



普通高等教育电气工程与自动化(应用型)“十二五”规划教材

**Process Control
Engineering**

过程控制工程

© 袁德成 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育电气工程与自动化（应用型）“十二五”规划教材

过程控制工程

主 编 袁德成

参 编 李 凌 郭小萍 赵文丹



机械工业出版社

过程控制工程是高等学校自动化专业的核心课程之一。本书主要讲述过程控制系统的设计理论、方法及其应用, 主要内容包括: 基于过程机理和数据驱动的过程建模方法, PID 控制器设计, 控制系统的结构设计, 基于经验的控制系统结构设计(包括串级控制、前馈控制、比值控制等), 面向全流程的控制系统结构设计, 模型预测控制, 典型单元操作的控制(包括流体输送、换热器、精馏分离、化学反应器等), 实时优化控制, 间歇过程控制等。本书选择了许多控制工程领域最新的研究成果, 对实际工作有现实指导意义。

本书适用于自动化、化学工艺与工程、测控技术与仪器等本科专业高年级学生和不具备控制理论基础的研究生学习, 也可以作为参考资料, 为在流程工业从事过程操作、系统管理、电气工程、自动控制和仪表等工作的工程师提供帮助。

图书在版编目(CIP)数据

过程控制工程/袁德成主编. —北京: 机械工业出版社, 2013. 2

ISBN 978-7-111-41374-5

普通高等教育电气工程与自动化(应用型)“十二五”规划教材

I. ①过… II. ①袁… III. ①过程控制 IV. ①TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 020866 号

机械工业出版社(北京市白万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 于苏华 责任编辑: 于苏华 王 荣

版式设计: 张 薇 责任校对: 陈延翔 肖 琳

封面设计: 张 静 责任印制: 张 楠

北京交通印务实业公司印刷

2013 年 5 月第 1 版·第 1 次印刷

184mm × 260mm · 17 印张 · 417 千字

标准书号: ISBN 978-7-111-41374-5

定价: 33.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心: (010)88361066 教材网: <http://www.cmpedu.com>

销售一部: (010)68326294 机工官网: <http://www.cmpbook.com>

销售二部: (010)88379649 机工官博: <http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线: (010)88379203 封面防伪标均为盗版

普通高等教育电气工程与自动化（应用型）“十二五”规划教材

编审委员会委员名单

主任委员：刘国荣

副主任委员：张德江 梁景凯 张 元 袁德成

焦 斌 吕 进 胡国文 刘启中

汤天浩 黄家善 钱 平 王保家

委 员（按姓氏笔画排序）：

丁元明 马修水 王再英 王 军 叶树江

孙晓云 朱一纶 张立臣 李先允 李秀娟

李海富 杨 宁 陈志新 周渊深 尚丽萍

罗文广 罗印升 罗 兵 范立南 娄国焕

赵巧娥 项新建 徐建英 郭 伟 高 亮

韩成浩 蔡子亮 樊立萍 穆向阳

前 言

根据普通高等学校自动化专业系列教材编写计划，我们编写了本书。过程控制工程是以流程工业为背景，以控制理论为指导，综合应用数学建模、计算机仿真、调节仪表、测控系统、化学工程和化工热力学等知识，分析生产过程的动态特征和工艺优化操作对自动控制系统的要求、给出控制系统结构设计的总体评价和组成架构、选择最合理的控制策略和算法、形成典型单元操作的控制系统的定制化设计和实施方案。过程控制工程作为控制理论实现工业应用的方法和技术，在需要借助自动控制手段提升效能的各类应用场合中，也是关键的“使能”技术之一。我们认为，过程控制工程特有的思想：“把脉动态变化、实施反馈机制、达到系统优化”，不仅自动化专业的学生，而且其他理工科相关专业的学生都应该学习、领会和应用。

对本书的内容和结构，主要考虑以下几个方面：一是关于过程控制工程的方法学习，作为自动控制原理的后续课程，介绍了系统动态建模基本方法的学习，以此作为控制理论到控制工程的衔接过渡；作为过程控制工程自身的方法，详细介绍了控制系统组成、结构设计和算法综合包括 PID 控制、模型预测控制等内容。二是关于过程控制工程的技术学习，选择流程工业常用的单元操作——流体输送、换热器、精馏分离、反应器等，从动态特性分析、控制系统设计到实施，给予详细介绍。三是关于过程控制工程最新发展的学习，安排了实时优化控制和间歇过程控制两章内容。本书安排了两个附录：Laplace 变换和常微分方程求解，便于自学。

本书由沈阳化工大学袁德成担任主编。具体编写分工为：第 1 章、第 7~8 章由袁德成编写；第 2 章、第 9 章、第 14~15 章、附录由李凌编写；第 3~6 章由郭小萍编写；第 10~13 章由赵文丹编写。

由于编者水平有限，欢迎读者对本书中的错误和不妥之处提出批评意见。

编者

目 录

前 言

第一篇 过程模型

第 1 章 引言	1
1.1 了解要控制的对象——工艺流程	1
1.2 控制系统的组成	2
1.3 与控制紧密相关的操作——性能评估和 过程监视	3
1.4 过程控制教育	4
第 2 章 典型过程的特征与模型描述	5
2.1 液位系统	5
2.1.1 单容液位对象	5
2.1.2 双容液位对象	7
2.1.3 三容液位对象	8
2.2 反应器系统	9
2.3 电机系统	12
2.4 TE 过程	13
2.4.1 概述	13
2.4.2 TE 过程描述	13
2.4.3 TE 过程机理建模	18
思考题与习题	21
第 3 章 基于数据驱动的过程建模	22
3.1 引言	22
3.2 线性回归	22
3.3 非线性回归	24
3.4 软测量模型	25
3.4.1 明确任务	25
3.4.2 辅助变量的选择	25
3.4.3 过程数据的处理及训练样本的 确定	26
3.4.4 软测量模型的建立	27
3.4.5 软测量模型的在线校正	29
3.5 主成分分析	30
3.5.1 数据的标准化处理	30
3.5.2 主成分分析的基本原理	30
3.6 偏最小二乘	35
思考题与习题	36

第二篇 控制系统结构与算法

第 4 章 单回路控制	37
4.1 概述	37
4.2 传感器和变送器	37
4.2.1 仪表信号的标准化	38
4.2.2 传感器	41
4.2.3 变送器	41
4.3 执行装置	45
4.3.1 控制阀	45
4.3.2 阀位定位器	46
4.3.3 特制尺寸的控制阀	46
4.3.4 控制阀的口径选择	49
4.4 仪表准确度	50
4.5 基本控制规律	52
4.5.1 比例控制	53
4.5.2 积分控制	54
4.5.3 比例积分控制	55
4.5.4 比例微分控制	55
4.5.5 比例积分微分控制	56
4.5.6 双位控制	57
4.5.7 数字 PID 控制器	58
4.6 过程控制系统设计	60
4.6.1 概述	60
4.6.2 被控参数、控制参数的选择	61
4.6.3 确定控制方案及控制算法	62
4.6.4 过程控制系统的硬件选择	63
4.7 过程的安全性	73
思考题与习题	74
第 5 章 扩展的单回路控制策略	75
5.1 串级控制	75
5.1.1 串级控制系统的基本概念	75
5.1.2 串级控制系统分析	77
5.1.3 串级控制系统设计	79
5.1.4 串级控制系统投运及参数整定	82
5.2 时延补偿	84
5.3 推断控制	86

11.3.3 加热炉的安全联锁保护	161	13.4.3 前馈控制	203
11.4 锅炉的控制	162	13.4.4 分程控制	203
11.4.1 锅炉锅筒水位控制	164	13.4.5 分段控制	204
11.4.2 锅炉燃烧过程控制	165	13.5 反应器控制方案的应用	204
11.4.3 蒸汽过热系统控制	166	13.5.1 反应器-精馏塔控制	204
11.5 仿真实例	166	13.5.2 聚合釜内温控制	205
思考题与习题	171	13.5.3 聚合釜温度-压力串级控制	205
第 12 章 精馏塔的控制	172	13.6 仿真实例	206
12.1 概述	172	思考题与习题	209
12.1.1 精馏塔的控制要求	172	第 14 章 实时优化控制	210
12.1.2 精馏塔的扰动分析	173	14.1 概述	210
12.2 精馏塔的静态特性	174	14.2 实时优化实现流程	212
12.2.1 总物料平衡	174	14.3 实时优化问题描述与求解	214
12.2.2 能量平衡	174	14.4 线性规划	216
12.2.3 扰动对静态的影响	175	14.4.1 线性规划的标准形式	216
12.3 精馏塔的动态特性	175	14.4.2 线性规划问题的求解方法	217
12.3.1 动态平衡方程	176	14.5 非线性规划	218
12.3.2 单一塔板的动态特性	178	14.5.1 非线性规划问题描述	218
12.3.3 精馏塔的受控变量的选择	180	14.5.2 非线性规划问题 MATLAB	
12.4 精馏塔的基本控制方案	181	解法	218
12.4.1 按精馏段指标控制	182	14.5.3 二次规划	219
12.4.2 按提馏段指标控制	183	思考题与习题	220
12.4.3 精馏塔压力控制	184	第 15 章 间歇过程控制	222
12.5 二元精馏塔仿真实例	186	15.1 间歇过程控制简介	222
思考题与习题	191	15.1.1 间歇过程的定义	222
第 13 章 化学反应器的控制	193	15.1.2 间歇过程的特点	222
13.1 化学反应和化学反应器	193	15.1.3 间歇过程控制的研究现状	223
13.1.1 化学反应特征	193	15.2 顺序逻辑控制	224
13.1.2 化学反应器分类	193	15.2.1 引言	224
13.1.3 化学反应器的控制要求	195	15.2.2 顺序控制技术的现状及进展	225
13.2 化学反应的基本规律	195	15.3 批次对批次控制	226
13.2.1 反应速度方程	195	15.3.1 批次对批次控制简介	226
13.2.2 均相反应动力学方程	196	15.3.2 典型的 Run-to-Run 过程	
13.2.3 反应速度常数与温度的关系	196	举例	227
13.2.4 化学平衡	197	15.3.3 常见的几种 Run-to-Run 控	
13.3 化学反应器动态数学模型	198	制器	229
13.3.1 单一不可逆反应	198	15.3.4 厂级控制	231
13.3.2 反应器-汽提塔	199	15.4 指数加权移动平均控制器	233
13.3.3 含两种反应物的反应器-精		15.4.1 指数加权移动平均控制器	
馏塔	200	介绍	233
13.4 化学反应器的常规控制	201	15.4.2 多人多出过程的双指数加权移动	
13.4.1 单回路控制	202	平均控制器	238
13.4.2 串级控制	202	15.4.3 多变量指数加权移动平均控制器	

的稳定性分析	239	附录 B 常微分方程求解	251
附 录			
附录 A Laplace 变换	241	B.1 数值积分法	251
A.1 典型函数的 Laplace 变换	241	B.2 常用方法	254
A.2 Laplace 变换的性质与定理	243	B.2.1 数值积分算法计算过程	254
A.3 微分方程的 Laplace 变换解法	245	B.2.2 积分步长的选择	255
A.3.1 部分分式展开法	246	B.2.3 MATLAB 的数值积分求解	
A.3.2 解微分方程的一般步骤	248	方法	255
		参考文献	258

第一篇 过程模型

第1章 引言

流程工业（或称过程工业）的任务是把原材料经过一系列物理化学操作转化成具有特定用途的化学品或物品，涵盖炼油、化工、冶金、食品、制药、污水处理、半导体、热电、生物质加工等生产行业。虽然流程工业种类繁多，但在其生产部门，工艺、装备和操作控制是三个关键组成要素，它们紧密相关、缺一不可，其中工艺部分可以想象成一个“圆葱”：处于中心位置的是化学反应器、依次往外分别是分离操作、热交换网络和公用设施（包括能源、水等资源的补给）等；在每一层上都有相应的单元操作设备，是实现物理、化学变化的载体，像反应器、精馏塔、换热器、泵等；而操作控制部分是使能技术，可统一归纳到过程系统工程（Process Systems Engineering, PSE）框架下，包括设计、建模、仿真、控制、监视、优化等理论、方法和技术等。

1.1 了解要控制的对象——工艺流程

学习过程控制最好的出发点是从了解工艺开始，一般的方法是把整个工艺流程分为原料预处理、反应、分离、能源交换网络、公用设施等组成单元。自然界存在的物质大多处于混合状态，例如：原油、天然气、煤、生物质等均包含了复杂的物质成分，其中一些是反应转化所必需的成分，还有其他一些物质，虽然量少但进入工艺流程后可能和设备材料接触或遇水发生化学反应形成酸或碱，产生不期望的腐蚀效应等，因此原料必须在进入反应转化工序之前进行预处理。需要指出的是，如果一个加工企业使用来自多地的原料，不同地方的原料混合或切换将产生扰动，需要设计相应的操作控制策略予以克服。

了解工艺流程的重点是要搞清楚在化学反应器内进行化学反应的特征。化学反应的种类非常多，例如：反应物或产物可能是气相、液相、固相或离子态等；反应进程包括可逆反应、不可逆反应、多步序贯反应、并行同步反应等多种步骤；反应转化也分间隙、连续、半连续等形式；化学反应是否使用催化剂；生化反应还涉及复杂的微生物新陈代谢网络等。若转化率不太高，需要后续工艺把产物和未反应完的原料分离，原料部分返回反应器入口继续反应转化，产物进入后续工艺设备继续处理。这样形成了内部循环工艺，扰动可能在这个循环物系内越积越多，需要用控制系统自动调节防治失衡。此时还可能多了一个选项，即原料从何处加入产生的转化效果可能不同，需要工艺的优化设计。如果在绝热容器内进行的是放热反应，则需要控制好温度，否则反应温度升高会加速反应，反应快了又产生更多的热，这样的正反馈效应，如不及时移走反应热，容易引起设备安全性问题，一般需要设计专门的安

全保护系统。由于受反应转化率低即未反应的物料需要循环使用，以及能量需要综合利用等因素影响，工艺设备内在关联必然存在，而且为应对全球化竞争、可持续发展、生态环境友好等日益增长的要求，可靠性要求更高、约束集合更加严格、市场需求变化更加快捷等，客观上只有依赖控制技术才能实现现代化学工业绿色化的目标。

一般来说，一种物质纯度越高则价值越高，例如：空气通过空分装置分解为氮气、氧气、氢气、惰性气体后，用途非常广。经过化学反应单元后的产物一般包括了产品（或中间品）以及各种副产物，需要把它们分离开。精馏塔、模拟移动床等都是典型常用的分离设备，它们利用混合物料组分具有不同的沸点或凝固点、不同的吸附能力等物理性质。分离操作单元有两个显著特征：一是消耗大量的能源（化学工业主要的能耗在此操作）；二是直接与分离出的产品质量相关。任何节能和保证产品品质的工艺要求，需要通过精细的控制系统才能实现。

物料在各种工艺设备上的传递由电动机提供动能，物质之间接触和反应一般需要热能。原料在反应单元和分离单元进行转化时需要供给大量能源，一旦这些工序的任务完成，相比常态，混合物料往往还携带大量的能量，回收或循环或集成使用是必要的工艺任务。热能交换需要温差，这样也可以把一个工艺流程等效成冷热两种流体进行热量交换的网络，依据网络中温差最小的“夹点”温度（Pinch Temperature），过程系统工程可以系统设计热交换网络结构，实现热能的综合补给和最佳使用。

除了加工原料，流程工业还消耗大量的电、水（汽）、煤、燃气、冷剂等资源，需要公用设施把这些资源转变成整个工艺所需要的状态。这些资源也是工艺流程的“生命线”，需要设计可靠的安全保护系统。同时，现代企业往往有全球化的供应链管理（Supply Chain Management, SCM）系统，公用设施是这类系统需要考虑的重要环节之一。

1.2 控制系统的组成

人们知道，一条流程生产线是由一个个工艺操作单元组成的，每个单元设备有物料流和能量流的输入、输出。如果某个输入（能量或物料）和输出之间存在确定的因果关系，即输入刺激能够观察到输出响应，则可以通过设计和实施自动控制系统，让输出响应按照工程师预定的轨迹（或称设定值）变化。如果预定的轨迹是常数，则对应定值控制系统，其主要任务是抵御内部或外部干扰；如果预定的轨迹随时间变化，则控制任务主要是伺服跟踪。预定轨迹的设计由工艺工程师和控制工程师协同完成，涉及稳态模型的仿真计算以及工业现场的最优实验设计等工作。

一个自动控制系统由被控对象、测量传感器（眼睛）、执行机构（手脚）和控制策略（大脑）四部分组成。控制策略又可分为反馈控制和前馈控制两种。反馈控制是通过计算比较输出测量信号和其设定值之间的偏差，按所设计的控制规律计算出合理的控制作用，输出到执行机构，以调节输入到被控对象的能量或物料量，达到把被控对象输出保持在设定值附近变化的目的。在工业上得到广泛应用的控制规律是PID（比例-积分-微分）和MPC（模型预测控制）。前馈控制主要用于抵御外部扰动对被控对象输出的影响，与反馈策略不同，它通过在可测扰动进入到被控对象之前实施检测，并按照与扰动影响被控对象输出相反的方向计算适当的控制作用，输出到执行机构反向补偿外部扰动的的影响。反馈控制的好处之一是能

够在不确定性环境下工作，最大问题是有可能导致闭环不稳定的现象。前馈控制一般需要精确的模型信息以及扰动是可测的。

目前工业界主要实施的分层型过程自动化系统架构，其一般组成如图 1-1 所示，其中实时优化（Real-Time Optimization, RTO）位于基础控制层和计划调度层之间，协调计划调度任务和生产装置的操作。位于最上层的计划功能，生成经济预报和生产目标，而调度功能则决定如何执行所选择的计划，这层功能实现的关键是确定可行解域；位于最下层的基础控制层则利用各类闭环控制算法，例如 PID、MPC 等，实现安全、产量和质量等基本生产目标，这些控制回路的设定值一般是具体的工艺参数，如温度、压力、流量、液位和物质组分等，与一个企业追求的经济指标之间并没有直接显性的

关系。实时优化层任务的重点在于考虑装置运行的经济效益，即控制目标可能是能耗最小或收益最大，而要实现这样一个要求往往需要基础层若干个控制回路协同动作。时间尺度从上层的周或天到底层的秒或毫秒级不等，空间尺度可能跨越单个装置、全流程甚至更广，信息集成了来自工艺装置的生产实时数据和供应链管理的数据，某一层的操作则是利用从下一层获取的信息和接受上一层的指令，通过某种优化策略计算给出下一层的设定值，即基于串级-反馈控制的思想。目前支撑分层型过程自动化系统架构功能实现的有效方法是基于稳态模型的手段，但如果各功能层所依赖的模型不一致，往往无法实现既定目标。这也是有关实时优化技术中被研究者关注最多的问题。

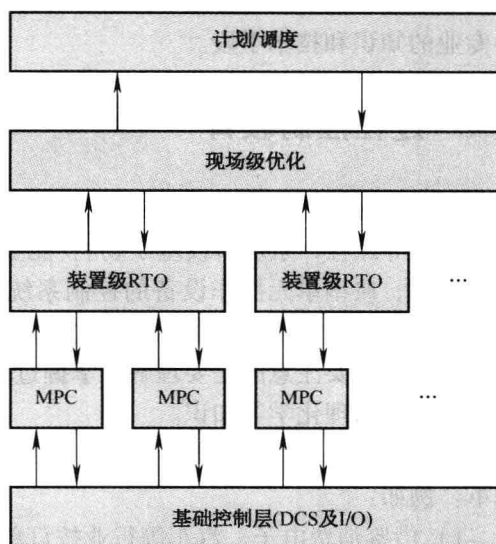


图 1-1 分层型过程自动化系统

1.3 与控制紧密相关的操作——性能评估和过程监视

处于全球化激烈市场竞争中的流程工业，生产装置日趋大型化，工艺流程不断复杂化，这也导致对设备和控制系统的投资越来越大。每个控制系统是否工作在最佳状态、整个系统的能源消耗是否合理、主要设备的运行是否达到最大出力、采用的工艺参数是否满足实现最大效益的要求等问题，可能直接关系到一个企业的存亡。借助各种信息、知识和手段，对控制系统的经济性能进行评估，不仅为企业实施技术升级提供科学决策依据，同时也使用户和工程师可以更好地分析和维护好控制系统。与自动控制技术一起在流程工业运行操作中发挥重要作用的相关技术有：设备在线监视和管理系统，能源管理系统，控制性能监测和评估技术，故障检测和故障诊断技术，基于六西格玛的统计过程控制技术。

如何在已有的控制系统信息的基础上，对过程控制性能进行监控并对存在的问题进行识别和诊断，并给予合理的处理方案，最终能够维护控制系统高品质运行，实现装置的最佳经济效益，已成为当前企业和控制工程师普遍关注的任务。解决这一问题的有效途径是研究和开发一类过程性能评估和决策支持的一体化解决方案，这类集成技术涉及了系统辨识、性能

评估和过程监控、故障诊断、经济性能评估、控制系统调节方案以及市场管理决策等多个学科专业的知识和技术手段。

1.4 过程控制教育

世界上许多大学的化工类本科专业均开设过程动态学及控制 (Process Dynamics and Control) 等课程, 系统讲授基于物料/能量/动量平衡的机理建模方法、单/多回路控制系统设计方法、典型单元操作设备的控制系统构成方法、典型流程工业控制系统设计案例等内容, 一些新的教材也包括基于统计过程监视、全流程控制设计、实时优化控制等最新的过程控制技术。需要注意的是要理解和掌握过程建模和控制技术, 必须结合学习有关化工工艺、化学工程、物理化学等知识。

化学工业为应对全球化竞争、可持续发展、环境生态友好等要求, 正在多方面发生巨大变革。例如:

1) 借鉴消费电子、汽车等行业按订单生产的成功经验, 重新探索哪些化学品能够从以采购原料—生产加工—销售获利为主的原料驱动模式, 转变到以需求订单—采购原料—生产加工的市场驱动模式, 最大限度地降低成本, 提高行业竞争力。

2) 为生命科学、制药、生物质燃料、能源化工、食品加工等新型行业的相关需求, 提供包括单元操作设备和工艺流程在内的关键技术。

3) 全面推进化工过程强化 (Process Intensification, PI) 技术的研发、实验验证和示范应用等。化学工业已经经历了两次变革: 第一次是从经验设计到单元操作技术, 目前在流程工业领域广泛使用; 第二次是基于传递现象的技术, 尽管学术界付出了巨大的研究努力, 但最终并没有被工业界采纳; 目前正在孕育兴起的化工过程强化技术可能是第三次, 一般认为这将是化学工业又一次根本性的变革。化工过程强化将彻底突破上述架构, 按照四个基本原则: ①最大化分子间和分子内事件的效率; ②让每个分子都有被加工的经历; ③优化每个尺度上的驱动力和最大化承载驱动力的比表面积; ④最大化单个事件和部分过程的综合效应等, 重新研究、设计化学反应动力学实现的最佳途径。

在化学工业经历巨大变革的进程中, 以反馈为核心, 目前仅支持单元操作设备与工艺的系统控制技术, 必将面临新的机遇和挑战。新一代从事过程控制的学者和工程师, 更需要面向化工过程强化的技术需求, 系统学习和掌握过程系统工程的理论、方法和手段。

第2章 典型过程的特征与模型描述

为了实现有效的系统分析与控制，首先必须正确认识系统的性质。为此，人们通常借助于数学模型这一有效工具。可以这样说，正确地提出和建立系统的数学模型，是实现系统控制的基础和前提。

一般来说，建立系统的数学模型有两种方法。第一种方法为机理分析方法，采用这种方法建立系统的数学模型，需要深入分析系统的运动规律，利用已知的物理定律和方程，如化学动力学定律、生物学定律、牛顿力学方程、麦克斯威尔电磁方程组、物质和能量的各类平衡方程等，作为建立数学模型的依据。因此，这种方法也叫做理论建模。另一种方法是实验方法或称统计建模法，其要点是，根据系统的输入、输出数据所提供的信息，进行数据的统计处理，从而得到关于系统模型的参数。本章以液位系统、反应器系统、电动机系统、TE过程四个典型过程为例，分别阐述各个典型过程的特征，采用第一种方法——理论建模的方法，建立各自的模型描述。关于第二种建模方法——实验方法，将在第3章中重点讲解。

2.1 液位系统

以工业过程中最简单的水槽液位对象为例，基于物料平衡关系式，分析推导其数学模型描述形式，说明控制的必要性。

在连续生产过程中，最基本的关系是物料平衡和能量平衡。在稳态条件下，单位时间流入对象的物料（或能量）等于从系统中流出的物料（或能量）；在动态条件下，单位时间流入对象的物料（或能量）与单位时间从系统中流出的物料（或能量）之差等于系统内物料（或能量）的储存量的变化率。依据这个基本原理，下面分别推导单容液位对象、双容液位对象以及三容液位对象的数学描述。

2.1.1 单容液位对象

图2-1所示是一个简单的水槽液位对象，输出变量为液位 H ，水槽的流入量 q_{v1} 由入水阀来调节，水槽的流出量 q_{v2} 由出水阀开度决定， q_{v1} 、 q_{v2} 均为体积流量。

显然，在任何时刻水位的变化均满足下面的物料平衡关系

$$q_{v1} - q_{v2} = \frac{dV}{dt} \quad (2-1)$$

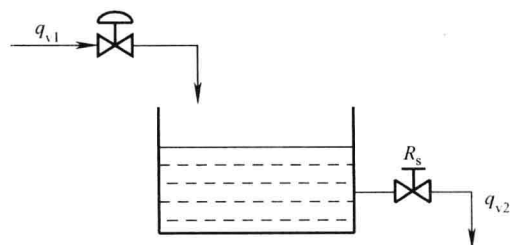


图2-1 有自衡单容液位对象

式中， V 为水槽内液体的储存量（液体的体积）； $\frac{dV}{dt}$ 为储存量的变化率。

设水槽的横截面积为 A ，且为一常数，则由于 $V = AH$ ，有

$$\frac{dV}{dt} = A \frac{dH}{dt} \quad (2-2)$$

在稳态情况下, $\frac{dV}{dt} = 0$, 则 $q_{v1} = q_{v2}$ 。

当 q_{v1} 发生变化时, 液位 H 将随之变化, 水槽出口处的静压也随之变化, 流出量 q_{v2} 也发生变化。假设变化量很小, 可以近似认为流出量 q_{v2} 和液位 H 成正比关系, 而与出水阀的阻力系数 R_s 成反比关系, 即

$$q_{v2} = \frac{H}{R_s} \quad (2-3)$$

当出水阀开度不变时, 阻力系数 R_s 为常数。将式 (2-2) 和式 (2-3) 代入式 (2-1), 整理得

$$AR_s \frac{dH}{dt} + H = R_s q_{v1} \quad (2-4)$$

令 $T = AR_s$, $K = R_s$, 并代入式 (2-4), 可得

$$T \frac{dH}{dt} + H = K q_{v1} \quad (2-5)$$

式 (2-5) 是用来描述单容水槽液位系统的微分方程, 它是一个一阶微分方程式。因此, 通常将其称为一阶对象, 其中 T 称为时间常数, K 称为放大系数, 它们可以反映单容水槽液位系统的对象特性。

假设流入量 q_{v1} 在 t_0 时刻突然有一个阶跃变化量 Δq_{v1} , 则可由式 (2-5) 求出相应的液位变化量

$$\Delta H = K \cdot \Delta q_{v1} [1 - e^{-(t-t_0)/T}] \quad (2-6)$$

当 $t \rightarrow \infty$ 时

$$\Delta H = K \cdot \Delta q_{v1} \quad (2-7)$$

式中, K 、 Δq_{v1} 均为常数, 所以液位稳定在一个新的平衡状态。此时, $q_{v1} = q_{v2}$, 这也称对象的自衡特性, 即当输入量发生变化破坏了对象的平衡而引起输出量变化时, 在没有人为干预的情况下, 对象自身能重新恢复平衡的特性。自衡特性有利于控制, 在某些情况下, 使用简单的控制系统就能得到良好的控制质量。

在实际生产中, 还有一类无自衡特性的对象, 如图 2-2 所示。

由于泵的出口流量 q_{v2} 不随液位变化而变化, 因此对象的动态方程为

$$\Delta q_{v1} = A \frac{d\Delta H}{dt} \quad (2-8)$$

同理, 假设流入量 q_{v1} 在 t_0 时刻突然有一个阶跃变化量 Δq_{v1} , 则可由式 (2-8) 求出相应的液位变化量

$$\Delta H = \frac{\Delta q_{v1}}{A} (t - t_0) \quad (2-9)$$

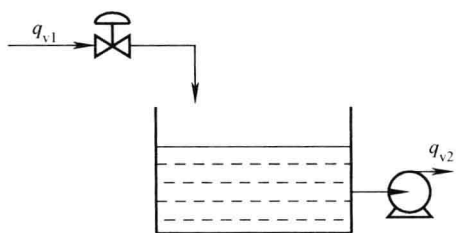


图 2-2 无自衡单容液位对象

由于水槽流出量不变，所以当流入量突然增加 Δq_{v1} 时，液位 H 将随时间的推移恒速上升，不会重新稳定下来，直至水槽顶部溢出，这就是无自衡特性。无自衡特性的对象在受到扰动作用后不能重新恢复平衡，因此控制要求较高。对这类对象必须要施加相应的控制才行。

2.1.2 双容液位对象

双容水槽如图 2-3 所示，它有两个串联在一起的水槽，它们之间的连通管具有阻力，因此两者液位不同。水首先进入水槽 1，然后再通过水槽 2 流出，入水流量 q_{v1} 由阀 1 控制，流出量 q_{v2} 由阀 2 的开度决定，被控变量是水槽 2 的液位 h_2 。下面分析 h_2 在阀 1 开度扰动作用下的动态特性。根据物料平衡方程可以写出两个关系式：

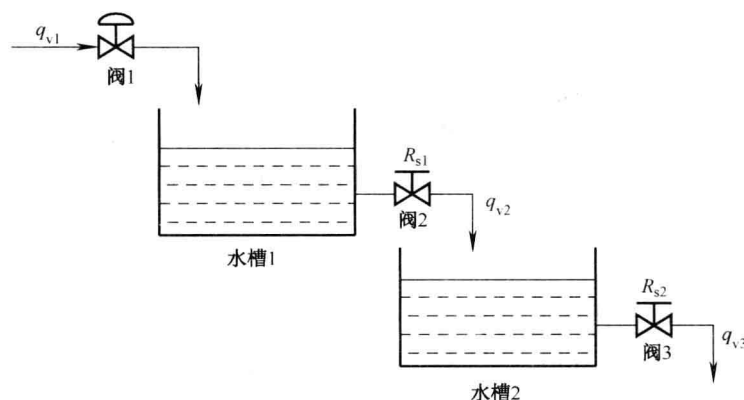


图 2-3 双水槽液位系统

水槽 1 的动态平衡关系为

$$q_{v1} - q_{v2} = A_1 \frac{dh_1}{dt} \quad (2-10)$$

水槽 2 的动态平衡关系为

$$q_{v2} - q_{v3} = A_2 \frac{dh_2}{dt} \quad (2-11)$$

式 (2-10) 与式 (2-11) 相加可得水槽 1 的动态平衡关系，即

$$q_{v1} - q_{v3} = A_1 \frac{dh_1}{dt} + A_2 \frac{dh_2}{dt} \quad (2-12)$$

同理，在 q_{v2} 、 q_{v3} 变化量极小时，水流出量与液位的关系近似为

$$q_{v2} = \frac{h_1}{R_{s1}} \quad (2-13)$$

$$q_{v3} = \frac{h_2}{R_{s2}} \quad (2-14)$$

先将式 (2-13) 代入式 (2-10)，然后再与式 (2-14) 一起代入式 (2-12) 并求微分后，经整理得

$$\frac{dh_1}{dt} = R_{s1} A_2 \frac{d^2 h_2}{dt^2} + \frac{R_{s1}}{R_{s2}} \frac{dh_2}{dt} \quad (2-15)$$

再将式 (2-14) 和式 (2-15) 代入式 (2-12), 经整理得

$$A_1 A_2 R_{s1} R_{s2} \frac{d^2 h_2}{dt^2} + (A_1 R_{s1} + A_2 R_{s2}) \frac{dh_2}{dt} + h_2 = R_{s2} q_{v1} \quad (2-16)$$

式中, A_1 、 A_2 分别为水槽 1、2 的横截面积; R_{s1} 、 R_{s2} 分别为水槽 1、2 的出水阀阻力系数。

令 $T1 = A_1 R_{s1}$ 、 $T2 = A_2 R_{s2}$, $K = R_{s2}$, 则有

$$T1 T2 \frac{d^2 h_2}{dt^2} + (T1 + T2) \frac{dh_2}{dt} + h_2 = K q_{v1} \quad (2-17)$$

式中, $T1$ 、 $T2$ 分别为水槽 1、2 的时间常数; K 为被控对象的放大系数。

式 (2-17) 就是图 2-3 所示的双容水槽液位对象的二阶微分方程式。通常将这样的对象称为二阶被控对象。

2.1.3 三容液位对象

三容水槽液位控制系统组成如图 2-4 所示。利用三容水槽实验装置中各个组件的不同组合情况, 可以构成多种不同功能的实验系统。其中, 三个水槽截面积为 A , Q_1 和 Q_2 分别为水泵 1 和水泵 2 的流量, h_1 、 h_2 和 h_3 分别为水槽 1 (T1)、水槽 2 (T2) 和水槽 3 (T3) 的液位, H_{max} 是最高液位。

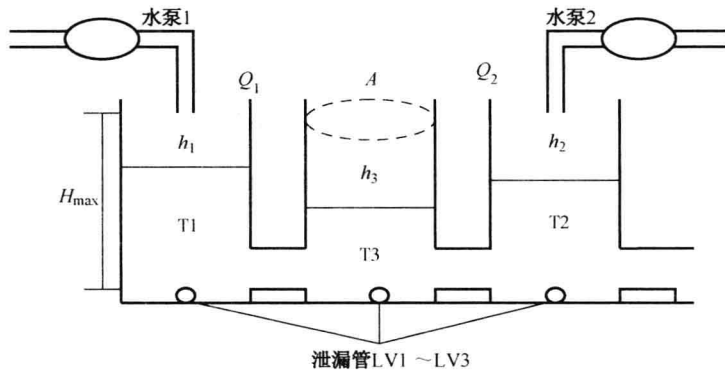


图 2-4 三容水槽液位系统

下面采用理论建模的方法对三容水槽进行建模。如图 2-4 所示, 该装置可实现的一个典型工作状态是: 泵 P1、P2 用于供水, 连通阀 CV1、CV2、CV3 开启, 泄漏阀 LV1、LV2、LV3 关闭, 调整比例阀 PV1、PV2 的开度以保持液位 h_1 、 h_2 稳定在各自的给定值上, 根据系统的平衡方程:

$$A dh/dt = \text{所有流量的总和} \quad (2-18)$$

用于三个水槽, 所得结果为

$$A dh_1/dt = Q_1 - Q_{12} \quad (2-19)$$

$$A dh_2/dt = Q_{12} - Q_{23} \quad (2-20)$$

$$A dh_3/dt = Q_2 + Q_{23} - Q_{20} \quad (2-21)$$

Q_{12} 、 Q_{23} 和 Q_{20} 可由在一般情况下的托里切利规则决定。定义为

$$q = \lambda S_n \text{sgn}(\Delta h) (2g |\Delta h|)^{1/2} \quad (2-22)$$