

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbtdqk.2019.0025

严天序,刘超,查智力,等.立式泵肘形进水流道喉部高度对性能的影响[J].南水北调与水利科技,2019,17(1):186-192. YAN T X, LIU C, ZHA Z L, et al. Influence of height of throat section of elbow inlet channel on performance of vertical pump system [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2019, 17(1): 186-192. (in Chinese)

# 立式泵肘形进水流道喉部高度对性能的影响

严天序,刘超,查智力,黄佳卫

(扬州大学水利与能源动力工程学院,江苏扬州 225009)

**摘要:**为保证水流进入弯道时的流态良好,肘形进水流道进口段末端断面的高度通常较小,被称为“喉部”。基于CFD数值模拟进行方案设计和建模计算,对进水流道喉部断面的高度定量分析,对各方案的内部流态和泵系统性能进行研究。结果表明:喉部高度大的方案进入弯道的流速慢,水力损失小,但流速变化快,分布不均匀;高度小的方案进入弯道流速快,水力损失大,但流速变化慢,流道出口流速均匀性好;文中喉部高度的最优方案为0.8倍叶轮直径,此方案的泵系统效率在340 L/s达到79.08%。

**关键词:**肘形进水流道;喉部高度;数值模拟;内部流态;泵系统

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



## Influence of height of throat section of elbow inlet channel on performance of vertical pump system

YAN Tianxu, LIU Chao, ZHA Zhili, HUANG Jiawei

(College of Hydraulic & Power Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China)

**Abstract:** In order to ensure a good flow pattern when the water flows into the curve, the end cross-section of the inlet of the elbow inlet flow channel usually has a small height, and is called "the throat". Based on CFD numerical simulation, we carried out scheme design and modeling calculation, conducted quantitative analysis on the height of the throat section of the flow channel, and studied the internal flow state and pump system performance in each scheme. The results showed that: the scheme with a large throat height had a slow flow velocity at the curve and small hydraulic loss, but the flow velocity changed rapidly with uneven distribution. The small height scheme had a fast flow velocity and large hydraulic loss, but the flow velocity changed slowly, with high uniformity at the outlet. The optimal solution for the throat height in the study was 0.8 times the impeller diameter. The pump system efficiency of this scheme reached 79.08% at 340 L/s.

**Key words:** elbow inlet flow channel; height of throat section; numerical simulation; internal flow state; pump system

进水流道是泵系统中重要的组成部分,其主要作用是:为水泵进口提供良好的流态,保证水泵机组

稳定高效的运行。进水流态的变化必然引起泵系统中水泵工作状态的变化,进水流态不良不仅会增加

收稿日期:2018-08-18 修回日期:2018-11-26 网络出版时间:2018-12-03

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20181130.1120.006.html>

基金项目:国家自然科学基金项目(51279173);江苏省水利科技项目(2017031);南四湖至东平湖段泵站运行性能测试与技术开发(DDYXB(YW)-2018002)

作者简介:严天序(1993—),男,江苏扬州人,主要从事泵站工程理论方面研究。E-mail:st.yan@foxmail.com

通信作者:刘超(1950—),男,江苏盐城人,教授,博士生导师,主要从事泵站工程理论方面研究。E-mail:liuchao@yzu.edu.cn

泵内水力损失,降低水力效率,而且还会降低泵的空蚀性能。因此,进水流道的水力设计将直接影响到水泵和泵系统的工作性能。

在大型泵站中,肘形进水流道应用早,水力性能好,是一种常见的应用形式。传统的进水流道水力设计采用的是一维水力设计方法,即平均流速法,以沿流道断面中心线的各断面平均流速均匀变化为目标<sup>[1]</sup>。一维水力设计方法的缺点是只考虑了平均流速的变化,而忽略了流道内的流速分布。陆林广等<sup>[2]</sup>提出进水流道水力设计优化问题的目标函数,即流速分布均匀度和速度加权平均角度,为判别流道水力设计的优劣提供了新的依据。成立等<sup>[3]</sup>改进并引入了质量加权的流速均匀度目标函数,提出水力损失最小目标函数。刘超等<sup>[4]</sup>考虑到断面单元面积大小不等,提出应以断面流量为基础用单元面积为权重进行加权计算。

肘形进水流道一般分为进口段、弯管段和出口段三部分。为了改善弯管段的流态,减少因水体流

动方向改变而产生的旋涡,进口段末端的流道断面高度往往较小,所以被称为肘形进水流道的喉部<sup>[5]</sup>。陆林广等<sup>[6]</sup>经试验发现在流道高度一定的情况下,流道喉部高度越大肘形流道水力损失越小。张弛<sup>[7]</sup>运用仿真计算并试验验证了喉部断面的面积减小,不仅导致此处流速增大,而且导致该段及其附近的流速分布不均匀。

本文着重研究喉部高度变化导致的进水流道内部流态的改变,探究水力损失以及泵系统内外性能的变化规律,以期对肘形进水流道的设计有所帮助。

## 1 进水流道方案设计

本文主要研究肘形进水流道喉部断面的高度对于泵系统性能的影响,并具体分析影响的原因。肘形进水流道示意图如图1,图1(a)中喉部断面到流道出口的横向长度为 $L_a$ ,纵向长度为 $L_b$ ,图1(b)喉部断面的形状为矩形,宽度为 $B_t$ ,高度为 $H_t$ 。

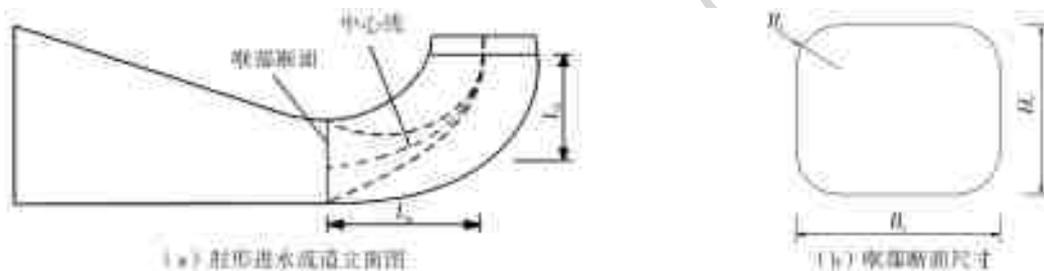


图1 肘形进水流道示意图(单位:mm)

Fig. 1 Schematic diagram of elbow inlet flow channel (unit:mm)

在保证进水流道总长度、进口断面尺寸和流道出口高度不变情况下,设置了三种方案,为方便控制喉部断面参数,参数由与叶轮直径 $D$ 的相对值来表示。为定量分析喉部断面高度,方案的喉部断面均设计为矩形断面,流道弯管段的中心线为椭圆曲线,其方程为

$$\begin{cases} x=L_b \cos\theta \\ z=L_a \sin\theta \end{cases} \quad (1)$$

方案1的喉部断面高度设置为 $1.0D$ ,方案2设置为 $0.8D$ ,方案3设置为 $0.5D$ ,进口段底部倾角都为 $0^\circ$ ,顶部倾角相应地变化;各方案的弯道相对高度都为 $0.67$ 。方案示意图见表1。

表1 方案示意图  
Tab. 1 Schemes diagram

方案	$H_t/D$	$B_t/D$	$L_b/L_a$
1	1.0	2.5	0.67
2	0.8	2.5	0.67
3	0.5	2.5	0.67

## 2 数值模拟

### 2.1 模型参数及几何建模

泵系统模型从前到后依次分为前池、进水流道、叶轮、导叶、弯管段和出水流道等6个部分。进水流道是在MatLab R2014b中设计建模,导入UG 10.0修改,进水流道末端与叶轮连接处设置导水锥。选择直径为 $300\text{ mm}$ ,轮毂比为 $0.4$ ,叶顶间隙为 $0.1\text{ mm}$ ,叶片安放角为 $0^\circ$ 的高效轴流泵叶轮模型,叶轮有4片叶片,额定转速为 $1\ 450\text{ r/min}$ ,所匹配的导叶模型有7个叶片。弯管段的断面形状为圆形,前部扩散角为 $7^\circ$ ,直径由 $310\text{ mm}$ 扩散为 $350\text{ mm}$ ,后部转弯 $85^\circ$ ,转弯半径取出口断面直径的两倍,即 $700\text{ mm}$ 。出水流道断面由直径 $350\text{ mm}$ 的圆渐变为宽 $750\text{ mm}$ 高 $550\text{ mm}$ 的矩形,长度取四倍叶轮直径。为保证进水流道进口的流态,在进水流道之前设置了前池,长度为叶轮直径的三倍。泵系统模型见图2。

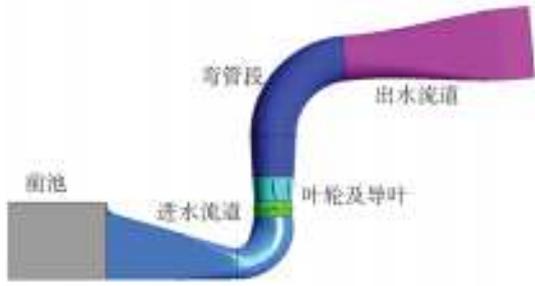


图 2 泵系统模型示意  
Fig. 2 Pump system model

## 2.2 网格划分

本文用结构化网格划分泵系统模型各部分。叶轮及导叶网格采用 Turobo Grid 进行建模和网格划分，叶轮为 H/J/L-Grid 拓扑结构，导叶网格为

ATM automatic 拓扑结构；其他过水部件均采用 ANSYS-ICEM CFD 软件划分网格，保证网格的最小内角大于  $20^\circ$ ，网格质量大于 0.7，满足计算要求。为了进行网格无关性验证，保证收敛精度（计算残差为  $10^{-4}$ ），经计算发现，当进水管道网格总数大于 100 万后，计算结果趋于稳定，不随网格数量增加而改变，即满足网格无关性要求，本文中取进水管道网格数在 100 万左右。各方案的出水部件相同，其网格划分见图 3(a)，网格总数 1 289 615，叶轮网格数 363 680，导叶网格数 1 019 179（见图 3(b)），方案 1 进水管道网格数为 1 298 762（见图 3(c)），方案 2 进水管道网格数为 1 141 065 [见图 3(d)]，方案 3 网格数为 1 424 026（见图 3(e)），网格数满足计算精度要求。



图 3 模型网格划分  
Fig. 3 Model meshing

## 2.3 边界条件

在对计算域求解时，本文基于 N-S 方程，采用标准  $k-\epsilon$  紊流模型。进口采用质量流进口边界条件；出口采用平均静压出口边界条件，设为一个标准大气压 (1 atm)；旋转叶轮部件与固定导叶及进水管道之间采用动静交界面 Stage 条件，液体一壁面之间采用无滑移固壁条件。

## 3 进水管道特性分析

### 3.1 叶轮进口流速分布

进水管道出口与水泵叶轮进口衔接处速度分布易受周期性影响<sup>[10]</sup>，为方便分析，取管道出口下方  $0.1D$  处的断面进行研究。

设计工况下 (340 L/s) 该断面相对轴向流速 ( $v_z/\bar{v}_a$ ) 分布见图 4。显然，各方案从管道断面的内侧到外侧流速梯度由高到低分布。方案 3（见图

4(c)）的高速区更小，流速分布最均匀，方案 1（见图 4(a)）和方案 2（见图 4(b)）分布差别不大，三个方案都在导流锥内侧存在低速区，方案 1 的低速区最大。

叶轮进口断面轴向流速均匀度  $V_{su}$  和速度加权平均角  $\theta_s$  可以反映叶轮进口流速分布情况，是评判进水管道水力特性的重要指标。考虑到断面单元面积大小不等，引入面积加权流速均匀度，其数值越大，表明断面流速分布越均匀。同时，进水部件出口的入流角度会影响水泵的能量性能和汽蚀性能，引入叶轮进口断面速度加权平均角  $\theta$  来衡量入流方向性的优劣。速度加权平均角  $\theta$  越大，入流方向性越好。计算公式为

$$V_{su} = 1 - \frac{1}{v_a} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (v_{ai} - \bar{v}_a)^2 \Delta A_i}{A}} \quad (2)$$

$$\theta_s = \frac{\sum v_{ai} [90^\circ - \arctan \frac{v_{ti}}{v_{ai}}]}{\sum v_{ai}} \quad (3)$$

式中: $V_{su}$ 为叶轮进口断面流速均匀度; $\theta_s$ 为叶轮进口断面速度加权平均角; $\bar{v}_a$ 为叶轮进口断面平均轴向速度, $\bar{v}_a=Q/A$ ;Q为流量;A为叶轮进口断面面积; $v_{ai}$ 为叶轮进口第*i*个网格单元的轴向速度; $v_{hi}$ 为叶轮进口第*i*个网格单元的横向速度; $\Delta A_i$ 为叶轮进口第*i*个网格单元的面积;A为叶轮进口断面面积。

如图5为三种方案在各工况下轴向流速均匀度变化曲线,设计工况下方案1流道出口轴向流速均

匀度为86.95%,此时的速度加权平均角为76.39°;方案2流道出口轴向流速均匀度为87.22%,此时的速度加权平均角为77.93°;方案3流道出口轴向流速均匀度为89.45%,此时的速度加权平均角为79.88°。流道出口均匀度规律表现为:喉部高度越小,其进水流道出口流态越均匀;流量对流速均匀度的影响较小,在非设计工况下各工况的流速均匀度都基本保持平稳。

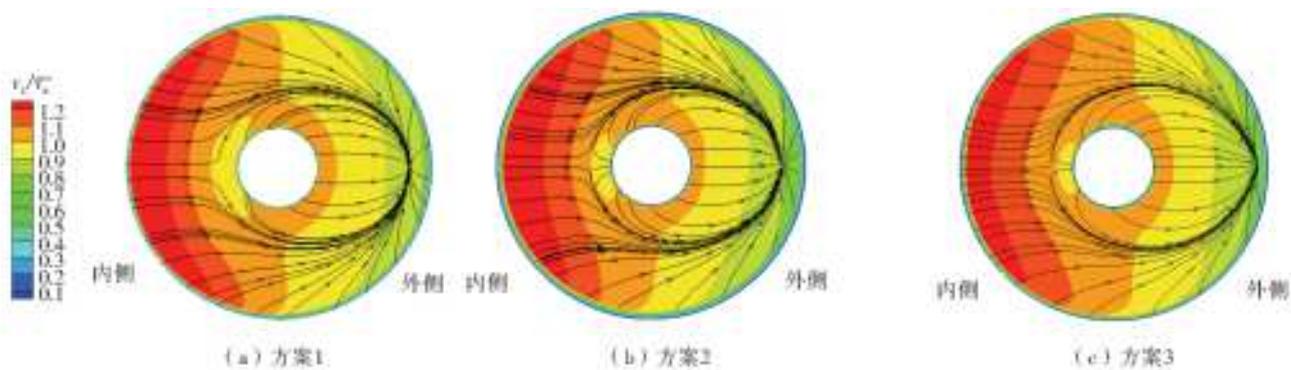


图4 设计工况流道出口断面相对轴向流速分布

Fig. 4 Relative axial flow velocity distribution at outlet cross-section under design condition

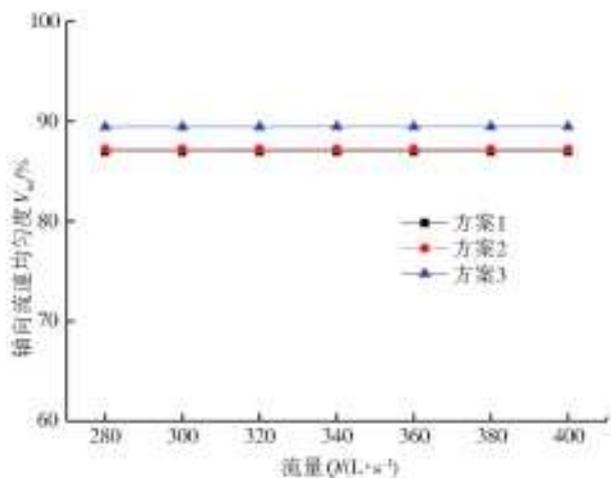


图5 轴向流速均匀度变化曲线

Fig. 5 Axial flow velocity uniformity curve

### 3.2 流道水力损失

进水流道水力损失见图6。使用OriginPro 9.0对流量-水力损失曲线用二次多项式拟合,三种方案的曲线拟合后的方程依次为: $h_{s,方案1}=2E-07Q^2+1E-05Q+0.0006$ , $h_{s,方案2}=4E-07Q^2+9E-06Q+0.0003$ , $h_{s,方案3}=5E-07Q^2+2E-05Q-0.0004$ ,拟合度都达到100%,因此各方案进水流道的水力损失与流量的满足二次方关系,水力损失随流量增大而增大,符合水力学规律。设计工况下,方案1水力损失为0.031 m,方案2水力损失为0.052 m,方案3水力损失为0.060 m。经比较可知,进水流道的水力损失随喉部高度减小而增大,水力损失最小的方案的

喉部高度为1.0D(方案1)。在设计方案选定的喉部高度范围内,喉部断面的高度降低,使水流进入弯道时断面收缩过急,流速提高,增大了进水流道的水力损失。

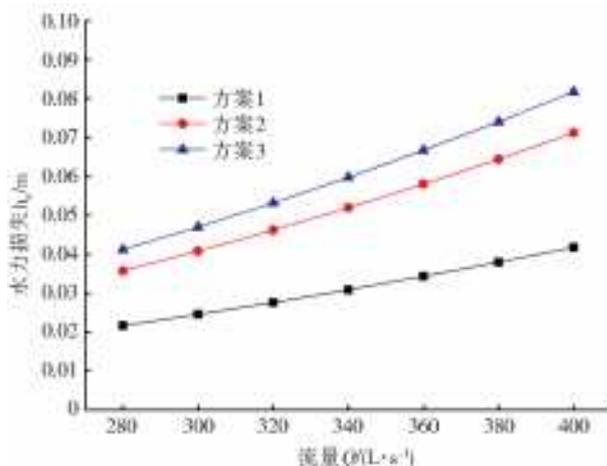


图6 进水流道水力损失与流量关系曲线

Fig. 6 Hydraulic loss as a function of flow of inlet flow channel

### 3.3 喉部断面流速分布

喉部高度的改变首先影响的是喉部断面周围的流态,图7为设计工况下流道喉部断面的流速分布图。各方案流线总体平稳,从两边流向中心,流速梯度呈环形分层分布,高速区集中在流道内侧(顶部)中心,低速区集中在流道外侧(底部)的两角。

三个方案中,方案1(见图7(a))喉部断面高度最大,断面面积最大,流速比其他方案小,最大流速

在 2.4 m/s 以下,流态最均匀。方案 3(见图 7(c))喉部断面高度最小,断面面积最小,流速比其他方案大,最小流速高于 2.1 m/s,断面高度低导致流道两边的水流受挤压,流速梯度呈倒梯形,流态最差。方案 2(见图 7(b))的情况介于方案 1 和方案 3 之间。

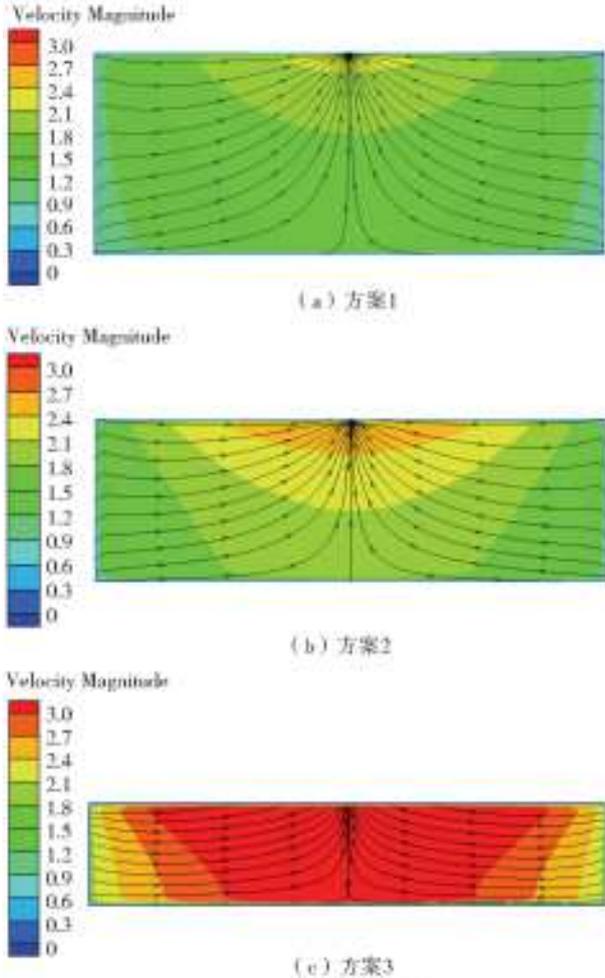


图 7 喉部断面速度分布(单位:m/s)

Fig. 7 Velocity distribution at the throat (Unit:m/s)

### 3.4 流道内部流动特性分析

取流道中间断面为典型断面以直观反映流道内部流动的情况,经数值模拟后的设计工况(340 L/s)下速度等值线和流线图见图 8。从流线可以看出,水流在弯道中的偏转情况不同:在喉部高度小的方案中,水流向竖直方向偏转效果更好,而在喉部高度大的方案中,水流在出口附近仍未完全转向竖直方向,这与上文中的速度加权平均角计算结果一致。

在进口段,可以看出方案 1 和 2 的流态比较平顺,经过喉部时流速大约在 2.0 m/s 左右,进入弯道后流速增至 3.0 m/s 以上。而方案 3 的进口段倾角过大,断面面积减小得快,水流流速到达喉部时已有 3.0 m/s。进入弯道后,各方案的高速区(大于 5.5

m/s)集中在流道内侧靠近弯道后部,喉部高度越大,流道断面收缩越快,所以弯道后部的流速增加越迅速,弯道流速分布越不均匀。然而,喉部断面高度越小,弯道段的整体流速增大,使得管路水力损失增大。因此,设计肘形进水流道时需选择合适的喉部高度,综合考虑流态和水力损失,既要保证流速分布均匀,又要控制弯道部分的流速不至于过快,以减小管路水力损失。

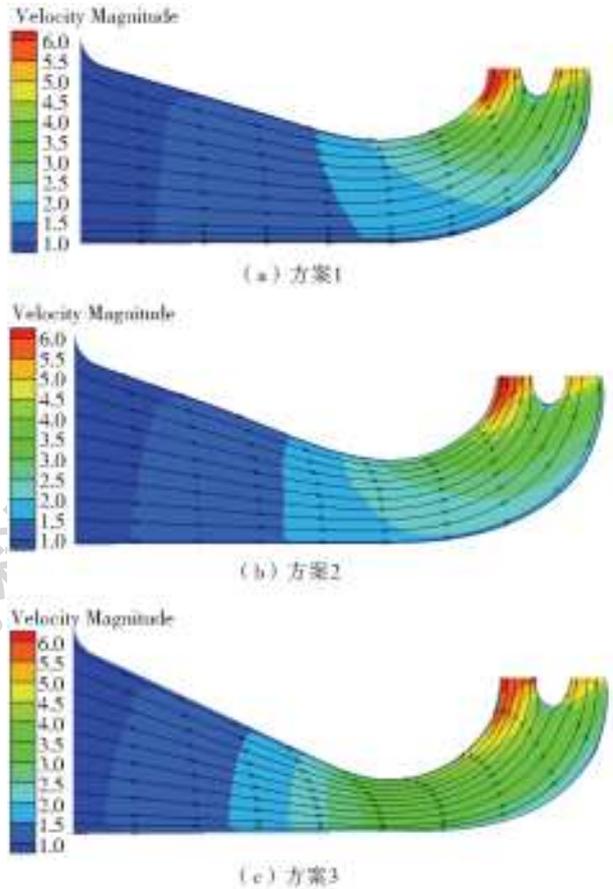


图 8 设计工况流道中间断面速度等值线(单位:m/s)

Fig. 8 Velocity contours of the middle cross-section under design condition (Unit:m/s)

### 4 泵系统性能分析

根据数值模拟的计算结果,本文对三种方案的泵系统性能进行了预测(见图 9)。由图 9(a)泵系统流量-扬程与流量-效率曲线可知,喉部高度为 0.8D 的方案性能好,最优工况流量都为 340 L/s,方案 2 性能最优越,泵系统最高水力效率达到为 79.08%,此时的泵系统扬程为 3.98 m。其次,方案 1 的最优工况流量为 340 L/s,最高效率为 79.00%,扬程为 3.98 m。方案 3 最优工况流量为 340 L/s,最高效率为 78.71%,是三种方案中最低的,扬程为 3.96 m。当流量小于设计流量时,方案 1 和方案 2 的效率和扬程降低得比另外两个方案慢;当流量大于

设计流量时,方案按其效率由大到小排列:方案3>方案2>方案1。从图9(b)可以看出,三种方案的轴功率变化趋势相似。

总体来看,泵系统水力效率受进水条件和水力损失综合影响。进水条件不好对泵系统性能有负面影响,当叶轮进口的流速分布均匀度和速度加权平

均角高于一定数值可视为进水条件达到要求,此时进水流道水力损失决定泵系统水力效率。方案1流速均匀度和速度加权平均角均最小,进水条件不好,泵系统水力效率低。方案2和方案3进水条件都达到要求,而方案2的进水流道水力损失更小,所以其水力效率较高。

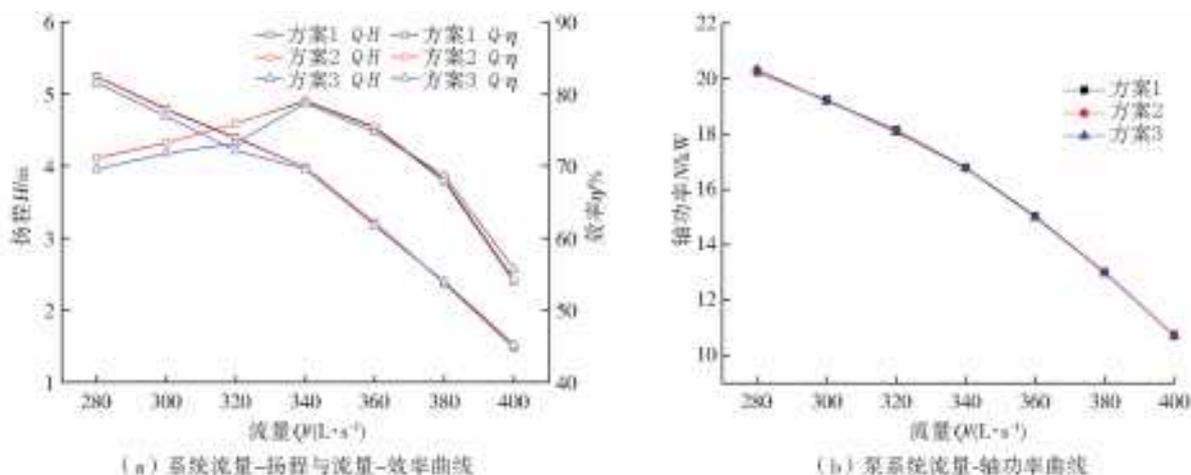


图9 数值模拟性能预测

Fig. 9 Numerical simulation prediction of performance

## 5 结论

(1)减小喉部断面的高度,会使进入弯道的水流流速增大,令弯道部分的水力损失增加;增大喉部断面的高度使弯道的断面面积变化率增加,使流速的变化梯度加大,流速变化更靠近弯道的后部,导致流道出口流速分布不均匀。

(2)泵系统叶轮进口水流不均匀会明显增加叶轮内部的水力损失,虽然方案2(喉部高度为0.8D)的水力损失不是最小,但其流道出口轴向流速均匀度更符合水泵的设计要求,所以其泵系统的综合性能最优。

### 参考文献(References):

[1] 刘超. 水泵及水泵站[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2012(LIU C. Pump and pump station[M]. Beijing:China Water&Power Press,2012. (in Chinese))

[2] 陆林广. 泵站进水流道设计理论的新进展[J]. 河海大学学报(自然科学版),2001,29(1):40-45. (LU L G. Progress in design theory for suction boxes of pumping stations[J]. Journal of Hohai University,2001,29(1):40-45. (in Chinese))

[3] 成立,刘超. 泵站进出水流道优化设计目标函数研究[J]. 水泵技术,2007(3):39-42. (CHENG L, LIU C. Research on objective function of optimal design of inlet and outflow channels of pump station[J]. Pump

Technology,2007(3):39-42. (in Chinese))

[4] 刘超,梁豪杰,金燕,等. 立式轴流泵进水流场 PIV 测量[J]. 农业机械学报,2015,46(8):33-41. (LIU C, LI-ANG H J, JIN Y, et al. PIV measurements of intake flow field in axial-flow pump. [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(8):33-41. (in Chinese)) DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.08.006.

[5] 杨应玖. 大型立式轴流泵站肘形进水流道的设计[J]. 排灌机械工程学报,1984(1):14-18. (YANG Y J. Design of elbow inlet water passage for large vertical axial flow pumping station[J]. Drainage and Irrigation Machinery,1984(1):14-18. (in Chinese))

[6] 陆林广,祝婕,冷豫,等. 泵站进水流道模型水力损失的测试[J]. 排灌机械工程学报,2005,23(4):14-17. (LU L G, ZHU J, LENG Y, et al. Measurement for hydraulic loss of inlet conduit of pumping station[J]. Drainage and Irrigation Machinery,2005,23(4):14-17. (in Chinese))

[7] 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. (ZHANG C, LI Y J, JIANG H Y, et al. Numerical simulation and experiment of optimum hydraulic design for elbow inlet passage[J]. Journal of drainage and irrigation machinery engineering (JDIME), 2016,34(10):860-866. (in Chinese)) DOI:10.3969/j.issn.1674-8530.15.0254

[8] 关醒凡. 现代泵理论与设计[M]. 北京:中国宇航出版

- 社, 2011. (GUAN X F. Modern pump theory and design[M]. China Aerospace Publishing House, 2011. (in Chinese))
- [9] 泵站设计规范. GB 50265-2010[S]. (Pump station design specification. GB 50265-2010[S]. (in Chinese))
- [10] 刘超, 周庆连, 钱均, 等. 双向流道立轴潜水泵系统流动特性研究[J]. 农业机械学报, 2016, 47(10): 59-65. (LIU C, ZHOU Q L, QIAN J, et al. Flow characteristics of two-way passage vertical submersible pump system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(10): 59-65. (in Chinese)) DOI: 10. 6041 / j. issn. 1000-1298. 2016. 10. 008
- [11] 杨帆, 谢传流, 刘超, 等. 轴流泵装置运行工况对肘形进水水道水力性能的影响[J]. 农业机械学报, 2016, (2): 15-21. (YANG F, XIE C L, LIU C, et al. Influence of axial-flow pumping system operating conditions on hydraulic performance of elbow inlet conduit [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016(2): 15-21. (in Chinese)) DOI: 10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2016. 02. 002.
- [12] 汤方平, 袁家博, 周济人. 轴流泵站进出水流道水力损失的试验研究[J]. 排灌机械工程学报, 1995(3): 13-14. (TANG F P, YUAN J B, ZHOU J R. Experimental study on hydraulic loss of inlet and outflow channels of axial flow pumping station[J]. Drainage and Irrigation Machinery, 1995(3): 13-14. (in Chinese))
- [13] 刘超. 南水北调低扬程水泵装置水力性能考核指标探讨[J]. 排灌机械工程学报, 2003, 21(6): 2-5. (LIU C. Discussion on the evaluation index of hydraulic performance of low lift pump unit in South-to-North Water Transfer Project[J]. Drainage and Irrigation Machinery, 2003, 21(6): 2-5. (in Chinese))
- [14] 陆林广, 冷豫, 吴开平, 等. 泵站进水水道内部流态模型试验方法研究[J]. 排灌机械工程学报, 2005, 23(3): 17-19. (LU L G, LENG Y, WU K P, et al. Study on method for model test of flow pattern in suction box of pumping station[J]. Drainage and Irrigation Machinery, 2005, 23(3): 17-19. (in Chinese))
- [15] 陈松山, 王林锁, 陆伟刚, 等. 大型轴流泵站双向流道设计及泵装置特性试验[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2001, 22(3): 45-49. (CHEN S S, WANG L S, LU W G, et al. Design of reversible passage in large axial pumping stations and experimental research on the characteristics of pump sets[J]. Journal of Jiangsu University of Science and Technology, 2001, 22(3): 45-49. (in Chinese))

.....

(上接第 163 页)

- [18] 俞聿修. 随机波浪及其工程应用[M]. 大连: 大连理工大学出版社, 2011. (YU Y X. Random wave and its applications to engineering[M]. Dalian: Dalian University of Technology Press, 2011. (in Chinese))
- [19] 钟瑚穗. 斜面坡度对波浪最大压力的影响[J]. 华东水利学院学报, 1985(1): 142-154. (ZHONG H S. The effect of slope on the maximum wave pressure[J]. Journal of East China Institute of Water Conservancy, 1985(1): 142-154. (in Chinese))