

21世纪 高等学校本科电子电气专业系列实用教材

过程控制系统

李国勇 编著

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



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

21 世纪高等学校本科电子电气专业系列实用教材

过程控制系统

李国勇 编著

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书全面地论述了过程控制系统的要求、组成、性能指标和发展；工业生产过程数学模型的一般表示形式和建模方法；控制器的特性、选型与参数整定；调节阀的设计、选型和计算；简单控制系统的结构和特点及分析、设计和调试等；常用的复杂控制系统，如串级控制、补偿控制、比值控制、均匀控制、分程控制和选择性控制等系统的结构、分析、设计和实施等；多变量解耦控制系统的分析和解耦设计方法；计算机过程控制系统的组成与类型和先进控制策略的简单介绍。

本书可作为高等院校自动化和信息类其他专业研究生和高年级本科生的教材，也可作为从事自动控制研究、设计和应用的科学技术人员的参考用书。

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 / 李国勇编著. —北京：电子工业出版社，2009.5

(21世纪高等学校本科电子电气专业系列实用教材)

ISBN 978-7-121-08343-3

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

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第053438号

责任编辑：张 榕

印 刷：北京京师印务有限公司

装 订：

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 印张：16.75 字数：428.8千字

印 次：2009年5月第1次印刷

印 数：4000册 定价：35.00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 zlts@phei.com.cn，盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线：(010) 88258888。

序 言

随着世界经济一体化的进程,我国已成为世界最大的加工基地和制造基地,尤其是长江三角洲地区更为突出,已有近百家名列世界五百强的企业落户该地区,带动了该地区经济突飞猛进的发展,同时也为就业创造了广阔的前景。企事业单位对应用型本科人才的需求多了,但要求也提高了。这就对工程教育的发展提出了新的挑战,同时也提供了新的发展机遇。

在此形势下,国家教育部近年来批准组建了一批以培养应用型本科人才为宗旨的高等院校,同时举办了多次“应用型本科人才培养模式研讨会”,对应用型本科教育的办学思想和发展定位进行初步探讨。并于2002年在全国高等院校教学研究中心立项,成立了21世纪中国高等学校应用型人才培养体系的创新与实践课题组,有十几所应用型本科院校参加了课题组的研究,取得了多项研究成果,并于2004年结题验收。我们就是在这种形势下,组织了多所应用型本科院校编写本系列教材,以适应国家对工程教育的新要求,满足培养素质高、能力强的应用型本科人才的需要。

工程强调知识的应用和综合,强调方案优缺点的比较并做出论证和合理应用。这就要求我们对应用型本科人才的培养需实施与之相配套的培养方案和培养模式,采用具有自身特点的教材。同时,避免重理论、轻实践、工程教育“学术化”的倾向;避免在工程实践能力的培养中,轻视学生个性及创新精神的培养;避免工程教育在实践中与社会经济、产业的发展脱节。为使我国应用型人才培养适应社会发展的新形势,我们必须开拓进取、努力改革。

组织编写本系列教材,有利于应用型人才培养所需要的、富有特色的本科教材的建设。本系列教材的编写原则如下。

1. 确保基础

在内容安排上,本系列教材确保学生掌握基本的理论基础,满足本科教学的基本要求。

2. 富有特色

围绕培养目标,以工程应用为背景,通过理论与实践相结合,构建应用型本科教育系列教材特色。在融会贯通本科教学内容的基础上,挑选最基本的内容、方法和典型应用,将有关技术进步的新成果、新应用纳入教学内容,妥善处理传统内容的继承与现代内容的引进;在保持本科教学基本体系的前提下,处理好与交叉学科的关系,并按新的教学系统重新组织;在注重理论与实践相结合的基础上,注入工程概念,包括质量、环境等诸多因素对工程的影响,突出特色、强化应用。

3. 精选编者,保证质量

参编院校根据编委会要求推荐了一批具有丰富工程实践经验和教学经验的教师参加编写工作。本系列教材的许多内容都是在优秀教案、讲义的基础上编写的,并由主编全文统稿,以确保教材质量。

本系列教材的编写得到了电子工业出版社的大力支持。他们为编好这套教材做了大量认真细致的工作,为教材的出版提供了许多有利条件,在此深表感谢!

编委会

序 言

随着世界经济一体化的进程,我国已成为世界最大的加工基地和制造基地,尤其是长江三角洲地区更为突出,已有近百家名列世界五百强的企业落户该地区,带动了该地区经济突飞猛进的发展,同时也为就业创造了广阔的前景。企事业单位对应用型本科人才的需求多了,但要求也提高了。这就对工程教育的发展提出了新的挑战,同时也提供了新的发展机遇。

在此形势下,国家教育部近年来批准组建了一批以培养应用型本科人才为宗旨的高等院校,同时举办了多次“应用型本科人才培养模式研讨会”,对应用型本科教育的办学思想和发展定位进行初步探讨。并于2002年在全国高等院校教学研究中心立项,成立了21世纪中国高等学校应用型人才培养体系的创新与实践课题组,有十几所应用型本科院校参加了课题组的研究,取得了多项研究成果,并于2004年结题验收。我们就是在这种形势下,组织了多所应用型本科院校编写本系列教材,以适应国家对工程教育的新要求,满足培养素质高、能力强的应用型本科人才的需要。

工程强调知识的应用和综合,强调方案优缺点的比较并做出论证和合理应用。这就要求我们对应用型本科人才的培养需实施与之相配套的培养方案和培养模式,采用具有自身特点的教材。同时,避免重理论、轻实践、工程教育“学术化”的倾向;避免在工程实践能力的培养中,轻视学生个性及创新精神的培养;避免工程教育在实践中与社会经济、产业的发展脱节。为使我国应用型人才培养适应社会发展的新形势,我们必须开拓进取、努力改革。

组织编写本系列教材,有利于应用型人才培养所需要的、富有特色的本科教材的建设。本系列教材的编写原则如下。

1. 确保基础

在内容安排上,本系列教材确保学生掌握基本的理论基础,满足本科教学的基本要求。

2. 富有特色

围绕培养目标,以工程应用为背景,通过理论与实践相结合,构建应用型本科教育系列教材特色。在融会贯通本科教学内容的基础上,挑选最基本的内容、方法和典型应用,将有关技术进步的新成果、新应用纳入教学内容,妥善处理传统内容的继承与现代内容的引进;在保持本科教学基本体系的前提下,处理好与交叉学科的关系,并按新的教学系统重新组织;在注重理论与实践相结合的基础上,注入工程概念,包括质量、环境等诸多因素对工程的影响,突出特色、强化应用。

3. 精选编者,保证质量

参编院校根据编委会要求推荐了一批具有丰富工程实践经验和教学经验的教师参加编写工作。本系列教材的许多内容都是在优秀教案、讲义的基础上编写的,并由主编全文统稿,以确保教材质量。

本系列教材的编写得到了电子工业出版社的大力支持。他们为编好这套教材做了大量认真细致的工作,为教材的出版提供了许多有利条件,在此深表感谢!

编委会

目 录

第 1 章 概述	(1)
1.1 过程控制的要求与任务	(1)
1.2 过程控制系统的组成与特点	(2)
1.2.1 过程控制系统的组成	(2)
1.2.2 过程控制系统的特点	(4)
1.3 过程控制系统的性能指标	(5)
1.3.1 单性能指标	(5)
1.3.2 综合性能指标	(6)
1.4 过程控制系统的设计	(7)
1.4.1 过程控制系统设计的基本步骤	(7)
1.4.2 确定控制变量与控制方案	(7)
1.4.3 过程控制系统硬件选择	(9)
1.5 过程控制的发展与趋势	(10)
1.5.1 过程控制装置的进展	(10)
1.5.2 过程控制策略的进展	(12)
本章小结	(12)
习题	(13)
第 2 章 被控过程的数学模型	(14)
2.1 过程模型概述	(14)
2.1.1 被控过程的动态特性	(14)
2.1.2 数学模型的表达形式与要求	(17)
2.1.3 建立过程数学模型的基本方法	(19)
2.2 机理法建模	(20)
2.2.1 单容对象的传递函数	(20)
2.2.2 多容对象的传递函数	(24)
2.3 测试法建模	(27)
2.3.1 对象特性的实验测定方法	(27)
2.3.2 测定动态特性的时域法	(28)
2.3.3 测定动态特性的频域法	(34)
2.4 利用 MATLAB 建立过程模型	(36)
本章小结	(40)
习题	(40)
第 3 章 执行器	(42)

3.1	气动调节阀的结构	(42)
3.1.1	气动执行机构	(43)
3.1.2	阀	(43)
3.1.3	阀门定位器	(44)
3.2	调节阀的流量系数	(45)
3.2.1	调节阀的流量方程	(45)
3.2.2	流量系数的定义	(46)
3.2.3	流量系数计算	(47)
3.3	调节阀结构特性和流量特性	(51)
3.3.1	调节阀的结构特性	(51)
3.3.2	调节阀的流量特性	(54)
3.3.3	调节阀的可调比	(57)
3.4	气动调节阀的选型	(59)
3.4.1	调节阀结构形式的选择	(59)
3.4.2	调节阀气开与气关形式的选择	(60)
3.4.3	调节阀流量特性的选择	(60)
3.4.4	调节阀口径的确定	(62)
3.5	利用 MATLAB 确定调节阀的口径	(68)
	本章小结	(74)
	习题	(74)
第 4 章	PID 控制原理	(76)
4.1	PID 控制的特点	(76)
4.2	比例控制 (P 控制)	(76)
4.2.1	比例控制的调节规律和比例带	(76)
4.2.2	比例控制的特点	(78)
4.2.3	比例带对控制过程的影响	(79)
4.3	比例积分控制 (PI 控制)	(80)
4.3.1	积分控制的调节规律	(80)
4.3.2	比例积分控制的调节规律	(82)
4.3.3	积分饱和现象与抗积分饱和的措施	(84)
4.4	比例积分微分控制 (PID 控制)	(86)
4.4.1	微分控制的调节规律	(86)
4.4.2	比例微分控制的调节规律	(87)
4.4.3	比例微分控制的特点	(88)
4.4.4	比例积分微分控制的调节规律	(89)
4.5	数字 PID 控制	(90)
4.5.1	基本的数字 PID 控制算法	(90)
4.5.2	改进的数字 PID 控制算法	(91)
4.6	利用 MATLAB 实现 PID 控制规律	(93)

(123) 本章小结	(97)
(124) 习题	(98)
第5章 简单控制系统	(99)
(125) 5.1 简单控制系统的分析	(99)
(126) 5.1.1 控制系统的工作过程	(99)
(127) 5.1.2 简单控制系统的组成	(100)
(128) 5.2 简单控制系统的设计	(101)
(129) 5.2.1 被控变量和操作变量的选择	(102)
(130) 5.2.2 测量变送装置的选择	(104)
(131) 5.2.3 控制器的选型	(106)
(132) 5.3 简单控制系统的整定	(110)
(133) 5.3.1 控制器参数整定的基本要求	(110)
(134) 5.3.2 PID 控制器参数的工程整定	(112)
(135) 5.3.3 PID 控制器参数的自整定	(119)
(136) 5.4 简单控制系统的投运	(122)
(137) 5.5 简单控制系统的故障与处理	(124)
(138) 5.6 利用 MATLAB 对简单控制系统进行仿真	(125)
(139) 5.6.1 利用 MATLAB 对 PID 控制器参数进行整定	(125)
(140) 5.6.2 利用 Simulink 对 PID 控制器参数进行自整定	(128)
(141) 本章小结	(131)
(142) 习题	(132)
第6章 串级控制系统	(133)
(143) 6.1 串级控制系统的基本概念	(133)
(144) 6.1.1 串级控制的提出	(133)
(145) 6.1.2 串级控制系统的组成	(135)
(146) 6.1.3 串级控制系统的工作过程	(136)
(147) 6.2 串级控制系统的分析	(138)
(148) 6.2.1 增强系统的抗干扰能力	(138)
(149) 6.2.2 改善对象的动态特性	(139)
(150) 6.2.3 对负荷变化有一定的自适应能力	(141)
(151) 6.3 串级控制系统的设计	(142)
(152) 6.3.1 副回路的选择	(142)
(153) 6.3.2 主、副回路工作频率的选择	(144)
(154) 6.3.3 主、副控制器的选型	(146)
(155) 6.4 串级控制系统的整定	(149)
(156) 6.4.1 逐步逼近法	(149)
(157) 6.4.2 两步整定法	(150)
(158) 6.4.3 一步整定法	(150)
(159) 6.5 串级控制系统的投运	(151)

6.6	利用 MATLAB 对串级控制系统进行仿真	(152)
	本章小结	(157)
	习题	(157)
第 7 章	补偿控制系统	(158)
7.1	补偿控制的原理	(158)
7.2	前馈控制系统	(159)
7.2.1	前馈控制的概念	(159)
7.2.2	前馈控制系统的结构	(160)
7.2.3	前馈控制系统的设计	(166)
7.2.4	前馈控制系统的整定	(170)
7.3	大迟延控制系统	(173)
7.3.1	大迟延系统的概述	(173)
7.3.2	大迟延控制系统的设计	(173)
7.4	利用 MATLAB 对补偿控制系统进行仿真	(179)
	本章小结	(182)
	习题	(183)
第 8 章	特殊控制系统	(184)
8.1	比值控制系统	(184)
8.1.1	比值控制的概念	(184)
8.1.2	比值控制系统的类型	(185)
8.1.3	比值控制系统的设计	(188)
8.1.4	控制器的选型和整定	(196)
8.2	均匀控制系统	(197)
8.2.1	均匀控制的概念	(197)
8.2.2	均匀控制系统的设计	(198)
8.2.3	均匀控制系统的整定	(201)
8.3	分程控制系统	(203)
8.3.1	分程控制的概念	(203)
8.3.2	分程控制系统的应用	(204)
8.3.3	分程控制系统的实施	(207)
8.4	选择性控制系统	(209)
8.4.1	选择性控制的概念	(209)
8.4.2	选择性控制系统的类型	(209)
8.4.3	控制器的选型和整定	(212)
8.5	利用 MATLAB 对特殊控制系统进行仿真	(214)
	本章小结	(217)
	习题	(217)
第 9 章	解耦控制系统	(219)
9.1	解耦控制的基本概念	(219)

9.1.1	控制回路间的耦合	(219)
9.1.2	被控对象的典型耦合结构	(220)
9.2	解耦控制系统的分析	(221)
9.2.1	耦合程度的分析	(221)
9.2.2	相对增益分析法	(222)
9.2.3	减少及消除耦合的方法	(228)
9.3	解耦控制系统的设计	(229)
9.3.1	前馈补偿解耦法	(230)
9.3.2	反馈解耦法	(232)
9.3.3	对角阵解耦法	(233)
9.3.4	单位阵解耦法	(234)
9.4	解耦控制系统的实施	(235)
9.4.1	解耦控制系统的稳定性	(236)
9.4.2	多变量控制系统的部分解耦	(236)
9.4.3	解耦控制系统的简化	(237)
9.5	利用 MATLAB 对解耦控制系统进行仿真	(237)
	本章小结	(241)
	习题	(242)
第 10 章	计算机过程控制系统	(244)
10.1	计算机过程控制系统简介	(244)
10.2	计算机过程控制系统的组成	(244)
10.3	计算机过程控制系统的类型	(246)
10.4	先进过程控制方法	(250)
	本章小结	(254)
	习题	(254)
附录 A	仪表位号	(255)
	参考文献	(257)

第1章 概述

1.1 过程控制的要求与任务

生产过程是指物料经过若干加工步骤而成为产品的过程。该过程中通常会发物理化学反应、生化反应、物质能量的转换与传递等，或者说生产过程表现为物流变化的过程。伴随物流变化的信息包括体现物流性质（物理特性和化学成分）的信息和操作条件（温度、压力、流量、液位或物位等）的信息。

生产过程的总目标，应该是在可能获得的原料和能源条件下，以最经济的途径将原物料加工成预期的合格产品。为了达到该目标，必须对生产过程进行监视与控制。

对生产过程所进行的控制，称为过程控制，它是自动控制学科的一个重要分支。过程控制一般是指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。它主要针对六大参数，即温度、压力、流量、液位（或物位）、成分和物性等参数的控制问题，它能覆盖许多工业部门，如石油、化工、冶金、炼焦、造纸、建材、轻工、纺织、陶瓷、食品及电力等，因而，过程控制在国民经济中占有极其重要的地位。

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、数字仪表或计算机等构成的控制总体，称为过程控制系统。

图 1-1 为转炉供氧量控制系统。转炉是炼钢工业生产过程中的—种重等要设备。熔融的铁水装入转炉后，通过氧枪供给—定的氧。其目的是使铁水中的碳氧化燃烧，以不断降低铁水中的含碳量。控制吹氧量和吹氧时间，可以获得不同品种的钢产品。由图 1-1 可见，从节流装置 1 采集到的氧气流量，送入流量变送器 FT，再经过开方器 2，其结果送到流量控制器 FC，流量控制器 FC 根据氧气流量的测量值与其设定值的偏差，按照—定的控制算法输出控制信号，去控制调节阀 3 的—开度，从而改变供氧量的大小，以满足生产工艺的要求。

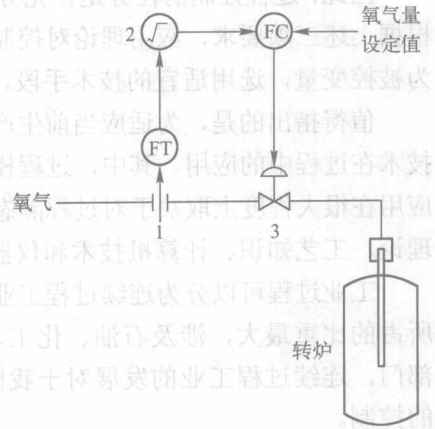


图 1-1 转炉供氧量控制系统图

通常，将系统中被控制的物理量称为被控变量，而被控变量所要求的理想值称为设定值或给定值。设定值是系统的输入变量，被控变量是系统的输出变量。

过程控制系统一般有如下两种运行状态：一种是稳态，此时系统没有受到任何外来干扰，同时设定值保持不变，因而被控变量也不会随时间变化，整个系统处于稳定平衡的工况。另一种是动态，当系统受到外来干扰的影响或者在改变了设定值后，原来的稳态遭到破坏，系统中各组成部分的输入/输出变量都相继发生变化，尤其是被控变量也将偏离原稳态值而随时间变化，这时就称系统处于动态。经过—段调整时间后，如果系统是稳定的，被控变量将会

重新达到新设定值或其附近，系统又恢复稳定平衡工况。这种从一个稳态到达另一个稳态的历程称为过渡过程。由于被控对象总是不时受到各种外来干扰的影响，设置控制系统的目的也正是为了克服这种情况，因此系统经常处于动态过程。显然，要评价一个过程控制系统的工作质量，只看稳态是不够的，还应该考核它在动态过程中被控变量随时间变化的情况。

工业生产对过程控制的要求是多方面的，最终可以归纳为安全性、稳定性和经济性。

(1) 安全性

在整个生产过程中，确保人身和设备安全是最重要和最基本的要求。在过程控制系统中通常采用越限报警、事故报警和连锁保护等措施来保证生产过程的安全性。另外，在线故障预测与诊断、容错控制等可用于进一步提高生产过程的安全性。

(2) 稳定性

稳定性指系统抑制外部干扰、保持生产过程长期稳定运行的能力。变化的（特别是恶劣的）工业运行环境、原料成分的变化、能源系统的波动等均有可能影响生产过程的稳定运行。在外部干扰下，过程控制系统应该使生产过程参数与状态产生的变化尽可能小，以消除或减小外部干扰可能造成的不良影响。

(3) 经济性

在满足以上两个基本要求的基础上，低成本高效益是过程控制的另一个目标。为了达到这个目标，不仅需要对过程控制系统进行优化设计，还需要管控一体化，即以经济效益为目标的整体优化。

因此，过程控制的任务是在充分了解、掌握生产过程的工艺流程和动静态特性的基础上，根据上述三项要求，应用理论对控制系统进行分析与综合，以生产过程中物流变化信息量为被控变量，选用适宜的技术手段，实现生产过程的控制目标。

值得指出的是，为适应当前生产对控制的要求愈来愈高的趋势，必须充分注意现代控制技术在过程中的应用。其中，过程模型化的研究起着举足轻重的作用，因为现代控制技术的应用在很大程度上取决于对过程静态和动态特性认识的深度。因此可以说，过程控制是控制理论、工艺知识、计算机技术和仪器仪表等知识相结合而构成的一门应用科学。

工业过程可以分为连续过程工业、离散过程工业和间隙过程工业。其中，连续过程工业所占的比重最大，涉及石油、化工、冶金、电力、轻工、纺织、制药、建材、食品等工业部门，连续过程工业的发展对于我国国民经济意义重大。过程控制主要是指连续过程工业的控制。

1.2 过程控制系统的组成与特点

1.2.1 过程控制系统的组成

在生产过程中有各种各样的控制系统，图 1-2 所示为几个简单控制系统带测控点的工艺流程图。

图 1-2 所示带测控点的工艺流程图，由于省略了仪表位号中的回路编号，故以下在不引起混淆的情况下，将其简称为系统图。

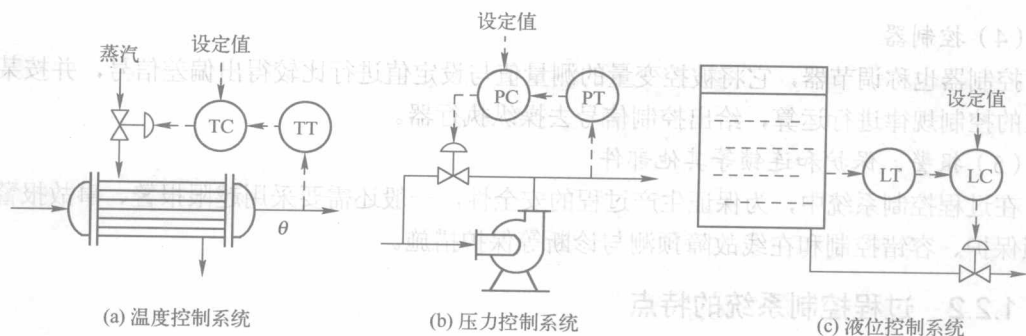


图 1-2 简单控制系统带测控点的工艺流程图

在这些控制系统中，对生产设备都有一个需要进行控制的过程变量，如温度、压力、液位等，这些需要进行控制的过程变量也称为被控变量。在系统工作时，被控变量常常偏离其所要求的理想值（设定值）。被控变量偏离设定值的原因是由于过程中存在干扰，如蒸汽压力、泵的转速、进料量的变化等。为了使这些被控变量与其设定值保持一致，需要有一种控制器，它将被控变量的测量值与设定值进行比较得出偏差信号，并按某种预定的控制规律进行运算，给出控制信号，用于改变某些变量，使得被控变量与其设定值相等。过程控制中用于调节的变量，如图 1-2 中的蒸汽流量、回流流量和出料流量等被称为操作变量或控制变量。在系统中，用于测量、变换和传送被控变量信号的仪表称为测量变送装置。用于实施控制命令的设备称为执行器。

由此可见，过程控制系统一般由被控过程（或称被控对象）、测量变送装置、执行器和控制器（或称调节器）等环节组成。

(1) 被控过程

被控过程也称被控对象，是指被控制的生产设备或装置。工业生产中的各种反应器、换热器、泵、塔器和压缩机及各种容器、储槽都是常见的被控对象，甚至一段管道也可以是一个被控对象。在复杂的生产设备中（如精馏塔、吸收塔等），一个设备上可能有几个控制系统，这时在确定被控对象时，就不一定是生产设备的整个装置，只有该装置的某一个与控制有关的相应部分才是某一个控制系统的被控对象。

(2) 测量变送装置

测量变送装置一般由测量元件和变送器组成。其作用是测量被控变量，并按一定算法将其转换为标准信号输出作为测量值，即把被控变量转化为其测量值。例如，用热电阻或热电偶测量温度，并将其测量信号用温度变送器转换为统一的气压信号（0.02~0.1MPa）或直流电流信号（0~10mA 或 4~20mA）。

(3) 执行器

在过程控制系统中，常用的执行器是调节阀，其中以气动薄膜调节阀最为多用。执行器接收控制器送来的控制信号，直接改变操纵变量；操纵变量是被控对象的一个输入变量，通过操作这个变量可克服扰动对被控变量的影响，操纵变量通常是执行器控制的某一工艺变量。

在过程控制系统中，往往把被控对象、测量变送装置和执行器三部分串联在一起统称为广义被控对象。

(4) 控制器

控制器也称调节器，它将被控变量的测量值与设定值进行比较得出偏差信号，并按某种预定的控制规律进行运算，给出控制信号去操纵执行器。

(5) 报警、保护和连锁等其他部件

在过程控制系统中，为保证生产过程的安全性，一般还需要采用越限报警、事故报警、连锁保护、容错控制和在线故障预测与诊断等保护措施。

1.2.2 过程控制系统的特点

1. 工业生产的特点

由于过程控制主要是指连续工业生产过程的控制，故工业生产的特点主要指连续工业生产的特点。

工业生产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、时变性以及非线性等因素。因此，过程控制的难度是显而易见的，要解决过程控制问题必须采用有针对性的特殊方法与途径。工业生产常常处于恶劣的生产环境中，同时常常要求苛刻的生产条件，如高温、高压、低温、真空、易燃、易爆或有毒等。因此，生产设备与人身的安全性特别重要。

由连续生产的特征可知，工业生产更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。

2. 过程控制系统的特点

(1) 被控过程的多样性

工业生产涉及各种工业部门，其物料加工成的产品是多样的。同时，生产工艺各不相同，如石油化工过程、冶金工业中的冶炼过程、核工业中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（包括被控变量）是多样的，明显地区别于运动控制系统。

(2) 控制方案的多样性

由工业生产的特点及被控过程的多样性决定了过程控制系统的控制方案必然是多样的。这种多样性包含系统硬件组成和控制算法及软件设计。对于图 1-1 和图 1-2 所示的简单过程控制系统，早期的控制器采用的是模拟调节仪表，如果将控制器、执行器和检测元件与变送器统称为常规检测控制仪表，则一个简单的过程控制系统可以被认为是由被控过程和常规检测控制仪表两部分组成，这样的系统也称为常规仪表过程控制系统。随着现代工业生产的发展，工业过程越来越复杂，对过程控制的要求也越来越高，传统的模拟式过程检测控制仪表已经不能满足控制要求，因而采用计算机作为控制器组成计算机过程控制系统。从控制方法的角度看，有单变量过程控制系统，也有多变量过程控制系统。同时，控制算法多种多样，有 PID 控制、复杂控制，也有包括智能控制的先进控制方法等。

(3) 被控过程属慢过程，且多属参数控制

连续工业生产大惯性和大迟延的特点决定了被控过程为慢过程。被控过程是物流变化的过程，伴随物流变化的信息（物性、成分、温度、压力、流量、液位或物位）表征为被

控过程状态的参数,也是过程控制系统的被控变量。

(4) 定值控制是过程控制的主要形式

在多数工业生产过程中,被控变量的设定值为一个定值,定值控制的主要任务在于如何减小或消除外界干扰,使被控变量尽量保持接近或等于设定值,使生产稳定。

(5) 过程控制系统有多种分类方法

① 按被控参数分类:可分为温度过程控制系统、压力过程控制系统、流量过程控制系统、液位或物位过程控制系统、物性过程控制系统和成分过程控制系统等。

② 按被控变量数分类:可分为单变量过程控制系统和多变量过程控制系统。

③ 按设定值分类:可分为定值过程控制系统、随动(伺服)过程控制系统和程序过程控制系统。

④ 按参数性质分类:可分为集中参数过程控制系统和分布参数过程控制系统。

⑤ 按控制算法分类:可分为简单过程控制系统、复杂过程控制系统和先进或高级过程控制系统。

⑥ 按控制器形式分类:可分为常规仪表过程控制系统和计算机过程控制系统。

1.3 过程控制系统的性能指标

工业生产过程对控制的要求,可以概括为准确性、稳定性和快速性。另外,定值控制系统和随动(伺服)控制系统对控制的要求既有共同点,也有不同点。定值控制系统在于恒定,即要求克服干扰,使系统的被控参数能稳、准、快地保持接近或等于设定值。而随动(伺服)控制系统的主要目标是跟踪,即稳、准、快地跟踪设定值。根据过程控制的特点,主要讨论定值检测的性能指标。图 1-3 为一个过程控制系统的阶跃响应曲线。

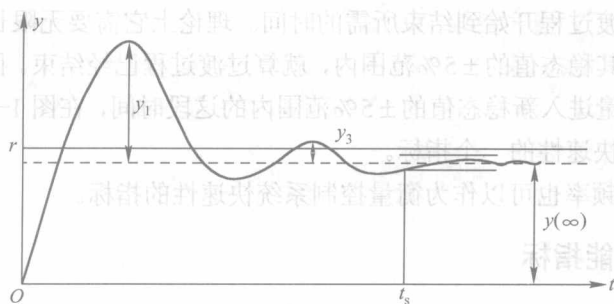


图 1-3 过程控制系统的阶跃响应曲线

1.3.1 单项性能指标

1. 衰减比和衰减率

衰减比是衡量一个振荡过程的衰减程度的指标,它等于系统阶跃响应曲线两个相邻的同向波峰值之比,如图 1-3 所示,即衰减比可表示为

$$n = \frac{y_1}{y_3} \quad (1-1)$$

衡量振荡过程衰减程度的另一种指标是衰减率，它是指每经过一个周期以后，波动幅度衰减的百分数，即衰减率可表示为

$$\psi = \frac{y_1 - y_3}{y_1} \times 100\% \quad (1-2)$$

衰减比与衰减率两者有简单的对应关系，如衰减比 n 为 4:1 就相当于衰减率 $\psi = 0.75$ 。为了保证控制系统有一定的稳定裕度，在过程控制中一般要求衰减比 n 为 4:1~10:1，这相当于衰减率 ψ 为 75%~90%。这样，大约经过两个周期以后就趋于稳态，看不出振荡了。

2. 最大动态偏差和超调量

最大动态偏差是指设定值阶跃响应中，过渡过程开始后第一个波峰超过其新稳态值的幅度，如图 1-3 中的 y_1 。

最大动态偏差占被控变量稳态变化幅度的百分数称为超调量。对于二阶振荡过程而言，超调量与衰减率有严格的对应关系，即超调量可表示为

$$M = \frac{y_1}{y(\infty)} \times 100\% \quad (1-3)$$

一般来说，图 1-3 所示的阶跃响应并不是真正的二阶振荡过程，因此超调量只能近似地反映过渡过程的衰减程度。最大动态偏差更能直接反映在被控变量的生产运行记录曲线上，因此它是控制系统动态准确性的一种衡量指标。

3. 残余偏差

残余偏差是指过渡过程结束后，被控变量新的稳态值 $y(\infty)$ 与新设定值 r 之间的差值，它是控制系统稳态准确性的衡量指标。

4. 调节时间和振荡频率

调节时间是从过渡过程开始到结束所需的时间。理论上它需要无限长的时间，但一般认为当被控变量已进入其稳态值的 $\pm 5\%$ 范围内，就算过渡过程已经结束。因此，调节时间就是从扰动开始到被控变量进入新稳态值的 $\pm 5\%$ 范围内的这段时间，在图 1-3 中以 t_s 表示。调节时间是衡量控制系统快速性的一个指标。

过渡过程的振荡频率也可以作为衡量控制系统快速性的指标。

1.3.2 综合性能指标

人们还时常常用误差积分指标衡量控制系统性能的优良程度。它是过渡过程中被控变量偏离其新稳态值的误差沿时间轴的积分。无论是误差幅度大或是时间拖长都会使误差积分增大，因此它是一类综合指标，希望它越小越好。误差积分可以有各种不同的形式，常用的有以下几种。

(1) 误差积分 (IE)

$$IE = \int_0^{\infty} e(t) dt \quad (1-4)$$

(2) 绝对误差积分 (IAE)

$$IAE = \int_0^{\infty} |e(t)| dt \quad (1-5)$$

误差(3)平方误差积分(ISE)

$$ISE = \int_0^{\infty} e^2(t) dt \quad (1-6)$$

误差(4)时间与绝对误差乘积积分(ITAE)

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

以上各式中,误差 $e(t) = y(t) - y(\infty)$, 见图 1-3。

采用不同的积分公式意味着估计整个过渡过程优良程度时的侧重点不同。例如, ISE 着重于抑制过渡过程中的大误差, 而 ITAE 则着重惩罚过渡过程拖得过长。人们可以根据生产过程的要求, 特别是结合经济效益的考虑加以选用。

误差积分指标有一个缺点, 它们并不能都保证控制系统具有合适的衰减率, 而后者则是人们首先关注的。特别是, 一个等幅振荡过程是人们不能接受的, 然而它的 IE 却等于零, 显然极不合理。为此, 通常的做法是首先规定衰减率的要求。在这个前提下, 系统仍然可能有一些灵活的余地, 这时再考虑使误差积分为最小。

1.4 过程控制系统的设计

过程控制系统的设计是自动控制工程设计的一个重要环节, 设计的正确与否, 直接影响到工程能否投入正常运行。因此要求过程控制专业人员必须根据生产过程的特点、工艺对象的特性和生产操作的规律, 只有正确运用过程控制理论, 合理选用自动化技术工具, 才能设计出技术先进、经济合理、符合生产要求的控制系统。

1.4.1 过程控制系统设计的基本步骤

过程控制的目标与任务是通过过程控制系统的设计与实现来完成的。过程控制系统的设计作为工程设计的一个环节, 其具体设计步骤为:

- (1) 根据工艺要求和控制目标确定系统变量;
- (2) 建立数学模型;
- (3) 确定控制方案;
- (4) 选择硬件设备;
- (5) 选择控制算法, 进行控制器设计;
- (6) 软件编程。

系统设计完成后, 先进行设备安装、调试与整定, 再投入运行。

1.4.2 确定控制变量与控制方案

1. 确定控制目标

前面所述的过程控制目标定性地说明了过程控制的一般目标, 即所设计出的系统需确保过程的稳定性、安全性和经济性。

控制系统的设计是为工艺生产服务的, 因此它与工艺流程设计、工艺设备设计及设备选