



教育部高等学校电子信息类专业教学指导委员会规划教材
高等学校电子信息类专业系列教材

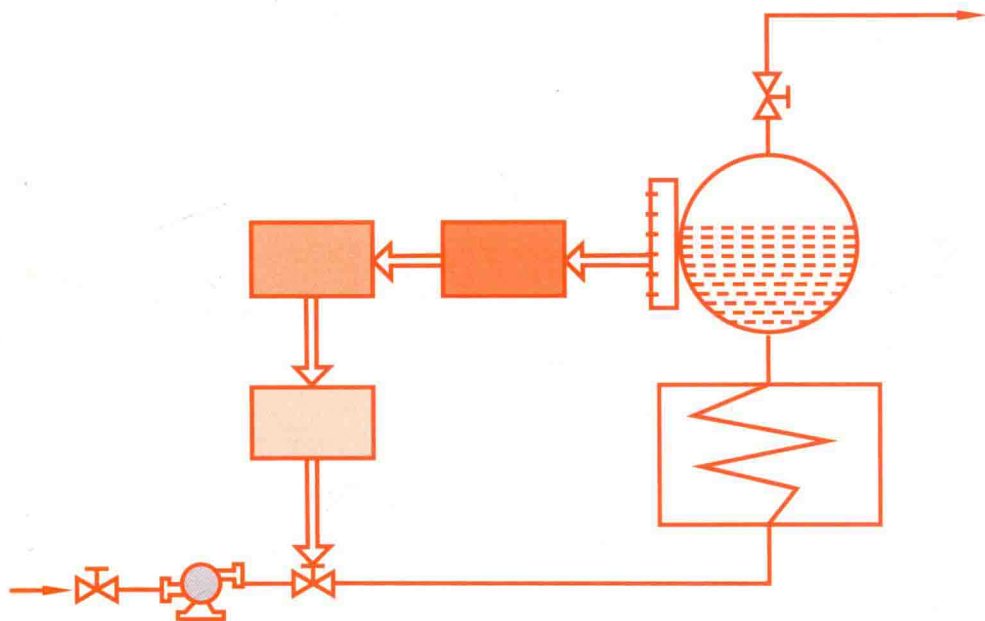
嵌入式与工业控制技术

Process Control System

过程控制系统

慕延华 华臻 林忠海 编著

Mu Yanhua Hua Zhen Lin Zhonghai



清华大学出版社



Simulink版



教育部高等学校电子信息类专业教学指导委员会规划教材
高等学校电子信息类专业系列教材

Process Control System

过程控制系统

慕延华 华臻 林忠海 编著

Mu Yanhua Hua Zhen Lin Zhonghai



清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书从教学和应用的角度出发,全面讲解各种过程控制系统的基本概念、工作原理、系统设计分析方法和应用中的技术问题;并通过 Simulink 仿真实例详细阐述了过程控制系统的设计及参数整定等技术。本书共 6 章,包括绪论、简单控制系统、复杂控制系统、先进控制系统、智能控制系统及锅炉设备的控制。

本书内容深入浅出,理论与 Simulink 仿真紧密结合。本书可作为高等院校自动化专业及其他相关专业本科生专业课的教材,也可供从事过程控制领域工作的工程技术人员参考。

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

过程控制系统/慕延华,华臻,林忠海编著. —北京:清华大学出版社,2018

(高等学校电子信息类专业系列教材)

ISBN 978-7-302-48221-5

I. ①过… II. ①慕… ②华… ③林… III. ①过程控制—高等学校—教材 IV. ①TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 207277 号

责任编辑:盛东亮

封面设计:李召霞

责任校对:焦丽丽

责任印制:董 瑾

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:北京嘉实印刷有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm 印 张:19

字 数:463千字

版 次:2018年8月第1版

印 次:2018年8月第1次印刷

定 价:59.00元

产品编号:054253-01

高等学校电子信息类专业系列教材

一 顾问委员会

| | | | |
|-----|--------------------|-----|--------------------|
| 谈振辉 | 北京交通大学 (教指委高级顾问) | 郁道银 | 天津大学 (教指委高级顾问) |
| 廖延彪 | 清华大学 (特约高级顾问) | 胡广书 | 清华大学 (特约高级顾问) |
| 华成英 | 清华大学 (国家级教学名师) | 于洪珍 | 中国矿业大学 (国家级教学名师) |
| 彭启琮 | 电子科技大学 (国家级教学名师) | 孙肖子 | 西安电子科技大学 (国家级教学名师) |
| 邹逢兴 | 国防科学技术大学 (国家级教学名师) | 严国萍 | 华中科技大学 (国家级教学名师) |

一 编审委员会

| | | | | |
|--------|-----|-----------|-----|------------------|
| 主 任 | 吕志伟 | 哈尔滨工业大学 | | |
| 副主任 | 刘 旭 | 浙江大学 | 王志军 | 北京大学 |
| | 隆克平 | 北京科技大学 | 葛宝臻 | 天津大学 |
| | 秦石乔 | 国防科学技术大学 | 何伟明 | 哈尔滨工业大学 |
| | 刘向东 | 浙江大学 | | |
| 委 员 | 王志华 | 清华大学 | 宋 梅 | 北京邮电大学 |
| | 韩 焱 | 中北大学 | 张雪英 | 太原理工大学 |
| | 殷福亮 | 大连理工大学 | 赵晓晖 | 吉林大学 |
| | 张朝柱 | 哈尔滨工程大学 | 刘兴钊 | 上海交通大学 |
| | 洪 伟 | 东南大学 | 陈鹤鸣 | 南京邮电大学 |
| | 杨明武 | 合肥工业大学 | 袁东风 | 山东大学 |
| | 王忠勇 | 郑州大学 | 程文青 | 华中科技大学 |
| | 曾 云 | 湖南大学 | 李思敏 | 桂林电子科技大学 |
| | 陈前斌 | 重庆邮电大学 | 张怀武 | 电子科技大学 |
| | 谢 泉 | 贵州大学 | 卞树檀 | 火箭军工程大学 |
| | 吴 瑛 | 解放军信息工程大学 | 刘纯亮 | 西安交通大学 |
| | 金伟其 | 北京理工大学 | 毕卫红 | 燕山大学 |
| | 胡秀珍 | 内蒙古工业大学 | 付跃刚 | 长春理工大学 |
| | 贾宏志 | 上海理工大学 | 顾济华 | 苏州大学 |
| | 李振华 | 南京理工大学 | 韩正甫 | 中国科学技术大学 |
| | 李 晖 | 福建师范大学 | 何兴道 | 南昌航空大学 |
| | 何平安 | 武汉大学 | 张新亮 | 华中科技大学 |
| | 郭永彩 | 重庆大学 | 曹益平 | 四川大学 |
| | 刘缠牢 | 西安工业大学 | 李儒新 | 中国科学院上海光学精密机械研究所 |
| | 赵尚弘 | 空军工程大学 | 董友梅 | 京东方科技集团股份有限公司 |
| | 蒋晓瑜 | 装甲兵工程学院 | 蔡 毅 | 中国兵器科学研究院 |
| | 仲顺安 | 北京理工大学 | 冯其波 | 北京交通大学 |
| | 黄翊东 | 清华大学 | 张有光 | 北京航空航天大学 |
| | 李勇朝 | 西安电子科技大学 | 江 毅 | 北京理工大学 |
| | 章毓晋 | 清华大学 | 张伟刚 | 南开大学 |
| | 刘铁根 | 天津大学 | 宋 峰 | 南开大学 |
| | 王艳芬 | 中国矿业大学 | 靳 伟 | 香港理工大学 |
| | 苑立波 | 哈尔滨工程大学 | | |
| 丛书责任编辑 | 盛东亮 | 清华大学出版社 | | |

序

FOREWORD

我国电子信息产业销售收入总规模在 2013 年已经突破 12 万亿元,行业收入占工业总体比重已经超过 9%。电子信息产业在工业经济中的支撑作用凸显,更加促进了信息化和工业化的高层次深度融合。随着移动互联网、云计算、物联网、大数据和石墨烯等新兴产业的爆发式增长,电子信息产业的发展呈现了新的特点,电子信息产业的人才培养面临着新的挑战。

(1) 随着控制、通信、人机交互和网络互联等新兴电子信息技术不断发展,传统工业设备融合了大量最新的电子信息技术,它们一起构成了庞大而复杂的系统,派生出大量新兴的电子信息技术应用需求。这些“系统级”的应用需求,迫切要求具有系统级设计能力的电子信息技术人才。

(2) 电子信息系统设备的功能越来越复杂,系统的集成度越来越高。因此,要求未来的设计者应该具备更扎实的理论基础知识和更宽广的专业视野。未来电子信息系统的设计越来越要求软件和硬件的协同规划、协同设计和协同调试。

(3) 新兴电子信息技术的发展依赖于半导体产业的不断推动,半导体厂商为设计者提供了越来越丰富的生态资源,系统集成厂商的全方位配合又加速了这种生态资源的进一步完善。半导体厂商和系统集成厂商所建立的这种生态系统,为未来的设计者提供了更加便捷却又必须依赖的设计资源。

教育部 2012 年颁布了新版《高等学校本科专业目录》,将电子信息类专业进行了整合,为各高校建立系统化的人才培养体系,培养具有扎实理论基础和宽广专业技能的、兼顾“基础”和“系统”的高层次电子信息人才给出了指引。

传统的电子信息学科专业课程体系呈现“自底向上”的特点,这种课程体系偏重对底层元器件的分析与设计,较少涉及系统级的集成与设计。近年来,国内很多高校对电子信息类专业课程体系进行了大力度的改革,这些改革顺应时代潮流,从系统集成的角度,更加科学合理地构建了课程体系。

为了进一步提高普通高校电子信息类专业教育与教学质量,贯彻落实《国家中长期教育改革和发展规划纲要(2010—2020 年)》和《教育部关于全面提高高等教育质量若干意见》(教高【2012】4 号)的精神,教育部高等学校电子信息类专业教学指导委员会开展了“高等学校电子信息类专业课程体系”的立项研究工作,并于 2014 年 5 月启动了《高等学校电子信息类专业系列教材》(教育部高等学校电子信息类专业教学指导委员会规划教材)的建设工作。其目的是为推进高等教育内涵式发展,提高教学水平,满足高等学校对电子信息类专业人才培养、教学改革与课程改革的需要。

本系列教材定位于高等学校电子信息类专业的专业课程,适用于电子信息类的电子信

息工程、电子科学与技术、通信工程、微电子科学与工程、光电信息科学与工程、信息工程及其相近专业。经过编审委员会与众多高校多次沟通,初步拟定分批次(2014—2017年)建设约100门课程教材。本系列教材将力求在保证基础的前提下,突出技术的先进性和科学的前沿性,体现创新教学和工程实践教学;将重视系统集成思想在教学中的体现,鼓励推陈出新,采用“自顶向下”的方法编写教材;将注重反映优秀的教学改革成果,推广优秀的教学经验与理念。

为了保证本系列教材的科学性、系统性及编写质量,本系列教材设立顾问委员会及编审委员会。顾问委员会由教指委高级顾问、特约高级顾问和国家级教学名师担任,编审委员会由教育部高等学校电子信息类专业教学指导委员会委员和一线教学名师组成。同时,清华大学出版社为本系列教材配置优秀的编辑团队,力求高水准出版。本系列教材的建设,不仅有众多高校教师参与,也有大量知名的电子信息类企业支持。在此,谨向参与本系列教材策划、组织、编写与出版的广大教师、企业代表及出版人员致以诚挚的感谢,并殷切希望本系列教材在我国高等学校电子信息类专业人才培养与课程体系建设中发挥切实的作用。

吕志伟 教授

前言

PREFACE

“过程控制系统”是自动化及其相关专业的核心课程之一,也是一门理论与生产实际密切联系的技术性课程。通过本课程的学习,要求学生能够掌握生产过程控制系统的分析、设计和工程实施能力。

本书的编排如下:第1章介绍过程控制的基本概念,过程控制系统的组成、特点和分类,以及设计过程控制系统的基本步骤;第2章是本书的重点,首先介绍简单控制系统的组成和控制性能指标,然后从过程建模、检测变送仪表的选型、控制阀的选型、控制器的控制算法以及控制器的参数整定等几个方面详细阐述了分析、设计一个简单控制系统的基本内容;第3章介绍串级、比值、均匀、前馈、选择、分程、双重等复杂控制系统的设计与实现方法;第4章介绍解耦控制、大滞后补偿控制、推断控制、软测量技术、模型预测控制、自适应控制等几种先进控制技术;第5章介绍模糊控制和专家系统控制这两种典型的智能控制系统,重点讲解了模糊控制在过程控制领域的应用;第6章详细介绍各种控制方案在锅炉设备控制中的应用。

本书在内容上有如下特点:首先是注重系统性设计思想,在第2章中将性能指标分析、过程建模、仪表和控制阀的选型、控制器的控制算法以及参数整定作为一个整体来介绍,使学生更加清晰明了地了解简单控制系统的设计内容;其次是理论与 Simulink 仿真紧密结合,可以通过仿真加深对控制系统设计及参数整定方法的理解。

本书主要由慕延华、华臻、林忠海编著。另外,在本书的编写过程中得到了山东工商学院信息与电子工程学院全体教师的关心和帮助,同时得到了清华大学出版社盛东亮编辑的大力支持和帮助,谨此一并表示衷心感谢!

由于编者水平有限,书中难免存在不足和错误,恳请读者批评指正。作者的 E-mail 为: muyan-hua@163.com。

编者

2018年1月

目录

CONTENTS

| | |
|----------------------------|----|
| 第 1 章 绪论 | 1 |
| 1.1 过程控制的基本概念 | 1 |
| 1.2 过程控制系统的发展与趋势 | 1 |
| 1.3 过程控制系统的组成、特点及分类 | 3 |
| 1.3.1 过程控制系统的组成 | 3 |
| 1.3.2 过程控制系统的特点 | 5 |
| 1.3.3 过程控制系统的分类 | 6 |
| 1.4 过程控制的要求和任务 | 6 |
| 1.4.1 过程控制的要求 | 6 |
| 1.4.2 过程控制的任务 | 6 |
| 1.5 设计和实现过程控制系统的基本步骤 | 7 |
| 思考题与习题 | 9 |
| 第 2 章 简单控制系统 | 10 |
| 2.1 简单控制系统的组成和控制性能指标 | 10 |
| 2.1.1 简单控制系统的组成 | 10 |
| 2.1.2 过程控制系统的性能指标 | 12 |
| 2.2 过程动态特性和过程建模 | 15 |
| 2.2.1 典型过程动态特性 | 15 |
| 2.2.2 过程特性对控制性能指标的影响 | 19 |
| 2.2.3 过程建模的基本概念 | 25 |
| 2.2.4 机理建模 | 27 |
| 2.2.5 过程辨识与参数估计 | 31 |
| 2.3 检测变送仪表的选型 | 57 |
| 2.3.1 检测变送仪表概述 | 58 |
| 2.3.2 测温仪表的分类与选型 | 60 |
| 2.3.3 流量仪表的分类与选型 | 63 |
| 2.3.4 压力仪表的分类与选型 | 65 |
| 2.3.5 物位仪表的分类与选型 | 67 |
| 2.3.6 检测变送信号的处理 | 71 |
| 2.4 控制阀的选型 | 75 |
| 2.4.1 控制阀概述 | 75 |
| 2.4.2 控制阀结构形式及材质的选择 | 77 |
| 2.4.3 控制阀作用方式的选择 | 84 |

| | | |
|--------------|----------------------------|------------|
| 2.4.4 | 控制阀的流量特性 | 86 |
| 2.4.5 | 控制阀流量特性的选择 | 91 |
| 2.4.6 | 控制阀口径的选择 | 92 |
| 2.4.7 | 阀门附件的选择 | 102 |
| 2.5 | 控制器的控制算法 | 103 |
| 2.5.1 | 概述 | 103 |
| 2.5.2 | 模拟 PID 控制算法 | 105 |
| 2.5.3 | 数字 PID 控制算法 | 116 |
| 2.5.4 | 双位控制 | 124 |
| 2.6 | PID 控制器的参数整定 | 126 |
| 2.6.1 | PID 控制器参数整定的一般原则 | 126 |
| 2.6.2 | PID 控制器参数的工程整定方法 | 127 |
| 2.6.3 | PID 控制器参数的自整定方法 | 135 |
| 2.7 | 控制系统的投运 | 137 |
| 2.7.1 | 投运前的准备 | 137 |
| 2.7.2 | 投运过程 | 137 |
| | 思考题与习题 | 138 |
| 第 3 章 | 复杂控制系统 | 139 |
| 3.1 | 串级控制系统 | 139 |
| 3.1.1 | 串级控制系统的基本原理和结构 | 139 |
| 3.1.2 | 串级控制系统的特点 | 142 |
| 3.1.3 | 串级控制系统的设计 | 144 |
| 3.1.4 | 串级控制系统的参数整定及投运 | 148 |
| 3.1.5 | 串级控制系统的变型 | 150 |
| 3.1.6 | 串级控制系统 Simulink 仿真示例 | 152 |
| 3.2 | 比值控制系统 | 156 |
| 3.2.1 | 比值控制系统的基本原理和结构 | 156 |
| 3.2.2 | 比值系数的计算 | 161 |
| 3.2.3 | 比值控制系统的设计 | 163 |
| 3.2.4 | 比值控制系统的参数整定和投运 | 165 |
| 3.2.5 | 比值控制系统的变型 | 166 |
| 3.2.6 | 比值控制系统 Simulink 仿真示例 | 167 |
| 3.3 | 均匀控制系统 | 172 |
| 3.3.1 | 均匀控制系统的基本原理 | 172 |
| 3.3.2 | 均匀控制系统的类型 | 174 |
| 3.3.3 | 均匀控制系统控制规律的选择及参数整定 | 176 |
| 3.3.4 | 均匀控制系统 Simulink 仿真示例 | 177 |
| 3.4 | 前馈控制系统 | 180 |
| 3.4.1 | 前馈控制和不变性原理 | 180 |
| 3.4.2 | 前馈控制的主要结构形式 | 181 |
| 3.4.3 | 前馈控制系统的设计及工程实施中的几个问题 | 186 |
| 3.4.4 | 前馈控制系统的投运与参数整定 | 187 |
| 3.4.5 | 前馈控制系统 Simulink 仿真示例 | 187 |

| | | |
|------------|---------------------------------|------------|
| 3.5 | 选择性控制系统 | 192 |
| 3.5.1 | 选择性控制系统的基本原理 | 193 |
| 3.5.2 | 选择性控制系统的类型 | 194 |
| 3.5.3 | 选择性控制系统的设计 | 198 |
| 3.5.4 | 选择性控制系统应用实例 | 199 |
| 3.6 | 分程控制系统 | 201 |
| 3.6.1 | 分程控制系统的基本概念和结构 | 201 |
| 3.6.2 | 分程控制系统的应用 | 202 |
| 3.6.3 | 分程控制系统设计和工程应用中的几个问题 | 204 |
| 3.7 | 双重控制系统 | 205 |
| 3.7.1 | 基本原理和结构 | 205 |
| 3.7.2 | 双重控制系统设计和工程应用 | 207 |
| 3.7.3 | 双重控制系统应用实例 | 207 |
| | 思考题与习题 | 208 |
| 第4章 | 先进控制系统 | 209 |
| 4.1 | 解耦控制系统 | 209 |
| 4.1.1 | 系统的关联分析 | 209 |
| 4.1.2 | 相对增益和相对增益矩阵 | 210 |
| 4.1.3 | 解耦控制系统的设计 | 214 |
| 4.1.4 | 解除控制系统的简化设计 | 216 |
| 4.1.5 | 解耦控制系统设计举例 | 217 |
| 4.1.6 | 解耦控制系统的 Simulink 仿真 | 218 |
| 4.2 | 大滞后补偿控制系统 | 223 |
| 4.2.1 | 大滞后过程概述 | 223 |
| 4.2.2 | 纯滞后对系统控制品质的影响 | 223 |
| 4.2.3 | Smith 预估补偿控制方案 | 224 |
| 4.2.4 | Smith 补偿器的计算机实现 | 225 |
| 4.2.5 | 改进型 Smith 预估补偿控制 | 227 |
| 4.2.6 | Smith 补偿控制系统的 Simulink 仿真 | 229 |
| 4.3 | 推断控制系统 | 231 |
| 4.3.1 | 推断控制系统的组成 | 231 |
| 4.3.2 | 推断反馈控制系统 | 233 |
| 4.3.3 | 输出可测条件下的推断控制 | 234 |
| 4.4 | 软测量技术 | 237 |
| 4.4.1 | 软测量模型的数学描述 | 237 |
| 4.4.2 | 影响软测量性能的主要因素 | 238 |
| 4.4.3 | 软测量的实施 | 241 |
| 4.4.4 | 软测量的工业应用 | 241 |
| 4.5 | 预测控制 | 242 |
| 4.5.1 | 预测控制的发展 | 242 |
| 4.5.2 | 预测控制的基本原理 | 243 |
| 4.5.3 | 模型算法控制 | 244 |
| 4.6 | 自适应控制 | 246 |

| | | |
|------------|----------------|------------|
| 4.6.1 | 自适应控制的基本概念 | 246 |
| 4.6.2 | 模型参考自适应控制系统 | 247 |
| 4.6.3 | 自校正控制系统 | 248 |
| | 思考题与习题 | 252 |
| 第5章 | 智能控制系统 | 253 |
| 5.1 | 模糊控制系统 | 254 |
| 5.1.1 | 模糊控制的基本概念及发展 | 254 |
| 5.1.2 | 模糊集合及基本运算 | 255 |
| 5.1.3 | 模糊关系及合成 | 256 |
| 5.1.4 | 模糊推理 | 258 |
| 5.1.5 | 模糊控制器的基本结构 | 262 |
| 5.1.6 | 模糊控制器设计的若干问题 | 264 |
| 5.1.7 | 模糊控制器设计实例 | 269 |
| 5.2 | 专家控制系统 | 274 |
| 5.2.1 | 专家系统与专家控制 | 274 |
| 5.2.2 | 专家控制器 | 274 |
| 5.2.3 | 专家控制系统的设计 | 275 |
| | 思考题与习题 | 276 |
| 第6章 | 锅炉设备的控制 | 277 |
| 6.1 | 锅炉汽包水位的控制 | 278 |
| 6.1.1 | 锅炉汽包水位的动态特性 | 279 |
| 6.1.2 | 锅炉汽包水位控制方案 | 280 |
| 6.2 | 锅炉燃烧系统的控制 | 284 |
| 6.2.1 | 燃烧控制系统的任务 | 284 |
| 6.2.2 | 蒸汽压力控制系统 | 285 |
| 6.2.3 | 烟气氧含量闭环控制系统 | 287 |
| 6.2.4 | 炉膛压力控制系统 | 288 |
| 6.2.5 | 安全联锁控制系统 | 289 |
| 6.3 | 蒸汽过热系统的控制 | 289 |
| 6.3.1 | 过热蒸汽温度控制的任务 | 289 |
| 6.3.2 | 过热蒸汽温度控制的基本方案 | 290 |
| | 思考题与习题 | 291 |
| | 参考文献 | 292 |

1.1 过程控制的基本概念

工业自动化是综合运用控制理论、电子装备、仪器仪表、计算机和相关工艺技术,对工厂或企业的生产设备或工业生产过程实现检测、控制、优化、调度、管理和决策,以达到增加产量、提高质量、节省能源、降低消耗、减少污染、确保安全等目的的一种综合性技术。

工业自动化涉及的范围极广,可分为生产过程自动化、电气传动自动化、电力系统自动化、生产管理自动化、楼宇自动化等。生产过程自动化是工业自动化的重要分支,是自动控制技术在石油、化工、冶金、电力、轻工、纺织等工业生产过程中的具体应用。

凡是采用数字或模拟控制方式对生产过程中的某些物理参数进行自动控制的过程就称为过程控制。具体来说,过程控制是通过采用各种自动化仪表、计算机等自动化工具,应用自动控制理论,对生产过程中某些物理参数进行自动检测、监督和控制,从而实现现代企业安全、优质、低耗和高效益的生产。因而,过程控制是控制理论与工业生产过程、设备,以及自动化仪表和计算机工具相结合的工程应用科学。

工业生产过程是指原材料经过若干加工步骤转变成产品并具有一定生产规模的过程。它分为连续生产过程(如石油化工、冶金、发电、造纸、化工、轻工、污水处理等)、半连续和间歇(批量)生产过程(如制药工业、食品工业)和离散制造过程(如机械制造、汽车工业、仪器仪表工业、家电工业等)。过程控制主要是针对连续生产过程采用的一种控制方法,在这些生产过程中自动控制系统的被控参数通常是温度、压力、流量、液位(或物位)和成分等变量。

1.2 过程控制系统的发展与趋势

在 20 世纪 40 年代以前,工业生产非常落后,大多数工业生产过程均处于手工操作状态,只有少量简单的检测仪表用于生产过程,操作人员主要根据观测到的反映生产过程的关键参数,人工改变操作条件,凭经验去控制生产过程。

20 世纪 40 年代以后,工业生产过程的自动化技术发展迅速。过程控制系统的发展,大致经历了以下四个阶段:基地式仪表控制系统、单元组合式仪表控制系统、计算机控制系统和计算机综合自动化系统(computer integrated processing system, CIPS)。

1. 基地式仪表控制系统

20 世纪 50 年代前后,一些工厂企业的部分生产过程实现了仪表化和局部自动化。这

是过程控制发展的第一个阶段。这一阶段过程控制系统的主要特点如下：系统结构大多数是单输入单输出系统；检测控制仪表普遍采用基地式仪表和部分单元组合仪表（气动Ⅰ型和电动Ⅰ型）；控制理论是基于传递函数、以反馈为中心的经典控制理论。

2. 单元组合式仪表控制系统

20世纪60年代，随着工业生产的不断发展，对过程控制提出了新的要求，开始了过程控制的第二个阶段。在过程控制系统方面，为了提高控制质量和实现一些特殊的工艺要求，相继开发和应用了各种复杂的过程控制方案，如串级控制、比值控制、均匀控制、前馈控制和选择性控制等。在仪表方面，单元组合仪表（气动Ⅱ型和电动Ⅱ型）成为主流产品。这些复杂控制系统的理论基础主要是以状态空间法为基础，以极小值原理和动态规划等最优控制理论为基本特征的现代控制理论。

3. 计算机控制系统

20世纪70年代，出现了专门用于过程控制的小型计算机，最初是由直接数字控制（direct digital control, DDC）实现集中控制，代替常规控制仪表。由于当时数字计算机的可靠性还不够高，一旦计算机出现某种故障，就会造成系统崩溃，所有控制回路瘫痪、生产停产的严重局面。由于工业生产很难接受这种危险高度集中的系统结构，使得集中控制系统的应用受到一定的限制。随着计算机可靠性的提高和价格的下降，过程控制领域又出现了一种新型控制方案——集散控制系统（distributed control system, DCS）。DCS在硬件上将控制回路分散化，并将数据显示、实时监督等功能集中化，提高了系统的可靠性，有利于安全平稳地生产。就控制策略（算法）而言，DCS仍以简单PID控制为主，再加上一些复杂控制算法，并没有充分发挥计算机的功能和控制水平。在仪表方面，气动单元组合仪表（气动Ⅲ型）的品种不断增加，电动单元组合仪表（电动Ⅲ型）也实现了本质上安全防爆，适应了各种复杂控制系统的要求。以微处理器为核心的智能控制装置（如KMM可编程调节器）、可编程逻辑控制器（programmable logic controller, PLC）、工业PC和数字控制器等成为控制装置的主流。在控制理论方面，形成了大系统理论和智能控制理论。

20世纪70年代后期，为了克服控制理论与工业应用之间不协调的问题，人们开始打破传统方法的约束，试图直接面对工业过程的特点，寻找对模型要求低、综合控制质量好、在线计算方便的优化控制新算法，模型预测控制（model predictive control, MPC）因此发展起来。MPC是一种基于模型的计算机控制算法，目前已经在炼油、化工、电力、航空航天、汽车控制等多个方面有着成功的应用，是当前工业过程应用中最具代表性的先进控制算法。此外，软测量技术、自适应控制等先进控制技术也开始应用于过程控制系统。

4. 计算机综合自动化系统

20世纪80年代中后期，随着微电子技术和大规模以及超大规模集成电路的迅速发展，国际上发展起来一种以微处理器为核心，使用集成电路实现现场设备信息采集、传输、处理以及控制等功能的智能信号传输技术——现场总线，并构成了新型的网络集成式全分布控制系统——现场总线控制系统（fieldbus control system, FCS）。现场总线控制系统将挂在总线上、作为网络节点的智能设备连接为网络系统，并进一步构成自动化系统，从而实现基本控制、补偿计算、参数修改、报警、显示、监控、优化及管控一体化的综合自动化功能。

现场总线控制系统突破了DCS通信由专用网络的封闭系统来实现所造成的缺陷，把基于封闭、专用的解决方案变成了基于公开化、标准化的解决方案。既可以把来自不同厂商而

遵守同一协议规范的自动化设备,通过现场总线网络连接成系统,实现综合自动化的各种功能,同时也可以把 DCS 集中与分散相结合的集散系统结构,变成新型全分布式结构,把控制功能彻底下放到现场,依靠现场智能设备本身便可实现基本控制功能。

当前,过程控制已进入全新的、基于网络的计算机综合自动化系统时代。CIPS 以综合生产指标(包括产品质量、产量、成本和消耗等)为性能指标,以计算机和网络技术为手段,以生产工业的控制过程与管理过程为主要对象,将生产过程中的生产工艺技术、设备运行技术和生产过程管理技术集成,实现生产过程控制、运行、管理的优化集成,从而进一步实现管理的扁平化和综合生产指标的优化。

随着现代工业生产的迅速发展,工艺条件越来越复杂,对过程控制的要求也越来越高。复杂工业过程的特点主要表现为多变量、分布参数、大惯性、大滞后和非线性等。面对复杂的对象,用传统控制的理论和方法已经不能很好地完成控制任务了。因此,模糊控制、神经网络控制、专家系统控制等智能控制技术已经成为过程控制的重要技术。可以预见,随着人工智能技术不断地发展和完善,过程控制系统的智能化程度会越来越高。

1.3 过程控制系统的组成、特点及分类

1.3.1 过程控制系统的组成

过程控制系统主要由被控过程和自动化仪表(包括计算机)两部分组成,其中自动化仪表负责对被控过程的工艺参数进行自动地测量、监视和控制等。下面以几个典型的工业控制系统为例介绍过程控制系统的基本组成。

1. 锅炉汽包水位控制系统

在锅炉正常运行中,汽包水位是一个重要的参数,它的高低直接影响蒸汽的品质和锅炉的安全。水位过低,当负荷很大时,汽化速度很快,汽包内的液体将全部汽化,导致锅炉烧干甚至会引起爆炸;而水位过高则会影响汽包的汽水分离,产生蒸汽带液现象,降低了蒸汽的质量和产量,严重时则会损坏后续设备。

图 1-1 是锅炉汽包水位人工控制系统示意图。人工控制的过程简述如下:操作人员用眼睛观察玻璃液位计中的指示值,然后通过神经系统传给大脑,大脑根据指示值和工艺要求

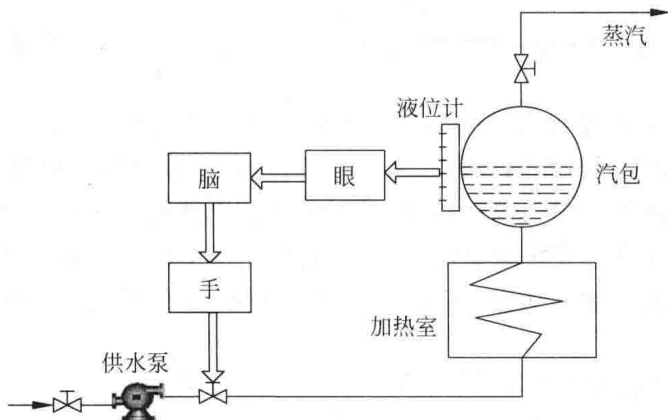


图 1-1 锅炉汽包水位人工控制系统示意图

的控制目标值进行比较,得到偏差的大小和方向,并根据操作经验发出信息命令传至双手,双手根据大脑的指令去改变给水阀的方向和大小,使蒸汽的消耗量和给水量相等,最终使水位保持在设定目标值上。在这个过程中,人的眼睛、大脑、手分别起到检测、判断分析和运算、执行的作用,完成测量、计算偏差、纠错偏差的过程,保持锅炉汽包水位恒定。

人工控制方式由于受生理的限制,无论在速度上还是在精度上都是有限的。为了提高控制精度,减轻操作人员的劳动强度,改善操作人员的工作环境,用一些自动控制装置,如测量仪表、控制仪表、执行机构等替代人工操作过程,使人工控制转变成自动控制。

图 1-2 为锅炉汽包水位自动控制系统的示意图。汽包水位自动控制的过程简述如下:液位测量变送器检测锅炉汽包水位的变化,并将汽包水位高低这一物理量转换成仪表间的标准统一信号。控制器接收液位测量变送器输出的标准统一信号,并与工艺控制要求的目标水位信号相比较得出偏差信号的大小和方向,按一定的规律运算后输出一个对应的标准统一信号。执行器接收到控制器的输出信号后,根据信号的大小和方向控制阀门的开度,从而改变给水量,经过反复测量和控制使锅炉汽包水位达到工艺控制要求。

2. 转炉供氧量控制系统

转炉是炼钢工业生产过程中的重要设备。熔融的铁水装入转炉后,可以通过氧枪供给转炉一定的氧气量,在氧气的作用下,铁水中的碳逐渐氧化燃烧,从而使铁水中的含碳量不断地降低,控制吹氧量和吹氧时间就可以控制冶炼钢水的含碳量,从而获得不同品种的钢。为了冶炼各种不同品种的钢材,设计了如图 1-3 所示的转炉供氧量控制系统。

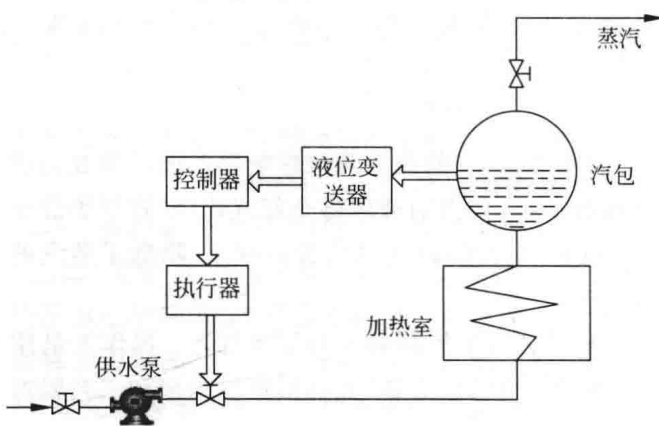


图 1-2 锅炉汽包水位自动控制系统示意图

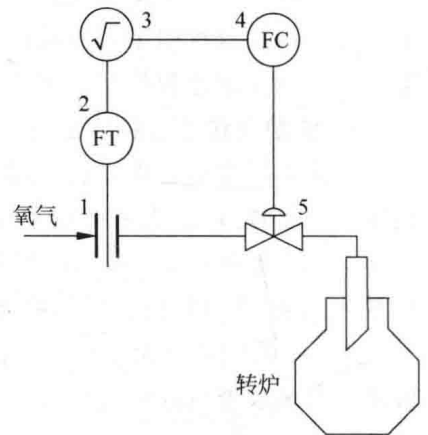


图 1-3 转炉供氧量控制系统示意图

本系统采用 DDZ-III 型仪表。采用节流装置 1 测量氧气流量,并送至流量变送器 (FT) 2,再经开方器 3 后作为流量控制器 (FC) 4 的测量值,将测量值与供氧量的给定值进行比较得到偏差,控制器按此偏差输入信号以某种 PID 控制规律进行运算,并输出控制信号去调节控制阀 5 的开度,从而改变供氧量的大小,以满足生产工艺的要求。

由以上两个过程控制系统的分析,可以得到过程控制系统的一般性框图,如图 1-4 所示。

对于图 1-4,需要说明以下几点:

(1) 在该图中,检测变送、控制器和执行器等各环节是单向作用的,即各环节的输入信号会影响输出信号,但是输出信号不会反过来影响输入信号。

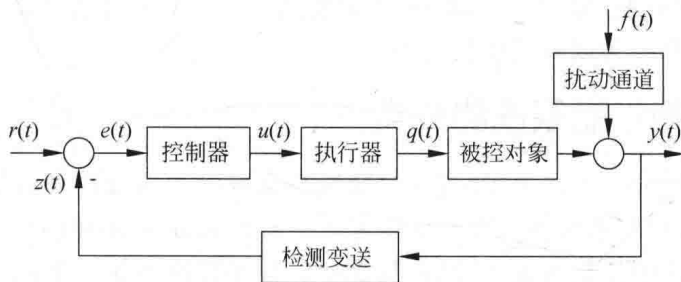


图 1-4 过程控制系统的一般性框图

(2) 框图中,箭头表示信号的流向,而不是具体物料或能量的流向。

(3) 图中的比较环节实际上是控制器的一个部分,并不是独立的元件,是为了更醒目地表示控制器的比较作用,才将其单独画出。

现将图 1-4 中名词术语作如下说明:

(1) 被控变量 $y(t)$: 被控变量表征生产设备或过程运行状况,是需要加以控制的变量,也是过程控制系统的输出量。如锅炉汽包水位控制系统中的水位就是被控变量。

(2) 设定值(给定值、期望值) $r(t)$: 设定值是工艺要求上被控变量的值,也是过程控制系统的输入量。如锅炉汽包水位控制系统中要求水位保持在 50%,其所对应的标准信号就是设定值。

(3) 扰动变量 $f(t)$: 在生产过程中,凡是影响被控变量的各种外来因素都称为扰动。扰动也是过程控制系统的输入量。如锅炉汽包水位控制系统中给水压力的变化和蒸汽负荷的变化等都是扰动。

(4) 操纵变量 $q(t)$: 操纵变量是受控制器操纵,用以克服扰动变量的影响,使被控变量保持在设定值的物料量或能量。在选择操纵变量时,应考虑对被控变量具有较强直接影响的且便于调节的变量。用来实现控制作用的物料一般称为操纵介质。如锅炉汽包水位控制系统中的给水量就是操纵变量,给水就是操纵介质。

(5) 测量值 $z(t)$: 被控变量经检测变送环节实际测量的值。

(6) 偏差 $e(t)$: 被控变量的设定值与测量值之差。

(7) 控制作用 $u(t)$: 控制器的输出值。

1.3.2 过程控制系统的特点

同其他自动控制系统相比,过程控制系统具有如下明显特点。

1. 被控过程的连续性

大多数被控过程都是以长期或间歇的形式连续运行,在密封的设备中被控变量不断地受到各种扰动的影晌。

2. 被控对象的复杂性

首先,被控对象涉及的范围广。如石油化工过程的精馏塔、反应器,热工过程的换热器、锅炉等。其次,被控对象具有复杂特性。如大惯性、大滞后、非线性、分布参数、时变等特性。

3. 控制方案的多样性

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。包括常规

PID控制、改进PID控制、串级控制、前馈-反馈控制、解耦控制、比值控制、均匀控制、选择性控制、模糊控制、预测控制以及最优控制等。

1.3.3 过程控制系统的分类

过程控制系统的分类方法很多,按被控变量类型可分为温度控制系统、压力控制系统、流量控制系统、液位控制系统等;按开闭环可分为开环控制系统和闭环控制系统;按给定值信号特点可分为定值控制系统、随动控制系统和程序控制系统。下面简单说明按给定值信号特点的分类方式。

1. 定值控制系统

定值控制系统是一类给定值保持恒定的控制系统。定值控制系统是工业生产过程中应用最多的一种控制系统。该系统的主要作用是克服一切扰动对被控变量的影响,使被控变量保持在设定值。

2. 随动控制系统

随动控制系统,又称为伺服控制系统,是指给定值随时间随机变化的控制系统。导弹发射架控制系统、雷达天线控制系统等都属于随动控制系统。串级控制系统中的副回路、比值控制系统中的副流量回路也是随动控制系统。

3. 程序控制系统

如果给定值按事先设定好的程序变化,则称为程序控制系统。电饭锅是程序控制系统在现实生活中应用的一个典型例子。

1.4 过程控制的要求和任务

1.4.1 过程控制的要求

现代工业生产过程往往流程复杂、规模庞大,同时又有高温、高压、易燃、易爆、有毒等特点。因而,对过程控制的要求有很多,但归纳起来主要有三个方面,即安全性、稳定性和经济性。

1. 安全性

安全性是指在整个生产过程中,要确保人身和设备安全,这是最重要也是最基本的要求。为达到此目的,通常采用参数越限报警、联锁保护等措施加以实现。随着工业生产过程的连续化和大型化,上述措施已不能满足要求,还必须设计在线故障诊断系统和容错控制系统等来进一步提高生产运行的安全性。

2. 稳定性

稳定性是指系统具有抑制外部干扰、保持生产过程长期稳定运行的能力,这也是过程控制系统能够正常运行的基本保证。

3. 经济性

经济性是指要求生产成本低而效率高,这也是现代工业生产所追求的目标。

1.4.2 过程控制的任務

过程控制的任务是在了解、熟悉、掌握生产工艺流程与生产过程的静态和动态特性的基础上,根据工艺要求,应用控制理论、现代控制技术,对过程控制系统进行分析、设计、整定,