

高等学校通用教材

工业过程检测与控制

孟 华 主编
王幸之 主审



北京航空航天大学出版社

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

高等学校通用教材

工业过程检测与控制

孟 华 主编

王幸之 主审

北京航空航天大学出版社

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

226244

内 容 简 介

本书以自动控制系统为体系,全面系统地介绍了过程参数的检测方法和过程控制系统的组成、原理、设计方法等基础知识,并有典型的应用实例。

全书共分八章,内容包括:过程控制系统的基本概念、过程参数的检测与仪表、过程控制仪表与装置、过程特性与数学模型、简单控制系统、复杂控制系统、过程计算机控制系统和典型工业控制系统等。

本书可作为工科高等院校石油、化工、制药、冶金、轻工、机械、环保等工艺类专业中仪表及自动控制课程的教材,也可作为专科学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

工业过程检测与控制/孟华等编著. —北京:北京航空航天大学出版社,2002.8

ISBN 7-81077-210-4

I. 工… II. 孟… III. ①工业 生产过程 检测
②工业—过程控制 IV. TB

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 041845 号

工业过程检测与控制

孟 华 主 编

王幸之 主 审

责任编辑 刘晓明

*

北京航空航天大学出版社出版发行

北京市海淀区学院路 37 号(100083) 发行部电话:(010)82317024 传真:(010)82328026

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

E-mail:pressell@publica.bj.cninfo.net

河北省涿州市新华印刷厂印装 各地书店经销

*

开本:787×960 1/16 印张:17 字数:381 千字

2002 年 8 月第 1 版 2002 年 8 月第 1 次印刷 印数:5 000 册

ISBN 7-81077-210-4 定价:23.00 元

前 言

过程控制作为自动化技术的重要组成部分,已广泛地应用于石油、化工、制药、冶金、电力、轻工、机械、环保等许多国民经济的重要领域。要实现工业生产过程的自动化,不但需要自动化专业人员,而且还需要各类工艺专业人员和设备设计与管理人員的相互配合。因此,工艺和设备人員必须具备一定的自动化基础知识,以便能和自控人員相互协商与合作,使生产过程控制在最佳工况,改善生产条件,达到优质、高产、安全、低耗的目的。

本书在内容组织上以自动控制系统为体系,将过程检测及控制仪表作为组成系统的相应环节,力求完整体现过程控制的整体内容。在参数检测方面,以过程参数的检测方法为主线,辅以介绍实现该方法的仪表。在仪表选择上,充分考虑其代表性及发展趋势;同时,考虑工艺类专业的特点,以较少的数学推导和较简明的叙述,将过程检测和控制中的基本概念、基本内容呈现在读者面前。面向 21 世纪,结合信息时代的特点,本书将数字检测、数字控制仪表与计算机控制贯穿于各章节,使模拟仪表、数字仪表和计算机技术自然衔接。此外,还简要介绍了集散控制系统和现场总线控制系统。

为便于读者学习,本书各章后面均配有习题与思考题。

全书由孟华主编。参加编写的有河北科技大学孟华(第一章、第四章),宋哲英(第二章),颜翠英(第三章),齐树兴(第五章、第六章),郝立军(第七章),北京石油化工学院付小美、纪文纲(第八章)。全书由王幸之主审。

在本书编写过程中,参考了大量的文献;王幸之教授对全书进行了

详细的审阅和修改;本书的出版得到了北京航空航天大学出版社的诚挚帮助;在此一并向参考文献的作者及关心和支持本书出版的所有单位和个人表示衷心的感谢。

由于编者水平有限,书中难免有错误或不妥之处,恳切希望读者批评指正。

编 者

2002 年 3 月

目 录

第一章 过程控制系统的基本概念

1.1 过程控制的发展概况及特点	1
1.2 过程控制系统的组成	3
1.3 过程控制系统的两种表示形式	5
1.3.1 方框图	5
1.3.2 管道及仪表流程图	6
1.4 过程控制系统的主要类型	10
1.4.1 闭环控制系统	11
1.4.2 开环控制系统	12
1.5 过程控制系统的性能指标及要求	14
1.5.1 过程控制系统的过渡过程	14
1.5.2 过程控制系统的质量指标	15
习题与思考题	17

第二章 过程参数的检测与仪表

2.1 概 述	19
2.1.1 检测过程及误差	19
2.1.2 检测仪表的基本技术性能指标	20
2.2 压力检测方法 & 仪表	24
2.2.1 压力检测的基本知识	24
2.2.2 压力检测方法	25
2.2.3 压力检测仪表	30
2.2.4 差压(压力)变送器	32
2.2.5 压力检测仪表的选择	38
2.3 物位检测方法 & 仪表	40
2.3.1 物位检测方法	40
2.3.2 超声波物位计	45
2.4 流量检测方法 & 仪表	46

2.4.1	流量检测方法	46
2.4.2	差压式流量计	57
2.4.3	电磁流量计	59
2.5	温度检测方法 & 仪表	60
2.5.1	温度检测的基本知识	60
2.5.2	温度检测方法	61
2.5.3	热电偶温度计	64
2.5.4	热电阻温度计	70
2.5.5	温度变送器	72
2.6	成分量检测	76
2.6.1	pH 值的检测	76
2.6.2	氧含量的检测	80
2.7	数字式显示记录仪表	82
2.7.1	数字式显示仪表	82
2.7.2	无笔无纸记录仪	88
	习题与思考题	91

第三章 过程控制仪表与装置

3.1	概 述	94
3.1.1	过程控制仪表与装置的分类和特点	94
3.1.2	控制仪表的发展趋势	95
3.1.3	信号制及供电方式	95
3.2	基本控制规律及其对控制过程的影响	96
3.2.1	基本控制规律概述	96
3.2.2	PID 控制规律对控制过程的影响	98
3.3	DDZ-Ⅲ型控制器	103
3.3.1	PID 控制器的组成原理	103
3.3.2	PID 控制器的特性分析	104
3.4	开方器	110
3.4.1	概 述	110
3.4.2	开方器的运算关系	110
3.4.3	电路原理分析	111
3.5	比例积算器	114
3.5.1	概 述	114

3.5.2 比例积分器的组成和工作原理	115
3.6 执行器	116
3.6.1 概 述	116
3.6.2 电动执行器	116
3.6.3 气动执行器	118
3.6.4 阀门定位器	125
3.6.5 智能执行器	126
3.7 可编程序控制器	129
3.7.1 概 述	129
3.7.2 PLC 的基本组成和工作过程	131
3.7.3 PLC 的选型和应用	134
习题与思考题	136

第四章 过程特性与数学模型

4.1 过程特性	138
4.1.1 过程特性的类型	138
4.1.2 描述过程特性的参数	140
4.2 过程数学模型的建立	144
4.2.1 机理分析法	145
4.2.2 实验测试法	149
4.3 拉氏变换与传递函数	150
4.3.1 拉普拉斯变换	150
4.3.2 传递函数	152
习题与思考题	153

第五章 简单控制系统

5.1 简单控制系统设计原则	155
5.1.1 被控变量的选择	155
5.1.2 操纵变量的选择	156
5.1.3 系统设计中的测量变送问题	158
5.1.4 控制器控制规律的选择	160
5.2 简单控制系统的投运及控制器参数的工程整定	161
5.2.1 简单控制系统的投运	161
5.2.2 控制器参数的工程整定	162

5.3 单回路控制系统工程设计实例	165
习题与思考题	167

第六章 复杂控制系统

6.1 串级控制系统	169
6.1.1 串级控制系统的基本概念	169
6.1.2 串级控制系统的特点	171
6.1.3 串级控制系统的设计	172
6.1.4 串级控制系统的应用场合	173
6.1.5 串级控制系统应用中的问题	174
6.2 比值控制系统	175
6.2.1 概 述	175
6.2.2 常用的比值控制方案	175
6.2.3 比值控制系统的设计	178
6.3 前馈控制系统	179
6.3.1 前馈控制系统的基本概念	179
6.3.2 前馈控制系统的几种结构形式	181
6.3.3 前馈控制系统的应用场合	183
6.4 均匀控制系统	183
6.4.1 均匀控制的基本概念	183
6.4.2 均匀控制方案	185
6.5 分程控制系统	186
6.5.1 分程控制系统的基本概念	186
6.5.2 分程控制系统的应用	187
6.5.3 分程控制应用中的几个问题	189
6.6 选择性控制系统	190
6.6.1 选择性控制系统的基本概念	190
6.6.2 选择性控制系统的应用	190
6.6.3 积分饱和及其防止	192
习题与思考题	194

第七章 过程计算机控制系统

7.1 概 述	195
7.1.1 过程计算机控制系统的组成	195

7.1.2 过程计算机控制系统的分类	197
7.2 直接数字控制系统	199
7.2.1 直接数字控制系统的组成原理	199
7.2.2 直接数字控制系统的 PID 控制算式	200
7.2.3 直接数字控制系统的 PID 控制参数选择	203
7.3 集散控制系统	205
7.3.1 集散控制系统概述	205
7.3.2 现场控制站	208
7.3.3 操作员站及工程师站	210
7.3.4 集散控制系统网络	211
7.4 现场总线及现场总线控制系统	212
7.4.1 现场总线概述	212
7.4.2 几种有影响的现场总线技术	214
7.4.3 以现场总线为基础的控制系统	217
习题与思考题	219

第八章 典型工业过程控制

8.1 精馏过程控制	220
8.1.1 概 述	220
8.1.2 精馏过程的控制要求	221
8.1.3 基本控制方案	222
8.1.4 其他控制方案	226
8.1.5 精馏塔控制系统实例	227
8.2 锅炉设备的自动控制	228
8.2.1 概 述	228
8.2.2 锅炉汽包水位控制系统	229
8.2.3 锅炉燃烧控制系统	232
8.2.4 过热蒸汽控制系统	234
8.2.5 采用集散系统的锅炉控制实例	234
8.2.6 采用常规仪表的锅炉控制实例	235
8.3 子午胎纤维帘布全自动裁断机控制系统	236
8.3.1 工艺过程及对控制系统的要求	236
8.3.2 控制系统硬件配置方案	237
8.3.3 硬件选型配置	238

8.3.4 实验调试结果	241
习题与思考题	242

附 录

附录一 常用热电偶分度表	243
附录二 常用热电阻分度表	255

参考文献

第一章 过程控制系统的基本概念

1.1 过程控制的发展概况及特点

自动控制技术在工业、农业、国防和科学技术现代化中起着十分重要的作用,自动控制水平的高低也是衡量一个国家科学技术先进与否的重要标志之一。随着国民经济和国防建设的发展,自动控制技术的应用日益广泛,其重要作用也越来越显著。

生产过程自动控制(简称过程控制)是自动控制技术在石油、化工、电力、冶金、机械、轻工、纺织等生产过程的具体应用,是自动化技术的重要组成部分。进入 21 世纪,随着自动化技术、计算机技术、通信技术的迅速发展,过程控制发生了深刻的变革,正在向着数字化、网络化和综合自动化方向发展,在实现各种最优控制和经济指标、保证生产的质量和产量、提高经济效益和劳动生产率、节约能源、改善劳动条件、保证生产安全、保护环境等方面发挥着越来越巨大的作用。

在过程控制发展的历程中,生产过程的需求、控制理论的开拓以及控制技术工具和手段的进展三者相互影响、相互促进,推动了过程控制不断地向前发展。纵观过程控制的发展历史,大致经历了以下几个阶段:

20 世纪 40 年代,大多数工业生产过程均处于手工操作状态,只有少量的检测仪表用于生产过程,操作人员主要根据观测到的反映生产过程的关键参数,用人工来改变操作条件,凭经验去控制生产过程。因此,劳动生产率很低,且产品质量差,劳动强度大。

20 世纪 40 年代末至 50 年代,生产过程的控制有了长足的发展,部分生产过程实现了仪表化和局部自动化。在这期间,过程控制系统的结构多为单输入、单输出系统,即是以温度、压力、流量、液位等参数为被控变量的简单控制系统;过程检测、控制的技术工具普遍采用的是基地式仪表和部分单元组合仪表(气动 I 型和电动 I 型);以反馈控制为代表的经典控制理论被广泛应用于系统的分析、设计中,控制的目的是保证生产的稳定和安全。

进入 20 世纪 60 年代,随着工业生产过程向着大型化、连续化方向发展,生产过程的复杂程度进一步提高,非线性、耦合性、时变性等特点十分突出。为提高控制质量和实现一些特殊的工艺要求,相继出现了串级、比值、均匀、前馈和选择性等多种复杂控制系统。以状态空间方法为基础,以极小值原理和动态规划等最优控制理论为基本特征的现代控制理论,将传统的单输入、单输出系统发展到多输入、多输出系统领域,为实现高水平的过程控制奠定了理论基础,对自动控制技术的发展起到了积极的推动作用。由于过程机理复杂及建模困难,因此现代控

制理论在过程控制领域实际应用一时还难以实现。随着电子技术的迅速发展,控制技术工具不断完善,气动Ⅱ、Ⅲ型和电动Ⅱ、Ⅲ型仪表已成为过程控制应用的主流产品;组装仪表的开发,将各个单元划分为更小的功能块,以适应比较复杂的模拟和逻辑规律相结合的控制系统的需要。60年代后期,出现了专门用于过程控制的小型计算机,直接数字控制系统和监督计算机控制系统开始应用于过程控制领域。

从20世纪70年代开始,出现了微处理器和以微处理器为主要构成单元的控制装置。集散控制系统(DCS)、可编程逻辑控制器(PLC)、工业PC机和数字控制器等,已成为控制装置的主流。集散控制系统的应用,实现了控制分散、危险分散,操作监测和管理集中,克服了常规仪表系统控制功能单一和计算机控制系统危险集中的局限性,能够实现数据采集处理、连续控制、间歇控制、顺序控制,将操作、管理与生产过程紧密地结合起来,使生产过程控制进入管控一体化的新模式。现代控制理论进一步向纵深发展,形成了大系统理论和智能控制理论。在工程上,模糊控制、专家系统控制、人工神经网络控制、模式识别技术的应用,大大促进了过程控制的发展。

20世纪末,信息技术飞速发展。现场总线控制系统的出现,引起过程控制系统体系结构和功能结构上的重大变革。现场仪表的数字化和智能化,形成了真正意义上的全数字过程控制系统。综合自动化是当今生产过程控制的发展方向。在自动化技术、信息技术、计算机技术和各种生产加工技术基础上,从生产过程的全局出发,利用网络技术将各种信息集成,把控制、优化、调度、决策、经营管理融为一体,形成一个能适应各种生产环境和市场需求、多变性的、总体最优的高质量、高效益、高柔性的生产管理系统。

过程控制系统与其他自动控制系统相比,有如下几个特点。

1. 生产过程的连续性

在过程控制系统中,大多数被控过程都是以长期的或间歇的形式运行。在密闭的设备中被控变量不断地受到各种扰动的影响。过程控制的主要目的是消除或减少扰动对被控变量的影响,使被控变量稳定在工艺要求的数值上,从而实现生产过程的优质、高产和低耗。

2. 被控过程的复杂性

过程控制涉及范围广,既有石化过程的精馏塔、反应器,热工过程的换热器、锅炉,冶金过程的转炉、平炉,又有机电行业的加热炉等。被控对象相对较大,比较复杂。其动态特性多为大惯性、大滞后形式,且具有非线性、分布参数和时变特性,甚至有些过程特性至今尚未被人们所认识。

3. 控制方案的多样性

由于被控过程对象特性各异,工艺条件及要求也各不相同,因此,过程控制系统的控制方案非常丰富,既有常规PID控制、改进PID控制、串级控制、前馈-反馈控制、解耦控制,又有为满足特定要求而开发的比值控制、均匀控制、选择性控制、推断控制,还有许多新型控制系统,如模糊控制、预测控制、最优控制等。

1.2 过程控制系统的组成

在工业生产过程中,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:贮罐和容器(包括油罐、水箱、锅炉汽包等)的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 值等要符合工艺要求。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情况下,使这些工艺参数能自动按照预定的规律变化。

下面通过两个实例来了解什么是过程控制系统。

1. 锅炉汽包水位控制

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既可作为风机、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;如果水位过高,会影响汽包的汽水分离,产生蒸汽带液现象,降低蒸汽的质量和产量,严重时损坏后续设备。图 1.1(a)为锅炉汽包示意图。

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,那么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。

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,则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 1.1(b)为锅炉汽包水位控制系统示意图。

2. 发酵罐温度控制

发酵罐是间歇发酵过程中的重要设备,广泛应用于微生物制药、食品等行业。发酵罐的温度是影响发酵过程的一个重要参数。因为微生物菌体本身对温度非常敏感,只有在适宜的温度下才能正常生长代谢,而且涉及菌体生长和产物合成的酶也必须在一定的温度下才能具有高的活性。温度还会影响发酵产物的组成。因此,按一定的规律控制发酵罐的温度就显得非常重要。

影响发酵过程温度的主要因素有微生物发酵热、电机搅拌热、冷却水的流量和本身的温度变化以及周围环境温度的改变等。一般采用通冷却水带走反应热的方式使罐内温度保持工艺

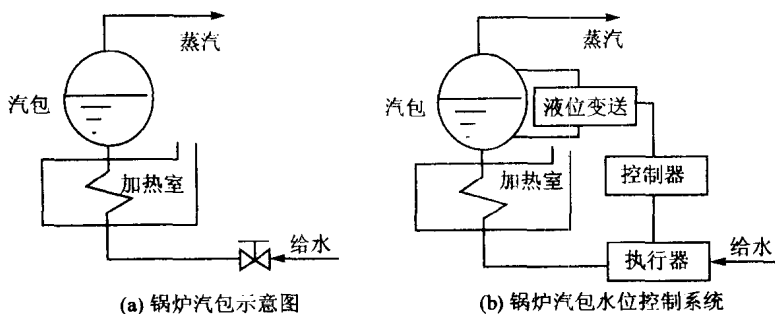


图 1.1 锅炉汽包水位控制示意图

要求的数值。对于小型发酵罐,通常采用夹套式冷却形式,如图 1.2(a)所示。

可使用温度检测仪表(如热电偶、热电阻等)测量罐中的实际温度,将测得的数值送入控制器,然后与工艺要求保持的温度数值进行比较。如果两个信号不相等,则由控制器的输出控制冷却水阀门的开度,改变冷却水的流量,从而达到控制发酵罐温度的目的。图 1.2(b)为发酵罐温度控制系统示意图。

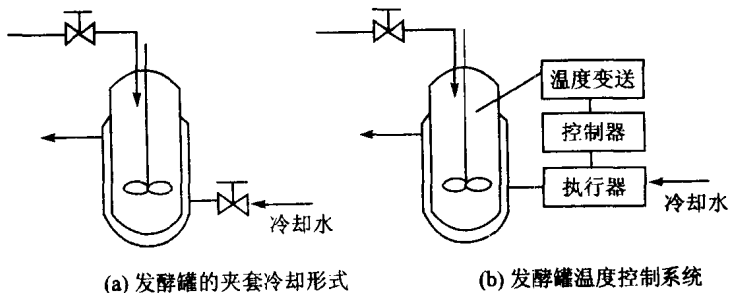


图 1.2 发酵罐温度控制系统示意图

在描述过程控制系统时常用到以下几个术语。

被控过程(对象):工艺参数需要控制的生产过程设备或机器等,如锅炉汽包、发酵罐等。

被控变量:被控对象中要求保持设定值的工艺参数,如汽包水位、发酵温度等。

操纵变量:受控制器操纵,用以克服扰动的影响使被控变量保持设定值的物料量或能量,如锅炉给水量、发酵罐冷却水量等。

扰动量:除操纵变量外,作用于被控对象并引起被控变量变化的因素,如蒸汽负荷的变化、冷却水温度的变化等。

设定值:被控变量的预定值。

偏差:被控变量的设定值与实际值之差。在实际控制系统中,能够直接获取的信息是被控变量的测量值而不是实际值。因此,通常把设定值与测量值之差作为偏差。

通过以上介绍的实例可以看出,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。

检测元件(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,则一般再转换为电量。如测速发电机用于检测电动机轴的速度,并将电动机轴的速度转换为电压;热电偶用于检测温度并将温度转换为电压等。

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。

执行器(装置):作用是接受控制器的控制信号,直接推动被控对象,使被控变量发生变化,如气动薄膜调节阀、电动执行器、电动机等。

1.3 过程控制系统的两种表示形式

1.3.1 方框图

方框图是控制系统或系统中每个环节的功能和信号流向的图解表示,是控制系统进行理论分析、设计中常用到的一种形式。方框图由方框、信号线、比较点、分支点组成。其中,每一个方框表示系统中的一个组成部分(也称为环节),方框内添入表示其自身特性的数学表达式或文字说明;信号线是带有箭头的直线段,用来表示环节间的相互关系和信号的流向;比较点表示对两个或两个以上信号进行加减运算,“+”号表示相加,“-”号表示相减;引出点表示信号引出,从同一位置引出的信号在数值和性质方面完全相同。作用于方框上的信号为该环节的输入信号,由方框送出的信号称为该环节的输出信号。图 1.3 为方框图基本组成单元示意图。

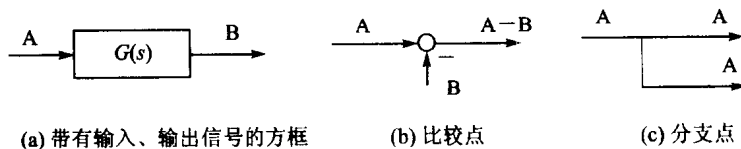


图 1.3 方框图的组成单元示意图

图 1.4 表示 1.2 节中锅炉汽包水位控制系统方框图。系统中的每一个环节用一个方框来表示,四个方框分别表示被控过程(锅炉汽包)、测量变送装置、控制器和执行器。每个方框分别标出各自的输入、输出变量。如在被控过程环节中,给水流量变化会引起汽包水位的变化,因此给水流量(操纵变量)作为输入信号作用于被控过程,而汽包水位(被控变量)则作为被控过程的输出信号。引起被控变量(汽包水位)偏离设定值的因素还包括蒸汽负荷的变化和给

水管压力的变化等扰动量,它们也作为输入信号作用于被控过程。

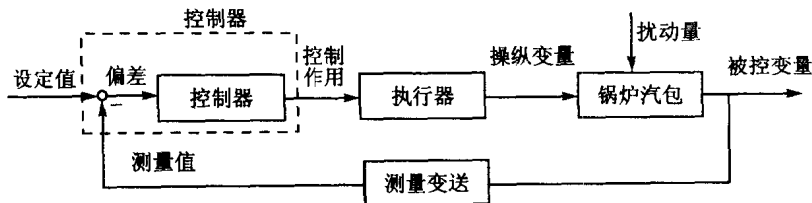


图 1.4 锅炉汽包水位控制系统方框图

图 1.4 中通过测量变送装置将被控变量的测量值送回到系统的输入端,这种把系统的输出信号直接或经过一些环节引回到输入端的做法叫作反馈。反馈分为正反馈和负反馈两种类型。引回到输入端的信号是减弱输入端作用的称为负反馈,用“-”号表示;引回到输入端的信号是增强输入端作用的称为正反馈,用“+”号表示。1.2 节中两例就是负反馈控制系统。

在绘制方框图时应注意以下 3 点:

① 方框图中每一个方框表示一个具体的实物。

② 方框之间带箭头的线段表示它们之间的信号联系,与工艺设备间物料的流向无关。方框图中信号线上的箭头除表示信号流向外,还包含另一种方向性的含义,即所谓单向性。对于每一个方框或系统,输入对输出的因果关系是单方向的,只有输入改变了才会引起输出的改变,输出的改变不会返回去影响输入。例如冷水流量会使汽包水位改变,但反过来,汽包水位的变化不会直接使冷水流量跟着改变。

③ 比较点不是一个独立的元件,而是控制器的一部分。为了清楚地表示控制器比较机构的作用,故将比较点单独画出。

方框图可非常直观地显示出系统中各组成部分以及它们之间的相互影响和信号的联系。它是进行系统特性分析、研究的必要工具。

1.3.2 管道及仪表流程图

管道及仪表流程图是用自控设计的文字代号、图形符号在工艺流程图上描述生产过程控制的原理图,是控制系统设计、施工中采用的一种图示形式。该图在工艺流程图的基础上,按其流程顺序,标出相应的测量点、控制点、控制系统及自动信号与连锁保护系统等,由工艺人员和自控人员共同研究绘制。在管道及仪表流程图的绘制过程中所采用的图形符号、文字代号应按照有关的技术规定进行。下面结合化工部《过程检测和控制系统用文字代号和图形符号》HG20505—92,介绍一些常用的图形符号和文字代号。

1. 图形符号

过程检测和控制系统图形符号包括测量点、连接线(引线、信号线)和仪表圆圈等。