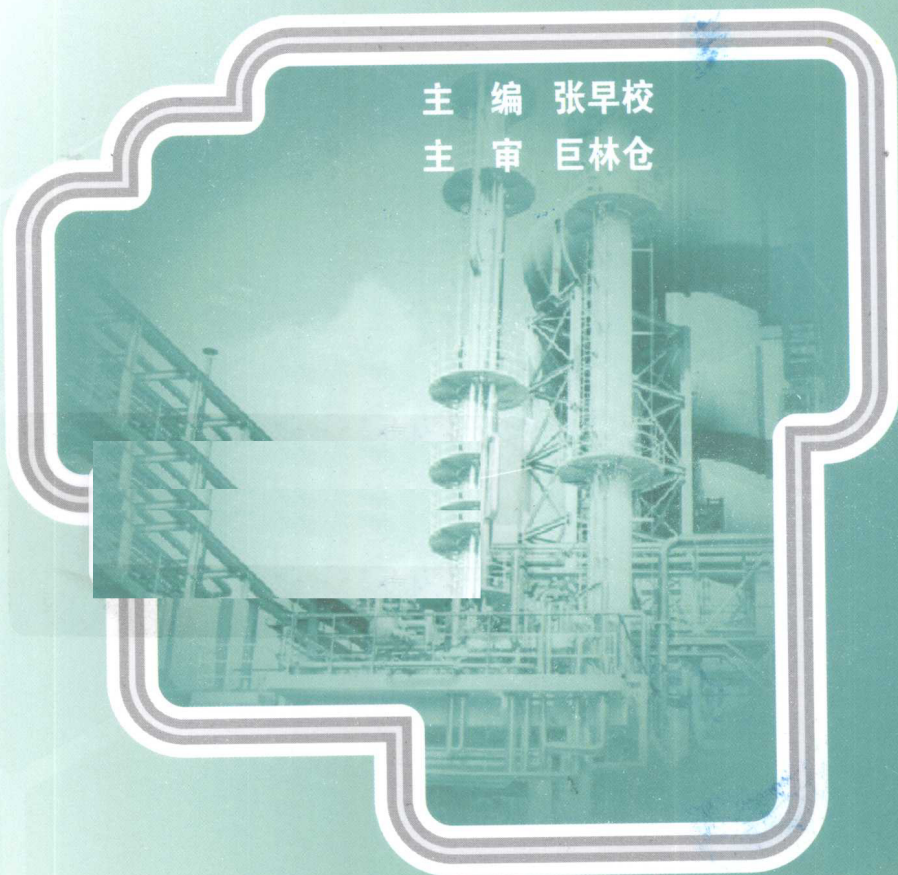




全国高等院校 **过程装备与控制工程** 专业系列规划教材

过程控制装置及系统设计

主 编 张早校
主 审 巨林仓



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

全国高等院校过程装备与控制工程专业系列规划教材

过程控制装置及系统设计

主 编 张早校

副主编 王斯民

主 审 巨林仓



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

内 容 简 介

本书比较系统地介绍了过程控制装置及其设计的基本概念及步骤, 主要内容包括过程自动控制的基本概念, 过程控制系统设计的基本步骤, 被控对象的动态特性的描述和建模以及各种动态特性的实验测定, 常规过程控制装置包括典型变送器、控制器和执行器的工作原理, 单回路控制系统及其参数的整定方法, 常用的以前馈、串级、比值、均匀、选择性控制系统为主的复杂控制系统原理, 计算机控制系统构成。同时, 介绍了现场总线系统、工业以太网以及智能无线仪表与网络以及软测量等新知识点, 还对自动控制系统的一些典型应用做了详细介绍。

本书既可供高等学校过程装备与控制工程专业的专业课教学使用, 也可以作为该专业在教改中进行课程设计的参考书, 还可以为能源系统及自动化、化学工程、环境工程等相关专业提供参考。

图书在版编目(CIP)数据

过程控制装置及系统设计/张早校主编. —北京: 北京大学出版社, 2010.8

(全国高等院校过程装备与控制工程专业系列规划教材)

ISBN 978-7-301-17635-1

I. ①过… II. ①张… III. ①过程控制—控制设备—系统设计—高等学校—教材 IV. ①TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 155321 号

书 名: 过程控制装置及系统设计

著作责任者: 张早校 主编

责任编辑: 郭穗娟

标准书号: ISBN 978-7-301-17635-1/PH·0213

出 版 者: 北京大学出版社

地 址: 北京市海淀区成府路 205 号 100871

网 址: <http://www.pup.cn> <http://www.pup6.com>

电 话: 邮购部 62752015 发行部 62750672 编辑部 62750667 出版部 62754962

电子邮箱: pup_6@163.com

印 刷 者: 三河市北燕印装有限公司

发 行 者: 北京大学出版社

经 销 者: 新华书店

787 毫米×1092 毫米 16 开本 16.25 印张 375 千字

2010 年 8 月第 1 版 2010 年 8 月第 1 次印刷

定 价: 30.00 元

未经许可, 不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有 侵权必究

举报电话: 010-62752024

电子邮箱: fd@pup.pku.edu.cn

前 言

截至 2009 年底,为了满足国内行业对“宽口径”人才培养的迫切需要,全国已经有一百多所院校设置了“过程装备与控制工程”专业,以服务过程工业为宗旨,围绕过程装备与控制技术以及系统集成技术开展教育教学工作。新的形势对该专业教学教材建设也提出了更新更高的要求。随着对本学科发展规律的深入了解,以及教学改革的不深入开展,许多过程装备与控制工程专业在基础课阶段给学生开设了自动控制原理的课程。但是,如何将理论与应用紧密联系起来,培养学生的应用能力,以适应控制技术及应用飞速发展的形势,需要在掌握基本理论的基础上,增加学生对过程装备控制技术的软硬件知识的理解和掌握。基于此,立足于加强学生的能力培养、拓展知识面、了解新技术发展趋势,编者根据多年的教学经验和体会编写了《过程控制装置及系统设计》这本教材。

本教材的章节共划分为七章。每章按照以下模块进行了材料组织编写:

- (1) 教学目标,简单介绍了各章要通过教学让学生掌握的要点。
- (2) 教学要求,列出了各章主要知识点所占权重百分数,供教师教学和学生学时参考。
- (3) 引例,类似于前言的方式为该章内容做一引子。
- (4) 正文部分,系统介绍相关知识。
- (5) 应用案例,在正文穿插部分应用案例加深对知识的理解。
- (6) 特别提示,对知识难点做特别提示,在学习中引起重视。
- (7) 知识链接,作为课外知识延伸提供给读者,为有兴趣的同学提供更多的参考。
- (8) 小结,对各章内容做一简单小结。
- (9) 复习思考题,这一部分给出了练习题,供读者加强练习,以加深对相应章节知识的掌握。

本教材主要内容概述如下:

第 1 章主要介绍了一些基础知识,包括了框图和传递函数的概念。

第 2 章介绍了被控对象的动态特性,突出介绍了数学建模方法。

第 3 章围绕常规过程控制装置包括典型变送器、控制器和执行器的工作原理进行了系统阐述。

第 4 章介绍了单回路控制系统及其控制器参数的整定方法。

第 5 章重点介绍了常用的以前馈、串级、比值、均匀、选择性控制系统为主的复杂控制系统原理。

第 6 章介绍了计算机控制系统及其发展趋势,特别是对现场总线系统、工业以太网以及智能无线仪表与网络进行了一些原理分析,便于拓展读者的知识面。

第 7 章对自动控制系统的一些典型应用做了详细介绍,特别介绍了软测量的原理。

本书设想读者已经学习了过程测试技术这门课程,因此对测量变送单元知识点只在第 3 章做了部分介绍,以利于单回路控制系统知识点的完整。

参加本书编写的有张早校、王斯民。在编写过程中,研究生余云松、李鸿飞、王慧渊、花磊、颜立伟、侯璐达、鲍泽威、张春飞、吴量、杨春华、艾波、董锐锋、刘菲等参与收集和整理了部分材料。

本书大部分内容已经在西安交通大学过程装备与控制工程系的本科生教学中使用过,计划学时在 48~64 学时之间。各有关单位在使用本教材时可以根据学时数对内容做适当的取舍。对于小学时课程设置例如 32 学时的选修课,建议不讲第 6、7 章。

在编写过程中,编者从大量已有教材和参考书中得到许多启发,除了在参考文献中列出主要引用文献外,在文中不再一一指明,特此致谢。

西安交通大学能源与动力工程学院巨林仓教授仔细审阅了本书,并提出了许多宝贵中肯的意见,在此深表感谢。

本书适合作为高等院校过程装备与控制工程专业的专业课教材使用,也可以作为该专业课程设计的参考书,还可以作为能源系统及自动化、化学工程、环境工程等相关专业参考书。

由于编者的学识水平、对教学改革的研究深度和认识水平有限,本书中难免有不妥或疏漏之处,恳请读者批评指正,以利于不断修改和补充完善本书。

编 者

2010 年 5 月于西安

目 录

第 1 章 基本概念.....1	第 2 章 被控对象动态特性及实验测定28
1.1 过程自动化的主要内容2	2.1 被控对象动态特性29
1.2 自动控制系统的组成4	2.1.1 一阶系统动态特性与 基本参数29
1.3 自动控制系统的框图6	2.1.2 二阶系统动态特性与 基本参数30
1.3.1 框图的组成和绘制7	2.1.3 高阶系统动态特性.....32
1.3.2 环节的基本连接形式7	2.2 被控对象的数学描述32
1.3.3 闭环控制系统的框图9	2.2.1 微分方程描述32
1.4 自动控制系统的分类10	2.2.2 传递函数描述33
1.4.1 按给定值变化规律分类10	2.2.3 零极点增益描述33
1.4.2 按控制作用的形式分类10	2.2.4 部分分式描述33
1.4.3 按系统的特性分类11	2.2.5 状态方程描述33
1.4.4 按系统参数是否随时间 变化分类12	2.3 数学描述的转换33
1.4.5 按控制系统的结构分类13	2.4 建立数学模型的方法34
1.4.6 按控制系统闭环回路的 数目分类15	2.4.1 建立数学模型概述.....34
1.4.7 按被控变量数目分类15	2.4.2 机理演绎法35
1.5 自动控制系统过渡过程及其 品质指标16	2.4.3 系统辨识法37
1.5.1 自动控制系统的过渡过程16	2.4.4 混合建模法37
1.5.2 过渡过程的品质指标17	2.5 单容液位对象的动态特性和 数学描述38
1.5.3 对自动控制系统的性能 基本要求19	2.5.1 有自衡能力的对象.....39
1.6 过程控制系统设计研究的基本内容20	2.5.2 无自衡能力对象39
1.6.1 过程控制系统设计步骤20	2.6 多容对象的特性、纯滞后与 容量滞后40
1.6.2 被控变量与输入变量的 选择21	2.6.1 双容对象的特性40
1.6.3 控制方案的确定21	2.6.2 双容对象的有自衡响应.....40
1.6.4 硬件设备的选择22	2.6.3 双容对象的无自衡响应.....41
1.6.5 控制器的设定22	2.6.4 双容对象的干扰特性.....41
1.7 过程控制系统应用实例23	2.6.5 纯滞后42
小结26	2.6.6 容量滞后42
复习思考题26	2.7 被控对象特性的实验测定.....42
	2.7.1 实验测定方法概述.....42

2.7.2 实验测定的时域法	43	小结	136
2.7.3 实验测定的频域法	44	复习思考题	137
2.7.4 实验测定的最小二乘法	48		
小结	49	第 5 章 复杂控制系统	139
复习思考题	49	5.1 前馈控制系统	140
第 3 章 过程控制装置	53	5.1.1 前馈控制原理	140
3.1 概述	54	5.1.2 前馈控制系统的特点	142
3.2 变送器	54	5.1.3 前馈控制的主要结构形式	143
3.2.1 变送器概述	54	5.1.4 前馈控制系统的参数整定	145
3.2.2 常用变送器及其工作原理	55	5.2 串级控制系统	147
3.3 控制器	69	5.2.1 串级控制的基本原理	147
3.3.1 控制器的控制规律	69	5.2.2 串级控制系统的主要特点及其 应用场合	150
3.3.2 控制器的运算电路	80	5.2.3 副回路的确定	151
3.4 执行器和防爆栅	99	5.2.4 控制器正、反作用的选择	154
3.4.1 执行器	99	5.2.5 串级控制系统的控制器 参数的工程整定	155
3.4.2 防爆栅	109	5.3 比值控制系统	156
小结	116	5.3.1 比值控制的基本概念	156
复习思考题	116	5.3.2 比值控制系统的类型	157
第 4 章 单回路控制系统及其控制器 参数整定	118	5.3.3 比值控制系统的设计和 实施方案	162
4.1 单回路控制系统的组成及 分析方法	119	5.3.4 比值控制系统的整定	165
4.2 被控变量的选择	120	5.4 均匀控制系统	166
4.3 控制变量的选择	122	5.4.1 均匀控制系统的组成	166
4.3.1 控制变量和干扰	122	5.4.2 控制器的控制规律的选择	170
4.3.2 过程静态特性的分析	122	5.4.3 控制器的整定	170
4.3.3 过程动态特性的分析	124	5.5 选择性控制系统	171
4.3.4 选择控制参数的一般原则	126	5.5.1 选择性控制系统的原理	172
4.4 控制器控制规律的选择原则	126	5.5.2 选择性控制系统的类型及 应用	172
4.4.1 控制器控制规律的选择	126	5.5.3 控制器的选择	175
4.4.2 控制器正反作用的选取	127	5.5.4 积分饱和及其防止措施	175
4.5 单回路控制系统控制器参数的 工程整定	128	小结	176
4.5.1 临界比例度法	128	复习思考题	176
4.5.2 衰减曲线法	130	第 6 章 计算机控制系统	179
4.5.3 响应曲线法	131	6.1 概述	180
4.5.4 经验试凑法	132	6.2 计算机控制系统的工作原理、 组成及分类	180
4.6 控制系统的投运及操作中的 常见问题	135	6.2.1 计算机控制系统的硬件组成	181

6.2.2 计算机控制系统的软件组成	183	第 7 章 自动控制系统在生产过程中的应用	222
6.2.3 计算机控制系统的分类	183	7.1 石油加工蒸馏装置的自动控制系统	223
6.3 直接数字控制系统	190	7.1.1 常压炉温度先进控制	223
6.3.1 基本构成	190	7.1.2 蒸馏装置中现场总线控制系统	225
6.3.2 DDC 中的 PID 算式	191	7.2 热交换器控制系统	227
6.3.3* 可编程控制器	195	7.2.1 静态前馈控制	227
6.4 集散控制系统	201	7.2.2 反馈-前馈控制系统	229
6.4.1 概述	201	7.2.3 前馈-串级控制系统	230
6.4.2 主要特点	202	7.3 流体输送设备的自动控制	231
6.4.3 基本构成	203	7.3.1 冷却水循环系统	231
6.4.4 典型 DCS 简介	204	7.3.2 压缩机输出压力控制系统	232
6.5 现场总线控制系统	206	7.4 化学反应器的自动控制	234
6.5.1 概述	206	7.5 其他典型过程工业应用实例	238
6.5.2 现场总线控制系统的技术特点	207	7.5.1 DCS 在电厂中的实现	238
6.5.3 几种典型的现场总线	207	7.5.2 炉温控制系统的计算机控制	239
6.5.4 现场总线系统的基础和目标	210	7.6 软测量技术及其应用	242
6.5.5 发展中的现场总线系统	210	7.6.1 软测量技术的四个组成	242
6.5.6 一般的现场总线结构	211	7.6.2 软测量建模方法	243
6.6 工业以太网技术	214	7.6.3 软测量在过程优化中的应用	245
6.6.1 工业以太网概况	214	7.6.4 软测量在加氢裂化分馏塔航煤干点测量中的应用	245
6.6.2 Ethernet 应用于工业现场的关键技术	214	7.6.5 软测量在吸收法捕集二氧化碳过程离子浓度监测中的应用	246
6.6.3 工业以太网协议	215	小结	248
6.6.4 工业以太网的优势	217	复习思考题	249
6.6.5 工业以太网在控制领域应用现状	217	参考文献	250
6.7 无线现场仪表与网络	219		
小结	220		
复习思考题	220		

第1章 基本概念

教学目标

通过本章的学习，了解过程自动化的主要内容并复习掌握一些基本概念。了解自动控制系统的组成、框图、分类、过渡过程及其品质指标以及过程控制系统设计研究的基本内容。通过具体实例能够将理论与实际问题相对应，有助于更好地理解本章的内容。

教学要求

知 识 要 点	相 关 知 识	权 重	自 测 分 数
自动化的相关概念	过程工程、单元操作和过程自动化的基本概念；过程控制工程与过程工程的区别与联系	20%	
自动控制系统的相关知识	自动控制系统的组成、框图以及分类	30%	
自动控制系统过渡过程及品质指标	自动控制系统的过渡过程、过渡过程的品质指标以及对自动控制系统的性能基本要求	30%	
过程控制系统设计研究的基本内容	过程控制系统设计步骤；被控变量与输入变量的选择；控制方案的确定；硬件设备的选择；控制器的设定	20%	

引例

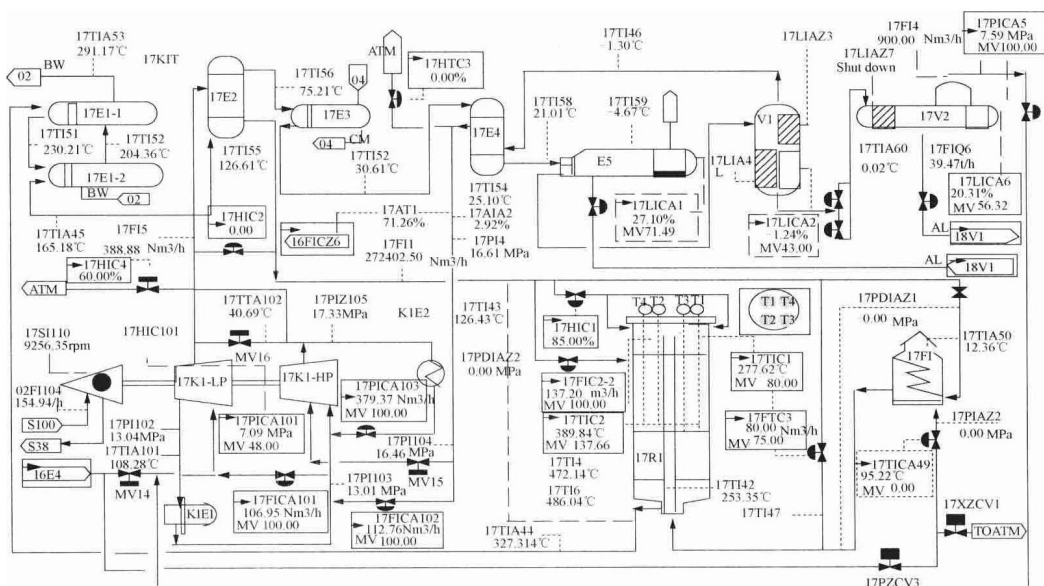
随着工业生产过程向大型化、规模化、集成化、综合化方向的发展，对生产过程的性能要求越来越高。此外，随着资源的枯竭，以及日益严峻的环保和安全生产形势，对过程工业提出了更高的指标要求，由此导致一个现代化的过程生产工厂在运行操作方面变得越来越复杂。为此，采用安全、可靠、高效的過程控制装置实现对过程生产的优化控制就显得尤为重要。在过程工业中，通过自动控制装置能够实现对生产过程的平稳安全操作，同时在降低生产成本、提高产品质量、减少废物排放等方面发挥重要作用。

在电力、石油化工、冶金工业、环境工程、水处理等领域中，常需要控制多股流体在管线中的输送、分配，调节工艺过程中相关的参数。比如，压力、温度以及产品浓度等，以达到实现某一物理化学过程稳定发生的目的。比如，化肥生产企业中(如图 1.1 所示)的大型工业过程现在采用了引进的 TIIcC6000，可以实现合成氨系统的六个合成塔近五十个控制回路的计算机分散调节控制。

从理论和实践方面掌握过程控制知识，了解过程检测与控制装置的基本工作原理以及过程控制的基本理论，对于从事过程工业生产及相关产品设计开发的人员具有重要意义。



(a) 化工厂实景



(b) 控制系统

图 1.1 大型化肥企业中氨合成集散控制系统

1.1 过程自动化的主要内容

过程工业，例如，化学工业，是把原料加工成有用产品的生产过程。过程工程师通过自动控制系统把生产设备有机结合起来，从而实现了生产过程的自动化。

在学习过程自动化知识时，常常需要了解过程工程、过程控制工程以及过程自动化的基本概念。

1. 过程工程

“过程”顾名思义，在广义上是指一个事物的历程、进程与经过。而“工程”的意思是将自然科学的理论应用到具体工农业生产等部门中形成的各学科的总称。而过程工程一般就是指在各种各样的生产过程中所涉及的具体的操作步骤以及流程等。例如，在石化生产过程中，过程工程主要包括两类。一类以进行化学反应为主，通常是在各种反应器中进行；另一类则为无化学反应的物理过程，包括原料预处理过程和反应产物后处理过程。尽管从生产某种产品的意义上说，反应过程是生产过程的核心，但它在工厂的设备投资和操作费用中通常并不占据主要比例，而在实际上起决定作用的往往是众多的物理过程，决定了整个生产的经济效益，这一类重要的物理过程就是单元操作，如流体输送、热交换、搅拌、沉降、过滤、蒸发、结晶、吸收、蒸馏、萃取、吸附以及干燥等。单元操作是了解化工生产过程的重要环节，其他过程工程可以此为参考。

2. 过程控制工程

工业中的过程控制是指对工业的生产过程中的温度、压力、流量、液位和成分等工艺参数加以要求，采用一定的方法对上述工艺参数加以调节控制，使得各个参数在生产过程中保持在所要求的范围内。

3. 过程自动化

过程自动化是指在工业生产中广泛采用各种自动检测和自动控制装置，对生产过程进行自动测量、检验、计算、控制、监视等，以代替“人”来操纵机器设备。自动化是生产机械化的更高阶段，也是工业技术现代化的基本方向之一。按其发展阶段划分：第一为半自动化，即部分采用人工操作，部分采用自动控制进行生产；第二为全盘自动化，又称自动化生产线，指全部工序过程自动化；第三是综合自动化，即从原料进厂直到产品出厂，包括加工、包装、打标记等整个过程的自动化，也是企业管理自动化的主要内容。过程自动化可减轻工人的劳动强度，减少操作工人数量，保证工人的安全，生产连续，产品质量稳定，劳动生产率高；但投资费用较大，能耗高，更换品种规格较困难，要求有较高的管理水平和工人文化技术素质。

过程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方面的内容。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的影响，使其始终保持在预先设定的数值范围内，使生产过程维持在正常或最佳的工艺操作状态。自动检测系统是利用各种检测仪器对主要工艺参数进行指示或记录，“了解”生产的任务。自动控制系统是对生产中某些关键性参数进行自动调节，使其在受到干扰影响而偏离正常状态时，能自动地调整到规定的数值范围内。自动信号和连锁保护系统是对某些关键性参数设有自动信号连锁装置。当工艺参数超过了允许范围，系统自动地发出声光报警信号，以提醒操作人员及时采取应对措施。自动化技术不仅可以把人从繁重的体力劳动、部分脑力劳动以及恶劣、危险的工作环境中解放出来，而且能扩展人的器官功能，极大地提高劳动生产率，增强人类认识世界和改造世界的能力。因此，自动化是国家

现代化的重要条件和显著标志。

工业生产中对过程控制的基本要求总体上可以归纳为三项基本要求：即安全性、稳定性和经济性。安全性是指在整个生产过程中，确保人身和设备的安全，这是最重要也是最基本的要求；而稳定性是指系统应具有抵抗外部干扰、保持生产过程长周期稳定运行的能力；经济性是指在生产同样质量和数量的产品时所消耗的成本最少。随着环境保护观念的日益加强以及环保法规的日益严格，安全性正演变成安全环保性。即确保工厂对环境无影响，并保持人身和设备安全。因此，在过程控制中为了满足以上的要求，在理论与实践中的许多问题需要解决。

过程自动化一般多用于产品结构较先进、工艺稳定、批量大、需要节约大量劳动力的工业生产，以及危险性场合的生产活动中。过程控制装置是生产过程自动化的核心内容部分，是实现过程自动化的基础条件。

随着自动控制理论不断发展以及电子计算机技术的广泛应用，过程自动化在工业生产和科学技术发展中起到了越来越重要的作用。而过程自动化的程度已经成为衡量工业企业现代化水平的一个重要标志。

1.2 自动控制系统的组成

在日常的工业生产过程中，一般都是在相应的温度、压力、流量、浓度、成分、厚度和液位等工艺条件下进行的。因此，为了满足相应的工艺要求，就必须对其生产过程加以控制，使其能够稳定在保证生产过程所要求的范围之内进行。为了实现控制的要求，可以对其过程采用自动控制。下面以锅炉燃烧过程为例，来说明其自动控制系统的组成，如图 1.2 所示。

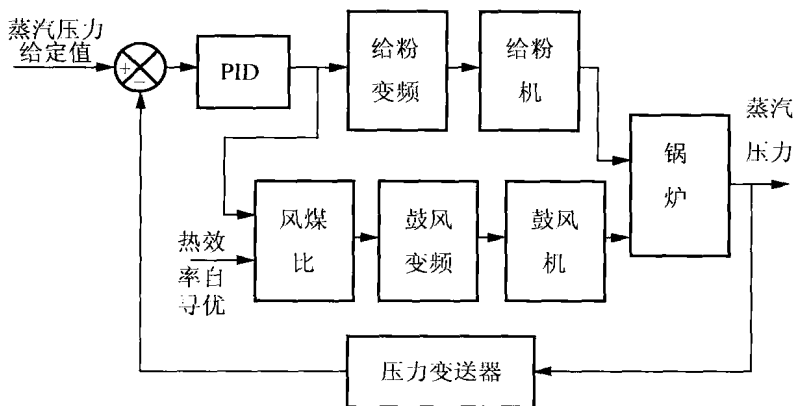


图 1.2 锅炉燃烧过程自动控制系统框图

锅炉燃烧过程自动控制系统的选择虽然与燃料的种类及其供给系统、燃烧方式以及锅炉与负荷的联结方式都有关系，但是任务都是一样的。归纳起来，锅炉燃烧过程自动控制系统有三大任务：

(1) 维持汽压(蒸汽压力)恒定。汽压的变化表示锅炉所提供的蒸汽量和所需要负荷的耗汽量不相适应，必须相应地改变送入炉膛燃烧的燃料量，以改变锅炉的蒸汽量。

(2) 保证燃烧过程的经济性。当燃料量改变时, 必须相应地调节送风量, 使其与燃料量成一定比例实现完全燃烧, 保证燃烧过程有较高的经济性。

(3) 调节引风量与送风量相配合, 以保证炉膛压力不变。

锅炉燃烧控制系统一般有三个被控变量, 分别是蒸汽压力、烟气含氧量和炉膛负压; 一般有三个操纵变量, 分别是燃料量、送风量和引风量。对于燃料量, 根据其燃料种类的不同, 可能是炉排电机驱动(对固体燃料如煤), 也可能是燃料阀(液体、气体燃料); 对于送风量和引风量, 一般是挡板执行机构或变频器。

燃烧控制系统是一个多参数变量的控制系统。这种控制系统通常把其简化成互相联系, 密切配合但又相对独立的三个单变量系统来实现。燃烧过程控制系统一般采用如下的控制过程。先通过蒸汽压力变送器经滤波后取得信号, 与所设定的蒸汽压力进行比较, 判断出鼓风机 PI 控制器调节的方向和大小, 通过鼓风机 PI 控制单元计算出鼓风机变频器的输出大小。同时将该信号输出给风煤比计算单元, 相应地算出在当时的风量下炉排的最大输出值。再把蒸汽压力的差值信号送给炉排 PI 控制器, 通过炉排 PI 控制单元计算出炉排变频器的输出大小。经过风煤比限位, 输出给炉排变频器。在实际调试过程中往往把鼓风机 PI 控制中的比例系数设的比炉排 PI 单元的大, 这样可以很好的保证鼓风系统对蒸汽压力的敏感度要高于炉排。用这样的控制过程反复调节, 较好地完成锅炉燃烧过程的自动控制。

从以上的锅炉燃烧过程的自动控制系统中可以看到, 一个自动控制系统主要由两大部分组成: 其一是实现控制作用的全套控制装置, 包括测量仪表、变送器、控制仪表以及执行器等; 另一个是自动控制装置控制下的生产装置, 即被控对象, 如锅炉、反应器、换热器等。上述锅炉中的燃烧过程, 锅炉、鼓风机排控制器、鼓风机排执行器等构成了一个完整的自动控制系统。下面对系统中各部分加以定义:

(1) 自动控制: 自动控制是指在没有人直接参与的情况下, 利用外加的设备或装置, 使机器、设备或生产过程的某个工作状态或参数自动地按照预定的规律运行。是相对人工控制概念而言的。

(2) 自动控制系统: 在无人直接参与下可使生产过程或其他过程按所期望规律或预定程序进行的控制系统。

(3) 被控对象: 在自动控制系统中, 工艺变量需要控制的生产设备或机器称为被控对象。在化工生产中, 各种塔器、反应器、泵、压缩机以及各种容器、储罐、储槽以及由这些单元设备构成的系统等。前述例子中, 锅炉就是控制系统中的被控对象。

(4) 测量元件和变送器: 测量需控制的工艺参数并将其转化为一种特定信号的仪器, 在自动控制系统中起着监视作用, 因此要求准确、及时、灵敏。

(5) 控制器: 又称调节器, 将检测元件或变送器送来的信号与其内部的工艺参数给定值信号进行比较, 得到偏差信号; 根据这个偏差的大小按一定的运算规律计算出控制信号, 并将控制信号传送给执行器。

(6) 执行器: 接受控制器送来的信号, 自动地使控制机关动作, 从而改变输送给被控对象的能量或物料量。

(7) 被控变量 $c(t)$: 简称被控量, 指需要控制的工艺参数, 如锅炉汽包的液位、反应器的温度、燃料流量等是被控对象的输出信号。在后面介绍的控制系统框图中, 也是自动控制系统的输出信号。但其是理论上的真实值, 从测量变送器输出的信号是被控变量的测量值。

(8) 给定值 $r(t)$: 对应于生产过程中被控变量的期望值。当其值由工业控制器内部给出时称为内给定值。最常见的内给定值是一个常数, 它对应于被控变量所需保持的工艺参数值; 当其值产生于外界某一装置, 并输入至控制器时称为外给定值。

(9) 测量值 $b(t)$: 由检测元件得到的被控变量的实际测量值。

(10) 偏差信号 $e(t)$: 在理论上应该 是被控变量的实际值与给定值之差, 而能够直接获取的信息是被控变量的测量值, 因此通常把给定值与测量值的差作为偏差。

(11) 操纵变量 $m(t)$: 执行器输出值, 用以克服干扰的影响, 具体实现控制作用的变量称为操纵变量。在前述例子中, 燃料量就是操纵变量。

(12) 干扰 $d(t)$: 引起被控变量偏离给定值的, 除操纵变量以外的各种因素。最常见的干扰因素是负荷改变, 电压、电流的波动, 气候变化等。



【应用案例】

图 1.3 所示为某厂的自力式储槽液位控制系统。其中储槽为被控对象; 储槽中的水的液位为被控变量; 进水流量为操纵变量。

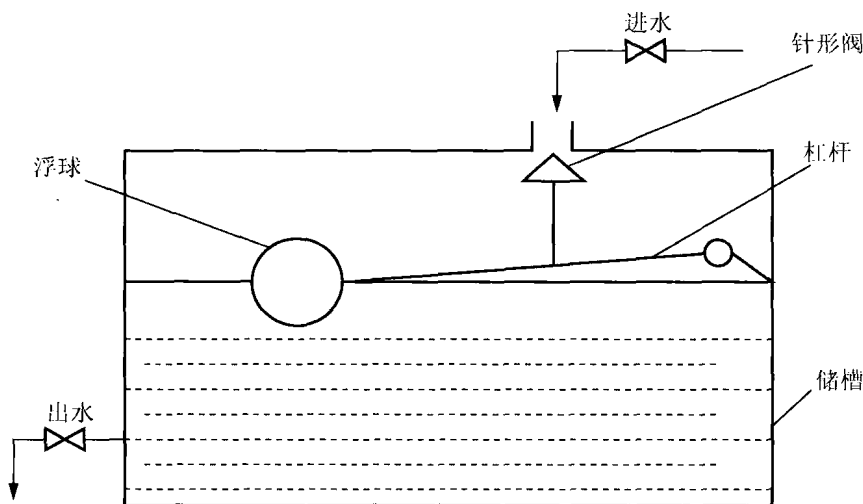


图 1.3 储槽液位控制系统

在该系统中, 当出水量突然增大时, 出水量大于进水量, 使液位下降, 浮球下移, 通过杠杆装置带动针形阀下移, 增大了进水量, 使得出水量与进水量之差随之减小, 液位下降变缓, 直至进水量与出水量又相等, 液位停止下降, 重新稳定在某一位置, 从而实现了液位自动控制。

1.3 自动控制系统的框图

在研究控制系统的过程中, 为了能够更清楚更直观地表示出控制系统中各个组成部分之间的相互影响和信息的联系, 一般采用框图来表示控制系统的组成以及各部分的作用。所谓框图就是表示系统各单元、部件之间信号传递关系的一种数学图示模型, 这是控制理论中描述复杂系统的一种简便方法。适用于线性和非线性系统。

1.3.1 框图的组成和绘制

框图由信号线、分支点、相加点和框图单元组成,如图1.4所示。

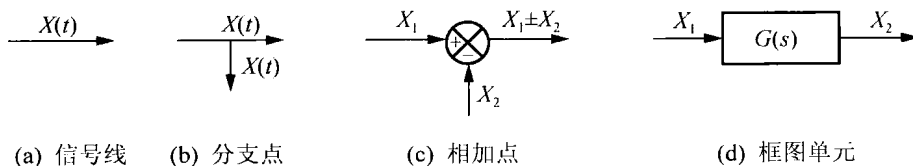


图 1.4 框图的基本组成单元

图1.4(d)中的框图单元表示对信号进行拉普拉斯变换(拉氏变换),其输出量等于框图单元的输入量与传递函数的乘积,即

$$X_2 = G(s)X_1$$

传递函数定义为零初始条件下系统(或环节)的输出拉普拉斯变换与输入拉普拉斯变换之比。

1.3.2 环节的基本连接形式

复杂的自动控制系统是由若干环节以不同的方式连接组合而成,而在自动控制系统中框图就是用来直观表示这些环节间的连接关系。环节之间有串联、并联和反馈(反并联)三种基本连接方式。

1. 串联

在串联环节中,前一环节的输出作为后一个环节的输入,如图1.5所示。



图 1.5 串联环节

根据图1.5可以得出以下的等式:

$$\begin{aligned}
 R_2(s) &= G_1(s)R_1(s) \\
 R_3(s) &= G_2(s)R_2(s) \\
 &\vdots \\
 R_n(s) &= G_{n-1}(s)R_{n-1}(s) \\
 C(s) &= G_n(s)R_n(s)
 \end{aligned} \tag{1-1}$$

根据式(1-1),可以导出下面的函数:

$$G(s) = \frac{C(s)}{R_1(s)} = G_1(s)G_2(s) \cdots G_n(s) \tag{1-2}$$

因此,各个环节总的传递函数为:

$$G(s) = G_1(s)G_2(s) \cdots G_n(s) \tag{1-3}$$

这里必须注意的是,在应用公式(1-3)时,每个环节都必须具有单向性(无负载效应)。

2. 并联

并联环节输入量都相同，输出量的代数和作为环节组的输出，如图 1.6 所示。

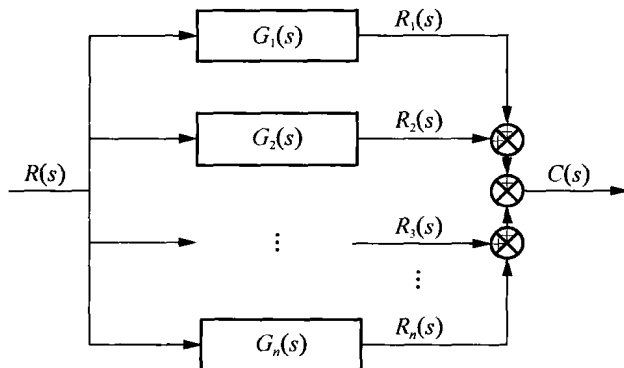


图 1.6 并联环节

每个环节的输入量都等于 $R(s)$ ，环节组的总输出为

$$C(s) = \sum_{i=1}^n \pm R_i(s) \quad (1-4)$$

又因为

$$\begin{aligned} R_1(s) &= G_1(s)R(s) \\ R_2(s) &= G_2(s)R(s) \\ &\vdots \\ R_n(s) &= G_n(s)R(s) \end{aligned} \quad (1-5)$$

将式(1-5)代入式(1-4)中可得

$$C(s) = R(s) \sum_{i=1}^n \pm G_i(s) \quad (1-6)$$

因此并联环节总的传递函数为

$$G(s) = \frac{C(s)}{R(s)} = \sum_{i=1}^n \pm G_i(s) \quad (1-7)$$

根据拉氏反变换的线性定理可知，环节并联后总输出量的时间函数就等于各并联环节输出分量时间函数的代数和。

3. 反馈连接

反馈连接是自动控制系统中应用最普遍的连接方式。自动控制系统和模拟自动控制器都是根据反馈原理而设计的。在反馈连接中，信号的传递构成闭合回路，如图 1.7 所示。

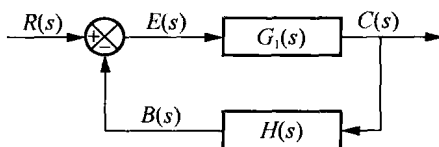


图 1.7 反馈连接

在图 1.7 所示的反馈连接中, 反馈连接环节总的传递函数 $G(s)$ 的输出 $C(s)$ 在经过环节 $H(s)$ 后成为反馈信号 $B(s)$, 反馈信号又送到环节 $G(s)$ 的输入端。在信号的合点上有

$$\left. \begin{aligned} E(s) &= R(s) - H(s)C(s) \\ C(s) &= E(s)G_1(s) \end{aligned} \right\} \quad (1-8)$$

联立(1-8)两个方程式, 得到总的传递函数

$$G(s) = \frac{C(s)}{R(s)} = \frac{G_1(s)}{1 + G_1(s)H(s)} \quad (1-9)$$

$G(s)$ 的分子是输入量 $X(s)$ 到输出量 $Y(s)$ 沿信号前进方向的传递函数 $G_1(s)$, 称为前向通道传递函数, $H(s)$ 则称为反馈通道传递函数。如果是负反馈连接环节组传递函数 $G(s)$, 那么式(1-9)中的分母是 $1 + G_1(s)H(s)$; 如果是正反馈连接环节组传递函数, 那么其分母是 $1 - G_1(s)H(s)$ 。通常都采用负反馈系统。上式中 $G_1(s)H(s)$ 称为开环传递函数。开环传递函数是把反馈连接所形成的闭环断开后所形成的传递函数。相对于开环传递函数而言, 把 $G(s)$ 称为闭环传递函数。当反馈通道的传递函数 $H(s)=1$ 时, 反馈环节可以不在框图中画出, 但输入/输出信号线必须连接, 这时系统称为单位反馈系统。

🔑 特别提示

反馈连接的优势

在反馈连接系统中, 不管出于什么原因(外部干扰或系统内部变化), 只要被控制量偏离给定值, 就会产生相应的控制作用去消除偏差。因此, 具有抑制干扰的能力, 对元件特性变化不敏感, 并能改善系统的响应特性。

1.3.3 闭环控制系统的框图

闭环控制系统是指在控制系统中将被控变量反馈到系统输入端, 对控制作用产生影响的一类控制系统。是自动控制系统中最常见的一类, 因此在这里对闭环控制系统典型的框图加以介绍。

图 1.8 就是一个典型的闭环控制系统框图。

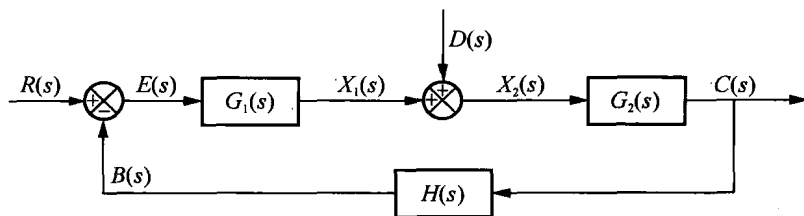


图 1.8 闭环控制系统框图

图中 $R(s)$ 表示给定输入量, $D(s)$ 表示干扰输入量, $C(s)$ 表示被控变量, $E(s)$ 称为误差, $G_1(s)$ 和 $G_2(s)$ 表示前向通道的传递函数, $B(s)$ 称为反馈, $H(s)$ 为反馈通道的传递函数。