万吨级反渗透海水淡化高压泵的优化设计

胡敬宁，肖霞平，周生贵，周广凤，潘金秋
（江苏大学 流体机械工程技术研究中心，江苏 镇江 212013）

摘 要：结合反渗透海水淡化高压泵的能耗状况，合理选择了万吨级反渗透海水淡化高压泵的泵型，提出了一种轴向吸入节段式高压多级泵的新型结构型式. 在已有高效水力模型的基础上，对影响效率的几个关键水力尺寸进行不同的优化组合，设计了6种叶轮模型和2种导叶模型，组合成6组水力模型. 应用CFD方法对6组水力模型进行了性能预测，挑选出2组效率高（预测）的水力模型制作成2台单级模型泵进行试验研究. 2组水力模型试验表明，泵的流量、扬程满足高压泵的要求，其中最优模型的效率达到了79.72%.

关键词：反渗透海水淡化；高压多级泵；离心泵；轴向吸入；效率；模型
中图分类号：TH311 **文献标志码**：A **文章编号**：1005-6254(2009)01-0025-05

Optimal design of high pressure pump for 10 000 tons reverse osmosis desalination system

Hu Jingning, Xiao Xiaping, Zhou Shenggui, Zhou Guangfeng, Pan Jinqiu
(Technical and Research Center of Fluid Machinery Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China)

Abstract: Considering the energy consumption of the HP-pump for SWRO, a reasonable type of high pressure pump was selected, and a new structure of the axial suction segment multistage pump was proposed. Based on the existing effective hydraulic models, through optimizing several key hydraulic dimensions which affect the efficiency, six kinds of impeller models and two kinds of guide vanes were designed, and six groups of hydraulic models were assembled . Performance characteristics of these models were predicted by using the CFD technology. Two groups of high-efficiency hydraulic models were selected to produce two single-stage model pumps for test research. The tests show that the capacity and head meet the requirements of the HP-pump, and the efficiency of the best model pump reaches to 79.72%.

Key words: SWRO; high pressure multi-stage pump; centrifugal pump; axial suction; efficiency; model

我国是一个淡水资源严重缺乏的国家. 有关专家分析提出，淡化海水是解决我国沿海地区淡水严重短缺的有效途径之一[1]，海水淡化也有望成为我国新兴的朝阳产业.

反渗透技术是一项效率高、易于大规模使用的海水淡化技术，在水资源紧缺的今天，有着广阔的应用前景. 高压泵是反渗透法海水淡化技术应用中的一个关键设备. 在反渗透膜选定的情况下，反渗透海水淡化系统的能耗指标主要取决于高压泵、提升泵和能量回收装置的能耗指标[2,3].

国内外用于反渗透海水淡化工程的高压泵主要是往复式柱塞泵和多级离心泵. 国内的往复式柱塞泵、多级离心泵制造技术已经十分成熟，并被成功地用于油田注水、高压锅炉给水等行业，但这些产品不能直接应用于反渗透海水淡化工程，主要存在效率不高、机型不经济等问题[4].

收稿日期：2008-05-15
基金来源：国家科技支撑项目（2006BAB03A02）；江苏省高新技术项目（BG2006024）
作者简介：胡敬宁（1962—），男，安徽安庆人，研究员（hujingning@263.net），主要从事流体机械及工程研究.
肖霞平（1983—），女，湖南邵阳人，硕士研究生（xiaoxiaping2003@126.com），主要从事流体机械研究.

万方数据

结合万吨级反渗透海水淡化工程,针对工程中所用高压泵等的技术参数,提出一种新型轴向吸入的多级离心泵,并对其结构进行优化、水力模型进行试验研究.这对加速海水淡化高压泵的国产化有着非常重要的意义.

1 技术参数确定

1.1 反渗透海水淡化流程

图1是反渗透海水淡化工艺流程框图[5].在反渗透海水淡化工程中,待处理的海水经过高压泵进行加压后,进入反渗透膜堆;经过渗透后的为所需的淡水,剩余部分为浓度较高的海水,这部分具有高压力能的浓海水通过能量回收装置将待处理的海水升压,再经过提升泵进一步提升压力后进入高压管道,又与高压泵中的海水混合后,送往反渗透膜堆.

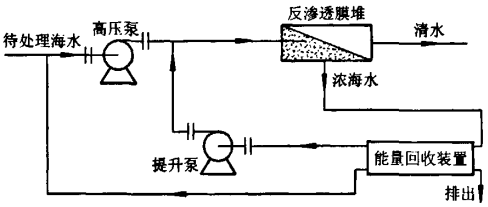

图1 反渗透海水淡化工艺流程
Fig. 1 Process diagram of the SWRO system

1.2 主要技术指标

从流程图中可以得出,海水淡化装置的产水量指标就是高压泵全天累积流量.国内万吨级海水淡化工程中一般采用两台泵并联运行.则高压泵流量为

$$Q = (10\ 000/24)/2 \approx 208\ \mathrm{m^3/h}$$

高压泵所需的扬程与海水淡化生产装置操作压力有关.海水反渗透操作压力越高,产水率就越高.但随着压力的提高,设备投资也越来越高.我国海水淡化选择的是6.4 MPa压力等级,一般要求高压泵扬程为600~620 m.考虑到产水量有一定的余量,万吨级反渗透海水淡化工程中的高压泵的技术指标为:流量 $Q=220\ \mathrm{m^3/h}$;扬程 $H=620$ m;效率指标不低于80 %.

2 泵结构的优化设计

2.1 总体结构

结合技术指标和各种高压泵的优缺点,采用一种新型结构,即轴向吸入节段式多级离心泵,泵的结构如图2所示.此种结构的具体优点如下.

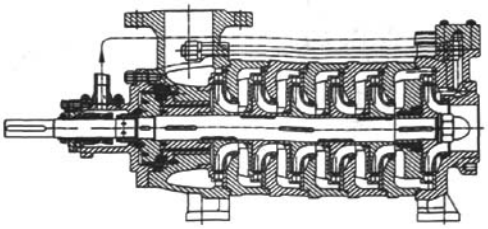

图2 轴向吸入节段式多级泵结构示意图
Fig. 2 Structural diagram of the axial suction segment multistage pump

2.1.1 轴向吸入结构

轴向直管吸入结构取代了传统节段式多级泵径向入口的环形吸入室.直管吸入室流速分布均匀,水力损失小,有利于效率的提高.由于在叶轮的吸入口侧没有轴承,叶轮进口不穿过轴,轴向式吸入的叶轮由原来的穿轴结构变成悬臂结构,就可以对首级叶轮进行优化设计,无需考虑太多汽蚀性能,而与次级叶轮一样主要考虑提高效率的设计原则.轴向吸入的结构,减少了一套机械密封和机械密封辅助冲洗系统,不仅提高了运行的可靠性,也可以减少专门冲洗机械密封的容积损失.

2.1.2 结构紧凑

减少了一套机械密封腔与轴承座,轴向尺寸大大缩短,轴向尺寸、轴承跨距分别为两端支撑节段式多级泵的2/3和1/2.在保持刚度不变的条件下,可以采用更细的轴径.有研究表明[6]:对泵效率影响最大的因素就是叶轮当量进口直径.轴径的减少,可以使轮毂减小,故能更好地控制叶轮当量进口直径、叶轮口环直径、级间口环直径,给提高效率设计提供了机会.海水淡化多级泵由前置泵供水,无需考虑汽蚀性能,可选择更小的叶轮当量进口直径.

2.1.3 水润滑轴承的应用

水润滑轴承的应用简化了轴承结构,缩小了泵的尺寸,减轻了机组重量.在多级泵中,比起采用滚动轴承的传统结构,转子不需要克服滚动轴承外圈和轴承体之间的比较大的摩擦力,转子轴向运动更加灵活.除了能减少机械损失外,也给轴向力平衡装置减少容积损失提供了条件.

2.2 级数确定

离心泵的效率与比转速有很大关系.在相同流量下,比转速高的泵,其效率相对高些;比转速低的泵,其效率要低些.根据GB/T 13007—1991《离心泵效率》中的规定,流量为220 $\mathrm{m^3/h}$,扬程620 m,转速

万方数据

2 980 r/min 的多级泵效率和级数的关系见图 3.

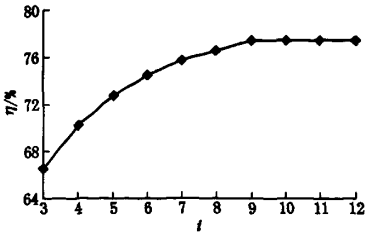

图 3　级数与效率曲线

Fig. 3　Series-efficiency curve

仅仅从效率来说，级数越多效率越高，但从结构和可靠性来说，级数越少越可靠[7]. 新型多级泵采用的是液体滑动轴承，其液膜是不稳定的，并且转子不平衡，口环间隙处的缝隙流动对液膜刚度存在很大影响，在结构有着很大的限制.

高压泵转子动力学特性分析计算表明：相同的泵型，随着级数的增加，轴承跨度增加，轴上惯性元件增加，从而导致工作转速下第一阶临界转速呈递减趋势. 图 4 表示叶轮级数 i 与转子系统临界转速 n_c 关系. 从图 4 中可见，四级到六级下降最快；当十、十二级时，第一阶临界转速接近工作转速. 图 5 表示工作转速下转子系统的对数衰减率(δ_{min})变化情况，δ_{min}越大表示转子系统越稳定. 相同泵型条件下，随着级数增加，最小对数衰减率呈递减趋势，相比之下，四级泵稳定性最好，八级以后曲线趋于平稳.

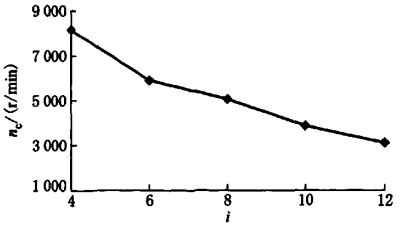

图 4　叶轮级数与转子系统临界转速关系

Fig. 4　Relationship between impeller series and critical speed of rotor system

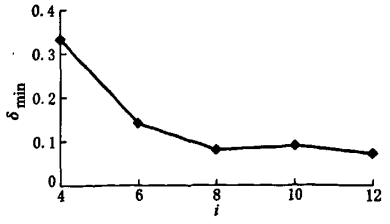

图 5　工作转速下转子系统的对数衰减率变化图

Fig. 5　Change chart of logarithm decay rate of rotor system under working speed

综合转子动力学特性和泵效率两方面的因素，海水淡化高压泵采用六级泵方案.

2.3　轴向力平衡装置

提高节段式多级泵的效率，不仅应设法降低泵叶轮和导叶内的损失，还应减少平衡装置的泄漏损失. 因为平衡装置是靠压差而工作的，没有泄漏就不能产生平衡[8]. 据文献[9]统计：节段式多级泵一般泄漏量为额定流量的 4% ~10%，高扬程小流量多级泵高达 20%.

高压泵采用平衡鼓和平衡盘联合机构[10]来平衡轴向力，采用水润滑轴承兼作平衡鼓. 此结构不仅减少了泄漏量，而且拥有水润滑轴承的所有优点，比滚动轴承的摩擦力小，平衡鼓的间隙选取要以水润滑轴承的设计为依据. 平衡装置结构见图 6.

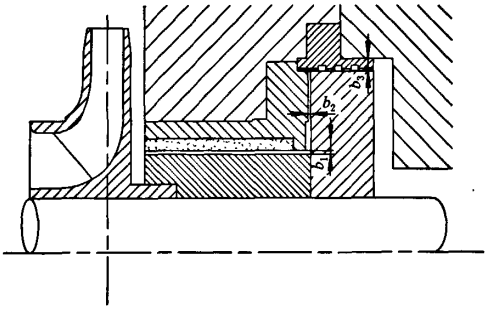

图 6　平衡鼓和平衡盘联合结构

Fig. 6　United structure of balancing drum and balancing disk

高压泵轴向力及轴向力平衡计算表明，随着灵敏度提高(值变小)，泄漏量也随之降低. 灵敏度 k = 0.26，平衡装置泄漏量小于 6 m^3/h，平衡装置泄漏损失不到 3%. 图 7 为泄漏量 q_v 和灵敏度关系曲线. 平衡间隙减小趋势时，平衡装置有很大的抵抗力，足以保证平衡盘和静止的耐磨环不发生研磨现象. 图 8 为轴向不平衡力 F 和转子位置关系曲线.

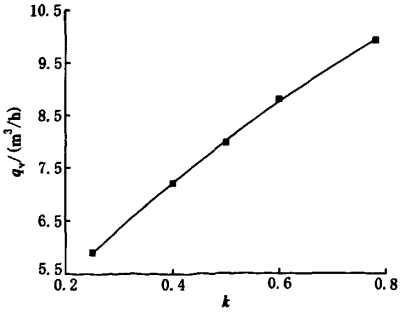

图 7　泄漏量和灵敏度关系曲线

Fig. 7　Relationship between leakage and sensitivity

万方数据

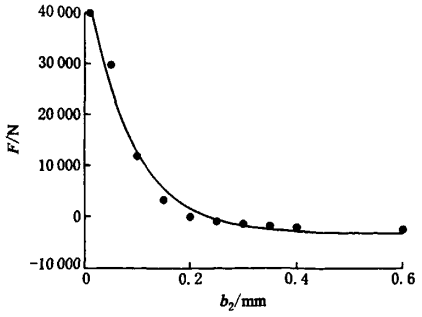

图8 轴向不平衡力和转子位置关系曲线($k=0.26$)
Fig. 8 Relationship between axial unbalancing force and rotor position

3 水力部件的优化设计

3.1 叶轮与导叶的匹配

在水力设计中,叶轮、导叶各个参数的选择对泵的性能均有很大影响,将导叶与叶轮统一考虑,各个参数选择配合恰当,可提高水力效率.

3.2 叶轮的主要参数

考虑到多级泵轴向吸入的结构形式,应用损失极值法、相似换算法、优秀水力模型与水力设计软件相结合的方法,设计出6种首级叶轮,应用FLUENT软件对其进行内部流场模拟与性能预测,选出2种较好的模型,叶轮主要参数见表1.

表1 叶轮的主要参数
Tab. 1 Major parameters of impellers

名称	叶轮A	叶轮B
进口直径 D_j/mm	155	158
出口直径 D_2/mm	280	294
出口宽度 b_2/mm	18	21
出口安放角 β_2/(°)	30	20
叶片数 Z	7	5
包角 φ/(°)	103	149
轮毂直径 d_h/mm	170	173

3.3 导叶的主要参数

分段式多级泵中,从叶轮出来的液体靠导叶收集并输送到下一级叶轮的进口.

导叶的水力损失在多级泵中占的比例较大,合理设计导叶十分重要.因此对导叶总的要求是:在其收集和输送液体的过程中损失最小,并使液体均匀地进入下一级叶轮.优化设计后的导叶,其主要参数见表2,其中,导叶A与B分别与叶轮A与B相匹配.

表2 导叶的主要参数
Tab. 2 Major parameters of guide vanes

名称	导叶A	导叶B
基圆直径 D_3/mm	288	300
轴面宽度 b_3/mm	23	25
喉部面积 A_3/mm	420	350
正导叶进口安放角 α_3/(°)	11	15
正导叶叶片入口厚度 δ_3/mm	4	3.4
正导叶叶片数 Z_1	9	12
扩散段出口面积 A_4/mm^2	837	648
反导叶进口直径 D_5/mm	320	330
反导叶出口直径 D_6/mm	135	110
反导叶进口安放角 α_5/(°)	28	18
反导叶出口安放角 α_6/(°)	60	90
正导叶叶片入口厚度 δ_5/mm	3	3
反导叶叶片数 Z_2	10	9

4 模型试验

为了保证泵的性能要求,进行了单级模型泵试验研究.两组单级水力模型泵的性能曲线图见图9,10.

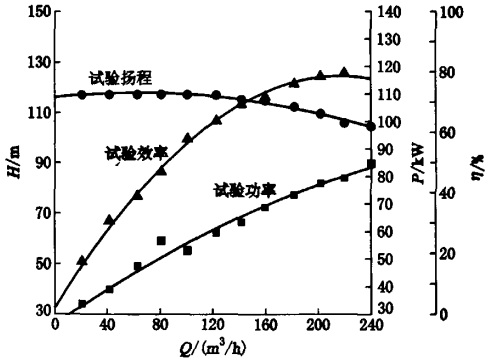

图9 A组模型泵性能曲线
Fig. 9 Performance curves of modle pump A

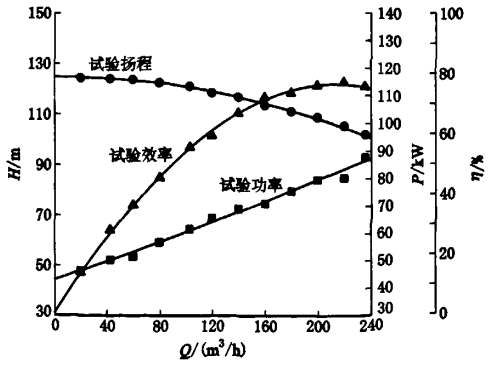

图10 B组模型泵性能曲线
Fig. 10 Performance curves of modle pump B

万方数据

由图 9 可见，在模型泵采用砂模铸造条件下，A 组模型的效率达到了 79.72%. 在实型泵中，通过采用精密铸造提高过流部件的水力尺寸精度和表面质量，效率指标有望突破 80%，可达到万吨级海水淡化工程对高压泵的效率要求.

5 结　论

1）针对万吨级反渗透海水淡化装置用高压泵，采用过流部件内安装一组液体自润滑轴承的方法，在大型多级泵中实现了轴向吸入式结构.

2）采用液体润滑轴承的多级泵，应充分考虑转子动力学特性，在大型多级泵中最好不采用超过 6 级的结构.

3）平衡鼓和平衡盘联合平衡轴向力装置，可以通过优化设计，达到减少平衡装置泄漏损失的目的.

4）对水力部件进行了优化设计，借助于 CFD 技术的，通过性能预测筛选，进行了模型泵的试验研究. 模型泵最优效率达到 79.72%. 通过进一步提高过流部件的水力尺寸精度和表面质量，实型泵的效率有望突破 80%.

参考文献（References）

[1] 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.
Chen Yitang, Hu Zhaoyin. A path to solve the shortage of fresh water resource in sea islands-seawater desalination[J]. *Technology of Water Treatment*, 2006, 32(6): 65－69. (in Chinese)

[2] AI－Enezi G, Fawzi N. Design consideration of RO units: case studies[J]. *Desalination*, 2003, 153(1－3): 281－286.

[3] Grundisch A, Schneider B P. Optimising energy consumption in SWRO systems with brine concentrators [J]. *Desalination*, 2001, 138(1－3): 223－229.

[4] 叶晓琰，许国乐，胡敬宁. 反渗透海水淡化高压泵的优化选择[J]. 水处理技术，2008，34(9)：79－81.
Ye Xiaoyan, Xu Guole, Hu Jingning. The selection and optimization of high-pressure pump in reverse osmosis seawater desalination[J]. *Technology of Water Treatment*, 2008, 34(9): 79－81. (in Chinese)

[5] Stover R L. Seawater reverse osmosis with isobaric energy recovery devices[J]. *Desalination*, 2007, 203(1－3): 168－175.

[6] 何希杰，黄毓文，赵艳霄，等. 离心泵多参数对效率影响的大小和排序[J]. 排灌机械，2002，20(4)：9－10.
He Xijie, Huang Yuwen, Zhao Yanxiao, et al. The magnitude and ording of impeller multi-parameter effect on centrifugal pump efficency[J]. *Drainage and Irrigation Machinery*, 2002, 20(4): 9－10. (in Chinese)

[7] 刘在伦，邢乐斌，朱　亮. 潜水泵设计时值得注意的几个问题[J]. 排灌机械，2003，21(2)：12－14.
Liu Zailun, Xing Lebin, Zhu Liang. Several noteworthy problems on submersible pump design[J]. *Drainage and Irrigation Machinery*, 2003, 21(2): 12－14. (in Chinese)

[8] 赵万勇，张　亮，王　振，等. 多级泵平衡盘灵敏性优化设计[J]. 排灌机械，2008，26(4)：14－17.
Zhao Wanyong, Zhang Liang, Wang Zhen, et al. Structural optimization design of balance disc in multistage pump for better sensitivity [J]. *Drainage and Irrigation Machinery*, 2008, 26(4): 14－17. (in Chinese)

[9] 关醒凡. 现代泵技术手册[M]. 北京：宇航出版社，1995：521.

[10] 赵万勇，刘天宝，梁　森. 多级泵三间隙平衡盘间隙流动的理论分析[J]. 兰州理工大学学报，2006，32(6)：62－64.
Zhao Wanyong, Liu Tianbao, Liang Sen. Theoretical analysis of fluid flow within gaps in three-gap balance disc of multi-stage-section pump[J]. *Journal of Lanzhou University of Technology*, 2006, 32(6): 62－64. (in Chinese)

（责任编辑　张文涛）

万方数据