

自动控制原理

鄢景华 主编



哈尔滨工业大学出版社



自动控制原理

(修订本)

鄢景华 主编

哈尔滨工业大学出版社

哈尔滨

内 容 简 介

本书包括古典和现代控制理论,主要介绍自动控制基本理论及工程分析和设计方法。全书共分十章,其内容包括自动控制概论、控制系统的数学模型、控制系统的时域分析、根轨迹法、频率特性法、控制系统的校正与综合、非线性控制系统、线性离散系统、控制系统的状态空间分析法与综合法。

本书是高等工科院校非控制专业的教材,也可作为从事控制工程及工业自动化的科技人员自学与参考。

自 动 控 制 原 理

Zidong Kongzhi Yuanli

(修订本)

鄢景华 主编

*

哈尔滨工业大学出版社出版发行

黑龙江省肇东粮食印刷厂印刷

*

开本 787×1092 1/16 印张 23.25 字数 510 千字

2000 年 7 月第 2 版 2000 年 7 月第 4 次印刷

印数 15 001—20 000

ISBN 7-5603-1137-7/TP·83 定价 25.00 元

前 言

本书是高等工科院校非控制专业自动控制原理课程的教材,是在哈尔滨工业大学自动控制理论及应用教研室历届所用教材的基础上编写的,是作者多年教学经验和科研成果的总结。

全书包括古典控制理论和现代控制理论,共十章,其中前六章是线性定常连续系统的分析与综合,第七、八章讲述了非线性系统及线性离散系统的基本理论,第九、十章是控制系统的状态空间分析法与综合法。

本书在讲述方法上注意了简明扼要、通俗易懂,加强概念性;在内容安排上注意了各专业的通用性和便于不同教学时数的取舍。

为了帮助读者掌握和运用所学理论,每章均备有足够的例题,并附有相当数量的习题,可供练习。

本书第一、三、四、六、九章由鄢景华教授编写,第二、五章由梅晓榕副教授编写,第七、八、十章由王彤副教授编写。参加本书编写的还有王常虹、戴绍安、曾月明、柏桂珍、王卫红、王子华、郭维藩等同志。全书由鄢景华教授主编,由傅佩琛教授主审。

在本书编写过程中,得到哈尔滨工业大学自动控制理论及应用教研室的领导及许多同志的大力支持,在此深表感谢。

由于编者水平有限和时间仓促,书中定有不当之处,敬请读者批评指正。

作 者

1995 年 8 月

本书出版以来,被多所院校选作教材。现在借修订再版的机会对书中的内容进行了调整和充实,以更适合非控制类专业自动控制原理课程的需要。修订工作由梅晓榕和王彤完成。其中第一、三、四、九章由王彤、梅晓榕修订,第二、五章由梅晓榕修订,第六、七、八、十章由王彤修订。

作 者

2000 年 6 月

目 录

第一章 自动控制概论	1
1.1 自动控制与自动控制系统的基本概念	1
1.2 开环控制与闭环控制	4
1.3 控制系统举例	5
1.4 控制系统的组成与对控制系统的基本要求	8
习题	11
第二章 控制系统的数学模型	12
2.1 控制系统微分方程式的建立	12
2.2 传递函数	17
2.3 控制系统的方块图和传递函数	24
2.4 脉冲响应	38
2.5 非线性方程的线性化	38
习题	43
第三章 控制系统的时域分析	47
3.1 典型输入信号	47
3.2 一阶系统的过渡过程	49
3.3 二阶系统的过渡过程	52
3.4 高阶系统的过渡过程	68
3.5 控制系统的稳定性	74
3.6 控制系统稳态误差的基本概念	80
3.7 稳态误差的计算	81
3.8 消除和减少稳态误差的办法	86
3.9 顺馈控制的误差分析	93
习题	97
第四章 根轨迹法	103
4.1 控制系统的根轨迹	103
4.2 绘制根轨迹的基本规则	104
4.3 按根轨迹分析控制系统	114
习题	116
第五章 频率特性法	118
5.1 频率特性	118
5.2 典型环节的频率特性	120
5.3 Nyquist 稳定判据	134
5.4 控制系统的相对稳定性	142
5.5 闭环频率特性图	144

5.6 开环频率特性与控制系统性能的关系	147
习题	149
第六章 控制系统的综合与校正	155
6.1 引言	155
6.2 基本控制规律分析	156
6.3 超前校正参数的确定	159
6.4 滞后校正参数的确定	163
6.5 滞后-超前校正参数的确定	166
6.6 按系统期望频率特性确定串联校正参数	169
6.7 反馈校正参数的确定	172
习题	177
第七章 非线性控制系统	181
7.1 非线性控制系统概述	181
7.2 描述函数法	184
7.3 相平面法	203
7.4 利用非线性特性改善系统的性能	222
习题	223
第八章 线性离散系统	227
8.1 采样过程	227
8.2 采样定理与采样周期的确定	229
8.3 信号保持	232
8.4 Z 变换	234
8.5 脉冲传递函数	241
8.6 线性离散系统的稳定性	248
8.7 线性离散系统的时域分析	253
8.8 数字控制器的模拟化设计	261
习题	268
第九章 控制系统的状态空间分析法	271
9.1 状态空间法的基本概念	271
9.2 线性定常系统状态空间表达式的建立	275
9.3 由状态空间表达式求传递函数(阵)	287
9.4 线性定常系统状态方程的解	290
9.5 线性定常离散系统的分析	293
9.6 线性连续状态方程的离散化	299
9.7 李雅普诺夫稳定性分析	301
9.8 线性系统的李雅普诺夫稳定性分析	308
习题	313

第十章 线性系统的状态空间综合法.....	315
10.1 线性系统的能控性与能观性.....	315
10.2 线性系统的状态反馈与状态观测器.....	338
习题.....	354
附录一 拉氏变换、 Z 变换表	358
附录二 常用校正装置表.....	359
参考文献	362

第一章 自动控制概论

随着生产和科学技术的发展,自动控制技术在国民经济和国防建设中所起的作用越来越大。例如,没有整套的自动控制系统,现代化的热力发电厂的锅炉、汽轮机和发电机就无法正常运转。又如,为使导弹能准确地命中目标,人造卫星能按预定的轨道运行并返回地面,宇宙飞船能准确地在月球着陆并重返地球,这些都要有很复杂的自动控制系统予以保证才行。

在工业生产过程中,诸如对压力、温度、湿度、流量、频率以及原料、燃料成分比例等方面的控制都要应用自动控制技术。

自动控制技术的应用,不仅使生产过程实现了自动化,极大地提高了劳动生产率和产品质量,改善了劳动条件,并且在人类征服自然、探索新能源、发展空间技术和改善人民物质生活等方面都起着极为重要的作用。因此,自动控制技术已经成为实现工业、农业、科学技术和国防现代化必不可少的一门技术。

自动控制原理是一门技术基础课程,主要讲述自动控制技术中最基本的理论和分析、设计控制系统的基本方法。自动控制原理可分为古典控制理论和现代控制理论两大部分。

古典控制理论主要以传递函数为基础,研究单输入-单输出一类自动控制系统的分析和设计问题。这些理论早已经成熟,并且在工程实践中得到广泛的应用。

现代控制理论是 60 年代在古典控制理论的基础上,随着科学技术的发展和工程实践的需要而迅速发展起来的。它的内容主要以状态空间法为基础,研究多输入-多输出、变参数、非线性、高精度、高效能等控制系统的分析和设计问题。最优控制、最佳滤波、系统辨识、自适应控制等理论都是这一领域研究的主要课题。特别是近年来由于电子计算机技术的迅速发展,现代控制理论在实践中也得到越来越多的应用。

1.1 自动控制与自动控制系统的基本概念

首先,通过实例说明有关自动控制与自动控制系统的基本概念。

例 直流电动机的转速控制。

设有一台直流电动机带动负载以转速 n 在转动,见图 1.1-1,要求转速保持不变,即控制转速 $n=n_0=\text{常数}$ 。但实际上有很多因素要引起电动机转速发生变化,如电源电压的变化、激磁电流 i_b 的变化、负载力矩 M_L 的变化等。要想保持转速不变,必须设法抵消或削弱这些因素的影响。这种抵消或削弱上述因素影响的过程就是对转速的控制过程。需要说明,在这里对直流电动机采用电枢控制,即无论什么因素引起转速变化,均通过调整电枢电压将转速控制到 $n=n_0$ 。

对转速的控制可以由人工来完成,见图 1.1-2。

其控制的具体过程如下：

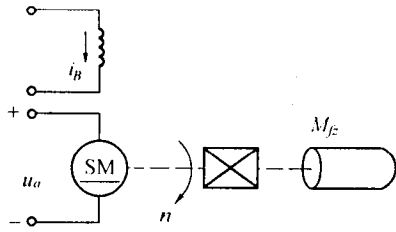


图 1.1-1 直流电动机

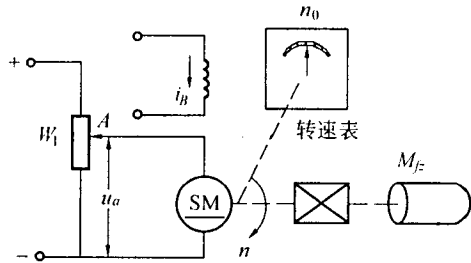


图 1.1-2 电动机转速人工控制系统

1. 通过转速表观察电动机的转速 n ；
2. 与要求的转速值 n_0 进行比较，得出偏差；
3. 根据偏差的大小和正负进行控制：若 $n > n_0$ ，则移动电位器 W_1 滑臂（A 点），使 u_a 下降，直到转速降到所要求的数值 n_0 ；若 $n < n_0$ ，使 u_a 上升，直到转速升到所要求的数值 n_0 ；若 $n = n_0$ ，则不动电位器。

可见，在人工控制过程中，必须有一个测量元件（如测量转速的转速表）和一个受人工操作的元件（如电位器 W_1 ）。人在控制过程中起了测量、比较、判断、操作的作用，所以人工控制过程的实质，就是“检测偏差，纠正偏差”的过程。

所谓自动控制就是在没有人直接参与的情况下，通过控制器使被控制对象或过程自动地按照预定的规律运行。图 1.1-3 就是直流电动机转速自动控制系统的原理图。

在这里，定义用以完成一定任务的一些部件（或元件）的组合为系统。在转速控制过程中，直流电动机是被控制的装置，叫做系统的被控制对象。除了被控制对象之外的各个部分的组合叫做控制器。控制器给被控制对象以适当的控制作用来完成特定的任务。如在转速控制系统中，就是要完成使电动机转速维持恒定的任务。

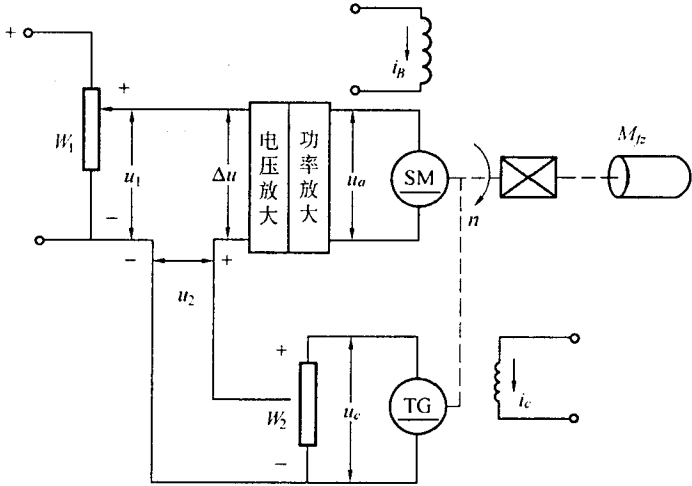


图 1.1-3 电动机转速自动控制系统

下面就来分析图 1.1-3 所示系统是如何使用仪器设备来代替人工完成转速自动控制的问题。

图中用测速发电机 TG 测量转速，它的输出电压 u_c 正比于转速 n ，即 $u_c = k_c n$ 。测速发电机完成了测量转速并把转速转换为相应电压的任务，称为测量元件。转速 n 被定义为系统的被控制量或输出量。对任何一个控制系统来说，被控制量是极为重要的物理量，它的

变化规律在生产过程中要严加控制。图中 W_2 是比例电位计, W_2 的输出电压 u_2 与被控制量 n 成比例, 在自动控制系统中被称为反馈量(或叫反馈信号)。

电位计 W_1 是给定元件, 产生基准电压 u_1 , u_1 的设置值与转速的期望值 n_0 相对应, 称电压 u_1 为系统的参考输入。参考输入代表了系统所要执行的命令, 代表被控制量希望的变化规律。而所有妨碍被控制量按要求变化的因素(如负载力矩的变化、激磁电流的变化及系统内部参数的变化等)被定义为系统的干扰量(或干扰信号)。

将电压 u_2 反馈到系统的输入端, 与参考输入 u_1 进行比较(这代替了人工去观察转速并判断是否与要求值发生偏差这一过程), 得到的电压差 $\Delta u = u_1 - u_2$ 叫做偏差量(或偏差信号)。图中的电压放大器、功率放大器统称为放大元件, 它的作用是将很小的偏差信号 Δu 进行放大, 使放大后的信号 u_a 具有足够的能量去驱动直流电动机。 u_a 是直接加到被控对象、直接改变被控量的变量, 称为控制量或控制作用。

我们假设转速已调好, $n = n_0$, 系统处于稳定的平衡状态, $u_2 = u_{20}$, $\Delta u = u_1 - u_{20} = \Delta u_0$, Δu_0 经放大得电动机电枢电压 $u_a = u_{a0}$, 在 u_{a0} 的作用下, 电动机转速维持 n_0 不变。

现在来分析具体的控制过程。假如因某种原因引起转速变化, 例如负载转矩 M_{fz} 增加, 将引起转速下降($n < n_0$), 进而使反馈信号 u_2 下降($u_2 < u_{20}$), 偏差信号 Δu 上升($\Delta u > \Delta u_0$), 电枢电压 u_a 上升($u_a > u_{a0}$), 转速 n 上升, ..., 直到 n 接近 n_0 时, 系统达到新的平衡状态, 从而完成一个控制过程。

从上看出, 对转速的控制完全是在没有人参与的情况下自动进行的。因此, 把这种不需要人直接参与, 而使被控制量自动地按预定规律变化的控制过程叫做自动控制。

为便于研究, 把实际的物理系统按信号传递过程画成如图 1.1-4 所示的方块图。图 1.1-4 中圆叉号代表比较元件, 负号表示两信号相减, 一般地说, 比较元件的输出信号等

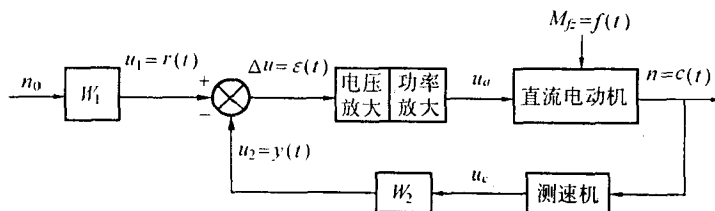


图 1.1-4 电动机转速自动控制系统方块图

于各输入信号的代数和。从图 1.1-4 可以明显地看出, 产生控制作用的关键是偏差信号, 而偏差信号是对被控制量不断测量转换并反馈到系统的输入端与参考输入量相减(即负反馈)而得到的。这种利用负反馈得到偏差信号, 进而产生控制作用, 又去消除偏差的控制原理叫反馈控制原理。由于有了负反馈, 自动控制系统便形成了一个按偏差进行控制的闭环系统(又称反馈控制系统)。

在本书中, 参考输入用 $r(t)$ 表示; 被控制量用 $c(t)$ 表示; 反馈量用 $y(t)$ 表示; 偏差量用 $\epsilon(t)$ 表示; 干扰量用 $f(t)$ 表示。

在反馈控制系统中, 各物理量都反映出传递过程, 方块图可形象地表示出信号的传递过程。在图 1.1-4 所示方块图中, 从偏差量 $\epsilon(t)$ 到被控制量 $c(t)$ 的通道称为前向通道。由被控制量 $c(t)$ 到反馈量 $y(t)$ 的通道称为反馈通道。

1.2 开环控制与闭环控制

控制系统分为开环控制系统和闭环控制系统。

开环控制 若系统的被控制量对系统的控制作用没有影响,则此系统叫开环控制系统。其方块图如图 1.2-1 所示。

在开环控制系统中,既不需要对被控制量进行测量,也不需要将被控制量反馈到系统的输入端与参考输入比较。这样,对于一个确定的参考输入就有一个与之对应的被控制量。因此,系统的控制精度将取决于控制器及被控对象的参数稳

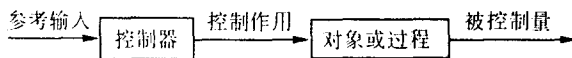


图 1.2-1 开环控制系统

定性。也就是说,欲使开环控制系统具有满足要求的控制精度,则系统各部分的参数值,在工作过程中,都必须严格保持在事先校准的量值上,这就必须对组成系统的元部件质量提出严格的要求。

显然,当出现干扰时,开环控制系统会引起被控制信号较大的变化,系统内部参数的变化同样会引起被控制信号较大的变化,这就是说开环控制系统没有抗干扰能力。

闭环控制 凡是系统的被控制信号对控制作用有直接影响的系统都叫闭环控制系统,如图 1.2-2 所示。

在闭环控制系统中,需要对被控制信号不断地进行测量、变换并反馈到系统的控制端与参考输入信号进行比较,产生偏差信号,实现按偏差控制。如在上节中介绍的转速控制系统就是闭环控制系统。

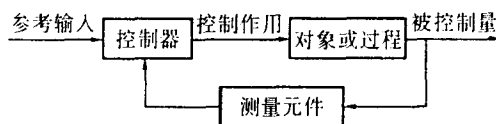


图 1.2-2 闭环控制系统

由于闭环控制系统采用了负反馈,使系统的被控制信号对外界干扰和系统内部参数的变化都不敏感,即闭环控制抗干扰能力强。这样就有可能采用成本低的元部件,构成精确的控制系统,而开环控制系统则做不到这一点。

从系统的稳定性来考虑,开环控制系统容易解决,因而不是十分重要的问题。但对闭环控制系统来说,稳定性始终是一个重要问题。因闭环控制系统可能引起系统振荡,甚至使得系统不稳定。

开环控制系统结构简单,容易建造,成本低廉,工作稳定。一般说来,当系统控制量的变化规律能预先知道,并且对系统中可能出现的干扰,可以有办法抑制时,采用开环控制系统是有优越性的,特别是被控制量很难进行测量时更是如此。目前,用于国民经济各部门的一些自动化装置,如自动售货机、自动洗衣机、产品生产自动线及自动车床等,一般都是开环控制系统。用于加工模具的线切割机也是开环控制的很好一例。只有当系统的控制量和干扰量均无法事先预知的情况下,采用闭环控制才有明显的优越性。

如果要求实现复杂而准确度较高的控制任务,则可将开环控制与闭环控制适当结合起来,组成一个比较经济而性能较好的控制系统。

1.3 控制系统举例

控制系统有不同的分类方法,因而也有各种各样的类型。根据系统是否满足叠加原理,可分为线性系统 and 非线性系统。根据系统中信号的类型,可分为连续系统和离散系统(或称计算机控制系统)。本节介绍的二类系统是按参考输入信号的性质进行分类的。

一、随动系统

在闭环控制系统中,如果参考输入信号为一任意时间函数,其变化规律无法预先予以确定,则承受这类输入信号的闭环控制系统叫做随动系统。

例 1.3-1 火炮随动系统。

火炮随动系统的任务是控制火炮跟踪敌机,以便适时开炮击中目标。其原理线路图如图 1.3-1 所示。

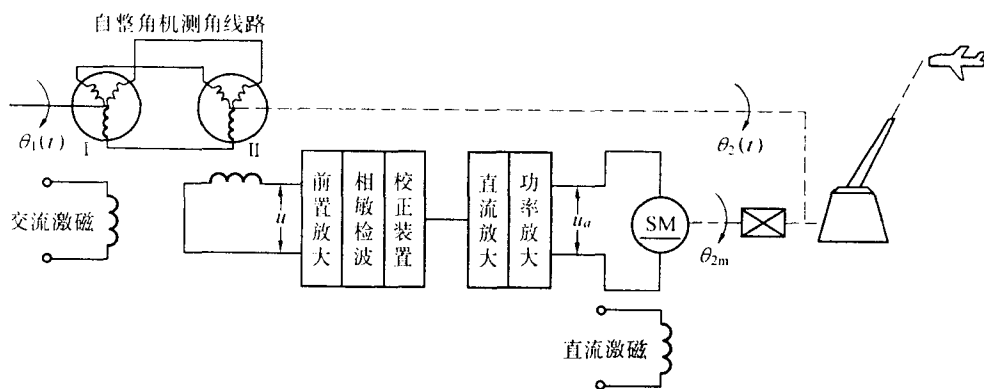


图 1.3-1 火炮随动系统原理线路图

图中一对自整角机组成测角线路。自整角发送机 I 转轴的位置由指挥仪来控制,此轴为系统的输入轴。当炮瞄雷达已搜索到目标,且目标已进入火炮射程之内时,天线随动系统将进入自动跟踪工作状态。这时安装在天线轴上的数据传递系统,不断地把目标的方位角(俯仰角)数据传递给指挥仪。指挥仪根据当时气候条件,炮弹在空中飞行的弹道,目标在空中移动的速度、高度等数据,计算出为了使炮弹与目标在空中相遇的火炮炮口的方位角(俯仰角)应有的数值 $\theta_1(t)$,这个 $\theta_1(t)$ 就是火炮随动系统的参考输入信号。自整角接收机 II 的转子轴与火炮轴相固联,此轴为系统的输出轴。这一对自整角机测量出系统的输入轴与输出轴之间的角差并转换成相应的电压,其输出电压的大小由角差的大小决定,而输出电压的相位由角差的符号决定,即

$$u = K_1(\theta_1 - \theta_2) = K_1\Delta\theta$$

式中 K_1 ——自整角机的传递系数,量纲为伏/度。

图 1.3-1 中的直流伺服电动机是系统的执行元件,由功率放大器的输出信号 u_a 来控制。直流电动机的转轴经减速器带动被控对象(火炮)。

下面说明随动系统的工作原理:

假设随动系统处于平衡状态,即 $\theta_1 = \theta_2 = 0^\circ$, 故 $u = 0, u_a = 0$, 直流执行电动机不动, 火炮亦不动。

若自整角发送机转子顺时针转过 10° , 则角差 $\Delta\theta = 10^\circ$, 使 $u \neq 0$, 此信号经相敏检波变成直流信号, 并经功率放大使 u_a 具有足够的功率去驱动直流伺服电动机转动, u_a 的极性决定电动机经减速器带动火炮顺时针旋转, 当火炮轴转过 10° 时, 由于自整角接收机与火炮同轴相联, 所以接收机转子也顺时针转 10° , 使得 $\theta_2 = \theta_1 = 10^\circ$, 即 $\Delta\theta = 0^\circ, u_a = 0$, 电动机及火炮停止转动。说明火炮已瞄准好目标, 下令发炮即可击中目标。

反之, 若自整角发送机转子逆时针转 10° , 则火炮亦逆时针转 10° 。实际上角差很小时火炮就要动作。

若自整角发送机转子连续转动, 则火炮也跟着发送机转子按相同方向连续转动。这样, 火炮的轴就始终跟随自整角发送机的轴转动, 从而实现被控制量 $\theta_2(t)$ 始终自动而准确地复现输入量 $\theta_1(t)$ 的规律, 即控制火炮自动地跟踪敌机。这里需要两套相同的随动系统分别控制火炮的方位角和俯仰角。火炮随动系统方块图见图 1.3-2 所示。

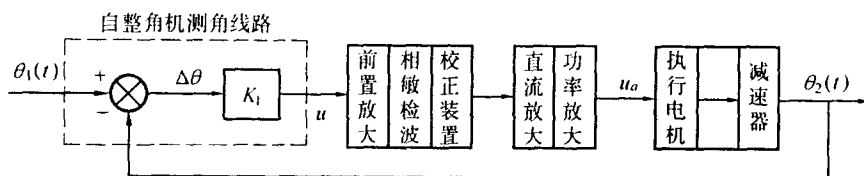


图 1.3-2 火炮随动系统方块图

例 1.3-2 位置控制电液伺服系统。

图 1.3-3 为一控制工作台位置的电液反馈控制系统的原理图。该系统的任务是控制工作台的位置, 使之按指令电位器给定的规律变化。

在图 1.3-3 所示的系统中, 用一对电位计组成测量线路, 它测量指令电位计滑臂转角 $\theta_1(t)$ 与接收电位计滑臂转角 $\theta_2(t)$ 之间的角差 (偏差信号), 并转换成相应的电压, 即 $u = K_1(\theta_1 - \theta_2) = K_1\Delta\theta$ 。其中, 接收电位计的转轴与反应工作台位置的齿轮转轴相固联 (见图

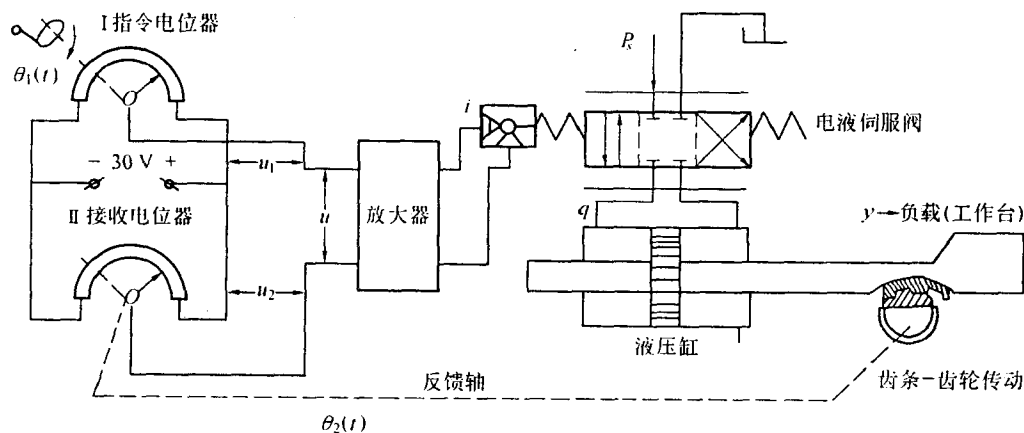


图 1.3-3 位置控制电液伺服系统

1.3-3)。当 $\theta_1(t)=\theta_2(t)$ 时, $\Delta\theta=0$, 即没有偏差信号, 工作台处于静止状态。若改变指令电位计滑臂的位置, 使偏差信号 $\Delta\theta$ 不为零, 电压 u 亦不为零, 经放大器放大后变为电流信号去控制伺服阀, 伺服阀便输出压力液压油, 使液压缸活塞推动工作台移动, 以减小偏差, 直到与工作台位置相对应的接收电位计的滑臂转角 $\theta_2=\theta_1$ 时, 偏差信号为零, 伺服阀恢复零点而不再输出压力油, 液压缸活塞停止运动, 于是工作台达到了输入信号 $\theta_1(t)$ 所规定的位置。如果指令电位计滑臂位置 $\theta_1(t)$ 不断改变, 则工作台位置也跟着不断变化。系统方块图如图 1.3-4 所示。

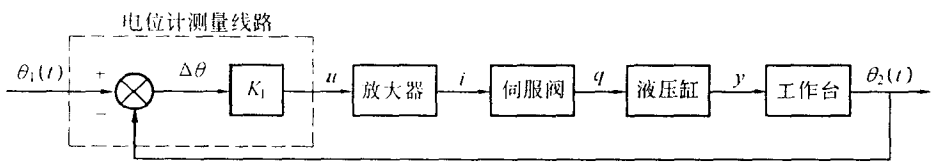


图 1.3-4 位置控制电液伺服系统方块图

二、定值调节系统

如果反馈控制系统的参考输入信号 $r(t)$ 为恒定的常量, 即 $r(t)=\text{常量}$, 则称这类反馈控制系统为定值调节系统。

例 1.3-3 电炉炉温控制系统。

机电工业中常用的原材料, 如硅钢片在热处理过程中需要进行 10 小时连续保温 680°C 后, 才能达到预期的性能, 这就需要对退火炉的温度进行控制。电炉炉温控制系统的原理图如图 1.3-5 所示。

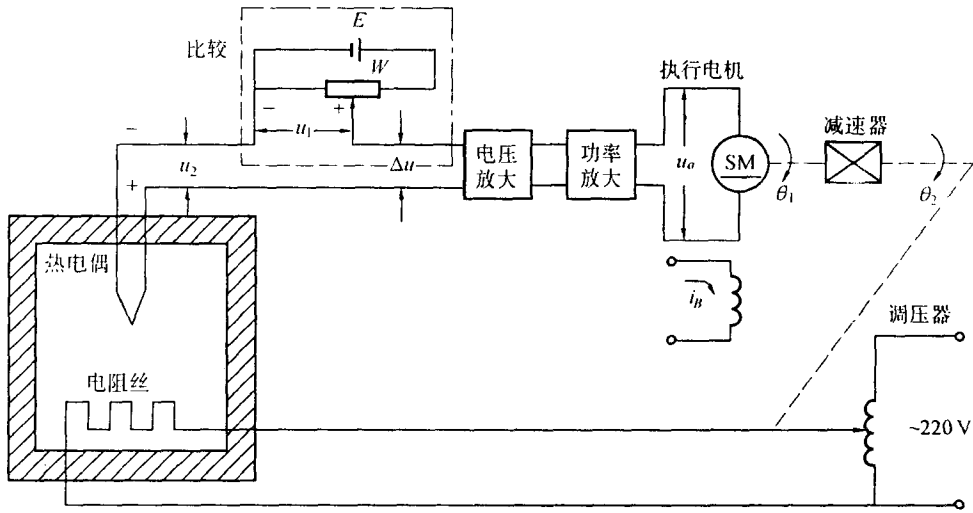


图 1.3-5 电炉炉温控制系统

这里用调压器给电炉加热, 图中的热电偶用来测量炉温, 它的输出电压 u_2 正比于炉温 T , 即 $u_2=K_2T$ 。电压 u_1 为给定的基准电压, 其设定值与炉温的期望值相对应。下面说明炉温控制系统的工作原理。

假设系统已调好,处于平衡状态,即 $u_1 = u_2$, $\Delta u = 0$,电动机不动,此时炉温 $T = T_0 = 680^\circ\text{C}$ 。

若因某种原因使炉温 T 高于要求的炉温值 T_0 ,即 $T > T_0$,则有 $u_1 < u_2$,得偏差 $\Delta u = u_1 - u_2 < 0$ 。 Δu 经放大后使 $u_a \neq 0$, u_a 的极性决定直流电动机通过减速器带动调压器手柄朝减小加热电流的方向转动,使炉温 T 及反馈信号 u_2 下降,进而使 Δu 与 u_a 下降。直到 $u_1 = u_2$, $\Delta u = 0$, $u_a = 0$ 时,电动机停止转动,电炉的温度恢复到要求的数值。此时,系统达到新的平衡状态。炉温控制系统方块图如图 1.3-6 所示。

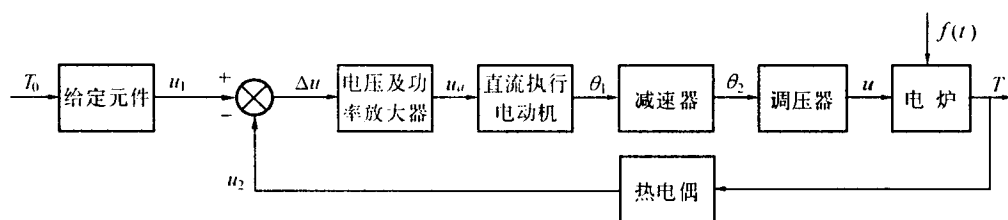


图 1.3-6 炉温控制系统方块图

1.4 控制系统的组成与对控制系统的基本要求

一、控制系统的基本组成

从以上各节的分析可以知道,为了组成一个自动控制系统,必须包含以下几个基本元件。

1. 测量元件 一般称为传感器,过程控制中又称为变送器。其功能是将一种量检测出来,并且按着某种规律转换成容易处理和使用的另一种量。测量元件的精度直接影响控制系统的精度,因此,应尽可能采用精度高的测量元件和合理的测量线路。

2. 比较元件 对被控制量与参考输入进行比较,并产生偏差信号。比较元件在多数控制系统中是和测量元件或放大元件结合在一起的。

3. 放大元件 对比较微弱的偏差信号进行变换放大,使其具有足够的幅值和功率。

4. 执行元件 接受偏差信号的控制并产生动作,去改变被控制量,使被控制量按照期望的规律变化。

5. 校正元件 实践证明,按反馈原理由上述基本元件简单组合起来的控制系统往往是不能完成既定任务的。系统在控制过程中还有可能产生振荡,甚至会使系统的正常工作遭到破坏。因此,为了使系统正常工作,需要在系统中加进能消除或减弱上述振荡以及提高系统性能的一些元件,我们把这类元件叫做校正元件。校正元件可以加在由偏差信号至被控制信号间的前向通道内,也可以加在由被控制信号至反馈信号间的局部反馈通道内。前者称为串联校正,后者称为反馈校正。在有些情况下,为了更有效地提高系统的控制性能,可以同时应用串联校正和反馈校正。

由上述各基本元件组成的反馈控制系统的一般方块图,如图 1.4-1 所示。

一般说来,尽管反馈控制系统的控制任务各不相同,使用元件的结构和能源形式亦有

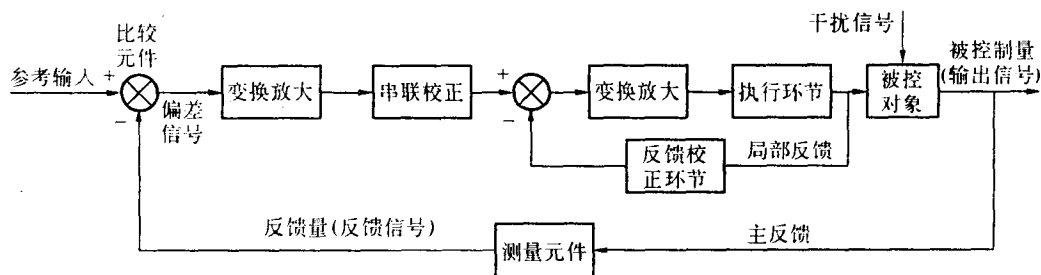


图 1.4-1 反馈控制系统方块图

所不同,但就其信号的传递、变换的职能来说,都可抽象成图 1.4-1 所示的方块图。它表示了控制系统的基本组成。

二、对控制系统的基本要求

对反馈控制系统最基本的要求是工作的稳定性,同时对准确性(稳态精度)、快速性及阻尼程度也要提出要求。上述要求通常是通过系统反应特定输入信号的过渡过程,及稳态的一些特征值来表征的。

过渡过程是指反馈控制系统的被控制量 $c(t)$,在受到输入量作用时,由原来的平衡状态(或叫稳态)变化到新的平衡状态时的过程。例如,1.1 节所举的电动机转速控制系统中,设电动机原以恒定转速 n_0 转动,此时系统处于平衡状态。假若要求电动机以新的转速 n_1 转动,可通过改变输入信号(电压 u_1)来实现,此时系统将在偏差信号作用下,从原有平衡状态(n_0)逐渐过渡到新的平衡状态(n_1)。转速从 n_0 到 n_1 的变化过程就是转速控制的过渡过程。

1. 稳定性

在单位阶跃信号(见图 1.4-2)作用下,控制系统的过渡过程曲线如图 1.4-3 所示。如果系统的过渡过程曲线 $c(t)$ 随着时间的推移而收敛(振荡收敛见图 1.4-3 中的曲线①;单调收敛见图 1.4-3 中的曲线②),并最终趋于被控制信号的稳态值 $c(\infty)$,则称这类系统是稳定的。反之,如果系统的过渡过程曲线 $c(t)$ 随着时间的推移而发散(振荡发散见图 1.4-3 中的曲线③;单调发散见图 1.4-3 中的曲线④),此时系统便不可能达到平衡状态,把这类系统叫做不稳定系统。显然,不稳定系统在实际中是不能应用的。

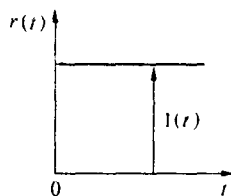


图 1.4-2 单位阶跃信号

2. 稳态精度

控制系统的稳态精度表征系统的稳态品质。我们把被控制信号的希望值 $c_r(t)$ 与稳态值 $c(\infty)$ 之差叫做稳态误差。稳态误差和静差是表征系统稳态精度的一项性能指标。

3. 快速性与阻尼特性

控制系统反应单位阶跃信号作用下的过渡过程的一般形式示于图 1.4-4 中。

如果当 $t \geq t_s$ 时, 有 $|c(t) - c(\infty)| / c(\infty) \leq \Delta$, 则定义 t_s 为系统的过渡过程时间。一般取 $\Delta = 2\%$ 或 $\Delta = 5\%$ 。

图 1.4-4 中曲线 $c(t)$ 是一条衰减的正弦振荡曲线, 其振荡程度用超调量 σ_p 来描述, σ_p 定义如下

$$\sigma_p = \frac{|c_{\max} - c(\infty)|}{|c(\infty)|} 100\%$$

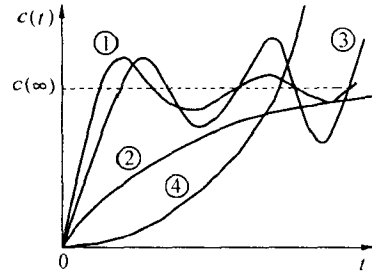


图 1.4-3 控制系统的过渡过程曲线

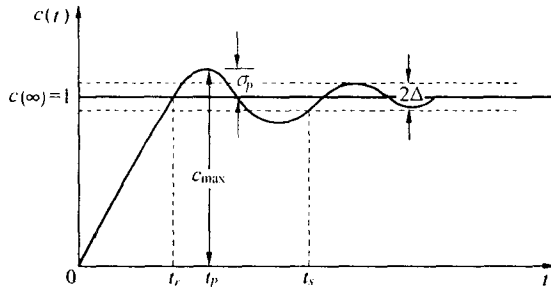


图 1.4-4 单位阶跃信号作用下控制系统的过渡过程

$c(t)$ —系统的被控制(输出)信号; $c(\infty)$ —系统输出的稳态值

式中 $c_{\max}$ ——过渡过程曲线 $c(t)$ 第一次达到极值时的数值, 如图 1.4-4 所示。

过渡过程时间 t_s 和超调量 σ_p 是描述控制系统过渡过程好坏的两个重要指标。 t_s 越小, 说明系统从一个平衡状态过渡到另一个平衡状态所需的时间越短, 反之则越长。因此, t_s 是表征系统反应输入信号速度的性能指标。而 σ_p 越小, 说明在过渡过程中引起的超调越小。值得注意的是超调现象严重不仅使组成系统的各个元件处于恶劣的工作条件下, 而且过渡过程在长时间内不能结束, 致使系统的误差不能很快地减小到允许范围之内。

按照过渡过程评价控制系统的性能, 除了 t_s 和 σ_p 两项指标外, 有时还需要注意 $c(t)$ 穿越 $c(\infty)$ 水平线的次数。定义在 $0 < t < t_s$ 时间内, $c(t)$ 穿越 $c(\infty)$ 水平线的次数的一半为控制系统过渡过程的振荡次数 N 。 N 的数值越小, 说明控制系统的阻尼性能越好。有时还通过过渡过程达到第一个极值所需要的时间 t_p (t_p 称为峰值时间) 以及上升时间 t_r (见图 1.4-4 中所示) 来表征控制系统反应输入信号的快速性。

过渡过程时间 t_s 、峰值时间 t_p 、上升时间 t_r 、超调量 σ_p 和振荡次数 N 称为控制系统的动态指标, 其中 t_s 、 t_p 、 t_r 表征系统的快速性能, σ_p 和 N 表征系统的阻尼性能。

按照给定的控制任务设计一个既满足稳定性和稳态精度的要求, 又满足动态指标要求的控制系统, 是控制工程人员必须解决的课题, 也是自动控制原理这门学科的基本任务。