

# 化学工程手册

《化学工程手册》编辑委员会

第 25 篇

## 化工自动控制

化学工业出版社

81.17.75  
152.1  
25:1

# 化学工程手册

## 第25篇

### 化工自动控制

《化学工程手册》编辑委员会

化学工业出版社

## 内 容 提 要

本册是《化学工程手册》的第25篇, 主要介绍自动控制理论、自动化技术工具和控制系统的基础知识及其在化工过程自动控制上的应用。全篇共分6章, 依次叙述控制理论基础、各种化工测量仪表、调节装置、计算机控制系统、各种常用控制系统和化工过程的自动控制。

本书可供化学工业及其他有关部门的设计、研究人员, 工厂技术人员及有关院校的师生参考。

## 化学工程手册

### 第25篇

#### 化工自动控制

|     |     |        |
|-----|-----|--------|
| 编写人 | 蒋慰孙 | 华东化工学院 |
|     | 徐功仁 | 华东化工学院 |
|     | 陈彦尊 | 华东化工学院 |
|     | 邵惠鹤 | 华东化工学院 |
|     | 俞金寿 | 华东化工学院 |
| 审校人 | 周春晖 | 浙江大学   |

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 $17^{5/8}$ 字数440千字印数1-9,500

1982年12月北京第1版1982年12月北京第1次印刷

统一书号15063·3437定价1.80元

## 《化学工程手册》总篇目

1. 化工基础数据
2. 化工应用数学
3. 化工热力学
4. 流体流动
5. 搅拌及混合
6. 流体输送机械及驱动装置
7. 传热
8. 传热设备及工业炉
9. 蒸发及结晶
10. 传质
11. 蒸馏
12. 气体吸收
13. 气液传质设备
14. 萃取及浸取
15. 增湿与减湿
16. 干燥
17. 吸附及离子交换
18. 薄膜过程
19. 颗粒及颗粒系统
20. 流态化
21. 气态非均一系分离
22. 液固分离
23. 粉碎、分级及团聚
24. 化学反应工程
25. 化工自动控制
26. 化工系统工程

## 《化学工程手册》编辑委员会成员

|            |                |
|------------|----------------|
| <b>主 任</b> |                |
| 冯伯华        | 化学工业部          |
| <b>副主任</b> |                |
| 陈自新        | 化学工业部科技局       |
| 苏元复        | 上海化工学院         |
| 汪家鼎        | 清华大学           |
| 李步年        | 化学工业部第六设计院     |
| 蔡剑秋        | 化学工业出版社        |
| <b>委 员</b> |                |
| 卢焕章        | 化学工业部化工设计公司    |
| 区灿棋        | 化学工业部规划院       |
| 邓颂九        | 华南工学院          |
| 朱亚杰        | 华东石油学院         |
| 朱自强        | 浙江大学           |
| 余国琮        | 天津大学           |
| 时 钧        | 南京化工学院         |
| 沈 复        | 华东石油学院         |
| 吴锡军        | 南京化学工业公司化工研究院  |
| 林纪方        | 大连工学院          |
| 杨友麒        | 化学工业部化工科学研究总院  |
| 张洪沅        | 成都科技大学         |
| 张剑秋        | 北京燕山石油化学总公司设计院 |
| 郑 炽        | 上海化工设计院        |
| 郭慕孙        | 中国科学院化工冶金研究所   |
| 傅举孚        | 北京化工学院         |
| 萧成基        | 化学工业部第六设计院     |

# 前 言

化学工程是研究化工类型生产过程共性规律的一门技术科学，是化工类型生产重要的技术和理论基础。化学工程学科的内容主要包括：传递过程原理及化工单元操作；化学反应工程；化工热力学及化工基础数据；化工系统工程学等。研究和掌握化学工程，对于提高化工生产效率和经济效益，加速新技术的开发，提高科研、设计和生产技术水平，有着十分重要的作用。因此，对化学工业来说，化学工程是涉及提高技术水平的主要环节之一。

建国以来，我国的化学工程技术工作逐步发展，已经初步具有一定的基础，并取得了一定的成果。但是，目前国内还缺少一套较为完整实用的化学工程参考资料。编辑出版一套适合国内需要的，具有一定水平的《化学工程手册》，是化工技术工作者多年来的宿愿。早在五十和六十年代，国内的化学工程专家就曾酝酿和筹备组织编写《化学工程手册》，一九七五年化学工程设计技术中心站又曾组织讨论过编写计划。今天，在党中央提出加快实现四个现代化宏伟目标的鼓舞下，在化学工业部和中国化工学会的领导下，于一九七八年正式组成《化学工程手册》编委会，经过化工界许多同志的共同努力，《化学工程手册》终于与广大读者见面了。

希望这部手册的出版，将有助于国内的化工技术人员在工作中掌握和运用化学工程的科学技术原理，更好地处理和解决设计、科研和生产中遇到的化工技术问题。

本手册是一本通用性的工作手册。内容以实用为主，兼顾理论；读者对象为具有一定化工专业基础知识的工程技术人员和教学人员；内容取材注意了结合国内的情况和需要，并反映国内工作已取得的成果；对于国外有关的技术及数据，也尽量予以吸收。

根据当前国内的实际情况，计量单位一律采用“米-公斤(力)-秒”工程制(MKfS制)。但是考虑到我国将逐步过渡到采用国际单位制(SI)，除了在第一篇中列出详细的单位换算表外，并在每篇之末加列简明的MKfS制-SI换算表。

参加本手册编写工作的，有全国各有关的设计、科研和高等院校等共二十多个单位，近二百人。此外，还有其它许多单位和人员提供资料或间接参与手册的有关工作。《化学工程手册》编辑委员会负责指导手册工作的开展，研究和确定编审工作中一些原则问题，并负责书稿的最后审定工作。手册编写的日常组织工作，由化工部化学工程设计技术中心站负责。

本手册系按篇分册陆续出版，今后还将定期修订再版并出版合订本。希望广大读者对本手册提出宝贵意见，以便再版时改进。

《化学工程手册》编辑委员会

1979年7月

# 目 录

## 概述

|                                                                                                                                                   |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 25.1 控制理论基础 .....                                                                                                                                 | 2   |
| 25.1.1 自动控制系统概述 .....                                                                                                                             | 2   |
| (1) 控制系统的类型及组成 (2) 静态和动态 (3) 品质指标 (4) 广义对象特性<br>及对调节过程品质的影响 (5) 调节器特性及对调节过程品质的影响                                                                  |     |
| 25.1.2 传递函数及方块图 .....                                                                                                                             | 17  |
| (1) 环节的微分方程 (2) 传递函数 (3) 方块图及其变换 (4) 信号流程图                                                                                                        |     |
| 25.1.3 线性连续控制系统 .....                                                                                                                             | 30  |
| (1) 时间特性和频率特性 (2) 开环特性和闭环特性 (3) 稳定性和稳定裕量 (4)<br>多变量系统的分析方法                                                                                        |     |
| 25.1.4 线性离散控制系统 .....                                                                                                                             | 44  |
| (1) 采样器及保持器 (2) $z$ 变换及脉冲传递函数 (3) 线性离散系统的分析方法                                                                                                     |     |
| 25.1.5 非线性控制系统 .....                                                                                                                              | 53  |
| (1) 非线性特性 (2) 非线性系统的分析方法                                                                                                                          |     |
| 25.1.6 系统辨识及参数估计 .....                                                                                                                            | 61  |
| (1) 概述 (2) 阶跃响应法 (3) 频率响应法 (4) 频谱分析法 (5) 相关函数<br>法 (6) 最小二乘参数估计法                                                                                  |     |
| 25.1.7 最优控制系统 .....                                                                                                                               | 70  |
| (1) 静态及动态最优化 (2) 目标函数和约束条件 (3) 确定性系统的最优控制<br>(4) 最优状态估计及随机最优控制 (5) 自适应控制系统                                                                        |     |
| 参考书目 .....                                                                                                                                        | 81  |
| 25.2 化工测量仪表 .....                                                                                                                                 | 82  |
| 25.2.1 压力测量仪表 .....                                                                                                                               | 82  |
| (1) 液柱式压力计 (2) 弹性式压力计 (3) 活塞式压力计 (4) 应变片式压力计<br>(5) 热电式真空计 (6) 压力测量仪表的选用                                                                          |     |
| 25.2.2 物位测量仪表 .....                                                                                                                               | 86  |
| (1) 浮力式液位计 (2) 静压式液位计 (3) 电容式液位计 (4) 放射性液位计<br>(5) 超声波液位计 (6) 液位测量仪表的选用                                                                           |     |
| 25.2.3 流量测量仪表 .....                                                                                                                               | 91  |
| (1) 椭圆齿轮流量计 (2) 差压式流量计 (3) 转子流量计 (4) 靶式流量计<br>(5) 旋涡流量计 (6) 涡轮流量计 (7) 电磁流量计 (8) 超声波流量计 (9)<br>激光流量计 (10) 热式质量流量计 (11) 推导式质量流量计 (12) 流量测量仪表的选<br>用 |     |
| 25.2.4 温度测量仪表 .....                                                                                                                               | 101 |
| (1) 液体膨胀式温度计 (2) 固体膨胀式温度计 (3) 压力式温度计 (4) 热电阻<br>温度计 (5) 热电偶温度计 (6) 高温计 (7) 温度测量仪表的选用                                                              |     |
| 25.2.5 化学成分分析仪表 .....                                                                                                                             | 108 |
| (1) 热导式气体分析器 (2) 磁导式氧气分析器 (3) 红外线气体分析器 (4) 电                                                                                                      |     |

|                                                           |     |
|-----------------------------------------------------------|-----|
| 导式分析器    (5) 工业酸度计    (6) 工业色谱分析器    (7) 取样及预处理装置         |     |
| 25.2.6 物性测量仪表 .....                                       | 116 |
| (1) 密度计    (2) 湿度计    (3) 粘度计                             |     |
| 25.2.7 显示仪表 .....                                         | 120 |
| (1) 模拟式显示仪表    (2) 数字式显示仪表    (3) 屏幕显示    (4) 报警装置    (5) |     |
| 巡回检测                                                      |     |
| 参考书目 .....                                                | 123 |
| 25.3 调节装置 .....                                           | 125 |
| 25.3.1 调节仪表分类 .....                                       | 125 |
| 25.3.2 气动调节仪表 .....                                       | 125 |
| (1) 气动仪表结构上的特点    (2) 气动仪表的优点    (3) 选用气动仪表时应该考虑的         |     |
| 问题                                                        |     |
| 25.3.3 电动调节仪表 .....                                       | 131 |
| (1) 电动调节仪表之发展    (2) 模拟式控制仪表    (3) 数字式控制仪表    (4) 集散     |     |
| 系统    (5) 使用电动仪表的几个问题                                     |     |
| 25.3.4 常用的几种国产调节仪表 .....                                  | 147 |
| (1) 过去分类——基地式和单元组合式    (2) 气动调节器    (3) 电动调节器    (4)      |     |
| 变送器    (5) 电-气转换器    (6) 记录仪    (7) 其它                    |     |
| 25.3.5 执行器 .....                                          | 162 |
| (1) 电动执行机构    (2) 气动执行机构    (3) 调节机构    (4) 阀门定位器         |     |
| 参考书目 .....                                                | 171 |
| 25.4 计算机控制系统 .....                                        | 172 |
| 25.4.1 计算机控制系统的发展 .....                                   | 172 |
| 25.4.2 计算机控制系统的若干功能 .....                                 | 172 |
| 25.4.3 计算机控制系统的结构 .....                                   | 176 |
| (1) 计算机    (2) 单机结构系统    (3) 多机结构的目的    (4) 前后连接(串联)系     |     |
| 统    (5) 并行(双重)系统    (6) 多处理器系统    (7) 多计算机系统    (8) 阶层系  |     |
| 统    (9) 输入输出接口                                           |     |
| 参考书目 .....                                                | 185 |
| 25.5 常用控制系统 .....                                         | 186 |
| 25.5.1 简单调节系统 .....                                       | 186 |
| (1) 被调变量及操作变量的选择    (2) 调节规律的选择    (3) 调节阀特性的选择(4)        |     |
| 调节器参数的工程整定    (5) 调节系统的投运                                 |     |
| 25.5.2 串级调节系统 .....                                       | 193 |
| (1) 串级调节系统的概念    (2) 串级调节的特点和适用范围    (3) 串级调节系统的应         |     |
| 用                                                         |     |
| 25.5.3 均匀调节系统 .....                                       | 196 |
| (1) 均匀调节系统的目的要求    (2) 均匀调节系统的型式                          |     |
| 25.5.4 比值调节系统 .....                                       | 198 |
| (1) 比值调节系统的常用方案    (2) 比值调节系统的实施方案及比值系数的计算                |     |
| 25.5.5 多冲量调节系统 .....                                      | 201 |
| (1) 双冲量调节系统的作用及应用    (2) 三冲量调节系统的作用及应用                    |     |
| 25.5.6 分程调节系统 .....                                       | 205 |



|                        |                 |                 |
|------------------------|-----------------|-----------------|
| (1) 分程调节系统的作用          | (2) 分程调节系统的应用   |                 |
| 25.5.7 前馈调节系统          |                 | 208             |
| (1) 前馈调节的概念            | (2) 前馈调节系统的结构型式 | (3) 前馈调节系统的应用   |
| 25.5.8 选择性调节系统         |                 | 214             |
| (1) 选择性调节的概念           | (2) 选择性调节系统的类型  | (3) 积分饱和及防止措施   |
| (4) 选择性调节系统的应用         |                 |                 |
| 25.5.9 带有模拟计算装置的调节系统   |                 | 219             |
| 25.5.10 预估调节系统         |                 | 221             |
| (1) 预估调节的概念            | (2) 预估调节系统的应用   |                 |
| 25.5.11 非线性调节系统        |                 | 226             |
| (1) 非线性调节的概念           | (2) 非线性调节系统的应用  |                 |
| 25.5.12 采样调节系统         |                 | 229             |
| (1) 采样调节的概念            | (2) 采样调节的应用     |                 |
| 参考书目                   |                 | 232             |
| 25.6 化工过程的自动控制         |                 | 233             |
| 25.6.1 化工过程的动态特性       |                 | 233             |
| (1) 动态数学模型的类型          | (2) 传热设备的动态特性   | (3) 传质设备的动态特性   |
| (4) 化学反应器的动态特性         |                 |                 |
| 25.6.2 确定化工单元控制方案的若干原则 |                 | 244             |
| 25.6.3 流体输送设备的控制方案     |                 | 245             |
| (1) 泵的自动调节             | (2) 离心式压缩机的控制方案 |                 |
| 25.6.4 传热设备的控制方案       |                 | 251             |
| (1) 一般传热设备的自动调节方案      | (2) 管式加热炉的控制    | (3) 锅炉设备的控制     |
| (4) 蒸发器的控制             |                 |                 |
| 25.6.5 干燥器的控制方案        |                 | 256             |
| 25.6.6 精馏塔的控制方案        |                 | 257             |
| (1) 质量指标的选取            | (2) 按精馏段指标的控制方案 | (3) 按提馏段指标的控制方案 |
| (4) 压力控制               | (5) 内回流及热焓控制    | (6) 解耦控制        |
| (7) 前馈控制与推断控制          |                 |                 |
| (8) 浮动压力控制             |                 |                 |
| 25.6.7 化学反应器的控制方案      |                 | 268             |
| 参考书目                   |                 | 274             |

## 概 述

本篇内容分为三个部分，即控制理论（第一章）、自动化技术工具（第二、三、四章）和化工自动化系统（第五、六章）。力求从化学工程工作者的要求出发，阐述化工自动控制的基本内容，并注意反映现代科学技术成就。

书中对基本概念作必要的阐述，而对方法、类型、结构、方案等，注意深度和广度，作适当介绍，但不作系统推导和详细解释。

在控制理论部分，先作定性讨论，着重说明动态及反馈概念，接着介绍传递函数和方块图，以使读者掌握控制系统最基本的概念。然后按线性（时间连续及离散）及非线性分类，列述适用于化工自动控制系统的主要分析方法。在估值和辨识一节内，介绍通过测试手段求取动态数学模型的方法。最后，简单介绍最优控制。需要说明，本部分的很多理论内容不仅可用于自动控制，而且近年来已渗透和移植至化学工程研究领域。

检测仪表、调节装置及计算机系统着重于类型、方法和方案的介绍，这些是化学工程与自动控制相互衔接的领域；而不介绍电子线路及具体结构，因为这些通常不属于化学工程工作者的工作范畴。如有需要，可从仪表及计算机手册及产品目录中找到。

化工自动化系统分常用控制系统及化工过程的自动控制两章，前者从系统结构的角度出发，后者从化工过程动态特性及各种单元操作的要求出发，两章内容互为补充，有所交叉而不重复。为适应当前情况及将来发展，对常规的及先进控制方案各有相应的比例。

## 25.1 控制理论基础

### 25.1.1 自动控制系统概述

#### (1) 控制系统的类型及组成

在化工生产中, 对各工艺变量有一定的控制要求。例如, 一个化学反应器的入口或出口温度必须保持平稳, 才能使收率达到指标; 一个精馏塔的塔顶或塔釜温度, 必须不超出规定的范围, 才能得到合格的产品。这些变量对产品的数量和质量起着决定性的影响。另外有些变量的影响虽不这样直接, 然而使它们保持平稳是使生产过程获得良好控制的前提。例如, 对于一个蒸汽加热的反应器或再沸器, 如果蒸汽总管压力波动剧烈, 要把温度控制好将极为困难。还有一些变量对物料平衡起重要作用, 为保持连续均衡生产, 必须加以调节。例如, 中间容器的液位高度及气柜的高度, 应维持在容许范围之内。此外, 有一些变量是决定生产安全的因素, 不允许超出规定的限度。象以上各种类型的变量, 都属应予控制的范畴。

为了实现控制要求, 可以有两类手段, 一是人工控制, 二是自动控制。自动控制是在人工控制基础上发展起来的, 自动化仪表等控制装置代替了人的直接观测、判断、决策和操作, 自动控制规律是人工操作经验的事仿与发展。

#### (1.1) 几个术语

① 对象 需要实现控制的设备、机器或生产过程, 称为对象, 例如上述的精馏塔、反应器等。

② 被控变量 (被调变量) 对象内要求保持给定数值 (接近恒值或按预定规律变化) 的物理量, 称为被控变量, 例如温度、压力、流量、液位、成分等。

③ 操作变量 受到控制装置操纵, 用以使被控变量保持给定值的物料量或能量, 称为操作变量, 如加热炉温度控制系统的燃料流量等。

④ 扰动 (干扰) 除操作变量以外, 作用于对象并引起被控变量变化的因素, 称为扰动。负荷 (处理量) 变化是一种典型的扰动, 其它象环境温度和压力的变动等也是很常见的扰动。

⑤ 给定值 被控变量的预定值称为给定值。

⑥ 偏差 偏差本来应该是被控变量的给定值与实际值之差。但是, 我们能够直接获取的信息是被控变量的测量值而不是实际值, 因此通常把给定值与测量值之差作为偏差。

#### (1.2) 控制系统的类型

如果不进行调节, 被控变量将会偏离给定值, 背离工艺要求。主要原因有以下三个方面。

① 在大多数情况下, 扰动不可避免。当扰动出现时, 操作变量必须作相应的变动, 否则由于扰动的效应, 使被控变量发生变化。以一个蒸汽加热器为例, 当冷流体的流量增加时, 如不相应地加大蒸汽流量, 出口温度将会下降。

② 当给定值变化时, 如不改变操作变量的数值, 被控变量不可能适应新的要求。例如, 要提高蒸汽加热器的出口温度, 如果冷流体的流量和入口温度不变, 则蒸汽量也必须加大。

③ 即使给定值不变, 扰动也不出现, 在操作变量不作调节的情况下, 长期保持平衡出

非常困难。以一个液体贮槽为例，即使流出量恒定不变，要找出恰好等于流出量的流入量，精确程度总有一定限度，时间一长，累积误差将越来越大，液位将起变化。

按控制系统的基本结构，可以分为开环控制系统和闭环控制系统两大类。

① 开环控制系统又分两种，一种是按给定值进行控制，仍以蒸汽加热器为例，是使蒸汽流量与给定值间保持一定的函数关系，当给定值变化时，操作变量随之变化。图1-1(a)即为其原理图。

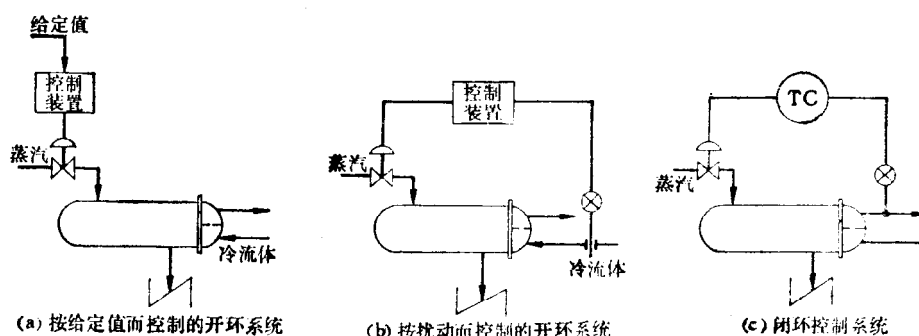


图 1-1 控制系统的基本结构

另一种是按扰动而控制，即所谓前馈控制。在蒸汽加热器中，如果负荷是主要扰动，则使蒸汽流量与冷流体流量间保持一定的函数关系，当扰动出现时，操作变量即随之变化。图1-1(b)即为其原理图。

② 闭环控制系统又称反馈控制系统，它们是按偏差进行调节的。在蒸汽加热器的出口温度控制系统中，温度调节器接受检测元件（及变送器）送来的测量值信息，并与给定值相比较，依据偏差情况，按照一定的控制规律，去调整蒸汽阀门的开度，改变蒸汽量。图1-1(c)即为其原理图。

从上例可以看出，操作变量（蒸汽量）会通过对象去影响被控变量（温度），而被控变量又会通过自动控制装置去影响操作变量，从信息的传送关系来看，构成了一个闭合的回路，所以称为闭环控制系统；被控变量的信息要送回到自动控制装置，所以也称为反馈控制系统。

闭环控制系统较之开环控制系统，应用要广泛得多。它有很多优点，最主要的是它能适应给定值和扰动的不同变化，使被控变量趋向于给定值，而开环控制系统却不能自动察觉被控变量的变动情况，也不能自动判断操作变量的调整是否切合需要。但是，闭环控制系统也有缺点，因为它是按偏差调节的，在扰动出现时不能立即引起控制作用，所以在有些情况下调节不及时。开环与闭环控制相结合的系统，如前馈-反馈控制系统，就兼收并蓄了两类系统的优点。

有时也采用自动调节系统一词。它的含义是指闭环控制系统。

在闭环控制系统中，按照给定情况的不同，又可分为三种类型。

① 定值控制系统 给定值是一个恒值，控制系统的基本任务是在扰动作用下仍能使被控变量保持在给定值或其附近。化工自动控制系统中的大多数都要求工艺变量平稳不变，属于这一类型控制系统。

② 程序控制系统 给定值是一个预先规定的时间函数，要求被控变量能按照此时间函

数变化。在化工自动化中，间歇反应器的升温控制系统属于此类系统。

③ 随动控制系统（伺服系统） 给定值是事前未知的函数，要求被控变量能很好跟踪给定值的变化。在化工自动化中，有些比值调节系统属于此类，例如要求甲流体的流量与乙流体的流量保持一定的比值，当乙流体的流量变化时，甲流体的流量能很好随之变化。

### (1.3) 闭环控制系统的组成

任何一个自动控制系统，总是由对象和自动控制装置组成的。自动控制装置可以很简单，例如用浮球带动阀门的液位控制器；也可以相当复杂，例如采用工业控制机及其外围设备和接口。不论其结构如何，闭环控制系统的自动控制装置总要实现检测、判断、决策和动作的功能，可以用图1-2所示的方块图来表示。目前在化工自动化系统中应用最广的是电动和气动自动化仪表，下面就以它们为例，说明闭环控制系统的组成。

采用下列符号：

$r(t)$  给定值；  $y(t)$  测量值；  
 $e(t)$  偏差， $e(t) = r(t) - y(t)$ ；  $c(t)$  被控变量；  
 $u(t)$  调节器输出，即控制作用；  $q(t)$  操作变量；  
 $f(t)$  扰动。

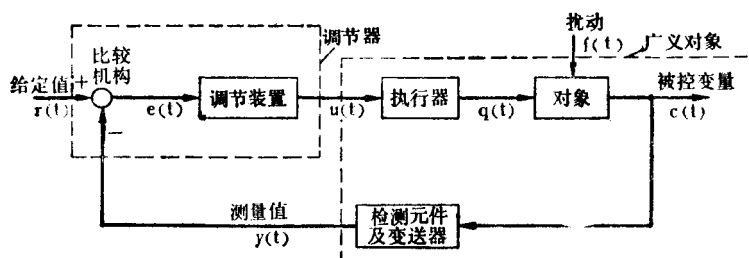


图 1-2 闭环控制系统的组成

检测元件和变送器的作用，是把被控变量  $c(t)$  转化为测量值  $y(t)$ 。例如，用热电偶或热电阻测量温度，并用温度变送器转换为统一信号，如  $0.2 \sim 1.0 \text{ kgf/cm}^2$  的气压或  $0 \sim 10 \text{ ma}$  的电流。

比较机构的作用是得出给定值  $r(t)$  与测量值  $y(t)$  的差值。在自动控制系统分析中，把  $e(t)$  定义为  $[r(t) - y(t)]$ 。然而，在仪表制造行业中，却把  $[y(t) - r(t)]$  作为偏差，正负符号恰好相反。

调节装置的作用是依据偏差的正负、大小及变化情况，按某种预定的控制规律给出控制作用  $u(t)$ 。 $u(t)$  也往往是统一的气压或电流信号。

比较机构与调节装置通常是组合在一起的，称为调节器。

执行器的作用是接受调节器送来的  $u(t)$ ，相应地去改变操作变量  $q(t)$ 。最常用的执行器是气动调节阀，在采用电动调节器的场合，还预先通过电气转换装置。

系统中调节器以外的各部分组合在一起，即执行器、对象、检测元件与变送器的组合，称为广义对象。

在分析控制系统的工作过程时，有四个很重要的概念。

第一是信息的概念。图1-2中的  $r(t)$ 、 $y(t)$ 、 $e(t)$ 、 $u(t)$ 、 $q(t)$ 、 $c(t)$  和  $f(t)$ ，它们尽管

本身是实际的物理量，然而作为信息来转换和作用。图中的箭头方向表示信息流的流向。试分析图1-3中的两个液位控制系统，图（a）的操作变量是进入量，图（b）的操作变量是流出量。作为物料流动方向来看，两者有进、出之分。但作为信息来看，它们都是作用于对象，使液位发生变化的输入信号，因此箭头方向相同。图中每一部分可以称为一个环节。作用于它的信息称为输入信号，它送出的信息称为输出信号。上一环节的输出信号就是下一环节的输入信号。从整个系统来看，给定值和扰动是输入信号，被控变量或其测量值是输出信号。

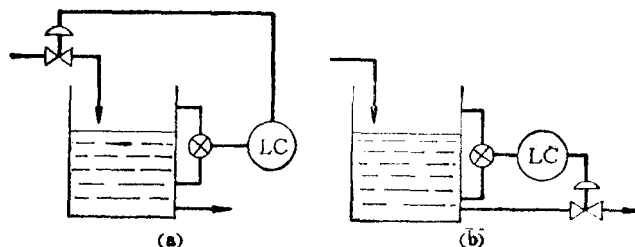


图 1-3 两个液位控制系统

第二是反馈的概念。每个环节的信息流向都是单向的，由输入端流向输出端。把一个或几个环节的输出信号送回到输入端，叫做反馈。在反馈控制系统中，系统输出端送回的信号与给定值相减，亦即取负值后与给定值相加，这属于负反馈。如果接成正反馈，例如把电动变送器的输出信号接到调节器时极性反接，则达不到调节的目的，系统往往不能稳定。

第三是闭环的概念。这在前面已作说明，闭环与反馈是同一件事。需要指出，把系统的反馈通道切断或接通，系统输出与输入信号间的函数关系并不相同，在前一种情况称为开环特性，后一种情况称为闭环特性。

第四是动态的概念。在图1-3中， $r(t)$ 、 $y(t)$ 、 $e(t)$ 、 $u(t)$ 、 $q(t)$ 、 $f(t)$ 和 $c(t)$ 都表明是时间函数，它们是随时间而变化，是不断运动的。在定值控制系统中，扰动作用使被控变量偏离给定值，调节作用又驱使它复归给定值。扰动与调节构成一对主要矛盾，变量处于不断运动之中。

## （2）静态和动态

对于一个控制过程，我们除了关心调节的最终结果以外，更须注意调节的变化过程。拿精馏塔来说，如果在出现扰动后，被控变量回到给定值要经过很长的时间，其间的偏差又很大，则将在很长时间内给出不合格的产品，那是不能容许的。因此，对系统不仅需要从静态的观点来考虑，更需要从动态的角度作分析。

所谓静态，是指系统或环节在某一输入下，到 $t \rightarrow \infty$ 时达到平稳时的情况。对于化工对象来说，静态特性由物料平衡、能量平衡、传热、传质及化学反应速度和平衡等规律所确定。从严格的意义上说，应该称为稳态特性，因为它所反映的是动态平衡情况。例如，一个液体贮槽，如果流入量与流出量时时相等，则液位保持初始位置不变，这时候建立动态平衡，这种情况就是静态。如果出现扰动之后，液位最终又在一个新的位置上建立平衡，则又建立了静态。

所谓动态，是指在输入信号作用下，系统或环节从原来的静态出发，逐渐变化的过渡过

程。仍以液体贮槽为例,如果流入量多于流出量,物料平衡被破坏,多出来的液体蓄积于贮槽内,引起液位逐渐升高,这种过程就是动态。动态特性亦称暂态特性。可以认为静态是动态特性在  $t \rightarrow \infty$  时的特例。

化学工程经典内容的主体实质上就是化工对象的静态特性。要对自动控制系统作分析,

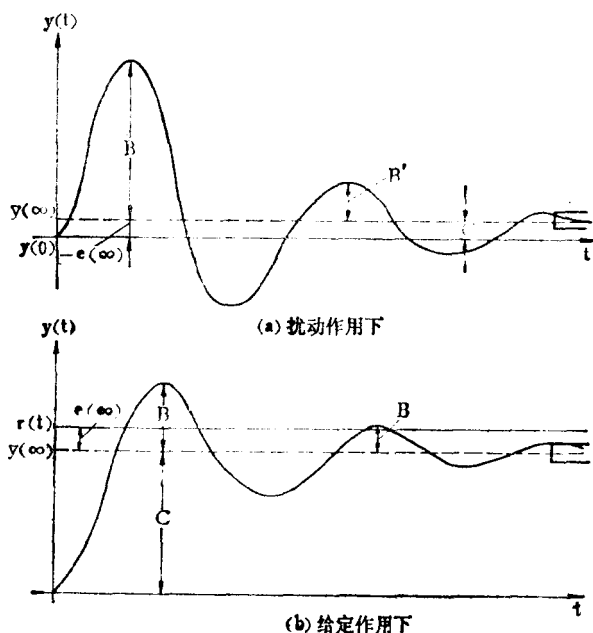


图 1-4 过渡过程的典型例子

需要增加动态特性的考虑与探讨。也就是说,要分析物料进入量与流出量不等时,物料的蓄积或亏损引起被控变量的变化过程;能量进入量与流出量不等时,能量的蓄积或亏损引起被控变量的变化过程等等。

对于集中参数的系统或环节,静态特性用代数方程描述,动态特性用微分方程(时间连续情况)或差分方程(时间离散情况)来描述。这些微分方程中包括以时间为自变量的导数项。

### (3) 品质指标

在化工自动控制系统中,时间域品质指标具有直接的意义。

品质指标的出发点是控制系统原来处于平衡状态,以此时的被控

变量作为基准值,即取  $y(0)=0$  [或  $c(0)=0$ ]。从  $t=0$  的时刻开始,系统受到单位阶跃外作用,即  $\Delta f$  或  $\Delta r=1$ 。于是被控变量开始变化,最后达到新的平衡状态  $y(\infty)$  [或  $c(\infty)$ ]。图 1-4(a) 和 (b) 分别为扰动作用和给定作用下过渡过程的典型例子。

品质指标分单项指标与综合指标两大类。

单项指标中主要有:

① 余差(静差)  $e(\infty)$  在阶跃外作用下的最终偏差叫做余差。在图 1-4(a) 的情况,即为  $-y(\infty)=-C$ ,在图 1-4(b) 的情况,为  $r-y(\infty)=r-C$ ,式中的  $C$  是  $y(t)$  的最终值。余差取决于系统各环节的静态特性,要求为零,或不超过预定的范围。

② 衰减比  $N$  如果过渡过程存在振荡,上一个波的振幅与下一个波的振幅之比( $B/B'$ )叫做衰减比。衰减比是衡量稳定程度的动态指标。如果振幅不衰减,反而扩大,  $N$  小于 1:1,调节过程不稳定,系统不能正常工作。如果  $N$  等于 1:1,则为等幅振荡,系统处于稳定边缘。如果  $N$  大于 1:1,则为衰减振荡,那是可以容许的。如果  $N \rightarrow \infty$ ,或者连第一个波也不出现,系统更加稳定。

在多数情况下,  $N$  应取为 4:1 至 10:1。

也有人用衰减率  $\eta$  来反映阻尼情况,  $\eta = \frac{B-B'}{B'}$ 。  $N=4:1$  相当于  $\eta=0.75$ ,  $N=10:1$  相当于  $\eta=0.90$ 。

③ 最大偏差  $e_{\max}$  或超调量  $\sigma$  前一项指标常用于扰动作用下的控制系统,  $|e_{\max}| =$

$|B+C|$ ；后一项指标常用于给定作用下的控制系统， $\sigma = \frac{B}{C} \times 100\%$ 。这两者都是动态指标，它们都反映超调情况。在定值控制系统， $e_{\max}$ 应该有它的容许界限。

④调节时间 要使 $y(t)$ 完全趋近于 $y(\infty)$ ，时间几乎要无限地长。然而，要使 $y(t)$ 进入 $y(\infty)$ 附近一定范围，并继续保持于此范围之内，时间还是有限的。对于给定作用下的控制系统， $y(t)$ 进入 $y(\infty)$ 附近 $\pm 5\%$ 或 $\pm 3\%$ 区域之内所需时间，叫做调节时间。提高振荡频率，或增大衰减比，都能缩短调节时间。

各项指标须结合具体系统的控制要求来选择，要分清主次，因为要求这四个质量指标都要很高是困难的。

综合指标往往通过偏差的某些函数对时间的积分值来表述，它们兼顾了衰减比、超调量和调节时间几方面的因素。较常用的有三种：

① 偏差绝对值对时间的积分  $IAE = \int_0^{\infty} |e| dt$  如果直接按偏差对时间积分，则将产生上下积分面积相消现象，采用偏差的绝对值后可避免这一点。

② 偏差绝对值与时间乘积对时间的积分  $ITAE = \int_0^{\infty} |e| t dt$  与IAE比较，它对消除偏差所需的时间更为敏感。

③ 偏差平方值对时间的积分  $ISE = \int_0^{\infty} e^2 dt$  与IAE比较，它对最大偏差的数值更为敏感。

在现代控制理论中，常采用某种目标函数 $J$ 作为品质指标，常用的二次型指标可说是ISE的一种发展。

#### (4) 广义对象特性及对调节过程品质的影响

##### (4.1) 广义对象特性的类型

前已说明，广义对象是由执行器、对象、检测元件和变送器所组成，即控制系统中除调节器以外的全部环节的组合。显然，对于一个已定的控制回路，广义对象是否能控，是否易控，对调节过程品质有很大影响。

广义对象特性可以通过控制作用 $u(t)$ 作阶跃变化（而扰动 $f(t)$ 不变化）时被控变量测量值的时间特性 $y(t)$ ，和扰动 $f(t)$ 作阶跃变化（而控制作用 $u(t)$ 不变化）时被控变量测量值的时间特性 $y(t)$ 来反映。用图形表示时，前者称为调节通道的响应曲线，后者称为扰动通道的响应曲线。

响应曲线可以分为四种类型。

① 有自衡的非周期特性 讨论图1-5(a)所示的液体贮槽。设进料调节阀为气开阀，则当调节器输出气压增加时，进料量就加大。如果进料多于出料，多出的液体蓄积起来，使液位升高。然而随着液位的上升，出料量将随着静压头的上升而加大。这样，进、出流量之差会逐渐减小，液位的上升速度会逐渐变慢，系统会自发地趋向新的平衡。图1-5(b)就是它的响应曲线。

图1-6所示的蒸汽加热器也有类似的特性。当蒸汽阀开大后，流入热量增加，打破了原来的热量平衡。多出的热量使管壁及管内流体温度上升，出口温度也将上升。然而随着出口温度的上升，流出热量也增加，这样就使温度的上升速度变慢，最后能自发地建立新的平衡。



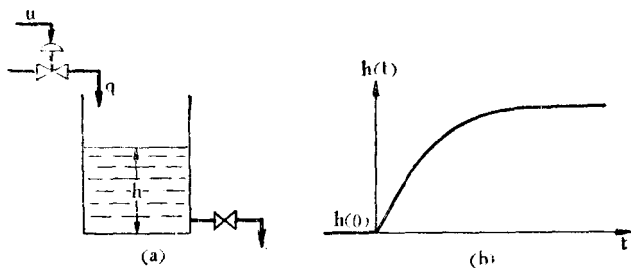


图 1-5 有自衡的液位对象

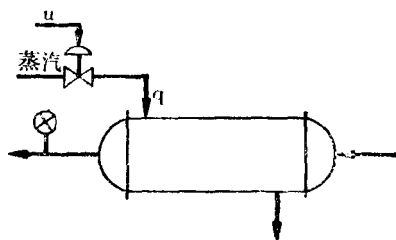


图 1-6 蒸汽加热器的例子

这种类型的对象在化工自动化系统中是最常见的。

② 非自衡的非周期特性 图1-7(a)所示也是一个液体贮槽，它与图1-5所示系统的差别在于：这里的出料不是用阀门节流，而是用定量泵抽送。当进料量增加后，液位的上升不会影响到出料量。因此，当进料量作阶跃变化后，液位将等速上升，不能建立新的平衡，图1-7(b)所示即为非自衡的响应曲线。

非自衡的非周期过程的响应曲线也可能出现图1-8所示的形状。

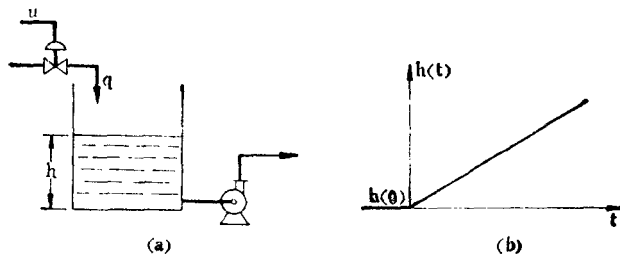


图 1-7 非自衡的液位对象

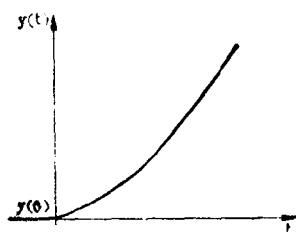


图 1-8 非自衡响应曲线一例

一般地说，非自衡对象要比自衡对象难控一些。

③ 振荡特性 有些对象在 $f(t)$ 或 $u(t)$ 的阶跃作用下，即使未构成调节回路，本身就要振荡（图1-9）。显然，振荡特性的对象也往往较自衡的非周期特性的对象难控一些。

④ 反向特性 也有少数对象，会出现图1-10所示的反向特性，即起始时的变化方向与最终的变化方向相反。处理这类对象必须十分留意，要避免作出误向控制动作。

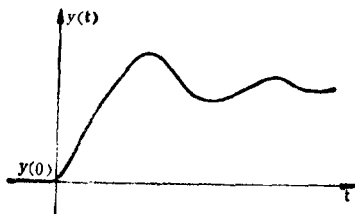


图 1-9 振荡特性

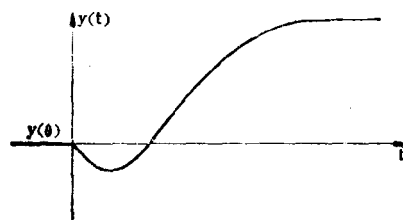


图 1-10 反向特性