

文章编号:1007-2284(2021)06-0102-04

箱涵式双层流道后壁结构优化分析

赵振江¹,石磊¹,蒋红樱²,成立³,张聪聪³,卜舸⁴

(1. 泗洪县水利局,江苏 宿迁 223900; 2. 江苏省水利工程科技咨询股份有限公司,南京 210029;
3. 扬州大学水利科学与工程学院,江苏 扬州 225009; 4. 江苏省水利勘测设计研究院有限公司,江苏 扬州 225009)

摘要:为优化箱涵式双层流道后壁结构,基于CFX软件,采用RNG $k-\epsilon$ 紊流模型,对方形、圆形、 ω 形后壁进行了数值模拟,分析了不同组合方式对箱涵式进出水通道内流态的影响。数值结果表明:方形后壁的进水流道流态较好,但是出水通道的流态比较紊乱,出水通道断面流速均匀度较差,加权平均角较低,进水流道后壁形状为 ω 形,出水通道后壁形状为圆形时,进出水流道的流态得到了明显的改善,出水断面流速均匀度提高35.4%,加权平均角提高10.2°,优化效果比较突出,若考虑施工问题,也可只改变出水通道后壁形状。

关键词:箱涵式;双层流道;后壁;优化;数值模拟

中图分类号:TV131 **文献标识码:**A

赵振江,石磊,蒋红樱,等.箱涵式双层流道后壁结构优化分析[J].中国农村水利水电,2021(6):102-105,113.

ZHAO Z J, SHI L, JIANG H Y, et al. Optimization analysis of the back wall structure of Box-culvert double flow channel[J]. China Rural Water and Hydropower, 2021(6):102-105, 113.

Optimization Analysis of the Back Wall Structure of Box-Culvert Double Flow Channel

ZHAO Zhen-jiang¹, SHI Lei¹, JIANG Hong-ying², CHENG Li³, ZHANG Cong-cong³, BU Ge⁴

(1. Sihong Water Conservancy Bureau, Suqian 223900, Jiangsu Province, China;

2. Hydraulic Engineering Science and Technology Consultation Limited Company of Jiangsu Province, Nanjing 210029, China;

3. College of Hydraulic Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225009, Jiangsu Province, China;

4. Jiangsu Provincial Water Conservancy Survey and Design Institute Co., Ltd, Yangzhou 225009, Jiangsu Province, China)

Abstract: In order to optimize the back wall structure of the box-culvert double flow channel, based on the CFX software, RNG $K-\epsilon$ turbulence model is used to simulate the square, circular and ω shaped back wall, and the influence of different combinations on the flow pattern in the box culvert inlet and outlet channel is analyzed. The numerical results show that the flow pattern of the inlet channel with square back wall is better, but the flow pattern of the outlet channel is more disorderly, the flow velocity uniformity of the outlet channel section is poor, and the weighted average angle is low. The flow pattern of the inlet channel back wall is ω shape, and when the outlet channel back wall is circular, the flow pattern of the inlet and outlet channel is obviously improved. The uniformity of flow velocity and weighted average angle of the outlet section increases by 35.4% and 10.2° respectively. If the construction problem is considered, only the shape of the back wall of the outlet runner can be changed.

Key words: box-culvert; double flow channel; back wall; optimization; numerical simulation

收稿日期:2020-08-17

基金项目:国家自然科学基金项目(51779214);江苏省第五期“333高层次人才培养工程”。

作者简介:赵振江(1974-),男,高级工程师,从事水利工程建设管理工作。E-mail: 1138505957@qq.com。

通讯作者:成立(1975-),男,教授,博士生导师,从事泵站工程研究。E-mail: chengli@yzu.edu.cn。

在我国平原地区的很多泵站建设中,经常需要同时满足排涝和灌溉的过程,这时就需要泵站能够双向运行。双层流道泵站由于结构紧凑,占地面积小、工程投资少等优点,广泛应用于我国排涝灌溉领域中。在双层流道的工程应用中,双向运行机组和单向运行机组总是同时出现,目前对于双向运行机组的研究较多^[1-4]。张仁田^[5]将优化参数与水泵装置的外特性进行对

比,得出水泵进口(进水流道出口)流速不均匀度及水泵入口角与装置效率之间的关系;张鹏等^[6]研究了喇叭口高度对双向流道泵装置得影响,研究表明优化后的泵装置在不同工况下均可以稳定运行,最高装置效率可达76%;杜玲等^[7]根据双向泵站进水流道的设计要求,对泵站进水流道水力的优化流程进行了分析探讨,并对优化结果进行了实验模拟。以上研究对象均为双向运行机组,对于单向运行机组的研究较少^[8-11]。本文研究着眼于采用双层流道的单向运行机组,单向运行机组的进出水流道后壁通常设置为方形,由于水力设计理论不成熟,导致水力性能普遍较低,运行稳定性普遍较差。因此,对单向进出水流道后壁进行优化设计,保证其安全运行具有重要的学术意义与工程价值。

本文设计了3种进出水流道后壁形状,组合方案6种,利用CFD技术对流道内部流场进行定常计算,通过研究分析进出水流道后壁对流道内部流态、压力、进出口流速均匀度以及进出口水流平均偏流角的影响选择最优组合。本研究可以为同类箱涵式进出水流道的水力设计提供一定的参考。

1 物理模型及计算方法

1.1 双层流道泵站参数

某新建泵站采用箱涵式双层流道,选用4台立式轴流泵机组,配500 kW立式异步电机4台套,单向运行,主水泵叶轮直径1 600 mm,转速245 r/min,设计排涝流量为29.09 m³/s,单机设计流量为7.3 m³/s,总装机容量2 000 kW。流道底板高程为6.8 m,在设计排涝工况下,内河侧水位为14.0 m,外河侧水位为16.9 m。泵站的特征水位、特征扬程及规划设计流量见表1,机组站身结构图如图1所示。

1.2 数学模型及计算区域

本文初步采用RNG $k-\epsilon$ 模型和Realizable $k-\epsilon$ 模型对原方案模型进行数值计算,通过对两种模型的计算结果进行收敛性、相容性和稳定性分析,发现RNG $k-\epsilon$ 湍流模型对该双层流道模型适用性更好,故最终选用RNG $k-\epsilon$ 模型作为数学模型。

箱涵式双层流道的计算区域由引水渠、进水流道、叶轮、导叶、出水流道、外河6个部分组成,如图2(a)所示。选取两个断

表1 工程设计参数表

m

Tab.1 Engineering design parameter

运行工况		水位	水位差
引水工况	设计	外河侧	11.3
		内河侧	14.0
	最高	外河侧	11.3
		内河侧	14.5
排涝工况	设计	外河侧	16.9
		内河侧	14.0
	最高	外河侧	17.3
		内河侧	13.5

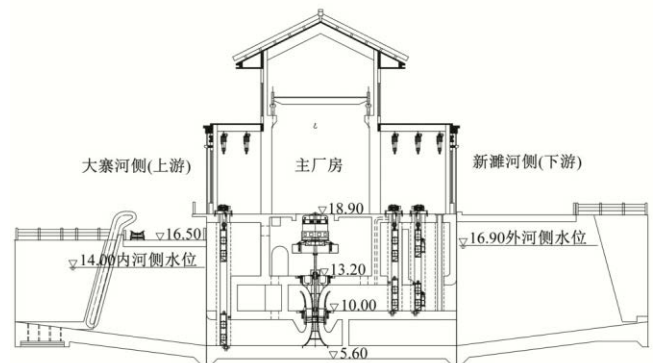


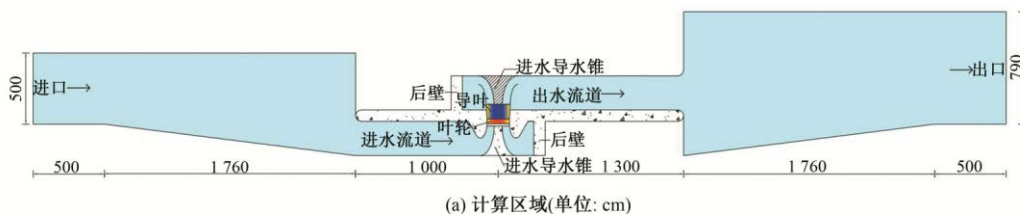
图1 单向运行机组站身结构示意图(高程单位:m)

Fig. 1 Diagram of unit station structure of one-way operation

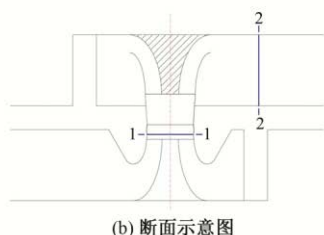
面用于计算比较流速均匀度与加权平均角,断面1-1为叶轮进口断面,断面2-2位于出水流道,距离叶轮中心线3 m处,此时出水趋于均匀,如图2(b)所示。本文研究的后壁结构有3种,分别是方形、圆形和 ω 形,其中圆形的直径与进出水流道宽度相同, ω 形的型线图如图2(c)所示。

1.3 边界条件及网格划分

边界条件主要包括5个部分:①进口:进口为引渠进水断面,设置流量进口,流量为7.3 m³/s;②出口:出口为外河出水断面,采用静压出口,压力值为1 atm;③固体边壁:计算区域的边壁及底部等设置为wall,采用无滑移的壁面进行处理;④自由水面:忽略水面和空气的热交换,计算区域自由水面设为对称边



(a) 计算区域(单位:cm)



(b) 断面示意图

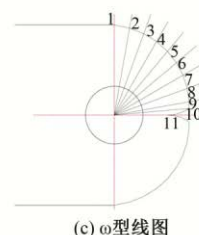
(c) ω 型线图

图2 计算区域及示意图

Fig. 2 Calculation area and schematic diagram

界条件;⑤交界面:本模型的交界面有3个,分别是进水流道-叶轮、叶轮-导叶、导叶-出水流道,其中叶轮设置为冻结转子,转速为245 r/min。计算步数为1 000步,收敛精度为 10^{-4} 。

采用分块网格划分的方式,分为进水流道、叶轮、导叶、出水流道4个部分,网格划分如图3所示,由于叶轮和导叶的结构比较复杂,对水流流态影响较大,网格划分时网格大小应小一点,本研究叶轮和导叶的网格大小为0.025 m,进出水流道的网格大小为0.25 m,网格数量分别为494 318、682 354、3 054 924、747 589,网格总数约为498万个。

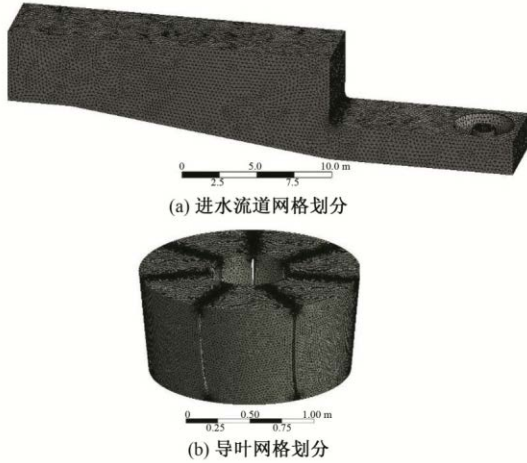


图3 网格划分示意图

Fig.3 Grid division diagram

2 研究方案

为了分析双层流道后壁结构对进出水流道流态的影响,对3种后壁结构形式进行研究,分别是方形、圆形、 ω 形,后壁结构示意图见表2。进出水流道后壁结构的不同形式会对水流流态造成不同的影响,因此设计了如表3所示的6种方案。

3 计算结果及分析

3.1 进水流道内部流态分析

图4为进水流道和出水流道水平截面流线图及静压云图,

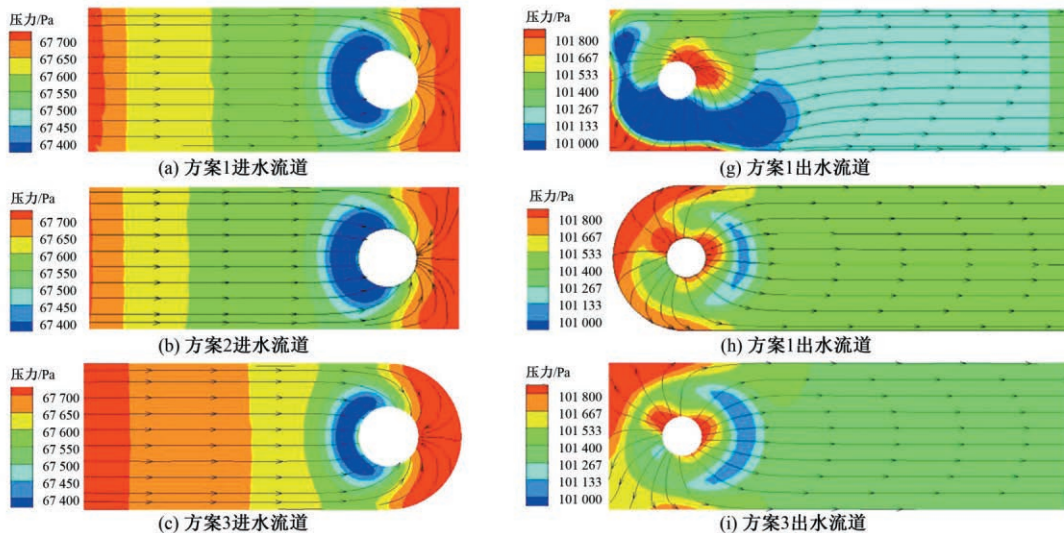


表2 后壁结构示意图

Tab.2 Rear Wall Structural Diagram

形式	方形	圆形	ω 形
示意图			

注:叶轮直径 $D_0=1.6$ m;导水锥底部直径 $D_1=2.5$ m;流道宽度 $B=5$ m。

表3 研究方案

Tab.3 Research Programs

方案	进水流道后壁形式	出水流道后壁形式
1	方形	方形
2	方形	圆形
3	圆形	方形
4	圆形	圆形
5	ω 形	圆形
6	ω 形	ω 形

其中进水流道的水平截面选取的近水流道底部(距底板0.4 m),出水流道的水平截面是近出水流道顶部(距顶板0.2 m)。

通过对比图4(a)~(f)可知,将方形后壁变为圆形或 ω 形,进水喇叭口至后壁的空间变小,由此会导致进水导水锥左侧压力变大,且 ω 形后壁的影响更显著;但是由于圆形后壁的边缘比较光滑,所以进水导水锥右侧水流回转比较顺畅,由于圆形后壁中间部分水流较少,因此 ω 形后壁得以衍生。

由图4(g)~(m)可知,水流出水喇叭管后受到出水流道导水锥分流作用分别向出水流道两端流动。由于导叶对速度环量回收不完全,所以出水流道内水流紊乱,导水锥两侧压力不均,水流不对称。通过对比方案2和方案1可以看出,出水流道后壁设置为圆形可以明显改善出水流道的流态。方案3和方案

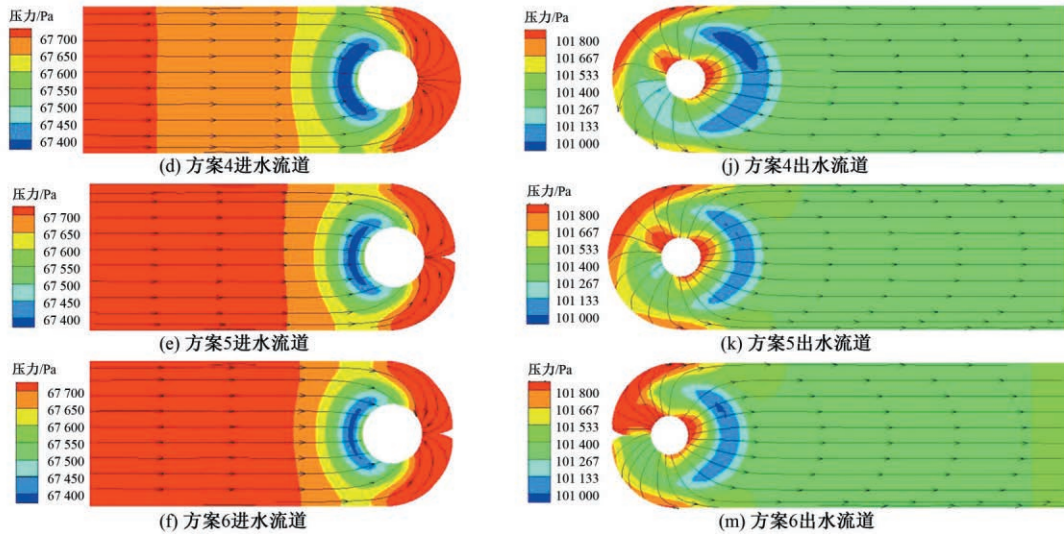


图4 进出水道截面压力、流线图

Fig.4 Section pressure and streamline diagram of inlet and outlet passage

2都是一方一圆的组合,对流动改善效果相似,方案2出水道的低压区更小。方案4在保留进水水道后壁圆形的基础上,将出水水道后壁设置为圆形,可以看出高压区偏移的情况没有得到改善,反而右上方出现了低压区。方案5和方案6的进水水道改为 ω 形,方案5的进水水道后壁为圆形,可以看出,与方案3相比,方案4的静压分布更加对称;方案6的出水水道后壁也为 ω 形,但出水水道左上方高压区得到了扩散。总体来说将进水水道和出水水道后壁改成圆形或 ω 形均可以改善流态,静压分布有一些不同,可以进一步定量分析,比较各个方案之间的差异,从而确定最优组合。

3.2 进水水道水力性能分析

选取叶轮进口断面1-1和出水断面2-2为定量分析的计算断面[如图2(b)所示]。通常采用轴向流速分布均匀度 V_u 以及加权平均角 $\bar{\theta}$ 来反映进水水道的优劣^[12,13]。轴向流速分布均匀度 V_u 以及加权平均角 $\bar{\theta}$ 计算公式如下:

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

式中: \bar{u}_a 为断面平均轴向速度; u_{ai} 为断面各单元轴向速度; m 为断面网格单元个数。

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

式中: u_{ti} 为断面各单元横向速度; u_{ai} 为断面各单元轴向速度; m 为断面网格单元个数。

通常,轴向流速分布均匀度 V_u 越接近100%,加权平均角 $\bar{\theta}$ 越接近 90° 时,水泵入流条件越好。通过计算可知,在设计流量工况下,当改变进水水道后壁形状时,叶轮进口的流速均匀度变化不大,但是对出水水道影响较大,除方案1和方案4外出水水道流速均匀度均有明显改善且相差不大;加权平均角的变化趋势与流速均匀度具有一致性。通过计算数据我们不难发现,

方案2、3、5、6对流速均匀度和加权平均角的改善效果比较接近,单纯从数据最优来看,方案5(进水水道为 ω 形出水水道为圆形)的优化效果更好,出水断面流速均匀度提高35.4%,进口断面加权平均角提高 0.3° ,出水断面加权平均角提高 10.2° 。但若考虑施工难度及工程成本,方案2(进水水道为方形出水水道为圆形)也不失为一种经济简单的好方案。

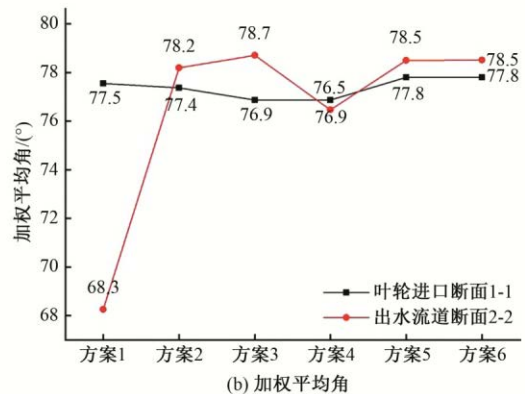
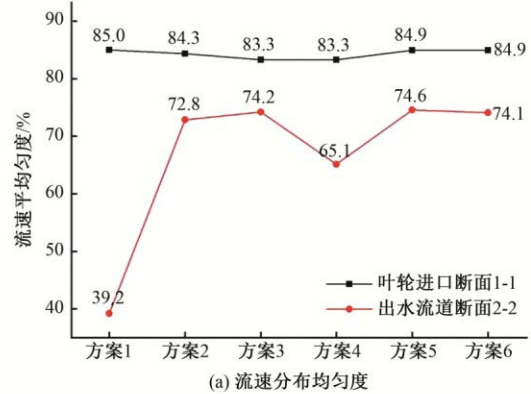


图5 各方案流速分布均匀度及加权平均角比较
Fig.5 Comparison of velocity distribution uniformity and weighted average angle of each scheme

(下转第113页)

- [18] VICENTE-SERRANO S M, BEGUERÍA S, LÓPEZ-MORENO J I. A multiscale drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index [J]. *Journal of Climate*, 2010, 23(7): 1 696-1 718.
- [19] BEGUERÍA S, VICENTE-SERRANO S M, REIG F, et al. Standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) revisited: parameter fitting, evapotranspiration models, tools, datasets and drought monitoring [J]. *International Journal of Climatology*, 2014, 34(10): 3 001-3 023.
- [20] 刘卫林, 朱圣男, 刘丽娜, 等. 基于SPEI的1958-2018年鄱阳湖流域干旱时空特征及其与ENSO的关系 [J]. *中国农村水利水电*, 2020(4): 116-123.
- [21] 李 雁. 内蒙古典型草原区域Palmer气象干旱指数适用性分析 [J]. *气象科学*, 2019, 39(5): 626-634.
- [22] 董安祥. 中国气象灾害大典. 甘肃卷 [M]. 北京: 气象出版社, 2005.
- [23] 袁 林. 西北灾荒史 [M]. 兰州: 甘肃人民出版社, 1994.
- [24] LI Q, LIU Y, NAKATSUKA T, et al. East Asian Summer Monsoon moisture sustains summer relative humidity in the southwestern Gobi Desert, China: evidence from $\delta^{18}\text{O}$ of tree rings [J]. *Climate Dynamics*, 2019, 52(11): 6 321-6 337.
- [25] 王 姝, 李金建, 秦宁生. 基于历史帕默尔干旱指数(PDSI)数据集重建的长江源区过去706 a径流量 [J]. *中国沙漠*, 2019, 39(3): 126-135.
- [26] 王文亚, 张 鑫, 王 云, 等. 青海省东部高原植被指数对干旱的响应研究 [J]. *中国农村水利水电*, 2016(6): 94-98.
- [27] 王金鑫, 赵光成, 张广周, 等. 基于修正NDVI时间序列的大区域冬小麦全生育期墒情监测 [J]. *节水灌溉*, 2019(1): 61-67, 71.
- [28] ZHANG X J, LIU Y, SONG H M, et al. Interannual variability of PDSI from tree-ring widths for the past 278 years in Baotou, China [J]. *Trees*, 2017, 5(31): 1-11.
- [29] 王振威, 李 强, 刘 禹, 等. 树轮记录的吕梁山北部过去175年来帕尔默干旱指数变化 [J]. *地球环境学报*, 2020, 11(1): 72-80.
- [30] LI Q, LIU Y, NAKATSUKA T, et al. The 225 year precipitation variability inferred from tree-ring records in Shanxi Province, the North China, and its teleconnection with Indian summer monsoon [J]. *Global and planetary change*, 2015, 132(9): 11-19.
- [31] 杨凤萍. 秦岭火地塘林区树木生长与气候变化的关系研究 [D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2013.
- [32] 高洪娜, 高瑞馨. 气象因子对树木生长量影响研究综述 [J]. *森林工程*, 2014, 30(2): 6-9.
- [33] 刘昌明, 孙 睿. 水循环的生态学方面: 土壤-植被-大气系统水分能量平衡研究进展 [J]. *水科学进展*, 1999, 10(3): 251-259.
- [34] KENDALL M G. Rank correlation methods [J]. *British Journal of Psychology*, 1990, 25(1): 86-91.
- [35] 施雅风, 沈永平, 李栋梁, 等. 中国西北气候由暖干向暖湿转型的特征和趋势探讨 [J]. *第四纪研究*, 2003, 23(2): 152-164.
- [36] 闫 炎, 赵昕奕, 周力平. 近50年中国西北地区干湿演变的时空特征及其可能成因探讨 [J]. *干旱区资源与环境*, 2010, 24(4): 38-44.

(上接第105页)

4 结 论

(1) 通过数值模拟结果可知, 方形后壁的进水流道流态较好, 但是出水流道的流态比较紊乱, 出水流道段断面流速均匀度较差, 加权平均角较低, 在工程实践中不推荐使用双方形后壁。

(2) 断面加权平均角和流速均匀度的变化趋势一致, 改变进水流道的后壁形状对叶轮进口断面流速均匀度和加权平均角影响不大, 但是对出水流道的流态影响较大。

(3) 进水流道后壁形状为 ω 形, 出水流道后壁形状为圆形时, 进水流道的流态得到了明显的改善, 流速均匀度和加权平均角数值结果最优; 若考虑施工问题, 也可以只将出水流道后壁形状改为圆形。 □

参考文献:

- [1] 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, 2009.
- [2] 成 立, 汤方平, 仇宝云, 等. 某双向灌排泵站的现场测试及改造思路 [J]. *扬州大学学报(自然科学版)*, 2005(3): 67-69.
- [3] 王朝飞, 汤方平, 石丽建, 等. 箱涵式轴流泵装置进水流道优化

设计 [J]. *中国农村水利水电*, 2019(7): 182-188.

- [4] 焦伟轩, 成 立, 颜红勤, 等. 超低扬程双向流道泵装置压力脉动特性研究 [J]. *水力发电学报*, 2019, 38(6): 101-112.
- [5] 张仁田. 双向泵站进水流道优化水力设计与试验研究 [J]. *农业机械学报*, 2003(6): 73-76, 72.
- [6] 张 鹏, 王麦琪, 李彦军, 等. 大型双向流道泵装置优化与试验研究 [J]. *江苏水利*, 2017(7): 28-32.
- [7] 杜 玲, 王 飞, 仵永平. 探讨双向泵站进水流道优化水力设计 [J]. *科技资讯*, 2015, 13(4): 200-201.
- [8] 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.
- [9] 邵培寅, 周正富. 钟形进水流道后壁形状优化 [J]. *中国科技信息*, 2019(18): 76-77.
- [10] 陈松山, 何钟宁, 周正富, 等. 泵站新型箱涵式出水流道三维湍流数值模拟研究 [J]. *灌溉排水学报*, 2007(5): 18-21.
- [11] 杨 帆, 刘 超, 汤方平, 等. 箱涵式进水流道的立式轴流泵装置水动力特性分析 [J]. *农业工程学报*, 2014, 30(4): 62-69.
- [12] 高 波, 倪 丹. 轴流泵叶轮导水锥型式设计及其流道水力特性模拟 [J]. *农业工程学报*, 2015, 31(11): 81-88.
- [13] 顾 巍, 成 立, 蒋红樱, 等. 立式轴流泵装置虹吸式出水流道水力特性CFD研究 [J]. *江苏水利*, 2018(1): 7-15.