



全国高等职业教育工业生产自动化技术系列规划教材

电子·教育

过程控制系统

齐卫红 主编 林春丽 副主编
王永红 主审

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



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

全国高等职业教育工业生产自动化技术系列规划教材

过程控制系统

齐卫红 主编

林春丽 副主编

王永红 主审

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书以常规过程控制系统为主体,以目前在工业生产过程中广泛应用或应用较为成熟的控制系统和控制方案作为重点内容,予以系统的阐述。

本书共分为8章。第1章过程控制基础知识,第2章简单控制系统,第3章串级控制系统,第4章前馈控制系统,第5章比值控制系统,第6章其他控制系统,第7章典型化工单元的控制,第8章控制系统工程设计。每章前面均配有内容提要,章后附有本章小结、习题和实验项目等内容,以满足读者练习和实训的需要。

本书由浅入深,重点突出,选材精练,便于自学,适合作为高职高专院校过程控制自动化、测控技术及仪器仪表等相关专业教材,也可供电气、机械、炼油、化工、冶金、轻工等相关专业参考。

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。

图书在版编目(CIP)数据

过程控制系统 / 齐卫红主编. —北京: 电子工业出版社, 2007.5
(全国高等职业教育工业生产自动化技术系列规划教材)

ISBN 978-7-121-04351-2

I. 过… II. 齐… III. 过程控制—自动控制系统—高等学校; 技术学校—教材 IV. TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 065341 号

责任编辑: 韩玲玲

印 刷: 北京市海淀区四季青印刷厂

装 订: 涿州市桃园装订有限公司

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本: 787×1092 1/16 印张: 18.25 字数: 467 千字

印 次: 2007 年 5 月第 1 次印刷

印 数: 5 000 册 定价: 25.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zlt@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010) 88258888。

出版说明

党的十六大提出,走我国新型工业化发展的道路,必须坚持“以信息化带动工业化、以工业化促进信息化”,而且要达到“科技含量高、经济效益好、资源消耗低、环境污染少、人力资源优势”等五个具体目标,这表明我国要基本实现工业化,不仅要采用机械化和电气化,而且要充分利用自动化和信息化。因此,以自动化技术为代表的先进生产技术,将在我国产业结构调整、推动传统产业现代化、实现经济及社会持续协调发展中,发挥极其重要的作用。

目前,作为我国高等教育一翼的高等职业教育,已经在招生规模方面取得了巨大的突破,但在教学改革方面与西方发达的职业教育相比,还相对落后。高职教育的培养目标是培养企业真正需要的具有实践动手能力的技术工人,这是当前高职教育改革的重点,也是一线教师所真正关心的话题。而工业生产自动化技术是高职教育中的一个重要领域,承担着为工业生产培养一线技术工人的重要作用,而且,无论社会用人需求还是就业前景,这一领域目前都被广泛看好。

与此相适应,电子工业出版社在广泛调查研究的基础上,于2006年3月组织全国数十所高等职业院校的一线教师和企业技术专家,在上海召开了“全国高等职业教育工业生产自动化技术规划教材研讨会”,就相关的课程教学和高职培养目标进行了深入的探讨,确定了相关的主干教材10余种。与会代表多是所在学校的领导和业务骨干,具有丰富的教学经验、实践经验和编写教材的经验。

本套教材体现了高等职业教育改革的方向,以培养岗位技术人员的综合能力为中心,淡化理论、强化应用,突出职业教育的教育特色,并且根据教育部制定的“高职高专教育课程教学基本要求”,将传统课程重新组合,缩短教学课时,力求突出应用性、针对性、岗位性和专业性等特点。

本套教材在内容编排上以能力为单位模块,强调实用原则;书中实例完整,注重原理和方法的应用,以提高对高职学生技能的培养。本套教材将学历课程与资格应试结合,满足目前大多数高等职业院校学生毕业时对毕业证与资格证或上岗证的要求。本套教材力求内容新颖,紧跟国内外工业生产自动化技术的最新进展,同时兼顾国内高职院校相关专业的最新教学内容。本套教材均配套教学参考资料,为高职师生的教与学提供方便和帮助。

本套教材的出版对于高等职业教育的改革和高等职业专门人才的培养将起到积极的推动作用。对于教材中所存在的一些不尽如人意之处,将通过今后的教学实践不断修订、完善和充实,以便我们更好地服务于高等职业教育。

本套教材适用于生产过程自动化技术、计算机控制技术、工业网络技术、液压与气动技术、检测技术及应用等专业,也适用于机电类专业。

电子工业出版社
高职高专教育教材事业部
2006年7月

前 言

“过程控制”是现代工业自动化的一个重要领域。随着各类生产工艺技术不断改进提高,生产过程的连续化、大型化不断强化,随着对过程内在规律的进一步了解,以及仪表、计算机技术的迅猛发展,生产过程控制技术获得了更大的进展。《过程控制系统》是过程控制自动化及相关专业的一门主要专业课程。近几年来,随着我国高等职业技术教育的迅速发展,生产过程自动化专业的办学规模也在逐步扩大。本书正是为了适应工业生产发展的需要和高等职业技术教育的教学特点而编写的。

本书编写的宗旨是,以常规过程控制系统为核心内容,以目前在工业生产过程中广泛应用或应用较为成熟的控制系统和控制方案作为重点内容,以系统的分析、设计与应用为轴线,从工程角度出发,进行较为系统的阐述。本次编写对高职教材中专业知识相对陈旧的部分内容作了适当的删除或调整;而对于以往包含在过程控制系统中的有些内容,诸如新型控制系统、计算机控制与集散型控制系统等,随着生产过程控制技术的迅速发展,因它们已各自自成体系,大多数的高等职业院校也已就上述内容开设了相应的课程,因此本次《过程控制系统》的编写不再重复纳入;基于高职学生的培养要求,在理论上本着“必需、够用”的原则,将原来的《过程控制原理》和《过程控制系统》整合为一本书,并对《过程控制原理》的原有内容作了较大的删减,将其必需的基础知识合为一章,纳入本书;为适应高职学生的接受能力,并针对高等职业技术教育注重培养学生的实际操作技能这一特点,在编写过程中减少了有关理论分析的内容,除了在某些章节保留必要的理论推导之外,其余部分全部采用定性分析的方法进行讨论;为了加强对学生专业技能的培养,对控制系统工程设计的部分知识也作了简要介绍。

本书共分为8章,包括三大部分内容。第一部分为第1章过程控制基础知识,阐述了过程控制系统的组成、基本要求、控制指标、控制规律对系统控制质量的影响,以及过程动态特性与建模方法;第二部分为过程控制系统,包括第2章简单控制系统、第3章串级控制系统、第4章前馈控制系统、第5章比值控制系统和第6章其他控制系统,各章均以系统的分析、设计与应用为轴线,重点讨论了各类控制系统的组成、特点、设计原则、实施和应用范围,以及系统的投运和参数整定方法;第三部分为过程控制的工程设计和应用,包括第7章典型化工单元的控制和第8章控制系统工程设计,以培养学生工程设计的初步知识和识图能力,为控制系统的应用、维护、改进、设计奠定基础。

本书由西安理工大学高等技术学院齐卫红主编,参加本书编写的都是各高职高专院校从事自动化教学和研究的一线教学人员,其中齐卫红编写了绪论、第1~3章、第8章和第7章的3、4、5节,辽宁科技大学高职学院林春丽编写了第4章,第7章的1、2节分别由辽宁科技大学高职学院的杨德宝和黄轶老师编写,第5章由山东胜利职业学院于洪庆编写,第6章由山东化工职业学院高燕、孙庆玉编写;全书由齐卫红统稿,南京化工职业技术学院王永红主审。

由于编者的业务和知识水平有限,本书难免有不妥之处,恳请读者不吝指正。

编 者

2007年2月

目 录

绪论	(1)
0.1 过程控制的定义和任务	(1)
0.2 过程控制的发展与趋势	(4)
0.2.1 自动控制理论的发展历程	(4)
0.2.2 过程控制系统的发展与趋势	(5)
第 1 章 过程控制基础知识	(7)
1.1 自动控制系统的组成及分类	(7)
1.1.1 人工控制与自动控制	(7)
1.1.2 自动控制的基本方式	(8)
1.1.3 自动控制系统的组成	(10)
1.1.4 自动控制系统的分类	(12)
1.2 系统运行的基本要求	(13)
1.2.1 系统的动态与静态	(13)
1.2.2 基本要求	(14)
1.3 过程控制系统的过渡过程及控制性能指标	(15)
1.3.1 过程控制系统的过渡过程	(15)
1.3.2 过程控制系统的控制性能指标	(17)
1.4 过程动态特性与建模	(20)
1.4.1 数学模型的定义	(20)
1.4.2 被控过程的数学模型(过程特性)	(20)
1.4.3 传递函数	(27)
1.4.4 过程特性的一般分析	(29)
1.4.5 过程动态模型的实验测取	(32)
1.5 过程控制系统的方框图及其化简	(34)
1.5.1 系统方框图	(34)
1.5.2 方框图的等效变换与化简	(35)
1.5.3 过程控制系统的传递函数	(40)
1.6 常规控制规律及其对系统控制质量的影响	(42)
1.6.1 位式控制	(42)
1.6.2 比例控制(P)	(44)
1.6.3 积分控制(I)	(46)
1.6.4 微分控制(D)	(49)
本章小结	(51)
思考与练习	(53)
实验一 单回路控制系统控制过程演示	(55)

实验二 一阶(单容)过程特性测试 二阶(双容)过程特性测试	(55)
第2章 简单控制系统	(57)
2.1 系统组成原理	(57)
2.1.1 简单控制系统的结构组成	(57)
2.1.2 控制过程分析	(58)
2.1.3 简单控制系统的设计概述	(60)
2.2 被控变量的选择	(60)
2.2.1 被控变量的选择方法	(61)
2.2.2 被控变量的选择原则	(61)
2.2.3 被控变量的选择实例	(62)
2.3 过程特性对控制质量的影响及操纵变量的选择	(64)
2.3.1 扰动通道特性对控制质量的影响	(65)
2.3.2 控制通道特性对控制质量的影响	(69)
2.3.3 操纵变量的选择	(72)
2.4 执行器(气动薄膜控制阀)的选择	(72)
2.4.1 控制阀概述	(72)
2.4.2 控制阀的结构形式及选择	(75)
2.4.3 控制阀气开、气关形式的选择	(78)
2.4.4 控制阀流量特性的选择	(79)
2.4.5 控制阀口径的选择	(86)
2.4.6 阀门定位器的正确使用	(88)
2.5 测量变送环节的选取及其对控制质量的影响	(90)
2.5.1 对测量变送环节的基本要求	(90)
2.5.2 测量误差分析	(91)
2.5.3 减小动态误差的方法	(92)
2.6 控制器的选择	(94)
2.6.1 控制器控制规律的选择	(94)
2.6.2 控制器正、反作用方式的选择	(96)
2.7 简单控制系统的投运和整定	(98)
2.7.1 控制系统的投运	(98)
2.7.2 控制系统的整定	(101)
2.8 简单控制系统的故障与处理	(107)
2.8.1 故障产生的原因	(107)
2.8.2 故障判断和处理的一般方法	(108)
2.8.3 故障分析举例	(108)
2.9 控制系统间的关联与解耦	(110)
2.9.1 系统关联及其影响	(110)
2.9.2 分析系统关联的方法	(111)
2.9.3 系统关联的解耦	(113)

本章小结	(115)
思考与练习	(117)
实验三 简单控制系统的投运和整定	(120)
第3章 串级控制系统	(122)
3.1 基本原理和结构	(122)
3.1.1 串级控制系统的组成原理	(122)
3.1.2 串级控制系统的结构	(124)
3.1.3 串级控制系统的控制过程	(126)
3.2 串级控制系统的优点	(127)
3.3 串级控制系统的应用范围	(131)
3.3.1 用于具有较大纯滞后的过程	(131)
3.3.2 用于具有较大容量滞后的过程	(133)
3.3.3 用于存在变化剧烈和较大幅值扰动的过程	(134)
3.3.4 用于具有非线性特性的过程	(134)
3.4 串级控制系统的设计	(135)
3.4.1 主、副被控变量的选择	(135)
3.4.2 主、副控制器控制规律的选择	(140)
3.4.3 主、副控制器正、反作用的选择	(141)
3.4.4 串级控制系统的实施	(142)
3.5 串级控制系统的投运和整定	(144)
3.5.1 串级控制系统的投运	(144)
3.5.2 串级控制系统的整定	(144)
本章小结	(146)
思考与练习	(147)
实验四 串级控制系统的投运和整定	(149)
第4章 前馈控制系统	(151)
4.1 前馈控制原理	(151)
4.2 前馈控制的特点及局限性	(152)
4.2.1 前馈控制的特点	(152)
4.2.2 前馈控制的局限性	(153)
4.3 前馈控制系统的几种主要结构形式	(153)
4.3.1 单纯的前馈控制系统	(153)
4.3.2 前馈-反馈控制系统	(154)
4.3.3 前馈-串级控制系统	(155)
4.4 前馈控制系统的实施及应用	(156)
4.4.1 前馈控制系统的实施	(156)
4.4.2 前馈控制系统的应用	(158)
本章小结	(159)
思考与练习	(160)

第 5 章 比值控制系统	(161)
5.1 概述	(161)
5.2 比值控制系统的类型	(161)
5.2.1 单闭环比值控制系统	(162)
5.2.2 双闭环比值控制系统	(163)
5.2.3 变比值控制系统	(164)
5.3 比值系数的计算	(166)
5.3.1 流量与测量信号成线性关系时的折算	(166)
5.3.2 流量与测量信号成非线性关系时的折算	(168)
5.4 比值控制系统的实施	(169)
5.4.1 两种实施方案	(169)
5.4.2 比值控制系统中的信号匹配问题	(170)
5.5 比值控制系统的投运与整定	(170)
本章小结	(171)
思考与练习	(172)
实验五 单闭环比值控制系统的投运和整定	(173)
第 6 章 其他控制系统	(175)
6.1 均匀控制系统	(175)
6.1.1 均匀控制原理	(175)
6.1.2 均匀控制方案	(177)
6.2 选择性控制系统	(178)
6.2.1 选择性控制原理	(178)
6.2.2 选择性控制系统的类型	(179)
6.2.3 选择性控制系统工程设计和实施时的几个问题	(182)
6.3 分程控制系统	(184)
6.3.1 分程控制系统的组成及工作原理	(184)
6.3.2 分程控制的应用场合	(185)
6.3.3 分程控制系统的实施	(188)
6.4 自动保护系统	(189)
6.4.1 自动信号报警系统	(189)
6.4.2 自动联锁保护系统	(191)
本章小结	(196)
思考与练习	(197)
第 7 章 典型化工单元的控制	(198)
7.1 流体输送设备的控制	(198)
7.1.1 泵的控制	(199)
7.1.2 压缩机的控制	(202)
7.1.3 离心式压缩机的防喘振控制系统	(204)
7.2 传热设备的控制	(206)

7.2.1	传热设备的静态数学模型	(207)
7.2.2	一般传热设备的控制	(208)
7.2.3	管式加热炉的控制	(211)
7.3	锅炉设备的控制	(214)
7.3.1	锅炉汽包水位的控制	(216)
7.3.2	锅炉燃烧系统的控制	(220)
7.3.3	蒸汽过热系统的控制	(223)
7.4	精馏塔的控制	(223)
7.4.1	精馏塔的工艺要求和扰动分析	(224)
7.4.2	精馏塔被控变量的选择	(225)
7.4.3	精馏塔的控制方案	(227)
*7.4.4	复杂控制和新型控制方案在精馏塔中的应用	(231)
7.5	化学反应器的控制	(232)
7.5.1	化学反应器的控制要求和被控变量的选择	(233)
7.5.2	化学反应器的基本控制策略	(234)
7.5.3	几种典型反应器的控制方案	(234)
	本章小结	(237)
	思考与练习	(238)
第 8 章	控制系统工程设计	(241)
8.1	工程设计的基本知识	(241)
8.1.1	工程设计的基本任务和设计步骤	(241)
8.1.2	工程设计的内容	(242)
8.1.3	自控系统工程设计的方法	(243)
8.2	控制方案及工艺控制流程图的设计	(244)
8.2.1	工程设计的图例符号	(244)
8.2.2	控制方案的设计	(250)
8.2.3	工艺控制流程图的绘制	(254)
8.3	控制系统的设备选择	(256)
8.3.1	仪表自动化设备的选型	(256)
8.3.2	检测仪表的选择	(257)
8.3.3	显示控制仪表的选型	(257)
8.3.4	自控设备表	(260)
8.4	仪表盘正面布置图和背面电气接线图	(260)
8.4.1	仪表盘正面布置图	(260)
8.4.2	仪表盘背面电气接线图	(264)
8.5	其他设计文件简介	(269)
	本章小结	(272)
	思考与练习	(272)
附录 A	工艺流程图上常用设备和机器图例符号	(274)

附录 B 工艺流程图上常用物料代号	(276)
附录 C 工艺流程图上管道、管件、阀门及附件图例符号	(277)
附录 D 过程控制范例——识读工业锅炉工艺控制流程图	(278)
附录 E 某自控设计的自控设备表(表一)(部分)	(279)
附录 F 某自控设计的自控设备表(表二)(部分)	(280)
参考文献	(281)

绪 论

生产过程自动化,一般是指石油、化工、冶金、炼焦、造纸、建材、陶瓷及电力发电等工业生产中连续的或按一定程序周期进行的生产过程的自动控制。电力拖动及电机运转等过程的自动控制一般不包括在内。凡是采用模拟或数字控制方式对生产过程的某一或某些物理参数进行的自动控制通称为过程控制。过程控制是自动控制学科的一个重要分支。

过程控制系统可分为常规仪表过程控制系统与计算机过程控制系统两大类。前者在生产过程自动化中应用最早,已有六十余年的发展历史,这是本书要介绍的主要内容。后者是自20世纪70年代发展起来的以计算机为核心的控制系统,这部分内容将在《计算机过程控制》课程中予以专门介绍,因此不再纳入本书的讨论范围。

0.1 过程控制的定义和任务

1. 过程控制的基本概念

(1) 自动控制。在没有人的直接参与下,利用控制装置操纵生产机器、设备或生产过程,使表征其工作状态的物理参数(状态变量)尽可能接近人们的期望值(即设定值)的过程,称为自动控制。

(2) 过程控制。对生产过程所进行的自动控制,称为过程控制。也可采用前面的表述方法:凡是采用模拟或数字控制方式对生产过程的某一或某些物理参数进行的自动控制通称为过程控制。

(3) 过程控制系统。为了实现过程控制,以控制理论和生产要求为依据,采用模拟仪表、数字仪表或微型计算机等构成的控制总体,称为过程控制系统。

2. 过程控制的研究对象与任务

过程控制是自动化的一门分支学科,是对过程控制系统进行分析与综合。在这里,“综合”主要是指方案设计。有关过程控制系统的设计内容和步骤将在第2章、第8章中予以专门介绍。

3. 过程控制的目的

生产过程中,对各个工艺过程的物理量(或称工艺变量)有着一定的控制要求。有些工艺变量直接表征生产过程,对产品的数量与质量起着决定性的作用。例如,精馏塔的塔顶或塔釜温度,一般在操作压力不变的情况下必须保持一定,才能得到合格的产品;加热炉出口温度的波动不能超出允许范围,否则将影响后一工段的效果;化学反应器的反应温度必须保持平稳,才能使效率达到指标。有些工艺变量虽不直接地影响产品的质量和数量,然而保持其平稳却是使生产获得良好控制的前提。例如,用蒸汽加热反应器或再沸器,如果在蒸汽总压波动剧烈的情况下,要把反应温度或塔釜温度控制好将极为困难;中间储槽的液位高度与气柜压力,必须维持在允许的范围之内,才能使物料平衡,保持连续的均衡生产。有些工艺变量是决定安全生产的因素。例如,锅炉汽包的水位、受压容器的压力等,不允许超出规定

的限度，否则将威胁生产安全。还有一些工艺变量直接鉴定产品的质量。例如，某些混合气体的组成、溶液的酸碱度等。近二十几年来，工业生产规模的迅猛发展，加剧了对人类生存环境的污染，因此，减小工业生产对环境的影响也已纳入了过程控制的目标范围。

综上所述，过程控制的主要目标应包括以下几个方面：

- ① 保障生产过程的安全和平稳；
- ② 达到预期的产量和质量；
- ③ 尽可能地减少原材料和能源损耗；
- ④ 把生产对环境的危害降低到最小程度。

由此可见，生产过程自动化是保持生产稳定、降低消耗、降低成本、改善劳动条件、促进文明生产、保证生产安全和提高劳动生产率的重要手段，是 20 世纪科学与技术进步的特征，是工业现代化的标记之一。

图 0.1 所示是工业生产中常见的锅炉汽包示意图。

锅炉是生产蒸汽的设备，几乎是工业生产中不可缺少的设备。保持锅炉汽包内的液（水）位高度在规定范围内是非常重要的，若水位过低，则会影响产汽量，且锅炉易烧干而发生事故；若水位过高，生产的蒸汽含水量高，会影响蒸汽质量。这些都是危险的。因此对汽包液位严加控制是保证锅炉正常生产必不可少的措施。其液位是一个重要的工艺参数。

如果一切条件（包括给水流量、蒸汽量等）都近乎恒定不变，只要将进水阀置于某一适当开度，则汽包液位能保持在一定高度。但实际生产过程中这些条件是变化的，如进水阀前的压力变化、蒸汽流量的变化等。此时若不进行控制（即不去改变阀门开度），则液位将偏离规定高度。因此，为保持汽包液位恒定，操作人员应根据液位高度的变化情况，控制进水量。

在此，工艺所要求的汽包液位高度称为设定值；所要求控制的液位参数称为被控变量或输出变量；那些影响被控变量使之偏离设定值的因素统称为扰动作用，如给水量、蒸汽量的变化等（设定值和扰动作用都是系统的输入变量）；用以使被控变量保持在设定值范围内的作用称为控制作用。

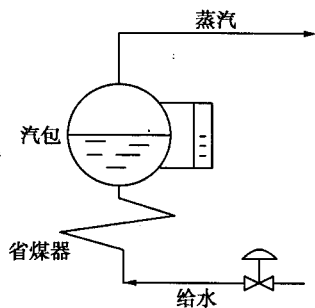


图 0.1 锅炉汽包示意图

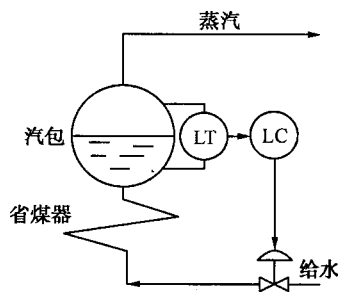


图 0.2 锅炉汽包液位过程控制系统示意图

为了保持液位为定值，手工控制时主要有三步：

- ① 观察被控变量的数值，即汽包的液位；
- ② 把观察到的被控变量值与设定值加以比较，根据两者的偏差大小或随时间变化的情况，做出判断并发布命令；
- ③ 根据命令操作给水阀，改变进水量，使液位回到设定值。

如采用检测仪表和自动控制装置来代替手工控制，就成为自动控制系统。

现以图 0.2 所示的锅炉汽包液位过程控制系统为例，说明过程控制系统的原理。当系统受到扰动作用后，被控变量（液位）发生变化，通过检测仪表得到其测量值 z ；在自动控制装置（液位控制器 LC）中，将测量值 z 与设定值 x 比较，得到偏差 $e = z - x$ ；经过运算后，发出控制信号，这一信号作用于执行器（在此为控制阀），改变给水量，以克服扰动的影响，使被控变量回到设定值。这样就完成了所要求的控制任务。这些自动控制装置和被控的工艺对象就组成了一个过程控制系统。

通常，设定值是系统的输入变量，而被控变量是系统的输出变量。输出变量通过适当的检测仪表，又送回输入端，并与输入变量相比较，因此称为反馈。二者相加称为正反馈，二者相减称为负反馈。输出变量与输入变量相比较所得的结果叫做偏差，控制装置根据偏差的方向、大小或变化情况进行控制，使偏差减小或消除。发现偏差，然后去除偏差，这就是反馈控制的原理。利用这一原理组成的系统称为反馈控制系统，通常也称为自动控制系统。在一个过程控制系统中，实现自动控制的装置可以各不相同，但反馈控制的原理却是相同的。由此可见，有反馈存在和按偏差进行控制，是过程控制系统最主要的特点。

4. 过程控制的特点

生产过程的自动控制，一般是要求保持过程进行中的有关参数为一定值或按一定规律变化。显然，过程参数的变化，不但受外界条件的影响，它们之间往往也相互影响，这就增加了某些参数自动控制的复杂性和难度。过程控制有如下特点。

(1) 被控对象的多样性

工业生产各不相同，生产过程本身大多比较复杂，生产规模也可能差异很大，这就给对被控对象的认识带来困难。不同生产过程要求控制的参数各异，且被控参数一般不止一个，这些参数的变化规律不同，引起参数变化的因素也不止一个，并且往往互相影响，所以要正确描绘这样复杂多样的对象特性还不完全可能，至今也只能对简单的对象特性有明确的认识，对那些复杂多样的对象特性，还只能采用简化的方法来近似处理。虽然理论上有所适应不同情况的控制方法，但由于对象特性辨识的困难，要设计出适应不同对象的控制系统至今仍非易事。

(2) 对象存在滞后

由于热工生产过程大多在比较庞大的设备内进行，对象的储存能力大，惯性也较大，内部介质的流动与热量转移都存在一定的阻力，并且往往具有自动转向平衡的趋势，因此当流入或流出对象的物质或能量发生变化时，由于存在容量、惯性和阻力，被控参数不可能立即反映出来。滞后的大小决定于生产设备的结构与规模，并同其流入量与流出量的特性有关。显然，生产设备的规模愈大，物质传递的距离愈长，热量传递的阻力愈大，造成的滞后就愈大。一般来说，热工过程中大多是具有较大滞后的对象，对自动控制十分不利。

(3) 对象特性的非线性

对象特性往往是随负荷而变的。当负荷不同时，其动态特性有明显的差别，即具有非线性特性。如果只以较理想的线性对象的动态特性作为控制系统的设计依据，则难以达到控制目的。

(4) 控制系统比较复杂

由于生产安全上的考虑，生产设备的设计制造都力求使各种参数稳定，不会产生振荡，所以作为被控对象就具有非振荡环节的特性。热工对象往往具有自动趋向平衡的能力，即被控量发生变化后，对象本身能使被控量逐渐稳定下来，这种对象就具有惯性环节的特性。也

有无自动趋向平衡能力的对象，被控量会一直变化而不能稳定下来，这种对象就具有积分特性。

由于对象的特性不同，其输入与输出量可能不止一个，控制系统的设计在于适应这些不同的特点，以确定控制方案和控制器的设计或选型，以及控制器特性参数的计算与设定。这些都要以对象的特性为依据，而对象的特性正如上述那样复杂且难以充分认识，所以要完全通过理论计算进行系统设计与整定至今仍不可能。目前已设计出的各种各样的控制系统（如简单的位式控制系统、单回路及多回路控制系统，以及前馈控制、计算机控制系统等），都是通过必要的理论计算，采用现场调整的方法达到过程控制的目的的。

0.2 过程控制的发展与趋势

0.2.1 自动控制理论的发展历程

20 世纪 40 年代开始形成的控制理论被称为“20 世纪上半叶三大伟绩之一”，在人类社会的各个方面有着深远的影响。与其他任何学科一样，控制理论源于社会实践和科学实践。在自动化的发展中，有两个明显的特点：第一，任务的需要、理论的开拓与技术手段的进展三者相互推动，相互促进，显示了一幅交错复杂但又轮廓分明的画卷，三者间显出清晰的同步性；第二，自动化技术是一门综合性的技术，控制论更是一门广义的学科，在自动化的各个领域，移植和借鉴起了交流汇合的作用。

自动化技术的前驱，可以追溯到我国古代，如指南车的出现。至于工业上的应用，一般以瓦特的蒸汽机调速器作为正式起点。工业自动化的萌芽是与工业革命同时开始的，这时的自动化装置是机械式的，而且是自力型的。随着电动、液动和气动这些动力源的应用，电动、液动和气动控制装置开创了新的控制手段。

有人把直到 20 世纪 30 年代末这段时期的控制理论称为第一代控制理论。第一代控制理论分析的主要问题是稳定性，主要的数学方法是微分方程解析方法。这时候的系统（包括过程控制系统）是简单控制系统，仪表是基地式、大尺寸的，满足当时的需要。

到第二次世界大战前后，控制理论有了很大发展。Nyquist (1932) 和 Bode (1945) 频率域法分析技术及稳定判据、Evans 根轨迹分析方法的建立，使经典控制理论发展到了成熟的阶段，这是第二代控制理论。至此，自动控制技术开始形成一套完整的，以传递函数为基础，在频率域对单输入、单输出 (SISO) 控制系统进行分析与设计的理论，这就是今天所谓的古典控制理论。古典控制理论最辉煌的成果之一要首推 PID 控制规律。PID 控制原理简单，易于实现，对无时间延迟的单回路控制系统极为有效。目前，工业过程控制中 80%~90% 的系统还使用 PID 控制规律。经典控制理论最主要的特点是：线性定常对象，单输入、单输出，完成定值控制任务。即便对这些极简单对象的描述及控制任务，理论上也尚不完整，从而促使现代控制理论的发展。

从 20 世纪 50 年代开始，随着工业的发展、控制需求的提高，除了简单控制系统以外，各种复杂控制系统也发展起来了，而且取得了显著的功效。为适应多种结构系统的需要，在控制器方面，单元组合式仪表应运而生。在 20 世纪 60~70 年代的相当长的一段时期内，气动单元组合仪表 (QDZ) 和电动单元组合仪表 (DDZ) 是控制仪表的主流。

20 世纪 60 年代，现代控制理论迅猛发展，它是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特征的,而以在随机干扰下采用 Kalman 滤波器的线性二次型系统(LQG)设计方法宣告了时域方法的完成,这是第三代控制理论。第三代控制理论在航天、航空、制导等领域取得了辉煌的成果,在过程控制领域也有所移植。

从 20 世纪 70 年代开始,为了解决大规模复杂系统的优化与控制问题,现代控制理论和系统理论相结合,逐步发展形成了大系统理论。其核心思想是系统的分解与协调。多级递阶优化与控制正是应用大系统理论的典范。实际上,大系统理论仍未突破现代控制理论的思想与框架,除了高维线性系统之外,它对其他复杂控制系统仍然束手无策。对于含有大量不确定性和难于建模的复杂系统,基于知识的专家系统、模糊控制、人工神经网络控制、学习控制和基于信息论的智能控制等应运而生,它们在许多领域都得到了广泛的应用。

0.2.2 过程控制系统的发展与趋势

从系统结构来看,过程控制已经经历了四个阶段。

1. 基地式控制阶段(初级阶段)

20 世纪 50 年代,生产过程自动化主要是凭生产实践经验,局限于一般的控制元件及机电式控制仪器,采用比较笨重的基地式仪表(如自力式温度控制器、就地式液位控制器等),实现生产设备就地分散的局部自动控制。在设备与设备之间或同一设备中的不同控制系统之间,没有或很少有联系,其功能往往限于单回路控制。过程控制的目的是几种热工参数(如温度、压力、流量及液位)的定值控制,以保证产品质量和产量的稳定。时至今日,这类控制系统仍没有被淘汰,而且还有了新的发展,但所占的比重大为减少。

2. 单元组合仪表自动化阶段

20 世纪 60 年代出现了单元组合仪表组成的控制系统,单元组合仪表有电动和气动两大类。所谓单元组合,就是把自动控制系统仪表按功能分成若干单元,依据实际控制系统结构的需要进行适当的组合。因此单元组合仪表使用方便、灵活。单元组合仪表之间用标准统一信号联系。气动仪表(QDZ 系列)为 20~100 kPa 气压信号。电动仪表信号为 0~10 mA 直流电流信号(DDZ-II 系列)和 4~20 mA 直流电流信号(DDZ-III 系列)。由于电流信号便于远距离传送,因而实现了集中监控与集中操纵的控制系统,对提高设备效率和强化生产过程有所促进,适应了工业生产设备日益大型化与连续化发展的需要。随着仪表工业的迅速发展,对过程控制对象特性的认识、对仪表及控制系统的设计计算方法等都有了较快的进展。但从设计构思来看,过程控制仍处于各控制系统互不关联或关联甚少的定值控制范畴,只是控制的品质有较大的提高。单元组合仪表已延续 30 多年,目前国内还广泛应用。由单元组合仪表组成的控制系统,其控制策略主要是 PID 控制和常用的复杂控制系统(如串级、均匀、比值、前馈、分程和选择性控制等)。

3. 计算机控制的初级阶段

20 世纪 70 年代出现了计算机控制系统,最初是直接数字控制(DDC)实现集中控制,代替常规的控制仪表。但由于集中控制的固有缺陷,未能普及与推广就被集散控制系统(DCS)所替代。DCS 在硬件上将控制回路分散化,数据显示、实时监督等功能集中化,有利于安全平稳生产。就控制策略而言,DCS 仍以简单 PID 控制为主,再加上一些复杂的控制算法,并没有充分发挥计算机的功能和控制水平。

4. 综合自动化阶段

20 世纪 80 年代以后出现二级优化控制,在 DCS 的基础上实现先进控制和优化控制。在

硬件上采用上位机和 DCS（或电动单元组合仪表）相结合，构成二级计算机优化控制。随着计算机及网络技术的发展，DCS 出现了开放式系统，实现多层次计算机网络构成的管控一体化系统（CIPS）。同时，以现场总线为标准，实现以微处理器为基础的现场仪表与控制系统之间进行全数字化、双向和多站通信的现场总线网络控制系统（FCS）。FCS 将对控制系统结构带来革命性变革，开辟控制系统的新纪元。

当前自动控制系统发展的一些主要特点是：生产装置实施先进控制成为发展主流；过程优化受到普遍关注；传统的 DCS 正在走向国际统一标准的开放式系统；综合自动化系统（CIPS）是发展方向。

综合自动化系统，就是包括生产计划和调度、操作优化、先进控制和基层控制等内容的递阶控制系统，亦称管理控制一体化系统（简称管控一体化系统）。这类自动化是靠计算机及其网络来实现的，因此也称为计算机集成过程系统（CIPS）。这里，“计算机集成”指出了它的组成特征，“过程系统”指明了它的工作对象，正好与计算机集成制造系统（CIMS）相对应，有人也称之为过程工业的 CIMS。

可以认为，综合自动化是当代工业自动化的主要潮流。它以整体优化为目标，以计算机为主要技术工具，以生产过程的管理和控制的自动化为主要内容，将各个自动化“孤岛”综合集成为一个整体的系统。