



“十三五”普通高等教育本科规划教材

过程控制及仪表

潘维加 主编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



“十三五”普通高等教育本科规划教材

过程控制及仪表

主编 潘维加
参编 潘 岩 颜 帅
阮 琦 徐维晖
主审 牛玉广

常州大学图书馆
藏书章



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

2017年11月

本书为“十三五”普通高等教育本科规划教材。

本书将“过程控制系统”和“自动化仪表”这两门课基础性的教学内容深度融合,从工程实际应用出发,避开烦琐的理论推导。本书主要内容包括过程控制及仪表概述、过程对象动态特性和建模、过程调节器、过程执行器、单回路控制系统、前馈-反馈控制系统、串级控制系统、其他过程控制系统、集散控制系统和过程控制系统工程设计,书后附有过程控制及仪表实验指导书。

本书适合以火力发电工业为背景的自动化类、电气类、能源动力类、仪器类、电子信息类等相关专业本科生选用。

图书在版编目(CIP)数据

过程控制及仪表/潘维加主编. —北京:中国电力出版社, 2018.1

“十三五”普通高等教育本科规划教材

ISBN 978-7-5198-1350-5

I. ①过… II. ①潘… III. ①过程控制仪表—高等学校—教材 IV. ①TH89

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第275795号

出版发行:中国电力出版社

地 址:北京市东城区北京站西街19号(邮政编码100005)

网 址: <http://www.cepp.sgcc.com.cn>

责任编辑:吴玉贤(010-63412540) 孙 晨

责任校对:王小鹏

装帧设计:张 娟

责任印制:吴 迪

印 刷:北京雁林吉兆印刷有限公司

版 次:2018年1月第一版

印 次:2018年1月北京第一次印刷

开 本:787毫米×1092毫米 16开本

印 张:18.5

字 数:447千字

定 价:45.00元

版权专有 侵权必究

本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

前言

“过程控制系统”和“自动化仪表”是自动化专业的两门主要专业课。“过程控制系统”主要讲述连续生产过程的控制理论和方法，“自动化仪表”主要讲述实现过程控制系统的控制仪表。随着国家高校专业调整，自1998年命名为自动化专业以来，这两门专业课合并成一门专业课，相继出版了《过程控制与自动化仪表》《自动化仪表与过程控制》《过程控制仪表及控制系统》《过程控制系统及仪表》《过程控制及仪表》等一些与其配套的本科教材。2012年国家高校专业调整，自动化专业按自动化类招生，进一步明确了“过程控制及仪表”这门专业课的内涵。

本书依据2012年教育部公布的普通高等学校本科专业目录，结合近十年来自动化专业技术的发展情况，以火力发电工业为主要工业背景，阐述火力发电工业过程控制的基本理论和基本方法。

本书是在长沙理工大学规划教材《过程控制及仪表》的基础上修订而成的，是作者多年教学讲义的结晶。本书与现有的相关教材编写方式不同，将“过程控制系统”和“自动化仪表”这两门课基础性的教学内容深度融合，从工程实际应用出发，避开烦琐的理论推导；以该门课程的教学大纲为标准，删除一些陈旧的、非基础性的、与其他课程教学内容重叠的知识，在阐述过程控制系统的同时，阐述与其相关的自动化仪表。实践表明，这种编写方式系统性强，学生容易理解。本教材编写的内容均是在工程实际中成功应用的、最基础的知识，适合少学时（48学时左右）的教学。

本书共分十章，第一章主要介绍过程控制及仪表的发展概况和基本概念；第二章主要介绍过程被控对象及建模方法；第三章主要介绍过程调节器组成原理及调节规律，它相当于人的“大脑”，是过程控制系统的核心；第四章主要介绍过程执行器的组成原理，它接收调节器的调节指令，相当于人的“手”，属于现场控制仪表；第五章是本书的重点，属于过程控制系统的基础知识，主要介绍单回路控制系统的组成原理；第六章在介绍前馈控制原理的基础上，主要介绍前馈-反馈复合控制系统；第七章也是本书的重点，主要介绍串级控制系统的组成原理；第八章是过程控制系统的拓展，主要介绍其他过程控制系统；第九章主要介绍集散控制系统，它是取代盘、台安装仪表的、实现过程控制系统的控制设备；第十章主要介绍过程控制系统的工程设计，它是学生接触工程实际的必备知识。书后附有过程控制及仪表实验指导书。

本书由华北电力大学博士生导师牛玉广教授主审，牛教授认真审阅了全文，并提出了许多宝贵意见，在此向他表示诚挚的感谢。

本书的出版得到了长沙理工大学电气与信息工程学院院长曾祥君教授的鼎力推荐，得到了中国电力出版社的大力支持，在此一并表示感谢。

限于编者水平，书中难免存在不妥和疏漏之处，望读者批评指正。

编者

2017年11月

目 录

前言	1
第一章 过程控制及仪表概述	1
第一节 过程控制及仪表发展概况	1
第二节 过程控制系统的组成与特点	3
第三节 过程控制系统的分类	5
第四节 过程控制系统的性能指标	7
本章小结	11
思考题与习题	11
第二章 过程对象动态特性和建模	13
第一节 过程对象动态特性的结构参数	13
第二节 有自平衡能力对象的动态特性	15
第三节 无自平衡能力对象的动态特性	20
第四节 过程对象现场测试建模	24
本章小结	28
思考题与习题	28
第三章 过程调节器	31
第一节 基本调节规律	31
第二节 模拟调节器的调节规律及特点	33
第三节 数字调节器的控制算法及特点	38
本章小结	42
思考题与习题	42
第四章 过程执行器	43
第一节 电动执行机构	43
第二节 气动执行机构	50
第三节 调节机构	55
第四节 变频调速机构	64
本章小结	68
思考题与习题	68
第五章 单回路控制系统	70
第一节 单回路控制系统的组成	70

第二节 单回路控制系统的分析	73
第三节 单回路控制系统的整定	83
第四节 单回路控制系统应用实例	90
本章小结	93
思考题与习题	93
第六章 前馈 - 反馈控制系统	95
第一节 前馈控制系统的组成	95
第二节 前馈控制系统的分析与整定	96
第三节 前馈 - 反馈控制系统的分析和整定	98
第四节 前馈 - 反馈控制系统应用实例	100
本章小结	104
思考题与习题	105
第七章 串级控制系统	106
第一节 串级控制系统的组成	106
第二节 串级控制系统的分析	107
第三节 串级控制系统的整定	110
第四节 前馈 - 反馈串级控制系统	112
第五节 串级控制系统应用实例	114
本章小结	117
思考题与习题	117
第八章 其他过程控制系统	118
第一节 比值控制系统	118
第二节 纯迟延控制系统	130
第三节 解耦控制系统	134
第四节 均匀控制系统	144
第五节 分程控制系统	152
第六节 选择性控制系统	155
本章小结	159
思考题与习题	160
第九章 集散控制系统	163
第一节 集散控制系统基础知识	163
第二节 集散控制系统数据通信系统	167
第三节 集散控制系统硬件设备	185
第四节 集散控制系统软件结构	195
本章小结	208
思考题与习题	208

第十章 过程控制系统工程设计.....	210
第一节 热工过程检测控制系统图的设计.....	210
第二节 热工过程自动调节系统图的设计.....	251
本章小结.....	266
思考题与习题.....	266
附录 A 过程控制及仪表实验指导书.....	268
参考文献.....	285

生产规模的过程。工业生产过程主要分为连续生产过程和离散制造过程。本书主要讨论连续生产过程的控制。实现连续生产过程控制的自动控制系统称为过程控制系统。

第一节 过程控制及仪表发展概况

一、过程控制系统发展简介

过程控制系统的发端与自动控制理论的发展是分不开的。20 世纪 40 年代以前,过程控制系统处于起步阶段。这一时期绝大多数的工业生产过程以手动操作为主。20 世纪 40 年代至 60 年代,经典控制理论为工业生产过程控制系统的设计提供了强有力的理论支撑。这一时期设计的过程控制系统主要是单变量控制系统,控制方案大多为单输入单输出的单回路反馈控制系统,控制算法主要是比例积分微分 (PID) 控制算法。

从 20 世纪 60 年代开始,随着工业生产规模的不断扩大,在大型工业装置中单元操作之间的耦合更加紧密,孤立地考虑一些工艺变量的定值控制系统已很难满足稳定生产的基本要求。同时工业生产对产品质量提出了更高的要求。另一方面,工业系统的复杂性在理论上体现为对象是多输入多输出、时变、非线性的被控制对象。这对控制系统的性能指标提出了更严格的要求。基于上述原因,经典控制理论的设计方法已不能完全满足当时工业生产过程控制的需求。

20 世纪 60 年代后,现代控制理论应运而生,人们开始研究将这种新理论和方法应用于工业生产过程控制。然而直到七八十年代,现代控制理论才真正在工业生产过程中得到实际应用。但是比较完美的现代控制理论在过程控制的实际应用中都存在较大问题。因为一方面它严格依赖于被控对象精确的数学模型,而在工业生产过程中要得到精确过程或动态数学模型是非常困难的;另一方面工业生产过程的干扰也十分复杂,它们的统计特性往往未知,甚至是不确定值。可以说这一时期,在过程控制领域,实验室和半实式的研究远多于过程工业上的实际应用。目前在工业过程控制领域,将近 90% 以上的控制系统还是基于经典控制理论,控制算法仍是 PID 控制算法。如何将现代控制理论应用于工业生产过程控制仍然是人们研究的热点问题之一。

从 20 世纪 80 年代开始,人们针对工业生产过程系统的干扰性、时变性、耦合性和不确定性等,提出了解耦控制、推断控制、预测控制、自适应控制、内模控制、鲁棒控制等先进过程控制方案,有效地解决了一些采用常规控制效果差,甚至无法控制的复杂工业生产过程的控制问题。

20 世纪 90 年代后,针对工业生产控制领域中出现的生产优化、故障检测与诊断、生产计划和调度等问题,人们开始研究智能控制,神经网络模型和专家控制等智能控制理论应

第一章 过程控制及仪表概述

过程控制系统的发展与自动控制理论的发展是分不开的。20 世纪 40 年代以前, 过程控

从 20 世纪 60 年代开始,随着工业生产规模的不断扩大,在大型工业装置中单元操作之

20 世纪 60 年代后,现代控制理论应运而生,人们开始研究将这种新的理论和方法应用

从 20 世纪 80 年代开始,人们针对工业生产过程本身的非线性、时变性、耦合性和不确

20 世纪 80 年代后, 针对工业生产过程领域中提出的生产优化、故障检测与诊断、生产

20 世纪 80 年代后, 针对工业生产过程领域中提出的生产优化、故障检测与诊断、生产计划和调度等问题, 人们开始研究将模糊控制、神经网络控制和专家控制等智能控制理论应

用于工业生产过程控制。模糊控制是利用模糊数学方法描述人类对事物的分析过程,将人类的实践经验加以整理,总结出一套拟人化的、定性的工程控制规则,它具有无须知道被控对象数学模型、构造容易、易于理解等特点。神经网络控制是一种不依赖于模型的控制方法,它具有快速并行处理、自学习及适用于高度不确定和非线性的特点。专家控制就是将专家系统理论和技术同控制理论、技术和方法相结合,在未知环境下,仿效专家的智能,实现对被控对象的控制。模糊控制、神经网络控制和专家控制等智能控制算法是解决工业生产过程领域中生产优化、故障检测与诊断、生产计划和调度等问题的主要算法。到目前为止,模糊控制、神经网络控制和专家控制等智能控制算法在工业过程控制中成功应用的不多,是目前控制领域主要研究的热点问题。

二、过程控制仪表发展简介

过程控制系统是伴随着过程控制仪表的发展而发展的。自 20 世纪 40 年代开始,过程控制陆续采用自动检测及控制取代人工操作。工业自动化仪表的发展经历了从气动仪表到电动仪表、从现场就地控制到中央控制室控制、从仪表盘上监视操作到计算机操作站监视操作、从模拟信号到数字信号等历程。

20 世纪 50 年代是电子真空管时代,工业生产规模比较小,检测和控制仪表主要采用基地式仪表和气动单元组合仪表,20~100kPa 气动信号作为统一标准信号,记录仪是电子管式的自动平衡记录仪。

20 世纪 60 年代,随着工业规模的不断扩大,工业生产过程要求集中操作与控制。在这期间,过程控制仪表开始用电动仪表,电子管由晶体管代替,开发出以半导体分立元件制造的 DDZ-Ⅱ型电动单元组合仪表,控制信号标准为 0~10mA (DC)。采用中央仪表控制室对工业生产过程进行操作、监视与控制,同时计算机开始在工业生产过程中应用,实现直接数字控制 (DDC)。

20 世纪 70 年代,由于集成电路和微处理器的工业化生产,使电动仪表更可靠,很快开发出 DDZ-Ⅲ型电动单元组合仪表,控制信号标准为 4~20mA (DC) 和 1~5V (DC)。这一期间,以微处理器为核心的集散控制系统 (DCS) 出现,代替了原有集中式 DDC 系统,在工业生产过程中开创了计算机控制的新时代。

20 世纪 80 年代是集散控制系统 (DCS) 广泛在工业生产过程控制中应用的年代。同时,过程控制仪表数字化、智能化不断创新,网络和通信技术引入到自动控制系统中,友好的人机界面及工业电视等成为工业自动化的重要手段之一。

20 世纪 90 年代,随着市场对产品多样化、高品质,工业生产本身对产品低能耗、低成本的要求,迫切需要过程控制仪表具有高精度、高可靠的特点,因此,在线分析仪表大量在工业生产过程中被采用。同时,技术人员开发出比 DCS 价格更低的现场总线控制系统 (FCS) 和智能仪表。

21 世纪,随着 DCS 和 FCS 的逐渐融合和 FCS 的成功应用,DCS 和 FCS 将广泛应用于过程控制领域。当前随着科学技术和市场竞争的需求,工业生产过程控制的一个研究热点是以市场为导向的集管理与控制于一体的计算机集成过程控制系统 (CIPS),又称计算机集成综合自动化系统。它应用计算机技术、网络技术、信息技术和自动控制技术,引入实时数据库服务器和关系数据库服务器协同工作的概念,实现生产过程、计划调度、操作优化、趋势分析、物资供应、产品质量、办公和财务等整个企业信息平台的集成和利用,实现过程控制

最优化与现代化集中调度管理的结合。

第二节 过程控制系统的组成与特点

一、过程控制系统的组成

正常运行的生产过程必须保证产品满足一定的数量和质量要求，同时也要保证生产过程的安全性和经济性，因此要求生产过程在规定工况下运行。由于生产过程在进行的时候总是处在许多因素影响下，如果不加以操作和控制就不能保证生产过程的正常进行。生产过程是否正常，通常是用生产过程中的各种物理量或化学量来表征的。当这些变量偏离所希望的数值时，就表示生产过程离开了规定工况，必须加以调节。生产过程的调节分为人工调节（手动）和自动调节（自动）两种，自动调节是在人工调节的基础上产生和发展起来的。

（一）人工调节与自动调节

1. 人工调节

以单容水箱水位人工调节为例。单容水箱水位人工调节示意如图 1-1 所示。

正常运行时，为方便操作人员观测水位，通常在水箱上设置水位计。操作人员根据水位计的指示，不断改变给水调节阀开度，控制进入水箱的给水量，从而使水位保持在要求的数值上，这就是人工调节。

人工调节规律是当操作人员从水位计上观察到的数值低于要求的水位数值时，则开大调节阀，增大给水流量，使水位上升到要求的数值；当操作人员从水位计上观察到的数值高于要求的水位数值时，则关小给水调节阀，减小给水流量，使水位下降到要求的数值；当操作人员从水位计上观察到的数值等于要求的水位数值时，则不做任何操作，保持给水调节阀开度不变。从人工调节过程可看出，人工调节可分为观察、分析和判断、操作三部分。人工调节过程就是“检测偏差、纠正偏差”的过程。

2. 自动调节

如果采用控制仪表来代替操作人员的操作过程，使生产过程不需要操作人员的直接参与而能自动地完成人工调节任务，则称为自动调节。单容水箱水位自动调节示意如图 1-2 所示。

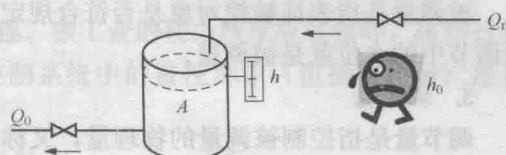


图 1-1 单容水箱水位人工调节

Q_r —水箱流入量； Q_0 —水箱流出量；

A —水箱横截面积； h —水箱实际水位；

h_0 —水位要求值

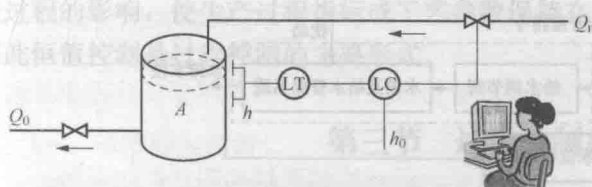


图 1-2 单容水箱水位自动调节示意

图 1-2 中，LT 为液位变送器，用来测量水箱水位，相当于操作人员用“眼睛”观察水箱水位；LC 为液位调节器，将水箱实际水位与水位给定值进行比较，并计算出需要改变的给水量，相当于操作人员用“大脑”分析和判断；

调节阀为执行器，接收调节器输出的需要改变的给水量，控制给水调节阀开度，改变给水量，相当于操作人员用“手臂”操作。

自动调节过程是当水箱水位不等于水位给定值时，调节器根据偏差计算出需要调整的给水指令，并发送给执行器，执行器按照这一指令去操作给水调节阀门，再由变送器测量出水位的变化，并将这一信号送给调节器，再次与水位给定值比较。根据偏差，调节器再发出调节指令，执行器再次改变给水调节阀门开度，直到调节过程达到一个新的平衡状态为止，这就是自动调节过程。

从图 1-1 和图 1-2 可看出，在人工调节中，操作人员是凭经验支配双手操作的，其效果在很大程度上取决于经验；而在自动调节中，调节器是根据偏差信号，按一定规律控制给水调节阀，其效果在很大程度上取决于调节器发出的调节规律是否恰当。

(二) 过程控制中的常见术语

为深入研究自动调节，这里先介绍自动调节中的常见术语。

1. 被控对象

被控对象是指被控制的生产过程或设备，又称控制对象或调节对象。如单容水箱水位自动调节中的水箱及相应的管路就是被控对象。

2. 被调量

被调量是指表征被控对象是否符合规定工况的物理量，又称被控量。如单容水箱水位自动调节中的水位就是被调量。

3. 调节量

调节量是指控制被调量的物理量，又称控制量。如单容水箱水位自动调节中的给水调节阀开度就是调节量。

4. 给定值

给定值是指被调量所要维持的数值，又称规定值。如单容水箱水位自动调节中的水位允许值。

5. 扰动

扰动是指引起被调量偏离给定值的各种因素，又称干扰。如单容水箱水位自动调节中流出单容水箱的水量就是扰动。扰动分为内扰和外扰，内扰是指发生在控制回路内部的扰动，外扰是指不包括在控制回路内部的扰动。

6. 自动调节系统

自动调节系统指由被控对象和控制器（包括变送器、调节器和执行器等）组成的系统，又称过程控制系统。如单容水箱水位自动调节中被控对象和控制器组成的系统，通常称为单容水箱水位自动调节系统。分析和设计自动调节系统时通常用系统框图进行描述。单容水箱水位自动调节系统框图如图 1-3 所示。



图 1-3 单容水箱水位自动调节系统框图

需要注意的是，与示意图不同，框图中箭头指向并不代表物料的实际流向。

二、过程控制系统的特点

(一) 过程工业的特点

过程工业的特点是指连续过程工业的特点,其主要特点如下。

(1) 过程工业伴随着物理化学反应、生化反应、物质能量的转换与传递,是一个十分复杂的大系统,存在不确定性、时变性及非线性等因素,因此过程控制难度较大,必须采用有针对性的特殊方法和途径。

(2) 过程工业常常处于恶劣的生产环境中,同时要求苛刻的生产条件,如高温、高压、低温、真空、易燃、易爆、有毒等,因此生产设备与人身安全性特别重要。

(3) 过程工业强调实时性和整体性,协调复杂的耦合与制约因素,求得全局优化也是十分重要的,因此有必要采用智能控制方法和计算机控制技术。

(二) 过程控制系统的特点

与其他自动控制系统相比,过程控制系统具有如下明显的特点。

1. 被控过程多样化

过程工业涉及各种工业部门,生产规模大小不同,工艺要求各异,产品多种多样,如火力发电过程、石油化工过程、冶金工业的冶炼过程、核工业的动力核反应过程等,这些过程的机理不同,甚至执行机构也不同,因此过程控制系统中的被控对象(包括被控量)是多样的。

2. 控制过程多属于缓慢控制过程和参量控制形式

连续生产过程设备体积大,工艺反应过程缓慢,其主要特性表现为大惯性和大滞后,这决定了被控过程为缓慢过程。被控过程是物流变化过程,通常是用一些物理量和化学量来表征其生产过程是否正常,因此需要对表征生产过程的温度、压力、流量、物位、成分等过程参量进行控制,即过程控制多半是参量控制形式。

3. 控制方案多样性

由于被控过程的多样性、复杂性,且控制要求各异,使得控制方案多种多样,除常见的单回路和串级控制回路外,还有前馈、比值、均匀、分程、超驰、阀位等基于经典控制理论的过程控制系统,还有预测、解耦、自适应、内模、鲁棒控制等基于先进控制理论的过程控制系统,还有模糊、神经网络、专家控制等基于智能控制理论的过程控制系统。在这些过程控制系统中,单回路控制系统占50%以上,串级控制系统约占20%。

4. 恒值控制是过程控制的主要形式

在多数工业生产过程中,为使生产过程安全稳定运行,控制目的在于克服外界扰动对被控过程的影响,使生产过程指标或工艺参数保持在设定值不变或在设定值周围小范围波动,因此恒值控制是过程控制的主要形式。

第三节 过程控制系统的分类

过程控制系统有多种分类方法,本节主要介绍常见的三种分类方法。

一、按控制方式分类

按控制方式分类,过程控制系统分为开环控制系统、闭环控制系统和复合控制系统。

(一) 开环控制系统

开环控制系统指控制器和被控对象在信号关系上没有形成闭合回路,即被调量没有反馈到控制器输入端的控制系统,又称前馈控制系统。其原理示意如图 1-4 所示。

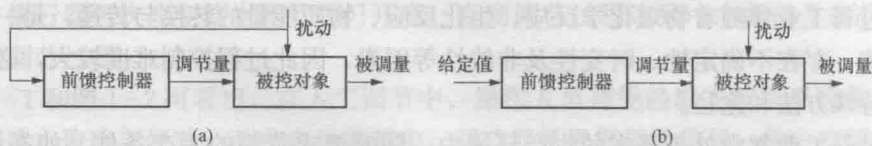


图 1-4 开环控制系统原理示意

(a) 扰动前馈控制系统; (b) 给定值前馈控制系统

开环控制系统结构简单、精度差,过程控制系统很少单独使用。

(二) 闭环控制系统

闭环控制系统指控制器和被控对象在信号关系上形成了闭合回路,即被调量反馈到控制器输入端的控制系统,又称反馈控制系统。其原理示意如图 1-5 所示。



图 1-5 闭环控制系统原理示意

闭环控制系统可消除被调量的偏差,实现恒值调节,是构成过程控制系统的主要控制系统。

(三) 复合控制系统

复合控制系统指综合开环控制系统和闭环控制系统的控制系统,又称前馈-反馈控制系统。其原理示意如图 1-6 所示。

绝大多数过程控制系统都是复合控制系统。

二、按闭合回路的数目分类

按闭合回路的数目分类,过程控制系统分为单回路控制系统和多回路控制系统。

(一) 单回路控制系统

单回路控制系统指只有一个被调量反馈到控制器的输入端,形成一个闭合回路的控制系统。如图 1-5 所示的闭环控制系统就是单回路控制系统,又称简单控制系统。

(二) 多回路控制系统

多回路控制系统指具有多个被调量反馈到控制器的输入端,形成一个以上闭合回路的控制系统,又称复杂控制系统。大型复杂被控过程的被控参数较多,多采用多回路控制系统。

三、按给定值分类

按给定值分类,过程控制系统分为恒值控制系统、随动控制系统和程序控制系统。

(一) 恒值控制系统

恒值控制系统指系统给定值保持不变的控制系统,又称定值控制系统。绝大多数过程控制系统都是恒值控制系统。

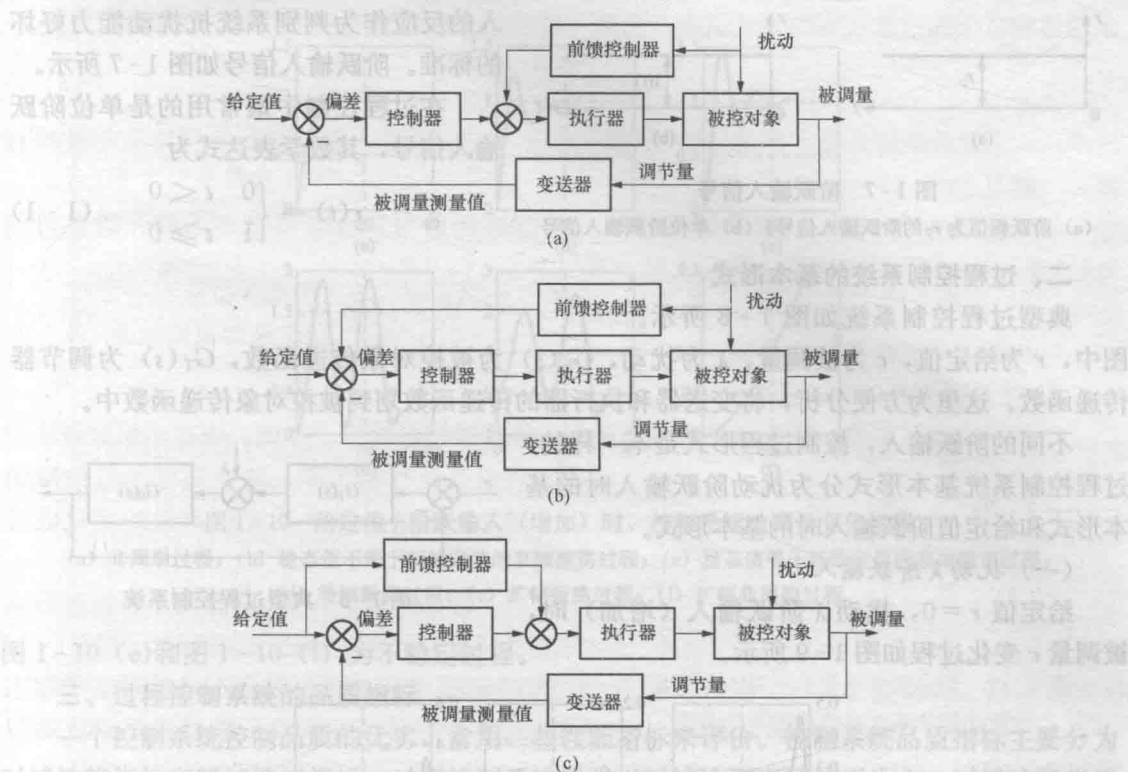


图 1-6 复合控制系统原理示意

- (a) 扰动前馈信号与反馈控制器输出信号叠加的复合控制系统；
 (b) 扰动前馈信号与反馈控制器输入信号叠加的复合控制系统；
 (c) 给定值前馈信号与反馈控制器输出信号叠加的复合控制系统

(二) 随动控制系统

随动控制系统指系统给定值按预先不能确定的一些随机因素变化的控制系统。如串级控制系统的内回路控制系统就是随动控制系统。

(三) 程序控制系统

程序控制系统指系统给定值按已知时间函数变化的控制系统。如火力发电厂的汽轮机自启动控制系统 (ATC) 就是程序控制系统。

第四节 过程控制系统的性能指标

过程控制系统的优劣主要是通过评价其克服扰动能力大小来确定的。一般来说，控制系统抗扰动能力越强，控制系统就越好。为评价控制系统优劣，本节主要介绍衡量控制系统的品质指标。

一、典型输入函数

过程控制系统所要克服的扰动有大有小，有的变化快，有的变化慢。一般来说，变化慢的扰动总比变化快的扰动容易克服。阶跃输入是最不利的扰动，也是最经常出现的典型扰动形式。如果一个控制系统能很好地克服阶跃输入的影响，那么它对其他形式的扰动也就不难克服。因此常把阶跃输入作为研究控制系统调节品质的标准输入信号，把控制系统对阶跃输

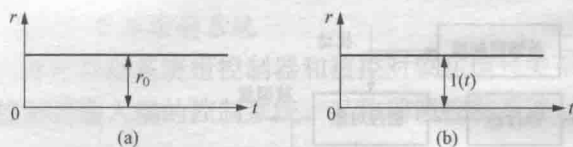


图 1-7 阶跃输入信号

(a) 阶跃幅值为 r_0 的阶跃输入信号; (b) 单位阶跃输入信号

入的反应作为判别系统抗扰动能力好坏的标准。阶跃输入信号如图 1-7 所示。

在过程控制中最常用的是单位阶跃输入信号, 其数学表达式为

$$r(t) = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ 1 & t \geq 0 \end{cases} \quad (1-1)$$

二、过程控制系统的基本形式

典型过程控制系统如图 1-8 所示。

图中, r 为给定值, c 为被调量, λ 为扰动, $G_0(s)$ 为被控对象传递函数, $G_T(s)$ 为调节器传递函数。这里为方便分析, 将变送器和执行器的传递函数划到被控对象传递函数中。

不同的阶跃输入, 控制过程形式是不一样的。

过程控制系统基本形式分为扰动阶跃输入时的基本形式和给定值阶跃输入时的基本形式。

(一) 扰动 λ 阶跃输入

给定值 $r=0$, 扰动 λ 阶跃输入 (增加) 时, 被调量 c 变化过程如图 1-9 所示。

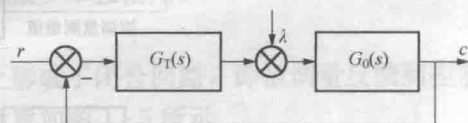
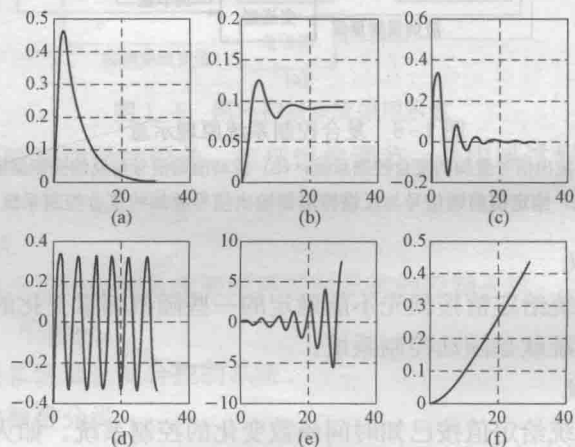


图 1-8 典型过程控制系统

图 1-9 扰动 λ 阶跃输入 (增加) 时, 调节系统被调量变化过程

(a) 衰减非周期过程; (b) 稳态值不等于给定值的衰减振荡过程;

(c) 稳态值等于给定值的衰减振荡过程; (d) 等幅振荡过程;

(e) 扩幅振荡过程; (f) 扩幅非周期过程

由图 1-9 可看出, 扰动阶跃输入 (增加) 时, 图 1-9 (a) ~ 图 1-9 (c) 均为稳定过程, 图 1-9 (d) 为临界稳定过程, 图 1-9 (e) 和图 1-9 (f) 为不稳定过程。

(二) 给定值 r 阶跃输入

扰动 $\lambda=0$, 即无扰动, 给定值 r 阶跃输入 (增加) 时, 被调量 c 变化过程如图 1-10 所示。

与扰动阶跃输入 (增加) 时的变化过程类似, 由图 1-10 可看出, 给定值阶跃输入 (增加) 时, 图 1-10 (a) ~ 图 1-10 (c) 均为稳定过程, 图 1-10 (d) 为临界稳定过程,

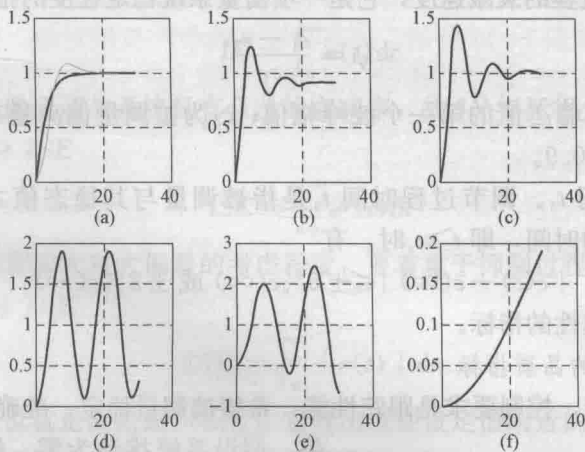


图 1-10 给定值 r 阶跃输入（增加）时，控制系统被调量变化过程

- (a) 非周期过程；(b) 稳态值不等于新给定值的衰减振荡过程；(c) 稳态值等于新给定值的衰减振荡过程；
(d) 等幅振荡过程；(e) 扩幅振荡过程；(f) 扩幅非周期过程

图 1-10 (e)和图 1-10 (f) 为不稳定过程。

三、过程控制系统的品质指标

一个控制系统控制品质的优劣，常用一些性能指标来评价。控制系统品质指标主要分为时域性能指标和频域性能指标。过程控制系统通常以时域性能指标分析为主。时域性能指标又分单项性能指标和综合性能指标。

(一) 单项性能指标

单项性能指标是指以阶跃响应曲线上的几个特征参数作为评价标准的性能指标。由于在过程控制系统中，对恒值控制系统和随动控制系统的性能要求不同，单项性能指标通常分为恒值调节系统的品质指标和随动调节系统的品质指标。

1. 恒值调节系统的品质指标

对于恒值调节系统，控制要求是克服扰动影响，在扰动发生后，希望被调量稳定、准确、快速地达到给定值或新的平衡状态，使被调量保持在给定范围内。假设系统给定值保持不变，扰动作单位阶跃输入（增加）时恒值调节系统被调量的变化曲线如图 1-11 所示。

(1) 静态偏差 $c(\infty)$ 。静态偏差是指被调量稳态值与给定值之间的长期偏差，即图 1-11 中的 $c(\infty)$ 。它是衡量恒值调节系统静态准确性的重要指标，它反映了恒值控制系统的静态调节精度。

(2) 最大动态偏差 c_m 。最大动态偏差是指调节过程中被调量偏离给定值的最大暂时偏差。它是衡量被调量偏离给定值程度的指标。从图 1-11 可得

$$c_m = c_1 + c(\infty) \tag{1-2}$$

(3) 衰减率 ψ 。衰减率是指每经过一个波动周期，被调量波动幅值减少的百分数。它用

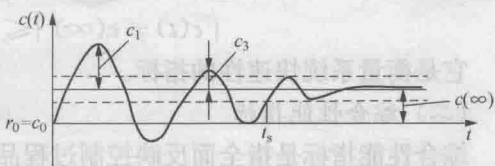


图 1-11 扰动作单位阶跃输入（增加）时恒值调节系统被调量的变化曲线

来描述衰减振荡过渡过程的衰减速度，它是一项衡量系统稳定程度的指标。由图 1-11 可得

$$\psi = \frac{c_1 - c_3}{c_1} \quad (1-3)$$

式中： c_1 为被调量偏离稳态值的第一个波峰幅值； c_3 为被调量偏离稳态值的第三个波峰幅值。一般取 $\psi = 0.75 \sim 0.9$ 。

(4) 调节过程时间 t_s 。调节过程时间 t_s 是指被调量与其稳态值之差不超过稳态值的 $\pm 5\%$ 或 $\pm 2\%$ 所需要的时间，即 $t \geq t_s$ 时，有

$$|c(t) - c(\infty)| \leq \pm 5\% c(\infty) \text{ 或 } \pm 2\% c(\infty) \quad (1-4)$$

它是衡量系统快速性的指标。

2. 随动调节系统的品质指标

对于随动调节系统，控制要求是跟踪性能，希望被调量稳定、准确、快速地跟踪新给定值。假设系统扰动为零，给定值作单位阶跃输入（增加）时随动调节系统被调量的变化曲线如图 1-12 所示。

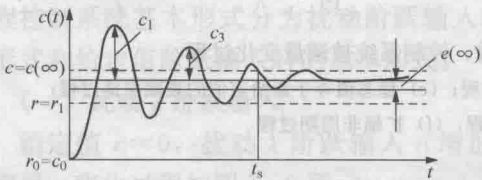


图 1-12 给定值作单位阶跃输入（增加）时随动调节系统被调量的变化曲线

静态偏差 $e(\infty)$ 。静态偏差是指被调量稳态值与新给定值之间的长期偏差，即图 1-12 中的 $e(\infty)$ 。它是衡量随动调节系统静态跟踪准确性的重要指标，它反映了随动调节系统的静态调节精度。

(2) 超调量 σ 。随动调节系统的超调量是指被调量第一个偏离稳态值的波峰幅值与被调量稳态值之比，即

$$\sigma = \frac{c_1}{c(\infty)} \times 100\% \quad (1-5)$$

式中： $c(\infty)$ 为被调量稳态值，它是用来衡量被调量偏离稳态值程度的指标。

(3) 衰减率 ψ 。衰减率是指每经过一个波动周期，被调量波动幅值减少的百分数。它用来描述衰减振荡过渡过程的衰减速度，它是一项衡量系统稳定程度的指标。由图 1-12 可得

$$\psi = \frac{c_1 - c_3}{c_1} \quad (1-6)$$

(4) 调节过程时间 t_s 。调节过程时间 t_s 是指被调量与其稳态值之差不超过稳态值的 $\pm 5\%$ 或 $\pm 2\%$ 所需要的时间，即 $t \geq t_s$ 时，有

$$|c(t) - c(\infty)| \leq 5\% c(\infty) \text{ 或 } \pm 2\% c(\infty) \quad (1-7)$$

它是衡量系统快速性的指标。

(二) 综合性能指标

综合性能指标是指全面反映控制过程品质的偏差积分指标。它是过渡过程中偏差 e 和时间 t 的某些函数的积分，可表示为

$$J = \int_0^{\infty} f(e, t) dt \quad (1-8)$$

可见无论是偏差幅度或是偏差存在时间都与指标有关，可兼顾衰减率、超调量、调节时间各方面因素。一般来说，过渡过程的动态偏差越大，或者调节越慢，则积分指标（目标函数）数值将越大，表明控制品质越差。偏差积分性能指标通常采用以下几种形式。