

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2025.16.003

面向未来的污水处理厂设计与运行:范式转型与挑战应对

陈 珺

(中持水务股份有限公司, 北京 100192)

摘要: 随着环境问题的日益复杂和技术的不断进步,污水处理厂的设计与运行面临日益增多的挑战,同时也迎来了转型的机遇。阐述了当前污水处理厂设计与运行的现状及其发展趋势,重点分析了安全系数的意义及其局限性,并探讨了转型过程中面临的挑战、不确定性分析方法及应对策略。此外,还深入讨论了运行模式从被动控制向主动控制转变的驱动因素及其带来的挑战。

关键词: 污水处理厂; 设计与运行; 模型; 不确定性

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2025)16-0013-08

Design and Operation of Future Wastewater Treatment Plants: Paradigm Shifts and Challenge Responses

CHEN Jun

(CSD Water Service Co. Ltd., Beijing 100192, China)

Abstract: As environmental concerns grow increasingly complex and technological advancements accelerate, the design and operation of wastewater treatment plants are confronting with escalating challenges, while simultaneously presenting opportunities for transformation innovation. The paper outlines the current status and emerging trends in the design and operation of wastewater treatment plants, with a focus on analyzing the significance and limitations of safety factors of traditional approaches. It also examines the challenges associated with the transition, explores methodologies for uncertainty analysis, and corresponding strategies. Furthermore, the driving factors behind the shift from reactive control to proactive control in operational modes are discussed, alongside the challenges inherent in this paradigm shift.

Key words: wastewater treatment plant; design and operation; model; uncertainty

随着污水处理排放标准的不断提高、全球气候变化加剧以及技术进步的加速,污水处理行业已经演变为一个复杂的工程系统,污水处理厂的设计与运行面临着前所未有的挑战。传统的污水处理厂设计方法通常依赖经验和确定性指南,通过采取保守的安全系数以及不断叠加处理工艺单元来应对风险的方式已显现出诸多问题。此外,各地污水处理厂的运行策略大多依赖被动式反应控制,在应对未来环境中的不确定性和复杂性时存在明显的局限性。

1 污水处理厂的设计、运行现状与演进

1.1 现状

在过去的50年,全球污水处理设计指南不断更新,以适应日益严格的处理标准,技术从简单的有机物去除逐步发展到脱氮除磷^[1]。总体而言,这些传统设计指南主要依赖于经验参数,而这些参数通常基于历史数据和类似设施的运行经验。工程师通常会在这些参数的基础上依据主观判断乘以一定的安全系数来考虑系统的不确定性。这里需要特别强调不确定性的概念,不确定性可定义为对系

统或过程的确切行为在当前和未来都无法准确确定或预测的程度^[2],不确定性的性质可分为由知识不足引起的认知不确定性和由系统或现象固有随机性引起的变异不确定性。

安全系数在传统污水处理设计指南中占据重要的地位,历史上发展起来的安全系数方法经受了时间的考验,并且被广泛接受为行业标准。它的使用可以看作是一种隐性应对不确定性的方法。通过增加安全裕度,可同时考虑到各种不确定性来源,确保系统在各种不利条件下仍能稳定运行。该方法的优点在于其简单性,以下以污水处理工艺设计中泥龄的取值为例进行说明。

著名的德国规程DWA-A 131(2016年版)指出,在设计一个硝化-反硝化系统所需的泥龄(SRT_{design})时,需要考虑不同氮负荷峰值因子条件下的安全系数^[3],具体如下式所示:

$$SRT_{design} = PF \cdot 3.4 \cdot 1.103^{(15-T)} \cdot \frac{1}{1 - \frac{V_D}{V_{AT}}} \quad (1)$$

式中:PF为工艺系数,与安全系数同义,一般为1.2~2.4;T为水温; V_D 为缺氧池池容; V_{AT} 为好氧池池容。

同样,美国水环境联合会(WEF)的污水处理厂设计手册^[4]提到,在设计活性污泥法系统时,需要根据预期的峰值/平均TKN负荷选择适当的安全系数用于计算设计泥龄 SRT_{design} ,安全系数可能在1.3~2.0之间变化,具体算式如下:

$$SRT_{design} = SF \cdot \frac{1}{\mu_N - b_N} \quad (2)$$

式中:SF为安全系数; μ_N 为硝化菌比增长速率; b_N 为硝化菌衰减系数。

我国《室外排水设计标准》(GB 50014—2021)提到,好氧池的设计泥龄采用下式进行计算:

$$SRT_{design} = F \cdot \frac{1}{\mu} \quad (3)$$

式中:F为安全系数,宜为1.5~3.0; μ 为硝化菌比生长速率。

从上述中外设计指南中可以看出,安全系数的取值范围差异较大,高安全系数和低安全系数可能导致池容相差一倍之多。

安全系数不仅体现在硝化设计系统中,还贯穿整个污水处理工艺流程,包括缺氧池容、二沉池表

面负荷、氧转移效率的确定等。在传统的设计方法中,缺氧池的池容通常根据经验来确定。例如,在DWA-A 131设计指南中,缺氧池的尺寸必须满足特定的比例要求,缺氧区的容积与生物反应器总容积的比例应为0.2~0.5,低于0.2或高于0.5的设计都不被推荐。设计时,根据水温、缺氧池与好氧池的比例以及安全系数来计算总的泥龄。然而,缺氧池的尺寸在很大程度上受到进水中易生物降解COD(RBCOD)的影响,而传统的设计方法难以准确反映这一参数在设计中的重要性;在设计曝气系统时,工程师通常会假设一些设计参数,如 α 值、曝气器污垢因子、曝气器的标准氧传递效率(SOTE)。大量的工程实例表明,曝气系统的过度设计是常见的问题,不仅会带来较高的投资费用,而且对运行也具有较大的影响,如回流中的高溶解氧浓度会影响厌氧区和缺氧区的性能^[5]。

总之,经验方法将一些设计变量乘以一个系数,或对流量、进水、动力学/计量系数的设计值进行保守假设,但这种假设并不直接分析流量和负荷的相关性、单元过程之间的相互作用或系统的可靠性,而对设计的不同要素采用安全系数的假设所导致的问题之一是重复计算不确定性。通常,使用这些设计指南会导致相对保守且昂贵的投资,而不一定带来有价值的收益^[6-7]。Russell^[8]指出,大多数市政污水处理厂的设计使用安全系数后,可能会过度设计100%或更多。

同样,在运行过程中,日常操作决策更像是一门艺术而非科学^[9],运行人员往往根据既有的历史经验采用保守的运行参数,如较长的SRT、较高的DO值,另外也缺乏应对外部变化的灵活手段,这不仅造成平时运行能耗、物耗较高,同时存在各种运行风险。

1.2 演进

随着工艺模拟对污水处理行业的影响愈加深入,欧美国家逐渐兴起从传统经验指南(安全系数)向建模和模拟的过渡。美国水环境联合会(WEF)的设计手册WEF MOP8(第六版)引入了污水处理厂设计与运行的模型应用,主要包括国际水协(IWA)优良建模实践(GMP)导则的介绍和全厂建模的应用。CH2M(现在的Jacobs)公司在1998年就开发了Pro2D(基于ASM2d的一个扩展模型)模拟工具用于污水处理厂的设计与升级改造,Pro2D模型能够与

动态模型相结合,对污水处理厂的初步设计进行进一步调整;德国DWA-A 131(2016年版)引入COD组分作为模型设计计算的基本方法^[3]。荷兰、瑞士和英国的污水处理厂在模型设计方面通常采用稳态模拟设计,有时也使用动态模拟^[10]。日本的大多数市政污水处理厂设计主要依赖传统方法,日本下水道协会在2009年修订的市政污水处理厂设计指南中也纳入了活性污泥数学模型(Activated Sludge Model, ASM)的使用,其中稳态模拟是首选。

在运行优化方面,模型的应用已经超过30年,欧美国家从20世纪90年代就开始在污水处理厂开展工艺模拟辅助运行的实践^[11],2000年左右我国很多污水处理厂开始进行模型的模拟应用。但是早期的这种模拟运行往往采用离线模型,以静态或动态模拟为主。

向模型辅助设计和运行过渡的关键原因包括以下几个方面:①污水处理模拟软件的进步,目前的各种商业污水处理模拟软件已非当初ASM模型可比,不仅在模拟组分、过程反应等方面的复杂性与日俱增,而且包含了全厂工艺单元的模拟,而非只是活性污泥单元的模拟,应用的成熟度不断提

高;②更严格的出水要求无法用传统方法设计,如对于要求实现极限脱氮除磷(LOT)的污水厂,通常出水需要达到TN<3 mg/L、TP<0.1 mg/L的标准,Charles等^[12]的研究结果表明达到这样的标准往往是基于概率的表达,即某些工艺流程能够在95%可靠性水平下达到该出水标准;③模型可以更真实地描述由水力方式、反应器配置和操作模式变化引起的复杂性,使工程师能够分析某个单元操作对整个处理链性能的影响,便于检查出水水质对特定设计假设的敏感性;④模型可以模拟出水水质对瞬态条件(如雨天引发的进水负荷和运行方式)的响应,而这正是以往传统设计所欠缺的技术性能。

2 设计与运行的范式转型

2.1 挑战

基于上述分析,结合当前的国际发展趋势,污水处理厂设计和运行正在经历深刻的范式转型,即从基于经验的方法向基于模型的方法转变。

使用模型设计污水处理厂有诸多挑战,其中包括输入数据和模型参数的不确定性、模型结构不确定性、数值计算和模型输出的不确定性,上述几个方面的不确定性来源及示例见表1。

表1 模型用于污水处理厂设计和运行的不确定性来源

Tab.1 Sources of uncertainty in models used for design and operation of WWTP

项目	详细信息	来源	示例
输入	检测数据	进水数据;物理数据;运行设置;性能数据	流量、进水水质、池容、DO、出水水质、MLSS、侧流输入
	模型参数	水力学;生物动力学;沉淀	系列中的池数;微生物最大生长速率;沉淀系数
模型结构	模型类型	进水模型;水力模型;工艺模型;曝气系统模型	
	模型接口		剩余污泥排入厌氧消化池;侧流返回进水
数值计算	模拟软件	求解器设置;数值近似;软件限制;错误	
模型输出	不确定性的传播	所有模型的不确定性	满足排放标准的概率

不确定性对模型用于污水厂的设计和运行产生了不容忽视的挑战,明确这些不确定性来源后,如何科学分析这些不确定性成为模型应用的关键。

2.2 不确定性分析

在讨论不确定性分析之前,需要强调一下不确定性与可变性的区别,不确定性(Uncertainty)指由测量误差、数据缺失或认知不足导致的未知性,如进水流量测量的误差或监测数据的偏差。可变性(Variability)指系统或过程本身的固有变动,如生活污水量的日变化、季节性变化,或降雨导致的流量波动。详细深入的不确定性分析论述远远超出文中内容涉及的范畴,对于模型应用于污水处理厂的

设计与运行而言,需要重点关注输入数据和模型参数的不确定性。

输入数据的不确定性实际上无论是对传统设计方法还是模型应用都是关键因素,输入数据的不确定性源于测量误差,这些误差包括随机误差、系统误差和粗大误差。随机误差是测量过程中众多不可控和不可预测误差的结果,其影响由多个微小误差累积叠加而成。随机误差是不可确定的,虽然可以尽量减少,但无法完全消除,它们存在于任何测量过程中,并且只能通过提高测量精度来降低其影响。系统误差是由仪器校准不当、设备故障,或手动或自动取样的方法和位置不当引起的非随机

误差。粗大误差包括人为疏忽或在测量读取、记录和解读过程中出现的错误。其中最常见的是人为测量误差,这类错误可以通过实施质量控制程序加以减少。

上述各种误差可能来自仪表的误差、检测分析方法、化验数据的质量控制、低频采样方法、传感器与参考测量值之间的线性回归程度等。对上述因素做出量化的不确定性分析有众多方法,其中一个重要手段是数据调谐。数据调谐是包括误差检测、误差隔离和误差识别^[13],以及为建模目标准备适用的数据集。数据调谐是国际水协会(IWA)“良好建模实践”工作组发布的《活性污泥模型使用指南》的关键步骤^[14],最常见的是对全厂的流量和总磷测量进行数据调谐,沉淀池、浓缩和脱水过程中TSS、COD和总氮的测量也可以通过物料平衡进行数据调谐。

模型参数校准的重点是进水特性以及准确的水力学、曝气、沉淀建模,同时还包括一些模型参数的手动调整,以便在测量数据与模型输出之间实现合理拟合。以往很多工程师认为模型过于复杂,模型参数众多,难以准确把握、校正复杂等。实际上从模型应用的数十年发展来看,对于典型的生活污水,绝大多数模型参数并不需要逐一调整,进水水质组分准确性的影响远远超过模型参数的影响。当需要对参数不确定性和水质可变性进行更详细的评估时,建议将蒙特卡洛模拟与参数估计算法结合使用,其中可根据研究需求选择一维(仅考虑不确定性)或二维(同时考虑不确定性和可变性)蒙特卡洛模拟方法。蒙特卡洛模拟是一种通过随机抽样解决复杂问题的计算方法,类似于投掷硬币的过程。如果多次重复投掷,便能得到正反面出现的概率。蒙特卡洛模拟基于相同原理,但采用计算机随机生成的数据进行“模拟实验”,从而预测复杂系统中的各种可能结果。

此外,气候变化带来的极端天气事件如暴雨和干旱,对污水处理厂的设计和运行提出了新的挑战。传统设计方法往往难以应对这些变化,因此需要在污水处理厂设计与运行过程中更多考虑这方面的不确定性。

3 应对策略

基于上述不确定性分析,在设计过程中引入概

率分析和风险评估方法,有助于设计更加稳健且具备较强适应性的系统。该方法不仅提高了设计的准确性,还能优化资源配置,减少不必要的冗余。

3.1 制定基于概率的排放标准

设计和运行的前提是保证污水处理的达标排放,因此在某种程度上排放标准决定了设计和运行的基本范式。众所周知,无论是进水的动态变化,还是模型参数的准确确定,污水处理过程始终具有一定程度的不确定性^[15]。但事实上很多地方污水处理厂的排放标准往往是确定的不容超越的排放限值。虽然这样的标准限值易于理解和执行,但并不能真正反映受纳水体的生态状况或其实际效果^[16],由此可能导致为了在极端事件下达标而进行不可持续且昂贵的基础设施投资,而这些投资仅带来微小的额外环境效益。

因此,在这样一个充满不确定性的世界,如何通过探索设计、运行和达标排放之间的相互作用来研究不同出水标准的等效性是非常有意义的。对于正常运行并偶尔受到极端事件影响的污水处理设施,允许一年内出现一定次数的超标排放似乎更合适。这种标准评价方法更适合平衡环境保护与投入之间的关系,通过探索替代解决方案,而不是仅仅通过扩建污水厂来获得有限的出水水质改进。

事实上,有些国家早已采用这样的标准,奥地利、西班牙、法国、荷兰等国针对BOD、COD、SS指标采用可变比例的水样达标标准,即达标的水样比例并不是一个固定的数值,而是根据污水处理厂的规模等因素而变化。例如,丹麦污水处理厂的排放标准按照水样的平均值与标准偏差达标制定,即 $X + k_n S < K$ 。其中, X 为水样的平均值, S 为水样的标准差, k_n 为标准差系数(或离散系数), K 为标准值。这两种方法都是建立在统计概念的基础上,置信度为95%。

3.2 向基于模型的概率设计方法过渡

为了推动污水处理厂设计从传统的基于确定性的经验方法向基于模型的概率方法转变,需要将工艺模型与统计方法相结合,开发相应的设计框架。在该框架中,模型将污水处理厂视为一个整体系统,综合考虑各工艺单元之间的相互作用。同时,概率统计方法能够将系统中的变异性和不确定性传递到模型输出中,从而以更高的客观性和透明度引导设计人员进行设计决策,确保设计过程更加

科学严谨。在该领域, IWA 设计与运行不确定性工作组(DOUT)在过去 10 余年中逐步建立了这种设计方法。

该方法主要分为 3 个步骤,按照先后顺序主要包括生成具有不同安全等级的一组预设计、筛选各种预设计方案并评估、使用动态模拟量化超标概率(probability of non-compliance, PONC),具体如图 1 所示。这里仅对上述 3 方面内容做概要性的介绍,若了解详细深入的内容,可参考 IWA STR 21 的技术报告^[10]。

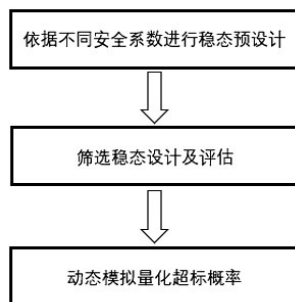


图 1 基于模型的概率设计方法主要流程

Fig.1 Main process of model-based probabilistic design methods

第一步是根据传统设计指南或运行稳态模型生成预设计。与传统方法不同,此步骤采用均匀分布来描述每个设计输入,其分布范围的上下限由专家意见、已有研究或可用数据确定。在此阶段,采用蒙特卡洛抽样法对设计输入参数(如池容、负荷)进行随机采样,从而生成多个预设计方案。由于输入参数的随机选择,每个方案的保守性水平不同。该设计方法的概念示意图 2。

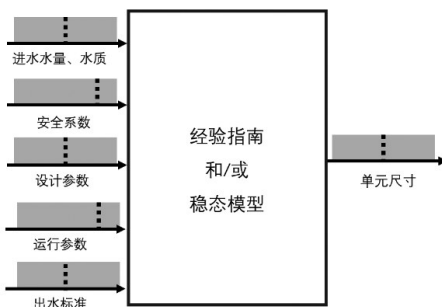


图 2 基于输入参数为均匀分布采样的设计概念

Fig.2 Design concept based on input parameters sampled from a uniform distribution

在图 2 中,灰色区域表示每个输入和输出的均匀分布,黑色竖直的虚线表示保守性水平。显然,

这种设计方法与传统设计方法不同,传统设计方法是输入单一的设计值来确定各处理单元的大小。

在第一步生成的设计方案中,部分可能由于场地限制或成本过高而不可行,且某些方案在性能上差异不大。因此,经过筛选,将不太可能且性能相近的方案剔除,保留少量备选方案。这些备选方案随后将在动态进水条件下进行评估。通常情况下,动态模拟需要使用一年的进水时间序列数据进行分析,使用一年的进水时间序列数据不仅能捕捉季节性变化、不同运行工况,还能提高模拟的可靠性,并符合设计规范。模型可以采用默认参数值,但如果明确的信息表明默认值不适用,则可以对某些参数进行调整。模拟输出用于评估污水处理厂在动态条件下的预期性能表现。对于每个预设计方案,可以针对关键的出水水质参数构建累积分布函数。通过分析这些累积分布函数,可以筛除动态条件下出水表现较差的设计方案。

在第三步中,动态概率评估涉及使用随机的进水条件和模型参数值进行模拟运行。因此,必须先确定将在动态模型中传播的不确定性来源,列出相关的不确定性来源清单。在所有潜在的不确定性来源中,仅评估设计人员认为对特定目标至关重要的部分。设计人员必须应对的主要不确定性和变异性来源之一是进水的动态特性。通常,进水的变异性(如流量、温度或水质特性)可以通过已有的数据时间序列来描述。如果缺乏足够频率和持续时间的测量数据,可以使用进水生成器随机生成合成时间序列^[17],将适当的变异性引入模型。此外,设计人员还需关注活性污泥模型、沉淀模型等来自模型结构不确定性的来源。

在动态概率评估阶段,采用蒙特卡洛不确定性传播方法,对进水条件和模型参数进行概率抽样,然后运行模型,生成不同的出水时间序列。该方法可以传播系统的不确定性,并用于估算出水指标的累积分布函数。该方法生成了不同的出水时间序列(即不同的“可能现实”),在污水处理建模领域具有重要意义。总结了不确定性传播和出水指标估算的流程,具体见图 3。

一旦所有的蒙特卡洛模拟运行完成,就可以汇总并比较每个设计方案的评估指标,其中最重要的两个指标分别为 PONC 和每个设计方案的总成本。以图 4 为例说明用累积分布函数估算出水水质的

PONC。假设出水氨氮的标准是 1.0 mg/L, 累积分布函数表明该设计方案在 98% 的合规期内会产生 1.0 mg/L 或以下的出水浓度。在 2% 的合规期内, 1.0 mg/L 的出水限值将被突破, 导致超标事件发生。

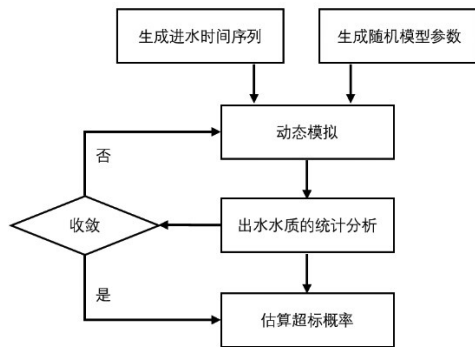


图 3 不确定性传播与出水指标估算程序

Fig.3 Uncertainty propagation and effluent quality estimation procedure

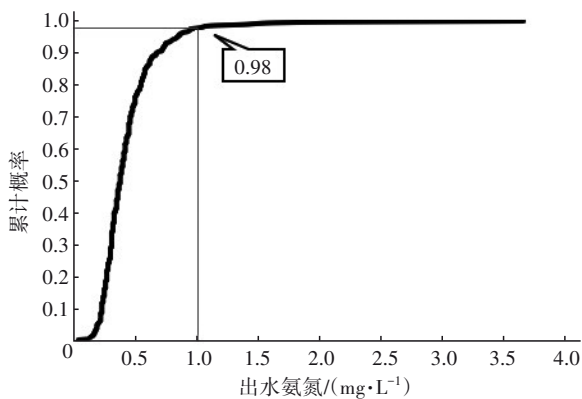


图 4 出水氨氮的累计概率分布

Fig.4 Cumulative probability distribution of effluent ammonia nitrogen

PONC 值表示超标事件相对于总事件数的预期比率。例如, 如果出水标准是基于日均值, 那么每一天都构成一个超标或不超标事件。在图 4 示例中, 超标天数可以通过将与出水标准(此处为 1.0 mg/L)对应的 PONC 值乘以一年的总天数来计算得到, 即: $0.02 \times 365 = 7 \text{ d}$ 。在计算 PONC 值之后, 另一个需要计算的关键指标是每个设计备选方案的总成本, 有关污水处理厂的成本可以通过成本函数进行计算^[18-19]。

目前, 基于模型的概率设计方法已经在一些发达国家和地区得到应用。例如, 丹麦和荷兰在污水处理厂的设计中已经采用概率方法, 瑞典则正在制定一部包含概率方法的国家设计手册。在北美, 有

的污水处理厂在升级改造过程中与咨询公司合作, 也应用了基于模型的概率设计方法。

3.3 从被动性控制向主动性控制的运行转变

3.3.1 被动性控制与主动性控制的概念

未来污水处理厂运行方式的转变不仅体现在概率方法的应用上, 另一个重要趋势是由被动性控制向主动性控制的演进。被动性控制指的是在系统运行过程中, 当出现问题或异常情况后, 运行人员或控制系统才采取措施进行响应, 如污水处理工艺中常见的反馈控制。主动性控制则依赖于实时数据、预测分析和智能优化技术, 提前预防潜在问题, 并主动调整操作参数, 以实现更高效、更稳定的运行。从被动性控制向主动性控制转型的概念示意如图 5 所示。

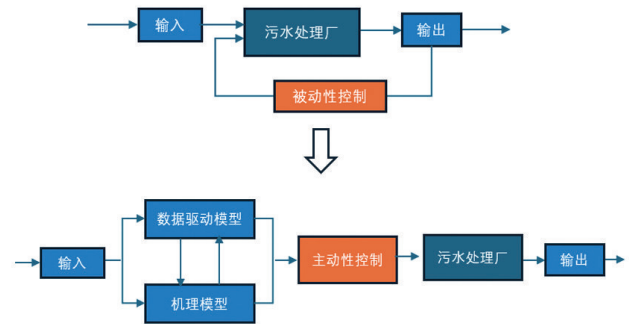


图 5 从被动性控制向主动性控制转型示意

Fig.5 Transition from reactive control to proactive control

3.3.2 主动性控制的推动因素

主动性控制的出现并非偶然, 其从被动性控制转变而来具有深刻的历史背景, 并受到多方面因素的推动。

① 技术进步。随着传感器技术、自动化控制系统和模拟技术的快速发展, 污水处理厂逐步具备实时获取数据并做出响应的能力。尤其是数字孪生技术的出现, 使得污水处理厂能够通过虚拟模型模拟和优化实际运行, 提升运行的智能化水平, 这些进步正在引领污水处理厂向在线决策支持系统的过渡。

② 排放标准日益严格。无论是欧盟新的污水处理厂排放标准, 还是北美部分地区要求的极限排放标准, 或是我国近年来各地污水处理厂的地方排放标准, 世界各地污水处理厂面临更严格的排放标准是大势所趋, 这种严格不仅体现在标准数值方面, 还体现在采样频率上。传统的被动控制模式无

法应对日益严格的排放标准,迫使行业向更加高效、精确的主动控制模式转变。

③ 成本压力。能源和资源成本上升促使污水处理厂寻求更为经济的解决方案。主动性控制能够通过优化运行参数,减少能耗和化学品使用,从而降低运营成本。

④ 人工智能的应用。机器学习和人工智能技术的广泛应用,使得污水处理厂能够处理大量实时数据,提前预测未来的运行状况,从而主动优化控制策略。这一技术进步是主动性控制得以实现的重要支撑。

⑤ 气候变化影响。气候变化带来的不确定性和极端天气事件,使得污水处理厂需要具备更强的应对能力。主动性控制通过预测性模型和实时响应能力,能够应对负荷波动和气候变化带来的挑战。正是在这些历史背景的推动下,污水处理厂需要从以往的被动应对模式,逐渐转向以数据驱动、预测分析和优化操作为核心的主动性控制模式,从而大幅提升其运行效率和运营弹性。

3.3.3 主动性控制的实施挑战

被动性控制向主动性控制的转变面临多个挑战,主要集中在技术、数据分析、管理方式和成本等方面。

① 技术挑战。主动性控制依赖于大量实时数据,需要高精度传感器、自动化控制系统和复杂的建模计算。先进的模拟计算和预测算法要求较高的计算资源和专业知 识,提高了技术门槛。

② 数据管理与分析。主动性控制依赖于机理模型和机器学习模型,而这些技术需要大量历史数据和持续的实时数据流来训练和校正模型,许多污水处理厂可能缺乏足够的数 据积累或历史数据质量较低,导致模型预测能力受限。

③ 管理方式的转变。许多污水处理厂的管理流程围绕传统的被动性控制,以应对突发问题为核心。主动性控制要求管理层转变思维模式,从以往的事后响应转向更为前瞻、主动的预防式管理。这不仅涉及技术流程的调整,还涉及管理文化的变革,对于一些传统组织来说这可能是一个艰难的转型过程。

④ 成本因素。由于主动性控制涉及高昂的传感器、数据处理和计算资源投入,目前更适合在大型污水处理厂中应用。在北美,一些小型污水厂

对该技术的需求也较高,但受限于技术成熟度和投资成本,预计在未来成本下降、技术更加成熟后,会逐步推广。

目前,一些发达国家的污水处理厂已经开始从被动控制向主动控制转变,并取得了初步成效。例如,美国的 Agua Nueva 污水处理厂通过数据驱动模型与机理模型的结合,使操作人员能够基于实时数据做出主动决策,优化曝气池的 DO 设定值,实现显著的节能效果^[20]。新加坡的樟宜再生水厂通过模型分析传感器数据的异常情况,可及时发出预警,并利用经过校准的模型评估不同运行场景,使运维人员能够更全面地理解维护计划对系统运行的潜在影响^[21]。

在这些污水处理厂中,数字孪生技术的应用成为实现主动控制的核心推动力。与传统的被动式控制相比,基于预测与优化的操作模式显著提高了系统的灵活性和应对能力,促使运行方式从以往的被动响应逐步转变为前瞻性、主动化的操作管理。随着相关技术的持续发展与深入应用,预计将有更多的污水处理厂逐步转向主动控制的运营模式,从而进一步提升整体系统的运行效率与可靠性。

4 结论

污水处理厂的设计与运行正处于一场从基于经验的确 定性方法向基于模型的概率方法转型的重大变革中。基于模型的概率方法面临的主要挑战是进水水质及模型参数的不确定性。通过引入蒙特卡洛不确定性分析,可以定量评估这些不确定性带来的风险,并提供相应的风险控制数据,同时有助于节约成本。在污水处理厂的设计、建设和运营阶段,采用基于模型的概率方法有利于做出更加明智的决策,不会因为对未知的担忧而过度设计,也不会因为无法理解复合风险而设计不足,资金使用更加高效,可进一步提升污水处理厂的整体效能。

从传统的被动性控制转向主动性控制,未来污水处理厂的运行将变得更加高效,同时在应对气候变化和其他不确定性因素的挑战中能够保持高效稳定。未来的污水处理厂将不仅仅是资源回收设施,更将成为智能化、可持续发展的综合系统,为环境保护和资源管理作出更大的贡献。

参考文献:

[1] JENKINS D, WANNER J. Activated Sludge-100 Years

- and Counting[M]. London: IWA Publishing, 2014.
- [2] BELIA E, AMERLINCK Y, BENEDETTI L, *et al.* Wastewater treatment modelling: dealing with uncertainties[J]. *Water Science & Technology*, 2009, 60(8): 1929–1941.
- [3] DWA. Bemessung von einstufigen Belebungsanlagen: DWA-A 131[M]. Germany: DWA, 2016.
- [4] Water Environment Federation. Design of Municipal Wastewater Treatment Plants [M]. US: Water Environment Federation, 2009.
- [5] RAUCH-WILLIAMS T, PRETORIOUS C, REARDON R. How oversized blower designs became an industry standard[C]//Water Environment Federation. Proceedings of the Water Environment Federation Conference 2013. DOI:10.2175/193864713813673893.
- [6] JR DOBY T A. Optimization of Wastewater Treatment Design under Uncertainty and Variability [D]. US: North Carolina State University, 2004.
- [7] WATERS R D, PARKER F L. Reliability analysis for hazardous waste treatment processes[J]. *Risk Analysis*, 1999, 19: 249–259.
- [8] RUSSELL D L. Practical Wastewater Treatment [M]. US: Wiley, 2019.
- [9] TCHOBANOGLIOUS G, STENSEL H D, TSUCHIHASHI I R, *et al.* Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery [M]. US: McGraw Hill Education, 2013.
- [10] BELIA E, BENEDETTI L, JOHNSON B, *et al.* Uncertainty in Wastewater Treatment Design and Operation[M]. London: IWA Publishing, 2021.
- [11] BRDJANOVIC D, MEIJER S C F, LOPEZ-VAZQUEZ C M, *et al.* Applications of Activated Sludge Models [M]. London: IWA Publishing, 2015.
- [12] CHARLES B B, PARKER D, NEETHLING J B, *et al.* WEF/WERF cooperative study of BNR plants approaching the limit of technology: II. Statistical evaluation of process reliability [C]//Water Environment Federation. Proceedings of the Water Environment Federation Conference 2009. US: Water Environment Federation, 2009: 4501–4528.
- [13] ISERMANN R, BALLE P. Trends in the application of model-based fault detection and diagnosis of technical processes [J]. *Control Engineering Practice*, 1997, 5(5): 709–719.
- [14] RIEGER L, GILLOT S, LANGERGRABER G, *et al.* Guidelines for Using Activated Sludge Models [M]. London: IWA Publishing, 2012.
- [15] CLARK D. Nutrient Management Volume III : Development of Nutrient Permitting Frameworks [R]. US: Water Environment & Reuse Foundation, 2016.
- [16] MAERE T, BOISVERT C, MGRUBERT D A, *et al.* Assessing the equivalence of WRRF regulations using dynamic model simulations [J]. *Water Science & Technology*, 2023, 88(6): 1484–1494.
- [17] MARTIN C, VANROLLEGHEM P A. Analysing, completing, and generating influent data for WWTP modelling: a critical review [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2014, 60: 188–201.
- [18] BENEDETTI L, CLAEYS F, NOPENSI, *et al.* Assessing the convergence of LHS Monte Carlo simulations of wastewater treatment models [J]. *Water Science & Technology*, 2011, 63(10): 2219–2224.
- [19] BODE H, LEMMEL P. International product cost comparison in the field of water management [J]. *Water Science & Technology*, 2001, 44(2/3): 85–93.
- [20] JOHNSON B R. Rise of the machines at Agua Nueva WRF: piloting experience of machine learning hybrid nutrient controller [C]//Water Environment Federation. Proceedings of WEFTEC Conference 2023. DOI: 10.2175/193864718825159117.
- [21] JOHNSON B R, KADIYALA R, OWENS G, *et al.* Water reuse and recovery facility connected digital twin case study: Singapore PUB's Changi WRP process, control, and hydraulics digital twin [C]//Water Environment Federation. Proceedings of WEFTEC Conference 2021. DOI:10.2175/193864718825158033.
-
- 作者简介:**陈琨(1975–),男,山西大同人,工学博士,中持水务副总工程师,长期从事城市污水处理相关技术工作,主要包括污水处理密集化技术的开发与应用,基于各种传感器、分析仪表的工艺模拟与控制,污水处理厂运行故障解决,以及工艺创新技术的开发与应用等。
- E-mail:**chenjunly@gmail.com
- 收稿日期:**2025-02-13
- 修回日期:**2025-03-20

(编辑:丁彩娟)