

杨小柳 / 主编

过程控制及仪表

GUOCHENG KONGZHI JI YIBIAO



贵州大学出版社

Guizhou University Press

杨小柳 / 主编

常州大学图书馆
藏书章

过程控制及仪表

GUOCHENG KONGZHI JI YIBIAO



贵州大学出版社
Guizhou University Press

图书在版编目 (C I P) 数据

过程控制及仪表 / 杨小柳主编. - 贵阳 : 贵州大学出版社, 2016.8

ISBN 978-7-81126-907-9

I. ①过... II. ①杨... III. ①过程控制仪表—高等学校—教材 IV. ①TH89

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 200874 号

过程控制及仪表

主 编: 杨小柳

责任编辑: 但明天

出版发行: 贵州大学出版社

印 刷: 贵阳精彩数字印刷有限公司

开 本: 787 毫米×1092 毫米 1/16

印 张: 19

字 数: 505 千字

版 次: 2016 年 8 月 第 1 版

印 次: 2016 年 9 月 第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-81126-907-9

定 价: 59.00 元

版权所有 违权必究

本书若出现印装质量问题, 请与本社联系调换。

电话: 0851-88292951

本书编委会

主编

杨小柳

副主编

杨 靖

参编

曹 敏 陈湘萍 覃 涛 罗雪梅

前 言

本书是依据普通高等学校《过程控制与自动化仪表》教学大纲的要求，从当前流程工业生产自动化的实际需要出发，结合过程控制技术的最新发展，系统地介绍了过程控制系统的基本原理、结构体系、特点和应用。本书在数学模型方面简化了数学推导；在参数检测方面，深入浅出地介绍了检测原理及方法，并依据其代表性及发展趋势，介绍了目前生产中广泛应用的检测仪表；在控制仪表方面，根据生产实际情况，介绍了目前广泛采用的模拟、数字控制器和电动、气动执行器；在控制系统方面，着重介绍了单回路控制系统和几种常用复杂控制系统的设计。

为了紧跟学科发展前沿，本书还对目前应用很广并不断发展的现场总线控制系统（FCS）和工业以太网的硬件和软件体系构成进行了简明扼要的分析 and 论述。此外，为了与工程实践相结合，本书参阅了仪器仪表安装设计及选型的最新标准，简要介绍了工程设计的方法和要求。

全书分 7 章：第 1 章绪论，第 2 章被控过程的数学模型，第 3 章过程控制系统中的仪器仪表，第 4 章简单控制系统的设计，第 5 章常用复杂过程控制系统，第 6 章先进控制技术介绍，第 7 章网络化的过程控制系统。预计 48~54 学时，实验教学 8~10 学时，理论教学 40~44 学时。

本书由贵州大学自动化教研室杨小柳主编，并编写了第 1、第 3、第 4 章；副主编杨靖教授对本书的结构进行了规划和设计；贵州大学自动化教研室曹敏副教授编写了第 2 章；覃涛编写了第 6 章；罗雪梅副教授编写了第 7 章；测控技术与仪器教研室陈湘萍副教授编写了第 5 章。重庆樱花电气开关有限公司张发斌高级工程师对全书内容进行了耐心细致的审核校对并提出了宝贵意见和建议。

本书在编写过程中，得到了贵州大学电气工程学院自动化系的领导及同事的热情鼓励和支持；贵州大学电气工程学院的李泽滔、李捍东、何志琴和吴钦木教授仔细审阅了书稿，并给予了宝贵的修改意见和建议，在此表示衷心的感谢！本书参考了大量文献资料，对有关文献的作者和版权单位也表示诚挚的谢意。

由于编者水平所限，书中的错漏和不足之处在所难免，恳请广大读者批评、建议，以便进一步修订与完善。

目 录

第1章 绪论	1
1.1 工业生产过程的概念与分类	2
1.2 过程控制系统的发展概况和分类	5
1.3 过程控制系统的基本组成	10
1.4 过程控制系统的相关仪器仪表	13
1.5 被控过程的特性及性能指标	16
1.5.1 被控过程的特性	16
1.5.2 过程控制系统的性能指标	17
1.6 过程控制系统工程设计方法	19
1.6.1 常用规定、标准和图例符号	20
1.6.2 工程设计方法	24
第2章 被控过程的数学模型	29
2.1 概述	30
2.2 被控过程的特性	31
2.3 被控过程的数学模型	36
2.3.1 被控过程的数学模型类型	36
2.3.2 过程建模的基本方法	37
2.3.3 过程建模实例分析	41
第3章 过程控制系统中的仪器仪表	49
3.1 概述	50
3.2 过程参数的检测仪表	51
3.2.1 过程参数检测概述	51
3.2.2 流量检测及仪表选用	52
3.2.3 温度检测及仪表选用	69
3.2.4 物位检测及仪表选用	83

3.2.5 压力检测及仪表选用.....	95
3.2.6 成分检测及仪表选用.....	105
3.3 过程控制仪表.....	110
3.3.1 调节器.....	110
3.3.2 执行器.....	120
3.4 安全防护措施.....	136
3.4.1 防爆安全的基本概念.....	136
3.4.2 防爆安全栅.....	138
第4章 简单控制系统的设计.....	145
4.1 概述.....	146
4.2 系统分析.....	149
4.3 方案确定.....	152
4.3.1 控制规律的选择.....	157
4.3.2 控制系统各环节正反作用的确定.....	167
4.3.3 控制器参数整定.....	170
4.4 安全防护设计.....	177
4.5 单回路控制系统设计举例.....	182
4.5.1 传热设备控制系统的设计.....	182
4.5.2 储槽液位控制系统的设计.....	189
第5章 常用复杂过程控制系统.....	191
5.1 概述.....	192
5.2 串级控制系统.....	192
5.2.1 基本概念.....	193
5.2.2 系统性能分析.....	197
5.2.3 串级控制系统设计.....	200
5.2.4 系统整定.....	203
5.3 比值控制系统.....	205
5.3.1 概述.....	205
5.3.2 常用比值控制系统.....	206
5.3.3 比值控制系统设计.....	208
5.3.4 系统整定.....	211

5.4 前馈控制系统.....	212
5.4.1 概述	212
5.4.2 常见前馈控制系统.....	216
5.4.3 系统整定	219
5.5 大滞后控制系统.....	221
5.5.1 概述	221
5.5.2 控制方案	222
第6章 先进控制技术介绍	231
6.1 概述.....	232
6.2 模糊控制.....	232
6.2.1 模糊控制的基本概念.....	232
6.2.2 模糊控制的适用范围.....	233
6.2.3 预备知识	234
6.2.4 模糊控制规则的设计和模糊化方法.....	239
6.2.5 模糊控制器的设计.....	240
6.3 自适应控制.....	245
6.3.1 自适应控制的特征.....	245
6.3.2 自适应控制系统的分类.....	246
6.4 神经网络.....	249
6.4.1 神经网络方法分类.....	249
6.4.2 BP神经网络算法.....	249
6.4.3 神经网络在控制系统中的应用.....	253
6.5 预测控制.....	254
6.5.1 模型算法控制	255
6.5.2 动态矩阵控制	257
6.5.3 广义预测控制	259
6.6 推理控制.....	260
6.7 软测量技术.....	264
第7章 网络化的过程控制系统.....	271
7.1 概述.....	272
7.2 现场总线控制系统.....	274

7.2.1 系统的组成	274
7.2.2 系统的特点	278
7.2.3 系统构建	280
7.3 工业以太网.....	283
7.3.1 工业以太网概述.....	283
7.3.2 工业以太网的特点.....	285
7.3.3 基于工业以太网的过程控制系统构建.....	286
7.3.4 工业以太网的发展趋势.....	289
参考文献	291

第1章 绪 论

本章要目

- ◆ 工业生产过程的分类
- ◆ 过程控制系统的发展状况
- ◆ 过程控制系统的基本组成
- ◆ 过程控制系统的相关仪器仪表
- ◆ 被控过程的特性及性能指标
- ◆ 过程控制系统工程设计

1.1 工业生产过程的分类

1. 生产过程的分类

生产过程是指从投料开始，经过一系列的加工，直至成品生产出来的全部过程。在生产过程中，劳动者运用劳动工具，直接或间接地作用于劳动对象，使之按人们的预定目的变成工业产品。

2. 工业生产过程的分类

根据生产过程的操作性质（美国 ISA）可将工业生产过程分为：连续过程、半连续过程、批量（间歇）过程和离散过程。

从控制的角度可将生产过程分为：连续型、离散型和混合型。

(1) 连续过程

原料的物料流及能量流持续进入由一系列生产装置序贯组成的固定生产流程后，连续经过反应、换热、分离、流体输送等环节，直至生成最后产品。连续过程的生产工艺流程固定，原材料、中间产物和最终产品皆为流体，生产过程长期连续不断运行，如能源工业（发电过程）、石油化工（炼油过程）、化工（化肥生产）、污水处理等。

连续型生产过程的被控量是过程的温度、流量、压力、物位和成分等参数，基本控制原理为 PID 定值控制，控制系统组成包含一次仪表（商品化传感器）和二次仪表。二次仪表包括：变送器、显示仪（数字）调节器、执行器和 DCS 等。本书主要讨论连续型的生产过程，对该过程的控制即为过程控制。

(2) 半连续过程

生产运行采用类似连续过程的方式进行产品加工，通过切换操作可以利用生产装置生产多种产品。造纸、轧钢、特殊化工生产等都是以该种方式进行。同种原材料通过固定的生产装置生产不同品种产品，或者原材料（配方）变化通过固定或变化的生产装置生产出不同种类产品。

(3) 批量或间隙过程

主要特征为物料加入某个生产装置后，按一定的工艺条件，经历一定时间（在这一时间中往往没有物料流出）达到某指标的要求后，再排出物料进行后续过程。制药过程的生物反应发酵罐、高分子化工中的聚合过程、涂料生产过程和炼钢等过程，这一类企业通常是按一定批量，有间断、周期地进行生产，故又称之为批处理过程。

(4) 离散过程

主要特征是产品生产以件/次的模式进行，产品以单件或流水线上成批进行生产。在使用生产线方式的情况下，组成产品的部件在生产线的不同加工设备上依次加工装配完成；在产品加工地点相对静止的情况下，产品的不同处理工序在同一地点完成。

固体状态的原材料通过不同加工步骤完成产品组件，通过生产线组装，形成最终单件产品。例如：机械制造工业加工、汽车/飞机制造、家电生产过程，仪器仪表工业等。对离散过程的控制主要采用运动控制系统或顺序控制系统，其被控参数为加工过程的位移、速度、加速度等参数。其基本控制原理为随动反馈控制，控制系统的组成包括商品化传感器、检测元件、电力电子元件、数控装置、PLC 等。

(5) 混合型

混合型生产过程包含离散型和连续型，因此含有两种控制系统。例如：啤酒生产过程其发酵过程为连续型，而罐装成瓶为离散型。

3. 离散制造过程与流程生产过程的比较

(1) 生产模式比较

离散制作与流程工业生产模式的对比如表 1-1 所示。

表 1-1 离散制造与流程工业生产模式对比

比较因素	离散制造过程	流程生产过程
产品生产	大批量、小批量、单件	大批量为主
物料流	离散	连续
加工线路	灵活、动态可变	工艺线路单一，基本不变
上下游工序关系	松弛	相当强的耦合、关联、制约
产品加工种类	多变	稳定

续表

比较因素	离散制造过程	流程生产过程
产品设计	根据要求经常进行	投产后几乎没有
产品加工时间	可变	装置投产后, 同样处理量情况下, 不变
加工过程	一般为物理过程	伴随着化学、物理变化, 机理复杂
生产柔性	强	以刚性系统为主
环境问题	轻	排污问题严重, 需要全面治理

(2) 操作模式比较

离散制作与流程工业操作模式的对比如表 1-2 所示。

表 1-2 离散制造与流程工业操作模式对比

比较因素	离散制造过程	流程生产过程
操作工况	常规环境	通常在高温、高压、低温、真空、易燃、易爆、有毒的恶劣工况下
缓冲单元	生产线存在某些缓冲单元	一般没有中间缓冲单元, 设备启停、正常操作和紧急处理步骤复杂
操作监控要求	一般	很强的实时性要求
操作参数	一般为物理几何参数, 状态可以由人工观测	以热工参数、组分参数为主, 状态不能直接观测, 操作参数量很大
操作经济目标	缩短供货周期, 提高设备利用率	强调操作整体性, 实现均衡、安全、长周期、高效、低能耗生产, 保证产品质量
产品设计	生产重要环节, 通过并行工程, 在生产过程中进行	比重很小, 通常与生产过程分离, 单独进行
控制方式	递阶分层管理与控制	集中管理/分散控制
操作干扰	强度低	随机的、不确定的干扰情况普遍存在
优化手段	调整生产计划, 分配负荷, 优化排序	调整工艺参数, 达到最优工况

续表

比较因素	离散制造过程	流程生产过程
柔性操作代价	一般通过选择不同的加工设备 & 夹具进行柔性操作，主要以时间为代价，时间较短，代价低	流程切换后需进行设备及管线的清洗、再次开车周期较长，生产在稳定未达标前，原料、能量存在浪费，柔性切换操作时间较长，切换成本大

(3) 自动化技术水平比较

离散制作与流程工业自动化水平的对比如表 1-3 所示。

表 1-3 离散制造与流程工业自动化水平对比

比较因素	离散制造过程	流程生产过程
自动化程度	普遍实现了单机自动化，中小企业处于机械化阶段，少数大企业处于生产自动化阶段	DCS 系统普遍应用于生产过程中完成生产过程的监控、管理工作，部分企业完成计算机信息管理系统工作，自动化孤岛现象普遍存在，自动化基础水平好
自动化基础技术	CAD、CAM、FMS、数控加工设备	DCS、PLC、控制仪表、现场总线
数据库	工程数据库、集中分布式数据库	实时数据库、分布式数据库、海量存储数据库
计算机网络	开放异构网络互连，递阶结构	开放异构网络互连，实时性、可靠性要求很高

1.2 过程控制系统的发展概况和分类

1. 过程控制系统的发展历程

在石油、化工、冶金、电力、轻工和建材等工业生产中存在连续的或按一定程序周期进行的生产过程，通过采用模拟或数字控制方式对此类生产过程的某一或某些物理参数进行自动控制，使之接近给定值或保持在给定范围，此类自动控制就称为过程控制。这里“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及转换过程。例如，锅炉中蒸汽的产生、分馏塔中原油的分离等。

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,可使生产过程中产品产量增加、质量提高和能耗减少,生产安全,从而使生产过程向最优化目标进行。无论是在大规模、结构复杂的工业生产过程中,还是在传统工业过程改造中,过程控制技术对提高产品质量、节省能源等均起着十分重要的作用。

20世纪50年代,过程控制主要用于使生产过程中的一些参量保持不变,从而保证产量和质量稳定。20世纪60年代,随着各种组合仪表和巡回检测装置的出现,过程控制已开始过渡到集中监视、操作和控制。随着工业生产规模走向大型化、复杂化、精细化、批量化,靠仪表控制系统已很难达到生产和管理要求。

20世纪70年代,出现了过程控制最优化与管理调度自动化相结合的多级计算机控制系统。无论是从过程控制的历史和现状看,还是从过程控制发展的必要性、可能性来看,过程控制正朝着综合化、智能化的方向发展,即计算机集成制造系统(Computer/contemporary Integrated Manufacturing Systems, CIMS):以智能控制理论为基础,以计算机及网络为主要手段,对企业的经营、计划、调度、管理和控制全面综合,实现从原料进库到产品出厂的自动化,整个生产系统信息管理的最优化。流程工业的自动化技术发展如图1-1所示。

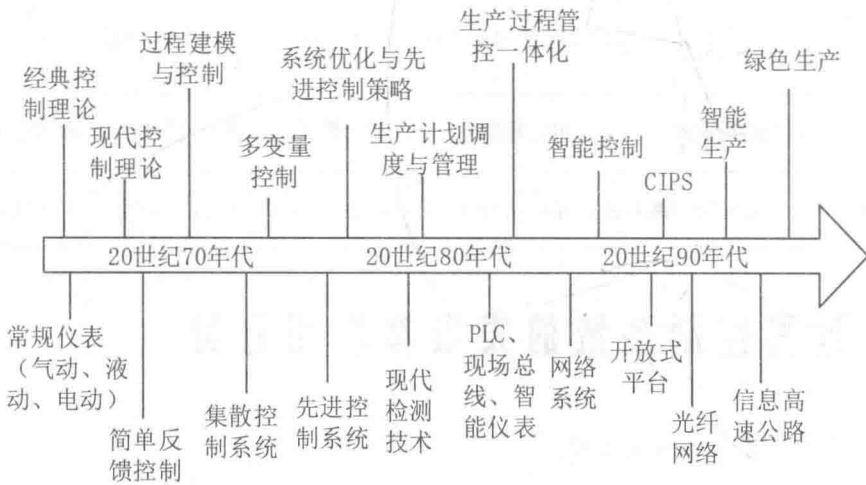


图 1-1 流程工业的自动化技术发展图

2. 发展趋势

随着计算机软硬件技术和通信技术的飞速发展,新的控制理论和控制方法也层出不穷。展望未来,过程控制系统的发展趋势有以下几个方面。

- 大力推广应用成熟的先进技术。主要是普及应用具有智能 I/O 模块的、功能强、可靠性高的可编程序控制器 (PLC)，广泛使用智能化调节器，采用以位总线 (Bit bus)、现场总线 (Field bus) 技术等先进网络通信技术为基础的新型 DCS 和 FCS 控制系统。
- 大力研究和发​​展智能控制系统。智能控制是一种无需人工干预就能够自主地驱动智能机器实现其目标的控制，也是用机器模拟人类智能的又一重要领域。智能控制系统的类型主要包括：分级递阶智能控制系统、模糊控制系统、专家控制系统、学习控制系统、人工神经网络控制系统和基于规则的仿人工智能控制系统等。
- 控制与管理相结合并向低成本自动化 (Low Cost Automation, LCA) 方向发展。LCA 是一种以现代技术实现常规自动化系统中主要的、关键的功能，而投资较低的自动化系统。在 DCS 和 FCS 的基础上采用先进的控制策略，将生产过程控制任务和企业管理任务共同兼顾，构成计算机集成控制系统 (CIPS)，可实现低成本综合自动化系统的方向发展。

总之，由于计算机过程控制在控制、管理、经济效益等方面的显著优势，使之在石油、化工、冶金、航天、电力、纺织、印刷、医药、食品等众多工业领域得到广泛应用。计算机控制系统将会随着计算机软硬件技术、控制技术和通信技术的进一步发展而得到更大的发展并深入到生产的各部门。

近年来，以太网技术逐渐渗入到工业自动化领域。随着高速以太网的到来，智能以太网交换机的使用和耐工业环境（防尘、防潮、防爆、耐腐蚀、抗电磁干扰等）以太网器件的面市，工业以太网将会更加广泛地在工业自动化中得到应用，从而使过程控制系统更为灵活、方便和经济。

3. 过程控制系统的分类

过程控制系统的分类方法较多，可根据被控参数的类型、设定值的形式、控制装置结构类型、被控对象的特点、系统功能、控制规律和控制方式等进行分类。

(1) 常规分类方法

按照被控量、被控参数以及装置类型来分，有以下种类。

- 按照被控参数可分为：温度、流量、物位、流量、压力等控制系统。
- 按照被控量的多少可分为：单变量和多变量控制系统。