



国家示范（骨干）高职院校  
重点建设专业优质核心课程系列教材

主编 许郢

# 生产过程控制系统 安装与调试



中国水利水电出版社  
www.waterpub.com.cn

国家示范（骨干）高职院校重点建设专业优质核心课程系列教材

# 生产过程控制系统安装与调试

主编 许郢

## 内 容 提 要

本书以实践应用能力培养为原则,以过程控制系统为主线,基于工程实施的工作过程设计教学项目,按具体工作任务对项目内容进行分解,将知识点融于项目实施的过程中。具体介绍了各种生产过程控制系统的分析、建模、构思设计、控制系统实施、控制器参数整定、调试和系统投运。

本书内容精炼,系统性强,强调理论联系实际,有很多工业过程控制的案例,便于学生理解应用,突出了项目化教学、项目化教材的实用性、实践性和先进性。

本书可作为高职高专院校、成人教育学院生产过程自动化技术、过程控制技术、电气自动化、检测技术等专业的教材,也可作为电气、机电一体化、冶金、化工、制药、轻工等相关专业的参考书,并可作为相关专业技术人员的参考资料。

本书配有电子教案,读者可以从中国水利水电出版社网站和万水书苑免费下载,网址为:  
<http://www.waterpub.com.cn/softdown/>和 <http://www.wsbookshow.com>。

## 图书在版编目(CIP)数据

生产过程控制系统安装与调试 / 许郢主编. — 北京:  
中国水利水电出版社, 2014. 3

国家示范(骨干)高职院校重点建设专业优质核心课程系列教材

ISBN 978-7-5170-1762-2

I. ①生… II. ①许… III. ①生产过程—控制系统—安装—高等职业教育—教材②生产过程—控制系统—调试—高等职业教育—教材 IV. ①TP278

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第038531号

策划编辑: 石永峰 责任编辑: 李 炎 加工编辑: 田新颖 封面设计: 李 佳

|      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
|------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 书 名  | 国家示范(骨干)高职院校重点建设专业优质核心课程系列教材<br>生产过程控制系统安装与调试                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| 作 者  | 主编 许郢                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| 出版发行 | 中国水利水电出版社<br>(北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038)<br>网址: <a href="http://www.waterpub.com.cn">www.waterpub.com.cn</a><br>E-mail: <a href="mailto:mchannel@263.net">mchannel@263.net</a> (万水)<br><a href="mailto:sales@waterpub.com.cn">sales@waterpub.com.cn</a><br>电话: (010) 68367658 (发行部)、82562819 (万水)<br>北京科水图书销售中心(零售)<br>电话: (010) 88383994、63202643、68545874<br>全国各地新华书店和相关出版物销售网点 |
| 经 售  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| 排 版  | 北京万水电子信息有限公司                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| 印 刷  | 北京蓝空印刷厂                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| 规 格  | 184mm×260mm 16开本 9.75印张 246千字                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| 版 次  | 2014年3月第1版 2014年3月第1次印刷                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| 印 数  | 0001—2000册                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| 定 价  | 23.00元                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

# 前 言

本教材为项目化教材，将控制理论与控制系统的基本内容整合在一起，打破了传统教材的教学体系。全书以实践应用能力培养为原则，以过程控制系统为主线，基于工程实施的工作过程设计教学项目，按具体工作任务对项目内容进行分解，将知识点融于项目实施的过程中。具体介绍了各种生产过程控制系统的分析、建模、构思设计、控制系统实施、控制器参数整定、运行调试、系统投运组建，全书以工程应用、培养生产过程控制系统设计、组态、运行与维护的高职高专应用型技能人才为目标设计了四个项目任务。

本教材内容选择合理，符合高职高专学生学习特点和认识规律，突出了知识的实用性、实践性和先进性。书中除介绍了控制系统分析与设计方法、控制系统实施与应用的知识，同时还介绍了控制系统的运行调试和系统投运、基于计算机及先进控制理论等在内的过程控制新技术，如现场总线技术、组态软件以及控制与管理信息集成技术等，旨在培养学生的工程应用能力和解决现场实际问题的能力，体现了职业教育的特色和满足培养高技能人才的需要。

全书由黑龙江职业学院许郢任主编，并编写全部章节。

本书的编审和出版得到了中国水利水电出版社的诚挚帮助，在此一并向书中引用参考文献的专家、学者及关心和支持本书出版的所有单位和个人表示衷心感谢！

由于编者水平有限，书中难免出现错误和疏漏，敬请读者批评指正，殷切希望得到读者的宝贵意见与建议。

编者

2014年1月

# 目 录

## 前言

|                              |    |                        |     |
|------------------------------|----|------------------------|-----|
| 项目一 生产过程控制系统 .....           | 1  | 任务三 双容水箱液位定值控制系统 ..... | 80  |
| 【项目学习目标】 .....               | 1  | 2.3.1 任务要求 .....       | 80  |
| 任务一 过程控制系统 .....             | 1  | 2.3.2 相关知识 .....       | 80  |
| 1.1.1 任务要求 .....             | 1  | 2.3.3 任务分析与实施 .....    | 85  |
| 1.1.2 相关知识 .....             | 2  | 2.3.4 任务思考 .....       | 87  |
| 1.1.3 任务分析与实施 .....          | 13 | 任务四 流量过程控制系统 .....     | 88  |
| 1.1.4 任务思考 .....             | 19 | 2.4.1 任务要求 .....       | 88  |
| 任务二 过程控制系统的过渡过程 .....        | 19 | 2.4.2 相关知识 .....       | 88  |
| 1.2.1 任务要求 .....             | 19 | 2.4.3 任务分析与实施 .....    | 93  |
| 1.2.2 相关知识 .....             | 19 | 2.4.4 任务思考 .....       | 95  |
| 1.2.3 任务分析与实施 .....          | 20 | 任务五 压力过程控制系统 .....     | 96  |
| 1.2.4 任务思考 .....             | 26 | 2.5.1 任务要求 .....       | 96  |
| 任务三 实训系统 ZHSK-2 控制功能实现 ..... | 26 | 2.5.2 相关知识 .....       | 96  |
| 1.3.1 任务要求 .....             | 26 | 2.5.3 任务分析与实施 .....    | 101 |
| 1.3.2 相关知识 .....             | 26 | 2.5.4 任务思考 .....       | 102 |
| 1.3.3 任务分析与实施 .....          | 30 | 任务六 随动流量比值控制系统 .....   | 102 |
| 任务四 被控对象特性分析和测试 .....        | 37 | 2.6.1 任务要求 .....       | 102 |
| 1.4.1 任务要求 .....             | 37 | 2.6.2 相关知识 .....       | 102 |
| 1.4.2 相关知识 .....             | 38 | 2.6.3 任务分析与实施 .....    | 107 |
| 1.4.3 任务分析与实施 .....          | 52 | 2.6.4 任务思考 .....       | 109 |
| 1.4.4 任务思考 .....             | 57 | 任务七 水箱液位解耦过程控制系统 ..... | 109 |
| 项目二 过程控制系统设计与调试 .....        | 58 | 2.7.1 任务要求 .....       | 109 |
| 【项目学习目标】 .....               | 58 | 2.7.2 相关知识 .....       | 110 |
| 任务一 单回路过程控制系统设计和投运 .....     | 59 | 2.7.3 任务分析与实施 .....    | 111 |
| 2.1.1 任务要求 .....             | 59 | 2.7.4 任务思考 .....       | 113 |
| 2.1.2 相关知识 .....             | 59 | 项目三 串级控制系统设计与调试 .....  | 114 |
| 2.1.3 任务分析与实施 .....          | 60 | 【项目学习目标】 .....         | 114 |
| 2.1.4 任务思考 .....             | 71 | 任务一 串级过程控制系统 .....     | 115 |
| 任务二 单容水箱液位定值控制系统 .....       | 71 | 3.1.1 任务要求 .....       | 115 |
| 2.2.1 任务要求 .....             | 71 | 3.1.2 相关知识 .....       | 115 |
| 2.2.2 相关知识 .....             | 72 | 3.1.3 任务分析与实施 .....    | 117 |
| 2.2.3 任务分析与实施 .....          | 76 | 3.1.4 任务思考 .....       | 120 |
| 2.2.4 任务思考 .....             | 79 | 任务二 水箱双容液位串级控制系统 ..... | 120 |

|                       |     |                              |     |
|-----------------------|-----|------------------------------|-----|
| 3.2.1 任务要求 .....      | 120 | 3.4.3 任务分析与实施 .....          | 132 |
| 3.2.2 相关知识 .....      | 121 | 3.4.4 任务思考 .....             | 133 |
| 3.2.3 任务分析与实施 .....   | 125 | 项目四 电加热锅炉温度控制系统的开发           |     |
| 3.2.4 任务思考 .....      | 127 | 与实施 .....                    | 134 |
| 任务三 液位-流量串级控制系统 ..... | 127 | 【项目学习目标】 .....               | 134 |
| 3.3.1 任务要求 .....      | 127 | 任务 工业锅炉内胆温度 PID 连续控制系统 ..... | 135 |
| 3.3.2 相关知识 .....      | 128 | 4.1.1 任务要求 .....             | 135 |
| 3.3.3 任务分析与实施 .....   | 129 | 4.1.2 相关知识 .....             | 135 |
| 3.3.4 任务思考 .....      | 130 | 4.1.3 任务分析与实施 .....          | 145 |
| 任务四 三闭环液位串级控制系统 ..... | 131 | 4.1.4 任务思考 .....             | 146 |
| 3.4.1 任务要求 .....      | 131 | 附录 控制阀参考表 .....              | 147 |
| 3.4.2 相关知识 .....      | 131 | 参考文献 .....                   | 149 |

# 项目一

## 生产过程控制系统

### 【项目学习目标】



#### 知识目标

- 了解过程控制系统的发展、特点、分类及性能;
- 掌握单回路过程控制系统的组成、控制原理及各部分功能;
- 了解干扰对过程控制系统性能指标的影响;
- 掌握 P、PI、PD 和 PID 四种调节器的控制规律;
- 掌握调节器相关参数的变化对过程控制系统静、动态性能的影响;
- 了解过程控制系统调节器参数的整定和控制方法。



#### 技能目标

- 能熟练完成过程控制系统的组成、控制原理等分析工作;
- 能熟练操作各种调节阀门的开关、泵的启动关闭、控制器的手动自动切换;
- 能熟练分析过程控制系统各部分的作用、安装位置并进行连接;
- 能分析控制器参数变化对过程控制质量的影响;
- 能对生产过程控制系统的调试运行结果进行控制性能指标分析。

### 任务一 过程控制系统

#### 1.1.1 任务要求

分析过程控制的发展、特点;选择过程控制的种类、性能;建立过程控制系统的方框图;分析控制器的控制原理;选择控制器的类型和控制规律;选择控制器参数的整定方法;进行过程控制系统的整定。

## 1.1.2 相关知识

### 1.1.2.1 过程控制

#### 1. 过程控制概述

在石油、化工、冶金、电力等工业生产中,连续的或按一定程序周期进行生产过程的自动控制称为生产过程自动化,即过程控制。“过程”是指在生产装置或设备中进行的物质和能量的相互作用和转换过程。例如,锅炉中蒸汽的产生、分馏塔中原油的分离等。表征过程的主要参数有温度、压力、流量、液位、成分、浓度等,通过对过程参数的控制,可使生产过程中产品的产量增加、质量提高和能耗减少。

工业中的过程控制是指以温度、压力、流量、液位和成分等工艺参数作为被控变量的自动控制,广泛应用于控制各种生产和工艺加工过程。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,是工业现代化的标志。

#### 2. 过程控制的发展

在现代工业控制中,过程控制技术是历史较为久远的一个分支,过程控制的发展经历了手工阶段、局部自动化阶段、综合自动化阶段、全盘自动化阶段、计算机集成过程控制阶段五个发展阶段。

20世纪40年代前后(手工阶段),过程控制技术就已有应用,当时的化工、石油化工等生产处于手工操作阶段,凭经验人工控制生产过程,劳动生产率很低,过程控制仅仅是一些仪表显示和反应主要变量。

20世纪50年代前后(仪表化与局部自动化阶段),过程控制发展的第二个阶段,一些工厂企业实现了仪表化和局部自动化。主要特点是:检测和控制仪表采用基地式仪表和部分单元组合仪表(多数是气动仪表);过程控制系统结构是单输入、单输出系统;被控参数是温度、压力、流量和液位参数;控制目的是保持参数的稳定,消除或者减少对生产过程的主要扰动;控制理论是频率法和根轨迹法的经典控制理论,解决单输入单输出的定值控制系统的分析和综合问题。

20世纪60年代(综合自动化阶段),过程控制发展的第三个阶段,工厂企业实现车间或大型装置的集中控制。随着各种组合仪表和巡回检测装置的出现,过程控制具有五个层次的功能:调度、操作模式确定、质量控制、反馈控制(自动调节)和顺序控制、故障的防止和弥补。主要特点是:检测和控制仪表采用单元组合仪表(气动、电动)和组装仪表,计算机控制系统的应用,实现直接数字控制(DDC)和设定值控制(SPC);过程控制系统结构是多变量系统,各种复杂控制系统,如串级、比值、均匀控制、前馈、选择性控制系统;控制目的可以提高控制质量或实现特殊要求;控制理论开始由经典控制理论向现代控制理论方向应用。

60年代开始,过程控制得到较快发展,为适应工业生产过程控制的要求,计算机开始用于过程控制,一些复杂控制系统得到开发,出现了过程控制最优化与管理调度自动化相结合的多级计算机控制系统。从直接数字控制(DDC)到集散控制系统DCS,特别是集散控制系统的硬件可靠性大大提高,控制回路和危险的分散、数据显示和实时监督等功能的集中,在实践应用中被证明有良好控制效果,使得它在工业生产过程的控制中得到广泛应用,现代控制理论因计算机的应用而得以实现。

20世纪70年代以来(全盘自动化阶段),发展到现代过程控制的新阶段,这是过程控制发展的第四个阶段。主要特点是:检测和控制仪表采用新型仪表、智能化仪表、微型计算机;过程控制

系统结构是多变量系统,由PID(比例—积分—微分)控制规律向特殊控制规律发展,由定值控制向最优控制、自适应控制发展,由仪表控制系统向智能化计算机分布式控制系统发展;现代控制理论应用于过程控制领域,例如状态空间分析,系统辨识与状态估计,最优滤波与预报。

20世纪80年代,过程控制系统开始与过程信息系统相结合,具有更多的功能。过程信息系统在操作员与自动化系统之间提供了人机交互功能,各种显示屏幕能显示过程设备的状态、报警和过程变量数值的流程图,并能在屏幕的一定区域显示过去的信息。过程信息系统还能统一处理销售、设计、内部运输、存储、包装、行情调查、会计、维修、管理等环节的信息,沟通企业内部和企业内外的信息,并能根据使用人员的需要有选择地提供信息报告。例如,顾客订货单可在门市部送到信息系统中的同时立即传送到信息系统的生产调度部门。

80年代末(计算机集成过程控制阶段),随着计算机技术、显示技术、控制技术、通信技术的发展,现场总线(FCS)和现场总线仪表得到了迅速的发展。现场总线是顺应智能现场仪表而发展起来的一种开放型的数字通信技术,它是综合运用微处理器技术、网络技术、通信技术和自动控制技术的产物。现场控制系统和现场总线仪表的诞生和应用开辟了过程控制的新纪元。

现场总线是一种计算机的网络通信总线,是位于现场的多个总线仪表与远端的监控计算机装置间的通信系统。现场总线是底层控制通信网,现场总线控制系统把控制功能彻底分散到现场总线仪表,真正实现分散控制的功能。

现场总线控制系统既是一个开放通信网络,又是一种全分布控制系统,是一项以智能传感器、控制、计算机、数字通信、网络为主要内容的综合技术。它作为智能设备联系的纽带,把挂接在总线上、作为网络节点的智能设备连接为网络系统,并进一步构成自动化系统,实现基本控制、补偿计算、参数修改、报警、显示、监控、优化及管控一体综合自动化功能。

过程控制技术发展至今天,在石油、化工、电力、冶金等部门有广泛的应用。过程控制在控制方式上经历了从人工控制到自动控制的发展时期。在自动控制时期内,过程控制系统又经历了三个发展阶段:分散控制阶段、集中控制阶段和集散控制阶段。几十年来,工业过程控制取得了惊人的发展,无论是在大规模结构复杂的工业生产过程中,还是在传统工业过程改造中,过程控制技术对于提高产品质量以及节省能源等均起着十分重要的作用。

过程控制正朝高级阶段发展,不论是从过程控制的历史和现状看,还是从过程控制发展的必要性、可能性来看,过程控制正向综合化、智能化方向发展。先进的过程控制技术包括:双重控制和阀位控制、时滞补偿控制、解耦控制、自适应控制、差拍控制、状态反馈控制、多变量预测控制、推断控制及软测量技术、智能控制(专家控制、模糊控制、神经网络控制等)等,尤其以智能控制作为开发、研究和应用的重点。例如计算机集成制造系统(CIMS),就是以智能控制理论为基础,以计算机及网络为主要手段,对企业的经营、计划、调度、管理和控制全面综合,实现从原料进库到产品出厂的自动化、整个生产系统信息管理的最优化。

#### 1.1.2.2 过程控制系统

在生产设备上,配备一些自动化仪表等控制装置来代替人的观察、判断、决策和操纵,使某些工艺变量能准确地按照预期的规律变化,使生产在不同的程度上自动进行,这种系统就是过程控制系统。

##### 1. 过程控制系统的任务

过程控制系统是自动化的一门分支学科,任务是对过程控制系统进行分析、设计和应用。对工业生产过程中的已有的控制方案进行分析,总结各种控制方案的特点,确定工业生产过程的工艺流程,设计满足工艺控制要求的控制方案。在确定控制方案后,如何使控制系统能够正常运行,并发挥其

功能，这些都是过程控制系统要完成的任务。

## 2. 过程控制系统的特点

过程控制系统具有以下特点。

(1) 定值控制是过程控制的一种主要控制形式，主要是减小或消除外界扰动对被控量的影响，使被控量能控制稳定在给定值上，使生产安全稳定。

(2) 过程控制系统一般由检测仪表、控制器和执行器等单元组成。

(3) 被控过程多样性，生产规模不同、工艺要求各异、产品品种多样。

(4) 控制方案的多样性。

过程控制系统通常有单变量控制系统、多变量控制系统、常规仪表控制系统、计算机集散控制系统、提高控制品质的控制系统、实现特定要求的控制系统；有单回路、串级、前馈、比值、均匀、分程、选择性、大时延、多变量控制系统；还有高级新型控制系统（自适应控制、预测控制）以及成为系统主流的集散控制系统（DCS）。

(5) 过程控制的控制过程多数属于慢过程，而多半又属于参量控制，对表征其生产过程的温度、压力、流量、液位（物位）、成分、PH 等过程参量进行自动检测和自动控制。

(6) 被控过程具有大惯性、大时延（滞后）等特点。

## 3. 过程控制系统的组成

单回路过程控制系统由被控对象、测量变送器、控制器和执行器（控制阀）四个基本环节组成一个单闭环控制系统。

### (1) 被控对象

被控对象是控制系统的主体，在自动控制系统中，将需要控制其工艺变量的生产设备或机器叫做被控对象，例如常压塔、精馏塔、锅炉等。

### (2) 测量变送器

测量变送器包括检测元件和变送器两部分，其作用是将被控制的物理量检测出来并转换成工业仪表间的标准统一信号。例如：液位变送器的作用是测量液位，并将液位的高低转化为一种特定的信号（标准电流信号、标准气压信号或者标准电压信号等）。

### (3) 控制器

控制器，也称调节器，作用是将测量值与目标值比较得出偏差，按一定的规律运算后对执行机构（控制阀）发出相应的控制信号或指令。例如：液位控制器接受变送器送来的信号，与工艺要求的液位高度相比较，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（电流或气压）发送出去。

### (4) 执行器

执行器也称执行机构，其作用是依据控制器发出的控制信号或指令，改变控制量，对被控对象产生直接的控制作用。例如：执行器通常指控制阀，它和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改变阀门的开启度。

单回路过程控制系统的给定量是某一定值，要求系统的被控制量稳定至给定量，这种控制系统具有结构简单、性能较好、调试方便等优点，故在工业生产中被广泛应用。

## 4. 过程控制系统流程图的规范表示

在过程控制系统流程图中，一般用小圆圈表示某些自动化装置，圈内写有两位（或三位）字母，第一位字母表示被测变量，后继字母表示仪表的功能。例如：过程控制系统流程图中以  $\text{LT}$  表示

液位变送器,用 $\textcircled{\text{LC}}$ 表示液位控制器。

常用被测变量和仪表功能的字母代号见表 1-1。

表 1-1 被测变量和仪表功能的字母代号

| 字母 | 第一位字母   | 修饰词    | 后继字母             |
|----|---------|--------|------------------|
|    | 被测变量    |        | 功能               |
| A  | 分析      |        | 报警               |
| C  | 电导率     |        | 控制(调节)           |
| D  | 密度      | 差      |                  |
| E  | 电压      |        | 检测元件             |
| F  | 流量      | 比(或分数) |                  |
| I  | 电流      |        | 批示               |
| K  | 时间或时间程序 |        | 自动-手动操作器         |
| L  | 物位      |        |                  |
| M  | 水分或湿度   |        |                  |
| P  | 压力或真空   |        |                  |
| Q  | 数量或件数   | 积分、累积  | 积分、累积            |
| R  | 放射性     |        | 记录或打印            |
| S  | 速度或频率   | 安全     | 开关、联锁            |
| T  | 温度      |        | 传送               |
| V  | 粘度      |        | 阀、挡板、百叶窗         |
| W  | 力       |        | 套管               |
| Y  | 供选用     |        | 继电器或计算器          |
| Z  | 位置      |        | 驱动、执行或未分类的终端执行机构 |

### 5. 过程控制系统的分类

(1) 按被控参数分类,可分为温度控制系统、压力控制系统、流量控制系统、液位控制系统、成分控制系统、位置控制系统等。

(2) 按给定值信号的特点分类,可分为定值控制系统、随动控制系统、顺序(程序)控制系统。

#### ①定值控制系统

定值控制系统也称恒值控制系统,是指在生产过程中,如果要求控制系统使被控变量保持在一个生产指标上不变,或者说要求工艺参数的给定值不变,这类控制系统称为定值控制系统。例如温度控制系统应用于恒温箱,刚出生的早产儿要放在恒温箱里,恒温箱温度一经调整,被控量就与调整好的参数保持一致。

#### ②随动控制系统

随动控制系统是指给定值是一个未知变化量的控制系统,这类控制系统的任务是保证各种条件下的输出(被控变量)以一定的精度跟随着给定信号的变化而变化,所以这类控制系统又称为跟踪系统。例如在加热炉燃烧过程控制中,控制系统就要克服一切扰动,使空气量跟随燃料值的变化自

动控制空气量的大小从而保证达到最佳燃烧。

在随动控制系统中,扰动的影响是次要的,控制系统分析、设计的重点是研究被控制量跟随的快速性和准确性。函数记录仪、高炮自动跟踪系统都是典型的随动控制系统。在随动控制系统中,如果被控制量是机械位置(角位置)或其导数时,这类系统称之为伺服控制系统。

### ③程序控制系统

程序控制系统也称顺序控制系统,给定值有规律地变化,是已知的时间函数。这类控制系统往往适用于特定的生产工艺或工业过程,要求被控制量迅速、准确地实现。例如机械工业中的退火炉的温度控制系统,按所需要的控制规律给定输入,使被控量按规定的程序自动变化。机械加工使用的数字程序控制机床也是非常典型的程序控制系统。

程序控制系统和随动控制系统的参变量都是时间的函数,不同之处在于程序控制系统是已知的时间函数,随动系统是未知的任意的时间函数,而恒值控制系统可视为程序控制系统的特例。

(3) 按过程控制系统的结构特点分类,可分为反馈控制系统(闭环)、串级控制系统、前馈控制系统(开环)、前馈-反馈(复合)控制系统等。

#### ①反馈控制系统

反馈控制系统是根据系统被控量与给定的偏差进行工作,最后达到消除或减小偏差的目的,偏差值是控制的依据。反馈控制系统又称闭环控制系统,是过程控制系统中最基本的一种。

#### ②前馈控制系统

前馈控制系统根据扰动量的大小进行工作,扰动是控制的依据。前馈控制系统不构成闭合回路,故也称为开环控制系统。由于前馈控制是一种开环控制,无法检查控制的效果,所以在实际生产过程中是不能单独应用的。

#### ③串级控制系统

串级控制系统是根据两个控制器串接工作,主控制器输出作为副控制器的给定值,副控制器的输出去控制执行器改变操纵变量。串级控制系统可以减少控制通道的惯性,改善过程控制动态特性;对于干扰有很强抑制能力,系统抗扰动能力强,从而得到更高的控制品质。

#### ④前馈-反馈控制系统

前馈-反馈控制系统,又称复合控制系统,前馈开环控制的优点是能针对主要扰动迅速及时克服对被控量的影响。反馈控制的优点是克服其他扰动,使系统在稳态时能准确地使被控量控制在给定值上。复合构成的前馈-反馈控制系统具有二者的优点,可以提高控制质量。

(4) 控制系统按有无闭合(简称闭环)来分类,可分为开环控制系统和闭环控制系统。

开环控制系统是指系统的输出信号不能影响控制作用的控制系统;闭环控制系统是指系统的输出信号对控制作用有直接影响的控制系统。

蒸汽加热器开环控制系统如图 1-1 所示。在蒸汽加热器中,如果负荷是主要干扰,则开环控制系统能使蒸汽流量与冷流体流量之间保持一定的函数关系。当冷流体流量变化时,通过控制蒸汽流量以保持热量平衡。蒸汽加热器开环控制系统方框图如图 1-2 所示,显然,开环控制系统不是反馈控制系统。

由于闭环控制系统采用了负反馈,使系统的被控变量受外来干扰和内部参数变化小,具有一定的抑制干扰、提高控制精度的特点,开环控制系统不能做到这一点,但开环控制系统结构简单、使用便捷。

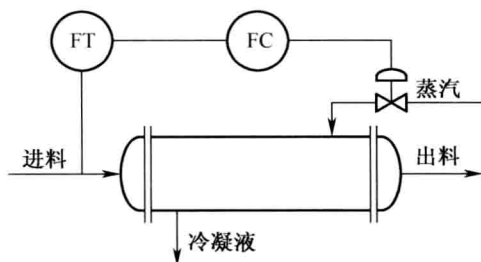


图 1-1 蒸汽加热器开环控制系统

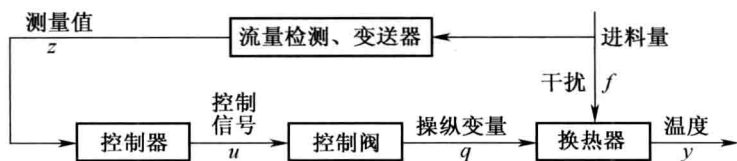


图 1-2 蒸汽加热器开环控制系统方框图

## 6. 过程控制系统的工作过程

过程控制系统的工作过程包括数据采集、控制决策、控制输出等基本内容。

数据采集是实时检测来自于测量变送装置的被控变量瞬时值，经过 A/D 转换后送入控制器。

控制决策是将测量值与系统的给定值相比较，产生一定的偏差信号  $e$ ，对该偏差信号按照某种控制规律（算法）进行数学运算，如常规 PID 算法、自适应控制算法、模糊控制算法等，最后产生控制信号。

控制输出是对计算机输出的控制信号进行 D/A 转换后，向执行机构发出控制信号，完成控制任务。

### 1.1.2.3 控制器的控制规律

在过程控制系统中，控制器的输入信号是指被控变量的测量值与给定值的偏差，用  $e$  表示。控制器的输出信号是指控制器送往执行器的控制信号，用  $u$  表示。要使控制器发挥合理的调节功能，需要设置好控制器的 PID 参数，而这要求必须熟悉控制器的控制规律。

控制器的控制规律是指控制器输出信号与输入信号之间的关系，即控制器的输出信号  $u(t)$  随着输入信号  $e(t)$  变化的规律，数学关系表示为： $u(t) = f[e(t)]$ 。

在生产过程常规控制系统中，控制器常用的控制规律有位式控制、比例控制（P）、积分控制（I）、微分控制（D）以及它们的组合控制规律（PI、PD、PID）等。

#### 1. 位式控制规律

位式控制的输出只有数个特定的数值，或它们的执行机构只有数个特定的位置。最常见的是双位控制，它的输出只有两个数值（最大或最小），其执行机构只有两个特定的位置（全关或全开）。

位式控制器结构简单、成本较低、易于实现，但其控制作用不是连续变化的，由其所构成的控制系统的被控变量的变化是一个等幅振荡过程而不能稳定在某一数值上，因此位式控制器只能应用在被控变量允许在一定范围内波动的场合，如某些液位控制、恒温箱和管式炉的温度控制、仪表用压缩空气储罐的压力控制等。

## 2. 比例控制规律 (P)

### (1) 比例控制

比例控制规律 (P) 可以用下列数学式来表示:

$$\Delta u = K_C e \quad (1-1)$$

式中,  $\Delta u$ ——控制器输出变化量;  $K_C$ ——控制器的比例增益或比例放大系数;  $e$ ——控制器的输入, 即偏差。

由式 (1-1) 可以看出, 比例控制器的输出变化量与输入偏差成正比, 在时间上是没有延滞的。或者说, 比例控制器的输出是与输入一一对应的, 如图 1-3 所示比例控制器的输入输出特性。

当输入为一阶跃信号时, 比例控制器的阶跃响应如图 1-4 所示。

比例放大系数  $K_C$  是可调的, 所以比例控制器实际上是一个放大系数可调的放大器。 $K_C$  愈大, 在同样的偏差输入时, 控制器的输出愈大, 因此比例控制作用愈强; 反之,  $K_C$  值愈小, 表示比例控制作用愈弱。

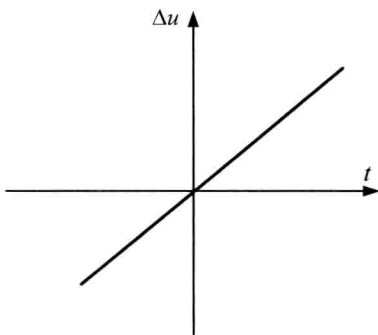


图 1-3 比例控制器的输入输出特性

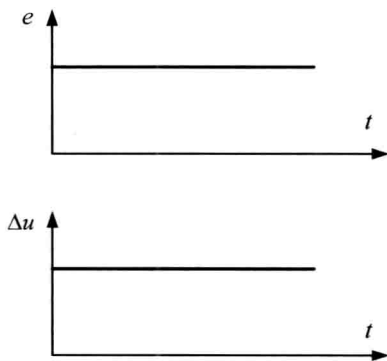


图 1-4 比例控制器的阶跃响应

### (2) 比例度

比例放大系数  $K_C$  值的大小, 可以反映比例作用的强弱。但对于使用在不同情况下的比例控制器, 由于控制器的输入与输出是不同的物理量, 因而  $K_C$  的量纲是不同的。这样, 就不能直接根据  $K_C$  数值的大小来判断控制器比例作用的强弱。工业生产上所用的控制器, 一般都用比例度 (或称比例范围)  $\delta$  来表示比例作用的强弱。

比例度是控制器输入的相对变化量与相应的输出相对变化量之比的百分数。用数学式可表示为:

$$\delta = \frac{\frac{e}{z_{\max} - z_{\min}}}{\frac{\Delta u}{u_{\max} - u_{\min}}} \times 100\% \quad (1-2)$$

式中,  $z_{\max} - z_{\min}$ ——控制器输入的变化范围, 即测量仪表的量程;  $u_{\max} - u_{\min}$ ——控制器输出的变化范围。

由式 (1-2) 看出, 控制器的比例度可理解为: 要使输出信号作全范围的变化, 输入信号必须改变全量程的百分数。

控制器的比例度  $\delta$  的大小与输入输出关系如图 1-5 所示。从图 1-5 可以看出, 比例度越小, 使输出变化全范围时所需的输入变化区间也就越小; 比例度越大, 使输出变化全范围时所需的输入变

化区间也就越大。

比例度  $\delta$  与比例放大系数  $K_C$  的关系为:

$$\delta = \frac{K}{K_C} \times 100\% \quad (1-3)$$

式中,  $K = \frac{u_{\max} - u_{\min}}{z_{\max} - z_{\min}}$ 。

由于  $K$  为常数, 因此控制器的比例度  $\delta$  与比例放大系数  $K_C$  成反比关系。比例度  $\delta$  越小, 则放大系数  $K_C$  越大, 表示比例控制作用越强; 反之, 当比例度  $\delta$  越大, 则放大系数  $K_C$  越小, 表示比例控制作用越弱。

在单元组合仪表中, 控制器的输入信号是由变送器来的, 而控制器和变送器的输出信号都是统一的标准信号, 因此常数  $K=1$ 。所以在单元组合仪表中,  $\delta$  与  $K_C$  互为倒数关系, 即:

$$\delta = \frac{1}{K_C} \times 100\% \quad (1-4)$$

### 3. 积分控制规律 (I)

当控制器的输出变化量  $\Delta u$  与输入偏差  $e$  的积分成比例时, 就是积分控制规律, 其数学表达式为:

$$\Delta u = K_I \int_0^t e dt \quad (1-5)$$

式中,  $K_I$ ——积分比例系数。

积分控制作用的特性可以用阶跃输入下的输出来说明。当控制器的输入偏差是一幅值为  $A$  的阶跃信号时, 式 (1-5) 就可写为

$$\Delta u = K_I \int_0^t e dt = K_{IA} t \quad (1-6)$$

由式 (1-6) 可以画出在阶跃输入作用下的输出变化曲线, 如图 1-6 所示积分控制器特性。由图 1-6 可看出: 当积分控制器的输入是一常数  $A$  时, 输出是一直线, 其斜率为  $K_{IA}$ ,  $K_I$  的大小与积分速度有关。从图中还可以看出, 只要偏差存在, 积分控制器的输出随着时间不断增大 (或减小)。

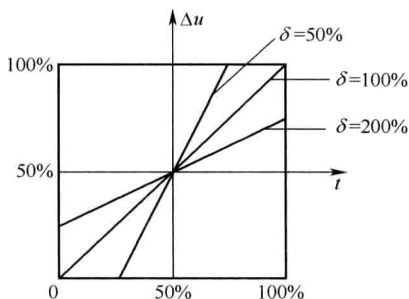


图 1-5 比例度与输入输出关系

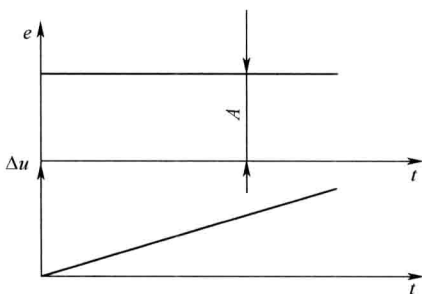


图 1-6 积分控制器特性

在图 1-6 中, 积分控制器输出的变化速度与偏差成正比。这就说明积分控制规律的特点是: 只要偏差存在, 控制器的输出就会变化, 执行器要动作, 系统就不可能稳定。只有当偏差消除 (即  $e=0$ ) 时, 输出信号不再变化, 执行器停止动作, 系统才可能稳定下来。积分控制作用达到稳定时, 偏差等于零, 这是它的一个显著特点, 也是它的一个主要优点, 因此积分控制器构成的积分控制系统是一个无差系统。

式 (1-6) 也可以改写为:

$$\Delta u = \frac{1}{T_I} \int_0^t e dt \quad (1-7)$$

式中,  $T_I$ ——积分时间。

对上式求拉氏变换, 可得积分控制器的传递函数  $G_C(s)$  为:

$$G_C(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = \frac{1}{T_I s} \quad (1-8)$$

#### 4. 比例积分控制规律 (PI)

比例积分控制规律是比例与积分两种控制规律的结合, 其数学表达式为:

$$\Delta u = K_C \left( e + \frac{1}{T_I} \int_0^t e dt \right) \quad (1-9)$$

当输入偏差是一幅值为  $A$  的阶跃变化时, 比例积分控制器的输出是比例和积分两部分之和, 其特性如图 1-7 所示比例积分控制器特性。

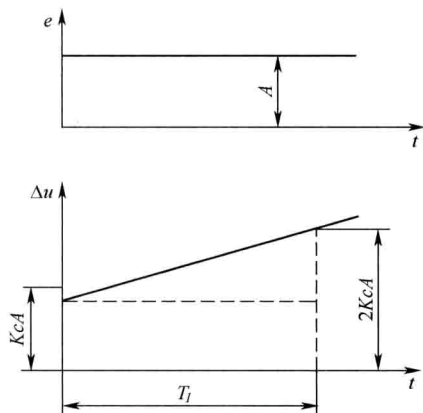


图 1-7 比例积分控制器特性

由图 1-7 可以看出,  $\Delta u$  的变化开始是一阶跃变化, 其值为  $K_C A$  (比例作用), 然后随时间逐渐上升 (积分作用)。比例作用是即时的、快速的, 而积分作用是缓慢的、渐变的。

由于比例积分控制规律是在比例控制的基础上加上积分控制, 所以既具有比例控制作用及时、快速的特点, 又具有积分控制能消除余差的性能, 因此比例积分控制规律是生产上常用的控制规律。

对式 (1-9) 取拉氏变换, 可得比例积分控制器的传递函数:

$$G_C(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_C \left( 1 + \frac{1}{T_I s} \right) \quad (1-10)$$

#### 5. 微分控制规律 (D)

具有微分控制规律 (D) 的控制器, 其输出  $\Delta u$  与偏差  $e$  的关系可用式 (1-11) 表示:

$$\Delta u = T_D \frac{de}{dt} \quad (1-11)$$

式中,  $T_D$ ——微分时间。

由式 (1-11) 可以看出, 微分控制作用的输出大小与偏差变化的速度成正比。对于一个固定不

变的偏差, 不管这个偏差有多大, 微分作用的输出总是零, 这是微分作用的特点。

如图 1-8 所示微分特性, 如果控制器的输入是一阶跃信号, 按式 (1-11), 微分控制器的输出如图 1-8 (b) 所示, 在输入变化的瞬间, 输出趋于  $\infty$ 。在此以后, 由于输入不再变化, 输出立即降到零, 这种控制作用称为理想微分控制作用。

由于调节器的输出与调节器输入信号的变化速度有关系, 变化速度越快, 调节器的输出就越大。如果输入信号恒定不变, 则微分调节器就没有输出, 因此微分调节器不能用来消除静态偏差。而且当偏差的变化速度很慢时, 输入信号即使经过时间的积累达到很大的值, 微分调节器的作用也不明显, 所以这种理想微分控制作用一般不能单独使用, 也很难实现。

如图 1-8 (c) 所示是实际的近似微分控制作用。在阶跃输入发生时刻, 输出  $\Delta u$  突然上升到一个较大的有限数值 (一般为输入幅值的 5 倍或更大), 然后呈指数曲线衰减至某个数值 (一般等于输入幅值) 并保持不变。

对式 (1-11) 进行拉氏变换, 可得理想微分控制器规律的传递函数:

$$G_C(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = T_D s \quad (1-12)$$

如图 1-9 所示为理想微分控制规律的 Bode 图。

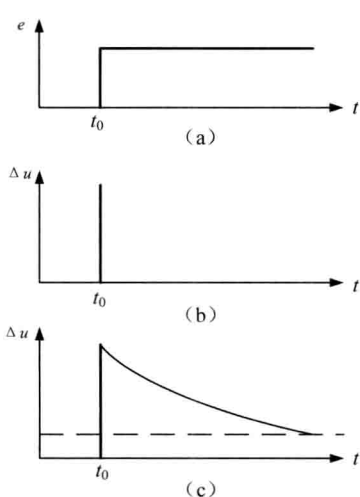


图 1-8 微分控制器特性

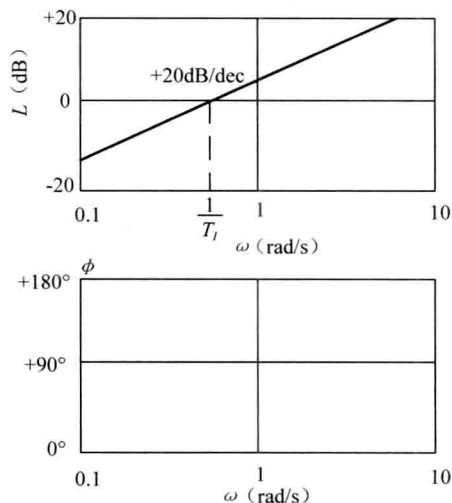


图 1-9 理想微分控制规律的 Bode 图

## 6. 比例积分微分控制规律 (PID)

比例积分微分控制规律 (PID) 的输入输出关系可用下面公式表示:

$$\Delta u = \Delta u_p + \Delta u_i + \Delta u_d = K_C \left( e + \frac{1}{T_i} \int e dt + T_D \frac{de}{dt} \right) \quad (1-13)$$

由式 (1-13) 可见, PID 控制作用的输出分别是比例、积分和微分三种控制作用输出的叠加。当输入偏差  $e$  为一幅值为  $A$  的阶跃信号时, 实际 PID 控制器的输出特性如图 1-10 所示。

如图 1-11 所示 PID 控制规律的 Bode 图, 图中显示, 实际 PID 控制器在阶跃输入下, 开始时微分作用的输出变化最大, 使总的输出大幅度地变化, 产生强烈的“超前”控制作用, 这种控制作用可看成是“预调”。然后微分作用逐渐消失, 积分作用的输出逐渐占主导地位, 只要余差存在,