

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20220835

簸箕形进水流道进水收缩段底面倾角 对流道水力性能的影响

高志锴, 汪顺生, 刘新阳, 高传昌

(华北水利水电大学水利学院, 河南 郑州 450045)

摘要: 为了探究簸箕形进水流道进水收缩段底面倾角对流道水力性能的影响,建立了簸箕形进水流道的进水结构物理模型和水动力学模型,采用雷诺 N-S 方程和 RNG κ - ϵ 湍流模型,对进水收缩段 5 种不同底面倾角的流道水流场进行数值模拟。结果表明,底面倾角对流道进水收缩段和喉部的流速分布影响较大,较大的底面倾角使进水收缩段的流线分布密集度和喉部流线弯曲度增大、流速升高,增大了流道水力损失,降低了流道出口断面流速分布的均匀度;较小的底面倾角使进水收缩段的流线分布平顺和喉部流线弯曲度变缓、流速降低,减小了流道水力损失,提高了流道出口断面的流速分布均匀度;进水收缩段底面倾角的大小对流道出口断面的水流速度加权平均角无明显影响;分析不同底面倾角的流道水力性能,在簸箕形进水流道的进水收缩段底面倾角 $\leq 3^\circ$ 时,进水流道的水流平顺,水力损失小,流道出口的水流流态满足水泵叶轮室进口的进水条件。

关键词: 簸箕形; 进水收缩段; 倾角; 数值计算; 水力性能

中图分类号: TV146

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)02-0117-04

1 工程概况

邢家渡灌区位于黄河下游济南市西北部,是济南市最大的引黄灌区和重要的粮棉生产基地,素有“省会粮仓”的美誉。在邢家渡灌区引黄闸前建有 1 座装设 4 台设计流量为 $12.5 \text{ m}^3/\text{s}$ 的潜水电泵的引黄提水泵站。泵站主要由进水前池、进水闸室、簸箕形进水流道、机组和出水池 5 部分组成。进水前池设计水位 23.0 m,最低运行水位 22.4 m。目前,就簸箕形进水流道的叶轮中心高度、进口断面高度和宽度、流道长度、喉部高度、后壁距、喇叭管进口直径及其高度等主要控制参数对水力性能的影响均已进行了研究,提出了优化后簸箕形进水流道主要参数设计值^[1,2],并成功应用于工程实践。但已有研究^[3-6]主要分析了簸箕形进水流道的主要控制参数对流道水力性能的影响,而关于簸箕形进水流道进水收缩段底面倾角对流道水力性能的影响研究甚少。鉴于此,本文针对邢家渡引黄闸前泵站簸箕形进水流道的进水收缩段,模拟分析了不同底面倾角对流道流

场及水力性能的影响,提出流道水力性能较优的进水收缩段底面倾角,旨在为类似工程应用提供技术依据。

2 数值计算模型与方法

2.1 进水模型与网格剖分

进水模型包括泵站前池、闸室、簸箕形进水流道及其出口延长段 4 部分,进水模型比尺为 1:7,采用 Pro E 软件建立的进水三维模型和模型尺寸见图 1。运用 Pointwise 软件对进水模型进行网格剖分,结果见图 1。对进水模型选取 10 种不同网格剖分方案进行数值计算,发现当网格数量大于 250×10^4 个时,进水流道的水力损失趋于稳定。综合考虑后,确定进水模型的网格数量为 290×10^4 个。

2.2 计算方法及边界条件

簸箕形进水流道三维湍流流动数值模拟控制方程包括连续性方程和动量方程,湍流模型采用 Fluent 中的 RNG κ - ϵ ^[7]。空间离散采用二阶迎风格式,数值计算采用 SIMPLEC 算法。在进水前

收稿日期: 2022-04-24, **修回日期:** 2022-05-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(51309099, 52079051)

作者简介: 高志锴(1985-),男,助工,研究方向为农田水利工程, E-mail: 61212667@qq.com

通讯作者: 高传昌(1957-),男,教授,研究方向为流体机械及工程, E-mail: gcc@ncwu.edu.cn

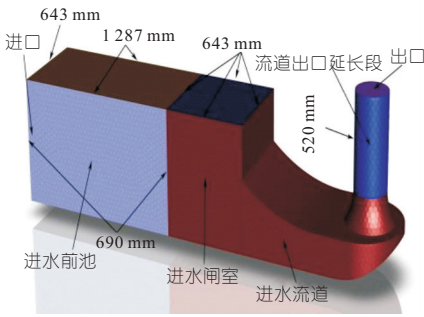


图 1 计算模型及网格剖分示意图

Fig. 1 Calculation model and grid division diagram

池加 2 倍进水流道宽度的进水段(图 1),采用该断面上平均速度作为进口边界条件,在流道出口加 2 倍管径的断面作为自由出流边界条件。进水池和进水闸室水面设置为对称面,其余边壁、底壁均采用无滑移的壁面边界条件。

2.3 计算模型流量

计算采用欧拉相似准则,即 $\lambda_Q = 49$ 。原型泵的设计流量为 $45\ 000\ \text{m}^3/\text{h}$,计算模型设计流量为 $918\ \text{m}^3/\text{h}$,计算模型最小流量为设计流量 $918\ \text{m}^3/\text{h} \times 0.8 = 734\ \text{m}^3/\text{h}$ 。

2.4 计算方案

在保证簸箕形进水流道的进水收缩段、吸水室和吸水喇叭管等主要控制参数不变的情况下,设置 5 种方案研究不同进水收缩段底面倾角 β (β 值分别为 $0^\circ, 3^\circ, 6^\circ, 9^\circ, 12^\circ$) 对通道水力性能的影响,并就其影响原因进行具体分析。

3 计算结果分析

3.1 进水收缩段流速分布

图 2 为设计工况下进水收缩段进口、中间和喉部 3 个典型断面的流速分布。水流由进口断面流向喉部断面。由图 2 可看出,3 个断面的流速分布随着底面倾角 β 的增大差异较大。进口断面的流速在底面倾角 $\beta \leq 3^\circ$ 时分布均匀,当底面倾角 $\beta \geq 6^\circ$ 后,在断面底部出现了流速为 $1.2\ \text{m/s}$ 流速区(方案 3),随着底面倾角的增大,除顶部有较小区域流速为 $1.0\ \text{m/s}$ 外,其他区域流速均为 $1.2\ \text{m/s}$ (方案 5)。中间断面流速随着底面倾角

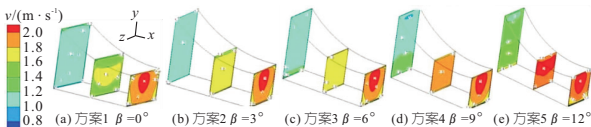


图 2 进水收缩段不同 β 下典型断面流速分布

Fig. 2 Velocity profile of typical cross-section of inlet contraction section under different β

的增大从低到高,由分布不均(方案 1)到分布均匀(方案 2~4)再到分布不均(方案 5)变化。喉部断面的流速随着底面倾角的增大分布差异较小,沿断面中心线由大到小依次对称分布着 $2.0, 1.8, 1.6\ \text{m/s}$ 共 3 种流速区。由于进水收缩段的进口断面和中间断面随底面倾角的增大逐渐减小,而喉部断面不变,因此底面倾角对进口断面和中间断面流速分布影响较大,而对喉部断面流速分布基本无影响。

3.2 吸水室出口断面流速分布

设计工况下进水收缩段不同底面倾角 β 对吸水室出口断面流速分布的影响见图 3。由图 3 可看出,5 种方案的水流流线由吸水室周边集中流向吸水室出口断面的后部且总体平顺; $3.0\ \text{m/s}$ 以上高流速区集中在吸水室出口断面的中部, $0.6\ \text{m/s}$ 以下低流速区主要分布在吸水室出口断面后部,且高、低流速区分布范围随底面倾角增大基本不变;低流速区随着底面倾角增大由无漩涡(方案 1、2)到有漩涡产生(方案 3~5);从吸水室出口断面的后部流线分布可看出,底面倾角小(方案 1、2)的流线分布平顺,底面倾角大(方案 4、5)的流线分布较乱。这可能是由于簸箕形吸水室进口断面流速分布(图 2)和水流通过簸箕形吸水室底部圆弧时产生的离心力影响了吸水室出口断面流速分布,因此在进水收缩段底面倾角 $\beta \leq 3^\circ$ 的簸箕形吸水室出口断面的流速分布优于进水收缩段底面倾角 $\beta \geq 6^\circ$ 的流速分布。

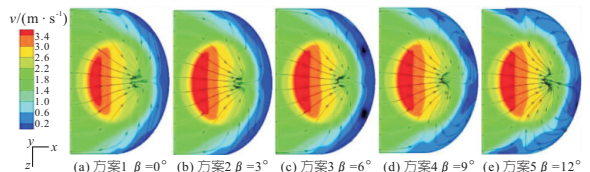


图 3 不同 β 下吸水室出口断面流速分布

Fig. 3 Flow velocity distribution at the outlet section of suction chamber under different β

3.3 流道纵断面流速分布

设计工况下流道中心纵断面速度分布见图 4。由图 4 可看出,各方案的水流由进水前池经流

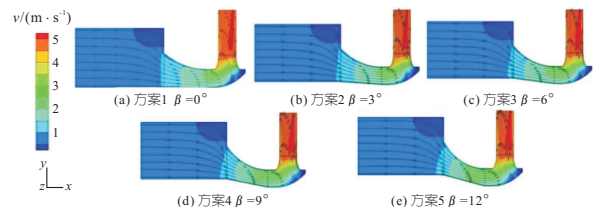


图 4 不同 β 下流道中心纵断面流速分布

Fig. 4 Velocity distribution in the center longitudinal section of passage under different β

道流向喇叭管,流速在进水前池和进水闸室较小,经过进水收缩段速度逐渐增加,到吸水喇叭管进口速度进一步增加,至出口速度上升到 4.5 m/s 以上。

由图 4 还可看出,簸箕形进水水道内的流线比较平顺,仅进水收缩段的流线随着底面倾角的增大逐渐由疏变密,喉部流线弯曲度逐渐增大;底面倾角 $\beta \leq 3^\circ$ 的进水收缩段和吸水室的流线分布比底面倾角 $\beta \geq 6^\circ$ 的流线分布平顺。说明底面倾角对进水收缩段和喉部的速度分布影响比较明显,其次是对吸水室速度分布影响较小,而对吸水喇叭管的速度分布无明显影响。因此,底面倾角较小的水道纵断面速度分布比底面倾角较大的速度分布均匀。

3.4 水道水力性能的评价

3.4.1 水道出口流场分布

为了保证水泵叶轮室进口的水流流态,进水水道应将进水前池的水流平顺均匀地引向水泵叶轮进口,《泵站设计规范》(GB50265-2010)^[8] 规定,进水水道出口断面处的流速和压力分布应比较均匀。进水水道出口水流流场分布状况可用两个指标来评价,计算公式分别为:

$$V_u = \left[1 - \frac{1}{u_a} \sqrt{\frac{1}{m} \sum (u_{ai} - \bar{u}_a)^2} \right] \times 100\% \quad (1)$$

$$\bar{\theta} = \left\{ \sum u_{ai} \left[90^\circ - \arctan\left(\frac{u_{ti}}{u_{ai}}\right) \right] \right\} / \sum u_{ai} \quad (2)$$

式中, V_u 为水道出口断面轴向流速分布均匀度; u_{ai} 为出口断面计算单元的轴向流速; \bar{u}_a 为出口断面平均轴向流速; m 为出口断面的计算单元总数; $\bar{\theta}$ 为出口水流速度加权平均角; u_{ti} 为出口断面计算单元的切向流速。

5 种方案水道出口断面流速分布均匀度和水流速度加权平均角随流量的变化见图 5。流量的大小对水道出口断面速度分布均匀度和水流速度加权平均角基本无影响;由图 5(a)可知,各方案

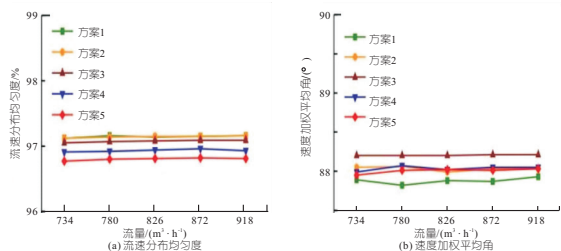


图 5 不同 β 下水道出口流场分布随流量变化关系曲线

Fig. 5 Relationship between flow field distribution and flow rate of exit passage under different β

的水道出口速度分布均匀度处于 96.7%~97.3% 之间,底面倾角小(方案 1、2)的水道出口流速分布均匀度比底面倾角大(方案 3~5)的流速分布均匀度高;由图 5(b)可知,5 种方案的水流速度加权平均角随底面倾角无明显的变化规律,约处于 $87.8^\circ \sim 88.2^\circ$ 之间,方案 1 水流速度加权平均角最低,方案 3 最高,其他 3 个方案居中,约为 88° 。由此可见,在进水收缩段地面倾角范围内,水道出口断面的流场分布均能较好地满足水泵叶轮室进口进水条件。

3.4.2 水道水力损失

图 6 为 5 种底面倾角下进水水道水力损失与流量变化的关系曲线。设计工况下,方案 1~5 的水力损失分别为 0.178、0.195、0.204、0.208、0.210 m。由图 6 可看出,进水水道的水力损失随底面倾角的增大而增大,水力损失最小的是底面倾角 $\beta = 0^\circ$ 的方案 1,水力损失最大的是底面倾角 $\beta = 12^\circ$ 的方案 5。进水收缩段底面倾角的增大不仅使通过进水收缩段的流线分布越来越密集,流速提高,而且流线的弯曲也越来越大,增大了进水水道的水力损失。

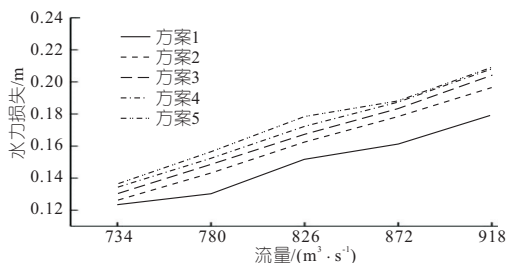


图 6 不同 β 下进水水道水力损失与流量关系曲线
Fig. 6 Relationship curves between hydraulic loss and discharge of inlet passage under different β

分析比较 5 种地面倾角对簸箕形进水水道水力性能的影响可知,簸箕形进水水道的进水收缩段底面倾角 $\beta = 3^\circ$ 的水道水流流态和水力损失均比底面倾角 $\beta \geq 6^\circ$ 的小;底面倾角 $\beta = 0^\circ$ 时,进水水道的水流流态更均匀,水道水力损失在所研究方案中最小。因此,选取簸箕形进水水道的进水收缩段底面倾角 $\beta \leq 3^\circ$ 能较好地满足水泵叶轮室的进水条件。

经过近 3 年运行,邢家渡引黄闸前泵站簸箕形进水水道内水流流态和机组均运行平稳,达到了工程设计要求。

4 结论

a. 底面倾角主要对簸箕形进水水道进水收缩段和喉部的流速分布影响较大,对簸箕形吸水室

流速分布影响较小,而对喇叭管的流速分布影响甚微。流道进水收缩段的流线分布密集度和喉部流线弯曲度随底面倾角的增大逐渐加大,提高了进水收缩段和喉部流速,增大了流道水力损失。

b. 流道出口流速分布均匀度随底面倾角的减小逐渐提高,而出口水流速度加权平均角随底面倾角无明显的变化;在所研究的底面倾角范围内,流道出口流速分布均匀度和速度加权平均角随流量的变化均基本保持平稳。

c. 在研究的 5 种簸箕形进水流道进水收缩段地面倾角范围内,底面倾角 $\beta \leq 3^\circ$ 的水力性能满足进水流道水力设计要求。 $\beta = 0^\circ$ 的方案 1) 流道水力性能优于其他 4 个方案,为最优方案。

参考文献:

[1] 陆林广,周济人,叶健,等. 簸箕形进水流道的优化水力设计[J]. 水利学报,1997(9):31-36.

[2] 陈松山,周正富,潘先星,等. 泵站簸箕型进水流道

水力特性试验及数值模拟[J]. 扬州大学学报(自然科学版),2006,9(4):73-77.

[3] 李四海,陈松山,周正富,等. 两种簸箕形进水流道泵装置数模分析与比较[J]. 水利与建筑工程学报,2014,12(4):191-195,203.

[4] 高传昌,孙龙月,董旭敏. 簸箕形进水流道宽度对流道水流流态的影响[J]. 人民黄河,2020,42(1):91-96,104.

[5] 陈洋. 簸箕型流道泵站水泵振动的处理和技术分析[J]. 水电能源科学,2021,39(11):187-190.

[6] 王亦晓,秦战生,陈洋,等. 基于 PANS 的轴流泵簸箕形进水流道水力特性[J]. 南水北调与水利科技,2019,17(6):201-208.

[7] 郑亚军,王凯,雷兴春,等. 基于 RNG 湍流模型的泵站进水流道三维数值模拟[J]. 水电能源科学,2008,26(6):123-125.

[8] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 泵站设计规范:GB50265-2010[S]. 北京:中国计划出版社,2010.

Influence of Bottom Dip Angle of Inlet Contraction Section on Hydraulic Performance of Dustpan-shaped Inlet Passage

GAO Zhi-kai, WANG Shun-sheng, LIU Xin-yang, GAO Chuan-chang

(1. School of Water Conservancy, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450045, China)

Abstract: In order to investigate the influence of the bottom dip angle of contraction section of the dustpan-shaped inlet on the hydraulic performance of the passage, the physical model and hydrodynamic model of the inlet structure of the dustpan-shaped inlet were established. The Reynolds N-S equation and RNG $k-\epsilon$ turbulence model were adopted to simulate the flow field of the passage with 5 different underside inclinations in the inlet contraction section. The results show that the bottom dip angle increases has a great influence on the velocity distribution of the inlet contraction section and the throat of the winnowed dustpan-shaped inlet passage, and the scheme of the bottom dip angle increases the density of the streamline distribution and the curvature of the throat, with the increase of flow velocity, the hydraulic loss of the passage is large, and the velocity distribution uniformity of the outlet section of the passage is low; The scheme with small bottom dip angle makes the streamline distribution smooth and the throat streamline curvature becomes slow, the velocity decreases, the hydraulic loss of the passage reduces, and the velocity distribution uniformity of the outlet section of the passage increases; The magnitude of the inclination of the bottom surface of the intake contraction section has no obvious influence on the weighted average angle of the flow velocity of the outlet section of the passage. Hydraulic performance of passage with different bottom dip angles was analyzed. When the bottom dip angle of the inlet contraction section of the dustpan-shaped inlet passage is less than 3° , the water flow in the inlet passage is smooth, the hydraulic loss is small, and the flow pattern at the outlet of the passage meets the water inlet conditions of the pump impeller chamber.

Key words: dustpan shape; inlet contraction section; dip angle; numerical calculation; hydraulic performance

(上接第 176 页)

Study on Uniaxial Tensile Mechanical Properties of Autoclaved Aerated Concrete Blocks

LIU Lei^{1a,1b,2}, ZHENG Zhi-hui³, SHI Yang-guang^{1a,1b}

(1a. College of Physical Science and Technology; 1b. Xinjiang Condensed Matter Phase Transition and Microstructure Laboratory, Yili Normal University, Yining 835000, China; 2. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, China; 3. School of Civil Engineering and Architecture, Ningbo Technology University, Ningbo 315100, China)

Abstract: In order to study the uniaxial tensile behavior of autoclaved aerated concrete blocks (AACB) in static state, the uniaxial tensile test of AACB with different densities was carried out. The tensile failure characteristics and failure mechanism of AACB were analyzed. The change rules of its tensile strength and elastic modulus under different densities were discussed, as well as the relevant formulas of the relationship between uniaxial tensile strength and porosity, compressive strength and splitting tensile strength. The experimental results show that the tensile yield strength and elastic modulus of AACB increase with the increase of density, but the tensile yield strain decreases gradually. The macroscopic failure of AACB under uniaxial tension is mainly controlled by the tensile damage mechanism of the material. It shows obvious brittle failure characteristics. Based on the ideal prediction model of porous materials and the regression analysis of test results, the semi-empirical formula and correction coefficient of AACB uniaxial tensile strength and porosity under the test conditions were fitted. The conversion relationship between AACB tensile strength and its compressive strength and splitting tensile strength was proposed.

Key words: uniaxial tensile; elastic modulus; porosity; compressive strength; splitting tensile strength