



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

# 工业生产过程控制

第二版

何衍庆 黎冰 黄海燕 编著



化学工业出版社

附光盘



TP278/11=2D

2010

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

# 工业生产过程控制

第二版

何衍庆 黎 冰 黄海燕 编著



化学工业出版社

· 北京 ·

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,所附光盘提供 CAI 课件,可用于网络教育和供学生自学。在第一版基础上,本书增补了近年来控制工程领域的新成果。

本书共分 8 章。分别按控制结构、工业过程设备、工业生产过程三部分进行讨论。第一部分内容涉及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、比值控制、前馈控制、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;先进控制系统,包括预测控制、解耦控制、软测量和推断控制、自适应和鲁棒控制、时滞补偿控制、智能控制、监督控制、故障检测诊断和容错控制及综合自动化等。第二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的控制。第三部分按工业生产过程分类,分别对合成氨过程、间歇过程、常减压过程、催化裂化过程、乙烯过程、聚合过程、生物发酵过程、制浆造纸过程和冶金过程的控制进行分析。针对特定的工业生产过程,分析各自的特点,并提出相应控制方案。

本书可作为自动化、测控技术与仪器及相关专业本科生和研究生的教材,亦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参考。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

工业生产过程控制/何衍庆,黎冰,黄海燕编著. —2  
版. —北京:化学工业出版社,2009.8

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

ISBN 978-7-122-06016-7

I. 工… II. ①何…②黎…③黄… III. 生产过程-过程  
控制-高等学校-教材 IV. TP278

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 101462 号

---

责任编辑:郝英华

装帧设计:关 飞

责任校对:陈 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:大厂聚鑫印刷有限责任公司

787mm×1092mm 1/16 印张 18 $\frac{3}{4}$  字数 490 千字 2010 年 4 月北京第 2 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: 37.00 元

版权所有 违者必究

# 前 言

本书自 2004 年第一版出版以来,作为自动化和测控技术与仪器专业本专科生的教材,得到广大教师和学生的肯定和厚爱,并被评为上海市和国家级精品课程教材。作为教育部批准的普通高等教育“十一五”国家级规划教材,第二版秉承第一版的特色,结合近年来控制工程的最新进展和多年教学及科研工作的实践经验,对原教材进行了如下的修改和创新。

(1) 精品课程教材的目标是少而精,学到手。为此,在内容上有较多精简;在形式上采用表格、图形,便于理解和比较;改写并增加思考题。为少而精,学到手,降低成本,虽然精简教材内容,但在所附光盘内,仍为学有余力的读者提供更多学习资料和有关程序。

(2) 先进性。结合现代控制理论的应用和节能减排的要求,充实和改写有关内容。包括介绍 PCS、MES 和 ERP 三层扁平化模型、现场总线控制系统、无线通信、功能安全、数据校正和数据融合、变频调速技术等内容。

此外,从卓越操作 (Opx) 出发,对传统的内回流控制、热量控制、热焓控制和仪表比值系数大于 1 的比值控制等按模型计算测量值的控制系统,根据稳定运行准则的分析,这些控制系统造成开环总增益的变化,因此,应转换为按模型计算设定值的控制系统。

由于计算机应用的普及,提供了用于过程参数估计的 MATLAB 程序,删除了两点法等传统的参数计算方法,提供了模糊控制程序,便于读者仿真研究等。

(3) 标准化。本次改版,采用符合国家标准 GB 2625 规定的过程检测和控制流程图用的工程设计符号。便于分析和理解实际的自控工程图纸,与国际设计标准接轨。本教材采用 MATLAB 语言编写有关程序,可绘制标准的根轨迹图、阶跃响应曲线、伯德图等,便于控制系统分析。

(4) CAI 课件是评选精品课程的重要内容。本次改版,重新编写 CAI 课件,提供了画面的任意缩放功能,适应了不同显示分辨率应用的要求。为便于仿真,增加有关仿真实验。改版后,可提供滤波器效果、液位单回路控制、夹套反应器温度串级控制和分程控制、氨冷器温度和液位超驰控制、液位模糊控制等动画仿真实验(用 S 函数编写),读者可方便地更改控制系统的控制器参数,进行控制器参数影响和整定实验;更改被控对象类型,研究不同被控对象的控制效果等。这种精确的仿真实验是其他课件无法比拟的。

为便于使用 CAI 课件,光盘内还用问答的方式提供有关操作方式。例如,画面调用、仿真实验操作、用户画面制作等。

本书分 8 章。第 1 章介绍简单控制系统的基本概念;第 2 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 3 章介绍以现代控制理论为基础的先进控制系统;第 4~7 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、传热设备、精馏塔和化学反应器的控制;第 8 章介绍典型工业生产过程的控制,该章以工业生产过程分类,分别对合成氨过程、间歇过程、常减压过程、催化裂化过程、乙烯过程、聚合过程、生物发酵过程、制浆造纸过程和冶金过程的控制进行分析。

何衍庆、黎冰、黄海燕参加了第二版编写工作。本次编写工作得到华东理工大学教务

处、信息科学与工程学院自动化系的黄捷、刘百祥、侍洪波、王慧锋、孙自强、凌志浩、王华忠等的大力支持。蒋慰孙、俞金寿、彭瑜、黄道、吴勤勤、邱宣振、Michael R、何尊青、冯伟国、杨洁等给予了不少建议，并提供了大量资料和技术支持。部分兄弟院校教授“过程控制工程”课程的教师对本书的编写也提供了宝贵的建议和意见。参加本书编写工作的还有陈积玉、何乙平、王朋等同志，此外，洪光明、蒋明华、范秀兰、张胜利、陈天成、顾成达、杭一飞、冯保罗等同志也提供了不少帮助。谨在此一并表示衷心感谢。

由于时间仓促和编著者的水平所限，疏漏在所难免，恳请读者不吝指正。

**编著者**

**2009 年 12 月**

# 目 录

|                                     |    |                                    |    |
|-------------------------------------|----|------------------------------------|----|
| 绪论 .....                            | 1  | 应用中的问题 .....                       | 61 |
| 习题和思考题 .....                        | 6  | 2.2 均匀控制系统 .....                   | 66 |
| 1 简单控制系统 .....                      | 7  | 2.2.1 基本原理和结构 .....                | 66 |
| 1.1 控制系统组成和控制性能指标 .....             | 7  | 2.2.2 控制器参数整定 .....                | 67 |
| 1.1.1 控制系统的组成 .....                 | 7  | 2.3 前馈控制系统 .....                   | 68 |
| 1.1.2 控制系统的控制性能指标 .....             | 9  | 2.3.1 基本原理、结构和性能<br>分析 .....       | 68 |
| 1.2 过程动态特性和建立过程的动态<br>模型 .....      | 12 | 2.3.2 前馈控制系统设计和工程<br>应用中的问题 .....  | 71 |
| 1.2.1 过程动态特性 .....                  | 12 | 2.4 比值控制系统 .....                   | 75 |
| 1.2.2 过程动态模型的建立 .....               | 16 | 2.4.1 基本原理、结构和性能<br>分析 .....       | 75 |
| 1.3 检测变送环节 .....                    | 18 | 2.4.2 控制方案分析 .....                 | 76 |
| 1.3.1 检测变送环节的性能 .....               | 18 | 2.4.3 比值控制系统设计和工程<br>应用中的问题 .....  | 77 |
| 1.3.2 检测变送信号的处理 .....               | 20 | 2.5 分程控制系统 .....                   | 79 |
| 1.4 执行器环节 .....                     | 21 | 2.5.1 基本原理、结构和性能<br>分析 .....       | 79 |
| 1.4.1 执行器概述 .....                   | 21 | 2.5.2 分程控制系统设计和工程<br>应用中的问题 .....  | 80 |
| 1.4.2 流量特性 .....                    | 23 | 2.6 选择性控制系统 .....                  | 81 |
| 1.4.3 控制阀流量特性的选择 .....              | 25 | 2.6.1 基本原理、结构和性能<br>分析 .....       | 81 |
| 1.4.4 阀门定位器的正确使用 .....              | 29 | 2.6.2 选择性控制系统设计和工程<br>应用中的问题 ..... | 82 |
| 1.4.5 其他执行器 .....                   | 30 | 2.6.3 选择性控制系统与其他控制<br>系统的结合 .....  | 83 |
| 1.5 控制器的控制算法 .....                  | 32 | 2.7 双重控制系统 .....                   | 84 |
| 1.5.1 模拟 PID 控制算法 .....             | 33 | 2.7.1 基本原理、结构和性能分析 .....           | 84 |
| 1.5.2 数字 PID 控制算法 .....             | 40 | 2.7.2 双重控制系统设计和工程<br>应用中的问题 .....  | 85 |
| 1.5.3 开关控制 .....                    | 45 | 2.8 基于模型计算的控制系统 .....              | 86 |
| 1.5.4 与 PID 控制密切相关的几类<br>控制算法 ..... | 45 | 2.8.1 根据模型计算测量值的控制<br>系统 .....     | 86 |
| 1.6 控制器参数整定和控制系统<br>投运 .....        | 51 | 2.8.2 根据模型计算设定值的控制<br>系统 .....     | 89 |
| 1.6.1 控制器参数整定原则 .....               | 51 |                                    |    |
| 1.6.2 控制器参数整定方法 .....               | 52 |                                    |    |
| 1.6.3 控制系统的投运和维护 .....              | 54 |                                    |    |
| 习题和思考题 .....                        | 55 |                                    |    |
| 2 常用复杂控制系统 .....                    | 57 |                                    |    |
| 2.1 串级控制系统 .....                    | 57 |                                    |    |
| 2.1.1 基本原理、结构和性能<br>分析 .....        | 57 |                                    |    |
| 2.1.2 串级控制系统设计和工程                   |    |                                    |    |

|                                   |     |                                          |     |
|-----------------------------------|-----|------------------------------------------|-----|
| 2.8.3 非线性控制 .....                 | 90  | 3.9.3 现场总线和现场总线控制<br>系统 .....            | 143 |
| 习题和思考题 .....                      | 92  | 3.9.4 无线通信 .....                         | 146 |
| <b>3 先进控制系统</b> .....             | 94  | 3.9.5 功能安全 .....                         | 147 |
| 3.1 预测控制 .....                    | 94  | 3.9.6 数据校正和数据融合 .....                    | 148 |
| 3.1.1 预测控制 .....                  | 94  | 习题和思考题 .....                             | 150 |
| 3.1.2 预测控制系统实施时应注意<br>的问题 .....   | 96  | <b>4 流体输送设备的控制</b> .....                 | 152 |
| 3.1.3 预测控制算法 .....                | 97  | 4.1 泵和压缩机的基本控制 .....                     | 152 |
| 3.2 解耦控制 .....                    | 99  | 4.1.1 离心泵的控制 .....                       | 152 |
| 3.2.1 系统关联分析和相对增益 .....           | 99  | 4.1.2 容积式泵的控制 .....                      | 153 |
| 3.2.2 解耦控制系统设计和工程应用<br>中的问题 ..... | 101 | 4.1.3 风机的控制 .....                        | 154 |
| 3.3 软测量和推断控制 .....                | 105 | 4.1.4 压缩机的控制 .....                       | 155 |
| 3.3.1 软测量技术 .....                 | 105 | 4.2 离心压缩机的防喘振控制 .....                    | 156 |
| 3.3.2 推断控制系统 .....                | 108 | 4.2.1 离心压缩机的喘振 .....                     | 156 |
| 3.4 自适应控制 .....                   | 109 | 4.2.2 离心压缩机防喘振控制系统的<br>设计和应用时的注意事项 ..... | 157 |
| 3.4.1 自适应控制系统的基本结构<br>和基本类型 ..... | 109 | 4.2.3 实例分析 .....                         | 161 |
| 3.4.2 过程辨识的实验方法 .....             | 110 | 4.3 变频调速技术的应用 .....                      | 163 |
| 3.4.3 简单自适应控制系统 .....             | 111 | 4.3.1 概述 .....                           | 163 |
| 3.4.4 自整定控制器 .....                | 111 | 4.3.2 离心风机的变频调速 .....                    | 163 |
| 3.4.5 自校正控制器 .....                | 112 | 4.3.3 离心式水泵的变频调速 .....                   | 165 |
| 3.4.6 模型参考自适应控制<br>系统 .....       | 113 | 习题和思考题 .....                             | 165 |
| 3.5 时滞补偿控制 .....                  | 115 | <b>5 传热设备的控制</b> .....                   | 167 |
| 3.5.1 史密斯预估补偿控制 .....             | 115 | 5.1 传热设备的特性 .....                        | 167 |
| 3.5.2 其他时滞补偿控制系统 .....            | 117 | 5.1.1 热量传递方式 .....                       | 167 |
| 3.6 智能控制 .....                    | 120 | 5.1.2 换热器静态特性 .....                      | 168 |
| 3.6.1 智能控制概述 .....                | 120 | 5.2 一般传热设备的控制 .....                      | 170 |
| 3.6.2 专家系统 .....                  | 121 | 5.2.1 一般传热设备的基本控制 .....                  | 171 |
| 3.6.3 模糊控制 .....                  | 123 | 5.2.2 一般传热设备的复杂控制 .....                  | 172 |
| 3.6.4 神经网络控制 .....                | 127 | 5.3 锅炉设备的控制 .....                        | 173 |
| 3.7 监督控制 .....                    | 130 | 5.3.1 锅炉汽包水位的控制 .....                    | 173 |
| 3.7.1 监督控制概述 .....                | 130 | 5.3.2 蒸汽过热系统的控制 .....                    | 176 |
| 3.7.2 操作优化控制 .....                | 130 | 5.3.3 锅炉燃烧控制系统 .....                     | 177 |
| 3.7.3 统计过程控制 .....                | 132 | 5.3.4 单元机组的协调控制系统 .....                  | 180 |
| 3.8 故障检测诊断与容错控制 .....             | 135 | 5.4 加热炉的控制 .....                         | 183 |
| 3.8.1 故障检测和诊断 .....               | 135 | 5.4.1 加热炉的简单控制 .....                     | 183 |
| 3.8.2 工况监测控制 .....                | 137 | 5.4.2 加热炉的复杂控制 .....                     | 183 |
| 3.8.3 容错控制 .....                  | 138 | 5.4.3 加热炉的安全联锁保护<br>系统 .....             | 184 |
| 3.9 综合自动化 .....                   | 139 | 5.5 蒸发器的控制 .....                         | 185 |
| 3.9.1 企业信息化系统 .....               | 139 | 5.5.1 蒸发器的特性 .....                       | 185 |
| 3.9.2 网络化 .....                   | 142 | 5.5.2 蒸发器的控制 .....                       | 185 |
|                                   |     | 5.6 工业窑炉的控制 .....                        | 186 |

|                                                  |     |                              |     |
|--------------------------------------------------|-----|------------------------------|-----|
| 5.6.1 陶瓷窑炉的控制 .....                              | 186 | 7.2.4 化学反应器的推断控制 .....       | 235 |
| 5.6.2 玻璃熔窑的控制 .....                              | 188 | 7.2.5 稳定外围的控制 .....          | 236 |
| 5.6.3 水泥窑炉的控制 .....                              | 190 | 7.2.6 开环不稳定反应器的控制 ...        | 237 |
| 习题和思考题 .....                                     | 191 | 习题和思考题 .....                 | 239 |
| <b>6 精馏塔的控制</b> .....                            | 193 | <b>8 典型工业生产过程的控制</b> .....   | 240 |
| 6.1 概述 .....                                     | 193 | 8.1 合成氨过程的控制 .....           | 240 |
| 6.1.1 精馏塔的控制要求 .....                             | 193 | 8.1.1 变换炉的控制 .....           | 240 |
| 6.1.2 精馏塔的扰动分析 .....                             | 194 | 8.1.2 转化炉水碳比控制 .....         | 241 |
| 6.2 精馏塔的特性 .....                                 | 195 | 8.1.3 合成塔的控制 .....           | 241 |
| 6.2.1 物料平衡和内部物料平衡 ...                            | 195 | 8.2 间歇过程的控制 .....            | 243 |
| 6.2.2 能量平衡 .....                                 | 196 | 8.2.1 间歇过程的特点 .....          | 243 |
| 6.2.3 进料浓度 $z_F$ 和流量 $F$ 对产品<br>质量的影响及控制策略 ..... | 197 | 8.2.2 间歇过程的控制 .....          | 247 |
| 6.3 精馏塔的基本控制 .....                               | 199 | 8.2.3 生产计划和调度 .....          | 250 |
| 6.3.1 精馏塔的被控变量 .....                             | 199 | 8.3 常减压过程的控制 .....           | 254 |
| 6.3.2 精馏塔的基本控制 .....                             | 200 | 8.3.1 常减压过程的特点 .....         | 254 |
| 6.4 复杂控制系统在精馏塔中的<br>应用 .....                     | 203 | 8.3.2 常减压塔的控制 .....          | 254 |
| 6.4.1 串级控制 .....                                 | 204 | 8.4 催化裂化过程的控制 .....          | 256 |
| 6.4.2 前馈-反馈控制 .....                              | 204 | 8.4.1 催化裂化过程的特点 .....        | 256 |
| 6.4.3 选择性控制 .....                                | 204 | 8.4.2 催化裂化过程的控制 .....        | 257 |
| 6.4.4 节能控制 .....                                 | 207 | 8.5 乙烯过程的控制 .....            | 260 |
| 6.5 先进控制系统在精馏塔中的<br>应用 .....                     | 213 | 8.5.1 乙烯裂解过程的特点 .....        | 260 |
| 6.5.1 软测量和推断控制 .....                             | 213 | 8.5.2 乙烯裂解过程的控制 .....        | 261 |
| 6.5.2 预测控制 .....                                 | 215 | 8.5.3 分离过程的控制 .....          | 265 |
| 6.5.3 优化控制 .....                                 | 218 | 8.6 聚合过程的控制 .....            | 265 |
| 习题和思考题 .....                                     | 225 | 8.6.1 聚合过程的特点 .....          | 265 |
| <b>7 化学反应器的控制</b> .....                          | 226 | 8.6.2 聚合过程的控制 .....          | 266 |
| 7.1 概述 .....                                     | 226 | 8.7 生化过程的控制 .....            | 273 |
| 7.1.1 化学反应器的类型和控制<br>要求 .....                    | 226 | 8.7.1 生化过程的特点 .....          | 273 |
| 7.1.2 化学反应器的特性 .....                             | 227 | 8.7.2 生化过程的控制 .....          | 275 |
| 7.2 化学反应器的控制 .....                               | 233 | 8.8 制浆造纸过程的控制 .....          | 278 |
| 7.2.1 出料成分的控制 .....                              | 233 | 8.8.1 制浆造纸过程的特点 .....        | 278 |
| 7.2.2 反应过程工艺状态参数作<br>为间接被控变量 .....               | 233 | 8.8.2 制浆造纸过程的控制 .....        | 279 |
| 7.2.3 pH 控制 .....                                | 234 | 8.9 冶金过程的控制 .....            | 283 |
|                                                  |     | 8.9.1 转炉炼钢过程的控制 .....        | 283 |
|                                                  |     | 8.9.2 初轧生产过程的控制 .....        | 286 |
|                                                  |     | 习题和思考题 .....                 | 288 |
|                                                  |     | <b>附录 管道仪表流程图的设计符号</b> ..... | 289 |
|                                                  |     | <b>参考文献</b> .....            | 292 |

# 绪 论

## (1) 工业生产过程控制概述

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。

工业生产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。工业生产过程控制需要达到一定的目标。例如，在一定的操作条件下（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，工业生产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 工业生产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。由于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，难于获得精确的过程数学模型，使在其他领域应用成功的控制策略不能移植或增加了移植的难度，因此，给控制带来了困难。

③ 工业生产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，工业生产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，过程的控制并不需要在极短时间完成。

④ 工业生产过程控制方案的多样性。由于工业过程的多样性，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 工业生产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 工业生产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、调整

日期、误差等；还可以直接进行仪表的校验和调整。

(2) 工业生产过程控制的发展和趋势

工业生产过程控制的发展有两个明显的特点：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 0-1 所示的几个阶段。

当前工业生产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，难于解决生产过程控制中的系统耦合、非线性和时变性

等特点，随着企业对过程控制高柔性和高效益的要求，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 0-1 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年增长率 30%左右递增。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、 $H_{\infty}$ 和  $\mu$  综合等，尤其以智能控制作为开发、研究和应用的热点。

表 0-1 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 ~ 50 年代 | 经典控制理论<br>微分方程解析方法         | 控制系统稳定性,单输入、单输出系统                | 基地式大型仪表<br>部分气动单元组合仪表          |
| 第二阶段 | 20 世纪 50 ~ 60 年代 | 经典控制理论<br>频域法、根轨迹法等        | 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 | 基地式仪表为主,大量应用气动单元组合仪表           |
| 第三阶段 | 20 世纪 60 ~ 70 年代 | 现代控制理论<br>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 |

续表

| 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                               |
|------|------------------|---------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|
| 第四阶段 | 20 世纪 70 ~ 80 年代 | 大系统控制理论<br>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) |
| 第五阶段 | 20 世纪 80 年代开始    | 管控一体化、综合自动化<br>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)<br>网络集成、数据集成、直到信息集成和应用集成<br>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            |

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(Opx: Operational Excellence)是根据客户的需求确定生产的产品质量和产量,以  $6\sigma$  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。

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。

◇ 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, 这表明现场总线采用数字通信。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。

现场总线控制系统把控制功能彻底分散到现场总线仪表,真正实现分散控制的功能。现场总线控制系统需要有类似 DCS 中分散过程控制装置的控制软件,一些要进行人机信息交换的现场总线仪表还需有类似操作管理装置的人机接口及管理软件。现场总线控制系统软件包括现场总线组态软件、维护软件、仿真软件、现场设备管理软件和监控软件等。

### (3) 工业生产过程控制的研究对象与任务

工业生产过程控制是自动化的一门分支学科。研究的任务是对过程控制系统进行分析、设计和应用。

对工业生产过程中已有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任务。

工业生产过程控制工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 0-2 表示学科结构之间的联系。

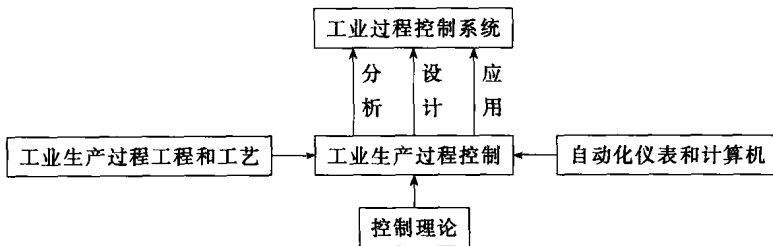


图 0-2 工业生产过程控制工程的学科结构

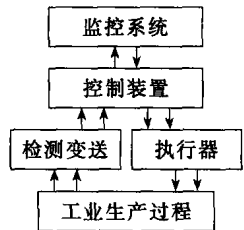


图 0-3 系统的控制结构

工业生产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过程工程和工艺、仪表和计算机的有机结合,是它们在工业过程控制系统的成功应用。

工业生产过程中的被控变量要求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工业生产过程控制工程所需要解决的问题。图 0-3 是控制系统的控制结构。因此,工业生产过程控制工程要解决图 0-3 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、工业生产过程工程和工艺、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。

## 习题和思考题

- 0-1 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？
- 0-2 现代控制理论为什么在工业生产过程控制中的应用不很成功？
- 0-3 试述计算机过程控制的发展过程。
- 0-4 工业生产过程控制中哪些因素与控制有关？
- 0-5 过程控制工程的综合性主要体现在什么地方？
- 0-6 为什么要对工业生产过程进行控制？
- 0-7 工业生产过程控制课程的特点和任务是什么？



# 简单控制系统

## 1.1 控制系统组成和控制性能指标

### 1.1.1 控制系统的组成

#### (1) 人工控制

以图 1-1 所示液位控制为例，说明人工控制的有关概念。人工控制的过程如下。

① 操作员用眼睛观测容器液位，经神经系统传到大脑。

② 大脑对液位观测值与工艺期望值进行比较，经分析和判别，发出控制指令。

③ 根据大脑发出的控制指令，操作员通过手操纵阀门，改变阀门开度，使流量变化。

④ 反复上述步骤，使液位维持在期望值。

#### (2) 自动控制

在生产过程中采用人工控制不能满足现代化工业生产要求，因此，设计了各种自动控制系统，它模拟人工控制的方法，用仪表、计算机等装置代替操作员的眼、大脑、手等的功能，实现对生产过程的自动控制。简单控制系统通常包含检测变送环节、控制器、执行器和被控对象等。各部分的功能、图形符号及典型仪表示例见表 1-1。过程控制的常用术语见表 1-2。

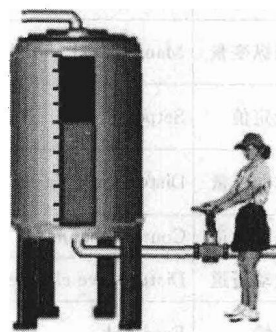
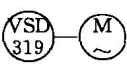


图 1-1 人工控制

表 1-1 简单控制系统组成

|        |      | 温度控制系统                                        | 液位控制系统          | 压力控制系统           |
|--------|------|-----------------------------------------------|-----------------|------------------|
| 控制系统示例 |      |                                               |                 |                  |
| 检测变送环节 | 图形符号 |                                               |                 |                  |
|        | 功能   | 检测被控变量，并将检测到的信号转换为标准信号输出                      |                 |                  |
|        | 仪表示例 | 热电阻或热电偶、温度变送器等                                | 差压变送器、液位变送器等    | 压力变送器(FF 现场总线仪表) |
| 控制器    | 图形符号 |                                               |                 |                  |
|        | 功能   | 将检测变送单元的输出与设定值比较，按一定控制规律对其偏差信号进行运算，运算结果输出到执行器 |                 |                  |
|        | 仪表示例 | 模拟控制器                                         | DCS 的控制器模块和共用显示 | FCS 的控制器模块和共用显示  |

续表

|      |      | 温度控制系统                                                                                       | 液位控制系统                                                                            | 压力控制系统                                                                              |
|------|------|----------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| 执行器  | 图形符号 |  圆的图形符号可不画出 |  |  |
|      | 功能   | 接收控制器的输出信号,改变执行器的节流件流通面积或转速等,使操纵变量改变                                                         |                                                                                   |                                                                                     |
|      | 仪表示例 | 气动控制阀(气开)                                                                                    | 电动执行器+控制阀(气关)                                                                     | 变频器+异步电动机                                                                           |
| 被控对象 | 图形符号 | 具体设备和生产过程的图形符号,例如,换热器、液位罐、水泵等的图形符号                                                           |                                                                                   |                                                                                     |
|      | 功能   | 需要控制的设备或生产过程,例如,换热器、液位罐、水泵等                                                                  |                                                                                   |                                                                                     |

注:带控制点工艺流程图(P&ID)上,仪表图形符号的圆直径约11mm。设计符号等详见附件。

表 1-2 过程控制常用术语

| 中文名称 | 英文名称                 | 说 明                     | 示 例                                           |
|------|----------------------|-------------------------|-----------------------------------------------|
| 被控变量 | Controlled Variable  | 被控对象中需要控制的过程变量          | 表 1-1 中的 $\theta, L, p$                       |
| 操纵变量 | Manipulated Variable | 由执行器控制的某一工艺流量,又称为操作变量   | 表 1-1 中的蒸汽流量、出料流量和泵转速                         |
| 设定值  | Setpoint             | 工艺希望被控变量达到的期望值,又称参比变量   | 表 1-1 中的设定温度、设定液位和设定压力                        |
| 扰动变量 | Disturbance Variable | 使被控变量偏离设定值的其他变量         | 表 1-1 中的蒸汽压力、进料量或管路负荷的波动                      |
| 控制通道 | Control channel      | 操纵变量到被控变量之间的通道          | 图 1-2 的被控对象                                   |
| 扰动通道 | Disturbance channel  | 扰动变量到被控变量之间的通道          | 图 1-2 的扰动通道                                   |
| 反馈   | Feedback             | 输出的全部或部分返回到输入端          | 检测变送的信号被反馈到控制器作为测量值                           |
| 开环   | Open-loop            | 没有反馈通路的控制系统,组成开环控制系统    | 图 1-2 的 $G_v(s)$ 、 $G_p(s)$ 和 $G_m(s)$ 组成开环控制 |
| 闭环   | Closed-loop          | 检测变送信号被反馈到控制器时,组成闭环控制系统 | 图 1-2 组成的控制系统                                 |

控制系统的控制过程。当系统受到干扰影响时,检测信号与设定值之间出现偏差,控制器将检测变送信号与设定值比较,按一定控制规律对其偏差值进行运算,并输出信号驱动执行机构改变操纵变量,使被控变量回复到设定值。

### (3) 简单控制系统的传递函数

简单控制系统构成可用图 1-2 的框图表示。图 1-3 是用传递函数描述图 1-2 简单控制系统的框图。这是单输入单输出控制系统的通用框图。从图中可获得闭环控制系统的输入输出传递函数。

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{G_c(s)G_v(s)G_p(s)}{1 + G_c(s)G_v(s)G_p(s)G_m(s)} \quad (1-1)$$

$$\frac{Y(s)}{F(s)} = \frac{G_f(s)}{1 + G_c(s)G_v(s)G_p(s)G_m(s)} \quad (1-2)$$

对图 1-3 说明下列几点。

① 框图中各个信号都是增量。增益和传递函数都是在稳态值为零时得到的。箭头表示信号流向,并非物流或能流的方向。

② 根据稳态条件下该环节输出增量与输入增量之比确定各环节增益的正或负。当该环节的输入增加时,其输出增加,则该环节的增益为正,反之,如果输出减小则增益为负。如

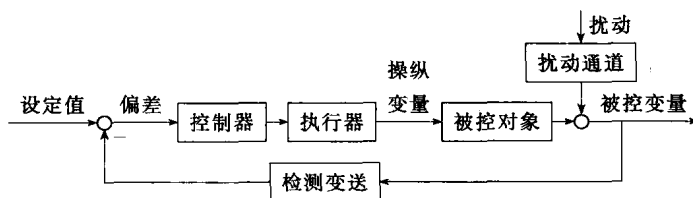


图 1-2 简单控制系统的框图

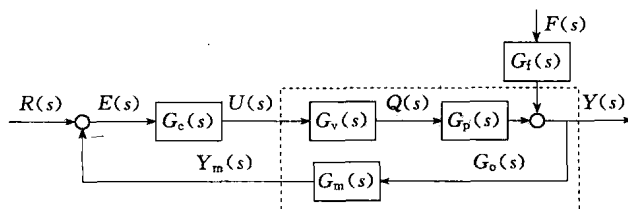


图 1-3 简单控制系统传递函数描述

图 1-4 所示的输入输出关系曲线上，某工作点  $(x_w, y_w)$  的增益  $K$  是该点切线的斜率，即  $K = dy/dx$ 。换热器温度被控对象，当蒸汽控制阀开度增加时，出口温度升高，因此，被控对象的增益为正。如果换热器用于冷却原料，则冷却剂控制阀开度增加，原料出口温度下降，因此，这时被控对象的增益为负。

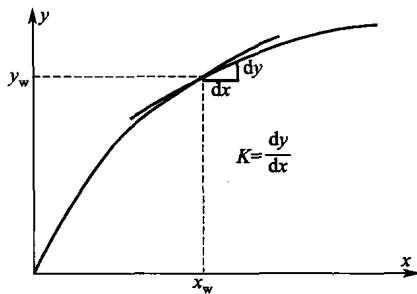


图 1-4 增益的计算

③ 通常将执行器、被控对象和检测变送环节合并为广义对象，广义对象传递函数用  $G_o(s)$  表示。因此，简单控制系统亦可表示为由控制器  $G_c(s)$  和广义对象  $G_o(s)$  组成的闭环系统。

④ 将各环节的增益除以该物理量的基准值得到无量纲的描述。当控制器输入和输出信号采用统一标准信号时，广义对象的增益是无量纲的。

⑤ 简单控制系统分为定值控制和随动控制两类。当扰动变量影响被控变量时，简单控制系统通过控制通道，改变操纵变量，克服扰动对被控变量的影响，这类控制系统称为定值控制系统。当控制系统设定值变化时，控制系统同样通过控制通道，改变操纵变量，使被控变量能随设定值的变化而变化，这类控制系统称为随动控制系统或伺服控制系统。

⑥ 包含采样开关的控制系统称为采样控制系统，它可由常规仪表加采样开关组成，也可直接由计算机控制系统组成。根据采样开关的数量、设置的位置、采用保持器的类型和采样周期的不同，控制系统的控制效果会不同，应根据具体情况分析。

⑦ 通常将检测变送环节表示为 1，其原因是被控变量能够迅速正确地被检测和变送，此外，为了简化，也常将  $G_m(s)$  与被控对象  $G_p(s)$  合并在一起考虑。但是，对于有非线性特性的检测和变送环节，例如采用孔板和差压变送器测量流量时，应分别列出。为简化，在带控制点工艺流程图 (P&ID) 上也可不标注检测变送仪表。

⑧ 被控变量分为直接被控变量和间接被控变量两大类。

### 1.1.2 控制系统的控制性能指标

控制系统的性能指标可用稳定性、准确性、快速性、偏离度等指标或积分指标描述。

稳定性是控制系统性能的首要指标。这表明组成控制系统的闭环极点应位于  $s$  左半平