

21 世纪高等理工科重点课程辅导丛书

自动控制原理 知识要点及典型习题详解

..... 李书臣 主编 王 莉 翟春艳 副主编



化学工业出版社

21 世纪高等理工科重点课程辅导丛书

自动控制原理 知识要点及典型习题详解

李书臣 主编 王 莉 翟春艳 副主编



化学工业出版社

· 北 京 ·

前 言

自动控制技术已经广泛应用于国民经济的各个领域，自动控制原理作为高等学校自动化及其相关专业的一门重要技术基础课，为了帮助本科生或自动控制原理课程初学者掌握这门技术，也为满足报考研究生的读者进行系统复习的要求，特编写此书，希望能帮助广大学子更好地理解教学内容，掌握重点和难点及其基本要求，学会分析方法，掌握解题思路和学习技巧，提高分析问题和解决问题的能力。

全书共 9 章。第 1 章介绍了自动控制系统常用的术语和概念，并给出了从控制系统到方框图转换的多个实例分析。第 2 章介绍了数学模型的概念，并重点对传递函数分析和方框图、梅逊公式的数学模型简化方法进行了详细讨论。第 3 章介绍了线性系统的时域分析方法，并重点对系统的稳定性、快速性、准确性分析方法做了讨论。第 4 章介绍了系统的根轨迹方法，对根轨迹作图及分析系统性能做了讨论。第 5 章介绍了频率响应法，重点讲解了频率特性作图、分析方法，并且给出了截止频率、相位裕量的计算方法。第 6 章介绍了线性系统的校正方法，涉及串联频率法校正，给出了校正网络设计方法和稳定裕量验算方法。第 7 章介绍了有关采样控制系统的计算问题。第 8 章介绍了非线性系统的描述函数和相平面分析法。第 9 章介绍了线性系统的可控性、可观测性、稳定性、实现、极点配置等内容。

本书选材力求内容全面、分析透彻，例题具有一定的代表性，并且给出多种解法，帮助读者分析最简单的解题步骤。每章首先列出整体的知识结构图，然后列出重点与难点及基本要求，接着是典型习题讲解，最后为测试题及答案。

本书由辽宁石油化工大学李书臣主编，王莉、翟春艳副主编，其中肖军编写了第 1 章，许秀编写了第 2、3 章，王莉编写了第 4、5 章，李书臣编写了第 6 章，翟春艳编写了第 7、9 章，张新玉编写了第 8 章。

由于时间及作者水平有限，书中难免有不妥之处，敬请广大读者批评指正。

编者

2011 年 8 月

目 录

1 自动控制的一般概念	1
1.1 知识要点	1
1.1.1 知识结构图	1
1.1.2 知识重点	1
1.1.3 知识难点	2
1.1.4 基本要求	3
1.2 典型习题详解	3
1.3 测试题及答案	7
2 自动控制系统的数学模型	11
2.1 知识要点	11
2.1.1 知识结构图	11
2.1.2 知识重点	11
2.1.3 知识难点	15
2.1.4 基本要求	15
2.2 典型习题详解	15
2.3 测试题及答案	26
3 控制系统的时域分析法	38
3.1 知识要点	38
3.1.1 知识结构图	38
3.1.2 知识重点	38
3.1.3 知识难点	41
3.1.4 基本要求	41
3.2 典型习题详解	41
3.3 测试题及答案	56
4 根轨迹法	66
4.1 知识要点	66
4.1.1 知识结构图	66
4.1.2 知识重点	66
4.1.3 知识难点	68
4.1.4 基本要求	69
4.2 典型习题详解	69

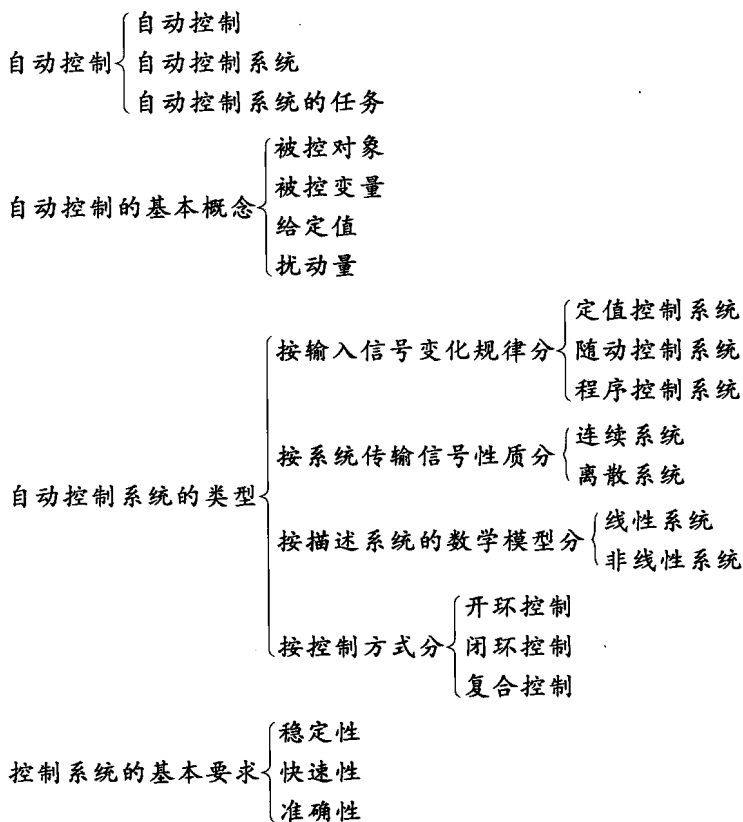
4.3	测试题及答案	87
5	频率响应法	92
5.1	知识要点	92
5.1.1	知识结构图	92
5.1.2	知识重点	92
5.1.3	知识难点	97
5.1.4	基本要求	98
5.2	典型习题详解	98
5.3	测试题及答案	112
6	线性系统的校正方法	119
6.1	知识要点	119
6.1.1	知识结构图	119
6.1.2	知识重点	119
6.1.3	知识难点	125
6.1.4	基本要求	126
6.2	典型习题详解	126
6.3	测试题及答案	137
7	采样系统理论	139
7.1	知识要点	139
7.1.1	知识结构图	139
7.1.2	知识重点	139
7.1.3	知识难点	143
7.1.4	基本要求	143
7.2	典型习题详解	144
7.3	测试题及答案	154
8	非线性系统分析法	159
8.1	知识要点	159
8.1.1	知识结构图	159
8.1.2	知识重点	159
8.1.3	知识难点	161
8.1.4	基本要求	162
8.2	典型习题详解	162
8.3	测试题及答案	169
9	状态空间分析法	174
9.1	知识要点	174
9.1.1	知识结构图	174

9.1.2 知识重点	175
9.1.3 知识难点	178
9.1.4 基本要求	178
9.2 典型习题详解	178
9.3 测试题及答案	193
参考文献	204

1 自动控制的一般概念

1.1 知识要点

1.1.1 知识结构图



1.1.2 知识重点

① 自动控制：在没有人直接参与的情况下，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。

② 控制系统的任务：减小或消除扰动量的影响，使被控对象的被控量始终按给定值确定的运行规律去变化。

③ 自动控制系统：能够完成自动控制任务的系统，一般由控制装置和被控对象组成。

④ 被控对象：要求实现自动控制的机器、设备或生产过程。

⑤ 被控变量：需要进行控制的表征被控对象工作状态的物理量，也是系统的输出量。

⑥ 给定值：又称参考输入、希望值，即希望被控变量保持的数值，是作用于控制系统输入端，使系统具有预定功能或预定输出的物理量。

⑦ 扰动量：使系统被控量偏离预定运行规律的物理量。

⑧ 自动控制系统的类型如下。

a. 按输入信号变化规律分类。

定值控制系统：给定输入信号是一个恒定的数值。系统的基本任务是出现扰动时，使系统的输出值保持为恒定的希望值。

随动控制系统：给定输入信号是一个未知的时间函数。系统的基本任务是使其输出量以要求的精度跟随输入量变化。

程序控制系统：给定输入信号是一个未知的时间函数。系统输入量按既定规律变化，系统的控制过程按预定程序进行。

b. 按系统传输信号性质分类。

连续系统：系统各部分信号都是模拟的连续时间函数。

离散系统：系统中信号有一处或一处以上为离散的时间函数。

c. 按描述系统的数学模型分类。

线性系统：由线性元件构成，可以用线性微分方程或差分方程描述的系统。

非线性系统：构成系统的环节中，有一个或一个以上非线性环节的系统。

d. 按控制方式分类。

开环控制：控制装置与被控对象之间只有顺向作用没有反向联系的控制过程。可分为按给定值操纵和干扰补偿两种形式。开环控制系统结构简单，成本低廉，工作稳定。但其没有抑制外部干扰及内部参量变化的能力，当系统的干扰影响不大，且对控制精度要求不高时，可采用这种控制方式。

闭环控制：又称反馈控制，指控制器与被控对象之间既有顺向作用又有反向联系的控制过程。闭环负反馈控制，即按偏差调节的自动控制系统控制精度高，抗干扰性好，能真正完成自动控制的任务。但其结构较复杂，成本较高，系统参数应适当选择，否则可能无法正常工作。

复合控制：是开环控制和闭环控制相结合的一种控制方式。它是在闭环控制回路的基础上，附加一个输入信号或扰动信号的顺馈通路，以提高系统的控制精度。

⑨ 负反馈控制的基本原理：将系统的输出信号引回输入端，与给定输入信号比较，利用所得的偏差信号产生控制作用调节被控变量，达到减小偏差或消除偏差的目的。负反馈控制原理是构成闭环控制系统的核心。

⑩ 自动控制系统的过渡过程：在干扰作用和控制作用下，系统从一个平衡状态过渡到另一个平衡状态被控变量变化的过程。一般自动控制系统的过渡过程有下列几种：单调过程、衰减振荡过程、等幅振荡过程和发散振荡过程。

⑪ 控制系统的基本要求如下。

稳：指控制系统的稳定性和平稳性。要求系统稳定，这是系统正常工作的必要条件。

快：动态要求。指系统的快速性，即动态过程进行的时间长短。要求系统快速平稳地完成过渡过程，超调量要小，调节时间要短。

准：稳态要求。要求系统稳态控制精度要高，稳态误差要小。

1.1.3 知识难点

① 分析自动控制系统的工作原理。

② 由系统工作原理图画出系统方框图。

1.1.4 基本要求

- ① 掌握有关自动控制的基本概念，明确控制系统的任务、组成及相关概念。
- ② 熟悉自动控制系统的类型、基本控制方式及特点，正确理解负反馈控制原理。
- ③ 正确理解对控制系统稳、快、准的要求。
- ④ 掌握由系统工作原理图画出系统方框图的方法。

1.2 典型习题详解

【例 1-1】 水箱液面高度控制系统的原理方案如图 1-1 所示。在运行中，希望液面高度 H 维持不变。

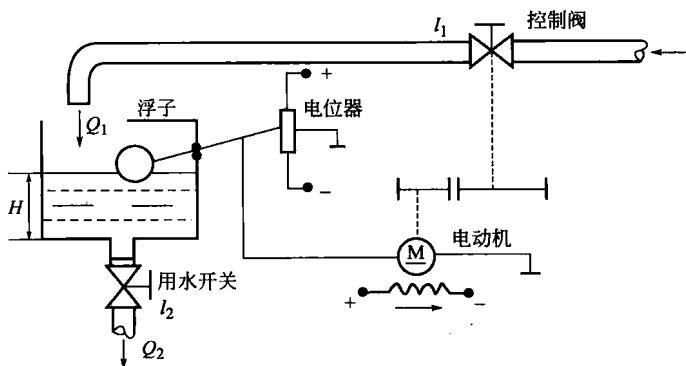


图 1-1 水箱水位高度控制系统

- (1) 试说明系统的工作原理。
- (2) 画出系统的方框图，并指出被控对象、被控量、干扰量是什么。
- (3) 试说明系统属于哪种控制方式。

解 (1) 工作原理：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，使水箱中进水流量与用水量相等，从而液面保持在希望高度 H_0 上。一旦进水流量或用水量发生变化，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，驱动电动机减小阀门 l_1 开度，使进水流量减少。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，液面恢复希望高度。反之，若水箱液位下降，则系统会自动增大阀门 l_1 开度，加大进水流量，使液位升到希望高度 H_0 。

(2) 系统的方框图如图 1-2 所示，控制任务是通过浮子控制水箱，保持水箱水位高度 H 不变。被控对象：水箱；被控量：水位高度 H ；干扰量：用水量 Q_2 。

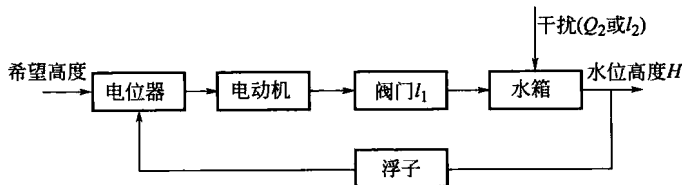


图 1-2 水位高度控制系统原理方框图

(3) 控制方式：按偏差调节的闭环控制。

【例 1-2】 图 1-3 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、关的工作原理，并画出系统方框图。

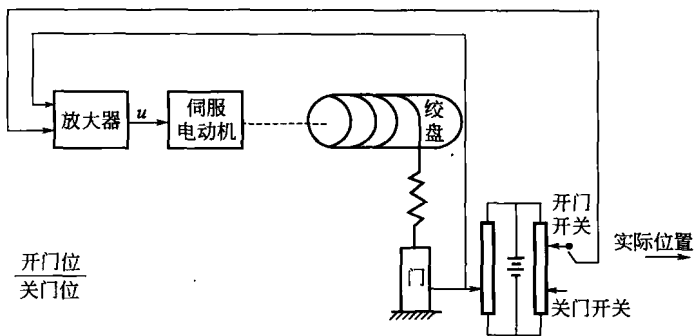


图 1-3 仓库大门自动开关控制系统

解 当合上开门开关时，电桥会测量出开门位置与大门实际位置间对应的偏差电压，偏差电压经放大器放大后，驱动伺服电动机带动绞盘转动，将大门向上提起。与此同时，和大门连在一起的电刷也向上移动，直到桥式测量电路达到平衡，电动机停止转动，大门达到开启位置。反之，当合上关门开关时，电动机带动绞盘使大门关闭，从而可以实现大门远距离开关自动控制。系统方框图如图 1-4 所示。

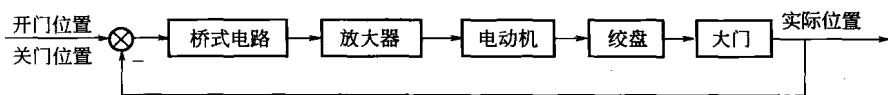


图 1-4 仓库大门自动开关控制系统方框图

【例 1-3】 图 1-5 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、被控量和干扰量各是什么？

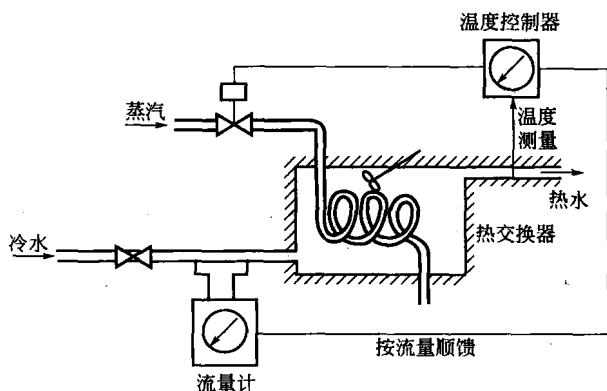


图 1-5 水温控制系统

解 工作原理：温度传感器不断测量交换器出口处的实际水温，并在温度控制器中与给定温度相比较，若低于给定温度，其偏差值使蒸汽阀门开大，进入热交换器的蒸汽量加大，热水温度升高，直至偏差为零。如果由于某种原因，冷水流量加大，则流量值由流量计测得，通过温度控制器，开大阀门，使蒸汽量增加，提前进行控制，实现按冷水流量进

行顺馈补偿，保证热交换器出口的水温不发生大的波动。

其中，热交换器是被控对象，实际热水温度为被控量，给定量（希望温度）在控制器中设定；冷水流量是干扰量。这是一个按干扰补偿的复合控制系统。系统方框图如图 1-6 所示。

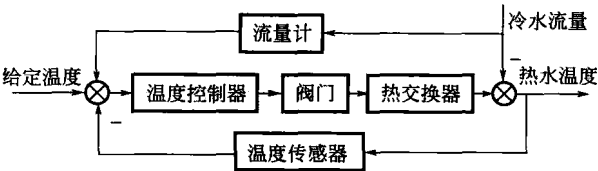


图 1-6 水温控制系统方框图

【例 1-4】 图 1-7 是一蒸汽加热器的三种不同形式的控制方案。如果需要控制的都是被加热物料的出口温度，被控对象、被控变量、操纵变量和可能的扰动量是什么？这几种控制方案从结构上来说各有什么特点？绘制系统方框图。

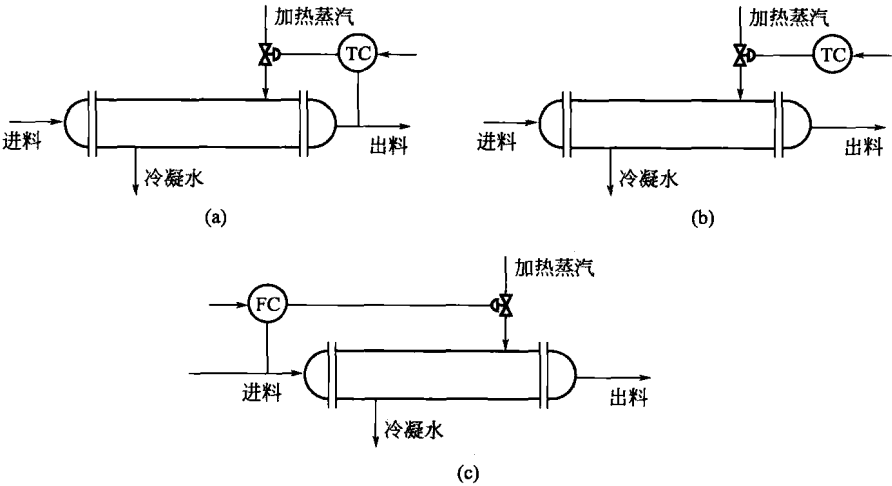


图 1-7 蒸汽加热器的控制方案

解 被控对象：蒸汽加热器；被控变量：物料的出口温度；操纵变量：加热蒸汽量；可能的扰动量：进料的温度、流量、组分、加热蒸汽的流量、压力等。

在图 1-7(a) 中，出料温度被测量并送给温度控制器 TC，通过改变加热蒸汽量来维持出料温度在给定值。在这个系统中，控制器的控制作用会改变加热蒸汽量，进而改变出料温度；出料温度改变以后又会将信号反馈给控制器。由于这是一个控制器与被控对象之间既有顺向控制又有反向联系的控制系统，因而是闭环的。其方框图见图 1-8(a)。

在图 1-7(b) 中，控制器会根据给定值的信号（或操作指令）来自动改变它的输出信号，进而改变加热蒸汽量，当加热蒸汽量改变以后，通过蒸汽加热器会改变出料温度。但这时出料温度并没有被测量，更不可能反馈给控制器，从结构上来看，并没有形成闭合回路，故是开环控制系统。其方框图见图 1-8(b)。

在图 1-7(c) 中，进料流量被测量并被送给控制器 FC，进而改变加热蒸汽量，加热蒸汽量的改变会影响出料温度。但是在这个系统中，出料温度并没有被测量，亦没有反馈给控制器，控制器只是根据进料量（扰动量）的变化来改变加热蒸汽量的，所以这是一种按扰动进行控制的开环系统，它在一定程度上，能够补偿由于扰动对被控变

量的影响,但对于被控变量来说,由于没有被测量与反馈,所以仍然是开环的。其方框图见图 1-8(c)。

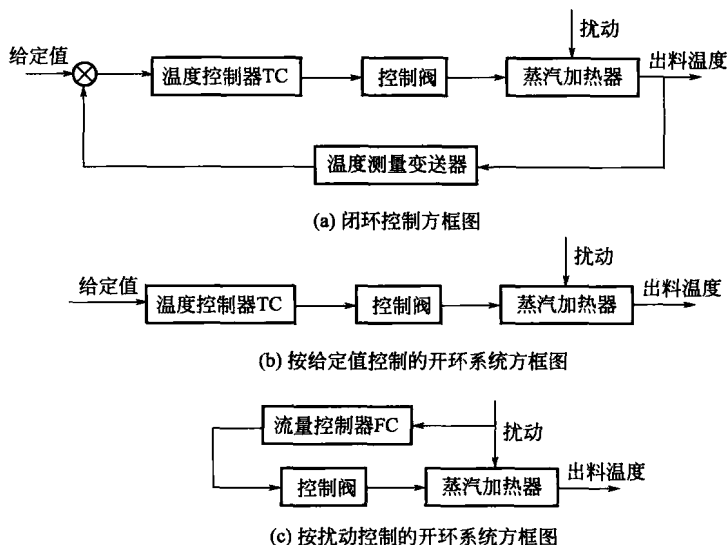


图 1-8 蒸汽加热器控制系统方框图

【例 1-5】 位置随动系统的原理图如图 1-9 所示。试说明系统的工作原理,并画出系统的方框图。

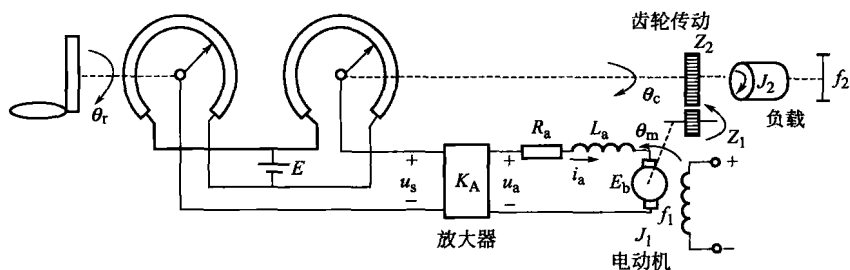


图 1-9 位置随动系统

解 控制任务: 控制机械负载的位置, 使其与参考位置相协调。

被控对象: 工作机械 (负载); 被控量: 角位置 θ_c 。

工作原理: 当工作机械的角位置 θ_c 与输入量的角位置 θ_r 指示方向一致时, $u_s = 0$, 交流放大器输出电压 $u_a = 0$, 电动机静止, 工作机械保持原来的协调方向。当输入量的角位置 θ_r 转过一个角度, $\theta_c \neq \theta_r$ 时, 与角位置偏差 $\Delta\theta = \theta_r - \theta_c$ 成比例的电压信号经电位器后变成 u_s , 经放大器后驱动电动机旋转, 并通过减速器带动工作机械跟踪输入量的指向, 使偏差减小, 直到输出角位置和输入角位置达到一致时为止。系统方框图如图 1-10 所示。

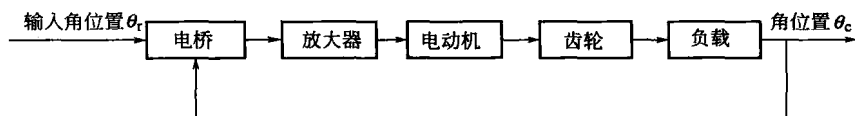


图 1-10 位置随动系统方框图

1.3 测试题及答案

一、填空题

1. ()、() 和 () 是对自动控制系统性能的基本要求。
2. 线性控制系统的特点是可以使用 () 原理, 而非线性控制系统则不能。
3. 根据系统给定值信号特点, 控制系统可分为 () 控制系统、() 控制系统和 () 控制系统。
4. 自动控制的基本方式有 () 控制、() 控制和 () 控制。
5. 一个简单的自动控制系统主要由 ()、()、() 和 () 四个基本环节组成。
6. 自动控制系统的过渡过程有 () 过程、() 过程、() 过程和 () 过程。

二、单项选择题

1. 下列系统中属于开环控制的为 ()。
A. 自动跟踪雷达 B. 无人驾驶汽车 C. 普通车床 D. 家用空调器
2. 下列系统中属于闭环控制系统的为 ()。
A. 自动化流水线 B. 传统交通红绿灯控制
C. 普通车床 D. 家用电冰箱
3. 下列系统中属于定值控制系统的为 ()。
A. 自动化流水线 B. 自动跟踪雷达 C. 家用电冰箱 D. 家用微波炉
4. 下列系统中属于随动控制系统的为 ()。
A. 自动化流水线 B. 火炮自动跟踪系统
C. 家用空调器 D. 家用电冰箱
5. 下列系统中属于程序控制系统的为 ()。
A. 家用空调器 B. 传统交通红绿灯控制
C. 普通车床 D. 火炮自动跟踪系统
6. () 为按照系统给定值信号特点定义的控制系統。
A. 连续控制系统 B. 离散控制系统 C. 随动控制系统 D. 线性控制系统
7. 下列不是对自动控制系统性能的基本要求的是 ()。
A. 稳定性 B. 复现性 C. 快速性 D. 准确性
8. 下列不是自动控制的基本方式的是 ()。
A. 开环控制 B. 闭环控制 C. 前馈控制 D. 复合控制
9. 下列不是自动控制系统的基本组成环节的是 ()。
A. 被控对象 B. 被控变量 C. 控制器 D. 测量变送器
10. 自动控制系统不稳定的过渡过程是 ()。
A. 发散振荡过程 B. 衰减振荡过程 C. 单调过程 D. 以上都不是

三、简答题

1. 什么是自动控制? 什么是自动控制系统?
2. 自动控制系统的任务是什么?
3. 自动控制的基本方式有哪些?
4. 什么是开环控制系统? 什么是闭环控制系统? 各自的优缺点是什么?
5. 简述负反馈控制系统的基本原理及基本组成。
6. 自动控制系统主要有哪些类型?
7. 对控制系统的基本要求是什么? 请加以说明。

8. 什么是自动控制系统的过渡过程？主要有哪几种？

四、名词解释

1. 被控对象
2. 被控变量
3. 给定值
4. 扰动量
5. 定值控制系统
6. 随动控制系统
7. 程序控制系统

五、分析绘图题

1. 日常生活中有许多开环和闭环控制系统，试举几个具体例子，并说明它们的工作原理。
2. 说明负反馈的工作原理及其在自动控制中的应用。
3. 自动驾驶器用控制系统将汽车的速度限制在允许范围内。画出方框图并说明此反馈系统。
4. 学生-教师教学进程继承了将错误减少到最少的反馈进程，要求的输出是学习的知识，学生可被考虑在此进程中，画出方框图说明此反馈系统。
5. 用方块图表示司机沿给定路线行驶时观察道路正确驾驶的反馈过程。
6. 图 1-11 为炉温自动控制系统的工作原理图。分析系统的工作原理，指出被控对象、被控量和给定量，画出系统方框图。

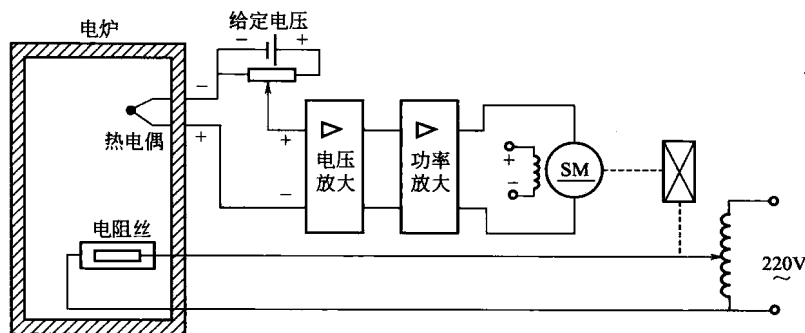


图 1-11 炉温自动控制系统原理图

7. 图 1-12(a)、(b) 和 (c) 所示为水箱液位控制系统的三个不同控制方案。试说明其工作原理有何不同，画出系统方框图。

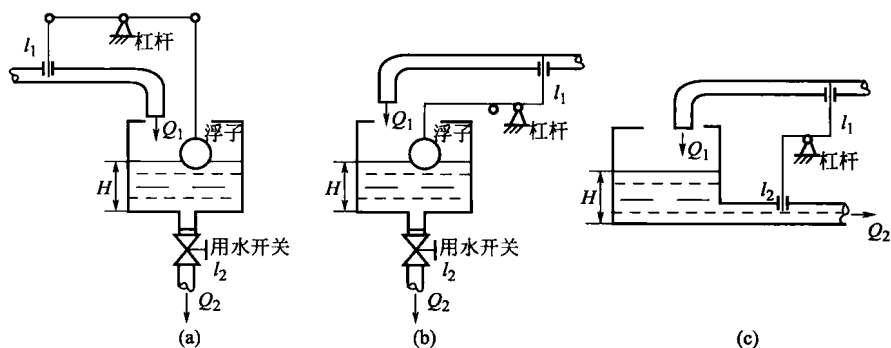


图 1-12 水箱液位控制系统

8. 洗衣机控制系统方框图如图 1-13 所示。试设计一个闭环控制的洗衣机系统方框图。
9. 图 1-14(a)、(b) 所示是水槽液位系统的两个不同控制方案。图中 LC 表示液位控制器。 (1) 分别画出两个控制系统的方框图；

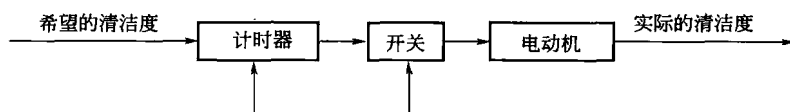


图 1-13 洗衣机控制系统方框图

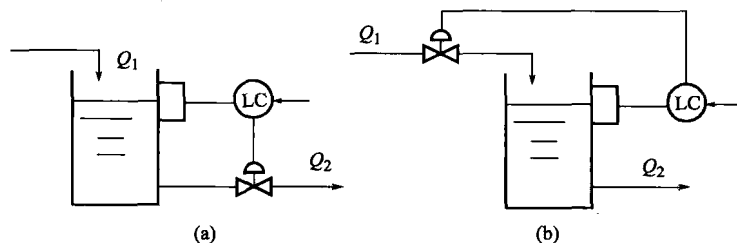


图 1-14 水槽液位控制系统

(2) 分别指出两个控制系统的被控对象、被控变量和操纵变量。

10. 图 1-15 所示为一反应器温度控制系统。A、B 两种物料进入反应器进行反应，通过改变进入夹套的冷却水流量来控制反应器内的温度维持恒定。图中 TC 表示温度控制器。试指出该系统中被控对象、被控变量、操纵变量和可能的扰动量各是什么。画出该系统的方框图。

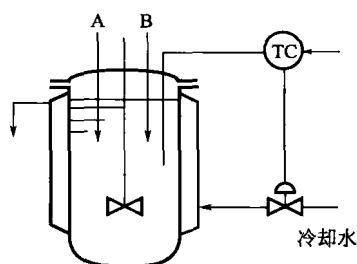


图 1-15 反应器温度控制系统

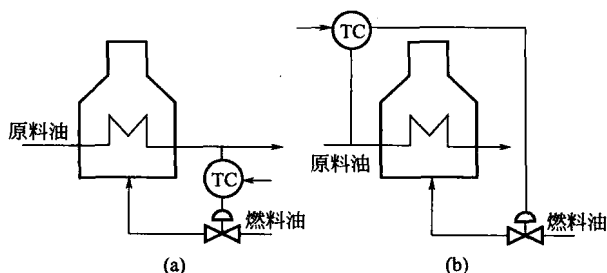


图 1-16 加热炉出口温度控制系统

11. 图 1-16 所示是一加热炉出口温度控制系统，燃料油在炉中燃烧，放出热量以加热原料油。工艺上要求原料油的出口温度控制在 $(350 \pm 5)^\circ\text{C}$ ，为此设计了两种控制方案。

(1) 分别画出两种控制系统的方框图，说明它们在控制系统结构上分别属于什么控制系统。

(2) 当原料油的入口温度经常波动时，图 1-16(b) 所示控制方案能否使原料油的出口温度保持不变？

(3) 图 1-16(a) 所示控制方案属于定值还是随动控制系统？给定值是多少？

12. 根据图 1-17 所示的电动机速度控制系统工作原理图，完成：

(1) 将 a、b 与 c、d 用线连接成负反馈状态；

(2) 画出系统方框图。

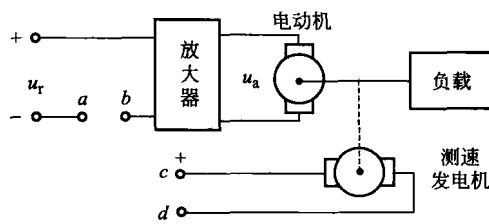


图 1-17 速度控制系统原理图

13. 图 1-18(a)、(b) 所示的系统均为电压调节系统。假设空载时两系统发电机端电压均为 110V，试问带上负载后，图 1-18(a)、(b) 中哪个能保持 110V 不变，哪个电压会低于 110V？为什么？

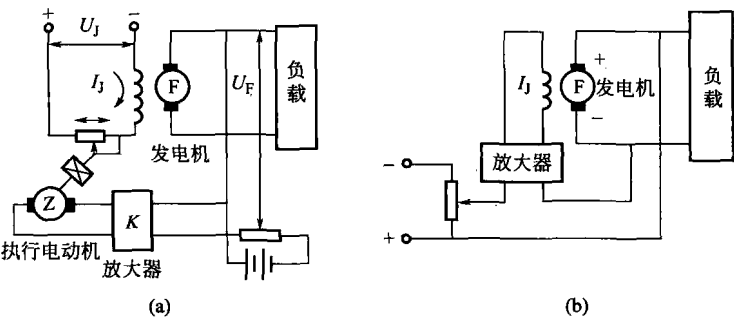


图 1-18 电压调节系统工作原理图

14. 图 1-19 是控制导弹发射架方位角的电位器式随动系统原理图。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连接，组成方位角的给定元件和测量反馈元件。输入轴由手轮操纵；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式工作。试分析系统的工作原理，指出系统的被控对象、被控量和给定量，画出系统的方框图。

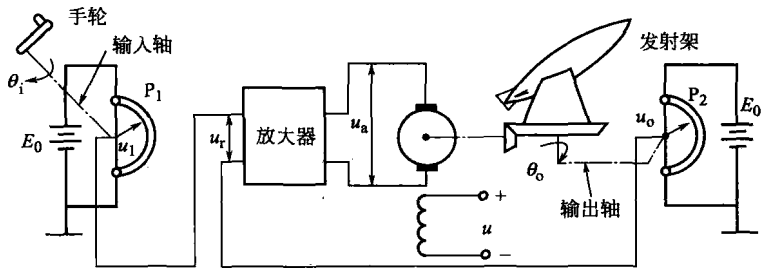


图 1-19 导弹发射架方位角控制系统原理图

15. 图 1-20 是一个远程机械手控制系统原理图。图中机械手在月球表面，机械手的活动由摄像机摄制图像并通过无线电送回地面操作站。地面操作站人员通过操纵杆进行操作，操作信号通过天线发往月球。试画出显示闭环系统工作原理的方框图。

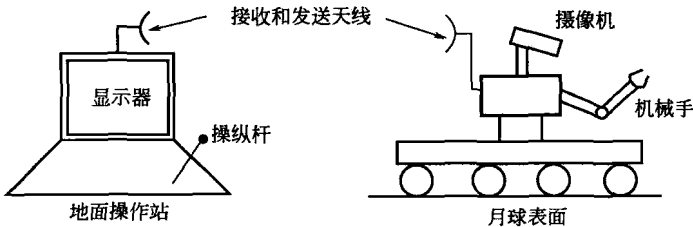


图 1-20 远程机械手控制系统原理图

参考答案

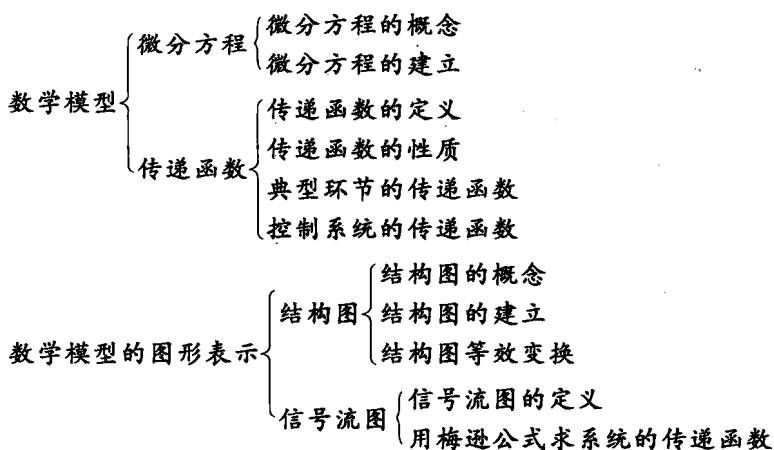
- 一、填空题 1. 稳定性、快速性、准确性 2. 叠加 3. 定值、随动、程序 4. 开环、闭环、复合
5. 被控对象、测量变送器、控制器、执行器 6. 单调、衰减振荡、等幅振荡、发散振荡
- 二、单项选择题 1. C 2. D 3. C 4. B 5. B 6. C 7. B 8. C 9. B 10. A
- 三、简答题 答案略
- 四、名词解释 答案略
- 五、分析绘图题 答案略

2

自动控制系统的数学模型

2.1 知识要点

2.1.1 知识结构图



2.1.2 知识重点

(1) 数学模型

数学模型是指描述系统输入、输出变量以及系统内部各变量之间动态关系的数学表达式。

(2) 建立数学模型的方法

方法有解析法和实验法。

(3) 建立微分方程的一般步骤

- ① 根据实际情况确定系统的输入、输出以及中间变量，搞清各变量之间的关系。
- ② 做出合乎实际的假设，以便忽略一些次要因素，使问题简化。
- ③ 根据支配运动特性的基本规律，列出各部分的原始方程。
- ④ 消去中间变量，写出只有输入变量和输出变量的微分方程。
- ⑤ 对微分方程进行标准化处理。

(4) 传递函数

① 定义 当初始条件为零时，系统对象或环节输出参数的拉氏变换式与输入参数的拉氏变换式之比。

② 性质