

活性污泥法污水处理系统控制策略的研究

彭永臻 王宝贞

(哈尔滨建筑工程学院市政与环境工程系, 哈尔滨 150001)

摘要 根据对活性污泥法处理系统运行控制的理论分析并结合国内外运行现状, 提出了该处理系统控制策略分类的新概念, 给出各种控制策略的定义, 并着重说明各自特点与应用条件。此外还推导出该处理系统非稳定状态下动力学基本方程式, 同时提出了“非稳定度”这一描述处理系统运行稳定程度的定量指标。

关键词: 活性污泥法; 控制; 动力学。

国家环境保护局对全国55个大中城市的5556套工业废水处理设施的调查^[1]表明, 三项效率(设施运行率、设备利用率和污染物去除率)均较好的只占24.2%, 而没能运行的和处理水量达不到设计能力一半的设施竟占总数的63.8%。这说明我国的废水处理工作中存在着相当严重的问题。虽然, 问题的根源是多方面的, 但是处理系统的管理与运行控制是最重要的因素之一。

不同国家与不同地区对二级处理的排放有不同的要求。为了使处理系统满足当地环保部门的不同要求, 维持正常运行, 并且考虑到处理系统的设备条件与运行管理水平, 应当以与其相适应的控制方法来运行。然而目前对活性污泥处理系统控制策略的分类及其特征的研究仍很不够。我们经过多年试验研究, 参阅了大量的有关文献, 并对包括美国和日本在内的国内外污水处理厂进行过实地考察。在此基础上, 首次提出了活性污泥法处理系统控制策略分类的新概念, 并着重说明各种控制策略的特点与应用条件。给出“非稳定度”的定义, 导出该处理系统非稳定状态下的动力学基本方程式。

1 活性污泥法处理系统控制策略的分类及特点

一般来说, 无论是城市污水还是工业废

水, 其原水的水质水量都是不断变化的。图1表示生活污水的典型变化情况^[2], 其变化幅度达5倍左右。有些工业废水甚至是间歇排放的。污水处理厂很难维持其稳定状态运行。然而, 目前通用的活性污泥法控制策略与动力学都是针对稳定状态而言的^[2,3]。它虽然具有很大的理论意义与指导意义, 但并不能直接应用于普遍存在的非稳定状态下运行的处理系统。

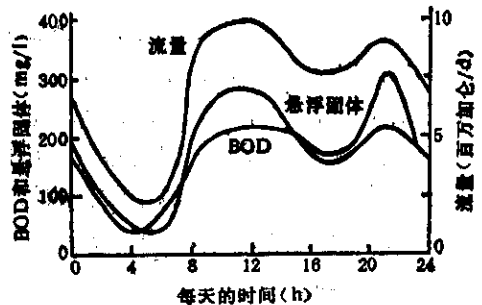


图1 生活污水流量和成分的典型小时变化

许多调查研究^[3]表明, 长宽比不太大的推流式曝气池中的流态更接近于完全混合式, 近似于完全混合的流态是曝气池中普遍存在的。此外, 完全混合式过程的描述易于数学化, 它也是进一步研究推流式的基础, 因此, 本文以完全混合式活性污泥法污水处理系统(简称处理系统)为研究对象, 如图

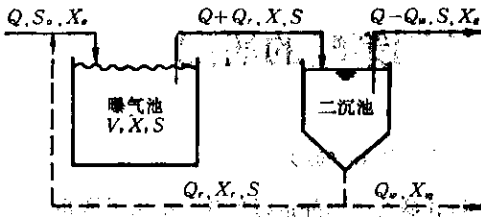


图2 完全混合式活性污泥处理系统流程

Q —污水流量, 简称流量 (m^3/d); S_0 —经初次沉淀后的进水底物浓度 (以COD或BOD表示) (mg/L); V —曝气池的有效容积 (m^3); S —曝气池与出水中底物浓度 (简称底物浓度) (mg/L); Q_r —回流污泥流量 (m^3/d); Q_w —排放的剩余污泥量 (m^3/d); X_0 —进水中的微生物浓度 (mg/L); X_r —回流污泥浓度 (mg/L); X_w —排放的剩余污泥浓度, 从回流管排泥时, 有 $X_w = X_r$ (mg/L); X —出水中的微生物浓度 (mg/L); X —曝气池中污泥浓度 (mg/L).

2所示。

所谓处理系统的稳定状态运行是指图2中的所有参数都不随时间变化, 而非稳定状态则除了曝气池容积之外, 其它参数都可能随时间而变化。前者也可看作后者的一个特例。由于曝气池中的溶解氧浓度一般维持在 2mg/L 左右, 水温主要取决于原水温度, 在短时期内变化不大, 为了使二次沉淀池有效地工作, 其污泥斗中贮存的污泥量也不应有很大的波动, 因此, 假定曝气池中的溶解氧浓度与温度以及二沉池中贮存的污泥量不变。这些条件对于维持处理系统的正常运行也是必要的。

从现代控制论的观点来看, 处理系统的控制向量 u 包括排放的剩余污泥量 $Q_w X_w$ (简称排泥量), 供气量 Q 与回流污泥量 Q_r , 可表示为:

$$u = [Q_w X_w, Q, Q_r]^T \quad (1)$$

式中, τ 表示转置; Q_r 的大小可以根据维持曝气池中溶解氧浓度不变来调节; 而 Q 可根据如下的物料平衡来决定:

$$Q_r \cdot X_r = (Q + Q_r) X \quad (2)$$

$$Q_r = \frac{Q X}{X_r - X} \quad (3)$$

这就是说, 在控制向量中, Q_r 和 Q 的量可根据溶解氧浓度、 Q 、 X_r 与 X 的具体数值来控制种调节。在控制向量中只有排泥量是还未确定的控制变量。还可以看到, 根据污泥龄 θ (亦称固体平均停留时间, d) 的简单表达式:

$$\theta = V X / Q_w X_w \quad (4)$$

污泥龄的控制必须由控制排泥量来实现。污泥龄是活性污泥法中最重要的参数, 排泥量控制就是污泥龄的控制。

由此可见, 在溶解氧浓度维持不变的情况下, 排泥量是唯一的控制变量。根据图2所表示的处理系统可能出现的所有控制方法与运行方式, 我们提出该处理系统控制策略分类, 并且命名与定义这些控制策略, 如图3所示。该处理系统的控制策略可分为稳定状态控制与非稳定状态控制两大类。

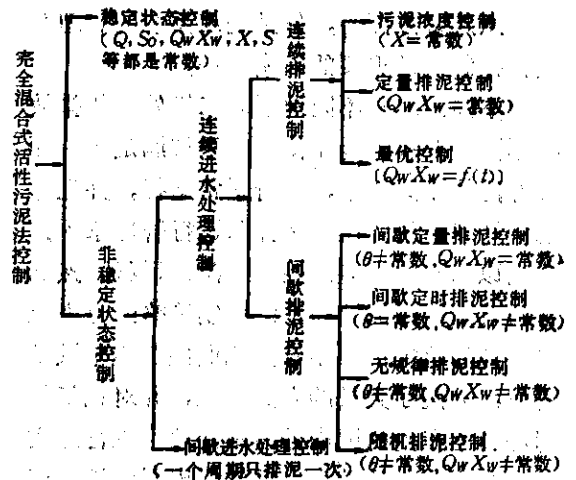


图3 完全混合式活性污泥法控制策略的分类

稳定状态控制必须在进水流量与底物浓度不随时间变化, 并且连续排泥量也维持一个常数时才能实现。显然, 它是一种理想的但又很难实现的状态。本文着重讨论复杂的且普遍存在的非稳定状态控制。

非稳定状态控制又可分为连续进水处理控制与间歇进水处理控制。连续进水处理控

制又可分为连续排泥与间歇排泥控制两种。

1.1 连续进水处理控制

1.1.1 连续排泥控制

1.1.1.1 污泥浓度控制

使曝气池中污泥浓度 X 维持不变的控制, 称污泥浓度控制。在进水水质水量变化时, 通过连续排泥始终维持污泥浓度不变, 这样, 出水底物浓度将随进水量及其底物浓度的增减而增减, 两者呈同步变化趋势。这种控制策略的优点是, 如果尽可能维持曝气池中较高的污泥浓度, 能最大限度地去污水中的有机物, 充分利用处理设施的处理能力。

1.1.1.2 定量排泥控制

使连续排泥量保持一个常数的控制, 称为定量排泥控制。它与稳定状态控制相同, 当进水水质水量不变时, 这种控制将使系统处于稳定状态。当进水变化时, 由于 $Q_w X_w = \text{常数}$, 微生物的增长速度与浓度将随着水质水量的增减而增减。因此, 它的优点是在一定程度上能缓解进水变化的冲击负荷与出水底物浓度的变化幅度, 运行管理也很方便。

1.1.1.3 最优控制

为了使某一个目标函数为最优, 按最优控制模型计算确定的排泥量随时间变化的规律进行排泥的控制, 称最优控制。按这种控制策略来运行的系统中的污泥浓度、出水底物浓度和排泥量都不一定是常数。但是, 这种控制策略实现后, 可以在满足某些约束条件下使人们追求的目标最优。例如, 可以在满足平均出水质量要求的约束条件下, 使运行费最省^[4]。至今, 最优控制仍然是一门新兴科学, 受到普遍重视, 然而在污水处理系统中的应用还远远没有开发。

1.1.2 间歇排泥控制

间歇排泥就是不连续排泥。在排泥后污泥浓度大幅度降低, 这时污泥浓度是时间的非连续函数。假定排泥的动作能在瞬间完

成。排泥时的运行状态称作“排泥点”, 次排泥间隔的运行期间称为“运行区间”, 在这个区间 $Q_w X_w = 0$, 在“排泥点”处污泥浓度 X 有间断点。

1.1.2.1 间歇定量排泥控制

当曝气池中的污泥浓度增长至某一约定的最大浓度时, 排放污泥使污泥浓度减少至另一约定的最小浓度为止, 再反复进行这样的控制, 称为间歇定量排泥控制。每次排泥量为常数。其优点是“运行区间”的长短随着进水水质水量的变化而确定, 避免污泥浓度太高而带来的问题。

1.1.2.2 间歇定时排泥控制

每隔一定的时间 θ 排泥一次($\theta = \text{常数}$), 使曝气池中的污泥浓度至某一约定的最小浓度为止的控制, 称为间歇定时排泥控制。何时排泥只取决于其间隔时间, 而与排泥前的污泥浓度无关。由于进水水质水量的变化是不均衡的, 污泥增长速率是变化的, 排泥前的污泥浓度也不相同, 所以每次的排泥量并不相同。

1.1.2.3 无规律排泥控制

根据曝气池中污泥浓度的大小, 无规律地进行非定量非定时的排泥控制, 称为无规律排泥控制。这种排泥方式特点是根据污泥浓度增长到一定程度(无严格定量标准), 就排放一部分剩余污泥。这是由于计量和监测装置不完备, 运行管理水平较低而自然产生的控制方式, 我国许多污水处理厂正是按这种方式进行排泥控制的。

1.1.2.4 随机排泥控制

根据进水水质水量的变化及出水质量的要求, 通过随机地排泥有目的地控制污泥浓度的非定量非定时的排泥控制, 叫做随机排泥控制。它也是一种较先进的控制方式, 和无规律排泥控制有着本质的区别, 例如, 由于曝气池的容积是一定的, 而当进水量很大时, 为了缓解冲击负荷的影响尽可能降低出水底物浓度, 控制不排泥或少排泥以维

持较高的污泥浓度。

1.2 间歇进水处理控制

间歇式活性污泥法(SBR法)同图2所示的流程有所区别。它是曝气池兼作二沉池,两者轮流工作,但曝气池间歇工作时也属于完全混和曝气,也处于非稳定状态。排泥控制只是在曝气与二次沉淀后进行,一个运行周期(进水、曝气、沉淀与排泥)只排泥一次,也是典型的间歇排泥。排泥量的多少决定了曝气池工作的起始污泥浓度和曝气池运行时的需氧速率。

2 非稳定状态下动力学在控制中的应用

本文在导出非稳定状态下动力学时,仍然以目前还被广泛应用的比底物利用速率与比污泥增长速率这两个公式为基础⁽¹⁾,

$$q = kS / (K_s + S) \quad (5)$$

$$\mu = Yq - K_d \quad (6)$$

式中, q —比底物利用速率(L/d), k —最大比底物利用速率(l/d), K_s —饱和常数(mg/L), μ —比污泥净增长速率(l/d), Y —产率系数, K_d —污泥自身氧化系数(l/d)。完全混合式曝气池中的底物浓度与出水底物浓度相同,都很低,一般有 $S \ll K_s$, 所以式(5)可近似表示为:

$$q = KS \quad (7)$$

式中, K —比底物利用速率常数(L/mg·d)。以时间 t 为自变量,以图2所示的处理系统为隔离体,根据式(5)~(7),先对污泥量作物料平衡:

$$\begin{aligned} & [\text{污泥的变化速率}] = \text{污泥的增加速度} \\ & - [\text{污泥的排出速率}] \end{aligned} \quad (8)$$

上式中的三项分别为 $V \cdot dX/dt$, $VX(Yq - K_d) + QX_0$ 和 $Q_w X_w + (Q - Q_w)X_0$, 其中 dX/dt 表示污泥浓度的变化速率, 将它们代入式(8)得:

$$\begin{aligned} V \frac{dX}{dt} = & VX(Yq - K_d) + QX_0 - \\ & - Q_w X_w - (Q - Q_w)X_0 \end{aligned} \quad (9)$$

同理, 再作底物量的物料平衡, 可得:

$$V \frac{dS}{dt} = QS_0 - QS - VXq \quad (10)$$

式中, dS/dt 表示底物浓度的变化速率。一般, 经过初沉池和二沉池后, 进水和出水的污泥浓度 X_0 与 X_w 都很低, 而且在物料平衡式中是一正一负, 因此式(9)可以化简。再将式(7)代入式(9)与(10), 组成的联立微分方程式就是完全混合式活性污泥法的非稳定状态下动力学的基本方程式:

$$\begin{cases} V \frac{dX}{dt} - VX(YKS - K_d) + \\ \quad + Q_w X_w = 0 \\ V \frac{dS}{dt} - QS_0 + QS + VXKS = 0 \end{cases} \quad (11)$$

如果高负荷下底物浓度很高, 可用式(5)中的 q 代替式(7), 并代入式(9)与式(10), 得到更精确的公式:

$$\begin{cases} V \frac{dX}{dt} - VX \left(\frac{YkS}{K_s + S} - K_d \right) \\ \quad + Q_w X_w = 0 \\ V \frac{dS}{dt} - QS_0 + QS + \frac{VXkS}{K_s + S} = 0 \end{cases} \quad (13)$$

为了进一步定量地描述处理系统的运行状态, 本文还提出了一个评价处理系统运行稳定程度的指标——“非稳定度”概念。

定义, 曝气池中底物浓度随时间的变化率(即对时间的导数)的绝对值, 叫做处理系统运行的“非稳定度”。如式(15)所示:

$$N = \left| \frac{dS}{dt} \right| \quad (15)$$

式中 N ——表示“非稳定度”的大小, 在非稳定状态下它也是随时间变化的。

当处理系统的进水质水量不变, 并且

在稳定状态下运行时, $N=0$, $dX/dt=0$, 这时式(11)~(14)就变成稳定状态下动力学公式。当进水水质水量变化时, 不可能通过排泥量控制来使 N 和 dX/dt 同时为零, 而只可能通过控制排泥量来调节污泥浓度, 使“非稳定度”尽可能小。可见, “非稳定度”的大小取决于进水变化情况与排泥量的控制, 它是描述处理系统运行稳定程度的一个定量指标。当 $N=0$, 出水质量不变。

除了采用最优控制、无规律排泥控制与随机排泥控制之外, 都可以用式(11)~(12)的动力学基本方程式求出本文提出的另外几种控制策略在不同要求下排泥量的变化规律, 即解决如何控制定量排泥问题。

3 结语

应当指出, 本文提出的 9 种具体控制策略各具优缺点, 都是能够实现的。为了达到不同的目的和要求, 在一定设施条件与管理水平下, 它们都具有不同的实用价值。然而, 它们之间也有优劣之分。比如, 最优控制是所有控制策略中最先进的, 它要求的设

施条件与管理水平也最高, 其次是污泥浓度控制与随机排泥控制等, 它们也都要求处理系统具有连续自动的计量、监测与控制设备甚至计算机控制系统, 以及较高的运行管理水平。

为了迅速提高污水处理厂的运行管理水平, 根据具体情况确定应当采取的控制策略与实现它的手段, 这是一项理论性与实践性都很强的课题, 加强这方面的研究和实践, 提高运行管理人员的素质, 是解决我国污水处理厂运行管理问题的一个关键问题。

参考文献

- 1 汪贞惠. 从《全国工业废水处理设施调查》对我国水污染防治几个问题的探讨. 中国环境科学, 1989, 9(4), 288~294
- 2 Metcalf and Eddy, Inc. Wastewater Engineering. New York, McGraw-Hill Book Company, 1972.69~418
- 3 Benefield L D, Randall C W. Biological process design for wastewater treatment. Englewood Cliffs, Prentice-Hall, Inc., 1980.131~150
- 4 彭永臻. 非稳定状态下活性污泥法处理系统最优控制的研究. 中国给水排水, 1989, 5(1), 14~20

CONTROL STRATEGY FOR THE ACTIVATED SLUDGE PROCESS OF SEWAGE TREATMENT

Peng Yongzhen Wang Baozhen

(Municipal and Environmental Engineering Department, Harbin Architectural and Civil Engineering Institute, Harbin 150001)

Abstract For the first time, a new concept of classification of control strategy for the activated sludge process of sewage treatment was put forward, and definitions, characteristics and application conditions of each strategy were shown emphatically, based on theoretical analysis of the operational control and the operational situation at home and abroad for the process. In addition, a fundamental kinetic equation of the process at unsteady state was deduced, and a “unsteady level” was put forward as the quantitative index for the degree of steadiness of the process operation.

Key words: Activated sludge process, Control, Kinetics.