

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.04.003

我国反渗透海水淡化能量回收装置研究与应用现状

翁晓丹, 张希建, 张建中, 何钦雅, 余浩, 陈亮, 陶如钧
(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: 能量回收装置可以大幅降低反渗透海水淡化的产水能耗和制水成本,是反渗透海水淡化系统的标准配置。简述了水力透平式和功交换式能量回收装置的发展历程与其特点,综述了我国能量回收装置研究现状,比较了典型能量回收装置的性能,列举了 2005 年以来能量回收装置在我国万吨级以上反渗透海水淡化工程中的应用情况。功交换式能量回收装置的能量回收效率高达 90% 以上,已经成为海水淡化行业研究和应用的热点,其中国产功交换式能量回收装置已在国内大型反渗透海水淡化工程中开始应用。

关键词: 反渗透海水淡化; 能量回收装置; 功交换

中图分类号: TU99 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2021)04-0011-05

Research and Application Status of Energy Recovery Devices for Desalination of Reverse Osmosis Sea Water System in China

WENG Xiao-dan, ZHANG Xi-jian, ZHANG Jian-zhong, HE Qin-ya, YU Hao,
CHEN Liang, TAO Ru-jun

(PowerChina Huadong Engineering Corporation Limited, Hangzhou 311122, China)

Abstract: The energy recovery devices (ERD) can greatly reduce the energy consumption and cost of freshwater production of reverse osmosis seawater desalination, which is the standard configuration of reverse osmosis seawater desalination system. This paper described the development history and characteristics of hydraulic turbine and work-exchange ERD, summarized the present research of the ERD in China, compared the performance of the typical ERD, and listed the application projects of ERD for large-scale reverse osmosis system in China after 2005. As the energy recovery efficiency is higher than 90%, the work-exchange ERD are emerging as a research and application hot spot in seawater desalination industry. In addition, Chinese-made work-exchange ERD are developed and have been successfully applied in domestic large-scale reverse osmosis seawater desalination project.

Key words: reverse osmosis seawater desalination; energy recovery device; work-exchange

反渗透海水淡化过程需要消耗大量电能来提高进水海水压力以克服其渗透压,高能耗是海水淡化产水成本较高的主要原因之一^[1]。通常,反渗透海水淡化脱盐系统的运行压力为 5.0 ~ 6.0 MPa,从膜

堆排出的浓海水余压仍有 4.8 ~ 5.8 MPa。按照 40% 的回收率计算,浓海水中还蕴含着约 60% 的进入膜堆的高压原海水的压力能,具有巨大的回收价值和效益^[2]。能量回收装置可以回收上述高压浓

基金项目: 浙江省科技计划项目(2018C03034)

通信作者: 张希建 E-mail: zhang_xj3@ecidi.com

海水中蕴含的压力能,用于提高进水海水压力,从而显著降低反渗透海水淡化技术的能耗和产水成本,已成为反渗透海水淡化系统的标准配置。简述了能量回收装置的发展历程与其特点,比较了典型能量回收装置的性能,综述了我国能量回收装置研究与应用现状,为海水淡化工程提供借鉴。

1 能量回收装置的发展简况

20世纪60年代,反渗透海水淡化技术开始应用于海水淡化市场,当时膜法产水能耗约为 $12 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$,相比于热法产水能耗没有明显优势。为了降低反渗透海水淡化产水能耗,20世纪80年代和90年代在全球范围内掀起了能量回收装置的研究热潮,相继研发出水力透平式能量回收装置和功交换式能量回收装置^[3-4]。

20世纪80年代初,水力透平式能量回收装置进入海水淡化市场。此类装置利用高压浓盐水驱动透平转动,使其中的压力能转换为机械能(轴功),再利用机械能辅助同轴的电机驱动高压泵旋转,通过减小电机转矩,降低电机能量消耗,以达到节能的目的,其能量回收效率仅为45%~70%,代表性产品主要有 Reverse Running Pump Turbine, Francis Turbine 和 Pelton Wheel 等。在此基础上,水力透平式能量回收装置逐渐得到改进,比如将透平和泵两部分通过同一根轴结合为一个整体,利用高压浓盐水驱动透平的同时带动同轴的泵,使流经的原海水增压。此类装置在结构上有了较大改进,提高了装置的可靠性、易安装性和能量回收效率。然而,能量回收过程中还是存在“压力能-机械能-压力能”的能量形式转换,因此这类能量回收装置的能量回收效率仍然不高,约为65%~80%,代表性产品主要有美国 PEI 公司的 Turbo Charger, Turbo Booster 和瑞士 Calder AG 公司的 Pelton Turbine 等。

20世纪90年代初,功交换式能量回收装置开始应用于反渗透海水淡化系统。此类装置利用功交换原理,采用高压浓海水对低压原海水直接增压,是液-液直接传递压力的一种能量回收装置,称为功交换式能量回收装置。由于功交换式能量回收装置没有能量形式的变化,能量回收效率大幅提升,可达90%以上。代表性产品主要有瑞士 Calder AG 公司的 DWEER、德国 KSB 公司的 SalTec DT、挪威 Aqualyng 公司的 Recuperator、美国 ERI 公司的 PX 和浙江帕尔公司的 IPX 等。目前新建的反渗透海水

淡化系统大多采用此类能量回收装置。按照功交换式能量回收装置输出的高压原海水是否达到反渗透膜操作压力,可分为等压型和差压型两类。按照能量传递过程的实现形式,又可分为阀控式和转子式。

2 我国能量回收装置的研究现状

国内研究能量回收装置的时间较晚,2000年以后,随着能量回收技术在国内外各大反渗透海水淡化工程中的广泛应用,天津大学、大连理工大学、中国科学院广州能源研究所、杭州水处理技术研究开发中心、天津海水淡化与综合利用研究所和中国电建集团华东勘测设计研究院等单位开始对适用于反渗透海水淡化系统的能量回收技术和装置进行探索性的研究。经过了十多年的探索,取得了一系列研究成果和专利技术,国内能量回收装置的研究逐渐从工作原理、模型模拟、核心部件、控制系统、样机开发走向了工程试运行与产品性能优化。天津大学王越等^[5-7]于“十五”规划期间在国内率先建成阀控余压能量回收试验平台,对功交换阀控式能量回收装置中海水混合过程、流体切换器、控制系统等进行了系统研究,研制出功交换阀控式能量回收装置,并在天津规模为 $1\,000 \text{ m}^3/\text{d}$ 的反渗透海水淡化示范项目中进行试验研究,现场试验结果表明,该能量回收装置的能量回收效率可达93%~95%。2007年,中科院广州能源所孙业山等^[8]采用1个低压三通电磁阀和1个高压三通电磁阀替代 DWEER 能量回收装置的8个止回阀,研制出适用于小型反渗透海水淡化装置的差动式能量回收装置,试验研究结果表明,该装置的能量回收效率可达97%。2008年,杭州水处理中心张希建、张建中等^[9-11]采用1个插装式三位四通电磁阀和4个止回阀作为控制阀组,发明了一种水压驱动的切换阀组,采用对顶或者刚性联接的两个差动水压缸作为压力交换容器,最终研制出阀控式能量回收装置(HVCPX-1000),并在 $1\,000 \text{ m}^3/\text{d}$ 反渗透海水淡化示范工程中进行了试运行,结果表明,该装置的能量回收效率可达96%以上。2013年,天津海水淡化所苏慧超等^[12]研制出一种具备双活塞功能的差动式能量回收装置(BoostPE300),并在灵山岛 $300 \text{ m}^3/\text{d}$ 的海水淡化工程中进行了试运行,结果表明,该装置的能量回收效率可达94.72%。

上述研究主要针对功交换阀控式能量回收装置,并形成了相应的产品,能量回收效率超过90%。

此外,也有部分研究在进行功交换转子式能量回收装置的开发^[13]。2006 年,大连理工大学常宇清^[14]首次采用外动力驱动转子的方式,研制出外驱型转子式能量回收装置(PD-RPE),并进行了试验研究,结果表明,转子端面与定子之间的间隙是影响各种试验结果的最主要因素,该装置的最大掺混率约为 11.8%,最高能量回收效率仅为 53.5%。2010 年,杭州帕尔水处理科技有限公司发明了一种马达驱动的功交换转子式能量回收装置^[15],采用低速马达驱动转子旋转,选用新型高分子耐磨工程塑料和耐腐蚀不锈钢材料为主材,在关键的配流面上采用自紧密封结构和水润滑静压支撑技术,使高压配流面上基本无泄漏,该装置不但效率高,而且安全稳定、体积小、寿命长、噪声低。2013 年,天津大学程百花^[16]对基于聚醚醚酮-陶瓷和陶瓷-陶瓷的端面摩擦副配对的转子式能量回收装置进行了试验研究,结果表明,试验前期,该能量回收装置的泄漏量约为 0.6 m³/h,能量回收效率约为 94%,但到试验后期,聚醚醚酮端面磨损严重,导致该装置的泄漏量逐渐增加,不能维持高压环境,能量回收效率逐渐降低。2015 年,中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司张希建等^[17]利用电动机和转子式能量回收装置的结构特点,利用交变电流产生旋转磁场驱动永磁转子旋转,设计了一种电驱动转子式能量回收装置,该装置中心轴无需伸出交换器外连接动力,简化了能量回收装置的结构,与水力冲击驱动的能量回收装置相比,具有转速稳定且可控制的优点。同年,浙江帕尔公司自主研发了功交换转子式能量

回收装置(IPX-110,单台 IPX-110 处理流量为 105 m³/h),其能量回收效率高达 97.3%,并成功地在六横 10 × 10⁴ m³/d 海水淡化二期续建 1 × 10⁴ m³/d、三期 1 × 10⁴ m³/d 工程中得到应用(见图 1),实现国产能量回收装置在大中型反渗透海水淡化工程应用上的零突破,标志着我国成为世界上少数几个掌握大型海水淡化系统能量回收技术的国家之一。

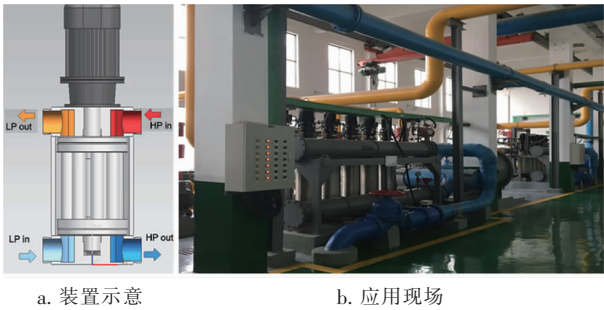


图 1 功交换转子式能量回收装置及其应用现场

Fig. 1 Work-exchange ERD and its application

3 我国能量回收装置的应用现状

表 1 为目前市场上常用的几种能量回收装置的性能对比^[2]。表 1 中,前两种为透平式能量回收装置,与高压泵串联安装,不需要设置压力提升泵,通过减小高压泵扬程可降低能耗,但能量回收效率较低,用于中小型海水淡化系统中效率更低。后 4 种为功交换式能量回收装置,与高压泵并联安装,通过减少高压泵流量而降低能耗,在很宽的流量范围内均能达到很高的能量回收效率。其中等压型功交换式能量回收装置需增设压力提升泵对高压原海水进一步增压,以达到反渗透膜操作压力要求。

表 1 能量回收装置性能对比

Tab. 1 Performance comparisons of the typical ERD

装置名称	制造商	类型	流量/(m ³ ·h ⁻¹)	泄漏率/%	混合率/%	效率/%
Pelton Turbine	Calder AG	透平式	15 ~ 1 200	可忽略	可忽略	45 ~ 80
Turbo Charger	PEI	透平式	100 ~ 1 600	可忽略	可忽略	45 ~ 80
DWEER	Calder AG	阀控式	15 ~ 350	1 ~ 3	≤2.5	90 ~ 98
SalTec DT	KSB	阀控式	40 ~ 400	可忽略	≤1.5	90 ~ 98
PX	ERI	转子式	4.5 ~ 68	3 ~ 5	≤4.0	90 ~ 98
IPX	浙江帕尔	转子式	1.5 ~ 110	1 ~ 2	≤1.5	90 ~ 98

根据《2017 年全国海水利用报告》,总结了 2005 年以来能量回收装置在我国万吨级以上反渗透海水淡化工程中的应用情况,具体见表 2。我国透平式能量回收装置主要在 2005 年前投产的反渗透海水淡化工程中应用。此后,在已建成的海水淡

化工程中,功交换式能量回收装置尤其是功交换转子式能量回收装置被普遍采用。其中,国产能量回收装置 IPX,自 2016 年在浙江舟山六横海水淡化厂投产运行以来,已有 3 年。据悉,该批装置共 12 台,运行稳定,节能效果明显。

表2 2005年以来能量回收装置在我国万吨级以上反渗透海水淡化工程中的应用

Tab.2 Application of ERD for large-scale reverse osmosis seawater desalination projects in China after 2005

项 目	工程名称	规模/($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	工程所用能量回收装置
2005 年	河北唐山大唐王滩电厂海水淡化工程	10 000	Turbo Charger
2006 年	浙江台州玉环华能电厂海水淡化工程	35 000	PX
2007 年	辽宁大连庄河电厂海水淡化工程	14 400	PX
2007 年	辽宁大连松木岛石化园区 I 期海水淡化工程	20 000	PX
2007 年	辽宁华能营口电厂海水淡化工程	10 000	PX
2007 年	山东青岛黄岛电厂 II 期海水淡化工程	10 000	PX
2007 年	浙江温州乐清电厂海水淡化工程	21 600	PX
2009 年	辽宁大连化工集团大孤山热电厂海水淡化工程	20 000	PX
2009 年	天津大港新泉海水淡化工程	100 000	PX
2009 年	山东青岛碱业 I 期海水淡化工程	10 000	PX
2010 年	辽宁红沿河核电有限公司海水淡化工程	11 000	PX
2010 年	浙江舟山普陀区六横岛 I 期 I 海水淡化工程	10 000	PX
2010 年	福建宁德核电厂海水淡化工程	10 800	PX
2010 年	广东揭阳惠来电厂海水淡化工程	12 000	PX
2011 年	河北曹妃甸北控阿科凌海水淡化工程	50 000	Recuperator
2011 年	浙江舟山普陀区六横岛 I 期 II 海水淡化工程	10 000	PX
2011 年	广东惠州平海电厂海水淡化工程	18 000	Turbo Booster
2013 年	山东青岛百发海水淡化工程	100 000	PX
2014 年	浙江舟山普陀区六横岛 II 期 I 海水淡化工程	12 500	PX
2014 年	浙江浙能舟山六横电厂海水淡化工程	24 000	PX
2015 年	浙江三门核电海水淡化工程	16 000	PX
2015 年	浙江台州第二发电厂海水淡化工程	18 000	PX
2016 年	山东海阳核电站海水淡化工程	16 800	PX
2016 年	山东青岛董家口海水淡化工程	100 000	PX
2016 年	浙江舟山普陀区六横岛 II 期 II 海水淡化工程	20 000	IPX
2016 年	广东汕尾华润海丰电厂海水淡化工程	20 000	PX
2018 年	沧州临港中科保海水淡化工程	25 000	IPX

4 结语

我国对反渗透海水淡化能量回收装置的研究较晚,但已开发出阀控式和转子式功交换能量回收装置,并在国内海水淡化工程中开始应用,然而,相比于国际先进产品的市场份额,还有不小的差距。随着我国反渗透海水淡化工程项目的建设和推广,国产能量回收装置在海水淡化工程中的应用将更加成熟,这对推动国产能量回收装置的深入研究,降低海水淡化工程投资,促进海水淡化产业发展具有十分重要的意义。

参考文献:

- [1] 曲磊,杨晓超. 反渗透海水淡化(SWRO)能量回收技术应用分析[J]. 山东化工,2015,44(16):110-112.
QU Lei, YANG Xiaochao. The analysis of reverse osmosis (SWRO) desalination energy recovery technology application [J]. Shandong Chemical Industry, 2015, 44(16): 110-112 (in Chinese).
- [2] 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.
PAN Xianhui, WANG Shenghui, YANG Shouzhizhi, et al. Development and use of energy recovery technology in RO seawater desalination [J]. China Water & Wastewater, 2010, 26(16): 16-19 (in Chinese).
- [3] WILLIAM T A, DAVID S L. A twelve-year history of large scale application of work-exchanger energy recovery technology [J]. Desalination, 2001, 138(1/2/3): 201-206.
- [4] 刘中良,刘宁,李艳霞,等. 反渗透海水淡化压力能回收装置进展[J]. 北京工业大学学报,2014,40(9): 1408-1417.
LIU Zhongliang, LIU Ning, LI Yanxia, et al. Progress of pressure energy recovery devices in reverse osmosis

- seawater desalination system [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2014, 40(9): 1408 - 1417 (in Chinese).
- [5] 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, 2003.
- WANG Yue. Research on Valve-controlled Residual Pressure Energy Recovery Device for Reverse Osmosis Desalination System [D]. Tianjin: Tianjin University, 2003 (in Chinese).
- [6] 王越, 王世昌, 徐世昌. 反渗透海水淡化能量回收装置中盐水和海水混合过程研究[J]. 膜科学与技术, 2005, 25(6): 35 - 39.
- WANG Yue, WANG Shichang, XU Shichang. Mixing behavior of feed and concentration in SWRO energy recovery cylinder and its computer simulation [J]. Membrane Science and Technology, 2005, 25(6): 35 - 39 (in Chinese).
- [7] 陈艳艳, 王越, 王照成, 等. 海水淡化能量回收装置用分腔式切换器研究[J]. 化工进展, 2012, 31: 2162 - 2166.
- CHEN Yanyan, WANG Yue, WANG Zhaocheng, *et al.* Experimental study on separate-chamber type fluid switcher of energy recovery device for SWRO [J]. Chemical Progress, 2012, 31: 2162 - 2166 (in Chinese).
- [8] 孙业山, 马玉久, 游亚戈, 等. 反渗透海水淡化中差动式能量回收装置的研究[J]. 水处理技术, 2007, 33(6): 67 - 70.
- SUN Yeshan, MA Yujiu, YOU Yage, *et al.* Experimental study of differential energy-recovery device for reverse osmosis seawater desalination [J]. Technology of Water Treatment, 2007, 33(6): 67 - 70 (in Chinese).
- [9] 张希建, 张建中, 谭斌, 等. 一种水压驱动的切换阀组: 200810122234. 8 [P]. 2009 - 06 - 17.
- ZHANG Xijian, ZHANG Jianzhong, TAN Bin, *et al.* A Water-driven Switching Valve Group: 200810122234. 8 [P]. 2009 - 06 - 17 (in Chinese).
- [10] 张建中, 杜鹏飞, 张希建, 等. 反渗透海水淡化能量回收装置的研制[J]. 水处理技术, 2010, 36(6): 42 - 46.
- ZHANG Jianzhong, DU Pengfei, ZHANG Xijian, *et al.* Study of energy recovery device for reverse osmosis seawater desalination system [J]. Technology of Water Treatment, 2010, 36(6): 42 - 46 (in Chinese).
- [11] 张希建, 张建中, 赵浩华, 等. 一种阀控式能量回收单元装置: 201110410950. 8 [P]. 2012 - 01 - 21.
- ZHANG Xijian, ZHANG Jianzhong, ZHAO Haohua, *et al.* A Valve-controlled Energy Recovery Unit: 201110410950. 8 [P]. 2012 - 01 - 21 (in Chinese).
- [12] 苏慧超, 王生辉, 赵河立, 等. BoostPE300 能量回收装置在海水淡化工程中的应用[J]. 中国给水排水, 2013, 29(15): 130 - 133.
- SU Huichao, WANG Shenghui, ZHAO Heli, *et al.* Application of BoostPE300 energy recovery device in seawater desalination project [J]. China Water & Wastewater, 2013, 29(15): 130 - 133 (in Chinese).
- [13] 李炎, 谢春刚, 张铭. 外驱式能量回收装置的设计与研究[J]. 海洋技术, 2012, 31(4): 64 - 67.
- LI Yan, XIE Chungang, ZHANG Ming. Design and research on energy recovery device driven by external power [J]. Ocean Technology, 2012, 31(4): 64 - 67 (in Chinese).
- [14] 常宇清. 反渗透海水淡化系统外驱型旋转式压力交换器试验研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2006.
- CHANG Yuqing. A Study on Plus-driven Rotary Pressure Exchanger for Seawater Reverse Osmosis Process [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2006 (in Chinese).
- [15] 陈杭英. 一种功交换式能量回收装置: 201010197604. 1 [P]. 2010 - 10 - 20.
- CHEN Hangying. A Power Exchange Energy Recovery Device: 201010197604. 1 [P]. 2010 - 10 - 20 (in Chinese).
- [16] 程百花. 基于不同材料摩擦副的旋转式能量回收装置性能研究[D]. 天津: 天津大学, 2013.
- CHENG Baihua. Performance Studies of Rotary Energy Recovery Device Based on Different Material Friction Pairs [D]. Tianjin: Tianjin University, 2013 (in Chinese).
- [17] 张希建, 陶如钧, 张建中, 等. 电驱动转子式压力交换能量回收装置: 201520070743. 6 [P]. 2015 - 08 - 05.
- ZHANG Xijian, TAO Rujun, ZHANG Jianzhong, *et al.* Electrically Driven Rotor Pressure Exchange Energy Recovery Device: 201520070743. 6 [P]. 2015 - 08 - 05 (in Chinese).

作者简介: 翁晓丹 (1990 -), 男, 浙江龙游人, 博士, 高级工程师, 主要从事海水淡化工艺与膜材料研究开发。

E-mail: weng_xd@ecidi.com

收稿日期: 2019 - 03 - 11

修回日期: 2019 - 04 - 21

(编辑: 丁彩娟)