditions, the sudden drop and surge of the water level could not lead to excessive suction vacuum lift of the pump or the top penetration of the closed pump. Therefore, the preliminary design scheme of this closed sump is feasible. Results of this research can provide technical support for the design and operation of this project, and also provide references for the design and operation scheduling of other similar projects.

Key words: The Central Yunnan Water Diversion Project; pump sump; 3D numerical simulation; hydraulic response; Flow-3D