

21世纪

高等学校应用型规划教材

化工仪表及自动化

孟华 刘娜 厉玉鸣 等编



化学工业出版社

21 世纪高等学校应用型规划教材

化工仪表及自动化

孟 华 刘 娜 厉玉鸣 等编



化学工业出版社

· 北京 ·

本书为满足应用型本科院校的教学要求,全面系统地介绍了化工过程控制系统的基本概念、过程检测与控制仪表、控制系统的设计方法等基础知识,并配有典型的应用实例。

全书共分八章。内容包括:绪论、过程参数的检测方法 with 仪表、过程控制仪表与装置、简单控制系统、复杂控制系统、过程计算机控制系统、典型生产过程控制和过程控制系统工程设计。

本书可作为应用型本科院校石油、化工、制药、冶金、轻工、机械、生物、环境等专业仪表及自动控制课程的教材,也可作为高职高专院校相关专业同类课程的教材,还可供工程技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

化工仪表及自动化/孟华,刘娜,厉玉鸣等编. —北京:
化学工业出版社, 2009. 2
21 世纪高等学校应用型规划教材
ISBN 978-7-122-04581-2

I. 化… II. 孟… 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. TQ056

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 008817 号

责任编辑:唐旭华
责任校对:蒋宇

文字编辑:张艳
装帧设计:尹琳琳

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:三河市延风印装厂

787mm×1092mm 1/16 印张17¼ 字数468千字 2009年3月北京第1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: 29.80 元

版权所有 违者必究

前 言

伴随着科学技术的迅猛发展,自动化技术已广泛地应用于石油、化工、制药、冶金、电力、轻工、机械、生物、环境等许多国民经济的重要领域。要实现化工生产过程的自动化,不但需要自动化专业人员,还需要有各类工艺专业人员和设备设计与管理人员的配合。因此,广大的工艺生产技术及管理人员有必要学习和掌握必要的检测技术及自动化方面的知识。这是现代化工生产实现高效、优质、安全、低耗的基本条件和重要保证,也是实现管理和开发现代化生产过程的重要保障。

我国高等教育已走进大众化阶段的今天,人才培养模式多样化已成为必然的趋势。应用型人才的培养注重面向工程实践,培养学生理论联系实际、解决实际问题的能力。从这点出发,本书在内容编排和组织上注重实际应用,注意引用工程中的实例,培养学生的工程意识和工程应用能力,并配有适当的实验内容和工程设计实例,以适应应用型本科院校的教学要求。

全书共分八章。第一章绪论,介绍化工过程自动化所包含的主要内容、发展概况、控制系统组成与分类。第二章过程参数的检测方法 with 仪表,介绍化工过程常用参数的检测方法和检测仪表原理、选用。第三章过程控制仪表与装置,除介绍常用变送器、控制器、执行器的结构、原理及选用外,还为 PLC(可编程控制器)系统的学习特别增加了常用低压电器方面的知识。第四章简单控制系统,介绍简单控制系统的典型结构、过程模型的建立方法、简单控制系统的设计及实例。第五章复杂控制系统,介绍串级、比值、前馈、均匀、分程和选择性控制系统的特性及设计方法。第六章过程计算机控制系统,对 DCS(集散控制系统)、PLC、FCS(现场总线控制系统)等系统的结构、特点、功能进行了较详细介绍,并给出了应用实例。第七章典型生产过程控制,分别对传热设备、精馏塔、化学反应器、锅炉设备、生化过程控制进行了分析和讨论。第八章过程控制系统工程设计,介绍工程设计的基本概念和基本内容,相关的设计标准和设计实例。为便于读者学习,各章后面均配有思考题与习题。

本书编写具体分工如下:孟华编写第四章、第五章、第八章,刘娜编写第二章的第二、三、四、六、七节及第三章的第一、二、三、四节,厉玉鸣编写第一章、第七章,刘慧敏编写第六章的第一、二、三、四、六节,甄然编写第三章的第五节和第六章的第五节,王凤全编写第二章的第一节,魏文渊编写第二章的第五节。

在书稿编写过程中,参考了大量的文献,得到了化学工业出版社的诚挚帮助,在此一并向参考文献的作者及关心和支持本书出版的单位和个人表示衷心的感谢。

本书配有相关的电子课件可免费提供给采用本书作为教材的院校使用,如有需要请联系 txh@cip.com.cn。

由于编者水平有限,难免有错误或不妥之处,恳切希望广大专家和读者给予批评和指正。

编者
2008年11月

目 录

第一章 绪论	1	第六节 成分量的检测	51
第一节 化工过程自动化概述	1	一、pH值的检测	51
一、化工过程自动化的目的及学习意义	1	二、氧含量的检测	53
二、化工过程自动化的主要内容	2	第七节 数字式显示记录仪	55
第二节 化工过程自动化发展概况	3	一、数字式显示仪表	55
第三节 过程控制系统的组成及分类	4	二、无笔无纸记录仪	59
一、过程控制系统的组成	4	思考题与习题	61
二、过程控制系统的分类	5	实验一 检测系统设计实验	63
第四节 过程控制系统性能指标	7	实验二 Pt100铂电阻测温特性实验	63
一、单项控制性能指标	7	实验三 K热电偶测温特性实验	64
二、综合控制性能指标	8	第三章 过程控制仪表与装置	66
思考题与习题	9	第一节 过程控制仪表的基础知识	66
第二章 过程参数的检测方法与仪表	10	一、过程控制仪表的分类	66
第一节 概述	10	二、过程控制仪表的型号命名	67
一、检测过程及误差	10	三、过程控制仪表的信号制式	68
二、检测仪表的基本技术性能指标	11	四、安全防爆的基本知识	68
第二节 压力检测方法及其仪表	14	第二节 变送器	70
一、压力检测的基本知识	14	一、变送器的基本概念	70
二、主要压力检测方法及其分类	15	二、差压变送器	73
三、压力检测仪表	15	三、温度变送器	76
四、压力计的选用	23	第三节 控制器	79
第三节 物位检测方法及其仪表	24	一、控制器的控制规律	79
一、物位检测的主要方法及分类	24	二、模拟式控制器	84
二、静压式液位计	25	第四节 执行器	88
三、电容式物位计	27	一、气动执行器	88
四、超声式物位计	28	二、电动执行器	90
五、磁致伸缩式液位计	29	三、控制机构	92
第四节 流量检测方法及其仪表	30	四、电-气转换器及电-气阀门定位器	99
一、流量检测方法及其分类	30	第五节 常用低压电器	100
二、差压式流量计	31	一、低压电器的作用与分类	100
三、电磁式流量计	36	二、常用电磁式低压电器	101
第五节 温度检测方法及其仪表	38	三、常用其他低压电器	106
一、温度检测的基本知识	38	四、继电器接触式电气控制	109
二、温度检测方法	38	思考题与习题	113
三、热电偶温度计	40	实验一 变送器校验系统设计实验	113
四、热电阻温度计	46	实验二 三相异步电动机正反转运行控制	
五、测温元件的选用和安装	49	实验	114

第四章 简单控制系统	115	第六章 过程计算机控制系统	166
第一节 简单控制系统的组成	115	第一节 概述	166
第二节 过程的特性及建模方法	116	一、过程计算机控制系统的组成	167
一、过程特性及基本类型	117	二、过程计算机控制系统的分类	168
二、过程动态模型的建立方法	118	第二节 数据通信技术	171
三、过程参数对过程动态特性的影响	123	一、异步传送与同步传送	171
第三节 简单控制系统的设计	126	二、并行与串行传输	172
一、被控变量的选择	126	三、RS-232C/RS-485 接口及应用	172
二、操纵变量的选择	127	第三节 工业网络技术	175
三、系统设计中的测量变送问题	128	一、工业网络概述	175
四、控制器控制规律的选择	132	二、网络协议及其层次结构	176
五、简单控制系统设计实例	133	三、工业网络的性能评价和选型	177
第四节 简单控制系统的投运及参数		第四节 集散控制系统	178
整定	134	一、集散控制系统概述	178
一、简单控制系统的投运	134	二、现场控制站	179
二、控制器参数的工程整定	135	三、操作员站及工程师站	180
思考题与习题	140	四、集散控制系统的工程设计	182
实验 简单控制系统实验	141	五、集散控制系统的应用	183
第五章 复杂控制系统	143	第五节 可编程控制器控制系统	187
第一节 串级控制系统	143	一、PLC 概述	187
一、串级控制系统的基本概念	143	二、PLC 的结构及工作原理	189
二、串级控制系统的特点	146	三、可编程控制器的硬件资源	190
三、串级控制系统的设计	147	四、PLC 的编程语言	191
四、串级控制系统的应用场合	147	五、PLC 应用系统设计实例	192
五、串级控制系统应用中的问题	148	第六节 现场总线及现场总线控制系统	195
第二节 比值控制系统	149	一、现场总线概述	195
一、概述	149	二、几种有影响的现场总线技术	196
二、常用的比值控制方案	149	三、以现场总线为基础的控制系統	198
三、比值控制系统的设计	152	思考题与习题	200
第三节 前馈控制系统	153	实验一 S7-200 基本操作及位逻辑指令应用	
一、前馈控制系统的基本概念	153	实验	200
二、前馈控制系统的几种结构形式	155	实验二 自动往返的小车控制编程实验	203
三、前馈控制系统的应用场合	156	第七章 典型生产过程控制	205
第四节 均匀控制系统	157	第一节 流体输送设备的控制方案	205
一、均匀控制的概念	157	一、离心泵的控制方案	205
二、均匀控制方案	158	二、往复泵的控制方案	207
第五节 分程控制系统	158	三、压气机的控制方案	207
一、分程控制系统的基本概念	158	四、离心式压缩机的防喘振控制	208
二、分程控制系统的应用	159	第二节 传热设备的自动控制	211
三、分程控制应用中的几个问题	162	一、两侧均无相变化的换热器控制	
第六节 选择性控制系统	162	方案	211
一、选择性控制系统基本概念	162	二、载热体进行冷凝的加热器自动	
二、选择性控制系统的应用	162	控制	213
三、积分饱和及其防止措施	164	三、冷却剂进行汽化的冷却器自动	
思考题与习题	165	控制	214

第一章 绪 论

第一节 化工过程自动化概述

一、化工过程自动化的目的及学习意义

自动化技术是现代化社会的一大标志，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。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。

化工过程自动化是化工、炼油、食品、轻工等化工类型生产过程自动化的简称。即在化工设备上，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，称为化工过程自动化。

自动化是提高社会生产力的有利工具之一，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，提高产品的产量和质量。在人工操作的生产过程中，由于人的五官、手、脚对外界的观察和控制其精准度和速度有一定限制。而且由于体力关系，人直接操纵设备功率也有限制。如果用自动化装置代替人的操纵，则以上情况可以得到改善，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。

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，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；同时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，工艺类专业设置了这门课程。通过本课程的学习，应能了解化工生产过程自动化的基本知识，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，并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；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性；在生产控制、管理和调度中，能正确的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方法；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、考虑事务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，化学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。

二、化工过程自动化的主要内容

化工过程自动化一般包括自动检测系统、自动信号和连锁保护系统、自动操纵及自动开停车系统和自动控制系统等，现分别予以介绍。

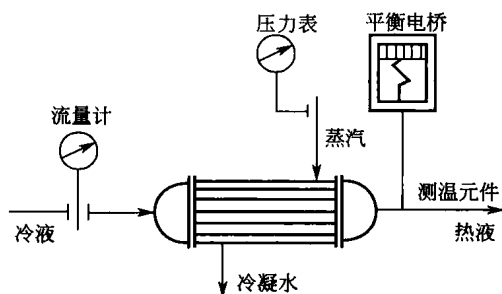


图 1-1 热交换器自动检测系统

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。

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。

2. 自动信号和连锁保护系统

生产过程中，有时会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，从而出现不正常情况，引起事故的发生。为此，常对那些关键性参数设计自动信号连锁装置。当工艺参数超过允许范围，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。如果工况已到达危险状态，连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的极限值，自动信号系统就会发出声光信号，报警给工艺操作人员以及及时处理生产事故。在一个强化的生产过程中，事故常常会在几秒内发生，由操作人员直接处理是根本来不及的。自动连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，连锁系统可立即采取应急措施，加大冷却剂量或者关闭进料阀门，减缓或停止反应，从而可避免引发爆炸产生事故。

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的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、吹净等步骤周期性的接通空气和水蒸气，利用自动操纵机可代替人工自动的按照一定的时间程序扳动空气和水蒸气的阀门，使它们交替的接通煤气发生炉，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停止运行。

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；自动信号和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；自动操纵及自动开停车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的排除各种干扰因素对工艺参数的影响，使它们始终保持在事先规定的数值上，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，也是本书的重点内容。

第二节 化工过程自动化发展概况

在化工过程自动化发展的历程中，生产过程的需求、控制理论的开拓和控制技术工具和手段的进展三者相互影响、相互促进，推动了过程控制技术不断向前发展。纵观其发展历史，大致经历了以下几个阶段。

20世纪40年代，绝大多数化工生产处于收工操作状况，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储槽，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，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，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，对自动控制系统设计和参数整定起到了相当重要的作用，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，概括地说，现代自动化技术主要具有以下一些特点：现代自动化技术已经发展为综合自动化，其应用的领域和规模越来越大，控制和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，软设备所起的作用在日益被重视，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。

从 20 世纪 90 年代开始，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讯总线，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控制器产品的体系结构、功能结构都发生了很大改变。

第三节 过程控制系统的组成及分类

一、过程控制系统的组成

在化工生产过程中，各类工艺参数必须在预先规定的工况条件下进行操作才能保证生产安全、高效地进行。如：储罐和容器（包括油罐、水箱、锅炉汽包等）液位要求维持在规定的范围；生化过程中发酵罐的温度、压力、pH 等要符合工艺要求。但是在实际生产过程中，由于种种因素的影响，往往会使这些表征生产过程状态的参数偏离要求。若要做到稳定操作，就必须对其进行必要的控制。利用自动控制装置构成的过程控制系统，可以在没有人直接参与的条件下，使这些工艺参数能自动按照预定的规律变化。下面通过一个实例来了解化工过程自动控制系统。

锅炉是化工、炼油、发电等工业生产过程中的重要动力设备。它所产生的高压蒸汽即可作为风机、压缩机、大型泵类的动力源，又可作为蒸馏、化学反应、干燥和蒸发等过程的热源。

在锅炉正常运行中，汽包水位是一个重要的参数，它的高低直接影响着蒸汽的品质及锅炉的安全。如果水位过低，当负荷很大时，汽化速度很快，汽包内的液体将全部汽化，导致锅炉烧干甚至会引起爆炸；水位过高会影响汽包的汽水分离，产生蒸汽带液现象，降低了蒸汽的质量和产量，严重时损坏后续设备。图 1-2(a) 为锅炉汽包示意。

要使锅炉水位保持在规定的数值上，必须使蒸汽的耗汽量与锅炉给水量相适应。如果锅炉给水量不变，蒸汽负荷突然增加或减小就会使水位下降或上升。反之，蒸汽负荷不变而给水压力变化，水位同样会偏离规定的数值。

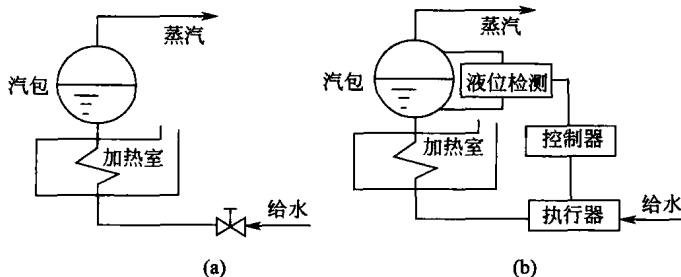


图 1-2 锅炉汽包水位控制示意

要想实现对汽包水位的控制，首先应随时掌握水位的变化情况。通过液位变送器就可以及时了解水位的变化情况，同时把测得的水位信号转换成相应的标准信号送到控制器。控制器将接收到的测量信号与预先规定的水位高度进行比较。如果两个信号不相等，表明实际水位与规定水位有偏差，此时控制器将根据偏差的大小向执行器输出一个控制信号，执行器即可根据控制信号来改变阀门的开度，从而使进入锅炉的水量发生变化，达到控制锅炉汽包水位的目的。图 1-2(b) 为锅炉汽包水位控制系统示意。

通过实例可以看出，一个过程控制系统一般由两部分组成。一部分是需要控制的现场设备或机器，即被控过程（对象），另一部分是起控制作用的全套自动控制装置。在不同的系统中，结构完全不同的装置（元件）可能具有相同的作用。控制装置由具有一定职能的各种装置（元件）组成。这些装置应具备三种基本功能，即测量、比较计算和执行。

(1) 传感器（检测装置）作用是检测被控制的物理量，如果这个物理量是非电量，一般还需转换为电量。例如测速发电机用于检测电动机轴的速度，并将其转换为电压；热电偶用于检测温度并将温度转换为电压。

(2) 控制器 作用是将设定值与测量信号进行比较，求出它们之间的偏差，然后按照预先选定的控制规律进行计算，并将计算结果作为控制信号送给执行装置。

(3) 执行器（装置）作用是接收控制器的控制信号，直接影响被控对象，使被控变量发生变化。例如，气动薄膜调节阀、电动执行器、电动机等。

二、过程控制系统的分类

从不同的角度出发，对过程控制系统有不同的分类方法。如按系统功能可将系统分为温度控制系统、压力控制系统、位置控制系统、流量控制系统等；按系统性能可分为线性系统 and 非线性系统、连续系统和离散系统、定常系统和时变系统；按被控变量的数量分为单变量控制系统和多变量控制系统；按采用的控制装置又分为常规仪表控制系统、计算机控制系统；按控制系统基本结构形式进行分类，又可将系统分为闭环控制系统和开环控制系统。下面重点介绍闭环控制系统和开环控制系统。

1. 闭环控制系统

闭环控制系统是指控制器与被控对象之间既有顺向控制又有反向联系的控制系统。如图 1-2 所示的锅炉汽包水位控制系统。系统的输出（被控变量）通过测量变送环节返回到系统的输入端与设定信号进行比较，并以偏差的形式进入控制器，对系统起控制作用，整个系统构成了封闭的闭合回路。这样的控制系统称为闭环控制系统，也称反馈控制系统。因此凡是系统的输出端与输入端之间存在反馈支路，使得输出变量对控制作用有直接影响的系统既是闭环控制系统。

闭环控制系统的优点是，不管任何扰动引起被控变量偏离设定值，都会产生控制作用去克服被控变量与设定值的偏差。因此闭环控制系统有较高的控制精度和较好的适应能力，其应用范围非常广泛。闭环控制系统的缺点是，由于闭环控制系统的控制作用只有在偏差出现后才产生，当系统的惯性滞后和纯滞后较大时，控制作用对扰动的克服不及时，从而使其控制质量大大降低。

在闭环控制系统中，根据设定值的不同形式，又可分为定值控制系统、随动控制系统和程序控制系统。

(1) 定值控制系统 设定值是固定不变的闭环控制系统称为定值控制系统。在这类控制系统中，引起输出波动的原因不是设定值而是扰动量，因此这类控制系统的任务是保证在扰动作用下使被控变量始终保持在设定值上。在生产过程控制中大量的控制系统属于定值控制系统。这是因为这些生产过程都需要有一定的工作条件，要求将过程参数（如温度、压力、

液位、流量、位移、速度等)保持在一定的数值上。

(2) 随动控制系统 设定值是一个未知变化量的闭环控制系统称为随动控制系统。这类控制系统的任务是保证在各种条件下系统的输出(被控变量)以一定的精度跟随设定值的变化而变化。

随动控制系统在交通、通信、国防等方面应用很广。如船舶驾驶舵角位置自动跟踪系统;雷达的自动跟踪系统;火炮自动瞄准系统等。在仪器仪表中的自动平衡电桥和电子电位差计也是典型的随动系统,自动平衡电位差计原理如图 1-3 所示。

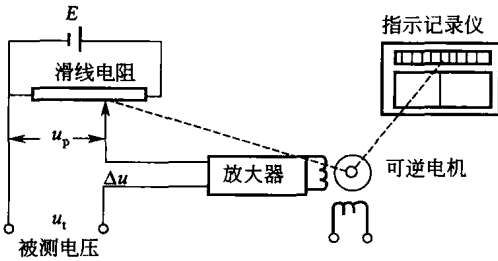


图 1-3 自动平衡电位差计原理

图中被测信号(电位差 u_i)是系统的输入变量,可逆电机的角位移 ϕ 或相应的仪表指示或记录值是系统的输出变量。当被测电压 u_i 发生变化时, u_i 与滑线电阻上的反馈电压 u_p 进行比较,其偏差电压 Δu 经放大器放大后控制可逆电机移动滑线电阻的滑动触点,改变反馈电压,直至与被测电压相平衡, $\Delta u = u_i - u_p = 0$ 。此时电机移动一角位移 ϕ 后停止转动,仪表的指针(或记录笔)也停止在某一相对的位置上,并将被测电压

u_i 显示出来。从自动平衡电位差计的动作原理可以看出,其输出变量是跟随着输入变量的变化而变化的,所以是一个随动系统。

(3) 程序控制系统 设定值是一个按一定时间程序变化的时间函数的闭环控制系统称为程序控制系统。如:机械行业的数控车床、间歇生产过程中化学反应器的温度控制等都属于这类控制系统。程序控制系统可以看成是随动控制系统的特殊情况,其分析研究方法与随动控制系统相同。

2. 开环控制系统

开环控制系统是指控制器与被控对象之间只有顺向控制而没有反向联系的控制系统。即操纵变量可以通过被控对象去影响被控变量,但被控变量不会通过控制装置去影响操纵变量。从信号传递关系上看,未构成闭合回路。

开环控制系统分为两种形式。

(1) 按设定值进行控制 这种控制方式的原理是,需要控制的是被控对象中的被控变量,而测量的只是设定值。如图 1-4 所示的换热器。换热器的工作原理是:冷物料与载热体(蒸汽)在换热器中进行热交换,使冷物料出口温度上升至工艺要求的数值。因此,系统中被控变量为冷物料出口温度,操纵变量为蒸汽流量。操纵变量与设定值保持一定的函数关系,当设定值变化时,操纵变量随之变化进而改变被控变量。

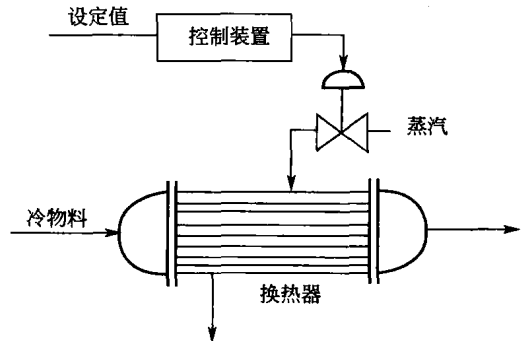


图 1-4 按设定值控制的开环控制系统

这种系统结构简单,但也存在较大缺陷。当被控对象受到扰动或工作过程中特性参数发生变化波及被控变量,系统不能自动地觉察被控变量的变化情况,无法自动补偿。因此,系统的控制精度难以保证。但是,如果系统的结构参数稳定,扰动作用很小,该系统在有些场合还是可用的。

(2) 按扰动进行控制 这种控制方式的原理是,需要控制的仍然是被控对象中的被控变

量，而测量的是破坏系统正常进行的扰动量。利用扰动信号产生控制作用，以补偿扰动对被控变量的影响，故称按扰动进行控制。如图 1-5 所示的系统就是按扰动进行控制的系统示意图及方框图。从方框图中可以看出，扰动量经测量、控制器、执行器到被控对象的被控变量，也是单线传递的，故亦称开环控制系统。

由于测量的是扰动量，这种控制方式只能对可测的扰动进行补偿。对于不可测扰动及对象，各功能部件内部参数的变化对被控变量造成的影响，系统自身无法控制。因此控制精度仍然受到原理上的限制。

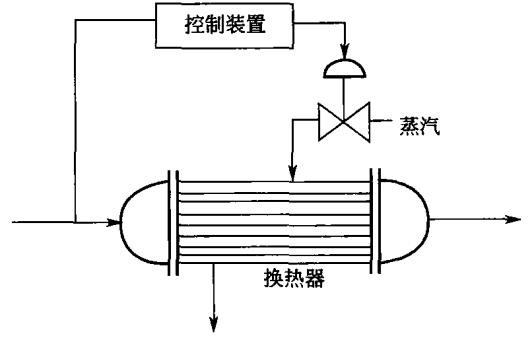


图 1-5 按扰动控制的开环控制系统

第四节 过程控制系统性能指标

一个控制良好的系统，在经受扰动作用后，一般应平稳、快速和准确地趋近或恢复到设定值。这里所讲的“平稳”是指动态过程的振荡倾向和系统重新恢复平衡工作状态的能力。它是控制系统能正常工作的基本条件。“快速”是指动态过程进行的时间很短，“准确”是指系统最终恢复平衡状态后所能保持的精度。

由于被控对象的具体情况不同，各种系统对平稳、快速、准确的性能要求的侧重点也有所不同。例如，随动控制系统对快速性和准确性要求较高，定值控制系统一般却侧重于平稳性和准确性。同一个系统，平稳、快速、准确是相互制约的。例如，为了提高系统动态响应的快速性和稳态精度，就需要增大系统的放大能力，而放大能力的增强，可能会引起系统强烈振荡，促使系统动态性能变差，甚至使系统变为不稳定。反之，若强调系统动态过程平稳性的要求，系统的放大倍数就应更小，从而导致系统稳态精度的降低和动态过程的缓慢。由此可见，系统动态响应的快速性、高精度与动态稳定性之间是一对矛盾。

在比较不同控制方案时，应首先规定评价控制系统的优劣程度的性能指标，一般情况下，主要采用以阶跃响应曲线形式表示的各种单项控制性能指标和综合控制性能指标。这些控制指标仅适用于衰减振荡过程。

一、单项控制性能指标

1. 衰减比 n

这是表示衰减过程响应曲线衰减程度的指标。它的定义是第一个波的振幅与同方向第二个波的振幅之比。在图 1-6 中，用 B 表示第一个波的振幅， B' 表示同方向第二个波的振幅，即：

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

显然，当 $n=1$ 为等幅振荡； $n<1$ 为发散振荡； $n>1$ 为衰减振荡。为保持系统有足够的稳定程度，工程上常取衰减比为 $(4:1) \sim (10:1)$ 。

2. 峰值时间 t_p

峰值时间是指过渡过程曲线达到第一个峰值所需要的时间。在图 1-6 中用 t_p 表示， t_p 愈小表明控制系统反应愈灵敏。这是反映系统快速性的一个动态指标。

3. 过渡时间 t_s

过渡时间是指控制系统受到扰动作用后，被控变量从过渡状态恢复到新的平衡状态所经历的最短时间。从理论上讲，被控变量达到新的平衡状态需要无限长的时间。工程上常常在被控变量进入新稳态值的 $\pm 5\%$ 或 $\pm 2\%$ 范围内且不再越出时，就认为被控变量已达到新的稳态值了。 t_s 的大小一般与控制系统中的最大时间常数有关， t_s 越短，系统响应越快，克服频繁扰动的能力就越强。

4. 最大偏差 A (或超调量 σ)

对于一个稳定的定值控制系统来说，最大偏差是指被控变量第一个波峰值与设定值的差。但在随动系统中通常采用超调量这个指标，超调量的数学表达式为：

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

最大偏差 (或超调量) 表示了被控变量偏离设定值的程度。 A (或 σ) 愈大，表示偏离生产规定的状态愈远，特别是对一些有危险限制的情况，如化学反应器的化合物爆炸极限等，应特别慎重，以确保生产安全进行。

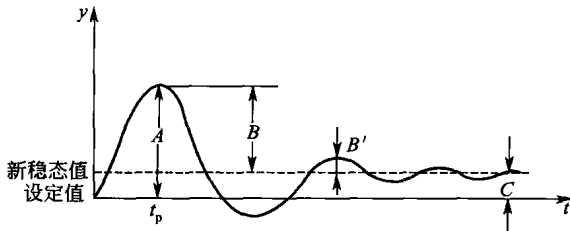


图 1-6 过渡过程质量指标示意

5. 余差 C

余差是指过渡过程終了时新稳态值与设定值之差。它是反映控制系统控制精度的静态指标，一般希望它为零或不超过工艺设计的范围。

过渡过程质量指标如图 1-6 所示。

上述各种过渡过程的性能指标，其重要程度各不相同，且相互之间既有矛盾又相互联系。在对系统进行分析设计时，要注意综合考虑过程的快速性、稳定性和准确性。要根据工艺的实际要求，优先保证那些对生产过程起决定性作用的主要指标，而不要片面追求全面的高性能。单项控制性能指标虽然清晰明了，但尚缺乏对控制性能指标的统筹兼顾。

二、综合控制性能指标

综合控制性能指标采用偏差积分的形式，它可以全面反映控制系统性能的品质指标。无论过渡过程中动态偏差增大或是回复时间拖长，都表明控制品质变差，在偏差积分指标上的综合反映就是偏差积分指标值增大，因此，偏差积分指标可以兼顾衰减比、超调量、过渡时间等方面的因素，偏差积分指标越小越好。偏差积分指标通常采用以下几种形式。

1. 偏差积分 (IE)

$$IE = \int_0^{\infty} f(e, t) dt \quad (1-3)$$

式中， e 为动态偏差， t 为时间。

2. 平方偏差积分 (ISE)

$$ISE = \int_0^{\infty} e^2 dt \quad (1-4)$$

3. 绝对偏差积分 (IAE)

$$IAE = \int_0^{\infty} |e| dt \quad (1-5)$$

用动态偏差 e 作为 $f(e, t)$ 函数，正、负偏差将相互抵消。即使 e 值很大或剧烈波动，值仍然可以很小，所以一般用 e^2 或 $|e|$ 评定定值控制系统质量指标。式中，平方项对大误差的加权甚于小误差，故此方法对大误差比较灵敏。

4. 时间与绝对偏差乘积积分 (ITAE)

$$ITAE = \int_0^{\infty} |e|t dt \quad (1-6)$$

式(1-6)是为了突出快速性的要求,一般用于随动控制系统的质量指标评定。

对于有差系统, e 不会最终趋于零,上述指标都将趋于无穷大,无法进行比较,以上各式中的偏差可以采用 $e(t) \sim e(\infty)$ 作为动态偏差项代入。值得注意的是基于偏差积分的综合性能指标不能很好地反映控制系统的静差指标。

采用不同的偏差积分指标意味着评价过渡过程优良程度时的侧重有所不同,可以根据控制系统的实际需要选用。

思考题与习题

1. 简述化工过程自动控制的发展概况及各阶段的特点。
2. 一个过程控制系统主要由哪几个环节组成?其中测量变送装置、控制器、执行器各起什么作用?
3. 什么是闭环控制系统?它又分为哪几种基本形式?每种特点是什么?
4. 常用的评价控制系统动态性能的单项目标指标有哪些?哪些属于静态质量指标?哪些属于动态质量指标?

第二章 过程参数的检测方法与仪表

第一节 概 述

为了正确地指导生产运行和操作, 保证生产的安全、产品的质量和实现生产过程的自动化, 一项重要的工作是准确而迅速地检测出生产过程中各种有关的工艺参数, 如, 压力、流量、物位和温度等。用来检测这些过程参数的技术工具称为检测仪表, 检测仪表被广泛地应用于石油、化工、电力和冶金等国民经济各个重要的部门和领域。可以说, 现代工业生产离不开现代检测技术。本章将主要介绍有关压力、流量、物位、温度等参数的检测方法和检测仪表。

一、检测过程及误差

生产过程中需要检测的参数是多种多样的, 所采用的检测方法和仪表也各不相同。但是从检测过程的实质来看, 却都有相同之处。检测过程就是将被测参数与其相应的测量单位进行比较的过程, 而检测仪表就是实现这种比较的技术工具。检测仪表是将被测参数经过一次或多次的信号能量转换, 获得一种便于检测的信号形式, 最后由仪表显示出来。

在检测过程中, 由于所使用的检测工具本身不一定很准确, 或者由于检测者的主观性及周围环境的影响等, 必然会影响检测结果的准确性。从检测仪表读得的被测参数的值与被测参数的真值之间, 存在一定的差距, 这一差距就称为测量误差。

1. 误差的形式

测量误差通常用绝对误差和相对误差表示。

绝对误差是指仪表的指示值 x 和被检测的真值 x_0 之间的差值, 表示为

$$\Delta = x - x_0 \quad (2-1)$$

式中, Δ 为绝对误差, x 为被校表的读数值, x_0 为标准表的读数值。真值是指被测的物理量客观存在的真实数值, 是无法真正得到的。因此, 所谓测量仪表在其标尺范围内各点的读数的绝对误差, 通常是用被校表 (精确度低) 和标准表 (精确度高) 同时对同一被测参数进行检测所得到的两个读数之差。但是, 必须指出仪表的绝对误差在测量范围内的各点上是不相同的。因此, 常说的“仪表的绝对误差”指的是绝对误差中的最大值, 即最大绝对误差。

相对误差是仪表某一点的绝对误差 Δ 与标准表在这一点的指示值 x_0 之比, 表示为

$$y = \frac{\Delta}{x_0} = \frac{x - x_0}{x_0} \quad (2-2)$$

式中, y 为仪表在 x_0 处的相对误差。

2. 误差的分类

除了按测量误差的形式分为绝对误差、相对误差外, 按误差的测量条件还可分为基本误差和附加误差, 按误差的变化速度分为静态误差和动态误差。

基本误差是仪表在规定条件下 (如, 温度、湿度、电源电压、频率等), 仪表本身具有