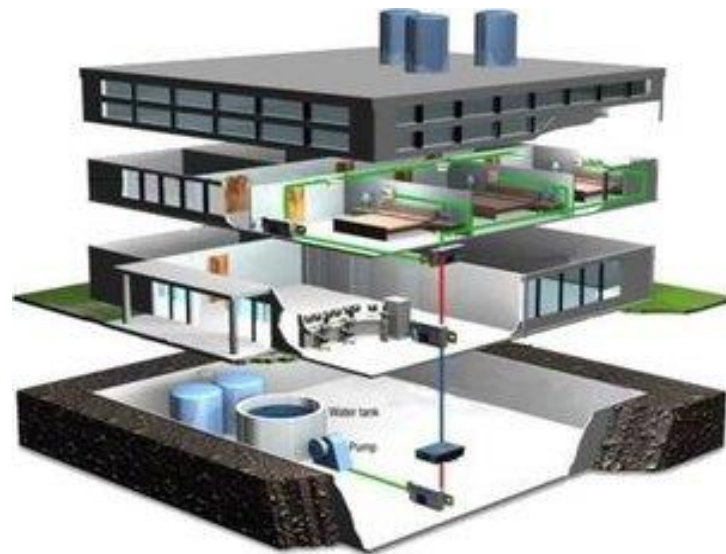
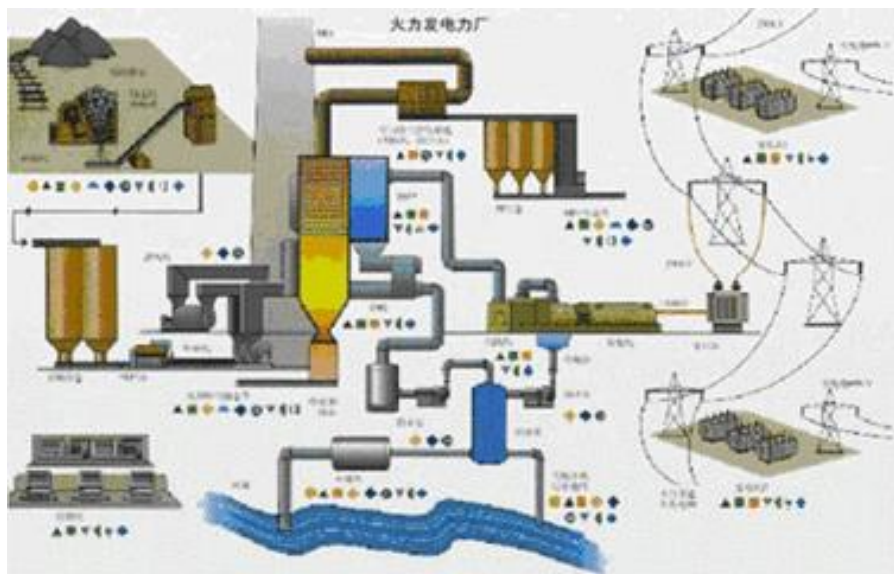


自动控制理论



教材：自动控制原理（第4版）电子工业出版社，主编：刘文定 谢克明

参考书：自动控制原理 科学出版社 主编：胡寿松

段朝霞 duanzx1989@163.com 14751830092 勤学楼1212

课程目的





课程介绍

自动控制理论是自动化学科的重要理论基础，专门研究有关自动控制系统中的基本概念、基本原理和基本方法。这门课程是针对工科知识背景讲授经典控制理论和自动控制技术基础，分析控制系统性能，设计控制器，满足稳定、准确、快速的性能要求。



课程内容

1. **绪论：**基本概念、控制思想和方法等
2. **系统的数学模型：**传递函数、方框图、状态方程等
3. **时域分析：**系统的输出响应计算和分析、稳定性及判别法、时域性能指标等
4. **根轨迹法：**基本概念、根轨迹绘制和分析等
5. **频域分析：**频率特性函数、频率特性图绘制、相对稳定性及分析



课程内容

- 6. 系统设计与校正：基本概念、校正方法及设计、PID控制、状态反馈与极点配置设计等
- 7. 非线性系统分析：概念、数学模型、性能分析与校正
- 8. 采样控制系统：采样、Z变换、稳定性分析



1. 绪 论

§ 1.1 自动控制理论的发展概况

- 公元前14 ~11世纪在中国、埃及和巴比伦出现的自动计时漏壶。





瓦特 (James Watt
19/01/1736- 1819) 英
工程师，于1788年利
反馈控制原理发明了
汽机调速器，极大地
高了蒸汽机的效率与
能，成为第一次工业



§ 1.1 自动控制理论的发展概况

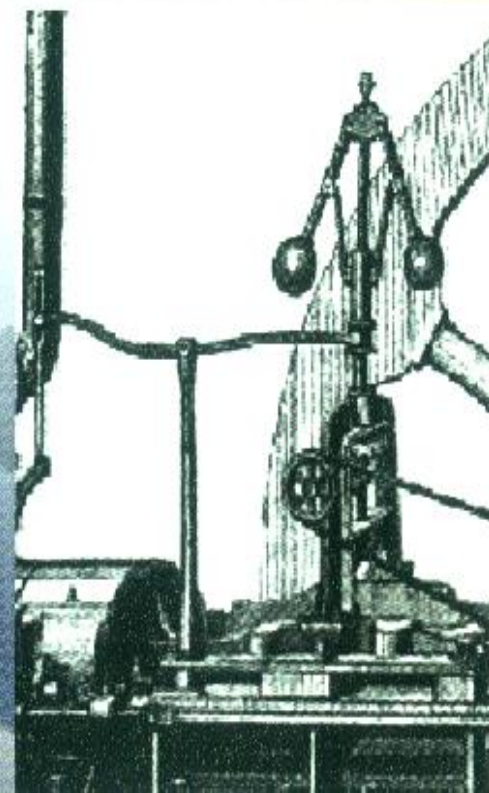
- 1868年，英-麦克斯韦(J. C. Maxwell)发表了“论调速



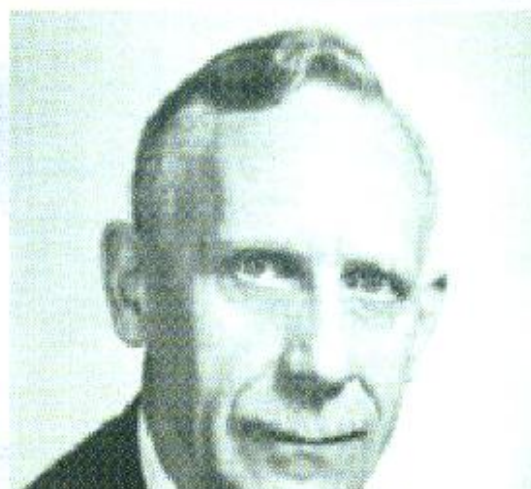
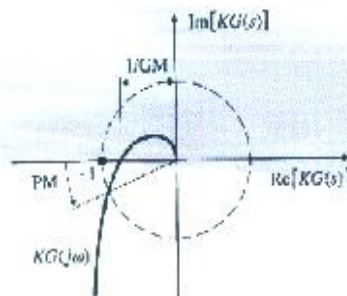
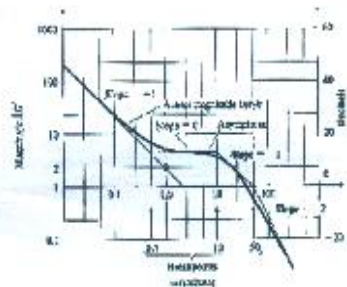
$$\frac{d^3x}{dt^3} + a_1 \frac{d^2x}{dt^2} + a_2 \frac{dx}{dt} + a_3 x = 0$$

$$S^3 + a_1 S^2 + a_2 S + a_3 = 0$$

麦克斯韦 (James Clerk Maxwell, 13/06/1831- 1879) 法国科学家，于1868年发表文章 On Governors，首次全面地论述了反馈系统的稳定性问题。文章中他建立了调速器的微分方程，在平衡点线性化之后，获得代数特征方程，并以该方程的根作为判断稳定性的依据。他成功解决了二阶及三阶系统的稳定性。



§ 1.1 自动控制理论的发展概况



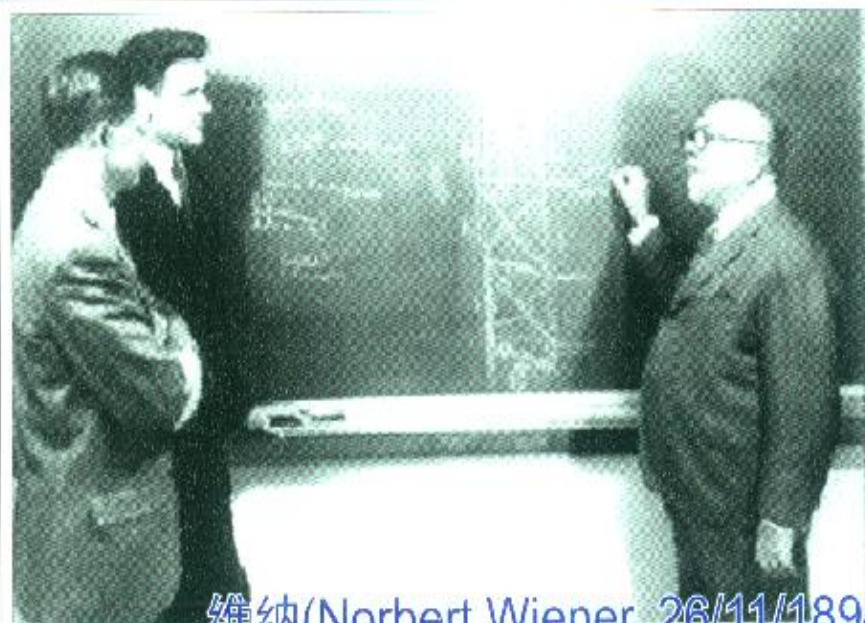
奈奎斯特 (Harry Nyquist, 7/02/1889-1976),
波特 (H.W. Bode, 24/12/1905 - 1982) 美国 Bell 实验室
电气科学家 他们的工作为控制理论 通信工程

李亚普诺夫 (Aleksandr Lyapunov, 6/06/1857-1918) 俄国数学家 (Chebyshev 的学生, Markov 的同学), 在他的博士论文中, Lyapunov 系统地研究了由微分方程描述的一般运动系统的稳定性问题, 建立了著名的 Lyapunov 方法。他的工作为现代控制及非线性控制奠定了基础。



§ 1.1 自动控制理论的发展概况

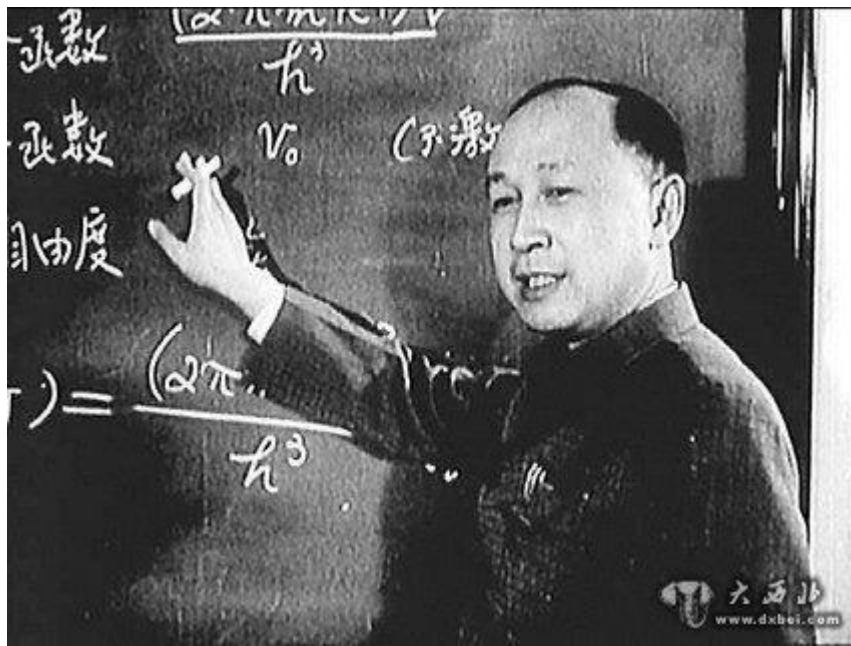
- 1938年，前苏联米哈依洛夫提出了图解分析方法判别系统稳定性的准则，把奈氏判据推广到条件稳定



维纳(Norbert Wiener, 26/11/1894 - 1964)，美国天才数学家，早期与V.Bush研制模拟计算机，之后提出Wiener Filter，是控制论(Cybernetics)的创始人。

§ 1.1 自动控制理论的发展概况

- 1954年我国-钱学森在美出版了《工程控制论》一书，书中所阐述的基本理论和观点，奠定了工程控制论的基础。





§ 1.1 自动控制理论的发展概况

三个时期：（1）经典控制理论（20世纪30~50年代）

对 象：SISO 线性定常系统

数学工具：拉氏变换

数 模：传递函数

方 法：时域法 频域法 根轨迹法



§ 1.1 自动控制理论的发展概况

(2) 现代控制理论（20世纪50~70年代）

对象：MIMO 非线性系统 时变系统

数学工具：线性代数 矩阵理论

数模：状态空间表达式

方法：状态空间法



§ 1.1 自动控制理论的发展概况

(3) 大系统理论和智能控制理论 (20世纪60年代末~)

特点: 多样化发展的时期

理论方法: 自动控制理论, 人工智能, 模糊数学, 神经网络, 运筹学等

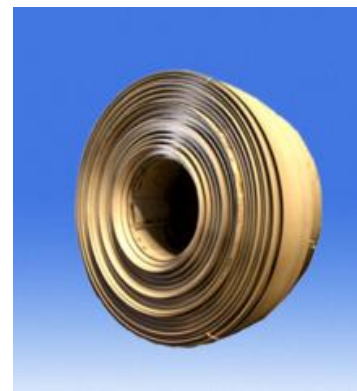
代表学者: 美-扎德(L.A. Zadel)

美籍华人傅京生(J.S. Fu)

桑托斯(E.S. Saridis)

§ 1.2 自动控制的应用

- 钢铁轧制：轧出厚度一致的高精度铁板（厚度控制，张力控制）

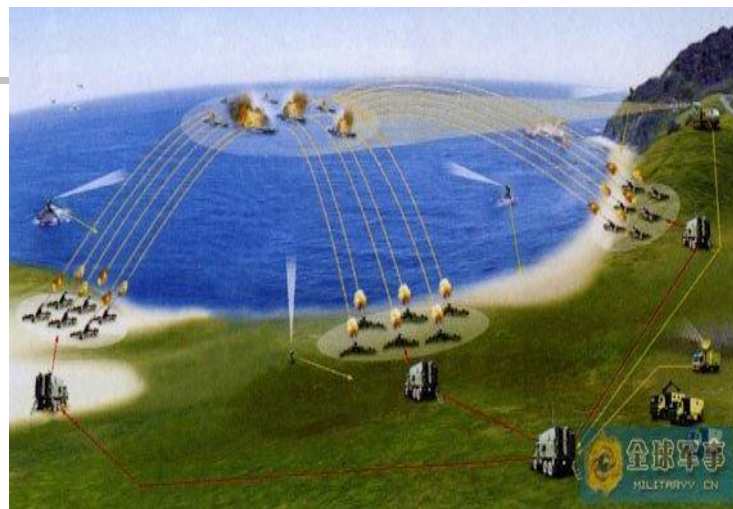


- 程控机床：自动进刀切削，加工出预期的几何形状。



§ 1.2 自动控制的应用

- 火炮跟踪射击系统：火炮跟踪速度和射击准确性控制



- 智能照明系统：自动灯光调节，不同环境灯光变换



§ 1.2 自动控制的应用



导弹



卫星



航天器

§ 1.2 自动控制的应用

计算机
集成制
造系统



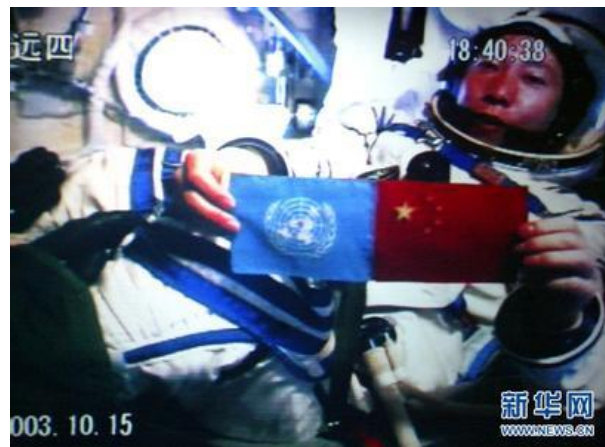
智能
机器人



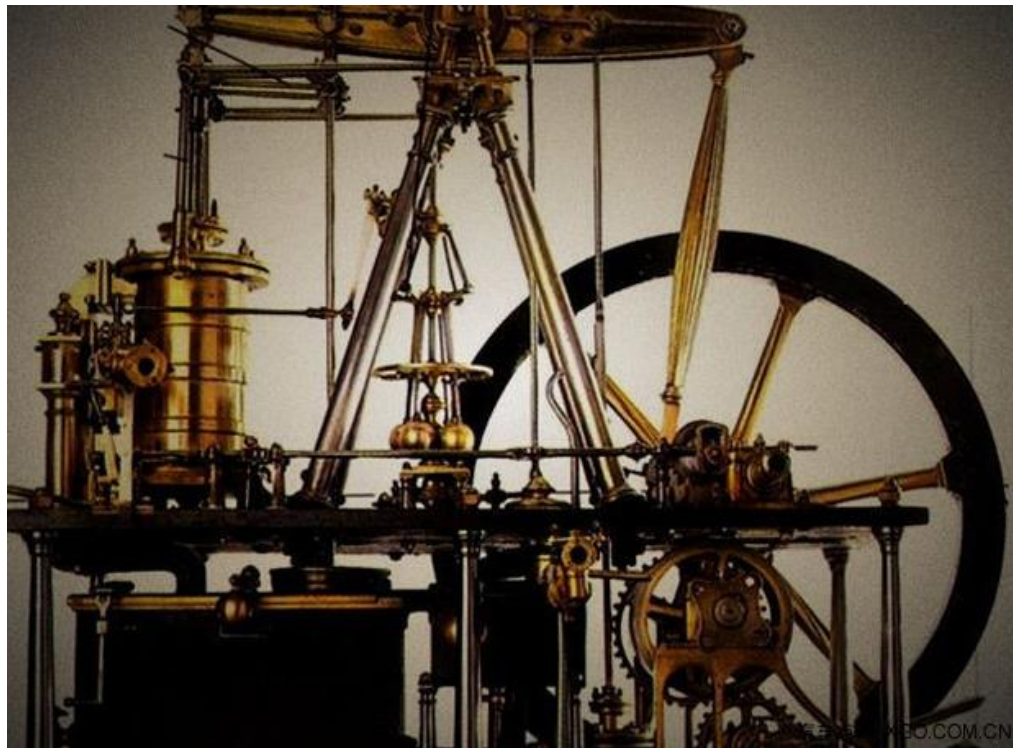
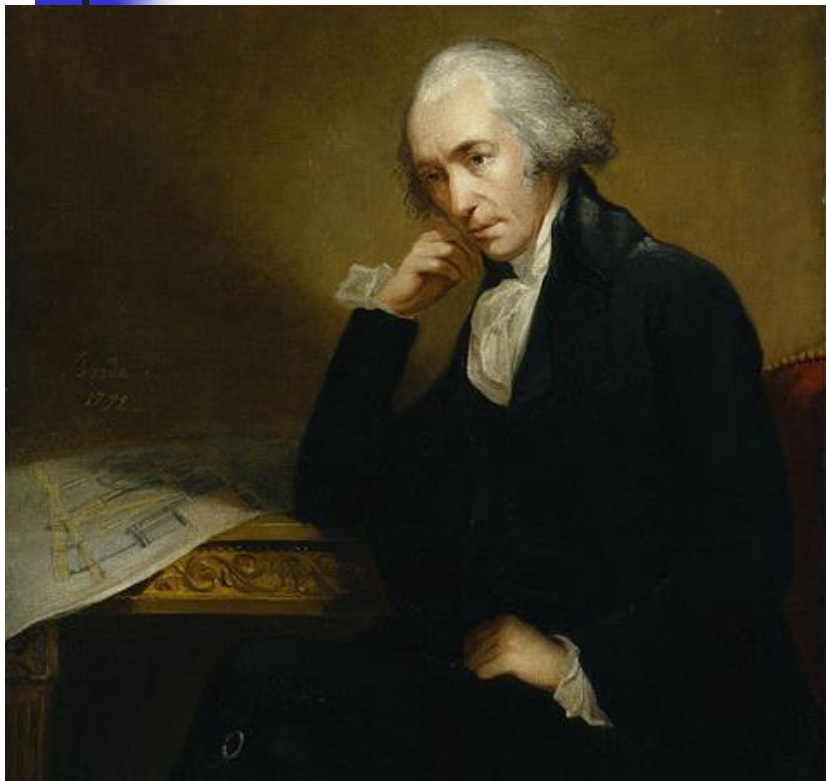
娱乐
机器人



载人卫星



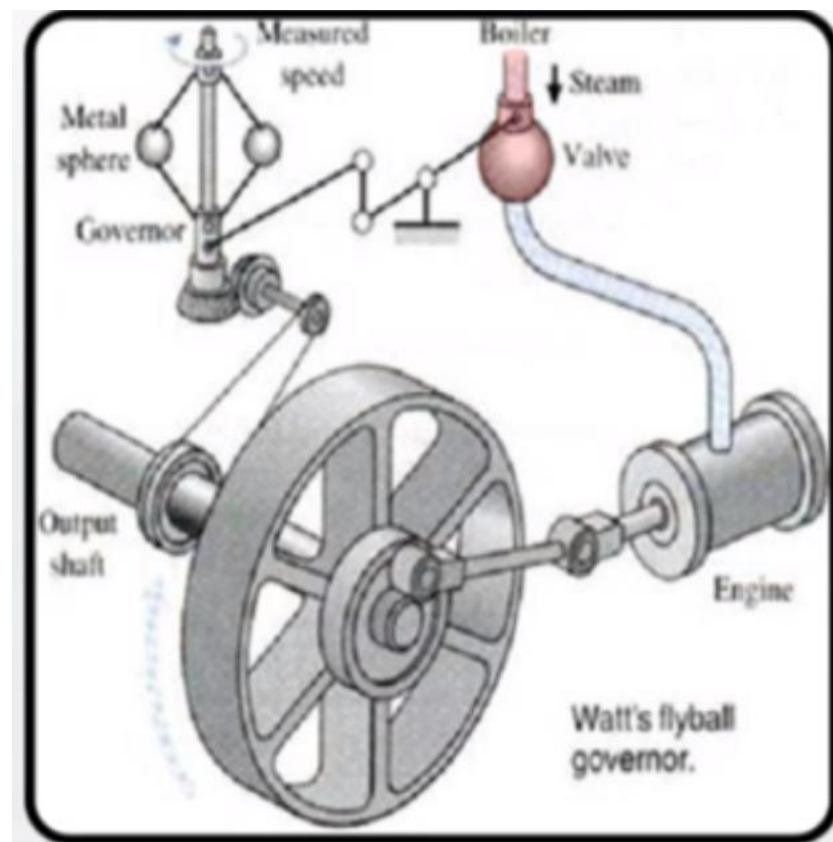
例1：离心调速器控制蒸汽轮机



James Watt

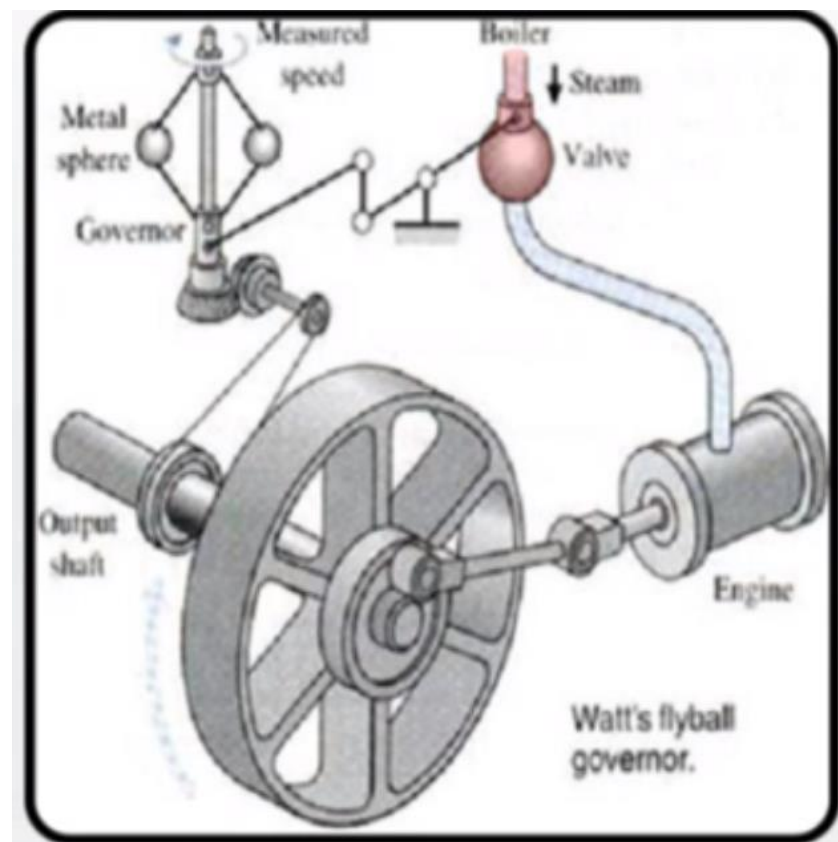
例1：离心调速器控制蒸汽轮机

- 蒸汽机的速度 > 给定速度
 - 小球的张角变大，带动杠杆机构调节阀门，减少它的进气量，从而使蒸汽机的速度降低

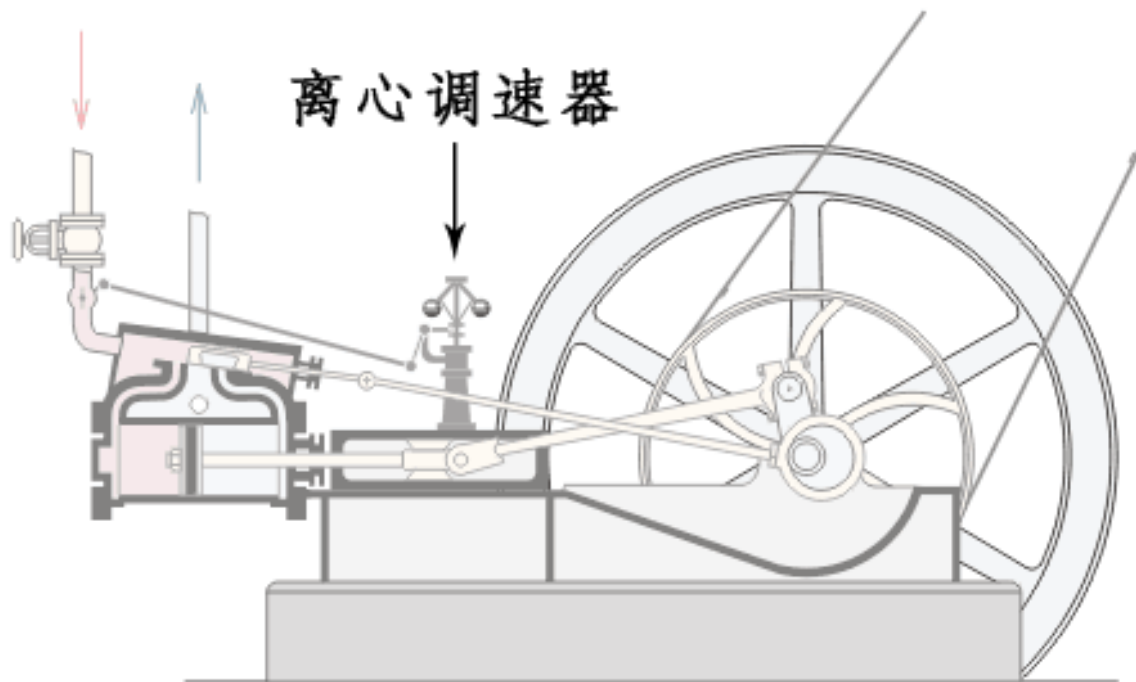


例1：离心调速器控制蒸汽轮机

- 蒸汽机的速度 < 给定速度
 - 小球的张角变小，带动杠杆机构调节阀门，增加它的进气量，从而使蒸汽机的速度增加

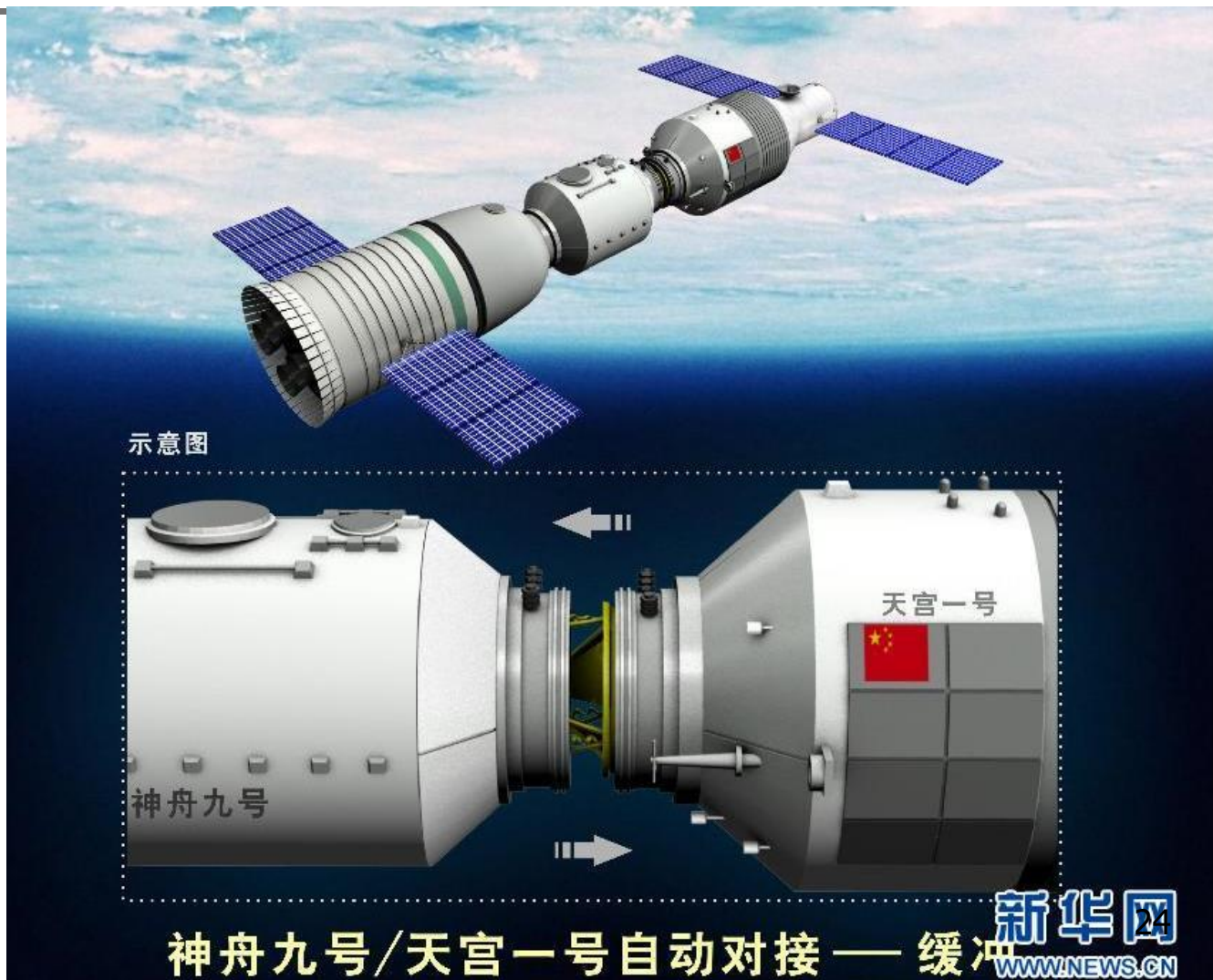


例1：离心调速器控制蒸汽轮机

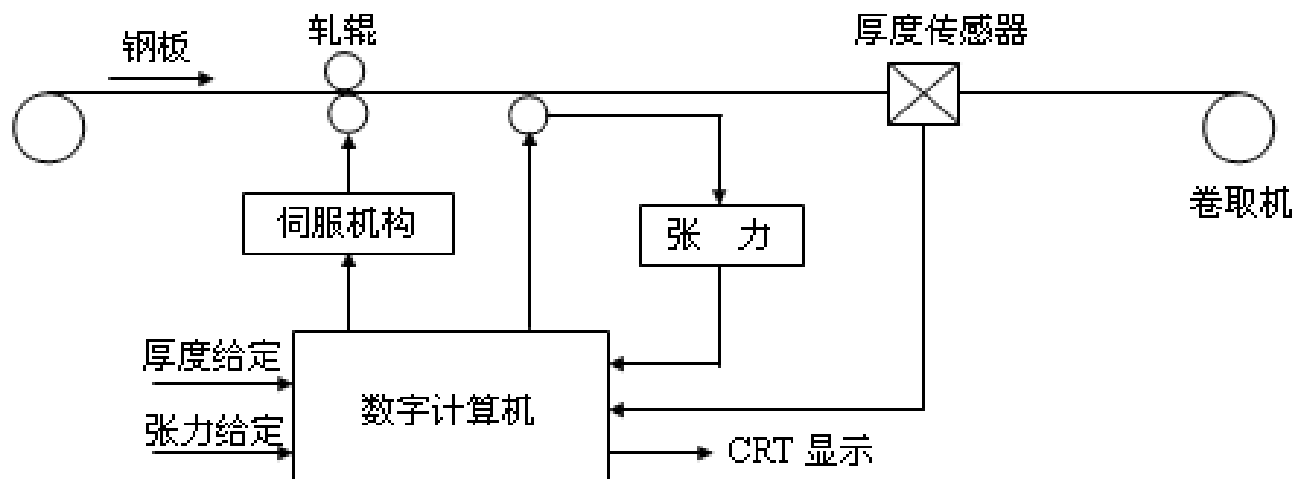


例2：神九天宫自动交汇对接

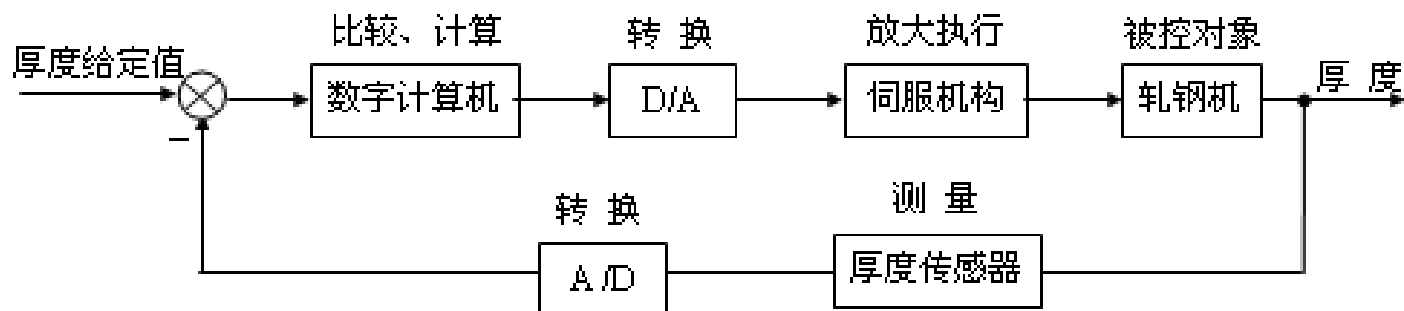
- 地面引导
- 自动寻的
- 靠近
- 对接合拢



例3：轧钢控制系统



轧钢机计算机控制系统示意图



轧钢机计算机控制系统方块图



§ 1.2 自动控制的应用

三个例子的共同点：

系统的输出通过反馈元件测量送给控制器，告诉控制器下一步做什么。



§ 1.3 自动控制系统的工作原理

控制的**本意**：为了达到某种目的对事物进行支配、管束、管制、管理、监督、镇压。

自动控制：

在没有人**直接参与**的情况下，利用外加的设备或装置（**称控制装置或控制器**），使机器、设备或生产过程（**被控对象**）的某个工作状态或参数（**即被控量**）自动地按照预定的规律运行。

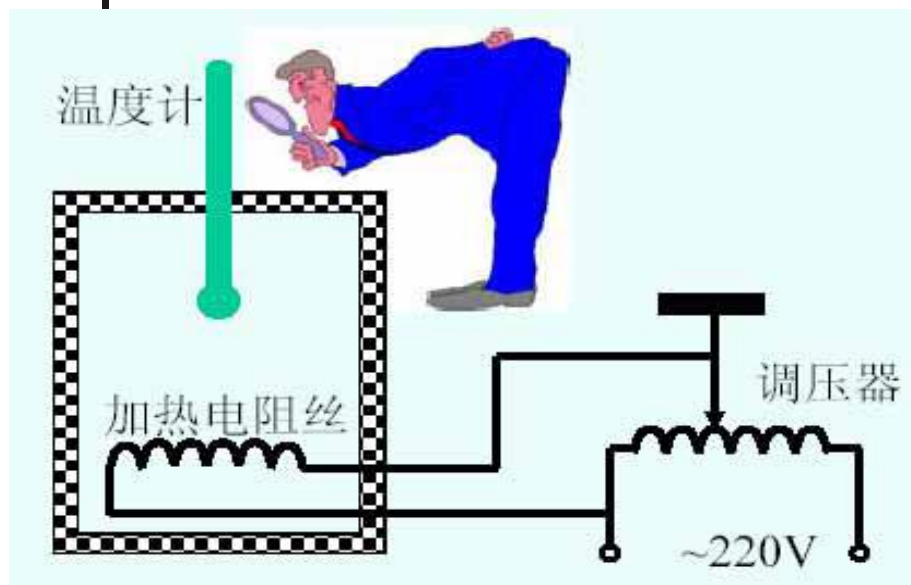
§ 1.3 自动控制系统的工作原理

■ 工作原理——恒温箱控制为例

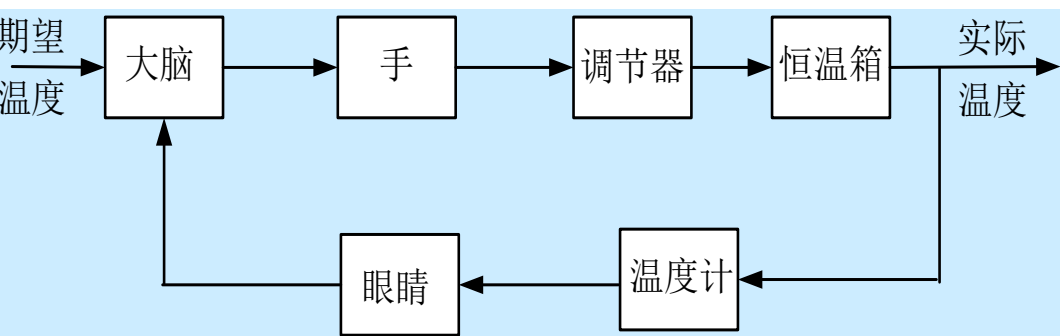


1. 人工控制原理及方块图
2. 自动控制原理及方块图

恒温箱人工控制



- **观测**恒温箱内的温度（被控量）
- 与要求的温度（给定值）进行**比较**得到偏差的大小和方向
- 根据偏差的大小和方向**调节**调压器，控制加热电阻丝的电流以调节温度回到要求值



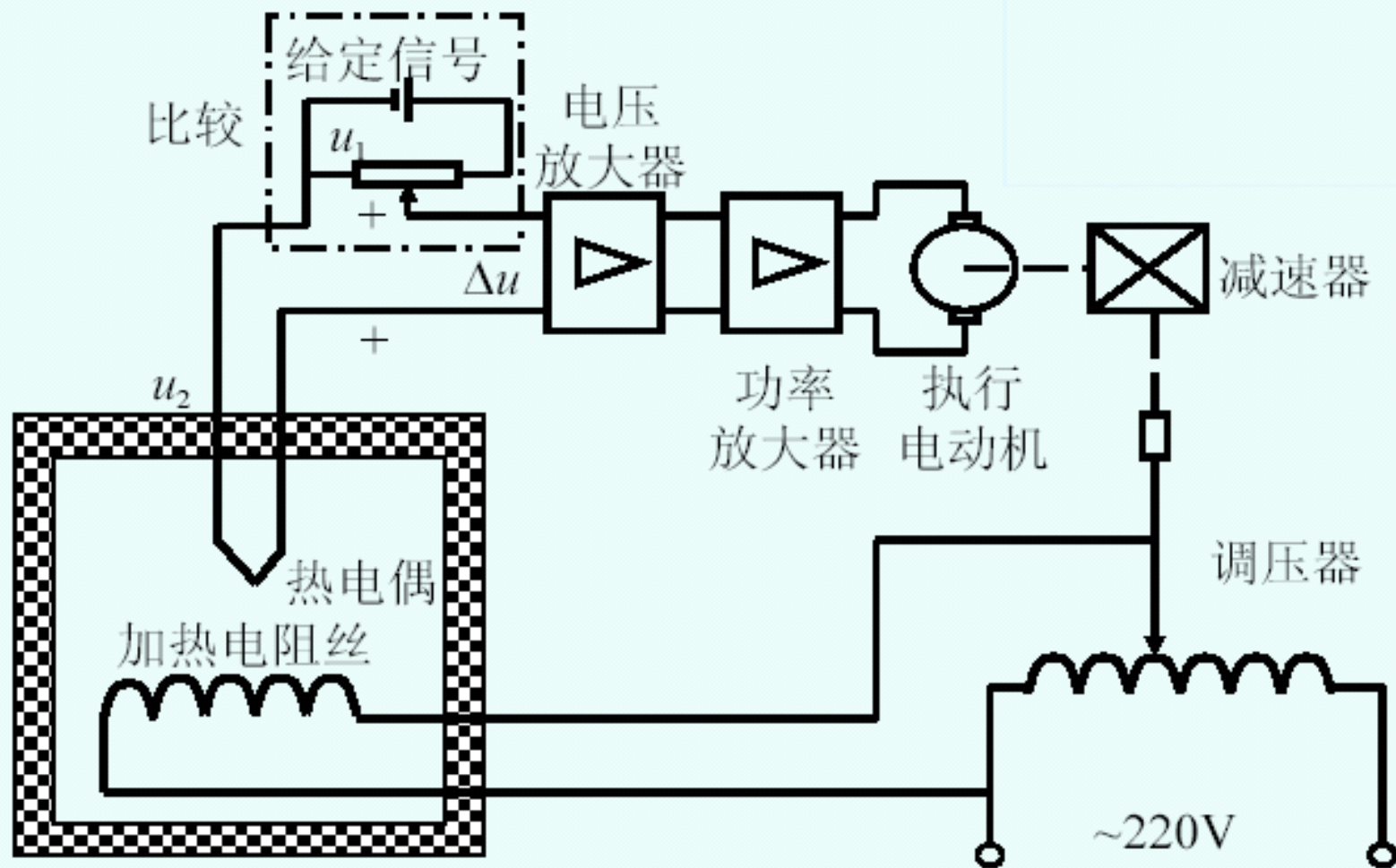
人工控制过程:

实质检测偏差纠正偏差

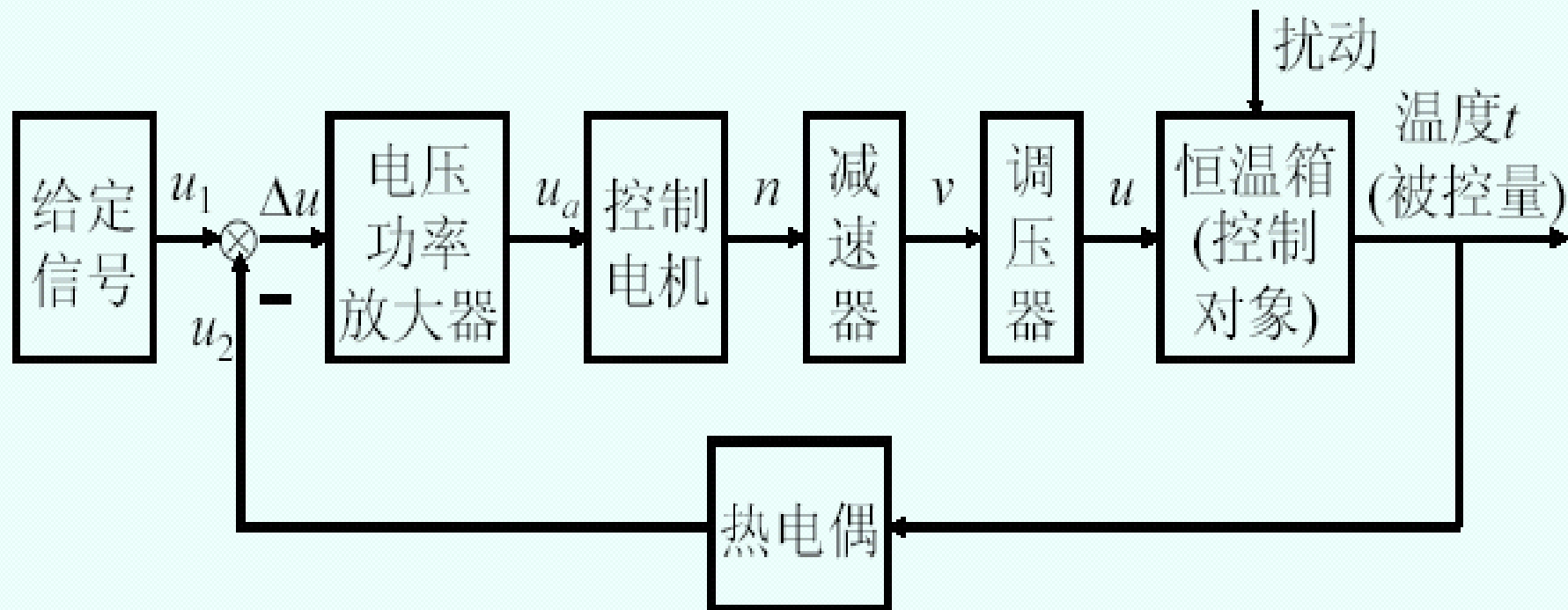
如果温度过高 → 控制手柄使触头左移 →
电阻丝中的电流减少 → 温度下降 → 直到
达到给定温度

如果温度过低 → 控制手柄使触头右移 →
电阻丝中的电流增大 → 温度上升 → 直到
达到给定温度

恒温箱自动控制系统



恒温箱自动控制系统



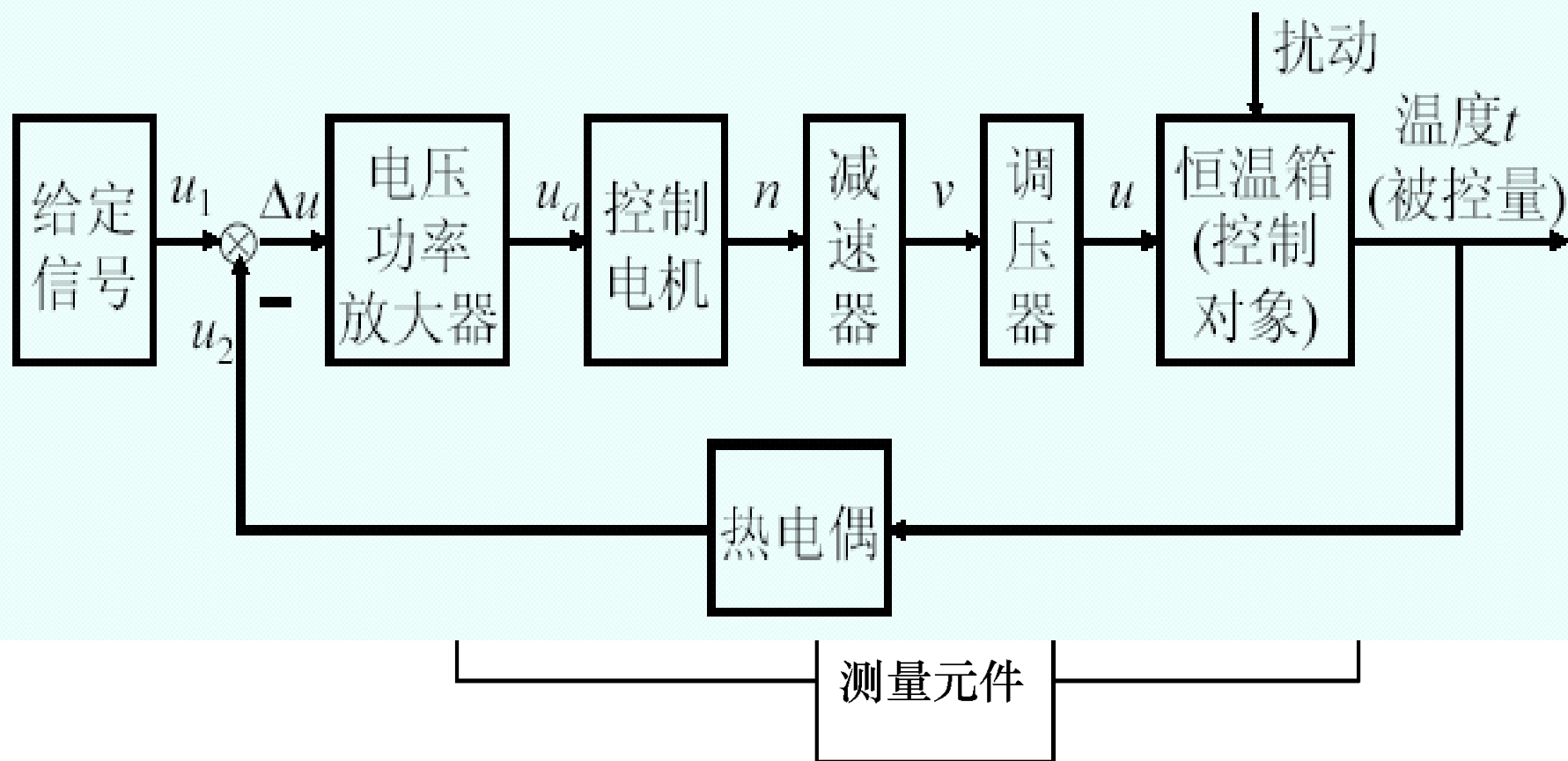
系统原理方块图

自动控制过程:

如果温度过高 \rightarrow U_2 增加 \rightarrow U_1 不变 \rightarrow
 $U_1 - U_2$ 减小 \rightarrow 控制手柄使触头左移 \rightarrow
电阻丝中的电流减少 \rightarrow 温度下降 \rightarrow
直到达到给定温度

如果温度过低 \rightarrow U_2 减小 \rightarrow U_1 不变 \rightarrow
 $U_1 - U_2$ 增加 \rightarrow 控制手柄使触头右移 \rightarrow
电阻丝中的电流增加 \rightarrow 温度上升 \rightarrow 直
直到达到给定温度

恒温箱自动控制系统





控制系统工作原理:

- **1) 检测:** 由测量元件检测输出量（被控制量）的实际值。
- **2) 偏差:** 检测输出量与给定值（输入量）进行比较, 得到偏差的大小和方向。
- **3) 控制:** 根据偏差的大小和方向产生控制调节信号（控制量）去消除偏差, 使得输出量维持期望值。

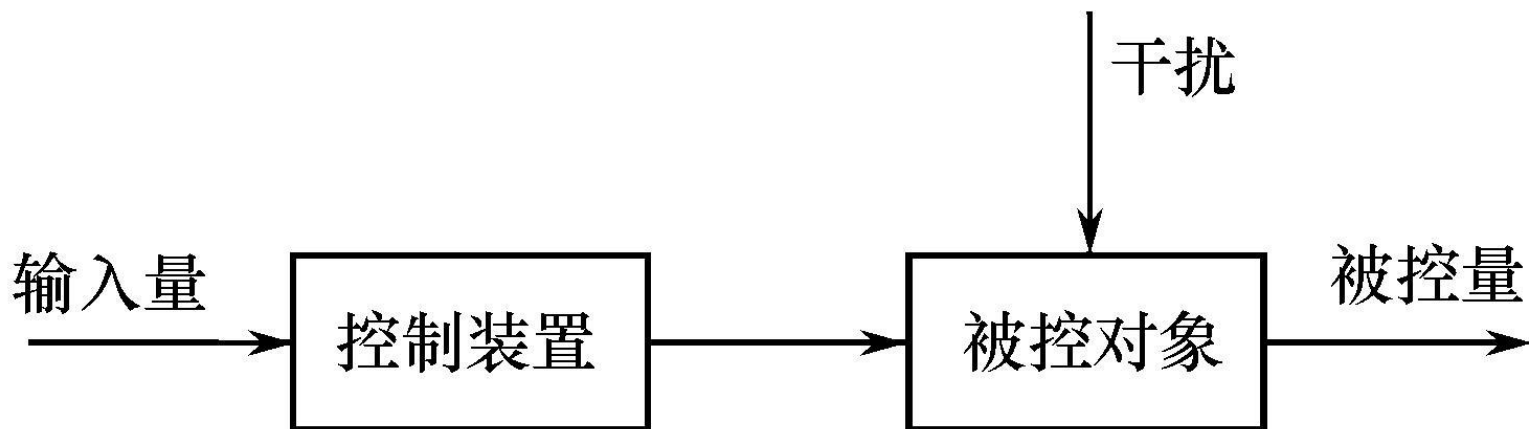


§ 1.4 开环控制和闭环控制

控制系统的类型很多，它们的结构类型和所完成的任务也各不相同。控制系统中最常见的两种控制方式是开环控制和闭环控制，这两种控制的组合——即为复合控制，相对应的控制系统称为开环控制系统、闭环控制系统和复合控制系统。

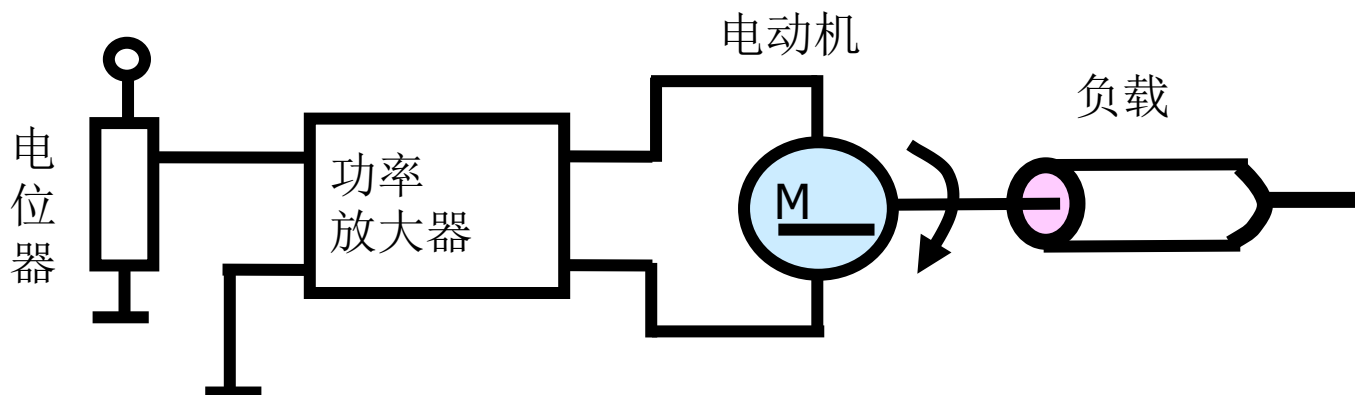
1.4.1 开环控制系统

开环控制系统是指无被控量反馈的控制系统,即需要控制的是被控对象的某一量(被控量),而测量的只是给定信号, **被控量对于控制作用没有任何影响的系统**。结构如图所示。

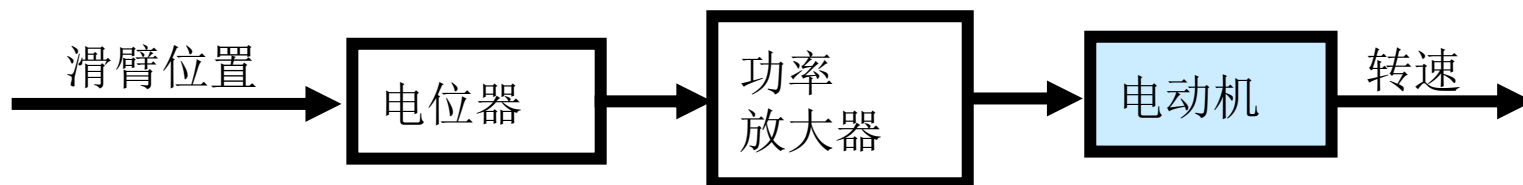


1. 按给定控制

例：直流电动机按给定控制

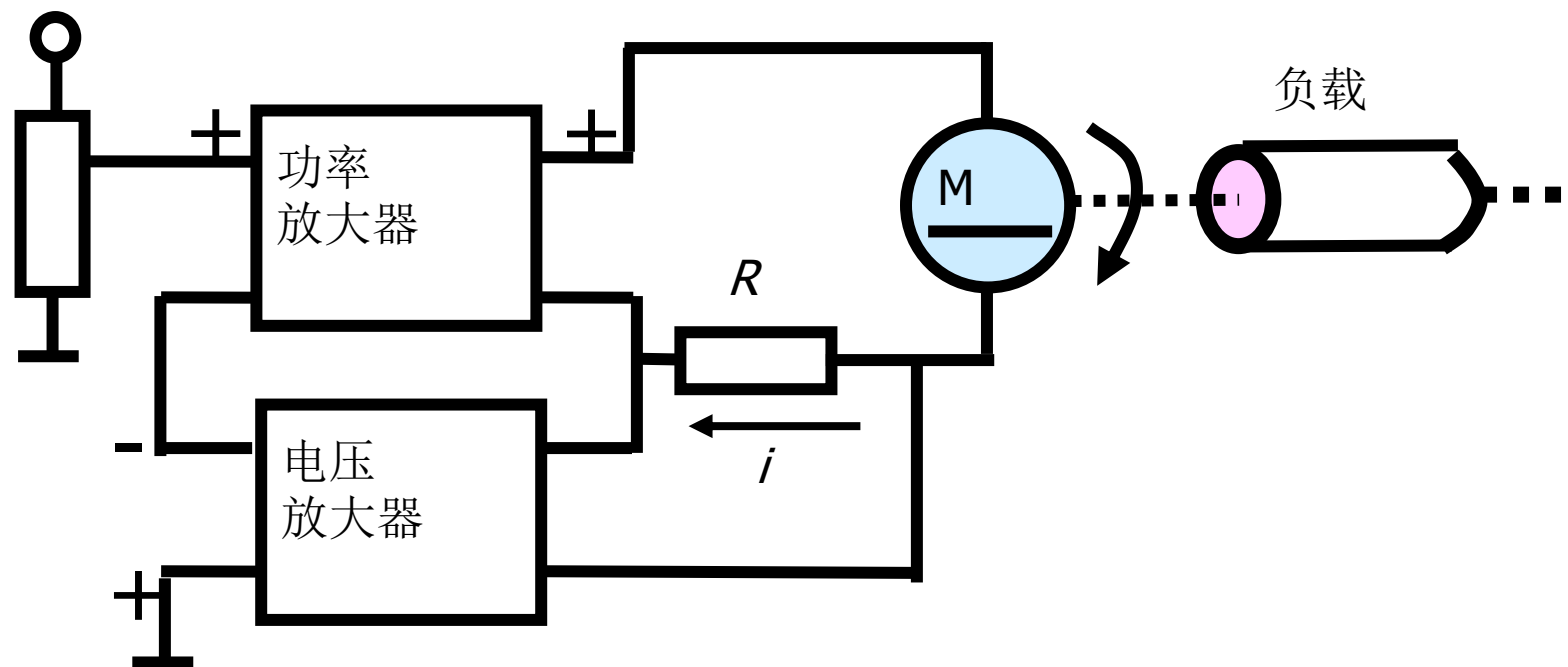


当调节电位器滑臂位置时，改变功率放大器的输入电压，从而改变电动机的电枢电压，最终改变电动机的转速。

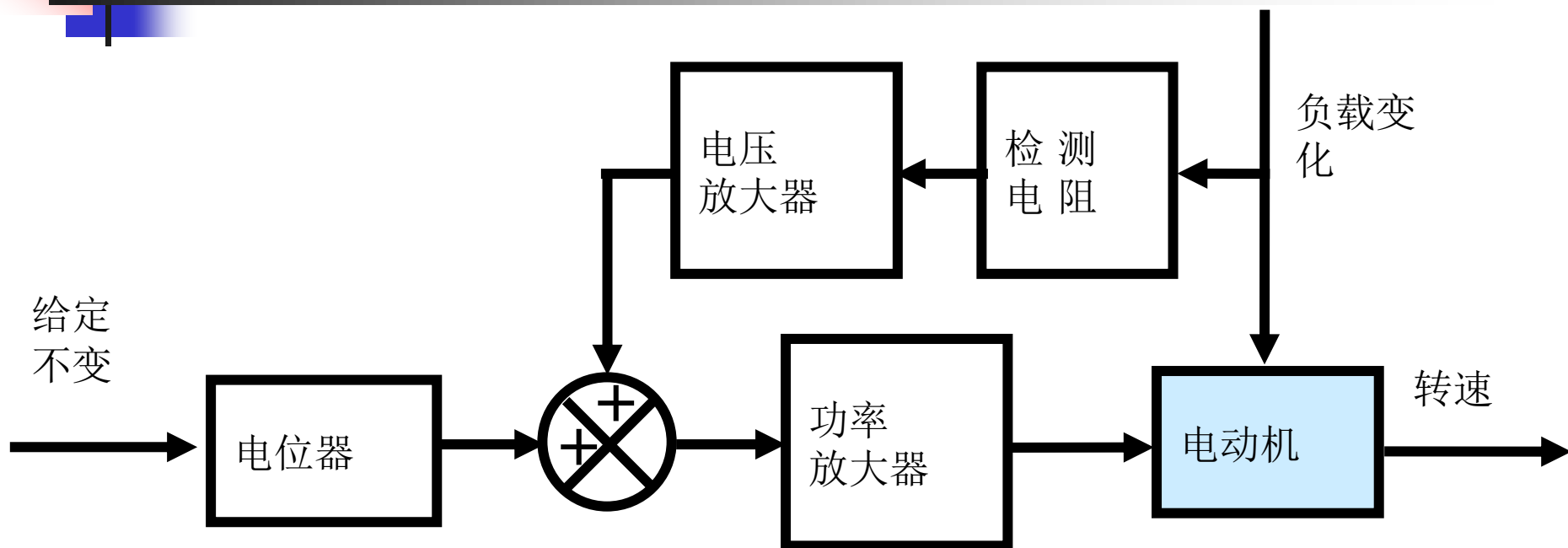


2. 按扰动控制

例：直流电动机按扰动控制



2. 按扰动控制



把负载变化视为外部扰动输入，对输出转速产生的影响及控制补偿作用，分别沿箭头的方向从输入端传送到输出端，作用的路径也是单向的，不闭合的。有时我们称按扰动控制为顺馈控制。



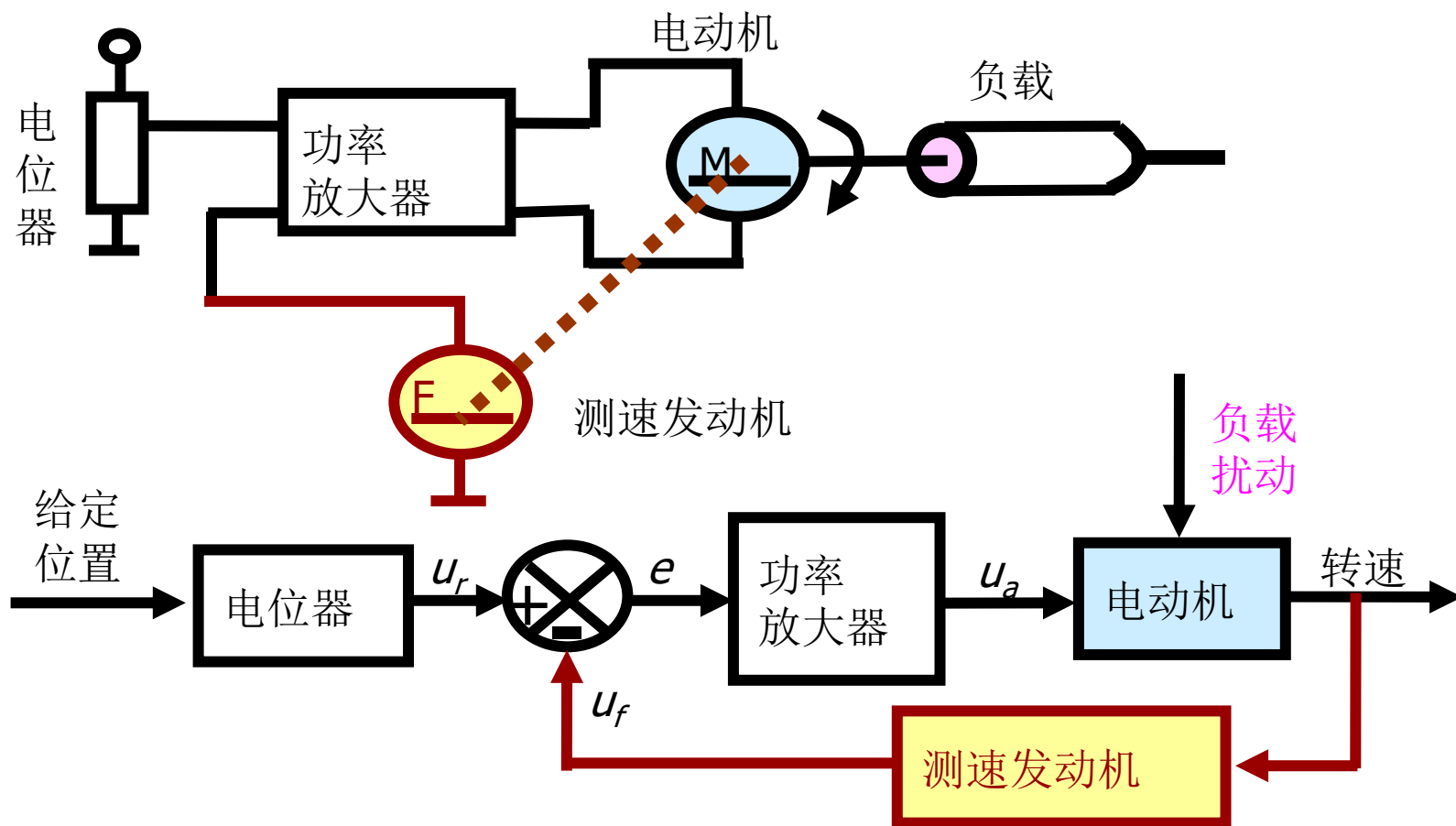
开环控制系统

开环控制的特点：

- (1) 结构简单、调整方便、成本低。
- (2) 给定一个输入，有相应的一个输出。
- (3) 在系统方框图中，作用信号是单方向传递的，形成开环。
- (4) 输出不影响输入。
- (5) 若系统有外界扰动时，系统输出量不可能有准确的数值，即开环控制精度不高，或抗干扰能力差。

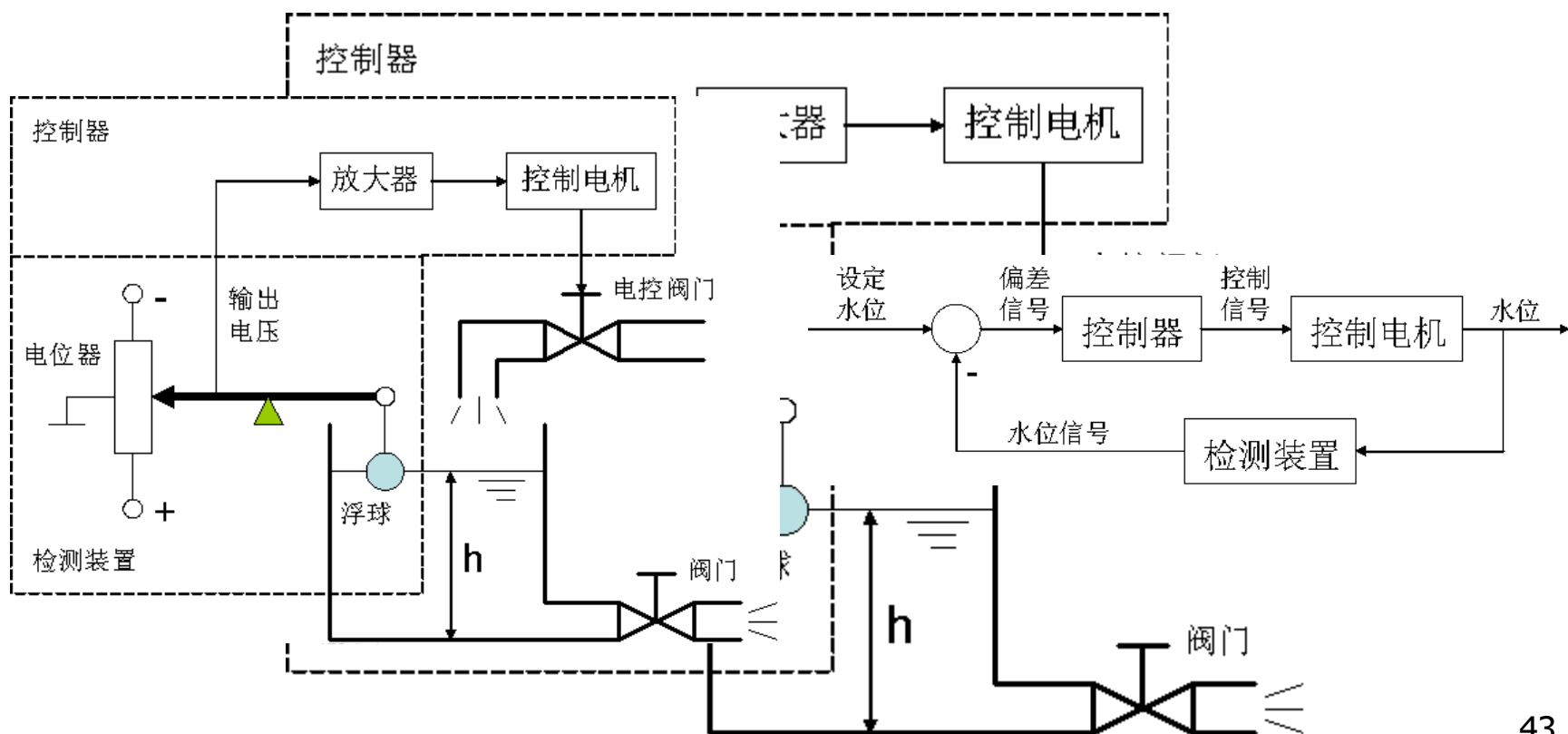
1.4.2 闭环控制系统

例：直流电动机闭环控制

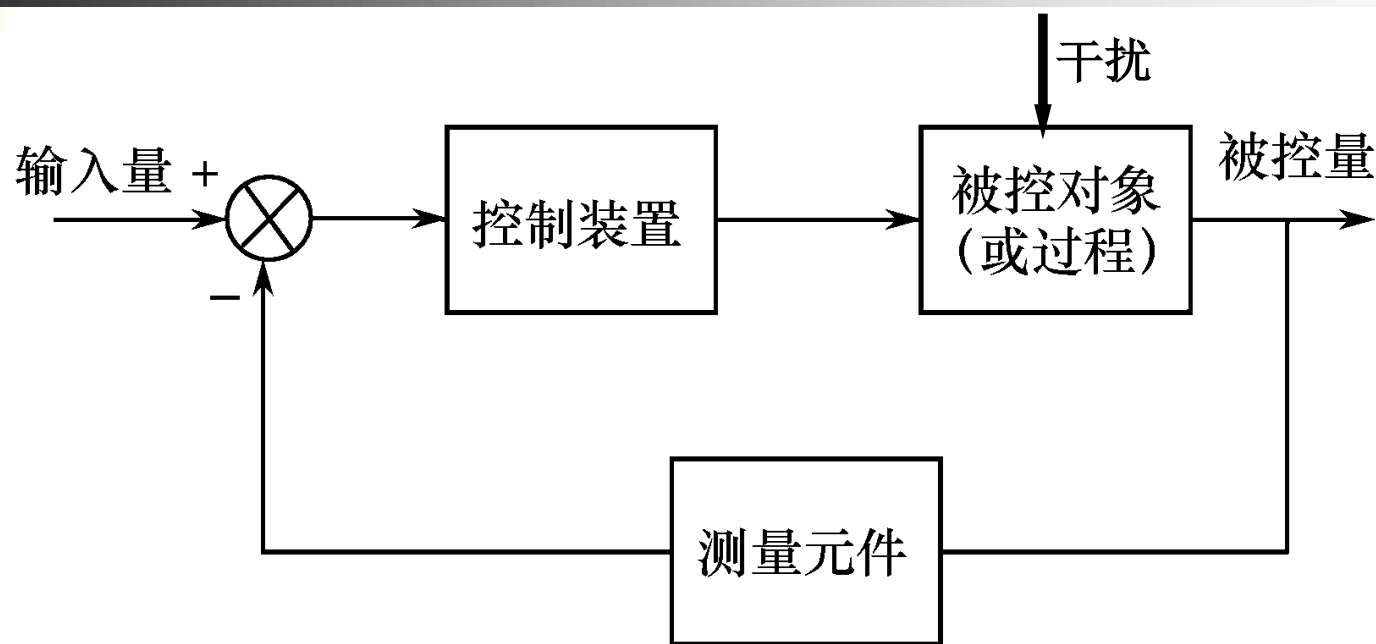


闭环控制系统

例：水箱液位控制



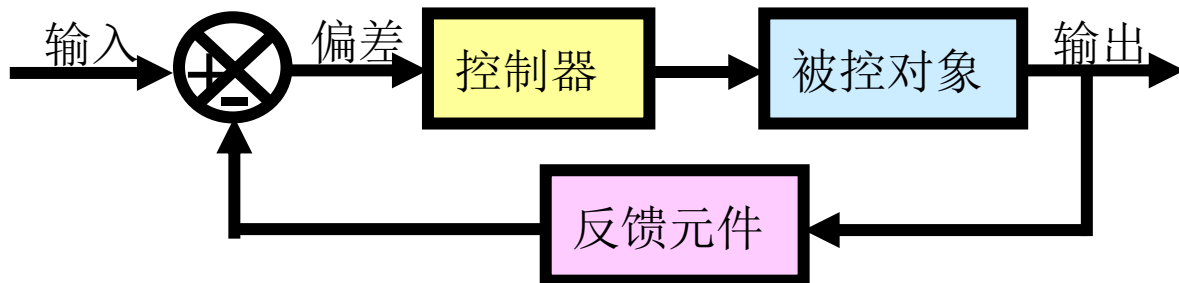
闭环控制的定义是有被控制量反馈的控制，其原理框如图所示。从系统中信号流向看，系统的输出信号沿反馈通道又回到系统的输入端，构成闭合通道，故称**闭环控制系统**或**反馈控制系统**。



闭环控制系统

闭环控制的特点：

- ① 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；
- ② 系统被控量的反馈信息又反过来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。
- ③ 提高了控制精度。

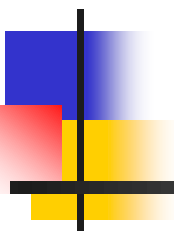




结论：


通过检测、比较得到偏差，由偏差产生控制作用，由控制作用使偏差减少或消除的原理就是自动控制原理也称反馈控制原理。（负反馈）

这种控制方式，无论是由于干扰造成，还是由于结构参数的变化引起被控量出现偏差，系统就利用偏差去纠正偏差，故这种控制方式为按偏差调节。



开环系统的**优点**——**结构简单，系统稳定性好**，调试方便，成本低。因此，在输入量和输出量之间的关系固定，且内部参数或外部负载等扰动因素不大，或这些扰动因素可以预测并进行补偿的前提下，应尽量采用开环控制系统。

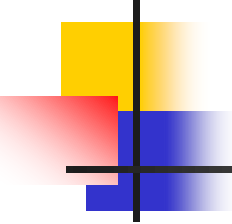
开环控制的**缺点**——当控制过程中受到来自系统外部的各种扰动因素，如负载变化、电源电压波动等，以及来自系统内部的扰动因素，如元件参数变化等，都将会直接影响到输出量，而控制系统不能自动进行补偿，**抗干扰性能差**。因此，开环系统对元器件的精度要求较高。



闭环控制的**优点**——抑制扰动能力强，与开环控制相比，对参数变化不敏感，并能获得满意的动态特性和控制精度。

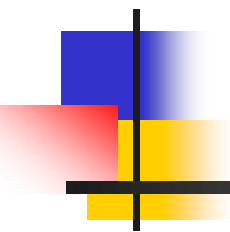
闭环控制的**缺点**——引入反馈增加了系统的**复杂性**，如果闭环系统参数的选取不适当，系统可能会产生**振荡**，甚至系统失稳而无法正常工作，这是自动控制理论和系统设计必须解决的重要问题。

自动控制理论主要研究闭环控制系统



开环控制和闭环控制方式各有优缺点，在实际工程中应根据工程要求及具体情况来决定。如果事先预知输入量的变化规律，又不存在外部和内部参数的变化，则采用开环控制较好。如果对系统外部干扰无法预测，系统内部参数又经常变化，为保证控制精度，采用闭环控制则更为合适。如果对系统的性能要求比较高，为了解决闭环控制精度与稳定性之间的矛盾，可以采用开环控制与闭环控制相结合的**复合控制系统**。

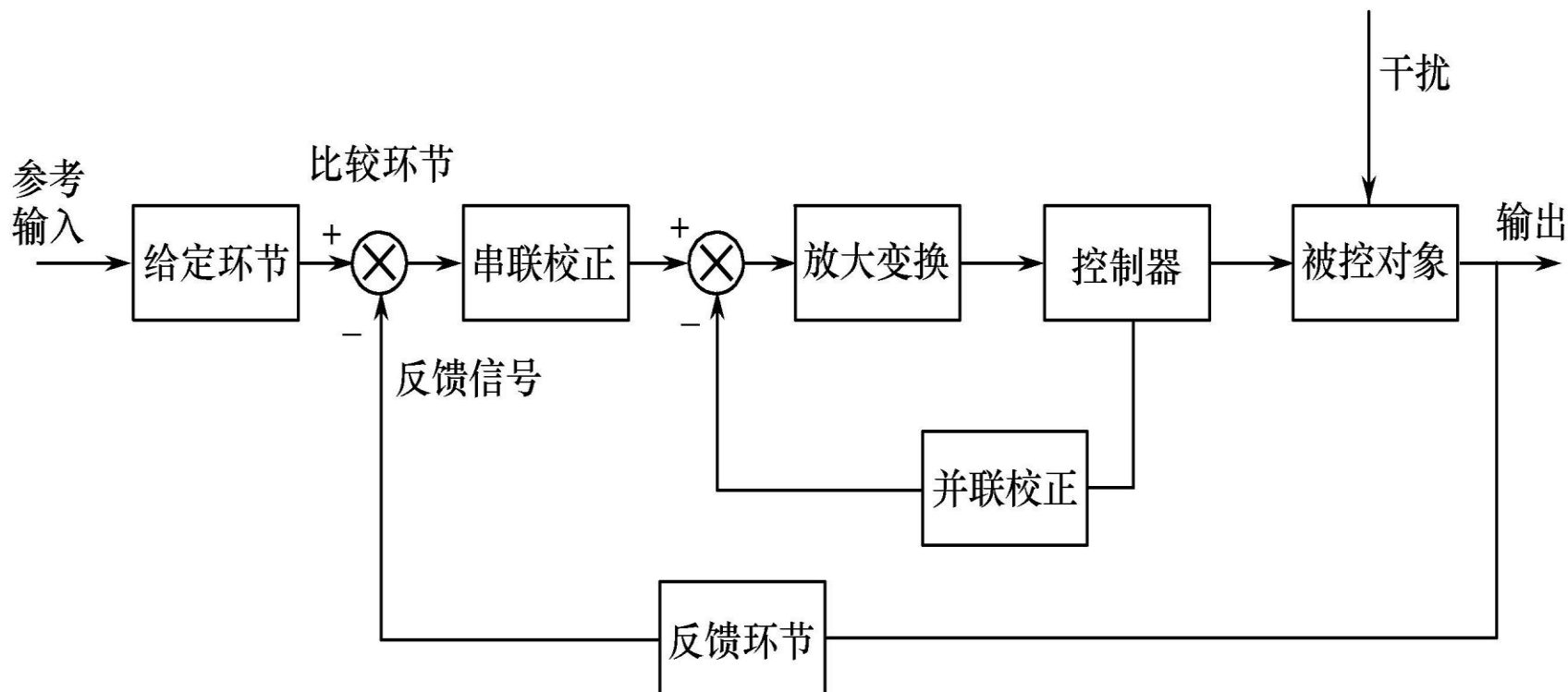
自动控制

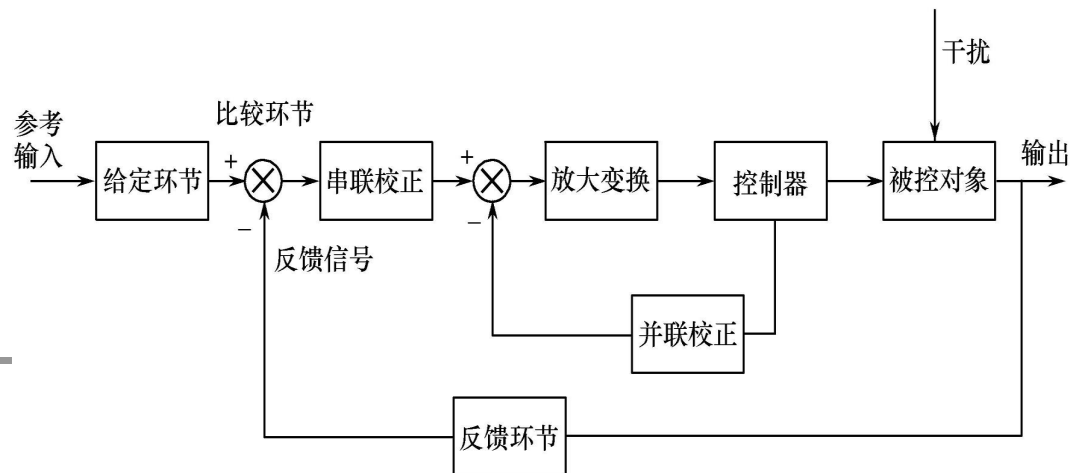


所谓自动控制就是在没有人直接参与的情况下，利用控制装置使被控对象中某一物理量或数个物理量准确地按照预定的要求规律变化。

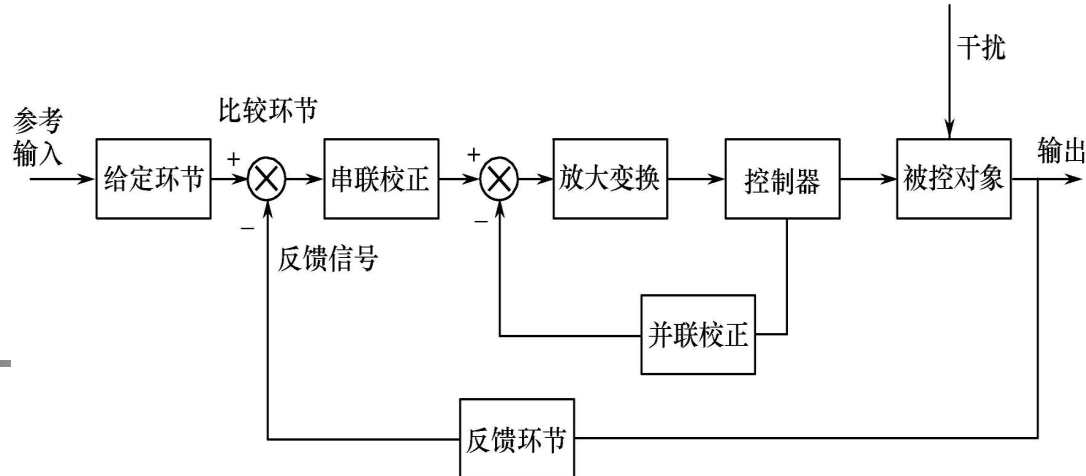
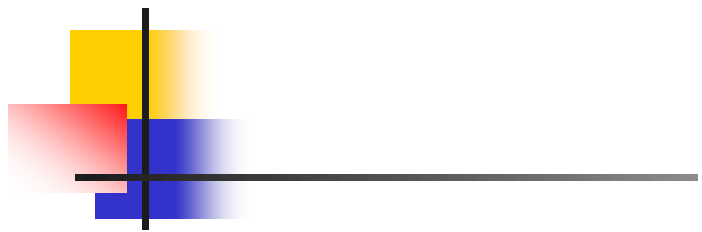
§ 1.5 自动控制系统的组成及术语

典型闭环（反馈）控制系统的原理图





- (1) **被控对象**：控制系统控制和操纵的对象,它接受控制量并输出被控制量。
- (2) **控制器**：接收变换和放大后的偏差信号,转换为对被控对象进行操作的控制信号。
- (3) **放大变换环节**：将偏差信号变换为适合控制器执行的信号。它根据控制的形式、幅值及功率来放大变换。



(4) **校正装置**: 为改善系统动态和静态特性而附加的装置。如果校正装置串联在系统的前向通道中, 称为串联校正装置; 如果校正装置接成反馈形式, 称为并联校正装置, 又称局部反馈校正。

(5) **反馈环节**: 它用来测量被控量的实际值, 并经过信号处理, 转换为与被控制量有一定函数关系, 且与输入信号同一物理量的信号。反馈环节一般也称为测量变送环节。

(6) **给定环节**: 产生输入控制信号的装置。



控制系统中常用的**名词术语**：

- (1) **输入信号**：泛指对系统的输出量有直接影响的外界输入信号，既包括控制信号又包括扰动信号。其中控制信号又称控制量、参考输入、或给定值。
- (2) **输出信号**(输出量)：是指反馈控制系统中被控制的物理量，它与输入信号之间有一定的函数关系。
- (3) **反馈信号**：将系统(或环节)的输出信号经变换、处理送到系统(或环节)的输入端的信号，称为反馈信号。若此信号是从系统输出端取出送入系统输入端，这种反馈信号称主反馈信号。而其它称为局部反馈信号。



(4) **偏差信号**：控制输入信号与主反馈信号之差。

(5) **误差信号**：系统输出量的实际值与希望值之差。系统希望值是理想化系统的输出，实际上并不存在,它只能与控制输入信号具有一定比例关系的信号来表示。在单位反馈情况下，希望值就是系统的输入信号,误差信号等于偏差信号。

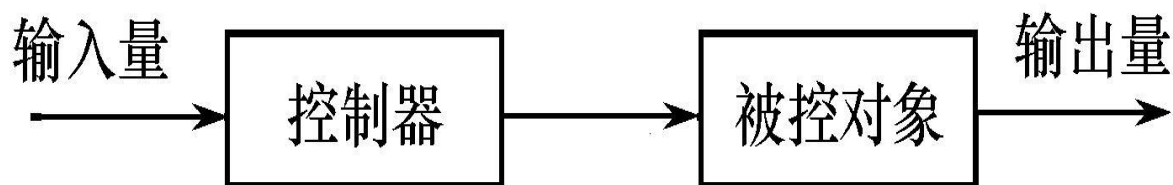
(6) **扰动信号**：除控制信号以外，对系统的输出有影响的信号。

§ 1.6 自动控制系统的类型

1.6.1 按信号流向划分

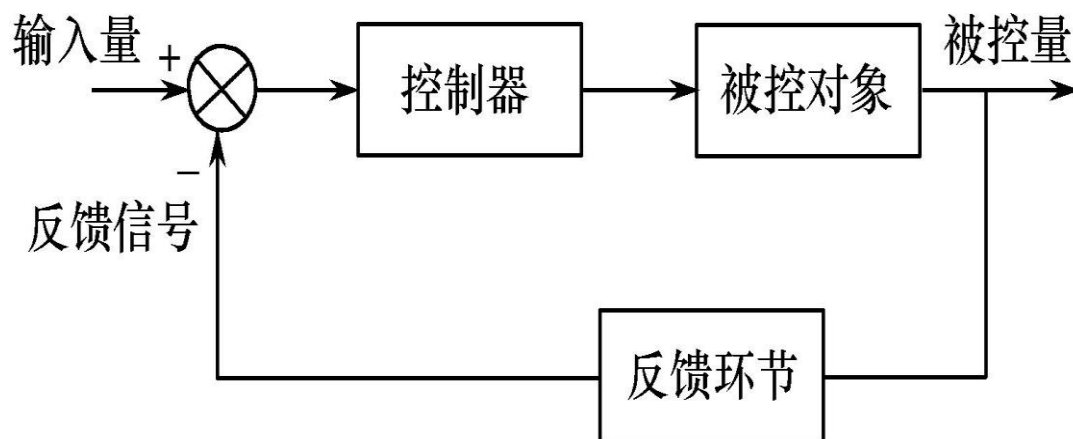
1. 开环控制系统

信号流动由输入端到输出端**单向流动**。



2. 闭环控制系统

若控制系统中信号除从输入端到输出端外，还有输出到输入的反馈信号，则构成**闭环控制系统**，也称反馈控制系统，如图所示。

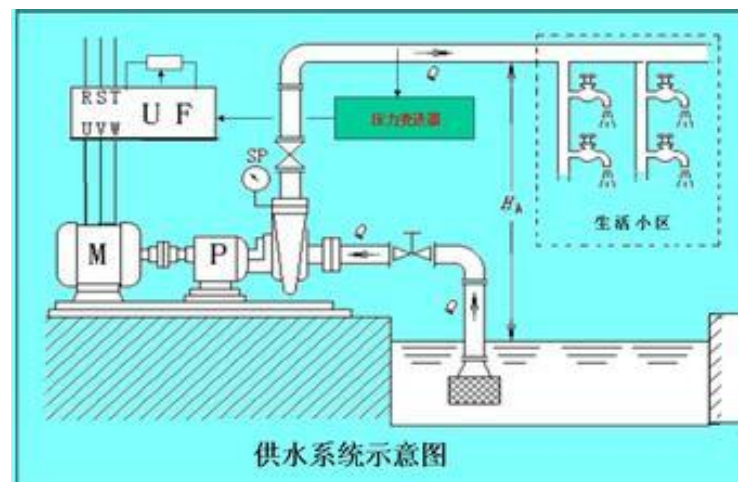


1.6.2 按系统输入信号划分

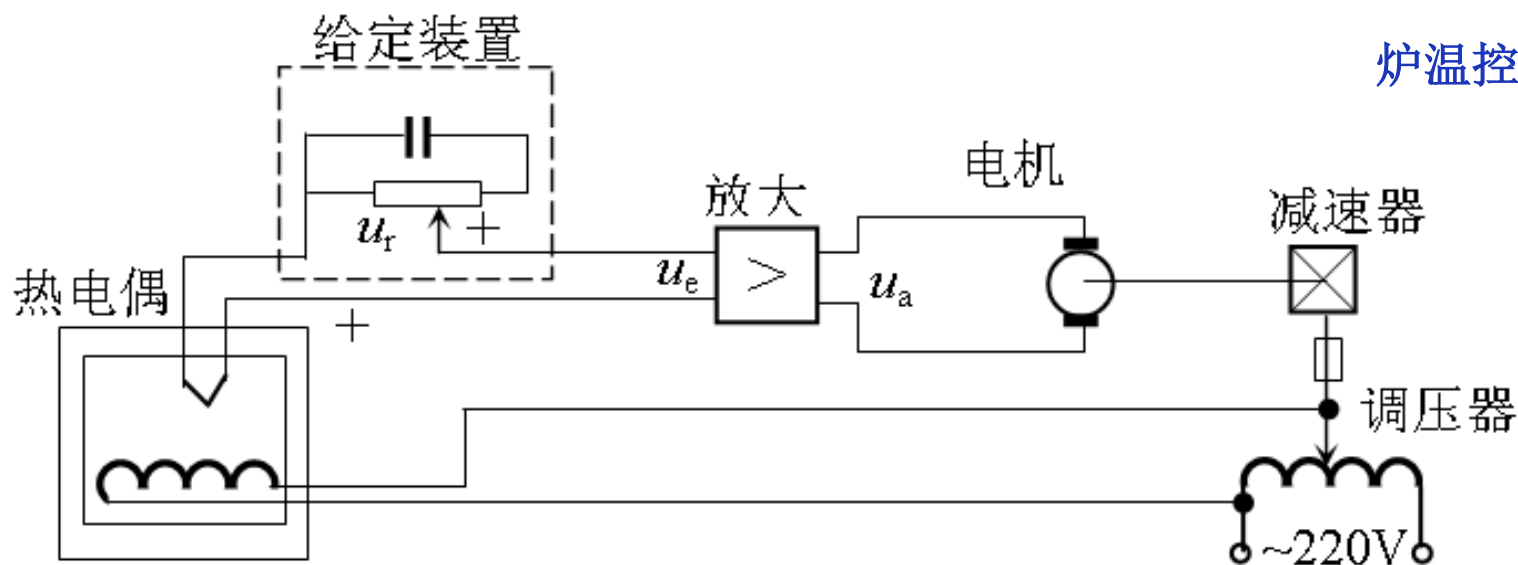
1. 恒值调节系统 (自动调节系统)

系统的特征是输入量为一恒值, 通常称为系统的给定值。控制系统的任务是尽量排除各种干扰因素的影响, 使输出量维持在给定值(期望值)。

如工业过程中恒温、恒压、
恒速等控制系统。

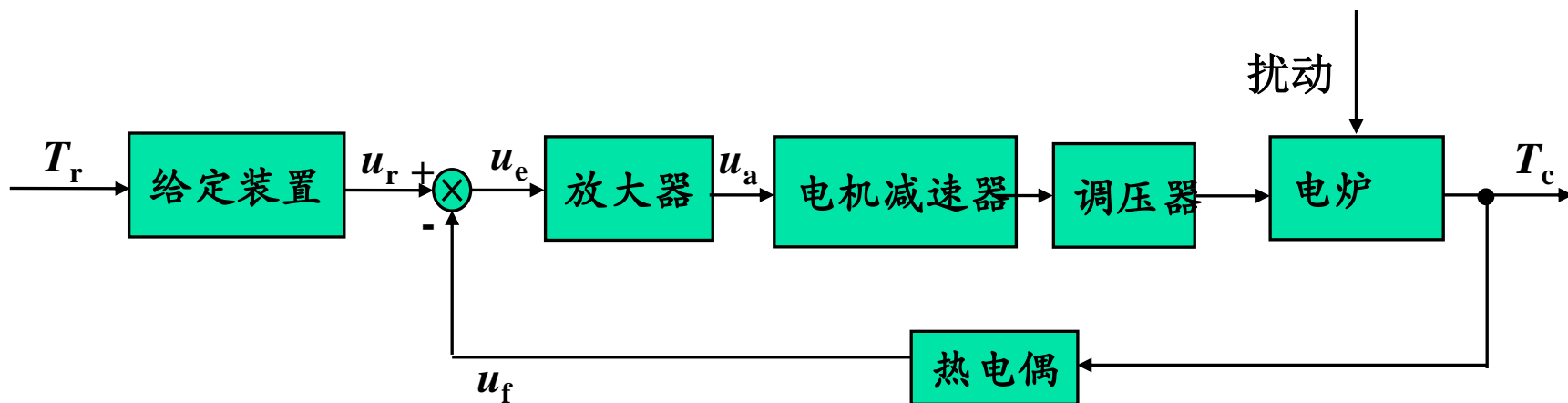


例：炉温控制系统



炉温控制系统的理想温度由电压 u_r 给出，热电偶检测箱温输出电压 u_f ，偏差电压 $\Delta u = u_r - u_f$ ，经电压和功率放大后控制电机的速度和转向，从而改变调压器滑动触头的位置，改变炉温控制系统的外施电压达到恒定炉温的目的。

炉温自动控制系统方框图



原理：即当恒温箱内温度偏高时，使调压器降压，反之升压，直到温度达到给定值为止。此时偏差电压 $u_e=0$ ，电机停转。

温度 T_c 下降， $T_c \downarrow \rightarrow u_f \downarrow \rightarrow u_e = u_r - u_f \uparrow \rightarrow u_a \uparrow \rightarrow$ 电机向增大调压器输出电压的方向加速旋转 $\rightarrow T_c \uparrow \rightarrow u_f \uparrow$ ，直到 $T_c = T_r$ ， $u_e=0$ 。

2. 随动系统 (跟踪系统伺, 服系统)

该系统的控制输入量是一个事先无法确定的任意变化的量，要求系统的输出量能迅速平稳地复现或跟踪输入信号的变化。如雷达天线的自动跟踪系统和高炮自动瞄准系统就是典型的随动系统。



3. 程序控制系统

系统的控制输入信号不是常值，而是事先确定的运动规律，编成程序装在输入装置中，即控制输入信号是事先确定的程序信号，控制的目的是使被控对象的被控量按照要求的程序动作。如数控车床就属此类系统。



1.6.3 线性系统和非线性系统

1. 线性系统

组成系统元器件的特性均为线性的，可用一个或一组线性微分方程来描述系统输入和输出之间的关系。线性系统的主要特征是**具有齐次性和叠加性**。

2. 非线性系统

在系统中只要有一个元器件的特性不能用线性微分方程描述其输入和输出关系，则称为非线性系统。非线性系统还没有一种完整、成熟、统一的分析法。通常对于非线性程度不很严重，或做近似分析时，均可用线性系统理论和方法来处理。非线性系统分析将在第七章专门讨论。

1.6.4 定常系统和时变系统

1. 定常系统

如果描述系统特性的微分方程中各项系数都是与时间无关的常数，则称为定常系统。该类系统只要输入信号的形式不变,在不同时间输入下的输出响应形式是相同的。

2. 时变系统

如果描述系统特性的微分方程中只要有一项系数是时间的函数，此系统称为时变系统。

1.6.5 连续系统和离散系统

1. 连续系统

系统中所有元件的信号都是随时间连续变化的，信号的大小均是可任意取值的模拟量，称为连续系统。

2. 离散系统

离散系统是指系统中有一处或数处的信号是脉冲序列或数码。若系统中采用了采样开关，将连续信号转变为离散的脉冲形式的信号，此类系统称为采样控制系统或脉冲控制系统。若采用数字计算机或数字控制器，其离散信号是以数码形式传递的，此类系统称为数字控制系统。

1.6.6 单输入单输出系统与多输入多输出系统

1. 单输入单输出系统(单变量系统SISO)

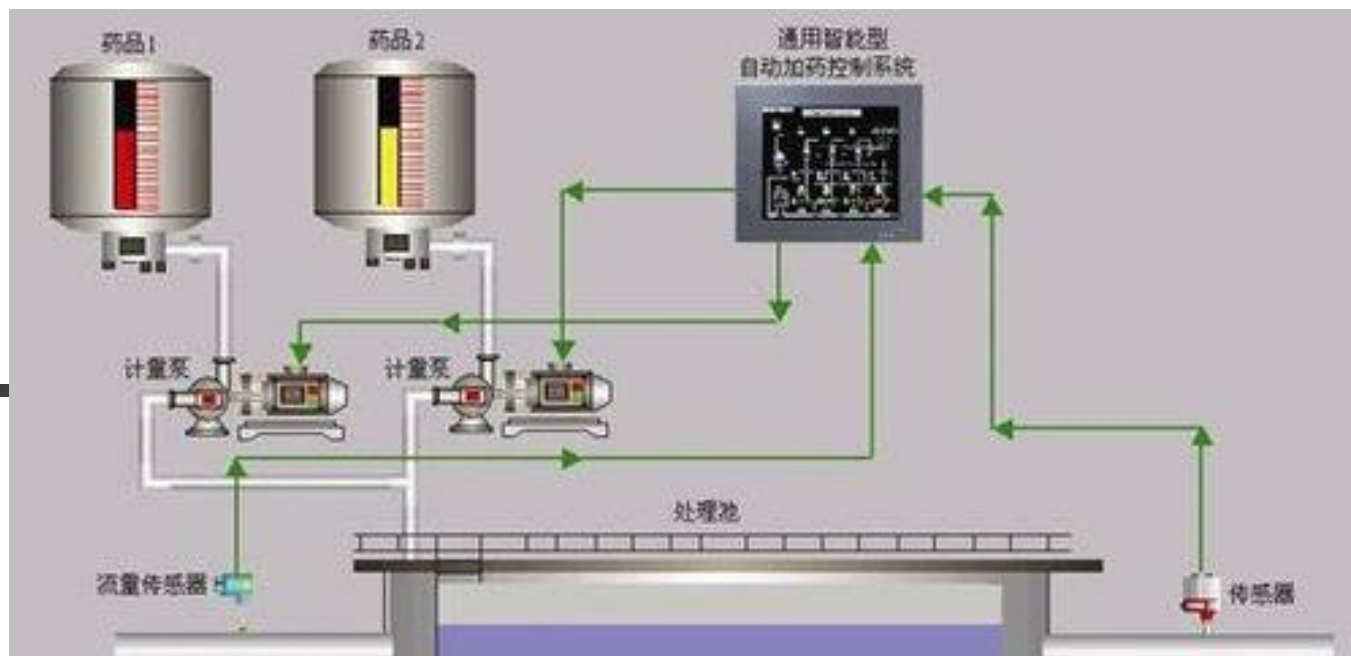
系统的输入量和输出量各为一个，称为单输入单输出系统。

2. 多输入多输出系统(多变量系统MIMO)

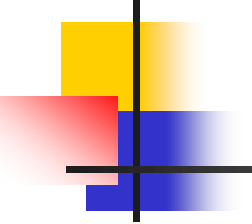
若系统的输入量和输出量多于一个，称为多输入多输出系统。对于线性多输入多输出系统，系统的任何一个输出等于数个输入单独作用下输出的叠加。



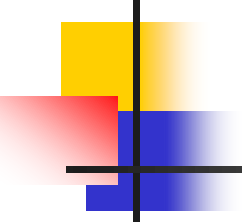
§ 1.7 自动控制系统性能的基本要求



自动控制系统是否能很好地工作，是否能精确地保持被控量按照预定的要求规律变化这取决于被控对象和控制器及各功能元器件的特性参数是否设计得当。



要提高控制质量，就必须对自动控制系统性能提出一定的具体要求。尽管自动控制系统有不同的类型，对每个系统都有不同的特殊要求。但总的说来，都是希望设计的控制过程尽量接近理想的控制过程。工程上常常从**稳、准、快**三个方面来评价自动控制系统的总体精度。

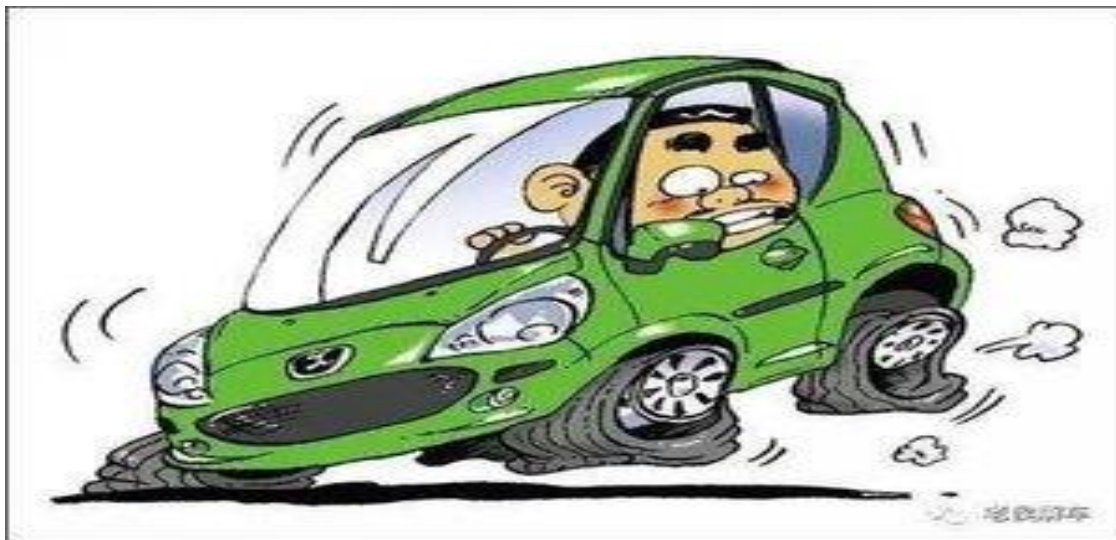


理想情况下，控制系统的输出量应按照事先规定的要求去动作，系统完全无误差，且不受干扰的影响。

实际系统中，由于各种各样原因，系统在受到输入信号(包括扰动信号)的激励时，被控量将偏离输入信号作用前的初始值，经历一段动态过程(过渡过程)，则系统控制性能的优劣，可以从**动态过程**中较充分地表现出来。

■ 1.7.1 稳定性（稳）

稳定工作是所有自动控制系统的**最基本要求**，是系统能否工作的前题。不稳定的系统根本无法完成控制任务。考虑到实际系统工作环境或参数的变动，可能导致系统不稳定，因此，我们除要求系统稳定外，还要求其具有一定的**稳定裕量**。





1. 稳——指控制系统的稳定性和平稳性。

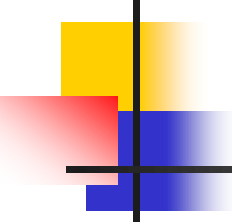
◆**稳定性**——指系统重新恢复平衡状态的能力，它是自动控制系统正常工作的先决条件。一个稳定的控制系统，其被控量偏离期望值的初始偏差应随时间的增长逐渐减小至稳态值或趋于零。

◆**平稳性**——指过渡过程振荡的振幅与频率。即被控量围绕给定值摆动的幅度和摆动的次数。好的过渡过程摆动的幅度要小，摆动的次数要少。

1.7.2 稳态精度(准)

稳态精度是指系统过渡到新的平衡工作状态以后，或系统对抗干扰重新恢复平衡后，最终保持的精度。稳态精度与控制系统的结构及参数，输入信号形式有关。



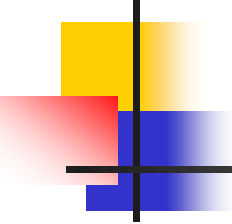


2. 准确性——是指系统在过渡过程结束后，**偏差的最终值的大小，称为稳态误差**，它是衡量系统稳态精度的重要指标。稳态误差越小，表示系统的准确性越好，被控量（输出量）的期望值与实际值之间的差值就越小。

1.7.3 动态过程(好)

动态过程是指控制系统的被控量在输入信号作用下随时间变化的全过程,衡量动态过程的品质好坏常采用单位阶跃信号作用下过渡过程中的超调量, 过渡过程时间等性能指标。





3. 快速性——即过渡过程继续的时间长短。过渡过程越短，说明系统快速性越好，过渡过程持续时间越长，说明系统响应迟钝，难以实现快速变化的指令信号。



§ 1.8 自动控制课程的主要任务

本课程的主要内容是阐述**构成、分析和设计自动控制系统的基本理论**。对实际系统，建立研究问题的数学模型，进而利用所建立的数学模型来讨论构成、分析、综合自动控制系统的基本理论和方法。

作为研究自动控制系统分析与综合的方法来说，对单输入单输出系统常采用的是**时域法，频域法，根轨迹法以及目前广泛应用的计算机辅助设计**。

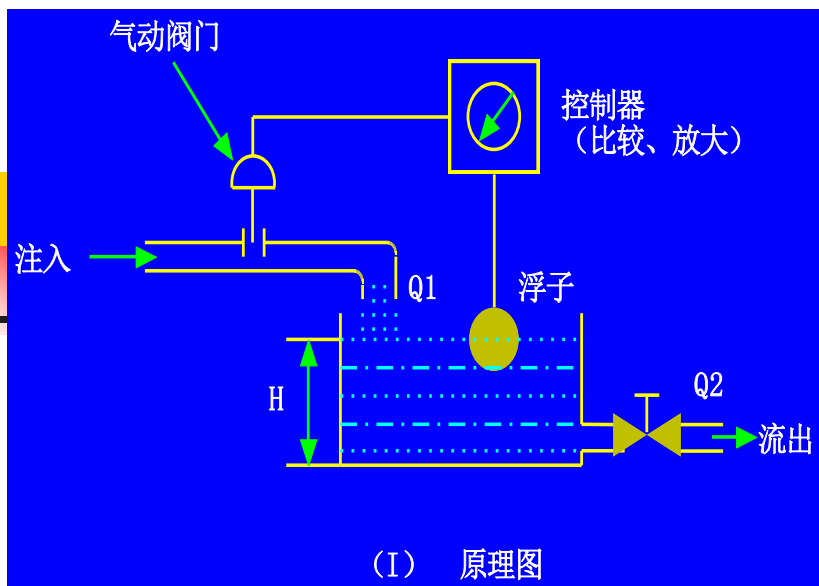
§ 1.8 自动控制系统实例



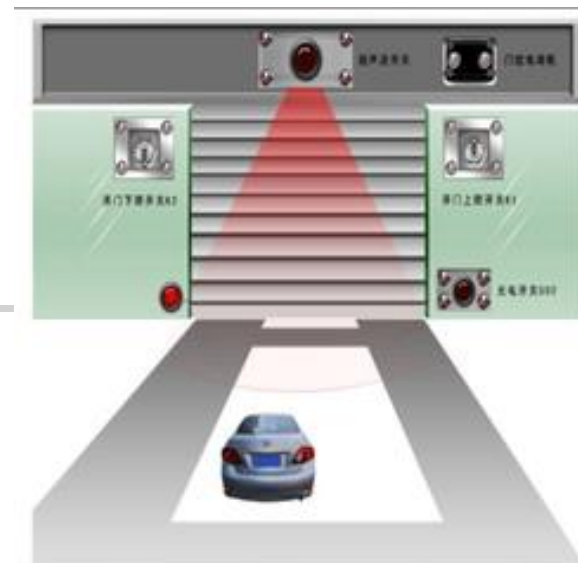
造纸机分部传动控制系统



烘烤炉温度控制系统



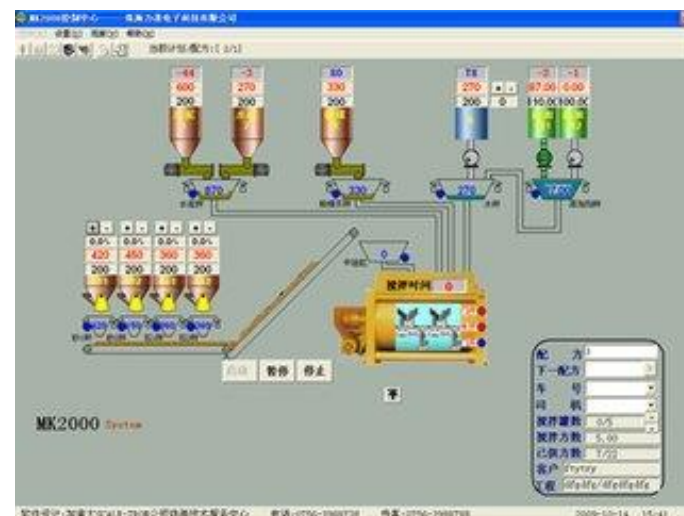
水箱水位控制系统



车库自动门控制系统



污水处理控制系统

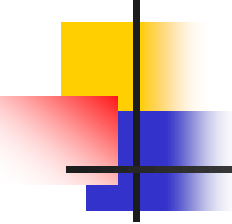


配料自动称重系统



本章小结

- 1、通过自动控制系统的实例了解自动控制的定义，并了解控制对象，系统输入量、被控量、控制装置以及控制系统等概念。
- 2、控制系统按是否存在反馈分为开环控制系统和闭环控制系统。闭环控制系统即反馈控制系统，其主要特点是系统输出量经测量后返送到系统输入端构成闭环，并由偏差产生控制作用使被控量朝减少偏差，消除偏差的方向运动。因而有较高的控制精度。
- 3、根据控制系统的工作原理及各元件信号的传送方向，可画出控制系统的方块图。方块图是分析控制系统的基础。



4、自控系统有各种分类方法。若按系统给定输入信号的时间特性进行分类，可分为恒值系统，随动系统和程序控制系统。

5、对自控系统的基本要求：系统必须是稳定的；系统的稳态控制精度要高，即稳态误差要小；系统的动态性能要好，即系统的单位阶跃响应过程要平稳，响应过程要快。



作业1

1. 以同等精度元件组成的开环系统和闭环系统，其精度_____。
(A) 开环高 (B) 闭环高 (C) 一样高 (D) 相差不多
2. 系统的输出信号对控制作用的影响_____。
(A) 开环有 (B) 闭环有 (C) 都没有 (D) 都有
3. 对于系统抗干扰能力_____。
(A) 开环强 (B) 闭环强 (C) 都强 (D) 都不强
4. 试比较开环系统闭环系统的优缺点。
5. 举出两个身边控制系统的例子，试用方块图说明其基本原理，并指出是开环控制还是闭环控制。