

第一章 绪论

1.1 自动控制的基本概念

自动控制技术现在广泛应用于工农业生产、交通运输、国防建设和航天科技等各个领域。

所谓自动控制 是指在无人直接参与的情况下 利用自动控制装置使整个生产过程或工作机械自动地按预先规定的规律运行 或使它的某些参数 称为被控量 按预定要求变化。

图 1-1 所示的是一个简单的水箱自动控制系统。因生产和生活的需要，希望液面高度维持恒定（或在允许的偏差范围以内），当水的流量与流出量平衡时，水箱的液面高度维持在预定的（希望的）高度上。当水的流出量增大或流入量减小时（或流出量减小或流入量增大），平衡则被破坏，液面的高度降低（或升高），这时与希望的液面高度之间产生了偏差。这个偏差由浮子检测出来，送到控制器，控制器在偏差的作用下控制气动阀门，使阀门开大（或关小），使水的流入量增大（或减小），对偏差进行修正，从而保持液面高度不变。

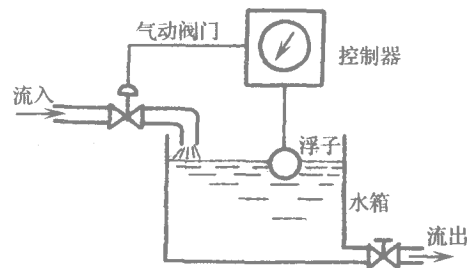


图 1-1 水箱自动控制系统

自动控制系统一般是由控制器和被控对象组成。自动控制系统的功用及组成是多种多样的，其结构也有简有繁。它可以是只控制一个物理量（如液面高度、温度、速度等）的简单系统，也可以是包括整个企业全部过程的大系统，也可以是抽象的社会系统、生态系统或经济系统等。

自动控制原理是研究自动控制技术的基础理论和自动控制规律的技术科学。它的发展初期，是以反馈理论为基础的自动调节原理，并主要用于工业控制。第二次世界大战期间，由于战争的需要，进一步促进并完善了自动控制理论的发展。到战后，已形成完整的自动控制理论体系，称为经典控制理论。它以传递函数为工具，主要研究单输入单输出系统的分析和设计问题，主要研究的方法是根轨迹法和频率法。这些理论成熟，并在工程实践中得到了广泛的应用。本教材主要介绍这部分内容。

20 世纪 60 年代初期，随着航天技术、微电子技术、计算技术等科学技术的发展和工程实践的需要，自动控制理论跨入了一个新阶段——现代控制理论。它的主要内容是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、模糊控制、人工智能等理论都是这一领域研究的主要课题。

现代控制理论的发展速度是惊人的，目前还在急速地向更纵深发展。它无论在数学工具、理论基础，还是在研究方法上都不是经典理论的简单延伸和推广，而是认识上的一次飞跃，在应用科学领域中将受到越来越多的重视。

1.2 自动控制的基本方式

自动控制系统根据有无反馈，分为开环控制和闭环控制两种控制方式。

1.2.1 开环控制

如果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过程，称这种控制方式为开环控制，相应的系统为开环控制系统。图 1-2 所示的直流电动机转速控制系统就是一个开环控制系统。图中电动机是电枢控制的直流电动机，要求带动负载以一定的转速转动。

输入量是给定电压 u_r ，输出量（被控制量）是电动机转速 ω 。调整给定电位器滑臂的位置，可得到不同的给定电压 u_r 和电枢电压 u_a 从而控制了电动机的转速 ω 。上述的控制过程可用方框图简单直观地表示成图 1-3 的形式。当负载转矩不变时，给定电压 u_r 和电动机转速 ω 有一一对应的关系。因此，可由给定电压直接控制电动机转速。如果出现扰动如负载转矩增加（减少）电动机转速便随之降低（增高）而偏离给定值。若要维持给定转速不变，操作人员必须经过判断，相应地调整电位器滑臂的位置来提高（降低）给定电压 u_r ，使电动机转速恢复到原给定值。

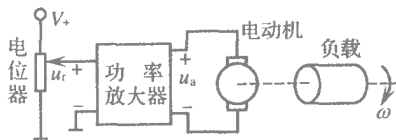


图 1-2 直流电动机转速控制系统

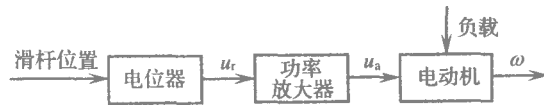


图 1-3 直流电动机转速控制方框图

这种控制方式的特点是控制作用的传递具有单向性，作用路径不是闭合的。由方框图可明显地看出控制信息的传递过程是由输入端沿箭头方向逐级传向输出端。控制作用直接由系统的输入量产生。给定一个输入量，就有一个输出量与之对应。控制精度取决于信息传递过程中所用元件性能的优劣及校准的精度。由于开环控制系统不具备自动修正被控量偏差的能力，故系统的精度低，即抗干扰能力差。但是开环控制结构简单、调整方便、成本低，在国民经济各部门均有采用。如自动售货机、自动洗衣机、产品自动生产线、数控机床及交通指挥红绿灯转换等。

1.2.2 闭环控制

闭环控制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过程。图 1-4 所示的是一种自动调整转速的闭环控制系统。该系统在原来的基础上，增加了一个由测速发电机构成的反馈回路，用来检测输出转速，并给出与电动机转速成正比的反馈电压。将这个代表实际输出转速的反馈电压与代表希望输出转速的给定电压进行比较，所得出的偏差信号作为产生控制作用的基础，通过功率放大器来控制电机的转速。这也常

称为按偏差控制。可以看出，只要偏差存在，控制作用总是存在的。控制的最终目的是减小偏差，提高控制精度。这种通过反馈构成系统闭环，按偏差产生控制作用，以减小或消除偏差的控制系统，称为闭环控制系统，或反馈控制系统。用方框图直观地把上述控制过程描述出来，更方便进行性能分析，方框图如图 1-5 所示。

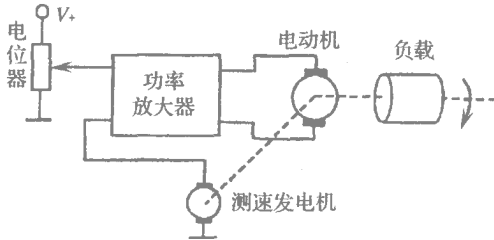


图 1-4 直流电动机转速闭环控制系统

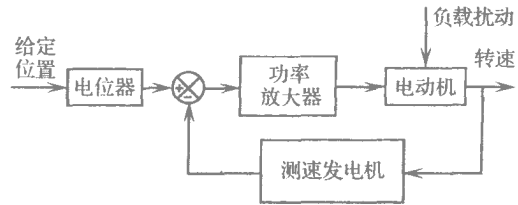


图 1-5 直流电动机转速闭环控制方框图

由方框图分析电动机转速自动调节的过程如下：当系统受到扰动影响时，例如负载增大，则电动机的转速降低，测速发电机的端电压减小。在给定电压不变时，偏差电压则会增加，电动机的电枢电压上升，使得电动机转速增加。如果负载减小，则电动机转速调节的过程与上述过程变化相反。这样，抑制了负载扰动对电动机转速的影响。同样，对其他扰动因素，只要影响到输出转速的变化，上述调节过程会自动进行，从而保证了系统的控制精度，提高了抗干扰能力。

这种控制方式的特点是控制作用不是直接来自给定输入，而是系统的偏差信号，由偏差产生对系统被控量的控制。系统被控量的反馈信息反过来又影响系统的偏差信号，即影响控制作用的大小。这种自成循环的控制作用，使信息的传递路径形成了一个闭合的环路，称为闭环。由于闭环控制能自动修复被控量偏差的能力，故控制精度高，抗干扰能力强。但是闭环控制系统不仅使用元件多、线路复杂，且因信号反馈的作用，如果未选好系统元件或系统参数配合不当时，调节过程可能变得很差，甚至出现发散或等幅振荡等不稳定情况。

1.2.3 闭环控制系统的基本组成

根据控制对象使用元件不同，闭环控制系统有各种不同的形式，但一般闭环控制系统由以下基本元件（或装置）组成。闭环控制系统的基本组成方框图如图 1-6 所示。

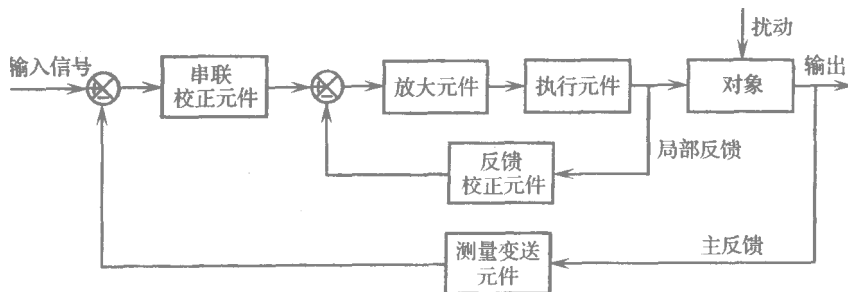


图 1-6 闭环控制系统的基本组成方框图

被控对象——自动控制系统需要进行控制的工作机械或生产过程。被控对象要求实现控制的物理量称为被控量或输出量。

执行元件——直接对被控对象进行操作使被控量达到期望值的元件如阀门、伺服电机等。

反馈测量元件——用来测量被控量并将其转换成与控制量同一物理量并反馈到输入端的元件，如测速发电机等。

比较元件——用来比较控制信号与反馈信号，并产生反映两者差值的偏差信号的装置如电位器、电桥等。

放大元件——将过于微弱的偏差信号加以放大，以足够的功率来推动执行机构。放大倍数越大，系统的反应越敏感。一般情况下，只要系统稳定，放大倍数应适当大些。

校正元件——为改善或提高系统性能，便于调整系统参数或结构的一种装置，也称为调节器。

在图 1-6 中，系统基本元件和被控对象均用方框表示。信号的传递方向由箭头表示。该传递方向是单向不可逆的。信号从输入端沿箭头方向到达输出端的传输通路称为前向通路或前向通道；系统输出量由测量元件反馈到输入端的通路称为主反馈通路；前向通路与主反馈通路一起构成主回路。此外，尚有局部反馈通路以及由它组成的内回路。

1.2.4 复合控制

将开环控制与反馈控制适当地结合在一起，通常比较经济，并且能够获得满意的综合系统性能，此方式构成复合控制方式。

复合控制实质上是在闭环控制的基础上，附加一个输入信号（给定信号或扰动信号）的顺馈通路，对该信号实行加强或补偿，以达到精确的控制效果。常见的方式有以下两种。

1. 附加给定输入补偿

图 1-7 给出了该复合控制方框图。通常，附加的补偿装置可提供一个顺馈控制信号，与原输入信号一起对被控对象进行控制，以提高系统的跟踪能力。这是一种对控制能力的加强作用，往往提供的是输入信号的微分作用，起到超前控制。

2. 附加扰动输入补偿

图 1-8 给出了该复合控制方框图。附加的补偿装置所提供的控制作用，主要起到对扰动“防患未然”的效果。故应按照不变性原理来设计，即保证系统输出与作用在系统上的扰动完全无关，这一点与前一种补偿作用截然不同。

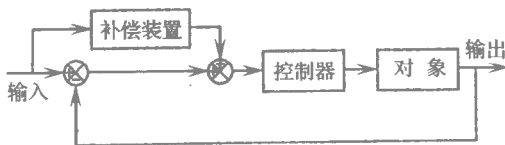


图 1-7 附加给定输入补偿

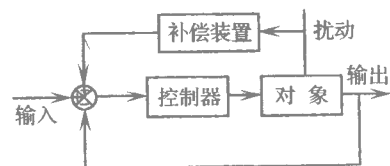


图 1-8 附加扰动输入补偿

应当强调的是，附加的顺馈控制相当于开环控制。因此，对其本身补偿装置参数稳定性要求较高。否则，会由于参数本身的漂移而减弱其补偿效果。此外，顺馈通道对闭环回

路性能影响不大 特别是对稳定性无影响 却能大大提高系统控制精度 因此获得了广泛应用。

1.3 自动控制系统的分类

随着科学技术的发展, 自动控制系统的的应用渗透到各个领域, 其形式是多种多样的。对自动控制系统的分类可根据需要和应用方便, 从各个不同的角度加以划分。例如, 根据系统元件的属性可分为机电系统、液压系统、气动系统等; 根据系统功率的大小可分为大功率系统和小功率系统。总之, 大多都是根据系统较明显的结构特征来进行分类的, 分类的目的主要是应用上的方便。从研究自动控制系统的动态性能、运动规律和设计方法的理论角度, 我们常有以下几种能反映系统基本实质的划分方式。读者可能注意到, 控制理论研究的重点主要是信息的传递与转换。因此, 在分类方式上, 也是以系统信息为出发点。前面介绍的开环控制与闭环控制, 正是从控制信息的传递路径上来划分的。其他的几种主要类型分别介绍如下。

1.3.1 按给定信号的特征划分

给定信号是系统的指令信息, 它代表了系统希望的输出值, 反映了控制系统完成的基本任务和职能。

1. 恒值控制系统

恒值控制系统的特点是给定输入一经设定就维持不变, 希望输出维持在某一特定值上。这种系统主要任务是当被控量受到某种干扰而偏离期望值时, 通过自动调节的作用, 使它尽可能快地恢复到期望值。系统的结构设计的好坏, 直接影响到恢复的精度。如果由于结构的原因不能完全恢复到期望值时, 则误差应不超过规定的允许范围。

前面提到的液位控制系统、直流电动机调速系统 以及其他恒定压力、恒定流量、恒定温度等都属于这一类系统。显然, 要想使系统输出维持恒定, 克服扰动的影晌是系统设计中要解决的主要矛盾。

2. 随动控制系统

随动控制系统的主要特点是给定信号的变化规律是事先不知道的随机信号。这类系统的任务是使输出快速、准确地跟随给定值的变化而变化, 故称作随动控制系统。显然, 由于输入在不断变化, 设计一个好的跟随性就成为这类系统中要解决的主要矛盾。当然, 系统的抗干扰性也不能忽视, 但与跟随性相比, 应放在第二位来解决。

用于军事上的自动炮火系统、雷达跟踪系统 用于航天、航海中的自动导航系统、自动驾驶系统等都属于典型的随动系统, 在工业生产中的自动测量仪器也属于这一类。

3. 程序控制系统

程序控制系统与随动系统不同之处就是它的给定输入不是随机不可知的, 而是按事先预定的规律变化。这类系统往往适用于特定的生产工艺或工业过程, 按所需要的控制规律给定输入, 要求输出按预定的规律变化。设计这类系统比随动系统有针对性。由于变化规律已知, 可根据要求事先选择方案, 保证控制性能和精度。

在工业生产中广泛应用的程序控制有仿形控制系统、机床数控加工系统、加热炉温度

自动变化控制等。

1.3.2 按系统的数学描述划分

任何系统都是由各种元件组成的。从控制理论的角度，这些元件的性能可用其输入输出特性来进行分析。按照描述元件特征的方程式的不同，可将系统分为线性系统 and 非线性系统两大类。

1. 线性系统

当系统中各元件输入输出特性是线性特性 系统的状态和性能可以用线性微分 或差分方程来描述时 则称这种系统为线性系统。

线性系统的一个突出特点就是满足叠加原理。叠加原理指出：当多个输入信号同时作用在系统上，产生的总输出等于每个输入信号单独作用时系统的输出之和，即叠加性；当系统输入增大或缩小某一倍数时，系统的输出也相应增大或缩小相同的倍数，即齐次性。也可以运用叠加原理的这两个性质作为鉴别系统是否为线性系统的依据。

当微分方程的系数均为常数时 则为线性定常系统。这类系统有一个明显的特征 即系统的响应曲线形状只取决于具体的输入，而与输入的时间起点无关。也就是说无论什么时刻开始输入 只要输入信号一致 响应就是相同的 这称为定常特性。另一类是微分方程的系数是随时间变化的函数 则称为线性时变系统。它不具备定常特性 研究起来比定常系统复杂。线性定常系统理论比较成熟 所以若系统参数随时间变化不大 可用常值来对待时 为分析、设计方便 就常常视为定常系统。

2. 非线性系统

系统中只要存在一个含非线性特性的元件 系统就由非线性方程来描述 这种系统称为非线性系统。由于非线性特征的多样性 在数学上较难处理 叠加原理也不成立 研究起来不方便，至今尚没有通用的分析方法。只有一些在特定条件下近似分析的方法。

严格地说 任何物理系统总是不同程度地具有非线性 虽然许多物理系统常以线性方程来表示 但大多数情况下实际系统并非真正线性的。所谓线性系统 也只是在一定工作范围内 保持较好的线性关系。例如系统中应用的放大器 在较大的输入信号下 输出可能饱和。此外 某些元件还可能具有死区 影响小信号正常工作。对于这类系统 在某一工作区域 可以视为线性系统 但在大范围工作区域 则是非线性系统。这可称为非本质非线性。另外 有些控制系统 对于任意大小的输入信号而言 系统都是非线性的。例如，在继电控制系统中，控制作用不是接通就是关断。这类控制器的输入输出总是非线性的，称为本质非线性。

虽然含有非线性特性的系统可以用非线性方程描述，但它的求解是困难的。而对于各类非线性问题，尚无统一的方法来研究。对于非本质非线性系统，满足小偏差原理时，往往可以采用线性化的方法 用线性化数学模型来近似地表示非线性系统 就可以采用一些线性理论来分析和设计系统。对于本质非线性系统，必须用非线性理论来进行分析研究。

非线性特性明显时 会产生一些比线性系统复杂的现象 有些是不希望的 要通过分析加以控制。而有些非线性元件，通过正确地在使用中，会收到意想不到的控制效果。因此，近年来在系统中引入非线性特性以改善控制系统质量，已取得了很成功的经

验。非线性理论也在不断地发展着。

1.3.3 按信号传递的连续性划分

1. 连续系统

连续系统的特点是系统中各元件的输入信号和输出信号都是时间的连续函数。这类系统的运动规律是用微分方程来描述的。

连续系统中各元件传输的信息在工程上称为模拟量，多数实际物理系统都属于这一类。

2. 离散系统

控制系统中只要有一处的信号是脉冲序列或数码信号时，该系统为离散系统。这种系统的状态和性能一般用差分方程来描述。实际物理系统中，信息的表现形式为离散信号的并不多见，往往是控制上的需要，人为地将连续信号离散化，称其为采样。采样过程如图 1-9 所示。

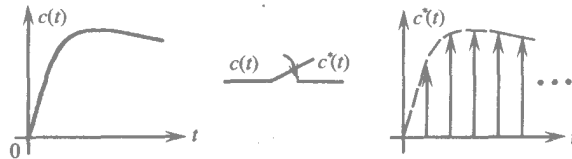


图 1-9 采样过程

采样过程是通过采样开关把连续的模拟量变为脉冲序列，具有这类信号的系统一般又称为脉冲控制系统。

当今时代，计算机作为控制器用于系统控制越来越普遍，计算机进行采样的过程是把连续信号转换为数码信号来进行运算处理的，A/D 转换器承担了这一任务。具有数码信号的系统一般称为数字控制系统。计算机控制系统如图 1-10 所示。

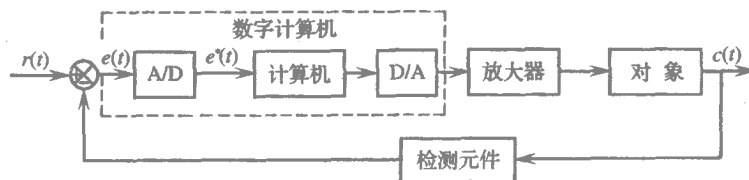


图 1-10 计算机控制系统的结构图

离散系统的数学描述形式与连续系统不同，分析研究方法也有不同的特点。随着计算机控制的广泛应用，离散系统理论方法也越显重要，有关的内容将在第六章介绍。

1.3.4 按系统的输入与输出信号的数量划分

1. 单变量系统 (SISO)

单变量系统只有一个输入量和一个输出量，所谓单变量是从系统外部变量的描述来分类的，不考虑系统内部的通路与结构。也就是说给定输入是单一的，响应也是单一的。但系统内部的结构回路可以是多回路的，内部变量显然也是多种形式的。内部变量也称

为中间变量 输入与输出变量称为外部变量。对系统的性能分析 只研究外部变量之间的关系。

单变量系统是经典控制理论的主要研究对象。它以传递函数作为数学工具，讨论线性定常系统的分析和设计问题，也是本课程讲述的主要内容。

2. 多变量系统 (MIMO)

多变量系统有多个输入量和多个输出量。其特点是变量多、回路多 而且相互之间呈现多路耦合 研究起来比单变量系统复杂得多 如图 1-11 所示。

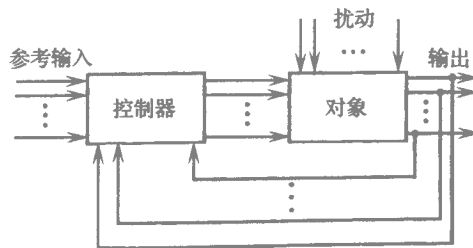


图 1-11 多变量系统

多变量系统是现代控制理论研究的主要对象。在数学上以状态空间法为基础，讨论多变量、多参数、非线性、高精度、高性能等控制系统的分析和设计。

1.4 自动控制系统的要求

1.4.1 对系统的要求

自动控制理论是研究自动控制共同规律的一门学科。尽管自动控制系统有不同的类型，对每个系统也都有不同的特殊要求，但对于各类系统来说，在已知系统的结构和参数时，我们感兴趣的都是系统在某种典型输入信号下，其被控量变化的全过程。例如，对恒值控制系统是研究扰动作用引起被控量变化的全过程；对随动系统是研究被控量如何克服扰动影响并跟随参考输入变化的过程。但是，对每一类系统被控量变化全过程提出的共同基本要求都是一样的，且可以归结为稳定性、快速性和准确性，即稳、快、准的要求。

(1) 稳定性。稳定性是保证控制系统正常工作的先决条件。不稳定的系统是无法工作的。线性自动控制系统的稳定性是由系统结构所决定，与外界因素无关。由于控制系统中一般都含有储能元件或惯性元件 如电路中的电感、电容 机械装置中的惯性、质量等 储能元件不可能突变。因此 当系统受到扰动或给定输入信号作用时 控制过程不会立即变化 而是经历一段时间 即系统运动必然有一个渐变的过程 称为过渡过程。如果系统是稳定的，则过渡过程会振荡收敛或平稳收敛到平衡状态。

(2) 快速性。为了很好地完成控制任务，控制系统仅仅满足稳定性要求是不够的，还必须对其过渡过程的形式和快慢提出要求，一般称为动态性能。快速性是指过渡过程时间长短，反映系统快速复现信号的能力。平稳性反映动态过程的振荡程度及偏离量大小，过大的波动可能性会使系统运动部件受损。

(3) 准确性。理想情况下，当过渡过程结束后，被控量达到的稳态值应与期望值一致。但实际上，被控量的稳态值与期望值之间会有误差存在，称为稳态误差。稳态误差是衡量控制系统精度的重要标志，在技术指标中一般都会有具体要求。

1.4.2 控制系统的分析与设计

控制系统的分析和设计，分别是两个互逆的研究过程，前者是从已知确定系统出发，分析计算系统所具有的性能指标，而后者则是根据要求的性能指标来确定系统应具备的结构和参数。

1. 系统分析

系统的分析是在描述系统数学模型基础上，用数学的方法来进行研究讨论的。因此，必须在规定的工作条件下，对已知系统进行以下步骤的工作：

- (1) 建立系统的数学模型。
- (2) 分析系统的性能，计算三大性能指标是否满足要求。
- (3) 分析参数变化对上述性能指标的影响，决定如何合理地选取。

系统的分析方法会随数学模型的类型各有不同，本书主要介绍时域分析和频域分析。

2. 系统的设计

系统设计的目的是要寻找一个能够实现所要求的自动控制系统。因此，在系统应完成的任务和应具备的性能已知的条件下，根据被控对象的特点，构造出适当的控制器是设计的主要任务。应进行的步骤如下：

- (1) 根据要求的性能指标综合出系统应有的数学模型。
- (2) 根据已知的被控对象求出对象的数学模型，并画出系统结构图。
- (3) 按结构图与数学模型关系，根据已知部分和系统应有的数学模型，即可求出控制器的数学模型和控制规律。
- (4) 各部分结构确定后，按已定结构求出系统数学模型，进行性能分析，验证它在各种信号作用下是否满足要求，若不满足，及时修正。
- (5) 结构参数最终确定后，可进行实验仿真，若效果理想即可制作样机。

1.5 解题示范

例 1-1 图 1-12 为液位自动控制系统示意图。在任何情况下，希望液面高度 c 保持不变。试说明系统工作原理，并画出系统原理方框图。

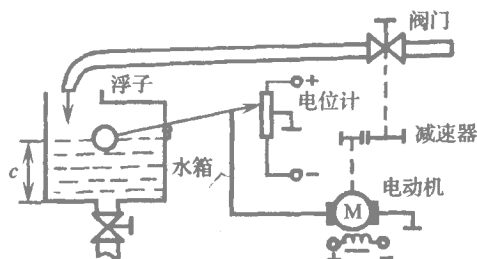


图 1-12 液位自动控制系统

解:(1) 工作原理: 闭环控制方式。

当电位器电刷位于中点位置时, 电动机不动, 控制阀门有一定的开度, 使水箱中流入水量和流出水量相等, 从而液面保持在希望高度上。当进水或出水量发生变化, 导致液面变化 例如液面下降 通过浮子和杠杆检测出来 使电位器电刷从中点位置上移 从而给电动机提供一定的控制电压, 驱使电动机通过减速器开大阀门开度, 使液位上升, 回到希望高度。电位器电刷回到中点, 电动机停止。

(2) 被控对象是水箱, 被控量是水箱液位, 给定量是电位器设定位置 (代表液位的期望值) 主扰动是流出水量。

系统的方框图如图 1-13 所示。

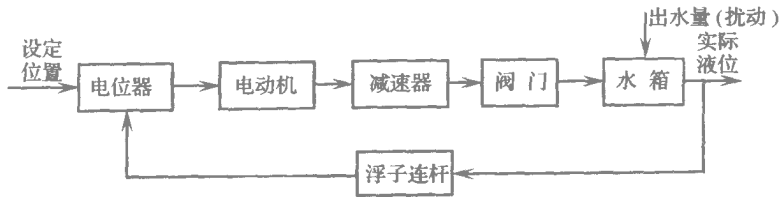


图 1-13 液位自动控制系统方框图

例 1-2 如图 1-14 所示为自动调压控制系统。试分析系统在负载电流变化时的稳压过程 并给出系统方框图。

解:(1) 工作原理 顺馈控制方式。

当负载电流变化 I_F 时 发电机 G 的电枢绕组压降也随之改变, 造成端电压不能保持恒定 因此 负载电流变化对稳压控制来说是一种扰动。采用补偿措施 将电流 I_F 在电阻 R_F 上的压降检测出来 通过放大 来改变发电机的励磁电流 I_f , 以补偿电枢电压的改变, 使其维持恒定。

(2) 被控对象是发电机 G 被控量是电枢端电压 U_F 给定值是励磁电压 U_f 扰动量是负载电流 I_F 。系统方框图如图 1-15 所示。

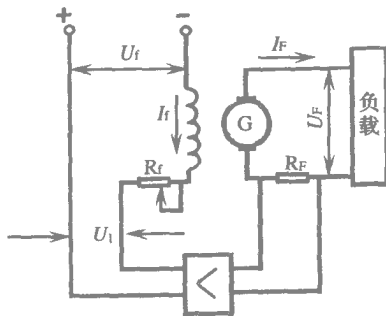


图 1-14 自动调压系统

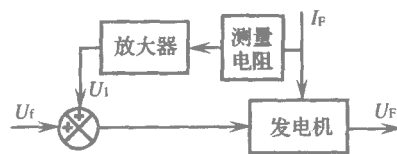


图 1-15 自动调压系统方框图

例 1-3 角位置随动系统原理图如图 1-16 所示。系统的任务是控制工作机械角位置 θ_c 随时跟踪手柄转角 θ_s 。试分析其工作原理 并画出系统方框图。

解:(1) 工作原理: 闭环控制方式。

只要工作机械转角 θ_c 与手柄转角 θ_s 一致, 两环形电位器组成的桥式电路处于平衡

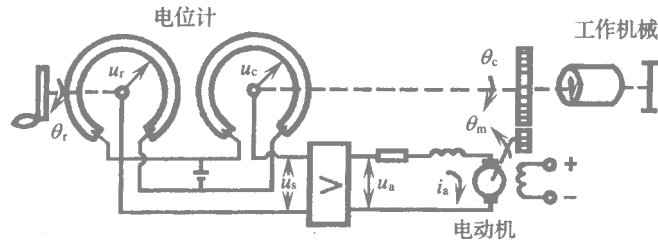


图 1-16 角位置随动系统

状态，无电压输出。此时表示跟踪无偏差，电动机不动，系统静止。

如果手柄转角 θ_r 变化了，则电桥输出偏差电压，经放大器驱动电动机转动。通过减速器拖动工作机械向 θ_r 要求的方向偏转。当 $\theta_c = \theta_r$ 时系统达到新的平衡状态电动机停转，从而实现角位置跟踪目的。

(2) 系统的被控对象是工作机械，被控量是工作机械的角位移。给定量是手柄的角位移。控制装置的各部分功能分别是：手柄完成给定，电桥完成检测与比较，电动机和减速器完成执行功能。系统方框图如图 1-17 所示。

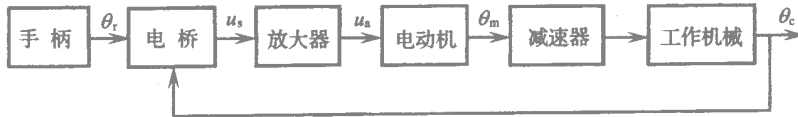


图 1-17 位置随动系统方框图

学习指导与小结

本章作为绪论较全面地展示了控制理论课程的全貌，叙述了今后在课程的学习中要进行研究的各个环节的内容和要点，为了今后的深入学习和理解，要特别注意本章给出的一些基本概念和专业术语及定义。

1. 基本要求

(1) 明确什么是自动控制，正确理解被控对象、被控量、控制装置和自动控制系统等概念。

(2) 正确理解 3 种控制方式，特别是闭环控制。

(3) 初步掌握由系统工作原理画方框图的方法，并能正确判别系统的控制方式。

(4) 明确系统常用的分类方式，掌握各类别的含义和信息特征，特别是按数学模型分类的方式。

(5) 明确对自动控制系统的基本要求，正确理解三大性能指标的含义。

2. 内容提要及小结

(1) 几个重要概念

自动控制。在没有人直接参与的情况下，利用控制器使被控对象的被控量自动地按照预先给定的规律去运行。

自动控制系统。指被控对象和控制装置的总体。这里控制装置是一个广义的名词，

主要是指以控制器为核心的一系列附加装置的总和。

负反馈原理。把被控量反送到系统的输入端与给定量进行比较，利用偏差引起控制器产生控制量，以减小或消除偏差。

(2) 3种基本控制方式

实现自动控制的基本途径有两种：开环和闭环。

实现自动控制的主要原则有如下 3 条：

主反馈原则——按被控量偏差实行控制。

补偿原则——按给定或扰动实行硬调或补偿控制。

复合控制原则——闭环为主，开环为辅的组合控制。

(3) 系统分类的重点

重点掌握线性与非线性的分类，特别对线性系统的定义、性质、判别方法要准确理解。

(4) 正确绘制系统方框图

绘制系统方框图一般遵循以下步骤：

搞清系统的工作原理，正确判别系统的控制方式。

正确找出系统的被控对象及控制装置所包含的各功能元件。

确定外部变量（即给定量、被控量和干扰量），然后按典型系统方框图的连接模式将各部分连接起来。

(5) 对自动控制系统的要求

对自动控制系统的要求用语言叙述就是两句话：要求输出等于给定输入所要求的期望输出值；要求输出尽量不受扰动的影响。

衡量一个系统是否完成上述任务，把要求转化成三大性能指标来评价：

稳定——系统的工作基础。

快速、平稳——动态过程时间要短，振荡要轻。

准确——稳态精度要高，误差要小。

习 题

1-1 如图 1-18 所示是一个水箱液位自动控制系统 试分析它的工作原理 并画出系统方框图。

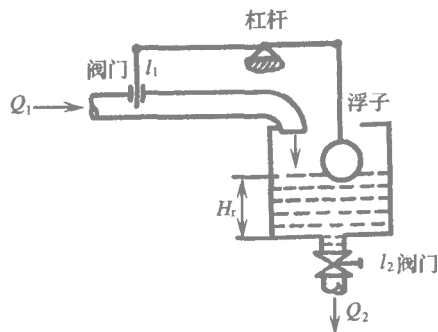


图 1-18 题 1-1 图

1-2 如图 1-19 所示为自动调速系统。

(1) 分析图 (a) 与图 (b) 的工作原理 画出功能方框图。

(2) 假设空载时, (a) 与 (b) 的工作机械转速均为 100r/min 当工作机械受到同样大的负载阻力矩时, 哪个系统能保持转速不变?

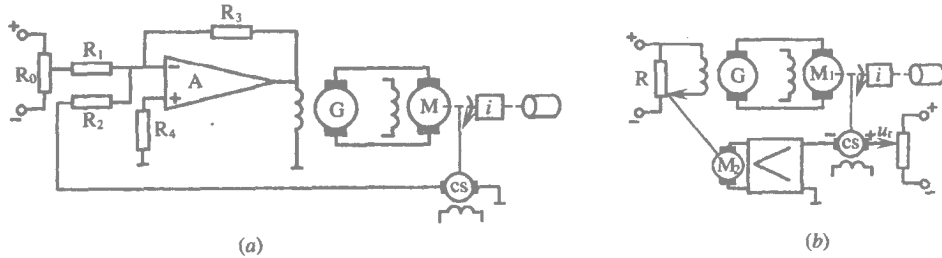


图 1-19 题 1-2 图

G—直流发电机; M, M₁, M₂—伺服电动机; CS—测速发电机; i——减速器速比。

1-3 如图 1-20 所示是仓库大门自动控制系统 试分析大门自动控制过程 并画出系统方框图。

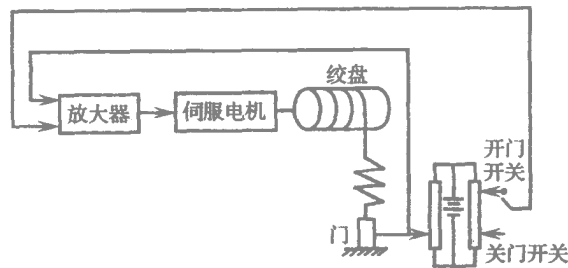


图 1-20 题 1-3 图

1-4 试判断下列微分方程哪些是线性的, 哪些是变系数的?

(1) $4 \frac{d^2 y}{dt^2} = y \frac{dy}{dt}$

(2) $x^2 \frac{d^3 y}{dx^3} - e^{-x} \frac{dy}{dx} + 2y = \sin x$

(3) $\frac{1}{y} \frac{d^2 y}{dt^2} + \frac{1}{y} \frac{dy}{dt} + 1 = 0$

(4) $\frac{dy}{dx} = \sqrt{x}$

(5) $\frac{d^2 y}{dt^2} + \frac{1}{y} \frac{dy}{dt} - 3 = 0$

(6) $\frac{d^2 y}{dt^2} + \frac{1}{t} \frac{dy}{dt} + \left(1 - \frac{n^2}{t^2}\right) y = 0$ (n 是常数)

(7) $(1 - x^2) \frac{d^2 y}{dx^2} - 2x \frac{dy}{dx} + n(n+1)y = 0$ (n 是常数)

第二章 控制系统的数学模型

欲分析或设计自动控制系统，首先要建立系统的数学模型。描述系统动态特性及各变量之间关系的数学表达式称为系统的数学模型。建立合理的数学模型决非易事。在建立模型过程中，必须在模型的简化性与分析结果精确性之间作出某些折中的考虑，即根据系统的实际结构、参数以及计算所要求的精度，忽略一些次要因素，使模型既能准确反映系统的动态性能，又能简化分析计算工作，即简化的合理的数学模型。在经典控制理论中，采用输入—输出的描述方法。常用的数学模型有微分方程、传递函数和动态结构图。

对于线性系统 数学模型是一个线性微分方程式 当微分方程式的系数是常数时 称相应的系统为线性定常系统。如果系统中含有数字计算机或数字元件，须用差分方程来描述系统 则称这种系统为离散时间系统。若系统中存在非线性特性 该系统必须用非线性微分方程来描述，则称这种系统为非线性系统。

2.1 微分方程式

2.1.1 列写微分方程的一般方法

微分方程式是控制系统的一种数学模型，也是最基本的一种模型。对于一般物理系统的微分方程建立过程 无论系统结构简单或复杂 总是遵循以下步骤：

- (1) 分析系统运动的因果关系 确定系统的输入量、输出量及内部中间变量。
- (2) 做出合乎实际的假设，忽略一些次要因素。
- (3) 根据支配系统动态特性的基本定律（如牛顿定律、能量守恒定律、基尔霍夫定律等）列写原始方程式。
- (4) 列写各中间变量与其他变量的因果式 即辅助方程式。
- (5) 联立上述方程 消去中间变量 得到系统只包含输入量与输出量的方程式。
- (6) 将方程式化成标准形。即将与输入量有关的各项放在等号的右边，而与输出量有关的各项放在等号的左边。各导数项按降阶排列。

例 2-1 图 2-1 是弹簧—质量—阻尼器机械位移系统。试列写质量 m 在外力 $F(t)$ 作用下 位移 $y(t)$ 的运动方程。

解：(1) 确定输入量为 $F(t)$ 输出量为 $y(t)$ 。作用于质量 m 的力还有弹簧力 $F_K(t)$ 和阻尼器的粘滞阻力 $F_f(t)$ 均作为中间变量。

(2) 设系统按线性集中参数考虑，且当无外力作用时，系统处于平衡状态。

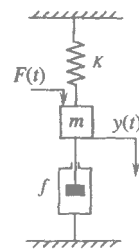


图 2-1 机械系统

(3) 按牛顿第二定律列写原始方程 即

$$\sum F = F(t) + F_K(t) + F_f(t) = m \frac{d^2 y(t)}{dt^2} \quad (2-1)$$

(4) 列写中间变量与输出变量的关系式

$$F_K(t) = -K \cdot h(t) \quad (2-2)$$

$$F_f(t) = -f \cdot \frac{dy(t)}{dt} \quad (2-3)$$

(5) 将以上辅助方程和原始方程联立求解 消去中间变量 得

$$m \frac{d^2 y(t)}{dt^2} + f \frac{dy(t)}{dt} + Ky(t) = F(t) \quad (2-4)$$

例 2-2 图 2-2 是由电阻 R、电感 L 和电容 C 组成的无源网络 试列写以 $u_r(t)$ 为输入量 以 $u_c(t)$ 为输出量的网络微分方程。

解:(1) 确定输入量为 $u_r(t)$ 输出量为 $u_c(t)$ 设回路电流为 $i(t)$ 。

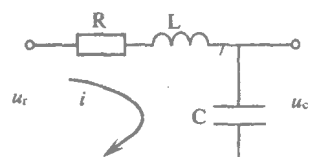


图 2-2 RLC 无源网络

(2) 网络按线性集中参数考虑,且忽略输出端负载效应。

(3) 由基尔霍夫定律写原始方程

$$L \frac{di(t)}{dt} + Ri(t) + u_c(t) = u_r(t) \quad (2-5)$$

(4) 列写中间变量 $i(t)$ 与其他变量的关系式

$$i(t) = C \frac{du_c(t)}{dt} \quad (2-6)$$

(5) 联立求解,消去中间变量得

$$LC \frac{du_c^2(t)}{dt^2} + RC \frac{du_c(t)}{dt} + u_c(t) = u_r(t) \quad (2-7)$$

显然 这是一个二阶微分方程 也就是图 2-2 无源网络的时域数学模型。

例 2-3 试列写图 2-3 所示电枢控制的直流电动机的微分方程。要求取电枢电压 $u_a(t)$ (V) 为输入量 电动机转速 $\omega(t)$ (rad/s) 为输出量。图中 $R_a(\Omega)$, L_a (H) 分别是电枢回路的电阻和电感, I_f 是常值, $M_L(t)$ (N·m) 是折合到电动机轴上的总负载转矩 激磁磁通为常值。

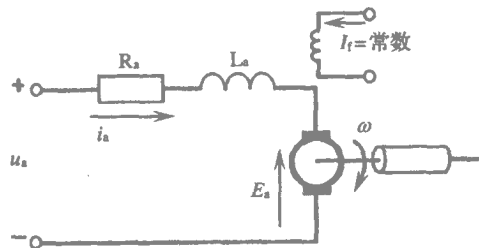


图 2-3 电枢控制的直流电动机系统

解 电枢控制的直流电动机的工作实质是将输入的电能转化为机械能 也就是由输入的电枢电压 $u_a(t)$ 在电枢回路中产生电枢电流 $i_a(t)$ 再由电流 $i_a(t)$ 与激磁磁通相互作用产生电磁转矩 $M_D(t)$ 从而拖动负载运动。

(1) 电枢电压 $u_a(t)$ 为输入量 负载转矩 $M_L(t)$ 为扰动输入 电动机转速 $\omega(t)$ 为输出量。

(2) 忽略电枢反应、磁滞、涡流效应等影响 当激磁电流 I_f 不变时, 激磁磁通视为不变。

(3) 列写原始方程和辅助方程。

电枢回路电压平衡方程:

$$L_a \frac{di_a(t)}{dt} + R_a i_a(t) + E_a = u_a(t) \quad (2-8)$$

式中, E_a (V) 是电枢反电势, 它是当电枢旋转时产生的反电势, 其大小与激磁磁通及转速成正比 方向与电枢电压 $u_a(t)$ 相反 即 $E_a = C_e \omega(t)$, C_e (V/rad/s) 是反电势系数。

电磁转矩方程:

$$M_D(t) = C_m i_a(t) \quad (2-9)$$

式中, C_m (N·m/A) 是电动机转矩系数; $M_D(t)$ 是电枢电流产生的电磁转矩。

电动机轴上的转矩平衡方程:

$$J_m \frac{d\omega(t)}{dt} = M_D(t) - M_L(t) \quad (2-10)$$

式中, J_m (kg·m·s²) 是电动机和负载折合到电动机轴上的转动惯量。

由式 (2-8)、式 (2-9) 和式 (2-10) 中消去中间变量 $i_a(t)$, E_a 及 $M_D(t)$ 得

$$L_a J_m \frac{d\omega^2(t)}{dt^2} + R_a J_m \frac{d\omega(t)}{dt} + C_m C_e \omega(t) = C_m u_a(t) - L_a \frac{dM_L(t)}{dt} - R_a M_L(t) \quad (2-11)$$

令

$$T_m = \frac{R_a J_m}{C_e C_m}$$

称为机电时间常数。

$$T_a = \frac{L_a}{R_a}$$

称为电磁时间常数。

式 (2-11) 又可写成

$$T_a T_m \frac{d\omega^2(t)}{dt^2} + T_m \frac{d\omega(t)}{dt} + \omega(t) = \frac{1}{C_e} u_a(t) - \frac{T_a T_m}{J_m} \frac{dM_L(t)}{dt} - \frac{T_m}{J_m} M_L(t) \quad (2-12)$$

在工程应用中, 由于电枢电感 L_a 较小 通常可忽略不计 式 (2-12) 可简化为

$$T_m \frac{d\omega(t)}{dt} + \omega(t) = \frac{1}{C_e} u_a(t) - \frac{T_m}{J_m} M_L(t) \quad (2-13)$$

对微型电机来说,转动惯量 J_m 很小而且 R_a 、 L_a 都可忽略,式 2-12 还可进一步简化为

$$\omega(t) = \frac{1}{C_e} u_a(t) \quad (2-14)$$

这时电动机的转速 $\omega(t)$ 与电枢电压 $u_a(t)$ 成正比,于是,电动机可作为测速发电机使用。

例 2-4 图 2-4 为直流电动机转速闭环控制系统。试建立系统的微分方程式。

解:控制系统的被控对象是电动机,系统的输出量是转速 $\omega(t)$ 给定输入为 $u_r(t)$ 扰动输入为负载转矩 $M_L(t)$ 。

画出系统的方框图如图 2-5 所示。现分别列写各元部件的微分方程。

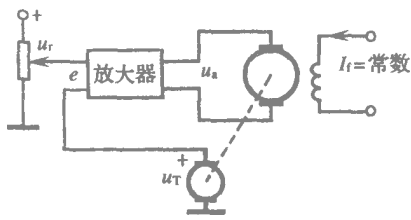


图 2-4 直流电动机转速闭环控制系统

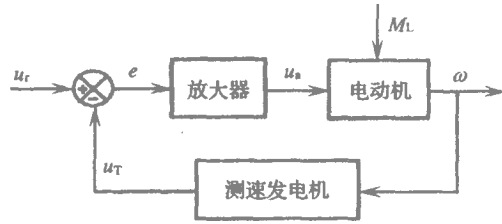


图 2-5 闭环控制系统方框图

放大器: 设线性放大器放大倍数为 k_a 则有

$$u_a(t) = k_a e(t) \quad (2-15)$$

误差比较器:

$$e(t) = u_r(t) - u_T(t) \quad (2-16)$$

电动机 由式 2-12)可知

$$T_a T_m \frac{d^2\omega(t)}{dt^2} + T_m \frac{d\omega(t)}{dt} + \omega(t) = \frac{1}{C_e} u_a(t) - \frac{T_a T_m}{J_m} \frac{dM_L(t)}{dt} - \frac{T_m}{J_m} M_L(t) \quad (2-17)$$

测速发电机 设电势系数为 k_T 由式 2-14) 可得

$$u_T(t) = k_T \omega(t) \quad (2-18)$$

从上述各方程中消去中间变量 e 、 u_T 及 u_a 经整理后便可得到控制系统的微分方程:

$$T_a T_m \frac{d^2\omega(t)}{dt^2} + T_m \frac{d\omega(t)}{dt} + \left(1 + \frac{k_a k_T}{C_e}\right) \omega(t) = \frac{k_a}{C_e} u_r(t) - \frac{T_a T_m}{J_m} \frac{dM_L(t)}{dt} - \frac{T_m}{J_m} M_L(t) \quad (2-19)$$

从以上各控制系统的元部件或系统的微分方程可以发现,不同类型的元部件或系统可以具有形式相同的数学模型。例如,RLC 无源网络和弹簧-质量-阻尼器机械系统的