



普通高等教育“十五”国家级规划教材

Huanjinggongcheng Fangzhen yu Kongzhi

环境工程 仿真与控制 (第二版)

姚重华 编著



高等教育出版社

普通高等教育“十五”国家级规划教材

环境工程仿真与控制

(第二版)

姚重华 编著

高等教育出版社

本书获上海市研究生教育专项经费及 华东理工大学研究生教育基金资助

第二版前言

《环境工程仿真与控制》(第一版)为教育部“九五”规划重点教材,也是面向21世纪教材,于2001年由高等教育出版社出版发行。

该教材的特点是将信息技术引入环境工程专业教学,在水污染控制、大气污染控制、固体废弃物处理处置等传统课程的基础上开创了环境工程专业教学一个新的方向。

该教材在结构上以信息技术内容为纲(系统仿真、过程控制、动态分析、人工智能等),以环境工程内容为目(活性污泥、厌氧消化、污泥脱水、药剂投放等),纲举目张,形成有别于环境工程传统教材的新的结构体系。

该教材中的许多实例基本为目前或近期环境工程研究的热点问题,如ASM、沉淀池流态、神经网络、模糊控制、专家系统等,教材内容富有新意。

该书第一版自2001年由高等教育出版社出版发行以来,受到我国环境工程专业教学、科研及管理部门有关人员的广泛关注。教育部高教司2003年9月发文委托华东理工大学举办“环境工程仿真与控制”师资培训班(教高司函[2003]191号),来自全国39所高校的52名骨干教师在华东理工大学参加了为期6天42学时的师资培训班学习。

《环境工程仿真与控制》(第二版)是教育部“十五”国家级规划教材。与第一版相比较,第二版主要增加了两方面的内容:一是MatLab/SimuLink在环境工程中的应用,涉及活性污泥过程仿真模型的编制、PI控制系统仿真的应用、用SimuLink编制神经网络仿真模型及神经网络预测控制模型、用MatLab工具箱进行模糊控制设计等;二是可编程逻辑控制器(PLC)在环境工程中的应用,涉及PLC基本原理、开关量控制设计、模拟量控制设计、PLC编程方法等。此外,第二版还对第一版中的部分内容进行了一些增、删,总篇幅约增加1/2。

本书第二版由上海市研究生教育专项经费和华东理工大学研究生教育基金共同资助,谨此致谢。

姚重华

2004.11

第一版前言

21 世纪是信息时代。仿真与控制,是信息技术在环境工程中应用的重要内容,也是环境工程学科发展的重要方向。为此,有必要在高等学校环境工程专业开设相关的课程,对学生进行适当的训练。《环境工程仿真与控制》就是在这方面为环境工程专业的本科生和研究生编写的一本教材。

顾名思义,仿真就是对真实的模仿。物理仿真是通过对过程建立的物理模型来进行,数字仿真通过对过程建立的数学模型来进行。由于计算机的发展与普及,同时由于数字仿真的简易、迅捷和巨大包容性,以及相对试验而言的低成本和互补性,数字仿真在包括环境工程在内的各个领域正迅速推进,被称为是一项“无孔不入”的技术。

自动控制包括过程控制、顺序控制、姿态控制等分支。化工、环境工程等领域的控制行为常与过程控制有关。使用过程控制时,在受控过程进行中要不断地对过程的状态或参数如温度、压力、浓度等进行测量,并将测量值与设定值进行比较,然后根据一定的控制方案对过程的有关参数进行调整,使该过程按照既定的一组工艺参数运行,达到确保过程运行稳定、安全、经济的目的。

环境工程是以污染物的处理和处置为主要内容的。环境工程仿真与控制的目的,是了解污染物处理过程的机制、提高污染物的处理效率、降低污染物的处理费用。这对保护环境具有重要作用。同时,我国目前在环境工程设施的工艺开发、工程设计和运行管理中,还未普遍应用仿真与控制技术,因而存在一个环境工程仿真与控制的潜在市场。开发这个市场,具有重要的经济价值。学习环境工程仿真与控制,还有助于提高环境工程专业毕业生与自动控制专业技术人员之间的理解与沟通。

本书共有五章。第一章是“仿真”,讲述环境工程过程的仿真,即过程建模及求解的方法,并介绍活性污泥过程、二沉池二维流态等模型的建模和求解过程。第二章是“过程控制”,讲述反馈控制系统的控制规律及自动化仪表,并介绍污水处理主要设施的自动控制方法。第三章是“动态分析”,讲述如何导出过程的传递函数,以及如何利用传递函数对环境工程的过程动态进行定性和定量的分析。第四章是“人工智能”,重点介绍神经网络、专家系统和模糊控制的理论及在环境工程仿真与控制中的应用。第五章是“复杂控制系统”,介绍串级、分程、比值、前馈、选择性和非线性控制系统及其在环境工程过程控制中的应用。

本书可作为大专院校环境工程专业的本科生及研究生学习“环境工程仿真

与控制”的教材或参考读物,也可供从事环境工程仿真与控制的技术人员阅读。由于信息技术发展很快,也由于本书内容涉及环境工程、自动控制、人工智能等不同学科,编写中疏漏之处在所难免,敬希读者不吝指教。本书由华东理工大学环境工程系赵庆祥教授审阅并提出宝贵意见,谨此致谢。

姚重华

2000.1

目 录

第1章 仿真	1
第一节 模型的建立	1
一、模型分类	2
二、简单系统建模	2
例 1.1 液槽水量模型	3
例 1.2 带溢流堰液槽液位模型	3
例 1.3 调节池水质模型	4
例 1.4 曝气池溶解氧浓度模型	5
例 1.5 污泥耗氧速率模型	6
例 1.6 污泥生长及氮的消耗模型	6
例 1.7 异养菌好氧生长与有机碳消耗模型	7
三、复杂系统建模	11
例 1.8 活性污泥过程数学模型	11
例 1.9 厌氧消化过程数学模型	20
例 1.10 二沉池一维浓度分布模型	24
例 1.11 沉淀池二维流场模型	28
第二节 模型的分析	41
一、四阶龙格-库塔法	41
例 1.12 溶解氧浓度 S_0 及易降解有机碳浓度 S_{00} 对系统的影响	43
二、有限差分法	54
例 1.13 矩形二沉池流体流速及固体浓度稳态分布	65
第三节 MatLab/SimuLink 应用	69
例 1.14 利用 SimuLink 编制基于 ASM1 的活性污泥过程数学模型	69

第2章 过程控制	79
第一节 反馈控制	80
一、比例控制	81
二、积分控制	82
三、微分控制	85

例 2.1 溶解氧浓度 PI 控制	87
第二节 自动化仪表	91
一、控制器	91
二、执行器	99
三、检测器和变送器	105
例 2.2 初沉池和污泥泵的过程控制	113
例 2.3 流量分配的过程控制	117
例 2.4 溶解氧 DO 和风机的过程控制	117
例 2.5 深冷制氧的过程控制	119
例 2.6 污泥回流的过程控制	121
例 2.7 废弃污泥的过程控制	123
例 2.8 药剂投放的过程控制	124
第三节 可编程逻辑控制器(PLC)	127
一、PLC 的基本概念	127
二、开关量控制	132
例 2.9 空气压缩机 PLC 控制	132
例 2.10 锅炉运行 PLC 顺序控制	133
三、模拟量控制	135
例 2.11 温度 PLC 控制	147
四、编程方法	149
例 2.12 SBR 程序 PLC 控制	152

第 3 章 动态分析

第一节 输入-输出模型	166
例 3.1 搅拌槽加热器输入-输出模型	167
例 3.2 混合过程的输入-输出模型	169
第二节 非线性系统的线性化	173
一、单变量系统的线性化	173
例 3.3 废水储槽液位模型线性化	174
二、多变量系统的线性化	175
例 3.4 连续搅拌反应釜模型线性化	175
第三节 传递函数	176
一、拉普拉斯变换	177
二、传递函数	180
例 3.5 连续搅拌反应釜的传递矩阵及其零点和极点	181
三、拉普拉斯反变换	183
第四节 过程动态分析	185

一、定性分析	185
二、定量分析	187
例 3.6 储槽液位模型分析	188
例 3.7 两个串联相互无影响的质量容量	192
例 3.8 两个串联相互有影响的质量容量	194
第五节 反馈控制过程动态响应	195
一、闭环动态响应	195
例 3.9 求储槽加热器温度反馈控制系统的闭环响应	197
二、比例控制对过程动态的作用	198
三、积分控制对过程动态的作用	200
四、微分控制对过程动态的作用	201

第 4 章 人工智能 203

第一节 神经网络 203

一、基本概念	204
二、训练方法	208
例 4.1 活性污泥过程曝气池曝气控制神经网络模型	213
例 4.2 活性污泥过程动态分析神经网络模型	216
三、神经网络控制	218
四、MatLab 神经网络工具箱应用	221
例 4.3 简化 ASM1 的神经网络模拟	221
例 4.4 液槽混合浓度神经网络模型预测控制	226

第二节 专家系统 233

一、基本概念	233
二、知识库构建	235
例 4.5 活性污泥过程故障诊断专家系统知识库	239
三、专家系统编制	242
例 4.6 利用 MS Visual Basic 5.0 和 Access 97 编制专家系统软件	242
四、专家系统控制	248

第三节 模糊控制 252

一、模糊集原理	253
二、模糊控制设计方法	268
例 4.7 污泥脱水模糊控制系统设计	272
例 4.8 曝气池曝气流量模糊控制	276
三、MatLab 模糊控制工具箱应用	279
例 4.9 污泥回流模糊控制设计	279

第5章 复杂控制系统	285
第一节 串级控制系统	285
一、结构与原理	285
二、应用实例	287
第二节 比值控制系统	290
一、结构与原理	290
二、应用实例	294
第三节 均匀控制系统	296
一、结构与原理	296
二、简单均匀控制系统	297
三、串级均匀控制系统	297
四、双冲量均匀控制系统	299
第四节 分程控制系统	299
一、结构与原理	299
二、应用实例	301
第五节 自动选择性控制系统	304
一、选择器在变送器和调节器之间	305
二、选择器在调节器和调节阀之间	307
三、应用实例	310
第六节 前馈控制系统	312
一、结构与原理	313
二、应用实例	315
第七节 非线性控制系统	317
一、结构与原理	318
二、应用实例	319

主要参考文献	323
---------------------	-----

第1章 仿 真

仿真是一种求解实际问题的方法。当问题有一定的复杂性时,可以先建立该问题的模型,并以模型为基础对问题进行分析。这一过程,即被称为仿真。如果建立的是物理模型,如水利工程中的水坝模型、风洞试验中的飞机模型等,则建模及分析的过程为物理仿真。如果建立的是数学模型,如大气污染物的扩散模型、物质的反应动力学模型等,则建模及分析的过程为数字仿真。随着计算机信息处理速度的加快及计算机的普及,数字仿真已开始显现强劲的发展势头,在工程技术乃至社会生活的许多领域获得广泛应用,被称为是一项“无孔不入”的技术。

仿真与试验是对立的统一。之所以要仿真,主要是进行试验有困难。例如,有的试验要求高温、高压,条件难以实现;有的试验时间过长、费用较高;有的研究对象变量多、要求试验次数过多,等等。由于数字仿真是在建立数学模型的基础上,利用计算机速度快、容量大的优点,可以模拟各种苛刻的试验条件,可以在短时间内获得结果,可以研究包含几十甚至几百个变量的问题,因此相对于试验,它有很大的优越性。但是,仿真又不能完全替代试验,仿真模型中的参数,往往要通过试验来确定;仿真的结果毫无疑问的仍要通过试验来验证。所以,在仿真与试验的关系上,一是要肯定仿真的重要作用,二是要确定试验的终裁性。将仿真与试验有机地结合在一起,是研究复杂系统的有效方法。

与航空、化工等领域相比,仿真在环境工程领域还处在起步阶段。在单元操作及处理流程的模型化方面,在模型的求解、解的验证和显示方面,以及在仿真机的研制方面,均有大量工作要做。笔者编写本章的目的,不是介绍有关仿真的完整的理论,而是试图结合环境工程实例为读者提供有关仿真的基本方法,即建模与求解的基本方法,以便读者能在环境工程的仿真中应用这些方法,以推动环境工程仿真工作的发展。

第一节 模型的建立

仿真的第一步,是要建立研究对象或过程的数学模型,以描述研究对象或过程内部各个变量间的相互关系。模型的主要用途,是对问题进行分析。在过程

的模型建立以后,可以通过有计划地变动模型的输入量,来模拟施加在该过程的外界扰动或人为控制,以考察该过程的响应情况;也可以通过改变模型的结构或参数,来模拟过程设施结构或过程参数的变化,以考察过程输出的相应变化。

一、模型分类

数学模型主要有机理模型与统计模型两大类。机理模型是依据过程的质量、能量及动量守恒的原则,以及反应动力学等原理来建立模型,属“白箱”模型。统计模型是依据过程的输入、输出数据,利用一定的统计方法对数据进行分析来建立模型,属“黑箱”模型。有的模型既利用过程机理又利用测试数据来建立模型,这种模型为混合模型,属“灰箱”模型。究竟使用机理模型还是统计模型为好,目前仍有各种意见。有的侧重工艺的技术人员倾向于使用机理模型,因为机理模型有坚实的理论基础;而有的侧重控制的技术人员倾向于使用统计模型,因为只要有过程的数据,即可通过辨识来建立模型。在实际工作中,兼考虑过程机理及数据统计的混合模型获得广泛应用。

数学模型除按建模原理分类之外,还有其他分类方法。例如,在模型的数学形式上,有代数方程、微分方程、偏微分方程之分;在模型参数的适用范围上,有集总参数和分布参数之分;在模型内变量的关系上,有线性与非线性之分;在模型的时间特性上,有连续和离散之分;在变量与时间的关系上,有稳态与非稳态之分,等等。

在仿真工作中,机理模型仍是使用较多的模型。本章内容主要涉及过程的机理模型。在机理模型中,集总参数过程的变量间关系一般用微分方程(组)来描述,而分布参数过程的变量间关系一般用偏微分方程(组)来描述。

二、简单系统建模

机理模型的建模原则是所谓的“一进一出—反应”,即单位时间单位体积系统内物质、电荷(如 COD)、能量或动量的积累量,等于进入该系统的物质、电荷(如 COD)、能量或动量的量,减去离开该系统的物质、电荷(如 COD)、能量或动量的量,加上(或减去)系统内的物质、电荷(如 COD)、能量或动量的反应生成量(或消失量)。例如,有关物质数量模型的建模原则为:

$$V \frac{d\rho_j}{dt} = q_i \rho_{j,i} - q_o \rho_{j,o} \pm \sum VR_{j,n} \quad (1.1)$$

式中: V 为反应器体积; $d\rho_j/dt$ 为组分 j 在 V 内的浓度 ρ 随时间 t 的变化率; q_i 、 q_o 分别为流入或流出 V 的液体流量; $\rho_{j,i}$ 、 $\rho_{j,o}$ 分别为组分 j 在进水和出水中的浓度; $R_{j,n}$ 为第 n 个反应中组分 j 生成或消失时浓度变化的速率。

例 1.1 液槽水量模型

对于单组分系统,如图 1.1 所示简单液槽,系统组分仅为水,若进水流量为 m_{in} (kg/s),出水流量为 m_{out} (kg/s),可根据“一进一出”原则(无反应项),描述该液槽的储水量 M 随时间的变化速率的动态数学模型为:

$$\frac{dM}{dt} = m_{in} - m_{out} \quad (1.2)$$

系统达稳态时,有:

$$\frac{dM}{dt} = 0 \quad (1.3)$$

此时进水流量 m_{in} (kg/s) 等于出水流量 m_{out} (kg/s),描述该液槽的储水量随时间的变化速率的稳态数学模型为:

$$m_{in} = m_{out} \quad (1.4)$$

图 1.2 显示简单液槽进水口流量产生阶跃变化后出水口流量产生同步变化。

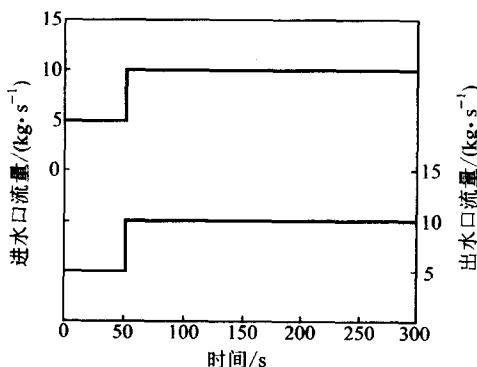


图 1.2 简单液槽输入输出响应示意图

例 1.2 带溢流堰液槽液位模型

若液槽带溢流堰,则须考虑溢流堰对出水流量的节制作用。从溢流堰流出的水量计算公式为(Francis 堰):

$$m_{out} = 1.015 \rho n L h^{1.5} \quad (1.5)$$

式中: ρ 为流体密度; n 为溢流堰数量; L 为溢流堰长度; 指数 1.5 与溢流堰形状有关; h 为溢流堰上方液面高度。

$$h = \frac{M}{\rho A} - H \quad (1.6)$$

式中: A 为液槽面积; H 为溢流堰高度。

将方程(1.5)与方程(1.6)代入方程(1.2),即可得到带溢流堰液槽模型。图 1.3 显示带溢流堰液槽进水口流量产生阶跃变化后出水口流量产生非同步变化。

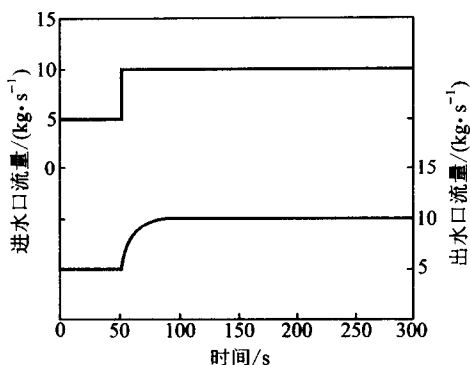


图 1.3 带溢流堰液槽输入输出响应示意图

例 1.3 调节池水质模型

对于双组分系统(图 1.4),如废水调节池(简化),其中既含水,又有基质 S_s ,模型中会涉及 S_s 的浓度。若不考虑反应,则描述调节池内组分 S_s 浓度的动态模型:

$$V \frac{dS_s}{dt} = q_{in} S_{s,in} - q_{out} S_{s,out} \quad (1.7)$$

对于完全混合液槽反应器(CSTR), $S_{s,out} = S_s$ 。

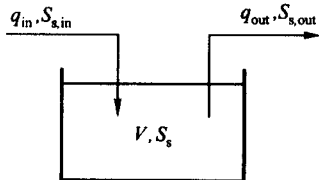


图 1.4 废水调节池示意图

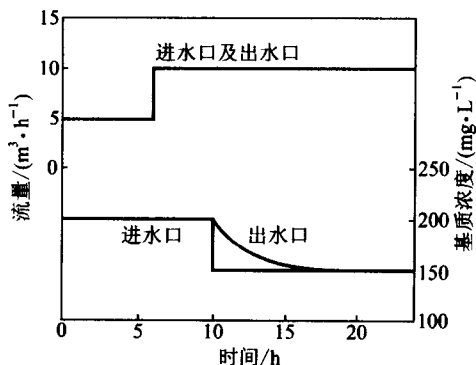


图 1.5 调节池输入输出响应示意图

图 1.5 显示调节池输入输出响应示意图。由图可知,当进水口基质浓度产生阶跃下降后,出水口的基质浓度不是同步阶跃下跌,而是经过一段时间后才下降到与进水口相同的基质浓度。

例 1.4 曝气池溶解氧浓度模型

活性污泥过程曝气池是复杂系统,但若仅考虑溶解氧 S_o 浓度,则也可视为水与溶解氧的双组分系统。该系统的溶解氧输入有 2 条途径,即通过含溶解氧的进水的输入及通过曝气使氧在气、液界面发生传质而产生输入。因此,曝气池 DO 浓度随时间的变化速率为:

$$V \frac{dS_o}{dt} = q_{in} S_{o,in} - q_{out} S_{o,out} + V \cdot K_L a (S_{o,s} - S_o) \quad (1.8)$$

式中: $S_{o,in}$ 为进水溶解氧浓度; $S_{o,out}$ 为出水溶解氧浓度; $S_{o,s}$ 为曝气池当前条件下的饱和溶解氧浓度; $K_L a$ 为溶解氧传质系数,其中 K_L 可看作吸收系数, a 在无曝气时可看作水池气、水界面面积与体积的比值,在有曝气时与气泡大小有关。

$K_L a$ 的值与水的污染程度有关:

$$K_L a = \alpha (K_L a)_{cw} \quad (1.9)$$

式中: $(K_L a)_{cw}$ 为纯水中溶解氧传质系数; α 为比例常数。

同样,废水饱和溶解氧浓度也与水的污染程度有关:

$$S_{o,s} = \beta (S_{o,s})_{cw} \quad (1.10)$$

一般而言, $K_L a$ 的值与空气流速成正比,常可线性化为 $K_a q_a$, 可得:

$$V \frac{dS_o}{dt} = q_{in} S_{o,in} - q_{out} S_{o,out} + V \cdot K_a q_a (S_{o,s} - S_o) \quad (1.11)$$

式中: K_a 与曝气装置有关; q_a 为空气流量。

图 1.6 为曝气池输入输出响应示意图。由图可知,当曝气池空气流量成阶跃变化时,曝气池出水口的溶解氧浓度缓慢上升,逐渐达到稳态。

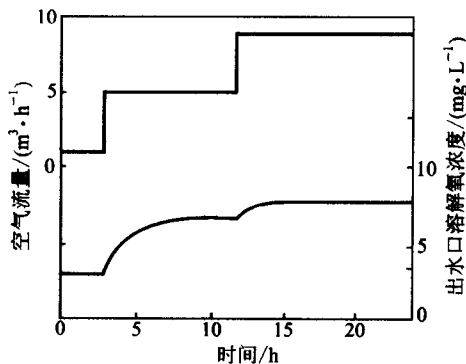


图 1.6 曝气池空气流量变化对出水溶解氧浓度的影响

例 1.5 污泥耗氧速率模型

以上所述简单系统均未涉及反应项。若系统内发生反应,则在建立系统动态模型时,须将因反应造成的系统变化包含在模型中。例如,活性污泥与空气中的氧同处一密闭的试瓶中即构成一个反应系统,污泥呼吸耗氧会造成试瓶内污泥上方空气中的氧含量下降。若将等量污泥分别置于一系列试瓶中,密封后经不同时间间隔依次测定各瓶中的溶解氧浓度。将密封反应时间对溶解氧浓度作图,可得图 1.7 所示曲线。由图 1.7 可知,在 0~17h,污泥试瓶内溶解氧浓度随时间成线性下降,17h 以后成非线性下降。由此可采用以下方程来描述污泥耗氧速率:

$$\frac{dS_o}{dt} = r_{\max} \frac{S_o}{K_o + S_o} \quad (1.12)$$

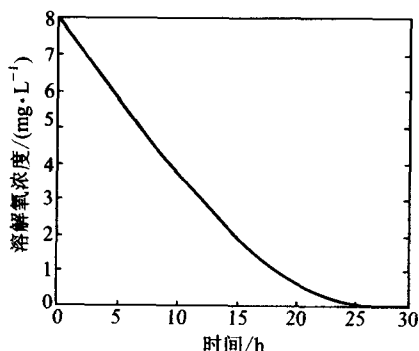


图 1.7 污泥耗氧速率测试瓶内溶解氧浓度随时间的变化

式中: $r_{\max}$ 为污泥最大耗氧速率; K_o 为一较小数值。

当溶解氧浓度 S_o 较大时,如 $>1\text{mg/L}$,分式 $S_o/(K_o + S_o)$ 接近 1, dS_o/dt 接近 $r_{\max}$,为一常数。当 S_o 过小时,如 $<0.1\text{mg/L}$,分式 $S_o/(K_o + S_o)$ 接近 0,使 dS_o/dt 数值变小,斜率下降,曲线趋平缓,直至为 0。

例 1.6 污泥生长及氮的消耗模型

若考虑一活性污泥与氨氮的简单反应系统,则因系统包含微生物生长与氨氮消耗 2 个反应,相应的系统动态模型也要包含个方程,每个方程既含“一进一出”,又含“一反应”。

过程方程(1.13)表示反应器内微生物的浓度 X_b 随时间的变化率 dX_b/dt 与体积 V 的乘积,即单位时间微生物质量的变化速率,等于进水水量 q_{in} 与进水微生物浓度 $X_{b,in}$ 的乘积,减去出水水量 q_{out} 与出水微生物浓度 $X_{b,out}$ 的乘积,再

加上微生物的反应速率 r_b 与体积 V 的乘积,即“一进一出—反应”。

$$V \frac{dX_b}{dt} = q_{in} X_{b,in} - q_{out} X_{b,out} + V \cdot r_b \quad (1.13)$$

方程(1.14)表示反应器内氨氮的浓度 S_n 随时间的变化率 dS_n/dt 与体积的乘积,即单位时间氨氮质量的变化速率,等于进水水量 q_{in} 与进水氨氮 $S_{n,in}$ 浓度的乘积,减去出水水量 q_{out} 与出水氨氮浓度 $S_{n,out}$ 的乘积,再加上氨氮的反应速率 r_n 与体积 V 的乘积,也即“一进一出—反应”。

$$V \frac{dS_n}{dt} = q_{in} S_{n,in} - q_{out} S_{n,out} + V \cdot r_n \quad (1.14)$$

假定反应器为 CSTR,反应器内的氨氮 S_n 与微生物 X_b 的浓度,分别等于出水氨氮 $S_{n,out}$ 与微生物 $X_{b,out}$ 的浓度。

根据 Monod 方程,微生物的生长速率 r_b 及氨氮的消耗速率 r_n 分别为:

$$r_b = \hat{\mu} \frac{S_n}{S_n + K_n} X_b \quad (1.15)$$

$$r_n = -\frac{1}{Y_b} \hat{\mu} \frac{S_n}{S_n + K_n} X_b \quad (1.16)$$

式中: Y_b 为微生物相对氨氮的生长系数,即微生物的生长量与氨氮消耗量的比值。

将方程(1.15)与(1.16)分别代入(1.13)及(1.14),即可得到计算反应器内微生物与氨氮浓度随时间变化速率的数学模型。曝气池微生物浓度对出水氨氮浓度的影响可见图 1.8。

例 1.7 异养菌好氧生长与有机碳消耗模型

若考虑一异养菌好氧生长与有机碳消耗的系统,则因系统涉及异养菌、溶解氧、有机碳 3 个组分,系统的动态模型会包含 3 个方程:

$$V \frac{dX_h}{dt} = q_{in} X_{h,in} - q_{out} X_{h,out} + V \cdot r_h \quad (1.17)$$

$$V \frac{dS_s}{dt} = q_{in} S_{s,in} - q_{out} S_{s,out} + V \cdot r_s \quad (1.18)$$

$$V \frac{dS_o}{dt} = q_{in} S_{o,in} - q_{out} S_{o,out} + V \cdot r_o + V \cdot K_L a (S_{o,s} - S_o) \quad (1.19)$$

方程(1.17)表示反应器内以 COD 表示的微生物浓度 X_h 随时间的变化率 dX_h/dt 与体积 V 的乘积,即单位时间微生物浓度(COD)的变化速率,等于进水

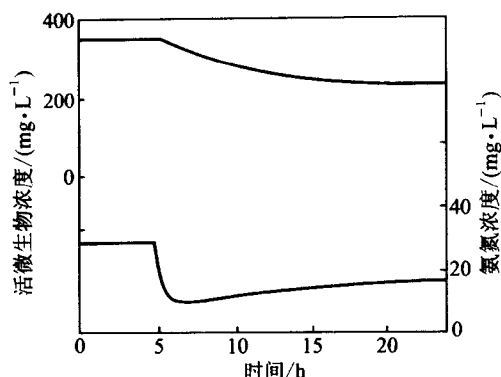


图 1.8 曝气池微生物浓度对出水氨氮浓度的影响

水量 q_{in} 与进水微生物浓度 (COD) $X_{h,in}$ 的乘积, 减去出水水量 q_{out} 与出水微生物浓度 (COD) $X_{h,out}$ 的乘积, 再加上微生物的反应速率 r_h 与体积 V 的乘积, 即“一进一出—反应”。

方程 (1.18) 表示反应器内以 COD 表示的可溶碳浓度 S_s 随时间的变化率 dS_s/dt 与体积的乘积, 即单位时间可溶碳质量的变化速率, 等于进水水量 q_{in} 与进水可溶碳 $S_{s,in}$ 浓度的乘积, 减去出水水量 q_{out} 与出水可溶碳浓度 $S_{s,out}$ 的乘积, 再加上可溶碳的反应速率 r_s 与体积 V 的乘积, 也即“一进一出—反应”。

方程 (1.19) 表示反应器内溶解氧的浓度 S_o 随时间的变化率 dS_o/dt 与体积的乘积, 即单位时间溶解氧质量的变化速率, 等于进水水量 q_{in} 与进水溶解氧浓度 $S_{o,in}$ 的乘积, 减去出水水量 q_{out} 与出水溶解氧浓度 $S_{o,out}$ 的乘积, 再加上溶解氧的反应速率 r_o 与体积 V 的乘积, 并加上因曝气产生的溶解氧的输入, 同样是“一进一出—反应”。

假定反应器为 CSTR, 反应器内的易降解有机碳 S_s 、异养菌 X_h 及溶解氧 S_o 的浓度, 分别等于出水易降解有机碳 $S_{s,out}$ 、出水异养菌 $X_{h,out}$ 及出水溶解氧 $S_{o,out}$ 浓度。

根据 Monod 方程, 异养菌生长速率 $(r_h)_G$ 为:

$$(r_h)_G = (dX_h/dt)_G = \hat{\mu}_h \frac{S_s}{S_s + K_s} \frac{S_o}{S_o + K_{oh}} X_b \quad (1.20)$$

式 (1.20) 中 K_{oh} 为溶解氧半饱和常数, 数值约为 0.1 左右。当溶解氧浓度 S_o 较大时, 该分式值趋近 1, 表示该好氧过程的存在; 若 S_o 较小时, 该分式值趋近 0, 表示该好氧过程不存在。 K_s 为易降解有机碳半饱和常数, 数值约为 20 ~