

# 机械控制工程基础

韦子枝 韩立强 主编

兵器工业出版社

# 机械控制工程基础

韦子枝 韩立强 主编

兵器工业出版社

(京)新登字 049 号

内 容 简 介

《机械控制工程基础》内容包括:机械工程控制的基本概念、系统的数学模型、时域分析法、频率特性分析和系统的校正。

本书可供机械工程类各专业,特别是机械电子工程专业的大学生作为教材,也可供有关教师与科技人员参考。

**机械控制工程基础**

韦子枝 韩立强 主编

责任编辑 周延民

兵器工业出版社 出版发行

(北京市海淀区车道沟 10 号)

各地新华书店经销

梅河口市美术印刷厂印装

\*

开本:787×1092 1/32 印张:8.5 字数:220 千字

1993 年 8 月第 1 版 1993 年 8 月第 1 次印刷

印数:1~2150 定价:8.90 元

ISBN7-80038-710-0/TB·25

# 前 言

随着工业生产科学技术的发展,自动控制系统已经普遍出现在人类生活、生产和探索新技术的各个领域中,控制理论就是专门研究有关自动控制系统中的基本概念、基本原理和基本方法的一门科学,所以将控制理论应用于机械工程的重要性日益明显,这就导致“机械控制”这门学科的产生和发展。

本书作为一门技术基础课的教材,是机械工程专业的重要理论基础之一,从自动控制的三个基本问题——系统的模型、系统的分析和系统的控制出发,着重阐述经典控制理论中的基本概念、基本理论和基本方法,不盲目追求体系的完整性,以避免内容庞杂,篇幅过大。

全书共分五章,其中第一章概论由赵凤桐编写;第二章系统的数学模型、第五章线性定常系统的校正由韦子枝编写;第三章时域分析法由赵仲举编写;第四章频率特性分析由韩立强编写;第四章中频率特性的实验测定法部分内容及附录由王瑾编写。全书由韦子枝、韩立强统编与定稿。

本书承蒙安承业副教授认真审阅,提出了许多中肯意见,在此深表谢意。

由于编者水平有限,书中不妥甚至错误在所难免,切望读者不吝指教。

编者

1993. 4

# 目 录

## 前 言

第一章 概 论 .....	(1)
§ 1-1 控制系统的工作原理及其组成 .....	(1)
一、控制系统的工作原理 .....	(1)
二、反馈 .....	(6)
三、系统的分类 .....	(10)
四、控制系统的组成 .....	(12)
§ 1-2 评价控制系统的基本指标 .....	(14)
一、系统的稳定性 .....	(14)
二、响应的快速性 .....	(14)
三、响应的准确性 .....	(15)
§ 1-3 本课程的学习方法 .....	(16)
习 题 .....	(17)
第二章 系统的数学模型 .....	(18)
§ 2-1 线性系统的微分方程 .....	(18)
§ 2-2 传递函数 .....	(24)
一、传递函数概念 .....	(24)
二、典型环节的传递函数 .....	(26)
§ 2-3 系统结构图及其传递函数 .....	(36)
一、系统结构图基本单元及其图法 .....	(37)
二、结构图的简化 .....	(39)
三、系统闭环传递函数及开环传递函数 .....	(41)
§ 2-4 系统的信号流图 .....	(45)
一、信号流图画法 .....	(45)
二、梅森增益公式 .....	(46)

§ 2-5	小 结	(49)
§ 2-6	示 例	(49)
	习 题	(57)
第三章	时域分析法	(62)
§ 3-1	典型输入信号及时间响应	(62)
	一、典型输入信号	(62)
	二、系统时间响应	(63)
§ 3-2	低阶系统动态响应分析	(64)
	一、一阶系统动态响应	(64)
	二、二阶系统动态响应	(68)
§ 3-3	任意输入下系统动态响应分析	(85)
§ 3-4	高阶系统动态响应分析	(88)
	一、高阶系统的阶跃响应	(88)
	二、高阶系统的近似分析方法	(90)
§ 3-5	线性系统稳定性分析	(93)
	一、稳定性概念及其充分必要条件	(93)
	二、劳斯(Routh)稳定判据	(95)
	三、系统开环增益、零、极点对系统稳定性的影响	(99)
§ 3-6	系统稳态误差分析	(105)
	一、稳态误差概念及系统类型	(105)
	二、给定作用下稳态误差分析	(109)
	三、扰动作用下的稳态误差	(116)
	四、改善稳态误差的一般方法	(120)
§ 3-7	小结及示例	(124)
	习 题	(131)
第四章	频率特性分析	(140)
§ 4-1	频率特性的基本概念	(141)
	一、简谐输入下的稳态响应	(141)

二、频率特性的表达形式 .....	(142)
三、频率特性的求取 .....	(143)
四、频率特性的图示方法 .....	(146)
§ 4-2 典型环节的频率特性 .....	(150)
一、比例环节 .....	(150)
二、积分环节 .....	(151)
三、微分环节 .....	(153)
四、惯性环节 .....	(154)
五、一阶微分环节 .....	(158)
六、振荡环节 .....	(159)
七、延时环节 .....	(164)
§ 4-3 开环系统的频率特性绘制方法 .....	(165)
一、开环系统的极坐标图 .....	(165)
二、开环系统的对数坐标图 .....	(171)
§ 4-4 奈奎斯特稳定判据 .....	(175)
一、辅助函数的频率特性 .....	(175)
二、奈氏判据 .....	(178)
三、奈氏判据应用举例 .....	(181)
§ 4-5 系统的相对稳定性 .....	(185)
一、相位裕度和幅值裕度 .....	(186)
二、应用举例 .....	(188)
§ 4-6 闭环频率特性 .....	(189)
一、等 $M$ 圆图和等 $N$ 圆图 .....	(189)
二、闭环频率特性曲线的绘制 .....	(192)
§ 4-7 频域指标与时域指标的关系 .....	(194)
一、频域指标与二阶系统过渡过程指标 .....	(194)
二、频率特性与稳态误差 .....	(198)
三、Bode 图形状对系统性能指标的影响 .....	(199)
§ 4-8 频率特性实验测定法简介 .....	(200)

一、概述 .....	(200)
二、最小相位系统和非最小相位系统 .....	(202)
三、由对数坐标图求系统的传递函数 .....	(204)
§ 4-9 小结 .....	(207)
习    题 .....	(208)
第五章 线性定常系统的校正 .....	(214)
§ 5-1 控制系统校正概念、方式和方法 .....	(214)
§ 5-2 常用校正装置及其特性 .....	(217)
一、相位超前校正装置 .....	(218)
二、相位滞后校正装置 .....	(220)
三、相位滞后-超前校正装置 .....	(221)
§ 5-3 输出反馈系统时对数频率特性法校正 .....	(224)
一、对数频率法串联校正的基本原理 .....	(225)
二、输出反馈系统的并联校正 .....	(235)
§ 5-4 小    结 .....	(237)
§ 5-5 示    例 .....	(238)
习    题 .....	(246)
附录 拉普拉斯变换 .....	(247)
一、拉氏变换的定义 .....	(247)
二、常用典型信号的拉氏变换 .....	(248)
三、拉氏变换的基本定理 .....	(251)
四、拉普拉斯反变换 .....	(256)
附表 Laplace 变换简表 .....	(259)
主要参考文献 .....	(261)



# 第一章 概 论

机械控制工程基础主要讲述自动化技术的基本原理、基础理论和方法。

在我国国民经济发展的进程中，机械工业担负着为国民经济各部门提供高质的、先进的成套技术装备的重要任务。机械工业为发展基础和先进的科学技术提供各种各样的技术装置，而先进的科学技术的迅速发展又不断地促进机械工业面貌的改变，其发展明确的动向就是越来越深入而广泛地引入控制理论，人们不仅把着眼点放在静态精度上，同时也注意了动态精度、动态变化过程。与此同时，人们对机械性能定性的分析，开始向定量分析方法过渡。在这种转化的过程中，机械控制理论就显得十分必要了。其主要原因，就是现代化大生产的发展同机械领域内人们的传统机械唯物论方法发生尖锐矛盾；而机械控制理论为解决这一矛盾提供了辩证唯物主义思想方法。所以，机械控制理论能够有力地推动机械领域的生产和科学技术向前发展。

控制理论刚刚引入机械工程领域，就表现出它无比的生命力；然而，机械控制理论又是一门新兴的学科，现阶段还不十分成熟，许多问题有待进一步探讨，使其更加完善、实用。

本教材主要讲述经典控制理论的基本内容、基本方法和解决工程问题的一般思路。

## § 1-1 控制系统的工作原理及其组成

### 一、控制系统的工作原理

在各种各样的生产过程和设备中，常常要求某些物理参数

(如温度、压力、液面高度、速度等)保持恒定,或者按着一定的规律变化。要满足这些要求,必须对某些物理量进行控制调整,抵消外界的扰动。那么,控制系统是怎样实现对物理量的控制?

例如恒温控制基本有两种方法:一种是人工控制,另一种是自动控制。

首先,以人工控制的热热水炉为例,说明操作者是如何控制热水炉输出的热水温度为一个恒定值。

图 1.1 为热水炉的原理图,其工作过程和人工操作原理如下所述:

热水炉能为工业生产提供一定温度的热水。冷水由下部流入加热炉,经过蒸气加热后由上部输出恒温的热水。操作者大脑中记住输出热水温度这一给定值(如 $80^{\circ}\text{C}$ )眼睛要看温度计上显示出的测得热水温度值,操作者的手操纵蒸气量供气阀门。当热水炉开始加热冷水时,操作者把蒸气量控制阀门开得最大,使流入炉中的冷水逐渐被加热,输出的热水温度逐步上升,当操作者看到输出热水温度达到他大脑中记住的给定值时,开始关小蒸气量供给阀门,由于热水炉内储存着一定量热水,在蒸气量减少的同

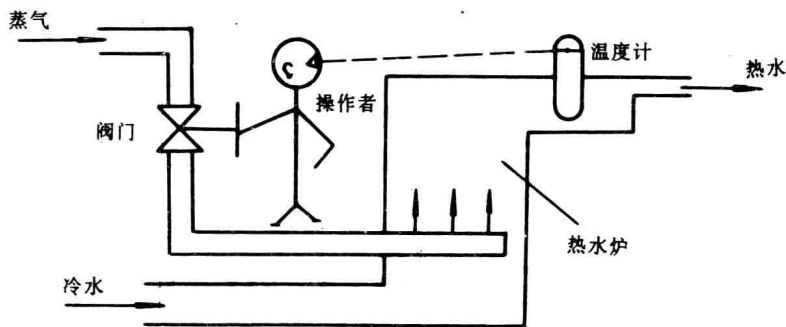


图 1.1 人工控制的热热水炉

时，由于延时效应的影响，输出热水温度继续上升，因此，操作者继续关小阀门，这时输出的热水温度开始下降，在温度下降过程中，不可能一下子就停留在要保持在要维持的恒定温度处（80℃），输出水温低于恒定温度值。操作者眼睛看到输出水温后，要和大脑中记住的温度比较，比较过程在操作者大脑中瞬时完成，并作出开大蒸气量供气阀门的决策，命令手去开大阀门。把操作者这一比较决策过程展开分析应该是这样的：首先操作者大脑中记住给定温度（80℃），并把它作为正值，眼睛看到的温度计显示出的输出热水温度，也输入给大脑，大脑比较决策的过程应该是把给定温度值减去热水实测温度值，若得出负值，表明输出热水温度比给定值高，则命令手关小蒸气阀门；反之，得出正值，表明输出热水温度比给定值低，阀门则要开大。如此反复几次，输出热水温度稳定在给定的温度附近，热火炉连续不断的供应恒温热水。

通过这一过程分析，正好揭示了恒量自动控制系统的控制原理。

图 1.2 所示系统是自动控制热水炉工作原理图。

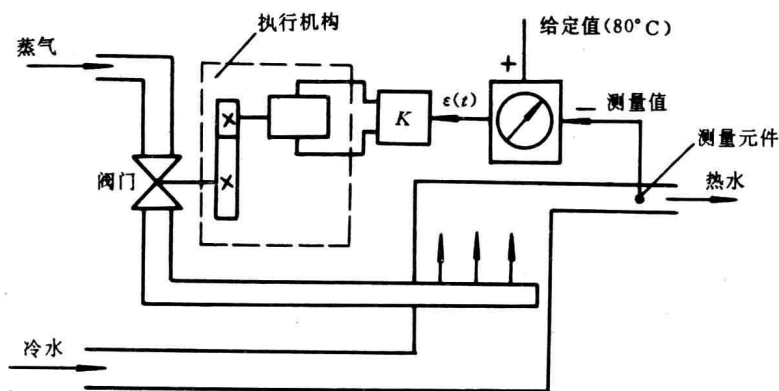


图 1.2 自动控制热水炉

自动控制热水炉，输入冷水，输出恒定温度的热水，由蒸气对冷水进行加热。

若把自动控制热水炉与人工控制的热水炉比较一下，所不同之处是测量元件由用人眼观察的液体温度计换成温电转换的半导体点温计；用比较器代替大脑，用直流电机和减速器代替人的手。其控制作用原理如下：

炉内冷水被蒸气加热后，输出热水的温度由测量元件测得，并转换成电量，送入比较器中，在比较器中与给定的温度值即转换为电量的给定值相减，得出的差值为偏差值 $[\pm \epsilon(t)]$ 。由放大环节进行功率放大，驱动直流电动机转动，通过齿轮减速器减速，开大或者关小蒸气量供给阀门达到控制蒸气量，来调节输出热水温度。在此过程中，特别要注意的是偏差值的正负号与电机的转向关系，也就是与蒸气阀门开大或关小的关系。偏差值 $\epsilon(t) = \text{给定值} - \text{测量值}$ ，若偏差值 $\epsilon(t)$ 为正值，表明实际输出热水温度比给定值小，必须开大阀门增加供气量，所以电机应向使阀门开大方向转动；反之，偏差值为负值，表明实际输出热水温度比给定值高，经放大后驱动电机反向转动，使阀门关小，输出热水温度下降。经过多次反复调整使热水炉输出热水的温度在给定值附近波动，热水炉进入稳态工作状态。若某个参数发生变化，如输出热水量增加，或者输入冷水的温度变化，或者蒸气的温度变化等，都会破坏热水炉的平衡工作状态，使输出热水温度偏离给定值；热水炉又要进行一次新的调节过程，使热水炉重新恢复到稳态工作状态。

由此可见，无论是人工控制的热水炉，还是自动控制的热水炉，由以上工作原理可以得出一条共同规律，即按着时间变化规律均符合图 1.3 所示的曲线关系。

由图 1.3 可见，这种曲线反映出的规律，无论是自动控制系统还是人工操作系统，在曲线波动值还没有进入 $2\Delta$ 公差带前，都表明控制调节作用对输出量进行反复的调节过程，若输出曲线进入 $2\Delta$ 公差带且不再超出时的最小时间为 $t_s$ ，把 $t_s$ 这段时间内曲线变化

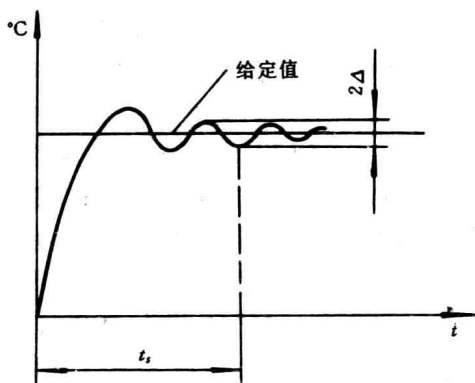


图 1.3 输出量的时间函数曲线

过程称之为瞬态过程(动态过程,调节过程,过渡过程等)。时间大于 $t_s$ 时,控制系统进入稳定工作过程,称之为稳态过程。把这种随时间变化的曲线叫作飞升曲线。

例 2 图 1.4 为控制工作台位置电液伺服控制的工作原理图。

该控制系统的目的是控制工作台的位置,使之按指令电位器给定的规律变化。操作者移动指令电位器的滑臂、滑臂的角位移

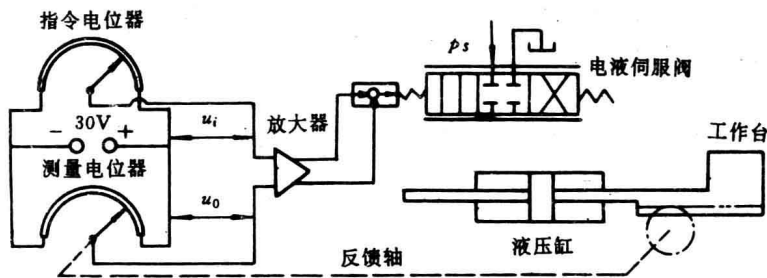


图 1.4 工作台控制系统

$\theta(t)$ 被转换成控制电压 $u_i(t)$ 。被控制的工作台位置由测量电位器转换成电压 $u_o(t)$ ；当工作台位置与指令信号给定的位置存在偏差时，通过两个电位器接成的桥式电路得到偏差值 $\epsilon(t) = u_i(t) - u_o(t)$ 。当指令电位器和测量电位器的滑臂均处在右端位置时，即 $u_i(t) = 0, u_o(t) = 0$ ，故 $\epsilon(t) = 0$ ，即无偏差信号，工作台处于静止状态。若突然给出一指令信号，即将指令电位器的滑臂移到中间位置，假设此时 $u_i(t) = 15V$ ，而工作台改变位置之前，测量电位器电压为零，所以工作台与指令信号位置间的偏差电压为 $\epsilon(t) = 15V$ 。放大器将该偏差信号放大后去控制伺服阀，伺服阀便输出具有一定压力的液压油，液压油缸推动工作台移动，减少偏差，直到测量电位器达到中间位置时，使 $u_o(t) = 15V, \epsilon(t) = 0$ ，即输出完全复现输入。伺服阀恢复零位而不再输出液压油，液压缸便停止运动，于是工作台到达信号所给定的位置。如果指令电位器不断改变滑臂位置，则工作台位置也跟随着不断变化。从这个例子进一步看出：为了使被控制量与控制作用之间保持一定的函数关系，系统应不断地对被控制量进行检测，并把测量得到的结果返回到输入端，使之与给定的指令信号进行比较得出偏差值，再利用这个偏差值去控制系统的运动，以便随时消除偏差。从而实现工作台按指令电位器给定的变化规律而变化的目的。

从这两个例子可以看出，虽然系统不同，但都具有两个主要特点：一是存在着测量环节，并把测得的输出量返回到输入端；二是按偏差进行控制。

## 二、反馈

机械控制理论中一个最基本、最重要的概念就是反馈。

一般将系统输出的一部分或者全部返回到输入端，称之为系统反馈。

系统之所以存在着输入、输出和系统本身三者间的动态关系，就是由于系统本身存在着信息联系、信息交换和信息反馈。

在前述人工控制的热水瓶例中，测量环节是温度计，测得的输

出量是通过人的眼睛反馈到人的大脑中；自动控制热水炉是通过测温装置，测得输出热水温度并转换成电量返回到输入端，与给定值相比较，得出偏差值，放大后驱动执行元件，使系统的状态向着给定值与输出量之间偏差减小的方向转化，以消除偏差为最终目的。

下面以机械系统为例子说明系统、输入和输出之间的信息联系及反馈。

一般的机构系统都可以转化成为 $m-c-k$ 系统，即用质量、粘性阻尼、弹簧刚度表示的单自由度系统。

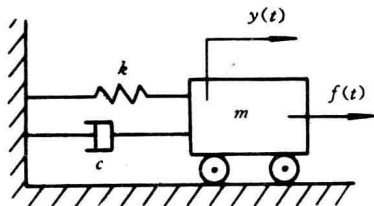


图 1.5 机械系统动力模型

图 1.5 表示在外力  $f(t)$  作用下，质量块的位移为  $y(t)$ ，系统的动力学方程为：

$$m\ddot{y}(t) + c\dot{y}(t) + ky(t) = f(t) \quad (1.1)$$

$$y(0) = y_0 \quad \dot{y}(0) = \dot{y}_0$$

方程式(1.1)左端是由该系统的结构参数决定的，与外界无关的系统本身的固有特性。

$y(0)$ 与 $\dot{y}(0)$ 分别表明质量块的初位移和初速度，表明在输入作用于系统之前的初始状态。可见，系统任何瞬间的状态完全由质量块的位移 $y(t)$ 和速度 $\dot{y}(t)$ 两个变量来描述，因为 $y(t)$ 的取值代表了一时刻质量块位移的情况； $\dot{y}(t)$ 的取值代表了质量块 $t$ 时刻位移变化的趋势，由这两个量就描述了该系统的动态过程。

在式(1.1)中， $f(t)$ 称系统的输入， $y(t)$ 称系统的输出，也称为

系统对输入的响应。显然,  $y(t)$  就是微分方程的解, 是由系统的初始状态、系统的固有特性、系统与输入的关系及输入决定的, 也可以说是系统在外界输入条件下的动态过程。若知道了  $y(t)$ 、 $\dot{y}(t)$  的任何瞬时取值, 就完全能描述系统该瞬时的运动状态。

将式(1.1)改写成如下的表示形式:

$$ky(t) = f(t) - m\ddot{y}(t) - c\dot{y}(t) \quad (1.2)$$

把该式的方框图画出来, 就清楚地看出系统本身信息交换的全过程。

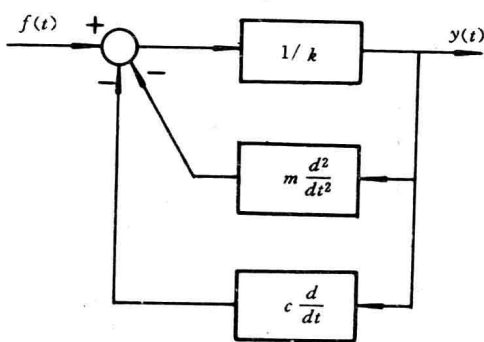


图 1.6 式(1.2)框图

由图可见, 输入力作用在弹簧上, 弹簧产生了位移  $y(t)$ ,  $y(t)$  又使质量块  $m$  和阻尼  $c$  运动, 产生惯性力  $m\ddot{y}(t)$  和阻尼力  $c\dot{y}(t)$ ; 反馈作用在弹簧上, 使弹簧的位移发生变化。这里, 质量块  $m$  对位移  $y(t)$  起着二阶微分反馈作用; 阻尼  $c$  起着一阶微分反馈作用。这种信息交换、反复循环, 使系统处在运动状态。

显然可以看出, 微分方程中输出函数及其导函数项之间的关系就是系统状态变量间的反馈关系。

如果把式(1.1)改写成式(1.3)或式(1.4), 道理是完全相同的。

$$c\dot{y}(t) = f(t) - m\ddot{y}(t) - ky(t) \quad (1.3)$$



$$m\ddot{y}(t) = f(t) - c\dot{y}(t) - ky(t) \quad (1.4)$$

上面的例子表明系统内部存在着信息反馈；下面再介绍一个经典动力学的典型例子，即蒸气机外加调速系统，称之为反馈控制，以区别上面叙述的反馈。

如图 1.7 所示，由离心机构、比较机构、转换机构等组成的蒸气机调速器，它调节进入蒸气机的蒸气量  $Q$ ，使蒸气机在工作负载（输出轴扭矩  $M$ ）不同时，输出量（输出轴转速  $n$ ）保持不变；若外负载变化使  $M$  减小时，由于蒸气带入的功率不变，输出轴转速上升，而  $n$  一上升，离心机构就以原点为支点进一步张开，使比较机构的滑块上移，通过转换机构的杠杆，使调节阀的阀门下降，减小蒸气量  $Q$  的流入，使  $n$  下降，逐渐趋向原位（给定值）；反之，向相反方向调整。这就是转速  $n$  本身的交互作用和反馈。因此从蒸气机和调速器所组成的系统来看，这种反馈的本质还是信息交换。但从具体装置的特点来看：

(1) 对蒸气机而言，离心调速器是附加的反馈控制装置。因此称这种反馈为外反馈。 $m, k, c$  系统的反馈称内反馈。

(2) 从反馈作用对输出量影响效果来看，若反馈作用总是使输

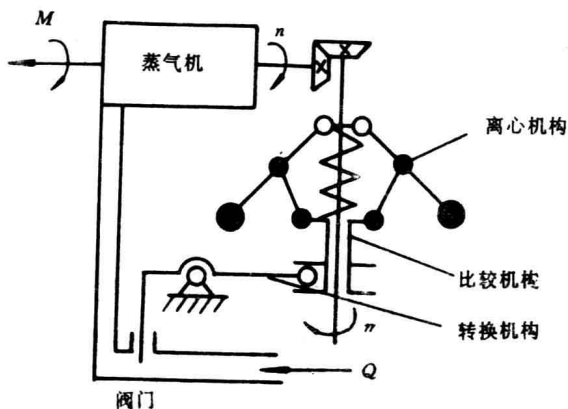


图 1.7 离心调速机构