立式轴流泵装置的三维湍流流动数值模拟

陆林广[1]，伍 杰[2]，陈阿萍[1]，秦钟建[2]
（1. 扬州大学 水利科学与工程学院，江苏 扬州 225009；2. 中水淮河工程有限责任公司，安徽 蚌埠 233001）

摘 要：采用三维湍流数值模拟方法对南水北调东线工程某泵站立式轴流泵装置进行了优化水力设计研究工作；分别建立了轴流泵模型和立式轴流泵装置几何型体数学模型，并分别对轴流泵模型和立式轴流泵装置的内部流动进行了三维湍流数值模拟，计算所得的轴流泵模型的水力性能与模型试验的结果一致；轴流泵装置数值计算所得的水力性能与装置模型试验结果的基本规律相符。计算结果表明：采用数值计算的方法研究立式轴流泵装置内部的三维湍流流动及其水力性能是可行的，在此基础上对立式轴流泵装置进行深入的优化水力设计，可以最大限度地提高泵装置的水力性能。

关键词：立式轴流泵；泵装置；三维湍流流动；数值模拟
中图分类号：S277 **文献标识码**：A **文章编号**：1005－6254(2007)01－0029－04

Numerical simulation of 3D turbulent flow in a vertical axial-flow pump system

LU Lin-guang[1], *WU Jie*[2], *CHEN A-ping*[1], *QIN Zhong-jian*[2]
(1. College of Hydraulic Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou, Jiangsu 225009, China; 2. Investigation and Design Institute of Huaihe River Commission, Bengbu, Anhui 233001, China)

Abstract: Numerical simulation for 3D turbulent flow in an axial-flow pump and the pump system is conducted. The mathematical models of both axial-flow pump and vertical axial-flow pump system are built up, and numerical simulations of 3D turbulent flows in the pump and pump system are completed respectively. The computed result is consistent with that of the model test.

Key words: vertical axial-flow pump; pump system; 3D turbulent flow; numerical simulation

立式轴流泵装置具有投资省，效率高，安装检修方便，人们对其设计制造及运行管理经验丰富等优点，适用于低扬程、较长的年运行时数的泵站。在我国已建的300多座大型泵站中，大部分采用了此泵型。但在泵站扬程较低的条件下，立式轴流泵装置不易得到较高的泵装置效率。为了使立式轴流泵装置在较低扬程工况下获得较高的水泵装置效率，对水泵装置进行优化水力设计研究工作尤为重要。作者采用三维湍流数值模拟方法对南水北调东线工程某泵站（以下简称A泵站）立式轴流泵装置内部的三维湍流流动及水力性能进行了探索。

立式轴流泵装置由泵段和进、出水流道组成。作者对立式轴流泵装置的数值模拟研究分为两个阶段，首先对轴流泵泵段的内部流动进行数值模拟，并将计算结果和模型泵泵段的试验结果进行比较和分析，以检验轴流泵转轮内部流动数值模拟方法的可行性和准确性；在上述计算工作的基础上，再进行立式轴流泵装置的整体数值模拟。

收稿日期：2006－11－12
基金项目：国家自然科学基金资助项目(50279045)
作者简介：陆林广(1947－)，男，江苏扬州人，教授，主要从事泵站工程方面的研究。
伍 杰(1964－)，女，湖南涟源人，教授级高工，主要从事水机设计方面的研究。

万方数据

1 轴流泵泵段的三维流动数值模拟

1.1 轴流泵模型的有关参数

根据南水北调东线工程某泵站设计参数的要求,选用了ZBM791-100水泵水力模型进行泵段的三维流动数值模拟研究。该水力模型水力性能优良,在低扬程泵站得到了广泛的应用。图1和图2所示分别为该水力模型的透视图和模型试验所得的泵段的性能曲线。

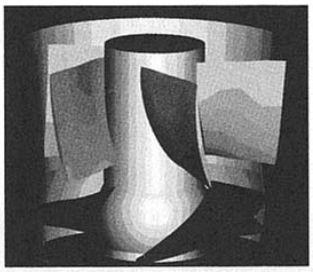

图1 ZBM791-100水泵水力模型透视图

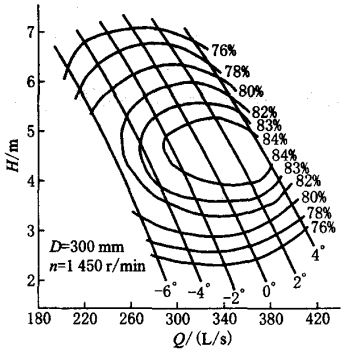

图2 ZBM791-100水泵水力模型性能曲线

1.2 轴流泵泵段三维流动数值模拟的数学模型

1.2.1 控制方程

轴流泵泵段内部流场数值模拟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,已有很多文献对此作了介绍[1-5],本文不再赘述。

1.2.2 边界条件

将轴流泵泵段内部流动数值模拟的实体区域分成5个部分:①进水直管,②叶轮室,③导叶体,④扩散管,⑤60°弯管。这样做,一方面是为了便于局部加密网格,另一方面也是为了便于为水泵叶轮室单独给定流体区域的边界条件。

(1)进口边界。计算流场的进口设置在进水管路的进口断面,在这里,可认为来流速度在整个断面上均匀分布。计算流量可作为已知条件,故而进口边界采用速度进口边界条件。

(2)出口边界。计算流场的出口设置在离60°弯管出口有一定距离的直管段,水流经过一定距离的调整,在这里可认为流动已达到充分发展的状态,因而采用自由出流边界条件。

(3)壁面边界。进水管路边壁、导叶体、出水管路边壁及叶轮室轮缘面处设置为静止壁面。固壁边界条件的处理中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[6],以减少近固壁区域的节点数。

叶轮室段中所有与叶轮一起旋转的壁面(叶片表面及轮毂表面)都设置为移动壁面,移动的速度和方向与叶轮旋转的速度和方向一致。

(4)自由表面。进、出水池的表面为自由水面,若忽略水面风引起的切应力及与大气层的热交换,则自由面对速度和紊动能均可视为对称平面处理[6]。

(5)内部界面。在内部界面上不需要输入任何内容,只需指定其位置[2]。为便于取出流场计算结果,在泵段中设置了进水管进口、叶轮室进口、扩散管出口和60°出水弯管出口等4个内部界面。

(6)流体条件。流体条件实际上并非针对具体边界而言,而是针对区域而言,因此称为流体区域条件。水泵叶轮是旋转的,而其他过流部件是静止的。作者对泵段内部流场的数值模拟采用的是动静结合的全通道模拟,将整个计算域按照不同部件的相对运动关系划分为若干子区域。

1.3 模型泵泵段的三维造型与网格系统

对于水泵泵段这样的复杂系统,应用Pro/ENGINEER 2001软件完成了转轮叶片和导叶片三维立体造型及表面光滑性修型,然后将其导入GAMBIT软件进行网格划分。

使用GAMBIT软件分别对进水直管、叶轮室、导叶体、扩散管和60°弯管等5个部分进行网格剖分,各部分的网格类型不同,疏密不等,对叶轮室和导叶体采用了较密的非结构化网格。图3给出了泵段表面的网格图。

1.4 模型泵泵段三维流动数值模拟结果及分析

模型泵泵段三维流动的数值模拟在设计流量(0.33 m^3/s)附近计算了8个流量点,流量计算范围为0.30~0.37 m^3/s。迭代计算的收敛情况总体较

万方数据

好，在计算范围内，大流量点附近收敛较快，小流量点附近收敛较慢。

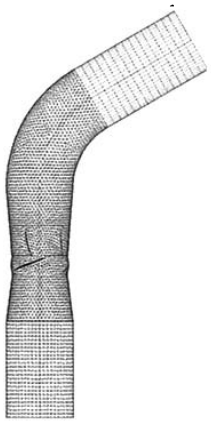

图 3　模型泵泵段表面网格图

数值计算所得模型泵的泵段能量性能（叶片角度为 0°）主要参数列于表 1，该结果与 ZBM791 - 100 泵段模型试验结果的比较示于图 4。可以看到：在计算范围内，泵段能量性能数值计算结果与泵段模型试验结果的变化趋势一致，计算差距较小。在设计流量点，扬程计算的相对误差为

$$\frac{4.357-4.21}{4.21}\times 100\% = 3.49\%$$

效率计算的相对误差为

$$\frac{84.05-84.7}{84.7}\times 100\% = -0.77\%$$

表 1　模型泵泵段能量性能数值模拟结果

流量点编号	流量 Q/(m^3/s)	进口总压 P_{0in}/Pa	出口总压 P_{0out}/Pa	力矩 M/(N·m)	扬程 H/m	效率 η/%
1	0.300	12 040	65 341	127.551 40	5.433	82.56
2	0.310	11 830	62 144	122.754 90	5.129	83.68
3	0.320	11 688	58 406	116.946 40	4.762	84.19
4	0.330	11 560	54 306	110.534 40	4.357	84.05
5	0.340	11 445	49 921	103.547 10	3.922	83.20
6	0.350	11 329	45 273	96.022 17	3.460	81.48
7	0.360	11 225	40 398	87.999 09	2.974	78.60
8	0.370	11 153	35 343	79.528 88	2.466	74.12

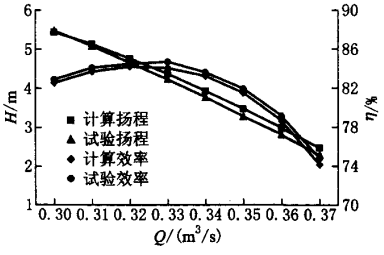

图 4　泵段数值计算结果与模型试验结果的比较

2　泵装置的三维流动数值模拟

2.1　立式轴流泵装置的有关参数

泵站 A 水泵叶轮直径 2.9 m，单泵设计流量为 31.5 m^3/s。由于该站实际采用的水泵水力模型需待设备招标后才能确定，故对立式轴流泵装置三维流动的数值模拟采用与该站要求相近的 ZBM791 - 100 水力模型。

2.2　边界条件

立式轴流泵装置三维流动数值模拟的控制方程与泵段三维流动数值模拟相同，但两者的边界条件不完全相同，不同之处如下：

（1）进口边界。计算流场的进口设置在进水池中距进水流道进口足够远处，进口面为一垂直于水流方向的断面，在这里，可认为来流速度在整个断面上均匀分布。

（2）出口边界。计算流场的出口设置在出水池中距出水流道出口足够远处，出口面为一垂直于水流方向的断面，这里的流动是充分发展的，可采用自由出流边界条件。

（3）自由表面。进、出水池的表面为自由水面，若忽略水面风引起的切应力及与大气层的热交换，则自由面对速度和紊动能均可视为对称平面处理[6]。

（4）内部界面。为便于取出流场计算结果，设置了进水池进口、叶轮室进口、导叶出口和出水池出口等 4 个内部界面。

2.3　三维造型与网格系统

泵站 A 采用肘形进水流道和直管式出水流道，设计了 1 个肘形进水流道和 2 个直管式出水流道（方案 1 和方案 2），组成了泵装置方案 1 和泵装置方案 2。图 5 和图 6 所示分别为泵装置方案 1 和泵装置方案 2 的透视图。

泵装置的计算区域包括立式轴流泵装置三维流动数值模拟的实体区域，分为 6 个部分：进水池、进水流道、叶轮室、导叶体、出水流道和出水池。首先应用 Pro/ENGINEER 2001 软件完成水泵叶轮及导叶的三维实体造型工作，再应用 GAMBIT 软件完成进、出水流道及进、出水池的建模工作，最后通过 GAMBIT 软件对立式轴流泵装置的各相邻实体进行拼接，完成整个装置的三维实体造型。

使用 GAMBIT 软件分别对进水池、进水流道、叶轮室、导叶体、出水流道及出水池等 6 个部分进行网

万方数据

格剖分,对叶轮室和导叶体部分加密了网格。图7给出了泵装置方案2的表面网格图。

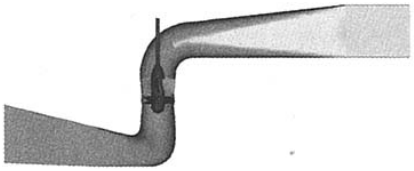

图5 泵站A立式轴流泵装置透视图(方案1)

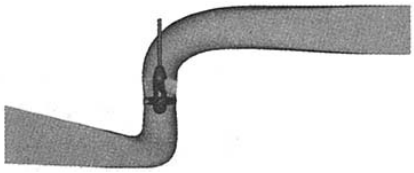

图6 泵站A立式轴流泵装置透视图(方案2)

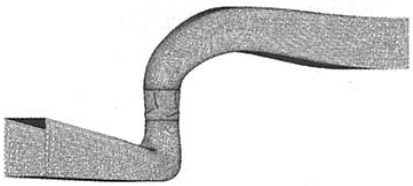

图7 泵站A立式轴流泵装置表面网格图(方案2)

2.4 三维流动数值模拟结果及分析

由于对水泵装置内部三维流场的分析需要借助于较多的流场图,限于篇幅,这里仅给出立式轴流泵装置外特性的计算结果。泵装置方案1和泵装置方案2数值计算所得能量性能(叶片角度为0°)曲线示于图8。

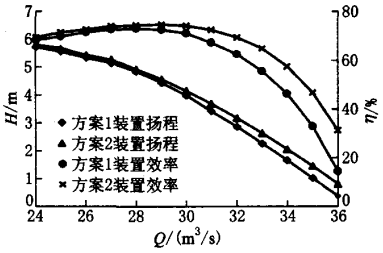

图8 计算所得泵站A泵装置的能量性能曲线

数值计算结果表明:(1)计算所得装置的流量与扬程曲线和流量与效率曲线的量值及变化趋势与通常水泵装置性能模型试验的结果相符;(2)泵装置方案2的能量性能明显优于泵装置方案1。

2.5 进、出水流道模型试验结果

为了验证泵装置三维流动及能量特性数值模拟的结果,对泵站A采用的肘形进水流道和2个直管式出水流道进行了模型试验。流道模型试验装置、试验方法等具体情况详见文献[7,8]。表2列出了流道水力损失模型试验的结果。

表2 流道模型试验所得进、出水流道的水力损失

泵装置方案	进水流道水力损失/m	出水流道水力损失/m	流道总水力损失/m
泵装置方案1	0.095	0.753	0.848
泵装置方案2	0.095	0.601	0.696

流道模型试验的结果表明:泵装置方案1出水流道的水力损失比泵装置方案2出水流道的水力损失大,这与数值计算所得泵装置方案1的能量性能明显低于泵装置方案2的结果相一致。

3 结 论

(1)采用数值计算的方法研究轴流泵泵段的三维流动及其能量性能可得到较为准确的结果;

(2)采用数值计算的方法研究立式轴流泵装置的三维流动及其能量性能所得的结果与模型试验所得泵装置性能的基本规律相符,也与流道模型试验的结果相符,这种方法可应用于轴流泵装置的优化水力设计研究。

参考文献(References)

[1] 金忠青. N-S方程的数值解及紊流模型[M]. 南京:河海大学出版社,1988:11-66.

[2] 王福军. 计算流体动力学分析-CFD软件原理与应用[M]. 北京:清华大学出版社,2004:113-143.

[3] 马福喜,王金瑞. 三维水流数值模拟[J]. 水利学报,1996(8):39-44.

[4] 曹树良,许 国,吴玉林. 水轮机蜗壳和固定导叶内部三维紊流的数值研究[J]. 工程热物理学报,1998,19(5):586-589.

[5] 郭鹏程,罗兴锜,刘胜柱. 基于三维紊流数值计算的离心泵叶轮优化设计[J]. 机械工程学报,2004,40(4):181-184.

[6] Rodi W. Turbulence models and their application in hydraulics experimental and mathematical fluid dynamics [M]. Delft: IAHR Section on Fundamentals of Division Ⅱ,1980: 44-46.

[7] 陆林广,祝 婕,冷 豫,等. 泵站进水流道模型水力损失的测试[J]. 排灌机械,2005,23(4):14-17.

[8] 陆林广,吴开平,冷 豫,等. 泵站出水流道模型水力损失的测试[J]. 排灌机械,2005,23(5):23-26.

(责任编辑 张文涛)

万方数据