



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

过程控制工程

第二版

王树青 戴连奎 于玲 编著



化学工业出版社

TP273/486

2008

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

过程控制工程

第 二 版

王树青 戴连奎 于 玲 编著



化学工业出版社

· 北 京 ·

过程控制工程是控制科学与控制工程学科中的重要知识领域,是自动化专业学生必修课程之一。本书是在原《化工过程控制工程》和《工业过程控制工程》教材基础上进行重新编写的。

全书共分14章,每章末都附有练习题。本书从内容上全书可分成三大部分:第一部分是过程控制工程的基础知识,包括第1~8章,内容有过程控制概论,过程机理和经验建模,反馈控制,前馈控制和比值控制,串级、均匀、非线性增益补偿、选择性和分程控制,多回路控制系统分析与设计和计算机控制系统;第二部分是先进控制技术,包括第9、10、14章,内容有基于模型的控制方法,过程监督控制和计算机综合集成控制;第三部分是过程控制工程应用示例,包括第11、12、13章,内容有间歇过程控制、传热设备的控制以及精馏塔的控制。

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,也可供在煤油、石油化工、化工、冶金、电力、轻工等领域从事工业过程自动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/王树青,戴连奎,于玲编著. —2版.
北京:化学工业出版社,2008.2
普通高等教育“十一五”国家级规划教材
ISBN 978-7-122-01873-1

I. 过… II. ①王…②戴…③于… III. 过程控制-高等学校-教材 IV. TP273

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第015255号

责任编辑:唐旭华
责任校对:周梦华

文字编辑:郝英华
装帧设计:关 飞

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:化学工业出版社印刷厂

787mm×1092mm 1/16 印张18 字数468千字 2008年3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:29.00元

版权所有 违者必究

第二版前言

过程工业包括化工、石油化工、炼油、钢铁、有色冶金、电力、轻工、医药、生物化工、精细化工、食品、纺织以及半导体生产等工业部门,占国民经济生产总值的一半左右。随着资源与能源的紧缺,人类生存环境条件的恶化,对过程工业的自动控制要求越来越高,因此,过程控制工程已成为工程技术和管理人员必备的科学技术知识。

本教材是在传承王骥程教授主编的《化工过程控制工程》(第二版)和王树青教授等人编著的《工业过程控制工程》基础上,结合作者多年的教学和科研工作的实践经验以及对过程工业自动控制问题的理解重新编写而成的。其中,第1、7、9、12、13章由戴连奎编写;第2、3、4、5、6、8章由于玲编写;第10、11、14章由王树青编写;全书由王树青统稿。

在书中,着重介绍和讨论如何应用过程控制理论解决过程工业的各种实际控制问题。例如,如何设计一个控制系统,如何设计控制器,如何整定控制器的参数,如何建立过程控制模型等过程控制工程的各种方法和技术的基本知识。同时,也将介绍过程工业的典型应用实例,如传热过程控制、精馏过程控制等。随着计算控制技术和现代控制理论的发展,在书中介绍基于模型的先进控制方法与应用,基于测量数据的过程监督控制和计算机综合集成控制技术。由于在流程工业中间歇生产过程方式的广泛应用以及根据这种生产方式的特点,特别将间歇过程控制单列成一章。

全书共分14章,第1章是介绍过程控制工程的一些基本概念和知识;第2章和第3章介绍过程建模的机理方法和基于数据的经验建模方法;第4章介绍单回路反馈控制方法;第5章是前馈控制和比值控制;第6章是介绍过程工业中典型的一些控制方法,如串级控制、非线性增益补偿控制、均匀控制、选择性控制以及分程控制和阀位控制;第7章讨论多回路控制系统的分析与设计,即原来的解耦控制问题;第8章是以DCS为主的计算机控制系统;第9章讨论基于模型的先进控制算法,其中包括史密斯预估控制、内模控制、模型预测控制以及应用示例;第10章是介绍过程监督控制基本方法,即随机统计过程控制;第11章介绍间歇生产过程的控制问题;第12章和第13章分别介绍过程工业中传热设备和精馏过程的控制问题;最后一章,第14章是介绍计算机综合集成控制与最优化控制技术及其应用。

为方便教学,本书配套的电子教案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 txh@cip.com.cn。

在该书的编写过程中,得到各兄弟学校老师,特别是教授过程控制课程老师和企业界过程控制工程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的教授及其他老师。同时,也要感谢来国妹女士为本书的部分书稿录入以及编排所付出的辛勤劳动。在此,我们要感谢所有帮助此书编写和出版的朋友!

编 者
2008年1月
于浙大求是园

第一版前言

应用计算机技术和控制理论,改造和拉动传统产业已成为工业生产过程的紧迫任务。同时,自动化已是现代工业必不可少的生产技术。本书是在浙江大学王骥程教授等主编的《化工过程控制工程》(第二版)一书的基础上,综合多所大学最近十多年在过程控制工程这一门课程的教学与相关科学研究的成果编写而成。本书可作为本科自动化及相关专业高年级学生或硕士生的教材。

本书共分3篇24章。第1篇是工业过程控制工程基础篇,它汇集了近50年来工业过程控制最基础的而且又实用的内容。第2篇是先进控制技术篇,它是现代可用于工业生产过程控制的高级控制算法与策略。第3篇是工业生产过程控制应用篇,它是第1篇和第2篇内容分别在工业生产过程典型装置、过程和领域中的应用示例。参加本书编写的有浙江大学王树青、戴连奎、祝和云,西北工业大学王新民,石油大学田学民和大连理工大学宋彤。他们参加编写的内容分别为:王树青编写第1,10,16,24章;戴连奎编写第13,14,17,18,19,20章及串级和预测控制应用示例;祝和云编写第4,5,6,8,11,23章;王新民编写第7,9章;田学民编写第2,3,12,22章;宋彤编写第15,21章;全书由王树青统稿。

本书在内容选取上力求保留原有过程控制工程中的精华部分,尽力增加现代控制理论中行之有效的内容。在写作上,做到概念清楚,深入浅出,并尽量用例子来说明,每章后面都有思考题与习题。由于本书涉及内容广泛,既有控制理论内容,又有工程实践算法和技术,同时,还有大量的不同性质的工业实际被控过程知识,因此,在选用本书作为教材时,可以根据不同需求进行组合。

本书在编写过程中,一直得到王骥程教授的指导和关心,北京化工大学厉玉鸣教授对书中内容提出了许多宝贵意见,浙江大学控制系部分研究生参与了仿真实验以及画图工作,特别是来国妹女士对全书的录入、编排、画图等做了大量工作,在此向他们表示衷心的感谢。

本书内容已制作成用于多媒体教学的Power point课件,并将免费提供给采用本书作为教材的大专院校使用。如有需要可与编者联系,联系方法为:gmlai@ipc.zju.edu.cn。

由于编者水平有限,书中不足之处,恳请读者批评指正。

编 者

2002年8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	3
1.2 控制仪表与控制装置	4
1.2.1 单元组合控制仪表	4
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	10
1.4 反馈控制系统的分类	11
思考题与习题 1	13
2 基于过程动力学的机理建模	14
2.1 过程建模的目的和方法	14
2.2 机理建模	15
2.2.1 机理法建模的步骤	15
2.2.2 常用的方程	15
2.3 典型过程的动态建模	20
2.3.1 液体储罐的动态模型	21
2.3.2 串联液体储罐的动态模型	22
2.3.3 气体压力储罐的动态模型	23
2.3.4 夹套式换热器的动态模型	24
2.3.5 管式换热器的动态模型	25
2.3.6 化学反应器的动态模型	26
思考题与习题 2	28
3 基于实验数据的经验建模	30
3.1 阶跃响应建模	30
3.1.1 阶跃响应的获取	30
3.1.2 由阶跃响应确定近似传递函数	31
3.1.3 脉冲响应方法	34
3.2 回归建模方法	35
3.2.1 线性回归建模	35
3.2.2 离散时间模型及其辨识	37
3.2.3 神经网络建模	39
思考题与习题 3	42
4 反馈控制	44
4.1 控制系统的性能指标	44
4.1.1 以阶跃响应曲线的特征参数作为性能指标	44
4.1.2 偏差积分性能指标	45
4.2 三种常规的反馈控制模式	46
4.2.1 比例控制作用	47
4.2.2 比例积分控制作用	48
4.2.3 比例积分微分控制作用	50
4.3 PID 控制器的选取与整定	51
4.3.1 控制器的选型	51
4.3.2 控制器参数整定	52
4.3.3 PID 参数自整定	55
4.4 反馈控制系统的投运	58
思考题与习题 4	59
5 前馈控制和比值控制	60
5.1 前馈控制系统	60
5.1.1 前馈控制的基本原理	60
5.1.2 前馈控制系统的特点	62
5.2 前馈控制系统的几种结构形式	62
5.2.1 静态前馈	62
5.2.2 动态前馈	63
5.2.3 前馈反馈控制系统	64
5.2.4 多变量前馈控制	65
5.2.5 用计算机实施前馈控制	67
5.3 比值控制系统	68
5.3.1 定比值控制系统	69
5.3.2 变比值控制系统	71
5.3.3 比值控制系统的实施	72
5.3.4 比值控制系统的设计、投运及整定	74
5.3.5 比值控制系统中的若干问题	75
思考题与习题 5	76
6 其他典型控制系统	78
6.1 串级控制系统	78
6.1.1 串级控制的概念及方框图描述	78
6.1.2 串级控制系统分析	79
6.1.3 串级控制系统设计	80
6.1.4 串级控制系统举例	83
6.2 非线性增益补偿控制	88
6.2.1 非线性过程的特点	88
6.2.2 非线性补偿方法	90
6.2.3 pH 中和过程控制	94
6.3 均匀控制	100
6.3.1 均匀控制的由来	100

6.3.2 均匀控制的实现	101	9.3.2 SISO 无约束动态矩阵控制	163
6.3.3 均匀控制参数工程整定	102	9.3.3 MIMO 受约束动态矩阵控制	166
6.4 选择性控制系统	103	9.4 先进控制应用示例: 原油蒸馏塔的 多变量预测控制	167
6.4.1 用于设备软保护的选择性控制	103	9.4.1 工艺概况	167
6.4.2 其他选择性控制系统	105	9.4.2 常压塔的多变量约束控制问题	169
6.5 分程控制系统和阀位控制系统	106	9.4.3 常压塔先进控制系统的运行结果 ...	170
6.5.1 分程控制系统	106	思考题与习题 9	171
6.5.2 阀位控制系统	110	10 过程监督控制	172
思考题与习题 6	111	10.1 监督控制概述	172
7 多回路控制系统分析与设计	114	10.2 过程监视与控制	172
7.1 相对增益	114	10.2.1 过程变量限值检查法	173
7.1.1 相对增益的概念	114	10.2.2 过程监控一般方法	173
7.1.2 相对增益矩阵的计算	116	10.2.3 质量控制图法	175
7.2 耦合系统的变量配对与控制参数整定 ...	117	10.3 统计过程控制技术	179
7.2.1 耦合系统的变量配对	118	10.3.1 过程能力指数	179
7.2.2 耦合多回路系统的控制器参数 整定	120	10.3.2 6-Sigma 方法	180
7.3 多回路系统的解耦设计	124	10.3.3 多元统计控制技术	181
7.3.1 基于方框图的线性解耦器	124	10.3.4 过程控制和统计过程控制的 关系	182
7.3.2 基于过程机理的非线性解耦器	130	思考题与习题 10	183
思考题与习题 7	131	11 间歇过程控制	184
8 计算机控制系统	133	11.1 间歇生产过程及控制	184
8.1 计算机控制系统概述	133	11.1.1 间歇生产过程特点	184
8.2 信号采集与处理	135	11.1.2 间歇生产过程控制系统	185
8.2.1 信号采集与变换	135	11.2 顺序逻辑控制	186
8.2.2 信号处理与数据滤波	137	11.3 间歇生产过程中的控制	188
8.3 数字 PID 控制算法	140	11.3.1 间歇生产过程的特殊控制方法	189
8.3.1 数字 PID 控制算式	140	11.3.2 间歇反应器的控制	191
8.3.2 数字 PID 改进算式	141	11.4 批次对批次 (Run-to-Run) 控制	193
8.3.3 数字 PID 控制的实现	143	11.4.1 概述	193
8.3.4 数字 PID 控制器参数整定	145	11.4.2 指数加权移动平均控制算法	194
8.4 数字控制系统举例	146	11.4.3 应用示例	196
8.4.1 DCS(Distributed Control System) 概念	146	11.5 间歇生产过程管理	197
8.4.2 JX-300X 系统结构	147	11.5.1 处方 (Recipe) 和配方的管理	197
8.4.3 JX-300X 系统软件	150	11.5.2 间歇生产过程计划与调度	198
思考题与习题 8	153	思考题与习题 11	199
9 基于模型的控制方法	154	12 传热设备的控制	201
9.1 史密斯预估控制	154	12.1 概述	201
9.1.1 史密斯补偿原理	154	12.1.1 热量传递的三种方式	201
9.1.2 史密斯预估器的几种改进方案	157	12.1.2 换热设备的结构类型	203
9.2 内模控制	157	12.1.3 换热设备的静态特性	203
9.2.1 基本内模控制系统的结构与性质 ...	158	12.1.4 换热设备的动态特性	205
9.2.2 改进型内模控制系统	159	12.2 换热设备的控制	207
9.3 模型预测控制	161	12.2.1 换热器的控制	207
9.3.1 模型预测控制的主要特征	162	12.2.2 蒸汽加热器的控制	208

12.2.3 冷凝冷却器的控制	209	13.5.1 内回流控制	253
12.3 加热炉的控制	210	13.5.2 产品质量的软测量与推断控制	254
12.3.1 加热炉的单回路控制方案	210	13.5.3 精馏塔的节能控制	255
12.3.2 加热炉的串级控制方案	211	思考题与习题 13	257
12.4 锅炉设备的控制	214	14 计算机综合集成控制	259
12.4.1 汽包水位的控制	216	14.1 计算机综合集成控制概述	259
12.4.2 燃烧系统的控制	219	14.1.1 流程工业生产过程运作特点	259
12.4.3 蒸汽过热系统的控制	222	14.1.2 计算机综合集成控制	260
思考题与习题 12	222	14.2 信息源与信息集成系统	261
13 精馏塔的控制	224	14.2.1 企业信息和数据来源	261
13.1 精馏塔的控制目标	224	14.2.2 信息分类与编码	261
13.1.1 质量指标	224	14.2.3 企业信息系统综合集成技术	263
13.1.2 产品产量和能量消耗	225	14.3 数据校正技术	264
13.2 精馏塔的静态特性和动态特性	226	14.3.1 概述	264
13.2.1 精馏塔的静态特性	226	14.3.2 数据校正原理	264
13.2.2 精馏塔的动态模型	228	14.3.3 过失误差检测原理	264
13.3 精馏塔质量指标的选取	233	14.4 数据驱动下的企业运行	265
13.3.1 灵敏板的温度控制	233	14.4.1 生产过程的安全、稳定运行	265
13.3.2 温差控制	233	14.4.2 生产过程的优化管理及运行	266
13.3.3 双温差控制	234	14.5 优化技术及应用	267
13.4 精馏塔的常用控制方案	235	14.5.1 最优化概念	267
13.4.1 物料平衡控制	237	14.5.2 实时优化经济模型	269
13.4.2 精馏段质量指标控制	241	14.5.3 实时优化控制技术	270
13.4.3 提馏段质量指标控制	246	14.5.4 最优化算法及控制	273
13.4.4 两端质量指标控制	249	思考题与习题 14	276
13.5 精馏塔的先进控制方案	253	参考文献	278

1 过程控制概论

现代工业生产过程，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、优化、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，最后说明过程控制系统的分类。

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 1.1-1 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希望波动的原因，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 1.1-1 所示的液位控制问题为例，可采用液位测量变送器 LT 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 $4\sim 20\text{mA}$ 直流信号。同时，采用液位控制器 LC 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 $4\sim 20\text{mA}$ 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，带控制回路的工艺流程如图 1.1-2 所示。

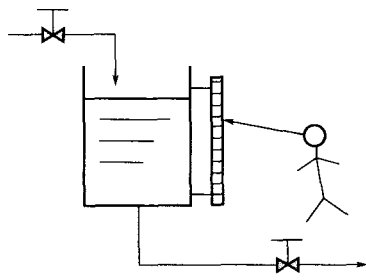


图 1.1-1 液位人工控制

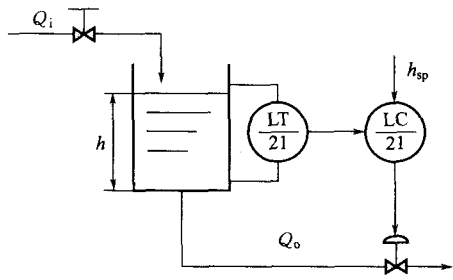


图 1.1-2 液位自动控制回路

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 1.1-2 中，“LT 21”表示 21 回路的液位变送， “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 1.1-3 所示，它由蒸汽加热器、温度变送器 TT、温度控制器 TC 和蒸汽流量控制阀组成，控制的目标是保持流体出口温度恒定。当进料流量或温度等因素的变化引起出口物料的温度变化时，通过温度变送器 TT 测得温度的变化，并将其信号送至温度控制器 TC 与给定值进行比较，温度控制器 TC 根据其偏差信号进行运算后将控制命令送至控制阀，以改变蒸汽量来维持出口温度。

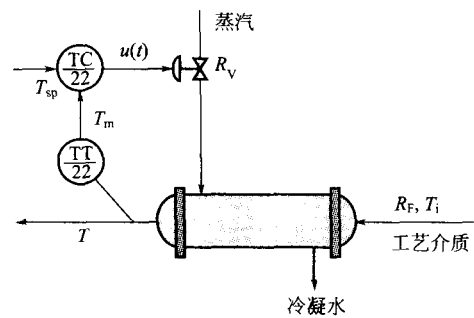


图 1.1-3 蒸汽加热器温度控制系统

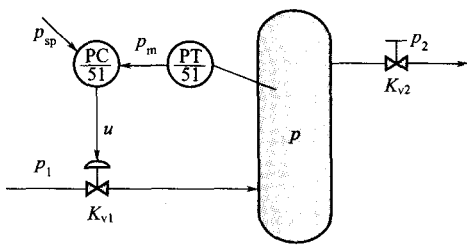


图 1.1-4 储罐压力自动控制系统

例 1-3 某一压力控制系统如图 1.1-4 所示，它由气体储罐、压力变送器 PT 51、压力控制器 PC 51 和进气控制阀组成。控制的目标是保持储罐内压力恒定。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，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（也称被控过程）是指被控制的生产设备或装置。针对以上三例，分别是液罐、蒸汽加热器、气罐系统。

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：0~10mA DC 信号（DDZ II 型仪表）、4~20mA DC 信号（DDZ III 型仪表）、0.02~0.10MPa 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 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 4~20mA 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。如图 1.1-5 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可用如图 1.1-6 所示的方框图来表示。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，就可清楚地获得系统的全貌。

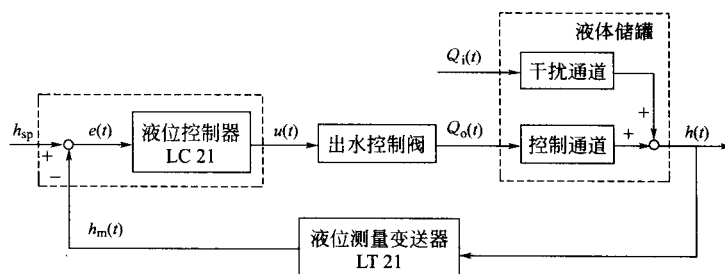


图 1.1-5 液位控制系统的方框图

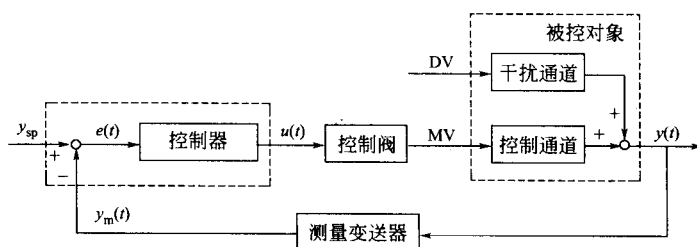


图 1.1-6 单回路控制系统的方框图

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）。通常是由执行器控制的某一工艺流量。操作变量对被控变量的影响要求直接、灵敏、快速。以图 1.1-3 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，由于蒸汽冷凝所发出的大量潜热，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 1.1-3 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 1.1-4 所示的储罐压力控制系统，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 1.1-6 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 1.2-1 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 1.2-1 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等八类。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 1.1-3 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 1.2-1 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。

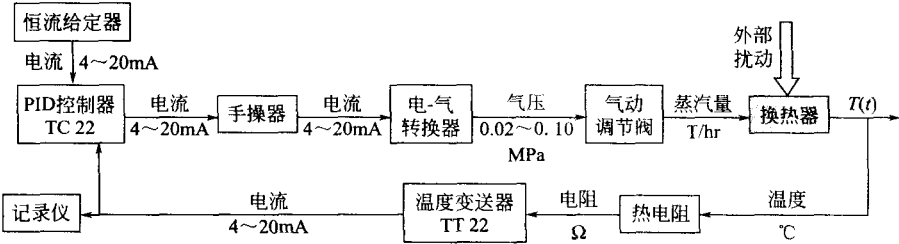


图 1.2-1 蒸汽加热器温度控制系统的仪表实现与信号连接

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 1.2-2 所示。与图 1.1-6 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

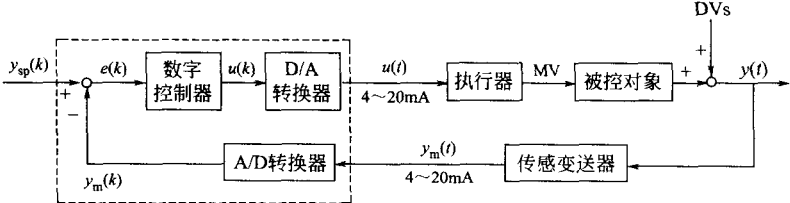


图 1.2-2 计算机控制系统的原理框图与信号连接

等接口装置，从而构成一个闭合控制回路。

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如下三个步骤。

- 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 1.2-2 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 1.2-3 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。

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

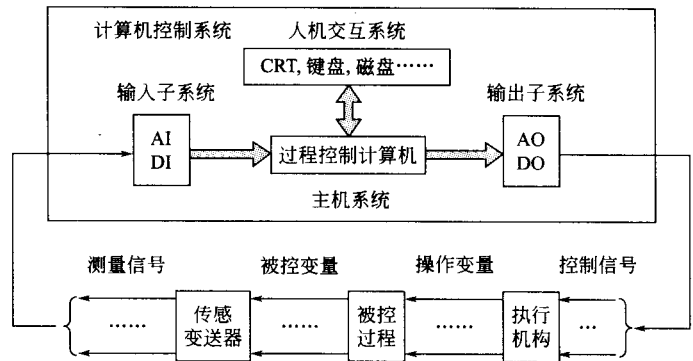


图 1.2-3 集中型计算机控制系统的原理图

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技术也大大改善了操作条件。此后，随着网络技术的日臻完善和现场控制器功能的不断提高以及成本的不断下降，DCS 获得了极大的成功，目前已成为主流的自动化控制装置。

典型的 DCS 系统结构如图 1.2-4 所示，它以 LAN 为基本的数据传输平台，主要单元设备包括：现场控制站、操作员站、工程师站等。现场控制站一方面完成前述的 DDC 控制功能，每个控制站相对独立运行，并只负责若干个控制回路；而各个控制站对外均具有强大的数据通信功能。操作员站为操作者提供了友好的操作界面，便于操作员完成对生产过程的监控与操作条件的调整。工程师站为仪表工程师提供了友好的组态界面，主要用于完成控制回路的设计、组态与控制方案的调整等。

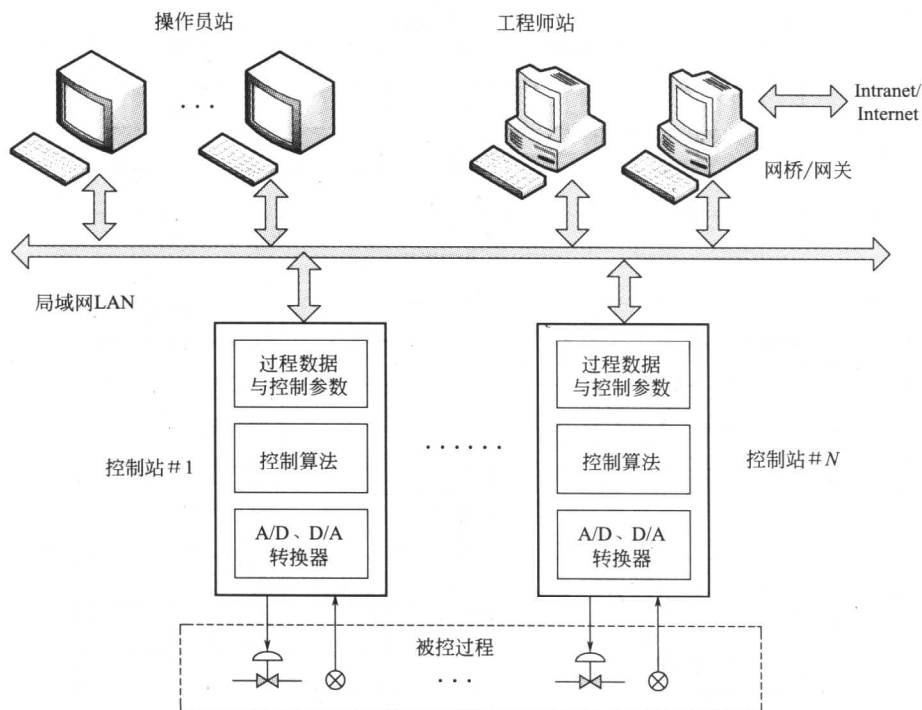


图 1.2-4 集散控制系统的典型结构

1.3 过程控制策略

尽管为实现自动控制，可采用的控制仪表或控制装置种类繁多，然而，从控制策略的角度来看，不外乎反馈控制与前馈控制两大类。下面以蒸汽加热器温度控制问题为例，来具体讨论这两种控制策略。

1.3.1 反馈控制

如图 1.1-3 所示的蒸汽加热器温度控制方案称为“反馈控制方案”。假设扰动引入前，控制系统处于稳态，且被控变量与其给定值无偏差。此时，若工艺介质入口温度 T_i 下降，经过一定延迟后，被控变量工艺介质出口温度 T 也开始下降。一旦出口温度下降，连接至温度控制器的测量信号也发生相应变化。此时，控制器感受到出口温度与其设定值的偏差，并认识到需要通过调整蒸汽阀的开度来补偿扰动的影响。控制器于是发出控制命令去增大蒸汽阀的开度，蒸汽量也随之增大。上述调节过程可用图 1.3-1 所示的动态曲线来描述。

由图 1.3-1 可以发现，开始因入口温度的下降导致出口温度随之下降，但出口温度随后上升，甚至超过其设定值，之后发生振荡直至最终达到稳定。这种振荡响应在反馈控制中相当普遍，可以说，反馈控制基本上是一个试差（trial and error）过程。具体地说，当控制器感受到出口温度低于设定值时，发出控制命令使蒸汽阀开大，但很可能开度过大，造成蒸汽量增加过多，结果可能使出口温度上升至设定值以上；控制器一旦发现这种情况，就会略微关小蒸汽阀开度，以降低出口温度。这种试差过程将不断进行直至出口温度达到并稳定在设定值。

基于上述反馈机制，可以看出：反馈控制的突出优势在于它能补偿任意扰动，而且技术简单明了。对于任意影响被控变量的扰动，一旦引起被控变量偏离其设定值，控制器就会改