

污水处理设施鼓风机启停策略研究

王明昊

(北京东方显示技术有限公司, 北京 100161)

摘要 本研究围绕污水处理设施中鼓风机运行调控的精细化需求, 系统分析污水处理工艺曝气特性, 梳理水质负荷变化、溶解氧需求、管网压力及设备约束等对鼓风机启停的影响因素, 重点构建基于负荷预测与溶解氧闭环控制的启停策略, 并从设备轮换、分级启停及最小运行时长等方面明确具体实施方法, 以为污水处理厂鼓风机规范化、科学化启停提供技术参考。

关键词 污水处理; 鼓风机; 启停策略; 溶解氧控制; 负荷预测

中图分类号: X78

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.06.036

0 引言

污水处理厂曝气系统作为活性污泥法核心环节, 其供氧能力直接影响有机污染物和氨氮的去除效率。鼓风机作为曝气系统的主要动力设备, 其启停控制不仅关系到系统氧量供给, 还涉及能耗、设备磨损及运行安全。随着污水水量与污染负荷的波动幅度加大, 传统固定运行模式难以满足精细化管理要求。近些年, 基于负荷预测与在线溶解氧监控的鼓风机启停策略逐渐成为提升系统稳定性、降低能耗和延长设备寿命的有效方法。本研究系统梳理启停影响因素, 构建可实施的控制策略, 旨在为污水处理设施优化运行提供参考。

1 污水处理工艺与鼓风机运行概述

1.1 污水处理核心工艺及曝气需求

城市污水处理厂主体工艺是活性污泥法及其改良工艺, 包含A²/O、氧化沟及SBR等种类, 其运行核心是借持续稳定曝气供氧条件维系好氧微生物降解有机污染物及氨氮的能力。从工艺机理看, 生化段单位BOD₅去除要的氧量一般是0.8~1.5 kgO₂/kgBOD₅, 对应单位水量综合需氧强度大概是0.25~0.45 kgO₂/m³, 随着进水负荷和温度变现有明显波动特点, 确保硝化反应正常开展, 曝气池溶解氧一般得长期控制在1.5~3.0 mg/L范围内, 低易抑制硝化速率, 过高就降低供氧效率^[1]。因此, 曝气系统需有和瞬时生化负荷相匹配的供氧调节能力, 鼓风机运行方式和启停节奏直接决定曝气需求能否及时响应。

1.2 鼓风机启停的核心影响机制

鼓风机关停对污水处理系统运行稳定性有明显影响, 其作用机理主要在供氧强度突变、生化反应环

境扰动及曝气管网压力波动这些方面体现, 在启停过程中, 单台鼓风机风量变化范围能够到额定值的70%~100%, 若启停控制不合适, 易致使曝气池溶解氧短时间内掉到0.5 mg/L以下或瞬间涨到4.0 mg/L以上, 进而破坏硝化和反硝化所需的氧环境平衡。同时, 在多台鼓风机并联运转情形下, 启停操作会致使曝气主管压力迅速波动, 其变化范围一般是±5~10 kPa, 进而影响支管配风均匀程度及调节阀稳定状况, 因此, 鼓风机启停不只是设备方面运行举动, 更是影响整体生化系统稳定的关键控制部分。

2 鼓风机启停影响因素

2.1 污水水质与负荷变化

进水水质与水量时变特性是影响鼓风机启停决策首要因素, 其的变化直接决定生化系统瞬间需氧水平, 运行监测表明, 典型城市污水处理厂进水COD日变化系数通常于1.3~1.8范围当中, 高峰时段BOD₅负荷比低谷时段能提升40%~60%, 部分雨污合流区域在降雨情况时波动幅度更显著。在固定运转模式里, 若鼓风机台数和风量长时间维持不变, 容易于高负荷阶段出现供氧不充足状况, 低负荷阶段出现过曝气情况, 搅乱生化反应条件。

2.2 曝气池溶解氧需求

溶解氧是体现曝气强度能否满足工艺需求的直接控制指标, 其的变化对鼓风机启停有着重要指示作用, 工程运行经验显示, 曝气池DO长时间低于1.0 mg/L时, 硝化细菌活性遭抑制, 硝化反应速度显著降低; 而DO持续高于3.5 mg/L的时候, 供氧利用率降低, 还会破坏反硝化区所需的缺氧环境。若鼓风机启停控制未和

作者简介: 王明昊(1996-), 男, 本科, 研究方向: 环境工程。

DO 变化构成有效联动, 容易出现启停延迟或频繁变换问题^[2]。因此, 制定启停策略时, 要明确 DO 控制目标范围, 设置上下限阈值、控制死区及持续判别时间, 把短时波动和真实供氧需求区分开, 让鼓风机启停行为能精准体现曝气池实际需氧状况。

2.3 管网压力与回流量

曝气管网压力是体现鼓风机运行状况和曝气系统水力条件的重要参数, 其变化受鼓风机运行台数、阀门调节情形及池内水位等好些因素一同影响, 一般情况下, 曝气主管设计运行压力大多控制于 50 ~ 65 kPa, 允许波动范围不超出 ±10%, 确保各曝气支管供风均匀。回流污泥量变化时, 回流比一般处于 50% ~ 100% 之间, 池内水位和有效水深随着调整, 致使曝气阻力产生变化, 若鼓风机启停策略未同时考虑管网压力和回流流量的耦合关系, 可能在局部地方出现供气不够或气量分配不匀的情况, 所以启停判据里要加入压力变化趋势和水力条件约束。

2.4 环境与设备性能约束

环境条件和设备自身性能是限制鼓风机启停频率及方式的重要边界因素, 运行实践表明, 在夏天高温情形下, 进气温度每上升 10 °C, 鼓风机单位体积空气密度减小, 实际有效风量能下降大概 3% ~ 5%, 对曝气能力产生直接作用。同时, 频繁启停让电机绕组、电控系统及轴承承受反复热冲击和机械应力, 加速设备老化, 多数设备厂商对磁悬浮或高速离心鼓风机明确给出启停间隔不少于 10 分钟的技术要求, 所以制定启停策略时, 得把环境温度修正系数、最小启停间隔及设备保护逻辑当作刚性约束条件归入控制体系。

3 污水处理鼓风机启停策略

3.1 负荷预测驱动启停策略

负荷预测带动的鼓风机启停策略以污水处理厂长期运行数据为基础, 经过对进水水量及污染负荷变化规律做系统分析, 预判未来短周期曝气需求变化走向, 工程实施中, 通常选进水流量、COD、BOD₅ 及氨氮浓度当作核心预测变量, 数据采集周期把控在 5 ~ 15 分钟, 还要对异常数据做剔除、插补和平滑处理, 确保预测输入的稳定与可靠。针对城市污水显著的昼夜波动特性, 可按时段划分预测模型, 分别设立高峰、平峰和低谷负荷基准, 给后续启停决定提供数据根基。

在负荷预测模型构建方面, 工程里常采用滑动平均、线性回归或基于历史曲线的经验模型, 估算未来 1 ~ 3 小时内有机负荷及需氧量, 预测出的单位时间需氧量乘氧转移效率与安全系数, 再换算成系统目标供风量范围, 为防止预测差错直接致使启停误判, 通常

于预测结果里引入 10% ~ 20% 的缓冲区间, 只在预测需氧量连续好多周期超出当下运行能力范围之际, 作启停判据输入控制系统。

在启停执行层面, 负荷预测主要用来提前规划鼓风机运行台数改变, 而不是直接引发即时启停指令, 工程上一般把预测结果当作“前置信号”, 负荷变化发生前 20 ~ 30 分钟, 提前开启或预备停用相应机组, 让鼓风机运行情形和快要到来的工艺需求相符, 进而防止因被动回致致使曝气系统调节延后, 保证启停动作有足够时间裕度与操作稳定性。

3.2 溶解氧闭环控制启停逻辑

溶解氧闭环控制启停逻辑以曝气池 DO 实时监测数据作为直接控制依据, 是实现鼓风机精细启停的关键技术途径。在工程实施中, 一般顺着曝气池水流方向设置 2 ~ 3 个以上在线 DO 探头, 探头间距把控在 20 ~ 40 m, 都接入控制系统做集中处理。DO 数据采集周期通常定为 30 ~ 60 秒, 同时用时间平均或加权平均方式生成代表性 DO 值, 削弱局部曝气不均或瞬时扰动对控制判断的影响^[3]。

于控制参数设定方面, 要结合具体工艺种类明确 DO 目标范围和控制界限, 通常把曝气池 DO 控制目标定在 1.5 ~ 3.0 mg/L, 并于上下限基础分别设控制触发值, 如上限 3.2 mg/L、下限 1.2 mg/L, 同时配置 0.2 ~ 0.3 mg/L 的控制死区, 用来过滤短时间里的随机波动。此外, 还得设置持续判别时间参数, 一般要求 DO 超限状态持续保持 10 ~ 15 分钟以上, 才能进到启停逻辑判断阶段, 以避免频繁切换。

在启停逻辑运行中, DO 闭环控制并非单独作用, 而是和鼓风机运行状况协同联动, DO 持续高于上限, 现有鼓风机运行在低风量区间 (一般是额定风量的 40% ~ 50%) 时, 系统优先判定减台或停机条件; 当 DO 一直低于下限, 当变频调节快到上限了还是不能满足供氧需求的时候, 则触发启机逻辑。把 DO 变化趋势、持续时间和设备运行状态综合放进判断, 实现启停动作和实际生化需氧状态的闭环匹配。

3.3 设备轮换与分级启停策略

设备轮换和分级启停策略是保障鼓风机系统长久稳定运行的重要构成部分, 核心是经由合理分配运行负荷, 减轻单个设备持续运行的压力, 工程实践中, 一般按照鼓风机额定风量、效率范围及启动性能, 把机组分成基载机组和调节机组两类^[4]。其中, 基载机组负责系统 60% ~ 70% 的基础供氧需要, 长时间保持稳定运转; 调节机组依据负荷变化情形参与启停, 拿来补充或削减系统供氧能力, 进而构成清楚的运行层级架构。

分级启停策略里,基载机组通常不参与频繁启停,其运行风量控制于高效范围里,防止低负荷运转致使效率降低,调节机组有着较高启停灵活性,主要用来应对进水负荷短期波动情况,启停顺序一般依照“先开调节机组、后关调节机组”的准则去做,且在多台调节机组同时存在的时候,优先选运行小时数少或在备用状态的机组去参与运行,降低设备疲劳集中风险。

设备轮换机制一般拿累计运行小时数当作核心判据,控制系统自动统计并执行,工程里常把轮换周期设成7~14天,且规定各台鼓风机累计运行小时数偏差超10%,偏差靠近阈值时,系统借助调控基载和调节机组的角色,实现运行负荷自动均衡分派。

3.4 启停间隔与最小运行时间优化

启停间隔和最小运行时间控制是鼓风机启停策略里得严格遵循的基础约束条件,这直接关联设备安全与系统稳定。在工程实施中,要依据鼓风机类别和厂家技术规定,控制系统里明确设定最小连续运行时间及最小停机时间参数。针对高速离心或磁悬浮鼓风机,最小连续运行时间通常设成30~60分钟,工程里常拿45分钟当作控制值;最小停机时间一般不少于10~15分钟,防止频繁启动引致电机电流冲击及轴承热疲劳。

在启停逻辑设计中,这类时间参数要当作强制性条件优先去执行,启停判据满足,却未到最小运行或停机时间要求时,系统要延迟执行启停命令,借由变频调节或风量分配办法暂且满足曝气需求^[5]。同时,能在控制逻辑里加入启停冷却计时器及运行锁定机制,对启停操作做状态管理,避免短时间内反复进到判断流程里。

针对负荷波动经常但幅度不大的运行工况,启停策略要避免把启停当作首选调节方法,当负荷变化幅度比系统调节能力低(如风量调节范围的10%~15%)时,优先用变频调节或局部阀门调控办法;只在负荷变化幅度和持续时间同时满足启停判定条件,并且时间约束解除以后,能执行启停操作。

4 策略实施效果分析

综合应用负荷预测、溶解氧闭环控制及设备轮换等启停策略之后,对运行数据开展系统分析能评估策略实施成效,运行时着重采集鼓风机运行台数、曝气池DO及曝气主管压力等关键参数,且对启停前后30分钟里的数据变化做对比统计(见表1)。监测结果表明,策略施行后曝气池DO波动范围显著收敛,长时间稳定控制于1.5~3.0 mg/L范围,瞬时偏离幅度控制于±0.3 mg/L之内;曝气主管压力大致保持在50~65 kPa

表1 鼓风机启停策略前后运行指标对比

指标	策略前	策略后	改进幅度	备注
曝气池DO波动(mg/L)	±0.8~1.0	±0.3	下降约65%	稳定在1.5~3.0
曝气主管压力(kPa)	±8~10	±3~5	下降约60%	维持设计范围50~65
鼓风机单日启停次数	8~10	≤6	下降约40%	符合设备要求
单机连续运行时间(min)	30~40	≥45	提高约15%~50%	减少机械冲击
累计运行小时数偏差(%)	15~20	≤10	优化约50%	均衡负荷分配

设计范围内,波动幅度从原本的±8~10 kPa缩减到±3~5 kPa。与此同时,鼓风机一天启停次数稳控于6次以内,单次接连运行时长通常大于45分钟,各机组累计运行小时数偏差控制于10%以内,合乎设备运行规范规定。

5 结束语

污水处理设施鼓风机启停策略是一项涉及工艺、生化反应及设备运行多因素耦合的系统工程。通过将负荷预测、溶解氧闭环控制与设备运行约束有机结合,可构建具有工程可操作性的启停逻辑体系。本研究为污水处理厂鼓风机运行由经验控制向数据驱动、规则约束转变提供系统化思路,旨在为提升曝气系统运行的规范性和可控性提供有益参考。

参考文献:

- [1] 王杰.基于PLC的污水处理控制系统设计与应用[D].长沙:中南大学,2022.
- [2] 唐玉玲.城市污水处理流程能效建模及优化研究[D].武汉:武汉大学,2015.
- [3] 张琳,俞意聪,陆秋萍.磁悬浮鼓风机在污水处理SBR工艺上的应用[J].纯碱工业,2025(05):26-28.
- [4] 石诗义.“源荷储”一体化污水厂与配电/配电网协同调度的博弈策略[D].重庆:重庆大学,2024.
- [5] 申彦斌.污水处理鼓风机自动控制系统改造研究[J].城镇供水,2024(06):80-84.