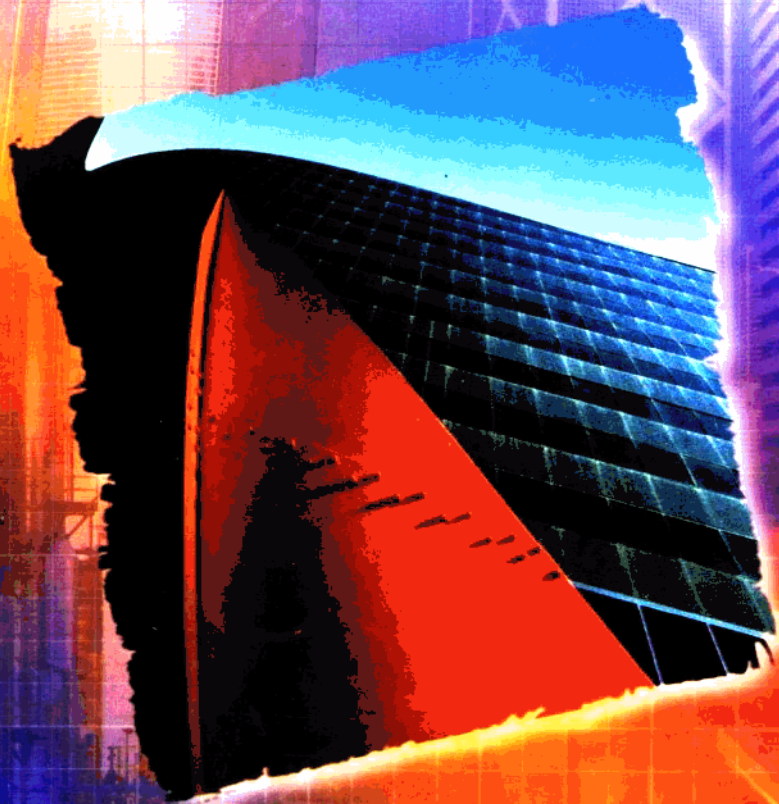


# 工程控制基础

高纪念 主编



石油大学出版社

# 工程控制基础

高 纪 念 主 编

石油大学出版社

## 内 容 提 要

本书主要介绍工程控制的基本理论和方法。内容包括工程控制的基本概念、系统的数学模型、系统的稳定性分析、误差分析、时间响应分析、线性时延系统分析、系统性能的分析与校正、非线性系统分析、采样控制系统分析以及现代控制和智能控制理论概述。

本书可作为机械工程类机械电子工程、机械设计与制造、化工机械等专业大学本科生教材,也可供有关专业研究生和工程技术人员参考。

### 工程控制基础

高纪念 主编

\*

石油大学出版社出版

(山东省东营市)

新华书店发行

石油大学印刷厂印刷

\*

开本 787×1092 1/16 18 印张 454 千字

1998 年 11 月第 1 版 1998 年 11 月第 1 次印刷

印数 1—800 册

ISBN 7-5636-1129-O/TP·71

定价:20.00 元

# 前 言

工程控制基础已成为高等院校机械工程类专业必修的专业基础课。它主要介绍工程控制论的基本理论和基础知识,工程控制论是研究控制论在工程技术中应用的科学,它渗透到各个工程技术领域,诸如机械、电气、电子、液压、气动、能源、化工、航空、航天等,已成为人类发展生产和征服自然的重要手段,是现代工程技术人员必须具备的基础之一。

本书重点阐述反馈控制系统的基本理论和方法,以线性系统为主要对象,突出一模四法三性,即在建立系统数学模型的基础上,综合利用频域法、时域法、根轨迹法和计算机辅助分析法对系统的稳定性、准确性、快速性进行分析和校正。同时对非线性系统和采样系统的分析和校正进行了必要的讨论,对现代控制和智能控制的理论给予简要的介绍。

全书共分十章,前七章为基本部分,内容包括工程控制的基本概念、系统的数学模型、稳定性分析、误差分析、时间响应、时延系统和系统性能的分析与校正。后三章可根据需要选学,其内容为非线性系统、采样系统以及现代控制和智能控制理论概述。

本书对理论的论述力求概念准确、层次清楚,适当结合机、电、液工程实例,尽可能编入较多的例题和习题,以加强对基本概念的理解并提高实际分析和应用的能力。

本书由高纪念主编,并编写 1~2 章。乔建明编写 3~7 章,冯勇建编写 8~10 章。

本书由陈新海教授主审,并对本书提出了许多宝贵意见,在此表示衷心的感谢。

本书编写过程中,傅则绍教授给予了热情的关心和支持,在此谨致谢意。

限于水平,书中疏漏和错误之处难免,恳请读者批评指正。

编 者

1997 年 6 月

# 目 录

第一章 绪论 .....	(1)
第一节 概述 .....	(1)
第二节 工程控制的应用实例 .....	(2)
第三节 工程控制的基本概念 .....	(7)
习 题 .....	(10)
第二章 系统的数学模型 .....	(12)
第一节 微分方程 .....	(12)
第二节 非线性微分方程的线性化 .....	(15)
第三节 用拉氏变换求解线性微分方程 .....	(19)
第四节 传递函数 .....	(30)
第五节 函数方块图 .....	(40)
第六节 频率特性及其计算机辅助绘制算式 .....	(46)
第七节 根轨迹及其计算机辅助绘制 .....	(55)
习 题 .....	(68)
第三章 系统的稳定性分析 .....	(72)
第一节 基本概念 .....	(72)
第二节 系统稳定的条件 .....	(73)
第三节 系统稳定的判断与判据 .....	(75)
第四节 系统的相对稳定性 .....	(87)
第五节 计算机辅助对数频率特性稳定分析 .....	(90)
习 题 .....	(92)
第四章 系统的误差分析 .....	(94)
第一节 基本概念 .....	(94)
第二节 系统的类型和无差度 .....	(97)
第三节 静态误差系数 .....	(99)
第四节 动态误差系数 .....	(103)
习 题 .....	(107)
第五章 系统的时间响应分析 .....	(108)
第一节 基本概念 .....	(108)
第二节 一阶系统的时间响应 .....	(111)
第三节 二阶系统的时间响应 .....	(113)
第四节 高阶系统的时间响应 .....	(122)
第五节 根轨迹法求系统时间响应性能指标 .....	(126)
第六节 系统时间响应和频率响应之间的关系 .....	(129)

第七节 计算机辅助求取系统的时间响应	(133)
习 题	(136)
<b>第六章 线性时延系统的分析</b>	(137)
第一节 时延环节	(137)
第二节 线性时延系统的稳定性分析	(139)
习 题	(144)
<b>第七章 系统性能的分析与校正</b>	(145)
第一节 基本概念	(145)
第二节 串联校正	(148)
第三节 并联校正	(151)
第四节 复合校正	(153)
第五节 根轨迹法在系统校正中的应用	(154)
第六节 频率法在系统校正中的应用	(159)
第七节 系统的计算机辅助校正	(166)
第八节 线性系统校正的实际应用问题	(169)
习 题	(171)
<b>第八章 非线性系统的分析</b>	(174)
第一节 基本概念	(174)
第二节 非线性系统的时间响应	(177)
第三节 非线性系统的相平面法	(179)
第四节 非线性系统的描述函数法	(186)
习 题	(194)
<b>第九章 采样控制系统分析</b>	(196)
第一节 基本概念	(196)
第二节 采样系统的数学模型	(201)
第三节 线性采样系统的稳定性分析	(216)
第四节 采样系统的误差分析	(220)
第五节 采样系统的时间响应分析	(222)
第六节 采样系统性能的校正	(226)
习 题	(237)
<b>第十章 现代控制和智能控制理论概述</b>	(239)
第一节 引言	(239)
第二节 状态空间法	(239)
第三节 线性定常系统的可控性与可观性	(254)
第四节 状态反馈与极点配置	(259)
第五节 基于二次型性能指标的最优控制	(264)
第六节 智能控制理论的基本概念	(268)
习 题	(277)
<b>参考文献</b>	(279)

# 第一章 绪 论

## 第一节 概 述

工程控制基础课程的主要内容是阐述工程控制论的基本理论和基础知识,工程控制论是一门研究控制论在工程技术中应用的科学。

控制论是二次世界大战中及战后在武器火力控制、飞行器自动驾驶、电子技术、生产自动化、电子计算机等科学技术实践的基础上总结有关学科成果而形成的。1948年美国学者维纳发表《控制论——关于动物和机器中控制和通讯的科学》一书,奠定了控制论的基础,也标志着这门学科的正式诞生。维纳发现机器系统、生命系统甚至社会和经济系统都有一个共同特点,即通过信息的传递、加工处理和反馈来进行调整,这就是控制论的中心思想。控制论诞生后在很短时期内便迅速地渗透到许多科学技术领域,除工程和生物学科外,还有经济管理、社会管理、人口管理等学科,从而形成和派生出许多新型的边缘学科,诸如工程控制论、生物控制论、经济控制论、社会控制论、人口控制论等,大大推动了近代科学技术的发展。

1954年钱学森在美国把控制论的思想和方法引入工程技术领域首先创立了工程控制论,发表了英文专著《The Theory of Engineering Control》。工程控制论是控制论思想在众多工程技术学科中应用和相互渗透的产物,它是一门介于许多工程学科之间的应用科学,它渗透到各个工程领域,诸如机械、电子电气、液压气动、航空航天、能源化工等。

工业生产的各工程领域都广泛采用机械系统、电子电气系统和液气气动系统,且常常相互渗透、相互配合向着机—电—液—一体化方向发展,有力地促进了设备自动化水平的提高,这就需要结合机电液系统阐述工程上共同遵循的基本控制规律和理论——工程控制论。同时现代工业生产趋向实现最佳控制,要求利用最少的能源和原材料消耗、最低成本以取得最大的生产成效、最高的生产率、最好的产品质量等。因此,在能源、国防、运输、机械、化工等生产领域中都提出了范围极大、内容极其深刻而复杂的控制问题,促使工程控制论不断向更深入的方向发展,使这门多科学学科被列为当今世界最有发展前途的学科之一。

控制论是人类在征服和改造自然的斗争中逐渐形成的一门学科,按其发展的进程和研究方法它已经经历了经典控制理论和现代控制理论两个重要发展阶段,现在正处于第三代发展阶段。

40年代酝酿形成、50年代蓬勃发展的经典控制理论以传递函数为基础,主要解决单变量系统的反馈控制问题,即研究单输入-单输出线性定常控制系统的分析和设计问题,也称为经典反馈控制理论,它对工业发展和技术进步起到了十分重大的作用,被称作第一代控制理论。

60年代在经典控制理论的基础上发展起来的现代控制理论以状态空间分析为基础,主要解决多变量系统的优化控制问题,即研究多输入-多输出控制系统的分析和设计问题。多变量控制、最优控制、参数估计、最佳滤波、系统辨识、自适应控制等理论都是现代控制理论的主要研究课题。特别是近年来电子计算机技术和现代应用数学的迅速发展,使现代控制理论在大系统理论方面有了重大发展。现代控制理论借助状态模型揭示了系统输入、输出等系统内、外部信息(状态变量)的关系,从而为有效地获取系统内部信息,实现高级控制策略开辟了广阔的

前景,把控制论推向了第二个重要的发展阶段。人们把现代控制理论称为第二代控制理论。

进入 70 年代中期之后,科学技术的高度发展导致被控对象结构日趋复杂化和大型化,特别是复杂性不仅仅表现在高维性上,更多的则是表现在系统信息的模糊性、不确定性、偶然性和不完全性上。基于精确数学模型的大系统理论对高维线性系统是行之有效的,但对其余四问问题的解决仍然是控制论的新课题。此时人工智能得益于计算机技术而飞速发展并渗入到控制技术领域,促使智能控制的研究也活跃起来,1985 年 IEEE 在美国纽约召开了第一届智能控制学术讨论会,会上集中讨论了智能控制的原理和系统结构问题。1987 年 1 月 IEEE 控制系统学会和计算机学会又召开了智能控制国际学术讨论会,这次会议的召开为智能控制作为一门独立的新学科的崛起奠定了基础。国内 80 年代初开始研究智能控制。虽然智能控制理论诞生只有十几年的历史、尚未形成比较完整的理论体系,但其已有的应用成果和理论发展说明智能控制正成为自动控制的前沿学科之一,因此,有人说智能控制就是人们寻求已久的第三代控制理论,尽管目前这种断言还为时尚早,但至少可以把智能控制理论看作是第三代控制理论的开始和重要分支。

必须指出:经典控制理论是控制论的基础,现代控制理论和智能控制理论都是从经典控制理论中蜕变出来的。经典控制理论在现代实际工程中仍然极为重要,现有控制系统的大多数是通过经典控制理论分析和设计而建立的,且对相当多新提出的控制问题的解决仍然非常有效。因此本书主要介绍经典控制理论,以便为更好地学习和应用控制论打好基础。

## 第二节 工程控制的应用实例

工程控制的应用是非常广泛的,本节仅列举几个典型实例。

### 一、机械系统的动力学问题

在机械工程中,图 1-1(a)所示的质量弹簧阻尼系统是一个具有代表性的动力学系统。图

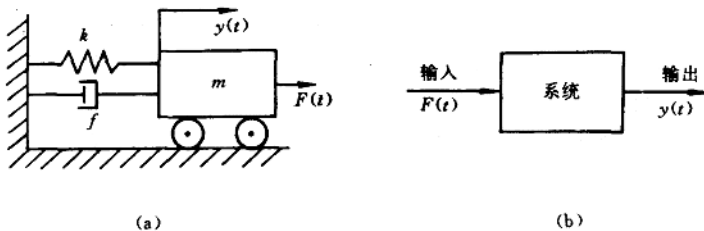


图 1-1 质量弹簧阻尼系统

(a) 系统组成; (b) 系统模型

中  $m$ 、 $f$ 、 $k$  分别表示质量、粘性阻尼系数和弹簧刚度。假设略去两个滚轮的滚动摩擦力,当质量  $m$  受外力  $F(t)$  作用时,其位移为  $y(t)$ ,则系统的动力学方程为:

$$m\ddot{y}(t) + f\dot{y}(t) + ky(t) = F(t) \quad (1-1)$$

$t=0$ (即初始状态)时

$$y(0) = y_0$$



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

式中  $m, f, k$ ——质量、粘性阻尼系数、弹簧刚度，都是系统本身的结构参数，反映了系统本身的特性，与外界无关；

$F(t)$ ——系统的输入；

$y(t)$ ——系统的输出。

广义地说任何机械设备、加工过程等机械系统都可看作作为一个动力学系统，简称为系统，可用图 1-1(b)所示的模型来表示。从工程控制论的观点考虑，将机械系统作为研究对象，其动力学问题就是讨论该系统及其输入、输出三者之间的动态关系，主要研究内容大致可归纳为如下四类：

- ① 当系统给定、输入已知时，求系统的输出，并通过输出，研究系统本身的有关特性，称为系统分析问题；
- ② 当输出给定、输入已知时，确定系统的结构和参数，称为系统设计问题；
- ③ 当系统给定、对输出的要求已知时，确定系统的输入，称为系统控制问题；
- ④ 当输入与输出均为已知时，确定系统的结构和参数，即建立系统的数学模型，称为系统辨识问题。

上述四类问题在电气电子系统，机电液一体化系统中都存在，具有普遍性，是工程控制基础课程研究的几个主要问题。

## 二、反馈控制的运算放大器

在电子技术中运算放大器是常用元件，其外部接线如图 1-2(a)所示， $u_i$  是输入电压， $u_o$  是输出电压。分析运算放大器时通常假设：

- ① 输入阻抗  $R_i = \infty$ ，输出阻抗  $R_o = 0$ ；
- ② 无零漂，不计失调电压和失调电流；
- ③ 在一定范围内，输入与输出呈线性关系。

根据以上假设运算放大器的输出与输入关系式为：

$$u_o = -Ku_i$$

式中  $K$ ——运算放大器的开环增益(即开环放大倍数)。

实际中，运算放大器的  $K$  因受温度、湿度等环境条件的影响极易发生变化，若  $K$  变化到  $K + \Delta K$ ，则放大器输出变为：

$$\begin{aligned} u'_o &= -(K + \Delta K)u_i \\ &= -Ku_i - \Delta Ku_i = u_o + \Delta u_o \end{aligned}$$

式中

$$\Delta u_o = -\Delta Ku_i \quad (1-2)$$

以上表明运算放大器开环使用时其精度不高，误差  $\Delta u_o$  随开环增益  $K$  的变化而变化。若采用反馈控制，如图 1-2(b)所示，输出电压  $u_o$  通过电阻  $R_2$  接到放大器的反号输入端，构成负反馈控制，即反馈控制型运算放大器，在上述相同假设下其输出与输入的关系为：

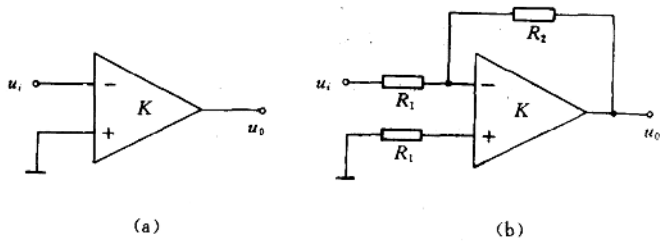


图 1-2 运算放大器  
(a)一般型；(b)反馈控制型

$$u_0 = -\frac{\beta K}{1 + \beta K} \cdot \frac{R_2}{R_1} u_i \quad (1-3)$$

式中  $\beta = \frac{R_1}{R_1 + R_2}$ 。

同样,若运算放大器的  $K$  变化到  $K + \Delta K$ ,则反馈控制运算放大器的输出变为:

$$\begin{aligned} u'_0 &= \frac{-\beta K}{1 + \beta K} \frac{R_2}{R_1} u_i - \frac{\beta R_2 / R_1}{(1 + \beta K)[1 + \beta(K + \Delta K)]} \Delta K u_i \\ &= -u_0 - \Delta E \cdot \Delta K u_i \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{式中} \quad \Delta E &= \frac{-\beta R_2 / R_1}{(1 + \beta K)[1 + \beta(K + \Delta K)]} \\ &= \left\{ \left[ 1 + \frac{R_1(1 + K)}{R_2} \right] \left[ 1 + \frac{R_1(1 + K + \Delta K)}{R_2} \right] \right\}^{-1} \end{aligned}$$

$$\text{又令} \quad \Delta u_0 = -\Delta E \cdot \Delta K u_i \quad (1-4)$$

比较式(1-2)和式(1-4)可知,  $\Delta E$  总是远远小于 1 的,因此采用反馈控制后,输出误差  $\Delta u_0$  会大大的缩小,精度获得显著提高。

实际中,  $K \gg 1$ ,由式(1-3)可得:

$$u_0 \approx -\frac{R_2}{R_1} u_i$$

此式说明,反馈控制型运算放大器的输出输入关系可被近似地认为仅取决于反馈电阻  $R_2$  与输入电阻  $R_1$  之比值,而与运算放大器的开环增益  $K$  的变化无关,从而消除了增益  $K$  变化的影响,使其误差减小,且误差值稳定,可改善放大器的频率特性。但这种反馈控制会降低放大倍数,且引入不稳定等问题。

### 三、钢板轧制厚度控制系统

由于对钢板轧制厚度和速度的要求愈来愈高,现代化轧机的压下机构基本上都采用高精度高动态的电液控制,图 1-3 为钢板轧制厚度控制系统。当给系统输入厚度指令信号  $u_i$  时,在控制元件 2 中,指令信号  $u_i$  与反馈信号  $u_f$  进行比较,然后输出液压功率  $Q$  和  $p$  给液压执行元件 1,从而调节两工作辊的辊距  $h_g$ ,使得被轧制钢板的厚度  $h_0$  保持在指令信号  $u_i$  要求的尺寸公差范围之内。

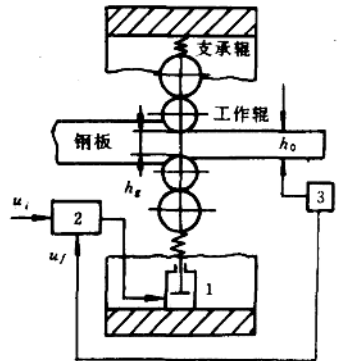


图 1-3 钢板轧制厚度控制系统

### 四、滚筒转速伺服控制系统

港口、建筑、采矿、石油等工程现场的提升机械设备中,大多数都采用滚筒装置,对滚筒转速的控制问题具有普遍性。图 1-4 所示为滚筒转速伺服控制系统,其工作原理如下:当转速指令信号  $e_i$  为零时,电液伺服阀无输入,电流  $i=0$ ,无流量进入液压缸,变量泵亦无输出流量  $Q_p=0$ ,定量马达静止不转  $\omega=0$ ,即滚筒转速为零。当有转速指令信号  $e_i \neq 0$  时,在伺服放大器前部的比较器中,指令信号  $e_i$  与反馈信号  $e_f$  进行比较,产生偏差电压  $e_g = e_i - e_f$ ,经过伺服放大器将  $e_g$  放大并转换成电流信号  $i$ ,将  $i$  输入到电液伺服阀,根据  $i$  的大小和极性控制电液伺服阀输出的流量和方向,使液压缸输出相应的位移,用此位移控制变量泵变量机构的摆角(即泵斜盘倾角),改变变量泵的流量  $Q_p$ ,控制定量马达的转速  $\omega$ ,从而实现滚筒转速的控制。反馈信号  $e_f$  是通过测速发电机检测,且与  $\omega$  成比例。如果指令信号  $e_i$  不断变化,则滚筒转速  $\omega$  也相应

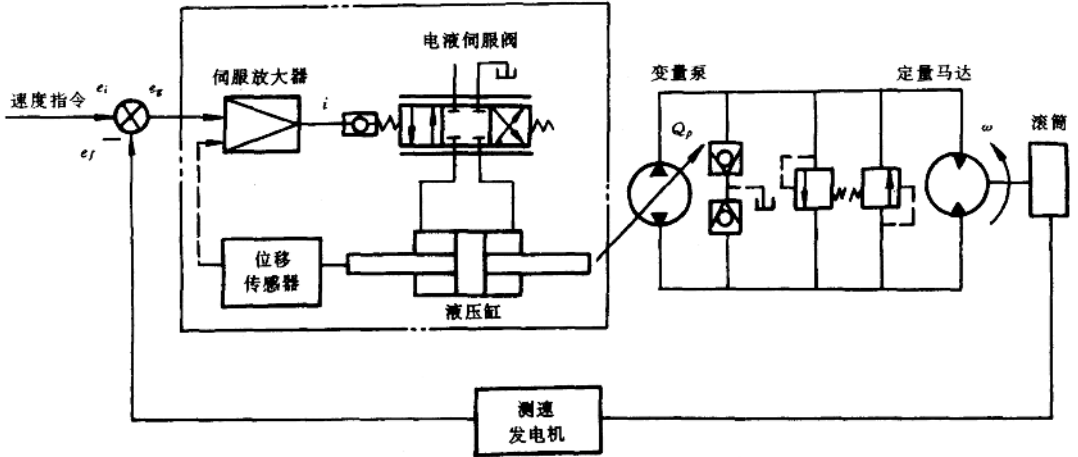


图 1-4 滚筒转速伺服控制系统

变化,  $e_f$  亦跟着变化; 一旦  $e_i = e_f, e_g = 0$ , 则电液伺服阀输出流量为零, 液压缸保持原来已输出的位移不变, 从而变量泵流量  $Q_p$  一定, 定量马达的转速  $\omega$  为对应常值, 即滚筒转速保持恒定, 完成了滚筒转速的伺服控制。

### 五、石油钻机控制系统

图 1-5 所示为石油钻机控制系统, 其主要功能有二: 一是控制绞车通过钢丝绳带动钻柱提升和下降; 二是控制转盘驱动钻柱转动。由于钻井工况和地质情况复杂多变, 需要对钻柱的提升、下降和转动进行灵活方便的无级调速。

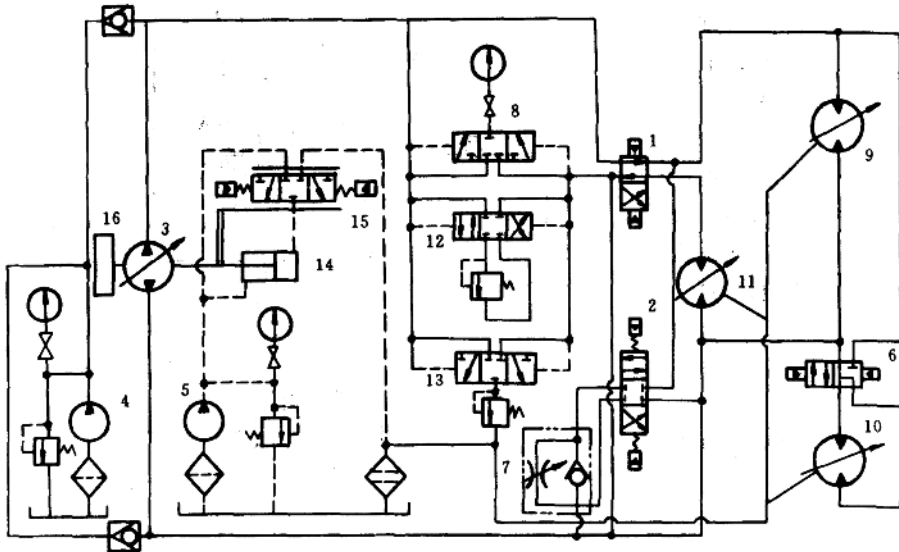


图 1-5 石油钻机控制系统

1、2、6-电液换向阀; 3-双向变量泵; 4-补油泵; 5-控制油泵; 7-单向节流阀; 8-压力表及开关; 9、10-绞车液压马达; 11-转盘液压马达; 12-换向、安全阀; 13-冷却换向阀; 14-伺服液压缸; 15-伺服阀; 16-柴油机

### 1. 钻柱的提升和下降

钻机中由绞车卷绕钢丝绳,由钢丝绳带动钻柱实现提升或下降。柴油机 16 带动双向变量泵 3,两个双向变量液压马达 9 和 10 驱动绞车,电液换向阀 6 可选择是用一个马达 9 驱动绞车还是用两个马达 9 和 10 同时驱动绞车(增加提升力)。在提升过程中换向阀 1 可使转盘液压马达 11 处于浮动状态。

钻柱靠自重下降,带动绞车和马达 9、10 反转,此时泵 3 的流量为零,靠换向阀 2 和单向节流阀 7 使马达 9、10 浮动,还靠阀 7 的节流作用控制钻柱的下降速度,同时备有机械刹车。

### 2. 钻柱的转动

由转盘带动钻柱的转动,泵 3 控制马达 11 驱动转盘转动。

### 3. 钻柱提升、下降和转动的速度及方向的控制

伺服阀 15 和伺服液压缸 14 构成泵 3 的伺服变量机构,用该机构控制双向变量泵 3 的流量和流向,从而可进行钻柱下降和转动的速度及方向控制。这是一个泵控马达的速度控制系统,属于开环控制系统,基本上能够满足钻机的控制要求。

系统中泵 3、马达 9、10 和 11 均属可变量机构,变速范围较大,总调速比可达 1:30 以上。阀 8 是测压换向阀。阀 12 的作用是主油路高、低压对调时可共用一个安全阀对系统进行溢流保护。阀 13 可使泵控马达主油路的低压段适当放油,让补油泵 4 通过单向阀给该低压段补充油箱的冷油,达到冷却主油路油液的作用。

## 六、工作台往复运动位置控制系统

图 1-6 所示为典型的工作台往复运动位置控制系统,它主要由指令电位器、放大器、电液伺服阀、液压缸、工作台和反馈电位器组成。系统的被控量是工作台往复运动的位置(位移) $x_f$ ,系统的功能是使  $x_f$  按照指令电位器的输入信号  $x_i$  的变化规律而变化。这是一个负反馈闭环控制系统。

当给定输入信号  $x_i$  时,指令电位器产生相应的电压信号  $e_i$ ,此时若被控工作台所处位置为  $x_f$ ,则由反馈电位器检测并产生相应的电压信号  $e_f$ ,两个参数相同的线性电位器接成桥路,该桥路输出  $\Delta e$  称为偏差电压,则

$$\Delta e = e_i - e_f = K(x_i - x_f)$$

式中  $K$ ——电位器增益,

$$K = E/x_0$$

当工作台位置与指令电位器位置对应一致时,即  $x_i = x_f$ ,则桥路输出  $\Delta e = 0$ ,此时放大器无输出,  $I = 0$ ,电液伺服阀处于零位,无输出流量  $Q$ ,液压缸不动,工作台处

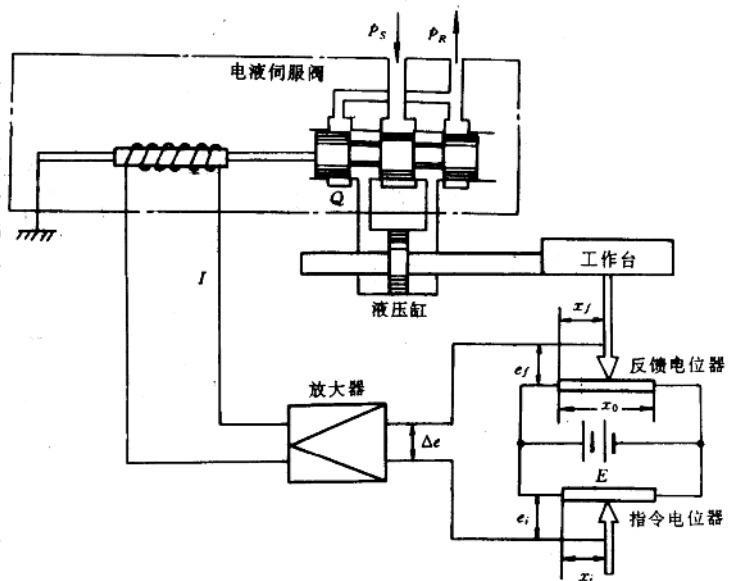


图 1-6 工作台往复运动位置控制系统

于静止状态。

输入信号  $x_i$  发生变化时,例如指令电位器滑臂向右移  $\Delta x_i$ ,在工作台位置变化之前电桥输出的偏差电压  $\Delta e = K\Delta x_i$ ,该偏差电压经放大器放大并转换成电流信号  $I$  去控制伺服阀,伺服阀输出压力油  $Q$  进入液压缸的左腔推动工作台向右移动  $\Delta x_f$ , $\Delta x_f$  逐渐增大,直至  $\Delta x_f = \Delta x_i$  时,桥路重新平衡, $\Delta e = 0, I = 0, Q = 0$ ,工作台停止右移,静止在新的位置上。如果指令电位器的滑臂左移,则工作台向左跟随移动。

该系统的工作台位置能精确地跟随指令电位器滑臂位置(即输入信号)而变化,实现位置跟踪,故称为工作台往复运动位置控制系统或位置伺服系统。

这个系统输出位移  $x_f$  之所以能够精确地复现输入位移  $x_i$ ,是因为  $e_f$  不断地同  $e_i$  进行比较得出偏差电压  $\Delta e$ ,由  $\Delta e$  产生  $I$ ,由  $I$  产生  $Q$ ,由  $Q$  产生  $x_f$ ,从而完成工作台的跟踪。 $\Delta e$  越大, $Q$  越大,跟踪越快;反之跟踪就慢。当  $\Delta e = 0$  时, $Q = 0$ ,工作台保持静止。该系统属于反馈控制系统,是靠偏差电压  $\Delta e$  进行工作的,其控制过程就是以偏差消除偏差的过程。

### 第三节 工程控制的基本概念

工程控制的研究对象是工程控制系统。本节介绍几个有关系统的基本概念。

#### 一、基本术语

##### 1. 控制系统和工程控制系统

将某些元部件、装置或计划进行组合,使其能够完成预定的功能或达到某一目的,这种组合就称为控制系统。这个定义的含义是非常广泛的,它不仅包含机械、电子、液压等类实体元件组成的物理系统,而且还包含一些抽象的动态现象,如经济学中的经济运行系统;人口学中的人口变迁系统等都各自组成相应的控制系统。控制系统是控制论的研究对象。

在工程技术中将机、电、液、气等实体元件进行组合,使其完成预定功能,这种实体组合称为工程控制系统。如数控机床的刀具进给系统,恒温控制箱的温度控制系统等。

##### 2. 反馈信号和反馈控制系统

由反馈元件输出,并送入比较元件,与输入信号进行比较的信号称为反馈信号,如图 1-7 所示,它是与输入信号具有相同形式的物理量,反馈信号可以是输出信号本身,也可以是输出信号的函数。

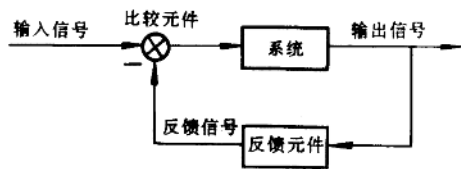


图 1-7 反馈控制系统

当反馈信号与输入信号的符号相同时称为正反馈,相反时则称为负反馈,直接取自系统最终输出端的反馈称为主反馈,否则为局部反馈。局部反馈往往是为了对系统进行补偿、线性化而设的,有些局部反馈是元件本身所固有的。

具有主反馈回路的系统称为反馈控制系统。主反馈一定是负反馈,因为正反馈会使偏差越来越大,直至系统完全失控。严格地说,反馈控制系统都是负反馈控制系统。

##### 3. 开环控制系统和闭环控制系统

若系统输出量对控制作用不产生影响,即无主反馈的系统称为开环控制系统。在这种系统中,通常输入信号是预先确定的,系统的控制精度取决于各元件、部件的精度。如图 1-8 所示洗衣机的控制就是一个开环控制系统,人根据经验预先设定洗衣时间(或程序),不检测衣服洗涤

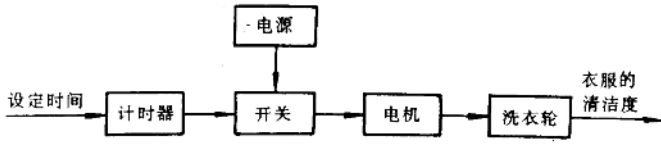
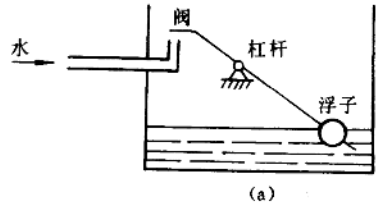


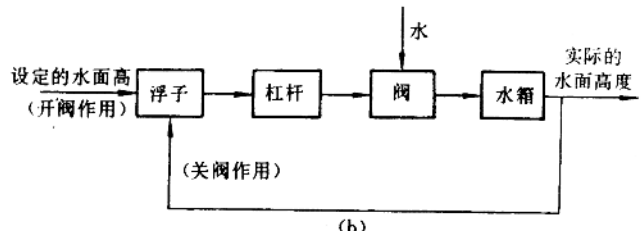
图 1-8 洗衣机开环控制系统

的干净程度,设定时间一到立即自动停止,输出量(衣服的清纯度)对系统的控制作用不产生任何影响。

若系统输出量对控制作用产生影响,即有主反馈的系统称为闭环控制系统。在这种系统中,输入信号与反馈信号相比较所产生的误差信号经转换和放大后,输入执行元件控制被控对象,使系统的输出量向着减少或消除误差的方向变化,从而使输出量趋近于与输入相对应的期望值。图 1-9 所示的水箱水面高度控制就是一个闭环控制系统,通过改变浮子在杠杆上的位置,来设定水面的高度,用杠杆完成反馈功能,随着水面的升高,浮子逐渐浮起,通过杠杆逐渐关小阀口,当实际水面高达到设定高度时,阀口完全关闭,水面保持设定高度,即达期望值。闭环控制系统就是反馈控制系统,它的控制精度高、对系统内外部干扰不敏感,但存在稳定性、稳态误差等问题。



(a)



(b)

图 1-9 水箱水面高度闭环控制系统

## 二、基本元件

实际的工程控制系统有简单的和复杂的,功能和具体结构也

各不相同,但都是由一些基本元件所组成。图 1-10 所示为一典型工程控制系统的组成图,它表示了系统组成的基本元件及其在系统中的位置和相互作用的关系。下面简要介绍它们各自的功能及典型装置,以期对工程控制系统的组成有初步的认识。

### 1. 输入元件

输入元件也称给定元件,用于产生指令信号(也称输入信号或控制信号) $x_i$ ,加于系统的输入端。它可以是人工调节的电位器,也可以是函数发生器、可编程序控制器或计算机。

### 2. 反馈元件

反馈元件也称检测反馈元件,用于检测系统的输出量,并将其转换成主反馈信号 $x_f$ ,主反馈信号与输出量存在确定的函数关系(通常为比例关系)。 $x_f$ 应与 $x_i$ 有相同的形式和量纲,以便进行比较。它可以是与输出量 $x_o$ 相应的各类传感器,如测速发电机、位移传感器等。

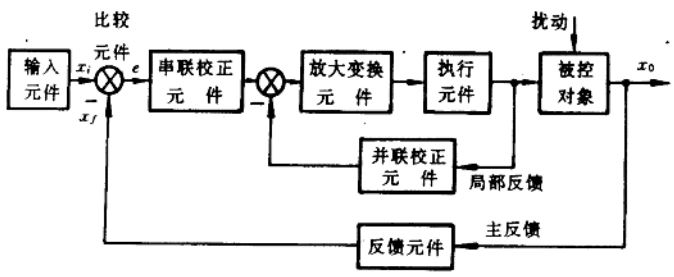


图 1-10 典型工程控制系统

### 3. 比较元件

比较元件用于比较指令信号和反馈信号,并给出偏差信号 $e$ ,其实质是个减法器。它可以是运算放大器或差接的电路,也可由计算机实现。实际工程系统中比较元件并不一定独立存在,有时它与放大元件组合在一起;有时它与输入元件、反馈元件组合在一起构成偏差(误差)检测器,如自整角机、旋转变压器等。

#### 4. 放大变换元件

放大变换元件用于将微弱的偏差信号(或输入信号)放大并转换为强功率信号,如电流和电压或流量和压力。通常它包括前置放大和功率放大,它可以是电放大器或电液伺服阀等。放大变换元件是工程控制系统的重要组成部分,必须具有足够的输出功率和良好的静态、动态特性。

#### 5. 执行元件

执行元件是将电能(电流和电压)或液压能(流量和压力)转换成机械能(力和位移或力矩和转角)直接驱动被控对象的元件,如执行电动机、液压马达等。为使驱动特性与被控对象的负载特性相匹配,还可附加变速机构,如减速器等。

#### 6. 被控对象

被控对象是为完成一定功能动作的机械装置,系统所要操作的对象,如轧辊、滚筒等。从力学观点来看被控对象就是负载力或负载力矩,可分为惯性的、弹性的、摩擦的、流体的、恒定的、变化的或随机的等,工程实际中通常都是几种性质负载的组合。

#### 7. 校正元件

校正元件也称校正装置,是为用于改善系统性能而增加的具有某种典型特性的元件,可分为串联校正元件和并联校正元件。通常使用的有无源或有源微积分网络、速度和加速度传感器等。

### 三、基本类型

工程控制系统的类型很多,他们的结构和所完成的任务也各不相同,按不同的分类原则有如下基本类型。

#### 1. 按输入量的变化规律分类

① 恒值控制系统 输入量为恒定不变的系统,对这类系统分析的重点在于克服扰动对输出的影响。如稳压电源、恒温控制系统等。

② 程序控制系统 输入量为已知给定的时间函数时称为程序控制系统。由于微处理机的发展,数字程序控制系统应用日益广泛。如程控机床、程控电话机等。

③ 随机控制系统 也称随动系统,这种系统的输入量是时间的未知函数,即输入量的变化规律事先无法确定,要求输出量能够准确、快速地复现输入量。如火炮自动瞄准目标的控制系统等。

#### 2. 按描述系统的微分方程分类

① 线性控制系统 描述系统微分方程是线性的,如微分方程的系数是常数,则称为线性定常控制系统;如系数不是常数而是时间 $t$ 的函数,则称为线性非定常(或变系数)控制系统。线性系统的特点是可应用叠加原理,在数学上较容易处理。

② 非线性控制系统 描述系统的微分方程是非线性的,在数学处理上比较困难。

#### 3. 按系统传递信号的性质分类

① 连续控制系统 系统传递的信号都是时间的连续函数。

② 数字控制系统 系统传递的信号是数字量,数值不连续,时间上是离散的,一般来说信号的输入、检测、比较、放大均由微处理机实现。这种系统也称为采样系统或离散系统。

#### 四、基本要求

工程控制系统用于不同的目的,具体要求往往不完全一样,但存在着共同的基本要求,一般将其归结为稳定性、准确性和快速性,简称“三性”。工程控制基础是研究各类工程控制系统共同规律的一门技术,因此也可以说它研究的主要内容是工程控制系统的“三性”。

##### 1. 稳定性

由于系统或多或少的都存在着惯性,当系统的各参数分配不当时,将会引进系统的振荡而失去工作能力,稳定性就是指系统动态过程的振荡倾向和系统能够恢复平衡状态的能力。一个稳定的系统,当输出量偏离平衡状态后,应该随时间增长而收敛,并最终回到初始的平衡状态。稳定性的要求是系统能正常工作的首要条件。

##### 2. 准确性

准确性是指在瞬态过程结束后的输出量与期望输出量之间的偏差,也称稳态误差或静态误差。它是衡量系统控制精度的指标,如数控机床的稳态误差愈小,则加工精度也就愈高,一般恒值控制系统的精度在期望值的1%以内。但准确性只在系统稳定的前提下才有意义。

##### 3. 快速性

快速性也是在系统稳定的前提下提出的,是指系统消除实际输出量与期望输出量之间偏差过程的速度。如果快速性差,则消除偏差的时间长,说明系统反应迟钝,难以复现快速变化的指令信号。

上述工程控制系统的稳定性、准确性和快速性主要与系统本身结构参数有关,也可能与外界作用有关。三者之间相互联系而又相互矛盾,如提高系统的快速性,有可能引起系统强烈的振荡而趋向不稳定,即会使系统的稳定性下降;如增加系统的稳定性,则系统的响应有可能变慢,即快速性下降,甚至有时会使稳态误差增大。由于被控对象的要求不同,所用系统对稳、准、快三项指标的要求各有所侧重,如对速度控制系统要求较好的稳定性;对高精度位置控制系统重点要求准确性;对用于飞行器姿态控制的电液控制系统则首先要求有较好的快速性。

## 习 题

1. 什么是工程控制系统? 试举例说明。

2. 什么是开环控制系统? 什么是闭环控制系统? 二者的本质区别何在?

3. 函数记录仪是一种自动记录电压信号的设备,其原理图如图1-11所示。其中记录笔与电位器 $R_M$ 的电刷机构联结,由电位器 $R_0$ 和 $R_M$ 组成桥路的输出电压 $u_p$ 与记录笔位移成正比。当有输入信号 $u_r$ 时,在放大器输入端得到偏差电

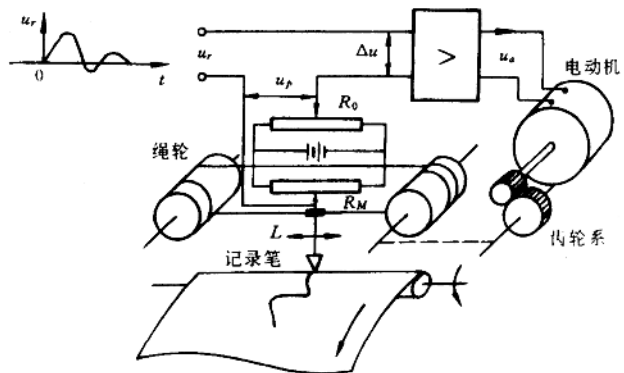


图 1-11 函数记录仪原理图



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  $\Delta u$  减小, 直到  $u_p = u_r$ ,  $\Delta u = 0$  时, 电动机停止转动。这时记录笔的位移  $I$  就代表了输入信号的大小。若输入信号  $u_r$  随时间连续变化, 则记录笔便跟踪并记录其随时间变化的曲线。试说明该系统有哪些基本元件? 并描述系统中信号的传递过程。