

普通高等教育“十三五”规划教材

Chemical Instrumentation
and Automation

化工仪表及 自动化

(化工、食品、制药、环境、轻工、生物等工艺类专业适用)

第②版

李学聪 林德杰 © 主编



 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

非外借

普通高等教育“十三五”规划教材

化工仪表及自动化

(化工、食品、制药、环境、轻工、生物等工艺类专业适用)

第 2 版

主 编 李学聪 林德杰
副主编 宋亚男
参 编 曾珞亚 朱燕飞 唐雄民

机械工业出版社

本书基于生产实际和工程应用,介绍了化学工业生产过程中自动控制系统方面的基本知识,重点介绍了被控对象的建模、检测变送仪表、显示仪表、自动控制仪表、各种过程控制系统的设计、参数整定及常用过程自动控制系统分析。在简单、复杂控制系统的基础上,还介绍了新型控制系统与计算机控制系统,结合生产过程介绍了典型化工单元操作的控制方案。对电子化、微型化、数字化和智能化等先进的过程自动控制仪表的工作原理及其外特性以及计算机集散控制系统和现场总线自动控制系统进行了深入、系统和详细的分析和论述。全书内容丰富,取材新颖,结构严谨,系统性强,充分体现了理论联系实际,重在培养能力的原则。

本书可作为高等学校化工、食品、制药、环境、轻工、生物等工艺类专业的本科生教材以及相近专业的本科生教材,亦可作为相关专业的研究生和工程技术人员的参考用书。

本书配有免费电子课件,欢迎选用本书作教材的教师登录 www.cmpedu.com 注册下载。

图书在版编目(CIP)数据

化工仪表及自动化/李学聪,林德杰主编.—2版.—北京:机械工业出版社,2016.8

普通高等教育“十三五”规划教材.化工、食品、制药、环境、轻工、生物等工艺类专业适用

ISBN 978-7-111-54210-0

I. ①化… II. ①李…②林 III. ①化工仪表-高等学校-教材②化工过程-自动控制系统-高等学校-教材 IV. ①TQ056

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第154818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:贡克勤

责任编辑:贡克勤

责任校对:刘志文 佟瑞鑫 封面设计:张静

责任印制:孙炜

北京玥实印刷有限公司印刷

2017年9月第2版第1次印刷

184mm×260mm·12.75印张·304千字

标准书号:ISBN 978-7-111-54210-0

定价:32.00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

服务咨询热线:010-88379833

机工官网:www.cmpbook.com

读者购书热线:010-88379649

机工官博:weibo.com/cmp1952

教育服务网:www.cmpedu.com

封面无防伪标均为盗版

金书网:www.golden-book.com

第2版前言

本书是普通高等教育“十三五”规划教材。

本书是在基本保持第1版体系结构的基础上,对其内容进行增减、适当修改而成的,取消原书中第4章,只将其中数字式显示仪表和虚拟显示仪表两节内容放到本书中的第3章,而对模拟显示仪表只做简单介绍。根据自动控制系统组成的各个环节,将原第5章的执行器部分独立成为一章,强调了执行器这一环节,而且删改了一部分内容,提高教材的易读性,便于读者理解掌握相关内容。

随着现代工业生产的迅速发展,生产过程规模不断扩大,化工自动化已成为一项庞大的系统工程,生产过程控制系统的结构日益复杂。微电子技术、数据通信技术、网络技术和计算机多媒体技术在化工自动化中已得到日益广泛的应用,仪表自动化已向电子化、微型化、数字化和智能化的方向发展;化工控制系统从传统的仪表控制系统向计算机集散控制系统和现场总线控制系统迅速发展已成为不争的事实。本书以“理论联系实际、重在能力培养和与时俱进”为原则,紧密联系国内生产实际和国内外先进的技术水平,以目前国内仍在广泛应用仪表控制系统为主线展开深入的讨论,并详细介绍了代表当今仪表自动化发展方向的电子化、微型化、数字化和智能化过程控制仪表以及计算机集散控制系统和现场总线控制系统,以便使培养的学生适应目前自动化技术发展的需要。

本书将自动控制仪表和控制系统有机地结合起来,结合现代工业生产过程的特点,介绍过程控制系统的设计方法和典型过程控制系统的分析,做到系统性与典型性相统一,技术先进性与工程实用性相融合。本书内容丰富,取材新颖,结构严谨,系统性强。在内容叙述上,注重由浅入深,简明扼要,通俗易懂,以工程应用实例引导读者正确运用基础理论和新技术解决工程实际问题,充分体现了理论联系实际和重在能力培养的原则。

本书可作为高等学校化工、食品、制药、环境、轻工、生物等工艺类专业的本科生教材以及相近专业的本科生教材,亦可作为相关专业的研究生和工程技术人员的参考用书。

本书由李学聪、林德杰任主编,宋亚男任副主编。第1、2章由林德杰编写;第3、4章由李学聪编写;第5章由曾珞亚编写;第6章由唐雄民编写;第7章由宋亚男编写;第8章由朱燕飞编写。广东工业大学自动化学院领导对本书的编写给予了大力支持。在此,对各位专家、教授和领导表示衷心感谢。本书的编写参考了大量文献和资料,在此对有关单位和作者一并致谢。

由于编者水平有限,书中缺点和错误在所难免,敬请广大师生和读者批评指正。

编者

第1版前言

“化工仪表及自动化”是高等工科院校化工工艺和相近专业的一门必修课。本书以被控对象的特性、检测变送仪表、自动控制仪表、过程控制系统的设计和分析为主线展开论述，系统地阐述了各种化工自动控制系统的基本原理、结构、特点及应用。

随着现代工业生产的迅速发展，生产过程规模不断扩大，化工自动化已成为一项庞大的系统工程，生产过程控制系统的结构日益复杂。微电子技术、数据通信技术、网络技术和计算机多媒体技术在化工自动化中已得到日益广泛的应用，仪表自动化已向电子化、微型化、数字化和智能化的方向发展。化工控制系统从传统的仪表控制系统向计算机集散控制系统和现场总线控制系统迅速发展已成为不争的事实。本书以“理论联系实际，重在能力培养，与时俱进”为原则，详细介绍了代表当今仪表自动化发展方向的电子化、微型化、数字化和智能化过程控制仪表以及计算机集散控制系统和现场总线控制系统，以适应目前自动化技术发展的需要。

本书将自动控制仪表和控制系统有机地结合起来，结合现代工业生产过程的特点，介绍过程控制系统的设计方法和典型过程控制系统的分析，做到系统性与典型性相统一，技术先进性与工程实用性相融合。本书内容丰富，取材新颖，结构严谨，系统性强。在内容叙述上，注重由浅入深，简明扼要，通俗易懂，以工程应用实例引导读者正确运用基础理论和新技术解决工程实际问题，充分体现了理论联系实际和重在能力培养的原则。

本书可作为高等学校化工、食品、制药、环境、轻工、生物等工艺类专业的本科生教材以及相近专业的本科生教材，亦可作为相关专业的研究生和工程技术人员的参考用书。

本书由广东工业大学林德杰任主编，并编写第1、2、4章；广东工业大学李学聪编写第3章，并任副主编；广东工业大学宋亚男编写第7章，并任副主编；广东工业大学曾珞亚编写第5章；广东工业大学朱燕飞编写第8章；广东工业大学唐雄民编写第6章。广东工业大学自动化学院领导对本书的编写给予了大力支持。在此，对各位专家、教授和领导表示衷心感谢。本书的编写参考了大量文献和资料，在此对有关单位和作者一并致谢。

由于编者水平有限，书中缺点和错误在所难免，敬请广大师生和读者批评指正。

编者

目 录

第2版前言

第1版前言

第1章 概述

1.1 自动控制系统的组成	1
1.2 自动控制系统的分类	2
1.2.1 按系统的结构特点分类	3
1.2.2 按给定信号的特点分类	3
1.3 自动控制系统的品质指标	3
1.3.1 静态与动态	3
1.3.2 系统的品质指标	4
1.4 工艺管道及控制流程图	6
1.4.1 仪表功能标志	7
1.4.2 仪表位号	7
1.4.3 仪表的图形符号及安装位置	7
1.4.4 测量点与连接线的图形符号	7
1.4.5 常见执行机构及控制阀体的图形符号	8
1.4.6 常规仪表控制系统图形符号示例	8
1.5 化工自动化的发展概况	8
1.5.1 仪表化与局部自动化阶段	8
1.5.2 综合自动化阶段	9
1.5.3 全盘自动化阶段	9
习题与思考题	9

第2章 对象特性及其建模

2.1 对象的数学模型	11
2.2 模型形式及参数特性	12
2.2.1 线性系统输入输出模型的表现	12
2.2.2 模型特性参数对被控变量的影响	14
2.3 模型建立的方法	17
2.3.1 机理建模方法	17
2.3.2 实验建模方法	20
2.3.3 混合建模方法	23
习题与思考题	23

第3章 检测变送仪表

3.1 检测变送仪表的基本性能与分类	25
3.1.1 检测的基本概念	25
3.1.2 检测仪表的基本性能	26
3.1.3 检测仪表的分类	29
3.1.4 变送器的使用	30
3.2 压力检测仪表	31
3.2.1 压力的基本概念	32
3.2.2 压力检测仪表的分类	32
3.2.3 差压(压力)变送器	35
3.2.4 差动电容差压(压力)变送器	37
3.2.5 微型化压力变送器	38
3.2.6 压力检测仪表的选用和安装	41
3.3 温度检测仪表	43
3.3.1 温度测量的方法	43
3.3.2 热电偶温度检测仪表	44
3.3.3 热电阻温度检测仪表	50
3.3.4 DDZ-Ⅲ型温度变送器	52
3.3.5 微型化温度变送器	53
3.4 流量检测仪表	54
3.4.1 流量的基本概念	54
3.4.2 差压式流量计	55
3.4.3 靶式流量计	59
3.4.4 转子流量计	59
3.4.5 容积式流量计	61
3.4.6 涡轮流量计	62
3.4.7 涡街流量计	63
3.4.8 电磁流量计	64
3.5 物位检测仪表	65
3.5.1 浮力式液位变送器	65
3.5.2 差压式液位计	66
3.5.3 电容式物位计	68
3.5.4 超声波物位计	70
3.5.5 光电式物位计	72
3.6 成分分析仪表	72
3.6.1 pH计	74

3.6.2 红外气体分析仪	75	5.5.2 调节阀流量特性的选择	116
3.6.3 气相色谱分析仪	76	5.5.3 调节阀口径的选择	117
3.6.4 氧量分析仪	77	习题与思考题	118
3.7 显示仪表	80	第6章 简单控制系统	119
3.7.1 模拟式显示仪表	80	6.1 简单控制系统的基本结构	119
3.7.2 数字式显示仪表	81	6.2 简单控制系统设计的主要内容	120
3.7.3 显示仪表的发展趋势	81	6.3 简单控制系统的方案设计	120
3.7.4 全数字式显示仪表	82	6.3.1 被控变量的选择	120
3.7.5 数字模拟混合显示仪表	83	6.3.2 操纵变量的选择	121
3.7.6 虚拟显示仪表	84	6.3.3 放大系数、时间常数和滞后 时间对控制质量的影响	122
习题与思考题	85	6.4 元件特性对控制系统的影响	124
第4章 自动控制仪表	87	6.4.1 测量元件时间常数对控制系统 的影响	124
4.1 控制器的发展与分类	87	6.4.2 测量元件输出信号传递滞后对 控制系统的影响	125
4.1.1 控制器的发展过程	87	6.4.3 执行元件对控制系统的影响	126
4.1.2 控制器的分类	88	6.5 控制器的设计	126
4.2 控制器基本控制规律	88	6.5.1 控制器控制规律的选择	126
4.2.1 双位控制	89	6.5.2 控制器正、反作用的确定	127
4.2.2 比例控制(P)	90	6.6 控制器参数的工程整定	128
4.2.3 比例积分控制(PI)	93	6.6.1 临界比例度法	128
4.2.4 比例微分控制(PD)	95	6.6.2 衰减曲线法	130
4.2.5 比例积分微分控制(PID)	96	6.6.3 经验法	131
4.2.6 PID控制规律总结	96	6.7 单回路控制系统的投运	131
4.3 模拟式控制器	97	6.8 简单控制系统的分析与设计	132
4.4 数字式控制器	98	6.8.1 蒸汽加热、物料温度控制系统 的分析与设计	132
4.4.1 数字式控制器的组成	98	6.8.2 喷雾式干燥设备控制系统的分 析与设计	133
4.4.2 可编程序控制器	100	6.8.3 精馏塔控制系统的分析与 设计	134
4.4.3 专家自整定控制器	104	习题与思考题	138
习题与思考题	104	第7章 复杂控制系统	139
第5章 执行器	105	7.1 提高控制品质的控制系统	139
5.1 概述	105	7.1.1 串级控制系统	139
5.1.1 执行器的分类及特点	105	7.1.2 前馈控制系统	147
5.1.2 执行器的组合方式	105	7.1.3 大延时控制系统	153
5.1.3 执行器的基本结构	106	7.2 特定要求过程控制系统	155
5.2 调节机构	106	7.2.1 比值控制系统	155
5.2.1 调节阀的分类	107	7.2.2 均匀控制系统	156
5.2.2 调节阀的流量特性	108	7.2.3 分程控制系统	158
5.3 执行机构	112	7.2.4 选择性控制系统	161
5.3.1 电动执行机构	112		
5.3.2 气动执行机构	113		
5.4 电—气转换器和电—气阀门 定位器	114		
5.5 执行器的选择	115		
5.5.1 执行器结构形式的选择	115		

习题与思考题	162	8.5.2 集散控制系统在火力发电厂中 的应用实例	173
第8章 计算机控制系统	164	8.5.3 现场总线控制系统的应用 实例	176
8.1 计算机控制系统的组成与特点	164	习题与思考题	179
8.1.1 计算机控制系统的组成	164	附录	180
8.1.2 计算机控制系统的特点及 用途	164	附录 A 铂铑 10-铂热电偶分度表	180
8.2 直接数字控制系统	165	附录 B 镍铬-铜镍热电偶分度表	184
8.3 集散控制系统	166	附录 C 镍铬-镍硅热电偶分度表	185
8.4 现场总线控制系统	168	附录 D Pt100 热电阻分度表	188
8.4.1 现场总线的组成	168	附录 E Cu50 热电阻分度表	191
8.4.2 现场总线控制系统的结构	168	附录 F Cu100 热电阻分度表	191
8.4.3 现场总线控制系统的特点	169	参考文献	193
8.5 控制系统实例分析	170		
8.5.1 工业水处理 pH 值的智能 控制	170		

1.1 自动控制系统的组成

如果一个系统由人来操作机器,例如开汽车,则称为人工控制。如果一个系统在无人参与的情况下,利用控制装置使生产设备或生产过程自动地按预先设定规律运行,例如采用温度控制室内温度,则称为自动控制。

基于偏差的反馈控制方式,是自动控制系统中最常见的。为了便于理解,下面以人工液位控制(见图 1-1a)和自动液位控制(见图 1-1b)为例,对比介绍一个简单反馈控制系统的组成。



图 1-1 人工液位控制和自动液位控制

1—浮球阀 2—操作人员 3—液位控制器 4—液位

1.1.1 人工液位控制

如图 1-1a 所示,操作人员用眼睛监视液位 4 的情况,反映系大脑作判断,若液位 4 高于给定值 5,则人手关小阀门开度 2,减小,使 4 回到给定值 5;反之,若 4 低于给定值 5,则人手开大阀门开度 2,使 4 增大,保证 4 回到给定值 5 附近。可见,利用人工控

第 1 章 概 述

化学工业是重要的能源和基础原材料工业，也是国民经济的重要支柱产业，与国民经济各领域和人民生活密切相关。此外，化学工业还肩负着为国防工业提供高技术材料和常规战略物资的重任。化工自动化是化工、炼油、食品、轻工、环境、生物等生产过程自动化的简称。化工自动化是指在化工设备上配置一些自动化装置，代替或部分代替操作人员的直接劳动，使得生产在不同程度上自动地进行。化工生产过程自动化的程度直接影响到化工产品成本、数量和质量，同时也为减轻劳动强度、改善劳动条件、保证生产安全以及改变劳动方式提供基础。因此，实现化工自动化及提高其自动化程度具有重要意义。

1.1 自动控制系统的组成

如果一个系统由人来操作机器，例如开汽车，则称为人工控制。如果一个系统在没人参与的情况下，利用控制装置使生产设备或生产过程自动地按预先设定规律运行，例如采用恒温器控制室内温度，则称为自动控制。

基于偏差的反馈控制方式，是自动控制系统中最常见的。为了便于理解，下面以人工液位控制（见图 1-1a）和自动液位控制（见图 1-1b）为例，对比介绍一个简单反馈控制系统的组成。

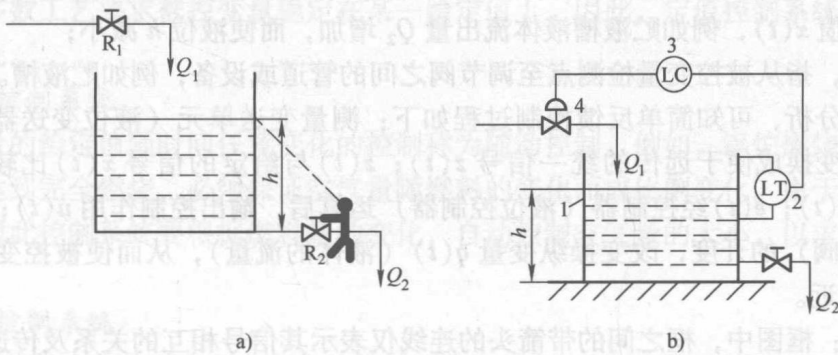


图 1-1 人工液位控制和自动液位控制

a) 人工液位控制 b) 自动液位控制

1—贮液槽 2—液位变送器 3—液位控制器 4—调节阀

1. 人工液位控制

如图 1-1a 所示，操作人员用眼睛监视液位 h 的情况，反映至大脑作判断，若液位 h 高于给定值 h_0 ，则人手关小阀门开度 R_1 ， Q_1 减小，使 h 回到给定值 h_0 ；反之，若 h 低于给定值 h_0 ，则人手开大阀门 R_1 ，流量 Q_1 增大，保证 h 回到给定值 h_0 附近。可见，采用人工控

制存在反应缓慢，液位波动较大的缺点。

2. 自动液位控制

如图 1-1b 所示，用液位变送器 LT 测量液位 h ，将 h 转换成电信号，传输到液位控制器 LC 与给定信号 h_0 比较，若 h 与 h_0 有偏差，经液位控制器进行适当的运算后，输出信号控制调节阀 4 作适当的变化，使流量 Q_1 作适当的变化，从而保证液位 h 回到给定值 h_0 附近。

将自动控制与人工控制对比可看出：用液位变送器代替人的眼睛监视液位的变化；用液位控制器代替人的大脑，将液位 h 与给定值 h_0 进行比较和运算；用控制器输出信号代替人的手，控制阀门的开度，改变流量 Q_1 ，使 h 回到 h_0 附近。

图 1-1b 所示的自动液位控制系统可画出组成框图，如图 1-2 所示。

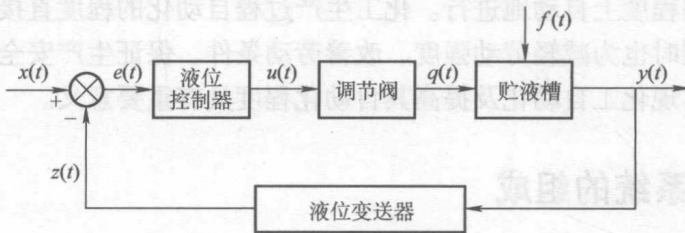


图 1-2 自动液位控制系统组成框图

在图 1-2 中：

$y(t)$ 为被控变量，在控制系统中，控制作用就是要克服外部扰动 $f(t)$ 对被控变量 $y(t)$ 的影响，保证其尽快回到给定值，例如贮液槽的液位 h_0 ；

$q(t)$ 称为操纵变量，操纵变量 $q(t)$ 的作用是使被控变量稳定于给定值附近，例如液体的流量 Q_1 ；

$f(t)$ 称为扰动，作用于被控对象且使被控变量 $y(t)$ 变化，扰动作用 $f(t)$ 企图使被控变量 $y(t)$ 偏离给定值 $x(t)$ ，例如贮液槽液体流出量 Q_2 增加，而使液位 h 减小；

被控对象，指从被控变量检测点至调节阀之间的管道或设备，例如贮液槽。

综合以上分析，可知简单反馈控制过程如下：测量变送单元（液位变送器）将被控变量检测出来并转换成便于远传的统一信号 $z(t)$ ； $z(t)$ 与给定的信号 $x(t)$ 比较，得到偏差 $e(t) = z(t) - x(t)$ ； $e(t)$ 经控制器（液位控制器）运算后，输出控制作用 $u(t)$ ； $u(t)$ 控制执行机构（调节阀）的开度，改变操纵变量 $q(t)$ （液体的流量），从而使被控变量 $y(t)$ 回到给定值 $x(t)$ 附近。

必须指出：框图中，框之间的带箭头的连线仅表示其信号相互的关系及传递方向，并不表示框之间的物料联系。

可见，一个简单反馈控制系统由测量变送单元、控制器、执行机构和被控过程（被控对象）组成。若将测量变送单元、控制器、执行机构看作测量控制仪表，则一个简单反馈控制系统由被控对象和测量控制仪表两部分组成。

1.2 自动控制系统的分类

自动控制系统的分类方法很多，例如，按被控量分类：温度、压力、流量、液位等控制系统；按是否有被控变量到输入的反馈分类：闭环（有反馈）、开环（无反馈）控制系统；

按系统结构特点分类：反馈、前馈、前馈—反馈控制系统；按给定信号特点分类：定值、随动、程序控制系统等。

下面按系统结构特点和给定信号特点分类进行讨论。

1.2.1 按系统的结构特点分类

1. 反馈控制系统

反馈控制系统是根据被控参数与给定值的偏差进行控制的，最终达到消除或减小偏差的目的，偏差值是控制的依据。它是最常用、最基本的一种过程控制系统。由于该系统由被控变量的反馈构成一个闭合回路，故又称为闭环控制系统，如图1-2所示。反馈信号也可能有多个，构成两个以上的闭环回路，称为多回路反馈控制系统。

2. 前馈控制系统

前馈控制系统是根据扰动量的大小进行控制的，扰动是控制的依据。由于没有被控变量的反馈，所以是一种开环控制系统。前馈控制是根据扰动量设计的提前控制，所以控制快速，但是无法检查控制效果且不能抑制未知扰动。

3. 前馈—反馈控制系统

前馈—反馈控制系统综合前馈控制系统和反馈控制系统的特点，其利用前馈控制迅速克服可测扰动，同时利用反馈控制克服其他未知扰动，使被控变量稳定在给定值上以提高控制系统的控制品质。

1.2.2 按给定信号的特点分类

1. 定值控制系统

被控变量要求稳定在某一给定值上的控制，称为定值控制，例如恒温控制。由于工业生产过程中大多数工艺要求被控变量稳定在某一给定值上，因此，定值控制系统是应用最多的一种控制系统。

2. 随动控制系统

被控变量的给定值随时间任意变化的控制称为随动控制。例如，锅炉燃烧过程控制系统中，为保证达到完全燃烧，必须保证空气量随燃料的变化而成比例变化。由于燃料量是随负荷变化的，因此控制系统要根据燃料量的变化，自动控制空气量的大小，以求达到最佳燃烧状态。

3. 程序控制系统

被控变量的给定值按预定程序变化的控制，称为程序控制。例如，退火炉温度控制系统的给定值是按升温、保温与逐次降温等程序变化，因此，控制系统按预先设定程序进行控制。

1.3 自动控制系统的品质指标

1.3.1 静态与动态

自动控制系统的输入信号有两种：一种是给定信号；另一种是扰动信号。

当输入恒定不变时，整个系统若能建立平衡，系统中各个环节将维持一种相对静止的状

态，系统输出也不发生改变，这种状态称为静态。保持平衡时，输出与输入之间的关系为系统的静态特性。当输入发生变化，系统的平衡被破坏，则输出发生变化，这种状态称为动态。输入变化时，输出与输入之间的关系为系统的动态特性。特别的，当自控系统的输入发生变化后，输出随时间不断变化，输出随时间变化的过程被称为过渡过程。

1.3.2 系统的品质指标

1. 系统单项指标

系统典型输入有脉冲、阶跃、斜坡、正弦和加速度输入等。因为阶跃作用很典型，实际中经常遇到，而且这类输入变化对系统来讲是比较严重（信号在0时刻发生突变，且0时刻之后一直有作用）的情况，如果一个系统对这种输入有较好的响应，那么对其他形式的输入变化就更能适应。所以，系统的各项单项指标，通常基于阶跃输入作用下控制系统输出响应的过渡过程曲线来定义。阶跃输入 $R(t)$ 定义为

$$R(t) = \begin{cases} A, & t \geq 0 \\ 0, & t < 0 \end{cases}$$

式中， A 为常数。

特殊情况，若 $A=1$ ，则 $R(t)$ 被称为单位阶跃函数，如图 1-3 所示。

自动控制系统在阶跃输入作用下过渡过程可能有 4 种形式，如图 1-4 所示。图 1-4a、b 为衰减过程；图 1-4c 为等幅振荡过程；图 1-4d 为发散振荡过程。

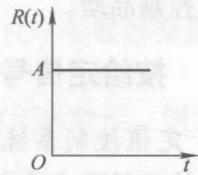


图 1-3 阶跃函数示例图

工业上，多数情况下，希望得到衰减振荡的过渡过程，如图 1-4b 所示，最后被控量稳定在某一给定值上，例如，恒温在 70°C 。因此，下面取这种过渡过程形式讨论控制系统的品质指标。

图 1-5a 所示为定值控制系统在阶跃作用下的响应曲线；图 1-5b 所示为随动控制系统在阶跃作用下的响应曲线。

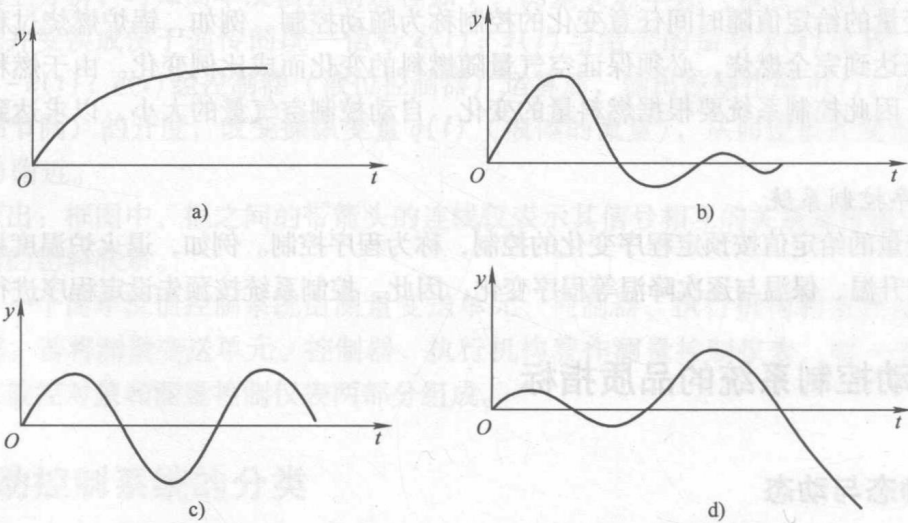


图 1-4 自动控制系统在阶跃输入作用下过渡过程的四种形式

a) 非周期衰减过程 b) 衰减振荡过程 c) 等幅振荡过程 d) 发散振荡过程

主要关注的控制品质指标为稳定性、准确性和快速性,具体说明如下:

(1) 余差(静态偏差)

余差,用 e 表示,是指系统过渡过程结束后,被控参数新的稳定值 $y(\infty)$ 与给定值 c 之差,其值可正可负。它是一个静态品质指标。对于定值控制系统,给定值是生产的技术指标,希望余差越小越好。

(2) 衰减比

衰减比是衡量过渡过程稳定性的一个动态品质指标,它等于振荡过程的第一个波的振幅与第二个波的振幅之比,即

$$n = \frac{B}{B'} \quad (1-1)$$

$n < 1$, 系统是不稳定的,是发散振荡; $n = 1$, 系统是临界稳定,是等幅振荡; $n > 1$, 系统是稳定的,衰减比越大,意味着系统越快达到稳定,所以一般 n 越大越好。若 $n = 4$, 系统为4:1的衰减振荡,是比较理想的。

(3) 最大偏差和超调量

对于定值控制系统,最大偏差是指被控参数第一个波峰值与给定值 c 之差,它用来衡量被控参数偏离给定值的程度。如图1-5a所示,最大偏差 $A = B + e$ 。

对于随动控制系统,用超调量来衡量被控参数偏离给定值的程度。超调量 σ 可定义为

$$\sigma = \frac{y(t_p) - y(\infty)}{y(\infty)} \times 100\% \quad (1-2)$$

$y(\infty)$ 和 $y(t_p)$ 含义如图1-5b所示。

最大偏差 A 和超调量 σ 是衡量控制系统的重要品质指标。有些生产工艺规定了最大偏差的限制条件,不允许超出某一数值。

(4) 过渡过程时间 t_s

从扰动开始到被控参数进入新的稳态值的 $\pm 5\%$ 或 $\pm 2\%$ 范围内所需的时间,称为过渡过程时间 t_s 。它是反映系统过渡过程快慢的质量指标, t_s 越小,过渡过程进行得越快。一般希望过渡过程时间越短越好。

(5) 峰值时间 t_p

从扰动开始到过渡过程曲线到达第一个峰值所需的时间,称为峰值时间 t_p ,如图1-5b所示。 t_p 值的大小反映了系统响应的灵敏程度。

必须指出,上述各项品质指标是相互联系又相互制约的。例如,一个系统的稳态精度要求很高时,可能会引起动态不稳定;解决了稳定问题后,又可能因反应迟钝而失去快速性。要高标准地同时满足各项质量指标是很困难的,因此应根据生产工艺的具体要求,分清主次,统筹兼顾,保证优先满足主要的品质指标。

例1-1 某发酵过程工艺规定操作温度为 $(40 \pm 2)^\circ\text{C}$ 。考虑到发酵效果,操作过程中温度偏离给定值最大不得超过 6°C 。现设计温度定值控制系统,在阶跃扰动作用下的过渡过程

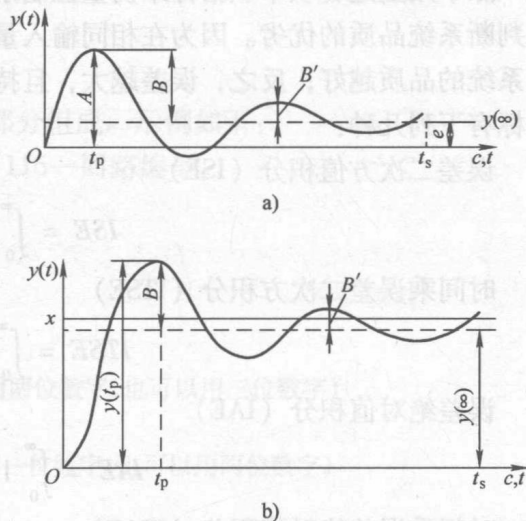


图1-5 阶跃作用下控制系统过渡过程响应曲线

a) 定值控制系统 b) 随动控制系统

响应曲线如图 1-6 所示。试求最大偏差、衰减比、余差、过渡过程时间（按进入新的稳态值 $\pm 2\%$ 范围内所需的时间计算）、振荡周期等过渡过程品质指标，并说明该控制系统是否满足题中的工艺要求。

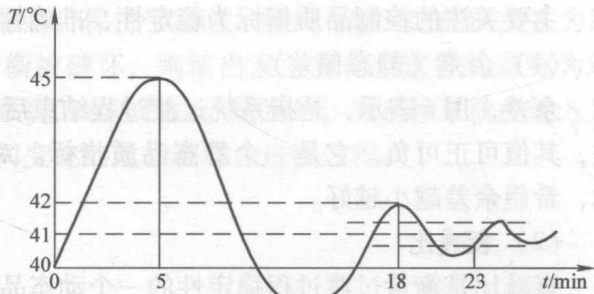


图 1-6 发酵过程控制系统的过渡过程响应曲线

解：最大偏差 $A = 45^{\circ}\text{C} - 40^{\circ}\text{C} = 5^{\circ}\text{C}$ ；
衰减比 $n = (45 - 41)/(42 - 41) = 4:1$ ；振
荡周期为 $18\text{min} - 5\text{min} = 13\text{min}$ ；余差 $e =$

$41^{\circ}\text{C} - 40^{\circ}\text{C} = 1^{\circ}\text{C}$ ；过渡过程时间 $t_s = 23\text{min}$ （进入 $41^{\circ}\text{C} \times 2\% = 0.82^{\circ}\text{C}$ ）。满足工艺要求。

2. 系统综合指标

除了用上述各项单项指标来衡量控制系统控制品质外，也常用基于误差的积分综合指标来判断系统品质的优劣。因为在相同输入量作用下，如果误差越小，且持续作用时间越短，则系统的品质越好；反之，误差越大，且持续作用时间越长，则品质越差。常用的误差性能指标有下列几种：

误差二次方值积分（ISE）

$$ISE = \int_0^{\infty} e^2(t) dt \rightarrow \min$$

时间乘误差二次方积分（ITSE）

$$ITSE = \int_0^{\infty} te^2(t) dt \rightarrow \min$$

误差绝对值积分（IAE）

$$IAE = \int_0^{\infty} |e(t)| dt \rightarrow \min$$

时间乘误差绝对值积分（ITAE）

$$ITAE = \int_0^{\infty} t|e(t)| dt \rightarrow \min$$

上述各式中， $e(t)$ 为偏差， $e(t) = y(t) - y(\infty)$ 。在实际工作中具体选用何种性能指标，必须根据系统的性能和生产工艺要求进行综合考虑后确定。

1.4 工艺管道及控制流程图

自控专业工程设计阶段的工作可归纳为以下 6 个方面的内容：

- 1) 根据生产工艺提出的监控条件绘制工艺控制流程图（Process Control Diagram, PCD）。
- 2) 配合系统专业绘制各管道仪表流程图（Piping and Instrument Diagram, P&ID）。
- 3) 征集研究用户对 P&ID 及仪表设计规定的意见。
- 4) 编制仪表采购清单，配合采购部门开展仪表和材料的采购工作。
- 5) 编制仪表制造商的有关图样，按仪表制造商返回的技术文件，提交仪表接口条件，并开展有关设计工作。
- 6) 编（绘）制最终自控工程设计文件。

从自控工程设计的程序中可以看到，完成一个工程项目的工程设计时，自控专业始

终与工艺、系统、管道、电气等专业有着密切的协作关系。为了便于项目顺利实施，需要非自动化专业人员了解自控工程设计内容。

在自控工程设计的图样上，按设计标准，有统一规定的图例、符号。这里将行业标准HG/T 205050—2000《过程测量与控制仪表的功能标志及图形符号》中的一些主要内容作简要介绍，这些功能标志及图形符号主要用于工艺控制流程图（PCD）、管道仪表流程图（P&ID）的设计。

1.4.1 仪表功能标志

仪表功能标志由一个首位字母及1个或2、3个后继字母组成。示例如下：

PI—功能标志。其中，P—首位字母（表示被测变量），I—后继字母（表示读出功能）。PI表示压力指示。

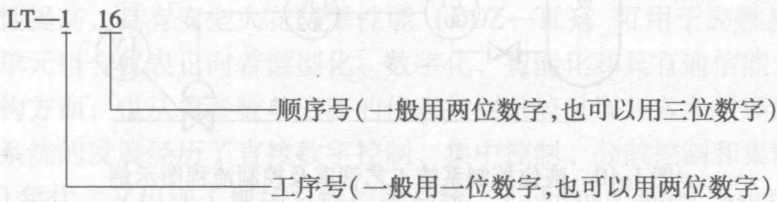
1.4.2 仪表位号

仪表位号由仪表功能标志与仪表回路编号两部分组成。示例如下：

LT—116—仪表位号。其中，LT—功能标志，116—回路编号。

回路编号可以用工序号加仪表顺序号组成。

例如：



1.4.3 仪表的图形符号及安装位置

仪表的图形符号及安装位置见表1-1。

表 1-1 仪表的图形符号及安装位置

	现场安装	控制室安装	现场盘装
单台常规仪表			
集散控制系统			
计算机功能			
可编程序逻辑控制			

1.4.4 测量点与连接线的图形符号

测量点（包括检测元件）是由过程设备或管道引至检测元件或就地仪表的起点，一般

不单独表示。需要时，检测元件或检测仪表可用细实线加图形表示，如图 1-7 所示。
复杂系统中，当有必要表明信息流动的方向时，应在信号线上加箭头。

1.4.5 常见执行机构及控制阀体的图形符号

带弹簧的薄膜执行机构的图形符号如图 1-8 所示。截止阀的图形符号如图 1-9 所示。

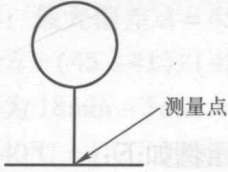


图 1-7 测量点与连接线的图形符号示例



图 1-8 带弹簧的薄膜执行机构的图形符号



图 1-9 截止阀的图形符号

1.4.6 常规仪表控制系统图形符号示例

液位控制系统工艺管道及控制流程图示例如图 1-10 所示。

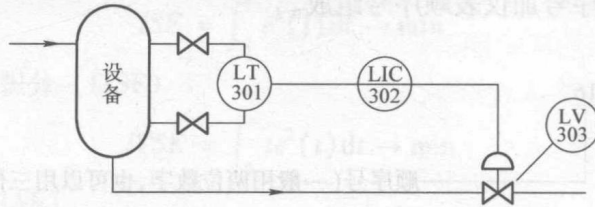


图 1-10 液位控制系统工艺管道及控制流程图示例

图 1-10 中，通过液位变送器（LT）检测当前的液位，对比给定液位，若与给定液位存在偏差，则通过液位控制仪表（LIC）（带指示功能）控制阀门（LV）的开度，实现对设备液位的控制。

1.5 化工自动化的发展概况

化工自动化是适应现代工业生产要求，伴随控制理论及其应用、计算机技术和数字通信技术的发展而迅速发展的。回顾化工自动化的发展历程，大致经历了下述几个阶段。

1.5.1 仪表化与局部自动化阶段

20 世纪 50 ~ 60 年代，一些工厂企业实现了仪表化与局部自动化，这是发展的第一个阶段。这个阶段的主要特点是：检测和控制仪表主要采用基地式仪表和部分单元组合仪表（多数是气动仪表），组成单输入—单输出的单回路定值控制系统，对生产过程的热工参数，如温度、压力、流量和液位进行自动控制。控制的目的是保持这些参数的稳定。过程控制系统的设计、分析的理论基础是以频率法和根轨迹法为主体的经典控制理论。

1.5.2 综合自动化阶段

20世纪60~70年代中期,由于工业生产的不断发展,对过程控制提出了新的要求,电子技术的发展也为生产过程自动化的发展提供了完善的条件,过程控制的发展进入第二个阶段。在这个阶段,出现了一个车间乃至一个工厂的综合自动化。其主要特点是:大量采用单元组合仪表(包括气动和电动)和组装式仪表。同时,电子计算机开始应用于过程控制领域,实现直接数字控制(DDC)和设定值控制(SPC)。在系统结构方面,为提高控制品质与实现一些特殊的控制要求,相继出现了各种复杂控制系统,例如串级、比值、均匀和前馈—反馈控制等。在过程控制理论方面,除了采用经典控制理论外,开始应用现代控制理论以解决实际生产过程中遇到的更为复杂的控制问题。

1.5.3 全盘自动化阶段

20世纪70年代以来,过程控制技术进入了飞速发展阶段,实现了全盘自动化。微型计算机(以下简称微机)广泛应用于过程控制领域,对整个工艺流程,全工厂,乃至整个企业集团进行集中控制和经营管理,以及应用多台微机对生产过程进行控制和多参数综合控制,是这一阶段的主要特点。在检测变送方面,除了热工参数的检测变送以外,粘度、湿度、pH值及成分的在线检测与数据处理的应用日益广泛。模拟过程检测控制仪表的品种、规格增加,可靠性提高,具有安全火花防爆性能(DDZ—Ⅲ),可用于易燃易爆场合。以微处理器为核心的单元组合仪表正向着微型化、数字化、智能化和具有通信能力方向发展。过程控制系统的结构方面,也从单参数单回路的仪表控制系统发展到多参数多回路的微机控制系统。微机控制系统的发展经历了直接数字控制、集中控制、分散控制和集散控制几个发展阶段。20世纪90年代,又出现了现场总线控制系统(Fieldbus Control System, FCS),它是继计算机技术、网络技术和通信技术得到迅猛发展后,与自动控制技术和系统进一步结合的产物。它的出现使控制系统中的基本单元——各种仪表单元也进入了网络时代,从而改变了传统回路控制系统的基本结构和连接方式。现场总线控制系统是一种全分散、全数字化、智能化、双向、互联、多变量、多点和多站的通信和控制系统。它的出现给过程控制系统带来了一次全新的革命性的变化,是过程控制系统的发展方向。

习题与思考题

- 1-1 什么是化工自动化?具有什么重要意义?
- 1-2 简述一个简单反馈控制系统的组成,并给出实例分析,画出对应控制框图。
- 1-3 按系统结构特点分类,自动控制系统可以分为哪几类,分别具有什么特点?
- 1-4 按给定信号特点分类,自动控制系统可以分为哪几类,分别具有什么特点?
- 1-5 什么是阶跃输入?为什么采用阶跃输入作用下的输出研究系统的品质指标?
- 1-6 什么是系统的静态与动态?常用品质指标有哪些?它们分别是静态指标还是动态指标?
- 1-7 某化学反应器工艺规定的操作温度为 $(800 \pm 0.5)^\circ\text{C}$ 。考虑安全因素,操作过程中温度偏离给定值最大不得超过 10°C 。现设计的温度定值控制系统在阶跃扰动作用下的过渡过程曲线如图1-11所示,试求最大偏差、衰减比、余差、过渡时间(按进入新的稳态值 $\pm 2\%$ 范围内所需的时间计算)、振荡周期等过渡过程品质指标,并说明该控制系统是否满足题中的工艺要求。
- 1-8 锅炉是化工、炼油等企业常见的主要设备。锅筒水位是影响蒸汽质量及锅炉安全的一个十分重要