

DOI :10.3876/j.issn.1000-1980.2009.01.011

基于 CFD 技术的泵站进水池水力性能研究

成 立,刘 超

(扬州大学水利科学与工程学院,江苏 扬州 225009)

摘要 :为了改进泵站进水池设计,应用 CFD 技术对进水池内部流态和水力性能进行分析.首先基于重整化群湍流模型和 SIMPLEC 算法,数值模拟了泵站典型矩形进水池内的定常流动;然后基于流速均匀度优化目标函数,分析了进水池进水管内各个断面的轴向流速分布规律,并提出了叶轮名义高度的取值范围,即喇叭口直径的 1.3 ~ 1.7 倍.计算结果表明,矩形进水池内流态紊乱,水力性能差,增加导流墩和采用 W 形后壁后,进水池流态和水力性能能得到明显改善.

关键词 :进水池;泵站;水力性能;计算流体动力学

中图分类号 :TV131.4 文献标识码 :A 文章编号 :1000-1980(2009)01-0052-05

开敞式进水池在中小型泵站中的应用较广^[1].进水池设计参数的选取会影响到水泵性能的发挥.国内外一些学者^[2-4]通过模型试验给出了进水池悬空高、淹没深度、后壁距、池宽、池长等重要参数的参考取值范围,但取值范围有较大出入.其主要原因是试验研究条件和标准等存在差异. Padmanabhan 等^[5]对进水池流态试验中的模型比尺效应进行了分析. Jain 等^[6]通过试验得出了漩涡含气量与水泵水力性能的关系. Sween 等^[7]给出了池宽设计的池内平均流速经验值. Iversen 等^[8]给出了可避免水泵气蚀问题的高比转速水泵的淹没深度取值范围. Fraser 等^[9]研究了雨水泵站进水池内的漩涡问题. Ansar 等^[10]详细分析了矩形进水池进口有切向回流和无切向回流条件下水泵进水池内的流态.

随着 PIV 和 LDV 等现代流动测试技术的出现,实现泵站进水池流场的可视化成为试验研究发展的方向^[11].随着计算机硬件的发展和数值计算方法的不断改进,计算流体动力学(CFD)技术成为研究泵站进水流体的重要手段^[12-13].本文采用 CFD 技术模拟了泵站进水池基本流态,分析了进水管内流速分布规律,提出了叶轮名义高度建议取值范围,并对采用改进措施后的进水池流态和水力性能进行了研究.对于进水池流态和水力性能的研究,过去主要是通过模型试验进行的.

1 水力性能评判函数

水力损失相近的进水池,水泵进口断面的流速分布会影响叶片表面的压力分布,使水泵出现不同的水力性能.研究表明,流速均匀度越高,断面均匀性越好.流速均匀度可通过均匀度函数来评判.本文采用基于质量加权的流速均匀度函数^[14]

$$\max\{v_{zu}\} = \left[1 - \frac{1}{\bar{u}_z \bar{m}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (u_{zi} m_i - \bar{u}_z \bar{m})^2}{n}} \right] \times 100\% \tag{1}$$

来评判流速均匀度.其中

$$\bar{u}_z = \frac{\int_{s1} u_{zi} \rho |\mathbf{u} \cdot d\mathbf{A}|}{\int_{s1} \rho |\mathbf{u} \cdot d\mathbf{A}|} = \frac{\sum_{i=1}^n u_{zi} \rho |\mathbf{u}_i \cdot d\mathbf{A}_i|}{\sum_{i=1}^n \rho |\mathbf{u}_i \cdot d\mathbf{A}_i|}$$

收稿日期 :2008-01-11

基金项目 :国家自然科学基金(50779060)、江苏省自然科学基金(BK2007557)、江苏省“青蓝工程”优秀中青年骨干教师基金(苏教[2007]2 号)

作者简介 :成立(1975—),男,江苏盐城人,副教授,博士,主要从事泵站水动力学数值模拟及实验研究.

式中： $\bar{u}_z$ ——断面质量加权平均轴向流速； $\bar{m}$ ——计算断面质量平均值； u_{zi} ——计算单元轴向流速分量； A_i ——计算单元面积矢量； u_i ——计算单元流速矢量； ρ ——水体密度； n ——计算断面单元个数； m_i ——计算单元质量，其值为 $\rho|u_i \cdot dA_i|$ 。

2 数值计算

2.1 控制方程及重整化群湍流模型

进水池内流动为不可压缩湍流流动，该流动可用雷诺时均 N-S 方程和连续性方程来描述。由于进水池内流动为复杂的强曲率的流动，采用优于标准 $k-\epsilon$ 紊流模型的 RNG $k-\epsilon$ 紊流模型^[15]进行数值计算。

2.2 计算区域和数值方法

典型的开敞式进水池为矩形结构形式。其主要几何参数为进水池宽度 W 、池长 L 、喇叭管悬空高度 h_c 、后壁距 T 、叶轮名义高度 H 及淹没深度 S ，如图 1 所示。其中， D 为吸水喇叭管口直径，各几何参数以 D 作为基本参数来表示。计算区域取整个进水池包围的水体。

采用非正交曲线贴体坐标系，通过求解椭圆微分方程生成计算区域贴体网格。雷诺时均 N-S 方程（动量方程）、连续性方程和湍动能及湍动能耗散率方程构成了封闭的非线性偏微分方程组，将上述方程变换到贴体坐标系（ ξ, η, ζ ）中，应用有限容积法离散、SIMPLEC 算法计算求解流速场和压力场。

2.3 边界条件

进口边界取在进水池上游较远处，认为来流已是充分发展的紊流，比较均匀。给定进水池入口的流速场，在水深方向设为对数式分布。出口边界取在泵吸水管出口处，认为出口流动已成单向状态，取各流动参数沿流向梯度为零。由于进水池内的流速不大，水面波动不大，采用静水压力假定，自由表面简化为对称边界条件。进水池中的固体壁面包括边墙、吸水管及其圆柱轮毂体等，采用标准壁面函数法，并规定固体边壁处无滑移条件。

3 计算结果及讨论

3.1 典型矩形进水池内部流态

3.1.1 基本流态及存在问题

图 2 为计算得到的进水池基本流态。由图 2 可知，进水池流动可分为 3 个阶段：直段、喇叭口吸水和进水管内流动。其中喇叭口吸水的流动最为复杂，流动表现为水流从喇叭口四周进入吸水管。进水池底部的水流直接由喇叭口前部进入吸水管，底部向上近 2/3 左右的水体，在池中心线附近水流从喇叭口前部进入吸水管，靠近两侧池壁水流从喇叭口的两侧进入管中，水面向下 1/3 左右的水体，从喇叭口后侧进入管中。

矩形进水池流态紊乱，主要表现为（a）当水流从四周流向喇叭管口时，在喇叭口的下方有一奇点区，漩涡可能产生（图 2（b））。（b）进水池后壁处易形成 2 个对称的回流区。这是由于水面附近的水体将绕过吸水管从进水池的后壁处由水面向下流向喇叭口，水流流过吸水管后，管后必然出现低速回流区，再加上与向下运动的趋势叠加，容易形成漩涡区（图 2（a））。（c）矩形进水池 2 个角处易形成死水区，是引发漩涡的区域（图 2（b））。

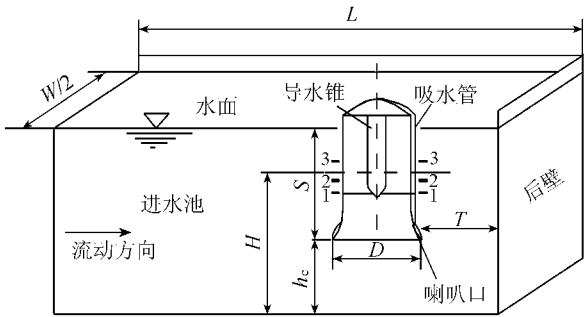


图 1 典型进水池结构形式
Fig. 1 Structure of a typical sump

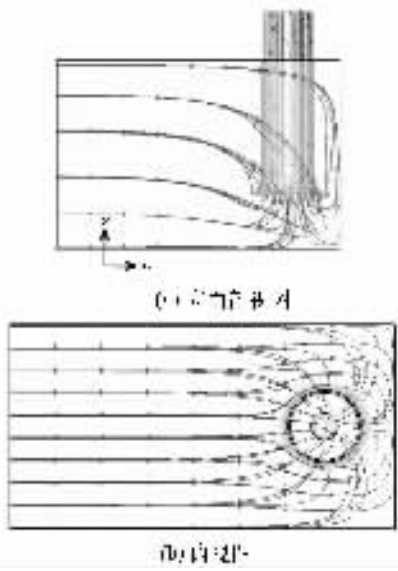


图 2 基本流态
Fig. 2 Basic flow patterns

3.1.2 不同流量下的流态及水力性能比较

图 3 为各流量下的进水池内流态及立面压力分布.由计算结果可知:在各流量下,流态及压力分布相似;进水管水面处、喇叭口下方靠近后壁处均为低速区,压力较高.由喇叭口处压力分布(图 4)可知,水流由进水池进入吸水管时,喇叭口处压力急速下降,吸水管出口处压力出现最小值.数值计算结果表明,进水池水力损失与流量二次方呈线性关系.

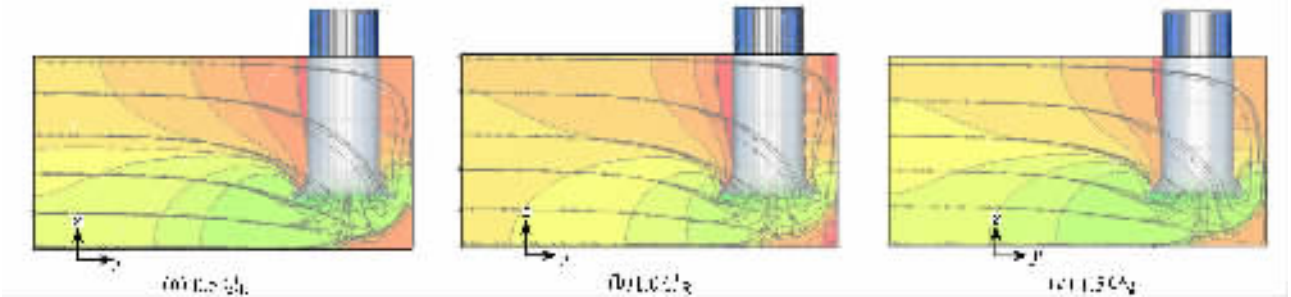


图 3 各流量下的进水池流态

Fig. 3 Flow patterns of sump with different pumping discharges

3.2 改进方案进水池

3.2.1 流态分析及水力性能

根据对典型进水池流态的分析,综合考虑水力性能、漩涡消除等因素,对采用 W 形后壁形状加导水锥方案的进水池进行了计算.图 5 给出了设计工况下改进方案的进水池流态.由图 5(a)可知,吸水管喇叭口下方四周均匀进水,边壁形状符合水流流线要求(图 5(b)),后壁的隔舌有效地限制了管后对称回流的发生(图 5(c)),使得池水面不易产生漩涡.由图 5(d)可知,底部的流线奇点被设置的导水锥消除,水面处管后的回流区被压缩在较小的区域内.表 1 对各种平面后壁形状的水力损失进行了比较,结果表明改进方案水力损失较小.

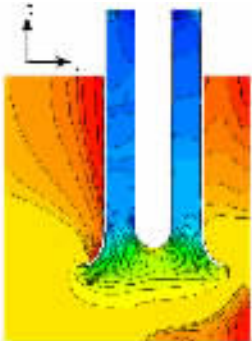


图 4 喇叭口处压力分布

Fig. 4 Distribution of pressures at bell mouth

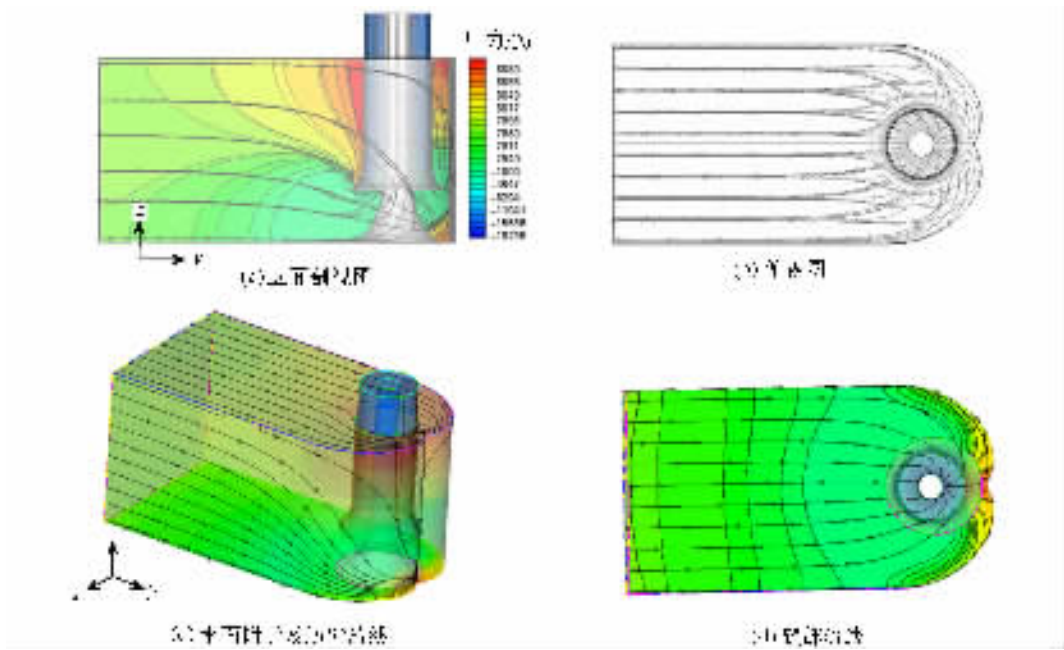


图 5 进水池改进方案流态(设计工况)

Fig. 5 Flow patterns of sumps with modified scheme(BEP)

表 1 各方案水力损失比较(设计工况)

Table 1 Comparison of head loss of sumps with different schemes(BEP)

平面形状	矩形 ^[1]	梯形 ^[1]	半圆形 ^[1]	W 形	W 形 + 导水锥
水力损失 h_w/m	0.390	0.393	0.398	0.379	0.370

3.2.2 进水池的叶轮名义高度分析

叶轮名义高度 H/D 的确定主要考虑进口最低运行水位、水泵的气蚀性能和进水池流态. 从进水条件优劣来说, 主要看水泵进口断面流场的均匀性.

图 6 给出了吸水管各断面流速均匀度 v_{zu} 随断面的变化关系. 由图 6 可知, 流速均匀度曲线在 1.3 ~ 1.6 断面位置处存在极值. 图 7 给出了吸水管各断面轴向流速等值线(v_z/v_{au} , v_z 为断面各网格点上的轴向流速, v_{au} 为断面轴向平均流速). 由图 7 可知: 当 $H/D = 0.8 \sim 1.2$ 时, 轴向流速大的在内侧(即进水侧), 吸水锥管呈现半月牙的流速分布, 月牙位于内侧, 月牙口向外侧(即后壁侧); 当 $H/D = 1.3 \sim 1.7$ 时, 管内的流速分布较为均匀, 无半月牙流速分布出现; 当 $H/D = 1.8 \sim 2.5$ 时, 吸水锥管呈现位于外侧的半月牙流速分布, 月牙口向内侧; 只有当 $H/D > 3.5$ 时, 流速分布才较为均匀.

传统的学术观点^[7]认为增加水泵叶轮进口断面至进水喇叭口的距离可以满足进水要求, 但本文研究表明, 增加该

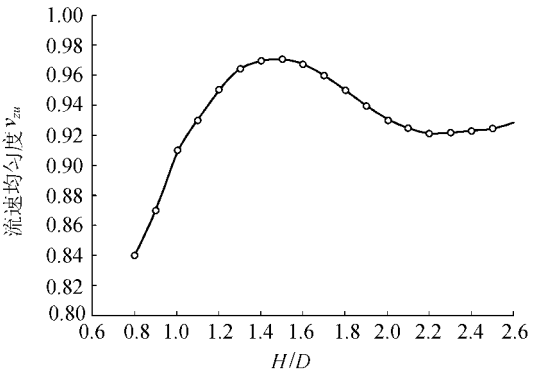


图 6 吸水管各断面流速均匀度

Fig. 6 Uniform level of pipe sections

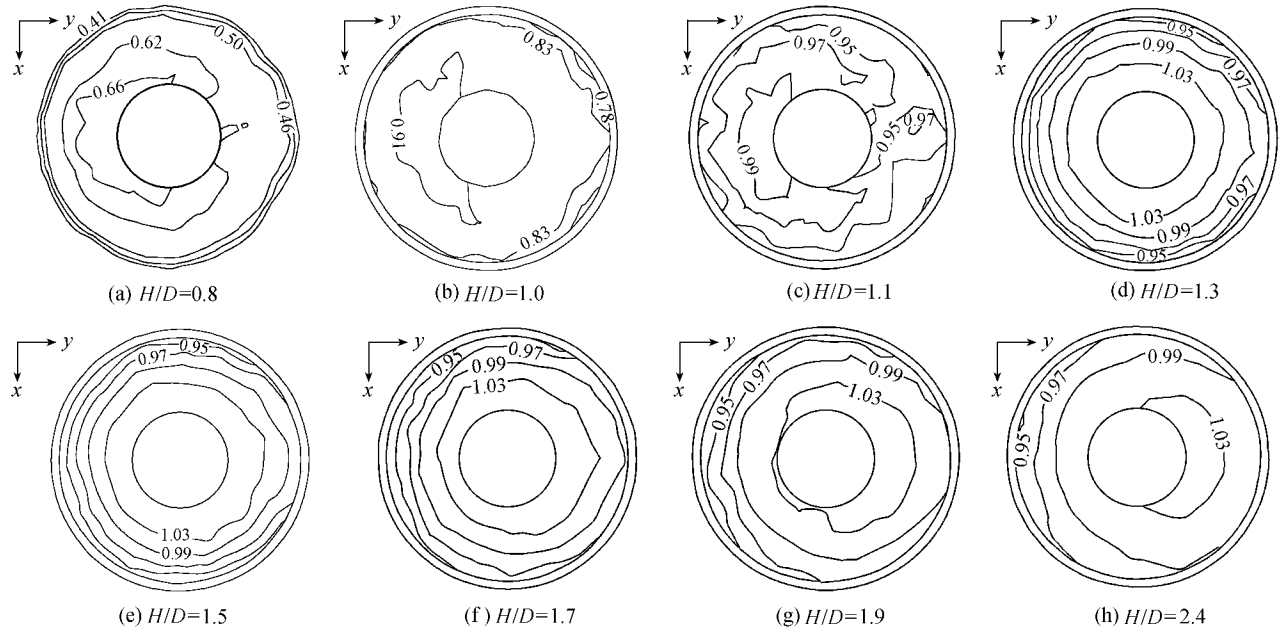


图 7 吸水管各断面轴向流速等值线(v_z/v_{au})

Fig. 7 Axial velocity contours of pipe sections

距离后, 断面流速分布发生了改变, 较高的流速由内侧转移至外侧, 可见其对改善流速分布并无明显效果. 因此, 无论从改善流速分布还是从节省土建投资来看, 一味增加水泵叶轮进口断面至进水喇叭口的距离是不可取的.

从数值计算综合分析结果来看, 水泵叶轮位置即名义高度 H/D 取值范围宜为 1.3 ~ 1.7.

4 结 论

a. 开敞式进水池是中小型泵站最常用的进水形式. 与大型泵站有压进水流道相比, 该形式的进水池水力性能差, 易产生漩涡.

b. 本文基于定常不可压流体的控制方程和重整化群湍流模型,应用 SIMPLEC 算法计算了典型泵站进水池内的定常流动,并通过流态分析,提出了增加导流墩和 W 形后壁的进水池改进方案.改进方案进水池通过设置的导水锥消除池底的流线奇点,水面附近管后的回流区被压缩在较小的区域内,吸水管喇叭口下方四周均匀进水,边壁形状符合水流流线要求.改进方案水力损失较小.

c. 本文基于流速均匀度优化目标函数,分析了改进方案进水池进水管内各个断面的轴向流速分布,提出了叶轮名义高度 H/D 的取值范围:1.3 ~ 1.7.

参考文献:

- [1] 刘超.水泵及水泵站[M].北京:科学技术文献出版社,2003:144-150.
- [2] U.S. Army Corps of Engineers. Hydraulic design guidance for rectangular sumps of small pumping stations with vertical pumps and ponded approaches, Engineer technology letter no. 1110-2-31[R]. Washington, D.C: U.S. Army Corps of Engineers, 1988.
- [3] 钱义达,严登峰,刘超,等.泵站开敞式进水流道试验研究[J].江苏农学院学报,1989,10(2):47-52.
- [4] PROSSER M J. The hydraulic design of pump sumps and intakes[M]. Cranfield: British Hydromechanics Research Association, 1977.
- [5] PADMANABHAN M, HECKER G E. Scale effects in pump sump models[J]. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 1984, 110(11): 1540-1556.
- [6] JAIN A K, RAJU K G R, GARDE R J. Vortices formation at vertical pipe intakes[J]. Journal of Hydraulic Division, 1978, 104(10): 1429-1445.
- [7] SWEEN C E, ELDER R A, HAY D. Pump sump design experience[J]. Journal of Hydraulic Division, 1982, 108(3): 361-377.
- [8] IVERSEN H W, BERKELEY C. Studies of submergence requirements of high-specific-speed pumps[J]. The American Society of Mechanical Engineers, 1953(75): 635-641.
- [9] FRASER W H, HARRISON N J. Hydraulic problems encountered in intake structures of vertical wet-pit pumps and methods leading to their solution[J]. The American Society of Mechanical Engineers, 1953(75): 645-652.
- [10] ANSAR M, TATSUAKI N. Experimental study of 3D pump intake flows with and without cross flow[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2001, 127(10): 825-834.
- [11] LIU Chao, LI Da-liang, ZHOU Ji-ren et al. Application of 3D-PIV to the flow measurements in pump sump[C]//ASME. Proceedings of 5th Joint ASME/JSME Fluids Engineering Conference. New York: ASME, 2007.
- [12] 蒋小欣,李龙,王玲玲,等.双向贯流泵装置特性数值模拟[J].河海大学学报:自然科学版,2005,33(1):81-84.
- [13] 成立,刘超.低扬程泵装置流动特性及水力性能研究进展[J].水利水电科技进展,2008,28(4):85-88.
- [14] 成立,刘超,薛坚.泵站进出水流道优化设计目标函数研究[J].水泵技术,2007(3):39-42.
- [15] YAKHOT V, ORSZAG S A. Renormalization group analysis of turbulence I, basic theory[J]. Journal of Scientific Computing, 1986, 1(1): 3-5.

Hydraulic performance of pump sumps based on CFD approach

CHEN Li, LIU Chao

(College of Hydraulic Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China)

Abstract: In order to improve the design of pump sumps, the CFD approach was employed to analyze the flow patterns and hydraulic performance. Based on the renormalization group analysis model and the SIMPLEC algorithm, the steady flows in a typical rectangular sump were simulated. By use of the optimum objective function of the velocity uniformity, the distribution of axial velocities of various sections of the suction pipe was analyzed. The range of nominal height for the impeller was suggested, that is, 1.3 to 1.7 times the diameter of the bell mouth. The computed results show that the flow patterns of the rectangular sump are turbulent and the hydraulic performance is poor. The hydraulic performance of the sump with a tone and a W-type wall is obviously improved.

Key words: sump; pump station; hydraulic performance; computational fluid dynamics