



普通高等教育“十一五”国家级规划教材
自动化国家级特色专业系列规划教材

本书荣获中国石油和化学工业优秀出版物(教材类)一等奖

过程控制工程

第三版

戴连奎 于 玲 田学民 王树青 等编著



化学工业出版社

过程控制工程为自动控制学科的重要组成部分,是自动化专业学生的必修课程之一。本书是在原国家规划教材《化工过程控制工程》和《过程控制工程》(第二版)的基础上重新编写的。

全书共分12章,第1章为过程控制概论;第2~6章讲述常规控制技术,内容包括过程动态建模,PID单回路控制,前馈与比值控制,串级、均匀、选择与分程控制等;第7、8章为先进控制技术,内容包括关联分析与解耦设计、基于模型的模型方法等;第9~12章为常用过程操作单元的控制方案,内容包括传热设备控制、精馏塔控制、化学反应过程控制及间歇过程控制概论。

本书可作为自动化及相关专业高年级本科生或研究生的教材,也可供炼油、石油化工、化工、冶金、电力、轻工、环保等领域从事工业过程控制工程的技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

过程控制工程/戴连奎等编著.—3版.—北京:
化学工业出版社,2012.8
普通高等教育“十一五”国家级规划教材
自动化国家级特色专业系列规划教材
ISBN 978-7-122-14946-6

I. ①过… II. ①戴… 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(2012)第168106号

责任编辑:唐旭华 郝英华
责任校对:顾淑云

装帧设计:张辉

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19¼ 字数501千字 2012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

总 序

随着工业化、信息化进程的不断加快,“以信息化带动工业化、以工业化促进信息化”已成为推动我国工业产业可持续发展、建立现代产业体系战略举措,自动化正是承载两化融合乃至社会发展的核心。自动化既是工业化发展的技术支撑和根本保障,也是信息化发展的主要载体和发展目标,自动化的发展和应用水平在很大程度上成为一个国家和社会现代工业文明的重要标志之一。从传统的化工、炼油、冶金、制药、机械、电力等产业,到能源、材料、环境、军事、国防等新兴战略发展领域,社会发展的各个方面均和自动化息息相关,自动化无处不在。

本系列教材是在建设浙江大学自动化国家级特色专业的过程中,围绕自动化人才培养目标,针对新时期自动化专业的知识体系,为培养新一代的自动化后备人才而编写的,体现了我们在特色专业建设过程中的一些思考与研究成果。

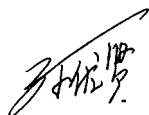
浙江大学控制系自动化专业在人才培养方面有着悠久的历史,其前身是浙江大学于1956年创立的化工自动化专业,这也是我国第一个化工自动化专业。1961年该专业开始培养研究生,1981年以浙江大学化工自动化专业为基础建立的“工业自动化”学科点被国务院学位委员会批准为首批博士学位授予点,1984年开始培养博士研究生,1988年被原国家教委批准为国家重点学科,1989年确定为博士后流动站,同年成立了工业控制技术国家重点实验室,1992年原国家计委批准成立了工业自动化国家工程研究中心,2007年启动了由国家教育部和国家外专局资助的高等学校学科创新引智计划(“111”引智计划)。经过50多年的传承和发展,浙江大学自动化专业建立了完整的高等教育人才培养体系,沉积了深厚的文化底蕴,其高层次人才培养的整体实力在国内外享有盛誉。

作为知识传播和文化遗产的重要载体,浙江大学自动化专业一贯重视教材的建设工作,历史上曾经出版过很多优秀的教材和著作,对我国的自动化及相关专业的人才培养起到了引领作用。当前,加强工程教育是高等学校工科人才培养的主要指导方针,浙江大学自动化专业正是在教育部卓越工程师教育培养计划的指导下,对自动化专业的培养主线、知识体系和培养模式进行重新布局和优化,对核心课程教学内容进行了系统性重新组编,力求做到理论和实践相结合,知识目标和能力目标相统一,使该系列教材能和研讨式、探究式教学方法和手段相适应。

本系列教材涉及范围包括自动控制原理、控制工程、检测和传感、网络通信、信号和信息处理、建模与仿真、计算机控制、自动化综合实验等方面,所有成果都是在传承老一辈教育家智慧的基础上,结合当前的社会需求,经过长期的教学实践积累形成的。大部分教材和其前身在我国自动化及相关专业的培养中都具有较大的影响,例如《过程控制工程》的前身是过程控制的经典教材之一、王骥程先生编写的《化工过程控制工程》。已出版的教材,既有国家“九五”重点教材,也有国家“十五”、“十一五”规划教材,多数教材或其前身曾获得过国家级教学成果奖或省部级优秀教材奖。

本系列教材主要面向自动化（含化工、电气、机械、能源工程及自动化等）、计算机科学和技术、航空航天工程等学科和专业有关的高年级本科生和研究生，以及工作于相应领域和部门的科学工作者和工程技术人员。我希望，这套教材既能为在校本科生和研究生的知识拓展提供学习参考，也能为广大科技工作者的知识更新提供指导帮助。

本系列教材的出版得到了很多国内知名学者和专家的悉心指导和帮助，在此我代表系列教材的作者向他们表示诚挚的谢意。同时要感谢使用本系列教材的广大教师、学生和科技工作者的热情支持，并热忱欢迎提出批评和意见。



2011 年 6 月

前言

过程工业涉及炼油、化工、冶金、制药等国民经济支柱产业，过程控制系统已成为保证现代企业安全、平稳、优化、环保低耗和高效益生产的主要技术手段。“过程控制工程”为自动化与相关专业的核心专业课程，旨在培养学生从事过程控制系统设计与工程实施能力。

本书是在传承王骥程教授主编的《化工过程控制工程》(第二版)、王树青教授等人编著的《工业过程控制工程》与《过程控制工程》(第二版)的基础上，结合作者几十年来的教学和科研实践经验以及对过程控制问题的理解重新编写而成的。本书可作为自动化及相关专业高年级本科生或硕士生的教材。

全书共分12章，第1章对过程控制工程的一些基本概念和知识进行概述；第2章介绍过程机理建模法和基于响应数据的经验建模法；第3章重点介绍单回路反馈控制方法；第4章讲述前馈控制和比值控制方法；第5章详细介绍了过程工业中一些典型的控制方案，如串级控制、非线性增益补偿控制、均匀控制、选择控制、分程控制和阀位控制；第6章简要介绍以DCS为主的计算机控制系统；第7章讨论多回路控制系统的关联分析与解耦设计；第8章讲述几种基于模型的先进控制算法，包括史密斯预估控制、内模控制、预测控制；第9章概述了间歇生产过程的控制问题；第10~12章分别介绍了过程工业中的传热设备、精馏塔与化学反应器的常用控制方案。

本书第1、7、10、11章由戴连奎编写；第2~6章由于玲编写；第8、12章由田学民编写；第9章由谢磊编写；王树青教授对本书编写提供了很多基础材料；全书由戴连奎统稿。

本书结构紧凑，重点突出。针对过程工业的实际应用状况，本书详细分析了常用的反馈控制技术；在此基础上，以若干典型过程设备为控制对象，全面地探讨了控制问题的提出、控制方案的设计与控制系统的实施等关键环节。与此同时，引入了大量的应用实例，并运用Matlab/SimuLink平台进行了深入的数字仿真研究，显著提升了本书的吸引力和易读性，增强了高校学生对过程控制技术的感性认识。

为方便教学与自学，本书除提供完整的电子教案外，还提供了大量的仿真实验模型。本书配套材料可免费提供给采用本书作为教材的相关院校使用。如有需要，请发电子邮件至 cipedu@163.com 索取。

在该书的编写过程中，得到了各兄弟学校老师，特别是教授过程控制课程的老师和企业界从事过程控制工作技术人员的大力支持和帮助，在此向他们表示深深的感谢。此外，也要感谢支持、帮助和关心我们编写工作的浙江大学控制系老师与学生。同时，我们要感谢所有帮助此书编写和出版的朋友！

编著者

2012年7月于浙大求是园

目 录

1 过程控制概论	1
1.1 控制系统的组成与目标	1
1.1.1 控制系统的由来	1
1.1.2 控制系统的组成	3
1.1.3 过程控制的术语与目标	4
1.2 控制仪表与控制装置	5
1.2.1 单元组合控制仪表	5
1.2.2 计算机控制装置	6
1.3 过程控制策略	9
1.3.1 反馈控制	9
1.3.2 前馈控制	11
1.4 反馈控制系统的分类	12
1.5 过程控制的任务和要求	13
思考题与习题 1	16
2 过程动态特性	17
2.1 典型工业过程的动态特性	17
2.1.1 自衡过程	17
2.1.2 非自衡过程	19
2.2 机理建模方法	21
2.2.1 机理建模的步骤	21
2.2.2 常用的方程	21
2.2.3 机理建模举例	26
2.3 测量变送环节	31
2.3.1 关于测量误差	31
2.3.2 测量信号的处理	32
2.4 控制阀	32
2.4.1 控制阀概述	32
2.4.2 流量特性和阀门增益	33
2.4.3 流量特性的选择	36
2.5 广义对象及经验建模方法	38
2.5.1 广义对象的概念	38
2.5.2 经验建模的步骤	39
2.5.3 广义对象的测试法建模	39
思考题与习题 2	45
3 反馈控制	48
3.1 控制系统的性能指标	48
3.1.1 以阶跃响应曲线的特征参数作为性能指标	48
3.1.2 偏差积分性能指标	50
3.2 三种常规的反馈控制模式	51
3.2.1 比例控制	51
3.2.2 比例积分控制	52
3.2.3 比例积分微分控制	55
3.3 PID 控制器的选取与整定	56
3.3.1 控制器的选型	56
3.3.2 PID 参数整定	57
3.3.3 PID 参数自整定	60
3.4 单回路反馈控制系统的投运	64
思考题与习题 3	64
4 前馈控制和比值控制	65
4.1 前馈控制系统	65
4.1.1 前馈控制的基本原理	65
4.1.2 前馈控制系统的特点	67
4.2 前馈控制系统的结构形式	67
4.2.1 静态前馈	67
4.2.2 动态前馈	68
4.2.3 前馈反馈控制	69
4.2.4 多变量前馈控制	70

4.2.5 用计算机实施前馈控制	72	4.3.3 比值控制的实施	77
4.3 比值控制系统	73	4.3.4 比值控制系统的设计与投运	80
4.3.1 定比值控制	74	4.3.5 比值控制系统中的若干问题	81
4.3.2 变比值控制	76	思考题与习题 4	83
5 其他典型控制系统	85		
5.1 串级控制系统	85	5.3.1 用于设备软保护的选择性控制	99
5.1.1 串级控制的概念及方框图描述	85	5.3.2 其他选择性控制系统	101
5.1.2 串级控制系统分析	86	5.4 分程控制系统和阀位控制系统	103
5.1.3 串级控制系统设计	87	5.4.1 分程控制系统	103
5.1.4 串级控制系统举例	90	5.4.2 阀位控制系统	107
5.2 均匀控制	96	5.5 非线性过程增益补偿	108
5.2.1 均匀控制的由来	96	5.5.1 非线性过程的特点	108
5.2.2 均匀控制的实现	97	5.5.2 非线性增益补偿方法	111
5.2.3 均匀控制的控制器参数整定	99	5.5.3 pH 中和过程控制	116
5.3 选择性控制系统	99	思考题与习题 5	122
6 计算机控制系统	125		
6.1 计算机控制系统概述	125	6.3.3 数字 PID 控制的实现	137
6.2 信号采集与处理	127	6.4 数字控制系统举例	139
6.2.1 信号采集与变换	127	6.4.1 DCS (Distributed Control System)	
6.2.2 信号处理与数据滤波	130	概念	139
6.3 数字 PID 控制算法	133	6.4.2 JX-300X 系统结构	140
6.3.1 数字 PID 控制算式	133	6.4.3 JX-300X 系统软件	144
6.3.2 数字 PID 改进算式	134	思考题与习题 6	146
7 多回路控制系统分析与设计	147		
7.1 相对增益	147	7.2.2 耦合多回路系统的控制参数	
7.1.1 相对增益的概念	148	整定	153
7.1.2 相对增益矩阵的计算	149	7.3 多回路系统的解耦设计	157
7.2 耦合系统的变量配对与控制参数		7.3.1 基于方块图的线性解耦器	158
整定	151	7.3.2 基于过程机理的非线性解耦器	163
7.2.1 耦合系统的变量配对	151	思考题与习题 7	165
8 基于模型的控制方法	167		
8.1 史密斯预估控制	167	8.3 模型预测控制	176
8.1.1 史密斯补偿原理	167	8.3.1 模型预测控制的基本原理	177
8.1.2 史密斯预估器的几种改进方案	170	8.3.2 SISO 无约束动态矩阵控制	178
8.2 内模控制	171	8.3.3 MIMO 受约束动态矩阵控制	181
8.2.1 内模控制系统的结构与性质	171	8.3.4 预测控制软件包简介	183
8.2.2 内模控制器的设计方法	172	8.4 应用示范	186
8.2.3 改进型内模控制系统	173	8.4.1 Wood-Berry 塔的预测控制仿真	186

8.4.2 工业应用实例	187	思考题与习题 8	191
9 间歇过程控制	192		
9.1 间歇生产过程及控制	192	9.4.1 概述	203
9.1.1 概述	192	9.4.2 指数加权移动平均控制算法	204
9.1.2 间歇生产过程控制系统	193	9.4.3 应用示例	205
9.2 顺序逻辑控制	194	9.5 间歇生产过程管理	207
9.3 间歇生产过程中的控制	197	9.5.1 处方 (Recipe) 和配方的管理	207
9.3.1 间歇生产过程的特殊控制方法	197	9.5.2 间歇生产过程计划与调度	207
9.3.2 间歇反应器的控制	200	思考题与习题 9	209
9.4 批次对批次 (Run-to-Run) 控制	203		
10 传热设备的控制	211		
10.1 传热设备的静态与动态特性	211	10.3 加热炉的控制	220
10.1.1 热量传递的三种方式	211	10.3.1 加热炉的单回路控制方案	221
10.1.2 换热设备的结构类型	213	10.3.2 加热炉的串级控制方案	222
10.1.3 换热设备的静态特性	213	10.4 锅炉设备的控制	225
10.1.4 换热设备的动态特性	215	10.4.1 汽包水位的控制	227
10.2 换热设备的控制	217	10.4.2 燃烧系统的控制	232
10.2.1 换热器的控制	217	10.4.3 蒸汽过热系统的控制	235
10.2.2 蒸汽加热器的控制	218	思考题与习题 10	235
10.2.3 冷凝冷却器的控制	219		
11 精馏塔的控制	238		
11.1 精馏塔的控制目标	238	11.4.1 物料平衡控制	251
11.1.1 质量指标	238	11.4.2 精馏段质量指标控制	255
11.1.2 产品产量和能量消耗	239	11.4.3 提馏段质量指标控制	261
11.2 精馏塔的静态特性和动态特性	240	11.4.4 两端质量指标控制	263
11.2.1 精馏塔的静态特性	240	11.5 精馏塔的先进控制方案	267
11.2.2 精馏塔的动态模型	242	11.5.1 内回流控制	267
11.3 精馏塔质量指标的选取	247	11.5.2 产品质量的软测量与推断控制	268
11.3.1 灵敏板的温度控制	247	11.5.3 精馏塔的节能控制	270
11.3.2 温差控制	248	思考题与习题 11	272
11.3.3 双温差控制	248		
11.4 精馏塔的常用控制方案	249		
12 化学反应过程控制	274		
12.1 化学反应过程概述	274	12.2.2 反应器的热稳定性	280
12.1.1 化学反应器的类型	274	12.3 反应器的基本控制方案	282
12.1.2 化学反应的基本规律	276	12.3.1 概述	282
12.2 化学反应器的动态数学模型	279	12.3.2 反应器的温度控制	283
12.2.1 基本动态方程式	279	12.3.3 外围条件的稳定控制	286

12.4 典型反应器的控制方案设计	288	12.4.2 合成氨过程的控制	291
12.4.1 聚合反应釜的控制	288	思考题与习题 12	297
参考文献	298		

1 过程控制概论

在现代工业生产过程中，随着生产规模的不断扩大、生产过程的强化、对产品质量的严格要求以及各公司之间的激烈竞争，人工操作与控制已远远不能满足现代化生产的要求。过程控制系统已成为工业生产过程必不可少的装备，为保证现代企业安全、优质、低消耗和高效益生产提供了有效的技术手段。本书将重点针对连续生产过程，介绍过程控制系统的设计目标、分析设计技术与工程实施等方面的内容。

作为概论，本章将简要介绍过程控制系统的组成、术语与目标，回顾控制装置的发展历史，并重点比较反馈与前馈控制策略的异同，然后简单说明过程控制系统的分类，最后指出过程控制的任务与要求。

1.1 控制系统的组成与目标

1.1.1 控制系统的由来

自动控制系统是在人工控制的基础上产生和发展起来的。下面首先以图 1-1 所示的液位控制问题为例，来说明控制系统的由来、组成与工作原理。

【例 1-1】 从维持生产平稳考虑，工艺上希望罐内的液位 h 能维持在所希望的位置 h_{sp} 上。液位 h 是需要控制的工艺变量，称为被控变量； h_{sp} 为被控变量的控制目标，称为给定值或设定值。显然，当进水量 Q_i 或出水量 Q_o 波动时，都会使罐内的液位发生变化。现假定通过控制出水量 Q_o 维持液位的恒定，则称 Q_o 为操纵变量。而进水量 Q_i 是造成被控变量产生不期望波动的原因，称为扰动。若由操作工来完成这一控制任务，所要做的工作如下。

- ① 用眼睛观察液位计实际液位的指示值，并通过神经系统告诉大脑。
- ② 通过大脑对眼睛观测到的实际液位值与给定值进行比较，根据偏差的大小和方向，并结合操作经验发出命令。
- ③ 根据大脑发出的控制命令，通过手去改变出水阀门开度，以改变 Q_o 来控制液位。
- ④ 反复执行上述操作，直到将液位控制到其给定值。

上述操作工通过眼、脑、手相互配合完成液位的控制过程就是一个典型的人工控制过程，操作工与所控制的液罐设备构成了一个人工控制系统。

然而，人工控制难以满足现代工业对控制精度的要求，特别对于现代流程工业，典型的生产装置需要控制的回路多达几百个，人工控制几乎不可能完成。如果能用一些仪表或自动化装置代替操作工的眼、脑、手来自动地完成控制任务，不仅能大大减轻操作工的劳动强度，而且可大大提高控制精度与工作效率。以图 1-1 所示的液位控制问题为例，可采用液位测量变送器 LT 21 代替人眼，来检测液位的高低并将其转换为标准的电信号，如 4~20mA 直流信号。同时，采用液位控制器 LC 21 代替人脑，通过接收液位测量信号，并与其设定值进行比较。控制器根据偏差的正负、大小及变化情况，发出标准的控制信号，如 4~

20mA 直流信号。此外,需要采用自动执行机构代替人手,来实施对出口流量的控制,这里为控制阀。控制阀根据控制信号变化,来增大或减小出口阀门的开度以调节出水流量,并最终使液位测量值接近或等于给定值。这样,就构成了一个典型的液位自动控制系统,其中测量变送器、控制器和执行器分别具有眼、脑、手的功能。通常将控制器、变送器用通用符号来表示,带控制回的工艺流程如图 1-2 所示。

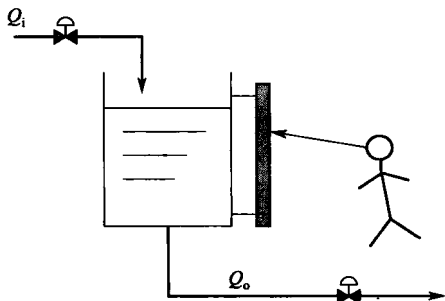


图 1-1 液位人工控制

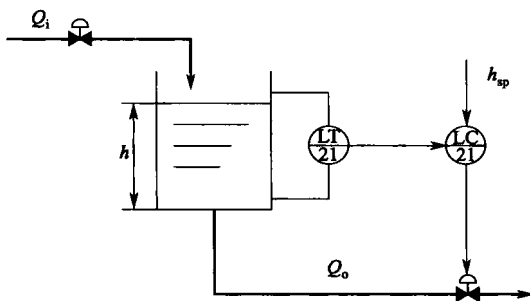


图 1-2 液位自动控制回路

在带控制点的工艺流程图中,小圆圈表示某些自动化仪表,圆内通常由“两位以上字母+序号”组成,第一位字母表示被控变量的类别,常见的字母包括:T(温度)、P(压力)、dP(差压)、F(流量)、L(液位或料位)、A(分析量)、W(重量或藏量)、D(密度)等;后继字母表示仪表功能,常见的字母包括:T(传感变送器)、C(控制器)、I(指示仪表)等。而序号通常与被控变量的检测位号有关,同一回路的自动化仪表采用同一序号,序号位数可依据装置的复杂程度而有所不同。

图 1-2 中,“LT 21”表示 21 回路的液位传感器,“LC 21”表示该回路的液位控制器。该控制回路的目标是保持液位恒定。当进料流量变化导致液位发生变化时,通过液位变送器 LT 21 将液位转化为电信号,并送至液位控制器 LC 21 与其给定值进行比较,该控制器根据其偏差信号进行运算后将控制命令送至控制阀,以改变出口流量来维持液位的稳定。

【例 1-2】针对蒸汽加热器的某一温度自动控制系统如图 1-3 所示,它由蒸汽加热器、温度变送器 TT 22、温度控制器 TC 22 和蒸汽流量控制阀组成。控制的目标是保持流体出口温度 T 恒定。当进料流量 R_F 或温度 T_i 等因素的变化引起物料出口的温度变化时,通过温度变送器 TT 22 测得温度的变化,并将其信号 T_m 送至温度控制器 TC 22 与给定值 T_{sp} 进行比较,温度控制器 TC 22 根据其偏差信号进行运算后将控制命令 $u(t)$ 送至控制阀,以改变蒸汽量 R_v 来维持出口温度的稳定。

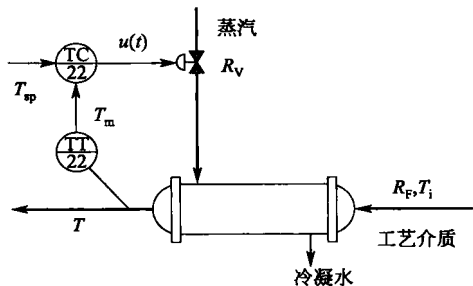


图 1-3 蒸汽加热器温度控制系统

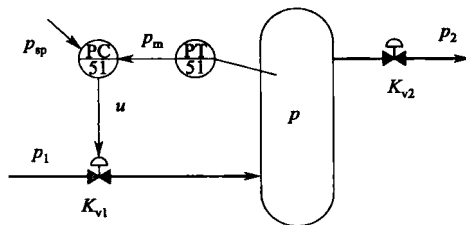


图 1-4 贮罐压力自动控制系统

【例 1-3】某一压力控制系统如图 1-4 所示,它由气体贮罐、压力变送器 PT 51、压力

控制器 PC 51 和进气控制阀组成。控制的目的是保持贮罐内压力恒定。当气源压力 p_1 、出口压力 p_2 或其他因素发生变化时, 气罐压力将偏离其设定值。利用压力测量变送器, 将压力信号转化为标准电流信号; 该信号送至压力控制器与其设定值进行比较; 压力控制器根据其偏差信号进行运算后, 并将控制命令送至控制阀, 改变进气阀门开度, 从而调整进气量, 最终使罐内压力维持在设定值。

1.1.2 控制系统的组成

以上所列举的控制系统都属于简单控制系统。与其他任何的控制系统相同, 这些控制系统均由下列基本单元组成。

① 被控对象 (有时也称为被控过程) 被控对象是指被控制的生产设备或装置, 而被控过程既包括运行中的设备与生产关系, 也反映其输入输出动态关系。

② 测量变送器 用于测量被控变量, 并按一定的规律将其转换为标准信号作为输出。依据电气标准的不同, 常用的标准信号包括: $0 \sim 10\text{mA}$ DC 信号 (DDZ-II 型仪表)、 $4 \sim 20\text{mA}$ DC 信号 (DDZ-III 型仪表)、 $0.02 \sim 0.10\text{MPa}$ 气动信号等。

③ 执行器 常用的是控制阀。它接受来自控制器的命令信号 u , 用于自动改变控制阀的开度。如例 1-2 中, 控制器通过改变出水阀门的开度以调节出水量 Q_o , 最终达到克服外部扰动对被控变量 h 的影响。

④ 控制器 (也称调节器) 它将被控变量的测量值与设定值进行比较, 得出偏差信号 $e(t)$, 并按一定的规律给出控制信号 $u(t)$ 。对于工业中常用的各类控制器, 其输入输出信号大都为标准的电流信号, 如 DDZ-III 型仪表的 $4 \sim 20\text{mA}$ DC 信号。

通常, 用文字叙述的方法来描述控制系统的组成和工作原理较为复杂, 而在过程控制实践中常常采用直观的方框图来表示。图 1-5 为液体储罐液位控制系统对应的方框图, 一般的单回路控制系统的方框图如图 1-6 所示。方框图中每一条线代表系统中的一个信号, 线上的箭头表示信号传递的方向; 每个方块代表系统中的一个环节, 它表示了其输入对其输出的影响。方框图可以把一个控制系统变量间的关系完整地表达出来。如果方框图和工艺控制流程图一起给出, 就可清楚地获得整个系统的全貌。

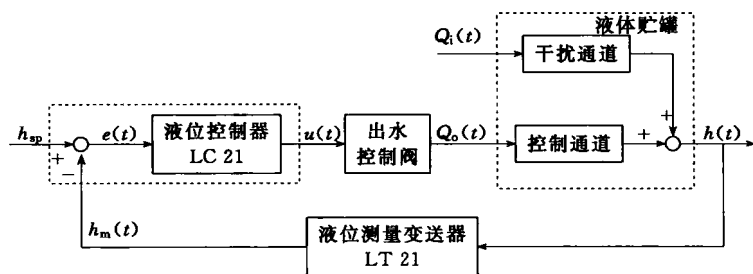


图 1-5 液位控制系统的方框图

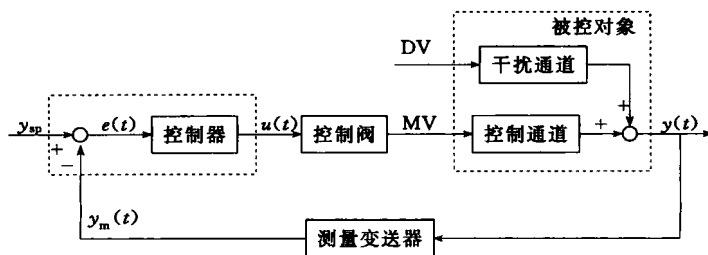


图 1-6 单回路控制系统的方框图

1.1.3 过程控制的术语与目标

为便于后续讨论，有必要定义一些在过程控制领域常用的专业术语。

① 被控变量 (Controlled Variable, CV) 也称受控变量或过程变量 (Process Variable, PV)。它是指被控对象需要维持在其理想值的工艺变量，如上述各例中的液罐液位、换热器工艺介质出口温度、罐内压力。在过程控制中常用的被控变量包括：温度、压力/差压、液位/料位、流量、成分含量等实际物理量。有时，也可用过程变量的检测电信号来表示被控变量，该测量信号称为过程变量的测量值 (Measurement)。

② 设定值 (Setpoint, SP) 也称给定值 (Setpoint Value, SV)。它是指被控变量要求达到的期望值。作为控制器的参考输入信号，设定值在实际应用中通常用其对应的电量或相对百分比来表示，以便于与被控变量的测量值进行比较。

③ 操作变量 也称操纵变量 (Manipulated Variable, MV)。通常是指由执行器控制的某一工艺变量。操作变量对被控变量的影响要求直接、灵敏、快速。以图 1-3 所示的蒸汽加热器温度控制系统为例，其操作变量为蒸汽流量，它对被控变量 (流体出口温度) 的影响方向为“正作用”，即蒸汽量的增加，在其他条件不变的情况下均使流体出口温度增加；此外，由于蒸汽冷凝所放出的大量潜热，使操作变量对被控变量的作用非常灵敏。值得一提的是，很多文献对“操作变量”与“控制变量”不加区分。在过程控制领域，“控制变量”通常指控制器的输出电信号，即执行器的输入信号；而“操作变量”往往指某一执行器可控制、对被控变量有直接影响的物理量，最常见的是一些工艺介质流量。

④ 扰动变量 (Disturbance Variables, DVs) 也称干扰变量或简称扰动，是指任何导致被控变量偏离其设定值的输入变量。对于图 1-3 所示的蒸汽加热器温度控制系统，其扰动变量包括：蒸汽的阀前压力、工艺介质的进料流量、进料温度与组成等；同样，对于图 1-4 所示的贮罐压力控制系统，其扰动变量包括：控制阀前压力、出口压力、出口阀开度等。对于控制系统而言，扰动主要来自于扰动变量的动态变化。当某一扰动输入变量本身变化很小，对被控变量的影响可忽略时，该输入不再成为一种扰动。在自动控制领域，扰动大量存在。事实上，正是由于扰动的存在，才使自动控制系统显示出其应用价值；否则，根本没有必要设计相应的控制系统。

结合上述专业术语，过程控制系统的目标可简单描述为：“自动控制系统的目的是通过调节操纵变量，以克服各种扰动的影响，使被控变量保持在设定值。”自动控制系统应用广泛，就过程工业而言，其最主要的原因如下。

① 安全性 (Safety) 对流程工业而言，确保生产过程的安全是最重要的。通过设计合适的控制系统，避免生产事故的发生，防止或避免可能造成的对生产操作人员的伤害与对生产装置的损害，并通过减少废气废料的排放以保护环境。

② 质量 (Quality) 为确保产品质量符合国家标准的要求，并减少产品质量的波动，一种简单实用的实现方案是采用自动控制系统。借助于控制系统，确保生产要素、工艺操作条件与原料组成的基本恒定。以精馏产品质量控制为例，通过控制产品灵敏板温度可基本实现对产品质量的控制要求。

③ 收益 (Profit) 在确保生产安全、产品质量的前提下，如何降低生产成本、提高收益是各个生产企业永恒的主题。借助于自动控制系统，可实现工艺操作条件的稳定与优化，最大限度地提高核心产品的产量、实现生产成本的最小化，并减少对操作人员的需求。事实

上, 自动控制系统是实现过程工业操作优化与管理现代化的基础。

1.2 控制仪表与控制装置

典型的过程控制系统如图 1-6 所示, 由被控过程、测量变送单元、控制器与执行器组成, 本节着重介绍控制器的硬件设备, 即控制仪表与控制装置的发展。

1.2.1 单元组合控制仪表

单元组合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, 将仪表设计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, 可以构成各种适合于不同应用场合的自动检测或控制系统。依据能源形式的不同, 这类仪表包括电动单元组合仪表 (DDZ) 与气动单元组合仪表两大类。

气动控制仪表于 20 世纪 40 年代起就已广泛应用于工业生产, 它采用 0.14MPa 的气源作为动力源, 各个单元之间的传输信号为 0.02~0.10MPa 的气压信号。它尽管具有结构简单、易于维护、安全防爆等优点, 但由于信号可传输距离近、故障率高、难以构成复杂控制系统等局限性, 已基本上被电动仪表所替代。

电动控制仪表自 20 世纪 60 年代起就开始应用于工业生产, 经历了 I 型、II 型和 III 型三个发展阶段, 经过不断改进, 性能已日臻完善。DDZ-II 型和 III 型仪表的电气标准如表 1-1 所示, 下面以目前应用广泛的 DDZ-III 型仪表为例, 介绍各种单元组合仪表。

表 1-1 DDZ-II 型和 III 型仪表的电气标准

	DDZ-II 型仪表	DDZ-III 型仪表
供电	220V, 50Hz 交流电	24V 直流电
传输信号	0~10mA DC	4~20mA DC
电子器件	电阻、电容、晶体管等分立元件	集成电路、微处理器为主

单元组合仪表可分为传感变送单元、转换单元、控制单元、运算单元、显示单元、给定单元、执行单元和辅助单元八类。各单元的作用说明如下。

① 传感变送单元 它能将各种被测参数, 如温度、压力、差压、流量、液位等物理量, 经传感放大转换成相应的标准信号 (如 4~20mA) 传送到接收仪表或装置, 以供指示、记录或控制。具体产品包括: 温度变送器、差压变送器等。

② 转换单元 它将电压、频率等电信号转换成标准信号, 或者进行不同类型标准信号之间的转换, 以使不同信号可在同一控制系统中使用。常用产品包括: 频率转换器、电气转换器、气-电转换器等。对于过程工业中常用的气动薄膜调节阀, 其控制信号为 0.02~0.10MPa 的气压信号, 若控制单元采用 DDZ-III 型电动仪表, 此时就需要引入“电-气转换器”将标准的 4~20mA 电信号转换成标准的气压信号。

③ 控制单元 它将来自传感变送单元的测量信号与给定信号进行比较, 按照偏差给出控制信号, 去控制执行器的动作。常用的控制单元包括: PID (比例-积分-微分) 控制器、PI 控制器、PD 控制器等。

④ 运算单元 它将几个标准信号进行加、减、乘、除、开方、平方等运算, 适用于多种参数综合控制、比值控制、前馈控制、流量信号的温度压力补偿计算等。常见的运算单元包括: 加减器、比值器、乘法器和开方器等。

⑤ 显示单元 它对各种被测参数进行指示、记录、报警和积算, 供操作人员监视控制系统和生产过程工况。主要品种包括: 指示仪、指示记录仪、报警器、比例积算器、开方积

算器等。

⑥ 给定单元 它输出标准信号，作为被控变量的给定值送至控制单元，实现定值控制。常用的品种包括：恒流给定器、比值给定器和时间程序给定器等。

⑦ 执行单元 它按照控制器输出的控制信号或手动操作信号，去改变操作变量的大小。常用的执行单元包括：角行程电动执行器、直行程电动执行器、气动薄膜调节阀与变频器等。

⑧ 辅助单元 辅助单元是为了满足自动控制系统某些特殊要求而增设的仪表，如手操器、阻尼器、限幅器、安全栅等。手操器（或称操作器）用于手动操作，同时又起手动/自动的双向切换作用；阻尼器相当于低通滤波器，用于压力、差压或流量等信号的平滑与滤波；限幅器用于限制控制信号的上下限值；安全栅用于将危险场所与非危险场所强电隔离，起安全防爆的作用。

以图 1-3 所示的蒸汽加热器温度自动控制系统为例，假设采用热电阻作为温度传感器件，采用气动薄膜调节阀作为执行器，并采用 DDZ-III 型电动仪表，所涉及的主要仪表与信号连接如图 1-7 所示。该控制系统的设计目标是维持工艺介质出口温度的恒定。当进料流量或温度等因素改变引起工艺介质出口温度变化时，由热电阻传感器感受温度变化并将其转换成电阻值的变化。通过温度变送器 TT 22 将信号放大，并将电阻值的变化转换成标准 4~20mA 电信号的变化。为实现出口温度的自动控制，由恒流给定器提供期望温度所对应的电流值，并将标准的温度测量信号与给定信号送至 PID 控制器 TC 22；该控制器根据测量信号与给定信号的偏差进行 PID 运算后获得标准的 4~20mA 自动控制信号。任意控制系统在实际应用中有时因特殊工况都需要进行人工手动控制，为此需要引入手操器，以实现手动操作及手动/自动的双向切换。此外，由于选用气动薄膜调节阀作为执行机构，其控制信号为 0.02~0.10MPa 的气压信号，因此需要引入“电-气转换器”将标准的 4~20mA 电信号转换成标准的气压信号。通过气动薄膜调节阀阀头压力的变化，使调节阀的开度改变，以自动调节蒸汽量，并最终通过蒸汽量的调节来维持工艺介质出口温度的恒定。另外，为监视温度的动态变化，可引入指示记录仪以曲线方式保存出口温度的历史变化趋势。

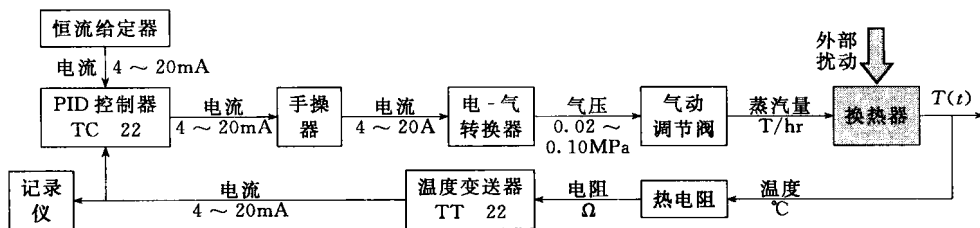


图 1-7 蒸汽加热器温度控制系统的仪表实现与信号连接

1.2.2 计算机控制装置

随着微电子学与计算机技术的发展，特别是高速网络通信技术的不断完善，作为自动化工具的自动化仪表和计算机控制装置取得了突飞猛进的发展，各种类型的计算机控制装置已经成为工业生产实现安全、高效、优质、低耗的基本条件与重要保证，成为现代工业生产中不可替代的神经中枢。

所谓“计算机控制”就是利用计算机实现工业生产过程的自动控制，典型的计算机控制系统原理框图如图 1-8 所示。与图 1-6 所示的模拟控制系统对比可知：计算机控制装置的外部功能相当于控制器，但根本区别在于内部的控制器为数字控制器（即计算机控制算法），其输入输出信号均为数字信号；为实现与外部模拟信号的连接，需要引入 A/D、D/A 等接

口装置，从而构成一个闭合控制回路。

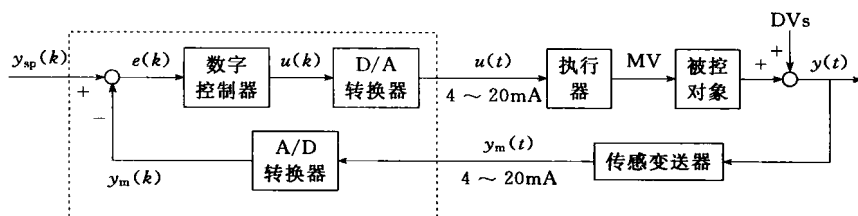


图 1-8 计算机控制系统的原理框图与信号连接

从上述原理框图可见，计算机控制的基本工作过程可归纳为三个步骤。

- ① 数据采集 实时检测来自变送器的被控变量瞬时值，并将其转换为离散化数据。
- ② 控制决策 根据采集到的被控变量采样数据，按一定的控制算法进行分析计算，产生数字化控制信号。
- ③ 控制输出 将控制决策产生的数字控制信号转换成标准的电信号，实时地向执行机构发出控制命令以调节操作变量。

计算机控制系统不断地重复执行上述三个步骤，使整个闭环系统按照一定的控制目标进行工作。

与前述的组合仪表控制系统相比，计算机控制系统有极大的优越性，例如控制系统搭建简单、维护方便、控制功能强大、便于实现先进控制、人机交互界面友好、可操作性强等。此外，计算机控制系统不仅能够有效地实现常规意义上的回路控制，而且还可以实现集过程监控、实时优化与生产管理于一体的综合自动化。

计算机控制系统自 20 世纪 60 年代初提出以来，随着计算机技术的发展，其性能不断完善。依系统结构的不同，计算机控制系统发展至今大致经历了直接数字控制、集中控制、分布式控制、现场总线控制四个阶段，下面简单介绍一下前三个阶段的系统结构与特点。

(1) 直接数字控制

直接数字控制 (Direct Digital Control, DDC) 最早出现于 20 世纪 60 年代初，它使用一台计算机代替过程控制中的模拟控制器，并不改变原有的控制功能。DDC 是计算机控制技术的基础，其控制系统原理图如图 1-8 所示，计算机首先通过 AI (模拟输入) 和 DI (数字输入) 接口实时采集数据，把检测仪表送来的反映各种工艺参数和过程状态的标准模拟信号 (4~20mA、0~10mA 等)、开关量信号 (“0”/“1”) 转换为数字信号，及时送往计算机主机；主机按照一定的控制规律进行计算，发出数字化的控制信息；最后通过 AO (模拟输出) 和 DO (数字输出) 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 (如 4~20mA、0~10mA、“0”/“1”等)，直接控制生产过程。

与采用模拟控制器的控制系统相比，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，控制工程师能方便地对传统的 PID 算法进行改进或实现其他的复杂控制算法，如串级控制、前馈控制、解耦控制等。当时 DDC 用于工业控制的主要问题是计算机系统价格昂贵，而且计算机运算速度难以满足快速过程实时控制的要求。

(2) 集中型计算机控制系统

集中型计算机控制是 DDC 控制的自然延伸。由于当时的计算机系统的体积庞大、价格非常昂贵，为了与常规仪表控制相竞争，研究人员试图用一台计算机来控制尽可能多的控制回路，同时实现集中检测、集中控制和集中管理。

典型的集中型计算机控制系统如图 1-9 所示, 就控制装置而言, 其输入为一系列标准的检测信号 (如 4~20mA 电流信号), 其输出为一系列标准的控制信号 (如 4~20mA 电流信号、“0”/“1”开关信号等)。整个控制装置由主机系统、输入子系统、输出子系统与人机交互系统等部分组成。

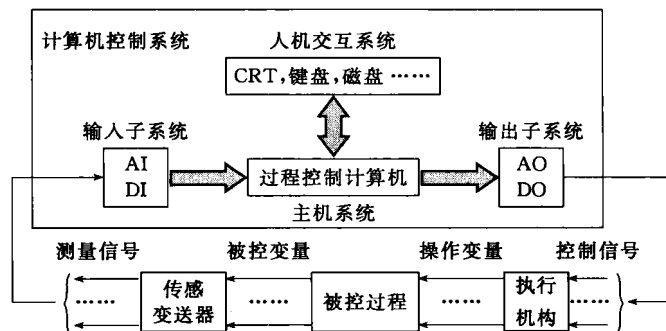


图 1-9 集中型计算机控制系统的原理图

从表面上看, 集中型计算机控制系统与常规仪表控制相比具有更大的优越性: 集中型计算机控制可以实现解耦控制、联锁控制等各种更复杂的控制功能; 信息集中, 便于实现操作管理与优化生产; 灵活性大, 控制回路的增减、控制方案的改变可由软件来方便实现; 人机交互系统友好, 操作方便, 大量的模拟仪表盘可由 CRT 取代, 各种人机干预设备可通过标准的计算机输入输出设备 (如键盘等) 来完成。

然而, 由于当时计算机总体性能低、运算速度慢、容量小, 利用一台计算机控制很多个回路容易出现负荷超载, 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。一旦计算机出现故障, 甚至系统中某一控制回路发生故障就可能对整个生产过程的全面瘫痪。在当时, 集中型计算机控制系统不仅没有给工业生产带来明显的好处, 反而有可能严重影响正常生产, 因此很难被过程企业所接受。

(3) 集散控制系统

由于在可靠性方面存在重大缺陷, 集中型计算机控制系统在当时的过程控制领域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, 需要将控制功能分散到若干个相对独立运行的控制站去实现; 此外, 为便于对整个生产过程的统一管理, 各个局部控制系统之间还应当存在必要的相互联系。这种管理的集中性与控制的分散性为保证生产过程的高效安全运行提供了理想的结构, 并直接推动了分布式控制系统的产生和发展。

分布式控制系统 (Distributed Control System, DCS), 也称集散控制系统, 其基本设计思想就是同时适应管理与控制两方面的需要: 一方面使用若干个控制器完成系统的控制任务, 每个控制器实现一定的有限控制目标, 可以独立完成数据采集、信号处理、算法实现与控制输出等功能; 另一方面, 强调管理的集中性, 它依靠计算机网络完成操作显示单元与控制器之间的数据传输, 使所有控制器都能协调动作。

20 世纪 70 年代微处理器的出现为研制 DCS 创造了条件, 一台微处理器实现几个回路的控制, 若干个微处理器就可以控制整个生产过程。基于上述思想, 美国 Honeywell 公司于 1975 年推出了世界上第一套以微处理器为核心的 DCS 系统 TDC-2000。进入 20 世纪 80 年代, 局域网 (Local Area Network, LAN) 技术的引入, 使 DCS 系统组态更为灵活, 良好的人机交互接口也大大改善了操作条件。此后, 随着网络技术的日臻完善和控制器功能的