

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbtdqk.2020.0103

车晓红,张帝,成立. 立式混流泵站进出水流道水力优化[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2020, 18(5):144-150. CHE X H, ZHANG D, CHENG L. Hydraulic optimization of inlet and outlet passages of vertical mixed flow pumping station[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2020, 18(5):144-150. (in Chinese)

# 立式混流泵站进出水流道水力优化

车晓红<sup>1</sup>, 张帝<sup>2</sup>, 成立<sup>2</sup>

(1. 扬州广播电视大学 邗江分校, 江苏 扬州 225009; 2. 扬州大学 水利科学与工程学院, 江苏 扬州 225009)

**摘要:**为得到某大型混流泵站进出水流道最优设计方案,基于CFX软件,对进出水流道内水流流态进行数值模拟研究。以泵站进出水流道初步设计方案为基础,对流道型线进行优化研究:通过调整进水流道断面参数,得出进水流道优化方案;通过改变虹吸式出水流道上升角与下降角,得到水力损失最小的出水流道型式。最终结果表明:当进水流道流速和流道长度、断面面积和流道长度的关系曲线光滑无突变时,流道内无不良流态,符合优化设计要求;当出水流道上升角为22°下降角为29°时,泵站出水流道流速分布较为均匀、水力损失最小。由此得出所选泵站最优设计方案。所得结果对大中型泵站的流道优化有指导作用。

**关键词:**进水流道;出水流道;数值模拟;水力优化;泵装置

中图分类号:TV131 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标志码(OSID):



## Hydraulic optimization of inlet and outlet passages of vertical mixed flow pumping station

CHE Xiaohong<sup>1</sup>, ZHANG Di<sup>2</sup>, CHENG Li<sup>2</sup>

(1. Hanjiang Branch of Yangzhou Radio and Television University, Yangzhou 225009, China;

2. College of Hydraulic Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China)

**Abstract:** In order to obtain the optimal design scheme of the inlet and outlet passages of a large vertical mixed flow pumping station, the numerical simulation of the flow pattern in the inlet and outlet passages is carried out using the CFX software. Based on the preliminary design scheme of the inlet and outlet passages of the pumping station, the inlet passage optimization scheme is obtained by adjusting the section parameters of the inlet passage. The optimum design scheme is determined by changing the rising and falling angles of the siphon outlet passages. The final results show that: when the relationship between the inlet passage flow velocity and the length of the passage, the section area and the length of the passage is smooth and there is no sudden change, indicating that it meets the optimization design requirements, likewise, the rising angle of the outlet passage is 22 degrees and the falling angle is 29 degrees, respectively, the velocity distribution of the outlet passage is more uniform and the hydraulic loss is the smallest. The results obtained can be used to guide the passage optimization of large and medium-sized pumping stations.

**Key words:** inlet passage; outlet passage; numerical simulation; hydraulic optimization; pump device

收稿日期:2019-09-22 修回日期:2020-03-12 网络出版时间:2020-04-13

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1430.TV.20200413.1230.008.html>

基金项目:国家自然科学基金(51779214);江苏省第五期“333高层次人才培养工程”(BRA2018382);江苏省水利科技项目(2018035)

作者简介:车晓红(1971—),女,江苏扬州人,副教授,主要从事机电一体化研究。E-mail:574340975@qq.com

通信作者:成立(1975—),男,江苏盐城人,教授,博士,主要从事泵站工程研究。E-mail:chengli@yzu.edu.cn

进水流道和出水流道都是水泵装置重要的组成部分。泵站进水流道为了将前池的水流逐步加速,转变流向后依旧能平顺进入叶轮室。进水流道内的水流状态直接决定了水泵吸入条件,来流能量利用率直接影响着整个泵装置的水力效率。出水流道衔接导叶体和出水池使水流转向有序、扩散平缓。在要求条件下尽量回收动能,出水流道内的流态及动能回收情况决定了出水流道水力损失,对装置性能有较大影响<sup>[1-4]</sup>。进水流态和出水流态的好坏直接影响水泵装置的性能,严重时甚至导致水泵不能运行,因此,对进出水流道内的流态研究尤为重要。目前对流道水力性能的研究主要通过数值模拟技术以及模型试验方法。陆林广等<sup>[5-7]</sup>结合数值模拟方法,对大型泵站不同形式进出水流道水力性能进行对比研究,实现流道优化水力设计。Zhu 等<sup>[8]</sup>搭建了双向流道泵装置模型试验台,分析双向流道装置内水流流态及流动特性,通过多方案比较,提出改善流态的措施;流道形状的细微改变直接影响混流泵的流量及内部流态,从而影响混流泵的水力性能、汽蚀性能及运行稳定性。Bing 等<sup>[9]</sup>通过试验研究流道的变化对混流泵性能的影响,有利于混流泵流道的优化设计。Zhang 等<sup>[10]</sup>通过试验与数模相结合手段,验证数模的准确性,对低比转速混流泵不同流量下整个流道内压力脉动作出了分析。王福军等<sup>[11-14]</sup>总结了泵站内部流动分析方法,对水泵数值模拟计算中湍流模型选取及网格划分作出研究。张德胜等<sup>[15-17]</sup>通过试验与数模结合方式,分析轴流泵内部压力脉动情况,指出转速及流量大小对脉动幅值的影响关系。杨帆等<sup>[18-21]</sup>对不同工况下水泵进出水流道内流脉动及流动噪声作出测试,分析流道内流态及压力脉动变化规律。目前对肘形进水流道的研究

主要通过结合 CFD 分析不同设计参数对流态的影响及机理研究<sup>[22-24]</sup>等,虹吸式出水流道主要研究内容包括流道内流机理分析<sup>[25-26]</sup>、流道参数设计<sup>[27-29]</sup>、虹吸形成过程<sup>[30-31]</sup>等。

前人研究发现,对于泵站而言,水泵的水力性能与泵装置的水力性能存在较大的差异,主要由于泵装置内除水泵以外还包含进水流道与出水流道。进水流道和出水流道的水力性能对泵装置整体效率有重要影响,对进出水流道进行优化研究可在原流道的基础上减小水力损失,调整流道内水流流态,优化水泵进流与出流条件,提高泵装置整体效率。因此,对包含有进出水流道在内泵装置的水力性能研究十分必要。本文以某混流泵站泵装置为研究对象,通过数值模拟方法对泵装置内部三维湍流流动优化研究,分析不同方案下进出水流道水力损失及流态情况,确定影响水力损失和流态的主要因素。对水泵进出水流道进行了初步的性能预测,将不同进出水流道方案进行组合,确保了装置性能最优。研究结果对大中型泵站的流道优化有指导作用。

## 1 数值模拟及研究方案

### 1.1 计算模型及控制参数

计算模型采用肘形进水流道和虹吸式出水流道模型,计算区域包括进水延伸段、肘形进水流道、虹吸式出水流道、出水延伸段等 4 个部分,实体造型见图 1。针对肘形进水流道和虹吸式出水流道开展研究,进水流道喉部高度为  $H_k$ ,进水流道转弯处内外圆弧半径为  $R_1$ 、 $R_2$ 。进出水流道设计参数见图 2。控制虹吸式出水流道的主要参数有:上升段倾角  $\alpha$ 、驼峰断面高  $H_2$ 、下降段倾角  $\beta$ 、出口断面宽  $B_3$  等。

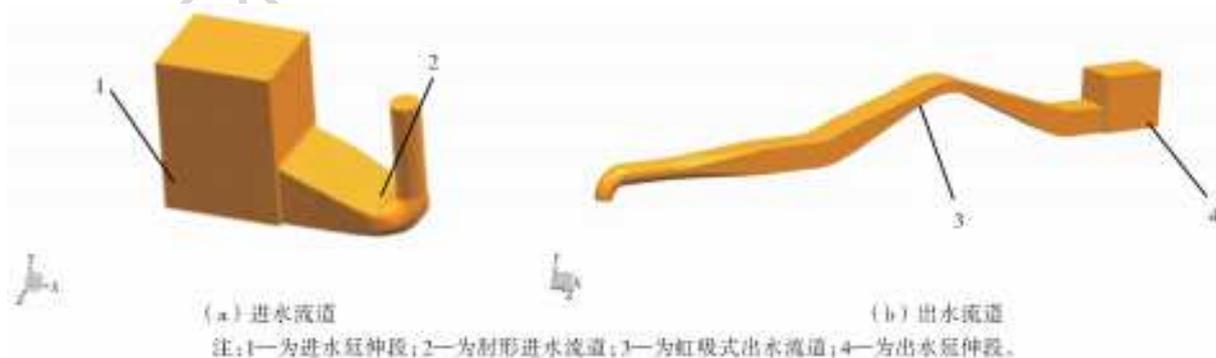


图 1 进出水流道三维实体图

Fig. 1 3D view of inlet and outlet passages

### 1.2 数值计算方法及边界条件

描述混流泵装置内的不可压缩流体的湍流流动采用三维雷诺时均 N-S 方程。湍流模型采

用 RNG  $k-\epsilon$  模型,考虑到了湍流旋涡,有效改善了精度。动静交界面采用冻结转子(Frozen Stator)模型,从而保证交界面的连续性。运用商用

软件 Ansys CFX 数值计算求解器,用有限体积法来求解,计算格式设置为高阶迎风,收敛精度设为  $10^{-5}$ 。

对肘形流道、虹吸式出水流道采用四面体网格计算,网格划分是 CFD 计算前的必要步骤,网格划分的质量直接影响计算结果的准确性。进出水流道网格划分见图 3。计算时进口条件设置为流量进口,出口条件设置为压力出流,水面采用刚盖假定设

置为 symmetry。在近壁区采用标准壁面函数法处理,并且规定在固体边壁处没有滑移条件。水力损失是评测流道水力性能的主要依据,在此选其作为判断数值模拟满足网格无关性的参考标准,基于网格无关性分析图 4 可知,当肘形进水流道网格数量为 2 086 936,虹吸式出水流道网格数量为 4 423 541 时,水力损失计算值相对误差小于 2%,基本稳定,可认为满足网格无关性要求。

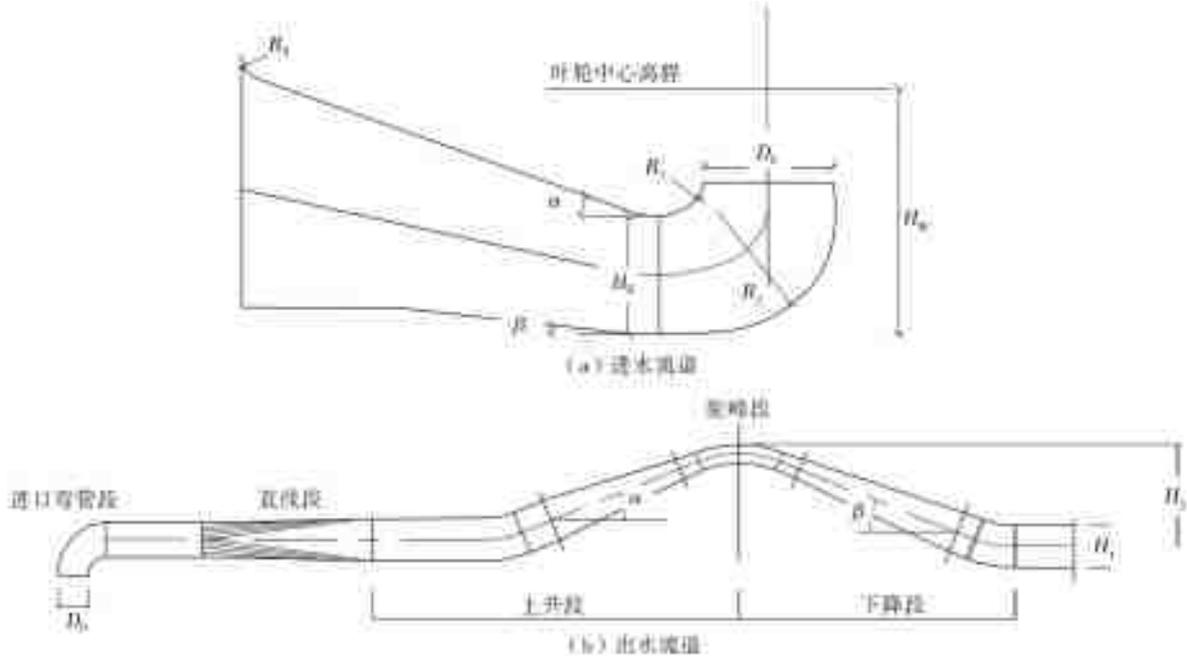


图 2 进出水流道设计参数

Fig. 2 Design parameters of inlet and outlet passage



图 3 进出水流道计算网格示意图

Fig. 3 Schematic grid for calculation of inlet and outlet passages

### 1.3 研究方案

#### 1.3.1 肘形进水流道研究方案

限定进水流道的剖面轮廓线,在此基础上考虑肘形进水流道设计的参考控制参数<sup>[1,32]</sup>,绘制平面轮廓图和平面展开图,改变调整剖面轮廓图初步设计 3 个方案  $J_{S1}$  至  $J_{S3}$ 。对方案进行数值模拟计算。进水流道几何参数见表 1。

#### 1.3.2 虹吸式出水流道研究方案

限制规定了虹吸式出水流道驼峰顶部和底部的

高程以及出口中心高程保持不变,在此基础上考虑虹吸式出水流道设计的参考控制参数<sup>[1,32]</sup>,通过控制出水流道下降段倾角不变,改变上升段倾角,以及控制上升段倾角不变,改变下降段倾角。初步设计方案  $C_{S1}$  至  $C_{S3}$  (上升段倾角  $\alpha$  分别为  $18^\circ$ 、 $22^\circ$ 、 $26^\circ$ ,下降段倾角  $\beta$  均为  $22^\circ$ )。取方案  $C_{S2}$  的上升段倾角角度  $22^\circ$ ,改变下降段倾角得到方案  $C_{S4}$ 、 $C_{S5}$  (上升段倾角  $\alpha$  为  $22^\circ$ ,下降段倾角  $\beta$  分别为  $29^\circ$ 、 $32^\circ$ ),并对  $C_{S4}$ 、 $C_{S5}$  进行数值计算。出水流道各方案设计参数见表 2。

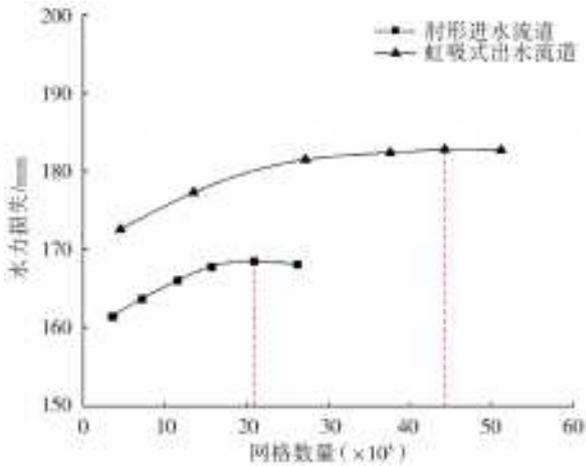


图4 进出水流道网格无关性分析

Fig. 4 Grid independence analysis of inlet and outlet passages

表1 进水流道参数

Tab. 1 Inlet passage parameters

几何参数	$H_k/D_0$	$R_1/D_0$	$R_2/D_0$	$H_w/D_0$
设计方案	0.92	0.50	0.40	1.72
规范取值	0.8~1.0	0.5~0.7	0.35~0.45	1.6~1.8

注: $D_0$ 为进水流道出口直径。

表2 出水流道参数

Tab. 2 Outlet passage parameters

设计参数	$\alpha/^\circ$	$\beta/^\circ$	$H_2/D_0$	$B_3/D_0$
方案 $C_{S1}$	18	22	0.73	1.63
方案 $C_{S2}$	22	22	0.73	1.63
方案 $C_{S3}$	26	22	0.73	1.63
方案 $C_{S4}$	22	29	0.73	1.63
方案 $C_{S5}$	22	32	0.73	1.63

注: $D_0$ 为出水弯管出口直径。

## 2 结果与分析

### 2.1 肘形进水流道性能分析

#### 2.1.1 肘形进水流道流态分析

图5为不同方案下流速和流道长度、断面面积和流道长度的关系曲线。由图5可知,方案  $J_{S2}$  和  $J_{S3}$  的曲线光滑平顺度明显高于方案  $J_{S1}$ ,说明优化后的方案  $J_{S3}$  进水流道尺寸参数满足设计要求。再对比方案  $J_{S1}$  至  $J_{S3}$  的流线图(图6),3个方案的肘形进水流道内流线均较为平顺,未发现不良流态,进水流道弯曲段流线集中在内侧处。对比进水流道的压力云图(图7)可知,不同方案下,压力均沿着剖面中心线方向递减,靠近流道进口处压力变化较慢,流道肘形曲率变化较大的压力变化较快,进水流道弯曲段下边缘出现压力突变区,且方案  $J_{S1}$  进水流道内压力较其他方案偏大。

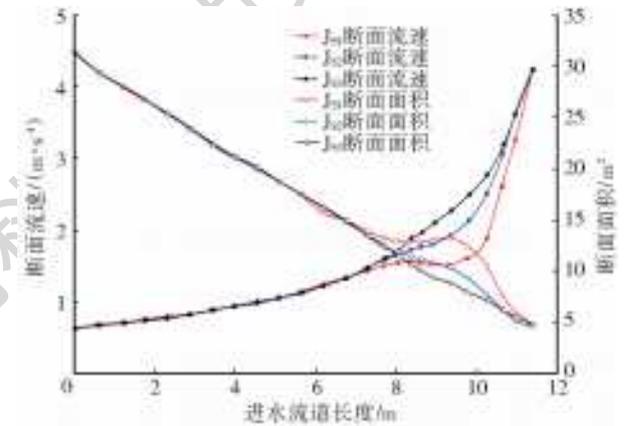


图5 进水流道断面平均流速及断面面积变化曲线

Fig. 5 Variation curves of average velocity and cross-section area of inlet passage

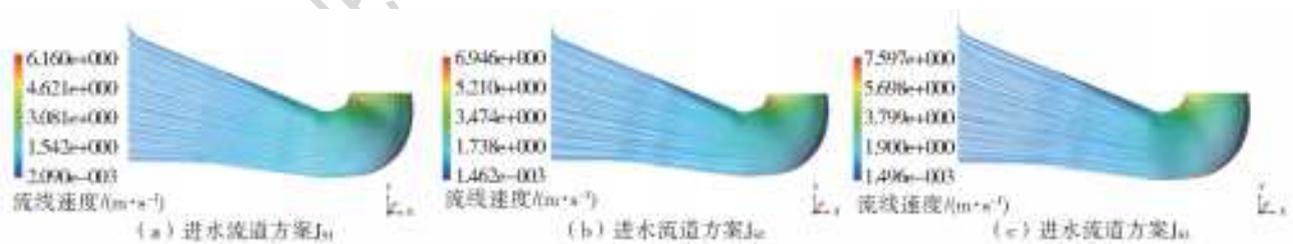


图6 进水流道不同方案流线图

Fig. 6 Streamlines of different intake passage schemes

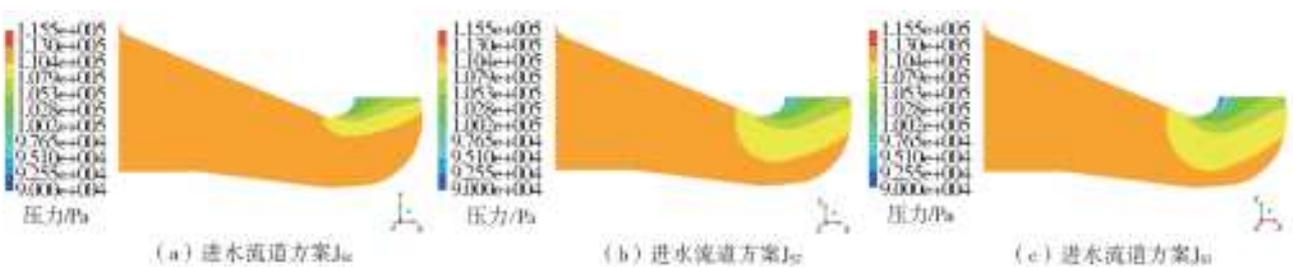


图7 进水流道不同方案压力云图

Fig. 7 Pressure nephogram of different inlet passage schemes

### 2.1.2 肘形进水水道水力损失分析

分析进水水道流线图(图 6)可知,在进口段,水流在顺水流方向都均匀收缩和加速。经过弯曲段后通过锥管收缩调整后水流较为均匀地流向叶轮室进口,根据流场计算结果,方案  $J_{S1}$  进水水道出口的流速分布均匀度为 91.71%,出口断面速度加权平均角为  $88.45^\circ$ ;方案  $J_{S2}$  进水水道出口的流速分布均匀度为 90.02%,出口断面速度加权平均角为  $88.87^\circ$ ;方案  $J_{S3}$  进水水道出口的流速分布均匀度为 89.95%,出口断面速度加权平均角为  $89.84^\circ$ 。在设计流量条件下进水水道各方案水力损失分别为 16.07、16.31、12.4 cm。由计算结果可知:进水水道出口断面流速均匀度相差不大,进入叶轮室的水流流态平顺;此外,通过优化,方案  $J_{S3}$  流态更优,能量的损耗减少,水道的水力损失减小。

### 2.2 虹吸式出水水道性能分析

#### 2.2.1 上升、下降角虹吸式出水水道流态分析

为了解上升角与下降角的改变对出水水道性能的影响,对 5 个出水水道方案进行 CFD 计算分析。由计算可知:虹吸式出水水道内整体流态较为平顺,

未产生明显脱流。各方案上升段较为平顺,分析看出上升段设计倾角较为合理。

进一步分析了流量为  $20 \text{ m}^3/\text{s}$  时  $C_{S2}$ 、 $C_{S4}$ 、 $C_{S5}$  3 个方案出水水道中心纵断面的速度云图(见图 8)。由图 8 可知,3 个方案分布规律相似,均在弯管段流速较大并在直管段得到较好扩散,驼峰段对虹吸式出水水道水力性能具有重要影响。由图 9(a)对比可知,3 个方案在驼峰段流速较为均匀,其中  $C_{S4}$  在驼峰段具有相同流速的范围更广。图 9(b)表明,随着  $C_{S2}$ 、 $C_{S4}$ 、 $C_{S5}$  下降角逐步增大,对比下降段流速云图发现  $C_{S4}$ 、 $C_{S5}$  底部存在低速区, $C_{S2}$  在此处扩散更为均匀。为了更加全面的分析出水水道内部的流态,选取了 6 个特征断面(1-1 至 6-6),分别分析流量为  $20 \text{ m}^3/\text{s}$  时出水水道特征断面  $C_{S2}$ 、 $C_{S4}$ 、 $C_{S5}$  3 个方案速度云图(见图 10)。特征断面分别取靠近进口弯管段、圆变方段、直线段、上升段,驼峰以及下降段分别取 1 个断面。分析各方案驼峰断面流速云图发现,在弯管段各方案流速存在明显分层,未得到扩散。方案  $C_{S4}$  在 4-4 断面顶部存在较大流速,扩散不充分,而在下降段断面 6-6 中,方案  $C_{S2}$ 、 $C_{S5}$  流速分布不均,其中方案  $C_{S5}$  较为紊乱。

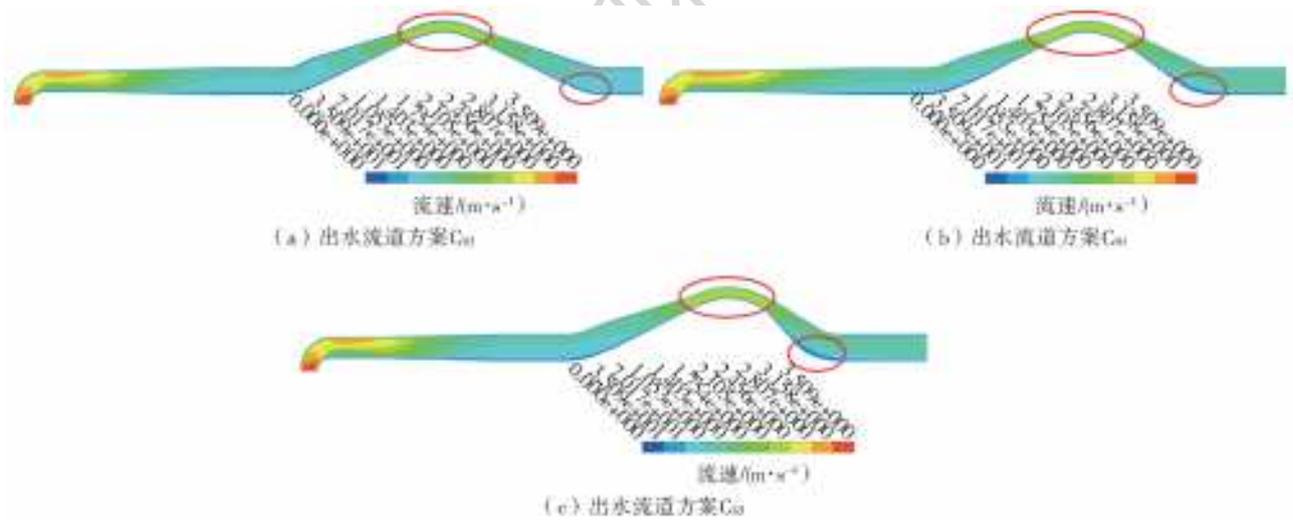


图 8 出水水道不同方案速度云图

Fig. 8 Velocity contour of different outlet passage schemes

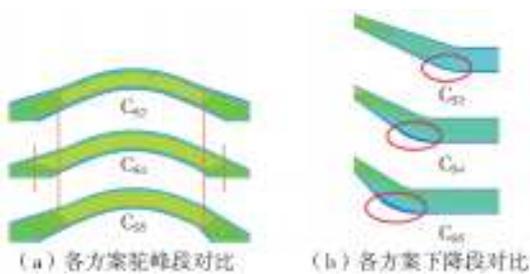


图 9 不同方案速度云图细节对比

Fig. 9 Detailed comparison of velocity contour for different schemes

#### 2.2.2 上升、下降角虹吸式出水水道水力损失分析

在分析各出水水道方案内流态的基础上,进一步分析设计流量条件下出水水道各方案的计算水力性能,方案  $C_{S1}$  至  $C_{S5}$  水力损失分别为 18.0、17.8、31.0、16.6、19.0 cm。对 5 种出水水道的方案比较,方案  $C_{S4}$  水力损失最小。

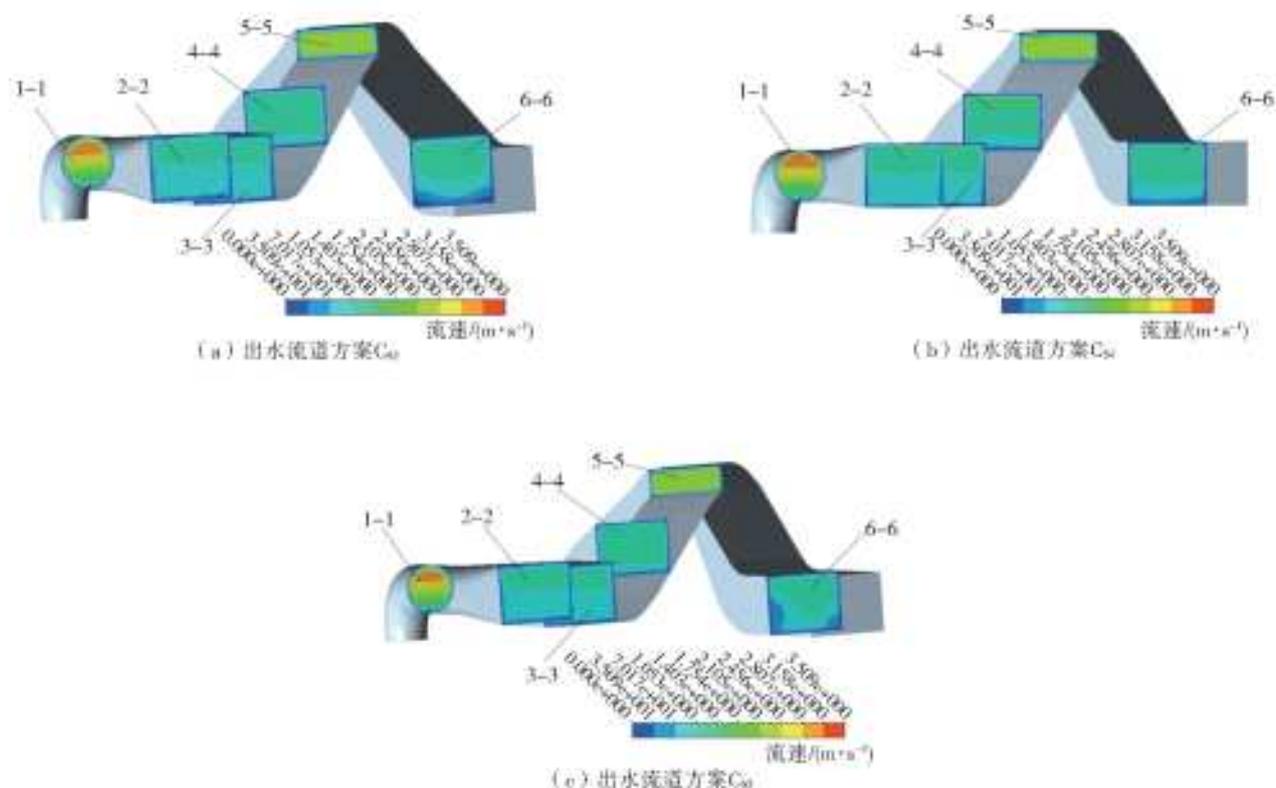


图 10 出水通道不同方案特征断面速度云图

Fig. 10 Velocity contour of characteristic sections of different outlet passage schemes

### 3 结论

(1)以某泵站为例,采用 CFD 技术对泵站进出水流道内流场进行三维数值模拟,揭示了立式轴流泵站肘形进水流道及虹吸式出水流道内水流的基本流动形态。通过对不同流道方案进行计算对比,确定了进水流道和出水流道的最优方案。

(2)肘形进水流道在剖面轮廓线确定的情况下,其流态及水力损失主要受到流道断面变化的影响,特别是弯肘处断面过渡变化,流道断面不均匀变化会加大流道损失,降低机组运行效率。虹吸式出水流道在流道的主要控制尺寸满足条件并且不变的条件下,其内部的流态及流道的水力损失受上升段与下降段倾角的影响。

#### 参考文献:

- [1] 刘超. 水泵及水泵站[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2009.
- [2] 陆林广. 高性能大型低扬程泵装置优化水力设计[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2013.
- [3] 成立,刘超,颜红勤,等. 泵站水流运动特性及水力性能[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2016.
- [4] 成立,刘超,周济人,等. 低扬程灌排泵装置进出水流道研究进展及展望[J]. 灌溉排水学报, 2008(1): 112-

114. DOI:10. 13522/j. cnki. ggps. 2008. 01. 009.
- [5] 陆林广, 杲东彦, 祝婕. 大型泵站虹吸式出水流道优化水力设计[J]. 农业机械学报, 2005(4): 60-63, 68. DOI: 10. 3969/j. issn. 1000-1298. 2005. 04. 016.
- [6] 陆林广, 杲东彦. 大型泵站斜式出水流道优化水力设计[J]. 农业机械学报, 2002(6): 60-63. DOI: 10. 3969/j. issn. 1000-1298. 2002. 06. 018.
- [7] 陆林广, 刘荣华, 梁金栋, 等. 虹吸式出水流道与直管式出水流道的比较[J]. 南水北调与水利科技, 2009, 7(1): 91-94. DOI: 10. 13476/j. cnki. nsbdqk. 2009. 01. 018.
- [8] ZHU J M, ZENG F C. Experimental study on two-way flow passages in pumping system[J]. Journal of Mechanical Science & Technology, 2008, 22(10): 1966-1970. DOI: 10. 1007/s12206-008-0740-y.
- [9] BING H, CAO S L. Experimental study of the influence of flow passage subtle variation on mixed-flow pump performance[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2014, 27(3): 615-621. DOI: 10. 3901/CJME. 2014. 03. 615.
- [10] ZHANG W W, ZHU B S, YU Z Y, et al. Numerical study of pressure fluctuation in the whole flow passage of a low specific speed mixed-flow pump[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2017, 9(5): 168781401770765. DOI: 10. 1177/1687814017707651.
- [11] 王福军, 唐学林, 陈鑫, 等. 泵站内部流动分析方法研

- 究进展[J]. 水利学报, 2018, 49(1): 47-61, 71. DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.20170887.
- [12] 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. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.02.001.
- [13] 谢丽华, 王福军, 何成连, 等. 15 度斜式轴流泵装置水动力特性实验研究[J]. 水利学报, 2019, 50(7): 798-805. DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.20190124.
- [14] 资丹, 王福军, 陶然, 等. 边界层网格尺度对泵站流场计算结果影响研究[J]. 水利学报, 2016, 47(2): 139-149. DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.20150495.
- [15] 张德胜, 耿琳琳, 施卫东, 等. 轴流泵水力模型压力脉动和振动特性试验[J]. 农业机械学报, 2015, 46(6): 66-72. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2015.06.010.
- [16] 张德胜, 王海宇, 施卫东, 等. 轴流泵多工况压力脉动特性试验[J]. 农业机械学报, 2014, 45(11): 139-145. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2014.11.022.
- [17] 张德胜, 施卫东, 王川, 等. 斜流泵叶轮和导叶叶片数对压力脉动的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2012, 30(2): 167-170. DOI: 10.3969/j.issn.1674-8530.2012.02.009.
- [18] YANG F, LIU C. Pressure pulsations of the blade region in S-shaped shaft-extension tubular pumping system[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2014, 2014(3): 105-124. DOI: 10.1155/2014/820135.
- [19] 杨帆, 高慧, 刘超, 等. 轴流泵装置出水道内流脉动与流动噪声试验分析[J]. 农业机械学报, 2018, 49(3): 144-149, 165. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.03.017.
- [20] 杨帆, 赵浩儒, 刘超, 等. 立式轴流泵装置进水道出口流态与脉动试验分析[J]. 农业机械学报, 2017, 48(12): 141-146, 113. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.12.016.
- [21] 杨帆, 刘超, 汤方平, 等. 基于全流道模拟的泵装置出水道水力特性分析[J]. 农业机械学报, 2014, 45(3): 83-89. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2014.03.015.
- [22] 张驰, 李彦军, 蒋红樱, 等. 肘形进水流道水力优化仿真计算与试验[J]. 排灌机械工程学报, 2016, 34(10): 860-866. DOI: 10.3969/j.issn.1674-8530.15.0254.
- [23] 陈晓强, 郑源, 曹婷, 等. 出口段长度及弯肘段半径对肘形进水流道水力特性的影响[J]. 水电能源科学, 2013, 31(12): 217-220.
- [24] 施伟, 李彦军, 邓东升, 等. 肘形进水流道优化设计与数值计算[J]. 流体机械, 2009, 37(12): 19-22, 26. DOI: 10.3969/j.issn.1005-0329.2009.12.005.
- [25] 杨帆, 刘超, 孙丹丹, 等. 轴流泵装置虹吸式出水道内流机理数值分析[J]. 农业机械学报, 2015, 46(6): 60-65, 91. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2015.06.009.
- [26] 雍成林, 汤正军, 朱红耕, 等. 虹吸式出水贯流泵装置结构特点及对比试验研究[J]. 南水北调与水利科技, 2014, 12(5): 36-40. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2014.05.009.
- [27] 张雪. 泵站虹吸式出水道参数化设计[D]. 扬州: 扬州大学, 2017.
- [28] 王芃也, 刘超, 徐磊, 等. 基于全模拟的水泵装置模型虹吸出水道水力特性分析[J]. 南水北调与水利科技, 2016, 14(6): 128-134. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2016.06.022.
- [29] 谭淋露, 冯建刚, 陈毓陵, 等. 泵站虹吸式出水管数值模拟及水力优化[J]. 中国农村水利水电, 2014(3): 126-129, 133. DOI: 10.3969/j.issn.1007-2284.2014.03.036.
- [30] 李海峰, 何明辉, 潘再兵. 虹吸式出水道虹吸形成过程数值模拟[J]. 排灌机械工程学报, 2015, 33(11): 932-939. DOI: 10.3969/j.issn.1674-8530.15.0084.
- [31] 刘梅清, 杨文容, 徐叶琴. 带虹吸式出水道轴流泵站起动力过渡过程研究[J]. 武汉大学学报(工学版), 2003(1): 1-4. DOI: 10.3969/j.issn.1671-8844.2003.01.001.
- [32] GB 50265—2010 泵站设计规范[S].