

市政污水处理厂曝气系统优化运行的技术路径与效能提升研究

文 / 卢晓彤 葛洲坝集团生态环保有限公司

吴 磊 葛洲坝集团生态环保有限公司

摘要：随着我国城市化进程的加快，人口的快速增长，城市污水处理面临着严峻的考验。污水处理厂是一项重要的环保基础设施，其运行效率与效率直接影响着城市的可持续发展与居民生活品质。其中，曝气系统是污水处理系统中的核心环节，它为污水输送氧气，促进微生物的生长与代谢，起着至关重要的作用。然而，传统曝气系统存在能耗高、曝气效率低、运行稳定性差等问题，不仅增加了污水处理成本，而且制约了污水厂处理能力与出水水质。因此，研究城市污水处理厂曝气系统的优化运行是非常有意义的。

关键词：市政污水处理厂；曝气系统；优化运行；技术路径；效能提升

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.22.116

引言

城市污水处理厂曝气系统的优化运行是一项涉及多学科和多学科交叉的复杂课题。它需要从生物处理工艺、曝气设备的特点、水质和水量的变化以及自动控制等方面进行综合考虑^[1]。在生物处理过程中，不同工艺需要不同的曝气量，如何针对不同工艺特点进行优化，是当前研究的重点，意在为城市污水厂曝气系统的高效运行提供理论支撑与技术保证。

一、市政污水处理厂曝气系统效能提升的重要性

（一）降低污水处理能耗控制运营成本

能源消耗是城市污水处理厂整体运行的重要组成部分，而曝气系统作为污水处理过程的核心环节，其能量消耗在整个过程中所占的比重更为突出。相关研究表明，曝气系统能耗占污水处理厂总能耗的40%-60%，其运行效率直接影响污水处理厂运行成本^[2]。如果曝气系统效率不高，就会使设备长时间处于高负荷运行状态，既消耗大量的电能，又加剧设备的损耗，增加设备的维修与更换成本。反之，当曝气系统性能得到有效提升时，可大幅降低能耗，降低设备失效频率，实现对运行成本的根本控制。

（二）保障污水达标排放维护水环境

随着我国社会经济的迅速发展，城市化进程加快，城市污水排放量逐年增加，给水环境带来了巨大的压力。城市污水处理厂是水环境治理和水环境改善的重要基础设施，其处理效果直接影响水环境质量。曝气系统是污水处理工艺中的重要组成部分，它能为微生物提供足够的氧，促进其在污水处理中的降解与去除。如果曝气系统效率不高，则会造成反应器中溶解氧浓度过低，微生物活性受抑制，污染物降解效果不能充分发挥，造成废水处理效果不佳，出水水质难以达标。未达标污水排入自然水体后，将造成水体富营养化和水质恶化，对水生态系统造成破坏，影响居民生活和饮水安全^[3]。

（三）提升污水处理效率满足处理需求

曝气系统是污水处理过程中的核心环节，其运行效率的高低直接影响到整个污水处理系统的运行效率^[4]。高效曝气系统可使反应器内空气分布均匀，提高氧转移效率，加速微生物降解污染物，达到缩短污水处理周期、增加单位时间污水处理能力的目的。如果曝气系统运行效率不高，则会造成污水处理速度慢、处理周期长、处理能力不能充分发挥，难以满足日益增长的污水处理需求，甚至可能导致污水漫溢，给城市生态环境带来负面影响。因此，提升曝气系统效能对提高污水处理厂处理效率，保证其及时高效处理，满足日益增长的城市污水处理需求意义重大。

（四）延长设备使用寿命减少更换投入

曝气系统是由曝气风机、曝气器和管路等一系列设备组成的，它们的正常运行是保证曝气系统正常运行的前提。曝气系统运行过程中，当系统运行效率较低时，常会出现设备运行不合理的现象，如曝气风机因供氧需求长时间超负荷运行、曝气器因不均匀布气造成局部磨损加剧等。长时间不合理地运行，将加速设备老化，缩短其使用寿命，增大设备失效的几率。污水处理厂设备故障频繁、更换频繁，不仅影响设备正常运行，造成处理中断，而且增加设备更新及维护费用，给污水处理厂造成很大的经济负担。而提高曝气系统的性能，可以让设备更加合理地运转，让每一台设备都处于最优的工作状态，降低设备的磨损与老化，减少设备故障的发生率，进而延长设备的使用寿命。

二、市政污水处理厂曝气系统优化运行的技术路径

（一）智能曝气控制技术应用与优化

智能曝气控制是指利用先进的传感器、自动控制装置及计算机软件，实时监控、分析、调控曝气系统的运行参数，实现曝气系统的最优运行。智能曝气控制技术应用于城市污水处理厂，可有效提高曝气系统运行精度与稳定性，实现需曝气，避免能源浪费^[5]。

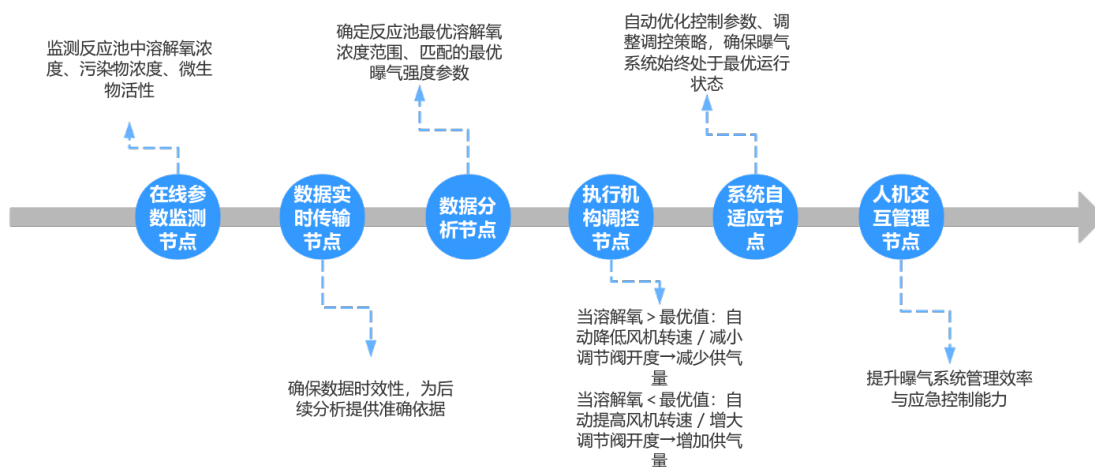
应采用智能曝气控制技术,将溶解氧、氧化还原电位、pH 值等多种在线检测设备集成到反应器中,实现对溶解氧、污染物浓度、微生物活性等的实时监测。这些传感器的特点是精度高,稳定性好,能连续、精确地采集数据,并能实时地向中央控制中心传送数据。中央控制系统利用专用软件快速分析、处理采集的数据,并结合污水处理工艺要求及微生物生长代谢规律,确定最优溶解氧浓度范围及曝气强度。

然后,中央控制系统根据分析结果,将控制命令发送给曝气风机和调节阀等执行机构,实时调节曝气系统的供气量。如在反应器中溶解氧浓度高于最优值时,系统能自动降低曝气风机转速或降低调节阀开度,从而降

低供气量;当系统中溶解氧浓度低于最优值时,再逐渐加大供气量,以保证反应池中总的溶解氧浓度。该控制方法实时精确,避免传统人工控制方式中供气量过大或过小的缺点,提高氧的利用率,降低能耗。

另外,智能曝气控制具有自学习、自适应能力。当污水处理厂的运行工况发生变化时,该系统能基于历史数据与实时监控数据,对控制参数及策略进行自适应调整,以确保曝气系统始终处于最优运行状态。同时,在中央控制系统的人机界面上,员工可实时查看曝气系统的运行状况及各参数的变化趋势,并根据实际情况进行人工干预与调节,提高曝气系统的管理与控制水平(智能曝气控制系统工作流程图如图1)。

图 1: 智能曝气控制系统工作流程图



(二) 曝气器优化选型与布置技术

在选择曝气器时,应从污水处理厂的工艺特性、进水水质及水量、反应器结构尺寸及运行费用等方面综合考虑。目前,常用的掺气坎有微孔掺气坎、中孔掺气和射流掺气三种。微孔曝气器因其氧传递效率高、气泡均匀、能量消耗低等优势,适合 A/O、A²/O 等污水处理工艺。中孔曝气装置具有抗淤堵能力强,使用寿命长,维修方便等优点,特别适用于含悬浮物、杂质较多的污水处理场合。射流掺气装置利用射流实现空气和污水的充分混合,具有混合效率高、氧气利用率高、适应性强等优点,适用于某些特殊污水处理工艺,也适用于对混合要求高的反应器^[6]。

在选择掺气装置的过程中,需对不同掺气装置的氧传递系数、功率效率、气泡直径、有效面积等性能参数进行详细的对比分析,并结合污水处理厂的实际需要,筛选出性能优越、经济性好的掺气坎型。在此基础上,对曝气器材料及制作工艺进行研究,以保证其耐腐蚀、耐磨、密封性能好,能适应污水处理厂的苛刻工况,延长其使用寿命。

在曝气装置的布置上,应根据池的形状、尺寸和来流条件,确定合理的布局方案,以确保池内空气分布均匀,提高氧利用率。对于矩形反应器,通常采用沿池长均匀

布设掺气装置,根据池宽、水深等因素调节掺气坎间距及布置方式,以保证各区域溶解氧浓度一致。对于圆形反应器,通常采用同心圆排列和放射状排列,使得掺气装置能均匀地覆盖整个反应池底部,不会产生空气分布盲区。

(三) 曝气系统管道优化设计技术

在进行曝气系统管路优化设计时,要根据总供气量、掺气装置数目及布置形式来确定管路的管径及材质。管径的选取要综合考虑风量、速度及压损三个方面的因素。管径过小将造成管道内气流速度过大,压降增大,不仅增加风机功率,而且可能造成管路振动、噪音等问题,如果管径太大,虽然可以减少压损,但是会使管道投资增加、安装困难。因此,要根据空气流量及允许速度范围,进行水力计算,选择合理的管径,使管路压损在一个合理的范围内,同时兼顾经济性与实用性。

管道材料的选择也是非常重要的,它的耐腐蚀性能,强度以及使用寿命都要考虑在内。由于曝气系统内空气中可能含有硫化氢等腐蚀性气体,所以对管道材料的抗腐蚀性能提出更高的要求。曝气管道常用材料有硬质聚氯乙烯、钢管、不锈钢等。硬聚氯乙烯管材具有质轻、耐腐蚀性、价格低廉等优点,但其强度偏低,适合在低压曝气系统中使用;钢管具有较高的强度和较高的温度

和压力，但易生锈，需防腐处理，适合中高压曝气系统使用，不锈钢管耐腐蚀性能好，强度高，但价格偏高，适合通风系统中对防腐要求很高。因此，必须综合考虑曝气系统压力、运行环境及经济性等因素，选择合适的管路材料。

(四) 曝气风机节能运行技术

曝气风机选型时，应根据系统总供气量、压力及运行条件的变化，选用适当型号及规格的风机。目前，罗茨风机、离心式风机和螺旋风机是最常用的曝气风机。罗茨风机结构简单，工作可靠，压力稳定，但其效率较低，适合中、低压曝气系统；离心风机效率高，流量范围宽，调节压力容易，适合于大流量中高压曝气系统；螺旋风机以其高效率、低噪声、低振动和长寿命等优点，在城市污水处理厂得到了广泛的应用。在选用风机时，应通过分析不同型号风机的性能曲线和效率曲线，并根据实际需要选择在一般情况下具有较高效率的风机型式。同时，要考虑风机调节范围，保证风机在各种工况下均能保持高效运行，避免出现“大马拉小车”现象，造成能源浪费。

在曝气风机控制模式上，传统的控制模式是通过调节阀开度实现送风量的，该方法虽然简单，但压力损失大，风机能耗高。采用变频调速技术可以很好地解决这个问题。变频调速技术是通过改变风机的电源频率来调整风机转速，从而实现对风机送风量的控制。当曝气系统需要的空气量减少时，由于风机的能量消耗与转速的三次方成比例，故可采用减小风机转速的方法来降低风机的能耗。另外，变频控制技术具有快速响应、高精度和稳定的特点，能根据曝气系统的实时要求快速调节供气量，确保反应器中溶解氧浓度稳定。除采用变频控制技术外，为满足不同工况条件下曝气系统的供气量要求，还可采用并联或串联两种控制模式。当污水处理厂进水量及水质变化很大，造成曝气系统需要的供气量波动较大的情况下，采用多台风机并联或串联运行，并根据实际需要调整运行风机数目及组合形式进行调整，可达到灵活调节供气量、提高运行效率、降低能耗的目的（同类型曝气风机性能对比如表1）。

表 1：同类型曝气风机性能

风机类型	效率特点	压力范围	流量调节方式
罗茨风机	效率较低（通常 <70%）	中低压（50-98kPa）	出口阀门调节、旁路调节、变频调速
离心式风机	效率较高（通常 75%-90%）	中高压（80-150kPa）	进口导叶调节、变频调速
螺旋（涡旋）风机	高效率（通常 80%-95%）	低压（≤ 50kPa）	变频调速

(五) 基于微生物特性的曝气优化技术

需要对污水处理过程中主要功能菌群（如异养细菌、硝化菌和反硝化细菌）的特征进行深入研究。不同种类的微生物对环境因子（如溶氧、温度、pH、养分等）的需求各不相同。例如，异养细菌主要对废水中有机物进行降解，它的生长和繁殖需要一定的溶氧，通常为 2~4 毫克/升；硝化菌是一类以硝化作用为主的化能自养菌群，将氨氮转化为亚硝酸氮和硝酸氮，它对溶氧的要求很高，一般要保持在 2mg/L 以上，并且对温度比较敏感，适宜的温度范围是 20-30℃。反硝化菌在低氧环境下通过反硝化作用将硝酸盐氮、亚硝酸盐氮转化成氮，对溶氧要求极低，通常低于 0.5mg/L。

因此，在曝气系统运行时，应根据不同处理阶段及微生物需求，对曝气强度及溶氧浓度进行调节。例如，在污水处理系统中，为了满足异养菌与硝化菌的生长代谢需要，需保证充足的溶解氧供给，需采用曝气系统对反应器进行充氧。在缺氧阶段，需降低曝气量，甚至完全不曝气，为反硝化菌生长提供有利条件。根据微生物特性，调节曝气系统的运行参数，可使曝气系统始终保持在最优的生长、代谢状态。

结语

综上，优化曝气系统对提高污水处理效率，降低能耗，提高出水质量至关重要。对曝气系统优化技术路径进行深入研究，不仅能解决当前城市污水处理面临的现实难题，而且可为未来污水处理技术的研发提供新思路与新方向。

未来，随着科技的进步及环保要求的提高，市政污水厂对节能与智能化的要求越来越高。因此，优化曝气系统对于促进污水处理工业的可持续发展具有重要意义。

参考文献

[1] 刘璐, 薛栋, 王金鑫. 城镇污水处理厂节能减碳的实现路径与技术探讨 [J]. 新型城镇化, 2024, (12): 77-80.

[2] 张家权. 城镇污水处理厂碳排放控制技术研究 [J]. 皮革制作与环保科技, 2024, 5 (22): 28-29+35.

[3] 金小飞, 马耀辉, 许波. 智能机器人在污水处理厂的应用研究 [J]. 中国环保产业, 2024, (10): 25-29.

[4] 陈培, 丁伦涛, 郭松林. 污水处理厂提标改造中的节能降耗技术探讨 [J]. 中国资源综合利用, 2024, 42 (09): 236-238.

[5] 黄文佳, 赵国清, 张荣兵, 高琼, 刘启诚, 阮永兴, 刘昕, 冯伟. 大型污水处理厂重点设备节能研究和实践 [J]. 给水排水, 2024, 60 (09): 50-56.

[6] 董佳. 污水处理厂电气能耗路径分析与节能措施探讨 [J]. 节能与环保, 2024, (06): 65-71.

作者简介: 卢晓彤, 1985 年 6 月, 女, 汉族, 湖北省麻城市, 博士研究生, 工程师, 葛洲坝集团生态环保有限公司资本与金融事业部总经理, 研究方向: 市政污水处理。吴磊, 1982 年 2 月, 男, 汉, 湖北武汉, 硕士研究生, 高级工程师, 葛洲坝集团生态环保有限公司科技与信息化事业部总经理, 研究方向: 水处理及固废处理。