



普通高等教育  
电气工程与自动化类  
“十一五”规划教材

PROCESS CONTROL SYSTEM

# 过程控制系统

俞金寿 孙自强 编著



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育电气工程与自动化类“十一五”规划教材

# 过程控制系统

俞金寿 孙自强 编著  
钱积新 审校



机械工业出版社

本书在分析稳态和动态数学模型的基础上,主要讨论了简单控制系统,常用复杂控制系统(串级、均匀、比值、前馈、选择性、分程、双重、差拍等控制)的结构、原理、特点、适用场合、系统设计及应用等问题,并简单介绍了先进控制技术(基于模型的预测控制、软测量技术、纯滞后补偿控制、自适应控制、智能控制、综合自动化等)。阐述了过程工业(石化、化工、轻工、医药等)生产过程中的典型单元操作的控制方案,还介绍了典型工业生产过程(常减压过程、催化裂化过程、乙烯生产过程、聚合过程、生化过程、造纸过程、冶金过程、电力过程和化肥生产过程)的控制。本书的特点是理论与实际结合,基本理论与新技术并重,内容切合信息时代的需要,并力求深入浅出,着重物理概念。

本书可作为大学过程控制系统课程的教材或参考书,也可供从事过程控制的工程技术人员或有关专业的高校师生阅读使用,还可供需要了解过程控制系统的自动化工作者参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

过程控制系统/俞金寿,孙自强编著. —北京:机械工业出版社,2008.8

普通高等教育电气工程与自动化类“十一五”规划教材  
ISBN 978-7-111-24932-0

I. 过… II. ①俞…②孙… III. 过程控制-自动控制系统-高等学校-教材 IV. TP273

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第126203号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:于苏华

责任编辑:姚元明 版式设计:张世琴 责任校对:姚培新

封面设计:王洪流 责任印制:邓博

北京京丰印刷厂印刷

2009年1月第1版·第1次印刷

184mm×260mm·19.75印张·484千字

标准书号:ISBN 978-7-111-24932-0

定价:34.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

销售服务热线电话:(010)68326294

购书热线电话:(010)88379639 88379641 88379643

编辑热线电话:(010)88379711

封面无防伪标均为盗版

# 全国高等学校电气工程与自动化系列教材 编 审 委 员 会

**主任委员** 汪櫟生 浙江大学

**副主任委员** (按姓氏笔画排序)

王兆安 西安交通大学

王孝武 合肥工业大学

田作华 上海交通大学

刘 丁 西安理工大学

陈伯时 上海大学

郑大钟 清华大学

赵光宙 浙江大学

赵 曜 四川大学

韩雪清 机械工业出版社

**委 员** (按姓氏笔画排序)

戈宝军 哈尔滨理工大学

王钦若 广东工业大学

吴 刚 中国科技大学

张纯江 燕山大学

张晓华 哈尔滨工业大学

邹积岩 大连理工大学

陈庆伟 南京理工大学

夏长亮 天津大学

萧蕴诗 同济大学

韩 力 重庆大学

熊 蕊 华中科技大学

方 敏 合肥工业大学

白保东 沈阳工业大学

张化光 东北大学

张 波 华南理工大学

杨 耕 清华大学

陈 冲 福州大学

范 瑜 北京交通大学

章 兢 湖南大学

程 明 东南大学

雷银照 北京航空航天大学

# 序

随着科学技术的不断进步，电气工程与自动化技术正以令人瞩目的发展速度，改变着我国工业的整体面貌。同时，对社会的生产方式、人们的生活方式和思想观念也产生了重大的影响，并在现代化建设中发挥着越来越重要的作用。随着与信息科学、计算机科学和能源科学等相关学科的交叉融合，它正在向智能化、网络化和集成化的方向发展。

教育是培养人才和增强民族创新能力的基础，高等学校作为国家培养人才的主要基地，肩负着教书育人的神圣使命。在实际教学中，根据社会需求，构建具有时代特征、反映最新科技成果的知识体系是每个教育工作者义不容辞的光荣任务。

教书育人，教材先行。机械工业出版社几十年来出版了大量的电气工程与自动化类教材，有些教材十几年、几十年长盛不衰，有着很好的基础。为了适应我国目前高等学校电气工程与自动化类专业人才培养的需要，配合各高等学校的教学改革进程，满足不同类型、不同层次的学校在课程设置上的需求，由中国机械工业教育协会电气工程及自动化学科教学委员会、中国电工技术学会高校工业自动化教育专业委员会、机械工业出版社共同发起成立了“全国高等学校电气工程与自动化系列教材编审委员会”，组织出版新的电气工程与自动化类系列教材。这套教材基于“**加强基础，削枝强干，循序渐进，力求创新**”的原则，通过对传统课程内容的整合、交融和改革，以不同的模块组合来满足各类学校特色办学的需要。并力求做到：

**1. 适用性：**结合电气工程与自动化类专业的培养目标、专业定位，按技术基础课、专业基础课、专业课和教学实践等环节，进行选材组稿。对有的具有特色的教材采取一纲多本的方法。注重课程之间的交叉与衔接，在满足系统性的前提下，尽量减少内容上的重复。

**2. 示范性：**力求教材中展现的教学理念、知识体系、知识点和实施方案在本领域中具有广泛的辐射性和示范性，代表并引导教学发展的趋势和方向。

**3. 创新性：**在教材编写中强调与时俱进，对原有的知识体系进行实质性的改革和发展，鼓励教材涵盖新体系、新内容、新技术，注重教学理论创新和实践创新，以适应新形势下的教学规律。

**4. 权威性：**本系列教材的编委由长期工作在教学第一线的知名教授和学者组成。他们知识渊博，经验丰富。组稿过程严谨细致，对书目确定、主编征集、

资料申报和专家评审等都有明确的规范和要求，为确保教材的高质量提供了有力保障。

这套教材的顺利出版，先后得到全国数十所高校相关领导的大力支持和广大骨干教师的积极参与，在此谨表示衷心的感谢，并欢迎广大师生提出宝贵的意见和建议。

这套教材的出版如能在转变教学思想、推动教学改革、更新专业知识体系、创造适应学生个性和多样化发展的学习环境、培养学生的创新能力等方面收到成效，我们将会感到莫大的欣慰。

全国高等学校电气工程与自动化系列教材编审委员会

汪植生 陈永时 郑大钟

# 前 言

近十多年来，过程控制系统与整个的工业自动化一样，出现了很大变化，现代控制理论在继续完善和发展，尽管并没有像一些理论界所希望的那样在工业上得到足够的推广，但是，来自工业界的一些先进控制策略发展很迅速。多变量预测控制作为先进控制技术的代表，在国际和国内都备受关注，在国内外得到了广泛应用，取得了明显的经济效益；智能控制的热潮也已来到，模糊控制、神经网络控制、专家系统等已在过程控制中开始应用；自动化的范畴进一步扩大，现在早已不局限于检测和控制，操作优化带来显著的经济效益，故障检测和诊断提高了生产的安全性和可靠性，自动化与生产管理结合，进而走向综合自动化。

本书在综观工业自动化发展形势以后，侧重介绍了基本控制系统的原理，这部分内容十分重要，它是更高层次的多变量控制及优化控制等的基础。

全书总共8章，第1章绪论，主要叙述过程控制系统的发展以及过程控制系统基本概念。第2章工业过程数学模型，介绍了工业过程数学模型建立的基本方法及例子。第3章控制器的控制规律，介绍了连续和离散比例、积分、微分控制算法。第4章简单控制系统，介绍了简单控制系统组成及设计。第5章常用复杂控制系统，介绍了常用复杂控制系统（串级、均匀、比值、前馈、选择性、分程、双重、差拍等控制）的结构、原理、特点、适用场合、系统设计及应用等问题。第6章先进控制技术，简单介绍了基于模型的多变量预测控制、软测量技术、纯滞后补偿控制系统、自适应控制、智能控制系统、综合自动化系统等先进控制技术。第7章典型过程单元控制，阐述了生产过程中典型单元操作（流体输送设备、传热设备、蒸发器、管式加热炉、工业窑炉、精馏塔、化学反应器）的控制方案。第8章典型工业生产过程的控制，介绍了常减压过程、催化裂化过程、乙烯生产过程、聚合过程、生化过程、造纸过程、冶金过程、电力过程和化肥生产过程等的控制。

本书介绍的各类控制系统可以采用基地式仪表、气动单元组合仪表、电动单元组合仪表、可编程序控制器、现场总线、计算机等自动化工具来实现。考虑到自动化专业应用范围广泛，第7、8章内容较多，各有关院校可以根据自身特点进行选择。

本书的特点是理论与实际结合，基本理论与新技术并重，内容切合信息时代的需要，力求深入浅出，着重物理概念。

本书由俞金寿、孙自强编著，刘爱伦、何衍庆编写了部分章节。浙江大学钱积新教授审校了全书，提出了详细修改意见，在此向他表示诚挚的感谢。由于作者水平有限，不妥之处欢迎读者批评指正。

作者于华东理工大学

# 目 录

## 序

## 前言

## 第1章 绪论 ..... 1

- 1.1 控制理论与过程控制系统的发展  
    状况 ..... 1
- 1.2 过程控制系统简介 ..... 5
  - 1.2.1 概述 ..... 5
  - 1.2.2 闭环控制与开环控制 ..... 7
  - 1.2.3 控制系统的组成及框图 ..... 8
  - 1.2.4 控制系统的分类 ..... 9
- 1.3 控制系统的过渡过程 ..... 11
  - 1.3.1 稳态与动态 ..... 11
  - 1.3.2 控制系统的过渡过程及品质  
    指标 ..... 12
- 1.4 过程控制系统的研究对象与任务 ..... 14
- 习题及思考题 ..... 15

## 第2章 工业过程数学模型 ..... 16

- 2.1 工业过程稳态数学模型 ..... 16
  - 2.1.1 机理建模 ..... 16
  - 2.1.2 经验模型 ..... 17
  - 2.1.3 机理与经验的组合建模 ..... 19
- 2.2 工业过程动态数学模型 ..... 19
  - 2.2.1 动态数学模型的作用和要求 ..... 19
  - 2.2.2 动态数学模型的类型 ..... 20
  - 2.2.3 建立动态数学模型的途径 ..... 21
  - 2.2.4 工业过程动态机理模型 ..... 23
  - 2.2.5 过程辨识与参数估计 ..... 32
  - 2.2.6 典型过程动态数学模型 ..... 39
- 习题及思考题 ..... 42

## 第3章 控制器的控制规律 ..... 43

- 3.1 双位控制 ..... 43
- 3.2 比例控制 ..... 45
- 3.3 积分控制及比例积分控制 ..... 47
  - 3.3.1 积分控制 ..... 47
  - 3.3.2 比例积分控制 ..... 48
  - 3.3.3 积分饱和 ..... 50
- 3.4 微分控制及比例微分控制 ..... 51

- 3.4.1 微分控制 ..... 52
- 3.4.2 比例微分控制 ..... 52
- 3.5 比例积分微分控制 ..... 53
- 3.6 离散比例积分微分控制 ..... 55
  - 3.6.1 离散比例积分微分控制算法 ..... 55
  - 3.6.2 离散比例积分微分控制算法  
    的特点 ..... 56
  - 3.6.3 离散比例积分微分控制算法  
    的改进 ..... 56
- 习题及思考题 ..... 58

## 第4章 简单控制系统 ..... 59

- 4.1 控制系统的组成 ..... 59
- 4.2 简单控制系统的设计 ..... 61
  - 4.2.1 控制系统设计概述 ..... 61
  - 4.2.2 被控变量与操纵变量的选择 ..... 62
  - 4.2.3 检测变送环节选择 ..... 64
  - 4.2.4 执行器（气动薄膜控制阀）  
    的选择 ..... 66
  - 4.2.5 控制规律及控制器作用方  
    向的选择 ..... 73
- 4.3 简单控制系统的参数整定 ..... 75
  - 4.3.1 控制器的参数整定若干原则 ..... 75
  - 4.3.2 控制器参数的工程整定法 ..... 75
- 4.4 控制系统的投运 ..... 78
  - 4.4.1 投运前的准备工作 ..... 78
  - 4.4.2 投运过程 ..... 79
- 4.5 简单控制系统设计案例 ..... 79
  - 4.5.1 控制方案设计 ..... 79
  - 4.5.2 检测控制仪表的选用 ..... 80
- 习题及思考题 ..... 80

## 第5章 常用复杂控制系统 ..... 82

- 5.1 串级控制系统 ..... 82
  - 5.1.1 串级控制系统的基本原理 ..... 82
  - 5.1.2 串级控制系统的特点 ..... 84
  - 5.1.3 串级控制系统的设计 ..... 87
  - 5.1.4 串级控制系统控制器参数的  
    整定 ..... 89



5.1.5 串级控制系统的变型 .....	89	习题及思考题 .....	117
5.1.6 串级控制系统的应用实例 .....	91	<b>第6章 先进控制技术</b> .....	119
5.2 比值控制系统 .....	92	6.1 基于模型的预测控制 .....	119
5.2.1 比值控制系统的基本原理和 主要结构形式 .....	92	6.1.1 预测控制的基本原理 .....	119
5.2.2 比值系数的计算 .....	94	6.1.2 预测控制算法 .....	121
5.2.3 比值控制系统工程应用中的 问题 .....	96	6.1.3 预测控制软件包的发展 .....	123
5.2.4 比值控制系统的参数整定和 投运 .....	97	6.1.4 预测控制的工业应用 .....	123
5.2.5 比值控制系统的应用实例 .....	97	6.2 推断控制 .....	127
5.3 均匀控制系统 .....	99	6.3 软测量技术 .....	129
5.3.1 均匀控制系统的基本原理和 主要结构形式 .....	99	6.3.1 软测量技术的基本原理 .....	130
5.3.2 均匀控制系统控制规律的选择 及参数整定 .....	100	6.3.2 软测量技术的工业应用实例 .....	131
5.4 前馈控制系统 .....	101	6.4 纯滞后补偿控制 .....	133
5.4.1 前馈控制系统的基本原理 .....	101	6.5 解耦控制 .....	134
5.4.2 前馈控制系统的主要结构 形式 .....	102	6.5.1 系统的关联分析 .....	134
5.4.3 前馈控制系统的设计及工程 实施中若干问题 .....	103	6.5.2 相对增益 .....	135
5.4.4 前馈控制系统的应用实例 .....	105	6.5.3 减少与解除耦合途径 .....	137
5.5 选择性控制系统 .....	106	6.5.4 串接解耦控制 .....	138
5.5.1 选择性控制系统的基本原理 和主要结构形式 .....	106	6.5.5 解耦控制系统的工业应用实例 .....	140
5.5.2 选择性控制系统设计和工程 应用中的问题 .....	109	6.6 自适应控制 .....	142
5.5.3 选择性控制系统的应用实例 .....	110	6.6.1 简单自适应控制系统 .....	143
5.6 分程控制系统 .....	112	6.6.2 模型参考型自适应控制系统 .....	145
5.6.1 不同工况需要不同的控制 手段 .....	113	6.6.3 自校正控制系统 .....	146
5.6.2 扩大控制阀的可调范围 .....	113	6.7 智能控制 .....	146
5.7 双重控制系统 .....	114	6.7.1 专家系统 .....	146
5.7.1 双重控制系统的基本原理和 主要结构形式 .....	114	6.7.2 模糊控制 .....	149
5.7.2 双重控制系统设计和工程应 用中的问题 .....	115	6.7.3 神经网络控制 .....	152
5.7.3 双重控制系统的应用实例 .....	115	6.8 综合自动化 .....	155
5.8 差拍控制系统 .....	116	6.8.1 综合自动化的意义 .....	155
5.8.1 差拍控制系统的基本原理 .....	116	6.8.2 综合自动化系统的特点 .....	156
5.8.2 大林控制算法 .....	116	6.8.3 综合自动化系统的构成 .....	157
5.8.3 V. E. 控制算法 .....	117	习题及思考题 .....	158
		<b>第7章 典型过程单元控制</b> .....	159
		7.1 流体输送设备的控制 .....	159
		7.1.1 泵的控制 .....	160
		7.1.2 变频调速器的应用 .....	162
		7.1.3 压缩机的控制 .....	163
		7.1.4 离心式压缩机的防喘振控 制系统 .....	164
		7.2 传热设备的控制 .....	169
		7.2.1 传热设备的稳态数学模型 .....	169
		7.2.2 一般传热设备的控制 .....	172
		7.2.3 传热设备的热焓与热量控 制方案 .....	174

7.3 蒸发器的控制 .....	175	8.2.1 催化裂化过程反应-再生系 统的控制 .....	237
7.3.1 蒸发器的特性 .....	176	8.2.2 裂解气分馏塔的控制 .....	238
7.3.2 蒸发器的主控制回路 .....	176	8.2.3 吸收-稳定系统的控制 .....	239
7.3.3 蒸发器的辅助控制回路 .....	178	8.2.4 反应-再生专家系统 .....	240
7.4 管式加热炉的控制 .....	178	8.3 乙烯生产过程的控制 .....	242
7.4.1 加热炉的简单控制 .....	179	8.3.1 裂解过程的控制 .....	242
7.4.2 加热炉的串级控制系统 .....	179	8.3.2 乙烯精馏塔控制 .....	246
7.4.3 加热炉的安全联锁保护系统 .....	180	8.3.3 乙炔加氢反应器控制 .....	249
7.4.4 加热炉的热效率控制 .....	181	8.4 聚合过程的控制 .....	252
7.5 工业窑炉的控制 .....	182	8.4.1 聚对苯二甲酸乙二酯(聚酯) 生产过程的控制 .....	252
7.5.1 玻璃窑炉的控制 .....	182	8.4.2 聚氯乙烯生产过程的控制 .....	253
7.5.2 燃烧式工业窑炉的控制 .....	185	8.4.3 聚乙烯生产过程的控制 .....	255
7.5.3 水泥窑炉的控制 .....	187	8.5 生化过程的控制 .....	258
7.6 精馏塔的控制 .....	188	8.5.1 常用生化过程的控制 .....	259
7.6.1 精馏塔的控制要求 .....	189	8.5.2 啤酒发酵过程的控制 .....	261
7.6.2 精馏塔的扰动分析 .....	190	8.5.3 典型生化过程的计算机控制 .....	262
7.6.3 精馏塔的特性 .....	191	8.6 制浆造纸过程的控制和硫酸盐法制 浆过程的控制 .....	264
7.6.4 精馏塔被控变量的选择 .....	195	8.6.1 制浆造纸过程的控制 .....	265
7.6.5 精馏塔的控制方案 .....	197	8.6.2 硫酸盐法制浆过程的控制 .....	270
7.6.6 精馏塔的高级控制 .....	202	8.7 冶金过程的控制 .....	272
7.6.7 精馏塔节能控制 .....	208	8.7.1 转炉炼钢过程的控制 .....	272
7.6.8 精馏塔优化 .....	216	8.7.2 氧化转炉炼钢过程的控制 .....	274
7.7 化学反应器的控制 .....	220	8.7.3 初轧生产过程的控制 .....	277
7.7.1 化学反应器的控制要求 .....	220	8.8 电力过程的控制 .....	279
7.7.2 化学反应器的热稳定性 .....	221	8.8.1 锅炉设备的控制 .....	279
7.7.3 化学反应器的基本控制策略 .....	223	8.8.2 电站锅炉和发电机组的协调 控制 .....	288
7.7.4 化学反应器的基本控制方案 .....	223	8.9 化肥生产过程的控制 .....	291
习题及思考题 .....	229	8.9.1 合成氨生产过程的控制 .....	291
<b>第8章 典型工业生产过程的控制</b> .....	<b>231</b>	8.9.2 尿素生产过程的控制 .....	300
8.1 常减压蒸馏过程的控制 .....	231	习题及思考题 .....	302
8.1.1 常减压蒸馏过程的控制要求 和目标 .....	232	<b>参考文献</b> .....	<b>303</b>
8.1.2 减压精馏塔智能多变量控制 系统 .....	235		
8.2 催化裂化过程的控制 .....	237		

# 第 1 章 绪 论

## 1.1 控制理论与过程控制系统的发展状况

20 世纪 40 年代开始形成的控制理论被称为“20 世纪上半叶三大伟绩之一”，在人类社会的各个方面有着深远的影响。控制理论与其他任何学科一样，源于社会实践和科学实践。在自动化的发展中，有两个明显的特点：第一，任务的需要、理论的开拓与技术手段的进展三者相互推动、相互促进，显示了一幅交错复杂，但又轮廓分明的画卷，三者间表现出清晰的同步性；第二，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，在自动化的各个领域，移植和借鉴起了交流汇合的作用。

自动化技术的前驱，可以追溯到我国古代，如指南车的出现。至于工业上的应用，一般以瓦特的蒸汽机调速器作为正式起点。工业自动化的萌芽是与工业革命同时开始的。这时候的自动化装置是机械式的，而且是自力型的。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创了新的控制手段。

到第二次世界大战前后，控制理论有了很大发展。电信事业的发展导致了 Nyquist 频率域分析技术和稳定判据的产生（1932 年）。Bode 的进一步研究开发了易于实际应用的 Bode 图（1945 年）。1948 年，Evans 提出了一种易于工程应用的求解闭环特征方程根的简单图解方法——根轨迹法。至此，自动控制技术开始形成一套完整的，以传递函数为基础的，在频率域对单输入单输出控制系统进行分析与设计的理论，这就是今天所谓的经典控制理论。经典控制理论最辉煌的成果之一要首推比例积分微分（PID）控制规律。PID 控制原理简单，易于实现，对无时间延迟的单回路控制系统极为有效，直到目前为止，在工业过程控制中有 80% ~ 90% 的系统还使用 PID 控制规律。经典控制理论最主要的特点是：线性定常对象，单输入单输出，完成镇定任务。复杂大型化生产过程对控制提出了更高要求，经典控制理论已不能满足要求，从而促使了现代控制理论的发展。

20 世纪 60 年代，控制理论发展迅猛，这是以状态空间方法为基础，以极小值原理（Pontryagin, 1962 年）和动态规划方法（Belman, 1963 年）等最优控制理论为特征的，而以采用 Kalman 滤波器的随机干扰下的线性二次型系统（LOG）（Kalman, 1960 年）为标志线性系统的理论体系已基本建立。现代控制理论在航天、航空、制导等领域取得了辉煌的成果。现代控制理论中首先得到透彻研究的是多输入多输出系统，其中特别重要的是对描述控制系统本质的基本理论的建立，如可控性、可观性、实现理论、典范型、分解理论等，使控制由一类工程设计方法提高成为一门新的科学。为了扩大现代控制理论的应用范围，相继产生和发展了系统辨识与参数估计、随机控制、自适应控制以及鲁棒控制等各种理论分支，使控制理论的内容越来越丰富。现代控制理论虽然在航天、航空、制导等领域取得了辉煌的成果，但对于复杂的工业过程却难于推广。

从 20 世纪 70 年代开始，为了解决大规模复杂系统的优化与控制问题，现代控制理论和

系统理论相结合,逐步发展形成了大系统理论(Mohammad, 1983年)。其核心思想是系统的分解与协调,多级递阶优化与控制(Mesarovic, 1970年)正是应用大系统理论的典范。实际上,大系统理论仍未突破现代控制理论的基本思想与框架,在工业过程控制中难以广泛应用。

20世纪80年代发展起来智能控制,对于含有大量不确定性和难于建模的复杂系统,基于知识的专家系统、模糊控制、人工神经网络控制、学习控制和基于信息论的智能控制等应运而生,它们在许多领域都得到了广泛的应用,成为自动控制的前沿学科之一。

智能控制(Intelligent Control, IC)是20世纪80年代以来极受人们关注的一个领域。学术界有不少人认为智能控制将是继经典控制理论方法和现代理论控制方法之后,成为新一代的控制理论方法。智能控制的理论和应用研究很多,在国内外都是受人瞩目的热点。加上近年来在洗衣机、空调器、摄像机等家电产品中采用模糊控制,而像智能仪表、智能大厦等术语也在一般报刊上常会看到,智能控制已走进千家万户。

什么是智能控制呢?最直观的定义显然是引入人工智能(Artificial Intelligence, AI)的控制,也就是人工智能与自动控制的结合。傅京孙教授在1971年就是这样提的。人工智能与自动控制两者是不可或缺的。它一方面表明智能控制范围很广,而且会不断接纳新的内容;另一方面也给出明显的界限,与人工智能无关的控制不是智能控制。后来还有各式各样的提法,如美国的Saridis教授提出了把运筹学也结合起来的思想等。但是,从交集的角度看,还是以二元结构为宜。

人工智能的内容很广泛,如知识表示、问题求解、语言理解、机器学习、模式识别、定理证明、机器视觉、逻辑推理、人工神经网络、专家系统、智能控制、智能调度和决策、自动程序设计、机器人学等都是人工智能的研究和应用领域。人工智能是指智能机器所执行的通常与人类智能有关的功能,如判断、推理、证明、识别、感知、理解、设计、思考、规划、学习和问题求解等思维活动。

人工智能中有不少内容可用于控制,当前最主要的是3种形式:①专家系统;②模糊控制;③人工神经网络控制。它们可以单独应用,也可以与其他形式结合起来;可以用于基层控制,也可用于过程建模、操作优化、故障检测、计划调度和经营决策等不同层次。

从工业过程控制系统结构来看,已经经历了4个阶段。20世纪50年代是以基地式控制等组成的控制系统,像自力式温度控制器、就地式液位控制器等,它们功能往往限于单回路控制。时至今日,这类控制系统仍没有淘汰,而且有了新的发展,但所占的比重大为减少。

20世纪60年代出现了单元组合仪表组成的控制系统。单元组合仪表有电动和气动两大类,已延续40多年,目前国内还广泛应用。由单元组合仪表组成的控制系统,控制策略主要是PID控制和常用的复杂控制系统(例如串级、均匀、比值、前馈、分程和选择性控制等)。

20世纪70年代出现了计算机控制系统,最初是直接数字控制(DDC)实现集中控制,代替常规控制仪表。由于集中控制的固有缺陷,未能普及和推广就被集散控制系统(DCS)所替代。DCS在硬件上将控制回路分散化。数据显示、实时监督等功能集中化,有利于安全平稳生产。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。

20世纪80年代以后出现优化与控制二层结构,在DCS的基础上实现先进控制和操作优化。在硬件上采用上位机和DCS或电动单元组合仪表相结合,构成二级计算机优化控制。随着计算机及网络技术的发展,DCS出现了开放式系统,实现多层次计算机网络构成的管控一体化系统,即综合自动化系统。

现场总线导致了传统控制系统结构的变革,形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)。它就是将挂接在总线上、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,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。这是继基地式气动仪表控制系统、电动单元组合式模拟仪表控制系统、集中式数字控制系统、集散控制系统后的新一代控制系统。

新型的现场总线控制系统突破了DCS中通信由专用网络的封闭系统来实现所造成的缺陷,把封闭、专用的解决方案变成了公开化、标准化的解决方案,即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;同时把DCS集中与分散相结合的集散系统结构,变成了新型的全分布式结构,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。现场总线控制系统将给控制系统结构带来革命性变革,开辟控制系统的新纪元。

当前过程控制系统发展的一些主要特点是:

### 1. 生产装置实施先进控制成为发展主流

早期的简单控制由于受到经典控制理论和常规仪表的限制,难以处理工业过程中存在的耦合性、非线性和时变性等。尽管在20世纪70年代以后,许多生产装置采用了DCS,但由于当时的理论和技术原因,控制水平仍停留在单回路PID控制、联锁保护控制等。随着企业提出的高柔性、高效益的要求,上述控制方案已经不能适应,以多变量预测控制为代表的先进控制策略的提出和成功应用以后,先进控制受到了过程工业界的普遍关注。先进过程控制(Advanced Process Control, APC)是指一类在动态环境中,基于模型、借助充分计算能力,为工厂获得最大利润而实施的运行和技术策略。这种新的控制策略实施后,系统运行在最佳工况,实现所谓“卡边生产”。据资料报道,一个乙烯装置投资163万美元实施先进控制,完成后预期可获得的效益为600万美元/年。目前,国内许多大企业纷纷投资,在装置自动化系统中实施先进控制。国外许多控制软件公司和DCS生产商都在竞相开发先进控制和优化控制的商品化工程软件包,西方国家有一定规模的先进控制软件公司大约有45家,推出APC软件312种,全世界应用APC有数千项,APC软件应用年增长率达到30%左右。先进控制策略主要有:多变量预测控制、推理控制及软测量技术、自适应控制、鲁棒控制、智能控制(专家控制、模糊推理和神经网络控制)等,尤其智能控制已成为开发和应用的热点。

### 2. 过程优化得到迅速发展

在过程控制中,过程在线操作优化已得到迅速发展。在连续过程工业中,往往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、物料平衡和能量平衡等一系列的问题。借助在线优化可使整个生产过程获得较好的经济效益和社会效益。在过程操作优化中,主要是寻找最佳的工艺变量(参数)设定值以获得最大的经济效益,这称为稳态优化。稳态优化采用稳态模型,进行离线或在线优化计算。离线优化是指利用稳态模型在约束条件下寻优的方法,求解最优的工艺变量值,提供操作指导。在线优化是周期性完成

模型计算、模型和参数修正，并将最优变量值直接送到控制器作为设定值。为获得稳态最优，要求系统运行在一种特定的、保守程度较小的工况之下，为此，要求控制器具有良好控制性能，实现卡边控制，以获得最大经济效益。随着稳态优化的深入研究，一种基于动态模型联立求解的优化算法显示出其重要性。

生产过程的优化是在各种约束条件下，求取目标函数的最优值，通常是复杂的非线性优化问题。应用传统优化理论往往遇到困难。在过程优化中，由于系统的复杂性，求全局最优值十分困难，而且实际过程并不一定要求最优值，而只要求得“优化区域”或“满意解”就可满足要求。在过程优化中，实际的最优值往往处于约束的边界上。最近有人提出把工艺设计与控制整体考虑，在工艺设计的同时考虑到控制的实施方案及效果，就可以在工艺设计阶段消除那些可能导致控制困难的因素，这种方法正在受到人们的关注。

### 3. 故障预报与诊断受到各方普遍关注

故障预报与诊断技术 (Fault Estimation and Diagnosis Technology) 是发展于 20 世纪中叶的一门科学技术，是指对系统的异常状态的检测、异常状态原因的识别以及包括异常状态预报在内的各种技术的总称。

随着现代工业及科学技术的迅速发展，生产设备日趋大型化、高速化、自动化和智能化，系统的安全性、可靠性和有效性日益重要和越来越复杂，故障预报与诊断技术也越来越受到人们的重视。

故障预报与诊断技术是一门综合性技术，它的开发涉及多门学科，如现代控制理论、可靠性理论、数理统计、模糊集理论、信号处理、模式识别、人工智能等。

故障预报与诊断系统要力求提高故障的正确检测率，要降低故障的漏报率和误报率。漏报指发生了故障未报警，误报指未发生故障反而报警。

故障预报与诊断技术经过十几年的迅速发展，到目前为止已经出现了基于各种不同原理的众多方法。同以前相比，这些方法不论是预报性能、诊断性能，还是鲁棒性都有很大提高，而且对于线性时不变系统理论上已经形成了相对较为完整的体系结构。

对于基于解析冗余的方法，国际故障诊断权威，德国的 P. M. Frank 教授认为所有的故障诊断方法可以划分为基于知识的方法、基于解析模型的方法和基于信号处理的方法。

### 4. 传统的 DCS 走向国际统一标准的开放式系统

自 1975 年第一套分布式工业控制计算机系统诞生以来，历经近 20 年，各家 DCS 生产厂商的产品大多不能兼容。随着综合自动化的潮流和计算机科学与技术的发展，一些主要的 DCS 生产商经过激烈地竞争，最后终于联手共同推出一种国际标准的现场总线 (Fieldbus) 控制系统，它被公认为具有时代特点的新一代分布式计算机控制系统，它的主要特点如下：

1) 开放性。现场总线采用同一种国际标准的通信协议，不同厂商的产品可方便地互连，可与局域网相连。

2) 智能化现场仪表。除了一般现场控制、检测仪表功能以外，还具有诊断、自补偿、现场组态、现场校验功能。

3) 现场仪表采用数字信号传输。提高了传输可靠性，节约了传输线的投资。

4) 彻底的分散性。简单控制回路基本分散在现场实现，关键数字信号进中央控制室，中央控制室主要完成信息管理、先进控制和优化。

现场总线是自动化领域技术发展的热点之一，它的出现标志着工业控制技术领域又一个新时代的开始。现场总线控制系统必将逐步取代传统的独立控制系统、集中采集控制系统等，成为 21 世纪自动控制系统的主流。

现场总线的国际标准虽然从 1984 年开始就着手制订，先后曾经过 9 次投票表决，其中两次遭到否决，但经过有关各方的共同努力和协商，终于在 1999 年年底的投票表决中，8 种现场总线协议的 IEC61158 国际标准正式通过。为了反映工业网络通信技术的最新发展，2003 年 4 月，由 IEC/SC6SC/MT9 小组负责修订的 IEC61158 Ed. 3（现场总线标准第 3 版）正式成为国际标准。在新版本标准中规定了 10 种类型的现场总线，它们是：TS61158 现场总线；ControlNet 和 Ethernet/IP 现场总线；Profibus 现场总线；P-Net 现场总线；FF HSE（High Speed Ethernet）现场总线；SwiftNet 现场总线；WorldFIP 现场总线；InterBus 现场总线；Type9 FF H1 现场总线；Type 10 ProfiNet 现场总线。

### 5. 综合自动化系统是发展方向

过程工业自动化在 20 世纪 90 年代以前仍是自动化孤岛模式。进入 90 年代，国内外企业国际市场剧烈竞争的刺激下，特别是过程工业还受到环境保护的巨大社会压力，节能降耗，少投入多产出的高效生产和减少污染的洁净生产成为企业的生产模式，企业把提高综合自动化水平作为挖潜增效、提高竞争能力的重要途径，集常规控制、先进控制、过程优化、生产调度、企业管理、经营决策等功能于一体的综合自动化成了当前自动化发展的趋势。综合自动化就是在计算机通信网络和分布式数据库的支持下，实现信息与功能的集成，进而充分调动人的因素的经营系统、技术系统及组织系统（Humanware）的集成，最终形成一个能适应生产环境不确定性和市场需求多变性的全局优化的高质量、高效益、高柔性的智能生产系统，这就是 CIM 思想在连续工业中的体现。

在一些综合自动化系统中，底层控制系统的功能非常先进，高层 ERP 系统的功能也相当完整，但应用效果并不理想。尽管综合自动化系统应用不成功的因素是多方面的，但缺乏面向制造过程的 MES 来连接底层的控制系统和高层的经营/计划/决策系统是关键性的因素之一。

## 1.2 过程控制系统简介

### 1.2.1 概述

生产过程中，对各个工艺过程的物理量（或称工艺变量）有一定的控制要求。有些工艺变量直接表征生产过程，对产品的数量和质量起着决定性的作用。例如，精馏塔的塔顶或塔釜温度，一般在操作压力不变的情况下，必须保持一定，才能得到合格的产品；加热炉出口温度的波动不能超出允许范围，否则将影响后一工段的效果；化学反应器的反应温度必须保持平稳，才能使效率达到指标。有些工艺变量虽不直接地影响产品的数量和质量，然而保持其平稳却是使生产获得良好控制的前提。例如，用蒸汽加热反应器或再沸器，在蒸汽总压波动剧烈的情况下，要把反应温度或塔釜温度控制好将极为困难；中间贮槽的液位高度与气柜压力，必须维持在允许的范围之内，才能使物料平衡，保持连续的均衡生产。有些工艺变量是决定安全生产的因素，例如，锅炉锅筒的液（水）位、受压容器的压力等，不允许超

出规定的限度，否则将威胁生产的安全。还有一些工艺变量直接鉴定产品的质量，例如，某些混合气体的组成、溶液的酸碱度等。对于以上各种类型的变量，在生产过程中，都必须加以必要的控制。

图 1-1 所示是工业生产常见的锅炉锅筒示意图，其液位是一个重要的工艺参数。液位过低，影响产汽量，且易烧干而发生事故；液位过高，影响蒸汽质量。因此，对锅筒液位应严加控制。

如果一切条件（包括给水流量、蒸汽量等）都近乎恒定不变，只要将进水阀置于某一适当开度，则锅筒液位能保持在一定高度。但实际生产过程中这些条件是变化的，例如进水阀前的压力变化、蒸汽流量的变化等。此时若不进行控制（即不去改变阀门开度），则液位将偏离规定高度。因此，为保持锅筒液位恒定，操作人员应根据液位高度变化情况，控制进水量。

在此，把工艺所要求的锅筒液位高度称为设定值；把所要求控制的液位参数称为被控变量或输出变量；那些影响被控变量使之偏离设定值的因素称为扰动作用，如给水量、蒸汽量的变化等，设定值和扰动作用都是系统的输入变量；用以使被控变量保持在设定值范围内的作用称为控制作用。

为了保持液位为定值，手动控制时主要有 3 步：

- 1) 观察被控变量的数值，在此即为锅筒的液位。
- 2) 把观察到的被控变量值与设定值加以比较，根据两者的偏差大小或随时间变化的情况，做出判断，并发布命令。
- 3) 根据命令操作给水阀，改变进水量，使液位回到设定值。

如采用检测仪表和自动控制装置来代替手动控制，就成为自动控制系统。

现以图 1-2 所示的锅炉锅筒液位自动控制系统为例，说明自动控制系统的原理。当系统受到扰动作用后，被控变量（液位）发生变化，通过检测仪表（液位变送器 LT）得到其测量值  $h$ 。在自动控制装置（液位控制器 LC）中，将  $h$  与设定值  $h_0$  比较，得到偏差  $e = h - h_0$ ，经过运算后，发出控制信号，这一信号作用于执行器（在此为控制阀），改变给水量，以克服扰动的影 响，使被控变量回到设定值。这样就完成了所要求的控制任务。这些自动控制装置和被控的工艺对象组成了一个自动控制系统。

通常，设定值是系统的输入变量，而被控变量是系统的输出变量。输出变量通过适当的检测仪表，又送回输入端，并与输入变量相比较，因此称为反馈。两者相加称为正反馈，两者相减称为负反馈。输出变量与输入变量相比较所得的结果叫做偏差，控制装置根据偏差方向、大小或变化情况进行控制，使偏差减小或消除。发现偏差，然后去除偏差，这就是反馈控制的原理。

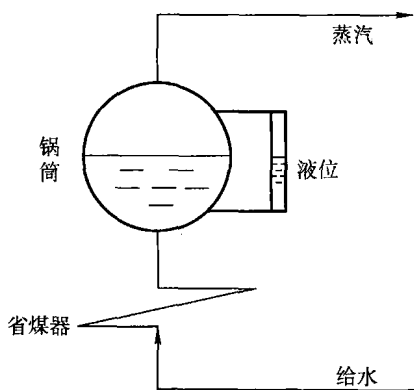


图 1-1 锅炉锅筒示意图

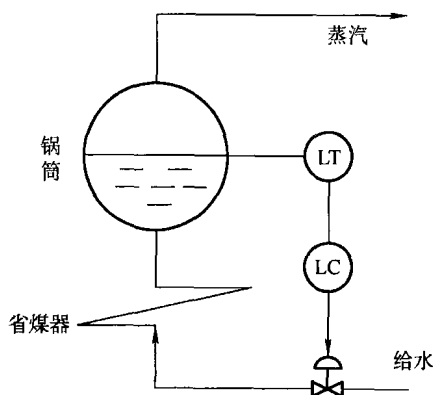


图 1-2 锅炉锅筒液位自动控制系统示意图



利用这一原理组成的系统称为反馈控制系统，通常也称为自动控制系统。实现自动控制的装置可以各不相同，但反馈控制的原理却是相同的。由此可见，有反馈存在，按偏差进行控制，是自动控制系统最主要的特点。

### 1.2.2 闭环控制与开环控制

在反馈控制系统中，被控变量送回输入端，与设定值进行比较，根据偏差进行控制，控制被控变量，这样，整个系统构成了一个闭环，因此称为闭环控制。

闭环控制的特点是按偏差进行控制，所以不论什么原因引起被控变量偏离设定值，只要出现偏差，就会产生控制作用，使偏差减小或消除，达到被控变量与设定值一致的目的，这是闭环控制的优点。

由于闭环控制系统按照偏差进行控制，所以尽管扰动已经发生，但在尚未引起被控变量变化之前，是会产生控制作用的，这就使控制不够及时。此外，如果系统内部各环节配合不当，系统会引起剧烈振荡，甚至会使系统失去控制，这些是闭环控制系统的缺点，在自动控制系统的设计和调试过程中应加以注意。

有时亦采用比较简单的开环控制方式，这种控制方式不需要对被控变量进行测量，只根据输入信号进行控制。由于不测量被控变量，也不与设定值相比较，所以系统受到扰动作用后，被控变量偏离设定值，并无法消除偏差，这是开环控制的缺点。

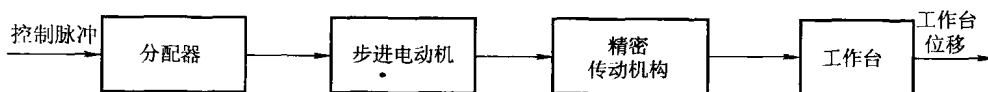


图 1-3 精密定位控制系统框图

图 1-3 所示是目前数字程序控制机床中广泛应用的精密定位控制系统框图。这是一个开环控制系统。工作台位移是被控变量，它只根据控制信号（控制脉冲）变化。系统中既不对被控变量进行测量，也不将其与控制信号进行比较，系统结构比较简单，但不能保证消除误差。图中，步进电动机是一种由“脉冲数”控制的电动机，只要输入一个脉冲，电动机就转过一定角度，称为“一步”。所以，根据工作台所需要移动的距离，输入端给予一定数量的脉冲。如果因为外界干扰，步进电动机多走或少走了几步，系统并不能“觉察”，从而造成误差。

图 1-4 所示是开环的液位控制系统。这里是根据由检测仪表（流量变送器 FT）测得的扰动信号（蒸汽流量）来控制给水量。这种开环控制仅在蒸汽扰动信号对液位有影响时，才进行补偿，而对其他影响液位的扰动无控制作用。因此，不能保证液位无误差。

依据扰动作用进行控制的系统，虽然不一定能消除偏差，但是也有突出的优点，即控制作用不需等待偏差的产生，控制很及时，对于较频繁的主要扰动能起到补偿的效果。这种系统称为前馈控制系统，所用的控制装置 FFC 称为前馈控制器。

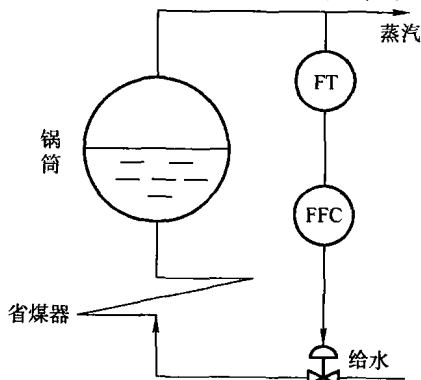


图 1-4 开环的液位控制系统