

DOI: 10.3969/j.issn.1004-4701.2019.04-02

竖井贯流泵进水流道的数值模拟研究

商邑楠¹, 罗 灿², 夏臣智³, 曾淑蕾¹

(1. 江西省九江市水利电力规划设计院, 江西 九江 332001; 2. 扬州大学水利与能源动力工程学院, 江苏 扬州 225000;
3. 南水北调东线江苏水源有限责任公司, 江苏 南京 210000)

摘 要: 基于标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型, 采用雷诺时均 N-S 方程和 SIMPLE 算法, 通过针对不同竖井线型参数下竖井贯流泵进水流道进行三维数值模拟, 展现了各方案进水流道出口断面的轴向速度分布、水平剖面的流线和压力分布以及流道水力损失的状况。通过比较发现: 流道过渡平缓时, 流道的水力损失性能较好; 各方案出口断面上的速度分布呈现为对称分布; 由于 3 种方案的水力损失性能相差不大, 考虑到工程的经济性, 选择方案 1 作为最终方案。

关键词: 竖井贯流泵; 进水流道; 数值模拟; 流态

中图分类号: TV136+.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-4701(2019)04-0241-06

0 引 言

为了节省投资, 大型泵站通常设计专门的进水流道作为前池与水泵叶轮室之间的连接过渡段。其作用是水泵叶轮室的水泵提供良好的进水流态, 以满足水泵叶轮对叶轮室进口所要求的水力设计条件^[1]。竖井式贯流装置的通风散热条件较好、投资少、结构简单、开挖深度小、效率高, 同时安装检修方便, 常用于低扬程泵站和超低扬程泵站。基于这些特点, 专家学者针对竖井式贯流装置的水力性能做了大量的研究^[2-12]。本文以某泵站为例, 其最高净扬程为 2.70m, 设计净扬程为 1.24m, 平均净扬程为 0.90m, 单机设计流量为 15m³/s, 兼具有城市排涝和调水功能, 因此采用了竖井式贯流装置。借助数值模拟的手段, 由竖井式贯流泵不同的参数设计了 3 种方案, 研究了进水流道由直线渐缩段变为曲线渐缩段的位置对进水流道内流态的影响。

1 数学模型

假定进水流道内的流动为不可压缩定常紊流流

动, 遵循质量守恒方程、动量守恒方程以及能量守恒方程, 采用连续性方程、紊流雷诺时均方程、湍动能方程和耗散率输运方程描述该流动。选择标准 $k-\varepsilon$ 紊流模型作为紊流模型。根据有限体积法, 利用非结构化网格对计算区域进行离散, 运用二阶迎风格式离散控制方程中的源项和对流项。采用标准壁面函数对近壁处进行处理。基于交错网格技术, 使用分离求解器求解离散方程组, 通过压力修正实现了 SIMPLE 算法, 将其作为该模型的求解算法。

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \bar{u}_i \bar{u}_j) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\mu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \rho \bar{u}_i' \bar{u}_j' \right] + F_i \quad (2)$$

式中: \bar{u}_i 、 \bar{u}_j ($i, j=1, 2, 3$) 为 X 、 Y 、 Z 方向的平均速度分量; \bar{p} 为平均压力; μ 为动力黏滞系数; F_i 为体积力; ρ 为介质密度。

引入湍动能方程和耗散率输运方程, 将方程 (1) 与 (2) 组成的方程组封闭:

收稿日期: 2019-05-09

作者简介: 商邑楠 (1990-), 男, 硕士, 助理工程师。

$$\rho \frac{dk}{dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon + Y_m \quad (3)$$

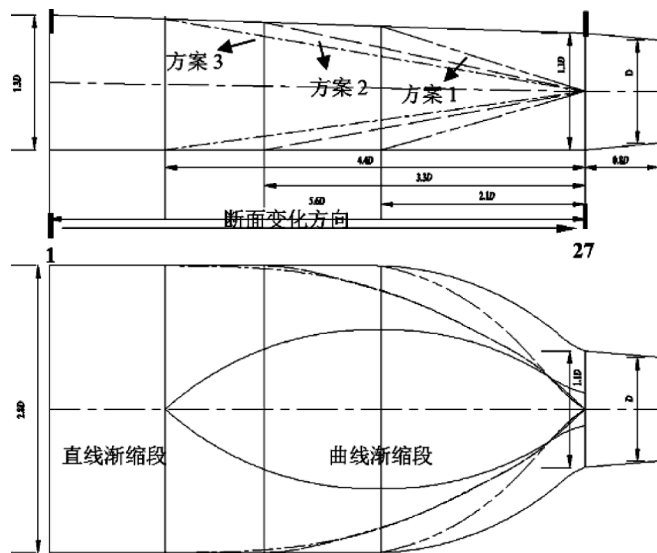
$$\rho \frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (4)$$

式中： G_k 为平均速度梯度引起的湍动能； G_b 为浮力引起的湍动能； $C_{1\varepsilon}$ 、 $C_{2\varepsilon}$ 和 $C_{3\varepsilon}$ 均为常数； σ_k 、 σ_ε 分别为 k 和 ε 的 Prandtl 数。

2 数值模拟计算

2.1 模型建立与网格剖分

为了避免水泵内部复杂的流态对进水流道的计算产生影响，借助商用 FLUENT 软件的前处理模块 GAMBIT，单独建立了竖井贯流装置进水流道的三维立体计算域。根据曲线渐缩段起始位置的不同，采用不同的平顺过渡策略，制定了 3 种进水流道的方案。图 1 为各方案进水流道的轮廓尺寸示意图，进水流道进口截面的长宽分别为 $2.8D$ 、 $1.3D$ (D 为水泵出口直径)，整个进水流道长度为 $5.6D$ ，各方案曲线渐缩段的起始位置离流道出口截面的距离分别为 $2.9D$ 、 $4.1D$ 、 $5.2D$ 。各方案计算域示意图如图 2 所示：在流道进口前加一段长 $3.5D$ 的前池，前池水深为设计水位，在流道出口末端加一段长 $2D$ 的出水直管。考虑到进水流道曲线渐缩段的



注： D 为水泵出口直径

图 1 各方案轮廓尺寸示意图

末端几何结构相对复杂，采用适应性较强的非结构化网格对进水流道进行离散，前池和直管段采用结构化网格进行网格离散。3 种方案的网格数目分别为 42 万、41 万和 50 万，前池和出水直管段的网格数分别为 34 万和 3.8 万。

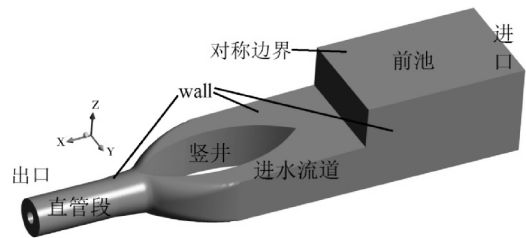
2.2 边界条件

2.2.1 进口边界条件

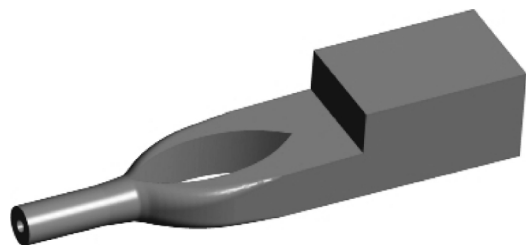
计算区域的进口设置在进水流道的入口处（如图 2），流道进口速度分布比较均匀，故采用了质量进口。为了研究不同流量下进水流道内的流态，选择了 3 个不同的流量，分别为 $0.6Q_D$ （小流量）、 Q_D （设计流量）和 $1.2Q_D$ （大流量）。

2.2.2 出口边界条件

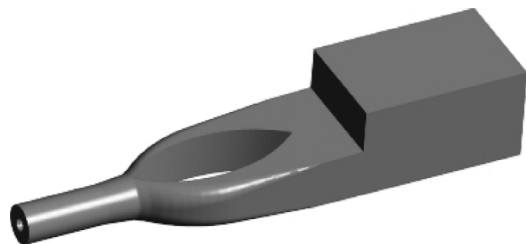
据已做的相关研究^[3]可知，水泵正常运行工况下，叶轮室水泵叶轮的旋转对进水流道内的流态影响较小，所以将出口设置成自由出流的边界条件（如图 2）。



方案 1



方案 2



方案 3

图 2 3 种方案计算域示意图

2.2.3 固体边壁边界条件

该竖井贯流装置进水流道的固体边壁包括进水流道的固体边壁以及流道中心轴线上竖井的固体边壁,均作墙面处理,设置为 wall,即固体壁面处无滑移条件(X 、 Y 、 Z 方向上的分速度均为 0)。

除此之外,前池水面设置为对称边界,各子计算域间的接触区域设置为交界面,本计算共有 2 组交界面。

2.3 计算结果及分析

2.3.1 进口断面轴向速度分析

图 3 为 3 种方案出口断面在 $0.6Q_D$ (小流量)、 Q_D

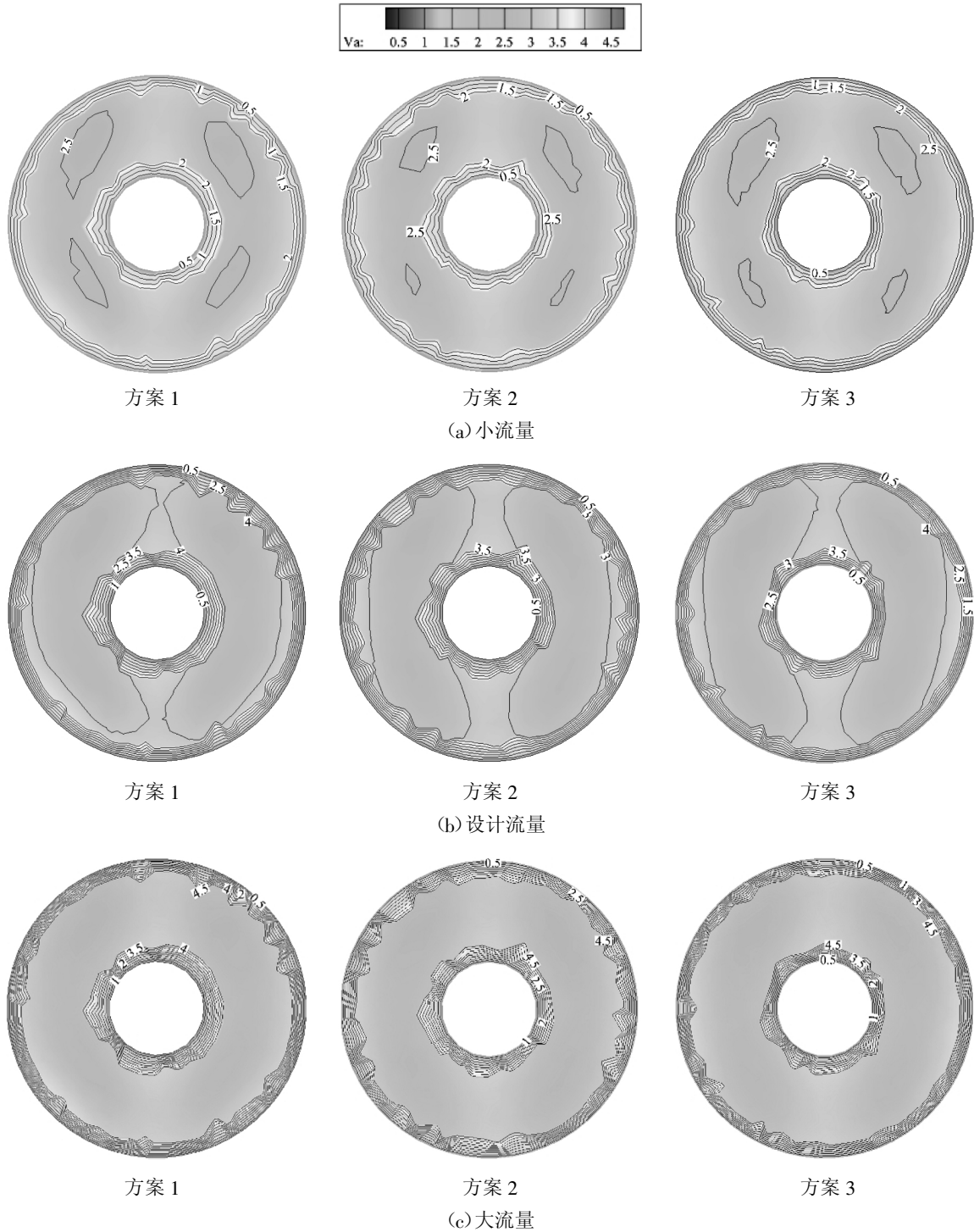


图 3 不同流量下各方案出口断面轴向速度等值云图

(设计流量)和 $1.2Q_b$ (大流量)下的轴向速度等值云图。通过对比发现:不同流量下,各方案出口断面的轴向流速分布基本上呈上下对称、左右对称的分布趋势,且表现为越靠近壁面边界速度越小,在壁面上的速度为0,这与实际情况相同;在同一流量下,3种方案出口断面上的轴向速度分布趋势和数值大小均基本相似;在不同流量下,随着流量的增加,各方案出口断面上的轴向速度变大,设计流量下最大流速是小流量下最大流速的1.67倍左右,而大流量下最大流速则是设计流量下最大流速的1.2倍左右,这与根据流量与断面面积之比计算出的结果完全吻合。

2.3.2 水平剖面流态分析

取进水流道中心水平剖面 $Z=0$ 为分析断面,研究该断面上压力分布和水流流态。图4为不同流量下各方案在所选分析断面上的流线压力云图。通过对比发

现:竖井收缩段的末端两侧,存在对称的负压区,方案2和方案3的负压区范围大致一样,比方案1的负压区略小;随着流量的增加,断面上的压力水平增加;竖井两侧的压力云图基本对称;竖井两侧的流线均较为平顺,未见明显的回流发生。

2.3.3 进水流道内水力损失分析

图5为各方案沿着进口方向直至出口处的断面积情况,方案1的面积变化率较陡,方案3次之,方案2的断面变化最缓。流道的断面变化情况将影响到流道的水力损失性能,流道过渡越平缓,水力性能越好。

以方案1大流量(25 000 l/s)下的水力损失为基准,图6为各方案在小流量、设计流量和大流量下的相对水力损失情况。由图6可知,方案1的水力损失略大,方案2的水力损失略小于方案3。这从侧面反映了上述流道断面面积的变化率反映的结果。

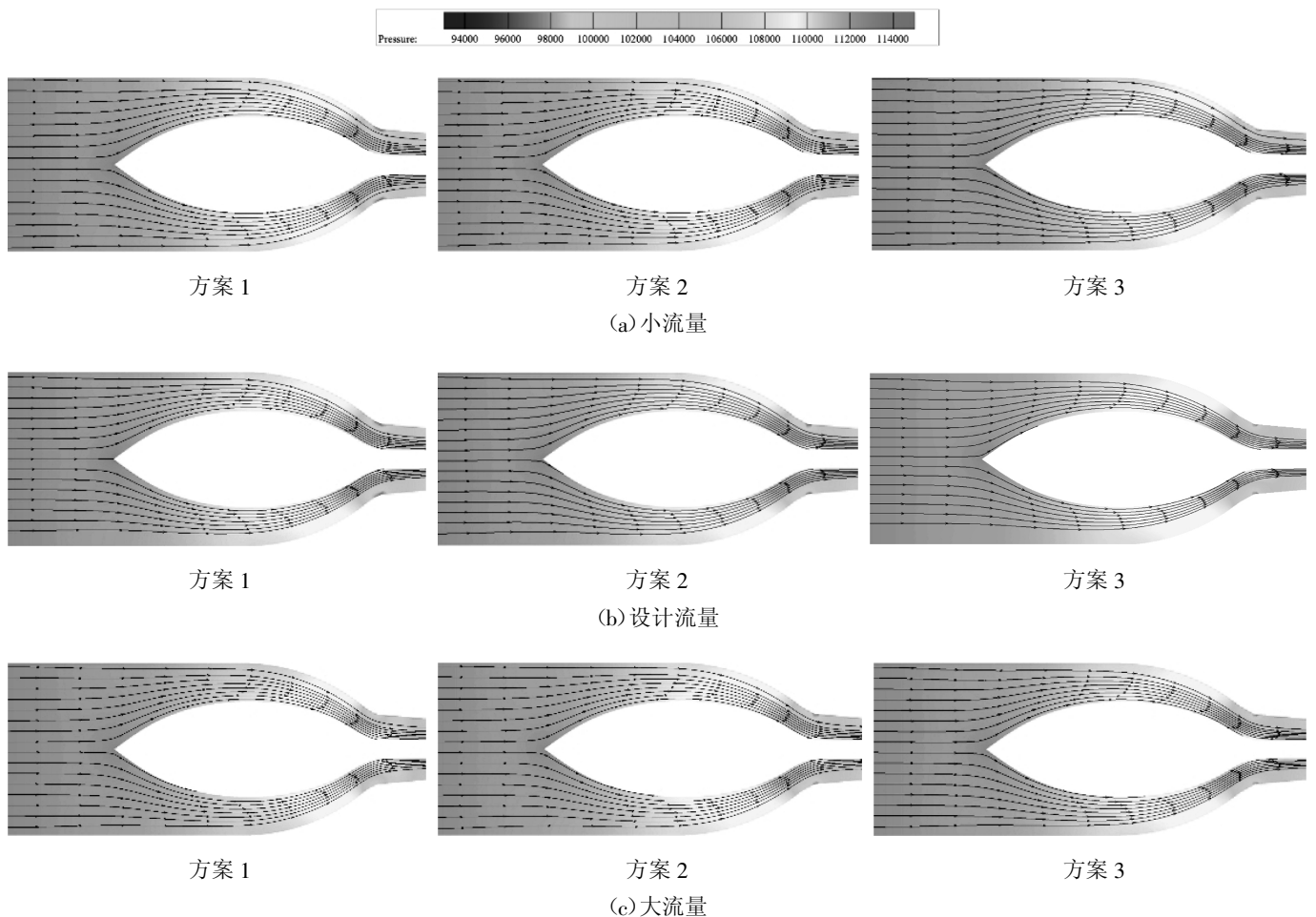


图4 不同流量各方案水平剖面($Z=0$)流线压力云图

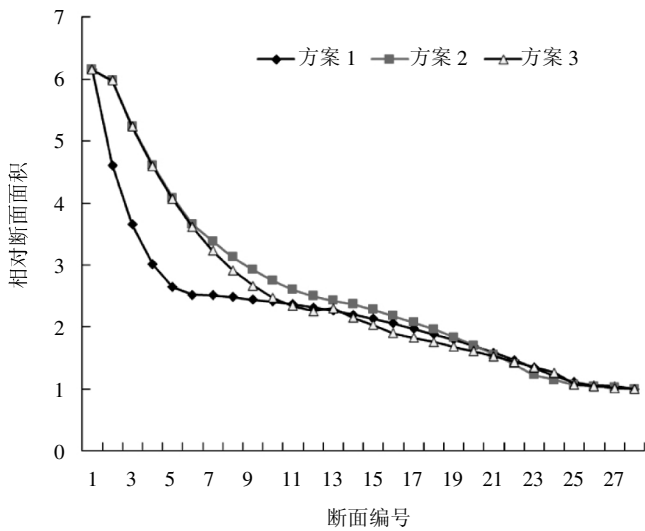


图 5 各方案断面面积情况

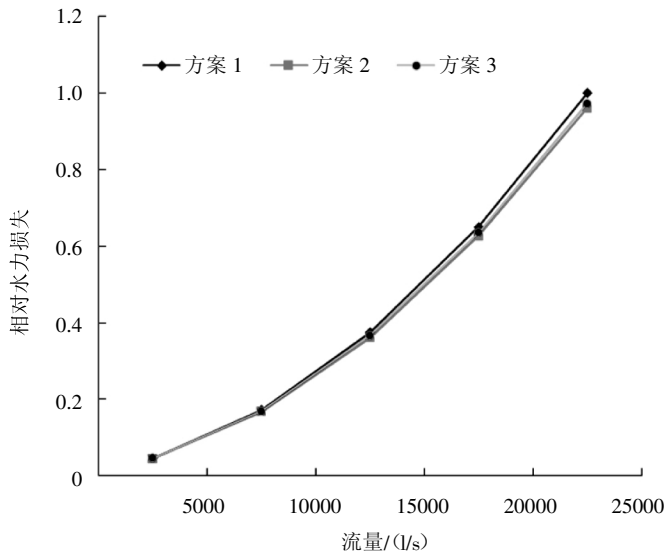


图 6 各方案不同流量下的水力损失示意图

3 结 论

(1) 数值模拟了 3 种流道方案在小流量、设计流量和大流量下的流动规律, 发现各方案出口的速度分布

相差不大, 均且呈现出了上下、左右对称分布的趋势。

(2) 通过分析各方案的水力损失与断面面积变化的关系可知, 流道过渡的平缓与否会影响到水力损失性能的好坏。

(3) 3 种方案的水力损失性能相差不大, 所以考虑到工程的经济性, 选择方案 1 作为最终方案。

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] 成立, 刘超, 薛坚, 等. 基于 CFD 流动分析的泵站肘形进水流道水力特性研究 [J]. 应用基础与工程科学学报, 2008, 16 (6): 891~899.
- [3] 何钟宁, 陈松山, 周正富, 等. 大型竖井进水流道水力优化设计研究[J]. 灌溉排水学报, 2010, 29 (6): 97~99.
- [4] 徐磊, 陆林广, 陈伟, 等. 南水北调邳州站竖井贯流泵装置进出水流态分析[J]. 农业工程学报, 2012, 28 (6): 50~56.
- [5] 肖玉平, 郑源, 江如汉, 等. 竖井式贯流泵装置的数值模拟与优化[J]. 水电能源科学, 2010, 28 (2): 143~145.
- [6] 陈松山, 葛强, 严登丰, 等. 泵站竖井进水流道数值模拟与装置特性试验[J]. 农业机械学报, 2006, 37 (10): 58~61.
- [7] 杨帆, 罗祝北, 汤方平, 等. 大型低扬程泵站钟形进水流道水力特性研究[J]. 中国农村水利水电, 2011 (2): 135~138.
- [8] 颜红勤. 梅梁湖泵站竖井贯流泵装置主要参数的确定[J]. 水利水电科技进展, 2005 (06): 91~94.
- [9] 陆伟刚, 张旭. 特低扬程竖井贯流泵装置水力特性试验研究 [J]. 灌溉排水学报, 2012, 31 (06): 103~106+125.
- [10] 谢荣盛, 汤方平, 刘超, 等. 竖井与轴伸贯流泵装置水力特性比较[J]. 农业工程学报, 2016, 32 (13): 24~30.
- [11] 孟凡, 裴吉, 李彦军, 等. 导叶位置对双向竖井贯流泵装置水力性能的影响 [J]. 农业机械学报, 2017, 48 (02): 135~140.
- [12] 孙衍, 李尚红, 颜蔚, 等. 竖井式贯流泵装置进出水流道优化 CFD[J]. 中国农村水利水电, 2018 (08): 186~189+193.
- [13] 汤方平, 袁家博, 周济人. 轴流泵站进出水流道水力损失的实验研究[J]. 排灌机械, 1995, 13 (3): 13~14.

编辑: 张绍付

Numerical simulation of shaft tubular pump inlet duct

SHANG Yinan¹, LUO Can², XIA Chenzhi³, ZENG Shulei¹

(1. JiuJiang Municipal Planning and Designing Institute of Water Conservancy & Hydro-Electric Power of Jiangxi Province, JiuJiang 332001, China; 2. Yangzhou University, Yangzhou 225000 China; 3. The Eastern Route of South-to-North Water Diversion Project Jiangsu Water Source Co.Ltd, Nanjing 210000, China)

Abstract: Based on the Standard $k-\varepsilon$ turbulence model, with the Reynolds averaged N-S equations and the SIMPLE algorithm, the inlet duct of the shaft tubular pump with different design parameters is simulated. The flow pattern in the inlet passage, the velocity distribution of the feature section and the hydraulic losses with different design parameters are showed in the article. On the contrast, the conclusion below can be got: (1)The smoother the lateral design line of the shaft is, the better the performance of the hydraulic losses is. (2)The velocity distribution of each case presents as a symmetrical distribution. (3)There is little difference among the hydraulic performance of the three cases. Choose case 1 as the final case, considering the economics of the project.

Key words: Shaft tubular pump; Inlet passage; CFD; Flow pattern

翻译: 商邑楠

(上接第 240 页)

Study on dam risk assessment based on fuzzy analytic hierarchy process

ZHOU Duanqi¹, ZHOU Zhiwei²

(1. Luyuan Reservoir Administration of Wan'an County of Jiangxi Province, Wanan 343800, China;
2. Jiangxi Institute of Water Sciences, Nanchang 330029, China)

Abstract: Based on the fragility degree and the analytic hierarchy process(AHP), a dam risk assessment method using fuzzy mathematics as a tool is proposed in this paper. The risk classification of reservoirs is determined by the degree of membership. Risk analysis of four reservoirs in Dayu county shows that the risk of large and medium-sized reservoirs is low, while that of small reservoirs is high. The study shows that the fuzzy evaluation method based on vulnerability can objectively reflect the risk ranking of reservoirs and provide a new way for risk assessment of dams.

Key words: Vulnerability; Fuzzy mathematics; Index system; Risk assessment

翻译: 周端祺