

GAODENGXUEXIAOJIAOCAI

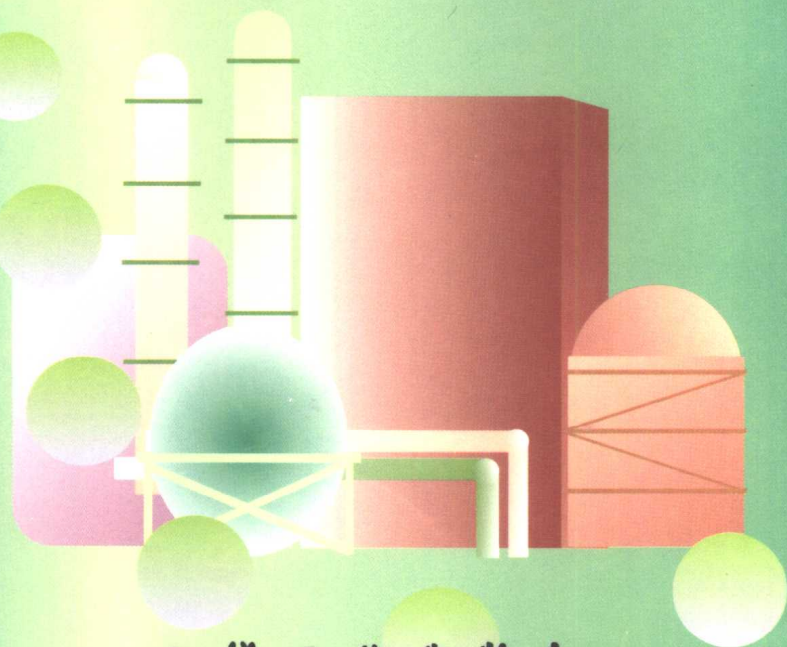
高等学校教材



化工过程控制原理

(第二版)

周春晖 主编



化学工业出版社

高等学校教材

化工过程控制原理

(第二版)

周春晖 主编

化学工业出版社

·北京·

(京)新登字 039 号

图书在版编目 (CIP) 数据

化工过程控制原理/周春晖主编. —2 版. —北京: 化学工业出版社, 1998
高等学校教材
ISBN 7-5025-2034-1

I. 化… II. 周… III. 化工过程-过程控制-高等学校-教材 N. TQ02

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (97) 第 22569 号

高等学校教材
化工过程控制原理
(第二版)

周春晖 主编

责任编辑: 唐旭华 王丽娜

责任校对: 陶燕华

封面设计: 宫 历

*

化学工业出版社出版发行

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

新华书店北京发行所经销

北京云浩印制厂印刷

三河市延风装订厂装订

*

开本 787×1092 毫米 1/16 印张 25½ 字数 630 千字

1998 年 4 月第 2 版 1998 年 4 月北京第 1 次印刷

印 数: 1—5000

ISBN 7-5025-2034-1/G · 596

定 价: 27.50 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责调换

前 言

在 70 年代后期,当我们着手编写本书第一版的时候,在过程控制这一领域中,还是以常规的控制器和常规的控制机理为主的状态。虽然控制理论及一些先进的控制规律已经有一定程度的发展,但是限于实际控制手段的局限,在生产上很少实现,较多地尚在实验之中,因而当时对于本书的编写目标,定为以经典控制理论为主并适当地引入一些现代控制理论的基础。

由于控制理论的高速发展,更由于计算机及其软件的突飞猛进,在今天,使昔日望尘莫及的复杂控制 and 多变量综合控制等方案能够进行实验研究,有的能在现场得以实现。从这种现状来看,本书的第一版已经远不能满足要求了。如何修订这本教材,经过一些时间的考虑认为,仍然以写好基础材料为主,不过在编写中不再划分为经典与现代两部分,而是将两者溶为一个完整的整体,让学生在此基础上,碰到要解决的问题时,能自然地深入到有关这一问题的各种文献中去,经过分析比较,能选出一种最好的方法,进一步具体解决之。

在这里对本书的书名中“化工过程”需略加说明,它不是我国习惯上按工业领导部门而定的,而是学科上的含意,因而诸如炼钢、炼铁、造纸、印染,以及医药的生产等等都在本书的考虑范围。

全书共分八章,第一章绪论;第二章介绍系统建模的方法;第三章介绍控制系统的时域分析方法;第四章介绍控制系统的根轨迹分析方法;第五章介绍控制系统的频域分析与设计方法;第六章介绍采样控制系统的概念和方法;第七章介绍状态空间分析设计方法;第八章介绍了非线性系统控制的分析设计方法以及系统稳定性的分析方法。

本书由周春晖主编,钱积新执笔第一章,鲍立威执笔第二、七、八章,梁军执笔第四、五章,吴明光执笔第六、二、三章,叶效锋执笔第三章,全书由周春晖作了全面的审阅和修正。

本书中出现不当之处,请阅者指出,以便编者将在下次印刷或再版时修正。

编 者

1997 年 9 月

内 容 简 介

《化工过程控制原理(第二版)》一书共分八章,第一章概述了生产过程自动化的发展历史和趋势以及过程控制的一些基本概念;第二章介绍了建立控制系统各环节的数学模型的方法及模型之间的转化关系;第三章介绍了控制系统的时域分析方法;第四章介绍了控制系统的根轨迹分析与设计方法;第五章介绍了控制系统的频率特性分析与设计方法;第六章介绍了采样控制系统和离散化系统模型及分析的方法;第七章介绍了线性系统的状态空间分析设计方法;第八章介绍了非线性系统分析方法以及系统稳定性分析方法;在本书的附录中介绍了《化工过程控制原理》课程的计算机辅助教学软件“控制原理CAI”,并提供该软件的软盘。全书由周春晖主编、审阅和修改。

本书将经典控制理论与现代控制理论的基本概念和基本方法相结合,从化工过程控制的特点出发,突出了反馈控制的基本思想,强调了理论与实践的结合。

本书是高等学校生产过程自动化与仪表专业的教材,也可供从事生产过程自动化工作的有关技术人员参考。

目 录

第一章 概述	1
第一节 生产过程自动化的发展和趋势.....	1
第二节 控制系统的组成.....	3
第三节 控制系统的主要类型.....	5
第二章 控制系统的数学模型	9
第一节 被控对象的微分方程模型.....	9
2.1.1 几个典型例子	9
2.1.2 非线性特性的局部线性化处理.....	13
2.1.3 数学模型的无因次化.....	14
第二节 控制系统的状态空间模型	16
2.2.1 几个典型例子的状态方程模型.....	16
2.2.2 状态空间的基本概念.....	20
第三节 分布参数系统数学模型	24
第四节 纯滞后特性和其他特性	26
第五节 控制系统中其他环节的数学模型	28
2.5.1 工业控制器的数学模型.....	28
2.5.2 测量元件的数学模型.....	29
2.5.3 执行机构的数学模型.....	31
第六节 控制系统的复域数学模型	32
2.6.1 传递函数.....	32
2.6.2 系统方块图.....	34
2.6.3 利用方块图进行分析运算.....	37
2.6.4 用传递矩阵描述多变量系统.....	46
2.6.5 信号流图.....	48
第七节 数学模型各种表达式之间的对应关系	53
2.7.1 由微分方程式求状态方程式.....	53
2.7.2 由状态方程式求传递函数.....	57
2.7.3 状态变换和状态变换中特征值的不变性.....	58
2.7.4 由传递函数求状态空间表达式.....	59
2.7.5 由方块图求系统状态空间表达式.....	62
第八节 本章小结	63
第三章 控制系统的时域分析方法	64
第一节 控制系统的过渡过程分析	64
3.1.1 典型试验信号.....	64
3.1.2 一阶系统的动态响应.....	65

3.1.3	二阶系统的动态响应	68
3.1.4	高阶系统的动态响应	76
3.1.5	控制系统动态响应的质量指标	77
3.1.6	控制系统稳态偏差分析	88
第二节	控制系统的劳斯稳定判据	91
3.2.1	控制系统稳定的基本条件	91
3.2.2	劳斯 (E. J. Routh) 稳定判据	91
3.2.3	用劳斯稳定判据分析系统参数对稳定性的影响	95
第三节	常规控制规律对系统控制质量的影响	96
3.3.1	常规控制器的控制规律	96
3.3.2	控制器参数对控制过程的影响	98
第四节	测量滞后对控制质量的影响	101
第五节	控制系统状态方程的分析	103
3.5.1	矩阵函数和状态转移矩阵	104
3.5.2	线性定常状态方程的解	111
3.5.3	控制系统状态方程的稳定性判据	113
3.5.4	控制系统状态方程的动态响应	114
第六节	本章小结	115
第四章	根轨迹方法: 分析与设计	117
第一节	根轨迹的基本概念	117
第二节	根轨迹的性质	120
第三节	根轨迹的计算机辅助生成	132
第四节	根轨迹方法的推广	134
4.4.1	多参数根轨迹——根轨迹簇	134
4.4.2	负参数的根轨迹	136
4.4.3	纯滞后系统的根轨迹	139
4.4.4	离散控制系统的根轨迹	142
第五节	控制系统的根轨迹设计	143
4.5.1	开环极点对系统质量的影响	143
4.5.2	开环零点对系统质量的影响	145
4.5.3	增益 K 的选取	145
4.5.4	超前补偿器的设计	147
4.5.5	滞后补偿器的设计	149
4.5.6	系统闭环动态响应的根轨迹分析	151
第六节	极点配置原理	152
第七节	本章小结	159
第五章	频率特性分析法	161
第一节	频率特性及其图示法	161
5.1.1	频率特性的定义	161
5.1.2	频率特性与传递函数的关系	162

5.1.3 频率特性的图示法	162
第二节 Nyquist 稳定性判据	174
第三节 频域性能指标	181
第四节 频率特性方法的计算机辅助设计	188
5.4.1 公式推导法	188
5.4.2 基本模块法	189
5.4.3 多项式综合除法	189
5.4.4 幅值裕量和相位裕量的计算	190
第五节 补偿器设计方法	191
第六节 多变量系统的频率特性方法	198
第七节 鲁棒控制理论与方法	201
5.7.1 历史发展过程	201
5.7.2 鲁棒控制系统研究的时域方法	203
5.7.3 鲁棒控制系统研究的频域方法	204
5.7.4 鲁棒控制理论的应用	206
第八节 本章小结	206
第六章 采样控制系统	207
第一节 采样控制系统概述	207
第二节 采样过程及采样定理	208
6.2.1 采样过程	208
6.2.2 采样过程的数学描述	208
6.2.3 采样定理	210
6.2.4 采样信号的复现	211
第三节 Z 变换	212
6.3.1 Z 变换定义	212
6.3.2 Z 变换方法	213
6.3.3 Z 变换性质	215
6.3.4 Z 反变换	217
6.3.5 改进 Z 变换	219
第四节 脉冲传递函数	221
6.4.1 脉冲传递函数	221
6.4.2 脉冲传递函数的代数运算法则	223
第五节 连续模型的离散化	225
6.5.1 微分方程的离散化	225
6.5.2 连续状态方程的离散化	226
6.5.3 传递函数(矩阵)的离散化	227
第六节 采样系统的数学模型及求解	228
6.6.1 差分方程和脉冲传递函数的关系	228
6.6.2 差分方程和状态方程的关系	228
6.6.3 脉冲传递函数(矩阵)和状态方程的关系	230

6.6.4	差分方程求解	236
6.6.5	离散状态方程求解	237
第七节	采样系统的性能分析	240
6.7.1	稳定性分析	241
6.7.2	采样系统稳态偏差	244
6.7.3	Z 平面上根的分布和系统动态品质的关系	245
第八节	数字控制器设计	247
6.8.1	模拟化设计方法	247
6.8.2	数字化设计方法	248
第九节	本章小结	252
第七章	线性系统状态空间设计方法	253
第一节	系统能控性和能观性	253
7.1.1	系统能控性和能观性的基本概念	253
7.1.2	系统能控性和能观性定理	256
7.1.3	能控性和能观性的 PBH 检验	262
第二节	线性变换及标准形	263
7.2.1	状态方程的线性变换	263
7.2.2	状态方程的几种特殊形式	264
7.2.3	状态方程的能控能观标准形	265
7.2.4	不变子空间分解	268
第三节	线性系统状态反馈控制	273
7.3.1	状态空间设计法的基本思想	273
7.3.2	状态反馈控制原理	274
7.3.3	闭环线性系统的能控性和能观性	276
第四节	线性系统极点配置法	279
7.4.1	单输入单输出系统的极点配置	279
7.4.2	多输入多输出系统的极点配置	286
7.4.3	闭环系统极点位置的选择	288
第五节	线性二次型最优调节器的设计	293
7.5.1	动态系统的最优性条件	295
7.5.2	无限时间状态调节器问题	296
7.5.3	无限时间输出调节器问题	299
7.5.4	代数黎卡提方程的求解	301
第六节	持续扰动系统的状态反馈设计	302
第七节	渐近跟踪控制问题	307
第八节	状态观测器	309
7.8.1	观测器的基本思想	309
7.8.2	全维状态观测器	311
7.8.3	降维状态观测器	314
7.8.4	分离定理	317

第九节 本章小结	318
第八章 非线性系统和系统稳定性分析	319
第一节 非线性系统概述	319
第二节 描述函数分析法	321
8.2.1 描述函数的概念	321
8.2.2 描述函数分析法	331
第三节 相平面分析法	337
8.3.1 相平面的概念	337
8.3.2 相平面分析法	342
第四节 非线性系统的李雅普诺夫稳定性分析法	348
8.4.1 非线性系统稳定性的一般定义	348
8.4.2 李雅普诺夫稳定性分析法	349
第五节 时滞系统的 Smith 预估控制及稳定性分析	358
8.5.1 时滞过程的 Smith 预估控制	359
8.5.2 一阶时滞系统的 Smith 预估控制器的稳定性分析	362
8.5.3 存在参数不确定时的 Smith 预估控制器的鲁棒设计	371
第六节 本章小结	378
附录 化工过程控制原理计算机辅助教学软件 CAI 使用手册	380
一、化工过程控制原理计算机辅助教学软件结构	380
(一) 进入控制原理 CAI	380
(二) 教学仿真环境下各菜单的内容简介	381
二、化工过程控制原理 CAI 的操作	382
(一) 系统模型的文件操作	382
(二) 对当前模型的操作	387
(三) 工程文件	389
(四) 帮助系统	391
名词索引	393
参考文献	397

第一章 概 述

第一节 生产过程自动化的发展和趋势

生产过程自动化从系统的角度讲,狭义地可以定义为控制理论及其在生产过程中的应用。从广义上讲还应包括自动化的工具,诸如检测、控制仪表及控制用计算机系统等。所以论及生产过程自动化的发展就不免要提及作为自动化的工具,特别是计算机的发展以及生产实践对控制理论发展的促进作用。如果要更加完善地来定义生产过程自动化,则还应包括为保证生产安全进行的越限报警、联锁以及近年来颇受重视的故障诊断、容错控制等,甚至更广义地还包括了操作优化、最优调度与生产管理等内容。这里暂且用狭义的定义来讨论生产过程自动化的发展和趋势。

控制理论和其他技术科学一样,它的产生与发展主要由人类生产与发展的需求并由人类已有的技术和知识水平所决定。控制中的一些概念,例如反馈、补偿等,早在一千多年前中国古代的计时装置——铜壶滴漏中已有体现。但当时由于生产需求和技术水平的限制,控制理论并没有在这古老文明的土地上产生。直到19世纪中(1868年),物理学家J. C. Maxwell才作出关于蒸汽机调速器稳定性分析的著名论文。这是人类历史上第一篇控制理论的论文。然而,自动控制理论作为一门独立的学科却是从20世纪40年代末(1948年),二次世界大战后由N. Wiener发表了他的著名著作“控制论”以后产生并迅速发展起来的。

30年代以来,自动化技术首先在电子通讯工程中获得了惊人的成就,对自动控制理论产生了极大的推动作用。40年代末产生以Nyquist的工作所开创的基于反馈回路的经典控制理论,它是以传递函数为基础,主要适用于单输入单输出(SISO)线性定常系统的分析与综合问题。系统的分析方法有时间域方法、频率响应法、根轨迹法等,这些方法中以频率响应法为主要方法。系统的综合手段是输出反馈和校正,综合的目标是使系统在满足性能指标要求的同时具有足够的稳定裕量,以此来保证系统在对象特性发生变化和外部干扰影响下仍能保持可接受的控制品质。

从40年代至60年代,经典控制理论为生产过程控制系统的设计提供了强有力的理论支持。以此为基础的单变量控制系统得到了广泛的应用,并达到了相当完善的程度。在这一时期工业自动化技术工具是气动或电动模拟的仪表或调节器。

尽管如此,从60年代开始,由于工业装置规模的扩大,出于充分利用各种能级能量的考虑,在大型工业装置中单元操作之间的耦合更加紧密,使得孤立地考虑一些工艺变量的定值控制已很难满足稳定生产的基本要求。另一方面,大工业生产对产品质量提出了更高的要求。在这段时期中,尤其是航天航空事业的发展,客观上出现了更为困难的控制问题。建立在试探方法基础之上的经典控制理论中的系统设计方法已不能满足需要(因为它们通常得不到最优控制系统)。这就对控制理论提出了新的要求。工程系统的复杂性在理论上体现为对象是多输入多输出(MIMO)、时变、非线性,这对控制系统的性能指标提出了更严格的要求,系统的复杂程度也大大增加,相应地计算工作量也急剧增加。本世纪60年代一种以设计和分析复杂控制系统的新方法——现代控制理论便应运而生,它是以Bellman的动态规划理论(1957

年)、Kalman 等的最优滤波理论(1961 年)和 Pontryagin 等的极大值原理(1962 年)为标志的建立在状态空间上的理论。以现代控制理论为基础的控制器设计方法是规范而强有力的,能够有效地处理很多简单或复杂的系统控制问题。这种新的理论和方法很快在航天航空领域,接着在生产过程控制中得到了越来越多的应用。同时理论本身也得到了迅速的发展。然而,现代控制理论真正在工业生产中得到广泛的应用还是在七、八十年代的事。这一时期由于计算机的可靠性及性能价格比的大幅度提高,特别是作为基础级控制用的集中分散式控制系统(DCS)以及多级递阶结构的控制方式被广泛采用,使得各种复杂控制方法的在线实现成为可能。经过近一、二十年的探索,工业过程自动化已从稳定单个工艺变量的 SISO 系统发展到着眼于稳定整个单元操作运行工况的 MIMO 系统,进而发展到生产装置的优化操作及着眼于以市场为导向的集管理与控制于一体的工厂综合自动化。随着控制规模的扩大,自动化带来的经济效益也显著增长。

工业过程自动化其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(仅限于越限报警和联锁)与平稳地进行。

由于多数工业过程运行工况一般不会偏离额定工况太远,而且简单工业过程往往可以用一阶或二阶加纯滞后的、具有自衡的集中参数对象特性来近似描述,故很多控制回路只需要采用常规仪表及简单的单输入单输出的控制方案即可满足控制的要求。在工业过程中为使生产过程平稳地进行,极大部分的控制系统的对诸如温度、压力、流量、物位等工艺变量的定值控制系统。这就是直到现在为止,为什么经典控制方法至今不衰的重要原因。据有关文献报道,目前在工业过程控制系统中 90% 以上还是采用 PID 及一些简单的多回路控制系统(它们往往在基础控制级 DCS 上实现)。利用现代控制理论设计的控制系统只是在特殊需要时(特别是对产品质量控制时)才被采用。所以对于经典控制理论的学习与认识不仅在实际应用上不是可有可无的,而且在学习与理解现代控制理论的分析与设计方法上也是非常重要的。因为现代控制理论在理论上讲是更系统、更规范、更强有力,但是其分析与设计方法的物理意义却远没有经典控制理论清晰。

现代控制理论对于经典控制理论来说是一大进步,解决了一大类难以控制的问题。但在应用中又出现了新的问题。数学上比较完美的现代控制理论,它是严格地依赖于控制对象的数学模型。众所周知,在工业生产中要得到被控对象准确的数学模型是非常困难的,在建模过程(包括机理建模与辨识)中必要的假设与简化是必不可少的。也就是说工业过程中的被控对象的模型总包含有被称为未建模动态部分。由于它的存在有时会使控制系统的品质大大恶化,有时甚至使诸如自适应控制系统发散。除了被控对象的上述这种不确定性以外,工业生产过程中的干扰也十分复杂,它们的统计特性往往未知,有时甚至是不确定的,这给设计控制系统带来很大的困难。因而针对上述情况,近年来成为控制理论界研究的热点,如鲁棒控制、非线性控制、自适应控制、预测控制等一直长盛不衰。与此同时一些所谓无模型控制方法如模糊控制、专家系统、人工神经网络控制等也应运而生并且蓬勃发展,在控制理论界形成一个多角度、多方位的研究势态。

当前工业过程自动化研究的另一个热点是以市场为导向的集管理与控制于一体的计算机集成综合自动化系统。由于其给企业带来显著的经济效益,已引起企业界与学术界广泛的兴趣。从系统的角度来研究综合自动化系统,这使得控制理论从系统的总体特征上遇到了前所未有的困难。解决这类问题的重要途径可以是将控制理论、运筹学与智能控制三者相结合。而

这些问题的解决可能意味着新一代控制理论或复杂系统控制理论的产生。

值得指出的是，虽然现在已有许多现成的先进控制理论，并且它们还在吸引着众多的理论工作者进行探索。但是从应用的角度看，仍然缺乏行之有效的控制方法与控制技术去满足不断发展的工业生产提出来的各种要求。作为自动控制领域的工作者，我们需要有一种清醒的认识，即自动控制界所面临的这种严峻的现实，以及造成这种现实的原因。一般来说，理论是从实践中抽象而来，而实践则是在理论指导下进行。自动控制领域目前的现实则是理论研究与应用研究之间的严重脱节，理论的研究成果无法用来指导实践中的应用研究，这说明了理论研究的不完善性。造成这种不完善性的直接原因就在于某些理论研究甚至在一开始就没有意识到应该为应用服务。何以使然？这就是在某种程度上存在着只重视理论研究而忽视了应用技术研究，忽视了如何把实验研究成果进一步深入探索，以转化为生产进步的技术动力。这种主观上的偏颇，造成了在工业自动化领域中学术研究上的显羨浮华而深入踏实不足的风气。这些就是造成目前普遍存在的科学研究成果累累，而转化为生产力的却十分寥寥的根本原因。当然自动化领域是一个涉及范围很广、包括内容极丰的研究领域，每种自动控制理论的提出都有其相应的背景和应用对象，企图包罗万象是不可能的。但是对于我们每一个自动控制领域的工作者而言，这一点却是极其值得注意的，要注意甄别每一种自动控制理论的应用背景，切不可一概而论。这样说，并不是说理论研究不重要，本书恰恰正是一本关于工业自动控制的基本概念、基本理论和基本方法的书。这样说的目的在于强调控制理论与生产实际的密切结合，纠正在理论上做理论，在文章中写文章的倾向，提倡加强应用理论和应用技术的研究，真正使科学研究的成果转化为现实的生产力，为经济发展服务。

第二节 控制系统的组成

图 1-1 所示的反应器温度控制是一个简单的工程例子。图中的表示方法称控制流程图。在正常运转中，反应器的温度 y_{out} 是控制的目的，称为被控变量。控制的目标是希望这个温度保持在一个恒定的数值 y_0 ，称为给定值。因为化学反应是放热的，用冷却水 W 通入夹套进行冷却。混合原料由前道工序送来，因而其流量 q 及温度 y_m 都可能波动，这是造成被控变量波动的主要原因（如果反应生成热很小而忽略了反应生成热的变化），一般都称为扰动。生成物的流量与进料流量相同，反应器中保持着恒定的物料量。反应器的温度通过温度计测量出来经温度变送器 TT 将其送至温度控制器 TC ，在那里与给定值 y_0 进行比较，按比较的结果 $(y_0 - z)$ 进行一定的计算，然后带动控制阀移动，使冷却水量改变，以达到消除扰动影响的目的。冷却水流量是用作消除扰动影响的手段，故称为控制变量。控制器进行计算的方法称控制规律。

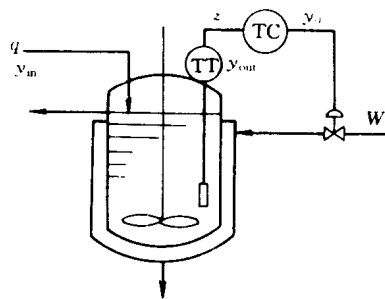


图 1-1 反应器温度控制系统

上面这样多的叙述，目的在于比较清楚地描述这一温度控制系统。但是这种方法总是冗长噜苏，在自动化领域里常常采用直观图形的方法来表达，具体如图 1-2，叫做方块图。图中每一条线代表系统中的一个变量信号，线上的箭头表示信号传递的方向。每个方块代表系统中的一个环节。线上的小圆圈代表加法或减法器，由进入圆圈信号线上的正负符号来决定。有了这些规定，不需要文字的补充，方块图就可以把一个控制系统变量间的关系完整地表达出来。如果方块图和控制流程图一起给出，那么整个系统的全貌就更清楚了。

从图 1-2 看出，一个控制系统包括四个基本组成部分，一个是控制对象，简称对象，即图 1-1 中的反应器及其内部的反应物和生成物；第二是控制阀；第三是测量元件，有的情况还包括变送器；第四是控制器，通常控制器也包括图 1-2 中所示的减法器，这个减法器一般称为控制器的比较元件。随着需要和设计的不同，还可以有其他的补充组成部分。

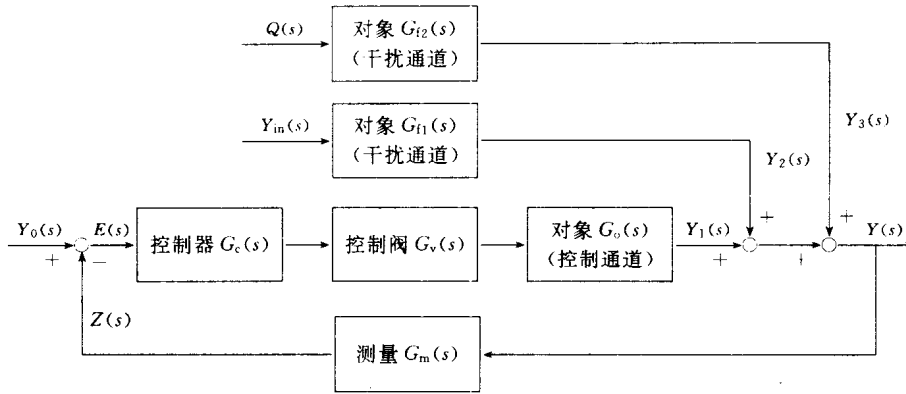


图 1-2 温度控制系统的方块图

应用图 1-2 表示系统的一个主要优点是它能定量地描述各个信号间的关系。定量的数学关系式常用传递函数，用符号 $G(s)$ 代表，并用注脚说明所属的组件。传递函数是用拉氏变换形式表示的输入对输出影响的关系式。从图上看对象有两类通道或两类传递函数，而其他的组件只有一种。如果与图 1-1 对比一下，就能清楚地看出将对象分为两部分的必要性。对象的控制通道是冷却水流量的改变对反应器温度的影响，代表这一影响关系的拉氏变换形式是 $G_o(s)$ ，扰动通道是进料流量或进料温度的改变对反应器温度的影响，由于表示这两种影响的微分方程式不完全相同，故分别用传递函数 $G_{i1}(s)$ 及 $G_{i2}(s)$ 代表。两类通道的传递函数在一些情况下可以相同，而在多数情况下是不相同的。

用方块图表示系统时，一般将系统的反馈回路表示在下面，将系统的正向通路表示在上面，目的是明确地将正向及反馈回路都置于固定的显著地位。通路的方向按信号的箭头指向来识别。如果一串信号的箭头都是从输入指向输出的，这一通路就叫做正向通路。如果是从输出指向输入的，亦即从输出返回到输入的，就叫做反馈回路。针对图 1-2 来说，系统的输出信号 Y 经过测量而得到信号 Z ，并被送至比较元件与给定值 Y_0 进行比较的这一通路，就是系统的反馈回路。图中反馈信号 Z 旁还有一个负号“ $-$ ”，因而称这个反馈为负反馈。假若反馈信号旁有一个正号“ $+$ ”，则称为正反馈。一般只有负反馈才有可能改善控制系统的质量，正反馈是有害的。

在方块图中带箭头的直线代表信号。信号有方向性，以图 1-1 中的系统为例，反应器温度代表对象受到扰动或控制作用后所处的状态，故称为对象的输出变量。为了在方块图中明确表示反应器温度是对象的输出，在代表反应器温度的信号线上加一个箭头，其方向是指离对象的。冷却水流量是改变对象输出的手段，故称为对象控制通道的输入变量。相似地进料流量及进料温度都是改变对象输出的因素，故也都是对象扰动通道的输入变量。为了在方块图中表明他们是输入，在冷却水流量、进料流量及进料温度等的信号线上都用一个指向对象的箭头表示。因而指向与指离的关系（或输入与输出的关系）是原因与后果的关系，而不是进入与离开的关系。故在方块图中信号的指向与指离不能与流程图中物料或能量的流入与流出

相混淆,两种情况都有方向,但两种方向不代表相同的含意。下面仍用图 1-1 的系统进一步说明,如果将系统中的控制阀改装到冷却水的出口处,这时控制变量将由流入对象的冷却水流量改换为流出对象的冷却水流量,从工艺流程上看,显然是从流入流量改换至流出流量了。但是从因果关系来看,两种情况下的流量都是改变输出温度的手段,因而都是输入,在方块图上也都具有相同的方向。除对象外,与其他系统组成部分有关的信号也按因果的关系(即信息流的方向)标定指向或指离的方向。

方块图中信号线上的箭头还有另一种方向性的含意,即所谓单向性。对每一个方块或系统,输入对输出的因果关系是单方向的,只有输入改变了才会引起输出改变,输出的改变不会反回去影响输入。例如以对象的控制通道来说,冷却水流量的变化会使反应器的温度改变,但是反过来,反应器温度的变化却不会直接使冷却水流量跟着改变。

在方块图中,各种变量的信号都用大写的字母代表,在控制流程图中都用小写字母代表。相同的字母都代表相同的变量,小写的形式表示变量的时间函数,大写则表示该变量的拉氏变换形式。

图 1-1 及图 1-2 所示的控制系统,是一种最简单最常用的形式。随着生产的发展,出现了不少复杂的控制系统,例如具有前馈补偿,非线性环节、采样环节等的系统和多变量的系统、最优化控制系统等。这些系统的基本组成还是和简单系统相似,将在后面有关章节中详述。

第三节 控制系统的主要类型

从不同的角度出发,对控制系统有不同的分类方法,本节不拟讨论这些分类方法,而是对化工自动化领域中常见的几种类型作初步的区分和说明。

从控制理论出发,早期用作改进系统质量的主要措施是反馈,反馈控制在电子通讯方面发展得较早也比较完整。在那里主要是按随动系统考虑的。以图 1-2 中的方块图来说,是按给定值的改变作为输入的系统。其他的输入都认为是次要的或较小的,都不作为分析和设计的依据。这种方法除了电子工业,还在宇航、交通、机床控制等方面得到广泛应用。

在炼油、化工等连续生产过程中,给定值往往是固定不变的,引起输出波动的原因不是给定值而是各种扰动。因为给定值不变,这一类系统通称定值控制系统。由于历史原因,在分析和设计定值系统时,多借用较成熟的随动系统理论。但是由于造成输入偏离的原因不同,故在借用的过程中需要补充和修正。这将是本书后续一些章节的重点内容。

不管是随动系统还是定值系统,都可以用图 1-2 所示的方块图表示。这个方块图有一个反馈回路,或者说有一个闭合回路,这是一个突出的特征。所谓闭环是指从系统中输入信号出发,按箭头的方向前进,若最终又能回到已经通过的一点时,这个系统就具有一个闭合回路,或简称闭环。在简单的控制系统中,由于反馈是改善控制质量的一个有效措施,有反馈和闭环,往往是系统质量较高的象征,所以也有按有无闭环分类的习惯。从这点出发,随动系统和定值系统也都叫做闭环控制系统。没有闭环的控制系统就叫做开环控制系统。

随着控制理论和自动化工具的发展,控制的手段和方法增多了,系统也复杂了,往往在一个系统有几个局部的闭环。为了确切起见,在今后的讨论中,应用闭环系统这一名词时,并不单纯地看系统中有没有一个闭环,而是看有没有包括系统输出信号在内的闭环,因为只有由输出反馈至给定值所构成的闭环对改进系统质量才是最直接、最有效的。下面用一个例子来进一步说明这一观点。

图 1-1 所示的温度控制问题,在一般情况下经过分析认为,造成温度波动的主要原因是进

料流量及冷却水流量的改变，如果将这两个流量保持恒定或基本上恒定，则温度的波动将会减小到生产上可以接受的误差范围之内。按照这一设想，可以得到图 1-3 所示的系统方块图。从这个图可以看到整个系统有两个闭环，但是其中都没有包括系统的输出（反应器的温度），因而对反应器的温度来说，这个系统是开环的而不是闭环的。

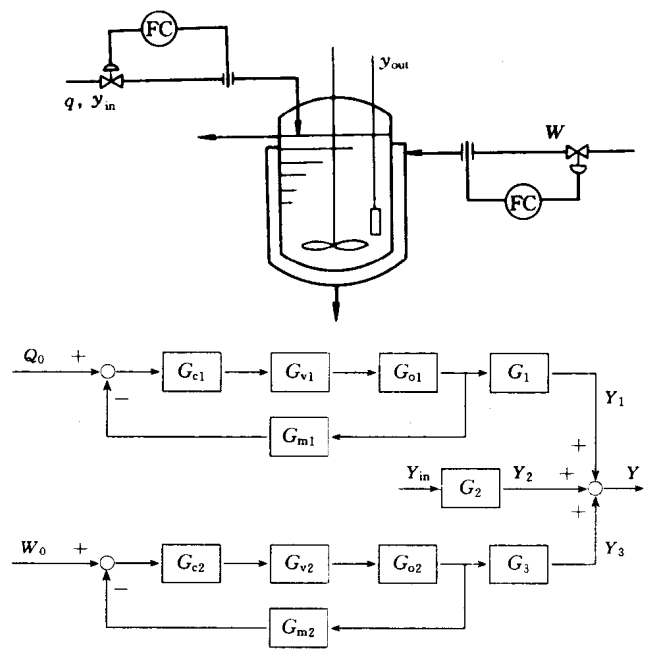


图 1-3 一种开环温度控制方案

分析一下图 1-2 所示的负反馈简单闭环系统，该系统必须要有一个测量机构 G_m ，有一个比较元件。闭环控制系统控制器的作用就是根据偏差 $(Y_0 - Z)$ 的大小与方向按一定规律指挥控制阀的动作，使被控变量朝着减小偏差 E 的方向移动。产生偏差的原因有两种。一种是由于给定值 Y_0 的变化（在随动系统中），另一种是由于外部扰动 Q 及 Y_{in} 的变化（定值控制系统）。不论哪种情况发生，该闭环系统的作用均是朝着减小偏差 $(Y_0 - Z)$ 的方向移动被控变量 Y 。一般情况下，往往要求 $E=0$ ，即 $Y=Y_0$ 。也就是说，闭环控制系统的反馈有反抗扰动（包括给定值及外扰）的影响，使被控变量 Y 尽量趋于给定值 Y_0 。（使偏差 E 尽可能小）的趋势。这与人类完成某些特定动作相似，比如要去取一杯水，人脑并不是特别命令某一些肌肉来运动。实际上，人类一般也不知道要经过哪些肌肉的运动才能完成这个特定的动作。人脑是根据眼睛测得手与杯子的距离或者某种表示动作尚未完成的量（也即偏差）的大小来控制手的动作，直到拿到这杯水，此时手与杯子的距离偏差正好为零。这就是生物中大量动作也是根据反馈原理进行的一个例子。

上面谈到的反馈控制系统在其受到扰动以后具有反抗被控变量 (Y) 偏离控制目标 (Y_0) 的能力，而且希望系统尽快平稳下来并使 $Y=Y_0$ 。从动态讲，被控变量在趋向控制目标时偏差 E 如何逐步减小的，这是控制系统设计的品质要求。偏差逐步减小的过程可以是非振荡的，即单调地减小至零，也可以是衰减振荡式地减小至零。这要根据实际需要来确定。

图 1-4 所示为一流体浓度控制系统被控变量的过渡过程曲线。对一个稳定的系统，当浓度给定值由 C_0 改变到 C_1 时被控变量 C 从 C_0 趋向 C_1 的变化过程有两种可能。曲线 1 是衰减振

荡过程。图中阴影所示的面积是偏差 $(C - C_1)$ 对时间的积分。它是整个变化过程中被控变量偏离理想值的总量，也是平均浓度偏离理想值的多少。曲线 2 是非周期式过程，这时被控变量的偏离总量是直线 C_1 与曲线 2 之间整块面积的负值。如果设计的目的是在一段时间内平均浓度的偏离要小，那么显然曲线 1 的过程比曲线 2 要好。反过来，有的生产过程不允许有超过 C_1 出现时就必须采取图 1-4 中曲线 2 的变化过程形式。

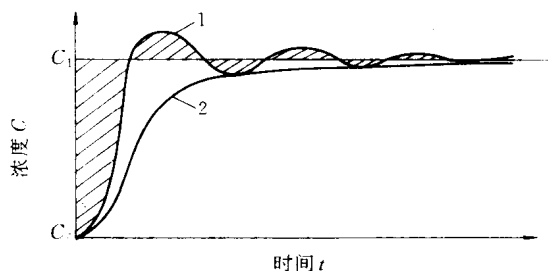


图 1-4 控制系统被控变量的过渡过程曲线

闭环系统的控制质量比开环控制系统优越的这一概念，在 50 年代以前是完全确切的。早期控制系统是开环的，反馈和闭环实际上就是从提高控制质量而发展起来的。但是随着对被控变量的品质指标要求的提高以及随着相应控制理论的发展，控制工具和方法的更新，因而在讨论和比较新型的控制方案时，单纯地从反馈出发就不能作为高质量的象征了。近年常见的前馈控制和时间最优控制系统就是应用开环控制改进系统质量的例子。

对于图 1-1 中的系统，若用图 1-2 的反馈控制方案，这是一种被动的控制方法。当系统的主要扰动（进料流量）改变后，系统并不能立即采取措施进行克服，而是等扰动影响到输出，经测量变送及比较等环节后，发现输出偏离给定值时，控制器才会改变输出，使控制阀改变开度，并通过改变冷却水流量来克服扰动的影响。至于校正作用是否有效，后果如何，还需等校正作用影响到输出，再经测量和比较后才能知道，这时也才能进一步补充校正作用的不足。

图 1-5 中的方案有主动的特点。既然知道进料流量是使输出偏离的主要因素，控制系统理应从直接消除这一因素的角度出发。方案中按进料流量的波动情况立即采取校正措施，这种变被动为主动的原则是控制思想中一个突出的转变。这种控制方法称为前馈控制。应用前馈控制是一种主动的控制方法，也是一种开环的方案。在前馈方案中，通过理论计算或是实测计算，先找出扰动影响输出的定量关系 $G_{f2}(s)$ ，亦即扰动通道的传递函数。再找出扰动通过补偿环节 $F(s)$ 和控制通道 $G_v(s)G_o(s)$ 而影响输出的定量关系，亦即补偿环节和控制通道的传递函数 $F(s)G_v(s)G_o(s)$ ，假若设计的补偿环节能全部抵消扰动对输出的影响即 $G_{f2}(s) = -F(s)G_v(s)G_o(s)$ ，上述两种影响的代数和必然等于零，亦即两种影响在数值上相等而符号相反，从这个等式可以求出补偿环节的具体定量关系 $F(s) = \frac{-G_{f2}(s)}{G_v(s)G_o(s)}$ ，这个环节叫做前馈控制器或称前馈补偿器。如果各种计算都较准确，则求得的补偿环节就较可靠，结果其控制质量可以超过反馈控制的质量。在系统滞后大时，反馈控制的质量较低，前馈的效果就更显著了。在实际应用时，一方面由于对象特性了解得不够深入，只能简单粗略地估计补偿环节；另一方面在扰动数量多时，也只能对主要扰动进行前馈补偿，故在实际应用中常以前馈和反馈结合在一起，如图 1-6 所示。这样，前馈控制或前馈补偿可以消除进入系统的主要扰动。由于各通道的模型不可能测准，加之存在各种不可测扰动的影响，再用反应温度 Y_{out} 的反馈控制可以消除一些不可避免的扰动。这种复合控制系统大大提高被控变量的控制品质。所以一般反馈控制系统是必须要有的，前馈补偿是否能实现决定于主要扰动，如图 1-6 中的 $Q(s)$ 是否可被检测及前馈补偿器是否能实现。只要有可能要尽量采用前馈补偿的手段。前馈控制是一种开环控