

光伏峰谷适配的苦咸水淡化控制系统研发与验证

杨树军^{1,2,3}, 桑东梓⁴, 晏 鹏^{1,2,3}, 黄鹏飞^{1,2,3}, 朱 杰^{1,2,3}, 刘 玮^{1,2,3*}

(1. 自然资源部天津海水淡化与综合利用研究所, 天津 300192; 2. 自然资源部海水淡化与膜材料重点实验室, 天津 300192; 3. 威海市海水综合利用产业技术研究中心, 山东 威海 264201; 4. 天津膜天膜科技集团股份有限公司, 天津 300457)

摘要:为解决新疆某团场光伏发电峰谷特性与淡化工艺固定运行模式的供需错配、光伏利用率低等问题,设计基于 PLC + 上位机的光伏适配型苦咸水淡化控制系统。系统以 PLC 为控制核心,增设缓冲水箱实现工艺与能量双解耦,结合环境参数构建光伏峰谷动态识别模型。通过引入卡尔曼滤波、变参数 PID 控制等算法,实现光伏峰谷精准识别与工艺参数精准调控。试验验证表明,系统光伏峰谷识别响应时间 ≤ 1 s,识别准确率 $\geq 98.5\%$,工艺参数控制精度达液位 ± 0.04 m、流量 ± 0.09 m³/h、压力 ± 0.015 MPa,光伏利用率提升至 85.6%,可在高温、高沙尘工况下实现 24 h 连续稳定供水,为西北偏远地区全光伏供电水处理工程提供智能化控制方案。

关键词:PLC + 上位机;光伏发电;苦咸水淡化

中图分类号:TP202

文章编号:1000-0682(2026)04-0020-07

文献标识码:B

DOI:10.19950/j.cnki.CN61-1121/TH.2026.04.004

Research and validation of a control system for desalination of brackish water adapted to photovoltaic peak and valley shifts

YANG Shujun^{1,2,3}, SANG Dongzi⁴, YAN Peng^{1,2,3}, HUANG Pengfei^{1,2,3}, ZHU Jie^{1,2,3}, LIU Wei^{1,2,3*}

(1. The Institute of Seawater Desalination and Multipurpose Utilization, MNR (Tianjin), Tianjin 300192, China;
2. Key Laboratory of Seawater Desalination and Membrane Materials, Ministry of Natural Resources, Tianjin 300192, China;
3. Weihai Industrial Technology Research Center of Seawater Multipurpose Utilization, Shandong Weihai 264201, China;
4. Tianjin Motimo Membrane Technology Group Co., Ltd., Tianjin 300457, China)

Abstract:To address issues such as the mismatch between the peak-valley characteristics of photovoltaic power generation and the fixed operation mode of desalination process in a certain farm in Xinjiang, as well as low photovoltaic utilization rate, a photovoltaic-adaptive brackish water desalination control system based on PLC + supervisory computer was designed. The system uses PLC as the control core and incorporates a buffer water tank to achieve dual decoupling of process and energy. It combines environmental parameters to construct a dynamic identification model for photovoltaic peak-valley and formulates a refined linkage control strategy. By introducing algorithms such as Kalman filtering and variable parameter PID control, it achieves precise identification of photovoltaic peak and valley. Experimental validation shows that the system's response time for photovoltaic peak and valley identification is ≤ 1 s, with an identification accuracy of $\geq 98.5\%$. The control precision of process parameters reaches a liquid level of ± 0.04 m, flow rate of ± 0.09 m³/h, and pressure of ± 0.015 MPa, while the utilization rate of photovoltaic energy is improved to 85.6%. This system can provide continuous and stable water supply for 24 hours, offering an intelligent control solution for water treatment projects powered entirely by photovoltaic energy in the remote areas of Northwest China.

Keywords:PLC + upper computer; photovoltaic power generation; buffer water tank

收稿日期:2026-02-23

基金项目: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-2025-P01,K-JBYWF-2025-J03,K-JBYWF-2026-XK15)

第一作者:杨树军(1985—),男,天津人,博士,工程师,研究方向为海水淡化自动化控制的研究与工艺设计。E-mail:yangshu_32@tju.edu.cn

通信作者:刘玮(1983—),男,天津人,本科,工程师,主要从事海水淡化领域科研管理与行业统筹工作。

0 引言

新疆兵团南疆团场地处西北偏远盐碱区域,淡水资源匮乏、电网覆盖薄弱,全光伏供电成为当地苦咸水淡化的唯一可行方式^[1-2]。该区域极端最高气温达 45.6℃,年扬沙天气超 80 天,且需 24 h 连续供水,对淡化系统的环境适配性、运行稳定性提出严格要求。

当前光伏供电苦咸水淡化系统的核心痛点为:光伏发电受光照、温度、沙尘影响呈现峰谷出力特性,出力波动幅度超过 90%^[3-4],而传统控制系统采用固定运行模式,预处理与脱盐撬块刚性联动,未设置解耦装置,导致光伏峰值能源未充分利用、谷值时段储能消耗过度,光伏利用率普遍低于 65%^[5]。此外,现有系统多采用固定阈值划分光伏峰谷,环境适应性差;硬件设计未兼顾南疆高温、高沙尘工况,现场可靠性低;且缺乏完善的远程运维功能,人工运维成本高^[6]。

PLC + 上位机控制架构已广泛应用于水处理领域,但针对全光伏供电、24 h 连续运行的适配性研究不足^[7-8]。基于此,结合南疆某团场 200 m³/d 苦咸水淡化项目,设计全光伏供电适配型 PLC + 上位机控制系统,通过缓冲水箱解耦、光伏峰谷动态识别、精细化联动控制,实现光伏发电与淡化工艺的精准适配,最大化光伏消纳,同时提升系统的工况适配性与运维智能化水平。

1 项目概况与系统总体设计

1.1 项目基本概况

系统应用于南疆某团场 200 m³/d 苦咸水淡化项目,无电网覆盖,采用 100 kW 晶硅光伏阵列 + 200 kWh 磷酸铁锂储能电池组 + 60 kW 逆变器的全光伏供电模式。进水为地下苦咸水,矿化度 4620 mg/L、浊度 4.5 NTU,产水需满足 GB5749—2022《生活饮用水卫生标准》,即电导率 ≤ 20 μs/cm、浊度 ≤ 1 NTU。

淡化工艺为原水箱 → 絮凝沉淀 → 石英砂过滤器 → 活性炭过滤器 → 保安过滤器 → 缓冲水箱 → 一级反渗透 → 产水箱 → 消毒,核心优化为在预处理与脱盐撬块间增设 10 m³ 缓冲水箱,实现工艺与能量双解耦。核心设备包括 4 台 2 用 2 备高压泵(流量 20 m³/h,压力 6.5 MPa)、12 支 BW-8040 反渗透膜组件,以及石英砂/活性炭过滤器各 2 台。

系统接入环境监测站实时光照、温度、沙尘浓度数据,同步采集光伏出力、储能 SOC 参数,为光伏峰

谷动态识别与储能充放电优化提供数据支撑。

1.2 系统总体设计原则

结合项目全光伏供电、24 h 连续运行、高温高沙尘工况与无人值守需求,系统设计围绕光伏适配性、控制精细化、工况适配性、操作智能化、系统扩展性、连续运行性及经济性展开,兼顾能源利用效率与现场实际应用需求。光伏适配性上需动态匹配光伏峰谷出力变化,保障光伏利用率 ≥ 80%、储能充放电效率 ≥ 90%;控制精细化要求采用多参数闭环控制,工艺参数控制精度达液位 ± 0.05 m、流量 ± 0.1 m³/h;工况适配性需满足硬件防护等级 ≥ IP65,工作温度 -25 ~ 60℃,具备抗沙尘、抗电磁干扰能力;操作智能化支持本地自动 + 远程运维,故障预警准确率 ≥ 99%,远程监控延迟 ≤ 5 s;系统扩展性需预留硬件 ≥ 20% I/O 接口,软件支持模块化功能扩展;连续运行性依托缓冲水箱与储能系统,实现无计划停机率为 0,年运行时间 ≥ 8760 h;经济性则优先选用高性价比、易维护设备,降低建设与运维全周期成本。

1.3 系统五层分布式架构

系统采用现场感知层 - 核心控制层 - 上位机监控层 - 执行机构层 - 远程运维层五层分布式架构,各层级数据双向传输、协同工作。

现场感知层由工业级传感器/变送器组成,采集环境参数、光伏参数、工艺参数及设备状态参数,所有传感器均做抗沙尘、防结垢防护设计;核心控制层以西门子 S7-400H 冗余 PLC 为核心,完成数据滤波、光伏峰谷识别、缓冲水箱控制、指令下发、故障诊断等功能,冗余设计确保 24 h 不间断运算;上位机监控层由工业工控机与 WinCC 组态软件组成,实现参数可视化、历史数据存储、曲线绘制、参数在线设置,数据存储周期 ≥ 1 年;执行机构层由变频泵、电动阀、加药装置等组成,接收 PLC 指令完成设备启停与工艺调节,适配光伏变频供电的电压波动特性;远程运维层基于 4G/5G 工业无线模块,实现 PLC 与远程平台、移动终端的通信,支持远程状态查看、故障预警、参数设置与故障复位。

系统采用自动为主、手动为辅运行模式:正常工况下全自动控制,调试或故障工况下可通过上位机或 PLC 本地触摸屏手动操作,异常工况下触发快速响应与冗余备份机制。

2 系统硬件设计与选型

系统硬件设计遵循高可靠性、高适配性、抗干扰

性、易维护性原则,针对南疆高温、高沙尘工况完成精准选型与专用防护设计,兼顾光伏变频供电特性与缓冲水箱控制需求,核心硬件选型及配置如下。

2.1 现场感知层:传感器与变送器

针对南疆高沙尘、高矿化度工况,所有传感器均做专用防护:压力/差压传感器采用防结垢陶瓷探头;浊度/电导率传感器配备每 2 h 自动清洗 1 次的

清洗装置;光伏辐照度传感器加装防风沙遮光罩与 30°倾角调节装置(适配南疆日照角度);缓冲水箱液位变送器选用高精度型号,精准监测液位波动。

核心传感器与变送器的选型、参数及应用位置见表 1,所有传感器均具备 4~20 mA 标准模拟量或 RS485 数字量输出,与 PLC 无缝对接,抗干扰能力强,满足 24 h 连续采集需求。

表 1 现场感知层核心传感器/变送器选型及参数

传感器类型	型号	测量范围	精度	输出信号	应用位置	专用防护/适配设计
环境光照传感器	TBQ-2C	0~2000 W/m ³	±2% FS	4~20 mA	环境监测点	防风沙遮光罩,倾角 30°,防腐外壳
环境温度传感器	PT100	-40~80 ℃	±0.1 ℃	4~20 mA	环境监测点、PLC 柜	防尘密封,耐高温,防腐处理
光伏辐照度传感器	TBQ-2C	0~2000 W/m ³	±2% FS	4~20 mA	光伏阵列中央	防风沙遮光罩,倾角 30°
光伏发电量传感器	DTSU666	0~200 kW	±0.5% FS	RS485	光伏逆变器	防电磁干扰,屏蔽线敷设
储能 SOC 传感器	BMS-200	0~100%	±1% FS	RS485	储能电池组	欠压/过压/过热保护
缓冲水箱液位变送器	MPM4700	0~5 m	±0.02% FS	4~20 mA	缓冲水箱	高精度,防挂料,实时监测波动
电磁流量计	LDG-DN80	0~40 m ³ /h	±0.2% FS	4~20 mA	缓冲水箱进出水	衬氟防腐,防尘密封接口
压力变送器	MPM480	0~10 MPa	±0.2% FS	4~20 mA	高压泵进出口	防结垢陶瓷探头,抗压力波动
电导率变送器	DDSJ-307F	0~1000 μS/cm	±0.5% FS	4~20 mA	反渗透产水	防腐探头,温度补偿

2.2 核心控制层:PLC 与配套模块

核心控制层选用西门子 S7-400H 冗余 PLC 系统,确保 24 h 无故障连续运行,主站为 CPU417-5H,运算速度≤0.05 μs/指令,满足多参数、多模型的实时计算需求;配置 ET200SP 远程 I/O 模块,就近安装于现场设备旁,减少信号传输距离,降低电磁

干扰与沙尘影响。

PLC 系统详细配置见表 2,所有模块均为工业级设计,工作温度-25~60 ℃,适配南疆高温环境。配备西门子 TP1500 精智触摸屏作为本地操作终端,具备防尘、防水、防反光特性,适配现场强光环境。

表 2 西门子 S7-400H PLC 系统详细配置

模块类型	型号	数量	核心参数	主要功能
CPU 模块	6ES7417-5HT06-0AB0	2(冗余)	3.6MB 内存,运算≤0.05 μs/指令	主控制,光伏峰谷识别,冗余容错
电源模块	6ES7407-0KA02-0AA0	2	10 A,24 VDC	稳定供电,冗余备份,适配电压波动
模拟量输入模块	6ES7431-7KF00-0AB0	8	8 点/块,16 位精度	采集环境、光伏、工艺模拟量信号
模拟量输出模块	6ES7432-5HF00-0AB0	4	8 点/块,16 位精度	输出控制信号至执行机构
通信模块	6ES7443-1GX30-0XE0	2	以太网/Profinet,100 Mbps	与上位机、4G/5G 模块通信
本地触摸屏	TP1500	1	15 英寸,彩色触控,防反光	本地操作、参数设置、故障复位

PLC 控制柜采用 304 不锈钢双层密封结构,防护等级 IP65,内置工业空调、除湿机、防雷器,确保柜内设备稳定运行;柜内布线遵循强电/弱电、模拟量/数字量分离原则,所有信号线采用屏蔽线,接地电阻≤4 Ω,有效降低光伏供电的电磁干扰。

2.3 通信层:现场与远程通信设计

针对南疆现场环境与偏远地理位置,采用工业以太网+PROFIBUS-DP+4G/5G 三层通信架构,实现高速、可靠通信,各层级均设置冗余备份,确保 24 h 不间断数据传输。

现场通信中,PLC 与远程 I/O、变频柜、缓冲水箱设备间采用 PROFIBUS-DP 总线,传输速率 1.5

Mbps,通信距离≤1000 m,屏蔽双绞线敷设于镀锌钢管内,降低电磁干扰与沙尘侵蚀;本地通信里,PLC 与上位机、环境监测站间采用工业以太网,传输速率 100 Mbps,光纤传输介质,抗电磁干扰能力强,采用 TCP/IP 协议实现数据双向实时传输,主链路故障时备用链路 10 s 内自动切换;远程通信采用华为 ME909s-821 4G/5G 工业无线模块,支持双模切换,传输速率≥10 Mbps,工作温度-40~85 ℃,防护等级 IP67,适配南疆信号覆盖特点。模块内置防雷保护,与 PLC 以太网对接,实现数据实时上传与运维指令下发,支持 72 h 离线数据存储,主模块故障时备用模块 30 s 内自动切换。

2.4 执行机构层与辅助硬件

执行机构层选用适配光伏变频供电的设备,核心配置包括:变频泵、电动调节阀、自动加药装置、次氯酸钠消毒装置,所有设备均具备过压、过流、过热保护功能,可应对光伏出力波动导致的电压、电流变化。

辅助硬件包括 10 m³ 缓冲水箱、光伏储能系统、工业工控机、4G/5G 云服务器,所有辅助硬件均做防尘、防腐处理,适配南疆现场工况。

3 系统软件设计

系统软件设计采用模块化、结构化思路,基于西门子 TIAPortalV17 开发 PLC 控制程序,WinCC Professional 开发上位机监控软件,Java 语言开发远程运维软件,集成卡尔曼滤波、光伏峰谷动态识别、变参数 PID 控制、故障诊断等核心算法,实现数据采集与处理、光伏峰谷精准识别、缓冲水箱液位精准控制、预处理-脱盐撬块柔性联动、远程运维等功能。

3.1 软件整体架构设计

系统软件由 8 大核心模块组成,各模块相互协同、数据互通,数据采集与处理模块为核心数据枢纽,光伏峰谷动态识别模块为运行模式切换核心,缓冲水箱液位控制模块为工艺与能量解耦核心,各模块各司其职、联动配合。

数据采集与处理模块负责采集传感器模拟量/数字量数据,完成量程转换、卡尔曼滤波、数据有效性判断,输出标准化数据;光伏峰谷动态识别模块接收环境与光伏参数,基于动态阈值模型划分峰、平、谷时段,输出状态信号;缓冲水箱液位控制模块基于变参数 PID 算法,动态调节进出水流量,将液位稳定在 3.0~4.0 m 预设区间;预处理-脱盐撬块联动控制模块接收峰谷状态与液位指令,执行峰值满负荷、平值时序优化、谷值低耗间歇策略;故障诊断与报警模块基于故障特征库实现 28 类故障精准诊断,触发分级报警与紧急保护;上位机监控模块实现参数可视化、历史数据查询、报表生成,支持权限管理;远程运维模块基于 Web 端与移动 APP,实现远程监控、故障预警、工单管理、参数远程设置;软件抗干扰模块集成数据滤波、指令防抖、程序看门狗等策略,确保极端工况下软件稳定运行。

(1) 卡尔曼滤波算法

为剔除沙尘、电磁干扰导致的传感器数据异常,采用卡尔曼滤波算法对模拟量数据进行降噪处理,核心递推公式为:

状态预测:

$$\hat{X}_k^- = A \hat{X}_{k-1} + B_u U_{k-1} \quad (1)$$

$$P_k^- = A P_{k-1} A^T + Q \quad (2)$$

观测更新:

$$K_k = P_k^- H^T (H P_k^- H^T + R)^{-1} \quad (3)$$

$$\hat{X}_k = \hat{X}_k^- + K_k (Z_k - H \hat{X}_k^-) \quad (4)$$

$$P_k = (I - K_k H) P_k^- \quad (5)$$

式中: $\hat{X}_k$ 为 k 时刻滤波后状态值; Z_k 为 k 时刻观测值; K_k 为卡尔曼增益; Q 为过程噪声协方差; R 为观测噪声协方差; A 为状态转移矩阵; H 为观测矩阵。

(2) 光伏峰谷动态识别模型

基于环境参数与光伏参数,构建动态阈值模型,划分峰、平、谷时段。

基础阈值:标准工况(25℃)下,辐照度峰值阈值为 $G_1 = 800 \text{ W/m}^2$,平值阈值为 $G_2 = 300 \text{ W/m}^2$ 。

温度修正系数为:

$$K_T = 1 + 0.01 \times (25 - T) \quad (6)$$

沙尘修正系数:根据沙尘浓度分级,轻度沙尘 $K_s = 0.9$,中度沙尘 $K_s = 0.7$,重度沙尘 $K_s = 0.5$ 。

动态阈值:

$$G_1' = G_1 \times K_T \times K_s, G_2' = G_2 \times K_T \times K_s \quad (7)$$

峰谷判定:当 $G \geq G_1'$ 且光伏出力 $P \geq 80 \text{ kW}$,为峰值; $G_2' \leq G < G_1'$ 且 $30 \text{ kW} \leq P < 80 \text{ kW}$,为平值; $G < G_2'$ 且 $P < 30 \text{ kW}$,为谷值。

(3) 变参数 PID 控制算法

缓冲水箱液位采用变参数 PID 闭环控制,核心公式为:

$$u(t) = K_p \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (8)$$

式中: $u(t)$ 为控制输出量; $e(t) = H_{\text{set}} - H_{\text{act}}$ 为液位偏差; K_p 为比例系数; T_i 为积分时间; T_d 为微分时间。

根据光伏峰谷时段调整 PID 参数:峰值 $K_p = 5.0$, $T_i = 10 \text{ s}$, $T_d = 2 \text{ s}$;平值 $K_p = 4.0$, $T_i = 12.5 \text{ s}$, $T_d = 3.3 \text{ s}$;谷值 $K_p = 3.0$, $T_i = 20 \text{ s}$, $T_d = 5 \text{ s}$ 。

3.2 PLC 控制程序开发

PLC 控制程序采用结构化文本(ST) + 功能块图(FBD)混合编程方式,遵循“主程序-子程序-功能块”分层架构,主程序负责初始化与调度,子程序实现具体功能,功能块封装通用算法,程序扫描周期 100 ms,确保控制实时性。

3.2.1 主程序设计

主程序(OB1)为程序调度核心,初始化阶段完成 PLC 模块自检、传感器校准、参数初始化(液位预设值、峰谷阈值、PID 参数)、通信链路初始化;调度阶段按故障诊断>光伏峰谷识别>液位控制>联动控制>数据上传>反洗控制的优先级调用子程序,当某子程序触发故障时,立即调整优先级执行故障处理逻辑。

3.2.2 核心子程序开发

据采集与处理子程序采集模拟量/数字量数据,对模拟量执行量程转换,将 4~20 mA 转换为实际物理量,同时完成卡尔曼滤波;对数字量执行防抖处理,连续 3 个扫描周期状态一致确认有效。设置数据异常识别机制,当数据超出合理范围或连续 10 个扫描周期无变化时,切换至冗余传感器数据,无冗余时触发故障报警。处理后的数据存储至 PLC 数据块(DB 块),按 1 s 间隔上传至上位机。

光伏峰谷动态识别子程序输入光照强度、环境温度、光伏辐照度、实际出力等参数,通过光伏峰谷动态识别模型计算动态阈值,完成峰谷时段判定,输出状态信号至联动控制与液位控制子程序,识别响应时间 ≤ 1 s,保障峰谷判定的实时性。

缓冲水箱液位控制子程序输入实时液位、光伏峰谷状态信号,基于变参数 PID 算法输出预处理出水流量与脱盐进水流量调节指令。液位控制目标 3.0~4.0 m,当液位高于 4.0 m 时增大脱盐进水流量、减小预处理出水流量;当液位低于 3.0 m 时则反向调节。设置极值保护,液位 ≥ 4.8 m 时预处理停机、脱盐满负荷运行并打开溢流阀;液位 ≤ 0.5 m 时脱盐降负荷、预处理满负荷运行,确保水箱不溢流、不抽空。

预处理-脱盐撬块联动控制子程序接收峰谷状态与液位指令,实现柔性联动,同时集成过滤器反洗逻辑。峰值时段预处理与脱盐撬块满负荷运行,预处理出水 20 m³/h,脱盐产水 8.3 m³/h,液位控制目标 3.5~4.0 m,最大化利用光伏能源;平值时段基于液位动态调整负荷,液位 ≥ 3.8 m 时预处理降负荷、脱盐满负荷,3.0 m<液位<3.8 m 时两者 70% 负荷运行,液位 ≤ 3.0 m 时预处理满负荷、脱盐 50% 负荷,设备启停间隔 30s,降低启动冲击电流;谷值时段预处理按需启停,液位 ≤ 3.0 m 启动,液位 ≥ 3.8 m 停机,脱盐间歇运行,20 min 运行+10 min 停机,运行时高压泵频率 30 Hz,产水 5.0 m³/h,降低

储能消耗;过滤器反洗在压差 ≥ 0.1 MPa 时触发,优先选择光伏峰值时段,采用“3 min 气洗+5 min 水洗”的方式,气洗压力 0.2 MPa,水洗流量 30 m³/h,反洗期间备用过滤器保障出水连续。

故障诊断与报警子程序建立包含 28 类故障的故障特征库,涵盖传感器故障、高压泵故障、通信故障等类型,每类故障对应明确特征参数。实时对比监测参数与特征库,判定故障类型并记录故障信息,包含故障时间、代码、位置、参数等,触发三级报警机制。轻微故障如传感器波动仅进行远程预警;一般故障如单台高压泵故障触发本地声光报警+远程推送,同时自动切换备用设备;严重故障如水箱溢流、光伏供电中断执行紧急停机,停机顺序为先脱盐、后预处理、最后关进水阀,同时进行多渠道紧急预警。

3.2.3 功能块封装

为提升程序复用性与可维护性,将通用算法封装为标准化功能块(FB),供各子程序调用。卡尔曼滤波功能块(FB10)输入原始数据,输出滤波后数据,支持滤波系数自定义;PID 控制功能块(FB20)输入设定值、实际值,输出控制量,支持峰谷参数切换;光伏峰谷识别功能块(FB30)输入环境与光伏参数,输出峰谷状态信号,内置动态阈值修正;故障诊断功能块(FB40)输入监测参数,输出故障代码与类型,支持特征库更新。

3.3 上位机监控界面开发

上位机监控界面基于 WinCC Professional 开发,采用模块化设计,按功能划分 8 大核心界面,遵循简洁直观、操作便捷原则,通过工业以太网与 PLC 通信,数据更新周期 100 ms,支持权限管理,分为管理员、运维人员、访客 3 个等级。系统总览界面作为首页,以组态模拟图展示光伏阵列、缓冲水箱、脱盐撬块等核心设备状态,实时显示液位、产水电导率、光伏出力、储能 SOC,顶部滚动显示故障信息,底部设置系统启停、自动/手动切换、紧急停机按钮,实现系统整体状态的快速查看与核心操作。光伏储能监控界面显示光照、温度、辐照度、光伏出力、储能 SOC 等参数,绘制光伏出力-时间、SOC-时间趋势曲线,支持多时段查看,当出力波动 $>30\%/min$ 时触发预警,及时掌握光伏储能运行状态。

工艺参数监控界面按工艺流程分区展示原水水质、预处理参数、缓冲水箱参数、反渗透参数,参数超限时变红闪烁并触发报警,实现工艺参数的精细化监控。设备状态监控界面以列表+图标展示泵、阀、

变频器等设备状态、运行时长、电流/电压,手动模式下支持设备启停,故障时图标变红闪烁并显示故障代码,方便设备状态的实时监测与故障定位。缓冲水箱控制界面显示液位、进出水流量、PID 参数,绘制液位趋势曲线,支持 PID 参数在线整定与液位预设区间微调,实现缓冲水箱的精准控制。故障报警界面分实时、历史报警两个板块,实时报警显示未处理故障及处理建议,支持故障确认与远程复位;历史报警按时间倒序存储,支持多条件筛选与导出,便于故障的追溯与分析。参数设置界面支持光伏峰谷阈值、工艺控制精度、设备运行参数、报警阈值的在线修改,修改后需二次确认并留存记录,防止误操作。报表统计界面自动生成日报、周报、月报,包含光伏发电量、产水量、水质达标率、设备运行时长、故障次数等核心数据,为能耗分析与成本核算提供数据支撑。

上位机配备工业硬盘,采用循环存储方式存储历史数据,存储周期 ≥ 1 年,硬盘存满后自动覆盖最早数据。集成数据安全保护功能,包含操作日志记录、手动/自动数据备份、权限分级管理,操作日志记录所有登录、操作、参数修改行为,数据备份周期可自主设置,全方位防止数据丢失或误操作。

3.4 远程运维软件开发

远程运维软件基于 Java 语言开发,采用 B/S 架构,支持 Web 端远程监控平台与移动 APP 双端访问,通过 4G/5G 模块与 PLC 数据交互,解决南疆偏远地区运维不便问题,实现无人值守高效运维。

Web 端远程监控平台部署于云服务器,支持浏览器访问,无需安装客户端。可实现实时状态监控,同步上位机核心数据,数据更新周期 ≤ 5 s;故障预警与处理,接收故障报警信息,首页弹出提示,支持故障确认、远程复位,预警信息可通过短信或邮件推送;参数远程设置,管理员身份认证后,可远程修改光伏峰谷阈值、PID 参数等核心参数,响应时间 ≤ 1 s;历史数据查询,支持多参数、多时间范围查询,绘制趋势曲线,可导出 Excel 报表;运维工单管理,支持工单创建、分配、跟踪,实时更新工单状态;系统管理,包含用户管理、操作日志查询、数据备份与恢复,保障平台安全。

移动 APP 支持 Android/iOS 双系统,采用轻量化设计,聚焦便捷运维核心需求。故障预警推送功能在故障发生时进行震动+铃声提醒,推送故障详情与处理建议,支持远程复位;简洁状态查看功能展示光伏出力、液位、产水流量、电导率等核心参数与

设备状态,实现移动化监控;工单管理功能支持接收、处理、反馈工单,可上传检修照片,实现闭环管理;离线数据查看功能存储最近 72 h 运行数据,无网络时可查看,网络恢复后自动同步。

远程通信采用 SSL/TLS 加密传输协议,对数据传输进行加密,防止窃取或篡改;设置通信防火墙,过滤非法访问请求;定期更新模块固件与软件版本,修复安全漏洞;限制远程操作权限,仅管理员可执行参数修改、设备启停等关键操作,全方位保障远程通信安全。

4 系统调试与验证

为验证系统性能与可靠性,在南疆某团场项目现场完成安装调试后,开展 30 天试运行验证,重点测试光伏峰谷识别精度、工艺控制精度、光伏利用率、连续运行稳定性、故障诊断准确性及远程运维功能,验证系统对南疆高温、高沙尘、全光伏供电工况的适配性。

4.1 调试内容与方法

硬件调试涵盖传感器校准、PLC 系统调试、通信链路调试、执行机构调试。采用标准仪器对所有传感器现场校准,确保测量精度符合设计要求;测试 PLC 冗余模块切换功能,模拟单 CPU 故障,验证备用 CPU 在 1 s 内自动切换,同时测试 PLC 与各设备的通信连接,确保数据传输稳定;测试工业以太网、PROFIBUS-DP、4G/5G 的传输速率、误码率,验证断网重连与冗余切换机制;在手动、自动模式下测试泵、阀、加药装置的响应性能,验证与 PLC 指令的匹配性。

软件调试包含 PLC 控制程序、上位机监控软件、远程运维软件调试。在线监控各子程序与功能块运行逻辑,优化 PID 参数与峰谷阈值修正系数,确保光伏峰谷识别与联动控制精准;测试上位机各界面数据显示、趋势绘制、参数设置、故障报警功能,确保操作流畅、数据同步及时;测试 Web 端与 APP 的数据同步、远程参数设置、故障推送功能,验证通信加密与权限管理的有效性。

4.2 试运行验证结果

光伏峰谷识别精度方面,同步记录环境与光伏参数,将系统识别的峰谷状态与人工判定对比,结果显示光伏峰谷识别响应时间 ≤ 1 s,识别准确率 $\geq 98.5\%$;在 42℃ 高温、重度沙尘等极端工况下,识别准确率仍达 97% 以上,动态阈值修正机制有效避免了固定阈值的识别偏差,保障了峰谷识别的准确性

与环境适配性。

工艺控制精度重点测试缓冲水箱液位、流量、压力控制精度,结果如表 3 所示,所有参数控制精度均优于设计指标,产水电导率稳定在 $12 \sim 18 \mu\text{S}/\text{cm}$,浊度 $\leq 0.5 \text{ NTU}$,满足《生活饮用水卫生标准》要求,实现了工艺参数的精准调控。

表 3 工艺参数控制精度验证结果

工艺参数	设计精度	实际验证精度
缓冲水箱液位/ m	± 0.05	± 0.04
预处理出水流量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1})$	± 0.1	± 0.08
反渗透产水流量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1})$	± 0.1	± 0.09
高压泵出口压力/ MPa	± 0.02	± 0.015

光伏利用率与储能消耗方面,30 天试运行期间,系统累计光伏发电量 2850 kWh ,累计消耗电能 2340 kWh ,其中光伏直接供电 2020 kWh ,储能供电 320 kWh ,光伏利用率达 85.6% ,超出设计指标要求,储能充放电效率 92.3% ,谷值时段储能平均消耗功率 $\leq 10 \text{ kW}$,较传统控制系统光伏利用率提升 18 个百分点,储能消耗降低 25% ,大幅提升了光伏能源利用效率。

连续运行稳定性上,30 天内系统 24 h 连续稳定运行,无计划停机率为 0,累计产水量 5980 m^3 ,日均产水量 199.3 m^3 ,接近设计产能 $200 \text{ m}^3/\text{d}$;在 45°C 高温、3 天连续沙尘等极端工况下,系统运行参数保持稳定,缓冲水箱液位无溢流、抽空现象,供水连续性不受影响,满足南疆现场连续供水需求。

故障诊断与远程运维方面,模拟传感器故障、高压泵故障、通信中断等多类常见故障,系统故障诊断准确率 100% ,分级报警机制运行正常;远程运维功能稳定,Web 端与 APP 数据同步延迟 $\leq 3 \text{ s}$,远程参数设置响应时间 $\leq 1 \text{ s}$,故障远程复位成功率 100% ,运维工单闭环管理顺畅,有效降低人工运维成本,实现了智能化远程运维。

4.3 调试验证结论

现场调试与 30 天试运行验证表明,系统的光伏峰谷识别精度、工艺控制精度、光伏利用率、连续运行稳定性、故障诊断准确性及远程运维功能均达到或优于设计指标,能够精准适配现场高温、高沙尘、全光伏供电的工况需求,可实现 24 h 连续稳定供水,最大化光伏能源消纳,满足实际运行需求。

5 结论与展望

5.1 结论

针对南疆团场全光伏供电苦咸水淡化装置 24 h

连续运行需求,设计基于 PLC + 上位机的光伏适配型苦咸水淡化控制系统,通过硬件精准选型与防护、软件模块化设计与核心算法集成,有效解决了传统控制系统光伏适配性差、利用率低、运维成本高等问题。

系统采用五层分布式架构,增设缓冲水箱实现工艺与能量双解耦,结合环境监测数据构建光伏峰谷动态识别模型,制定“峰值满负荷、平值时序优化、谷值低耗间歇”的精细化联动控制策略,解决了光伏发电与淡化工艺的供需错配问题。硬件设计充分兼顾南疆高温、高沙尘工况,完成传感器专用防护、PLC 冗余配置、通信链路冗余设计,所有硬件防护等级 $\geq \text{IP65}$,工作温度 $-25 \sim 60^\circ\text{C}$,具备强抗干扰、抗沙尘能力,可适配全光伏供电电压波动特性。软件集成卡尔曼滤波、变参数 PID、故障特征库匹配等核心算法,开发 PLC 控制程序、上位机监控软件与远程运维软件,实现了数据降噪、光伏峰谷精准识别、工艺参数精准控制、故障分级报警与远程运维,软件抗干扰能力强,可在极端工况下稳定运行。

现场试运行验证表明,系统光伏峰谷识别响应时间 $\leq 1 \text{ s}$ 、准确率 $\geq 98.5\%$,工艺参数控制精度达液位 $\pm 0.04 \text{ m}$ 、压力 $\pm 0.015 \text{ MPa}$,光伏利用率提升至 85.6% ,可实现 24 h 连续稳定供水,故障诊断准确率 100% ,远程运维功能可靠,完全适配南疆团场工况需求。该系统突破了传统固定控制模式与刚性联动的局限性,实现了光伏发电与苦咸水淡化工艺的精准适配,为西北同类偏远地区全光伏供电水处理项目提供了可行的智能化控制方案,具有重要的工程应用价值。

5.2 展望

未来将从光伏出力预测、控制算法优化、区域协同运维 3 个方向对系统进行优化,提升光伏适配性与智能化水平。引入光伏出力预测功能,基于 LSTM 神经网络,结合历史环境数据与实时光照、温度参数,构建光伏出力 24 h 预测模型,提前优化运行策略,提升光伏消纳效率与储能利用合理性;集成模型预测控制 (MPC) 算法,替代传统 PID 控制,综合考虑光伏出力变化、工艺参数约束、储能 SOC 状态,实现多目标优化控制,提升工艺控制精度与能源利用效率;构建区域协同运维平台,实现南疆团场多项目集中监控、故障智能诊断、运维资源优化调度,降低运维成本,提升运维效率,为西北偏远地区光伏供电水处理工程的规模化、智能化发展提供支撑。

(下转第 31 页)

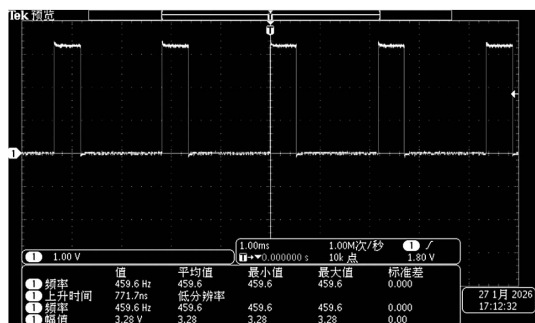


图 6 GD32H757 测试结果

表 1 算法解算频率对比

	STM32F411	GD32H757
启用 FPU/ μ s	1280	530
不启用 FPU/ μ s	1344	640

从表 1 可以看出,开启 FPU 后,GD32H757 的姿态解算时间比自身减少了约 17%,比 STM32F411 减少了约 59%。该结果表明,GD32H7 的高主频和双精度 FPU 有效提升了互补滤波算法的计算速度。新的硬件设计使解算频率提高至 1 kHz 以上。

4 结论

该文基于 GD32H757 单片机设计了一种全国产化的惯性测量单元,并搭建平台完成了算法执行效率的验证实验。实验结果表明,GD32H757 单片机硬件性能的提升能够显著提高系统的数据处理能力和算法执行效率。另外,该文还解决了传统设计中

对进口器件的依赖问题,为国内相关领域的技术发

展提供了新的解决方案。

参考文献:

- [1] 张燕,王博.微惯性测量单元研究[J].电工技术,2023(6):13-15.
- [2] 李孟委,徐文武,张鹏.基于四元数互补滤波算法的车载 MIMU[J].河南理工大学学报(自然科学版),2021,40(1):111-117.
- [3] 张禹,钱宏文.一种全国产化捷联惯性导航信号处理平台设计[J].电子技术应用,2021,47(5):102-107.
- [4] 陈世强,刘明.基于 STM32F767IGT6 的 AGV 姿态解算系统设计[J].电子设计工程,2023,31(5):70-79.
- [5] 赵雨婷,邢计元,张东钥,等.基于 DSP 的实时姿态感知系统设计[J].电子技术应用,2025,51(11):76-82.
- [6] 胡楷,李雷.基于国产 DSP 多传感器融合姿态解算系统[J].现代电子技术,2024,47(21):177-182.
- [7] 宗意凯,苏淑靖,高瑜宏.基于多源 IMU 和粒子滤波优化的姿态融合算法[J].仪表技术与传感器,2023(8):88-95.
- [8] 黄亚辉,王巍,阳领.卡尔曼滤波与互补滤波在移动机器人导航中的对比研究[J].电子制作,2025(1):109-112.
- [9] 李瑞,王伟,唐龙鑫,等.基于决策树的自适应互补滤波姿态解算[J].科学技术与工程,2024,24(4):1538-1545.
- [10] 李文良,颜斌,冯彬.基于单片机的互补滤波与四元数滤波的研究[J].电子制作,2024(6):37-39.
- [11] 彭井花.基于 STM32 和 MPU9250 的高精度姿态检测系统设计[J].宁夏大学学报,2025,46(4):428-436.

(上接第 26 页)

参考文献:

- [1] 马晓菲,姜继芳,杜明亮.喀什地区苦咸水利用潜力及成因研究[J].地下水,2025,47(2):76-79+115.
- [2] 刘绍山,张鹤,朱伯媛.库尔勒地区苦咸水自然冷冻淡化技术研究[J].当代化工研究,2023,23(7):164-166.
- [3] 陈泉.风光耦合电解水制氢技术在光伏发电中的应用分析[J].光源与照明,2025,48(5):157-159.
- [4] 李娜,许楚斯,曾湘安.沙尘天气对屋顶光伏组件性能影响分析[J].环境技术,2024,42(6):200-204+212.
- [5] 黄平.基于 PLC 控制的智能农业灌溉系统设计与优化[J].中国农机装备,2025,25(10):123-125.

- [6] 沈昱雯,王昊洋.偏远地区光伏-储能一体化系统供电关键技术及其应用[J].光源与照明,2025,48(9):190-192.
- [7] 朱烈兵.设计自动化 PLC 标准程序在水处理中的应用[J].流体测量与控制,2021,2(2):49-52.
- [8] 胡津诚.光伏牛棚提水系统的设计过程浅析[J].高原工业,2026,10(1):103-109.
- [9] 张融,张铭杰,陈旭.基于卡尔曼滤波与电磁屏蔽的真空微推力测量信号降噪方法研究[J].集成电路与嵌入式系统,2026,25(2):1-6.
- [10] 赵晴晴.汽车动力电池 SOC 估算的卡尔曼滤波数学算法[J].汽车电器,2026,67(2):23-25.