

高等院校教材

# 过程控制系统

陈夕松 汪木兰 主编

李奇 主审



科学出版社  
www.sciencep.com

高等院校教材

# 过程控制系统

陈夕松 汪木兰 主编  
李 奇 主审

科学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书以过程控制系统组成和结构为线索,介绍了过程控制的基本概念,过程控制常用仪表的原理和工程选用,过程对象及建模方法,过程执行器的原理和选择,过程控制器的设计和整定及先进过程控制策略,串级过程控制系统,各种复杂过程控制系统的控制方案与工程设计,计算机过程控制系统的原理、组成与应用等。

本书除过程控制的基础知识外,还介绍了基于计算机及先进控制理论等在内的过程控制新技术,如现场总线技术、组态软件以及控制与管理信息集成技术等。

本书可作为高等院校自动控制、工业自动化及相关专业高年级本科生的教材,也可供有关工程技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

过程控制系统/陈夕松,汪木兰主编. —北京:科学出版社,2005  
(高等院校教材)

ISBN 7-03-015382-0

I. 过… II. ①陈…②汪… 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(2005)第052252号

责任编辑:段博原 贾瑞娜 / 责任校对:包志虹

责任印制:钱玉芬 / 封面设计:陈 敬

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

新蕾印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2005年7月第一版 开本:B5(720×1000)

2005年7月第一次印刷 印张:18 1/4

印数:1 3 500

字数:350 000

定价:26.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈环伟〉)

# 前 言

过程控制技术近年来发展迅速,特别是在计算机、网络通信和先进控制理论的带动下,过程控制的检测、执行仪表及控制系统日益向智能化方向发展。过程控制教材必须与时俱进,适应这种新形势。

本书根据作者多年的教学体会和从事过程控制的实际经验,合理组织过程控制的基本内容和近年来过程控制的有关新技术精心编写而成。

自动控制的核心是反馈,过程控制也不例外。一个典型的过程控制系统一般由控制器、执行器、被控过程和测量变送等 4 个部分组成,也称单回路控制系统,如图 0.1 所示。

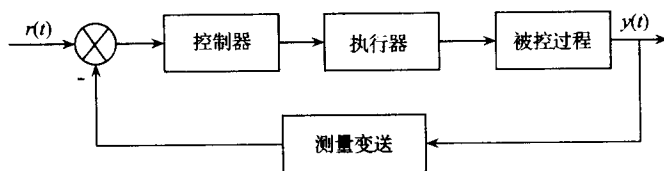


图 0.1 过程控制系统的一般结构

本书在介绍过程控制的基本概念后,分 5 章介绍了过程控制的 4 大组成部分,接着用两章篇幅介绍了几种典型的过程控制系统。为了突出计算机在过程控制中的应用,最后本书单辟一章详细讲述了计算机过程控制系统。具体安排如下:

在第 1 章过程控制概述后,第 2 章讲述过程测量变送,主要包括过程控制中常见的温度、压力、流量、物位及成分等工艺参数的测量技术;第 3 章讲述执行器,主要介绍调节阀和变频器的应用知识;第 4 章讲述被控过程特性及过程建模方法;第 5 章和第 6 章讲述过程控制器,其中第 5 章讲述了应用最为普遍的 PID 控制算法及工程整定,作为 PID 这种常规算法的补充,第 6 章讲述了先进过程控制策略,包括内模控制、预测控制和智能控制等。

至此,过程控制的 4 个基本环节已讲述完毕,接着在第 7 章讲述了除单回路控制系统以外使用最多的另一类过程控制系统——串级控制系统;在第 8 章讲述了包括前馈控制系统、时间滞后控制系统、解耦控制系统、比值控制系统、均匀控制系统、超驰控制系统、分程控制系统和阀位控制系统在内的各种复杂控制系统。

第 9 章详细讲述了计算机过程控制系统,重点介绍了集散控制系统(DCS)、基于可编程序控制器的监督控制与数据采集系统(PLC-SCADA)和现场总线控制系

统(FCS)等相关技术。

为了突出工程应用特点,附录中列举了过程控制 SAMA 图和过程控制仪表位号,这为大型过程控制工程的设计与施工提供了保障。最后列出的部分中英文专业术语有助于读者阅读过程控制的相关国外文献资料。

本书在编写上,对控制中的一些共性内容,合理地安排和相关教材中讲授,避免概念、原理重复,同时又力求做到概念准确,条理清晰。

本书第 1 章、第 3 章、第 6 章、第 8 章和第 9 章由陈夕松编写,第 2 章、第 4 章、第 5 章和第 7 章由汪木兰编写。全书由陈夕松统稿。

全书由东南大学博士生导师李奇教授主审,并提出了许多宝贵意见,对提高本书的质量起到了重要作用,在此表示衷心感谢。

本教材是东南大学“自动化专业主干技术课程改革与实践”项目的重要组成部分(该项目 2004 年获得江苏省优秀教学成果一等奖),在编写过程中得到了项目负责人博士生导师周杏鹏教授的热心关怀和指导,特此一并致谢。

本书规定的教学时数为 32~48 学时,根据各校的实际情况,教师可对书中章节有选择地讲授。

由于编者水平有限,对于书中存在的缺点和错误,恳请读者批评指正。联系方式:

陈夕松,东南大学自动控制系,210096,E-mail:chenxisong@263.net

汪木兰,南京工程学院自动化系,210013,E-mail:zdhx@njit.edu.cn

编 者

2005 年 5 月

# 目 录

## 前言

<b>第 1 章 过程控制系统概述</b> .....	1
1.1 过程控制系统组成及特点 .....	1
1.1.1 过程控制认识 .....	1
1.1.2 过程控制系统组成 .....	2
1.1.3 过程控制的特点 .....	4
1.2 过程控制系统分类及性能指标 .....	5
1.2.1 过程控制系统的分类 .....	5
1.2.2 过程控制的性能指标 .....	7
1.3 过程控制技术的发展.....	11
1.3.1 过程控制仪表的发展 .....	11
1.3.2 计算机在过程控制中的应用及发展 .....	12
1.3.3 过程控制理论的发展 .....	13
1.3.4 我国过程控制技术的发展.....	14
1.4 本课程的地位和任务.....	14
1.4.1 本课程的地位 .....	14
1.4.2 本课程的任务 .....	15
1.4.3 过程控制的设计 .....	15
习题与思考题 .....	16
<b>第 2 章 过程检测仪表</b> .....	18
2.1 检测仪表组成及接线方式.....	18
2.1.1 检测仪表组成 .....	18
2.1.2 过程检测仪表的接线方式.....	19
2.2 测量误差及处理.....	21
2.2.1 测量误差的基本概念 .....	21
2.2.2 测量变送中的几个问题 .....	22
2.2.3 测量信号的处理 .....	23
2.3 安全防爆基础.....	24
2.3.1 危险场所划分 .....	24

2.3.2	防爆安全栅	25
2.4	温度检测	26
2.4.1	接触式与非接触式测温	27
2.4.2	热电偶	28
2.4.3	热电阻	31
2.4.4	集成式温度传感器	32
2.4.5	接触式测温元件的选型与安装	33
2.5	压力检测	34
2.5.1	弹性式压力检测	36
2.5.2	应变片式压力检测	37
2.5.3	压阻式压力检测	38
2.5.4	压力表的选择与安装	39
2.6	流量检测	40
2.6.1	容积式流量计	41
2.6.2	节流式流量计	42
2.6.3	浮子式流量计	45
2.6.4	涡轮流量计	46
2.6.5	漩涡(涡街)流量计	47
2.6.6	电磁流量计	47
2.6.7	超声波流量计	48
2.6.8	质量流量计	49
2.6.9	多相流体的流量测量	50
2.7	物位测量	51
2.7.1	浮力式液位测量	51
2.7.2	静压式液位测量	52
2.7.3	电容式物位测量	53
2.7.4	超声波式物位测量	54
2.7.5	雷达式物位测量	54
2.7.6	核辐射式物位计	55
2.7.7	光纤式液位测量	56
2.7.8	多相界面的测量	56
2.8	成分测量	57
2.8.1	热导式气体成分测量	58
2.8.2	红外式气体成分测量	59

2.8.3	氧化锆氧量成分测量 .....	59
2.8.4	气相色谱成分测量 .....	60
2.8.5	工业电导仪 .....	62
2.8.6	工业酸度计 .....	63
2.8.7	浊度的检测 .....	64
2.9	过程控制中的软测量技术 .....	64
2.9.1	软测量技术 .....	64
2.9.2	软测量方法 .....	66
2.9.3	基于人工神经网络的软测量 .....	68
	习题与思考题 .....	70
<b>第3章</b>	<b>过程执行器</b> .....	<b>72</b>
3.1	调节阀 .....	72
3.1.1	电动执行机构 .....	74
3.1.2	气动执行机构 .....	74
3.1.3	调节阀的流通能力 .....	75
3.1.4	调节阀的流量特性 .....	77
3.1.5	调节阀的选择 .....	83
3.2	变频器 .....	87
3.2.1	变频器原理 .....	87
3.2.2	变频器在过程控制中的应用 .....	88
	习题与思考题 .....	90
<b>第4章</b>	<b>被控过程</b> .....	<b>92</b>
4.1	被控过程特性 .....	92
4.1.1	自衡过程与非自衡过程 .....	92
4.1.2	单容和多容过程 .....	93
4.1.3	振荡和非振荡过程 .....	94
4.1.4	具有反向特性的过程 .....	95
4.2	过程特性对控制品质的影响 .....	96
4.2.1	增益(放大系数) $K$ 的影响 .....	96
4.2.2	时间常数 $T$ 的影响 .....	97
4.2.3	时滞 $\tau$ 的影响 .....	98
4.3	被控过程数学模型 .....	98
4.3.1	建立过程数学模型的目的 .....	99
4.3.2	过程数学模型的求取方法 .....	100



4.3.3	过程被控变量的选择	101
4.3.4	过程输入变量的选择	102
4.3.5	数学模型的无因次化	102
4.4	过程建模	103
4.4.1	机理建模	103
4.4.2	时域法建模	106
4.4.3	频域法建模	110
4.4.4	最小二乘法建模	111
	习题与思考题	114
<b>第5章</b>	<b>常规过程控制策略</b>	<b>116</b>
5.1	开关控制	116
5.1.1	可编程逻辑控制器简介	116
5.1.2	PLC在过程控制中的应用	119
5.2	PID控制	123
5.2.1	模拟式PID调节器	124
5.2.2	数字式PID调节器	125
5.2.3	改进的PID算法	127
5.3	PID参数的整定	129
5.3.1	参数整定原则	129
5.3.2	参数整定方法	130
5.4	PID调节器控制规律的选择	132
5.4.1	根据过程特性选择调节器控制规律	132
5.4.2	根据 $\tau_0/T_0$ 比值选择调节器控制规律	133
5.4.3	控制器正/反作用选择	133
5.5	过程控制系统的投运与维护	134
	习题与思考题	135
<b>第6章</b>	<b>先进过程控制策略</b>	<b>137</b>
6.1	内模控制	138
6.1.1	理想内模控制器	138
6.1.2	实际内模控制器	139
6.1.3	内模控制器与反馈控制器的关系	139
6.2	模型预测控制	140
6.2.1	模型预测控制的特点	141
6.2.2	模型算法控制	142

6.2.3	动态矩阵控制 .....	145
6.2.4	模型预测控制中应注意的问题 .....	148
6.3	模糊控制 .....	148
6.3.1	模糊逻辑基础 .....	149
6.3.2	模糊控制系统 .....	153
6.3.3	模糊控制器设计 .....	155
6.4	神经网络控制 .....	158
6.4.1	神经网络概念 .....	158
6.4.2	神经网络控制 .....	163
6.5	专家控制 .....	165
6.5.1	专家系统概述 .....	166
6.5.2	专家控制系统 .....	167
6.5.3	专家控制器 .....	171
	习题与思考题 .....	172
<b>第7章</b>	<b>串级控制系统</b> .....	173
7.1	串级控制系统结构 .....	173
7.1.1	串级控制问题的提出 .....	173
7.1.2	串级控制系统结构 .....	175
7.2	串级控制系统分析 .....	177
7.2.1	减小了被控对象的等效时间常数 .....	177
7.2.2	提高了系统工作频率 .....	179
7.2.3	对负载变化具有一定的自适应能力 .....	180
7.3	串级控制系统设计 .....	181
7.3.1	设计原则 .....	181
7.3.2	主、副控制器选择 .....	186
7.3.3	串级控制系统的整定 .....	188
7.4	串级控制系统设计举例 .....	189
	习题与思考题 .....	192
<b>第8章</b>	<b>复杂过程控制系统</b> .....	194
8.1	前馈控制系统 .....	194
8.1.1	前馈控制的原理和特点 .....	194
8.1.2	前馈控制系统的结构形式 .....	197
8.1.3	前馈控制的应用 .....	198
8.2	时间滞后控制系统 .....	202

8.2.1	史密斯(Smith)预估补偿方案	202
8.2.2	采样控制方案	203
8.3	解耦控制系统	205
8.3.1	多变量系统中的耦合与解耦	205
8.3.2	相对增益	207
8.3.3	耦合系统的解耦设计方法	211
8.3.4	解耦系统的简化	215
8.4	比值控制系统	215
8.4.1	单闭环比值控制	215
8.4.2	双闭环比值控制	216
8.4.3	变比值控制	217
8.5	均匀控制系统	219
8.6	超弛控制系统	220
8.7	分程控制系统	222
8.8	阀位控制系统	225
	习题与思考题	226
<b>第9章</b>	<b>计算机过程控制系统</b>	<b>230</b>
9.1	计算机过程控制系统的特点和构成	230
9.1.1	计算机过程控制系统的特点	230
9.1.2	计算机过程控制系统的发展趋势	231
9.1.3	计算机过程控制系统的构成	232
9.2	计算机过程控制系统的应用型式	233
9.2.1	巡回检测与数据处理	233
9.2.2	直接数字控制(DDC)系统	233
9.2.3	监督控制(SCC)系统	234
9.2.4	集散控制系统(DCS)	234
9.3	集散控制系统(DCS)	235
9.3.1	DCS的体系结构	235
9.3.2	DCS的基本组成	236
9.3.3	典型DCS简介	241
9.4	基于PLC的监督控制与数据采集系统	245
9.4.1	PLC-SCADA系统和DCS的比较	246
9.4.2	组态软件	247
9.4.3	基于Web的远程监控	248

9.5 现场总线技术 .....	252
9.5.1 现场总线及其特点 .....	252
9.5.2 现场总线通信模型 .....	253
9.5.3 常见现场总线简介 .....	254
9.5.4 现场总线控制系统 .....	257
9.6 计算机信息集成技术 .....	258
9.6.1 计算机信息集成概述 .....	259
9.6.2 实时数据库与关系数据库的集成 .....	262
9.6.3 企业信息集成系统 .....	266
习题与思考题 .....	268
<b>附录 A 过程控制 SAMA 图 .....</b>	<b>269</b>
<b>附录 B 过程控制仪表位号 .....</b>	<b>271</b>
<b>附录 C 过程控制部分专业术语对照表 .....</b>	<b>274</b>
<b>参考文献 .....</b>	<b>277</b>

# 第 1 章 过程控制系统概述

## 教学要求

本章概要介绍过程控制系统的基本概念,重点介绍过程控制系统的组成、特点和分类。学完本章后,应能达到如下要求:

- 掌握过程控制的定义,弄清过程控制的目的;
- 掌握过程控制系统的组成和特点;
- 掌握过程控制系统的分类以及相互之间的区别;
- 掌握过程控制的阶跃响应指标,理解偏差积分性能指标;
- 了解过程控制的发展历程和发展方向;
- 了解本课程的地位和性质。

## 1.1 过程控制系统组成及特点

### 1.1.1 过程控制认识

所谓过程控制是指根据工业生产过程的特点,采用测量仪表、执行机构和计算机等自动化工具,应用控制理论,设计工业生产过程控制系统,实现工业生产过程自动化。

通常把原材料转变成产品并具有一定生产规模的过程叫做工业生产过程,它可分为连续(或批处理)生产过程(如化工、石油、冶金、发电、造纸、生物化工、轻工、水处理、制药等)和离散制造过程(如机械加工、汽车制造等)。

本书讨论的工业生产过程主要是指连续生产过程,这些生产过程中自动控制系统的被控参数往往是温度、压力、流量、物位和成分等变量。

下面通过一个具体例子来认识一下过程控制。

#### 例 1.1 过程控制认识。

图 1.1(a)所示是矿石经给矿机下矿后,由皮带送往磨机的工业生产过程,它是冶金行业选矿生产中的一个生产环节。在生产过程中,要求控制矿石流量以保证产量稳定。以前由人工控制给矿机的频率来调节矿石流量,产量波动较大。

为稳定矿量,在给矿机皮带上安装皮带秤,矿量控制器根据设定的矿量(矿量给定)和皮带秤的检测信号自动调节给矿机的频率,保证产量稳定。该控制系统示意图如图 1.1(a)所示,根据自动控制原理知识,该控制系统方框图如图 1.1(b)所示。

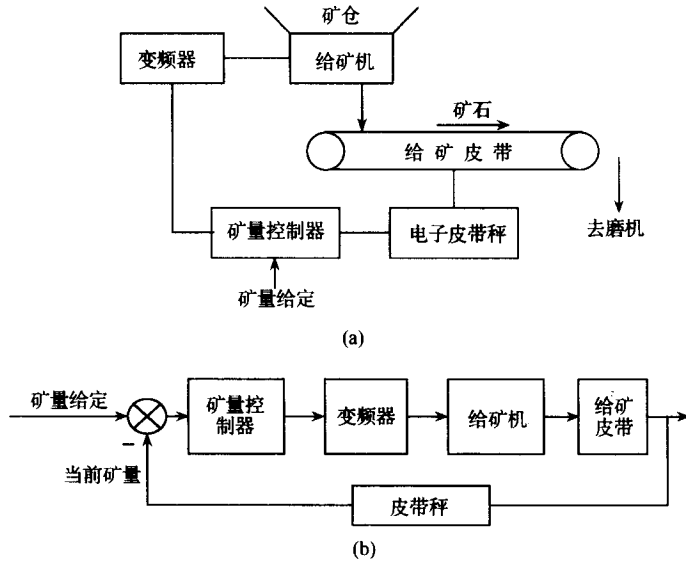


图 1.1 冶金行业选矿过程矿石流量控制系统  
(a) 示意图 (b) 方框图

这是一个以流量为被控参数的工业生产过程控制系统。通过给矿过程的自动控制,可以稳定产量,并为后续工艺质量的控制提供基础,而且该过程控制还可以减轻人工操作强度,改善劳动条件等。

过程控制由来已久,早在 20 世纪中叶,工业生产过程中就开始陆续引入过程控制。特别是近年来,随着计算机技术、网络通信技术以及先进控制理论的发展,过程控制已经深入到工业生产过程的各个层面。

过程控制最根本的目的在于抑制外界扰动的影响,确保生产过程的稳定性,并实现生产过程工况的最优化。其实,随着过程控制的不断发展,过程控制在工业生产过程中的作用越来越大。具体来说,通过过程控制可以达到保证质量、提高产量、节能降耗、实现安全运行、改善劳动条件、保护环境卫生和提高管理水平等多种目的和要求。

可见,过程控制是保证现代化工业企业安全、优质、低耗和高效生产的主要技术手段。实现过程控制不仅可以给企业带来优质、高效、节能等直接的经济效益,还可以为企业和社会带来间接的社会效益。

### 1.1.2 过程控制系统组成

由图 1.1 可知,过程控制系统一般由控制器、执行器、被控过程和测量变送等环节组成,其一般性框图如图 1.2 所示。

图 1.2 也反映了自动控制的本质——反馈。基于反馈构成的闭环控制是过程

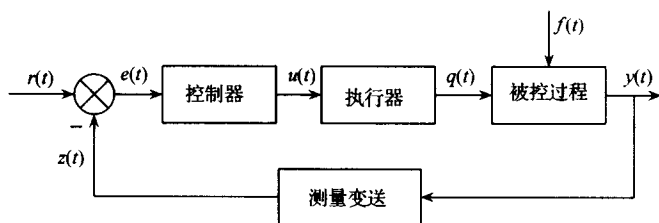


图 1.2 过程控制系统的一般性框图

控制的核心内容。在过程控制中,图 1.2 所示的系统也称为单回路控制系统。在本书以后的章节中,将首先介绍该系统的各个组成环节,并在此基础上介绍多种其他复杂控制系统。

图 1.2 中,有以下几个名词术语:

- 1) 被控参数(变量) $y(t)$ :被控过程内要求保持设定数值的工艺参数。
- 2) 控制(操纵)参数(变量) $q(t)$ :受控制器操纵,用以克服扰动量的影响,使被控参数保持设定值的物料量或能量。
- 3) 扰动量  $f(t)$ :除控制参数外,作用于被控过程并引起被控参数变化的各种因素。
- 4) 给定值  $r(t)$ :被控参数的设定值,一般用 SP 表示。
- 5) 当前值  $z(t)$ :被控参数经测量变送环节实际测量的值,一般用 PV 表示。
- 6) 偏差  $e(t)$ :被控参数的设定值与当前实际值之差。
- 7) 控制作用  $u(t)$ :控制器的输出量。

过程控制系统中,有时将控制器、执行器和测量变送环节统称为过程仪表。这样,过程控制系统就由过程仪表和被控过程两部分组成。

### 例 1.2 过程控制系统框图。

在石油化工生产过程中,常常利用液态丙烯汽化来吸收裂解气体热量,使裂解气体的温度下降到规定数值。图 1.3 是一个简化的丙烯冷却器温度控制系统,被冷却的物料是乙烯裂解气,其温度要求控制在  $15 \pm 1.5^\circ\text{C}$ 。若温度太高,冷却后的气

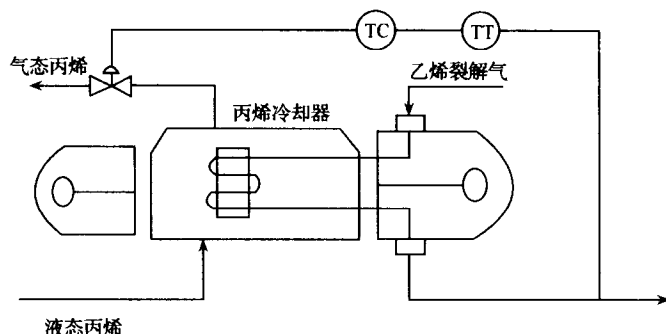


图 1.3 丙烯冷却器温度控制系统示意图

体会含过多的水分；若温度太低，乙烯裂解气会产生结晶析出，堵塞管道。现请指出系统中被控过程、被控参数和控制参数，并画出该控制系统的方框图。图中 TT、TC 是过程控制中的仪表位号，分别代表温度检测和温度控制，参见附录 A。

**解** 由上述工艺介绍可知，在丙烯冷却器温度控制系统中，被控过程为丙烯冷却器；被控参数为乙烯裂解气的出口温度；控制参数为气态丙烯的流量。

该系统方框图如图 1.4 所示。

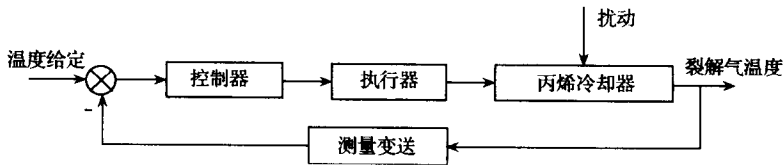


图 1.4 丙烯冷却器温度控制系统方框图

需要注意的是，与示意图不同，方框图中箭头的指向并不代表物料的实际流向。比如在本例示意图中，气态丙烯的流向是由丙烯冷却器流出的。而在方框图中，气态丙烯作为控制参数，其信号的流向是指向丙烯冷却器的。

### 例 1.3 过程控制系统组成。

例 1.1 中的被控过程是指给矿皮带；测量变送是皮带秤；执行机构是变频器和给矿机。作为控制器，矿量控制器一般是由电子元件组成的数字调节器，或可编程序控制器 (PLC)、工业计算机 (IPC) 等。

### 1.1.3 过程控制的特点

同其他自动控制系统相比，过程控制具有如下明显特点。

#### (1) 被控过程形形色色

由于生产规模大小不同，工艺要求各异，产品多种多样，过程控制中被控过程的形式很多，比如化学反应器、精馏塔、锅炉、压力容器以及像例 1.1 中的给矿设备和例 1.2 中的丙烯冷却器等。

#### (2) 控制过程多属缓慢过程和参量控制形式

许多工业生产过程设备体积大，工艺反应过程缓慢，具有大惯性大滞后等特点。通常是用一些物理量和化学量来表征其生产过程是否正常，因此需要对表征生产过程的温度、压力、流量、物位、成分等过程参量进行控制，即过程控制多半为参量控制。

#### (3) 控制方案多种多样

由于被控过程的多样性、复杂性，且控制要求各异，使得控制方案多种多样，除最常见的单回路和串级控制外，还有前馈、比值、均匀、分程、超驰、阀位等多种过程控制系统。



在这些控制系统中,单回路控制约占总数的一半以上,串级控制约占 20%左右。所以本书前几章均以单回路控制为主线介绍,串级控制作为一章详细介绍,其他控制系统将在第 8 章集中阐述。

(4) 定值控制是过程控制的一种主要控制形式

在大部分工业生产中,控制的目的在于克服外界扰动对被控过程的影响,使生产指标或工艺参数保持在设定值不变,或只允许小范围内波动。如例 1.2 中,乙烯裂解气的温度要求定值在 15℃,只允许在±1.5℃范围内变化。

## 1.2 过程控制系统分类及性能指标

### 1.2.1 过程控制系统的分类

按系统结构和系统给定值的不同,过程控制系统有如下不同的分类方法。

#### 1. 按系统结构特点分

##### (1) 反馈控制系统

如前所述,反馈是过程控制的核心内容,只有通过反馈才能实现对被控参数的闭环控制,所以这类系统是过程控制中使用最为普遍的。

反馈控制是根据系统被控参数与给定值的偏差进行工作的,偏差是控制的依据,最后目的是减小或消除偏差。反馈信号也可能有多个,从而可以构成串级等多回路控制系统。

#### 例 1.4 闭环与开环控制系统。

图 1.5(a)所示为一列管式换热器。工艺要求出口物料温度保持恒定。经分析,如果保持物料入口流量和蒸汽流量基本恒定,则温度的波动将会减小到工艺允许的误差范围内。现分别设计了物料入口流量和蒸汽流量两个控制系统,以保持出口物料温度恒定。相应的控制系统方框图如图 1.5(b)所示。

从方框图可以看出,对于物料入口流量和蒸汽流量而言,系统均为闭环控制系统。而对于出口物料温度,并未经过测量变送环节反馈到系统输入端,没有形成闭环系统。故从“出料温度”这个被控参数角度来说,该控制系统为开环控制系统。

开环控制系统不能自动地“察觉”被控参数的变化情况,也不能判断控制参数的校正作用是否适合实际需要。

##### (2) 前馈控制系统

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,属于开环控制。前馈控制系统方框图如图 1.6 所示。鉴于前馈控制的种种局限性,所以在实际生产中不能单独采用。关于前馈控制的内容详见 8.1 节。