

基于优化供电配置与电网需求响应的水产养殖智能监测系统研究

孔祥瑞, 成 杨, 冯仁杰, 郭栩畅

南京工程学院电力工程学院、沈国荣学院, 江苏 南京

收稿日期: 2026年3月18日; 录用日期: 2026年3月31日; 发布日期: 2026年4月30日

摘 要

在电力体制改革的背景下, 针对水产养殖行业中日益增长的电力需求与环境管理挑战, 研究构建了一套基于优化供电配置与电网需求响应的水产养殖智能监测系统。该系统利用物联网技术实现对水质参数与电力使用的实时监测与分析, 以动态协调水产养殖供需关系, 促使能源资源的高效利用。研究采用多元化的数据收集方法, 包括文献调研、案例分析及实地考察, 系统分析了智能监测系统对养殖效率提升及电网经济效益优化的显著影响。研究结果表明, 该智能监测系统有效降低了养殖运营成本, 优化了饲料管理, 提升了水产养殖的生态友好性与可持续发展能力。同时, 电网的优化配置与需求响应机制相结合, 确保了养殖用电的稳定性, 促进了电力资源的合理配置。

关键词

智能监测系统, 水产养殖, 优化供电配置, 电网需求响应, 可持续发展

Research on an Intelligent Monitoring System for Aquaculture Based on Optimized Power Supply Configuration and Grid Demand Response

Xiangrui Kong, Yang Cheng, Renjie Feng, Xuchang Guo

School of Electric Power Engineering (School of Shengguorong), Nanjing Institute of Technology, Nanjing Jiangsu

Received: March 18, 2026; accepted: March 31, 2026; published: April 30, 2026

Abstract

In the context of power system reform, in response to the increasing power demand and environ-

文章引用: 孔祥瑞, 成杨, 冯仁杰, 郭栩畅. 基于优化供电配置与电网需求响应的水产养殖智能监测系统研究[J]. 电力与能源进展, 2026, 14(2): 149-156. DOI: 10.12677/aepe.2026.142016

mental management challenges in the aquaculture industry, a set of intelligent monitoring system for aquaculture based on optimized power supply configuration and grid demand response was developed. This system utilizes Internet of Things technology to achieve real-time monitoring and analysis of water quality parameters and power usage, dynamically coordinating the supply and demand relationship in aquaculture and promoting the efficient utilization of energy resources. The study adopted diversified data collection methods, including literature research, case analysis, and field investigation, to systematically analyze the significant impact of the intelligent monitoring system on the improvement of aquaculture efficiency and the optimization of grid economic benefits. The research results show that this intelligent monitoring system effectively reduces operating costs in aquaculture, optimizes feed management, and enhances the ecological friendliness and sustainable development capabilities of aquaculture. At the same time, the combination of optimized power supply configuration and demand response mechanism of the grid ensures the stability of aquaculture power supply and promotes the rational allocation of power resources.

Keywords

Intelligent Monitoring System, Aquaculture, Optimized Power Supply Configuration, Grid Demand Response, Sustainable Development

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

水产养殖是我国农业生产与食品供给的关键支柱产业，其现代化与规模化发展对能源供应的稳定性和高效性提出了更高要求[1]；同时，我国电力体制改革对电网运行的精细化调控与能源消耗侧的优化管理提出了新的目标[2]。在此背景下，一方面，规模化、高密度的水产养殖已经成为了不可忽视的连续电力负荷，对供电可靠性和经济性构成了挑战，另一方面，电网侧急需发展灵活的管理手段以优化负荷曲线、降低损耗并促进可再生能源消纳。这两方面的需求促使了水产养殖与电力系统的深度融合和协调优化[3]。

近年来，物联网、人工智能等技术的发展推动了水产养殖的智能化转型。现代智能监测系统结合了物联网技术、云计算和大数据分析，为养殖户提供了实时监测和精准管理的手段[4]。杨琛等针对养殖区域供电不稳定问题，提出了一种基于多目标螳螂搜索算法的微电网优化调度方法，通过崇明区某水产养殖基地仿真，验证了算法优化在经济成本、环保目标方面的促进作用，为多能互补型养殖微电网的高效运行提供了理论技术支撑[5]。Nie 等通过养殖场试验评估了智能水产养殖系统在对虾养殖中的作用，通过与传统养殖方法的环境参数、性能参数对比，发现使用智能水产养殖系统提高了饲料的转化率、虾的生长速度，并降低了虾的发病率和死亡率[6]。蒋静运用理论与实验相结合的研究方法，通过具体案例开展物联网系统在稻虾共作养殖模式中的应用研究，设计开发了一套稻虾共作物联网监控系统，发现该系统能实施监控水质、温度和虾类生长状况，准确反馈最优养殖信息，相较于传统模式，“物联网 + 稻虾共作”模式中克氏原螯虾的终末体重、体长和增重率均显著提升，养殖总产量提高约 250% [7]。杨旭东等分析了边缘计算平台、计算卸载、数据存储与管理、安全隐私等核心技术的特点及其在渔业养殖中的应用适配性，研究发现边缘计算能有效减轻云端负荷、显著降低数据传输延迟与带宽压力，提升了渔业装备的数据处理速度和实时响应能力[8]。姜跃峰等结合实践观察和数据模型分析，系统梳理并阐述了人

人工智能技术在大口黑鲈工厂化养殖中的应用场景和关键技术路径，具体包括放养模式优化、水质监测调控、饲养管理升级、灾害防治、质量安全追溯与市场优化策略等方面[9]。相关研究实践已广泛部署各类水质传感器，通过数据分析实现了对溶解氧、pH值、温度等核心环境因子的实时监控与预警，显著提升了养殖管理的科学性与病害防控能力[10]。然而，这些研究与实践大多聚焦于对养殖对象及水体环境的独立监控与管理，其用能设备往往被视为单纯的负荷，但水产养殖的特殊运行模式和环境关联性使其成为独特的生产型负荷，其与电网的深度关联和实施路径尚未被系统性研究，养殖监测系统不关心电网的运行状态与经济性，电网优化调度也未能将养殖过程的相关约束纳入考量。

针对以上论述，如何设计一套协同机制，将水产养殖的智能调控需求与电力系统经济安全运行进行耦合从而提升养殖生产效益、优化区域配电网的运行状态是研究的关键。为此，本研究聚焦信息协同和控制协同耦合，旨在构建一个集智能感知、协同优化和自主决策于一体的水产养殖智能监测与能量优化系统。论文章节安排为：第二章阐述研究的理论基础，第三章说明研究方法，第四章详细设计智能监测系统，第五章进行结果分析，第六章为结论和展望。

2. 研究理论框架

2.1. 电网需求响应与线损主动优化理论

为提高水产养殖系统的能源利用效率，解决农村电网因养殖负荷冲击导致的高线损、地稳定性难题，本研究将宏观电网需求响应理论与微观的线损主动优化方法进行深度融合与适配。

传统电网需求响应理论侧重于引导用户调整整体用电负荷以削峰填谷，但在养殖场景中，宏观引导难以直接优化线路的具体损耗。本研究引入了线损敏感度分析作为延伸理论，即通过节点电压法与牛顿一拉夫逊潮流计算，建立适用于养殖场拓扑结构的电网等效模型，并定义各节点的“线损敏感度”。敏感度计算公式为：

$$S_i = \frac{\partial P_{loss}}{\partial P_i} \approx \frac{\Delta P_{loss}}{\Delta P_i}$$

式中， (P_{loss}) 为系统总线损， (P_i) 为节点 (i) 的注入功率。

进一步构建以全网线损最小为首要目标，兼顾光伏消纳率和储能协同的多目标优化模型，促使电网调度指令能精确作用到具体线路和高损耗节点上，从而将宏观能源管理与微观供电质量优化紧密结合。最小化总线损的目标函数表达为：

$$\min P_{loss} = \sum_{ij \in \Omega_L} \frac{R_{ij} (P_{ij}^2 + Q_{ij}^2)}{V_i^2}$$

其中， (R_{ij}) 为支路电阻， (P_{ij}) 、 (Q_{ij}) 为支路有功与无功功率， (V_i) 为节点电压幅值。

2.2. 水产养殖智能监测与自主决策理论

针对养殖水体环境复杂，水下图像普遍存在雾化、模糊、非均匀光照及红光衰减等问题，在感知层面，本研究通过组合分析改进的暗通道先验(DCP)与基于LIME框架的Retinex算法各自优势来解决特定退化问题。Retinex算法引入LIME框架与自适应权重图以解决非均匀光照问题，其光照分量估计公式为：

$$I(x) = R(x) \cdot L(x), \hat{L}(x) = \max_{c \in \{R, G, B\}} I^c(x)$$

处理后的高清图像是实现精准淤泥识别的基础，而在部署边缘设备时，模型的计算消耗和结果精度平衡和关注重点。本研究选择对YOLOv5s框架进行轻量化改进，通过综合可分离卷积方法并嵌入SE注

意力机制，有选择性地增强淤泥目标特征的权重，有效弥补了轻量化过程中可能带来的精度损失。

决策层的构建需要克服实时决策与全局优化之间的矛盾。传统的定时或阈值清洗策略缺乏灵活性，无法适应多变的养殖水体环境与波动的电网状态。本研究从理论层面构建了融合图像与多源环境数据(水质、声呐)的双流深度强化学习(DS-DRL)自适应控制策略，通过一个专门的多尺度特征融合 CNN (MSF-CNN)流来提取和融合多模态环境特征，该特征输入到一个基于 Actor-Critic 架构的深度强化学习流，通过设计一个多维度奖励函数来引导智能体自主学习最优清晰策略。奖励函数表达为：

$$R_t = \sum_{i=1}^n w_i r_i(s_t, a_t)$$

权重(w_i)通过逆强化学习从专家示范数据中学习获得，正向奖励包括成功识别异常、响应提速、能耗降低，负向奖励包括误报、漏报及延迟。

3. 研究方法

3.1. 数据收集与多源融合分析

为构建并验证理论模型，论文采用数据驱动、仿真验证和实地联调的系统性研究方法。

数据收集覆盖电力运行与养殖环境两类数据集。电力数据包括光伏出力曲线、储能 SOC、高耗能设备功率时序数据及线路阻抗参数；环境数据包括水下图像序列、水质传感器读数(pH、DO、NTU、浊度)、淤泥厚度与覆盖率。

分析方法上，采用线损敏感度模型与多源数据融合策略。基于电网拓扑与实时量测数据，计算各节点线损敏感度(S_i)，筛选关键调度节点。再对环境数据实施跨模态对齐，图像特征通过以下损失函数进行空间映射：

$$\mathcal{L}_{align} = \left\| \phi(f_{img}) - \psi(f_{sensor}) \right\|_2^2 + \lambda \cdot KL(p_{img} \parallel p_{sensor})$$

该融合方法为后续协同优化提供统一特征表示。数据分析工具包括 MATLAB/PowerFactory 用于电网仿真，Python/OpenCV 用于图像处理，TensorFlow/PyTorch 用于模型训练与评估[11]。

3.2. 案例仿真与对比实验法

为量化评估系统各项性能指标，本研究在华东某规模化养殖基地搭建了仿真与实景实验一体化平台，平台部署一套光储协同系统(光伏容量 200 kW，储能容量 500 kWh)及智能监测终端，并设计了三组对照实验。

实验一：验证线损优化效果。设置对照组(传统定时供电)与实验组(基于敏感度的光储协同调度)，运行周期 30 天。记录系统总线损、光伏消纳率、设备故障次数。

实验二：验证智能监测性能。在养殖池不同浊度条件下，采集水下图像 1000 组，记录 mAP、准确率、误报率及边缘设备推理耗时。

实验三：系统集成联动测试。模拟光伏出力骤降与水质突变复合场景，验证电力调度系统与监测清洗系统的协同响应能力，记录从异常识别到功率调整/清洗触发的端到端延迟[12]。

3.3. 实地考察与工程化联调方法

进驻养殖场进行为期 4 个月的实地考察与系统联调，考察重点包括：

- 1) 硬件部署适应性：验证光伏板抗腐蚀性能、储能集装箱散热设计、水下探头防生物附着效果。
- 2) 通信可靠性测试：在塘区复杂电磁环境下，测试 4G/NB-IoT/光纤等多种通信方式的丢包率与延迟。

3) 算法边缘部署：将轻量化 CNN 与 DRL 策略网络部署至 Jetson Nano 边缘计算盒，实测平均功耗与温度稳定性。

4) 人机交互与运维流程：记录养殖人员对系统可视化界面(Web/APP)的使用反馈，并编制标准化运维手册。

4. 智能监测系统设计

基于前述理论与方法，设计一套高度集成化的“水产养殖智能监测与能量优化系统”，集成环境监测、电力优化和智能决策三大核心功能，通过“云-边-端”三级架构实现协同运作，推动水产养殖供电系统向高效、低碳、智能化转型。

4.1. 系统总体架构设计

为解决养殖场景下网络连接不稳定、关键控制任务延迟、高并发数据处理集中管理的综合挑战，本研究采用“云-边-端”三级分布式架构，兼顾集中管理优势与边缘实时响应需求。

设备终端层：是系统感知与执行的末梢，由光伏阵列、储能系统、智能断路器、高耗能养殖设备、水下监测探头(含摄像头与多参数传感器)构成。各设备通过 Modbus-TCP/RS485 或无线 LoRa 接入。

边缘智能层：是整个系统的实时决策与控制核心。考虑到网络稳定性，该层设备部署在养殖区现场，形成了具有高度自治能力的本地环路。该层的核心在于模块化划分：

- 1) 电力调度引擎：实时运行线损敏感度分析算法与光储协同调度模型。
- 2) 视觉分析引擎：运行图像增强(DCP-Retinex)与目标检测(YOLOv5s 变体)流水线。
- 3) 本地决策单元：运行轻量化 DRL 策略网络，在断网时实现清洗触发、设备启停的自治决策。

云端平台层：提供大数据存储、历史数据分析、策略远程升级、可视化驾驶舱及移动 APP 服务。采用微服务架构，支持弹性扩容。

系统通信采用混合网络：关键控制指令走有线工业以太网，监测数据走 4G/5G 无线网络，确保高可靠与广覆盖[13]。

4.2. 核心功能模块设计

系统的高效运行依赖于电力与视觉监测两大模块的紧密耦合与智能化联动。电力优化模块通过线损敏感度分析驱动决策，而非简单的负荷需求排序，视觉监测与清洗决策模块则更侧重于环境感知与动作执行的实时联动。

4.2.1. 线损敏感度分析模块

该模块工作流程如下：

- 1) 数据采集：智能电表以 1 分钟周期采集各节点信息 (P_i, Q_i, V_i) 。
- 2) 敏感度计算：根据电网导纳矩阵及实测数据，在线计算 $(S_i = \partial P_{loss} / \partial P_i)$ 。
- 3) 节点筛选：应用阈值条件： $(S_i > 1.5 \times \bar{S} \ \&\& \ P_{i,rated} > 50 \text{ kW})$ ，生成“关键调度列表”。

4) 协同优化：以最小化 (P_{loss}) 为目标，结合光伏超短期预测(误差 > 10%的单元纳入调度)与储能 SOC 状态，求解如下优化问题：

$$\begin{aligned} & \min P_{loss}(P, Q) \\ & \text{s.t.} \quad P_{grid} + P_{pv} + P_{ess} = \sum P_{load} \\ & \quad \quad SOC_{min} \leq SOC \leq SOC_{max} \\ & \quad \quad |V_i| \in [0.95, 1.05] \text{ p.u.} \end{aligned}$$

5) 指令下发：优化结果转化为设备启停、功率设定指令，经 PLC 执行[14]。

4.2.2. 智能视觉监测与自适应清洗控制模块

该模块工程流程包括：

1) 图像预处理：摄像头以 5 fps 采集图像，经改进 Retinex 算法增强，公式中自适应权重图($W(x)$)根据局部标准差($\sigma(x)$)计算：

$$W(x) = \frac{1}{1 + \exp(-\alpha(\sigma(x) - \beta))}$$

2) 淤泥检测与分类：增强图像输入轻量化 CNN(含 SE 注意力)，输出三类置信度： $(C_{light}, C_{medium}, C_{heavy})$ 。

3) 多源决策融合：结合水质传感器实时数据(NTU 值、淤泥厚度)，采用 D-S 证据理论融合判断最终覆盖等级。

4) 清洗策略生成：若判定为“重度覆盖”或 NTU 突变超过阈值，则触发清洗指令。策略由 DRL 模块生成，奖励函数(R_t)融合图像识别准确率、响应时间与能耗。

4.3. 数据管理与分析平台设计

平台基于时序数据库与关系数据库构建混合存储体系，支持高频电力数据与结构化事件数据的高效存取。分析功能包括：

1) 能效看板：展示系统实时线损率、光伏自发自用率、单位产量电耗等 KPI。

2) 环境健康图谱：基于 GIS 展示各养殖池水质空间分布与历史趋势。

3) 预测性维护：基于设备运行数据与故障历史，训练 LSTM 模型预测增氧机、水泵等关键设备剩余寿命。

4) 策略仿真沙盘：提供图形化界面，供管理人员调整线损敏感度阈值、清洗触发条件等参数，并仿真不同策略下的经济与环境效益。

5. 结果与分析

5.1. 智能监测系统应用效果

通过实时数据采集与分析，系统能够精确监控水质参数，提升水域管理的科学性与有效性。针对夏季天气变化导致水中细菌滋生的挑战，系统及时提示养殖管理者采取相应措施，从而有效降低了鱼类的死亡率，保障了养殖效益。此外，优化的饲料投喂策略通过智能监测系统的实施得以精细管理，使养殖产品更快速达到市场规格，提升了经济收益。监测系统的全面数据分析功能为电网需求响应提供了有力支持，通过精准预测养殖用电需求，电网公司能够更合理地配置资源，实现能源的高效使用。这种全方位的监控和反馈机制，不仅促进了水产养殖的可持续发展，也为电力资源的优化配置奠定了坚实基础[15]。

5.2. 电网优化配置的经济效益

在电网优化配置的背景下，经济效益的提升是衡量系统性能的重要标准。通过合理的供电配置策略，电网能够在保障供应的前提下，降低运营成本及损耗率，从而实现经济效益的显著增长。优化过程中，电力需求响应的有效实施，使得电网在高峰负荷时段的负担得以平衡，通过分散高峰用电的需求，降低了对备用电源的需求，进而节约了电能成本。此策略的效果在水产养殖中尤为显著，智能监测系统的引入不仅提高了养殖环境的适应性响应，还可通过实时数据分析预测用电高峰，促使电网运营商实施精准调度。电网资源的科学配比和灵活调度，不仅为水产养殖提供了稳定的电力保障，亦在长远中减少了因

供电不足造成的经济损失。

5.3. 水产养殖管理指标改进效果

水产养殖管理指标的改进效果是通过数字化智能监测系统与优化供电配置的结合而实现的，显著提升了养殖效率与资源利用率。在实施智能监测系统后，实时监测养殖环境的水质、温度、溶氧等关键指标，使得养殖者能够及时捕捉到变化趋势，从而采取有效措施进行调节。通过持续的数据收集与分析，养殖单位能够针对不同水体的需求，精细化饲料投放，优化生长环境，提高鱼类的生长速率。同时，电网优化配置策略，也有效降低了养殖场的电力成本，为养殖者提供了更为稳定和经济的能源支持。许多养殖户在采用新管理模式后，观察到其养殖产品的品质和产量双双提升，不但满足了市场的需求，还增强了竞争力[16]。

6. 结论

本研究通过对电网优化配置与水产养殖智能监测系统的综合分析，揭示了两者的深度融合对提升水产养殖管理效率及电网经济效益的重大意义，主要研究结论如下。

- 1) 智能监测系统的引入显著提升了水产养殖的管理效率，尤其是在实时数据监测与环境调节上，通过信息技术的应用，不仅优化了养殖环境，还显著降低了鱼类死亡率。
- 2) 电网优化配置对水产养殖系统的可持续发展至关重要，合理的供电策略与需求响应机制的结合，有效解决了因供电不足而导致的养殖停滞现象，保证了养殖的持续性和经济效益的提升。
- 3) 管理层对水产养殖的重视程度在逐步提升，针对当前面临的挑战，提出了科学合理的管理优化建议，推动了养殖品种结构的优化与设施养殖技术的研发。

基金项目

2025 年江苏省大学生创新创业训练计划项目“基于需求响应与智能监控的水产养殖综合应用方案”(项目号 202511276077Y)。

参考文献

- [1] 刘波. 面向水产养殖的异构新能源系统能量控制设计研究[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 华中农业大学, 2025.
- [2] 张雅宁. XZ 供电公司电网规划管理优化研究[D]: [硕士学位论文]. 太原: 山西大学, 2021.
- [3] Wu, Y., Duan, Y., Wei, Y., An, D. and Liu, J. (2022) Application of Intelligent and Unmanned Equipment in Aquaculture: A Review. *Computers and Electronics in Agriculture*, **199**, Article ID: 107201. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.107201>
- [4] 邓棚文, 管毅敏. 智能化水产养殖工程中溶解氧在线监测与精准调控系统研究[J]. 江西农业, 2026(3): 160-162.
- [5] 杨琛, 高鑫, 戴莹宣, 许竞翔. 基于 IMOMSA 的水产养殖微电网多目标优化调度[J]. 上海海洋大学学报, 2026, 35(2): 588-600.
- [6] Nie, Y., Yang, H.N., Qu, K., Zhang, L.B. and Du, J.Y. (2025) Research on the Development and Application of an Intelligent Aquaculture System. *Information Resources Management Journal*, **38**, 1-20.
- [7] 蒋静. 稻虾共作物联网应用研究——以南通如皋为例[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京林业大学, 2024.
- [8] 杨东旭, 张胜茂, 戴阳, 吴祖立, 唐峰华, 樊伟. 边缘计算技术及其在渔业智能化装备中的应用浅析[J]. 渔业现代化, 2025, 52(4): 1-14.
- [9] 姜跃峰, 顾成威, 朱广银. 人工智能在大口黑鲈工厂化养殖中的应用[J]. 水产养殖, 2025, 46(11): 35-36.
- [10] 洪玉芳. 水产养殖的管理措施[J]. 宁夏农林科技, 2013, 54(2): 64-65.
- [11] 王伯东, 姚晓宏. 水产养殖管理技术探析[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2011(36): 1-5.
- [12] 于忠诚. 水产养殖后期管理措施[J]. 水产养殖, 2009, 30(11): 37.

- [13] 申芝郁. 基于电动汽车需求响应的微电网优化配置[D]: [硕士学位论文]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2023.
- [14] 卜世杰. 水产养殖环境智能监测系统的开发[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 兰州交通大学, 2016.
- [15] 王绍卜. 基于 ZigBee 的水产养殖智能监测系统设计[J]. 微型机与应用, 2013, 32(7): 16-19.
- [16] 邢俊, 李庆武, 何飞佳, 等. 基于智能视觉物联网的水产养殖监测系统[J]. 应用科技, 2017, 44(5): 46-51.