



自动控制原理

张爱民

自动化科学与工程学院

Address: 东二楼 自动控制研究所 167房间

Email: zhangam@mail.xjtu.edu.cn



一、学习该课程要求

1. 一本教材 ★
2. 二个本子
3. 三个“尽量”：**复习、答疑、做作业**

二、考核要求

1. 平时成绩 (20%)
包括：作业、课堂表现、SPOC线上学习
2. 期末成绩 (80%)

线上学习登陆指南



三、本课程的4项基本任务

1. 掌握**反馈控制**的基本概念；
2. 掌握基于物理规律的**系统建模**、基于Matlab、Simulink的**数字建模与仿真分析**的方法；
3. 掌握**系统分析**方法：能够利用时域法、根轨迹法、频域法，分析系统的稳定性、瞬态性能、稳态性能；
4. 掌握**系统设计**方法：通过控制器的设计，使系统性能满足期望的性能指标。



四、控制理论课程的重要性

1. 自动控制原理课程是**所有**后续**控制类课程**的**先修课程**。
2. 人工智能与控制理论的关系。

1) 二者的核心目标：相同

“使系统或机器具备自主适应和处理复杂任务的能力”，只是控制理论更侧重**“稳定控制”**，人工智能更侧重**“智能决策”**。

2) 二者的关系：相互融合、相互支撑

- **控制理论为AI提供基础框架**。许多AI算法（如强化学习）的实现依赖控制理论中的系统建模、稳定性分析等工具。
例如，强化学习通过与环境的交互来优化决策策略，其背后需要控制理论来保证学习过程的收敛性和系统稳定性；
- **AI拓展控制理论的应用边界**。传统控制理论依赖精确的数学模型，而AI（如模糊控制、神经网络控制）能处理模型未知、非线性、强干扰的复杂系统。

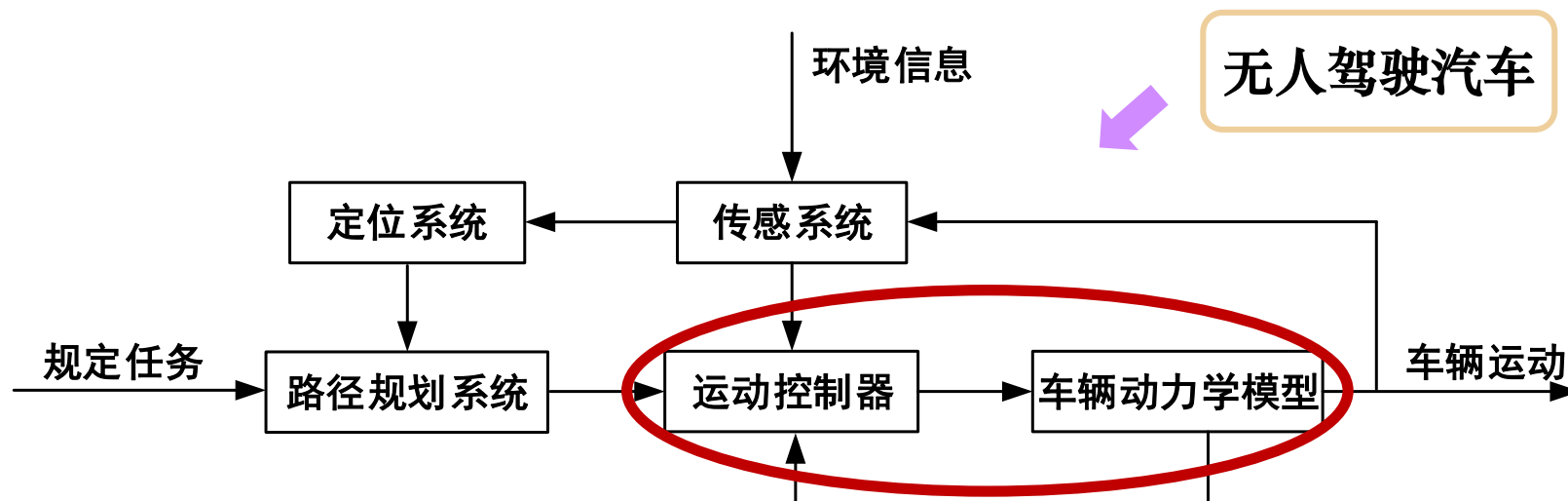


四、控制理论课程的重要性

总之，**控制理论**是AI实现物理世界交互的“**执行基础**”，而**AI**为**控制理论**提供了应对复杂、不确定场景的“**智能工具**”，二者协同推动了自动化、机器人、智能系统等领域的发展。

人工智能主要是加强了信息的获取、信息处理；主要解决的是控制系统的**建模、感知、规划**的问题。

人工智能提高了控制的能力，扩展了控制的应用范围。





四、控制理论课程的重要性

3. 目前，**控制理论在实际工控系统中依然应用广泛。**

尤其在电力系统中，控制系统的**分类方法、时域、频域分析法、设计方法**，在电力系统中应用广泛；带有PID控制策略的反馈控制应用普及。

电力系统是人造的最复杂系统，建模困难；电力系统又恰恰对稳定性和鲁棒性要求极高。

反馈控制能够提高系统的抗干扰能力，使得**带有PID反馈控制在电力系统中能够解决大部分的问题。**

不管反馈控制如何变形，也不管PID如何改进，都是以最基本的反馈控制为基础的，也即是**以控制理论课程为基础的。**



四、控制理论课程的重要性

4. 依据课程特色，启发思维模式

1) **反馈**的思维方式

用“反馈”的思维方式来纠偏，会更快、更准确的达到期望目标。

2) 从**系统**地角度思考问题

无论是从系统建模、系统性能分析，还是控制器的设计，都是从整个系统的角度来考虑问题的。

3) **抓住主要矛盾**，忽略次要因素

使用的数学模型都是在忽略某些次要因素之后得到简化的数学模型；闭环主导极点：分析高阶系统时，都是按照闭环主导极点降阶，忽略掉次要因素，将复杂问题简单化。

4) 接受“不完美”，**折中处理问题**的思想

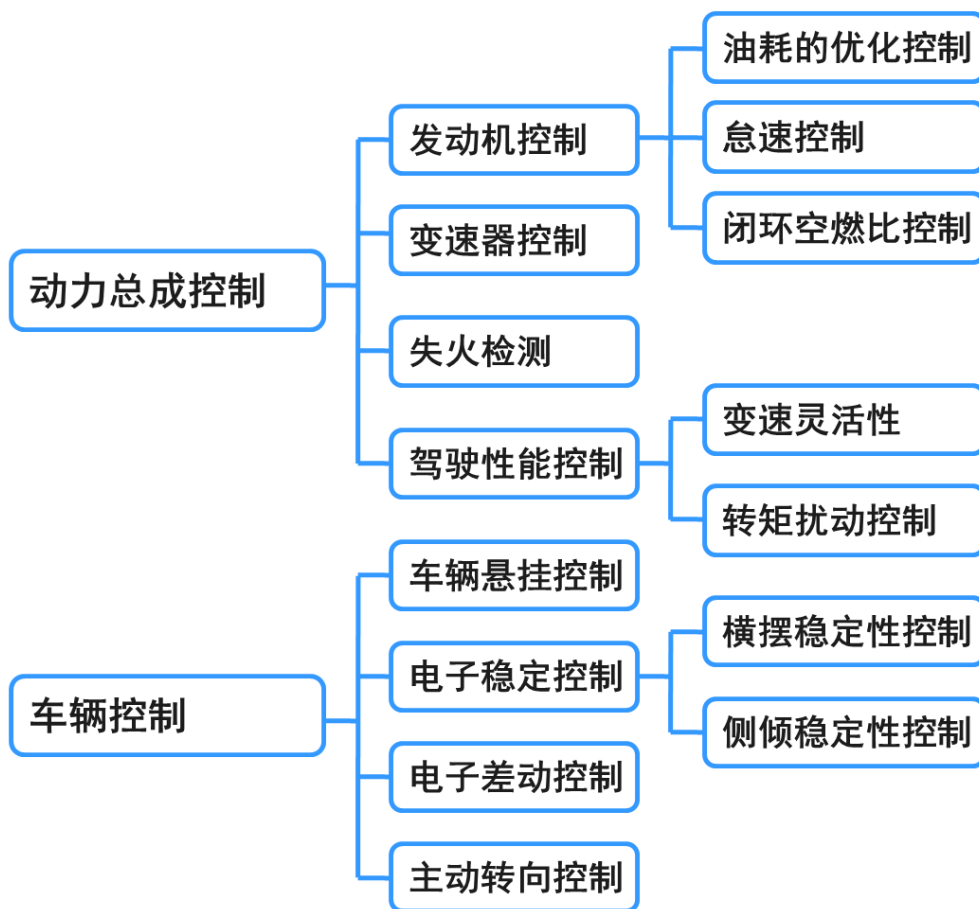
在控制器设计时，经常不能同时满足系统的稳定性、瞬态性能、稳态性能的指标要求，只能折中处理。



工程应用实例1：汽车控制

——来源于课程组教师翻译的《控制系统的行业应用》专著

汽车的专业？ 机械工程学院：车辆工程；能动学院：汽车工程



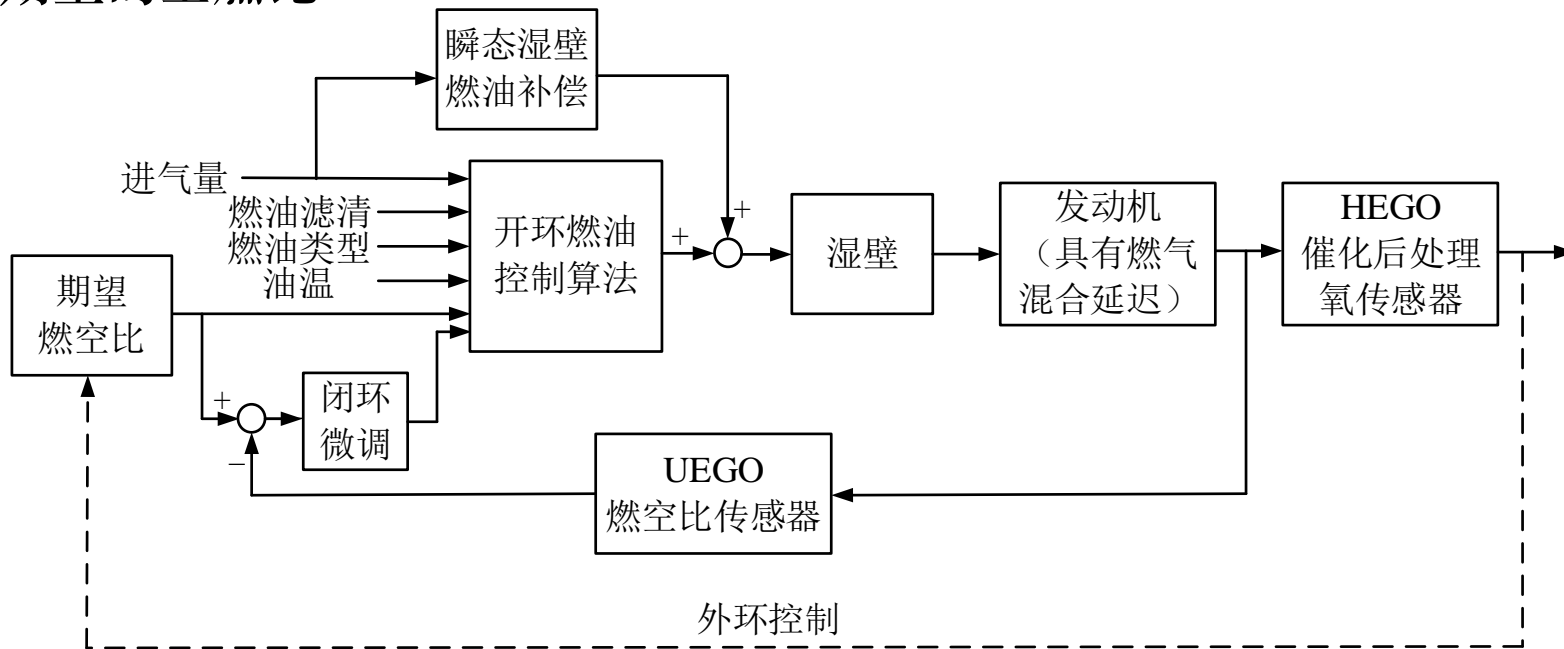
- 怠速控制和燃空比控制中的**反馈控制**
- 阻尼传动系统振荡中的**反馈设计**
- 改善动力总成系统的瞬态特性发动机中的**前馈扰动抑制方法**

汽车燃空比的闭环控制：

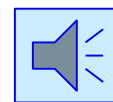
——来源于课程组教师翻译的《控制系统的行业应用》专著

为了使燃空比保持在期望的化学计量附近，汽车发动机的燃油控制系统结构图采用了**前馈—反馈相结合的复合控制系统**，有两个反馈回路。

内反馈控制器调节燃油喷射量；外反馈控制器向内反馈回路提供调节过的期望的空燃比。

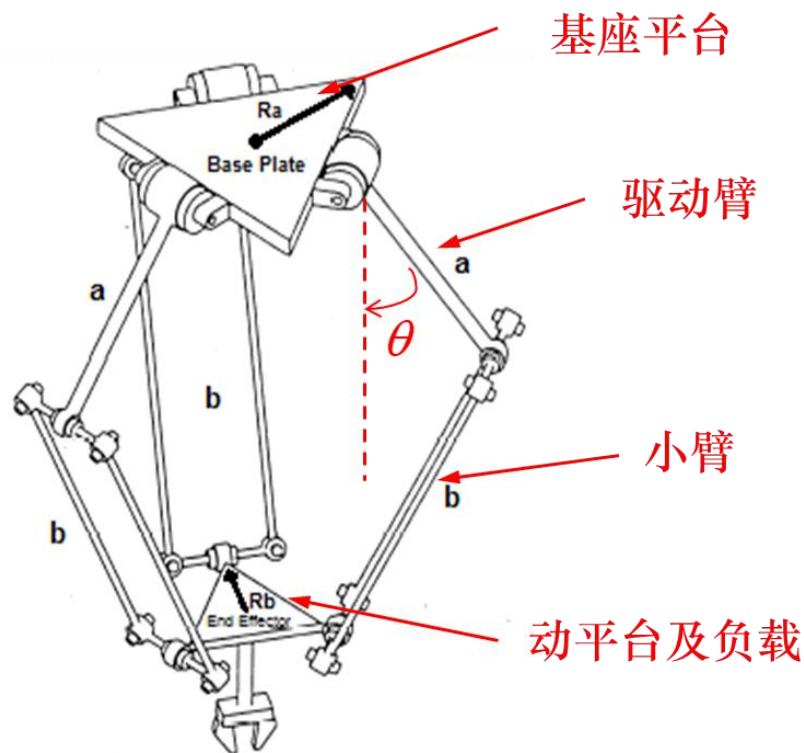


工程应用实例2: Delta机器人的控制



——来源于课程组教师的科研项目

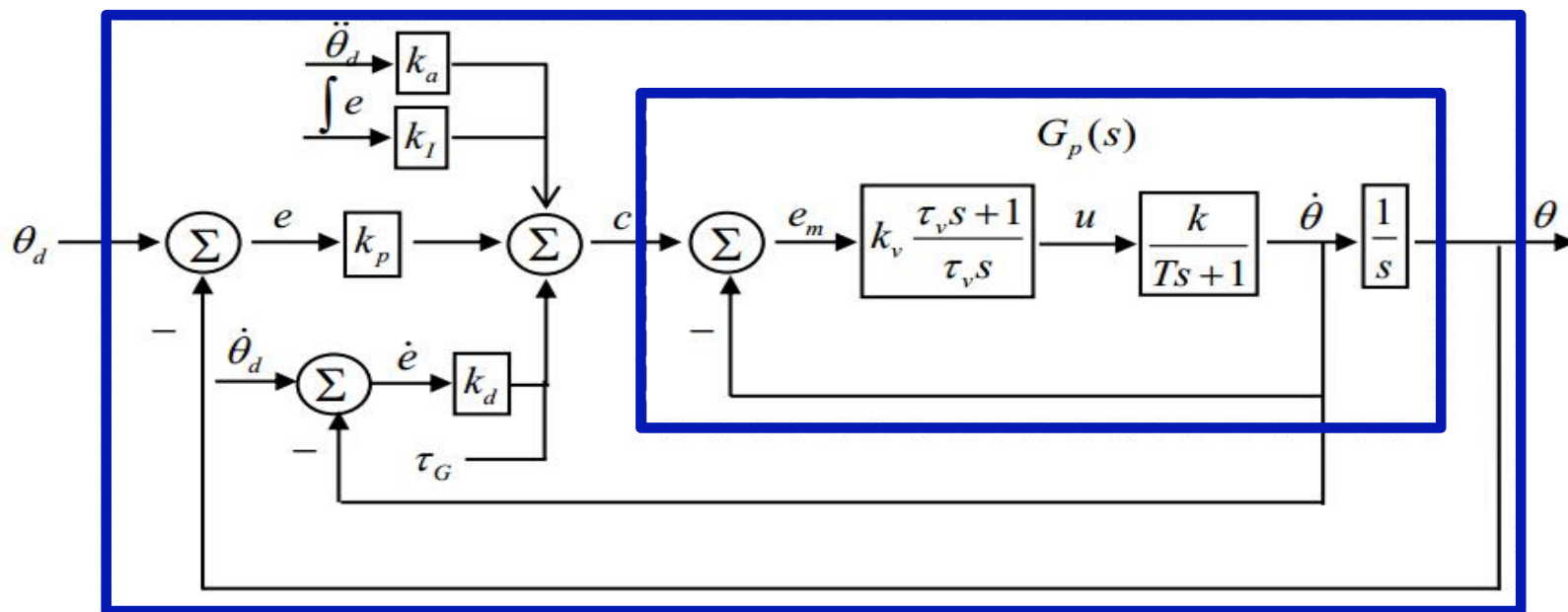
上位机将机器人需要抓取的轨线点，通过轨线规划和逆向运动学雅可比矩阵等，将其转换为电机的角速度和角位移的期望值。由4个伺服电机驱动，在运动控制器中，对电机的位置和速度进行控制。





运动控制器设计

- 目标：对位置、速度进行实时控制，以减小点定位时的**稳态误差**和**调整时间**，同时尽量减小轨线**跟踪误差**。
- 结构：**内环PI环节控制器**对角速度进行调节；**外环PID控制器**对角位移进行调节。



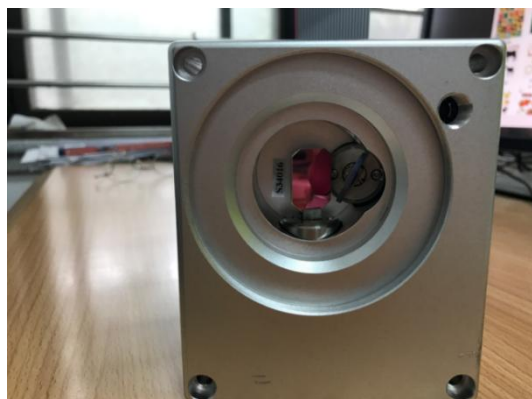
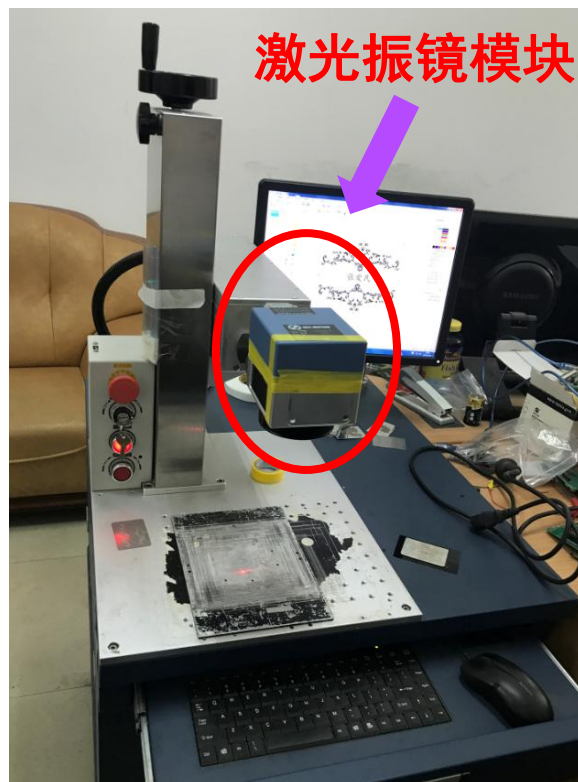


工程应用实例3：激光打标机

——来源于课程组教师的科研项目



- 两个激光反射镜由两个无刷电机带动
- 每个电机三个反馈控制回路：电流回路、位置回路、速度回路



难度：高精度

$1\text{丝} = 10\mu m$

控制策略：

复合PID控制



第1章 绪论

- 1.1 自动控制的基本概念
- 1.2 开环控制与闭环控制系统
- 1.3 自动控制系统的分类
- 1.4 自动控制原理的研究内容和对系统的基本要求
- 1.5 控制理论的发展简史



1.1 自动控制的基本概念

控制 (Control)

日常生活

房屋的室内温度
汽车的方向和速度
洗衣机
扫地机器人

In daily life

Temperature control in a house
Speed and direction control of an automobile
Control of a washing machine

经济
领域

国家收入控制
立法控制
税率控制

In economic
system

National income control
Legislative control
Control of the tax rate



工业
生产

发电厂污染物控制
电网电压
电机转速
锅炉的温度和压力
物流上仓储机器人的控制

被控对象: controlled process
被控变量: controlled variables

生物
工程

人体温度和血压
假手（或人工手）的控制





控制： 控制是指为了达到期望的**目标**，而对被控制对象中的某一个(或某些)物理量进行的**操作**。

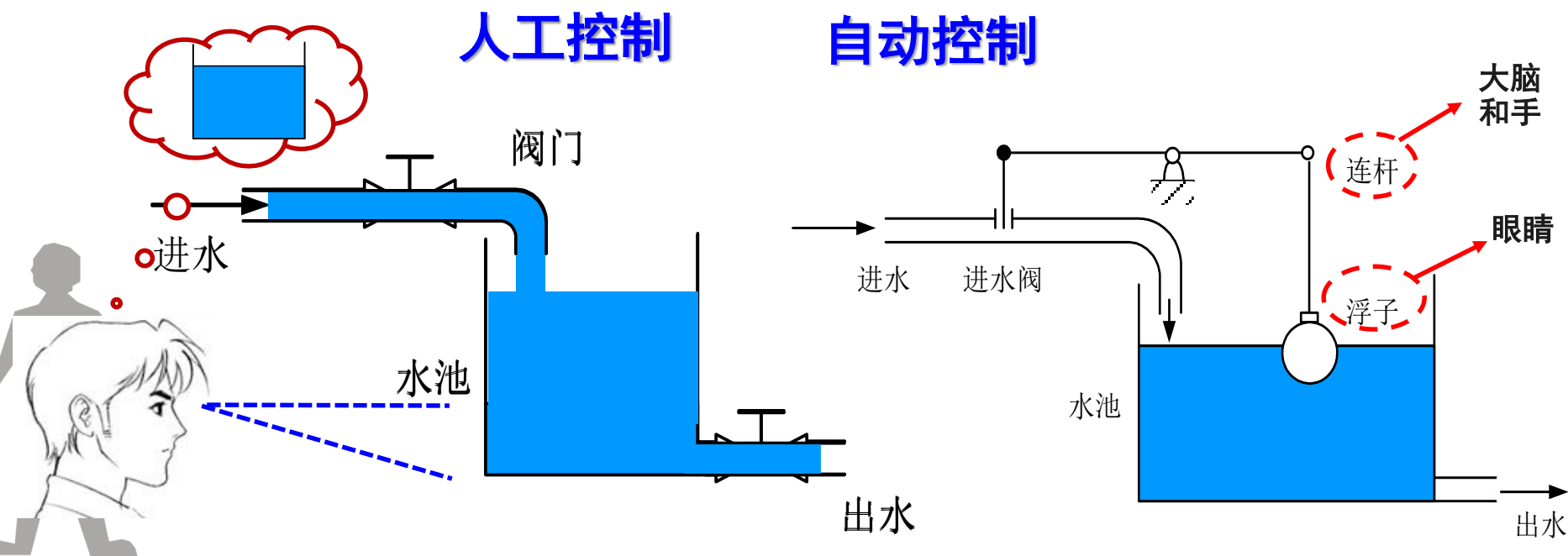
Control: Control can be defined as the operation to a certain (or some) variables of a given process to meet specifications.

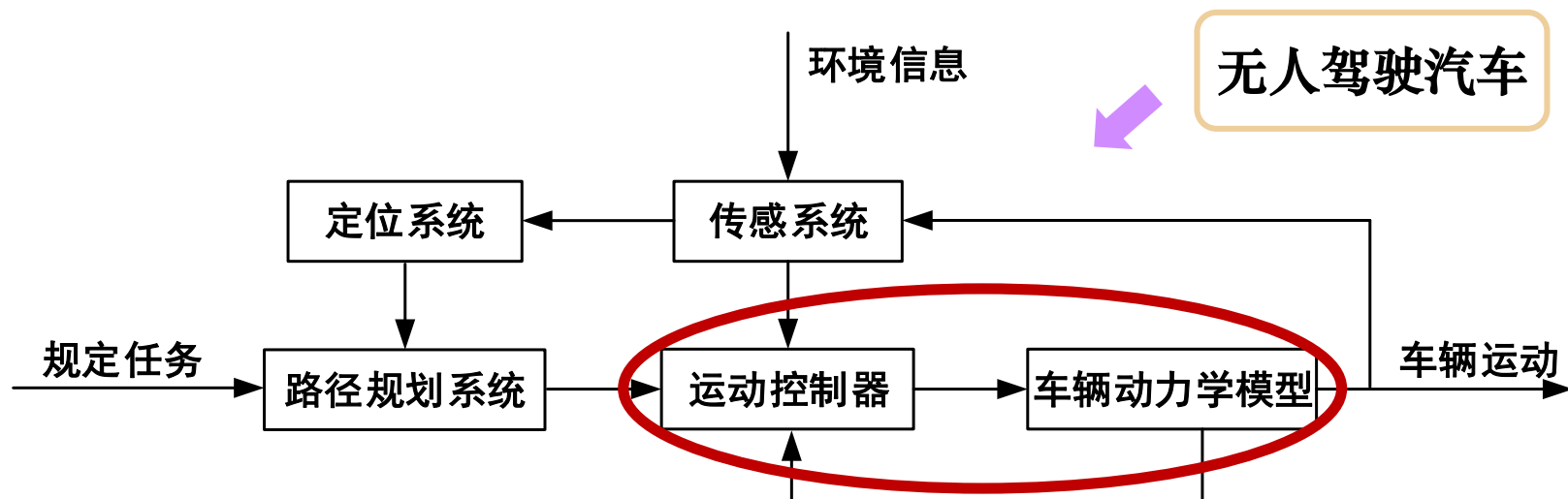


人工控制： 若由人来完成对被控量的控制

自动控制： 若由自动控制装置代替人来完成这种操作

例：人工控制的恒值水位系统







自动控制和人工控制的区别在于：

在自动控制系统中某些装置被有机地组合在一起，代替了人工控制系统中的人的功能。由于这些装置担负着控制的功能，通常称之为**控制器**。



The difference between automatic control and manual control:

Some devices combined together in automatic control system take the place of human beings in the manual system. The devices can be called as **controller** for its function of controlling.



自动控制可定义为：在无人参与的情况下，利用外加的设备或装置(称自动控制装置或控制器)使整个生产过程或工作机械(称被控对象)自动地按预定规律运行，或使其某个参数(称被控制量)按预定的要求变化。

Automatic control can be defined as: The whole process or the work of machinery (controlled object) is operated in some prescribed manner by the inputs through the additional equipments or devices (or controller) in the case of nobody getting involved.

自动控制系统可定义为：由被控对象和控制器按一定方式连接起来，以完成某种自动控制任务的有机整体。

A control system can be defined as: A control system is an interconnection of components forming a system configuration that will provide a desired system response .

1.2 Open-loop and Closed-loop control systems

1.2.1 开环控制系统

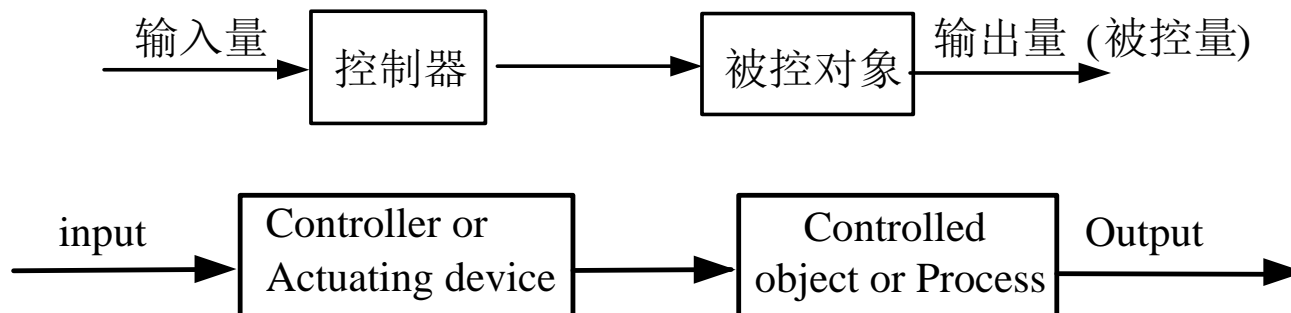
Open-loop control systems

定义：输出量（即被控量）对系统的控制作用无任何影响的控制系统。如洗衣机，数控机床等等。

Definition: An Open-loop control system utilizes an actuating device to control the process directly without using feedback. For example washing machine, NC machine tool

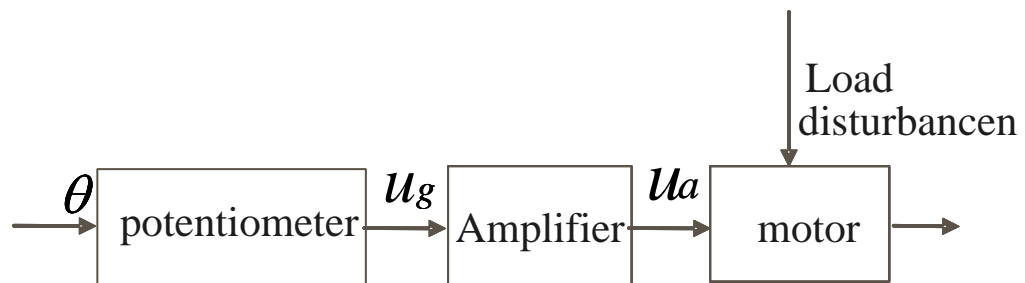
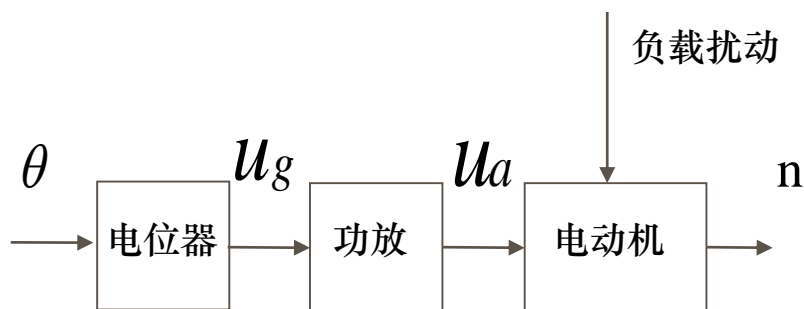
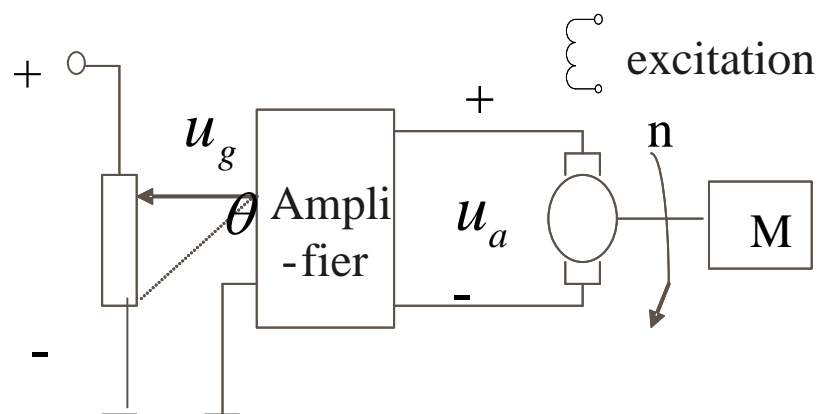
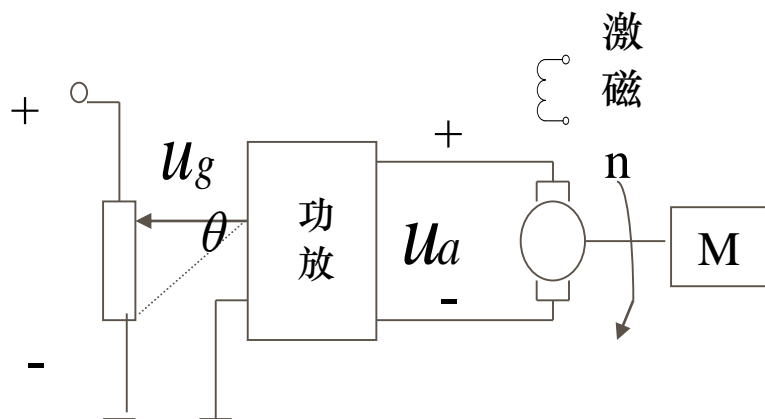
开环控制系统结构图：

The component block diagram of open-loop control systems



例：转速控制系统

e.g. Speed control system



开环控制系统的缺陷？



1.2.2 闭环控制系统

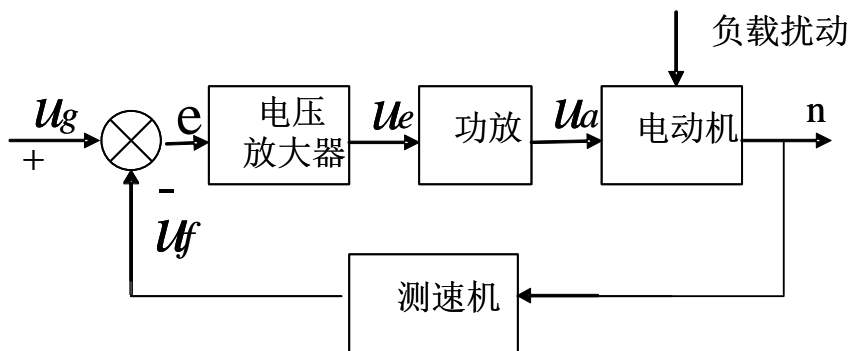
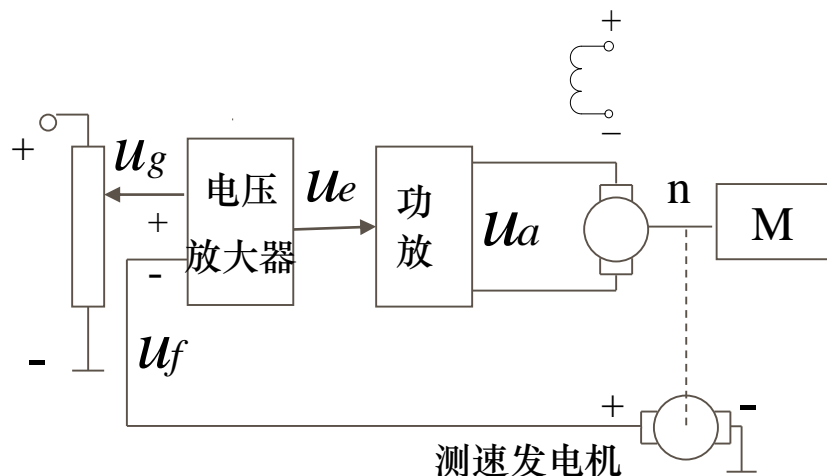
注意：控制量与被控变量的区别

定义：控制器与被控对象之间，不仅存在着正向作用，而且存在着反馈作用的控制系统，即系统的输出信号对**控制量**有直接的影响的系统。

Definition: A **closed-loop control system** uses a measurement of the output and feedback of this signal to compare it with the desired output.

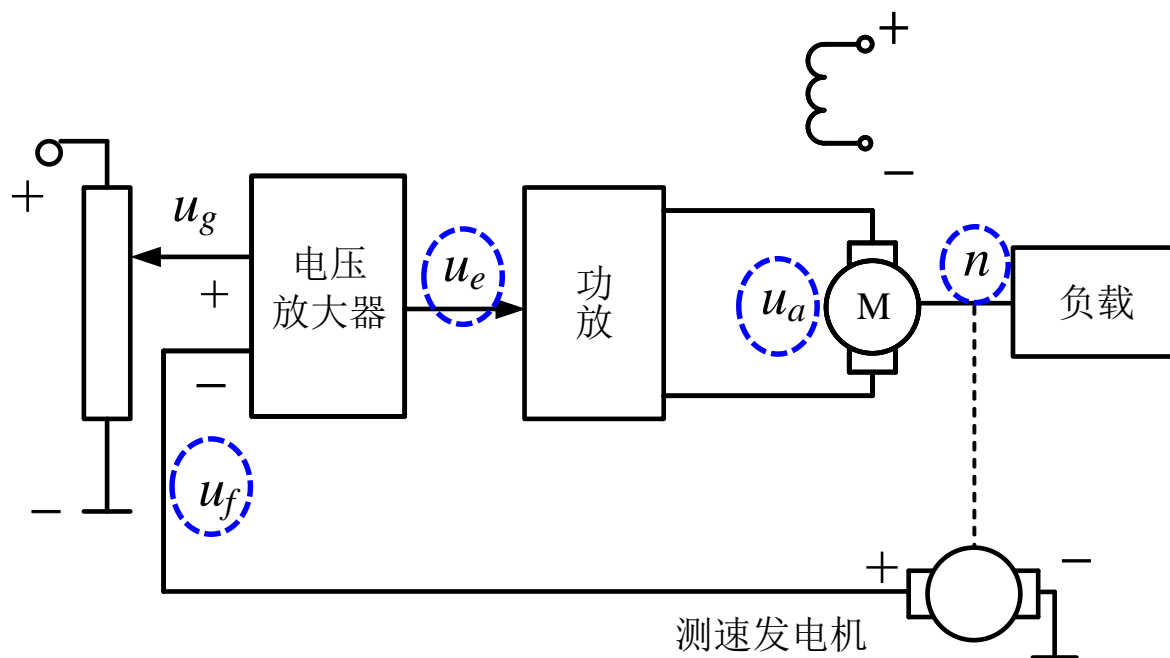
e.g. Speed control system (closed-loop control system)

例：转速控制系统（闭环控制系统）





控制系统真的能提高系统的抗干扰能力吗？



$$n \downarrow \rightarrow u_f \downarrow \rightarrow e = u_g - u_f \uparrow \rightarrow u_e \uparrow \rightarrow u_a \uparrow \rightarrow n \uparrow$$

可见，该系统可以自动地进行转速调节，以减小或消除偏差。
对于其他因素造成的转速变化，系统也可自动进行调节。



闭环控制的实质：利用负反馈的作用来减小系统误差。

The main idea of closed-loop control : Reduce the system error with negative feedback

自动控制的工作原理：通过**测量**，**比较**得到系统**偏差**，由偏差产生**控制**作用，由控制作用使偏差消除或减少，使被控量趋近于要求值。因此，**闭环控制系统**又称为**反馈**控制系统、**偏差**控制系统，以及**调节**系统。

The principle of automatic control: By using the measurement of the output signal and comparing it with the desired output to generate an error signal which is used to control the process, the difference between the output of the process and the reference input is continually reduced. **A closed-loop control system is also known as a negative feedback control system, an error control system, or as a regulator system.**



1.2.3 开环控制系统与闭环控制系统的比较

开环控制系统的优点：

The advantages of open-loop control systems:

- 构造简单，维护容易。
- 成本比相应的闭环系统低。
- 当输出量难于测量，或者要测量输出量在经济上不允许时，采用开环系统比较合适。

- Simplicity
- Low cost
- Suitable for this kind of situation where the output is difficult to measure, or is expensive to measure

开环控制系统的缺点：

The disadvantages of open-loop control systems:

- 抗干扰能力差，开环控制精度不是很高。

- Low accuracy

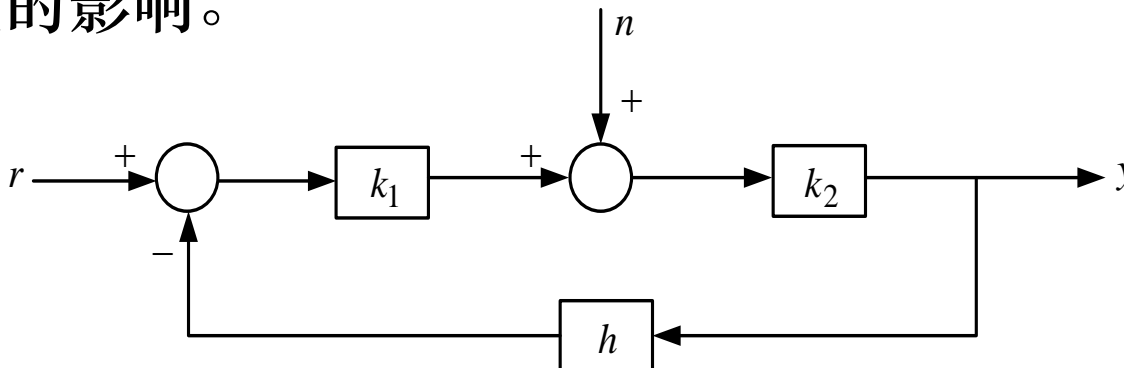


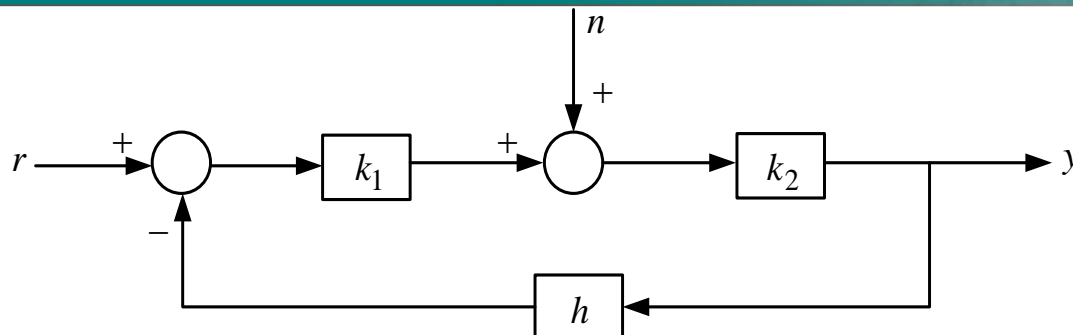
闭环控制的优点:

- 闭环控制系统是利用负反馈的作用来减小系统误差的。
- 闭环控制系统能够有效地抑制被反馈通道包围的前向通道中各种扰动对系统输出量的影响。

The advantages of closed-loop control systems:

- Negative feedback is used to reduce the error between the reference input and the system output
- Negative feedback can reduce the effect of noise and disturbance on system performance.





当系统是开环控制系统，并且输入为零时，有 $y = k_2 n$

而对于闭环控制系统，当输入为零时，有 $y = \frac{k_2}{1 + k_1 k_2 h} n$ 

由此可知，在闭环控制系统中由扰动引起的输出部分被减小了 $(1 + k_1 k_2 h)$ 倍，也即闭环控制系统具有抑制扰动的能力。

In an open-loop control system, $y = k_2 n$ on the condition of zero-input; however, under the same condition, the output in a closed-loop control system will be $y = \frac{k_2}{1 + k_1 k_2 h} n$

It can be seen that, the output caused by the disturbance in a close-loop control system has been reduced by factor $(1 + k_1 k_2 h)$. In other words, the closed-loop control system has the ability to reduce the effects of disturbance and noise inputs.

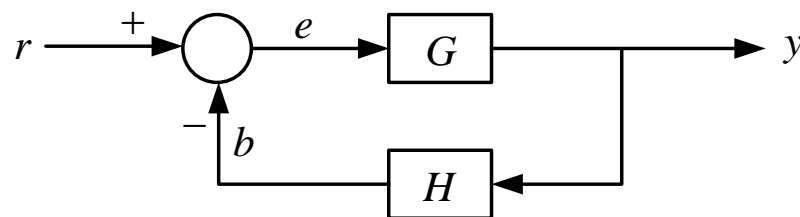
- 闭环控制系统可以减小前向通道的参数变化对输出量的影响。也即减少系统总传递函数对前向通道参数变化的灵敏度。

灵敏度定义：

- The closed-loop control system can decrease the **sensitivity** of the gain of the overall system M to the variation in G . The sensitivity of M for G is defined as:

$$S_G^M = \frac{\partial M / M}{\partial G / G}$$

$$S_G^M = \frac{\partial M}{\partial G} \cdot \frac{G}{M} = \frac{1}{1 + GH}$$



$$M = \frac{y}{r} = \frac{G}{1 + GH}$$



总传递函数对反馈通道参数变化的灵敏度？



Drawbacks of the feedback control system :

- 很显然，由于增加了反馈通道，使闭环控制系统增加了元器件的数目和系统的复杂程度。
- 闭环控制系统用增益的损失换取了系统对参数变化和干扰灵敏度的降低，亦即换取了对系统响应的控制能力。

对于开环控制系统，开环增益为 G 。单位反馈控制系统的闭环增益为 $\frac{G}{1+G}$ 。

- Apparently, as feedback is added, **more components** are used, so the system becomes more complex.
- Feedback may increase the gain of a system in one frequency range but decrease it in another.
Suppose the **gain of an open-loop control system** is G , then the gain of a unity feedback closed-loop control system is $G/(1+G)$.



带来的一些问题：

- 闭环控制系统带来了系统稳定性问题。对于开环控制系统，只要被控对象稳定，系统就能稳定地工作。而在闭环控制系统中，输出信号被反馈到系统输入端，与参考输入比较后形成偏差信号，控制器再按照偏差信号的大小对被控对象进行控制。在这个过程中，**由于控制系统的惯性**，可能**引起超调**，造成系统的等幅或增幅振荡，使系统变成不稳定，从而产生了闭环控制系统的**稳定性问题**。关于稳定性问题详见第三章。

Some problems :

- Feedback can cause a system that is originally stable to become unstable. For an open-loop control system, if the controlled object is stable, then the system will be stable. But in a closed-loop control system, the output signal is fed back to the input of the system to be compared with the input signal to form an error signal, on which the controller depends to control the controlled object. In this process, the system inertial may cause an overshoot. As a result, the system may oscillate with a stable or increasing amplitude, so that the problem related to the **stability** of closed-loop control system appears, which will be particularly described in chapter 3.



1.2.4

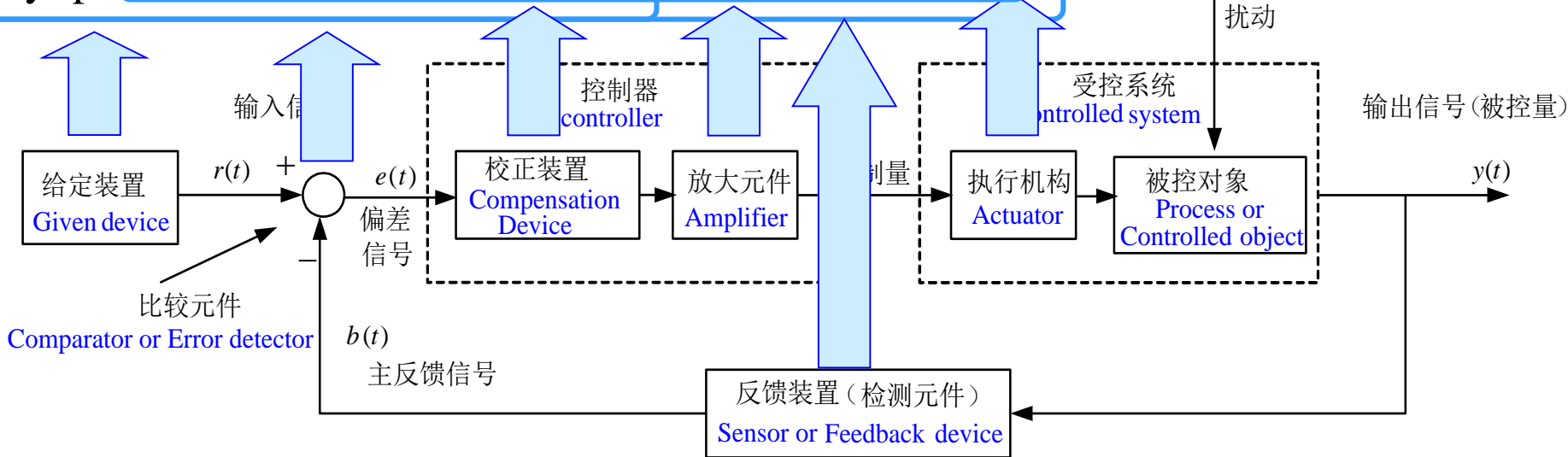
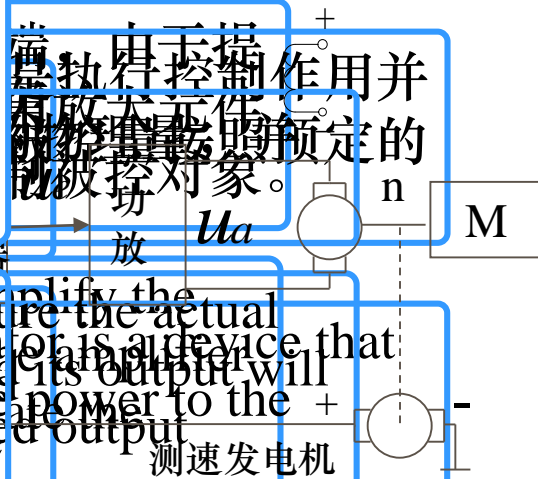
给定装置
输出信号
与反馈信号
进行比较

校正装置：其功能是对偏差信号进行加工处理和运算，以形成合适的控制作用，或形成适当的控制规律，从而使系统的被控量按预定的规律变化。

比较元件
Comparator or Error detector

Controller: The controller is used to measure the actual value of the system and compare it with the reference value to form an error signal. The error signal is then processed by the controller to produce a control signal. The control signal is used to cause the process to produce the desired output. The output of the process is then measured and fed back to the controller to correct the error.

Amplifier: An amplifier is used to amplify the control signal. The amplified signal is then used to drive the actuator. The actuator is used to drive the process to produce the desired output. The output of the process is then measured and fed back to the controller to correct the error.





- 给定装置：

其功能是给出与期望的被控量相对应的系统输入量（即参考输入信号或给定值）。

- 比较元件：

其功能是将检测元件测量到的被控量的实际值，与给定装置提供的给定值进行比较，求出它们之间的偏差。



- Given device

A given device is used to provide a reference signal that is proportional to the desired output.

- Comparator or Error detector

A comparator is used to compute the difference between the reference signal and the sensor output to give the controller a measure of the system error.



- **放大元件：**

比较元件通常位于低功率的输入端，由于提供的偏差信号通常很微弱，因此须用放大元件将其放大，以便推动执行机构去控制被控对象。如果偏差是电信号，则可用集成电路和晶闸管等元器件所构成的电压放大器和功率放大器来进行放大。

- **执行机构：**

其功能是执行控制作用并驱动被控对象，使被控量按照预定的规律变化。

- **Amplifier**

An amplifier is used to amplify the weak error signal and the output of the amplifier is used to cause the actuator to modulate the process in order to reduce the error. If the error signal is an electrical one, the voltage amplifier and power amplifier which consists of integrated circuits and thyristors are used.

- **Actuator:**

An actuator is a device that provides the motive power to the process.



- **检测元件：**

其功能是测量被控制的物理量，并将其反馈到系统输入端。在闭环控制系统中检测元件及相关的元器件构成系统的反馈装置。如果被测量的物理量为电量，一般用电阻、电位器、电流互感器和电压互感器等来测量；如果被测量的物理量为非电量，通常检测元件应将其转换为电量，以便于处理。



- **Sensor:**

A sensor is used to measure the actual output response of the process, and its output will be used to compare with the desired output response.

If the actual output is an electrical signal, we could measure it through resistant, potentiometer, current transformer, voltage transformer, and so on. If the variable is not the electrical parameters, it should be changed to the electrical parameters.



- **控制器：**

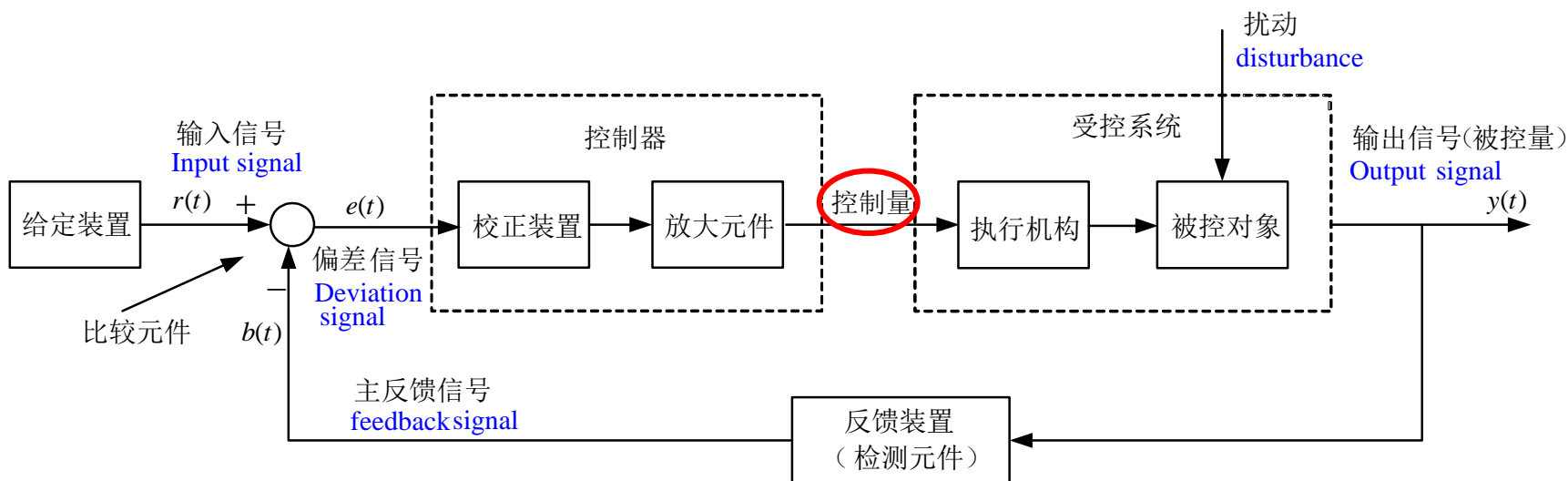
控制器的功能是对偏差信号进行加工处理和运算，以形成合适的控制作用，或形成适当的控制规律，从而使系统的被控量按预定的规律变化。通常在控制系统中，将校正装置和放大器组合在一起构成一个器件，称为控制器。在有计算机参与的控制系统中，往往用计算机（或微处理器）作为控制器。



- **Controller:**

The controller will operate on the difference and provide the desired control signal to adjust the controlled variables to correct the error.

Usually, a controller consists of the compensation device and the amplifier.

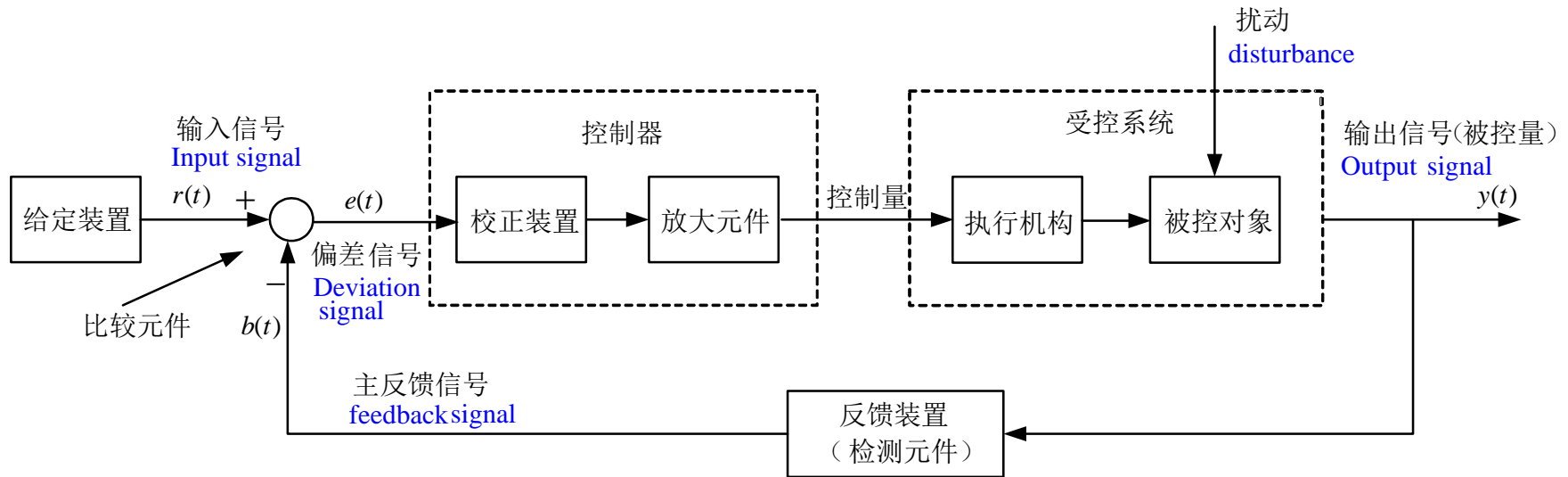


闭环控制系统方块图中，各信号定义如下：

- **输入信号：**系统的输入信号是指参考输入，又称给定量、给定值或输入量。

In a closed-loop control system (shown above), the signals are defined as below:

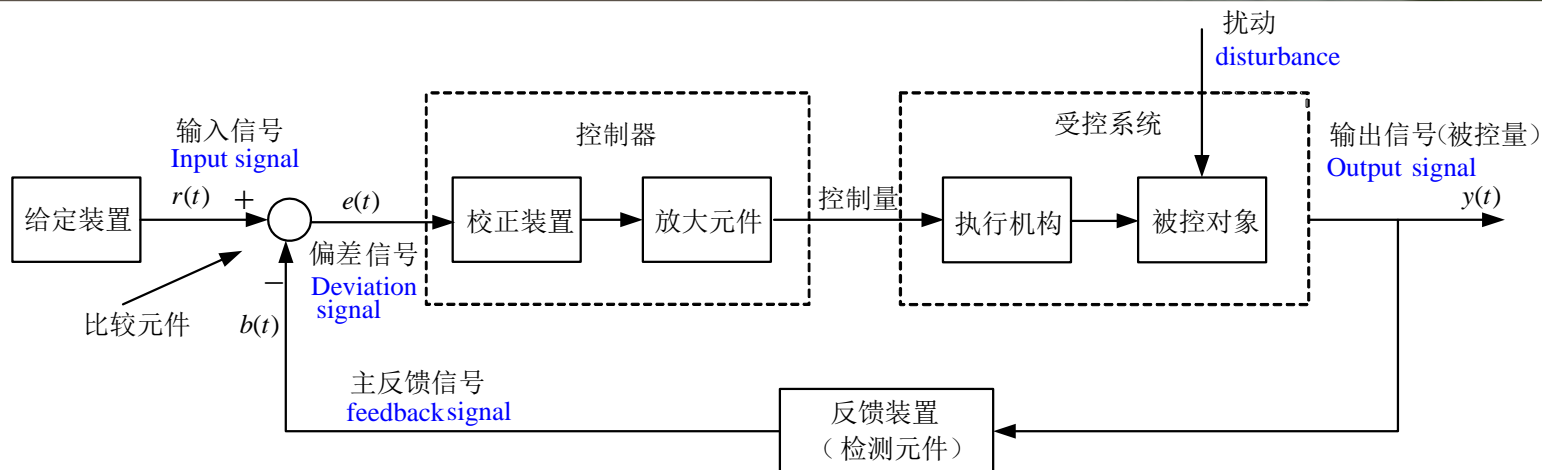
- **Reference input:** Usually, it's the desired output response, which is also named given variable, given value or input value.



- **输出信号：**系统的输出信号是指被控对象中要求按一定规律变化的物理量，又称被控量或输出量，它与输入信号之间满足一定的函数关系。

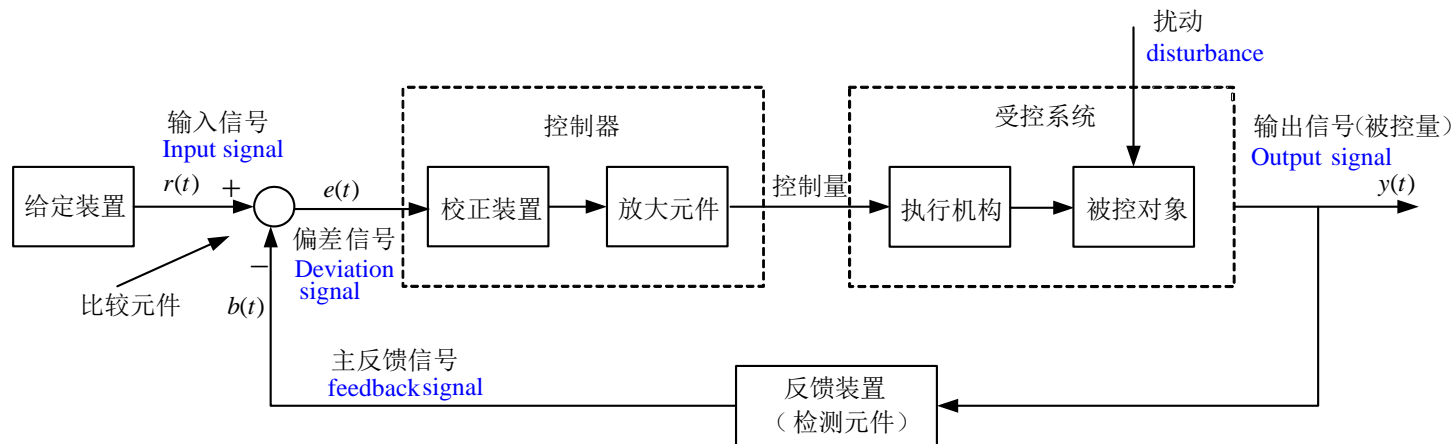
• **Output signal:**

It is known as the controlled variable.



- **反馈信号：**由系统（或元件）输出端取出并反向送回系统（或元件）输入端的信号称为反馈信号。反馈有主反馈和局部反馈、正反馈和负反馈之分。在反馈通道中，当主反馈信号与输出信号相等时，称为单位反馈。
- **偏差信号：**它是指输入信号与主反馈信号之差。偏差信号简称偏差。

- **Feedback signal:** The measure of the output is called the feedback signal. It can be classified as the main feedback and local feedback, **positive feedback and negative feedback**. If the main feedback signal is equal to the output signal, then it is called **a unity feedback**.
- **Deviation signal:** It indicates the difference between the input signal and the main feedback signal, which is called deviation for short.



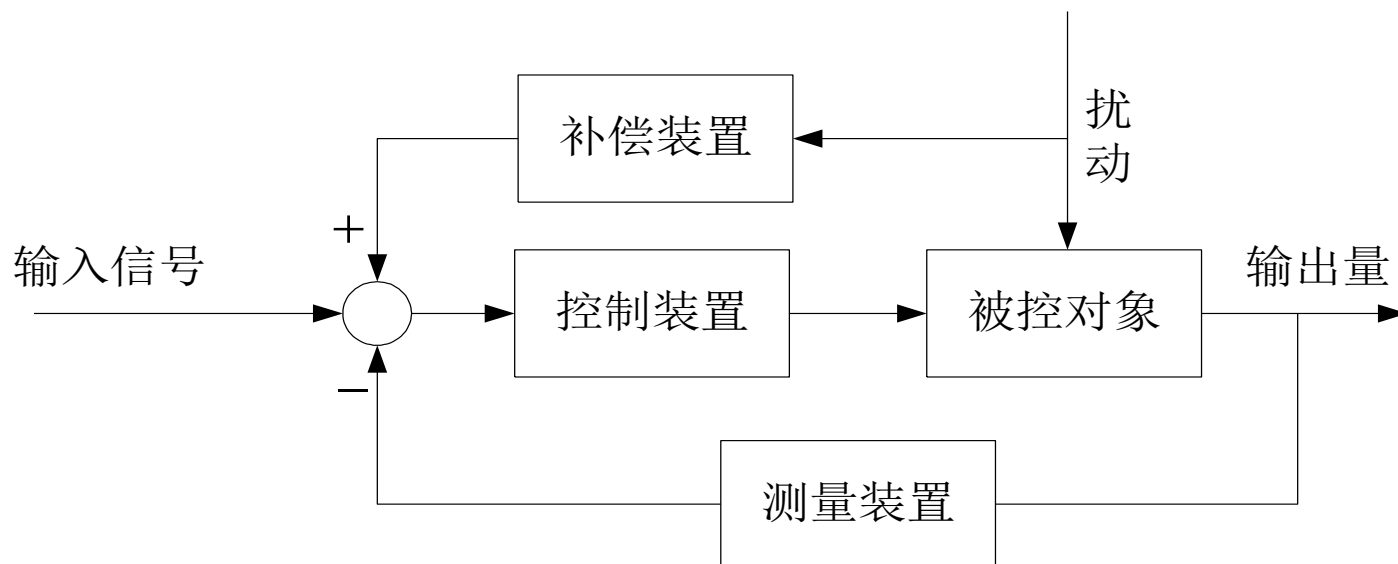
- **误差信号**: 它是指系统被控制量期望值与实际值之差, 简称误差。在单位反馈情况下, 误差值也就是偏差值, 二者是相等的。在非单位反馈情况下, 两者存在着一定的关系。
- **扰动信号**: 简称扰动或干扰, 它与控制作用相反, 是一种不希望的、影响系统输出的不利因素。扰动信号既可来自系统内部, 又可来自系统外部, 前者称为内部扰动, 后者称为外部扰动。

- **Error**: The error is the difference between the desired output and the actual output. When it's a unity feedback system, the error is equal to the deviation. In other cases, there is a certain relationship between them.
- **Disturbance or noise signal**: It is an unexpected input signal. It could be external or internal disturbances.

1.2.5 复合控制系统

定义：开环控制和闭环控制相结合的控制系统。带有负反馈的闭环起主要的调节作用。开环控制部分，可以按输入量进行控制或按扰动量进行控制（当扰动量可测量时）。

指南车



按扰动作用补偿



1.3 自动控制系统的分类

1.3.1 按系统的结构特点分类

1.3.2 按输入信号特征分类

1.3.3 按系统中传递的信号的变化特征分类

1.3.4 按数学模型分类

1.3 Types of the feedback systems

1.3.1 Open-loop and Closed-loop control system

1.3.2 Regulator and Servo system

1.3.3 Continuous-Data and Discrete-Data system

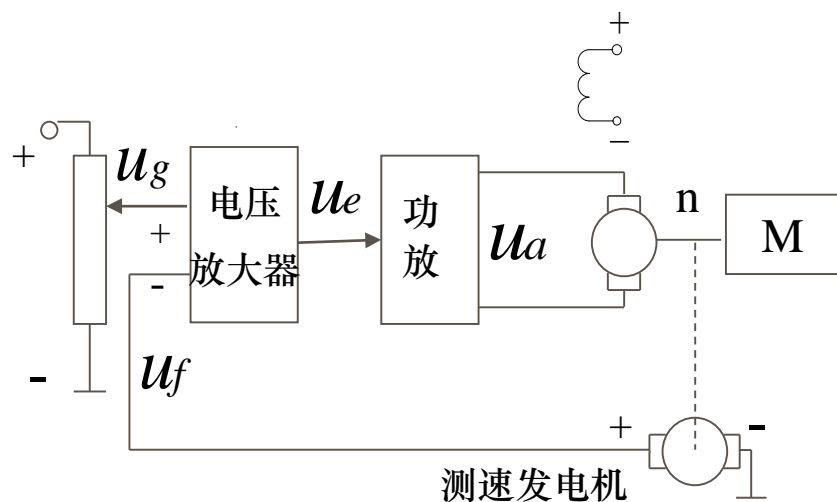
1.3.4 Linear versus Nonlinear design control system and time-invariant versus time-varying system

1. 按系统的结构特点分类

开环控制系统和闭环控制系统

2. 按输入信号特征分类

1. 恒值控制系统:

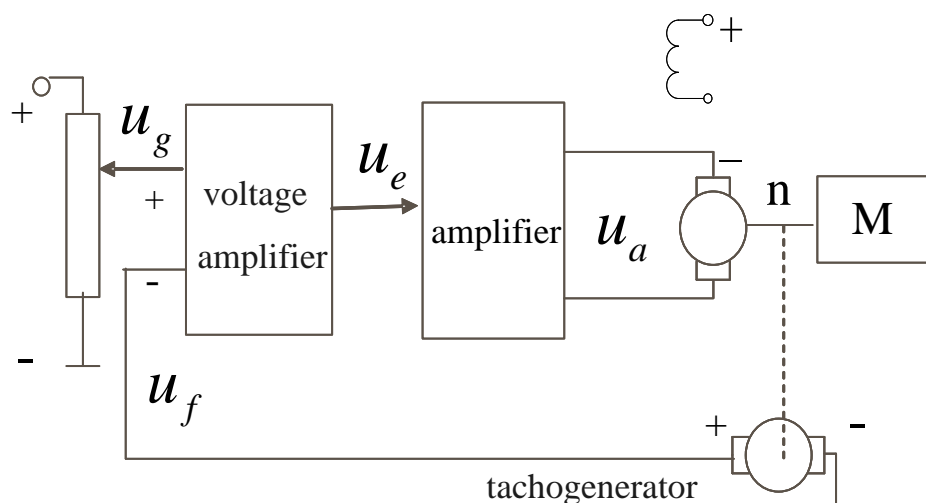


1. According to the structure of the system

Open-loop and closed-loop control system

2. According to the main purpose of the system

1. Regulating control or a regulator:





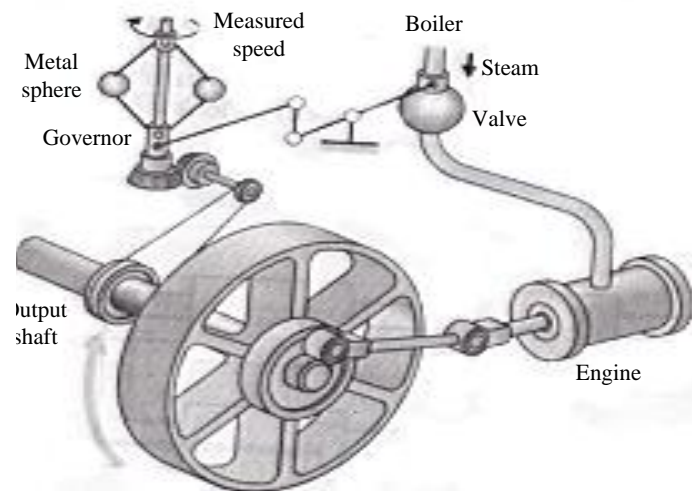
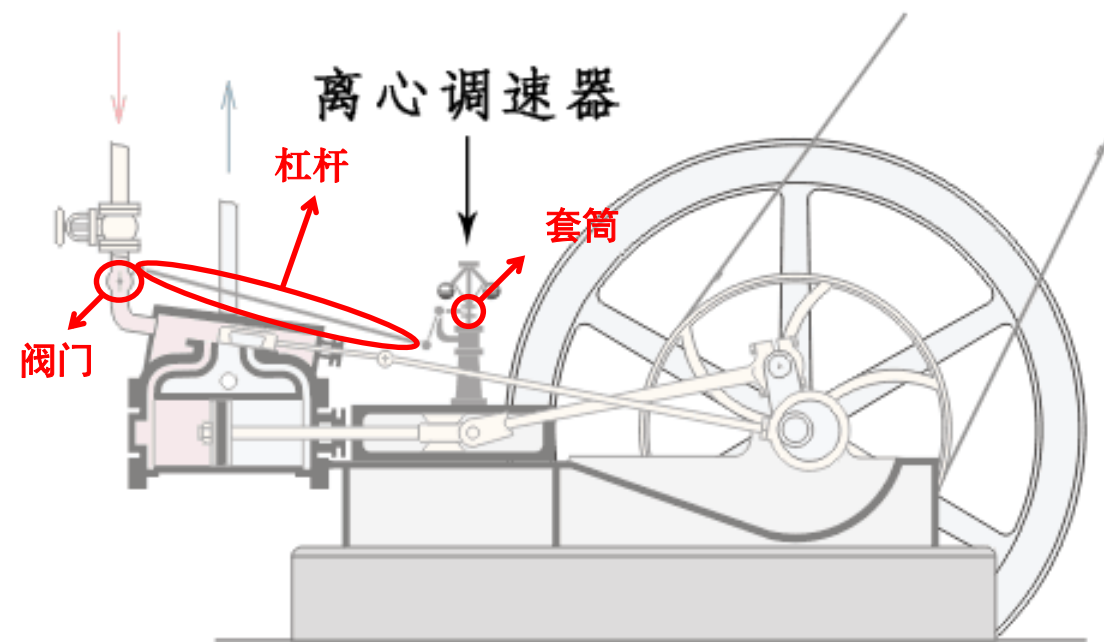
恒值控制系统:

这类系统的特点是输入信号为某个恒定不变的常数，要求系统的被控量尽可能保持在期望值附近；系统面临的主要问题是存在使被控量偏离期望值的扰动；控制的任务是要增强系统的抗扰动能力，使扰动作用于系统时，被控量尽快地恢复到期望值上。如上述的转速控制系统。

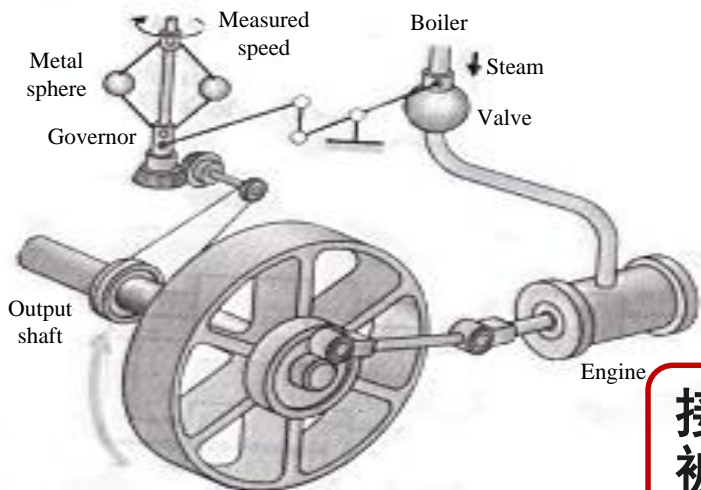
A system designed to maintain an output fixed regardless of the disturbances present is called a regulating control or a regulator. The main task of the system is to enhance the anti-disturbance ability, so that when the system is subject to the disturbances or noises during operation, the system can still hold an output steady.



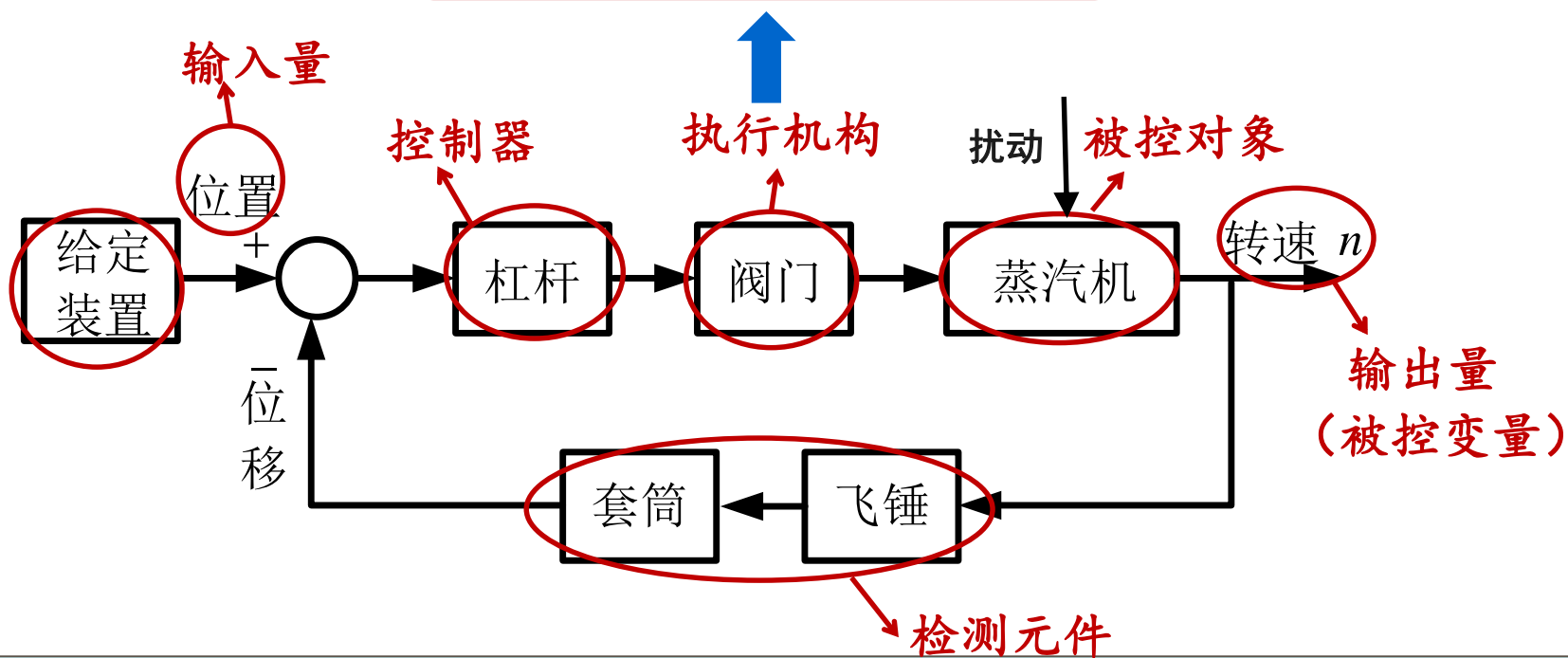
例：瓦特发明的离心调速器，蒸汽机转速控制系统

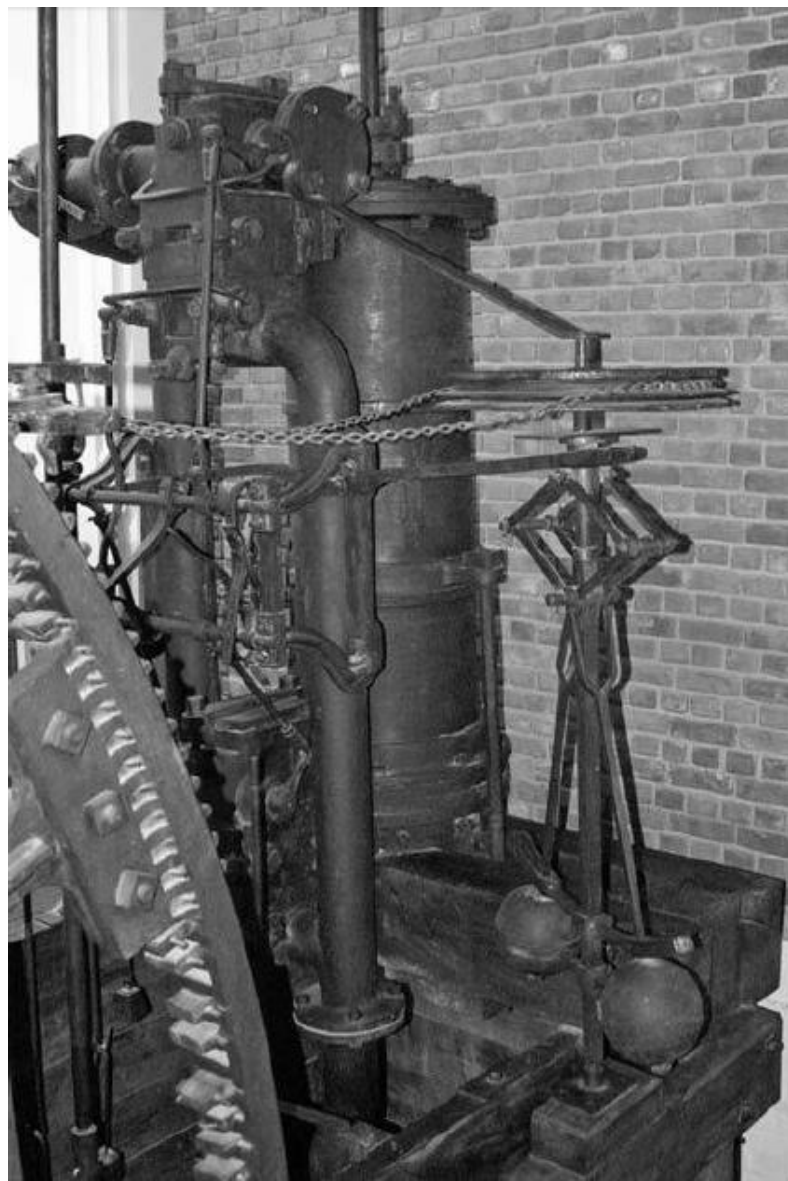


控制过程：负载 \uparrow \Rightarrow 蒸汽机转速 n \downarrow \Rightarrow 套筒 \downarrow \Rightarrow 通过杠杆使阀门的开度 \uparrow \Rightarrow 蒸汽机转速 n \uparrow



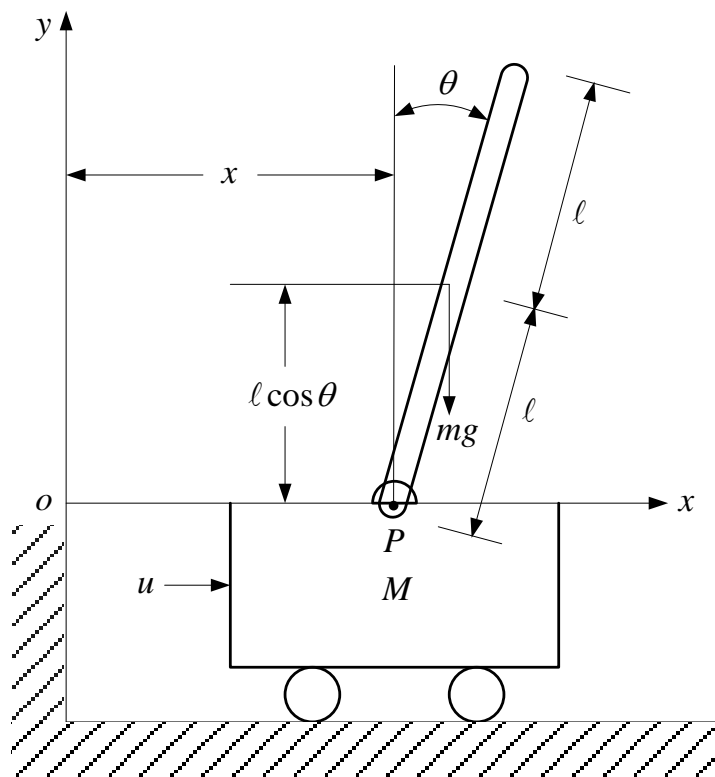
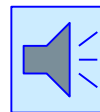
接受控制器来的信息，并对被控对象施加控制作用。







例：安装在马达驱动车上的一阶倒立摆，它可以作为航天飞机发射时固体助推器的姿态控制模型。

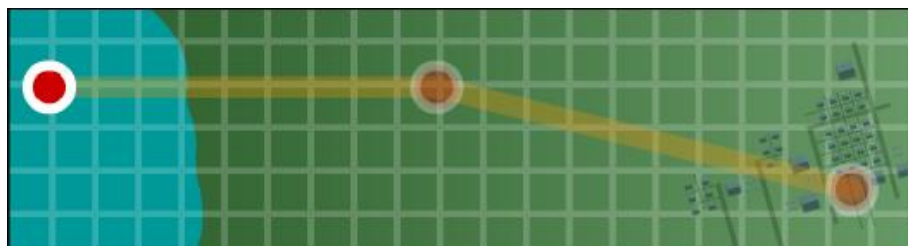


2. 随动系统（自动跟踪系统、伺服系统）：

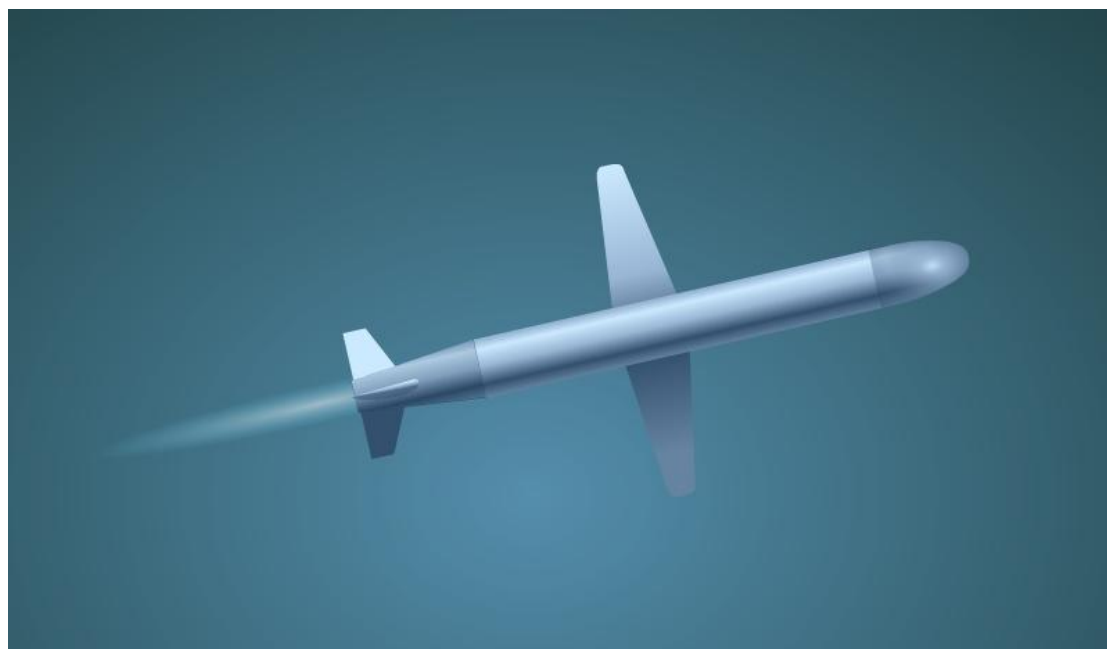
这类系统的特点是：**输入信号是随时间任意变化的函数**，要求系统的输出信号紧紧跟随输入信号的变化；系统面临的主要矛盾是，被控对象和执行机构**因惯性等因素的影响**，使得系统的输出信号不能紧紧跟随输入信号的变化；控制的任务是**提高系统的跟踪能力**，使系统的输出信号能跟随难于预知的输入信号的变化。

2. servo system or tracking control system

A system designed to follow a changing reference is called tracking control or a servo. The control task is to enhance the tracking ability, so that the output can follow the change of the input signal as accurate as possible.

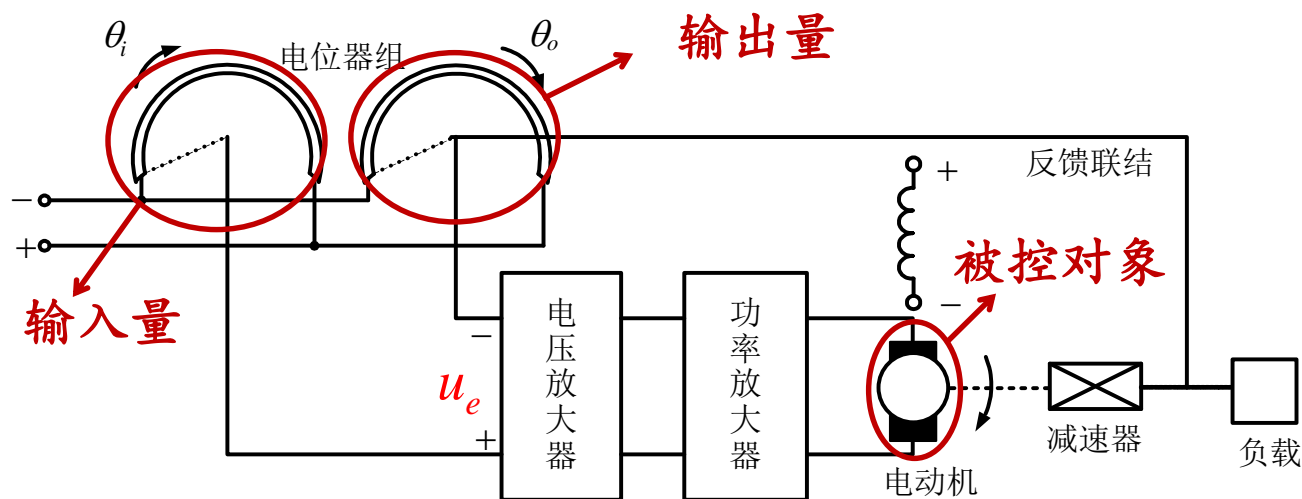


巡 航导弹发射输入目标首、尾和中心的经、纬度程序；



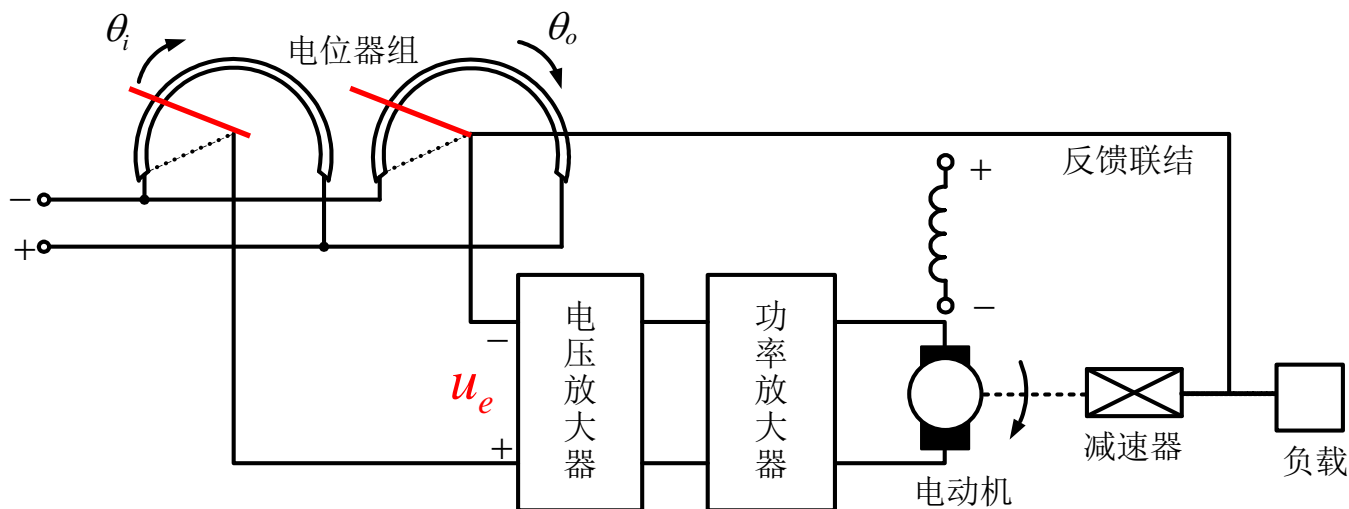


例：船舶驾驶**舵角位置跟踪系统**。该系统的控制任务是使船舶舵角位置跟踪操纵杆角位置的变化。船舵是**被控对象**，船舵的角位置和操纵杆角位置分别是**被控量**和**给定量**。





舵角位置跟踪系统

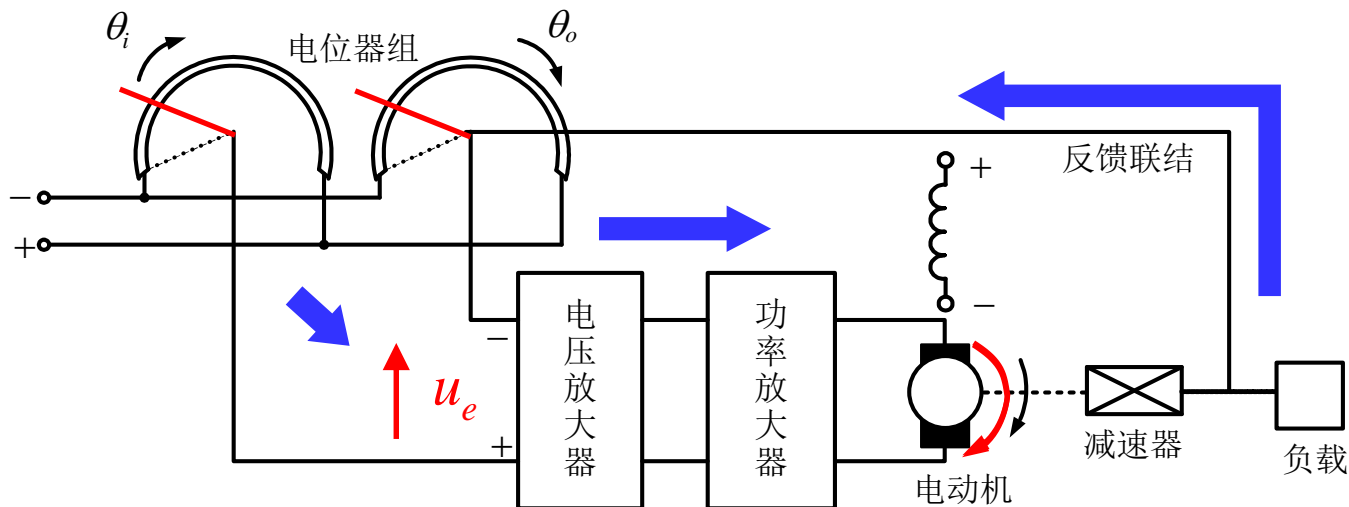


控制目标：使舵角位置 θ_0 跟随操纵杆角位置 θ_i 的变化。

理想情况下， $\theta_0 = \theta_i$ ，两环形电位计输出电压 $u_e = 0$ ，被控量维持在期望位置 θ_0 。



舵角位置跟踪系统

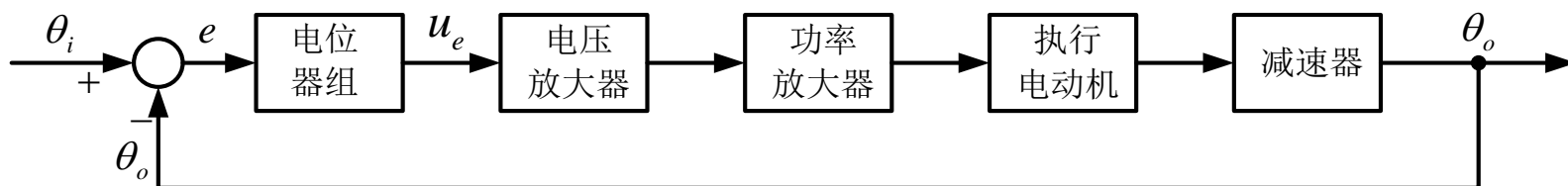


控制目标：使舵角位置 θ_o 跟随操纵杆角位置 θ_i 的变化。

理想情况下， $\theta_o = \theta_i$ ，两环形电位计输出电压 $u_e = 0$ ，被控量维持在期望位置 θ_o 。

操纵杆角度 θ_i 改变 \rightarrow 电位器组输出 $u_e \neq 0$ \rightarrow u_e 放大 \rightarrow 带动电动机转动

跟随给定值 θ_i \leftarrow 减速器连同船舵和输出电位计滑臂一起运动

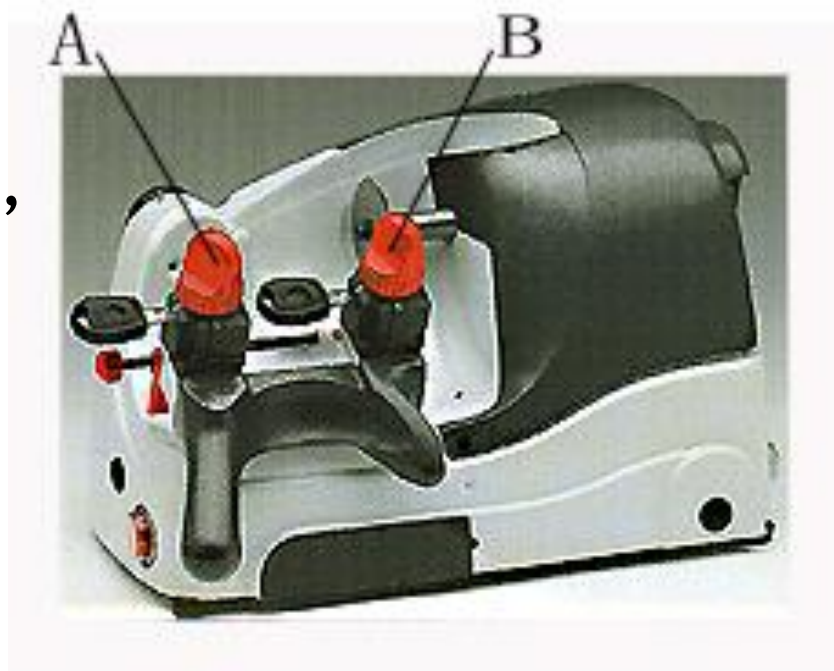




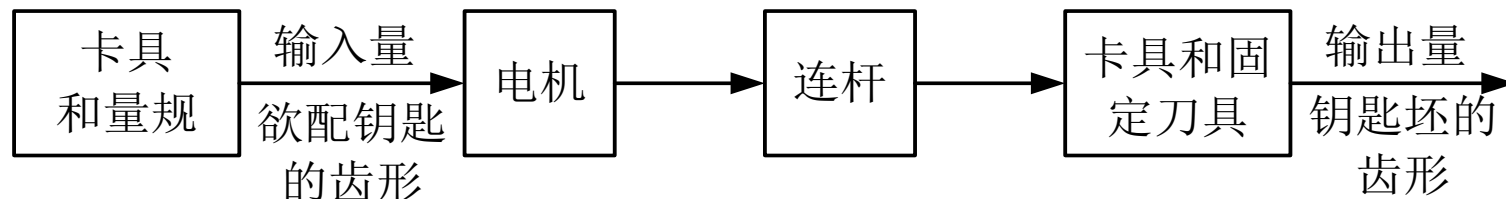
3. 程序控制系统:

3. Programming control system

这类系统的特点是：输入信号按照预先知道的函数变化。如热处理炉温度控制系统中的升温、保温、降温等过程，都是按照预先设定的规律进行的。又如机械加工的数控机床也是典型的程序控制系统。



例：全自动钥匙机





3. 按系统中传递的信号的变化特征分类

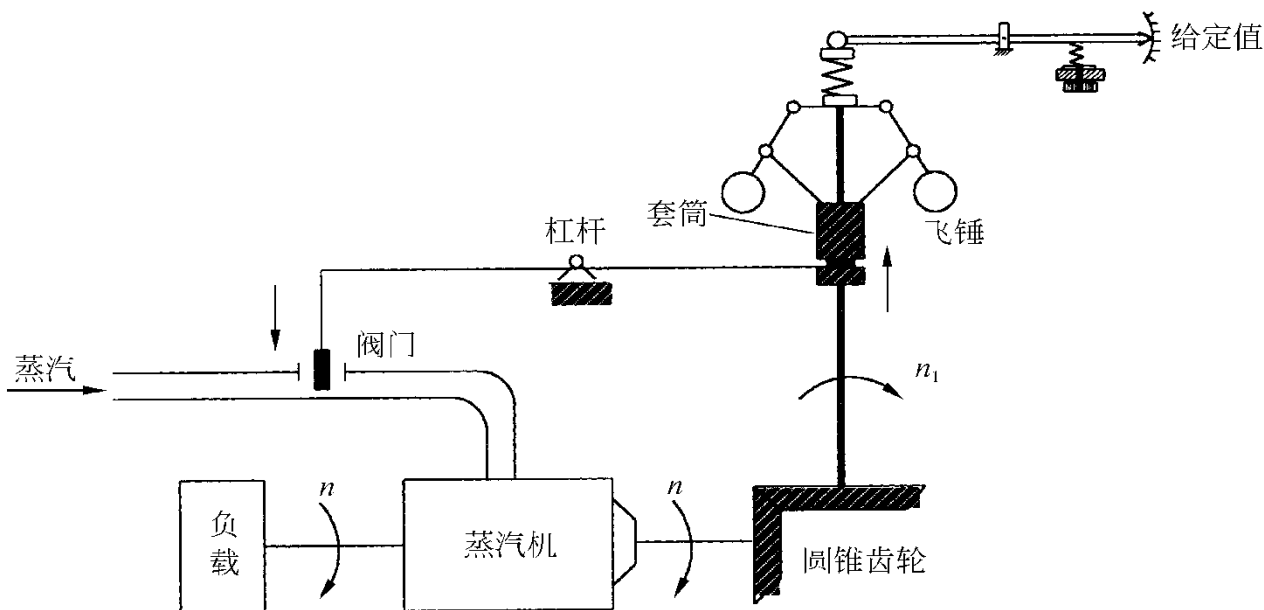
1. 连续控制系统

系统中各环节间的信号均是时间 t 的连续函数。

1.3.3 According to the types of signal found in the system

1. Continuous-Data control systems

The signals at various parts of system are all functions of the continuous time variable t .





2. 离散控制系统

系统中某处或几处的信号是脉冲序列或数字编码的形式。
凡是有计算机参与的自动控制系统均属离散控制系统。

2. Discrete-Data Control systems

The signals at one or more points of the system are in the form of either a pulse train or a digital code.

The systems using computer belong to discrete-data control systems.



4. 按数学模型分类

1) 线性和非线性控制系统

凡是同时满足叠加性与均匀性（或齐次性）的系统均为线性控制系统。

1) Linear versus nonlinear control systems

A linear system satisfies the properties of superposition and homogeneity.

Superposition: when the system at rest is subjected to an excitation $x_1(t)$, it provides a response $y_1(t)$. Furthermore, when the system is subjected to an excitation $x_2(t)$, it provides a corresponding response $y_2(t)$. For a linear system, it is necessary that the excitation $x_1(t) + x_2(t) = y_1(t) + y_2(t)$. This is usually called the principle of superposition.

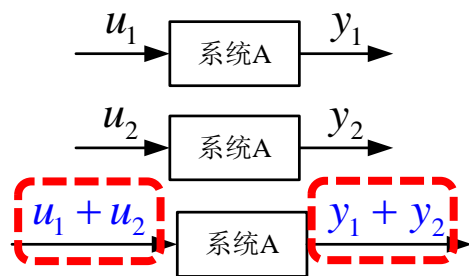
Homogeneity: the response of a linear system to a constant β of an input x is equal to the response to the input multiplied by the same constant so that the output is equal to βy . This is called the property of homogeneity.

按系统的固有内在特性

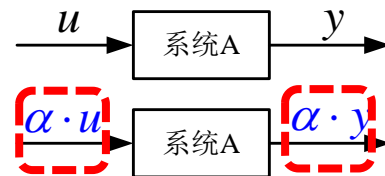
线性控制系统

同时满足叠加性与均匀性（或齐次性）的系统。

◆ **叠加性**：当几个输入同时作用于系统时产生的输出，等于各个输入单独作用于系统时产生的输出之和。



◆ **均匀性**：输入成比例增大时，输出按照相同比例增大。



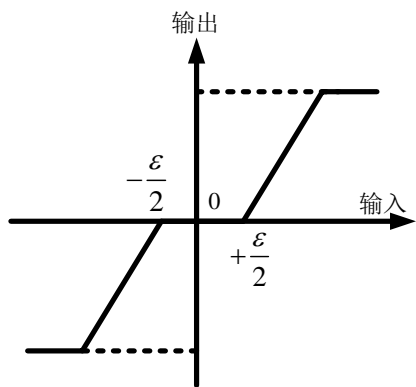


按系统的固有内在特性

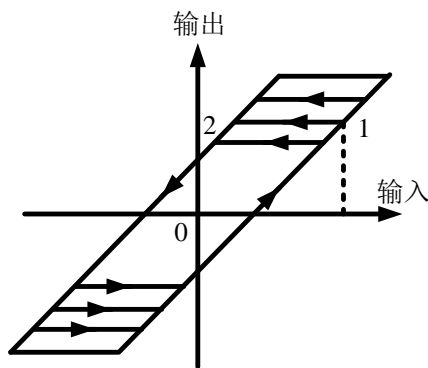
非线性控制系统

不同时满足叠加性和均匀性的系统均为非线性系统。

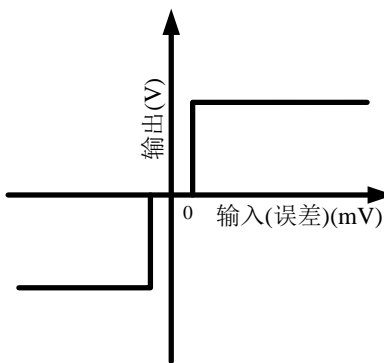
典型的非线性特性有饱和特性、死区特性、间隙特性、继电特性、磁滞特性。



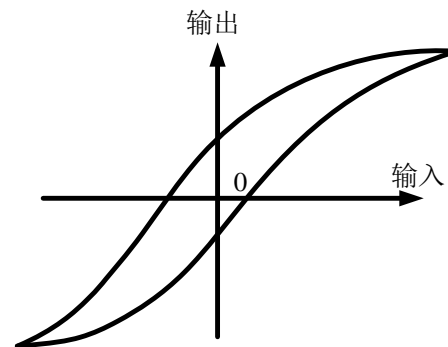
饱和和死区特性



间隙特性



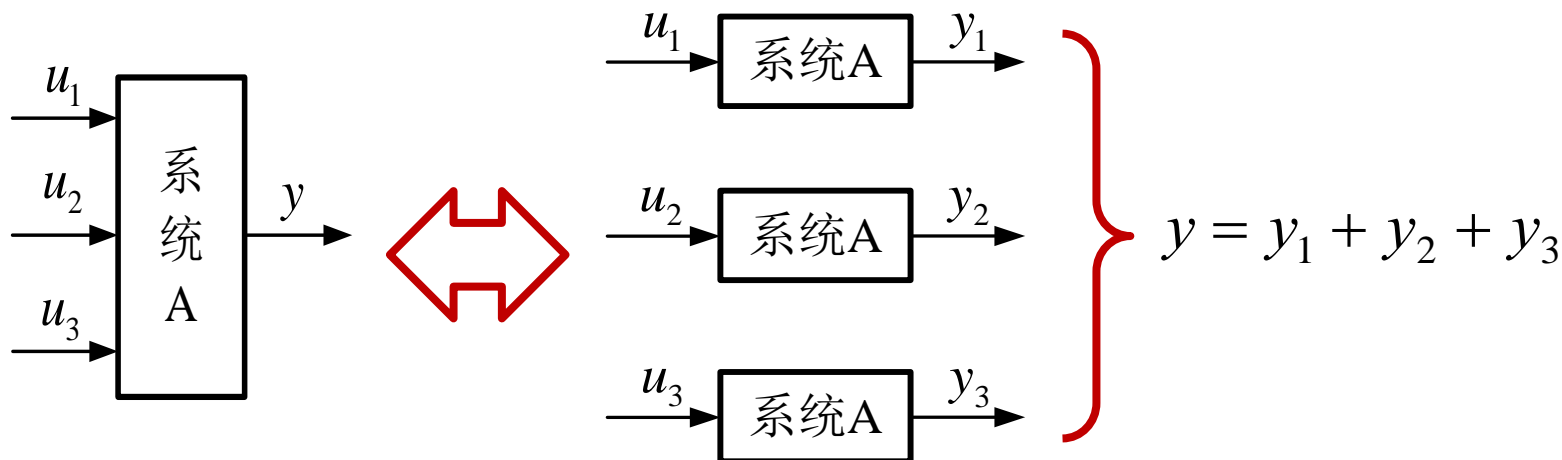
继电特性



磁滞特性



注意：利用线性控制系统所需满足的叠加性和均匀性，可大大简化系统的分析。

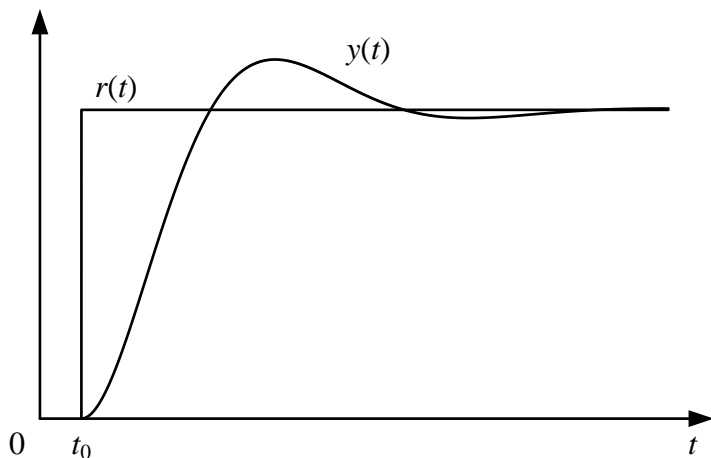




2) 定常系统和时变系统

如果描述系统运动的微分或差分方程的系数均为常数，则称这类系统为定常系统，又称为时不变系统。 ▶

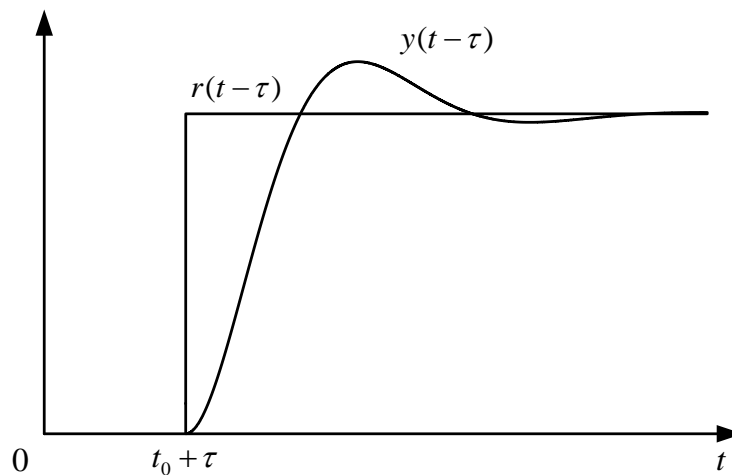
定常系统的特点是：系统的响应特性只取决于输入信号的形状和系统的特性，而与输入信号施加的时刻无关。



2) Time-invariant versus time-varying systems

when the parameters of a control system are stationary with respect to time during the operation of the system, the system is called a time-invariant system.

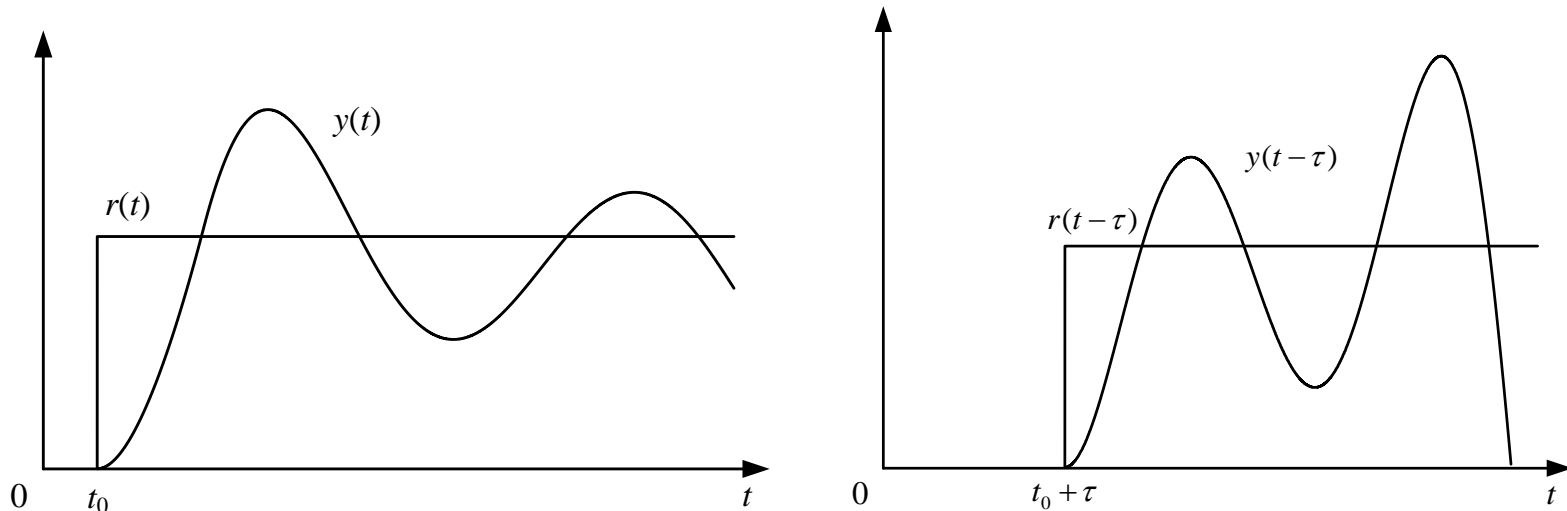
Features of time-invariant systems are: the response characteristics of the system only depends on the shape of the input signal and System characteristics, rather than the excited time of the system.



如果系统的参数或结构随时间而变化，则称这类系统为时变系统。

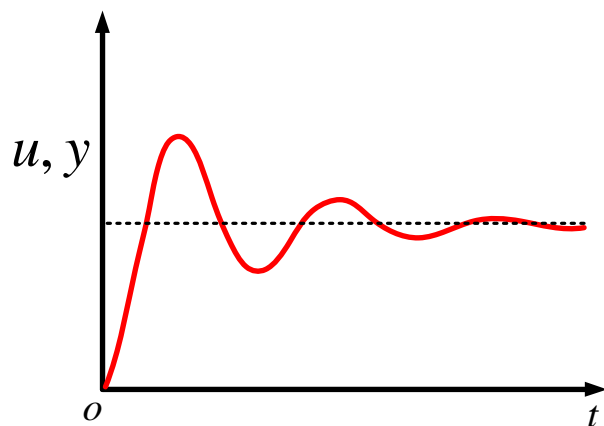
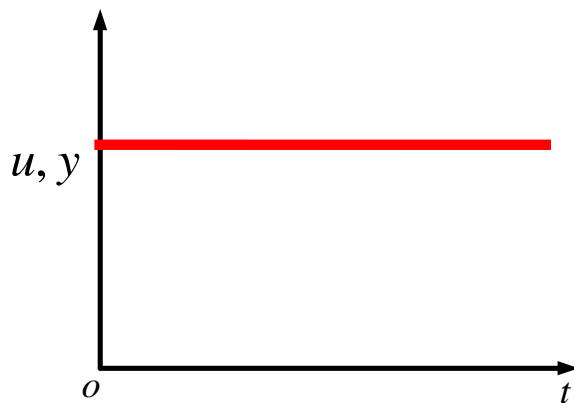
这类系统的特点是：系统的响应特性不仅取决于输入信号的形状和系统的特性，而且还与输入信号施加的时刻有关。

The system can be named after time-varying system if the parameters or the structure of the system varies with time. The feature of the system is that the response characteristics of the system depend not only on the shape of the input signal or the characteristics of the system but also the time when the input signal is imposed on the system.

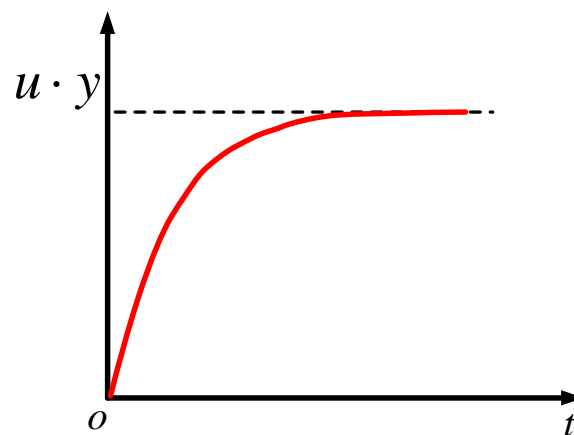




1.4 自动控制原理的研究内容和对系统的基本要求

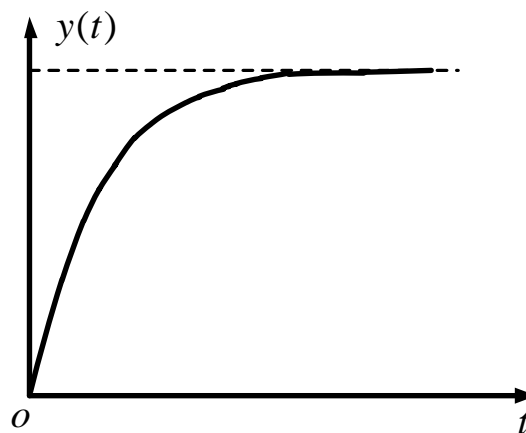
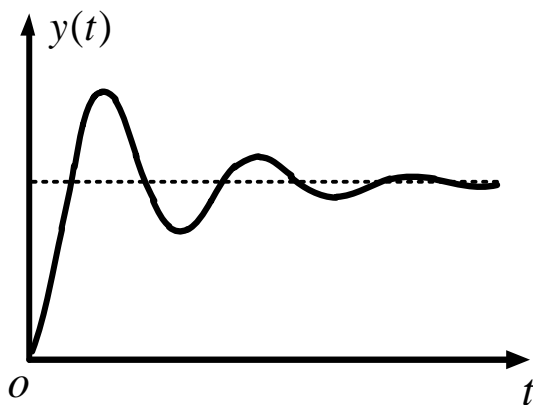
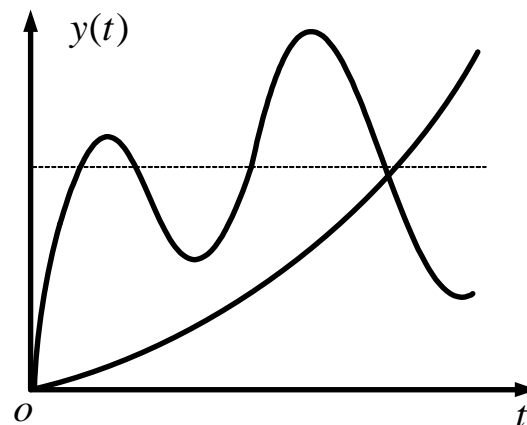
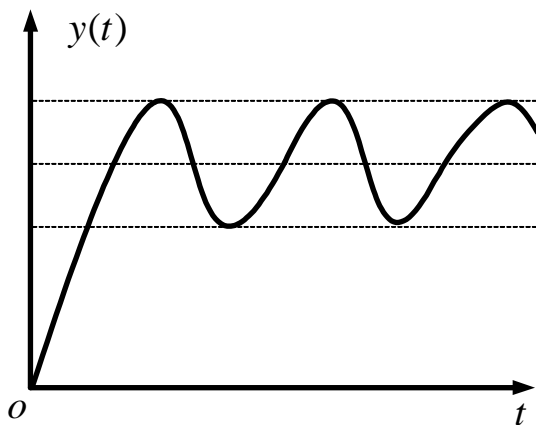


?

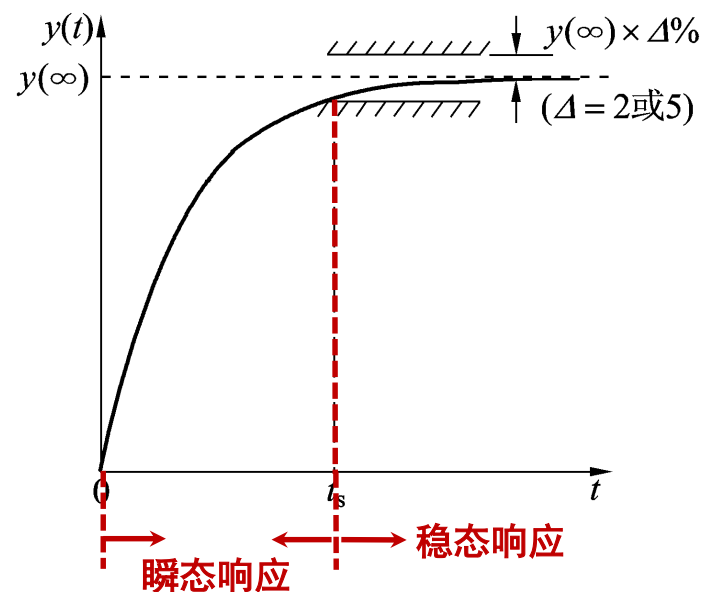
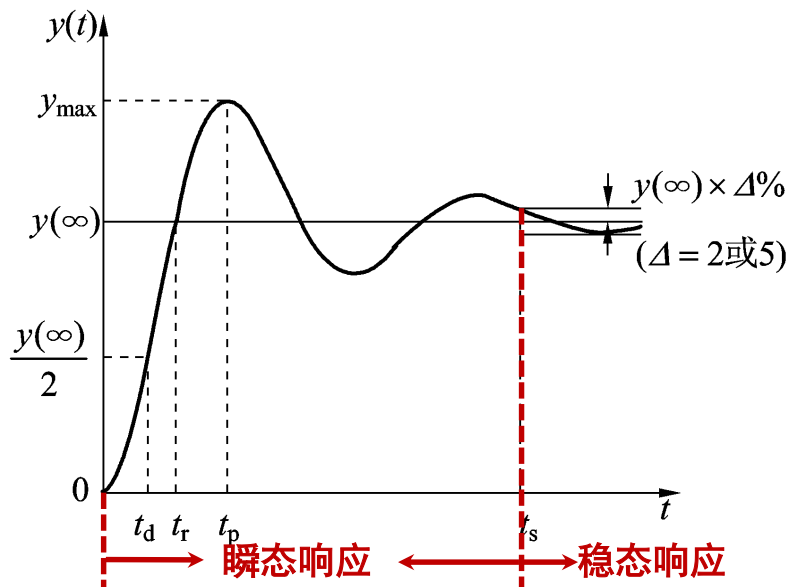




被控量的具体响应过程可归结为**四类**:



对控制系统的第一个要求: **稳定性**



瞬态响应：既要快，又要平稳。

稳态响应：稳态误差尽可能地小。



控制系统的基本要求

稳：要求系统稳定；

准：稳态误差要小；

好：动态响应快，超调量小，调节时间短。



课程任务：

学会**反馈**的概念；**建模和仿真**；
系统的**分析方法**；系统的**设计方法**

系统分析： 在已知系统结构和参数的情况下，利用将要学到的时域分析法、根轨迹法和频域分析法，求出评价系统性能的指标：稳定性、瞬态性能和稳态性能。

系统设计： 改变系统的某些参数或加入某种控制装置，使系统满足预期的性能指标。



1.5 控制理论的发展简史

- 自动化技术的早期发展
- 经典控制理论的发展
- 现代控制理论的发展
- 现代控制理论的多个重要分支

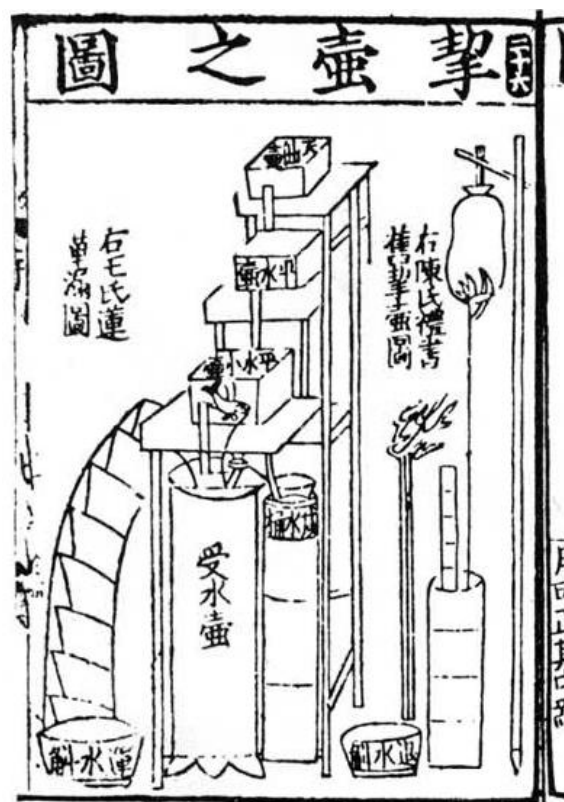


1. 自动化技术的早期发展

- 古代的计时器——水钟（刻漏，漏壶）



铜壶滴漏实物图



莲华漏计时装置



- 指南车——具有开环控制（前馈控制）特点

指南车是“人类历史上迈向控制论机器的第一步”。……是人类第一架机内稳定机。





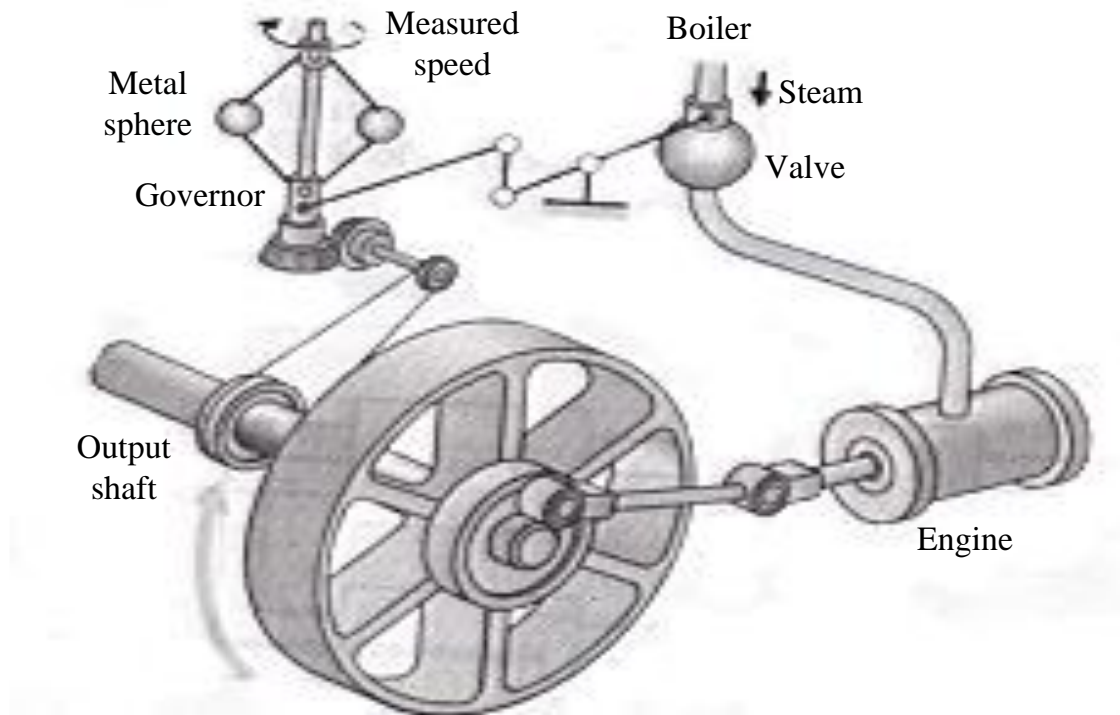
- 18世纪的风车引入了“扇尾”传动装置，使风车自动地面向风。再后来，在风车中还使用了离心调速器。



图为以风车为主题的邮票



- 瓦特的蒸汽调节器——反馈调节器最成功的应用





2. 经典控制理论的发展

1) 稳定性理论的早期发展

- 麦克斯韦：他在论文《论调节器》中，导出了调节器的微分方程，并在平衡点附近进行线性化处理，指出稳定性取决于特征方程的根是否具有负的实部。
- 劳斯：根据多项式的系数决定多项式在左半平面根的数目。劳斯的这一成果后来被称为劳斯判据。






- 赫尔维茨：赫尔维茨的条件同劳斯的条件在本质上是一致的。因此，这一稳定性判据后来也被称为劳斯—赫尔维茨（Routh-Hurwitz）稳定性判据。
- 李雅普诺夫：1982年，俄国伟大的数学力学家李雅普夫提出了广为当今学术界应用且影响巨大的李雅普诺夫方法（即李雅普诺夫第二方法，亦被称为李雅普诺夫直接法）。这一方法不仅可用于线性系统，而且可用于非线性时变系统的稳定性分析，已成为当今自动控制理论课程讲授的主要内容之一。



2) 负反馈放大器及频域理论的建立

- 1928年布莱克：发明了在当今控制理论中占核心地位的负反馈放大器。
- 1932年奈奎斯特：发表了包含著名的“奈奎斯特判据 (Nyquist criterion)” 的论文。
- 1940年波特：引入了半对数坐标系。
- 1942年哈里斯：引入了传递函数的概念。

至1945年，控制系统设计的频域方法——“波特图 (Bode plots)” 方法，已基本建立了。



3) **根轨迹**的建立

- 埃文斯 (W.R.Evans) : 埃文斯所从事的是飞机导航和控制研究工作, 其中涉及许多动态系统的稳定问题。相比较70多年前麦克斯韦和劳斯曾取得的特征方程的研究成果, 埃文斯用系统参数变化时特征方程的根变化轨迹来研究, 开创了新的思维和研究方法。



4) **脉冲控制理论**的建立和发展

- 奈奎斯特: 首先证明把正弦信号从它的采样值复现出来, 每周期至少必须进行两次采样。
- 香农: 于1949年完全解决了这个问题。香农由此被称为信息论的创始人。

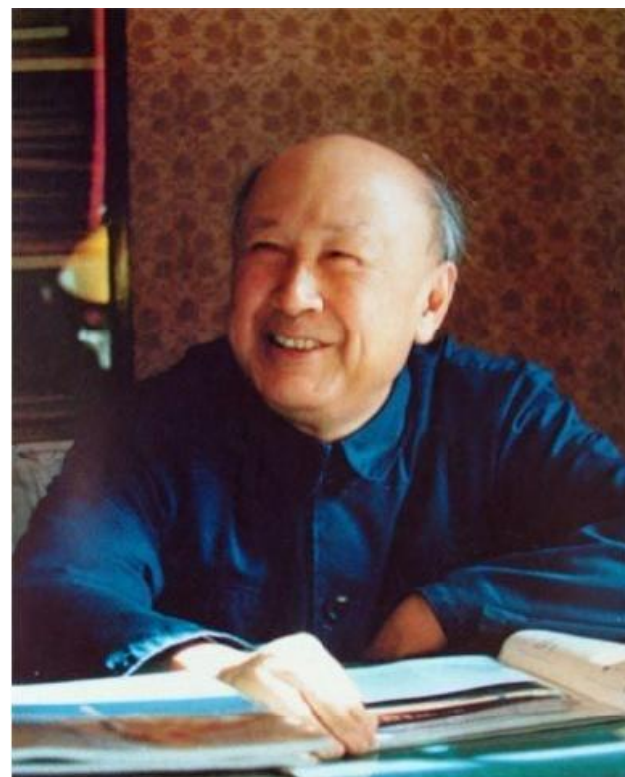


- 崔普金（奥尔登伯格和莎托里厄斯）：于1948年分别提出了脉冲系统的稳定判据，即线性差分方程的所有特征根应位于单位圆内。
- 卡尔曼：离散状态方法，能控性和能观性
- 扎德：Z变换定义

20世纪50年代末，脉冲系统的Z变换法已日趋成熟。



- 1945年**维纳**：把反馈的概念推广到生物等一切控制系统。1948年他出版了名著《**控制论**》一书，为控制论奠定了基础。
- 1954年**钱学森**：全面地总结和提高了经典控制理论，在美国出版了用英语撰写的在世界上很有影响的《**工程控制论**》
(Engineering Cybernetics)一书。



经典控制：

以**传递函数**为基础，采用的方法主要有：时域分析法、根轨迹法和频率法。

特点：

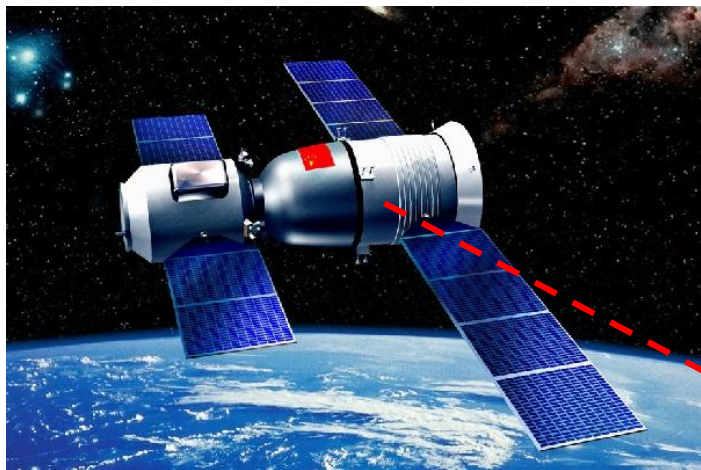
- 经典控制理论建立在传递函数和频率特性的基础上，而传递函数和频率特性均属于**系统的外部描述**（只描述输入量和输出量之间的关系），不能充分反映系统内部的状态；
- 无论是根轨迹法还是频率法，本质上是频域法（或称复域法）中，都要通过积分变换（包括拉普拉斯变换、傅里叶变换、Z变换），因此原则上只适宜于解决“**单输入—单输出**”**线性定常系统**的问题。

经典控制理论：

只适宜于解决“单输入—单输出”系统中的分析与设计问题，但是，经典控制理论至今仍**活跃在各种工业控制领域中**。



飞行器的监测和控制



宇宙飞船

需要解决的关键技术问题：

1. 对宇宙飞船运行状态的监测
2. 对宇宙飞船的有效控制



地面站



3) 现代控制理论的发展

- 1954年贝尔曼：创立了动态规划，并在1956年将其应用于控制过程。他的研究成果开拓了控制理论中最优控制理论这一新的领域。
- 1959年庞特里亚金：提出了后来被命名为“极大值原理”的综合控制系统新方法。
- 1960年卡尔曼：提出能控性和能观性两个概念，揭示了系统的内在属性。卡尔曼还引入状态空间法（State Space Method），提出具有二次型性能指标的线性状态反馈律，为线性自动控制系统给出了最优调节器的概念。

以上这些新概念和新方法标志着现代控制理论的诞生。



- 20世纪60-70年代，多名英国学者H. 罗森布罗克(Rosenbrock)、D. 梅恩(Mayne)和A. 麦克法兰(MacFarlane)等将**频率法**推广到分析和设计多变量系统。他们提出的一些方法，称为**现代频率法**。这些方法保留经典控制理论中频率法的一些优点，并已成功地用于**石油、化工、造纸、原子能反应堆、飞机发动机和自动驾驶仪**等设备中多变量系统的分析和设计上，取得令人满意的结果。



现代控制:

以**状态空间法**为基础研究**多输出多输入(MIMO)**系统。采用的方法主要有：状态空间分析法。本质上是一种“时域法”

特点:

- 状态空间模型不仅描述了系统的外部特性，而且也给出了**系统的内部信息**。这种模型分两段来描述输入输出之间的信息传递。
- 采用状态方程后，最主要的优点是系统的运动方程采用向量、矩阵形式表示，因此形式简单、概念清晰、运算方便，尤其是对于**多变量、时变系统**更是明显。



控制理论的分支：

- 系统辨识
- 自适应控制
- 最优控制
- 预测控制
- 智能控制
-

多学科交叉：

人工智能、大数据分析、数字孪生、元宇宙等。



小 结

- 自动控制和自动控制系统的含义；
- 反馈的概念；
- 自动控制系统的组成和分类；
- 能够确定实际控制系统的被控对象，被控量和给定量；
- 能够绘制控制系统的方块图；

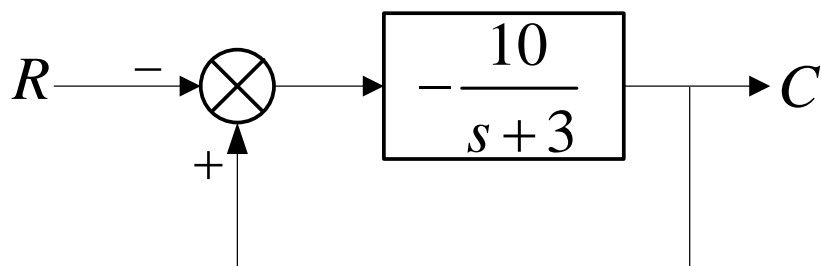
Summary

- Concepts of the automatic control and the automatic control system;
- Concepts of feedback;
- Configuration and types of the automatic control system;
- Determine the process or controlled object, controlled variables and the given variable;
- Find the component block diagram for a control system;

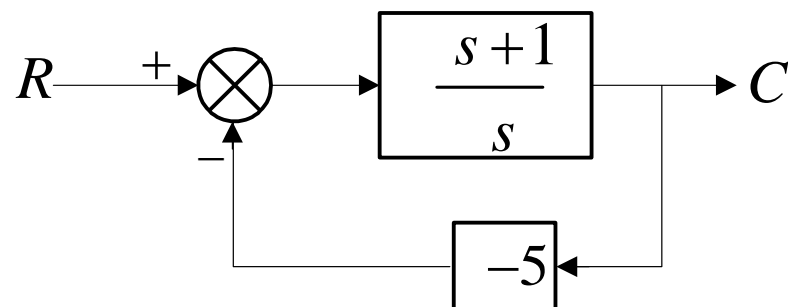


第一章练习题

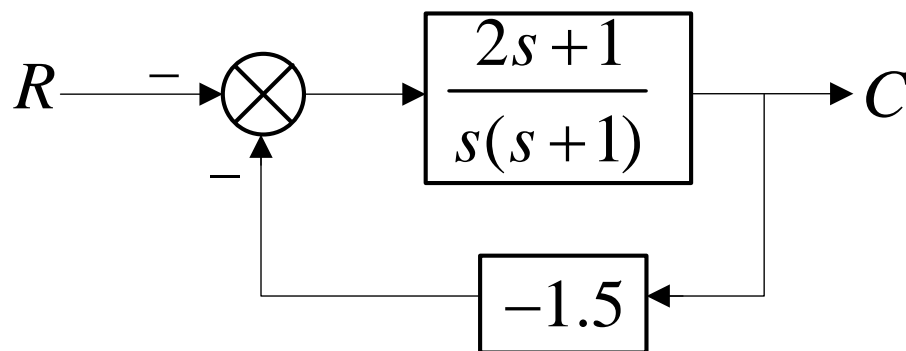
1. 试判别下图所示的正负反馈。



(a)



(b)



(c)