

海水淡化能量回收装置系统设计

肖建群, 李鹏

引用本文:

肖建群, 李鹏. 海水淡化能量回收装置系统设计[J]. 南方能源建设, 2021, 8(S1): 75-79.

XIAO Jianqun, LI Peng. Design of Seawater Desalination Energy Recovery Unit System[J]. *Southern Energy Construction*, 2021, 8(S1): 75-79.

相似文章推荐 (请使用火狐或IE浏览器查看文章)

Similar articles recommended (Please use Firefox or IE to view the article)

[脱硫废水零排放技术在清远电厂中的应用探讨](#)

Applicable Discussion of the FGD Waste Water Zero-discharging Treatment Process for QingYuan Power Plant

南方能源建设. 2016, 3(4): 78-81,101 <https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2016.04.016>

[一种新型太阳能冷热联产系统的设计](#)

Design of a New Solar-powered Combined Heating and Cooling System

南方能源建设. 2015, 2(2): 76-79 <https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2015.02.014>

[±1100kV换流站户内直流场智能巡检系统设计](#)

Intelligence Inspection System Design of DC Indoor Switch Yard in ±1100 kV Converter Substation

南方能源建设. 2017, 4(4): 118-123 <https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2017.04.022>

[区域级综合能源系统多能耦合优化研究](#)

Multi-energy Complementary Optimization Research on Local Area Integrated Energy System

南方能源建设. 2017, 4(2): 24-28 <https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2017.02.003>

[安全仪表系统在二次再热机组的应用研究](#)

Application of Safety Instrument System in Secondary Reheat Unit

南方能源建设. 2020, 7(4): 107-112 <https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2020.04.017>

海水淡化能量回收装置系统设计

肖建群[✉], 李鹏

(中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广州 510663)

摘要: [目的] 能量回收装置作为反渗透法海水淡化系统中的重要节能设备, 其系统设计至关重要。[方法] 从设计原则、工作原理、设计计算、设备配置与选择等方面, 对三种最常用的能量回收装置系统设计进行了详细的比较。[结果] 系统设计比较后得出了三种能量回收装置的优、缺点, 供设计人员选择。[结论] 为设计人员提供了具有针对性且有效的设计指导, 提高了设计效率。

关键词: 反渗透法; 海水淡化; 能量回收装置; 系统设计

中图分类号: TM611; P747

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2021)S1-0075-05

开放科学(资源服务)二维码:



Design of Seawater Desalination Energy Recovery Unit System

XIAO Jianqun[✉], LI Peng

(China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, China)

Abstract: [Introduction] As an important energy-saving equipment in reverse osmosis seawater desalination system, the system design of energy recovery unit is very important. [Method] In this paper, from the aspects of design principle, working principle, design calculation, equipment configuration and selection, the three most commonly used energy recovery unit system designs were compared in detail. [Result] After the system design comparison, the advantages and disadvantages of the three energy recovery units are obtained for designers to choose. [Conclusion] This paper provides designers with targeted and effective design guidance and improves design efficiency.

Key words: reverse osmosis; seawater desalination; energy recovery unit; system design

2095-8676 © 2021 Energy China GEDI. Publishing services by Energy Observer Magazine Co., Ltd. on behalf of Energy China GEDI. This is an open access article under the CC BY-NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

海水淡化是一种从海水中获取淡水的技术, 是解决岛屿和沿海地区缺水问题的一个重要手段^[1]。目前主要的海水淡化技术包括膜法和蒸馏法, 膜法以反渗透(SWRO)为主, 蒸馏法以多级闪蒸(MSF)和低温多效蒸发(LT-MED)为主^[2]。

由于反渗透法海水淡化技术具有设备投资省、能耗低、建设周期短等优点, 目前已成为世界范围内应用最多的海水淡化技术之一^[3]。

反渗透法海水淡化系统设计的关键技术在于海水反渗透系统和能量回收装置系统的设计。关于海水反渗透系统设计已有很多相关研究, 本文针对能

量回收装置系统的设计进行详细阐述, 旨在为设计人员提供相关设计指导, 提高设计效率。

1 系统功能和装置类型

能量回收装置是反渗透法海水淡化系统中的重要节能设备, 其作用是把海水反渗透系统高压浓水的压力能量回收再利用, 从而降低制水能耗和运行成本。能量回收装置系统主要包括能量回收装置及其附属设备^[4]。

目前应用最多的能量回收装置主要有三种类型: ERI公司的PX能量回收装置和TURBO涡轮式能量回收装置、CALDER公司的ERT涡轮直联式能量回收装置^[4-5]。

收稿日期: 2020-06-17 修回日期: 2020-08-06

基金项目: 中国能建广东院科技项目“海水反渗透及能量回收装置设计指导书”(EV01211W)

2 设计原则

在反渗透海水淡化系统设计中选择能量回收装置时, 需要综合考虑多个因素来选取最佳性价比的节能产品, 主要包括设备投资、节能效率、可靠性、易维护性、易操作性等^[6]。

运行全过程的节能效率是能量回收装置选择中最重要的参数, 设计时应应对各种能量回收装置进行设计工况下的产水能耗计算分析, 并综合考虑设备投资成本、维护成本、操作简便性等其他因素, 选取最经济、适用的产品。

单位产水能耗可按式(1)进行计算:

$$P = \frac{P_n}{Q_c} \quad (1)$$

$$P_n = \frac{Q \times p \times \rho \times g \times 100}{\eta_1 \times \eta_2 \times \eta_3 \times 3600 \times 1.013} \quad (2)$$

式中: P 为单位产水能耗 (kW/m^3); P_n 为轴功率 (kW); Q_c 为反渗透产水流量 (m^3/h); Q 为泵流量 (m^3/h); p 为泵压力 (MPa); ρ 为流体密度 (t/m^3); g 为重力加速度, 取 $9.8 \text{ (m/s}^2)$; η_1 为水泵效率 (%); η_2 为电机效率 (%); η_3 为变频器效率 (%)。

3 PX 能量回收装置系统设计

3.1 工作原理

PX 能量回收装置系统包括 PX 能量回收装置、变频增压泵。其工作原理是: 反渗透提升泵出水分成两路进入反渗透装置: 其中一路通过高压泵增压至反渗透的进水压力, 其流量稍高于反渗透产水流量; 另一路进入 PX 能量回收装置, 通过与反渗透浓水进行直接的水力能量交换, 将 90%~95% 的浓水能量转换为增压泵进水能量, 使增压泵进水压力大幅增加至接近反渗透的进水压力, 再由增压泵小幅升压至反渗透的进水压力^[7-9]。PX 能量回收装置的工作原理参见图 1。

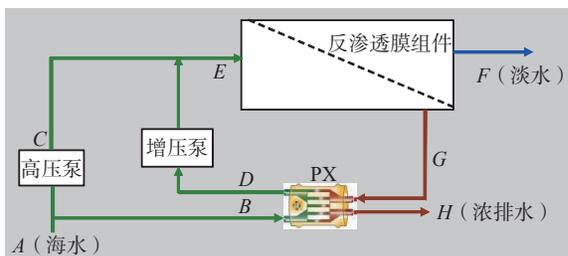


图1 PX能量回收装置工作原理图

Fig. 1 Working principle of PX energy recovery unit

图1中各流量均有如下关系:

$$\begin{aligned} A &= E = B + C = F + G \\ B &= D \\ G &= H \end{aligned} \quad (3)$$

式中: A 为单套海水反渗透系统海水进水流量 (m^3/h); B 为 PX 装置海水进水流量 (m^3/h); C 为高压泵流量 (m^3/h); D 为 PX 装置海水出水流量 (m^3/h); E 为单套海水反渗透系统海水进水流量 (m^3/h); F 为单套海水反渗透系统产水流量 (m^3/h); G 为 PX 装置进浓水流量 (m^3/h); H 为 PX 装置排放浓水流量 (m^3/h)。

3.2 设计输入数据

反渗透装置参数: 产水量、回收率、进水压力和跨膜压差。PX 能量回收装置参数: 浓水排出压力。高压泵和增压泵参数: 泵效率、电机效率。

3.3 设计计算

PX 能量回收装置系统的工艺计算可以通过制造商 ERI 公司的专用软件进行计算。

PX 装置本体能量回收效率可按以下公式计算:

$$\eta = \frac{D \times P_D + H \times P_H}{G \times P_G + B \times P_B} \times 100\% \quad (4)$$

式中: η 为能量回收效率 (%); P_B 为海水进 PX 装置的压力 (MPa); P_D 为海水出 PX 装置的压力 (MPa); P_G 为浓水进 PX 装置的压力 (MPa); P_H 为浓水出 PX 装置的压力 (MPa); 其他符号见之前定义。

值得注意的是, 该装置由于采用直接的液体-液体能量传递, 反渗透浓水与 PX 装置的海水进水有一定量的混水, 一般为 2%~3%, 混水将使反渗透装置进水含盐量小幅增加, 制水能耗有所增大。反渗透装置进水盐度可根据以下公式进行计算:

$$\text{反渗透装置进水盐度} = \text{原水盐度} \times (1 + \text{混盐率}) \quad (5)$$

混盐率可根据以下经验公式计算:

$$\text{混盐率} \approx \text{系统回收率} \times 0.0624 \quad (6)$$

比如回收率为 45%, 则混盐率为 2.81%。

3.4 设备配置与选择

1) PX 能量回收装置的最高适用压力为 8.3 MPa。可根据流量要求并联多个 PX 能量交换元件。表 1 列出了 PX 能量交换元件的型号和流量。

PX 能量交换元件应根据海水淡化装置出力尽量选用大流量型号, 以减少并联元件的数量, 提高效率。

表 1 PX 能量交换元件的型号和流量

Tab. 1 Model and flow of PX energy exchange element

型号	流量/(m ³ ·h ⁻¹)	型号	流量/(m ³ ·h ⁻¹)
PX-15 (PX-15B)	2.3~3.4	PX-120 (PX-120B)	20.7~27.3
PX-25 (PX-25B)	3.6~5.7	PX-140 (PX-140B)	27.3~34.1
PX-40 (PX-40B)	5.9~9.1	PX-200	36~45
PX-60 (PX-60B)	9.3~13.6	PX-220	41~50
PX-90 (PX-90B)	13.9~20.4	—	—

2) 当多台 PX 装置并联连接时, 系统连接方式可以采用 Z-flow 或 U-flow 两种方式。Z-flow 是 PX 装置母管进出口在相反方向, U-flow 是 PX 装置母管进出口在相同方向。通常 U-flow 比 Z-flow 具有更好的流量分配效果, 并且采用 U-flow 方式, PX 装置进水流速可以达到 3.7 m/s, 从而可以有效的减小进水管径; 而采用 Z-flow 方式, PX 装置进水流速为 2.1 m/s。

3) 为防止气蚀, PX 装置浓水排放管应设置浓水节流阀以产生背压, 防止气蚀破坏。浓水排放压力最低不小于 0.06 MPa, 一般按 0.1 MPa 设计。

4) 海水反渗透增压泵应采用变频控制, 以稳定反渗透装置的进水流量。

4 TURBO 涡轮式能量回收装置系统设计

4.1 工作原理

TURBO 涡轮式能量回收装置工作原理是: 能量回收装置采用联轴双涡轮的型式, 通过反渗透浓水能量对涡轮的推动力, 使高压泵出口水流的压力提高到反渗透装置所要求的进水压力。^[8] 该装置的能量回收效率通常在 70%~80%, 单台装置流量越大, 效率越高。TURBO 能量回收装置的工作原理参见图 2。

4.2 设计输入数据

反渗透装置参数: 产水量、回收率、进水压力和跨膜压差。TURBO 能量回收装置参数: 能量回收效率。高压泵参数: 泵效率、电机效率。

4.3 设计计算

TURBO 能量回收装置的工艺计算可以通过制

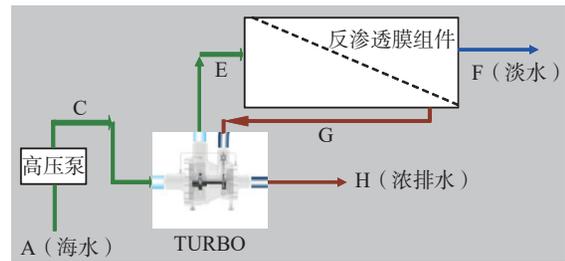


图 2 TURBO 能量回收装置工作原理图

Fig. 2 Working principle of TURBO energy recovery unit

造商 ERI 公司的专用软件进行计算。

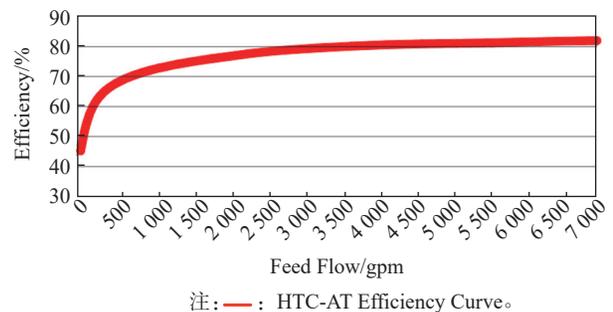
TURBO 能量回收装置的工艺计算也可以根据制造商提供的效率曲线人工计算:

$$\Delta P = \frac{(G \times P_G - H \times P_H) \times \eta}{C} \quad (7)$$

$$P_C = P_E - \Delta P \quad (8)$$

式中: ΔP 为 TURBO 装置能量转换净压力 (MPa); P_C 为高压泵出口压力 (MPa); P_E 为海水反渗透装置进口压力 (MPa); 其他符号见之前定义。

TURBO 装置能量回收效率, 可以通过图 3 查得。



注: —: HTC-AT Efficiency Curve.

图 3 HTC-AT 效率曲线

Fig. 3 HTC-AT efficiency curve

4.4 设备配置与选择

1) TURBO 涡轮式能量回收装置由于其流量越高, 能量回收效率越高的特点, 适合用于大型海水淡化系统。其单台设备最大流量可达 1 100 m³/h。表 2 列出了 TURBO 能量回收装置的型号和流量。

2) 与 TURBO 装置相配合的高压泵, 可以采用离心泵或柱塞泵:

当高压泵采用离心泵时, 通常在高压泵出口与 TURBO 装置之间设置一个节流阀。在高压泵启动时, 该阀门可以人工调节, 从而降低高压泵和电机的启动荷载。

当高压泵采用柱塞泵时, 在高压泵出口管路上

表2 TURBO 能量回收装置的型号和流量

Tab. 2 Model and flow of TURBO energy recovery unit

型号	流量/(m ³ ·h ⁻¹)	型号	流量/(m ³ ·h ⁻¹)
HTC-AT 25	4~9	HTC-AT 600	119.2~170.3
HTC-AT 50	9~14.75	HTC-AT 900	170.3~238.4
HTC-AT 75	14.75~20.4	HTC-AT 1200	238.4~340.6
HTC-AT 100	20.4~28.4	HTC-AT 1800	340.6~476.9
HTC-AT 150	28.4~42.7	HTC-AT 2400	476.9~806.2
HTC-AT 225	42.7~59.5	HTC-AT 3600	806.2~953.7
HTC-AT 300	59.5~85.2	HTC-AT 4800	953.7~1 362.5
HTC-AT 450	85.2~119.2	—	—

禁止使用节流阀。高压泵出口与TURBO装置之间应设置减震器。在TURBO装置出水和反渗透装置进水之间的管路上应设安全阀。

3) TURBO装置的低压浓水应背压排放。

5 ERT 涡轮直联式能量回收装置系统设计

5.1 工作原理

ERT 涡轮直联式能量回收装置的工作原理是：能量回收装置装有一台电动机和一个与反渗透高压泵直联的叶轮，通过反渗透装置排出的高压浓水推动能量回收装置的叶轮转动，叶轮又通过直联轴与电动机联合向高压泵输送能量，提供高压泵需要的动力，反渗透装置进水达到所需要的压力。该装置的能量回收效率通常在85%~90%。ERT能量回收装置的工作原理参见图4。

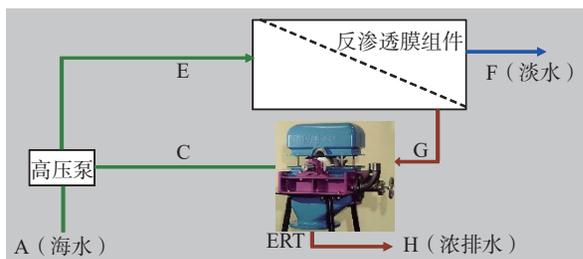


图4 ERT 能量回收装置工作原理图

Fig. 4 Working principle of ERT energy recovery unit

5.2 设计输入数据

反渗透装置参数：产水量、回收率、进水压力和跨膜压差。ERT 能量回收装置参数：能量回收效率。高压泵参数：泵效率、电机效率。

5.3 设计计算

ERT 能量回收装置的工艺计算可以通过制造商 CALDER 公司的专用软件进行计算。

ERT 装置能量转换净压力也可通过下式进行计算：

$$\Delta P = \frac{(G \times P_G - H \times P_H) \times \eta}{C} \quad (9)$$

$$P_C = P_E - \Delta P \quad (10)$$

上式中符号见之前定义。

5.4 设备配置与选择

1) ERT 涡轮直联式能量回收装置单台最大流量可达1 200 m³/h。表3列出了ERT能量回收装置的型号和流量。

表3 ERT 能量回收装置的型号和流量

Tab. 3 Model and flow of ERT energy recovery unit

型号	最大流量/(m ³ ·h ⁻¹)	型号	最大流量/(m ³ ·h ⁻¹)
RO-290-40-20	15	RO-350-80	200
RO-290-40-30	25	RO-310-100	250
RO-290-65	40	RO-350-100	250
RO-310-65	55	RO-310-80-2	330
RO-350-65	80	RO-350-80-2	330
RO-310-70	110	RO-310-100-2	550
RO-350-70	110	RO-350-100-2	650
RO-310-75	150	RO-310-100-4	900
RO-350-75	150	RO-350-100-4	1 200
RO-310-80	200	—	—

2) ERT 装置应设置浓水排放阀以调节流量并防气蚀。

6 能量回收装置布置与安装设计

1) 能量回收装置与高压泵、反渗透装置的相对位置尽量靠近布置，以减少高压不锈钢管道的长度^[6]。

2) 为防汽蚀，TURBO 能量回收装置低压浓水排放管路宜采用倒U型形设计，管道上端高于能量回收装置泵腔，以形成水封。

3) ERT 能量回收装置浓水排放管不可以产生背压排放。

4) 当能量回收装置噪音不能达标时，应采取隔离降噪措施。

7 三种能量回收装置的优、缺点

三种能量回收装置的优、缺点见表4。

表4 三种能量回收装置的优、缺点
Tab. 4 Advantages and disadvantages of the three energy recovery units

型式	优点	缺点
PX	能量回收效率高,可以达到90%~95%。 流量没有限制,可以多个并联;当一个损坏时系统仍可运行。 高压泵流量相对TURBO或ERT可减小50%~60%。	设备总投资较高。 运行噪音较高。 PX元件需要流量平衡和控制,运行控制和保护要求高。 启动时间长,技术高。 需要增压泵,占地相对较大。 PX元件易损坏,维护工作量相对较大。
TURBO	设备总投资低。 设备占地面积小。 高压泵扬程相对PX可降低37%~45%。 启动快,运行和维护简单。 进水流量越大,能量回收效率越高。	能量回收效率低。
ERT	设备总投资较低。 能量回收效率较高。 设备占地面积小。 运行和维护较简单。	能量回收效率较低。 需要浓水流量调节。

8 结 论

近十几年来,很多大、中型生产规模的海水淡化系统多以反渗透法海水淡化为首选。能量回收装置作为反渗透法海水淡化系统中的重要节能设备,其系统设计至关重要。

本文从设计原则、工作原理、设计计算、设备配置与选择等方面,对三种最常用的能量回收装置系统设计进行了详细的比较。系统设计比较后得出了三种能量回收装置的优、缺点,供设计人员参考。

参考文献:

- [1] 朱玉兰. 海水淡化技术的研究发展 [J]. 能源研究与信息, 2010, 26(2): 72-78.
ZHU Y L. Advances in the technologies for seawater desalination [J]. Energy Research and Information, 2010, 26(2): 72-78.
- [2] 林斯清, 张维润. 海水淡化的现状与未来 [J]. 水处理技术, 2000, 26(1): 7-12.
LIN S Q, ZHANG W R. The present situation and future of seawater desalination [J]. Technology of Water Treatment, 2000, 26(1): 7-12.

- [3] 谭永文. 反渗透海水淡化技术与工程进展 [C]//中国海水淡化与水再利用学会. 海水淡化与水再利用西湖论坛, 杭州, 2007. 杭州: 中国海水淡化与水再利用学会, 2007: 24-30.
TAN Y W. Reverse osmosis seawater desalination technology and engineering progress [C]// China Society for Desalination and Water Reuse. West lake forum on seawater desalination and water reuse, Hangzhou, 2007. Hangzhou: China Society for Desalination and Water Reuse, 2007: 24-30.
- [4] 高从堦, 周勇, 刘立芬. 反渗透海水淡化技术现状和展望 [J]. 海洋技术学报, 2016, 35(1): 1-14.
GAO C J, ZHOU Y, LIU L F. Status and prospect of reverse osmosis seawater desalination technology [J]. Journal of Ocean Technology, 2016, 35(1): 1-14.
- [5] 卢彦越, 胡仰栋, 徐冬梅, 等. 反渗透海水淡化系统的优化设计 [J]. 水处理技术, 2005(3): 9-14.
LU Y Y, HU Y D, XU D M, et al. Optimum design for reverse osmosis seawater desalination system [J]. Technology of Water Treatment, 2005(3): 9-14.
- [6] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国质量监督检验检疫总局. 火力发电厂海水淡化工程设计规范: GB/T 50619—2010 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2011.
Ministry of Housing and Urban Rural Development of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Code for designing of thermal power plants seawater desalination system: GB/T 50619—2010 [S]. Beijing: China Planning Press, 2011.
- [7] 杨恒, 徐金枝, 王荣海. 反渗透法海水淡化技术在大连石化公司的应用 [J]. 油气田环境保护, 2009, 19(2): 24-26+61.
YANG H, XU J Z, WANG R H. Application of seawater desalination by reverse osmosis membrane in Dalian petrochemical corporation [J]. Environmental Protection of Oil & Gas Fields, 2009, 19(2): 24-26+61.
- [8] 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 X H, WANG S H, YANG S Z, et al. Development and use of energy recovery technology in RO seawater desalination [J]. China Water & Wastewater, 2010, 26(16): 16-19.

作者简介:



肖建群

肖建群 (通信作者)

1977-, 女, 江西永新人, 高级工程师, 武汉水利电力大学环境工程学士, 主要从事发电厂水化学控制、工业给水和污水处理、垃圾渗滤液处理、海水淡化处理技术研究及设计 (e-mail) xiaojianqun@gedi.com.cn。

(责任编辑 李辉)