



## 第二讲：

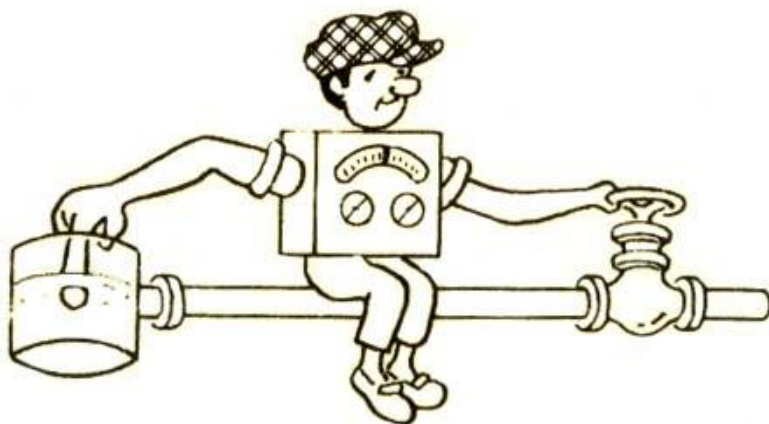
---

---

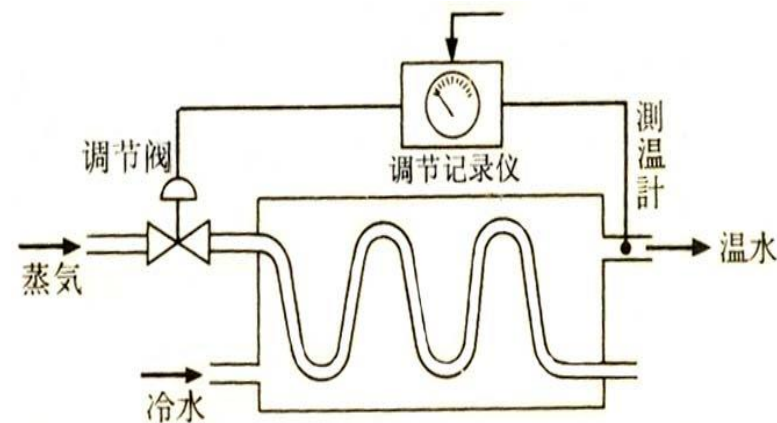
# 自动控制的基本理论与方法

- 自动化的概念与应用
- 自动控制的发展历史
- 基本的控制理论与方法

# 什么是自动化：水温控制实例



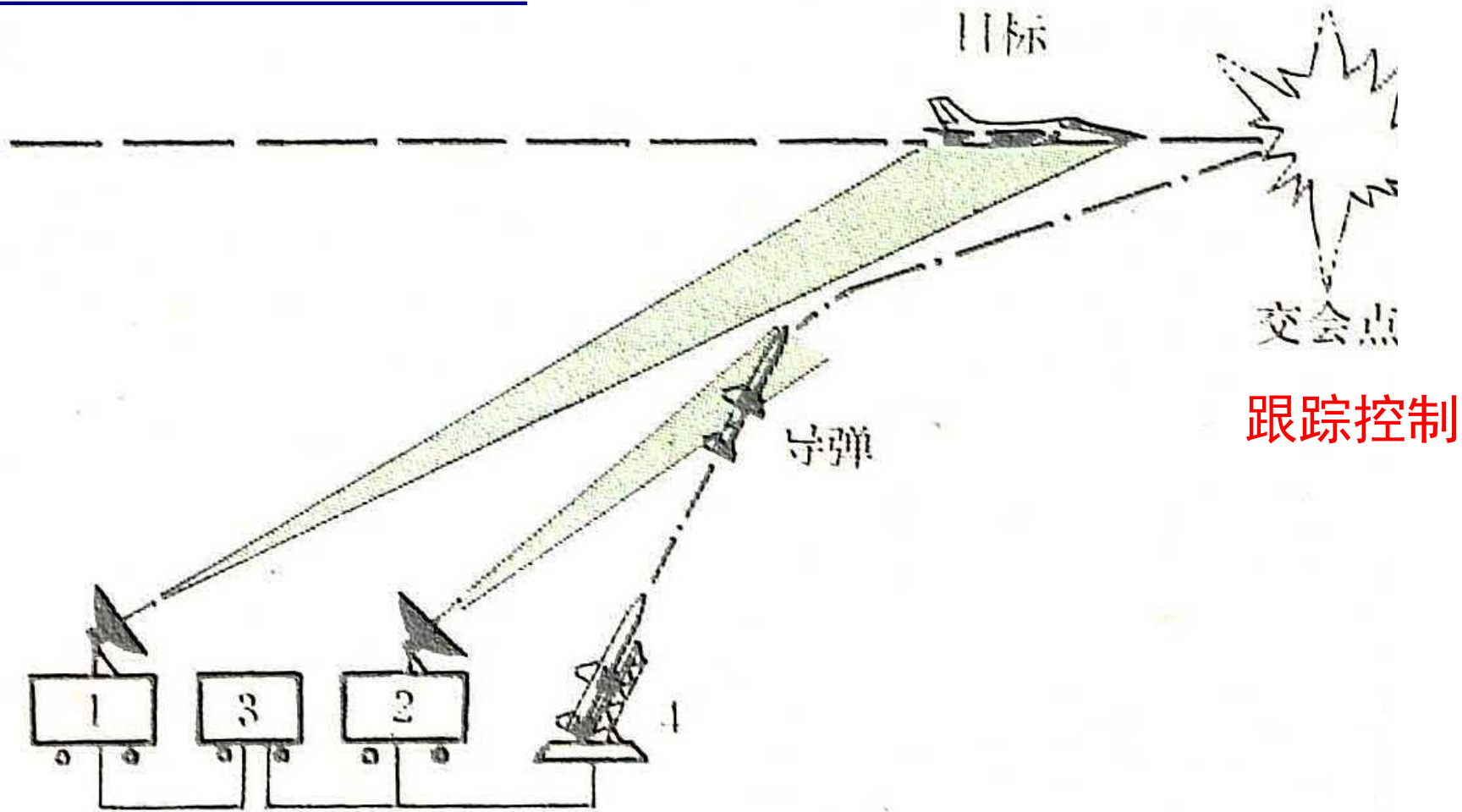
手动控制漫画



自动控制

水温的手动控制和自动控制示意图(定值控制)

# 什么是自动化：防空导弹制导控制



跟踪控制

1-目标跟踪雷达

2-导弹导引雷达

3-计算机雷达

4-导弹发射架

# 社会和生活自动化

- 现代社会和现代生活离不开对一些物理量的控制，包括实现对这种控制的自动化
  - ✓ 公共电网上的电压是50周、220伏的交流电。为此，在发电厂就要设法控制电压、频率这两物理量为恒值，这要采用**自动调压和自动调频装置**
  - ✓ 在化肥厂控制反应釜（塔）内**温度和压力为恒值**，使化学反应速度加快
  - ✓ 在机械加工厂金属切削机床上，经常是控制工件或刀具的**转速为恒值**，使产品的质量、产量能提高
  - ✓ 各种现代火炮的俯仰角和方位角都是自动控制的（**跟踪控制**）
  - ✓ 现代生活中，空调器保持**室内温度为恒值**，冰箱、洗衣机无不进行一些物理量的控制，而洗衣机更把洗衣、漂洗和脱水等**操作自动按程序进行（程序控制）**

# 自动化与自动控制

- **自动化** (Automation)，是指机器或装置在无人干预的情况下按规定的程序或指令自动地进行操作或运行
- **自动控制** (Automatic Control) 是关于受控系统的分析、设计和运行的理论和  
技术

在没有人直接参与的情况下，利用外加的设备（称为**控制器**）操作被控对象（如**机器、设备或生产过程**）的某个状态或参数（称为**被控量**）使其按预先设定的规律自动运行

# 自动化的应用

## ➤ 工业自动化

包括**生产设备**、**生产线**、**生产过程**、**管理过程**等的自动化

数控机床、数控加工中心、工业机器人、自动传送线、无人运输车、自动化仓库及计算机监控中心



自动化生产设备



一种数控加工中心

宝马自动化生产线视频：[点击查看](#)

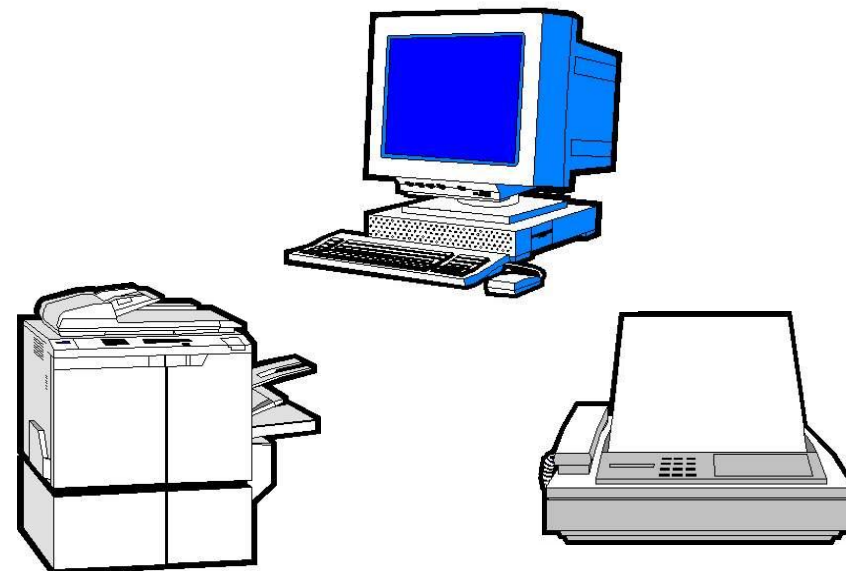
德国工业视频：[点击查看](#)



# 自动化的应用

## ➤ 办公自动化

利用各种现代化办公设备和先进的通信技术，高效率地从事办公业务



## ➤ 家庭自动化

家庭生活服务或家庭信息服务的自动化

智能家居实例视频: [点击查看](#)

# 自动化的应用

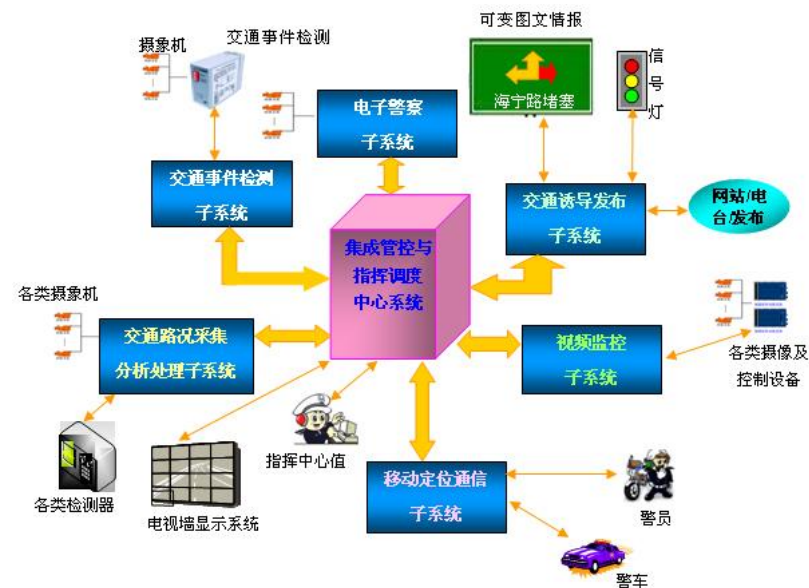
## ➤ 交通自动化

综合运用计算机、通信、检测、自动控制等先进技术，以实现对交通运输系统的自动化管理和控制

无人驾驶汽车视频：[点击查看](#)

## ➤ 军事自动化

作战机器人、无人飞机、无人潜艇等各种智能型武器系统







# 自动化的作用

- 提高社会生产率和工作效率
- 节约能源和原材料消耗
- 保证产品质量
- 改善劳动条件，减轻体力、脑力劳动
- 改进生产工艺和管理体制

加速社会产业结构的变革和社会信息化的进程

# 自动化的起源—中国古代

## ➤ 历史上的起源:

指南车(78)

记里鼓车

候风地动仪

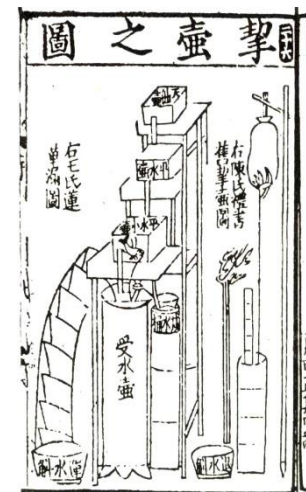
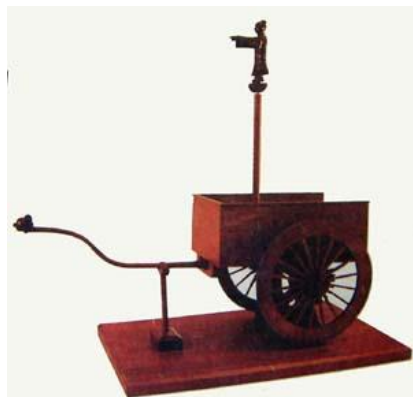
(地震观测, 132)

水运仪象台

(水文观测, 1088)

铜壶滴漏(1135)

.....



# 自动化的起源—近现代

➤ 近代自动装置：

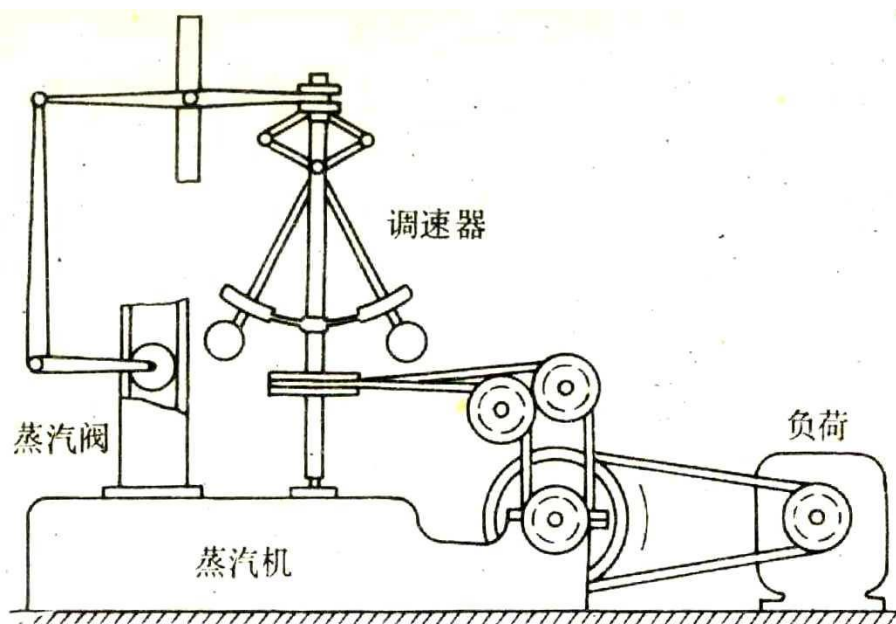
加法器(法国, 1642), 钟表(荷兰, 1657), 风磨(英国, 1745), 浮子式阀门水位调节器(俄国, 1765)

➤ 工业上的起源：

瓦特的蒸汽机(1776, 1788)

➤ 理论上的起源：

维纳的控制论(1948)

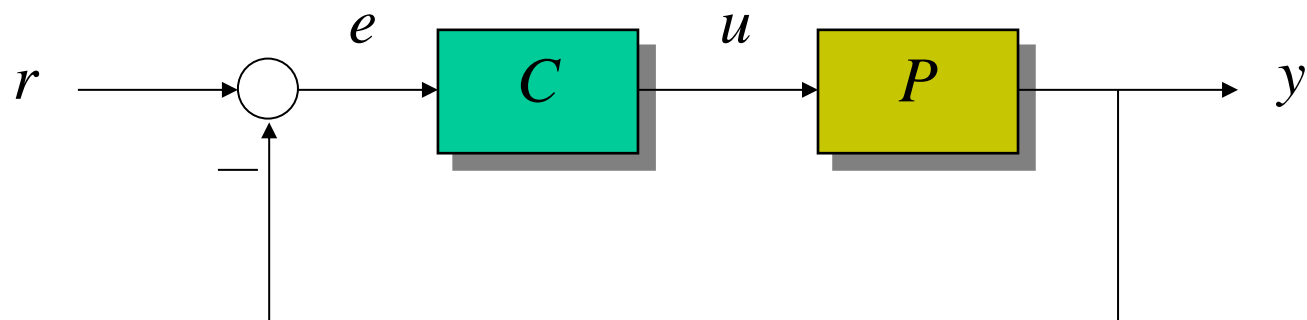


# 自动调节的广泛应用

- 由于第一次工业革命的需要，人们开始采用**自动调节器(Regulator)**或装置，使一些物理量保持在给定值附近
- 公元1868年法国工程师法尔科(J. Farcot)发明反馈调节器，并把它与蒸汽阀连接起来，操作蒸汽船的舵，称之为**伺服机构(Servo-mechanism)**
- 20世纪20~30年代，美国开始采用**PID模拟式调节器**(比例-积分-微分调节器)。现在还在许多工厂中采用

# 自动控制的基本概念

## ➤ 反馈 (Feedback) —— 反馈控制系统

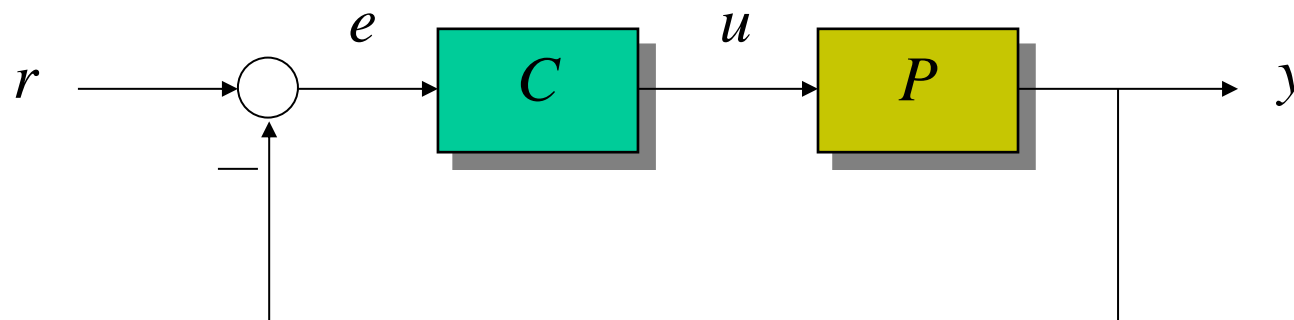


- $P$ : 蒸汽机 (控制对象);  $C$ : 调节器 (控制器)
- 反馈 (Feedback) 是指将系统的实际输出和期望输出进行比较, 形成误差, 从而为确定下一步的控制行为提供依据



# 自动控制研究的基本问题

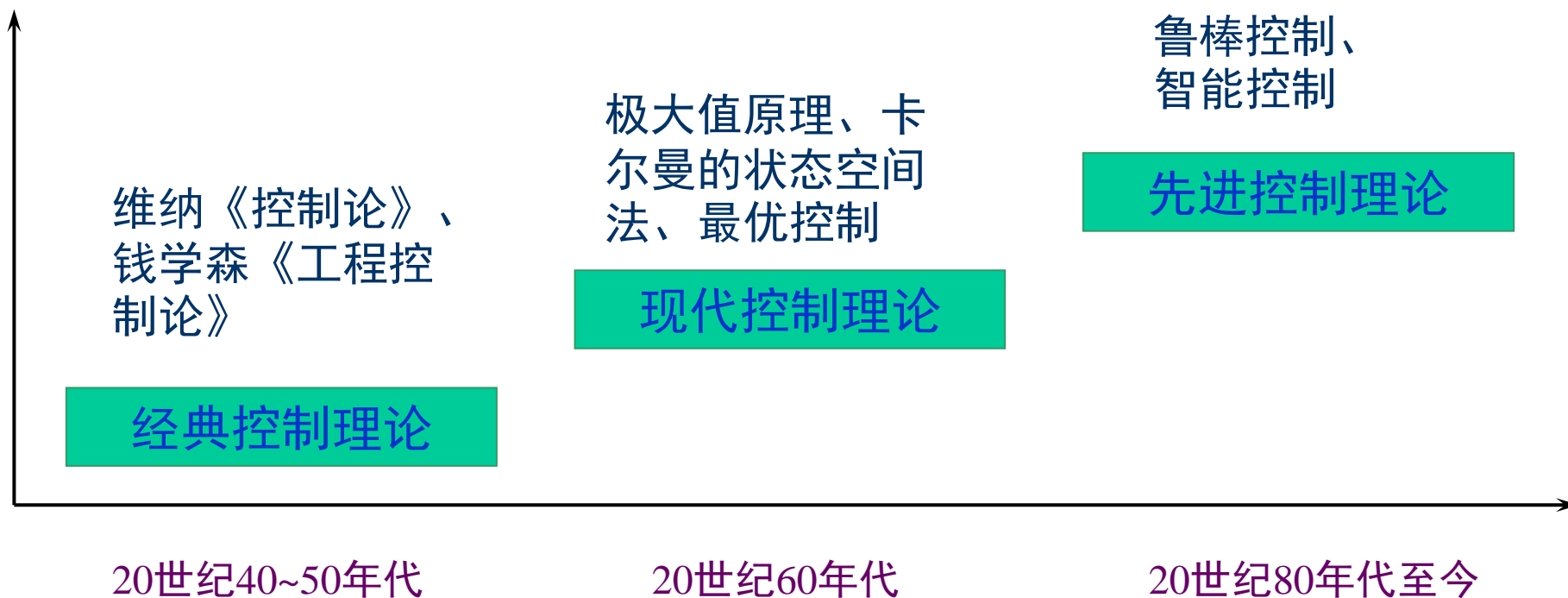
## ➤ 自动控制(Automatic Control)研究的问题:



- 自动控制系统分析 (Analysis)
  - (1) 稳定性 (Stability)
  - (2) 动态特性 (Dynamic Performance)
  - (3) 静态特性 (Static Performance)
  - (4) 鲁棒性 (Robustness)
- 自动控制系统综合(Synthesis) / 设计(Design)

# 自动化的发展历程

## ➤ 自动化的发展——控制理论的发展



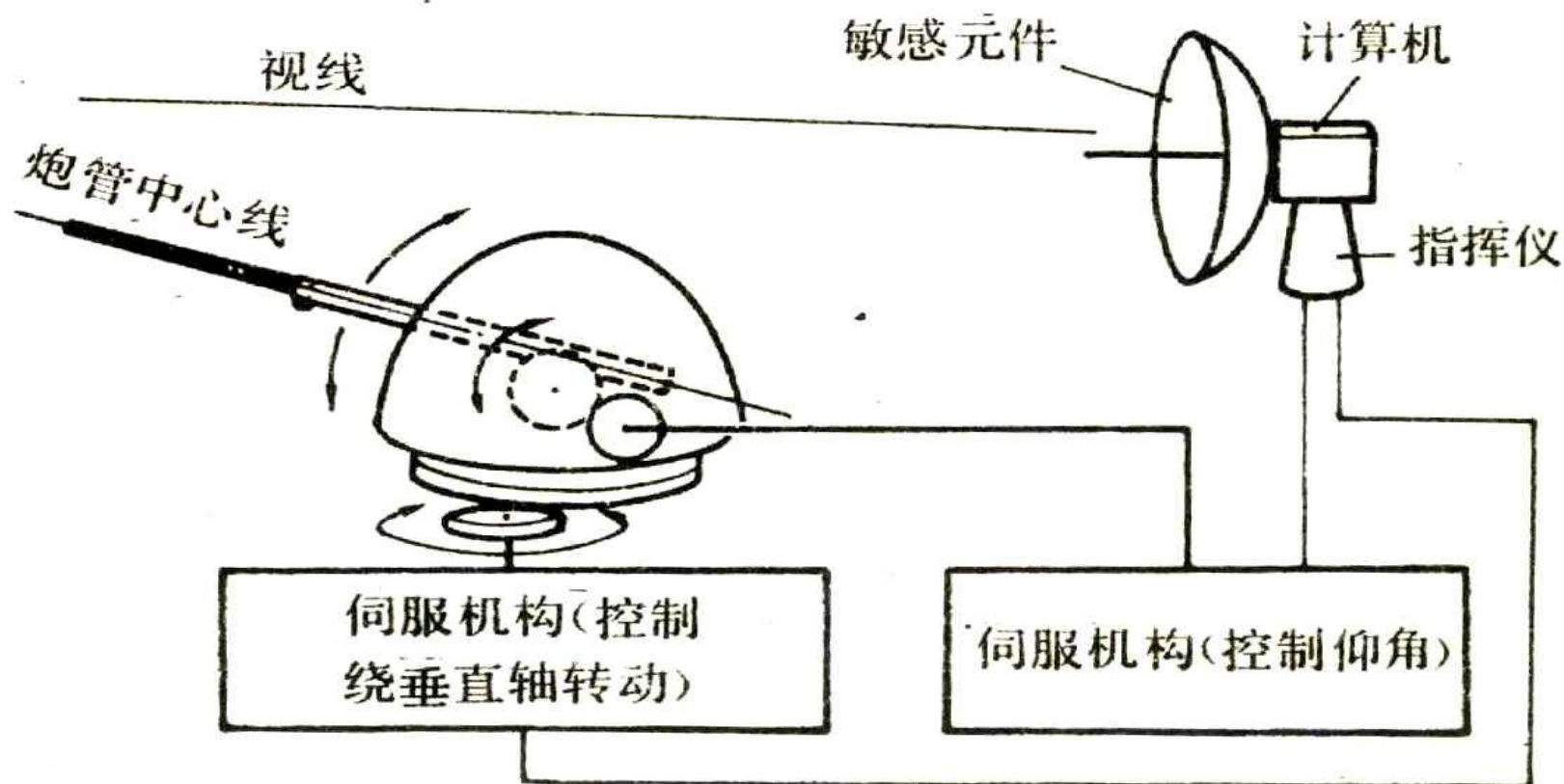
# 控制理论的形成与发展

- 经典控制理论（1930~1960）：
  - 基于频域 (Frequency Domain) 的方法
  - 传递函数 (Transfer Function)
  - 1948年诺伯特 维纳发表了著名的《控制论——关于在动物和机器中控制和通讯的科学》，标志着控制理论完整体系的形成
  - 1954年钱学森出版《工程控制论》



# 自动防空火力控制系统

在第二次世界大战期间，为了解决防空火力控制系统和飞机自动导航系统等军事技术问题，设计了各种精密的自动调节装置





# 经典控制理论形成的历史动力

---

---

**推 动：** 受当时重大技术（通讯技术和火炮技术等）  
的深刻影响

**物理学：** 牛顿力学中的“质点和姿态动力学”

**数 学：** 线性常系数微分方程、复变函数、概率、统计

**工 具：** 模拟电路和模拟计算机



# 局部自动化的广泛应用

- 二次大战后，在工业上已广泛应用PID调节器，并用电子模拟计算机（Electronic Analog Computer）来设计自动控制系统。当时在工业上实现**局部自动化**，即单个过程或单个机器的自动化
- 在20世纪30~40年代出现了统一信号的、通用的、标准的**气动单元组合仪表**。20世纪50年代研制出了**电动单元组合仪表**。这些为工业自动化提供了必不可少的技术工具，并使得构成和设计自动控制系统更简便、更工程化了
- **智能化的仪表和控制器**是当前流行的产品

# 数字电子计算机的发明

- ❑ 电子数字计算机内部元件和结构，经历了电子管、晶体管、集成电路和大规模集成电路的四个发展阶段。电子数字计算机的发明，为20世纪60~70年代开始的在控制系统广泛应用程序控制和逻辑控制以及应用数字计算机直接控制生产过程，奠定了基础
- ❑ 小型电子数字计算机或单片计算机已成为复杂自动控制系统的一个组成部分，以实现复杂的控制和算法



# 控制理论的形成与发展

- 现代控制理论（20世纪60年代）：
  - 庞特里亚金提出极大值原理
  - 卡尔曼提出能控性和能观性标志着现代控制理论的诞生
  
- 先进控制理论（20世纪80年代至今）：
  - 1981年，Zames提出最优灵敏度控制——鲁棒控制
  - 从20世纪80年代开始，出现了智能控制、集成控制



卡尔曼

# 现代控制理论的形成与发展

- 1956年，前苏联数学家Л.庞特里亚金提出极大值原理。同年，美国数学家R.贝尔曼创立动态规划。两者为解决最优控制问题提供了理论工具
- 1960年美国数学家R.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，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，英国学者H.罗森布罗克、D.梅恩和A.G.麦克法兰等将频率法推广到分析和设计多变量系统，称为现代频率法

# 现代控制理论形成的历史动力

---

---

**推 动：** 远程火箭技术与航天技术、现代航海技术的直接影响

**物理学：** 力学、电动力学、化学反应机理

**数 学：** 线性代数（几何方法）和矩阵论；线性常微分方程组理论；  
实、复变函数论变分法；泛函分析；概率、统计

**工 具：** 电子计算机技术促进



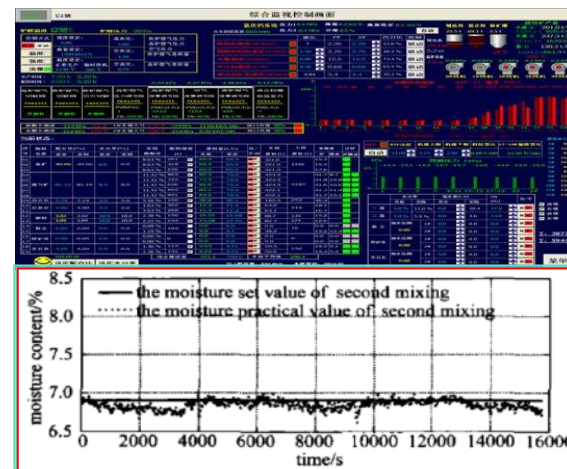
# 先进控制理论的形成与发展及其推动力

- 1981年，基于频域和时域方法，Zames提出最优灵敏度控制，开始了鲁棒控制研究时代
- 从20世纪80年代开始，基于知识的方法，把人工智能与自动控制相结合，出现了智能控制研究阶段
- 近年来，基于知识和解析的方法，实现了集成控制

**推 动：** 微电子技术、计算机技术、通讯和网络技术、机器人技术  
经济、技术全球化进程的加快

# 遥测、遥控和遥感以及综合自动化

- 遥测就是对被测对象的某些参数进行远距离测量
- 遥控就是对被控对象进行远距离控制
- 遥感就是利用装载在飞机或人造卫星等运载工具上的传感器，收集由地面目标物反射或发射出来的电磁波，再根据这些数据来获得关于目标物（如矿藏、森林、作物产量等）的信息
- 综合自动化
  - ✓ 电子数字计算机控制的化工厂
  - ✓ 制造业自动化生产线
  - ✓ 由机床组成的无人工厂
  - ✓ 用柔性制造系统组成的无人工厂



# 自动控制的历史地位和作用

20世纪40年代是自动化技术和理论形成的关键时期：

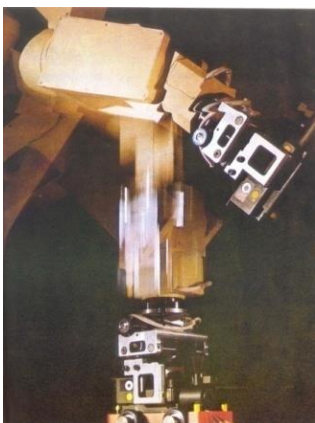
- 工业过程自动化首先来自于传统机械制造业生产方式的变更，最典型的例子是汽车生产流水线，能够大幅度提高质量、降低成本
- 汽车工业的发展，带动了冶金、化工、石油等工业，促进了连续生产过程自动化的发展

先进控制技术与高端自动化系统的应用有力推动了产业发展：

- 高速列车运行控制、航空航天运动体控制、水下潜航器控制、复杂地质钻进控制
- 大型冶金过程控制、化工过程控制、造纸过程控制、电力系统控制（火电、水电、核电、风电、太阳能）
- .....

# 智能机器人

工业机器人



服务机器人



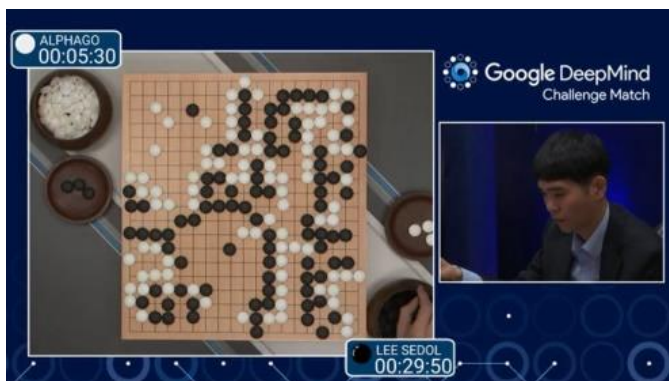
水下机器人



娱乐机器人



AlphaGo



百度无人车



情感机器人



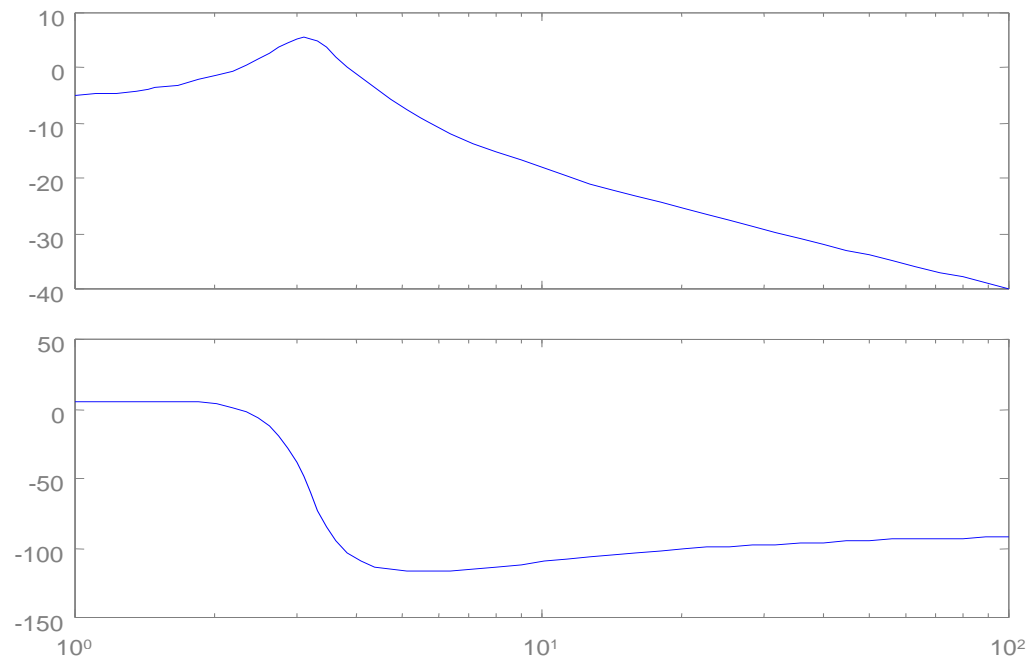
# 基本的控制理论与方法—经典控制

## □ 波德图 (Bode Plot) 方法

频率响应:

幅频特性(Magnitude)

相频特性(Phase)



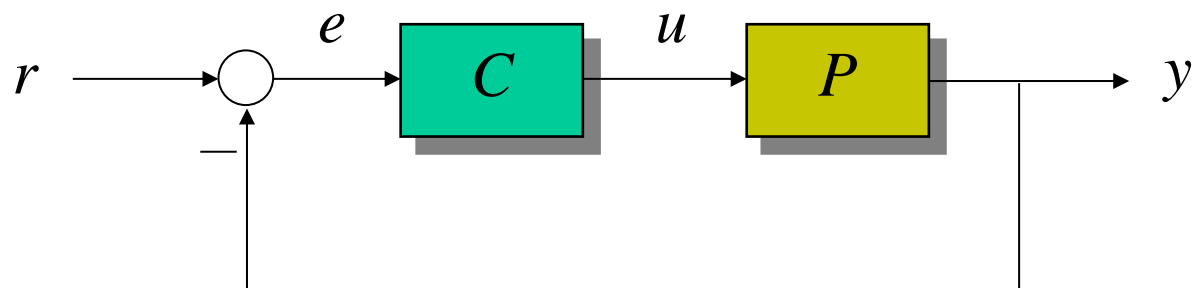
## □ 奈魁斯特稳定性 (Nyquist Stability) 分析

## □ 劳斯稳定性判据



# 基本的控制理论与方法—经典控制

## □ PID (Proportion-Integration-Differentiation) 控制



$$u(t) = K_p e(t) + K_I \int_0^{\infty} e(t) dt + K_D \frac{de(t)}{dt}$$

$$U(s) = (K_p + K_I \frac{1}{s} + K_D s) E(s)$$

$$C(s) = K_p + K_I \frac{1}{s} + K_D s$$

## □ 经典控制的基本特征：

- ✓ SISO (Single Input Single Output) 系统
- ✓ LTI (Linear Time-Invariant) 系统
- ✓ 频域方法
- ✓ 传递函数 (复变函数作为数学工具)



# 基本的控制理论与方法—现代控制

- 状态空间模型 (*State Space Model*)

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu \\ y = Cx + Du \end{cases}$$



- **能控性:** 存在一个输入 $u(t)$ , 使 $x(t)$ 从任意的初始状态出发, 在有限时间内达到原点, 则  $(A, B)$  是能控的
- **能观性:** 任意的初始状态, 可以由有限时间内的输出 $y(t)$ 和输入 $u(t)$ 来唯一决定, 则  $(C, A)$  是能观的
- **外部稳定性:** 输入输出 (BIBO) 稳定性, 基于 $G(s)$ 进行分析
- **内部稳定性:** 内部状态的收敛性, 基于系统矩阵 $A$ 进行分析 ( $A$ 的特征根具有负实部)

能控性+能观性: 内部稳定性 = 外部稳定性

# 基本的控制理论与方法—现代控制

## LQ (Linear Quadratic)最优控制:

- 控制对象是线性的
- 控制目标是使线性二次型性能指标为最小

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu \\ y = Cx + Du \end{cases} \quad J = \int_0^{\infty} [x^T(t)Qx(t) + u^T(t)Ru(t)]dt$$

## 控制系统设计:

寻找控制规律 $u(t)$ , 实现 $\min J$

- LQR (Linear Quadratic Regulator) 方法
- LQG (Linear Quadratic Gaussian) 方法



# 基本的控制理论与方法—现代控制

## 现代控制中最活跃的几个领域

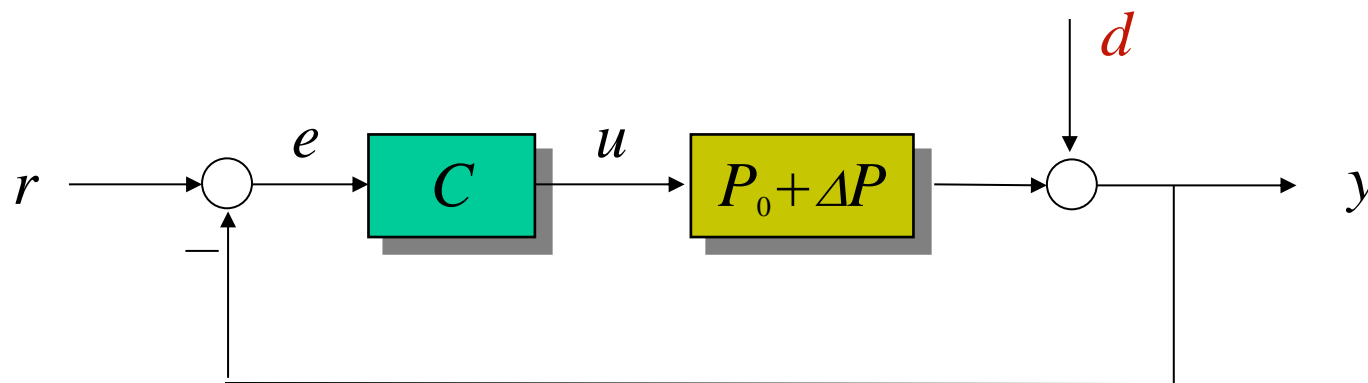
- 最优控制 (*Optimal Control*)
- 自适应控制 (*Adaptive Control*)
- 随机控制 (*Stochastic Control*)
- 系统辨识 (*System Identification*)
- 线性多变量系统的频域方法
- 大系统理论 (*Large Scale System*): 递阶控制、分散控制

## 现代控制的基本特征

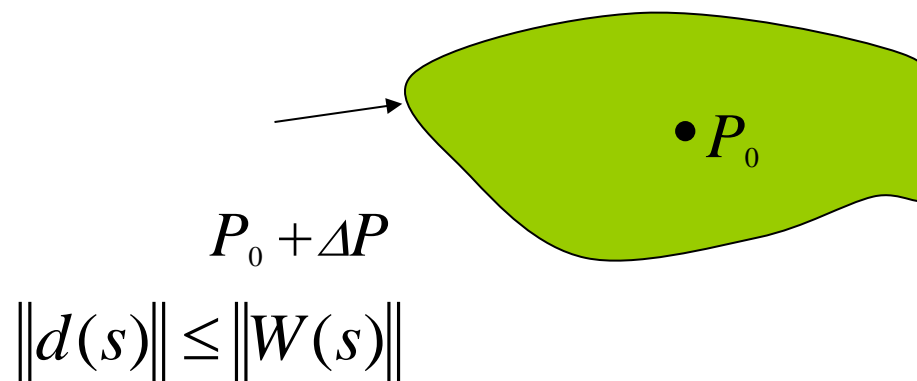
- MIMO (Multi-Input and Multi-Output) 系统
- 扰动特性 (数学期望, 均方差) 已知的系统
- 时域方法
- 状态空间模型 (矩阵论作为数学工具)

# 基本的控制理论与方法—先进控制

## ➤ 不确定系统的鲁棒控制(Robust Control)



- 不确定性系统的描述方法
- 鲁棒性分析和设计方法
- 鲁棒控制的应用领域





# 基本的控制理论与方法—先进控制

## ➤ 智能控制 (*Intelligent Control*)

基于知识的控制 (*Knowledge Based Control*)

——人工智能与自动控制相结合的产物

(1) 分级递阶智能控制 (*Hierarchical Intelligent Control*)

(2) 学习控制 (*Learning Control*)

(3) 专家控制 (*Expert Control*)

(4) 模糊控制 (*Fuzzy Control*)

(5) 神经网络控制 (*Neural Network Control*)

人工智能 (*Artificial Intelligence*), 深度学习 (*Deep Learning*)

# 基本的控制理论与方法—先进控制

## ➤ 集成控制(*Integrated Control*)

基于模型和知识的控制

(*Model and knowledge Based Control*)

集成控制器  
(*Integrated Controller*)

