

# 提高反渗透海水淡化用提升泵效率的研究

胡敬宁,刘三华,江伟,张军辉

(江苏大学 流体机械工程技术研究中心,江苏 镇江 212013)

摘 要: 针对反渗透海水淡化提升泵效率的问题,在已有水力模型基础上,设计出 3 种水力模型方案。运用 Fluent 软件,采用多参考坐标系,基于雷诺时均的  $N-S$  方程和标准  $k-\epsilon$  湍流模型,对 3 种水力模型的内部流场进行数值模拟与性能预测;基于预测的结果,选取一组性能符合要求,效率最高的模型方案制作成模型泵,并进行试验研究。性能预测和模型试验结果表明:预测值与试验值总体吻合较好,其中预测扬程与试验扬程在设计工况点比较接近,偏离设计工况点存在一定误差;通过理论计算优选后得到的水力模型实际泵效率为 81.3%,达到了海水淡化泵的效率要求。

关 键 词: 海水淡化; 提升泵; 效率; 性能预测; 误差

中图分类号: TH311 文献标识码: A

## 引 言

我国是一个淡水资源严重缺乏的国家,海水淡化是解决我国沿海地区淡水严重短缺的有效途径之一<sup>[1]</sup>。反渗透海水淡化技术由于其设备投资小、能量消耗低、建造周期短等诸多优点,近年来发展速度很快,已成为海水淡化的主导技术。在海水淡化技术已经相当成熟的今天,耗能指标对海水淡化技术的应用有着重要的影响,提高泵的效率是提高经济效益的一个主要方面<sup>[2-3]</sup>。

提升泵是反渗透海水淡化系统装置中能量回收部分的一个必不可少的设备,主要是补偿能量回收装置的损失,将经过能量交换的淡水压力提高到膜堆操作压力<sup>[4-5]</sup>。提升泵的耗能占直接制淡水装置的 20% 左右,它的效率对整个系统装置的效率有着重要的影响。

本研究以单线日产淡水量 2 500 t/d、膜堆压力等级 6.4 MPa 的反渗透系统的提升泵为研究对象,通过对水力模型进行理论上的计算,并在理论计算的基础上进行性能预测,在预测的水力模型中优选出效率最高、高效区宽广的方案进行模型试验验证。

提升泵技术参数为:

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  $\eta = 80\%$

## 1 计算模型和 Fluent 计算方法

### 1.1 水力模型

在已有水力模型的基础上,通过改变叶轮一些关键水力尺寸,得出 3 组水力模型。3 组水力模型主要参数如表 1 所示。

表 1 3 组水力模型主要参数

	方案一	方案二	方案三
叶轮外径 $D_2/\text{mm}$	190	192	190
进口直径 $D_1/\text{mm}$	120	119	125
出口角 $\beta_2/(\text{°})$	27	32	30
叶片数 $Z$	6	6	6
包角 $\varphi/(\text{°})$	110	120	130
轮毂直径 $D_h/\text{mm}$	50	50	50
出口宽度 $b_2/\text{mm}$	25	23	27
叶轮出口面积/ $\text{mm}^2$	13 415	12 650	14 618
第八断面面积/ $\text{mm}^2$	4 800	4 800	4 800
面积比	0.357	0.379	0.328

### 1.2 计算模型

利用 Pro/E 分别对水力模型的吸入段、叶轮和压水室等过流部件进行造型,再建立整体装配图,得出水力模型的计算模型,如图 1 所示。

将三维图导入 Fluent 的前处理软件 GAMBIT 进行网格划分。由于吸入段比较规则,采用六面体网格划分,叶轮和压水室形状比较复杂,采用四面体网格划分,最后总的划分网格数大约 45 万。

收稿日期: 2010 - 05 - 06; 修订日期: 2010 - 05 - 27

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

作者简介: 胡敬宁( 1962 - ) 男,安徽望江人,江苏大学教授。

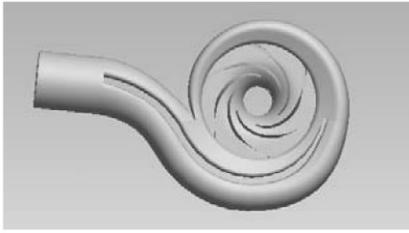


图 1 计算模型

1.3 水力模型计算

1.3.1 控制方程与湍流模型

应用 Fluent 软件模拟时,利用有限体积法对雷诺时均 Navier-Stokes 方程进行数值离散;采用标准  $k-\varepsilon$  湍流模型及 SIMPLEC 算法进行求解;控制方程对流项的离散采用二阶迎风格式;扩散项、源项的离散采用二阶中心差分格式<sup>[6]</sup>。连续方程、动量方程和  $k-\varepsilon$  方程形成了封闭的控制方程组。

雷诺时均 Navier-Stokes 方程为<sup>[7~8]</sup>:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0;$$

$$u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} [v \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - u_i u_j]$$

式中: $\rho$ —液体密度; $u_i$ — $i$  方向的雷诺平均速度; $p$ —雷诺平均静压; $u_i u_j$ —脉动量。

标准  $k-\varepsilon$  方程:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} [\rho u_j k - (\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}) \frac{\partial k}{\partial x_j}] = \rho (P_k - \varepsilon)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} [\rho u_j \varepsilon - (\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}] = \frac{\varepsilon}{\rho k} (C_1 P_k - C_2 \varepsilon)$$

$$P_k = \frac{\mu_t}{\rho} (\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}) \frac{\partial_i \mu}{\partial x_j}$$

式中: $\mu_t$ —涡粘性系数; $P_k$ —湍动能  $k$  生成项; $C_\mu = 0.09$   $\sigma_k = 1.0$   $\sigma_\varepsilon = 1.3$   $C_1 = 1.44$   $C_2 = 1.92$ 。

1.3.2 边界条件

叶轮进口采用速度进口,出口采用自由出流,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)。计算过程中通过监控控制方程的残差和出口的平均压力来判断是否收敛。

2 计算结果与分析

每组方案模型分别在  $0.4 Q_r$ 、 $0.6 Q_r$ 、 $0.8 Q_r$ 、 $0.9 Q_r$ 、 $1.1 Q_r$ 、 $1.2 Q_r$  等 6 种工况下进行模拟计算,其中  $Q_r$  为额定流量。通过模拟计算,可得出相应的速度场与压力场,如图 2~图 3 所示。

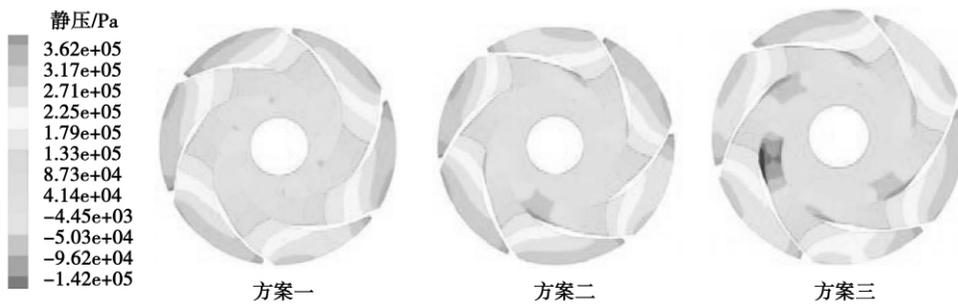


图 2 3 种叶轮内部的静压分布

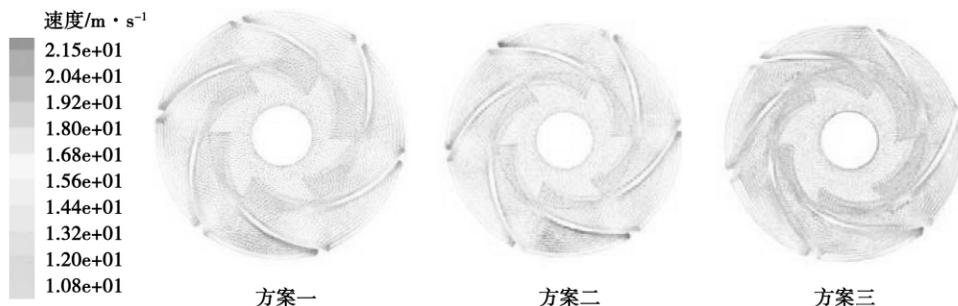


图 3 3 种叶轮内部的速度矢量分布

### 2.1 静压分布

从图 2 可看出,随叶轮的旋转作用,3 种方案叶片之间的静压值从叶轮进口到出口逐渐增加,并且呈均匀分布状态;叶片工作面处压力值大于叶片背面压力值。在叶轮出口附近,由于叶轮与压水室相对位置不断发生变化,静压分布受到干扰,从而叶轮出口处静压出现不稳定、局部不对称状态,这就是影响泵出口压力脉动的主要因素。

相对而言,方案一静压分布较均匀,方案二和方案三在叶片进口端均出现了局部不对称状态,说明方案二和方案三叶轮进口部分存在不合理之处,有待进一步优化。

### 2.2 速度分布

从图 3 可看出,水流由进口进入叶轮后,在叶轮的旋转作用下,作径向运动和圆周运动,速度随叶轮的旋转不断增大,在叶片的出口端达到最大;整个叶轮中速度场分布呈均匀分布状态。3 种方案的速度场分布比较合理,叶片工作面的速度大于背面速度,与理论分析一致;叶轮中没有二次回流与撞击现象。

### 2.3 性能预测

#### 2.3.1 性能计算式

Fluent 处理后得出计算结果,包括通过某一面的通量、力、绕轴的力矩、物理量的面积分、体积分等,可通过计算数据来预测离心泵的外特性<sup>[9-10]</sup>。

扬程计算:

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

在 Fluent 中,可以得到流场中某一点的总压  $P_0$ ,即:

$$P_0 = p + \frac{1}{2} \rho v^2 \quad (2)$$

利用总压计算扬程为:

$$H = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \frac{P_0}{\rho g} \right)_{out} - \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \left( \frac{P_0}{\rho g} \right)_{in} \quad (3)$$

轴功率:

$$N = M\omega \quad (4)$$

效率:

$$\eta = \frac{\rho g Q H}{M\omega} \quad (5)$$

式中:  $m$ 、 $n$ —进出口截面节点数;  $p$ —静压, Pa;  $v$ —绝对速度, m/s;  $\rho$ —水的密度, kg/m<sup>3</sup>;  $Q$ —流量, m<sup>3</sup>/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;  $\omega$ —叶轮转动的角速度, rad/s。

#### 2.3.2 性能比较分析

基于 CFD 技术能对指定工况下泵的扬程、轴功率、效率等性能参数进行比较准确地预测,因此通过 Fluent 计算,利用上述性能计算式,可得出 3 组水力模型的性能预测值,如图 4~图 5 所示。

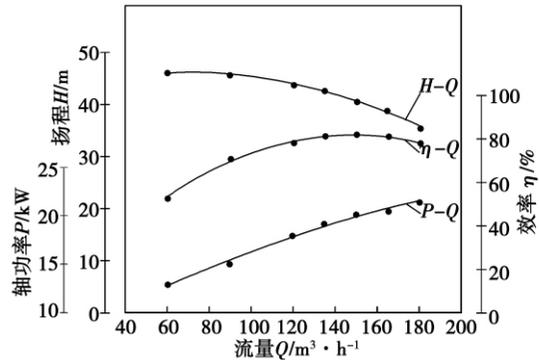


图 4 方案一预测性能曲线

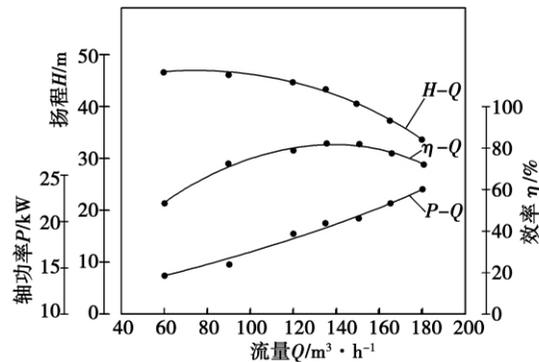


图 5 方案二预测性能曲线

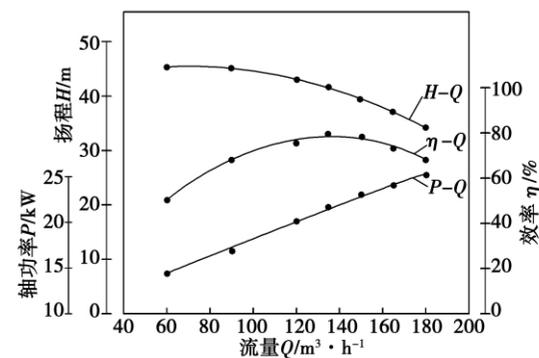


图 6 方案三预测性能曲线

从图 4~图 6 可知:3 组水力模型的性能指标都达到了提升泵的要求。方案一效率最高,效率为

82% , 并且方案一的高效区也是最宽广的。在额定性能点 , 方案一预测的性能参数为: 流量  $150 \text{ m}^3/\text{h}$  , 扬程  $40.51 \text{ m}$  , 效率  $82.0\%$  。

### 3 模型试验及对比

#### 3.1 模型试验结果

将优选出的方案一做成试验模型泵 , 进行水力模型的试验论证 , 其试验结果如图 7 所示。

在额定点性能点流量  $150 \text{ m}^3/\text{h}$  时 , 扬程为  $41 \text{ m}$  , 效率高达  $81.3\%$  ; 流量在  $130 \sim 175 \text{ m}^3/\text{h}$  范围内 , 效率指标都在  $80\%$  以上 , 高效区宽广。泵的性能指标完全满足海水淡化的要求。

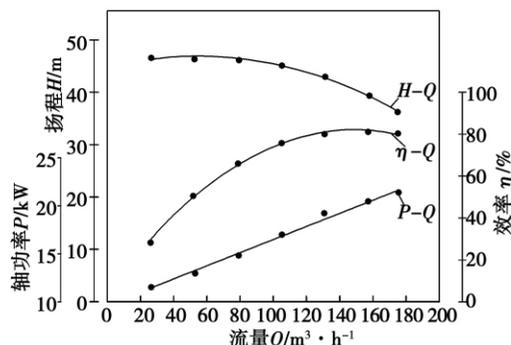


图 7 模型泵性能曲线

#### 3.2 试验结果和性能预测值比较

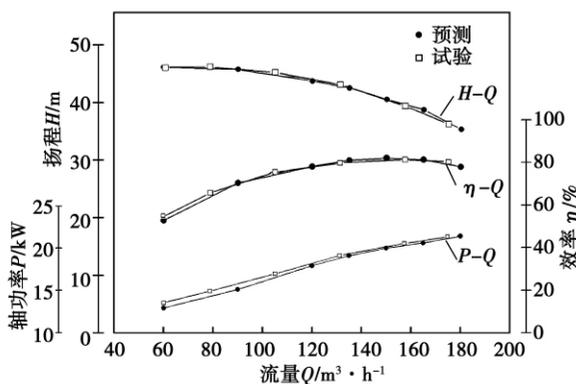


图 8 试验结果和预测的性能对比

试验结果和预测的性能对比如图 8 所示。由图可知: 流量 - 扬程曲线的试验值与模拟值在设计工况点处吻合的较好 , 在偏离设计工况点 , 存在一定的误差 , 但仍然在工程应用允许范围内。主要原因是 Fluent 提供的计算模型是假设流场是稳态的 , 在额定工况附近 , 流场中的非稳定成分小 , 这种假设趋

于合理 , 计算值和试验值吻合较好。而偏离额定工况 , 流场中的非稳定成分较强 , 叶面边界层会发生分离 , 如果仍然采用这种稳定流场的假设就不太合理 , 也就带来较大的误差。效率的模拟计算值总是高于试验值 , 这是因为模型计算的是过流部件的水体部分 , 无法考虑到水体以外的机械损失和容积损失。

### 4 结论

(1) 通过对多组水力模型的内特性分析和性能预测 , 在理论上对水力模型进行优选 , 再通过模型试验的方法 , 使海水淡化提升泵的效率达到  $81.3\%$  , 符合海水淡化工程的要求。

(2) 在高效区 , 扬程 - 流量预测性能曲线与试验值比较符合 , 误差在工程许可范围。模拟计算预测泵性能是可行的 , 在一定流量范围对性能有严格要求的泵是非常有意义的。

(3) 虽然泵的效率预测误差比较大 , 但对于多组模型进行比较还是有参考价值的。模拟和性能预测做为一种先进手段 , 能大大加速研究工作的进程 , 尤其在提高泵效率研究和大型泵研究中更具有意义。

#### 参考文献:

- [1] 杨尚宝. 我国海水淡化产业发展的现状与对策 [J]. 水处理技术 2006 32(12): 1-3.
- [2] 常宇清, 鞠茂伟, 周一卉. 反渗透海水淡化系统中的能量回收技术及装置研究进展 [J]. 实用节能技术 2006(3): 48-52.
- [3] 陈益棠, 胡兆银. 用海水淡化法解决海岛用水 [J]. 水处理技术 2006 32(6): 65-69.
- [4] STOVER RICHARD L. Development of a fourth generation energy recovery device. A 'CTO's Notebook [J]. Desalination, 2004, 165: 313-321.
- [5] STOVER RICHARD L. Seawater reverse osmosis with isobaric energy recovery devices [J]. Desalination 2007 203: 168-175.
- [6] 龙新平, 关运生, 韩宁, 等. 可调式射流泵性能的数值模拟 [J]. 排灌机械 2008 26(6): 1-5.
- [7] 宫恩祥, 周生贵, 肖霞平, 等. 基于 CFD 的反渗透海水淡化高压泵的性能预测 [J]. 排灌机械 2009 27(2): 100-104.
- [8] 杨敬官, 李辉, 刘栋, 等. 液下泵内三维湍流流动的数值模拟 [J]. 机械工程学报 2008 44(3): 160-165.
- [9] CRAIG HORNSBY. CFD—Driving pump design forward [J]. World Pumps, 2002(431): 18-22.
- [10] GONZÁLEZ JOSÉ, JOAQUÍN FERNÁNDEZ, EDUARDO BLANCO. Numerical simulation of the dynamic effects due to impeller-volute interaction in a centrifugal pump [J]. Journal of Fluids Engineering 2002, 124(2): 348-355.

based helium turbine (HTR-10GT) power generation project were described and the detailed structure design and key design parameters of the magnetic bearings, given. A structure with an integral vertical arrangement was adopted for the rotor of the helium turbine. The above-mentioned rotor was supported by two radial magnetic bearings along with an axial magnetic bearing. The design load carrying capacity of the axial magnetic bearing was 9.800 kN with a clearance of 0.7 mm. The design load carrying capacity of the radial magnetic bearings reached 1.960 kN with a clearance between the stator and rotor being 0.6 mm. Furthermore, the load carrying characteristics of the magnetic bearings and the kinetic characteristics of the helium turbine rotor were studied. The results calculated by using the rotor kinetics show that before arriving at the rated speed of 250 Hz, the turbine and compressor rotor must pass through the first and second order bending critical speed. **Key words:** magnetic bearing, helium turbine, HTR-10GT, load carrying capacity

**提高多机风力发电并网系统稳定性的研究 = Study on Enhancement of the Stability of a Multiple Wind Turbine Power Generation and Grid Connection System** [刊 汉] KUANG Hong-hai, WU Zheng-qiu (College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha, China, Post Code: 410082), HE Xiao-ning, WANG Bing (College of Electrical and Information Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou, China, Post Code: 412008) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2011, 26(2). - 238 ~ 243

Wind power can not produce electric energy constantly and stably as influenced by natural elements. When a large amount of wind power is connected to a grid, it will certainly bring about an adverse effect on the stability of the electric power system. To guarantee a stable operation of electric power systems, presented was a solution using a super capacitor energy storage system (SCCESS) based on a fuzzy logic control coupled with a dual feed induction generator (DFIG). In this connection, the software Matlab/Simulink was used to perform a simulation analysis of the multiple wind turbine power generation and grid connection system. The simulation results show that the SCCESS and DFIG scheme presented by the authors can improve the transient stability of the above-mentioned system. When an accident occurs to the system, it can continue its stable operation. **Key words:** super capacitor, energy storage system, converter, transient stability, dual feed induction generator

**提高反渗透海水淡化用提升泵效率的研究 = Study of Enhancement of the Efficiency of a Booster Pump Destined for Reverse Osmosis Sea Water Desalination** [刊 汉] HU Jing-ning, LIU San-hua, JIANG Wei et al (Research Center for Fluid Mechanical Engineering Technology, Jiangsu University, Zhenjiang, China, Post Code: 212013) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2011, 26(2). - 244 ~ 247

With a view to solving the problems relating to the efficiency of booster pumps for reverse osmosis sea water desalination, designed were three hydraulic model versions on the basis of the currently available models. By employing software Fluent and multiple reference coordinates, and based on the Renault time-averaged  $N-S$  equation and standard  $k-\varepsilon$  turbulent flow model, a numerical simulation and performance prediction were performed of the inner flow fields in the three hydraulic models. On the basis of the prediction results, a model pump was manufactured by choosing a model scheme meeting the performance requirements and having the highest efficiency. Furthermore, an experimental study was conducted. The performance prediction and model test results show that the prediction values are in relatively good agreement with the test ones on a comprehensive basis, among which, the predicted head is relatively close to the test one under the design operating conditions but a certain error still exists under the off-design operating conditions. The real efficiency of the pump manufactured by using the hydraulic model and optimized through a theoretical calculation reaches 81.3%, meeting the requirement for the efficiency of a sea water desalination pump. **Key words:** sea water desalination, booster pump, efficiency, performance prediction, error