

材料成形 自动控制基础

张殿华 张健成 张国范 编著



NEUPRESS
东北大学出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

材料成形自动控制基础/张殿华, 张健成, 张国范编著. —沈阳: 东北大学出版社, 2000.4

ISBN 7-81054-516-7

I. 材… II. ①张… ②张… ③张… III. 轧制-自动控制 IV. TG334.9

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2000) 第 22661 号

内 容 提 要

本书是为满足材料成形工程及相关专业的本科生和有关工程技术人员学习自动控制基础理论的需要而编写的。本书重点介绍经典控制理论的基本概念和基本方法。内容包括: 工程控制论的基本概念; 建立系统数学模型的理论方法和实验方法; 系统的时间响应分析、频率响应分析、稳定性分析、稳态误差分析和基本的校正方法。并以具体实例阐述了计算机辅助分析方法及其应用。

本书在力求阐明基本概念和基本方法的前提下, 较多地结合材料成形工程的实际, 帮助读者学习如何用理论知识解决实际问题。

©东北大学出版社出版

(沈阳市和平区文化路 3 号巷 11 号 邮政编码 110006)

沈阳农业大学印刷厂印刷

东北大学出版社发行

开本: 787mm×1092mm 1/16 字数: 320 千字 印张: 12.75

印数: 1~1060 册

2000 年 4 月第 1 版

2000 年 4 月第 1 次印刷

责任编辑: 文 韬

责任校对: 米 戎

封面设计: 唐敏智

责任出版: 杨华宁

定价: 25.00 元

前 言

随着材料成形过程自动化水平的不断提高,从事该专业的工程技术人员掌握有关自动控制方面的知识显得尤为重要。为此,我们根据多年的教学和科研实践编写了这本书。它可以作为材料成形工程专业本科生的教材,也可供有关工程技术人员参考。

本书对经典控制理论的基本内容做了较为详细的介绍。在论述上力求概念准确、层次分明、深入浅出、精讲多练,结合机、电、液压,尤其是材料成形设备的例子讨论问题,使读者能将基础理论知识和专业知识联系起来。为了突出实用性,本书还以一定篇幅介绍了系统数学模型识别的实验方法,同时也对计算机辅助分析在控制中的应用给予实例说明。

全书共分7章。第1,3章由张殿华执笔;第2,4章及7.1,7.2节由张健成执笔;第5,7章由张国范执笔;第6章由王君执笔;最后由张殿华统编定稿。

本书的结构设计及内容安排,是与东北大学王国栋教授、丁桦副教授多次商讨后确定的,王国栋教授、刘相华教授、顾树生教授及冶金部自动化院薛兴昌副院长对全书进行了审阅,并提出了许多宝贵的修改意见。编者谨向这些专家表示衷心地感谢。

本书编写过程中,参考了有关文献,并将其中主要文献列于书后,这里谨向各书作者致以谢意。敬请专家和读者对本书予以批评指正。

编 者

2000年3月

目 录

前 言

第 1 章 自动控制的一般概念	1
1.1 工程控制论的基本含义	1
1.2 控制系统的分类和组成	2
1.3 对控制系统的基本要求	6
1.4 材料成形工程中的控制实例	7
习 题	10
第 2 章 控制系统的数学模型	11
2.1 线性系统微分方程的建立	11
2.2 非线性模型的线性化	15
2.3 传递函数	18
2.4 系统方框图及其简化	29
2.5 材料成形工程实际系统传递函数的推导	38
习 题	53
第 3 章 控制系统的时间响应分析	56
3.1 典型输入信号和系统瞬态性能指标	56
3.2 一阶系统的时间响应	59
3.3 二阶系统的时间响应	61
3.4 高阶系统的时间响应及计算机辅助分析	67
3.5 单位脉冲响应函数	72
习 题	74
第 4 章 控制系统的频率特性	76
4.1 频率特性的基本概念	76
4.2 频率特性的表示方法	79
4.3 系统开环频率特性	91
4.4 系统闭环频率特性	100
4.5 频率特性的辨识	108
习 题	114
第 5 章 控制系统的稳定性分析	117
5.1 系统稳定的概念	117

5.2 劳斯稳定判据	119
5.3 乃奎斯特稳定判据	125
5.4 对数稳定判据	134
习 题.....	139
第 6 章 控制系统的稳态误差分析.....	142
6.1 误差分析的基本概念	142
6.2 静态误差系数	145
6.3 动态误差系数	150
6.4 减小稳态误差的方法	153
习 题.....	156
第 7 章 控制系统的校正.....	159
7.1 系统校正的基本概念	159
7.2 基本控制规律分析	166
7.3 相位超前校正	169
7.4 相位滞后校正	174
7.5 相位滞后-超前校正	178
7.6 并联校正	181
7.7 前馈校正	188
习 题.....	193
参考文献.....	197

第 1 章 自动控制的一般概念

1.1 工程控制论的基本含义

1.1.1 控制理论发展的简单回顾

控制理论起源于 1788 年 J.Watt 的蒸汽机离心调速器所带来的离心调速问题。这是一个自动调节系统的问题，也是一个典型的机械动力学问题。1868 年，J.C.Maxwell 首先在 Proceeding of the Royal Society of London 第 16 卷上发表了“论调速器”一文。E.J.Routh 与 И.А.Въцнеградскій 于 1884 年和 1877 年提出了有关线性系统稳定性的判据，使自动控制技术前进了一大步。1923 年，Heaviside 提出设计系统的算子法。1932 年，H.Nyquist 研制出电子管振荡器，同时提出了著名的 Nyquist 稳定性判据。此后，H.W.Bode 对负反馈放大器做了总结。第二次世界大战期间，美国 MIT 伺服机构实验室等研究了以往的自动调节器与反馈放大器，提出了反馈控制的数学基础。与此同时，随动系统在军事部门中迅速发展。1945 年，第一本经典控制理论图书《伺服机构》出版。1948 年，N.Wiener 发表了著名的《控制论》，形成了完整的经典控制理论。1950 年，W.R.Evans 提出了根轨迹法，能简便地寻找特征方程的根，进一步充实了经典控制理论。

20 世纪 50 年代，随动系统理论从军用逐步转用于民用生产部门，控制理论的应用得到进一步发展。例如，在化工、炼油、冶金等部门，实现了对过程的控制，解决了压力、温度、流量与化学成分的控制问题。50 年代及其以前的控制理论属于经典控制理论。它是以调节器与伺服机构为基础的自动调节原理的进一步提高，主要是在复域(特别是频域)内利用传递函数(或频率特性)来研究与解决单输入单输出线性定常系统的稳定性、响应快速性与响应准确性问题。

在 50 年代末与 60 年代初，一方面由于空间技术的发展与军事工业的需要，对自动控制系统的要求越来越高；另一方面由于电子计算机技术日趋成熟，从而产生了现代控制理论。现代控制理论主要是在时域内利用状态空间分析和综合的方法来研究与解决多输入多输出系统的最优控制问题。它成功地解决了导弹、航空和航天工程中的制导问题，并逐步用于民用工业生产。在这里，关键问题有二：一是对某一过程或系统能否建立一个反映该过程或系统的动态数学模型；二是对此模型能否提供有效的算法与程序。现代控制理论在同有关学科(例如，模糊数学、分形几何、分叉与混沌、灰色理论、人工智能、人工神经网络、遗传基因算法等等)的交叉、渗透与结合中不断发展。

在现代控制理论发展中，特别应当提到三位学者的重大贡献：1956 年，前苏联的 Д.С.Понтрягин 提出了最大值原理；1957 年，美国的 R.I.Bellman 提出了动态规划；1960 年，美国的 R.E.Kalman 提出了 Kalman 滤波理论。他们的工作对现代控制理论体系的建立起着特别重要的作用。

1.1.2 工程控制论的基本含义

工程控制论是一门研究控制理论在工程中应用的科学。它把控制理论与工程技术结合起来,形成一门独具特色的学科。工程控制论的核心是研究控制理论在工程中的应用。因此,它不仅是一门应用科学,而且也是一种重要的科学方法论。

工程控制论的内容大致可归纳为如下几个方面:

- (1) 当系统已定、输入已知时,求出系统的输出(对输入的响应),并通过输出来研究系统自身的有关问题,此即系统分析问题;
- (2) 当系统已定时,确定输入,且所确定的输入能使系统输出符合给定的最佳要求,此即最优控制问题;
- (3) 当输入已知时,确定系统,并使系统输出符合给定最佳要求,此即最优设计问题;
- (4) 当输出已知时,确定系统,以识别输入或输入中的有关信息,此即滤波与预测问题;
- (5) 当输入与输出均已知时,求出系统的结构与参数,即建立系统的数学模型,此即系统识别或辨识问题。

本教材侧重介绍如何用经典控制理论研究材料成形工程中的控制问题。研究的对象是单变量线性定常系统;研究的内容是系统的分析和设计,并以适当篇幅介绍系统的辨识;研究问题的方法是时域和频域方法;目的是在生产效率、产品质量和节能诸方面提高材料成形系统的综合性能。

1.2 控制系统的分类和组成

自动控制系统的种类很多,应用范围也十分广泛,它们的结构、性能和控制任务也各不相同。因此,其分类方法很多。现将经常讨论的几种控制系统的类型和组成情况概括如下。

1.2.1 线性和非线性控制系统

按组成自动控制系统主要元件的特性方程式的特征,可以分为线性控制系统和非线性控制系统。

(1) 线性控制系统

线性控制系统是由线性元件组成的系统,其运动方程式可用下面的线性微分方程描述。

$$\begin{aligned} a_n \frac{d^n x_o(t)}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} x_o(t)}{dt^{n-1}} + a_{n-2} \frac{d^{n-2} x_o(t)}{dt^{n-2}} + \dots + a_1 \frac{dx_o(t)}{dt} + a_0 x_o(t) \\ = b_m \frac{d^m x_i(t)}{dt^m} + b_{m-1} \frac{d^{m-1} x_i(t)}{dt^{m-1}} + b_{m-2} \frac{d^{m-2} x_i(t)}{dt^{m-2}} + \dots + b_1 \frac{dx_i(t)}{dt} + b_0 x_i(t) \end{aligned}$$

式中, $x_i(t)$ ——系统的输入量;

$x_o(t)$ ——系统的输出量。

在该方程式中,输出量 $x_o(t)$ 及其各阶导数都是一次的,并且各项系数与输入量(自变量)无关。这是一种简单而重要的系统,并且已有较为成熟的研究成果和分析设计方法。线性系统主要特点是具有叠加性和齐次性,这也是判别系统是否为线性系统的基本依据。有关线性系统的基本定义和主要特点在下一章有详细说明。

(2) 非线性控制系统

如果系统微分方程式的系数与自变量 $x_i(t)$ 有关, 则为非线性微分方程; 由非线性微分方程描述的系统称为非线性控制系统。应该指出, 在自动控制系统中, 即使只含有一个非线性环节, 这一系统也是非线性的。典型的非线性环节有继电器特性非线性环节、饱和特性非线性环节和不灵敏区非线性环节等, 如图 1-1 所示。

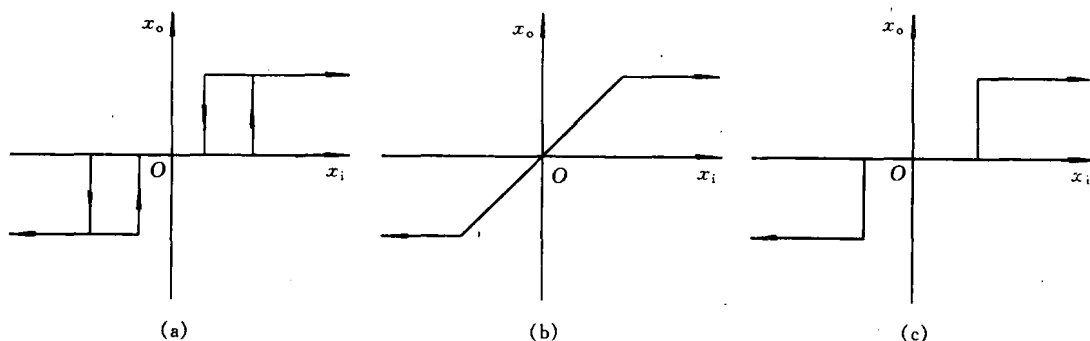


图 1-1 典型非线性环节特性

(a)继电器特性; (b)饱和特性; (c)不灵敏区特性

对于非线性控制系统的理论研究远不如线性系统那样完整, 一般只能满足于近似的定性描述和数值计算。应指出的是, 任何物理系统的特性, 精确地说都是非线性的, 但在误差允许范围内, 可以将非线性特性线性化, 近似地用线性微分方程来描述, 这样就可以按照线性系统来处理。

非线性系统的瞬态特性与初始条件有关。从这一点来看, 它与线性系统有很大的区别。例如当偏差的初始值很小时, 系统的瞬态过程为稳定的, 而当偏差量的初始值较大时, 则可能变为不稳定的。而线性系统的瞬态过程则与初始条件无关。

1.2.2 连续和离散控制系统

(1) 连续控制系统

系统中各部分信号都是连续函数形式的模拟量, 此系统就称作连续控制系统。如前所述的直流电动机转速控制系统和随动系统都属连续控制系统。

(2) 离散控制系统

所谓离散控制系统是指在控制系统的一处或几处的信号为脉冲序列或数字信号的系

统。如果在系统中使用了采样开关, 将连续函数形式的信号转变为脉冲序列形式的信号去控制系统, 则称此系统为采样控制系统。

如果在系统中采用了数字计算机或数字控制器, 其信号是以数码形式传递, 则称此系统为采样数字控制系统, 或简称数字控制系统。

通常把采样控制系统和数字控制系统称为离散控制系统或采样控制系统。描述离散控制系统运动用差分方程。同连续控制系统一样, 离散控制系统也有线性和非线性离散控制系统之分。

1.2.3 开环和闭环控制系统

(1) 开环控制系统

如果控制系统的输出量对系统没有控制作用，这种系统称为开环控制系统。图 1-2(a)所示直流电动机速度系统就是开环控制系统的一个例子，其给定量是给定电压 u_i ，输出量是电动机转速 n 。当改变电位器滑动端位置时，就相应改变了给定电压 u_i 和可控硅整流装置的输出电压 u_d ，这样，电动机的转速也就随着改变了。对应电位器滑动端的一个位置，电动机就运行在一个对应的转速上，从而达到了控制的目的。当有外部扰动(例如电动机的负载变化、可控硅电源电压变化等)或内部扰动(例如可控硅的移相器特性变化)时，电动机转速将偏离给定值。这时如要维持给定转速不变，必须人工重新调整电位器滑动端的位置。例如负载突然增加，电动机的转速相应降低，偏离了给定值。操作人员检测到实际转速并与给定值进行比较，判断出实际转速低于给定值时，可相应调整电位器的滑动端子，增加给定电压 u_i ，使电动机转速恢复到给定值。图 1-2(b)所示方框图可以表示这种系统的输入量与输出量之间的关系。这里，给定量直接经过控制器作用于控制对象，不需要将输出量反馈到输入端去与给定量进行比较，所以只有给定量影响输出量。当出现外部扰动或内部扰动时，没有人的干预，输出量将不能按照给定量所期望的状态去工作。这种开环控制系统多用于轧钢厂的许多辅助传动。在这些传动中，有的只需要控制其起动、制动过程，或者有的转速不需要精确地加以控制。

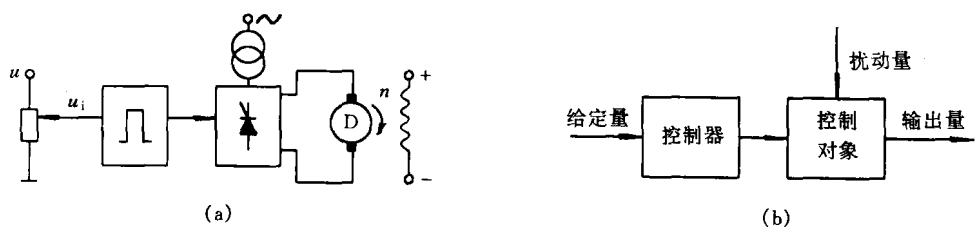


图 1-2 开环调速系统

(a) 开环调速系统原理图

(b) 开环调速系统方框图

(2) 闭环控制系统

闭环控制系统是把输出量检测出来，经过物理量的转换，再反馈到输入端去与给定量进行比较(相减)，并利用比较后的偏差信号，经过控制器或调节器对控制对象进行控制，抑制系统内部或外部扰动对输出量的影响，减小输出量的误差。

图 1-3(a)所示的调速系统是闭环控制系统的一个例子。这里用测速发电机 CF 将输出量检测出来，并转换成与给定量 u_i (电压)有相同量纲的反馈信号 u_f (电压)。 u_i 与 u_f 在输入端进行比较，其差值经过放大器的放大后控制可控硅的输出电压和电动机的转速。当给定电位计的滑动端处于某一位置时，电动机就会以一个相应的转速运转。如果由于系统外部或内部扰动，比如电动机负载突然增加，电动机的转速会降低。这一转速的变化由测速发电机检测出来，表现为反馈电压 u_f 相应降低，与给定电压 u_i 比较后，偏差电压增大，再经放大器放大后，使可控硅移相角前移，整流电压升高，从而提高电动机转速，减小或消除电动机由于负载增大造成的转速偏差。这一调节过程不用人的干预而自动完成，调节的结果是可以近似保

持电动机以恒定转速运转。图 1-3(b)表示该系统的输入量、输出量和反馈量之间的关系。

这种系统把输出量直接或间接地反馈到输入端形成闭环，参与系统的控制，所以称为闭环控制系统。由于系统是根据负反馈原理按偏差进行控制的，因此，也叫作反馈控制系统或偏差控制系统。

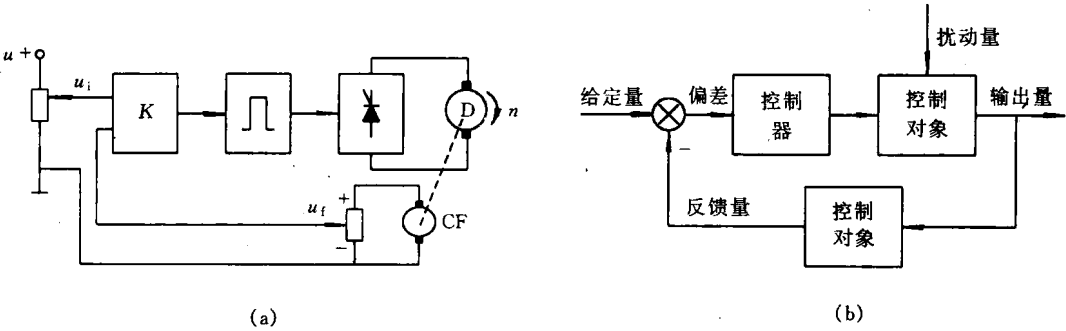


图 1-3 闭环调速系统

(a)闭环调速系统原理图

(b)闭环调速系统方框图

闭环控制系统一般由以下几个环节组成。

给定环节——它是给出输入信号 x_i 的环节，用于确定被控对象的“目标值”(或称给定值)。给定环节可以给出各种形式的信号，如电量、非电量、数字量、模拟量等。图 1-3 系统的输入电位计就是给定环节。

测量环节——用于测量被控量，并将被控量转换为便于传递的物理量(一般的电量)的装置。例如用电位计将角位移量转换为相应的电压，用光栅测量装置将直线位移量转换成数字量等。图 1-3 系统的测量环节为测速发电机。

比较环节——在这个环节中，输入信号 x_i 与测量环节发出的有关被控量 x_o 的反馈信号 x_f 相比较，并得到一个小功率的偏差信号 $\epsilon = x_i - x_f$ 。图 1-3 系统的比较环节由输入电位计和反馈电位计组成。

放大及运算环节——为了实现控制，要将偏差信号作必要的校正，然后进行功率放大，以便推动执行环节。常用的放大类型有电流放大、电气-液压放大等。图 1-3 系统的放大环节是增益为 K 的电压放大器。

执行环节——它接收放大环节送来的控制信号，驱动被控对象按照预期的规律运行。执行环节一般是一个有源的功率放大装置，工作中要进行能量转换。例如，把电能通过直流电机转换成机械能，驱动被控对象作机械运动。图 1-3 系统的执行环节是电动机。

应强调指出，所谓系统是开环的或闭环的，这决不意味着系统本身有没有反馈，而是按照研究的需要，将系统表示为合适的方框图时，根据图上有无反馈回路来称系统是开环的或是闭环的。更进一步讲，对于方框图上表明的所要控制的对象而言，应按照它的输入是否受到它本身输出的影响来确定系统是开环的或是闭环的。

1.2.4 按给定输入分类的控制系统

(1) 恒值控制系统

在这类系统中，给定值是不变的。但由于扰动的存在，将使被控量偏离期望值，控制系

统能根据偏差产生控制作用,使被控量恢复到期望值,以克服扰动作用的影响。恒温、恒速、恒压等控制系统都是恒值控制系统。

(2) 随动系统

这类系统其给定值是预先不知道的随时间任意变化的函数。控制系统能够使被控量以尽可能小的误差跟随给定值(即输入量)的变化。随动系统也能克服各种扰动作用的影响。图1-4(a),(b)分别为一位置随动系统的原理图及方框图。机械系统的工作角位移被转换成为电压 u_i , 被控对象的位置由反馈电位器检测并转换成反馈电压 u_o 。当工作机械位置与指令信号位置有偏差时,通过两个电位器组成的桥式电路得到偏差电压

$u_e = u_i - u_o$, 即当给定量 θ_i 与被控量 θ_o 不等时,电位器便有偏差电压 u_e 输出。 u_e 经放大后,使执行电动机连同工作机械和输出电位器的滑臂一起跟随给定值 θ_i ,直至 $u_o = u_i$ 。执行电动机便停止运转。不管 θ_i 以什么规律变化, θ_o 都能跟随其变化,故称之为随动系统。由图1-4(b)看出,这种系统属于单位反馈系统。

(3) 程序控制系统

给定值按预先编制的程序变化的控制系统,称为程序控制系统。机械加工中的程控机床就是一个典型的例子。

1.3 对控制系统的基本要求

对控制系统的要求是指对控制系统性能方面的基本要求,这是系统分析和设计的出发点,也是所追求的目标。因此,对系统性能的要求应该考虑综合性和实用性。控制系统的性能可以从三个方面评价。

(1) 稳定性

稳定性是系统受扰动信号作用后表现出的某种收敛性能,或理解为系统的输出量对给定输入量的偏离应随时间的增长逐渐趋近于零。不仅如此,系统的稳定性还应该具有一定的裕度,即在系统参数发生一定变化时仍能保证上述收敛性。稳定性是系统正常工作的必要条件。稳定的系统可能不具备令人满意的综合性能,但不稳定的系统根本无法正常工作。因此,稳定性是一项最基本的性能要求。

(2) 瞬态品质

瞬态品质反映了系统在两种稳定状态间过渡过程的品质。它有两层含义:迅速和平稳。

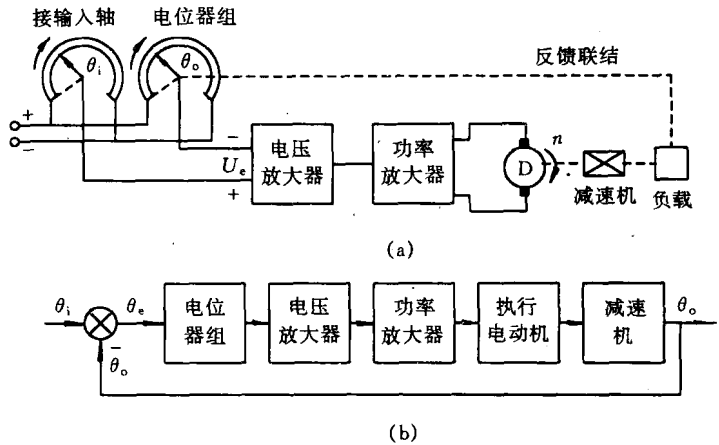


图 1-4. 位置随动系统

(a)位置随动系统原理图

(b)位置随动系统方框图

迅速是指当系统的输出量与给定的输入量(或同给定输入量相应的稳态输出量)之间产生偏差时,能很快消除这种偏差。另一层含义是相对平稳性。在过渡过程中可能会出现系统的实际输出量 $x_o(t)$ 超过其稳态值 $x_o(\infty)$ 的情况,其差值称为超调量。超调量是一种瞬间冲击,反映了系统在过渡过程中表现出的相对平稳性。超调量过大会使系统的一些元件处于恶劣的工作条件中。因此,好的瞬态品质应是过渡过程,既迅速又平稳。

(3) 稳态精度

稳态精度体现了系统对给定信号跟踪的准确性和对扰动信号的抗干扰能力。对于控制系统来说,这一点无疑是十分必要的。

1.4 材料成形工程中的控制实例

(1) 材料试验机力控制系统

在某些工厂和设计部门,常需要对金属材料和非金属材料进行各种性能试验,如拉、压以及疲劳强度就是常见的试验项目。图 1-5(a) 所示为电液伺服材料试验机力控制系统原理图。

图 1-5(a) 中 m_1 为油缸活塞及夹头 1 的质量, m_2 为夹头 2 的质量, k_1 为被试验材料的弹性系数, k_2 为力传感器的弹性系数。电压 u_1 为输入量,它比例于试件所需施加的力,力传感器 k_2 输出的电压比例于试件实际受的力,这个电压经放大器 2 放大后为输出电压 u_2 , u_2 在放大器 1 的输入端与 u_1 相比较,形成差值电压 Δu , Δu 经放大器 1 放大后输出电流 i , 电流 i 控制电液伺服阀输出的液体流量及压力差,从而控制油缸活塞的作用力,这个力通过夹头 m_1 加到试件 k_1 上,并通过另一个夹头 m_2 加到力传感器 k_2 上。这样,信号构成闭合回路。当输入电压 u_1 变化时,试验件 k_1 受到同样规律的作用力。在这个系统中,作用力是被控制的物理量,反馈元件是力传感器,因此是力控制系统。力控制系统的信号传递方框图见图 1-5(b)。

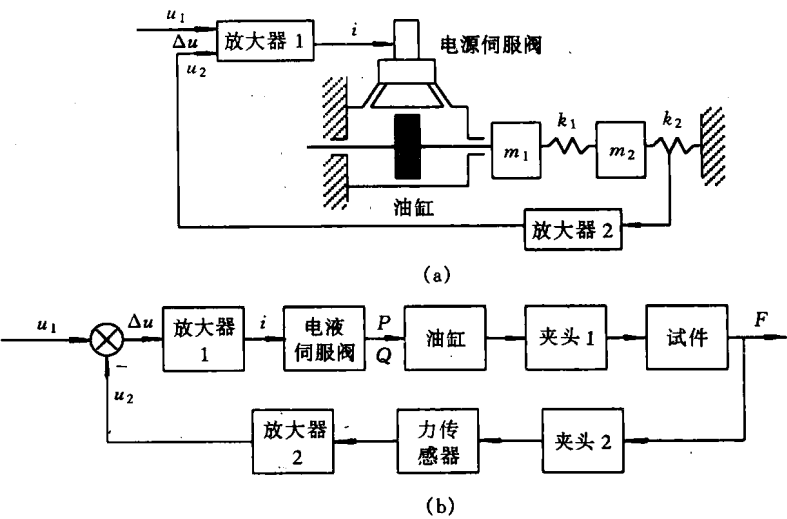


图 1-5 力控制系统
(a)材料试验机力控制系统原理图 (b)材料试验机力控制系统方框图

(2) 轧机速度控制系统

图 1-6 是带钢连轧机机架轧辊的转速自动控制系统。连轧机生产的主要特点是:轧制过程中,在各机架中的带钢必须保持秒流量相等的关系,否则将产生拉钢或叠钢等故障。这样,

就要求各机架轧辊的转速之间保持一定的比例,并在各种扰动的情况下保持这一比例不变。在图1-6中,转速给定量由电位器滑动端的电压 u_i 给定,转速输出量由测速机检测出来,并转换为反馈电压 u_f 。把这个电压反馈到输入端与给定量比较,其偏差电压经过调节器T和功率放大器SCR来控制执行机构(电动机)的转速,使轧辊保持在给定转速。在这个系统中,输出量是转速,所以称为转速控制系统或转速反馈系统。

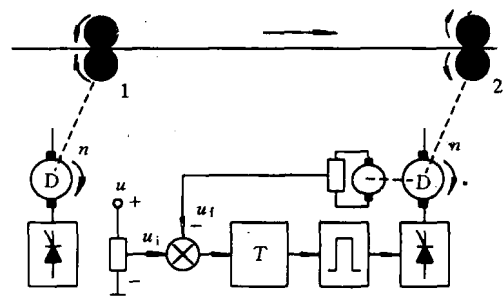


图 1-6 连轧机速度控制系统

(3) 板坯连铸中间罐重量控制系统

为了使流入结晶器内的钢水流动平稳,减少因中间罐内钢水静压头变化给结晶器液位控制造成外来干扰,同时有利于钢水内杂质上浮,提高钢水纯净度,有必要对中间罐内液位进行自动控制。由于目前尚无直接测量中间罐内钢水液面的手段,因而较多地采用测量中间罐重量并对其进行控制从而稳定中间罐液位的方式。

一般中间罐重量控制是通过调节盛钢桶滑动水口的开度,控制流入中间罐的钢水量来维持中间罐重量的稳定。但是在容量的盛钢桶上滑动水口滑板所受静压很大,频繁地开闭水口势必加速滑动水口的磨损。因此,设计控制系统时必须同时考虑两方面的问题:①使中间罐重量控制尽量准确;②在准确控制的同时,尽可能减少滑动水口的动作频度,以利于延长水口的使用寿命。因此中间罐重量控制系统在其系统构成以及控制器的控制算法上有其独特之处。

图1-7是某厂板坯连铸机的中间罐重量控制系统构成框图。中间罐重量由安装在中间罐车上的4个负荷传感器测量,经信号变换将荷重传感器的微弱mV信号转换为4~20mA标准信号,并送入连铸主机数字仪表(DCS)系统完成进一步的信号变换和处理,即去除皮重和进行重量信号数字滤波,消除测量信号中的高频干扰。根据测量值PV和目标值SV的偏差以及PC的变化率 dPV/dt 值的大小来决定盛钢桶下方滑动水口动作方向和行程。

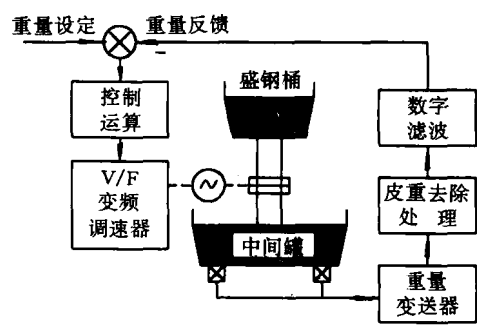


图 1-7 中间罐重量控制系统

(4) 轧机板厚控制系统

轧机自动厚度控制(AGC)液压执行机构的典型闭环控制系统示于图1-8中。最常用的液压缸控制方式有位置控制方式和轧制力控制方式两种。

选择位置控制方式时,液压缸位置基准信号与由液压缸位置感应器提供的反馈信号相比较。偏差信号被放大,并输入到电液伺服阀中,伺服阀把这个模拟电信号转变成进入或流出液压缸的流量,进或出取决于所要求的运动方向。

对操作侧和传动侧液压缸提供相同的闭环控制系统。对两个系统使用共同的位置基准值,以保证液压缸同步运动。

选择轧制力控制方式时,轧制力基准值与负荷元件或压力传感器提供的反馈信号相比

较，如图 1-8 所示。

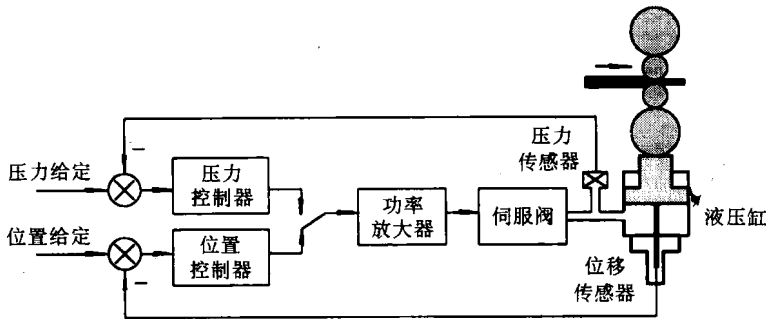


图 1-8 戴维-洛伊 (Davy-Loewy) 液压执行机构板厚控制系统

(5) 带材热连轧机上机架间张力控制系统

在带材热连轧机上，一般用所谓的活套支撑器保持机架间张力。活套支撑器是一个包括穿带以后升到轧制线以上的自由转动辊的机构。连续地监视活套高度和带材的张力。控制的目的是当活套支撑器升到预定的位置时，获得要求的机架间张力。如果在不同的活套支撑位置得到要求的张力，那么就调整 1 个相邻机架的辊缝或辊速。

活套支撑器有 3 种：(1)由电机驱动的电动活套支撑器；(2)由气缸驱动的气动活套支撑器；(3)由液压缸驱动的液压活套支撑器。

图 1-9 表示使用电动活套支撑器的机架间张力控制。控制包括两个电路：第一个控制电路保持恒定的带材张力 s ，根据活套支撑器电机电流 I_L 和活套支撑器角度 φ_a 的实测量，计算实际带材张力 s_a ，实际带材张力 s_a 和带材张力基准值 s_i 之间的偏差信号输入到活套支撑器电机的电流调节器中，电流调节器调整活套支撑器电机的力矩，达到要求的带材张力；第二个控制电路提供恒定的活套支撑器角度，偏差信号，即实际活套支撑器角度 ϕ_a 和基准值 ϕ_i 之间的差值，输入到一个相邻机架的轧机电机速度调节器中，速度调节器调整机架的速度，所以提供了要求的活套支撑器角度。

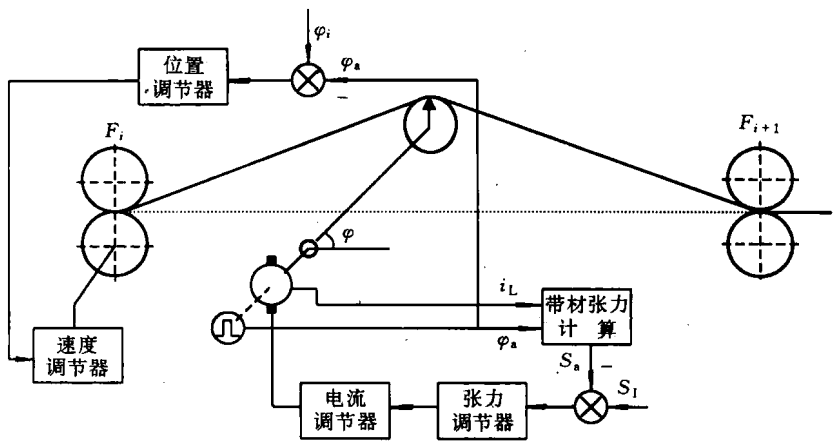


图 1-9 板带热连轧活套角度及张力控制系统

习 题

1-1 试举几个开环与闭环控制系统的例子，画出它们的方框图，并说明其工作原理，讨论其特点。

1-2 在下列持续运动过程中都存在信息的传输，并利用反馈来进行控制，试加以说明。

(1) 人骑自行车；(2) 人驾驶汽车；(3) 行驶中的船。

1-3 闭环控制系统由哪些基本环节组成？各环节在系统中起什么作用？

1-4 对控制系统的基本要求是什么？

1-5 图1-10为一直流发电机电压自动控制系统。图中，1 为发电机；2 为减速器；3 为执行电机；4 为比例放大器；5 为可调电位计。说明系统各环节的作用。

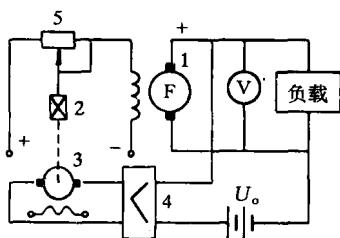


图 1-10 直流发电机电压自动控制系统

1-6 图1-11为一简单液压系统工作原理图。其中， x 是输入位移， y 为输出位移。试画出该系统的方框图。

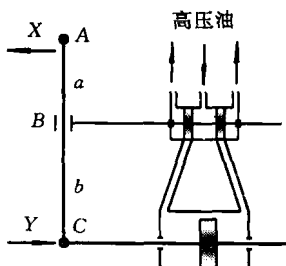


图 1-11 简单的液压系统

第2章 控制系统的数学模型

工程应用对控制系统的性能指标都有具体的数量要求,常称为技术指标。因此,只定性地分析系统的工作原理和大致的运动过程是不够的,还必须深入地掌握系统在外作用下的运动规律,能够从理论上对系统的性能进行定量的分析和计算。要做到这一点,首先要建立系统的数学模型,它是分析和设计系统的依据。

本章首先介绍线性系统的基本特点和经典控制理论中数学模型的几种形式以及建模的一般方法和原则,进而讨论非线性模型的线性化问题,使一类非线性系统的控制问题可以用线性方法加以解决。在传递函数一节着重阐明传递函数的定义和概念,详细介绍典型环节传递函数的推导过程和这些环节的基本特性。为了方便研究,又介绍了系统方框图的构成和简化方法。最后列举工程实例说明控制系统理论建模的方法。

2.1 线性系统微分方程的建立

2.1.1 线性系统

(1) 线性系统的定义

如果系统的数学模型是线性微分方程,这样的系统称为线性系统。若线性微分方程中的系数是常数,相应的系统称为线性定常系统。若这些系数是时间或输入的函数,相应的系统称为线性时变系统。如果系统只有一个输入量和一个输出量,相应的系统称为单变量(SISO)系统。经典控制理论研究的对象就是单变量线性定常系统。

线性系统具有比较成熟的理论和研究方法。在一定条件下,很多工业控制系统可以近似为线性定常系统。因此,线性系统的研究具有理论上的基础性和工程中的实用性。

(2) 线性系统的特点

线性系统最重要的特点是可以应用叠加原理。叠加原理包含两个内容,即可加性和均匀性(或齐次性),现举例说明。

设线性系统的微分方程为

$$a_2 \frac{d^2 x_o(t)}{dt^2} + a_1 \frac{dx_o(t)}{dt} + a_0 x_o(t) = b_1 \frac{dx_i(t)}{dt} + b_0 x_i(t)$$

式中, $x_i(t)$ 为系统的输入量, $x_o(t)$ 为系统的输出量。若 $x_i(t) = x_{i1}(t)$ 时,微分方程的解为 $x_{o1}(t)$; $x_i(t) = x_{i2}(t)$ 时,微分方程的解为 $x_{o2}(t)$ 。可以证明当 $x_i(t) = x_{i1}(t) + x_{i2}(t)$ 时,微分方程的解为 $x_o(t) = x_{o1}(t) + x_{o2}(t)$,这就是可加性。设 k 为常数,也可以证明,当 $x_i(t) = kx_{i1}(t)$ 时,微分方程的解为 $x_o(t) = kx_{o1}(t)$,这就是均匀性。

应用叠加原理给线性系统的研究工作带来极大的方便。可加性表明,多个外作用同时加于系统产生的总响应,等于每个外作用单独加于系统所产生的响应之和。因此,欲求系统在几个输入信号和干扰信号同时作用下的总响应,可以对这几个外作用逐个单独求响应,然后

在输出端代数求和。均匀性表明, 当外作用的数值增大若干倍时, 其响应的数值亦增大同样的倍数。因此, 可以采用单位典型外作用(例如单位阶跃函数、单位脉冲函数)对系统进行分析研究, 这样既简化了问题又不失一般性。

2.1.2 数学模型

(1) 数学模型的形式

描述系统动态特性的数学表达式叫做系统的数学模型。数学模型描述系统运动的主要特征。

自动控制系统加上输入信号以后, 输出量的运动过程可以用联系输入量和输出量的微分方程加以描述。因为它既能定性又能定量地描述整个系统运动过程, 所以微分方程是系统的一种数学模型。实际的控制系统用这种抽象的数学语言——微分方程描述以后, 这样的微分方程就是实际系统的一种等价, 系统的主要行为特征可以从数学模型中得到和体现。

数学模型有多种形式。在现代控制理论中, 用状态空间表达式作为系统的数学模型, 它是一阶微分方程组。在经典控制理论中所用的数学模型除微分方程外, 还有传递函数和频率特性。其中微分方程是最基本的数学模型, 因为传递函数和频率特性都是微分方程经过积分变换演变而来的, 这三种数学模型之间的关系可以用图 2-1 加以说明。

应当指出, 同一个系统, 由于描述方法或研究方法的不同, 可以采用不同的数学模型。例如研究时域响应时可以用微分方程和传递函数, 研究频域响应时则要用频率特性。另一方面, 物理性质完全不同的实际系统, 如一个电气系统和一个液压系统, 却可以具有相同形式的数学模型。

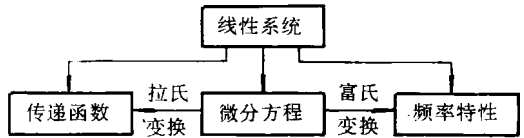


图 2-1 三种数学模型之间的关系

(2) 建模的一般原则和方法

模型的简单性和准确性是建立元件或系统数学模型时应遵循的一般原则, 并应根据实际情况在二者之间做出相应的折衷。严格地说, 实际系统都具有非线性特性、分布参数, 且参数随时间而变化。这种既是非线性又是时变的偏微分方程求解困难, 以至于使系统的分析工作难以进行。为此, 常将非线性特性化为等效的线性特性; 用集中参量代替分布参量; 将时变参量简化为非时变参量, 等等, 以抓住影响系统运动规律的主要因素, 忽略次要因素, 使得到的数学模型尽可能简单些。这样, 既可以简化计算过程, 又能以一定的准确度描述系统的本来特性, 从而使分析和设计得到满意的结果。但是当非线性特性、分布参数和变参量的影响较大时, 尽管得到的模型复杂也不能忽略, 因为不准确的数学模型是毫无实际意义的。

系统中所用的元件有机械、电气、液压、气动、光学和热力学的, 等等。建立不同系统的数学模型涉及各方面的专业知识, 因此, 要建立一个经过合理简化又具有一定准确度的数学模型不是一件容易的事, 必须对具体系统有全面、深入的了解。

建立系统或元件的数学模型, 目前工程上采用如下方法。

①分析法。它是根据支配系统或元件内在运动规律的物理定律(例如力学中的牛顿定律, 电学中的基尔霍夫定律等等), 以及系统或元件的结构与参数, 推导出输入量和输出量之间的数学表达式, 从而建立数学模型。这种方法仅适用于简单的系统或元件。