

过程控制工程 及仿真

——基于MATLAB/Simulink

郭阳宽 王正林 编著

- ◀ Simulink与过程控制完美结合
- ◀ 经典实例，分步骤手把手教会
- ◀ 仿真程序、电子教案一应俱全



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

http://www.phei.com.cn



MATLAB
精品丛书

过程控制工程 及仿真

——基于MATLAB/Simulink

郭阳宽 王正林 编著

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书以仿真应用为中心,系统、详细地讲述了过程控制系统的仿真,并结合 MATLAB/Simulink 仿真工具的应用,通过大量经典的仿真实例,全面讲述过程控制系统的结构、原理、设计和参数整定等知识。

全书分为基础篇、实战篇和综合篇。基础篇包括过程控制及仿真概述、Simulink 仿真基础、Simulink 高级仿真技术,以及过程控制系统建模;实战篇包括 PID 控制、串级控制、比值控制、前馈控制、纯滞后和解耦控制系统;综合篇包括典型过程控制系统及仿真。

本书的特点是理论与仿真紧密结合,用仿真实例说话,通过仿真来加深对过程控制理论的理解,帮助读者掌握过程系统的分析、设计与整定等技术,切实缩短书本知识与实际应用的距离。

本书可作为自动化、信息、机电、测控、化学工程、环境工程、生物工程等专业的教材或参考书,也可供从事过程控制工程的人使用,对从事过程控制应用研究的研究生和研究人员也很有参考价值。

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

过程控制工程及仿真:基于 MATLAB/Simulink / 郭阳宽,王正林编著. —北京:电子工业出版社,2009.4
(MATLAB 精品丛书)

ISBN 978-7-121-08096-8

I. 过… II. ①郭… ②王… III. 过程控制—计算机辅助计算—软件包, Matlab、Simulink IV. TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 002536 号

责任编辑:许 艳

印 刷:北京东光印刷厂

装 订:三河市鹏成印业有限公司

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 1/16 印张:20.5 字数:410.5 千字

印 次:2009 年 4 月第 1 次印刷

印 数:4000 册 定价:39.90 元(含光盘 1 张)

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。

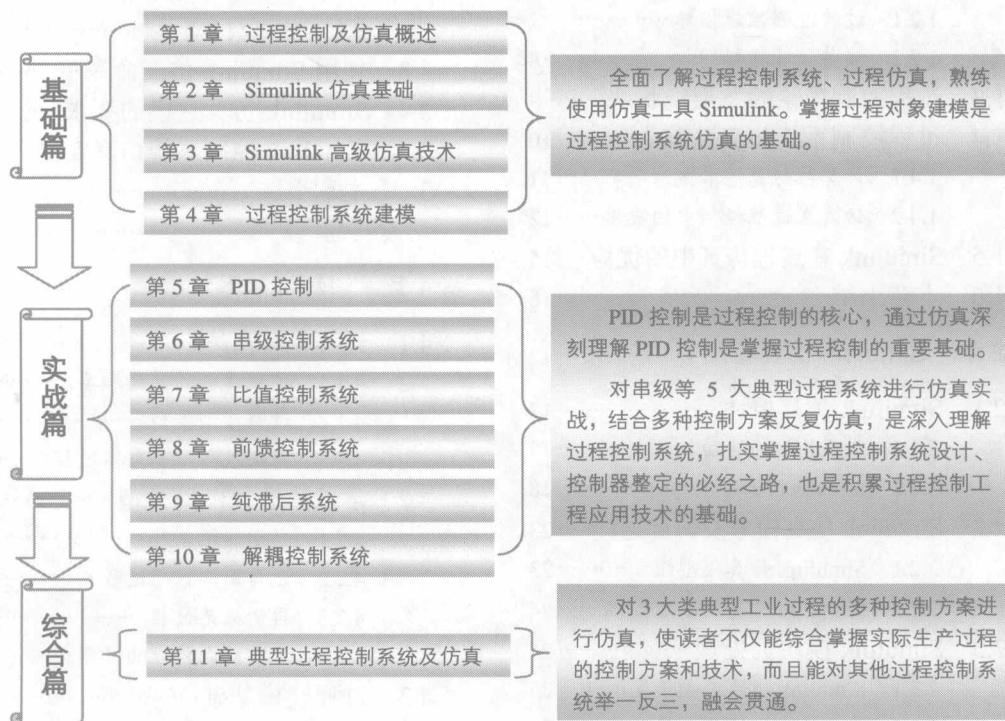
服务热线:(010) 88258888。

前 言

过程控制是控制理论、生产工艺、计算机技术和仪器仪表等知识相结合的一门综合性应用学科，理论性、综合性和实践性都很强。过程控制系统仿真是架起理论与实践之间的重要桥梁，是掌握过程系统分析与设计精髓的重要手段。

Simulink 是著名的、应用普遍的动态系统仿真工具，Simulink 能够直观、快捷地构建过程控制系统的方块图模型，并在此基础上进行仿真结果的可视化分析，是进行过程控制系统设计和参数整定的首选仿真工具。

本书精讲了大量的仿真实例，仿真步骤清晰，读者能快速上手，扎实掌握。全书篇章结构如下图所示。



已故恩师汪仁先教授对本书曾给出了许多宝贵的修改意见，在此表示衷心感谢。

对孙一康、李庆祥教授等给予的指导与帮助表示深深的感谢。

由于时间仓促、笔者水平和经验有限，书中疏漏之处在所难免，敬请读者指正，我们的邮箱是 wa_2003@126.com。同时本书提供相应课件，下载地址为：www.broadview.com.cn。

笔 者

2008 年 12 月于北京

目 录

基础篇

第 1 章 过程控制及仿真概述	2
1.1 过程控制系统概述	2
1.1.1 系统结构	2
1.1.2 系统特点	5
1.1.3 系统分类	5
1.2 过程控制系统的性能指标	6
1.2.1 过渡过程性能指标	7
1.2.2 误差性能指标	8
1.3 过程控制理论的发展现状	9
1.4 过程控制系统仿真基础	10
1.4.1 计算机仿真基本概念	11
1.4.2 仿真在过程控制中的应用	12
1.5 Simulink 在过程仿真中的优势	15
1.6 本章小结	16
第 2 章 Simulink 仿真基础	17
2.1 Simulink 仿真概述	17
2.1.1 Simulink 的启动与退出	17
2.1.2 Simulink 模块库	18
2.2 Simulink 仿真模型及仿真过程	23
2.2.1 Simulink 仿真模型组成	23
2.2.2 Simulink 仿真的基本过程	24
2.3 Simulink 模块的处理	25
2.3.1 Simulink 模块参数设置	25
2.3.2 Simulink 模块基本操作	27
2.3.3 Simulink 模块连接	29
2.4 Simulink 仿真设置	30
2.4.1 仿真器参数设置	31
2.4.2 工作空间数据导入/ 导出设置	33
2.5 Simulink 仿真举例	34
2.6 本章小结	37
习题与思考	38

第 3 章 Simulink 高级仿真技术	39
3.1 Simulink 子系统及其封装	39
3.1.1 创建子系统	39
3.1.2 封装子系统	40
3.1.3 封装的查看和解封装	42
3.1.4 子系统实例	42
3.2 S 函数设计与应用	45
3.2.1 S 函数设计模板	45
3.2.2 S 函数设计举例	47
3.3 使用 Simulink 仿真命令	51
3.4 Simulink 仿真建模的要求	52
3.5 Simulink 控制系统仿真实例	53
3.6 本章小结	61
习题与思考	61
第 4 章 过程控制系统建模	62
4.1 过程模型概述	62
4.1.1 过程建模的目的和要求	62
4.1.2 过程模型类型	63
4.1.3 自衡过程与非自衡过程	64
4.2 常见的过程模型类型	64
4.2.1 自衡非振荡过程	64
4.2.2 无自衡非振荡过程	65
4.2.3 自衡振荡过程	66
4.2.4 具有反向特性的过程	66
4.3 过程建模基础	67
4.3.1 过程建模法分类	67
4.3.2 阶跃响应法建模	68
4.3.3 过程模型的特点	72
4.4 单容过程模型	73
4.4.1 无自衡单容过程	73
4.4.2 自衡单容过程	75
4.5 多容过程模型	77
4.5.1 有相互影响的双容过程	77
4.5.2 无相互影响的双容过程	79

4.6	模型参数对控制性能的影响	81
4.6.1	静态增益的影响	82
4.6.2	时间常数的影响	82
4.6.3	时滞的影响	83
4.7	本章小结	83
	习题与思考	84

实战篇

第5章	PID控制	86
5.1	PID控制概述	86
5.2	PID控制算法	87
5.2.1	比例(P)控制	87
5.2.2	比例积分(PI)控制	89
5.2.3	比例微分(PD)控制	91
5.2.4	比例积分微分(PID)控制	93
5.3	PID控制器参数整定	94
5.3.1	Ziegler-Nichols整定法	94
5.3.2	临界比例度法	100
5.3.3	衰减曲线法	104
5.4	本章小结	108
	习题与思考	108
第6章	串级控制系统	110
6.1	串级控制系统概述	110
6.1.1	基本概念	110
6.1.2	基本组成	112
6.1.3	串级控制的特点	113
6.2	串级控制系统性能分析	114
6.2.1	抗扰性能	114
6.2.2	动态性能	116
6.2.3	工作频率	117
6.2.4	自适应能力	120
6.3	串级控制系统设计	121
6.3.1	副回路选择	121
6.3.2	主、副控制器的设计	123
6.4	串级控制参数整定	125
6.4.1	逐次逼近法	125
6.4.2	两步法	126
6.4.3	一步法	126

6.5	综合仿真实例	127
6.5.1	串级与单回路控制对比仿真	127
6.5.2	串级控制的参数整定仿真	131
6.5.3	串级控制系统设计仿真	133
6.6	本章小结	136
	习题与思考	136

第7章	比值控制系统	137
7.1	比值控制系统基础知识	137
7.1.1	比值控制系统特点	138
7.1.2	比值控制系统的类型	138
7.1.3	比值系数计算	145
7.2	比值控制系统设计	146
7.2.1	比值控制方式的选择	146
7.2.2	主从物料的选择	147
7.2.3	比值控制系统工程整定	148
7.3	综合仿真实例	149
7.3.1	单闭环比值控制系统仿真	149
7.3.2	双闭环比值控制系统仿真	154
7.3.3	变比值控制系统仿真	158
7.3.4	参数摄动对系统影响仿真	162
7.4	本章小结	165
	习题与思考	166
第8章	前馈控制系统	167
8.1	前馈控制系统基础知识	167
8.1.1	系统结构	167
8.1.2	系统特点	170
8.1.3	系统分类	170
8.2	前馈控制系统设计	178
8.2.1	前馈控制系统选择原则	178
8.2.2	工程整定	179
8.3	综合仿真实例	184
8.3.1	静态前馈系统仿真	185
8.3.2	动态前馈系统仿真	189
8.3.3	前馈-反馈复合系统仿真	194
8.3.4	前馈-串级复合系统仿真	199
8.3.5	参数摄动对系统影响仿真	202
8.4	本章小结	207
	习题与思考	207

第 9 章 纯滞后系统	209		
9.1 纯滞后系统基础知识	209		
9.2 纯滞后系统的设计	211		
9.2.1 改进的常规控制方案	211		
9.2.2 补偿控制方案	213		
9.3 综合仿真实例	221		
9.3.1 微分先行控制仿真	221		
9.3.2 中间微分控制仿真	227		
9.3.3 史密斯补偿控制仿真	229		
9.3.4 增益自适应补偿控制仿真	232		
9.3.5 改进型史密斯补偿 控制仿真	238		
9.3.6 参数扰动对系统影响仿真	240		
9.4 本章小结	245		
习题与思考	245		
第 10 章 解耦控制系统	247		
10.1 解耦控制系统基础知识	247		
10.1.1 系统特点	248		
10.1.2 相对增益	248		
10.2 解耦控制系统设计	253		
10.2.1 系统分类及解耦方法	253		
10.2.2 解耦控制方案	254		
10.2.3 解耦控制中的问题	257		
10.3 综合仿真实例	258		
		10.3.1 前馈补偿解耦控制	259
		10.3.2 反馈补偿解耦控制	264
		10.3.3 对角阵解耦控制	268
		10.3.4 参数扰动对系统 影响仿真	276
		10.4 本章小结	280
		习题与思考	281
		综合篇	
		第 11 章 典型过程控制系统及仿真	283
		11.1 燃烧过程控制系统	283
		11.1.1 基本理论	283
		11.1.2 综合仿真实例	285
		11.2 pH 值控制系统	293
		11.2.1 基本理论	293
		11.2.2 综合仿真实例	295
		11.3 精馏控制系统	303
		11.3.1 基本理论	304
		11.3.2 基本控制方案	305
		11.3.3 综合仿真实例	308
		11.4 本章小结	315
		习题与思考	315
		参考文献	317

Part

1 第

基础篇

- 第 1 章 过程控制及仿真概述
- 第 2 章 Simulink 仿真基础
- 第 3 章 Simulink 高级仿真技术
- 第 4 章 过程控制系统建模

第 1 章 过程控制及仿真概述

本章阐述了过程控制系统及仿真的基本概念，介绍了过程控制系统的结构、特点以及过程控制理论的发展现状，过程控制系统仿真等基础知识。通过对本章的学习，读者对过程控制系统仿真的发展现状，以及本书的主要内容能有初步的认识。

1.1 过程控制系统概述

1.1.1 系统结构

过程控制系统在实际中应用非常普遍，下面以一个工业锅炉水位控制系统为例来说明过程控制系统的组成。

锅炉是生产蒸汽的设备，保持锅炉锅筒内的水位在一定范围内是非常重要的，如果水位过低，锅炉可能被烧干；水位过高，生产的蒸汽含水量大，而且水还可能溢出。这些状况都相当危险，因此水位控制是保证正常运行的必要条件。

当锅炉的给水量与蒸汽的蒸发量保持平衡时，锅炉的水位才不变。如果锅炉的给水量变化或蒸发量变化，水位就会产生变化，因此必须观察水位变化以调整给水量，使它跟随蒸汽负荷的大小而相应变化，以保持水位在规定的范围内变化。

采用自动控制时，水位变化量 Δh 由水位计检测并经液位变送器转换为统一的标准信号后送到控制器，控制系统将 Δh 与水位设定值进行比较和运算后发出控制命令，由执行器改变阀门的开度，相应地增减给水量，以保持给水量与蒸汽量之间的平衡，这就是锅炉水位自动控制的原理，如图 1.1 所示。

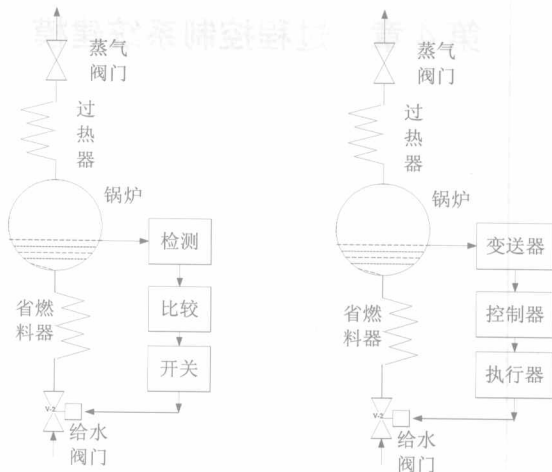


图 1.1 锅炉水位过程控制系统示意图

由此可见,实现锅炉水位控制需要这样一些设备:检测水位变化的传感器与变送器、比较水位变化并进行控制运算的控制器、实施控制命令的执行器、改变给水量的控制阀等。在此基础上再加上一些其他必要的辅助装置,就可构成常规仪表过程控制系统,如图 1.2 所示。

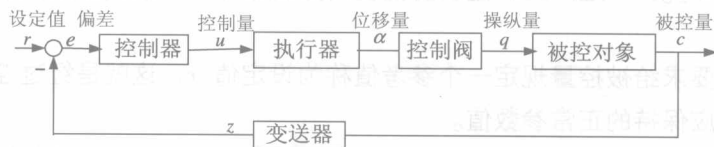


图 1.2 锅炉水位过程控制系统框图

典型的过程控制系统由被控对象、传感器和变送器、控制器、执行器、控制阀等几部分组成。

1. 被控对象

被控对象指被控制的生产设备或装置,如上述进行水位控制的锅炉。常见的被控对象有锅炉、加热炉、分馏塔、反应釜、干燥炉、压缩机、旋转窑等生产设备,或存储物料的槽、罐或传送物料的管段等。

如果生产工艺过程中需要控制的参数只有一个,如电阻加热炉炉温控制的被控量只有炉温一个参数,则生产设备与被控对象是一致的;如果需要控制的参数不止一个,其特性互不相同,各有一套可能是互相关联的控制系统,这样的生产设备其被控对象就不止一个,应该对其中的不同过程分别作不同的分析和处理。

使被控量发生变化的任何作用称为扰动,在控制通道内在控制阀未动作的情况下,由于通道内质量或能量等因素变化造成的扰动称为内扰,上述锅炉水位控制中给水压力变化引起水位波动就是内扰;其他来自外部的影响统称为外扰,上述锅炉水位控制中蒸汽负荷变化而引起水位波动就是外扰。

2. 传感器和变送器

反映生产过程的工艺参数大多不止一个,一般都需要用不同的传感器进行检测,才能了解生产过程进行的状态,以获得可靠的控制信息。需要进行自动控制的参数称为被控量,上例中的锅炉锅筒中的水位就是被控量,被控量往往就是对象的输出量。

如果系统只有一个被控量则只有一个控制回路,称为单回路控制系统,也称为单变量控制系统。如果系统不止一个被控量则不止一个控制回路,称为多回路控制系统,也称为多变量控制系统。

一个生产设备需要控制的回路数不一定和它的过程参数数目完全相同,因为有些参数并不需要进行自动控制,进行检测和显示就可以了。

被控量由传感器进行检测,其输出必须采用变送器转换为统一的标准电信号,传感器或变送器的输出就是被控量的测定值 z 。

3. 控制器

控制器也称调节器，它接收传感器或变送器送来的信息——被控量，当其符合生产工艺要求时，控制器的输出保持不变，否则控制器的输出发生变化，对系统施加控制作用。无论是内扰还是外扰，一经产生，控制器就发出控制命令，对系统施加控制作用，使被控量回到设定值。

按生产工艺要求给被控量规定一个参考值称为设定值 r ，这就是经过控制系统的自动控制作用被控量应保持的正常参数值。

在过程控制系统中，被控量的测量值 z 由系统的输出端反馈到系统的输入端，与设定值 r 比较后得到偏差值 $e=r-z$ 就是控制器的输入信号，当 $r>z$ 时称 e 为正偏差，当 $r<z$ 时称 e 为负偏差。

4. 执行器

被控量的测量值与设定值在控制器内进行比较后得到的偏差大小，由控制器按规定的控制规律（PID 等）进行运算后，发出相应的控制信号去推动执行器，该控制信号是控制器的输出量，称为控制量 u 。

5. 控制阀

由控制器发出的控制信号，通过执行器产生的位移量 a 驱动控制阀门，以改变输入对象的操纵量 q ，使被控量受到控制。控制阀是控制系统的终端部件。阀门的输出特性决定于阀门本身的结构，有的与输入信号呈线性关系，有的则呈对数或其他曲线关系。

控制器有正、反控制作用之分，控制器的正作用是指被控量增大时，控制器的输出增大；控制器的反作用则使被控量增大时输出减小。在前述锅炉水位控制中，如采用气关式阀门，控制器应取正作用。采用气开式阀门时则应取反作用。同样，控制器正、反控制作用的选择应视实际情况而定，也不能一概而论。

通常，一个完整的过程控制系统，除自动控制回路外，应备有一套手动控制回路，以便在自动控制系统因故障而失效后，或在某些紧急情况下对系统进行手动控制。另外还应有一套必要的信号显示、通信、联络、联锁，以及自动保护等设施，才能充分保证生产过程的顺利进行和保障人身与设备的安全。

控制器是根据被控量测量值的变化与设定值进行比较得出的偏差值，对被控对象进行控制的。对象的输出信号即控制系统的输出，通过传感器与变送器的作用，将输出信号反馈到系统的输入端，构成一个闭环控制回路，简称闭环。

如果系统的输出信号只是被检测和显示，并不反馈到系统的输入端，则是一个没有闭合的开环控制系统，简称开环。开环系统只按对象的输入量变化进行控制，即使系统是稳定的，其控制品质也较低。

在闭环控制回路中可能有两种形式的反馈，即正反馈与负反馈。

(1) 正反馈

正反馈的作用会扩大不平衡量，是不稳定的。如采用正反馈去控制室内温度，当温度

超过设定值时，系统会增加热量，其作用使室温升高；当温度低于设定值时，它又减小热量，使室温进一步降低。具有正反馈的控制回路，总是将被控量锁定在高端或低端的极值状态下，这种性质不符合控制目的。

(2) 负反馈

负反馈的作用与正反馈相反，总是力求恢复到平衡温度，即保持在规定的设定值范围内。具有负反馈（包括前馈）作用的回路，一般称为反馈控制系统，这种系统能密切监视和控制被控对象输出量的变化，抗干扰能力强，能有效地克服对象特性变化的影响，有一定的自适应能力，因而控制品质较高，是应用最广，研究也最多的控制系统。

1.1.2 系统特点

过程控制在实际中有着各种各样的应用，具体的过程控制系统也不尽相同，但概括起来，过程控制系统主要具有以下特点：

1. 系统由过程检测控制仪表组成

过程控制通过各种检测仪表、控制器等自动化设备和技术工具，对整个生产过程进行自动检测和自动控制。

2. 被控过程具有多样性

实际生产过程中，由于生产规模不同、工艺要求各异、产品品种多样，因此被控过程具有多样性。

3. 控制方案具有多样性

由于被控过程具有多样性，而且被控过程也各有特点，例如有多变量过程、大惯性过程、大滞后过程等，因此要求相应的控制方案具有多样性。通常有单变量控制系统，也有多变量控制系统；有计算机集散控制系统，也有现场总线控制系统；有提高控制品质的控制系统，也有实现特定要求的控制系统。

4. 被控过程多属慢过程，控制目标多为过程参数

从前面可以看出，被控过程具有大惯性、大滞后等特点，所以过程控制的控制过程是一个慢过程。实际中，通常是对表征其生产过程的温度、压力、流量、液位（物位）、成分、PH 等过程参数进行自动检测和自动控制。

5. 给定值控制是主要的控制形式

实际生产过程中，过程控制的主要目的是减小和消除扰动对被控参数的影响，通常按被控量的给定值进行控制，所以给定值控制是主要的控制形式。

1.1.3 系统分类

过程控制系统分类的方法很多，通常按照系统的结构特点和给定值特点来分类，下面分别进行介绍。

按系统的结构特点进行分类，过程控制系统可以分为反馈控制系统、前馈控制系统和复合控制系统。

1. 反馈控制系统

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

2. 前馈控制系统

前馈控制系统是直接根据扰动量的大小进行工作的，扰动是控制的依据。不构成闭合回路，故也称为开环控制系统。前馈控制由于无法检查控制的效果，因此在实际生产过程中很少单独应用，尤其是在复杂过程中。

3. 复合控制系统

复合控制系统也就是通常所指的前馈-反馈控制系统，它是反馈控制和前馈控制的结合，具有两者的优点。前馈控制的主要优点是能针对主要扰动迅速及时克服对被控量的影响；反馈控制的主要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，因此构成的复合控制系统可以提高控制质量。

按系统的给定值的特点进行分类，过程控制系统可以分为恒值控制系统、随动控制系统和程序控制系统。

1. 恒值控制系统

系统的被控量（温度、压力、流量、液位、成分等）的给定值保持在某一恒值（或在某一很小范围内不变）。

2. 随动控制系统

系统的被控量的给定值随时间任意地变化，因此控制的作用是克服扰动，使被控量及时跟踪给定值变化。

3. 程序控制系统

系统的被控量的给定值是按预定的时间程序而变化的，控制的目的是使被控量按规定的程序自动变化。

1.2 过程控制系统的性能指标

对于控制回路来说，在设定值发生变化或系统受到扰动作用后，被控量应该平稳、迅速和准确地趋近或回复到设置值。因此，通常在稳定性、快速性和准确性这三方面提出各种单项控制指标。

评价控制性能好坏的性能指标，是根据工业生产过程对控制的实际要求来定的。通常采用过渡过程性能指标和误差性能指标来评价控制系统的优劣。

1.2.1 过渡过程性能指标

下面以设定值为阶跃信号的响应为例说明过渡过程的质量指标, 阶跃响应的一般情况如图 1.3 所示。

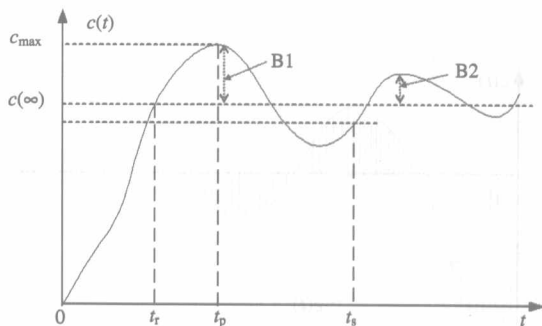


图 1.3 阶跃响应瞬态指标图

图 1.3 中, t_r 称为上升时间, 它表示 $c(t)$ 第一次达到稳态值 $c(\infty)$ 的时间。对于单调无超调过程显然该定义不适用, 一般可定义 t_r 为 $c(t)$ 从 $0.1c(\infty)$ 上升到 $0.9c(\infty)$ 所需的时间。

1. t_p 称为峰值时间, 它表示 $c(t)$ 达到最大值 c_{\max} 的时间, 即系统过渡过程曲线达到第一个峰值所需要的时间, 其大小反映系统响应的灵敏程度。

2. $\sigma_p\%$ 称为超调量, 且

$$\sigma_p \% = \frac{c_{\max} - c(\infty)}{c(\infty)} \cdot 100\%$$

$\sigma_p\%$ 愈大则表示被控量偏离生产规定的状态越远。规定允许最大偏差。

3. t_s 称为调节时间, 且

$$\left| \frac{c(t) - c(\infty)}{c(\infty)} \right|_{t \geq t_s} \leq \Delta$$

其中 Δ 称为允许误差, 一般取 $\Delta = 0.05$ 或 $\Delta = 0.02$ 。调节时间表示系统过渡过程曲线进入新的稳态值的 $\pm 5\%$ 或 $\pm 2\%$ 范围内所需的时间。 t_s 愈小表示过渡过程进行得愈快。它是反映系统过渡过程快慢的指标。

4. 衰减比 n

在阻尼振荡中, 两个相邻的同方向幅值之比称为衰减比, 通常用前一幅值与后一幅值的比来表示, 如图中的 $n=B1:B2$ 。

衰减比 n 是衡量系统稳定性的指标。衰减比小于 1, 是发散振荡, 系统不稳定。通常, 为了保持系统足够的稳定裕度, 恒值系统的衰减比以 4:1 为佳; 对于随动系统, 通常要求为 10:1。

上述指标显然从不同的侧面反映了系统的性能, 其中 t_r 反映了快速性, $\sigma_p\%$, n 反映了对稳定性, 而 t_s 是稳定性和快速性的一种综合体现。

1.2.2 误差性能指标

过渡过程性能指标从不同侧面衡量了系统的性能，我们还可以用综合指标来对系统过渡过程进行综合评价。一个过程控制系统的质量主要看偏差的变化情况，阶跃响应误差指标图如图 1.4 所示。

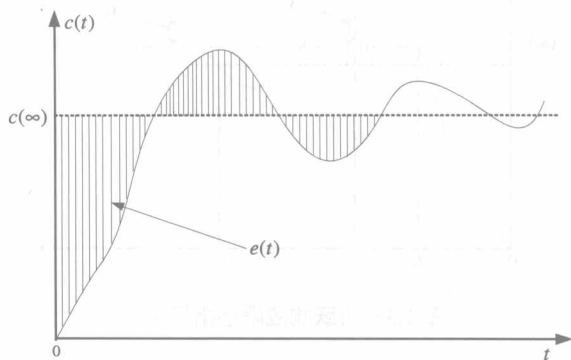


图 1.4 阶跃响应误差指标图

定义误差函数 $e(t) = c(\infty) - c(t)$ ，为图 1.4 中的阴影部分所示。显然，如果阴影部分的面积越小，则跟随性能越好。

有如下几种常用的误差积分指标：

1. 误差积分指标 IE

$$IE = \int_0^{\infty} e(t) dt$$

显然，该指标对于振荡型过程不适用。

2. 误差绝对值积分指标 IAE

$$IAE = \int_0^{\infty} |e(t)| dt$$

3. 误差平方积分指标 ISE

$$ISE = \int_0^{\infty} e^2(t) dt$$

第 2、第 3 两种指标均用于振荡型响应分析，其中 ISE 指标比较适合在理论分析中使用。一般来说，在同等条件下，用 ISE 指标设计出来的系统与用 IAE 指标设计出来的系统相比较，其 t_r 较小而 $\sigma_p\%$ 较大。

4. 误差绝对值乘时间积分指标 ITAE

$$ITAE = \int_0^{\infty} |e(t)| t dt$$

由图 1.4 可以看出，无论是 IAE 和 ISE，指标大小主要取决于第一块面积，但在一般

情况下,系统的相对稳定性 $\sigma_p\%$ 和综合快速性 t_s 由第二块面积的大小来反映,因此应加上第二块在指数函数中的份额,处理方法是乘以时间函数 t 作为权系数。该指标目前被广泛应用于最优化分析和设计。

1.3 过程控制理论的发展现状

20 世纪 40 年代之前,工业生产大多处于手工操作状态,主要凭经验用人工控制生产过程,劳动生产率很低。

20 世纪 50 年代前后,过程控制开始得到发展,过程控制理论是以频率法和根轨迹法的经典控制理论,主要解决单输入单输出的定值控制系统的分析和综合问题,经典控制理论此后一直在生产过程中得到广泛应用,直至今日,它还是应用于生产过程的主要控制理论。

20 世纪 60 年代逐渐发展起来并且日趋完善的现代控制理论,在短短的 40 年中已在航空航天等工业中获得卓越的成就。遗憾的是,这些理论与方法在工业生产过程中的应用却受到种种限制,没有受到预期的效果。其原因大致可以归纳为:

1. 这类控制必须基于系统的参数模型,但工业过程往往是高维多变量复杂系统,难以用一个简单而精确的数学模型加以描述,因此给现代控制理论的应用带来极大的困难。

2. 工业过程往往具有非线性、时变性、耦合性和不确定性等特点,即使做了大量的简化得到线性定常模型,求解出某些高等控制策略,例如最优控制,在实施过程中也难以达到预期的效果。面对过程、结构、环境和控制均十分复杂的工业系统,现有的理论与方法远不能适应需要。

3. 必须从整个系统的控制、优化、管理决策及其集成化着手开展研究,这将涉及控制理论、系统工程、人工智能、计算机技术和通信以及信号处理等多个学科领域,目前尚未形成这类工业大系统过程控制的理论及其相应的实现模式。

因此,在过程控制领域中,虽然已逐步采用了计算机这个强有力的工具,但就其控制策略而言,占统治地位的仍然是经典 PID 算法,没有充分发挥计算机的功能来提高过程控制水平。

为了克服控制理论和工业应用之间的脱节现象,应该尽快地将现代控制理论经过改造,移植到过程控制领域。20 世纪 70 年代以来,加强了建模理论、辨识技术、最优控制、最优化等方面的工程化的研究,开始打破传统方法的束缚,推出了从工业系统特点出发,寻求对模型要求不高,在线计算方便,对环境的不确定性有一定适应能力的实用的控制策略和方法等。

采用先进控制可以克服由于系统本身的时变性、非线性和外扰的随机性等带来的问题。近年来,先进控制策略及软件在工业生产中也得到了一定的应用,虽然应用得不多,但是预示着未来的趋势。

目前配置在过程控制计算机中的先进控制策略及相应软件主要有:多变量预测控制、自适应控制、模糊控制及故障诊断、神经元网络等。

1. 多变量模型预测控制

20 世纪 80 年代初, 模型预测控制逐渐发展成为一项成熟的控制技术。其基本原理是利用一个过程动态模型(脉冲响应模型或 ARMA 模型)和可测量的信息来预测将来的过程行为, 再利用滚动优化的方法, 使预测过程的响应和设计希望的响应差别为最小。模型预测控制还能处理过程变量有不等式约束的情况, 如当传感器和调节器失效时, 可以通过改变相应的不等式约束来解决。近年来一些商品化软件产品已应用于石化和化工过程。

2. 自适应控制

早在 20 世纪 70 年代初, 自适应控制已在热工、化工对象上应用成功。利用在线最小二乘辨识律和最小方差控制律的自校正调节器、自校正 PID 调节器都有相应的商品化软件。一种更简单实用的自整定器已配置在 DCS 中。自整定器实质是根据对象的特性自动给出 PID 参数, 这种自整定在正常工作过程中仍以固定参数 PID 调节器的形式工作, 不进行在线参数辨识和修改控制, 目前在化工过程中得到应用。

3. 模糊控制

模糊控制器依照人工操作思维程序工作。它首先把测量输出的精确量模糊化, 变为模糊语言变量, 由模糊规则进行模糊决策, 再把模糊决策量清晰化转变成精确量进行控制。与传统控制方法相比, 模糊控制无需建立数学模型, 被控对象的特性和参数变化对控制质量的影响较小(鲁棒性强), 对于非线性和大时滞对象采用模糊控制的效果要比 PID 效果好。因此很适合于过程控制, 如 pH 值的控制, 目前已有商品化软件。

4. 人工神经网络

人工神经网络是模仿人类脑神经活动的一种人工智能技术。由于反向传递学习算法 BP 网络和 Hopfield 网络的出现, 使人工神经网络技术大为改观, 发展很快。目前已在过程控制的许多领域, 如在非线性系统的辨识和控制、基于模型的软测量、质量预报、故障诊断等方面获得应用。

目前, 控制策略上出现了多学科研究的交叉与渗透, 它们之间相互取长补短, 如神经网络与模糊控制相结合构成了模糊神经网络控制, 它兼有模糊控制和神经网络的优势, 是一个很有前途的研究方向。

1.4 过程控制系统仿真基础

过程控制主要讲述流程型工业的控制问题, 它是在基本控制理论的基础上, 将控制理论知识和工程应用结合起来, 把理论应用于实际。

现代流程工业越来越多地采用以 DCS 为代表的计算机控制系统。硬件的发展促进了对过程控制技术的需求, 但过程控制系统最终需要工艺技术人员来掌握操作。由于这些系统涉及一系列理论与实践问题, 大多数工艺人员难以理解, 因而最终影响使用效果。