

化工自动化技术



窦同水◎主编 刘法钦◎副主编

中国石化出版社

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

高职高专系列教材

化工自动化技术

窦同水 主 编
刘法钦 副主编

中国石化出版社

内 容 提 要

本书是根据教育部规定,结合化工工艺类专业教学实际,为满足高职高专院校化工工艺类专业的需要进行编写的。在编写时力求体现高职教育的特点,突出人才培养中创新意识、创新能力和实际应用能力的培养。全书共分五个模块:模块一,自动控制基础;模块二,检测仪表;模块三,控制仪表及装置;模块四,过程控制系统;模块五,化工设备控制。

本书既可作为高职高专院校工艺类专业必修课程教材,同时也可作为函授学校、成人教育学校、企业培训操作工教材和相关工程技术人员学习参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

化工自动化技术/窦同水,刘法钦主编. —北京:
中国石化出版社,2013.3
ISBN 978-7-5114-1957-6

I. ①化… II. ①窦… ②刘… III. ①化工仪表-高等职业教育-教材 IV. ①TQ056

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 021207 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

北京科信印刷有限公司印刷

全国各地新华书店经销

*

787×1092 毫米 16 开本 12.5 印张 310 千字

2013 年 5 月第 1 版 2013 年 5 月第 1 次印刷

定价:36.00 元

前 言

自动化技术是当今举世瞩目的高技术之一，也是中国今后重点发展的一个高科技领域。自动化技术的研究开发与应用水平是衡量一个国家发达程度的重要标志，也是现代化社会的一大标志。

自动化技术的进步推动了工业生产的飞速发展，在促进产业革命中起着十分重要的作用。特别是在石油、化工、冶金、轻工等部门，由于采用了自动化仪表和集中控制装置，促进了连续生产过程自动化的发展，大大地提高了劳动生产率，获得了巨大的社会效益和经济效益。

化工自动化是化工、炼油、冶金、轻工等化工类型生产过程自动化的简称。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，这种用自动化装置来管理化工生产过程的办法，称为化工自动化。

自动化是提高社会生产力的有力工具之一。实现化工生产过程自动化的目的有如下几方面：

(1) 加快生产速度，降低生产成本，提高产品产量和质量。在人工操作的生产过程中，由于人的五官、手、脚，对外界的观察与控制其精确度和速度是有一定限度的。而且由于体力关系，人直接操纵设备功率也是有限的。如果用自动化装置代替人的操纵，则以上情况可以得到避免和改善，并且通过自动控制系统，使生产过程在最佳条件下进行，从而可以大大加快生产速度，降低能耗，实现优质高产。

(2) 减轻劳动强度，改善劳动条件。多数化工生产过程是在高温、高压或低温、低压下进行，还有的是易燃、易爆或有毒、有腐蚀性、有刺激性气味，实现了化工自动化，工人只要对自动化装置的运转进行监视，而不需要再直接从事大量危险的操作。

(3) 能够保证生产安全，防止事故发生或扩大，达到延长设备使用寿命，提高设备利用能力的目的。如离心式压缩机，往往由于操作不当引起喘振而损坏机体；聚合反应釜，往往因反应过程中温度过高而影响生产，假如对这些设备进行必要的自动控制，就可以防止或减少事故的发生。

(4) 生产过程自动化的实现，能从根本上改变劳动方式，提高工人文化技术水平，为逐步地消灭体力劳动和脑力劳动之间的差别创造条件。

由于现代自动化技术的发展，在化工行业，生产工艺、设备、控制与管理已逐渐成为一个有机的整体，因此，一方面，从事化工过程控制的技术人员必须深入了解和熟悉生产工艺与设备；另一方面，化工工艺技术人员必须具有相应的自动控制的知识。现在，越来越多的工艺技术人员认识到：学习自动化及仪表方面的知识，对于管理与开发现代化化工生产过程是十分重要的。为此，化工工艺类专业设置了本门课程。通过本课程的学习，既了解化工自动化的基本知识，理解自动控制系统的组成、基本原理及各环节的作用；又可以根据工艺要求，与自控设计人员共同讨论和提出合理的自动控制方案；还可以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，并为自控设计人员提供正确

的工艺条件与数据；既能了解化工对象的基本特性及其对控制过程的影响；又能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同的关系；还能了解主要工艺参数(温度、压力、流量及物位)的基本测量方法和仪表的工作原理及其特点；在生产控制、管理和调度中，能正确地选用和使用常见的测量仪表和控制装置，使它们充分发挥作用；在生产开停车过程中，能初步掌握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，能发现和分析出现的一些问题和现象，以便提出正确的解决办法；在处理各类技术问题时，可以应用一些控制论、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。

化工生产过程自动化是一门综合性的技术学科。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。然而，化学工程本身又是一门覆盖面很广的学科，化工过程有其自身的规律，而化学工艺更是类型纷繁。对于熟悉化学工程学科的人员，如能再学习和掌握一些检测技术和控制系统方面的知识，必能在推进中国的化工自动化事业中，起到事半功倍的作用。

化工生产过程自动化，一般要包括自动检测、自动保护、自动操纵和自动控制等方面的内容，现分别予以介绍。

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，因此起到人的眼睛的作用。

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，告诫操作人员注意，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。它是生产过程中的一种安全装置。例如某反应器的反应温度超过了允许极限值，自动信号系统就会发出声光信号，报警给工艺操作人员并及时处理生产事故。由于生产过程的强化，往往靠操作人员处理事故已成为不可能，因为在一个强化的生产过程中，事故常常会在几秒钟内发生，由操作人员直接处理是根本来不及的。自动联锁保护系统可以圆满地解决这类问题，如当反应器的温度或压力进入危险限时，联锁系统可立即采取应急措施，加大冷却剂量或关闭进料阀门，减缓或停止反应，从而可避免引起爆炸等生产事故。

3. 自动操纵及自动开停车系统

自动操纵系统可以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。例如合成氨造气车间的煤气发生炉，要求按照吹风、上吹、下吹、制气、吹净等步骤周期性地接通空气和水蒸气，利用自动操纵机可以代替人工自动地按照一定的时间程序扳动空气和水蒸气的阀门，使它们交替地接通煤气发生炉，从而极大地减轻了操作工人的重复性体力劳动。

自动开停车系统可以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。

4. 自动控制系统

生产过程中各种工艺条件不可能是一成不变的。特别是化工生产，大多数是连续性生产，各设备相互关联着，当其中某一设备的工艺条件发生变化时，都可能引起其他设备中某些参数或多或少地波动，偏离了正常的工艺条件，为此，就需要用一些自动控制装置，对生

产中某些关键性参数进行自动控制，在它们受到外界干扰(扰动)的影响而偏离正常状态时，能自动地控制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。

由以上所述可以看出，自动检测系统只能完成“了解”生产过程进行情况的任务；信号联锁保护系统只能在工艺条件进入某种极限状态时，采取安全措施，以避免生产事故的发生；自动操纵系统只能按照预先规定好的步骤进行某种周期性操纵；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。因此，自动控制系统是自动化生产中的核心部分，也是本课程了解和学习的重点。

通过本门课程的学习，应能了解掌握自动控制系统的组成、基本要求、控制指标、对象特性、以及基本控制规律；能了解掌握化工检测仪表基本知识，以及四大常规参数的检测方法及其仪表的工作原理和特点；了解各种类型的控制装置，另外对 DCS、PLC 及 FCS 作简单了解；掌握常规的简单和复杂控制系统，理解控制器参数是如何影响控制系统质量的；熟悉化工生产中常见设备的控制方案。

目 录

模块一 自动控制基础

第1章 自动控制系统概述	(1)
1.1.1 自动控制系统的组成	(1)
1.1.2 系统运行的基本要求	(3)
1.1.3 自动控制系统的分类	(3)
1.1.4 自动控制系统的过渡过程和品质指标	(4)
1.1.5 管道及仪表流程图	(8)
第2章 对象特性	(11)
1.2.1 对象特性的类型	(11)
1.2.2 对象特性的描述	(12)
1.2.3 对象特性的一般分析	(15)
1.2.4 对象特性参数的实验测定方法	(18)
第3章 基本控制规律	(19)
1.3.1 双位控制	(20)
1.3.2 比例控制	(20)
1.3.3 积分控制	(23)
1.3.4 微分控制	(24)
思考题与习题	(26)

模块二 检测仪表

第1章 检测仪表基本知识	(28)
2.1.1 测量过程与测量误差	(28)
2.1.2 测量仪表的性能指标	(29)
2.1.3 工业仪表的分类	(31)
2.1.4 检测系统中信号的传递形式	(32)
第2章 压力检测及仪表	(33)
2.2.1 压力单位及测压仪表	(33)
2.2.2 弹性式压力计	(35)
2.2.3 弹簧管压力表	(35)
2.2.4 电气式压力计	(37)
2.2.5 智能型压力变送器	(39)
2.2.6 压力计的选用及安装	(41)
第3章 流量检测及仪表	(43)
2.3.1 概述	(43)

2.3.2	差压式流量计	(44)
2.3.3	转子流量计	(48)
2.3.4	电磁流量计	(50)
2.3.5	涡轮流量计	(51)
2.3.6	旋涡流量计	(52)
2.3.7	容积式流量计	(52)
2.3.8	质量流量计	(53)
第4章	物位检测及仪表	(54)
2.4.1	概述	(54)
2.4.2	差压式液位变送器	(55)
2.4.3	浮筒式液位计	(58)
2.4.4	电容式物位计	(58)
2.4.5	核辐射式物位计	(59)
2.4.6	超声波物位计	(59)
2.4.7	磁翻转式液位计	(60)
2.4.8	物位检测仪表的选用	(60)
第5章	温度检测	(61)
2.5.1	温度检测的主要方法和分类	(61)
2.5.2	热电偶及其测温原理	(61)
2.5.3	热电阻及其测温原理	(67)
2.5.4	温度变送器简介	(69)
2.5.5	其他温度检测仪表简介	(72)
2.5.6	温度检测仪表的选用和安装	(73)
	思考题与习题	(74)

模块三 控制仪表及装置

第1章	模拟式控制器	(81)
3.1.1	基本构成原理及部件	(82)
3.1.2	DDZ - III型电动控制器	(82)
第2章	数字式控制器	(85)
3.2.1	数字式控制器的主要特点	(85)
3.2.2	数字式控制器的基本构成	(85)
第3章	可编程序控制器	(88)
3.3.1	概述	(88)
3.3.2	PLC 基本组成	(89)
3.3.3	PLC 的基本工作原理	(90)
第4章	集散控制系统	(91)
3.4.1	概述	(91)
3.4.2	DCS 的硬件体系结构	(92)
3.4.3	DCS 的软件系统	(96)

3.4.4 DCS 的组态内容	(98)
第5章 现场总线控制系统	(100)
3.5.1 现场总线概述	(100)
3.5.2 基金会现场总线	(102)
第6章 执行器	(103)
3.6.1 气动执行器	(103)
3.6.2 电动执行器	(112)
3.6.3 电 - 气转换器及电 - 气阀门定位器	(113)
3.6.4 数字阀与智能控制阀	(114)
第7章 显示记录仪表	(115)
3.7.1 数字显示仪表	(115)
3.7.2 无笔、无纸记录仪	(117)
3.7.3 虚拟显示仪表简介	(118)
思考题与习题	(119)

模块四 过程控制系统

第1章 简单控制系统	(121)
4.1.1 简单控制系统的结构与组成	(121)
4.1.2 简单控制系统的设计	(122)
4.1.3 简单控制系统的投运与参数整定	(130)
第2章 复杂控制系统	(134)
4.2.1 串级控制系统	(134)
4.2.2 均匀控制系统	(142)
4.2.3 比值控制系统	(144)
4.2.4 前馈控制系统	(147)
4.2.5 选择性控制系统	(150)
4.2.6 分程控制系统	(154)
思考题与习题	(158)

模块五 化工设备控制

第1章 流体输送设备的控制	(161)
5.1.1 泵的控制	(161)
5.1.2 压缩机的控制	(163)
5.1.3 防喘振控制系统	(164)
第2章 传热设备的控制	(166)
5.2.1 传热设备的静态数学模型	(166)
5.2.2 一般传热设备的控制	(166)
5.2.3 管式加热炉的控制	(168)
第3章 锅炉设备的控制	(170)
5.3.1 锅炉汽包水位的控制	(171)

5.3.2	锅炉燃烧系统的控制	(174)
5.3.3	蒸汽过热系统的控制	(175)
第4章	精馏塔的控制	(176)
5.4.1	工艺要求和扰动分析	(177)
5.4.2	精馏塔被控变量的选择	(178)
5.4.3	精馏塔的控制方案	(180)
第5章	化学反应器的控制	(183)
5.5.1	反应器的控制要求和被控变量的选择	(183)
5.5.2	釜式反应器的控制	(184)
5.5.3	固定床反应器的控制	(185)
5.5.4	流化床反应器的控制	(186)
5.5.5	管式裂解反应器的控制	(187)
5.5.6	鼓泡床反应器的控制	(188)
	思考题与习题	(189)
	参考文献	(190)

模块一 自动控制基础

◆ 本模块主要介绍自动控制的一些基本知识和基本概念，如系统组成、工作原理、动态与反馈，以及过渡过程的品质指标、系统各环节特性等，为后面模块的学习奠定基础。

第1章 自动控制系统概述

本章首先介绍自动控制的一些基本概念，如系统组成、工作原理、动态及反馈，以及过渡过程的品质指标等，为后面章节的学习提供必要的基础知识。

1.1.1 自动控制系统的组成

自动控制系统是在人工控制的基础上产生和发展起来的。为对自动控制有一个更加清晰的了解，下面对人工操作与自动控制作一个对比与分析。

图1-1-1是一个液体储槽，在生产中常用来作为一般的中间容器或成品罐。从前一个工序出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 Q_i (或流出量 Q_o) 波动就会引起槽内液位的波动，严重时甚至会溢出或抽空。解决这个问题的最简单办法，是以储槽液位为操作指标，以改变出口阀门开度为控制手段，如图1-1-1所示。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。为了使液位上升和下降都有足够的余地，选择玻璃管液位计指示值中间的某一点为正常工作时的液位高度，通过改变出口阀门开度而使液位保持在一定高度，这样就不会出现储槽中液位过高而溢出槽外，或使贮槽内液体抽空而发生事故的现象。归纳起来，操作人员所进行的工作有以下三个方面。

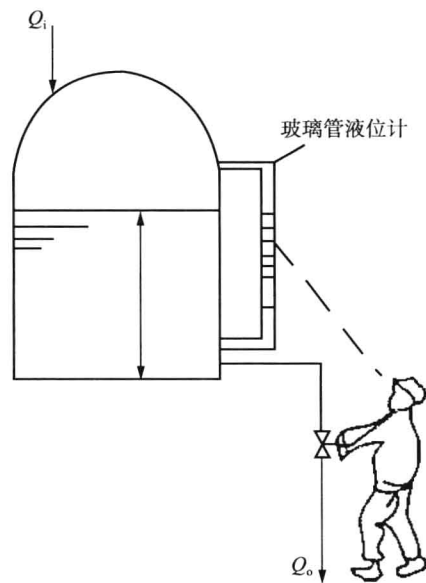


图1-1-1 液位人工控制

(1)检测 用眼睛观察玻璃管液位计(测量元件)中液位的高低。

(2)运算、命令 大脑根据眼睛看到的液位高度，与要求的液位值进行比较，得出偏差的大小和正负，然后根据操作经验，经思考、决策后发出命令。

(3)执行 根据大脑发出的命令，通过手去改变阀门开度，以改变出口流量 Q_o ，从而使液位保持在所需高度上。

眼、脑、手三个器官，分别担负了检测、运算/决策和执行三个任务，来完成测量偏差、

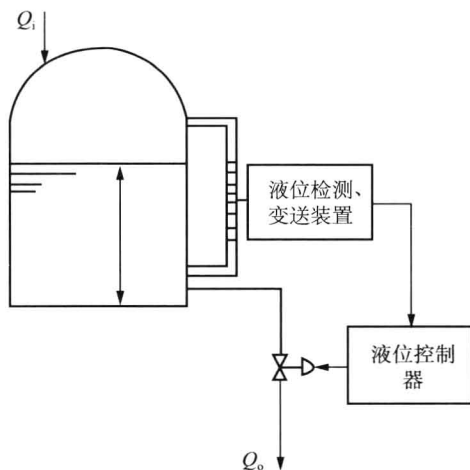


图 1-1-2 液位自动控制

操纵阀门以纠正偏差的全过程。

若采用一套自动控制装置来取代上述人工操作，就称为液位自动控制。自动化装置和液体贮槽一起，构成了一个图 1-1-2 所示的自动控制系统。

下面为以后叙述的方便，结合图 1-1-2 的例子介绍几个常用术语。

(1) 被控对象 需要实现控制的设备、机械或生产过程称为被控对象，简称对象，如图 1-1-2 中的液体储槽。

(2) 被控变量 对象内要求保持一定数值(或按某一规律变化)的物理量称为被控变量，如图 1-1-2 中的液位。被控变量也即为对象的输出变量。

(3) 操纵变量 受执行器控制，用以使被控变量保持一定数值的物料或能量称为控制变量或操纵

变量，如图 1-1-2 所示的出料流量。

(4) 干扰(扰动) 除操纵变量以外，作用于对象并引起被控变量变化的一切因素称为干扰，如图 1-1-2 中的流入贮槽的液体流量。

(5) 设(给)定值 工艺规定被控变量所要保持的数值，如图 1-1-2 中的液位高度。

(6) 偏差 偏差本应是设定值与被控变量的实际值之差，但能获取的信息是被控变量的测量值而非实际值。因此，在控制系统中通常把设定值与测量值之差定义为偏差。

图 1-1-2 所示的液位自动控制系统各环节之间的联系可用图 1-1-3 的方块图来表示。每个方块表示组成系统的一个环节，两个方块之间用一条带箭头的线段表示其相互间的信号联系，箭头表示进入还是离开这个方块，线上的字母表示相互间的作用信号。

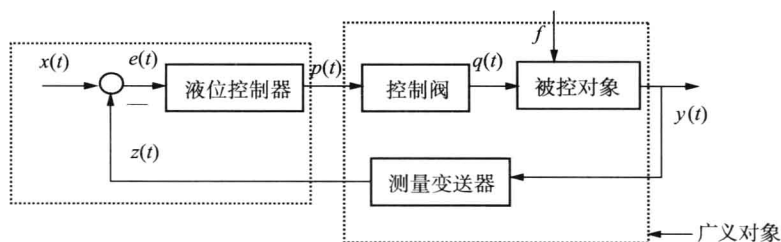


图 1-1-3 自动控制系统方块图

由图 1-1-3 可见，图 1-1-2 所示的液位自动控制系统由控制器、执行器、被控对象及测量/变送环节四部分组成。事实上，图 1-1-3 所示的结构也就是一个典型的简单控制系统的基本组成。因此，一个控制系统的基本组成环节为控制器、执行器、测量/变送环节及被控对象，各部分的功能如下。

(1) 检测与变送环节 它测量被控变量 $z(t)$ ，并将被控变量转换为特定的信号 $y(t)$ 。

(2) 控制器 它接受来自于变送器的信号，与设定值进行比较得出偏差 $e(t) = x(t) - y(t)$ ，并根据一定的规律进行运算，然后将运算结果用特定的信号发送出去。比较机构是控制器的一个组成部分。

(3) 执行器 它根据控制器送来的信号相应地改变控制变量，以达到控制被控变量的

目的。

图中执行器、被控对象及测量/变送环节统称为广义对象，则图 1-1-3 又可用图 1-1-4 所示的方块图表示。

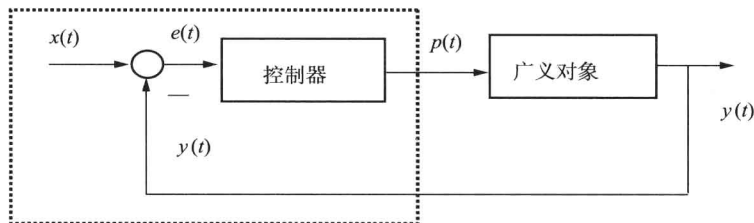


图 1-1-4 控制器与广义对象之间的关系

1.1.2 系统运行的基本要求

1. 系统运行的基本要求

自动控制系统的基本要求是系统运行应保证满足一定的精度要求或某些规定的性能指标，但最基本的要求是稳定的。也就是说系统投入运行后，被控变量不致失控而发散。

再看图 1-1-3 可知，控制系统实际上是各环节输入输出信息相互作用的一个整体，所以整个系统是否稳定运行与系统中的各个环节的特性有关，其中反馈特性更为重要。反馈是控制系统的输出（即被控变量）通过测量、变送环节返回到控制系统的输入端，并与设定值比较的过程。若反馈的结果是使系统的输出减小则称为负反馈；反之，使系统的输出增加的反馈则称为正反馈。工业控制系统一般情况下都应为负反馈。

2. 闭环与开环

系统的输出被反馈到输入端并与设定值进行比较的系统称为闭环系统，此时系统根据设定值与测量值的偏差进行控制，直至消除偏差。系统的输出没有被反馈到输入端，执行器只根据输入信号进行控制的系统称为开环系统，此时系统的输出与设定值及测量值之间的偏差无关。

综上所述，要实现自动控制，系统必须闭环。闭环控制系统稳定运行最基本的必要条件是负反馈。因此自动控制系统必须构成闭环负反馈系统。

3. 正作用与反作用

能否构成闭环负反馈系统和系统中各环节的特性有关。输出信号随输入信号的增加而增加的环节称为正作用环节；而输出信号随输入信号的增加而减小的环节称为反作用环节。由于测量、变送环节一般均具有正作用特性，所以，图 1-1-3 所示的系统要构成负反馈，则控制器、执行器、被控对象三个环节串连相乘后应具有反作用特性。或从图 1-1-4 来看，系统要构成负反馈，则当广义对象为正作用特性时，控制器应为反作用特性；当广义对象为反作用特性时，则控制器应为正作用特性。

由于被控对象和执行器的特性是由实际的工艺现场条件决定的，所以应当通过控制器的正、反作用特性来满足系统负反馈的要求。

1.1.3 自动控制系统的分类

自动控制系统有多种分类方法。按系统的反馈形式可以分为开环控制系统与闭环控制系统；按系统的结构形式可以分为简单控制系统与复杂控制系统；按系统的给定值是否变化可以分为定值控制系统、随动控制系统和程序控制系统。

1. 定值控制系统

给定值恒定不变的闭环控制系统称为定值控制系统。在生产过程中，若工艺要求被控变量为恒定值，那么，就需要采用定值控制系统。图 1-1-2 所示的液位控制系统就是定值控制系统。其目的是为了使贮槽内的液位保持恒定。

2. 随动控制系统

随动控制系统又称自动跟踪系统，这类系统的特点是给定值不断变化，而这种变化不是预先规定好的，也就是说，给定值是随机变化的。随动控制的目的是使被控变量准确、快速地跟随给定值的变化而变化。例如军事领域的导弹制导系统、航空领域的导航雷达系统等都是采用随动控制系统。在化工生产中，比值控制系统就属于随动控制系统。

3. 程序控制系统

这类控制系统的给定值是变化的，但它是一个已知的时间函数，即被控变量按一定的时间程序变化。

1.1.4 自动控制系统的过渡过程和品质指标

1.1.4.1 系统的稳态和动态

(1) 稳态 被控变量不随时间而变化的平衡状态称为系统的稳态，也称定常状态。在这种状态下，自控系统的输入和输出均保持原有的状态不变，整个控制系统处于相对稳定的平衡状态，系统各组成环节的输入、输出信号也都处于相对的静止状态，即各环节信号的变化率为零。此时输入与输出的关系称为稳态特性。

这里所谓的稳态并不是指物料不流动或能量不交换，而是指物料的流动和能量的交换达到了动态平衡。如图 1-1-2 所示的液位贮槽的流入量等于贮槽的流出量时，贮槽的液位就达到了相对平衡状态，即所谓的系统处于稳态。

(2) 动态 被控变量随时间变化的不平衡状态称为系统的动态。在这种状态下，系统各环节的输入、输出信号都处于变化的过程之中。此时输入与输出的关系称为动态特性。此时由于系统各环节的输入是变化的，所以系统的被控变量及各环节的输出信号也是变化的。

在定值控制中，扰动不断使被控变量偏离设定值，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，在随动或程序控制系统中，设定值不断变化，系统也总是处于动态过程中。所以，在自动控制中，了解系统的动态特性比了解系统的稳态特性更为重要。

1.1.4.2 系统的过渡过程

自动控制的目的是使被控变量保持在设定值上。但在实际生产过程中，总是会有干扰存在，使系统偏离平衡状态，处于动态之中，而控制作用又使系统回复到平衡状态。系统从偏离平衡的状态回复到平衡状态的过程，或者说系统从一个平衡状态过渡到另一个平衡状态的过程称为系统的过渡过程。在这个过程中，被控变量是随时间不断变化的。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是十分重要的。

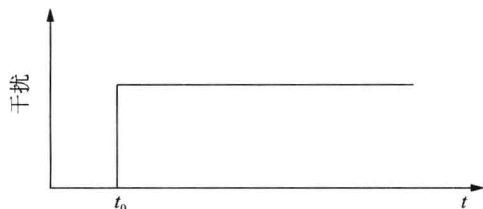


图 1-1-5 阶跃干扰

被控变量的变化规律取决于系统的特性和作用于系统的干扰形式。在生产中，出现的干扰是没有固定形式的，多半属于随机性质。在分析和设计控制系统时，为了方便，常选择一些定型的干扰形式，其中常用的是图 1-1-5 所示的阶跃干扰。采用阶跃干扰的形式来研究自动控制系统是因为考虑到这种形式的干扰比较突然，它对被控

变量的影响较大。如果一个控制系统能够有效地克服这种类型的干扰,那么对于其他较缓和的干扰也能较好地克服。同时,这种干扰的形式简单,容易实现,便于分析、实验和计算。

一般来说,自动控制系统在阶跃干扰作用下的过渡过程有图 1-1-6 所示的几种基本形式。

(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,这种过渡过程形式为非周期衰减过程,如图 1-1-6(a)所示。

(2)衰减振荡过程 被控变量在给定值附近波动,但幅度逐渐减小,最后稳定在某一数值上,这种过渡过程形式为衰减振荡过程,如图 1-1-6(b)所示。

(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,这种情况称为等幅振荡过程,如图 1-1-6(c)所示。

(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,这种情况称为发散振荡过程,如图 1-1-6(d)所示。

(5)单调发散过程 被控变量虽不振荡。但偏离原来的平衡点越来越远,如图 1-1-6(e)所示。

以上过渡过程的五种形式可以归纳为三类(参照图 1-1-6)。

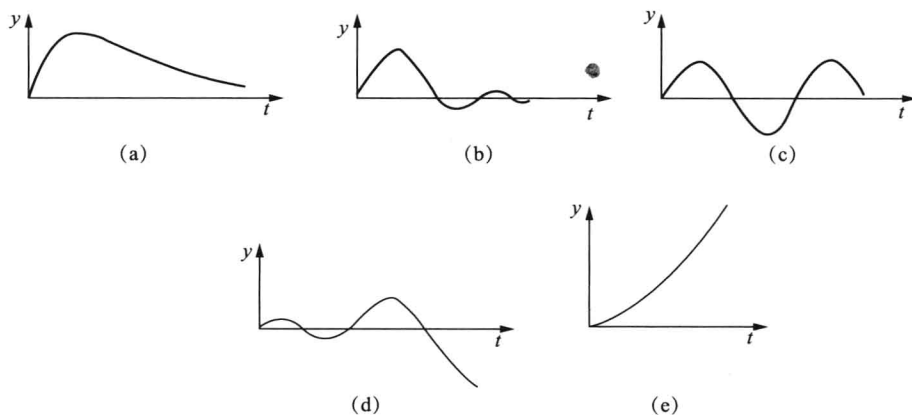


图 1-1-6 过渡过程的几种形式

(1)衰减过程 过渡过程形式(a)和(b)都是衰减的,称为稳定过程。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,这是所希望的。对于非周期的衰减过程,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)等幅振荡过程 过渡过程形式(c)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,那么这种过渡过程的形式是可以采用的。

(3)发散过程 过渡过程形式(d)、(e)是发散的,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越工艺允许范围,严重时会引起事故,这是生产上所不允许的,应竭力避免。

1.1.4.3 描述系统过渡过程的品质指标

控制系统的过渡过程形式是衡量控制系统品质的依据。由于在多数情况下,都希望得到衰减振荡过程,所以取衰减振荡的过渡过程形式来讨论控制系统的品质指标。假定自

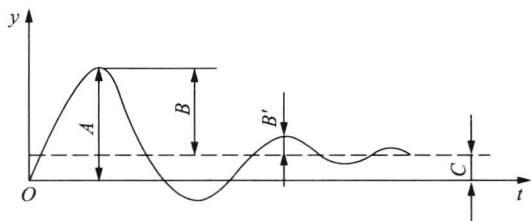


图 1-1-7 过渡过程的品质指标

动控制系统在阶跃输入作用下, 被控变量的变化曲线如图 1-1-7 所示。图上横坐标为时间, 纵坐标为被控变量。假定在时间 $t=0$ 之前, 系统稳定, 且被控变量等于给定值, 在 $t=0$ 时刻, 外加阶跃干扰作用, 系统的被控变量开始按衰减振荡规律变化, 然后逐渐稳定在 C 值上。

对于如图 1-1-7 所示的过渡过程一般采用下列品质指标来评价控制系统的质量。

1. 最大偏差或超调量

最大偏差是指在过渡过程中, 被控变量偏离给定值的最大数值。在衰减振荡过程中, 最大偏差就是第一个波的峰值, 在图 1-1-7 中以 A 表示。最大偏差表示系统瞬间偏离给定值的最大程度。若偏离越大, 偏离的时间越长, 对稳定正常生产越不利。一般来说, 最大偏差以小为好, 特别是对于一些有约束条件的系统, 如化学反应器的化合物爆炸极限、触媒烧结温度极限等, 都会对最大偏差的允许值有所限制。同时考虑到干扰会不断出现, 当第一个干扰还未消除时, 第二个干扰可能又出现了, 偏差有可能是叠加的, 这就更需要限制最大偏差的允许值。所以, 在决定最大偏差允许值时, 应根据工艺情况慎重选择。

有时也可以用超调量来表征被控变量偏离给定值的程度。在图 1-1-7 中超调量以 B 表示。从图中可以看出, 超调量是第一峰值 A 与新稳态值 C 之差, 即 $B = A - C$ 。如果系统的新稳态值等于给定值, 那么最大偏差 A 也就与超调量 B 相等。超调量习惯上用百分数 σ 来表示。

$$\sigma = \frac{B}{C} \times 100\% \quad (1-1-1)$$

2. 衰减比 n

衰减比指前后相邻两个峰值之比。在图 1-1-7 中, 衰减比 $n = B/B'$ 。若 $n > 1$, 过渡过程是衰减振荡过程; 若 $n = 1$, 过渡过程是等幅振荡过程; 若 $n < 1$, 过渡过程是发散振荡过程。

要满足控制要求, n 必须大于 1。若 n 虽然大于 1, 但只比 1 稍大一点, 则过渡过程接近于等幅振荡过程, 由于这种过程不易稳定、振荡过于频繁, 不够安全, 因此一般不采用。如果 n 很大, 则又太接近于非振荡过程, 过渡过程过于缓慢, 通常这也是不希望的。一般 n 取 4:1 ~ 10:1 之间为宜。因为衰减比在 4:1 ~ 10:1 之间时, 过渡过程开始阶段的变化速度比较快, 被控变量在同时受到干扰作用和控制作用的影响后, 能比较快地达到一个峰值, 然后马上下降, 又较快地达到一个低峰值, 而且第二个峰值远远低于第一个峰值。当操作人员看到这种现象后, 心里就比较踏实, 因为操作人员知道被控变量再振荡数次后就会很快稳定下来; 并且最终的稳态值显然在两峰值之间, 决不会出现太高或太低的现象, 更不会远离给定值以致造成事故。尤其在反应比较缓慢的情况下, 衰减振荡过程的这一特点尤为重要。对于这种系统, 如果过渡过程是或接近于非振荡的衰减过程, 操作人员很可能在较长时间内, 都只看到被控变量一直上升(或下降), 就会怀疑被控变量会继续上升(或下降)不止, 由于这种焦急的心情, 很可能会进行干预。假若一旦出现这种情况, 那么就等于给系统施加了人为的干扰, 有可能使被控变量离开给定值更远, 使系统处于难以控制的状态。所以, 选择衰减振荡过程并规定衰减比在 4:1 ~ 10:1 之间, 是根据多年的实践经验总结得出的结论。

3. 余差

过渡过程终了时, 被控变量新稳态值与设定值之差称为余差。或者说余差就是过渡过程

终了时存在的残余偏差,在图1-1-7中用 C 表示。给定值是生产的技术指标,所以,被控变量越接近给定值越好,亦即余差越小越好。但实际生产中,也并不是要求任何系统的余差都很小,如一般储槽的液位调节要求就不高,这种系统往往允许液位有较大的变化范围,余差就可以大一些。又如化学反应器的温度控制,一般要求比较高,应当尽量消除余差。所以,对余差大小的要求,必须结合具体系统作具体分析,不能一概而论。有余差的控制过程称为有差控制,相应的系统称为有差系统;没有余差的控制过程称为无差控制,相应的系统称为无差系统。

4. 过渡时间

从干扰作用开始,到系统重新建立平衡为止,过渡过程所经历的时间称为过渡时间。从理论上讲,要完全达到新的平衡状态需要无限长的时间。实际上,我们把从干扰开始作用之时起,到被控变量进入新稳态值的 $\pm 5\%$ (或 $\pm 2\%$)的范围内且不再越出时为止所经历的时间,可计为过渡时间。过渡时间短,表示过渡过程进行得比较迅速,这时即使干扰频繁出现,系统也能适应,系统控制质量就高;反之,过渡时间太长,第一个干扰引起的过渡过程尚未结束,第二个干扰就已经出现,这样,几个干扰的影响叠加起来,就可能使系统满足不了生产的要求。

5. 振荡周期或频率

过渡过程同向相邻两波峰(或波谷)之间的时间间隔称为振荡周期或工作周期,其倒数称为振荡频率。在衰减比相同的情况下,周期与过渡时间成正比。一般希望振荡周期短一些。

除上述品质指标外,还有一些次要的品质指标,其中振荡次数,是指在过渡过程内被控变量振荡的次数。所谓“理想过渡过程两个波”,就是指过渡过程振荡两次就能稳定下来,它在一般情况下,可认为是较为理想的过程。另外,上升时间也是一个品质指标,它是指干扰开始作用起至第一个波峰时所需要的时间,显然,上升时间以短一些为好。

综上所述,过渡过程的品质指标主要有:最大偏差、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,且相互之间既有矛盾又有联系。因此,应根据具体情况分清主次,区别轻重,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。另外,对一个系统提出的品质要求和评价一个控制系统的质量,都应该从实际需要出发,不应过分偏高偏严,否则就会造成人力物力的巨大浪费,有时甚至根本无法实现。

例1-1 某换热器的温度调节系统在单位阶跃干扰作用下的过渡过程曲线如图1-1-8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°C)。

解: (1)最大偏差: $A = 230 - 200 = 30(^{\circ}\text{C})$ 。

(2)余差 $C = 205 - 200 = 5(^{\circ}\text{C})$ 。

(3)第一个波峰值 $B = 230 - 205 = 25(^{\circ}\text{C})$, 第二个波峰值 $B' = 210 - 205 = 5(^{\circ}\text{C})$, 衰减比 $n = 25:5 = 5:1$ 。

(4)振荡周期为同向相邻两波峰之间的时间间隔,故周期: $t = 20 - 5 = 15(\text{min})$ 。

(5)过渡时间与规定的被控变量限制范围大小有关,假定被控变量进入额定值的 $\pm 2\%$,就可以认为过渡过程已经结束,那么限制范围为 $200 \times$

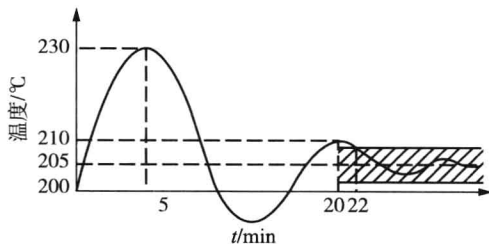


图1-1-8 温度控制系统过渡过程曲线