



普通高等教育“十二五”规划教材

# 化工仪表及自动化

刘 美 主 编

司徒莹 禹柳飞 副主编

中国石化出版社

[HTTP://WWW.SINOPEC-PRESS.COM](http://www.sinopec-press.com)

普通高等教育“十二五”规划教材

# 化工仪表及自动化

刘 美 主编

司徒莹 禹柳飞 副主编

中国石化出版社

## 内 容 提 要

本书概述了仪表与自动化的基本原理和实用技术。主要介绍工业生产过程中温度、压力、流量、液位、成分等工业参数的检测技术及仪表、过程控制仪表、过程控制系统及生产过程自动化的基本知识,并结合石油化工、油气储运、热工、轻工、机械等领域分析其典型控制系统的原理、设计及应用实例。

本书可作为大中专院校和职业技术学院化学工程与工艺、油气储运工程、高分子材料与工程、过程装备与控制工程、测控技术与仪器等专业教材及企业培训教材,还可供石油化工、油气储运、热工、轻工、机械等领域技术人员、管理人员和操作人员参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

化工仪表及自动化/刘美,司徒莹,禹柳飞主编.  
—北京:中国石化出版社,2013.11  
普通高等教育“十二五”规划教材  
ISBN 978-7-5114-2462-4

I. ①化… II. ①刘… ②司… ③禹… 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(2013)第 254258 号

未经本社书面授权,本书任何部分不得被复制、抄袭,或者以任何形式或任何方式传播。版权所有,侵权必究。

## 中国石化出版社出版发行

地址:北京市东城区安定门外大街 58 号

邮编:100011 电话:(010)84271850

读者服务部电话:(010)84289974

<http://www.sinopec-press.com>

E-mail:press@sinopec.com

北京柏力行彩印有限公司印刷

全国各地新华书店经销

\*

787×1092 毫米 16 开本 14.75 印张 356 千字

2014 年 1 月第 1 版 2014 年 1 月第 1 次印刷

定价:36.00 元

# 前 言

本书从工程应用及技术管理型人才的要求出发,较系统全面地介绍了检测技术及仪表、过程控制仪表、过程控制系统及生产过程自动化的基本知识。书中融会了编者多年教学、科研和生产经验,从实际适应角度出发,内容实用、新颖,充分反映了该领域的最新进展。本书可作为石油化工、油气储运、热工、轻工、机械等领域化学工程与工艺、油气储运工程、高分子材料与工程、过程装备与控制工程、测控技术与仪器等相关专业学习仪表及自动化知识的教材,还可作为高职高专、函授、电大等成人教育相关专业教材使用,也可作为企业职工培训和科技人员及管理人士的参考书。

本书共九章。第一、二章介绍自动控制系统基础及过程特性和数学模型,第三、四、五章介绍检测仪表与传感器、控制器、执行器原理及应用,第六、七、八章介绍各种简单和复杂控制系统及先进控制技术与计算机控制系统,第九章结合相关专业介绍其典型单元的自动控制系统应用实例和最新控制方法。各章后附有习题和思考题可供读者参考。

本书由刘美主编,司徒莹、禹柳飞副主编,康珏、伍林、卢均治参加编写。刘美编写绪论、第一、第二章,康珏编写第三章,禹柳飞编写第四、六、七章,伍林编写第五章,卢均治编写第八章,司徒莹编写第九章。

由于作者水平有限,书中错误、不妥之处在所难免,恳请读者批评指正。

编 者

# 绪 论

自动化是一门有着广泛社会需求和技术基础的综合性技术学科，是当今世界各国重点发展的高科技领域，其研究开发和应用水平是衡量一个国家发达程度的重要标志，是一个国家技术先进程度、生产力发达程度与生产关系相适应程度的标志之一。

工业自动化技术是当代发展最迅速、应用最广泛、效益最显著的技术密集型与智力密集型技术之一，是推动新的技术革命、走新型工业化道路的关键技术之一。工业自动化技术是综合运用控制理论、仪器仪表、电子装备、计算机和相关工艺技术，对工业生产过程实现检测、控制、优化、调度、管理和决策，达到增加产量、提高质量、节省能耗、降低消耗、减少污染、确保安全等目的的一种综合性技术。

化工仪表及自动化是工业自动化的重要组成部分。化工自动化是化工、炼油、储运、热工、机械、食品、轻工等化工类型生产过程自动化的简称；是在化工设备上，配备上一些自动化装置，代替操作人员的部分直接劳动，使生产在不同程度上自动地进行；是化工仪器设备与自动化控制技术的有机结合。具体地，化工自动化就是在生产设备上配备自动化仪表和计算机系统，来检测、显示或记录生产过程中的重要工艺参数，无论是否受到外界干扰的影响，整个生产过程都能自动地维持在正常状态，所有工艺参数都能控制在规定的数值范围内。而仪表作为自动化的“核心”，其主要作用是：在生产过程中，对工艺参数进行检测、显示、记录或控制，或在无人操作的情况下自动地完成测量、记录和控制等工作，有些还可实现信息远距离传送和数据处理。

生产过程自动化是提高社会效益的有力工具。通过化工生产过程自动化，使化工生产保持在最佳生产状况下，节约原材料和能源，降低生产成本；减轻劳动强度，改善工作环境；延长设备使用寿命，提高设备利用率；提高产品质量和数量；实现优质高产低耗安全生产。同时，通过生产过程自动化，获得最高的技术经济指标，从根本上改变传统的劳动方式，提高劳动者的科学文化素质和技术素质。

化工生产过程自动化技术是伴随社会经济发展需求和科学技术革新进步而不断发展的。纵观化工生产过程自动化技术发展，在 20 世纪 40 年代以前，开始应用自动检测仪表检测工业过程的主要参数，操作工人根据自动检测仪表指示的情况，结合操作工平时积累的经验，通过人工来改变操作条件和调节生产过程。

20 世纪 50 年代到 60 年代，化工生产过程朝着大规模、高效率、连续生产、综合利用方向发展。但在实际生产中，自动控制系统主要是温度、压力、流量和液位四大参数的简单控制；自动化技术工具主要是基地式电动、气动仪表及单元组合式仪表；电动仪表主要元件为电子管，体积大、可靠性差、控制精度低。

20 世纪 70 年代到 80 年代，应用的仪表主要为气动仪表及电动单元组合式仪表，其中电动仪表主要元件由晶体管过渡为集成电路，仪表控制精度、稳定性、可靠性、整体性能有较大提高。基本控制和复杂控制可以实现，主要工艺参数集中监控，自动化水平有较大提



高。尤其在 1975 年,出现了以微处理器为基础的过程控制仪表集中分散型控制系统(Distributed Control System, DCS),极大推动了自动化技术的发展,石油和化工行业从下至上都积极推进 DCS 的应用。到了 20 世纪 80 年代,新上大型石油和化工装置基本都采用 DCS,先进控制、优化控制开始引入应用。

20 世纪 90 年代,DCS 不断发展和完善,进入成熟期,新建和改造大中型石油和化工装置基本都采用 DCS、PLC;20 世纪末,计算机、信息技术的飞速发展,促进了自动化系统结构的变革,仪器仪表向数字化、智能化、网络化、现场化、微型化方向飞速发展:智能测控仪表以专用微处理器为核心,固化智能算法,具有远程通信功能;采用双绞线等作为通信总线,把多个测控仪表连成网络系统,并按开放、标准的通信协议,在多个现场智能测控仪器设备之间以及与远程监控计算机之间实现数据传输与信息交换,构成现场总线控制系统(Fieldbus Control System, FCS)。

自动化及相关学科技术的飞速发展,使自动化仪表、可编程序控制器、集散控制系统和现场总线控制系统技术相互交叉融合,现代自动化技术已经向信息技术、自动化技术、管理科学等相结合的控制与管理一体化现代综合自动化高技术发展,企业资源计划(Enterprise Resource Planning, ERP)、计算机集成制造系统(Computer Integrated Manufacturing Systems, CIMS)开始在部分大型石油和化工装置上应用,并取得初步效果。大型石油和化工企业在不断总结 ERP、CIMS 应用经验基础上稳步地向集控制、管理、经营一体化的企业综合自动化方向推进。目前,石油化工企业控制、管理、经营一体化系统所需要的仪表自动化新技术主要有信息综合处理技术、现场总线及现场总线控制系统(FCS)、现代智能控制技术、预测预报技术、快速仿真技术、多媒体技术等。

由上述化工生产过程自动化技术发展状况可见,化工生产过程自动化是一门覆盖面很广的综合性技术学科,它应用自动控制学科、仪器仪表学科及计算机学科的理论和技术服务于化学工程学科。石油化工企业生产工艺、仪器设备、控制与管理通过现代自动化技术连结成一个有机整体。因此,从事石油化工、油气储运、热工等相关领域的技术人员、管理人员和操作人员必须适应现代科学发展需求,学习和掌握化工生产过程自动化方面的知识。通过对化工仪表及自动化课程的学习,了解化工生产过程自动化的主要内容,掌握自动控制系统的组成、原理及作用;根据工艺要求,与自控设计人员共同讨论和提出合理的自动控制方案;在工艺设计或技术改造中,与自控设计人员密切合作,综合考虑工艺与控制两个方面,为自控设计人员提供正确的工艺条件与数据;了解化工对象的基本特性及其对控制过程的影响;了解基本控制规律及其控制器参数与被控过程的控制质量之间的关系;了解主要工艺参数(温度、压力、流量、物位及成分)的基本测量方法和仪表的工作原理及特点;在生产控制、管理和调度中,正确选用和使用常见的测量仪表和控制装置;在生产开停车过程中,了解自动控制系统的投运及控制器的参数整定;在自动控制系统运行过程中,发现和分析出现的问题和现象,提出正确的处理意见;在处理各类技术问题时,应用控制论、系统论、信息论的观点来分析思考,寻求考虑整体条件、考虑事物间相互关联的综合解决方法。

因此,作为从事石油化工、油气储运、热工等相关领域的技术人员、管理人员和操作人员,学习自动化及仪表方面的知识,对管理、从事和开发现代化化工生产过程,提高企业经济效益是十分重要的。

# 目 录

## 绪论

|                                |         |
|--------------------------------|---------|
| 第1章 自动控制系统基本概念 .....           | ( 1 )   |
| § 1.1 化工自动化的主要内容 .....         | ( 1 )   |
| § 1.2 自动控制系统的基本组成及方块图 .....    | ( 2 )   |
| § 1.3 自动控制系统的分类 .....          | ( 5 )   |
| § 1.4 自动控制系统的过渡过程和品质指标 .....   | ( 6 )   |
| § 1.5 工艺控制流程图 .....            | ( 10 )  |
| 习题与思考题 .....                   | ( 13 )  |
| 第2章 过程特性及其数学模型 .....           | ( 16 )  |
| § 2.1 概述 .....                 | ( 16 )  |
| § 2.2 对象特性的数学模型 .....          | ( 16 )  |
| § 2.3 对象的特性参数 .....            | ( 20 )  |
| § 2.4 对象特性参数对控制过程的影响 .....     | ( 24 )  |
| 习题与思考题 .....                   | ( 25 )  |
| 第3章 检测仪表与传感器 .....             | ( 26 )  |
| § 3.1 概述 .....                 | ( 26 )  |
| § 3.2 压力检测及仪表 .....            | ( 29 )  |
| § 3.3 流量检测及仪表 .....            | ( 38 )  |
| § 3.4 物位检测及仪表 .....            | ( 52 )  |
| § 3.5 温度检测及仪表 .....            | ( 59 )  |
| § 3.6 成分检测及仪表 .....            | ( 78 )  |
| § 3.7 现代检测技术与发展 .....          | ( 84 )  |
| 习题与思考题 .....                   | ( 87 )  |
| 第4章 控制器 .....                  | ( 91 )  |
| § 4.1 概述 .....                 | ( 91 )  |
| § 4.2 基本控制规律及其对系统过渡过程的影响 ..... | ( 91 )  |
| § 4.3 模拟式控制器 .....             | ( 101 ) |
| § 4.4 数字式控制器 .....             | ( 104 ) |
| 习题与思考题 .....                   | ( 108 ) |
| 第5章 执行器 .....                  | ( 110 ) |
| § 5.1 执行器的结构原理 .....           | ( 110 ) |
| § 5.2 执行器的特性 .....             | ( 116 ) |
| § 5.3 执行器的选择和安装 .....          | ( 121 ) |
| § 5.4 阀门定位器 .....              | ( 124 ) |

|                                  |       |
|----------------------------------|-------|
| § 5.5 数字执行器与智能执行器 .....          | (125) |
| 习题与思考题 .....                     | (127) |
| <b>第6章 简单控制系统</b> .....          | (128) |
| § 6.1 简单控制系统的结构与组成 .....         | (128) |
| § 6.2 自动控制的目的及被控变量的选择 .....      | (129) |
| § 6.3 对象特性对控制质量的影响及操纵变量的选择 ..... | (131) |
| § 6.4 测量滞后对控制质量的影响 .....         | (134) |
| § 6.5 控制规律及控制器作用方向的选择 .....      | (136) |
| § 6.6 控制器参数的工程整定 .....           | (139) |
| 习题与思考题 .....                     | (142) |
| <b>第7章 复杂控制系统</b> .....          | (143) |
| § 7.1 串级控制系统 .....               | (143) |
| § 7.2 前馈控制系统 .....               | (149) |
| § 7.3 均匀控制系统 .....               | (151) |
| § 7.4 比值控制系统 .....               | (154) |
| § 7.5 选择性控制系统 .....              | (158) |
| § 7.6 分程控制系统 .....               | (162) |
| 习题与思考题 .....                     | (166) |
| <b>第8章 先进控制技术与计算机控制系统</b> .....  | (168) |
| § 8.1 预测控制 .....                 | (168) |
| § 8.2 自适应控制 .....                | (170) |
| § 8.3 模糊控制 .....                 | (172) |
| § 8.4 计算机控制系统 .....              | (174) |
| 习题与思考题 .....                     | (180) |
| <b>第9章 典型单元的自动控制</b> .....       | (181) |
| § 9.1 流体输送设备的自动控制 .....          | (181) |
| § 9.2 传热设备的自动控制 .....            | (190) |
| § 9.3 化学反应器的控制 .....             | (195) |
| § 9.4 精馏塔的控制 .....               | (200) |
| § 9.5 生化过程的控制 .....              | (205) |
| 习题与思考题 .....                     | (209) |
| <b>附录</b>                        |       |
| 附录1 压力单位换算表 .....                | (210) |
| 附录2 常用压力表规格型号 .....              | (210) |
| 附录3 镍铬-镍硅(镍铬-镍铝)热电偶分度表 .....     | (211) |
| 附录4 铂铑-铂热电偶分度表 .....             | (215) |
| 附录5 镍铬-铜镍热电偶分度表 .....            | (220) |
| 附录6 铂电阻分度表 .....                 | (223) |
| 附录7 铜电阻分度表 .....                 | (225) |
| <b>参考文献</b> .....                | (226) |



# 第 1 章 自动控制系统基本概念

## § 1.1 化工自动化的主要内容

生产过程中,对各个工艺过程的物理量(或称工艺变量)有一定的控制要求。有些工艺变量直接表征生产过程,对产品的数量和质量起着决定性的作用。例如,一个液体储槽,在生产中常用来作为一般的中间容器或成品罐,从前一个工序来的物料连续不断地流入槽中,而槽中的液体又送至下一工序进行加工或包装,当流入量(或流出量)波动时会引起槽内液位的波动,严重时甚至会溢出或抽空,因此必须将槽内液位维持在允许的范围之内,才能使物料平衡,保持连续的均衡生产。又如:加热炉出口温度的波动不能超出允许范围,否则将影响后一工段的效果。我们还可列举出许多类似的例子。因此,为了保证生产安全顺利进行,达到优质高产,提高劳动生产率和经济效益,节约能源,改善劳动条件和保护环境,必须对生产过程的各种参数[例如,温度、压力、流量、物位、黏度、湿度、酸碱度(pH 值)及各种物料的成分等]进行必要的控制,这就涉及化工自动化的内容。

化工自动化一般包括自动检测、自动保护、自动操纵和自动控制等四个方面的内容。

### 1.1.1 自动检测系统

利用各种检测仪表对主要工艺参数进行测量、指示或记录的系统,称为自动检测系统,它代替了操作人员对工艺参数的不断观察与记录,起到人的眼睛的作用。

图 1-1 是利用蒸汽来加热冷物料的热交换器,冷液经加热后的温度是否达到要求,可用测温元件配上显示仪表平衡电桥来进行测量、指示和记录;冷液的流量可用流量计进行检测;蒸汽压力可用压力表来指示。上述这些构成检测温度、流量、压力参数的自动检测系统。

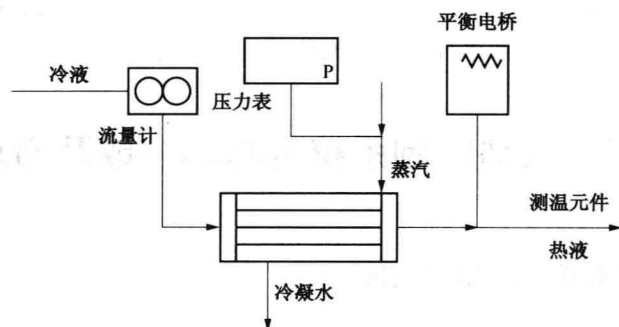


图 1-1 热交换器自动检测系统示意图

### 1.1.2 自动信号和联锁保护系统

生产过程中,有时由于一些偶然因素的影响,导致工艺参数超出允许的变化范围而出现不正常情况时,就有引起事故的可能。为此,常对某些关键性参数设有自动信号联锁装置,当工艺参数超过了允许范围,在事故即将发生以前,信号系统就自动地发出声光信号,提醒操作人员注意,并及时采取措施。如工况已到达危险状态时,联锁系统立即自动采取紧急措施,打开安全阀或切断某些通路,必要时紧急停车,以防止事故的发生和扩大。自动信号和联锁保护系统是生产过程中的一种安全装置。例如,

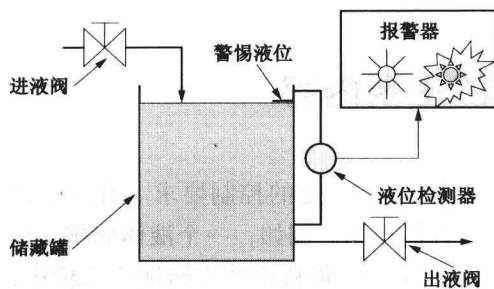


图 1-2 液位自动报警系统示意图

如图 1-2 所示的液位自动报警系统,当液位超过了允许极限值时,自动报警信号系统就会发出声光信号,提醒工艺操作人员及时处理生产事故;当液位进入危险极限值时,联锁系统立即采取应急措施,打开出液阀门或关闭进液阀门,从而避免引起液体溢出的生产事故。

### 1.1.3 自动操纵及自动开停车系统

自动操纵系统可根据预先规定的步骤自动地对生产设备进行某种周期性操作。例如,某自动加料系统如图 1-3 所示,工艺要求需要将 A 原料和 B 原料按一定比例在容器中混合后排出,利用自动操纵机可代替人工自动地按照加料、混合、排出等步骤周期性地打开加料阀门、搅拌器及出料阀门,从而减轻操作工人的重复性体力劳动。自动开停车系统可按照预先规定好的步骤,将生产过程自动地投入运行或自动停车。

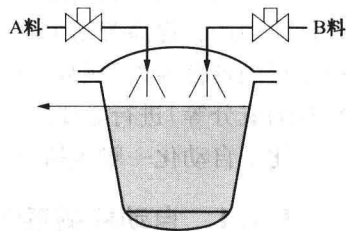


图 1-3 自动加料系统示意图

### 1.1.4 自动控制系统

对生产过程中某些关键性参数进行自动控制,使它们在受到外界干扰(扰动)的影响而偏离正常状态时,能自动地调节而回到规定的数值范围内,为此目的而设置的系统就是自动控制系统。自动控制系统是自动化生产的核心部分,只有自动控制系统才能自动地排除各种干扰因素对工艺参数(如温度、压力、流量、液位)的影响,使它们始终保持在预先规定的数值上,保证生产维持在正常或最佳的工艺操作状态。

## § 1.2 自动控制系统的基本组成及方块图

### 1.2.1 自动控制系统的基本组成

#### (1) 人工控制

人工控制过程如图 1-4 所示,操作人员用眼睛观察玻璃管液位计中液位的高低,并通

过神经系统告诉大脑,大脑根据液位高度,与液位设定值(可选择指示值中间的某一点为正常工作时的液位高度)进行比较,得出偏差的大小和正负,然后发出命令,根据大脑发出的命令,通过手去改变阀门开度(出口流量)。当液位上升时,将出口阀门开大,液位上升越多,阀门开得越大;反之,当液位下降时,则关小出口阀门,液位下降越多,阀门关得越小。从而使液位保持在所需液位上。

眼、脑、手3个器官,分别担负了检测、控制和执行三个作用,完成了测量、求偏差及运算、操纵阀门以纠正偏差的全过程。

## (2) 自动控制系统

自动控制系统是在人工调节的基础上产生和发展起来的,其主要的自动化装置包括测量元件与变送器、控制器、执行器,它们分别代替了人的眼、脑、手三个器官。液体储槽和自动化装置一起就构成了一个自动控制系统,如图1-5所示。

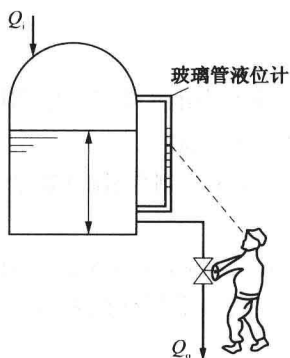


图 1-4 人工控制液位

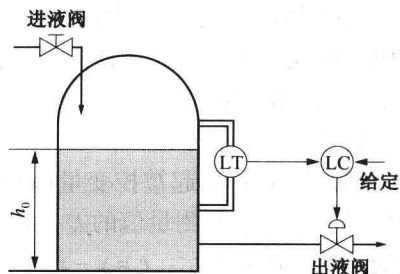


图 1-5 液位自动控制系统

①测量元件与变送器(LT) 测量液位并将液位的高低转化为统一的标准信号输出(如气压或电信号等)。

②控制器(LC) 接受变送器送来的信号,与液位给定值相比较得出偏差,并对偏差按某种运算规律进行运算后,将运算结果用标准信号输出。

③执行器 通常称控制阀,它能自动根据控制器送来的信号大小改变阀门的开度,调节介质流量的大小,使工艺参数维持在给定值。

④被控对象 除了必须具有上述的自动化装置外,在自动控制系统中,还包含控制装置所控制的生产设备或生产过程,即被控对象,简称对象。图1-5所示的液体储槽就是这个液位控制系统的被控对象。化工生产中的各种塔、反应器、换热器、泵和压缩机以及各种容器、储槽都是常见的被控对象,甚至一段输气管道也可以是一个被控对象。对复杂的生产设备,如精馏塔、吸收塔等,在一个设备上可能有几个控制系统,几个不同的被控对象。

## 1.2.2 自动控制系统的方框图

在研究自动控制系统时,为了更清楚地表示出一个自动控制系统中各个组成环节之间的相互影响和信号联系,便于对系统分析研究,一般用方块图来描述控制系统。其中,每个方块表示组成系统的一个部分,称为“环节”。两个方块之间用一条带有箭头的线条表示相互

关系,称为信号线,箭头指向方块表示为这个环节的信号输入,箭头离开方块表示为这个环节的信号输出。

### (1) 简单控制系统方框图

简单控制系统方框图如图 1-6 所示。图中的字母和术语代表的意义如下:

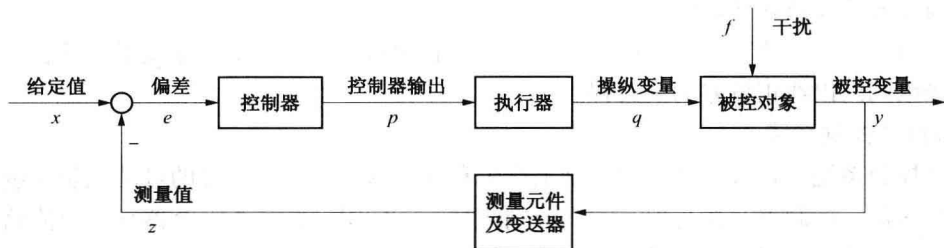


图 1-6 简单控制系统方框图

被控变量: 工艺上需要控制的工艺参数, 用  $y$  表示。

给定值(设定值): 生产过程中被控变量的期望值, 数值的大小由工艺决定, 用  $x$  表示。

测量值: 由检测元件及变送器得到的被控变量的实际值, 用  $z$  表示。

操纵变量(控制变量): 受控于执行器, 克服干扰影响, 实现控制作用的变量, 它是执行器的输出信号, 用  $q$  表示。

干扰(外界扰动): 引起被控变量偏离给定值, 除操纵变量以外的各种因素, 用  $f$  表示。

偏差信号: 给定值与测量值的差, 在反馈控制系统中, 控制器是根据偏差信号的大小来控制操纵变量的, 用  $e$  表示,  $e = x - z$ 。

控制信号: 控制器将偏差按一定规律计算后得到的输出量, 用  $p$  表示。

对于图 1-5 的液位控制系统, 方块图的结构与图 1-6 基本相同, 只需要将方框图中的名称换成具体的仪表设备名即可, 如图 1-7 所示。不同的控制系统方块图的结构形式可以相同。

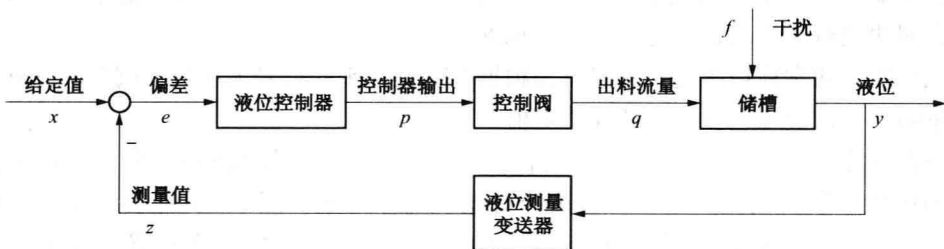


图 1-7 液位控制系统方框图

### (2) 自动控制系统的控制过程

以图 1-5 的液位控制系统为例, 说明自动控制系统的控制过程。

来自各方面的干扰(其中包括外界扰动和给定值改变), 会引起被控变量偏离给定值。假设干扰为进料流量的波动, 当进料流量增加, 使储槽液位上升, 则液位变送器的输出增加, 测量值大于给定值, 负偏差值增加, 经过控制器的控制作用, 使控制阀门打开, 出料流量增加, 液位下降, 当测量值重新回到给定值时, 控制过程结束。

## § 1.3 自动控制系统的分类

自动控制系统有多种分类方法,可以按被控变量来分类,如温度、压力、流量、液位等控制系统;也可按控制器具有的控制规律来分类,如比例、比例积分、比例微分、比例积分微分等控制系统;还可按系统的结构特点、给定值信号的特点等进行分类。下面主要介绍后两种分类方法。

### 1.3.1 按系统的结构特点分类

如按照控制系统的结构来分有闭环控制系统和开环控制系统。

#### (1) 闭环控制系统

也称反馈控制系统。它是根据被控变量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。这是最常用、最基本的一种过程控制系统。由于该系统由被控变量的负反馈量构成一个闭合回路,故又称为闭环控制系统。

闭环控制的特点是按偏差进行控制,所以不论什么原因引起被控变量偏离设定值,只要出现偏差,就会产生控制作用,使偏差减小或消除,最终达到被控变量与设定值一致的目的,这是闭环控制的优点。由于闭环控制系统按照偏差进行控制,所以尽管扰动已经发生,但在尚未引起被控变量变化之前,是不会产生控制作用的,这将导致控制不够及时。此外,如果系统内部各环节配合不当,会引起系统剧烈振荡,甚至会使系统失去控制,这是闭环控制系统的缺点,在自动控制系统的设计和调试过程中应加以注意。

#### (2) 开环控制系统

生产过程有时亦采用比较简单的开环控制方式,这种控制方式不需要对被控变量进行测量,只根据输入干扰信号进行控制。由于不测量被控变量,也不与设定值相比较,所以系统受到其他扰动作用后,被控变量偏离设定值,并且无法消除偏差,这是开环控制的缺点。

依据扰动作用进行控制的系统,虽然不一定能消除偏差,但是也有突出的优点,即控制作用不需等待偏差的产生,就开始进行控制作用,控制很及时,对于较频繁的主要扰动能起到补偿的效果。如前馈控制系统就属于开环控制系统。

综上所述,开环控制与闭环控制各有特点,应根据各种情况和不同要求,合理选择适当的方式。前馈-反馈控制系统就是开环与闭环控制的组合形式,在不少情况下可获得很好的效果。

### 1.3.2 按给定值信号的特点分类

在分析自动控制系统特性时,经常遇到将控制系统按照需要控制的被控变量的给定值是否变化和如何变化来分类,这样可将系统分为三类,即定值控制系统、随动控制系统和程序控制系统。

#### (1) 定值控制系统

由于工业生产大多数情况下,工艺都要求系统的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。前面讨论的液位控制系统就是定值控制系统的一个例子,这个控制系统的目的是使储槽内的液位保持在给定值不变。

### (2) 随动控制系统

也称自动跟踪系统。其控制的目的是让被控变量能准确而快速地跟踪给定值的变化,而给定值是随时间任意随机变化的。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成比例变化。由于燃料量是随负荷变化的,因此控制系统就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

这类系统的给定值是按预定的时间程序来变化,它是一个已知的时间函数。这类系统在间歇生产过程中应用比较普通。例如,箱式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自动变化,因此,控制系统要按预先设定的程序进行控制,追随给定值的变化。

## § 1.4 自动控制系统的过渡过程和品质指标

### 1.4.1 控制系统的静态与动态

自动控制系统的输入有两种形式,一种是给定值的变化或称给定作用,另一个是干扰的变化或称扰动作用。当输入恒定不变时,整个系统若能建立平衡,系统中各个环节将暂不动作,它们的输出都处于相对静止状态,这种状态称为稳态。值得注意的是这里所指的静态与习惯上所讲的静止是不同的。自动控制系统在静态时,生产还在进行,物料和能量仍然有进有出,只是平稳进行数量没有改变。例如,图1-5所示的液位控制系统,当流入储槽的流量和流出储槽的流量相等时,液位恒定,此时系统处于静态。

同样对于任何一个环节来说,都存在稳态,在保持平衡时的输出与输入关系称为环节的稳态特性。系统和环节的稳态特性是很重要的。系统的稳态特性是控制品质的重要环节;对象的稳态特性是扰动分析、确定控制方案的基础;检测变送器的稳态特性反映其精度,控制器和执行器的稳态特性对控制品质有显著的影响。

假若一个系统原来处于稳态,由于出现了扰动或给定值改变,即输入有了变化,系统的平衡受到破坏,被控变量(即输出)发生变化,从而使控制器、控制阀等自动化装置改变原来平衡时所处的状态,产生一定的控制作用来克服干扰的影响,并力图使系统恢复平衡。一方面,从干扰变化开始,经过控制,直到系统重新建立平衡,在这段时间内,整个系统的各个环节和信号都处于变动状态之中,所以这种状态叫作动态。另一方面,在设定值变化时,也引起动态过程,控制装置力图使被控变量在新的设定值或其附近建立平衡。

同样,对任何一个环节来说,当输入变化时,也引起输出的变化,其间的关系称为环节的动态特性。在控制系统中,了解动态特性比了解稳态特性更为重要,也可以说稳态特性是动态特性的一种极限情况。在定值控制系统中,扰动不断产生,控制作用也就不断克服其影响,系统总是处于动态过程中。同样,在随动控制系统中,设定值不断变化,系统也总是处

于动态过程中。因此,控制系统的分析重点要放在系统和环节的动态特性上,这样才能设计出良好的控制系统,以满足生产的各种要求。

### 1.4.2 控制系统的过渡过程

当自动控制系统的输入(即扰动或给定值)发生变化后,被控变量(即输出)随时间变化,系统进入动态过程。由于自动控制系统的负反馈作用,经过一段时间以后,系统应该重新恢复平衡。因此系统的过渡过程就是系统从一个平衡状态过渡到另一个平衡状态的过程。了解过渡过程中被控变量的变化规律对于研究自动控制系统十分重要。被控变量的变化规律首先取决于作用于系统的干扰形式,其中常用的就是阶跃干扰,如图1-8所示。因为生产过程中,阶跃扰动最为常见。例如负荷的改变、阀门开度的突然变化、电路的突然接通或断开等。另外,设定值的变化通常也是以阶跃形式出现,且这类输入变化对系统来讲是比较严重的情况。如果一个系统对这种输入有较好的响应,那么对相同幅度的其他形式的输入变化就更能适应。

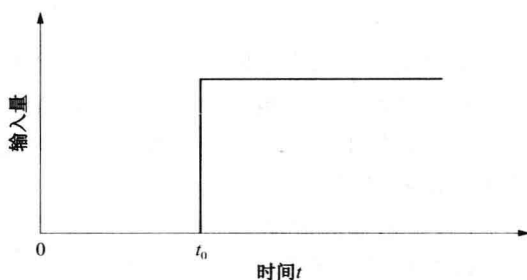


图1-8 阶跃干扰作用

一般说来,自动控制系统在阶跃干扰作用下的过渡过程有如图1-9所示的几种基本形式。

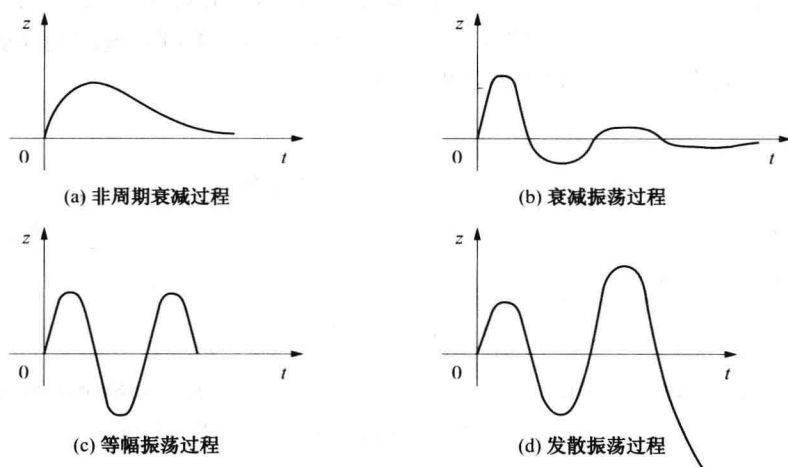


图1-9 定值控制系统过渡过程形式

#### (1) 非周期衰减过程

被控变量在给定值的某一侧作缓慢变化,没有来回波动,最后稳定在某一数值上,如图1-9(a)所示。这是一种稳定过程。被控变量经过一段时间后,逐渐趋向原来的或新的平衡状态,但由于这种过渡过程变化较慢,被控变量在控制过程中长时间地偏离给定值,而不能很快恢复平衡状态,所以一般不采用,只是在生产上不允许被控变量有波动的情况下才采用。

### (2) 衰减振荡过程

被控变量上下波动,但幅度逐渐减少,最后稳定在某一数值上,如图1-9(b)所示。这也是一种稳定过程,由于能够较快地使系统达到稳定状态,所以在多数情况下,这是所希望的过渡过程。

### (3) 等幅振荡过程

被控变量在给定值附近来回波动,且波动幅度保持不变,如图1-9(c)所示。介于不稳定与稳定之间,一般也认为是不稳定过程,生产上不能采用,只是对于某些控制质量要求不高的场合,如果被控变量允许在工艺许可的范围内振荡(如双位式控制),这种过渡过程的形式可以采用。

### (4) 发散振荡过程

被控变量来回波动,且波动幅度逐渐变大,即偏离给定值越来越远,如图1-9(d)所示。发散振荡为不稳定的过渡过程,其被控变量在控制过程中,不但不能达到平衡状态,而且逐渐远离给定值,它将导致被控变量超出工艺允许范围,严重时会引起事故,这是生产上所不允许的,应竭力避免。

## 1.4.3 控制系统的品质指标

一个性能良好的过程控制系统当给定值发生变化或受到外界扰动作用时,被控变量应能平稳、迅速和准确地趋近或回复到给定值上。因此,在稳定性、快速性和准确性三个方面提出了各种单项控制指标和综合性控制指标。这些控制指标仅适用于衰减振荡过程。

假定自动控制系统在阶跃输入作用下,被控变量的变化曲线如图1-10所示。其中图1-10(a)为定值控制系统的响应曲线;图1-10(b)为随动控制系统的响应曲线。下面是阶跃信号作用下控制系统过渡过程的各项单项控制指标。

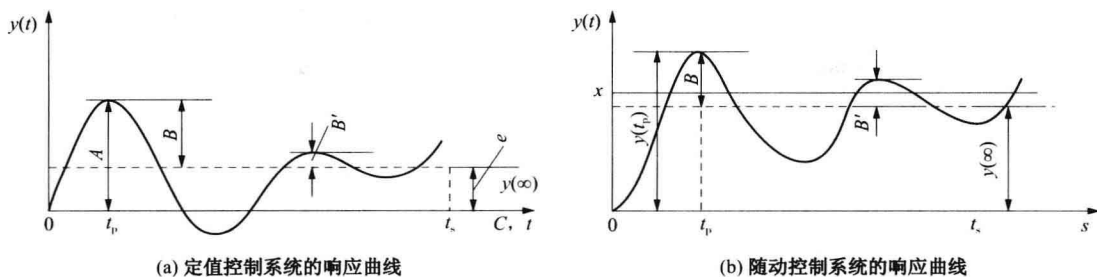


图1-10 阶跃信号作用下控制系统过渡过程响应曲线

### (1) 最大偏差或超调量

最大偏差或超调量是描述被控变量偏离给定值最大程度的物理量,也是衡量过渡过程稳定性的一个动态指标。最大偏差是指在过渡过程中,第一个波的峰值,在图1-10(a)中以A表示,  $A = B + e$ 。超调量可定义为第一个波的峰值与最终稳态值之差,见图1-10(b)中的B,超调量通常用来表示被控变量偏离设定值的程度。一般超调量以百分数给出,即

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

最大偏差或超调量越大,生产过程瞬时偏离设定值就越远。对于某些工艺要求比较高的

生产过程,例如存在爆炸极限的化学反应,就需要限制最大动态偏差的允许值;同时,考虑到扰动会不断出现,偏差有可能是叠加的,这就更需要限制最大动态偏差的允许值。因此,我们必须根据工艺条件确定最大偏差或超调量的允许值。

最大偏差  $A$  或超调量  $\sigma$  是衡量控制系统的重要动态质量指标。

### (2) 衰减比

衰减比是衡量过渡过程稳定性的一个动态质量指标,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,在图 1-10 中衰减比是  $B:B'$ ,习惯上表示为  $n:1$ 。 $n$  越小,意味着控制系统的振荡过程越剧烈,稳定度也越低; $n < 1$ ,过渡过程发散振荡; $n$  接近于 1 时,控制系统的过渡过程接近于等幅振荡过程;反之  $n$  越大,则控制系统的稳定度也越高; $n > 1$ ,过渡过程衰减振荡;当  $n$  趋于无穷大时,控制系统的过渡过程接近于非振荡过程。衰减比究竟多大为合适,没有确切的定论。根据实际操作经验,一般要求  $n = 4 \sim 10$  为宜。

### (3) 余差

余差是控制系统过渡过程终了时给定值  $x$  与被控变量稳态值  $y(\infty)$  之差,即  $e = x - y(\infty)$ ,其值可正可负。它是一个静态质量指标。对于图 1-10(a) 的定值控制系统的过渡过程,  $x = 0$ ,其余差为负的  $y(\infty)$ 。对于图 1-10(b) 的随动控制系统的过渡过程,余差为  $e = x - y(\infty)$ ,此值为正值。余差是反映控制准确性的一个重要稳态指标,一般希望余差愈小愈好,或者不超过预定的范围,但并不是所有的控制系统对余差都有很高的要求,如一般储槽的液位控制,对余差的要求就不是很高,而往往允许液位在一定范围内变化。

### (4) 过渡时间

系统从受到干扰作用发生变化开始,到建立新平衡所需时间即为过渡时间  $t_s$ 。严格地讲,对于具有一定衰减比的衰减振荡过渡过程来说,要完全达到新的平衡状态需要无限长的时间。但实际上当被控变量的变化幅度衰减到足够小时,一般在稳态值的上下规定一个小的范围,当被控变量进入这一范围并不再越出时,就认为被控变量已经达到新的稳态值,或者说过渡过程已经结束。这个范围一般定为稳态值的  $\pm 5\%$  (也有的规定为  $\pm 2\%$ )。过渡时间短,表示控制系统的过渡过程快,即使扰动频繁出现,系统也能适应。显然,过渡时间越短越好,它是反映控制快速性的一个指标。

### (5) 振荡周期或频率

过渡过程同向两波峰(或波谷)之间的间隔时间叫振荡周期或工作周期,其倒数称为振荡频率。在衰减比相同的条件下,振荡频率与过渡时间成反比,振荡频率越高,过渡时间越短。因此振荡频率也可作为衡量控制快速性的指标,定值控制系统常用振荡频率来衡量控制系统的快慢。

综上所述,过渡过程的品质指标主要有:最大偏差(或超调量)、衰减比、余差、过渡时间等。这些指标在不同的系统中各有其重要性,相互之间既有矛盾,又有联系。高标准地要求同时满足这几项控制指标是很困难的。因此,应根据具体情况分清主次,区别轻重,对那些对生产过程有决定性意义的主要品质指标应优先予以保证。

**例** 某换热器的温度控制系统在单位阶跃干扰作用下的过渡过程曲线如图 1-11 所示。试分别求出最大偏差、余差、衰减比、振荡周期和过渡时间(给定值为  $200^\circ\text{C}$ )。

**解** 最大偏差  $A = 230 - 200 = 30^\circ\text{C}$