

# 第 1 章 自动控制系统的基本概念

## 1.1 引言

你现在可能并不理解自动控制复杂的细节，却已从现代生活中的洗衣机、电冰箱、电饭煲等生活用品感受到自动控制给我们带来的便利。在这个地球上，我们的生活在很大程度上都依赖于自动运行的系统。这些系统在不需要人们干预的情况下，自动执行某些功能的能力对我们的生活产生了巨大的影响，自动控制的成就令人类着迷和兴奋。

### 1.1.1 自动控制的自然和人造系统

我们先来认识一些我们周围存在的能实现自动控制的自然和人造系统。

以人体自然系统为例，这个系统持续的自动控制是我们保持健康的基本条件。人体可以通过体温控制系统、心跳控制系统、眼球聚焦系统、新陈代谢系统、呼吸系统以及肾脏、肺和肝脏及其他许多人体内的系统完成许多功能，从而维持我们的生命。这些系统是在我们非有意识干预的情况下自动运行的。

在日常生活中，我们接触到或使用着许多自动运行的人造系统，如在高层建筑中的电梯控制系统，炎热夏季和寒冷冬季的室内温度空调系统，水箱中热水的温度控制系统，水位控制装置，刹车防抱死系统。这些只是众多的自动运行系统的几个例子，除此之外，你也能试举出类似的例子。

自动控制的作用就是在人不直接参与的情况下，能够使某些被控制量（如工业加热炉的炉温、飞机的飞行速度与仰角）按指定的规律变化。因此自动控制是一个非常具有吸引力的研究领域，在过去的几十年中发展起来的理论和实践解决了大量的自动化问题，使这个领域具有了通用的特点。在现代生活的所有方面，从宇宙飞船、导弹制导和飞机驾驶到机器制造、工业生产过程和日常生活中，自动控制系统都是极其重要且不可缺少的部分。例如，在工业过程中，对压力、温度、流量、液位和成分的控制；在机器制造工业中，机器零件的加工、处理和装配的控制；此外，在机器人、城市交通、网络堵塞等问题中，自动控制也发挥着重要作用。

将自动控制技术用于生产，可以提高劳动生产率，改善劳动条件和加强企业管理。将自动控制技术用于国防领域，可以提高部队的战斗力，促进国防现代化。自动控制技术在探索新能源、发展空间技术、改善人民生活以及处理经济、社会问题等方面都起着日益重要的作用。自动控制系统有电子的、机械的、化学的、水力的、金融的和经济的。

自动控制理论是一门使用很多数学方法的边缘学科。它不仅吸取众多领域的研究成果和知识，它的不断发展和深入研究还有利于把很多分离研究的学科融合到一起，并应用于同一问题之中。自动控制理论的概念正在不断地扩充和渗透到诸多其它研究领域。

## 1.1.2 自动控制理论发展简史

在学习自动控制之前，我们满怀敬重简要的了解自动控制理论及发展史上的重要理论与贡献人物。

自动控制理论是关于自动控制系统及分析与设计的理论。其任务是研究自动控制系统中变量的运动规律和改变这种运动规律的可能性和途径，为建立高性能的自动控制系统提供必要的理论依据。

自动控制的某些思想可以追溯到久远的古代。古代罗马人的具有反馈原理的简单水位控制装置；我国和希腊古代的具有反馈原理控制水流速度的“铜壶滴漏”钟；两千年前我们祖先发明的指南车；公元 1086—1089 年我国的苏颂和韩公廉发明的水运仪象台；大约在 1620 年 Derbbel 设计的鸡蛋孵化器等。但是直到 1787 年 James Watt 设计的离心式调速器在蒸汽机速度控制上得到普遍应用并易于出现振荡现象时，才开始出现研究控制理论的需要。控制理论的形成远比控制技术的应用晚。

1868 年，英国物理学家 J. C. Maxwell 在论文“论调节器”中首先解释了 Watt 速度控制系统中出现的稳定问题，通过线性常微分方程的建立和分析，指出了振荡现象的出现与从系统导出的一个代数方程根的分布有密切的关系，开辟了用数学方法研究控制系统运动特性的途径。此后，英国数学家 E. J. Routh 和德国数学家 A. Hurwitz 分别在 1877 年和 1895 年独立地建立了直接根据代数方程的系数判别系统稳定性的准则。1892 年俄国数学家李雅普诺夫 (A. M. Lyapunov) 用严格的数学分析方法全面地论述了稳定性问题，Lyapunov 稳定性理论至今仍然是分析系统稳定性的重要方法。

1927 年美国贝尔实验室的电气工程师 H. S. Black 在解决电子管放大器失真问题时首先引入反馈的概念。1925 年英国电气工程师 O. 亥维赛把拉普拉斯变换应用到求解电路网络的问题上，创立了运算微积分，随后被应用到分析自动控制系统的问题上，并取得了显著的成就。传递函数是在拉普拉斯变换的基础上引入的描述线性定常系统或线性元件的输入输出关系的方法，是分析自动控制系统的重要工具。

1932 年，美国物理学家 H. Nyquist 运用复变函数理论的方法建立了以频率特性为基础的稳定性判据。这种方法比当时流行的基于微分方程的分析方法有更大的实用性，也更便于设计反馈控制系统。Nyquist 的工作奠定了频率响应法的基础。随后，H. W. Bode 和 N. B. Nichols 等在 20 世纪 30 年代末和 40 年代初进一步发展了频率响应法。

在研究反馈放大器的同时，反馈控制在工业过程中也得到普遍应用。在这个领域中，受控过程的特性相当复杂，常常是非线性的，而且在执行器和传感器之间的信号传递有很大的时间滞后。由此在实践中提出了比例-积分-微分控制，即所谓的 PID 控制器，这种根据大量的实际经验和对系统动态的线性近似提出的方法，经过调试可获得满意的控制效果。在同一时期，随着测量飞机高度和速度的传感器的研制，飞机的导航和控制装置也有很大发展。

第二次世界大战期间，军事科学的需要，如飞机驾驶、火炮控制系统、雷达天线控制系统等都大大促进了反馈控制理论的发展。美国麻省理工学院雷达实验室的工程师和数学家把反馈放大器理论，PID 控制以及 N. Wiener 的随机过程理论等结合在一起，形成了一整套称为随动系统的设计方法。

1948年，美国科学家 W. R. Evans 提出了有名的根轨迹的分析方法，并于 1950 年进一步应用于反馈控制系统的设计，形成了与频率响应方法相对应的另一核心方法——根轨迹法。20 世纪 40 年代末和 50 年代初，频率响应法和根轨迹法被推广应用于研究采样控制系统和简单的非线性控制系统。在这一时期，理论上和应用上所获得的成就，促使人们试图把这些原理推广到像生物控制机理、神经系统、经济及社会过程等非常复杂的系统，美国数学家 N. Wiener 在 1948 年出版的《控制论》具有重要的影响。

20 世纪 50 年代中期，空间技术的发展迫切要求建立新的控制理论以解决一类更复杂的控制问题。1956 年，前苏联科学家 L. S. Pontryagin 提出极大值原理。同年美国数学家 R. Bellman 创立动态规划。极大值原理和动态规划为最优控制提供了理论工具。1959 年美国数学家 R. E. Kalman 提出了著名的卡尔曼滤波器，1960 年又提出能控性和能观测性的概念。到 20 世纪 60 年代初，一套以状态空间法、极大值原理、动态规划、卡尔曼滤波为基础的分析 and 设计控制系统的新理论和方法已经基本确定。

“经典控制理论”和“现代控制理论”这两个名词是 1960 年在第一届全美联合自动控制会议上提出的。在这次会议上把系统和控制领域中研究单变量控制问题的理论称为经典控制理论，研究多变量控制问题的理论称为现代控制理论。现在，一些学者对“经典”和“现代”的提法是否恰当提出了意见。

按经典控制理论和现代控制理论的提法，经典控制理论是自动控制理论中建立在频率响应法和根轨迹法基础上的一个分支。它的研究对象是单输入、单输出的自动控制系统（单变量控制系统），特别是线性非时变系统。经典控制理论是以输入输出特性（主要是传递函数）为系统的数学模型，采用频率响应法和根轨迹法这些图解的方法，分析系统的性能和设计控制装置。现代控制理论则是建立在状态空间法基础上的一种研究多变量控制系统的控制理论，对控制系统的分析和设计主要是通过对系统的状态变量描述进行的，基本方法是时域方法，是自动控制理论的一个主要组成部分。

20 世纪 60 年代，时域法在空间技术上获得了很好的效果，但是在工业控制系统中却遇到一些困难，其主要原因是难以得到控制对象的精确数学模型，性能指标不能以确切的形式表达出来，而直接采用最优控制和最优滤波的综合方法所得到的控制器往往结构过于复杂，甚至无法实现，于是不少学者恢复了对频域法的兴趣。1969 年英国的 H. H. 罗森布洛克发表著名论文《用逆奈奎斯特阵列法设计多变量控制系统》。随后，不少学者也取得了许多成果。多变量频域法的共同特性是，把一个多变量系统的问题，转化为一组单变量系统的设计问题。现代频域法已成功地应用于石油、化工、造纸、原子反应堆、飞机发动机和自动驾驶设备中多变量系统的分析和设计上，取得了满意的成果。在控制系统计算机辅助设计中，现代频域法也占有重要地位。

20 世纪 70 年代中期以来，自动控制理论不仅用于解决工程技术领域的各种控制问题，其概念和方法已应用于交通管理、生态控制、生物和生命现象的研究、经济科学、社会系统等领域。自动控制理论的建立和发展，不仅推动了自动控制技术的发展，也推动了其它领域的学科和技术的发展。自动控制理论不仅是 20 世纪在科学上所取得的重大成就之一，而且在现在和未来，自动控制理论及其应用还将十分活跃，它的影响将扩大到人类活动的各个领域。

### 1.1.3 自动控制中的常用术语

在接触自动控制系统之前，我们来认识一些自动控制中的常用术语。

**控制** 对于人-机系统，为使某一机器、设备或过程处于希望的状态而对其进行的操作，称为控制。

**人工控制** 在人直接参与下完成的控制，称为人工控制。

**自动控制** 如果使用某种物理装置代替人的作用，在没有人的直接参与下，利用物理装置对生产设备和工艺过程进行合理的控制，使被控制的物理量保持恒定，或者按照一定的规律运行并达到预期的状态或性能要求，称为自动控制。例如矿井提升机速度的控制、水泥回转窑湿度的控制、造纸厂纸浆浓度的控制、轧钢厂加热炉温度的控制、物料传输机速度的控制，等等。这种能代替人对生产设备和工艺过程施加控制作用的装置，称为自动控制装置。

**受控对象** 被控制的机器、设备或过程称为受控对象或对象。如提升机、回转窑、加热炉等。

**被控量** 被控制的物理量称为被控量或输出量。被控量是表征受控对象工作状态的物理量，即速度、湿度、浓度、炉温、电压等。

**给定量** 决定被控量的物理量称为给定量或参考输入。给定量表征了被控量的期望值或受控对象的期望状态。

**扰动量** 妨碍给定量对被控量进行正常控制的所有因素称为扰动量。如果扰动量产生在系统内部称为内扰；扰动量产生在系统外部称为外扰。给定量和扰动量都是自动控制系统的输入量。

**系统** 由一些相互联系和相互制约的环节组成并具有特定功能的整体称为系统。在工业生产中，一台机器、一套设备或任意工艺过程，如加热炉、轧钢机、化学反应釜、核反应堆等都称为系统。

**自动控制系统** 为实现某一控制目标所需要的所有物理部件的有效组合体。自动控制系统由自动控制装置与受控对象组成。控制系统一般按被控量命名，如速度控制系统、压力控制系统、温度控制系统等。

## 1.2 开环控制系统和闭环控制系统

自动控制系统种类繁多。按其结构分为开环控制系统、闭环控制系统和复合控制系统。

### 1.2.1 开环控制系统

我们首先来认识开环控制系统的工作原理和结构特点。

图 1.1 给出了一个加热炉炉温开环控制系统原理图。控制任务要求炉温保持恒定。

根据控制要求，确定图 1.1 中给定炉温所要求的希望值（给定值或参考输入），对应于调压器滑动端置于某一固定位置。接通电源，通过电阻丝给电炉加热，实现加热炉炉温保持恒定。

实际上，由于存在电压的波动（内部扰动），炉门的开闭（外部扰动），炉内实际温度与期望温度（给定值）会出现偏差，有时偏差可能较大。但因图 1.1 系统调压器

滑动端的位置固定，不能改变电阻丝的电流来消除温度偏差。系统实际温度的高低不能影响系统的控制作用。

图 1.1 炉温控制系统中，受控对象是加热炉，被控量是炉内温度，调压器、电阻丝构成控制装置。炉温的希望值（给定值）由调压器滑动端位置给出（电压值）。控制系统通常根据受控对象和被控量界定，所以称为加热炉炉温控制系统。以给定值为输入，被控量为输出，系统结构可用图 1.2 的方框图表示，图中方框表示系统各组成环节，箭头表示信号的作用方向。

如果控制系统的输出量对系统本身没有控制作用，这种系统称为开环控制系统。在开环控制系统结构中，只有从输入端到输出端的信号前向通道，不存在由输出端到输入端的信号反馈通路。因此，开环控制系统是按给定控制方式，又称为无反馈控制系统，由控制器或控制装置与受控对象组成。

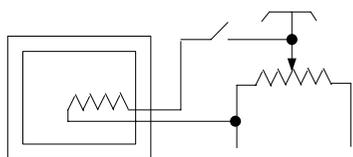


图 1.1 开环控制的电加热炉原理图

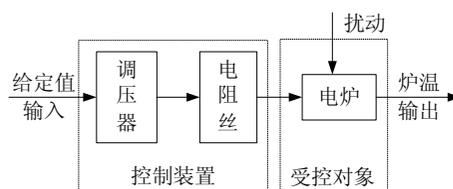


图 1.2 开环控制的电加热炉方框图

开环控制有两种形式：按给定值控制的开环控制，图 1.3 (a) 就是这种形式的开环控制；另一种形式是按扰动补偿的开环控制，如图 1.3 (b) 所示，该系统对扰动进行测量，利用测量得到的扰动值修正控制作用，补偿扰动对被控量的影响，从扰动作用端至输出端，也仅有顺向作用而无反向联系，因此，也是开环控制。按扰动补偿的开环控制方式的前提条件是扰动能够被测量。



图 1.3 两种开环控制形式方框图

(a) 按给定控制的开环控制 (b) 按扰动补偿的开环控制

目前国民经济各部门都广泛应用开环控制系统，如自动售货机、自动洗衣机、产品自动生产流水线及交通指挥的红绿灯转换等。

### 1.2.2 闭环控制系统

你可能已经意识到，图 1.1 所示开环控制系统难以保持炉温恒定。如果无论是否出现扰动都要使炉温保持恒定，就需人工干预。闭环控制是在开环控制基础上引入人工干预过程演变而来的。

那么操作人员怎么保证炉温恒定，即人工干预过程是怎么进行的呢？

图 1.4 是一个手动控制的电加热炉示意图。从图 1.4 看出，控制的过程主要有三个部分：一是测量炉温，并用眼观察温度计，将读数送至大脑；二是在大脑中将观察的读数与给定温度（如 600 度）比较，并根据比较的结果指挥手臂的动作；三是适当

地调整（增加或减小）调压器滑动端位置，改变加热电阻丝电流来减小乃至完全消除偏差，以使炉温尽可能接近给定值，实现炉温基本恒定（在一定偏差范围内）。

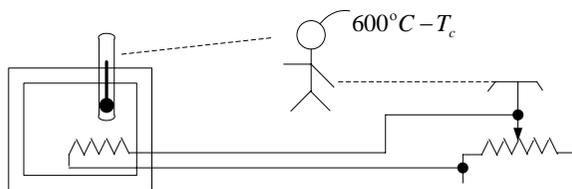


图 1.4 手动控制电加热炉

这里，操作人员的工作顺序是测量输出量（测量功能）、将其转换成与给定量相同物理量纲（电压）的反馈量，并与给定量进行比较（比较功能），根据给定量与反馈量的偏差值调整变压器滑动端的位置（执行功能）。  
温度计

操作人员的关键性作用是使得系统的输出量参与了系统的控制，形成了信号传递的闭环回路。系统一旦出现偏差，就调整控制量，从而保证了输出量的恒定。因此，可以叫做人工反馈系统，或叫人工闭环控制系统。

自动控制的目的是要在人不直接参与的情况下实现同样的控制目的。你将如何设计必要的功能元件组成自动控制系统来完成此任务呢？如果用自动控制装置来取代人工操作功能，就变成自动控制系统，或叫闭环控制系统。图 1.5 是为此任务建立的一个自动控制系统。

在图 1.5 电加热炉系统中，要求炉内温度稳定在某一个给定的温度  $T_r$  附近， $T_r$  由给定的电压信号  $u_r$  反映。实际炉温  $T_c$  通过热电偶测量，并输出比例于炉温  $T_c$  的电压  $u_c$ ，偏差信号反映炉内期望温度与实际温度之差，即  $e = u_r - u_c$ 。该偏差信号经放大后控制电机旋转以带动调压器滑头移动，通过改变流过加热电阻丝的电流，消除温度偏差，使炉内实际温度等于或接近期望炉温。具体调节过程或工作原理详细分析如下：

某一时刻，若  $e > 0$ ，表明  $T_r > T_c$ ，电机旋转带动调压器滑头向右移动，通过电阻丝的电流增大，炉温升高，直到偏差  $e$  等于或接近零。

若  $e < 0$ ，电机旋转带动调压器滑头向左移动，通过电阻丝的电流减小，炉温继续下降直到偏差  $e$  等于或接近零。

图 1.6 描述了该系统的输入量、输出量和反馈量之间的作用关系。这种系统是把输出量直接或间接地反馈到输入端形成闭环，使得输出量也参与系统的控制，所以称为闭环控制系统，又称反馈控制系统。

在闭环控制系统中，既存在由输入端到输出端的信号前向通路，也存在从输出端到输入端的信号反馈通道，两者组成一个闭合的回路。控制系统要达到预定的目的或规定的性能，必须把输出量的信息反馈到输入端，根据二者的偏差进行控制。换言之，闭环控制系统是把输出量检测出来，经过物理量的转换，再反馈到输入端去与给定值（参考输入）进行比较（相减），并利用比较后的偏差信号，以一定的控制规律产生控制作用，抑制内部或外部扰动对输出量的影响，逐步减小以至消除这一偏差，从而实现要求的控制性能。因此，闭环控制系统是按偏差控制方式。

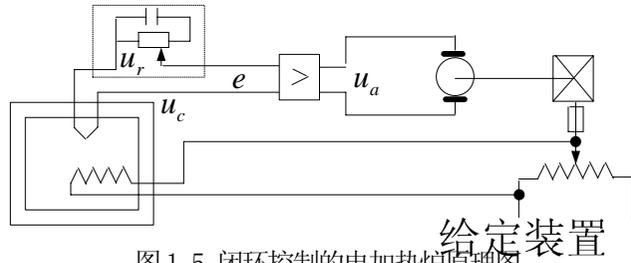


图 1.5 闭环控制的电加热炉原理图

在反馈控制系统中，偏差为输入信号与反馈信号之差，称为负反馈；若偏差为输入信号与反馈信号之和，则称为正反馈。实现反馈，首先要测量输出量，然后再与输入量相比较而构成反馈回路。因此，存在比较、测量装置是闭环控制系统的基本构成特征。炉温闭环控制系统方框图 1.6 中，反馈信号的符号“-”表示负反馈，若为“+”表示正反馈。

在认识了开环与闭环控制系统的结构与原理后，你一定有兴趣对你所接触或了解到的系统或领域进行如此一般的分析。你将发现，闭环控制是最常用的一种控制方式。显然，有简单的闭环控制，也有复杂的闭环控制。闭环控制在工程系统和社会经济系统中正得到广泛的应用，在生命有机体的生长和进化过程中也普遍存在着这种反馈控制。生命有机体为适应环境的变化而做出有效的动作反应，主要是依靠这种反馈作用。人具有学习能力，能通过学习积累经验，用过去的经验来调节未来行为的策略，并具有通过学习来适应环境和改造世界的能力，本质上也是一种反馈控制。

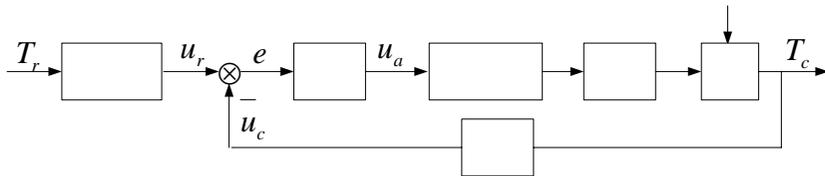


图 1.6 闭环控制的电加热炉方框图

现在，你不仅认识了开环控制系统与闭环控制系统，而且还能对这两种系统进行一番比较了。

一般地，在开环系统中，从控制结构上来看，只有从输入端到输出端的信号传递通道（称为正向通道或前向通道）；从控制原理来看，只有输入量对输出量产生控制作用，是按给定控制方式；开环控制系统结构比较简单，成本较低；对系统参数变化敏感，抑制扰动能力差，控制精度较低。一般用于可以不考虑外界影响或精度要求不高的场合，如洗衣机、步进电机控制及水位调节等。

与开环控制相比，闭环控制具有很大优点。尽管闭环控制系统种类繁多，具体结构不一样，而且它们完成的控制任务也不相同，但从检出偏差、利用偏差信号对受控对象进行控制，以减小或纠正输出量的偏差的控制过程却是相同的。归纳起来，这种系统的特点如下：

(1) 从控制结构上来看，闭环控制系统中除正向通道外，还必须有从输出端到输入端的信号反馈通道，使输出信号也参与控制作用。闭环控制系统就是由正向通道和反馈通道组成的。

(2) 从控制原理来看，输入量与输出量共同（二者偏差）产生控制作用，是按偏差控制方式。闭环控制系统是利用偏差量作为控制信号来纠正偏差的，只要输出量与给定值之间存在偏差，就有控制作用存在，并力图纠正这一偏差。因而，对于闭环控制系统，不论是给定信号的变化，或者外部扰动的影响，或者系统内部的变化，只要是被控量偏离了给定值，都会产生相应的作用去消除偏差。

(3) 对系统参数变化不敏感，抑制扰动能力强，控制精度较高。

(4) 闭环控制系统结构比较复杂，成本较高。为了检测偏差，必须直接或间接地检测出输出量，并变换为与输入量相同的物理量，以便与给定值相比较，得出偏差信号。所以闭环系统必须有检测环节和比较环节，系统设备投资大。

因此，与开环控制相比，闭环控制抑制扰动能力强，对参数变化不敏感，并能获得满意的动态特性和控制精度。但是引入反馈增加了系统的复杂性，如果闭环控制系统参数的选取不适合，系统可能会产生震荡，甚至系统失稳而无法正常工作，这是自动控制理论和系统设计必须解决的重要问题。

好！掌握了开环与闭环控制系统的结构与原理，你已充满热情，要实践一番。习题中有几个可供你练习的系统。

### 1.2.3 复合控制系统

在应用你已掌握的开环与闭环控制系统结构与原理分析你所接触或了解到的系统时，你还将发现，有一种集开环控制结构与闭环控制结构于一体的复合控制系统。

反馈控制是在外部作用（参考输入或扰动）对受控对象产生影响后才能做出相应的控制，尤其是受控对象具有较大延迟时，反馈控制不能及时地调节输出的变化。前馈控制能预测输出随外部作用的变化规律，在受控对象还没有受到影响之前就做出相应的控制，使系统在偏差即将产生之前就注意纠正偏差。前馈控制和反馈控制相结合构成了复合控制，即复合控制是开环控制和闭环控制相结合的一种控制形式，也是构成高精度控制的一种有效控制方式，能使自动控制系统具有更好的控制性能。复合控制基本上具有两种形式：按参考输入前馈补偿的复合控制和按扰动前馈补偿的复合控制，如图 1.7 所示。

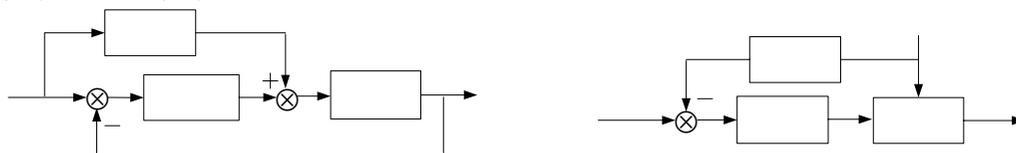


图 1.7 复合控制系统

(a) 按参考输入补偿的复合控制系统 (b) 按扰动补偿的复合控制系统

## 1.3 自动控制系统的基本构成

通过上一节讲述的炉温闭环控制系统这一典型例子，你已经可以归纳出一个闭环控制系统的基本构成了。建立一个闭环控制系统，首先存在需要控制的设备或过程，即受控对象；对受控对象提出的期望状态或变化规律即给定量或参考输入，需要通过一个参考输入变换装置给出；表征系统实际状态的被控量或系统输出量需要通过一个

检测装置测量并转换成与输入量同量纲的反馈量，实际被控量的反馈量与参考输入的偏差需要通过一个比较装置给出；偏差信号可能需要经过运算和放大处理，再送给执行机构进行相应的操作，控制受控对象的工作状态或变化规律。因此，闭环控制系统的一般构成可以用方框图 1.8 表示。

(1) 受控对象（或过程），指需要对它的某个特定的量进行控制的设备或过程。受控对象的输出变量是受控变量，记作  $c(t)$ 。受控对象除了受到控制作用外，还受到外部扰动作用，图 1.8 中用  $d(t)$  表示。受控对象是控制系统的核心部分，它的特征，对控制系统的性能具有重要影响。

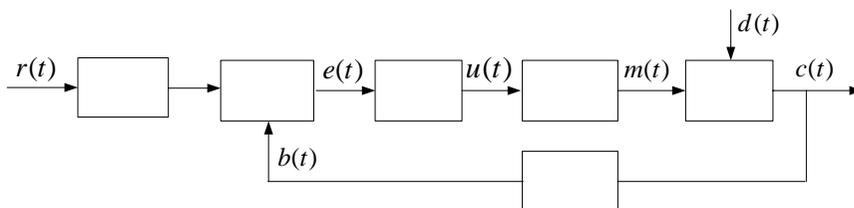


图1.8 控制系统的一般构成

(2) 测量装置，如传感器和测量仪表，它感受或测量受控变量的值并把它变换为可以进行比较的信号。测量装置的输出信号是反馈信号  $b(t)$ 。

(3) 参考输入变换装置，或称给定装置。它的输入信号是受控变量的希望值，通常称为参考输入或设定值，记作  $r(t)$ 。它的作用是把参考输入变换为能和反馈信号  $b(t)$  相比较（同量纲）的信号。

(4) 比较装置，它比较参考输入变换装置的输出信号和反馈信号  $b(t)$ 。其输出为偏差信号  $e(t)$ ，作为控制器的输入，以产生校正误差的控制作用。方框图中用符号“⊗”表示综合或比较功能。

(5) 控制器，对偏差信号  $e(t)$  按一定规律进行处理，产生控制信号  $u(t)$  作为其输出信号。结构图中控制器一般指校正或运算装置、放大装置。实际的控制器常常兼有参考输入传感器、比较器与控制器的功能。

(6) 执行机构，是能够影响受控过程的装置或设备，如电动机、气动控制阀等。通常，为了能够影响受控过程，必须把控制信号变换为具有一定功率的信号，执行机构正是起这一作用的。它的输入信号为控制器的输出  $u(t)$ ，其输出信号为受控过程的输入信号  $m(t)$ ，常称为操纵变量。

应当指出，系统中某一部分本身可能就是一个具有反馈的环节或系统，例如，一个复杂系统的执行机构本身，可能是用带反馈的控制来实现的。在这个意义上，这里讲的是“基本”的反馈控制系统的构成，忽略了系统中的某些细节。

## 1.4 自动控制系统的分类和应用

自动控制系统的功能和组成多种多样，因而自动控制系统有多种分类方法。

按其工作原理可分为开环控制系统、闭环控制系统和复合控制系统；

按其数学模型可以分为线性系统和非线性系统，非时变系统和时变系统；

按系统内部的信号特征可分为连续系统和离散系统；

按系统的功能分类，如温度控制系统、位置控制系统等；

按系统装置类型可分为机电系统、液压系统和电机系统等；

按系统参考输入变化规律可分为恒值控制系统、随动控制系统和程序控制系统等。

控制系统的基本要求是使被控变量和参考输入保持一致，参考输入反映了对被控变量的要求。因此，常按参考输入的特征对系统进行分类。

(1) 恒值控制系统：系统的参考输入为零或为某一常值，当系统受到各种干扰作用时，该系统能使输出量与恒定的参考输入保持一致，称恒值控制系统或恒值调节系统。常见的有恒速、恒温、恒压等自动控制系统，水位调节系统，稳压电源，导航稳定平台，船舶稳定系统都属于这一类系统，恒值控制系统在工业、农业、国防等部门有广泛的应用。

(2) 程序控制系统：系统的参考输入是按预定规律随时间变化的函数，要求被控量迅速、准确地复现输入。如机械加工使用的数字程序控制机床，热处理加热炉的炉温控制等。

(3) 随动控制系统：系统的参考输入是预先未知的随时间任意变化的函数，要求系统的输出以一定的精度和快速性跟踪参考输入变化。函数记录仪、高炮自动跟踪系统便是典型的随动系统例子。在随动系统中，如果被控制量是机械位置（角位置）或其导数时，这类系统称之为伺服系统。伺服系统要求高精度的测量元件，按所采用的执行机构的类型可分为机电伺服系统、液压伺服系统和气动伺服系统。伺服系统最初用于船舶的自动驾驶、火炮控制和指挥仪中，后来逐步推广到很多领域，如带钢飞剪机控制系统，天线位置伺服系统，导弹和飞船的制导系统等。

程序控制系统和随动系统的参考输入都是时间的函数，不同之处在于程序控制系统是已知的时间函数，随动系统是未知的任意的时间函数，而恒值控制系统可视为程序控制系统的特例。各种类型的控制系统有着广泛的应用。

图 1.5 炉温控制系统是一个恒值控制系统。该控制系统的控制功能是在各种干扰作用下，维持炉温不变。

图 1.9 是一个调速系统工作原理图。控制任务是保持电机转速恒定。当电机负载加大或减小时，电机转速下降或上升，测速发电机输出电压  $u_c$  变化，与给定值  $u_r$  比较后，偏差信号  $e$  也变化，使电机电枢电压  $u_a$  也跟着增大或减小，从而使电机转速得到补偿，而维持电机转速恒定。调速系统的方框图如图 1.10 所示。

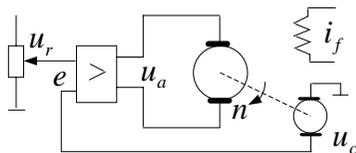


图 1.9 调速系统原理图

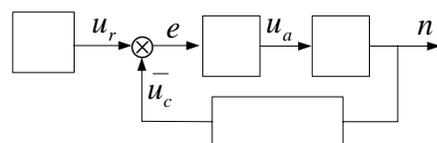


图 1.10 调速系统方框图

图 1.11 给出了一个位置伺服系统的工作原理图，控制任务要求工作机械和输入指令机构同步转动，即要求工作机械输出角位置  $\theta_c$  以一定的精度和快速性跟踪输入指令转角位置  $\theta_r$ 。在这个系统中，控制对象是工作机械，被控量是工作机械输出角位置  $\theta_c$ ，输入量是  $\theta_r$ ，测量装置是两个相同的电位计，分别把转角  $\theta_c$ 、 $\theta_r$  转换成电压  $u_c$  和  $u_r$ ，其偏差信号  $e$  经放大元件放大后送至执行机构，驱动工作机械转动。双电位计结构实现转角测量和比较作用。位置伺服系统方框图如图 1.12 所示。

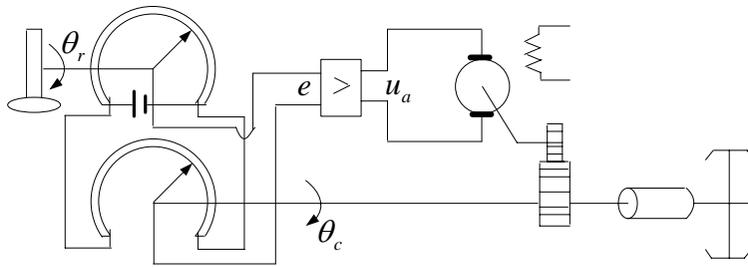


图 1.11 位置伺服系统工作原理图

以表征生产过程的参数为被控量的自动控制系统称为过程控制系统。生产过程是指在生产装置或设备中进行的物质和能量的相互作用和转换过程，表征过程的主要参数有温度、压力、流量、液位、成分、浓度等。相应的控制系统又称为温度控制系统、压力控制系统等。通过对过程参数的控制，可使生产过程中产品的产量增加、质量提高和能耗减少。

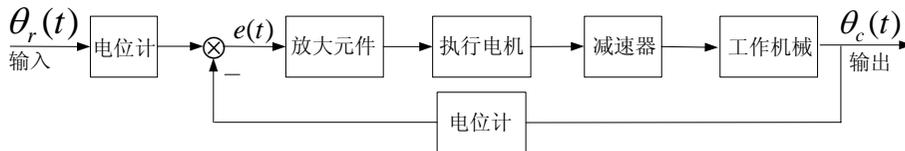


图 1.12 位置伺服系统方框图

在实际产生过程中，往往有多个参数（被控量）需要控制，又有多个变量可以作为控制量。在很多情况下，被控量与控制量之间呈现出交互影响的关系，每个控制量的变化会同时引起几个被控量变化，这种变化间的交互影响称为耦合。耦合的存在会使过程控制系统变得复杂化。

过程控制在生产过程中有广泛的应用，当前出现了过程控制最优化与管理调度自动化相结合的多级计算机控制系统。

## 1.5 对自动控制系统的基本要求

负反馈是实现控制的基本方式。但是，仅仅有了负反馈，并不一定能够实现满意的控制。

你曾经荡过的秋千就是一个例证。试观察秋千，我们以秋千的垂直悬挂位置作为基准。在荡秋千时，如果秋千摆到左边，就把它向右推；如果秋千摆到右边，就把它向左推。显然，这也是一种负反馈。然而，这样控制的结果，并不一定能使秋千回到其垂直位置，相反却可能使秋千越摆越高，最后在基准位置的两边形成大幅度的等幅振荡。设计得不好的负反馈控制系统的被控量也会出现类似的振荡，从而达不到控制的目的。这种振荡现象在技术上称为不稳定。显然，不稳定的控制系统是没有工程价值的。

对于一个控制系统，稳定性是其正常工作的首要条件。除了这个绝对稳定性的要求之外，控制系统还必须具有合理的相对稳定性，即其响应还必须表现出合理的阻尼性和快速性。控制系统还必须能够减少误差到零或者到一个能容许的范围内。

线性系统的动态过程可分为瞬态过程和稳态过程。控制系统的基本要求是系统具

有稳定的动态过程，同时还必须满足一定的瞬态特性和稳态特性。

### 1 稳定性

当系统输入量变化或受到扰动作用，系统的被控量将发生变化而偏离原平衡状态。随着时间的推移，偏差会逐渐衰减，具有达到新的平衡状态或恢复到原平衡状态的性能，则称系统具有稳定性或系统是稳定的；否则，称系统是不稳定的。如图 1.13 和图 1.14 所示。

对恒值系统要求当系统受到扰动后，经过一定时间的调整能够回到原来的期望值。对随动系统，被控量始终跟踪参考输入量的变化。

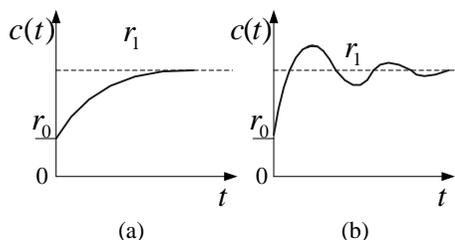


图 1.13 系统给定量突变

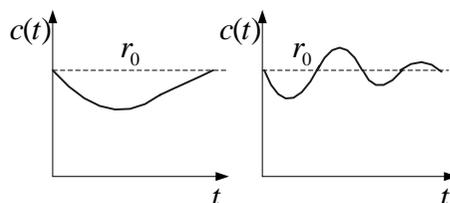


图 1.14 系统受到扰动

稳定性是控制系统自身的固有特性，由系统的结构与参数决定，与外界因素无关。

### 2 快速性

对瞬态过程的形式和快慢提出要求，一般称为瞬态性能。例如高射炮射角随动系统，要求炮身能迅速跟踪目标变动，如果炮身行动迟缓，仍然抓不住目标。

### 3 准确性

对稳态过程的精度提出要求，用稳态误差来表示。如果在参考输入信号作用下，当系统达到稳态后，其稳态输出与期望输出之差叫做给定稳态误差。显然，这种误差越小，表示系统的输出跟随参考输入的精度越高。

由于被控对象具体情况的不同，各种系统对上述三方面性能要求（稳、准、快）的侧重点也有所不同，例如随动系统对快速性和稳态精度的要求较高，而恒值系统一般侧重于稳定性能和抗扰动的能力。在同一个系统中，上述三方面的性能要求通常是相互制约的。提高过程的快速性，会引起系统强烈振荡；改善平稳性，过程又可能变得迟缓，甚至使最终的精度变的很差。

## 1.6 本书的主要内容

自动控制理论研究对控制系统进行分析和设计的方法。

系统分析——对于一个给定的具体的控制系统，如何从理论上对它的动态性能和稳态精度进行定性的分析和定量的估算。

系统设计——对于已给定的系统性能要求，如何根据已知的受控对象，合理地确定控制装置的部分结构和参数（校正装置），使系统的性能全面地满足技术上的要求。

本书讲述单变量系统的自动控制理论部分。第 1~2 章讲述自动控制系统的基本概念、物理系统的数学模型，属于控制系统分析的基础部分。第 3~5 章讲述自动控制系统的动态响应、根轨迹、频率域分析方法。第 6 章讲述自动控制系统的根轨迹、频率域设计方法。在学习了连续时间控制系统的分析与设计方法之后，在第 7 章讲述离散

系统的理论基础。第 8 章讲述非线性控制系统。

自动控制既复杂又有趣，深入学习研究单变量系统的自动控制理论，你准备好了吗？

### 思考与习题

- 1 列举几个开环控制与闭环控制系统的例子，并分析说明其工作原理。
- 2 比较开环控制与闭环控制系统的优缺点。
- 3 什么是反馈？什么是正反馈和负反馈？负反馈在自动控制系统中有什么意义？
- 4 复合控制与开环控制、闭环控制是什么关系？什么情况下可采用复合控制方式？

5 判断下列概念正确与否

- (1) 闭环控制系统通常精度比开环系统精度高。
- (2) 负反馈有时用于提高控制系统的精度。
- (3) 开环控制系统不存在稳定性的问题。
- (4) 闭环控制系统总是稳定的。
- (5) 反馈可能引起系统振荡。
- (6) 控制系统的稳定性是其固有特性，由系统结构与外界因素决定。

6 炉温闭环控制系统如图 1.15 所示，电阻丝电源的通断由接触式水银温度计控制，水银温度计的两个触点 a 和 b 接在常闭继电器的线圈电路中，它随着水银柱的升降而接通或断开，通过控制继电器触点 K 的开、闭而接通或断开电阻线的电源，以达到自动调温的目的。试说明该系统的控制过程，并画出系统的方框图。

7 图 1.16 是供电闭环控制系统原理图。分析该系统的控制过程，并画出系统的方框图。

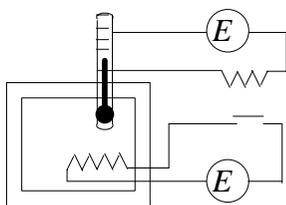


图 1.15 炉温闭环控制系统原理图

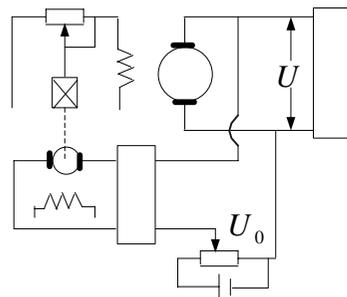


图 1.16 供电闭环控制系统原理图

判断题 5 答案：

- (1) —(T)；(2) —(T)；(3) —(T)；(4) —(F)；(5) —(T)；(6) —(F)