



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 119430521 A

(43) 申请公布日 2025. 02. 14

(21) 申请号 202411352146.2

C02F 1/66 (2023.01)

(22) 申请日 2024.09.26

G16C 20/10 (2019.01)

G16C 20/70 (2019.01)

(71) 申请人 杭州电子科技大学

C02F 103/06 (2006.01)

地址 310018 浙江省杭州市钱塘区白杨街
道2号大街1158号

(72) 发明人 黄进刚 汪海 徐晓滨 韩伟
裘姗姗 刘洁 侯平智

(74) 专利代理机构 杭州君度专利代理事务所
(特殊普通合伙) 33240

专利代理师 朱亚冠

(51) Int. Cl.

C02F 9/00 (2023.01)

C02F 1/52 (2023.01)

C02F 3/30 (2023.01)

C02F 3/12 (2023.01)

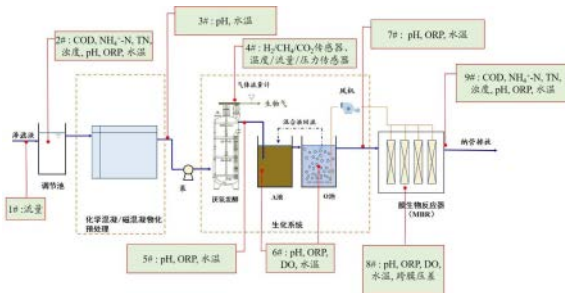
权利要求书2页 说明书9页 附图2页

(54) 发明名称

一种基于“端-边-云”协同控制的垃圾渗滤液低碳智能处理与资源化方法

(57) 摘要

本发明公开一种基于“端-边-云”协同控制的垃圾渗滤液低碳智能处理与资源化方法。所述方法是终端层获取各传感器实时监测数据,并发送到边缘层,在边缘层采用机器学习算法对出水水质指标、系统综合能耗、厌氧产氢速率进行多目标预测,进而构建目标函数,进而得到各模块的运行参数理想值;根据理想值和终端层传感器实时监测数据,对系统关键工艺运行工况进行调整,从而获取出水水质指标、厌氧产氢速率、系统综合能耗的最优结果。本发明通过“端-边-云”物联感知网络,优化、控制生化系统的运行参数,实现垃圾渗滤液处理与资源/能源化整体工艺流程的智能化管控,实现垃圾渗滤液处理与资源化过程中关键影响因素的动态调整。



1. 一种基于“端-边-云”协同控制的垃圾渗滤液低碳智能处理与资源化方法, 基于垃圾渗滤液处理系统; 所述垃圾渗滤液处理系统包括依次级联的调节池、絮凝预处理模块、生化系统、膜生物反应器;

所述调节池负责接收垃圾渗滤液并进行水质均匀调节;

所述絮凝预处理模块负责对进水中的颗粒物进行高效快速去除; 优选混凝/絮凝物化预处理, 或磁絮凝预处理;

所述生化系统包括依次级联的厌氧反应器、单级或多级串联的厌氧-好氧生化系统;

所述厌氧-好氧生化系统包括依次级联的厌氧池、好氧曝气池、澄清池, 好氧曝气池的一部分出水回流至厌氧池; 厌氧池、好氧曝气池负责对厌氧发酵产物依次进行厌氧生化反应和好氧生化反应, 完成初步脱氮和有机物的去除; 澄清池负责好氧曝气池的出水进行泥水分离;

所述膜生物反应器负责厌氧-好氧生化产物进行高效固液分离, 进一步加强生化反应效率;

其特征在于, 所述方法包括以下步骤:

步骤S1: 终端层各传感器实时监测数据的获取;

所述各传感器实时监测数据包括调节池的运行参数, 絮凝预处理模块的运行参数, 厌氧反应器的运行参数, 厌氧-好氧生化系统中厌氧池和好氧池运行参数, 膜生物反应器的运行参数;

步骤S2: 将所述各传感器实时监测数据通过通信网络发送到边缘层, 在边缘层采用机器学习算法对出水水质指标, 以及系统综合能耗、厌氧反应器的厌氧产氢速率进行多目标预测;

步骤S3: 根据出水水质指标、系统综合能耗、厌氧反应器的厌氧产氢速率构建目标函数, 在约束条件下, 利用云服务器中的决策级优化模型, 得到调节池、絮凝预处理模块、厌氧反应器、厌氧-好氧生化系统、膜生物反应器的运行参数理想值;

步骤S4: 基于决策级优化模型优化结果和终端层传感器实时监测数据, 对系统关键工艺运行工况进行调整, 从而获取出水水质指标、厌氧产氢速率、系统综合能耗的最优结果。

2. 根据权利要求1所述方法, 其特征在于步骤S1中, 所述调节池的运行参数包括pH值、水温、溶解氧、ORP, 以及进水水质指标, 所述进水水质指标包括进水流量、进水COD、氨氮、总氮;

所述絮凝预处理模块的运行参数包括絮凝剂用量、沉淀停留时间、pH值、ORP、水温;

所述厌氧反应器的运行参数包括厌氧发酵罐水力停留时间、外加氧化还原介体投加量、厌氧池pH值、水温、ORP, 产生的生物气的流量、温度、总压力、不同生物气各自的分压;

所述厌氧-好氧生化系统中厌氧池和好氧池运行参数包括: 溶解氧、ORP、水温、pH值;

所述膜生物反应器的运行参数包括pH、ORP、水温、溶解氧、跨膜压差;

所述膜生物反应器处理后的出水水质指标包括浊度、出水COD、氨氮、总氮。

3. 根据权利要求1所述方法, 其特征在于步骤S2中, 所述机器学习算法包括随机森林、极端梯度提升、长短期记忆网络、人工神经网络中至少一种。

4. 根据权利要求1所述方法, 其特征在于步骤S3中, 所述决策级优化模型具体是遗传算法、粒子群优化算法中的一种。

5. 根据权利要求1所述方法,其特征步在于步骤S3中,所述目标函数具体是:

$$f(x) = \omega_1 \cdot f_1(x) + \omega_2 \cdot f_2(x) + \omega_3 \cdot f_3(x)$$

$$f_1(x) = \min E(x)$$

$$f_2(x) = \min (\alpha_1 \cdot \text{COD}(x) + \alpha_2 \cdot \text{NH}_4^+ - \text{N}(x) + \alpha_3 \cdot \text{TN}(x))$$

$$f_3(x) = \max R_{H_2}(x)$$

其中, $f_2(x) = \min (\alpha_1 \cdot \text{COD}(x) + \alpha_2 \cdot \text{NH}_4^+ - \text{N}(x) + \alpha_3 \cdot \text{TN}(x))$ 为权重; $f_1(x)$ 表示系统综合能耗最小化, $f_2(x)$ 表示水质达标排放目标值, $f_3(x)$ 表示厌氧反应器的厌氧产氢速率最大化; $E(x)$ 表示系统在某运行参数下的过程综合能耗; α_1 、 α_2 、 α_3 是各出水水质指标COD、氨氮和总氮对达标排放目标值优化结果重要性的权重; $\text{COD}(x)$ 表示系统在某运行参数下的出水COD值与排放标准值间的关系; $\text{NH}_4^+ - \text{N}(x)$ 表示系统在某运行参数下的出水氨氮值与排放标准值间的关系; $\text{TN}(x)$ 表示系统在某运行参数下的出水总氮值与排放标准值间的关系; $R_{H_2}(x)$ 表示系统在某运行参数下厌氧反应器中的产氢速率。

6. 根据权利要求5所述方法,其特征步在于步骤S3中,所述约束条件具体是:

$$\left\{ \begin{array}{l} \omega_1 + \omega_2 + \omega_3 = 1 \\ E(x) \leq E_0; \quad E(x) = E_0' + E_A \\ \text{COD}(x) = \sigma\left(\frac{C - C_{(t)}}{S_1}\right) \\ \text{NH}_4^+ - \text{N}(x) = \sigma\left(\frac{N - N_{(t)}}{S_1}\right) \\ \text{TN}(x) = \sigma\left(\frac{T - T_{(t)}}{S_1}\right) \\ R_{H_2}(x) = \text{Tanh}\left(\frac{H_2 - H_{2(\text{opt})}}{S_2}\right) \end{array} \right.$$

式中, E_0 为系统在进行“端-边-云”协同控制之前的工艺设备能耗; E_0' 为系统进行“端-边-云”协同控制之后的工艺设备实际能耗; E_A 为系统在进行“端-边-云”协同控制时数据采集、传输、计算、反馈、控制过程中的能耗; C 为系统出水实际COD值, $C_{(t)}$ 为出水COD排放标准值; N 为出水实际氨氮浓度, $N_{(t)}$ 为出水氨氮排放标准值; T 为出水实际总氮浓度, $T_{(t)}$ 为出水总氮排放标准值; σ 为Sigmoid函数; H_2 为系统实际产氢速率, $H_{2(\text{opt})}$ 为最大产氢速率; Tanh 为双曲正切函数; S_1 、 S_2 为用于缩放数据的参数。

7. 根据权利要求1所述方法,其特征步在于步骤S4中,所述系统关键工艺运行工况包括: 絮凝预处理模块的关键工艺运行工况、厌氧-好氧生化系统的关键工艺运行工况、膜生物反应器系统的关键工艺运行工况。

8. 根据权利要求7所述方法,其特征步在于步骤S4中,所述絮凝预处理模块的关键工艺运行工况包括搅拌机的搅拌速度、高速剪切机的转速。

9. 根据权利要求7所述方法,其特征步在于步骤S4中,所述厌氧-好氧生化系统的关键工艺运行工况包括曝气强度、搅拌机的搅拌速度、污泥回流量。

10. 根据权利要求7所述方法,其特征步在于步骤S4中,所述膜生物反应器系统的关键工艺运行工况包括产水泵工作压力、曝气强度。

一种基于“端-边-云”协同控制的垃圾渗滤液低碳智能处理与资源化方法

技术领域

[0001] 本发明属于环境保护与资源利用技术领域,具体地说是涉及一种基于“端-边-云”协同控制的垃圾渗滤液低碳智能处理与资源化方法。

背景技术

[0002] 垃圾渗滤液中悬浮固体、有机物、营养盐、盐分、重金属等含量都很高,处理难度较大,目前主要处理方式通常采用:物化前处理-生化处理(厌氧-好氧)和后端深度处理的工艺。其中,物化预处理通常采用混凝/絮凝法。常用的聚合氯化铝(PAC)、聚合硫酸铁(PFS)以及聚丙烯酰胺(PAM)等混凝/絮凝剂对渗滤液预处理效果有限,药剂投用量大,污泥产量大,沉淀过程慢,药剂投加比例无法根据原水水质的变化做到及时调整,从而影响生化系统中微生物的活性和后端膜处理系统使用寿命。

[0003] 此外,渗滤液中的有机污染物、氨氮等污染物浓度高、可生化性差,曝气能耗高,系统运行自动化程度相对较低,劳动量较大,水质的监测与反馈控制存在滞后性等问题,实际应用中达不到预期的处理效果。因此,利用渗滤液处理设备中集成的传感器,采集生产设备、工艺、运维等各类数据,并进行智能算法优化和工艺参数调控,对实现垃圾渗滤液污水处理设施的智能化运行及维护,提升运营水平和监管能力具有重要的意义。

发明内容

[0004] 本发明的目的是针对现有技术的不足,提供一种基于“端-边-云”协同控制的垃圾渗滤液低碳智能处理与资源化方法。

[0005] 一种基于“端-边-云”协同控制的垃圾渗滤液低碳智能处理与资源化方法,基于垃圾渗滤液处理系统;所述垃圾渗滤液处理系统包括依次级联的调节池、絮凝预处理模块、生化系统、膜生物反应器;

所述方法包括以下步骤:

步骤S1:终端层各传感器实时监测数据的获取。

[0006] 所述各传感器实时监测数据包括调节池的运行参数,絮凝预处理模块的运行参数,厌氧反应器的运行参数,厌氧-好氧生化系统中厌氧池和好氧池运行参数,膜生物反应器的运行参数。

[0007] 步骤S2:将所述各传感器实时监测数据通过通信网络发送到边缘层,在边缘层采用机器学习算法对出水水质指标,以及系统综合能耗、厌氧反应器的厌氧产氢速率进行多目标预测。

[0008] 步骤S3:根据出水水质指标、系统综合能耗、厌氧反应器的厌氧产氢速率构建目标函数,在约束条件下,利用云服务器中的决策级优化模型,得到调节池、絮凝预处理模块、厌氧反应器、厌氧-好氧生化系统、膜生物反应器的运行参数理想值。

[0009] 步骤S4:基于决策级优化模型优化结果和终端层传感器实时监测数据,对系统关

键工艺运行工况进行调整,从而获取出水水质指标、厌氧产氢速率、系统综合能耗的最优结果。

[0010] 作为优选,步骤S1中,所述调节池的运行参数包括pH值、水温、溶解氧(DO)、氧化还原电位(ORP),以及进水水质指标,所述进水水质指标包括进水流量、进水化学需氧量(COD)、氨氮($\text{NH}_4^+ - \text{N}$)、总氮(TN)。

[0011] 所述絮凝预处理模块的运行参数包括絮凝剂用量、沉淀停留时间、pH值、ORP、水温。

[0012] 所述厌氧反应器的运行参数包括厌氧发酵罐水力停留时间、外加氧化还原介体投加量、厌氧池pH值、水温、ORP,产生的生物气的流量、温度、总压力、不同生物气各自的分压。

[0013] 所述厌氧-好氧生化系统中厌氧池和好氧池运行参数包括:DO、ORP、水温、pH值。

[0014] 所述膜生物反应器的运行参数包括pH、ORP、水温、DO、跨膜压差。

[0015] 所述膜生物反应器处理后的出水水质指标包括浊度、出水COD、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、TN。

[0016] 作为优选,步骤S2中,所述机器学习算法包括随机森林(RF)、极端梯度提升(XGBoost)、长短期记忆网络(LSTM)、人工神经网络(ANN)中至少一种。

[0017] 作为优选,步骤S3中,所述决策级优化模型具体是遗传算法(GA)、粒子群优化算法(PSO)中的一种。

[0018] 作为优选,步骤S3中,所述目标函数具体是:

$$f(x) = \omega_1 \cdot f_1(x) + \omega_2 \cdot f_2(x) + \omega_3 \cdot f_3(x)$$

$$f_1(x) = \min E(x)$$

$$f_2(x) = \min (\alpha_1 \cdot \text{COD}(x) + \alpha_2 \cdot \text{NH}_4^+ - \text{N}(x) + \alpha_3 \cdot \text{TN}(x))$$

$$f_3(x) = \max R_{H_2}(x)$$

其中, ω_1 、 ω_2 、 ω_3 为权重; $f_1(x)$ 表示系统综合能耗最小化, $f_2(x)$ 表示水质达标排放目标值, $f_3(x)$ 表示厌氧反应器的厌氧产氢速率最高; $E(x)$ 表示系统在某运行参数下的过程综合能耗; α_1 、 α_2 、 α_3 是各出水水质指标COD、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和TN对达标排放目标值优化结果重要性的权重; $\text{COD}(x)$ 表示系统在某运行参数下的出水COD值与排放标准值间的关系; $\text{NH}_4^+ - \text{N}(x)$ 表示系统在某运行参数下的出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 值与排放标准值间的关系; $\text{TN}(x)$ 表示系统在某运行参数下的出水TN值与排放标准值间的关系; $R_{H_2}(x)$ 表示系统在某运行参数下厌氧反应器中的产氢速率。

[0019] 所述约束条件具体是:

$$\left\{ \begin{array}{l} \omega_1 + \omega_2 + \omega_3 = 1 \\ E(x) \leq E_0; E(x) = E_0' + E_A \\ \text{COD}(x) = \sigma \left(\frac{C - C(t)}{S_1} \right) \\ \text{NH}_4^+ - \text{N}(x) = \sigma \left(\frac{N - N(t)}{S_1} \right) \\ \text{TN}(x) = \sigma \left(\frac{T - T(t)}{S_1} \right) \\ R_{H_2}(x) = \text{Tanh} \left(\frac{H_2 - H_{2(opt)}}{S_2} \right) \end{array} \right.$$

式中, E_0 为系统在进行“端-边-云”协同控制之前的工艺设备能耗; E_0' 为系统进行“端-边-云”协同控制之后的工艺设备实际能耗; E_A 为系统在进行“端-边-云”协同控制时数据采集、传输、计算、反馈、控制过程中的能耗; C 为系统出水实际COD值, $C_{(t)}$ 为出水COD排放标准值; N 为出水实际 NH_4^+-N 浓度, $N_{(t)}$ 为出水 NH_4^+-N 排放标准值; T 为出水实际TN浓度, $T_{(t)}$ 为出水TN排放标准值; σ 为Sigmoid函数; H_2 为系统实际产氢速率, $H_{2(\text{opt})}$ 为最大产氢速率; Tanh 为双曲正切函数; S_1 、 S_2 为用于缩放数据的参数。

[0020] 作为优选, 步骤S4中, 所述系统关键工艺运行工况包括: 絮凝预处理模块的关键工艺运行工况、厌氧-好氧生化系统的关键工艺运行工况、膜生物反应器系统的关键工艺运行工况。

[0021] 所述絮凝预处理模块的关键工艺运行工况包括搅拌机的搅拌速度、高速剪切机的转速。

[0022] 所述厌氧-好氧生化系统的关键工艺运行工况包括曝气强度、搅拌机的搅拌速度、污泥回流量。

[0023] 所述膜生物反应器系统的关键工艺运行工况包括产水泵工作压力、曝气强度。

[0024] 本发明的有益效果是:

本发明“端-边-云”协同控制的垃圾渗滤液低碳智能处理与资源化方法, 是通过“端-边-云”物联感知网络, 实现渗滤液处理与资源/能源化工艺流程单元的互通互联; 通过优化、控制生化系统的运行参数, 实现垃圾渗滤液处理与资源/能源化整体工艺流程的智能化管控。该工艺集成了化学混凝/磁絮凝高效预处理、厌氧发酵产氢/产酸、基于模块化超滤膜的膜生物反应器等技术, 可缩短系统整体停留时间、降低生化系统负荷、减少占地面积和系统能耗, 同时能产生新能源氢气, 提高废水中有机物发酵生产挥发性脂肪酸能力, 并可用于提供生物高效脱氮除磷碳源, 实现渗滤液处理过程中的颗粒物、有机物、营养盐的高效去除, 实现渗滤液处理的资源化、能源化和智能化。

[0025] 在“云-边-端”智能调控架构下, 首先将垃圾渗滤液处理各环节的终端层各传感器实时监测数据通过专用网络或运营商网络发送到边缘层, 并利用在边缘层部署的智能算法对系统综合能耗、出水水质(COD、 NH_4^+-N 、TN)、发酵产氢速率进行实时预测。监测数据通过边缘上传至云端, 在多维参数空间中探索, 评估目标函数值, 逐步收敛至最优解。结合梯度下降、遗传算法等方法, 精准定位关键影响因素全局最优点。并将最优结果返回至边端。边端形成相应操作指令回传至控制系统关键工艺参数的执行设备执行具体操作, 实现垃圾渗滤液处理与资源化过程中关键影响因素的动态调整, 从而实现处理效能和产氢速率最高、而系统整体综合能耗最低, 达到“节能减排”目标。

附图说明

[0026] 图1为垃圾渗滤液处理系统终端层传感器部署示意图。

[0027] 图2为实施例1为某焚烧发电厂垃圾渗滤液处理系统监测点位图。

[0028] 图3为实施例2为某生活垃圾填埋场渗滤液污水处理站监测点位图。

[0029] 图4为机器学习算法的模型拓扑结构。

具体实施方式

[0030] 以下结合具体实施例对本发明作进一步说明,但本发明的保护范围并不限于此。

[0031] 本发明实施例提供一种基于“端-边-云”协同控制的垃圾渗滤液低碳智能处理与资源化方法,是基于垃圾渗滤液处理系统实现;所述垃圾渗滤液处理系统包括依次级联的调节池、絮凝预处理模块、生化系统、膜生物反应器(MBR)。

[0032] 所述调节池负责接收垃圾渗滤液并进行水质均匀调节。

[0033] 所述絮凝预处理模块负责对进水中的颗粒物进行高效快速去除;优选混凝/絮凝物化预处理,或磁絮凝预处理。

[0034] 所述生化系统包括依次级联的厌氧反应器、单级或多级串联的厌氧-好氧生化系统。

[0035] 所述厌氧反应器负责利用厌氧微生物的代谢作用,将废水中的有机物转化为氢气,从而实现有机物的降解和稳定化,优选为厌氧IC反应器或USAB反应器。

[0036] 所述厌氧-好氧生化系统包括依次级联的厌氧池(A池)、好氧曝气池(O池)、澄清池,好氧曝气池(O池)的一部分出水回流至厌氧池(A池);厌氧池、好氧曝气池负责对厌氧发酵产物依次进行厌氧生化反应和好氧生化反应,完成初步脱氮;澄清池负责对好氧曝气池(O池)的出水进行泥水分离。

[0037] 所述膜生物反应器(MBR)负责对厌氧-好氧生化产物进行高效固液分离,进一步加强生化反应效率。

[0038] 所述“端-边-云”协同控制的垃圾渗滤液低碳智能处理与资源化方法,包括以下步骤:

步骤S1:终端层各传感器实时监测数据的获取。

[0039] 所述各传感器实时监测数据包括调节池的运行参数,絮凝预处理模块的运行参数,厌氧反应器的运行参数,厌氧-好氧生化系统中厌氧池(A池)和好氧池(O池)运行参数,膜生物反应器(MBR)的运行参数。

[0040] 所述调节池的运行参数主要包括pH值、水温、溶解氧(DO)、氧化还原电位(ORP),以及进水水质指标,所述进水水质指标包括进水流量、进水化学需氧量(COD)、氨氮(NH_4^+-N)、总氮(TN)。

[0041] 所述絮凝预处理模块的运行参数包括絮凝剂用量、沉淀停留时间、pH值、ORP、水温等。

[0042] 所述厌氧反应器的运行参数包括厌氧发酵罐水力停留时间、外加氧化还原剂投加量、厌氧池pH值、水温、ORP,产生的生物气的流量、温度、总压力、不同生物气各自的分压;所述生物气包括 H_2 、 CH_4 、 CO_2 。

[0043] 所述厌氧-好氧生化系统中厌氧池(A池)和好氧池(O池)运行参数主要包括:DO、ORP、水温、pH值。

[0044] 所述膜生物反应器(MBR)的运行参数包括pH、ORP、水温、DO、跨膜压差。

[0045] 所述膜生物反应器(MBR)处理后的出水水质指标包括浊度、COD、 NH_4^+-N 、TN。

[0046] 步骤S1中所述终端层传感器的部署具体见图1-图3,具体如下:

(1)在调节池的进水位置设置流量传感器,主要监控垃圾渗滤液进水流量;在调节池中设置第一pH传感器、第一温度传感器、第一水温传感器、第一ORP传感器、第一COD测定

传感器、第一 NH_4^+ -N测定传感器、第一TN测定传感器、第一浊度测定传感器。

[0047] (2) 絮凝预处理模块的出水口位置或内部设置第二pH传感器、第二水温传感器。

[0048] (3) 厌氧反应器的气体出口位置设置气相组分传感器、状态传感器、所述气相组分传感器用于检测 H_2 、 CH_4 、 CO_2 ；所述状态传感器包括气体流量传感器、气体温度传感器、压力传感器；厌氧反应器的出水口设置第三pH传感器、第三水温传感器、第三ORP传感器。

[0049] (5) 厌氧-好氧生化系统的A池和O池中均设置第四pH传感器、第四水温传感器、第四ORP传感器、第一DO传感器。

[0050] (6) 厌氧-好氧生化系统的澄清池内设置第五pH传感器、第五水温传感器、第五ORP传感器，负责上清液的pH、ORP、水温的在线监测。

[0051] (7) 膜生物反应器(MBR)中设置第六pH传感器、第六水温传感器、第六ORP传感器、第二DO传感器、跨膜压差等传感器，实时监控MBR池内的运行状态；膜生物反应器(MBR)的出水口位置设置第七pH传感器、第七水温传感器、第七ORP传感器，以及第二COD测定传感器、第二 NH_4^+ -N测定传感器、第二TN测定传感器、第二浊度测定传感器。

[0052] 步骤S2：将S1中所述各传感器实时监测数据通过通信网络发送到边缘层，在边缘层采用机器学习算法对出水水质指标，以及系统综合能耗、厌氧反应器的厌氧产氢速率进行多目标预测。

[0053] 步骤S2中，所述机器学习算法包括随机森林(RF)、极端梯度提升(XGBoost)、长短期记忆网络(LSTM)、人工神经网络(ANN)等中一种或几种；模型拓扑结构如图4所示。

[0054] 步骤S3：根据出水水质指标、厌氧产氢速率、系统综合能耗构建目标函数，在约束条件下，利用云服务器中的决策级优化模型，得到调节池、絮凝预处理模块、厌氧反应器、厌氧-好氧生化系统、MBR系统的运行参数理想值。

[0055] 步骤S3中，所述决策级优化模型具体是遗传算法(GA)、粒子群优化算法(PSO)中的一种。

[0056] 步骤S3中，所述目标函数为出水水质指标达到排放标准要求，系统综合能耗达到最小，且厌氧产氢速率达到最大。目标函数表达如下：

$$[0057] \quad f(x) = \omega_1 \cdot f_1(x) + \omega_2 \cdot f_2(x) + \omega_3 \cdot f_3(x)$$

其中， ω_1 、 ω_2 、 ω_3 为各目标的权重，反映了系统综合能耗最小化($f_1(x)$)、水质达标排放目标值($f_2(x)$)和产氢速率最高($f_3(x)$)之间的优先级。

[0058] 约束条件： $\omega_1 + \omega_2 + \omega_3 = 1$

所述系统综合能耗最小化表达式：

$$f_1(x) = \min E(x)$$

式中， $E(x)$ 表示系统在某运行参数下的过程综合能耗； $f_1(x)$ 表示系统运行过程中综合能耗的最小化，可通过调整设备的运行频率、启停时间等实现。

[0059] $f_1(x)$ 约束条件： $E(x) \leq E_0$ ； $E(x) = E_0' + E_A$

式中， E_0 为系统在进行“端-边-云”协同控制之前的工艺设备能耗； E_0' 为系统进行“端-边-云”协同控制之后的工艺设备实际能耗； E_A 为“端-边-云”协同控制系统中各单元模块在数据采集、传输、计算、反馈、控制过程中的能耗；

所述出水水质达标排放目标值 $f_2(x)$ 优化表达式：

$$f_2(x) = \min (\alpha_1 \cdot \text{COD}(x) + \alpha_2 \cdot \text{NH}_4^+ - \text{N}(x) + \alpha_3 \cdot \text{TN}(x))$$

式中, $f_2(x)$ 用于优化出水水质各参数的目标值, 目标优化水质指标为 COD、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 TN; 其中, α_1 、 α_2 、 α_3 是各水质指标对达标排放目标值优化结果重要性的权重。COD(x) 表示系统在某运行参数下的出水 COD 值与排放标准值间的关系; $\text{NH}_4^+ - \text{N}(x)$ 表示系统在某运行参数下的出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 值与排放标准值间的关系; TN(x) 表示系统在某运行参数下的出水 TN 值与排放标准值间的关系。

[0060] 出水水质约束条件:

$$\text{COD}(x) = \sigma\left(\frac{C - C_{(t)}}{S_1}\right)$$

$$\text{NH}_4^+ - \text{N}(x) = \sigma\left(\frac{N - N_{(t)}}{S_1}\right)$$

$$\text{TN}(x) = \sigma\left(\frac{T - T_{(t)}}{S_1}\right)$$

式中, C 为系统出水实际 COD 值, $C_{(t)}$ 为出水 COD 排放标准值 ($0 \leq C_{(t)} \leq 500 \text{ mg/L}$); N 为出水实际 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度, $N_{(t)}$ 为出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 排放标准值 ($0 \leq N_{(t)} \leq 25 \text{ mg/L}$); T 为出水实际 TN 浓度, $T_{(t)}$ 为出水 TN 排放标准值 ($0 \leq T_{(t)} \leq 70 \text{ mg/L}$); σ 为 Sigmoid 函数, 用于水质目标值优化, 使得各项水质指标趋向于目标值; S_1 为用于缩放数据的参数, 使得不同变量间的尺度可比。

[0061] 所述厌氧产氢速率最大化 $f_3(x)$ 表达式:

$$f_3(x) = \max R_{H_2}(x)$$

式中, $f_3(x)$ 表示厌氧产氢速率最大化; $R_{H_2}(x)$ 表示系统在某运行参数下厌氧反应器中的产氢速率。

[0062] 约束条件:

$$R_{H_2}(x) = \text{Tanh}\left(\frac{H_2 - H_{2(\text{opt})}}{S_2}\right)$$

H_2 为系统实际产氢速率, $H_{2(\text{opt})}$ 为最大产氢速率; Tanh 为双曲正切函数, 用于控制产氢速率, 使其接近最大值; S_2 为用于缩放数据的参数。

[0063] 步骤 S4: 基于决策级优化模型优化结果 (即, 调节池、絮凝预处理模块、厌氧反应器、厌氧-好氧生化系统、MBR 系统的运行参数理想值) 和终端层传感器实时监测数据, 对系统关键工艺运行工况进行调整, 从而获取出水水质指标、厌氧产氢速率、系统综合能耗的最优结果。

[0064] 所述系统关键工艺运行工况包括:

1. 絮凝预处理模块的关键工艺运行工况

搅拌机的工作频率和搅拌速度: 通过改变搅拌机变频器工作频率 (20HZ~50HZ) 调整搅拌机转速, 搅拌机转速范围为 20~600 转/分钟。

[0065] 高速剪切机: 当絮凝单元选择磁絮凝技术时, 通过改变变频器工作频率 (30HZ~50HZ) 调整高速剪切机转速, 高速剪切机转速范围为 2000~2000 转/分钟。

[0066] 2. 厌氧-好氧生化系统的关键工艺运行工况

曝气强度:在好氧池(O池),根据DO的实时监测、预测和优化结果,调整变频器工作频率(25HZ~50HZ)和启停时间,调整曝气设备的风量和曝气时间。

[0067] 搅拌速度:在缺氧池(A池),通过改变搅拌机变频器工作频率(20HZ~45HZ)调整搅拌机转速,搅拌机转速范围为40~1000转/分钟。

[0068] 污泥回流量:通过调整回流泵的电机转速(30HZ~50HZ),调整污泥回流量和内回流量,维持系统内适宜的污泥浓度和反硝化脱氮效能。

[0069] 3. 膜生物反应器(MBR)系统的关键工艺运行工况

产水泵工作压力:根据跨膜压差的实时监测、预测和优化结果,通过调整产水泵的工作压力、定期反洗或化学清洗,确保MBR系统膜通量和产水量稳定。

[0070] 曝气强度:在MBR池内,根据DO的实时监测、预测和优化结果,调整变频器工作频率(35HZ~50HZ)和启停时间,调整曝气设备的风量和曝气时间。

[0071] 实施例1

某垃圾焚烧发电厂污水处理站,采用调节池—化学混凝—厌氧发酵—厌氧(A)池—O池—MBR—纳管排放的处理工艺。采用本发明“云-边-端”协同控制方法对全厂污水处理各环节进行智能调控。其中各处理环节的终端层传感器如附图2所示:

[0072] (1) 进水1#:设置流量传感器,实时监测进水流量。

[0073] (2) 调节池2#:设置pH、ORP、水温、浊度等在线传感器,同时自动采集水样,泵送至在线监测设备进行COD、氨氮(NH_4^+-N)、总氮(TN)的在线监测。

[0074] (3) 化学混凝后3#:在澄清池上方设置pH、水温等在线传感器。

[0075] (4) 厌氧IC反应器4#、5#:在顶空位置设置 $\text{H}_2/\text{CH}_4/\text{CO}_2$ 等气相组分传感器,以及温度/流量/压力等状态传感器,用于实时监控产生的生物气组分的分压;在水相设置pH、ORP、水温等运行状态传感器。

[0076] (5) 厌氧-好氧生化系统中(A/O系统)6#:在A池和O池中均设置pH、DO、ORP、水温等传感器,实时监控生化系统的运行状态。

[0077] (6) A/O系统出水7#:泵取A/O生化池出水至系统外的小型澄清池进行泥水分离,在上清液中设置pH、水温、ORP等传感器。

[0078] (7) MBR池中8#:在MBR池中设置pH、ORP、DO、水温、水位、跨膜压差等传感器,实时监控MBR池内的运行状态。

[0079] (8) MBR出水9#:在MBR出水池中设置pH、ORP、水温等传感器,同时泵取出水至在线监测设备进行COD、 NH_4^+-N 、TN、浊度的在线监测。

[0080] 随后,对终端层各类传感器历史数据进行数据预处理,通过特征工程将其转化为稳健数据集;其次,在搭建的稳健数据集上进行了随机森林(RF)、极端梯度提升(XGBoost)等算法的训练与调优,在边缘层对系统综合能耗、出水水质(COD、 NH_4^+-N 、TN)、发酵产氢速率进行预测,并进行特征重要性分析,确定影响焚烧厂渗滤液出水水质、厌氧产氢速率、系统综合能耗的关键影响因素。

[0081] 以优化的XGBoost算法为内核,结合粒子群优化算法(PSO),在云平台层建立了出水水质、厌氧产氢速率、系统综合能耗等多目标函数的决策级优化模型(XGBoost-PSO模型),并进行系统整体最优条件(综合能耗最低、水质达标排放、产氢速率较高)下的逆向工程设计。

[0082] 系统综合能耗对目标函数整体优化结果的权重 $\omega_1=0.32$ 。

[0083] 出水水质 (COD、 NH_4^+-N 、TN) 对目标函数整体优化结果的权重 $\omega_2=0.41$ ；其中，COD对达标排放目标值优化结果重要性的权重 $\alpha_1=0.55$ ， NH_4^+-N 对达标排放目标值优化结果重要性的权重 $\alpha_2=0.28$ ，TN对达标排放目标值优化结果重要性的权重 $\alpha_3=0.17$ 。

[0084] 厌氧产氢速率对目标函数整体优化结果的权重 $\omega_3=0.27$ 。

[0085] 在上述多目标优化条件下，基于终端层实时监测、预测和优化数据，对化学絮凝预处理模块的搅拌电机搅拌速度，厌氧-好氧生化系统好氧池 (O池) 曝气风机的风量和曝气时间、缺氧池 (O池) 搅拌机转速、污泥回流泵流量，以及MBR系统曝气设备的风量和曝气时间、产水泵的工作压力等进行调控，实现关键参数的在线自适应调整。

[0086] 基于上述“云-边-端”协同控制方法的垃圾焚烧厂渗滤液处理效能和资源化水平如附表1所示。

[0087] 附表1. “云-边-端”协同控制下的垃圾焚烧厂渗滤液处理效能和资源化水平

系统	水质						综合能耗 (kwh/m ³)	产氢速率 (L/ (m ³ ·d))
	进水			出水				
	COD (mg/L)	NH ₄ ⁺ -N (mg/L)	TN (mg/L)	COD (mg/L)	NH ₄ ⁺ -N (mg/L)	TN (mg/L)		
对照系统	14000~18000	1600~1880	1800-2200	360~540	20~36	85~260	9.5~13.2	960~1350
“云-边-端” 协同控制系统	14000~18000	1600~1880	1800-2200	135~248	9~14	35~56	6.8~9.6	1260~1740

实施例2

某生活垃圾填埋厂渗滤液污水处理站，采用调节池—磁混凝—UASB—两级厌氧/好氧 (A/O) —MBR—纳滤—纳管排放的处理工艺。采用本发明“云-边-端”协同控制方法对全厂污水处理各环节进行智能调控。其中各处理环节的终端层传感器如附图3所示：

[0088] (1) 进水1#：设置流量传感器，实时监测进水流量。

[0089] (2) 调节池2#：设置pH、ORP、水温、浊度等在线传感器，同时自动采集水样，泵送至在线监测设备进行COD、氨氮 (NH_4^+-N)、总氮 (TN) 的在线监测。

[0090] (3) 磁混凝后3#：在澄清池上方设置pH、水温等在线传感器。

[0091] (4) 厌氧UASB反应器4#、5#：在顶空位置设置 $\text{H}_2/\text{CH}_4/\text{CO}_2$ 等气相组分传感器，以及温度/流量/压力等状态传感器，用于实时监控产生的生物气组分的分压；在水相设置pH、ORP、水温等运行状态传感器。

[0092] (5) 两级A/O系统6#：在第一级、第二级的A池和O池中均设置pH、DO、ORP、水温等传感器，实时监控生化系统的运行状态。

[0093] (6) A/O系统出水7#：泵取A/O生化池出水至系统外的小型澄清池进行泥水分离，在上清液中设置pH、水温、ORP等传感器。

[0094] (7) MBR池中8#：在MBR池中设置pH、DO、ORP、水温、水位、膜过滤压力等传感器，实时监控MBR池内的运行状态。

[0095] (8) MBR出水9#：在MBR出水池中设置pH、水温、浊度等传感器，同时泵取出水至在线监测设备进行COD、 NH_4^+-N 、TN的在线监测。

[0096] 随后,对终端层各类传感器历史数据进行数据预处理,通过特征工程将其转化为稳健数据集;其次,在搭建的稳健数据集上进行了人工神经网络(ANN)、长短期记忆网络(LSTM)等算法的训练与调优,在边缘层对系统综合能耗、出水水质(COD、 NH_4^+ -N、TN)、发酵产氢速率进行预测,并进行特征重要性分析,确定影响填埋场渗系统综合能耗、滤液出水水质、厌氧产氢速率的关键影响因素。

[0097] 以优化的LSTM算法为内核,结合遗传算法(GA),在云平台层建立了出水水质、厌氧产氢速率、系统综合能耗等多目标函数的决策级优化模型(XGBoost-GA模型),并进行系统整体最优条件(综合能耗最低、水质达标排放、产氢速率较高)下的逆向工程设计。

[0098] 系统综合能耗对目标函数整体优化结果的权重 $\omega_1=0.25$ 。

[0099] 出水水质(COD、 NH_4^+ -N、TN)对目标函数整体优化结果的权重 $\omega_2=0.45$;其中,COD对达标排放目标值优化结果重要性的权重 $\alpha_1=0.46$, NH_4^+ -N对达标排放目标值优化结果重要性的权重 $\alpha_2=0.30$,TN对达标排放目标值优化结果重要性的权重 $\alpha_3=0.24$ 。

[0100] 厌氧产氢速率对目标函数整体优化结果的权重 $\omega_3=0.30$ 。

[0101] 在上述多目标优化条件下,基于终端层实时监测、预测和优化数据,对磁絮凝预处理模块的搅拌电机搅拌速度、高速剪切机转速,厌氧-好氧生化系统好氧池(O池)曝气风机的风量和曝气时间、缺氧池(O池)搅拌机转速、污泥回流泵流量,以及MBR系统曝气设备的风量和曝气时间、产水泵的工作压力等进行调控,实现关键参数的在线自适应调整。

[0102] 附表2 “云-边-端”协同控制下的垃圾填埋厂渗滤液处理效能和资源化水平

系统	水质						综合能耗 (kwh/m ³)	产氢速率 (L/(m ³ ·d))
	进水			出水				
	COD (mg/L)	NH ₄ ⁺ -N (mg/L)	TN (mg/L)	COD (mg/L)	NH ₄ ⁺ -N (mg/L)	TN (mg/L)		
对照系统	28000~39000	1400~2100	1620-2330	190~460	16~28	125~280	12.3~15.6	1550~1850
“云-边-端” 协同控制 系统	28000~39000	1400~2100	1620-2330	95~208	6.5~15	42~60	8.7~12.8	1900~2360

上述实施例并非对于本发明的限制,本发明并非仅限于上述实施例,只要符合本发明要求,均属于本发明的保护范围。

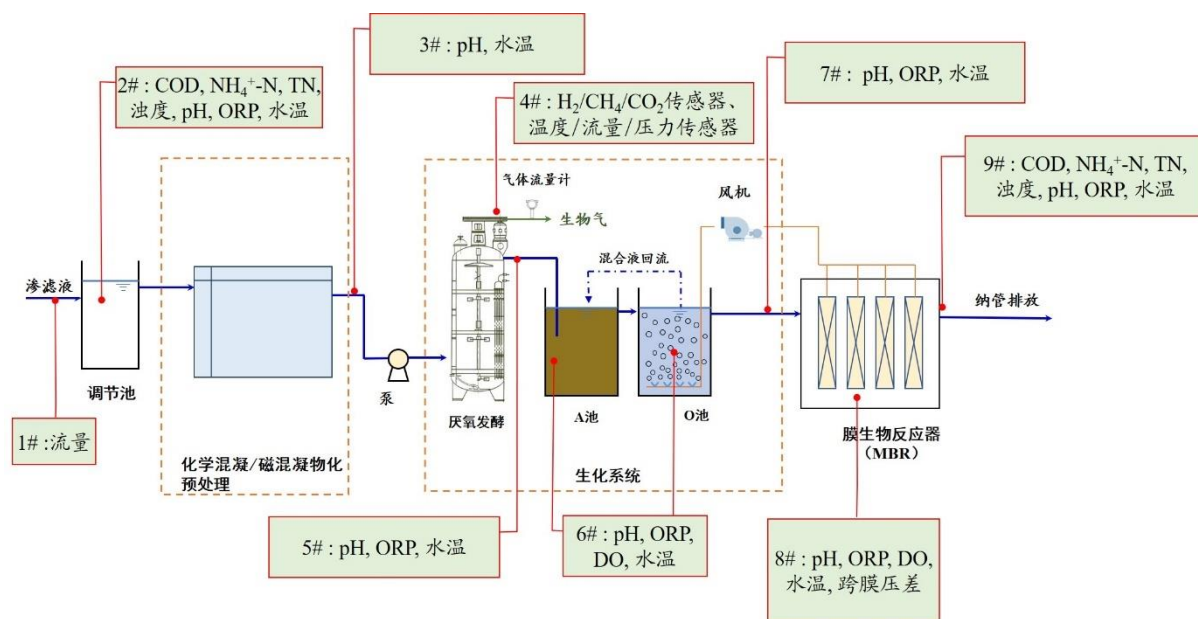


图1

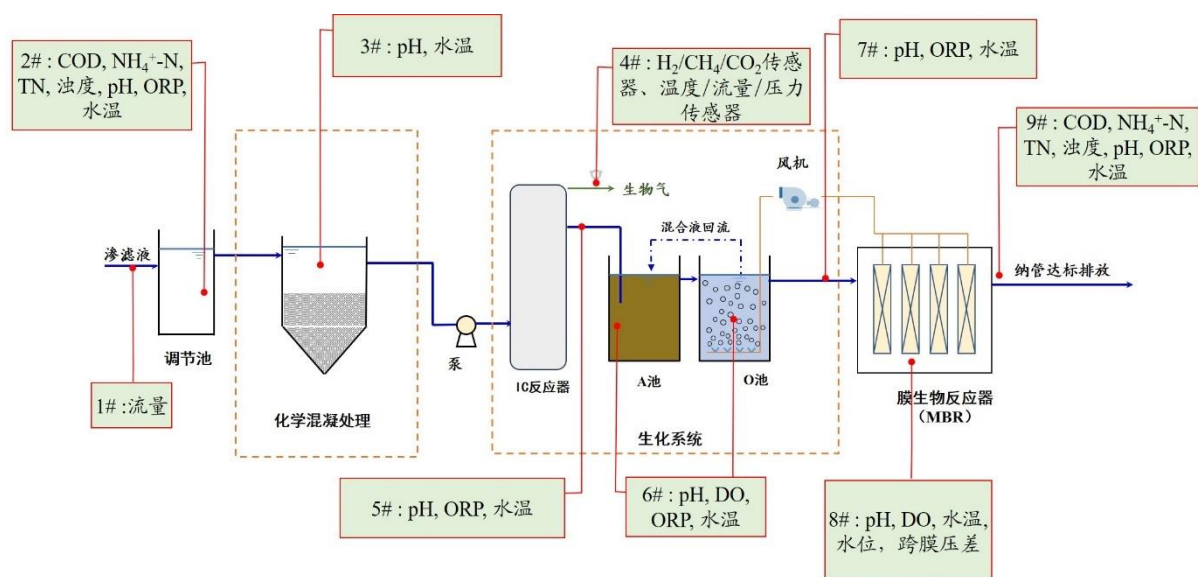


图2

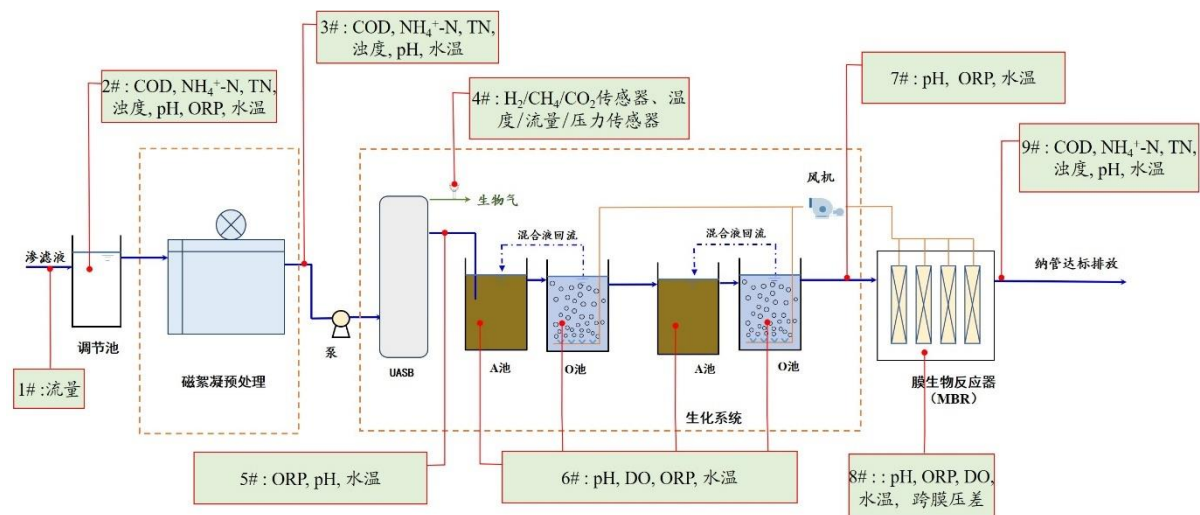


图3

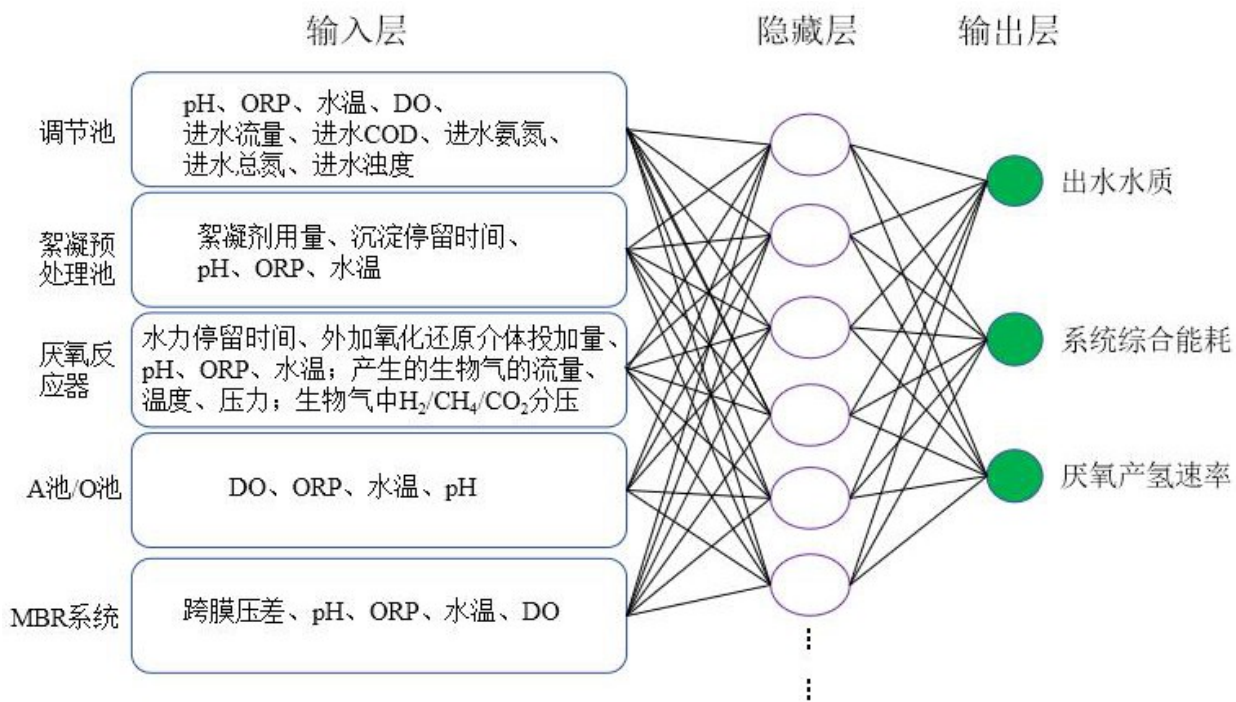


图4