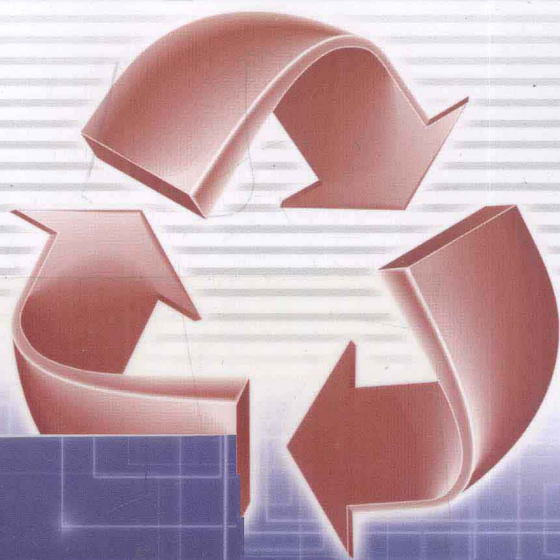


过程控制系统 及工程应用

◎ 蔡大泉 张晓东 耿建风 徐 荣 编著



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

过程控制系统 及工程应用

蔡大泉 张晓东 耿建风 徐 荣 编著
郭献军 主审



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

内 容 提 要

本书概要介绍了过程控制系统的基本概念,深入分析了过程控制中常用检测与控制仪表的原理与工程选型、过程执行器的类型及特性,详细讨论了被控过程的特性及建模方法,具体论述了简单控制系统的设计与参数整定、复杂控制系统的控制策略,并对近年来发展迅速的计算机过程控制技术,如集散控制系统、现场总线技术、组态软件作了重点介绍。最后,以工程实例为基础,对过程控制系统的设计与实际应用进行了深入分析。

本书侧重理论联系实际,内容深入浅出,可作为高校自动化、电气工程及自动化、测控技术与仪器、过程装备与控制工程、化学工程等专业的教材或参考书,也可供电力、石化、冶金、化工、轻工等行业的工程技术人员和研究人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

过程控制系统及工程应用/蔡大泉等编著. —北京:中国电力出版社, 2010.9

ISBN 978-7-5123-0794-0

I. ①过… II. ①蔡… III. ①过程控制-自动控制系统
IV. ①TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 163447 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 http://www.cepp.com.cn)

航远印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2010 年 11 月第一版 2010 年 11 月北京第一次印刷

710 毫米×980 毫米 16 开本 12.25 印张 207 千字

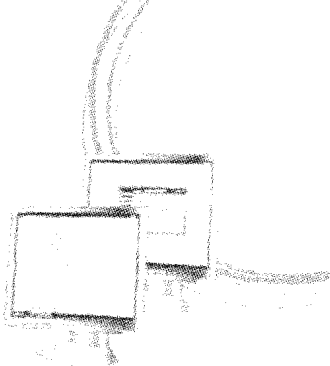
印数 0001—3000 册 定价 25.00 元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签,加热后中心图案消失
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

前言



过程控制技术是自动控制领域的重要分支,已经广泛应用于电力、石化、冶金、化工、轻工等工业生产过程。近年来,在计算机技术和先进控制理论的带动下,过程控制技术得到了迅速发展,对于提高劳动生产率、改善产品质量以及优化生产经济技术指标等方面发挥了重要作用。

过程控制与仪表是自动化等专业的重要专业课,与工业生产过程联系十分紧密。它涵盖了自动控制理论、检测与控制仪表、工业生产过程特性及建模、控制系统设计与控制器参数整定、复杂过程控制系统、先进过程控制技术、计算机控制系统等知识点,内容丰富。本书遵循“新颖、简洁、实用”的原则,完整介绍了过程控制理论及过程控制技术的工程应用,力求理论与实践相结合,使读者系统掌握过程控制系统各个部分的组成、原理和典型过程控制系统的设计方法,并对过程控制系统的应用和最新发展有一个全面的了解。

全书共分八章,第一章绪论,主要讲述过程控制系统的概念、组成和特点;第二至五章,分四个章节系统讨论了一个典型过程控制系统的四个组成部分:检测与控制仪表,过程执行器,被控过程特性及建模,简单控制系统设计及参数整定;第六章复杂控制系统,论述了包括串级、前馈、时间滞后、比值、均匀、超驰、分程、阀位和解耦控制系统在内的各种复杂控制系统的特性及其设计、整定方法;第七章计算机过程控制系统,对集散控制系统、现场总线技术和组态软件作了重点介绍;第八章过程控制系统实例,对过程控制系统的工业应用实例进行了分析和讨论。全书在章节安排上力求层次清晰,重点突出,衔接合理,以便于读者学习与理解。

本书由河南省电力勘测设计院蔡大泉、河南工业大学张晓东、河南省电力勘测设计院耿建风、河南省电力勘测设计院徐荣编著。第一、八章由蔡大泉编写,第二、三、五、六章由张晓东编写,第四章由耿建风编写,第七章由徐荣编写。全书由河南省电力勘测设计院郭献军主审。郭献军在百忙之中审阅了全书,提出了非常宝贵的修改意见,对本书的完善和提高发挥了重要作用,在此表示衷心感谢。同时,在本书的编写过程中,Wonderware公

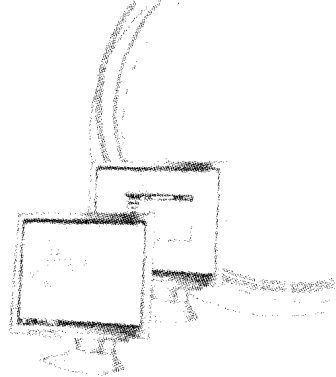
司（北京）、北京化工大学张贝克教授为本书提供了大量资料和素材，在此一并致谢。

限于编者水平，在内容的组织和编写上难免有不妥之处，敬请广大读者批评指正。

编 者

2010 年 7 月

目 录



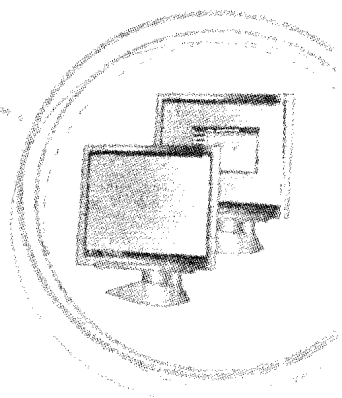
前言

第一章 绪论	1
第一节 过程控制概述	1
第二节 过程控制技术的发展	2
第三节 过程控制系统的组成	3
第四节 过程控制系统的分类及性能指标	5
第二章 检测与控制仪表	12
第一节 检测仪表的组成及应用	12
第二节 测量误差及处理	18
第三节 过程参数检测	19
第四节 可编程序控制器 PLC	28
第三章 过程执行器	36
第一节 执行器的类型	36
第二节 调节阀	37
第四章 被控过程特性及建模	55
第一节 被控过程的数学模型	55
第二节 典型被控过程的动态特性	56
第三节 常用被控过程数学模型的建模方法	62
第五章 简单控制系统设计及参数整定	73
第一节 简单过程控制系统概述	73
第二节 位式控制	79
第三节 PID 控制	81
第四节 单回路 PID 调节器参数的整定	97
第五节 单回路 PID 调节器控制规律的选择	105
第六章 复杂控制系统	110
第一节 串级控制系统	110

第二节	前馈控制系统	117
第三节	时间滞后控制系统	124
第四节	比值控制系统	130
第五节	均匀控制系统	134
第六节	超弛控制系统	136
第七节	分程控制系统	138
第八节	阀位控制系统	143
第九节	解耦控制系统	144
第七章	计算机过程控制系统	150
第一节	概述	150
第二节	集散控制系统	151
第三节	现场总线技术	152
第四节	组态软件	153
第八章	过程控制系统实例	161
第一节	工业锅炉设备的控制	161
第二节	多功能过程与控制仿真实验系统	163
参考文献		186



第一章



绪 论

过程控制技术是自动控制理论和工业生产过程与设备、自动化仪表、通信技术以及计算机技术密切结合的工程应用学科。

本章概要介绍了过程控制的概念，简要论述了过程控制的发展历史、应用现状和最新发展，重点介绍了过程控制系统的组成，最后讨论了过程控制系统的分类及性能评价指标。

第一节 过程控制概述

自动化是指机器或装置在无人干预的情况下按规定的程序或指令自动地进行操作或运行。自动化技术形成于 18 世纪末至 20 世纪 30 年代。1788 年，英国机械师詹姆斯·瓦特发明了自动调节蒸汽机运转速度的离心式调速器，开创了近代自动调节装置应用的新纪元。进入 20 世纪以来，工业生产中广泛应用的各种自动调节装置，促进了对调节系统进行的各项研究工作。自动化技术已经广泛用于工业、农业、国防、科学研究、商业、交通运输、医疗以及家庭等各方面。

过程控制 (Process Control) 是在自动控制理论的基础上发展起来的，内容涵盖了自动控制理论、工业过程对象特性及其建模、控制系统分析与设计、控制器参数整定、复杂控制系统设计及投运、先进控制算法与应用、计算机控制系统等方面，既包括过程控制理论，又包括工程实际应用。

所谓过程控制，是指根据工业生产过程的特点，采用测量仪表、执行机构和计算机等自动化工具，应用控制理论，设计工业生产过程控制系统，实现工业生产过程的自动化。

过程控制是自动化技术的一个重要分支，与工业生产过程联系十分密切。

工业中的过程控制通常是指以温度、压力、流量、液位和成分等工艺参数作为被控变量的连续生产过程的自动控制。与其他自动控制系统相比，过程控制具有以下显著的特点：

(1) 被控过程的多样性。现代工业生产过程规模大小不同，形势多种多样，工艺生产要求各异。如发电、石油、化工、冶金等行业的锅炉、精馏塔、化学反应器、高炉等设备，生产过程中常常有复杂的物理、化学变化，还伴随着物料、能量、动量等的转换和传递。因此，过程控制系统的被控过程形形色色，复杂多样。

(2) 被控对象的滞后和非线性。在涉及过程控制的众多工业生产过程中，很多生产过程设备体积庞大，工艺过程缓慢，大多具有大惯性、大滞后的特点。表征过程的物理参数多涉及温度、压力、流量、物位和成分等过程参量，过程控制多为慢过程参数的控制。

(3) 控制方案丰富多样。被控过程的多样性和生产工艺的复杂性，也决定了过程控制方案的多种多样。近年来，随着工艺生产要求的提高和控制理论的发展，控制方案也越来越丰富，既有传统的基地式仪表控制系统、单元组合式控制系统，也有发展迅猛的集散式控制系统（Distributed Control System, DCS）、现场总线控制系统（Fieldbus Control System, FCS）；有传统的经典PID控制，也有新型的模糊控制、自适应控制、预测控制、解耦控制等。

(4) 定值控制是过程控制中最主要的控制形式。工业上常见的过程控制生产过程中，设定值是恒定不变或者只允许在很小的范围内变动的。过程控制的主要目的是减小或消除外界干扰对生产过程的影响，使被控参数稳定在设定值或其附近，以满足生产工艺的要求。

第二节 过程控制技术的发展

20 世纪早期的工业生产技术水平比较落后，生产过程很大程度上依赖于手动操作，生产效率低下。20 世纪 40 年代以来，特别是二次世界大战以后，自动化技术在工业过程中的应用发展很快，大致经历了以下几个阶段：

(1) 20 世纪 50 年代，工业生产多为钢铁、纺织、化工、造纸等规模较小的生产过程，经典控制理论的成熟为过程控制技术的发展提供了有力支持。在此期间，过程控制系统的结构一般为单输入单输出（SISO）的单回路定值控制系统，多采用基地式仪表、气动组合仪表和气动仪表控制器来完成简单

控制。

(2) 20 世纪 60 年代, 工业生产规模不断扩大, 工业生产过程的复杂性使各个单元之间的耦合程度更加紧密, 在控制理论上体现为对象的非线性、时变和多输入多输出 (MIMO)。传统的经典控制理论已经不能满足控制系统设计的需求。

现代控制理论在航空航天领域的成功应用以及计算机技术的发展, 使得过程控制技术的各种复杂控制系统方案的实现成为可能。电动仪表开始使用, 且电子仪表逐步取代气动仪表, 单元组合式仪表和组装式仪表在过程控制中应用越来越广泛。同时, 计算机开始应用于自动控制, 过程控制系统中出现了集中控制及直接数字控制。

(3) 20 世纪 70 年代, 现代企业的生产过程一般是大型的分散系统, 先进控制技术、数字化仪表、计算机, 特别是网络通信技术的进一步发展, 使基于“分散控制, 集中管理”理念设计的集散控制系统 (DCS) 成功应用于大型生产过程中。过程控制系统的可靠性、安全性都达到了新的水平, 为企业带来了巨大的经济效益。可以说, DCS 是现代过程控制的主流, 现今集散控制系统已经广泛应用于发电、化工、炼油等企业。

过程控制技术在最近 30 多年得到了迅速发展, 计算机控制技术、各种集散控制系统 (DCS) 和现场总线控制系统 (FCS) 不断涌现, 人工智能技术如专家系统、人工神经网络、模糊控制、遗传算法等也有了长足进步, 在许多科学与工程领域得到了广泛应用。先进过程控制技术的广泛应用和良好的发展前景, 正在成为企业取得更好经济效益的关键手段。

第三节 过程控制系统的组成

一个常规的过程控制系统框图如图 1-1 所示。

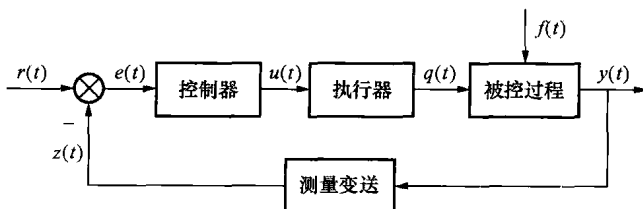


图 1-1 过程控制系统框图

图中的参数含义如下：

给定值 $r(t)$ ：被控参数的设定值，在控制器中用 SP 表示。

偏差 $e(t)$ ：设定值与被控参数的当前值之差。

控制作用 $u(t)$ ：控制器的输出量（控制量）。

控制参数 $q(t)$ ：受控制器操纵并使被控参数稳定在给定值的能量。

被控参数（变量） $y(t)$ ：被控对象要求保持恒定的或按一定规律变化的物理量，也称被控制量。

当前值 $z(t)$ ：被控参数经测量变送环节所测得的实际值，在控制器中用 PV 表示。

扰动量 $f(t)$ ：除控制参数外，作用于被控过程并引起被控参数变化的其他各种因素。

如图 1-1 所示，常规过程控制系统由控制器、执行器、被控过程和测量变送环节四部分组成。

1. 测量变送环节

测量变送环节主要是指检测仪表，一般包括传感器和变送器两部分。

传感器（transducer/sensor）是检测仪表中重要的检测装置，能感受到被测量的信息，按照一定规律转换成电信号或其他信号形式输出。

变送器（transmitter）是指将普通电信号或其他测量信号转换为标准信号的设备。过程控制中常见的标准电信号形式有 $0(4) \sim 20\text{mA}$ 直流电流信号、 $1 \sim 5\text{V}$ 的直流电压信号等。此外，还有 $20 \sim 100\text{kPa}$ 的标准压力信号等。在某些参考文献上，广义的变送器与传感器的概念是通用的。在图 1-1 中，测量变送环节的输出值就是被控变量 $y(t)$ 的当前值 $z(t)$ 。

2. 被控过程

被控过程（process），也称被控对象，是指需要实现控制的机器设备或生产过程（装置）。常见的被控过程包括加热炉、换热器、锅炉、化学反应器、压缩机、精馏塔等。被控过程是过程控制系统中重要的组成部分，过程控制的其他几个环节，如自动化仪表、调节器和执行器等的选型及设计主要依赖于被控过程本身的特性。只有全面认识被控过程本身的动态特性，才能依据系统的控制要求合理设计并实现控制方案。

3. 控制器

控制器（controller），也称调节器，是过程控制系统实现控制的核心部分，它接收测量变送环节输出的来自被控对象的测量信号，按照一定的控制规

律产生控制作用 $u(t)$ ，控制信号推动执行器工作，完成闭环控制。

4. 执行器

执行器 (actuator) 是过程控制系统中的操作环节，直接安装在生产现场，其作用是根据控制器送来的控制信号改变所操作介质的大小，将被控变量 $y(t)$ 维持在给定值 $r(t)$ 上。在过程控制系统中，执行器由执行机构和调节机构两部分组成。执行机构接受来自控制器的控制信号，把它转换为驱动调节机构的输出（如角位移或直线位移输出）；调节机构则通过执行元件直接改变生产过程参数，使生产过程满足控制要求。常见的执行器按所用驱动能源可分为气动、电动和液压执行器三种。有时现场工作条件比较苛刻，执行器能否稳定工作会直接影响系统的可靠性和安全性。

第四节 过程控制系统的分类及性能指标

一、过程控制系统的分类

按照不同的分类标准，过程控制系统有如下几种不同的分类方法：

1. 按系统的结构特点划分

(1) 反馈控制系统。反馈控制系统在过程控制中应用最为普遍，是过程控制系统中最基本的结构形式，其框图如图 1-2 所示。反馈控制是按照被控参数 $y(t)$ 与给定值 $r(t)$ 的偏差 $e(t)$ 进行调节，偏差值是其控制的依据，最终的控制目的是减小或消除偏差。反馈是控制的核心，只有通过反馈才能实现对被控参数的闭环控制。

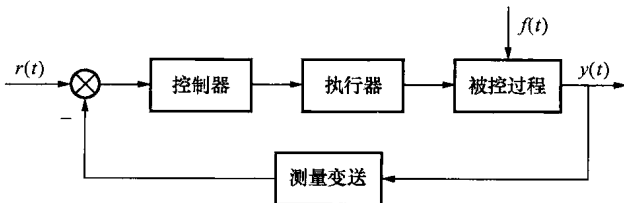


图 1-2 反馈控制系统框图

(2) 前馈控制系统。在前馈控制系统中，扰动量的大小是控制的依据。前馈控制属于开环控制系统，在实际生产中不能单独采用。前馈控制系统框图如图 1-3 所示。

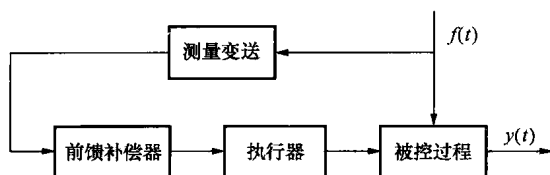


图 1-3 前馈控制系统框图

(3) 前馈—反馈复合控制系统。前馈—反馈复合控制系统是将前馈控制与反馈控制结合在一起构成的复合控制系统，其框图如图 1-4 所示。前馈—反馈复合控制系统集中了前馈和反馈的各自优势，既综合了前馈控制对扰动进行及时补偿的好处，又保持了反馈控制能克服多种扰动的优点。前馈—反馈复合控制能够显著提高控制品质。

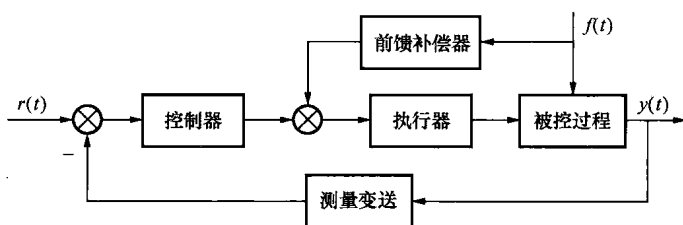


图 1-4 前馈—反馈复合控制系统框图

2. 按给定值的不同形式划分

(1) 定值控制系统。定值控制系统是指将系统被控变量的设定值保持在某一恒定值（或者只允许在某一很小范围内变动）的控制系统。定值控制是在过程控制中应用最多的一种控制形式。在定值控制中，因为控制输入即设定值是恒定不变的，系统中引起被控参数变化的因素就只有扰动量 $f(t)$ 。生产车间用空调调节室内温度是一个常见的例子，控制要求是利用空调将室内温度稳定在一个定值 u 上（或其附近），而室内与室外的热交换、室内热负荷的改变等因素都是影响生产车间温度的扰动量。

(2) 随动控制系统。在某些生产过程中，被控参数的给定值 $r(t)$ 是随时间变化的，也就是说设定值并不是恒定不变的。随动控制系统就是要克服一切扰动，使被控参数准确、及时地跟随给定值的变化而变化。如在锅炉炉膛中或燃料与空气的比例控制系统中，当燃料供应量一定时，输送的空气不能过多或过少。若通入空气过少，会造成燃料燃烧不充分；而供应空气过多，则燃料燃

烧所产生的部分热量将随过量空气流失。因此，助燃空气的输送量是跟随燃料流量的变化而变化的。

(3) 程序控制系统。程序控制系统被控变量的设定值是按预定的时间程序变化的，控制目的是使被控参数按设定的程序自动变化。这种类型在间歇生产过程中比较常见，如石化行业中的带搅拌的釜式反应器（CSTR）的间歇反应过程，工序包括下料、加热升温、冷却控制、保温、出料及反应釜清洗阶段，反应釜内温度的给定值并不是恒定不变的，而且按照工艺的要求随时间变化而改变。设定值按程序自动改变，系统按设定程序自动运行，直到整个程序运行完毕。

二、过程控制系统的性能指标

在实际的生产过程中，由于生产工艺要求复杂多变，其控制目的也是各不相同的。概括来说，考查一个过程控制系统的性能，往往是看系统的设定值发生变化或系统在受到外界扰动作用后，能否平稳、准确、迅速地达到给定值或稳定在其附近。

工业过程控制系统在运行中一般可以概括为两种状态：一种是在生产过程中，各个信号保持不变，被控变量不随时间变化而变化的平衡状态，称为系统的稳态；另一种是生产过程受到扰动时，被控变量随时间变化而变化的不平衡状态，称为系统的动态。要评价过程控制系统过渡过程的控制品质，了解稳态是必要的，但由于系统中扰动是不可避免的，因此考查其在动态过程中被控参数的变化情况更为重要。

过程控制系统性能的评价指标可概括为“稳”、“准”、“快”，即：

平稳：系统必须是稳定的（最重要、最基本的需求）。一个系统要能正常工作，首先必须是稳定的，从阶跃响应上看应该是收敛的。

准确：“准”是指控制系统的准确性、控制精度，通常用稳态误差来描述，它表示系统输出稳态值与期望值之差。系统应提供尽可能优良的稳态调节（静态指标）。

迅速：“快”是指控制系统响应的快速性，通常用上升时间 t_r 来定量描述。系统应提供尽可能优良的过渡过程（动态指标）。

评价过程控制系统的性能指标通常采用系统阶跃响应的几个特征参数来反映。阶跃响应性能指标清晰明了，便于工程整定和分析，在工程应用中使用广泛。在计算机仿真分析时，有时也采用偏差积分性能指标。

(一) 阶跃响应性能指标

在工业过程控制中,经常采用阶跃作用下过渡过程的时域参数来评价过程控制系统的性能。给定值阶跃变化时,过渡过程的典型曲线如图 1-5 所示,

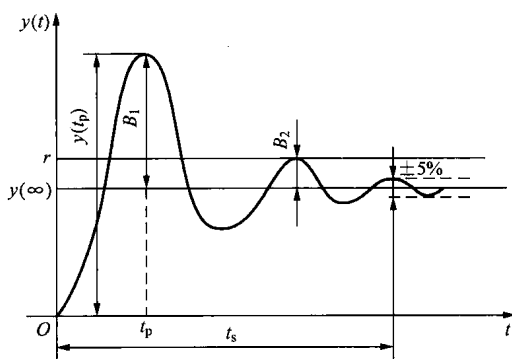


图 1-5 给定值阶跃变化时过渡过程的典型曲线

几个时域指标包括稳态误差、衰减比、超调量、过渡过程时间(调节时间)等,其中稳态误差是描述系统静态性能的唯一指标,衰减比 n 、超调量 σ 、过渡过程时间(调节时间) t_s 是描述系统动态性能的指标。

1. 稳态误差(余差) e_{ss}

稳态误差是指系统过渡过程终了时被控参数稳态值与给定值之差

$$e_{ss} = y(\infty) - r \quad (1-1)$$

一般要求稳态误差越小越好或为零。需要注意的是,在自动控制原理的框图中,稳态误差定义为给定值与系统过渡过程终了时被控参数稳态值之差

$$e_{ss} = r - y(\infty) \quad (1-2)$$

2. 衰减比 n

衰减比是衡量系统过渡过程稳定性的一个动态指标,通常定义为图 1-5 曲线上第一个波峰与稳态值的差 B_1 和同方向第二个波峰与稳态值的差 B_2 之比,即

$$n = \frac{B_1}{B_2} \quad (1-3)$$

若衰减比 $n < 1$,过渡过程是发散振荡, n 越小发散越快; $n = 1$,过渡过程为等幅振荡; $n > 1$,过渡过程是衰减振荡, n 越大,衰减越快,系统越稳定;当 $n \rightarrow \infty$ 时,系统过渡过程为非周期衰减过程。

根据实际经验,为保持系统具有足够的稳定裕度,一般取衰减比 n 在 4:1~10:1 的范围内。其中 4:1 的衰减比通常作为评价过渡过程动态性能的一个理想指标。

3. 超调量 σ

超调量用来反映系统受扰动后的超调情况和衡量系统的稳定性。如图 1-5

所示, 超调量 σ 定义为被控变量第一个波峰值 $y(t_p)$ 与稳态值的差与稳态值之比, 即

$$\begin{aligned}\sigma &= \frac{y(t_p) - y(\infty)}{y(\infty)} \times 100\% \\ &= \frac{B_1}{y(\infty)} \times 100\% \quad (1-4)\end{aligned}$$

4. 过渡过程时间 (调节时间) t_s

如图 1-5 所示, 过渡过程时间 t_s 是指系统从受扰动作用时起, 直到被控参数进入新稳态值的 $\pm 5\%$ 或 $\pm 2\%$ 范围内所经历的最短时间。调节时间是反映系统快速性的一个指标。

通常超调量 σ 、过渡过程时间 t_s 越小越好。

例 某换热器内要将温度控制在 40°C , 该温度控制系统在单位阶跃干扰作用下的过渡过程曲线如图 1-6 所示。根据该图分别求出该过渡过程中最大偏差、稳态误差、衰减比、超调量、过渡过程时间等品质指标。

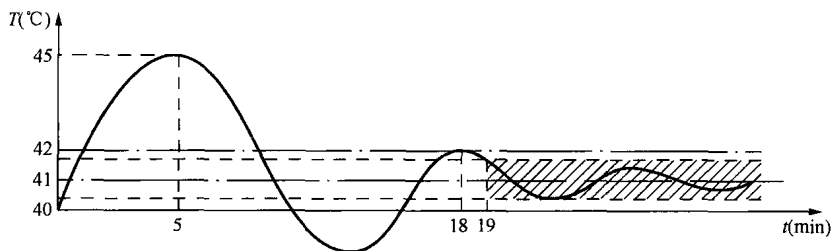


图 1-6 换热器温度控制系统在单位阶跃干扰作用下的过渡过程曲线

解 由过渡过程曲线可知:

最大偏差是过渡过程中被控变量偏离给定值的最大数值, 即

$$A = 45 - 40 = 5 (^{\circ}\text{C})$$

稳态误差是指过渡过程终了时被控变量新的稳态值与给定值之间的偏差, 即

$$e(\infty) = 41 - 40 = 1 (^{\circ}\text{C})$$

衰减比是前后两个相邻的同向波峰值与稳态值之差的比值, 即

$$n = \frac{B_1}{B_2} = \frac{45 - 41}{42 - 41} = 4 : 1$$

超调量为

$$\begin{aligned}
 \sigma &= \frac{y(t_p) - y(\infty)}{y(\infty)} \times 100\% \\
 &= \frac{45 - 41}{41} \times 100\% \\
 &= 9.76\%
 \end{aligned}$$

过渡过程时间 t_s 是从干扰作用发生时刻起直到系统重新建立新的平衡时止, 一般当被控变量进入新的稳态值的 $\pm 5\%$ 或 $\pm 2\%$ 范围内并不再超出, 即认为过渡过程结束, 从图 1-6 中可以看出, 当 19min 时, 过渡过程曲线进入新稳定值的 $\pm 2\%$ 范围内不再超出, 所以该过渡过程时间 t_s 为 19min。

(二) 偏差积分性能指标

系统阶跃响应的几个单项参数虽然清晰明了, 但是要统筹兼顾比较困难。偏差积分性能指标是一种常用的综合性能指标, 可以比较全面地反映控制系统的品质。

定义误差函数 $e(t) = y(t) - y(\infty)$, 偏差积分性能指标是过渡过程中偏差 e 和时间 t 的某些函数沿时间轴的积分, 表示为

$$J = \int_0^{\infty} f(e, t) dt \quad (1-5)$$

由式 (1-5) 可见, 偏差幅度和偏差存在的时间都与偏差积分性能指标有关, 可以兼顾衰减比、超调量以及过渡过程时间等几个单项指标, 因此偏差积分性能指标是一种综合性能指标。一般来说, 偏差积分指标越小越好。过渡过程中的动态偏差越大或是调节时间越长, 反映在偏差积分指标上就是偏差积分性能指标值增大, 表明控制品质变差。

偏差积分性能指标通常采用以下几种形式表示:

(1) 误差积分 (integral of error, IE) 指标

$$IE = \int_0^{\infty} e(t) dt \quad (1-6)$$

该指标使用较少, 且不适用于振荡过程。

(2) 绝对误差积分 (integral of absolute error, IAE) 指标

$$IAE = \int_0^{\infty} |e(t)| dt \quad (1-7)$$

该指标从图形上看就是偏差面积的积分, 是一种常用的误差性能指标。

(3) 平方误差积分 (integral of squared error, ISE) 指标

$$ISE = \int_0^{\infty} e^2(t) dt \quad (1-8)$$