



普通高等教育“十一五”国家级规划教材
化学核心教程立体化教材系列

物理化学核心教程

(第三版)

沈文霞 王喜章 许波连 编

南京大学化学化工学院



科学出版社

过程控制系统与实践

丁永生 韩芳 任正云 陈磊 等 编著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书以过程控制系统为研究对象,阐述了过程控制系统的主要设计方法,同时结合编者从事的实际课题,对典型流程工业的生产过程控制系统进行案例分析。全书共8章:第1章为绪论;第2章为工业过程的建模方法;第3章为常规过程控制策略;第4章为简单控制系统的分析与设计;第5章为常用复杂控制系统;第6章为实现特殊工艺要求的复杂控制系统;第7章为先进控制技术;第8章为过程控制系统工程实践,包括化纤过程控制系统应用、单晶硅生长炉过程控制系统应用等。

本书可以作为普通高等院校自动化类专业本科生及研究生“过程控制系统”课程的教材和教学参考书,也可作为有关工程技术人员的自学教材和参考资料。

图书在版编目(CIP)数据

过程控制系统与实践 / 丁永生等编著. —北京:科学出版社,2016.8
ISBN 978-7-03-049533-4

I. ①过… II. ①丁… III. ①过程控制-研究 IV. ①TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 187025 号

责任编辑:张海娜 高慧元 / 责任校对:桂伟利

责任印制:张 倩 / 封面设计:蓝正设计

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

新科印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016年8月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2016年8月第一次印刷 印张:17 1/4

字数:345 000

定价:95.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

本书是控制理论、生产工艺、计算机技术和仪器仪表知识等相结合的一门综合性教材。随着计算机、控制、传感检测等相关技术的高速发展,过程控制技术这一自动化领域内的重要分支也在不断地前进与发展。国际上的很多学者在此领域内作出了杰出的成就,并成功运用于电力、冶金、轻工、纺织等连续型生产过程系统。由于过程控制的理论与应用结合紧密、内容较广、实践性较强,从而造成学生在学习的过程中遇到了很多的实际困难。因此,本书课程的教学内容、理念、方法和手段都必须随着新应用和新技术的出现而进行改革,以使学生更好地适应社会发展的需要,真正实现实践型与创新型人才的培养。

基于上述考虑,本书以过程控制系统为研究对象,积极跟踪过程控制领域内最新研究成果,扩充先进控制理论应用的成果,并分析控制系统方案。主要包括:工业过程的建模方法、控制器的控制规律、简单控制系统的分析与设计、常用复杂控制系统(串级控制系统、前馈控制系统、大滞后过程控制系统等)、实现特殊工艺要求的复杂控制系统(比值控制、均匀控制、分程控制、选择控制、解耦控制等)和先进控制技术(自适应控制、预测控制、模糊控制、神经网络控制等)等。同时结合编者的实际工程研究课题,对典型流程工业的生产过程进行案例分析,如化纤生产过程控制系统、单晶硅生长炉过程控制系统等。

本书的特点是理论与实际相结合,基本理论与新技术并重,内容切合信息时代的需要,并力求深入浅出,有很多工业过程控制的应用案例,便于学生学习与理解。全书内容丰富,系统性和先进性都比较突出。

感谢东华大学提供的工作条件,以及各位同仁对我们工作的一贯支持,使我们能顺利地完成本书的编写工作,尤其要感谢徐楠、黄丽、韩韬等博士生和周凯、赵然、陈贝贝、程功、李峰、毛祎蒙、赵军、刘妍、鲍磊、赵润喆、朱欣萌、沈冬梅、侍倩、李彩云、毕云松、王伟凯、张广磊、王艺楠等硕士生为本书的编写和校对所作出的贡献。

由于本书内容涉及面广,编者学识有限,书中的有些观点和提法难免有不妥之处,恳请广大读者给予批评指正。

作 者
2016 年 4 月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 过程控制系统的发展简史	1
1.2 过程控制系统组成及特点	1
1.2.1 过程控制系统组成	1
1.2.2 过程控制系统特点	3
1.3 过程控制系统的分类	4
1.4 过程控制系统的性能指标	5
1.5 过程控制系统设计	6
1.6 过程控制策略与算法的进展	7
思考题与习题	8
第 2 章 过程控制系统建模方法	9
2.1 过程模型概念及其建模方法	9
2.1.1 概述	9
2.1.2 建模方法	10
2.1.3 机理建模方法	11
2.2 过程机理建模方法	14
2.2.1 自衡过程与非自衡过程	14
2.2.2 单容过程模型	14
2.2.3 单容过程模型仿真	17
2.2.4 多容过程模型	18
2.2.5 多容过程模型仿真	23
2.3 测试建模方法	24
2.3.1 对象特性的试验测定方法	25
2.3.2 测定动态特性的时域法	25
2.3.3 测量动态特性的频域法	30
2.3.4 测量动态特性的统计相关法	31

2.3.5 最小二乘法	35
思考题与习题	37
第3章 PID 常规过程控制规律	39
3.1 PID 控制器概述	39
3.2 比例控制	40
3.2.1 比例控制规律	40
3.2.2 控制器的正作用和反作用	41
3.2.3 比例增益对闭环系统过渡过程的影响	41
3.3 积分控制与比例积分控制	43
3.3.1 积分控制	44
3.3.2 比例积分控制	45
3.4 微分控制与比例微分控制	48
3.4.1 微分控制	49
3.4.2 比例微分控制	50
3.5 比例积分微分控制	51
3.6 离散比例积分微分控制	53
3.6.1 离散比例积分微分控制算法	53
3.6.2 离散比例积分微分控制算法的改进	54
3.7 PID 调节器参数的工程整定	55
3.7.1 PID 参数的工程整定方法	55
3.7.2 PID 参数的自整定方法	61
思考题与习题	62
第4章 简单过程控制系统的分析与设计	64
4.1 简单过程控制系统的结构组成	64
4.2 简单过程控制系统的分析	66
4.2.1 被控变量的选择	67
4.2.2 对象特性对控制质量的影响及操纵变量的选择	67
4.2.3 调节阀的选择	73
4.2.4 控制器控制规律及控制器作用方向的选择	79
4.3 简单控制系统的投运	82
4.3.1 投运前的准备工作	82
4.3.2 系统投运的过程	82

4.4 简单控制系统设计举例	83
4.4.1 喷雾式干燥设备控制系统设计	83
4.4.2 贮槽液位控制系统设计	86
思考题与习题	87
第5章 常用复杂控制系统	89
5.1 串级控制系统	89
5.1.1 串级控制系统基本概念	89
5.1.2 串级控制系统组成	91
5.1.3 串级控制系统特点	92
5.1.4 串级控制系统设计	96
5.1.5 串级控制系统参数整定	99
5.1.6 串级控制系统仿真实例	101
5.2 前馈控制系统	107
5.2.1 前馈控制系统基本概念	107
5.2.2 前馈控制系统基本结构	109
5.3 大滞后过程控制系统	113
5.3.1 常规控制方案	113
5.3.2 Smith 预估补偿控制方案	115
5.3.3 采样控制方案	116
5.4 解耦控制系统	117
5.4.1 系统的关联分析	118
5.4.2 相对增益矩阵	119
5.4.3 减少与解除耦合的方法	124
5.4.4 解耦控制系统设计	126
思考题与习题	130
第6章 实现特殊工艺要求的复杂控制系统	131
6.1 比值控制系统	131
6.1.1 基本概念	131
6.1.2 比值控制方案及其分析	132
6.1.3 比值控制系统设计	135
6.1.4 比值控制系统的实施	136
6.1.5 比值控制系统的参数整定和投运	140

6.1.6 注意的问题	141
6.1.7 比值控制系统的工业应用实例	141
6.1.8 比值控制系统的 MATLAB/Simulink 仿真	142
6.2 均匀控制系统	146
6.2.1 基本原理	146
6.2.2 控制方案	146
6.2.3 系统整定	149
6.3 分程控制系统	150
6.3.1 基本原理	150
6.3.2 控制方案	151
6.3.3 系统设计	152
6.3.4 分程控制系统的工业应用	153
6.4 选择性控制系统	157
6.4.1 基本概念	157
6.4.2 控制方案	158
6.4.3 系统设计	159
6.4.4 选择性控制系统的工业应用实例	160
6.5 阀位控制系统	161
6.5.1 基本原理	161
6.5.2 系统设计	162
6.5.3 阀位控制系统的工业应用实例	164
思考题与习题	165
第7章 先进控制技术	169
7.1 自适应控制	169
7.1.1 增益可变自适应控制系统	169
7.1.2 模型参考自适应控制系统	170
7.1.3 自校正控制系统	179
7.2 预测控制	182
7.2.1 预测控制的基本原理	182
7.2.2 预测控制算法	184
7.2.3 动态矩阵算法 MATLAB 仿真	191
7.3 模糊控制	203

7.3.1 模糊控制系统的基本结构	204
7.3.2 模糊 PID 控制	207
7.3.3 模糊 PID 控制的 MATLAB/Simulink 仿真	208
7.3.4 模糊控制在纺织工程中的应用	211
7.4 神经网络控制	216
7.4.1 神经网络的基本原理	217
7.4.2 神经网络控制的结构	220
7.4.3 碳纤维生产过程的神经网络性能预测	223
7.4.4 基于神经网络的故障监测和诊断	228
思考题与习题	233
第 8 章 过程控制系统工程实践	234
8.1 化纤过程控制系统应用	234
8.1.1 化纤生产工艺流程及其过程控制系统	234
8.1.2 干喷湿纺法纺丝过程的浓度-温度-液位解耦控制	236
8.1.3 聚丙烯腈纤维多级牵伸过程协同控制	242
8.2 直拉式单晶硅生长炉过程控制系统应用	248
8.2.1 直拉式单晶硅生长炉工艺流程及其控制目标	248
8.2.2 直拉式单晶硅生长炉过程控制系统	250
8.2.3 直拉式单晶硅生长炉关键技术	253
8.2.4 直拉式单晶硅生长炉具体方案	256
思考题与习题	262
参考文献	263

第 1 章 绪 论

1.1 过程控制系统的发展简史

在石油、化工、化纤、冶金、电力、轻工和建材等工业生产中,连续的或按一定程序周期进行的生产过程的自动控制称为生产过程自动化。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,是工业现代化的标志。

过程控制是指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。过程控制系统可以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。随着工业生产规模走向大型化、复杂化、精细化、批量化,常规仪表过程控制系统已很难达到生产和管理的要求,所以计算机过程控制系统应运而生,这是近几十年发展起来的以计算机为核心的控制系统。

过程控制在石油、化工、电力、冶金等工业生产中有广泛的应用。20 世纪 50 年代,过程控制主要用于使生产过程中的一些参量保持不变,从而保证产量和质量稳定。60 年代,随着各种组合仪表和巡回检测装置的出现,过程控制已开始过渡到集中监视、操作和控制。70 年代,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。80 年代至现在,出现了过程控制的各种先进控制方法和网络控制系统。

1.2 过程控制系统组成及特点

1.2.1 过程控制系统组成

以表征生产过程的参数为被控制量,使之接近给定值或保持在给定范围内,是过程控制系统的主要任务。这里“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。

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,实现工业生产过程自动化。

过程控制系统的基本结构一般可用图 1-1 表示。

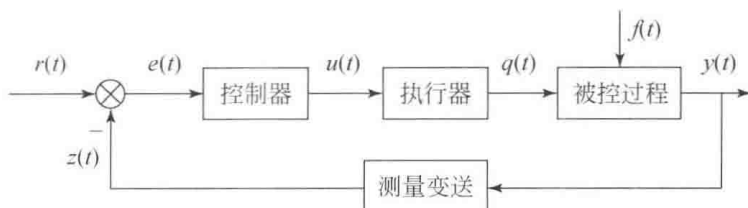


图 1-1 过程控制系统的基本结构

图 1-1 中各变量分别为被控变量 $y(t)$ 、控制(操纵)变量 $q(t)$ 、扰动量 $f(t)$ 、给定值 $r(t)$ 、反馈值 $z(t)$ 、偏差 $e(t)$ 和控制作用 $u(t)$ 。

图 1-2 所示几个简单过程控制系统的实例。图中需要控制的变量,如温度、压力、液位、流量等,称为被控变量。为了使被控变量与希望的设定值保持一致,那些

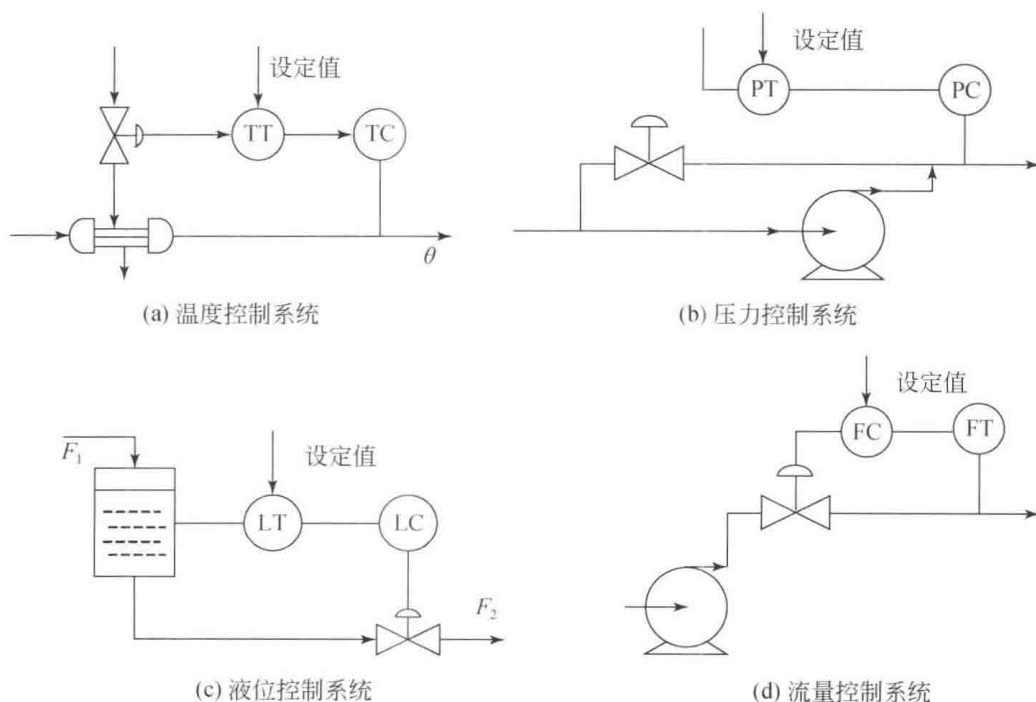


图 1-2 简单控制系统实例

用于调节的变量,如蒸汽流量、回流流量和出料流量等,称为操纵变量或操作变量。被控变量偏离设定值的原因是过程中存在扰动,如蒸汽压力、泵的转速、进料量的变化等。

过程控制系统工作的基本方式是,检测元件和变送器将被控变量检测出来并转换为标准信号,当系统受到扰动影响时,检测信号与设定值之间就有了偏差,控制器(或调节器)根据系统输出反馈值与设定值的偏差,按照一定的控制算法输出控制量,驱动执行机构(如调节阀)改变操纵变量,使被控变量恢复到设定值。可见,简单控制系统由被控过程(控制对象)、测量变送单元、控制器和执行器(调节阀)组成。

测量变送单元用于检测被控变量,并将检测到的信号转换为标准信号输出,如热电阻、热电偶等温度变送器、压力变送器、液位变送器、流量变送器等。

控制器用于将检测变送单元的输出信号与设定值信号进行比较,按一定的控制规律对其偏差信号进行计算,运算结果输出到执行器。控制器可以采用模拟仪表的控制器,或由微处理器组成的数字控制器,如用 DCS 中的控制功能模块等实现。

调节阀是控制系统环路的最终元件,直接用于控制操纵变量变化。调节阀接收控制器的输出信号,改变操纵量。调节阀可以是气动薄膜调节阀、带电气阀门定位器的电动调节阀等,也可用变频调速电动机等实现。

图 1-2 中,TT、PT、LT 和 FT 分别表示温度、压力、液位和流量变送器,TC、PC、LC 和 FC 表示相应的控制器。用这些符号表示的过程控制系统结构图称为系统的工艺流程图。

1.2.2 过程控制系统特点

生产过程的自动控制,一般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。被控参数不但受内、外界各种条件的影响,而且各参数之间也会相互影响,这就给对某些参数进行自动控制增加了复杂性和困难性。此外,过程控制还有如下一些特点:

(1)被控对象的多样性。对生产过程进行有效的控制,首先得认识被控对象的行为特征,并用数学模型给以表征,这是对象特性的辨识。被控对象多样性这一特点,给辨识对象特性带来一定困难。

(2)被控对象存在滞后。由于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,惯性也大。在热工生产过程中,内部介质的流动和热量转移都存在一

定的阻力,因此对象一般均存在滞后性。

由自动控制理论可知,如系统中某一环节具有较大的滞后特性,将给系统的稳定性和动态质量指标带来不利的影响,增加控制的难度。

(3)被控对象一般具有非线性特点。当被控对象具有的非线性特性较明显而不能忽略不计时,系统为非线性系统,必须用非线性理论来设计控制系统,设计的难度较高。若将具有明显非线性特性的被控对象经线性化处理后近似成线性对象,用线性理论来设计控制系统,由于被控对象的动态特性有明显的差别,难以达到理想的控制目的。

(4)控制系统比较复杂。控制系统的复杂性表现之一是其运行现场具有较多的干扰因素。基于生产安全的考虑,应使控制系统具有很高的可靠性。但是基于以上特点,要完全通过理论计算进行系统设计与控制器的参数整定至今仍存在相当的困难,一般是通过理论计算与现场调整的方法,达到过程控制的目的。

1.3 过程控制系统的分类

按系统的结构特点,过程控制系统可分为:

(1)反馈控制系统。偏差值是控制的依据,最后达到减小或消除偏差的目的。反馈信号可能有多个,从而可以构成多回路控制系统(如串级控制系统)。

(2)前馈控制系统。扰动量的大小是控制的依据,控制“及时”。它属于开环控制系统,在实际生产中不能单独采用。

(3)闭环与开环控制系统。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。开环控制系统不能自动地“察觉”被控参数的变化情况,也不能判断控制参数的校正作用是否适合实际需要。闭环控制系统在过程控制中使用最为普遍。

按给定值信号的特点,过程控制系统可分为:

(1)定值控制系统。定值控制系统是工业生产过程中应用最多的一种过程控制系统。在运行时,系统被控量(温度、压力、流量、液位、成分等)的给定值是固定不变的,有时在规定的小范围附近不变。

(2)随动控制系统。随动控制系统是一种被控量的给定值随时间任意变化的控制系统。如在锅炉燃烧控制系统中,要求空气量随燃料量的变化而变化,以保证燃烧的经济性。它的主要作用是克服一切扰动,使被控量随时跟踪给定值。一般意义上的随动控制系统是指位置随动系统,如火炮、导弹的位置跟踪等。

1.4 过程控制系统的性能指标

控制系统的性能指标应根据生产工艺过程的实际需要来确定,不能不切实际地提出过高的控制性能指标要求。评价系统控制性能的好坏通常从稳定性、快速性和准确性三个方面来进行。

分析系统性能指标通常采用阶跃响应性能指标,系统工程整定时采用偏差积分性能指标。

系统性能指标主要包括以下几个方面:

(1)稳态误差,即余差。描述系统稳态特性的唯一指标,反映控制的准确性。指系统过渡过程终了时给定值与被控参数稳态值之差。阶跃扰动作用下控制系统过渡过程曲线如图 1-3 所示。一般要求稳态误差为零或越小越好,但不是所有的控制系统对余差都有很高的要求,如一般贮槽的液位控制,往往允许液位在一定范围内变化。

(2)静态指标与动态指标。生产过程中干扰无时不在,控制系统时时刻刻都处在一种频繁的、不间断的动态调节过程中。所以,在过程控制中,了解或研究控制系统的动态比其静态更为重要、更有意义。常用的动态指标有衰减比、超调量、过渡过程时间等。

①衰减比。衡量系统过渡过程稳定性的一个动态指标,它的定义是振荡过程中第一个波的振幅与同方向第一个波的振幅之比,如图 1-4 中的 B_1/B_2 。一般取衰减比为 $4:1 \sim 10:1$,其中 $4:1$ 衰减比常作为评价过渡过程动态性能的一个理想指标。

②最大动态偏差或超调量 σ 。 σ 是描述被控变量偏离设定值最大程度的物理量,是衡量过渡过程稳定性的一个动态指标。对于定值控制系统,过渡过程的最大动态偏差是指被控变量第一个波的峰值。在随动控制系统中,通常采用超调量来表示被控变量偏离设定值的程度,其定义是第一个波的峰值与最终稳态值之差。一般超调量以百分数给出。

③过渡过程时间 t_s 。 t_s 指系统从受扰动作用时起,直到被控参数进入新的稳态值 $\pm 5\%$ (或 $\pm 2\%$) 的范围内所经历的时间,反映控制的快速性。要求 σ 、 t_s 应越小越好。

性能指标之间的关系有些是相互矛盾的(如超调量与过渡过程时间)。对于不同的控制系统,这些性能指标各有其重要性。应根据工艺生产的具体要求,分清主

次, 统筹兼顾, 保证优先满足主要的品质指标要求。

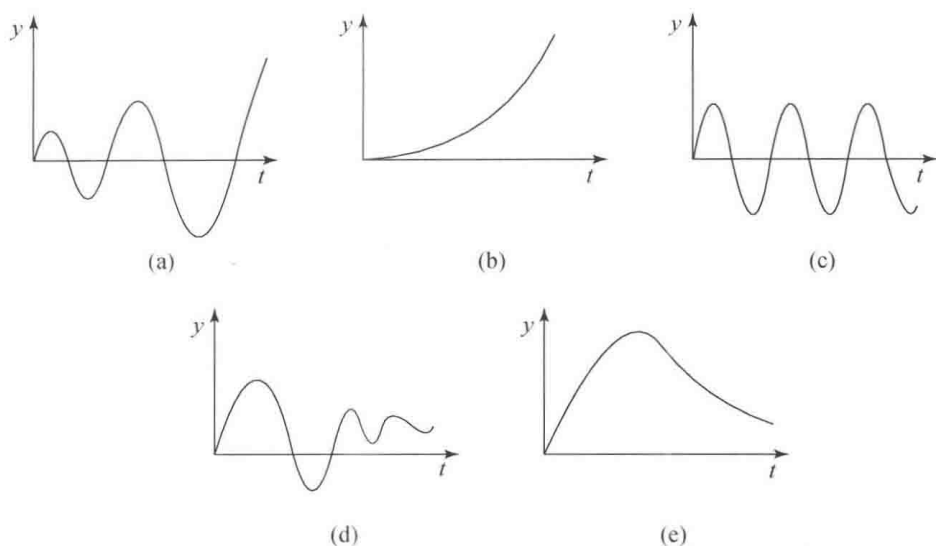


图 1-3 阶跃扰动作用下控制系统过渡过程曲线

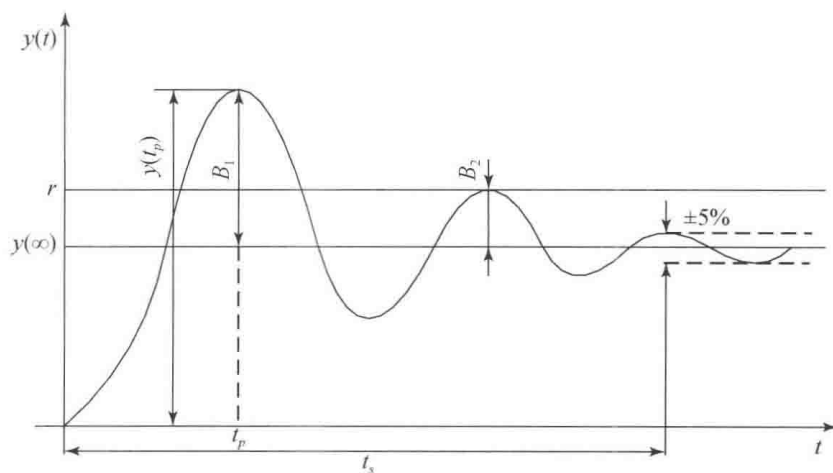


图 1-4 给定值阶跃变化时过渡过程的典型曲线

1.5 过程控制系统设计

工业过程自动化的目标应该是使生产过程达到安全、平稳、优质、高效(高产、低耗)。作为自动化的初级阶段能够达到的目标主要是使生产过程安全(仅限于超限报警和联锁)与平稳地进行。

要实现过程自动控制,首先要对整个工业生产过程的物料流、能源流和生产过程中的有关状态(如温度、压力、流量、物位、成分等)进行准确的测量和计量。根据测量到数据和信息,用生产过程工艺和控制理论的知识管理、控制该生产过程。

一个完整的过程控制系统设计,应包括方案设计、工程设计、工程安装、仪表调校以及控制器参数整定等主要内容。控制方案设计和控制器参数整定则是系统设计中的两个核心内容。由于工业生产过程各种各样而且非常复杂,因此,在设计工业生产过程控制系统时,必须花大量的时间和精力了解该工业生产过程的基本原理、操作过程和过程特性,这是设计和实现一个工业生产过程控制系统的首要条件。这就要求从事过程控制的技术人员必须与工艺人员充分交流。

控制方案设计的基本原则包括合理选择被控参数和控制参数、被控参数的测量变送、控制规律的选取以及执行机构的选择等。

1.6 过程控制策略与算法的进展

几十年来,过程控制策略与算法出现了三种类型:简单控制、复杂控制与先进控制。通常将单回路 PID 控制称为简单控制,它一直是过程控制的主要手段。PID 控制以经典控制理论为基础,主要用频域方法对控制系统进行分析与综合。目前,PID 控制仍然得到广泛应用。

从 20 世纪 50 年代开始,过程控制界逐渐发展了串级控制、比值控制、前馈控制、均匀控制和 Smith 预估控制等控制策略与算法,称为复杂控制。它们在很大程度上,满足了复杂过程工业的一些特殊控制要求。但它们仍然是以经典控制理论为基础,只是在结构与应用上各有特色,而且目前仍在继续改进与发展。

20 世纪 70 年代中后期,出现了以 DCS 和 PLC 为代表的新型计算机控制装置,为过程控制提供了强有力的硬件与软件平台。

从 20 世纪 80 年代开始,在现代控制理论和人工智能发展的理论基础上,针对工业过程控制本身的非线性、时变性、耦合性和不确定性等特性,提出了许多行之有效的解决方法,如解耦控制、推断控制、预测控制、模糊控制、自适应控制、人工神经网络控制等,常统称为先进过程控制。近十年来,以专家系统、模糊逻辑、神经网络、遗传算法为主要方法的基于知识的智能处理方法已经成为过程控制的一种重要技术。先进过程控制方法可以有效地解决那些采用常规控制效果差,甚至无法控制的复杂工业过程的控制问题。

实践证明,先进过程控制方法能取得更高的控制品质和更大的经济效益,具有