

九章
丛书

高校经典教材同步辅导丛书
配套科学版·胡寿松主编

教你用更多的自信面对未来!

一书两用
同步辅导+考研复习

自动控制原理

(第六版) 同步辅导及习题全解

主 编 李家星

习题超全解
名师一线经验大汇集, 解题步骤超详细, 方法技巧最实用

新版



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

高校经典教材同步辅导丛书

自动控制原理（第六版） 同步辅导及习题全解

主 编 李家星



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书是与科学出版社, 胡寿松主编的《自动控制原理》(第六版)一书配套的同步辅导及习题全解辅导书。

本书共有 10 章, 分别介绍自动控制的一般概念、控制系统的数学模型、线性系统的时域分析法、线性系统的根轨迹法、线性系统的频域分析法、线性系统的校正方法、线性离散系统的分析与校正、非线性控制系统分析、线性系统的状态空间分析与综合、动态系统的最优控制方法。本书按教材内容安排全书结构, 各章均包括知识点归纳、课后习题解答二部分内容。全书按教材内容, 针对各章节习题给出详细解答, 思路清晰, 逻辑性强, 循序渐进地帮助读者分析并解决问题, 内容详尽, 简明易懂。

本书可作为高等院校学生学习《自动控制原理》(第六版)课程的辅导教材, 也可作为考研人员复习备考的辅导教材, 同时可供教师备课命题作为参考资料。

图书在版编目(CIP)数据

自动控制原理(第六版)同步辅导及习题全解 / 李家星主编. -- 北京: 中国水利水电出版社, 2014.8
(高校经典教材同步辅导丛书)
ISBN 978-7-5170-2455-2

I. ①自… II. ①李… 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(2014)第207437号

策划编辑: 杨庆川 责任编辑: 张玉玲 加工编辑: 孙 丹 封面设计: 李 佳

书 名	高校经典教材同步辅导丛书
作 者	自动控制原理(第六版)同步辅导及习题全解
出版发行	主 编 李家星 中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: mchannel@263.net(万水) sales@waterpub.com.cn
经 售	电话: (010) 68367658(发行部)、82562819(万水) 北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 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	北京正合鼎业印刷技术有限公司
规 格	170mm×227mm 16开本 23.25印张 576千字
版 次	2014年8月第1版 2014年8月第1次印刷
印 数	0001—6000册
定 价	32.80元

凡购买我社图书, 如有缺页、倒页、脱页的, 本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

前言

胡寿松主编的《自动控制原理》(第六版)以体系完整、结构严谨、层次清晰、深入浅出的特点成为这门课程的经典教材,被全国许多院校采用。为了帮助读者更好地学习这门课程,掌握更多的知识,天津科技大学海洋科学与工程学院的李家星老师根据多年的教学经验,编写了这本与此教材配套的《自动控制原理(第六版)同步辅导及习题全解》。本书旨在使广大读者理解基本概念,掌握基本知识,学会基本解题方法与解题技巧,进而提高应试能力。

本书作为一种辅助性的教材,具有较强的针对性、启发性、指导性和补充性。考虑“自动控制原理”这门课程的特点,本书还有如下特点:

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、步骤完善、数据准确、附图齐全。

“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在解题过程中存在的问题,进行分析而研究出来的一种新型的、拓展思路的解题方法。“知识点窍”提纲挈领地抓住了题目的核心知识,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,旨在培养学生科学的思维方法,即掌握答题的思维技巧。在此基础上提供了详细的“解题过程”,使学生熟悉整个答题过程。

由于时间较仓促,编者水平有限,难免书中有疏漏之处,敬请各位同行和读者给予批评、指正。

编者

2014年6月

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
课后习题与解答	5
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图	20
2.4 数学模型的试验测定法	23
课后习题与解答	24
第三章 线性系统的时域分析法	53
3.1 系统时间响应的性能指标	53
3.2 一阶系统的时域分析	54
3.3 二阶系统的时域分析	55
3.4 高阶系统的时域分析	58
3.5 线性系统的稳定性分析	58
3.6 线性系统的稳态误差分析	60
课后习题与解答	63

目录

contents

第四章 线性系统的根轨迹法	97
4.1 根轨迹法的基本概念	97
4.2 根轨迹绘制的基本法则	99
4.3 广义根轨迹	101
4.4 系统性能的分析	102
课后习题与解答	104
第五章 线性系统的频域分析法	141
5.1 频率特性	141
5.2 典型环节的频率特性	143
5.3 频率域稳定判据	147
5.4 稳定裕度	148
5.5 闭环系统的频域性能指标	149
课后习题与解答	150
第六章 线性系统的校正方法	174
6.1 系统的设计与校正问题	174
6.2 常用校正装置及特性	174
6.3 串联校正	176
课后习题与解答	180
第七章 线性离散系统的分析与校正	206
7.1 离散系统的基本概念	206
7.2 信号的采样与保持	206
7.3 Z变换理论	207
7.4 离散系统的数学模型	209
7.5 离散系统的稳定性与稳态误差	210

7.6 离散系统的动态性能分析	212
7.7 离散系统的数字校正	214
课后习题与解答	214

第八章 非线性控制系统分析

8.1 非线性控制系统概述	242
8.2 常见非线性特性及其对系统运动的影响	242
8.3 相平面法	243
8.4 描述函数法	244
8.5 非线性控制的逆系统方法	247
课后习题与解答	247

第九章 线性系统的状态空间分析与综合

9.1 线性系统的状态空间描述	280
9.2 线性系统的可控性与可观测性	282
9.3 线性定常系统的线性变换	284
9.4 线性定常系统的反馈控制及状态观测器	286
课后习题与解答	291

第十章 动态系统的最优控制方法

10.1 最优控制的一般概念	331
10.2 最优控制中的变分法	333
10.3 极小值原理	335
10.4 线性调节器与跟踪器	336
10.5 离散系统的最优控制	338
课后习题与解答	339

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。

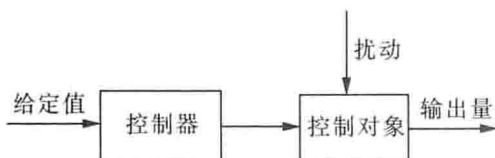


图 1-1 按给定量控制的开环控制原理图

(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。

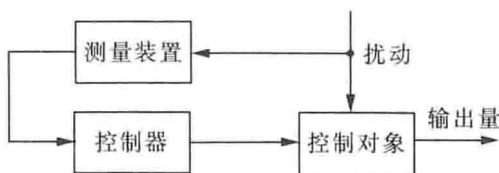


图 1-2 按扰动控制的开环控制原理图

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

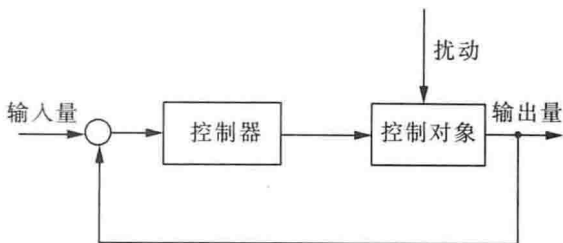


图 1-3 典型闭环控制系统的原理方框图

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。

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。

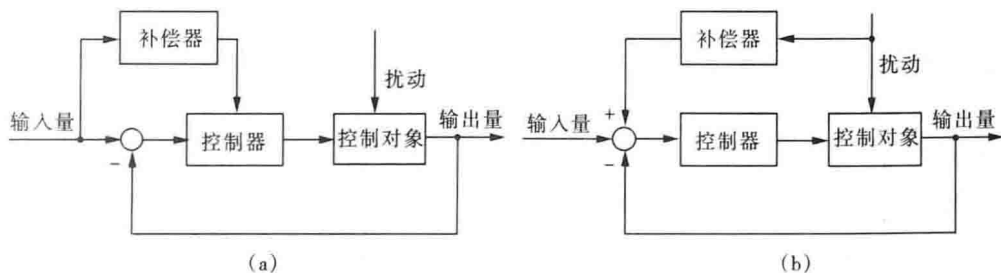


图 1-4 典型复合控制系统的原理方框图

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 $f(t-t_0)=R \cdot 1(t-t_0)$ 。

(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。

(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 $\delta(t - t_0)$ 。

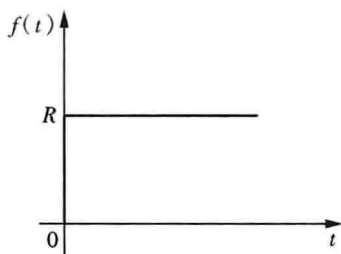


图 1-5 阶跃函数

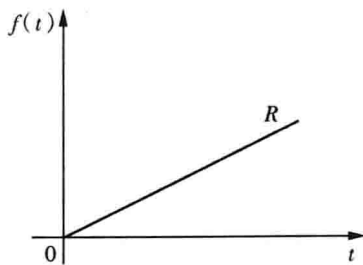


图 1-6 斜坡函数

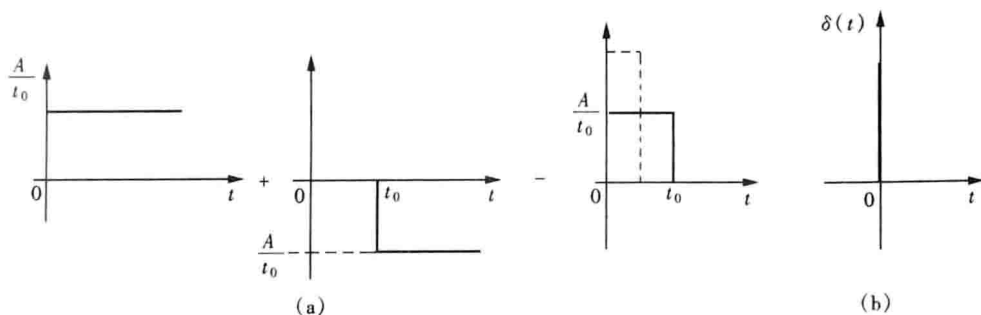


图 1-7 脉冲函数

(4) 正弦函数。

正弦函数的数学表达式为

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

课后习题与解答

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 图 1-8 是液位自动控制系统原理示意图。在任意情况下, 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方块图。

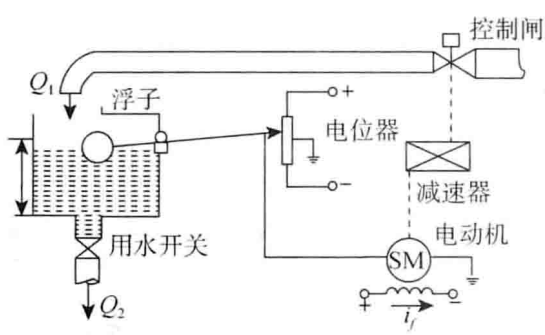


图 1-8 液体自动控制系统

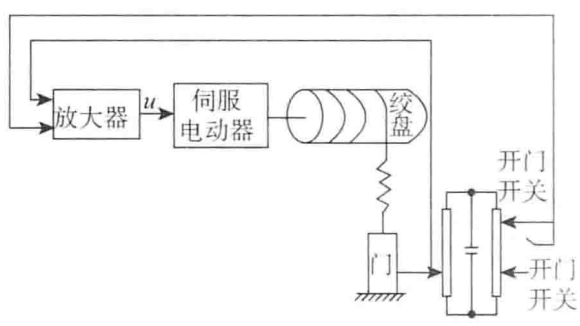


图 1-10 仓库大门自动开闭控制系统

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。
解题过程 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 C 。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 1-9 所示。

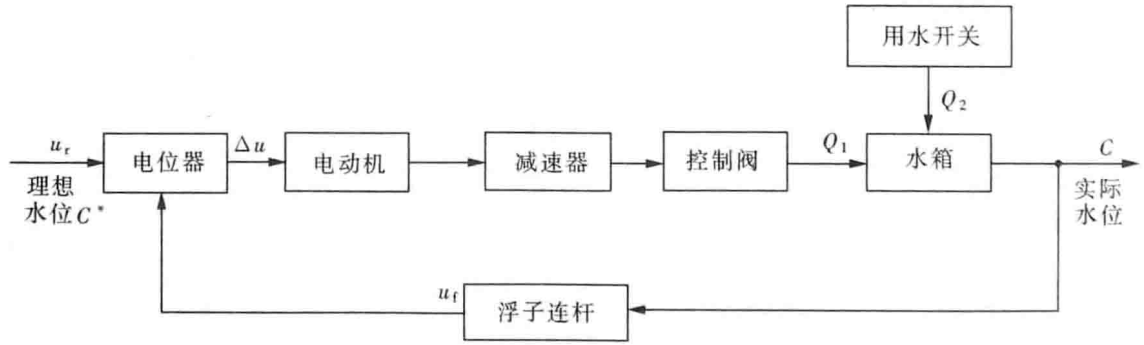


图 1-9 液位自动控制系统的原理方框图

1.2 图 1-10 是仓库大门自动控制系统原理示意图。试说明系统自动控制大门开闭的工作原理并画出系统方块图。

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。
解题过程 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。伺服电动机通过蜗轮蜗杆传动机构驱动大门。当合上关门开关时,电位器桥式测量电路产生一个相反的偏差电压信号,经放大器放大后,驱动伺服电动机反向转动,使大门关闭。

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 1-11 所示。

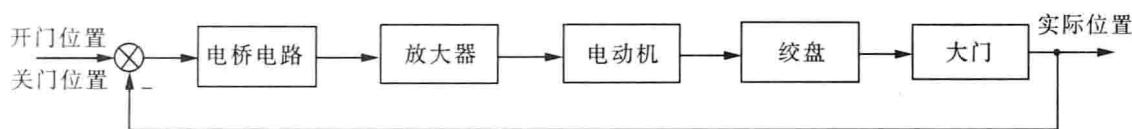


图 1-11 仓库大门自动控制系统的原理方框图

- 1.3 图 1-22(a) 和(b) 均为自动调压系统。设空载时,图(a) 与图(b) 的发电机端电压均为 110V。试问带上负载后,图(a) 与图(b) 中哪个系统能保持 110 V 电压不变?哪个系统的电压会稍低于 110 V?为什么?

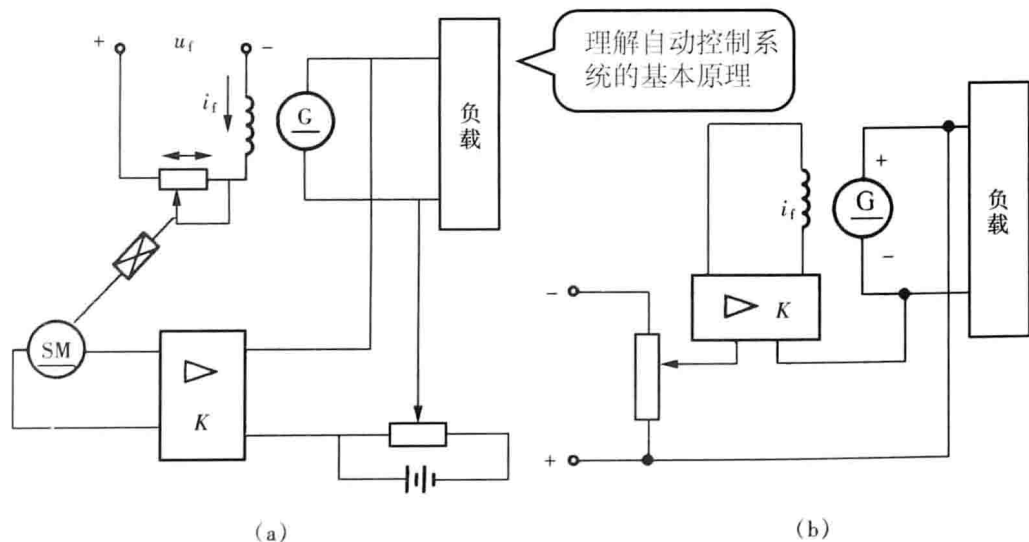


图 1-12 自动调压系统

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。

解题过程 带上负载以后,图 1-13(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。

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,使发电机的激磁电流增大,提高电动机 G 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。

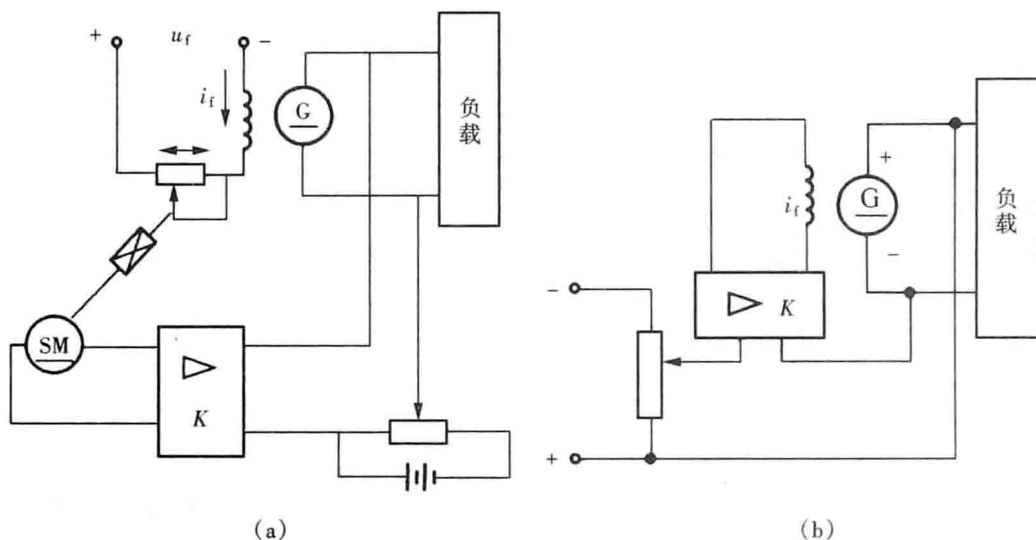


图 1-13 自动调压系统

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激磁电流增大,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,激磁电流也为零,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 图1-14为水温控制系统示意图。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。冷水流量变化用流量计测量。试绘制系统方块图,并说明为了保持热水温度为期望值,系统是如何工作的?系统的被控对象和控制装置各是什么?

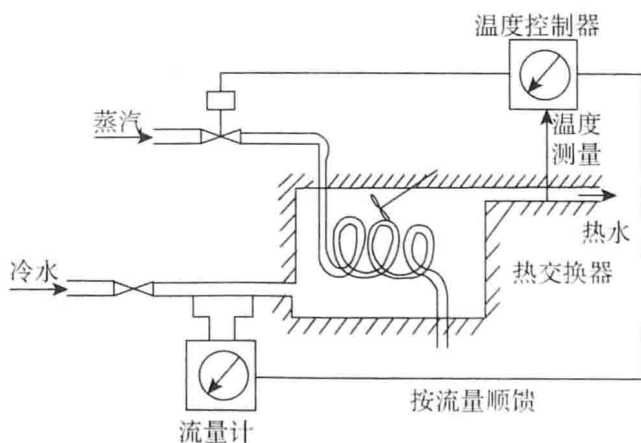


图 1-14 水温控制系统示意图

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。

解题过程 水温控制系统的方框图如图1-15所示。

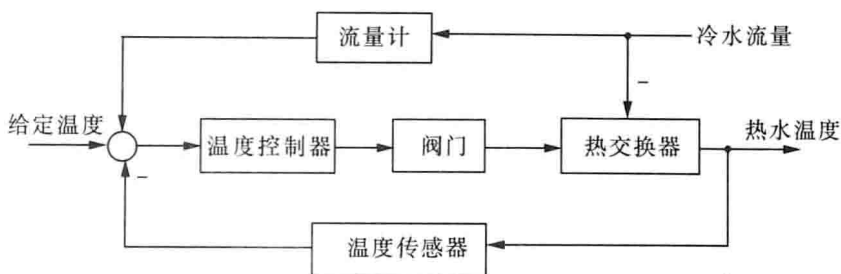


图 1-15 水温控制系统的方框图

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 图 1-16 是电炉温度控制系统原理示意图。试分析系统保持电炉温度恒定的工作过程，指出系统的被控对象、被控量及各部件的作用，最后画出系统方块图。

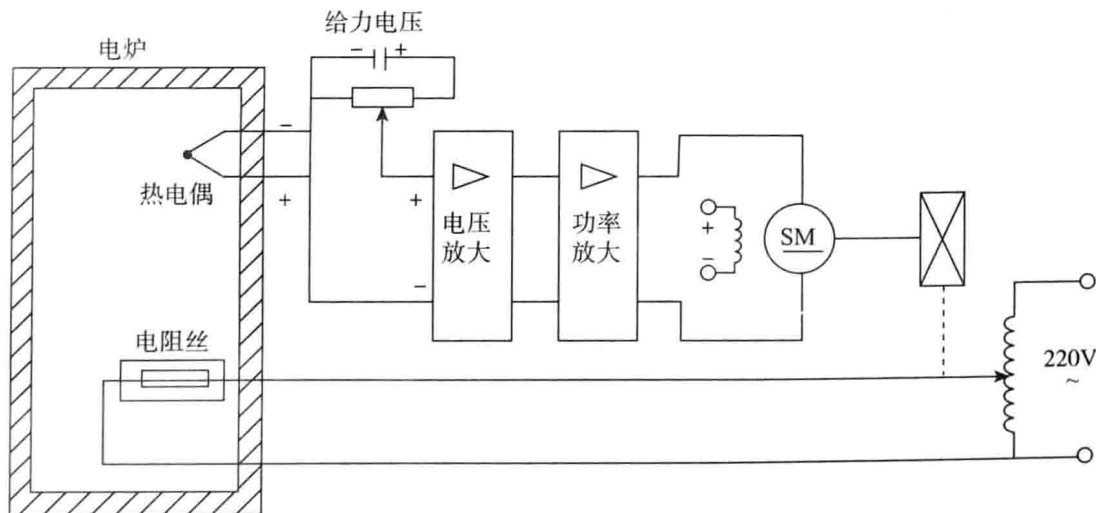


图 1-16 电炉温度控制系统原理图

知识点窍
逻辑推理
解题过程

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。

按偏差进行控制的反馈控制方式。

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 为正时,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 1-17 所示。



图 1-17 电炉温度控制系统的方框图

- 1.6** 图 1-18 是自整角机随动系统原理示意图。系统的功能是使接收自整角机 TR 的转子位移 θ_0 与发送自整角机 TX 的转子角位移 θ_i 始终保持一致。试说明系统是如何工作的,并指出被控对象、被控量以及控制装置各部件的作用,画出系统方块图。

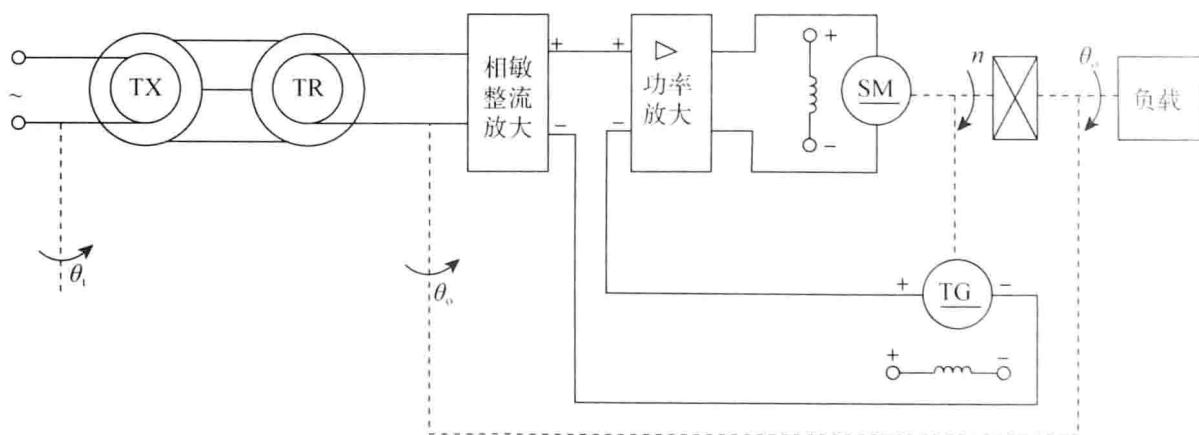


图 1-18 自整角机随动系统原理图

知识点旁 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。

解题过程 发送自整角机的转子与给定轴相连;接收自整角机的转子与负载轴(从动轴)相连。TX 与 TR 组成角差测量电路。若发送自整角机的转子离开平衡位置转过一个角度 θ_i ,则在接收自整角机转子的单相绕组上将感应出一个偏差电压 u_e ,它是一个振幅为 u_{em} 、频率与发送自整角机激磁频率相同的交流调幅电压,即

$$u_e = u_{em} \cdot \sin \alpha t$$

在一定范围内, u_{em} 正比于 $\theta_i - \theta_0$,即

$$u_{em} = k_e [\theta_i - \theta_0]$$

所以可得

$$u_e = k_e [\theta_i - \theta_0] \sin \alpha t$$