

MATLAB/Simulink

与过程控制系统

刘文定 王东林 © 等编著



MATLAB/Simulink 与过程控制系统

刘文定 王东林 等编著



机械工业出版社

本书从基本概念入手,系统地阐述了简单过程控制系统和复杂过程控制系统的构成、基本原理、特点、设计方法及过程控制系统的计算机辅助设计。内容包括 MATLAB/Simulink 的基础知识和常用工具箱在过程控制系统中的应用、PID 控制策略、单回路控制系统、串级控制系统、比值控制系统、均匀控制系统、分程控制系统、选择性控制系统、补偿控制系统、解耦控制系统,以及典型控制系统的分析、设计、参数整定。通过大量经典的 Simulink 仿真实例全面阐述了过程控制系统的原理、设计及参数的整定等技术。

本书内容深入浅出,概念清楚,理论与 Simulink 仿真紧密结合,各个章节的内容既相互联系又相互独立,读者可以结合自己的专业领域深入地进行研究。本书适用于自动化、自动化仪表、计算机应用、机械电子及自动化等领域的本、专科生及研究生作为教学参考书,也可以供从事生产过程自动化、机械电子及自动化、计算机应用等领域的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

MATLAB/Simulink 与过程控制系统/刘文定等编著.

—北京:机械工业出版社,2012.11

ISBN 978-7-111-40060-8

I. ①M… II. ①刘… III. ①过程控制—自动控制
系统—计算机辅助计算—软件包 IV. ①TP273-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 243701 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑:顾谦 责任编辑:顾谦

版式设计:霍永明 责任校对:张晓蓉

封面设计:赵颖喆 责任印制:乔宇

北京铭成印刷有限公司印刷

2013 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

184mm×260mm·20 印张·495 千字

0001—3000 册

标准书号:ISBN 978-7-111-40060-8

定价:49.80 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换
电话服务

网络服务

社服务中心:(010)88361066 教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售一部:(010)68326294 机工官网:<http://www.cmpbook.com>

销售二部:(010)88379649 机工官博:<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线:(010)88379203 封面无防伪标均为盗版



前 言

随着科学技术的飞速发展，生产过程也在向规模化、复杂化和大型化的方向日新月异地发展。过程控制系统是一门与生产过程联系非常密切的课程，过程控制系统的设计涉及生产工艺、测控技术、自动控制理论、智能控制和计算机技术等领域的知识，是一门综合性的学科。

随着控制系统越来越复杂、控制功能和系统要求的多样化，利用传统的计算方法进行控制系统分析、设计已越来越困难。而 MATLAB 结合了计算机强大的数字处理能力，集数值计算、符号计算和图形可视化功能于一体，其重要组成部分 Simulink 提供了基于信号流图的连续、离散系统组态的仿真平台，功能强大、操作简单，其模块库可直观、方便地建立控制系统仿真模型，为过程控制系统设计与参数整定的计算与仿真提供了一个强有力的工具，使过程控制系统的设计与整定发生了革命性的变化。

本书从基本概念入手，系统地讨论了过程控制系统的构成、基本原理、特点、设计方法及过程控制系统的计算机仿真。全书共 9 章，内容包括 MATLAB 的基础知识和 Simulink 常用工具箱过程控制系统中的应用、PID 控制策略、单回路控制系统、串级控制系统、比值控制系统、均匀控制系统、分程控制系统、选择性控制系统、补偿控制系统、解耦控制系统，以及典型控制系统的分析、设计、参数整定。为突出计算机辅助设计在工程应用中的重要性，本书每章通过大量经典的 Simulink 仿真实例全面阐述了过程控制系统的原理、设计及参数的整定等技术。

本书内容深入浅出，概念清楚，理论阐述与实例仿真紧密结合，用仿真实例来加深对控制系统的理解，各个章节的内容既相互联系又相互独立，读者可以结合自己的领域方向深入地进行研究。本书适用于自动化、自动化仪表、计算机应用、机械电子及自动化等领域的本、专科生及研究生作为教学参考书，也可供从事生产过程自动化、测控技术、电气工程自动化、机械电子及自动化、计算机应用等领域的工程技术人员和研究人员参考。

本书主要由刘文定、王东林编著，陈泽华、刘夏、黎媚、麻广睿、庞书经、强小红、边兴田、刘慧、王昭燕、闫文、贾鹏霄等同志为本书的编写及制图、仿真等做了大量工作。另外，本书在编写过程中还得到了北京林业大学工学院自动化系全体教师的关心和帮助，得到了机械工业出版社顾谦编辑的大力支持和帮助，谨此一并表示衷心感谢！

由于时间仓促以及编著者的水平所限，书中难免存在一些不足和错误，恳请读者批评指正。

编著者
2012 年 11 月



目 录

前言

第 1 章 过程控制系统及仿真概述	1
1.1 过程控制的任务与目标	1
1.2 过程控制系统的组成与特点	2
1.3 过程控制系统的分类	4
1.3.1 一般分类	4
1.3.2 按设定值形式分类	5
1.3.3 按系统的结构特点分类	5
1.4 过程控制系统的性能指标	6
1.4.1 时域控制性能指标	6
1.4.2 综合控制性能指标	7
1.5 过程控制系统的 MATLAB 计算与仿真	8
1.5.1 控制系统计算机仿真	8
1.5.2 控制系统的 MATLAB 计算与仿真	8
第 2 章 MATLAB 与 Simulink 基础	10
2.1 MATLAB 系统概述	10
2.1.1 MATLAB 简介	10
2.1.2 MATLAB 使用简介	11
2.1.3 MATLAB 编程基础	14
2.2 MATLAB 数值计算功能	15
2.2.1 MATLAB 数据类型	15
2.2.2 矩阵及其运算	17
2.3 MATLAB 图形功能	20
2.3.1 二维图形的绘制	20
2.3.2 三维图形的绘制	23
2.4 程序设计	25
2.4.1 M 文件	25
2.4.2 流程控制语句	26
2.5 Simulink 仿真基础	28
2.5.1 Simulink 的基本操作	28
2.5.2 系统仿真及参数设置	31
2.5.3 Simulink 的基本模块	34
2.6 Simulink 仿真举例	36
第 3 章 PID 控制器	40



3.1 概述	40
3.2 比例调节器	41
3.2.1 比例调节和比例带	41
3.2.2 比例调节的特点	42
3.3 积分调节器	47
3.3.1 积分调节器概述	47
3.3.2 积分调节器的特点	47
3.3.3 积分速度对控制系统的影响	47
3.4 比例积分调节器	49
3.4.1 比例积分调节	49
3.4.2 比例积分调节器的特点	50
3.4.3 比例积分调节器对系统过渡过程的影响	50
3.4.4 积分饱和及防止	54
3.5 比例微分调节器	56
3.5.1 比例微分控制算法	56
3.5.2 比例微分调节器的特点	57
3.6 比例积分微分调节器	59
3.6.1 比例积分微分调节器的表达式	59
3.6.2 PID 调节器的频率响应特性	60
3.6.3 PID 调节器的阶跃响应	60
3.7 数字式 PID 调节器	62
3.7.1 数字式 PID 控制算法的形式	63
3.7.2 数字式 PID 控制算法的特点	64
3.8 改进的 PID 控制算法	65
3.8.1 积分分离 PID 控制算法	65
3.8.2 抗积分饱和 PID 控制算法	68
3.8.3 梯形积分 PID 控制算法	71
3.8.4 变速积分 PID 控制算法	71
3.8.5 微分先行 PID 控制算法	74
3.8.6 比例先行 I-PD 控制算法	77
3.8.7 带有死区的 PID 调节器	78
3.9 PID 调节器参数的工程整定	78
3.9.1 PID 调节器参数整定的原则	79
3.9.2 PID 调节器工程整定法的特点	80
3.9.3 PID 调节器参数的工程整定	80
3.10 PID 控制器参数的优化整定	92
第 4 章 简单过程控制系统及 Simulink 仿真	96
4.1 简单过程控制系统的组成	96
4.2 简单过程控制系统的设计	97



4.2.1	被控对象的动态特性	97
4.2.2	被控变量的选择	107
4.2.3	操纵变量的选择	108
4.2.4	检测变送环节	109
4.2.5	执行器(调节阀)的选择	110
4.3	简单过程控制系统的 Simulink 仿真	120
第5章 串级控制系统及 Simulink 仿真		127
5.1	串级控制系统的基本原理和结构	127
5.1.1	串级控制系统的基本概念	127
5.1.2	串级控制系统的组成	131
5.1.3	串级控制系统的工作过程	132
5.2	串级控制系统的分析与设计	135
5.2.1	串级控制系统的分析	135
5.2.2	串级控制系统的设计	143
5.3	串级控制系统控制器参数的整定	153
5.3.1	逐步逼近法	153
5.3.2	两步整定法	153
5.3.3	一步整定法	154
5.4	串级控制系统应用及 Simulink 仿真	155
5.4.1	串级控制系统用于克服变化剧烈和幅值大的干扰	155
5.4.2	串级控制系统用于克服对象的纯滞后	159
5.4.3	串级控制系统用于克服对象的容量滞后	160
5.4.4	串级控制系统用于克服对象特性的非线性	164
第6章 特殊控制系统及 Simulink 仿真		169
6.1	比值控制系统	169
6.1.1	比值控制原理	169
6.1.2	比值控制系统的结构类型	169
6.2	比值控制系统设计	172
6.2.1	主动量、从动量的选择	172
6.2.2	控制方案的选择	173
6.2.3	调节器控制规律的选择	173
6.2.4	比值系数的计算	173
6.2.5	实施方案的选择	175
6.2.6	调节器参数的整定	175
6.3	比值控制系统及 Simulink 仿真	176
6.4	均匀控制系统	185
6.4.1	均匀控制的概念	185
6.4.2	均匀控制系统的特点	186
6.5	均匀控制系统的结构形式	187



6.5.1	简单均匀控制	187
6.5.2	串级均匀控制	187
6.5.3	双冲量均匀控制	188
6.5.4	控制规律的选择	189
6.5.5	均匀控制系统参数整定	189
6.6	均匀控制系统及 Simulink 仿真	189
6.7	分程控制系统	193
6.7.1	分程控制的概念	193
6.7.2	分程控制系统的应用	194
6.7.3	分程控制应用中的几个问题	196
6.7.4	分程控制的应用	197
6.8	选择性控制系统	198
6.8.1	选择性控制的概念	198
6.8.2	选择性控制系统的类型	198
6.8.3	选择性控制系统设计	205
6.8.4	选择性控制系统的应用	205
6.9	双重控制系统	206
6.9.1	基本原理和结构	206
6.9.2	双重控制系统设计	207
6.9.3	双重控制系统的 Simulink 仿真	207
6.10	应用实例	212
6.10.1	间歇式生产化学反应的分程控制	213
6.10.2	精馏过程中冷凝器的选择性控制系统	213
6.10.3	甲烷转化反应中的比值控制及比值报警系统	214
6.10.4	隧道窑炉的串级及比值控制系统	214
6.10.5	加热炉的安全联锁保护系统	215
第7章	补偿控制系统及 Simulink 仿真	216
7.1	前馈控制系统	216
7.1.1	前馈控制系统的原理和特点	216
7.1.2	前馈控制系统的基本结构	218
7.2	前馈控制系统的设计	221
7.2.1	前馈控制系统可实现的条件	221
7.2.2	前馈控制器的实施	221
7.2.3	前馈控制系统的参数整定	222
7.3	前馈控制系统的 Simulink 仿真	230
7.3.1	前馈控制系统	230
7.3.2	前馈-反馈控制系统	231
7.4	大时滞过程控制系统及 Simulink 仿真	235
7.4.1	改进的常规控制方案	236



7.4.2	预估补偿控制	239
7.4.3	采样控制方案	245
第8章	解耦控制系统	246
8.1	多变量控制系统的耦合	246
8.1.1	第一增益	247
8.1.2	第二增益	247
8.1.3	相对增益	248
8.1.4	相对增益的性质	249
8.1.5	多输入多输出系统的相对增益矩阵	249
8.2	消除和减弱耦合的方法	252
8.2.1	被控变量(输出变量)与操纵变量(输入变量)间的正确匹配	252
8.2.2	控制器的参数整定	253
8.2.3	减少控制回路	253
8.2.4	串接解耦控制	253
8.3	解耦控制系统设计	253
8.3.1	对角阵解耦控制	253
8.3.2	单位矩阵解耦控制	257
8.3.3	前馈补偿解耦控制	259
8.3.4	反馈解耦控制	260
8.3.5	简化解耦控制系统	262
8.4	解耦控制系统的 Simulink 仿真	263
第9章	典型过程控制系统	270
9.1	传热设备的控制系统	270
9.1.1	传热设备的类型	270
9.1.2	传热设备的控制目的	270
9.1.3	换热器的控制	271
9.1.4	蒸汽加热器的控制	280
9.1.5	冷凝冷却器的控制	281
9.2	锅炉设备的控制	283
9.2.1	锅炉设备概述	283
9.2.2	锅炉锅筒水位控制	285
9.2.3	锅炉燃烧控制系统	296
参考文献	311

第 1 章

1

过程控制系统及仿真概述

过程控制系统是利用过程检测装置、变送器、控制仪表和执行器等对整个生产过程进行检测与控制,以达到所需控制目标。过程控制系统的被控量为温度、压力、流量、液位、成分等,它涉及冶金、机械、石油、化工、电力、轻工、建材等领域,因而过程控制在国民经济中占有极其重要的地位。

1.1 过程控制的任务与目标

凡是采用数字或模拟控制方式对生产过程的某一个或某些物理参数进行自动控制的系统称为过程控制系统。过程控制主要针对温度、压力、流量、液位(物流)、成分和物性等参数进行控制。

生产过程是与化学反应、生化反应、物理反应、相变过程、能量的转换过程、传热传质过程等复杂的反应或过程相伴随的。这些过程或反应的进行,必须满足一定的内部和外部条件。满足这些条件,并且使这些条件保持稳定,生产过程就能正常、稳定地进行,产品的产量和质量就能得到保证。所以,过程控制主要是决定生产过程是否正常控制,以保证整个生产过程的正常运行。工业生产对过程控制的要求是多方面的,比如生产过程中原料和能源消耗最小,即成本低而效率高,以及工业生产过程中的某一量以最短时间到达设定值等。总的来说,可从以下三个方面对过程控制提出要求:

1) 安全性。整个生产过程中,人身安全和设备安全是控制系统中最重要和最基本的要求。在整个生产过程中,通常采用越限报警、事故报警和联锁保护等措施来保证系统的安全性。随着工业生产过程的高度集成化和大型化,目前将在线故障预测与诊断、容错控制等应用于过程控制中,进一步提高了系统运行的安全性。

2) 稳定性。工业生产环境中存在各种各样的干扰以及生产原料的变化和波动,如何有效地抑制或减小系统外部干扰,保持生产过程长期稳定运行是设计过程控制系统的又一要求。

3) 经济性。随着市场竞争加剧和世界能源及原材料的匮乏,在满足安全性和稳定性的前提下,要求控制系统低成本、高效益。

过程控制的任务就是在了解、掌握生产工艺和系统综合指标的要求基础上,根据安全性、稳定性、经济性的要求,应用控制理论、最优控制、系统论等理论知识,对系统进行分析和设计,提出合理的控制方案,设计报警和联锁保护系统,选择最优的控制器参数及生产过程现场调试方案等。



对于大型、复杂的控制系统，同时达到上述要求是很困难的，如何应用理论知识对系统进行分析和综合，提出整体优化的控制技术方，实现生产过程全局最优控制是有待研究的。

1.2 过程控制系统的组成与特点

过程控制系统涉及冶金、机械、石油、化工、电力、轻工、建材等领域，下面以液体储槽的水位控制为例说明过程控制系统的组成。

液位是许多工业生产中的重要参数之一，在化工、冶金、医药、航空等领域，液位的测量和控制直接影响到产品的质量。如图 1-1 所示的水槽液位控制系统，其半成品流入量和成品流出量分别为 q_1 和 q_2 ，系统的任务是维持水槽的液位不变。当水槽的成品流出量与半成品流入量保持平衡时，水槽的液位才不变。如果干扰使半成品流入量变化，液位就会产生变化，为此必须观察液位变化，以调整成品流出量，使其随流入量的变化而相应变化，以保持液位在规定范围内变化。

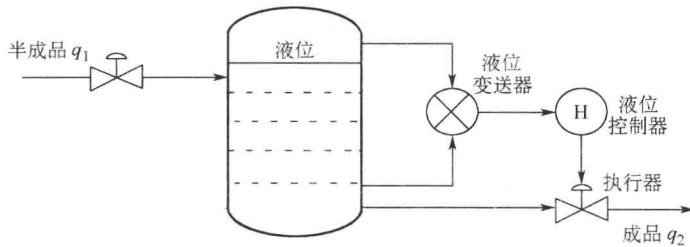


图 1-1 水槽液位控制系统

要使液位保持在设定值上，首先要随时了解液位的变化情况，通过液位传感器检测液位变化，并经过液位变送器转换为相应的标准信号送到液位控制器。与液位设定值比较，如果产生偏差信号(实际液位高于或低于设定液位)，控制器根据偏差的大小运算后输出控制命令，执行器依据控制指令调整控制阀的开度(根据偏差相应地增减流出量)，液位逐渐恢复到给定值。

从水槽液位的控制过程看，简单的控制系统包括检测被控量的传感器与变送器、完成控制运算的控制器、执行控制命令的执行器、改变被控量的控制装置(控制阀)和被控对象。典型单回路控制系统框图如图 1-2 所示。

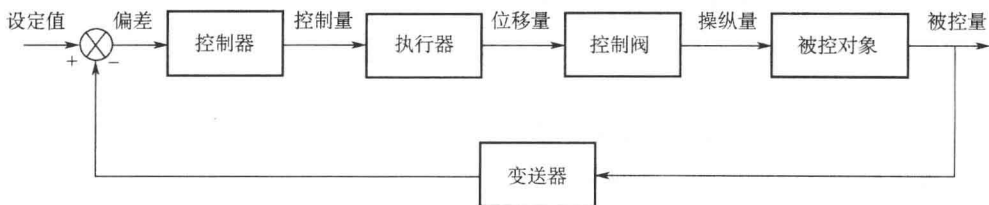


图 1-2 典型单回路控制系统框图

- 1) 被控对象(过程)：指需要控制的生产过程、设备或装置，如锅炉锅筒、水槽等。
- 2) 被控变量(被控量)：被控对象中要控制的某个物理量或生产过程中的某个参数，如



加热炉的温度、水槽的液位等。

3) 检测和变送器: 用于检测被控对象的被控量, 并将检测信号转换为统一的标准电信号输出。

4) 控制器(调节器): 将检测信号与设定值信号进行比较, 产生偏差信号, 按一定的控制规律对偏差信号进行运算, 产生控制信号输出到执行器。

5) 执行器: 将控制信号进行放大, 转换为控制操纵变量的执行信号, 以驱动控制阀。常见的执行器有气动调节阀和电动调节阀。

6) 控制阀: 接受执行器的输出信号变换为控制进给量。控制阀有气开式和气关式两种。

7) 干扰: 凡是影响被控量的各种作用信号均称为干扰或扰动。干扰分内干扰和外干扰(内干扰如原料成分的变化等)。

8) 偏差: 准确地说, 应是被控量的给定值与实际值之差。但能够直接得到的信号是被控量的测量值, 故通常把给定值与测量值之差称为偏差。

9) 辅助装置: 为保证过程控制系统的安全性、稳定性等附加的一些装置, 如报警装置、联锁保护装置等。

过程控制系统涉及冶金、机械、石油、化工、电力、轻工、建材等领域, 但控制的目的均为保持过程控制系统中的被控变量为一定值或被控变量按事先预定的控制规律变化。

过程控制的被控对象涉及的范围很广。被控对象不一定是指一个具体的设备, 不少情况下被控对象是指一个过程。有些过程可能涉及好几种设备, 而在有些设备内部可能包括了几个过程。过程控制系统具有以下特点:

1) 被控对象的多样性。过程控制涉及各个工业领域(如石化、电力、冶金、造纸、化工、医药、食品等领域), 被控变量有温度、压力、流量、液位、成分等, 生产工艺各不相同, 执行机构多种多样, 因此过程控制系统中的被控对象具有多样性。

2) 对象特性的难辨性。过程控制被控对象的内在机理较为复杂, 不论简单还是复杂过程, 它存在严重的非线性, 且有多变量过程, 有些被控对象的特性随时间或工作条件而变化, 要想完全从机理上揭示其内在规律, 以获得精确的数学模型还有较大的困难, 即对象复杂性和不确定性的控制过程, 采用机理建模非常困难, 甚至是不可能的。可根据过程输入、输出数据确定过程模型的结构和参数的系统辨识方法建模, 构成白箱模型、黑箱模型和灰箱模型。

3) 对象的滞后和耦合。在化工、热工等过程控制中, 被控量往往具有较大的惯性, 被控对象往往具有纯滞后性(如化工管道加料的延迟以及化学反应的滞后)。被控对象的滞后, 对于调节过程产生不利的影晌, 它将降低调节系统的稳定性, 增大调节参数的偏差, 延长调节时间。

在实际生产过程中, 往往有多个参数(被控量)需要控制, 又有多个变量可用作控制量。在很多情况下, 被控量与控制量之间呈现出交互影响的关系, 每个控制量的变化会同同时引起几个被控量的变化, 形成控制量与被控量的耦合。耦合的存在会使过程控制系统变得复杂化。

4) 特性往往具有非线性。客观世界本来就是非线性的, 线性只是一种近似。在工业生产过程中, 大多数过程都是非线性的。非线性是控制系统中普遍存在的系统特性, 来源于被



控对象特性、控制系统硬件和控制算法。如间歇式加温过程、齿轮运动等为典型的非线性控制系统。

对于一个非线性程度不高的过程，可以把它当作一个线性过程来处理。

5) 控制方案的多样性。由于被控过程的多样性，而且多半属于多变量、非线性分布参数和时变参数，因此过程控制中应用的控制方案的种类和内容十分丰富。过程控制系统的发展随着工业生产要求的提高和生产技术的发展，出现了单回路控制、串级控制、前馈-反馈控制、比值控制、均匀控制、分程控制、选择性控制、智能控制(专家控制、模糊控制、神经网络控制等)、数字和计算机过程控制系统等。

6) 定值控制是主要控制形式。大多数生产过程中被控量的设定值为一定值，控制的目的是使系统尽快减小或消除干扰的影响，使被控量保持或接近设定值，即系统为定值控制。

7) 系统多属于慢变化过程。过程控制的被控对象往往具有很大的储蓄容积，导致被控量的变化十分缓慢。

8) 容错性。对复杂(如非线性、快时变、复杂多变量和环境扰动等)控制系统来说，能进行有效的全局控制，并具有较强的容错能力。

过程控制系统按控制器形式分为常规仪表过程控制系统和计算机过程控制系统。

计算机的应用不仅促进了现代控制理论的发展，而且也推动了工业生产过程向深度与广度进军。为解决大规模复杂系统的优化和控制问题，计算机过程控制系统经历了直接数字控制(DDC)、集散控制系统(DCS)、现场总线控制系统，使生产自动化提高到了更高的水平，甚至在向智能化的方向大步迈进。

随着计算机技术、现代控制理论和智能控制理论的发展，针对工业过程的非线性、时变性、不确定性等特点，过程控制算法从最基本的比例积分微分(PID)控制发展到了先进控制策略(模糊控制、预测控制、自适应控制等)。

1.3 过程控制系统的分类

1.3.1 一般分类

1. 按控制工艺参数分类

过程控制系统按被控量分为温度控制系统、压力控制系统、流量控制系统、成分控制系统、物位控制系统等。

2. 按控制系统的任务分类

根据生产任务的要求，过程控制系统分为比值控制、均匀控制、串级控制、前馈控制等。

3. 按自动化装置的不同分类

有常规仪表控制系统、计算机控制系统。

4. 按控制策略分类

有简单控制、复杂控制和先进控制。



1.3.2 按设定值形式分类

按系统输入信号的特点可分为：

1. 定值控制系统

系统被控量的设定值是恒值或在规定的较小范围附近波动的量。控制的目的是使系统的被控量尽快排除各种干扰的影响，维持在设定值上。常见的定值控制系统有恒温、恒压、恒速控制系统。

2. 随动控制系统

系统被控量的设定值为一个事先无法确定的随时间任意变化的量。控制目的是使系统的被控量能迅速、平稳地跟踪输入信号的变化，如雷达天线自动跟踪系统、高炮自动瞄准系统。

3. 程序控制系统

系统被控量的设定值是事先确定的程序信号，控制的目的是使系统的被控量按照要求的程序动作。如机械工业中退火炉的温度控制系统，其设定值是按升温、保温、逐次降温等程序变化的，如间歇生产过程中化学反应器的温度控制和电脑控制的洗衣机、电饭煲等。

1.3.3 按系统的结构特点分类

1. 反馈控制系统

反馈控制系统通过测量系统的输出值、反馈到系统的输入端与设定值比较，产生偏差信号，进行系统控制，系统输入端和输出端之间不仅存在输入到输出的前向通道，还存在输出到输入的反馈通道，构成闭环控制系统。

反馈控制系统是利用偏差纠正偏差，即偏差值是控制的依据，控制的目的是达到减小或消除偏差，控制系统有较高的控制精度和较好的适应能力。由于反馈控制系统的控制作用只有在偏差出现后才产生，因此对于具有大惯性和纯滞后时间常数较大的时变系统，反馈控制系统的控制作用不及时，降低了控制效果。

反馈控制系统的反馈信号可能有多个，可以构成多回路反馈控制系统。

2. 前馈控制系统

前馈控制是一种利用输入或扰动信号的直接控制作用构成的开环控制系统。如果被控过程具有严重的可测、可控的扰动信号，前馈控制可以利用干扰信号直接产生控制输出，以减少干扰对控制系统的影响，它应用的是补偿原理。前馈控制器能有效地改善控制系统的性能。

3. 复合控制系统(前馈-反馈控制系统)

按输入或扰动直接构成的开环控制通常与包含按偏差的闭环控制共同组成反馈-前馈控制系统，称之为复合控制系统。对于滞后较大的控制对象，其反馈控制作用不能及时影响系统的输出，以致引起输出量的过大波动，直接影响控制品质。如果引起输出量较大波动的主要外来扰动参量是可量测和可控的，则可在反馈控制的同时，利用外来扰动信号直接控制输出，构成复合控制能迅速有效地补偿外来扰动对整个系统的影响，并利于提高控制精度。

前馈控制是一种开环控制方法。开环控制的优点是不存在闭环系统稳定性问题，但它要求模型精确，且不能消除余差。所以前馈控制和反馈控制一起构成了复合控制，这样既发挥



了前馈控制校正及时的优点，又保持了反馈控制能克服多种扰动对被控量影响的特点。

1.4 过程控制系统的性能指标

工业过程控制系统是否能精确地保持被控量按照生产工艺要求的预定规律变化，这取决于所设计的控制系统结构、被控过程的特性、过程检测装置、控制策略等。

一个性能良好的过程控制系统，在受到外来扰动影响或设定值发生变化后，应能迅速、准确、平稳地恢复或趋近到设定值。

过程控制系统的评价指标可从以下三个方面考虑：

1) 稳定性：稳定性是控制系统的首要要求，并且考虑到实际过程控制系统工作环境、参数、原料等的变化，对系统除要求稳定外，还要求其具有一定的稳定裕量。

2) 准确性：系统过渡过程结束后，控制系统被控量与设定值之间的偏差是衡量系统性能的重要指标，通常希望静态偏差尽可能小。

3) 快速性：控制系统受到干扰影响后，系统是否可迅速做出响应，根据偏差调节操纵变量，使被控量与设定值之间的偏差尽快地减小，并且被控量在工艺要求范围内变化。

过程控制系统的性能指标应根据生产工艺过程的实际需要确定，可分为时域控制性能指标和综合控制性能指标。

1.4.1 时域控制性能指标

采用系统阶跃输入信号作用下系统的输出响应曲线的一些特征点来定义控制系统的时域性能指标，有衰减比、衰减率、最大动态偏差、超调量、调节时间、振荡频率等。

系统的阶跃响应曲线如图 1-3 所示。

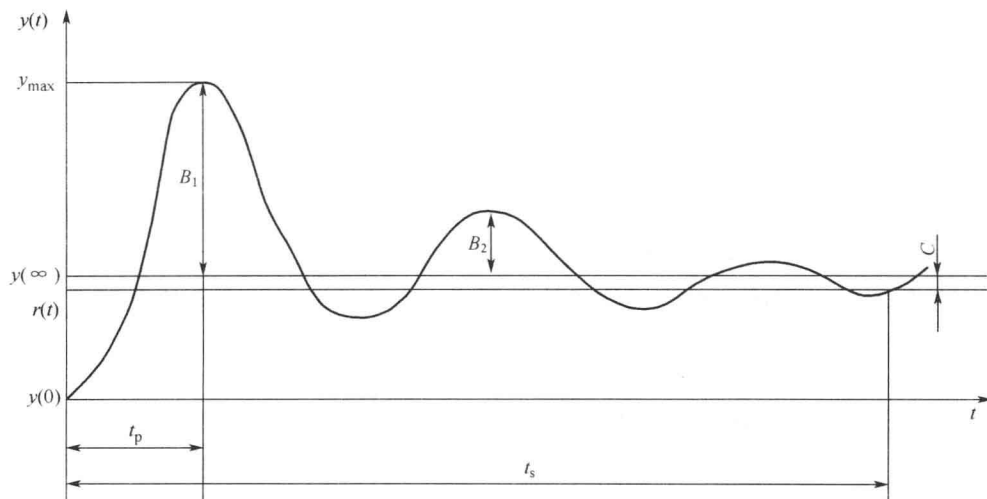


图 1-3 系统的阶跃响应曲线

1. 衰减比

衰减比表示系统衰减响应曲线的衰减程度，定义为两个相邻的同向波峰值之比，即



$$n = \frac{B_1}{B_2}$$

衰减比是系统的稳定性指标, 衰减比越大, 系统越稳定, 当衰减比 $n=1$ 时, 系统的输出为等幅振荡; $n < 1$ 时系统的响应为发散振荡; $n > 1$ 时系统的响应为衰减振荡。一般认为, 随动系统 $n=10$ 、定值系统 $n=4$ 时, 系统的性能较佳, 衰减比应根据实际情况灵活处理。

2. 衰减率

衰减率也用于对控制系统稳定性的衡量。衰减率是指每经过一个周期, 输出响应曲线波动幅值衰减的百分数, 即

$$\Psi = \frac{B_1 - B_2}{B_1} = 1 - \frac{B_2}{B_1} = 1 - \frac{1}{n}$$

一般当 $\Psi=0.75 \sim 0.9$ 时, 对应于 $n=4 \sim 10$ 。

3. 余差(静态偏差) C

余差是指输出系统的过渡过程稳态值与设定值之差。余差是控制系统稳态准确性指标, 对于定值系统或随动系统, 一般要求余差为零或小于工艺设计范围。

4. 最大动态偏差(最大超调量)

最大动态偏差是指系统输出量的最大值与输出的稳态值之差, 其与输出稳态值的相对百分数构成系统的最大超调量 $\sigma\%$ 。最大超调量表征控制系统最大输出值偏离稳态值的程度, 它是系统动态稳定性的重要指标。最大超调量定义为

$$\sigma\% = \frac{y(t_p) - y(\infty)}{y(\infty)} \times 100\%$$

5. 调节时间 t_s (过渡过程时间)

系统的调节时间 t_s 是指控制系统受到扰动作用开始, 直到被控量从过渡过程状态恢复到新的平衡状态的 $\pm 5\%$ (或 $\pm 2\%$) 误差带的范围内所需要的最短时间。调节时间反映了控制系统的快速性, 调节时间 t_s 越短, 表明系统动态响应越快, 系统克服扰动信号的能力越强。

对于不同的被控对象, 系统的性能指标要求有所侧重。例如, 随动系统动态特性要求较高。同一系统中各种性能指标互相制约, 提高了系统的快速性, 可能会加速系统振荡; 改善了系统的平稳性, 控制过程又可能拖长, 甚至使系统的稳态精度也变差。实际上, 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。

1.4.2 综合控制性能指标

控制系统中除上述单项控制性能指标外, 也采用综合控制性能指标来衡量控制系统的优劣, 常采用偏差积分性能指标。

1. 偏差积分(IE)

$$J = \int_0^{\infty} e(t) dt \rightarrow \min$$

2. 偏差绝对值积分(IAE)

$$J = \int_0^{\infty} |e(t)| dt \rightarrow \min$$



该综合性能指标适用于衰减和无静差系统。

3. 偏差绝对值与时间乘积的积分(ITAE)

$$J = \int_0^{\infty} t |e(t)| dt \rightarrow \min$$

该综合性能指标既包含了控制系统初始大误差对性能指标的影响,又同时强调了过渡过程后期的误差对系统性能指标的影响。

4. 偏差二次方值积分(ISE)

$$J = \int_0^{\infty} e^2(t) dt \rightarrow \min$$

该积分性能指标重点考虑抑制过渡过程中的大偏差。

采用不同积分性能指标对控制系统整个过渡过程优良程度的侧重点不同。

1.5 过程控制系统的 MATLAB 计算与仿真

1.5.1 控制系统计算机仿真

控制系统的计算机仿真是一门涉及控制理论、计算数学与计算机技术的综合性学科,它的产生及发展差不多是与计算机的发明和发展同步进行的。

控制系统的计算机仿真就是以控制系统的模型为基础,采用数学模型代替实际的控制系统,以计算机为工具,对控制系统进行实验和研究的一种方法。

控制系统计算机仿真的过程包含如下步骤:

1. 建立控制系统的数学模型

系统的数学模型是指描述系统输入、输出变量以及内部变量之间的数学表达式。系统数学模型的建立可采用解析法和实验法,常见的数学模型有微分方程、传递函数、结构图、状态空间表达式。

2. 建立控制系统的仿真模型

根据控制系统的数学模型转换成能够对系统进行仿真的模型。

3. 编制控制系统的仿真软件

采用各种各样的计算机语言(Basic、FORTRAN、C 等语言)编制控制系统的仿真程序,或直接利用一些仿真语言。

4. 进行系统仿真实验并输出仿真结果

通过对仿真模型及实验参数的修改,进行系统仿真实验,输出仿真结果。

应用 MATLAB 的 Toolbox 及 Simulink 集成环境作为仿真工具,完成 MATLAB 仿真。

1.5.2 控制系统的 MATLAB 计算与仿真

MATLAB 是矩阵实验室(Matrix Laboratory)之意。MATLAB 具有以下主要特点:

1. 功能强大,适用范围广

MATLAB 除具备卓越的数值计算能力外,它还提供了专业水平的符号计算。差不多所有科学研究与工程技术应用所需要的计算, MATLAB 均可完成。

2. 语言简洁紧凑,使用方便灵活