内 容 简 介

本书主要介绍了经典控制理论的基本内容，包括自动控制的一般概念，控制系统的数学模型，线性系统的时域分析法、根轨迹法和频域分析法，控制系统的校正，线性离散系统的分析与校正以及非线性控制系统的分析等。除配合各章内容介绍了MATLAB在自动控制理论中的使用方法外，每章还都给出了较丰富的例题和习题，便于读者自学。

本书可作为高等院校自动化或相关专业本科生的教材或教学参考书，也可作为有关专业研究生、教师及从事自动化方面工作的工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

自动控制理论/吴晓燕，张双选编著．—西安：西安电子科技大学出版社，2008.7

面向21世纪高等学校信息工程类专业规划教材

ISBN 978-7-5606-2032-9

Ⅰ．自… Ⅱ．①吴… ②张… Ⅲ．自动控制理论—高等学校—教材 Ⅳ．TP13

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第056346号

策　　划　臧延新

责任编辑　阎　彬　臧延新

出版发行　西安电子科技大学出版社(西安市太白南路2号)

电　　话　(029)88242885　88201467　　邮　编　710071

http://www.xduph.com　　E-mail:xdupfxb001@163.com

经　　销　新华书店

印刷单位　陕西天意印务有限责任公司

版　　次　2008年7月第1版　2008年7月第1次印刷

开　　本　787毫米×1092毫米　1/16　印张23.75

字　　数　563千字

印　　数　1～4000册

定　　价　34.00元

ISBN 978-7-5606-2032-9/TP·1052

XDUP 2324001-1

＊＊＊如有印装问题可调换＊＊＊

本社图书封面为激光防伪覆膜，谨防盗版。

第 1 章　自动控制的一般概念

1.1　引　　言

相对论、量子力学以及控制论被认为是 20 世纪三项伟大的科学成就，也是人类认识和改造世界的三大飞跃。1948 年，控制论的奠基人维纳(Norbert Wiener)出版《控制论，或关于在动物和机器中控制和通信的科学》一书，宣告了控制论作为一门学科的诞生。1954 年，我国杰出的科学家钱学森出版了《工程控制论》，将控制论发展为一门技术科学——工程控制论，该书从技术科学的观点，对各种工程技术系统的自动控制理论作了全面研究，奠定了工程控制论的基础，直到今天仍被认为是工程控制论的奠基性著作。

现在，自动控制技术不仅被广泛应用于工业、农业、国防和科学技术等各个行业，也被越来越广泛地应用在人口控制、成本控制、社会经济控制等社会科学领域。在今天的社会生活中，自动控制技术也是无处不在，例如，汽车、空调器、微波炉、全自动洗衣机等都大量采用了自动控制技术。随着计算机、通信和传感器等信息技术的不断发展和应用，自动控制理论本身也在不断地发展和完善，其应用越来越普及。

自动控制理论是工程控制论的主要理论部分，根据不同的发展阶段，其内容分为经典控制理论、现代控制理论、大系统理论及智能控制理论。经典控制理论又称古典控制理论，主要是指控制理论从其发展初期到 20 世纪 50 年代末所形成的理论，它以传递函数为基本工具，研究单输入单输出(Single-Input-Single-Output，SISO)控制系统的分析和设计问题。几十年来，经典控制理论解决了大量的工程实际问题，取得了非常广泛的应用。20 世纪 50 年代末至 60 年代初，在航天技术的推动下，现代控制理论应运而生，它以状态空间描述为基础，以矩阵论和近代数学方法作为工具，研究多输入多输出(Multi-Input-Multi-Output，MIMO)、时变、非线性等控制系统的分析与设计问题。现代控制理论本身也在不断拓展，已经形成了如线性系统理论、最优控制、最优估计、系统辨识、自适应控制等分支学科。自 20 世纪 70 年代以来，大系统理论、鲁棒控制、非线性控制、模糊控制、神经网络控制、专家系统等已成为控制理论研究的热点，并推动了自动控制理论向纵深方向的发展。目前，自动控制理论正朝着以控制论、信息论及仿生学为基础的智能控制理论深入发展。

纵观一个多世纪以来自动控制科学与技术的发展，我们发现，经典控制理论与现代控制理论并不是相互独立的，而是相互依存、互为补充的。作为基础性教材，本书只介绍经典控制理论的内容。

1.2　自动控制与自动控制系统

自动控制技术是通过自动控制系统来实现其应用的。本节从介绍人工控制概念入手，

引出自动控制及自动控制系统的概念。

1.2.1 人工控制

图 1.1 为电加热恒温箱的工作过程示意图。图中，恒温箱的实际温度由温度计测得，操纵者(人)用眼睛时刻观察温度计的指示值，当温度计的指示值高于事先设定的温度时，操纵者就会切断电源，经过一段时间，恒温箱的温度就会降低；而当温度计的指示值低于事先设定的温度时，操纵者就会接通电源，经过一段时间的加热，恒温箱的温度上升。如此反复，就会使恒温箱的实际温度接近或等于事先设定的温度。显见，温度计的指示值与温度的设定值进行比较的过程以及电源开关的接通与断开，都是在人工控制方式下完成的，离开操纵者的直接参与，该恒温箱就不能正常工作。

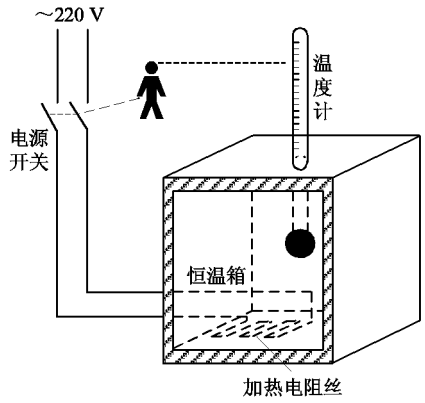


图 1.1 人工恒温控制系统

人工控制在复杂、快速、精确的系统中是不能满足要求的，尤其是不利于减轻劳动强度，必须应用控制装置代替人工操作，这就是自动控制。

1.2.2 自动控制

若用温度测量装置(热电偶)取代温度计，并以温度控制器代替操纵者(人)，就构成了自动恒温控制系统，如图 1.2 所示。图中，温度控制器将恒温箱的实际温度经测量和转换，传送至温度控制器，与温度的设定值进行比较，当实际温度高于温度的设定值时，切断电源，反之则接通电源。如果需要改变温度的设定值，只需对温度控制器作相应调试即可。这样，不需要人工直接参与，通过温度控制器的作用，即可使恒温箱的实际温度与设定值相同，这就是自动控制方式。由此，可给出自动控制的如下定义：

自动控制是指在没有人直接参与的情况下，利用外加设备(或装置)，使机器、设备或生产过程的某个工作状态(或参数)自动地按照预定的规律运行(或变化)。

上述定义中，将机器、设备或生产过程称为被控对象，例如，机床、发电机等；被控对象中要求保持给定数值或按给定规律变化的物理量称为被控量，它一般应选取表征被控对象工作状态的主要参量。除被控对象外，自动控制系统的其他部分统称为控制装置(或控制器)。例如，在图 1.2 所示自动恒温控制系统中，恒温箱是被控对象，恒温箱的实际温度就是被控量，温度控制器、温度测量装置、加热电阻丝及电源开关等构成控制装置。

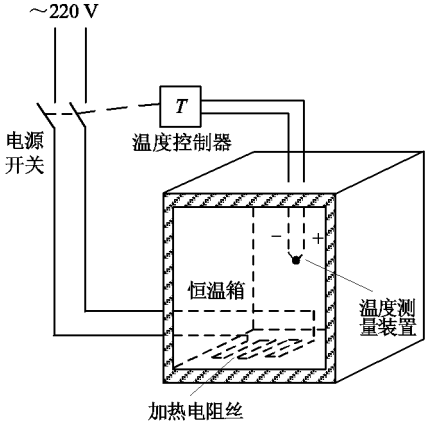


图 1.2 自动恒温控制系统

1.2.3　自动控制系统

系统是指由相互制约的各个部分组合而成并具有一定功能的整体。将被控对象和控制装置按照一定的方式连接起来组成的一个有机整体称为自动控制系统。控制装置和被控对象的关系如图 1.3 所示。

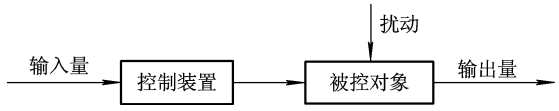


图 1.3　自动控制系统示意图

图 1.3 中，将作用于自动控制系统的输入端、并且作为控制依据的物理量称为输入量（或参考输入、给定值），它使系统具有预定性能；而受到控制的物理量，也就是系统对输入量的响应称为输出量（或被控量），它表征被控对象的状态和性能；除输入量以外，凡能够引起被控量变化的外界变量或因素称为扰动量（或扰动输入），简称扰动，它破坏系统被控量与给定值之间预定的函数关系。在图 1.2 所示自动恒温控制系统中，设定的温度值为输入量，恒温箱的实际温度为输出量，环境温度的变化、恒温箱中存放物品的变化以及电源电压的变化等，都可以看做是系统所受到的扰动。

1.2.4　控制系统的方块图

为了能清楚地说明控制系统各元件间的作用关系或信号传递关系，可用方块图来描述系统。所谓方块图，就是用若干方块表示系统中的每一个元件，按系统中各信号作用的顺序，用信号线（带有箭头的直线）将方块连接起来的图形。图中，系统的物理量（即信号），如电流、电压、温度、压力、位移、速度等，标注在信号线上。每个方块的输入，即为输入至该元件的作用量；方块的输出，则为该元件受到输入作用后的响应。使用方块图不仅有助于分析控制系统的工作原理，也便于建立控制系统的数学模型。

例如，根据图 1.2 自动恒温控制系统的工作原理，可以绘制其方块图如图 1.4 所示。图中，符号“○”表示比较元件或比较器（也可用符号“⊗”表示），它将温度测量装置测量出的实际温度与给定温度进行比较，比较结果即为误差信号。其中，“－”号或“＋”号表示信号极性，即信号在此进行减法或加法运算。图 1.4 中比较元件的输出即为实际温度与给定温度的差值，它既是系统的偏差（或误差）信号，也是温度控制器的输入量。

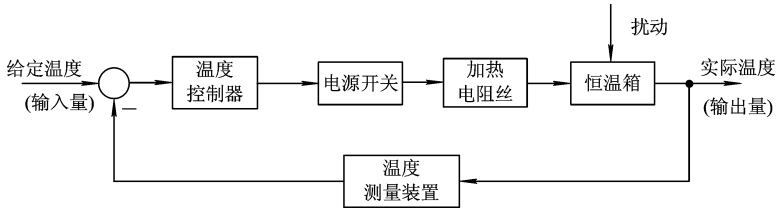


图 1.4　自动恒温控制系统方块图

1.3　自动控制系统的基本控制方式

自动控制系统的组成千差万别，所完成的控制任务也不尽相同，但基本的控制方式是

开环控制、闭环控制及复合控制。

1.3.1 开环控制

开环控制是指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。按开环控制方式组成的系统称为开环控制系统，其方块图如图 1.5 所示。

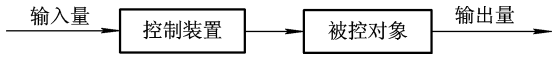


图 1.5 开环控制系统方块图

图 1.6 所示为直流电动机开环调速系统原理图。电位器输出电压 u_r 经触发装置和晶闸管整流器构成的晶闸管整流装置转换并放大为宽度可调的直流电压 u_a，作为直流电动机的电枢电压，电动机带动负载以转速 n 旋转。改变 u_r，即改变 u_a，从而改变了转速 n。

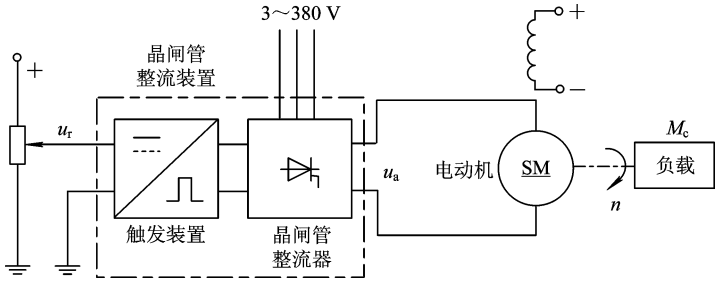


图 1.6 直流电动机开环调速系统原理图

图 1.6 中，输入量为给定电压 u_r，被控对象为负载，输出量为直流电动机转速 n。显见，电动机转速 n 由电位器控制，不同的电位器位置即给定电压 u_r，就有相应的电动机转速 n 与之对应。而转速 n 对电位器的控制作用(给定电压 u_r)没有影响。但是，当晶闸管整流装置的特性发生变化或负载力矩发生变化时(相当于系统受到扰动)，即使电位器位置不变，即电压 u_r 不变，电动机的转速 n 也将变化。

根据以上分析，可绘制图 1.6 所示直流电动机开环调速系统方块图如图 1.7 所示。

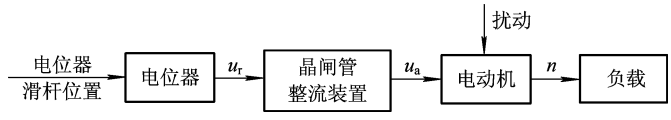


图 1.7 直流电动机开环调速系统方块图

开环控制系统具有如下特点：

(1) 作用信号由输入量到输出量单方向传递，输出量对控制作用没有影响；

(2) 没有测量元件，系统必须精确地校准，对于输出可能出现的偏差没有修正能力，故控制精度较低；

(3) 出现干扰时有可能不能完成既定的工作；

(4) 系统不存在稳定性问题。

由于开环控制系统结构简单、调整方便、成本较低，因此被广泛应用在精度要求不高或扰动影响较小的场合。常见的开环控制系统实例有：自动售货机、洗衣机、产品自动生产线、数控车床等。

1.3.2　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，也称为反馈控制。由这种控制方式组成的系统称为闭环控制系统。其方块图如图 1.8 所示。

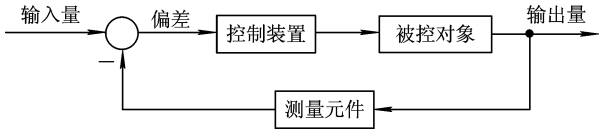


图 1.8　闭环控制系统方块图

将图 1.8 与图 1.5 比较可知，闭环控制系统在开环控制系统的基础上增加了测量元件，它将输出量检测出来，经过物理量的转换，再回送至输入端，与给定值(即输入量)进行比较，其差值即为偏差(或误差)信号，它是控制装置的输入量。显见，系统中的作用信号按闭环传递时，系统的输出量对控制作用有直接影响，即系统有负反馈。

反馈是指取出输出量回送到输入端，并与输入量比较产生偏差(或误差)的过程。回送到输入端的信号称为反馈信号。若反馈信号与输入信号极性相反，即两者相减，使产生的偏差越来越小，则此反馈称为负反馈(见图 1.8)；反之，则称为正反馈。

在图 1.6 所示直流电动机开环调速系统中，增加直流测速发电机和放大器，就构成直流电动机闭环调速系统，如图 1.9 所示。图中，直流测速发电机测量出电动机转速 n，并转换成与 n 成正比的反馈电压 u_t，再与给定电压 u_r 比较，产生偏差信号 $e=\Delta u=u_r-u_t$。Δu 分别经过放大器放大以及晶闸管整流装置整流后，得到控制电压 u_a，它施加于电动机电枢两端，使电动机按预定转速带动负载转动。图 1.10 所示为直流电动机闭环调速系统的方块图。

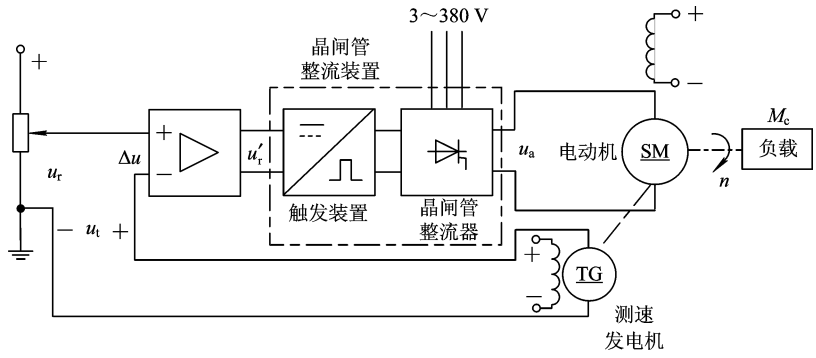


图 1.9　直流电动机闭环调速系统示意图

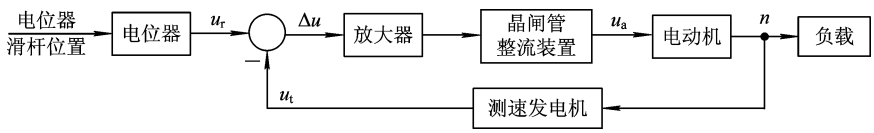


图 1.10　直流电动机闭环调速系统方块图

假设图 1.9 所示系统在与给定电压 u_r 相对应的转速 n 状态下运行。一旦系统受到扰动作用，如负载力矩增大或减小，而引起转速 n 下降或增加，即偏离给定值时，系统会自动地产生一个调整过程，使转速恢复到给定值。例如，当负载力矩减小导致转速 n 增加时，上述调整过程如下：

$$n\uparrow \rightarrow u_t\uparrow \rightarrow e(e=\Delta u=u_r-u_t)\uparrow \rightarrow u_a\uparrow \rightarrow n\uparrow$$

由上可知，闭环控制系统具有如下特点：

(1) 通过测量元件(即反馈元件)对输出量进行检测，即输出量对控制作用有直接影响；

(2) 应用负反馈减小输出量的实际值与给定值之间的偏差，以使系统的输出量趋于给定值；

(3) 当出现扰动时，可减弱其对系统的影响；

(4) 系统存在稳定性问题。

闭环控制也称为反馈控制，且属于偏差控制。因此，反馈控制就是指采用负反馈并利用偏差进行控制的过程。而反馈控制的原理为：按负反馈组成闭环系统，利用偏差减小或消除偏差。

自动控制理论主要研究闭环控制系统，因此，它所涉及的自动控制系统通常都是指闭环控制系统，亦即反馈控制系统。

1.3.3 复合控制

将开环控制与闭环控制相结合的控制方式称为复合控制。这种控制方式是在闭环控制的基础上，再附加一个按输入补偿或按扰动补偿的开环控制，该控制一般由按输入补偿的补偿元件(即校正元件)或按扰动补偿的补偿元件组成。由复合控制方式构成的系统称为复合控制系统，如图 1.11(a)和(b)所示。

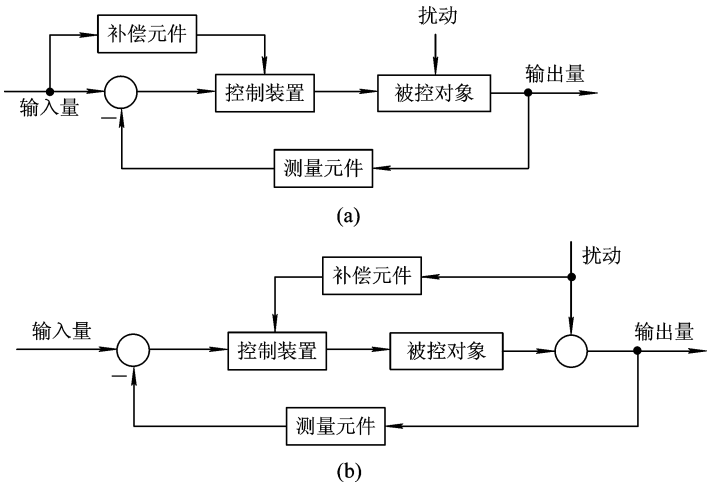


图 1.11 复合控制系统方块图

(a) 按输入补偿；(b) 按扰动补偿

1.4　自动控制系统的基本组成与分类

1.4.1　自动控制系统的基本组成

如前所述，自动控制系统(即反馈控制系统)由被控对象和控制装置两大部分组成，根据其功能，后者又是由具有不同职能的基本元部件组成的。图 1.12 是一个典型的自动控制系统的基本组成示意图，图中组成系统的各基本环节及其功能如下。

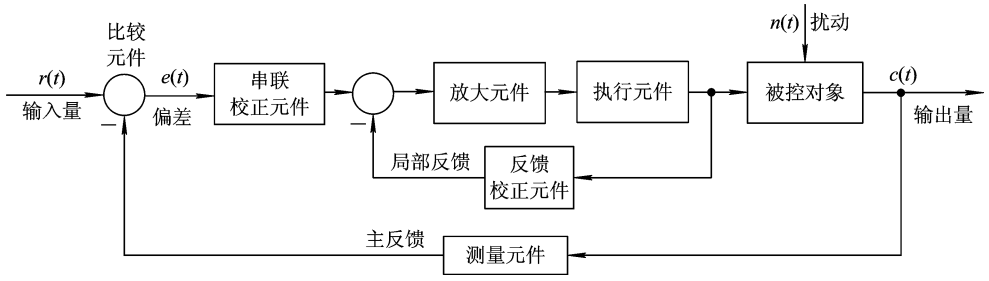


图 1.12　自动控制系统的基本组成示意图

1. 被控对象

如前所述，被控对象是指对其某个特定物理量进行控制的设备或过程。被控对象的输出即为系统的输出量，即被控量，通常以 $c(t)$(或 $y(t)$)表示。

2. 测量元件

测量元件用于对输出量进行测量，并将其反馈至输入端。如果输出量与输入量的物理单位不同，有时还要进行相应的量纲转换。例如，温度测量装置(热电偶)用于测量温度并转换为电压(见图 1.2)，测速发电机用于测量电动机轴转速并转换为电压(见图 1.9)。

3. 给定元件

根据控制目的，给定元件将给定量转换为与期望输出相对应的系统输入量(通常以 $r(t)$表示)，作为系统的控制依据。例如，图 1.9 中，给定电压 u_r 的电位器即为给定元件。

4. 比较元件

比较元件对输入量与测量元件测得的输出量进行比较，并产生偏差信号。例如，图1.9 中的电压比较电路。通常，比较元件输出的偏差信号以 $e(t)$表示。

5. 放大元件

放大元件是将比较元件给出的(微弱的)偏差信号进行放大(必要时还要进行物理量的转换)。例如，图 1.9 中的放大器和晶闸管整流装置等。

6. 执行元件

执行元件的功能是，根据放大元件放大后的偏差信号，推动执行元件去控制被控对象，使其被控量按照设定的要求变化。通常，电动机、液压马达等都可作为执行元件。

7. 校正元件

校正元件又称补偿元件，用于改善系统的性能，通常以串联或反馈的方式连接在系统中。

在图 1.12 中，作用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；系统输出量经测量元件反馈到输入端的传输通路称为主反馈通路；前向通路和主反馈通路构成的回路称为主反馈回路，简称主回路。除此之外，还有局部反馈通路以及局部反馈回路等。将只包含一个主反馈通路的系统称为单回路系统，将包含两个或两个以上反馈通路的系统称为多回路系统。

1.4.2 自动控制系统的分类

如前所述，自动控制系统的组成千差万别，所完成的控制任务也不尽相同，但可以按不同的分类方法，将其分为各种不同的类别。例如，按控制方式可分为开环控制系统、闭环控制系统和复合控制系统；按元件类型可分为机械系统、电气系统、机电系统、液压系统、气动系统、生物系统等；按系统功能可分为温度控制系统、压力控制系统、位置控制系统等。

为便于研究自动控制系统的实质，确定正确的研究方法及选择合适的数学工具，下面重点讨论几种最基本和最常用的分类方法。

1. 按输入量变换规律分类

（1）恒值控制系统。恒值控制系统的输入量为常值，要求系统在扰动存在的情况下，输出量保持恒定。因此，恒值控制系统的任务就是要克服各种扰动对系统的影响而保持输出量为恒值。前述介绍的自动恒温控制系统和直流电动机闭环调速系统均为恒值控制系统。此外，工业控制中的过程控制系统（输出量为温度、流量、压力、液位等生产过程参量）也都为恒值控制系统。

（2）随动控制系统。随动控制系统又称伺服系统或跟踪系统，其输入量是预先未知的随时间任意变化的函数，要求输出量能够迅速而准确地跟随输入量的变化。因而，随动控制系统的任务是在各种情况下保证输出量以一定精度和速度跟随输入量的变化而变化。武器系统中的火炮跟踪系统、雷达导引系统，机械加工设备的伺服机构，天文望远镜的跟踪系统等都属于随动系统。

（3）程序控制系统。程序控制系统的输入量是按照预定规律随时间变化的函数。例如，数字控制机床、机械手控制系统等。

2. 按组成系统元件特性分类

（1）线性系统。组成控制系统的所有环节（或元件）均为线性元件，即其输入/输出特性都是线性的，这样的控制系统称为线性系统，线性系统可以用线性微分方程（或差分方程）来描述。在线性系统中，环节（或元件）参数不随时间变化的控制系统称为定常系统（或时不变系统）；参数随时间变化的控制系统称为时变系统。

（2）非线性系统。组成控制系统的所有环节（或元件）中，至少有一个为非线性元件，其他为线性元件，这样的控制系统称为非线性系统。

3. 按系统信号性质分类

（1）**连续时间系统。系统中所有信号都是时间** t **的连续函数的控制系统称为连续时间系统，简称连续系统。**

（2）**离散时间系统。信号传输过程中存在间歇采样、脉冲序列等离散信号的控制系统称为离散时间系统，简称离散系统，其运动规律可用差分方程描述。**

1.5　自动控制系统示例

1.5.1　计算机硬盘读/写数据系统

硬盘是计算机中的主要存储设备之一，主要由盘片、磁头及其驱动机构、主轴、底层电路板以及接口等几部分组成，图 1.13 是其简化示意图。所有盘片装在盘片主轴上，每张盘片之间平行，由主轴电机带动盘片高速旋转。每张盘片的存储面上有一个磁头，高精度的磁头驱动机构驱动磁头在高速旋转的磁盘表面上沿盘片径向移动。读/写磁头、传动手臂和传动轴三部分构成磁头组件，而磁头驱动机构则由磁头驱动电机（也称为音圈电机）、磁头驱动小车、防振动装置构成，它能够对磁头进行精确的驱动和定位，并能在很短的时间内精确定位在系统指令指定的数据磁道，由磁头进行读/写数据的操作。计算机硬盘既可以读取存储在其中的数据，也可以将数据存储在其中。

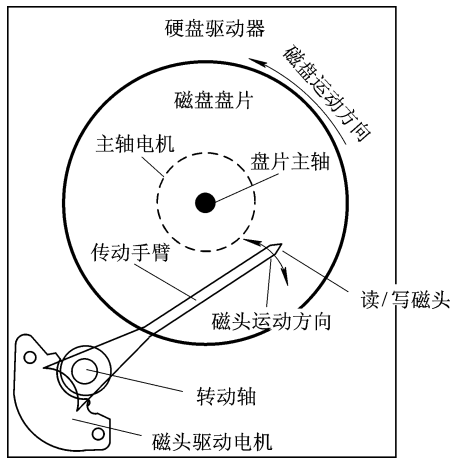


图 1.13　计算机硬盘结构示意图

下面以读数据为例介绍硬盘读/写系统的工作过程。硬盘驱动器加电正常工作以后，主轴电机启动并带动盘片高速旋转，磁头驱动机构通过转动手臂将浮动磁头置于盘片表面的 00 道，处于等待指令的启动状态。接收到系统传来的指令信号后，经过放大，磁头驱动电机通过转动手臂来控制磁头对盘片数据信息进行正确定位，并通过探测磁颗粒极性的变化来读取数据，然后将数据放大并传输到接口电路，反馈给主机系统完成指令操作。该系统通过读取一条预先记录的索引磁道的误差获得误差信号。图 1.14 是硬盘读取数据的方块图，图中的传感器指盘片中的读磁头及索引磁道。

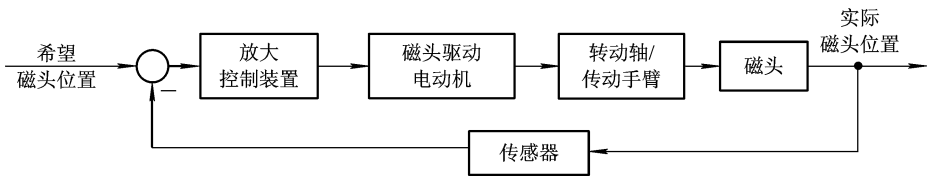


图 1.14　计算机硬盘读取数据方块图

1.5.2 水加热自动控制系统

图 1.15 为水加热自动控制系统(即热水电加热器)示意图。显见，系统由控温开关、电加热器、温度测量装置、水箱及保温层等组成。控制目的是维持水箱内水温在给定的温度上。

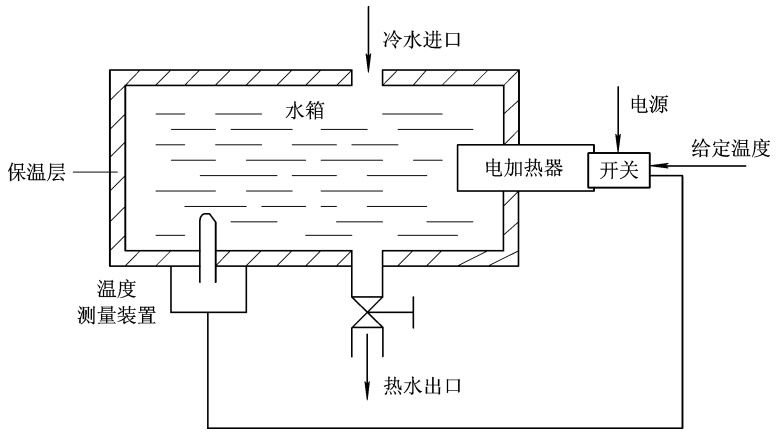


图 1.15 水加热自动控制系统示意图

该系统的工作原理分析如下：

电加热器的通断电由控温开关控制，以保持期望的水温。温度测量装置将热能转化为电能，给定温度为一电信号。需要热水时，打开阀门，水箱中流出热水并补充冷水。若水箱中的水温低于给定水温，温度测量装置(即反馈元件)将实际水温测量出来，回送到输入端，与给定温度相比较，产生一个偏差信号。在这个偏差信号的作用下，控温开关控制电加热器工作，使实际水温趋于，直至等于给定温度。

在水加热自动控制系统中，被控对象为水箱，输入量为给定水温，输出量(被控量)为水箱实际水温，主要扰动为放出热水并注入冷水而产生的降温作用，次要扰动为环境温度的变化，保温层、温度测量装置及电加热器等元件结构参数的变化等。由此，可绘制系统的方块图如图 1.16 所示。

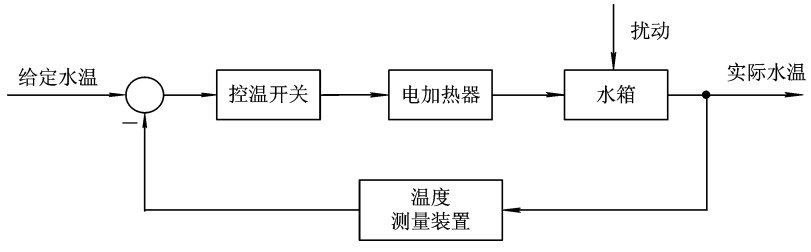


图 1.16 水加热自动控制系统方块图

1.5.3 防空导弹制导系统

防空导弹是一种由地面(或舰船)发射，拦截敌方来袭的空中目标(如飞机或巡航导弹)

的武器，制导控制系统是其重要的组成部分之一，它的功用是：引导和控制导弹有效拦截并摧毁目标。图 1.17 所示为防空导弹指令制导系统示意图。

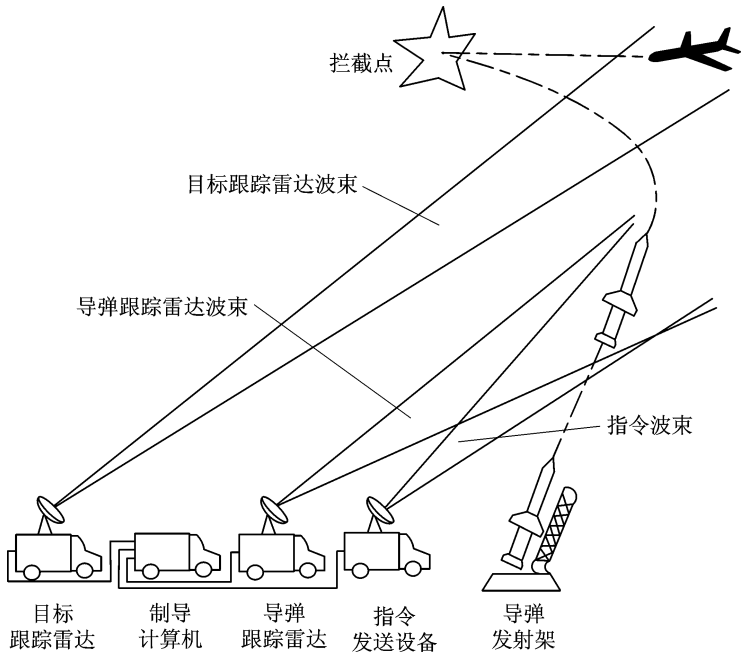


图 1.17　防空导弹指令制导系统示意图

该系统的工作过程是：目标跟踪雷达和导弹跟踪雷达不断探测并跟踪目标和导弹，并将测得的目标和导弹的运动参数送至制导计算机，制导计算机根据目标运动参数和导弹运动参数及选定的导引规律计算并产生编码控制指令，该指令由指令发送设备发送至导弹上；导弹上的指令接收机接收并将其转换成控制导弹运动的控制指令，自动驾驶仪根据这一控制指令控制导弹飞向目标，最终摧毁目标。

实际上，上述导弹制导过程就是按偏差控制的过程。即：导弹在飞向目标的过程中，制导系统不断地测量导弹的实际运动与理想运动之间的偏差，根据此偏差的大小和方向形成控制指令，在此指令的作用下，通过控制系统（即自动驾驶仪）控制导弹改变运动姿态，消除偏差。图 1.18 是该系统的方块图。

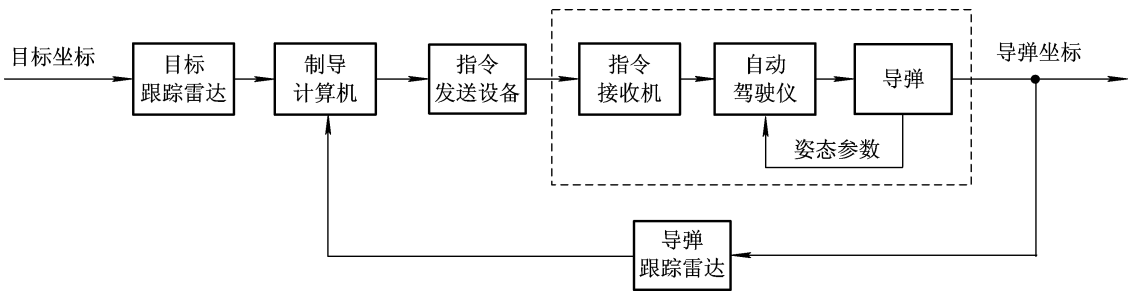


图 1.18　防空导弹指令制导系统方块图

1.6 对自动控制系统的要求

自动控制系统的基本任务就是应用控制装置去控制被控对象，使其被控量按照要求变化。为了提高控制质量，必须对控制系统在控制过程中所表现出的性能提出要求。通常，对自动控制系统的基本要求可归结为稳定性、快速性和准确性，简称稳、准、快。

1.6.1 稳定性

稳定性是对控制系统最基本的要求，是保证控制系统正常工作的必要条件，不稳定的控制系统不能实现预定的控制任务。稳定性是指系统在平衡状态下受到扰动作用后，系统恢复原有平衡状态的能力。稳定性通常由系统的结构和参数决定，与外界因素无关。对于恒值系统，稳定性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。对于随动系统，稳定性要求过渡过程结束后，被控制量始终跟随输入量的变化。此外，稳定系统的过渡过程收敛，而不稳定系统的过渡过程是发散的。

1.6.2 快速性

快速性是指控制系统对输入信号响应的快慢，即过渡过程持续的时间长短。而控制系统对输入信号响应的形式，即过渡过程的形式对快速性影响甚大。一般将过渡过程的快速性和振荡性能通称为控制系统的动态性能，且都有具体要求。

稳定性和快速性反映对控制系统过渡过程的要求。

1.6.3 准确性

准确性是对控制系统的控制精度提出的要求，用稳态误差来衡量，也称为稳态性能。稳定的控制系统在过渡过程结束后所处的状态称为稳态，稳态误差是指稳态时系统输出量的期望值与实际值之差。显然，稳态误差越小，表示系统输出量跟随输入量的精度越高，故设计时希望稳态误差要小。例如，在电动机闭环调速系统中，希望因负载扰动引起的稳态转速的变化要尽量小；在随动系统中，希望输出信号与输入信号尽量一致，即同步。

1.6.4 自动控制理论主要研究的问题

自动控制理论主要研究如下两方面的问题。

1. 分析

在控制系统的结构和参数已经确定的条件下，对控制系统的性能进行分析，并提出改善性能的途径。即，对于一个具体的控制系统，如何从理论上对它的稳定性、动态性能和稳态精度进行定性分析和定量计算。

2. 综合

根据控制系统要实现的任务，给出稳态和动态性能指标，并确定适当的参数，使控制系统满足给定的性能指标。即，根据对控制系统性能的要求，如何合理地设计校正装置，使控制系统的性能能全面地满足技术上的要求。

对控制系统进行分析和综合都离不开一个工具，这就是控制系统的数学模型。

习　　题

1.1　列举几个日常生活中开环控制系统和闭环控制系统的例子，简要说明其工作原理，并比较开环控制和闭环控制的优缺点。

1.2　简述闭环控制系统的工作原理及其组成。

1.3　恒值系统和随动系统是如何定义的？它们各有什么特点？试举例说明。

1.4　在图 1.9 所示直流电动机闭环调速系统中，若误将测速发电机的正负极性接反，系统能否正常工作？为什么？

1.5　图 1.19 是水箱液位控制系统示意图，希望水箱中液面高度 H 保持不变，说明其工作原理，绘制其原理方块图，并指明被控对象、被控量、输入量以及扰动。

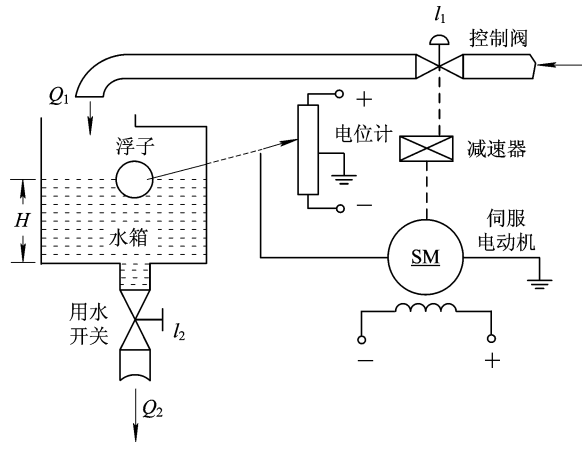


图 1.19　水箱液位控制系统

1.6　仓库大门自动控制系统原理如图 1.20 所示，试说明其工作原理，并绘制方块图。

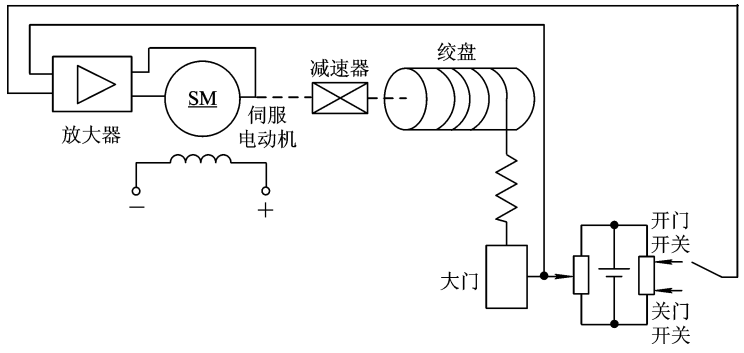


图 1.20　仓库大门自动控制系统原理图

1.7 **热处理炉温度控制系统的原理图如图 1.21 所示，简要分析其工作原理，并绘制其方块图。**

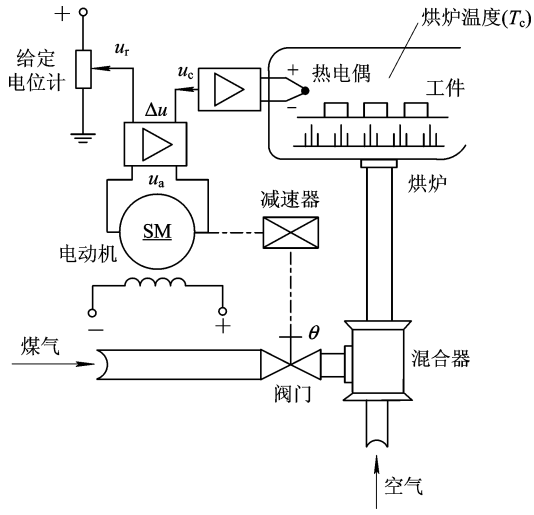


图 1.21 热处理炉温度控制系统原理图

1.8 **位置随动控制系统如图 1.22 所示，其中，输入量为指令转角 θ_i，输出量为角位移 θ_o，简要分析其工作原理，并绘制其方块图。**

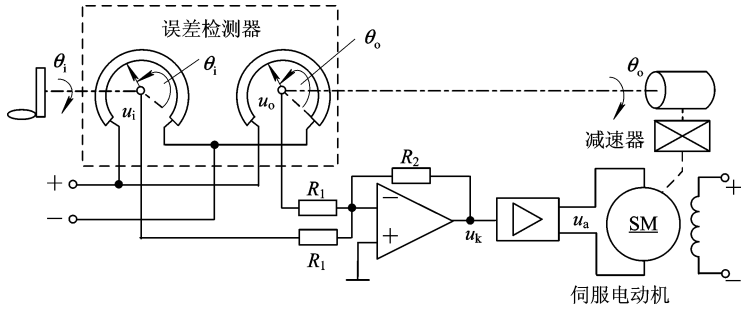


图 1.22 位置随动控制系统示意图

第 2 章　控制系统的数学模型

控制系统的性能分析与综合设计都离不开一个数学工具，这就是控制系统的数学模型。因此，在分析与设计控制系统之前，首先必须建立控制系统的数学模型。本章将介绍控制系统微分方程与传递函数这两类数学模型的建立方法。

2.1　数学模型概述

2.1.1　数学模型的定义与分类

控制系统的数学模型，就是能够精确地描述系统性能的数学表达式。具体讲，控制系统的数学模型就是描述系统输入变量、输出变量及系统内部各变量之间关系的数学表达式。

控制系统的数学模型通常有静态数学模型与动态数学模型之分。所谓静态数学模型，是指在静态(即变量各阶导数为零)条件下，描述系统变量之间关系的代数方程。而动态数学模型则是描述变量各阶导数之间关系的微分方程，用于描述系统的动态性能，本书着重研究此类数学模型。以微分方程为基础，动态数学模型又有多种表现形式，表 2.1 列出了控制系统数学模型的类型及表现形式，其中的传递函数是控制系统最重要的数学模型，其他数学模型均可据此求出。

表 2.1　控制系统数学模型的类型及表现形式

项目	类　型				
	静态数学模型	动态数学模型			
自变量域		时域	复域	频域	z 域
表现形式	代数方程	微分方程	传递函数	频率特性	脉冲传递函数
		差分方程	结构图		
		状态空间表达式	信号流图		

在对一个具体系统进行分析和设计时，一种数学模型可能比另一种数学模型更合适，例如，对于单输入单输出系统的分析研究，通常采用输入/输出间的传递函数(或脉冲传递函数)作为系统的数学模型比较合适；而在多输入/多输出系统中，采用状态空间表达式则更为方便。

2.1.2　数学模型建立的原则

控制系统的数学模型通常采用两种方法建立。第一种方法称为解析法或直接分析法，

是指对系统各部分的运动机理进行分析，在若干简化假定条件下，根据它们所依据的基本物理或化学定律，分别建立相应的数学模型。第二种方法称为实验法，是人为地给系统施加某种测试信号，记录其输出响应，并用适当的数学模型去逼近，这种方法也被称为系统辨识。本书主要采用解析法建立控制系统的数学模型。

通常，在建立控制系统数学模型时应该遵循如下原则：

（1）全面了解系统的自然特征、分析研究目的和准确性要求，选择合适的建模分析方法；

（2）根据所选建模分析方法，建立相应形式的数学模型；

（3）必要时应根据误差要求，忽略一些次要因素，对数学模型进行简化，最终得到的数学模型为线性的(甚至是定常的)。

2.2 控制系统的微分方程

控制系统的微分方程是描述系统动态性能最基本的一种数学模型，因而也将其称为动态方程。本节着重讨论线性、定常、集总参量控制系统(或元件)微分方程的建立方法。

2.2.1 微分方程列写步骤

建立系统(或元件)微分方程的一般步骤如下：

（1）根据系统和元件的工作原理及其在控制系统中的作用，确定其输入量和输出量；

（2）依据元件所遵循的物理或化学规律(如牛顿定律、基尔霍夫电压和电流定律、能量守恒定律等)，列写相应的微分方程；

（3）从所有元件的微分方程中消去中间变量，得到系统的输入/输出微分方程；

（4）将系统微分方程标准化，即输入量及其各阶导数项位于方程式左边，输出量及其各阶导数项位于方程式右边，且导数阶次按降幂排列。

2.2.2 控制系统元件微分方程的列写

组成控制系统的元件有很多种类型，最常用的是力学元件(如机械运动部件)和电气元件(如无源和有源网络及控制电机等)。下面举例说明这类控制系统元件微分方程的列写方法。

【例 2.1】 图 2.1 所示是弹簧—质量—阻尼器机械位移系统，其中，f 是阻尼系数，K 是弹性系数。当外力$F(t)$作用时，系统产生运动，位移 $x(t)$变化，试列写质量 m 在外力 $F(t)$作用下，位移$x(t)$的微分方程。

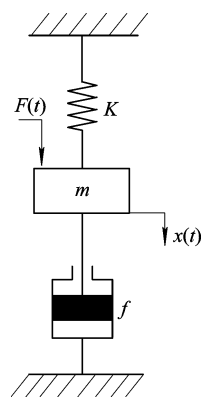


图 2.1 弹簧—质量—阻尼器机械位移系统

【解】 据题意，$F(t)$是系统的输入量，$x(t)$是系统的输出量。若不考虑摩擦与重力作用，根据牛顿第二定律，有

$$F(t)+F_1(t)+F_2(t)=m\frac{\mathrm{d}^2x(t)}{\mathrm{d}t^2} \quad (2.1)$$