

面向21世纪高等学校规划教材（信息类）

ZIDONGKONGZHI YUANLI XUEXI ZHIDAO

《自动控制原理》

学习指导

•王霞 宗晓萍 编著
•唐予军 姜萍



中国计量出版社
CHINA METROLOGY PUBLISHING HOUSE

面向 21 世纪高等学校规划教材 (信息类)

《自动控制原理》学习指导

王霞 宗晓萍 唐予军 姜萍 编著

中国计量出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

《自动控制原理》学习指导/王霞等编著. —北京:中国计量出版社, 2009.11

面向 21 世纪高等学校规划教材 (信息类)

ISBN 978-7-5026-3199-4

I. ①自… II. ①王… III. ①自动控制理论—高等学校—教学参考资料 IV. ①TP13

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 193117 号

内 容 提 要

本书是《自动控制原理》课程的教学辅导与学习参考书, 主要介绍了自动控制的一般概念, 控制系统的数学描述, 线性系统的时域分析, 根轨迹法, 频率响应法, 控制系统的校正, 线性离散系统, 非线性控制系统等内容, 共八章, 每章都包括知识要点, 习题解析, 水平测试题及其答案等内容。

本书适合作为高等学校自动化、电气工程及其自动化、测控技术与仪器、电子信息工程等相关专业的参考工具书, 也可供从事自动控制的工程技术人员学习参考。

中国计量出版社出版

北京和平里西街甲 2 号

邮政编码 100013

电话 (010) 64275360

<http://www.zgjl.com.cn>

北京市媛明印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

版权所有 不得翻印

*

787 mm×1092 mm 16 开本 印张 9.75 字数 234 千字

2010 年 1 月第 1 版 2010 年 1 月第 1 次印刷

*

印数 1—2 000 定价: 17.00 元

前 言

《自动控制原理》是一门理论性和实践性很强的课程，学习起来比较困难。为了帮助学生理清思路，有效地提高分析问题、解决问题的能力，我们结合多年的教学实践经验，吸取有关教材及资料的精华，编写了这本《自动控制原理》的学习指导书。

本书共分八章，分别介绍了自动控制的一般概念，控制系统的数学描述，线性系统的时域分析，根轨迹法，频率响应法，控制系统的校正，线性离散系统，非线性控制系统等内容。每章第一部分为知识要点，对该章的基本概念、基本内容和基本方法加以归纳；第二部分为习题解析，主要对《自动控制原理》（宗晓萍，王霞，姜萍等编著，中国计量出版社，2007）教材中相应部分的习题做了比较详细的解答；第三部分为水平测试题及其答案，主要精选了近十年各高校的考研真题，并提供了参考答案。

本书体例完整，既可作为教学辅导与学习参考书与配套教材一起使用，也可单独使用，特别是能够为考研者进行系统复习提供有益的辅导，适用面较宽。

本书在编写过程中，得到了河北大学高春霞老师和中国计量出版社的支持和帮助，在此谨致以诚挚的谢意。

由于编者水平所限，书中难免有不当之处，敬请读者批评指正。

编 者

2009 年 12 月

目 录

第一章 自动控制的一般概念	(1)
知识要点	(1)
习题解析	(3)
水平测试题	(6)
水平测试题答案	(8)
第二章 控制系统的数学描述	(10)
知识要点	(10)
习题解析	(15)
水平测试题	(21)
水平测试题答案	(23)
第三章 线性系统的时域分析	(26)
知识要点	(26)
习题解析	(33)
水平测试题	(42)
水平测试题答案	(45)
第四章 根轨迹法	(48)
知识要点	(48)
习题解析	(52)
水平测试题	(60)
水平测试题答案	(61)
第五章 频率响应法	(67)
知识要点	(67)
习题解析	(78)
水平测试题	(88)
水平测试题答案	(92)
第六章 控制系统的校正	(96)
知识要点	(96)
习题解析	(103)
水平测试题	(108)
水平测试题答案	(109)

第七章 线性离散系统	(111)
知识要点	(111)
习题解析	(118)
水平测试题	(122)
水平测试题答案	(124)
第八章 非线性控制系统	(128)
知识要点	(128)
习题解析	(139)
水平测试题	(145)
水平测试题答案	(147)
参考文献	(150)

第一章 自动控制的一般概念

知识要点

一、基本概念

自动控制 在无人直接参与的情况下，通过控制器使被控对象或过程自动地按照预定的规律运行。

自动控制系统 将被控对象和控制装置按照一定的方式连接起来，构成一个具有特定功能的有机整体，以实现自动控制的目的，即构成自动控制系统。

被控对象 要求实现自动控制的机器、设备或生产过程。

被控量 被控对象的输出量，要求加以控制的物理量 c 。

控制量 作用于被控对象，能够影响输出量，使之按照要求变化的物理量 u 。

输入量 作用于控制系统输入端，并可使系统具有预定功能或预定输出的物理量 r 。

控制器 对被控对象起控制作用的控制装置总体，根据被控量和输入量计算控制量。

扰动 破坏系统输入量和输出量之间预定规律的信号。

二、自动控制系统的分类

1. 按结构分类

开环控制

如图 1-1 所示。

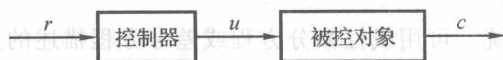


图 1-1 开环控制结构

闭环控制

如图 1-2 所示。

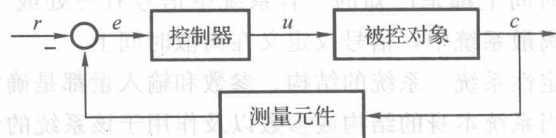


图 1-2 闭环控制结构

复合控制

如图 1-3，图 1-4，图 1-5 所示。

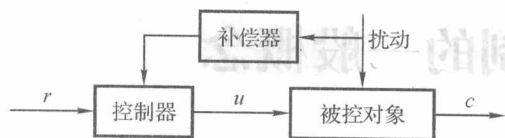


图 1-3 按扰动的前馈开环控制

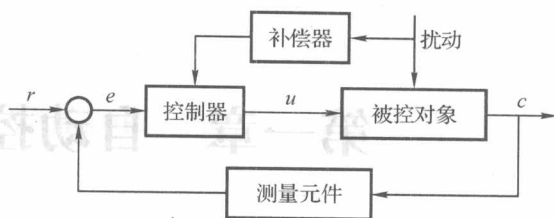


图 1-4 按扰动的前馈闭环控制

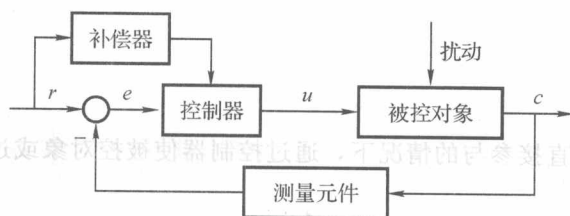


图 1-5 按设定值的前馈闭环控制

2. 输入信号特征分类

(1) 镇定系统 又称调节器。系统输入量为常值，或者随时间缓慢地变化。系统的基本任务是当出现扰动时，使系统的输出量保持为恒定的希望值。如水位控制系统，恒压调节系统等。

(2) 随动系统 又称跟踪系统。系统的输入量随时间任意变化。系统的基本任务是使系统输出量以要求的精度跟随输入量变化。系统的输出量常是机械位置、速度或加速度。如火炮控制系统、自动化仪表系统等属于这一类系统。

(3) 程序控制系统 系统输入量按既定规律变化，系统的控制过程按预定的程序进行。系统的输出量常为温度、压力、流量等物理量。如石油化学工业中的反应塔，加热炉的自动温度控制等，均采用程序控制系统。

3. 按系统性能分类

(1) 线性与非线性系统 可用线性微分方程或差分方程描述的系统，称为线性系统。如果微分方程或差分方程的系数为常数，则称为线性定常系统；否则称为线性时变系统。用非线性方程描述的系统，称为非线性系统。

(2) 连续与离散系统 输入量和输出量都是时间连续函数的系统，称为连续系统。在连续系统中，信号在全部时间上都是已知的。若系统中信号有一处或一处以上为离散时间函数，称为离散系统。在离散系统中，信号仅定义在离散时间上。

(3) 确定性与不确定性系统 系统的结构、参数和输入量都是确定的、已知的系统，称为确定性系统。反之，当系统本身的结构或参数以及作用于该系统的信号有不确定性或模糊性时，则称系统为不确定性系统。现实的工程系统，多为不确定性系统。

三、对自动控制系统的性能要求

(1) 稳定性 系统输出能复现输入的运动形式，这是系统能够工作的首要条件。

图(2)快速性 指系统的响应速度应尽可能快。

(3) 准确性 指过渡过程结束后,被控量应尽可能准确地达到希望值。

系统应能达到稳、快、准的要求,但实际上它们相互之间会产生矛盾。因此,要研究怎样兼顾这三方面的性能,以满足实际系统的需求。

习题解析

1-1 热水电加热系统如图 1-6 所示。为了保持希望的温度,由温控开关接通或断开电加热器电源。在使用热水时,水箱中流出热水并补充冷水。试说明系统工作原理并画出系统原理方框图。

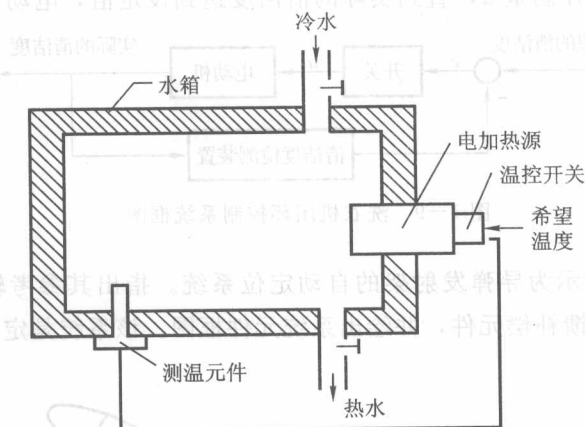


图 1-6 热水电加热系统

解 在热水电加热器系统中,被控对象为水箱,输入量为预置的希望温度(给定值),设为 $T_r(^{\circ}\text{C})$;输出量为水箱的实际水温,设为 $T(^{\circ}\text{C})$;温控开关为控制元件,通过执行器——电加热源实现温度控制;扰动主要是由于放出热水并注入冷水而产生的降温作用。当 $T(^{\circ}\text{C}) = T_r(^{\circ}\text{C})$ 时,电加热器不工作,此时水箱中水温保持在希望温度上。当使用热水时,由于扰动作用使实际水温下降,测温元件感受 $T(^{\circ}\text{C}) < T_r(^{\circ}\text{C})$ 的变化,并把这一温度变化转换为电信号使温控开关工作,温控开关接通电源,使水箱中的水升温,直到 $T(^{\circ}\text{C}) = T_r(^{\circ}\text{C})$ 为止。系统原理方框图如图 1-7 所示。



图 1-7 电加热器系统方框图

1-2 洗衣机的控制系统框图如图 1-8 所示，试设计一个闭环控制的洗衣机系统框图。



图 1-8 洗衣机的控制系统框图

解 在图 1-8 所示的洗衣机开环控制系统中，完全依赖经验设定洗衣时间，对实际的清洁度没有检测，结构虽然简单，但是最终的洗衣效果得不到保证。设计洗衣机闭环控制系统，原理方框图如图 1-9 所示。输入量为预置的希望清洁度（给定值）；被控量为衣物的实际清洁度，通过检测装置检测实际的衣物清洁度，根据实际清洁度是否达到设为要求，决定开关的状态即电动机的控制量 u ，直到实际的清洁度达到设定值，电动机停止工作。



图 1-9 洗衣机闭环控制系统框图

1-3 图 1-10 所示为导弹发射架的自动定位系统。指出其参考输入、被控变量、执行元件、测量元件和反馈补偿元件，并绘出系统元件框图。该系统是定值控制系统、随动系统还是程序控制系统？

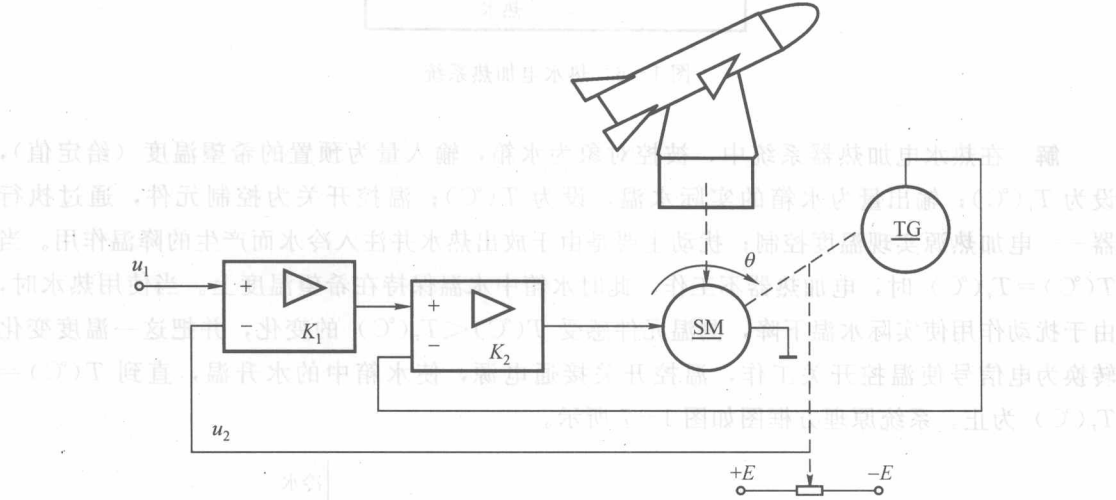


图 1-10 导弹发射架定位系统

解 在图 1-10 中， u_1 为参考输入，导弹发射架的倾角 θ 为被控变量，执行元件是发射架底部的电机，测量元件包括测量角速度和角位移的测速发电机和电位器，反馈补偿元件是两个放大器，系统框图如图 1-11 所示。由于发射架角度的设定值对应敌机的飞行位置，是一个不可预知的变化量，所以系统属于随动系统。

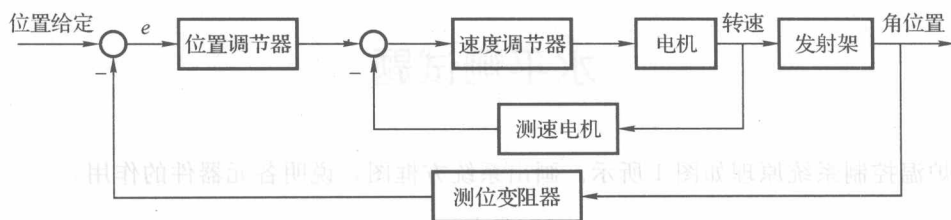


图 1-11 导弹发射架定位系统框图

1-4 图 1-12 所示为直流电动机双闭环调速系统的原理图。试画出该系统的方框图，并分析哪些装置起测量、比较、执行和校正等作用。

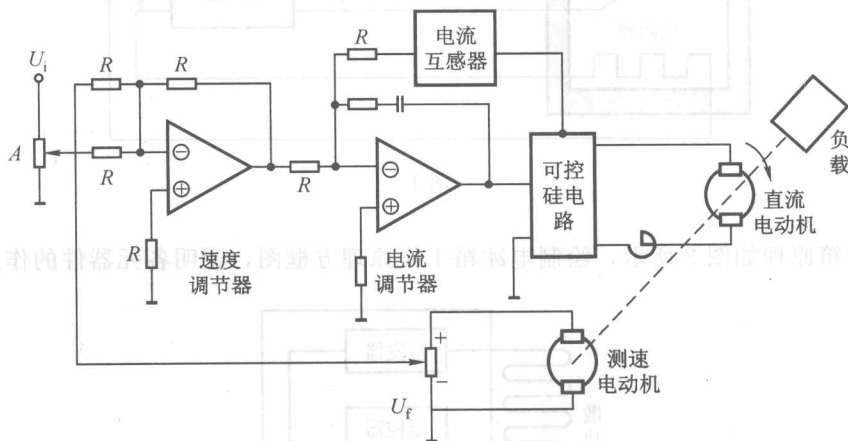


图 1-12 直流电动机双闭环调速系统

解 该系统除具有速度反馈（通常称主反馈）之外，还具有电流反馈（通常称为局部反馈）。可控硅电路的电流输出经电流互感器局部反馈，可控硅电路的电压输出加在直流电动机的电枢上，使电动机旋转，电动机输出转速经测速发电机形成主反馈。电位器 A 输出作为系统给定量；电流互感器是电流反馈的检测元件，积分器是校正元件，电流调节器在电流反馈中起比较、放大作用；测速发电机是速度反馈的测量元件，它将电动机的转速转换为电压信号反馈到输入端，速度调节器起比较、放大作用；可控硅电路和直流电动机是执行机构。其方框图如图 1-13 所示。

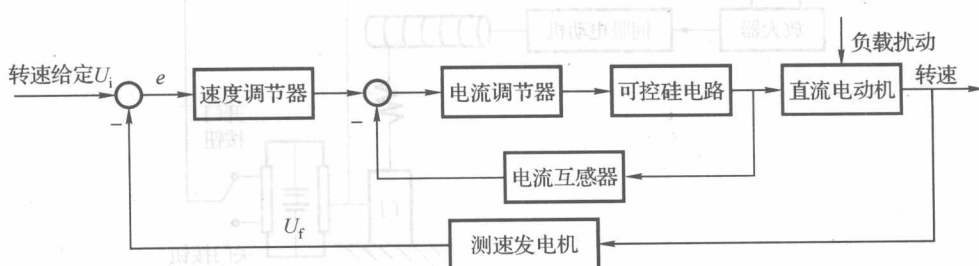


图 1-13 直流电动机双闭环调速系统框图

水平测试题

1. 炉温控制系统原理如图 1 所示。画出系统方框图，说明各元器件的作用。

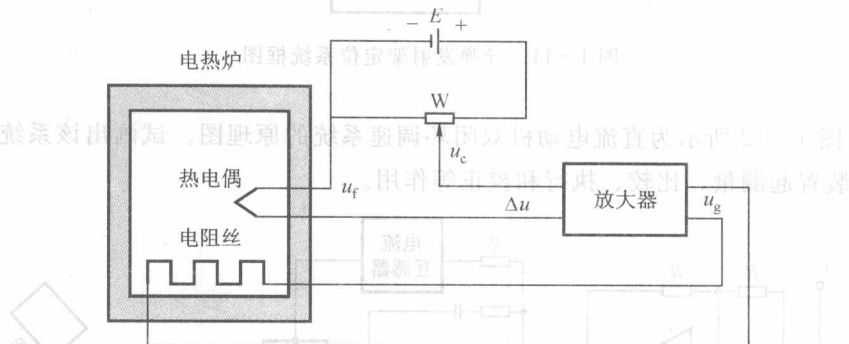


图 1

2. 电冰箱原理如图 2 所示，绘制电冰箱工作原理方框图，说明各元器件的作用。

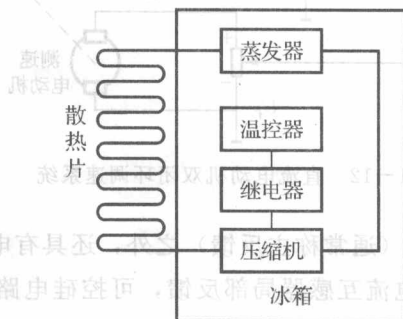


图 2

3. 图 3 是仓库大门自动开闭原理示意图。画出系统原理方框图，说明各元器件的作用。

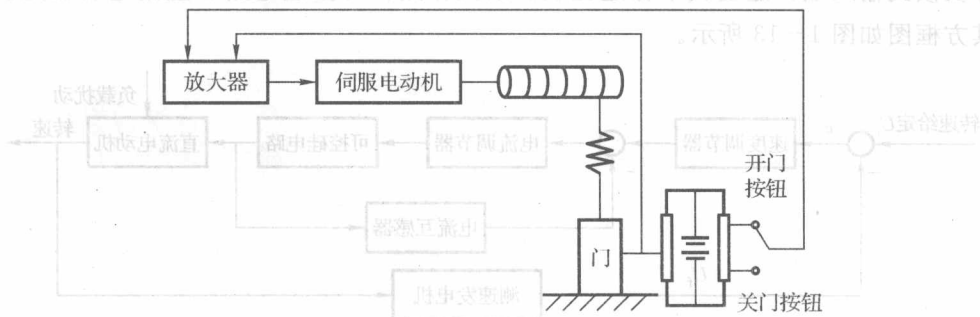


图 3

4. 图 4 为液位自动控制系统原理示意图。在任何情况下，希望液面高度 c 维持不变，试说明系统工作原理，并画出系统原理方框图。

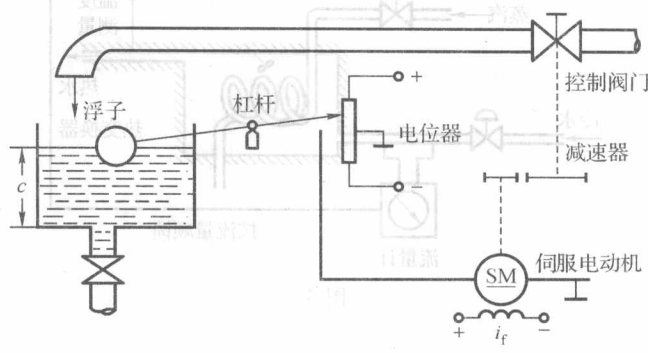


图 4

5. 图 5 是一种用电流控制的气动调节阀，用来控制液体的流量。图中，与杆固连的线圈内有一块永久磁铁，当电流通过线圈时，便产生使杆绕支点转动的力矩，从而带动挡板关闭或打开喷嘴。当喷嘴被关闭时，进入膜片上腔的空气压力将增大，从而将膜片下压，并带动弹簧、阀杆一起下移；反之，当喷嘴被打开时，由于空气从喷嘴跑出，进入膜片上腔的空气压力将减小，膜片连同弹簧、阀杆便一起上升。此外，阀杆上下移动的同时，通过反馈联动机构将阀杆位移反馈回去，并由与杆相连的弹簧产生一个平衡力矩。通过电流控制阀杆位移，从而改变阀门开度，达到控制液体流量的目的。

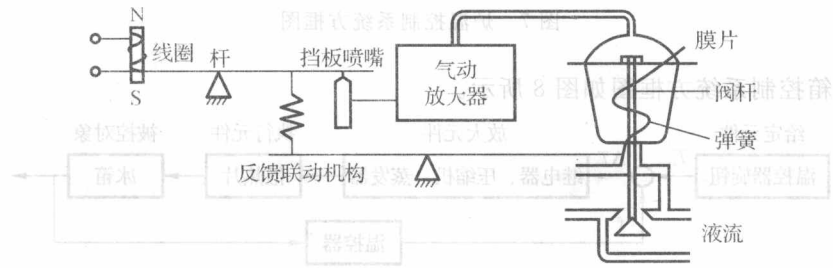


图 5

- (1) 确定该控制装置的输入量、输出量、控制对象和扰动量；
- (2) 绘出其原理方框图；
- (3) 指出该装置属于何种类型的系统。

6. 图 6 为水温控制系统，冷水在热交换器中由通入的蒸汽加热，从而得到一定温度的热水。冷水流量的变化可用流量计测得。

- (1) 说明为了保持热水温度为给定值，系统是如何工作的；
- (2) 指出系统的控制对象及控制器；
- (3) 绘制系统的原理方框图；
- (4) 指出系统属于何种类型。

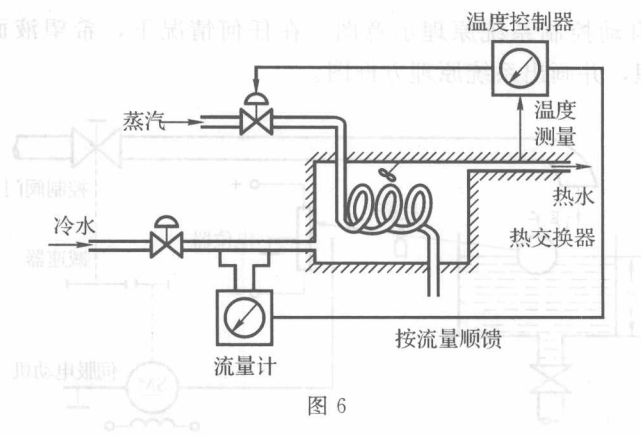


图 6

水平测试题答案

1. 炉温控制系统方框图如图 7 所示。

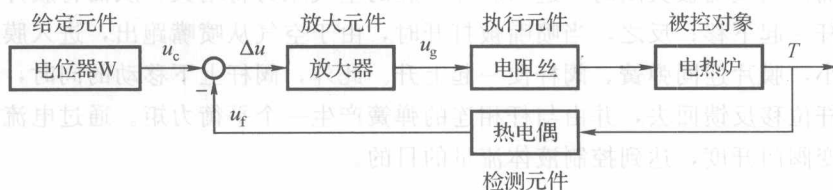


图 7 炉温控制系统方框图

2. 电冰箱控制系统方框图如图 8 所示。

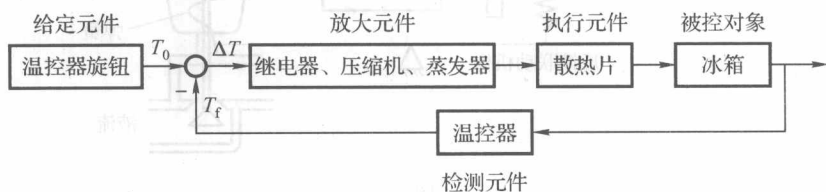


图 8 电冰箱控制系统方框图

3. 仓库大门开闭系统方框图如图 9 所示。

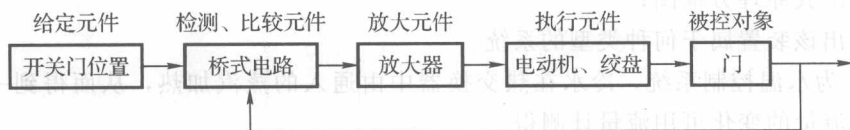


图 9 仓库大门开闭系统方框图

4. 当电位器电刷位于中点位置时，电动机不动，控制阀门有一定的开度，使水箱中流入水量与流出水量相等，从而液面保持在希望高度 c 上。一旦流入水量或流出水量发生变化，水箱液面高度便相应变化。例如，当液面升高时，浮子位置亦相应升高，通过杠杆作用

使电位器电刷从中点位置下移，从而给电动机提供一定的控制电压，驱动电动机通过减速器减小阀门开度，使进入水箱的流量减少。此时，水箱液面下降，浮子位置相应下降，直到电位器电刷回到中点位置，系统重新处于平衡状态，液面恢复给定高度。反之，若水箱液面下降，则系统会自动增大阀门开度，加大流入水量，使液位升到给定高度 c 。液位自动控制系统原理方框图如图 10 所示。

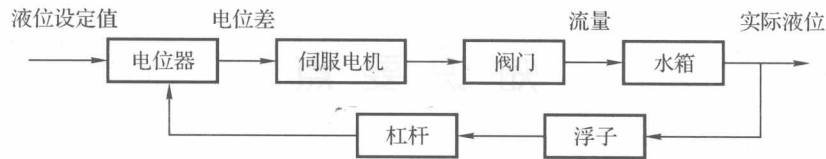


图 10 液位自动控制系统原理方框图

5. (1) 控制装置的输入量为通过线圈的电流、输出量为阀杆的位置、控制对象为气动调节阀、扰动量为液体的压力和流量。
- (2) 系统原理框图如图 11 所示。
- (3) 属于负反馈控制系统。

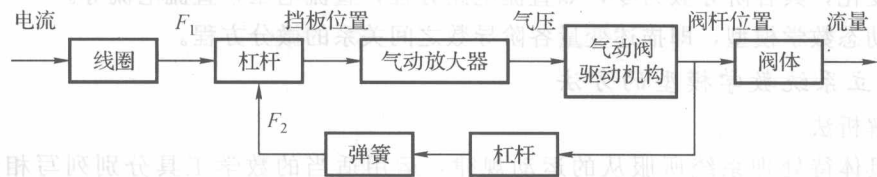


图 11

6. (1) 温度测量装置检测实际温度送给控制器，控制器根据实际温度和设定温度的偏差来决定蒸汽阀的开度，这是反馈控制回路。同时，待加热冷水的流量是系统的主要扰动，冷水流量的变化会影响系统内部的热量平衡，影响换热器出口的温度，为减小冷水流量对出口温度的影响，在水流量变化的同时，蒸汽量也应及时作出相应的调节，这就是克服扰动的前馈控制通道。
- (2) 控制对象为热交换器，控制器为温度控制器。
- (3) 系统的原理方框图如图 12 所示。
- (4) 属于前馈反馈控制系统。

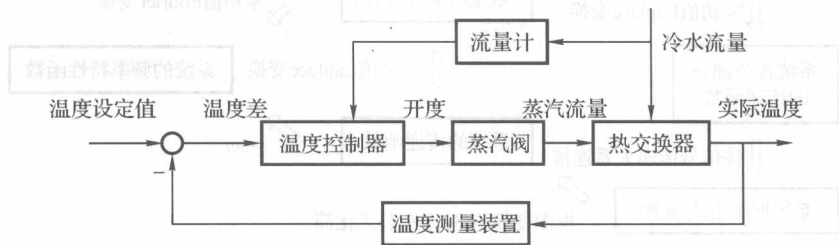


图 12

第二章 控制系统的数学描述

知识要点

一、数学模型

1. 数学模型的概念

控制系统的数学模型是描述系统内部物理量（或变量）之间关系的数学表达式。

(1) 静态数学模型，即在静态条件下，描述变量之间关系的代数方程。静态条件即变量不随时间变化，其各阶导数为零，如直流电路方程，直流电压，直流电流等。

(2) 动态数学模型，即描述变量各阶导数之间关系的微分方程。

2. 建立系统数学模型的方法

(1) 解析法

根据具体待处理系统所服从的运动规律，运用适当的数学工具分别列写相应的运动方程。

(2) 实验法

在系统内部关系十分复杂时，为了某特定目的，可以通过实验手段，测量该系统的输出输入量，然后运用“系统辨识”方法构建一个近似的数学模型。

3. 经典控制涉及的数学模型

各种数学模型之间的关系如图 2-1 所示。

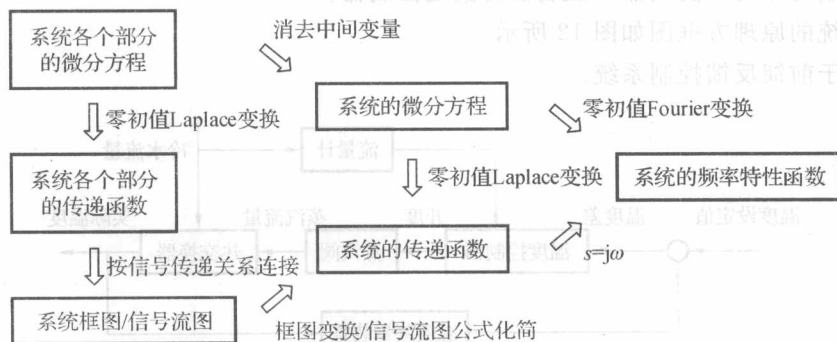


图 2-1 数学模型关系图

二、微分方程

微分方程是描述系统动态特性的最基本模型。

1. 用解析法建立系统微分方程的步骤

- (1) 由系统原理图画系统方框图或直接确定系统中各个基本部件(元件)的输入输出量, 确定系统的输入、输出变量。
- (2) 列写各方框图的输入、输出变量之间的微分方程。
- (3) 消去中间变量, 得到系统的微分方程。

注意: 为使计算简便, 在化简过程中可用微分算子 s 代替微分算符 $\frac{d}{dt}$, 将微分方程视为代数方程, 然后按照代数方程的解法求取并消去中间变量, 最后将 s 还原成 $\frac{d}{dt}$ 。为了保证系统的阶数不变, 化简过程中不能消去算子 s 。由于方程组的系数行列式只与系统结构参数相关, 所以表示输出的算子表达式分母不受系统输入输出的选择的影响。

2. 线性定常微分方程解的结构

$$y(t) = y^*(t) + C_1 e^{\lambda_1 t} + C_2 e^{\lambda_2 t} + \dots + C_n e^{\lambda_n t}$$

↑
稳态分量(非齐次特解) 暂态分量(齐次通解)

(1) 齐次解的运动形式取决于特征根, 由于微分方程的结构参数只取决于系统本身的结构和参数, 所以齐次解的运动形式只与系统本身有关, 这些运动形式是系统的固有运动, 当初始状态非零或者有输入信号时, 这些运动形式就会被激发出来。

(2) 特解的运动形式与输入量的形式一致, 它是外界输入作用于系统引起的受迫运动。

(3) 由特征根决定的组成齐次解的运动形式决定了系统的性能, 这些运动形式叫做系统的模态。

三、传递函数

在零初值条件下, 线性定常系统(或环节)输出的拉氏变换与输入的拉氏变换之比称为该系统(或环节)的传递函数, 记为 $G(s)$ 。

设系统微分方程的一般表示形式为

$$\begin{aligned} & a_n \frac{d^n}{dt^n} C(t) + a_{n-1} \frac{d^{n-1}}{dt^{n-1}} C(t) + \dots + a_1 \frac{d}{dt} C(t) + a_0 C(t) \\ &= b_m \frac{d^m}{dt^m} R(t) + b_{m-1} \frac{d^{m-1}}{dt^{m-1}} R(t) + \dots + b_1 \frac{d}{dt} R(t) + b_0 R(t) \end{aligned}$$

初始条件为零时, 对系统微分方程取拉氏变换后得

$$G(s) = \frac{C(s)}{R(s)} = \frac{b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \dots + b_1 s + b_0}{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0}$$

可表征控制系统的动态性能, 并用以求出给定输入量时系统的零初始条件响应。

1. 传递函数的性质

(1) 因果系统的传递函数是 s 的有理真分式, 分母多项式的次数 n 不小于分子多项式的次数 m 。

(2) 传递函数只适用于线性定常系统, 因为导出传递函数的拉氏变换是一种线性积分