

汪程鹏, 王生辉, 王锐浩, 等. 反渗透技术能量回收装置的开发与标准完善[J]. 净水技术, 2025, 44(8): 1-8, 20.

WANG C P, WANG S H, WANG R H, et al. Development and standard improvement of RO technology for energy recovery device [J]. Water Purification Technology, 2025, 44(8): 1-8, 20.

反渗透技术能量回收装置的开发与标准完善

汪程鹏^{1,2,3}, 王生辉^{1,4,*}, 王锐浩¹, 田林¹, 杨志宏¹, 黄浩鹏²

(1. 自然资源部天津海水淡化与综合利用研究所, 天津 300192; 2. 天津市蓝十字膜技术有限公司, 天津 300270; 3. 山东海水淡化与综合利用产业研究院, 山东济南 257343; 4. 威海市海水综合利用产业技术研究中心, 山东威海 264200)

摘 要 【目的】 能量回收装置(ERD)是海水淡化重要的节能装备,已被广泛用于海水淡化、污水资源化、中水回用等水处理领域。随着能量回收技术的快速发展,集成柱塞式 ERD 的出现,现有的 2 项标准[《反渗透用能量回收装置》(HY/T 108—2008)、《反渗透能量回收装置通用技术规范》(GB/T 30299—2013)]已无法充分覆盖新型 ERD 的分类与性能评价,特别是在能量转换效率的计算上忽略了外置电机驱动的能量输入。这导致现有标准在评估当前技术发展水平及指导实际应用时存在显著不足,亟需进行修订和完善以适应 ERD 技术发展的新要求。【方法】 文章通过文献计量与专利分析,系统梳理了 ERD 发展历程,分析了透平式、功交换式和柱塞式 ERD 的技术特征与能效差异,特别是对 GB/T 30299—2013 标准中的功交换式 ERD 的类型进行详细地描述,重点指出现行标准未涵盖柱塞式 ERD、效率计算忽略外置电机驱动能量输入等关键问题。【结果】 文章提出间接和直接能量转换特性的新型分类方式,完善了功交换式 ERD 的类型描述,并针对标准中能量转换效率指标的科学性不足问题,倡议亟需建立其与机械效率、水力效率、容积效率等参数的关联关系,同时建议引入吨水能耗指标,考虑构建 ERD 与高压泵、反渗透膜及管网的协同能效评价方法。【结论】 文章提出的覆盖新型 ERD 的分类体系、效率计算模型、系统级能效评价方法等建议,为海水淡化技术的标准化发展提供理论支撑,对推动能量回收技术规范化的重要意义。

关键词 反渗透 海水淡化 能量回收装置 转换效率 标准

中图分类号: P747 文献标志码: A 文章编号: 1009-0177(2025)08-0001-09

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2025.08.001

Development and Standard Improvement of RO Technology for Energy Recovery Device

WANG Chengpeng^{1,2,3}, WANG Shenghui^{1,4,*}, WANG Ruihao¹, TIAN Lin¹, YANG Zhihong¹, HUANG Haopeng²

(1. The Institute of Seawater Desalination and Multipurpose Utilization, MNR <Tianjin>, Tianjin 300192, China;

2. Tianjin Blue Cross Membrane Technology Co., Ltd., Tianjin 300270, China;

3. Shandong Desalination and Comprehensive Utilization Industry Research Institute, Jinan 257343, China;

4. The Industrial Technology Research Center of Seawater Multipurpose Utilization, Weihai 264200, China)

Abstract [Objective] The energy recovery device (ERD) is a crucial energy-saving equipment for seawater desalination, which has been widely applied in water treatment fields such as seawater desalination, wastewater resource recovery, and reclaimed water reuse. With the rapid development of energy recovery technology and the emergence of integrated plunger-type ERDs, the existing two

[收稿日期] 2025-03-28

[基金项目] 国家(兵团)科技计划项目(2023AB034);山东省重点研发计划(2024CXGC010808);农业农村部西北绿洲节水农业重点实验室开放课题(2023OWSL-01);农业农村部盐碱土改良与利用(干旱半干旱区盐碱地)重点实验室开放基金项目(YJDKFJJ202401);天津市自然科学基金项目(22JCYBJC00660);天津市中央引导地方科技发展资金项目(24ZYCGYS00720);天津市科技计划项目(24YDTPJC00620);中央科研院所基础科研业务专项资金(JBYWF-2023-T04, K-JBYWF-2024-ZT06, K-JBYWF-2024-T06, K-JBYWF-2025-J02)

[作者简介] 汪程鹏(1982—),男,高级工程师,研究方向为海水淡化能量回收技术与装备, E-mail: cpwang2003@foxmail.com。

[通信作者] 王生辉(1979—),男,正高级工程师,研究方向为海水淡化技术与装备, E-mail: wang_sh04@126.com。

standards [Energy Recovery Device in Reverse Osmosis (HY/T 108—2008), General Technical Specifications for Energy Recovery Devices in Reverse Osmosis System(GB/T 30299—2013)] can no longer fully cover the classification and performance evaluation of new type of ERD. Especially in the calculation of energy conversion efficiency, the energy input of the external motor drive is ignored. This leads to significant deficiencies in the existing standards when evaluating the current level of technological development and guiding practical applications. There is an urgent need for revision and improvement to adapt to the new requirements of ERD technology development. [Methods] This research systematically reviewed the development history of ERDs through bibliometric and patent analysis, analyzed the technical characteristics and energy efficiency differences among turbine-type, work-exchange-type, and plunger-type ERDs. It provided a detailed description of the types of work-exchange-type ERDs specified in the GB/T 30299—2013 standard, highlighting key issues such as the absence of plunger-type ERDs in the current standard and the neglect of external motor drive energy input in efficiency calculations. [Results] This research proposed a new classification method based on indirect and direct energy conversion characteristics, improved the type description of work-exchange-type ERDs, and advocated for the urgent establishment of an correlation between energy conversion efficiency indicators and parameters such as mechanical efficiency, hydraulic efficiency, and volumetric efficiency to address the scientific inadequacy of energy conversion efficiency indice in the standard. Additionally, it suggested introducing energy consumption per ton of water and considering the construction of a collaborative energy efficiency evaluation system for ERDs, high-pressure pumps, reverse osmosis membranes, and pipe networks. [Conclusion] The proposed classification system, efficiency calculation model, and system-level energy efficiency evaluation method covering new ERDs provide theoretical support for the standardized development of seawater desalination technology and are of great significance for promoting the standardization of energy recovery technology.

Keywords reverse osmosis(RO) seawater desalination energy recovery device(ERD) conversion efficiency standard



王生辉,正高级工程师,现任自然资源部天津海水淡化与综合利用研究所副所长,兼任中国海洋学会、中国海洋工程咨询等学术组织职务。长期致力于海水淡化关键装备研发、设计与成果转化工作,突破国产化能量回收装置等核心装备“卡脖子”关键技术,自主化产品应用于永兴岛、三角岛等50余个岛屿重点工程,完成了3万t/d国内单机最大的工程装备研制,推动了我国海水淡化规模化、高质量发展。主持国家重点研发计划等省部级项目20余项,发表论文60余篇,获专利30余件(含国际PCT专利2项),主编专著1部、参编标准1项。曾获国家海洋工程科学技术特等奖,入选自然资源部科技创新领军人才,其团队获评自然资源部创新团队称号。

海水淡化是解决水资源短缺的有效途径,其规模化发展主要受成本和能耗制约。无论是热法还是膜法,海水淡化过程均属于能量密集型过程^[1-2]。反渗透作为主流技术之一,需通过高压泵提升进水压力以克服渗透压,产生的浓盐水中蕴含80%以上的余压能。能量回收装置(ERD)通过回收该余压能提升进水压力、降低高压泵扬程,实现节能降耗功效^[3-4]。ERD作为反渗透系统的核心节能装备,其应用已从海水淡化扩展至工业废水再生利用等领域^[5-8]。随着集成柱塞式等新型ERD的出现,现行标准《反渗透用能量回收装置》(HY/T 108—2008)和《反渗透能量回收装置通用技术规范》(GB/T 30299—2013)存在明显局限:未涵盖新型装置型式,且效率计算中忽略外置电机能量输入,影响评价科学性^[9-11]。现有国内外研究多聚焦单一装置类型或应用效果,缺乏系统性分类与能效评价方法。

针对上述问题,本文通过文献计量与专利分析,系统梳理能量回收技术发展现状,提出基于间接和直接能量转换特性的新型分类方法,建议建立能量转换效率与机械效率、水力效率的关联关系,并引入吨水能耗指标构建系统级能效评价体系。本文将为海水淡化技术标准化发展提供理论支撑,对推动能量回收技术规范化的重要意义。

1 ERD 发展概况

ERD的发展历程可分为4个主要阶段(表1)。

20世纪80年代,第一代透平式ERD应用于反渗透海水淡化系统,主要包括Pump Ginard公司的法兰西斯型透平,瑞士Calder AG公司的佩尔顿透平、反转型透平、卡普兰型透平等^[12]。其中,法兰西斯型透平实质是一种反转叶片式离心泵,存在工况适应性差的问题;佩尔顿透平通过喷射高压浓盐水驱动水轮旋转,其效率随浓盐水的压力和流量变化

表 1 ERDs 发展历程
Tab. 1 Development History of ERDs

项目	20 世纪 80 年代的 ERD	20 世纪 90 年代的 ERD	20 世纪 90 年代后期的 ERD	21 世纪的 ERD
产品	法兰西斯型透平 佩尔顿透平 反转型透平 卡普兰型透平	BMET 透平直驱泵 HTC (hydraulic turbo charger) HPB (hydraulic pressure booster)	PX iSave DWEER (dual work exchange energy recovery) Clark pump SalTec DT OSMOREC RO-KINETIC Isobarix	SALINOVA SWPE 装置
特点	独立透平结构, 能量转换效率不高	透平与增压泵集成结构, 能量转换效率较第一代产品得到提升	采用直接做功的工作原理, 能量损失少, 能量转换效率大于 90%	采用柱塞式结构, 并与电机、高压泵或增压泵相集成, 结构紧凑

波动较大。该代产品采用“水压能-机械能-水压能”的二级能量转换机制, 独立透平结构导致效率仅为 50%~70%。

20 世纪 90 年代, 第二代 ERD 问世, 典型代表产品包括有丹麦 Grundfos 公司生产的 BMET 透平直驱泵、美国 ERI 公司的 HTC (hydraulic turbo charger) 和美国 FEDCO 公司的 HPB (hydraulic pressure booster)^[12-13], 其结构如图 1(a) 所示, 采用离心泵和水力透平同轴的集成化紧凑型结构设计。BMET 的透平直驱泵包含透平、电机与增压泵, 透平回收的能量与电机供能一起驱动增压泵, 增压泵由电机通过皮带轮驱动, BMET 透平直驱泵位于高压泵入口; HTC 和 HPB 两者结构形式一样, 均采用透平与增压泵一体化设计, 一根转轴连接 2 个叶轮, 全部封装在一个壳体中, 浓盐水驱动叶轮旋转并驱动透平轴运行、增压泵工作输出机械功, HTC 和 HPB 安装在高压泵的出口。第二代 ERD 采用一体化叶轮结构, 将能量转换效率提升至 80%, 系统稳定性显著改善。

20 世纪 90 年代后期, 基于“功交换”原理的第三代 ERD 出现, 这代装置包括转子和活塞 2 种形式。转子式代表产品为美国 ERI 公司的 PX, 其结构如图 1(b) 所示; 丹佛斯的 iSave, 转子式能量交换是在高、低压液体在通道内直接接触并进行压力传递。活塞式代表产品有美国 FLOWSERVE 公司的 DWEER, 其结构如图 1(c) 所示; 美国 Spectra 公司的 Clark pump, 德国 KSB 公司的 SalTec DT, 瑞士的 OSMOREC, 西班牙的 RO-KINETIC, 美国的 Isobarix^[14]。活塞式能量交换过程中, 高、低压液体在水压缸内通过活塞隔离进行压力传递。由于第三

代能量回收过程只需经过“水压能-水压能”的一步能量转换, 能量转换更直接, 效率突破 90%。

21 世纪初, 第四代柱塞式装置开发出现[图 1(d)], 其采用柱塞泵-马达(反向柱塞泵)联动的结构设计, 马达回收浓盐水高压余能并转化为传动轴的机械能, 再连同电机一起驱动柱塞泵对海水进行增压^[15-16], 代表产品有德国 KSB 公司的 SALINOVA 和 Danfoss 的 SWPE^[13]。其突出特点是取消增压泵、高度集成, 特别适合小型反渗透系统^[17-20]。

2 ERD 现行标准

现行反渗透 ERD 标准主要包括 2 种标准:《反渗透用能量回收装置》(HY/T 108—2008) 和国家标准《反渗透能量回收装置通用技术规范》(GB/T 30299—2013)。《反渗透用能量回收装置》(HY/T 108—2008) 适用于反渗透海水或苦咸水淡化装置的生产与检验, 《反渗透能量回收装置通用技术规范》(GB/T 30299—2013) 明确指出了适用于反渗透法海水淡化、苦咸水淡化等脱盐系统的“功交换式”ERD^[21-22]。

2.1 ERD 分类

2 种标准均对 ERD 进行了系统分类, 《反渗透用能量回收装置》(HY/T 108—2008) 基于工作原理, 将其划分为 2 种大类 4 种小类(表 2); 《反渗透能量回收装置通用技术规范》(GB/T 30299—2013) 针对功交换式装置, 将其细分为 2 种大类 5 种小类(表 3)。

如表 2 所示, 往复切换水压缸式 ERD 采用环向、旋转和端面 3 种密封形式。图 2(a) 给出了 DWEER Lin X 阀的内部结构^[13], 采用双同轴活塞与圆柱形筒体结构, 通过外部驱动力实现活塞线性

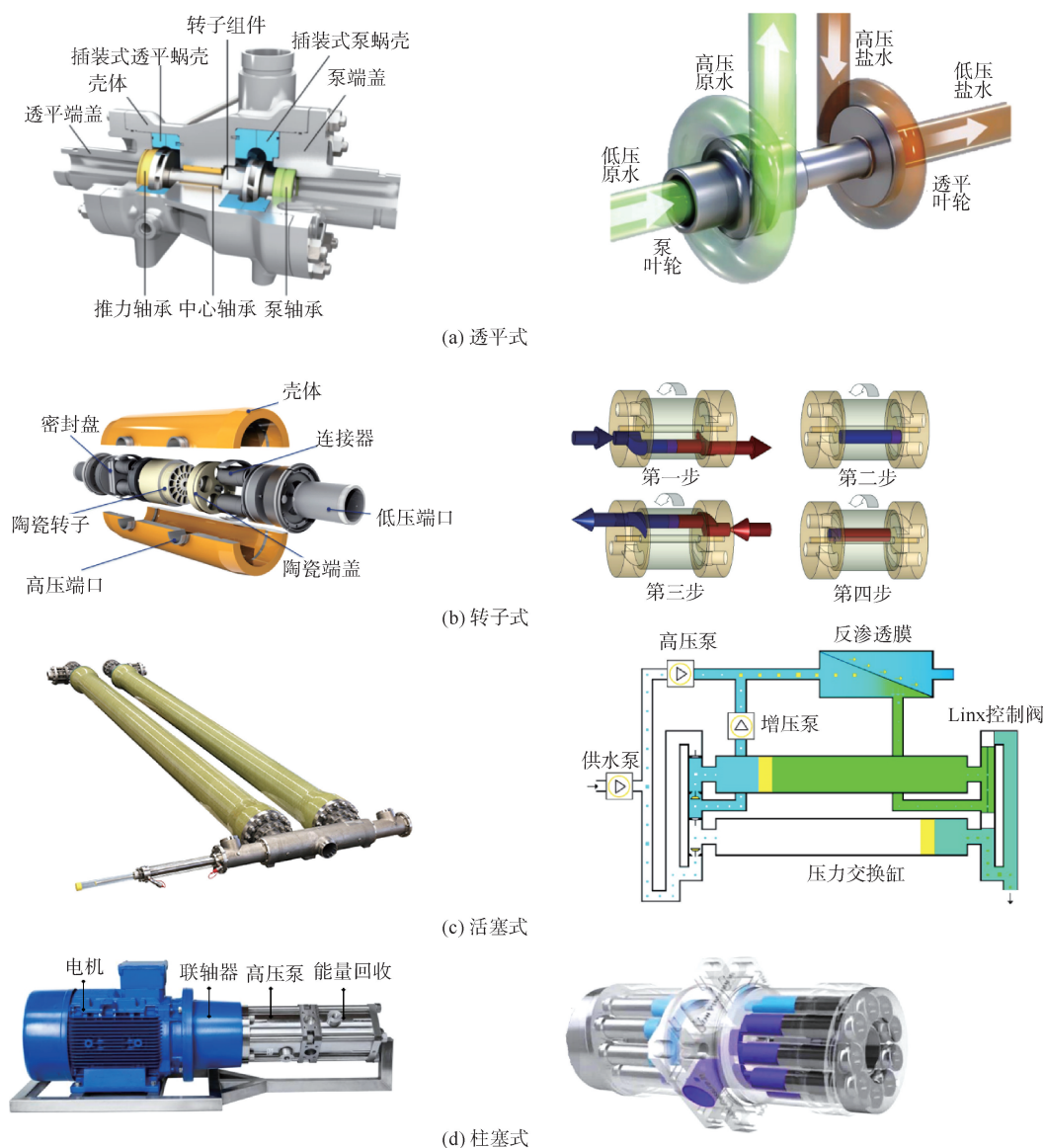


图 1 ERDs 型式及工作原理

Fig. 1 Types and Working Principles of ERDs

往复运动,其快速切换特性可有效避免系统水力冲击。Sal Tec DT 旋转阀如图 2(b) 所示,由转子、定子及轴承支撑构成,能独立控制各水压缸的高压盐水输入与泄压盐水排出。乞炳蔚^[23]开发的往复式切换阀[图 2(c)]采用金属密封阀板结构,通过分离密封面与运动面,显著改善了泄漏量、高压盐水流量波动及切换卡死等问题。

2.2 ERD 性能评价

2 项标准确立了包括能量转换效率、混合度、泄漏率在内的多项性能评价指标^[21-22]。本文重点分析能量转换效率相关性能,其他指标详见标准及文献^[24-26]。

《反渗透用能量回收装置》(HY/T 108—2008)定义了表观能量转换效率与有效能量转换效率 2 个关键参数,第一个效率为装置输出总能量与输入总能量之比,第二个效率为高压输出能量与输入总能量之比,因排除了低压浓盐水影响,更能准确反映装置的有效功输出^[21]。

表观能量转换效率(E_1)和有效能量转换效率(E_2)的计算如式(1)~式(2)。

$$E_1 = \frac{P_{\text{HPOUT}} Q_{\text{HPOUT}} + P_{\text{LPOUT}} Q_{\text{LPOUT}}}{P_{\text{HPIN}} Q_{\text{HPIN}} + P_{\text{LPIN}} Q_{\text{LPIN}}} \times 100\% \quad (1)$$

$$E_2 = \frac{P_{\text{HPOUT}} Q_{\text{HPOUT}}}{P_{\text{LPIN}} Q_{\text{LPIN}} + P_{\text{HPIN}} Q_{\text{HPIN}}} \times 100\% \quad (2)$$

表 2 反渗透用 ERD 的分类^[21]
Tab. 2 Classification of ERDs for RO^[21]

ERD 大类	工作原理	ERD 小类	工作特征	对等技术	代表产品
水力涡轮式	两步能量转换:浓盐海水力能通过涡轮叶轮转换为旋转轴机械能,旋转轴驱动水泵叶轮再把机械能转换成原水水力能	涡轮直驱水泵增压装置	涡轮叶轮与水泵叶轮同轴连接,涡轮叶轮转换为旋转轴机械能,旋转轴直接驱动水泵叶轮再把机械能转换成原水水力能	第 1 代产品技术	HTC HPB
		涡轮助推水泵电机轴增压装置	涡轮叶轮与水泵叶轮、驱动电机同轴连接,电机作为第一驱动,涡轮作为第二驱动	第 2 代产品技术	法兰西斯型透平、 佩尔顿透平
功交换式	一步能量转换:直接将浓盐海水力能转化为原水水力能	转子式无活塞压力交换装置	浓盐水和原水的压力交换过程在一个具有多个通道的旋转的转子体内完成,通道内浓盐水和原水直接接触	第 3 代产品技术	PX
		水压缸式有活塞压力交换装置	浓盐水和原水的压力交换过程在水压缸内完成,浓盐水和原水通过活塞隔离往复移动		DWEER

表 3 功交换式 ERD^[22]
Tab. 3 Power Exchange ERD^[22]

ERD 大类	ERD 小类	工作特征	代表产品
往复切换的水压缸式	环向密封往复切换	利用活塞侧面密封径向流道的往复切换	采用 Lin X 阀的 DWEER
	旋转切换	高低压切换通过旋转式切换阀实现,缸内 2 种液体通过活塞隔离或直接接触	采用旋转阀的 Saltec DT
转子式	端面密封往复切换	利用活塞端面密封轴向流道的往复切换	采用阀板密封的国产装置
	自转切换	转子为水流驱动自动旋转	PX
	动力切换	转子为外置电机驱动旋转	iSave

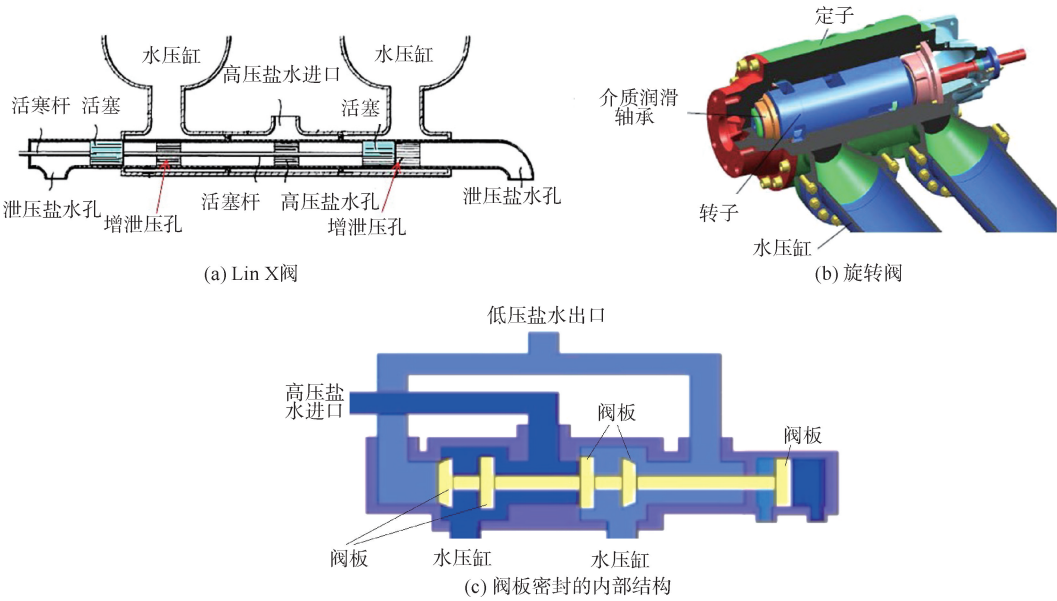


图 2 往复切换的水压缸式 ERD^[13,23]

Fig. 2 Internal Structure of Reciprocating Hydraulic Cylinder ERD^[13,23]

其中: P_{HPOUT} ——高压原水出口压力,MPa;
 Q_{HPOUT} ——高压原水出口流量, m^3/h ;
 P_{LPIN} ——低压原水进口压力,MPa;
 Q_{LPIN} ——低压原水进口流量, m^3/h ;
 P_{HPIN} ——高压浓盐水进口压力,MPa;
 Q_{HPIN} ——高压浓盐水进口流量, m^3/h ;
 P_{LPOUT} ——低压浓盐水出口压力,MPa;
 Q_{LPOUT} ——低压浓盐水出口流量, m^3/h 。

3 ERD 标准完善建议

3.1 ERD 分类

现行 2 项标准尚未涵盖新型柱塞式 ERD^[15-16],且《反渗透能量回收装置通用技术规范》(GB/T

30299—2013)仅适用于功交换式装置,亟需建立更科学的分类体系^[15-16]。

海水淡化 ERD 按转换方式可分为以下 2 类。

(1)间接转换型。通过机械动力转换实现能量传递,能量转换效率通常不超过 80%,包括透平式和柱塞式,透平式利用高压余压驱动叶轮旋转,将机械能转化为液压能;柱塞式类似柱塞泵,通过液压能驱动柱塞往复运动实现能量转换。

(2)直接转换型。通过液体直接接触或活塞间接接触进行能量交换,能量回收效率可达 95%以上^[14],压力能传递过程能量损失小,包括转子型腔直接传递和活塞间接接触 2 种形式。

现有的 ERD 的类型及代表产品如表 4 所示。

表 4 ERD 的建议分类^[27]
Tab. 4 Recommended Classification of ERD^[27]

项目	间接转换型		直接转换型	
	透平式	柱塞式	转子式	活塞式
能量转换过程	水压能-机械能-水压能	水压能-机械能-水压能	水压能-水压能	水压能-水压能
代表产品	第一代:法兰西斯型透平、佩尔顿透平、SWPE、SALINO、柱塞泵 反转型透平、卡普兰型透平 第二代:BMET 透平直驱泵、HTC、HPB		PX、iSave	DWEER、Clark pump、SalTec DT、OSMOREC、RO-KINETIC、Isobarix

3.2 ERD 转换效率

3.2.1 外置电机驱动类 ERD

能量转换效率作为 ERD 的核心评价指标,国内外研究及我国 2 项标准普遍采用有效能量转换效率作为评估依据。然而该指标主要适用于自驱动型装置,其简化计算方法弱化了其与机械效率、水力效率及容积效率等固有参数的关联性^[28]。鉴于 ERD 本质上属于特种泵范畴,多数型式由传统泵衍生而来,其转换效率与泵型效率参数(如机械效率、容积效率、水力效率等)的定量关系研究尚显不足^[28]。

随着能量回收技术集成度和智能化的发展,与高压泵、增压泵及电机进行耦合也是其发展的重要方向,带电机的转子式 ERD(表 3)、柱塞式 ERD^[15-16]都是加入外来能量的,如果还按照现有标准中的计算公式,就无法准确地进行性能评价,因此,建议修正现有的有效能量转换效率计算。

以柱塞式 ERD 为例,其简化结构及工作原理如图 3 所示^[15-16],柱塞式 ERD 为高压泵、马达与电机同轴连接,转轴转速与高压泵转速、能量回收马达转速存在等量关系,即式(3)。当(液压)马达回收能量做功时,高压泵由电机和马达共同驱动,因此,液

压泵转矩、液压马达转矩与电机转矩存在关系,如式(4)。

$$n = n_p = n_m \quad (3)$$

$$T_p = T_m + T_D \quad (4)$$

其中: n ——转轴转速, r/min ;

n_p ——高压转速, r/min ;

n_m ——能量回收马达转速, r/min ;

T_p ——液压泵转矩, $\text{N}\cdot\text{m}$;

T_m ——液压马达转矩, $\text{N}\cdot\text{m}$;

T_D ——电机转矩, $\text{N}\cdot\text{m}$ 。

针对带有电机的 ERD,在评估其能量输入时,现有标准无法准确反映其真实性能。如柱塞式 ERD,其能量转换过程涉及电机、液压马达和高压泵的耦合运行。有效能量转换效率应考虑高压泵输出能量相对于液压马达回收的能量与电机输入能量的总和的比例。

因此,修正后的公式如式(5)~式(6)。

$$E_3 = \frac{P_{\text{HPOUT}} Q_{\text{HPOUT}}}{P_{\text{HPIN}} Q_{\text{HPIN}} + P_{\text{LPIN}} Q_{\text{LPIN}} + W_{\text{motor}}} \times 100\% \quad (5)$$

$$W_{\text{motor}} = T_p \omega = 30\pi T_p n \quad (6)$$

其中: E_3 ——带有电机 ERD 的有效能量转换效率;

W_{motor} ——电机的功率, W;

ω ——电机的角速度, r/s。

式(5)、式(6)考虑了电机的输入功率,从而更准确地反映了柱塞式 ERD 在电机功率影响下的有效能量转换效率。

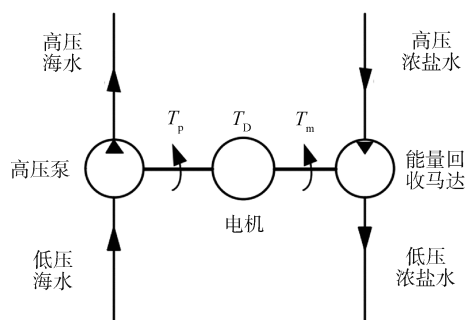


图3 柱塞式 ERD 简化结构及工作原理^[15-16]

Fig. 3 Simplified Structure and Working Principle

of Plunger ERD^[15-16]

3.2.2 系统能效综合评价

ERD 的性能直接影响反渗透系统的能耗,学者^[27]在原有表观能量转换效率或有效能量转换效率的基础上,提出了与能量回收装备辅助设备和系统性能有关的因素,即场效率(E_{FIELD}),理解为 ERD 在反渗透系统的布局影响,例如,并联形式的 PX 由于流道增加,管道压损及压力波动对能耗具有一样的影响。因此,除了 ERD 本身的性能还应该考虑系统布局与工艺优化^[29]。

针对能量回收反渗透系统的综合评价,采用吨水能耗来进行评估,计算如式(7)^[29-31]。

$$P = \sum P_i / Q_p \quad (7)$$

其中: P ——系统产水能耗, kW·h/m³;

$\sum P_i$ ——系统装置中动力设备运行功率总和, kW;

Q_p ——系统装置产水量, m³/h。

4 结语

ERD 技术作为反渗透海水淡化的重要节能装备,极大地降低了系统能耗和产水成本,已成为当代海水淡化工程不可或缺的重要装备之一。本文针对现有的能量回收技术发展状况与相关标准规范不足

之处,提出能量回收技术标准体系完善建议。

(1)考虑柱塞集成式 ERD 的工作原理与结构形式,建议完善现有标准对 ERD 的科学归类。

(2)考虑电机辅助驱动类 ERD 的能效形式,健全完善现有性能指标(特别是能量转换效率)的定义和解释,建立转换效率与现有泵类效率评价参数之间的关系和物理意义。

(3)建议考虑膜、高压泵与能量回收等反渗透系统的综合能耗评价指标。

参考文献

- [1] 汪程鹏, 李东洋, 王生辉, 等. 两类能量回收装置的海水淡化工程应用对比[J]. 净水技术, 2021, 40(7): 113-118.
WANG C P, LI D Y, WANG S H, et al. Comparison of two types application of energy recovery devices in seawater desalination projects [J]. Water Purification Technology, 2021, 40(7): 113-118.
- [2] AKGUL D, ÇAKMAKCE M, KAYAALP N, et al. Cost analysis of seawater desalination with reverse osmosis in Turkey. Desalination, 2008, 220(1/2/3): 123-131. DOI: 10.1016/j.desal.2007.01.027.
- [3] 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 J Z, DU P F, ZHANG X J, et al. Study of energy recovery device for reverse osmosis seawater desalination system [J]. Technology of Water Treatment, 2010, 36(6): 42-46.
- [4] 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 L, YANG X C. The analysis of reverse osmosis (SWRO) desalination energy recovery technology application [J]. Shandong Chemical Industry, 2015, 44(16): 110-112.
- [5] 徐恒阔, 王世昌. 反渗透淡化系统余压水能量回收装置的研究进展[J]. 水处理技术, 2002(2): 63-66.
XU X K, WANG S C. Progress in research of device of pressure-energy recovery from residual hydraulic in reverse osmosis desalination system [J]. Technology of Water Treatment, 2002(2): 63-66.
- [6] 李东洋, 汪程鹏, 王生辉, 等. 海岛反渗透海水淡化透平式能量回收技术工程应用[J]. 中国给水排水, 2020, 36(24): 130-133, 139.
LI D Y, WANG C P, WANG S H, et al. Application of turbine energy recovery technology in an island reverse osmosis desalination project [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(24): 130-133, 139.
- [7] 干钢, 陈丽雅, 杜鹏飞, 等. 海岛一体化制水装置研究与应用示范[J]. 水处理技术, 2010, 36(4): 118-121, 129.
GAN G, CHEN L Y, DU P F, et al. Study and extension on

- energy-saving integrated facility for sea water desalination in island[J]. *Technology of Water Treatment*, 2010, 36(4): 118-121, 129.
- [8] WANG C P, WANG S H, XIAO Y X, et al. Quantifying analysis and expanding application of desalination energy recovery technology[J]. *Desalination and Water Treatment*, 2024, 320: 100807. DOI: 10.1016/j.dwt.2024.100807.
- [9] WANG C P, MENG P Y, WANG S H, et al. Comparison of two types of energy recovery devices; Pressure exchanger and turbine in an island desalination project case[J]. *Desalination*, 2022, 533: 115752. DOI: 10.1016/j.desal.2022.115752.
- [10] WOODCOCK D J, WHITE M I. The application of Pelton type impulse turbines for energy recovery on sea water reverse osmosis systems[J]. *Desalination* 1981, 39: 447-458. DOI: 10.1016/S0011-9164(00)86148-2.
- [11] GUIRGUIS M J. Energy recovery devices in seawater reverse osmosis desalination plants with emphasis on efficiency and economical analysis of isobaric versus centrifugal devices[D]. Florida; University of South Florida, 2011.
- [12] 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.
- [13] 尹方龙, 汪阳, 贾国涛, 等. 反渗透海水淡化能量回收装置的研究现状及展望[J]. *液压与气动*, 2021, 45(9): 1-16.
- YIN F L, WANG Y, JIA G T, et al. Research situation and prospect of energy recovery device for seawater reverse osmosis desalination[J]. *Chinese Hydraulics & Pneumatics*, 2021, 45(9): 1-16.
- [14] 常宇清, 鞠茂伟, 周一卉. 反渗透海水淡化系统中的能量回收技术及装置研究进展[J]. *能源工程*, 2006, 26(3): 48-52.
- CHANG Y Q, JU M W, ZHOU Y H. Progress in research of technology and device of energy recovery in reverse osmosis desalination system [J]. *Energy Engineering*, 2006, 26(3): 48-52.
- [15] 刘思远, 张建姣, 赵静一, 等. 泵-马达式能量回收技术在海水淡化工程中的应用进展[J]. *液压与气动*, 2019, 43(1): 7-12.
- LIU S Y, ZHANG J J, ZHAO J Y, et al. Application progress of pump-motor energy recovery technology in seawater desalination project [J]. *Chinese Hydraulics & Pneumatics*, 2019, 43(1): 7-12.
- [16] 张建姣. 新型泵-马达一体化能量回收装置设计原理研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2019.
- ZHANG J J. Research on design principle of new pump-motor integrated energy recovery device [D]. Qinhuangdao; Yanshan University, 2019.
- [17] SONG D W, ZHOU J, WANG S H, et al. Adaptability evaluation of piston type high pressure pump integrated with energy recovery device through the numerical simulation and one year's island desalination [J]. *Energy*, 2023, 262 (Part A): 125359. DOI: 10.1016/j.energy.2022.125359.
- [18] ZHANG Y, SONG D W, WANG H T, et al. Performance fluctuations and evaluation of a piston type integrated high pressure pump-energy recovery device [J]. *npj Clean Water*, 2022, 5(1): 1-9.
- [19] SONG D W, ZHANG Y, WANG H T, et al. Performance investigation and evaluation of a new three-piston pump energy recovery device for small scale desalination system[J]. *Energy Conversion and Management*, 2022, 260: 115576. DOI: 10.1016/j.enconman.2022.115576.
- [20] STOVER R L. Development of a fourth generation energy recovery device. A 'CTO's notebook'[J]. *Desalination*, 2004, 165: 313-321. DOI: 10.1016/j.desal.2004.06.036.
- [21] 国家海洋局. 反渗透用能量回收装置: HY/T 108—2008 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- State Oceanic Administration. Energy recovery devices in reverse osmosis: HY/T 108—2008 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2008.
- [22] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 反渗透能量回收装置通用技术规范: GB/T 30299—2013[S]. 北京: 中国标准出版社, 2013.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. General technical specifications for energy recovery devices in reverse osmosis system: GB/T 30299—2013 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2013.
- [23] 乞炳蔚. 反渗透海水淡化系统能量回收装置性能及应用研究[D]. 天津: 天津大学, 2012.
- QI B W. Studies on characteristics and application of energy recovery device for seawater reverse osmosis desalination system [D]. Tianjin: Tianjin University, 2012.
- [24] 邵天宝, 李露, 卜建伟, 等. 反渗透海水淡化高压系统设计及设备选型要点[J]. *净水技术*, 2019, 38(9): 131-134.
- SHAO T B, LI L, BU J W, et al. Design and equipment selection of reverse osmosis desalination high pressure system [J]. *Water Purification Technology*, 2019, 38(9): 131-134.
- [25] 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(6): 67-70.
- SUN Y S, MA Y J, YOU Y G, et al. Experimental study of differential energy-recovery device for reverse osmosis seawater desalination [J]. *Technology of Water Treatment*, 2007(6): 67-70.

(下转第20页)

- Water, 2022, 14(6): 946.
- [73] LOTT D J, ROBEY N M, FONSECA R, et al. Behavior of per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) in pilot-scale vertical flow constructed wetlands treating landfill leachate [J]. Waste Manage (Oxford), 2023, 161: 187–192. DOI: 10.1016/j.wasman.2023.03.001.
- [74] 雷梦真, 何锦秋, 张洪利, 等. 成都市典型湿地公园全氟化化合物的污染特征及风险评估[J]. 环境化学, 2024, 43(9): 1–11.
- LEI M Z, HE J Q, ZHANG H L, et al. Pollution characteristics and risk assessment of perfluoroalkyl substances in the typical wetland of Chengdu City [J]. Environmental Chemistry, 2024, 43(9): 1–11.
- [75] Sadou BARRY, 汪永, 郭佳琦, 等. UV-Fenton 工艺的研究进展及其在水环境微污染处理领域的应用[J]. 净水技术, 2023, 42(5): 21–28, 43.
- BARRY S, WANG Y, GUO J Q, et al. Research progress in UV-Fenton process and the application of micropollution control in water environment [J]. Water Purification Technology, 2023, 42(5): 21–28, 43.
- [76] 张盼盼. 水体中持久性有机污染物 PFOS 的去除方法研究 [D]. 北京: 首都经济贸易大学, 2016.
- ZHANG P P. Study on the removal method of persistent organic pollutant PFOS in water [D]. Beijing: Capital University of Economics and Business, 2016.
- [77] 郭丽, 袁颐进, 冯丽贞, 等. 电活化过硫酸盐降解全氟辛酸及其中间产物的探究分析[J]. 环境科学学报, 2020, 40(6): 2045–2054.
- GUO L, YUAN Y J, FENG L Z, et al. Electrochemical activated persulfate to degrade perfluorooctanoic acid and the analysis of intermediate products [J]. Acta Science Circumstantiae, 2020, 40(6): 2045–2054.
- [78] 卓琼芳, 邓述波, 许振成, 等. 电化学氧化 PFOA 阳极材料筛选及其机制研究[J]. 环境科学, 2014, 35(5): 1810–1816.
- ZHUO Q F, DENG S B, XU Z C, et al. Screening and mechanism study of electrochemical oxidation PFOA anode materials [J]. Environmental Science, 2014, 35(5): 1810–1816.
- (上接第 8 页)
- [26] 王崇武. 反渗透海水淡化系统能量分析及优化 [D]. 天津: 天津大学, 2008.
- WANG C W. Energy analysis and optimization of reverse osmosis seawater desalination system [D]. Tianjin: Tianjin University, 2008.
- [27] WANG C P, WANG S H, WANG K J, et al. Developmental impediment and prospective trends of desalination energy recovery device [J]. Desalination, 2024, 578: 117465. DOI: 10.1016/j.desal.2024.117465.
- [28] WANG S H, XIAO Y X, WANG C P, et al. Performance improvement of turbo energy recovery device in desalination using flow field simulation and uniform design experiment [J]. Desalination and Water Treatment, 2025, 321: 100980. DOI: 10.1016/j.dwt.2024.100980.
- [29] 汪程鹏, 王生辉, 肖业祥, 等. 海水淡化能量回收装置能耗分析与设计比选[J]. 水处理技术, 2023, 49(12): 51–54.
- WANG C P, WANG S H, XIAO Y X, et al. Energy consumption analysis and design comparison of seawater desalination energy recovery device [J]. Technology of Water Treatment, 2023, 49(12): 51–54.
- [30] 吴水波, 李兆魁, 王晓玲, 等. 反渗透能量回收装置性能评价指标研究[J]. 给水排水, 2013, 49(7): 146–150.
- WU S B, LI Z K, WANG X L, et al. Research on performance evaluating indexes of energy recovery devices for reverse osmosis desalination [J]. Water & Wastewater Engineering, 2013, 49(7): 146–150.
- [31] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 海水淡化反渗透膜装置测试评价方法: GB/T 32359—2015 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Test and evaluation methods of reverse osmosis equipment for seawater desalination: GB/T 32359—2015 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2015.