

文章编号:1005-9865(2020)03-0161-08

基于双缸耦合原理的阀控式能量回收系统 原理设计与仿真分析

孙 毅^{1,2}, 张晓雨¹, 张希建³, 张建中³, 翁晓丹^{1,3}

(1. 浙江工业大学 机械工程学院, 浙江 杭州 310014; 2. 浙江工业大学 海洋研究院, 浙江 杭州 310011; 3. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 浙江 杭州 311122)

摘 要:针对小规模海水淡化需要解决能量回收装置的能回效率与空间问题,将能量回收装置与压力提升泵进行集成一体化设计,研究了一种双缸耦合阀控式能量回收系统。系统两液压缸内活塞各由一个电动推杆推动,叠加高压浓海水压力实现压力交换,同时进行活塞推力的耦合控制,避免了压力交换过程中活塞的压力脉冲波动,保障了反渗透膜工作压力稳定;基于小型海水淡化装置,根据压力能流反渗透工艺节点压力流进行了计算分析,得出电动推杆推力压力 0.5 MPa 左右的补偿压力曲线。通过 AMESim 进行液压仿真分析,结果表明在系统回收率为 30%,高压浓海水进口压力为 4.8 MPa,增压海水压力 4.6 MPa 的情况下,通过压力补充增压海水压力可增压到 5.0 MPa,反渗透膜压力与流量波动较小,满足反渗透海水淡化的压力需求。

关键词:海水淡化;双缸耦合;能量回收;流体仿真

中图分类号:P747.5 文献标志码:A DOI:10.16483/j.issn.1005-9865.2020.03.017

Principle design and simulation analysis of valve-controlled energy recovery system based on dual-cylinder coupling principle

SUN Yi^{1,2}, ZHANG Xiaoyu¹, ZHANG Xijian³, ZHANG Jianzhong³, WENG Xiaodan^{1,3}

(1. School of Mechanical Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China; 2. Institute of Marine Science & Technology, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310006, China; 3. Huadong Engineering Corporation Limited, Hangzhou 311122, China)

Abstract: In order to solve the energy recovery efficiency and space problems of energy recovery devices in small-scale seawater desalination, a dual-cylinder coupled valve-controlled energy recovery system was designed by integrating energy recovery devices and pressure lifting pumps. The pistons in the two hydraulic cylinders of the system are driven by an electric push rod, respectively. The pressure exchange is realized by superimposing high-pressure concentrated seawater pressure. At the same time, the coupling control of the piston thrust is carried out, which avoids the pressure pulse fluctuation of the piston in the process of pressure exchange and ensures the stability of the working pressure of reverse osmosis membrane. Based on the small-scale seawater desalination device, the compensating pressure curve is obtained with thrust pressure of electric push rod about 0.5 MPa by calculating and analyzing the pressure flow at the node of the pressure-energy flow reverse osmosis process. AMESim hydraulic simulation analysis results show that when the system recovery is 30%, the inlet pressure of high pressure concentrated seawater is 4.8 MPa, the pressure of pressurized seawater is 4.6 MPa, and the pressure of pressurized seawater can be increased to 5 MPa by pressure supplement with little fluctuation of pressure and flow rate of reverse osmosis membrane. The results meet the pressure demand of reverse osmosis desalination.

Keywords: seawater desalination; double cylinder coupling; energy recovery; fluid simulation

收稿日期:2019-07-19
基金项目:浙江省重大科技研发项目(2018C03034)
作者简介:孙 毅(1966-),男,浙江慈溪人,教授,博士生导师,主要从事机电一体化装备、海水淡化设备与能量回收技术研究。
E-mail: sunyi@zjut.edu.cn

小型反渗透海水淡化设备可有效地解决海岛、船舶、游艇等沿海地区分散式小规模的海水淡化需求^[1]。降低反渗透海水淡化能耗问题是小型海水淡化设备的关键技术之一,能量回收技术通过高压浓海水的压力交换实现能量回收利用,可有效降低能耗^[2]。目前常用的正位移式能量回收装置体积大、成本高,且使用时需另配置压力提升泵,不适用于小型海水淡化装置。

国外能量回收装置技术研究起步较早,Clark pump 是开发较早的自增压能量回收装置,其合理调节有杆与无杆腔的容积,增压海水压力可达到反渗透膜工作压力要求^[3];iSave 是目前将能量回收装置与增压泵耦合较成功的产品,将能量回收装置、高压容积式增压泵和电机马达集成耦合^[4];德国 KSB 公司研发的 SALINO 压力中心,将电机、高压泵、增压泵和能量回收装置集成设计,可满足中小型反渗透海水淡化装置系统工作需求^[5]。上述国外产品由于价格较高,不适宜用于我国小型海水淡化装置。

国内 Liu 等^[6]设计了一种全旋转阀式能量回收装置,通过电机带动曲轴旋转来实现增泄压完成能量回收过程。张瑞等^[7]基于动网格的方法,对偏载工况下液压缸的双向流固耦合进行了分析,建议在液压缸偏载分析设计中采用流固耦合的方法,或适当增大稳态分析结果的安全系数。吴杏等^[8]分析液压缸脉冲式激振过程,建立了液压缸两腔压力和流量的波动方程,得到了液压缸液腔压力呈周期性变化。近几年能量回收装置一体化设计逐渐成为海水淡化工艺研究的热点^[9],但大部分研究仍处于理论阶段,并存在系统流量与压力波动等问题,还未投入商业化应用。

基于双缸耦合原理介绍了一种集成压力提升与能量回收技术的双缸耦合阀控式能量回收装置,重点对能量回收回路和电动推杆压力补偿设计,通过 AMESim 仿真验证了经压力提升与耦合后,反渗透膜压力与流量的稳定性。

1 小型反渗透海水淡化工艺

小型反渗透海水淡化装置工艺流程^[10]如图 1 所示。装置正常工作时,止回阀 1 打开、止回阀 2 关闭,三通阀通向右侧产水箱,原水泵抽取原海水经多介质过滤器和精密过滤器过滤后分成两路:一部分原海水进入高压泵,经过高压泵直接加压流入反渗透膜组件;另一部分原海水进入能量回收装置,经过能量回收装置中高压浓海水与电动推杆压力交换加压后,流入反渗透膜组件。反渗透膜组件产出的淡水流入产水箱,未通过反渗透膜的高压浓海水流入能量回收装置与原海水进行压力交换,压力交换后高压浓海水变为泄压浓海水流出装置。

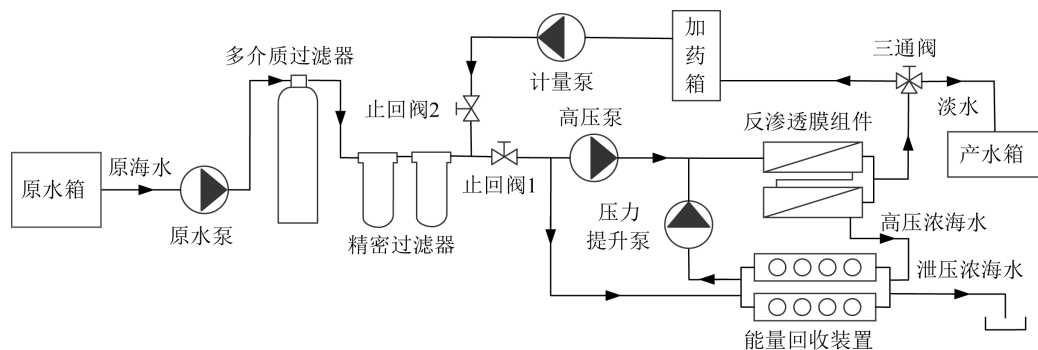


图 1 小型反渗透海水淡化装置工艺流程

Fig. 1 Small reverse osmosis desalination process

当需要清洗反渗透膜时,调节三通阀使其通向加药箱一侧,打开止回阀 2,计量泵将加入清洗药物的淡水打入反渗透膜,完成清洗工作。小型反渗透海水淡化装置配有控制模块,可对不同工作模式进行切换,实时监测和调节反渗透系统各部分工作参数^[11]。

小型海水淡化装置系统回收率一般较低^[12],参照《陶氏反渗透和纳滤膜元件产品与技术手册 2016 年 V2 版》,文中所涉及的小型海水淡化装置的两支反渗透膜组件串联连接,淡水系统回收率为 30%,总进水量 2 600 L/h,淡水产水量 780 L/h,高压海水进入反渗透膜组件工作压力 5.0 MPa。根据纳滤膜厂商提供的技术参数可知,通过两段纳滤膜元件的压力损失不超过 0.18 MPa^[13],液压缸内高压浓海水将压力能传递给原海水时,部分能量转化为原海水的动能,期间压力损失约为 0.12 MPa^[14]。因此,如小型海水淡化装置不安装

压力提升泵的情况下,通过上述分析可知在能量回收装置环节需对其进行约 0.3 MPa 的压力提升,小型反渗透海水淡化装置工艺节点参数如图 2 所示。

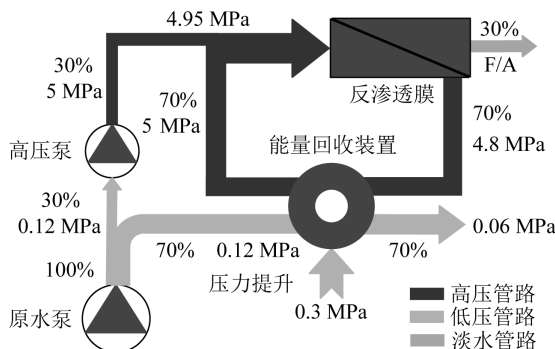


图2 小型反渗透工艺各节点的压力与流量值

Fig. 2 Flow and pressure values of each node in reverse osmosis system

2 反渗透双缸耦合阀控式能量回收装置

反渗透双缸耦合阀控式能量回收装置系统构成如图 3 所示,与活塞杆连接的电动推杆为增压海水二次增压提供压力补充,通过控制电磁换向阀的换向等待时间,对两缸增压开始与结束阶段压力进行补偿耦合,配合刚性弹簧、电磁换向阀等辅助设备,避免了流入反渗透膜增压海水压力与流量的波动。

反渗透双缸耦合阀控式能量回收系统的增压过程循环工作周期 T 可分为三个时间阶段,即增压开始充压耦合阶段 T_1 、稳定增压阶段 T_2 和增压结束充压耦合阶段 T_3 ,其中泄压过程时间与稳定增压阶段 T_2 时间相同,液压缸稳定工作时的压力变化如图 4 所示。

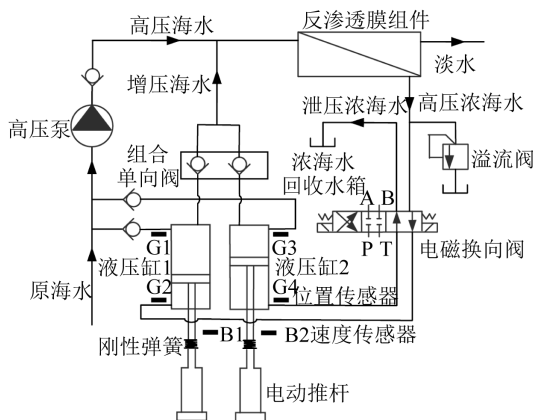


图3 反渗透双缸耦合阀控式能量回收系统构成

Fig. 3 Composition of reverse osmosis double cylinder coupled valve controlled energy recovery system

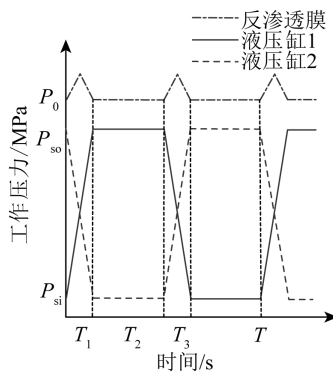


图 4 液压缸耦合工作压力简图

Fig. 4 Diagram of hydraulic cylinder coupling working pressure

在增压开始充压耦合阶段,电磁换向阀阀芯处于右侧,液压缸 1 内充满原海水(压力 P_{si}),处于底端的活塞受到高压浓海水压力与电动推杆推力开始做加速运动,液压缸 1 输出增压海水压力 P_{so} 与流量逐渐增加;在稳定增加阶段,液压缸 1 中的活塞到达下端位置传感器 G_2 时,所受到的黏性阻力与受到活塞的推力相等,电动推杆达到额定推力,活塞基本以匀速向上运动,液压缸 1 输出增压海水压力 P_{so} 与反渗透膜工作压力 P_0 相等;在增加结束充压耦合阶段,活塞运动到上端位置传感器 G_1 时换向阀换向,液压缸 1 下端自带排气装置由关闭状态变为开启状态(如图 5 所示),此时换向后活塞下端泄压海水受自重流出,电动推杆将继续推动活塞向上做减速运动。



图 5 液压缸排气装置
Fig. 5 Exhaust device of hydraulic cylinder

当活塞到达液压缸 1 顶端时,速度传感器 B_1 检测到活塞杆速度(即活塞)为零,由于电动推杆传动形式为滚珠丝杠传动即无自锁,活塞受原海水压力 P_{si} 与自重开始向下加速运动,从而实现快速泄压。其中在液压缸 1 处于增压开始充压耦合阶段时,液压缸 2 处于增压结束充压耦合阶段;液压缸 1 处于稳定增压阶段时,液压缸 2 处于泄压阶段;液压缸 1 处于增压结束充压耦合阶段时,液压缸 2 处于增压开始充压耦合阶段。双缸循环协同工作,不间断地为原海水增压。

在电磁换向阀的阀芯完全开启与关闭的过程中会有一段等待时间,使得双缸增压开始与结束时的充压耦合阶段的时间得以延长,进一步减弱了由于活塞冲击所带来的压力与流量的脉冲问题。在反渗透组件与电磁换向阀间的高压浓海水的管路中,安装了一个溢流阀,可及时溢流出未能全部流过电磁换向阀的高压浓海水,有效解决了高压浓海水管路的憋压问题。

3 双缸压力耦合与补充过程动态特性

为研究液压缸耦合阶段的压力特性变化,需建立液压缸压力交换过程动态模型^[15-16],对其不同阶段压力与流量变化进行理论分析。压力补充与耦合过程的受力模型如图 6 所示,其中推杆作用在活塞上的推力为 F_L ,活塞和活塞杆折算到活塞上的总质量为 m ,活塞与缸筒内部的摩擦力为 f_m ,活塞竖直方向运动速度为 v ,电磁换向阀阀芯的位移为 x_v ,液压缸无杆腔活塞面积为 A_1 ,有杆腔活塞面积为 A_2 ,增压海水压力为 P_{so} ,流量为 Q_{so} ,低压原海水压力为 P_{si} ,流量为 Q_{si} ,高压浓海水压力为 P_{bi} ,流量为 Q_{bi} ,泄压浓海水压力为 P_{bo} ,流量为 Q_{bo} 。

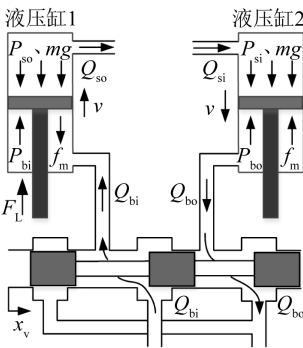


图 6 液压缸压力补充与耦合过程受力模型
Fig. 6 Stress model of hydraulic cylinder pressure supplement and coupling process

3.1 增压过程压力补充受力分析

左侧液压缸 1 在进行增压过程时,在增压开始充压耦合阶段,活塞加速度方向竖直向上,除了图 6 中所标明的活塞组件受到的摩擦力与重力,还受到向下的流体黏性阻力和惯性力的作用,该过程动力方程为:

$$A_2 P_{bi} + F_L - A_1 P_{so} = m \frac{dv}{dt} + Bv + f_m + mg \quad (1)$$

式中: g 为重力加速度, B 为活塞的黏性阻尼系数。

在稳定增压阶段,该阶段活塞加速度基本可看作为零,并以最大速度 $v_{\max}$ 向上运动,该过程动力方程为:

$$A_2 P_{bi} + F_L - A_1 P_{so} = Bv_{\max} + f_m + mg \quad (2)$$

在增压结束充压耦合阶段,活塞加速度方向竖直向下,因为该阶段有杆腔的泄压浓海水已流出,不再受高压浓海水压力作用,同时还受到向下的黏性阻力与惯性力的作用,该过程动力方程为:

$$F_L - A_1 P_{so} = m \frac{dv}{dt} + Bv + f_m + mg \quad (3)$$

在忽略液压缸密封处泄露的情况下,液压缸1无杆腔增压海水与有杆腔高压浓海水流量的连续性方程^[17]为:

$$Q_{so} = C_0 (P_{so} - P_{bi}) - A_1 v + \frac{V}{\beta_e} \frac{dp}{dt} \quad (4)$$

$$Q_{bi} = C_d w x_v \sqrt{\frac{2}{\rho} \Delta P_1} \quad (5)$$

式中: C_0 为缸体的内漏系数, β_e 为水的体积弹性模量, V 为液压缸无杆腔增压海水有效总体积, C_d 为换向阀阀口流量系数, w 为换向阀节流口面积梯度, ΔP_1 为高压浓海水经过换向阀时流体的压力损失。

3.2 泄压过程动态受力分析

右侧液压缸2在进行泄压过程中,泄压过程开始时,活塞仅受到原海水的压力与活塞组件的重力作用,加上图6中所标明的活塞组件受到的摩擦力与重力,还受到向下的流体黏性阻力和惯性力的作用,因此活塞会先向下经历一段加速运动,该过程动力方程为:

$$A_1 P_{si} - A_2 P_{bo} = m \frac{dv}{dt} + Bv + f_m - mg \quad (6)$$

当流体黏性阻力增加到一定值时,活塞将受力平衡,匀速向下运动,该过程的动力为:

$$A_1 P_{si} - A_2 P_{bo} = Bv + f_m - mg \quad (7)$$

在忽略液压缸密封处泄露的情况下,液压缸2无杆腔增压海水与有杆腔高压浓海水流量的连续性方程^[17]为:

$$Q_{si} = C_0 (P_{si} - P_{bo}) + A_1 v + \frac{V}{\beta_e} \frac{dp}{dt} \quad (8)$$

$$Q_{bo} = C_d w x_v \sqrt{\frac{2}{\rho} \Delta P_2} \quad (9)$$

式中: ΔP_2 为泄压浓海水经过换向阀时流体的压力损失。

4 能回装置的动态耦合过程的仿真分析

4.1 仿真概念模型

利用 AMESim 中液压库和 HCD 库建立液压仿真模型,分别用两个水泵来代替能量回收系统两液压缸输入端口的流量源,出口处各加入一个溢流阀,防止管路流量过大,导致结果失效。高压海水入口处与增压海水出口处各连接一个节流减压阀,用以模拟反渗透膜工作时的压力损失^[18-21]。两个带限位质量块的液压缸分别连接一个推力单元,推力单元与三位四通换向阀利用阶段控制信号源控制,概念模型如图7所示。

设置能量回收系统回路的元件参数,电磁换向阀完全关闭到完全开启所用等待时间为 1.4 s,即两液压缸压力耦合时间 T_1 与 T_3 为 0.7 s。原水泵与高压泵的马达转速分别为 130.0 r/min 和 124.8 r/min,其中两液压缸的内径 100 mm,活塞杆直径 20 mm,增压海水单向阀的开启压力设置为 0.4 MPa,原海水口单向阀的开启压力设为 0.04 MPa。

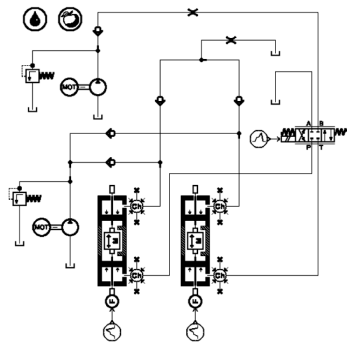


图 7 能量回收系统仿真概念模型

Fig. 7 Conceptual model of energy recovery system simulation

4.2 结果与分析

运行仿真后得到各模块参数仿真结果,在增压过程液压缸稳定增压时,活塞的运动速度可达 0.172 m/s,其中稳定增压所用时间 T_2 为 3.25 s,液压缸无杆腔增压海水压力变化如图 8 所示。

图 8 表明,在增压过程中,增压海水压力呈现迅速增加、稳定、迅速降低变化过程,在加入电动推杆压力进行补偿后,液压缸出口压力从 4.6 MPa 提升到目标压力 5.0 MPa,单液压缸压力提升后的增压海水压力能够达到设计要求。

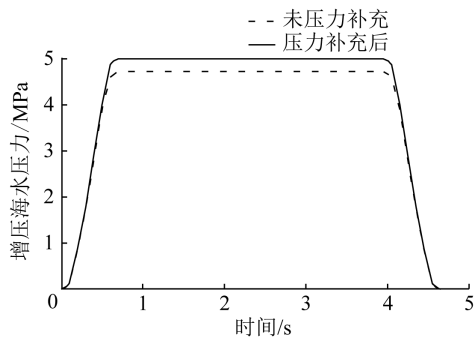


图 8 增压海水压力变化

Fig. 8 Pressure variation of pressurized seawater

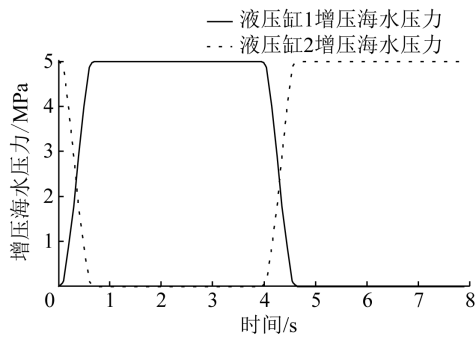


图 9 增压海水压力耦合过程

Fig. 9 Coupling process of pressurized seawater pressure

图 9 表明,在压力耦合阶段,两液压缸压力变化较为平稳,其中前 0.70 s 压力耦合阶段由液压缸 1 中高压浓海水和两液压缸推杆与原海水进行压力交换;0.70~3.95 s 液压缸 1 中的高压浓海水推杆与原海水进行压力交换;3.95~4.65 s 液压缸 2 中的高压浓海水和两液压缸推杆与原海水进行压力交换,压力耦合效果相对平稳。图 10 表明,增压海水流量耦合与压力耦合过程相似,其耦合过程中不同阶段所用时间也完全相同,稳定增压时流量为 13.0 L/min。

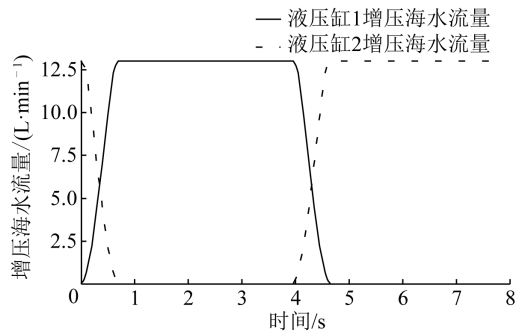


图 10 增压海水流量耦合过程

Fig. 10 Coupled process of pressurized seawater flow

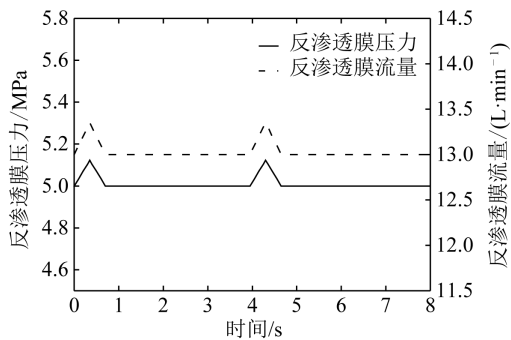


图 11 反渗透膜工作压力与流量

Fig. 11 Operating pressure and flow rate of reverse osmosis membrane

图 11 表明,经过双缸压力补充与耦合后,反渗透膜组件的工作压力与流量基本保持稳定,其流量基本稳定在 13.0 L/min,压力稳定在 5.0 MPa。在压力耦合阶段依然存在微弱的压力与流量波动,在装置的设计中,电动推杆与活塞杆间安装有缓冲弹簧结构,能进一步减弱双缸压力耦合引起的压力与流量波动。

5 结 语

基于双缸压力耦合原理,设计了一种反渗透工艺压力稳定的阀控式能量回收一体化系统,重点分析了液缸不同时间段的压力耦合过程,根据流体仿真结果得到以下结论:

1) 在阀控式能量回收系统中引入电动推杆结构,代替压力提升泵为增压海水二次增压补偿。通过调节换向阀换向等待时间,对双缸增压过程进行压力耦合控制,提出了一种满足反渗透膜工作压力要求,并能有效避免反渗透膜工作压力与流量波动的能量回收一体化方法。

2) 设计了一套适用于能量回收一体化系统的小型反渗透海水淡化工艺,根据相关标准和工艺参数,对小型反渗透海水淡化系统进行节点压力与电动推杆补偿压力分析计算,优化了反渗透系统工作参数值。

3) 通过 AMESim 软件对能量回收装置的压力补充及耦合过程进行仿真分析,结果表明在活塞杆的电动推杆补偿推力后,增压海水的压力可以提升 5.0 MPa 的反渗透膜组件目标压力,同时反渗透膜压力与流量基本保持稳定。

参考文献:

- [1] 胡缘, 杨绍辉, 何宏舟, 等. 多点液压式波浪能海水淡化系统建模与仿真[J]. 海洋工程, 2019, 37(1): 134-141. (HU Yuan, YANG Shaohui, HE Hongzhou, et al. Modeling and simulation analysis of multi-point hydraulic wave energy desalination system[J]. The Ocean Engineering, 2019, 37(1): 134-141. (in Chinese))
- [2] 黄方平, 穆永杰, 陈俊华, 等. 基于潮流能直驱式海水淡化系统的建模与仿真[J]. 海洋工程, 2014, 32(2): 79-88. (HUANG Fangping, MU Yongjie, CHEN Junhua, et al. Modeling and simulation of direct-drive system for sea water desalination[J]. The Ocean Engineering, 2014, 32(2): 79-88. (in Chinese))
- [3] MOHAMED E S, PAPADAKIS G, MATHIOULAKIS E, et al. The effect of hydraulic energy recovery in a small sea water reverse osmosis desalination system; experimental and economical evaluation[J]. Desalination, 2005, 184(1-3): 241-246.
- [4] LANGMAACK L N, WESSON W G. iSave, the easiest and most compact way to save energy on SWRO plants [C]// Asia-Pacific Conference on Desalination & Water Reclamation. 2010: 383-387.
- [5] 许恩乐, 王光明, 范美丹, 等. 转子式能量回收装置的研究进展[J]. 膜科学与技术, 2018, 38(3): 144-151. (XU Enle, WANG Guangming, FAN Meidan, et al. Research progress of rotor energy recovery device [J]. Membrane Science and Technology, 2018, 38(3): 144-151. (in Chinese))
- [6] LIU Ying, WANG Jianyou, WANG Lidan. An energy-saving "nanofiltration/electrodialysis with polarity reversal (NF/EDR)" integrated membrane process for seawater desalination[J]. Desalination, 2019(452): 230-237.
- [7] 张瑞, 姜峰, 杨晋, 等. 基于动网格的液压缸双向流固耦合分析[J]. 中国机械工程, 2017, 28(2): 156-162. (ZHANG Rui, JIANG Feng, YANG Jin, et al. Two-way fluid-solid coupling analysis of hydraulic cylinder based on dynamic mesh[J]. China Mechanical Engineering, 2017, 28(2): 156-162. (in Chinese))
- [8] 吴杏, 张俊萍, 赖成. 液压缸脉冲式激振系统数学建模及其实验测试研究[J]. 机床与液压, 2017, 45(16): 135-138. (WU Xing, ZHANG Junping, LAI Cheng. Research on mathematical modeling and experiment of hydraulic cylinder pulse excitation system[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2017, 45(16): 135-138. (in Chinese))
- [9] 吴家能. 旋转式能量回收装置在反渗透海水淡化系统中的应用研究[D]. 天津: 天津大学, 2016. (WU Jianeng. Application of the rotary energy recovery device in SWRO desalination system [D]. Tianjin: Tianjin University, 2016. (in Chinese))
- [10] HENTHORNE L, BOYSEN B. State-of-the-art of reverse osmosis desalination pretreatment[J]. Desalination, 2015, 356(356): 129-139.
- [11] 王伟. 船用反渗透海水淡化自动控制技术研究及实现[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2016. (WANG Wei. Research and implementation of automatic control technology for marine reverse osmosis desalination [D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2016. (in Chinese))
- [12] 李良. 海水淡化能量回收增压一体机关键结构设计与力学特性分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2018. (LI Liang. Key structural design and mechanical characteristic analysis of energy recovery and pressurization unit for seawater desalination [D].

Hangzhou: Zhejiang University, 2018. (in Chinese))

- [13] Product brochure of DOW group[EB/OL]. <http://www.taoshimo.cn/NF90-4040>. Html, 2015-01-22.
- [14] SONG Daiwang, WANG Yue, XU Shichang, et al. Analysis, experiment and application of a power-saving actuator applied in the piston type energy recovery device[J]. Desalination, 2015, 361: 65-71.
- [15] 柏艳红, 权龙, 郝小星, 等. 基于流量近似的阀控液压缸动力机构建模[J]. 机械工程学报, 2014, 50(24): 179-185. (BAI Yanhong, QUAN Long, HAO Xiaoxing, et al. Modeling of hydraulic valve-controlled cylinder power mechanism based on flow approximation[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(24): 179-185. (in Chinese))
- [16] 许宏, 杜治江, 沈佳丽, 等. 电动直驱式超高压液压系统动力机构特性分析[J]. 中国机械工程, 2017, 28(2): 162-166. (XU Hong, DU Zhijiang, SHEN Jiali, et al. Characteristics of power mechanism for ultra-high-pressure hydraulic system with direct electric drive[J]. China Mechanical Engineering, 2017, 28(2): 162-166. (in Chinese))
- [17] TRAN X B, HAFIZAH N, YANADA H. Modeling of dynamic friction behaviors of hydraulic cylinders[J]. Mechatronics, 2012, 22(1): 65-75.
- [18] YU Hongfei, XU Shuangyong, ZHANG Yuanshen, et al. The simulation research on dynamic performance of pressurized gas-liquid cylinder based on AMESim[J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2015(4): 64-67+72.
- [19] 李泽鹏, 权龙, 葛磊, 等. 液电混合驱动液压挖掘机动臂特性及能效研究[J]. 机械工程学报, 2018, 54(20): 213-219. (LI Zepeng, QUAN Long, GE Lei, et al. Research on characteristics and energy efficiency of hydraulic-electric combined driving hydraulic excavator boom[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(20): 213-219. (in Chinese))
- [20] GUO Xusheng, LI Quancai, XIAO Juliang. Dynamic characteristics simulation of the digital hydraulic cylinder based on AMESim[J]. Advanced Materials Research, 2013, 625: 75-78.
- [21] 王越. 反渗透海水淡化系统阀控余压能量回收装置的研究[D]. 天津: 天津大学, 2004. (WANG Yue. A study on valve-controlled energy recovery device for reverse osmosis desalination process[D]. Tianjin: Tianjin University, 2004. (in Chinese))

(上接第 131 页)

- [7] 乔飞, 郑丙辉, 雷坤, 等. 长江下游及河口区水动力特征[J]. 环境科学研究, 2017, 30(3): 389-397. (QIAO Fei, ZHENG Binhui, LEI Kun, et al. Hydrodynamics in the lower reaches of the Yangtze River and its estuary [J]. Research of Environmental Sciences, 2017, 30(3): 389-397. (in Chinese))
- [8] 杨龙晏. 三亚市雨洪潮遭遇精细化洪涝计算数值模型及影响分析[D]. 天津: 天津大学, 2016. (YANG Longyan. Detailed numerical model of flood and waterlogging caused by storm, flood and tide and influence analysis for Sanya City [D]. Tianjin: Tianjin University, 2016. (in Chinese))
- [9] 闻云呈, 夏云峰, 王晓俊, 等. 长江江苏段江堤防洪设计水位复核研究[R]. 南京: 南京水利科学院研究院, 2010. (WEN Yuncheng, XIA Yunfeng, WANG Xiaojun, et al. Study on recheck of design water level for flood control of river[R]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 2010. (in Chinese))
- [10] 刘斌, 闻平, 刘丽诗, 等. 近几十年来珠江三角洲主要水文站设计洪潮水位变化原因分析[J]. 人民珠江, 2018, 39(4): 5-11. (LIU Bin, WEN Ping, LIU Lishi, et al. Analysis on the causes of the design flood level of the main hydrological station in the Pearl River Delta in recent decades[J]. Pearl River, 2018, 39(4): 5-11. (in Chinese))
- [11] 钱明霞, 路川藤, 罗小峰, 等. 长江口北槽潮波对地形变化的响应研究[J]. 水利水运工程学报, 2016(5): 54-60. (QIAN Mingxia, LU Chuanteng, LUO Xiaofeng, et al. Response of tide waves in north channel of Yangtze Estuary to topographic variation[J]. Hydro-Science and Engineering, 2016(5): 54-60. (in Chinese))
- [12] 路川藤, 罗小峰, 陈志昌. 长江潮流界对径流、潮差变化的响应研究[J]. 武汉大学学报(工学版), 2016, 49(2): 201-205. (LU Chuanteng, LUO Xiaofeng, CHEN Zhichang. Study of current limit causing by runoff and tidal range in Yangtze River. [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2016, 49(2): 201-205. (in Chinese))
- [13] 徐林春, 林美兰, 黄东, 等. 西北江三角洲网河区洪潮水位与口门延伸的响应关系[J]. 广东水利水电, 2018(11): 35-39. (XU Linchun, LIN Meilan, HUANG Dong, et al. Response relationship between flood tide level and estuary extension in the river network in Pearl River Delta [J]. Guangdong Water Resources and Hydropower, 2018(11): 35-39. (in Chinese))
- [14] 沈汉堃, 钟上海, 刘建业. 海平面上升对珠江三角洲洪潮水位影响的研究[J]. 人民珠江, 1998(5): 30-34. (SHEN Hankun, ZHONG Shanghai, LIU Jianye. Investigation on the effect of rise of sea level on flood and tidal stage in the Pearl River Delta [J]. Pearl River, 1998(5): 30-34. (in Chinese))