中小型海水淡化装置及其能量回收技术的开发和应用

宋代旺[1]，初喜章[1]，王生辉[1]，邱冠华[1]，王海涛[1]，蒋立冬[1]，殷尉[2]

（1.国家海洋局天津海水淡化与综合利用研究所　天津　300192；2.中国海洋大学　青岛　266100）

摘要：海水淡化是解决沿海地区淡水资源短缺问题的重要途径，目前我国适用于海岛、舰船和钻井平台等工况的中小型海水淡化装置及其能量回收技术还不完善。文章分别介绍手持式、自增压式和撬装式（船用、岛用和风光油储一体化）中小型海水淡化装置系列的技术特点，并按类别分别介绍装置关键技术即能量回收技术的工作原理，提出研发中小型海水淡化装置与能量回收一体机的系列化产品可有效降低能耗、促进技术进步和满足国内需求。

关键词：海水淡化；水资源；中小型海水淡化装置；能量回收技术；海水综合利用

中图分类号：P747　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1005－9857(2018)04－0093－05

Development and Application of Small and Medium Sized Desalination Equipment and Matching Energy Recovery Technology

SONG Daiwang[1], CHU Xizhang[1], WANG Shenghui[1], QIU Guanhua[1], WANG Haitao[1], JIANG Lidong[1], YIN Wei[2]

(1.The Institute of Seawater Desalination and Multipurpose Utilization, SOA(Tianjin), Tianjin 300192, China; 2.Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

Abstract: Seawater desalination technology is an important way to solve the shortage of freshwater resources in coastal areas. At present, China's small and medium sized seawater desalination devices and energy recovery technology suitable for ship, island, drilling platform and other conditions are still incomplete. This paper introduced the technical characteristics of the small and medium sized seawater desalination device series, which include hand-held, self-pressurized and crowd-mounted (suitable for use on ships, islands and landscape oil storage integration), and compared the key technology of the device, namely the working principle of energy recovery technology, according to the classification. It was proposed that the products series of small and medium sized water desalination equipment and energy recovery device could effectively reduce energy

收稿日期：2017-09-05；**修订日期：**2018-04-15

基金项目：海洋公益性行业科研专项经费项目“高压泵能量回收一体机数值模拟及关键材料研究”(201505006－5)；2016 年中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目“水润滑上游泵送密封机理探究和配流盘开槽结构优化与效果评价”(K－JBYWF－2016－T16)；2017 年中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目“小型海水淡化设备中管路标准化设计方法及制造工艺研究”(K－JBYWF－2017－T15).

作者简介：宋代旺，高级工程师，博士，研究方向为海水淡化系统及其关键装置

consumption, promote technological progress and meet domestic needs.

Key words: Seawater desalination, Water resources, Small and medium sized desalination equipment, Energy recovery technology, Seawater multipurpose utilization

1 研究背景

开发利用海岛和海洋资源需要稳定的淡水资源供应[1],海水淡化技术是提供稳定淡水资源的重要技术。《全国海水利用"十三五"规划》明确提出海水淡化"百岛工程"和"进岛上船"等计划,中小型海水淡化装置的市场潜力巨大。

目前国外多家企业已率先开发系列化的中小型海水淡化装置,满足不同工况的用水需求,取得良好的经济和社会效益[2]。但对于国内用户,此类装置存在成本高、供货期长以及维护和维修难度大等问题。国内多家研究单位已掌握部分装置的工艺流程,并有装置进行示范应用,但对适用于海岛、舰船和钻井平台等工况的中小型海水淡化装置仍以定制为主,没有形成系列化产品,同样存在上述问题。中小型海水淡化装置应依据适用场所和淡水产量等因素发展系列化产品,综合装置的主要参数、工艺和结构等做出合理的集成设计,并协调与配套产品之间的关系。装置系列化有利于加速新产品的设计和开发、降低生产成本、提高产品质量、便于维护和维修以及提高专业化程度。此外,由于海岛、舰船和钻井平台等经常存在能源供应不足的问题,将风能、太阳能和潮汐能进行并网融合和一体化综合开发利用,可降低成本,同时解决单一能源开发利用受外界条件限制大的问题[3-4]。

目前多数国产中小型海水淡化装置未应用能量回收技术,导致装置能耗高和性价比低。作为反渗透海水淡化关键技术之一,能量回收技术通过回收高压浓盐水的余压能,可节省能耗约 50%,从而大幅降低运行成本。此项技术在我国已有 10 余年的研发历程,在适用于大型海水淡化装置的差动式能量回收、阀控正位移式能量回收和外驱转子式能量回收等方面均取得一定的成果。其中,国家海洋局天津海水淡化与综合利用研究所研制的差动式能量回收装置应用于国家海水和苦咸水利用产品质量监督检验中心的反渗透膜性能检测平台,已成功运行 10 余年,技术相对成熟。但国产中小型海水淡化装置能量回收技术的研究还处于起步阶段,根据这一迫切需要,近年来国家海洋局天津海水淡化与综合利用研究所率先在泵与能量回收一体机领域开展基础理论和关键技术研究,并形成试验样机,缩小了与国外先进水平的技术差距,促进我国中小型海水淡化产业的快速发展。

2 中小型海水淡化装置的分类及其系列化

相对于大型海水淡化装置,中小型海水淡化装置的特点是产水量小、结构紧凑、工艺简化、操作简单和便于运输,其调试和测试过程一般在生产制造车间完成,作为产品整体运输到应用场所。不同应用工况在用水数量和质量上的需求差异较大,为使各类工况以最低的成本获取淡水资源,需对中小型海水淡化装置进行科学合理的分类和系列化设计。

系列化设计需考虑产水量、取水条件、前处理方式、升压装置、能量回收装置、后处理方式、膜组件清洗方式、动力供应方式和外观结构形式等因素,从而使每个系列产品都能很好地满足用水需求[5]。在此基础上,还要进行模块化和标准化设计,使每个组成部件都便于更换,以解决远离大陆的海岛、舰船和钻井平台等工况下维护和维修的难题。综合上述因素,中小型海水淡化装置大致可分为 3 类,即手持式系列、自增压式系列和撬装式系列;其中,撬装式系列又可细分为船用系列、岛用系列和风光油储一体化系列。

2.1 手持式系列

为满足野外探险、科学考察、救援应急和单兵作战等特殊场合的短期、少量的淡水需求,海水淡化装置应具有体积小、重量轻、无须外接电源和操作简单等特点。常规大中型海水淡化装置的工艺和结构无法满足要求,应对其进行简化和改进,研发手持式海水淡化装置。

手持式海水淡化装置的主要特点包括:①以人力驱动手柄作为唯一动力来源,不受电能供应缺乏

的限制；②通过前处理过滤器后负压设计，省去低压供水泵；③膜组件数量设计为单支，开发专用型号的反渗透膜组件，运行压力约为 4.0 MPa；④为满足装置作为备用和应急使用的需求，将膜组件设计为易耗品，便于更换，并去掉加药清洗系统，从而降低维护成本；⑤手柄的摇动通过连杆结构转换为活塞的往复运动，替代高压泵对低压海水进行加压；⑥为降低人力损耗，增加能量回收装置；⑦采用集成块结构以简化管路连接，由多个集成块组成压力提升、能量回收和流体输送的主体，集成块之间通过简易螺栓紧固，可大幅度减小装置体积，也为远程设备维护和维修提供可能；⑧为尽量减轻重量，装置主体采用工程塑料和玻璃钢，少量金属部件采用钛材质。

通过优化设计，形成具有自主知识产权的手持式海水淡化装置系列，具有结构紧凑、操作简单、便于携带、系统稳定和应用广泛等优点。装置系列分为 3 个型号，产水量为 0.02～0.15 m^3/d，可满足 1～30 人的用水需求，其中最小型号的质量仅为 1 kg。手持式海水淡化装置系列使个人通过单体装置将海水和苦咸水转化成饮用水成为可能，满足相关工况需求。

2.2　自增压式系列

为满足团队旅行、岛礁勘察、船舶救援和渔船短程作业等工况的淡水需求，海水淡化装置应兼具产水量大和移动方便的特点。因此，研发自增压式海水淡化装置，主要特点包括：①产水量为 0.5～5 m^3/d；②唯一动力来源是供水泵，电压为 12 V 或 24 V；③质量在 60 kg 以内，人力无须借助外界专用工具即可移动。

自增压式海水淡化装置系列具有能源利用率高、集成化程度高、结构紧凑和重量较轻等优点，其核心部件是自增压高压泵能量回收一体机。通过供水泵提供的 0.4 MPa 的初始压力，自增压高压泵能量回收一体机通过差压式循环增压，将海水加压至约 5 MPa 后进入反渗透膜组件，此创新结构使淡化装置的驱动电压和功率大幅降低，吨水能耗为 3～4.5 kW·h。此外，为保证产水质量，增加电导传感器，经检测合格才会产水。

2.3　撬装式系列

2.3.1　船用系列

船用系列海水淡化装置是保障舰船所需淡水持续供给的有效方法，与传统的蒸馏式和电渗析式装置相比，其通过支架将供水泵、高压泵、膜组件、能量回收、仪表、电控和管路等部件集成一体，具有体积小，重量轻，安装、维护和维修方便，适应性强，无须频繁清洗，不受船舶主机等设备运行影响以及易于智能化操作等优点[6]。

船用系列海水淡化装置各种型号和主要性能参数如表 1 所示。

表 1　船用系列海水淡化装置型号和主要性能参数

型号	产水规模/m^3	脱盐率/%	回收率/%	操作压力/MPa	运行功率/kW	尺寸（长×宽×高）/cm	质量/kg
CH－005	5	99.5	21/25	5.5	1.8	70×55×170	80
CH－010	10	99.5	23/27	5.5	3.3	90×55×170	100
CH－020	20	99.5	25/28	5.5	4.3	100×80×170	120
CH－050	50	99.5	31	5.5	10.2	150×80×170	180

2.3.2　岛用系列

岛用系列海水淡化装置以反渗透法和蒸馏法为主，其中反渗透法装置只需外界提供电力，目前已在海岛广泛应用，很好地解决了海岛淡水资源短缺的问题[7]。其海水淡化过程分取水、预处理、升压、反渗透处理和能量回收 4 个步骤，即海水经泵抽取，经粗滤和细滤去除杂质，由高压泵输运到反渗透膜内进行淡化并产出淡水，浓缩海水进入能量回收装置回收余压能[8]。

与船用系列相比，岛用系列海水淡化装置主要采用模块设计，将取水、反渗透、电控和后处理等单元设计成独立模块，根据应用工况条件灵活组合，

具有结构紧凑，占地面积小，安装、维护和维修方便，自动化程度高以及操作简单等优点，适用于边远海岛和海洋监测站等。

岛用系列海水淡化装置各种型号和主要性能参数如表 2 所示。

表 2 岛用系列海水淡化装置型号和主要性能参数

型号	产水规模/m^3	脱盐率/%	回收率/%	操作压力/MPa	运行功率/kW	尺寸（长×宽×高）/cm	质量/kg
DH－050	50	99.5	33	5.5	10.5	120×60×170	170
DH－100	100	99.5	35	5.5	20.1	120×60×170	190
DH－200	200	99.5	40	5.5	37.1	150×60×180	300
DH－500	500	99.5	42	5.5	84.2	200×60×180	450

2.3.3 风光油储一体化系列

远离大陆的海岛多采用海底电缆和柴油发电提供电力，考虑到能源输送成本和环境污染等，海水淡化装置的动力来源应充分开发利用可再生能源。我国海岛多分布于东南沿海，太阳光照强度大，风力条件良好，潮汐能丰富；但单一能源供应受天气环境影响较大，限制装置的连续运行。因此，将多种能源通过微电网集成，研发风光油储一体化能源供应技术，可大幅降低海水淡化成本，解决电力短缺问题，也是保护海岛生态环境的重要举措[9]。

风光油储一体化系列海水淡化装置自带能源系统，无须外界提供能源，具有结构紧凑，安装、维护和维修方便，自动化程度高以及操作简单等优点，适用于电力紧缺的边远海岛和海洋监测站等。

风光油储一体化系列海水淡化装置各种型号和主要性能参数如表 3 所示。

表 3 风光油储一体化系列海水淡化装置型号和主要性能参数

型号	产水规模/m^3	脱盐率/%	回收率/%	操作压力/MPa	运行功率/kW	尺寸（长×宽×高）/cm
DHP－005	5	99.5	21/26	5.5	1.8	600×300×300
DHP－010	10	99.5	23/28	5.5	3.3	1 000×300×300
DHP－020	20	99.5	26/30	5.5	4.5	1 300×300×300
DHP－050	50	99.5	32	5.5	10.5	2 000×400×300
DHP－100	100	99.5	35	5.5	20.1	2 500×500×300

3 中小型海水淡化装置的能量回收技术

在反渗透海水淡化装置的运行成本中，能耗所占比重最大，因此降低能耗是降低淡化成本最有效的手段，而应用能量回收技术以回收利用浓盐水的余压能是降低能耗的重要方法。目前大型海水淡化装置的能量回收技术已较成熟，其吨水能耗已降至 3.8～4.5 kW·h；而未应用能量回收技术的中小型海水淡化装置的吨水能耗却可达 9 kW·h 甚至更高。因此，研发适用于中小型海水淡化装置的能量回收技术任务紧迫。

3.1 手持式海水淡化装置的能量回收技术

手持式海水淡化装置的唯一动力来源是人工施加的压力，在产出同等淡水量的条件下，应用能量回收技术的装置可极大地节省体力[10]。其主要技术特点为：①利用中空的集水管，将反渗透膜中心管分为 2 个部分，中心管与集水管之间为淡水，集水管内部为收集的高压浓盐水；当手柄向下摆动，高压浓盐水通过换向阀进入活塞左侧，与人力传递和转换到活塞的机械能共同对低压海水加压，实现能量回收，此为加压过程。②当手柄向上摆动，活塞向左运动，实现取水，同时将活塞左侧的低压浓

盐水通过换向阀排出，此为泄压过程。

这一能量回收过程采用正位移原理，效率较高；且装置集高压泵、能量回收和增压泵等功能于一体，大大缩小装置体积。

3.2　自增压式海水淡化装置的能量回收技术

自增压式海水淡化装置仅采用 1 台低压海水供水泵，不需反渗透系统中常用的高压泵和增压泵，系统设计流程更简单。海水经供水泵进入自增压高压泵能量回收一体机进行增压，采用差压式能量回收技术，效率可为 90%以上[11]。其主要技术特点为：采用 2 个大直径液缸进行压力交换，其中一个液缸中的高压浓盐水推动活塞，将能量传递给低压海水向外排液，另一个液缸中压入低压原海水补液并排出低压浓盐水；2 个液缸在换向阀的控制下交替排补海水，实现把浓盐水能量转换成原海水能量的回收过程。

这种能量回收装置通过物理活塞隔离浓盐水和原海水，无混合的问题[12]。

3.3　撬装式海水淡化装置的能量回收技术

撬装式海水淡化装置将各关键部件固定在支架上，通过管路连接形成完整工艺流程。其中，柱塞式高压泵能量回收一体机是装置的核心部件，集高压泵、能量回收和增压泵等功能于一体，是针对撬装式海水淡化装置无配套能量回收技术而研发的具有自主知识产权的装置[13]。

柱塞式高压泵能量回收一体机采用柱塞泵加压的逆过程实现对反渗透浓盐水余压能的回收利用，使反渗透系统的设计流程更加简单，同时减少中小型海水淡化装置的体积和重量[14]。经实测比较，目前市场上中小型海水淡化装置的吨水能耗多为 9～12 kW·h；而采用柱塞式高压泵能量回收一体机的中小型海水淡化装置的吨水能耗在 4～5 kW·h，降低约 50%。

4　结语

海岛、舰船和钻井平台等与国家利益和国家安全密切相关，应用于这些工况的海水淡化装置必须采用我国自主研发的技术产品，才能确保装置的安装、调试、运行以及维护和维修等环节掌握在自己手中。

与大型海水淡化装置相比，中小型海水淡化装置的应用范围更广、建设方式更灵活、建设周期更短，解决其中最关键的能量回收技术问题可降低能耗约 50%。研发中小型海水淡化装置与能量回收一体机的系列化产品，可打破发达国家的技术垄断，进一步提升我国海水淡化技术的水平和影响力，促进整个行业的技术进步，满足我国在该领域的巨大需求。

参考文献

[1]　宋代旺，刘玮，邱冠华，等.中国海岛水资源和海水淡化技术[J].海洋开发与管理，2016，33 (S2)：28－33.

[2]　阮国岭，冯厚军.国内外海水淡化技术的进展[J].中国给水排水，2008，24(20)：86－90.

[3]　王传崑.海洋能及其分类[J].太阳能，2008 (9)：17－18.

[4]　耿兆铨，潘存鸿.我国潮汐能研发状况和展望[C]//中国海岸工程学术讨论会.北京：海洋出版社，2005.

[5]　林振景，陈婧，郑辉，等.反渗透海水淡化能量回收装置的应用分析[J].科技致富向导，2013(23)：256－257.

[6]　潘献辉，王生辉，王晓楠.船用海水淡化装置的发展及应用[J].中国给水排水，2012，28(4)：24－26.

[7]　王晓丽，初喜章，单科，等.我国海岛发展海水淡化产业前景和战略对策分析[J].中国农村水利水电，2014(10)：96－100.

[8]　刘锡文，赵河立，王生辉.海岛地区海水淡化的开发和应用[J].净水技术，2014，33(4)：25－29.

[9]　邵天宝，王琪，王生辉，等.具有能量回收功能的人力驱动海水淡化器[P].中国专利：CN202576050U，2012－12－05.

[10]　郭力，王蔚，刘文建，等.风柴储海水淡化独立微电网系统能量管理方法[J].电工技术学报，2014，29(2)：113－121.

[11]　王生辉，苏慧超，赵河立，等.使用自增压能量回收高压泵的反渗透海水淡化系统[P].中国专利：CN103979643A，2014－08－13.

[12]　初喜章，王生辉，冯厚军，等.具有能量回收高压泵的小型反渗透海水淡化系统[P].中国专利：CN101913716A，2012－05－23.

[13]　蒋祖光.联轴高压柱塞泵[P].中国专利：CN103696920A，2014－04－02.

[14]　查雁鹏，任瑞文，李挺璇，等.活塞式海水淡化能量回收装置的研究和应用现状[J].装备制造技术，2014(5)：161－163.