



全国工程硕士专业学位教育指导委员会推荐教材

控制系统分析与设计

——过程控制系统

Control System Analysis and Design
—— Process Control Systems

王福利 主编

Wang Fuli

<http://www.tup.com.cn>



清华大学出版社

全国工程硕士专业学位教育指导委员会推荐教材

控制系统分析与设计

——过程控制系统

Control System Analysis and Design
—— Process Control Systems

王福利 主编
Wang Fuli

清华大学出版社

内 容 简 介

本书在阐述过程控制系统相关基本概念的基础上,介绍常见的过程控制参数检测及控制仪表的基本原理及使用方法、被控过程的建模方法以及比较成熟且具有广泛应用前景的过程控制技术和方法。

本书是控制工程领域工程硕士教材,也可供普通高等院校自动化等相关专业的本科生和研究生参考。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

控制系统分析与设计——过程控制系统/王福利主编.—北京:清华大学出版社,2014

全国工程硕士专业学位教育指导委员会推荐教材

ISBN 978-7-302-33320-3

I. ①控… II. ①王… III. ①过程控制—控制系统—系统分析—研究生—教材 ②过程控制—控制系统—系统设计—研究生—教材 IV. ①TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 173621 号



责任编辑:王一玲

封面设计:常雪影

责任校对:梁毅

责任印制:王静怡

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编:100084

社总机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

课 件 下 载: <http://www.tup.com.cn>, 010-62795954

印 装 者:北京国马印刷厂

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×230mm 印 张:21.5 字 数:483千字

版 次:2014年1月第1版 印 次:2014年1月第1次印刷

印 数:1~2500

定 价:39.00元

产品编号:048845-01

前言

“控制系统分析与设计——过程控制系统”是控制及相关领域工程硕士培养过程中的核心课程之一。通过“控制系统分析与设计——过程控制系统”课程的学习,有助于工程硕士进一步系统地了解 and 掌握过程控制系统设计的基本理论、技术和方法,培养其进行过程控制系统分析与设计的能力。

过程控制技术从控制器特点来分可分为常规控制技术和先进控制技术,作为控制及相关领域工程硕士课程,本书在阐述过程控制系统相关基本概念的基础上,介绍常用过程参数检测及控制仪表的基本原理及使用方法、被控过程的建模方法以及比较成熟且具有广泛应用前景的过程控制技术和方法,全书共分为 9 章:

第 1 章简述过程控制系统的组成和分类、过程控制系统的特点以及过程控制系统的控制质量指标等。

第 2 章介绍测量的基本概念,讲述温度、压力、压差、物位、流量、成分测量仪表的基本原理,最后简单介绍过程控制仪表的发展及其在使用过程中常见的问题。

第 3 章主要介绍机理建模方法、试验建模方法、基于神经网络的数据建模方法以及机理与数据相结合的建模方法。

第 4 章介绍 4 种工业生产过程中常用的常规控制方法,包括单回路控制、串级控制、前馈控制以及比值控制。

第 5 章在阐述多变量过程控制系统的特点及相关概念的基础上,介绍几种简单的解耦控制方法,同时提出了解耦控制系统在实现过程中存在的问题。

第 6 章介绍推理控制系统的组成、模型误差对系统性能的影响、输出可测条件下的推理控制以及多变量推理控制系统的结构及推理控制器设计。

第 7 章以模型算法控制、动态矩阵控制和广义预测控制算法为例讲述预测控制系统的基本结构、核心思想以及算法原理。

第8章介绍过程优化的基本概念、优化目标的确定及最优设定值的求解方法。

第9章给出了过程控制系统实例,包括发酵过程、化学反应过程、加热炉过程及锅炉过程的控制。

全书由王福利主编,常玉清、杨英华、王小刚、何大阔、牛大鹏、谭帅参加编写。由于笔者的水平有限,书中难免存在一些不足和错误之处,欢迎读者批评指正。

编著者

2013年8月于东北大学

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 过程控制系统的组成和分类	1
1.1.1 过程控制系统的组成	1
1.1.2 过程控制系统的分类	4
1.2 过程控制系统的特点	6
1.3 过程控制系统的发展简况	7
1.4 过程控制系统的控制质量指标	8
本章小结	10
思考题与习题	11
第 2 章 过程参数的检测及控制仪表	12
2.1 测量的概念和测量方法	12
2.2 测量误差与仪表的精度等级	13
2.2.1 测量误差的分类	13
2.2.2 仪表的基本误差、精度等级及分度标准	14
2.2.3 检测仪表的组成及分类	16
2.3 温度测量仪表	17
2.3.1 温度的概念	17
2.3.2 工业常用接触式测温仪表	20
2.3.3 非接触式测温仪表	25
2.3.4 电动显示仪表	26
2.3.5 温度仪表的工程应用与选型原则	32
2.4 压力、压差和物位测量	33
2.4.1 压力、压差测量	33
2.4.2 物位测量	36

2.5	流量测量仪表	40
2.5.1	概述	40
2.5.2	差压式流量计	42
2.5.3	容积式流量计	45
2.5.4	涡轮流量计	46
2.5.5	涡街流量计	47
2.5.6	靶式流量计	49
2.5.7	转子流量计	50
2.5.8	电磁流量计	50
2.5.9	超声流量计	51
2.6	成分分析仪表	52
2.6.1	氧化锆氧分析仪	53
2.6.2	红外线气体分析器	55
2.7	过程控制仪表	58
2.7.1	概述	58
2.7.2	过程控制仪表的常见应用问题	59
	本章小结	62
	思考题与习题	62
第3章	被控过程的数学模型	64
3.1	概述	64
3.1.1	单变量与多变量的被控过程	64
3.1.2	自衡过程和无自衡过程	66
3.1.3	被控过程数学模型的表示方法	67
3.2	被控过程的机理建模	68
3.2.1	建立自衡过程的数学模型	68
3.2.2	建立无自衡过程的数学模型	73
3.3	被控过程的实验建模	75
3.3.1	测取阶跃响应曲线	75
3.3.2	测取矩形脉冲响应曲线	75
3.3.3	由阶跃响应曲线辨识被控过程的模型	76
3.4	基于神经网络的数据建模	81
3.4.1	人工神经元和人工神经网络	81
3.4.2	典型神经网络	83
3.4.3	基于 RBF 神经网络的数据建模方法	86

3.5 数据与机理相结合的建模方法	88
本章小结	90
思考题与习题	90
第4章 常规控制系统	92
4.1 单回路控制系统	92
4.1.1 概述	92
4.1.2 被控参数与控制参数的选择原则	94
4.1.3 调节阀(执行器)的选择	100
4.1.4 控制器的选择	106
4.1.5 控制器的参数整定	112
4.2 串级控制系统	118
4.2.1 概述	118
4.2.2 串级控制系统的特点	121
4.2.3 串级控制系统的设计	126
4.2.4 串级控制系统的应用	130
4.2.5 串级控制系统控制器参数的整定	133
4.3 前馈控制系统	136
4.3.1 概述	136
4.3.2 前馈控制系统的结构形式	139
4.3.3 前馈控制系统的设计与参数整定	146
4.3.4 前馈控制系统的应用	150
4.4 比值控制系统	155
4.4.1 概述	155
4.4.2 比值控制方案	156
4.4.3 比值控制系统的设计	158
4.4.4 比值控制系统的方案及参数整定	161
4.5 工程应用实例	165
4.5.1 单回路控制系统应用实例	165
4.5.2 串级控制系统实例分析	166
4.5.3 前馈控制系统应用举例	168
4.5.4 比值控制系统应用举例	170
本章小结	170
思考题与习题	171

第 5 章 多变量过程控制系统	174
5.1 概述	174
5.1.1 系统的耦合与解耦	174
5.1.2 多变量系统中普遍存在的耦合现象	177
5.2 相对增益	179
5.3 解耦设计方法	183
5.3.1 对角矩阵解耦法	183
5.3.2 单位矩阵解耦法	184
5.3.3 前馈补偿解耦法	185
5.3.4 具有纯滞后耦合对象的解耦方法	186
5.3.5 具有大滞后耦合对象的解耦方法	188
5.4 解耦控制系统在实现过程中存在的问题	190
5.4.1 解耦控制系统的稳定性问题	190
5.4.2 解耦网络模型的简化	191
本章小结	192
思考题与习题	192
第 6 章 推理控制	194
6.1 概述	194
6.2 推理控制系统	195
6.2.1 问题的提出	195
6.2.2 推理控制系统的组成	196
6.2.3 推理控制器的设计	199
6.2.4 推理-反馈控制系统	201
6.3 模型误差对系统性能的影响	202
6.3.1 扰动通道模型误差的影响	202
6.3.2 控制通道模型误差的影响	203
6.4 输出可测条件下的推理控制	205
6.4.1 系统构成	206
6.4.2 模型误差对系统性能的影响	207
6.5 多变量推理控制系统	207
6.5.1 多变量推理控制系统的基本结构	207
6.5.2 多变量推理控制器的 V 规范型结构	209

6.5.3	带时间滞后多变量系统的V规范型推理控制器设计	210
6.5.4	滤波矩阵的选择	219
6.6	推理控制系统应用实例	221
6.6.1	精馏塔塔顶丁烷浓度的推理控制	221
6.6.2	脱木素反应的推理控制	223
	本章小结	226
	思考题与习题	227
第7章	预测控制	228
7.1	概述	228
7.2	预测控制的基本原理	229
7.3	模型算法控制	231
7.3.1	预测模型	231
7.3.2	模型校正	232
7.3.3	参考轨迹	233
7.3.4	滚动优化	234
7.4	动态矩阵控制的基本原理	235
7.4.1	预测模型	235
7.4.2	反馈校正	236
7.4.3	滚动优化	236
7.4.4	动态矩阵控制的基本算法	237
7.4.5	动态矩阵控制的性能分析	244
7.5	广义预测控制的基本原理	247
7.5.1	预测模型	247
7.5.2	预测模型参数的求取	248
7.5.3	滚动优化	250
7.5.4	反馈校正	253
7.5.5	广义预测控制的稳定性	254
7.6	面向实际应用中的预测控制	255
7.6.1	前馈-反馈预测控制	255
7.6.2	串级预测控制	258
	本章小结	259
	思考题与习题	259

第 8 章 过程优化	260
8.1 概述	260
8.1.1 基本概念	260
8.1.2 过程优化的主要工作	261
8.2 过程优化模型	262
8.2.1 目标函数	262
8.2.2 决策变量	264
8.2.3 约束条件	264
8.2.4 过程优化模型的建立	266
8.3 过程优化模型的求解	269
8.3.1 优化算法的选择	269
8.3.2 遗传算法	270
8.3.3 过程优化控制的结构	274
8.4 大工业过程稳态优化	274
8.4.1 大工业过程稳态优化问题的引入	274
8.4.2 大工业过程稳态优化问题的数学描述	277
8.4.3 三种基本协调方法	279
8.5 过程优化实例	285
8.5.1 常压蒸馏过程优化	285
8.5.2 发酵过程补料优化	285
本章小结	288
思考题与习题	289
第 9 章 过程控制系统实例	290
9.1 发酵过程的自动控制	290
9.1.1 发酵过程及其数学模型	290
9.1.2 发酵过程的控制	294
9.2 化学反应过程控制	300
9.2.1 化学反应过程概述	300
9.2.2 反应器的控制方案	301
9.3 加热炉过程的控制	310
9.3.1 概述	310
9.3.2 控制系统分析	311

9.3.3	基础控制回路原理	311
9.3.4	过程优化控制	314
9.4	锅炉过程的控制	321
9.4.1	概述	321
9.4.2	控制系统分析	323
9.4.3	基础控制回路原理	324
9.4.4	工业锅炉的优化控制分析与设计	327
参考文献		330

第 1 章

绪 论

学习目标

- (1) 掌握过程控制系统的基本概念；
- (2) 掌握控制系统的控制质量指标。

1.1 过程控制系统的组成和分类

1.1.1 过程控制系统的组成

工业生产过程必然会受到各种干扰因素的影响,使得工艺参数常常偏离希望的数值。为了实现优质高产和保证生产安全平稳地运行,必须对生产过程实施有效地控制。尽管人工操作也能控制生产,但由于受到生理上的限制,人工控制满足不了大型现代化生产的需要。在人工控制基础上发展起来的自动控制系统,可以借助一整套自动化装置,自动地克服各种干扰因素对工艺生产过程的影响,使生产能够正常运行。这里提到的生产过程一般指生产中连续的或按一定程序周期进行的工业过程,电力拖动及电机运转等过程的自动控制一般不包括在内。而面向生产过程的控制即采用控制装置对生产过程中的某一或某些物理参数(如温度、压力、流量、液位、成分等)进行的自动控制被称为过程控制。一般来说,可以把以温度、压力、流量、液位和成分等工艺参数作为被控变量的自动控制系统称为过程控制系统。

下面以液体储槽的液位控制为例来说明过程控制系统的基本构成。

在生产中液体储槽常被用来作为进料罐、成品罐或者中间缓冲容器。从前一个工序来的物料连续不断地流入槽中,而槽中的液体又被送至下一道工序进行处理。为了保证生产过程的物料平衡,工艺上要求将储槽内的液位控制在一个合理的范围。由于液体的流入量受到上一工序的制约是不可控的,因此流入量的变化是影响槽内液体波动的主要因素,严重时会使槽内液体溢出或抽空。解决这一问题的最简单方法,就是根据槽内液位的变化,相应

地改变液体的流出量。

液位在人工控制时,靠人眼观察玻璃管液位计(测量元件)的指示高度,并通过神经系统传入大脑;大脑将观察的液位高度与所期望的液位高度进行比较,判断出液位的偏离方向和程度,并经过思考估算出需要改变的流出量,然后发出动作命令;手根据大脑的指示,改变出口阀门的开度,相应地增减流出量,使液位保持在合理的范围内,如图 1-1(a)所示。

液位采用自动控制时,槽内液体的高度由液位变送器检测并将其转换成统一的标准信号后送到控制器;控制器将接收到的变送器信号与事先置入的液位期望值进行比较,根据两者的偏差按某种规律运算,然后将结果发送给执行器(调节阀);执行器将控制器送来的指令信号转换成相应的位移信号,去驱动阀门的动作,从而改变液体流出量,以实现液位的自动控制,如图 1-1(b)所示。

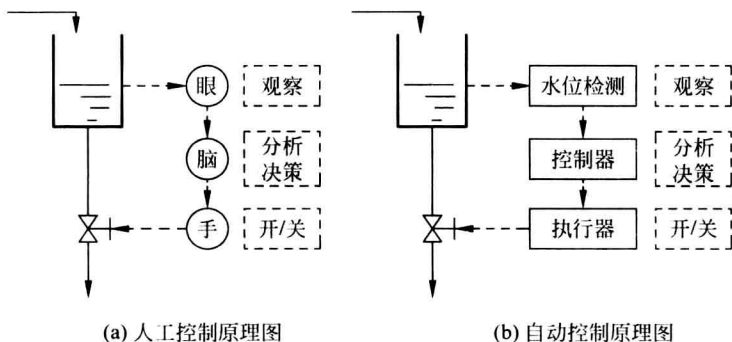


图 1-1 液位控制原理示意图

上述液位的人工控制和自动控制系统的工作原理是相似的,操作者的眼睛类似于测量装置;操作者的头脑类似于控制器;而操作者的肌体则类似于执行器。

从上述实例可见,实现某一物理参数的自动控制需要以下装置:反应被控参数变化情况的传感器、将测量信号转变为标准信号的变送器、设定被控参数正常值的定值器、比较被控参数变化并进行控制运算的控制器、实现控制命令的执行器及改变调节参数的控制阀。利用上述装置以及其他一些必要的设备对被控对象进行控制就构成了一个过程控制系统。简单过程控制系统的方框图如图 1-2 所示,图中箭头方向为信号传递方向,信号只能按照箭头方向传递,不可逆。各组成部分的功能和常用术语简介如下。

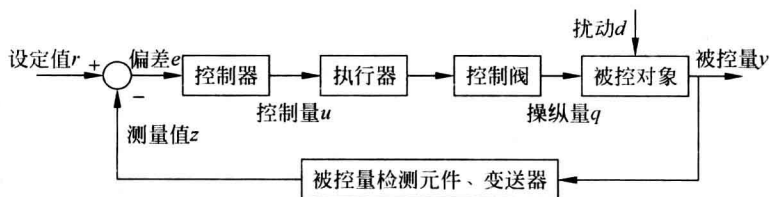


图 1-2 简单过程控制系统方框图

1. 被控对象(简称对象)

被控对象是指生产过程中需要进行自动控制的工艺设备或装置,如上述进行液位控制的水槽。典型的被控对象通常包括锅炉、加热炉、精馏塔、反应釜等生产设备以及储存物料的槽、罐或传输物料的管段等。被控对象有时也被称为被控过程。在被控过程中,所有需要进行自动控制的参数,称为被控量或被控参数。上例中水槽液位是被控量。当系统只有一个被控量时,称该系统为单变量控制系统;具有两个或两个以上被控量和操纵量且互相之间存在关联时,称其为多变量控制系统。被控量往往就是被控对象的输出量。

2. 检测元件和变送器

反映生产过程与生产设备状态的参数很多,按生产工艺要求,有关的参数都应通过自动检测,才能了解生产过程进行的状况,以获得可靠的控制信息。对被控对象进行自动控制时,应由传感器检测出被控参数的变化,当其输出不是电量或虽是电量而非标准信号时,再通过变送器将其转换成标准信号。传感器或变送器的输出就是被控量的测定值。

3. 控制器

由传感器或变送器获得的信息即被控量,当其符合生产工艺要求时,控制器的输出不变;否则控制器的输出发生变化,对系统施加控制作用。除了控制作用外,使被控量发生变化的任何其他作用都被称为扰动。当扰动使得被控参数发生变化时,控制器都将发出控制命令对系统进行自动控制。

按生产工艺要求,规定被控量的参考值称为设定值。设定值也是经过控制系统的自动控制作用后,被控量所应保持的正常值。在过程控制系统中,被控量的测量值 z 由系统的输出端反馈到输入端与设定值比较后得到的偏差值 $e=r-z$ 就是控制器的输入信号。当 $z<r$ 时称为正偏差, $z>r$ 称为负偏差。

控制器有正作用和反作用两种。在此,正作用的调节器是指偏差增大时,控制器的输出减小;反作用的调节器则是指偏差增大时,控制器的输出增大。

4. 执行器

被控量的测量值和设定值在控制器内进行比较得到的偏差大小,由控制器按规定的控制规律(如PID等)进行运算,发出相应的控制信号去推动执行器,该控制信号称为控制器的控制量 u 。目前采用的执行器多为气动执行器和电动执行器两类。

5. 控制阀

由控制器发出的控制作用,通过电或气动执行器驱动控制阀门,以改变被控对象的操纵量 q ,使被控量受到控制。在水槽液位控制系统中,出水流量就是操纵量。控制阀是控制系

统的终端部件,阀门的输出特性决定于阀门本身的结构,有的与阀门输入信号呈线性关系,有的则呈对数或其他曲线关系。

由液体储槽的液位控制可知,实现液位的自动控制需要三类环节,即测量与变送装置、控制器和执行器。测量与变送装置的作用是自动检测被控变量的变化,并将其转换成统一的标准信号后传送给控制器。控制器的作用是根据偏差的大小、方向以及变化情况,按照某种预定的控制规律计算后,发出控制信号。执行器的作用是将控制信号转换成位移,并驱动阀的动作,使操纵变量发生相应的变化。如果把测量与变送装置、控制器以及执行器统称为自动化装置,则过程控制系统是由被控对象和自动化装置两部分组成的。

显然,不论被控对象是什么,作为生产过程自动化装置必须具备测量、比较、决策、执行这些基本功能。前面所述的单回路系统是最基本的过程控制系统结构,复杂的系统都是以此为基础为了克服某些特定扰动或达到特殊功能而进一步丰富的。

1.1.2 过程控制系统的分类

过程控制系统根据划分过程控制类别的方式不同,有种种不同的名称。按被控参数的名称来分,可分为温度控制系统、压力控制系统、流量控制系统、液位控制系统以及成分控制系统等;按系统完成的任务和功能来分,可分为比值控制系统、均匀控制系统、前馈控制系统及选择控制系统等;按被控变量的多少来分,可分为单变量和多变量控制系统;按采用常规仪表和计算机来分,可分为常规过程控制系统和计算机过程控制系统等。但是最基本的分类方法有下列几种。

1. 按系统的结构特点来分

(1) 反馈控制系统

反馈控制系统是根据系统被控量和给定值之间的偏差进行工作的,偏差是控制的依据,控制系统要达到减小或消除偏差的目的。前面所述的液体储槽液位控制系统就是反馈控制系统。另外,因为该系统的被控量反馈到了系统的输入端,使得系统构成了一个闭合回路,所以又称其为闭环控制系统。反馈控制系统是过程控制系统中一种最基本的控制形式。另外,反馈控制系统中的反馈信号也可能有多个,从而可以构成多个闭合回路,称为多回路控制系统。

(2) 前馈控制系统

图 1-3 所示的前馈控制系统是根据扰动量的大小进行工作的,扰动是控制的依据。由于前馈控制没有被控量的反馈信息,因此它是开环控制系统。图 1-3 中,扰动 d 是引起被控量发生变化的原因,扰动的出现是前馈控制的依据,可见,前馈控制可以及时消除扰动对被控量的影响。但是,由于前馈控制系统是一种开环系统,最终无法检查控制的效果,所以在实际生产过程中是不能单独采用的。



图 1-3 前馈控制系统方框图

(3) 复合控制系统(前馈-反馈控制系统)

图 1-4 所示为复合控制系统方框图。前馈控制的主要优点是能及时迅速克服主要扰动对被控变量的影响。反馈控制的特点是能检查控制的效果。因此,在反馈控制系统中引入前馈控制,构成复合控制系统,可以大大提高控制系统的控制质量。

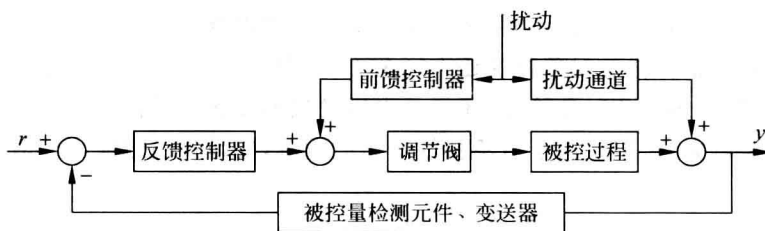


图 1-4 前馈反馈复合控制系统方框图

2. 按设定值信号的特点来分

(1) 定值控制系统

定值控制系统是工业生产过程中应用最多的一种过程控制系统。在运行时,系统被控量(温度、压力、流量、液位、成分等)的给定值是固定不变的。有时根据生产工艺要求,被控量的给定值保持在规定的较小范围附近不变。

(2) 随动控制系统

随动控制系统是一种被控量的给定值随时间任意变化的控制系统。它的主要作用是克服一切扰动,使被控量随时跟踪给定值。例如,在燃烧控制系统中,要求空气量随燃料量的变化而成比例变化,保证燃料经济地燃烧,而燃料量则随负荷而变,其变化规律是任意的,因此,空气流量控制系统就是随动控制系统。

(3) 顺序控制系统

顺序控制系统是被控量的给定值按预定的时间程序变化的控制系统。例如,机械工业中退火炉的温度控制系统,其给定值是按升温、保温和逐次降温等程序变化的,这就是顺序控制系统。