



21世纪高等学校新理念教材建设工程

自动控制理论学习指导

(修订版)

辽宁工业大学自动化教研室 编



东北大学出版社
Northeastern University Press

21 世纪高等学校新理念教材建设工程

自动控制理论学习指导

(修订版)

辽宁工业大学自动化教研室 编

东北大学出版社

• 沈 阳 •

© 王艳秋 2005

图书在版编目 (CIP) 数据

自动控制理论学习指导 / 辽宁工业大学自动化教研室编. —2 版. —沈阳: 东北大学出版社, 2008.6

(21 世纪高等学校新理念教材建设工程)

ISBN 978-7-81102-173-8

I. 自… II. 王… 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 (2008) 第 079510 号

内容简介

本书为《自动控制理论》课程的辅助教材。书中各章节结构基本相同, 分为内容提要、例题、练习题三个部分。其中, 内容提要归纳了自动控制理论的基本概念、原理与方法; 例题、练习题按难易程度分为 A, B, C 三类, 其中 A 类为基本题, B 类题增加了一定难度, C 类是为考研学生选编的综合题。每章后附有部分习题的参考答案。

本书可作为高等院校理工科学生《自动控制理论》课程的学习指导书, 也可作为硕士研究生入学考试的参考书, 还可作为各类工程技术人员和自学者的辅导书。

出 版 者: 东北大学出版社

地址: 沈阳市和平区文化路 3 号巷 11 号

邮编: 110004

电话: 024—83687331 (市场部) 83680267 (社务室)

传真: 024—83680180 (市场部) 83680265 (社务室)

E-mail: neuph@neupress.com

http://www.neupress.com

印 刷 者: 沈阳市第六印刷厂书画彩印中心

发 行 者: 东北大学出版社

幅面尺寸: 184mm × 260mm

印 张: 8

字 数: 210 千字

出版时间: 2005 年 8 月第 1 版

2008 年 6 月第 2 版

印刷时间: 2008 年 6 月第 1 次印刷

责任编辑: 牛连功

封面设计: 唐敏智

责任校对: 铁 履

责任出版: 杨华宁

ISBN 978-7-81102-173-8

定 价: 13.00 元

《自动控制理论学习指导》编委会

主 编 王艳秋 王立红 杨汇军

副主编 王德江 吕 媿

编 委 郑春娇 于 洋 梁 虹

前 言

本书由辽宁工业大学出版基金资助出版。

由于自动控制技术在各个行业的广泛应用,自动控制理论课程已成为高等学校许多学科的科学基础必修课,且占有愈来愈重要的位置。为帮助自动控制理论课程的初学者更好地掌握这门技术,也为适应报考研究生读者的需求,同时,自动控制理论课作为辽宁省精品课急需进行教材改革尝试,以适应教学改革的需要和对应用型人才培养的需求,我们精心编写了这本《自动控制理论学习指导》。

本书的主要特点是:每章按内容提要、例题、练习题的顺序编写,并在每章后附有全部练习题的参考答案,内容的编排比较适合学生自主学习。例题及练习题分为 A, B, C 三类, A 类为普通题, B 类题增加了一定难度, C 类题是为报考研究生和学有余力的同学准备的综合题型。

本书可作为高等院校、高等职业技术学院《自动控制理论》课程的辅助教材,也可作为硕士研究生入学考试的参考书,还可供从事控制工程领域的工程技术人员参考。

本书由王艳秋、王立红、杨汇军担任主编,王德江、吕妮担任副主编。全书共分 8 章,前言及第 3 章和第 5 章由王艳秋执笔,第 1 章由王德江执笔,第 4 章由吕妮执笔,第 2 章和第 8 章由王立红执笔,第 6 章和第 7 章由杨汇军执笔。郑春娇,硕士研究生于洋、梁虹也参加了本书的编写工作。本书编写过程中参考了其他院校出版的《自动控制原理习题集》的有关内容。

由于编者水平所限,书中不妥之处在所难免,望读者批评指正。

编 者

2008 年 5 月

目 录

第 1 章 自动控制概述	1
1.1 内容提要	1
1.1.1 基本概念	1
1.1.2 基本控制方式	1
1.1.3 闭环控制系统的组成	1
1.1.4 控制系统的分类	2
1.1.5 对控制系统的基本要求	2
1.2 典型题解	2
1.3 习 题	4
1.4 习题解答	7
第 2 章 控制系统的数学模型	9
2.1 内容提要	9
2.1.1 数学模型	9
2.1.2 动态微分方程的编写	9
2.1.3 传递函数	9
2.1.4 系统动态结构图	10
2.1.5 信号流图	11
2.1.6 梅逊公式	11
2.1.7 控制系统的传递函数	12
2.2 典型题解	12
2.3 习 题	22
2.4 习题解答	27
第 3 章 线性系统的时域分析法	29
3.1 内容提要	29
3.1.1 典型输入信号	29
3.1.2 系统的暂态过程	29
3.1.3 线性系统的稳定性分析	30
3.1.4 稳态误差	31
3.2 典型题解	31
3.3 习 题	42
3.4 习题解答	45
第 4 章 线性系统的根轨迹法	47
4.1 内容提要	47
4.1.1 根轨迹的基本概念	47
4.1.2 绘制根轨迹的基本法则	47
4.1.3 根轨迹与系统性能的关系	48
4.2 典型题解	49

4.3 习 题	56
4.4 习题解答	59
第5章 线性系统的频域分析法	60
5.1 内容提要	60
5.1.1 频率特性的基本概念	60
5.1.2 频率特性的几何表示法	60
5.1.3 奈奎斯特稳定性判据	60
5.1.4 对数频率特性稳定性判据	61
5.1.5 稳定裕度	61
5.1.6 最小相位系统与非最小相位系统	61
5.1.7 闭环频率特性性能指标	61
5.1.8 系统频域指标的计算	62
5.2 典型题解	63
5.3 习 题	74
5.4 习题解答	77
第6章 线性系统的校正	78
6.1 内容提要	78
6.1.1 系统设计与校正	78
6.1.2 常用校正装置及特性	79
6.1.3 串联校正装置的设计步骤	80
6.2 典型题解	81
6.3 习 题	90
6.4 习题解答	92
第7章 线性离散系统的分析与校正	94
7.1 内容提要	94
7.1.1 离散系统的基本概念	94
7.1.2 信号采样与保持的数学描述	94
7.1.3 Z 变换理论	95
7.1.4 离散系统的数学模型	95
7.1.5 离散系统的稳定性与稳态误差	96
7.1.6 离散系统的动态性能分析	97
7.1.7 离散系统综合——最少拍系统设计	97
7.2 典型题解	98
7.3 习 题	106
7.4 习题解答	107
第8章 非线性控制系统分析	109
8.1 内容提要	109
8.1.1 非线性控制系统概述	109
8.1.2 非线性特性及其描述函数对照表	109
8.1.3 描述函数法	110
8.1.4 相平面法	110
8.2 典型题解	111
8.3 习 题	115
8.4 习题解答	119
参考文献	120

□第1章 自动控制概述

1.1 内容提要

本章的主要任务是使学生了解开环控制与闭环控制的区别,掌握闭环控制系统的基本原理和组成,理解被控对象、被控量、控制量、干扰量等概念。

1.1.1 基本概念

(1) 自动控制

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按预定规律变化。

(2) 负反馈控制原理

指将系统的被控量直接或经变换后引入输入端,与控制量相减,利用所得的偏差量去控制被控对象,达到减小偏差或消除偏差的目的。

(3) 常用术语

- ① 自动控制系统:能自动对被控对象的被控量进行控制的系统。
- ② 被控对象:指工作状态需要给以控制的机械、装置或过程。
- ③ 被控量:也称输出量,表示被控对象工作状态的物理量。
- ④ 控制量:也称给定量,表示被控量的期望运行规律。
- ⑤ 扰动量:也称干扰量,是引起被控量偏离预定运行规律的量。
- ⑥ 反馈量:指被控量直接或经测量元件变换后送入输入端的量。
- ⑦ 偏差量:指给定量与反馈量相减后的输出量。

1.1.2 基本控制方式

基本控制方式有三种:开环控制、闭环控制与复合控制。

开环控制指控制装置与被控对象之间只有顺向作用而无反向联系的控制方式,其特点是系统的输出量不会对系统的控制作用产生影响。

闭环控制又称反馈控制,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方式,其主要特点是:①按偏差进行调节;②抗干扰性好,控制精度高。

复合控制指按扰动量或给定量的前馈补偿控制与反馈控制相结合的控制方式。

1.1.3 闭环控制系统的组成

闭环控制系统由被控对象和控制装置组成。控制装置包括:

- ① 给定元件:提供输入量。
- ② 测量元件:测量被控量。
- ③ 比较元件:比较给定量与反馈量,得出偏差量。

- ④ 放大元件：放大偏差量。
- ⑤ 执行机构：改变被控对象的被控量。
- ⑥ 校正元件：为改善系统性能引入的元件。

1.1.4 控制系统的分类

按给定量的形式，分为恒值控制系统、随动系统与程序控制系统；按系统是否满足叠加定理，分为线性系统与非线性系统；按信号传递是否连续，分为连续系统与离散系统。

1.1.5 对控制系统的基本要求

对控制系统的基本要求有稳定性、准确性和快速性。稳定性，是系统正常工作的必要条件。准确性，要求系统稳态误差要小，稳态误差为零称无差系统，否则称有差系统。快速性，要求系统快速平稳地完成暂态过程，超调量要小，调节时间要短。

1.2 典型题解

【例 1-A-1】 图 1.1 为一直流发电机电压自动控制系统示意图。其中，1 为发电机，2 为减速器，3 为执行电动机，4 为比例放大器，5 为可调电阻器。

(1) 该系统由哪些元件组成，各起什么作用？

(2) 绘出系统的框图，说明当负载电流变化时，系统如何保持发电机的电压恒定。

(3) 该系统是有差系统还是无差系统？

(4) 系统中有哪些可能的扰动？

解 (1) 该系统由给定元件、比较放大元件、执行机构、测量元件和被控对象组成。给定元件是电源电压 U_0 ，用来设定直流发电机电压的给定值。比较放大元件是比例放大器，实现被控量与给定量的比较和放大。执行机构由伺服电动机、减速器和可调电阻器组成，调节发电机的输出电压。测量元件为跨接在发电机电枢两端，并同电压源 U_0 一起连接到比例放大器输入端的导线，将系统的输出量直接反馈到系统的输入端。被控对象为直流发电机，供给负载恒定不变的电压。

(2) 系统结构框图如图 1.2 所示。当负载电流增大时，发电机端电压下降，电压偏差增大，偏差电压经运算放大器放大后，控制伺服电动机，带动可调电阻器的滑动端使励磁电流增大，使发电机的电压升高直至恢复到给定电压的数值上，从而实现电压的恒定控制。负载电流减小时调节过程与此相反。

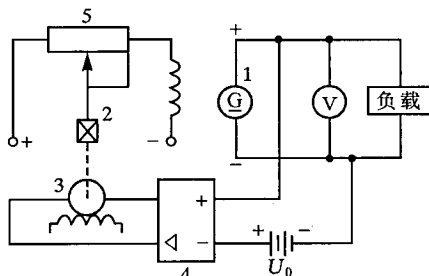


图 1.1 直流发电机电压自动控制系统原理图

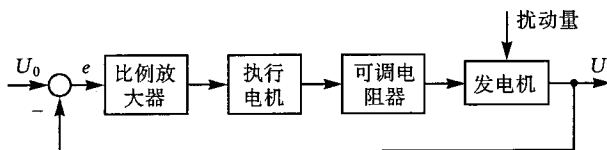


图 1.2 直流发电机电压自动控制系统结构框图

(3) 假设系统在稳定运行状态下, 发电机输出的电压与给定的电压 U_0 相等. 此时, 比例放大器输出为零, 执行电机不转动, 可调电阻器的滑动端不动, 发电机磁场不变化, 从而保持发电机输出电压 U 等于给定电压 U_0 . 假设成立, 故该系统为无差系统.

(4) 系统中可能出现的外部扰动: 负载电流的变化(增加或减小). 可能出现的内部扰动: 系统长时间工作使电源电压 U_0 降低, 执行机构、减速器等机械性能的改变等.

【例 1-B-1】 图 1.3 为电阻炉温度控制系统原理图.

(1) 指出系统输出量、给定量、扰动量、被控对象和控制器的组成元件.

(2) 说明系统是怎样消除或减小偏差的.

(3) 画出其方框图.

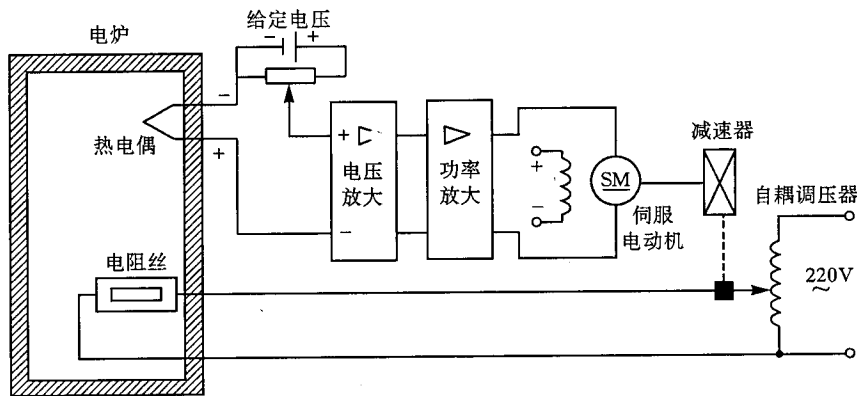


图 1.3 电阻炉温度控制系统原理图

解 (1) 炉温为输出量, 经电位器设定的电压是给定量, 电网电压的波动和炉门的开关为外部扰动量, 系统元器件和执行机构的性能改变为内部扰动量, 电阻炉是被控对象. 控制器由温度传感器(热电偶)、给定电位器、电压放大器、功率放大器、伺服电动机、减速器和自耦调压器组成.

(2) 在正常情况下, 炉温等于期望值, 热电偶输出的电压等于给定电压, 此时偏差为零, 电动机不动, 调压器输出电压不变, 这时, 炉子散失的热量正好等于从加热器获取的热量, 形成稳定的热平衡状态, 炉温保持恒定. 当炉温由于某种原因突然下降时, 热电偶输出电压下降, 与给定电压比较后出现正偏差, 经电压放大器, 功率放大器放大后, 驱动电动机正转使调压器电压升高, 炉温升高, 直至炉温等于期望值为止. 当炉温由于某种原因突然升高时, 调节过程正好相反.

(3) 系统方框图如图 1.4 所示.

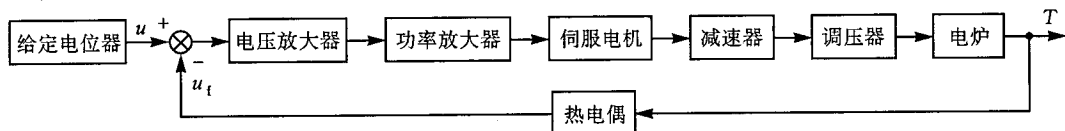


图 1.4 电阻炉温度控制系统方框图

【例 1-B-2】 图 1.5 为位置随动系统, 输入量为转角 θ_r , 输出量为转角 θ_c .

(1) 说明系统由哪几部分组成, 各起什么作用?

(2) 说明当 θ_r 变化时, θ_c 的跟随过程.

(3) 画出系统原理方框图.

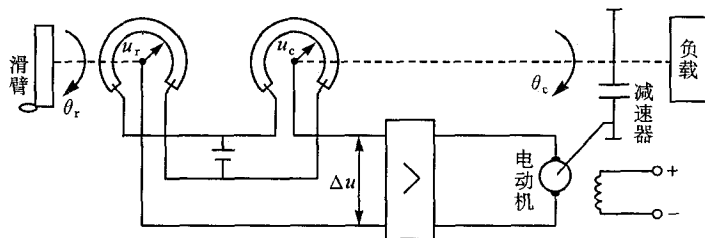


图 1.5 位置随动系统原理图

解 (1) 给定电位器和反馈电位器组成的桥式电路构成测量比较环节, 其作用就是测量输入角度 θ_r 与输出角度 θ_c 并将其变成电压信号 u_r 和 u_c , 比较后产生偏差电压 Δu . 放大器的作用是将 Δu 放大后加到直流伺服电动机电枢绕组上. 电动机和减速器是执行机构, 负载是被控对象.

(2) 当负载的实际位置 θ_c 与给定位置 θ_r 相符时, Δu 等于零, 电动机不转动. 当负载的实际位置 θ_c 与给定位置 θ_r 不相符时, Δu 不等于零. Δu 经放大器放大后, 使电动机朝着减小偏差的方向转动.

(3) 系统的方框图如图 1.6 所示.

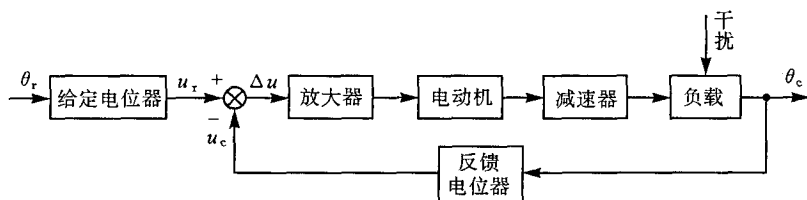


图 1.6 位置随动系统方框图

1.3 习 题

1-A-1 试阐述自动控制, 控制装置与被控对象, 给定量与被控量, 开环控制与闭环控制, 线性系统与非线性系统, 连续系统与离散系统, 恒值系统与随动系统, 稳定性、快速性和准确性的意义并举例说明.

1-A-2 直流发电机电压控制系统如图1.7所示, (a)为开环控制; (b)为闭环控制. 发

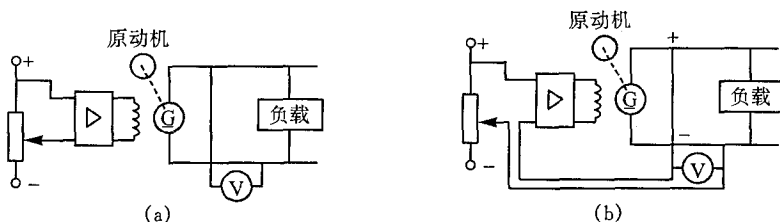


图 1.7 直流发电机电压控制系统示意图

电机电动势与原动机转速成正比, 与励磁电流成正比. 当负载变化时, 由于发电机电枢内阻上电压降的变化, 会引起输出电压的波动.

(1) 说明开环控制的工作原理, 并分析原动机转速的波动和负载的变化对发电机输出电压的影响.

(2) 分析闭环控制的控制过程, 并与开环控制进行比较, 说明负反馈的作用.

1-B-1 图 1.8 为水位控制系统原理图.

(1) 指出系统的输出量和输入量. (包括给定输入量和扰动输入量)

(2) 分析工作原理.

(3) 画出系统的原理方框图.

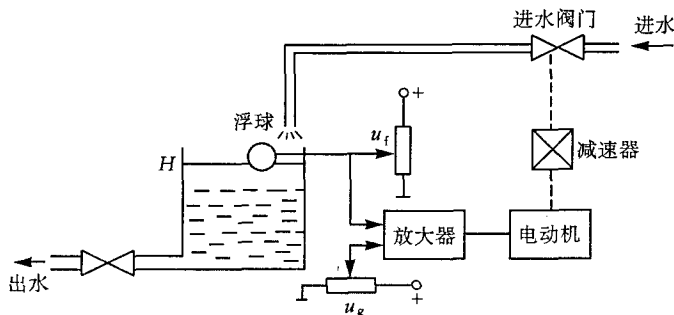


图 1.8 水位控制系统示意图

1-B-2 图 1.9 为电动机速度控制系统工作原理图.

(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.

1-B-3 图 1.10 是仓库大门自动控制系统原理示意图, 试说明自动控制大门开关的工作原理并画出系统原理方框图.

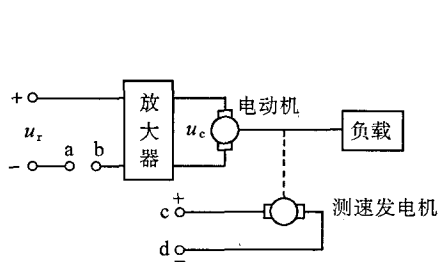


图 1.9 电动机速度控制系统示意图

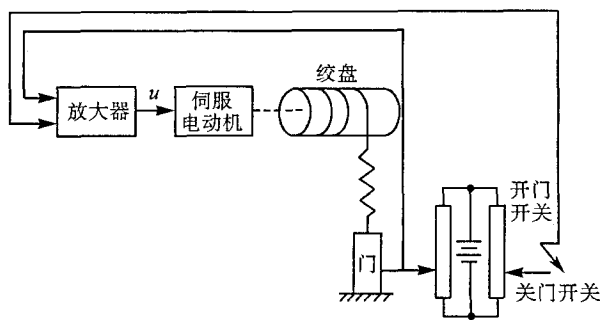


图 1.10 仓库大门自动控制系统示意图

1-C-1 图 1.11 为水温控制系统, 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. 冷水流量的变化可用流量计测得.

(1) 说明为了保持热水温度为给定值, 系统是如何工作的.

(2) 指出系统的被控对象及控制装置.

(3) 绘制系统的原理方框图.

(4) 指出系统属于何种控制方式.

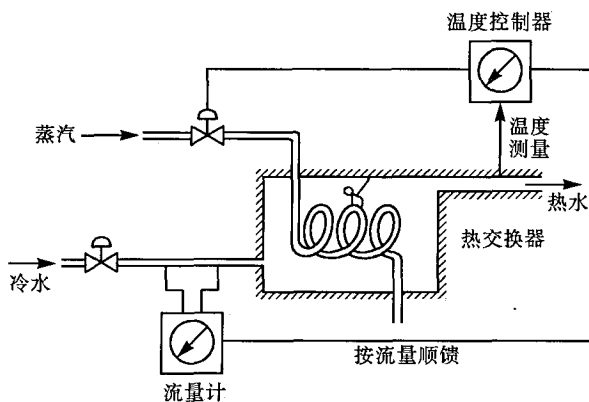


图 1.11 水温控制系统示意图

1-C-2 图 1.12 所示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，并分析哪些元件起测量、比较、执行和校正等作用。

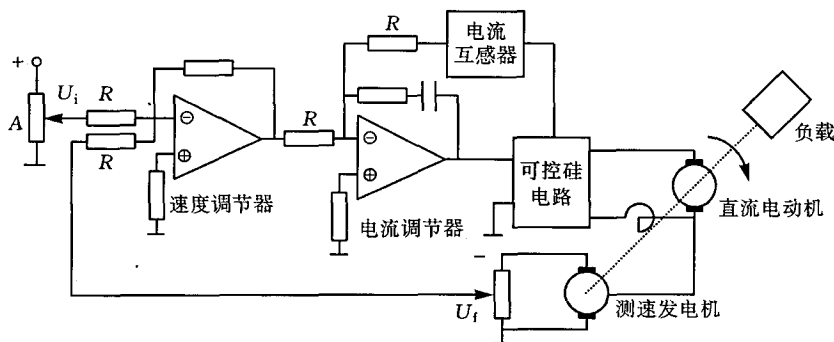


图 1.12 直流电动机双闭环调速系统示意图

1-C-3 图 1.13 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_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、被控量以及控制装置各部件的作用，画出系统方框图。

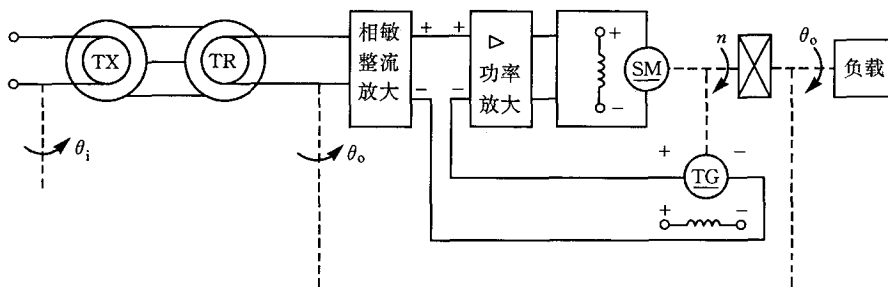


图 1.13 自整角机随动系统示意图

1.4 习题解答

1-A-1 略.

1-A-2 略.

1-B-1 (1) 输出量是 H , 给定输入量是 u_g , 扰动输入量是出水量; (2) 略; (3) 系统的原理方框图如图 1.14 所示.

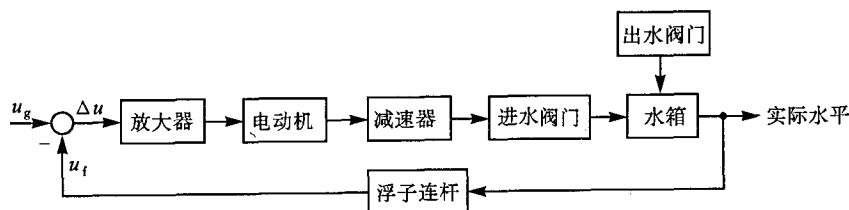


图 1.14 系统方框图

1-B-2 (1) a 和 d 连接, b 和 c 连接; (2) 系统方框图如图 1.15 所示.

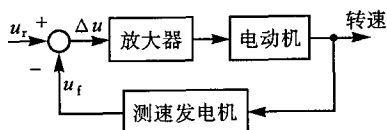


图 1.15 系统方框图

1-B-3 工作原理: 略; 系统方框图如图 1.16 所示.

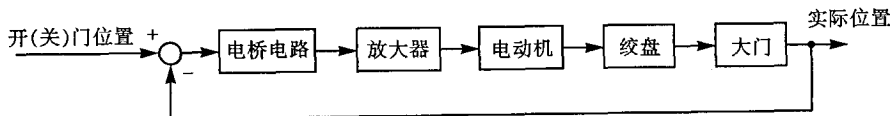


图 1.16 系统方框图

1-C-1 (1) 略; (2) 被控对象是热交换器, 控制装置是温度控制器; (3) 系统原理方框图如图 1.17 所示; (4) 属复合控制系统.

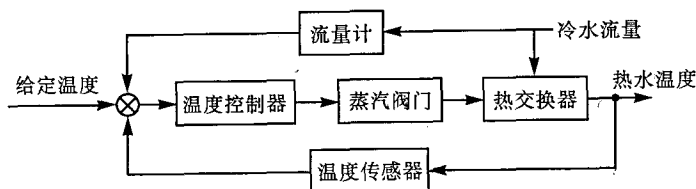


图 1.17 系统方框图

1-C-2 系统方框图如图 1.18 所示. 电流互感器是电流反馈的测量元件, 积分器起校正作用, 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, 它将直流电动机的转速变换为电压信号反馈到输入端, 速度调节器起比较、放大作用. 直流电动机是执行机构.

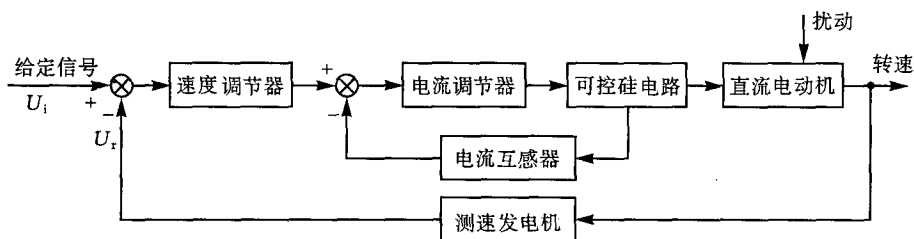


图 1.18 系统方框图

1-C-3 系统是如何工作的：略。系统的被控对象是负载轴，被控量是负载轴转角 θ_o ，相敏整流放大器和功率放大器起着放大信号的作用。电动机和减速器是执行机构。测速发电机是测量元件。系统方框图如图 1.19 所示。

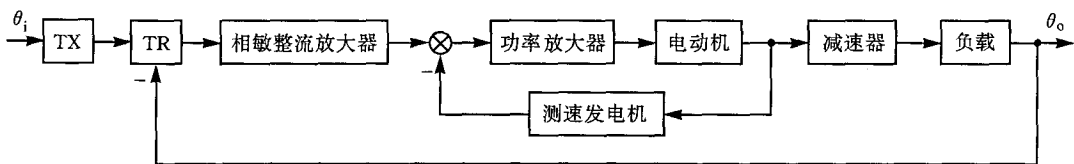


图 1.19 系统方框图

□第2章 控制系统的数学模型

2.1 内容提要

本章主要介绍自动控制系统数学模型的定义、种类及建模方法。重点介绍典型环节的传递函数、结构图变换化简方法及用梅逊公式求取传递函数的方法。

2.1.1 数学模型

自动控制系统的分析与设计是建立在数学模型基础上的。数学模型是描述系统内部各物理量之间动态关系的数学表达式。常用的数学模型有微分方程、传递函数、结构图、信号流程图、频率特性及状态空间描述等。

2.1.2 动态微分方程的编写

微分方程是描述控制系统动态性能的一种数学模型。建立系统微分方程的一般步骤如下：

- (1) 将系统分成若干个环节，确定系统和各环节的输入量和输出量。
- (2) 列写各个环节的微分方程。
- (3) 消去中间变量，并整理得到描述系统输出与输入之间的微分方程。

(4) 对求出的系统微分方程进行标准化处理。即将与输出有关的各项放在等号左侧，将与输入有关的各项放在等号右侧；等号左、右侧各项均按降幂排列；将各项系数化为具有一定意义的形式。

2.1.3 传递函数

(1) 传递函数的定义与性质

线性定常系统的传递函数定义为在零初始条件下，系统输出量的拉氏变换与输入量的拉氏变换之比。

传递函数的主要性质如下：

- ① 传递函数的概念只适用于线性定常系统，与线性定常系统微分方程一一对应；
- ② 传递函数的概念只适用于单输入单输出系统；
- ③ 传递函数是 s 的有理分式，对实际系统而言分母的阶次 n 大于分子的阶次 m ，此时称为 n 阶系统；
- ④ 传递函数仅与系统的结构和参数有关，与系统的输入无关；
- ⑤ 确定的传递函数有确定的零点、极点分布图。

(2) 求传递函数的方法

求传递函数的方法主要有三种：①根据传递函数定义；②利用结构图等效变换；③利用信号流程图。

(3) 典型环节的传递函数

- ① 比例环节 K ;
- ② 微分环节 s ;
- ③ 积分环节 $\frac{1}{s}$;
- ④ 惯性环节 $\frac{1}{Ts+1}$;
- ⑤ 一阶微分环节 $\tau s+1$;
- ⑥ 振荡环节 $\frac{1}{T^2 s^2 + 2\xi Ts + 1}$;
- ⑦ 二阶微分环节 $T^2 s^2 + 2\xi Ts + 1$;
- ⑧ 延迟环节 $e^{-\tau s}$.

2.1.4 系统动态结构图

系统动态结构图是将系统中的所有环节用方框图表示, 图中标明其传递函数, 并且按照在系统中各环节之间的联系, 将各方框图连接起来.

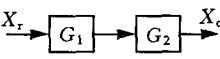
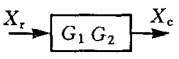
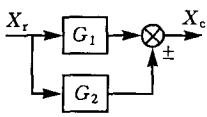
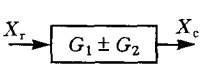
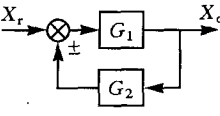
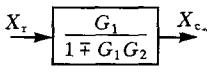
系统动态结构图的绘制步骤:

① 首先按照系统的结构和工作原理, 分解出各环节并写出其传递函数.

② 绘出各环节的动态结构图, 方框图中标明它的传递函数, 并以箭头和字母符号表明其输入量和输出量, 按照信号的传递方向把各方框图依次连接起来, 就构成了系统结构图.

利用结构图求系统的传递函数, 需要将复杂的结构图进行等效变换, 求其等效的结构图, 以简化系统传递函数的计算. 结构图的等效变换规则主要有以下几个方面: 环节串联, 环节并联, 反馈连接, 引出点、比较点移动. 具体变换见表 2.1.

表 2.1 结构图变换

	变 换 前	变 换 后
串 联		
并 联		
反 馈		
分支点前移	