



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 AND APPARATUS

过程控制系统与装置

张宏建 张光新 戴连奎 等 编著



 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育“十二五”电气信息类规划教材

过程控制系统与装置

张宏建 张光新 戴连奎 等 编著



机械工业出版社

本书以生产过程为背景介绍生产过程及典型装置各种参数的检测和控制方法。首先介绍过程控制的要求和特点,被控对象、控制器、执行器、测量变送单元的特性与分析;然后针对工业生产过程的主要参数介绍其检测方法和控制系统的设计;最后介绍计算机控制系统并结合典型生产装置介绍先进控制技术的设计方法和应用。

本书可以作为自动化专业本科生以及化学工程、热能工程炼油和轻工等专业的本科生或研究生教材,也可以作为从事生产过程检测控制的研究人员和工程技术人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

过程控制系统与装置/张宏建等编著. —北京:机械工业出版社, 2012. 8

普通高等教育“十二五”电气信息类规划教材
ISBN 978-7-111-38563-9

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

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第109561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:于苏华 王荣 王雅新

版式设计:刘怡丹 责任校对:张晓蓉

责任印制:乔宇

三河市国英印务有限公司印刷

2012年9月第1版第1次印刷

184mm×260mm 19.75印张·484千字

标准书号:ISBN 978-7-111-38563-9

定价:39.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010) 88361066

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售一部:(010) 68326294

机工官网:<http://www.cmpbook.com>

销售二部:(010) 88379649

机工官博:<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线:(010) 88379203

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 汪樾生 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。

此套教材的顺利出版，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。

此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

前 言

本书为普通高等教育电气工程与自动化类“十一五”规划教材，内容主要涉及以生产过程为对象的过程参数的检测与控制方法。本书以过程控制系统的组成和生产过程的主要参数为出发点进行编写，便于读者较快地了解控制系统的概念和常规的设计方法。本书的编排如下：第1章介绍过程控制系统的基本概念和特点；第2章根据控制系统的组成环节分别介绍被控对象、测量变送单元、执行器、控制器及其他辅助单元；第3章按照工业生产过程常见的参数介绍温度、压力、流量、液位和成分等参数的检测方法和相应的简单控制系统的设计；第4章结合典型生产装置介绍串级、前馈、比值、均匀、分程、选择等复杂控制系统的设计与实现方法；第5章介绍计算机控制系统；第6章和第7章介绍解耦控制、预测控制、自适应控制、软测量等先进检测控制方法。

本书的特点是自动化仪表部分的内容不单独成章，而是与控制系统紧密结合，这样可以使读者在掌握各种检测仪表的测量原理基础上，加深对仪表特性和测量环节对控制系统的影响的认识，进一步全面了解各类控制系统的特点。另外，本书在编排上尽量将各种应用实例结合在相应的控制系统的设计中，便于读者理解各种控制策略的基本原理、应用场合和应用特点，有利于提高学习的针对性和学习的兴趣。

张宏建编写第7章，张光新编写第1、2章，戴连奎编写第4、6章，张宏建、张光新共同编写第3章，张光新、冯冬芹、曾逢春、蔡庆荣共同编写第5章。全书由张宏建统稿并定稿。

由于作者水平有限，书中错误、不妥之处在所难免，希望读者批评指正。

作 者

目 录

序

前言

第 1 章 过程控制系统概述	1
1.1 过程控制的发展和特点	1
1.1.1 过程控制的发展概况	1
1.1.2 过程控制的特点	5
1.2 过程控制系统的组成	6
1.2.1 过程控制系统的组成和框图	7
1.2.2 过程控制系统的分类	9
1.2.3 过程控制系统的传递函数	11
1.3 控制系统的过渡过程和品质指标	17
1.3.1 静态和动态	17
1.3.2 过程控制系统的过渡过程	17
1.3.3 过程控制系统的品质指标	18
思考练习题	21
第 2 章 过程控制系统主要环节的特性与分析	22
2.1 被控对象	22
2.1.1 被控对象的基本特性	22
2.1.2 被控对象的一般描述方法	24
2.1.3 被控对象的一般建模方法	25
2.1.4 被控对象特性的分析	29
2.2 测量变送单元	31
2.2.1 测量变送的基本概念	31
2.2.2 测量仪表的主要特性分析	32
2.3 执行器	34
2.3.1 执行器的构成和分类	34
2.3.2 执行机构和特性分析	36
2.3.3 控制阀的结构和特性	39
2.3.4 控制阀的流量特性	43
2.3.5 控制阀的流量系数和不平衡力	46
2.3.6 控制阀附件	49
2.3.7 控制阀的选型与安装	51
2.4 控制器	54
2.4.1 控制器概述	54
2.4.2 控制器的基本控制规律	55
2.4.3 DDZ-III 型电动调节器	63

2.4.4 数字控制器	68
2.5 其他单元	72
2.5.1 显示与记录单元	72
2.5.2 安全栅	83
2.5.3 操作器	85
思考练习题	86
第 3 章 典型参数检测控制系统	89
3.1 温度检测控制系统	89
3.1.1 温度检测仪表与变送器	89
3.1.2 温度控制系统的分析与设计	98
3.2 压力检测控制系统	104
3.2.1 压力检测仪表与变送器	104
3.2.2 压力控制系统的分析与设计	114
3.3 流量检测控制系统	116
3.3.1 流量检测仪表	116
3.3.2 流量控制系统的分析与设计	128
3.4 液位检测控制系统	128
3.4.1 液位检测仪表	128
3.4.2 液位控制系统的分析与设计	136
3.5 成分检测控制系统	138
3.5.1 气体成分检测仪表	138
3.5.2 成分控制系统的分析与设计	147
3.6 简单控制系统的投运和参数整定	150
3.6.1 投运步骤	150
3.6.2 控制器的参数整定	150
思考练习题	154
第 4 章 其他控制系统	156
4.1 串级控制系统	156
4.1.1 串级控制的概念及框图描述	156
4.1.2 串级控制系统分析	158
4.1.3 串级控制系统设计与实施	159
4.2 前馈控制系统	166
4.2.1 前馈控制的基本原理	166
4.2.2 前馈控制的常用结构形式	168
4.3 比值控制系统	170
4.3.1 比值控制问题	170
4.3.2 定比值控制系统	171

4.3.3 变比值控制系统	172	5.4.2 几种主要现场总线简介	240
4.3.4 比值控制系统的实施与应用	174	5.4.3 现场总线控制系统的组成	252
4.3.5 比值控制系统的应用举例	176	5.4.4 信息集成的连接桥梁	
4.4 均匀控制系统	179	—OPC	254
4.4.1 均匀控制问题的由来	179	思考练习题	254
4.4.2 均匀控制系统的实现	180	第6章 先进控制系统	257
4.4.3 均匀控制参数工程整定	182	6.1 多回路系统关联分析与变量配对	257
4.5 分程控制系统	182	6.1.1 相对增益	257
4.5.1 分程控制原理	182	6.1.2 耦合系统的变量配对与控制	
4.5.2 分程控制系统的设计与应用	183	参数整定	261
4.6 选择控制系统	187	6.2 多回路系统的解耦设计	266
4.6.1 选择控制问题的由来	187	6.2.1 基于框图的串级解耦器	266
4.6.2 选择控制系统的设计	188	6.2.2 基于过程机理的非线性解	
4.6.3 选择控制中的积分饱和		耦器	271
及其防止	189	6.3 预测控制	273
思考练习题	191	6.3.1 模型预测控制的基本原理	274
第5章 计算机控制系统	193	6.3.2 动态矩阵控制	275
5.1 概述	193	6.3.3 预测控制应用示例	278
5.1.1 计算机控制系统的基本组成	193	6.4 自适应控制	282
5.1.2 计算机控制系统的发展过程	194	6.4.1 增益调度自适应控制	282
5.1.3 工业通信技术的发展过程	196	6.4.2 自整定PID控制	284
5.2 集散控制系统(DCS)	197	思考练习题	289
5.2.1 概述	197	第7章 软测量技术	290
5.2.2 DCS的硬件体系	199	7.1 软测量技术的基本原理	290
5.2.3 DCS的软件体系	202	7.1.1 软测量技术的基本思想	290
5.2.4 DCS的通信网络	205	7.1.2 软仪表的一般设计方法	290
5.2.5 DCS的应用示例	206	7.2 软测量模型	293
5.3 可编程序控制器(PLC)	213	7.2.1 回归分析方法	293
5.3.1 概述	213	7.2.2 主元回归方法	295
5.3.2 PLC的硬件系统	218	7.2.3 神经网络技术	296
5.3.3 PLC的软件系统	220	思考练习题	300
5.3.4 PLC的网络通信	230	附录 常用标准热电偶的分度表	301
5.3.5 PLC的应用示例	233	参考文献	304
5.4 现场总线控制系统(FCS)	238		
5.4.1 概述	238		

第 1 章 过程控制系统概述

1.1 过程控制的发展和特点

1.1.1 过程控制的发展概况

过程控制是一个系统的概念，它的发展与控制理论、自动化仪表以及过程控制系统的发展紧密相关，三者相互影响、相互促进，推动了过程控制不断地向前发展。

1. 控制理论的发展

自动控制理论是研究自动控制共同规律的技术科学，它的发展初期是以反馈理论为基础的自动调节原理。根据自动控制技术发展的不同阶段，自动控制理论相应经历了从经典控制理论、现代控制理论，到控制论、信息论、系统论等学科交叉的若干发展阶段。

经典控制理论是指在 20 世纪 40 年代到 50 年代末期所形成的理论体系，它主要是研究单输入单输出（SISO）线性定常系统的分析和设计，其理论基础是描述系统输入-输出关系的传递函数，解决 SISO 系统的稳定性问题。多年来，经典控制理论在工业过程的工程实践中得到了非常广泛的应用，特别是在解决比较简单的控制系统的分析和设计问题方面卓有成效。

现代控制理论是 20 世纪 60 年代初期，为适应系统的非线性特性、多变量特性和最佳性能要求等需要而出现的新理论。现代控制理论主要以状态空间方法为基础，以 Pontryagin 极大值原理、Bellman 动态规划和 Kalman 滤波等最优控制理论为特征，研究多输入多输出（MIMO）、变参数等复杂系统的“反馈”和“最优”控制问题。随后，相继产生和发展了系统辨识、随机控制、鲁棒控制和自适应控制等很多理论分支。20 世纪 70 年代开始，为了解决大规模复杂系统的控制和优化问题，现代控制理论和系统理论相结合，基于大系统的分解和协调思想，逐步发展形成了大系统理论。现代控制理论在航空、航天和军事等领域取得了辉煌的成果，但对于复杂的工业过程有时却显得力不从心。

20 世纪 80 年代以来，对于具有多变量、强耦合性、不确定性、非线性、信息的不完全性和大纯滞后等特征的复杂系统，软测量和软测量建模、预测控制、基于知识的专家系统、模糊控制、神经网络控制、基于信息论的智能控制等先进控制技术应运而生，成为自动控制的前沿学科。目前先进控制技术不但在理论上不断创新，而且在实际生产应用中也取得了令人瞩目的成绩。近几十年来，计算机及计算机控制技术的飞速发展各种先进控制技术的实施提供了强大的平台，过程控制开始突破自动化孤岛的传统模式，出现了集控制、优化、调度和管理于一体的新模式，控制目标从稳定性、准确度等工艺质量指标的控制，逐渐转向以提高产品质量、降耗节能和减少污染等综合质量指标的控制上，并最终效益为驱动力来重新组织整个生产系统。

需要指出的是，现代控制理论和先进控制技术的发展，虽然解决了经典控制理论不能解

决的许多理论和工程问题，但这绝不意味着经典控制理论已经过时。相反，在自动控制技术的发展中，由于经典控制理论便于工程应用，今后还将继续发挥其理论指导作用。

2. 自动化仪表的发展

自动化仪表是一种“信息机器”，其主要功能是信息形式的转换和表达，将输入信号转换成输出信号。信号可以按时间域或频率域表达，信号的传输则可调制成连续的模拟量或断续的数字量形式。自动化仪表的发展一直适应着工业的需要，经历了自力式、基地式、单元组合式、智能式和总线式几个发展阶段。其中，智能式仪表和总线式仪表通常称之为数字式仪表。目前，在工业现场广泛应用的主要有单元组合仪表和各种各样的数字仪表。

按照工作能源的不同，单元组合仪表还可分为电动单元组合仪表（DDZ）和气动单元组合仪表（QDZ）两大类，它们都经历了Ⅰ型、Ⅱ型、Ⅲ型3个阶段。就电动单元组合仪表而言，DDZ—Ⅰ型、Ⅱ型和Ⅲ型仪表的核心器件分别是电子管、晶体管和集成电路，从中也可以体会到单元组合仪表的发展历程。从20世纪50年代到70年代期间，单元组合仪表经过不断改进，性能已日臻完善。如今，各种DDZ—Ⅲ型仪表、部分DDZ—Ⅱ型仪表和以气动执行器为代表的气动仪表，在包括计算机控制系统在内的各类自动化装置中仍然扮演着极其重要的角色。值得一提的是，20世纪80年代初期，电动单元组合仪表还经历了以单片机为核心器件的DDZ—S型系列仪表这一短暂的发展过程，随后被发展迅速的智能仪表和现场总线仪表所取代。

智能仪表就是在普通的模拟仪表基础上增加微处理器电路而形成的仪表。这里所谓的“智能”，是指现场仪表具有普通模拟仪表拥有的信号变换、补偿、驱动等常规功能以外，还具有一定的拟人智能的特性或功能，例如自适应、自学习、自校正、自诊断和自组织等。智能仪表的特点主要是：可进行远程通信和管理、测控准确度高、使用与维修方便等。现场总线仪表则是支持标准化现场总线协议的智能仪表，它以数字化、网络化为其技术内涵，具有功能自治能力，可直接作为现场总线控制系统的智能网络节点并进行信息的数字化通信，甚至集成各种控制功能，实现真正意义上的全数字全分散控制。具有标准化现场总线协议是总线仪表最主要的技术特征。由于现阶段现场总线多标准并存（如FF、Profibus、EPA、CAN等），现场总线智能仪表通信协议很难统一。因而，总线仪表将像现场总线一样，开放统一的通信标准是其主要的发展方向。

3. 过程控制系统的发展

从结构形式上看，过程控制系统经历了基地式仪表控制系统、单元组合仪表控制系统、集中型计算机控制系统、集散控制系统（Distributed Control System, DCS）、现场总线控制系统（Fieldbus Control System, FCS）几个发展阶段。

（1）基地式仪表控制系统

基地式控制仪表相当于把单元组合仪表的几个单元组合在一起，构成一个仪表。它通常以指示、记录仪表为主体，附加控制、测量、给定等部件，其控制信号输出一般为开关量，也可以是标准统一信号。一个基地式仪表具有多种功能，与执行器联用，便可构成一个简单的调节系统。通常该类系统的功能较简单，控制准确度较低，适合于单参数的控制。而且基地式仪表信号仅在本仪表内起作用，一般不能传送给别的仪表或系统，各测控点间的信号难以相互沟通，操作人员只能通过巡视生产现场来了解生产状况。

近年来也有在智能变送器、智能式执行机构或智能式阀门定位器中带有控制功能，可与

其他现场智能仪表联合实现就地控制功能。当然,这已不再是简单意义上的基地式仪表控制,而是属于网络化控制系统中的全分散控制功能,各种仪表都成为系统中的网络节点,仪表与仪表之间、仪表与各层面的网络节点之间均可实现全数字化的通信。这种控制模式也是以 FCS 为代表的网络化控制系统的重要发展趋势。

(2) 单元组合仪表控制系统

单元组合式控制仪表是根据控制系统各组成环节的不同功能和使用要求,将仪表做成能实现一定功能的独立仪表(称为单元),各个仪表之间用统一的标准信号进行联系。将各种单元进行不同的组合,可以构成多种多样、适用于各种不同场合需要的自动检测或控制系统,实现如 PID 控制和串级、均匀、比值、前馈、选择性等一些常用的复杂控制功能。这类控制系统通常把模拟控制器、显示记录等控制室仪表集中安装在控制室内的仪表盘上,操作人员可以坐在控制室纵观生产流程各处的状况。但模拟信号需要一对一的物理连接,信号变化缓慢,提高计算速度与准确度的难度大,成本也较高。为此,单纯由单元组合仪表构成的控制系统也因其功能单一、维护困难等原因,现已基本上被各类计算机控制系统所取代。

(3) 集中型计算机控制系统

在应用过程控制之前,计算机主要作为数值运算、数据统计和数值分析的工具,与实际生产过程没有任何的物理连接。到 20 世纪 50 年代末,人们提供了计算机与过程装置间的接口,实现了“变送器—计算机—执行器”三者电气信号的直接传递,计算机系统在配备了变送器、执行器以及相关的电气接口后就可以实现过程的检测、监视、控制和管理。这种用数字控制技术简单地取代模拟控制技术,而不改变原有的控制功能,形成了所谓的直接数字量控制,简称 DDC。虽然控制功能极其有限,但这一开创性工作开辟了一个轰轰烈烈的计算机工业应用时代。

DDC 是计算机控制技术的基础,计算机首先通过 AI 和 DI 接口实时采集数据,把检测仪表送来的反映各种参数和过程状态的标准模拟量信号(4~20mA、0~10mA 等)和开关量信号(“0”/“1”)转换为数字信号及时送往过程控制计算机,计算机按照一定的控制规律进行计算,发出控制信息,最后通过 AO 和 DO 接口把主机输出的数字信号转换为适应各种执行器的控制信号(4~20mA、“0”/“1”等),直接控制生产过程。

典型的 DDC 控制系统原理图如图 1-1 所示,其本质上就是用一台计算机取代一组模拟调节器,构成闭环控制回路。相比于模拟仪表控制系统,DDC 的突出优点是计算灵活,它不仅能实现典型的 PID 控制规律,还可以分时处理多个控制回路。此外,随着计算机软硬件功能的发展,DDC 也很快发展到 PID 以外的多种复杂控制,如串级控制、前馈控制、解耦控制等。

在 20 世纪 60 年代,由于当时的计算机系统的体积庞大,价格非常昂贵,为了使计算机控制能与常规仪表控制相竞争,企图用一台计算机来控制尽可能多的控制回路,实现集中检测、集中控制和集中管理,出现了集中型计算机控制系统。从系统功能上说,集中型计算机控制就是 DDC 控制的简单发展。图 1-2 就是集中型计算机控制系统的原理图。在图 1-2 中,输入子系统 AI、DI,分别采集与控制有关的模拟量和开关量测量信号;输出子系统 AO、DO,用于输出模拟量和开关量控制信号。CRT 操作台代替传统的模拟仪表盘,实现参数的监视。

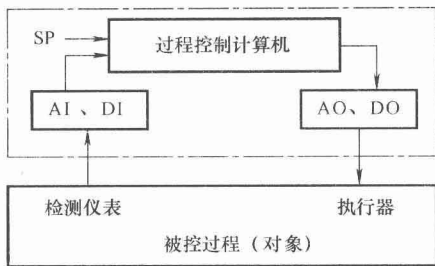


图 1-1 典型的 DDC 控制系统原理图

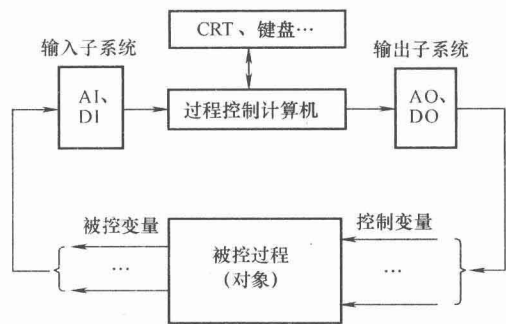


图 1-2 集中型计算机控制系统原理图

从表面上看，集中型计算机控制与常规仪表控制相比具有更大的优越性：信息集中，可以实现先进控制、联锁控制等各种更复杂的控制功能，也有利于实现更高层次上的优化控制和优化生产。由于当时计算机总体性能低，这种集中型的系统架构容易出现负荷过载，而且控制的集中也直接导致危险的集中，高度的集中使系统变得十分“脆弱”。在当时，集中型计算机控制系统并没有给工业生产带来明显的好处，曾一度陷入困境。

值得一提的是，随着当今计算机软硬件水平的提高，集中型计算机控制系统以其较高的性能价格比在许多中小型生产装置上又重新有了活力。

（4）集散控制系统

集中型计算机控制系统由于其可靠性方面的重大缺陷，在当时的过程控制中并没有得到成功的应用。人们开始认识到，要提高系统的可靠性，需要把控制功能分散完成；但考虑到生产过程的整体性要求，各个局部的控制系统之间还应当存在必要的相互联系，即所有控制系统的运行应当服从工业生产和管理的总体目标。这种管理的集中性和控制的分散性是生产过程高效、安全运行的需要，它直接推动了集散控制系统的产生和发展。

进入 20 世纪 70 年代，微处理器的诞生为研制新型结构的控制系统创造了无比优越的条件，一台微处理器实现几个回路的控制，若干台微处理器就可以控制整个生产过程，从而产生了以微处理器为核心的集中信息、集中管理、分散控制权、分散危险的集散型计算机控制系统（简称为集散控制系统，DCS），人们也常称之为分布式计算机控制系统。

层次化是集散控制系统最主要的体系特点。一个大的 DCS 系统可以分为若干层，大多数 DCS 系统自下而上分为 4 层：直接控制级、过程管理级、生产管理级和经营管理级。直接控制级主要实现现场数据采集、控制输出、安全性能和冗余性能的实施等功能；过程管理级主要包括系统组态、优化、运行过程的监控、故障监测等功能；生产管理主要是根据库存、能耗需求和约束等指标进行生产规划和调度；经营管理级居于最高一层，负责全厂范围的工程、经济、商务、人事以及其他的工作。在很多情况下，DCS 的功能层次和物理层次不一定完全相同，常常将两个或多个功能层上的任务或部分任务压缩到一个物理层次上去实现，这使 DCS 得以大大简化。

自 20 世纪 70 年代中期第一套 DCS 问世以来，已取得很多令人瞩目的成果。早期 DCS 的重点在于控制，以“分散”作为关键字。但随着网络技术的日臻完善和数据通信日趋标准化，现代发展更着重于全系统信息综合管理，今后“综合”又将成为其关键字，向实现控制体系、运行体系、计划体系、管理体系的综合自动化方向发展，通过由网络通信实现设

备互连和资源网络化共享,实施从最底层的实时控制、优化控制上升到生产调度、经营管理,以至最高层的战略决策,形成一个具有柔性、高度自动化的管控一体化系统。

(5) 现场总线控制系统

在过去的几十年中,工业过程控制仪表一直采用4~20mA等标准的模拟信号传输,一对信号传输线中仅能单向地传输一个信息,如图1-3所示。随着微电子技术的迅猛发展,微处理器在过程控制装置和仪表装置中的应用日渐广泛,智能变送器、智能执行器等仪表产品得到了快速发展,由此出现了用数字信号传输代替模拟信号传输的技术需要。这种连接现场仪表、承担现场信号双向传输的通信网络被称为现场总线。根据国际电工委员会和现场总线基金会现场总线的定义:现场总线是连接智能现场装置和自动化系统的数字式、双向传输、多分支结构的通信网络。

如图1-4所示,每个现场智能设备都视为一个网络节点,系统将通过现场总线实现各节点之间及其与过程控制管理层之间的信息传递与沟通,将不同区域的传感、控制、执行等分布对象通过网络连接起来,从而形成了更加灵活、功能更为强大、当然也更加复杂的控制体系。新型的现场总线控制系统突破了DCS中通信由专用网络实现所造成的缺陷,把基于封闭、专用的解决方案变成了基于公开、标准化的解决方案;把DCS集中与分散相结合的集散系统结构,变成了把控制功能彻底下放到现场、依靠现场智能设备本身实现基本控制功能的全分布式结构。因此,开放性、分散性与全数字通信是现场总线系统最显著的特征。

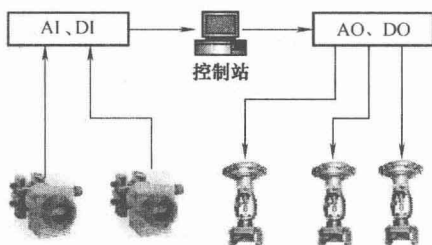


图 1-3 传统计算机控制结构示意图

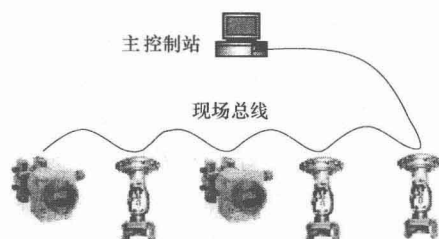


图 1-4 现场总线控制系统结构示意图

当前,现场总线及由此而产生的现场总线智能仪表和控制系统已成为全世界范围自动化技术发展的热点,这一涉及整个自动化和仪表的工业“革命”和产品全面换代的新技术在国际上已引起人们广泛的关注。特别是工业以太网技术,因其具有成本低、通信速率和带宽高、兼容性好、软硬件资源丰富和强大的持续发展潜力等诸多优点,正受到越来越广泛的关注,以太网应用于工业实时控制的一些关键技术问题正逐步得到解决。因此,基于工业以太网的现场总线技术已经成为现场总线和现场总线控制系统的主要发展方向。

1.1.2 过程控制的特点

自动控制技术在工业、农业、国防和科学技术现代化中起着十分重要的作用,自动控制水平的高低也是衡量一个国家科学技术先进与否的重要标志之一。随着国民经济和国防建设的发展,自动控制技术的应用日益广泛,其重要作用也越来越显著。

生产过程自动控制(简称过程控制)是自动控制技术在石油、化工、电力、冶金、机

械、轻工、纺织等生产过程的具体应用，是自动化技术的重要组成部分。与其他自动控制系统相比，过程控制系统有如下几个特点：

1) 生产过程的连续性 在过程控制系统中，大多数被控过程都是以长期的或间歇形式运行，被控变量不断地受到各种扰动的影响。

2) 被控过程的复杂性 过程控制涉及范围广：石化过程的精馏塔、反应器；热工过程的换热器、锅炉等；生物发酵过程的发酵罐、成品包装系统等。很多被控对象的动态特性多为大惯性、大滞后形式，且具有非线性、分布参数和时变特性。

3) 控制方案的多样性 被控过程对象特性各异，工艺条件及要求不同，过程控制系统的控制方案非常丰富，有常规的单回路PID控制、串级控制、前馈—反馈控制；更有为满足特定要求而开发的比值控制、均匀控制、选择性控制、推断控制、解耦控制、模糊控制、预测控制、最优控制等方法或策略。此外，顺序控制、过程联动、安全联锁等也属于过程控制的重要组成。随着过程控制技术的不断发展，以信息化为特征的综合自动化已成为当前的主要发展方向。

1.2 过程控制系统的组成

生产过程总是在一定的工艺参数条件下进行的。有些工艺参数直接表征生产过程，对生产效率和质量起着决定性的作用。例如，精馏塔的塔顶和塔釜温度，在操作压力保持不变的情况下，使塔内温度保持平稳，才能得到合格的产品。有些工艺参数虽然不直接影响生产效率和质量，然而保持其平稳是保证其他环节或工序良好、正常运行的前提。例如，换热系统中的蒸汽压力，如果换热系统入口蒸汽的压力波动剧烈，要把换热温度控制好将极为困难。有些工艺参数决定着生产过程的安全。例如，化学反应器内的温度和压力，在聚合反应过程中的温度参数控制不好，可能出现“爆聚”，使釜内压力迅速超出规定的限度，不仅会影响生产效率，更严重的还会威胁生产的安全。有些工艺参数和工艺过程控制不好，则会极大地增加生产的能耗水平。例如，传统风机、水泵的出口流量依靠风门、阀来调节，该种节流调节方式虽简单易行，但会造成能量的极大浪费。对于以上各种情况，在生产过程中都必须加以必要的控制。为了对自动控制有一个更清晰的了解，下面对人工控制和自动控制做一个对比和分析。

图 1-5 是一个储槽液位对象及其液位控制系统，图中， q_i 表示物料的流入量， q_o 表示物料的流出量， h 表示储槽的液位。

如图 1-5a 所示，稳态时，即单位时间内物料的流入量和出料量相等，储槽内的液位高度可维持在生产工艺所要求的液位高度上。此时如果生产工况发生变化，假设物料的流入量减少了，就会导致储槽内的液位下降。为了使储槽内的液位保持在既定的高度上，操作人员可以根据储槽内的液位变化情况，减小出料阀门的开度，使得槽内液位重新保持在工艺规定的高度上，这种依靠人工进行的操作称之为人工控制，如图 1-5b 所示。

所谓生产过程自动化就是在被控设备上安装过程控制装置，部分或者全部地取代人对生产过程进行控制。如图 1-5c 所示，如果在储槽对象上安装液位变送器来实时测量储槽内的液位，把液位信号转换成标准的测量信号（如 4 ~ 20mA 等）送给控制器，控制器再对测量信号和给定值（工艺要求的液位高度）进行比较并按照一定的规律进行运算或决策后，

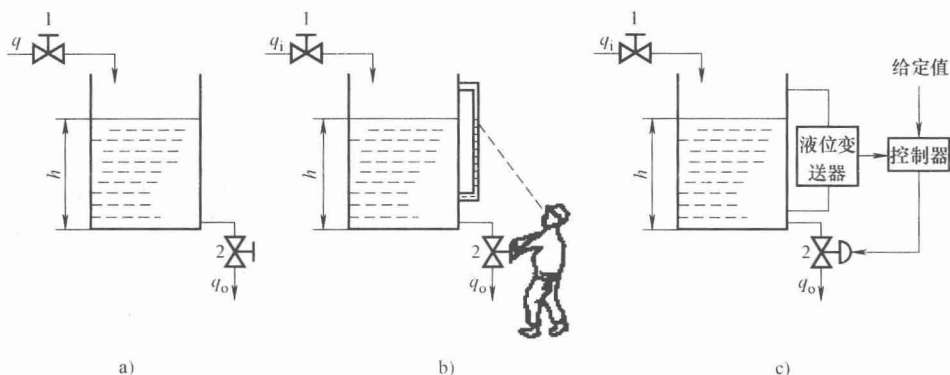


图 1-5 储槽液位对象及其液位控制系统示意图

a) 储槽液位对象 b) 人工控制 c) 自动控制

1—进料阀 2—出料(调节)阀

输出一个控制信号给执行器(出料调节阀),执行器根据信号大小自动改变储槽的出料流量,就可以使储槽内的液位自动地保持在希望的高度上。这种依靠过程控制装置完成的操作称为自动控制。

过程控制的主要目的可归纳为3种类型,即实现工业生产过程中产品质量的自动控制、物料平衡的自动控制和限制条件的自动控制。

1.2.1 过程控制系统的组成和框图

图 1-6 是工业生产过程中常见的换热器自动控制系统示意图,被加热介质的出口温度是该系统重要的工艺参数。这种只采用单个负反馈控制回路进行自动控制的系统,也称为简单控制系统。

不难看出,一个典型的简单控制系统由被控对象、检测元件和变送器、控制器(含计算机控制装置)以及执行器4个基本环节组成。事实上,任何复杂控制系统也都是由上述4类环节组成。例如,串级控制系统中包含主变量的测量和副变量的测量,因此也就需要两个检测仪表。当然,除了这些基本的控制装置之外,一个自动控制系统根据需要还可以设有显示记录、信号分配、安全保护等单元。

为了以后叙述的方便,现结合图 1-5c 和图 1-6 介绍几个常用术语。

1) 被控对象 被控对象是指需要实现控制的设备、机械或生产过程,如图 1-5c 中的储槽、图 1-6 中的换热器。

2) 被控变量 被控变量是指被控对象内要求保持一定数值(或按某一规律变化)的物理量,如图 1-5c 中的储槽液位、图 1-6 中的被加热介质出口温度。

3) 控制变量 控制变量也称为操纵变量,是指受执行器控制,用以使被控变量保持一定数值的物料或能量,如图 1-5c 中的出料流量 q_o 、图 1-6 中的蒸汽流量。

4) 干扰 干扰也称为扰动,是指除控制变量(操纵变量)以外,作用于对象并引起被

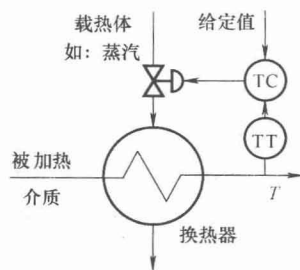


图 1-6 换热器自动控制示意图

控变量变化的一切因素，如图 1-5c 中的流入储槽的液体流量、图 1-6 中的被加热介质入口温度、流量、蒸汽温度、蒸汽压力等。

5) 给(设)定值 给(设)定值是指工艺规定被控变量所要保持的数值，如图 1-5c 中希望的液位高度、图 1-6 中希望的被加热介质出口温度。

6) 偏差 偏差本应是给定值与被控变量的实际值之差，但控制系统能获取的只是被控变量的测量值而非实际值，因此，在控制系统中通常把给定值与测量值之差定义为偏差。

在研究自动控制系统时，为了更清楚地表示控制系统各环节的组成、特性和相互间的信号联系，一般采用框图表示。图 1-6 所示的简单控制系统可用图 1-7 所示的框图表示。

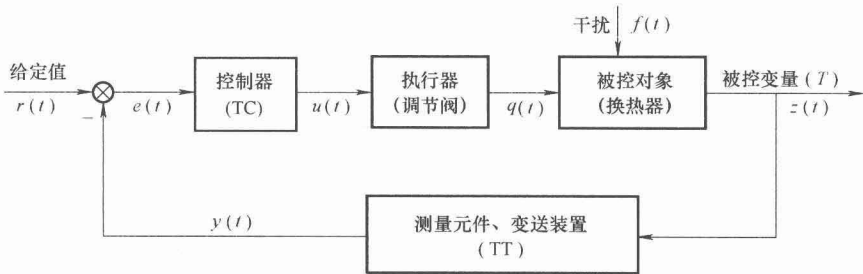


图 1-7 简单控制系统框图

$r(t)$ —设定值 $y(t)$ —测量值

$e(t)$ —偏差, $e(t) = r(t) - y(t)$ $u(t)$ —控制器输出 (阀位)

$z(t)$ —被控变量 $q(t)$ —控制变量 $f(t)$ —干扰

图 1-7 中，每个方框表示组成系统的一个环节，两个方框之间用一条带箭头的线条表示其相互间的信号联系，箭头表示进入还是离开这个方框。进入方框的信号为环节输入，离开方框的信号为环节输出。输入信号会引起输出的变化，而输出不会反过来影响输入，即各环节输入/输出具有单向性，每个环节的输出信号与输入信号之间的关系仅仅取决于该环节的特性。图中，检测元件和变送装置的作用是把被控变量 $z(t)$ 转换成测量值 $y(t)$ ，例如用热电阻或者热电偶测量温度，热电阻或者热电偶输出的电阻或者电动势信号即为 $y(t)$ ，若用温度变送器进行变换输出，则温度变送器输出的电信号 (DC 4~20mA 等) 为 $y(t)$ 。控制器中的比较装置比较设定值 $r(t)$ 与测量值 $y(t)$ ，产生差值 $e(t)$ 。若控制器设定为正作用形式，偏差 $e(t) = y(t) - r(t)$ ；若为反作用形式，则 $e(t) = r(t) - y(t)$ 。控制器根据偏差 $e(t)$ 的大小、方向，按照某种预定的控制规律计算输出控制信号 $u(t)$ 。执行器的作用是根据控制器送来的 $u(t)$ ，相应地去改变控制变量 $q(t)$ ，进而通过被控对象的控制通道实现 $z(t)$ 的反馈控制。

对于具体一个控制系统来说，被控对象、执行器和测量变送环节的特性一般都是固定的，且在研究对象特性时往往也要包含执行器和测量变送环节的特性。为此，执行器、被控对象及测量变送环节通常被视为一个环节，称为广义对象，如图 1-8 所示。

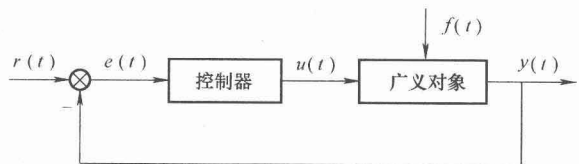


图 1-8 控制器和广义对象的关系