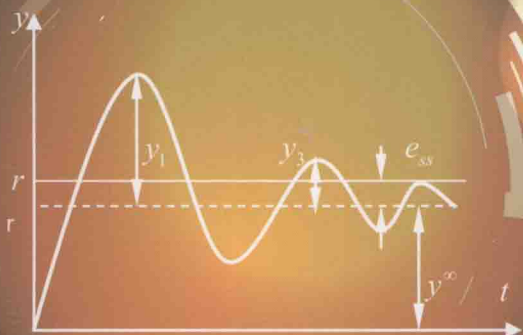


高职高专自动化类“十二五”规划教材

过程控制 工程

王淑红 主编



化学工业出版社

高职高专自动化类“十二五”规划教材

过程控制工程

王淑红 主编



化学工业出版社

·北京·

本书由过程控制工程理论、过程控制实训两大部分组成。第一部分共分7章,主要介绍过程控制原理、过程控制工程等方面的知识,阐述了过程控制系统的基本概念、过程控制系统的数学模型,比较详细地介绍了过程控制系统中的控制器和执行器、简单控制系统的分析与设计,对复杂控制系统、新型控制系统、典型过程单元控制方案作了比较全面的介绍。第二部分为实训部分,包括基本实训、提高实训、课程设计和综合实训,提供了相关课程设计和综合实训的设计任务书和课程设计报告书写格式。

本书可作为高职高专院校生产过程自动化技术等相关专业的教材,也可供电气、机械、冶金、化工工艺、制药、轻工等相关专业参考。

图书在版编目(CIP)数据

过程控制工程/王淑红主编. —北京:化学工业出版社, 2013.1

高职高专自动化类“十二五”规划教材

ISBN 978-7-122-15602-0

I. ①过… II. ①王… III. ①过程控制-高等职业教育-教材 IV. ①TP273

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第244828号

责任编辑:刘哲
责任校对:陈静

文字编辑:丁建华
装帧设计:韩飞

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印装:三河市延风印装厂

787mm×1092mm 1/16 印张13 字数336千字 2013年2月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:28.00元

版权所有 违者必究

前 言

为了适应社会经济和科学技术迅速发展及教育教学改革的需要,本教材贯彻“以市场需求为导向、以职业能力为本位,以培养应用型高技能人才为中心”的指导方针,坚持“理论够用为度,加强实践环节”的思想,突出职业能力培养,体现高职高专的办学定位,注重以先进的科学发展观调整和组织教学内容,增强认知结构与能力结构的有机结合,强调培养对象对职业岗位(群)的适应程度。

全书分为10章,主要内容为由过程控制工程理论、过程控制实训两部分组成。第一部分共分7章,主要介绍过程控制原理、过程控制工程等方面的知识,其中包括过程控制系统基本概念、过程控制系统的数学建模、简单控制系统、复杂控制系统、新型控制系统和典型过程单元控制方案等。

第二部分(第8~10章)为实训部分,过程控制实训包括基本实训、课程设计和综合实训。第8章基本实训以大型过程控制实验装置为载体,完成简单过程控制系统和复杂过程控制系统的验证性实验。第9章介绍了提高实训项目——智能温度控制系统。第10章以小型电锅炉为对象的课程设计和综合实训,包含了温度、压力、液位、流量四大参数控制系统设计,综合性强,在实验室模拟完成,做到“教、学、做”相结合,强化学生动手实践能力培养,提供了相关课程设计任务书和综合实训示例,并介绍了课程设计报告书写格式。

本书可作为高职高专、成人高等教育、继续教育等学校的各类生产过程控制(如化学工程、化学工艺、化学分析、环境保护、化工机械、计算机应用等)非仪表类专业的教材,也可作为化工、轻工、炼油、冶金、电力、纺织等院校及相关企业的职工培训教材,还可以供工业企业的工艺工程技术人员参考。

本书的第1、2、3、6章由张总编写,第4、5、7章由卢永杰编写,其余部分由王淑红编写,全书由王淑红统稿。

由于编者水平有限,不足之处在所难免,恳请读者批评指正。

编者

2012年10月

目 录

第 1 章 过程控制系统概述	1	影响	32
1.1 过程控制系统基本概念	1	3.2.1 双位控制	33
1.1.1 过程控制系统的组成及分类	1	3.2.2 比例控制	34
1.1.2 过程控制系统的发展概况	3	3.2.3 积分控制	37
1.2 过程控制系统方块图	4	3.2.4 微分控制	38
1.3 过程控制系统的过渡过程和品质指标	4	3.3 控制器	41
1.3.1 过程控制系统的静态与动态	4	3.3.1 模拟式调节器	42
1.3.2 过程控制系统的过渡过程	5	3.3.2 数字式调节器	45
1.3.3 过程控制系统的品质指标	6	3.3.3 可编程控制器	47
例题与解答	7	3.3.4 虚拟调节仪表	49
1.3.4 影响控制系统过渡过程品质指标的 主要因素	8	3.4 执行器	49
1.4 管道及仪表流程图 (P&ID)	9	3.4.1 执行器的构成	49
1.4.1 图形符号	9	3.4.2 执行器的分类及特点	50
1.4.2 字母代号	10	3.4.3 执行器的作用方式	50
1.4.3 仪表位号	11	3.4.4 气动执行器	50
1.4.4 仪表符号实例	11	例题与解答	59
本章小结	12	本章小结	59
思考题与习题	13	思考题与习题	60
第 2 章 过程控制系统的数学建模	14	第 4 章 单回路控制系统	61
2.1 数学建模	14	4.1 单回路控制系统概述	61
2.1.1 基本概念	14	4.2 被控变量的选择	62
2.1.2 建立数学模型的目的	14	4.3 操作变量的选择	63
2.1.3 过程数学模型的求取方法	15	4.3.1 操作变量	63
2.1.4 过程被控变量的选择	16	4.3.2 对象特性对选择操作变量的 影响	63
2.1.5 过程输入变量的选择	16	4.3.3 操作变量的选择原则	64
2.2 过程建模	17	4.4 测量元件及变送器特性的影响	65
2.3 试验建模	20	4.4.1 测量元件的时间常数	65
2.3.1 时域法建模	21	4.4.2 测量元件的纯滞后	65
2.3.2 矩形脉冲法	22	4.4.3 信号的传送滞后	66
2.4 描述对象特性的参数	22	4.4.4 克服变送器滞后特性的办法	66
2.4.1 放大系数 K	22	4.5 调节阀 (执行器) 的选择	67
2.4.2 时间常数 T	24	4.6 控制器控制规律的选择	67
2.4.3 滞后时间 τ	26	4.6.1 控制器控制规律的确定	67
例题与解答	29	4.6.2 控制器正、反作用的确定	69
本章小结	30	4.7 控制器参数的工程整定	70
思考题与习题	31	4.7.1 临界比例度法	71
第 3 章 控制器和执行器	32	4.7.2 衰减曲线法	71
3.1 控制器和执行器概述	32	4.7.3 经验凑试法	72
3.2 基本控制规律及其对系统过渡过程的 影响	32	例题与解答	73
		本章小结	76

思考题与习题	76	6.8 其他新型控制系统和系统故障诊断	116
第5章 复杂控制系统	78	6.8.1 推断控制	116
5.1 串级控制系统	78	6.8.2 鲁棒控制	117
5.1.1 概述	78	6.8.3 故障检测与故障诊断	117
5.1.2 串级控制系统的工作过程	80	本章小结	119
5.1.3 串级控制系统的特点	82	思考题与习题	119
5.1.4 串级控制系统中副回路的确定	82	第7章 典型过程单元的控制方案	121
5.1.5 主、副控制器控制规律及正、反作用的选择	84	7.1 流体输送设备的控制方案	121
5.1.6 控制器参数的工程整定	85	7.1.1 离心泵的控制方案	121
5.2 均匀控制系统	86	7.1.2 往复泵的控制方案	122
5.2.1 均匀控制的目的	86	7.1.3 空气压缩机的控制方案	123
5.2.2 均匀控制方案	87	7.1.4 离心式压缩机的防喘振控制	124
5.3 比值控制系统	88	7.2 传热设备的自动控制	127
5.3.1 概述	88	7.2.1 两侧均无相变化的换热器控制方案	127
5.3.2 比值控制系统的类型	89	7.2.2 载热体进行冷凝的加热器自动控制	129
5.4 前馈控制系统	91	7.2.3 冷却剂进行汽化的冷却自动控制	131
5.4.1 前馈控制系统及其特点	91	7.3 精馏塔控制方案	132
5.4.2 前馈-反馈控制	92	7.3.1 工艺要求	132
5.4.3 前馈控制的应用场合	93	7.3.2 精馏塔的干扰因素	132
5.5 选择性控制系统	93	7.3.3 精馏塔的控制方案	133
5.5.1 基本概念	93	7.4 化学反应器的控制	137
5.5.2 选择性控制系统的类型	94	7.4.1 化学反应器的控制要求	137
5.5.3 积分饱和及其防止	95	7.4.2 釜式反应器的温度自动控制	137
5.6 分程控制系统	96	7.4.3 固定床反应器的自动控制	138
5.6.1 概述	96	7.4.4 流化床反应器的自动控制	139
5.6.2 分程控制的应用场合	97	7.5 工业锅炉的控制方案	140
5.6.3 分程控制中的几个问题	99	7.5.1 锅炉设备的控制要求	140
例题与解答	99	7.5.2 锅炉汽包水位的控制	141
本章小结	104	7.5.3 锅炉燃烧过程的控制	145
思考题与习题	104	7.5.4 过热蒸汽温度控制	146
第6章 新型控制系统	105	例题与解答	146
6.1 自适应控制系统	105	本章小结	148
6.1.1 变增益自适应控制系统	106	思考题与习题	149
6.1.2 模型参考自适应控制系统	106	第8章 过程控制系统基本实训	150
6.1.3 直接优化目标函数的自适应控制系统	106	8.1 实训设备概述	150
6.1.4 自校正控制系统	106	8.1.1 实验装置特点	150
6.2 预测控制系统	107	8.1.2 技术规格	150
6.2.1 预测控制的基本结构	107	8.1.3 画面说明及操作说明	151
6.2.2 预测控制的特点及应用	108	8.1.4 装置使用注意事项	154
6.3 智能控制系统	109	8.2 简单过程控制系统	155
6.4 专家控制系统	110	8.3 复杂过程控制系统	164
6.5 模糊控制系统	111	第9章 智能温度控制系统	176
6.6 神经网络控制系统	112	9.1 智能温度控制系统概述	176
6.7 解耦控制系统	114		

9.2 专家自整定温度控制器	177	10.2.3 实训的内容	189
9.2.1 XMA5000 的功能特点	177	10.2.4 实习进程计划	189
9.2.2 常规 PID 参数设置	178	10.2.5 实习纪律要求	190
9.2.3 调节器面板接线	180	10.2.6 实习报告要求	190
9.3 温度传感器的选择与使用	180	10.2.7 实习考核	190
9.4 串口通信部分	181	综合实训示例	190
9.5 仪表使用注意事项	183	10.3 课程设计报告书写格式	191
第 10 章 小型电锅炉综合实训课题		10.3.1 设计报告的组成	191
举例	184	10.3.2 版式说明	192
10.1 小型电锅炉过程控制课程设计	184	附录	194
10.1.1 课程设计的性质、地位和任务	184	附录 1 拉氏变换对照	194
10.1.2 课程设计目标	184	附录 2 被测变量及仪表组合功能示例	195
10.1.3 时间分配	185	附录 3 工艺流程图上设备和机器图例符号	196
10.1.4 考核方式和成绩评定标准	185	附录 4 工艺流程图上的物料代号	198
10.1.5 课程设计参考选题与要求	185	附录 5 工艺流程图上管道、管件、阀门及附件图例	198
10.1.6 参考文献	187	附录 6 控制阀气开、气关形式选择参考	199
课程设计任务书	187	参考文献	200
10.2 小型电锅炉过程控制综合实训	189		
10.2.1 实训的目的、任务和要求	189		
10.2.2 实训的教学要求	189		

第 1 章 过程控制系统概述

学习目标

- 了解过程控制系统的基本概念。了解过程控制系统的组成和分类，读懂控制流程图，认识控制流程图的图形符号。掌握过程控制系统的过渡过程和品质指标。

1.1 过程控制系统基本概念

过程控制系统是以表征生产过程参数为被控变量，使之接近给定值（设定值）或保持在给定范围内的自动控制系统。“过程”是指在生产装置或设备中进行的物质和能量的相互作用和转换过程。例如，锅炉中蒸汽的产生、分馏塔中原油的分离等。而表征过程的主要参数有温度、压力、流量、液位、成分、浓度等。通过对过程参数的控制，可使生产过程更加安全，生产的产品产量增加、质量提高和能耗减少。

1.1.1 过程控制系统的组成及分类

过程控制系统中的控制是在人工控制基础上发展起来的，下面通过一个示例，分析人工控制操作，并与过程控制对比，以更直观地理解过程控制系统。

图 1-1 所示是一个液体罐，在生产中常用来作为一般的中间容器或成品罐，从前一个工序来的物料连续不断地进入到罐体中，而罐中的液体又送到下一工序进行加工或包装，当流入量 Q_i （或流出量 Q_o ）波动时会引起罐内液位的波动，严重时会出现溢出或被抽空。解决这一问题的最简单办法，是以储槽液位为操作指标，以改变出口阀门开度为控制手段，当液位上升时，将出口阀门开度加大，液位上升越大，出口阀门开口也大；反之，当液位下降时，则关小出口阀门，液位下降越多，开口阀开度越小。为了使液位上升下降都有足够的余地，选择玻璃管液位计指示中间的某一点为正常工作时的液位高度，通过改变出口阀门开度而使液位保持在这个高度上，这样就不会出现罐体中液位过高溢出或液体抽空事故。总结该

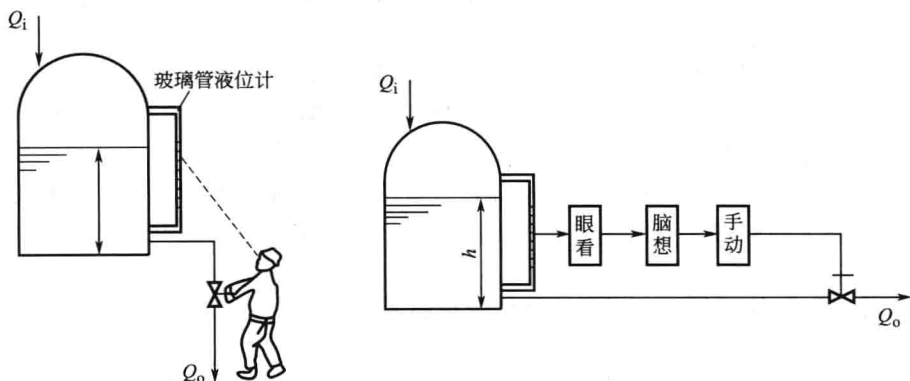


图 1-1 人工操作过程示意图

示例可知，操作人员所进行的工作使用了以下三个器官工具。

(1) 眼睛 用眼睛观察玻璃管液位计（测量元件）中液位的高低，并通过人体的神经网络将信息传递到大脑。

(2) 大脑 大脑根据眼睛看到的液位高度，进行思考、判断，得出与要求液位值的偏差，然后根据已有的操作经验或操作手册发出动作指令。

(3) 手臂 根据大脑发出的指令，通过手去改变阀门开度，以影响出口流量 Q_0 ，从而使液位保持在所需的高度。

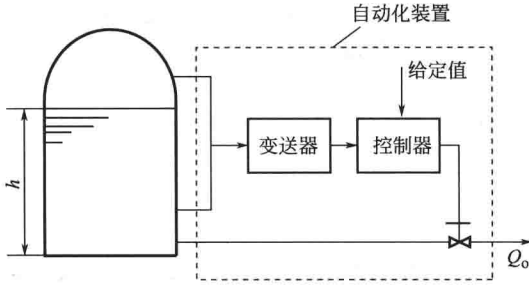


图 1-2 液位自动控制系统

人眼、脑、手三个器官分别承担了该装置中检测、运算处理和执行三个作用，来完成液位测量，求偏差，分析偏差方向及纠正偏差的操作过程，由于人工控制受到个人生理的限制，因此在控制速度、精度及准确度上都难以满足现代工业生产的需要。为了提高控制精度和减轻劳动强度，经过多年不懈的努力，发展出一套自动化装置代替上述人工操作，相同的工艺过程，由液体罐和自动化装置构成一套自动化控

制系统，如图 1-2 所示。

由人工操作装置可知，自动控制要完成液位保持的相同工艺，同样需要有模拟人眼、脑、手功能的三个部分，分别如下。

(1) 测量元件与变送器 其功能是测量液位并将液位的高低转化为一种特定的、有方向的、统一的输出信号（如电流、电压信号等），完成“眼睛”的功能。

(2) 自动控制器 其功能是接收变送器送来的信号，与工业需要保持的液位高度比较得出偏差及方向，并按照某种运算规律算出结果，然后将此结果用特定的信号发送出去，完成“大脑”的功能。

(3) 执行器 通常指控制阀或变频器等能自动地根据控制器送来的信号执行既定工作的器件，本例中控制阀与普通阀门的功能一样，控制器信号调节阀门的开启度，完成“手臂”的操作功能。

正因为该自动化装置具有人工控制操作中的人眼、脑、手的类似功能，所以，它能完成自动控制罐体液位高低的任务。

由上述示例分析知道，一般的过程控制系统是由被控对象和自动控制装置两大部分或被控对象、测量变送器、控制器、控制阀四个基本环节所组成。

过程控制系统有多种分类方法，每一种分类方法都反映了控制系统某一方面的特点。从控制系统的基本结构分类，可分为闭环控制系统和开环控制系统。为了便于分析反馈控制系统的特性，按设定值的形式不同，过程控制系统分为以下三种类型。

(1) 定值控制系统 所谓定值控制系统，是指过程控制系统的设定值恒定不变。工艺生产中要求控制系统的被控变量保持在一个标准值上不变，这个标准值就是设定值（也称期望值）。

在如图 1-1 所示的示例中，对罐体液位的控制系统就是一个定值控制系统，过程控制系统大多数都属于定值控制系统。由于引起这类系统输出参数（被控变量）波动的原因不是设定值的改变，而是各种扰动，系统的任务就是要克服扰动对被控变量的影响，所以也把以扰动信号为输入的系统叫做定值控制系统。

(2) 随动控制系统 随动控制系统也称跟踪控制系统,这类系统的设定值无规律地变化,是未知的时间函数,控制系统的任务是使被控量尽快地、准确地跟踪设定值变化,如全自动高炮防空系统就是典型的随动控制系统。

(3) 程序控制系统 程序控制系统的设定值有规律地变化,是已知的的时间函数。这类系统多用在间歇反应过程,酿酒工业中对发酵温度的控制就是这类系统。

上述各种反馈控制系统中,各环节的传递信号都是时间的函数,因而统称为连续控制系统。若系统中有一个或一个以上环节的传递信号是断续的,则这类系统为离散控制系统,计算机控制系统就是属于这类系统,但系统各环节输入输出特性是线性时,则称这种系统为线性控制系统,反之为非线性控制系统。根据系统输入输出信号的数量,可分为单信号输入、单信号输出系统和多信号输入、多信号输出系统等。

在石油、化工、电力、冶金、轻工、制药等工业生产过程中,定值控制系统占大多数,因此,研究的重点在线性、连续、单信号输入、单信号输出的定值控制系统上。

1.1.2 过程控制系统的发展概况

过程控制最早出现在20世纪40年代。当时只是利用一些检测仪表来监视生产。操作工人根据仪表的指示凭借经验进行人工操作,其弊端很多:首先,有些行业现场环境恶劣,可能造成人身危险;其次,高温、高压、深冷、真空等超常的工作条件人工无法控制,不能保证产品的质量和产量。于是在20世纪50~60年代,出现了过程控制系统,其以经典控制理论的最辉煌的成果之一PID(比例积分微分)控制规律为基本算法,以传递函数为基础对由控制仪表构成简单的控制回路进行分析,实现过程控制系统。

PID控制规律原理简单,易于实现,对没有时间延迟的单回路控制系统极为有效。到目前为止,在工业过程控制中,很多系统仍使用PID控制规律。其对系统的一般处理方法是将一个复杂过程分解为若干个简单的过程,然后采用单输入、单输出的控制系统,完成既定任务。主要由于此时生产自动化水平比较低级,理论上也尚不完整,实现控制的手段主要是由单个传感器、控制器和执行器组成。

20世纪60~70年代,由于生产的发展,生产过程向着大型化、连续性方向发展,而被控对象的要求也日趋复杂,原有简单控制的模式已不能满足要求,为适应工业生产控制的要求,一些复杂的控制系统得到开发,并在实践中获得了良好的控制效果。而在这个阶段,人们研究出了现代控制理论,这为新的控制技术提供了理论基础。它以状态空间为分析基础,包括以最小二乘法为基础的系统辨识,以极小值原理和动态规划为基础的优化控制和以卡尔曼滤波理论为核心的最优估计三个部分。为解决大规模复杂系统的优化与控制问题,现代控制理论和系统理论相结合,逐步形成了大系统理论(Mohammad, 1983)。同时,基于专家知识的专家系统、模糊控制、人工神经网络控制、学习控制和基于信息论的智能控制应运而生,并在很多领域得到了广泛的应用。这一时期大规模集成电路和微处理器的发展,也大大加速了工业计算机的商品化和计算机技术的普及和发展。作为全新的工业生产过程控制系统,集计算机技术、控制技术、通信技术和图形显示技术于一体的一种计算机控制系统DCS(集散控制系统)产生。

20世纪80年代以后的十几年里,在DCS的基础上实现了先进控制和优化控制。在硬件上采用上位机和DCS或电动单元组合仪表相结合,构成两级计算机优化与控制。伴随计算机及网络技术的发展,DCS出现了开放式系统,实现多层次计算机网络构成的计算机集成过程系统(Computer Integrated Process System, CIPS)。而自动化的实现工具也由DCS发展到了现场总线控制系统(Fieldbus Control System, FCS)。同时,控制理论和其他学科相互渗透,从而形成了以大系统理论和智能控制理论为代表的所谓第三代控制理论。直到现

在，尽管它还处于发展和完善过程中，但已受到极大的重视和关注，对过程控制系统的发展起到极大的推动作用。

1.2 过程控制系统方块图

在研究过程控制系统时，为便于对系统分析研究，一般都用方块图来表示控制系统的组成，方块图中每个方块代表系统中的一个环节，方块之间用一条带有箭头的直线连接，表示它们之间信号的相互联系，箭头指示信号的传递方向，直线上的字母说明传递信号的名称。另外，箭头还具有单向性，即方块的输入只能影响输出，而输出不能影响输入。还需要强调的是方块图中各线段表示的是信号关系，而不是具体的物料或者能量，方块图是过程控制系统分析中一个常用工具和重要的概念。

现在通过液位控制的例子及其方块图（如图 1-3 所示），说明过程控制系统中常用术语的意义。

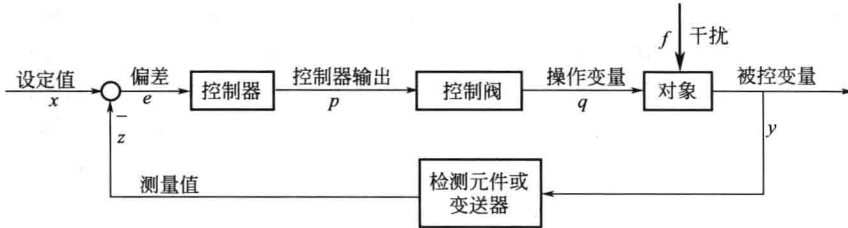


图 1-3 液位自动控制系统方块图

(1) 对象 它是被控制的工艺设备、机器或生产过程。

(2) 被控变量 y 它是指生产设备或过程运行是否正常而需要加以控制的温度、压力、流量、液位、成分等工艺变量。如图 1-1 中的水槽液位。

(3) 设定值 x 它是指与被控变量 y 相对应，由人为设定的信号值。

(4) 偏差 e 它是指设定值与被控变量 y 的实际测量值的差，其中，当实际测量值大于设定值时，产生的偏差称为正偏差；当实际测量值小于设定值时，其偏差称为负偏差。

(5) 操作变量 q 受控制装置操作，并使被控变量保持在设定值的物理量或能量，被称为操作变量。

(6) 干扰 f 在生产过程中，除操作变量外，作用于过程并引起被控变量变化的因素，统称为干扰（或扰动）。

(7) 检测元件或变送器 为了观察被控变量在干扰作用下是否在预期的设定范围之内，通常利用检测元件或变送器对被控变量进行测量，把系统输出信号转换成标准信号引回到系统输入端。从信号传递角度来看，该环节常常与系统其他环节构成一个闭合回路，形成反馈支路。

(8) 控制器 也称调节器。它将被控变量的设定值 x 与测量值 z 进行比较，得出偏差信号 e ，并按既定规律给出控制信号 p 。

1.3 过程控制系统的过渡过程和品质指标

1.3.1 过程控制系统的静态与动态

在工业生产中，自动控制系统的目的就是希望将被控变量稳定在某一不变的设定数值

上, 这只有当进入被控对象的物料量 (或能量) 和流出系统的物料量 (或能量) 相等时才可能, 此时整个体系处于一个相对稳定的状态。通常把被控变量不随时间变化的稳定状态称为系统的静态。但是由于干扰的客观存在, 在干扰的作用下, 被控变量会偏离设定值, 使系统失去之前的平衡状态, 而控制量的作用就是调整操作变量, 力图消除干扰影响, 使被控变量重新稳定在所设定的范围内。从干扰发生开始, 经过控制, 直到系统重新建立新平衡, 在这段时间中, 整个系统的各个环节和信号都处于变动之中。这种被控变量随时间变化的不稳定状态称为系统的动态。

在自动化工作中, 了解系统的静态特征是必要的, 但是, 作为自动化生产过程, 了解系统的动态过程更为重要。因为在生产过程中, 干扰是客观存在且无法避免的, 例如生产过程中加工顺序之间的相互影响; 电压、气压的波动; 环境的影响等, 它们的存在会破坏系统的平衡状态, 使被控量偏离原有的平衡处于不稳定状态。因此, 在工作过程中, 自动化装置需要不断地施加作用对抗或抵消干扰的影响, 时时刻刻处于动态调节的过程之中, 显然, 研究过程控制系统的重点是要研究系统的动态。

1.3.2 过程控制系统的过渡过程

图 1-4 所示是简单控制系统的方块图。设系统原处于稳定平衡状态, 系统中的各个信号不随时间的变化而变化, 在某一时刻 t_0 , 有一干扰 f 作用于对象, 使系统的输出 y 发生变化, 系统进入动态过程。由于自动控制系统的负反馈作用, 经过一段时间的调节之后, 系统应重新获得平衡状态, 这一动态过程结束。将一个过程控制系统在外部因素 (干扰) 作用下从原有稳定状态过渡到另一个稳定状态的过程, 称为过程控制系统的过渡过程。

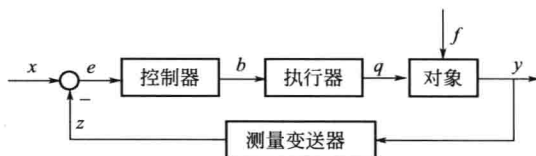


图 1-4 简单控制系统的方块图

过程控制系统中输出变量的变化是由于输入变量 (设定或者干扰) 引起的, 所以输出是输入的时间响应, 时间响应对应着过渡过程, 稳态响应对应着过渡过程的静态, 瞬态响应对应着过渡过程的动态。

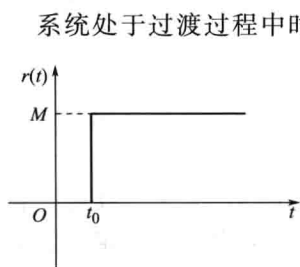


图 1-5 阶跃干扰作用

系统处于过渡过程中时, 被控变量是随时间变化的, 了解过渡过程中被控变量的变化规律对研究过程控制系统是十分重要的。此外, 由过渡过程可知, 被控变量随时间的变化规律首先取决于系统受到的干扰形式。生产中, 干扰没有固定的形式, 其随机性较强, 在分析和设计控制系统时, 为了安全和方便, 常选择一些定型的干扰形式, 验证系统的控制性能, 其中常用的是阶跃干扰, 如图 1-5 所示。

由图 1-5 可以看出, 所谓阶跃干扰就是在某一瞬间 t_0 , 干扰 f 突然以阶跃形式加到系统上, 并继续保持在这个幅度。采取阶跃干扰的形式来研究过程控制系统, 是因为考虑到这种形式的干扰比较突然, 对系统的稳定性冲击比较大, 系统比较危险, 它对被控变量的影响也最大。如果一个控制系统能够有效地克服这种类型的干扰, 那么对于其他比较缓和的干扰也一定能很好地克服, 同时, 这种干扰的形式简单, 易于实现, 便于分析、实验和计算。

一般来说, 过程控制系统在阶跃干扰作用下的过渡过程有以下几种形式, 如图 1-6 所示。图中 $y(t)$ 表示被控变量。

(1) 发散振荡过程 如图 1-6(a) 所示的被控变量变化幅度越来越大, 表现为发散振荡

的过渡过程。说明了一旦扰动进入系统，经控制器控制以后，被控变量的振荡逐渐增大，越来越偏离设定值，最后超出限度而出现事故。这属于一种不稳定具有破坏性的危险控制系统，是人们所不希望的。

(2) 等幅振荡过程 如图 1-6(b) 所示的被控变量的变化为一等幅振荡的过渡过程，既不衰减也不发散，介于稳定与不稳定之间。这种控制系统一般被认为是一种不稳定状态而不采用，只是对于某些对控制质量要求不高的场合，如果被控变量允许在工艺许可的范围之内振荡（主要指在位式控制时），这种控制形式可以采用。

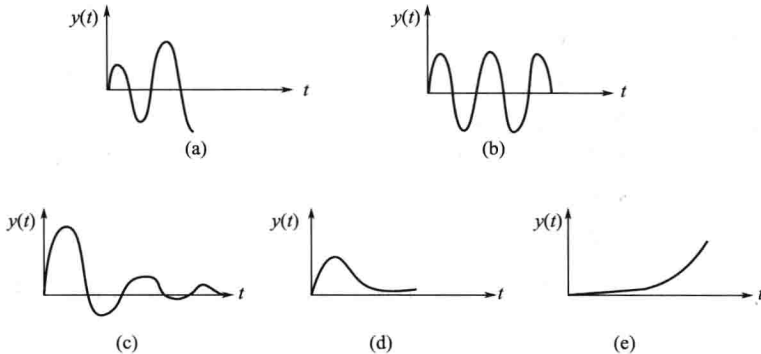


图 1-6 过渡过程的基本形式

(3) 衰减振荡过程 如图 1-6(c) 所示的就是一个衰减振荡过渡过程。被控变量经过几个周期波动之后就重新稳定下来，符合对系统的基本要求，稳定、迅速、准确，这是人们所希望的。

(4) 非振荡衰减过程 如图 1-6(d) 所示的是一个非衰减的单调衰减过渡过程。被控变量偏移设定值以后，要经过相当长的时间才能接近设定值。非振荡衰减过程符合稳定要求，但是不够迅速、不够理想，因此一般不宜采用，只有当生产上不允许被控变量有较大幅度波动时采用。

(5) 非振荡发散过程 如图 1-6(e) 所示的是一个非振荡发散的过渡过程。它与发散振荡过程同属于不稳定的系统，是人们不希望的。

1.3.3 过程控制系统的品质指标

控制系统的过渡过程是衡量控制系统品质的依据，由于在多数情况下，都希望得到衰减振荡过程，所以取衰减振荡过程形式来讨论过程控制系统的品质指标。

假定过程控制系统在阶跃输入作用下，被控变量的变化曲线如图 1-7 所示，这属于衰减振荡的过渡过程。图上横坐标 t 为时间，纵坐标 y 为被控变量离开设定值的变化量。假定在时间 $t=0$ 之前，系统稳定，且被控变量等于设定值，即 $y=0$ ；在 $t=0$ 瞬间，外加阶跃干扰作用，系统的被控变量开始按衰减振荡的规律变化，经过相当长的时间后， y 逐渐稳定在 y_{∞} 值。

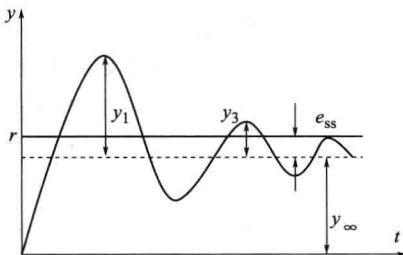


图 1-7 过渡过程品质指标示意图

通过分析如图 1-7 所示的过渡过程曲线，来评价该过程控制系统的质量时，常采用下列几个品质指标。

(1) 最大偏差或超调量 最大偏差是指在过渡过程中，被控变量偏离设定值的最大数值。在衰减振荡过程中，最大偏差就是第一波的峰值，在图 1-7 中以

y_1 表示。最大偏差表示系统瞬间偏离设定值的最大程度，若偏离越大，偏离的时间越长，即表明系统离开规定的工艺参数指标越远，这对稳定正常生产是不利的，因此最大偏差可以作为衡量过程控制系统的一个品质指标。一般来说，最大偏差越小越好，特别是对于一些有约束条件的系统，如化学反应的化合物爆炸极限、催化剂烧结温度极限等，都会对最大偏差的允许值有所限制。同时考虑到干扰连续出现，偏差可能叠加式，对最大偏差的允许值就更为设限。所以，应根据工艺情况慎重选择最大偏差允许值。

有时也可以用超调量来表征被控变量偏离设定值的程度，在图 1-7 中超调量以 $\sigma = y_1/y_\infty$ 表示。

(2) 衰减比 衰减比是衡量控制系统稳定性的一个动态指标。它是指过渡过程曲线同方向相邻两个波峰之比。若第一个波与同方向第二波的波峰分别为 y_1 、 y_3 ，则衰减比 $n = y_1/y_3$ ，习惯表示为 $n:1$ 。可见 n 越小， y_3 越接近 y_1 ，过渡过程接近等幅振荡，系统不稳定；而 n 越大，过渡过程越接近单调过程，过渡过程时间太长。由操作经验总结，衰减比为 $(4:1) \sim (10:1)$ 为宜。

(3) 余差 被控变量所达到的新的稳定值与设定值之间的偏差叫余差，也可认为余差就是过渡过程结束时的残余偏差，图 1-7 中以 y_∞ 表示，偏差的数值可正可负。在生产中，设定值是生产的技术指标，所以要求被控变量越接近设定值越好，即余差 y_∞ 越小越好。但是在实际生产中，不同的被控对象对余差大小有不同的要求，如对于某些液位调节要求不高，允许液位有较大的变化范围时，余差值可相应变大；而对化学反应中的温度控制，一般要求较高，要求尽量消除余差，所以，对余差的具体要求要根据不同的过程控制系统具体分析。

(4) 过渡时间 从干扰作用发生的时刻起，直到系统重新建立平衡为止，过渡过程所经历的时间叫过渡时间。严格地讲，对于具有一定衰减比的衰减振荡过渡过程来说，要完全达到新的平衡状态需要无限长的时间，实际上，由于仪表灵敏度的限制，当被控变量接近稳定值时，指示值就基本上不再改变了。因此，一般是在稳定值的上下规定一个小的范围，当被控变量进入这一范围并不再跃出时，就认为被控变量已经达到新的稳定值，或者说过渡过程已经结束。这个范围一般定为稳定值的 $\pm 5\%$ ，按照这个规定，过渡时间就是从干扰开始作用之时起，直至被控变量进入新稳定值的 $\pm 5\%$ 的范围内且不再跃出时为止经历的时间。过渡时间短，表示被控变量进入过程进行得比较迅速，这时即使干扰频繁出现，系统也能适应，系统控制质量就高；反之，过渡时间太长，第一个干扰引起的过渡尚未结束，第二个干扰就已经出现，几个干扰的影响叠加起来，就可能使系统无法满足生产要求。

(5) 振荡周期或频率 过渡过程同向波峰（或波谷）之间的间隔时间叫振荡周期或工作周期，其倒数称为振荡频率。在衰减比相同的情况下，周期与过渡时间成正比，一般希望振荡周期短一些为好。

例题与解答

【例题 1-1】 某石油裂解炉工艺要求的操作温度为 $(890 \pm 10)^\circ\text{C}$ ，为了保证设备的安全，在过程控制中，辐射管出口温度偏离设定值最高不得超过 20°C 。温度控制系统在单位阶跃干扰作用下的过渡过程曲线如图 1-8 所示。试分别求出最大偏差、余差、衰减比、振荡周期和过渡时间等过渡过程质量指标。

解： (1) 最大偏差： $A = 901.8 - 890 = 11.8$ ($^\circ\text{C}$)。

(2) 余差： $C = 898 - 890 = 8$ ($^\circ\text{C}$)。

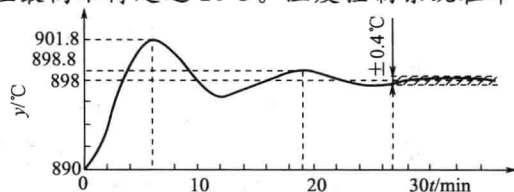


图 1-8 裂解炉温度控制系统过渡过程曲线

(3) 第一个波峰值: $B = 901.8 - 898 = 3.8$ ($^{\circ}\text{C}$); 第二个波峰值: $B' = 898.8 - 898 = 0.8$ ($^{\circ}\text{C}$), 衰减比: $n = 3.8 : 0.8 = 4.75 : 1$ 。

(4) 振荡周期: $T = 19 - 6 = 13$ (min)。

(5) 过渡时间与规定的被控变量限制范围大小有关。假定被控变量进入额定值的 $\pm 5\%$, 就可以认为过渡过程已经结束。那么限制范围为 $(898^{\circ}\text{C} - 890^{\circ}\text{C}) \times (\pm 5\%) = \pm 0.4$ ($^{\circ}\text{C}$), 这时, 可在新稳态值 (898°C) 两侧以宽度为 $\pm 0.4^{\circ}\text{C}$ 划一区域, 图 1-8 中以画有阴影线的区域表示, 只要被控变量进入这一区域且不再跃出, 过渡过程就可以认为已经结束。因此, 从图上可以看出, 过渡时间大约为 $t_s = 27$ min。

【例题 1-2】 某化学反应器工艺规定操作温度为 $(900 \pm 10)^{\circ}\text{C}$ 。考虑安全因素, 控制过程中温度偏离给定值最大不得超过 80°C 。现设计的温度定值控制系统, 在最大阶跃干扰作用下的过渡过程曲线如图 1-9 所示。试求该系统的过渡过程品质指标: 最大偏差、超调量、衰减比和振荡周期。该控制系统能否满足题中所给的工艺要求?

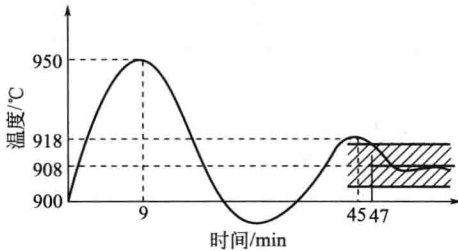


图 1-9 过渡过程曲线

解: 由反应器过渡过程曲线可知:

最大偏差 $A = 950 - 900 = 50$ ($^{\circ}\text{C}$)

超调量 $B = 950 - 908 = 42$ ($^{\circ}\text{C}$)

衰减比 n :

第一个波峰值与新稳定值之差 $B = 950 -$

$908 = 42$ ($^{\circ}\text{C}$); 第二个波峰值与新稳定值之差 $B' = 918 - 908 = 10$ ($^{\circ}\text{C}$); $n = B/B' = 42 : 10 = 4.2 : 1$

振荡周期为同向两波峰之间的时间间隔, 故振荡周期 $T = 45 - 9 = 36$ (min)。因为最大偏差 $A = 50^{\circ}\text{C} < 80^{\circ}\text{C}$, 且新稳定值 908°C 符合题中要求的 $(900 \pm 10)^{\circ}\text{C}$, 故该控制系统能满足题中所给的工艺要求。

此外, 还有其他一些品质指标, 如过渡过程内被控变量的振荡次数, 以及从干扰开始起至第一个波峰时所需要的上升时间等, 这里不再一一介绍。

作为好的过程控制系统, 一般希望最大偏差或超调量小一些 (系统稳定性好), 余差小一些 (控制精度高), 振荡周期短一些 (控制速度快), 衰减比适宜, 但这些指标之间既相互矛盾, 又互相关联, 不能同时满足, 因此, 应根据具体情况分出主次, 优先保证主要指标, 且从实际需要出发, 不追求过分的偏高偏严, 否则会造成人力物力的巨大浪费, 甚至根本无法实现。

1.3.4 影响控制系统过渡过程品质指标的主要因素

一个过程控制系统包括两大部分, 即工艺过程部分 (被控对象) 和自动化装置。前者是指与该过程控制系统有关的部分; 自动化装置则指为实现自动控制所必需的自动化仪表设备, 通常包括测量与变送、控制器和执行器三部分。自动化装置的选择主要依据对象 (控制工艺过程及过程量) 的性质, 因此, 影响控制系统过渡过程品质指标的主要因素、过渡过程品质的好坏, 很大程度上决定于对象的性质。在对象

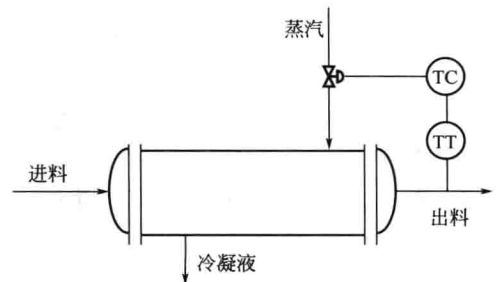


图 1-10 蒸汽加热器温度控制系统

特性基本确定的前提下，自动化装置应按对象性质加以选择和调整，如果自动化装置的选择和调整不当，也直接影响过程控制的质量。

下面通过蒸汽加热器温度控制系统来说明影响对象性质的主要因素。如图 1-10 所示，从加工工艺上分析可知，影响过程控制系统过渡过程品质的主要因素有：换热器的负荷的波动；换热器设备结构、尺寸和材料等；换热器内的换热情况、散热情况及结垢程度等。

针对不同的过程控制系统，依据对象的具体情况进行具体分析。此外，在控制系统运行过程中，自动化装置的性能一旦发生变化，如阀门失灵、测量失真，也要影响控制质量。

1.4 管道及仪表流程图 (P&ID)

1.4.1 图形符号

(1) 测量点 取样点(测量点)是由工艺设备轮廓线或工艺管线引到仪表圆圈的连接线的起点，一般无特定的图形符号，如图 1-11 所示。必要时，检测元件也可以用象形或图形符号表示。

(2) 连接线 通用的仪表信号线均以细实线表示。特别注意，连接线表示交叉及相接时，采用如图 1-12 所示的形式，必要时也可用加箭头的方向表示信号的方向，在需要区分信号的种类时，可用虚线表示电信号；在实线上打双斜线表示气信号以示区别。



图 1-11 测量点



图 1-12 连接线的表示法

(3) 仪表的图形符号 图形符号用于表示仪表的类型、安装位置、操作人员可否监控等功能。仪表的图形符号是一个细实线圆圈，直径约 10mm，处理两个或多个被测变量、具有相同功能(如多点流量指示记录仪)或不同功能(如指示记录控制器)的复式仪表，可用两个相切的圆圈表示。但当两个测量点在图纸上距离较远或不在同一张图纸上时，分别用细实线和细虚线圆圈相切表示，如图 1-13 所示。对于不同的仪表安装位置的图形符号，如表 1-1 所示。











图 1-13 单体仪表与复式仪表图形符号

表 1-1 仪表的基本图形符号

类别	安装在现场正常情况 操作员不能监控	安装在主操作台正常 情况操作员可监控	安装在盘后 或不与 DCS 通信	安装在辅助设备正常 情况操作员可监控
仪表				
分散控制 共用显示 共用控制				

续表

类别	安装在现场正常情况 操作员不能监控	安装在主操作台正常 情况操作员可监控	安装在盘后 或不与 DCS 通信	安装在辅助设备正常 情况操作员可监控
计算机				
PLC				

1.4.2 字母代号

在控制流程图中，用来表示仪表的小圆圈的上半圆内，一般写有两位（或两位以上）字母，并且同一字母在不同的位置、大小写不同时具有不同的含义或作用，当处于首字母时表示被测量变量或初始变量，而处于次位时作为修饰首位之用，此时用小写字母表示；对于后续字母，则表示仪表的功能，因此不能脱离字母所处的位置来说某个字母的含义。常用被测量和仪表功能的字母代号如表 1-2 所示。

例如：PSV 表示压力安全阀，P 表示被测变量是压力，S 表示具有安全功能，V 表示控制阀；TT 表示温度变送器，第一个字母 T 表示被测变量是温度，第二个字母 T 表示变送器；TS 表示温度开关，T 表示温度，S 表示开关；ST 表示转速变送器，S 表示被测变量是转速，T 表示变送器。

后续字母 Y 表示该仪表具有继电器、计算器或转换器的功能。例如，可以是一个放大器或气动继电器等，也可以是一个乘法器，或加法器，或实现前馈控制规律的函数关系等，也可以是电信号转换成气信号的电气转换器，或频率-电流转换器或其他转换器。

在 P&ID 中，一个控制回路可以用组合字母表示。例如，一个温度控制回路可表示为 TIC，或简化为 T。它表示该控制回路由 TT 温度变送器、TE 温度检测元件、TC 温度控制器、TI 温度指示仪表、TY 电气阀门定位器和 TV 气动薄膜控制阀组成。

表 1-2 常用被测量和仪表功能的字母代号

英文字母	首位字母		后续字母		
	被测、被控或引发变量	修饰词	读出功能	输出功能	修饰词
A	分析	—	报警	—	(供选用)
B	烧嘴、火焰	—	(供选用)	(供选用)	—
C	电导率	—	—	控制	—
D	密度	差	—	—	—
E	电压(电动势)	—	检测元件	—	—
F	流量	比率(比值)	—	—	—
G	位置或长度(尺寸)	—	玻璃、视镜、观测	—	—
H	手动	—	—	—	高
I	电流	—	指示	—	—
J	功率	扫描	—	—	—
K	时间、时间程序	变化速率	—	手-自动操作器	—
L	物位	—	指示灯	—	低