

数值模拟及可视化技术在旋转水力机械设计中的应用

蒋小欣¹, 王玲玲², 李 龙²

(1. 苏州市水务局, 江苏 苏州 215011; 2. 河海大学水利水电工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要:以苏州市仙人大港泵站工程为例,对泵站的叶轮、导叶及平面轴伸式流道进行三维立体图形显示,对排涝、引水等不同运行工况下泵站装置全流道三维流场进行数值模拟,并给出了流道中各点流速及压力等物理参量的空间分布.模拟结果以平面、立体相结合的方式展示,直观、逼真.该技术可用于流道型线的优化、结构形式及尺寸的多方案快速比选,并可预测水力机械性能,为旋转水力机械的设计和建设提供决策支持.

关键词:旋转水力机械;水力特性;数值模拟;可视化技术

中图分类号:TV136 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-1980(2006)04-0414-04

在泵站及水电站的设计、建设过程中,叶轮、导叶等旋转水力机械及进、出水流道的水力特性直接决定了泵站及水电站的运行效率,优化旋转水力机械的型线、改善叶片之间的流场特性成为提高泵站和水电站性能的重要途径^[1].

水力机械性能最直接、最可靠的研究方法是对水力机械如实型泵或水轮机组的外特性进行物理模型试验.试验工作历时长、投资大,研究工况及组次有限,同时试验观测点据较少也使物理模型试验在提供全流道精细流场分布方面存在缺陷.就量测手段来说,目前先进的 ADV 和 PIV 等精密量测仪器还只能用于研究流动机理、紊动结构^[2],而在流道型线、叶片及导叶体型设计方面的应用尚未见报道.与物理模型试验相比,数值模拟技术具有快速、便捷、成果丰富、信息全面和便于进行方案比选等特点^[3].随着计算机三维图形和可视技术的飞速发展以及数值计算方法的不断提高,运用数值模拟及三维可视技术对泵站及水电站内特性、叶片及导叶间流动结构和规律进行全三维精细模拟,对多方案进行快速比选,这一技术已成为旋转水力机械研究领域最重要的方法和手段之一.本文以苏州市仙人大港泵站流道型线、结构体型及水力性能数值研究为例,建立了泵站流道及复杂过流部件的模型并进行了三维立体可视化处理,同时对不同运行工况流道全三维流场进行了数值模拟,模拟结果以平面与立面相结合的方式展示.

1 仙人大港泵站水力结构三维可视化处理

仙人大港泵站位于苏州市城市中心区南部沧浪新城北侧,东与大龙港、涓长江相连,西与京杭大运河相通.根据防洪规划要求,拟在仙人大港枢纽上兴建 1 座净宽 8 m 的节制闸和 1 座流量为 15 m³/s 的泵站,闸、站均有双向运行要求,以达到防洪、排涝和改善城市水环境的目的.反复比选后确定仙人大港泵站工程采用 3 台单泵流量 5 m³/s 的机组,选用平面轴伸式泵型,其特征水位见表 1,平面及立面布置见图 1.

表 1 仙人大港泵站设计工况下的水位

Table 1 Water level under designed operational condition for Xianrendagang pumping station m

工况	内河水位	外河水位
排涝(正向)	3.10	4.29
调水(反向)	3.50	2.81

图 1 给出了该平面轴伸泵的立面及平面视图,但却无法表示出轴伸泵的弯管流道及其内部转轮、导叶等结构的三维体型.在 AUTO-cad 中读取图 1 所示的流道尺寸,采用三角形网格对结构进行空间建模.叶轮叶片为 4 片、直径为 140 cm,导叶为 7 片扭曲型叶片,同样进行三角形网格剖分.为使模型具有较高精度,网格数必须足够多.建模时流道表面采用 2.55 万个壁面三角形网格,叶轮表面和导叶表面则分别采用 0.91 万、3.14 万个三角网格.模型建立之后采用图形软件对结构材质进行定义,即可得到流道、叶片及导叶体的立体图像,

如图 2 和图 3 所示. 在 3D 图形软件中可任意地旋转模型结构, 从任意角度去观察它, 并可定义路径制作动画^[4].

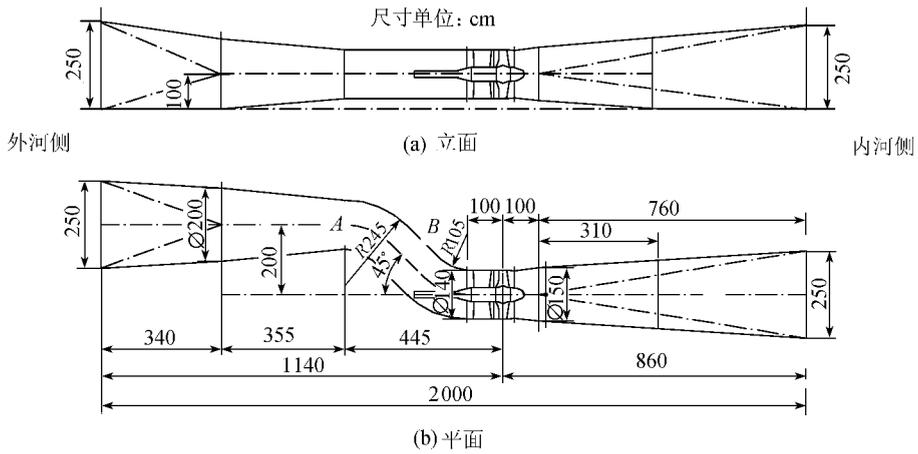


图 1 泵站流道立面及平面布置

Fig.1 Elevation and plane layout of water way of pumping station



图 2 泵站流道立体视图

Fig.2 Three-dimensional view of water way of pumping station

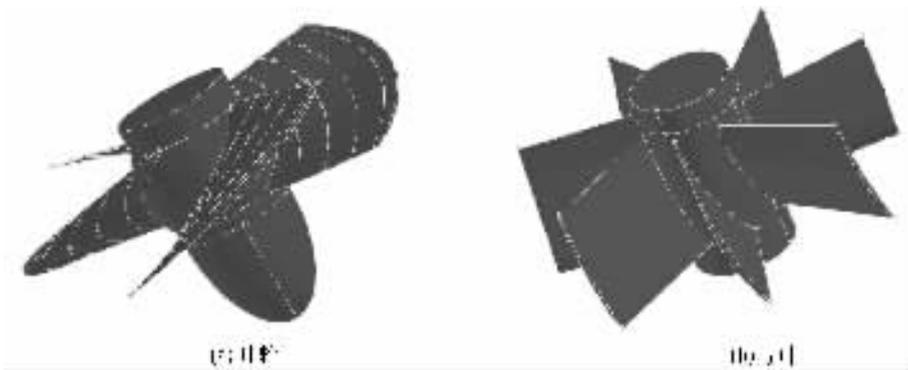


图 3 叶轮和导叶的三维视图

Fig.3 Three-dimensional view of impeller blade and guide blade

2 水力性能数值模拟

旋转水力机械水力性能的数值模拟是水力机械研究的另一重要内容. 利用计算流体力学及数值计算理论和方法在流动区域内求解流体所满足的控制方程, 可进行不同设计方案水力特性的数值模拟和比选.

仙人大港泵站数值模拟计算区域如图 1 所示, 从进口到出口包括弯段及泵段. 因为泵站流道中有形状极不规则的叶轮、导叶体等复杂的过流部件, 计算区域大, 结构复杂, 空间曲面多, 所以采用非结构化空间四面体网格来剖分计算区域. 壁面及结构物的表面采用三角形面网格. 流动较为复杂的叶轮区和导叶区, 网格局部加密, 以期获得较为精细的紊流结构.

计算模型为不可压流的雷诺时均方程和连续方程组成的方程组^[5]. 采用标准双方程紊流模型封闭紊动黏性系数. 控制方程在非结构化同位网格上积分离散. 为了实现同位网格上压力与速度的耦合, 采用动量插值方法对扩散项进行积分离散^[6].

全流道流场数值模拟成果的精度, 一方面取决于数值离散方法的精度, 另一方面取决于数值计算边界条

件的适应性^[7]。根据泵站的运行特点,模拟特定扬程工况时,在进、出水口边界上分别给定压力大小,两者之差即为给定的扬程。进口边界流速给定正向进流无环向分量条件,出口边界给定零梯度条件。进口紊动能取为进口平均动能的0.5%。紊动能耗散率根据紊动能和进口特征长度计算。动、静坐标区域之间的相互干涉用滑动耦合方法处理^[8],见图4和图5。

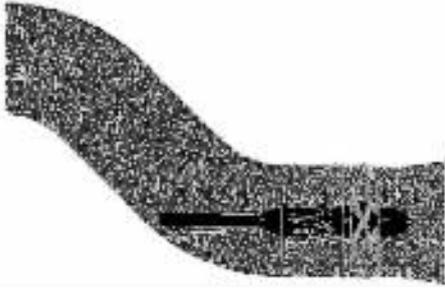


图4 弯曲流道水平中截面网格

Fig.4 Grid for middle cross section of bending water way

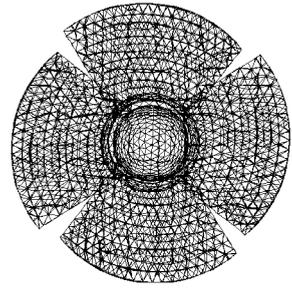


图5 叶轮表面非结构化三角网格

Fig.5 Un-structure triangle grid for surface of impeller blade

应用上述计算方法对仙人大港泵站的排涝工况和调水工况进行数值模拟,边界水位按表1取用,计算结果给出压力及速度分布。图6和图7为部分计算结果的平面及立体显示。

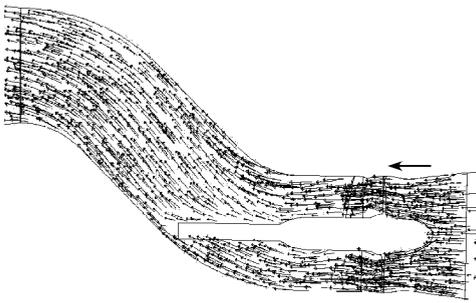


图6 排涝工况流速二维分布

Fig.6 Two-dimensional flow velocity distribution under drainage condition

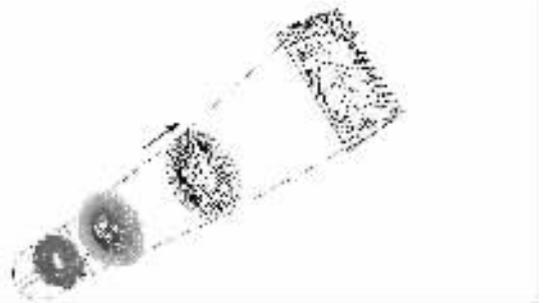


图7 调水工况出水水道沿程各截面三维速度矢量图

Fig.7 Three-dimensional flow velocity distribution in different cross sections along water way under water diversion condition

由图6可见:在排涝工况下,出水水道由于弯段的影响,流速分布不均,在弯道内侧壁面处,存在相对的高速低压区。随着水道断面面积的增大,断面平均流速快速下降,压力分布趋于均匀。图7表明:调水工况的出水水道整体流动具有轴对称特性;近壁水体受到较大离心力的作用,具有较大流速和环量,水道中心部位流体具有反向流速;接近水道出口处,反向流速逐渐减小,断面流速渐趋均匀。

对图1所示水道型线进行方案改进,对型线各几何参数取用不同的值(表2)。在单泵流量为 $5 \text{ m}^3/\text{s}$ 的条件下,运用上述数值方法模拟各方案的水力特性。表3列出了各方案出水水道的水头损失。就出水水道的水力损失而言,D和E均是相对较优的方案。

3 结 语

旋转水力机械水力结构仿真及其在不同运行工况下的水力特性数值研究是泵站及水电站建设中的热点问题。本文应用三维图形处理技术对泵站水道及过流部件进行了三维建模,应用计算流体力学数值计算技术对泵站的正、反向运行工况进行了全水道流场的数值模拟,并对计算结果进行了三维立体展示。

表2 型线方案比选

Table 2 Comparison of different linetypes of water way

方案	D/m	R_1/m	R_2/m	$\alpha/(\text{°})$	L_w/m	L_z/m
A	1400	1800	1800	45	3490	3510
B	1400	2000	2000	45	3656	3344
C	1500	1800	1800	45	3490	3510
D	1500	2000	2000	45	3656	3344
E	1500	2000	2000	50	3840	3160
F	1500	2000	2000	40	3540	3460

注: D 为弯管直径; R_1 为转弯半径; R_2 为转弯半径; α 为直管倾角; L_w 为弯段长度; L_z 为渐变段长度。

表3 不同型线方案出水水道水头损失

Table 3 Water head losses along outflow water way with different linetypes

方 案	A	B	C	D	E	F
排涝工况	16.6	14.1	12.4	9.2	8.7	10.4
调水工况	7.9	7.1	5.2	4.8	4.9	5.5

模拟结果表明,数值模拟技术与三维图形及可视技术相结合,在预测旋转水力机械的水力性能、优化过流部件体型及流道型线方面具有实用价值,可使数值模拟成果具有与物理模型试验同样直观、形象的演示效果。

参考文献:

- [1] 陆林广,张仁田. 泵站进水流道优化水力设计[M]. 北京:中国水利水电出版社,1997:2-10.
- [2] 朱宏武,薛敦松,董守平. 用PIV技术研究离心泵扩散段第八断面内流场[J]. 工程热物理学报,1995(4):440-443.
- [3] 王玲玲,戴会超,王琼. 三峡船闸水力学数值实验室的研制及应用[J]. 河海大学学报:自然科学版,2004,32(1):100-103.
- [4] 冯惠军,冯允成. 基于对象的仿真建模系统[J]. 北京航空航天大学学报,1996,22(5):607-610.
- [5] 蒋小欣,李龙,王玲玲,等. 双向贯流泵装置特性数值研究[J]. 河海大学学报:自然科学版,2005,33(1):81-84.
- [6] RHIE C M, CHOW W L. A numerical study of the turbulent flow past an isolated airfoil with trailing edge separation[J]. AIAA J, 1983, 21:1525-1552.
- [7] 陶文铨. 数值传热学[M]. 西安:西安交通大学出版社,2001:507-511.
- [8] 刘宇,吴玉林,张梁,等. 混流式原型水轮机的三维湍流计算[J]. 水力发电学报,2003(3):101-106.

Application of numerical simulation and VISC technique to rotary hydraulic machinery design

JIANG Xiao-xin¹, WANG Ling-ling², LI Long²

(1. Suzhou Water Affairs Bureau, Suzhou 215011, China;

2. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: With the Xianrendagang pumping station of Suzhou City taken as an example, 3D numerical simulation of impeller blades, guide blades, and planar water way in axial direction of the pumping station was performed by use of the technique of 3D visualization in scientific computing (VISC). Three-dimensional flow field for the whole water way of the pumping station was simulated under drainage and water diversion conditions, and the spatial distributions of flow velocity and pressure at different points in the water way were also given. The simulated results were shown in 2D and 3D ways. The present method can be applied to linetype optimization of water ways, fast comparison and determination of rational style and size, and prediction of performance of hydraulic machinery, providing a decision-making support for design and construction of hydraulic machinery.

Key words: rotary hydraulic machinery; hydraulic property; numerical simulation; visualization technique