



面向21世纪课程教材
Textbook Series for 21st Century

环境工程 仿真与控制 (第三版)

姚重华 刘漫丹 编著



高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS



面向21世纪课程教材
Textbook Series for 21st Century

环境工程仿真与控制

Huanjing Gongcheng Fangzhen yu Kongzhi

(第三版)



高等教育出版社·北京
HIGHER EDUCATION PRESS BEIJING

内容提要

本书为面向 21 世纪课程教材和普通高等教育“十一五”国家级规划教材。与第二版相比,第三版进一步强化了应用性。全书共分五章,分别为“仿真”、“过程控制”、“动态分析”、“复杂控制”及“人工智能”。在仿真部分,新增“模型校正”与“模型应用”两小节,介绍工厂数据的实验校核及计算校核、模型参数的灵敏度法校正与经验法校正,用于工艺参数优化的专用仿真平台及用于控制方案比较的通用仿真平台等;同时,对计算流体力学软件 FLUENT 的使用方法进行了介绍。在控制部分,新增自动控制系统常用概念和工程术语、控制器选择方法、离散 PID 控制器算法、控制器参数整定和投运方法、成分检测变送器、过程状态空间方程模型等,并新增串级、分程、比值、前馈、选择性、非线性等复杂控制系统在环境工程中的应用实例。

本书可作为高等学校环境工程专业本科生、研究生及青年教师学习“环境工程仿真与控制”的教材,也可供从事环境工程仿真与控制工作的专业技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

环境工程仿真与控制/姚重华,刘漫丹编著. —3
版. —北京:高等教育出版社,2010.7
ISBN 978-7-04-029577-1

I. ①环… II. ①姚… ②刘… III. ①环境工程-计算机仿真-高等学校-教材②环境工程-计算机控制-高等学校-教材 IV. ①X5-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 082556 号

出版发行	高等教育出版社	购书热线	010-58581118
社 址	北京市西城区德外大街 4 号	咨询电话	400-810-0598
邮政编码	100120	网 址	http://www.hep.edu.cn http://www.hep.com.cn
经 销	蓝色畅想图书发行有限公司	网上订购	http://www.landaco.com http://www.landaco.com.cn
印 刷	潮河印业有限公司	畅想教育	http://www.widedu.com
开 本	787×960 1/16	版 次	2001 年 8 月第 1 版 2010 年 7 月第 3 版
印 张	27.75	印 次	2010 年 7 月第 1 次印刷
字 数	510 000	定 价	42.50 元
插 页	1		

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

物料号 29577-00

第三版前言

《环境工程仿真与控制》(第一版)是普通高等教育“九五”国家级规划教材,也是面向 21 世纪课程教材,于 2001 年由高等教育出版社出版发行。《环境工程仿真与控制》(第二版)是普通高等教育“十五”国家级规划教材,于 2005 年由高等教育出版社出版发行,并逐步受到我国环境工程专业教学、科研、技术及管理部门有关人员的关注,该书于 2007 年获评上海市优秀教材二等奖。

《环境工程仿真与控制》(第三版)是面向 21 世纪课程教材和普通高等教育“十一五”国家级规划教材,与第二版相比,第三版的主要特点是在保持教材原有特色的基础上,强化了教材的应用性。

在仿真部分,新增了“模型校正”与“模型应用”两小节。在“模型校正”部分,介绍工厂数据的实验校核及计算校核,模型参数的灵敏度法校正与经验法校正,以及模型参数的规范化校正。在“模型应用”部分,介绍用于工艺参数优化的专用仿真平台及用于控制方案比较的通用仿真平台。在“计算方法”一节,对计算流体力学软件 FLUENT 的使用方法进行了介绍。

在控制部分,第三版对第二版的有关章、节进行了增、删,涉及的内容主要有:新增自动控制系统常用概念和工程术语、控制器选择方法、离散 PID 控制器算法、控制器参数整定和投运方法、成分检测变送器等,删除了模拟式控制器工作原理和构造;新增过程状态空间方程建立方法,以及输入-输出模型、传递函数模型、状态空间模型之间的转换方法;新增串级、分程、比值、前馈、选择性、非线性等复杂控制系统在环境工程中的应用实例,如 SBR 程序 PLC 控制、废水焚烧炉温度串级控制、硫黄回收装置的燃料气/酸性气/空气比值控制、洁净室温湿度分程控制、前置反硝化的碳源投加前馈-反馈控制、污水处理过程的递阶神经网络建模、污水处理过程 pH 专家控制系统等。

本书仿真部分由华东理工大学资源与环境工程学院姚重华教授负责修订,控制部分由华东理工大学信息学院刘漫丹教授负责修订,全书由姚重华教授负责统稿。华东理工大学硕士研究生曾俊武为本书 FLUENT 应用部分撰写了初稿。

编者

2010.1

第二版前言

《环境工程仿真与控制》(第一版)为普通高等教育“九五”国家级规划教材,也是面向 21 世纪课程教材,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的一个新方向。

该教材在体系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教材体系。

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、技术及管理部门有关人员的广泛关注。教育部高等教育司 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)。全国有 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)是普通高等教育“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,还对《环境工程仿真与控制》(第一版)中的部分内容进行了一些增、删,总篇幅约增加 1 倍。

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有关的课程,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,在被控过程进行中要不断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设定值运行,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。

本书分成五章。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,以及在环境工程过程控制中的应用。

本书内容可作为高等学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”课程的教材或参考读物,也可供从事环境工程仿真与控制工作的专业技术人员阅读。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

第一章 仿真	1
第一节 过程建模	2
一、模型分类	2
二、简单系统建模	2
例 1-1 液槽储水量模型	3
例 1-2 带溢流堰液槽液位模型	4
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 污泥生长及氨氮消耗模型	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	10
例 1-8 活性污泥反应池数学模型	11
例 1-9 厌氧消化过程数学模型	29
例 1-10 二沉池一维浓度分布模型	40
例 1-11 沉淀池二维流场模型	44
第二节 计算方法	56
一、四阶龙格-库塔法	57
例 1-12 利用四阶龙格-库塔法计算连续反应物质浓度变化	59
二、有限差分法	59
例 1-13 矩形二沉池流体流速及固体浓度稳态分布	71
三、MATLAB/Simulink 应用	75
例 1-14 利用 Simulink 编制基于 ASM1 的活性污泥过程数学模型	75
例 1-15 利用 Simulink 编制倒置 AAO 流程基于 ASM2D 的仿真程序	84
四、FLUENT 应用	93
例 1-16 平流式二沉池流态分析	94
第三节 模型校正	108
一、数据校核	109

例 1-17 利用 OUR 法测定污水易降解有机碳浓度	109
例 1-18 利用守恒计算校核数据	110
二、参数校正	112
例 1-19 倒置 AAO 流程模型参数灵敏度分析	115
三、规范化校正	120
例 1-20 BioMath 校正流程	120
第四节 模型应用	121
例 1-21 UniTank 工艺流程专用仿真平台	122
例 1-22 A/O 流程自动控制通用仿真平台	126
<hr/>	
第二章 过程控制	137
第一节 基本概念	138
一、系统组成	138
二、基本要求	139
例 2-1 溶解氧浓度控制器正反作用的选择	140
第二节 PID 控制规律	141
一、比例控制	141
二、积分控制	143
三、微分控制	145
四、离散 PID 控制	147
例 2-2 溶解氧浓度 PI 控制	149
第三节 自动化仪表	152
一、控制器	152
二、执行器	155
三、检测变送器	161
四、设计符号	176
例 2-3 初沉池和污泥泵的过程控制	180
例 2-4 流量分配的过程控制	182
例 2-5 深冷制氧的过程控制	184
例 2-6 废弃污泥的过程控制	184
例 2-7 药剂投放的过程控制	186
第四节 可编程逻辑控制器 (PLC)	188
一、PLC 的基本概念	188
二、开关量控制	193
例 2-8 曝气池单元的 PLC 控制	193

例 2-9 进水泵房单元的 PLC 控制	194
三、模拟量控制	197
例 2-10 环境温度 PLC 控制	209
四、编程方法	211
例 2-11 SBR 程序 PLC 控制	214
<hr/>	
第三章 动态分析	228
第一节 输入-输出模型	228
一、输入-输出模型的建立	228
例 3-1 搅拌槽加热器输入-输出模型	229
例 3-2 混合过程的输入-输出模型	230
二、非线性系统的线性化	233
例 3-3 污水储槽液位模型线性化	234
例 3-4 连续搅拌反应釜模型线性化	236
第二节 状态方程模型	237
例 3-5 串联水槽的状态方程模型	238
例 3-6 活性污泥法曝气池状态方程	241
第三节 传递函数	243
一、拉普拉斯变换	243
二、传递函数	246
例 3-7 连续搅拌反应釜的传递矩阵及其零点和极点	247
例 3-8 串联水槽的传递函数	249
三、拉普拉斯反变换	249
四、数学模型间的转换	252
例 3-9 在 MATLAB 环境下实现模型之间的转换	253
第四节 过程动态分析	257
一、定性分析	257
二、定量分析	259
例 3-10 储槽液位模型分析	260
例 3-11 两个串联相互无影响的质量容量	264
例 3-12 两个串联相互有影响的质量容量	265
第五节 反馈控制过程动态响应	267
一、闭环动态响应	267
例 3-13 求储槽加热器温度反馈控制系统的闭环响应	268
二、比例控制对过程动态的作用	270

三、积分控制对过程动态的作用	272
四、微分控制对过程动态的作用	273
<hr/>	
第四章 复杂控制	274
第一节 串级控制	274
一、结构与原理	274
二、串级控制系统的设计与应用	276
例 4-1 污水温度串级控制	277
例 4-2 物料浸取过程温度串级控制	278
例 4-3 石灰石浆液密度串级控制	278
例 4-4 精馏塔温度串级控制	279
例 4-5 溶解氧 DO 浓度和鼓风机风量串级控制	280
例 4-6 废水焚烧炉温度串级控制	281
第二节 比值控制	283
一、结构与原理	283
例 4-7 氯化过程变比值控制	286
二、比值控制系统的设计与应用	287
例 4-8 自来水消毒装置的水氯比值控制	287
例 4-9 硫黄回收装置的燃料气/酸性气/空气比值控制	288
第三节 均匀控制	290
一、结构与原理	290
二、均匀控制系统的设计与应用	293
例 4-10 串联曝气池液位-流量串级均匀控制	294
第四节 分程控制	297
一、结构与原理	297
二、分程控制系统的设计与应用	299
例 4-11 蒸汽减压分程控制	299
例 4-12 工业废水 pH 分程控制	302
例 4-13 洁净室温湿度分程控制	302
第五节 选择性控制	304
一、结构与原理	304
例 4-14 两个反应器负荷平衡选择性控制系统	305
例 4-15 有机溶剂回收选择性控制系统	307
例 4-16 蒸汽锅炉的燃烧控制	308
二、选择性控制系统的设计与应用	309

例 4-17 锅炉压力保护选择性控制	309
例 4-18 产量自动调整选择性控制	310
例 4-19 节水系统选择性控制	311
例 4-20 焚烧炉双交叉燃烧控制	312
第六节 前馈控制	313
一、结构与原理	314
二、前馈控制系统的设计与应用	317
例 4-21 锅炉汽包液位前馈控制	317
例 4-22 蒸发过程前馈-反馈控制	318
例 4-23 连续消毒塔温度前馈-反馈控制	318
例 4-24 原油废水处理装置废水浓度前馈-串级反馈控制	320
例 4-25 前置反硝化的碳源投加前馈-反馈控制	321
第七节 非线性控制	324
一、结构与原理	325
二、非线性控制系统的设计与应用	326
例 4-26 pH 的非线性控制	326
例 4-27 澄清池、清水池液位非线性控制	327
第五章 人工智能	329
第一节 神经网络	329
一、基本概念	330
二、训练方法	334
例 5-1 活性污泥处理过程曝气池曝气量控制神经网络分类模型	339
例 5-2 活性污泥过程动态过程神经网络拟合模型	340
例 5-3 废纸造纸废水处理过程神经网络建模	343
例 5-4 污水处理过程的递阶神经网络建模	346
三、神经网络控制	350
例 5-5 一体化氧化沟溶解氧浓度神经网络自适应控制	353
四、MATLAB 神经网络工具箱应用	354
例 5-6 简化 ASM1 的神经网络模拟	355
例 5-7 液槽混合浓度神经网络模型预测控制	360
第二节 模糊控制	366
一、模糊集合理论	367
二、模糊控制设计方法	381
例 5-8 污泥脱水模糊控制系统设计	385

例 5-9 曝气池曝气流量模糊控制	389
三、MATLAB 模糊控制工具箱应用	392
例 5-10 污泥回流模糊控制设计	392
第三节 专家系统	397
一、基本概念	397
二、知识库构建	400
例 5-11 活性污泥过程故障诊断专家系统知识库	403
三、专家系统编制	406
例 5-12 利用 MS Visual Basic 5.0 和 Access 2000 编制专家系统 软件	406
四、专家系统控制	412
例 5-13 污水处理过程 pH 专家控制系统	417
<hr/>	
主要参考文献	426

彩图

第一章 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。

仿真与试验既对立又统一。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,因此仿真相对于试验有很大的优越性。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。

仿真对于环境工程有特殊意义,原因在于环境工程的研究对象一般为复杂系统,信息量很大,常有多相、多组分、多反应、多尺度、多目标、时空动态变化的特征,利用实验室小试或小规模中试的方法一般难以对复杂系统进行全面、细致的研究。因此,在环境工程领域推广计算机仿真技术,具有实际意义及应用前景。

与航空、化工等领域相比,仿真在环境工程领域还处在起步发展阶段。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,均有大量工作可做。编写本章的目的,不是介绍有关仿真的完整理论,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 过程建模

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,目前仍有各种意见。侧重工艺的技术人员往往倾向于使用机理模型,因为机理模型有坚实的理论基础;而侧重控制的技术人员可能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,兼顾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:

$$V \frac{d\rho_j}{dt} = q_{V,in}\rho_{j,in} - q_{V,out}\rho_{j,out} \pm V \sum r_{j,n} \quad (1-1)$$

式中: V ——反应器体积, m^3 ;

ρ_j ——组分 j 的质量浓度^①, g/m^3 ;

$q_{V,in}$ ——流入流量, m^3/d ;

$q_{V,out}$ ——流出流量, m^3/d ;

$r_{j,n}$ ——组分 j 在第 n 个反应中浓度变化速率。

例 1-1 液槽储水量模型

对于单组分系统,如图 1-1 所示的简单液槽,系统组分仅为水,若流入流量为:

$q_{m,in}$ (kg/s), 流出流量为 $q_{m,out}$ (kg/s), 描述该液槽的储水量 M 随时间变化速率的动态数学模型为:

$$\frac{dM}{dt} = q_{m,in} - q_{m,out} \quad (1-2)$$

系统达稳态时, $\frac{dM}{dt} = 0$ (1-3)

此时流入流量 $q_{m,in}$ (kg/s) 等于流出流量 $q_{m,out}$ (kg/s), 描述该液槽的储水量随时间变化速率的稳态数学模型为:

$$q_{m,in} = q_{m,out} \quad (1-4)$$

当流入流量产生阶跃变化后流出流量会产生同步变化(图 1-2)。

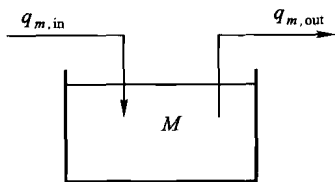


图 1-1 简单液槽输入-输出示意图

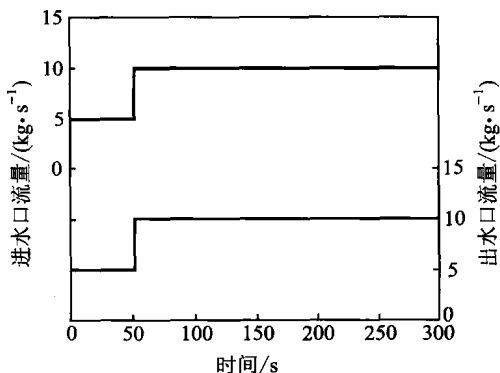


图 1-2 简单液槽输入-输出响应示意图

① 下文简称为浓度。

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):

$$q_{m,out} = 1.015\rho n L h^{1.5} \quad (1-5)$$

式中: ρ ——流体密度, mg/L ;
 n ——溢流堰数量;
 L ——溢流堰长度, m ;
 h ——溢流堰上方液面高度, m ;
 1.015——与溢流堰形状有关的系数。

$$h = \frac{M}{\rho A} - H \quad (1-6)$$

式中: A ——液槽面积, m^2 ;
 H ——溢流堰高度, m 。

将式(1-5)与式(1-6)代入式(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,达到新的稳态需要经过一段时间即经历一个动态过程。

例 1-3 调节池水质模型

对于双组分系统,如污水调节池(简化)(图 1-4),其中既含水,又有基质 S ,模型中会涉及 S 的浓度。若不考虑反应,则描述调节池内组分 S 浓度 S 的动态模型为:

$$V \frac{dS}{dt} = q_{V,in} S_{in} - q_{V,out} S_{out} \quad (1-7)$$

式中: S ——基质浓度, mg/L 。

对于完全混合液槽反应器(CSTR), $S_{out} = S$

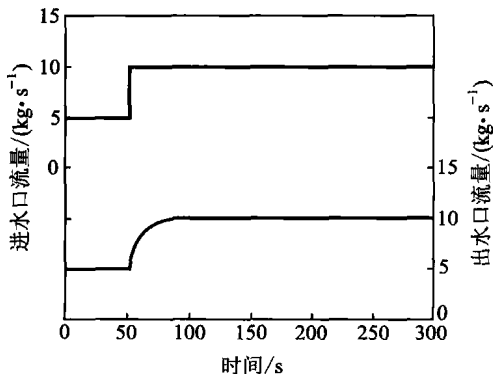


图 1-3 带溢流堰液槽输入-输出响应示意图

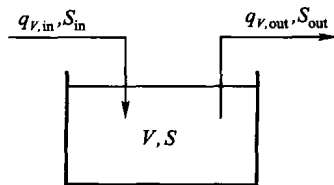


图 1-4 污水调节池(简化)示意图