

工 科 核 心 课 程 学 习 辅 导 丛 书

自动控制原理

学习要点与习题解析

刘明俊 主编

依 据 教学大纲

紧 扣 权威教材

利 于 自学 辅导 考研

精 选 例 题 提示解题方法

模 拟 自 测 提供答案详解

国防科技大学出版社

工科核心课程学习辅导丛书

电子信息类

自动控制原理

学习要点与习题解析

主 编 刘明俊

内 容 简 介

本书根据高等工科院校自动控制原理教学大纲的基本要求编写的。书中归纳了经典控制理论和线性系统状态空间分析的基本内容。第一至第九章为知识要点和典型题解析,知识要点是各章主要内容的提炼和概括,突出基本概念和方法,抓住重点和难点;通过丰富的典型例题使读者加深对基本概念的理解,化解难点,掌握解题方法和技巧。第十章给出了五套模拟测试题,附录1精选了七套国内重点院校的考研试卷。本书所选习题、典型例题及模拟自测试题,都是根据经典教材习题和历届考研试题精选出来的,题目具有典型性、代表性和系统性。

本书可以作为学习自动控制原理课的教学参考书,也可作为考研辅导用书。

图书在版编目(CIP)数据

自动控制原理学习要点与习题解析/刘明俊编著. —长沙:国防科技大学出版社,2004.5
(工科核心类课程学习辅导丛书)

ISBN 7-81099-076-4

I. 自… II. 刘… III. 自动控制-要点与解析-辅导教材 IV. TP13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 036922 号

国防科技大学出版社出版发行
电话:(0731)4572640 邮政编码:410073
E-mail: gfkdcbs@public.cs.hn.cn
责任编辑:潘 生 责任校对:肖 滨
新华书店总店北京发行所经销
国防科技大学印刷厂印装

*

开本:787×1092 1/16 印张:20.5 字数:537 千
2004 年 5 月第 1 版第 1 次印刷 印数:1-3500 册

ISBN 7-81099-076-4/TP·7

*

定价:28.00 元

前 言

随着工业生产和技术的发展,自动控制技术已经广泛地应用于工农业生产、交通运输和国防、宇航等领域。自动控制原理是工科院校自动控制专业或自动化专业必需的专业技术基础课之一,学好这门课程,对以后从事自动化方面的工作是很重要的。为了帮助广大学生和自学者更好地学习、深入理解和掌握自动控制原理的基本概念和基本方法,提高分析问题和解决问题的能力;同时,也为学习过自动控制原理课程、准备报考研究生的学生在复习时提供一套较全面、系统的参考材料,本书根据高等工科院校自动控制原理教学大纲的要求,在总结多年的教学经验的基础上编写而成。

书中第一至第九章依次为自动控制的一般概念、控制系统的数学模型、时域分析法、根轨迹法、频率响应法、线性控制系统的补偿与综合、非线性系统分析、采样系统理论和线性系统状态空间分析基础。第十章选编了五套模拟自测试卷,附录1精选了国内重点院校考研试卷七套。附录2给出了第一至第九章习题的参考答案。

第一章至第九章为知识要点和典型题解析。知识要点归纳了各章的主要内容和重要的基本概念,是各章要掌握的内容;通过丰富的典型例题的分析和介绍,强调解题思路、方法和步骤,使读者加深对基本概念的理解,化解难点,掌握解题方法和技巧。本书所选习题、典型例题和模拟自测试题都是从收集到的大量历届考研试题和经典教材试题中精选出来的,题目具有典型性、代表性和系统性。

由于作者水平有限,书中难免会有错误和不妥之处,恳请各位读者批评指正。

编 者

2004年5月于长沙:

国防科技大学

工科核心课程学习辅导丛书

电子信息类:

1. 模拟电子技术基础学习要点与习题解析
2. 数字电子技术基础学习要点与习题解析
3. 信号与系统学习要点与习题解析
4. 通信电路与通信原理学习要点与习题解析
5. 自动控制原理学习要点与习题解析

策划:潘生

目 录

第一章 自动控制的一般概念

1.1 基本内容与要点	(1)
1.1.1 基本内容	(1)
1.1.2 要点	(2)
1.2 典型题解析	(2)
1.3 习题	(6)

第二章 控制系统的数学模型

2.1 基本内容与要点	(8)
2.1.1 线性微分方程的建立及求解	(8)
2.1.2 传递函数	(8)
2.1.3 控制系统结构图	(9)
2.1.4 梅逊公式	(9)
2.1.5 要点	(9)
2.2 典型题解析	(10)
2.2.1 常用元部件传递函数	(10)
2.2.2 机械系统	(14)
2.2.3 无源和有源 RLC 电路网络	(17)
2.2.4 液压伺服系统	(18)
2.2.5 建立控制系统的结构图并推导闭环系统传递函数	(20)
2.2.6 系统结构图简化	(22)
2.2.7 用梅逊公式求系统传递函数	(25)
2.3 习题	(27)

第三章 时域分析法

3.1 基本内容与要点	(30)
3.1.1 线性系统的动态性能分析	(30)
3.1.2 系统稳定性分析	(32)
3.1.3 系统的稳态误差	(33)
3.1.4 要点	(36)
3.2 典型题解析	(36)
3.2.1 动态性能分析	(36)
3.2.2 稳定性分析	(41)
3.2.3 稳态误差计算	(44)

3.2.4 复合控制系统	(51)
3.3 习题	(53)

第四章 根轨迹法

4.1 基本内容与要点	(57)
4.1.1 根轨迹与根轨迹方程	(57)
4.1.2 绘制根轨迹的基本法则	(58)
4.1.3 要点	(60)
4.2 典型题解析	(61)
4.2.1 常规根轨迹	(61)
4.2.2 零度根轨迹	(68)
4.2.3 广义根轨迹	(71)
4.2.4 多回路系统根轨迹	(75)
4.3 习题	(78)

第五章 频率响应法

5.1 基本内容与要点	(80)
5.1.1 频率特性的定义	(80)
5.1.2 典型环节的频率特性	(80)
5.1.3 系统开环频率特性的绘制	(82)
5.1.4 基于频率特性的稳定性判据	(84)
5.1.5 稳定裕度	(84)
5.1.6 频率特性与时域性能指标	(86)
5.1.7 要点	(88)
5.2 典型题解析	(88)
5.2.1 根据频率特性计算稳态输出和稳态误差	(88)
5.2.2 频率特性的绘制	(89)
5.2.3 给定频率特性写出传递函数	(93)
5.2.4 稳定性分析与稳定裕度计算	(95)
5.2.5 条件稳定系统的稳定性分析	(100)
5.2.6 非最小相位系统的稳定性分析	(102)
5.2.7 具有延迟环节的系统稳定性分析	(107)
5.3 习题	(109)

第六章 线性控制系统的补偿与综合

6.1 基本内容与要点	(113)
6.1.1 频率响应法串联补偿	(113)
6.1.2 反馈补偿	(118)
6.1.3 基于根轨迹法的系统的补偿	(118)
6.1.4 复合控制系统	(121)
6.1.5 要点	(121)

6.2 典型题解析	(121)
6.2.1 基于频率法的串联补偿	(121)
6.2.2 反馈补偿	(135)
6.2.3 基于根轨迹法的串联补偿	(136)
6.2.4 具有延迟环节的系统补偿	(142)
6.3 习题	(143)

第七章 非线性系统分析

7.1 基本内容与要点	(146)
7.1.1 非线性系统的特点	(146)
7.1.2 描述函数法	(146)
7.1.3 相平面分析	(151)
7.1.4 要点	(153)
7.2 典型题解析	(153)
7.2.1 描述函数法	(153)
7.2.2 相平面法	(165)
7.3 习题	(174)

第八章 采样系统理论

8.1 基本内容与要点	(178)
8.1.1 信号的采样与复现	(178)
8.1.2 Z变换法	(179)
8.1.3 脉冲传递函数	(180)
8.1.4 采样系统的稳定性分析	(180)
8.1.5 采样时刻的稳态误差分析	(181)
8.1.6 W变换和伯德图	(181)
8.1.7 采样控制系统的校正与设计	(182)
8.1.8 要点	(183)
8.2 典型题解析	(183)
8.2.1 差分方程	(183)
8.2.2 脉冲传递函数	(185)
8.2.3 稳定性分析与稳态误差计算	(190)
8.2.4 系统分析与设计	(195)
8.3 习题	(200)

第九章 线性系统状态空间分析法基础

9.1 基本内容与要点	(203)
9.1.1 线性系统的状态空间描述	(203)
9.1.2 状态方程的解与连续时间系统的离散化	(204)
9.1.3 线性系统的可控性与可观测性	(206)
9.1.4 李雅普诺夫稳定性分析	(209)

9.1.5 线性定常系统的状态反馈与状态观测器	(210)
9.1.6 要点	(211)
9.2 典型题解析	(212)
9.2.1 建立状态空间表达式	(212)
9.2.2 系统最小实现	(221)
9.2.3 标准形变换	(228)
9.2.4 状态方程的解	(232)
9.2.5 线性连续系统方程离散化	(236)
9.2.6 可控性与可观测性	(239)
9.2.7 李雅普诺夫稳定性分析	(246)
9.2.8 极点配置与观测器设计	(248)
9.3 习题	(251)
第十章 模拟自测试题	
10.1 模拟自测试题(一)	(257)
10.2 模拟自测试题(二)	(259)
10.3 模拟自测试题(三)	(261)
10.4 模拟自测试题(四)	(263)
10.5 模拟自测试题(五)	(265)
10.6 模拟自测试题参考答案	(269)
附录 1:国内部分重点院校近年考研试卷精选	
1 哈尔滨工业大学 1999 年硕士研究生入学考试试题	(273)
2 哈尔滨工业大学 2000 年硕士研究生入学考试试题	(275)
3 南京理工大学 2001 年硕士研究生入学考试试题	(278)
4 浙江大学 2002 年硕士研究生入学考试试题	(279)
5 北京理工大学 2002 年硕士研究生入学考试试题(一)	(281)
6 北京理工大学 2002 年硕士研究生入学考试试题(二)	(283)
7 国防科技大学 2003 年硕士研究生入学考试试题	(285)
附录 2:第一至第九章各单元习题参考答案	(288)
参考文献	(319)

第一章 自动控制的一般概念

1.1 基本内容与提要

1.1.1 基本内容

1. 定义

系统 是指一些部件的组合,这些部件组合在一起,完成一定的任务。系统不限于物理系统,也应用于抽象的动态现象,如经济学中遇到的一些现象。

自动控制 是指在没有人直接参与的情况下,利用控制装置,使被控对象的被控量自动地按预定规律变化。

自动控制系统 指能自动地对被控对象的被控量进行控制的系统。

被控对象 指需要进行控制的机械装置、设备或过程。

被控量 又称输出量,是指被控对象的被控制的量。

给定值 也称输入量,被控量应达到的数值和期望的运行规律。

扰动 是指一种对系统输出产生不利影响的信号。如果扰动产生在系统内部,称为内部扰动;当扰动产生在系统外部时,则称为外部扰动。外部扰动是系统的输入量。

2. 反馈控制系统

反馈控制系统能对输出量与输入量进行比较,并将它们产生的偏差作为控制量,用来控制输出量能按照某种确定的规律运动的系统。

3. 闭环控制系统

反馈控制系统通常属于闭环控制系统。闭环控制系统的特点是系统的输出端与输入端之间存在着反馈通道,即输出量对输入控制作用有直接影响,闭环的作用是应用反馈来减少偏差。

4. 开环控制系统

开环控制是指系统的输出量对控制作用没有影响的系统。在开环控制系统中,既不需要对输出量进行测量,也不需要将输出量反馈到系统的输入端与输入量进行比较。

5. 闭环与开环控制系统的比较

闭环控制系统的主要优点是控制精度高,由于采用反馈实现偏差调整,因而使系统的被调量对外部干扰和内部系统参数变化均相当不敏感。这样,对给定的控制对象,有可能采用不太精密且成本较低的元件构成精度较高的控制系统。闭环控制系统的主要缺点是在采用偏差控制后,由于系统总是存在着惯性,很容易引起振荡,使系统不稳定。同时,闭

环控制系统需要较多的元件,故成本高。

开环控制系统的主要优点是构造简单,维护容易,成本比相应的闭环系统低,不存在稳定性问题,当输出量难于测量,或者要测量输出量在经济上不允许时,采用开环系统比较合适。开环控制系统的缺点是当扰动和标定尺度的变化将引起误差,从而使系统的输出量偏离希望的数值,为了保持必要的输出品质,需要对标定尺度不断地进行修正。

5. 复合控制系统

把开环控制和闭环控制适当的结合在一起,构成了复合控制系统,它能获得更满意的系统性能。

6. 自动控制系统的基本组成

自动控制系统由被控对象和控制装置组成。控制装置包括给定元件、测量元件、反馈元件、比较元件、放大元件、执行机构和校正元件(又称补偿元件)。

7. 自动控制系统的基本类型

按给定值的运动规律可分为下列类型:

恒值调节系统 对于这类系统,给定值通常是常值,例如稳压电源,恒温系统等。系统分析的重点是克服各种干扰对输出量的影响。

伺服系统 这类系统的给定值的变化规律是事先不知道的时间函数,要求输出量能够按照要求的精度和快速性复现给定量。

程序控制系统 这类系统的给定值是已知给定的时间函数。

8. 对控制系统的基本要求

(1)稳定性 指在系统稳定的前提下,具有平稳的动态特性。

(2)快速性 指在系统输出量与给定的输入量之间产生偏差时,消除这种偏差过程的快速程度。

(3)准确性 指在系统调整过程结束后,输出量与输入量间的偏差,或称为静态误差。

1.1.2 要点

1. 理解和掌握闭环控制系统、开环控制系统、复合控制系统的特点。

2. 给出控制系统的原理图,应能明白其工作原理和工作过程,能指出每个环节的作用,并且能画出控制系统方块图。

1.2 典型题解析

例 1.1 图 1.1 给出了发动机的瓦特式速度调节器的基本原理示意图,试分析其工作过程,并画出该控制系统的方块图。

解 当发动机的转速按规定的速度运转时,高压油将不进入动力油缸的任何一侧,油缸内活塞不动,控制阀门的开度不变,进入发动机的燃料不变,发动机转速不变。如果由于某种原因发动机转速增大,调速器的离心力增大,从而使离心机构上移,高压油进入动力油缸的上部,活塞向下运动,使控制阀门开度减少,这样会减少燃料供应,导致发动机的

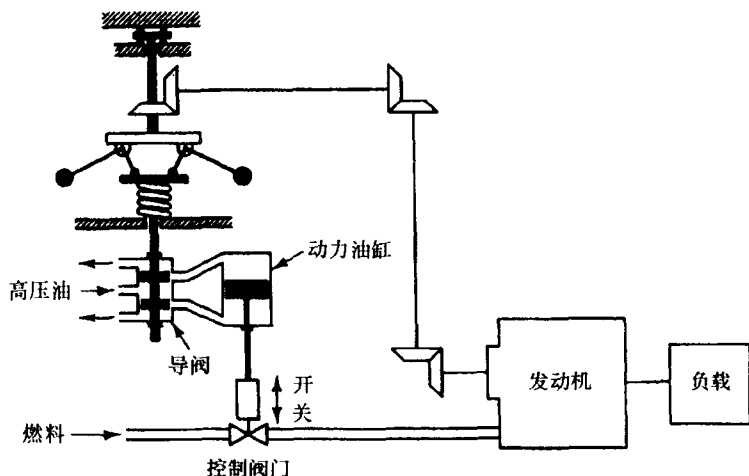


图 1.1 速度控制系统原理示意图

速度减少,直到达到所希望的速度为止。

该系统被控对象是发动机,发动机的转速是被控量,离心机构比较希望速度和实际运动速度之差而产生偏差信号,控制阀门的开度,不能预测的负载变化是扰动量。

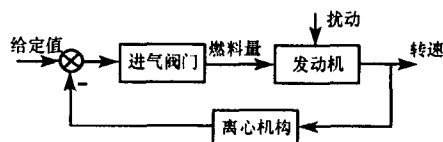


图 1.2 例 1.1 系统方块图

例 1.2 图 1.3 是一个简单液压伺服系统工作原理示意图,其中 e 是输入位移, y 为输出位移,试分析其工作过程,并画出系统原理方块图。

解 该系统是一个典型的简单机械液压伺服系统,由液压动力机构和机械反馈机构组成的闭环控制系统。滑阀的左边通过连杆 ABC 与动力活塞的左边相连,这种连接是一种浮动连接。

当阀门向左移动时,高压油从左端进入动力油缸,推动动力活塞向右运动;当阀门向右运动时,高压油从右端进入动力油缸,推动动力活

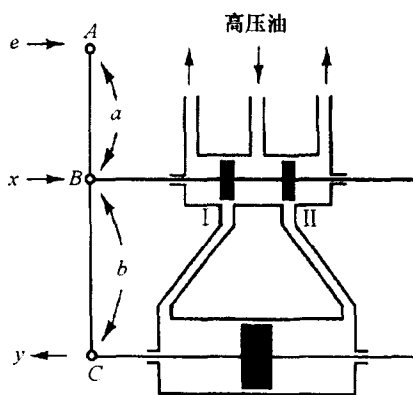


图 1.3 例 1.2 简单液压伺服系统原理示意图

塞向左移动;当阀的位置居中时,动力活塞也就停止运动。因此,阀的位置,即 B 点的位移是该系统的比较点。当 e 向左时, B 点也向左,而高压油迫使 y 向右,将 B 点拉回到原来的中点,堵住了高压油, y 的运动也就停止,其功能方块图如图 1.4 所示。

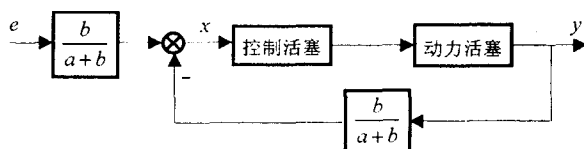


图 1.4 例 1.2 系统方块图

例 1.3 一晶体管稳压电源如图 1.5 所示。试画出其方块图,并说明被控量、给定值、干扰量是什么,哪些元件起着测量、放大和执行作用。

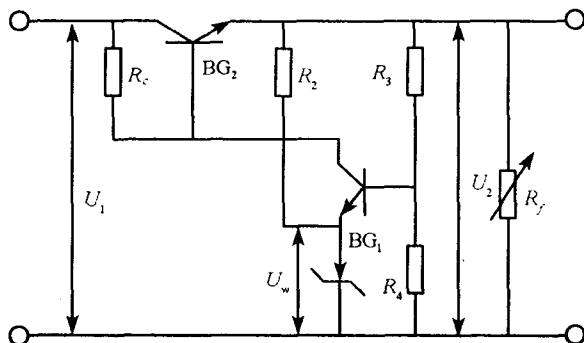


图 1.5 例 1.3 稳压电流系统原理图

解 稳压电源是一个恒值调节系统,被调量是输出电压 U_2 ,假设忽略 BG_2 的基极电压,则有

$$U_2 = U_1 - I_c R_c$$

I_c 是 BG_1 的集电极电流。直流稳压电源的基准是稳压二极管的电压,输出电压通过 R_3 和 R_4 分压后与稳压电压 U_w 比较。若输出电压偏高,则 U_b 增大, I_c 增大,降在 R_c 两端的电压也相应增加,则输出电压 U_2 相应减少,反之也是一样。稳压二极管和 BG_1 、分压电路构成比较测量和放大作用, BG_2 起到执行作用, U_1 的变化和负载的变化相当于干扰的作用。其系统方块图如图 1.6 所示。

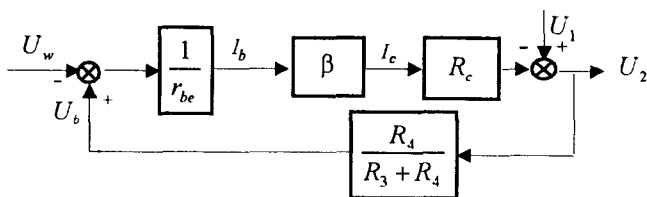


图 1.6 例 1.3 晶体管稳压电源方块图

例 1.4 一调速控制系统如图 1.7 所示,试分析其工作原理并画出系统原理方块图。

解 该系统的被控对象是电动机,被控量是电机转速。当由于某种原因,电动机转速发生变化时,测速发电机测量实际转速,给出电压信号 U_r 与给定值 u_g ,在电压放大器输入端实现比较,产生偏差控制信号调整电动机转速,使电动机恢复在给定的转速下运动。

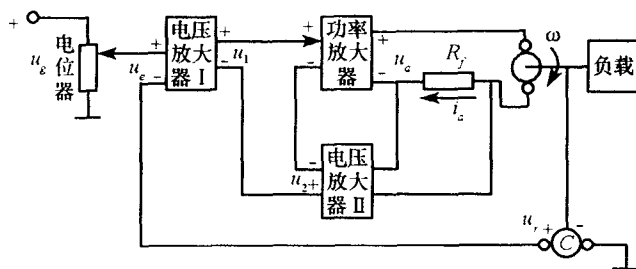


图 1.7 例 1.4 调速系统原理图

在一般的转速控制系统中,转速的变化主要由负载的变化引起的。如果能测量负载的变化,并根据它的大小产生附加的控制作用来补偿由它引起的转速变化,可以能有效地抑制干扰对转速特性的影响。负载的变化是随机的,不如直接测量,但电机回路电流能反映出负载变化对转速的影响,负载增大,转速降低,电机回路电流增大, R_f 两端电压经放大后 U_2 增大,进行正反馈后使 u_a 增大,从而提高电机转速而补偿了干扰的影响。该系统是干扰补偿的复合控制系统。

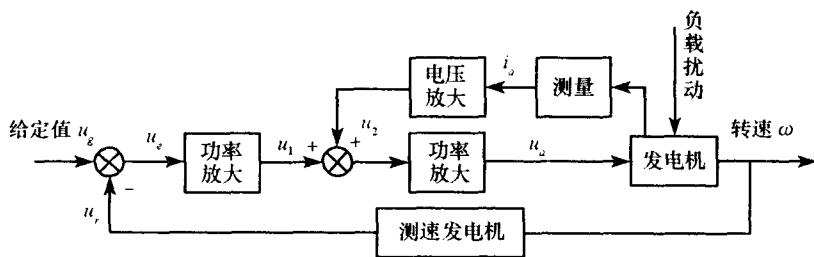


图 1.8 例 1.4 系统方块图

例 1.5 图 1.9 给出了一个反坦克导弹控制系统工作原理示意图。试分析其工作原理并画出系统功能方块图。

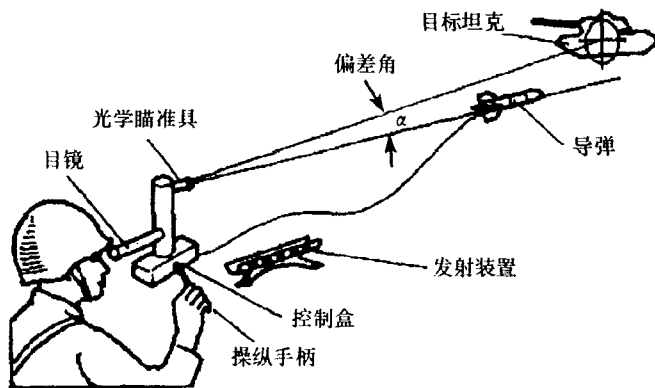


图 1.9 例 1.5 反坦克导弹系统工作原理示意图

解 该控制系统采取光学跟踪和有线制导。由于采用光学制导系统(红外线、激光),射手只需将与光学跟踪器(如红外线测角仪)同步的瞄准镜的十字线对准目标,光学制导系统能测出目标与导弹的偏差角,产生偏差控制信号,操纵导弹自动修正它与瞄准线间的偏差而飞向目标。

该系统导弹是被控对象,导弹运动的航迹是被控量,光学瞄准具是测量比较装置,目标运动是给定输入信号,其功能方块图如图 1.10 所示。

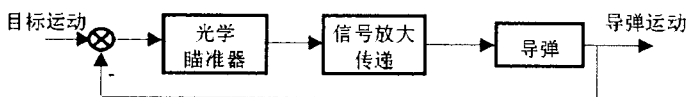
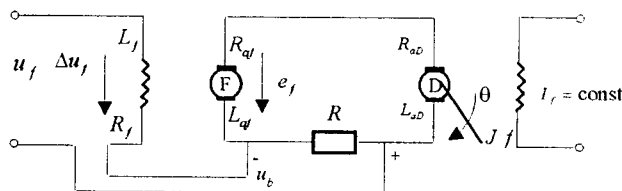


图 1.10 例 1.5 反坦克导弹系统方块图

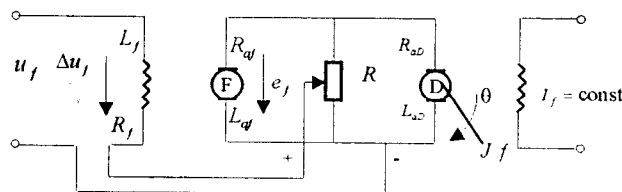
1.3 习题

题 1.1 带有电流反馈的发电机—电动机组控制系统如题图 1.1 所示。直流发电机电势与激磁绕组电流成正比, $e_f = K_e i_f(t)$ 。试分析其工作过程并画出系统功能方块图。



题图 1.1 题 1.1 系统工作原理示意图

题 1.2 具有电压反馈的发电机—电动机组控制系统如题图 1.2 所示。直流发电机电势与激磁绕组电流成正比, $e_f = K_e i_f(t)$ 。试分析其工作过程并画出系统功能方块图。

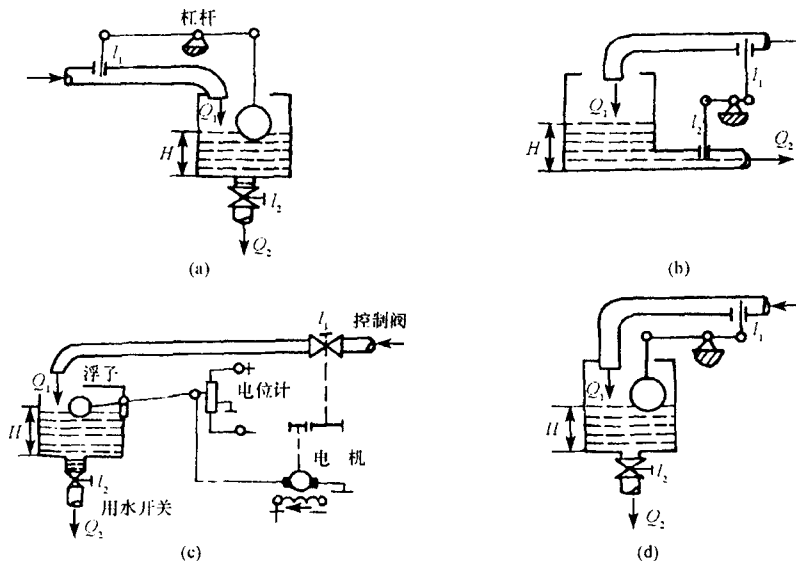


题图 1.2 题 1.2 系统工作原理示意图

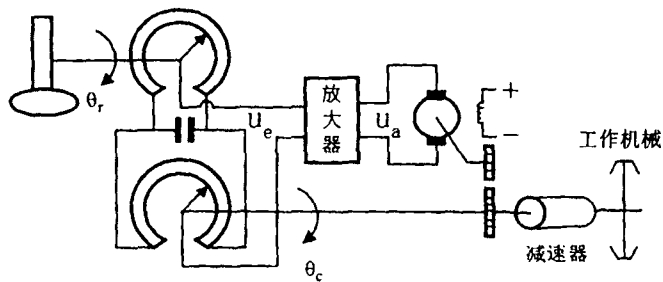
题 1.3 4 种控制方案的水位自动控制系统原理图如题图 1.3 所示,控制目标是维持水面高度 H 不变。

- (1) 说明各系统的工作原理;
- (2) 画出各系统的方块图;
- (3) 判断系统是开环控制还是闭环控制,并说明理由;
- (4) 比较 4 个系统的工作特点。

题 1.4 位置伺服系统工作原理示意图如题图 1.4 所示,控制的任务是要求输出角位置 θ 快速跟踪转入角位置 θ_r ,试分析其工作原理并画出系统方块图。

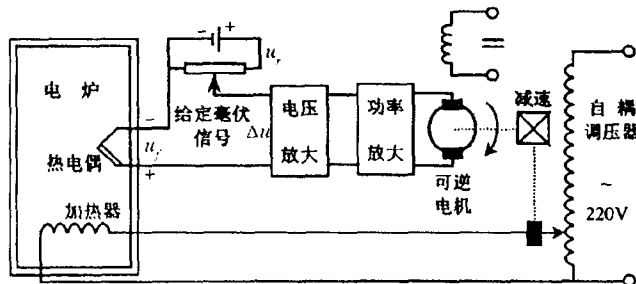


题图 1.3 题 1.3 4 种水位自动控制系统原理图



题图 1.4 题 1.4 位置伺服系统工作原理示意图

题 1.5 炉温控制系统如题图 1.5 所示,说明其工作原理并画出系统功能方块图。



题图 1.5 题 1.5 炉温控制系统原理示意图

第二章 控制系统的数学模型

2.1 基本内容与要点

2.1.1 线性微分方程的建立及求解

1. 建立系统微分方程

- (1)将系统划分为若干个环节,确定各环节的输入及输出量;
- (2)根据物理定律列写每个环节的微分方程式;
- (3)将各环节方程式联立,消去中间变量,最后得出只含有输入变量、输出变量的系统方程式。

2. 微分方程的线性化

如果所建立的微分方程不是线性微分方程而是非本质的非线性方程,应当对方程进行线性化。线性化是相对某一额定工作点的,工作点不同,则所得到的方程系数也往往不同。

3. 线性微分方程的解

对线性定常系统,通过对方程进行拉氏变换,求出输出、输入拉氏变换表达式,再进行拉氏反变换,得到系统微分方程的解。

2.1.2 传递函数

1. 传递函数的定义和主要性质

对于线性定常系统,在零初始条件下,系统输出量的拉氏变换与输入量的拉氏变换之比称为系统的传递函数。传递函数描述了系统内在的固有特性,它只与系统的结构和参数有关而与系统输入和外干扰作用无关。传递函数是系统在 s 域的数学模型,它不仅可以表征系统的动态特性,还可以用它来研究系统的结构或参数的变化对系统性能的影响。

传递函数一般是复变量 s 的有理真分子函数,所有的系数均为实常值,故所有的零、极点为实数或共轭复数。根据物理实现性,分子多项式的阶数小于或等于分母多项式的阶数。

传递函数只是对系统的一种外部描述,故不能反映系统内部各中间变量的情况。传递函数只能表达一个输入与一个输出量之间的关系。

传递函数是在零初始条件下得到的,已知系统的传递函数可以很容易得到系统的微分方程式,已知系统的输入和初始条件,可以求出系统的全响应。