



高等专科学校教材

# 过程控制原理

章高建 主编

化学工业出版社

7P273  
82

高等专科学校教材

# 过程控制原理

章高建 主编

化学工业出版社

(京)新登字039号

JS452/40  
09

高等专科学校教材

**过程控制原理**

章高建 主编

责任编辑: 陈逢阳

封面设计: 任 辉

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787×1092 1/16印张23字数580千字

1991年11月第1版 1991年11月北京第1次印刷

印 数 1—3,000

ISBN 7-5025-0937-2/G·254

定 价5.95元

## 前 言

为了尽快解决专科层次教材的需要,全国高等专科类《工业自动化及装置》专业教学研究会调查研究的基础上,经化工部教育司批准,教材编审组于1989年开始组织、编审和推荐一批自动化及仪表专业的教材,它包括有:《过程控制原理》、《过程控制工程》、《微型计算机原理及应用》、《过程测量仪表》、《模拟调节仪表》和《数字调节仪表》等。

《过程控制原理》是根据全国高等专科类《工业自动化及装置》专业教学研究会制定的教学大纲编写的。从高等专科教育的特点出发,理论以应用为目的,以够用为尺度;突出重点,避免面面俱到;力求讲清基本概念、方法和结论;用较多的篇幅介绍分析方法的应用实例,而精简理论性过强的数学推导。

本书以经典控制理论为基本内容,系统地论述了工业自动化仪表及过程控制中所必须的基础理论。从控制系统的基本结构和数学模型出发,重点介绍控制系统的时域法、根轨迹法和频率法的分析和校正。考虑到计算机在过程控制中的应用日益增多,对采样系统作了必要的论述。关于现代控制理论,目前各高等专科学校都不作为必修内容,因此本书不作系统介绍,但为了满足各校选择使用以及读者学习提高的需要,对现代控制理论的基础——状态空间分析法内容进行适当地阐述。

在内容的安排格局上,已有一些作者试图将各类分析法,乃至现代理论与经典理论穿插在一起进行综合介绍,无疑是一种有突破性的尝试,但这种布局还不太适宜于专科层次的教学。因此,本书仍按研究系统的不同方法分章独立介绍。第一章总体介绍了控制系统的发展概况、自动控制系统基本结构、类型及其研究方法,为后续内容提供必要的常识性的基础。第二章以微分方程为基础、传递函数为主要手段,讨论了典型环节的数学模型,从而导出控制系统的数学模型。第三章至第五章分别阐述了三种系统的分析和校正方法:时域法、根轨迹法和频率法。第六章介绍采样系统的基本概念以及应用经典理论的分析 and 设计。第七章简要介绍状态空间分析法的基础内容。

本书的参考教学时数为100学时,其中状态空间分析法为20学时。

本书由南京化工动力专科学校章高建主编。第一、二、四章由章高建编写,第三、六章由吉林电气化工程学校王邦富编写,第四章由上海冶金专科学校吕永宽编写,第七章由福州大学龚诗展编写。

全书由南京化工动力专科学校莫彬主审,上海仪表电子职工大学鲍新福参加审稿,提出了许多宝贵意见,对提高本书的质量起了重要作用,对此表示衷心的感谢。

由于编者的水平有限,书中的错误和不妥之处在所难免,恳请读者批评指正。

编 者

1990年12月

# 目 录

|                                   |                                  |
|-----------------------------------|----------------------------------|
| <b>第一章 绪论</b> ..... 1             | 名词术语.....40                      |
| 第一节 概述..... 1                     | 二、信号流图的性质.....40                 |
| 第二节 控制系统的工作原理及组成..... 2           | 三、信号流图的运算法则.....41               |
| 一、控制系统的工作原理..... 2                | 四、利用信号流图简化,求系统的传递函数.....43       |
| 二、控制系统的组成..... 4                  | 五、梅森增益公式及其应用.....43              |
| 三、控制系统的方框图表示法..... 4              | <b>第五节 动态特性的实验测试法</b> .....46    |
| <b>第三节 控制系统的分类</b> ..... 5        | 一、实验测试方法.....46                  |
| 一、开环控制系统与闭环控制系统..... 5            | 二、阶跃信号测试法的数据处理.....47            |
| 二、定值控制、随动控制和程序控制系统..... 6         | 三、矩形脉冲信号测试法.....51               |
| 三、线性与非线性控制系统..... 8               | <b>第六节 控制系统的数学模型</b> .....52     |
| 四、连续与离散控制系统..... 8                | 习题.....55                        |
| 五、单变量与多变量控制系统..... 9              | <b>第三章 时域分析法</b> .....61         |
| <b>第四节 控制系统的研究内容和方法</b> ..... 9   | <b>第一节 典型输入信号</b> .....61        |
| 一、控制系统的研究内容..... 9                | 一、阶跃函数.....61                    |
| 二、控制系统的研究方法..... 9                | 二、斜坡函数.....61                    |
| 习题.....10                         | 三、抛物线函数.....61                   |
| <b>第二章 控制系统的数学模型</b> .....11      | 四、单位脉冲函数.....62                  |
| <b>第一节 环节特性及其数学描述</b> .....11     | <b>第二节 系统的过渡过程和性能指标</b> .....62  |
| 一、环节的特性.....11                    | 一、系统的过渡过程.....62                 |
| 二、环节微分方程的理论推导.....12              | 二、过渡过程的性能指标.....63               |
| 三、非线性特性的线性化处理及增量方程式.....19        | <b>第三节 控制系统的稳定性分析</b> .....65    |
| 四、物理过程的类比.....21                  | 一、稳定性的一般概念.....65                |
| <b>第二节 传递函数与典型环节的阶跃响应</b> .....22 | 二、系统稳定的条件.....65                 |
| 一、传递函数的基本概念.....22                | 三、代数稳定判据.....67                  |
| 二、典型环节的传递函数及其阶跃响应.....24          | 四、代数判据的应用.....71                 |
| <b>第三节 方框图</b> .....32            | <b>第四节 控制系统的稳态误差</b> .....73     |
| 一、方框图的组成.....32                   | 一、稳态误差的一般概念.....73               |
| 二、方框图的基本运算.....33                 | 二、稳态误差的计算.....73                 |
| 三、方框图的等效变换.....35                 | 三、参比信号作用下的稳态误差与系统结构、参数的关系.....75 |
| 四、方框图的简化.....36                   | 四、静态误差系数.....77                  |
| 五、利用方框图推演环节的传递函数.....38           | 五、干扰信号作用下的稳态误差与系统结构、参数的关系.....79 |
| <b>第四节 信号流图</b> .....40           | 六、提高系统稳态精度的方法.....81             |
| 一、信号流图的组成元件及                      | <b>第五节 控制系统的动态性能分析</b> .....82   |

|                      |     |                         |     |
|----------------------|-----|-------------------------|-----|
| 三、高阶系统的近似分析          | 97  | 一、频率特性与传递函数的关系          | 174 |
| 第六节 基本控制规律对系统性能的影响   | 99  | 二、频率特性的图示法              | 175 |
| 一、比例控制作用分析           | 99  | 第二节 典型环节的频率特性           | 177 |
| 二、微分控制作用分析           | 100 | 一、比例环节                  | 177 |
| 三、积分控制作用分析           | 101 | 二、积分环节                  | 178 |
| 第七节 电子模拟计算机在系统分析中的应用 | 103 | 三、微分环节                  | 179 |
| 一、电子模拟计算机            | 104 | 四、一阶滞后环节                | 179 |
| 二、控制系统的模拟            | 104 | 五、一阶微分环节                | 181 |
| 三、传递函数的模拟            | 109 | 六、振荡环节                  | 182 |
| 习题                   | 112 | 七、二阶微分环节                | 185 |
| 第四章 根轨迹法             | 117 | 八、纯滞后环节                 | 186 |
| 第一节 根轨迹的基本概念         | 117 | 九、理想比例积分控制器 (PI 控制器)    | 186 |
| 一、闭环传递函数与开环传递函数      | 117 | 十、理想比例积分微分控制器 (PID 控制器) | 187 |
| 二、根轨迹的概念             | 118 | 第三节 开环控制系统的波特图          | 188 |
| 第二节 根轨迹的求作           | 119 | 一、开环控制系统波特图的绘制          | 188 |
| 一、图解法求作根轨迹的基本条件      | 119 | 二、最小相位系统                | 191 |
| 二、根轨迹的作图规则           | 122 | 第四节 开环系统的奈奎斯特图          | 193 |
| 三、非 $K$ 参变量的根轨迹      | 135 | 第五节 频率特性的实验测试           | 193 |
| 第三节 特征根与过渡过程性能指标的关系  | 138 | 一、频率特性实验分析的方法           | 196 |
| 一、系统的稳定条件            | 138 | 二、由波特图确定系统的传递函数         | 197 |
| 二、特征根的位置与过渡过程性能指标的关系 | 139 | 三、频率特性实验时应注意的问题         | 198 |
| 三、主导极点               | 142 | 第六节 奈奎斯特稳定性判据           | 199 |
| 第四节 控制系统的根轨迹分析法      | 143 | 一、开环系统和闭环系统的特征方程式       | 200 |
| 一、放大系数的改变对系统质量的影响    | 143 | 二、奈奎斯特稳定判据              | 201 |
| 二、开环极点对系统的影响         | 145 | 三、奈奎斯特稳定判据的普遍情况         | 203 |
| 三、开环零点对系统的影响         | 147 | 四、关于零根的处理               | 204 |
| 四、控制器参数对系统的影响        | 149 | 五、奈奎斯特稳定判据的物理意义         | 208 |
| 五、闭环零点对系统的影响         | 151 | 六、时数幅相频率特性的稳定性判据        | 209 |
| 六、环外极点对系统的影响         | 154 | 第七节 稳定裕度                | 210 |
| 第五节 控制系统的根轨迹综合与校正    | 158 | 一、相位裕度和增益裕度             | 211 |
| 一、开环系统放大系数的确定        | 159 | 二、相位裕度和增益裕度与系统性能之间的关系   | 212 |
| 二、串联微分 (超前) 校正       | 160 | 第八节 控制系统的频率法校正          | 214 |
| 三、串联积分 (滞后) 校正       | 163 | 一、串联校正                  | 214 |
| 四、串联积分-微分校正          | 165 | 二、反馈校正                  | 223 |
| 五、控制器参数的整定           | 166 | 三、串联校正与反馈校正的比较          | 224 |
| 习题                   | 168 | 习题                      | 225 |
| 第五章 频率特性法            | 173 | 第六章 采样控制系统              | 228 |
| 第一节 频率特性的基本概念        | 173 | 第一节 信号的采样与恢复            | 228 |
|                      |     | 一、信号采样及数学描述             | 229 |

|                       |     |                       |     |
|-----------------------|-----|-----------------------|-----|
| 二、采样定理.....           | 231 | 表达式.....              | 288 |
| 三、信号的恢复与零阶保持器.....    | 234 | 二、由传递函数导出状态空间         |     |
| 第二节 $z$ 变换.....       | 236 | 表达式.....              | 293 |
| 一、 $z$ 变换的定义.....     | 236 | 三、传递矩阵、特征方程和线性        |     |
| 二、 $z$ 变换的求法.....     | 237 | 变换.....               | 300 |
| 三、 $z$ 变换的基本定理.....   | 239 | 四、线性离散系统的状态空间         |     |
| 四、 $z$ 反变换.....       | 242 | 表达式.....              | 309 |
| 第三节 采样系统的数学模型.....    | 244 | 第三节 状态方程的求解及转移矩阵..... | 314 |
| 一、差分方程.....           | 244 | 一、连续线性定常系统状态方程的       |     |
| 二、由微分方程求近似差分方程.....   | 245 | 齐次解.....              | 314 |
| 三、用 $z$ 变换法解差分方程..... | 247 | 二、状态转移矩阵.....         | 316 |
| 四、脉冲传递函数.....         | 248 | 三、连续线性定常系统状态方程的       |     |
| 五、开环系统的脉冲传递函数.....    | 249 | 非齐次解.....             | 320 |
| 六、闭环脉冲传递函数.....       | 253 | 四、线性离散系统状态方程的求解.....  | 323 |
| 第四节 采样系统的分析.....      | 257 | 第四节 线性系统的可控性和         |     |
| 一、采样系统的稳定性分析.....     | 257 | 可观性.....              | 329 |
| 二、采样系统的稳态误差.....      | 261 | 一、状态可控性.....          | 329 |
| 三、采样系统的动态性能分析.....    | 265 | 二、输出完全可控的条件.....      | 335 |
| 四、根轨迹法在分析采样系统中的       |     | 三、状态可观性.....          | 336 |
| 应用.....               | 267 | 四、可控性、可观性和传递函数的       |     |
| 五、对数频率法在分析采样系统中的      |     | 关系.....               | 339 |
| 应用.....               | 271 | 第五节 用状态空间法分析和综合控制     |     |
| 第五节 采样系统的校正与设计.....   | 273 | 系统.....               | 339 |
| 一、连续校正与数字校正.....      | 273 | 一、状态反馈和极点的任意配置.....   | 339 |
| 二、最少拍采样系统的设计.....     | 274 | 二、状态观测器.....          | 343 |
| 习题.....               | 280 | 三、解耦控制系统.....         | 347 |
| 第七章 状态空间分析法.....      | 283 | 习题.....               | 351 |
| 第一节 状态空间的基本概念.....    | 283 | 附录.....               | 354 |
| 一、状态、状态变量和状态空间.....   | 283 | 附录一 拉氏变换基本定理.....     | 354 |
| 二、状态方程和输出方程.....      | 286 | 附录二 拉氏变换对照表.....      | 354 |
| 第二节 系统的状态空间表达式.....   | 288 | 附录三 阵矩的定义及性质.....     | 355 |
| 一、由高阶微分方程式导出状态空间      |     | 参考文献.....             | 358 |

# 第一章 绪 论

## 第一节 概 述

自动控制在工业、农业、国防和科学技术现代化中起着十分重要的作用，自动控制技术水平的高低也是衡量科学技术先进与否的重要标志之一。随着国民经济和国防建设的发展，自动控制技术的应用日益广泛，其重要作用也越来越显著。

生产过程自动控制（简称过程控制）是自动控制在工业生产过程（如在化工、炼油、冶金、制药、轻工、纺织等生产过程）中的具体应用，是自动化技术的一个分支。

过程控制理论则是研究过程自动控制的基础理论及其共同规律的技术科学。根据认识论的观点，理论来源于实践又高于实践和反作用于实践，控制理论也是如此。

自动机和自动钟其实早就发明。大约在公元前三世纪，古代希腊人特西比奥斯（Ktesibios）发明的滴水时钟（如图1-1），至公元九世纪经阿拉伯人改进后成为一个典型的负反馈控制系统。工业革命时期（1770年）瓦特（James·Watt）发明的蒸汽发动机离心式调速机构，也是一个很好的反馈控制系统，如图1-2所示。我国古代在自动学方面成就更为超前。远在三千年前出现的铜壶滴漏装置水平壶的水位控制问题比古希腊人的滴水时钟更早。二千年前发明的指南车，也可看成是一个按扰动补偿的自动控制系统。九百年前，创造发明的水运仪象台，其中的天衡装置可认为是一个按被控变量偏差进行控制的自动控制器。

控制理论的产生和发展乃至形成一门独立的工程学科还是在近代。在瓦特发明蒸汽发动机离心式调速机构之后的大约一百年时（即1868年），麦克斯威尔（J. C. Maxwell）才发表了“论调节器”一文，利用线性微分方程对离心式调速机构的动态性能进行了分析和研究。一般认为，这是有关反馈控制理论的第一篇正式发表的研究论文。之后霍尔维茨（A·Hurwitz）于1875年、劳斯（E·J·Routh）于1884年、李雅普诺夫（ЛЯПУНОВ）于1892都控制理论作出了重要的贡献，并提出了几个重要的稳定性判据。在这一时期，控制系统也开始

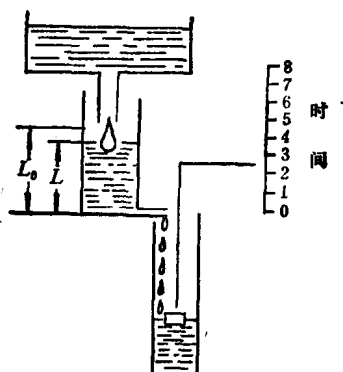


图 1-1 滴水时钟水位控制

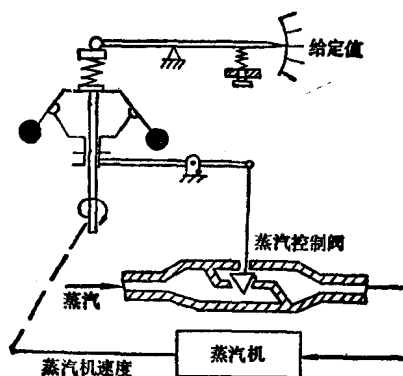


图 1-2 离心式调速机构



较广泛地应用于工业生产的控制，特别是第一次世界大战期间被广泛应用于军事工业上。如火炮仰角跟踪目的的随动控制系统和舰船的自动驾驶系统就是典型的例子。

在第二次世界大战前夕，自动控制理论有了进一步的发展。1934年赫芝(H. L. Hazen)发表了具有历史意义的著作《伺服机构理论》，第一次提出了控制系统的精确理论。在此期间电讯事业发展很快。长途电话的传送需要配置高质量的放大器，而解决放大器的稳定性问题是极为重要的，否则放大器发生振荡将无法使用。由于在通讯领域用微分方程来描述系统和分析系统较为困难，而用频率响应则比较容易。于是在1932年奈魁斯特(H. Nyquist)提出了根据频率响应研究得出的频率稳定性判据。之后，伯德(H. W. Bode)等也在频域分析和综合方法方面做了大量工作。大约于1938年前后，频率分析和综合法趋于完善。

第二次世界大战，由于军事需要使自动控制理论及其应用得到了很快地发展。飞机、火炮、舰船的快速精确地控制，雷达跟踪和导弹制导技术的发展已达到了很高的水平。战后，随着许多理论和实践成果的发表，使控制理论的发展推向高潮。1948年伊万斯(W. R. Evans)提出了根轨迹方法。用根轨迹法可以从开环微分方程或传递函数出发，分析系统参数变化时的闭环系统的品质。至此，经典控制理论已基本趋于完善。

经典控制理论，又可称之为第一代控制理论。这些理论在指导自动控制技术的应用和发展，发挥了重大的作用。然而，经典控制理论存在着严重的局限性。第一，它只限于线性非时变系统；第二，只限于单输入—单输出系统。因此，对于时变系统、非线性系统（除简单的之外）和多输入—多输出系统是无法使用的。为了突破经典控制理论的局限性，从六十年代初开始，一种新型的方法——现代控制理论被提出，并得到迅速地发展。现代控制理论是建立在状态空间的基础上，其本质上是利用状态方程的时域法。由于数字计算机的高速发展，使得复杂的数学问题得以解决，从而促进了现代控制理论的发展，并在应用中越来越显示出它的优越性。

随着生产技术的发展，系统的复杂性日益增加。遇到有大量数目的输入、输出变量的情况，对于系统的结构和分析，需要有相应的理论作指导。因此在七十年代以后大系统理论开始发展起来。大系统理论是多变量控制理论与系统运筹学相结合的产物，所谓递阶控制和分散控制是其具体的应用之例。

可以预料，随着时代的前进，控制理论在与其它学科的互相渗透与促进之中必将导致新的突破。

## 第二节 控制系统的工作原理及组成

### 一、控制系统的工作原理

自动控制是相对于人工控制而言的，自动控制系统是在人工控制的基础上产生和发展起来的。为了说明自动控制的工作原理，先分析一下人工控制的过程。

图1-3(a)所示的是一个换热器温度控制的示意图。在这里人工控制的目的是为了保证换热器出口的热物料温度稳定在某一要求值上（如80℃），以满足输送到下一工序进行再加工的需要。控制的方法是改变进换热器的加热蒸汽流量。加热蒸汽量通过手动改变阀门开度的大小来进行控制。人工控制的过程可归纳如下：

- ① 用眼睛观察温度计的指示值。
- ② 将观察值与要求值（如80℃）进行比较，得出偏差的大小和方向，并传递给大脑。
- ③ 大脑根据偏差的大小和方向，依据经验决定开关阀门开度的大小程度和方向，并指

令手去执行。

④ 手根据大脑的指令去执行控制（开或关）阀门的动作。

比如：当温度计测得的温度为 $70^{\circ}\text{C}$ ，眼睛观察到之后，与要求值 $80^{\circ}\text{C}$ 比较，得出有 $(-10)^{\circ}\text{C}$ 的偏差。大脑根据经验指令手，将阀门开大一定开度，增大蒸汽量，经换热器的热量交换使出口物料温度增加。这样反复观察温度计的指示值和操作阀门的开度，最终使得物料出口温度达到要求值 $80^{\circ}\text{C}$ 左右的一定误差范围之内，如 $80^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ 。

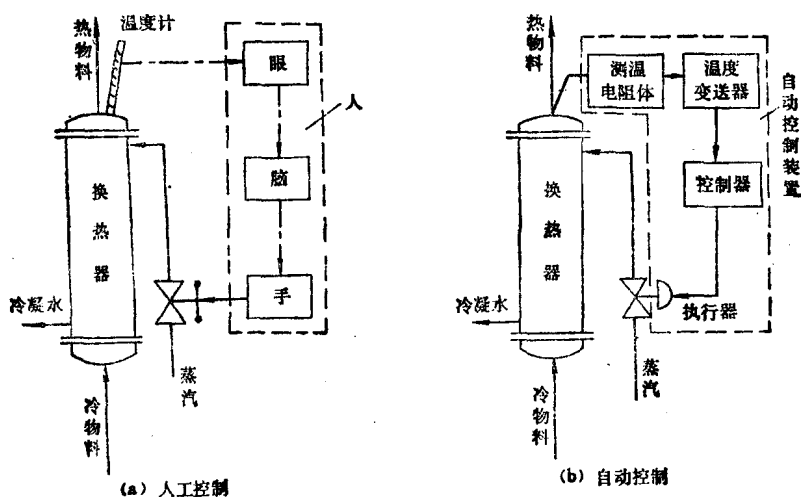


图 1-3 换热器温度人工控制和自动控制

人工控制无论是在速度上或是在精度上都是有限的。为了提高控制精度，减轻工人的劳动强度，可以采用一些自动化工具，如检测仪表、控制仪表、执行器等自动控制装置来代替人工控制，便成了自动控制。如图1-3(b)所示。自动控制过程可归纳如下：

① 由测温元件热电阻测得出口物料的温度，并转换成电阻信号，再由温度变送器将电阻信号转换成标准的气压信号。

② 将变送器得出的表示温度值的气压信号与要求值（给定值）进行比较，得出偏差的大小和方向。（通常在控制器内）

③ 气动控制器根据偏差的大小和方向，按一定的控制规律输送出一个对应的气压信号去指令控制阀的动作。

④ 控制阀接受控制器的输出信号后，根据信号的大小改变控制阀的开度大小，从而改变了进入换热器蒸汽量，达到改变换热器出口温度的目的。经过反复测量和控制，将使出口温度满足要求。

将以上过程与人工控制过程比较，可以得出：自动控制的工作原理与人工控制的机理是极为相似的。自动控制中：

测量变送仪表相当于操纵者的眼睛；

控制器相当于操纵者的大脑；

控制阀相当于操纵者的手

因此，可以定义：所谓自动控制，就是在没有人直接参与的情况下，利用自动控制装置，使生产过程中的某一物理量或多个物理量按预定的规律变化。

## 二、控制系统的组成

从图1-3(b)的换热器温度自动控制可以得出：该控制系统由换热器、热电阻和温度变送器、控制器、控制阀四部分组成。推广到一般情况，一个自动控制系统可以由被控对象、测量变送仪表（或元件）、控制器、执行器（或控制阀）四部分组成。这四个组成部分又称之为四个组成环节。

1. 控制对象 它是控制系统的主体，是一个具体的生产过程或运行中的设备，如换热器、加热炉、电动机等。要引起注意的是：不能将控制对象的概念完全等同于生产过程或设备。设备的输入、输出是工艺介质，而被控对象的输入是操纵变量、扰动变量，输出是被控变量。如：换热器设备，其输入是冷物料和蒸汽，输出是热物料和冷凝水；换热器被控对象，其输入是蒸汽流量的变化量（操纵变量）和其他各种影响物料温度变化的扰动变量，输出为出口物料的温度变化量。

2. 测量变送仪表（或元件） 通常包括检测元件和变送器两部分。其作用是将被控制的物理量检测出来并转换成相对应的仪表通用信号。如电阻体和温度变送器将温度检测出来并转换成气压信号。

3. 控制器 通常包括比较元件。其作用是根据测量值与要求值的偏差进行一定规律的运算、分析和判断，然后对执行器发出相应的控制信号或指令。如：各类控制仪表、计算机等。

4. 执行器（或控制阀） 根据控制器发出的控制信号或指令，对被控对象产生直接的控制作用。如：电动、气动控制阀、伺服电机等。

应当指出，随着具体控制方案、类型不同还可能有一些其他一些补充组成部分。

## 三、控制系统的方框图表示法

图1-3(b)描述的换热器温度控制系统，是将自动化工具（仪表及装置）与工艺设备和管道联系在一起表示控制系统的工作机理，这种图称之为控制系统原理图，或称控制流程图。它具有直观和形象的特点，但它不利于系统的分析，表达也需要较多的文字说明，很不方便。为此，在控制理论中常采用方框图来表示控制系统的结构。对于图1-3(b)的换热器温度控制系统，可用图1-4的方框图来描述。

从方框图中可以清楚地表示出控制系统的组成和结构，说明各部分之间的信号传递的因果关系。更重要的是，利用方框图可以定量地描述各信号之间的数学关系，进而求出控制系统的动态特性。各信号之间的定量关系也是各部分的特性，常用传递函数的形式来表达，用符号 $G(s)$ 标注，并用注脚来说明是哪一部分的传递函数。如图1-4中 $G_c(s)$ 表示控制器的传递函数、 $G_v(s)$ 表示执行器（或控制阀）的传递函数、 $G_m(s)$ 表示测量变送部分的传递函数、 $G_p(s)$ 表示被控对象的传递函数等。关于传递函数和方框图将在第二章中详细介绍。

对控制系统中一些常用的名词术语作以下说明：

被控变量 在控制对象中要求按预定规律变化的物理量，即被控制的物理量。它是控制目的变量，也是控制系统的输出变量。用 $c(t)$ 表示，在方框图上常用拉氏变换式 $C(s)$ 表示。如图1-3(b)中的出口物料的温度变量。

给定信号（或给定值） 被控变量的控制目标信号（或控制目标值）。是控制系统的输入变量。用 $r(t)$ 表示，在方框图上常用拉氏变换式 $R(s)$ 表示。如图1-3(b)中出口物料温度要求控制在 $80^\circ\text{C}$ ，则 $80^\circ\text{C}$ 相对应的信号值即为给定信号（值）。

扰动变量 造成被控变量偏离给定值的一切变量。它也是控制系统的输入变量，用 $w(t)$

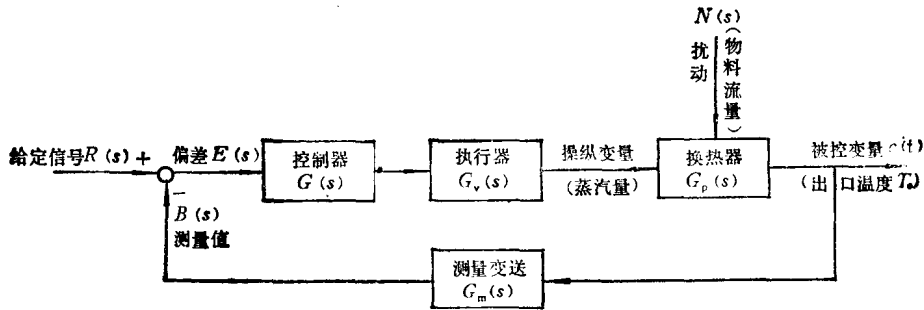


图 1-4 换热器温度控制系统方框图

或  $N(s)$  表示。如换热器温度控制系统中的物料流量、冷物料温度等。

**操纵变量** 用以克服扰动变量的影响，使被控变量达到给定值的变量。它是执行器的输出和被控对象的输入变量。如换热器温度控制系统中的蒸汽流量。

### 第三节 控制系统的分类

由于控制技术的广泛应用以及控制理论自身的发展，使得控制系统具有各种各样的形式。从不同的角度出发，分类的方式也不相同。一般可以有以下几种分类法。

#### 一、开环控制系统与闭环控制系统

##### 1. 闭环控制系统

图1-3(b)的换热器温度控制系统，从图1-4方块图可以看出，系统的输出（被控变量）通过测量变送环节又返回到系统的输入端与给定信号比较，以偏差的形式进入控制器，对系统起作用，整个系统构成了一个封闭的反馈回路。这样的控制系统称为闭环控制系统，或称反馈控制系统。因此，凡是系统的输出端与输入端之间存在反馈回路，使得输出变量对控制作用有直接影响的系统即是闭环控制系统。

闭环控制系统的优点是，不管任何扰动引起被控变量偏离给定值，都会产生控制作用去克服被控变量与给定值的偏差。因此闭环控制系统有较高的控制精度和较好的适应能力。正因为如此，闭环控制系统应用极广，本书中所讨论的控制系统主要是指闭环控制系统。

闭环控制系统的缺点，也是由于它是按偏差进行控制，当系统的惯性滞后和纯滞后较大时，控制作用对扰动的克服就很不及时，从而将使得控制质量不高。

##### 2. 开环控制系统

与闭环控制系统不同，当控制系统的输出信号（被控变量）没有反馈到系统的输入端，因而也不对控制作用产生影响的系统称为开环控制系统。

仍以换热器的温度控制为例来说明开环控制系统的工作原理和结构。假如已经知道影响出口物料温度的主要扰动变量是物料流量，那么可以用物料流量信号作为控制器的输入。控制器根据流量的变化大小去作用控制阀，使控制阀按控制器的输出信号去改变蒸汽流量。从而使出口物料温度达到要求值（给定值）。其控制系统的原理图和方框图如图1-5所示。

从图1-5(b)可以看出，控制系统的输出与输入之间没有反馈，整个系统没有构成闭合回路，因此它是一个开环控制系统。

开环控制系统一般不需要对被控变量进行测量，又根据输入变量（如扰动变量）进行控制。由于没有测量被控变量，也不与给定值进行比较，因此当被控变量偏离给定值时，偏差

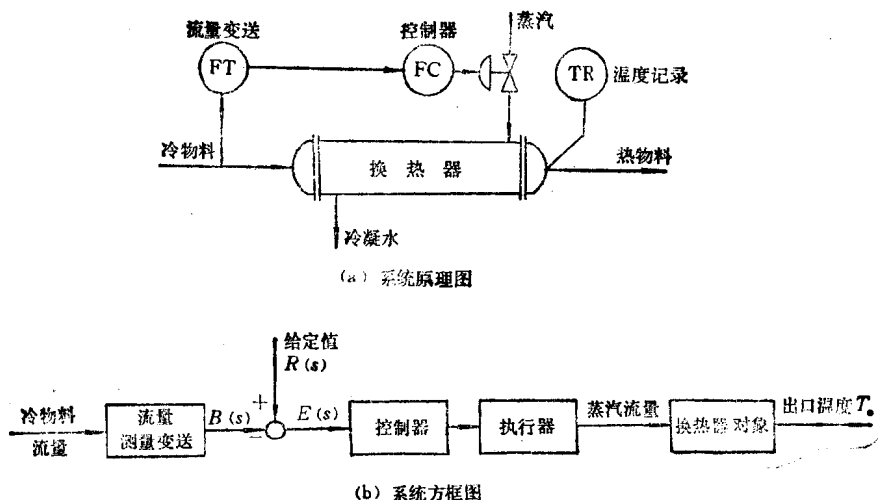


图 1-5 换热器温度开环控制系统

无法得知，更不可能消除。这是开环控制系统的缺陷。但是由于开环控制系统可以根据扰动来进行控制，不需要等待偏差产生之后才产生控制作用，所以克服扰动很及时，对于较频繁的扰动克服效果较好。这种按扰动变量进行控制的开环控制系统又称为“前馈控制系统”。

## 二、定值控制、随动控制和程序控制系统

在闭环控制系统中，根据给定信号（给定值）的形式不同，又可分为定值控制系统、随动控制系统和程序控制系统。

### 1. 定值控制系统

给定信号（给定值）为一常值的控制系统称为定值控制系统。这类控制系统的任务是保证在扰动作用下使被控变量始终保持在给定值上。在生产过程控制中大量的控制系统是属于定值控制系统。这是因为大量的生产过程都需要有一定的工作条件，这就要求将一些过程参数（如温度、压力、流量、液位、成份、位移、速度等）维持在一定的数值上。图1-3(b)的换热器温度控制系统，即是将出口物料温度保持在 $80^{\circ}\text{C}$ ，以满足生产条件。

### 2. 随动控制系统

给定信号是一个未知的变化量的闭环控制系统称为随动控制系统。这类控制系统的任务是保证在各种条件下系统的输出（被控变量）以一定的精度跟随着给定信号的变化而变化。所以这类控制系统又称跟踪系统。此时给定信号又称为参比信号。

随动系统在交通、通讯、国防等方面应用很广。如船舶驾驶舵角位置自动跟踪系统，雷达的自动跟踪系统、火炮自动瞄准系统等。在仪器仪表中的自动平衡电桥和自动电位差计也是典型的随动系统，如图1-6所示。

从系统角度分析，被测信号（电位差 $u_i$ ）是系统的输入变量（也即给定信号），可逆电机的角位移 $\phi$ 或相应的仪表指示和记录值 $l$ 是系统的输出变量（也即被控变量）。当被测电压 $u_i$ 发生变化时， $u_i$ 与滑线电阻上的反馈电压 $u_p$ 进行比较，其偏差电压 $\Delta u$ 经放大器放大后控制可逆电机移动滑线电阻滑动触点，改变反馈电压，直至使之与被测电压相平衡； $\Delta u = u_i - u_p = 0$ 。此时电机移动一角位移 $\phi$ 后停止转动，仪表的指针（或记录笔）也停止在某一相对的位置 $l$ 上，将被测电位差 $u_i$ 显示出来。从自动平衡电位差计的动作原理可以看出，其输出

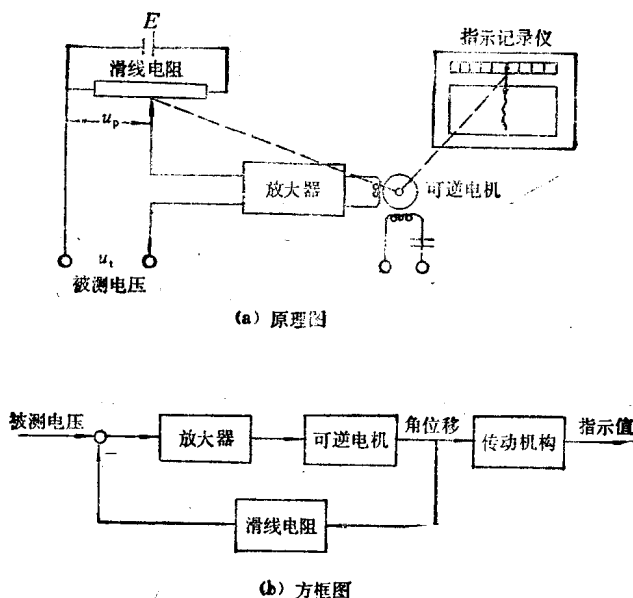


图 1-6 自动平衡电位差计的随动系统

变量是跟随着输入变量的变化而变化的，所以是一个随动系统。

过程控制中的比值控制系统也是典型的随动控制系统。参加化学反应的两种反应物  $A$  和  $B$ ，要求两流量  $F_A$  和  $F_B$  按一定的比例进入反应器。 $F_A$  量代表生产负荷，经常会发生变化，为保证  $F_B$  和  $F_A$  之间的比值关系不变，常采用比值控制系统，如图 1-7 所示。其工作原理是，当  $F_A$  发生变化时，经测量变送后乘以一定的比例系数  $K$ ，再作为物料量  $F_B$  控制器  $FC$  的给定值。此时由于给定信号是  $F_A$  的  $K$  倍，从而保证  $F_B/F_A = K$  的要求。从方块图 1-7(b) 可以看出它是一个随动控制系统。

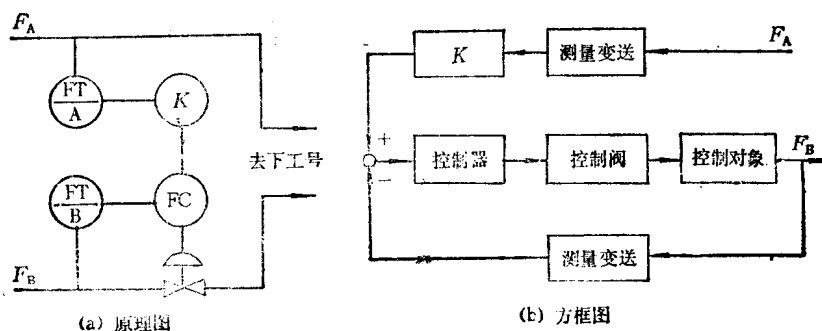


图 1-7 比值控制系统的示意图

### 3. 程序控制系统

给定信号是一个按一定时间程序变化的时间函数时，则该闭环控制系统就称为程序控制系统。在机械行业的数控机床是典型的例子。在某些过程控制中，如间歇生产的化学反应器的温度控制也属于这类控制系统。其实，程序控制系统可以看成是随动控制系统的特殊情

况，其分析研究方法也和随动控制系统相同。

### 三、线性与非线性控制系统

若按系统的特性来分类，可以分为线性控制系统与非线性控制系统。

#### 1. 线性控制系统

当系统中各组成环节的特性可以用线性微分方程（或差分方程）来描述时，称这类系统为线性控制系统。线性控制系统的特点是可以运用叠加原理。在系统存在几个输入时，系统的输出等于各个输入分别作用于系统时系统输出之和，当系统输入增大或缩小时，系统的输出也按比例增大或缩小。

若描述控制系统特性的微分方程（或差分方程）的系数是常数而不是随时间变化，则这种线性系统称为线性定常（或时不变）系统。若微分方程（或差分方程）的系数是时间的函数，则系统称为线性时变系统。

#### 2. 非线性控制系统

当系统中存在非线性的组成环节时，系统的特性就由非线性微分方程来描述，这样的控制系统称为非线性控制系统。对于非线性系统叠加原理是不适用的。

严格地讲，实际的控制系统都具有不同程度的非线性。非线性特性根据其处理方法不同，可以分为本质非线性和非本质非线性两种。对于非本质非线性，其输入、输出的关系曲线没有间断点和折断点，且呈单值关系。因此当系统变化量变化范围不大时，为便于分析研究，可简化为线性关系来处理。这样可以应用成熟的线性控制理论进行分析和讨论。对于本质非线性特性，其输入、输出关系或是具有间断点和折断点，或是具有非单值关系。这类控制系统需要用非线性理论来分析研究。

### 四、连续与离散控制系统

#### 1. 连续控制系统

当控制系统中各组成环节的输入和输出信号都是时间的连续函数时，称此类系统为连续控制系统。连续控制系统的特性一般是用微分方程来描述的。信号的时间函数允许有间断点（不连续点）。若系统是线性而且又是连续的特性，则称为线性连续系统。

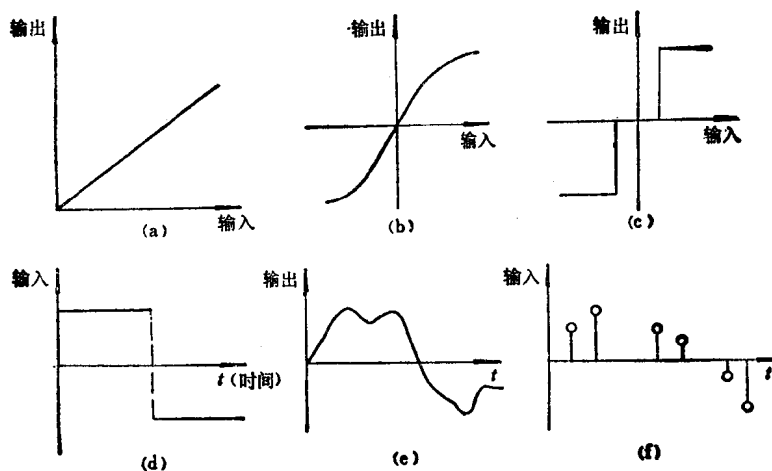


图 1-8 几种不同系统的特性

## 2. 离散控制系统

当控制系统中只要有一个组成环节的输入信号和输出信号在时间上是离散的, 这类控制系统称为离散控制系统。离散系统与连续系统的区别仅在于信号只在特定的离散的瞬时 (如  $t_1, t_2 \dots$ ) 是时间的函数, 而在两离散的瞬时点之间信号是不确定的, 如图1-8(f)所示。

离散控制系统的特性可用差分方程来描述, 若差分方程是线性的, 则系统为线性离散控制系统。

图1-8所示的是几种不同类型的特性。

## 五、单变量与多变量控制系统

### 1. 单变量控制系统

在一个控制系统中, 如果只有一个被控变量和一个控制作用来控制被控对象, 则称该系统为单变量控制系统, 又称为单输入-单输出系统。目前大量的过程控制系统都属于这类系统。

### 2. 多变量控制系统

如果一个控制系统中的被控变量多于一个, 控制作用也多于一个, 而且各控制回路相互之间有耦合关系, 则称这类控制系统为多变量控制系统, 也叫做多输入-多输出控制系统。其示意图如图1-9所示。

自动控制系统的分类方法很多, 主要的有以上几种。

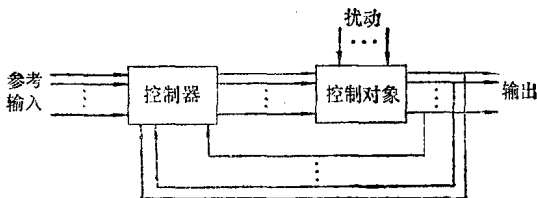


图 1-9 多变量控制系统

## 第四节 控制系统的研究内容和方法

### 一、控制系统的研究内容

控制系统的类型很多, 但研究的内容和方法是类似的。在研究控制系统时不是从具体控制系统的物理性质入手, 而是从表征这些控制系统的数学模型出发, 用数学 (包括实验) 的方法去构造一个人们所需要的数学模型, 或是去研究这种系统的数学模型。因此, 对于控制系统的研究主要可分成两大内容, 一是控制系统的分析, 二是控制系统的综合。

控制系统的分析是指在已知控制系统的数学模型的前提下, 分析系统的性能, 并研究性能指标与系统结构、参数之间的关系, 从而以便提出改善控制系统性能的途径和措施。

所谓控制系统的综合是指, 根据生产实际对控制系统提出的性能指标的要求, 用数学的方法去确定系统的某些参数或附加某种装置 (称校正装置) 的过程。可见控制系统的综合是控制系统设计的一部分。

### 二、控制系统的研究方法

对于单变量线性控制系统, 常采用经典的时域法、频率法和根轨迹法来进行研究。目前采用计算机为工具研究控制系统也越来越受到重视。

**时域法** 这是一种以微分方程为基础而构成的数学模型, 采用通常求解微分方程的途径, 直接在时间域中对控制系统进行研究的方法。在一定的输入变量作用下, 系统的输出变量时域表达式可以由微分方程求得 (或由传递函数求得), 从而计算出控制系统的性能指标。由这种方法得出的性能指标比较直观, 并且系统的参数与性能指标之间的关系比较清楚。由于目前计算技术的发展, 求解微分方程的工作量大为减轻, 从而使时域法的应用更为广泛。

**频域法** 对于一些不容易从理论推导得出系统微分方程的场合, 可以通过频率响应实验求得系统的特性。由于这种方法简便, 物理概念明了, 从而在实践中得到广泛的应用。



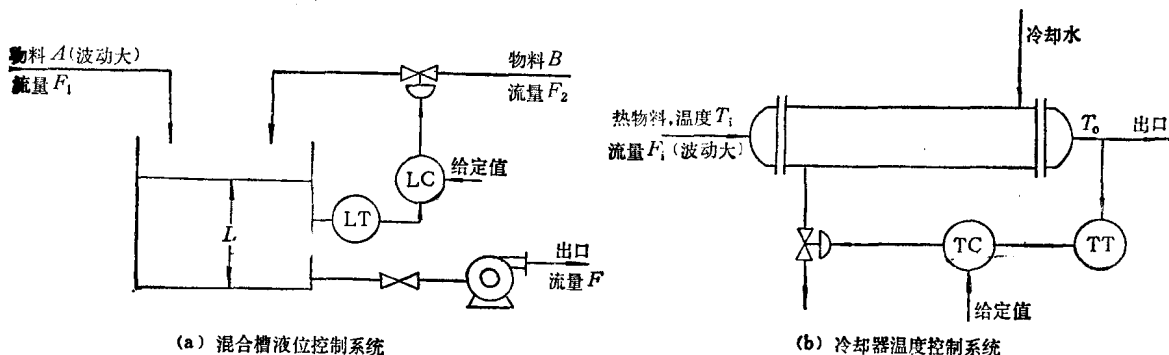
**根轨迹法** 这是一种以作图法为基础,去研究控制系统的方法。由于它是从系统的开环特性出发去研究系统的闭环特性,因此方法简单,特别是在系统设计时较为方便。

## 习 题

1-1 试说明开环控制系统与闭环控制系统各自的优缺点。

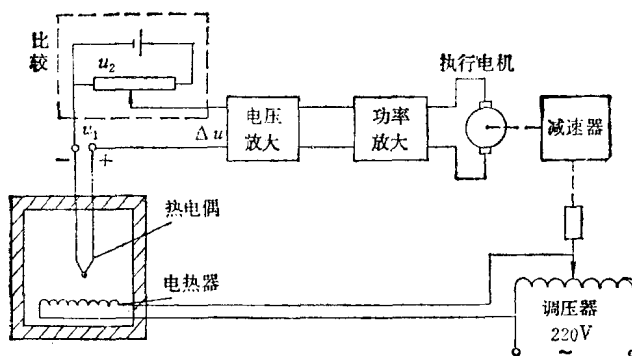
1-2 试举两个日常生活中的开环控制系统和闭环控制系统的例子,并说明其工作原理。

1-3 题图1-1(a)是一混合槽液位控制系统,题图1-1(b)是冷却器温度控制系统,试说明两系统的控制过程;画出控制系统的方框图,并指出被控变量、操纵变量、扰动变量。



题图 1-1

1-4 题图1-2所示为一恒温箱自动控制系统,试说明其工作原理,并画出系统的方块图,标明被控变量、操纵变量、可能存在的扰变量。



题图 1-2

1-5 试判别下列微分方程所描述的控制系统类型(即线性、非线性、定常、时变、随动、定值等)。

(1)  $3t \frac{dc(t)}{dt} + 5c(t) = r(t)$

(2)  $\frac{d^2c(t)}{dt^2} + 4 \frac{dc(t)}{dt} + c(t) = \frac{dr(t)}{dt} + 2r(t)$

(3)  $\frac{d^2c(t)}{dt^2} + c(t) \frac{dc(t)}{dt} + 2c(t) = n(t)$

(4)  $\frac{dc(t)}{dt} + 2c(t) = r(t) \sin \omega t$

(5)  $\frac{d^3c(t)}{dt^3} + 6 \frac{d^2c(t)}{dt^2} + 2 \frac{dc(t)}{dt} + c(t) = 7n(t)$