大型泵站肘形弯管进水流道数值优化研究

成立[1]，刘超[1]，谢伟东[2]，汤方平[1]，周济人[1]
（1. 扬州大学　2. 江苏省水利勘测设计研究院）

摘　要：针对江都三站运行存在的主要问题，采用了直接求解基于时间平均的N-S方程雷诺和$k-\varepsilon$紊流模型方程组的方法，通过数值模拟预测肘形弯管进水流道内部流动，优选了肘形弯管的改造方案。改善了流速分布，使得该泵站装置具有了较高的性能。

关键词：肘形管，数值模拟，泵站，优化设计
文献标识码：A　　**文章编号**：1005-6254(2002)06-0019-04

TV6

0　引言

作为南水北调源头泵站之一的江都三站建于1969年，采用对称蜗壳式进水流道，虹吸式出水流道。该站装有ZL13.5-8型立式轴流泵10台，叶轮直径$D=2000mm$，十多年运行中存在的主要问题是：实测装置效率较低，汽蚀特别严重，转轮室和叶片已严重穿孔，并诱发严重的振动与噪声，使机组不能在叶片安放角大于0°时运行，因而流量无法加大[1]。通过对原状流道的模型试验研究，发现在机组中心线两侧进水流道顶部存在明显的附壁涡带。本文对该站进水流道改造成肘形弯管形式进行数值优化和模型试验研究，提出了切实可行的改造方案。

1　进水流道改造的可能性

江都三站进水流道高度小，名义高度（叶轮中心线至流道底的距离）为$1.5D_{叶}$（$D_{叶}$为叶轮直径）。水泵运行时进水流道内有涡带产生，导致汽蚀、振动。无论是现场实际运行还是在模型试验中均得到证实。根据肘形进水流道在第一、二抽水站中应用效果较好，而且三站流道名义高度$1.5D_{叶}$尚为规范规定的肘形流道应用范围的临界值[2]，故理论上江都三站进水流道改为肘形流道还是有可能的。

2　数值模拟优化设计

2.1　控制方程组

考虑进水流道不可压缩流体三维粘性流动，其时间平均的连续方程和根据雷诺应力简化的N-S方程，即雷诺方程可分别表示如下[3,4]：

连续方程：

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i}=0 \tag{1}$$

雷诺方程：

$$\frac{\partial u_i}{\partial t}+u_j\frac{\partial u_i}{\partial x_j}=g_i-\frac{1}{\rho}\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i}+\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\nu\frac{\partial u_i}{\partial x_j}-\overline{u_i'u_j'}\right] \tag{2}$$

紊动能方程为

$$u_i\frac{\partial k}{\partial x_i}=\frac{\partial}{\partial x_i}\left[\left(\nu+\frac{\nu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_i}\right]+\nu_t\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)\frac{\partial u_i}{\partial x_j}-\varepsilon \tag{3}$$

紊动能耗散率方程为

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t}+u_i\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i}=\frac{\partial}{\partial x_i}\left[\frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon}\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i}\right]+\nu\frac{\partial^2\varepsilon}{\partial x_i\partial x_i}+C_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k}\nu_t\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)\frac{\partial u_i}{\partial x_j}-C_{2\varepsilon}\frac{\varepsilon^2}{k} \tag{4}$$

式（3）和（4）构成标准$k-\varepsilon$紊流模型，该模型广泛应用于计算流体动力学的数值计算中。

2.2　边界条件

以进水流道外形轮廓为计算边界，取整个进水流道包围的水体为计算区域。

计算流场进口设置在进水流道进口，来流速

第一作者简介：成立（1975.5-），男，扬州大学水利与建筑工程学院　讲师；江苏省扬州市（邮编：225009）。

万方数据

度在垂直方向上为对数式分布；出口取在泵吸入管出口处，认为出口流动已成单向状态，计算区域的解不受出口下游影响。固体壁面：在固体壁面附近为紊流的粘性底层，其中速度梯度很大，高雷诺数情况的计算模型不再适用，采用常用的壁面定理求得近壁处流速。

2.3 计算方案

根据初步研究，共提出了三种肘形流道。肘形进水流道1，该方案肘形弯管弯道内侧曲率半径较小，流道宽度收缩快、早。肘形进水流道2，该方案肘形弯管弯道内侧曲率半径为0.5m，外侧曲率半径为2.5m，流道宽度收缩慢、迟。肘形进水流道3，该方案肘形弯管弯道内侧曲率半径为0.5m，外侧曲率半径为2.5m，流道宽度收缩较慢、较迟。各方案的形状尺寸分别如图1、图2及图3所示。

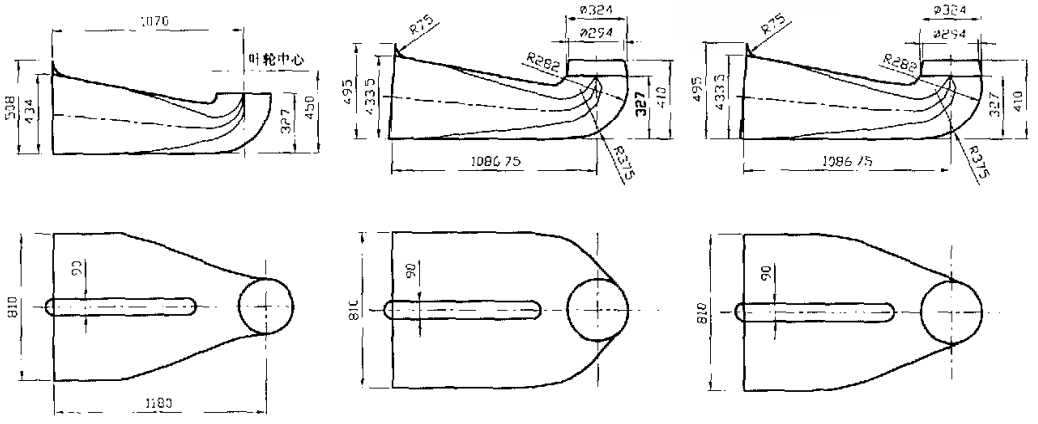


图1 方案1示意图　　图2 方案2示意图　　图3 方案3示意图

3 数值模拟计算结果与方案优选优化设计

为便于比较，各种计算方案均以最优工况为计算参数。图4a、图5a、图6a分别为方案1、2、3计算流场，图4b、图5b、图6b分别为方案1、2、3断面1等流速图（断面1为流道出口下方0.1D处）。

由上述各流场图和出口断面等流速图（v/v_0）可知，方案1进水流道内侧流速很大，引起脱流。方案2，水流在流道出口处的流速分布仍然没有调整均匀。方案3，水流在流道出口处经过调整，流速分布较为均匀。最终确定方案3为优化后的流道改造方案

立式装置是轴流泵、导叶式混流泵常见的装置形式，由于这种装置泵轴线（铅直）与水流方向（水平）互相垂直，故水流在进入水泵和流出水泵时均有一个流向改变，即水流转弯90°的问题。水流流向改变极易引起水流脱离、二次流、流速分布不均匀甚至产生旋涡、涡带。这些对水泵运行是极其有害的。

进水流道的作用是使水流在进水流道内逐步加速，完成流向转变。对进水流道最基本要求有二：首先，其出口（即泵叶轮进口）断面的流速场均匀或比较均匀；其次，是在流道内不产生有害旋涡（涡带）。所谓有害旋涡是指对水泵运行产生危害的强度较大的涡旋，在流动形态上往往表现为含有气（汽）腔的涡管，一般称涡带。有害旋涡对泵运行的影响主要表现在汽蚀、振动、噪音方面，而对泵能量性能影响不明显。进水流道出口流速场均匀和流道内不产生有害旋涡（涡带）是为了保证泵装置运行的经济性和可靠性。这正是一般工程设计所遵循的通则。

肘形弯管进水的流道，水流的加速和转向在弯管渐缩断面内同时实现[5]，如图7。这类流道的弯段断面是渐变渐缩的，以使水流逐步加速并在转弯时不发生脱离。这类流道的名义高度H值较大，一般$H=(1.5\sim2.0)D_{出}$，但宽度较小$B=(2.0\sim2.5)D_{出}$。这类流道设计过程中应注意流道内侧和外侧的半径曲率，特别是内侧半径曲率不宜过小，否则将引起水流在90度弯道转弯过程中发生脱流，从而产生涡带，这从前面的数值计算流场也可得到上述结论。

万方数据

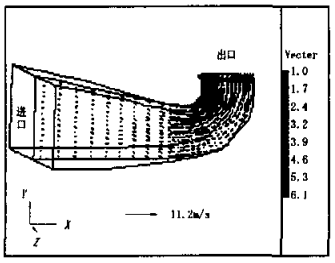


图4a　方案1计算流场

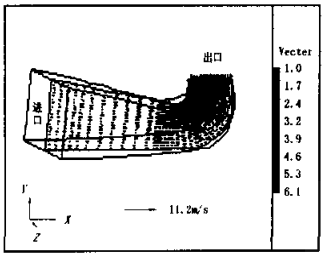


图5a　方案2计算流场

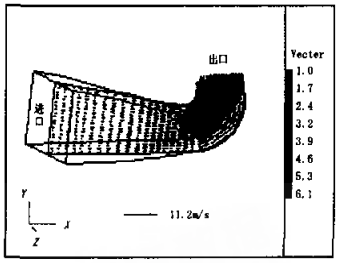


图6a　方案3计算流场

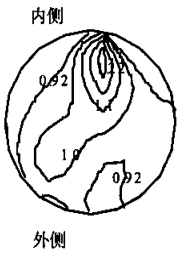


图4b　方案1等流速图

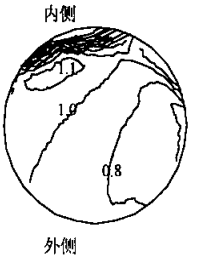


图5b　方案2等流速图

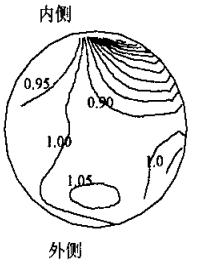


图6b　方案3等流速图

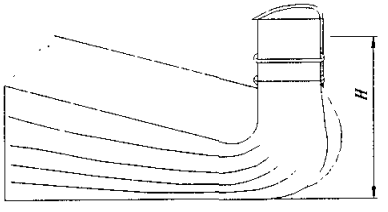


图7　肘形弯管进水的流道

4　模型试验研究结果

4.1　试验台和模型试验装置

江都三站泵装置模型试验在扬州大学水建学院江苏机电排灌工程研究所水泵通用试验台上进行。试验台为一立式封闭循环系统，系统主管道直径为500mm，总长度51m，系统水体总容量约60m^3。试验台主要由汽蚀筒、压力水箱、汽水分离筒、文吐里管、辅助泵、调节闸阀、管路等组成。试验台于1992年4月通过水利部鉴定，效率测试的总误差为±0.57%，优于国标GB321—89和国际ISO/DIS5198（A）级标准（草案）所规定的精度要求。

模型装置除转轮和导叶外与真机几何相似，模型转轮直径为300mm，模型装置参见图8。全部采用钢结构，过流表面为钢板原表面涂防锈漆。

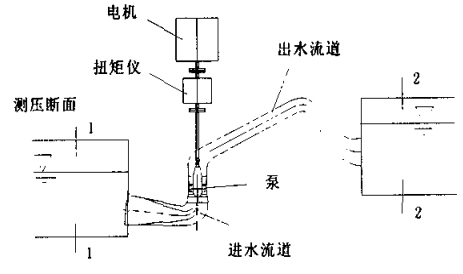


图8　水泵模型装置与测压断面示意图

4.2　试验结果

4.2.1　方案1

通过试验发现，该方案装置运行时水泵运行效率较低，且机组振动剧烈，当装置扬程在4.2m左右时，流道内噼啪声特别明显。通过闪频观察发现，肘弯管进水流道内侧有长间隔大空穴出现，位置如图9所示。根据分析，由于进水流道转弯处到转轮室距离较短，导致内侧水流脱流，形成

万方数据

涡带，从引起水泵振动。这与数值计算流态结果是一致的。

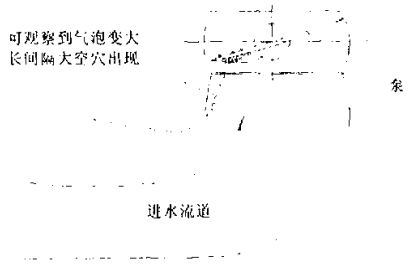


图9 涡带示意图

4.2.2 方案3

运用数值计算的方法对改进后的两种方案进行了流态模拟，并对其流道进行了初步优化。根据计算的结果，选择方案3为试验方案。通过试验发现，方案3装置运行时，流道内的涡带消失，流道内噼啪声和机组振动消除，机组效率有大幅度的提高，2度最高效率达72.5%左右。这说明，流道优化的效果明显。推荐方案采用方案3流道，ZM6.0~Y981转轮。

5 结论

1）肘形进水流道的名义高度和弯道内侧曲率半径较小，导致水流在弯道内侧有脱壁的趋势。由于水流转弯后没有足够的直段调整过渡，进水流道出口断面流速分布均匀性较差，这势必引起水泵性能的下降。

2）经优化后的肘形进水流道，其出口断面流速分布较均匀，可以保证机组安全运行。

3）数值模拟作为流道设计和模型试验的重要辅助设计工具，可在较短时间内优选出若干最佳方案，避免模型试验的盲目性，数值模拟计算出流道各断面的速度分布，使设计者了解水流运动状况，可节省大量的时间和试验成本。

参考文献

1 周济人，汤方平，袁家博. 江都二站水泵装置技术改造研究[J]. 渗灌排水，2000，19(1)：60~62

2 中华人民共和国国家标准. GB/T 50265—97. 泵站设计规范[S]. 北京：中国计划出版社，1997. 1~245

3 金忠青. N-S方程的数值解和紊流模型[M]. 南京：河海大学出版社，1989

4 Launder B E, Spalding D B. The numerical calculation of turbulence flows. Comp Meth Appl Mech Eng, 1974, 3:269~289

5 刘超. 低扬程水泵及其装置的研究与发展[J]. 江苏农学院学报，1998(4)：5~12

Optimum Numerical Design of Elbow Tube of Pumping Station

CHENG Li[1], *LIU Chao*[1], *XIE Wei-dong*[2], *TANG Fang-ping*[1], *ZHOU Ji-ren*[1]
(1. Yang zhou University 2. Jiangsu Surveying and Design Institute of Water Conservancy)

Abstract: A method based on numerical computations of the turbulence flow is applied to analyze the flow field of the elbow tube of pump suction. An optimum scheme was designed. A good agreement was achieved between the calculation data and the result of model test. The named height of elbow tube of Jiangdu No.3 Pumping Station reaches the critical value. Through optimum numerical design, the pumping station could works efficiently with high stability.

Key words: Elbow, Numerical simulation, Pumping station, Optimum design

会 议 消 息

中国农机学会排灌机械学会第七届理事会和学术交流会定于12月21~23日在江苏大学流体机械工程技术研究中心召开。

（本刊编辑部）

万方数据