

工程实例

# 使用能量回收高压泵的小型海水淡化装置的研制

苏慧超<sup>1</sup>, 吴水波<sup>1</sup>, 杨守智<sup>2</sup>

(1. 国家海洋局 天津海水淡化与综合利用研究所, 天津 300192; 2. 石家庄海阔捷能科技有限公司, 河北 石家庄 050031)

**摘要:** 研制了一套适用于海岛、海上平台、船舶等特殊场所的小型海水淡化装置。该装置采用自主研发的一体式能量回收高压泵,同时优化了装置设计,在保证淡化装置具有较低能耗的前提下,大大缩小了占地空间。通过开展多工况性能试验,表明该装置运行稳定可靠,当一体泵转速在 300 r/min 时,淡化装置达到额定产水量 8 m<sup>3</sup>/d,一体泵的电耗 < 3.5 kW · h/m<sup>3</sup>。

**关键词:** 海水淡化; 能量回收; 反渗透

**中图分类号:** TU99 **文献标识码:** C **文章编号:** 1000-4602(2018)02-0076-05

## Development of a Small Seawater Desalinator with High Pressure Pump for Energy Recovery

SU Hui-chao<sup>1</sup>, WU Shui-bo<sup>1</sup>, YANG Shou-zhi<sup>2</sup>

(1. The Institute of Seawater Desalination and Multipurpose Utilization, Tianjin 300192, China; 2. Shijiazhuang Haikuo Jieneng Science and Technology Co. Ltd., Shijiazhuang 050031, China)

**Abstract:** A small seawater desalinator for special places such as island, offshore platform and vessel has been developed. The high-pressure pump for energy recovery was developed independently and the design of the device was optimized, so that its energy consumption and footprint were reduced substantially. Through the performance test, it is showed that the desalinator run steadily and reliably. When the pump speed keeps at 300 r/min, the desalinator reaches the rated capacity of 8 m<sup>3</sup>/d, and the power consumption of the pump is less than 3.5 kW · h/m<sup>3</sup>.

**Key words:** desalination; energy recovery; reverse osmosis

随着国家海洋战略的实施、发展,海岛、海上平台和船舶作为海洋开发的固定载体和活动载体变得日益重要,而淡水紧缺一直都是主要制约因素<sup>[1]</sup>。这些特殊场所的生活用水需水规模小,要求水质高,电力能源宝贵,这就要求供水装置具备占地小、可靠性高、故障率低、高效节能等特点。小型反渗透海水淡化装置具有体积小、质量轻、集成度高和安装容易

等优势,可移动性高,总体投资少、出水水质好,非常适用于船舶、海岛和海上平台等特殊场合使用。开发具备能量回收装置的小型反渗透海水淡化装置,同时通过技术手段确保系统运行的可靠性,形成极具市场竞争力的产品,对国家海洋战略发展具有重要意义。

小型反渗透海水淡化装置研制有两个重要方

向:一是研发带能量回收功能的高压泵以达到节能的目的,二是优化系统设计,简化装置构成,以达到尽量节省占地的目的。研制了一套占地为 $2\text{ m}^2$ 、产水量为 $8\text{ m}^3/\text{d}$ 的小型反渗透海水淡化装置,采用了自主研发的一体式能量回收高压泵(一体泵),同时优化了系统的阀门管路设计,在保证淡化装置具有较低能耗的前提下,大大缩小了占地空间。

## 1 小型反渗透淡化装置的设计

### 1.1 一体式能量回收高压泵的研发

#### ① 一体泵结构设计

由国家海洋局天津海水淡化与综合利用研究所和石家庄海阔捷能科技有限公司共同研发的一体式能量回收高压泵是整套装置的核心部件,它将传统的高压泵、能量回收和增压泵的功能集成为一体。一体泵主要由能量回收器、曲轴箱、皮带、电机等部件组成。一体泵通过电机驱动输出扭矩,再将动力通过皮带传输至曲轴箱,曲轴箱的另一端与能量回收器连接,能量回收器与低压原水进水管、高压原水出水管、高压浓水进水管、低压浓水排出管相连。一体泵的能量回收器为过流部件,采用2205双相不锈钢材料,内部柱塞杆采用陶瓷材料;其余部件采用SS316L材质及工程塑料,或涂覆防腐涂层,在有效防腐的同时,尽量降低制造成本。

实际装置见图1。



图1 一体泵装置

Fig. 1 The object picture of integrated pump

#### ② 能量回收器设计

能量回收器采用功交换能量回收方式,基于异面积增压原理而设计。根据系统回收率来确定柱塞杆与柱塞的面积比,面积比一经确定,整个装置的回收率就是固定不变的<sup>[2]</sup>。该装置设计回收率为21%,柱塞杆与柱塞的面积比即为0.21。

能量回收器内部结构包括高压原水腔、低压原水腔、高压浓水腔、低压浓水腔,每个腔室分别通过接口与外部管路相连。能量回收器内部为三柱塞结构,柱塞可在各自的通道内往复运动。每个柱塞分别对应设置一个高压原水单向阀、一个低压原水单向阀、一个高压浓水单向阀和一个低压浓水单向阀,并通过对应的液流孔与四个水腔相通。其中,高、低压原水单向阀采用弹簧连接方式,高、低压浓水单向阀采用顶针连接方式,其中当顶针式单向阀打开时,可以通过顶针推动弹簧式单向阀同向运动,从而降低了弹簧连接方式的故障率。每个柱塞和其对应的四个单向阀组成一个能量回收单元。

#### a. 单个能量回收单元的工作原理

图2是单个能量回收单元的增压原理。

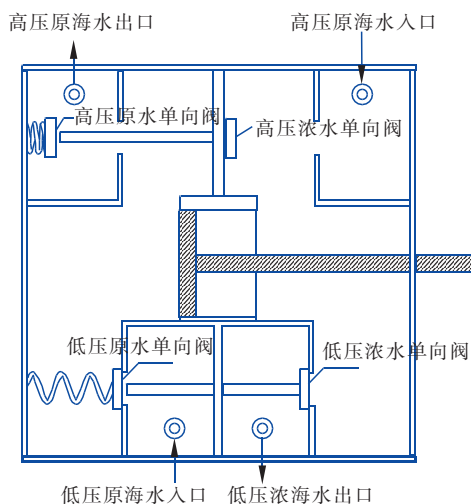


图2 单个能量回收单元原理

Fig. 2 Schematic diagram of single energy recovery unit

当柱塞由左向右运动时,柱塞左侧形成负压,高压浓水单向阀打开,高压原水单向阀关闭,低压原水进入能量回收单元;同时,柱塞右侧水流形成推力,低压浓水单向阀打开,低压原水单向阀关闭,低压浓海水排出能量回收单元。

当柱塞由右向左运动时,柱塞右侧形成负压,低压原水单向阀打开,低压浓水单向阀关闭,高压浓海水由反渗透膜系统进入能量回收单元;柱塞运行过程中,高压浓盐水的压力通过柱塞运行传递给低压原海水,柱塞左侧水流形成推力,高压原水单向阀打开,高压浓水单向阀关闭,增压后的原海水排出能量回收单元,进入反渗透膜系统。

#### b. 三柱塞循环增压原理

图3表示能量回收器内部由三个能量回收单元

组成,三个柱塞之间按照  $120^\circ$  的相位差进行往复交替运动,对应的单向阀随之往复交替打开和闭合。通过三柱塞的往复运动,实现循环增压,保证四个水腔内水流的不间断流动和能量的不间断传递。一体泵工作之初,柱塞的运动仅由电机通过皮带将动力传输至曲轴箱来驱动,当反渗透膜系统的高压浓水进入能量回收器,通过柱塞将能量传递给低压原海水时,柱塞的运动由浓海水与电机共同驱动,并最终达到平衡,从而达到了降低电机电耗的目的。此外,一体泵可以通过变频电机改变皮带传输速度,从而调节曲轴箱内三个柱塞杆的往复运动频率,最终实现输出压力的调节,能量回收效率可达 90% 以上。

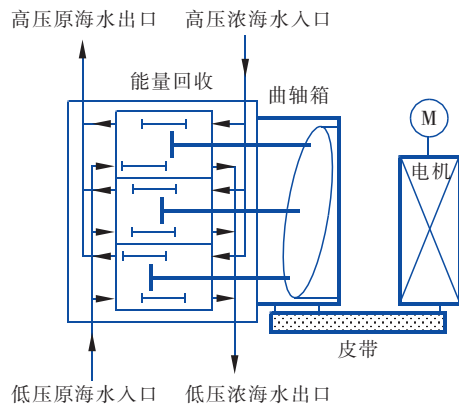


图3 三柱塞循环增压原理

Fig.3 Schematic diagram of three plungers cycle pressurized principle

此外,采用三柱塞循环增压的方式可以有效解决现有双柱塞式能量回收装置在阀门切换瞬间的高压腔压力波动问题。第三柱塞所在能量回收单元可以补偿另外两柱塞所在能量回收单元在单向阀切换瞬间的压力波动,保持整个高压原水腔的水流平顺和压力稳定(见图4)。

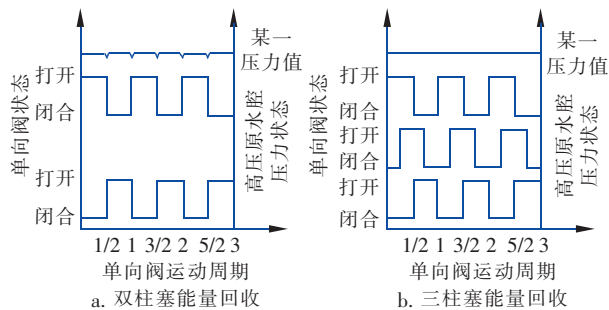


图4 双柱塞与三柱塞能量回收对比

Fig.4 Comparison of energy recovery between double plungers and three plungers

## 1.2 小型反渗透淡化装置的设计

### ① 工艺流程

小型反渗透淡化装置的工艺流程如图5所示。原水由取水泵提升后经介质过滤器和保安过滤器过滤后,直接由一体式能量回收高压泵增压后进入反渗透膜,同时实现浓水回收利用,产水进入产品水箱。产品水进入产水箱之前测试电导率,当产品水  $TDS < 1\ 000\ \text{mg/L}$  时进入产水箱,否则认为是不合格水,将由排水管路排出。

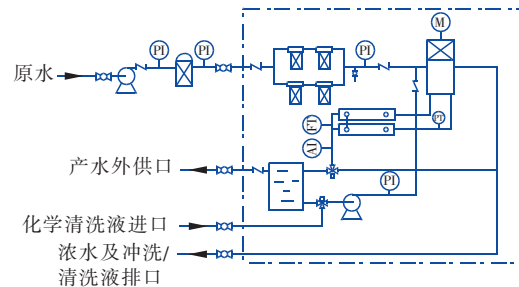


图5 淡化装置工艺流程

Fig.5 Process diagram of desalination device

### ② 装置构成

小型反渗透淡化装置主要包含四部分:预处理模块、反渗透模块、冲洗/化学清洗模块、控制模块。为提高装置的集成性,图5中以虚线框为界,虚线内的设备集成在一个尺寸为  $1\ \text{m} \times 2\ \text{m} \times 1.4\ \text{m}$  的 304 不锈钢框架内。

a. 预处理模块。由于取水条件和原水水质条件的不确定性,为使装置能够更加灵活地适用于各类场合,将取水泵和介质过滤器置于框架外。对于不同使用场合,应根据实际水质情况配置相应的预处理设备,特别是对于浊度较高的水质应增强预处理措施,以减轻反渗透膜的负担。框架内包含 2 支  $20\ \mu\text{m}$  精密过滤器和 2 支  $5\ \mu\text{m}$  精密过滤器。

b. 反渗透模块。经计算,反渗透膜选用 2 支陶氏 4 英寸 ( $1\ \text{英寸} = 2.54\ \text{cm}$ ) 海水膜元件,有效膜面积为  $7.4\ \text{m}^2$ ,稳定脱盐率为 99.4%,最高运行压力为  $6.9\ \text{MPa}$ 。膜壳采用乐普膜壳。该模块还包括自主研发的一体式能量回收高压泵和一个容积为  $0.25\ \text{m}^3$  的产品水箱。反渗透模块是整套装置的核心部分,设置于框架内。

c. 冲洗/化学清洗模块。清洗泵置于框架内与冲洗泵共用,因清洗水箱占地较大,且清洗周期较长,大约每 3~6 个月清洗一次,因此将清洗水箱另



行配置,留有清洗接口。

d. 控制模块。整套装置采用 PLC 控制系统,可以调节一体泵的运行频率,并监测泵的进、出口压力,产水流量,盐度等参数。

e. 管路优化设计。借鉴了国内外先进经验,采用电动三通阀和止回阀代替电动球阀,在实现自动化的同时,大大减少了电动控制元件的数量,使系统配置更加简洁。同时,部分管路采用软管连接,提高了管路连接的灵活性。

## 2 装置的运行测试

小型反渗透淡化装置(见图6)经过两年的精心研制,之后开展了为期半年的运行测试,对装置的整体性能进行了考察。



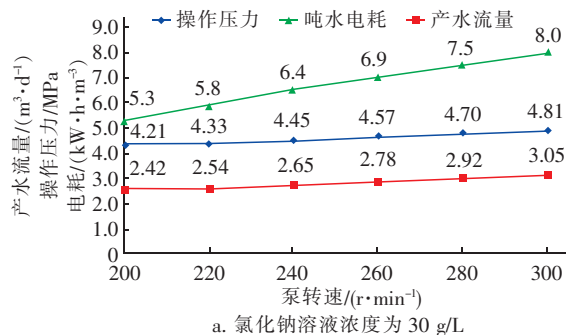
图6 淡化装置实物

Fig. 6 The object picture of desalination device

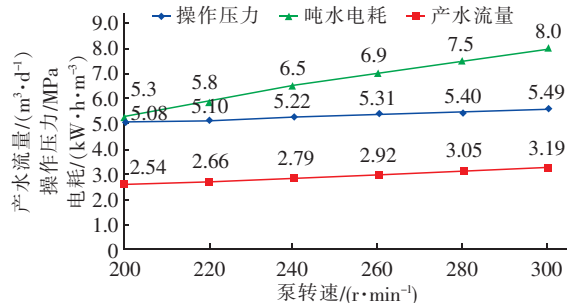
### 2.1 一体泵转速变化对装置性能的影响

淡化装置的操作压力和产水量均与一体泵的转速有关。本试验配制了 30、35、40 g/L 三种不同浓度的氯化钠溶液模拟不同盐度的海水,分别考察了改变一体泵的转速对操作压力和产水量的影响。

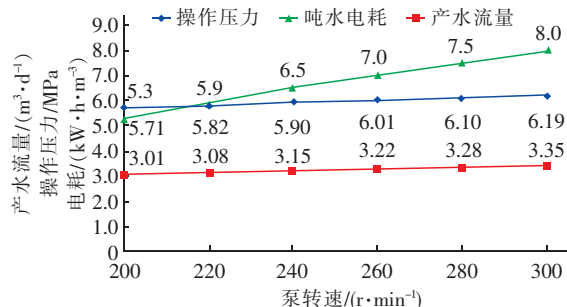
试验在室温(25℃)下进行,具体试验数据见图7。



a. 氯化钠溶液浓度为 30 g/L



b. 氯化钠溶液浓度为 35 g/L



c. 氯化钠溶液浓度为 40 g/L

图7 泵转速变化对运行参数的影响

Fig. 7 Effect of changing pump speed on operation parameters

上述测试结果表明,对于三种不同浓度氯化钠溶液,调节一体泵转速从 200 r/min 变化到 300 r/min 的过程中,系统操作压力、产水量、吨水电耗都在不断升高,呈线性关系,因此可以通过调节一体泵的转速,实现按需产水。而产水流量仅与泵的转速相关,与氯化钠溶液的浓度无关,当一体泵转速上升至 300 r/min 时,对于不同浓度氯化钠溶液,均可达到装置设计产水量 8 m<sup>3</sup>/d。该装置测算的系统能耗仅为框架内部的耗能设备,不包括框架外的取水泵,因而上述数据中的吨水电耗即为一体泵的能耗,通过测试电压、电流、功率因数,计算出泵的功率,并折算成吨水电耗。

### 2.2 进水浓度变化对系统能耗的影响

由前述测试可见,当一体泵转速上升至 300 r/min 时,即可达到装置设计产水量 8 m<sup>3</sup>/d,并且系统能耗会随着氯化钠溶液浓度的升高而升高。本试验配制了 7 种不同浓度的氯化钠溶液模拟海水中的盐度变化,考察装置达到额定产水量为 8 m<sup>3</sup>/d 时,系统能耗的最大值。试验在室温(25℃)下进行,具体试验数据见图 8。上述测试结果表明,保持一体泵转速在 300 r/min 不变的情况下,系统产水量稳定达到 8 m<sup>3</sup>/d,整套装置性能稳定可靠。而随着氯化

钠溶液浓度从 30 g/L 升高至 42 g/L 的过程中,系统操作压力随之升高(从 4.81 MPa 升高到 6.40 MPa),同时吨水电耗从 3.05 kW·h 升高到 3.41 kW·h。原因是原水盐度的升高会使过膜阻力增大,直接导致操作压力的升高,从而增加系统能耗。可见,对于不同浓度海水,一体泵的能耗可保证在 3.5 kW·h/m<sup>3</sup> 以下。同等规模的反渗透淡化装置如果不配备能量回收单元,市面上实测能耗在 15 kW·h/m<sup>3</sup> 左右<sup>[3]</sup>。该系统使用了一体泵,可使电耗降至 3.5 kW·h/m<sup>3</sup> 以下,节能效率 >77%。

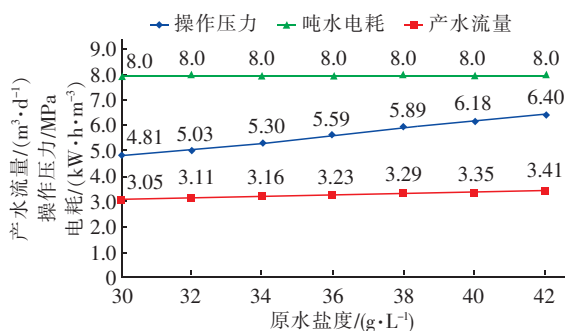


图8 进水浓度变化对运行参数的影响

Fig. 8 Effect of changing influent concentration on operation parameters

### 3 结论

研制了一套占地为 2 m<sup>2</sup>、额定产水量为 8 m<sup>3</sup>/d 的小型反渗透海水淡化装置,采用自主研发的一体式能量回收高压泵,同时优化了装置设计,在保证淡化装置具有较低能耗的前提下,大大缩小了占地空间,更加适用于海岛、海上平台、船舶等特殊场所。整体性能测试结果表明,该装置运行稳定可靠,改变一体泵的转速可以调节产水流量。对于不同浓度的

氯化钠溶液,一体泵转速在 300 r/min 时,系统产水量稳定达到 8 m<sup>3</sup>/d,电耗 <3.5 kW·h/m<sup>3</sup>,节能效率 >77%。

### 参考文献:

- [1] 张淑荣,张业山,曲航. 适用于分布设点的小型高效海水淡化装置的研制[J]. 膜科学与技术,2016,36(6): 113-118.
- [2] 王生辉,潘献辉,初喜章,等. 具备升压功能的差动式反渗透能量回收装置的研制[J]. 中国给水排水,2010,26(12):133-136.
- [3] 薛树旗,孙鑫,刘永强,等. 余压能量回收技术在船用反渗透海水淡化工艺中的应用研究[J]. 船舶工程,2016,38(1):82-85.



作者简介:苏慧超(1987-),女,山西大同人,硕士,工程师,主要从事反渗透海水淡化技术研究工作。

E-mail:suhuichaodhs@163.com

收稿日期:2017-08-15

珍惜水,保护水,  
实现人与自然和谐共处