

第 1 章 自动控制系统基础

本章介绍了自动控制系统的发展过程及分类。通过炉温控制系统的实例，讲解了人工控制与自动控制的特点。主要讲解了开环控制与闭环控制。本章应重点掌握自动控制系统的基本概念、组成、自动控制系统的一般工作过程以及自动控制系统的分析方法。

1.1 自动控制系统的发展

自动控制就是在没有人的直接参与的情况下，利用控制装置（控制器）使被控对象（如机器设备或生产过程）自动地按预定的运行规律去运行，使被控对象的一个或数个物理量（如电压、电流、速度、位移、流量、化学成分等）能够在一定的精度范围内按照给定的规律变化。导弹能准确地命中目标，火箭将人造卫星送入预定轨道，宇宙飞船能准确地月球上着陆并安全返回，都是自动控制技术发展的结果。

在现代的工业、农业、国防和科学领域中，自动控制技术得到了极为广泛的应用。将自动控制技术用于生产，可以提高劳动生产率、改进产品质量、降低生产成本、改善劳动条件和加强企业管理，节省人力和物力，提高经济效益。自动控制技术在探索新能源、发展空间技术和改善人民生活等方面也起着日益重要的作用。

自动控制是一门理论性很强的工程技术，称为“自动控制技术”实现这些技术的理论叫做“自动控制理论”。它分为 3 部分：经典控制理论、现代控制理论和大系统控制理论。

自动控制是一门年轻学科，从 1945 年开始形成。但自动控制理论的胚胎与萌芽时期却很早。如我国古代，3000 年前发明了自动计时的“铜壶滴漏”装置；公元前 2 世纪发明了用来模拟天体运动和研究天体运动规律的“浑天仪”；公元 132 年产生了世界第一架自动测量地震的“地动仪”；公元 11 世纪发明了自动调节器“平衡装置”等，都是自动控制设备的雏形。

工业生产和军事技术的需要，促进了经典控制理论和技术的产生和发展。18 世纪欧洲产业革命后，由于生产力的发展，蒸汽机被广泛用做原动力。为使工作更完善，1765 年俄国机械师波尔祖诺夫发明了蒸汽机锅炉水位调节器；1784 年英国的瓦特发明了蒸汽机离心式调速器；1877 年劳斯和胡尔维茨提出了系统稳定的判据。19 世纪前半叶，生产中开始利用发电机和电动机（根据行业习惯，以下电动机均称为电机），促进了水电发展，出现了水电站远控、简单程序控制、电压和电流的自动调节等技术。19 世纪末到 20 世纪前半叶，由于内燃机的应用，促进了船舶、汽车、飞机制造业、石油业的发展，对自动化提出了更高的要求。由此相应产生了伺服控制、过程控制等技术。二次世界大战中，为了生产和设计飞机、雷达、火炮上的各种伺服机构，需要把过去自动调节技术和反馈放大器技术进行总结和提高，于是搭起了经典控制理论的架子。战后这些理论公开，并用于一般工业生产控制中。

1. 经典控制理论（20 世纪 40~60 年代）

1945 年美国波德写了“网络分析和反馈放大器设计”，奠定了经典控制理论基础，在西

方国家开始形成自动控制学科。1947年美国出版了名为“伺服机件原理”的第1本自动控制教材。50年代是经典控制理论发展和成熟的时期。经典控制理论主要用于线性定常系统，研究的对象是单输入单输出自动控制系统的问题。其核心是自动调节器，研究的主要内容是稳定性问题。技术工具类型为机械、气动、液体、电子等，主要用于实现局部自动化。经典控制理论是研究控制理论的基础，现代控制理论就是在其基础上发展起来的。

2. 现代控制理论（20世纪60年代中期）

空间技术的需要和电子计算机的应用，推动了现代控制理论和技术的产生和发展。50年代末60年代初，空间技术的发展迫切要求对多输入多输出、高精度参数时变系统进行分析与设计。这是经典控制理论无法有效解决的问题，于是出现了新的自动控制理论，称为“现代控制理论”。以现代控制理论为基础的系统，其核心为电子计算机，对象为多输入多输出的复杂系统，研究的主要内容是最优性问题，用于实现企业管理和控制综合自动化。

3. 大系统理论和智能控制理论（20世纪70年代）

它是控制理论向广度和深度发展的结果。大系统是指规模庞大、结构复杂、变量众多的信息与控制系统。它涉及生产过程、交通运输、计划管理、环境保护、空间技术等多方面的控制和信息处理问题。智能控制系统是具有某些仿人智能的工程控制与信息处理系统，其中最典型的就是智能机器人。

1.2 自动控制系统的基本概念

1.2.1 自动控制系统示例

下面以加热炉温度自动控制系统为例，阐述控制系统的基本概念。

加热炉是冶金生产中常见的工艺设备。其加热能源可以是重油、煤气和电力等。根据工艺要求，炉内的温度应保持在一定的数值上。但许多因素，例如电源电压的波动，燃气流量或助燃空气流量的变化，工件的增减速度以及周围环境的温度变化等，都能影响着炉温使之偏离预定的数值。为保证生产的正常进行，就必须人工或自动地给炉子施加某种作用，抵消或削弱上述影响，使炉温恢复到原始的设定值。这种施加作用的过程，称为控制或调节。按实现控制的方式不同，可分为人工控制与自动控制。

1. 人工控制

见图 1.1 操作人员用眼睛观察温度显示仪表的炉温示值，继而将此信息传递给大脑。人的大脑经过分析实际炉温与工艺要求的炉温是否有偏差，然后决定并发出调节电压的命令。双手按此命令旋转调压器的手柄，改变供给炉子的电压，使炉温保持在工艺希望的范围。当炉温高于设定值时，旋转调压器手柄使电压降低，进而使炉温降低；反之，升高电压使温度上升。操作过程是用人工改变电压的方法调节炉温使之保持稳定。

这种控制是在人的直接参与下完成的。操作人员是整个控制系统的关键。人工控制的劳动强度大、工作单调、容易使操作者疲劳，发生差错和滞后。因而，控制质量决定于操作人

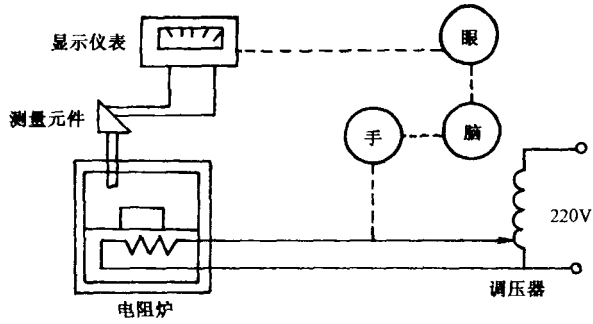


图 1.1 炉温人工控制系统

员的技术水平和精神状态。可见，用人工控制很难保证控制质量。尤其是对一些复杂的控制系统更无法达到控制要求。而有些工作场合如高温、密闭、有毒等不适和人工控制或人无法进行直接控制。因此，人工控制系统的应用受到了很大的限制。

2. 自动控制

为了解决人工控制的局限性与生产要求的复杂性之间的矛盾，人们设计了自动化装置，代替人的器官，模仿人工控制的过程，构成了自动温度控制系统，见图 1.2。温度测量元件（如热电偶）把温度信号变成了相应的电信号，加到变换器或放大器，使信号适合于处理。这一部分代替了人眼的功能，起到自动测量炉温的作用。测量信号再送给调节器，这一装置相当于人的大脑，与给定信号进行比较，得到两者的差值（偏差信号），并按照预先规定的规律进行运算发出按一定规律变化的电信号（调节信号）给电动执行器。后者代替人手的功能，旋转调压器手柄，按炉温的高低调节电压来纠正炉温偏差，使之达到期望值。

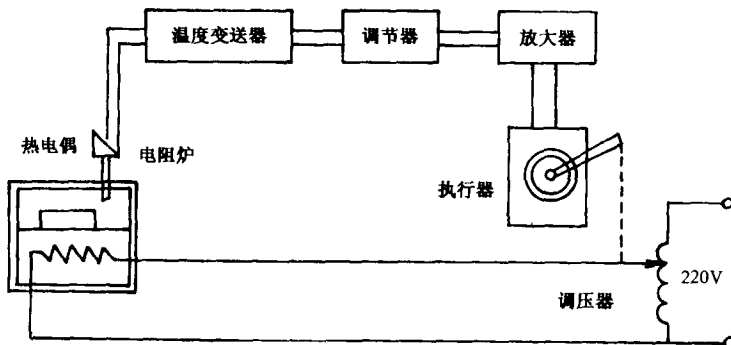


图 1.2 炉温自动控制系统

不论人工控制还是自动控制，都是“检测偏差，纠正偏差”的过程，没有偏差，也就没有控制过程。

1.2.2 开环控制系统和闭环控制系统

1. 开环控制系统

开环控制系统是指组成系统的控制装置与被控对象之间，只有顺向作用而没有反向联

系的控制。炉温控制系统如图 1.3 所示，方块图如图 1.4 所示。

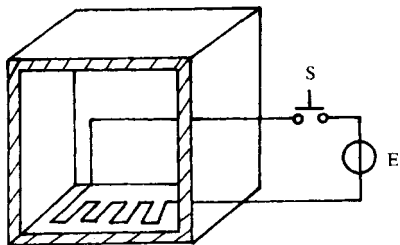


图 1.3 炉温开环控制系统

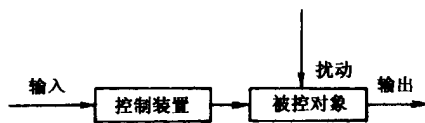


图 1.4 开环控制方块图

对炉温系统开环控制分析：炉子是被控对象，炉温是被控量，电阻丝的通电时间是操纵变量。加热电阻丝的开关 S 受时间继电器控制，按照预先规定的时间接通或断开电源 E 从而使炉温保持在希望的范围内。当我们已经将炉温调节到预定值时，如果工作条件发生了变化，使炉温偏离了希望值，而开关 S 不能相应的改变接通时间，炉温偏差就无法自动修正。也就是说系统不能根据输出量的变化情况反过来调整被控变量。

开环控制系统的特点是：系统的输出量受输入量的控制，却不能反过来去影响输入量。也就是说系统中没有反馈元件，信号传递路径的方向是单一的，不能构成闭合回路。因此当输出量偏离设定值时，系统不能对其进行修正。开环控制结构简单、费用节省。但一般来说，它的精确性较低、适应性较差，不能有效的克服干扰对系统的影响。因为系统内部和外部不可能不存在干扰，所以开环控制只适用于一些简单的要求不高的场合。

2. 闭环控制系统

为了改善开环控制系统的性能，就必须对系统的输出量进行测量，并将测得的结果与给定值进行比较，按其差值对系统进行控制，以修正其输出量。这样就形成了闭环控制系统。图 1.2 就是一个炉温控制的闭环控制系统。闭环控制系统的方块图如图 1.5 所示。

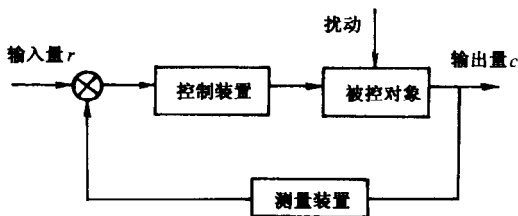


图 1.5 闭环系统方块图

闭环控制系统是指控制装置与被控对象之间既有顺向作用又有反向联系的控制系统。它的控制过程大致为：对被控量（输出量）进行测量，并将测量值与给定信号（输入量）进行比较，得到偏差信号；将偏差信号进行处理（放大与变换）；处理后的信号去控制被控量，使之做与原来方向相反的运动。这种利用偏差产生控制作用，达到消除或减小偏差的控制原理叫反馈原理。如果经过反馈使系统偏差增加，即为正反馈，经过反馈后使系统的偏差减小就称为负反馈。很显然，正反馈不能减小偏差，只能使输出量偏离设定值，它不能达到自动控制的目的。所以一般地说，反馈控制系统都是负反馈。只有负反馈才能减小偏差达到“纠偏”

的目的。

闭环控制系统的特点是干扰信号使得系统输出量发生的变化都会被反馈元件检测出来，通过控制装置去修正输出量，使输出量恢复到设定值。因此闭环控制系统对扰动有补偿、抵抗的能力，能用精度低的元件组成精度较高的控制系统。系统采用闭环控制后可能产生超调、振荡现象，所以稳定性是闭环控制系统中的重要问题，为此在系统中通常要加入校正装置。

1.3 自动控制系统的分类及性能指标

1.3.1 自动控制系统的分类

自动控制系统分类的方法有很多种，通常采用按控制系统的基本结构和按输入量进行的分类方法。按控制系统的基本结构可分为开环控制系统和闭环控制系统，按输入量变化的规律可分为：恒值控制系统，随动控制系统，程序控制系统和计算机控制系统。

1. 恒值控制系统

恒值控制系统也称为定值控制系统。如果控制信号（给定信号）为恒定常量的闭环控制系统就称为恒值控制系统。在整个工艺过程中，其设定值（给定信号）是始终保持不变的，而其输出量的期望值也是固定不变的。如炉温控制系统、自动调速系统、稳压、稳流、恒频的控制系统。炉温自动控制系统如图 1.6 所示。

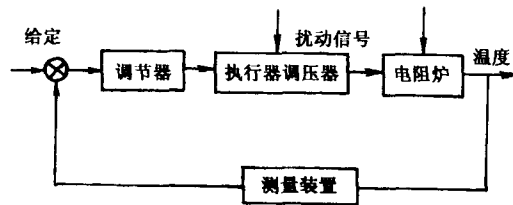


图 1.6 炉温自动控制系统方块示意图

本系统中炉温为被控量，电阻炉为被控对象。其给定值是恒值，要求输出量（炉温）也保持不变。这是一种恒温闭环控制系统。恒值控制系统的特点是控制信号是常量或变化缓慢的信号，其输出量一般也是恒定值。其主要任务是补偿干扰，使系统输出保持恒定。

2. 随动控制系统

随动控制系统的控制信号（设定值）是不断变化的任意时间函数。此函数在系统工作前又是随机的无法预先确定的。它的主要任务是使被控量准确地跟踪控制信号的变化而变化。所以，也称为自动跟踪系统。其输出量一般为位移或角位移等。如工作机械的位置控制、导弹发射架的角度控制、火炮的发射角控制等。工作机械的随动控制系统如图 1.7 所示。本系统的设定值是不断变化的，其输出量是工作机械的位移或角位移。这个位移紧紧跟随给定值的变化而变化。随动控制系统的特点是给定信号的变化规律是事先不能确定的，其输出量不是恒定值，而是跟随给定信号的变化而变化的。其主要任务是解决跟踪问

题，而补偿干扰是次要矛盾。工作机械随动系统方块图如图 1.7 所示。

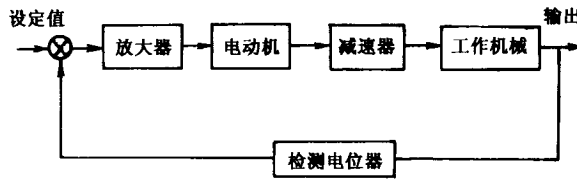


图 1.7 工作机械随动系统方块示意图

3. 程序控制系统

程序控制系统的设定值也是变化的，但它的变化是有规律的，是已知时间的函数，其设定值按照一定的时间顺序变化。其工艺过程一般都是按照一定规律反复变化的。例如食品加工中的消毒杀菌温度控制系统，机械加工中的电镀等工作都是程序控制系统。

4. 计算机控制系统

计算机在本系统中不只是计算工具，而且作为系统的核心部件参与控制工作，是一种新的控制方法。系统利用计算机的速度快、容量大、功能强的特点完成高精度复杂系统的控制，其发展前景十分广阔。宇宙飞船姿态控制系统如图 1.8 所示。



图 1.8 宇宙飞船姿态控制系统方块示意图

1.3.2 自动控制系统的组成和常用术语

1. 自动控制系统的组成

自动控制系统一般由被控对象与控制装置两大部分组成，控制装置又可分为 3 部分：自动检测装置、自动调节装置和执行机构。自动控制系统的方块图如图 1.9 所示，其工作过程是系统的输出量（被控变量）由其输入量控制，并且经检测元件及变送器（反馈环节）送到比较机构与给定值形成偏差信号，经调节器放大处理，然后去控制执行器。使之通过改变操纵变量的方法保证输出量达到我们预期的设定值。如果测量值与给定值相等，则无偏差信号。这时，说明输出量已经达到期望值，系统已经进入稳定状态，不需要调节。由此可见，自动控制系统的控制过程实际上就是所谓的“纠偏”过程。

(1) 被控对象要求实现自动控制的机器、设备或生产过程称为被控对象，如加热炉、电机、锅炉、机床、飞行器及工业生产过程等。

(2) 控制装置指对被控对象起控制作用的装置的总称叫做控制装置。它分为 3 部分：自动检测装置、自动调节装置和执行机构。

(3) 自动控制系统由被控对象和控制装置两大部分组成，是以某种规律或互相依赖

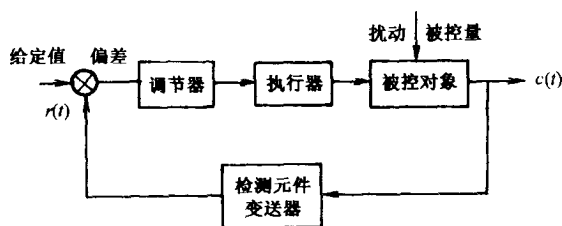


图 1.9 自动控制系统方块图

的方式结合为一个有机整体，使被控对象工作状态能自动控制的系统称为自动控制系统。

(4) 自动检测装置包括测量元件和变送元件，它们代替人眼和其他感官的功能，起自动检测被控对象参数的作用。如测速发电机、热电偶等。

(5) 自动调节装置代替人的大脑，起综合、分析、比较、判断和运算的作用，并按一定的规律发出控制信号或指令。最简单的调节装置可以是一副杠杆，可编程控制器及电子计算机则是复杂而完备的调节装置。

(6) 执行机构它代替人手和脚的功能，起具体执行控制信号或指令的作用，给被控对象施加某种作用，使其改变输出量。

2. 常用术语

为了便于研究和交流成果，人们通过实践，逐步形成并采用一套通用的名词术语。

(1) 被控量在自动控制系统中，按给定的工作要求要加以控制的物理量称为被控量。被控量一般就是系统的输出量，是时间的函数，记做 $c(t)$ 。

(2) 操纵变量受控于调节阀用于克服扰动的影响，使被控变量保持在给定值的物理量或能量称为操纵变量。它是用以直接改变被控量的物理量。

(3) 给定信号作为被控量的控制信号而加给自动控制系统的输入量称为给定信号，记为 $r(t)$ 。被控量的输出量就是由给定信号决定。

(4) 偏差信号它是比较元件的输出信号，即给定信号与反馈信号之差称做偏差信号，记做 $\epsilon(t)$ 。

(5) 误差信号系统被控量的希望值与实际值之差称为误差信号，记做 $e(t)$ 。

(6) 干扰信号破坏系统平衡，导致系统的被控量偏离其给定值的一切作用都称为干扰信号，记为 $N(t)$ 。干扰信号是系统不希望的输入信号，它可能来自系统内部（内扰）或系统外部（外扰）是影响系统控制质量的不利因素。

(7) 反馈信号从系统的输出端引出，经过变换（或直接）回送到输入端与给定信号进行比较的信号称为反馈信号，记为 $b(t)$ 。

1.3.3 对自动控制系统的一般要求

为了实现自动控制的基本任务，必须对系统在控制过程中的行为提出要求：系统的被控量应能迅速、准确地跟随给定量的变化，两者保持一定的函数关系，这种关系尽可能不受各种干扰的影响。对自动控制系统性能的基本要求，可归纳为 3 点，即稳定性、快速性、准确性。

1. 稳定性

对于一个自动控制系统的首要要求是系统必须是稳定的。如果一个系统，由于给定信号的变化，或者由于干扰的加入，平衡状态被破坏，使输出量偏离设定值，系统进入动态过程。最后，随着时间的推移，系统达到新的平衡，即动态过程是收敛的，则系统是稳定的系统。若动态过程是发散的或者是振荡的，则系统是不稳定的。图 1.10 为某些系统在阶跃信号作用下的响应曲线。其中 (a)、(b) 为稳定系统，(c) 为不稳定系统。

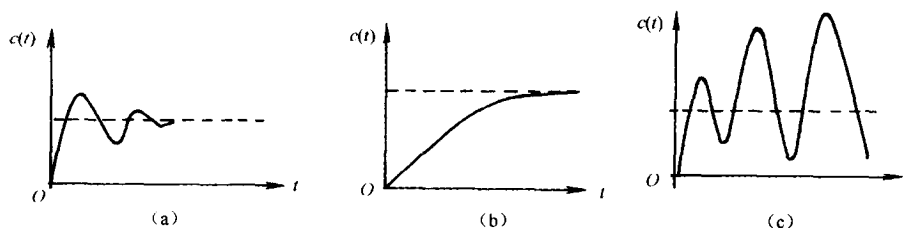


图 1.10 阶跃响应曲线

2. 快速性

对系统快速性的要求，就是对系统动态特性的要求，例如动态过程时间的长短、对输入信号反应的快慢等等。快速性是衡量系统品质的一个重要指标。衡量快速性的指标通常用过渡时间和振荡周期描述。过渡时间是指系统达到稳态时受到了干扰后，被控变量由稳态进入到动态后再达到新的稳态所需要的时间。过渡时间越短，其调节作用越强。振荡周期是指动态过程中两波峰间的间隔时间。振荡周期越短，其调节速度越快。

3. 准确性

所谓准确性是指在动态过程结束后，系统的实际输出量与期望输出量之间差值的大小。衡量准确性的主要指标是稳态误差。稳态误差是指系统从一种稳态过渡到另一种稳态后系统出现的误差。如果稳态误差为“0”，则称为无静差系统。在实际应用中，要达到稳态误差为“0”是很难做到的。我们往往是使稳态误差保持在某一范围内，使输出量能满足生产要求就达到了控制目的。

1.3.4 自动控制系统的性能指标

自动控制系统的的时间响应包括两个过程：动态过程和稳态过程。

动态过程是指系统从加入输入信号的瞬时起，到系统输出量到达稳态值之前的响应过程。动态过程表征系统的稳定性和对输入信号响应的快速性。

稳态过程是指时间 t 趋近于无穷大时的响应过程。稳态过程表征系统的输出量最终复现输入量的准确性。

1. 动态性能指标

现以单位阶跃信号作用下，控制系统的过渡过程来说明动态性能指标。如图 1.11 所示。

(1) 上升时间 t_r 系统输出量第一次上升到稳态值所需的时间。对于无振荡的系统则定义为：系统输出量从稳态值的 10% 上升到稳态值的 90% 所需要的时间。上升时间是衡量响应快慢的一个指标。

(2) 最大超调量 σ_p 系统响应的动态过程中，输出量的最大值超过稳态值或给定值的百分数。不同的控制系统，对超调量的要求也不同，一般要求 σ_p 在 5%~35% 之间。超调量反映了系统的平稳性。

$$\sigma_p = \frac{c(t) - c(\infty)}{c(\infty)} \times 100\% \quad (1-1)$$

(3) 调节时间（过渡过程时间） t_s 从给定输入作用于系统开始，到输出量进入期望值的 $\pm 5\%$ （或 $\pm 2\%$ ）区域所需时间。当 $t \geq t_s$ 时则有

$$|c(t) - c(\infty)| \leq \Delta \quad (\Delta = 0.05 \text{ 或 } 0.02) \quad (1-2)$$

t_s 是说明系统惯性的，它反映了系统的反应速度。

(4) 振荡次数 N 在调节时间范围内，输出量在期望值上下摆动的次数。振荡次数 N 小，说明系统阻尼性好，系统稳定。它标志着系统动态过程的稳定性。

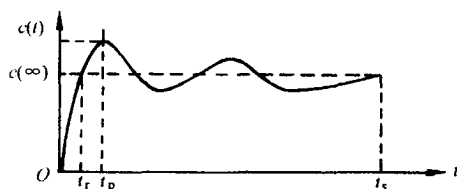


图 1.11 控制系统的单位阶跃响应曲线

2. 稳态性能指标

描述系统稳态性能的指标是稳态误差。稳态误差指输出的稳态值与期望值之间出现的偏差。它反映了系统的稳态精度，说明了系统的准确程度。

1.3.5 自动控制系统的分析方法

自动控制系统常用的分析方法是采用定性分析和定量分析的方法。定性分析方法是把控制系统的组成、各组成部分和各元件的工作原理及作用以及各部分之间的联系、输入量与输出量之间的关系分析清楚，而不进行计算和公式推导。定量分析方法是在定性分析的基础上，对系统进行量化分析。定量分析方法通常是建立系统的数学模型和传递函数，对系统的动、静态性能进行分析。本书采用以定性分析为主的分析方法。

本章小结

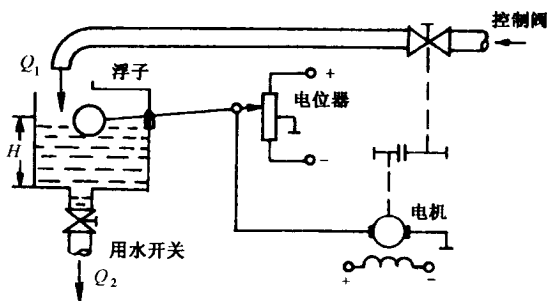
本章对自动控制系统的基本概念、基本分类和基本要求进行了讲述，重点讲解了人工控制与自动控制、开环控制与闭环控制。

- 自动控制理论 { 经典控制理论
现代控制理论
大系统智能控制理论

- 自动控制系统的基本组成 { 控制装置
被控对象
- 控制装置 { 自动调节装置
自动检测装置
执行机构
- 自动控制系统的基本类型 { 控制方式 { 开环控制系统
闭环控制系统
控制量的变化 { 恒值控制系统
随动控制系统
计算机控制系统
- 自动控制系统的时间响应 { 动态过程
稳态过程
- 动态过程的性能指标 { 最大超调量
上升时间
调节时间
振荡次数
- 反映系统稳态性能的指标是稳态误差。
- 对自动控制系统的一般要求是：系统的稳定性、快速性和准确性。

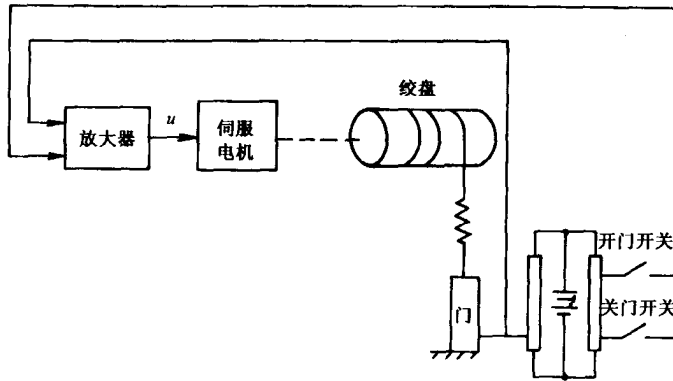
习 题 1

- 1.1 请举出几个日常生活中的开环和闭环的例子，并说明它们的工作原理。
- 1.2 闭环控制系统由哪些主要环节组成？它们在系统中的职能是什么？
- 1.3 习题 1.3 图为水位控制系统，说明它的工作原理，画出方块示意图，并标明控制量、被控量、干扰量以及组成的环节。



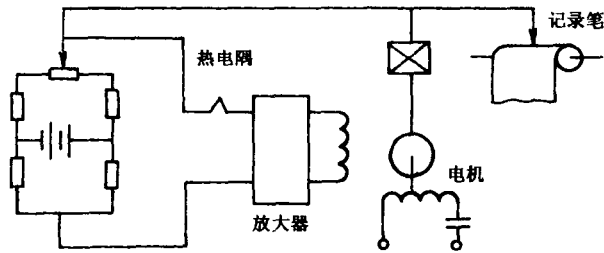
习题 1.3 图水位控制系统

1.4 习题 1.4 图是大门自动开关控制原理图。试说明工作过程，并画出方块图。



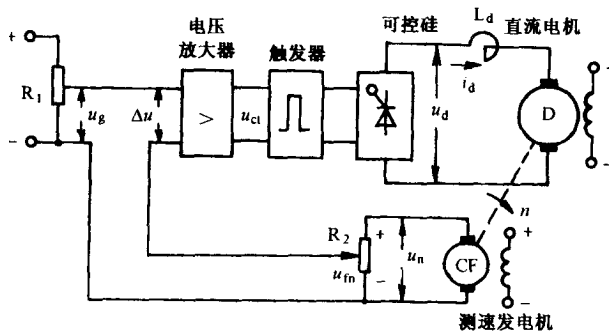
习题 1.4 图大门自动开关控制系统

1.5 习题 1.5 图是自动平衡记录仪的原理图，试说明工作原理，并画出系统方块图。
本系统是恒值系统还是随动系统？



习题 1.5 图自动平衡记录仪表

1.6 习题 1.6 图为电机直流调速系统，试说明其组成及工作原理，并画出方块示意图。
以此系统为背景，阐述闭环控制的特点。



习题 1.6 图电机直流调速系统

第 2 章 自动控制系统的典型环节

本章讲述了自动控制系统的调节器的典型电路及特点、调节规律。介绍了自动控制系统中常用的比例环节、积分环节、比例积分环节、微分环节、比例微分环节及比例积分微分环节的电路结构、工作原理及特性。介绍了典型输入信号，以及在单位阶跃信号作用下的典型环节的响应。

2.1 概述

自动控制系统是由若干元部件（或单元）按一定形式组合而成的。这些元部件可以是机械的、电子的、液压的或其他类型的装置。若从结构和工作原理来分，则种类繁多。但从描述它们的动态特性和性能来分，却只有几种类型，即几种典型环节。不管具体元部件的物理属性如何，只要具有相同的控制规律或相同的传递函数，就属同一类环节。这样划分，能方便且确切地揭示出元部件传递信号的特性及对系统的影响。实际上，自动控制系统的特性在很大程度上是由其调节器的特性决定的，调节器是自动控制系统的核心单元。所谓调节器的特性是指其输出信号随输入信号的变化而变化的规律，也叫调节器的调节规律。自动控制系统的工作过程是：系统的输出量由其输入量（给定值）决定，当有扰动信号加入到系统时，系统将偏离设定值产生偏差信号：

$$\epsilon(t) = r(t) - b(t) \quad (2-1)$$

这个偏差信号就作为调节器的输入信号。 $\epsilon(t) > 0$ 称为正偏差； $\epsilon(t) < 0$ 称为负偏差。调节器根据这个偏差信号的正负和大小进行相应的处理后输出调节信号 $Y(t)$ ，去控制执行机构，使输出信号重新回到设定值。当偏差信号 $\epsilon(t) > 0$ ，输出信号 $Y(t) > 0$ 时称为正作用调节器； $\epsilon(t) > 0$ ，而 $Y(t) < 0$ 时称为负作用调节器。正、负作用调节器只是调节方式不同，其最终结果都是通过调节作用去消除偏差，使输出量回到设定值。值得注意的是：调节器的输入信号与输出信号的物理量往往是不同的。例如：一个温度调节器的输入量可能是一个温差信号，而其输出信号在电动系统中通常是一个电压或电流；而在气动系统中通常是一个压力信号。在自动控制系统中，主要的典型环节有：比例环节、积分环节、微分环节、惯性环节、振荡环节和延迟环节。我们重点对本课程主要应用的比例环节、积分环节、微分环节和由它们组合而成的比例积分环节、比例微分环节和比例积分微分环节进行介绍和分析。

2.2 自动控制系统的典型环节

2.2.1 比例环节(P)

比例环节也称为放大环节。它的输出量与输入量之间在任何时候都是一个固定的比例关系，或者说它的输出量能毫无失真和滞后地以一定比值复现输入量。

其数学方程为

$$= K_p r(t) \quad (2-2)$$

式中： $c(t)$ ——输出量；

$r(t)$ ——输入量；

K_p ——比例系数，也称为比例增益。由于比例系数是可变的，所以，比例环节就是一个放大倍数可调的放大系统。

1. 比例调节的控制过程

比例环节的控制作用是以系统的偏差信号作为输入，其输出量就是系统的被控变量。输出量的大小与偏差信号成正比。偏差越大，调节作用越强。图 2.1 所示为液位控制系统的示意图，是一个典型的比例控制系统。液位 H 为被控变量。浮球与杠杆共同作用通过调节阀门的开度控制液体的流入量 Q_1 来调节水位，使其达到设定值 H_0 。

当 $H > H_0$ 时，说明流入量 Q_1 大于流出量 Q_2 ，这时浮球上升，通过杠杆的调节作用使 ΔP 减小，阀门间隙减小，使流量 Q_1 减小，则水位 H 下降；

当 $H < H_0$ 时，通过调节作用使流量加大。这样反复调节，使液位保持在设定值附近。在这个系统中，浮球是检测元件，杠杆就是一个比例调节器。阀门的开度 ΔP 与输入量（液位的偏差 $H - H_0$ ）成正比。由相似三角形的比例关系可知

$$\Delta P = \frac{b}{a}(H - H_0) = K_p \Delta e \quad (2-3)$$

即其输出量 ΔP 与输入量 Δe 成比例关系。比例系数为 K_p 。

2. 比例环节的实际电路

图 2.2 是由运算放大器组成的比例环节模拟电路。

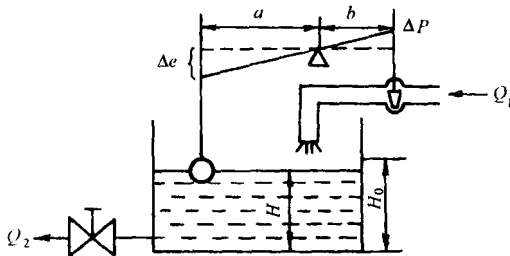


图 2.1 液位控制系统示意图

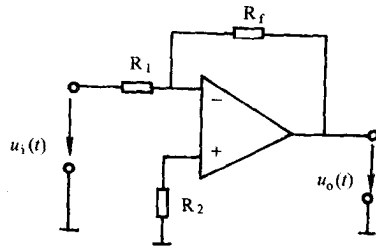


图 2.2 比例环节模拟电路

由“模拟电子技术”课程中我们已经知道其输入与输出的关系为

$$u_o(t) = -\frac{R_f}{R_1} u_i(t) = K_p u_i(t) \quad (2-4)$$

即输入与输出成比例关系。式中的负号表示输入与输出的相位相反。我们也可以从简单的电阻分压器得到比例关系，如图 2.3 所示。由电阻分压器的原理可知

$$U_o = \frac{R_2}{R_1 + R_2} U_i \quad (2-5)$$

其输入与输出也是比例关系，比例系数 $K_p = \frac{R_2}{R_1 + R_2}$

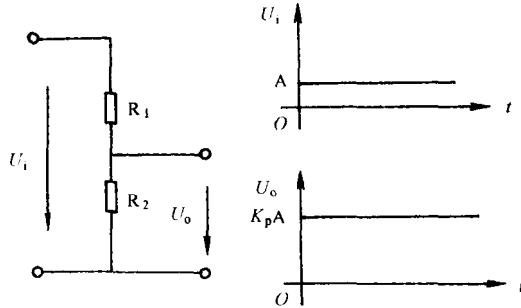


图 2.3 电阻比例电路及特性曲线

3. 比例环节的特点

(1) 比例控制环节的最大优点就是反应快，且无滞后现象其调节作用与偏差成正比，偏差越大输出量也越大，调节作用越强。如果没有偏差，其输出量为 0。所以，能及时、快速地克服扰动的影响，使输出量能稳定在设定值附近。比例调节器是最基本也是应用最广泛的调节器。

(2) 其输出量有余差余差也称为静差，是指系统受到扰动后再次达到稳态时的输出值与设定值之间的偏差。由于比例控制作用是与偏差成正比的，当偏差在控制作用下逐渐减小时其控制作用也变小，所以，比例调节器只能使系统的输出量减小偏差回到设定值附近，而不能完全消除偏差。而且，系统受到的扰动越大，所产生的余差也越大。

比例控制是最基本也是应用最广泛的控制规律，因其结构简单、反应快，能较快地克服扰动的影响使系统快速回到设定值附近，应用范围很广。但有余差存在、控制精度不高，所以很少单独使用。

2.2.2 积分环节(I)

积分环节是指其输出量等于输入量对时间的积分。积分环节的数学表达式为

$$c(t) = K \int r(t) dt \quad (2-6)$$

积分环节的输入信号也是系统的偏差信号，其输出不仅与输入量有关，而且与偏差存在的时间（积分时间）成正比，只要有偏差存在，输出量就不断地增加，偏差存在的时间越长输出量越大。当偏差为“0”时输出量就停止变化。所以积分环节能消除余差。

1. 积分环节的调节过程

从积分调节的输入与输出的关系来看，其输出量是输入量对时间的积累的结果。在现实生活中，积分调节规律是比较普遍的。例如：蓄水池的水位不断上升，就是体积对流量积分的结果，水的体积和流量的关系是

$$Q(t) = \frac{dV(t)}{dt} \quad (2-7)$$

$$V(t) = \int Q(t) dt \quad (2-8)$$

式中： $Q(t)$ 蓄水池流入的水量；

$V(t)$ ——蓄水池中水的体积。

积分环节的特性曲线见图 2.5。从曲线上可以看出，积分输出是从输入量加入的时刻 t_1 开始产生的，在输入存在的时间内输出量是不断增加的；当到达输入量为 0 的 t_2 时输出量达到了稳定状态就不再增加了。也就是说积分调节能消除余差。输出曲线上升的斜率由积分环节的时间常数决定。值得注意的是：积分的输出始终是从 0 开始的，与输入量的大小无关，说明其调节作用是缓慢的也是滞后的。

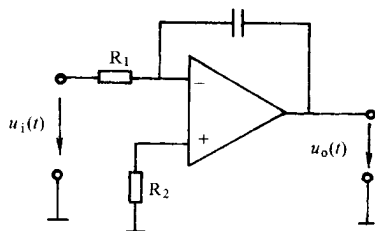


图 2.4 积分环节模拟电路

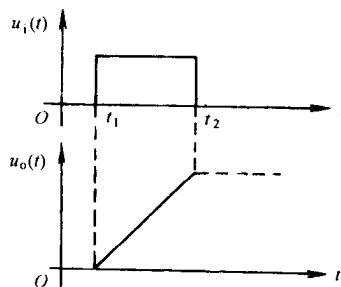


图 2.5 积分作用的特性曲线

2. 积分环节的实际电路

由运算放大器组成的积分环节模拟电路如图 2.4 所示。其输入与输出的关系式为

$$u_o(t) = -\frac{1}{RC} \int u_i(t) dt = -\frac{1}{\tau} \int u_i(t) dt \quad (2-9)$$

式中： $\tau = RC$ 称为积分时间常数，它决定了积分曲线上升的斜率。其数值越小，积分过程进行得越快，曲线斜率越大，输出量上升得也越快，调节作用越强。图 2.6 是由 RC 电路构成的简单的积分电路，其数学表达式是

$$u_c(t) = \frac{1}{RC} \int E dt \quad (2-10)$$

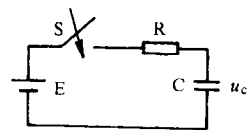


图 2.6 RC 充电电路

它虽然也能实现积分作用，但是其曲线是按照指数规律上升的，是非线形的。由运算放大器组成的积分电路其输入与输出的关系是线性的。

3. 积分环节的特点

(1) 能够消除余差这是因为只要有偏差存在，积分输出就不断增加，调节作用也不断加强，使偏差逐渐减小。直到偏差消失，输出就不再增加了。

(2) 有滞后由于不论偏差以何种方式加入，也不论其幅度有多大，积分环节的输出都是从“0”开始，然后再逐渐加大。也就是说，在扰动加入的瞬间积分是不起作用的，其调节作用是滞后的。调节器的滞后时间越长，调节速度越慢。但从另一个角度来看，滞后性却能减小波动增加系统的抗干扰能力。

2.2.3 比例积分环节(PI)

积分环节虽然能消除余差,但其滞后性使调节作用缓慢,不能快速消除扰动的影响。单纯使用积分环节可能使系统产生振荡甚至产生超调现象,稳定性较差。所以,在要求无静差的系统中一般都采用比例环节和积分环节相组合的比例积分控制环节。

1. 比例积分环节的工作过程

比例积分环节的输入、输出关系的表达式是

$$c(t) = K_p \left[r(t) + \frac{1}{T} \int r(t) dt \right] \quad (2-11)$$

其特性曲线及实际电路见图 2.7。从特性曲线上可以看出,输出是比例控制和积分控制两者之和,而在积分之前多了一个比例系数 K_p 。曲线的起点不像积分控制那样从“0”开始,而是以比例控制的起点 $K_p A$ 为起点。当扰动开始作用的瞬间首先起作用的是比例控制,使输出瞬间上升到 $K_p A$ 的位置,然后积分控制才开始起作用,输出曲线按照积分规律上升。直到偏差消失,输出停止增加。

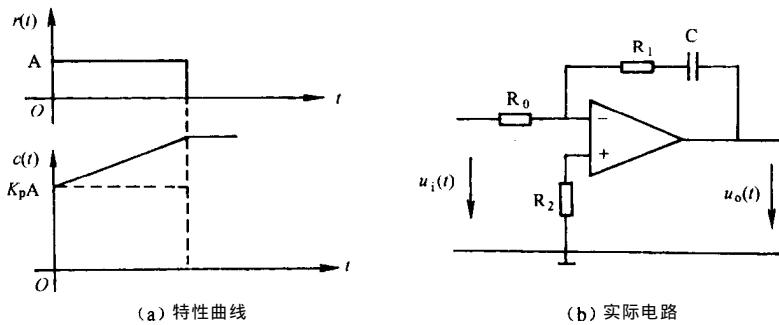


图 2.7 比例积分控制特性及实际电路

2. 比例积分环节的特点

比例积分环节具有如下特点:

- 比例积分环节具有比例控制的快速性和积分控制无余差的优点。其输出和调节作用可视为两者的叠加。值得注意的是:在积分的前面多了一个比例系数 K_p ,使积分控制的作用更强了。

- 扰动加入的瞬间积分并不立即响应,而是由比例控制首先有输出 $K_p A$ 然后比例和积分共同作用,直到偏差完全消失,消灭了余差。

- 虽然由于加入了比例控制,控制速度比单独采用积分控制时加快了,但因为积分控制的滞后性,使得系统对扰动变化的反应迟缓。也就是说还具有滞后性和惯性,对扰动的抑制作用还不够快。为了进一步加快对扰动的抑制作用,还需引入微分环节。

2.2.4 微分环节(D)

微分环节是指其输出等于输入的微分,即

$$c(t) = T_D \frac{dr(t)}{dt} \quad (2-12)$$

微分控制的输出量只与其输入量的变化率成正比。当输入量是偏差信号时，只与偏差的变化率有关而与其绝对值无关。偏差的变化率越大，输出量也越大，控制作用越强；即使偏差的绝对值再大，但无变化，微分控制的输出量也为“0”。所以，它能比比比例控制作用对扰动有更强的抑制能力。

微分环节的实际电路

由集成运算放大器组成的微分环节的实际电路见图 2.8 其工作原理不再赘述。图 2.9 为简单的 RC 微分电路，不难看出其数学表达式为

$$u_o(t) = RC \frac{du_i(t)}{dt} \quad (2-13)$$

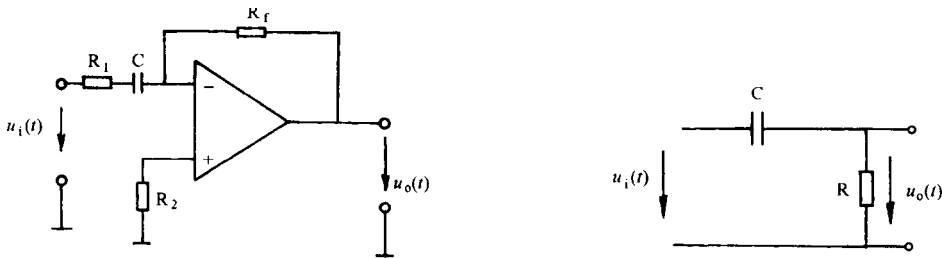


图 2.8 实际微分环节模拟电路

阶跃式扰动信号的输入输出特性曲线如图 2.10 所示。从特性曲线上可以看出，只有当输入产生跳变的 t_1 时刻才有输出，而且这时的输出最大；当输入不再变化时，不管其绝对值有多大，输出都不再增加，而是逐渐减小，一直到“0”。曲线衰减的快慢由微分时间常数 $\tau = RC$ 决定， τ 越小曲线衰减的越快，调节时间越短，调节作用越弱。若扰动是恒速信号时，由于扰动的变化率为定值，其输出是以一定斜率上升的直线，输出不再回到“0”点。恒速信号作用下的特性曲线见图 2.11。

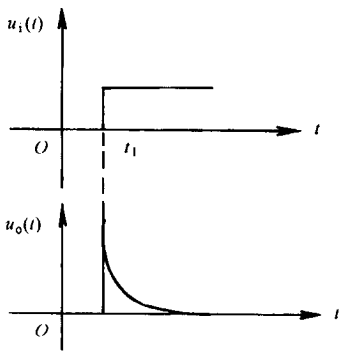


图 2.10 阶跃信号作用下的微分特性曲线

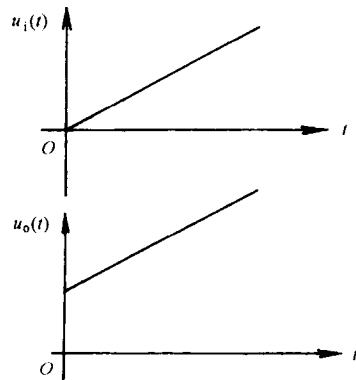


图 2.11 恒速信号作用下的特性