

《自动控制基础》

杨晨阳

新主楼 F417 82317213-101

cyyang@buaa.edu.cn

<http://welcom.buaa.edu.cn>



第一章 绪论

1.1 引言

18 世纪前：漏壶、指南车、钟表控制

● 第一篇自控论文

“论调节器”，J. G. Maxwell, 1868（第一次工业革命：调速器-蒸汽机-负荷系统）

1788，英，瓦特调速器，第一次工程应用

——稳定→1868，英，物，Maxwell；

1877，英，数，Routh 稳定判据；

1895，德，数，Hurwith 稳定判据 → 稳定、精度；

1892，俄，数，李雅普诺夫；



🔴 古典控制理论

1927, 反馈概念, 美, Bell Lab 的 Black(电子管放大器的失真问题);

1925, 英, 电, 亥维赛, 引入求电网络的传递函数;

1932, 英, 电, Nyquist, 频率响应法; 1945, Bode;

1948, 英, 电, 根轨迹法;

1945, 战后出版禁令撤销, 经典控制著作: 45, 维纳反馈→一切控制系统, 48, 《控制论》;

1951, 齐普金, 脉冲系统的分析设计;

1952, 美, 哥伦比亚, 拉加齐尼, 采样系统的分析和设计;

◆ 频率响应法: Nyquist, 1932 年; Bode, 1945 年, 第二次世界大战

◆ 根轨迹法: W. R. Evans, 1948 年

缺陷:

(1) 只能用试探法设计系统, 非最佳 (根据经验设计-分析系统-重新设计直至满意)

(2) 只适于线性定常, 单变量系统



🔴 现代控制理论 (50 年代)

{ 线性系统的状态空间理论
最佳滤波理论 (*Kalman*滤波)
最优控制理论
系统辨识理论

分支: 自适应控制、非线性、时变系统、分布参数、大系统、随机控制、分散控制、智能控制、混沌控制,

用于工控时的缺陷:

- (1) 工业对象难以得到准确的数学模型;
- (2) 性能指标难以用明显的数字形式表示;
- (3) 设计的控制器]往往过于复杂, 甚至不可实现

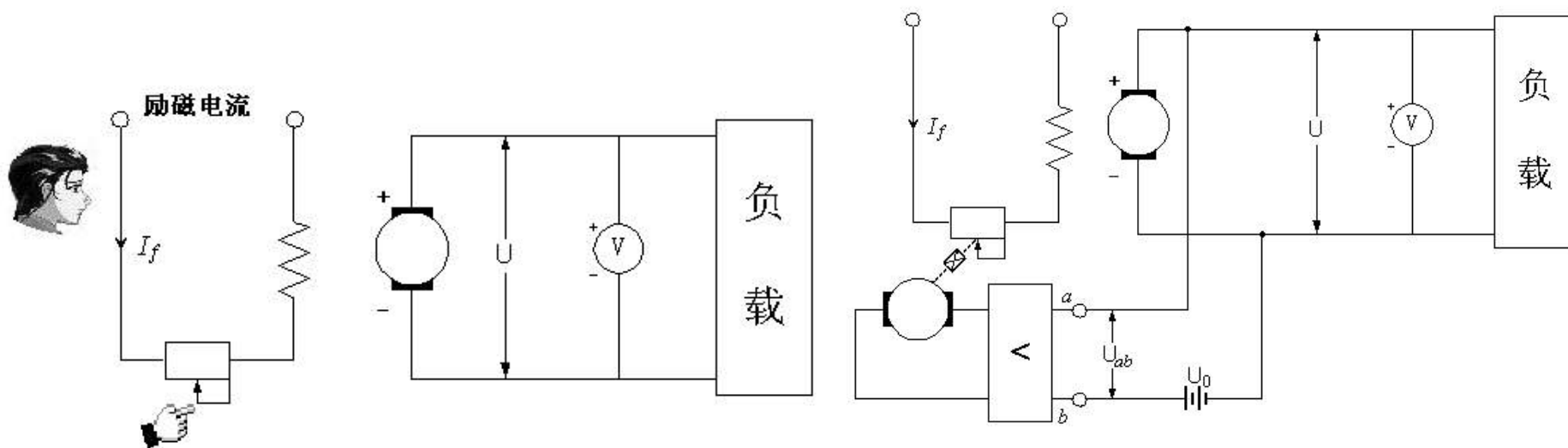
——70 年代 Rosenbrock 单变量频域法→多变量频域法→传统法

70 年代末, 鲁棒性, 解决参数不确定性系统的设计问题。多变量鲁棒性理论分析设计是近十年来最重要的进展之一。



§ 1.2 控制系统的一般概念

一. 人工控制系统与自动控制系统



● 人工控制系统原理:

要求: 调节变阻器使电压 U 保持给定值 U_0

人手 → 执行电动机 (+ 减速传动机构)

人眼、脑 → 求偏差电压的电路



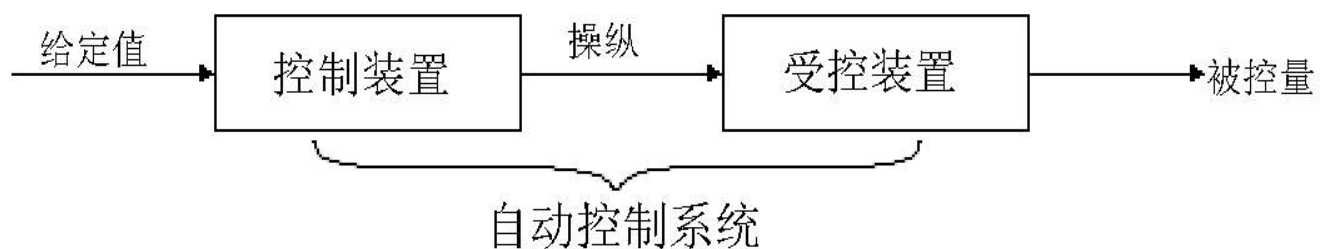
可见：仅使某些物理量变化并不难，困难在于要求这些量的变化符合指定的规律。

控制质量差：对被控量的偏差反应过于敏感或迟钝。

人工：控制质量的优劣与操作工人的经验、技巧有关。

自动：控制质量的优劣取决于控制系统的设计水平。

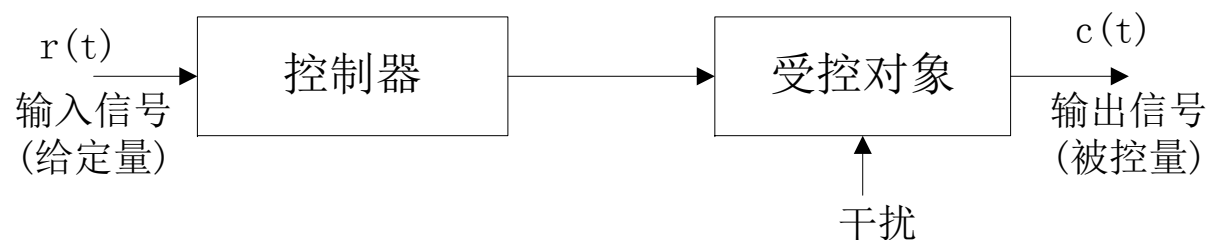
● 自动控制系统原理框图：



二. 开环控制与闭环控制

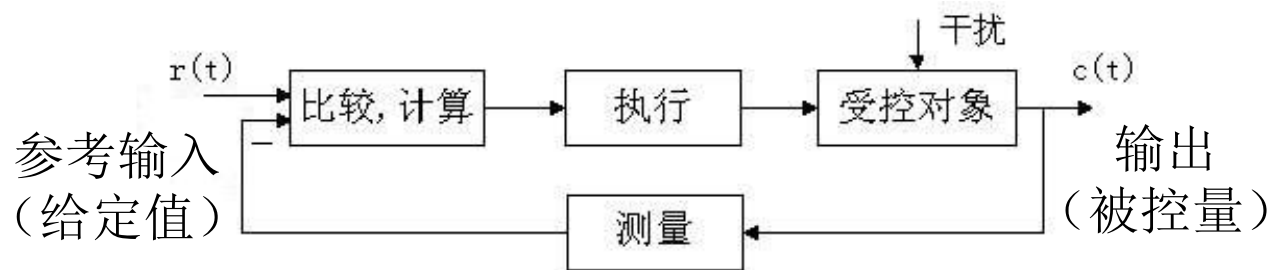
1. 开环控制





干扰/参数变化 $\rightarrow c(t)$ 变化, 无法自动补偿 \rightarrow 控制精度差
适于参数恒定、干扰小、精度要求不高的场合

2 闭环控制



干扰/参数变化 \rightarrow 误差信号 \rightarrow 自动纠正偏差 \rightarrow 控制精度高
 \rightarrow 强干扰下, 被控量可能有较大波动



三、自动控制系统举例

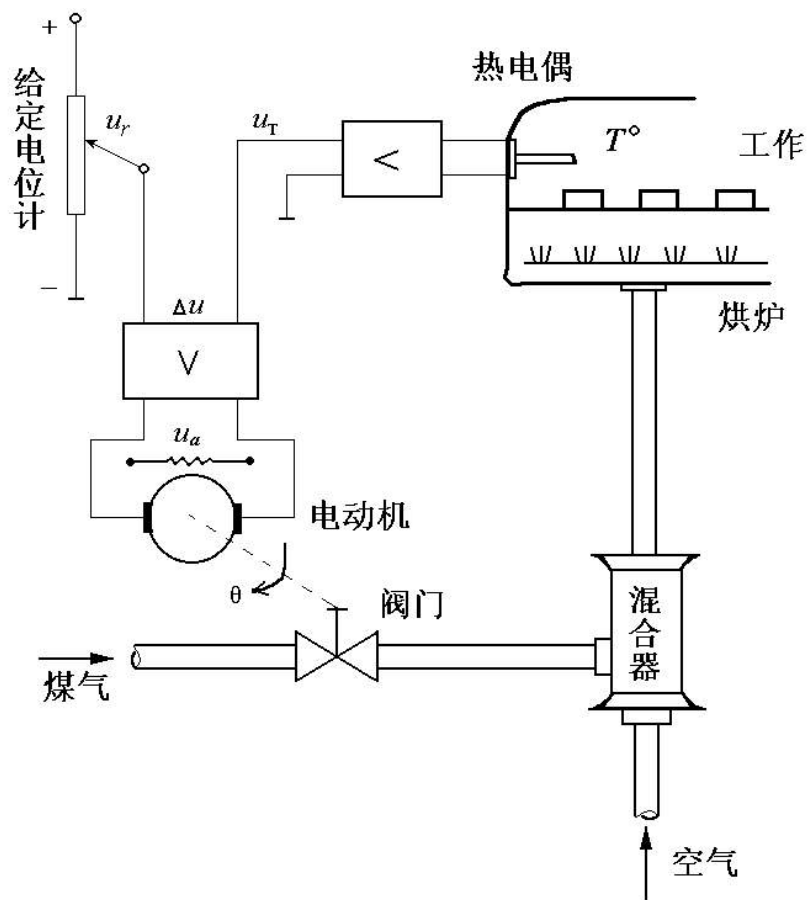
分析自控系统时，首先需明确以下问题：

(宏观分析、定性分析 — 建立系统的概念，是物理、数学建模的基础)

1. 受控对象是什么？
2. 被控量什么？（哪些状态参量要求控制）
3. 作用在对象上的干扰有哪些？
4. 依靠操纵哪个机构来改变被控量？
5. 有哪些测量元件？
6. 给定值由哪些装置提供？
7. 如何实现各信号的综合计算及判断偏差？
8. 控制作用通过什么部件去执行（包括4）？



例 (定性分析) 烘烤炉温度控制系统



● 控制的任務：保持爐溫 T 恒定

爐溫：工件數量、環境溫度、煤氣流量



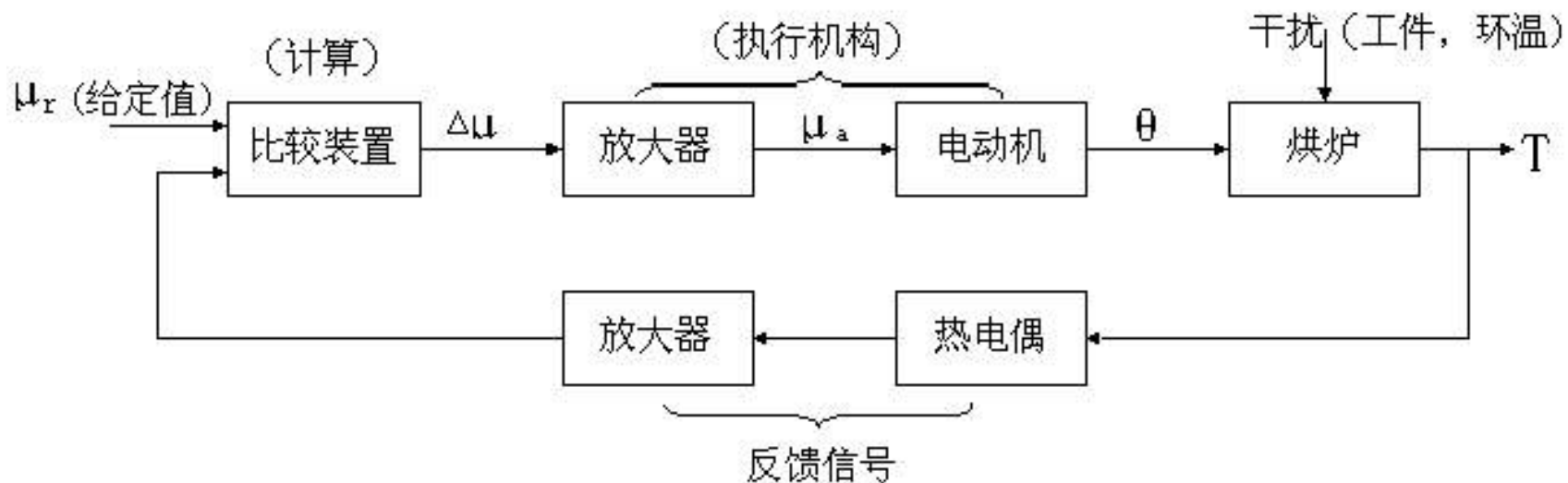
● 定性分析

1. 受控对象—烘炉
2. 被控量—炉温 T
3. 干扰—工件、环温
4. 依靠调节煤气管道上的阀门改变炉温
5. 测量元件—热电偶 ($T \rightarrow \mu T$)
6. 给定值—给定电位计的输出电压 μ_r —所要求的炉温经热电偶转化后的电压
7. 计算偏差— μ_r 与 μT 两电压反接, 即完成了减法运算。

输出电压 $\Delta \mu = \mu_r - \mu T$, 相当于炉温与给定温度的偏差量

8. 执行机构—电动机及传动装置





- ◆ 总输入—给定指令 + 外部干扰
- ◆ 输出—被控温度
- ◆ 除烘炉与供气装置，统称为温度控制装置或温度调节器
- ◆ 控制装置 + 受控对象 = 自控系统



§ 1.3 对控制系统的性能要求

一. 控制系统的动态特性

控制的目标: 使被控量按指定的规律变化

实现这一目标的困难: 扰动 + 控制系统本身的惰性

系统受到外加信号(给定值或干扰)作用之后, 被控量随时间变化并趋于一定规律的全过程称系统的动态特性。

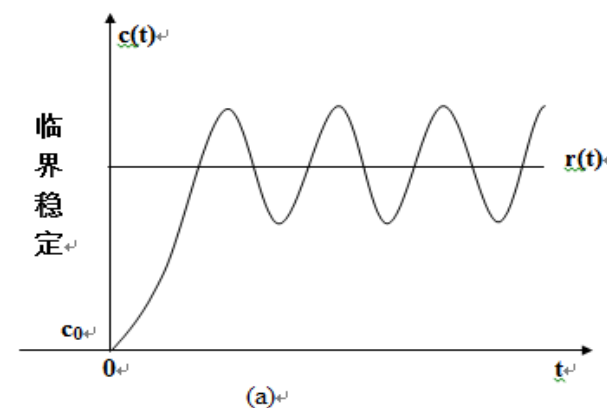
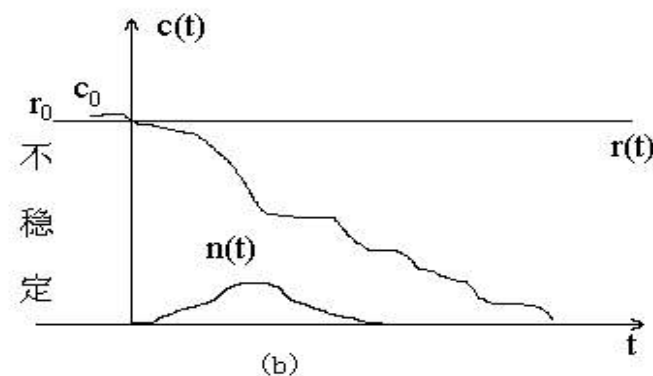
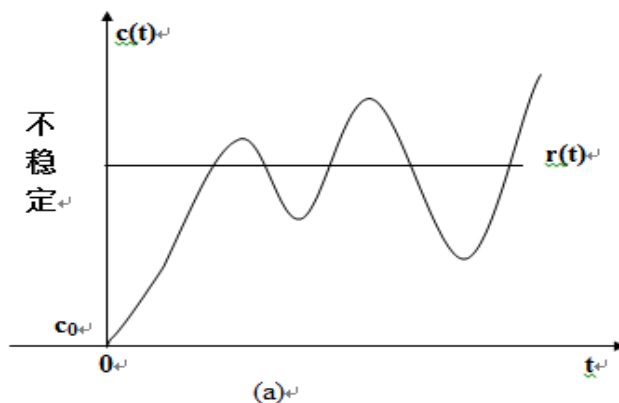
二. 动态过程中基本问题

1. 稳 (稳定 + 平稳)

● 稳定: 系统重新恢复平衡工作状态的能力

(1) 当给定值变化 $r(t)$ 一图 (a) 或受到干扰 $n(t)$ 一图 (b) 时不能恢复原状 \rightarrow 不稳定

(2) 当 $r(t)$ 变化, $c(t)$ 在 $r(t)$ 周围作等幅振荡 一图 (c) \rightarrow 临界稳定 $\xleftarrow{\text{工程上}} \rightarrow$ 不稳定



(3) 当 $r(t)$ 变化, $c(t) \rightarrow r(t)$ (d) 时 \rightarrow 稳定系统

- 平稳: 当系统稳定时, 要求 $c(t)$ 的振荡小—对其振幅和频率有所限制

2. 快

指动态过程持续时间的长短。

过程持续时间长, 将使系统长久地出现大偏差, 系统的响应迟钝, 难以复现快速变化的参考信号, 如下图中的曲线

②、③。

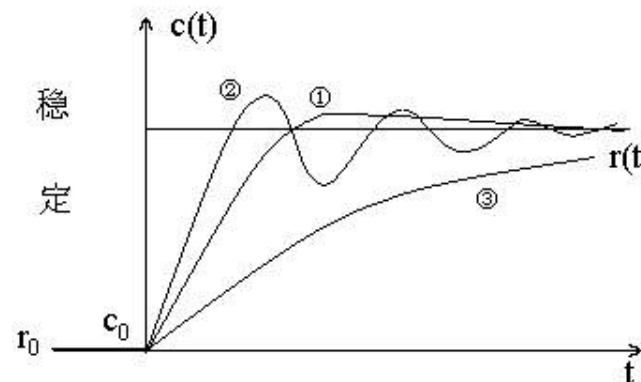
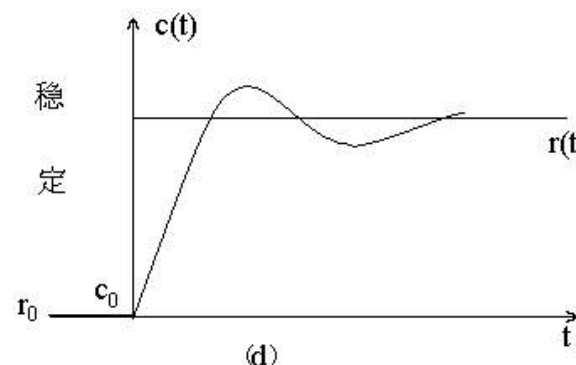
稳与快反映了系统在控制过程中的瞬态性能。

3. 准

指系统过渡到新的平衡状态后最终保持的精度, 反映了动态过程后期的性能。

◆ 受控对象的具体情况不同, 各种系统对稳、快、准的要求有侧重。

◆ 对同一个系统, 稳快准是相互制约的, 稳定将是构成系统的前提。



§ 1.4 控制系统的分类

一. 按给定量运动规律分类

$r(t)$: 常量 — 自动稳定系统

非常量 — 未知: 随动系统; 已知: 程控系统

1. 自动稳定系统 (称恒值控制系统)

若输入信号为恒值 ($r(t)=\text{常量}$), 要求被控信号也保持恒值, 则这类反馈控制系统为自动稳定系统。

2. 随动系统

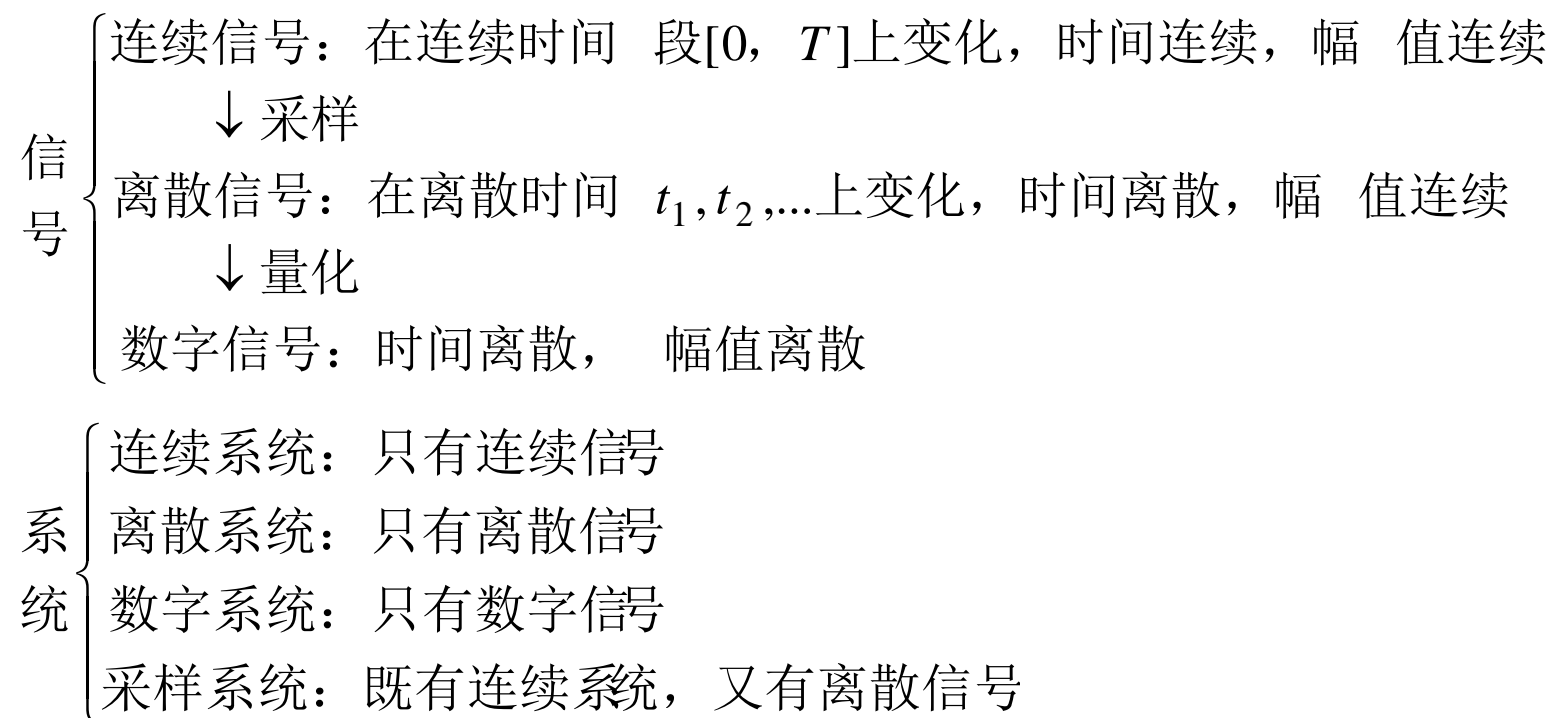
若 $r(t)$ 为任意时间函数, 其变化规律事先又无法确定, 而当输入信号作用于系统之后, 要求输出信号能准确、迅速地复现输入信号的变化, 称这类反馈控制为随动系统。

3. 程序控制系统

若输入信号为已知的时间函数, 则称这系统为程序控制系统。可以开/闭环 (如数控机床)。



二. 按系统中信号的特性分类



三. 一些新的控制系统

1. 最优控制系统 (控制规律)



其特点是根据每一时刻系统中各有关变量自动形成复杂的反馈信号和控制作用，使控制过程的某种指标达到最优。

如误差平方对时间的积分取极小值等。

2. 极值控制系统

其特点是自动搜索系统的最合理的工作状态，使被控量常保持在其极大值或极小值附近。

4. 自适应系统

其特点是自动改变系统中某一部分的参数甚至结构，使系统在对象特性或环境条件大幅度变化时仍能保持良好的性能。



§ 1.5 如何设计自控系统

一. 如何设计自控系统

1. 建立分析系统的物理模型 — 明确控制的目的、问题是什么

明确：受控对象、被控量、干扰、测量元件、参数输入、执行机构

2. 建立系统的数学模型 — 用数学语言描述问题

实验法（系统辨识）

解析法 — 了解元部件的工作原理。

3. 分析系统的动态性能 — 所设计的方案可行与否

稳、快、准。

4. 对系统进行校正设计 — 为什么现有的方案不行？怎样才行？

对给定的性能指标，确定控制装置的部分结构和参数。



二. 课程的内容

在已建立的物理、数学模型的基础上, 分析、设计自控系统

分析	{	连续	古典分析: 时域、根轨迹、频率法
			现代分析: 状态空间法
校正	{	采样	古典分析: 时域、根轨迹、频率法
			现代分析: 状态空间法

——要解决的问题、针对的系统不同

——基于的数学模型不同, 分析的方法也不同

