

不同湍流模型对海水淡化用提升泵模拟精度的影响

胡敬宁¹, 江 伟¹, 刘三华¹, 许万国²

(1. 江苏大学 流体机械工程技术研究中心, 江苏 镇江 212013; 2. 马鞍山钢铁股份公司煤焦化公司, 安徽 马鞍山 243021)

摘 要: 针对双蜗壳型式海水淡化用提升泵, 运用 Fluent 软件, 分别采用标准 $k - \varepsilon$ 、RNG $k - \varepsilon$ 和 Realizable $k - \varepsilon$ 湍流计算模型进行数值模拟。分析 3 种不同湍流模型中蜗壳与叶片的流场情况, 在此基础上进行了性能预测, 并与试验结果进行比较。研究表明: 采用 RNG $k - \varepsilon$ 湍流模型计算时, 中叶轮和蜗壳内部流线比较流畅, 性能预测结果与试验结果吻合较好; 采用 $k - \varepsilon$ 和 Realizable $k - \varepsilon$ 湍流模型计算时, 叶轮和蜗壳流线紊乱, 产生漩涡, 性能预测结果与试验结果相差比较大。RNG $k - \varepsilon$ 湍流计算模型更适合海水淡化用提升泵和类似结构离心泵的性能预测, 为海水淡化用提升泵及类似双蜗壳结构离心泵的性能预估和数值模拟提供一定参考。

关 键 词: 海水淡化用提升泵; FLUENT 软件; 性能预测; 湍流计算模型; 双蜗壳

中图分类号: O747; TK730 文献标识码: A

引 言

采用 CFD 方法对离心泵进行流场分析和性能预测是现在离心泵设计中的重要环节。在计算模型的选择上, 目前采用最多的是标准的 $k - \varepsilon$ 湍流模型和 RNG 湍流模型对离心泵进行数值模拟和性能预测^[1~4], 但缺少对不同湍流模型模拟精度比较的研究。

本研究以 2 500 t/d 反渗透海水淡化用提升泵为研究对象, 应用 Fluent 软件, 分别采用 RNG $k - \varepsilon$ 湍流模型、标准 $k - \varepsilon$ 湍流模型和 Realizable $k - \varepsilon$ 湍流模型, 按照完全相同的建模和网格生成, 对双蜗壳型式海水淡化用提升泵内部流场进行模拟, 并与试验结果进行比较, 找出最佳的湍流计算模型。

1 计算模型

1.1 物理模型

海水淡化用提升泵是单级单吸的流程泵, 其结

构如图 1 所示。物理模型是泵流动的主流区, 即泵进口、叶轮流道、蜗壳和出口管。计算区域略去了叶轮前后泵腔和口环间隙处流动。

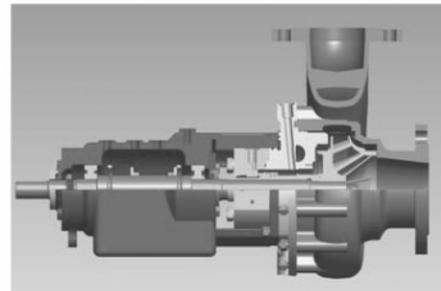


图 1 海水淡化用提升泵结构

2 500 t/d 反渗透海水淡化用提升泵的基本设计参数为:

流量 $Q = 150 \text{ m}^3/\text{h}$; 扬程 $H = 40 \text{ m}$
转速 $n = 2\,950 \text{ r/min}$; 效率 $\eta = 76\%$
水力模型的主要尺寸如表 1 所示。

表 1 水力模型的主要参数

	数值
叶轮外径 D_2/mm	190
进口直径 D_1/mm	120
出口角 $\beta_2/(\text{°})$	27
叶片数 Z	6
包角 $\phi/(\text{°})$	110
轮毂直径 D_h/mm	50
出口宽度 b_2/mm	25
叶轮出口面积/ mm^2	13 415
第八断面面积/ mm^2	4 800
面积比	0.357

收稿日期: 2010 - 07 - 12; 修订日期: 2010 - 08 - 31

基金项目: 国家科技支撑基金资助项目(2006BAB03A02); 江苏省高新技术基金资助项目(BG2006024)

作者简介: 胡敬宁(1962 -), 男, 安徽望江人, 江苏大学教授级高工。

1.2 计算模型

利用 PRO-E 三维软件对泵体、叶轮建模,最后进行整体组装建立计算模型,如图 2 所示。

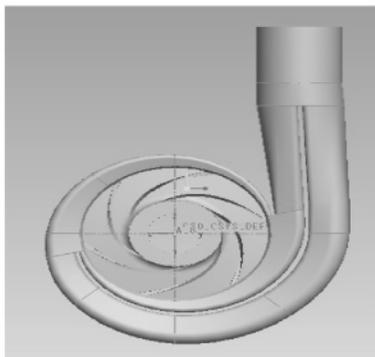


图 2 计算模型

由于几何模型较复杂,采用区域划分网格的方法。分成进口段、叶轮、压出室 3 个计算网格区域。

采用适应性较强的非结构网格,进口管和蜗壳出口处采用六面体网格,叶轮采用混合格网。

叶轮划分网格数 213 821,整个计算区域的网格单元数为 456 852。

1.3 控制方程及边界条件

流动模型:使用 FLUENT 流体计算软件进行流场模拟,控制方程包括连续方程、动量方程和湍流计算模

型;湍流计算模型分别采用标准 $k-\epsilon$ 湍流模型、RNG $k-\epsilon$ 湍流模型和 Realizable $k-\epsilon$ 湍流模型。

计算方法:采用标准壁函数和 SIMPLEC 算法;为了突出不同湍流模式的影响,对建模、网格和收敛标准等均采用完全相同处理;对流项采用二阶迎风格式离散;扩散项、源项采用二阶中心差分格式离散;为了加速收敛,松弛系数为 0.3,速度项为 0.2,湍动能耗散率项为 0.2^[5]。

边界条件:以水为计算流体,泵进口处采用速度进口,出口采用压力出口,固壁上取无滑移边界条件。旋转叶轮和静止蜗壳之间耦合采用多重参考坐标系法(MRF)^[5]。

每组湍流模型分别计算 0.2、0.4、0.6、0.8、1.0 和 1.2 倍设计流量 6 个工况点。

2 Fluent 计算和性能预测

2.1 流场分析

在设计流量下,3 种湍流模型叶轮和蜗壳内的流动状态如图 3 和图 4 所示。从图 3 叶轮内的流动可以看出标准 $k-\epsilon$ 湍流模型、RNG 湍流模型和 Realizable $k-\epsilon$ 湍流模型叶轮内部流动都比较好,流线沿叶片平滑过渡,相互之间不产生干涉,但是相对比较标准 $k-\epsilon$ 湍流模型、Realizable $k-\epsilon$ 湍流模型在叶轮出口出现流线紊乱。

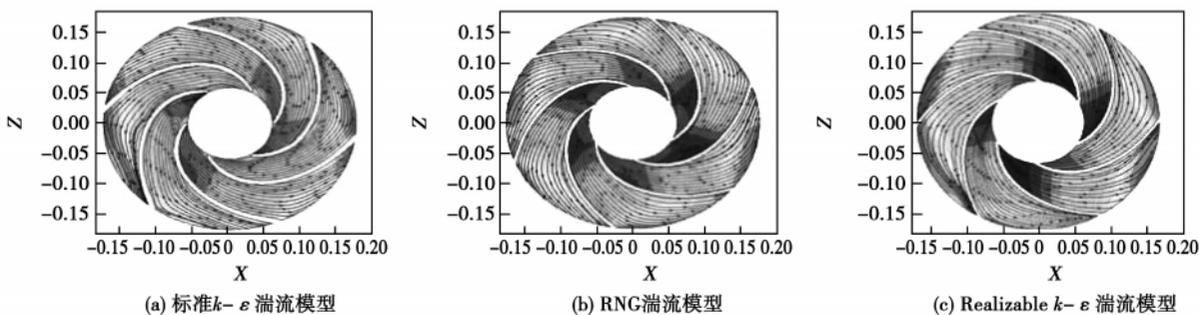


图 3 设计流量下叶轮内的流动

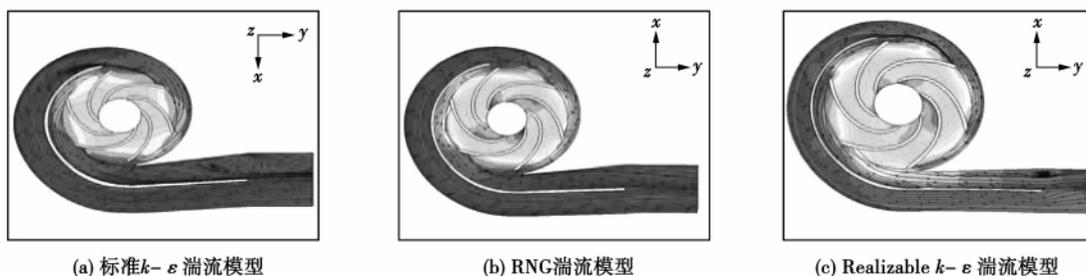


图 4 设计流量下蜗壳内的流动

从图 4 蜗壳内部流动可以看出, RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型蜗壳流线总体保持平滑过渡; 标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型和 Realizable $k-\varepsilon$ 湍流模型内部流线总体保持平滑过渡, 但是在叶轮出口处局部产生高速流体, 蜗壳出口处出现少量漩涡。

2.2 性能预测计算

FLUENT 的后处理能提供大量的计算结果数据, 包括物理量通过某一面的通量、力、绕轴力矩等, 可以用计算结果提供的数据报告来预测离心泵的外特性。

根据扬程的定义, 水泵扬程为:

$$H = \left\{ \frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{p}{\rho g} \right)_i}{n} + \frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{v^2}{2g} \right)_i}{n} \right\}_{out} - \left\{ \frac{\sum_{i=1}^m \left(\frac{p}{\rho g} \right)_i}{m} + \frac{\sum_{i=1}^m \left(\frac{v^2}{2g} \right)_i}{m} \right\}_{in} \quad (1)$$

式中: m 、 n —进出口截面节点数; p —静压, Pa; v —绝对速度, m/s; ρ —水的密度, kg/m^3 。

水泵的水力效率为:

$$\eta_h = \frac{\rho g Q H}{M \omega} \quad (2)$$

式中: Q —流量, m^3/s ; M —叶片正面、叶片背面和前后盖板表面受到的绕叶轮中心轴的力矩之和, N/m; ω —叶轮转动的角速度, rad/s。

2.3 效率修正

在 FLUENT 计算过程中由于没有考虑容积损失和圆盘损失的影响, 故需要对模拟结果进行修正, 修正方法为:

$$\text{容积效率: } \eta_v = \frac{1}{1 + 0.68 n_s^{-\frac{2}{3}}} \quad (3)$$

式中: n_s —比转速。

只考虑圆盘摩擦损失时的机械效率:

$$\eta'_m = 1 - 0.06 \frac{1}{(n_s/100)^{\frac{7}{6}}} \quad (4)$$

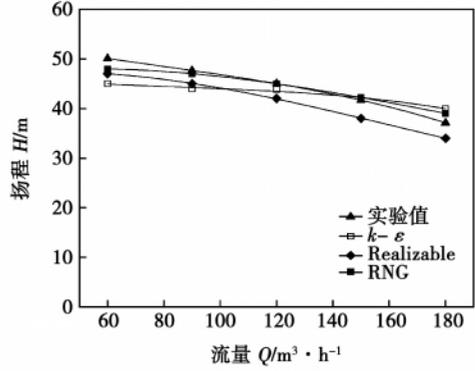
在具体计算时还应考虑轴承和机械密封的机械损失, 一般认为对于单级泵的机械效率在上述 η'_m 的基础上减去 1 个百分点, 即为泵的机械效率^[6]。

3 Fluent 计算与试验结果对比

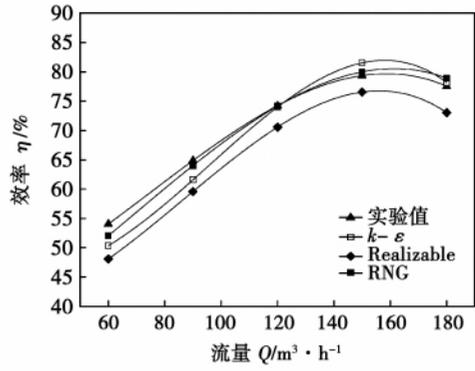
提升泵的性能试验结果和 FLUENT 计算的预测结果对比如图 5 所示。图中的效率按式 (3) 和式 (4) 进行了修正。

3.1 扬程曲线对比

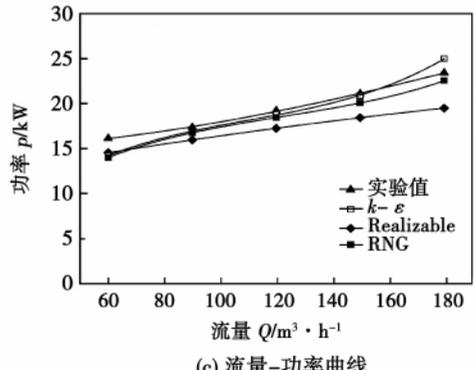
从图 5 (a) 流量-扬程曲线对比中可以看出:



(a) 流量-扬程曲线



(b) 流量-效率曲线



(c) 流量-功率曲线

图 5 性能曲线

在标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型中扬程下降趋势比较平缓; RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型, Realizable $k-\varepsilon$ 湍流模型扬程曲线相对陡降。

小流量区, RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型扬程最大, 标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型扬程最小。

在设计流量下, RNG $k-\varepsilon$ 湍流计算模型与试验曲线很接近, 误差不是很大。

小流量区标准 $k-\varepsilon$ 湍流计算模型与试验误差最大, 其次是 Realizable $k-\varepsilon$ 湍流模型。

3.2 效率曲线对比

从图 5 (b) 流量-效率曲线对比中可以看出: 高效区最宽广的是 RNG $k-\varepsilon$ 湍流计算模型。

在大流量工况,标准 $k-\epsilon$ 湍流计算模型、Realizable $k-\epsilon$ 湍流计算模型效率曲线下降趋势比 RNG $k-\epsilon$ 湍流模型更陡降。

在设计流量点,标准 $k-\epsilon$ 湍流计算模型和 Realizable $k-\epsilon$ 湍流计算模型的效率与试验值误差较大,RNG $k-\epsilon$ 湍流计算模型最小。

3.3 功率曲线对比

从图 5(c) 流量-功率曲线对比中可以看出:

在设计工况点,标准 $k-\epsilon$ 湍流计算模型与试验数据非常的接近,而 RNG $k-\epsilon$ 湍流模型、Realizable $k-\epsilon$ 湍流计算模型与试验误差较大。

偏离设计工况 $k-\epsilon$ 湍流计算模型、RNG $k-\epsilon$ 湍流模型和 Realizable $k-\epsilon$ 湍流模型与试验值误差较大。

3.4 对比分析

针对同一台海水淡化提升泵,分别采用的标准 $k-\epsilon$ 湍流计算模型、Realizable $k-\epsilon$ 湍流计算模型和 RNG $k-\epsilon$ 湍流计算模型进行了理论计算,并与试验数据对比,对产生的偏差进行分析:

(1) 标准 $k-\epsilon$ 模型是假定湍流为各向同性的均匀湍流,所以在旋流等非均匀湍流问题的计算中存在较大误差,特别是在处理强旋流或带有弯曲壁面的流动时,会出现一定失真。

(2) Realizable $k-\epsilon$ 模型是新出现的 $k-\epsilon$ 模型,在分离流计算和带二次流的复杂流动计算表现良好。但在旋转和静止区的流场计算中,如在多重参考系、旋转滑移网格等计算中,会产生非物理湍流粘性,因此在计算中误差较大。

(3) RNG $k-\epsilon$ 湍流模型可以更好的处理高应变率及流线弯曲程度较大的流动^[5],海水淡化用提升泵蜗壳是属于双蜗壳,更符合这种流动状态,采用 RNG $k-\epsilon$ 湍流模型进行模拟计算更适合。

4 结 论

对一台海水淡化用提升泵,采用 3 种不同湍流计算模型分别进行了内部流动模拟计算和性能预测,并与试验结果进行了对比和分析,得出结论:

(1) RNG $k-\epsilon$ 湍流计算模型中的叶轮和蜗壳内部流线比标准 $k-\epsilon$ 湍流模型和 Realizable $k-\epsilon$ 湍流模型要流畅。

(2) RNG $k-\epsilon$ 计算模型性能预测与试验更接近,误差最小。

(3) 海水淡化用提升泵这种双蜗壳结构的离心泵更适合采用 RNG $k-\epsilon$ 湍流计算模型。

参考文献:

- [1] 黎义斌, 鄢国秀. 低比转数冲压焊接离心泵三维湍流数值模拟[J]. 农业机械报, 2008, 39(7): 72-75.
- [2] 杨军虎, 王 国. 双叶片螺旋离心泵的内部流场模拟[J]. 流体机械, 2009, 37(10): 30-33.
- [3] 黄 思, 周先华. 节段式多级离心泵全三维湍流场的数值模拟[J]. 西华大学学报(自然科学版), 2005, 24(6): 37-39.
- [4] 黄 思, 吴玉林. 离心泵内三维流场非对称性及泵受力的数值分析[J]. 2006, 34(2): 30-33.
- [5] 王福军. 计算流体动力学分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
- [6] 关醒凡. 现代泵技术手册[M]. 北京: 中国宇航出版社, 1995.



四氟化碳作为核电站热力循环工质的效果

据《Электрические станции》2010 年 10 月报道, МЭИ(莫斯科动力学院)的研究人员对利用四氟化碳取代核电站热力循环中水和气体工质的可行性进行了研究。

四氟化碳化合物热力循环的热力计算表明,该循环达到高于水-蒸汽和气体循环的效率。

给出了快中子反应堆装置二回路使用四氟化碳的循环分析结果。也给出了考虑循环压力损失,使用 C₄F₁₀ 核电站二回路循环的计算结果。

详细列出了使用四氟化碳作为核电站热力循环工质的优点和缺点。

热力分析表明,四氟化碳用作为核电站热力循环工质,涡轮前压力不大于 14 MPa,温度不大于 580℃的情况下,可以实现超临界热力循环。

使用这种工质的动力装置既可应用于核电站,也可应用于一些特殊系统,如作为调峰或应急供热电源。

(学 牛 摘译)

Heat Pipes for Use in Bioreactors [刊, 汉] YIN Cai-xia, ZHANG Hong, WANG Zhong-xian, CHEN Fang (College of Energy Source, Nanjing Institute of Technology, Nanjing, China, Post Code: 210009) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2011, 26(4). - 480 ~ 482

On the basis of the currently available bioreactors, studied and developed was a new type rotating heat pipe-based bioreactor by using the heat pipe technology to absorb heat effectively. With water serving as the simulation working medium, the heat transfer performance of the rotating heat pipes (used as the agitator shafts) under different operating conditions was experimentally studied. It has been found that the rotating heat pipes thus designed can give out effectively the bio-reaction heat and the influence of the rotating speed and reaction temperature on the heat transfer performance of the rotating heat pipes was also identified. **Key words:** rotating heat pipe-based bioreactor, rotating heat pipe, heat transfer performance, rotating speed, reaction temperature

不同湍流模型对海水淡化用提升泵模拟精度的影响 = Influence of Various Turbulent Flow Models on the Precision of Simulating a Seawater Desalination-purpose Lift Pump [刊, 汉] HU Jing-ning, JIANG Wei, LIU San-hua (Research Center for Fluid Mechanical Engineering Technologies, Jiangsu University, Zhenjiang, China, Post Code: 212013), XU Wan-guo (Coal Coking Company, Ma'an Iron and Steel Stock Co. Ltd., Ma'an, China, Post Code: 243021) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2011, 26(4). - 483 ~ 486

By using software Fluent, a numerical simulation was performed of a dual volute type seawater desalination-purpose lift pump by employing the standard $k - \varepsilon$, RNG $k - \varepsilon$ and Realizable $k - \varepsilon$ turbulent flow calculation models respectively. Furthermore, the flow fields inside the volute and blades were analyzed by using the three turbulent flow models. On this basis, a performance prediction was conducted and compared with the test results. The research results show that when the RNG $k - \varepsilon$ turbulent flow model is used for calculation, the streamlines inside the impeller and volute are comparatively smooth and the performance prediction result is in relatively good agreement with the test one. When the $k - \varepsilon$ and Realizable $k - \varepsilon$ turbulent flow model are used for calculation, the streamlines inside the impeller and volute are disordered with vortexes being produced and the performance prediction result has a relatively big difference from the test one. The foregoing indicates that the RNG $k - \varepsilon$ turbulent flow calculation model is more suitable for the performance prediction of seawater desalination-purpose lift pumps and centrifugal pumps with the same structure. The research results can provide a certain reference for performance prediction and numerical simulation of seawater desalination-purpose lift pumps and centrifugal pumps with the same dual volute structure. **Key words:** seawater desalination-purpose lift pump, software Fluent, performance prediction, turbulent flow calculation model, double volute