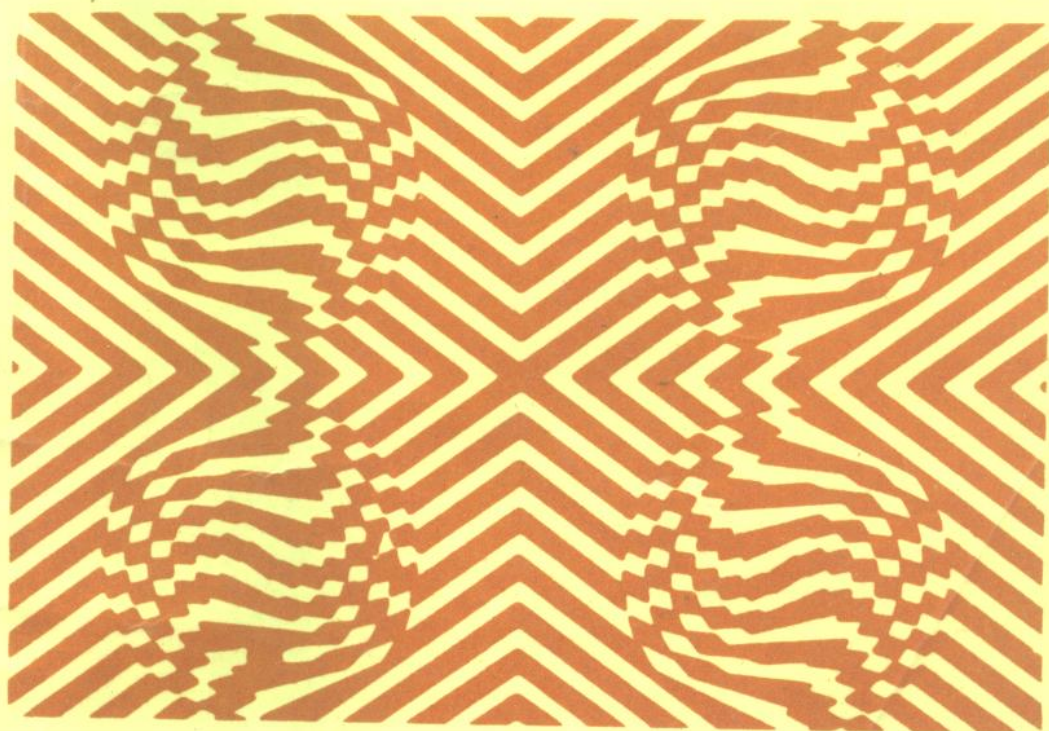


自动控制原理

鄢景华 主编



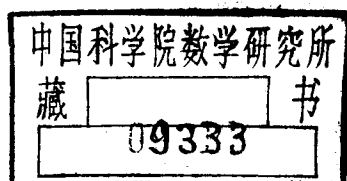
哈尔滨工业大学出版社

51.93

13

自动控制原理

鄢景华 主编



哈尔滨工业大学出版社

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

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 26.375 字数 510 千字

1996 年 5 月第 1 版 1997 年 8 月第 2 次印刷

印数 6 001—11 000

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

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	(13)
习题	(15)
第二章 控制系统的数学模型	(17)
§ 2-1 控制系统微分方程式的建立	(17)
§ 2-2 传递函数	(22)
§ 2-3 控制系统的方块图和传递函数	(29)
§ 2-4 脉冲响应	(42)
§ 2-5 非线性方程的线性化	(43)
习题	(47)
第三章 控制系统的时域分析	(52)
§ 3-1 典型输入信号	(52)
§ 3-2 一阶系统的过渡过程	(54)
§ 3-3 二阶系统的过渡过程	(57)
§ 3-4 高阶系统的过渡过程	(73)
§ 3-5 控制系统的稳定性	(79)
§ 3-6 控制系统稳态误差的基本概念	(84)
§ 3-7 稳态误差的计算	(86)
§ 3-8 消除和减少稳态误差的办法	(93)
§ 3-9 顺馈控制的误差分析	(100)
习题	(104)
第四章 根轨迹法	(109)
§ 4-1 控制系统的根轨迹	(109)
§ 4-2 绘制根轨迹的基本规则	(110)
§ 4-3 按根轨迹分析控制系统	(120)
§ 4-4 参数根轨迹	(122)
§ 4-5 附加零点的作用	(123)
§ 4-6 闭环极点、零点分布与控制系统性能指标	(126)
习题	(129)

第五章 频率特性法	(131)
§ 5-1 频率特性	(131)
§ 5-2 典型环节的频率特性	(133)
§ 5-3 Nyquist 稳定判据.....	(147)
§ 5-4 控制系统的相对稳定性	(154)
§ 5-5 闭环频率特性图	(156)
§ 5-6 开环频率特性与控制系统性能的关系	(159)
习题.....	(162)
第六章 控制系统的综合与校正	(168)
§ 6-1 引言	(168)
§ 6-2 基本控制规律分析	(169)
§ 6-3 超前校正参数的确定	(173)
§ 6-4 滞后校正参数的确定	(178)
§ 6-5 滞后-超前校正参数的确定	(185)
§ 6-6 按系统期望频率特性确定串联校正参数	(190)
§ 6-7 反馈校正参数的确定	(193)
习题.....	(198)
第七章 非线性控制系统	(202)
§ 7-1 非线性控制系统概述	(202)
§ 7-2 描述函数法	(205)
§ 7-3 相平面法	(224)
§ 7-4 利用非线性特性改善系统的性能	(243)
习题.....	(244)
第八章 线性离散系统	(249)
§ 8-1 采样过程	(249)
§ 8-2 采样定理与采样周期的确定	(251)
§ 8-3 信号保持	(254)
§ 8-4 Z 变换	(256)
§ 8-5 脉冲传递函数	(264)
§ 8-6 线性离散系统的稳定性	(271)
§ 8-7 线性离散系统的时域分析	(276)
§ 8-8 数字控制器的模拟化设计	(284)
§ 8-9 数字控制器的数字化设计	(291)
习题.....	(297)
第九章 控制系统的状态空间分析法	(301)
§ 9-1 状态空间法的基本概念	(301)
§ 9-2 线性定常系统状态空间表达式的建立	(305)
§ 9-3 由状态空间表达式求传递函数(阵)	(323)

§ 9-4 线性定常系统的分析	(325)
§ 9-5 线性定常离散系统的分析	(336)
§ 9-6 线性连续状态方程的离散化	(342)
§ 9-7 李雅普诺夫稳定性分析	(344)
§ 9-8 线性系统的李雅普诺夫稳定性分析	(350)
§ 9-9 非线性系统的李雅普诺夫稳定性分析	(356)
习题	(358)
第十章 线性系统的状态空间综合法	(361)
§ 10-1 线性系统的能控性与能观性	(361)
§ 10-2 线性系统的状态反馈与状态观测器	(384)
§ 10-3 最优控制与线性二次型问题	(400)
习题	(405)
附录一 拉氏变换-Z 变换表	(409)
附录二 常用校正装置表	(410)

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,主要讲述自动控制原理与控制系统设计、试验等内容。根据自动控制技术发展的不同阶段,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。

古典控制理论的内容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。这些理论研究较早,现在已经成熟,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和现代应用数学研究的迅速发展,使现代控制理论又在研究庞大的系统工程的大系统理论和模仿人类智能活动的智能控制、生物控制、模糊控制等方面有了重大进展。目前,现代控制理论正随着现代科学技术的发展而日新月异地向前发展着。

§ 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,如电枢电压 u_a 的变化、激磁电流 i_f 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:

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。

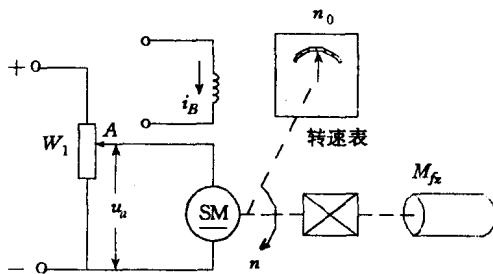


图1.1-2 电动机转速人工控制系统

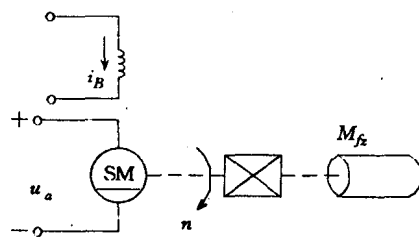


图1.1-1 直流电动机

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。

人固然能完成上述控制转速的任务,但随着生产的发展,需要控制的任务越来越多,样样都由人们亲自去完成,实不胜应付。况且人们用眼睛去观测,存在误差,用手去执行也不准确,因此,有些控制任务单凭人们的感觉器官是不能很好完成的。随着科学技术的发展,人们已经设计和制造出很多精密、灵巧、具有很高工作效能的仪器,代替人工去完成控制工作,从而实现自动控制。

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,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。

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 $u_c = k_n n$ 。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 为系统的控制量或输入量。控制量代表了系统所要执行的命令,即它控制被控制

量按一定的规律变化。而所有妨碍控制量对被控制量按要求进行正常控制的因素(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,与控制量 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。

我们假设转速已调好,系统处于稳定的平衡状态,其参数为 $n = n_{01}$ (注意, n_{01} 接近于 n_0 , 且 $n_{01} < n_0$, 为什么转速不能等于 n_0 , 这涉及到系统的控制精度问题,将在 § 3-6 ~ § 3-9 中详细讨论), $u_2 = u_{20}$, $\Delta u = u_1 - u_{20} = \Delta u_0$, 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_{01} 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($n < n_{01}$),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 $n = n_{01}$ 时,系统参数恢复到原平衡状态,参数不再变化。此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。

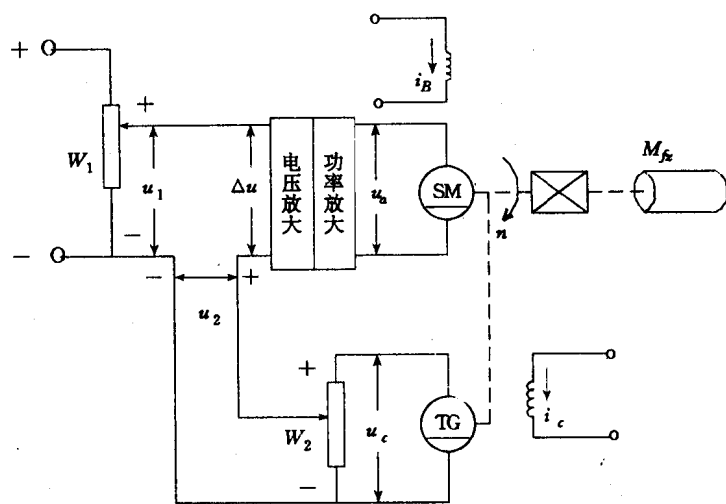


图1.1-3 电动机转速自动控制系统

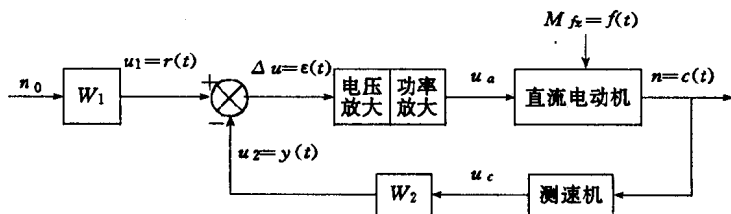


图1.1-4 电动机转速自动控制系统方块图

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,只有当偏差信号变化时(即 $\Delta u \neq \Delta u_0$, Δu 产生了增量)才存在控制过程,当偏差信号 $\Delta u =$

Δu_0 (Δu 的增量消除) 时控制过程就将结束。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控制量相减(即负反馈)而得到的。这种利用负反馈得到偏差信号(或偏差信号增量), 进而产生控制作用, 又去消除偏差(或偏差增量)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)。

由于转速控制系统具有能源, 所以图 1.1-4 所示的反馈控制系统是一个有源闭环控制系统。

因此, 严格地说, 自动控制系统是一个力图使控制信号与被控制信号之间保持给定函数关系的具有能源和负反馈的闭环系统。

在本书中, 控制量用 $r(t)$ 表示; 被控制量用 $c(t)$ 表示; 反馈量用 $y(t)$ 表示; 偏差量用 $e(t)$ 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 $e(t)$ 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

在上一节中主要结合闭环控制系统说明自动控制的基本概念并引出常用名词术语, 但在生产实践中还常常碰到开环控制系统。下面就来说明开环控制与闭环控制的特点及主要优缺点。

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控制量比较。这样, 对于一个确定的控制量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。

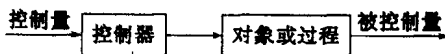


图 1.2-1 开环控制系统

当出现干扰时, 开环控制系统就不能完成既定的控制任务, 因为开环控制系统不能辨认是起控制作用的控制信号, 还是起妨碍控制作用的干扰信号, 只要有外加的输入信号就会引起被控制信号的变化(系统内部参数的变化同样会引起不需要的被控制信号的变化), 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控制信号进行比较, 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。

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。

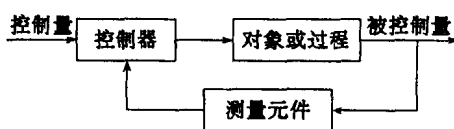


图1.2-2 闭环控制系统

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超调,从而造成系统振荡,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

一、随动系统

在闭环控制系统中,如果控制信号为一任意时间函数,其变化规律无法预先予以确定,则承受这类控制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。

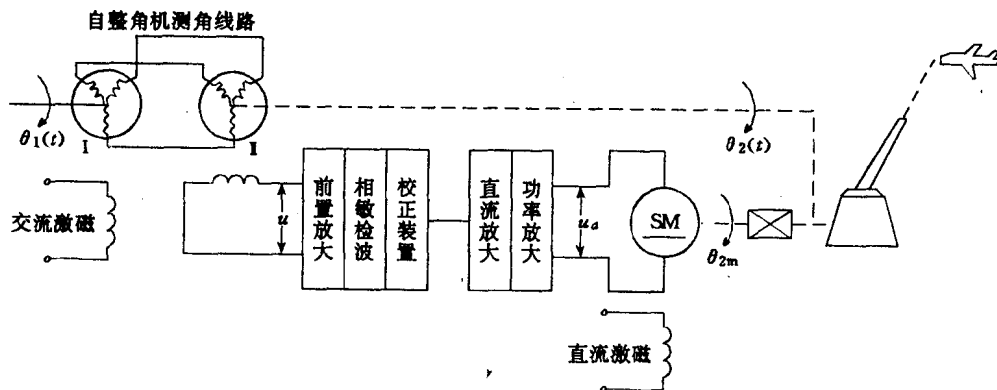


图1.3-1 火炮随动系统原理线路图

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,并注意到火炮和雷达站二者的方位角(俯仰角)之差,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控制信号。自整角接收机 I 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/密位。

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:

假设随动系统已调好,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(如 5 密位)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

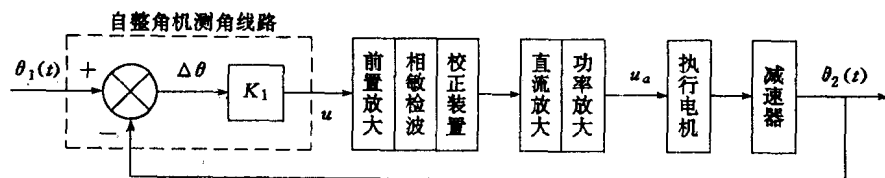


图 1.3-2 火炮随动系统方块图

确地复现控制量 $\theta_1(t)$ 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。

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

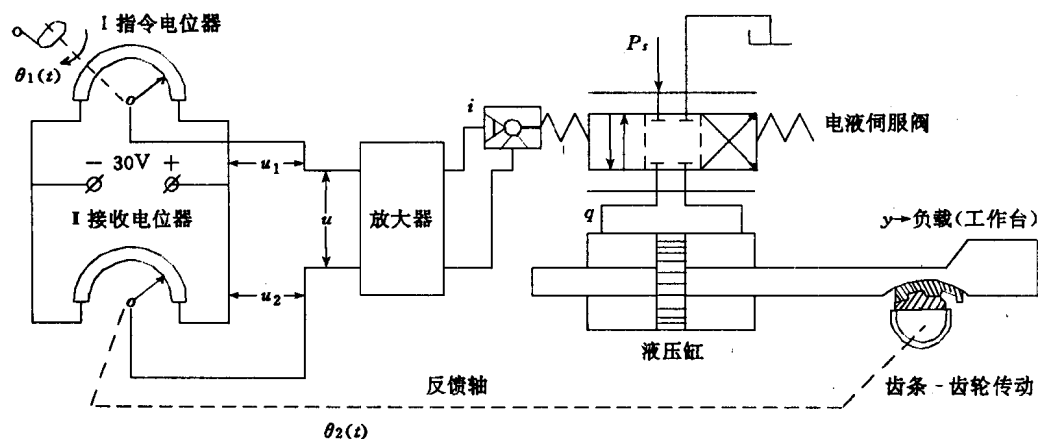


图1.3-3 位置控制电液伺服系统

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, 于是工作台达到了控制信号 $\theta_1(t)$ 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。

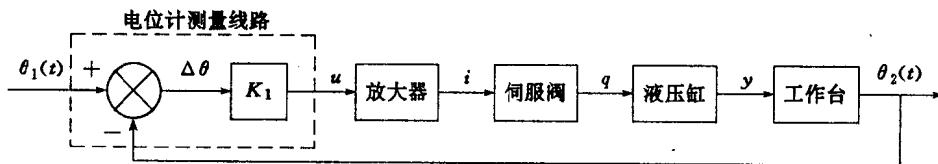


图1.3-4 位置控制电液伺服系统方块图

二、 定值调节系统

如果反馈控制系统的控制信号 $r(t)$ 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。

这里用调压器给电炉加温, 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 $u_2 = K_2 T$ 。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 $\Delta u =$

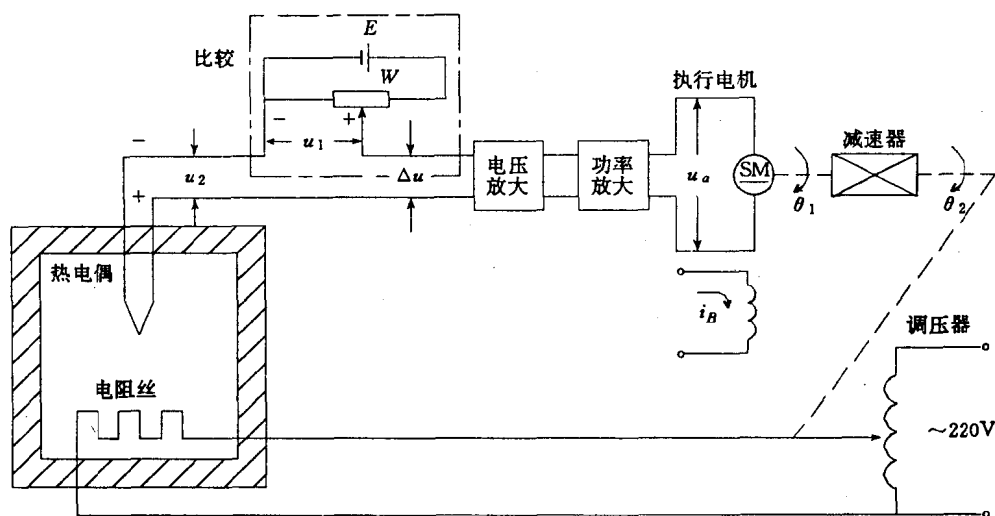


图1.3-5 电炉炉温控制系统

$u_1 - u_2 < 0$ 。 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。

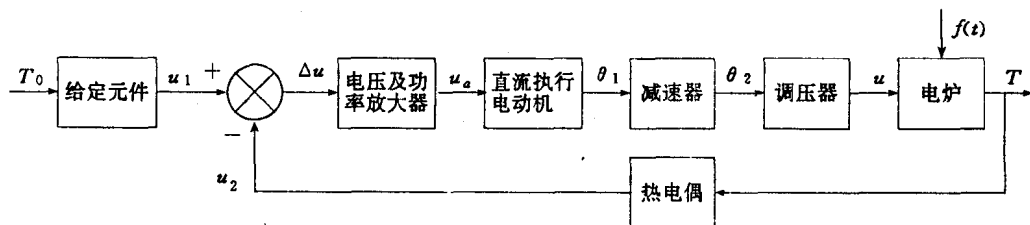


图1.3-6 炉温控制系统方块图

例 1.3-4 焊丝给送控制系统。

焊丝给送控制系统的原理线路图如图 1.3-7 所示。

为了说明焊丝给送控制系统的工作原理，首先介绍一下自动焊接的过程。如图 1.3-7 所示，焊丝由焊丝给送滚轮经导电嘴送往焊接电弧区。焊接电源的两极分别接在导电嘴（正极）和焊件（负极）上，两极之间形成电弧。这电弧一方面把被焊物在电弧附近的那一部分烧熔化，另一方面将焊丝烧熔化，并以滴状落下，与焊件被熔化的液态金属混合，经冷却而凝固，形成焊缝，完成焊接任务。焊接时，启动焊接按钮，焊接过程便可自动进行。随着焊接过程的进行，电弧向前移动（这要由另一套自动控制系统去完成）。

在整个焊接过程中，电弧长度（即电弧电压）是一个重要参数。电弧长度能否保持恒定，将直接关系到焊缝的质量。电弧长度是这个系统的被控制信号，在焊接过程中对它的变化规律要严加控制。

焊丝给送控制系统的任务，就是通过改变焊丝给送速度实现焊接过程中电弧长度保持恒定的要求，它是一个位置控制系统。

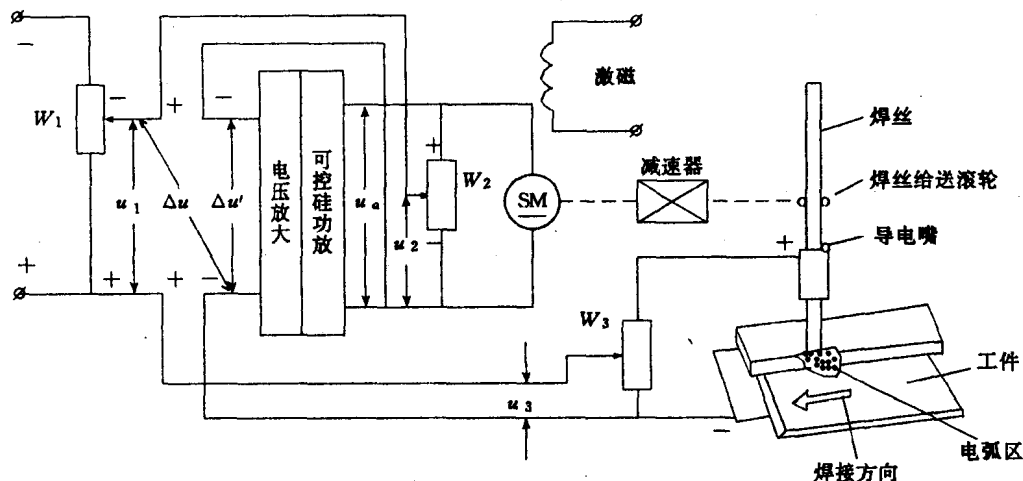


图1.3-7 焊接给送控制系统原理图

焊接电源的外特性如图1.3-8所示。电弧相当于一个非线性电阻作为负载加在电源两极间。当电弧长度改变时，电弧电阻亦改变，从而使电弧电压发生变化。所以在这个系统中电弧电阻是测量转换元件，它测量电弧长度并转换成电弧电压信号，经电位计 W_3 取出一部分(u_3)反馈到系统的控制端。电压 u_3 是系统的反馈信号。当电弧长度增加时(即电弧电阻值增加)，使电弧电流下降，电弧电压上升。反之，若电弧长度下降(即电弧电阻值下降)，电弧电流上升，使电弧电压下降。

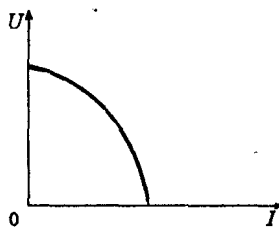


图1.3-8 焊接电源外特征

图1.3-7中 u_1 是电位计 W_1 给出的基准电压，其设置值与所要求的电弧长度相对应。 u_1 是本系统的控制信号。

现在就说明这个系统的工作原理。设某一时刻系统处于平衡工作状态，电弧长度保持在 l_0 ，与此对应的电弧反馈电压为 u_{30} 。反馈信号 u_{30} 与 u_1 (在此系统中 u_{30} 的设置值高于 u_1 的设置值)比较后得偏差信号 $\Delta u_0 = u_{30} - u_1$ ，经放大器放大后就是加在直流电动机电枢两端的控制电压 u_{a0} 。在 u_{a0} 的作用下，电动机以恒定转速(n_0)旋转。如果上述参数均不变化，电弧长度亦不会变化，始终保持为 l_0 。

实际上，常常有干扰信号作用在电动机上，如负载转矩变化(由焊丝弯曲变形等原因造成)、电网电压波动及放大器参数变化等，都将引起电动机转速的变化，使送丝速度变化，从而引起电弧长度变化，使系统的平衡工作状态受到破坏。设由于焊丝弯曲使电动机负载转矩增加，引起电动机转速下降(即 $n < n_0$)，即送丝速度下降，使焊丝熔化减慢，电弧拉长($l > l_0$)，电弧电压上升($u_3 > u_{30}$)，进而使偏差信号 $\Delta u = u_3 - u_1$ 上升($\Delta u > \Delta u_0$)，控制电动机转速上升，即加快送丝速度，使焊丝溶化加快，电弧长度缩短，直到电动机转速重新回到 n_0 ，电弧长度恢复到 l_0 时，系统参数便不再变化，又回到原平衡工作状态，从而完成了控制电弧长度维持恒定的任务。

如果因某种原因使负载转矩下降，其信号的传递及变化过程可表示如下：

$$M_{fz} \downarrow \rightarrow n \uparrow (n > n_0) \rightarrow l \downarrow (l < l_0) \rightarrow u_3 \downarrow (u_3 < u_{30}) \rightarrow \Delta u = (u_3 - u_1) \downarrow (\Delta u < \Delta u_0) \rightarrow u_a \downarrow$$

$(u_a < u_{a0}) \rightarrow n \downarrow \rightarrow l \uparrow$, 直到 $n = n_0, l = l_0$ 时系统参数停止变化, 又完成一个控制过程, 使电弧长度仍维持在恒定值 l_0 上。

系统中还有一个局部反馈信号 u_2 , 即将电枢电压 u_a 的一部分从放大器的输出端反馈到放大器的输入端, 它是一个负反馈。 u_2 的作用是使放大器的输出特性变硬(减少放大器

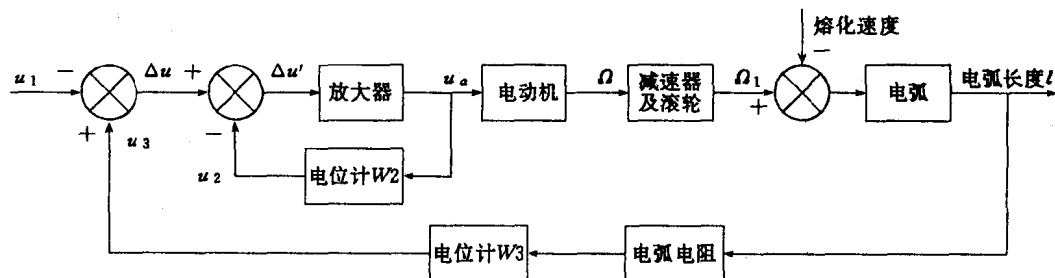


图1.3-9 焊丝给送控制系统方块图

负载变化对放大器输出电压的影响), 间接起到稳定电动机转速的作用, 亦即起到稳定电弧长度的作用。

按照信号传递过程, 将焊丝给送控制系统表示成方块图, 如图 1.3-9 所示。

例 1.3-5 压力控制系统。

图 1.3-10 表示一个压力控制系统。炉内的压力由挡板的位置来控制, 并且由压力测量元件进行测量。测出的压力信号传递到控制器中, 与希望值进行比较。比较后若有偏差存在, 控制器便将输出信号送到执行机构, 执行机构便相应地转动挡板, 以消除偏差。压力测量元件可以选用压电式压力变换器, 它是一种发电变换器, 是利用某些物质的压电效应制成的。压电式压力变换器可以把压力信号变换成相应的电压信号, 实现对压力的测量。

将图 1.3-10 所示压力控制系统表示成方块图, 如图 1.3-11 所示。

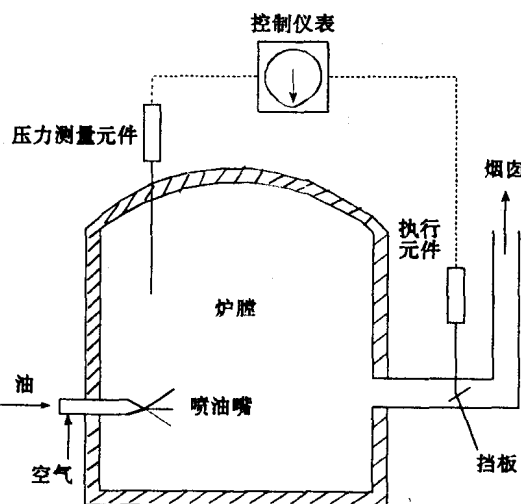


图1.3-10 压力控制系统

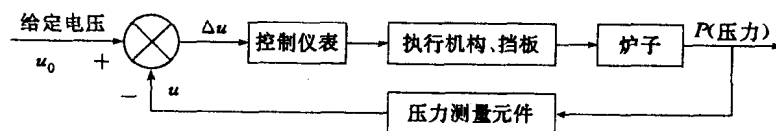


图1.3-11 压力控制系统方块图

三、 程序控制系统

在控制系统中, 如果控制信号 $r(t)$ 的变化规律为已知的时间函数, 即是事先确定的程序, 则称这类控制系统为程序控制系统。