

# 机械工程控制基础学习与考试指导

熊良才 吴波 编



华中科技大学出版社



华中科技大学远程与继续教育学院资源包系列

# 机械程控制基础学习与考试指导



熊良才 吴波 编

华中科技大学出版社  
华中科技大学电子音像出版社  
中国·武汉

·

机械工程控制基础学习与考试指导

熊良才 吴波 编

---

文本责任编辑：姚幸

封面设计：秦茹

文本责任校对：汪世红

责任监印：徐露

---

光盘责任编辑：陈建安

光盘技术测试：刘丽

---

出版发行：华中科技大学电子音像出版社

策 划：武汉华中科技教育传播公司

武昌喻家山

邮编：430074

电话：027-87545504

---

录 排：武汉市正风图文照排中心

印 制：武汉市轩辕印务有限公司

复 制：安阳飞音电脑数码制作有限公司

定 价：22.00 元（1CD，含配套文本）

（出版物若有质量问题，请向出版社调换）

---

# 前 言

《机械工程控制基础》作为一门多学科交叉的新课程，对于机械学科的学生来说，学习起来有一定的难度。因此，根据在教学过程中积累的一些素材，并参考有关习题解答材料，编写了这本学习与考试指导。为帮助读者正确理解和应用机械 engineering 控制基础课程的基本理论与基本方法，在每章的前半部分对该章的主要内容进行了简要的说明，接着，提出了学习该章的基本要求、重点和难点，然后，通过若干与教材中不同类型的例题扩充了教材的内容，以尽量扩展读者的视野。

需要说明的是，在编写的过程中，由于篇幅的限制，基本上只列举了教材中尚未出现的例题，而对教材中的例题，读者应该引起足够的重视。也就是说，此处的例题只是对教材内容的一个扩充，并不覆盖教材的全部。另外，本书在内容的安排、问题的描述上，尽量与教材保持一致，但并没有苛求完全相同，而对教材中的有些问题适当地予以扩充，读者在使用时，可以根据自己的实际情况进行取舍。

在本书的编写过程中，得到了华中科技大学机械科学与工程学院原信息与智能技术研究所的支持与帮助，在此表示感谢。书中参考或引用了书后所列资料的素材，对这些作者特此致谢。

由于编者经验不足，水平有限，时间仓促，书中内容和选题及解答等方面存在不少错误和不妥之处，恳请广大读者批评指正，我们将不胜感激。

编 者

2008 年 8 月于华中科技大学

# 目 录

|                                |      |
|--------------------------------|------|
| 第 1 章 绪 论 .....                | (1)  |
| 1.1 机械工程控制论的研究对象与任务 .....      | (1)  |
| 1.2 系统及其模型 .....               | (2)  |
| 1.3 反馈 .....                   | (3)  |
| 1.4 系统的分类及对控制系统的基本要求 .....     | (4)  |
| 1.5 本章的基本要求、重点与难点 .....        | (8)  |
| 1.6 例题 .....                   | (8)  |
| 第 2 章 系统的数学模型 .....            | (13) |
| 2.1 系统的微分方程 .....              | (13) |
| 2.2 系统的传递函数 .....              | (15) |
| 2.3 系统的传递函数方框图及其简化 .....       | (18) |
| 2.4 反馈控制系统的传递函数 .....          | (21) |
| 2.5 本章的基本要求、重点和难点 .....        | (22) |
| 2.6 例题 .....                   | (23) |
| 第 3 章 时间响应分析 .....             | (31) |
| 3.1 时间响应及其组成 .....             | (31) |
| 3.2 典型输入信号 .....               | (33) |
| 3.3 一阶系统的时间响应 .....            | (33) |
| 3.4 二阶系统的时间响应 .....            | (35) |
| 3.5 高阶系统的响应分析 .....            | (40) |
| 3.6 系统误差分析与计算 .....            | (41) |
| 3.7 $\delta$ 函数在时间响应中的作用 ..... | (45) |
| 3.8 用 MATLAB 进行时间响应分析 .....    | (46) |
| 3.9 本章的基本要求、重点和难点 .....        | (46) |
| 3.10 例题 .....                  | (48) |

|                               |       |
|-------------------------------|-------|
| 第 4 章 频率特性分析 .....            | (55)  |
| 4.1 频率特性概述 .....              | (55)  |
| 4.2 频率特性的图示法 .....            | (58)  |
| 4.3 闭环频率特性 .....              | (65)  |
| 4.4 频率特性的特征量 .....            | (66)  |
| 4.5 最小相位系统和非最小相位系统 .....      | (67)  |
| 4.6 本章的基本要求、重点和难点 .....       | (68)  |
| 4.7 例题 .....                  | (69)  |
| 第 5 章 系统的稳定性 .....            | (74)  |
| 5.1 系统稳定的初步概念 .....           | (74)  |
| 5.2 Routh (劳斯) 稳定判据 .....     | (74)  |
| 5.3 Nyquist (乃奎斯特) 稳定判据 ..... | (76)  |
| 5.4 Bode (伯德) 稳定判据 .....      | (80)  |
| 5.5 系统的相对稳定性 .....            | (82)  |
| 5.6 本章的基本要求、重点和难点 .....       | (83)  |
| 5.7 例题 .....                  | (84)  |
| 第 6 章 系统的性能与校正 .....          | (91)  |
| 6.1 系统的性能指标 .....             | (91)  |
| 6.2 系统的校正 .....               | (92)  |
| 6.3 无源校正 .....                | (92)  |
| 6.4 PID 校正 .....              | (103) |
| 6.5 反馈校正 .....                | (106) |
| 6.6 顺馈校正 .....                | (106) |
| 6.7 本章的基本要求、重点和难点 .....       | (107) |
| 6.8 例题 .....                  | (107) |
| 附录 模拟试题及参考答案 .....            | (114) |

# 第 1 章

## 绪 论

### 1.1 机械工程控制论的研究对象与任务

#### 1.1.1 系统及广义系统

系统是指由相互联系、相互作用的若干部分构成的且具有一定运动规律的一个有机整体。一个较大的系统之内可能包括若干个较小的子系统。不仅系统的各部分之间存在非常紧密的联系，而且，系统与外界之间也存在一定的联系。系统与外界之间的联系如图 1.1.1 所示，其中，输入是指外界对系统的作用，它包括给定的输入和干扰；输出是指系统对外界的作用。

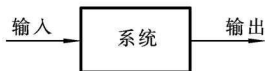


图 1.1.1 系统及其与外界的联系

系统可大可小，可繁可简，甚至可“实”可“虚”，完全由研究的需要而定，通常将它们统称为广义系统。

#### 1.1.2 机械工程控制论的研究对象

机械工程控制论实质上是研究机械工程技术中广义系统的动力学问题。具体地说，它研究的是机械工程广义系统在一定的外界条件（即输入或激励、干扰）作用下，从系统一定的初始状态出发，所经历的由其内部的固有特性（即由系统的结构与参数所决定的特性）所决定的整个动态历程；研究这一系统及其输入、输出三者之间的动态关系。

### 1.1.3 机械工程控制论的研究任务

从系统、输入、输出三者之间的关系出发,根据已知条件与求解问题的不同,机械工程控制论的任务可以分为以下五种:

- (1) 已知系统和输入,求系统的输出,属系统分析范畴;
- (2) 已知系统和系统的理想输出,设计输入,属最优控制范畴;
- (3) 已知输入和理想输出,设计系统,属最优设计范畴;
- (4) 输出已知,确定系统,以识别输入或输入中的有关信息,属滤波与预测范畴;
- (5) 已知系统的输入和输出,求系统的结构与参数,属系统辨识范畴。

## 1.2 系统及其模型

### 1.2.1 系统的特性

系统具有如下特性:

- (1) 系统的性能不仅与系统的元素有关,而且还与系统的结构有关;
- (2) 系统的内容比组成系统各元素的内容要丰富得多;
- (3) 系统往往表现出在时域、频域或空域等域内的动态特性。

### 1.2.2 机械系统

以实现一定的机械运动、输出一定的机械能,以及承受一定的机械载荷为目的的系统,称为机械系统。对于机械系统而言,其输入和输出也分别称为“激励”和“响应”。

### 1.2.3 系统模型

系统的模型包括实物模型、物理模型、数学模型等。而数学模型又包括静态模型和动态模型,动态模型在一定的条件下可以

转换为静态模型。在控制理论或控制工程中，一般关心的是系统的动态特性，因此，往往需要采用动态数学模型，即，一般所指的系统的数学模型指的是描述系统动态特性的数学表达式。

## 1.3 反馈

### 1.3.1 系统方框图及其组成

系统方框图由许多对信号（量）进行单向传递的元件方框和一些连线组成，表征了系统各元件之间及系统与外界之间进行信息交换的过程。它包括以下三个基本的单元。

(1) 引出点（分支点） 表示信号的引出或信号的分支，箭头表示信号的传递方向，线上标记信号的名称，如图 1.3.1（a）所示。

(2) 比较点（相加点） 表示两个或两个以上的信号进行相加或相减运算。“+”表示信号相加，“-”表示信号相减，如图 1.3.1（b）所示。

(3) 元件方框 方框中写入元部件的名称，进入箭头表示其输入信号；引出箭头表示其输出信号，如图 1.3.1（c）所示。

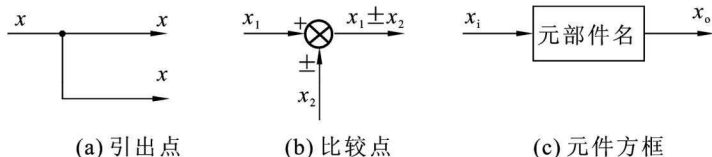


图 1.3.1 系统方框图的基本组成单元

### 1.3.2 信息及信息反馈的概念

(1) 信息 一切能表达一定意义的信号、符号和密码等统称为信息。信息也可定义为事物运动的状态或方式。

(2) 反馈（信息反馈） 将系统的输出以一定的方式返回到系统的输入端并共同作用于系统的过程，称为反馈或信息反馈。

### 1.3.3 内反馈和外反馈

(1) 内反馈 在系统或过程中存在的各种自然形成的反馈称为内反馈，它是系统内部各个元素之间相互耦合的结果。内反馈是机械系统存在动态特性的根本原因，纷繁复杂的内反馈的存在，使得机械系统变得异常复杂。读者对机械系统中普遍存在的内反馈应引起足够的重视。

(2) 外反馈 在自动控制系统中，为达到某种控制目的而人为加入的反馈称为外反馈。

## 1.4 系统的分类及对控制系统的基本要求

### 1.4.1 控制系统的基本概念

(1) 控制 通过对一定对象实施一定的操作，以使其按照预定的规律运动或变化的过程。

(2) 被控对象 在控制理论和控制技术中，运动规律或状态需要控制的装置或元件称为被控对象（控制对象）。被控对象可大可小，甚至可“实”可“虚”。

(3) 控制器 在控制系统中，除被控对象以外的所有装置统称为控制器。

(4) 给定元件 控制系统中用于产生给定信号（输入信号、希望值）的元件。

(5) 反馈元件（测量元件） 控制系统中用于测量被控量（输出量），产生反馈信号的元件。反馈信号与输出量之间往往存在确定的函数关系。

(6) 比较元件 控制系统中用来比较输出信号与反馈信号，并求取偏差信号的元件。有时比较元件并非为物理元件，可能通过物理定律或其他定律实现。

(7) 放大元件 控制系统中对输入信号进行幅值放大或功率

放大的元件。

(8) 执行元件 控制系统中直接对被控对象进行操作的元件。

(9) 被控制量 表征被控对象运动规律或状态的物理量，实质上是系统的输出（输出量）。

(10) 希望值 希望的被控对象运动规律或状态的物理量（或称输入量、系统输入）。

(11) 偏差 系统的输入量与反馈量之差或之和（即比较环节的输出值）。

(12) 控制量 被控对象的输入量。由于控制量往往是偏差的某种函数，因此，也可将偏差看成控制量。

(13) 扰动量（干扰） 指除给定量以外，所有使得被控制量偏离给定值的因素。扰动量包括因系统外部因素发生变化而引起的外扰动量和因系统内部因素所引起的内扰动量。

(14) 人工控制 在人的直接参与下，使被控对象的被控制量按预定的规律运动或变化的控制方式。

(15) 自动控制 在无人直接参与的情况下，利用一组装置使被控对象的被控制量按预定的规律运动或变化的控制方式。

(16) 自动控制系统 被控对象和参与实现其被控制量自动控制的装置或元部件的组合。

### 1.4.2 对广义系统按反馈的情况进行分类

(1) 开环系统 当一个系统以所需的方框图表示而没有反馈回路时，称之为开环系统。

开环控制系统一般由给定元件、放大元件、执行元件、被控对象等单元组成，其方框图可表示为如图 1.4.1 所示的形式。



图 1.4.1 开环控制系统方框图

(2) 闭环系统 当一个系统以所需的方框图表示而存在反馈回路时,称之为闭环系统。闭环控制系统一般由给定元件、比较元件、放大元件、执行元件、被控对象、测量元件等单元组成,其方框图可表示如图 1.4.2 所示的形式。

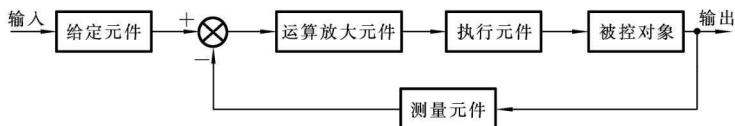


图 1.4.2 闭环控制系统方框图

若将控制系统按被控对象和控制器两部分进行划分,则开环系统和闭环系统还可以分别表示为如图 1.4.3 (a)、(b) 所示的形式。



图 1.4.3 系统方框图的简化形式

一个闭环控制系统的工作过程大体上可分为以下几个步骤。

**步骤 1** 测量被控制量的实际值。

**步骤 2** 将实际值与给定值进行比较, 求出偏差的大小与方向。

**步骤 3** 根据偏差的大小与方向进行控制, 以纠正偏差。

简单地讲, 闭环控制系统的工作过程就是一个“检测偏差并用以纠正偏差”的过程。因此, 闭环控制系统的控制精度比开环控制系统的精度要高。

按反馈的极性不同, 可以将反馈分为正反馈和负反馈。其中, 凡能使系统的偏差的绝对值增大的反馈称为正反馈; 能使系统的偏差的绝对值减小的反馈称为负反馈。

### 1.4.3 对自动控制系统按输出的变化规律进行分类

(1) 自动调节系统 在外界的作用下, 系统的输出仍能基本保持为常量的系统, 也称为镇定系统或恒值系统。

(2) 随动系统 在外界的作用下, 系统的输出能对应于输入, 在广阔范围内按任意规律变化的系统。

(3) 程序控制系统 在外界的作用下, 系统的输出按预定程序变化的系统。

另外, 广义系统还可根据是否满足叠加性而分为线性系统和非线性系统; 根据系统中信号或变量是否全是连续量而分为连续系统和离散系统(或模拟系统和数字系统); 根据系统中信号或变量是否全是确定值而分为确定性系统和随机系统; 根据系统的功能可分为温度控制系统、速度控制系统等。

### 1.4.4 对控制系统的基本要求

(1) 系统的稳定性 稳定性是指动态过程的振荡倾向和系统能够恢复平衡状态的能力。对稳定性的要求是系统工作的首要条件。

(2) 系统响应的快速性 快速性是指当系统输出量与给定的输入量之间产生偏差时, 消除这种偏差的快速程度。

(3) 系统响应的准确性 准确性是指在调整过程结束后输出量与给定的输入量之间的偏差, 亦称为静态精度。

对同一控制系统来说, 其稳定性、快速性和准确性往往是相互制约的。例如, 改善系统稳定性, 可能会导致准确性和(或)快速性的降低。

### 1.4.5 自动控制系统方框图的绘制步骤

**步骤 1** 分析控制系统的工作原理, 找出被控对象。

**步骤 2** 分清系统的输入量、输出量。

**步骤 3** 按照控制系统各环节的定义, 找出相应的各个环节。

**步骤 4** 按信息流动的方向,将各个环节用元件方框和连线连接起来。

## 1.5 本章的基本要求、重点与难点

### 1.5.1 基本要求

(1) 了解机械工程控制论的基本含义和研究对象,学习本课程的目的和任务,掌握广义系统动力学方程的含义。

(2) 了解系统、广义系统的概念,了解系统的基本特性,了解系统动态模型和静态模型之间的关系。

(3) 掌握反馈的含义,学会分析动态系统内信息流动的过程,掌握系统或过程中存在的反馈。

(4) 了解广义系统的几种分类方法,掌握闭环控制系统的工作原理、组成,学会绘制控制系统的方框图。

(5) 了解控制系统中基本名词和基本变量。

(6) 了解正反馈、负反馈、内反馈、外反馈的概念。

(7) 了解对控制系统的基本要求。

### 1.5.2 本章重点

(1) 学会用系统论、信息论的观点分析广义系统的动态特性、信息流,理解信息反馈的含义及其作用。

(2) 掌握控制系统的基本概念、基本变量、基本组成和工作原理,绘制控制系统方框图。

### 15.3 本章难点

广义系统的信息反馈及控制系统方框图的绘制。

## 1.6 例题

**例 1.1** 设电热水器如图 1.6.1 所示。为了保持希望的温度,

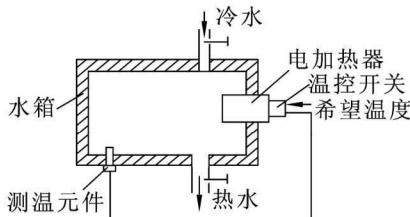


图1.6.1 电热水器示意图

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。试说明该系统工作原理并画出系统的方框图。

**解** 在电热水器系统中，水箱内的水温需要控制，即水箱为被控对象。水的实际温度是被控制量，或称为系统的输出量，设为  $T_o(^{\circ}\text{C})$ ；输入量为用户希望的温度（给定值），设为  $T_i(^{\circ}\text{C})$ ；由于放出热水并注入冷水或水箱散热等原因，使水箱内水温下降成为该系统的主要干扰。

当  $T_o(^{\circ}\text{C}) = T_i(^{\circ}\text{C})$  时，水箱的实际水温经测温元件检测，并将实际水温转化成相应的电信号，与温控开关预先设定的信号进行比较而得到的偏差为 0，此时电加热器不工作，水箱中的水温保持在希望的温度。当使用热水并注入冷水时，水温下降，此时  $T_o(^{\circ}\text{C}) < T_i(^{\circ}\text{C})$ ，则偏差不为 0，温控开关工作，于是电源接通，电加热器开始对水箱内的水进行加热，使水温上升，直到  $T_o(^{\circ}\text{C}) = T_i(^{\circ}\text{C})$  时为止。系统控制方框图如图 1.6.2 所示。

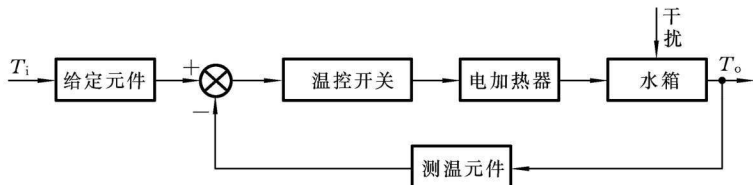


图 1.6.2 电热水器方框图

**例 1.2** 图 1.6.3 所示为一恒温箱的温度控制系统。试分析这

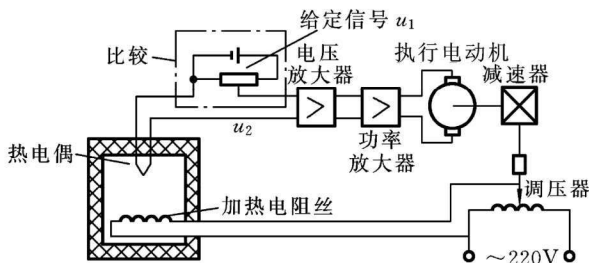


图 1.6.3 恒温箱温度控制系统示意图

个系统的自动调温过程，并说明这个系统的输出量、输入量、控制量和扰动量各是什么。

**解** 在该系统中,恒温箱内的温度需要被控制,因此,恒温箱为被控制对象。恒温箱的实际温度为被控制量(系统的输出量),设为  $T_o(^{\circ}\text{C})$ ;希望的恒温箱的温度为系统的输入量(给定值),设为  $T_i(^{\circ}\text{C})$ ;加热电阻丝的输出功率为控制量;恒温室散热量等为系统的扰动量。

恒温箱的温度是由给定的电压信号  $u_1$  和热电偶输出的电压信号  $u_2$  之间的偏差  $(u_1 - u_2)$  控制的。当  $T_o(^{\circ}\text{C}) = T_i(^{\circ}\text{C})$  时,  $u_1 - u_2 = 0$ , 即偏差为 0, 此时系统不工作, 恒温箱的温度保持在希望的温度上。当外界因素引起箱内温度变化时, 偏差信号  $u_1 - u_2 \neq 0$ , 偏差经电压和功率放大后, 使电动机的转速和转向发生改变, 并通过传动装置拖动调压器的动触头。当温度偏高时, 动触头向着减少电流的方向移动, 反之加大电流, 直到温度达到给定值为止。系统控制方框图如图 1.6.4 所示。

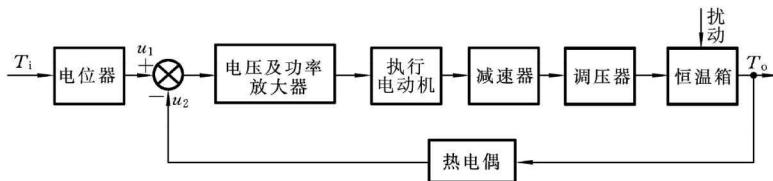


图 1.6.4 恒温箱温度控制系统方框图

**例 1.3** 图 1.6.5 所示为函数记录仪的示意图, 它通过记录笔记录缓变电压信号  $u_i$  的波形。试说明其工作原理, 并绘制其控制方框图。

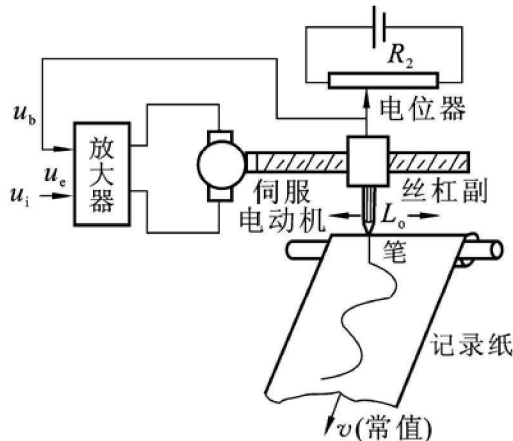


图 1.6.5 函数记录仪示意图

**解** 为了记录电压信号, 记录笔的位移需要进行控制, 因此, 记录笔为控制对象。记录笔的实际位移  $L_o$  为输出, 与电压信号  $u_i$  对应的理想位移  $L_i = Ku_i$  为输入。通过设定比例系数  $1/K$ , 将输入信号  $L_i$  与需要记录的电压  $u_i$  对应起来。记录笔的实际位移  $L_o$  通过带动电位器  $R_2$  的滑块, 对桥式电路输出电压  $u_b$  进行测量, 于是, 在放大器两端形成偏差电压信号  $u_e = u_i - u_b$ , 利用  $u_e$  的大小和正负对记录笔的位置进行控制。当  $u_i > u_b$  时, 偏差  $u_e$  为正, 该信号经放大, 驱动电动机, 带动丝杆副, 进而使记录笔及滑块正向移动, 此时偏差  $u_e$  逐渐减小, 直至  $u_e$  为 0; 反之, 当  $u_i < u_b$  时, 偏差  $u_e$  为负, 记录笔及滑块负向移动, 直至  $u_e$  为 0。这样, 再配合匀速走纸机构, 就能在纸上记录出电压信号  $u_i$  的波形了。其控制方框图如图 1.6.6 所示。