

# 反渗透海水淡化装置远程监测系统的 设计与应用

王可宁, 冯 涛, 尹立辉, 李 楠, 王金燕, 薛喜东

(自然资源部 天津海水淡化与综合利用研究所, 天津 300192)

**摘要:**以某 3 万 t/d 反渗透海水淡化工程为背景, 设计了一套采用“预处理 + 多介质过滤 + 超滤 + 二级反渗透”工艺的海水淡化中试装置。围绕工艺流程, 从电气系统、控制系统及远程监控系统三方面阐述了系统的设计开发过程。控制系统选用西门子 S7-1200 PLC 与 ET 200SP 分布式 IO 架构, 并引入先入先出队列调度机制, 有效解决了 3 套超滤膜组共用反洗泵的资源冲突问题。此外, 又基于 MCGS 物联网协议进一步开发了多终端访问的远程监控系统, 实现了关键参数在线整定、报警记录与历史数据远程获取等功能。目前, 该系统已成功应用于中试试验装置, 运行结果表明, 该系统运行安全可靠, 数据可追溯性强, 显著提升了运维管理效率和试验便捷性。

**关键词:**海水淡化; 反渗透; 自动化控制; MCGS; 远程监控

**中图分类号:**TP202

**文章编号:**1000-0682(2026)04-0003-06

**文献标识码:**B

**DOI:**10.19950/j.cnki.CN61-1121/TH.2026.04.001

## Design and application of a remote monitoring system for reverse osmosis seawater desalination plant

WANG Kening, FENG Tao, YIN Lihui, LI Nan, WANG Jinyan, XUE Xidong

(Institute of Seawater Desalination and Multipurpose Utilization, MNR < Tianjin >, Tianjin 300192, China)

**Abstract:** Against the backdrop of a 30,000-ton-per-day reverse osmosis seawater desalination project, this paper presents the design of a pilot-scale seawater desalination system incorporating the process sequence of "pretreatment + multi-media filtration + ultrafiltration + two-stage reverse osmosis". Focusing on the process flow, the design and development of the system are expounded from three dimensions: the electrical system, control system, and remote monitoring module. For the control system, a Siemens S7-1200 PLC paired with an ET 200SP distributed I/O architecture is employed, and a first-in-first-out (FIFO) queue scheduling mechanism is introduced—this effectively resolves the resource conflict arising from three ultrafiltration membrane units sharing a single backwash pump. Additionally, a multi-terminal accessible remote monitoring system is further developed based on the MCGS Internet of Things protocol, enabling functionalities including online tuning of key parameters, alarm logging, and remote retrieval of historical data. Presently, the system has been successfully deployed in the pilot test setup. Operational results demonstrate that the system exhibits safe and reliable performance, coupled with robust data traceability, which enhances the efficiency of operation and maintenance management as well as the convenience of experimental procedures.

**Keywords:** desalination; reverse osmosis; automatic control; MCGS; remote monitoring

收稿日期: 2026-03-26

**基金项目:**国家重点研发计划项目-低碳节能海水淡化及资源化关键材料研发及技术示范(2023YFE0101000); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目-基于人工智能的海水淡化工程运维管理技术研究(K-JBYWF-2025-XK02); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(K-JBYWF-2024-ZT03)

**第一作者:**王可宁(1993—), 男, 工程师, 主要从事海水淡化自动化控制系统的研究与开发。E-mail: 761216211@qq.com

## 0 引言

随着我国淡水资源短缺问题日益严重, 苦咸水脱盐和海水淡化已成为获取淡化资源的重要途径。目前, 以膜法反渗透代表的淡化技术已十分成熟, 工程规模和数量逐年增加<sup>[1]</sup>。为满足淡化工程信息化管理的需求, 实现对生产过程实时监测与运行绩

效的精准评估,远程监测技术已成为工程管理中不可或缺的关键支撑<sup>[2]</sup>。

以广东某市 3 万 t/d 反渗透海水淡化项目为背景,分别针对咸潮水与海水水质特点,设计了一套处理规模为 120 t/d 的淡化系统,并在当地 2 个站点完成中试验证。基于反渗透中试装置工艺流程,该文开发了一套集供电安全、控制稳定于一体的自动化控制系统,并基于 MCGS 物联网协议进一步构建了

支持远程操控的监测平台,显著提升了运维管理效率与试验便捷性。

## 1 工艺介绍

图 1 为工艺流程简图。装置由预处理和脱盐两大系统构成,共包括混凝沉淀、多介质过滤、超滤、一级反渗透、二级反渗透及清洗加药 6 个单元。

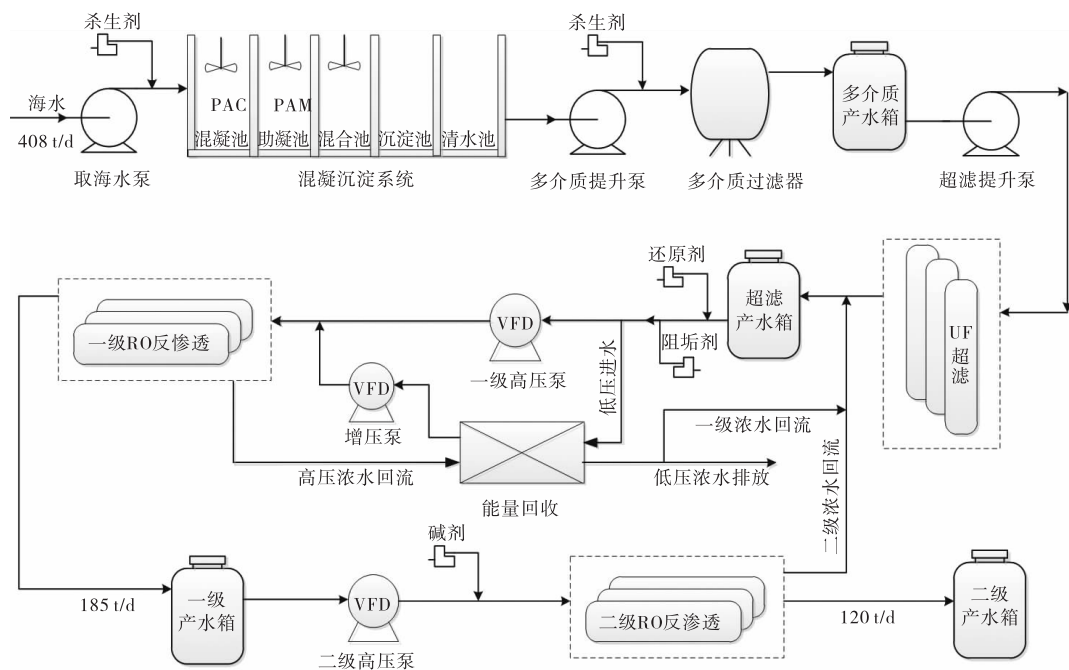


图 1 工艺流程简图

### 1.1 预处理系统

预处理系统由混凝沉淀和多介质过滤两级单元构成,其主要任务是通过化学和物理方法高效去除海水中的悬浮物、胶体及微生物,为后续膜系统提供合格的进水水质。

#### 1.1.1 混凝沉淀单元

原海水经取水水泵提升后进入混凝沉淀单元。该单元由混合池、絮凝池和沉淀池和清水池组成。通过加药单元在进水端定量投加非氧化性杀生剂,以抑制和杀灭海水中的微生物,防止生物污堵。同时,投加混凝剂聚合氯化铝和助凝剂聚丙烯酰胺,药剂经搅拌混合后,与水中的胶体颗粒接触并发生凝聚反应,形成微小的初始絮体。水流随后进入絮凝池,在缓慢的水力条件下,初始絮体进一步碰撞、吸附并成长为密实且易于沉降的矾花。最后,含矾花的水流进入沉淀池,在重力作用下实现固液分离,矾花下沉形成污泥,上层清液则自流进入清水池<sup>[3]</sup>。

#### 1.1.2 多介质过滤单元

混凝沉淀出水经中间水泵提升后进入多介质过滤器。过滤器内石英砂滤料按粒径级配与密度差异分层装填,形成高效的过滤床层,能够有效截留水中粒径在 10 ~ 100  $\mu\text{m}$  之间的颗粒物和悬浮物,从而降低出水的浊度。此过程是对混凝沉淀效果的强化与补充,为后续超滤系统的稳定运行提供保障。

#### 1.1.3 超滤单元

超滤膜孔径介于 0.01 ~ 0.1  $\mu\text{m}$  之间,其膜孔径能高效筛分截留水中的细小悬浮物、胶体、大分子有机物及细菌等杂质。作为预处理阶段的最终保障工序,超滤单元对多介质过滤产水进行深度净化。出水浊度稳定控制在  $\leq 1$  NTU (NTU 为浊度单位),污染指数  $\text{SDI} \leq 3$ ,完全满足后续反渗透系统的进水水质指标要求<sup>[4]</sup>。超滤 3 套膜组均采用死端过滤方式运行,并配备周期性反洗以维持膜通量。

### 1.2 脱盐系统

脱盐系统由一级反渗透单元和二级反渗透单元

串联而成,是装置的核心脱盐工序。

### 1.2.1 一级反渗透单元

超滤产水在进入一级反渗透单元前,需先后投加阻垢剂与还原剂。阻垢剂用于防止钙、镁难溶盐在膜面结晶析出,还原剂则用于还原水中可能残留的氧化性物质,以保障反渗透膜的安全运行。

经加药保护后的原水分为 2 路进入膜组:一路经一级高压泵增压后直接进入反渗透膜组件,在高于原水渗透压的操作压力驱动下,水分子透过膜层进入产水侧,溶解性盐类、有机物及微生物被截留,形成的淡水进入产水箱;另一路进入能量回收装置。能量回收装置将反渗透膜排放的高压浓水的压力能传递给待处理原水,完成能量交换后,获得压力能的原水再经增压泵补压至设定压力后进入反渗透膜。而交换压力后的浓水一部分排放,另一部分回流至超滤产水箱以调节系统回收率。能量回收装置的引入可显著降低系统能耗,其能量转化效率通常可达 95% 以上。

### 1.2.2 二级反渗透单元

为进一步提升产水水质,一级产水需进入二级反渗透单元进行深度脱盐。由于二级反渗透的进水水质已远优于原海水,其核心功能在于进一步脱除一级淡水中残留的微量离子及小分子有机物,从而提高产水水质。该单元在较低压力下运行,进膜压力稳定控制在约 0.85 MPa。二级反渗透产生的浓水含盐量较低,为提升系统整体回收率,将其全部回流至超滤产水箱前端进行再处理。

## 2 硬件设计

### 2.1 电气系统

中试试验装置采用 380/220 VAC、50 Hz、三相五线制供电,其中动力回路电压等级为 380 VAC,控制回路电压等级为 220 VAC。电气系统设计充分考虑试验装置的安全防护、能耗数据需求及工艺可调节性。

(1)安全防护配置:总进线端配置电源防浪涌保护器。当线路出现瞬态过电压时,快速泄放浪涌并限制残压,保护 PLC 及控制回路安全,确保试验系统可靠运行。

(2)能耗参数采集:在进线侧加装专用电流互感器与多功能电能表,可连续、实时地采集系统的运行能耗数据,为后续能效分析及运行成本核算提供基础数据支撑。

(3)工艺可调节性:对海水泵、多介质提升泵、反渗透供水泵、反渗透高压泵及增压泵等核心设备设置变频控制,通过无级调节水泵转速,实现对进水压力、产水通量等关键工艺参数的精细化调控。不仅能够提升试验装置对进水水质波动及运行条件变化的适应能力,降低吨水电耗,同时为探究反渗透系统在多样化工况下的运行规律提供了可靠的试验基础。

系统总装机功率为 64.5 kW,主体设备用电负荷清单见表 1。

表 1 主体电气设备清单

| 序号 | 用电设备     | 装机功率/kW | 数量/台 | 控制方式 |
|----|----------|---------|------|------|
| 1  | 取水泵      | 2.2     | 1    | 变频   |
| 2  | 混凝沉淀搅拌   | 1.5     | 3    | 直启   |
| 3  | 多介质提升泵   | 3.0     | 1    | 变频   |
| 4  | 多介质反洗泵   | 7.5     | 1    | 变频   |
| 5  | 超滤供水泵    | 3.0     | 1    | 变频   |
| 6  | 超滤反洗泵    | 1.5     | 1    | 变频   |
| 7  | 空压机      | 11.0    | 1    | 变频   |
| 8  | 一级反渗透提升泵 | 3.0     | 1    | 变频   |
| 9  | 一级反渗透冲洗泵 | 1.5     | 1    | 变频   |
| 10 | 一级反渗透高压泵 | 15      | 1    | 变频   |
| 11 | 一级反渗透增压泵 | 5.5     | 1    | 变频   |
| 12 | 二级反渗透提升泵 | 1.1     | 4    | 变频   |
| 13 | 二级反渗透高压泵 | 4.0     | 1    | 变频   |
| 14 | 化学清洗水泵   | 2.2     | 4    | 变频   |
| 15 | 加药单元     | 1.5     | 1    | /    |
| 16 | 控制系统     | 1.0     | 1    | /    |
|    | 合计       | 64.5    | /    | /    |

## 2.2 控制系统

硬件配置基于工艺测控需求及 I/O 点分布进行选型。系统共计模拟量输入(AI)68 点、模拟量输出(AO)12 点、数字量输入(DI)107 点、数字量输出(DO)49 点,总点数为 236 点。

鉴于该装置涉及多单元协同控制,工艺逻辑较为复杂,且测点分布广泛,控制系统采用主控 CPU + 分布式 IO 架构。以西门子 S7 - 1200 系列 PLC 为主控站,负责逻辑运算及指令输出;现场 ET 200SP 远程站负责仪表信号采集,并通过工业以太网与主控站进行实时数据交互。

监控操作端选用昆仑通泰 TPC1231Ni 型物联网触摸屏。该设备集成远程访问与数据交互功能,支持程序远程上下载、VNC 组态画面穿透及数据云上传,为后续云平台远程监控系统的开发提供硬件支撑。

表 2 PLC 硬件设备选型清单

| 序号 | 名称                 | 型号                     | 数量 |
|----|--------------------|------------------------|----|
| 1  | CPU 1214C          | 6ES7214 - 1BG40 - 0XB0 | 1  |
| 2  | IM 155 - 6 PN/2 HF | 6ES7155 - 6AU01 - 0CN0 | 1  |
| 3  | AI 模块(CPU 扩展)      | SM 1231 AI8            | 8  |
| 4  | AI 模块(IO 扩展)       | 6ES7134 - 6GF00 - 0AA1 | 2  |
| 5  | AO 模块(4 点)         | 6ES7135 - 6HD00 - 0BA1 | 3  |
| 6  | DI 模块(16 点)        | 6ES7131 - 6BH01 - 0BA0 | 8  |
| 7  | DO 模块(8 点)         | 6ES7132 - 6BH01 - 0BA0 | 4  |
| 8  | AO 模块(4 点)         | 6ES7 - 288 - 3AQ04     | 3  |
| 9  | 以太网交换机             | EDS208 - M - SC        | 1  |
| 10 | 控制终端(12 吋)         | TPC1231Ni              | 1  |

## 3 控制程序开发

### 3.1 控制过程分析

#### 3.1.1 混凝沉淀单元

本单元的控制逻辑围绕进水、药剂投加、搅拌及排泥操作展开,具体自动步序如下:①启动取海水泵,进水流量稳定且达到阈值后启动杀生剂加药泵。②混凝池液位到达高液位后,启动 PAC、PAM 加药泵和搅拌机。加药量采用流量比例控制,确保药剂投加量与进水量动态匹配。③沉淀池排泥定时执行,系统每间隔 4 h(可调)开启排泥阀,排泥时间达到 120 s(可调)后自动关闭。

#### 3.1.2 多介质单元

本单元的步序切换主要通过阀门的顺序切换来实现。提升泵与反洗泵的启停由 PLC 控制,仅在接收到当前步序下所有阀门动作到位信号后执

行。按以下 7 个步序循环运行:正冲→产水→反洗→排放→气洗→静置→再反洗。与常规多介质过滤控制流程不同,本流程在气洗和静置步骤完成后增加了一次反洗,以实现过滤层的深度清理。各步序的运行时间均设计成在线调整。各步序对应的设备状态见表 3,其中“○”表示设备开启,“×”表示设备关闭。

表 3 多介质单元步序及设备状态

| 步序<br>设备 | 正冲   | 产水   | 反洗   | 排放   | 气洗   | 静置   | 再反洗  |
|----------|------|------|------|------|------|------|------|
| 时间       | 60 s | 12 h | 60 s | 30 s | 60 s | 60 s | 60 s |
| 进水阀      | ○    | ○    | ×    | ×    | ×    | ×    | ×    |
| 产水阀      | ×    | ○    | ×    | ×    | ×    | ×    | ×    |
| 上排阀      | ×    | ×    | ○    | ○    | ○    | ○    | ○    |
| 下排阀      | ○    | ×    | ×    | ○    | ×    | ×    | ×    |
| 反洗阀      | ×    | ×    | ○    | ×    | ×    | ×    | ○    |
| 进气阀      | ×    | ×    | ×    | ×    | ○    | ×    | ×    |
| 反洗泵      | ×    | ×    | ○    | ×    | ×    | ×    | ○    |
| 提升泵      | ○    | ○    | ×    | ×    | ×    | ×    | ×    |

#### 3.1.3 超滤单元

本单元分为常规流程反洗 + 化学加强反洗两种运行模式。常规流程按以下 4 个步序循环运行:正冲 → 产水 → 上反洗 → 下反洗。常规流程步序及设备状态见表 4。

表 4 超滤单元常规运行步序及设备状态

| 步序<br>设备 | 正冲   | 产水     | 上反洗  | 下反洗  |
|----------|------|--------|------|------|
| 时间       | 30 s | 1800 s | 30 s | 30 s |
| 进水阀      | ○    | ○      | ×    | ×    |
| 产水阀      | ×    | ○      | ×    | ×    |
| 上排阀      | ○    | ×      | ○    | ×    |
| 下排阀      | ×    | ×      | ×    | ○    |
| 反洗阀      | ×    | ×      | ○    | ×    |
| 进气阀      | ×    | ×      | ×    | ×    |
| 反洗泵      | ×    | ×      | ○    | ×    |
| 提升泵      | ○    | ○      | ×    | ×    |

化学加强反洗是在常规流程运行 48 次后进行一次化学加强碱洗,完成 2 次碱洗流程后再常规反洗 48 次进行一次酸洗。化学加强反洗流程中程序将按以下 7 个步骤执行一次:碱/酸洗上加药→碱/酸洗下加药→浸泡→排放→气洗→上反洗→下反洗。步序时间和触发次数均在线可调。加强反洗步序步序和对应的设备状态见表 5。

表 5 超滤单元化学加强反洗步序及控制状态

| 步序<br>设备 | 上<br>加药 | 下<br>加药 | 浸泡   | 排放   | 气洗   | 上<br>反洗 | 下<br>反洗 |
|----------|---------|---------|------|------|------|---------|---------|
| 时间       | 30 s    | 30 s    | 60 s | 15 s | 30 s | 30 s    | 30 s    |
| 进水阀      | ×       | ○       | ×    | ×    | ×    | ×       | ×       |
| 产水阀      | ×       | ○       | ×    | ×    | ×    | ×       | ×       |
| 上排阀      | ×       | ×       | ×    | ○    | ○    | ○       | ○       |
| 下排阀      | ○       | ×       | ×    | ○    | ×    | ×       | ○       |
| 反洗阀      | ×       | ×       | ×    | ×    | ×    | ○       | ○       |
| 进气阀      | ×       | ×       | ×    | ×    | ○    | ×       | ×       |
| 反洗泵      | ○       | ○       | ×    | ×    | ×    | ○       | ○       |

### (1) 一级反渗透单元

本单元按照以下步序控制:①启动一级反渗透提升泵。②供水泵运行 5 s 后且泵后低压开关闭合,启动增压泵;缓慢调频至 45 Hz。③增压泵运行 30 s 后,启动高压泵;缓慢调频至 45 Hz。

### (2) 二级反渗透单元

本单元按照以下步序控制:①启动二级反渗透提升泵。②供水泵运行 5 s 后且泵,低压开关闭合后启动高压泵;缓慢调频至 48 Hz。

以上 2 个反渗透单元水泵启动方式均采用斜坡启动。连锁保护包括:前后水箱高低液位连锁;提升泵后低压信号连锁;进膜压力高连锁;进膜 ORP 高连锁。步序时间和水泵频率均在线可调。

## 3.2 PLC 程序设计

控制系统程序采用博图 TIA v16 编程软件进行开发,根据以水箱为界限的工艺特点采用模块化编程,以便于提高程序的可读性和可移植性。

在超滤单元的程序设计中,三套膜组并行运行且共用反洗泵和加药泵的工况较为复杂。以往单套或双套膜组控制方案仅需依据每组的反洗标志位即可完成反洗泵的启停判断与频率调节。然而,当膜组数量扩展至三套及以上时,基于状态机和互斥条件的设计方案在逻辑上无法直接适配多膜组并集场景下资源竞争和优先级管理。

因此,该控制系统的开发,在超滤控制程序中引入先入先出队列(FIFO),用以实现反洗和化学加强反洗过程中共用反洗泵的资源调度。该机制将各膜组发出的反洗请求按膜组编号压入队列,由调度逻辑依次分配反洗泵与加药泵的使用权限,并对反洗频率进行统一协调。FIFO 调度策略有效解决了多膜组同时发起反洗请求时可能出现的状态紊乱和冲突问题。

针对多介质单元及超滤单元中大量电动开关阀

仅配置开关到位信号、缺乏故障反馈信号的问题,该文在程序设计中开发了开关阀故障反馈功能块(FC)。该模块通过设定超时判断机制,当 PLC 发出控制指令后,在一定时间内未检测到开关到位反馈时,即输出阀门故障状态信号,实现对阀门执行状态的实时监测与异常预警。阀门故障反馈 FC 块程序如图 2 所示。

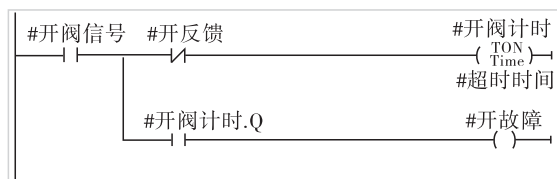


图 2 阀门故障反馈 FC 块程序

## 3.3 监控程序开发

基于昆仑通态 MCGS 嵌入式组态软件,开发了一套面向移动式海水淡化装置的上位监控系统。系统采用面向对象的组态设计思路,以工艺流程可视化为核心,构建了涵盖混凝沉淀、多介质过滤、超滤、反渗透及辅助加药清洗等子系统的集成监控界面,如图 3 所示。通过动态图形与数据变量关联,实时呈现各工艺单元的设备运行状态、仪表参数及报警信息,形成直观的人机交互环境。

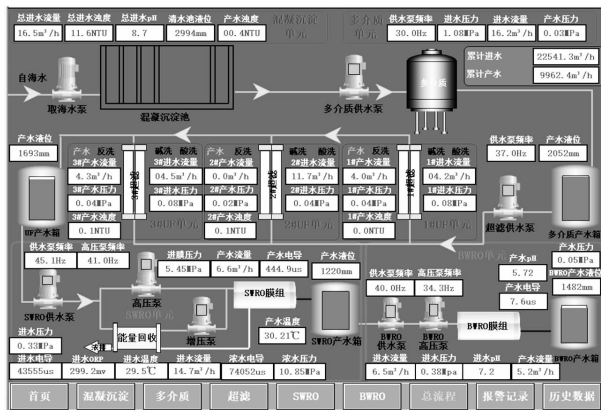


图 3 监控界面

在功能实现层面,监控系统集成了分模块一键启停、关键参数在线整定、历史数据曲线追溯及报警事件记录查询等核心功能。可通过触摸屏实现对设备启停顺序的灵活控制,并可依据水质变化实时调整加药系数、压力设定值及清洗周期等运行参数。

远程导出功能脚本代码:!

```
ExportHisDataToCSV (" $ MCGS_DIR_USER/海水淡化一期工程中试验数据. csv", " 数据记录", "", InputSTime, InputE-Time, 2000000, 1, "", 导出进度, 导出状态)。
```

图4 视频监控与移动端操控界面