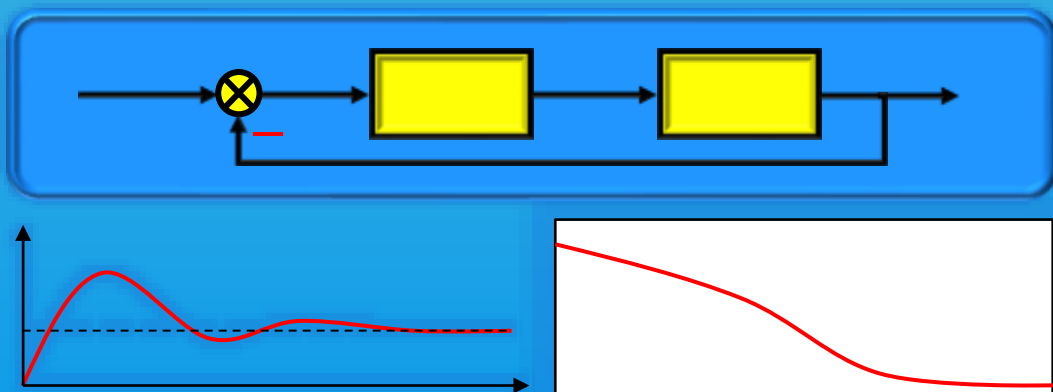


西南交通大学信息科学与技术学院 轨道交通信号与控制专业基础课

自动控制原理 (B)



任课教师：冯 涛

开课院系：信息学院自动化系

电子邮箱：taof@swjtu.edu.cn

课程说明

关于本课程的一些基本说明：

教材：

- ① 《自动控制原理 (上册)》, 黄家英著, 高等教育出版社
- ② 《自动控制理论新编教程》, 曾汉全等著, 西南交通大学出版社

学时： 16周次, 每周3学时, 共计48 学时

教室： X1105

要求： 课堂、作业、考核 (闭卷)

最终成绩评分标准

本课程最终成绩构成方式如下：

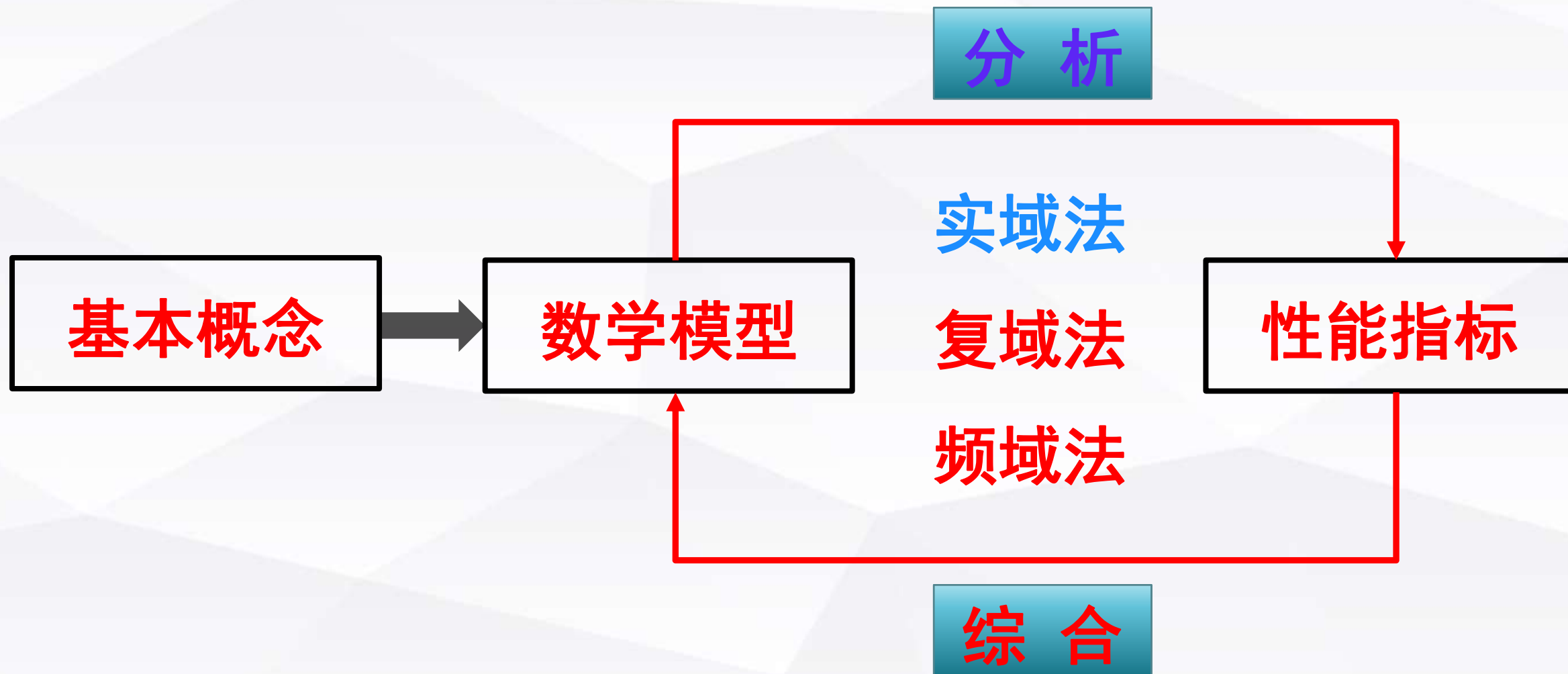
期末考试： 65% (题型：均为计算题)

期中考试： 10% (9或10周)

作 业： 15% (三次不交取消考试资格，助教记录)

签 到： 10% (三次不到取消考试资格，课上点名记录)

课程知识体系脉络图



第一章 绪论 自动控制理论基本概念

- 1.1 自动控制、自动控制系统以及自动控制理论
- 1.2 控制问题的表示方法：方框图及其绘制
- 1.3 自动控制系统的基本要求
- 1.4 自动控制系统的基本形式
- 1.5 自动控制系统的分类
- 1.6 自动控制系统的建模、分析与设计（综合）
- 1.7 控制理论的发展历史

§ 1.1 自动控制&系统&理论

自动控制

在无人直接参与的情况下，利用控制装置，使被控对象（工作机械、生产过程）的被控量（物理量、工作状态）按照给定的规律（给定量）运行。

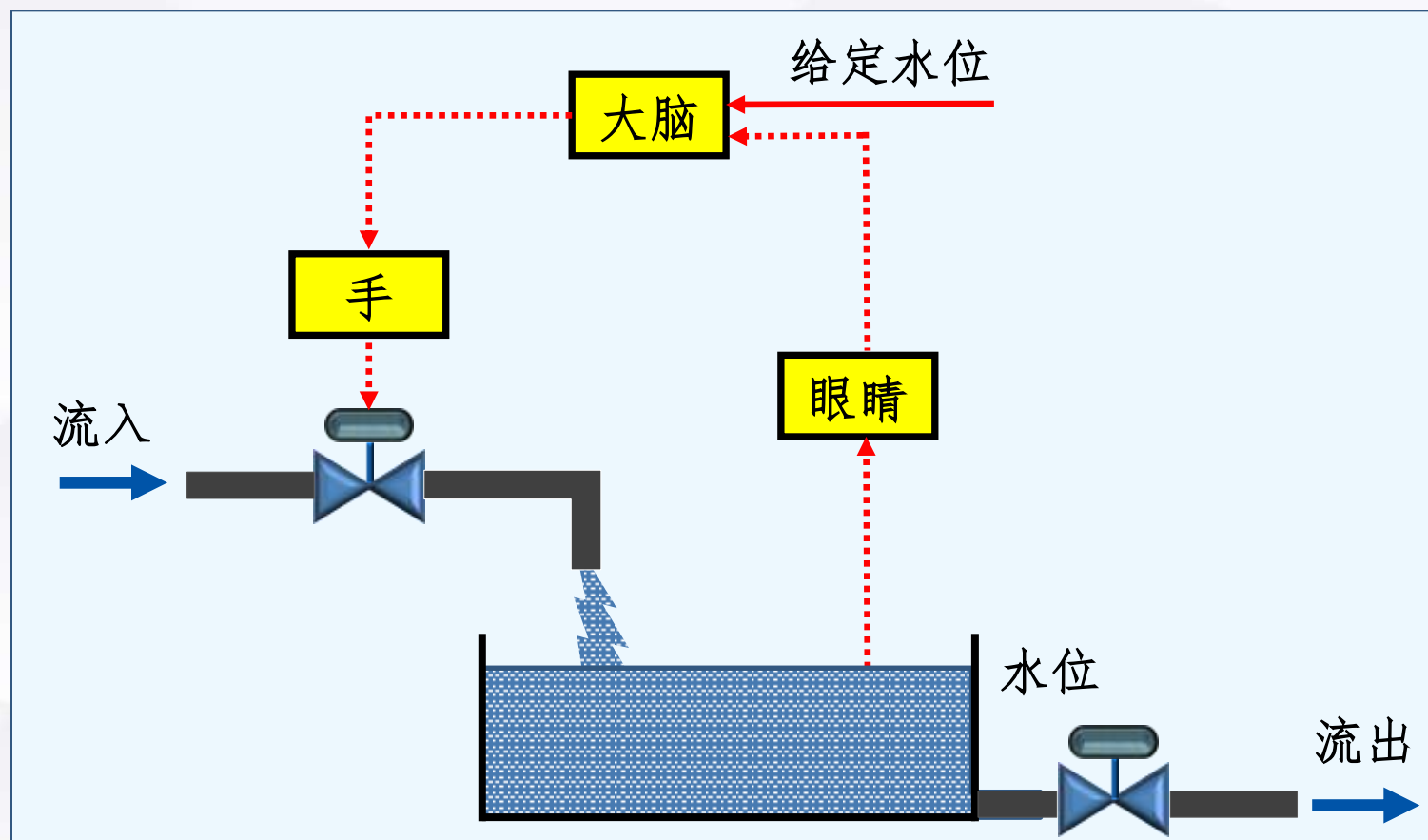
自动控制系统

自动控制系统指被控对象的某一物理量（或工作状态）能够实现自动控制的系统，由被控对象和控制装置组成。

§ 1.1 自动控制&系统&理论

例：水位控制系统，使水箱内水位保持恒定以满足供水需求。

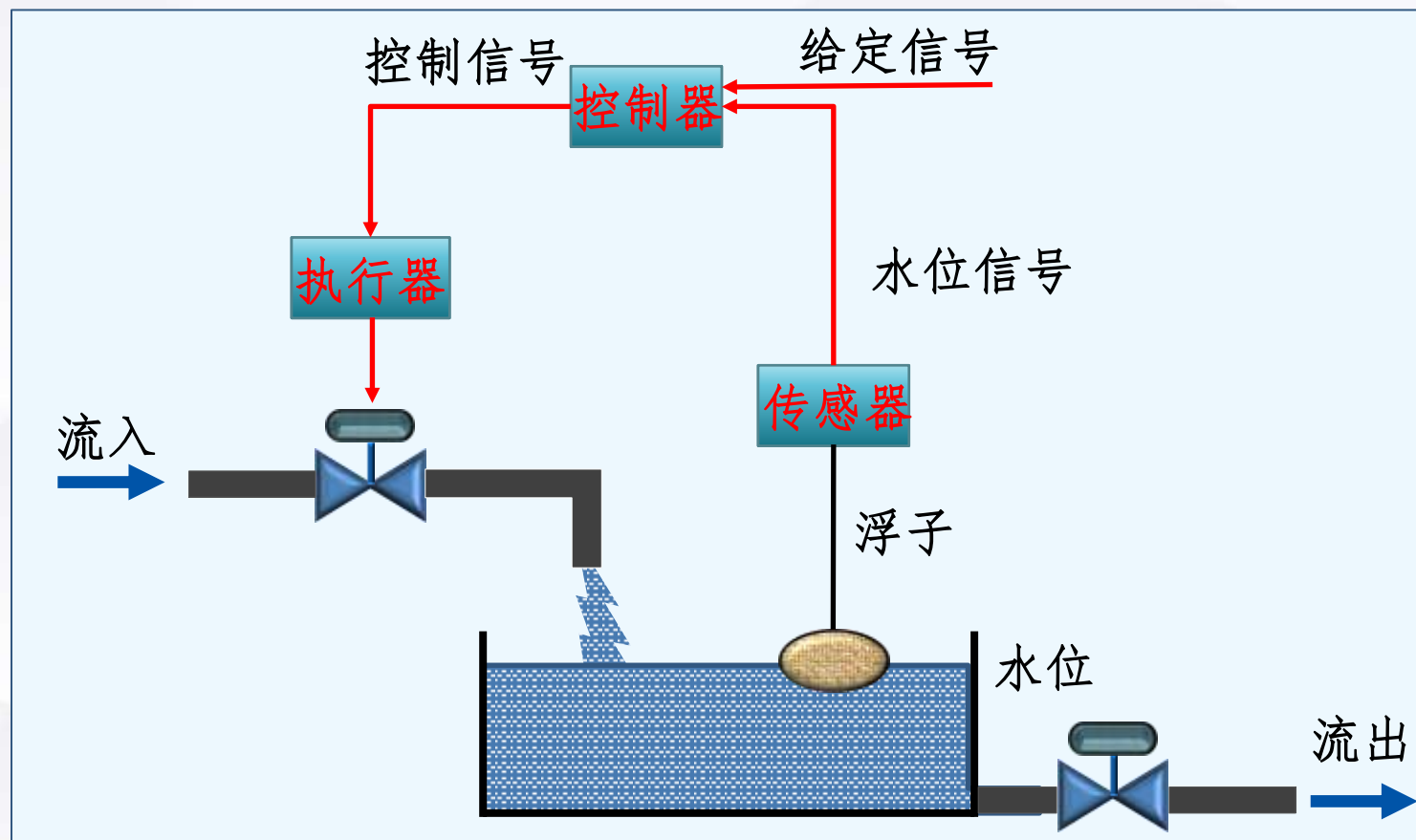
人工控制方式



§ 1.1 自动控制&系统&理论

采用机械装置对水位系统实施恒定水位控制的过程：

自动控制方式



§ 1.1 自动控制&系统&理论

自动控制理论

研究自动控制系统**建模、分析和设计方法的一般性理论**, 是研究**自动控制过程共同规律**的学科。

理解:

- ① 研究对象针对某个具体控制系统（不是针对你）
- ② 由某个具体控制系统建立的控制模型可以描述的所有系统均被研究了（而是说在座的各位）

§ 1.1 自动控制&系统&理论

自动控制理论

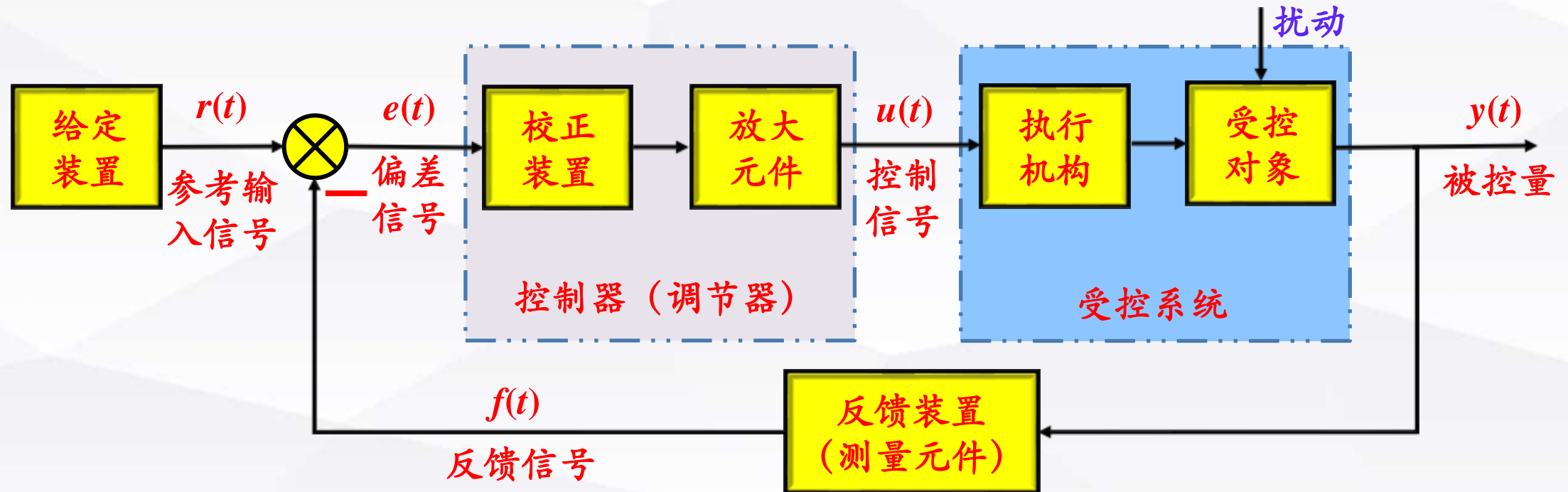
研究自动控制系统**建模、分析和设计方法的一般性理论**, 是研究**自动控制过程共同规律**的学科。

自动控制理论的核心：控制问题

通过对系统有关信息的采集、加工和处理以形成适当控制作用, 对系统进行控制使之在扰动和不确定性因素作用下, 能实现所要求的功能。

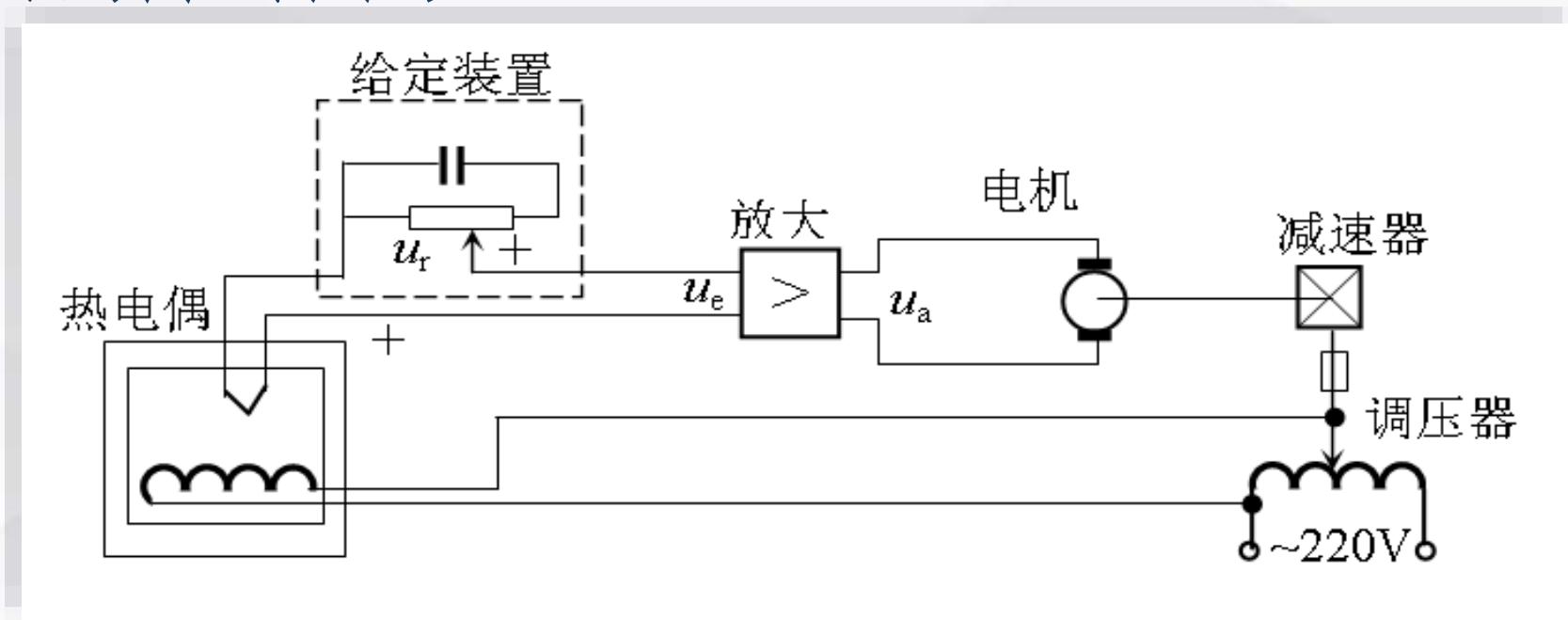
§ 1.2 控制问题的表示方法：方块图

方块图：可以直观的将系统中的信号传递、加工和决策控制的问题定性表示出来。自动控制系统的典型方块图如下所示：



§ 1.2 控制问题的表示方法：方块图

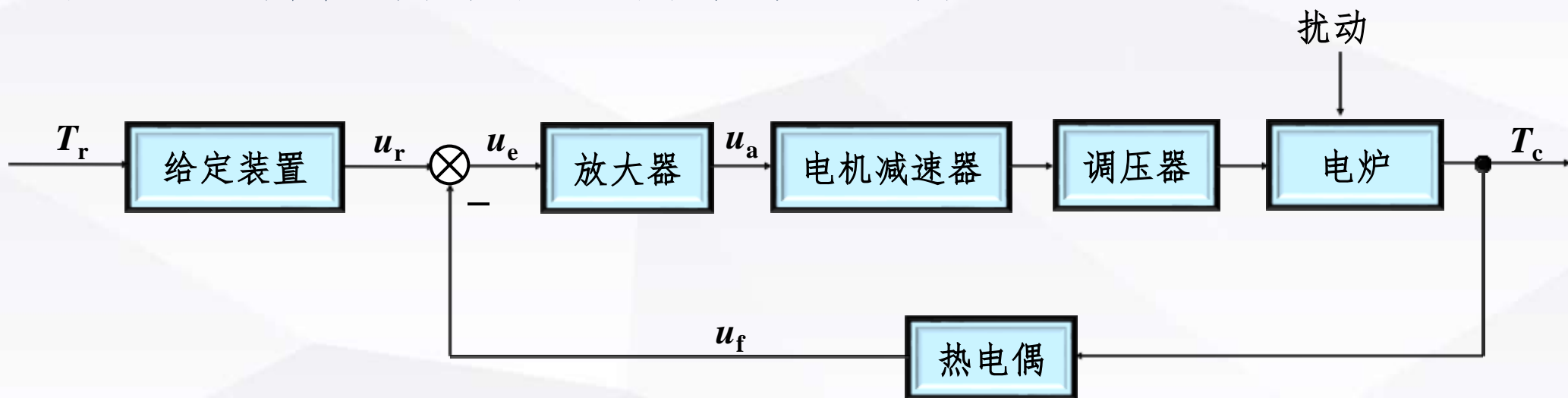
例：炉温自动控制系统



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。

§ 1.2 控制问题的表示方法：方块图

例：炉温自动控制系统方块图绘制：

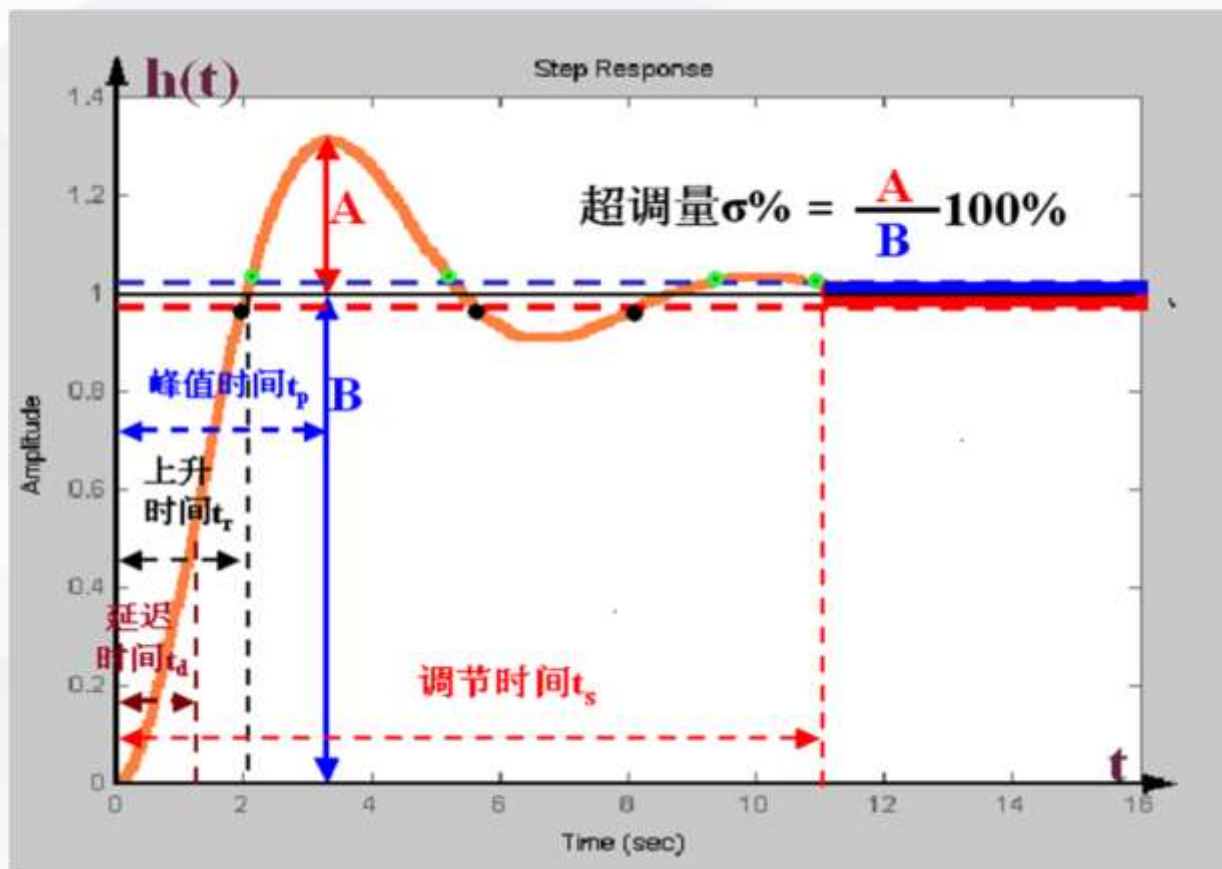


原理：当炉内温度偏高时，调压器降压；反之升压，直到炉内温度达到给定值为止。此时偏差电压 $u_e=0$ ，电机停转。

若受到外界扰动，则炉内温度 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方向加速旋转 $\rightarrow T_c \uparrow \rightarrow u_f \uparrow$ ，若 $T_c = T_r$ ， $u_e = 0$ 。

§ 1.3 自动控制系统的基本要求

典型二阶欠阻尼系统单位阶跃响应曲线



稳: 系统的**稳定性**；恢复平衡状态的能力

准: 系统稳态（静态）性能的要求；

稳态误差

快: 系统动态（过渡过程）性能的要求；

平稳（超调小振荡小）

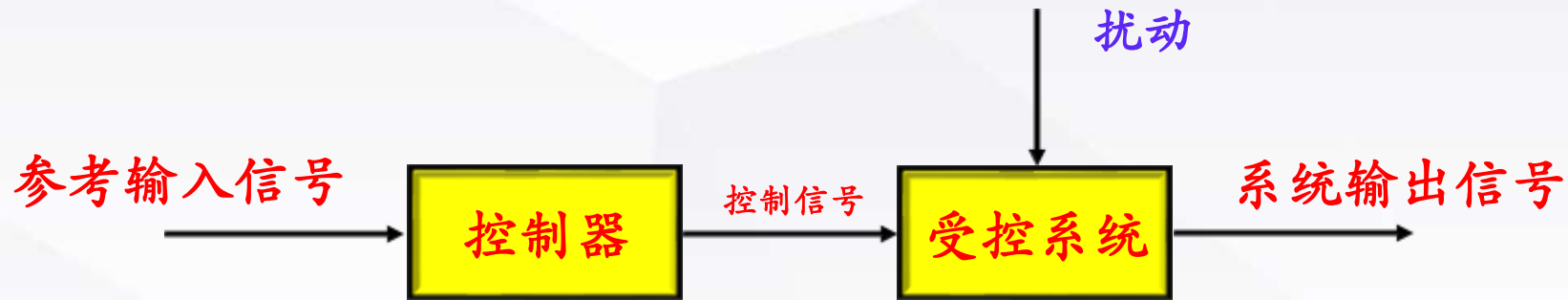
快速（过渡到新平衡态时间短）

稳定性是控制系统工作的基本前提

三个性能指标之间通常相互制约
实际应用中应根据需求有所侧重

§ 1.4 自动控制系统的基本形式：① 开环控制系统

开环控制系统方块图



特点：只有信号的前向通道而不存在由输出端到输入端反馈通路系统

控制作用不受输出影响；

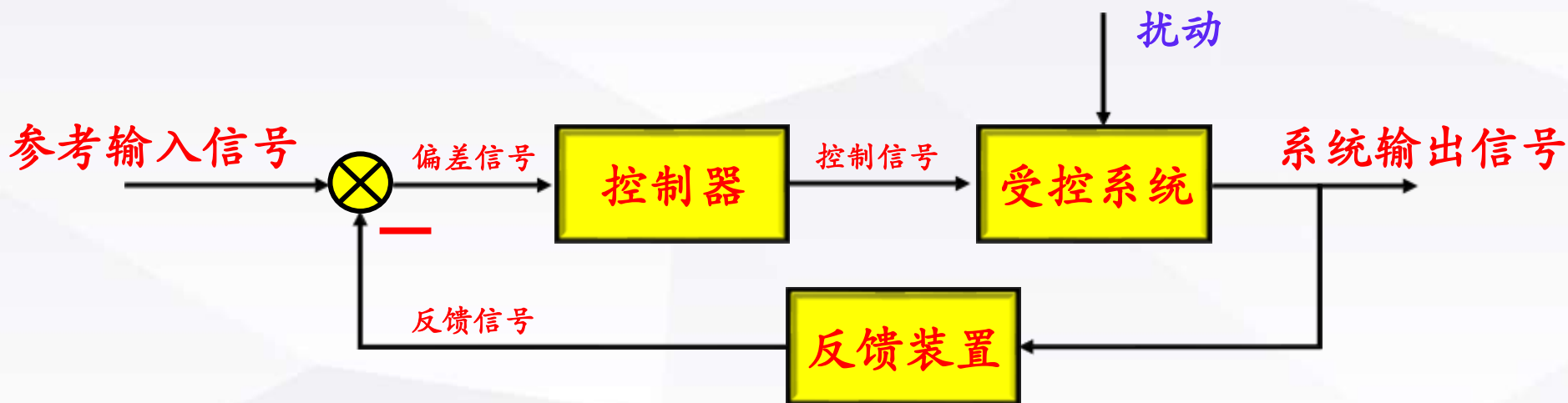
优点：结构简单，易于构造、调整方便、成本低

缺点：抗扰动能力差，控制精度低

范围：精度要求不高、扰动影响较小或扰动作用可以加以补偿的场合

§ 1.4 自动控制系统的基本形式：② 闭环控制系统

闭环控制系统方块图



特点：把输出量（**主**）反馈到输入端，通过比较输入值与输出值，产生偏差信号，并按照偏差产生控制作用，逐步减小或消除偏差

优点：对参数变化不敏感，可选取不太精密的元件，构成较为精密的控制系统，获得满意的动态特性和控制精度

§ 1.4 自动控制系统的基本形式：② 闭环控制系统

缺点：结构相对复杂，存在**稳定性**问题—环节中存在惯性、延时等，使得被控信号不能及时反映到控制作用的变化中，产生过度控制与振荡等

范围：**反馈控制**是抑制扰动和不确定性因素影响、提高系统控制精度的有效方法，是现代自动控制系统的基本形式，也是研究的**主要对象**

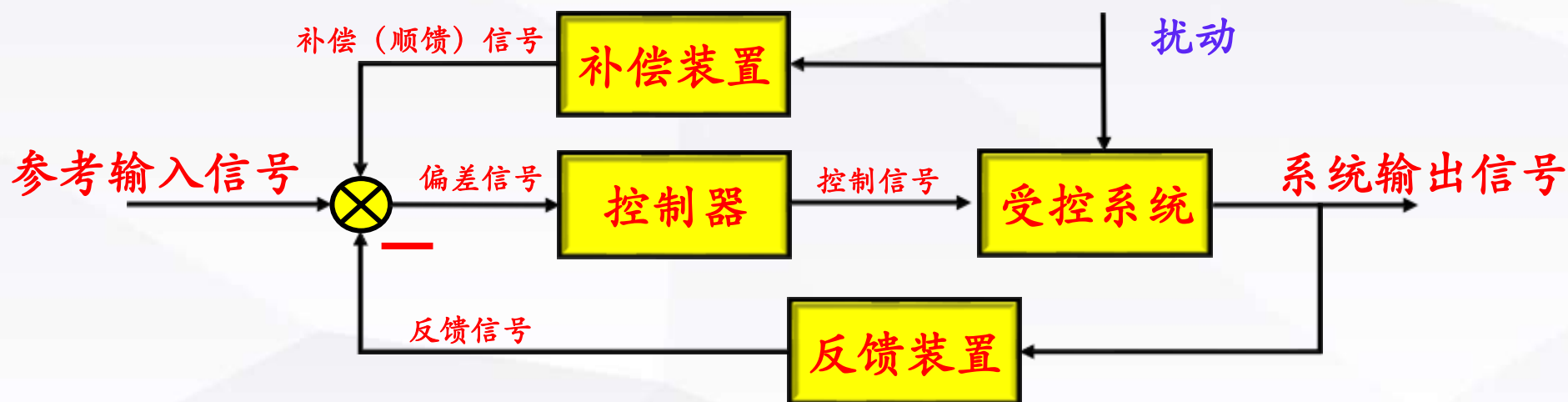
自动控制的基本原理

负反馈原理*

将系统的**输出信号**引回到**输入端**，与输入信号相比较，利用所得的**偏差信号**对系统进行调节，以达到**减小偏差或消除偏差**的目的。

§ 1.4 自动控制系统的基本形式：③ 复合控制系统

复合控制系统方块图



特点：开环、闭环相结合；在**反馈控制**基础之上，通过引入按扰动输入信号的补偿作用实现**顺馈控制**，以减小输入信号所引起的系统误差

优点：精度高

范围：干扰信号必须是可检测的，此要求非常苛刻，通常难以实现

§ 1.5 自动控制系统的分类

粗略地，控制系统可按照如下方式进行简单的分类：

一、按数学模型的特征：线性系统与非线性系统

$$\dot{x} = ax + bu \quad \text{和} \quad \dot{x} = f(x, u) = \sin(xu)$$

二、按信号的性质：连续时间信号与离散时间信号

$$\dot{x} = ax + bu \quad \text{和} \quad x(k+1) = ax(k) + bu(k)$$

三、按系统参数或结构是否随时间变化：定常系统和时变系统

$$\dot{x} = ax + bu \quad \text{和} \quad \dot{x} = a(t)x + b(t)u$$

注：简单起见，上述系统输出信号均假设为： $y = x$

§ 1.5 自动控制系统的分类

四、按输入/输出信号的数量：单输入单输出系统与多输入多输出系统

$$\begin{aligned}\dot{x} &= Ax + bu, \\ y &= c^T x + du \in R \\ x &\in R^n, u \in R\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx + Du \in R^m \\ x &\in R^n, u \in R^m\end{aligned}$$

五、按输入信号的变化规律：恒值控制系统与随动控制系统

前者是指控制输入信号是恒值，要求被控量保持不变，如水箱控制系统；

后者也称伺服系统，是指控制输入信号是规律未知的时间函数，要求被控量按相同规律变化并与控制输入信号保持在规定范围内，如自动火炮系统，函数记录仪等。

六、按信号或被控对象模型的确定性：确定性系统与不确定性系统

§ 1.6 自动控制系统的建模、分析与设计（综合）

建模： 建立适用的控制系统数学模型是分析和设计的前提

①数学模型

描述系统输入/输出信号之间或它们与系统内部状态关系的数学表达式。建立系统的数学模型，是对控制系统进行分析和设计的基础。

②建模方法

机理建模： 根据系统中各元部件所遵循的客观规律和运行机理写出相应的关系式，到处系统的数学模型，也称解析法建模；

系统辨识： 人为的给系统施加某种测试信号，记录该输入及相应的输出相应，并用适当的数学模型去逼近系统的输入输出特性，也称系统辨识法。

③建模的必要性思考：人工智能时代，建模的必要性还有吗？

§ 1.6 自动控制系统的建模、分析与设计（综合）

分析：

对控制系统的基本要求是：系统的被控量应迅速准确地按参考信号的变化而相应变化，且尽量减少任何干扰信号的不利影响，包括：稳定性、动态特性、稳态特性和鲁棒特性等。

分析方法包括定量分析和定性分析两种：

①定量分析：

利用系统的数学模型，求解在不同输入、不同初始条件下或不同系统参数下系统的输出响应，并与要求的系统性能作比较、求解析解或进行计算机数值仿真。

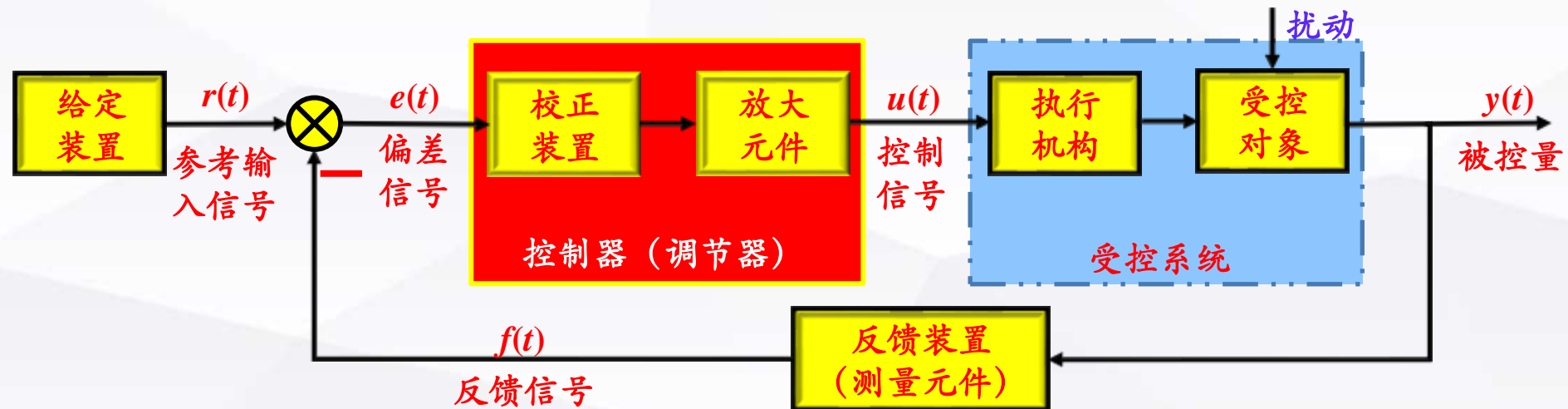
②定性分析：

利用系统数学模型的参数，通过一些判据来判断系统的性能，如稳定性、动态响应特性、稳态误差等。

§ 1.6 自动控制系统的建模、分析与设计（综合）

设计（综合）

根据被控对象的特点以及对控制系统的任务和要求，构造适当的控制器（主要是校正装置）来满足控制系统的要求。系统设计过程不是一个简单的一次可以完成的过程，而是一个**逐步试探**的过程。



§ 1.7 控制理论的发展历史：三个阶段

经典控制理论：40-50年代

以传递函数为基础，研究单输入、单输出系统的分析和设计，针对线性定常系统，主要研究方法有**时域分析法、根轨迹法和频率特性法**。

现代控制理论：60-70年代

矩阵理论等近代数学方法作为工具，主要研究方法是状态空间法，把高阶常微分方程转化为一阶常微分方程组来描述系统，解决多输入多输出问题，可处理多变量、非线性、时变系统。

智能控制理论：70年代至今

最优控制、系统辨识、多变量控制、**自适应控制**、专家系统、**人工智能**、**神经网络控制**、模糊控制、大系统理论等等。

§ 1.7 控制理论的发展历史：萌芽



Alexander Lyapunov

第一次技术革命（机械化）

- ① 俄国人波尔佐诺夫发明锅炉水位调节器。
- ② 英国人瓦特（于1770）发明蒸汽机离心飞锤式调速器，萌生了自动控制的初步思想，引发稳定性问题的思考。
- ③ **爱德华·劳斯**（于1877）和赫尔维茨（于1895）分别独立提出了系统稳定的代数判据。

- ④ **亚历山大·李雅普诺夫**于1892年发表专著《论运动稳定性的一般问题》，全面建立了稳定性问题分析方法。

注：一个经典的Lyapunov函数 $\dot{V}(x) = x^T P x$

§ 1.7 控制理论的发展历史：奠基

20世纪—经典控制论

① 20世纪30~40年代，奈奎斯特提出系统稳定性的频率判据：奈氏图、奈氏判据，从时域分析转到频域分析

② 1940年，伯德在频率法中引入对数坐标系，伯德图



诺伯特·维纳 (1894-1964)

③ 1942年，哈里斯引入传递函数概念

④ 1948年，伊万思提出根轨迹分析方法

⑤ 1949年，英国人诺伯特·维纳在火炮控制中发现了反馈的概念，发表了《控制——关于在动物和机器中控制和通讯的科学》，奠定了控制论（**Cybernetics**）的基础

⑥ 20世纪50年代中期，随着非线性系统理论和离散控制理论的研究深入，控制理论形成了完整的理论体系

§ 1.7 控制理论的发展历史：大发展



鲁道夫·卡尔曼 (1930–2016)：提出Kalman Filter的算法，给出了线性系统的状态空间基本分析方法，建立了可控性和可观性等基础性概念，为现代控制理论的发展提供了非常坚实的数学基础。

His passing not only brought about personal loss but also a sad reminder of the passing of a golden era in systems and control.

1953–1957年，理查德·贝尔曼创立“动态规划”原理为了解决多阶段决策过程逐步创立的，依据最优化原理，用一组基本的递推关系式使过程连续地最优转移。“动态规划”对于研究最优控制理论的重要性，表现于可得出离散时间系统的理论结果和迭代算法。

动态规划理论，是机器学习、增强学习和深度学习的重要理论基础，是推动人工智能发展的基础性理论。



§ 1.7 控制理论的发展历史：大发展



钱学森：1911年12月11日生，浙江杭州人，1959年8月加入中国共产党，中国工程院院士，“两弹一星功勋奖章”获得者。

[详见：钱学森简介-中国科学院 \(cas.cn\)](http://cas.cn)

1954年首创“工程控制论”，随后提出：

生物控制论：生命系统

经济控制论：经济运行与发展问题

社会控制论：社会管理与社会服务问题

总之，自动控制技术迅速渗透到许多学科，应用于火炮、导弹控制系统，数控、电力、冶金。随着计算机技术的发展，控制论无论在内涵上，还是在深度上和广度上都发展变化着，对促进生产的发展和社会进步产生深远的影响。

作业

1. B1.1, B1.2, B1.7

2. 复习傅里叶变换, 写一份研究报告

注意: B1.1可通过上网查资料给出分析结果