

竖井式进水流道尺寸对水力性能的影响

徐 磊, 陆林广, 王 海, 李亚楠

(扬州大学 水利与能源动力工程学院, 江苏 扬州 225009)

摘要: 根据南水北调东线工程邳州泵站的基本参数, 基于进水流道三维湍流流动数值模拟方法, 研究了竖井式进水流道控制尺寸对其水力性能的影响。揭示了竖井式进水流道长度、宽度和高度等控制尺寸对进水流道出口流速分布均匀度、流速加权平均角度和水头损失的影响规律和原因, 并分析了流道内的流速分布情况。研究表明: 控制尺寸对竖井式进水流道水力性能影响较为显著; 控制尺寸的增加明显提高了竖井式进水流道的水力性能, 当增加至一定值后, 影响趋于平缓; 邳州泵站竖井式进水流道方案控制尺寸取值合理, 水流收缩平顺均匀、流线层次分明, 流道内无任何脱流或旋涡等不良流态, 水头损失小。本研究结果可为竖井式进水流道的水力设计、控制尺寸的合理确定提供理论依据。

关 键 词: 贯流泵装置; 竖井式进水流道; 控制尺寸; 水力性能; 数值模拟

中图分类号: TV136⁺.2; TV675 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-640X(2014)05-0047-06

竖井式贯流泵装置将电动机、齿轮箱和轴承等设备布置在开敞式混凝土竖井中, 具有结构较简单、安装检修较方便、电机通风散热条件较好和投资较省等优点, 在水资源调配、水环境改善和城市防洪等领域应用广泛。

目前, 在竖井式贯流泵装置的水力性能方面已有一些研究, 主要是采用数值模拟和模型试验方法计算内部流动和测试水力特性。文献[1-2]结合工程建设分别对梅梁湖泵站和邳州泵站竖井式贯流泵装置性能进行了模型试验研究; 文献[3-4]对竖井式贯流泵进水流道和泵装置水力性能进行了数值模拟研究, 同时进行了泵装置模型试验验证; 文献[5]基于三维流动数值模拟方法对竖井式贯流泵装置进、出水流道流态进行了详细剖析。从已有研究来看, 关于流道设计参数对水力性能影响方面的系统研究很少, 文献[6]对此仅进行了初步研究。本文基于三维湍流流动数值模拟方法, 揭示流道控制尺寸对竖井式进水流道水力性能的影响规律及原因, 为竖井式贯流泵装置的水力设计、合理确定控制尺寸提供理论依据。

1 基本参数

南水北调东线一期工程邳州泵站设计扬程和平均扬程分别为 3.1 和 2.7 m, 单泵设计流量 33.4 m³/s, 采用经天津同台测试的 TJ04-ZL-06 水泵模型^[7], 叶轮直径 3.3 m, 为前置竖井式贯流泵装置。

本文借用邳州泵站基本参数, 在对进水流道进行初步优化水力设计研究的基础上^[6], 进一步研究流道长度、宽度和高度等 3 个控制尺寸对其水力性能的影响。经初步优化水力设计得到的方案(方案 00)流道长度、宽度和高度分别为 16.5、8.0 和 5.2 m, 其单线图和透视图见图 1。

收稿日期: 2014-05-13

基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目(51309200); 中国博士后科学基金资助项目(2013M540469); 江苏省博士后科研基金资助项目(1301021A)

作者简介: 徐 磊(1984-), 男, 江苏连云港人, 讲师, 博士, 主要从事低扬程泵装置优化水力设计研究。

E-mail: xulei1017@163.com 通信作者: 陆林广(E-mail: yzlul@126.com)

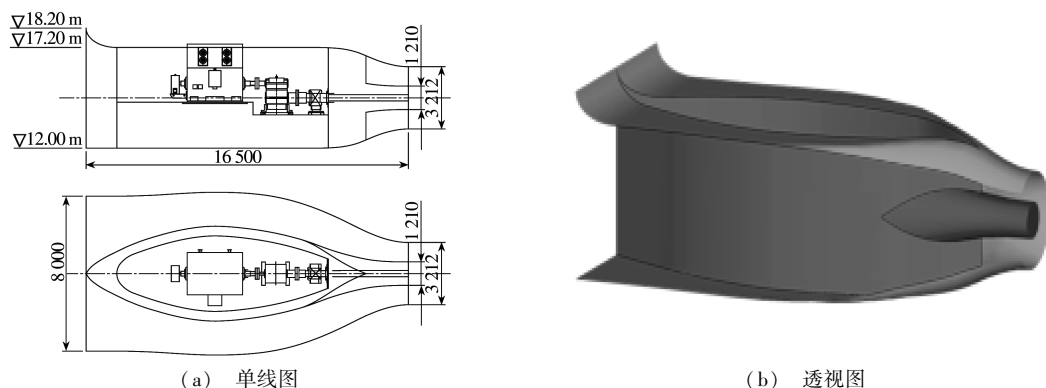


图 1 竖井式进水流道单线图和透视图(单位: mm)

Fig. 1 Single line drawing and perspective drawing of shaft inlet conduit (unit: mm)

2 三维流场数学模型

2.1 控制方程

竖井式贯流泵装置进水流道三维湍流流场求解的控制方程包括连续性方程、动量方程及 $k-\varepsilon$ 模型中的 k 方程和 ε 方程。对此,已有很多文献进行了介绍^[8-10],本文不再描述。

2.2 边界条件

(1)进口边界。竖井式进水流道三维流场计算的进口边界设置在距流道进口断面足够远的前池中,该断面的速度可认为是均匀分布,因计算流量已知,故采用速度进口边界条件。

(2)出口边界。竖井式进水流道三维流场计算的出口边界设置在距流道出口断面 2 倍出口直径处,该处的流动可认为是充分发展的,故采用自由出流边界条件。

(3)固壁边界。竖井式进水流道流场计算中的前池底壁、流道和竖井边壁等均为固壁,其边界条件按固壁定律处理,对紧靠固壁处节点的湍流特性,则采用对数式固壁函数处理^[11]。

(4)对称边界。计算区域中前池的侧面为对称面;前池表面为自由水面,忽略水面风引起的切应力及其与大气层的热交换,自由水面也可视为对称平面处理^[11]。

2.3 计算区域及网格剖分

根据竖井式贯流泵装置进水流道边界条件的设置情况,其三维流场计算的区域包括前池、进水流道和出水直管等 3 个部分。采用 GAMBIT 软件对计算区域进行网格剖分,进水流道部分采用适应性强的非结构化网格,前池和直管部分采用混合网格及结构化网格(图 2)。

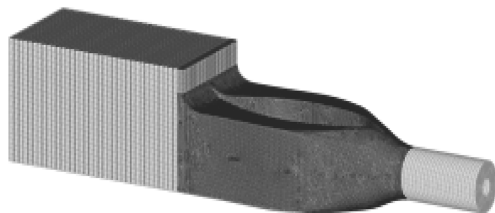


图 2 竖井式进水流道计算区域及网格剖分

Fig. 2 Calculation domain and meshes of shaft inlet conduit

3 计算结果及影响分析

进水流道的设计参数包含主要控制尺寸和次要几何变量。本文研究进水流道的长度 L_c 、宽度 W_c 和高度 H_c 等 3 个主要控制尺寸对流动水力性能的影响。进水流道水力性能好坏的衡量指标主要包括流道出口断面的流速分布均匀度 V_u , 流速加权平均角度 $\bar{\theta}$ 和流道水头损失 Δh_c 等 3 个方面^[12],其表达式如下:

$$(1) \text{流速分布均匀度 } V_u: \quad V_u = \max \left\{ 1 - \frac{1}{\bar{u}_a} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (u_{ai} - \bar{u}_a)^2}{m}} \right\} \quad (1)$$

式中: u_{ai} 和 $\bar{u}_a$ 分别为进水流道出口断面各点的轴向流速和平均轴向流速; m 为流道出口断面的单元数。

$$(2) \text{ 流速加权平均角度 } \bar{\theta}: \quad \bar{\theta} = \max \left\{ \frac{\sum_{i=1}^m \left(90^\circ - \arctg \frac{u_{ti}}{u_{ai}} \right)}{m} \right\} \quad (2)$$

式中: u_{ti} 为水泵进口断面各单元的横向速度。

$$(3) \text{ 流道水头损失 } \Delta h_c: \quad \Delta h_c = \min \left\{ (0.5 + \zeta_c) \frac{v_c^2}{2g} \right\} \quad (3)$$

式中: ζ_c 为进水流道水头损失系数; v_c 为进水流道进口断面平均流速。

以上3个性能指标中, V_u 和 $\bar{\theta}$ 的理想值分别为100%和90°, Δh_c 要求尽可能地小。

3.1 流道长度的影响

在竖井式进水流道初步优化水力设计过程中,流道内竖井的尺寸及形状考虑了电动机、齿轮箱及轴承等设备的安装要求,同时也考虑泵站运行管理人员的巡查和操作空间要求。因此,在研究流道长度对其水力性能影响时,保持竖井的形状及尺寸、流道宽度和高度不变,流道长度的改变量全部用于竖井尾部与叶轮室进口之间的锥段,并相应调整锥段形线使其收缩变化均匀。本项研究中,流道长度的变化范围取为15.5~17.5 m,每间隔0.5 m形成一个计算方案。流道长度对其水力性能影响研究的计算方案、流道尺寸和流场计算主要结果见表1。竖井式进水流道水力性能随流道长度变化的关系见图3。

表1 不同流道长度方案时竖井式进水流道水力性能

Tab. 1 Main results of hydraulic performance for shaft inlet conduit with different lengths

方案编号	流道长度/m	流道宽度/m	流道高度/m	流速分布均匀度/%	流速加权平均角度/°	流道水头损失/m
方案11	15.5	8.0	5.2	97.3	86.0	0.069
方案12	16.0	8.0	5.2	98.4	88.1	0.069
方案00	16.5	8.0	5.2	98.8	88.9	0.065
方案13	17.0	8.0	5.2	99.0	89.2	0.064
方案14	17.5	8.0	5.2	98.9	89.4	0.065

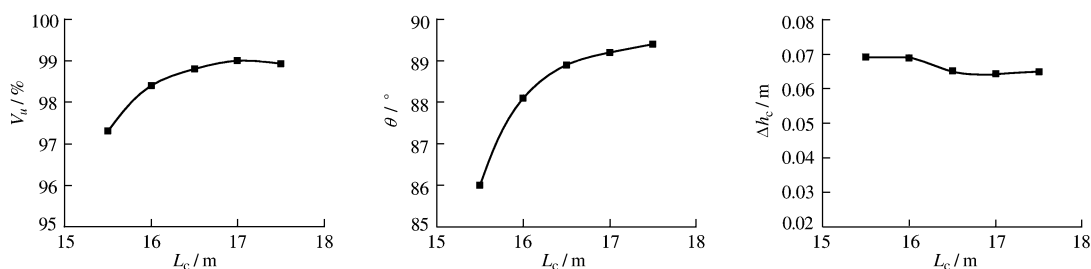


图3 流道水力性能与流道长度的关系曲线

Fig. 3 Relationship between conduit hydraulic performance and conduit length

由表1和图3可见:流道长度对竖井式进水流道水力性能具有较为明显的影响;在流道长度计算范围内,随着长度的增加,流道出口断面的流速分布均匀度 $\bar{V}_u$ 和流速加权平均角度 $\bar{\theta}$ 均逐渐增大、流道水头损失逐渐减小;当流道长度增加至16.5 m后,流道长度对水力性能的影响减弱、曲线变化趋于平缓。产生这一现象的原因是:流道锥段长度的增加有利于流道出口段流场的调整,故进水流道出口流速分布均匀度 $\bar{V}_u$ 和流速加权平均角度 $\bar{\theta}$ 变好;流道长度增加有利于水流收缩,故水头损失逐渐减小。但过大的增加长度将会增加沿程水头损失,引起水头损失增大,同时还会导致泵轴加长和土建投资增加。

3.2 流道宽度的影响

与研究流道长度对其水力性能影响相同,在研究流道宽度对竖井式进水流道水力性能的影响时,保持竖井形状和尺寸不变,同时保持流道长度16.5 m和高度5.2 m不变。进水流道宽度的计算范围取7.0~8.5 m,每间隔0.5 m形成一个计算方案,并根据宽度的不同对流道平面方向的形线进行调整。流道宽度对

其水力性能影响研究的计算方案、流道尺寸和进水流场计算主要结果见表 2。竖井式进水流道水力性能随流道宽度变化的关系见图 4。

表 2 不同流道宽度方案时竖井式进水流道水力性能

Tab. 2 Main results of hydraulic performance for shaft inlet conduit with different widths

方案编号	流道长度/ m	流道宽度/ m	流道高度/ m	流速分布均匀度/ %	流速加权平均角度/ °	流道水头损失/ m
方案 21	16.5	7.0	5.2	98.8	89.1	0.090
方案 22	16.5	7.5	5.2	98.8	89.0	0.073
方案 00	16.5	8.0	5.2	98.8	88.9	0.065
方案 23	16.5	8.5	5.2	98.8	88.8	0.065

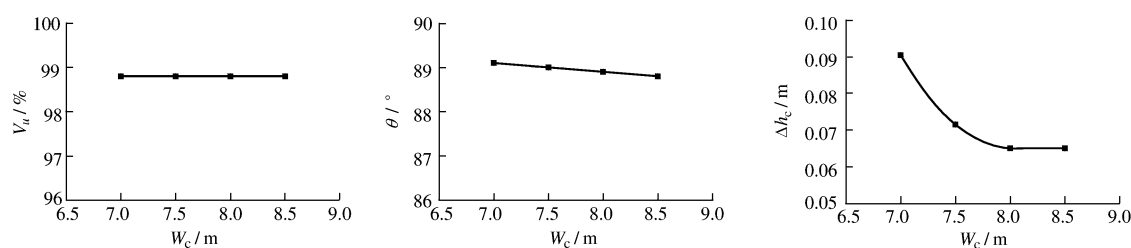


图 4 流道水力性能与流道宽度的关系曲线

Fig. 4 Relationship between conduit hydraulic performance and conduit width

由表 2 和图 4 可以看到:流道宽度对竖井式进水流道水力性能有一定的影响,对流速分布均匀度和流速加权平均角度影响较小,对水头损失影响较大;在流道宽度计算范围内,随着宽度的增加,流道内的流速逐渐减小,流道水头损失逐渐减小,当宽度增加至 8 m 后,流道水头损失基本不变。产生这一现象的原因是:流道高度不变,随着流道宽度增加,流道内的流速降低,则可减少流道水头损失;宽度增加导致收缩角增大,故流速加权平均角度减小;收缩角增加导致局部水头损失增大,使总水头损失变化变缓,同时过大的宽度还将增加土建投资。

3.3 流道高度的影响

竖井式进水流道的竖井与流道同高,故在研究流道高度对竖井式进水流道水力性能的影响时,保持竖井形状和平面方向的尺寸不变,同时保持流道长度 16.5 m 和宽度 8.0 m 不变。进水流道高度的计算范围取 4.2 ~ 5.7 m,每间隔 0.5 m 形成一个计算方案,并根据高度的不同对流道立面方向的形线进行调整。流道高度对其水力性能影响研究的计算方案、流道尺寸和进水流场计算主要结果见表 3。竖井式进水流道水力性能随流道高度变化的关系曲线见图 5。

由表 3 和图 5 可以看到:流道高度对竖井式进水流道的水力性能有一定的影响,对流速分布均匀度和流速加权平均角度影响较小,对流道水头损失影响较大;在流道高度计算范围内,流速分布均匀度和流速加权平均角度随高度的增加基本不变,流道水头损失减小较为明显,当高度增加至 5.2 m 后,高度增加对水头损失的影响趋于平缓。产生这一现象的原因是:流道宽度不变,随着高度增加,流道内的流速降低,则流道水头损失减少;当高度增加时,流道收缩角增大,流道局部水头损失增加,使总水头损失变化趋缓。

表 3 不同流道高度方案时竖井式进水流道水力性能

Tab. 3 Main results of hydraulic performance for shaft inlet conduit with different heights

方案编号	流道长度/ m	流道宽度/ m	流道高度/ m	流速分布均匀度/ %	流速加权平均角度/ °	流道水头损失/ m
优化方案 31	16.5	8.0	4.2	98.8	89.1	0.082
优化方案 32	16.5	8.0	4.7	98.8	89.0	0.072
优化方案 00	16.5	8.0	5.2	98.8	88.9	0.065
优化方案 33	16.5	8.0	5.7	98.9	88.9	0.064

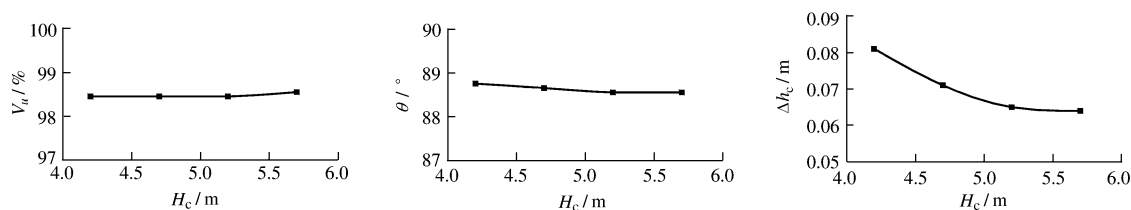


图5 进水流道水力性能与流道高度的关系曲线

Fig. 5 Relationship between conduit hydraulic performance and conduit height

4 竖井式进水流道的流场

基于控制尺寸对竖井式进水流道水力性能影响的研究结果,根据邳州泵站工程泵房设备及闸门布置的需要,在方案00的基础上,保持锥段长度不变,将流道长度由16.5 m调整为17.395 m,并对流道进口圆弧段和竖井头部的形线作适当调整,形成邳州泵站进水流道的最终方案。

对该流道方案设计流量时的流场进行了数值计算,结果表明:流道出口的流速分布均匀度和流速加权平均角度分别为98.9%和88.7°,流道水头损失为0.064 m。计算得到的设计流量时流场见图6,可以看到:流道进口至出口的流速逐渐增大,水流对称通过竖井两侧通道并于尾部汇合;流道出口断面水流流速分布均匀且基本垂直于出口断面;流道内的水流收缩平缓均匀、流线层次分明,无任何脱流或旋涡等不良流态。

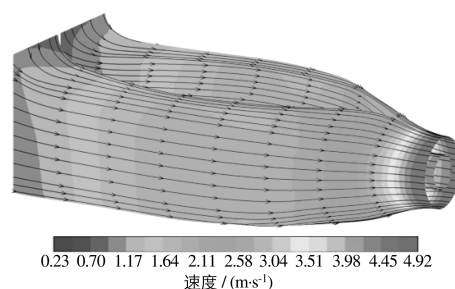


图6 邳州泵站竖井式进水流道流场

Fig. 6 Flow field in shaft inlet conduit of the Pizhou pumping station

5 结 语

(1) 竖井式进水流道的控制尺寸对其流道水力性能影响较为明显。

(2) 流道长度、宽度和高度等3个控制尺寸的增加显著提高了竖井式进水流道的水力性能,增加至一定值后,控制尺寸的影响趋于平缓。

(3) 邳州泵站竖井式进水流道方案控制尺寸取值合理,水流收缩平缓均匀、流线层次分明,流道内无任何脱流或旋涡等不良流态,水头损失小,可为水泵的高效运行提供理想的流态。

参 考 文 献:

- [1] 郑源,张德虎,廖锐,等. 竖井贯流泵能量特性试验研究[J]. 排灌机械, 2003, 21(3): 31-34. (ZHENG Yuan, ZHANG De-hu, LIAO Rui, et al. Experimental study on equipment energy characteristic for shaft tubular pump[J]. Drainage and Irrigation Machinery, 2003, 21(3): 31-34. (in Chinese))
- [2] 徐磊,陆林广,陈伟,等. 邳州站竖井式贯流泵装置模型试验研究[J]. 灌溉排水学报, 2012, 31(2): 120-123. (XU Lei, LU Lin-guang, CHEN Wei, et al. Model test for pit tubular pump system of Pizhou pumping station[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2012, 31(2): 120-123. (in Chinese))
- [3] 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. (CHEN Song-shan, GE Qiang, YAN Deng-feng, et al. Numerical simulation of turbulent flow inside inlet duct and experiment on characteristic performances in shaft tubular model pump set[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(10): 58-61. (in Chinese))
- [4] 郑源,肖玉平,刘文明,等. 大型竖井式贯流泵装置的数值模拟与性能预测[J]. 排灌机械, 2009, 27(6): 393-397. (ZHENG Yuan, XIAO Yu-ping, LIU Wen-ming, et al. Numerical simulation and performance prediction for large-scale shaft-

- well tubular pump unit[J]. Drainage and Irrigation Machinery, 2009, 27(6): 393-397. (in Chinese))
- [5] 徐磊, 陆林广, 陈伟, 等. 南水北调工程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. (XU Lei, LU Lin-guang, CHEN Wei, et al. Flow pattern analysis on inlet and outlet conduit of shaft tubular pump system of Pizhou pumping station in South-to-North Water Diversion Project[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(6): 50-56. (in Chinese))
- [6] 徐磊, 陆林广, 陈伟, 等. 竖井贯流泵装置水力设计方案比较研究[J]. 水力发电学报, 2011, 30(5): 207-215. (XU Lei, LU Lin-guang, CHEN Wei, et al. Study on comparison of hydraulic design schemes for shaft tubular pump system[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2011, 30(5): 207-215. (in Chinese))
- [7] 刘宁, 汪易森, 张纲. 南水北调工程水泵模型同台测试[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2006. (LIU Ning, WANG Yi-sen, ZHANG Gang. Pump model tested on the same test bed for South to North Water Diversion Project[M]. Beijing: China WaterPower Press, 2006. (in Chinese))
- [8] LI Yao-jun, WANG Fu-jun. Numerical investigation of performance of an axial-flow pump with inducer[J]. Journal of Hydrodynamics, 2007, 19(6): 705-711.
- [9] JAFARZADEH B, HAJARI A, ALISHAHI M M, et al. The flow simulation of a low-specific-speed high-speed centrifugal pump[J]. Applied Mathematical Modelling, 2010, 35: 242-249.
- [10] CONSTANTINESCU G S, PATEL V C. Numerical model for simulation of pump-intake flow and vortices[J]. Journal of Hydraulic Engineering, February 1998(2): 123-134.
- [11] RODI W. Turbulence models and their application in hydraulics experimental and mathematical fluid dynamics[M]. Delft, 1980: 44-46.
- [12] 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: 33. (LU Lin-guang. Optimum hydraulic design for high performance large pump system with low head[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2013: 33. (in Chinese))

Influence of control size of shaft inlet conduit on hydraulic performance

XU Lei, LU Lin-guang, WANG Hai, LI Ya-nan

(School of Hydraulic, Energy and Power Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China)

Abstract: According to the preliminary parameters of Pizhou pumping station in East Route Project of South-to-North Water Diversion, and based on the method of 3D turbulence flow numerical simulation for inlet conduit, the influence of the control size of the shaft inlet conduit on hydraulic performance has been studied. The influence of conduit control size including length, width and height on the velocity distribution, weighted average angle at the conduit outlet section and hydraulic loss has been revealed, and the velocity distribution in the conduit has been analyzed. The research results indicate that the control size has comparatively obvious influence on the hydraulic performance for the shaft inlet conduit; the increase of the control size improves the hydraulic performance of the conduit obviously, and its influence is going to be gentle after the size increases to a certain value; the control size of the shaft inlet conduit for the Pizhou pumping station is reasonable, the flow in the inlet conduit contracts smoothly and uniformly, and the stream line layers are clear; and there is no improper flow such as separation or vortex in the conduit, and the hydraulic loss is little. The analysis results can provide a theoretical basis for the hydraulic design as well as the control size of the shaft inlet conduit.

Key words: tubular pump unit; shaft inlet conduit; control size; hydraulic performance; numerical simulation