

ZIDONG KONGZHI YUANLI FUDAO YU XITI XIANGJIE

自动控制原理

辅导与习题详解

蒋国平 万佑红 主编



北京邮电大学出版社
www.buptpress.com

自动控制原理辅导与习题详解

蒋国平 万佑红 主编



北京邮电大学出版社
· 北京 ·

内 容 简 介

本书根据高等院校自动控制原理教学大纲的基本要求编写。书中包括了经典控制理论和现代控制理论的基本内容。全书共分10章,每章分为知识要点和习题解答两部分,对教材中相应章节的重点、难点作了深刻的分析,收集了大量典型习题和我国各重点大学研究生入学考试试题。本书可作为高等院校电气信息类本科生学习的参考书,也可作为自动控制理论授课教师的教学素材库,还可用于自动化类专业考研的复习和实战练习。

图书在版编目(CIP)数据

自动控制原理辅导与习题详解/蒋国平,万佑红主编. —北京:北京邮电大学出版社,2007
ISBN 978-7-5635-1355-0

I. 自… II. ①蒋…②万… 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(2007)第 031678 号

书 名: 自动控制原理辅导与习题详解

作 者: 蒋国平 万佑红

责任编辑: 王晓丹

出版发行: 北京邮电大学出版社

社 址: 北京市海淀区西土城路 10 号(100876)

北方营销中心: 电话: 010-62282185 传真: 010-62283578

南方营销中心: 电话: 010-62282902 传真: 010-62282735

E-mail: publish@bupt.edu.cn

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京市梦宇印务有限公司

开 本: 787 mm×1 092 mm 1/16

印 张: 14.25

字 数: 341 千字

印 数: 1—3 000 册

版 次: 2007 年 4 月第 1 版 2007 年 4 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5635-1355-0/TN·481

定价: 23.00 元

· 如有印装质量问题,请与北京邮电大学出版社营销中心联系 ·

前 言

本书根据高等院校自动控制原理教学大纲的基本要求编写。书中精辟地总结了自动控制理论的主要内容,列出各章主要知识点,有助于初学者把握重点,理解概念和掌握方法;针对学习过程中的重点、难点,设计组织了大量帮助深入理解概念和掌握分析问题方法的各类习题,类型有单个知识点的简单应用题,也有包含多个知识点的综合应用题,利于循序渐进地培养分析解决问题的能力;参考近年几所重点高等院校的自动控制理论硕士研究生入学试题,列选了有代表性的硕士研究生入学试题及详细解答。另外,本书加强了 MATLAB 软件在自动控制系统分析中的应用,精选了部分利用 MATLAB 分析控制系统的例题,使读者通过实例进一步提高分析和设计控制系统的能力。

本书由蒋国平教授、万佑红副教授主编,各章编写作者还有杨敏老师(第 5~7 章)、程艳云老师(第 8~10 章)。南京邮电大学自动化学院的领导和同事曾对此习题集的编写和出版提供了极大的关心和帮助,在此,向他们表示深深的感谢。

由于作者水平和经验有限,书中难免有不当之处,恳请读者批评指正。

目 录

第 1 章 自动控制的一般概念

1.1 基本术语	1
1.2 基本控制方式	1
1.3 自动控制系统的分类	2
习题解答	4

第 2 章 控制系统的数学模型

2.1 数学模型	11
2.2 微分方程	11
2.3 传递函数	12
2.4 结构图	13
2.5 信号流图	13
2.6 梅森增益公式	14
习题解答	14

第 3 章 线性系统的时域分析法

3.1 典型输入信号	37
3.2 动态过程与稳态过程	37
3.3 动态性能与稳态性能	38
3.4 一阶系统的时域分析	38
3.5 二阶系统的时域分析	39
3.6 高阶系统的时域分析	41
3.7 稳定性分析	41
3.8 线性系统的稳态误差计算	42
3.9 减小或消除稳态误差的措施	43
习题解答	43

第 4 章 线性系统的根轨迹法

4.1 根轨迹法的基本概念	74
4.2 根轨迹方程	74

4.3 根轨迹绘制的基本法则	75
4.4 广义根轨迹	76
4.5 系统性能的分析	76
习题解答	76
第5章 线性系统的频域分析法	
5.1 频率特性	90
5.2 典型环节的频率特性	91
5.3 开环频率特性曲线的绘制	93
5.4 频率域稳定判据	94
5.5 稳定裕度	96
习题解答	97
第6章 系统的校正与综合	
6.1 系统的设计与校正问题	109
6.2 控制系统的校正设计方法	109
习题解答	112
第7章 线性离散系统的分析与校正	
7.1 基本概念	123
7.2 信号的采样与保持	124
7.3 离散系统的数学模型	126
7.4 离散系统的稳定性与稳态误差	127
7.5 离散系统的动态性能分析	128
7.6 离散系统的数字校正	131
习题解答	132
第8章 非线性控制系统分析	
8.1 非线性系统	142
8.2 常见非线性因素对系统运动的影响	143
8.3 相平面法定义	143
8.4 描述函数法	146
习题解答	148
第9章 线性系统的状态空间分析和综合	
9.1 线性系统的状态空间描述	166
9.2 线性系统的可控性和可观测性	171
9.3 线性变换	172

9.4 反馈结构和状态观测器	175
9.5 李雅普诺夫稳定性分析	177
习题解答	178
第 10 章 动态系统的最优控制方法	
10.1 最优控制的一般概念	197
10.2 最优控制中的变分法	198
10.3 极小值原理及其应用	201
10.4 线性二次型问题的最优控制	203
习题解答	206
参考文献	218

第 1 章 自动控制的一般概念

1.1 基本术语

1. 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。
2. 自动控制系统：将被控对象和控制装置(控制器)按照一定的方式连接起来构成的有机总体。
3. 输入量：作用于控制系统输入端，可使系统具有预定功能或预定输出的物理量。
4. 被控量：被控对象的输出量，是要求严格加以控制(按给定规律)的物理量。
5. 自动控制理论：研究自动控制共同规律的技术科学。

1.2 基本控制方式

1. 开环控制

系统只有输入到输出量的顺向作用，而不存在反向联系。又可以分为按给定量控制(如图 1-1)和按扰动控制(如图 1-2)两种形式。没有修正偏差能力，抗扰动性较差。结构简单、调整方便、成本低。

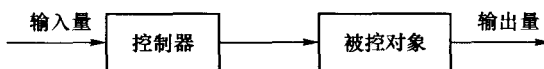


图 1-1 按给定量控制

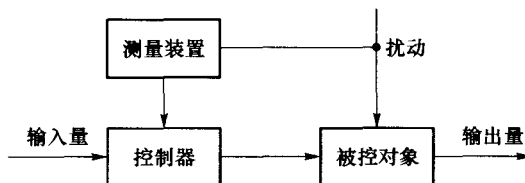


图 1-2 按扰动控制

2. 闭环控制

闭环控制又称反馈控制(如图 1-3)。凡是系统输出信号对控制作用有直接影响的系统，都称为闭环系统。输入信号和反馈信号(反馈信号可以是输出信号本身，也可以是输

出信号的函数或导数)之差,称为误差信号。误差信号加到控制器上,以减小系统的误差,并使系统的输出量趋于所希望的值。换句话说,“闭环”这个术语的涵义,就是应用反馈作用来减小系统的误差。

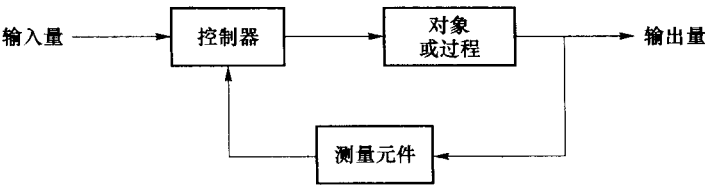


图 1-3 反馈控制

反馈控制可以抑制内、外扰动对被控制量产生的影响。其特点是精度高、结构复杂,但设计、分析麻烦。

3. 复合控制方式

复合控制方式是将开环控制和闭环控制相结合的一种控制方式(如图 1-4)。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。复合控制方式常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、人造卫星发射系统等。

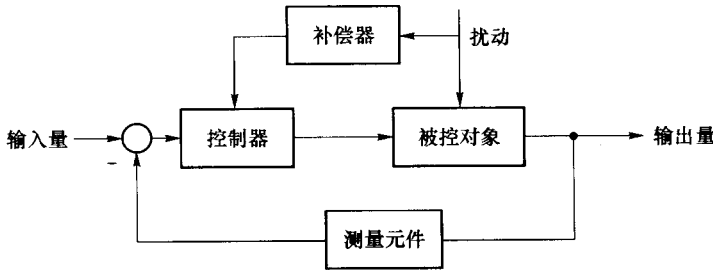


图 1-4 复合控制

1.3 自动控制系统的分类

自动控制系统有很多种分类方法。按系统性能可以分为：

(1) 线性连续控制系统

这类系统可以用线性微分方程式描述,即

$$a_0 \frac{d^n}{dt^n} c(t) + a_1 \frac{d^{n-1}}{dt^{n-1}} c(t) + \cdots + a_{n-1} \frac{d}{dt} c(t) + a_n c(t) = b_0 \frac{d^m}{dt^m} r(t) + b_1 \frac{d^{m-1}}{dt^{m-1}} r(t) + \cdots + b_{m-1} \frac{d}{dt} r(t) + b_m r(t)$$

式中: $c(t)$ 为被控量; $r(t)$ 为系统输入量。

系数 $a_0, a_1, \cdots, a_n, b_0, b_1, \cdots, b_m$ 若是常数时,称为定常系统;若随时间变化,称为时变系统。

线性定常连续系统按其输入量的变化规律又可分为：

- 恒值控制系统。参据量是一个常值,要求被控量也等于一个常值。这类系统分析、设计的重点是研究各种扰动对被控对象的影响以及抗扰动的措施。
- 随动系统(跟踪系统)。参据量是预先未知的随时间任意变化的函数,要求被控量以尽可能小的误差跟随参据量的变化。这类系统分析、设计的重点是研究被控量跟随的快速性和准确性。
- 程序控制系统。参据量是按预定规律随时间变化的函数,要求被控量迅速、准确地加以复现。

(2) 线性定常离散控制系统

这类系统可以用差分方程式描述,即

$$\begin{aligned} & a_0 c(k+n) + a_1 c(k+n-1) + \cdots + a_{n-1} c(k+1) + a_n c(k) \\ & = b_0 r(k+m) + b_1 r(k+m-1) + \cdots + b_{m-1} r(k+1) + b_m r(k) \end{aligned}$$

式中: $m \leq n$, n 为差分方程的次数; 系数 $a_0, a_1, \cdots, a_n, b_0, b_1, \cdots, b_m$ 为常数; $r(k), c(k)$ 分别为输入和输出采样序列。

(3) 非线性控制系统

至少存在一个元部件的输入/输出特性是非线性的元部件。譬如:

$$\ddot{y}(t) + y(t) \dot{y}(t) + y^2(t) = r(t)$$

非线性方程的特点为:

- 系数与变量有关;
- 方程中含有变量及其导数的高次幂、乘积项或者方程中包含常数项。

(4) 自动控制系统基本要求

可以归结为**稳**(稳定性)、**快**(快速性)、**准**(准确性)。

① 稳定性

1) 对恒值系统,要求当系统受到扰动后,经过一定时间的调整能够回到原来的期望值。

2) 对随动系统,被控制量始终跟踪参据量的变化。

稳定性是系统正常工作的前提,不稳定的系统不能实现预定任务。

稳定性通常由系统的结构决定,与外界因素无关。

② 快速性

对过渡过程的形式和快慢提出要求,一般称为动态性能。

例如稳定高射炮射角随动系统,虽然炮身最终能跟踪目标,但如果目标变动迅速,而炮身行动迟缓,仍然抓不住目标。

③ 准确性

在参考输入信号作用下,当系统达到稳态后,其稳态输出与参考输入所要求的期望输出之差,用稳态误差来表示。显然,这种误差越小,表示系统的输出跟随参考输入的精度越高。

习题解答

1.1 图 1-5 是液位自动控制系统原理的示意图。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框图。

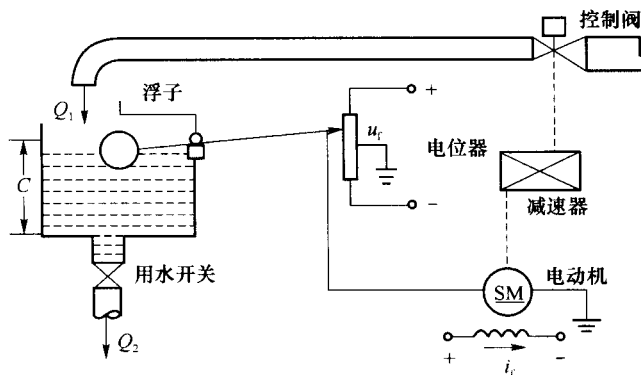


图 1-5 液位自动控制系统

解

首先确定系统被控对象是水箱,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,电动机输入电压为零,电动机保持不动,此时控制阀门有一定的开度,使水箱中留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地发生变化。例如,当液面升高时,浮子位置就相应地升高,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,浮子位置也相应地下降,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 。液位自动控制系统原理方框图如图 1-6 所示。

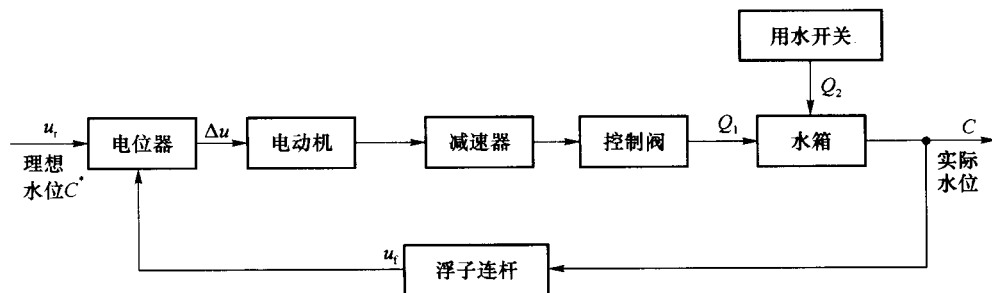


图 1-6 液位自动控制系统原理方框图

1.2 图 1-7(a)和(b)均为自动调压系统。设空载时,图(a)与图(b)的发电机端电压为 110 V。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?

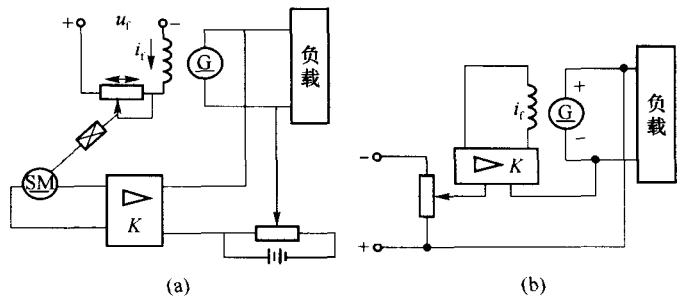


图 1-7 自动调压系统

解

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,发电机输出电压增大,从而偏差电压减小,直到偏差电压为零,执行电机才停止转动。因此,图(a)中的自动调压系统能保持端电压 110 V 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激磁电流增大,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(b)的自动调压系统端电压会低于 110 V。

1.3 图 1-8 为水温控制系统示意图。冷水在热交换器中由通入的蒸气加热,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?

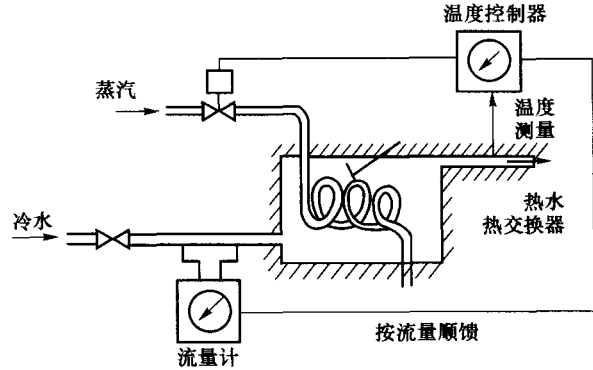


图 1-8 水温控制系统

解

水温控制系统的方框图如图 1-9 所示。

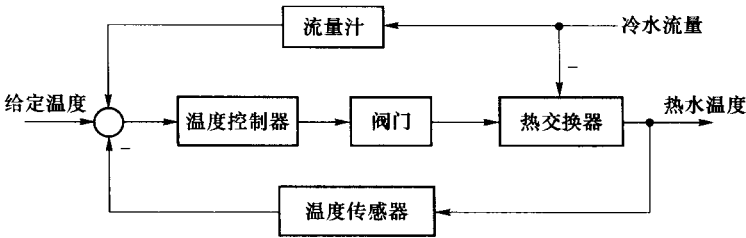


图 1-9 水温控制系统的方框图

系统是复合控制系统，它的控制方式是把按偏差控制和按扰动控制结合起来。

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，补偿量减少，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。

1.4 远距离操作的机器人手臂系统工作原理如图 1-10 所示，试简述其工作原理并画出系统方框图。

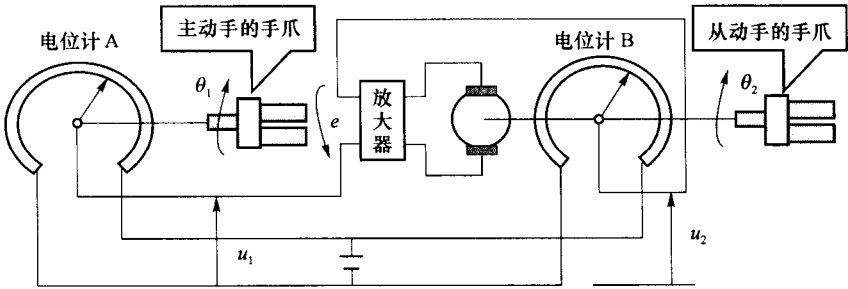


图 1-10 机器人手臂系统工作原理图

解

系统的任务是控制从动手的手爪角度 θ_2 跟踪主动手的手爪角度 θ_1 ，从动手的角位移是被控量，主动手的角位移是给定量，电位计 A 的作用是将主动手手爪的角度 θ_1 转换成电压 u_1 ，电位计 B 的作用是将从动手手爪的角度 θ_2 转换成电压 u_2 。

当从动手手爪的角位移 θ_2 与主动手手爪的角位移 θ_1 相等时， $u_1 = u_2$ ，环形电位计 A、B 组成的桥式电路处于平衡状态，输出电压 $e = 0$ ，电机不动。

当主动手手爪的角位移 θ_1 变化，从动手手爪的角度 θ_2 不等于 θ_1 时，输出电压 e 被送到放大器，使直流伺服电机向误差角减小的方向运转。直到 $\theta_1 = \theta_2$ 时， $u_1 = u_2$ ， $e = 0$ 。因此，从动手手爪的旋转角度几乎与主动手手爪的角度一致。

系统中的主动手手爪是给定元件，电位计 A、B 组成的电桥电路作为测量、比较元件，

电机和从动手手爪组成执行机构。系统方框图如图 1-11 所示。

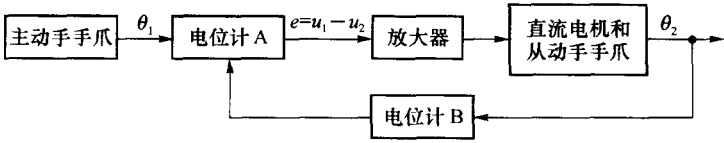


图 1-11 系统方框图

1.5 图 1-12 所示的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。

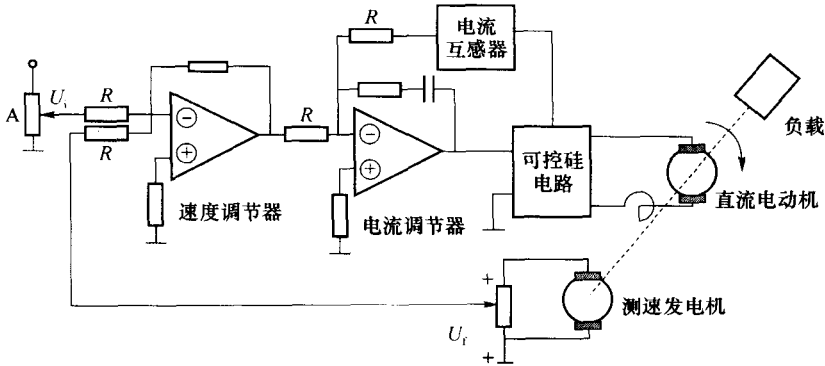


图 1-12 直流电动机双闭环调速系统的原理图

解

该系统除具有速度反馈(通常称为主反馈)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。

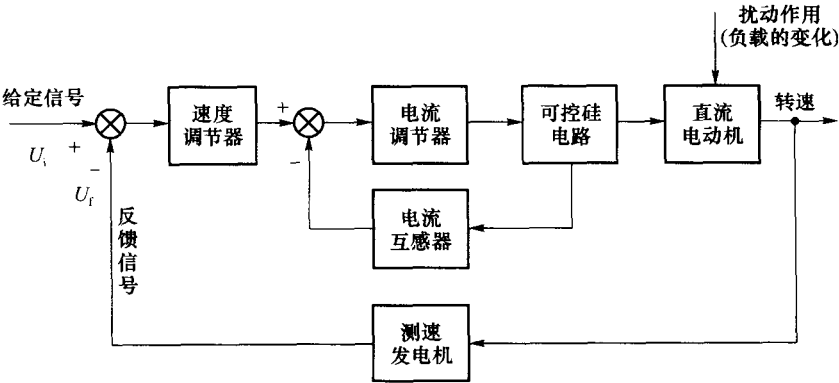


图 1-13 直流电动机双闭环调速系统方框图

1.6 图 1-14 是电炉控制系统原理示意图。试分析系统保持电路温度恒定的工作过程,指出系统的被控对象、被控量以及各部件的作用,最后画出系统的方框图。

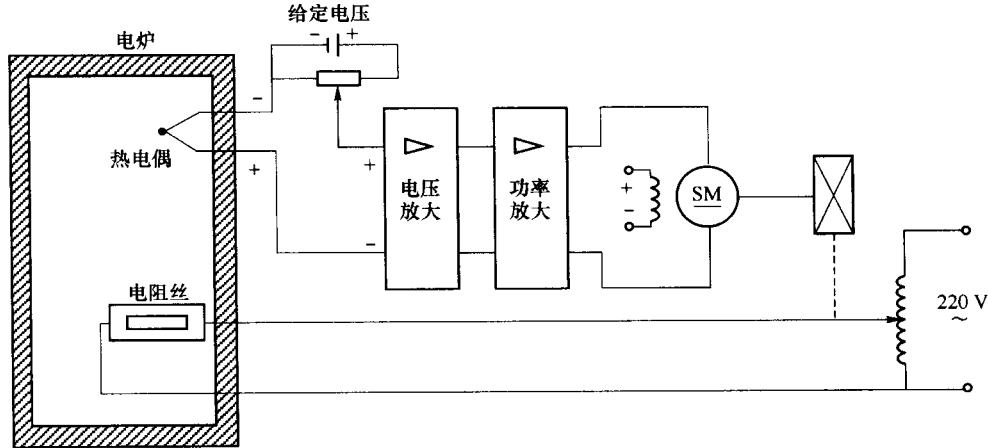


图 1-14 电炉控制系统原理图

解

电炉使用电阻丝加热,并要求保持炉温恒定。图 1-14 中采用热电偶测量炉温并将其转化为电压信号,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。两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滑动触头,改变电阻丝的供电电压,从而调节炉温。

譬如,当炉温偏低时,测量电压小于给定电压,两者比较得到偏差电压,偏差电压为正时,电动机“正”转,使调节器的滑动触头上移,电阻丝的供电电压增大,电流加大,炉温上升,直至炉温升至给定值为止,电动机停止转动,炉温保持恒定。

系统的被控对象是电炉,被控量是电炉温度,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 1-15 所示。

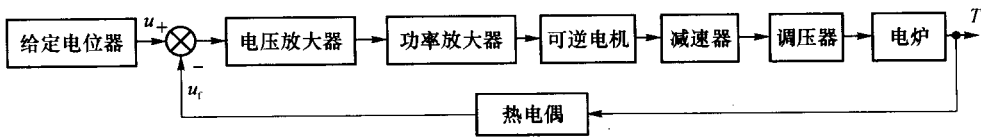


图 1-15 电炉温度控制系统的方框图

1.7 图 1-16 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 的转子角位移 θ_r 与发送自整角机 TX 的转子角位移 θ_t 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并画出系统方框图。

解

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 组成角差测量线路。若发送自整角机的转子离开平衡位置转过一个角度 θ_t ,

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

$$u_e = u_{em} \sin \omega t$$

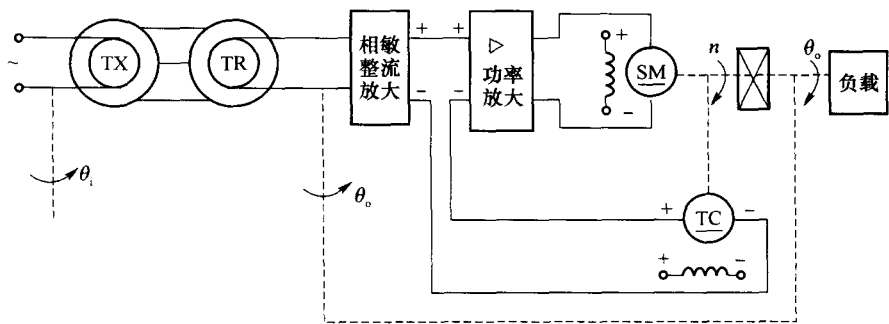


图 1-16 自整角机随动系统原理图

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

$$u_{em} = K_e [\theta_i - \theta_o]$$

所以可得

$$u_e = K_e [\theta_i - \theta_o] \sin \omega t$$

u_e 先经过相敏整流放大器变为直流电压，再经过功率放大器放大，放大后的直流信号作用在电动机电枢两端。电动机通过减速器带动负载和接收自整角机的转子，使其跟随发送自整角机的转子旋转，实现 $\theta_i = \theta_o$ ，以达到跟随的目的。为了使电动机转速恒定、平稳，引入了测速负反馈。

系统的被控对象是负载轴，被控量是负载轴转角 θ_o ，电动机和减速器是执行机构。相敏整流放大器及功率放大器起放大信号的作用，测速发电机是检测反馈元件。

自整角机随动系统的方框图如图 1-17 所示。

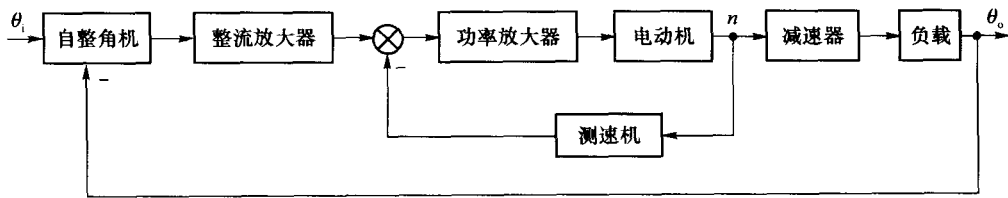


图 1-17 自整角机随动系统的方框图

1.8 在按扰动控制的开环控制系统中，为什么说一种补偿装置只能补偿一种与之相应的扰动因素？对于图 1-18 中的按扰动控制的速度控制系统，当电动机的激磁电压变化时，转速如何变化？改补偿装置能否补偿这个转速的变化？

解

按扰动控制的开环控制系统，是对于可测量的扰动产生一种补偿作用，以减少或抵消扰动对输出量的影响。显然，这种控制方式是直接从扰动获取信息，并以此改变被控量，所以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。

如图 1-18 中按电枢电流进行控制的速度控制系统,当电动机的激磁电压增大时,电动机的转速上升;当电动机的激磁电压减小时,电动机的转速下降。这种补偿装置不能补偿由激磁电压变化引起的转速变化。

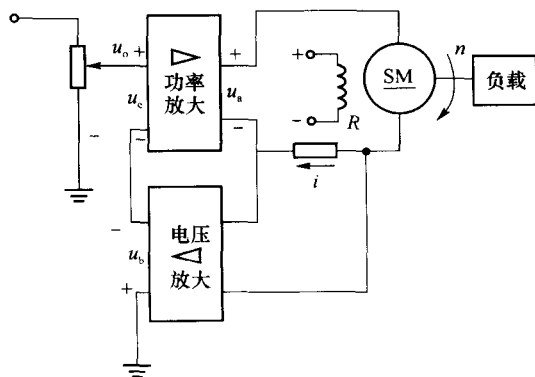


图 1-18 按扰动控制系统的速度控制系统

1.9 下列各式是描述系统的微分方程,其中 $c(t)$ 为输出量, $r(t)$ 为输入量,试判断哪些是线性定常系统或时变系统,哪些是非线性系统。

- (1) $c(t) = 5 + r^2(t) + t \frac{d^2 r(t)}{dt^2}$
- (2) $\frac{d^3 c(t)}{dt^3} + 3 \frac{d^2 c(t)}{dt^2} + 6 \frac{dc(t)}{dt} + 8c(t) = r(t)$
- (3) $t \frac{dc(t)}{dt} + c(t) = r(t) + 3 \frac{dr(t)}{dt}$
- (4) $c(t) = r(t) \cos \omega t + 5$
- (5) $c(t) = 3r(t) + 6 \frac{dr(t)}{dt} + 5 \int_{-\infty}^t r(\tau) d\tau$
- (6) $c(t) = r^2(t)$
- (7) $c(t) = \begin{cases} 0, & t < 6 \\ r(t), & t \geq 6 \end{cases}$

解

(1) 非线性系统; (2) 线性定常系统; (3) 线性时变系统; (4) 非线性系统; (5) 线性定常系统; (6) 非线性系统; (7) 线性时变系统。