



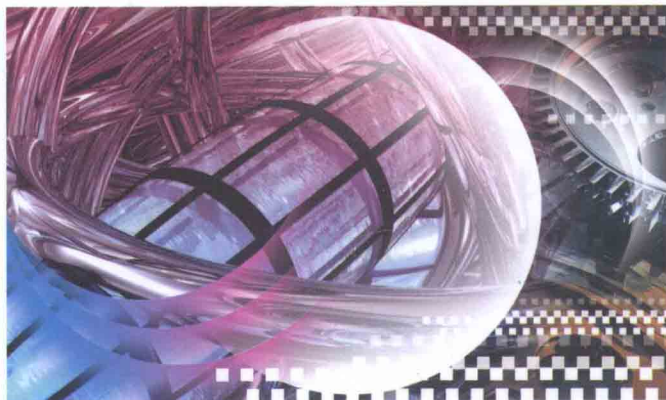
北京市高等教育精品教材立项项目

面向“十二五”高等教育课程改革项目研究成果

机械控制工程基础

JIXIE KONGZHI GONGCHENG JICHU

◎ 主 编 张之敬



北京高等教育精品教材立项项目
面向“十二五”高等教育课程改革项目研究成果

机械控制工程基础

张之敬 主编

 北京理工大学出版社

BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

内 容 简 介

本教材是针对机械工程有关专业本科生编写的,内容包括:控制工程基础的基本概念、控制系统的数学描述、控制系统的时域分析方法、控制系统的频域分析方法和控制系统的校正与分析。每章末附有习题,附录中给出了习题的参考答案。

本书可作为机械工程及其自动化(机械设计制造及其自动化)、机械电子工程、工业工程等专业的本科生、各类大专生的控制工程基础的教材,也可以作为相关专业的教师和工程技术人员的参考书。

版权专有 侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

机械控制工程基础 / 张之敬主编. —北京:北京理工大学出版社, 2011. 1

ISBN 978 - 7 - 5640 - 4124 - 3

I. ①机… II. ①张… III. ①机械工程 - 控制系统 - 高等学校 - 教材
IV. ①TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 260004 号

出版发行 / 北京理工大学出版社

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 / 100081

电 话 / (010)68914775(办公室) 68944990(批销中心) 68911084(读者服务部)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 北京泽宇印刷有限公司

开 本 / 787 毫米 × 1092 毫米 1/16

印 张 / 11

字 数 / 255 千字

版 次 / 2011 年 1 月第 1 版 2011 年 1 月第 1 次印刷

印 数 / 1 ~ 4000 册

定 价 / 21.00 元

责任校对 / 王 丹

责任印制 / 边心超

图书出现印装质量问题,本社负责调换

前 言

本教材是针对机械工程有关专业本科生编写的。本书共分五章：第1章为控制工程基础的基本概念；第2章为控制系统的数学描述；第3章为控制系统的时域分析方法；第4章为控制系统的频域分析方法；第5章为控制系统的校正与分析。全书计划授课学时数40~60学时，可作为机械工程及其自动化、机械电子工程等专业的专业基础课，“控制工程基础”及相关课程的教材。

本教材的主要特点是：在内容上紧紧围绕经典控制理论的基本概念和方法展开，突出机电控制系统的实例；在讲述方法上，从简单的实例入手引出控制理论的一般概念，力求做到深入浅出、循序渐进、突出重点、前应后呼，便于学生理解。为了方便学生自学，本教材每章末附有习题，附录部分给出了各章习题的参考答案。

本教材由北京理工大学张之敬教授主编，在编写过程中，金鑫、叶鑫和姜明老师参加了第4章和第5章的部分编写工作。北京理工大学张旺教授对书稿进行了详细审阅，并提出了许多宝贵修改意见。博士生左富昌、王强、张晓峰、刘冰冰、孙需要、郭娜、鄢勇等同学参与了大量的打字、排版、图例和习题整理等工作。

由于编者水平有限，本教材会有不少不妥和错误之处，恳切希望使用本教材的老师和其他读者不吝指正。

编 者

目 录

第1章 绪论	(1)
§ 1.1 自动控制的基本概念	(2)
1.1.1 反馈与控制	(2)
1.1.2 自动控制系统的组成	(6)
1.1.3 自动控制系统的分类	(7)
§ 1.2 自动控制系统实例	(8)
1.2.1 恒值控制系统	(8)
1.2.2 随动系统	(10)
§ 1.3 自动控制系统的性能要求	(11)
1.3.1 典型输入函数	(11)
1.3.2 自动控制系统的性能要求	(12)
习题	(14)
第2章 控制系统的数学描述	(16)
§ 2.1 控制系统的时间域的描述——微分方程	(16)
2.1.1 建立微分方程的一般步骤	(16)
2.1.2 用拉氏变换法求解线性常微分方程的方法简介	(19)
2.1.3 微分方程解的物理意义	(20)
2.1.4 非线性系统的(小偏差)线性化	(20)
§ 2.2 控制系统的s域描述之一——传递函数	(21)
2.2.1 传递函数的定义	(21)
2.2.2 传递函数的性质	(22)
2.2.3 典型环节的传递函数	(22)
§ 2.3 控制系统的s域描述之二——框图(结构图)	(25)
2.3.1 框图基本要素和组成	(26)
2.3.2 控制系统框图的画法	(26)
2.3.3 框图的等效变换	(28)
§ 2.4 反馈控制系统传递函数的一般表达式	(31)
2.4.1 闭环控制系统框图的一般表达式	(31)
2.4.2 闭环传递函数的一般表达式	(32)
2.4.3 开环传递函数	(32)
习题	(33)
第3章 控制系统的时间域及s域分析方法	(39)
§ 3.1 稳定的基本概念	(39)

3.1.1	稳定性定义	(39)
3.1.2	线性控制系统稳定的充分和必要条件	(40)
§ 3.2	系统稳定性判定方法——劳斯 (Routh) 判据	(41)
3.2.1	系统稳定的必要条件	(41)
3.2.2	劳斯判据	(42)
3.2.3	利用劳斯判据确定使系统稳定的参数	(43)
§ 3.3	过渡过程有关的基本概念	(44)
3.3.1	时间响应	(44)
3.3.2	过渡过程	(44)
3.3.3	评价过渡过程性能的指标	(45)
§ 3.4	一阶系统的过渡过程分析	(45)
3.4.1	一阶系统的数字模型	(45)
3.4.2	一阶系统的单位阶跃响应	(45)
3.4.3	一阶系统的单位斜坡响应	(46)
§ 3.5	二阶系统的过渡过程分析	(47)
3.5.1	二阶系统的数学模型	(47)
3.5.2	二阶系统的单位阶跃响应	(47)
3.5.3	欠阻 ($0 < \xi < 1$) 二阶系统的过渡过程性能指标分析	(50)
§ 3.6	高阶系统分析简介	(53)
3.6.1	高阶系统数学模型	(53)
3.6.2	主导极点和偶极子	(54)
§ 3.7	系统对任意输入信号的时间响应	(55)
3.7.1	线性控制系统的单位脉冲响应函数	(55)
3.7.2	系统对任意输入信号的响应	(55)
§ 3.8	控制系统误差分析的基本概念	(57)
3.8.1	误差函数与稳态误差	(57)
3.8.2	误差与偏差	(57)
3.8.3	误差传递函数	(58)
§ 3.9	稳态误差求法	(59)
3.9.1	稳态误差的一般解法	(59)
3.9.2	几种典型输入信号作用下的稳态误差 e_{ss} 的求解方法	(59)
3.9.3	用误差系数法求稳态误差	(62)
	习题	(63)
第 4 章	控制系统的频率域分析方法	(68)
§ 4.1	频率特性的基本概念及表示方法	(68)
4.1.1	频率特性的定义	(68)
4.1.2	频率特性的解析表示方法	(69)
4.1.3	频率特性的图形表示方法	(70)
§ 4.2	典型环节的频率特性	(72)

4.2.1	比例环节	(72)
4.2.2	积分环节	(72)
4.2.3	微分环节	(73)
4.2.4	惯性环节	(74)
4.2.5	一阶微分环节	(75)
4.2.6	振荡环节	(76)
§4.3	开环频率特性	(78)
4.3.1	准确开环幅相频率特性曲线的绘制	(78)
4.3.2	概略幅相曲线的绘制	(79)
4.3.3	开环对数坐标图	(81)
§4.4	最小和非最小相位系统	(83)
4.4.1	最小相位传递函数	(83)
4.4.2	对数幅频特性和对数相频特性的关系	(84)
§4.5	奈奎斯特稳定判据	(85)
4.5.1	幅角原理	(85)
4.5.2	奈奎斯特稳定判据	(88)
4.5.3	系统开环传递函数含有积分环节时奈氏判据的应用	(90)
§4.6	系统的相对稳定性	(93)
4.6.1	相对稳定性的概念	(93)
4.6.2	系统的稳定裕量	(93)
§4.7	系统动态性能与频域指标及参数的关系	(96)
4.7.1	超调量 σ_p 与相位稳定裕量 γ_c 间的关系	(96)
4.7.2	调整时间 t_s 与幅值穿越频率 ω_c 的关系	(97)
4.7.3	闭环频率特性参数 (M_p, ω_p, ω_b) 与过渡过程指标 (σ_p, t_r, t_s) 的关系	(97)
§4.8	利用频率特性求正弦信号作用下的稳态误差	(99)
习题		(100)
第5章 控制系统的校正		(105)
§5.1	校正基本概念与校正装置	(105)
5.1.1	校正基本概念	(105)
5.1.2	校正装置	(106)
§5.2	串联校正	(114)
5.2.1	比例 (P) 串联校正	(114)
5.2.2	比例微分 (PD) 校正 (相位超前校正)	(116)
5.2.3	相位滞后校正	(119)
5.2.4	串联滞后——超前校正	(122)
5.2.5	串联带阻滤波器校正	(127)
§5.3	反馈校正	(129)
5.3.1	反馈校正的一般特性	(129)

5.3.2 比例反馈包围惯性环节（硬反馈）	(129)
5.3.3 比例微分反馈包围积分环节和惯性环节相串联的元件（软反馈）	(130)
5.3.4 微分反馈包围积分环节和惯性环节相串联的元件（软反馈）	(130)
5.3.5 微分反馈包围振荡环节（软反馈）	(130)
5.3.6 一阶微分和二阶微分反馈包围由积分环节和振荡环节相串联组成的 元件（软反馈）	(131)
§ 5.4 PID 控制原理及其实例	(131)
5.4.1 PID 控制器原理	(131)
5.4.2 某精密微小型计算机显微测量仪的 PID 控制	(132)
习题	(137)
附录 1 拉普拉斯变换	(142)
附录 2 习题参考答案	(155)
参考文献	(168)

第 1 章 绪 论

粗略地讲，自动控制是人们利用某种装置或以某种方式使事物按照某种特定的规律自动运行或变化的过程。例如，数控机床根据控制器发出的指令和位置检测信号能够准确地控制机床工作台的位移轨迹达到自动加工工件的目的，仿生机器人能够根据视觉传感器对环境的探测通过控制器确定行动路径，化工生产中反应塔的温度和压力能够自动维持恒定，飞行器根据陀螺检测出的偏移量实时修正飞行方向等，都是自动控制理论和技术应用的结果。从 1784 年瓦特（James Watt）发明蒸汽机离心调速器以来，自动控制理论和技术与近代工业革命和技术的发展密切相关。19 世纪，大型蒸汽机作为动力用到轮船上，自动控制相应地在船速及船舵的控制上得到应用。1930 年左右，自动控制进一步应用到化工、冶金等工业部门，在这些部门中所控制的变量一般为生产过程中的温度、压力、流量以及液面高度等。在第二次世界大战期间，自动导引、高射火炮位置控制、雷达天线跟踪、飞机自动驾驶仪以及导弹制导等系统先后出现，这些装置的出现表明自动控制技术到了一个新的水平。1948 年，维纳（Weiner, N）所著《控制论》的出版标志着以反馈控制为中心的控制理论体系即经典控制理论基本形成。由于空间技术的发展，要求高精度地处理多变量和非线性控制问题，以及数字计算机的发展成熟，20 世纪 50 年代末 60 年代初形成了现代控制理论。现代控制理论的特点是：不仅研究系统的输入输出特性，而且还研究系统的内部特性；所使用的数学工具为矩阵理论等近代数学；所设计的系统对给定指标基本上是最优的，并且一般用计算机来实现控制。从 20 世纪 60 年代至今，现代控制理论又有巨大的发展，并形成了若干分支学科，如线性系统理论、最优控制理论、动态系统辨识、自适应控制、大系统理论等。

经典控制理论和现代控制理论构成了全部的控制理论。控制理论的发展进一步促进自动控制技术和其他学科的发展。现在自动控制技术及理论已经普遍应用于机械、冶金、石油、化工、电力、航空、航海、宇航、核反应堆、工业管理及生物学等各个科学领域，并为各学科之间的相互渗透起了促进作用。

今天，随着计算机技术的飞速发展，控制理论和技术得到了进一步发展，已被广泛应用于机械、冶金、石油、化工、电力、航空、航天、核工业、生物学等各个科学领域，并渗透到社会、经济、管理甚至政治等社会科学领域。

本教材重点介绍以单输入单输出的线性系统为主要对象的经典控制理论，为进一步学习有关机械、控制类专业其他课程打下一个较好的专业基础。

§1.1 自动控制的基本概念

1.1.1 反馈与控制

(1) 手动控制与自动控制。

所谓控制，是指对机器或物体的某些量的变化规律进行监视、测量，并将其结果与事先设定的目标值进行比较，然后用某种方式修正其与目标值偏离的差值的过程。如果这种过程中有人的动作参与，具体地说，其监测和修正是由人来完成时，称之为手动控制；如果整个过程由某种装置自动实现，则称之为自动控制。下面举例说明控制的概念。

例 1.1 图 1.1 表示了司机在道路上驾驶汽车时行驶方向控制过程。

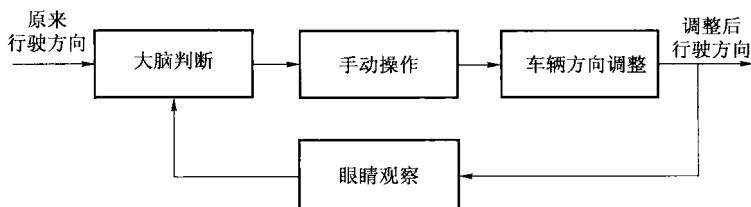


图 1.1

1) 当汽车在道路上行驶时，司机紧握方向盘且注视着车的前方。司机对汽车控制的目标值是使汽车在道路中以某种轨迹行驶，其参照物是路旁的某些物体或道路中的某些标志。

2) 当汽车偏离目标值即与参照物的距离发生变化时，司机通过眼睛将这种偏差反映给大脑，判断出偏差值的大小。

3) 根据上述判断信息，司机用手调整方向盘，使汽车又处于司机确定的合适的轨道上行驶的状态。

4) 调整后的行驶方向经眼睛观察并将观察结果送给大脑，继续判断所行驶方向。如果行驶方向有偏离，继续上述 2)、3) 的动作。

上述例子中，只考虑了汽车驾驶过程中的位置控制，忽略了速度控制。控制过程中，偏差值的测量和调整都是通过人进行的，这种控制就是一种手动控制。

例 1.2 图 1.2 表示了一个水箱液面自动控制的例子。其控制原理如下：

1) 当流出口处阀门 E 关闭、出口流量 Q_2 为零且水箱液面保持在目标值 H 时，浮球处于最高位置，电位器滑动触头位于 B 点，电机绕组两端输入电压为零，阀门 F 处于关闭状态。

2) 当阀门 E 被打开，流量 $Q_2 > 0$ ，则液面下降，电位器滑动触头随着浮球的下降而上移。触头上移至 C 点后，电机转动，通过齿轮减速装置带动阀门 F 阀芯移动，打开阀门，使流量 $Q_1 > 0$ 。

3) 当阀门 E 关闭后， $Q_2 = 0$ ，则液面不断上升，上升到目标值 H （给定水位）的高度时，电位器滑动触头移动到 B 点，电机停转，阀门 F 在恢复力作用下自动关闭（图中没有

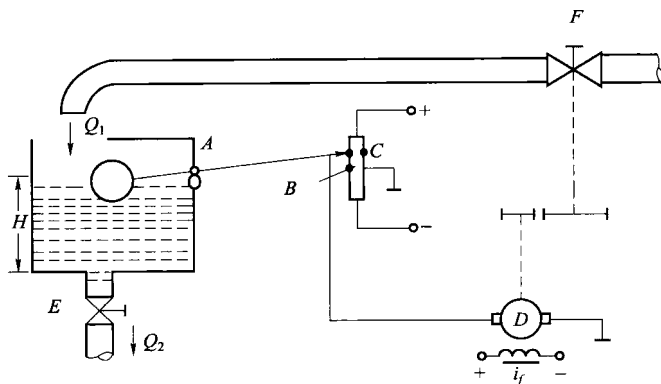


图 1.2

表示出阀门结构)，液面回到了原来的平衡状态。

在上例中，液面高度的检测和偏差值的消除都是控制装置自动进行的。整个过程是一种自动控制过程。

例 1.3 图 1.3 表示了某简易数控机床工作台控制原理，其控制过程如下：

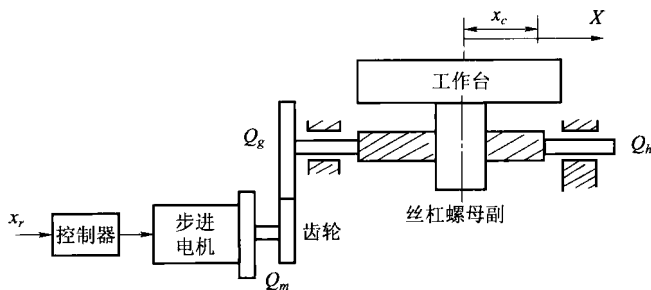


图 1.3

- 1) 根据图纸设定 x 方向加工尺寸 x_r 。
- 2) 把此数据输入机床控制器中，在控制器中把工作台总的行程换算成当量脉冲，使总脉冲数 = 总行程/脉冲当量。
- 3) 按计算所得脉冲数（电压信号）输给步进电机。
- 4) 步进电机输出转角 Q_m 通过减速齿轮变为转角 Q_g 传给丝杠。
- 5) 丝杠输出相应的转角 $Q_h = Q_g$ 。运动通过螺母传给工作台，工作台输出直线移动 x_c 。

在例 1.3 中，当系统中任意一个环节出现误差时，都会使工作台实际的输出 x_c 与控制目标值 x_r 之间存在有误差 $\Delta x = x_r - x_c$ 。本系统中，该误差是不能够被自动消除的。

例 1.4 图 1.4 是具有位置检测装置的直流伺服电机驱动的数控机床工作台运动原理简图。其控制过程如下：

- 1) 指令电位器 W_1 的滑动触点确定给工作台的位置指令，即 W_1 输入指令 x_r ，输出电压 u_r 。
- 2) 最初给出位置指令 x_r 时，在工作台改变位置之前的瞬间， $x_c = 0$ $u_c = 0$ 则电桥输出为偏差电压 $\Delta u = u_r - u_c = u_r$ 。

- 3) Δu 经放大器放大后, 变换为放大器输出电压 u_a 。
- 4) u_a 输入到直流伺服电机, 使其输出转角 θ_m 。
- 5) θ_m 经齿轮减速器传给丝杠, 丝杠输出转角 θ_h 。
- 6) 丝杠通过螺母将转动变换为工作台的移动, 工作台输出直线运动 x_c 。
- 7) 由于工作台的移动量为 x_c , 则 (反馈) 电位器 W_2 的滑动触点也移动 x_c , 使触点端输出 (反馈) 电压 u_c 。
- 8) 当 $x_c = x_r$ 时, $u_c \rightarrow u_r$, $\Delta u \rightarrow 0$, 工作台停止运动, 整个机械系统控制过程完毕; 如果 $u_r - u_c > 0$, $\Delta u > 0$, 即可知 $x_c < x_r$, 工作台继续向前运动; 反之, 工作台向后运动, 直到 $x_c = x_r$, 运动停止。

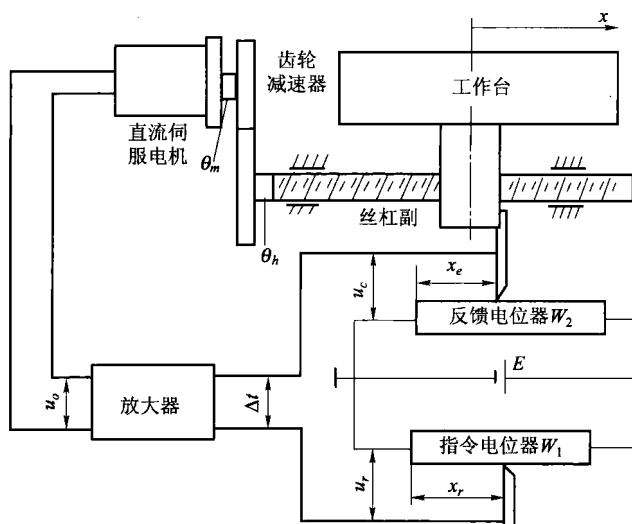


图 1.4

上例中, 当系统任一环节出现误差时, 都会使 $\Delta x = x_r - x_c \neq 0$, 则 $\Delta u = u_r - u_c \neq 0$, 工作台会继续向前或向后移动, 直至 $\Delta x = x_r - x_c = 0$, 控制过程结束。

(2) 反馈的概念。

从上面例子可以看出, 无论是手动控制还是自动控制, 其基本控制过程是类似的, 可以分别画出如图 1.1 和图 1.5 表示的控制过程原理框图。两种控制过程都是以目标值 (汽车行驶适当的方向、液面目标高度 H) 为基准, 经过某种操作或动作 (操作方向盘、打开阀门

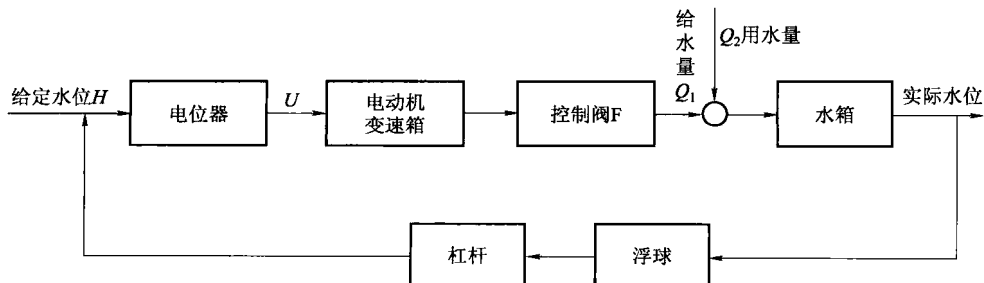


图 1.5

等一系列动作)使控制对象(汽车、水箱)的运动或状态逐步接近目标值。这种实际的运动规律或状态经过某种方式的检测(眼睛、浮球—杠杆—电位器)并与目标值比较后得出偏差值,根据偏差值进行实际操作或调整,使控制对象实际的运动或状态不断接近目标值。

这里,我们把能够完成诸如上述控制过程的系统称之为控制系统。以目标值为基准,对系统施加的作用称为对控制系统的输入量(或输入信号),被控量又可称为控制系统的输出量(或输出信号)。而将对系统输出量进行检测并把结果送回到系统的输入端与系统输入量(或目标值)进行比较的过程称为反馈。与系统输入量进行比较的信号叫反馈量或反馈信号。具有反馈的控制过程叫反馈控制。

反馈是事物之间或事物内部相互作用和信息传递的重要方式。广义地讲,它是事物发展变化过程得以控制的基本条件之一。如例1.1中,如果没有司机通过眼睛观察、大脑判断、调整方向盘等一系列动作形成的反馈过程,汽车就无法在道路上行驶;例1.2中,如果不设置浮球—杠杆—滑变电阻以及回转运动装置,就难以确定什么时候该打开或关闭进水阀门 F ,液面高度就无法控制。

反馈控制是自动控制系统的基本控制方式,也是自然界中一切生物自身运动控制的基本方式,同时也是人类社会发展的规律。本课程中所学的自动控制系统就是建立在反馈控制的基本原理上的,主要研究对象就是反馈控制系统。

(3) 开环控制。

在上述例1.1中,反馈过程是由人来完成的。在实际生产或生活中使用的许多机器或装置像汽车一样本身不具有反馈能力,如普通洗衣机的洗涤过程控制,普通机床的主轴转速控制等。在这类系统中,输入量和输出量之间只有顺向作用而无反向联系,这种控制方式称为开环控制。也就是说,机器或装置所组成的控制系统中,如果没有把系统输出量送回到系统输入端并与输入信号进行比较的反馈装置,则这种系统称为开环控制系统。图1.3所表示的简易数控铣床工作台进给系统就是一个开环控制系统的例子。图1.6是该控制系统的原理性框图。

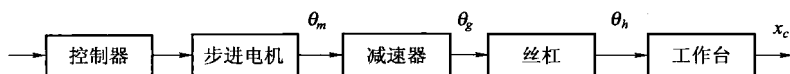


图 1.6

在上述系统中,当某个环节产生随机误差时,如步进电机丢转后,产生 $\Delta\theta$ 的转角误差,则工作台移动距离也产生误差 Δx_c 。所以在开环控制系统中,当某环节由于元件参数变化或外界扰动而产生偏差并使系统输出量有误差时,无法自动调整输出量、消除误差。但由于开环控制系统具有结构相对简单、工作稳定(见本章1.3节)等优点,在实际生产中被大量采用。

(4) 闭环控制。

如前所述,控制系统的输入量与输出量之间不仅有顺向作用,而且有反向作用即反馈作用的控制过程称为反馈控制,其系统称为反馈控制系统。反馈控制又称为闭环控制,其系统又称为闭环控制系统。上述图1.4所示具有位置检测装置的直流伺服电机驱动的数控机床工作台运动控制就是一种闭环控制,该系统就是一种闭环控制系统。图1.7是这种闭环控制系统的原理性框图。

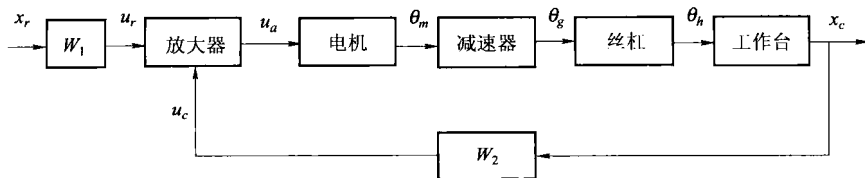


图 1.7

对于闭环控制系统，由于有反馈作用，闭环控制可以修正因元件参数变化以及外界扰动等因素引起系统输出量产生的偏差，其控制精度较高。但需设置反馈装置，结构较开环控制系统复杂，并存在有稳定性问题（见本章 1.3 节）。

1.1.2 自动控制系统的组成

上述例 1.2 和例 1.4 中讲述的闭环控制系统，虽然其用途和内部结构、输入量、输出量等完全不同，但都是按反馈原理构成的自动控制系统。如果把系统中各个环节按其对信号的作用及其功能分类，则可得出组成自动控制系统的基本要素。习惯上又把这些基本要素称为元件。一个自动控制系统主要由如下元件组成。

(1) 基准输入元件——把控制目标值转换为可与系统反馈信号相比较的基准输入信号的元件。如例 1.4 中的指令电位器 W_1 。

(2) 检测元件——对系统输出量进行检测并变换后送回到系统输入端与基准输入信号进行比较的元件。由此产生的反馈信号称为主反馈信号。如果反馈信号是由系统某个中间环节引出来或送回到某个中间环节的输入端，则称这种反馈为局部反馈。严格地讲，只有具有主反馈方式的系统称为闭环控制系统。如例 1.4 中的反馈电位器 W_2 就是检测元件，其产生的反馈信号 U_c 就是主反馈信号。检测元件又称为反馈元件。

(3) 比较元件——用以比较基准输入信号和主反馈信号，并产生反映其差值的偏差信号的元件。如例 1.4 中由指令电位器 W_1 、反馈电位器 W_2 和电源组成的电桥就是一个比较元件。

(4) 放大变换元件——对偏差信号进行放大和变换、输出足够功率和合适形式的物理量给后续的运动部件或装置的元件。如例 1.4 中的放大器。

(5) 执行元件——根据放大、变换后的偏差信号，对被控制对象进行控制、使之输出与控制目标值相吻合的物理量的元件。如例 1.4 中的直接伺服电机、齿轮传动和丝杠螺母机构所组成的部分。

(6) 被控对象——指人们要求实现某种确定的运动、生产过程、状态以及特定要求的机器设备即控制系统所要控制的装置、系统或产生过程。如例 1.4 中的工作台。

上述元件 (1) ~ (5) 组成控制装置即对被控对象起控制作用、使之实现所要求动作的机械 - 电子电气系统；由上述控制装置和被控对象组成的系统称为自动控制系统。

上述各元件除比较元件外，都可以用如图 1.5 框图来表示。其中左右两边的有向线，分别表示元件的输入量和输出量。比较元件如图 1.8 所示，其中箭头向着圆圈的有向线表示在比较元件中进行比较的信号，符号表示信号的正负。箭头向外的有向线表示比较元件的输出信号。一个控制系统可以用如图 1.8 的框图来表示，其中扰动表示来自系统之外或系统内部的干扰信号，即不需要却又对系统输出量有影响的物理量前向通路是指系统输入量与输出量

之间的顺向传递路径,而反馈通路是指系统输出量经反馈元件变换后成为反馈信号送回到输入端的信号传递路径。

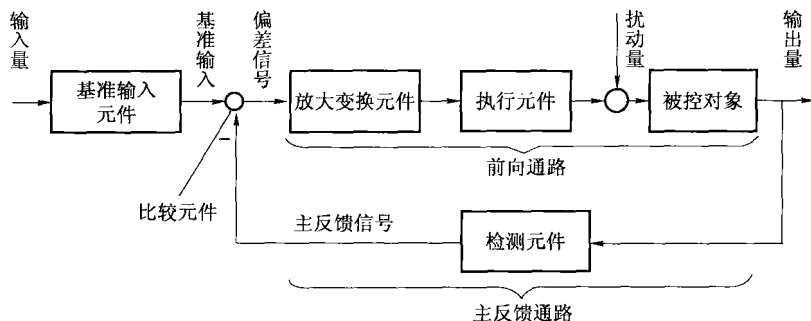


图 1.8

1.1.3 自动控制系统的分类

为了加深了解自动控制的概念和特点,现介绍一下自动控制系统的分类。由于自动控制技术发展很快,应用领域宽广,分类方法很多,这里仅介绍几种常见分类方法。

(1) 按控制目标即理想输出信号的特征分类。

1) 恒值控制系统 如果控制系统的控制目标即理想输出信号是常数,并要求在干扰作用下,其输出量在某一希望值附近做微小变化,则称这类系统为恒值控制系统。如控制的房间温度的空调、恒定压力控制的保压系统、液面高度控制系统等都是恒值控制系统。

2) 随动系统(又称伺服系统) 如果系统的输入信号是时间的函数(可以是已知的也可以是未知的),但是要求系统的输出信号须精确地随输入信号变化而实时地作相对应的变化,则这类控制系统称为随动系统。如雷达天线跟踪系统、数控机床工作台的伺服控制等属于这类系统。

3) 过程控制系统 生产过程通常是指把原料放在一定的外界条件下,经过物理或化学变化而制成产品或储能介质的过程。例如化工、石油、造纸中的原料生产;冶炼、发电中的热力过程等。在这些过程中,往往要求自动提供一定的外界条件,例如温度、压力、流量、液位、黏度、浓度等参量在一定的时间内保持恒值或按一定的程序变化。在生产过程的某一个局部系统,可能是一种按设定程序指令变化的恒值控制系统,也可能是一种随动控制系统。

(2) 按输入信号与输出信号关系分类。

1) 线性系统。如果一个系统的输入 $r(t)$ 与输出 $c(t)$ 之间具有如下关系。

① 当输入为 $A \cdot r(t)$ 时,输出为 $A \cdot c(t)$ (均匀性)。

② 当输入为 $\sum_{n=1}^N r_n(t)$ 时,输出为 $\sum_{n=1}^N c_n(t)$ (叠加性)。

则称该系统为线性系统。线性控制系统的运动方程一般可用常系数或变系数线性微分方程来描述。经典控制理论研究的是线性定常系统,即其运动方程为常系数线性微分方程。

2) 非线性系统。如果输入与输出之间不满足线性系统中阐述的条件,即输入与输出之

间呈非线性关系的系统为非线性系统。描述非线性控制系统的运动方程为非线性微分方程。

(3) 按动作信号与时间的关系分类。

1) 连续系统。若系统中各元件的输入量和输出量均为时间的连续函数时，则称这类系统为连续系统。

2) 离散系统。在系统中只要有一个环节的信号是脉冲序列或数字编码时，就称这类系统为离散系统。离散系统的运动规律可用差分方程描述。数字计算机控制的系统都可称为离散系统。

3) 概率控制系统。如果作用于系统的信号是不能用时间函数明确表示，只能用统计特征描述的随机信号，则称这类系统为概率控制系统。

§1.2 自动控制系统实例

1.2.1 恒值控制系统

(1) 转速、电流双闭环模拟式直流调速系统。

直流调速系统是用直流伺服电机作为执行元件、其转速作为被控量的伺服系统。图 1.9 是一种转速、电流双闭环模拟式直流调速系统原理图。

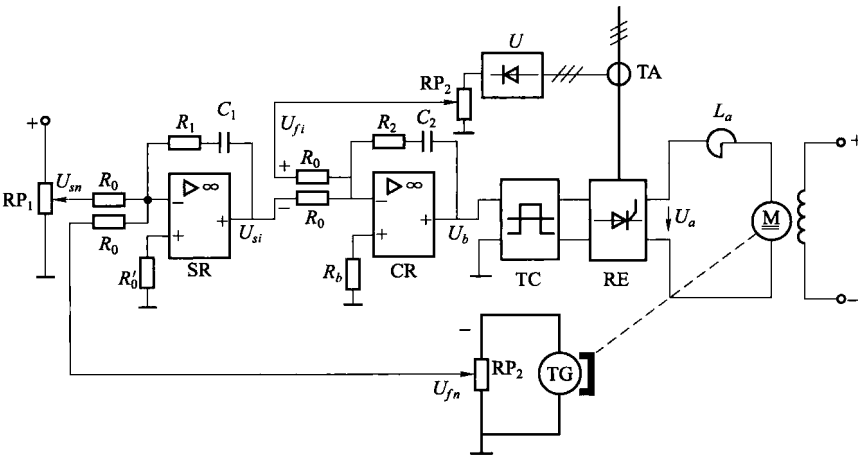


图 1.9

1) 系统组成。该系统有两个反馈通路，其中一个反馈通路是由执行元件即直流电机 M—永磁式直流测速发电机电机 TG—电阻 RP₂ 组成的主反馈通路，与前向通路形成的回路称为速度环，又称为外环。另外一个反馈回路是由电流互感器 TA—整流电路 U 和电阻 RP₃ 组成，由此构成的回路称为电流环，又称为内环。由于电流环是系统中的局部反馈回路。SR 是由积分运算放大器形成的速度调节器，CR 为电流调节器，TC 为触发电路，RE 为整流电路，TC 与 RE 形成可控整流回路，以调整对直流电机 M 的输出电压与电流，达到控制输出转速的目的。系统框图如图 1.10 所示。

从图 1.10 可以看出，电阻 RP₁ 是基准输入元件，（又称为给定元件），其输出电压 U_{sn} 是系统的基准输入量，与转速的目标值相对应。直流测速发电机 TG—电阻 RP₂ 形成了系统

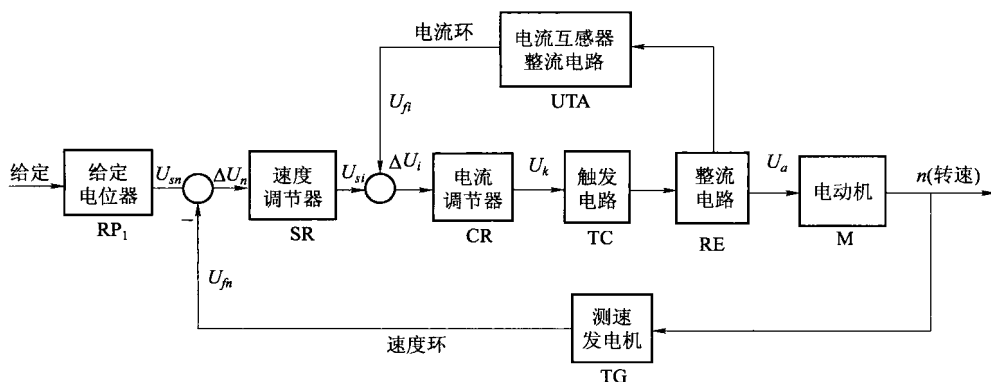


图 1.10

主反馈通路上的检测元件，其输入量为直流电机 M 的转速 n ，输出量是主反馈信号 U_{fn} ，这里 $U_{fn} = \alpha n$ ， α 为直流测速发电机转速反馈系数。速度调节器 SR 为比较元件，其输入量是偏差电压 ΔU_n ，即 $\Delta U_n = U_{sn} - U_{fn}$ ，其输出量为 U_{si} 。电流调节器 CR、触发电路 TC、整流电路 RE 和局部反馈通路形成了系统的主控回路。其输出电压为 U_a 。 L_d 为串接在电枢回路中的平波电抗器，起稳定电流的作用。直流电机 M 在这里既是执行元件又可看做是被控对象（确切地说，其负载是被控对象），其电枢绕组的输入电压即为 U_a （这里忽略了平波电抗器 L_d 上的压降）。在局部反馈回路即电流环中，电流互感器 TA 是电枢电流检测元件，其输出为与电枢电流成比例的电压信号，通过放大、反馈给局部反馈回路中的比较元件 CR，其反馈信号为 U_{fi} 。

2) 系统工作原理。

① 电流环工作原理。电流环是由电流调节器 CR、触发电路、整流电路和电流反馈环节组成的闭环，其主要作用是稳定电枢电流。当系统处于稳定状态时，偏差电压 $\Delta U_i = U_{si} - U_{fi} = U_{si} - \beta I_a = 0$ （ β 为电流反馈系数， I_a 为电枢电流），所以有 $I_a = U_{si} / \beta$ 。当电网电压波动或其他原因引起电枢电流 I_a 变化时，如 I_a 上升时，则偏差电压 $\Delta U_i = U_{si} - \beta I_a < 0$ ，使整流电路输出电压 U_a 下降，继而使 I_a 下降并很快恢复到稳态值。由于电流环电流调整过程很快，一般不影响到转速的变化，电网电压扰动的影响已被消除或基本被消除。

② 速度环工作原理。由系统前向通路和主反馈通路构成的速度环主要作用是保持转速稳定，消除转速误差。当系统平稳运行即输入量和输出量处于稳定状态时，偏差 $\Delta U_n = U_{sn} - U_{fn} = U_{sn} - \alpha n = 0$ ，即 $n = U_{sn} / \alpha$ 。当系统由于负载变化等原因引起输出转速 n 产生变动，如 n 减小时（即 $n < U_{sn} / \alpha$ ），则产生偏差电压 $\Delta U_n = U_{sn} - \alpha n$ 大于零，经速度调节器放大得 U_{si} 。由于 U_{si} 增大，使 ΔU_i 增大，随之引起 U_k 、 U_a 增大，最终使系统输出转速 n 增大，直至恢复到 $n = U_{sn} / \alpha$ ，调整过程结束。

由于双闭环调速系统具有良好的调节特性，被广泛应用于机床、冶金、轻工等行业中。

(2) 恒温控制系统。

恒温控制是机械制造、生物工程、环境工程中常见的一种温度控制方式。在制造业的热处理过程中，常常需要炉温保持恒值或按某一给定台阶式曲线变化，其恒温保持的准确程度将直接影响工件热处理质量。其工作原理如下。

当炉温 T 由于环境温度变化或增、减工件而产生变化如下降时，检测元件热电偶输出端电