

机械工程控制基础 学习指导与 习题详解

沈 越 铁维麟 编

补充拓广理论内容

机械工业出版社

机械工程控制基础学习 指导与习题详解

沈越 铁维麟 编



机械工业出版社

本书是根据杨叔子院士等编写的《机械工程控制基础》和朱骥北教授主编的《机械控制工程基础》而编写的学习指导与习题详解。其主要内容有系统的数学模型、瞬态响应及误差分析、频率特性分析、系统的稳定性、系统的综合与校正等。

通过对本书的学习,可以巩固学习过的理论知识,还可补充、拓广理论内容。可以更好地帮助读者掌握专业知识。

图书在版编目(CIP)数据

机械工程控制基础学习指导与习题详解/沈越,铁维麟编. —北京:机械工业出版社,1999.5

ISBN 7-111-07162-X

I. 机… II. ①沈… ②铁… III. 机械工程-控制系统-高等学校-教学参考资料 IV. TH

中国版本图书馆CIP数据核字(1999)第09684号

出版人:马九荣(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

责任编辑:朱 华 版式设计:张世奎 责任校对:李汝庚

封面设计:姚 毅 责任印制:路 琳

中国建筑工业出版社密云印刷厂印刷 新华书店北京发行所发行

1999年5月第1版第1次印刷

787mm×1092mm¹/₃₂·12.25印张·269千字

0 001—4 000册

定价:18.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换
本社购书热线电话(010) 68993821、68326677-2527

前 言

机械工程控制基础是一门理论性很强的技术基础课。在提倡素质教育的形势下，越来越多的专业都开设了这类课程。不仅自动控制、电气、机械、化工等工科专业需要，有些社会科学、管理等专业也十分重视。

习题课是这类课程的重要实践环节。通过习题演算，不仅可以巩固学过的理论知识，还可补充、拓广理论内容。为帮助教师搞好教学，培养学生的自学能力，免受“题海”之苦，作者编写了课程学习指导书，并自编了杨叔子院士等编著的《机械工程控制基础》和朱骥北教授主编的《机械控制工程基础》两本书的习题册。几年来，我院一直以自编习题册作为辅助教材，效果很好。希望出版后，能起到抛砖引玉的作用，对读者有所帮助。

本书的第一篇是学习指导，第二篇是与杨叔子主编的《机械工程控制基础》配套的习题详解，第三篇是与朱骥北主编的《机械控制工程基础》配套的习题详解。

编者水平有限，又仓促成篇，错误难免，恳请读者不吝指正。

编者

目 录

前 言

第一篇 学习指导

第一章 绪论	1
一、本章内容要点、基本要求及说明	1
二、本章重点	5
第二章 系统的数学模型	10
一、本章内容要点、基本要求及说明	10
二、本章重点及难点	19
三、例题分析	20
第三章 瞬态响应及误差分析	46
一、本章内容要点、基本要求及说明	46
二、本章重点及难点	61
三、例题分析	61
第四章 频率特性分析	88
一、本章内容要点、基本要求及说明	88
二、本章重点及难点	101
三、例题分析	102
第五章 系统的稳定性	118
一、本章内容要点、基本要求及说明	118
二、本章重点及难点	135
三、例题分析	135
第六章 系统的综合与校正	162

一、本章内容要点、基本要求及说明	162
二、本章重点及难点	181
三、例题分析	181
第二篇 习题详解 (上)	
第一章 绪论	193
第二章 传递函数	197
第三章 时间响应分析	211
第四章 频率特性分析	232
第五章 系统的稳定性	257
第六章 系统的性能分析与校正	273
第七章 系统辨识	291
第三篇 习题详解 (下)	
第一章 绪论	298
第二章 物理系统的数学模型及传递函数	301
第三章 瞬态响应及误差分析	314
第四章 频率特性分析	327
第五章 系统的稳定性	338
第六章 系统的综合与校正	347
附录 拉普拉斯变换	366
参考文献	383

第一篇 学 习 指 导

第一章 绪 论

一、本章内容要点、基本要求及说明

(一) 内容要点

1. 自动控制与自动控制系统

(1) 自动控制 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功能。

(2) 自动控制系统 能够实现自动控制任务的系统。

2. 自动控制系统的分类

按反馈情况,控制系统可分为以下两类。

(1) 开环控制系统 当系统的输出量对系统没有控制作用,即系统中输出端与输入端之间无反馈通道时,称开环控制系统。

(2) 闭环控制系统 当系统的输出量对系统有控制作用,即系统的输出与输入间存在着反馈通道时,称闭环控制系统。因此,反馈系统也就是闭环控制系统。

按系统功用,控制系统可分为以下三类。

(1) 自动调节系统 又称恒值控制系统。系统的输入量为一常值,或者随时间缓慢地变化,要求系统的输出量保持

为恒定的希望值。

(2) 随动系统 又称伺服跟踪系统。系统的输入量随时任意变化，系统的基本任务是控制输出量以要求的精度及时平稳地复现输入量。

(3) 过程控制系统 又称程序控制系统。系统输入量按既定规律变化，系统的控制过程按预定的程序进行。

按系统性能，控制系统可分为以下三类。

(1) 线性与非线性系统 可用线性微分方程或差分方程描述的系统，称为线性系统。如果微分方程或差分方程的系数为常数，则称为线性定常系统；否则为线性时变系统。用非线性方程描述的系统，称为非线性系统。

(2) 连续与离散系统 若输入量和输出量都是时间连续函数的系统，称为连续系统。在连续系统中，信号在全部时间上都是已知的。若系统中信号有一处或一处以上为离散时间函数，称为离散系统。在离散系统中，信号仅定义在离散时间上。

(3) 确定与不确定系统 系统的结构、参数和输入量都是确定的、已知的系统，称为确定系统。反之，当系统本身的结构或参数以及作用于该系统的信号有不确定性或模糊性时，则系统为不确定系统。现实的工程系统，多为不确定系统。

3. 反馈控制系统的基本组成

控制系统的控制分为人工控制与自动控制。从自动控制理论的角度，主要是研究闭环控制系统，也就是研究反馈控制理论与方法。反馈控制系统是完整而典型的自动控制系统，图 1-1-1 所示说明了典型反馈控制系统的组成图。一个系统的主反馈回路（或通道）只有一个。而局部反馈可能

有几个，图 1-1-1 中画出一个。各种功能不同的元件，从整体上构成一个系统来完成一定的任务。

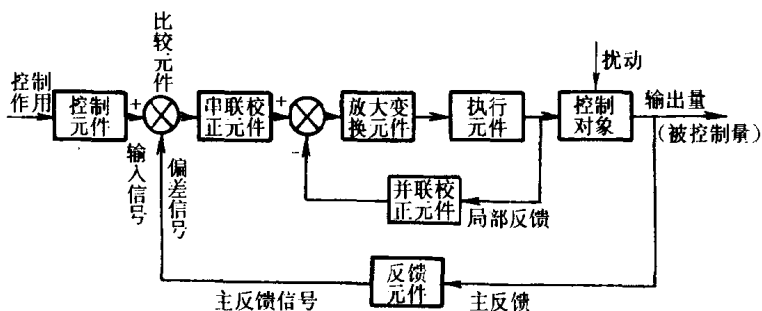


图 1-1-1 典型反馈控制系统的组成

4. 机械控制工程研究的对象

(1) 研究自动控制系统 用自动控制理论，包括经典控制理论和现代控制理论研究机电自动控制系统。经典控制理论，主要研究单输入、单输出系统。而现代控制理论以状态的概念，研究复杂的多输入、多输出系统及时变系统的最优控制和自适应控制。

本书内容限于经典控制理论。主要研究的内容有

1) 控制系统分析：就是对已知的系统，及其静态和动态性能（一般可概括为稳、准、快）进行分析，看它们是否满足要求，并提出改进措施。

2) 控制系统设计：也称为控制系统的综合。就是根据所要求系统的性能指标，来设计控制系统。

以上两个方面，都是需要首先建立系统的数学模型。

(2) 研究机械动力学系统 研究机械动力学系统，就是研究机械系统的动态特性，这是“机械控制工程”主要任务之一。

5. 本课程特点及学习方法

(1) 特点 本课程属于经典控制理论范畴，是一门技术基础课。

本课程较抽象、概括性强，而且涉及范围广，学习本课程要有良好的数学、力学、电学基础，还要有一定的机械工程方面的专业知识。

(2) 学习方法

1) 在学习某部分教材前，先翻阅大纲和本书“学习指导”部分中有关该部分的内容和要求，对该部分的基本要求、重点、难点有初步了解，以便阅读教材时做到心中有数。

2) 通过学习教材，正确地理解基本概念，对基本方法要完全掌握。

3) 对定义、性质、定理等的推导过程不必追求数学上的严密性，但结论要准确，物理概念要明晰，不要死背条文，要注重应用。

4) 重视作习题，认真仔细地完成教材中各章习题，通过作习题帮助掌握基本概念和基本方法。本书“习题详解”部分对每道习题给出了详细的分析及解答过程，可做参考。

5) 控制理论的书籍很多，要学会看参考书，以加深理解。

6) 在学习这门课程时，注意不断学会“控制论”中研究问题的观点和方法论，用系统和动态的观点研究问题、解决问题。

(二) 基本要求

1) 能从经常接触的实例中，明确自动控制的任务、自动控制的过程和原理。

2) 正确理解反馈控制的概念, 了解自动控制系统的分类。

3) 初步了解控制系统的基本组成以及各组成部分的功能、系统中各变量的名称和含义等。

4) 对本课程有一初步认识。

(三) 说明

对本章教材中为说明问题的举例及公式推导细节, 在初学时可能不十分体会, 但可通过后续章节的学习, 再加深理解。

二、本章重点

1) 自动控制与自动控制系统的含义。

2) 反馈及反馈控制的概念。

三、例题分析

例 1-1 函数记录仪是一种通用的自动记录仪, 它可以在直角坐标上自动描绘两个电学量的函数关系。同时, 记录仪还带有走纸机构, 用以描绘一个电学量对时间的函数关系。函数记录仪通常由衰减器、测量元件、放大元件、伺服电动机-测速机组、齿轮系及绳轮等组成, 采用负反馈控制原理工作, 如图 1-1-2 所示。试说明其工作原理, 并画出系统原理方框图。

解 函数记录仪系统的输入是待记录电压, 被控对象是记录笔, 其位移即为被控量。系统的任务是控制记录笔位移, 在记录纸上描绘出待记录的电压曲线。

在图 1-1-2 中, 测量元件是由电位器 R_Q 和 R_M 组成的桥式测量电路, 记录笔就固定在电位器 R_M 的滑臂上。因此, 测量电路的输出电压 u_p 与记录笔位移成正比。当有慢变的输入电压 u_r 时, 在放大元件输入口得到偏差电压 $\Delta u =$

$u_r - u_p$ ，经放大后驱动伺服电动机，并通过齿轮系及绳轮带动记录笔移动，同时使偏差电压减小。当偏差电压 $\Delta u = 0$ 时，电动机停止转动，记录笔也静止不动。此时， $u_p = u_r$ ，表明记录笔位移与输入电压相对应。如果输入电压随时间连续变化，记录笔便描绘出随时间连续变化的相应曲线。函数记录仪的方框图见图 1-1-3。图 1-1-3 中测速发电机反馈与电动机速度成正比的电压，用以增加阻尼，改善系统性能。

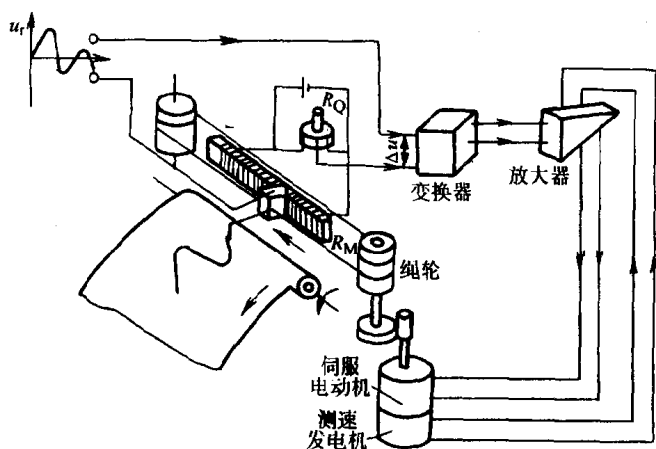


图 1-1-2 函数记录仪原理示意图

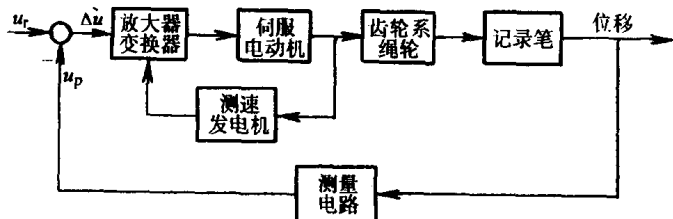


图 1-1-3 函数记录仪方框图

例 1-2 液体水位高度控制系统，如图 1-1-4 所示，试说明系统的工作原理，并画出系统的原理的方框图。

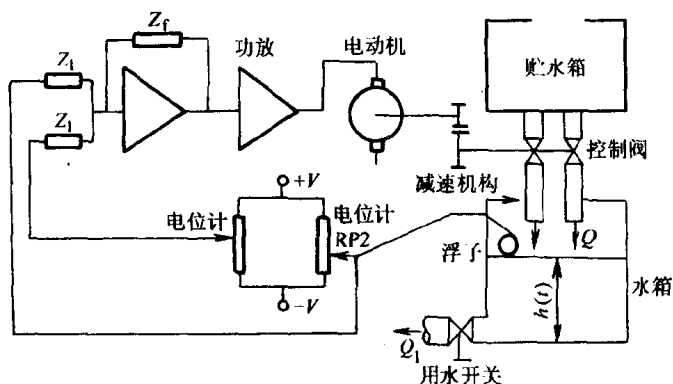


图 1-1-4 液体水位高度控制系统

解 系统的基本任务是保持水箱中水位高度等于期望的高度。显然，系统的被控对象是水箱，被控量是水位高度 h 。影响水箱中水位高度的扰动量是用水量 Q_1 的变动。系统的控制量是进水阀门的开度，它的大小由直流电动机控制，所以，可以认为电动机是控制的执行机构，而电动机由功率放大器驱动，它可看作是信号的放大变换装置。图 1-1-4 中的浮子及电位计 RP2 是水位高度的测量装置，实际水位高度由电位计 RP2 以电压输出。电位计是控制信号发生器的，它的输出电压是控制指令信号，上述两个电位计的信号以相反的符号送入前级的运算放大器进行综合，产生误差信号。同时依 Z_f 及 Z_1 、 Z_2 的特性对差值信号进行处理变换，故该放大器可以看作是校正装置（或控制器）。

与例 1-1 类似，按着信号的传递顺序，可画出该系统原理方框图，如图 1-1-5 所示。

系统的控制过程是这样的，当用水流量 Q_1 一定时，如

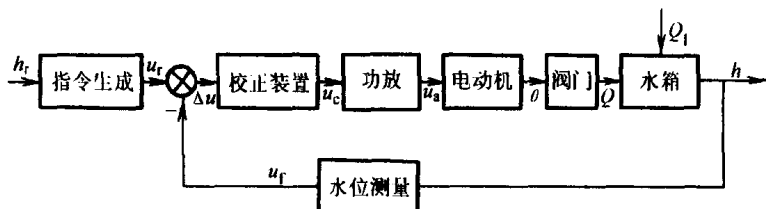


图 1-1-5 水位控制系统原理方框图

期望水位保持一定高度，此时可以由电位计设置一定的控制指令信号。如果此时水箱的实际高度与要求不符（譬如低于要求的高度），电位计测得的电压将低于控制电压，在综合放大器里产生正的误差信号，并进而通过功放驱动电动机使控制阀门开度增大，从而进水流量 Q 增大，水位高度便逐渐升高。当实际高度等于期望高度时，电位计及 RP2 的输出电压相等，误差为零，电动机停转，控制阀门保持一定开度，进水与出水量相等，从而维持给定的水位高度。当用水量 Q_1 有变化时，由于进水量 Q 不变，水位高度便随之产生变化，电位计 RP2 测得的电压亦变化，从而产生一定的误差信号并通过功放驱动电动机，调节控制阀门的开度，增大或减小流量，以保持水位高度不变。

例 1-3 设热水电加热器如图 1-1-6 所示。为了保持希望的温度，由温控开关接通或断开电加热器的电源。在使用热水时，水箱中流出热水并补充冷水。试说明系统工作原理并画出系统原理方框图。

解 在热水电加热器系统中，输入量为预定的希望温度（给定值），设为 $T_{\text{希}} (^{\circ}\text{C})$ ；输出量为水箱的实际水温，设为 $T (^{\circ}\text{C})$ ；控制对象为水箱；扰动信号主要是由于放出热水并注入冷水而产生的降温作用。

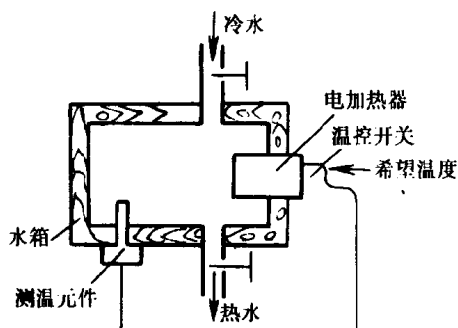


图 1-1-6 电加热器系统

当 $T = T_{\text{希}}$ 时，电加热器不工作，此时水箱中水温保持在希望温度上。当使用热水时，由于扰动作用使实际水温下降，测温元件感受 $T < T_{\text{希}}$ 的变化，并把这一温度变化转换为电信号使温控开关工作。温控开关接通电源，使水箱中水升温，直到 $T = T_{\text{希}}$ 为止。系统原理方框图如图 1-1-7 所示。

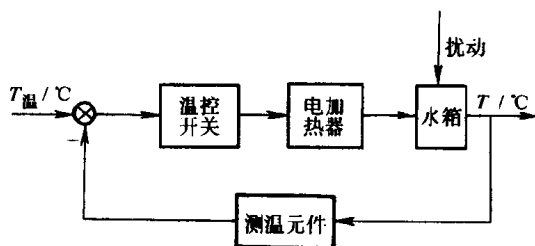


图 1-1-7 电加热器系统原理方框图

第二章 系统的数学模型

一、本章内容要点、基本要求及说明

(一) 内容要点

在控制系统的分析和设计中，建立合理的数学模型至关重要，它直接关系到控制系统能否实现给定的任务。所谓合理的数学模型，是指所建立的数学模型既准确，又简化。

1. 数学模型

(1) 数学模型 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（差）分方程、传递函数、结构图和信号流图、频率特性以及状态空间表达式。本章只研究微分方程、传递函数、结构图和信号流图等几种数学模型；频率特性是在频域中研究线性控制系统的数学模型，将在第四章介绍。状态空间表达式，是应用现代控制理论研究控制系统，特别是研究多输入、多输出系统特性的数学模型，本书不作介绍。

(2) 控制系统数学模型的建立方法 其方法有解析法和实验法两类。用解析法确定控制系统的数学模型时，要求依据系统及元件各变量之间所遵循的物理、化学定律，列出各变量间的数学关系式。用实验法确定控制系统的数学模型时，要求对系统施加典型测试信号（脉冲、阶跃或正弦信号），记录系统的时间响应曲线或频率响应曲线，从而获得系统的传递函数或频率特性。本章仅讨论解析法，关于实验法将在第四章介绍。

(3) 建立系统数学模型的主要目的 其目的是为了分析系统的性能。由数学模型求取系统性能指标的主要途径,如图 1-2-1 所示。由图 1-2-1 可知,傅氏变换、拉氏变换是分析和设计线性定常连续控制系统的主要数学工具。

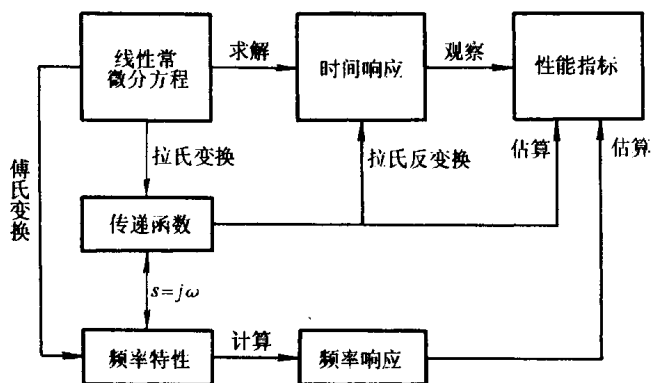


图 1-2-1 求取性能指标的主要途径

(4) 非线性系统的线性化 如果描述系统的数学模型是线性微分方程,则称该系统为线性系统;若方程中的系数为常数,则称其为线性定常系统。线性系统的最重要特性是可以应用叠加原理。如果描述系统的数学模型是非线性微分方程,则相应系统称为非线性系统,其特性是不能应用叠加原理。在分析和设计自控系统时,除非系统含有强非线性或参数随时间变化较大,一般应尽可能采用线性定常数学模型描述控制系统。

(5) 本课程涉及系统数学模型的形式 在时间域中用线性常微分方程描述;在复域中或频域中用传递函数或频率特性描述。

2. 线性系统微分方程

(1) 系统微分方程建立 系统微分方程是描述控制系统