



高等学校试用教材

化工过程控制原理

浙江大学等 合编
周 春 晖 主编

化学工业出版社

高等学校试用教材

化工过程控制原理

浙江大学等 合编

周 春 晖 主编

化学工业出版社

内 容 简 介

《化工过程控制原理》一书共分十章。第一、二、三、四、五章阐述线性控制理论和分析设计线性控制系统的根轨迹法与频率法。第六章简述处理具有非线性元件控制系统的相平面及描述函数方法。第七章略述控制系统的统计分析方法。第八章讨论在 z 平面上分析和设计离散控制系统的方法。第九、十章属现代控制论部分, 概述控制系统的状态空间分析法及最优控制。

本书中的某些章节标注有“*”号, 表示这些章节供选读用。

本书由浙江大学周春晖(一、四、八章)、顾钟文(二、三章)、北京化工学院沈承林(五、六章)、华南工学院黄昭庆(七章)、华东化工学院邵惠麟(九、十章)等同志执笔编写, 由蒋慰孙、黄孝诚、袁仆等同志审阅。

本书是高等学校化工自动化及仪表专业的教材, 也可供从事化工自动化和有关专业人员参考。

高等学校试用教材

化工过程控制原理

浙江大学等 合编

周春晖 主编

*

化学工业出版社出版

(北京和平里七区十六号楼)

化学工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

*

开本 $787 \times 1092^{1/16}$ 印张29字数730千字印数6,151—14,350

1980年12月北京第1版1982年7月北京第2次印刷

统一书号15063·3207(K-216)定价2.95元

目 录

第一章 概述	1
第一节 控制理论的发展.....	1
第二节 控制系统的组成.....	2
第三节 控制系统的主要类型.....	4
第四节 本书的主要内容.....	6
第二章 对象及其他环节的动态特性	7
第一节 一阶特性.....	8
一、对象或环节数学模型的建立.....	8
二、一阶对象或环节的特性.....	14
三、数学模型的无因次化.....	17
第二节 二阶特性.....	18
一、二阶数学模型的建立.....	18
二、二阶对象的特性.....	21
第三节 纯滞后特性.....	24
第四节 其他特性.....	25
一、积分特性.....	26
二、高阶特性.....	26
第五节 传递函数与方块图.....	28
一、传递函数.....	28
二、方块图.....	29
三、利用方块图推演对象的动态特性举例.....	35
第六节 信号流图.....	39
一、信号流图及有关术语.....	39
二、信号流图的运算.....	40
三、信号流图与方块图.....	42
四、应用信号流图推演对象的数学模型举例.....	42
第七节 对象动态特性的测试.....	44
一、实验测试.....	46
二、数据处理.....	46
第三章 系统的时域分析方法	59
第一节 调节系统的数学模型.....	59
第二节 调节系统的过渡过程.....	65
一、典型试验信号.....	65
二、一阶系统的暂态响应.....	65
三、二阶系统的暂态响应.....	68

四、高阶系统的试差求解	77
第三节 劳斯稳定判据	80
第四节 过渡过程的质量指标	83
一、以过渡过程形式表示的质量指标	83
二、误差性能指标	87
第五节 常规调节规律及其对系统调节质量的影响	93
一、常规调节器的调节规律	93
二、调节器参数对调节过程的影响	95
第六节 测量滞后对调节质量的影响	98
第七节 电子模拟计算机及其在系统分析中的应用	101
一、电子模拟计算机的运算器	101
二、应用电子模拟计算机求解微分方程	104
三、线性自动调节系统的模拟	110
第四章 根轨迹分析方法	123
第一节 概述	123
第二节 特征根与过渡过程的关系	123
一、系统的稳定条件	124
二、特征根与过渡过程的关系	124
三、调节系统质量指标在根平面上的表示	128
第三节 根轨迹作图法	131
一、开环与闭环极点	131
二、解析法求取根轨迹	132
三、图解法绘制根轨迹	134
第四节 调节系统的分析与设计	147
一、开环极点对系统质量的影响	148
二、开环零点对系统质量的影响	150
三、比例积分调节	153
四、从闭环零极点求取过渡过程	156
第五节 闭环零点及环外极点对调节质量的影响	158
一、闭环零点及其影响	158
二、环外极点对质量的影响	162
第五章 频率特性分析法	165
第一节 频率特性及其图示法	165
一、频率特性与传递函数的关系	166
二、频率特性的图示法	169
三、频率特性的实验测定法	186
第二节 奈魁斯特稳定判据	186
一、围线映射原理	186
二、奈魁斯特稳定判据	189
三、奈魁斯特稳定判据的物理意义	195

第三节 稳定裕度及其在系统分析与设计中的应用	196
一、稳定裕度及其与过渡过程之间的关系	197
二、控制系统分析与设计的稳定裕度法	203
*第四节 衰减频率特性及其在系统分析与设计中的应用	211
一、衰减频率特性	212
二、衰减频率特性曲线的绘制	212
三、衰减比判据——奈魁斯特准则的推广应用	215
四、衰减频率特性分析设计法	216
第五节 闭环频率特性及按M最大值的系统分析设计法	218
一、闭环频率特性及特性曲线的绘制	218
二、闭环幅频特性与调节系统品质之间的关系	224
三、最大M值分析设计法	227
第六章 非线性系统	233
第一节 概述	233
第二节 描述函数及其分析法	235
一、描述函数	235
二、描述函数分析法	247
第三节 相平面及其分析法	254
一、概述	254
二、相轨迹作图法	256
三、相轨迹图的特征	260
四、由相平面轨迹图求取时间特性的方法	262
五、非线性系统的相平面分析法	263
*第四节 非线性系统的李雅普诺夫稳定性分析法	270
一、非线性系统稳定性的一般定义	271
二、李雅普诺夫稳定性分析法	272
*第七章 控制系统的统计分析方法	277
第一节 平稳随机过程和各态历经性简介	277
一、平稳随机过程的概述	277
二、各态历经性	279
第二节 相关函数	280
一、相关函数的概念	280
二、相关函数的性质及其物理意义	283
三、自相关函数和互相关函数的关系	285
第三节 谱密度	288
一、谱密度的概念	288
二、谱密度和相关函数的关系	292
三、双边拉氏变换及其在谱论上的应用	293
四、谱密度的传递	301
五、谱密度的关系	304

六、用相关分析方法来估计传递函数的例子	307
第四节 有关随机信号的控制系统的的设计	314
一、反馈控制系统的误差	314
二、最优线性滤波器	317
三、反馈控制系统的最佳参数整定	322
第八章 离散系统与z变换	324
第一节 离散系统及连续系统的离散化	324
一、采样器	324
二、保持器	326
三、采样定律	327
四、微分方程的差分化	328
第二节 z变换及改进z变换	331
一、z变换	331
二、z变换的几个性质	333
三、改进z变换	334
四、z反变换	337
五、应用z变换求解差分方程式	340
六、脉冲传递函数	340
第三节 离散系统的分析与设计	346
一、z变换分析法	346
二、离散系统的稳定性	349
三、z平面中的分析与设计	353
四、频率特性平面中的分析与设计	357
五、采样调节器的设计	359
第九章 状态空间分析方法	366
第一节 状态空间概述	366
一、引言	366
二、状态变量和状态空间	366
三、矩阵状态方程	369
第二节 状态空间分析方法	370
一、控制系统的状态空间表达式	370
二、特征方程与特征根	382
三、线性定常系统状态方程求解及状态转移矩阵	385
四、二阶线性系统的状态空间表达式及求解	388
五、状态方程与传递矩阵的关系	390
六、离散系统的状态空间表达式	395
七、离散系统状态方程的求解	397
八、连续系统状态方程的离散化	399
*第三节 数字计算机模拟	401
一、概述	401

二、动态系统数字模拟的计算方法	402
三、控制系统的数字模拟	407
第十章 最优控制	412
第一节 概述	412
一、最优控制问题的特征	412
二、可控性	415
三、可观测性	418
第二节 最优控制中的变分法	421
一、变分法的基本命题与最优控制的基本类型	421
二、欧拉-拉格朗奇方程	422
三、拉格朗奇乘子法	427
第三节 极小值原理	430
一、汉密尔顿函数	431
二、极小值原理	433
三、用极小值原理求解最优控制问题的一般步骤	436
第四节 动态规划法	437
一、最优化原则	437
二、汉密尔顿-雅可比方程	440
第五节 最优控制系统举例——最小时间控制	443
附录	447
附录一、拉氏变换的基本定理	447
附录二、拉氏变换对照表	447
附录三、 z 变换表	449
附录四、矩阵	452
一、矩阵定义	452
一、矩阵的代数运算	454
三、矩阵的逆变换	455
四、矩阵的导数和积分	455
五、凯利-汉密尔顿定理	456

第一章 概 述

第一节 控制理论的发展

人们总想控制自然界，提高生产率，用机器来代替人工进行操作。但是，在过去很长一段时期内，无论在机械化还是自动化方面，都没有大的进展。只是最近五十年来，由于科学技术特别是电子技术的迅速发展，自动化才在各行各业中获得应用，产生不同程度的效果。

控制理论首先是从电子通讯工程中发展起来的。在四十年代期间，工业生产得到很大的发展，对自动控制和经典的控制理论都有很大的推动。在这期间自动控制技术和理论发展很快，达到了能够对单变量控制系统进行分析和设计的程度，并且开始逐步推广到其他工程技术领域中去。不久，又由于电子计算机的问世，增强了计算和信息处理的能力，促进了控制理论向更复杂更严密的方向发展。更由于航天及制导等的需要，逐渐向多变量及复杂控制系统理论推进，到六十年代开始形成现代控制理论。

在化工生产中，四十年代以前的大多数工厂都处在人工操作的状态。生产中的各种关键参数都靠工人观察和抄录，操作条件的改变也靠工人去执行。在生产流程中都设有各种大型的中间储槽或缓冲器，借以消除干扰的动态影响，以达到稳定生产的目的。五十年代以来，在国外由于生产费用的上涨，尤其是能源和原料价格的高涨，多数工厂必须提高劳动生产率，同时人工操作也已不能适应强化生产的需要。在这样的条件下，在化工生产过程中，出现了应用反馈原理的自动控制系统。但是控制系统的设计尚停留在经验准则的阶段，对动态特性的考虑不多。比较严格完整地按动态进行分析和设计控制系统，还是最近二十年内在于航和电子工业方面发展起来的，后来才引进化工自动化领域。与此同时，在化学工程方面，也开始从系统的角度将一个复杂工厂中的关键部分，进行综合性的研究和设计，以求获得更容易控制的生产流程，这属于系统工程的范畴。可以预计，当这几方面的工作都能配合进行时，控制理论在化工生产中将会发挥更大的作用。

随着工业的发展，在化工生产中采用自动控制越来越多。但是直到目前，百分之八十的控制系统可以仍按已有的经验准则设计、调整和投运，并都能达到满意的程度，并不存在大的困难。往往只有百分之十几的控制系统需要利用理论性的分析和研究、现场测试和严格的设计。往往正就是这些少数系统成为生产能否正常运转的关键。目前控制理论最能发挥作用的领域也正在这里。

在其他一些工业中，控制理论得到了比较广泛的应用。在交通运输方面，利用计算机按最优控制理论，可以使运输工具在高速运行中达到很平稳的最优状态，例如近年出现每小时二百多公里的超速火车，和几种大型全天候自动驾驶的客机等都是实例。在生物工程中的假肢配置方面，通过自动控制系统的作用，可以使假肢达到与真肢一样的功能。在国防军事方面，飞机、导弹和宇航器等的起飞、发射、航行、投弹、着陆等都应用了自动控制，并达到了相当深入的程度。

从上述可见，与其他工业部门比较起来，化工自动化的水平和程度是比较差的。这一方面是由于这门技术引入比较晚，控制理论是在电子工业应用得比较成熟以后，才借用来解决

化工控制问题的；另一方面是由于化工生产过程是长年连续运转的，生产流程繁杂，原料、能源、气候等干扰因素变化频繁，因而作为一个过程比其他行业中的个体生产对象更为复杂，控制起来更为困难。为了使化工自动化的水平跟上其他行业，不仅要深入研究控制理论及其在化工生产上的应用，而且要对作为控制对象的化工生产过程本身的性质和规律进行深入研究，要透过化工生产过程繁杂的现象，真正抓到它不同于其他行业的实质，以便能针对化工生产的特点，采取行之有效的措施，从根本上解决问题。

根据化工生产的连续性及大处理量等特点，很难规定一个单一的控制指标，来表征整个生产过程的质量。例如一个大型的化肥厂，日产量总在千吨以上，停产或减产在经济上和产量上都会造成极大的损失。要做到长年一直高产，目前还提不出适当的控制指标。例如，若用日产量最大为控制指标，我们可能使生产在数日内甚至数月内连续高产，产量比平常提高百分之几。这一结果，似可认为确有成效，但是往往在执行这一控制指标的过程中，很可能某种条件会超过安全连续生产的约束限制，从而造成某种机器或设备的损伤，加多或加长了维修的时间，甚至会引起事故。这样的损失往往是增产期间的收益所抵偿不了的。如果对各种可能出现的异常情况都加约束限制，则又很可能由于约束过多而不能得到高产了。这一事实说明，要得到长期平稳高产的控制指标，尚是一个需要进一步研究的重要课题。

第二节 控制系统的组成

在自动控制领域中，为了提高控制质量，一个简单的方法是采用反馈的措施。所以一般的自动控制系统（或自动调节系统）都是指有反馈的系统。图1-1所示的反应器温度调节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，称为被调参数。控制的目标是希望这个温度保持在一个恒定的数值 x ，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_{in} 都可能波动，是造成被调参数波动的主要原因，一般都称为干扰。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，并将其送至调节器 T ，在那里与给定值 x 进行比较，按比较的结果 $(x-z)$ 进行一定的计算，然后带动调节阀移动，使冷却水量改变，以达到消除干扰影响的目的。冷却水流量是用为消除干扰影响的手段，故称为调节参数。调节器进行计算的方法称调节规律。

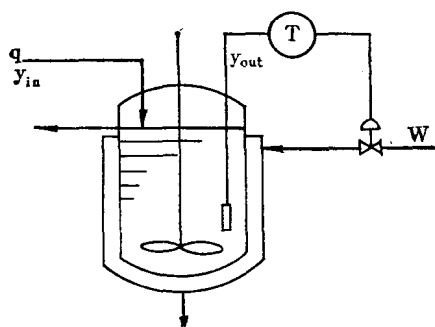


图 1-1 反应器温度控制系统

上面这样多的叙述，目的在于比较清楚地描述这一温度调节系统。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参数信号，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调节系统参数间的关系完整地

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，一个调节系统包括四个基本组成部分，一个是调节对象，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；第二是调节阀；第三是测量元件，有的情况

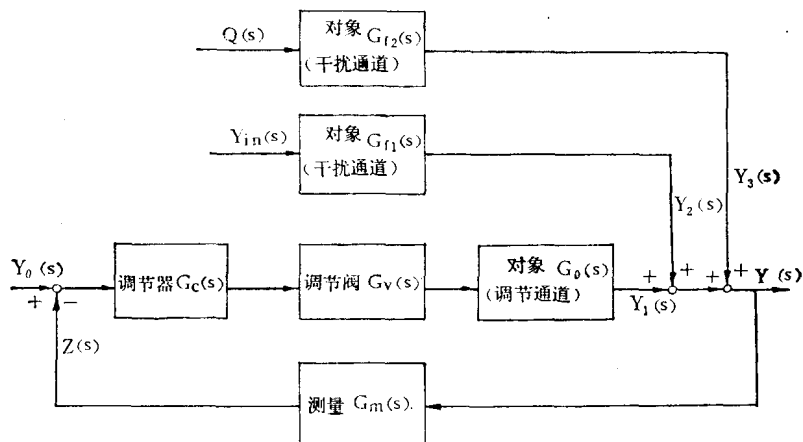


图 1-2 温度控制系统的方块图

还包括变送器；第四是调节器，通常调节器也包括图1-2中所示的减法器，这个减法器一般称为调节器的比较元件。随着需要和设计的不同，还可以有其他的补充组成部分。

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（常用 G 表示），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。对象的调节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 $G_0(s)$ ；干扰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 $G_{f1}(s)$ 及 $G_{f2}(s)$ 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，亦即从输出反回到输入的，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 X 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。一般只有负反馈才能改善调节系统的质量，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干扰或调节作用后所处的状态，故称为对象的输出参数。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，故称为对象调节通道的输入参数。相似地进料流量及进料温度都是改变对象输出的因素，故也都是对象干扰通道的输入参数。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，如果将系统中的调节阀改装到冷却水的出口处，这时调节参数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差别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,输出的改变不会反过来影响输入。例如以对象的调节通道来说,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,各种参数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参数,小写的形式表示参数的时间函数,大写则表示该参数的拉氏变换形式。

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,例如具有前馈回路,非线性元件、采样元件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干扰。因为给定值不变,这一类系统通称定值调节系统。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。但是由于造成输出偏离的原因不同,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环路,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才会对改进系统质量最直接最有效。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,在一种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控制系统来说,这个系统是开环的而不是闭环的。

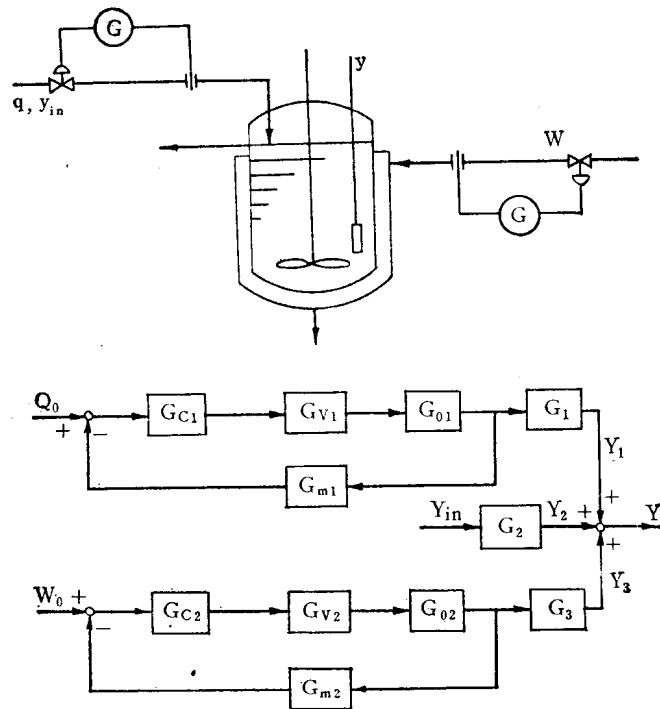


图 1-3 一种开环温度控制方案

闭环系统的控制质量比开环控制系统优越的这一概念,在五十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。但是近年来由于控制理论的发展,控制工具和方法的更新,控制的原理也有了变革,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。近年常见的前馈调节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。当系统的主要干扰(进料流量)改变后,系统并不立即采取措施进行克服,而是等干扰影响到输出,经测量变送及比较等环节后,发现输出偏离给定值时,调节器才会改变输出,使调节阀改变开度,并通过改变冷却水流量来克服干扰的影响。至于校正作用是否有效,后果如何,亦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1-3中的方案有主动的特点。我们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。图1-3的方案还不完整,应用前馈调节是一种比较完善的主动的控制方法,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,先找出干扰影响输出的定量关系,亦即干扰通道的传递函数,再找出干扰通过补偿环节和调节通道而影响输出的定量关系,亦即补偿环节和调节通道的传递函

数。假若设计的补偿环节能全部抵消干扰对输出的影响时，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。这个环节叫做前馈调节器或称前馈补偿器。如果各种计算都较准确，则求得的补偿环节就较可靠，结果可以超过反馈调节的质量。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。在现阶段，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；另一方面在干扰数量多时，也只能对主要干扰进行前馈补偿，故在实际应用中常以前馈和反馈结合在一起。在化工自动控制领域中，从被动转变到主动的道路还是比较长的。

第四节 本书的主要内容

全书包括经典控制理论及现代控制理论两大部分。经典控制理论由第二、三、四、五、六、七、八章组成，现代控制理论由第九、十两章构成。其中第六、七、八这三章的内容虽属经典理论范畴，但在过去的教材中都不包括。若按过去不包括的内容计算，这部分约占全书的45%左右。在使用本书时，应按具体情况酌选适当的内容。

本书第二章主要从微分方程式和传递函数的角度，讨论控制系统组成元件动态特性的推演。第三章用微分方程式求解的方法，分析和设计控制系统，本章的内容同时还是后续各章的基础。第四章详述从特征根平面分析和设计控制系统的方法，即所谓根轨迹法。第五章讨论从频率特性分析和设计控制系统的方法，即所谓频率法。第六章从相平面及描述函数的角度简述包括非线性环节控制系统的处理方法。第七章简述控制系统在随机输入下的统计分析方法。第八章在讨论 z 变换及 z 反变换的基础上，简述在 z 平面上分析和设计离散控制系统的方法。第九章简述控制系统的状态空间表示和分析方法，最后略述数字模拟。第十章是最优控制的概述。

第二章 对象及其他环节的动态特性

上一章已述及，化工过程控制中的自动调节系统是由对象、调节器、调节阀、测量元件等环节组成的。因而无论是对一个已知的自动调节系统进行分析研究，或是设计、综合、甚至改进一个自动调节系统，都应该知道构成系统的每个环节的特性。

所谓对象或是系统的其他组成环节的特性，是指对象或是环节的输出参数和输入参数之间的种种关系。这种关系最直接的描述方法是画出对象或各环节输出参数和输入参数与时间的关系曲线。例如图2-1所示的加热器，是将温度为 θ_c 的冷流体用蒸汽进行直接加热，使热流体温度升为 θ_a 的简单传热对象。若在 $t=0$ 到 $t=t_1$ 的一段时间内，冷流体温度为一定值 θ_{c0} ，则加热后的流体温度也为一定值 θ_{a0} ，这种情况，可用图2-2中 $t=0$ 到 $t=t_1$ 间隔内二条参数线 θ_c 、 θ_a 来表示。在 $t=t_1$ 时，冷流体温度由 θ_{c0} 增加为 θ_{c1} ，则温度 θ_a 亦将逐渐升高，当进入对象的热量和由对象带出的热量相等时，达到新的平衡，温度 θ_a 即在一个新的值 θ_{a1} 上稳定下来，这段时间内 θ_c 及 θ_a 的变化情况，可以从图2-2中 $t=t_1$ 到 $t=t_2$ 这一间隔内的曲线看出。如果在 $t=t_3$ 时， θ_c 突然降低至 θ_{c3} ，则温度 θ_a 亦将逐渐下降，当进入对象的热量又与对象带出的热量相等时，则重新达到平衡状态，输出参数 θ_a 就在 θ_{a3} 上稳定下来，如图2-2中 $t=t_3$ 到 $t=t_4$ 的情况。

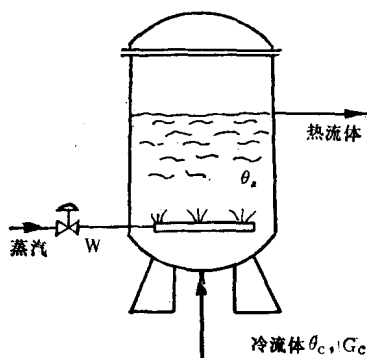


图 2-1 直接蒸汽加热器

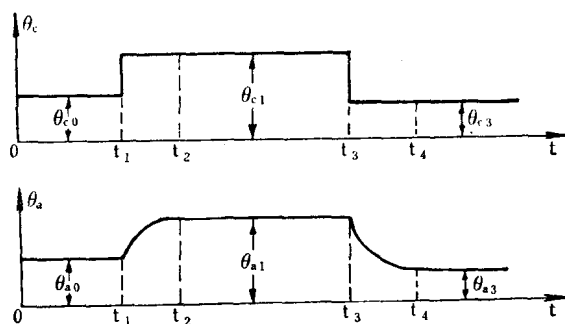


图 2-2 图2-1所示的输入参数与输出参数的变化曲线

图2-2中 t_1 到 t_2 ， t_3 到 t_4 这两段时间内 θ_a 的变化曲线，描述了对象在输入参数 θ_c 的变化后输出参数随时间而变化的情况，即表示了对象的动态特性。而在 $t=0$ 到 $t=t_1$ 及 $t=t_2$ 到 $t=t_3$ 及 $t>t_4$ 的几段中， θ_c 不变， θ_a 也不变，对象处于平衡状态，这时输出参数 θ_a 和输入参数 θ_c 之间的关系，称为对象的静态特性。在平衡状态下，对象的输出参数与输入参数的对应关系（静态特性）也可以表示在一张图上，如图2-3所示。

这种用曲线图形表示的方法虽然直观、明瞭，但用数学方法来描述对象或环节的特性更具有普遍意义。所谓用数学方法描述，也就是将对象或环节的输出参数对输入参数的响应（如上所述，这就是对象或环节的特性）用某一数学方程式来表示。这种表征对象及各环节特性的数学方程式，通常称为对象或环节的数学模型（或称动态方程式）。

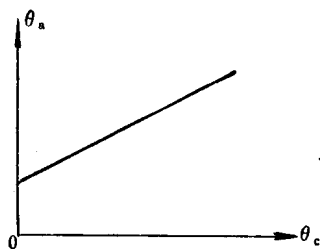


图 2-3 对象的静特性

寻求对象或环节数学模型的途径不外乎两种，一种是用理论推导的方法，另一种是用实验测试的方法。理论推导的方法在简单对象中较易进行，对于工业上较复杂的对象，或由于影响因素复杂，理论推导比较困难，或由于理论推导得到的模型过于复杂不便于使用，因此往往采用实验测试的方法。

数学模型可以有不同的表示形式，如微分方程式、微分方程组、传递函数表达式或频率特性表示式等。对于不同的系统和采用不同的分析方法，一种数学表达式可能比另一种更合适。例如在多变量控制问题中（多参数输入与多参数输出）采用微分方程组通常是比较方便的；在单参数输入与单参数输出的系统，应用时域分析方法或根轨迹分析方法，采用微分方程式或传递函数的形式是较为便利的；若应用频率特性分析方法时，采用频率特性的表达式则比其他形式更为方便。当然各种表示形式是可以互相转换的。但在各种形式的数学表达式中，微分方程式是最基本的表示形式，所以下面将首先讨论微分方程式形式的对象或环节的数学模型的建立（其他的表示形式将在以后相应的章节中讨论）。

如果对象或环节的数学模型是一阶微分方程式，则称这种对象或环节具有一阶特性；如果数学模型是二阶微分方程式，则称这种对象或环节具有二阶特性，其余类推。

第一节 一阶特性

一、对象或环节数学模型的建立

虽然生产上的对象及组成调节系统的各环节的种类繁多，结构各异，但代表它们特性的微分方程式，都可以通过支配它们的物理规律，例如物料平衡、能量平衡、牛顿定律和基尔霍夫定律等获得。这些物理规律的数学表达式，就是对象或环节的原始动态方程式。

例如图2-1所示的直接蒸汽加热器，在其间进行的过程是热交换的过程，故必符合热量平衡的关系。

设：蒸汽在单位时间内带入加热器的热量为 q_s ；

冷流体在单位时间内带入加热器的热量为 q_c ；

热流体在单位时间内由加热器带出的热量为 q_a ；

加热器里积存的热量为 U ；

忽略热损失。

则当：

$$q_s + q_c = q_a \quad (2-1)$$

时，该对象的输出参数 θ_a 即保持在一定值，这就是图2-2中 $t=0$ 到 $t=t_1$ 及 $t=t_2$ 到 $t=t_3$ 或 $t>t_3$

的状态，即所谓静态。对象的静态特性人们固然希望了解，但却更关心动态特性，即输入参数改变后输出参数如何改变。同样根据能量平衡关系应有：当进入加热器的热量与从加热器带出的热量不等时，就表现为对象内热量积存量的改变，用数学关系式表示即为：

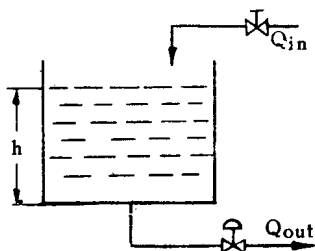


图 2-4 液体贮罐

$$q_s + q_c - q_a = \frac{dU}{dt} \quad (2-2)$$

(2-2) 式就是这个简单传热对象的原始动态方程式。

又如图2-4所示的液位对象，它是一个贮罐，有液体的流入与流出，所以在其间进行物料的传递，则必然遵循物料平衡的关系。因而它的原始动态方程式为：

$$Q_{in} - Q_{out} = \frac{dv}{dt} \quad (2-3)$$

式中的 Q_{in} 、 Q_{out} 分别表示单位时间内流入贮罐和由贮罐流出的液体量； $\frac{dv}{dt}$ 表示单位时间内贮罐中液体量的变化。

为了得到只含有输入参数和输出参数的微分方程式（数学模型），必须将原始动态方程式（2-2）、（2-3）式中的既不是输入参数又不是输出参数的中间变量消去。为此，必须对所研究的对象进行具体分析，以确定输出参数（一般为被调参数）与输入参数（也就是影响被调参数的参数，如干扰及调节参数），再通过中间变量与输出参数和输入参数的函数关系，将中间变量消去。

对于图2-1所示的对象，输出参数是被调参数 θ_a ，而能影响 θ_a 使之发生变化的因素有蒸汽量 W 及蒸汽压力 P 的变化，冷流体温度 θ_c 及冷流体流入量 G_c 的变化等。若在生产中蒸汽压力及冷流体流量始终不变，当冷流体温度 θ_c 改变后，用改变加热蒸汽量 W 的办法使 θ_a 尽量维持恒定，则在这个具体情况下，输入参数就是 θ_c （干扰）及 W （调节参数）。

因而（2-2）式中， q_s 、 q_c 、 q_a 以及 U 等就是中间变量，它们和输入参数与输出参数的关系是：

$$q_c = G_c c_c \theta_c$$

$$q_a = G_a c_a \theta_a$$

$$q_s = W \cdot H$$

$$\frac{dU}{dt} = V \gamma c_a \frac{d\theta_a}{dt}$$

其中 V ——加热器的有效体积，设基本不变；

γ ——流体的重度，设在所研究的情况下基本上为常数；

H ——加热蒸汽的热焓；

c_a 、 c_c ——冷、热流体的比热，设近似相等，并在下面都统一用 c_c 表示。

则按（2-2）式的关系得：

$$V \gamma c_c \frac{d\theta_a}{dt} = G_c c_c \theta_c + WH - G_a c_c \theta_a \quad (2-4)$$

若蒸汽耗用量较少，可近似地认为 G_a 与 G_c 相等。则（2-4）式又可简化为：

$$\frac{V \gamma}{G_c} \frac{d\theta_a}{dt} + \theta_a = \theta_c + \frac{H}{G_c c_c} W \quad (2-5)$$

（2-5）式就是图2-1所示的对象当冷流体温度变化或加热蒸汽量变化时的数学模型。

若进料温度及加热蒸汽量都不变，并等于额定值，则热流体的温度就等于给定值，从而 $\frac{d\theta_a}{dt}$ 为零，这时加热器处于平衡状态，（2-5）式即成为：

$$\theta_{a0} = \theta_{c0} + \frac{H}{G_c c_c} W_0 \quad (2-6)$$

这是平衡状态时输出参数与输入参数的关系式，也就是（2-1）式所表示的关系，即静态特