

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

# 化工仪表 及自动化

(化学工程与工艺专业适用)

第四版

厉玉鸣 主编



化学工业出版社  
高等教育教材出版中心

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

# 化工仪表及自动化

## (化学工程与工艺专业适用)

第四版

厉玉鸣 主 编  
王建林 副主编



化学工业出版社  
高等教育教材出版中心

· 北 京 ·

本书是在基本保持第三版的体系结构基础上,对其内容进行除旧添新、适当修改而成的,除介绍工业生产过程中自动控制系统方面的基本知识外,还分别介绍了构成自动控制系统的被控对象、检测元件与传感器、自动控制仪表、显示仪表及执行器等。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,最后结合生产过程介绍了典型化工单元操作的控制方案。

本书适用于高等学校化学工程与工艺专业,也适用于其他一些类型(例如石油、医药、轻工、食品、林业、冶金、煤矿、生物、环境……)高校相关专业,还可供从事连续生产过程的工艺技术人员参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

化工仪表及自动化/厉玉鸣主编.—4版.—北京:化学工业出版社,2006.5

普通高等教育“十一五”国家级规划教材  
ISBN 7-5025-8645-8

I.化… II.厉… III.化工仪表-高等学校-教材  
IV.TQ056

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第043057号

---

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

### 化工仪表及自动化

(化学工程与工艺专业适用)

第四版

厉玉鸣 主编

王建林 副主编

责任编辑:唐旭华

文字编辑:陈敏

责任校对:顾淑云 徐贞珍

封面设计:郑小红

\*

化学工业出版社 出版发行  
高等教育教材出版中心

(北京市朝阳区惠新里3号 邮政编码100029)

购书咨询:(010)64982530

(010)64918013

购书传真:(010)64982630

<http://www.cip.com.cn>

\*

新华书店北京发行所经销

化学工业出版社印刷厂印装

开本 787mm×1092mm 1/16 印张 16½ 字数 433千字

2006年9月第4版 2006年9月北京第1次印刷

ISBN 7-5025-8645-8

定价:25.00元

---

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者,本社发行部负责退换

# 前 言

本书自1981年出版以来,经全国许多高等学校试用,基本上满足了化工高等院校及其他一些类型(例如石油、医药、轻工、食品、林业、冶金、煤矿、生物、环境……)高校工艺类专业的教学需要。在1991年、1999年,作者针对该书多年使用中发现问题,并考虑到化工仪表及自动化生产水平的提高,对原书的内容作了两次较大的改动,逐渐形成以自动化为主线的整体编写思想,分别出版了该书的第二版和第三版。该书自出版以来,经过多次印刷,被许多学校和单位选用,受到广大师生和读者的欢迎和支持,并提出了许多宝贵的意见,在此向广大师生和读者表示衷心的感谢。

伴随着科学技术的迅猛发展,自动化技术已成为当代举世瞩目的高技术之一。由于生产过程连续化、大型化、复杂化,使得广大的工艺生产技术人员需要学习和掌握必要的检测技术及自动化方面的知识,这是现代工业生产实现高效、优质、安全、低耗的基本条件和重要保证,也是有关人员管理与开发现代化生产过程所必须具备的知识。为了满足广大师生及有关人员学习本门课程的需要,我们将在原书的基础上,编写该书的第四版。这次修订的总体思路是在基本保持原书体系结构的基础上,在内容上作了较大的改动,删除某些在当前已显得陈旧的内容,改写某些显得比较繁琐或工艺技术人员较少接触的内容,增加大量反映当前自动化水平的内容。针对工艺类学生的特点和需要,本教材在注重课程内容不断更新和整体优化的同时,努力以较少的理论推导和较简明的叙述,将化工仪表及自动化的基本内容以及许多新概念、新系统、新方法、新工具一并展现在读者面前。全书基本上涵盖了国内外仪表自动化方面的最新技术和发展动态。在编写方面,集教学内容的先进性与叙述的深入浅出为一体,以更好地满足化工工艺类学生学习的需要。

本教材各章后面给出了习题与思考题,供广大师生与读者参考。为了满足广大师生与读者的教学需要,我们与几所院校合作编写了相应的《化工仪表及自动化例题习题集》,该习题集第一版已于1999年由化学工业出版社出版。这次在修改教材的同时,我们将修订习题集。第二版的习题集在内容上将大大充实,基本上覆盖了目前已经出版的同类教材的所有习题与思考题,除了对主要的习题给出了详细的题解外,还列举了部分例题进行了深入的分析,以使该课程的任课教师与学生能更好地理解教材的内容与要点。

本书相关电子课件可免费提供给采用本书作为教材的大专院校使用,如有需要请联系:txh@cip.com.cn。

本书第四版由厉玉鸣教授主编,王建林教授任副主编。参加该版修订的还有北京林业大学张谦老师、北京服装学院李慧、陈亚男老师、北京化工大学金翠云、赵鑫老师等。

参加过本书第一、二、三版编写工作的还有华南理工大学吴嘉麟、南京化工大学何叔奋、钱玲,北京化工大学潘立登、马俊英、黄玉洁等老师,对他们为本书付出的辛勤劳动深表敬意。在这次改版过程中,得到许多同志的帮助,这里谨向这些同志及对本书提出过宝贵意见的广大师生和读者表示感谢,并恳切希望大家继续对本书第四版提出宝贵的意见。

编者

2006年4月

# 目 录

绪论 .....	1
<b>第一章 自动控制系统基本概念 .....</b>	<b>3</b>
第一节 化工自动化的主要内容 .....	3
第二节 自动控制系统的基本组成及方块图 .....	4
第三节 自动控制系统的分类 .....	7
第四节 自动控制系统的过渡过程和品质指标 .....	8
一、控制系统的静态与动态 .....	8
二、控制系统的过渡过程 .....	8
三、控制系统的品质指标 .....	10
四、影响控制系统过渡过程品质的主要因素 .....	12
第五节 工艺管道及控制流程图 .....	13
一、图形符号 .....	13
二、字母代号 .....	14
三、仪表位号 .....	15
习题与思考题 .....	15
<b>第二章 过程特性及其数学模型 .....</b>	<b>18</b>
第一节 化工过程的特点及其描述方法 .....	18
第二节 对象数学模型的建立 .....	20
一、建模目的 .....	20
二、机理建模 .....	20
三、实验建模 .....	24
第三节 描述对象特性的参数 .....	26
一、放大系数 $K$ .....	26
二、时间常数 $T$ .....	27
三、滞后时间 $\tau$ .....	29
习题与思考题 .....	32
<b>第三章 检测仪表与传感器 .....</b>	<b>34</b>
第一节 概述 .....	34
一、测量过程与测量误差 .....	34
二、仪表的性能指标 .....	34
三、工业仪表的分类 .....	37
第二节 压力检测及仪表 .....	38
一、压力单位及测压仪表 .....	38
二、弹性式压力计 .....	39
三、电气式压力计 .....	41
四、智能型压力变送器 .....	46
五、压力计的选用及安装 .....	47
第三节 流量检测及仪表 .....	49

一、概述 .....	49
二、差压式流量计 .....	50
三、转子流量计 .....	55
四、椭圆齿轮流量计 .....	60
五、涡轮流量计 .....	61
六、电磁流量计 .....	61
七、漩涡流量计 .....	62
八、质量流量计 .....	63
<b>第四节 物位检测及仪表 .....</b>	<b>65</b>
一、概述 .....	65
二、差压式液位变送器 .....	66
三、电容式物位传感器 .....	68
四、核辐射物位计 .....	70
五、称重式液罐计量仪 .....	70
<b>第五节 温度检测及仪表 .....</b>	<b>71</b>
一、温度检测方法 .....	72
二、热电偶温度计 .....	74
三、热电阻温度计 .....	81
四、电动温度变送器 .....	83
五、一体化温度变送器 .....	84
六、智能式温度变送器 .....	85
七、测温元件的安装 .....	86
<b>第六节 现代检测技术与传感器的发展 .....</b>	<b>87</b>
一、软测量技术的发展 .....	87
二、现代传感器技术的发展 .....	88
<b>习题与思考题 .....</b>	<b>90</b>
<b>附录一 常用压力表规格及型号 .....</b>	<b>93</b>
<b>附录二 铂铑<sub>10</sub>-铂热电偶分度表 .....</b>	<b>93</b>
<b>附录三 镍铬-铜镍热电偶分度表 .....</b>	<b>96</b>
<b>附录四 镍铬-镍硅热电偶分度表 .....</b>	<b>96</b>
<b>附录五 铂电阻分度表 .....</b>	<b>98</b>
<b>附录六 铜电阻 (Cu50) 分度表 .....</b>	<b>100</b>
<b>附录七 铜电阻 (Cu100) 分度表 .....</b>	<b>101</b>
<b>第四章 显示仪表 .....</b>	<b>102</b>
<b>第一节 模拟式显示仪表 .....</b>	<b>102</b>
一、自动电子电位差计 .....	102
二、自动电子平衡电桥 .....	105
<b>第二节 数字式显示仪表 .....</b>	<b>108</b>
一、数字式显示仪表的特点及分类 .....	108
二、数字式显示仪表的基本组成 .....	108
<b>第三节 新型显示仪表 .....</b>	<b>109</b>
一、无笔、无纸记录仪 .....	110
二、虚拟显示仪表 .....	111
<b>习题与思考题 .....</b>	<b>111</b>

<b>第五章 自动控制仪表</b> .....	112
<b>第一节 概述</b> .....	112
<b>第二节 基本控制规律及其对系统过渡过程的影响</b> .....	112
一、双位控制 .....	113
二、比例控制 .....	114
三、积分控制 .....	117
四、微分控制 .....	118
<b>第三节 模拟式控制器</b> .....	119
一、基本构成原理及部件 .....	119
二、DDZ-III型电动控制器 .....	120
<b>第四节 数字式控制器</b> .....	122
一、数字式控制器的主要特点 .....	122
二、数字式控制器的基本构成 .....	123
三、KMM型可编程序调节器 .....	125
<b>第五节 可编程序控制器</b> .....	126
一、概述 .....	126
二、可编程序控制器的基本组成 .....	128
三、可编程序控制器的编程语言 .....	130
四、OMRON C系列PLC .....	131
五、应用示例 .....	135
<b>习题与思考题</b> .....	139
<b>第六章 执行器</b> .....	140
<b>第一节 气动执行器</b> .....	140
一、气动执行器的结构与分类 .....	140
二、控制阀的流量特性 .....	143
三、控制阀的选择 .....	146
四、气动执行器的安装和维护 .....	148
<b>第二节 电动执行器</b> .....	148
<b>第三节 电-气转换器及电-气阀门定位器</b> .....	149
一、电-气转换器 .....	149
二、电-气阀门定位器 .....	150
<b>第四节 数字阀与智能控制阀</b> .....	150
一、数字阀 .....	150
二、智能控制阀 .....	151
<b>习题与思考题</b> .....	151
<b>第七章 简单控制系统</b> .....	153
<b>第一节 简单控制系统的结构与组成</b> .....	153
<b>第二节 简单控制系统的设计</b> .....	154
一、被控变量的选择 .....	154
二、操纵变量的选择 .....	156
三、测量元件特性的影响 .....	158
四、控制器控制规律的选择 .....	160
<b>第三节 控制器参数的工程整定</b> .....	163
一、临界比例度法 .....	163

二、衰减曲线法 .....	164
三、经验凑试法 .....	164
习题与思考题 .....	166
<b>第八章 复杂控制系统 .....</b>	<b>168</b>
<b>第一节 串级控制系统 .....</b>	<b>168</b>
一、概述 .....	168
二、串级控制系统的工作过程 .....	170
三、串级控制系统的特点 .....	172
四、串级控制系统中副回路的确定 .....	172
五、主、副控制器控制规律及正、反作用的选择 .....	175
六、控制器参数的工程整定 .....	177
<b>第二节 均匀控制系统 .....</b>	<b>178</b>
一、均匀控制的目的 .....	178
二、均匀控制方案 .....	179
<b>第三节 比值控制系统 .....</b>	<b>180</b>
一、概述 .....	180
二、比值控制系统的类型 .....	181
<b>第四节 前馈控制系统 .....</b>	<b>183</b>
一、前馈控制系统及其特点 .....	183
二、前馈控制的主要形式 .....	185
三、前馈控制的应用场合 .....	187
<b>第五节 选择性控制系统 .....</b>	<b>187</b>
一、基本概念 .....	187
二、选择性控制系统的类型 .....	188
三、积分饱和及其防止 .....	192
<b>第六节 分程控制系统 .....</b>	<b>193</b>
一、概述 .....	193
二、分程控制的应用场合 .....	194
三、分程控制中的几个问题 .....	196
<b>第七节 多冲量控制系统 .....</b>	<b>196</b>
习题与思考题 .....	198
<b>第九章 新型控制系统 .....</b>	<b>200</b>
<b>第一节 自适应控制系统 .....</b>	<b>200</b>
一、变增益自适应控制 .....	200
二、模型参考自适应控制系统 .....	201
三、直接优化目标函数的自适应控制系统 .....	201
四、自校正控制系统 .....	201
<b>第二节 预测控制 .....</b>	<b>202</b>
一、预测控制的基本结构 .....	202
二、预测控制的特点及应用 .....	203
<b>第三节 其他新型控制系统 .....</b>	<b>204</b>
一、智能控制 .....	204
二、专家控制系统 .....	205
三、模糊控制系统 .....	207



四、神经网络控制 .....	207
五、故障检测与故障诊断 .....	209
六、解耦控制系统 .....	211
七、推断控制系统 .....	213
八、鲁棒控制 .....	213
习题与思考题 .....	214
<b>第十章 计算机控制系统 .....</b>	<b>215</b>
<b>第一节 概述 .....</b>	<b>215</b>
一、计算机控制系统的组成 .....	215
二、计算机控制系统的特点 .....	216
三、计算机控制系统的发展过程 .....	216
<b>第二节 集散控制系统 .....</b>	<b>218</b>
一、集散控制系统的特点 .....	218
二、集散控制系统的基本构成 .....	219
三、CENTUM-CS集散控制系统 .....	219
<b>第三节 现场总线控制系统 .....</b>	<b>226</b>
一、现场总线控制系统的特点 .....	226
二、现场总线国际标准化 .....	228
三、主要的现场总线系统简介 .....	228
习题与思考题 .....	229
<b>第十一章 典型化工单元的控制方案 .....</b>	<b>230</b>
<b>第一节 流体输送设备的控制方案 .....</b>	<b>230</b>
一、离心泵的控制方案 .....	230
二、往复泵的控制方案 .....	231
三、压气机的控制方案 .....	232
四、离心式压缩机的防喘振控制 .....	233
<b>第二节 传热设备的自动控制 .....</b>	<b>235</b>
一、两侧均无相变化的换热器控制方案 .....	235
二、载热体进行冷凝的加热器自动控制 .....	237
三、冷却剂进行汽化的冷却器自动控制 .....	238
<b>第三节 精馏塔的自动控制 .....</b>	<b>239</b>
一、工艺要求 .....	240
二、精馏塔的干扰因素 .....	240
三、精馏塔的控制方案 .....	241
<b>第四节 化学反应器的自动控制 .....</b>	<b>244</b>
一、化学反应器的控制要求 .....	245
二、釜式反应器的温度自动控制 .....	245
三、固定床反应器的自动控制 .....	246
四、流化床反应器的自动控制 .....	248
<b>第五节 生化过程的控制 .....</b>	<b>248</b>
一、常用生化过程控制 .....	249
二、青霉素发酵过程控制 .....	250
三、啤酒发酵过程控制 .....	251
习题与思考题 .....	251
<b>参考文献 .....</b>	<b>253</b>

## 绪 论

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和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、食品、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如下。

(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，能根本改变劳动方式，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。

从化工生产过程自动化的发展情况来看，首先是应用一些自动检测仪表来监视生产。在20世纪40年代以前，绝大多数化工生产处于手工操作状况，操作工人根据反映主要参数的仪表指示情况，用人工来改变操作条件，生产过程单凭经验进行。对于那些连续生产的化工厂，在进出物料彼此联系中装设了大的贮槽，起着克服干扰影响及稳定生产的作用，显然生产是低效率的，花在设备上的庞大投资也是浪费的。

20世纪50年代到60年代，人们对化工生产各种单元操作进行了大量的开发工作，使得化工生产过程朝着大规模、高效率、连续生产、综合利用方向迅速发展。因此，要使这类工厂生产运行正常，必须要有性能良好的自动控制系统和仪表。此时，在实际生产中应用的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，同时，串级、比值、多冲量等复杂控制系统也得到了一定程度的发展。所应用的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。此时期由于还不能深入了解化工对象的动态特性，因此，应用半经验、半理论的设计准则和整定公式，给自动控制系统设计和参数整定起了相当重要

的作用，解决了许多实际问题。

20世纪70年代以来，化工自动化技术又有了新的发展。在自动化技术工具方面，仪表的更新非常迅速，特别是计算机在自动化中发挥越来越重要的作用，这对常规仪表产生了一系列的影响，促使常规仪表不断变革，以满足生产过程中对能量利用、产品质量等各方面越来越高的要求。在自动控制系统方面，由于控制理论和控制技术的发展和进步，给自动控制系统的的发展创造了各种有利条件，各种新型控制系统相继出现，控制系统的设计与整定方法也有了新的发展。

现代自动化技术已经不只是局限于对生产过程中重要参数的自动控制了，概括地说，现代自动化技术主要具有以下一些特点：现代自动化技术已发展为综合自动化，其应用的领域和规模越来越大，控制与管理一体化的系统已提到议事日程，因此，其社会、经济效益也越来越大；自动化技术显示了知识密集化、高技术集成化的特点，它是信息技术、自动化技术、管理科学等相结合的现代高技术，在发展自动化技术的过程中，软设备所起的作用日益被重视；自动化过程中的智能化程度日益增加，各种智能仪表不断出现，控制的精度越来越高，控制的方式日益多样化，自动化技术不仅仅是减轻和代替了人们的体力劳动，而且也在很大程度上代替了人们的脑力劳动。

20世纪末，计算机、信息技术的飞速发展，引发了自动化系统结构的变革：专用微处理器嵌入传统测量控制仪表，使它们具有数字计算和数字通讯能力；采用双绞线等作为通信总线，把多个测量控制仪表连接成网络系统，并按开放、标准的通讯协议，在多个现场智能测量控制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，组成各种适合实际需要的自动控制系统，即现场总线控制系统。现场总线控制系统的出现，使自动化仪表、集散控制系统和可编程序控制器产品的体系结构、功能结构都发生了很大的变化。

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，应能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；能根据工艺要求，与自控设计人员共同讨论和提出合理的自动控制方案；能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；能了解化工对象的基本特性及其对控制过程的影响；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间的关系；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；能在生产开车过程中，初步掌握自动控制系统的投运及控制器的参数整定；能在自动控制系统运行过程中，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；能在处理各类技术问题时，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。

# 第一章 自动控制系统基本概念

## 第一节 化工自动化的主要内容

为了实现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，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。

图 1-1 的热交换器是利用蒸汽来加热冷液的，冷液经加热后的温度是否达到要求，可用测温元件配上平衡电桥来进行测量、指示和记录；冷液的流量可以用孔板流量计进行检测；蒸汽压力可用压力表来指示，这些就是自动检测系统。

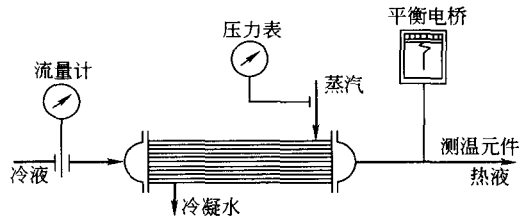


图 1-1 热交换器自动检测系统示意图

### 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及时处埋生产事故。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

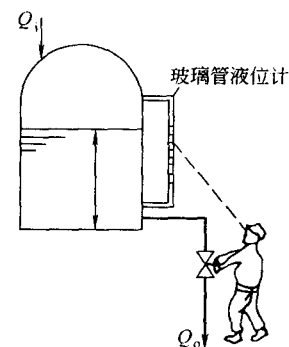
生产过程中各种工艺条件不可能是一成不变的。特别是化工生产，大多数是连续性生产，各设备相互关联着，当其中某一设备的工艺条件发生变化时，都可能引起其他设备中某些参数或多或少地波动，偏离了正常的工艺条件，为此，就需要用一些自动控制装置，对生

产中某些关键性参数进行自动控制,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。

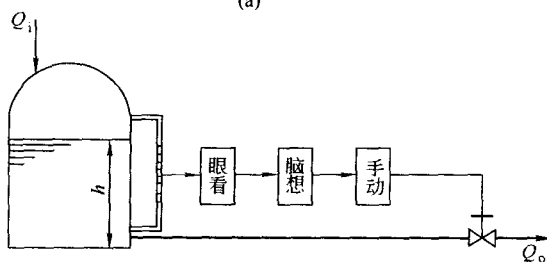
由以上所述可以看出,自动检测系统只能完成“了解”生产过程进行情况的任务;信号连锁保护系统只能在工艺条件进入某种极限状态时,采取安全措施,以避免生产事故的发生;自动操纵系统只能按照预先规定好的步骤进行某种周期性操纵;只有自动控制系统才能自动地排除各种干扰因素对工艺参数的影响,使它们始终保持在预先规定的数值上,保证生产维持在正常或最佳的工艺操作状态。因此,自动控制系统是自动化生产中的核心部分,也是本课程了解和学习的重点。

## 第二节 自动控制系统的基本组成及方块图

自动控制系统是在人工控制的基础上产生和发展起来的。所以,在开始介绍自动控制的时候,先分析人工操作,并与自动控制加以比较,对分析和了解自动控制系统是有裨益的。



(a)



(b)

图 1-2 液位人工控制

图 1-2 所示是一个液体贮槽,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  $Q_i$ (或流出量  $Q_o$ ) 波动时会引起槽内液位的波动,严重时会引起溢出或抽空。解决这个问题的最简单办法,是以贮槽液位为操作指标,以改变出口阀门开度为控制手段,如图 1-2 (a) 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这一高度上,这样就不会出现贮槽中液位过高而溢至槽外,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三方面,如图 1-2 (b) 所示。

(1) 检测 用眼睛观察玻璃管液位计(测量元件)中液位的高低,并通过神经系统告诉大脑。

(2) 运算(思考)、命令 大脑根据眼睛看到的液位高度,加以思考并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、运算和执行三个作用,来完成测量、求偏差、操纵阀门以纠正偏差的全过程。由于人工控制受到人的生理上的限制,因此在控制速度和精度上都满足不了大型现代化生产的需要。为了提高控制精度和减轻劳动强度,可用一套自动化装置来代替上述人工操作,这样就由人工控制变为自动控制了。液体贮槽和自动化装置一

起构成了一个自动控制系统，如图 1-3 所示。

为了完成人的眼、脑、手三个器官的任务，自动化装置一般至少也应包括三个部分，分别用来模拟人的眼、脑和手的功能。如图 1-3 所示，自动化装置的两个部分分别是：

(1) 测量元件与变送器 它的功能是测量液位并将液位的高低转化为一种特定的、统一的输出信号（如气压信号或电压、电流信号等）；

(2) 自动控制器 它接受变送器送来的信号，与工艺需要保持的液位高度相比较得出偏差，并按某种运算规律算出结果，然后将此结果用特定信号（气压或电流）发送出去；

(3) 执行器 通常指控制阀，它与普通阀门的功能一样，只不过它能自动地根据控制器送来的信号值来改变阀门的开启度。

显然，这套自动化装置具有人工控制中操作人员的眼、脑、手的部分功能，因此，它能完成自动控制贮槽中液位高低的任务。

在自动控制系统的组成中，除了必须具有前述的自动化装置外，还必须具有控制装置所控制的生产设备。在自动控制系统中，将需要控制其工艺参数的生产设备或机器叫做被控对象，简称对象。图 1-3 所示的液体贮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器、反应器、换热器、泵和压缩机以及各种容器、贮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。在复杂的生产设备中，如精馏塔、吸收塔等，在一个设备上可能有好几个控制系统。这时在确定被控对象时，就不一定是生产设备的整个装置。譬如说，一个精馏塔，往往塔顶需要控制温度、压力等，塔底又需要控制温度、塔釜液位等，有时中部还需要控制进料流量，在这种情况下，就只有塔的某一与控制有关的相应部分才是某一个控制系统的被控对象。例如，在讨论进料流量的控制系统时，被控对象指的仅是进料管道及阀门等，而不是整个精馏塔本身。

在研究自动控制系统时，为了能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，一般都用方块图来表示控制系统的组成。例如图 1-3 的液位自动控制系统可以用图 1-4 的方块图来表示。每个环节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其信号的相互关系，箭头指向方块表示为这个环节的输入，箭头离开方块表示为这个环节的输出。线旁的字母表示相互间的作用信号。

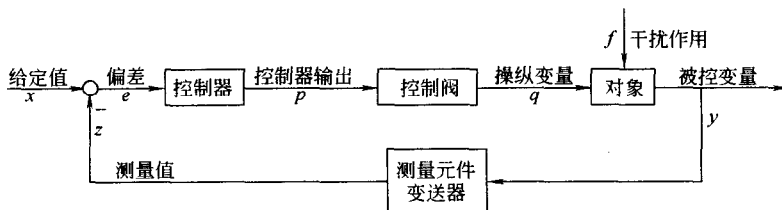


图 1-4 液位自动控制系统方块图

图 1-3 的贮槽在图 1-4 中用一个“对象”方块来表示，其液位就是生产过程中所要保持恒定的变量，在自动控制系统中称为被控变量，用  $y$  来表示。在方块图中，被控变量  $y$  就是对象的输出。影响被控变量  $y$  的因素来自进料流量的改变，这种引起被控变量波动的外来因素，在自动控制系统中称为干扰作用（扰动作用），用  $f$  表示。干扰作用是作用于对象

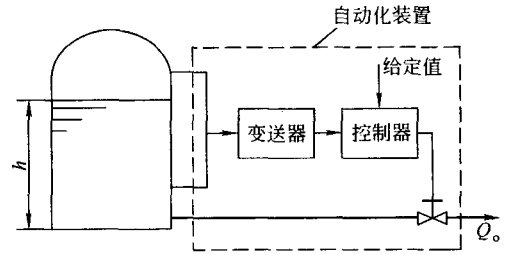


图 1-3 液位自动控制系统

的输入信号。与此同时，出料流量的改变是由于控制阀动作所致，如果用一方块表示控制阀，那么，出料流量即为“控制阀”方块的输出信号。出料流量的变化也是影响液位变化的因素，所以也是作用对象的输入信号。出料流量信号  $q$  在方块图中把控制阀和对象连接在一起。

贮槽液位信号是测量元件及变送器的输入信号，而变送器的输出信号  $z$  进入比较机构，与工艺上希望保持的被控变量数值，即给定值（设定值） $x$  进行比较，得出偏差信号  $e$  ( $e = x - z$ )，并送往控制器。比较机构实际上只是控制器的一个组成部分，不是一个独立的仪表，在图中把它单独画出来（一般方块图中是以  $\odot$  或  $\otimes$  表示），为的是能更清楚地说明其比较作用。控制器根据偏差信号的大小，按一定的规律运算后，发出信号  $p$  送至控制阀，使控制阀的开度发生变化，从而改变出料流量以克服干扰对被控变量（液位）的影响。控制阀的开度变化起着控制作用。具体实现控制作用的变量叫做操纵变量，如图 1-3 中流过控制阀的出料流量就是操纵变量。用来实现控制作用的物料一般称为操纵介质或操纵剂，如上述中的流过控制阀的流体就是操纵介质。

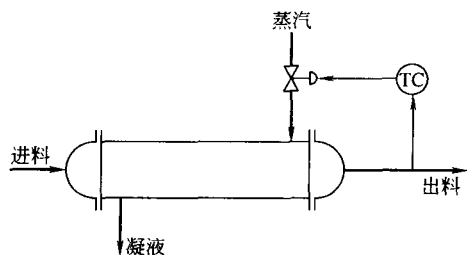


图 1-5 蒸汽加热器温度控制系统

用同一种形式的方块图可以代表不同的控制系统。例如图 1-5 所示的蒸汽加热器温度控制系统，当进料流量或温度变化等因素引起出口物料温度变化时，可以将该温度变化测量后送至温度控制器 TC。温度控制器的输出送至控制阀，以改变加热蒸汽量来维持出口物料的温度不变。这个控制系统同样可以用图 1-4 的方块图来表示。这时被控对象是加热器，被控变量  $y$  是出口物料的温度。干扰作用可能是进料流量、进料温度的变化、

加热蒸汽压力的变化、加热器内部传热系数或环境温度的变化等。而控制阀的输出信号即操纵变量  $q$  是加热蒸汽量的变化，在这里，加热蒸汽是操纵介质或操纵剂。

必须指出，方块图中的每一个方块都代表一个具体的装置。方块与方块之间的连接线，只是代表方块之间的信号联系，并不代表方块之间的物料联系。方块之间连接线的箭头也只是代表信号作用的方向，与工艺流程图上的物料线是不同的。工艺流程图上的物料线是代表物料从一个设备进入另一个设备，而方块图上的线条及箭头方向有时并不与流体流向相一致。例如对于控制阀来说，它控制着操纵介质的流量（即操纵变量），从而把控制作用施加于被控对象去克服干扰的影响，以维持被控变量在给定值上。所以控制阀的输出信号  $q$ ，任何情况下都是指向被控对象的。然而控制阀所控制的操纵介质却可以是流入对象的（例如图 1-5 中的加热蒸汽），也可以是由对象流出的（例如图 1-3 中的出口流量）。这说明方块图上控制阀的引出线只是代表施加到对象的控制作用，并不是具体流入或流出对象的流体。如果这个物料确实是流入对象的，那么信号与流体的方向才是一致的。

对于任何一个简单的自动控制系统，只要按照上面的原则去作它们的方块图时，就会发现，不论它们在表面上有多大差别，它的各个组成部分在信号传递关系上都形成一个闭合的环路。其中任何一个信号，只要沿着箭头方向前进，通过若干个环节后，最终又会回到原来的起点。所以，自动控制系统是一个闭环系统。

再看图 1-4 中，系统的输出变量是被控变量，但是它经过测量元件和变送器后，又返回到系统的输入端，与给定值进行比较。这种把系统（或环节）的输出信号直接或经过一些环节重新返回到输入端的做法叫做反馈。从图 1-4 中还可以看到，在反馈信号  $z$  旁有一个负号“-”，而在给定值  $x$  旁有一个正号“+”（正号可以省略）。这里正和负的意思是在比较时，以  $x$  作为正值，以  $z$  作为负值，也就是到控制器的偏差信号  $e = x - z$ 。因为图 1-4 中的反馈信号  $z$  取负值，所以叫负反馈，负反馈的信号能够使原来的信号减弱。如果反馈信号取正

值, 反馈信号使原来的信号加强, 那么就叫做正反馈。在这种情况下, 方块图中反馈信号  $z$  旁则要用正号 “+”, 此时偏差  $e = x + z$ 。在自动控制系统中都采用负反馈。因为当被控变量  $y$  受到干扰的影响而升高时, 只有负反馈才能使反馈信号  $z$  升高, 经过比较到控制器去的偏差信号  $e$  将降低, 此时控制器将发出信号而使控制阀的开度发生变化, 变化的方向为负, 从而使被控变量下降回到给定值, 这样就达到了控制的目的。如果采用正反馈, 那么控制作用不仅不能克服干扰的影响, 反而是推波助澜, 即当被控变量  $y$  受到干扰升高时,  $z$  亦升高, 控制阀的动作方向是使被控变量进一步升高, 而且只要有一点微小的偏差, 控制作用就会使偏差越来越大, 直至被控变量超出了安全范围而破坏生产。所以控制系统绝对不能单独采用正反馈。

综上所述, 自动控制系统是具有被控变量负反馈的闭环系统。它与自动检测、自动操纵等开环系统比较, 最本质的区别, 就在于自动控制系统有负反馈。开环系统中, 被控(工艺)变量是不反馈到输入端的, 如化肥厂的造气自动机就是典型的开环系统的例子。图 1-6 是这种自动操纵系统的方块图。自动机

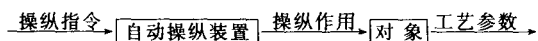


图 1-6 自动操纵系统方块图

在操作时, 一旦开机, 就只能是按照预先规定好的程序周而复始地运转。这时

煤气炉的工况如果发生了变化, 自动机是不会自动地根据炉子的实际工况来改变自己的操作的。自动机不能随时“了解”炉子的情况并依此改变自己的操作状态, 这是开环系统的缺点。反过来说, 自动控制系统由于是具有负反馈的闭环系统, 它可以随时了解被控对象的情况, 有针对性地根据被控变量的变化情况而改变控制作用的大小和方向, 从而使系统的工作状态始终等于或接近于所希望的状态, 这是闭环系统的优点。

### 第三节 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。也可以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。在分析自动控制系统特性时, 最经常遇到的是将控制系统按照工艺过程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, 这样可将自动控制系统分为三类, 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

所谓“定值”就是恒定给定值的简称。工艺生产中, 如果要求控制系统的作用是使被控制的工艺参数保持在一个生产指标上不变, 或者说要求被控变量的给定值不变, 那么就需要采用定值控制系统。图 1-3 所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贮槽内的液位保持在给定值不变。同样, 图 1-5 所示的温度控制系统也属于定值控制系统, 它的目的是为了出口物料的温度保持恒定。化工生产中要求的大都是这种类型的控制系统, 因此后面所讨论的, 如果未加特别说明, 都是指定值控制系统。

#### 2. 随动控制系统(自动跟踪系统)

这类系统的特点是给定值不断地变化, 而且这种变化不是预先规定好了的, 也就是说给定值是随机变化的。随动系统的目的就是使所控制的工艺参数准确而快速地跟随给定值的变化而变化。例如航空上的导航雷达系统、电视台的天线接收系统, 都是随动系统的一些例子。

在化工生产中, 有些比值控制系统就属于随动控制系统。例如要求甲流体的流量与乙流体的流量保持一定的比值, 当乙流体的流量变化时, 要求甲流体的流量能快速而准确地随之变化。由于乙流体的流量变化在生产中可能是随机的, 所以相当于甲流体的流量给定值也是



随机的，故属于随动控制系统。

### 3. 程序控制系统（顺序控制系统）

这类系统的给定值也是变化的，但它是一个已知的函数，即生产技术指标需按一定的时间程序变化。这类系统在间歇生产过程中应用比较普通。例如合成纤维锦纶生产中的熟化罐温度控制和机械工业中金属热处理的温度控制都是这类系统的例子。近年来，程序控制系统应用日益广泛，一些定型的或非定型的程控装置越来越多地被应用到生产中，微型计算机的广泛应用也为程序控制提供了良好的技术工具与有利条件。

## 第四节 自动控制系统的过渡过程和品质指标

### 一、控制系统的静态与动态

在自动化领域中，把被控变量不随时间而变化的平衡状态称为系统的静态，而把被控变量随时间变化的不平衡状态称为系统的动态。

当一个自动控制系统的输入（给定和干扰）和输出均恒定不变时，整个系统就处于一种相对稳定的平衡状态，系统的各个组成环节如变送器、控制器、控制阀都不改变其原先的状态，它们的输出信号也都处于相对静止状态，这种状态就是上述的静态。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。习惯上所说的静止都是指静止不动（当然指的仍然是相对静止）。而在自动化领域中的静态是指系统中各信号的变化率为零，即信号保持在某一常数不变化，而不是指物料不流动或能量不交换。因为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，只是平稳进行没有改变就是了。

自动控制系统的目的就是希望将被控变量保持在一个不变的给定值上，这只有当进入被控对象的物料量（或能量）和流出对象的物料量（或能量）相等时才有可能。例如图 1-3 所示的液位控制系统，只有当流入贮槽的流量和流出贮槽的流量相等时，液位才能恒定，系统才处于静态。图 1-5 所示的温度控制系统，只有当进入换热器的热量和由换热器出去的热量相等时，温度才能恒定，此时系统就达到了平衡状态，亦即处于静态。

假若一个系统原先处于相对平衡状态即静态，由于干扰的作用而破坏了这种平衡时，被控变量就会发生变化，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。从干扰发生开始，经过控制，直到系统重新建立平衡，在这一段时间中，整个系统的各个环节和信号都处于变动状态之中，所以这种状态叫做动态。

在自动化工作中，了解系统的静态是必要的，但是了解系统的动态更为重要。这是因为在生产过程中，干扰是客观存在的，是不可避免的，例如生产过程中前后工序的相互影响；负荷的改变；电压、气压的波动；气候的影响等。这些干扰是破坏系统平衡状态引起被控变量发生变化的外界因素。在一个自动控制系统投入运行时，时时刻刻都有干扰作用于控制系统，从而破坏了正常的工艺生产状态。因此，就需要通过自动化装置不断地施加控制作用去对抗或抵消干扰作用的影响，从而使被控变量保持在工艺生产所要求控制的技术指标上。所以，一个自动控制系统在正常工作时，总是处于一波未平，一波又起，波动不止，往复不息的动态过程中。显然，研究自动控制系统的重点是要研究系统的动态。

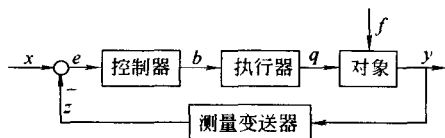


图 1-7 控制系统方块图

### 二、控制系统的过渡过程

图 1-7 是简单控制系统的方块图。假定系统原先处于平衡状态，系统中的各信号不随时间而变化。在某一个时刻  $t_0$ ，有一干扰作用于对象，于是系统的输出  $y$  就要变化，系统进入动态过程。由于自动