

TP13

3=3C4

2006

高等学校优秀教材辅导丛书

自动控制原理 知识要点与习题解析

(配胡寿松第四版教材·科学社版)

主 编 王晓陵

副主编 付江宁

哈尔滨工程大学出版社



P r e f a c e

前言

本书是与胡寿松主编的《自动控制原理》(第四版,科学社版)相配套的辅导性用书。本书体系和符号与原教材保持一致。为方便广大读者学习和掌握自动控制技术,各章均由四个部分组成:(1)知识要点,力求用准确、简洁的语言表述本章的基本概念、基本理论和基本方法;(2)习题解析,对原教材各章的习题进行详细解答,为读者掌握知识要点、提高解题技巧提供帮助;(3)同步训练题,精选出代表性习题以巩固和提高所学知识,读者在学习时应注重知识要点、解题技巧的归纳、总结,避免陷入“题海”,一些训练题综合性较强、难度略高;(4)同步训练题解答,建议读者先自主解答同步训练题后,再参阅这部分的答案。

在学习“线性系统的状态空间分析与综合”时,应注重线性定常连续系统的相关理论和分析方法,掌握这些理论和分析方法后,很容易理解线性定常离散系统的相关结论。“动态系统的最优控制方法”的内容很广,且定理推导需要有较好的数学基础;学习时,注重最优解的必要条件;只有简单的最优控制问题,才能方便地获得最优解,如习题解析和同步练习题中给出的习题。最小值原理和动态规划(最优性原理)是求解最优控制问题的两种有效方法,后者更适合求解离散最优化问题。重点掌握“具有二次型性能指标的最优线性系统”的有关内容。

我们希望本书能够为读者学习“自动控制原理”提供帮助,通过学习本书,使读者能在掌握基本概念和基本理论、系统分析、综合与校正、解题技巧和综合运用能力上有显著提高。

本书由王晓陵教授担任主编,付江宁担任副主编。

对于书中存在的错误、遗漏和不妥,希望读者指正。

编 者

2006 年 9 月

第1章 自动控制的一般概念	1
知识要点	1
1.1 自动控制与自动控制系统	1
1.2 自动控制方式	1
1.3 控制系统分类与命名	3
1.4 系统工作原理	4
书后习题解析	4
同步训练题	10
同步训练题答案	13
第2章 控制系统的数学模型	16
知识要点	16
2.1 控制系统的微分方程和拉氏变换方程	16
2.2 传递函数	17
2.3 控制系统的方框图	18
2.4 控制系统的信号流图	20
2.5 控制系统的传递函数	22
书后习题解析	23
同步训练题	42
同步训练题答案	44
第3章 线性系统的时域分析法	48
知识要点	48
3.1 系统响应的性能指标	48
3.2 系统中负实零点对系统响应的作用	50
3.3 系统中极点对系统响应的作用	50
3.4 高阶系统的时域分析	51
3.5 线性系统的稳定性分析	52
3.6 线性系统的稳态误差计算	53
3.7 复合控制	56
书后习题解析	56

同步训练题	64
同步训练题答案	66
第4章 线性系统的根轨迹法	69
知识要点	69
4.1 根轨迹方程	69
4.2 根轨迹绘制的基本规则	70
4.3 广义根轨迹	71
4.4 系统性能分析	71
书后习题解析	71
同步训练题	85
同步训练题答案	86
第5章 线性系统的频域分析法	91
知识要点	91
5.1 频率特性	91
5.2 典型环节的频率特性	92
5.3 开环频率特性曲线	97
5.4 频率域的稳定性判据	98
5.5 稳定裕度(相对稳定性)	99
5.6 闭环系统的频域性能指标	100
书后习题解析	100
同步训练题	109
同步训练题答案	110
第6章 线性系统的校正方法	114
知识要点	114
6.1 系统校正的基本概念	114
6.2 串联校正	116
6.3 反馈校正	119
6.4 复合校正	121
书后习题解析	121

同步训练题	133
同步训练题答案	135
第7章 线性离散系统的分析与校正	142
知识要点	142
7.1 离散系统的基本概念	142
7.2 Z变换理论	144
7.3 线性离散系统的数学模型	147
7.4 线性离散系统的分析	148
7.5 线性离散系统的综合与校正	150
书后习题解析	152
同步训练题	163
同步训练题答案	165
第8章 非线性控制系统分析	170
知识要点	170
8.1 非线性系统的基本概念	170
8.2 典型非线性特性及其对系统运动的影响	171
8.3 相平面法	173
8.4 描述函数法	178
书后习题解析	182
同步训练题	197
同步训练题答案	199
第9章 线性系统的状态空间分析与综合	203
知识要点	203
9.1 线性系统状态空间描述中的基本概念	203
9.2 线性系统的可控性与可观性	206
9.3 线性定常系统的线性变换	209
9.4 线性定常系统的反馈控制及状态观测器	213
9.5 李雅普诺夫稳定性分析	216
书后习题解析	218

同步训练题	234
同步训练题答案	236
第 10 章 动态系统的最优控制方法	244
知识要点	244
10.1 最优控制的一般概念	244
10.2 最优控制中的变分法	246
10.3 极小值原理及其应用	249
10.4 具有二次型性能指标的最优控制问题	252
10.5 动态规划	256
书后习题解析	259
同步训练题	269
同步训练题答案	271
参考文献	276

第1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 通过控制器使被控对象或过程按照预定规律运行的行为。

自动控制系统 实现自动控制任务的系统。典型控制系统如图 1-1 所示。



图 1-1 自动控制系统

输出量 被控对象中要求实现自动控制的物理量,位于系统输出端,简称系统的输出。

输入量 作用于系统的输入端,是实现输出量自动控制的参考物理量,也称为参考输入或指令输入。

控制量 是控制器根据其输入量(如图 1-1 的输入值与输出测量值的差值)按预定的规律产生的施加在被控对象上的控制作用。

扰动 使控制系统输出偏离预定规律的系统内部、外部作用都称为扰动。

1.2 自动控制方式

开环控制 典型开环控制系统如图 1-2 所示。只有控制器对被控对象的控制作用,无系统输出对控制器的影响。即控制器不能根据系统输出调整控制作用的控

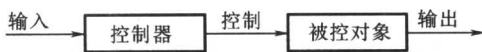


图 1-2 开环控制系统



制方式称为开环控制。

闭环控制 又称为反馈控制,是控制系统的主要控制方式。典型闭环控制系统如图 1-3 所示。控制器产生的控制作用施加在被控对象上,同时系统输入值与输出测量值的差值是控制器调整控制作用的主要依据。

反馈控制原理 将系统输出值与期望值进行比较,通过控制器对被控对象施加作用,使被控对象尽可能达到期望值。使用反馈控制原理的系统称为反馈控制系统。

复合控制 在反馈控制系统中,加入开环控制措施(或称前馈控制),以补偿反馈控制系统的不足,常用于控制性能要求高的系统中。既有反馈控制方式又有前馈控制方式的系统称为复合控制系统。如图 1-3 展示三类复合控制系统。

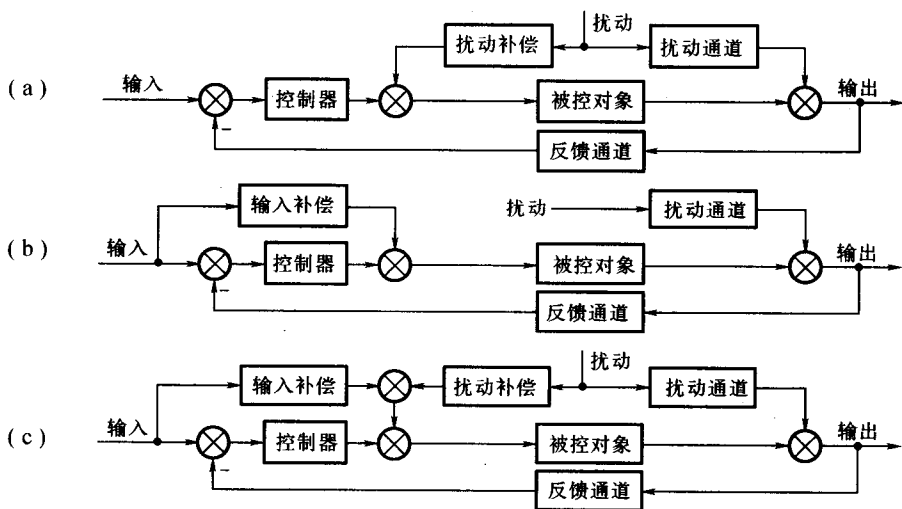


图 1-3 复合控制系统

扰动补偿 根据扰动的测量值,及时产生克服扰动影响的控制作用,补偿扰动对系统输出的影响,如图 1-3(a)和(c)。

输入补偿 常用于改善控制系统的稳态性能,即提高控制精度,如图 1-3(b)和(c)。

反馈控制系统与开环控制系统比较 表 1-1 给出比较结论。

表 1-1 反馈控制系统与开环控制系统比较

项目	开环控制	闭环控制
结构	简单	复杂
抑制扰动能力	无	能够抑制内、外扰动对系统输出的影响
控制精度	一般	较高
设计与分析	较方便	较困难,需要讨论闭环系统稳定性

1.3 控制系统分类与命名

控制系统的名称通常突出该系统的主要特征,如系统的控制方式、被控对象、控制目标、采用的控制部件、控制技术等。控制系统分类和命名方法很多,这里给出常用的分类和命名方法。为控制系统命名要遵循习惯,便于理解。

1.3.1 按控制方式分类

三种基本控制方式:开环控制系统;闭环控制系统;复合控制系统。

最优控制系统 使系统性能指标(如偏差最小,能耗最少,耗时最短,产量最多,利润最大,以及各种性能的综合指标)达到最优的控制系统。

智能控制系统 系统具有某种程度的“智能”,能够根据系统外部环境条件变化,“自主”调整控制策略、参数,保证控制性能的控制系统。

1.3.2 按数学特征分类

线性系统与非线性系统 能够用线性微分方程(或差分方程)描述的系统,称为线性系统,否则为非线性系统。

定常系统与时变系统 描述系统的微分方程(或差分方程)中,所有系数都是常数,该系统称为定常系统(或时不变系统),否则为时变系统。

连续系统与离散系统 控制系统的所有信号都是时间连续信号,该系统称为连续系统,否则为离散系统。

在对系统进行理论分析时,常按这两种分类方法给系统命名。命名时可能要突出其中一个或多个特征,如“线性定常连续系统”,该名称突出系统的3个数学特征;“非线性时变系统”,只突出了2个数学特征,所表达的系统可能是连续系统,也可能是离散系统。



1.3.3 按输入量分类

恒值控制系统 又称调节系统、镇定系统。输入量是恒定值。系统的控制任务是抑制内、外扰动的作用,使系统的输出量尽可能地保持在期望值上。

随动系统 又称跟踪系统。输入量是事前未知的随时间变化的信号。系统的控制任务是使系统输出量高精度地跟随输入量变化。

程序控制系统 输入量是事前已知的随时间变化的信号,通常是根 据生产工艺确定的时间函数。系统的控制任务是使系统输出量按照生产工艺要求变化。

1.3.4 在名称中包含被控对象、被控物理量、控制部件、系统所属单位等

例如,火炮随动系统,锅炉汽包液位控制系统,某厂微机监控系统等。

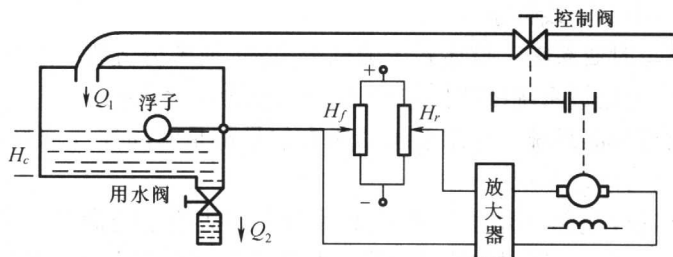
1.4 系统工作原理

系统工作原理常用简洁的原理图示出,画出原理图需要丰富的工程经验。本节只要求用已掌握的知识,根据原理图了解系统的工作原理。习题解析将帮助你提高关于系统工作原理的叙述能力。



SHU HOU XI TI JIE XI 课后习题解析

1-1 液位自动控制系统如题 1-1 图所示,在任意情况下,希望水箱中的液面高度 H_c 保持不变。试说明系统工作原理,画出系统方框图。



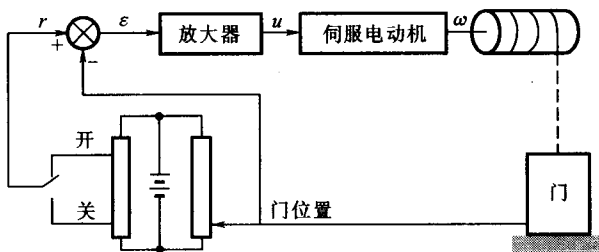
题 1-1 图 液位自动控制系统原理图

解 系统方框图如题 1-1 解图所示。

控制系统的输入信号 $r(H_r)$ 是液位指令信号(连续电压), 反馈信号 $y(H_f)$ 是代表水箱中液面高度 H_c 的电压信号。

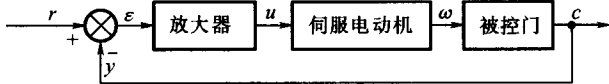
系统工作原理: 当反馈信号 H_f 与指令信号 H_r 不相等, 若 $\epsilon = H_r - H_f > 0$, 放大器输出 $I > 0$, 驱动进水管控制阀门开度增大, 使进水量 Q_i 增大, 经测量装置使 H_f 逐步增大, 直到 $\epsilon = 0$, 电机停止工作; 阀门开度是偏差信号 ϵ 的积分, 本系统是无差系统。 $\epsilon < 0$ 时系统工作原理相同, H_f 逐步减小, 直到 $\epsilon = 0$ 。

1-2 仓库大门自动控制系统原理如题 1-2 图所示, 试说明系统自动控制大门开闭的工作原理, 画出系统方框图。



题 1-2 图 仓库大门自动控制系统原理图

解 系统方框图如题 1-2 解图所示。

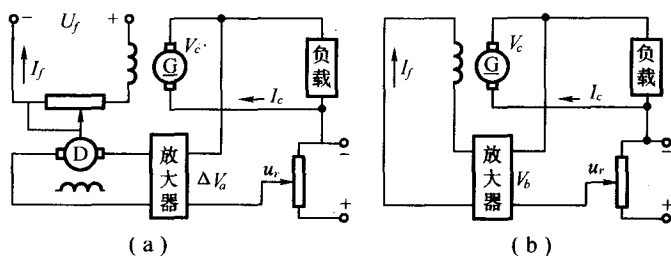


题 1-2 解图 仓库大门自动控制系统方框图

控制系统的输入信号 r 是二进制信号(高电位开门, 低电位关门), 反馈信号 y 是代表门位置的电压信号。

系统工作原理: 当门处于关闭状态, 而指令信号为开门(高电位)信号, $\epsilon = r - y > 0$, $u > 0$, $\omega > 0$ 使门开启, 门位置向打开方向平稳运动, 使 y 逐步增大, 直到 $\epsilon = 0$, 电机停止工作。关门过程原理相同, $\omega < 0$, 门位置向关闭方向运动, 直到 $\epsilon = 0$ 。

1-3 两种自动调压系统(a)和(b)如题 1-3 图所示, 设空载时, 图(a)与图(b)的发电机端电压均为 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?



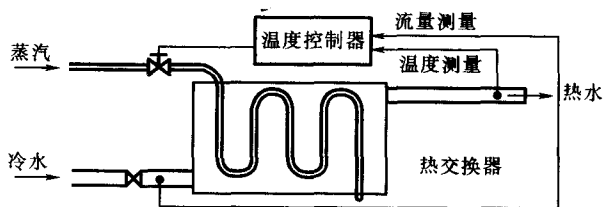
题 1-3 图 调压系统原理图

解 两种自动调压系统都是监视发电机两端的电压。空载时,发电机端电压均为 $V_0 = 110\text{ V}$ 。加上负载后,两系统的工作原理不同。调整开始时, $V_c < V_0$, 经放大器后增大发电机的励磁电流 I_f , 以减少因负载电流所降低的端电压, 力求使 $V_0 - V_c = 0$ 。

两种调压系统调整励磁电流 I_f 的方法不同。系统(a)中, 励磁电流 I_f 的改变量是放大器输入 ΔV_a 的积分值, 直到 $\Delta V_a = 0$, I_f 保持在使 $V_1 = V_0$ 的数值上。系统(b)中, 励磁电流 I_f 与放大器输入 V_b 成正比, 即在 u_r 不变条件下, I_f 的改变量与 V_b 的改变量成正比。因为 V_b 的改变量不能为零, 所以, 系统(b)不可能精确地保证发电机两端输出电压为 110 V 。

系统(a)能保持 110 V 电压不变, 称为无差系统; 系统(b)的电压会稍低于 110 V , 称为有差系统。

1-4 水温控制系统如题 1-4 图所示。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。试绘制系统方框图, 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?



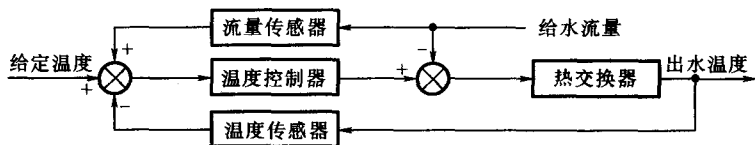
题 1-4 图 水温控制系统原理图

解 系统方框图如题 1-4 解图所示。

在该系统中, 被控对象是热交换器, 被控物理量是出口热水温度; 控制装置包括温度控制器、流量传感器、温度传感器和蒸汽(控制)阀门。

系统工作原理: 该系统是复合控制系统。当扰动(包括热水用量变化、冷水温度变化、蒸汽温度变化)使出口热水温度变化时, 温度控制器调整蒸汽阀门, 来保持热水温度。若扰动使出口

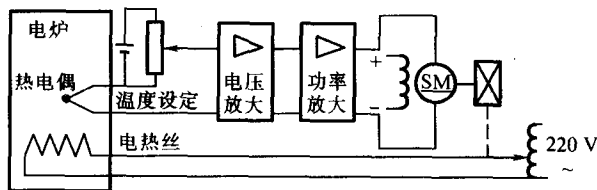
热水温度降低,由温度传感器将温度变化传给温度控制器,温度控制器增大蒸汽阀门开度,使蒸汽流量增大,提供的更多热量保持出口热水温度;反之,温度控制器减小蒸汽阀门。



题 1-4 解图 水温控制系统方框图

当热水用量增大(冷水流量增大),流量传感器及时将流量变化传给温度控制器,在出口热水温度开始降低前,温度控制器就加大蒸汽阀门,使出口水温几乎无降低过程;当热水用量减小,温度控制器在出口热水温度开始升高前,温度控制器就减小蒸汽阀门。这是前馈控制。

1-5 电炉温度控制系统原理如题 1-5 图所示。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,并画出系统的方框图。



题 1-5 图 电炉温度控制系统原理图

解 系统方框图如题 1-5 解图所示。



题 1-5 解图 电炉温度控制系统原理图

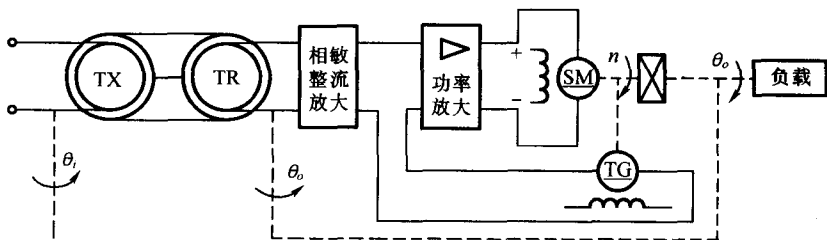
系统中,电炉是被控对象,炉内温度是被控量。除电炉、热电偶和给定电压外,都可以是控制装置的组成部分。

系统工作原理:若电炉内的温度低于设定温度,热电偶电势小于设定电压,该电压差值经电压放大和功率放大后,驱动伺服电机,使调压器输出电压加大,电热丝产生更多的热量,使炉温升到设定值。反之,伺服电机反转,炉温降到设定值。

1-6 角度随动系统原理如题 1-6 图所示。系统的功能是使接收自整角机 TR 的转子角位

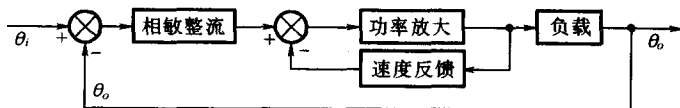


移 θ_o 。与发送自整角机 TX 的转子角位移 θ_i 始终保持一致。试说明系统是如何工作的,并指出被控对象、被控量及控制装置各部件的作用,并画出系统的方框图。



题 1-6 图 角度随动系统原理图

解 系统的方框图如题 1-6 解图所示。

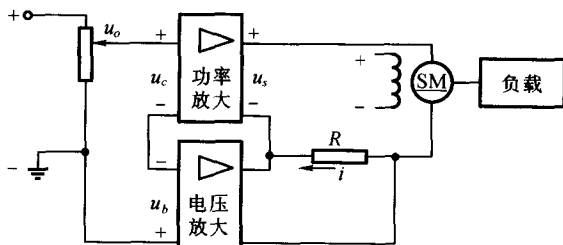


题 1-6 解图 角度随动系统方框图

负载是被控对象,被控量是负载轴的转角,即接收自整角机 TR 的转子角位移 θ_o 。除负载外,图中的部件都是控制装置的组成部分。

系统工作原理:该系统是具有两个控制回路的系统。当输出角度 θ_o 与给定角度 θ_i 不相等时,角接收机 TR 有信号输出,经相敏整流放大和功率放大后,驱动伺服电动机转动,直到输出角度与给定角度相等时,停止转动。在内部有速度反馈回路,当伺服电动机转速过快时,测速发电机使功率放大器的输入减小,保证伺服电动机的转速不会过大。

1-7 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? 对于题 1-7 图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? 该补偿装置能否补偿这种转速的变化?

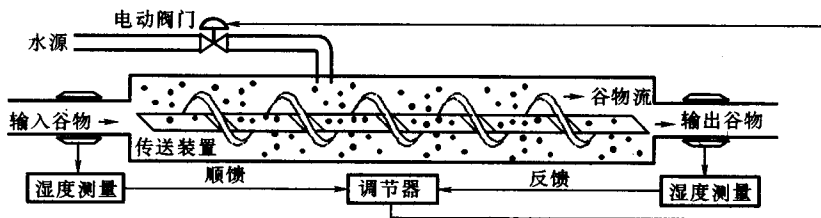


题 1-7 图 扰动控制系统原理图

解 题 1-7 图给出的系统是反馈控制系统,是在负载引起转速变化,导致电流 i 变化后产生控制作用。当 i 保持不变,激磁电压变化也能引起转速变化;因 i 保持不变,故不会调整功率放大器的输出。

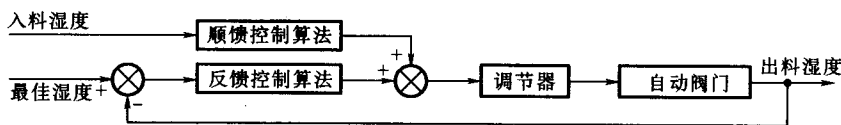
习题 1-4 给出的系统是复合控制系统,既有按输出温度变化的反馈控制又有按负载扰动(用水流量)的开环控制。在扰动控制的开环控制系统中,补偿装置是针对特指的扰动因素设计的。用水流量的变化能够及时地调整温度控制器的输出;而冷水温度的变化对出口热水温度的影响,只能由反馈控制来抑制。

1-8 谷物湿度控制系统如题 1-8 图所示。在谷物磨粉的生产过程中,在最佳湿度条件下,出粉率最高。因此,磨粉之前要给水谷加水以达到期望的湿度。图中,谷物被传送装置按一定流量通过加水点,加水量由电动阀门控制。加水过程中,谷物流量、加水前谷物湿度以及水压都是对谷物湿度控制的扰动作用。为了提高控制精度,系统中采用了谷物湿度的顺馈控制,试画出系统的方框图。



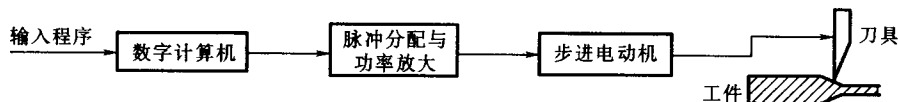
题 1-8 图 谷物湿度控制系统原理图

解 系统方框图如题 1-8 解图所示。



题 1-8 解图 谷物湿度控制系统方框图

1-9 数控机床刀具进给系统如题 1-9 图所示。要求将工件的加工过程编制成程序预先存入数字计算机,加工时,步进电机按照计算机给出的信息动作,完成加工任务。试说明该系统的工作原理。



题 1-9 图 数控机床刀具进给系统原理图

解 该系统是开环控制系统。因指令信号是事先知道的(时间)信号,该进给系统是程序控制系统,步进电机是高精度执行部件,在数字计算机及脉冲分配、功率放大器作用下,精确执行预先给定的切削任务。

1-10 下列各式是描述系统的微分方程,其中 $c(t)$ 为输出量, $r(t)$ 是输入量,试判断哪些是线性定常或时变系统,哪些是非线性系统?

$$(1) c = 5 + r^2 + t \frac{d^2 r}{dt^2};$$

$$(2) \frac{d^3 c}{dt^3} + 3 \frac{d^2 c}{dt^2} + 6 \frac{dc}{dt} + 8c = r;$$

$$(3) t \frac{dc}{dt} + c = r + 3 \frac{dr}{dt};$$

$$(4) c = \cos \omega t \cdot r + 5;$$

$$(5) c = 3r + 6 \frac{dr}{dt} + 5 \int_{-\infty}^r r(\tau) d\tau;$$

$$(6) c = r^2;$$

$$(7) c = \begin{cases} 0 & t < 6 \\ r & t \geq 6 \end{cases}$$

解 线性方程中,只有变量间的加减运算;定常系统的系数都是常数。

(1) 方程中,有变量的平方项,最右边一项的系数是时间函数 t ,系统是非线性时变系统。

(2) 方程是线性常微分方程,系统是线性定常系统。

(3) 方程中,最左边一项的系数是时间函数 t ,系统是线性时变系统。

(4) 方程中,等号右边第一项的系数是时间函数 $\cos \omega t$,系统是线性时变系统。

(5) 等式两边求导一次,方程是线性常微分方程,系统是线性定常系统。

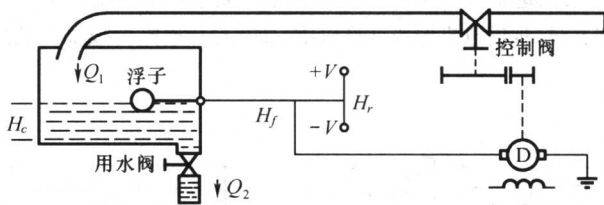
(6) 方程中,右边有变量平方运算,系统是非线性定常系统。

(7) 方程中,右边的系数与时间函数 t 有关,是线性时变系统,或称为分段线性时不变系统。



同步练习题

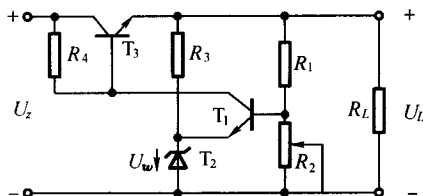
1. 某液位控制系统如题1图所示。在任意情况下,希望水箱中的液面高度 H_c 保持不变。试说明系统工作原理,画出系统方框图。问该系统是线性系统还是非线性系统?



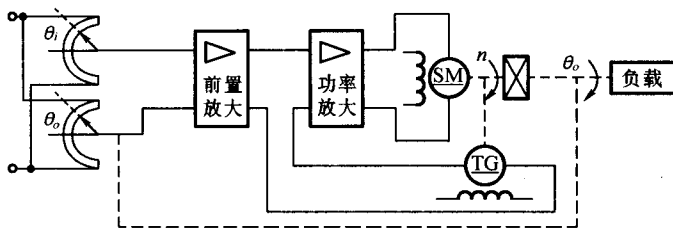
题1图 液位控制系统原理图

2. 晶体管稳压电源工作原理如题 2 图所示。试说明系统工作原理, 画出系统方框图。指出该系统中起着测量、放大、执行作用的元件, 系统中的给定量(参考输入)、输出量、干扰量。

3. 具有测速反馈的位置随动系统工作原理如题 3 图所示, SM 是伺服电机, TG 是测速电机。试说明系统工作原理, 画出系统方框图。

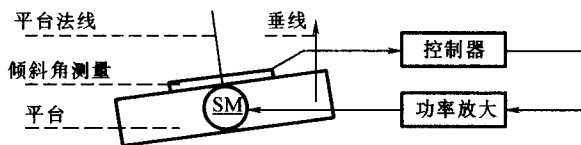


题 2 图 晶体管稳压电源工作原理图



题 3 图 测速反馈的位置随动系统工作原理图

4. 简化的平台位置控制系统工作原理如题 4 图所示, SM 是伺服电机。试说明系统工作原理, 画出系统方框图。

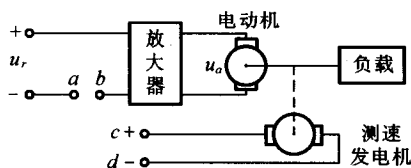


题 4 图 平台位置控制系统工作原理图

5. 电动机速度控制系统工作原理如题 5 图所示。

要求: (1) 将 a, b 与 c, d 用线连接成负反馈系统; (2) 画出系统方框图。

6. 控制导弹发射架方位的随动系统原理如题 6 图所示。图中电位器 P_1, P_2 并联后跨接到同一电源 E_0 的两端, 其滑臂分别与输入轴和输出轴相联结, 组成方位角的给定元件和测量反馈元件。输入轴受手轮操纵; 输出轴则由直流电动机经减速后带动, 电动机采用电枢控制的方



题 5 图 电动机速度控制系统工作原理图