



高等学校电子与电气工程及其自动化专业“十一五”规划教材



过程控制系统及工程

杨为民 邬齐斌 主编
唐功友 主审



西安电子科技大学出版社
<http://www.xduph.com>

TP273/488

2008

高等学校电子与电气工程及其自动化专业“十一五”规划教材

过程控制系统及工程

主 编 杨为民 邬齐斌
副主编 张彦军 赵艳东
主 审 唐功友

西安电子科技大学出版社

2008

内 容 简 介

本书结合过程工业的特点, 综合应用控制理论及自动化仪表和计算机等控制工具的知识, 全面介绍了传统的和近 30 年来出现的各类过程控制系统, 重点讲述它们的工作原理、结构特点、设计方法和应用中的技术问题。全书分为简单控制系统、复杂控制系统、先进控制系统、典型化工操作单元的过程控制系统等 4 个部分。

本书内容丰富, 取材新颖, 结构严谨, 系统性强, 且充分体现理论和实际密切联系、重在应用的原则。

本书可作为高等院校自动化、电气工程及自动化、测控技术与仪器、过程装备与控制工程、化学工程以及相近专业的本科生教材, 亦可作为相关专业的研究生和工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

过程控制系统及工程/杨为民, 邬齐斌主编.

—西安: 西安电子科技大学出版社, 2008. 4

高等学校电子与电气工程及其自动化专业“十一五”规划教材

ISBN 978 - 7 - 5606 - 2008 - 4

I. 过… II. ①杨… ②邬… III. 过程控制—自动控制系统—高等学校—教材 IV. TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 024913 号

策 划 毛红兵

责任编辑 段 蕾 毛红兵

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路 2 号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

<http://www.xduph.com> E-mail: xdupfxb001@163.com

经 销 新华书店

印刷单位 陕西光大印务有限责任公司

版 次 2008 年 4 月第 1 版 2008 年 4 月第 1 次印刷

开 本 787 毫米×1092 毫米 1/16 印张 17.5

字 数 411 千字

印 数 1~4000 册

定 价 25.00 元

ISBN 978 - 7 - 5606 - 2008 - 4/TP · 1041

XDUP 2300001-1

* * * 如有印装问题可调换 * * *

本社图书封面为激光防伪覆膜, 谨防盗版。

高等学校

自动化、电气工程及其自动化、机械设计制造及其自动化专业

“十一五”规划教材编审专家委员会名单

主任：张永康

副主任：姜周曙 刘喜梅 柴光远

自动化组

组长：刘喜梅（兼）

成员：（成员按姓氏笔画排列）

韦力 王建中 巨永锋 孙强 陈在平 李正明
吴斌 杨马英 张九根 周玉国 党宏社 高嵩
秦付军 席爱民 穆向阳

电气工程组

组长：姜周曙（兼）

成员：（成员按姓氏笔画排列）

闫苏莉 李荣正 余健明
段晨东 郝润科 谭博学

机械设计制造组

组长：柴光远（兼）

成员：（成员按姓氏笔画排列）

刘战锋 刘晓婷 朱建公 朱若燕 何法江 李鹏飞
麦云飞 汪传生 张功学 张永康 胡小平 赵玉刚
柴国钟 原思聪 黄惟公 赫东锋 谭继文

项目策划：马乐惠

策划：毛红兵 马武装 马晓娟



过程控制是一门发展迅速的学科，而作为它的重要组成部分——“过程控制系统”，又是一门与工业生产过程联系十分密切的课程。随着科学技术的飞速发展，过程控制技术也是日新月异。它不仅在传统工业的改造中起到了提高质量、节约原材料和能源、减少环境污染等十分重要的作用，而且已成为新建的大规模的结构复杂的工业生产过程不可缺少的组成部分。

“过程控制系统”是自动化类专业一门密切联系生产实际的技术性课程，是综合性、应用性很强的一门主干课程，它的基础是自动控制理论、化工(热工)过程及装备、自动化仪表和计算机控制技术 etc 知识。通过本课程的学习，要求学生能应用控制理论和工程处理方法，掌握过程控制系统控制方案的分析、设计和工程实施能力。

本书作为过程控制的教材，是在历年讲稿、讲义的基础上经多次修改完善而写成的。前3章以控制方案为经线，介绍各类过程控制的方案设计和分析方法。第1章和第2章为常规控制系统，它们是过程控制的基础，也是应用最广泛的系统。第3章重点介绍近30年来开发出来的先进控制系统，此项技术已趋成熟，经济效益显著，应用前景看好。考虑到这些系统比较复杂，为方便学习和今后的应用，邬齐斌教授根据自己多年在这方面的研究成果，博览中外文献，将这方面的内容写得较为细致，且充分体现理论和实际密切联系、重在应用的原则。此部分可单独开设课程。

本书后3章是以过程对象为纬线，介绍典型的单元操作的控制方案，包括流体输送设备控制系统、传热设备控制系统及精馏塔控制系统，并介绍如何结合过程本身的特点，正确、合理地制定控制方案，是前3章知识的综合应用。

本书在写作上注重深入浅出，讲清基本概念，同时力求反映近年来过程控制的新发展。全书内容较多，在讲授本课程时，可按章来组合，例如第3章可以单独构成“先进控制技术”一课。

在本书的编写过程中，唐功友教授一直给予关心和指导，并认真审阅了全书，提出了详细的修改意见；刘川来、刘军、尚继良等老师为本书的编写也做了大量的工作。在此向他们表示诚挚的感谢。为了方便教学，本书配有电子教案，需要者可通过发电子邮件到 yangweimina@163.com 索取。

由于作者水平有限，书中缺点和不足之处在所难免，恳请读者批评指正。

编者

2007年11月

目 录

绪论	1
第 1 章 简单控制系统	3
1.1 简单控制系统的结构组成及控制指标	3
1.1.1 简单控制系统的结构组成	3
1.1.2 简单控制系统的控制指标	4
1.2 典型受控过程的数学模型	7
1.2.1 纯滞后过程的建模	7
1.2.2 单容过程的建模	8
1.2.3 多容过程的建模	9
1.2.4 具有反向响应的过程	13
1.2.5 不稳定过程	14
1.3 被控变量与操纵变量的选择	15
1.3.1 被控变量的选择	15
1.3.2 操纵变量的选择	16
1.4 过程可控程度分析	16
1.4.1 度量过程可控程度指标 $k_m\omega_c$ 的导出	17
1.4.2 广义对象时间常数 T 和纯滞后 τ 对可控程度 $k_m\omega_c$ 的影响	18
1.5 广义对象各环节对控制质量的影响	20
1.5.1 干扰通道特性 $G_f(s)$ 对控制质量的影响	20
1.5.2 调节通道特性 $G_p(s)$ 对控制质量的影响	23
1.6 检测变送环节	26
1.6.1 检测变送环节的传递函数	26
1.6.2 测量误差及对测量信号的处理	27
1.7 执行器环节	27
1.7.1 执行器概述	27
1.7.2 气动执行器	28
1.7.3 控制阀流量特性和阀门增益	31
1.7.4 电/气转换器和电/气阀门定位器	34
1.7.5 电动执行器	35
1.8 连续 PID 控制及其调节过程	37
1.8.1 基本概念	37
1.8.2 比例调节	39
1.8.3 比例积分调节	42
1.8.4 比例微分调节	46
1.8.5 比例积分微分调节	48
1.8.6 控制规律的选择	48

1.9 控制器参数整定和控制系统投运	49
1.9.1 控制系统的投运	49
1.9.2 控制系统的工程整定方法	49
思考题与习题	51
第2章 常用复杂控制系统	55
2.1 串级控制系统	55
2.1.1 串级控制系统的基本概念	55
2.1.2 串级控制系统分析	58
2.1.3 串级控制系统设计	61
2.1.4 串级控制系统的投运及参数整定	63
2.2 均匀控制系统	64
2.2.1 均匀控制系统的由来和目的	64
2.2.2 均匀控制系统的特点	65
2.2.3 均匀控制方案	66
2.2.4 均匀控制系统的理论分析	68
2.3 比值控制系统	73
2.3.1 比值控制问题的由来	73
2.3.2 比值控制方案	74
2.3.3 比值控制系统的实施	77
2.3.4 比值控制系统的投运及参数整定	80
2.3.5 比值控制系统实施的若干问题	81
2.4 前馈控制系统	84
2.4.1 前馈控制系统的基本原理	84
2.4.2 前馈控制系统的几种结构形式	86
2.4.3 前馈控制规律的实施	90
2.5 分程控制系统	91
2.5.1 分程控制系统的基本概念及应用	91
2.5.2 分程控制系统的方案实施	94
2.5.3 阀位控制系统	95
2.6 选择性控制系统	96
2.6.1 选择性控制系统概述	96
2.6.2 选择性控制系统的设计应用	97
2.6.3 防积分饱和的方法	98
2.6.4 选择性控制系统的其它应用	99
2.7 按计算指标进行控制的系统	101
2.7.1 内回流及其对精馏操作的影响	101
2.7.2 内回流与外回流的关系	101
2.7.3 实现内回流控制的方法	102
思考题与习题	104
第3章 先进控制系统	112
3.1 状态反馈控制	112
3.1.1 状态反馈和极点配置原理	112
3.1.2 状态反馈控制系统设计和应用中的问题	117

3.2 内模控制	120
3.2.1 内模控制的基本原理	120
3.2.2 内模控制在 PID 控制参数整定中的应用	128
3.3 简化模型预测控制	135
3.3.1 单输入-单输出 SMPC	136
3.3.2 多输入-多输出 SMPC	143
3.4 预测控制	148
3.4.1 预测控制的基本原理	149
3.4.2 预测控制的基本算法	150
3.4.3 预测控制系统的性能分析	158
3.4.4 预测控制系统的工业应用	161
3.5 多变量解耦控制	167
3.5.1 控制回路间的关联和相对增益矩阵	167
3.5.2 关联系统控制器的整定	181
3.5.3 多变量解耦控制系统	184
思考题与习题	190
第 4 章 流体输送设备控制系统	195
4.1 离心泵控制系统	195
4.1.1 离心泵的工作原理及主要部件	195
4.1.2 离心泵的工作特性	198
4.1.3 离心泵的控制方案	199
4.1.4 容积式泵的控制方案	201
4.2 离心式压缩机防喘振控制	202
4.2.1 离心式压缩机的喘振	202
4.2.2 离心式压缩机防喘振控制系统的设计	203
4.2.3 测量式出口流量的可变极限流量防喘振控制	206
4.2.4 离心式压缩机串并联时的防喘振控制	206
思考题与习题	208
第 5 章 传热设备控制系统	209
5.1 换热器控制系统	209
5.1.1 换热器控制系统概述	209
5.1.2 传热设备的特性及静态数学模型	209
5.1.3 对象的动态数学模型	215
5.2 一般传热设备的控制	222
5.2.1 控制方案的确定	222
5.2.2 传热设备控制方案的实现	223
5.2.3 调节传热面积	226
5.2.4 复杂控制系统	227
5.3 锅炉设备的控制	230
5.3.1 工艺流程简介	230
5.3.2 锅炉汽包水位的控制	232
5.3.3 锅炉燃烧控制系统	239
5.3.4 蒸汽过热系统的控制	244

5.3.5 采用可编程控制器的锅炉控制实例	244
思考题与习题	248
第6章 精馏塔控制系统	249
6.1 精馏塔控制系统概述	249
6.1.1 精馏塔的控制要求	249
6.1.2 精馏塔的扰动分析	250
6.2 精馏塔的特性	251
6.2.1 精馏塔的静态特性	251
6.2.2 精馏塔的动态特性	252
6.3 精馏塔被控变量的选择	254
6.4 精馏塔的基本控制	256
6.4.1 产品质量的开环控制	256
6.4.2 按精馏段指标的控制	257
6.4.3 按提馏段指标的控制	259
6.4.4 精馏塔的塔压控制	260
6.5 精馏塔的新型控制方案	262
6.5.1 精馏塔的解耦控制	262
6.5.2 精馏塔的节能控制	263
6.5.3 精馏塔的最优控制	266
思考题与习题	268
参考文献	270



绪 论

一、过程控制概述

过程工业包括炼油、化工、冶金、电力、轻工、医药、核能等工业部门，是国民经济的支柱产业。过程工业加工的物料一般是不可数的连续介质，其加工方式也多是连续的工艺过程。控制的任务就是要实现生产过程的自动化，这对于过程的平稳操作和高效生产起着不可估量的作用，同时它也是改善操作人员的工作条件和保护环境的重要手段。

与其它控制系统相比较，过程控制有以下特点：

(1) 控制对象(即过程)的特性，往往具有非线性、时变、时滞、分布参数、变量相互关联和不确定性等特点，数学模型较复杂。

(2) 干扰较多，不仅有来自环境的外部干扰，也有来自对象内部的负荷干扰，甚至还有测量和控制装置的噪声干扰等。

(3) 控制方案具有多样性，同一被控过程因所受扰动的不同，可能有完全不同的方案，而同一方案又可能适用于不同的过程。

从以上特点看，过程控制是一门研究前景广阔、富有挑战性的学科。

二、过程控制的发展简史

纵观过程控制的发展史，过程控制技术进步源于三大动力：一是控制理论的进展，新的理论和概念的创新为应用技术打下了坚实的基础；二是过程工艺技术的进步，它为过程控制的发展提出了新的挑战；三是工业自动化仪表和控制装置不断地更新完善，使过程控制技术获得了强有力的硬件支持。

20世纪40年代前后，过程控制还处于黑箱时期，人们对过程本身知之甚少，仅是根据生产工业的需要选配仪表和凭经验进行控制，有人说那时的过程控制与其说是一门科学，不如说是一门技艺，我们把这一阶段称为仪表化阶段。

20世纪四五十年代，以频率法和根轨迹法为核心的经典控制理论被引入到过程控制工程中，人们开始认识到过程控制的关键是要了解被控对象。于是，一门研究过程动态行为的过程动态学开始兴起。但是由于当时工业生产过程的操作与管理相对简单，因此普遍采用测量与控制功能相结合(即所谓基地式仪表)，实行按岗位的分散操作，而对于控制系统，关心的主要是闭环稳定性的问题。

进入20世纪50年代后，以状态空间方法和最优控制为标志的现代控制理论取得了长足的进步，而且在航空、航天和制导领域取得了辉煌的成果。具有代表性的成果有极大值原理、动态规划和随机滤波。但是在过程控制领域，这些成果并没有发挥出作用，倒是现代控制理论的一些思想，如状态的可控性、可观性等观念备受关注。这一时期为适应车间

集中化控制的需要,单元组合仪表得到了充分应用。

从 20 世纪 70 年代开始,随着过程工业逐渐向大型化、单机组、精细化和追求高的经济效益方向发展,需要解决大规模复杂系统的控制问题,讲究分解和协调、多级递阶优化控制或分散控制的大系统理论已移植到过程控制中,代替单元组合仪表和直接数字控制计算机的集散系统(DCS)及可编程控制器(PLC)已经广泛用于过程工业,同时,过程控制理论也有很大的突破,一些基于现代控制理论又符合过程特点的新型控制方法,如预测控制、推断控制、多变量解耦控制等先进控制策略被源源不断地开发出来,创造出巨大的经济效益。

从 20 世纪 80 年代开始,过程控制技术向综合自动化方向发展,集计算机技术、显示技术、控制技术和通信技术(即 4C)于一身的计算机集成过程系统(CIPS)、计算机集成制造系统(CIMS)和现场总线技术正逐步走向实用化,以市场需求为导向,以全局优化为目标,将常规控制、先进控制、过程优化、生产调度和经营决策等多种功能集中在一起的智能化系统,已成为主流发展方向,它必将极大地推动过程工业登上新的高峰。

三、过程控制系统及工程课程设置的目的是和学习方法

过程控制系统及工程是一门密切联系生产实际的技术性课程,综合性和应用性很强,它的基础是自动控制理论、化工(热工)过程及装备、自动化仪表和计算机控制技术 etc 知识。

通过本课程的学习,要求学生能应用控制理论和工程处理方法,掌握过程控制系统控制方案的分析、设计和工程实施能力。

作为控制工程的教材,本书前 3 章是以控制方案为经线,介绍各类过程控制的方案设计和分析方法。第 1 章和第 2 章为常规控制系统,它们是过程控制的基础,也是应用最为广泛的系统,着重叙述了过程特性、控制系统的结构和工作原理、PID 控制规律及其整定和投运,以及其它工程实施知识。由于自动化专业设置有计算机控制技术课程,因此计算机控制系统的内容就不再引入。第 3 章重点介绍近 30 年来开发出来的技术已趋成熟、经济效益显著、应用前景看好的先进控制系统,包括状态反馈、内模控制、预测控制和多变量解耦控制系统,着重介绍它们的工作原理、控制算法、关键技术和应用实例。考虑到这些系统比较复杂,为方便学习和今后的应用,这部分我们写得较为细致。本书后 3 章是以过程对象为纬线,介绍典型的单元操作的控制方案,包括流体输送设备控制系统、传热设备控制系统及精馏塔控制系统,介绍如何结合过程本身的特点,正确、合理地制定控制方案。后 3 章是前 3 章知识的综合应用。

对于这门工程技术性很强的专业课程,在学习过程中,学生应当抓住课堂授课、实验教学、课程设计和生产实习这四个环节,努力做到理论联系实际,举一反三,提高自己分析、设计和投运过程控制系统的能力。

第1章 简单控制系统

简单控制系统是指单回路控制系统，是最基本、结构最简单的一种控制系统，具有相当广泛的适应性。在计算机控制已占主流地位的今天，这类控制仍占70%以上。

简单控制系统虽然结构简单，却能解决生产过程中大量的控制问题，同时也是复杂控制系统的基础。掌握了单回路系统的分析和设计方法，将会给复杂控制系统的分析和研究提供很大的方便。

1.1 简单控制系统的结构组成及控制指标

1.1.1 简单控制系统的结构组成

简单控制系统由四个基本环节组成，即被控对象（简称对象）、测量变送装置、控制器（亦称调节器）和控制阀（亦称调节阀）。有时为了分析问题方便起见，把控制阀、被控对象和测量变送装置合在一起称为广义对象。

液位控制系统如图 1.1-1 所示，控制要求是维持水槽液位 L 不变。为了控制液位，选择相应的变送器、控制器和控制阀，组成液位控制系统（即简单控制系统）。

假定图 1.1-1 中所示的是一个中间贮水槽，在平衡状态 ($Q_i = Q_o$) 下，如果输入流量端存在干扰 f ，则会使输入总流量 ($Q_i + f$) 增大，于是液位 L 上升。随着 L 的上升，控制器将感受到偏差（给定与测量的比较值），从而使控制器输出将控制阀关小，使输入流量 Q_i 减小，这样液位 L 将下降到给定值，达到新的平衡。

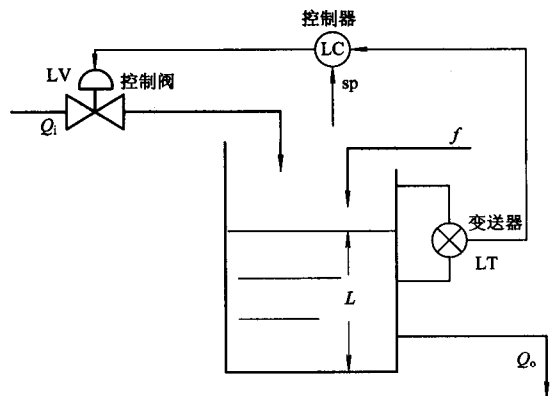


图 1.1-1 液位控制系统的结构原理图

对于图 1.1-1 所示的液位控制系统，可以画出它的框图，如图 1.1-2 所示。

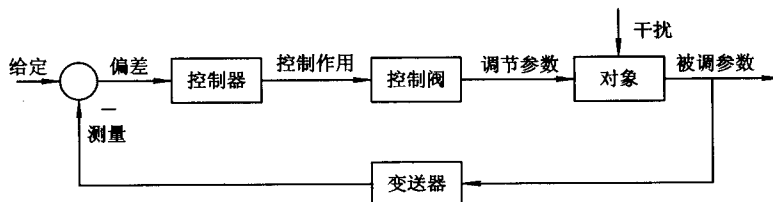


图 1.1-2 液位控制系统框图

从以上的液位控制系统工作过程可看出：在该系统中存在着一条从系统输出端引向输入端的反馈线，也就是说，该系统中的控制器是根据被控变量的测量值与给定值的偏差来进行控制的。控制的作用是纠正偏差，所以负反馈是简单控制系统的—个特点。

简单控制系统根据其被控变量的不同，可以分为温度控制系统、压力控制系统、流量控制系统、液位控制系统等。虽然这些控制系统名称不同，但是它们都具有相同的框图和组成结构。由于此类控制系统从组成方框图上看，由一个测量变送装置、一个控制器、一个控制阀和相应的被控对象组成一个负反馈回路，因此简单控制系统也常称为单回路控制系统。

1.1.2 简单控制系统的控制指标

对每一个控制回路来说，在设定值发生变化或系统受到扰动作用后，被控变量应该平稳、迅速和准确地趋近或回复到设定值。因此，通常在稳定性、快速性和准确性三个方面提出各种单项控制指标，把它们适当地组合起来，也可提出综合性指标。

1. 控制系统过渡过程单项指标

控制系统按其输入方式的不同，可分为随动系统与定值系统两种。随动系统与定值系统的控制要求有相同的一面，也有不同的一面。例如，两种系统都必须稳定，但定值系统的衰减比可以低一些，随动系统的衰减比则应该高一些；随动系统的重点在于跟踪，要跟得稳、跟得快、跟得准，定值系统的关键在一个“定”字，要定得又稳又快又准。

控制系统的主要单项指标包括衰减比、超调量与最大偏差、余差、恢复时间和振荡周期。这些指标可从控制系统的过渡过程曲线上求取。

1) 衰减比 n

在欠阻尼振荡系统中，两个相邻的同方向幅值之比称为衰减比，前一幅值作为分子，后一幅值作为分母，如图 1.1-3 中的 B/B' 。

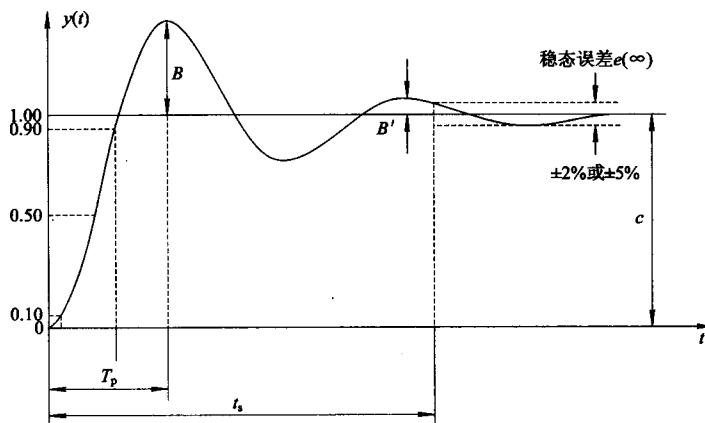


图 1.1-3 单位阶跃响应曲线

衰减比 n 是衡量稳定性的指标， $n \leq 1$ 时会振荡，这是不允许的。为了保持足够的稳定性，通常定值系统的 n 取 4 为宜。对随动系统， n 取 10 为宜，或采用过阻尼系数 $\xi \geq 1$ ($B' = 0$) 的形式。

2) 超调量 σ 与最大偏差 A

在随动系统(如图 1.1-4 所示)中, σ 是一个反映超调情况, 也是衡量稳定程度的指标。设被控变量的最终稳定值为 c , 最大瞬态偏差为 B , 则超调量 σ 的表达式为

$$\sigma = \frac{B-c}{c} \times 100\%$$

在定值控制系统(如图 1.1-5 所示)中, 最终稳态值是 0 或很小的数值, 这时如果仍用 σ 作为指标来衡量系统的超调就不合适了, 通常改用最大偏差 A 作为反映系统偏离给定值的最大量的指标, 其计算公式为

$$A = |B + c|$$

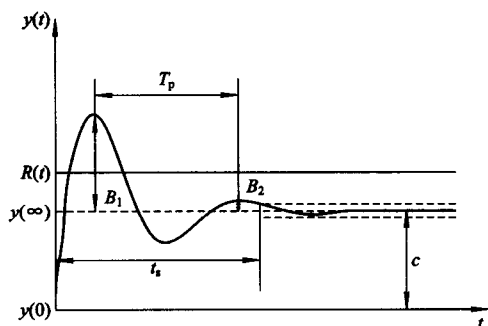


图 1.1-4 随动系统过渡过程曲线

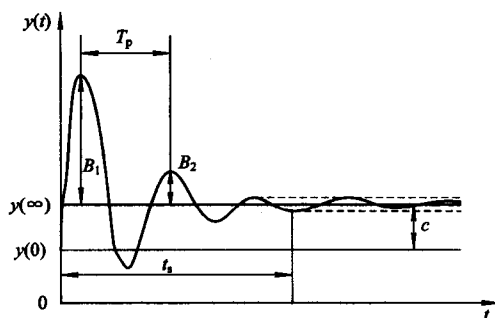


图 1.1-5 定值系统过渡过程曲线

3) 最终稳定值 c 或余差 $E(\infty)$

余差 $E(\infty)$ 是系统的最终稳态偏差。因为 $E(\infty) = R - c$ (R 为系统给定值), 在一般情况下, 设定 $R=0$, 所以 $E(\infty) = -c$ 。最终稳定值 c 或余差 $E(\infty)$ 是反映控制精度的一个稳态指标。

4) 恢复时间 t_s 和振荡周期 T_p

过渡过程要绝对地达到新的稳态, 需要无限长的时间, 然而要进入稳态值附近 $\pm 5\%$ 或 $\pm 2\%$ 以内的区域, 并保持在该区域之内, 需要的时间则是有限的, 这一时间称为恢复时间 t_s 。恢复时间是反映控制快速性的一个指标。

在同样的振荡频率下, 衰减比越大, 则恢复时间越短; 振荡频率越高, 则恢复时间也越短。因此, 与振荡频率紧密相关的振荡周期 T_p 在一定程度上也可作为衡量控制快速性的指标。

【例 1.1-1】 某化学反应器, 工艺规定操作温度为 $200 \pm 10^\circ\text{C}$, 考虑到安全因素, 调节过程中规定温度的最大变化不得超过 15°C 。现设计运行的温度定值调节系统在最大阶跃干扰作用下的过渡过程曲线如图 1.1-6 所示, 试求该系统的过渡过程品质指标(最大偏差、余差、衰减比、振荡周期及恢复时间), 并问该调节系统是否满足工艺要求。

解:

最大偏差: $A = 230 - 200 = 30^\circ\text{C}$

余差: $E(\infty) = 205 - 200 = 5^\circ\text{C}$

衰减比: $n = \frac{B}{B'} = \frac{230 - 205}{210 - 205} = 5$

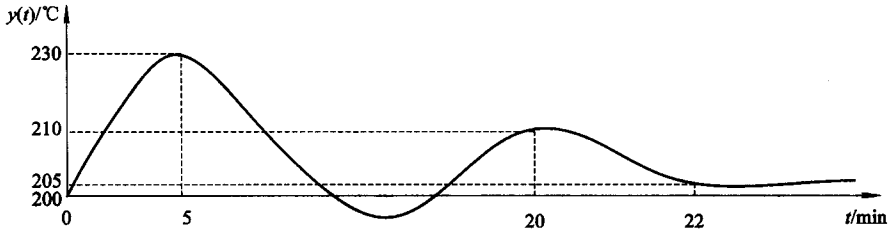


图 1.1-6 例 1.1-1 题图

振荡周期： $T_p = 20 - 5 = 15 \text{ min}$

恢复时间(调节时间)： $t_s = 22 \text{ min}$

工艺规定操作温度为 $200 \pm 10^\circ\text{C}$ ，考虑安全因素，调节过程中规定温度的最大变化不得超过 15°C ，而该调节系统的最大偏差 $A = 30^\circ\text{C}$ ，因此不满足工艺要求。

2. 控制系统过渡过程综合性指标

综合性指标往往采用积分鉴定的形式。一般来说，过渡过程中的动态偏差越大，或是恢复得越慢，则目标函数 J 值将越大，表明控制品质越差。 $J = \int_0^\infty f(e, t) dt$ 是 $e(t)$ 及 t 的一个泛函值。

控制系统过渡过程的综合性指标通常有以下几种。

1) 平方误差积分准则 ISE

$$f(e, t) = e^2, \quad J = \int_0^\infty e^2(t) dt \rightarrow \min$$

2) 绝对误差积分准则 IAE

$$f(e, t) = |e|, \quad J = \int_0^\infty |e(t)| dt \rightarrow \min$$

3) 时间乘绝对误差积分准则 ITAE

$$f(e, t) = |e|t, \quad J = \int_0^\infty t |e(t)| dt \rightarrow \min$$

对于存在余差的系统， e 不会最终趋于零，有 $e(\infty)$ 存在，上面三种形式的积分鉴定值 J 都将成为无穷大，无从进行比较。此时可用 $e(t) - e(\infty) = -[y(t) - c]$ 作为误差项代入。

一般地说，ITAE 为最小值的系统往往衰减比很大，ISE 为最小值的系统恢复时间很短，但过渡过程的振荡比较剧烈，如图 1.1-7 所示。

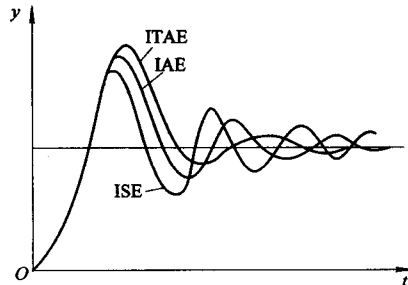


图 1.1-7 应用不同偏差积分性能指标下的闭环响应

在工作中，具体选何种指标，应根据控制系统的性能及工艺要求而定。

1.2 典型受控过程的数学模型

受控过程的数学模型是分析和设计过程控制系统的基础资料和依据。在对现代日益复杂和庞大的受控过程进行研究分析、实施控制，尤其是进行最优设计时，必须首先建立其数学模型。因此，数学模型对过程控制系统的分析设计、实现生产过程的优化控制具有极为重要的意义。

本节主要介绍几种常见的简单过程的特性，然后列出由它们组成的一些实际的典型过程。

1.2.1 纯滞后过程的建模

某些过程在输入变量改变后，输出变量并不立即改变，而要经过一段时间后才反映出来，这种过程称为纯滞后过程。纯滞后就是指在输入量变化后，看不到系统对其响应的这段时间。

当物质或能量沿着一条特定的路径传输时，就会出现纯滞后。路径的长度和运动速度是决定纯滞后大小的两个因素。因此纯滞后也称为传输滞后。纯滞后一般不单独出现，同时不存在纯滞后的生产过程也很少。任何与控制系统设计有关的技术都会涉及纯滞后问题。

图 1.2-1(a) 所示的固体传送带上的定量控制系统为一个单独存在纯滞后的例子，图 1.2-1(b) 是其过程变化曲线。从阀门动作到重量发生变化，这中间的纯滞后 τ 等于阀和压力传感器之间的距离除以传送带的运动速度 v ，即

$$\tau = \frac{L}{v} \quad (1.2-1)$$

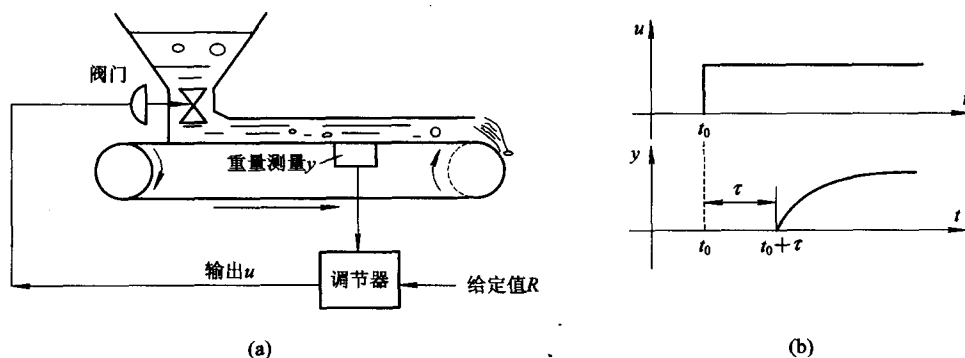


图 1.2-1 纯滞后过程示意图

(a) 重量传感器对固体流量变化过程图；(b) 阀门开度 u 使重量测量 y 纯滞后过程图
纯滞后环节的传递函数为

$$G(s) = e^{-s\tau} \quad (1.2-2)$$

相应的频率特性为

$$G(j\omega) = e^{-j\omega\tau} \quad (1.2-3)$$

纯滞后环节幅频特性对系统无影响，相频特性对系统的影响随频率的增加而增加。

1.2.2 单容过程的建模

所谓单容过程，是指只有一个贮蓄容量的过程。容量是储存物质(或能量)的地方，其作用就像流入量和流出量之间的缓冲器。单容过程又可分为自平衡单容过程与无自平衡单容过程。由于不同的物理背景的若干过程都遵循同一变化规律，因此单容过程可代表一类过程。

1. 无自平衡单容过程

典型的无自平衡单容过程如图 1.2 - 2 所示。

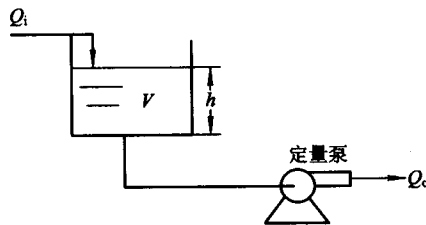


图 1.2 - 2 无自平衡单容过程

在图 1.2 - 2 中， Q_i 为贮槽的输入流量， Q_o 为贮槽的输出流量，其中定量泵排出的流量 Q_o 在任何情况下都保持不变，即与液位 h 的大小无关。

根据动态物料平衡关系

$$\text{输入流量} - \text{输出流量} = \text{单位时间容积的累积量变化}$$

有

$$\frac{dV}{dt} = Q_i - Q_o \quad (1.2 - 4)$$

其中， $V = Ah$ 为容器的容积， A 为容器的截面积。将 $V = Ah$ 代入式(1.2 - 4)，得

$$A \frac{dh}{dt} = Q_i - Q_o \quad (1.2 - 5)$$

其拉氏变换式为 $AsH(s) = Q_i(s) - Q_o(s)$ ， $Q_o(t)$ 为常量，其增量为 0，即 $\Delta Q_o = 0$ ， $Q_o(s) = 0$ ，则

$$G(s) = \frac{H(s)}{Q_i(s)} = \frac{1}{As} \quad (1.2 - 6)$$

其中， A 为积分时间常数，写成一般形式为

$$G(s) = \frac{1}{Ts} \quad (1.2 - 7)$$

式中， T 为积分时间常数。相应的频率特性为

$$G(j\omega) = \frac{1}{jT\omega} = -\frac{1}{T\omega}j \quad (1.2 - 8)$$

无自平衡过程的特点是在阶跃扰动的作用下，被控量会不断变化下去，不能由自身平衡下来，我们称这种过程为无自平衡能力过程，简称为无自衡过程。无自衡过程一般应设置自动控制系统，在没有自动控制系统的情况下，不允许设备长时间无人看管。