

自动控制原理

(Principle of Automatic Control)

• 河北工程大学机械与装备工程学院

• 任课教师：白小帆

• 2024-1-15



教学课时、考试安排及参考书目

- ◆ 学时：36（授课）+ 4（实验）
- ◆ 教学时间：1-9周
- ◆ 上课地点：J01西418，周二1-2节，周六5-6节
- ◆ 考试：**闭卷考试**（填空题 10×1 分，选择题 15×2 分，计算题 5×12 分）
- ◆ 成绩评定：10%平时成绩（上课情况）+20%实验和作业成绩（2次实验+ 3次作业）
+70%考试成绩
- ◆ 参考书目：自动控制原理（第7版），胡寿松，北京：科学出版社，2019
现代控制工程（第5版），Katsuhiko Ogata，北京：电子工业出版社，2015



前言



Q1-0: 为什么要学习自动控制原理?

第一：个人综合知识素质提升（自动化无处不在，工业智能制造、农业、日常生活...）

第二：机器人专业需求





课程目标与课程特点

对象：简单的线性时不变系统

内容：控制的基本原理和方法

目标：学会分析、设计与实现简单的控制系统

特点：了解控制的概念，易！

实施恰当的控制，**难**！

课堂要求：

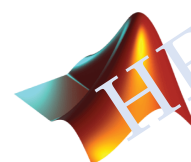
1. 请假问题

2. 提问、发言与讨论

概念多，抽象数学模型，计算繁杂



学会利用计算机软件帮助学习和设计



MATLAB



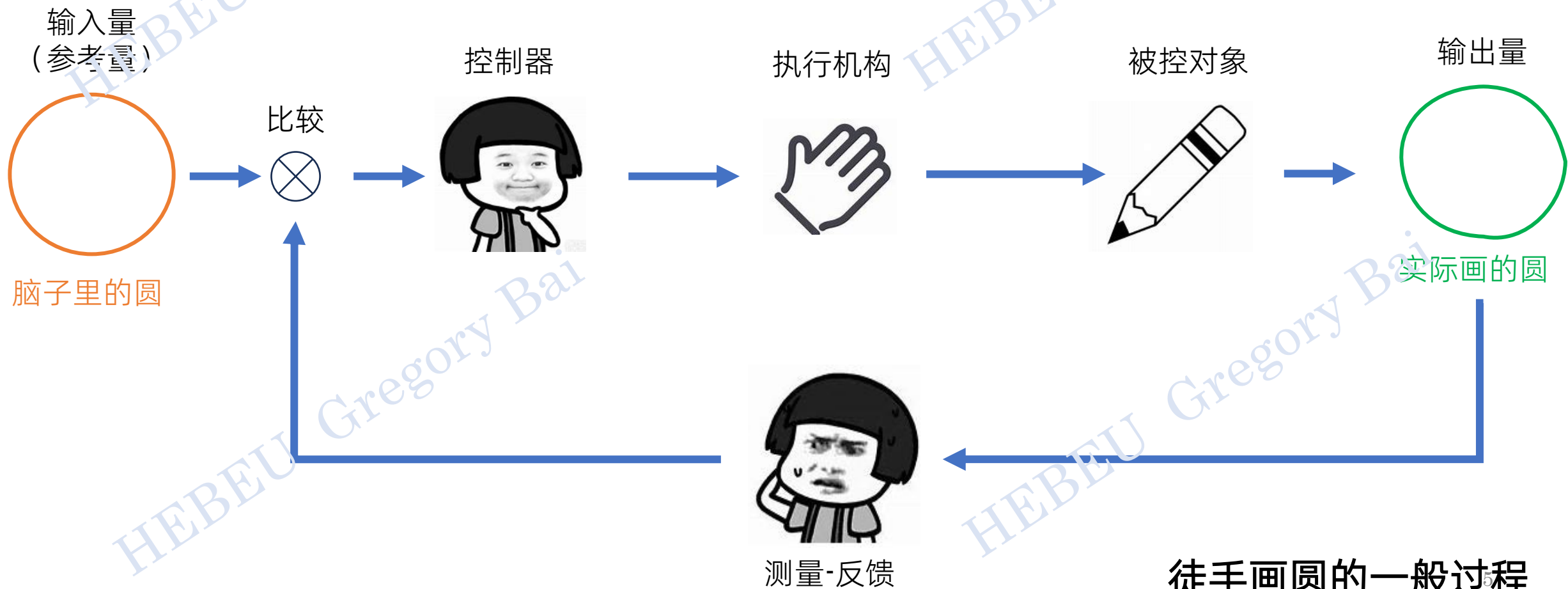
MATLAB或Python





Q1-1:什么是自动控制?

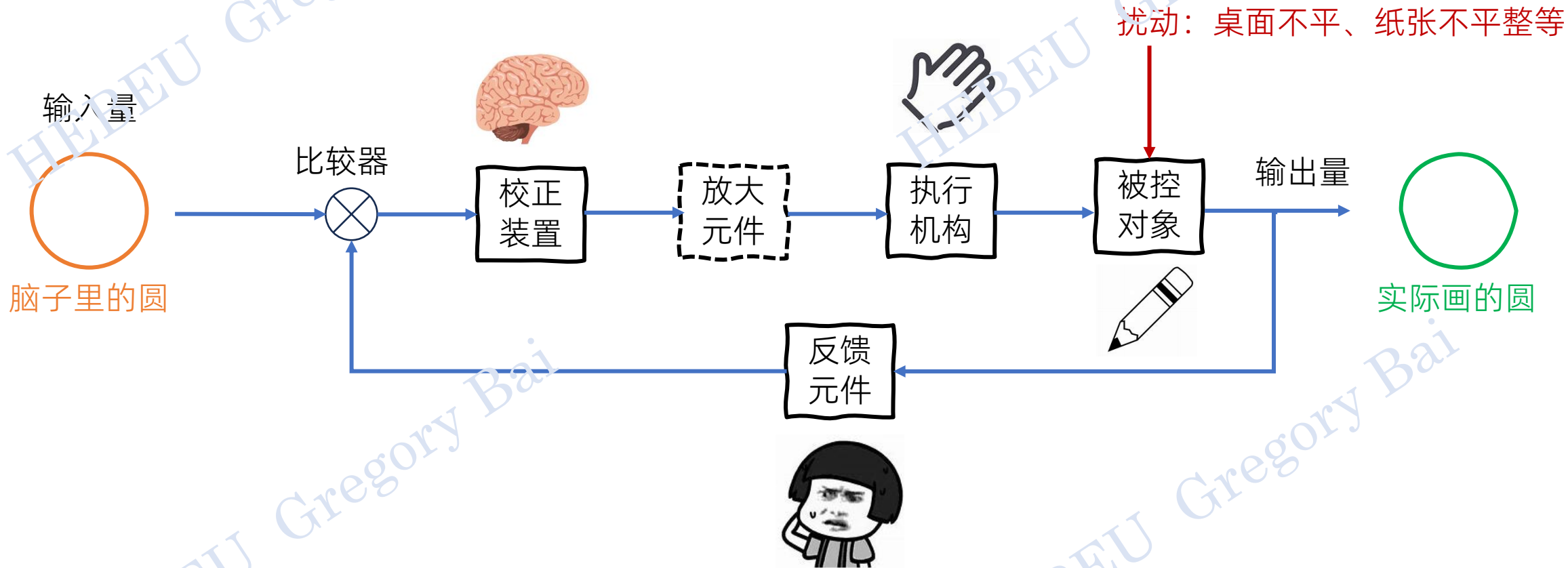
举个例子：如何徒手画圆？





Q1-1:什么是自动控制?

举个例子：徒手画圆（专业名词）



画圆自动控制系统框图



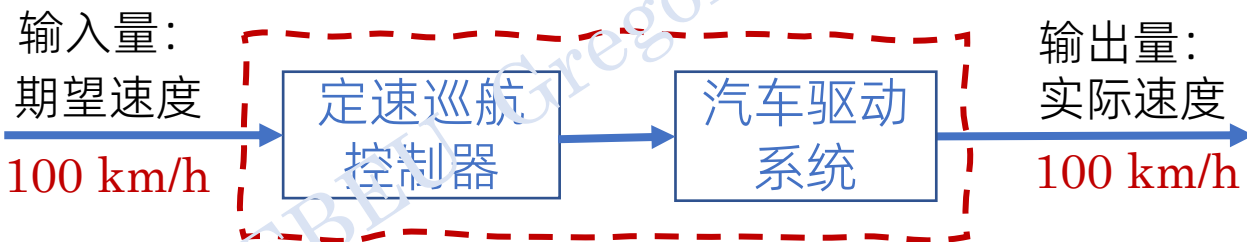
Q1-1:什么是自动控制?

自动控制原理

控制：是指为了确保组织（机构）内各项计划按规定去完成而进行的监督和纠偏的过程。

自动控制：不需借着人力亲自操作机器或机构，而能利用动物以外的其他装置元件来达成人类所期盼执行的工作。

（书定义P-1）



Q1-2：骑自行车时如何控制速度？

Q1-3：骑电动车/摩托车时如何控制速度？

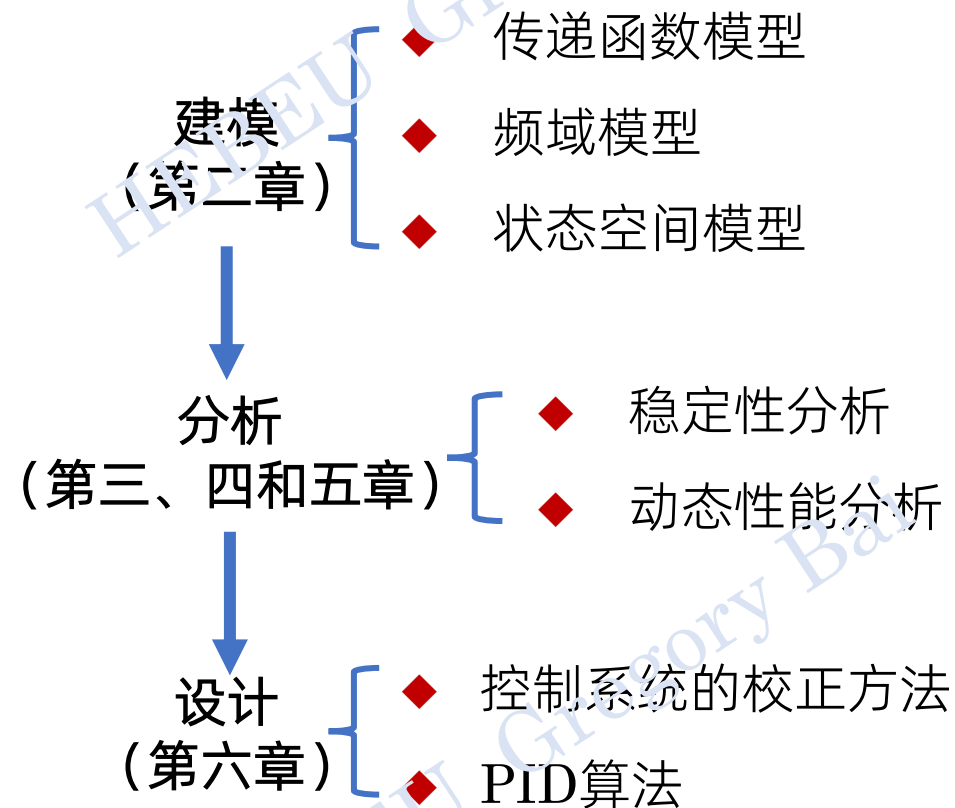
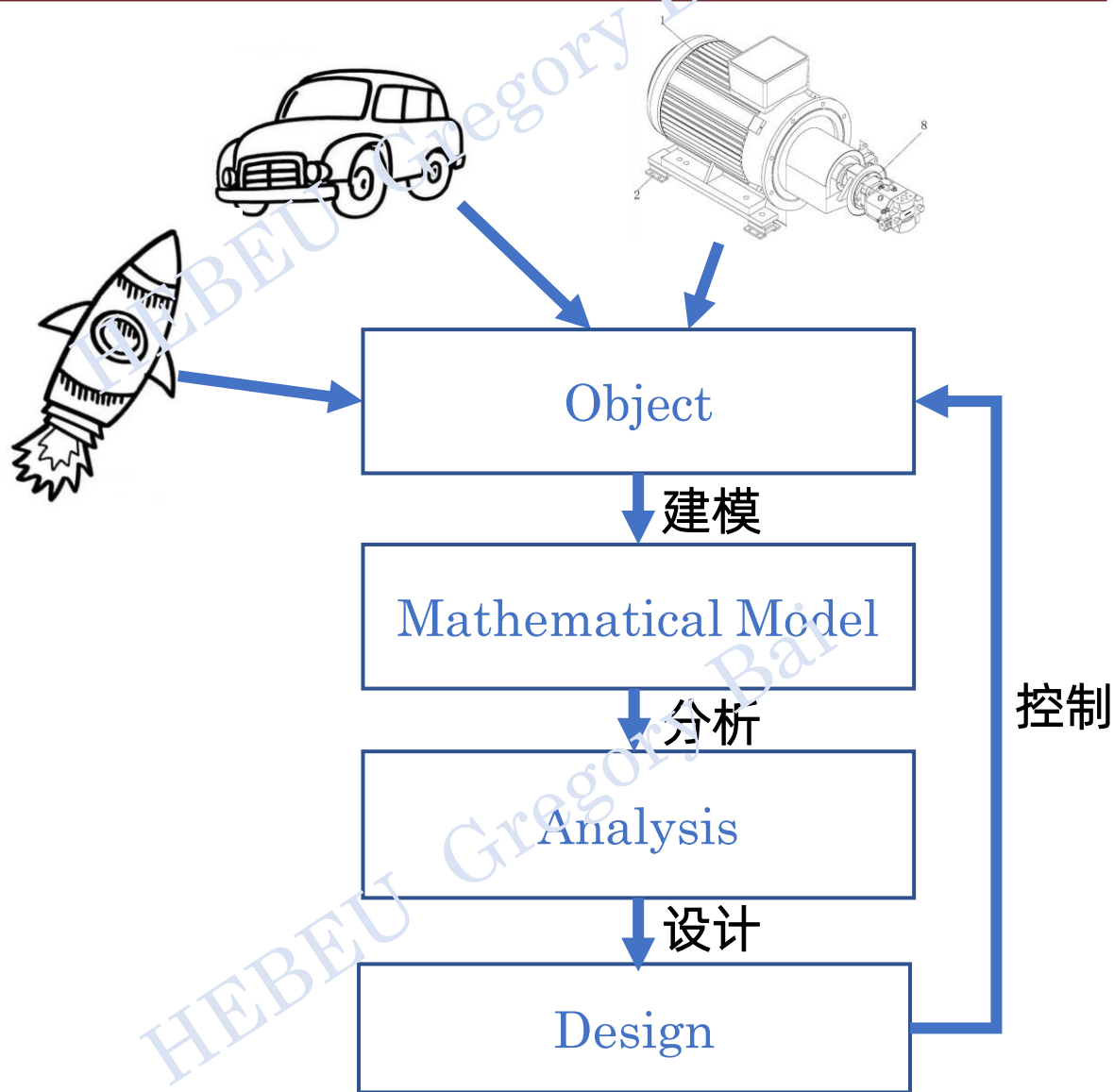
Q1-4：骑电动车/摩托车时通过油门控制速度算不算自动控制？



Q1-5：开汽车时通过定速巡航装置控制车速算不算自动控制？



自动控制原理的主要内容





第一章 绪论

- ◆ 1-1 自动控制理论的发展：了解自动控制理论发展的四个主要阶段。
- ◆ 1-2 基本概念：明确什么叫自动控制，正确理解被控对象、控制装置和自控系统等概念。
- ◆ 1-3 控制系统的分类：明确系统常用的分类方式，掌握各类别的含义和信息特征。
- ◆ 1-4 基本要求：明确对自控系统的基本要求，正确理解三大性能指标的含义。



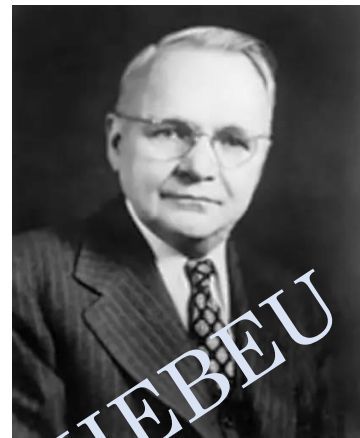
1-1 自动控制理论的发展历史

自动控制理论是研究自动控制共同规律的技术科学。既是一门古老的、成熟的学科，又是一门正在发展的、具有强大生命力的新兴学科。从1868年麦克斯威尔（J. C. Maxwell）提出低阶系统稳定性判据至今一百多年里，自动控制理论的发展可分为四个主要阶段：

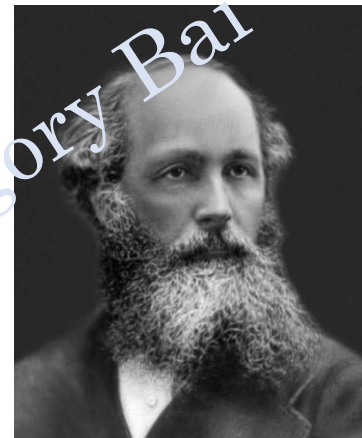
- ◆ 第一阶段：经典控制理论（或古典控制理论）的产生、发展和成熟；
- ◆ 第二阶段：现代控制理论的兴起和发展；
- ◆ 第三阶段：大系统控制兴起和发展阶段；
- ◆ 第四阶段：智能控制发展阶段。



钱学森
(1911-2009)



Harry Nyquist
(1889-1976)



J. C. Maxwell
(1831-1879)¹⁰

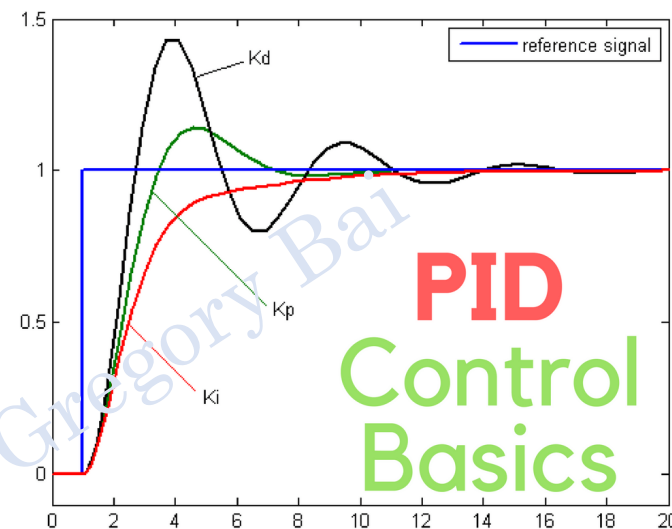


1-1-1 经典控制理论

控制理论的发展初期，是以**反馈理论**为基础的自动调节原理，主要用于工业控制。第二次世界大战期间，为了设计和制造飞机及船用自动驾驶仪、火炮定位系统、雷达跟踪系统等基于反馈原理的军用装备，进一步促进和完善了自动控制理论的发展。

- ◆ 1868年，马克斯威尔（J. C. Maxwell）提出了**低阶系统的稳定性代数判据**。
- ◆ 1875年和1896年，数学家劳斯（Routh）和赫尔维茨（Hurwitz）分别独立地提出了**高阶系统的稳定性判据**，即**Routh-Hurwitz判据**。
- ◆ 二战期间（1938-1945年）奈奎斯特（H. Nyquist）提出了频率响应理论。
- ◆ 1948年，伊万斯（W. R. Evans）提出了根轨迹法。

至此，控制理论发展的第一阶段基本完成，形成了以**频率法**和**根轨迹法**为主要方法的经典控制理论。





1-1-1 经典控制理论

经典控制理论的基本特征:

- ◆ 主要用于线性定常系统的研究，即用于常系数线性微分方程描述的系统的分析与综合；
- ◆ 只用于单输入/单输出(SISO)的反馈控制系统；
- ◆ 基本方法：根轨迹法、频率法；
- ◆ 经典控制理论只注重系统的外部描述而忽视系统的内部状态，在实际应用中有很大的局限性。





1-1-1 经典控制理论(举例)



二战时期防空炮：
通过高低机和方位机纯人工瞄准



美国“密集阵”近防炮：
1973年服役，能实现自动探测、跟踪、锁定和攻击

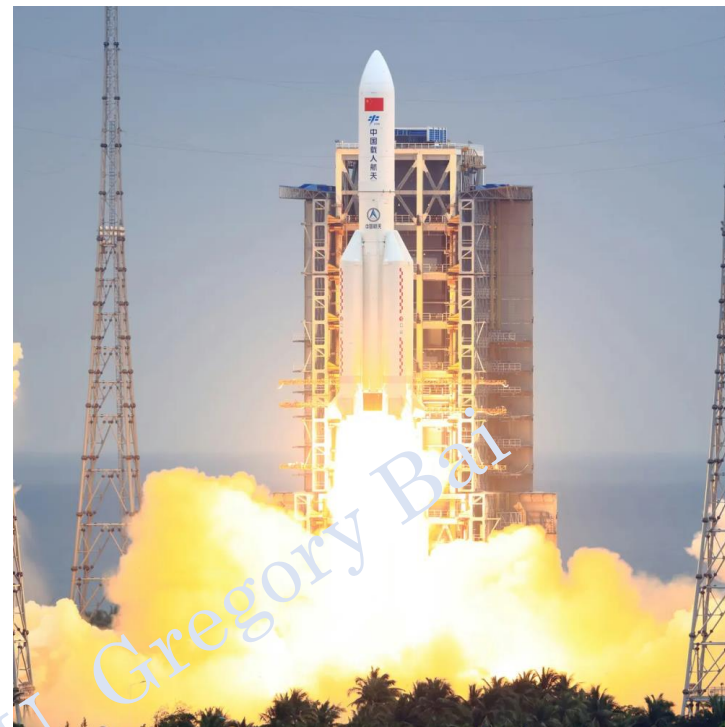
中国1130近防炮：
配有雷达、红外线追踪系统；系统装有11个炮管、2个弹舱，1次能够锁定40多个目标，最大火力为每分钟10 000发



1-1-2 现代控制理论

随着航天事业和计算机的发展，20世纪60年代初，在经典控制理论的基础上，以线性代数理论和状态空间分析法为基础的现代控制理论迅速发展起来：

- ◆ 1954年贝尔曼（R. Belman）提出动态规划理论
- ◆ 1956年庞特里雅金（L. S. Pontryagin）提出极大值原理
- ◆ 1960年卡尔曼（R. K. Kalman）提出多变量最优控制和最优滤波理论





1-1-2 现代控制理论

现代控制理论的基本特征:

在数学工具、理论基础和研究方法上不仅能提供系统的外部信息（输出量和输入量），而且还能提供系统内部状态变量的信息。它无论对线性系统或非线性系统，定常系统或时变系统，单变量系统或多变量系统，都是一种有效的分析方法。

◆ 基本方法：状态方程

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u} \\ \mathbf{y} = \mathbf{C}\mathbf{x} + \mathbf{D}\mathbf{u} \end{cases}$$



1-1-2 现代控制理论



俄罗斯现代级：
单臂式SA-N-7防空导弹



国产055驱逐舰：垂直发射单元





1-1-3 大系统理论

20世纪70年代开始，现代控制理论继续向深度和广度发展，出现了一些新的控制方法和理论。如：

- ◆ 现代频域方法：以传递函数矩阵为数学模型，研究线性定常多变量系统；
- ◆ 自适应控制理论和方法：以系统辨识和参数估计为基础，在实时辨识基础上在线确定最优控制规律；
- ◆ 鲁棒控制方法：在保证系统稳定性和其它性能基础上，设计不变的鲁棒控制器，以处理数学模型的不确定性。



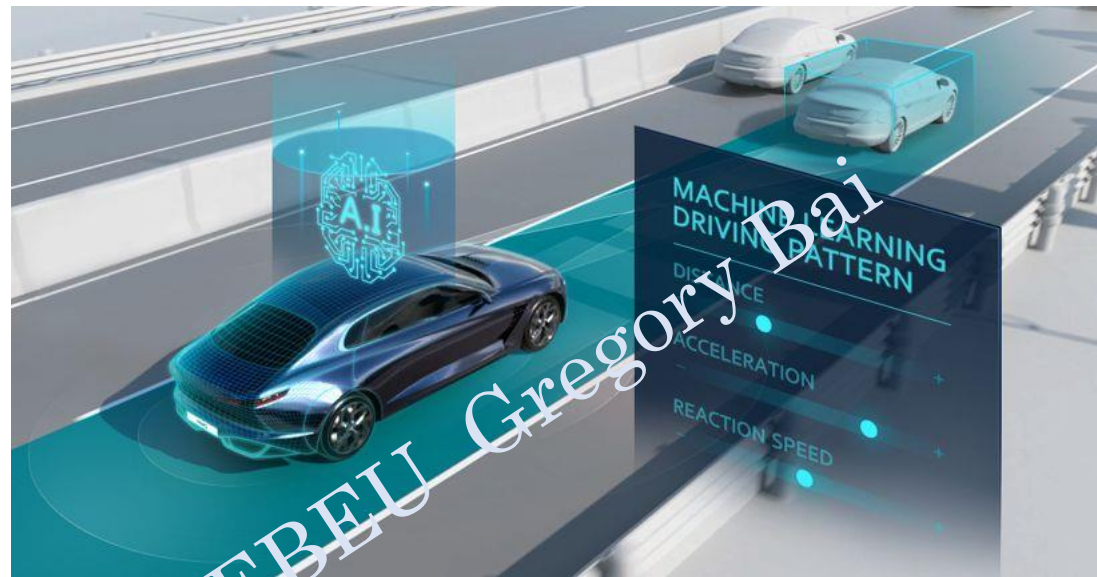
电网控制是大系统理论的典型应用之一



1-1-4 智能控制

智能控制理论是近年来新发展起来的一种控制技术，是人工智能在控制上的应用。智能控制的概念和原理主要是针对被控对象、环境、控制目标或任务的复杂性提出来的，它的指导思想是依据人的思维方式和处理问题的技巧，解决那些目前需要人的智能才能解决的复杂控制问题。

- ◆ 被控对象的复杂性体现为：模型的不确定性，高度非线性，分布式的传感器和执行器，动态突变，多时间标度，复杂的信息模式，庞大的数据量，以及严格的特性指标等。
- ◆ 智能控制是驱动智能机器自主地实现其目标的过程。
- ◆ 智能控制是从“仿人”的概念出发的，其方法包括：机器学习、模糊控制、神经网络控制和专家控制等方法。



自动驾驶

Deep Reinforcement Learning, DRL



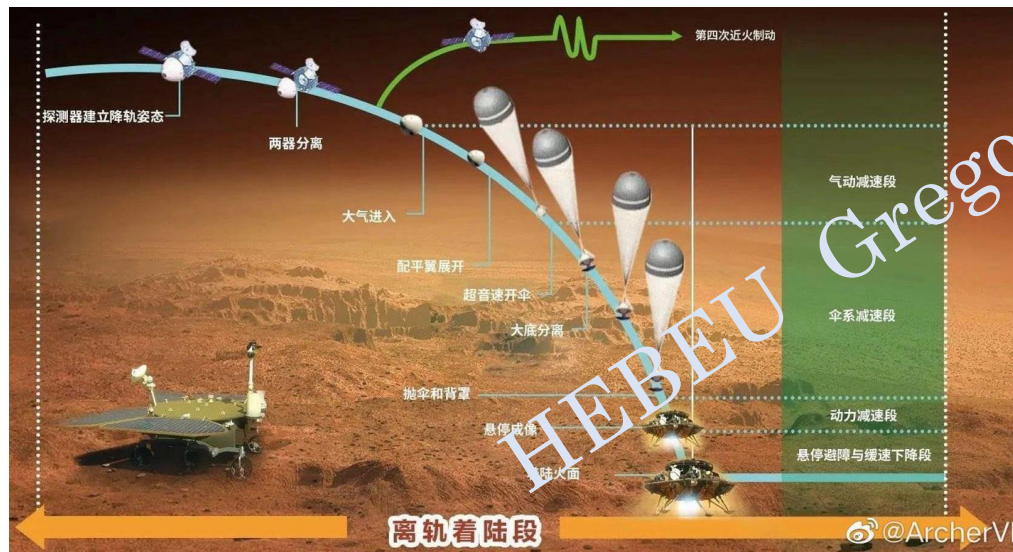
1-1-5 我们的自动控制之路



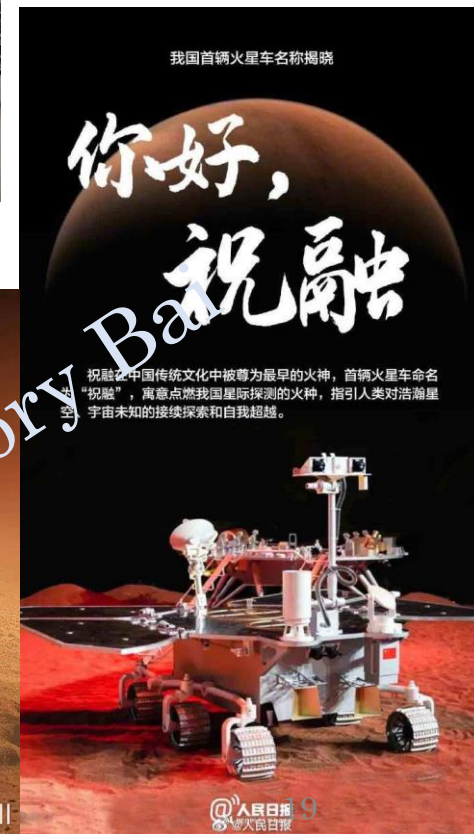
上世纪50年代宝鸡石油钢管厂投产



现在的宝鸡石油钢管厂生产线



2020年5月祝融号火星车成功着陆





1-2 自动控制方式的基本原理与方式

- ◆ **自动控制定义**：就是在没有人直接参与的情况下，利用外加的设备或装置（**控制装置或控制器**），使机器、设备或生产过程（统称控制对象）的某个工作状态或参数（**被控量**）自动地按照预定的规律运行。
- ◆ **自动控制系统**：是指能够对被控对象的工作状态进行**自动控制**的系统。它是控制对象以及参与实现其被控制量自动控制的装置或元部件的组合，一般由控制装置和被控对象组成。
- ◆ 一般包括3种元件：**测量元件**、**比较元件**、**执行元件**。

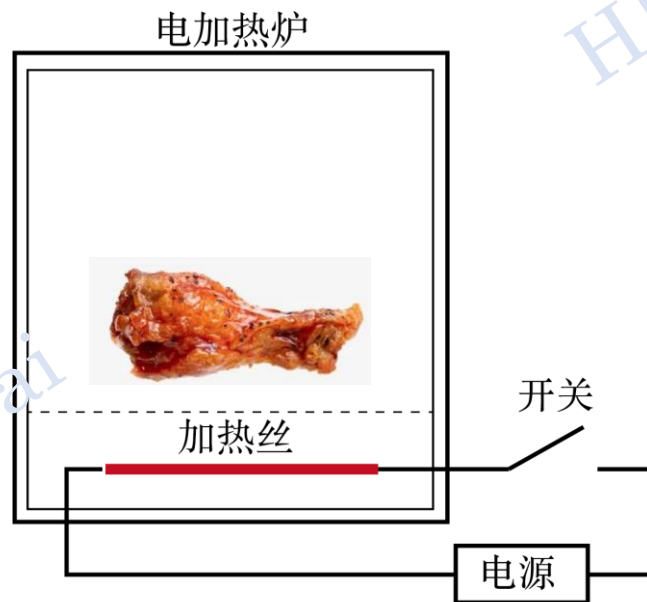


1-2 自动控制方式的基本原理与方式

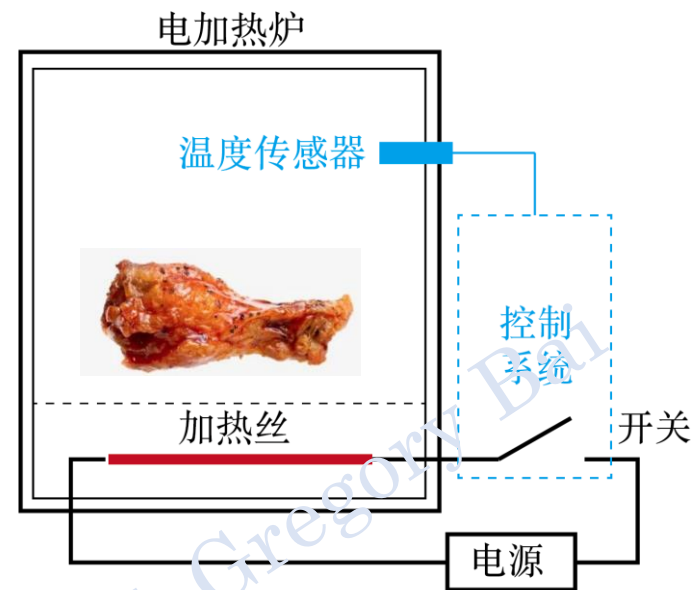
Q1-7: 请问下列哪种烤肉方式为自动控制方式？（被控量为温度）



(a) 篝火



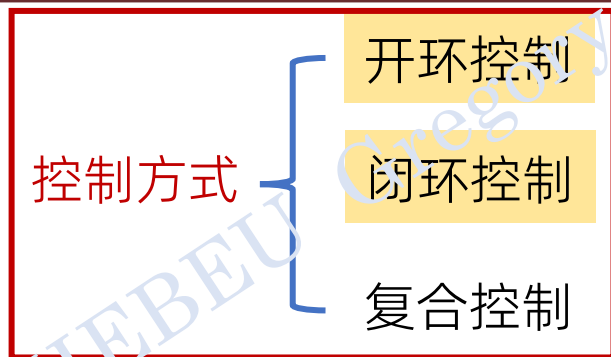
(b) 电烤炉（开环控制）



(c) 带有时间和温度控制的电烤炉（闭环控制）



1-2-1 开环控制



- ◆ **开环控制**：是指系统的被控制量（输出量）只受控于控制作用，而**对控制作用不能反施任何影响**的控制方式。
- ◆ 采用开环控制的系统称为**开环控制系统**。
- ◆ **优点**：结构简单，成本低廉，易于实现。
- ◆ **缺点**：对扰动没有抑制能力，**控制精度低**。

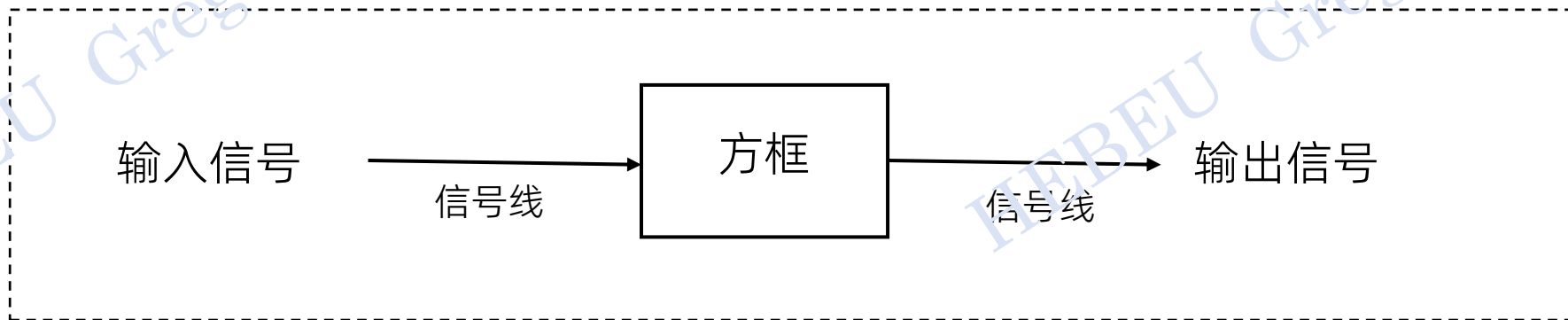


Q1-8：生活中有哪些使用开环控制系统的设备？





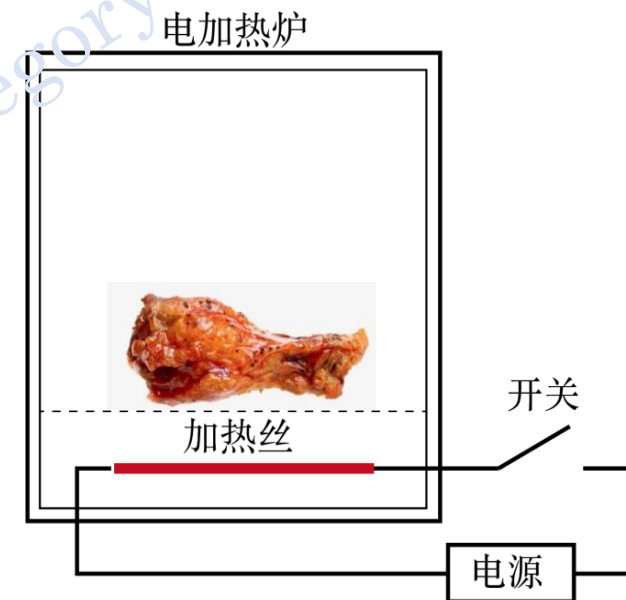
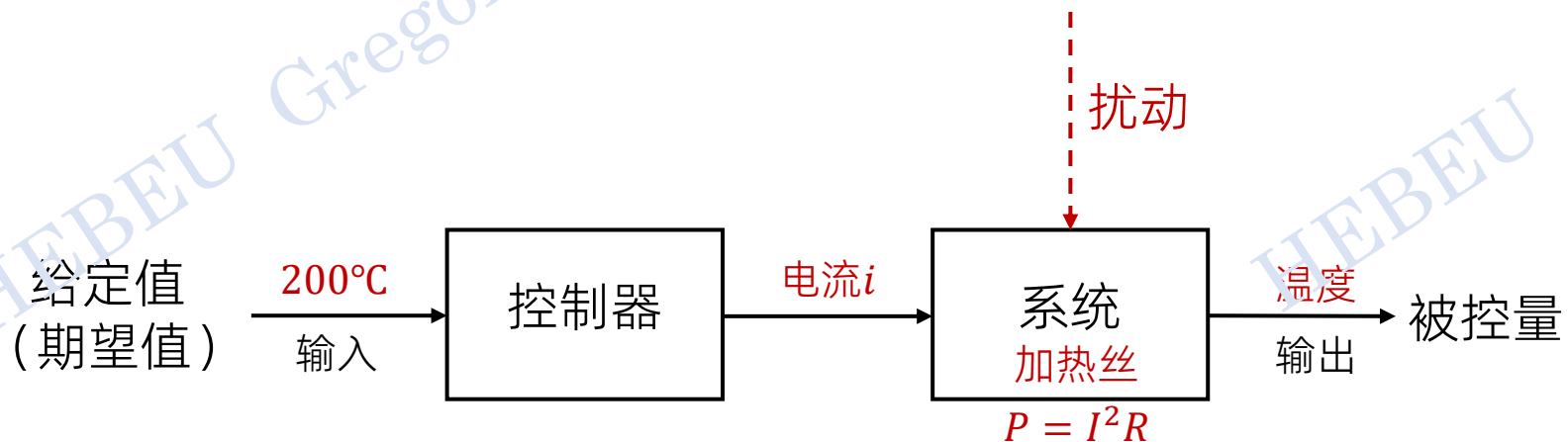
1-2-2 开环控制的方框图



- ◆ **方框**：控制装置和被控对象分别用方框表示
- ◆ **信号线**：方框的输入和输出以及它们之间的联接用带箭头的信号线表示
- ◆ **输入信号**：进入方框的信号
- ◆ **输出信号**：离开方框的信号



1-2-2 开环控制的方框图



- ◆ **给定值**：系统输出量期望达到的数值。
- ◆ **被控量**：指被控对象要求按给定值规律变化的物理量。
被控量又称输出量、输出信号。
- ◆ **扰动**：是一种对自动控制系统输出量起反作用的信号，
如电源电压的波动、环境温度的变化。





1-2-2 闭环控制

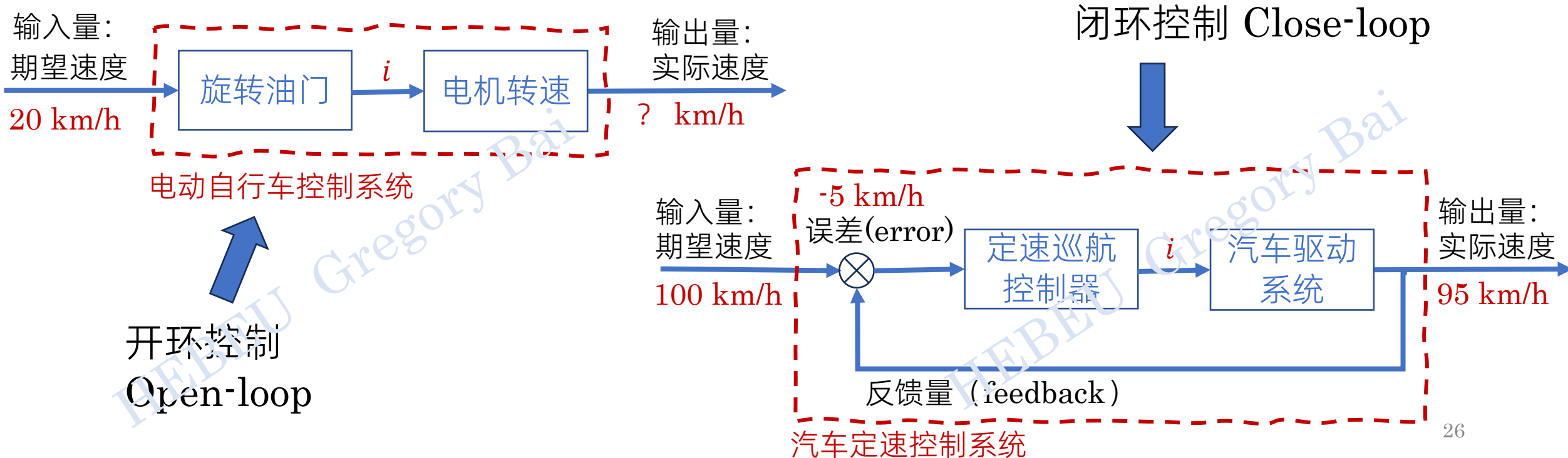
- 当扰动量无法预计或控制精度达不到预期要求时，则应采用闭环控制。
 - 若把系统的输出量（即被控制量）反馈到它的输入端，并与参考输入进行比较，这种控制方式称为闭环控制（close-loop control）。
 - 由于这种控制系统中存在着被控制量经反馈环节至输入端的反馈通道，故闭环控制又称反馈控制（feedback control）。
- ◆ **反馈控制原理**：控制装置对被控对象施加的控制作用，是取自被控量的反馈信息，用来不断修正被控量与输入量之间的偏差，并利用偏差 e 对被控对象进行控制的过程。



1-2-2 闭环控制

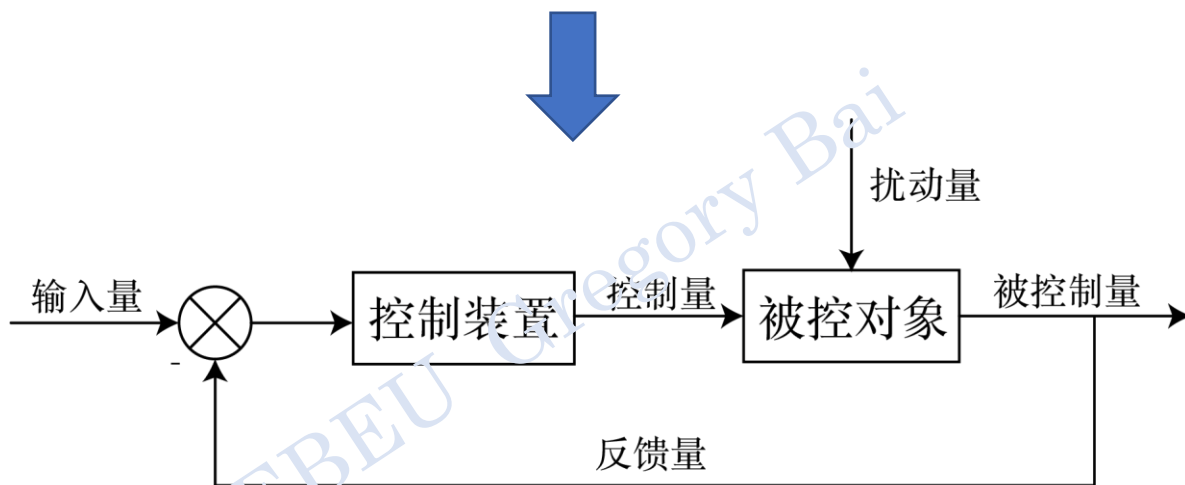
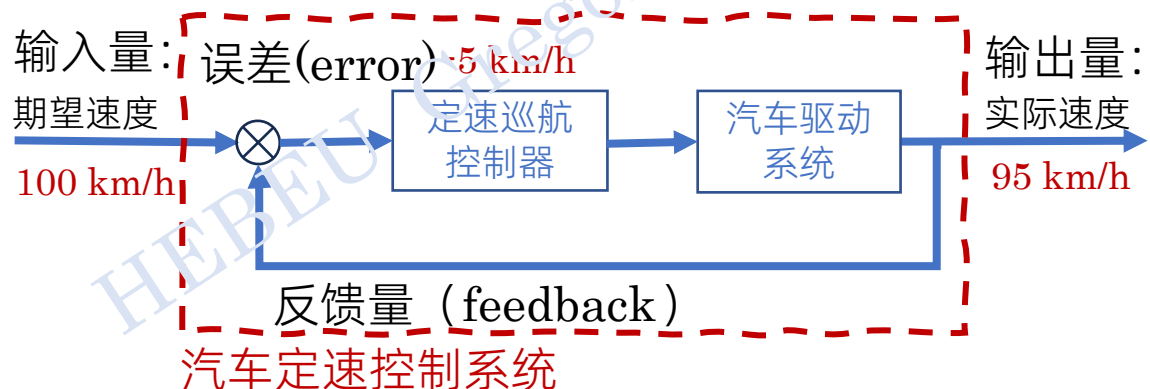
反馈控制是一种最基本最重要的控制方式。引入反馈信号后，系统对来自内部和外部干扰的响应变得十分迟钝，从而提高了系统的抗干扰能力和控制精度。与此同时，反馈作用又带来了系统稳定性问题。因此从某种意义上讲，古典控制理论是伴随着反馈控制技术的产生和发展而逐渐完善和成熟起来的。

Q1-9: 反馈控制是如何提高抗干扰能力和控制精度的?





1-2-2 闭环控制



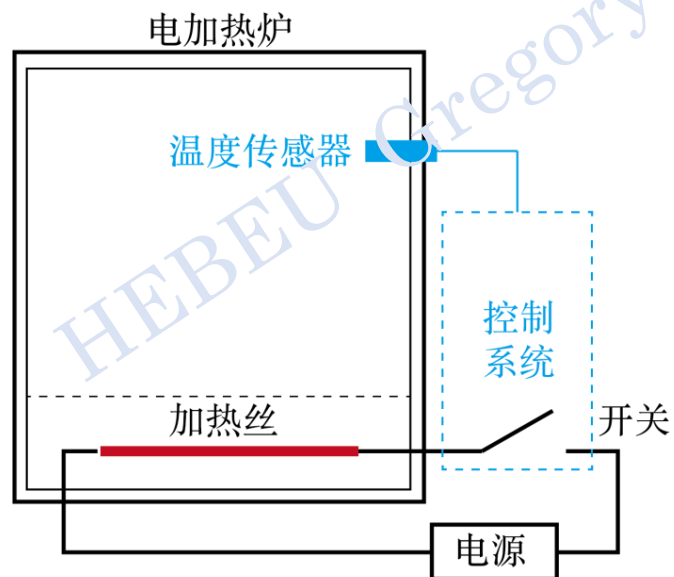
- ◆ **闭环控制**: 是指系统的被控制量（输出量）与控制作用之间存在着负反馈的控制方式。
- ◆ **反馈**是把输出量送回到系统的输入端并与输入信号比较的过程。若反馈信号是与输入信号**相减**而使偏差值越来越小，则称为**负反馈**；反之，则称为**正反馈**。显然，负反馈控制是一个利用偏差进行控制并最后消除偏差的过程，又称**偏差控制**。同时，由于有反馈的存在，整个控制过程是闭合的，故也称为**闭环控制**。
- ◆ **优点**: 具有**自动补偿**由于系统内部和外部干扰所引起的系统误差（偏差）的能力，因而有效地提高了系统的精度。
- ◆ **缺点**: 系统参数应适当选择，否则可能不能正常工作。

闭环控制是一切生物控制自身运动的基本规律。

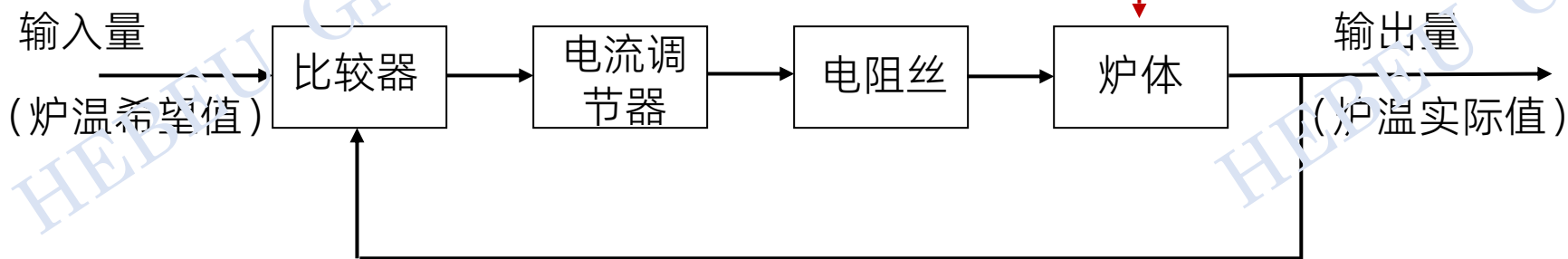
人本身就是一个具有高度复杂控制能力的闭环系统。



1-2-3 闭环控制系统的方框图

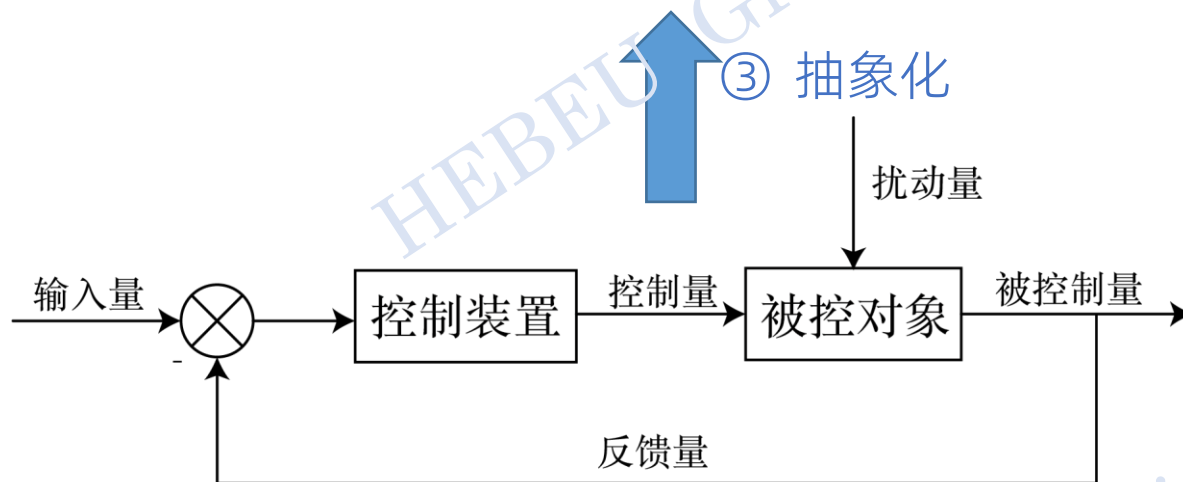


① 利用框图抽象化



系统的数学模型

③ 抽象化

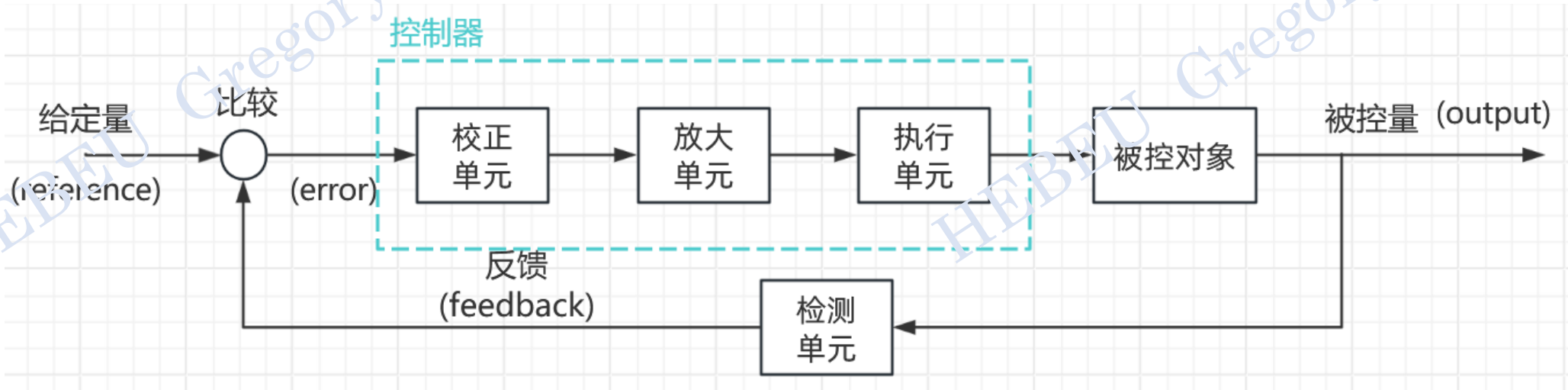


② 继续简化

扰动



1-2-3 闭环控制系统的方框图



一般闭环控制系统的方框图

Feedback is a method of controlling a system by inserting into it the result of its past performance.

——Norbert Winner 《控制论》，1947



1-3 自动控制系统分类

按被控制量属性分类：运动控制系统和过程控制系统

- ◆ **运动控制系统**：运动控制系统是指被控制量为力、位移、速度、加速度(或力矩、轨迹、角位移、角速度、角加速度)的自动控制系统。
- ◆ **过程控制系统**：如果系统的被控制量是温度、流量、压力、液位、成分、浓度等生产过程参量，这种自动控制系统则称为过程控制系统。



高速列车—运动控制



酿酒—过程控制



1-3 自动控制系统的分类

按参考输入量（reference）形式分类：恒值系统和随动系统

- ◆ **恒值系统**：是指参考输入量保持常值的系统。其任务是消除或减少扰动信号对系统输出的影响，使被控制量（即系统的输出量）保持在给定或希望的数值上。
- ◆ **随动系统**：是指参考输入量随时间任意变化的系统。其任务是要求输出量以一定的精度和速度跟踪参考输入量，跟踪的速度和精度是随动系统的两项主要性能指标。
- ◆ **程序控制系统**：这类控制系统的输入量是按预定规律随时间变化的函数，要求被控量迅速、准确地加以复现。



固定靶 → 恒值系统

移动靶 → 随动系统

按照一定顺序射靶



程序控制系统



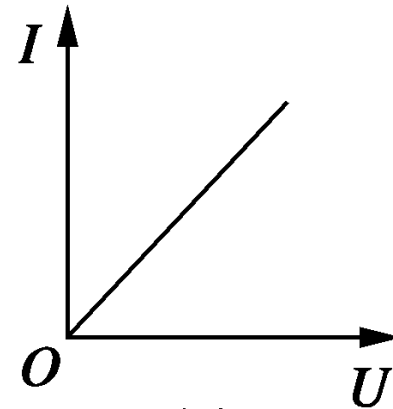
1-3 自动控制系统的分类

按组成系统的元件特性分类：线性系统和非线性系统

◆ **线性系统**：是指构成系统的所有元件都是线性元件的系统。

其动态性能可用线性微分方程描述，系统满足叠加原理。

◆ **非线性系统**：是指构成系统的元件中含有非线性元件的系统。其只能用非线性微分方程描述，不满足叠加原理。同时把可以进行线性化处理的系统或元件特性称为非本质非线性特性。反之，称之为本质非线性，它只能用非线性理论分析研究。



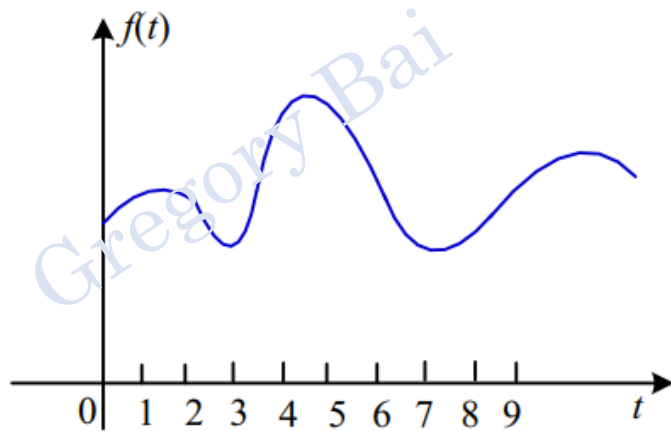
伏安特性曲线



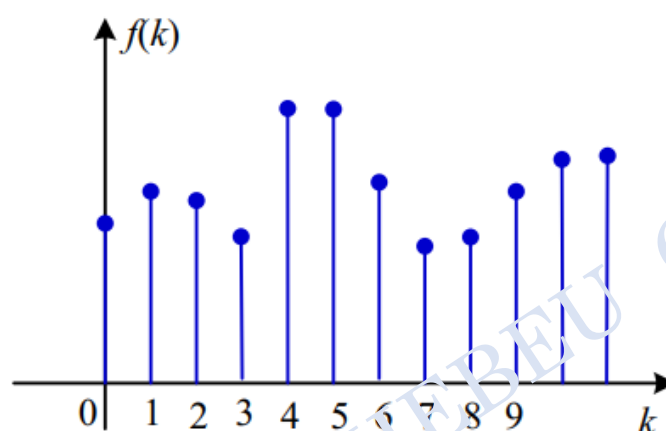
1-3 自动控制系统的分类

按系统内信号的传递形式分类：连续系统和离散系统

- ◆ **连续系统**：是指系统内各处的信号都是以**连续的模拟量**传递的系统。
- ◆ **离散系统**：是指系统内某处或数处信号是以**脉冲序列或数码**形式传递。其脉冲序列可由脉冲信号发生器或振荡器产生，也可用采样开关将连续信号变成脉冲序列，这类控制系统又称为**采样控制系统**或**脉冲控制系统**。而用数字计算机或数字控制器控制的系统又称为数字控制系统或计算机控制系统。



连续系统



离散系统

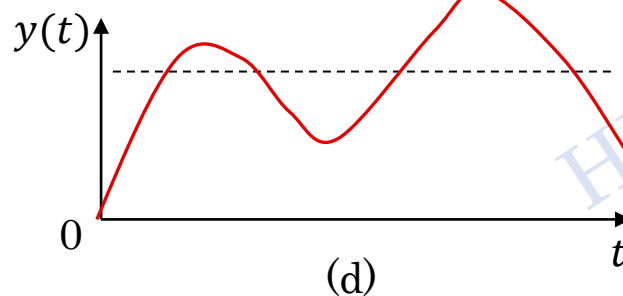
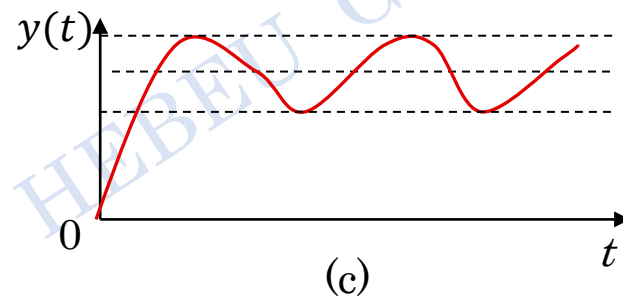
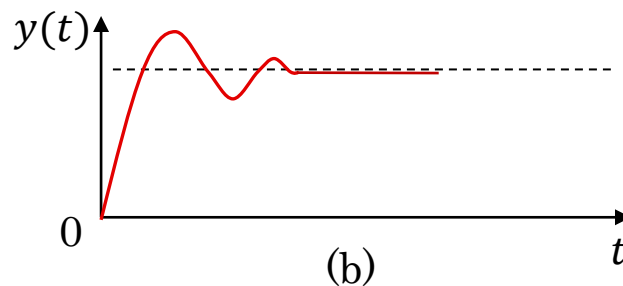
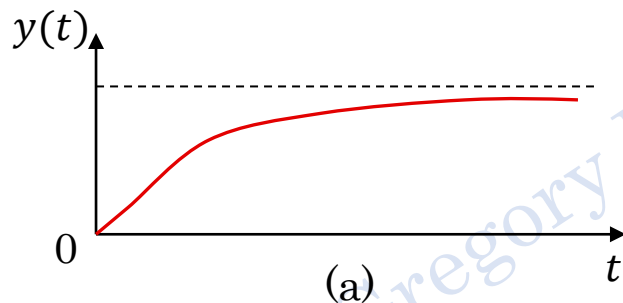


1-4 对控制系统的基本要求

对控制系统性能的要求概括为三方面：稳，准，快

- **稳定性**：控制系统运行的必要条件，**不稳定的系统是不能工作的。**
- **动态性能**：系统动态响应的快速性，系统的过渡过程越短越好。
- **稳态性能**：过渡过程结束，到达**稳态后**系统的控制精度的度量。

Q1-10: 下面哪个控制系统符合基本要求?



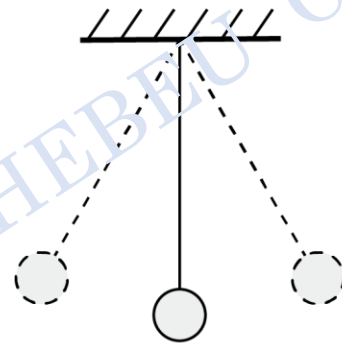


1-4 对控制系统的基本要求

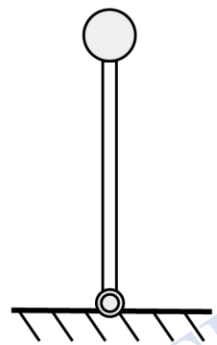
- **稳定性**：系统在受到扰动作用后自动返回原来的平衡状态的能力。

如果系统受到扰动作用（系统内或系统外）后，能**自动返回**到原来的**平衡状态**，则该系统是**稳定**的。

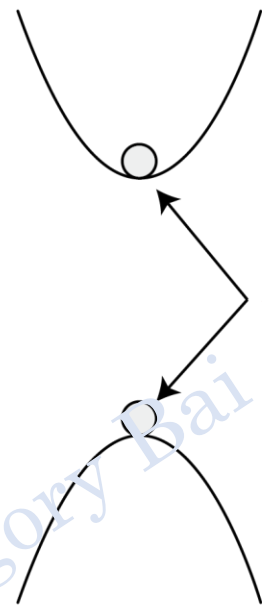
稳定系统的数学特征是其输出量具有**非发散性**。一个稳定的控制系统，其被控量偏离期望值的**初始偏差应随时间的增长逐渐减小并趋于零**；反之，系统是不稳定系统。



稳定



不稳定



平衡点

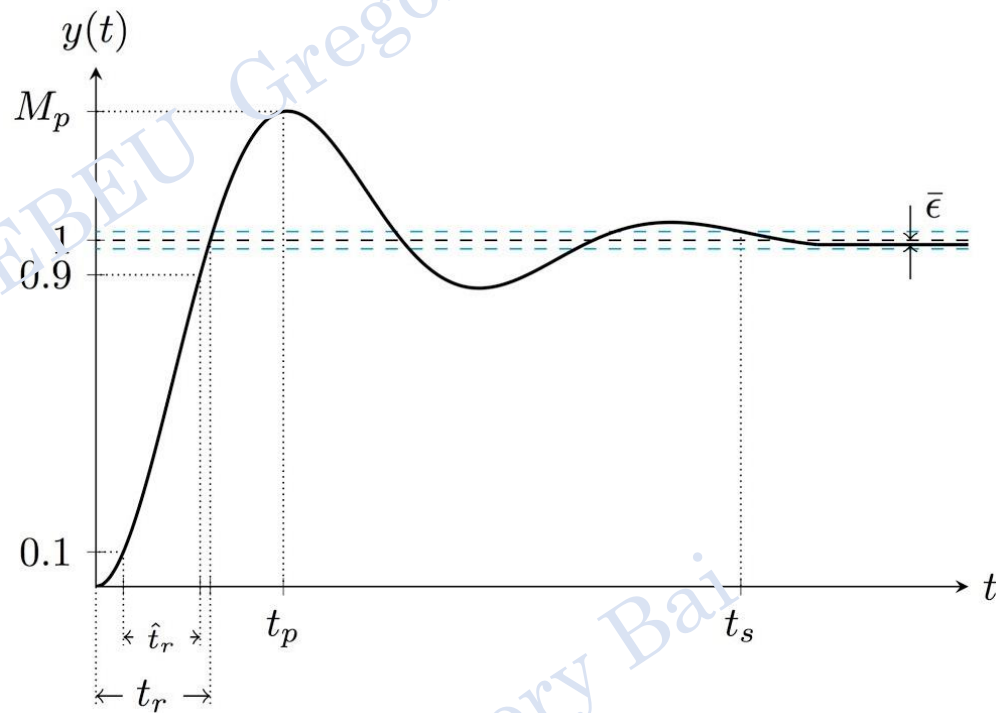


1-4 对控制系统的基本要求

- 动态性能:

当系统受到外部扰动的影响或者参考输入发生变化时，被控量会随之发生变化。经过一段时间，被控量恢复到原来的平衡状态或到达一个新的给定状态，称这一过程为过渡过程。

在时域中，常用单位阶跃信号作用下，系统输出的超调量 σ_p ，上升时间 T_r ，峰值时间 T_p ，过渡过程时间（或调整时间） T_s 和振荡次数 N 等特征量表示。



原始状态: 0°C



$t = 0$

新状态: 200°C

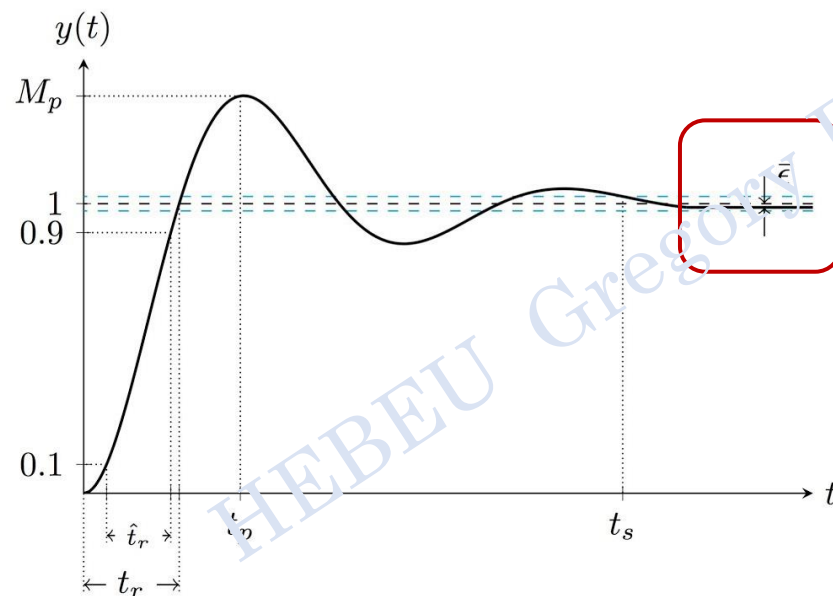


1-4 对控制系统的基本要求

- **稳态误差**：指稳定系统在完成过渡过程后的稳态输出偏离希望值的程度。

开环控制系统的稳态误差通常与系统的**增益**或**放大倍数**有关
闭环系统（闭环系统）的控制精度主要取决于它的**反馈深度**。

稳态误差越小，系统的精度越高。





本章小结

- ◆ 明确什么叫**自动控制**，正确理解**被控对象**、**控制装置**和**自控系统**等概念；
- ◆ 了解自动控制理论发展的**四个主要阶段**；
- ◆ 明确系统常用的**分类方式**，掌握各类别的含义和信息特征；
- ◆ 明确对自控系统的基本要求，正确理解**三大性能指标**的含义。



预习

1. 预习傅里叶变换与拉普拉斯（Laplace）变换；
2. 几个重要的拉氏变换对：

$x(t)$	$X(s)$	$x(t)$	$X(s)$
$\delta(t)$	1	$\sin \omega t$	$\frac{\omega}{(s^2 + \omega^2)}$
$u(t)$	$1/s$	$\cos \omega t$	$\frac{s}{(s^2 + \omega^2)}$
t	$1/s^2$	$e^{-at} \sin \omega t$	$\frac{\omega}{(s + a)^2 + \omega^2}$
e^{-at}	$\frac{1}{s + a}$	$e^{-at} \cos \omega t$	$\frac{s + a}{(s + a)^2 + \omega^2}$