

典型过程装备控制技术

李 斌 编



科学出版社

典型过程装备控制技术

李 斌 编

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书以流程工业中典型过程装备为对象,应用基本控制策略和方法,实现常见工艺参数的测量和控制,结合工程实例,强调知识的综合应用和工程实践能力的训练与培养。

全书共8章,第1、2章介绍过程控制的特点和基本控制方法,包括单闭环控制、串级控制、均匀控制、比值控制、前馈控制、分程控制、选择性控制等;第3~7章介绍典型过程装备的基本控制,包括流体输送设备、传热设备、锅炉设备、精馏塔以及化学反应器的控制原理和方法;第8章针对几种典型工业生产过程,结合各自特点介绍常用控制方案,包括合成氨过程、常减压过程、催化裂化过程、聚合过程、生化过程、制药过程以及制浆造纸过程等。

本书是高等学校过程装备与控制工程专业本科生教材,可作为化工类和工业自动化专业本科生参考教材,也可供有关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

典型过程装备控制技术/李斌编. —北京:科学出版社, 2016.2

ISBN 978-7-03-047156-7

I. ①典… II. ①李… III. ①过程控制 IV. ①TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 012543 号

责任编辑:陈雅娴/责任校对:贾伟娟

责任印制:徐晓晨/封面设计:迷底书装

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>

北京康华虎影印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016年1月第一版 开本:B5(720×1000)

2016年1月第一次印刷 印张:10 1/4

字数:207 000

定价:39.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

过程装备与控制工程专业学科交叉突出,集工艺过程、装备技术、控制工程于一体,覆盖过程工业的机械装备、过程控制、工艺原理等领域,提供适合本专业学生使用的教材显得非常必要。让学生在学习化工、机械和控制相关课程的基础上,利用基本控制原理,把控制方法应用于过程机械和设备,实现生产过程的自动化,达到综合能力的提高。为此,本书按照“过程+装备+控制”的思路来构建知识点和组织教学内容,将基本控制方法作用于典型过程装备,对常见过程变量实施有效测量与控制,强调手段、方法的多样性和灵活性,引导学生将理论与实践相结合、综合应用所学知识以及提高工程实践能力,培养分析和解决复杂工程问题的能力。

本书仅以过程工业中的常用、典型装备为对象,运用基本控制方法,围绕常见过程参数来进行系统的分析、控制与优化,涉及的过程参数为常见的温度、流量、压力、物位等,侧重对基本方法的学习和基本能力的训练。本书首先介绍基本控制系统的原理、构成及特点,包括单闭环控制、串级控制、均匀控制、比值控制、前馈控制、分程控制、选择性控制等。在此基础上从两条线来介绍控制策略与控制方法,并使两条线有机相连。一是以典型过程装备为对象,从其工作原理、运行特征来实施过程变量的测量与控制,包括流体输送设备、传热设备、锅炉设备、精馏塔和化学反应器等;二是围绕几种典型生产过程,从生产工艺、过程参数、控制要求来设计控制方案,包括合成氨过程、常减压过程、催化裂化过程、聚合过程、生化过程、制药过程以及制浆造纸过程等。

本书作为过程装备与控制工程专业的本科生教材,是前面先修课程的集成,又是后续教学的基础,尤其针对课程设计和毕业设计是较好的铺垫和准备。教学过程中充分调动学生的主观能动性,加强交流,通过对案例和实例的分析进行课堂讨论和课堂练习,并可适当延伸和拓展。

本书由昆明理工大学李斌编写,在编写过程中得到了过程装备与控制工程系各位老师的帮助和指导,在此深表谢意。

由于编者水平有限,书中疏漏与不妥之处在所难免,恳请读者批评指正。

编 者

2015年9月于昆明

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 过程控制概述	1
1.2 过程控制的特点	1
1.3 过程控制的要求	2
1.4 过程控制的任务	2
1.5 过程控制的功能	3
1.6 过程控制的发展趋势	3
1.7 过程控制系统设计概要	3
1.8 过程装备	4
1.9 控制流程图	5
第 2 章 基本控制策略	7
2.1 单闭环控制	7
2.1.1 控制系统组成	7
2.1.2 被控变量的选择	7
2.1.3 操纵变量的选择	8
2.1.4 控制器控制规律的选择	8
2.2 串级控制	9
2.2.1 系统结构	9
2.2.2 串级控制系统的结构特点	10
2.2.3 控制性能	10
2.3 均匀控制	11
2.3.1 控制作用	11
2.3.2 均匀控制方案	11
2.4 比值控制	12
2.5 前馈控制	12
2.6 分程控制	13
2.7 选择性控制	13
第 3 章 流体输送设备控制	15
3.1 离心泵的基本控制	15

3.1.1 离心泵的工作特性	15
3.1.2 管路特性	16
3.1.3 离心泵的工作点	17
3.1.4 离心泵的控制	17
3.1.5 离心泵特性曲线	19
3.1.6 影响离心泵性能的主要因素	20
3.2 容积式泵的基本控制	22
3.2.1 容积式泵的工作特性	22
3.2.2 容积式泵的控制	22
3.3 风机的基本控制	23
3.3.1 风机的工作特性	23
3.3.2 风机的控制	24
3.4 压缩机的基本控制	25
3.4.1 往复式压缩机的控制	25
3.4.2 离心式压缩机的控制	28
3.5 变频调速	32
3.6 离心式压缩机的防喘振控制	33
3.6.1 离心式压缩机的喘振	33
3.6.2 离心式压缩机防喘振控制方法	35
3.6.3 离心式压缩机串/并联时的防喘振控制	40
3.6.4 压缩机防喘控制实例分析	42
第4章 传热设备的控制	46
4.1 工业换热器的类型	46
4.2 传热基本方程	47
4.3 一般换热器的控制	48
4.3.1 控制方案的确定	48
4.3.2 一般换热器的控制方法	49
4.4 复杂控制系统的应用	55
4.4.1 前馈-反馈控制	55
4.4.2 基于模型计算的控制	57
4.4.3 选择性控制	59
4.5 蒸发器的控制	61
4.5.1 蒸发器概述	61
4.5.2 蒸发器控制系统设计	61
第5章 锅炉设备的控制	65
5.1 锅炉设备及控制要求	65

5.2 锅炉汽包水位控制	66
5.2.1 锅炉汽包水位的动态特性	67
5.2.2 锅炉汽包水位基本控制方法	68
5.2.3 汽包水位计算机控制系统	74
5.3 蒸汽过热系统的控制	76
5.4 燃烧控制系统	77
5.4.1 燃烧控制的任務	77
5.4.2 燃烧过程的控制	78
5.4.3 燃烧过程中烟气氧含量闭环控制	80
5.4.4 炉膛负压控制及安全控制系统	82
5.4.5 计算机技术在锅炉控制上的应用	84
第6章 精馏塔的控制	88
6.1 精馏塔概述	88
6.2 精馏塔的控制目标及变量分析	88
6.2.1 控制目标	88
6.2.2 变量分析	89
6.3 精馏塔的控制方案	91
6.3.1 一端产品质量控制	91
6.3.2 两端产品质量均需控制	92
6.3.3 两端产品质量控制实例分析	94
6.4 复杂控制系统在精馏塔中的应用	95
6.4.1 串级控制	95
6.4.2 前馈-反馈控制	96
6.4.3 选择性控制	96
第7章 化学反应器的控制	98
7.1 化学反应器概述	98
7.2 化学反应器的控制要求	98
7.3 化学反应器的基本控制	99
7.3.1 出料成分的控制	99
7.3.2 工艺参数为间接被控变量	100
7.3.3 pH 控制	102
7.3.4 常用固定床和流化床反应器的控制	103
7.3.5 化学反应器的推断控制	105
7.3.6 稳定外围的控制	107
第8章 典型工业生产过程控制	109
8.1 合成氨过程控制	109

8.1.1	合成氨	109
8.1.2	控制系统组成	110
8.1.3	合成塔的控制	113
8.2	常减压过程控制	115
8.2.1	常减压过程的特点	115
8.2.2	常减压塔的控制	117
8.3	催化裂化过程控制	120
8.3.1	催化裂化过程的特点	120
8.3.2	催化裂化过程控制系统	121
8.4	聚合过程控制	125
8.4.1	聚合过程的特点	125
8.4.2	几种常见聚合过程控制	126
8.5	生化过程控制	136
8.5.1	生化过程的特点	136
8.5.2	生化过程的控制类型	137
8.5.3	常见生化过程控制	139
8.5.4	发酵控制举例	142
8.6	制药过程控制	144
8.6.1	制药过程控制的特点	144
8.6.2	制药过程控制系统	145
8.6.3	化学制药过程控制	145
8.6.4	生物制药过程控制	145
8.6.5	中药制药过程控制	146
8.7	制浆造纸过程控制	148
8.7.1	制浆造纸过程的特点	148
8.7.2	制浆过程控制	149
8.7.3	碱回收过程控制	151
8.7.4	造纸过程控制	152
参考文献		155

第1章 绪 论

1.1 过程控制概述

过程自动控制是指石油、化工、冶金、纺织、轻工等工业生产中连续的或按一定程序进行的生产过程的自动控制。这种利用自动化装置来控制运转连续或间歇生产过程的综合性技术称为生产过程自动化，简称过程控制，它是对生产过程中的温度、压力、流量、物位、组分等工艺参数进行控制，使其保持为定值或按一定规律变化，以确保产品质量和生产安全，并使生产过程按最优化目标进行。

过程控制涉及自动控制、检测技术、计算机以及化学生产工艺等学科的相关知识。从控制的角度，生产过程分为连续型、离散型和混合型几类。过程控制主要是针对连续型生产过程采用的控制方法。连续型生产过程的特征是，呈流动状态的原材料在生产过程中经过传热、传质或物理、化学变化等，大多发生相变或分支结构的变化，从而产生新的产品。在这个过程中，工艺参数决定着产品的产量和质量，它们不仅受过程内部条件的影响，也受外界环境的影响。由于过程参数较多，所起的作用各不相同，有时还会相互影响，这就增加了对过程工艺参数进行控制的复杂性和特殊性。

1.2 过程控制的特点

过程控制所涉及的生产过程多种多样，生产设备的类型以及生产规模相差较大，过程控制的方法也不完全相同。大多数的生产过程具有复杂性、非线性、不确定性等特点，并且越来越朝着大规模、精细化的方向发展，这种发展现状对过程控制提出了更高的要求，大大促进了过程控制技术的发展，使得过程控制在生产中的地位越来越重要。过程控制具有以下特点。

(1) 控制系统由过程检测、变送和控制仪表、执行装置等组成。通常先由检测仪表或传感器将生产过程中的工艺参数转换为电信号或气压信号，并由显示仪表显示或记录，以便真实反映生产过程状态。同时，将测量信号通过某种变换或运算传给控制仪表，再通过执行装置实现对过程的自动控制，使工艺参数符合要求。

(2) 被控过程具有非线性、时变、时滞及不确定性，因此，难以获得精确的过

程数学模型,使得在其他领域应用成功的控制策略难以移植。例如,热力传递过程中的锅炉、热交换器、反应器、热处理过程、流体输送设备、精馏塔等,它们的内部结构和工作机理都比较复杂,其动态特征也各不相同,有时很难用机理解析的方法求得精确模型。

(3) 过程控制的过程多属于慢过程与参量控制。大多被控过程具有大惯性、大时延性,控制过程是一个慢变过程。此外,生产过程常用一些过程变量,如温度、压力、流量等来表征生产过程是否正常、产品质量是否合格,对它们的控制多属于参量控制。

(4) 被控过程复杂多样,过程控制的方案也多种多样。在控制方案上,既有传统的 PID 控制,也有先进的过程控制,如自适应控制、预测控制、推理控制、非线性控制、智能控制等。

1.3 过程控制的要求

工业生产对控制的要求是多种多样的,随着工业生产技术的不断发展,生产工艺越来越成熟,对控制要求也越来越高。在目前阶段主要有安全性、稳定性、经济性三方面。

1) 安全性

生产过程中要及时地预测以及防止事故的发生,确保人身和设备的安全。常采用参数越限报警、连锁保护、在线故障诊断和容错控制等措施。

2) 稳定性

当生产过程的环境发生变化或受到随机因素影响时,能抑制外部干扰,使生产过程仍然保持原来的状态平稳地运行,使生产过程长期稳定运行。

3) 经济性

在保证生产安全性、稳定性以及产品质量的前提下,降低生产成本,提高生产效率。

1.4 过程控制的任务

过程控制的任务就是在熟悉工艺流程的基础上,掌握过程对象的静态和动态特征,应用控制理论分析和设计,并采用相应的过程控制系统和技术手段使生产满足安全性、稳定性和经济性的要求,达到优质、高产和低耗能的控制目标。

生产过程的自动化对保证生产安全和稳定、降低成本和能耗、提高产量以及改善生产条件、提高设备使用率、提高经济效率等方面都有重要的意义。

1.5 过程控制的功能

1) 检测变送与执行功能

利用传感器测量过程变量，通过变送器转换为系统统一信号，再进入控制器实现功能运算并输出统一控制信号，执行装置则将控制信号转换为可直接改变被控参数的控制动作。

2) 方便操作与安全功能

能实时显示过程变量和工艺参数，随时掌握过程状态，方便实行单元操作和系统控制，实现非正常工况报警、自动保护和紧急停车，确保生产过程的绝对安全。

3) 多种控制功能

能实现常规的反馈控制和前馈补偿，使被控变量满足工艺要求，常规控制不满足要求时，可采用先进控制技术或高级控制功能加以实现。多种控制手段和技术方法灵活构建，并实时优化。

1.6 过程控制的发展趋势

1) 同步性

任务的需要、理论的开拓、技术手段的进展三者之间互相推动，互相促进。

2) 综合性

自动化技术是一门综合性的技术，控制论更是一门广义的学科，在自动化各个领域移植借鉴、交流汇合，表现出明显的交流性。当前发展的特点为：生产装置实施先进过程控制成为主流，过程优化受到普遍关注，开放系统和标准化，综合自动化。

1.7 过程控制系统设计概要

1) 确定控制目标

确保系统安全运行，确保过程工况达到工艺要求，保证产品质量满足要求。

2) 确定被控参数

根据工艺条件, 选择合适的过程变量作为被控变量, 可以是可测量的直接参数, 也可以是通过函数计算或参数估计的间接变量。过程参数的选择是体现控制目标的前提条件。

3) 选择操作量

根据生产工艺过程, 从安全、方便、经济、实用的角度, 选择适当的控制介质, 对被控变量实施操控。

4) 确定控制方案和控制策略

按照控制目标的多少和控制精度的要求, 首先考虑简单控制方法, 如控制精度不够, 则采用较为复杂的控制方案。如果是多输入多输出过程, 可考虑多变量耦控制方案。如果是多目标综合控制, 必须建立过程数学模型, 采用最优控制或智能控制。

5) 选择执行器

过程工业中常用气动和电动两类执行器, 要从安全环境、工艺条件和流量特征等方面来综合考虑合适的执行器。

6) 设计报警和连锁保护系统

正确设计报警和连锁保护系统是保障生产安全的重要措施, 报警系统的作用是及时提醒操作人员密切注视生产中的关键参数, 以便采取措施预防事故的发生。连锁保护系统是生产过程一旦发生事故时, 为确保人身与设备的安全, 迅速使被控制过程按预先设计的程序进行操作, 或自动转入应急状态。

7) 系统的工程设计

要求图纸、文档齐备。

1.8 过程装备

流程工业中涉及的所有的机器和设备均属于过程装备, 从传统的观点来看, 过程装备可以包括以下几大类: 流体动力过程及设备、传热过程及设备、传质过程及设备、热力过程及设备、机械过程及设备、化学过程及设备。

1.9 控制流程图

在控制方案确定后，根据工艺设计给出的流程图，并按流程顺序标注相应的测量点、控制点、控制系统及自动信号与连锁保护系统等，所形成的图称为控制流程图。如图 1.1 所示就是一个流量控制的控制流程图。

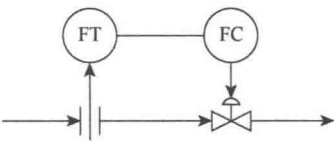


图 1.1 流量控制流程图

在控制流程图中，采用的图例符号要按有关的技术规定进行，包括图形符号、字母代码、仪表位置等。其中图形符号包括测量点、连接线和仪表，不同仪表安装位置的图形符号见表 1.1。字母代号一般有两位字母，第一位字母表示被测变量，后继字母表示仪表的功能。常用被测变量和仪表功能的字母代号见表 1.2。

表 1.1 仪表安装位置图形符号表示

序号	安装位置	图形符号	序号	安装位置	图形符号
1	就地安装仪表		4	集中仪表盘后安装仪表	
2	集中仪表盘面安装仪表		5	就地仪表盘后安装仪表	
3	就地仪表盘面安装仪表				

表 1.2 被测变量和仪表功能的字母代号

字母	第一位字母		后继字母
	被测变量	修饰词	功能
A	分析		报警
C	电导率	差	控制(调节)
D	密度		
E	电压		检测元件
F	流量	比(分数)	
H	手动		
I	电流		指示
K	时间		自动-手动操作

续表

字母	第一位字母		后继字母
	被测变量	修饰词	功能
L	物位		
M	水分或湿度		
P	压力或真空		
Q	数量或件数	积分、累积	积分、累积
R	放射性		记录或打印
S	速度或频率	安全	开关、限锁
T	温度		传送
V	黏度		阀、挡板
W	力		套管
Y	供选用		继电器或计算器
Z	位置		驱动、执行

第 2 章 基本控制策略

2.1 单闭环控制

2.1.1 控制系统组成

简单的闭环控制系统通常是由一个测量变送器、一个控制器、一个执行器和一个被控对象四部分构成。单回路控制系统的方块图如图 2.1 所示。



图 2.1 简单控制系统的方块图

(1) 被控对象是指受控的设备或机器，也可以说是在控制系统中反映操纵变量、扰动和被控变量之间关系的环节。

(2) 执行器是指接受被控变量的信号来改变操纵变量的环节。在过程控制中，执行器常为控制阀。

2.1.2 被控变量的选择

生产过程中希望借助自动控制保持恒定值(或按一定规律变化)的变量称为被控变量。

1. 被控变量的界定

它们对产品的产量、质量以及安全具有决定性的作用，而人工操作又难以满足要求的；人工操作虽然可以满足要求，但是这种操作是既紧张而又频繁的。

2. 选择被控变量的原则

(1) 被控变量应能代表一定的工艺操作指标或能反映工艺操作状态，一般是工

艺过程中较重要的变量。

(2) 被控变量在工艺操作过程中经常受到一些干扰影响而变化。为维持其恒定, 需要较频繁地调节。

(3) 尽量采用直接指标作为被控变量。当无法获得直接指标信号, 或其测量和变送信号滞后很大时, 可选择与直接指标有单值对应关系的间接指标作为被控变量。

(4) 被控变量应能被测量出来, 并具有足够大的灵敏度。

(5) 选择被控变量时, 必须考虑工艺合理性和国内仪表产品现状。

(6) 被控变量应是独立可控的。

2.1.3 操纵变量的选择

在自动控制系统中, 把用来克服干扰对被控变量的影响, 实现控制作用的变量称为操纵变量。最常见的操纵变量是介质的流量。

操纵变量的选择原则:

(1) 操纵变量应是可控的, 即工艺上允许调节的变量。

(2) 操纵变量一般应比其他干扰对被控变量的影响更加灵敏。

(3) 在选择操纵变量时, 除了从自动化角度考虑外, 还要考虑工艺的合理性与生产的经济性。

2.1.4 控制器控制规律的选择

控制器是控制系统的核心。它的作用是将测量的信号与设定值相比较产生偏差信号, 并按一定的运算规律产生输出信号。目前工业上常用的控制器主要有三种控制规律: 比例控制规律(P)、比例积分控制规律(PI)和比例积分微分控制规律(PID)。

1. 比例控制器

比例控制器的输出与偏差成比例

$$u(t) = K_c e(t) + u_0 \quad (2.1)$$

式中: $u(t)$ 为控制器的输出信号; $e(t)$ 为测量变送信号与设定值的差值; K_c 为控制器增益; u_0 为当偏差为 0 时的输出信号。

比例控制器具有简单、调整方便的优点, 但是会产生余差。余差的大小与开环增益有反比关系。因此比例控制系统适用于低阶过程, 多用于就地控制和允许有余差的场合。

2. 比例积分控制器

比例积分控制器的数学计算式是

$$u = K_c \left(e + \frac{1}{T_i} \int_0^t e dt \right) + u_0 \quad (2.2)$$

式中： T_i 为积分时间系数。

如果偏差为 0，则积分控制器的输出不变。偏差为正或负时，偏差积分后使控制器输出的信号向上或向下变化。

比例积分控制器一般适用于流量或快速压力系统的场合。

3. 比例积分微分控制器

理想的比例积分微分控制器的数学计算式是

$$u = K_c \left(e + \frac{1}{T_i} \int_0^t e dt + T_d \frac{de}{dt} \right) + u_0 \quad (2.3)$$

式中： T_d 为微分时间系数。

比例积分微分控制系统一般用于温度控制、成分控制、缓慢和多容过程，如在图 2.2 的液位控制系统和图 2.3 的温度控制系统中，采用比例积分微分控制算法可以实现较好的控制精度。

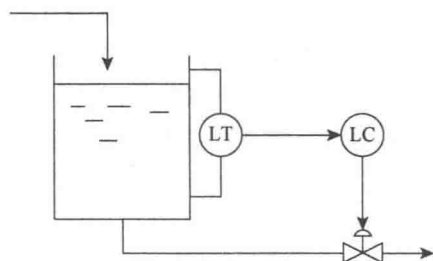


图 2.2 液位控制系统

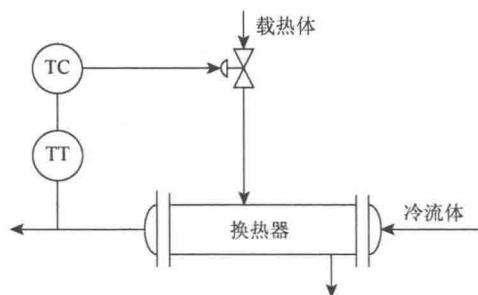


图 2.3 温度控制系统

2.2 串级控制

2.2.1 系统结构

串级控制系统由两个或两个以上的控制器串联连接组成，一个控制器的输出