排灌机械工程学报
Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering
2017 年 5 月 May 2017 | 第 35 卷 第 5 期 Vol. 35 No. 5
doi:10.3969/j.issn.1674-8530.16.0079

系列高效海水淡化高压泵的研制

王家斌[1]，叶晓琰[2]，李秀鹏[1]，胡敬宁[2]，李彩虹[1]，郑建波[2]
（1.山东双轮股份有限公司，山东 威海 264203；2.江苏大学国家水泵及系统工程技术研究中心，江苏 镇江 212013）


王家斌

摘要：为了研制国产系列高效反渗透海水淡化高压泵产品并实现产业化，应用国家科技支撑课题最新技术，结合当前世界海水淡化高压泵制造技术的发展新趋势，并根据实际使用中的性能要求，通过从总体结构、轴向力平衡装置、轴承润滑方式、耐磨材料等入手，进行了大量的研制、试制及试验工作.并针对目前现有产品存在的问题和品种较单一的状况，研制开发了满足日产5 000，10 000，15 000 t 淡水的海水淡化装置的3 种规格高压泵产品，经生产、试验及用户使用结果表明，该系列高效高压泵产品的性能指标已达到目前国际上同类产品的技术水平.

关键词：系列海水淡化高压泵；反渗透海水淡化；高效率；轴向力平衡
中图分类号：S277.9；TH311　**文献标志码**：A　**文章编号**：1674-8530(2017)05-0387-06

王家斌，叶晓琰，李秀鹏，等. 系列高效海水淡化高压泵的研制[J]. 排灌机械工程学报，2017，35(5)：387-392.

WANG Jiabin，YE Xiaoyan，LI Xiupeng，et al. Development of a series high efficiency seawater desalination high pressure pump [J]. Journal of drainage and irrigation machinery engineering(JDIME)，2017，35(5)：387-392.(in Chinese)

Development of a series high efficiency seawater desalination high pressure pump

WANG Jiabin[1]，*YE Xiaoyan*[2]，*LI Xiupeng*[1]，*HU Jingning*[2]，*LI Caihong*[1]，*ZHENG Jianbo*[2]
(1. Shandong Shuanglun Co. Ltd.，Weihai，Shandong 264203，China；2. National Research Center of Pumps，Jiangsu University，Zhenjiang，Jiangsu 212013，China)

Abstract：In order to develop a series products of high efficiency reverse osmosis seawater desalination high pressure pump and realize its industrialization，a lot of work，such as design of both overall structure and axial thrust balance device，selection of both bearing lubrication and wear-resistant materials and so on，was done in the pump development，trial production and testing based on latest techniques developed in national scientific and technological support projects by combining the new development trend of manufacturing technology in desalination high-pressure pumps in the world and by considering actual requirements of pump end-users on the pump performance. As a result，these products of high pressure pumps are developed for seawater desalination systems with 5 000，10 000 and 15 000 tonnes daily output，respectively. The problems in existing products of the high pressure pump and the situation of a less varied variety in the products are turned over. Based on production，experiment and user application，it is shown that the performance of these series of pro-ducts has reached the same level of the similar products in the world.

Key words：series seawater desalination high pressure pump；reverse osmosis seawater desalination；high efficiency；axial force balance

收稿日期：2016-04-12；**网络出版时间**：2017-05-03
网络出版地址：http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1814.TH.20170503.1638.022.html
基金项目：“十二五”国家科技支撑计划项目(2014BAB08B01，2013BAB08B02)
作者简介：王家斌(1966—)，男，山东淄博人，高级工程师(wangjb@shuanglun.cn)，主要从事流体机械设计研究.
郑建波(1988—)，男，浙江衢州人，硕士研究生(通信作者，zhengjb1988@163.com)，主要从事流体机械设计研究.

海水淡化是解决水资源短缺的重要途径，越来越得到一些沿海国家的重视. 中国是一个水资源贫乏的国家，反渗透海水淡化是解决水资源危机的战略选择[1-3]. 海水淡化用高压泵是反渗透海水淡化工程中的核心动力设备，是海水淡化工程的“心脏”. 在反渗透膜选定的情况下，海水高压泵的效率直接决定反渗透海水淡化系统的能耗指标[4-5]. 在反渗透海水淡化装置中，电费占制水成本的1/2～2/3，设备投资约占制水成本的1/4，高压泵是主要耗能设备，其电耗约占系统总费用的35%，是影响产品制造成本的主要因素之一[6-7]. 国家“十一五”规划初期，海水淡化系统的动力设备高压泵主要依赖进口，欧美泵制造商通过技术垄断导致设备投资高，成为制约中国发展海水淡化产业发展的主要技术瓶颈. 随着国内市场的进一步开放，国外许多高压泵产品争先抢占中国市场，使中国的用户有更多的选择性和对比性. 如果全部使用进口泵将使设备投资费用过高，导致企业投资负担过重，不利于国内海水淡化产业的发展. 因此，研制系列高效海水淡化高压泵，对逐步实现反渗透海水淡化关键设备的国产化和降低能耗，加速海水淡化的广泛应用及产业化进程，具有重要的意义.

“十一五”和“十二五”规划期间，国家科技支撑计划列题对海水淡化高压泵进行国产化研制，国内已有部分厂家参与海水淡化高压泵研制，多台日产5 000 t淡水的高压泵样机已成功应用在浙江舟山六横水务有限公司万吨级海水淡化示范工程. 但就目前的状况看，仍未形成系列化产品. 为此，山东双轮股份有限公司和江苏大学合作，开展系列高效海水淡化高压泵产品的研制和产业化工作，结合当前世界海水淡化高压泵制造技术的发展新趋势，通过大量的研制、试制及试验工作，创新系列海水淡化高压泵的结构，解决了轴向力平衡、轴承润滑方式、耐磨材料等关键技术难题. 文中针对目前现有产品存在的问题和品种较单一的状况，研制开发满足日产5 000，10 000，15 000 t海水淡化装置的3种规格高压泵产品，经生产、试验及用户使用，系列高效高压泵产品的性能指标达到目前国际上同类产品的技术水平.

1 关键技术

研制系列高效海水淡化高压泵关键技术包括高压泵参数、结构、级数的选择；新型轴向力平衡装置的开发；内置介质润滑滑动轴承的研发以及铸造工艺的选择等.

1.1 高压泵参数

不同规模的反渗透海水淡化装置所用高压泵的流量是由其日产淡水量决定的，高压泵所需的扬程根据选用膜的型号和通量、运行情况、原水水质和水温等情况变化，通常反渗透的操作压力为5.0～7.2 MPa.

以日产5 000 t淡水的海水淡化装置为例，该装置日消耗海水12 500 m^3，产水率为40%，安全余量系数为5%. 海水淡化装置的产水量指标接近高压泵的流量，即高压泵流量为$Q=220\ m^3/h$. 海水反渗透操作压力越高，操作成本越高，设备投资也越高. 根据选用膜的要求，该系统确定高压泵扬程为620 m. 由此高压泵性能参数确定为流量$Q=220\ m^3/h$，扬程$H=620$ m.

1.2 高压泵结构

选择海水淡化高压泵的泵型，虽然有生产、制造和检修方面的原因，但更多方面取决于工程投资和运行成本. 海水淡化工程绝大部分属于地方政府为解决居民和工业用淡水问题而实施的，工程投资制约了泵型的选择. 高压泵泵型的优选方法主要综合考虑能耗和投资成本，以最小目标支出为原则建立反渗透海水淡化系统的系列化高压泵选型型谱，对于单机日产万吨级以上产水规模，海水淡化高压泵适用的泵型主要为蜗壳式多级离心泵和节段式多级离心泵[8].

蜗壳式多级泵在应用和维修方面具有较大优势，但是其重量大，而海水淡化高压泵采用的是双相不锈钢材料，制造成本极其昂贵. 所以在万吨级反渗透海水淡化装置中很少应用蜗壳式多级泵，而在十万吨级以及二十万吨级反渗透海水淡化装置中有的应用大型蜗壳式多级泵，其最大流量可以达2 000 m^3/h.

节段式多级泵由于结构简单、重量轻、造价低的特点，在万吨级反渗透海水淡化装置中得到广泛应用. 世界上一些著名的泵制造厂家都专门研制了海水淡化用高压泵系列产品，其日产5 000，10 000，15 000 t淡水的海水淡化装置配套的高压泵均采用节段式多级泵.

根据对国内大型海水淡化用户调查，大多数采用阶段式结构的高压泵，通过一系列的试验和试制，系列高效高压泵的总体结构方案确定采用轴向

吸入节段式多级泵型式，内置液体润滑轴承结构. 泵的总体结构如图 1 所示.

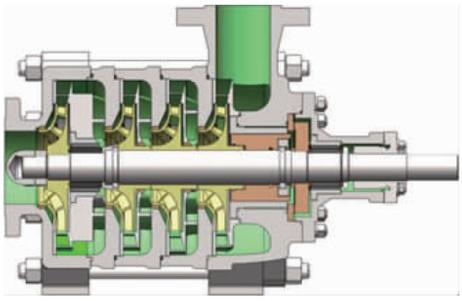


图 1　轴向吸入节段式多级泵结构示意图
Fig. 1　Structure of end-suction axially split multistage pump

该轴向吸入新型节段式多级泵结构与传统的径向吸入节段式多级泵相比，首级叶轮效率可提高约 4. 0%，仅入口方式就可使整泵效率提高约 0. 7%；泵的尺寸可减小 35%，并减少一套机械密封，大大提高了泵的可靠性；泵的重量比传统结构大大减轻. 因此，该新型结构在提高效率的同时，具有非常好的经济性.

在此新结构的基础上，针对不同海水淡化产水规模和工艺流程接口以及考虑用户要求，通过对泵吸入端、水力部件及支撑型式采用模块化设计，提高了产品的标准化、通用化水平，增强了与国外产品互换性. 以内置式全滑动轴承高压泵为基本型，泵驱动端支撑改变为滚动轴承方式，泵的结构变为轴向吸入的水润滑轴承加滚动轴承支撑，如图 2 所示.

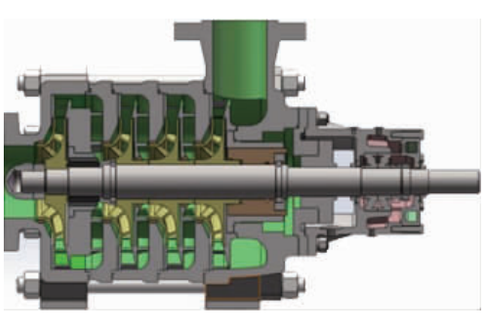


图 2　滑动轴承和滚动轴承组合结构
Fig. 2　Combined structure of sliding and rolling bearings

不同结构型式同一种规格的高压泵还可采用相同的水力部件，即有相同的叶轮、导叶和中段等主要水力部件，相同或不同的支撑结构，不同的进、出口段设计可以进行方位变化，以适用于不同的接口需要，如图 3 所示，可变化 12 种不同的接口形式，以满足海水淡化工程的需求.

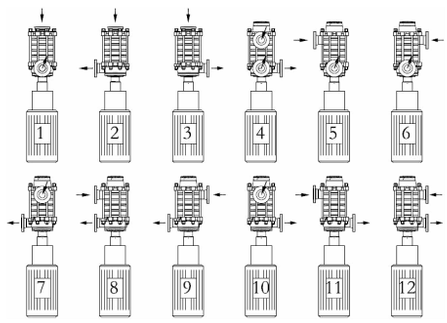


图 3　高压泵不同接口型式
Fig. 3　Various inlet and outlet pipe installations

1. 3　高压泵级数

离心泵的效率与比转数有密切关系，仅仅对效率而言，泵的比转数为 120 ~ 210 时，泵效率最高. 如果仅追求高效率，将比转数确定为 120 ~ 210，势必增加泵的级数. 但从结构和可靠性上，级数越少越有利于转子系统的可靠性提高[9]. 高压泵是反渗透海水淡化系统中的关键设备，泵在运转过程中，没有专业人员巡检维护值守，也没有备用设备，这对高压泵可靠性提出了很高的要求.

新型多级高压泵采用的是液体自润滑滑动轴承，应该充分考虑液膜刚度对转子系统动力学特性的影响[10].

通过对高压多级泵在不同级数时的转子系统进行模态分析，得到泵临界转速与叶轮级数的关系，图 4 为日产 5 000 t 淡水高压泵一阶临界转速与叶轮级数的关系.

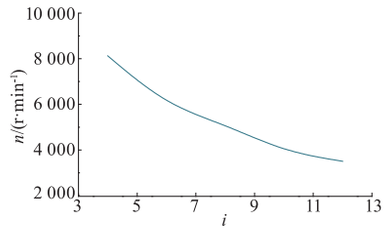


图 4　一阶临界转速与叶轮级数的关系
Fig. 4　Relationship between first-order critical speed and impeller stage number

由图 4 可以看出：对于模型相同的泵，随着级数的增加，轴承跨度增大，轴上惯性元件增多，从而导致工作转速下第一阶临界转速呈下降趋势.

综合考虑泵的运行效率和运行稳定性，确定日产 5 000，10 000，15 000 t 海水淡化装置的 3 种规格高压泵产品最优级数分别为 6 级、4 级和 3 级.

1. 4　新型轴向力自动平衡装置

轴向力平衡机构工作的好坏是直接影响泵可

靠运转的关键因素,因此,轴向力的准确计算对于多级泵安全运行非常重要. 泵腔内部流动极其复杂,至今仍没有一个准确的方法计算轴向力大小. 轴向力计算大多采用经验公式,采用不同的经验公式得出的轴向力大小相差很大,且轴向力计算过程十分复杂,计算工作量很大.

江苏大学在“十一五”和“十二五”国家科技支撑课题研究过程中,以150ROD－100×6型海水淡化高压泵为研究对象,采用数值模拟和试验研究相结合的方法探讨轴向力的计算方法. 利用试验值修正理论计算的方法得出了比较准确的盖板力计算公式,使多级泵的轴向力得以准确计算,在轴向力研究成果的基础上,开发出轴向力自动平衡装置设计软件.

系列高效海水淡化高压泵的平衡装置均采用创新的双鼓双盘的结构,平衡鼓兼作水润滑轴承. 平衡鼓与平衡盘对平衡轴向力的分配比例,决定平衡鼓的轴向和径向尺寸,从理论上,平衡鼓径向间隙越小,平衡轴向力越大,但间隙过小,将导致平衡鼓泄漏量减小,将影响平衡鼓后面滑动轴承的润滑及冷却,严重时将导致泵开车时烧毁平衡盘及润滑轴承. 轴向力和平衡装置的计算采用江苏大学的“多级泵轴向力平衡装置设计程序软件(V1.0)”,运行界面如图5所示. 该软件计算过程采用人机对话模式,可以通过调整所有平衡盘、鼓的几何尺寸,进行多方案选择. 综合平衡装置泄漏量、结构尺寸、平衡恢复力等因素确定最终方案.

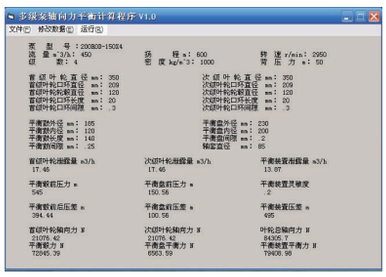


图5 平衡装置计算结果

Fig. 5 Calculated results of balancing device

1.5 转子动力学分析

系列高效海水淡化高压泵采用液体润滑轴承,虽然简化了海水淡化高压泵的结构,且有利于泵效率的提高,但由于水是一种低黏度液体,与油膜相比,水膜的承载能力较低,且不易形成流体动压润滑,润滑状态也较复杂. 因此,在研发过程中,需要对转子系统进行转子动力学特性研究,以确保产品稳定、可靠、安全运行[11－12].

多级泵转子系统的动力学特性研究,就是在设计研制阶段对转子系统的动力学特性进行计算分析,内容主要包括轴承动特性分析、系统临界转速和不平衡响应计算、各种激励下的瞬态响应计算以及系统稳定性分析等[13－14]. 掌握了转子系统的这些动力学特性,就可以在设计过程中选择合理参数,如轴承跨度、质量分布、轴承特性等.

通过对系列泵水润滑轴承－转子系统模态分析与稳定性等动力学特性研究,基于ANSYS软件对其轴承－转子系统进行模态分析、谐响应分析和瞬态动力学分析,依次对日产淡水5 000,10 000,15 000 t用高压泵进行转子动力学分析,得到各转子系统的第一阶临界转速分别为 n_{c1} = 5 882.9,7 179.0,8 928.6 r/min,都远大于泵的实际运转速度,不会发生共振. 恒定转速下突加激励时转子系统的瞬态特性分析等表明,虽然突加激励力后轴承－转子系统出现了较大的振动,但随后振幅将逐渐减小并最终趋于稳定,这些动力学特性的分析以及泵的实际运行效果表明该高压多级泵的水润滑轴承－转子系统是一个稳定的刚性转子系统.

1.6 内置介质润滑滑动轴承研发

高压泵采用双点支承海水自润滑冷却的滑动轴承系统,具有运行寿命长、噪声低、振动小、完全避免常规设备的油脂污染环境及介质等特点. 水泵支承均设置在水泵内部,结构简单紧凑. 由于需采用介质冷却及润滑,滑动轴承材料不但需具备优异的耐介质腐蚀性能,而且要具备滑动轴承所需的耐磨性、低的摩擦系数以及良好的热传导性. 为了验证材料的使用效果,选用硬质合金、复合材料(PEEK＋碳纤)、铜合金进行试验对比,根据试验结果,最终选用了硬质合金作为滑动轴承材料.

1.7 铸造工艺

由于高压泵的效率直接影响海水淡化制水成本,用户单位对高压泵效率指标要求很高. 高效水力模型是决定泵效率的关键因素,系列样机研制中采用江苏大学的研究成果,研制过程表明,水力模型的铸造质量对效率也有较大影响.

海水淡化高压泵要求采用具有良好耐海水腐蚀能力的材料,通常采用双相不锈钢. 双相不锈钢有优良的耐海水腐蚀性能和力学性能,但铸造流动性较差. 为保证水力模型具有高效率,高压泵水力部件最终采用金属模具精密铸造. 研制中,首台日产5 000 t淡水样机效率小于江苏大学“十一五”国家科技支撑计划项目课题已完成的样机效率,为此

对双相钢铸造工艺进行研究. 通过严格控制叶轮、导叶金属模的加工精度，仔细对压制蜡模尺寸进行检查，并对蜡模的精制、挂砂、干燥、脱蜡、焙烧、冶炼每一步严格掌控温度、时间、炉料化学成分等，铸造出质量良好的叶轮、导叶等过流部件的零件毛坯，工艺优化后制作出的日产 5 000 t 淡水样机效率比首台样机效率高 1.6%.

2　高压泵性能测试

2.1　高压泵的性能测试

样机首先在山东双轮股份有限公司内部试验台进行运转试验及性能测试，测试装置如图 6 所示. 为了模拟高压泵在海水淡化装置的使用条件，在泵的入口管路上安装了前置泵. 为防止试验水中的杂质对滑动轴承及平衡盘造成损害，在吸入管路安装了过滤器. 因高压泵采用自润滑轴承，为防止管路中存有的气体对轴承造成损害，必须首先启动前置泵，正常运行 10 min 以上，将管路中的空气排净，轴承处有充分的介质润滑，否则将造成泵刚启动将烧毁轴瓦及平衡盘.



图 6　HSB220/620 海水淡化高压泵测试装置

Fig. 6　Test rig for HSB220/620 seawater desalination high pressure pump

2.2　高压泵的现场运行验证

首台日产 5 000 t 淡水的 HSB220/620 - 150/125 型反渗透海水淡化高压泵，于 2014 年 12 月 26 日安装在浙江舟山六横万吨级海水淡化示范工程中装置中(见图 7).



图 7　HSB220/620 海水淡化高压泵现场运行

Fig. 7　HSB220/620 seawater desalination high pressure pump is in operation

该高压泵替代原进口泵. 高压泵一次启运成功，目前已经安全运行超过 1 a，性能稳定，各项指标正常，在保证系统负荷情况下，运行电流明显低于原进口高压泵.

3　产品的性能指标

通过上述研制开发工作，共形成高效海水淡化高压泵系列产品 3 种，产品样机如图 8 所示，研制的日产 5 000，10 000，15 000 t 淡水高压泵样机按 GB/T 3216 的规定进行性能检测，其性能指标达到国际同类产品水平，表 1 为系列样机效率指标与进口泵的对比，表中：P 为产水量；η_m 为系列样机实测效率；η_i 为进口泵样本效率.



图 8　HSB220/620 海水淡化高压泵样机

Fig. 8　HSB220/620 seawater desalination high pressure pump prototype

表 1　系列样机效率与国外泵效率对比

Tab. 1　Comparison of efficiency of series of prototype with pumps of foreign companies

P/(t·d^{-1})	Q/(m^3·h^{-1})	H/m	n/(r·min^{-1})	η_m/%	η_i/%
5 000	220	620	2 980	80.3	77.8
10 000	450	600	2 980	80.4	77.6
15 000	650	600	2 980	81.6	81.3

对样机进行振动测量，结果表明，泵运行平稳，振动小，达到标准要求，如表 2 所示，表中：h 为中心高度；v 为振动烈度.

表 2　系列样机震动测量

Tab. 2　Vibration measurement data of series of prototype

P/(t·d^{-1})	Q/(m^3·h^{-1})	H/m	n/(r·min^{-1})	h/mm	v/(mm·s^{-1})
5 000	220	620	2 980	300	2.3
10 000	450	600	2 980	350	2.5
15 000	650	600	2 980	410	2.7

4　结　论

针对系列海水淡化用高压泵的使用特点，采用一种轴向吸入新结构，并对泵吸入端、水力部分及支撑型式采用模块化设计，可满足不同海水淡化产

水规模和工艺流程接口以及用户要求;结合多级泵效率与级数的关系,综合转子系统的稳定性和效率两方面的因素,优化选择了海水淡化高压泵的级数;采用平衡鼓和平衡盘联合机构来平衡轴向力,采用平衡鼓兼作水润滑轴承,此结构大大减少了平衡装置的泄漏量;通过耐磨材料的对比试验解决了水润滑轴承及平衡装置配对面的耐腐耐磨问题;通过优化双相不锈钢的铸造工艺,提高了产品的效率;基于以上多项关键技术,系列高效海水淡化高压泵产品研制成功,通过试验对比,日产5 000,10 000,15 000 t淡水高压泵性能达到国外同类产品的先进水平.

参考文献(References)

[1] 段焕强,谈探. 中国海水淡化产业现状与趋势[J]. 高科技与产业化,2011(11):49-53.
DUAN Huanqiang,TAN Tan. The present situation and trend of seawater desalination industry in China[J]. High-technology and industrialization, 2011(11):49-53. (in Chinese)

[2] GREENLEE L, LAWLER D, FREEMAN B, et al. Reverse osmosis desalination: water sources, technology, and today's challenges [J]. Water research, 2009, 43(9):2317-2348.

[3] KHAWAJI A, KUTUBKHANAH I, WIE J M. Advances in seawater desalination technologies [J]. Desalination, 2008, 221 (1/2/3): 47-69.

[4] GRÜNDISCH A, SCHNEIDER B P. Optimizing energy consumption in SWRO systems with brine concentrators [J]. Desalination, 2001, 138(6):223-229.

[5] GHAZI A E. Design consideration of RO units: case studies [J]. Desalination, 2002, 153(8): 281-286.

[6] 邢国平, 刘洪海, 邵兆凤. 渤海地区反渗透海水淡化能耗分析[J]. 给水排水, 2012,38(S1): 146-149.
XING Guoping, LIU Honghai,SHAO Zhaofeng. Energy consumption analysis of reverse osmosis desalination in Bohai area[J]. Water supply and drainage, 2012,38(S1):146-149. (in Chinese)

[7] 苏立永, 潘献辉, 葛云红,等. 大型反渗透海水淡化工程能耗降低方法探讨[J]. 工业水处理, 2008, 28(3):81-83.
SU Liyong,PAN Xianhui, GE Yunhong, et al. Discussion on the way of decreasing the energy consumption of large SWRO desalination [J]. Industrial water treatment, 2008, 28(3):81-83. (in Chinese)

[8] 叶晓琰,佘旭南,胡敬宁,等. 年产万吨级海水淡化高压泵关键技术研究与工程应用[J]. 水处理技术,2015,41(10):95-99.
YE Xiaoyan, SHE Xunan, HU Jingning, et al. Key technology and engineering applications of 10 kt-scale desalination high-pressure pump[J]. Technology of water treatment,2015,41(10):95-99. (in Chinese)

[9] 胡敬宁, 江伟, 叶晓琰,等. 万吨级反渗透海水淡化高压泵级数的优化选择[J]. 排灌机械工程学报,2010,28(1):43-46.
HU Jingning, JIANG Wei, YE Xiaoyan, et al. Optimal selection for stage number of high pressure multi-stage pump for 10 k ton-scale reverse osmosis desalination systems[J]. Journal of drainage and irrigation machinery engineering,2010,28(1):43-46 (in Chinese)

[10] 史冬岩,张成,任龙龙,等. 滑动轴承压力分布和动特性系数[J]. 哈尔滨工程大学学报,2011,32(9):1134-1139.
SHI Dongyan,ZHANG Cheng,REN Longlong,et al. Research on the oil film pressure and dynamic coefficient of a sliding bearing[J]. Journal of Harbin Engineering University,2011,32(9): 1134-1139. (in Chinese)

[11] WU J J. Torsional vibration analyses of a damped shafting system using tapered shaft element[J]. Journal of sound and vibration, 2007, 306(3/4/5):946-954.

[12] 吕延军,虞烈,刘恒. 流体动压滑动轴承-转子系统非线性动力特性及稳定性[J]. 摩擦学学报,2005,25(1): 61-66.
LYU Yanjun,YU Lie,LIU Heng. Stability and nonlinear dynamic behavior of a hydrodynamic journal bearing-rotor system[J]. Tribology,2005,25 (1): 61-66. (in Chinese)

[13] 何芝仙,桂长林,李震,等. 轴-轴承系统动力学摩擦学弹性力学耦合分析[J]. 农业机械学报,2007,38(9): 116-121.
HE Zhixian,GUI Changlin,LI Zhen,et al. Research on integrated effects of dynamics tribology and elastic mechanics of shaft bearing system on variable load[J]. Transactions of the CSAM,2007,38(9): 116-121. (in Chinese)

[14] GUO Zenglin, HIRANO T, KIRK R G. Application of CFD analysis for rotating machinery——Part I: hydrodynamic, hydrostatic bearings and squeeze film damper [J]. Journal of engineering for gas turbines and power, 2005,127(2): 445-451.

(责任编辑 陈建华)