

高校经典教材同步辅导丛书
配套科学版·胡寿松主编

九章丛书

自动控制原理

第五版

同步辅导及习题全解

主编 孟浩 刘东星

- 知识点跨
- 逻辑推理
- 习题全解
- 全真考题
- 名师执笔
- 题型归类



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

新版

自动控制原理

10

圖書編號及刊例查詢

高校经典教材同步辅导丛书

自动控制原理（第五版）同步 辅导及习题全解

主编 孟浩 刘东星

编委（排名不分先后）

程丽园 李国哲 陈有志 苏昭平

郑利伟 罗彦辉 邢艳伟 范家畅

孙立群 李云龙 刘 岩 崔永君

高泽全 于克夫 尹泉生 林国栋

黄 河 李思琦 刘 闯 侯朝阳



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书是为了配合胡寿松主编的《自动控制原理》(第五版),科学出版社教材而编写的辅导书。

本书对教材中各章的重点、难点做了较深刻的分析,对各章的课后习题做了全面解析解答。

本书可作为高等院校电气信息类专业的参考书,也可作为各类工程技术人员和自学者的辅导书。

图书在版编目(CIP)数据

自动控制原理(第五版)同步辅导及习题全解 / 孟浩,
刘东星主编. —北京:中国水利水电出版社, 2008

(高校经典教材同步辅导丛书)

ISBN 978-7-5084-5976-9

I. 自… II. ①孟…②刘… III. 自动控制理论—高等学
校—教学参考资料 IV. TP13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 161777 号

书 名	高校经典教材同步辅导丛书 自动控制原理(第五版)同步辅导及习题全解
作 者	主编 孟浩 刘东星
出版 发行	中国水利水电出版社(北京市三里河路6号 100044) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: mchannel@263.net(万水) sales@waterpub.com.cn
经 售	电话: (010) 63202266(总机)、68367658(营销中心)、82562819(万水) 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	北京万水电子信息有限公司
印 刷	北京市梦宇印务有限公司
规 格	170mm×227mm 16开本 23印张 524千字
版 次	2009年2月第1版 2009年2月第1次印刷
印 数	0001—6000册
定 价	25.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

前言

“自动控制原理”一直是大中专院校电子专业学生的必修课程,其内容随着电子技术的发展而日趋丰富。这就产生了一个矛盾,一方面学生因所修课程越来越多而导致课外时间减少,另一方面因技术进步又要求学生了解比以前更多的知识。本书正是为了解决这一矛盾而精心编写的。它作为胡寿松主编的教材《自动控制原理》(第五版)的配套习题全解,除了有传统辅导书的解题过程外,还有以下特点:

(1)**知识点窍**:运用公式、定理及定义来点明知识点。

(2)**逻辑推理**:阐述习题的解题过程。

(3)**解题过程**:概念清晰、步骤完整、数据准确、附图齐全。

把**知识点窍—逻辑推理—解题过程**串联起来,做到融会贯通,最后给出本书的习题答案,在解题思路和解题技巧上进行精练分析和引导,巩固所学,达到举一反三的效果。

“**知识点窍**”和“**逻辑推理**”是本书的精华所在,是由多位著名教授根据学生的弱点进行分析而研究出来的一种新型的拓展思路的训练方法,“**知识点窍**”是提纲挈领地抓住了题目核心知识,让学生清楚地了解出题者的意图,而“**逻辑推理**”则注重引导学生思维,旨在培养学生的思维技巧。本书在此基础上,还提供了详细的“**解题过程**”,使学生熟悉整个答题过程。本书在编写过程中,参考了胡寿松主编的《自动控制原理》(第五版),并借鉴了书中部分插图,在此深表感谢。

由于作者水平有限及编写时间仓促,书中不妥之处在所难免,恳请广大读者批评指正。

编者

2008年11月

目 录

第一章 自动控制的一般概念	1
1.1 自动控制与自动控制系统	1
1.2 自动控制的基本原理方式	1
1.3 自动控制系统的分类	3
1.4 对自动控制系统的基本要求	4
典型例题与解题技巧	5
课后习题与解答	7
历年考研真题评析	12
第二章 控制系统的数学模型	14
2.1 控制系统的时域数学模型	14
2.2 控制系统的复数域数学模型	16
2.3 控制系统的结构图与信号流程图	20
2.4 数学模型的试验测定法	23
典型例题与解题技巧	24
课后习题与解答	26
历年考研真题评析	47
第三章 线性系统的时域分析法	51
3.1 系统时间响应的性能指标	51
3.2 一阶系统的时域分析	52
3.3 二阶系统的时域分析	53
3.4 高阶系统的时域分析	56
3.5 线性系统的稳定性分析	56
3.6 线性系统的稳态误差分析	58
典型例题与解题技巧	61
课后习题与解答	62
历年考研真题评析	86
第四章 线性系统的根轨迹法	90
4.1 根轨迹法的基本概念	90

4.2 根轨迹绘制的基本法则	92
4.3 广义根轨迹	94
4.4 系统性能的分析	95
典型例题与解题技巧	97
课后习题与解答	100
历年考研真题评析	131
第五章 线性系统的频域分析法	134
5.1 频率特性	134
5.2 典型环节的频率特性	136
5.3 频率域稳定判据	140
5.4 稳定裕度	141
5.5 闭环系统的频域性能指标	142
典型例题与解题技巧	143
课后习题与解答	145
历年考研真题评析	163
第六章 线性系统的校正方法	167
6.1 系统的设计与校正问题	167
6.2 常用校正装置及特性	167
6.3 串联校正	169
典型例题与解题技巧	173
课后习题与解答	176
历年考研真题评析	197
第七章 线性离散系统的分析与校正	200
7.1 离散系统的基本概念	200
7.2 信号的采样与保持	200
7.3 Z变换理论	201
7.4 离散系统的数学模型	203
7.5 离散系统的稳定性与稳态误差	204
7.6 离散系统的动态性能分析	206
7.7 离散系统的数字校正	208
典型例题与解题技巧	208
课后习题与解答	211
历年考研真题评析	234

第八章 非线性控制系统分析	238
8.1 非线性控制系统概述	238
8.2 常见非线性特性及其对系统运动的影响	238
8.3 相平面法	239
8.4 描述函数法	240
8.5 非线性控制的逆系统方法	242
典型例题与解题技巧	243
课后习题与解答	245
历年考研真题评析	273
第九章 线性系统的状态空间分析与综合	276
9.1 线性系统的状态空间描述	276
9.2 线性系统的可控性与可观测性	279
9.3 线性定常系统的线性变换	280
9.4 线性定常系统的反馈控制及状态观测器	283
典型例题与解题技巧	288
课后习题与解答	290
历年考研真题评析	321
第十章 动态系统的最优控制方法	325
10.1 最优控制的一般概念	325
10.2 最优控制中的变分法	327
10.3 极小值原理	329
10.4 线性调节器与跟踪器	330
10.5 离散系统的最优控制	332
10.6 动态规划法	333
典型例题与解题技巧	334
课后习题与解答	335
历年考研真题评析	360

第一章 自动控制的一般概念

1.1 自动控制与自动控制系统

自动控制 利用控制装置自动地操纵机器设备或生产过程,使其具有希望的状态或性能。

自动控制系统 能够实现自动控制任务的系统,由控制装置与被控对象组成。

被控对象 要求实现自动控制的机器、设备或生产过程。

控制装置 对被控对象起控制作用的控制装置总体。

输出量 位于控制系统输出端,并要求实现自动控制的物理量。也称为被控量。

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。

扰动 破坏系统输入量和输出量之间预定规律的信号。

反馈 将系统的输出量馈送到参考输入端,并与参考输入进行比较的过程。

反馈控制 将系统的输出量与参考输入进行比较,并力图保持两者之间既定关系的控制原理。

前向通道 从给定信号到被控变量的通道。

反馈通道 从被控变量到比较点的通道。

误差 期望输出值与实际输出值之间的偏差。在反馈控制系统中,参考输入和反馈信号的偏差也成为误差。

1.2 自动控制的基本原理方式

自动控制系统最基本的控制方式有开环控制方式、反馈控制方式和复合控制方式。近年来,以现代数学为基础,引入电子计算机的新的控制方式也有了很大的发展,例如最优控制、自适应控制、模糊控制等。

1. 开环控制方式

开环控制方式是指控制装置与被控对象之间只有顺向作用而没有反向联系的控制过程,其特点是系统的输出量不会对系统的控制作用发生影响。它可以分为按给定量控制和按扰动控制两种形式。

(1)按给定量控制的开环控制系统,其控制作用直接由系统的输入量产生,给定一个输入量,就有一个输出量与之相对应,控制精度完全取决于所用的元件及校准的精度,对工作过程中受到的扰动或特性参数的变化无法自动补偿。这种控制系统结构简单,调整方便,成本低,多用于系统结构参数稳定和扰动信号较弱的场合,如自动售货机、自动洗衣机、自动化流水线

及数控车床等。典型的按给定量控制的开环控制系统的原理方框图如图 1-1 所示。



图 1-1 按给定量控制的开环控制原理图

(2)按扰动控制的开环控制系统,是利用可测量的扰动量,产生一种补偿作用,以减小或抵消扰动对输出量的影响,这种控制方式也称为顺馈控制。这种控制方式是直接从扰动取得信息,并以此改变被控量,因此,其抗干扰性好,控制精度也较高,但它只适用于扰动是可测量的场合,而且一个补偿装置只能补偿一种扰动因素,对其余扰动均不起补偿作用。这种控制方式常用于工作机械的恒速控制以及电源系统的稳压、稳频控制。典型的按扰动控制的开环控制系统的原理方框图如图 1-2 所示。

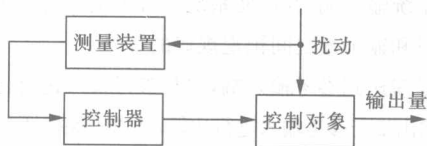


图 1-2 按扰动控制的开环控制原理图

2. 反馈控制方式

反馈控制方式又称为闭环控制方式,是指控制装置与被控对象之间既有顺向作用又有反向联系的控制过程。反馈控制方式是按偏差进行控制的,即不论什么原因使被控量偏离期望值而出现偏差时,必定会产生一个相应的控制作用去减小或消除这个偏差,使被控量与期望值趋于一致。它的主要特点是:

- (1)闭环负反馈控制,即按偏差进行调节。
- (2)抗干扰性好,控制精度高。
- (3)系统参数应适当选择,否则可能不能正常工作。典型闭环控制系统的方框图如图 1-3 所示。

3. 复合控制方式

复合控制是开环控制和闭环控制相结合的一种控制方式。这种控制方式把按偏差控制和按扰动控制结合起来,对于主要扰动采用适当的补偿装置实现按扰动控制,同时,再组成反馈控制系统实现按偏差控制,以消除其余扰动产生的偏差。复合控制的主要特点是:

- (1)具有很高的控制精度。
- (2)可以抑制几乎所有的可测扰动量,其中包括低频强扰动。
- (3)补偿器的参数要有较高的稳定性。

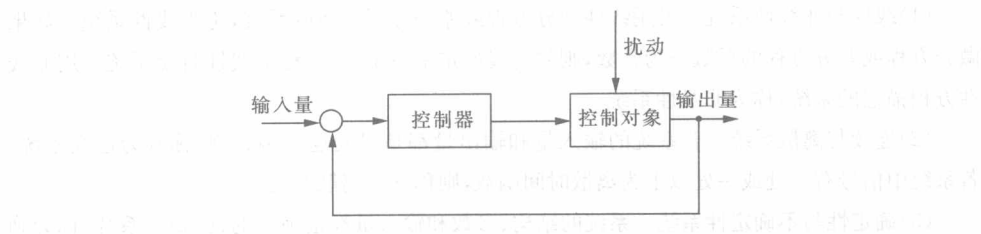


图 1-3 典型闭环控制系统的原理方框图

复合控制常被用于高精度的控制系统中，如火炮随动系统，飞机自动驾驶仪以及人造地球卫星控制系统等。典型复合控制系统的原理方框图如图 1-4 所示。

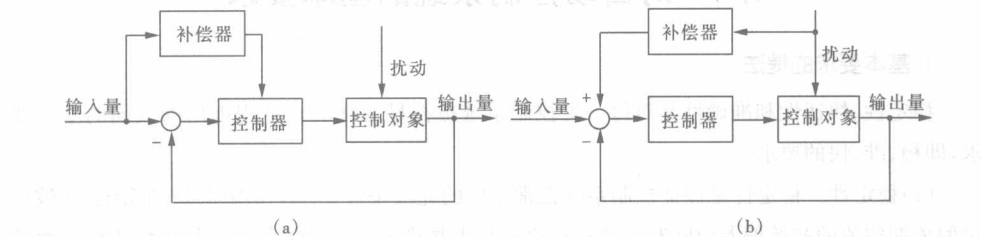


图 1-4 典型复合控制系统的原理方框图

1.3 自动控制系统的分类

1. 按控制方式分类

开环控制系统、反馈控制系统和复合控制系统。

2. 按元件类型分类

机械系统、电气系统、机电系统、液压系统、气动系统等。

3. 按系统功用分类

主要分为以下 3 类：镇定系统、随动系统和过程控制系统。

(1) 镇定系统，又称为调节器。系统输入量为常值，或者随时间缓慢的变化。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，又称为跟踪系统。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。如火炮控制系统、自动化仪表系统等。

(3) 过程控制系统，又称为程序控制系统。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。如石油化工工业中的反应塔、加热炉的自动温度控制系统等。

4. 按系统性能分类

主要分为以下 3 类：线性与非线性系统、连续与离散系统、确定性与不确定性系统。

(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全为常数,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。若系统的输入量和输出量都是时间连续函数,则称其为连续系统。若系统中信号有一处或一处以上为离散时间函数,则称其为离散系统。

(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,则称其为不确定性系统。

1.4 对自动控制系统的基本要求

1. 基本要求的提法

稳定性、快速性和准确性是对每一类控制系统被控量变化的全过程提出的共同的基本要求,即稳、准、快的要求。

(1)稳定性。稳定性是保证控制系统正常工作的先决条件。一个稳定的控制系统,其被控量偏离期望值的初始偏差应随时间的增长逐渐减小并趋于零。线性自动控制系统的稳定性是由其系统结构决定的,与外界因素无关。

(2)快速性。为了很好的完成控制任务,控制系统除了要满足稳定性的要求,还必须对其过渡过程的形式和快慢提出要求,即对控制系统的过渡时间和超调量提出要求,一般称为动态性能。

(3)准确性。理想情况下,当过渡过程结束后,被控量达到的稳态值应与期望值一致。但实际上,由于系统结构,外作用形式以及摩擦、间隙等非线性因素的影响,被控量的稳态值与期望值之间会存在误差,称为稳态误差。稳态误差是衡量控制系统控制精度的重要指标。

2. 典型外作用

目前,在控制工程中常用的典型外作用函数有阶跃函数、斜坡函数、脉冲函数以及正弦函数等。

(1)阶跃函数。

阶跃函数的数学表达式为

$$f(t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ R, & t \geq 0 \end{cases}$$

上式表示一个在 $t = 0$ 时出现的幅值为 R 的阶跃变化函数,如图 1-5 所示。幅值 $R = 1$ 的阶跃函数称为单位阶跃函数,用 $1(t)$ 表示。幅值为 R 的阶跃函数可表示为 $f(t) = R \cdot 1(t)$ 。在任意时刻 t_0 出现的阶跃函数可表示为 $f(t - t_0) = R \cdot 1(t - t_0)$ 。

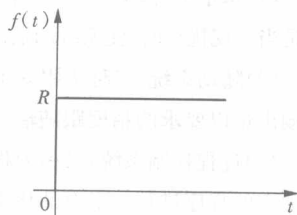


图 1-5 阶跃函数

(2) 斜坡函数。

斜坡函数的数学表达式为

$$f(t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ Rt, & t \geq 0 \end{cases}$$

上式表示从 $t = 0$ 时刻开始, 以恒定速率 R 随时间而变化的函数, 如图 1-6 所示。

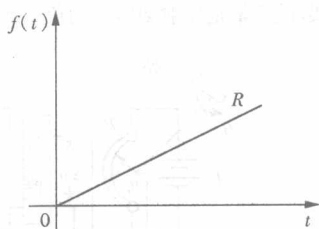


图 1-6 斜坡函数

(3) 脉冲函数。

$$\text{脉冲函数定义为 } f(t) = \lim_{t_0 \rightarrow 0} \frac{A}{t_0} [1(t) - 1(t - t_0)]$$

式中 $\frac{A}{t_0} [1(t) - 1(t - t_0)]$ 是由两个阶跃函数合成的脉动函数, 其面积 $A = (A/t_0)t_0$, 如图 1-7(a) 所示。当宽度 t_0 趋于零时, 脉动函数的极限便是脉冲函数, 它是一个宽度为零、幅值为无穷大、面积为 A 的极限脉冲, 如图 1-7(b) 所示。脉冲函数的强度用其强度来表示。面积 $A = 1$ 的脉冲函数称为单位脉冲函数或 δ 函数; 强度为 A 的脉冲函数可以表示为 $f(t) = A\delta(t)$; 在 t_0 时刻出现的单位脉冲函数则表示为 $\delta(t - t_0)$ 。

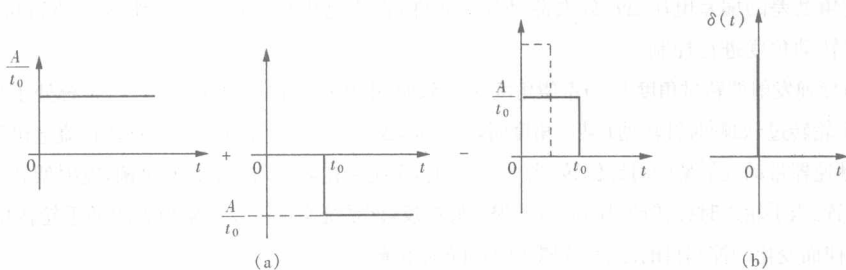


图 1-7 脉冲函数

(4) 正弦函数。

正弦函数的数学表达式为

$$f(t) = A \sin(\omega t - \varphi)$$

典型例题与解题技巧

例 1 图 1-8 所示是导弹发射架方位控制系统原理图, 希望发射架方位按要求角度转动。

(1) 指出系统的被控对象、被控量和给定量, 画出系统方框图。

(2) 说明控制系统中控制装置的各组成部分。

【知识点窍】 负反馈控制的原理。

【解】 (1) 根据题意, 控制系统的目的是使导弹发射架能够转动希望的角度, 故被控对象是发

射架,被控量是发射架转动的角度 θ_c ,给定量是手轮的角度 θ_r (希望值)。系统方框如图 1-9 所示。

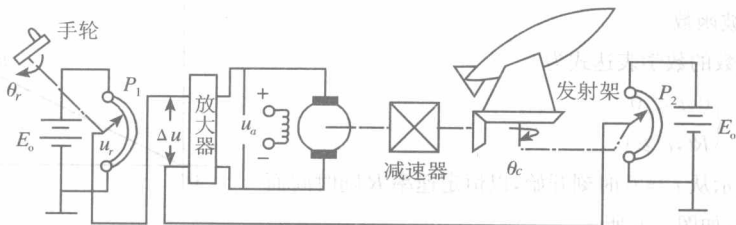


图 1-8 导弹发射架方位控制系统原理

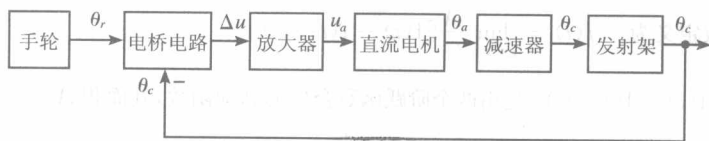


图 1-9

(2) 控制装置各组成元件如下:

手轮是给定元件,给出导弹发射架希望转动的角度 θ_r ;电位器 P_1, P_2 关联后跨接到同一电源 E_0 两端构成电桥电路,它既是测量元件又是比较元件,给出表征发射架希望转过角度与实际转过角度差的偏差电压 Δu ;放大器是放大元件;直流电机和减速器一起组成了执行机构,对发射架转动角度进行控制。

当导弹发射架转过角度 θ_c 与希望角度 θ_r 一致时,电桥电路输出电压 $\Delta u = 0$,系统处于平衡状态。当手轮转过(如顺时针转动)某一角度时, $\theta_r > \theta_c$, $\Delta u > 0$,放大器输出电压驱动直流电机正向转动,经减速器带动发射架顺时针偏转。当 $\theta_r = \theta_c$ 时,系统又在新的条件下达到平衡,发射架处于新的希望位置。当手轮逆时针转动时的调节过程正好相反,该系统实现了发射架位置跟随手轮转角 θ_r 的变化规律而变化的控制目的。此系统属于闭环随动系统。

例 2 图 1-10 所示为发电机—电动机转速负反馈控制系统,图中 U_g 为输入量,转速 n 为输入量, K_s 表示电压放大器, G 为发电机, M 为电动机, TG 为测速发电机。若不考虑扰动量,试画出系统的原理方框图。

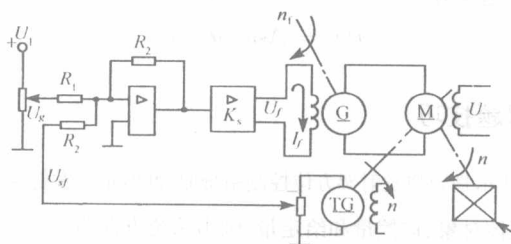


图 1-10 转速控制系统

【解】 系统的原理方框图如图 1-11 所示。

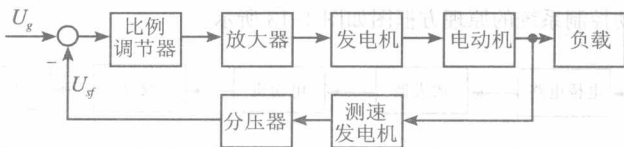


图 1-11

课后习题与解答(教材 P18)

式中 A 为正弦函数的振幅; $\omega = 2\pi f$ 为正弦函数角频率; φ 为初始相角。

1.1 【知识点窍】 自动控制系统的原理及其方框图。

【逻辑推理】 按偏差进行控制的反馈控制方式。

【解】 系统的被控对象是水箱,被控量(系统的输出量)是水箱的液位高度。

当电位器电刷位于中点位置时,电动机保持不动,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,水箱的液面高度便相应发生变化。例如,当液面升高时,浮子位置就相应升高,通过杠杆作用使电位器电刷从中点位置下移,从而给发电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,浮子位置也相应下降,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,若水箱液位下降,则系统会自动增大阀门开度,加大流入水量,使液位回到给定高度 C 。

液位自动控制系统的原理方框图如图 1-12 所示。

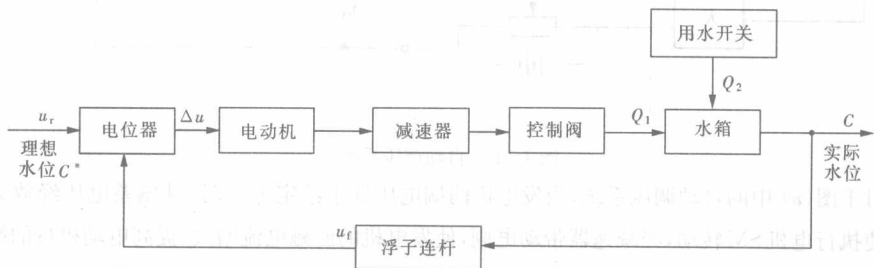


图 1-12 液位自动控制系统的原理方框图

1.2 【知识点窍】 自动控制系统的原理及其方框图。

【逻辑推理】 按偏差进行控制的反馈控制方式。

【解】 当合上开门开关时,电位器桥式测量电路产生一个偏差电压信号。此偏差电压经放大器放大后,驱动伺服电动机带动绞盘转动,使大门向上提起。与此同时,与大门连在一起的电位器电刷上移,直到桥式测量电路达到平衡,电动机停止转动,开门开关自动断开。反之,当合上关门开关时,伺服电动机反向转动,带动绞盘转动使大门关闭,从而实现了远距离自动控制。

大门开关的要求。

仓库大门自动控制系统的原理方框图如图 1-13 所示。



图 1-13 仓库大门自动控制系统的原理方框图

1.3 【知识点窍】 自动控制系统的原理。

【逻辑推理】 按偏差进行控制的反馈控制方式。

【解】 带上负载以后，图 1-14(a)(b) 所示两个系统的端电压均会下降。但是图(a) 中的系统由于自身调压作用能够恢复到 110V，而图(b) 中的系统不能恢复到 110V，其端电压将会稍低于 110V。

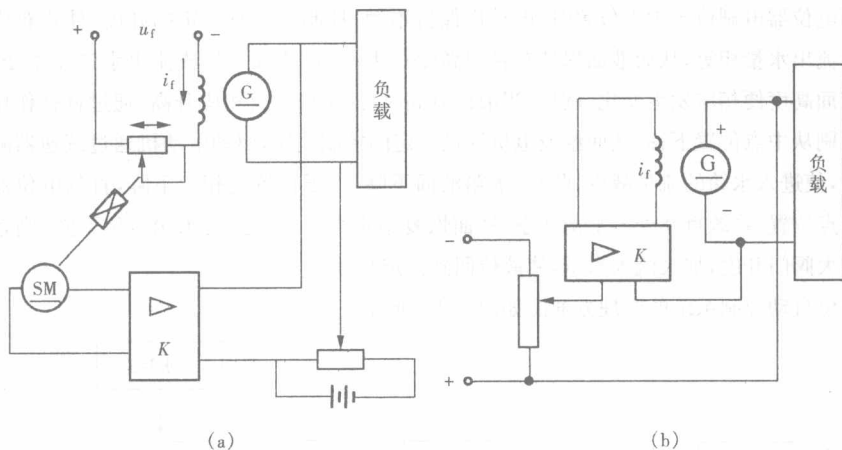


图 1-14 自动调压系统

对于图(a) 中的自动调压系统，当发电机两端电压低于给定电压时，其偏差电压经放大器放大使执行电机 SM 转动，经减速器带动电刷，使发电机的励磁电流增大，提高发电机的端电压，从而使偏差电压减小，直到偏差电压为零，执行电机停止转动。因此，图(a) 中的自动调压系统能保持端电压 110V 不变。

对于图(b) 中的自动调压系统，当发电机两端电压低于给定电压时，其偏差电压直接经放大器使发电机的励磁电流增大，提高发电机的端电压，即发电机 G 的端电压回升，此时偏差电压减小，但偏差电压始终不能为零。因为当偏差电压为零时，励磁电流也为零，发电机不能工作。因此，图(a) 中的自动调压系统端电压会低于 110V。

1.4 【知识点窍】 自动控制系统的原理及其方框图、被控对象、被控量、控制装置。

【逻辑推理】 按偏差控制与按扰动补偿相结合的复合控制方式。

【解】 水温控制系统的方框图如图 1-15 所示。

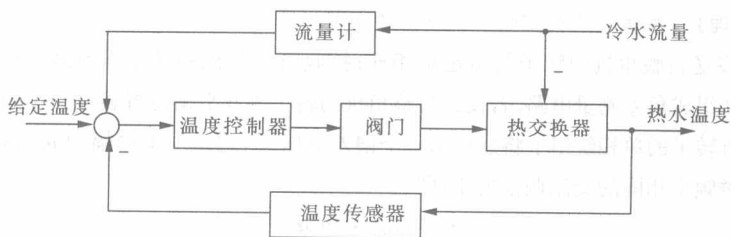


图 1-15 水温控制系统的方框图

系统是复合控制系统,它的控制方式是把按偏差控制与按扰动补偿的顺馈控制结合起来。

采用温度负反馈,由温度控制器对热水温度进行自动控制。若热水温度过高,控制器使阀门关小,蒸汽量减小,热水温度回到给定值。冷水流量是主要扰动量,用流量计测量扰动信号,将其送到控制器输入端,进行扰动顺馈补偿。当冷水流量减少时,补偿量减小,通过温度控制器使阀门关小,蒸汽量减少,以保持热水温度恒定。

系统的被控对象是热交换器,被控量是热水温度。控制装置是温度控制器。

1.5 【知识点窍】 自动控制系统的原理及其方框图、被控对象、被控量、控制装置。

【逻辑推理】 按偏差进行控制的反馈控制方式。

【解】 电炉使用电阻丝加热的,并要求保持炉温稳定。图中采用热电偶来测量炉温并将其转换为电压信号,将此电压信号反馈到输入端与给定电压比较,测量得到的电压信号与给定电压信号反极性连接,实现负反馈。二者的差值称为偏差电压,它经电压放大和功率放大后驱动直流电动机。电动机经减速器带动调压变压器的可动触头,改变电阻丝的供电电压,从而调节炉温。

当炉温偏低时,测量电压 u 小与给定电压 u_0 ,二者比较得偏差电压 $\Delta u = u_0 - u$, Δu 位正时,电动机“正”转,使调节器的可动触头上移,电阻丝的供电电压增加,电流加大,炉温上升,直至炉温升至给定值为止。 $u = u_0$, $\Delta u = 0$,电动机停止转动,炉温保持恒定。

当炉温偏高时, Δu 为负,经放大后使电动机“反”转,调节器的可动触头下移,使供电电压减小,直至炉温等于给定值为止。

系统的被控对象是电炉,被控量是电炉炉温,电动机、减速器、调压器是执行机构,热电偶是检测元件。

电炉温度控制系统的方框图如图 1-16 所示。

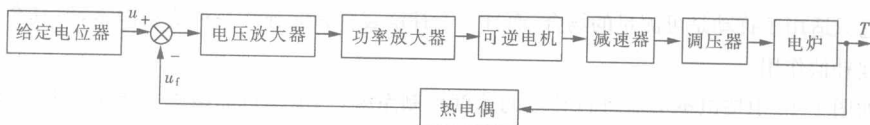


图 1-16 电炉温度控制系统的方框图