

大型潜水泵站竖井式出水流道的水力性能研究

孙振兴¹, 周勇胜¹, 陈云帆², 黄学军³, 李冬州⁴

(1. 合肥工业大学 化工机械研究所, 安徽 合肥 230009; 2. 河海大学 海洋学院, 江苏 南京 211100; 3. 蓝深集团股份有限公司, 江苏 南京 211500; 4. 新沂市机电排灌管理总站, 江苏 徐州 221400)

摘要: 大型潜水泵站竖井式出水流道优化设计的目的是尽可能地避免涡流及其他不良流态在出水流道内产生,减少出水流道水力损失。探讨了潜水泵与长轴泵扬程测试方法的不同,并指出了潜水泵站流道损失与长轴泵站的区别。以1600HQB-40大型潜水混流泵为例,利用ANSYS软件,对3种不同类型的出水流道进行了数值计算,获得了不同出水流道的水力特性分布规律。根据计算结果,对于不同形式的局部出水管路,推荐损失系数 ζ 取值在5.0~8.0左右。

关键词: 大型潜水泵站; 竖井式出水流道; 水力特性; 数值计算; 局部出水管路

中图分类号: TU998 **文献标识码:** C **文章编号:** 1000-4602(2018)05-0052-05

Hydraulic Characteristics of Vertical Outlet Conduit in Large Submersible Pumping Station

SUN Zhen-xing¹, ZHOU Yong-sheng¹, CHEN Yun-fan², HUANG Xue-jun³,
LI Dong-zhou⁴

(1. Research Institute of Chemical Machinery, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. College of Oceanography, Hohai University, Nanjing 211100, China; 3. Lanshen Group Co. Ltd., Nanjing 211500, China; 4. Xinyi Electrical and Mechanical Drainage and Irrigation Management Station, Xuzhou 221400, China)

Abstract: The design of the vertical outlet conduit in large submersible pumping station was optimized to prevent vortex flows and other undesirable flow patterns, and to reduce the hydraulic losses in the vertical outlet conduit. The differences in head test methods for the submersible pump and the long axle pump were discussed, and the distinctions with respect to the hydraulic loss of the outlet conduit were pointed out. A large submersible mixed flow pump (1600HQB-40) was taken as an example, and the distribution patterns of hydraulic characteristics of different outlet conduits were obtained in the numerical simulation using the ANSYS software. According to calculation results, the suggested values of the loss coefficient ranged from 5.0 to 8.0 for different types of partially closed pipe.

Key words: large submersible pumping station; vertical outlet conduit; hydraulic characteristics; numerical simulation; partially closed pipe

近年来,越来越多的大型潜水泵在国家重大工程中得以应用,如赤峰市北城银河路雨水泵站设计使用了4台配套功率为1 600 kW/台的潜水混流泵、福州市闽江下游侯官排涝站稳定运行了12台功率为800 kW/台的潜水混流泵。针对大型水泵的应用,国内外学者对泵站进出水流道进行了广泛研究,以提高泵站效率和安全运行为主要目的^[1~8]。由于大型潜水泵结构的特殊性,泵站进出水流道的内部流动特性及水力损失与传统结构的立式长轴混流泵有很大区别,其出水流道的水力损失缺乏数据分析依据,这给实际工程中的选型和计算带来了困难。

1 大中型潜水泵的特征

图1为大型潜水泵的现场安装示意。图中潜水泵装置采用竖井式安装结构,主体由潜水泵、进水流道、出水流道3部分组成。潜水泵作为泵机一体化结构,电机是干式全封闭潜水三相异步电动机,可以长期潜入水下运行。与传统立式长轴泵相比,电机具有良好的冷却效果,泵房内无高温、振动小、噪声低,改善了操作环境。同时,相对于传统立式长轴泵的传动轴结构,潜水泵电机传动效率较高,但潜水电机会对流道产生影响,增加泵站的功率损失。

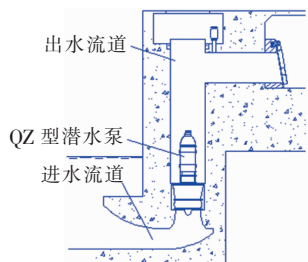


图1 潜水泵竖井式安装示意

Fig. 1 Vertical installation of submersible pump

大型潜水泵的试验方法依据国家标准《潜水电泵试验方法》(GB/T 12785—2014),如图2所示。图3为立式长轴混流泵的试验装置示意。

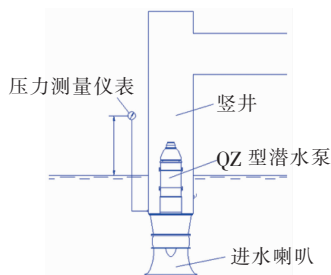


图2 大型潜水泵试验装置示意

Fig. 2 Experimental setup for large submersible pump

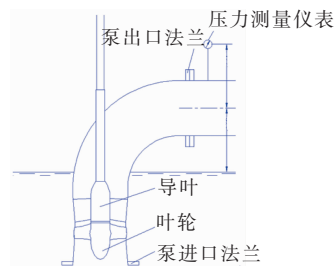


图3 立式长轴混流泵试验装置示意

Fig. 3 Experimental setup for vertical long axle pump

从图2、3可以看出,两者最大的区别在于测压点选择不同,大型潜水泵出口测压点设在潜水泵导叶出口处,而立式长轴泵的测压点设在出口法兰处。

综上可以看出,大型潜水泵性能测试结果中缺乏对潜水电机及竖井出水管内水力损失的测量,在测试结果中,流量所对应的水泵扬程中没有这部分损失。而实际工程应用中,大型潜水泵出水管内部流态对泵站装置水力性能影响较大,并且不同形式的出水管其水力性能不同,直接影响到潜水泵的选型和泵站的效率,而泵站设计人员在进行水泵选型时,按经验对竖井式出水管以及出水流道的水力损失进行估算,由于缺乏可靠数据的支撑,误差较大,特别是对于大流量、低扬程的轴流泵站,装置扬程的计算误差成为影响泵站设计质量的关键因素之一。

因此,本文通过研究不同形式出水管路的水力性能对水泵装置整体性能的影响,进行配套出水管路数值模拟试验,探讨竖井式出水管和出水流道内的水力损失,对出水管路水流流态及装置性能进行分析,以提高装置的水力特性,为大型潜水泵站优化设计及水泵选型提供可靠的依据。

2 物理模型、网格划分及边界条件

2.1 物理模型

本文选用蓝深集团有限公司生产的1600HQB-40型潜水泵水力模型,该泵主要性能参数如下:设计流量 $Q = 25\,920\text{ m}^3/\text{h}$,扬程 $H = 17\text{ m}$ (1 m水柱产生的压力约为9.8 kPa,下同),配套功率 $P = 1\,600\text{ kW}$,转速 $n = 280\text{ r/min}$,设计比转数 $n_s = 400$,叶轮直径 $D_2 = 1\,977\text{ mm}$,叶轮段内壁球半径 $S_1 = 1\,980\text{ mm}$,叶轮叶片数 $Z_1 = 5$,导叶叶片数 $Z_2 = 11$ 。采用三维造型软件进行三维建模,得到泵的结构域和流体域,如图4所示。结构域有叶轮、导叶以及电机组成,流体域由进水流道、叶轮段、导叶段以及出

水管路组成。

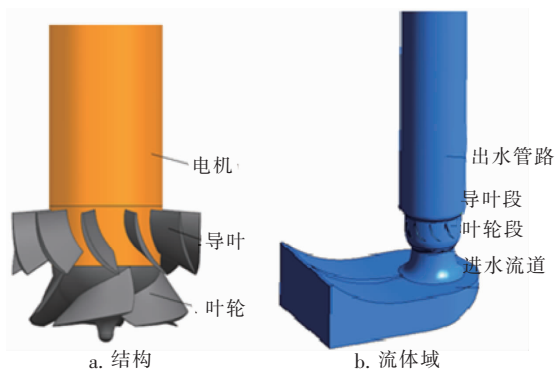


图4 大型潜水泵的三维模型

Fig. 4 Three-dimensional model of large submersible pump

采用3种不同的出水管路进行建模,分别为竖井悬吊式出水管路、带整流的竖井弯管式出水管路和竖井箱涵式出水管路,如图5所示。

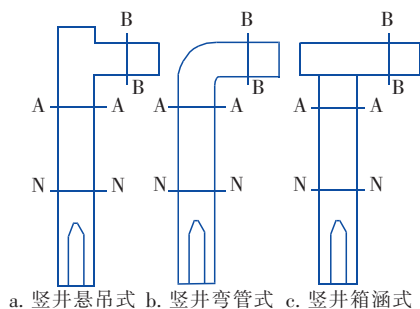


图5 3种出水流道示意

Fig. 5 Three types of outlet conduit

2.2 计算域网格生成

流体域网格划分如图6所示。

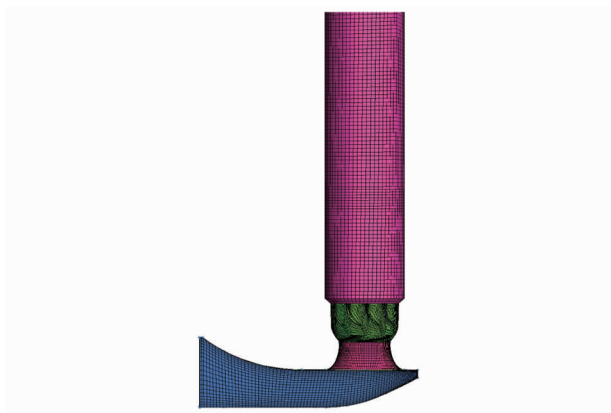


图6 流体域网格划分

Fig. 6 Mesh of flow field

网格划分的高质量 and 合理设计是数值计算的前提,网格质量和数量直接决定了计算精度和计算

效率。采用 ANSYS ICEM 对流体域进行高质量的六面体网格划分,网格总数量约为 20×10^5 个,其中簸箕型流道网格数量约为 3×10^5 个,叶轮段网格数量约为 8×10^5 个,导叶段网格数量约为 6×10^5 个,出水管路网格数量约为 3×10^5 个。通过网格无关性检验,该网格数量对数值计算结果无影响。

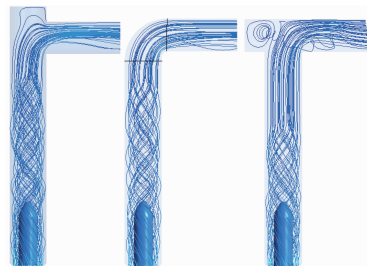
2.3 控制方程及边界条件

基于 ANSYS CFX 软件进行流动分析,采用标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型,选择收敛精度为 10^{-4} 。壁面采用无滑移边界条件,采用速度进口、压力出口边界,初始压力条件设定为标准大气压。在区域之间创建交界面连接不同计算区域,进行数值计算^[9]。

3 结果与分析

3.1 出水管路流态分析

图7为3种出水流道的三维流线。可以观察到水流沿竖井旋转上升,这是因为水流受到导叶出口环量的影响,并且旋转方向与叶轮旋转方向相同;由于水流受竖井与电机的整流作用的影响,水流总体沿管路旋转着向上流动,随着流动距离的增加,水流旋转逐渐减弱并沿管路平行流动,接近水平出水管附近处流态较均匀。

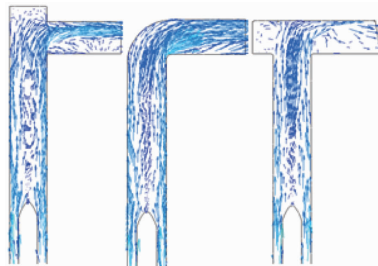


a. 竖井悬吊式 b. 竖井弯管式 c. 竖井箱涵式

图7 出水流道的三维流线

Fig. 7 3D streamlines of outlet conduit

图8、9分别为出水管速度矢量图和压力云图。



a. 竖井悬吊式 b. 竖井弯管式 c. 竖井箱涵式

图8 出水管速度矢量图

Fig. 8 Velocity vector of outlet conduit



图9 出水管压力分布云图

Fig.9 Cloud charts of pressure distribution

结合图8、9可知,竖井悬吊式出水管路:水流在A-A截面处附近流动趋于均匀,由于受到水平出水管路的影响,水流偏向右侧出水管路,竖井顶部右侧出现低压区,竖井顶部出现旋涡和一定回流的现象,并在顶部出现死水区。随着水流由竖井管路流向水平出水管,由于受到竖井与出水管衔接的影响,水平管路压力分布不均匀,水流大体往水平出水管上部过渡,并在出水管下部出现一定回流。

竖井弯管式出水管路:与竖井悬吊式出水管路相比,水流由竖井均匀平稳地过渡到水平出水管,虽然受到竖井与出水管衔接的影响,由于弯管对水流的导向作用,弯管内压力分布均匀,水平管路上部压力分布均匀且一直延伸到出口位置。水流大部分在水平出水管路中均匀流动,水管下部未出现回流和

旋涡,无不良流态。

竖井箱涵式出水管路:与另外两种出水管路相比,竖井内水流较早趋于均匀流动,由于箱涵出水流道的影响,箱涵出水流道左侧出现低压区,随着水流向右流动,高压区向右侧扩散,左侧出现严重的旋涡和回流。水平流道的水流大体流向右侧上半部分,下半部分出现较多旋涡和回流,流道内低压区占比较大且压力分布不均匀。

综上可知,竖井弯管式出水管路的水流流态较好,具有良好的水力性能。

3.2 水力损失分析

出水管路的水力损失与该管路的流量有关,出口管路水力损失 Δh 通常用式(1)表示。

$$\Delta h = SQ^2 \quad (1)$$

式中, S 为管路阻力系数, s^2/m^5 ; Q 为管路流量, m^3/s 。

标准工况下运行的3种出水流道的水力损失比较见表1。可以看出,随着流量的增加,出水管路水头损失也增加,出水管路阻力系数在 $0.01 \sim 0.02 s^2/m^5$ 范围内。分析得出,由于水平出水流道结构形式以及与竖井管路衔接方式的不同,不同形式出水管路的水力损失差别较大。通过对比发现,竖井弯管式出水流道的水头损失较小,出水管路阻力系数基本维持在 $0.015 s^2/m^5$ 左右。

表1 各计算流量下水管道水力损失

Tab.1 Hydraulic loss of outlet conduit under different calculated flow

项 目	0.8Q		1.0Q		1.2Q	
	出水管路损失/m	管路阻力系数/($s^2 \cdot m^{-5}$)	出水管路损失/m	管路阻力系数/($s^2 \cdot m^{-5}$)	出水管路损失/m	管路阻力系数/($s^2 \cdot m^{-5}$)
竖井悬吊式	0.560 3	0.016 9	0.690 1	0.013 3	0.810 7	0.010 9
竖井弯管式	0.479 4	0.014 4	0.574 3	0.011 1	0.756 5	0.010 1
竖井箱涵式	0.538 6	0.016 2	0.659 1	0.012 7	0.796 3	0.010 7

在分析出水管路水力损失时,可将此计算域的水力损失看成一个整体的局部损失,将此区域称为局部出水管路,因此,局部出水管路水力损失 Δh 和局部出水管路损失系数 ζ 的关系可由式(2)表示^[10]。

$$\Delta h = \zeta \frac{v^2}{2g} \quad (2)$$

式中, ζ 为管路损失系数; v 为管路内有效截面平均流速, m/s ; g 为重力加速度, m/s^2 。

由出水管路阻力系数 S 的取值范围可知,局部出水管损失系数 ζ 基本维持在 $5.0 \sim 8.0$ 左右。

4 结论

① 竖井弯管式出水管路的水力损失较小,可以保证潜水泵平稳高效运行。在实际工程中,对于大型潜水泵竖井悬吊安装方式,可采用竖井顶部设置导流板来模拟竖井弯管式安装方式,以减小水力损失,提高泵站效率。

② 对于DN1 600名义出口直径的潜水轴混流泵,竖井出水管可以根据结构形式的优化情况,局部出水管损失系数 ζ 在 $5.0 \sim 8.0$ 范围内取值,这为工程实践中出水流道的设计和计算以及大型潜水泵的选型提供了参考。

参考文献:

- [1] 施卫东,王洪亮,余学军,等. 深井泵的研究现状与发展趋势[J]. 排灌机械工程学报,2009,27(1):64-67.
Shi Weidong, Wang Hongliang, Yu Xuejun, *et al.* Development and prospect of deep well pump in China[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2009, 27(1): 64-67 (in Chinese).
- [2] 仇宝云,黄季艳,林海江,等. 立式轴流泵出水流动场试验研究[J]. 机械工程学报,2005,41(11):115-120.
Qiu Baoyun, Huang Jiyan, Lin Haijiang, *et al.* Experimental investigation on flow fields in outlet divergent passage of vertical axial-flow pump[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2005, 41(11): 115-120 (in Chinese).
- [3] 仇宝云,黄季艳,袁其寿,等. 轴流泵出水流动水力损失试验研究[J]. 机械工程学报,2006,42(5):39-44.
Qiu Baoyun, Huang Jiyan, Yuan Qishou, *et al.* Test investigation on hydraulic losses in discharge passage of axial-flow pump[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2006, 42(5): 39-44 (in Chinese).
- [4] 陆林广,刘荣华,梁金栋,等. 虹吸式出水流动与直管式出水流动的比较[J]. 南水北调与水利科技,2009,7(1):91-94.
Lu Linguang, Liu Ronghua, Liang Jindong, *et al.* Comparison between siphon outlet conduit and straight outlet conduit[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2009, 7(1): 91-94 (in Chinese).
- [5] 陆林广,吴开平,冷豫,等. 大型低扬程泵站直管式出水流动优化水力设计[J]. 农业机械学报,2007,38(8):196-198.
Lu Linguang, Wu Kaiping, Leng Yu, *et al.* Optimum hydraulic design of straight outlet conduit in large low head pumping stations[J]. Transactions of The Chinese Society of Agricultural Machinery, 2007, 38(8): 196-198 (in Chinese).
- [6] 陆林广,刘军,梁金栋,等. 大型泵站出水流动三维流动及水力损失数值计算[J]. 排灌机械工程学报,2008,26(3):51-54.
Lu Linguang, Liu Jun, Liang Jindong, *et al.* Numerical simulation of 3D turbulent flow and hydraulic loss in outlet conduit of large pumping station[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2008, 26(3): 51-54 (in Chinese).
- [7] 李文全,杨祖欣,游强强,等. 井筒式潜水轴流泵出水管道水力特性数值模拟研究[J]. 水电能源科学,2013,31(1):150-153.
Li Wenquan, Yang Zuxin, You Qiangqiang, *et al.* Numerical simulation of hydraulic characteristics of water out flow pipe of well-type submerged axial flow pump[J]. Water Resources and Power, 2013, 31(1): 150-153 (in Chinese).
- [8] 刘荣华. 潜水泵装置水力特性及优化设计研究[D]. 扬州:扬州大学,2010.
Liu Ronghua. Study on Hydraulic Characteristic and Optimum Design of Submerged Pump System[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2010 (in Chinese).
- [9] Cheah K W, Lee S T, Winoto S H, *et al.* Numerical flow simulation in a centrifugal pump at design and off-design conditions[J]. Int J Rotating Mach, 2007. DOI: 10.1155/2007/83641.
- [10] 施高萍,王益土,王莺. 大型竖井贯流泵站出水流动的水力性能分析[J]. 水利科技与经济,2015,21(2):72-74.
Shi Gaoping, Wang Yitu, Wang Ying. The hydraulic performance analysis for outlet conduit in shaft tubular pumping station[J]. Water Conservancy Science and Technology and Economy, 2015, 21(2): 72-74 (in Chinese).



作者简介:孙振兴(1992-),男,河南周口人,硕士研究生,主要从事流体机械研究。

E-mail: sun_zhenxing@qq.com

收稿日期:2017-10-12