

井头泵站竖井式贯流泵装置流态及性能分析

王 丽¹, 邹新胜², 徐 磊³, 王 海³, 李亚楠³

(1. 淮安市水利勘测设计研究院有限公司, 江苏 淮安 223005; 2. 宿迁市宿豫区水务局, 江苏 宿迁 223800;
3. 扬州大学, 江苏 扬州 225009)

摘要: 宿迁市井头泵站设计扬程和平均扬程均为 1.7 m, 为适应其扬程低的特点, 采用了竖井式贯流泵装置。运用三维湍流数值计算方法对该泵装置进、出水水道进行了优化水力设计, 并通过模型试验对泵装置水力性能进行了检验。模拟计算结果表明, 进、出水水道内的流态平顺均匀, 叶轮室进口的流速分布均匀度和水流入泵平均角度分别达到 98.7% 和 88.7°, 水头损失小; 设计工况时的泵装置效率和临界空化余量分别为 80.3% 和 3.11 m, 与模型试验结果 (设计工况时的泵装置效率和临界空化余量分别为 81.1% 和 3.3 m) 接近。因此, 井头泵站竖井式贯流泵装置的选型设计合理并达到最优, 为泵站的安全、稳定和高效运行奠定了基础。

关键词: 井头泵站; 竖井式贯流泵装置; 流态; 性能; 数值计算; 模型试验

中图分类号: TV 675; TV 136.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2014)04-0123-05

Flow Pattern and Performance Analysis of Shaft Tubular Pump System in Jingtou Pumping Station

WANG Li¹, ZOU Xin sheng², XU Lei³, WANG Hai³, LI Yan nan³

(1. Huai'an Investigation and Design Institute of Water Conservancy, Huai'an 223005, China;

2. Suyu District Water Authority in Suqian City, Suqian 223800, China; 3. Yangzhou University, Yangzhou 225009, China)

Abstract: The design and average heads of Jingtou pumping station in Suqian city are both 1.7 m, and thus shaft tubular pump system is applied to adapt its characteristics of low heads. The optimum hydraulic design for the inlet and outlet conduits of the pump system were conducted using the numerical simulation method of three dimensional turbulence flow, and the hydraulic performance of the pump system was verified using model test. The results indicated that the flow pattern in the inlet and outlet conduits is uniform and smooth, the velocity distribution uniformity and the average angle into the pump reach 98.7% and 88.7° at the impeller chamber inlet section, respectively, and the hydraulic losses of the optimized conduits are low. Moreover, the efficiency and critical net positive suction head of the pump system were 80.3% and 3.11 m under the design head conditions, respectively, which were similar to those obtained from model test (the efficiency and critical net positive suction head were 81.1% and 3.3 m under the design head conditions). Therefore, the selection and design for the shaft tubular pump system in Jingtou pumping station are reasonable and optimal, which lays a foundation for the safe, stable, and efficient operation of the pumping station.

Key words: Jingtou pumping station; shaft tubular pump system; flow pattern; performance; numerical simulation; model test

宿迁市井头泵站建成于 1983 年 5 月, 由一站、二站 2 座机房组成, 共安装 26 寸混流泵配 6 160 A 型柴油机 80 台套, 总装机容量 8 000 kW, 设计流量 80 m³/s, 主要为宿豫区来龙灌区提供灌溉水源, 特殊干旱年份向宿迁闸上中运河以及向骆马湖补水。改建后泵站设计流量仍为 80 m³/s, 设计扬程和平均扬程均为 1.7 m, 最大扬程 2.7 m。

经方案比选, 确定采用竖井式贯流泵装置 5 台套, 单机设计流量为 16 m³/s, 水泵叶轮轴线高程 14.35 m。贯流泵的泵轴采用卧式布置, 特别适用于大型低扬程泵站^[1-3]。其电机、齿轮箱、轴承等设备均布置在由混凝土浇筑的开敞式竖井中, 安装和检修较为方便, 电机通风散热条件较好, 而且基础构造简单, 开挖深度浅, 投资较省。该型式的贯流泵装

收稿日期: 2013-12-21 修回日期: 2014-01-24 网络出版时间: 2014-06-11

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/doi/10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2014.04.001.html>

基金项目: 中国博士后科学基金(2013M540469); 江苏省博士后科研基金(1301021A)

作者简介: 王 丽(1981-), 女, 江苏淮安人, 工程师, 主要从事泵站工程设计研究。E-mail: lilyking2003@163.com

通讯作者: 徐 磊(1984-), 男, 江苏连云港人, 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

置的流道顺直,经过充分的优化水力设计计算,可在特低扬程条件下得到十分优异的水力性能^[46]。对该型式泵装置的数值模拟和模型试验研究已有不少^[7-10]。本文结合井头泵站工程建设的需要,对该站竖井式贯流泵装置的流态及性能进行分析研究,并通过泵装置模型试验进行检验。

1 泵装置主要设计参数

井头泵站采用经南水北调同台测试的 TJ04-ZI-07 水泵模型^[11],确定原型泵叶轮直径为 2 500 mm、转速为 125 r/min,选用额定功率为 710 kW、电压等级为 10 kV 的卧式异步电动机,电机转速为 991 r/min,采用实际减速比为 7.889 的平行轴齿轮减速箱间接传动。根据模型泵换算的泵段叶轮室进口断面的直径为 2 433 mm,导叶体出口断面的直径为 2 629 mm(图 1)。

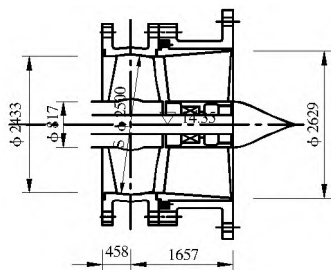


图 1 泵段主要安装尺寸(原型)

Fig. 1 Main installation dimensions of the pump segment (prototype)

2 进、出水流道水力优化的目标

2.1 进水流道水力优化的目标

进水流道是前池与水泵叶轮室之间的过渡段,其作用是为了使水流在流向叶轮室的过程中有序转向和均匀收缩。对进水流道水力设计的要求可概括为以下几点。

(1) 流道型线变化均匀,使水流收缩均匀,无涡流及其它不良流态。

(2) 流道出口断面的流速分布尽可能均匀、水流方向尽可能垂直于出口断面,其要求可用以下目标函数表示^[12]。

(a) 流速分布均匀度,用式(1)计算:

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

式中: \bar{u}_a 为流道出口断面的平均轴向速度; u_{ai} 为出口断面各单元的轴向速度; m 为出口断面的单元个数。

(b) 水流入泵速度加权平均角度,用式(2)计算:

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

式中: u_{ti} 为水泵进口断面各单元的横向速度。

在理想情况下 $V_u = 100\%$, $\bar{\theta} = 90^\circ$, 优化计算的目标是力争取得最优值。

(3) 流道水头损失尽可能小。

(4) 流道控制尺寸取值合理。

2.2 出水流道水力优化的目标

出水流道是水泵导叶出口与出水池之间的过渡段,其作用是为了使水流在流向出水池的过程中有序平缓扩散,尽可能

多地回收水流动能。对出水流道优化水力设计的要求可概括为以下几点。

(1) 适当加大出水流道出口断面的面积,尽量降低流道出口断面的流速,尽可能多地回收水流的动能。

(2) 流道型线变化平缓,尽可能避免水流在扩散的过程中产生脱流或涡流,最大限度地减少流道水头损失。

(3) 流道控制尺寸取值合理。

3 进、出水流场数值计算的数学模型

3.1 控制方程

泵站进、出水流道内水流的流动属于不可压缩湍流流动。湍流流动具有紊动性,可用非稳态的连续方程和 Navier Stokes 方程对湍流的瞬时运动进行描述。为使方程组封闭,还需引入反映湍动能的方程和反映湍动能耗散率的方程。已有很多文献对此进行过详细介绍^[13-15]。

3.2 计算区域及边界条件

3.2.1 进水流场

将进水流道三维湍流流动数值计算流场的进口断面设置在前池中距进水流道进口足够远处,进口边界垂直于水流方向,可认为此处来流速度均匀分布。计算流量为单泵设计流量,可作为已知条件,故而计算流场的进口边界可采用速度进口边界条件。

为了准确应用出口边界条件,将计算流场从进水流道出口沿出流方向等直径延长,使计算流场的出口断面设置在距进水流道出口 2 倍圆管直径处。此处的流动为充分发展的流动,可采用自由出流边界条件。

在计算流场中,前池底壁,进水流道边壁、竖井边壁和水泵叶轮室进口的导流锥边壁等均固壁,其边界条件按固壁定律处理。固壁边界条件的处理对所有固壁处的节点应用了无滑移条件,而对紧靠固壁处节点的湍流特性,则应用了所谓对数式固壁函数处理之,以减少近固壁区域的节点数^[16]。

前池的表面为自由水面,若忽略水面的风所引起的切应力及与大气层的热交换,则自由面可视为对称平面处理^[16]。

在本项研究中,进水流道的流场计算范围包括进水流道内的竖井。

3.2.2 出水流场

为了准确地应用进口的边界条件,将出水流道三维湍流流动数值计算的流场从出水流道进口断面逆水流方向等直径延伸,使计算流场的进口断面设置在距出水流道进口 2 倍圆管直径处。在这里,可认为来流速度均匀分布,计算流量为单泵设计流量,将其作为已知条件,故而计算流场的进口边界可采用速度进口边界条件。另一方面,由于出水流道的进口与水泵导叶出口相接,还需考虑导叶出口水流所具有的量对出水流道的流态及水头损失的影响,因此,需在出水流场的进口预置一定环量。

将出水流道三维湍流流动数值计算流场的出口断面设置在出水池中距出水流道出口足够远处,出口边界垂直于水流方向。在这里,流动是充分发展的,可采用自由出流边界条件。

在计算流场中,出水池底壁、出水通道边壁及水泵导叶出口的导流帽边壁等均为固壁,其边界条件按固壁定律处理^[6]。

出水池的表面为自由水面,若忽略水面的风所引起的切应力及与大气层的热交换,则自由面可视为对称平面处理^[6]。

3.2.3 渠道三维流动模拟的网格

根据上述有关边界条件,可应用 GAMBIT 软件分别完成进、出水通道三维湍流流动数值计算区域的建模和网格剖分,结果分别见图 2。

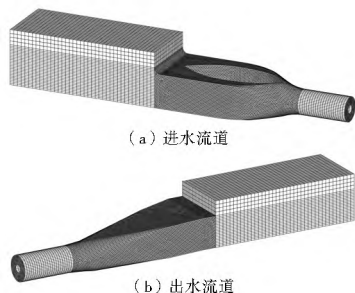


图 2 进、出水通道流场计算区域的网格
Fig. 2 Grid graphs of the calculation region for the inlet and outlet conduit

4 进、出水通道优化计算结果

4.1 进水通道

对井头泵站竖井式贯流泵装置进水通道内的流动进行了优化水力设计计算,其优化方案见图 3,计算所得设计流量时的流场见图 4。根据优化计算结果,进水通道出口断面的流速分布均匀度和水流入泵平均角度分别达到 98.7% 和 88.7°,设计流量时进水通道水头损失的计算值仅为 0.061 m。

由图 4 可以发现进水通道优化方案水流流动的特点:在渠道竖井段,水流在立面方向和平面方向收缩均匀,水流平顺;在渠道出口段,水流收缩加快,但依然保持流速匀称分布、流线层次分明;在渠道出口断面,水流以垂直于该断面的方向均匀流出。从渠道进口至渠道出口,水流收缩平缓、流速分布均匀、流线层次分明,无任何不良流态。

计算结果表明:井头泵站竖井式贯流泵装置进水通道优化方案的水流收缩均匀、流线层次分明、水头损失小,可为水泵叶轮室进口提供非常理想的进水流态。

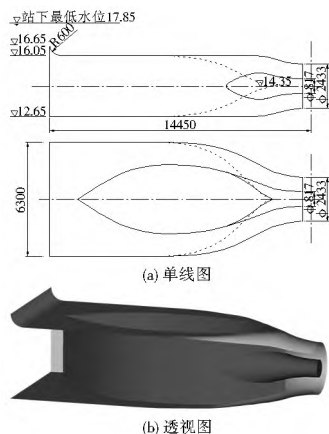


图 3 进水通道单线图和透视图

Fig. 3 Single line drawing and perspective drawing of the inlet conduit

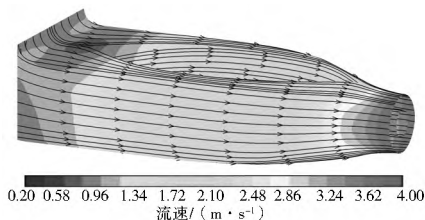


图 4 进水通道流场图

Fig. 4 Flow pattern in the inlet conduit

4.2 出水通道

对井头泵站竖井式贯流泵装置出水通道内的流动进行了优化水力设计计算,其优化方案见图 5,计算所得设计流量时的流场见图 6,设计流量时的渠道水头损失计算值仅为 0.086 m。

由图 6 可以发现出水通道优化方案水流流动的特点:受渠道进口环量的影响,水流以螺旋状进入出水通道;出水通道内水流的旋转运动从渠道进口一直保持到渠道出口,在旋转状态下流畅地完成扩散过程;水流在整个通道内的扩散均匀平缓,在旋转水流所具有的离心力作用下,通道内未出现水流脱壁或旋涡等不良流态。

计算结果表明:井头泵站竖井式贯流泵装置出水通道优化方案的水流扩散平缓均匀、渠道水头损失小,可以满足泵装置高效运行的要求。

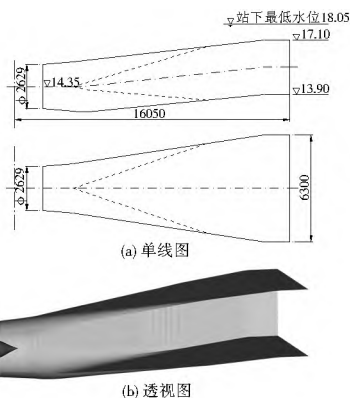


图 5 出水通道单线图和透视图

Fig. 5 Single line drawing and perspective drawing of the outlet conduit

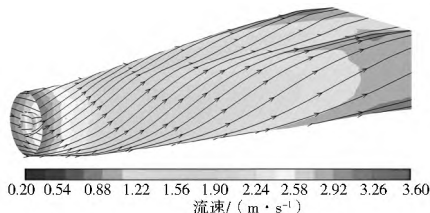


图 6 出水通道流场图

Fig. 6 Flow pattern in the outlet conduit

4.3 泵装置优化方案单线图

由进、出水通道优化方案和泵段构成的井头泵站竖井式贯流泵装置优化方案见图 7。

5 井头站泵装置设计工况性能计算

5.1 泵段性能的修正

泵段由叶轮与导叶体组成,其扬程的测压断面理论上应

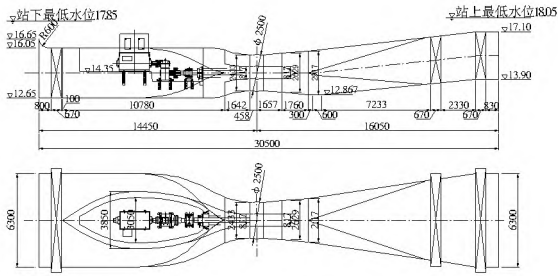


图 7 井头泵站竖井式贯流泵装置单线图

Fig. 7 Single line drawing of the shaft tubular pump system in Jingtou pumping station

分别位于叶轮室的进口断面和导叶体的出口断面。由图 8 可以看到,水泵模型测试段由泵段与标准的进水管、进水收缩管、出水弯管和出水直管组成。水泵模型水力性能的同台测试提供的结果实际上是水泵模型测试段的水力性能。因此,泵段性能与水泵模型测试段性能的差别在于扬程测压断面的位置不同。显然,前者的扬程高于后者,两者扬程的差值即为水泵模型测试段中进、出水管道的水头损失。相应地,前者的效率也高于后者。在低扬程的条件下,测试段中进、出水管道水头损失的影响相对较大,不能忽略,应予以修正^[7]。

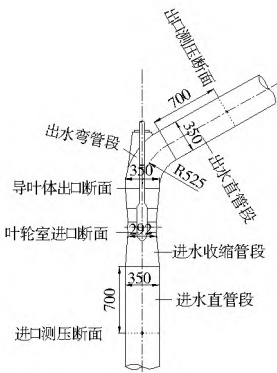


图 8 水泵模型水力性能测试段

Fig. 8 Test section for hydraulic performance of the pump model

根据同台测试结果,对 TJ04-ZL-07 水泵模型高效区扬程及效率进行修正的结果见表 1。

表 1 TJ04-ZL-07 水泵模型高效区效率的修正

Table 1 Efficiency modification within the peak efficiency range for the pump model (TJ04-ZL-07)

参数名称	流量 $l/(m^3 \cdot s^{-1})$	水泵模型测试段扬程 $/m$	水泵模型测试段效率 $(\%)$	测试段管道水头损失 $/m$	泵段效率 $(\%)$	泵效率修正值 $(\%)$
参数值	0.360	3.5	83.5	0.156	87.2	3.7

5.2 泵装置能量性能计算

泵装置效率等于水泵效率与流道效率的乘积:

$$\eta_{\text{装置}} = \eta_{\text{水泵}} \cdot \eta_{\text{流道}} \quad (3)$$

其中,流道效率可由下式计算:

$$\eta_{\text{流道}} = \frac{H_{\text{装置}}}{H_{\text{装置}} + h_{\text{流道}}} \times 100\% \quad (4)$$

式中: $H_{\text{装置}}$ 是泵装置扬程; $h_{\text{流道}}$ 是流道总水头损失。

井头泵站泵装置设计扬程工况 ($H = 1.7 \text{ m}$, $Q = 16 \text{ m}^3/\text{s}$) 能量性能主要指标的计算结果见表 2。

表 2 井头泵站竖井式贯流泵装置设计扬程工况能量性能主要参数

Table 2 The main parameters of energy performance for the shaft tubular pump system in Jingtou pumping station under design head conditions

参数名称	进水流道水头损失 $/m$	出水流道水头损失 $/m$	流道总水头损失 $/m$	流道效率 $(\%)$	水泵效率 $(\%)$	泵装置效率 $(\%)$
参数值	0.061	0.086	0.147	92.0	87.2	80.3

5.3 空化性能计算

井头站竖井式贯流泵装置的水泵叶轮直径为 2 500 mm,转速为 125 r/min,设计扬程工况时水泵运行的叶片角度为 θ 。根据同台测试结果,TJ04-ZL-07 水泵模型在叶片角度 θ 时的空化比转速 C 为 1 200,其表达式为

$$C = 5.62 \frac{n \sqrt{Q}}{\Delta H_r^{3/4}} \quad (5)$$

式中: n 为水泵转速 (r/min); Q 为水泵流量 (m^3/s); ΔH_r 为临界空化余量 (m); C 为空化比转速。

根据水泵的空化比转速推算该站泵装置设计工况的临界空化余量,可得

$$\Delta H_r = \left(\frac{5.62 n \sqrt{Q}}{C} \right)^{4/3} = \left(\frac{5.62 \times 125 \times \sqrt{16}}{1200} \right)^{4/3} = 3.11 \text{ (m)} \quad (6)$$

6 泵装置模型试验检验结果

对井头泵站竖井式贯流泵装置优化方案进行了 -4° 、 -2° 、 0° 、 $+2^\circ$ 和 $+4^\circ$ 等 5 个叶片角度的模型试验。图 9 所示为根据泵装置模型试验结果换算的原型泵装置综合性能曲线(原型、模型效率未换算)。

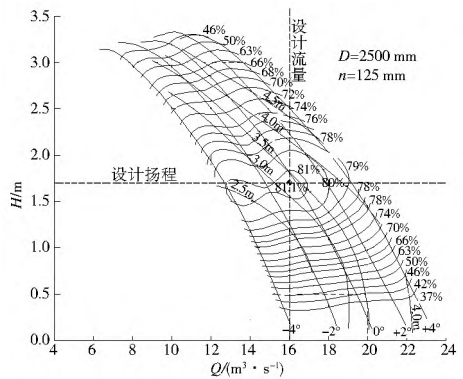


图 9 井头泵站竖井式贯流泵装置综合性能曲线(原型)

Fig. 9 Synthetic characteristics curve of the pump system in Jingtou pumping station (prototype)

根据模型试验结果得到的该站设计扬程工况的泵装置水力性能参数见表 3。

表 3 泵装置设计扬程工况下的性能参数

Table 3 Performance parameters for the pump system under design head conditions

参数名称	叶片角 $(^\circ)$	泵装置扬程 $/m$	流量 $l/(m^3 \cdot s^{-1})$	轴功率 $/kW$	泵装置效率 $(\%)$	临界空化余量 $/m$
参数值	-0.4	1.7	16.0	329.2	81.1	3.3

由表2和式(6)可以看到,计算分析得到设计工况时的泵装置效率和临界空化余量分别为80.3%和3.11 m。与泵装置模型试验结果(表3)比较接近,误差分别为0.8%和0.19 m。

7 结论

(1) 进水流道的流速分布均匀度和水流入泵平均角度分别达到98.7%和88.7,流道水头损失小,可满足水泵高效运行的要求。

(2) 出水流道内的水流扩散均匀平缓、水头损失小,可在较低扬程下获得优异的泵装置水力性能。

(3) 泵装置计算分析结果与模型试验结果接近。

综上,井头泵站竖井式贯流泵装置的选型设计合理并达到最优,为泵站的安全、稳定和高效运行奠定了基础。

参考文献(References):

- [1] 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, 25(6): 91-94. (YAN Hong qin. Determination of Main Parameters for Shaft Tubular Pumping System [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2005, 25(6): 91-94. (in Chinese))
- [2] 赵洁. 沙坪联围泵站改造主机设备选型探讨[J]. 水电与新能源, 2010, (4): 52-54. (ZHAO Jie. Discussing of the Pump Type Selection of Shaping United Pump Stations Reconstruction Project [J]. Hydropower and New Energy, 2010, (4): 52-54. (in Chinese))
- [3] 杜书文, 陈茂益. 佛山市南海区水口泵站机组选型设计[J]. 广东水利水电, 2010, (3): 72-74. DU Shu wen, CHEN Mao yi. Lectotype Design of Machine Set for Shui Kou Pumping Station in Nanhai, Foshan [J]. Guang Dong Water Resource and Hydropower, 2010, (3): 72-74. (in Chinese))
- [4] 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))
- [5] 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))
- [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. (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))
- [7] 谢伟东, 蒋小欣, 刘铭峰, 等. 竖井式贯流泵装置设计[J]. 排灌机械, 2005, 23(1): 10-12. (XIE Wei dong, JIANG Xiao xin, LIU Ming feng, et al. The Design of Shaft-Well Tubular Pump Unit [J]. 2005, 23(1): 10-12. (in Chinese))
- [8] 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 Wei 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))
- [9] 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 (Transactions of the CSAE), 2012, 28(6): 50-56. (in Chinese))
- [10] 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, 3(5): 207-215. (in Chinese))
- [11] 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 Water Power Press, 2006. (in Chinese))
- [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. (LU Lin guang. Optimum Hydraulic Design for High Performance Large Pump System with Low Head [M]. Beijing: China Water Power Press, 2013. (in Chinese))
- [13] Li Yaojun, Wang Fujun. Numerical Investigation of Performance of an Axial flow Pump with Inducer [J]. Journal of Hydrodynamics, 2007, 19(6): 705-711.
- [14] B Jafarzadeh, A Hajari, M M Alishahi, et al. The Flow Simulation of a Low specific speed High speed Centrifugal pump [J]. Applied Mathematical Modelling, May 2010: 242-249.
- [15] G S Constantinescu and V C Patel. Zhaogao Luan, M M Khorasari. Numerical Model for Simulation of Pump intake Flow and Vortices [J]. Journal of Hydraulic Engineering, February 2007: 123-134.
- [16] Rodi W. Turbulence Models and their Application in Hydraulics Experimental and Mathematical Fluid Dynamics [M]. Delft: IAHR Section on Fundamentals of Division 0, 1980: 44-46.
- [17] 徐磊, 陆林广, 王刚, 等. 泵段、水泵模型测试段与泵段效率修正[J]. 水力发电学报, 2012, 31(3): 209-216. (XU Lei, LU Lin guang, WANG Gang, et al. Pump Segment, Pump Model Test Section and Pump Segment Efficiency Modification [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2012, 31(3): 209-216. (in Chinese))