新能源海水淡化技术

北京中水科水电科技开发有限公司（监测）

张金接、张俊娥、冯宾春、符 平、莫为泽、赵卫全

1 调研背景概述

本次调研是在 2011 年院水利水电动态调研《海岛非常规水资源开发》专题的基础上，结合部门研究特点以新能源海水淡化为题进行的更深层次的调研。本次调研查阅相关文献数百篇，最终参考 82 篇文献，其中包括专著；国际脱盐协会、国际能源机构、海水淡化与水再利用海水淡化西湖论坛等学术研讨会的会议论文；全国优秀博士、硕士学位论文；以及国内国外优秀期刊，刊名如下。

国外期刊：

Desalination，Progress in Energy and Combustion Science，Solar Energy Engineering，Renewable Energy，Marine Policy，Energy，Solar Energy.

国内期刊：

华北电力技术、水处理技术、水利水电技术、海洋学研究、净水技术、太阳能学报、华电技术、新材料产业、中国给水排水、真空、高科技与产业化、国外核新闻、海洋科学、海洋开发与管理、可再生能源、广东造船、能源与环境、膜科学与技术。

2 选择本专题进行调研的原因、必要性和意义

随着社会经济的不断发展，全球对水资源的需求持续增长，但由于受自然环境和气候变化等因素的影响，区域淡水资源正变得越来越稀缺，尤其是干旱半干旱地区、沿海及海岛地区，缺水现象更加严重。为缓解水资源危机，我国在厉行节水的同时，积极开发利用海水等非常规水源。海水淡化是一种增加区域可利用水资源量的技术，可作为水资源的重要补充和战略储备（栾维新等，2010）。发展海水淡化产业，对缓解我国沿海缺水地区和海岛水资源短缺状况，优化用水结构，保障水资源可持续利用具有重要意义。然而，海水淡化产业是能耗密集型产业，利用传统能源

进行海水淡化难以维持其可持续性（Markus etc., 2007; Soteris etc., 2005）。一方面，随着能源消耗急剧增长，传统化石燃料出现了资源短缺、环境污染等问题；另一方面，一些偏远山区和海岛由于所处地理位置较远，本身就存在缺电现象，更无多余能源用于海水淡化。近年来，风电、太阳能、海洋能等新能源由于其可再生性、无污染等特点，受到世界各国研究机构的重视。随着相关技术研究的深入与突破，市场价格将会进一步下降，新能源将具有更大的竞争力。

本文以新能源海水淡化技术为题进行动态跟踪调查，主要基于以下三个方面的原因。

（1）国家战略需求。近年来，我国大力发展海水淡化技术与新能源开发。“十一五”期间，我国海水淡化产能年均增长超过 60%，截止 2010 年底，国内建成海水淡化装置 70 多套，设计淡化水产能 60 万 m^3/d；在建装置 5 套，设计淡化水产能 26 万 m^3/d。《海水淡化产业发展“十二五”规划》中，规划到 2015 年，我国海水淡化产能达到 220 万 m^3/d 以上，海水淡化对解决海岛新增供水量的贡献率达到 50%以上，对沿海缺水地区新增工业供水量的贡献率达到 15%以上。在新能源利用中，“十一五”期间，我国风电已进入规模化应用阶段，到 2010 年底，风电累计并网装机容量 3100 万 kW；太阳能发电的国内市场也已启动，2010 年光伏电池产量占到全球光伏电池市场的 50%，效率也不断提高，晶硅组件效率达到 15%以上，非晶硅组件效率超过 8%；生物质能、地热能和海洋能也均有不同程度的发展。《可再生能源发展“十二五”规划》中，规划“十二五”期间，新增装机风电 7000 万 kW，太阳能发电 2000 万 kW，生物质发电 750 万 kW。

综合以上，目前国家对海水淡化产业化与新能源开发方面投入较大的政策支持，然而对海水淡化与新能源的发展主要存在两大方面的问题。一方面，将新能源与海水淡化联合的技术发展欠缺；另一方面，海水淡化技术最大的产业化发展壁垒是能耗较高，致使成本较高。利用沿海或海岛地区较丰富的风能、太阳能、海洋能等新能源替代传统能源进行海水淡化可在一定程度上减轻对常规化石燃料需求过高的压力，追踪了解国际新能源海水淡化技术发展动态，可为我国未来缓解能源短缺和水资源短缺的战略规划提供技术储备。

（2）地区实际需求。改革开放以来，沿海地区已成为我国经济发展最具活力的地区，今后一个时期，我国还将进一步从海洋大国向海洋强国迈进。《我国国民经济

和社会发展“十二五”规划纲要》中明确阐述要科学规划海洋经济发展，加强海洋基础性、前瞻性、关键性技术研发，提高海洋科技水平，增强海洋开发利用能力；强化海域和海岛管理，推进海岛保护利用，扶持边远海岛发展。现阶段，我国东部沿海发达省市由于社会经济的快速发展，电力资源和水资源出现短缺的状况；偏远海岛由于所处地理位置远离大陆，水、电、交通等基础设施严重缺乏。新能源海水淡化技术的发展可以为缓解沿海发达地区的水资源短缺，解决偏远海岛居民生活用水、改善民生，提供有力的技术支撑。

（3）单位发展需求。中水科技新能源事业部自成立以来一直积极参与新能源相关的研发、风电建设等关键技术研究。2008 年，部门在院专项、公司专项、水利部行业专项支持下，同时自筹一部分资金开展了风能反渗透海水淡化技术研究，通过室内模拟与现场示范运行，已取得一定的研究经验和成果。但是目前我们的研究仍然处于起步阶段。近年来，国际上新能源开发与海水淡化技术两大课题均成为各国争相研究的热点，然而在应用上，利用新能源进行海水淡化的仅占全球海水淡化市场的 1%（IEA-ETSAP and IRENA, 2012），其中还存在很多技术难点需要攻克。通过本次新能源海水淡化技术动态调研跟踪，了解国内外研究现状的同时，也可以为部门今后的发展方向提供研究思路。

3 近年来本专题发展新动向和值得关注点

目前来看，风能、太阳能、核能、波浪能、潮汐能等新能源是海水淡化技术中可利用的清洁能源（张海春等，2010）。近年来，我国新能源取得了很大的成绩，风电、光伏发电、太阳能热利用和生物质能高效利用均取得了明显进展，为调整能源结构、保护环境、促进经济和社会发展做出了重大贡献，其中以风力发电和光伏发电尤为突出（邓勇，2011）。近年来，在利用新能源进行海水淡化方面的研究也取得了很大的进展，但仍然存在很多问题，本专题首先综述新能源海水淡化的发展动态和值得关注点，并对目前的研究进行点评，最后结合部门需求提出本专题未来发展的若干建议。

3.1 发展新方向和值得关注点

本专题研究人员通过多渠道的调研发现，近年来，多种新能源海水淡化方法中，

针对风能海水淡化、太阳能海水淡化、核能海水淡化以及各种形式的海洋能海水淡化方面的研究比较集中，以下将着重综述这几方面的研究动态和进展。

3.1.1 风能海水淡化

风能海水淡化可以分为直接风能海水淡化和间接风能海水淡化两种。直接风能海水淡化是将风能转化的机械能直接用于驱动脱盐单元进行海水淡化的方法。间接风能海水淡化是先将风能转化为电能，然后再驱动脱盐单元进行海水淡化的方法。直接风能海水淡化的优点是省去了“机械能→电能→机械能”之间的转换，提高了能量利用效率，并简化了系统结构，但该技术方案每套装置自成一套系统，不适合大型海水淡化厂。其原因是海水淡化厂对海水质量要求较高，对海流、生态等也有一定要求。大型海水淡化厂往往需要几十台乃至几百台风力机组，延绵几十公里，每套装置的取水点相距较远，海水质量、海流条件和生态情况等很难同时满足每台机组的要求（宿俊山等，2009）。丹麦、荷兰等国家建造了风能直接驱动海水淡化装置，我国的余立群等设计了风能直接驱动的反渗透海水淡化装置（余立群，2004）。然而直接将风能用于海水淡化还存在一些问题，如风力波动则影响到泵的流量或压缩机的压缩稳定性等，因此这种直接利用风能的应用比较少。大多数情况下，可以先利用风能发电，之后用于海水淡化（冯宾春，2009）。

间接风能海水淡化根据供电方式的不同又可分为离网型和并网型。离网型风力机单台装机容量约为 100 W~10 kW，一般不超过 15 kW。可作为沿海缺电、缺水的海岛地区小型海水淡化的动力能源。风力发电能顺利并入一个地区或有电海岛电网的电量，主要取决于电力系统对供电波动反应的能力。风力发电机在并网和大小发电机切换时产生的瞬间电流，对电网会造成冲击，这种冲击随着风力发电机组单机容量的增大而增强。过大的冲击不仅引起电力系统电压的大幅下降，并且可能对发电机和机械部件（塔架、桨叶、增速器等）造成损坏。如果并网冲击时间持续过长，还可能使系统瓦解或威胁其它挂网机组的正常运行，影响电网的供电质量和稳定性。只有当电网的容量比发电机的容量大得多时（≥25 倍），发电机联网时的冲击电流才可以忽略不计。因此，必须进一步提高风力机的并网技术，将并网冲击电流限制在允许的范围之内。（任曲勇，2009）

风能海水淡化脱盐技术的选择主要取决于给水质量和产水质量要求、脱盐技术

特性、风力发电技术特性以及建设场地环境条件等因素。可行的与风力发电相匹配的海水淡化技术主要有反渗透（RO）、机械蒸汽压缩（MVC）和电渗析（ED）（冯宾春等，2009）。RO 法能耗低，系统简单，由膜单元组成，适用于各种规模，目前应用也最为广泛。该方法可以通过关闭和启动部分反渗透处理单元，来适应风力发电能量的变化，同时维持处理单元的运行参数恒定。但 RO 法需要复杂的预处理系统，对操作人员要求较高，需要定期更换膜组件和添加化学药剂，所以对于偏远地区或孤立海岛运行维护的难度较大。MVC 法能耗略高于 RO 法，适合于中、小规模海水淡化，比 RO 更适合于变化的能量消耗，同时产品水的水质要好于 RO 法，另外不需要更换膜组件，添加的药剂也少，对工人操作要求低，从这些方面看，它更适合偏远地区或孤立海岛。但对于没有混合能源提供持续稳定电力的孤立风电系统由于风速的变化，淡化单元需要经常地启动、关闭和长时间处于待机状态，MVC 因为启动慢，并且容易结垢，需要经常进行耗时的维护，所以在这类场合就不适合应用。ED 法能够适应能量消耗变化的运行方式，也能够适应快速启动与关闭。但因为直流电和交流电的切换易造成电谐波扰动，导致 ED 装置的电能消耗较高。ED 法常用在含盐量不太高的中、小规模的海水淡化或苦咸水淡化工程中，其工艺简单，易于普及和实现自动化，比较适合于偏远地区或孤立海岛。但对不带电荷的物质如有机物、胶体、细菌等无脱除能力，出水品质较低（李杰等，2008）。

风能的自然特点是风速时常变化，能量供应不稳定，具有间歇性、波动性，这不仅限制了风力发电的发展，也与海水淡化单元对于能量稳定供应的要求相矛盾。这一问题也是现存风能海水淡化存在的主要问题，解决的方法有两个方面，一是提高供电系统的稳定性；二是适当增加淡化水蓄水池容量，在无法实现持续稳定的电力供应时，可以通过海水淡化单元间歇运行来维持淡水供应。在提高风力发电系统稳定性方面，有并网条件的可以通过提高并网技术来避免冲击电流对电网产生的负面影响；对于独立电网系统，主要通过储能技术弥补风电的不稳定性，常用的方法有：蓄电池储能、飞轮储能、电解制氢储能、抽水蓄能、柴油发电互补、风光互补等。

在众多能量存储的方式中，蓄电池的化学储能方式运用最为广泛。2009 年福建省水产研究所在东山岛歧下海面浮筏平台上进行了独立风电海水淡化试验，采用风电—蓄电池—海水淡化模式，先将风机发的电全部存储到蓄电池，然后通过逆变为

海水淡化设备供电。然而，独立的风能发电方式受天气的影响较大，直接引起系统供电与负荷用电量的不平衡，常常导致蓄电池处于过充或过放状态，长期处于这种运行状态对蓄电池的使用寿命有很大的影响，而蓄电池的成本价格较高，造成独立系统的投资成本随之增加。

西班牙加那利群岛上的独立风电海水淡化厂则是通过配备一定转动惯量的飞轮来抑制风机输出功率的快速波动对电网的冲击，即为飞轮储能，系统便可正常运行。在系统运行中，当风电输出过剩时，主要通过飞轮蓄能和调整迎风角来降低输出；当输出功率过低时，主要通过变桨增加输出功率和利用飞轮储能进行弥补；当飞轮转速降至电网最低频率时，则要关闭一组甚至多组 RO 系统。实验结果表明，采用以上运行策略的独立风电 RO 海水淡化系统在不进行能量回收情况下，单位产水耗电量为 7.5kWh/m^3。

西班牙 Carta 等人自 1999 年以来，在欧盟 JOULE III 的资助下，一直致力于将风电直接用于海水淡化的研究，并在加那利群岛进行了大量试验，先后研究了风电独立运行海水淡化的可行性、最适合风电独立运行的海水淡化技术。通过试验测试证明 MVC、ED 和 RO 技术与风电独立运行都技术可行，其中 RO 技术最适合风电直接海水淡化，并在此基础上研究了 RO 技术的优化运行控制策略。同时，Carta 等人还研究了风电—柴油互补以及风电—柴油发电—抽水蓄能联合组建为海水淡化供电独立电网的技术方案，分析了各种方案的技术和经济可行性（Joséa etc., 2004）。

近年来，德国著名风电公司 Enercon 投入大量资源进行了基于风力发电的海水淡化研究，并取得了很大进展，设计并生产出以反渗透海水淡化技术为基础的新型可变负荷运行的风电海水淡化装置，成功的解决了因风电不稳定而在独立为海水淡化系统供电上的限制。其成果和创新主要集中在两个方面：一是新型高效的能量回收装置；二是负载功率和产水量可连续调节。该项技术显著降低了海水淡化的能耗和成本，同时也大大降低了风电独立海水淡化的难度和技术风险。该技术于 2004 年用于挪威阿奇若岛（Utsira），Utsira 岛上的风力发电场可能也是目前世界上唯一的独立于电网的大型风力发电系统，整个系统由 4 组反渗透膜组成，最大产水能力为 1440m^3/d，耗电量仅为 2~2.8kWh/m^3。风力发电系统由 Enercon 风机、柴油发电机组、主同步装置、飞轮储能装置以及蓄电池装置 5 部分组成。柴油发电机组主要用于当风速波动过大或风速过小而供电不足时保证电厂的正常供电；主同步装置和飞轮蓄

能装置的作用是尽可能地减少柴油发电机组的启动；蓄电池装置主要用于平衡长周期的供电用电不匹配。除了蓄电池装置之外，作为试验，Utsira 岛风力发电厂还安装了一套电解槽装置。当风力过剩时，富余电力用于电解制氢，用于低风速时段发电。整个系统比较复杂，由一套能源管理系统进行统一管理。各部件的运行状态信息会及时传送到远在德国奥尔赤的 Enercon 公司控制中心，由该中心根据系统运行情况自动对其进行必要的调整和管理。

风光互补发电系统在很大程度上可以弥补风电和太阳能光伏发电独立应用在资源上的各自缺陷，而风力发电系统和光伏发电系统在储能环节可以通用，且在技术应用中可以通过储能环节使独立的风电、光电系统得到合理化整合，构成能充分利用资源条件的独立供电系统。对风光互补发电系统的研究，国内外学者主要集中在两大方面：一是风光互补发电系统的优化设计及方法；二是全系统的运行控制策略及技术方法。在优化设计及方法研究方面，国内外已相继开发出一些模拟风力、光伏及其互补发电系统性能的大型工具软件包，通过模拟不同系统配置的性能表现和供电成本优化出最佳的系统配置；在运行控制研究方面，主要是利用现代电力电子技术和微计算机控制技术以提高系统的供电高效性和运行稳定性。风光互补发电海水淡化系统是综合利用风、光、水资源来解决资源短缺有效的方法，其在技术上的实现和运用是可行的。但迄今为止，利用风能、太阳能提供电能的海水淡化项目还比较少见，综合利用风光互补发电作为能量提供端的海水淡化技术仍处于研究发展阶段。（宿俊山等，2009）

3.1.2 太阳能海水淡化

太阳能作为一种清洁的可再生能源，每秒钟照射到地球上的能量相当于 500 万吨煤，发展潜力巨大。将太阳能与海水淡化紧密结合起来的新型高效太阳能海水淡化技术必定有良好的发展前景（刘业凤等，2011）。

利用太阳能进行海水淡化，主要是利用太阳能的热效应和光效应。海水淡化方法有很多种，但具有一定发展潜力的太阳能和海水淡化技术的组合形式如表 3-1 所示。现有淡化技术中，蒸馏淡化技术最成熟、运行安全性高、适用范围广、单机规模大。太阳能直接平板蒸馏法虽然成本低廉，但效率太低，占地面积过大；而使用太阳能直接加热海水，通过多效蒸发、多级闪蒸等技术使其淡化，能源利用率显著

高于使用太阳能直接蒸馏。太阳能利用效率的提高意味着单位面积产水量的提高，这对于土地面积有限的海岛地区有着重要的意义。

表 3-1　太阳能技术与海水淡化方法的组合形式

太阳能利用方式	适用水质	海水淡化方式
光热	海水	多效蒸馏（MED）
	海水	多级闪蒸（MSF）
	海水/苦咸水	直接平板蒸馏
光伏	海水/苦咸水	反渗透
	苦咸水	电渗析

目前世界上海水淡化方法商业应用最多的是多级蒸馏法和反渗透法（Akili etc., 2008），它们代表了不同的淡化理念和淡化思路。另外，太阳能收集器决定了太阳能的利用效率，近期国内外学者在太阳能收集器的结构设计和性能优化方面都取得了一定的进展。槽式太阳能聚热系统具有规模大、寿命长、成本低等特点，是目前最成熟的大规模太阳能热利用技术，利用该系统进行海水淡化具有较好的产业化发展前景。因此，本次研究将分别从四个方面介绍太阳能海水淡化技术的最新进展。

（1）太阳能与蒸馏法的结合

太阳能与传统蒸馏法的结合利用的是太阳能的热效应，使用高效的集热器收集尽可能多的太阳能，替代传统能源加热海水，提高运行温度进而提升效率。目前应用比较成功的有太阳能多效蒸馏系统、太阳能多级闪蒸系统和太阳能压缩蒸馏系统。

目前的太阳能多效蒸馏系统是把传统热源替换成了太阳能集热器，系统由多个单效蒸发器循环组成，换热系数高，消耗动力少，浓缩比较大，负荷弹性也较大，但结构复杂，容易结垢。太阳能多级闪蒸系统是针对多效蒸发结垢严重的缺点提出来的。这种方法设备简单可靠，易于大型化，操作弹性大，正好利用太阳能低品位的热量，但系统需要额外的加热设备才能弥补太阳能不稳定的缺点（郑宏飞等，2005）。蒸汽压缩蒸馏法是压缩机的动力能源在机器启动时由外部提供，待运转后则利用海水蒸汽的潜热驱动，此法适用于小型海水淡化装置。压缩机的动力可用太阳能或太阳光发的电，但此法成本比较高，还有待进一步探索。

然而，传统的太阳能蒸馏法单位面积产量很低，主要因为：蒸汽的凝结潜热未被利用；蒸馏器换热管换热效率不高；蒸馏器中待蒸发的海水热容量太大。尤其前两点极大地限制了太阳能蒸馏制水的效率。为此，如何提高凝结潜热的利用率和换

热器的换热效率就成了提高太阳能蒸馏制水效率的突破口。

张小艳等（2003）发现多级迭盘式太阳能蒸馏器能充分利用蒸汽的潜热，效率较高，特别在较高温度段（>70 ℃）运行时，性能更加理想，而且运行温度越高，效果越好。S Al-Kharabsheh（2004）在蒸馏器四周安装循环冷却水管强化冷凝，凝结潜热得到利用，并分别以淡水、海水及工业废水为样品进行了性能试验，发现最大的日产水量大约为 1.4 L/（m^2・d），水质与雨水和矿物质水相当，大大提高了太阳能蒸馏器的效率。原郭丰等（原郭丰等，2007）提出了一种可以昼夜连续运行新型的闭式太阳能海水淡化装置，布置图如图 3-1 所示。系统在泵和集热器之间装有三通阀，白天运行时，三通阀开向集热器，海水加热后喷淋；在晚间，为了防止海水经过集热器后向环境放热造成能量损失，三通阀转向，海水绕过集热器直接喷淋。通过建立数学模型对其性能进行了分析，分析结果显示，在设定工况下，海水流量处于低流量阶段时，流量的增加将带来海水喷淋温度的急剧下降，从而淡水产量随之有较大幅度的下降，当海水流量增加到一定程度后，淡水产量趋于稳定，随着冷却水流量的增加，系统淡水产量有一个峰值，因此，利用此系统进行海水淡化需选取适度的冷却水流量。

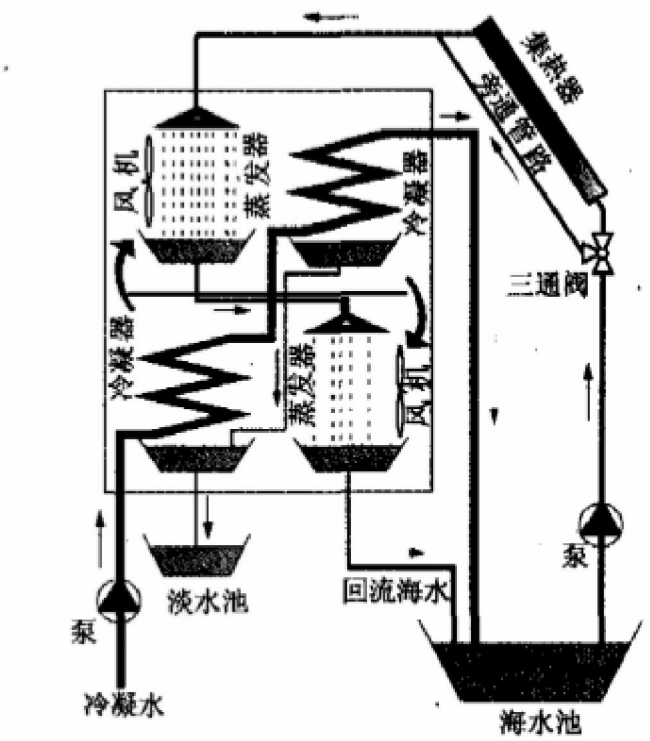

图 3-1　闭式太阳能海水淡化装置示意图

李正良等（2007）设计了一套具有四效回热的低温多效吸收式太阳能海水淡化装置，并用电加热器对该装置进行了稳态和动态实验，装置结构及运行原理如图 3-2 所示。装置采用激淋式横管降膜蒸发、多效闪蒸与多效回热、强化冷凝、强化对流等多项强化传热传质措施，减少了装置中海水的热容量，使装置升温更迅速；装置中的吸收器由于能够主动吸收第四级蒸发器中的蒸汽，从而使最后一级蒸发器横管外面的蒸发过程得到强化，同时也可以强化横管内的冷凝过程，同时作为其延伸效应，也有利于强化前面各级蒸发器的蒸发与冷凝过程，从而可提高整个装置的热质传递效率。

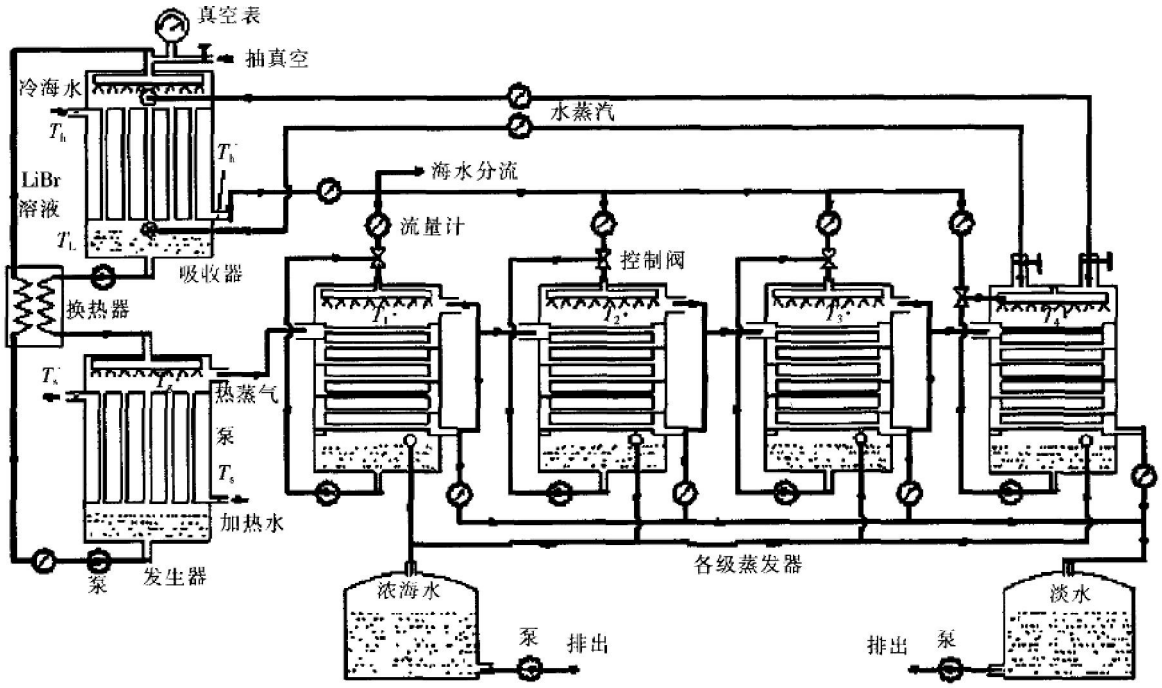

图 3-2　四效回热低温多效吸收式太阳能海水淡化装置示意图

天津大学田禾等（2009）综合多级闪蒸和低温多效两种系统的优点，设计了具有一效蒸发的直热式太阳能海水淡化试验装置，并对该系统进行了试验，系统装置示意图如图 3-3 所示。该系统的特征是使海水直接进入集热系统，省去产生蒸汽的热交换设备，能够有效利用太阳能集热器的高端热量，使用闪蒸与多效蒸发相结合的蒸馏淡化技术，使太阳能集热系统和淡化系统耦合运行。针对海水直接进入太阳能集热系统而引起的腐蚀和真空管结垢等问题，设计了真空玻璃管水平放置、具有耐海水腐蚀的纳米 PPR 材料的太阳能集热系统，同时整个海水淡化系统均涂有防腐阻垢涂层。试验表明，系统总体具有较高的性能系数，装置在较高温度好相对较高真

空度下工作具有更多优势，产水量更好，但温度超过 73℃后性能系数会下降，温度超过 75℃后结垢明显。

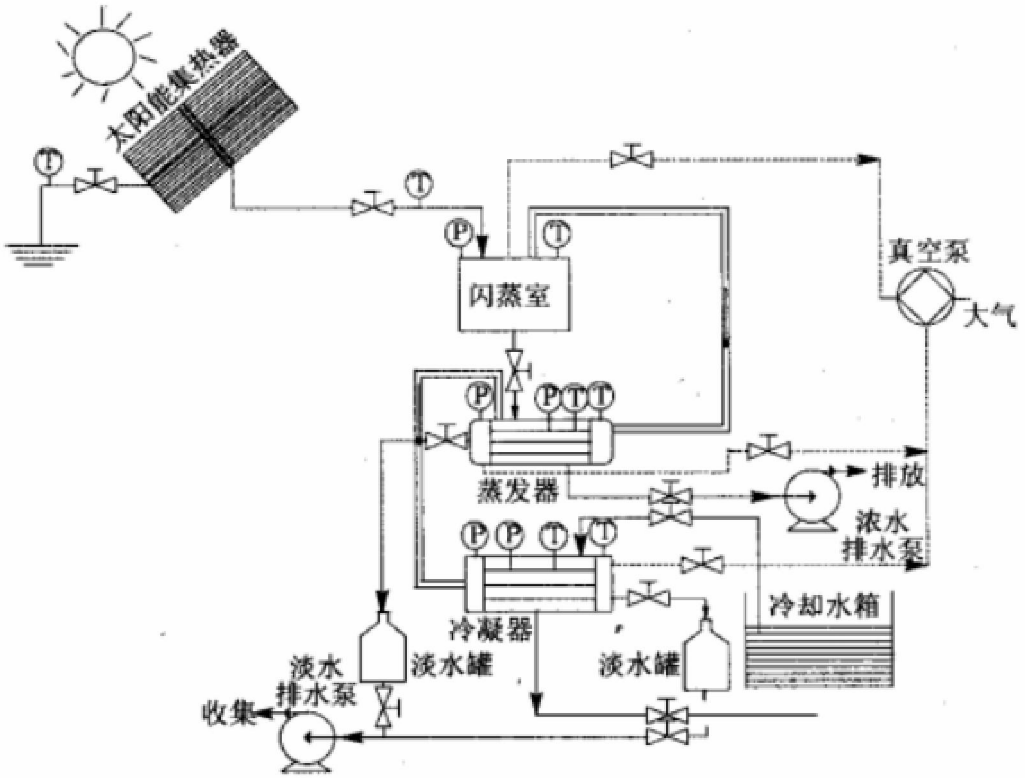

图 3-3　直热式太阳能海水淡化实验装置示意图

佛罗里达大学的 S Al-Kharabsheh（2004）设计了专门利用低能级太阳能的海水淡化系统，使用重力和环境压力制造出蒸馏室真空环境，理论分析结果表明运行时的蒸馏效率高达 90%甚至更高，而传统平板式太阳能蒸馏器平均值只有 30%～40%，即使运行条件良好也只有 50%。Kuiwen Zhao 等（2009）利用太阳能加热海水，利用潮汐能代替水泵和真空泵为系统给排水以及抽真空提供动力，降低运行成本，更有利于海水淡化的推广普及和实用化进程。

换热器的效率直接决定着整套系统的效率。在目前的研究中，多数换热器都是采用水平管降膜蒸发，在换热的过程中会有不间断的相变过程，换热系数高，热耗量小，还能利用低位余热，相比竖直管蒸发来说空间利用率有了很大的提高，但是管间距相对仍然较大，供液方式较复杂（Lianying Zhang，2003）。为此，刘振华、陈玉明、秋雨豪等先后对紧凑传热管束受限空间内的沸腾强化换热特性（1999）和紧凑满液型叉排管束蒸发换热器内水的沸腾强化换热特性（2005）进行了实验研究。实验表明将传热管束紧凑排列置于饱和状态液体中，使其变为满液式蒸发换热器，

其换热性能良好，在中小热负荷条件下甚至超过降膜式蒸发换热器；紧凑满液式水平管蒸发换热器具有良好的换热性能，传热管在管束中的位置对换热特性没有明显影响，随着压力增加，受限空间内沸腾强化换热效果显著增加。

（2）太阳能与渗析法的结合

太阳能与传统渗析的结合主要是利用太阳能发电后驱动系统产生淡水。其中电渗析法是将具有选择透过性的阴阳离子交换膜交替排列，外加直流电场分离淡水。反渗透法则是利用半透膜，利用电力驱动的加压设备在膜的一侧施加大于海水渗透压的外压，海水中的纯水将反渗透至淡水中。

目前利用太阳能发电的方法主要有两种。第一种是太阳能热发电，即利用聚光的方法将太阳光聚集到点或线上，得到的高温热源加热锅炉中的水汽化再利用汽轮机发电。美国早在 1989 年就建成了一座 194 MW 的太阳能热发电站。但是由于太阳能能流密度及热电转换效率较低，额外的蓄热装置等导致系统结构复杂，成本较高（宿建峰等，2009）。

另一种是太阳能光伏发电。典型光伏发电系统分为独立型和并网型两种，主要包括光伏阵列、逆变器、控制器等部分，在独立型系统中通常还包含蓄电池，系统结构简图如图 3-4 所示。太阳能光伏发电的核心器件是太阳能电池即光伏电池。自 20 世纪 80 年代以来，光伏发电技术和研发的主要目标是提高电池转化效率和降低电池制造成本（张耀明，2009）。光伏电池通常用晶体硅或薄膜材料制造。当前，晶体硅仍是太阳能光伏电池的主流（朱相丽，2008）。晶体硅电池包括单晶体硅太阳电池和多晶体硅太阳电池。单晶硅电池的实验室最高转换效率可达 24.7%，商业化电池效率为 16%~20%；多晶硅电池的实验室最高转换效率也超过了 20%，商业化电池效率为 15%~18%（吕贝等，2010）。与晶硅电池相比，薄膜太阳能电池造价更低，但转化效率也更低。目前，已经商业化的薄膜光伏材料有 3 种：硅基薄膜，主要包括非晶硅、微晶硅及微非迭层；铜铟镓硒；碲化镉，它们的厚度只有几微米。商业化硅基薄膜电池的效率在不断提高，其中，单结非晶硅电池效率为 5%~7%，双结非晶硅电池效率为 6%~8%，非晶硅/微晶硅迭层电池效率为 8%~10%；碲化镉薄膜电池转换效率可以达到 10%以上，但是镉具有毒性、碲产量较少等因素都制约了其发展；铜铟镓硒薄膜电池的转换效率可以达到 10%以上，不过镓的短缺也可能成为该技术发展的一个瓶颈（吕贝等，2010）。目前，商业化的薄膜光伏技术中，硅基薄膜的生产

和安装所占比重最大。

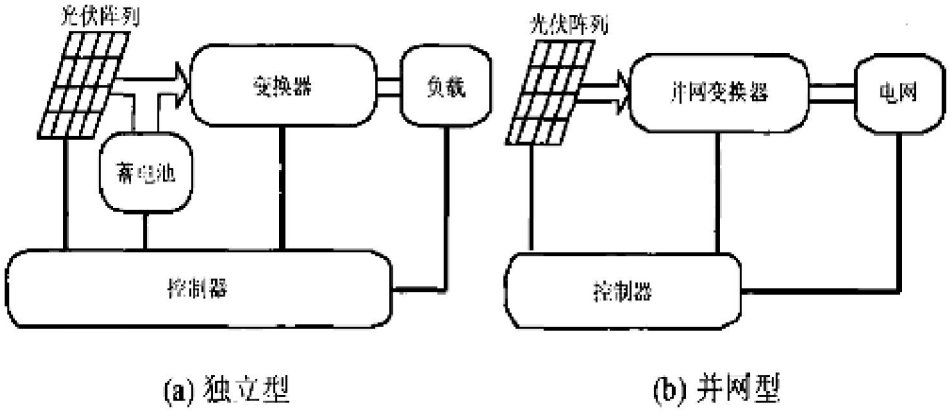

图 3-4　光伏发电系统结构简图（陆晓楠等，2009）

我国光伏工业自 20 世纪 80 年代起步以来，太阳能电池成本持续下降，2008 年 8 月中旬，国内最大兆瓦级太阳能光伏电站——上海崇明前卫村太阳能光伏电站等多个太阳能光伏和风电项目的上网电价获得国家发改委批复核定，核定的上网电价为 4 元/kWh（含税）（钱伯章，2009）。2011 年 6 月，国家能源局新能源和可再生能源司副司长梁志鹏透露，“十二五”期间，力争光伏发电成本降至 0.8 元/kWh 以下，为 2015 年后光伏规模化发展奠定基础。降低成本将是“十二五”期间光伏产业的主题。

反渗透海水淡化（ SWRO） 技术自 20 世纪 70 年代进入海水淡化市场后，发展十分迅速，现在已经占全世界淡化水总产量的 44%，世界上将近 80% 的海水淡化装置都采用的是反渗透膜技术（GREENLEE et al, 2009）。反渗透海水淡化一般包括取水、预处理、反渗透膜、能量回收和产品水后处理等工艺过程。其技术发展特征是膜的性能不断提高, 价格不断下降, 电力消耗不断降低（冯厚军等，2010）。对海水进行预处理对于保证反渗透海水淡化系统的正常运行，提高膜的使用寿命，降低海水淡化的成本具有十分重要的意义。传统的预处理流程主要包括：消毒、凝聚和絮凝、过滤、调节 pH 值、加阻垢剂等。 传统的预处理方式对于水质较好的海域可以满足反渗透海水淡化的进水需求， 在国内外海水淡化工程中应用广泛。随着膜过滤技术的不断发展， 许多新的预处理技术不断地应用到反渗透海水淡化技术当中，新型膜法预处理技术主要包括：连续微滤技术（CMF）、浸没式帘式膜过滤（IMF）、超滤技术（UF）、纳滤技术（NF）以及陶瓷膜过滤（CF）等（潘献辉等，2007；张海春等，2010）。

21 世纪初出现的能量回收技术使得反渗透膜技术的生产成本大大降低，能量回

收装置和脱盐/动力混合装置的发展极大地提高了反渗透海水淡化系统的能量使用效率（许骏等，2010）。经正常渗透膜后排出的浓水余压高达 5.5～6.5MPa，按照 40%的回收率计算，排放的浓盐水中还蕴含约 60%的进料水压力能量，回收这一部分能量可大幅降低反渗透海水淡化的能耗。目前能量回收装置主要分有水力涡轮式和功交换式两大类。水力涡轮式能量回收装置由于需要经过“水压能→机械能→水压能”两步转换，其能量回收效率较低；而功交换式能量回收装置只需要经过 “水压能→水压能”的一步能量转换，因此具有较高的能量回收效率。相比之下，功交换式能量回收装置已经逐渐成为海水淡化行业中研究和开发的热点，其产品市场占有率也呈逐年快速增长的发展趋势（张建中等，2010；潘献辉等，2010）。

能量回收装置在国外起步较早，发展很快，而且产品也已经基本成型。表 3-2 是国外各大公司能量回收装置的性能比较（徐晅阔等，2002；潘献辉等，2010）。其中前两种为水力涡轮式，用于与高压泵串联安装，通过降低高压泵所需的扬程达到节能的目的，不需要增压泵和自动阀门，但效率较低，特别是低流量时效率更低；后三种为功交换式，用于与高压泵并联安装，通过减小高压泵所需的流量达到节能的目的，需要配置增压泵，在很宽的流量范围内均能达到较高的效率。

表 3-2　国外能量回收装置的性能比较

装置	流量（m^3/h）	效率（%）	混合度（%）	外加动力	增压泵	自动阀门
Turbo charge	100～1 600	60～80	很小	无	无	无
佩尔顿叶轮	15～1 200	> 60	很小	有	无	无
PX	2～50	90～97	4	无	有	无
DWEER	15～280	90～97	1.5	有	有	有
SalTec	40～400	90～97	1.5	有	有	有

近年来国内海水淡化工程大多采用美国 ER I 公司的 PX 能量回收装置。国内对能量回收装置的研究起步较晚，进行反渗透用能量回收装置研究的主要有中科院广州能源所、天津大学、杭州水处理中心和天津海水淡化研究所等 4 家单位，研发方向均为双液压缸功交换式能量回收装置。广州能源所研发的试验样机为带活塞杆的双液压缸功交换式能量回收装置，已申请专利；天津大学的双液压缸功交换式能量回收装置也申请了专利；杭州水处理中心设计的能量回收装置主要由双液压缸、止回阀和四通功能阀组成，装置设计也申请了发明专利；天津海水淡化研究所自主研发的具备升压功能的差动式反渗透能量回收装置，已申请发明专利 1 项、实用新型

专利 2 项。虽然上述 4 家单位的研究成果还没有在海水淡化工程中得到推广应用，但工业化发展及应用前景良好，对中国反渗透海水淡化产业的发展，降低生产成本，提高制水效率起到了积极的推动作用。

（3）太阳能收集器

太阳能是一种低密度、间歇性、空间分布不断变化的能源，这就对太阳能的收集和利用提出了更高的要求。目前太阳能电池板多为平板式、固定角度方式布置，固定方式虽然成型简便，但太阳能的利用效率低（苏忠贤等，2008）。假如电池板对太阳光始终保持垂直，可使光电转换效率达到最大，同一装置太阳能的利用效益将获得提高。因此，如何使太阳能电池板跟踪太阳以获取最大效率逐渐成为研究的热点（朱俊昊等，2012）。力诺瑞特（2011）研发的太阳能集热器自动跟踪测试系统，能使集热器精确跟踪太阳的方位角和高度角，精度控制在 1 度以内，并带有经纬度修正功能，真正实现了精确定位。

Soteris A Kalogirou（2004）列举了常见太阳能集热器的分类和应用范围，并分别从光学、热力学与动力学 3 方面作了性能优化分析，为太阳能集热器的选择、设计优化提供了依据。翟辉等（2008）建立了大型平板型/真空管太阳集热器阵列排布的几何模型，分析了集热器倾角、间距、方位角对接收到辐射能量的影响；同时对集热阵列的最佳间距进行了研究和计算，得到了最佳间距与当地纬度和集热器倾角之间的函数关系式，这对非跟踪式系统的设计与安装具有极大的指导意义。Lidia Roca etc.（2008）使用复合抛物型太阳能集热器的低温多效蒸馏器，研究内部动态过程并建立了低复杂度的太阳能场用蓄热系统模型和蒸馏器产水量模型，仿真数据与实验结果一致，这些数据对确定最优操作点，建立完善控制参考，设计优化启动和操作程序具有重大的借鉴意义。制造工艺方面，魏海波等（2010）用真空磁控溅射技术在平板集热器板芯上沉积选择性吸收涂层，提高了平板集热器的集热效率和耐用性。

（4）槽式太阳能聚热海水淡化

在太阳能海水淡化产业化发展方面，槽式太阳能聚光热发电系统经过 20 年商业化运行是较为成熟的太阳能海水淡化技术。它的储能系统或者燃烧系统可以实现 24 小时运行，度电成本也具有一定的竞争力。目前，欧洲和美国正在建设一批改进的槽式太阳能热发电系统，其性能更为优越（敖火庚，2011）。

槽式太阳能海水淡化产生蒸汽的方式主要有三种：闪蒸法、直接法和间接法。闪蒸法是指加压的海水在集热管中被加热，然后在独立的气室中闪蒸为蒸汽，海水在集热管内由于压力较高保持单相流动（图 3-5）；直接蒸发法是指海水在集热管内直接加热最终产生蒸汽，通过汽水分离装置得到蒸汽，这种方法会在集热管内产生汽——水两相流动（图 3-6）；间接蒸发法是指传热流体在集热管中循环，海水在另一个不与集热器直接接触的容器内，通过热交换器被加热并产生蒸汽（图 3-7）。其中，闪蒸法由于具有结构简单、运行稳定、效率较高、建造成本低等优点，成为研究开发的重点。槽式太阳能闪蒸法海水淡化基本原理图如图 3-8 所示（龚广杰等，2009）。整个系统包括两个部分：槽式太阳能聚光——集热子系统和传统的海水淡化子系统。槽式太阳能聚光——集热系统是整个太阳能海水淡化的核心部件，包括抛物面反射镜、支架、追踪传动装置以及直通式真空集热管；传统的海水淡化子系统包括闪蒸分离器、MED 或 MSF 蒸发器、海水预处理系统和浓盐水排放系统。

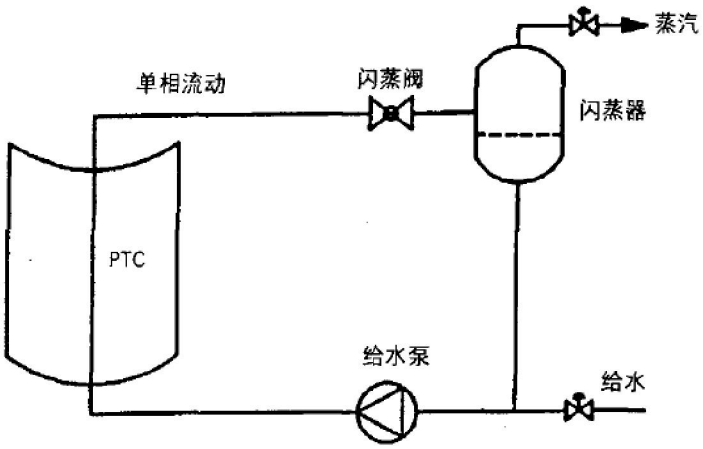

图 3-5　闪蒸法槽式太阳能海水淡化示意图

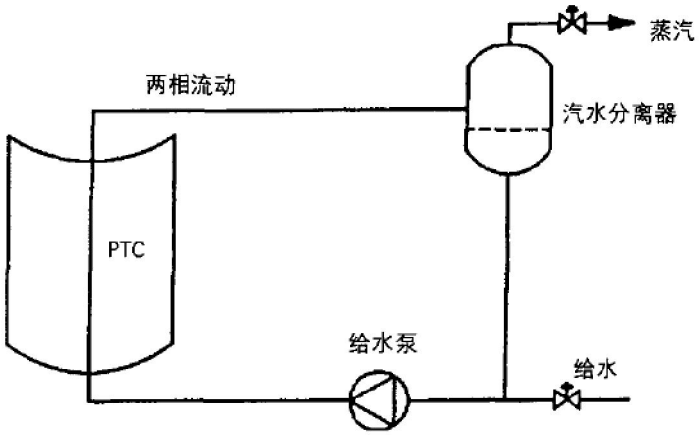

图 3-6　直接蒸发法槽式太阳能海水淡化示意图

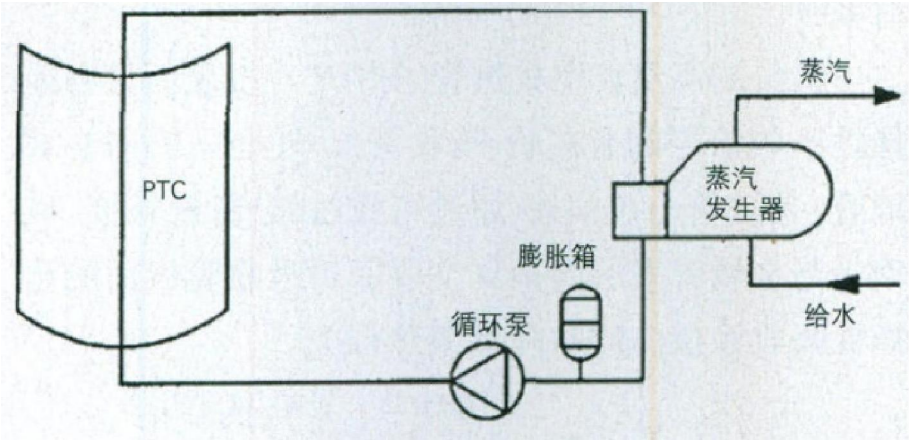

图 3-7　间接蒸发法槽式太阳能海水淡化示意图

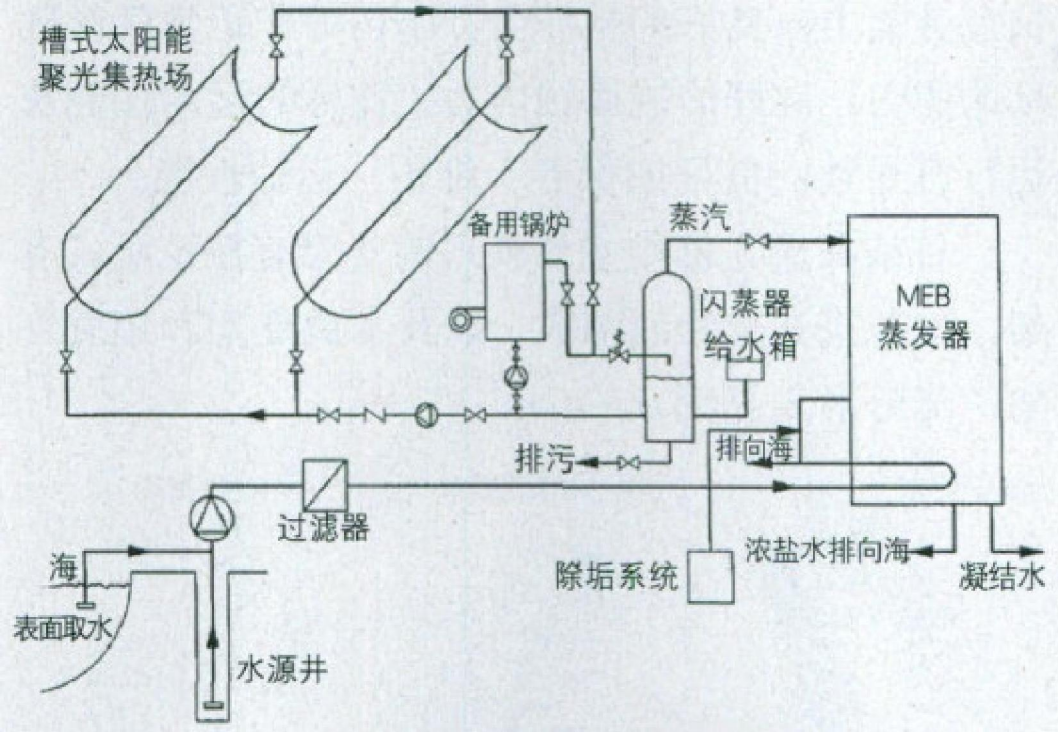

图 3-8　槽式太阳能闪蒸法海水淡化基本原理图

槽式太阳能聚光集热海水淡化系统的技术难点在于聚光集热子单元，国内目前在太阳能热水器上得到广泛应用的集热管仅能在低温下运行，用于太阳能海水淡化效率较低，而能承受中高温和一定压力的槽式太阳能真空集热管，制造难度较高，仅有极少厂商能够生产。

3.1.3 核能海水淡化

核能海水淡化涉及 3 种技术，即核技术、淡化技术和它们之间的耦合技术。核

能海水淡化可以是单一目的的，也可以是水电联产的，涉及的问题主要是核反应堆的选择和核燃料循环方式，核能海水淡化连接方式主要包括核电站和淡化装置的连接、供热用核反应堆和淡化装置的连接、水电联产核反应堆和淡化装置的连接。选择核能海水淡化必需考虑该地区的电水需求、核能淡化的经济性、安全性、可靠性和一定的运行弹性，保证产品水不被污染，电力和淡水的稳定供应，不对周围居民和环境产生影响，同时核能海水淡化工程的建设、管理和运行是一个非常复杂的过程，需考虑各个方面因素的影响。

若是采用反渗透法并利用核电站提供的上网电力进行海水淡化，即通过电网使核反应堆与海水淡化厂耦合，则除了经济上的考虑之外已不存在任何技术上的问题。若把核反应堆与热法海水淡化系统直接耦合，或利用核热预热 RO 法的给水，则人们最关心的问题是如何避免核反应堆对饮用水可能造成的放射性污染，并避免海水淡化系统可能导致对核反应堆系统安全性提出更高的额外要求。

当把核反应堆和热法海水淡化系统结合时，另一个要考虑的重要问题是两者的规模大小匹配问题。发电用核反应堆的规模大则经济性好，所以现在商业核电站的核反应堆许多单堆热功率都在 1000MW 左右。如山东核能海水淡化项目，即使是 200MW 热功率的堆，采用 RO 淡化方案就能提供高达 25 万 m^3/d 的淡化水（北京市区近年的最大日淡水消耗量不超过 250 万 m^3/d）。

在包括区域供热、工业工艺过程用热和海水淡化等核热应用方面，世界上已有大约 60 座反应堆和超过 500 堆年的核热应用运行经验，核热应用系统不存在大的技术和安全问题。在这些核热应用系统中，为防止放射性物质污染热网或淡水所采取的设计措施已被证明是有效的。（张亚军等，2006）

至目前为止，世界上实际应用核能进行海水淡化的经验还较少，仅有哈萨克斯坦和日本建立过实际运行的工业规模的核能海水淡化装置，中国和印度等国研究机构开展过用已建成的核反应堆进行小规模核能海水淡化的试验研究。有许多反应堆已经或正在被考虑用于核能海水淡化，见表 3-3。但是，不管反应堆的类型如何，核能与淡化技术结合都涉及一些必须解决的问题。其中包括核电厂的安全和防止放射性对水的污染，在反应堆停堆时饮用水的保证，以及经济性、融资、安全保障、不扩散以及公众接受等问题（朱树中等，2003）。

表 3-3　国际原子能机构（IAEA）成员国核能海水淡化研究状况（Goossen，2007）

反应堆类型	地点	淡化方法	状况
LMFR	哈萨克斯坦（阿克套）	MEF,MSF	1999 年关闭
PWS	日本（大阪、高滨、伊方、玄海） 韩国、阿根廷等 俄罗斯	MED,MSF,RO MED MEF, RO	有超过 125 堆年的运行经验 设计中 设计中（浮动站）
BWR	日本（帕崎・刈羽）	MSF	淡化单元退役
HWR	印度（卡尔帕卡姆） 加拿大	MSF/RO RO（预热）	调试中 设计中
NHR-200	中国	MED	设计中
HTRs	南非、法国、 荷兰、美国	MED,RO	研究与设计阶段

3.1.4 海洋能海水淡化

海洋能是指依附在海水中的可再生能源，主要包括了潮汐能、波浪能、温差能等（Robin etc., 2009）。以下将分别介绍利用这几种海洋能进行海水淡化的研究进展。

（1）潮汐能海水淡化

潮汐能是从海水面昼夜间的涨落中获得的能量。它与天体引力有关，地球－月亮－太阳系统的吸引力和热能是形成潮汐能的来源。潮汐能是被人类最早利用的海洋能，可以查到的最早关于潮汐能利用的报道大概在公元 1000 年。最早利用潮汐能的国家有英国、法国及西班牙等。潮汐能的利用技术也是所有海洋能利用技术中最成熟的，世界上许多国家，像英国、法国、俄罗斯及中国等都有已建或研究中的大型潮汐电站（李书恒等，2006），见表 3-4。

表 3-4　世界已建和研究中的部分大型潮汐电站

国家	站址	年平均潮差/m	装机总量 /10^4kW	年发电量 /10^8kWh	建成时间
韩国	始华		25.4	5.53	2010 年
法国	朗斯	8.55	24.0	5.44	1966
加拿大	安纳波利斯	6.4	1.78	0.50	1984
中国	江厦	5.1	0.39	0.11	1980
中国	幸福洋	4.2	0.128	0.032	1989
中国	海山	4.9	0.015	0.0031	1985
俄罗斯	美晋湾	5.66	1500	500	研究中
英国	塞文河口	8.4	600	144	研究中

加拿大	芬迪湾	11.8	380	127	研究中
澳大利亚	金伯利湾	8.4	90	30	研究中
阿根廷	圣何塞湾	6.5	495	120	研究中

但是关于潮汐能海水淡化的研究却很少，目前关于潮汐能海水淡化的研究只有刘业凤等人提出的潮汐能太阳能多效蒸馏海水淡化，该系统利用潮汐能做为抽真空及排放浓盐水的动力源，可以节省大量的电力或化石燃料（刘业凤等，2009；Kuiwen Zhao，2009）。如果能将已成熟的潮汐能利用技术与海水淡化相耦合，则有可能实现大规模海水淡化，其前景也非常可观。

（2）波浪能海水淡化

波浪能是指海洋表面波浪所具有的动能和势能。波浪的能量与波高的平方、波浪的运动周期以及迎波面的宽度成正比。波浪能是海洋能中最不稳定的一种能源，但其分布最广且能流密度大（刘美琴，2010）。世界能源委员会的调查显示，全球可利用的波浪能达到 20 亿 kW（孙业山等，2007；刘美琴，2010）。我国拥有广阔的海洋资源，波浪能的理论存储量约为 7000 万 kW，沿海波浪能能流密度大约为 2~7 kW/m。浙江、福建、广东和台湾沿海均为波能丰富的地区（孙业山等，2007）。

目前国内外波浪能的研究主要集中于波浪能的发电，对波浪能海水淡化的研究比较少。至今，能够应用于波浪能海水淡化的波浪能转换装置主要有振荡浮子式、点头鸭式、振荡水柱式、水波泵式及水锤泵式等（P A Davies，2005）。

最早的波浪能海水淡化的研究是关于振荡浮子式的。这种方式的波浪能海水淡化装置最简单，比较容易实现，因为基本上没有什么运动设备。在 20 世纪 80 年代初，美国的 Delaware 大学提出了一种名为 DELBOUY 的振荡浮子式波浪能海水淡化系统，该系统利用振荡浮子来驱动系于海床上的活塞泵，活塞泵产生的高压海水推进置于水下的反渗透膜组件来完成海水淡化（Douglas etc., 1989）。这是最典型的振荡浮子式波浪能海水淡化装置。近年来，林润生等人（2010）设计了一种振荡浮子式波浪能海水淡化装置，该装置考虑使用特制隔膜泵来代替活塞泵，但是没有关于特制隔膜泵的性能参数的进一步研究说明。

点头鸭式波浪能海水淡化最早是由 Salter 等人提出的，该系统利用蒸汽压缩式海水淡化方式，并将相应的海水淡化设备置于浮动的鸭型波浪能转换装置内部，通过波浪能转换装置将波浪能直接转换成机械能，并驱动内部的海水淡化装置。在此

之后，A JCrerar 等人（1991）在上述的点头鸭式波浪能海水淡化的思路基础上，对该系统提出了一些改进，并搭建了小型模拟装置进行实验。点头鸭式波浪能海水淡化的研究还在继续，它还有望与反渗透海水淡化相结合。

振荡水柱式波浪能海水淡化最早是由印度的国家海洋开发部提出来的，该系统先将波浪能转换为电能，然后用电机驱动反渗透海水淡化装置。该系统目前还在运行当中，是目前全世界运行较好的波浪能海水淡化系统（N Sharmila etc., 2004），该系统每天能产淡水 14.4~21.6 m^3，产水质量达到饮用水标准（Robin etc., 2002）。在此之后，中国科学院广州能源所也提出一种振荡水柱式海水淡化，该装置与印度装置的不同之处在于，波浪能不是全部通过转换成电能来驱动高压泵产生高压海水，而是直接将波浪能转换成液压能并驱动液压马达来产生高压海水，以提到系统效率（孙业山等，2007）。

另外，McCormick 等人提出了一种水波泵式波浪能海水淡化，该系统的波浪能转换装置由三节铰链连接的浮体组成，两节浮体对称地连接于中心浮体，中心浮体起到保持平衡的作用。两臂与中心体之间产生很大的力，这个力可以驱动活塞泵进行发电或海水淡化。Sawyer 等人提出了的一种水锤泵式波浪能海水淡化，该系统采用柔性管，管内装有海水，管的两端安装水锤泵，当波浪能作用于柔性管时，管的海水向两端运动并驱动两端的水锤泵工作，水锤泵产生高压海水用于海水淡化（Lourdes etc., 2003）。

以上关于波浪能海水淡化的研究主要集中于波浪能转换装置与海水淡化装置的耦合性能研究，力图寻找出一种最佳的组合。但是近年来，也有一些关于波浪能海水淡化的局部构件及其数学模型的研究。例如 Matt Folley 等人（2008；2009）提出在波浪能海水淡化系统中使用一种新型的能量回收装置，该能量回收装置适合在很多种类型的波浪能海水淡化系统中使用，并且非常适合波浪能这样的不稳定能量情况，能够有效提高整套系统的效率，预计产水能耗小于 2.0kWh/m^3，淡水的成本为每吨 0.45 英镑/t。Denver Cheddie（2010）则提出一种波浪能反渗透海水淡化的瞬态模型，该模型是第一个完整的波浪能海水淡化系统数学模型。模型为一维瞬态，并采用显式时间步长的有限体积离散化方法来解决极化层内的集中变量，另外模型中还采用了一些新的假设。

在波浪能海水淡化的研究中，关于波浪能转换装置与海水淡化的耦合性能研究

较多，而进一步的细化研究则很少，另外关于波浪能海水淡化的理论基础及数值模拟的研究也较少。至今仍没有一种运行效果好、产水成本低的波浪能海水淡化装置，这也是波浪能海水淡化迟迟不能商业化的一个原因。

（3）海洋温差能海水淡化

海洋温差能又称海洋热能，是利用海洋中受太阳能加热的暖和的表层水与较冷的深层水之间的温差进行发电而获得的能量。海洋温差能的主要研究工作也是在发电方面，以海洋受太阳能加热的表层海水（25～28℃）作高温热源，而以 500～l000m 深处的海水（4～7℃）作低温热源，用热机组成的热力循环系统进行发电。关于海洋温差能海水淡化的最早报道是 Rey, Lauro 于 1981 年提出了一个耦合海洋温度梯度的热能转换装置和一个蒸馏装置的系统。之后，Rabas, Panchal 于 1991 年提出了一种耦合了海洋温差能的多级闪蒸海水淡化系统。金志江等人（2008）也提出了一种海洋温差能海水淡化系统，并对该系统进行数值模拟及小型模型实验。

海洋温差能相对其他海洋能来说，具有不存在间歇、受昼夜和季节的影响较少等优点。但是海洋温差能利用系统所需的冷海水往往需要从 500～1000 m 的深海获得（王迅等，2008）。这就大大的提高了投资及维护成本，从而也限制了其商业发展。

3.1.5 其他新能源海水淡化技术

海水淡化技术除了以上可利用的新能源以外还包括地热能、生物质能、LNG 等，目前相关的海水淡化技术也正在初步研究之中。

3.1.6 新能源海水淡化的经济性分析

新能源海水淡化技术的经济性直接决定了其推广应用前景，本节将从海水淡化影响因素、海水淡化成本、新能源与传统能源成本对比等几个方面分析新能源海水淡化技术的经济性。

（1）海水淡化成本的影响因素

海水淡化成本主要受以下几方面因素的影响：①进水水质。水质成分中总固体颗粒物（TDS）的含量对处理成本影响最大，海水中 TDS 浓度越低，处理过程中的能耗越低；反之，TDS 浓度越高，能耗越高。②海水淡化厂的处理能力（LBG-Guyton Associates, 2003；Younos T, 2005）。处理能力的高低决定处理单元、泵站、蓄水池以及配水系统的规模。相比处理能力较低的海水淡化厂，处理能力越高，海水淡化厂

的初始启动资金越大。然而，由于规模的经济性特征，处理能力高的海水淡化厂其单位生产成本一般会低于处理能力低的海水淡化厂。③海水淡化厂的位置特征。海水淡化厂的位置特征，如厂区所在位置的土地供应和土地利用类型都会影响其生产成本。另外，海水淡化厂与水源和浓盐水排放点之间的距离也是另一影响因素。若处理厂距离取水点与浓盐水排放点较近，则加压泵站运行成本与管道的安装成本就会下降。④建设全新的海水淡化厂与改造原有水处理厂的成本也不同。

（2）常规海水淡化成本分析

一座海水淡化厂的成本主要分为建造成本和运行维护成本两大部分。建设成本又包括直接投资与间接投资。直接投资包括对土地、生产井、地表水储水池、管道设备、附属设备、各个处理建筑物等的投资。间接投资也是总投资的一部分，主要包括交通运输费、保险费、建设开销、租金以及一些意外费用。

运行维护成本又包括固定费用与可变费用。固定费用包括保险和分期付款利息。一般地，保险费用是总费用的 0.5%；分期付款利息在 5%~10%之间浮动。主要的可变费用包括工人、能源、化学材料以及维护费用等。对于总颗粒物含量较高的海水，维护运行费要高达总费用的 20%（Younos T，2005）。

根据相关研究成果，相比其他海水淡化方法，具有能量回收装置的 RO 法在淡化海水中的能耗较低（Loupasis，2002）。RO 法海水淡化与较大规模的热法海水淡化主要的成本构成分别见图 3-9 和图 3-10。如图 3-9 所示，RO 法海水淡化主要成本中所占比例最大的是电力能源和资本金。如图 3-10 所示，对于一座较大规模的热法海水淡化厂，电力能源与热能所占比例达到 59%，远高于资本金等其他成本。因此，对于热能海水淡化厂，诸如有发热和发电双重目的的工厂，通过利用其他可选择的热源或能源是降低成本的最有效的方法。另外，随着成本的降低和热转化表面耐腐蚀性的不断发展，资本金和能源成本也可以得以降低。

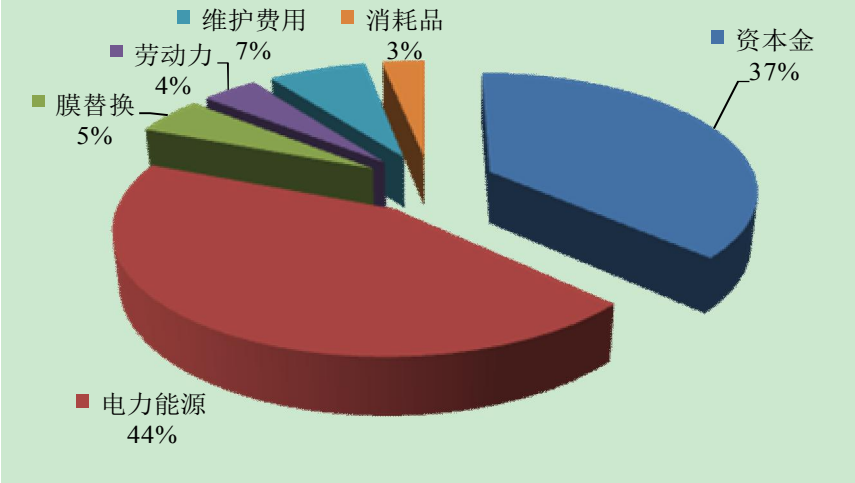

图 3-9　RO 法海水淡化主要成本构成示意图

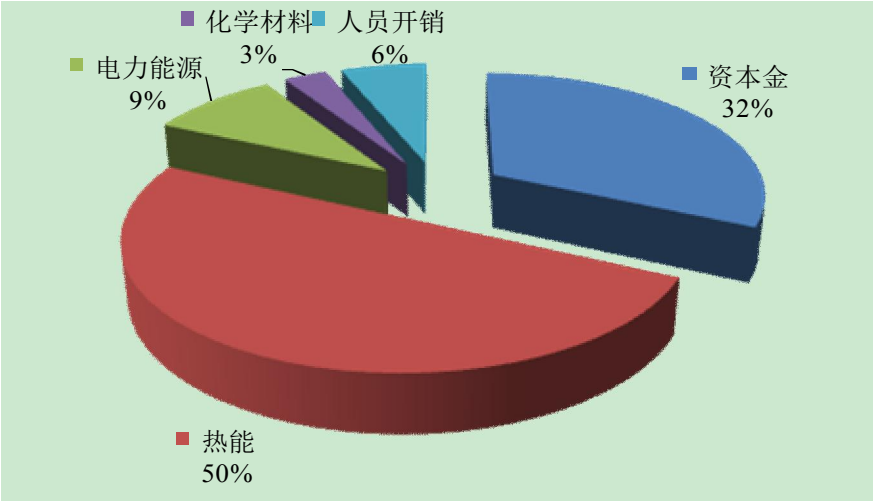

图 3-10　大型热法海水淡化主要成本构成示意图

多级闪蒸（MSF）和反渗透（RO）是最常用的海水淡化方法，利用这两种方法淡化不同规模海水或微咸水的成本见表 3-5。从表中可以看出，多级闪蒸更广泛的应用于大规模的海水淡化，而相比，反渗透方法的应用范围更广。表中数据仅作参考，实际制水成本受进水水质、出水水质、处理能力、厂区位置等多种因素影响。

表 3-5　不同规模 MSF 和 RO 法淡化海水/微咸水对应成本
（Karagiannis and Soldatos，2008）

海水淡化方法	海水/微咸水	淡化规模（m^3/d）	成本（€/m^3）
MSF	海水	23000-528000	0.42-1.40
RO	微咸水	<20	4.50-10.32
		20-1200	0.62-1.06
		40000-46000	0.21-0.43
	海水	<100	1.20-15.00

		250-1000	1.00-3.14
		1000-4800	0.56-1.38
		15000-60000	0.38-1.30
		100000-320000	0.36-0.53

（3）新能源发电技术成本分析

在 2005 年全球新能源全球报告中（Worldwatch Institute，2005），给出了最常用的新能源技术的应用规模及对应的成本，详见表 3-6。从表中可以看出，这些成本中有许多都高于传统能源发电技术（典型传统能源发电一般情况下为 2-5 美分/kWh，但在高峰用电期要远高于此）。较高的成本和其他市场壁垒使得大部分新能源技术的发展将继续依赖于政策的扶持。然而，这种经济竞争力并不是静止不变：新能源技术成本在下降的同时，传统能源技术的成本可能也在下降（如伴随燃气轮机技术的发展）。未来价格竞争力最大的不确定性来自于化石燃料的价格，化石燃料的价格直接影响着传统能源成本，但无关新能源技术。

表 3-6　新能源技术类型与对应的规模、成本（Worldwatch Institute，2005）

分类	技术	规模	能耗成（美分/kWh）	成本趋势与成本降低的潜力
发电	大型水电	10-18000 MW	3-4	稳定
	小型水电	1-10MW	4-7	稳定
	陆上风电	1-3MW	4-6	全球产能每增加一倍，成本即降低 12~18%。未来成本还会随风电场优化、叶片/发动机设计及电力系统的改进进一步下降。
	海上风电	1.5-5MW	6-10	市场较小，未来成本会随着市场的成熟与技术的改进而降低。
	生物质能	1-20MW	5-12	稳定
	地热能	1-100MW	4-7	自从 20 世纪 70 年代开始成本就一直下降。当下开发成本还会随着开采、钻孔和热提取技术的改进而降低。
	屋顶太阳能光伏	峰值:2-5kW	20-40	未来成本会由于太阳能光伏成本的降低以及逆变器和系统平衡组件的改进而持续下降。
	太阳热能	1-100MW	12-18	未来成本会随规模的扩大和技术的改进而降低。
热水能/热能	生物质热	1-20MW	1-6	稳定
	太阳能热水/采暖	集热面积：2-5m^2	2-25	成本稳定或者随规模、新材料、较大收集器和质量的改进适度下降。
	地热	1-100MW	0.5-5	同以上地热能。

农村（离网）能源	小型水电	100-1000kW	5-10	稳定
	微型水电	1-100kW	7-20	随效率的改进成本适度降低从而达到稳定
	微微型水电	0.1-1kW	20-40	随效率的改进成本适度降低从而达到稳定
	生物质气化炉	20-5000kW	8-12	随着未来技术的革新成本下降从而具有巨大的潜力
	小型风机	3-100kW	15-30	随着技术进步成本适度降低
	家庭用风机	0.1-1kW	20-40	随着技术进步成本适度降低
	村级微电网	10-1000kW	25-100	随着太阳能和风能组件成本的降低而降低
	太阳能家用系统	20-100W	40-60	随着太阳能组件成本的降低而降低

国际能源机构在本世纪初对新能源技术的价格竞争力作出如下描述："除大型水电和可燃的新能源与废料发电以外，与批发电价相比，新能源发电的平均成本不具备广泛的竞争力。然而，根据技术、应用范围和位置，新能源发电的价格可以与电网零售或者商业热力产品相竞争。在最好的条件下（系统设计最优，地理位置与资源可利用），生物质能、小型水电、风力机地热能发电厂的生产成本可以控制在 2-5 美分/kWh。在一些特定的地方，许多生物质能以及地热能的利用都是非常具有竞争力的。"在一些技术完备的区域，尽管较冷的气候区所拥有的太阳能资源较少并且所需热源更高，但太阳能热水器相比传统热水器更具有竞争力。

（4）利用新能源进行海水淡化的组合技术成本

一般来讲，相比于传统海水淡化方法，现阶段利用新能源进行海水淡化所需的投资和制水成本仍然较高。Papapetrou et al（2010）给出了常用的新能源与海水淡化的技术组合以及相对应的规模、能耗、制水成本和发展阶段，详见表 3-7。其中表中所列的制水成本仅供参考，因为制水成本受区域风能太阳能等资源状况、进水水质、运行状况、人员工资福利等多重因素影响，具体新能源海水淡化厂的投资和制水成本还需视情况而定。

表 3-7　常用新能源海水淡化技术成本对比（Papapetrou et al., 2010）

新能源-海水淡化技术组合	规模（m^3/d）	能耗（kWh/m^3）	制水成本（欧元/m^3）	发展阶段
太阳能蒸馏	<0.1	受太阳能所限	1-5	应用
太阳能-多效蒸馏	1-100	热耗：100；电耗：1.5	2-5	研究与设计、应用

太阳能-膜蒸馏	0.15-10	热耗：150-200	8-15	研究与设计
集中式太阳能-多效蒸馏	>5000	热耗：60-70；电耗：1.5-2	1.8-2.2	研究与设计
光伏发电-反渗透	<100	电耗：4-5	9-12	研究与设计、应用
风电-反渗透	50-2000	电耗：4-5	5-7（100m^3/d 以下）；1.5-4（1000m^3/d 左右）	研究与设计、应用
风电-机械压缩蒸馏	<100	电耗：11-14	4-6	基础研究

新能源事业部承担的水利部公益性行业科研专项《独立风电海水（苦咸水）淡化技术研究》在实验室模拟的基础上，研发并优化设计了基于交流母线的装机 20kW（15kW 风机、5kW 光伏电池）产水 20m^3/d 的新能源独立电网海水淡化系统，并在福建省东门屿进行了为期 1 年的现场示范运行，最后还根据现场运行情况提出了规模化应用方案。研究结果表明，整个系统使用寿命设定为 20 年，按照静态投资计算，系统安装及运行费用的单位产水成本为 13.47 元/m^3。在规模化应用阶段，考虑投资收益、配水费用等因素，产水 200m^3/d、1500m^3/d 方案的综合制水成本分别可控制在 8.00 元/ m^3 和 9.50 元/ m^3 左右。

3.2 点评和对水平的分析

新能源海水淡化是缓解能源危机、解决沿海或者海岛地区淡水缺乏的有力途径。风能海水淡化和太阳能海水淡化是目前应用最广泛和最经济的新能源海水淡化技术，也是新能源海水淡化技术研究的重点和热点。与风能匹配利用的海水淡化技术主要有反渗透（RO）、机械蒸汽压缩（MVC）和电渗析（ED）法，其中 RO 法由于能耗低、系统简单、可快速启动和变负荷运行，适用于各种规模，目前应用也最为广泛，而 MVC 法在没有其他热源的条件下启动缓慢，采用不稳定风能驱动能耗偏高，且运行维护较为复杂，不适合风能单独驱动，ED 法用于海水淡化能耗过高，不经济，但可用于风电苦咸水淡化。利用光热直接进行海水淡化的技术主要有多效蒸馏（MED）、多级闪蒸法（MSF）和传统的太阳能海水淡化技术，其中 MED 和 MSF 法将太阳能与现代海水淡化技术相结合，效率和经济性得到明显提升，但其工艺相对复杂，适用于较大规模的太阳能热法海水淡化，而传统太阳能海水淡化工艺具有操作和运行维护简单，适用于地广人稀、没有高新技术和专业技能的偏远村庄或者

居民区；利用光伏发电进行海水淡化方法有 RO 和 ED 法，其中 RO 法采用模块化设计，易扩展，可在各种规模下使用，但对运行维护有较高要求，适合缺水缺电的居民相对集中的地区使用。受恶劣的海上施工和运行维护条件的制约，海洋能利用技术发展缓慢，目前还处于小规模示范运行阶段，经济性差，因此有关海洋能海水淡化的研究与应用较少，研究工作主要集中于波浪能海水淡化，尚无实用技术可供利用。核反应堆可以提供稳定经济的热能和电能，传统的热法和膜法均可与其进行很好的匹配，经济性好，无明显的技术障碍。受核电开发的复杂性限制，核能海水淡化目前仅用于大型工程，不适用于解决地广人稀的边远地区和规模较小的中小岛屿的淡水资源短缺问题。同时，核事故的严重后果使得对核能海水淡化的安全性要求极高，在很大程度上限制了该技术的工程应用，因此到目前为止，世界上利用核能进行海水淡化工程较少，实际应用经验还较为有限。

除核能、生物质和地热外，其他新能源都具有时间上的波动性和不稳定性，虽然某些海水淡化技术可以适应其输出功率的变化，如传统的太阳能海水淡化，或经过有针对性的进行变负荷改进后可以适应其变化，如 RO 法和 MVC 法，但是过于频繁的启停会增加设备的运行和维护难度，同时也给设备的可靠性和使用寿命带来不利影响。因此如何减轻新能源功率输出的波动性一直是新能源海水淡化研究的热点和难题。可行的办法有在整个系统中增加储能设备和多种能源互补利用。新能源在空间和时间上一般都具有较好的互补性，通过互补利用能有效降低整个系统的功率输出波动幅度，提高系统的稳定性和经济性，但无法消除其波动性。因此，绝大多数新能源海水淡化系统都配有储能设备，尤其是以电能驱动的新能源海水淡化系统。实际应用的储能技术分为储热、储机械能（压缩空气、飞轮储能和抽水蓄能）和储电（超导储能、超级电容和蓄电池），其中以蓄电池应用最为普遍，也是目前研究的重点和热点，大容量的蓄电池已处于示范应用阶段，随着逐步进入商业化应用，将会对基于新能源发电的海水淡化规模化推广应用起到积极的推动作用。

除储能技术和多种能源互补利用之外，多种海水淡化技术联合运行也有利于提高新能源海水淡化系统的经济性和稳定性，比如光伏海水淡化中联合采用 RO 与 MVC 法，利用海水冷却光伏电池提高光伏电池发电效率的同时加热海水，可较好兼顾 MVC 设备的启动速度、系统可调节性和降低产水能耗，具有更好的系统产水弹性和经济性，可能成为新能源海水淡化技术研究的下一个热点。

另外，目前中小规模的新能源开发成本偏高，新能源海水淡化中提高能量利用效率在降低产水成本中至为关键，如热法中的蒸汽潜热回用和 RO 法中的高压浓盐水的能力回收都是行之有效的技术手段。采用常规能源的中小型海水淡化系统因能量回收装置所占投资比例偏大，实际应用中无明显经济优势，因此目前针对中小型系统的能量回收技术研究较少。近年来国外虽陆续推出部分中小型能量回收产品，但品种偏少，价格高，工程设备选型中往往受到限制。国内相关科研单位近几年也先后开展了一些研究工作，并申请了专利，但至今尚未形成真正可行的技术，中小型能量回收装置完全依赖进口。因此，开发出具有自主知识产权的中小型能量回收装置，逐步打破国外产品的垄断，形成完整的国产反渗透海水淡化产业链，已成为我国新能源海水淡化产业发展的关键。

3.3 对我院本专题发展的若干建议

新能源海水淡化是一新兴的涉及多学科交叉的课题，近年来随着国家政策的大力扶持取得了一定的研究进展，但总体研究仍处于初级阶段。我院中水科技新能源事业部，近几年在国家“十一五”支撑项目以及院专项、公司专项的支持下，主要在风能和太阳能海水淡化方面取得了一定的研究成果。针对新能源海水淡化现存的主要问题、结合自身基础条件，现提出我院在未来发展中在该领域应该着重关注的几个方向。

（1）风能、太阳能、海洋能等新能源互补利用研究

多种新能源互补利用在提高能量输出的稳定性、可靠性和经济性已成为业内共识，但风能、太阳能和海洋能无论是在资源分布上还是开发利用形式和输出特点都存在明显的差异，因此要实现新能源的高效利用，首先应对研究区域的可利用新能源进行系统调查、分析和评价，掌握其变化规律，并进行有针对性的以电力电子设备为代表的系统控制设备设计和全系统结构设计，从源头上减轻新能源发电系统的输出功率的波动性，减少系统储能设备配置容量，从而提高系统的整体效率和经济性。

（2）新能源与海水淡化耦合系统优化设计研究

基于经济性和设备能源利用效率的考虑，新能源独立供电系统中储能设备配置容量一般不大，无法满足常规海水淡化设备供电的可靠性要求，因此需要进行新能

源与海水淡化耦合系统优化设计研究，对常规海水淡化设备进行实时变负荷改造，并增加相应的保护措施，使其在一定程度上可以适应新能源输出功率波动的特点，从而对独立供电系统提供支撑，提高系统的可靠性。

（3）中小型反渗透海水淡化系统能量回收装置的设计与研发

配置能量回收装置已成为反渗透海水淡化降低单位产水能耗和提高工程经济性的重要措施，而中小规模新能源发电成本明显高于大型常规能源发电成本，因此配置能量回收装置已经成为中小型新能源海水淡化系统的必然选择。由于历史的原因，有关中小型海水淡化设备的能量回收技术研究较少，仅国外有少量产品可供选用，且在新能源工程应用有很大的局限性。为打破国外技术垄断，增强能量回收装置对新能源输出功率波动的适应性，促进新能源海水淡化技术的全面推广应用，我院应在已有工作基础上继续加大设计与研发力度，攻克技术难关。

（4）中小型海水淡化预处理方案优化设计

进水水质对反渗透膜的寿命和产水质量有重要影响，进入系统前一般要对海水进行比其他海水淡化方法更为严格的预处理，以降低海水中杂质含量和硬度。小型海水淡化系统因规模的限制，预处理工艺的投资和成本是设计中的重要考量因素，在预处理方法方面有其自身的特点，无法简单采用大型海水淡化工程的工艺和经验，且目前尚无对其进行专门研究的报导。因此，目前绝大多数的中小型海水淡化工程尚无经济实用的预处理工艺和方案，我院可联合中水科技新能源事业部与水环境所，通过实验等手段共同开展中小型海水淡化预处理方案优化设计与效益分析等方面的研究。

（5）太阳能 RO/MVC 法联产海水淡化技术研究

RO 法是目前能耗最低的海水淡化技术，而热法中 MVC 法能源利用效率最高，其能耗接近 RO 法，且产水质量明显高于 RO 法（RO 含盐量一般为 200mg/L，而 MVC 法含盐量一般低于 10mg/L），但常规 MVC 法在频繁启动条件下能耗明显升高。如在光伏海水淡化中联合采用 RO 与 MVC 法，利用海水冷却光伏电池提高光伏电池发电效率的同时加热海水，可实现系统的快速启动，提高系统的整体产水效率和产水质量，预期比单独采用 RO 法具有更好的系统产水弹性和经济性，可能成为新能源海水淡化技术研究的下一个热点，目前尚无开展相关研究的报导。我院可组织有关单位和部门进行前期可行性论证、方案设计和系统研发工作，引领新能源海水淡

化技术发展趋势，占领新能源海水淡化技术制高点。

（6）适用于海水淡化的太阳能集热器自动追踪技术研究

利用太阳能进行海水淡化时，太阳能的利用效率是重要的考核指标之一。太阳能收集器自动跟踪可以提高太阳能的利用效率，近期国内外学者在太阳能收集器自动跟踪系统的结构设计和性能优化方面都取得了一定的进展，但实际投产应用的大多是用在太阳能热水器等其他领域，直接应用于海水淡化的较少，我院可以组织相关单位开展对其进行专项研究。

参考文献

1. A J Crerara, C L Pritchard. Wave powered desalination: experimental and mathematical modelling[J]. Desalination, 1991,81:391-398.
2. Akili D Khawaji, Ibrahim K Kutubkhanah, Jong-Mihn Wie. Advances in seawater desalination technologies [J].Desalination, 2008, 2(21): 47-69.
3. C Charcosset, C Falconet, M Combe. Hydrostatic pressure plants for desalination via reverse osmosis[J].Renewable Energy,2009,34:2878-2882.
4. Denver Cheddie, Aatma Maharajh, Aneil Ramkhalawan, et al. Transient modeling of wave powered reverse osmosis [J].Desalination, 2010,260:153-160.
5. Douglas C Hicks, George R Mitcheson, Charles M Pleass, et al. Delbouy:ocean wave-powered seawater reverse osmosis desalination systems[J]. Desalination, 1989, 73: 81-94.
6. Ettouney, H. M. et al. Evaluating the economics of desalination[J]. Chemical Engineering Progress, 2002, 12: 32.
7. Fergal O Rourke, Fergal Boyle, Anthony Reynolds. Tidal energy update 2009[J]. Applied Energy, 2010, 87: 398-409.
8. Goossen John. Nuclear process heat desalination[R]. GCEP-Fission Energy Workshop, 2007,11:29-30.
9. GREENLEE L F，LAWLER D F，FREEMAN B D，et al． Reverse osmosis desalination: Water sources, technology, and today’s challenges［J］. Water Research，2009，43: 2317－2348．
10. IEA-ETSAP and IRENA. Water Desalination Using Renewable Energy. Technology Brief, 2012, 112:1-24.
11. JoséA. Carta, Jaime Gonzálezb, Vicente Subielac. The SDAWES project: an ambitious R&D prototype for wind-powered desalination[J]. Desalination, 2004, 161: 33-48.
12. Karagiannis I. C. and Soldatos P. Water desalination cost literature: review and assessment, Desalination, 2008, 223, 448-456
13. Kuiwen Zhao, Yefeng Liu. Theoretical study on multi-effect solar distillation system driven by

tidal energy[J]. Desalination, 2009, 249:566-570.
14. LBG-Guyton Associates. Brackish groundwater manual for Texas Regional Water Planning Groups. Prepared for Texas Water Development Board. 2003,31.
15. Lianying Zhang, Hongfei Zheng, Yuyuan Wu. Experimental study on a horizontal tube falling-film evaporation and closed circulation solar desalination system[J]. Renewable Energy, 2003, 28:1187-1199.
16. Lidia Roca, Luis J Yebra, Manuel Berenguel, et al. Modeling of a solar seawater desalination plant for automatic operation purposes[J].Solar Energy Engineering, 2008, 130: 041009-1-8.
17. Loupasis S. Technical analysis of existing RES desalination schemes (Commission of the European Communities Directirate-General for Energy and Transport, Altener Programme, Renewable Energy Driven Desalination Systems – REDDS, Contract number 4. 1030/Z/01-081/2001), 2002.
18. Lourdes Garcia Rodriguez. Renewable energy applications in desalination: state of the art[J]. Solar Energy, 2003, 75:381-393.
19. M Reya, F Lauro. Ocean thermal energy and desalination[J]. Desalination, 1981, 39: 159-168.
20. Markus Forstmeier, Fredrik Mannerheim, Fernando D'Amato, et al. Feasibility study on wind-powered desalination [J].Desalination, 2007, 203: 463-470.
21. Matt Folley, Baltasar Peate Suarez, Trevor Whittaker. An autonomous wave powered desalination system[J].Desalination,2008,220:412-421.
22. Matt Folley, Trevor Whittaker. The cost of water from an autonomous wave-powered desalination plant [J].Renewable Energy, 2009,34:75-81.
23. N Sharmila, Purnima Jalihal, A K Swamy, M Ravindran. Wave powered desalination system[J]. Energy, 2004, 29:1659-1672.
24. P A Davies. Wave-powered desalination: resource assessment and review of technology[J]. Desalination, 2005, 168:97-109.Papapetrou M, Wieghaus M, Biercamp C (2010). Roadmap for the development of desalination powered by renewable energy. Tech. rep., Prodes. http://www.prodes-project.org/. Accessed 10 Nov 2010.
25. PICCARI, Francesco, Maria. Method and plant for desalting seawater exploiting hydrostatic pressure: WO, 006323[P].1999-11-02.
26. REN21 Renewable Energy Policy Network. 2005. “Renewables 2005 Global Status Report.” Washington, DC: Worldwatch Institute.
27. Robin Pelc, Rod M Fujita. Renewable energy from the ocean [J].Marine Policy, 2002, 26: 471-479.
28. S Al Kharabsheh. An innovative reverse osmosis desalination system using hydrostatic pressure [J].Desalination, 2006, 196: 210-214.
29. S Al-Kharabsheh, D Yogi Goswami. Theoretical analysis of a waterdesalination system using low grade solar heat [J].Solar Energy Engineering,2004,126:775-780.
30. Soteris A Kalogirou. Seawater desalination using renewable energy sources [J]. Progress in

Energy and Combustion Science, 2005, 31: 242-281.
31. Soteris A. Kalogirou. Solar thermal collectors and applications [J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2004,30: 231-295.
32. Younos T. The economics of desalination Universities Council on Water Resources. Contemporary Water Research & Educatin. 2005,132(12):39-45.
33. 敖火庚. 太阳能海水淡化产业[J]. 高科技与产业化，2011,11:54-56.
34. 邓勇. 风光互补反渗透海水淡化系统的应用研究[D]. 汕头大学，2011,6.
35. 冯宾春，赵卫全. 风能海水苦咸水淡化现状[J]. 水利水电技术，2009,40（9）：8-11.
36. 冯厚军，谢春刚. 中国海水淡化技术研究现状与展望[J]. 化学工业与工程，2010,27（2）：103-109.
37. 龚广杰，黄鑫炎，郝梦龙等. 太阳能海水淡化技术[J]. 太阳能，2009，8:20-25.
38. 金志江，张素娟，黄国根等. 基于海洋温差能的海水淡化小试系统的建立及试验研究[J]. 能源与环境，2008(4): 41-45.
39. 李杰，陶如钧. 风能海水淡化概述[J]. 净水技术，2008,27（1）：9-11.
40. 李书恒，郭伟，朱大奎. 潮汐发电技术的现状与前景[J]. 海洋科学，2006, 30(12): 82-86.
41. 李正良，郑宏飞，等. 降膜蒸发多效回热吸收式太阳能海水淡化系统的实验研究[J]. 太阳能学报，2007,28(11)：1187-1193.
42. 力诺瑞特自主研发建成太阳能集热器自动跟踪测试系统, http://www.linuo-paradigma.com, 2010-01-06.
43. 林润生，叶家玮，刘林. 相对垂荡运动浮子在海水淡化中的应用探讨[J]. 广东造船，2010, (1) :26-27.
44. 刘美琴，郑源，赵振宙等. 波浪能利用的发展与前景[J]. 海洋开发与管理, 2010, 27 (3):80-82.
45. 刘业凤，胡海涛. 太阳能海水淡化新技术综述[J]. 水处理技术，2011,37（8）：7-14.
46. 刘业凤，赵奎文. 潮汐能太阳能多效蒸馏海水淡化装置的研究[J].太阳能学报，2009，30(3)：311-315.
47. 刘振华，陈玉明. 紧凑传热管束受限空间内沸腾强化换热特性[J]. 太阳能学报，1999, 20(4) :444-448.
48. 陆晓楠，黄立培，杨仲庆. 中国光伏发电产业的现状及发展趋势[J]. 高科技与产业化，2009（2）：86-88.
49. 吕贝，邱河梅，张宇. 太阳能光伏发电产业现状及发展[J]. 华电技术，2010,32（1）：73-76.
50. 栾维新等. 我国海水利用产业化研究[M]. 北京：海洋出版社，2010.
51. 潘献辉，王生辉，杨守志等. 反渗透海水淡化能量回收技术的发展及应用[J].中国给水排水，2010, 26 (16) :16-19.
52. 潘献辉，赵亮. 反渗透海水淡化膜法预处理技术研究进展[J]. 工业水处理，2007,27（6）：13-15.

53. 钱伯章. 太阳能光伏发电成本及展望[J]. 中国环保产业，2009（4）：24-28.
54. 秋雨豪，刘振华. 紧凑满液型叉排管束蒸发换热器内水的沸腾强化换热特性[J]. 太阳能学报，2005,26（5）：708-711.
55. 任曲勇，施慧雄. 海岛风能海水淡化组合体系研究[J]. 海洋学研究，2009, 27(2)：111-118.
56. 孙业山，游亚戈，马玉久等. 波浪能海水淡化的应用研究[J].可再生能源，2007, 25(2): 76-78.
57. 田禾，张于峰等. 直热式太阳能海水淡化系统试验研究[J]. 水处理技术，2009, 35(6): 53-56.
58. 王生辉，潘献辉等. 具备长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.
59. 王迅，李赫，谷琳. 海水温差能发电的经济和环保效益[J].海洋科学，2008, 32(11): 84-87.
60. 王越，苏保卫，徐世昌等. 反渗透海水淡化技术最新研究动态[J].膜科学与技术，2004, 24(2): 49-52.
61. 魏海波，龚肖南等. 真空磁控溅射法沉积平板集热器板芯选择性吸收涂层[J].真空，2010, 47 (3): 5-8.
62. 吴光夏，王维娜，钟慧. 在海水深处进行海水淡化的装置：中国，1654342A[P]. 2005-08-17.
63. 宿建峰，李和平等. 太阳能热发电技术的发展现状及主要问题[J]. 华电技术，2009 (31) :78-82.
64. 宿俊山，高季章. 利用风为能源的海水淡化[J]. 水利水电技术，2009,40（9）：25-31.
65. 徐晅阔，王世昌. 反渗透淡化系统余压水力能量回收装置的研究进展[J]. 水处理技术，2002, 28 (2) :63- 65.
66. 许骏，王志，王纪孝等. 反渗透膜技术研究和应用进展[J]. 化学工业与工程，2010,27（4）：351-357.
67. 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): 79-91.
68. 余立群.风能直接驱动的反渗透海水淡化装置：中国，200320105925.X [P]. 2004-12-08.
69. 原郭丰，张鹤飞. 新型闭式太阳能海水淡化装置及其性能模拟[J]. 水处理技术， 2007 (33)：42-45,35.
70. 翟辉，代彦军等. 大型平板型/真空管太阳集热器阵列排布问题研究[J]. 太阳能学报，2008,29(5):564-56.
71. 张海春，范会生，陆阿定. 新能源海水淡化技术应用进展及其在舟山的现状分析[J]. 水处理技术，2010,36（10）：23-27.
72. 张海春，陆阿定. 反渗透海水淡化预处理技术研究现状[J]. 能源环境保护，2010,24（3）：1-8.
73. 张建中，杜鹏飞等. 反渗透海水淡化能量回收装置的研制[J].水处理技术，2010, 3(6): 42-46.
74. 张小艳，郑宏飞等. 多级迭盘式太阳能蒸馏器的实验研究[J].水处理技术，2003， 29(4)：

233-235.
75. 张亚军，贾海军. 核能海水淡化及山东核能海水淡化厂研究进展. 海水淡化与水再利用海水淡化西湖论坛，2006.
76. 张耀明. 中国太阳能光伏发电产业的现状与前景[J]. 能源研究与利用，2007（1）：1-6.
77. 赵河立，初喜章，阮国岭. 核能在海水淡化中的应用[J]. 海洋技术，2002,21（4）：17-21.
78. 朱俊昊，何中杰. 自主调节跟踪的太阳能装置及控制方法[J]. 机电工程，2012,29（5）：45-548.
79. 郑宏飞，何开岩等. 太阳能海水淡化技术[M]. 北京：理工大学出版社，2005.
80. 郑章靖，徐青，李军等. 海洋能海水淡化研究进展[J]. 水处理技术，2011,37（9）：24-27.
81. 朱树中 译，高立 校. 核能海水淡化的历史和前景（一）[J]. 国外核新闻，2003,4：29-32.
82. 朱相丽. 世界光伏发电产业的现状及原材料的发展趋势[J].新材料产业，2008(11): 86-88.

负责人：张金接

参加人：冯宾春、符　平、莫为泽、赵卫全、张俊娥、杨锋、邢占清、黄立维、王　春、张子皿、周建华、秦鹏飞