21 世纪全国高等院校自动化系列实用规划教材

过程控制与自动化仪表

主　编　张井岗
副主编　许建平　佟　威　刘红丽
参　编　王海稳　邵雪卷

北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

内 容 简 介

本书不仅介绍了过程控制中常用的(温度、压力、流量、液位)检测和控制仪表、单回路控制系统、复杂控制系统(串级、均匀、比值、前馈、分程、选择)和先进控制技术(解耦控制、内模控制、预测控制、推理控制、稳态优化控制)，而且介绍了典型工业对象(精馏塔、锅炉设备、传热设备、化学反应器、生化过程)的控制。为帮助读者掌握各章内容，在各章后都有思考题与习题。全书内容新颖，重点突出，实用性强。

本书可作为自动化专业及石油、化工、电力、轻工业等专业的教材或参考书，也可供工业控制工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

过程控制与自动化仪表/张井岗主编. —北京：北京大学出版社，2007.9

(21 世纪全国高等院校自动化系列实用规划教材)

ISBN 978-7-301-12326-3

Ⅰ. 过… Ⅱ. 张… Ⅲ. ①过程控制—高等学校—教材 ②自动化仪表—高等学校—教材

Ⅳ. TP273 TH86

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 080691 号

书　　名：过程控制与自动化仪表

著作责任者：张井岗　主编

策 划 编 辑：李　虎

责 任 编 辑：刘　丽

标 准 书 号：ISBN 978-7-301-12326-3/TP・0879

出　版　者：北京大学出版社

地　　址：北京市海淀区成府路 205 号　100871

网　　址：http://www.pup.cn　http://www.pup6.com

电　　话：邮购部 62752015　发行部 62750672　编辑部 62750667　出版部 62754962

电 子 邮 箱：pup_6@163.com

印　刷　者：

发　行　者：北京大学出版社

经　销　者：新华书店

787 毫米×1092 毫米　16 开本　26 印张　600 千字

2007 年 9 月第 1 版　2007 年 9 月第 1 次印刷

定　　价：36.00 元

未经许可，不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有，侵权必究　　举报电话：**010-62752024**

电子邮箱：**fd@pup. pku. edu. cn**

前　言

本书是北京大学出版社《21 世纪全国高等院校自动化系列实用规划教材》之一，经过 2005 年 5 月在西安召开的组稿会和 2005 年 8 月在长春工业大学召开的审稿会研讨，最终确定了参与编写的单位和编写大纲。

过程控制与自动化仪表是一门与工业生产过程联系十分密切的课程。伴随着现代科技进步，过程控制技术得到了迅速发展，出现了很多先进的自动化成套设备及装置，例如集散控制系统(DCS)、现场总线(FB)、可编程逻辑器件(PLC)等，生产过程控制逐渐由常规仪表控制向计算机控制发展，常规 PID 控制向先进过程控制(APC)优化控制发展，生产过程自动化水平迅速从局部自动化向综合自动化发展。本书第 1 章绪论主要讲述过程控制系统的特点、组成及分类。第 2 章简单控制系统介绍了过程控制系统的典型结构，过渡过程的基本形式、品质指标及对象特性，调节器基本控制规律及单回路控制系统的设计。第 3 章检测与控制仪表介绍了过程参数和单元组合仪表。第 4 章复杂控制系统介绍了串级、均匀、比值、前馈、分程和选择性控制系统等各种复杂系统的特性、设计方法以及参数整定方法等。第 5 章先进控制系统介绍了解耦控制、内模控制、预测控制、软测量、推断控制及稳态优化控制。第 6 章过程控制系统的应用实例，对精馏塔控制系统、锅炉控制系统、传热设备控制系统、化学反应器的控制、生化过程的控制和冶金过程的控制进行了分析和讨论。

本书在内容上既介绍了典型的传统控制方法和装置，以使学生建立基本的概念，使知识能渐进衔接；同时又介绍了新技术、新方法，使知识结构适应现代科学技术发展和生产的需要。本课程的工程实践性强，因此本书在编写过程中特别注重学生能力的培养和知识的应用。在编写时专门开设第 6 章“过程控制系统的应用实例”。在本书的教学中配以相应的实验，力求理论和实践的密切结合。本书每章附有与内容相关的思考题与习题，以帮助学生消化和巩固上课学习的内容。

本书由太原科技大学张井岗教授主编，编写了第 1 章并同时审阅了全书，第 2 章由西安建筑科技大学佟威老师编写，第 3 章由武汉理工大学刘红丽老师编写，第 4 章由吉林工程技术师范学院许建平老师编写，第 5 章由太原科技大学王海稳老师编写，第 6 章由太原科技大学邵雪卷老师编写。江南大学的杨慧中教授对本书早期的组稿和大纲的制定做了大量的工作，在此表示衷心的感谢！

尽管全体编者都尽了很大努力，但由于水平有限，疏漏之处在所难免，在此恳请广大专家和读者给予批评和指正。

编　者

2007 年 6 月

总　　序

我们所处的时代被称为信息时代。信息科学与技术的迅速发展和广泛应用，深深地改变着人类生产、生活的各个方面。人类社会生产力发展和人们生活质量的提高越来越得益于和依赖于信息科学与技术的发展。自动化科学与技术涉及到信息的检测、分析、处理、控制和应用等各个方面，是信息科学与技术领域的重要组成部分。在我国经济建设的进程中，工业化是不可逾越的发展阶段。面对全面建设小康社会的发展目标，党和国家提出走新型工业化道路的战略决策，这是一条我国当代工业化进程的必由之路。实现新型工业化，就是要坚持走科技含量高、经济效益好、资源消耗低、环境污染少、人力资源优势得到充分发挥的可持续发展的科学发展之路。在这个过程中，自动化科学与技术起着不可替代的重要作用，高等学校的自动化学科肩负着人才培养和科学研究的光荣的历史使命。

我国高等教育中工科在校大学生数占在校大学生总数的 35%～40%，其中自动化类的学生是工科各专业中学生人数最多的专业之一。在我国高等教育已走进大众化阶段的今天，人才培养模式多样化已成为必然的趋势，其中应用型人才是我国经济建设和社会发展需求最多的一大类人才。为了促进自动化领域应用型人才培养，发挥院校之间相互合作的优势，北京大学出版社组织了此套《21 世纪全国高等院校自动化系列实用规划教材》。

参加这一系列教材编写的基本上都是来自地方工科院校自动化学科的专家学者，由此确定了教材的使用范围，也为“实用教材”的定位找到了落脚点。本系列教材具有如下特点：

(1) 注重实用性。地方工科院校的人才培养规格大多定位在高级应用型，对这一大类人才的培养要注重面向工程实践，培养学生理论联系实际、解决实际问题的能力。从这一教学原则出发，本系列教材注重实用性，注意引用工程中的实例，培养学生的工程意识和工程应用能力，因此将更适合地方工科院校的教学要求。

(2) 体现新颖性。更新教材内容，跟进时代，加入一些新的先进实用的知识，同时淘汰一些陈旧过时的内容。

(3) 院校间合作交流的成果。每一本教材都有几所院校的教师参加编写。北大出版社事先在西安市和长春市召开了编写计划会和审纲会，来自各院校的教师比较充分地交流了情况，在相互借鉴、取长补短的基础上，形成了编写大纲，确定了编写原则。因此，这一系列教材可以反映出各参编院校一些好的经验和做法。

(4) 这一系列教材几乎涵盖了自动化类专业从技术基础课到专业课的各门课程，到目前为止，列入计划的已有 30 多门，教材门数多，参与的院校多，参加编写人员多。

地方工科院校是我国高等院校中比例最大的一部分。本系列教材面向地方工科院校自动化类专业教学之用，将拥有众多的读者。教材专家编审委员会深感教材的编写质量对教学质量的重要性，在审纲会上强调了“质量第一，明确责任，统筹兼顾，严格把关”的原则，要求各位主编加强协调，认真负责，努力保证和提高教材质量。各位主编和编者也将尽职尽责，密切合作，努力使自己的作品受到读者的认可和欢迎。尽管如此，由于院校之间、编者之间的差异性，教材中还是难免会出现一些问题和不足，欢迎选用本系列教材的教师、学生提出批评和建议。

张德江

2006 年 1 月

目　　录

第 1 章　绪论.....1

1.1　过程控制概述.....1
1.2　当前控制系统的发展的趋势.....3
1.3　过程控制系统的组成及分类.....5
1.3.1　过程控制系统的组成.....5
1.3.2　过程控制系统的分类.....7
1.4　过程控制的要求.....8
思考题与习题.....9

第 2 章　简单控制系统.....10

2.1　典型结构和控制指标.....10
2.1.1　典型结构.....10
2.1.2　过渡过程的基本形式.....13
2.1.3　控制指标.....14
2.2　过程动态特性与建模.....17
2.2.1　过程特性的基本类型.....17
2.2.2　过程建模.....20
2.2.3　对象各环节特性对控制品质的影响.....33
2.3　控制器基本控制规律.....35
2.3.1　PID 控制算法.....35
2.3.2　离散 PID 控制算法.....45
2.4　单回路控制系统的设计.....57
2.4.1　检测信号的获取与处理加工.....57
2.4.2　执行器的若干问题.....61
2.4.3　系统被控变量的选择.....72
2.4.4　操纵变量的选择.....73
2.4.5　控制器参数整定.....73
思考题与习题.....79

第 3 章　检测与控制仪表.....81

3.1　概述.....82
3.1.1　测量误差.....82
3.1.2　仪表的主要性能指标.....83
3.1.3　仪表防爆的基本知识.....86
3.2　过程参数检测.....87
3.2.1　温度测量.....88
3.2.2　压力的检测.....107
3.2.3　流量的检测.....114
3.2.4　液位检测仪表.....125
3.2.5　成分分析仪表.....132
3.3　单元组合仪表.....140
3.3.1　单元组合仪表的信号传输方式及信号制.....141
3.3.2　变送单元.....146
3.3.3　控制器单元.....167
3.3.4　执行单元.....191
思考题与习题.....217

第 4 章　复杂控制系统.....218

4.1　串级控制系统.....218
4.1.1　串级控制系统的原理和结构.....218
4.1.2　串级控制系统的特点分析.....220
4.1.3　串级控制系统的设计.....223
4.1.4　串级控制系统的投运和参数整定.....225
4.1.5　串级控制系统的工业应用.....226
4.2　均匀控制系统.....228

4.2.1 基本原理与结构 228
4.2.2 控制器参数整定 232
4.2.3 需要说明的几个问题 233
4.3 比值控制系统 233
4.3.1 基本原理和结构 233
4.3.2 比值系数的确定 237
4.3.3 比值控制系统的设计及设计中的有关问题 237
4.3.4 比值控制系统的其他问题 238
4.3.5 工业应用举例 238
4.4 前馈控制系统 239
4.4.1 前馈控制系统的基本概念 239
4.4.2 前馈控制系统的几种主要结构形式 242
4.4.3 前馈控制的选用与稳定性 246
4.4.4 前馈控制系统的工程整定 247
4.4.5 前馈控制系统的工业应用 249
4.5 分程控制系统 252
4.5.1 分程控制基本原理与系统结构 252
4.5.2 分程控制系统设计和实施中的一些问题 254
4.5.3 分程控制系统的工业应用示例 255
4.6 选择性控制系统 257
4.6.1 选择性控制系统原理和结构 257
4.6.2 选择性控制系统设计和实施中的一些问题 259
4.6.3 选择性控制工业应用举例 261
思考题与习题 261
第 5 章 先进控制系统 268
5.1 系统关联与解耦控制 269
5.1.1 系统耦合及对控制过程的影响 269
5.1.2 相对增益 271
5.1.3 解耦控制设计方法 276
5.1.4 解耦控制系统实现中的问题 283
5.2 纯滞后补偿和内模控制 285
5.2.1 Smith(史密斯)预估补偿控制 286
5.2.2 内模控制 290
5.2.3 内模控制的应用 293
5.3 预测控制系统 295
5.3.1 预测控制的发展 295
5.3.2 预测控制的原理 296
5.3.3 预测控制的良好性质 301
5.3.4 实施预测控制系统时的注意问题 301
5.3.5 预测控制系统的稳定性和稳健性 302
5.3.6 预测控制软件包的发展历程 303
5.3.7 预测控制的应用概况 308
5.3.8 预测控制发展方向 310
5.4 软测量和推断控制系统 310
5.4.1 软测量技术的产生 311
5.4.2 软测量方法的研究现状 311
5.4.3 软测量技术的基本过程 311
5.4.4 软测量模型的建立 313
5.4.5 软测量模型的在线校正 318
5.4.6 软测量技术工业应用 318
5.4.7 软测量技术研究的方向 319
5.4.8 推断控制 320
5.5 稳态优化控制系统 323
5.5.1 基于传统模型的稳态优化方法 324
5.5.2 基于非传统模型的稳态优化方法 328
思考题与习题 330
第 6 章 过程控制系统的应用实例 332
6.1 精馏塔的控制 332
6.1.1 精馏原理 332
6.1.2 精馏塔的控制要求 333

6.1.3 精馏塔的干扰因素.....334
6.1.4 精馏塔的基本关系.....335
6.1.5 精馏塔被控变量的选择.....336
6.1.6 精馏塔的基本控制方案.....338
6.1.7 复杂控制在精馏塔中的应用.....342
6.1.8 精馏塔的先进控制.....344
6.2 锅炉设备的控制.....349
6.2.1 锅炉汽包水位的控制.....350
6.2.2 锅炉燃烧系统的控制.....357
6.2.3 过热蒸汽系统的控制.....360
6.3 传热设备的控制.....361
6.3.1 传热设备的类型.....361
6.3.2 传热设备的控制要求.....362
6.3.3 一般传热设备的控制.....362
6.3.4 蒸发器的控制.....369
6.4 化学反应器的控制.....372
6.4.1 化学反应器的类型.....372
6.4.2 化学反应器的控制要求.....374
6.4.3 化学反应速度及其影响因素.....375
6.4.4 化学平衡及其影响因素.....378
6.4.5 化学反应器的控制.....379
6.5 生化过程的控制.....385
6.5.1 生化反应过程的衡算关系.....386
6.5.2 细胞生长的动力学模型.....387
6.5.3 氧传递模型.....388
6.5.4 生化过程的参数检测.....389
6.5.5 生化过程的控制.....391
6.6 冶金过程的控制.....392
6.6.1 高炉炼铁生产过程的控制.....393
6.6.2 转炉炼钢过程的控制.....394
6.6.3 初轧生产过程的控制.....395
思考题与习题.....397
附录 常用管道仪表流程图设计符号.....399
参考文献.....402

第 1 章　绪　　论

1.1　过程控制概述

自 20 世纪 90 年代以来，计算机技术产生了突飞猛进的发展，并以计算机为工具产生了信息技术和网络技术。它在自动化技术领域中产生极大的影响和推动作用，自动化技术发展很快，并获得了惊人的成就，逐步形成了以网络集成化系统为基础的企业信息控制管理系统。而自动化的实现工具也由集散控制系统(Distributed Control Systems，DCS)发展到了现场总线控制系统(Fieldbus Control System，FCS)。自动化技术已在工业生产、科学技术和人们生活的各个领域中起到了关键的作用。已成为我国高科技的重要组成部分，在工业生产和国民经济各行业发挥着重要的作用。自动化水平已成为衡量各行各业现代化水平高低的一个重要标志。

自动化技术的发展首先从工业生产领域开始，而工业自动化的发展又与工业生产过程本身的发展有着密切的联系。随着生产从简单到复杂，从局部到全局，从低级到智能的发展，工业生产自动化也经历了一个不断发展的过程。

第一阶段：20 世纪 50 年代以前。这个阶段以经典控制理论为基本方法，以传递函数为基础，采用根轨迹法和频率法对系统进行分析。经典控制理论最辉煌的成果之一便是 PID 控制规律。PID 控制规律原理简单，易于实现，对没有时间延迟的单回路控制系统极为有效。到目前为止，在工业过程控制中，很多系统仍使用 PID 控制规律。在这个阶段，对系统的一般处理方法是将一个复杂过程分解为若干个简单的过程，然后采用单输入、单输出的控制系统，完成既定任务。自动化水平处于比较低级的阶段，理论上也尚不完整，从而促进了现代控制理论的发展。实现控制的手段主要是单个传感器、控制器和执行器。

第二阶段：20 世纪 60 年代以后，由于生产的发展，生产过程向着大型化、连续性方向发展，而控制对象的要求也日趋复杂，原有简单控制的模式已不能满足要求，为适应工业生产控制的要求，一些复杂的控制系统得到开发，并在实践中获得了良好的控制效果。而在这个阶段，人们研究出了现代控制理论，这为新的控制技术提供了理论基础。它以状态空间为分析基础，包括以最小二乘法为基础的系统辨识，以极小值原理和动态规划为基础的优化控制和以卡尔曼滤波理论为核心的最优估计三个部分。因此使分析系统的方法从外部现象深入到揭示系统的内在规律，从局部控制发展到了全局最优控制。现代控制理论在航天、航空和制导等领域取得了辉煌的成果。而自动控制的工具也产生了直接数字控制(Direct Digital Control，DDC)和监督计算机控制(Supervisory Computer Control，SCC)。但是，在工业生产过程控制领域，现代控制理论却并未能发挥作用。

第三阶段：20 世纪 70 年代以后，为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，逐步形成了大系统理论(Mohammad，1983)。其核心思想是系统的分解与协调，多级递阶优化与控制时应用大系统的典范。实际上，除了高维线性系统外，大系统理论仍未突破现代控制理论的基本思想与框架，对其他复杂系统仍然束手无策。同

时，基于专家知识的专家系统、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应运而生，并在很多领域得到了广泛的应用。这个阶段工业领域的一个最大成就是大规模集成电路和微处理器的产生，这大大加速了工业计算机的商品化和计算机技术的普及和发展。为了满足工业计算机可靠性和灵活性的需要，作为一种全新的工业控制工具，DCS 产生了。它是集计算机技术、控制技术、通信技术和图形显示技术于一体的计算机系统。而另一方面，控制理论和其他学科相互渗透，从而形成了以大系统理论和智能控制理论为代表的所谓第三代控制理论。直到现在，尽管它还处于发展和完善过程中，但已受到极大的重视和关注，也取得了很大的进展。

20 世纪 80 年代以后的十几年里，出现了两级优化与控制，在 DCS 的基础上实现了先进控制和优化控制。在硬件上采用上位机和 DCS 或电动单元组合仪表相结合，构成两级计算机优化与控制。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计算机集成过程系统(Computer Integrated Process System，CIPS)。而自动化的实现工具也由 DCS 发展到了现场总线控制系统(Fieldbus Control System，FCS)。

过程控制(process control)技术是自动化技术的重要组成部分，通常是指石油、化工、纺织、电力、冶金、轻工、建材、核能等工业生产中连续的或按一定周期程序进行的生产过程自动化，与其他自动控制系统比较，过程控制具有以下特点：

1. 被控过程复杂多样

工业生产是多种多样的，生产过程本身大多比较复杂，规模大小不同，生产的产品千差万别，因此过程控制的被控过程也多种多样。生产过程中充斥着物理变化、化学反应、生化反应，还有物质和能量的转换和传递，生产过程的复杂性决定了对它进行控制的艰难程度。有的生产过程进行得很缓慢，有的则进行得非常迅速，这就为对象的辨识带来困难。不同生产过程要求控制的参数不同，或虽然相同，但要求控制的品质完全不一样。不同过程参数的变化规律各异，参数之间相互影响，对过程的影响作用也极不一致，要正确描述这样复杂多样的对象特性还不完全可能，至今仍只能用适当简化的方法来近似处理。虽然理论上有适应不同对象的控制方法和系统，出于对象特性辨识的困难，要设计出能适应各种过程的控制系统至今仍不容易。由于被控过程的多样性，使过程控制系统明显地区别于运动控制系统。

2. 对象动态特性存在滞后和非线性

生产过程大多是在庞大的生产设备内进行，例如，热工过程中的锅炉、换热器、动力核反应堆等，对象的储存能力大，惯性也较大，设备内介质的流动或热量传递都存在一定的阻力，并且往往具有自动转向平衡的趋势。因此，当流入(或流出)对象的质量或能量发生变化时，由于存在容量、惯性和阻力，被控参数不可能立即产生响应，这种现象称为滞后。滞后的大小决定于生产设备的结构和规模，并同研究它的流入量与流出量的特性有关。生产设备的规模越大，物质传输的距离越长，热量传递的阻力越大，造成的滞后就越大。一般来说，热工过程大多具有较大的滞后，它对任何信号的响应都会延迟一些时间，使输出/输入之间产生相移，容易引起反馈回路产生振荡，对自动控制会产生十分不利的影响。

对象动态特性大多是随负荷变化而变的，即当负荷改变时，其动态特性有明显的不同。如果只以较理想的线性对象的动态特性作为控制系统的设计依据，就难以得到满意的控制

结果。

大多数生产过程都具有非线性特性，弄清非线性产生的原因及非线性的实质是极为重要的。对于一个不熟悉的生产过程，应先拟定合理的试验方案，并认真地进行反复的试验和估算，才能达到分析了解非线性的目的。但决不能盲目地进行试验，以免得出含混不清的错误结果，把非线性对象错当成线性对象来处理。

3. 过程控制方案丰富多样

由于工业过程的复杂性和多样性，决定了过程控制系统的控制方案的多样性。为了满足生产过程中越来越高的要求，过程控制方案也越来越丰富。通常有单变量控制系统，也有多变量控制系统；有常规仪表过程控制也由计算机集散控制系统；有提高控制品质的控制系统也有实现特殊工艺要求的控制系统；有传统的 PID 控制，也有先进控制系统，例如自适应控制、预测控制、解耦控制、推断控制和模糊控制等。

4. 控制系统分为随动控制和定值控制

定值控制是过程控制的一种主要控制形式，在多数过程控制系统中，设定值是保持恒定的或在很小的范围内变化，它们都采用一些过程变量，例如温度、压力、流量、成分等作为被控变量，过程控制的主要目的在于减小或消除外界干扰对被控变量的影响，使被控变量能够稳定在设定值或其附近，使工业达到优质、高产、低消耗与生产持续稳定的目标。

5. 过程控制系统有规范化的过程检测控制仪表组成

过程控制系统由过程检测、变送和控制仪表、执行装置的组成，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。传统的简单过程控制系统是由过程检测控制仪表(包括测量元件、变送器、调节器和执行器)组成和被控过程连接部分组成，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，从而达到所需的控制指标。

控制方案的确定、控制系统的设计、控制参数的整定都要以对象的特性为依据，而对象的特性又如上述那样复杂而难以充分地认识，要完全通过理论计算进行控制系统设计与控制参数的整定，至今仍不可能。目前已设计出各种各样的控制系统，都是通过必要的理论论证和计算，并且经过长期的运行、试验、分析、总结起来的，只要采用现场调整的方法得当，可望得到相当满意的控制效果。

1.2 当前控制系统的发展的趋势

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，对工业过程中存在的耦合性、非线性和时变性等难以解决。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、连锁保护控制等。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、充分借助计算能力，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，一个投资 163 万美元的乙烯装置实施先进控制后，预期每年可获得效益 600 万美元。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 的项目有数千项，APC 软件应用年增长率达到 30%左右。先进控制策略主要有解耦控制、时滞补偿控制、差拍控制、多变量预测控制、自适应控制、软测量技术及推断控制、稳健控制、专家控制、模糊推理和神经网络等智能控制，尤其智能控制已成为开发、研究和应用的热点。

2. 过程优化受到工业界的普遍关注

在过程控制中，过程优化已受到了普遍的关注。通常，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问题。借助过程优化可使得整个生产过程获得很大的经济效益和社会效益。过程优化主要寻找最佳的工艺参数设定值，使生产过程获得最大的经济效益，这也称之为稳态过程优化。稳态过程优化方法按实施方法可分为离线优化和在线优化两种。离线优化利用过程数学模型，在约束条件下求得最优工艺参数，提供给操作者作为操作指导信息，而不直接参与控制实施，因而实时性要求低，容易实现，目前应用较多。在线优化由计算机自动定期收集过程数据，完成模型参数更新、校正约束条件，通过求解寻找最优操作点，并将最优操作参数下传给控制系统，由控制系统对最优操作点进行跟踪。在线优化对算法实时性要求高，工业现场实时条件下的模型更新、约束校正都较难实施，但真正投入运行可保证可观的经济效益。随着稳态过程优化的深入研究，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操作条件下，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会遇到困难。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，而只要求得到“优化区域”或“满意解”就可以满足要求。在过程优化中，有许多是受工艺限制的。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. 传统的 DCS 正在走向国际统一标准的开放式系统

1975 年诞生了第一套分布式工业控制计算机系统，历经近 20 年，随着综合自动化的潮流和计算机技术的发展，一些主要的 DCS 生产商推出现场总线(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，它有开放性、智能化现场仪表、现场仪表采用数字信号传输、彻底的分散性等主要特点，具备了上述特点使得现场总线采用同一种国际标准的通信协议，不同厂家的产品可方便地互连，可与局域网相连，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、提高传输可靠性，节约传输线的投资，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。

4. 综合自动化系统是发展趋势

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”。20 世纪 90 年代后，国内外许多企业在国际市场激烈竞争的刺激下，特别是过程工业还受到保护环境的巨大压力。节能降耗、少投入多产出的高效生产和减少污染的清洁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系统成了当前自动化发展的趋势。综合自动化系统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、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。

1.3　过程控制系统的组成及分类

1.3.1　过程控制系统的组成

过程控制系统通常是指工业生产过程中自动控制系统的被控变量是温度、压力、流量、液位、成分、黏度、温度和 pH 值(酸碱度或氢离子浓度)等一些过程变量的系统。常规的过程控制系统框图如图 1.1 所示。

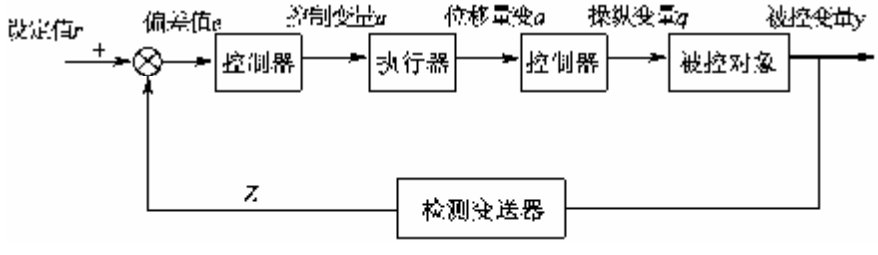


图 1.1　过程控制系统框图

1. 被控对象

被控对象是指被控制的生产设备或装置，常见的被控对象有加热炉、锅炉、分馏塔、反应釜、干燥炉、压缩机等生产设备，或储存物料的槽、罐以及传送物料的管段等。当生产工艺过程中需要控制的参数只有一个，如锅炉的水位控制，则生产设备与被控对象是一致的；当生产设备的被控参数不止一个，如果锅炉的水位控制实际上取决于给水量、压力和蒸汽流量等参数，其特性互不相同，应各有一套可能是互相关联的控制系统，此类生产设备被控对象就不止一个，应对其中的不同过程分别作不同的分析及处理。

2. 传感器和变送器

反映生产过程的工艺参数大多不止一个，一般都需用不同的传感器进行自动检测以获得可靠的信息，才能了解生产过程进行的状态，需要进行自动控制的参数称为被控变量，

被控变量往往就是对象的输出变量，其一般为非电量物理量，被控变量由传感器进行检测，将其变成相应的电信号，而变送器会将此信号转换为标准电信号。目前主要的标准电信号有两种，一种是 0～10mA 直流电流信号；另一种是 4～20mA 直流电流信号或 1～5V 的直流电压信号。如果是气动仪表，则应转换为1.96×10^4 ～ 9.8×10^4 Pa 的压力信号。传感器或变送器的输出就是被控变量的测量值 z。

3. 控制器

控制器也称调节器，它接收传感器或变送器的输出信号——被控变量。当其符合工艺要求时，控制器的输出保持不变，否则，控制器的输出发生变化，对系统施加控制作用。使被控变量发生变化的任何作用均称为扰动。在控制通道内并在控制阀未动作的情况下，由于通道内质量或能量等因素变化造成的扰动称为内扰，而其他来自外部的影响统称为外扰，无论是内扰或外扰，一经产生，控制器就发出控制命令，对系统施加控制作用，使被控变量回到设定值。

4. 执行器

被控变量的测量值 z 与设定值 r 在控制器内进行比较后得到的偏差 e 的大小，控制器根据偏差 e 的大小按控制器规定的控制算法(如 PID 控制等)进行运算后，发出相应的控制信号 u 经变化和放大后去推动执行器。目前采用的执行器有电动执行器与气动执行器两大类，应用较多的是气动薄膜控制阀。如果控制器是电动的，而执行器是气动的，就应在控制器与执行器之间加入电/气转换器。如果采用的是电动执行器，则电动控制器的输出信号需经伺服放大器放大后才能驱动执行器，以推动控制阀启闭。

5. 控制阀

由控制器发出的控制信号 u，通过电动或气动执行器产生的位移量驱动控制阀门，以改变输入对象的操纵变量 q，使被控变量受到控制。控制阀是控制系统的终端部件，阀门的输出特性决定于阀门本身的结构，有的与输入信号呈线性关系，有的则呈对数或其他曲线关系。

对于一个完整的过程控制系统来说，除自动控制回路外，还应备有一套手动控制回路，以便在自动控制系统因故障而失效后或在某些紧急情况下，对系统进行手动控制。另外，还应有一套必要的信号显示、通信、联络、连锁以及自动保护等设施，才能充分地保证生产过程的顺利进行和保障人身与设备的安全。

最后应当指出，控制器是根据被控变量测量值与设定值进行比较得出的偏差值对被控对象进行控制的。对象的输出信号即控制系统的输出，通过传感器与变送器的作用，将输出信号反馈到系统的输入端，构成一个闭环控制回路，简称闭环。如果系统的输出信号只是被检测和显示，并不反馈到系统的输入端，则是一个没有闭合的开环控制系统，简称开环。开环系统只按对象的输入量变化进行控制，即使系统是稳定的，其控制品质也较低。

在闭环控制回路中，可能有两种形式的反馈：即正反馈与负反馈。正反馈的作用会扩大不平衡量，是不稳定的。如采用正反馈去控制室内温度，当温度超过设定值时，系统会增加热量，使室温升高；当温度低于设定值时，它又减少热量，使室温进一步降低。具有正反馈的控制回路，总是将被控变量锁定在高端或低端的极值状态下，这种性质不符合控

制目的。如采用负反馈，其作用与正反馈相反，总是力求恢复到平衡温度，即保持在规定的设定值范围内。具有负反馈(包括前馈)作用的回路，一般称为反馈控制系统。这种系统能密切监视和控制被控对象输出变量的变化，抗干扰能力强，能有效地克服对象特性变化的影响，有一定的自适应能力，因而控制品质较高，是应用最广、研究最多的控制系统。

1.3.2 过程控制系统的分类

1. 按划分过程控制类别的方式

由于划分过程控制类别的方式不同，有各种不同的名称。

(1) 按被控变量分类，有温度控制系统、压力控制系统、流量控制系统、液位控制系统等。

(2) 按控制器的控制算法来分，有比例(P)控制系统、比例积分(PI)控制系统、比例积分微分(PID)控制系统及位式控制系统等。

(3) 按控制系统的模式来分，有比值控制系统、均匀控制系统、前馈控制系统及自适应控制系统等。

(4) 按控制器信号来分，有模拟控制系统与数字控制系统。

(5) 按是否采用计算机来分有常规的仪表控制系统、计算机控制系统、集散控制系统和现场总线控制系统等。

(6) 按控制系统所完成的功能来分，有串级控制系统、均匀控制系统、自适应控制系统等。

(7) 按控制系统组成回路的情况来分，有单回路控制系统与多回路控制系统、或开环控制系统与闭环控制系统等。以上是人们视具体情况所采用的不同的分类，并没有什么严格的规定。而作为过程控制而言，主要是分析反馈控制的特性，这就和设定值有密切关系，因此按设定值来分类则更有意义。

以上这些分类只反映了不同控制系统某一方面的特点，人们视具体情况可以采用不同的分类方法，其中并无原则的规定。

2. 按设定值的形式

过程控制主要是研究反馈控制系统的特性，按设定值的形式不同，可将过程控制系统分为以下三类。

1) 定值控制系统

将系统被控变量的设定值保持某一定值(或在某一很小范围内不变)的控制系统称为定值控制系统。在定值控制系统中，设定值固定不变，引起系统变化的只是扰动信号。这种控制系统是应用最多的一种。

2) 随动控制系统

对于有的生产过程，其被控变量是变化的，即控制系统的设定值不是定值，而是无规律变化的，自动控制的目的是要使被控变量相当准确而及时地跟随设定值的变化。例如，加热炉的燃料与空气的混合比控制，燃料量是按工艺过程的需要而设定的，这个设定值又随生产流程的要求而自动或手动改变，也就是说，燃料量在变化，控制系统就要使空气量跟随燃料量的变化，自动按预先规定的比例而相应地增减空气量，以保证燃料合理而经济地燃烧，这就是随动控制系统。自动平衡记录仪的平衡机构就是跟随被测信号的变化自动

达到平衡位置，是一种典型的随动控制系统。

3) 程序控制系统

程序控制系统被控变量的设定值是按预定的时间程序变化的。控制的目的是使被控变量按规定的程序自动变化。如工业热处理炉等周期作业的加热设备，一般都有升温、保温和降温等按时间变化的规律，设定值按此程序进行控制，以达到控制的目的。1.4 节中讲述了过程控制系统的性能指标。

1.4 过程控制的要求

过程控制涉及工业生产的各个领域，不同的工艺过程控制有不同的要求。但总的归纳起来有三个方面的要求：安全性、经济性和稳定性。

1. 安全性

安全性指的是在生产的整个过程中，确保人身安全和设备的安全，这是最重要的要求。特别是对于发电、化工、炼油等生产企业特别要注意系统的安全问题。因此在这样的系统中都要采用参数越限报警、事故报警和连锁保护等措施加以保证。在化工等易燃易爆环境中使用的仪表都必须是防爆仪表。为了保护大型设备的安全，系统可设计在线故障预测和诊断系统、容错控制系统等，以进一步提高系统运行的安全性。

2. 经济性

经济性旨在使过程控制系统在生产相同质量和产量的条件下，所消耗的能源和材料最少，做到生产成本低、生产效率高。随着市场竞争的日益加剧和我国加入 WTO 以后所面临的国际市场竞争，经济性受到了极大的重视。

3. 稳定性

稳定性即要求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。工业生产过程的生产条件不可能完全不变，例如生产工况的变化、原料的改变或生产量的起落、设备的老化和污染都会对生产造成一定的影响。特别是大型的复杂的系统，其影响因素就更多，这就要求过程控制系统在诸多因素干扰的情况下仍能保持系统的稳定。过程控制系统在运行时有两种状态：一种称为稳态，系统的设定值保持不变，也没有受到整个外来的任何干扰，因此被控变量也保持不变，整个系统处于平衡稳定状态；而另一种为动态，系统的设定值发生了变化，或者是系统受到了外扰，原来的稳态遭到了破坏，系统的各部分也将作出相应的调整，改变操纵变量的大小，使被控变量重新回复到设定值，使系统稳定下来。这种从前一个稳定状态到另一个稳定状态的过程称为过渡过程。实际上大多数系统被控对象总是不断地受到各种外来的干扰影响，系统经常处于动态过程中。因此评价一个系统的品质，不能单纯评价其稳态，更重要的是应该考虑它在动态过程中被控变量随时间变化的情况。

思考题与习题

1. 什么是过程控制系统？典型的过程控制系统由哪几部分组成？
2. 简述过程控制的发展概况及各个阶段的主要特点。
3. 什么是定值控制系统？什么是随动控制系统？
4. 生产对过程控制的要求是什么？其中什么是最重要的要求？