



普通高等教育“十一五”国家级规划教材



高等学校网络教育系列教材

过程控制工程

第三版

罗健旭 黎冰 黄海燕 何衍庆 编著



化学工业出版社

普通高等教育“十一五”国家级规划教材
高等学校网络教育系列教材

过程控制工程

第三版

罗健旭 黎冰 黄海燕 何衍庆 编著



化学工业出版社

本书讨论过程控制系统的结构、原理、特点、适用场合、系统分析和应用注意事项等问题，并与工艺设备和工业生产过程中控制系统的应用结合。本书理论与实际结合，在第二版的基础上，增补了近年来控制工程领域的新成果，并增加了设计应用示例，为适应网络教学的要求，对编排和内容进行了重新编写。

本书共分9章。分别按控制结构、工业过程设备等内容进行讨论。第1部分内容涉及建立被控过程的数学模型、简单控制系统各组成环节的分析和相互影响；常见的串级控制、均匀控制、前馈控制、比值控制、分程控制、选择性控制、双重控制和基于模型计算的控制系统等复杂控制系统；为便于理论与实践结合，增加了各类复杂控制系统的设计应用示例。介绍先进控制系统，包括预测控制、解耦控制、软测量和推断控制、时滞补偿控制、智能控制和间歇过程的控制等内容。第2部分以工业过程设备为主线，分析和讨论不同类型工业设备的控制，包括流体输送设备、传热设备、精馏塔和化学反应器设备的控制。

本书可作为普通高等学校自动化及相关专业本科生和研究生的教材，也可供工业生产过程控制领域的工程技术人员和设计部门的工程技术人员作为参考书或工具书。

图书在版编目 (CIP) 数据

过程控制工程/罗健旭等编著. —3版. —北京:

化学工业出版社, 2015.9

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

高等学校网络教育系列教材

ISBN 978-7-122-24849-7

I. ①过… II. ①罗… 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 (2015) 第 179880 号

责任编辑: 郝英华

装帧设计: 张 辉

责任校对: 吴 静

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 装: 三河市延风印装有限公司

787mm×1092mm 1/16 印张 16¼ 字数 420 千字 2015 年 10 月北京第 3 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 35.00 元

版权所有 违者必究

前 言

自 2004 年本书第一版出版以来,作为自动化和检测仪表专业本专科生的教材,得到广大教师和学生的肯定和厚爱,并作为上海市高等教育精品课程和国家级精品课程教材之一,被兄弟院校和有关培训部门采用。作为教育部批准的普通高等教育“十一五”国家级规划教材,第二版教材获得 2011 年上海市高校优秀教材二等奖,2012 年中国石油和化学工业优秀出版物(教材类)一等奖。结合近年来控制工程的最新进展和多年教学和科研工作的实践经验,这次改版作如下修改。

(1) 将本书名称“工业生产过程控制”改为“过程控制工程”,与课程名称一致。

(2) 本书采用符合国家标准 GB 2625 和 HG 20505 规定的过程检测和控制流程图用的工程设计符号。因此,深受自控工程设计人员欢迎。一些设计单位已将本书作为设计工具书,自控设计人员人手一册,他们将教材的有关控制方案直接应用于 P&ID 中,极大地方便了设计工作。他们希望能够在书中提供有关控制方案的设计示例,为此,这次改版中填补了这方面的空缺。

(3) 为便于应用,本次改版增加简单控制系统的整定计算公式、串级控制系统的整定计算公式,并增加了其他复杂控制系统的控制器参数整定等内容。

(4) MATLAB 语言是科学计算语言,它在国外已被广泛应用于控制系统的分析设计和应用,并发挥极其重要的作用。本次改版增强这方面内容,例如,精馏塔动态模型的仿真研究,并在课件中增加了有关控制系统的 Simulink 仿真等,便于读者应用 MATLAB/Simulink 平台对控制方案进行分析和设计。

(5) 原书为学有余力的学生提供大量资料,这对一般学生而言是资源浪费。因此,这次改版删除这部分内容,增强了有关基础知识内容的介绍,以有利于广大学生的学习和掌握。学有余力的学生可参考有关资料学习。

(6) 节能减排得到广泛重视,变频调速已经在流体输送设备获得广泛应用,并取得经济效益。为此,“流体输送设备的控制”章增加变频调速控制、变频调速和控制阀并存时的控制等内容,以适应日益增长的应用要求。

(7) CAI 课件是评选精品课程的重要内容。兄弟院校教师反映原版采用 MATLAB 语言编写,不容易增删有关内容,对教师积极性发挥不利。本次改版,采用容易操作的 PPT 重新编写 CAI 课件。改版后,CAI 课件仅提供采用本书的相关兄弟院校教师(向 cipedu@163.com 索取)。

(8) 间歇过程的控制与连续过程的控制各有不同特点,随着工业生产过程的精细化,对间歇过程的控制提出更高要求,为此,这次改版对间歇过程的控制特点、管理等内容进行介绍。

(9) 为便于练习,本教材的习题解答将另行出版发行。

本书分 9 章。第 1 章绪论,说明本课程的目的和任务,过程控制概述和发展。第 2 章过程动态数学模型,介绍动态建模方法和过程。第 3 章介绍单回路控制系统的基本概念,包括检测变送环节、执行器环节、控制算法、参数整定和控制系统投运及简单控制系统设计示

序

网络教育是依托现代信息技术进行教育资源传播、组织教学的一种崭新形式，它突破了传统教育传递媒介上的局限性，实现了时空有限分离条件下的教与学，拓展了教育活动发生的时空范围。从1998年9月教育部正式批准清华大学等4所高校为国家现代远程教育第一批试点学校以来，我国网络教育历经了8年发展期，目前全国已有67所普通高等学校和中央广播电视大学开展现代远程教育，注册学生超过300万人，毕业学生100万人。网络教育的实施大大加快了我国高等教育的大众化进程，使之成为高等教育的一个重要组成部分；随着它的不断发展，也必将对我国终身教育体系的形成和学习型社会的构建起到极其重要的作用。

华东理工大学是国家“211工程”重点建设高校，是教育部批准成立的现代远程教育试点院校之一。华东理工大学网络教育学院凭借其优质的教育教学资源、良好的师资条件和社会声望，自创建以来得到了迅速的发展。但网络教育作为一种不同于传统教育的新型教育组织形式，如何有效地实现教育资源的传递，进一步提高教育教学效果，认真探索其内在的规律，是摆在我们面前的一个新的、亟待解决的课题。为此，我们与有关出版社合作，组织了一批多年来从事网络教育课程教学的教师，结合网络教育学习方式，陆续编撰出版一批包括图书、课程光盘等在内的远程教育系列教材，以期逐步建立以学科为先导的、适合网络教育学生使用的教材结构体系。

掌握学科领域的基本知识和技能，把握学科的基本知识结构，培养学生在实践中独立地发现问题和解决问题的能力是我们组织教材编写的一个主要目的。系列教材包括了计算机应用基础、大学英语等全国统考科目，也将涉及管理、法学、国际贸易、化工等多学科领域的专业教材。

根据网络教育学习方式的特点编写教材，既是网络教育得以持续健康发展的基础，也是一次全新的尝试。本套教材的编写凝聚了华东理工大学众多在学科研究和网络教育领域中有丰富实践经验的教师、教学策划人员的心血，希望它的出版能对广大网络教育学习者进一步提高学习效率予以帮助和启迪。

华东理工大学副校长
涂善东教授

例。第4章介绍常用复杂控制系统，包括串级控制、均匀控制、前馈控制、比值控制、分程控制、选择性控制、双重控制和基于模型计算的控制系统等，第5章介绍常见的以现代控制理论为基础的先进控制系统，包括预测控制、解耦控制、软测量和推断控制、时滞补偿控制、智能控制和间歇过程的控制等。第6章到第9章以工业过程设备为主线，分析和讨论不同类型工业设备的控制，包括流体输送设备的控制、传热设备的控制、精馏塔的控制和化学反应器控制。

罗健旭、黎冰、黄海燕、何衍庆参加第三版编写工作。本次编写工作得到华东理工大学网络学院、信息科学与工程学院自动化系的涂善东、刘百祥、侍洪波、王慧锋、顾幸生、林家骏、刘漫丹、孙自强、凌志浩、王华忠给予的大力支持。青岛科技大学自动化与电子工程学院刘喜梅教授在百忙中审读了本书，并提出宝贵的改进意见。蒋慰孙、智北超先生生前对本书再版十分关心，并提出宝贵意见和建议，俞金寿、彭瑜、黄道、吴勤勤、邱宣振、袁景琪、杨慧中、叶银忠、姜捷、裴智轶、周人、汪湛、余勇、柯春雷、朱杰、陈联、龙卷海、胡雯茵、董亮、陈佳、智恒平、Michael R、何尊青、智恒勤、吴洁、张春利、车运慧、陈伟、王为国、杨洁给予了不少建议，并提供了大量资料和技术支持。兄弟院校教授“过程控制工程”课程的教师对本书的改版也提供了建设性的建议和意见。参加本书编写工作的还有陈积玉、何乙平、王朋，此外，栗粟、蒋明华、洪光明、范秀兰、张胜利、陈天成、顾成达、杭一飞、冯保罗、黄雅明、周孝英、赵俊艳、汪淳、周延峰、黄玉莲、张又文、方菲也提供了不少帮助。本书出版还得到化学工业出版社的大力支持和帮助，谨在此一并表示衷心感谢和诚挚谢意。同时要感谢使用本书的广大教师和学生、广大科技工作者和工程技术人员的热情支持，他们为本书的改进提供了宝贵的反馈意见和建议。

由于时间仓促和编著者的水平所限，疏漏之处在所难免，恳请读者不吝指正。

编著者

2015年6月于华东理工大学

目 录

| | | | |
|-----------------------------|----|-----------------------------|----|
| 第 1 章 绪论 | 1 | 3.5.1 控制器参数整定原则 | 49 |
| 1.1 过程控制工程课程的目的与任务 | 1 | 3.5.2 控制器参数整定方法 | 50 |
| 1.2 过程控制概述 | 2 | 3.5.3 控制系统的投运和维护 | 53 |
| 1.3 过程控制的发展和趋势 | 3 | 3.6 简单控制系统设计实例 | 54 |
| 习题和思考题 | 6 | 3.6.1 变换炉生产工艺过程简介 | 54 |
| 第 2 章 过程动态数学模型 | 7 | 3.6.2 控制方案分析 | 54 |
| 2.1 被控过程动态数学模型和建模 | 7 | 3.6.3 检测变送仪表和控制仪表的选型 | 55 |
| 2.1.1 被控过程的数学模型 | 7 | 习题和思考题 | 56 |
| 2.1.2 被控过程动态数学模型的建立 | 8 | 第 4 章 常用复杂控制系统 | 58 |
| 2.2 过程特性对控制性能指标的影响 | 13 | 4.1 串级控制系统 | 58 |
| 2.2.1 自衡的非振荡过程特性对控制性能指标的影响 | 13 | 4.1.1 基本原理、结构和性能分析 | 58 |
| 2.2.2 控制系统的确定 | 14 | 4.1.2 串级控制系统设计和工程应用中的问题 | 62 |
| 习题和思考题 | 15 | 4.1.3 串级控制系统中控制器的参数整定和系统投运 | 66 |
| 第 3 章 单回路控制系统 | 16 | 4.1.4 串级控制系统设计示例 | 67 |
| 3.1 控制系统组成和控制性能指标 | 16 | 4.2 均匀控制系统 | 69 |
| 3.1.1 控制系统的组成 | 16 | 4.2.1 基本原理和结构 | 69 |
| 3.1.2 控制系统的控制性能指标 | 19 | 4.2.2 均匀控制系统中控制器的参数整定 | 70 |
| 3.2 检测变送环节 | 22 | 4.2.3 均匀控制系统设计示例 | 71 |
| 3.2.1 检测变送环节的性能 | 22 | 4.3 前馈控制系统 | 72 |
| 3.2.2 检测变送信号的数据处理 | 24 | 4.3.1 基本原理、结构和性能分析 | 72 |
| 3.3 执行器环节 | 26 | 4.3.2 前馈控制系统设计和工程应用中的问题 | 75 |
| 3.3.1 执行器概述 | 26 | 4.3.3 前馈控制系统的参数整定和投运 | 78 |
| 3.3.2 控制阀流量特性 | 28 | 4.3.4 多变量前馈控制系统 | 78 |
| 3.3.3 控制阀流量特性的选择 | 30 | 4.3.5 前馈控制系统设计示例 | 79 |
| 3.3.4 阀门定位器的正确使用 | 33 | 4.4 比值控制系统 | 80 |
| 3.3.5 其他执行器 | 34 | 4.4.1 基本原理、结构和性能分析 | 80 |
| 3.4 控制器的控制算法 | 35 | 4.4.2 比值控制系统的实施 | 81 |
| 3.4.1 模拟 PID 控制算法 | 35 | | |
| 3.4.2 数字 PID 控制算法 | 44 | | |
| 3.4.3 开关控制 | 48 | | |
| 3.5 控制器参数整定和控制系统投运 | 49 | | |

| | | | | | |
|------------|--------------------|------------|------------|--------------------------|------------|
| 4.4.3 | 比值控制系统设计和工程应用中的问题 | 83 | 5.2.2 | 解耦控制系统的设计和工程应用中的问题 | 121 |
| 4.4.4 | 比值控制系统的参数整定和投运 | 85 | 5.2.3 | 解耦控制系统设计示例 | 126 |
| 4.4.5 | 比值控制系统设计示例 | 85 | 5.3 | 软测量和推断控制 | 130 |
| 4.5 | 分程控制系统 | 88 | 5.3.1 | 软测量技术 | 130 |
| 4.5.1 | 基本原理、结构和性能分析 | 88 | 5.3.2 | 推断控制系统 | 132 |
| 4.5.2 | 分程控制系统设计和工程应用中的问题 | 88 | 5.3.3 | 软测量和推断控制设计示例 | 133 |
| 4.5.3 | 分程控制系统设计示例 | 91 | 5.4 | 时滞补偿控制 | 134 |
| 4.6 | 选择性控制系统 | 91 | 5.4.1 | 史密斯预估补偿控制 | 135 |
| 4.6.1 | 基本原理、结构和性能分析 | 91 | 5.4.2 | 内模控制 | 136 |
| 4.6.2 | 选择性控制系统设计和工程应用中的问题 | 93 | 5.4.3 | 增益自适应补偿控制 | 138 |
| 4.6.3 | 选择性控制系统与其他控制系统的结合 | 93 | 5.4.4 | 观测补偿控制 | 138 |
| 4.6.4 | 选择控制系统设计示例 | 94 | 5.4.5 | 时滞补偿控制系统设计示例 | 140 |
| 4.7 | 双重控制系统 | 96 | 5.5 | 智能控制 | 142 |
| 4.7.1 | 基本原理、结构和性能分析 | 96 | 5.5.1 | 概述 | 142 |
| 4.7.2 | 双重控制系统设计和工程应用中的问题 | 97 | 5.5.2 | 模糊控制 | 142 |
| 4.7.3 | 双重控制系统设计示例 | 98 | 5.5.3 | 神经网络控制 | 146 |
| 4.8 | 根据模型计算的控制系统 | 99 | 5.5.4 | 智能控制系统设计示例 | 149 |
| 4.8.1 | 根据模型计算测量值的控制系统 | 99 | 5.6 | 间歇过程的控制 | 151 |
| 4.8.2 | 根据模型计算设定值的控制系统 | 100 | 5.6.1 | 间歇过程的特点 | 151 |
| 4.8.3 | 非线性控制 | 102 | 5.6.2 | 间歇过程的控制 | 152 |
| 4.8.4 | 根据模型计算的控制系统设计示例 | 104 | 5.6.3 | 间歇过程控制系统的特殊控制 | 154 |
| | 习题和思考题 | 106 | 5.6.4 | 间歇生产过程的生产计划和调度 | 155 |
| 第5章 | 先进控制系统 | 109 | | 习题和思考题 | 159 |
| 5.1 | 预测控制 | 109 | 第6章 | 流体输送设备的控制 | 161 |
| 5.1.1 | 预测控制 | 109 | 6.1 | 泵和压缩机的基本控制 | 161 |
| 5.1.2 | 预测控制系统实施时的注意事项 | 112 | 6.1.1 | 离心泵的控制 | 161 |
| 5.1.3 | 预测控制系统设计示例 | 113 | 6.1.2 | 容积式泵的控制 | 163 |
| 5.2 | 解耦控制 | 118 | 6.1.3 | 风机的控制 | 164 |
| 5.2.1 | 系统关联分析和相对增益 | 118 | 6.1.4 | 压缩机的控制 | 165 |
| | | | 6.2 | 离心压缩机的防喘振控制 | 166 |
| | | | 6.2.1 | 离心压缩机的喘振 | 166 |
| | | | 6.2.2 | 离心压缩机防喘振控制系统的设计和应用时的注意事项 | 167 |
| | | | 6.2.3 | 离心压缩机防喘振控制系统设计示例 | 171 |
| | | | 6.3 | 变频调速技术的应用 | 172 |
| | | | 6.3.1 | 概述 | 172 |
| | | | 6.3.2 | 离心风机的变频调速控制 | 174 |

| | | | | | |
|------------|------------------------|-----|-------------------|--|-----|
| 6.3.3 | 离心式泵的变频调速 | 175 | 8.2.2 | 能量平衡 | 206 |
| 6.3.4 | 变频调速控制系统设计 示例 | 176 | 8.2.3 | 进料浓度 x_F 和流量 F 对产品 质量的影响及控制策略 | 208 |
| | 习题和思考题 | 178 | 8.2.4 | 精馏塔动态模型 | 210 |
| 第7章 | 传热设备的控制 | 179 | 8.3 | 精馏塔的基本控制 | 213 |
| 7.1 | 传热设备的特性 | 179 | 8.3.1 | 精馏塔的被控变量 | 213 |
| 7.1.1 | 热量传递方式 | 179 | 8.3.2 | 精馏塔的基本控制 | 215 |
| 7.1.2 | 换热器静态特性 | 180 | 8.4 | 复杂控制系统在精馏塔中的 应用 | 219 |
| 7.2 | 一般传热设备的控制 | 183 | 8.4.1 | 串级控制 | 219 |
| 7.2.1 | 一般传热设备的基本 控制 | 183 | 8.4.2 | 前馈-反馈控制 | 219 |
| 7.2.2 | 一般传热设备的复杂 控制 | 184 | 8.4.3 | 选择性控制 | 219 |
| 7.3 | 锅炉设备的控制 | 185 | 8.4.4 | 节能控制 | 222 |
| 7.3.1 | 锅炉汽包水位的控制 | 186 | | 习题和思考题 | 227 |
| 7.3.2 | 蒸汽过热系统的控制 | 189 | 第9章 | 化学反应器的控制 | 228 |
| 7.3.3 | 锅炉燃烧控制系统 | 189 | 9.1 | 概述 | 228 |
| 7.4 | 加热炉的控制 | 193 | 9.1.1 | 化学反应器的类型和控制 要求 | 228 |
| 7.4.1 | 加热炉的简单控制 | 193 | 9.1.2 | 化学反应器的特性 | 229 |
| 7.4.2 | 加热炉的复杂控制 | 193 | 9.2 | 化学反应器的控制 | 235 |
| 7.4.3 | 加热炉的安全联锁保护 系统 | 194 | 9.2.1 | 出料成分的控制 | 235 |
| 7.5 | 蒸发器的控制 | 195 | 9.2.2 | 反应过程的工艺状态参数作为 间接被控变量 | 235 |
| 7.5.1 | 蒸发器的特性 | 195 | 9.2.3 | pH 控制 | 236 |
| 7.5.2 | 蒸发器的控制 | 195 | 9.2.4 | 化学反应器的推断控制 | 237 |
| 7.6 | 工业窑炉的控制 | 196 | 9.2.5 | 稳定外围的控制 | 238 |
| 7.6.1 | 陶瓷窑炉的控制 | 196 | 9.2.6 | 开环不稳定反应器的控制 | 239 |
| 7.6.2 | 玻璃熔窑的控制 | 198 | 9.3 | 典型化学反应过程的控制系统设计 示例 | 241 |
| 7.6.3 | 水泥窑炉的控制 | 200 | 9.3.1 | 合成氨过程的控制 | 241 |
| | 习题和思考题 | 201 | 9.3.2 | 催化裂化过程反应-再生系统的 控制 | 243 |
| 第8章 | 精馏塔的控制 | 203 | | 习题和思考题 | 244 |
| 8.1 | 概述 | 203 | 附录 | 管道仪表流程图的设计符号 | 245 |
| 8.1.1 | 精馏塔的控制目标 | 203 | 模拟试题 | 248 | |
| 8.1.2 | 精馏塔扰动分析 | 205 | 参考文献 | 250 | |
| 8.2 | 精馏塔的特性 | 205 | | | |
| 8.2.1 | 物料平衡和内部物料 平衡 | 205 | | | |

第 1 章 绪 论

本章内容提要

本章首先说明《过程控制工程》课程的目的和任务，指出该课程在工业生产过程自动化中的重要作用，《过程控制工程》是控制理论在工业生产过程控制系统的重要应用，它以控制理论为基础，将工业生产过程工程和工艺、自动化仪表和计算机技术结合，用于设计工业生产过程的控制系统和将这些控制系统在实际过程中成功应用。因此，学以致用是本课程的重点。

本章讨论了过程控制工程的发展史，阐明其特点，由于工业生产过程的复杂性、多样性，因此，控制系统的类型多、适应性广，应用时需要根据不同生产过程进行分析，制订合适的控制方案，以期达到优化操作过程的目的，因此，灵活应用所学知识是学习本课程的根本。

了解过程控制工程发展特点，不仅可拓展读者视野，还可提供今后深入学习和研究方向，是十分有用的资料。

1.1 过程控制工程课程的目的与任务

过程控制工程课程的目的是对过程控制系统进行分析、设计和应用。

过程控制是对工业生产过程中的温度、压力、物位、流量、成分、位移、电压等物理量和化学量进行的控制。过程控制的基本目的是安全性、稳定性和经济性。即保证生产过程安全稳定运行，防止事故发生；保证产品质量；节约原料、能源消耗，降低成本；提高劳动生产率，在保证质量的前提下充分发挥设备潜力，提高产量；减轻劳动强度，改善劳动条件等。

过程控制工程课程的任务是对生产过程的控制方案进行分析。总结各种控制方案的特点是过程控制工程的第一个任务。工业生产过程的工艺流程确定后，如何设计出满足工艺控制要求的控制方案是过程控制工程的第二个任务。在控制方案已经确定后，如何使控制系统能够正常运行，并发挥其功能是过程控制工程的第三个任务。

过程控制工程课程的基础是控制理论，它的技术工具和分析工具包括工业生产过程工程与工艺、自动化仪表和计算机，它所研究的主体是工业过程控制系统。用图 1-1 表示学科结构之间的联系。

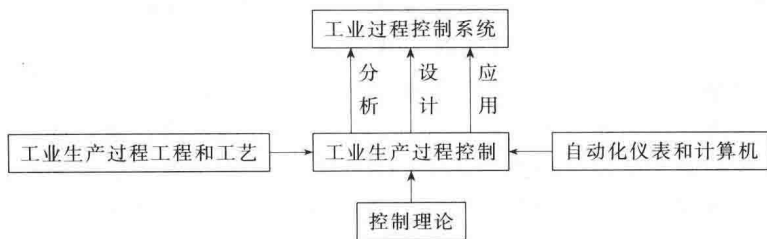


图 1-1 《过程控制工程》课程的学科结构

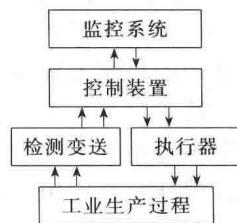


图 1-2 系统的控制结构

过程控制工程是控制理论在工业过程控制系统的重要应用。控制理论的移植和改造、控制系统结构的研究、控制算法的确定及控制系统的实现等都是控制理论与工业生产工程学和工艺、仪表和计算机的有机结合，是它们在过程控制系统的成功应用。过程控制工程课程系统地阐述过程控制系统的结构、原理、特点、适用场合、系统设计及应用等问题，并在分析稳态和动态数学模型的基础上，探讨生产过程中典型单元操作的控制方案。

生产过程中要求被控变量达到和保持在工艺操作所需的设定值，为此，需要检测和变送这些被控变量，并按一定的控制规律输出信号到执行器，调整操纵变量。如何选择被控变量、如何设计控制方案，如何选择操纵变量，应根据什么控制规律计算控制器输出，控制器参数应如何设置，控制系统各构成部件如何选择和配合等都是过程控制工程所需要解决的问题。图 1-2 是控制系统的控制结构。因此，过程控制工程要解决图 1-2 所示控制系统的方案设计、分析和应用问题。

从发展观点看，过程控制工程是从早期的凭经验、凭直觉、凭定性说理的实际控制系统设计上升为科学性、条理性、有定量理论指导的阶段。它是把控制理论、工业生产工程学和工艺、自动化仪表和计算机的知识有机结合，构成的一门综合性工程科学。

1.2 过程控制概述

工业生产过程指将原料转变成产品的具有一定生产规模的过程。例如，石油、化工、电力、冶金、纺织、建材、轻工、核能等工业部门的生产过程。

过程控制指工业生产过程的自动化。它包括生产过程的开停车、生产过程的操作、生产过程操作条件的改变等。过程控制需要达到一定的目标。例如，在一定操作条件下（物料和能量平衡）达到安全、稳定和长期运行，经济效益最大化，环境污染最小化等。

与其他自动控制系统比较，过程控制具有下列特点。

① 过程控制系统由过程检测、变送和控制仪表、执行装置等组成。过程控制是通过各种类型的仪表完成对过程变量的检测、变送和控制，并经执行装置作用于生产过程。这些仪表可以是气动仪表、电动仪表；可以是模拟仪表、计算机装置或者智能仪表；也可以是现场总线仪表或无线仪表。不管采用什么仪表或计算机装置，从过程控制的基本组成来看，过程控制系统总是包括对过程变量的检测变送、对信号的控制运算和输出到执行装置，完成所需操纵变量的改变，从而达到所需控制目标（或指标）。

② 过程控制的被控过程具有非线性、时变、时滞及不确定性等特点。因而，难于获得精确的过程数学模型，故在其他领域（例如，航空航天）应用成功的控制策略不能移植或增加了移植的难度，给控制带来困难。

③ 过程控制的被控过程多属于慢过程。与航天、运动过程的控制不同，过程控制所研究的被控过程通常具有一定时间常数和时滞，过程控制并不需要在极短时间完成。

④ 过程控制方案的多样性。由于工业生产过程的多样性，为适应被控过程的特点，控制方案也具有多样性。表现为：同一被控过程，因受到的扰动不同，需采用不同的控制方案，常用的控制方案有简单控制系统、串级控制系统、比值控制系统、均匀控制系统、前馈控制系统、分程控制系统、选择性控制系统、双重控制系统等；控制方案适应性强，同一控制方案可适用于不同的生产过程控制。随着过程控制研究的深入，大量先进控制系统和控制方案得到开发和应用，例如，预测控制、解耦控制、时滞补偿控制、专家系统和模糊控制等智能控制。

⑤ 过程控制系统分为随动控制和定值控制，常用的控制系统是定值控制系统。它们都

采用一些过程变量,例如,温度、压力、流量、物位和成分等作为被控变量,过程控制的目的是保持这些过程变量能够稳定在所需的设定值,能够克服扰动和负荷变化对被控变量造成的影响。

⑥ 过程控制实施手段的多样性。除了过程控制方案的多样性外,实施过程控制的手段也具有多样性,尤其在开放系统互操作性和互连性等问题得到解决后,实现过程控制目标的手段更丰富。例如,用计算机控制装置实现所需控制功能;方便地更换损坏的仪表而不必考虑是否与原产品一致;方便地在控制室或现场获得仪表的信息,例如,量程、校验日期、误差等;还可以直接进行仪表校验和调整。

1.3 过程控制的发展和趋势

过程控制的发展有两个明显特点:一、同步性,控制理论的开拓、技术工具和手段的进展、工程应用的实现三者相互推动,互相促进,显示了一幅交错复杂、但又轮廓分明的画卷,三者间显现明晰的同步性;二、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,表现强烈的交流性。

在进入信息社会、知识经济时代的今天,面对计算机技术的挑战,回顾过程控制技术的历史进程,对明确今后工业生产过程控制的发展方向是很必要的。

自动化技术的前驱,可以追溯到古代,如我国指南车的出现,水运仪象台的应用等。在工业生产的应用,通常以瓦特的蒸汽机调速器作为正式起点。因此,工业自动化的萌芽是与工业革命同时开始的。当时的自动化装置以自力式机械装置为代表。随着电动、液动和气动这些动力源的应用,电动、液动和气动的控制装置开辟了新的控制手段。

纵观过程控制发展的历史,大致经历如表 1-1 所示的四个阶段。

表 1-1 过程控制发展史

| 阶段 | 大致时间 | 控制理论和研究方法 | 过程控制研究对象 | 采用的仪表 |
|------|------------------|---|--|-------------------------------------|
| 第一阶段 | 20 世纪 40 ~ 60 年代 | 经典控制理论 微分方程解析方法、 频域法、根轨迹法等 | 控制系统稳定性,单输入、单输出系统 从随动到定值控制;从单回路到复杂控制;从 PID 到特殊控制规律 | 基地式大型仪表 气动单元组合仪表 |
| 第二阶段 | 20 世纪 60 ~ 70 年代 | 现代控制理论 状态空间、动态规划、 极小值原理等 | 复杂控制系统的开发和应用,在航天、航空和制导等领域取得成功 | 组合式仪表广泛应用,气动和电动单元组合仪表成为控制仪表的主流 |
| 第三阶段 | 20 世纪 70 ~ 80 年代 | 大系统控制理论 人工智能、鲁棒控制、 模糊控制、神经网络、多 变量频域 | 基于知识的专家系统、模糊控制、人工神经网络控制、智能控制、预测控制、故障诊断、生产计划和调度、优化控制等先进控制系统,非线性和分布参数系统 | 集散控制系统(DCS),可编程控制器(PLC)、信息管理系统(MIS) |
| 第四阶段 | 20 世纪 80 年代开始 | 管控一体化、综合自动化 过程控制系统、制造 执行系统和企业资源计划 结合 | 综合自动化系统(PCS、MES、ERP) 网络集成、数据集成、直到信息集成和应用集成 先进过程控制(APC)、卓越运行操作(OpX) | 现场总线控制系统(FCS)、无线仪表、网络化仪表 |

当前过程控制发展的主要特点如下。

① 生产装置实施先进过程控制成为发展主流。早期的简单控制由于受经典控制理论和常规仪表的制约,难于解决过程控制中的系统耦合、非线性和时变性问题,随着企业对过

程控制高灵活性和高效益的要求，简单控制系统较难适应生产过程控制的要求，先进控制正受到过程工业界的普遍关注。先进过程控制（APC）指在动态环境下，基于模型、充分借助计算机能力，为工厂获得最大利润而实施的一类运行和技术策略。这种先进过程控制策略的实施，能使工厂运行在最佳工况，实现所谓“卡边生产”。图 1-3 是先进控制投资和效益的关系。工业生产过程采用 DCS，需 70% 投资来获得 20% 效益；采用先进控制投资约 15%，可获得效益达 40% 以上；采用实时优化的投资约 15%，其效益达 30% 以上。目前，先进过程控制的软件约有几百种，应用先进过程控制的项目有数千项，一些

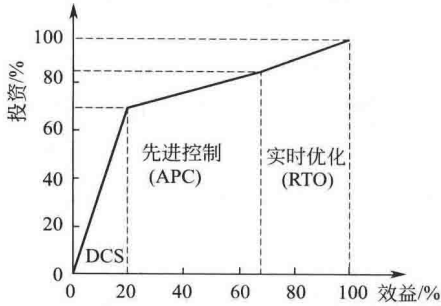


图 1-3 先进控制投资和效益

集散控制系统和控制软件开发公司都推出和研究开发相应的先进过程控制软件，先进过程控制软件的应用正以 30% 左右的年增长率递增。先进过程控制的控制策略包括：模型预测控制、时滞补偿控制、多变量预测控制、解耦控制、统计质量控制、自适应控制、推断控制及软测量技术、优化控制、智能控制（专家控制、模糊控制、神经网络控制等）、鲁棒控制、 H_∞ 和 μ 综合等，尤其以智能控制作为开发、研究和应用的热点。

先进过程控制的控制策略以下列实施方法实现：用先进控制算法取代传统 PID 控制算法；用先进控制算法计算出原有 PIC 控制系统的设定；先进控制算法和 PID 控制算法结合。

② 过程优化受到普遍关注。过程优化正受到过程工业界的普遍关注。通常，连续过程工业生产中上游装置的部分产品是下游装置的原料，整个生产过程存在装置间的物流分配、物料平衡、能量平衡等一系列问题。借助过程优化可使整个生产过程获得很大的经济和社会效益。过程优化主要寻找最佳工艺操作参数的设定值，使生产过程获得最大经济效益，这也称为稳态优化。稳态优化采用静态模型，进行离线或在线的优化计算。离线优化是在约束条件下采用各种建模优化方法寻求最优工艺操作参数，提供操作指导。在线优化是周期进行模型计算、模型修正和参数寻优，并将参数值直接送控制器作为设定值。为获得稳态最优，要求系统工作在一种保守程度较小的特定工况下，一旦偏离该工况，各项指标会明显变差，操作难度增加，并导致生产不安全。随着稳态优化的深入研究，直接影响过程动态品质的最优动态控制也显示出其重要性。

生产过程优化是在各种约束条件下，寻求目标函数最优值时生产过程变量的设定值。由于生产过程的复杂性，通常，生产过程的优化解并不一定是全局的最优解，但应是在约束条件下的满意解。为此，可以在工艺设计的同时，考虑控制方案的实施和控制效果，消除可能导致控制失效或可能的制约因素，使工艺和控制结合。

按照 ARC 给出的模型，卓越运行操作（Operational Excellence, OpX）是根据客户的需求确定生产的产品质量和产量，以 6σ 作为质量控制的指标，以控制系统和生产管理信息为核心，对生产潜力进行优化，并致力于不断的改善生产过程。因此，它首先必须实现卓越的安全性、卓越的资产设备管理、卓越的生产管理，最后才能达到卓越的运行操作。

基于模型的优化算法包括：线性规划、非线性规划、梯度搜索法、解析法、整数规划法及近年来获得发展的各种现代优化算法，例如，遗传算法、模拟退火算法、混沌算法、蚁群算法、免疫算法等。

③ 开放系统和标准化。从工业自动化仪表发展看，从基地式仪表、单元组合仪表到以微处理器为基础的计算机控制装置，自动化仪表的发展极为迅速，近年来，在传统 DCS 基础上，现场总线仪表和现场总线控制系统相继问世，使自动化仪表有了质的飞跃。现场总线

控制系统的主要特点是开放性、智能化，产品符合开放系统互联标准，它实现了真正双向的数字式通信和控制，降低成本，缩短设计、安装和维护工作量，将控制下放到现场级。

随着计算机技术、网络技术、通信技术、控制技术及其他高新科学技术的发展，过程控制仪表和系统都将出现新的发展，系统的开放和标准化使用户最终得益。

④ 综合自动化。过程工业自动化在国际国内的市场竞争中不断提高，从原来的各制造厂商的“自动化孤岛”综合集成为一个整体的系统。综合自动化是当代工业自动化的主要潮流。计算机集成制造系统在连续工业中的具体体现就是综合自动化。综合自动化是在计算机通信网络和分布式数据库的支持下，实现信息和功能的集成，把控制、优化、调度、管理、经营、决策等集成在一起，最终形成一个能适应生产环境的不确定性、市场需求的多变性、全局优化的高质量、高效益、高柔性的智能生产系统。

综合自动化通常由过程控制系统（PCS）、制造执行管理系统（MES）和企业资源计划（ERP）等组成。其特点如下。

- 系统采用递阶系统结构。由于综合自动化系统应用于相互关联的工业系统，它的决策不仅需要各子系统的决策，还需要上级的协调来实现全局的优化，因此，综合自动化系统采用递阶系统结构。它具有结构灵活、系统扩展容易、信息共享、减少各子系统的信息存储量和计算量、可靠性高、成本低等优点。

- 系统主线是控制和管理。综合自动化实现了管理和控制一体化，实现了电子、仪表和计算机的一体化。通常，现场总线控制系统和集散控制系统主要完成工业生产过程的控制任务，上位计算机组成计算机网络，完成全厂或整个企业信息、资源的合理利用、管理和决策。

- 系统的信息集成是综合自动化的关键。综合自动化是将现场设备的信息、过程控制的信息、车间经济核算的信息、管理调度和计划调度的信息、原料和产品的购销信息、市场需求信息等各种信息集成在一个系统中，信息共享，资源共享，充分利用信息，发挥信息作用，以获得最大的经济效益。

综合自动化是在实现网络集成基础上，通过数据集成，最终达到应用集成。其共同点是五个强调，即：

- 强调企业信息和控制系统的集成，即过程控制系统（PCS）、制造（或生产）执行系统（MES）和业务管理系统（企业资源规划 ERP）的集成。

- 强调为工程设计和组态（工艺设计、设备设计、自动化设计和编程等）、调试投运、运行操作、资产管理和优化、维护等各环节提供统一平台。

- 强调在控制层用统一平台解决电气控制、仪表控制、运动控制等多专业的功能性要求。

- 强调控制层、执行层和管理层不同网络的无缝连接和提供信息数据的高效交换。

- 强调与第三方系统和软件的协同和连接。

⑤ 现场总线和现场总线控制系统。现场总线控制系统是适应综合自动化发展需要而诞生的，它是仪表控制系统的革命。

现场总线是一种计算机的网络通信总线。是位于现场的多个现场总线仪表与远端的监视控制计算机装置间的通信系统。因此，从结构看，现场总线是底层控制通信网；从通信报文的长度看，它是短帧通信；从传输速率看，它有低速和高速两类；从传输范围看，它是局部通信网。

现场总线的技术特点如下。

- 开放性。现场总线是开放网络。符合现场总线通信协议的任何一个制造厂商的现场总

线仪表产品都能方便地连接到现场总线通信网，符合通信标准的不同制造商的产品可以互换或替换，而不必考虑该产品是否是原制造商的产品。因此，用户可以购置不同制造商的现场总线产品，把它们集成在一个控制系统中，并进行信息的互相交换。

- 智能化。现场总线仪表把处理器引入仪表，使仪表本身成为网络的一个节点，并参与通信，这表明现场总线是全数字化信号传输。在现场总线仪表中可完成原来需在分散过程控制装置或回路控制器中才能完成的各种运算和控制。因此，在现场就可以完成控制系统的各种基本功能要求，送控制室的数据全部是数字信号，保证了功能的自治性。

- 互操作性。互操作性包含设备的可互换性和可互操作性。可互换性指不同厂商的设备在功能上可以用同一功能的其他厂商同类设备互换。可互操作性指不同厂商的设备可互相通信，并能在各厂商的环境中完成其功能；

- 环境适应性。现场总线是专门为现场应用而设计，因此，现场总线能很好适应现场的操作环境。表现为通信媒体可采用双绞线、同轴电缆和光缆等多种类型，对电磁干扰的抗扰性强，可实现本安回路，可总线供电等。

现场总线技术发展推动了现场总线仪表的发展。为满足现场总线通信的开放和互操作性的要求，现场总线仪表应是智能仪表。它具有互操作性、互换性、可靠性、混合性、数字通信、智能化、分散性等特点。

习题和思考题

- 1-1 过程控制工程课程的特点和任务是什么？
- 1-2 过程控制工程的综合性主要体现在什么地方？
- 1-3 试述过程控制的发展史，它与控制理论、技术工具之间的关系如何。
- 1-4 过程控制中哪些因素与控制有关？
- 1-5 试述计算机过程控制的发展史。
- 1-6 什么是综合自动化？它的组成是什么？它们的共同点是什么？

第 2 章 过程动态数学模型

本章内容提要

本章是本书的基础，它介绍被控过程的数学模型，包括模型建立、参数估计等内容。讨论自衡非振荡过程的特性对控制系统的影响，并提出控制系统的被控变量、操纵变量的选择和确定控制方案的原则。

2.1 被控过程动态数学模型和建模

2.1.1 被控过程的数学模型

(1) 典型过程动态特性

工业生产过程数学模型有静态和动态之分。静态数学模型是过程输出变量和输入变量之间不随时间变化时的数学关系。动态数学模型是过程输出变量和输入变量之间随时间变化时动态关系的数学描述。过程控制中常采用动态数学模型，也称动态特性。建立控制系统中各组成环节和整个系统的数学模型不仅是分析和设计控制系统方案的需要，也是控制系统投运、控制器参数整定的需要，它在操作优化、故障检测和诊断、操作方案制订等方面也是极其重要的。所建数学模型的要求随实际应用而异。对所建模型的基本要求是力求简单实用、在满足控制精确度条件下能正确可靠地反映过程输入和输出之间的动态关系。

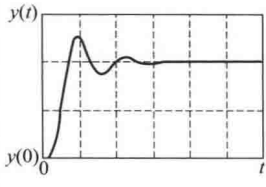
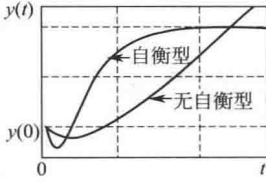
按时间特性，过程动态数学模型可分为连续和离散两大类；按模型描述，可分为传递函数、状态空间、微分方程和差分方程等模型；按过程类型，可分为集中参数、分布参数和多级过程模型等；按建模的输入信号，可分为非周期函数、周期函数、非周期性随机函数和周期性随机函数建立的模型等。

工业生产过程中常采用阶跃输入信号作用下过程的响应特性表示过程动态特性。典型工业过程的动态特性见表 2-1。

表 2-1 典型工业过程的动态特性

| 过程名称 | 过程阶跃响应曲线 | 过程特点 | 传递函数描述 | 实例 |
|--------------|----------|--|--|---|
| 自衡 非振荡过程 | | ① 自衡性：过程能自发地趋于新稳态值 ② 非振荡性：过渡过程无振荡 | $G(s) = \frac{K}{Ts+1} e^{-\tau s}$ $G(s) = \frac{K}{(T_1s+1)(T_2s+1)} e^{-\tau s}$ K 是过程增益；T 是过程时间常数； τ 是过程时滞 | 液位贮罐在进料阀开度增大时，原来的稳定液位会上升，直到液位达到一个新的稳定位置 |
| 无自衡 非振荡过程 | | ① 无自衡性：输出响应曲线从一个稳态一直上升或下降，不能达到新的稳态 ② 非振荡性：过渡过程无振荡 | $G(s) = \frac{K}{s} e^{-\tau s}$ $G(s) = \frac{K}{(Ts+1)s} e^{-\tau s}$ 过程增益 K (由斜率确定)；渐近线与时间轴交点处的时间是时间常数 T 和时滞 τ 之和；时滞 τ (未发生变化的时间) | 液位贮罐的出料采用定量泵排出，当进料阀开度阶跃变化时，因出料量不变，因此，液位会一直上升到溢出或下降到排空 |

续表

| 过程名称 | 过程阶跃响应曲线 | 过程特点 | 传递函数描述 | 实 例 |
|------------|---|---|---|---|
| 自衡 振荡过程 |  | ① 自衡性: 过程能自发地趋于新稳态值 ② 振荡性: 过渡过程从一个稳态以衰减振荡形式趋于另一个稳态 | $G(s) = \frac{K}{s^2 + 2\zeta\omega s + \omega^2} e^{-\tau s}$ $0 < \zeta < 1$ 阻尼比 ζ 和频率 ω (衰减比和振荡频率确定); 过程增益 K (新稳态值和原始稳态值及阶跃幅值确定); 时滞 τ (未发生变化的时间确定) | 在工业生产过程中不常见 |
| 反相特性 过程 |  | 反相特性: 开始与终止时出现反向的变化。即 $K > 0: \begin{cases} y'(t) _{t \rightarrow 0} < 0 \\ y(t) _{t \rightarrow \infty} > 0 \end{cases}$ 或 $K < 0: \begin{cases} y'(t) _{t \rightarrow 0} > 0 \\ y(t) _{t \rightarrow \infty} < 0 \end{cases}$ | $G(s) = \frac{K(1 - T_d s)}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)} e^{-\tau s}$ $G(s) = \frac{K(1 - T_d s)}{(T_1 s + 1)s} e^{-\tau s}$ 过程有一个正零点 $T_d = \frac{K_2 T_2 - K_1 T_1}{K_1 - K_2} > 0$ | 锅炉汽包水位。蒸汽量阶跃增加引起蒸汽压力突然下降, 汽包水位因锅炉内水的闪急汽化, 造成虚假水位上升, 最终水位反而下降。该类过程具有一个正零点, 属于非最小相位过程 |

(2) 建立被控过程数学模型的目的

建立被控过程数学模型的目的如下。

① 控制系统控制方案设计。控制系统的被控变量、操纵变量的选择、控制系统结构的确定都需根据被控过程的数学模型, 因此, 被控过程的数学模型是控制方案设计的基础。

② 控制系统调试和控制器参数的确定。控制方案确定后, 要将控制系统投运。对控制系统调试和控制器参数整定是保证控制系统正常、稳定和长期运行的关键。这些工作依赖于对被控过程的了解程度, 因此, 建立正确反映被控过程的数学模型是十分必要的。

③ 工业过程优化的需要。生产过程的操作优化离不开被控过程的正确描述, 因此, 需要对被控过程建立数学模型。

④ 确定新型控制方案。当控制系统运行后, 需要根据被控过程的特点, 改进和完善有关控制方案, 例如, 预测控制、解耦控制等, 它更需要有正确反映被控过程的数学模型为基础。

⑤ 仿真和培训的需要。对大型工业生产过程, 为培训操作人员的需要, 通常需要有关过程的仿真和培训系统, 这些系统能够较正确反映实际生产操作情况, 便于操作人员能够在仿真和培训系统中调试和培训。仿真和培训系统的建立是在被控过程的数学模型基础上建立的, 因此, 建立被控过程的数学模型是必要的。

⑥ 故障检测和诊断系统的设计。为便于对生产过程进行故障检测和诊断, 需要开发数学模型, 模拟实际过程在故障状态下的运行状态, 有利于对故障分析和处理。

2.1.2 被控过程动态数学模型的建立

建立被控过程动态数学模型的方法有机理建模、经验建模和混合方法。建立的模型分别为白箱模型、黑箱模型和灰箱模型。

(1) 对被控过程动态数学模型的要求

对过程模型的要求是正确、可靠和简单。模型应正确反映过程的主要特征, 如果误差过大, 则导致错误结论。模型应可靠, 这表明模型具有复现性, 能较长期地反映过程主要特征。模型应简单, 使模型能方便地被用于指导过程控制策略的计算, 能容易地被用于实施和