



现代控制理论

李 韬

tli@math.ecnu.edu.cn; sixumuzi@163.com

个人主页: <http://faculty.ecnu.edu.cn/s/3601/main.jsp>

华东师范大学数学科学学院

2019年4月-2019年6月

课程简介

- 授课对象：数学与应用数学、信息与计算科学高年级本科生；计算机、电子通信、经济管理等专业高年级本科生
- 系统控制科学：数学、自然科学、工程技术和经济管理的多学科交叉领域
- 系统科学的基本概念和方法、系统模型、现代自动控制理论的核心内容和最新前沿
- 先修课程：数学分析或微积分、线性代数、大学物理、常微分方程



课程整体安排


- 第一章 绪论
- 第二章 信号与系统的模型
- 第三章 控制系统的分析
- 第四章 控制系统的设计
- 第五章 最优控制系统

作业、考察方式

- 平时作业和课堂表现 30%
 - 课后作业
 - 讨论和演讲
- 期末考试：小论文70%

教材与参考书

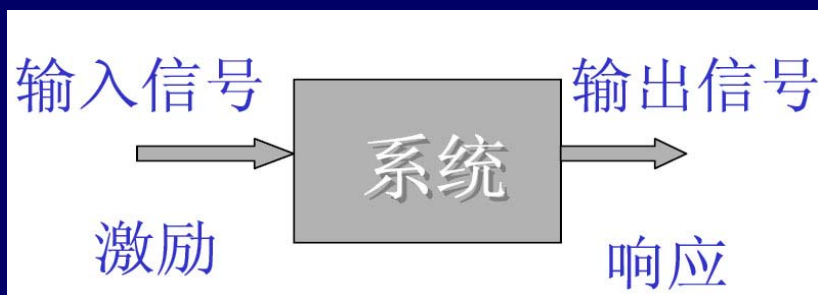
- 信号与系统/郑君里等，北京：高等教育出版社，2000。
- 自动控制原理/胡寿松主编，北京：科学出版社，2007。
- 现代控制理论/王翼编著，北京：机械工业出版社，**2005**。
- 线性系统理论（第2版）/郑大钟编著，北京：清华大学出版社，2002。



第一章 绪论

系统的概念与特性

- “系统”是由若干相互作用和相互依赖的要素组合而成的具有特定功能的整体。
- 系统的特性：
 - ✓ 整体性
 - ✓ 关联性
 - ✓ 层次性
 - ✓ 目的性
 - ✓ 适应性



信息、信号与系统

- 组成系统的各要素之间，系统与外界环境之间存在信息的交流，在信息科学与技术中，常常利用通信系统、控制系统和计算机系统对信息进行提取、识别、存储、传输、变换和控制。
- 信号是信息的物理载荷，是信息的表现形式和运载信息的工具。信息、信号与系统是系统科学的共有概念。
- 系统分析：系统给定，研究系统对于给定输入激励信号的输出响应。
- 系统综合：按照某种需要提出对于给定激励的响应，而后根据此要求设计（综合）系统
 - 信号处理与滤波、通信工程
 - 机器学习、模式识别、数据挖掘
 - 控制工程、动态经济学、管理科学

物理系统

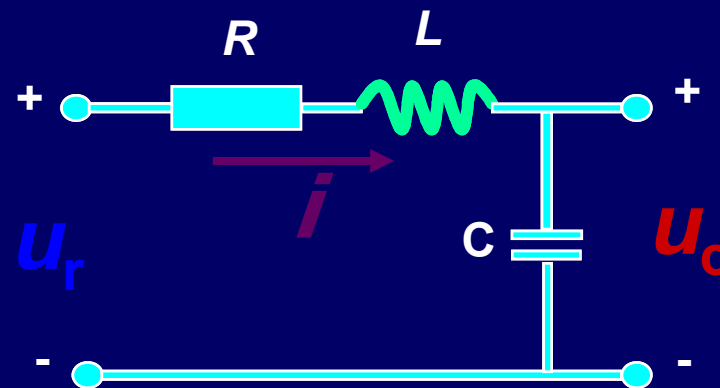
RLC电路

微分方程中只留下输入、输出变量，及系统常数

$$L \frac{di(t)}{dt} + \frac{1}{C} \left[\int_0^t i(\tau) d\tau + C_0 \right] + Ri(t) = u_r(t)$$

$$u_c(t) = \frac{1}{C} \left[\int_0^t i(\tau) d\tau + C_0 \right] \quad \longrightarrow \quad LC \frac{d^2 u_c(t)}{dt^2} + RC \frac{du_c(t)}{dt} + u_c(t) = u_r(t)$$

RLC电路是二阶常系数线性微分方程。



机械位移系统（汽车减震装置）

$$F(t) - F_1(t) - F_2(t) = ma(t)$$

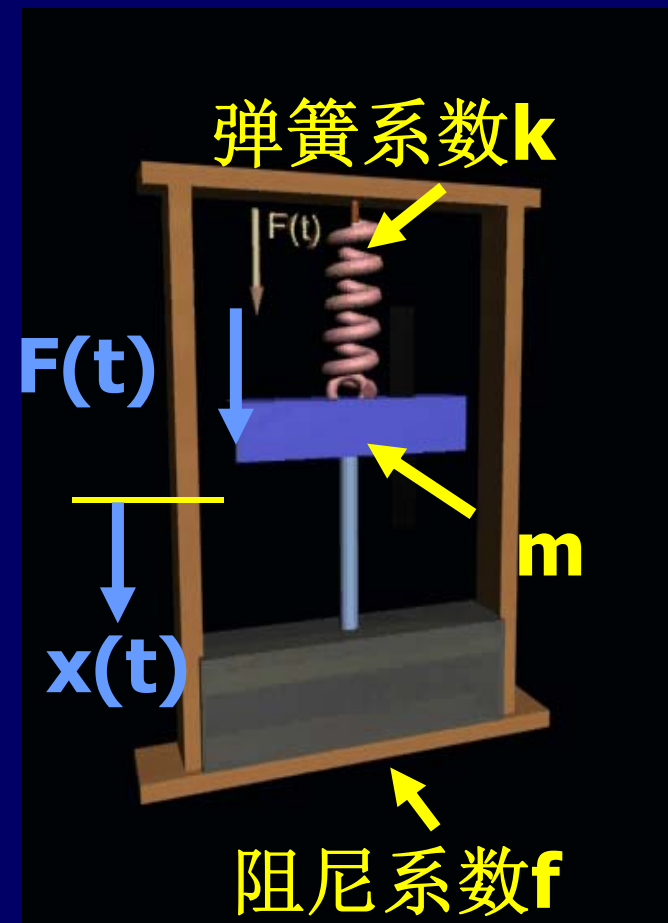
中间变量关系式：

$$F_2(t) = kx(t)$$

$$\begin{cases} F_1(t) = f \frac{dx(t)}{dt} \\ a(t) = \frac{d^2x(t)}{dt^2} \end{cases}$$

消除中间变量得：

$$m \frac{d^2x(t)}{dt^2} + f \frac{dx(t)}{dt} + kx(t) = F(t)$$



比较：RLC电路运动方程与机械位移系统的运动方程

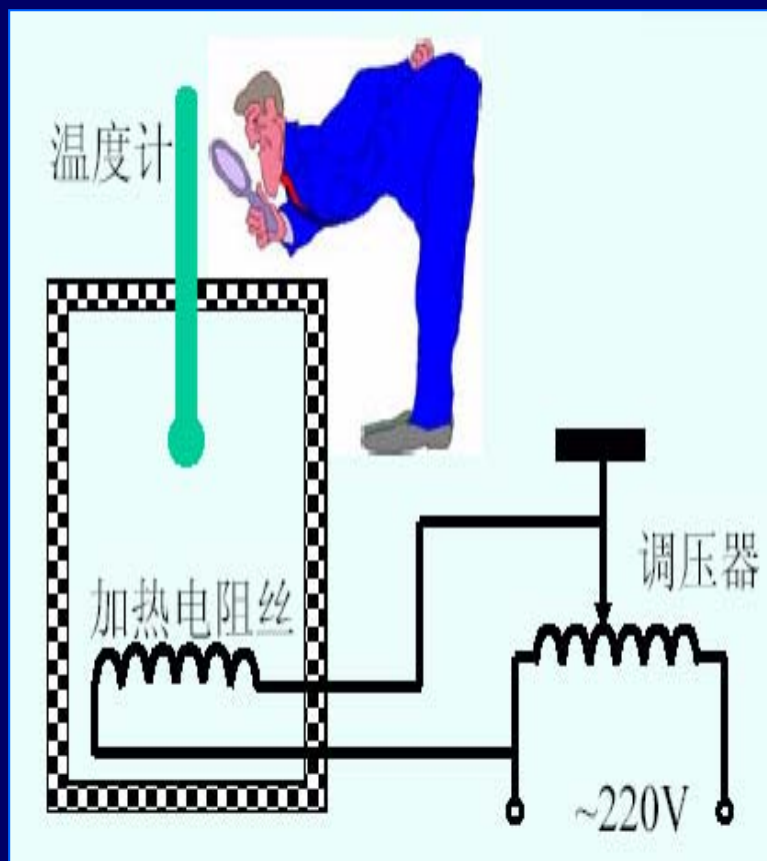
$$LC \frac{d^2 u_C(t)}{dt^2} + RC \frac{du_C(t)}{dt} + u_C(t) = u_r(t)$$

$$m \frac{d^2 x(t)}{dt^2} + f \frac{dx(t)}{dt} + kx(t) = F(t)$$

相似系统

- 相似变量：电压---位置； 电流---速度
- 揭示了不同物理现象之间的相似关系
- 内部物理结构和能量转换方式不同的系统可以具有相似的信息传递结构
- 便于用简单系统去研究相似的复杂系统

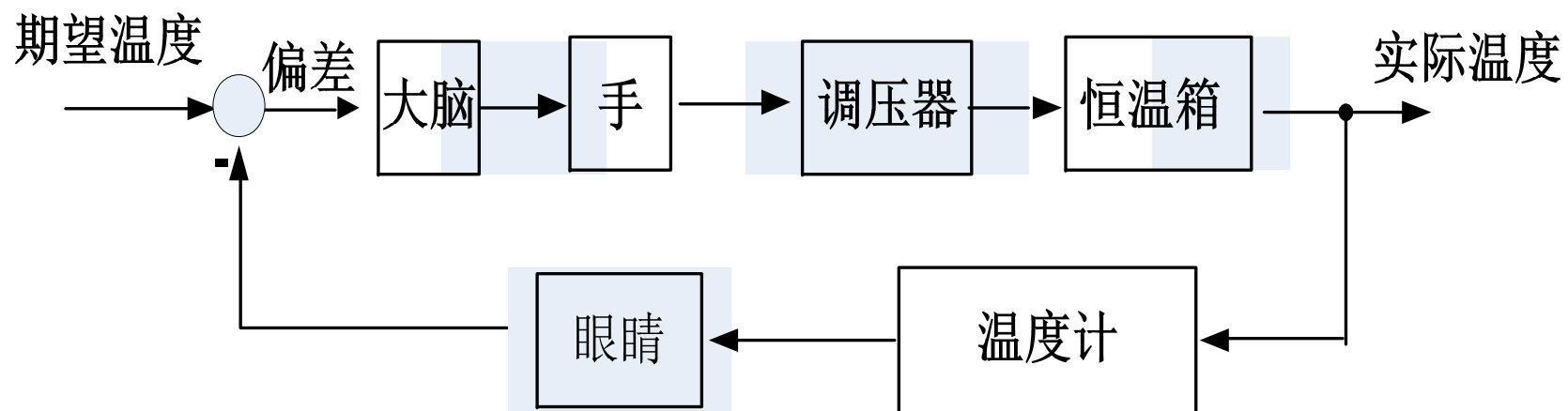
人工控制恒温箱



[控制过程]

- 1 观测恒温箱内的温度
(被控制量)
- 2 与要求的温度(给定值)
进行比较得到温度偏差
的大小和方向
- 3 根据偏差大小和方向调
节调压器, 手动控制加
热电阻丝的电流以调节
温度回复到要求值

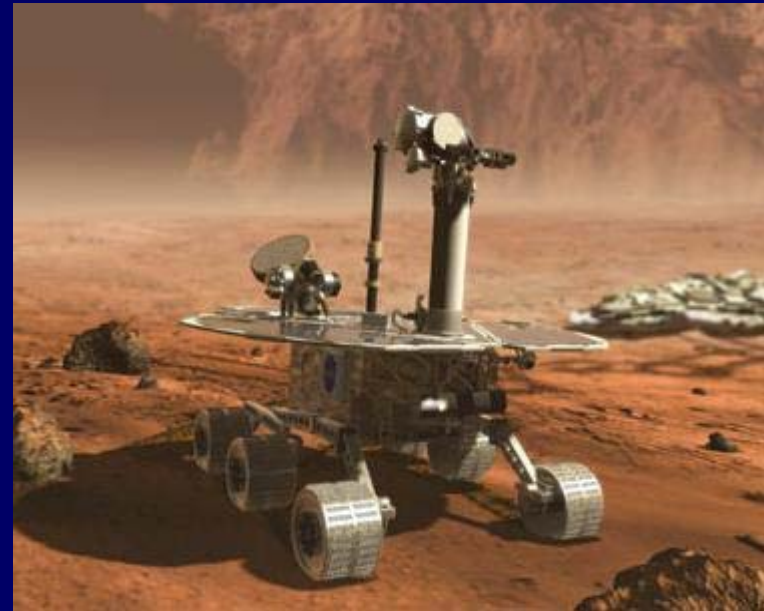
人工控制恒温箱（续）



人工控制恒温箱方块图



哈勃望远镜—特殊地球卫星



月球车（月面巡视器）



导弹发射和制导系统



反弹道导弹系统

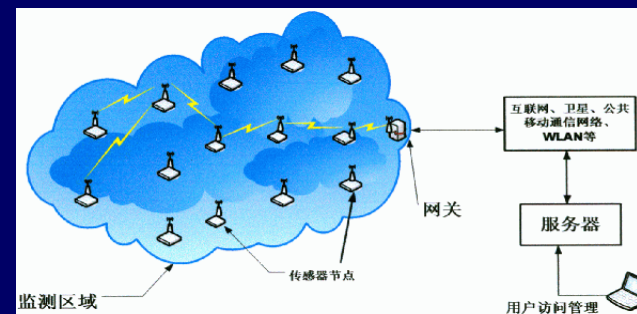
分布式网络化控制系统

- 感知
- 计算
- 决策
- 通信

封装



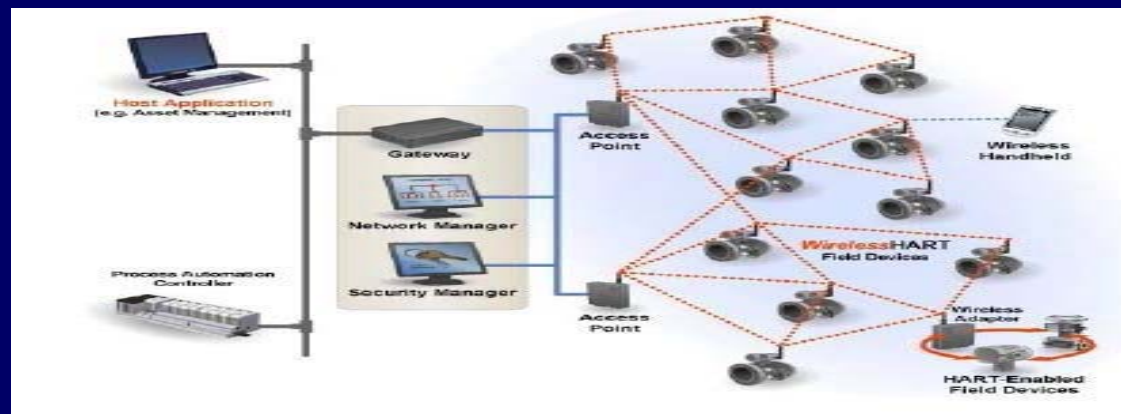
Agent



网络化控制系统与多自主体系统



L. Xie, CCC
2011



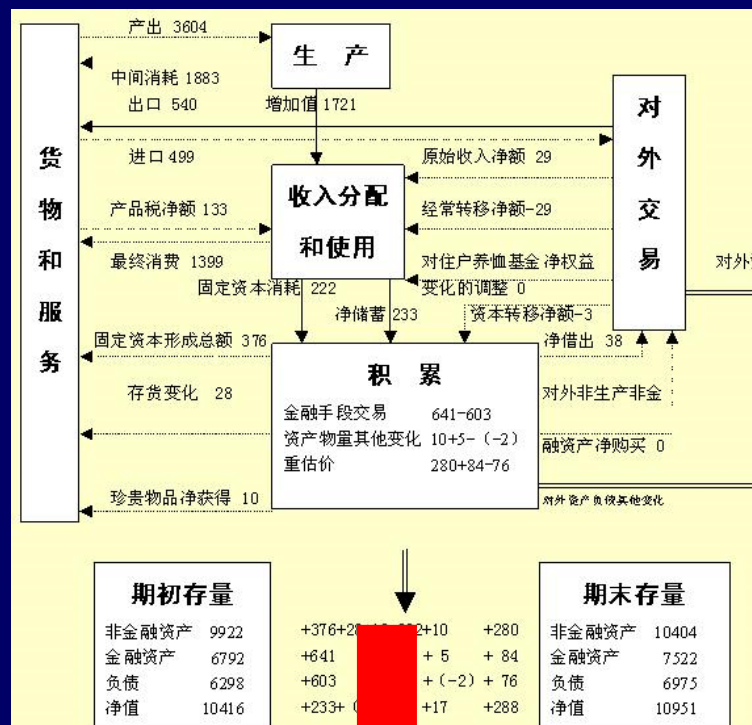
生物群体系统：生物物理学

■ 生物群体的集体行为（生物界中的多自主体系统）

- 个体和种群利益最大化（觅食、交配、避敌）
- 微观局部信息交换 \longrightarrow 宏观有序模式



社会、经济系统



社会网络

经济控制论

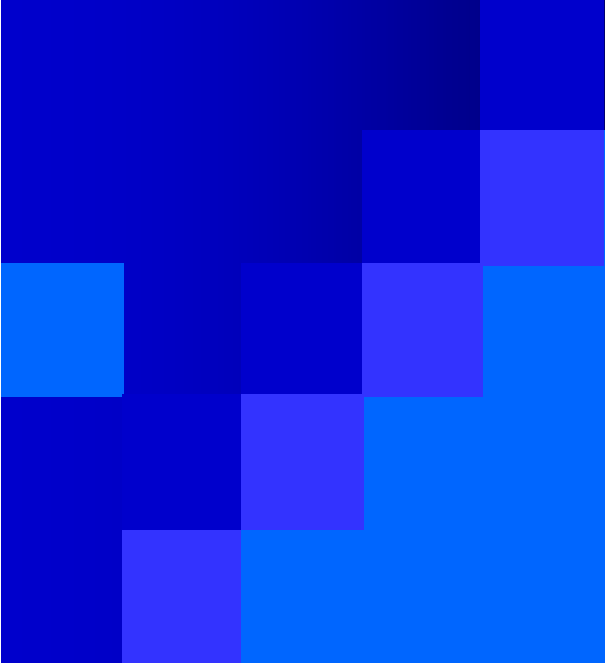


经济物理学

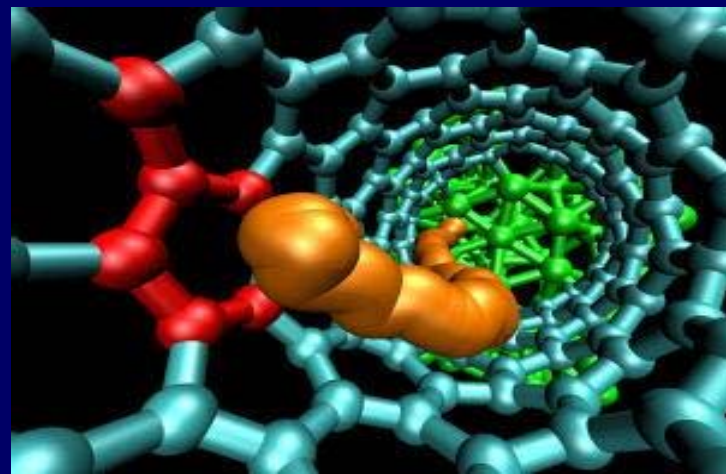


思考题

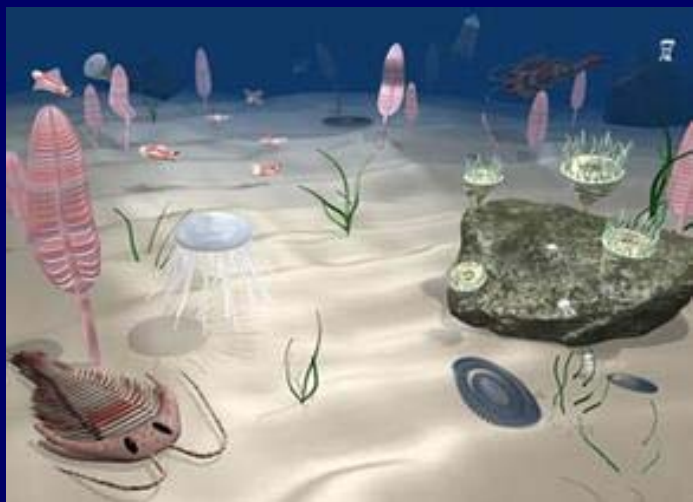
- 信号、数据、向量、信息、知识之间的关系
- 系统、变换、算子、矩阵、算法、程序之间的关系
- 什么叫静态系统？静态系统与函数关系
- 什么叫动态系统？动态系统与泛函的关系



系统科学的 产生和发展



系统科学在科学体系中作用



新技术革命



第四次产业
革命



系统科学在社会进步中的作用

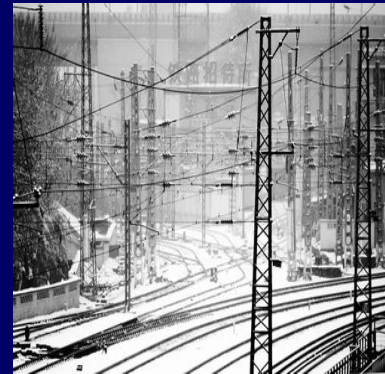
第一次、第
二次社会大
分工



第一次产业
革命



第二次产业
革命



古代自动化方面的成就

- 公元前14世纪至前11世纪，中国、埃及和巴比伦出现自动计时漏壶；
- 公元235年，马钧研制出用齿轮传动自动指示方向的指南车；

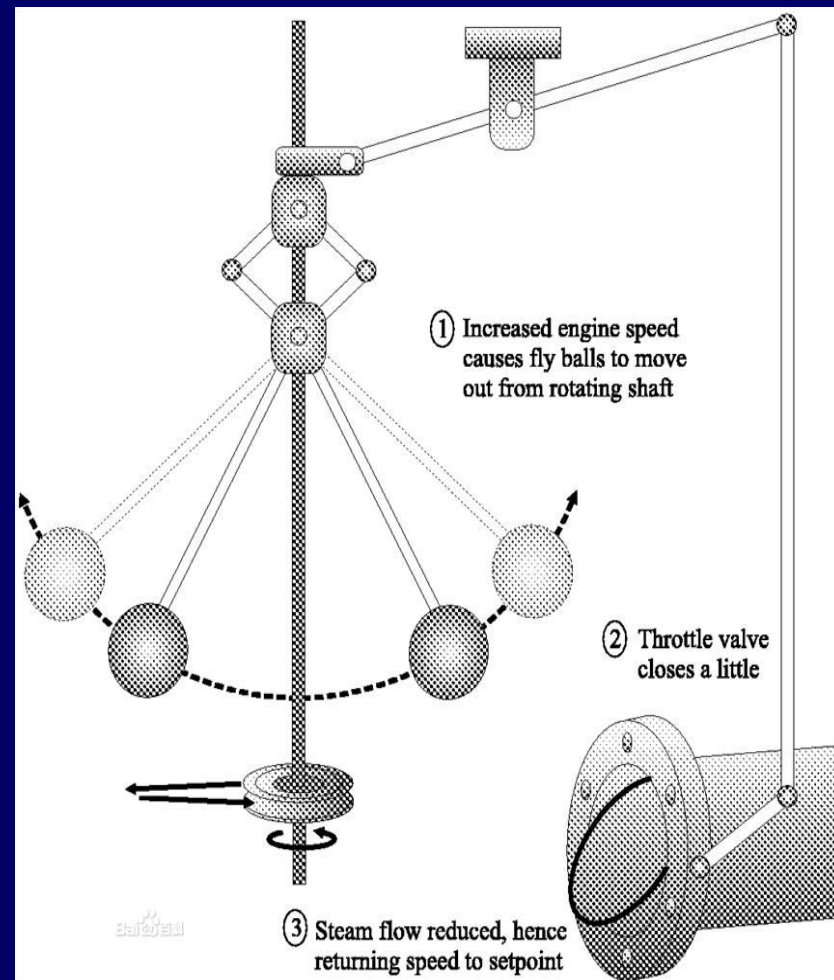



古代自动化方面的成就

- 公元725年，一行、梁令瓚发明有自动报时机构的水运浑象，其中使用了一个天衡装置，是一个按被调量偏差调节的自动调节器；
- 公元1086-1092年，苏颂和韩公廉利用负反馈原理建造具有“天衡”自动调节和自动报时机构的水运仪象台；
- 公元1135年，宋代王普记述“莲华漏”上使用浮子—阀门式机构自动调节漏壶的水位；
- 公元1637年，明代的《天工开物》一书中记载有程序控制思想的提花织机结构图。

离心式调速器

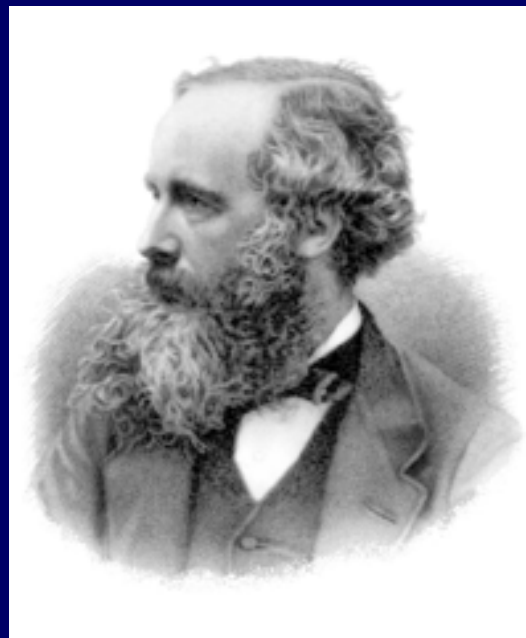
1788年瓦特发明利用反馈原理离心式调速器，当负载或蒸汽供给量发生变化时，离心式调速器能自动调节进气阀门的开度，从而控制蒸汽机的转速。

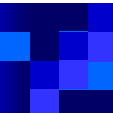


- 
- 离心调速器有时使蒸汽机速度出现大幅度振荡。
其它自动控制系统也有类似现象。
 - 由于当时还没有自动控制理论，所以不能从理论上解释这一现象。

自动控制理论的开端

- 1868年英国麦克斯韦尔的“论调速器”论文通过建立系统微分方程，分析微分方程解的稳定性，将控制系统稳定性的分析，变成了判别微分方程的特征根的实部的正、负号问题，解释了瓦特蒸汽机速度控制系统中出现的剧烈振荡的不稳定问题。这篇著名论文被公认为自动控制理论的开端。





分析问题、解决问题时，不是仅仅从出现问题的对象本身，而是从和对象有联系的其他关联要素入手，将对象和其他要素作为一个整体研究，这就是一种系统的思想方法。

古代朴素的系统思想

- 系统思想是关于系统的整体性观念、相互联系的观念和演化发展的观念。
- 中国古代的阴阳五行学说和中医辩证施治
- 《孙子兵法》的战争全局和整体观念
- 亚里士多德曾说：“一般说来，所有方式的显示并不是部分的总和”



近代形而上学自然观

- 机械论：伴随着牛顿力学的发展而确立
- 还原论：解剖、分析方法
- 静态观点：自然界的“质”绝对不变
- 外力论：归结为神的第一推动
- 形而上学的唯物主义

近代辩证唯物主义自然观

- 19世纪上半叶科学的三大发现：热力学定律、细胞学说和进化论
- 阿尔弗雷德·魏格纳（1880—1930）在1912年提出的大陆漂移学说
- 19世纪末-20世纪20年代：相对论和量子力学
- 辩证唯物主义的产生和发展



现代系统科学的形成和发展

- 电子计算机的出现
- 航空航天技术、制导和导航技术、原子能技术
- 系统论、控制论和信息论的诞生
- 系统工程与现代管理科学
- 经济控制论与动态经济学
- 自然科学与人文社会科学走向统一

文字产生、
一般知识

算术、天文
学、哲学

自然科学
技术和社会
科学的
分离

人类知识
体系的合
一

自然科学与哲学的彻底
分离、近代科学分支产
生

系统科学的
产生和发展



“三论”标志着系统科学的诞生

- 美籍奥地利生物学家贝塔朗菲L. V. Bertalanffy发现一切生物体都是在一定的时间与空间中，呈现出复杂的有层次的结构，1945年在《德国哲学周刊》18期上发表《关于一般系统论》的文章，但不久毁于战火，未被人们注意。1947年在美国讲学时再次提出系统论思想。1950年发表《物理学和生物学中的开放系统理论》。1955年专著《一般系统论》，成为系统论的奠基性著作。
- 1948年，Shannon发表论文《通信的数学原理》，标志信息论的产生。
- 1948年，维纳出版《控制论-关于动物与机器中控制与通信的科学》，标志着控制论的诞生。

- 在物理、生物、工程和社会经济系统中，虽然其内在的物质构造和能量转换方面显著不同，但其对于**信息**的识别、提取、存储、传输、变换、处理和控制存在许多共同规律。
- 同数学一样，系统科学是一门典型的**横断学科**，**自动控制理论**是系统科学的重要组成部分和主要基础。
- 从孤立的个别分析到综合的、整体分析。
- 从一时一地机械静止的观点到着重于所有可能的行为方式与状态，重视变化趋势的动态的观点与方法。
- 从物质、能量的形态观点到信息的形式观点讨论系统的功能；从物质、能量交换到物质、能量和信息的相互交换。

内容、实体、个体、
形、肉



形式、功能、关系、
神、灵

控制论与控制理论

- 控制论：Cybernetics
- 控制理论：Control theory
- Cybernetics 源于希腊语κυβερνητική, 拉丁化为kybernetics, 原文为舵手、掌舵者。
- 调速器、调节器：governor
- 控制理论是控制论的思想来源之一。控制论涵盖控制、通信、人工智能、神经心理学多个领域，是一个学科群，更确切的说是一种科学的哲学理论或观察世界的系统观点和方法。

经典控制理论的孕育——频域方法

- 1927年，为使广泛应用的电子管在其性能发生较大变化的情况下仍能正常工作，负反馈放大器正式诞生，从而确立了“反馈”在自动控制技术中的核心地位。
- 1932年，美国奈奎斯特提出奈奎斯特稳定判据，为研究负反馈放大器的稳定性提供了理论依据。伯德(H. W. Bode)和尼科尔斯(N. B. Nichols)在1930年代末和1940年代初进一步将频率响应法加以发展, 形成了控制系统的频域分析方法。

经典控制理论的孕育——复频域方法

- 1948年，美国伊万斯(W. R. Evans)提出了根轨迹法，为分析系统性能随参数变化的规律提供了有力的工具，标志着控制系统复频域分析方法的诞生。

经典控制理论的形成

- 1948年，维纳出版《控制论-关于动物与机器中控制与通信的科学》，系统地总结了工程、生物和社会系统中关于信息传输、处理和反馈调节的一般规律，标志着控制论作为一门独立学科的诞生。
- 1954年，钱学森出版《工程控制论》第一次用控制论（Cybernetics）称呼在工程设计和实验中能够直接应用的关于控制系统的理论、概念及方法。
- 20世纪50年代，经典控制理论发展成熟，以传递函数作为描述系统的主要数学模型，以时域分析法、根轨迹法和频域分析法为主要分析设计工具，主要研究单输入单输出线性定常系统的分析和设计。

经典控制理论的局限

- 无法处理时变、非线性系统。
- 只限于分析和设计标量系统，采用输入、输出描述方式，本质上忽略了系统结构和内部特性，缺乏对多输入、多输出，多耦合回路系统的有效分析设计方法。
- 采用“分析法”设计系统，即按照某种方法确定合适的、简单的、工程上易于实现的控制器，然后对闭环系统进行分析，直到找到满意的结果为止。缺乏针对给定控制目标的系统化、最优化的设计方法。

现代控制理论的孕育和产生

- 1892年，俄国学者李雅普诺夫发表了“论运动稳定性的一般问题”的博士论文，提出了李雅普稳定性理论。
- 20世纪50年代中期，由于空间技术的发展，控制对象更加复杂，对控制系统的要求更高，为控制理论的发展提出了新的研究课题。
- 20世纪50年代中期，苏联数学家庞特里亚金提出最优控制的极大值原理，发表在后来出版的《最优过程的数学理论》中。
- 1957年，苏联成功发射了第一颗人造地球卫星。
- 1957年，美国数学家贝尔曼出版《Dynamic Programming》。
- 1960年，卡尔曼提出了状态空间法和离散时间Kalman滤波。
- 1961年，卡尔曼和布什提出了连续时间Kalman-Bucy滤波。
- 1968年，美国阿波罗飞船成功登上月球。

现代控制理论的基本内容

- 20世纪60年代末，现代控制理论形成。主要研究具有高性能、高精度和多耦合回路的多变量系统的分析和设计问题，采取状态空间描述形式，以解析计算为主要手段，追求性能指标的最优，在宇航领域获得了卓有成效的应用。
- 现代控制理论的四大基础理论
 - ✓ 动态系统的状态空间理论
 - ✓ 动态系统的最优控制理论
 - ✓ 动态系统的状态估计理论
 - ✓ 动态系统的系统辨识理论



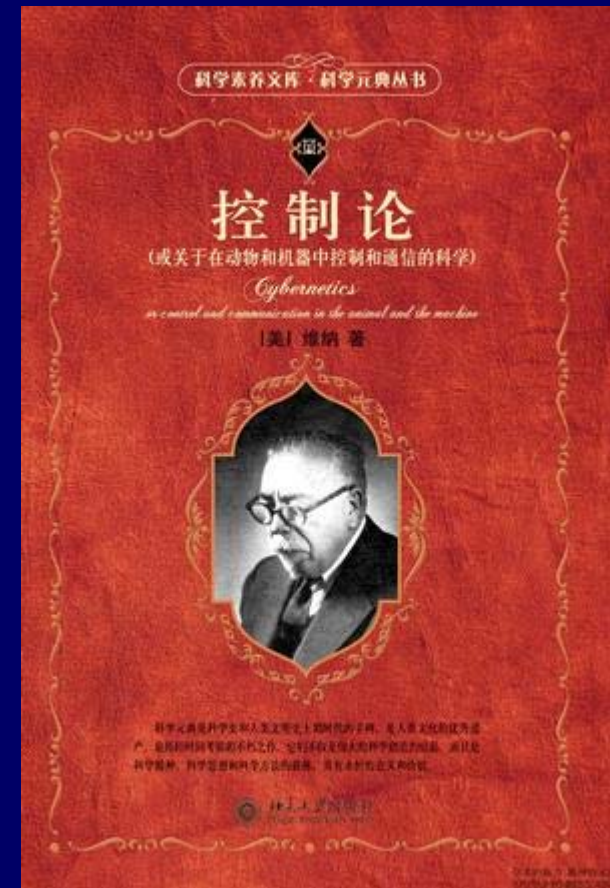
现代控制理论的主要分支

- 线性系统理论
- 非线性系统理论
- 分布参数系统理论
- 离散事件和混杂系统理论
- 最优控制理论
- 鲁棒控制理论
- 最优滤波与随机控制理论
- 系统辨识与自适应控制理论
- 智能控制理论
- 网络控制理论

.....

- 【美】维纳 著，郝季人译，《控制论---或关于在动物和机器中控制和通信的科学》，北京大学出版社，2007。

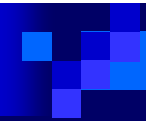
- Norbert Wiener, *Cybernetics---on control and communication in the animal and machine*, 1948.

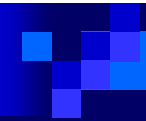


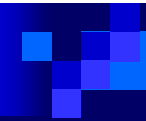


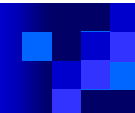
■ 郝季人：

1956年中宣部科技处：罗劲柏、侯德彭、
龚育之，中宣部国际处：陈步

- 
- 胡作玄，《控制论》导读，3-19页。
 - “无论自动机器，还是神经系统、生命系统，以至经济系统、社会系统，撇开各自的质态特点，都可以看做是一个自动控制系统。在这类系统中有专门的调节装置来控制系统的运转，维持自身的稳定和系统的功能。控制机构发出指令，作为控制信息传递到系统的各个部分（即控制对象）中去，由它们按指令执行之后再 把执行的情况作为反馈信息输送回来，并作为决定下一步调整控制的依据。”

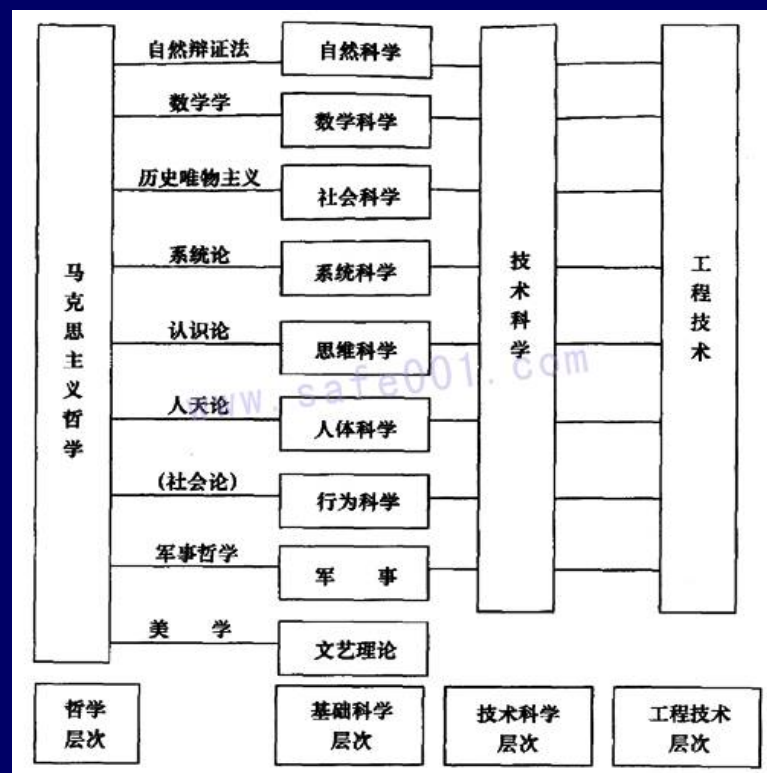
- 
- “对于有机体，机械论的观点是把它们一步一步分解到最后，把它们每个局部都搞清楚，有机体无非就是局部的总和。但是控制论的观点则力求回答整体问题，即揭示其模式。……”
 - “以人体来说，作为一个活的有机体，我们不断进行新陈代谢，组织器官都在不断的变化，换句话说，构成我们躯体的物质并不是不变的，**不变的只是模式，这才是生命的本质。**”
 - “模式就是消息，它也可以作为消息来传递，……。从某种意义上说，一个有机体的全部信息全在这个密码本上记录着。人的一生无非是这个密码按照一定的规则表达出来而已，看来维纳的控制论的确抓住了生物学研究的大方向。生物体的各种过程差不多都是为了达到稳态的调节与控制过程，……”

- 
- 在某种意味上道破了控制论乃至系统科学的玄机。
 - 生命离不开物理、化学反应，但生命的本质应该是一种信息的模式。在生命体和人造自动控制系统中存在着某些共同的信息模式。
 - 系统控制科学是一门研究信息模式的科学，系统控制科学应该能够揭示物理学所回答不了的某些关于物质世界乃至社会科学和心里科学的基本规律。

- 
- “智能的本质是什么，能否发明智能机器代替人类部分繁重的脑力劳动，实现自动控制和决策？”维纳的《控制论》系统地总结了**在生命体和人造机器中普遍存在的信息感知、信息传递和处理、反馈调节和决策的一般规律**，标志着控制科学的诞生，为人工智能科学与技术的发展奠定了重要的科学理论基础和研究范式。
 - 控制科学架起了数学和各门实体科学的桥梁，正如物理学使人们感受到数学在认识世界中的巨大作用一样，**控制与智能科学使人们感受到数学在改造世界中的无穷威力**。

现代科学技术的体系结构

钱学森现代科学技术体系

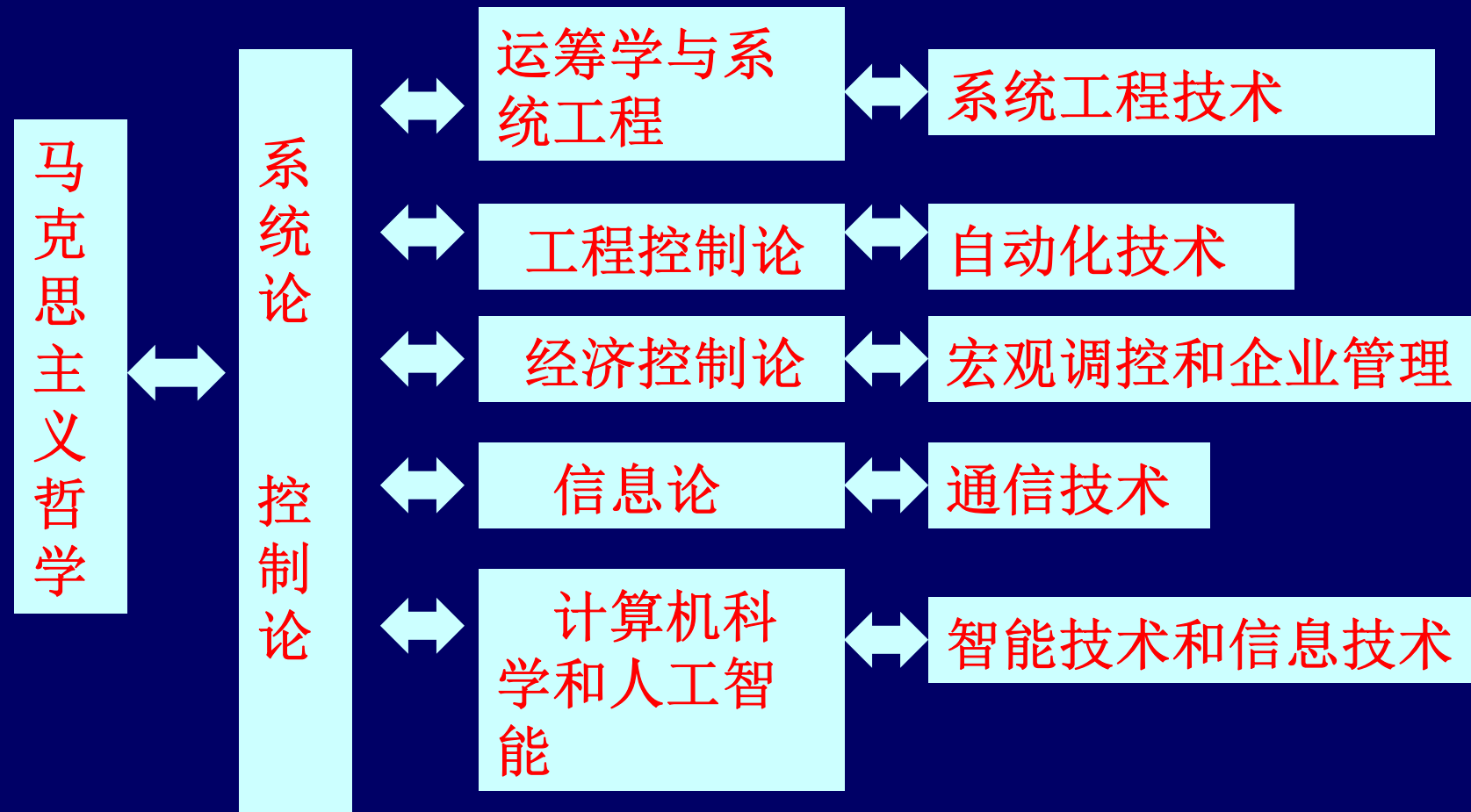


数学：数量关系与空间形式

系统科学：要素、结构、系统、环境、功能、信息与控制的关系

哲学：量变与质变、对立与统一、现象与本质、偶然性和必然性等

系统科学与工程层次和分支



哲学 → 基础科学 → 技术科学 → 工程技术

- 钱学森（1980）年评价指出“对现代生产和现代科学技术面貌发生深远影响的三项技术革命是“核能技术”、“电子数字计算机”和“航天技术”，“但所有这些科学技术的发展，所有这些技术革命都直接与控制论联系在一起。”“作为技术科学的控制论，对工程技术、生物和生命现象的研究和经济科学，以及对社会研究都有深刻的意义，比之相对论和量子论对社会的作用有过之而无不及。我们可以毫不含糊地说从科学理论的角度看，二十世纪上半叶三大伟绩是相对论、量子论和控制论，也许可以称它们为三项科学革命，是人类认识客观世界的三大飞跃。”

- 维纳曾预言“在这些信息与通信设施未来的发展过程中，人与机器、机器与人以及**机器与机器之间的信息**注定要发挥越来越重要的作用。”
- 当前“万物互联”的时代已经来临，数以亿计的通过各种通信网络互连并与人类交互的智能设备能够实时感知自己所处的环境、识别特定状态和对象、触发控制与决策并产生自主行为。**由控制论引发的这场智能化革命正在彻底改变人类的生产方式、生活方式、社会关系和思想文化。**
- 正如人口控制论专家宋健（1991）所指出的那样“已经开始的这场新技术革命将在系统控制技术的推动下，把人类生产活动的智能自动化和劳动生产率提到一个新的、前所未有的程度”。



系统科学与中国梦



中国古代辩证思想

- 《易经》的阴阳对立统一思想
- 老子的对立面转化思想
- 孔子的中庸思想



中医的系统观点

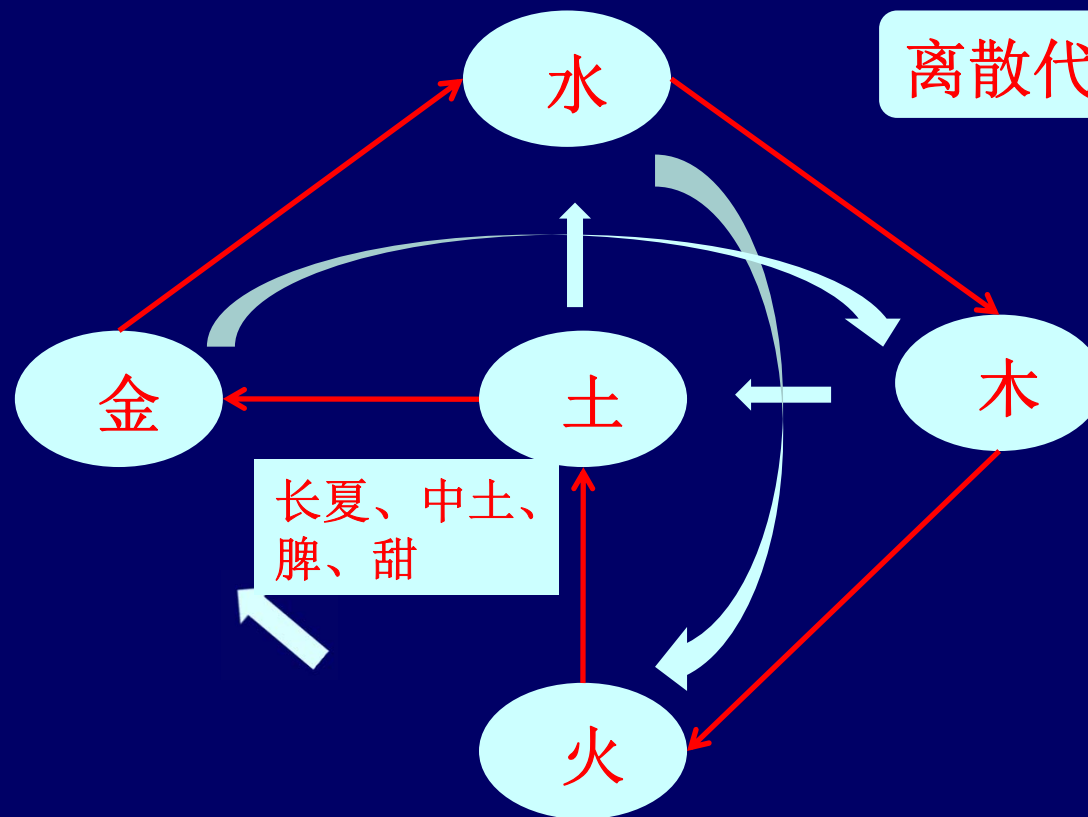
- 《黄帝内经》的天人合一思想
- 阴阳五行是那个没有数据和仪器的时代，用来描述系统的方法
- 中医是运用系统学原理的科学
- 中医学的很多理论和概念，很可能像软件一样，无法用解剖学验证

中医五行

离散代数逻辑系统



秋季、西方、
肺、辣



冬季、北方、
肾、咸

长夏、中土、
脾、甜

夏季、南方、
心、苦

春季、东方、
肝、酸

指挥系统

能量供给系统

资源管理系统

经络、血管、神经、淋巴系统

诊断维修系统

废物清理系统

周边环境

人体类计算机系统框图





东西方文化的对比

“系统科学和系统工程在当代中国科学中的地位至关重要，我在访问中国期间已觉察到这一点。在访问中，中国人思考 and 解决问题的方式一再给我留下深刻印象。我确信，这种思考方式将在全世界传播开来”

----- 赫尔曼. 哈肯

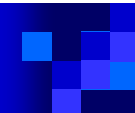
古代中国究竟有没有科学？

“科学在中国事实上是存在的，饱学之士从这种科学中每时每刻都可以发现其财富、早熟、独创性甚至现代性。李约瑟（**Joseph Needham**）曾审慎地考察了中国科学的发展历程，他评论说，中国的”有机的”世界观实际上倾向于今天的科学，与19世纪结束之前盛行一时的牛顿的机械主义世界观形成了对比，这种世界观构成了西方科学的根基。然而，非常奇怪的是，在中国，技术的发展跟不上科学的发展。它在原地踏步。出现这种状况的一个主要原因无疑是中国人力资源太过丰富。中国不必发明机器来节省人力，它是由地方性的人口过剩产生的贫穷的永久受害者。

----- 费尔南·布罗代尔 《A History of Civilizations》

	原始社会---古代	近代---现代	现代---未来
工具	石器---铁器	机器---自动化	网络化、智能化
能源	人力、畜力、水力、风力等自然力	化石能源、蒸汽机---传统集中火力发电	可再生新能源分布式发电
生产方式	分散个体生产	集中工厂式生产	分散个性化生产
生产关系	原始公有制---自然经济	资本主义市场经济	社会主义：公有制、计划和市场有机结合
科学体系	自然哲学混成一体	学科分离	学科统一
世界观和方法论	朴素整体论	还原论	还原论和整体论辩证统一
主导文化	东方文化	西方文化	东方文化

正-----反-----合

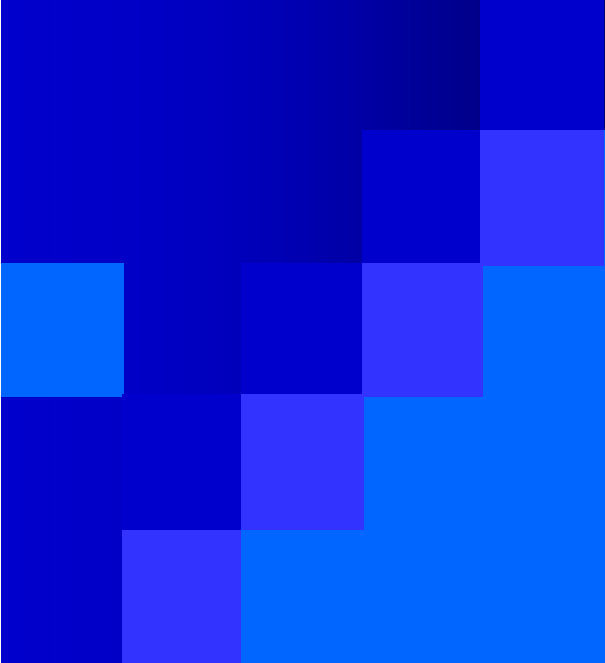
- 
- ✓ 从基于还原论的传统科学技术到基于整体论的现代科学技术体系
 - ✓ 从机械电气时代到信息网络自动化时代
 - ✓ 从天人对立的世界观到天人合一的世界观
 - ✓ 从西方近代文化兴起到东方传统文化的回归
 - ✓ 从“物统治人”的资本主义到“以人为本”的社会主义
 - ✓ 从美国梦到中国梦
 - ✓

思考题

- 试用辩证唯物主义的“否定之否定”原理揭示系统科学的产生和发展的必然性。
- 系统科学的相关科学与技术 in 人类社会发
展中所起到的关键作用。
- 系统科学的兴起与东方文化复兴的关系？
- 中国“诸子百家”的哪些学派和观点具有辩证法和系统科学思想？

参考文献

- 许国志、顾基发、车宏安等编，《系统科学》，上海：上海科技教育出版社，**2000**.
- 【法】费尔南·布罗代尔 著，常绍民、冯棠、张文英、王明毅 译《文明史》，**A History of Civilization**，北京：中信出版社，**2014**.



控制系统的 原理与构成

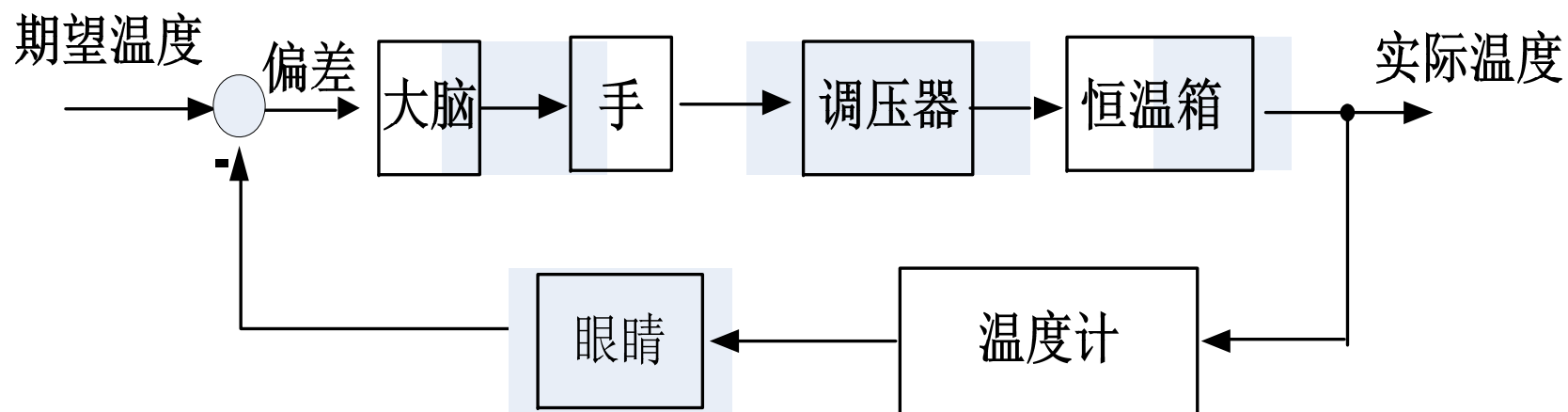
反馈控制的目标

- 在现代工业生产过程中，有很多物理量(如流量、温度、压力、转速、位置、液位等要求保持恒定，或按一定的规律变化)。工业设备在运行中负载经常变化，还存在各种干扰，使这些物理量偏离给定值或给定的运动规律，为此需要调整相应的另一物理量以适应负载的变化和抵消干扰的影响。
- 工业锅炉中保持蒸汽压力的恒定
- 工业加热炉中保持热油出口温度恒定
- 火炮跟踪飞机时，火炮口要随飞机方位和俯仰的改变而变化等。

反馈控制原理

- 在长期的生产实践中，人们逐渐总结出人工控制系统的控制规律和人在控制中的作用，逐渐用一些装置代替人的职能，这就实现了自动控制。
- 在反馈控制系统中，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给定量之间的偏差，从而实现对被控对象进行控制的任务，这就是反馈控制的原理。
- 我们将对被控对象状态的量测送回到给定信号端，并与给定信号相比较产生偏差信号的过程成为反馈。若反馈信号的作用是使偏差信号越来越小，称为负反馈，反之，称为正反馈。

人工控制恒温箱（续）

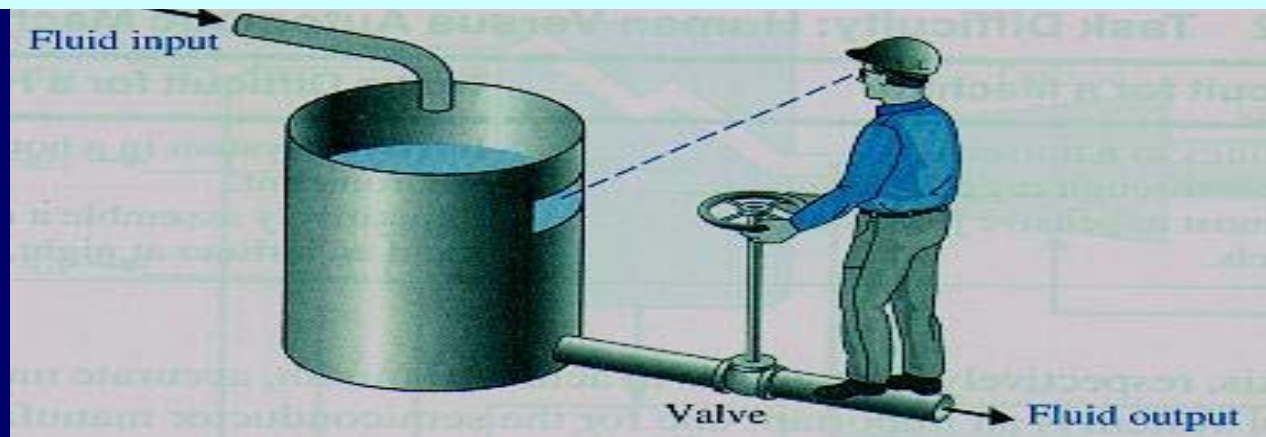


人工控制恒温箱方块图

反馈控制原理

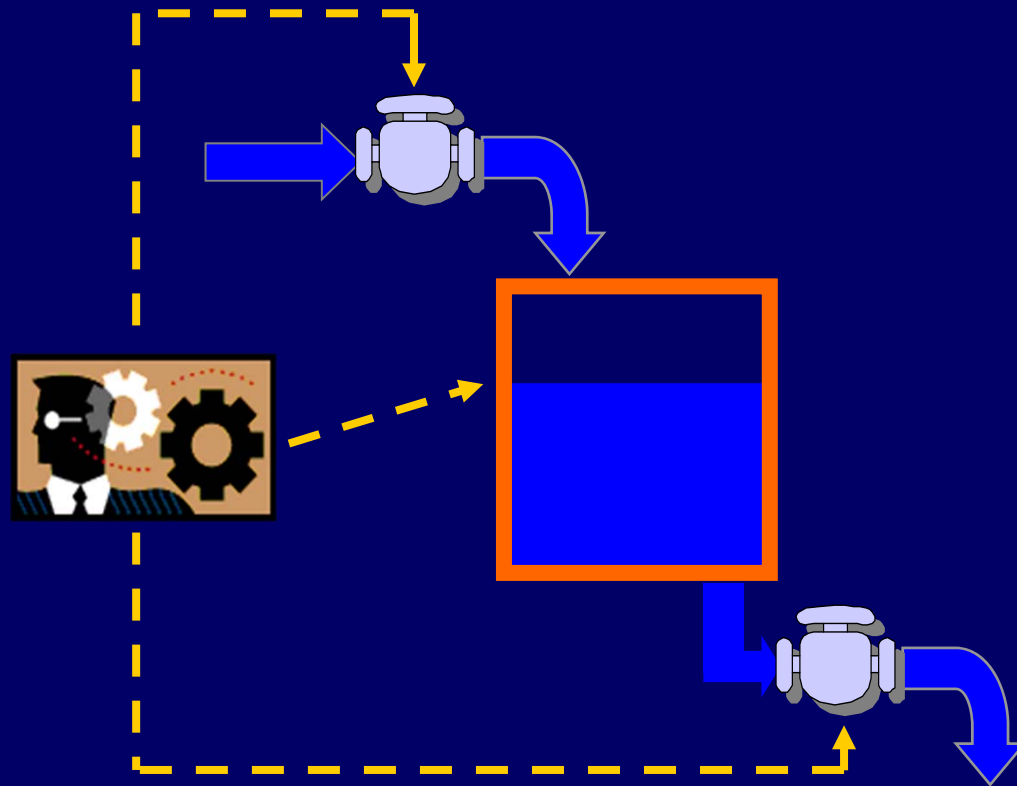
- 反馈控制就是采用负反馈并利用偏差进行控制的过程。由于引入被控量的反馈信息，整个控制过程成为闭合过程，也称闭环控制。
- 人的一切活动都体现出反馈控制原理，人本身就是一个具有高度复杂控制能力的反馈控制系统。

调节容器液面位置的人工闭环控制系统



人工反馈控制

■ 实例（示意图）

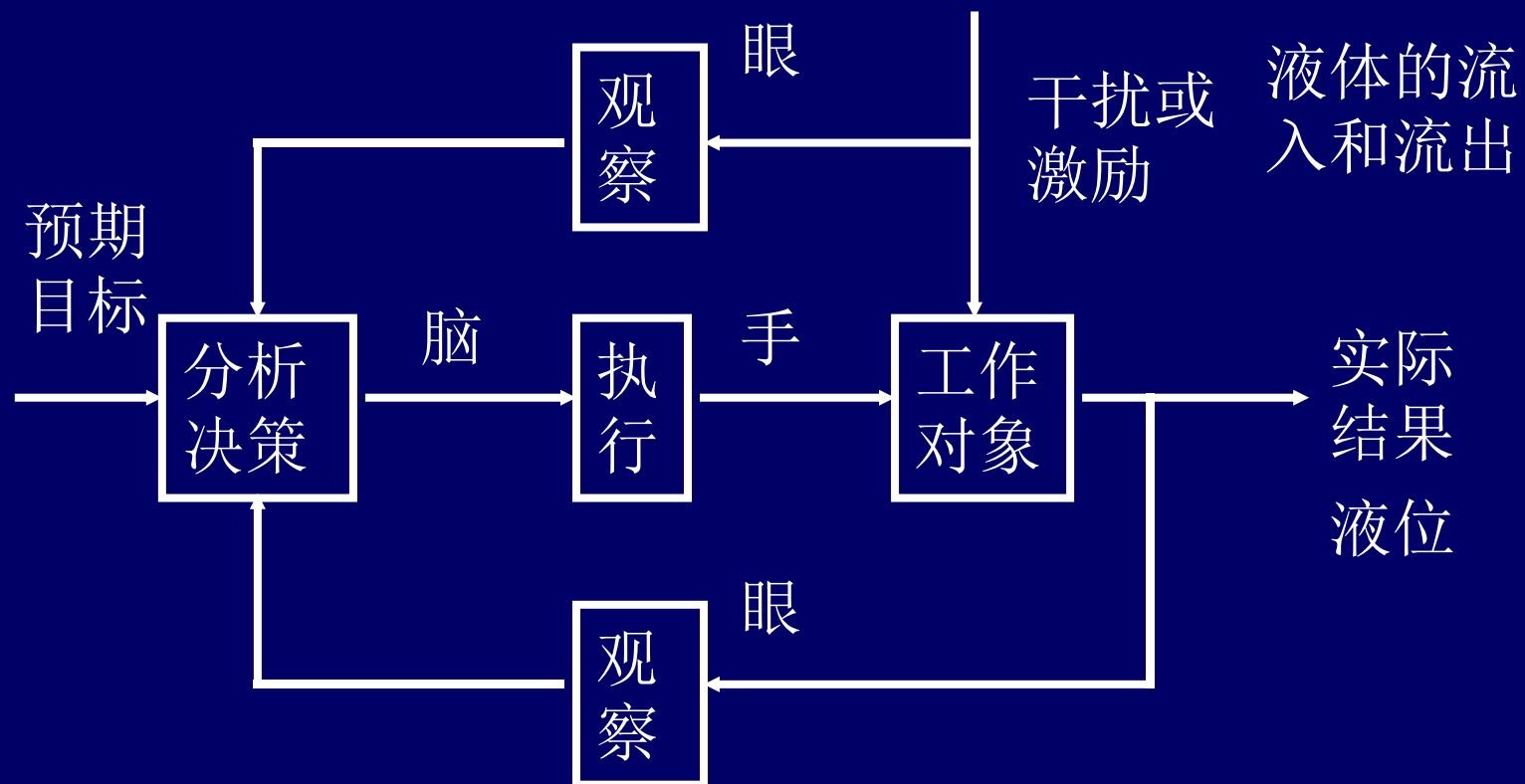


人工（手动）控制：

- (1) 对象：储液系统
- (2) 目标：液位
- (3) 眼睛：观察

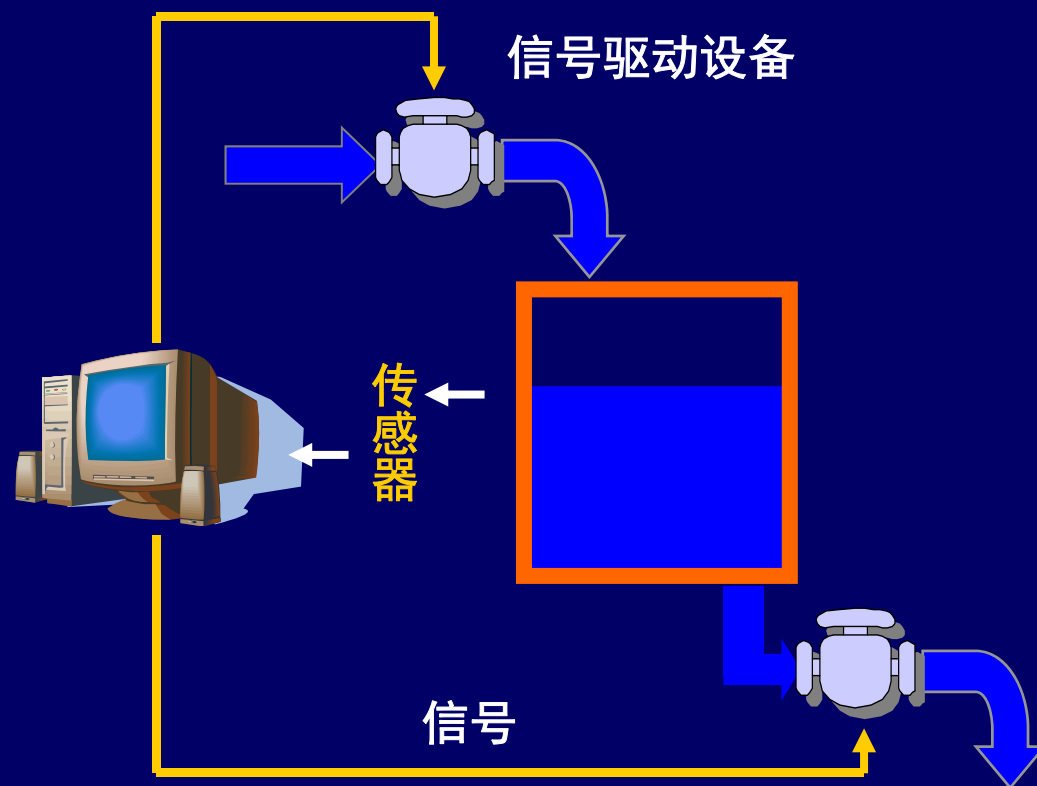
液位变化

- (4) 大脑：分析、比较、判断
- (5) 手/脚：动作执行



自动反馈控制

■ 实例（示意图）



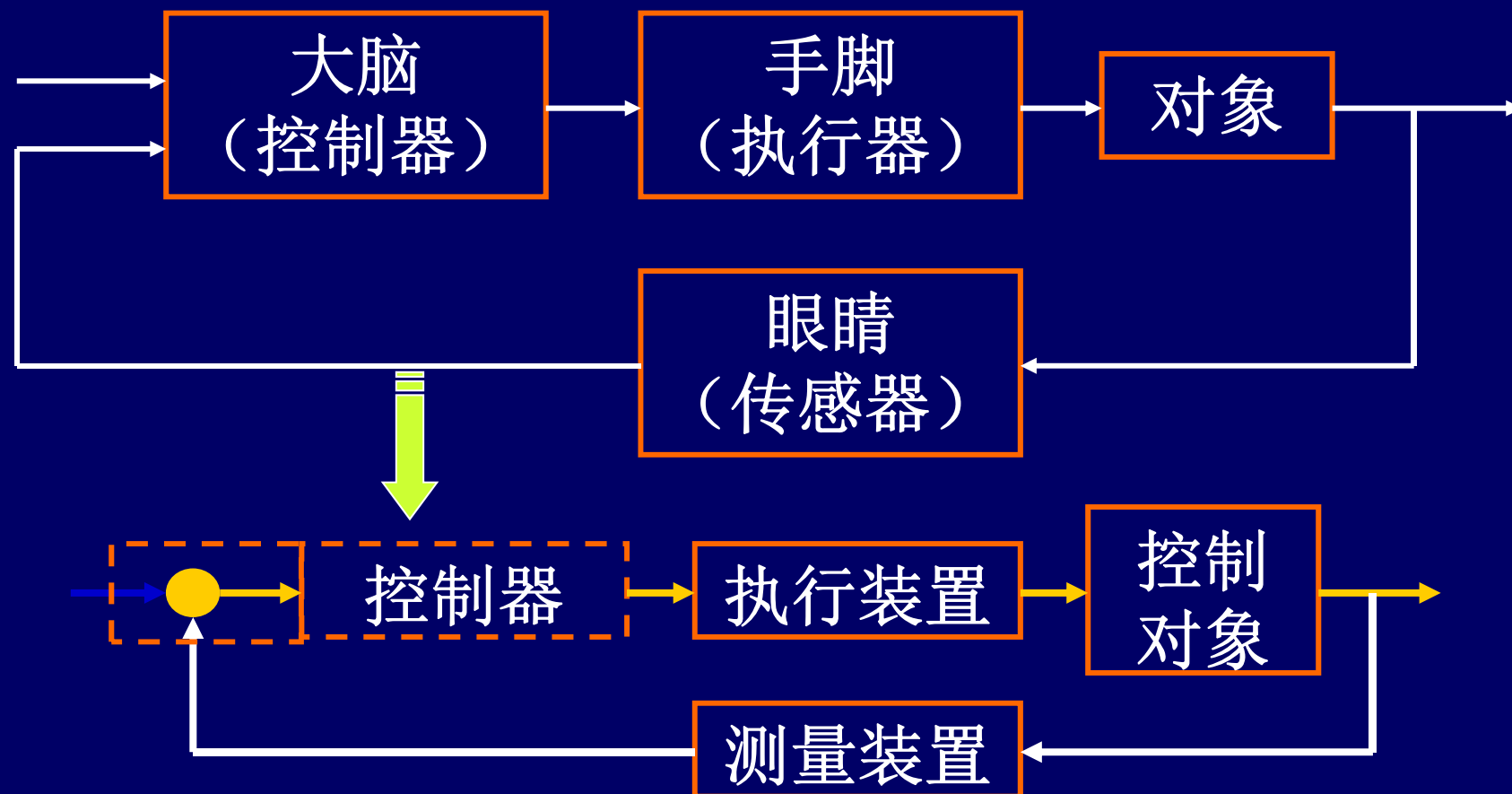
自动控制：

- （1）对象：储液系统
- （2）目标：液位
- （3）传感器：检测

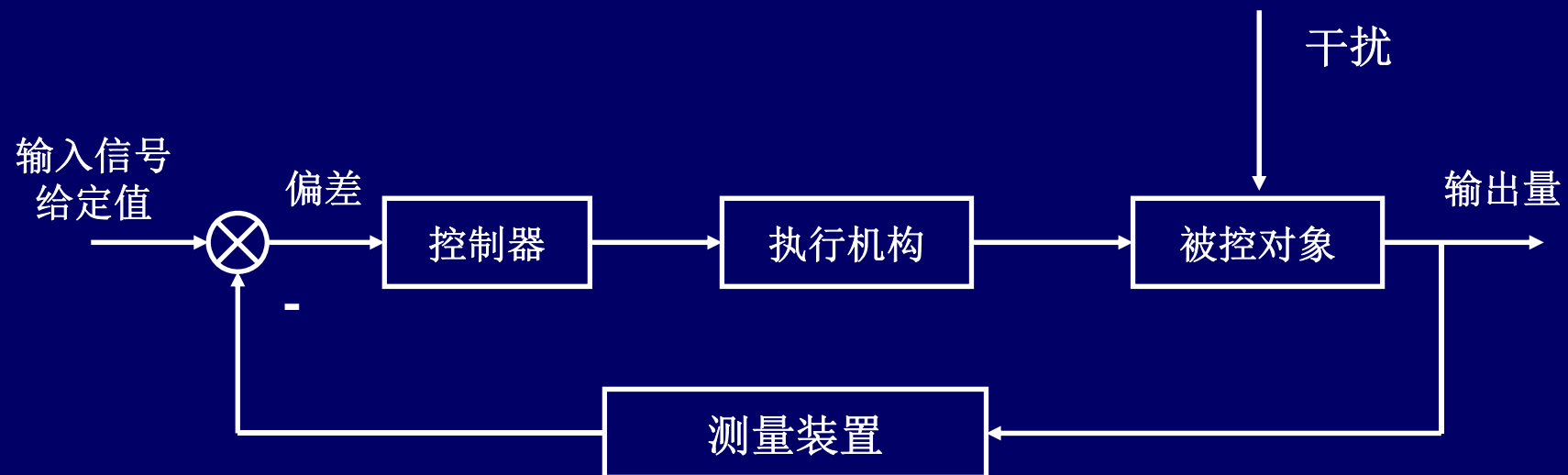
液位变化

- （4）控制器：控制功能
- （5）执行器：完成控制动作

反馈控制原理框图



反馈控制系统的组成



典型控制系统的方块图

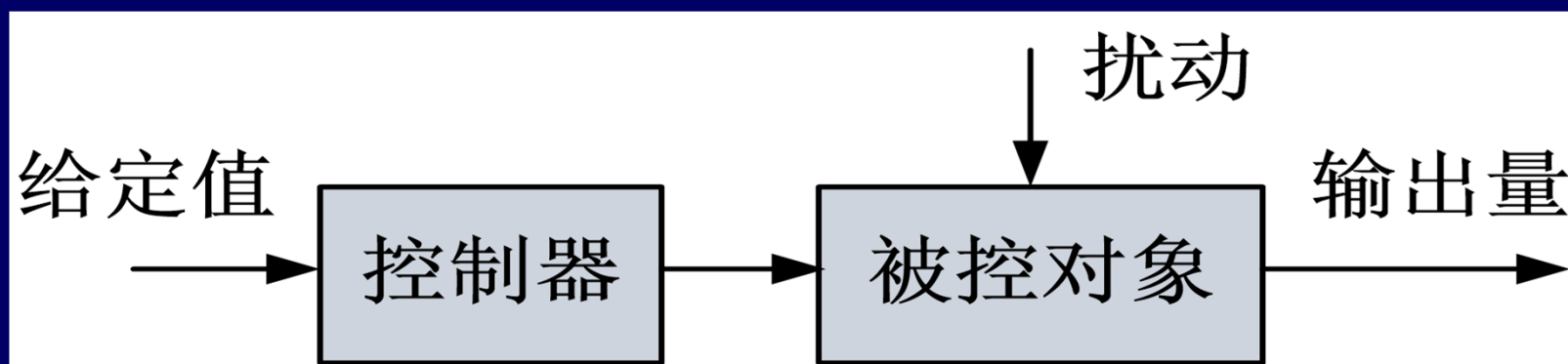


控制系统的基本控制方式

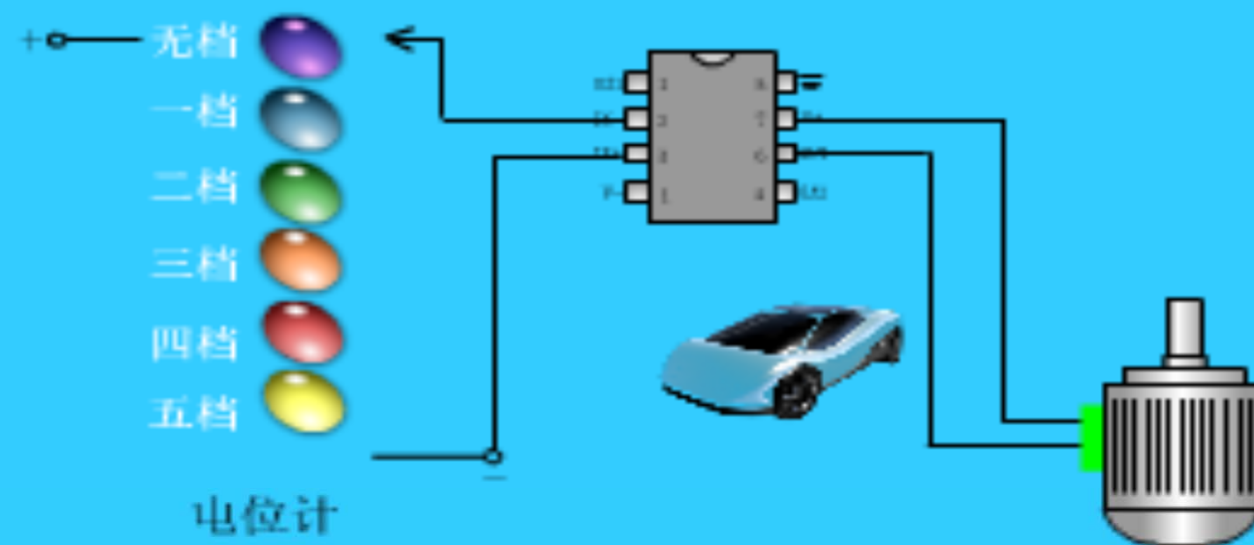
- 反馈控制
- 按给定量控制的开环控制
- 按扰动控制的开环控制
- 复合控制

开环控制方式

开环控制是指控制器与被控对象间只有顺向作用而无反向联系的控制过程。其特点是系统的输出量不会对系统的控制作用发生影响。

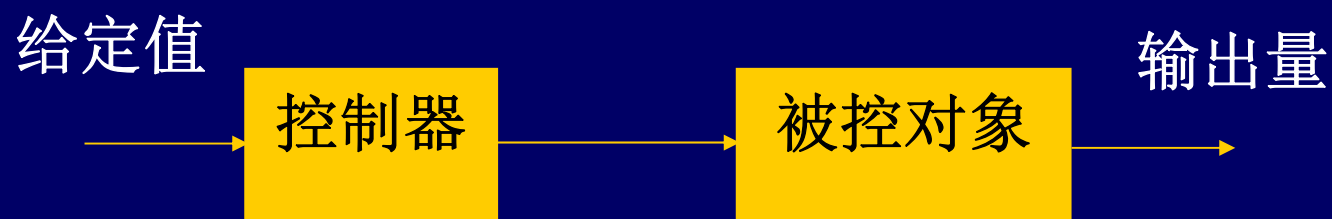


点击按钮选择挡位，改变小车的速度



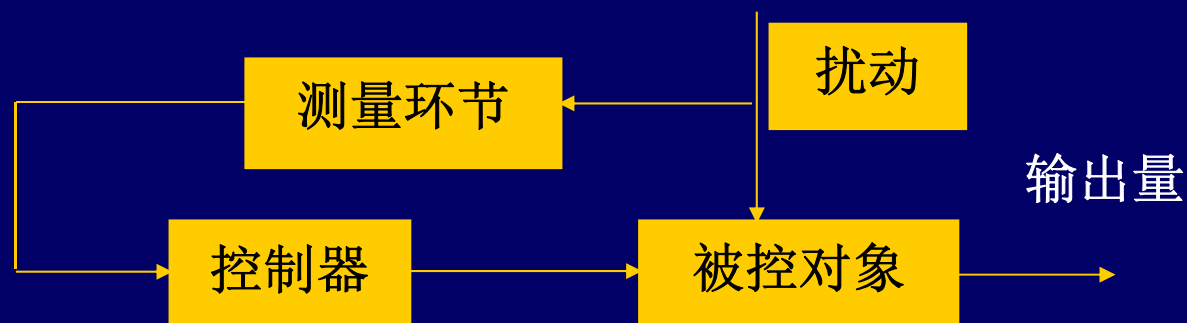
开环控制的两种控制方式

按给定量控制：控制作用直接由系统的输入量产生，给定一个输入量，就有一个输出量与之对应，控制精度完全取决于所用的元件及校准的精度。

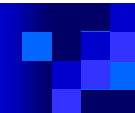


按给定量开环控制方块图

按扰动控制：通过对扰动信号的测量产生控制作用，以补偿扰动对输出量的影响。



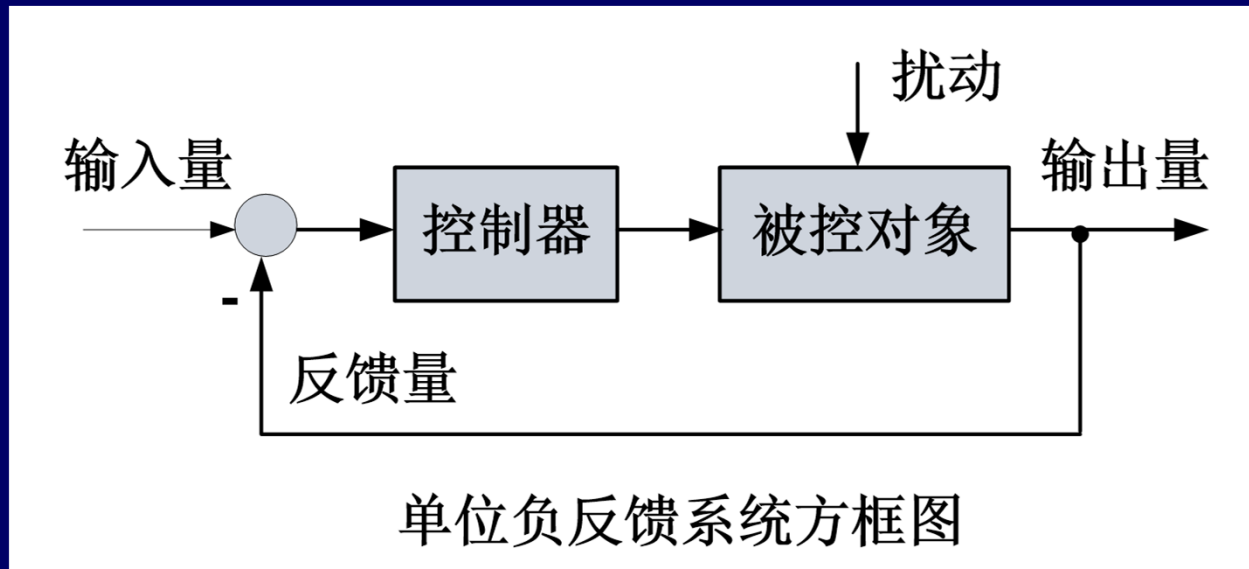
按扰动开环控制方块图

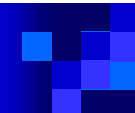


信号由给定值(扰动量)至被控量单向传递。这种控制较简单,但有较大的缺陷,即对象或控制装置受到干扰,或工作中特性参数发生变化,会直接影响被控量,而无法**自动补偿**。因此,系统的**控制精度**难以保证。从另一种意义理解,意味着对受控对象和其它控制元件的**技术要求较高**。如数控线切割机进给系统、包装机等多为开环控制。

反馈控制方式

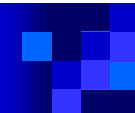
反馈控制是按偏差进行控制的，其特点是输出端和输入端之间存在反馈回路。是自动控制理论主要的研究对象。





这种控制方式,无论是由于干扰造成,还是由于结构参数的变化引起被控量出现偏差,系统就利用偏差去纠正偏差,故这种控制方式为**按偏差调节**。

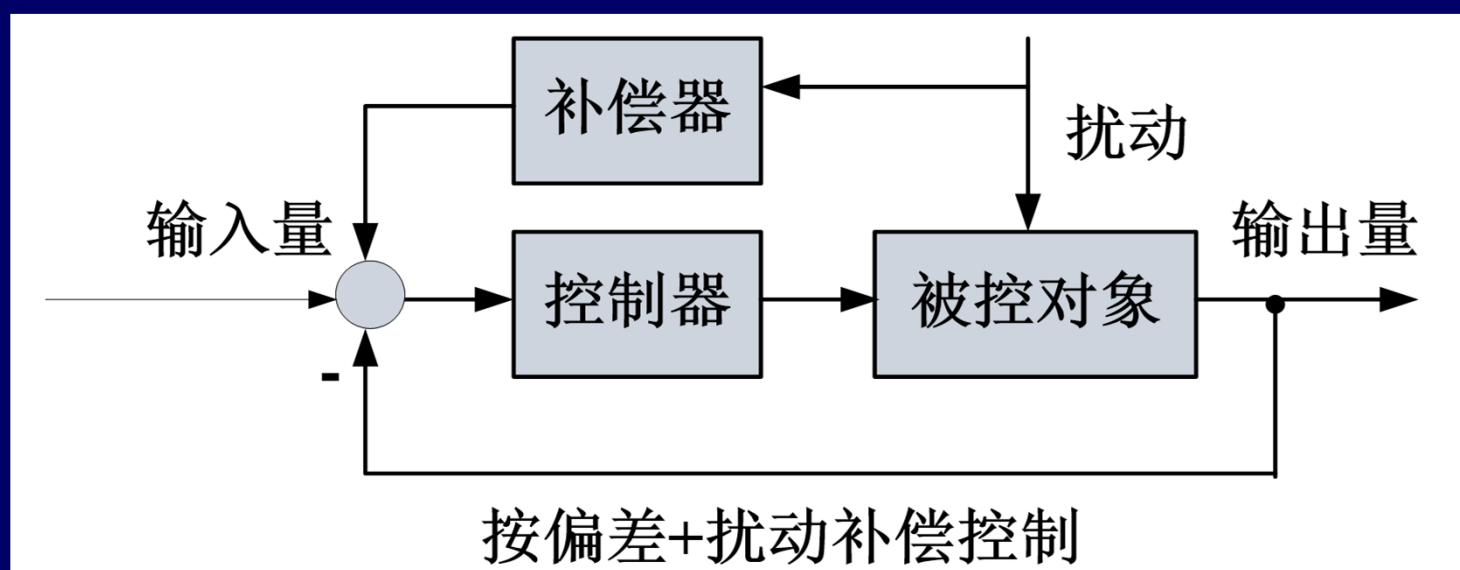
闭环控制系统的突出优点是利用偏差来纠正偏差,使系统达到**较高的控制精度**。但与开环控制系统比较,闭环系统的结构比较复杂,构造比较困难。需要指出的是,由于闭环控制存在**反馈信号**,利用偏差进行控制,如果设计得不好,将会使**系统无法正常和稳定地工作**。另外,控制系统的精度与系统的稳定性之间也常常存在矛盾。



开环控制和闭环控制方式各有优缺点,在实际工程中应根据工程要求及具体情况来决定。如果事先预知外部干扰的变化规律,又不存在外部和内部参数的变化,则采用开环控制较好。如果对系统外部干扰无法预测,系统内部参数又经常变化,为保证控制精度,采用闭环控制则更为合适。如果对系统的性能要求比较高,为了解决闭环控制精度与稳定性之间的矛盾,可以采用开环控制与闭环控制相结合的复合控制系统。

复合控制方式

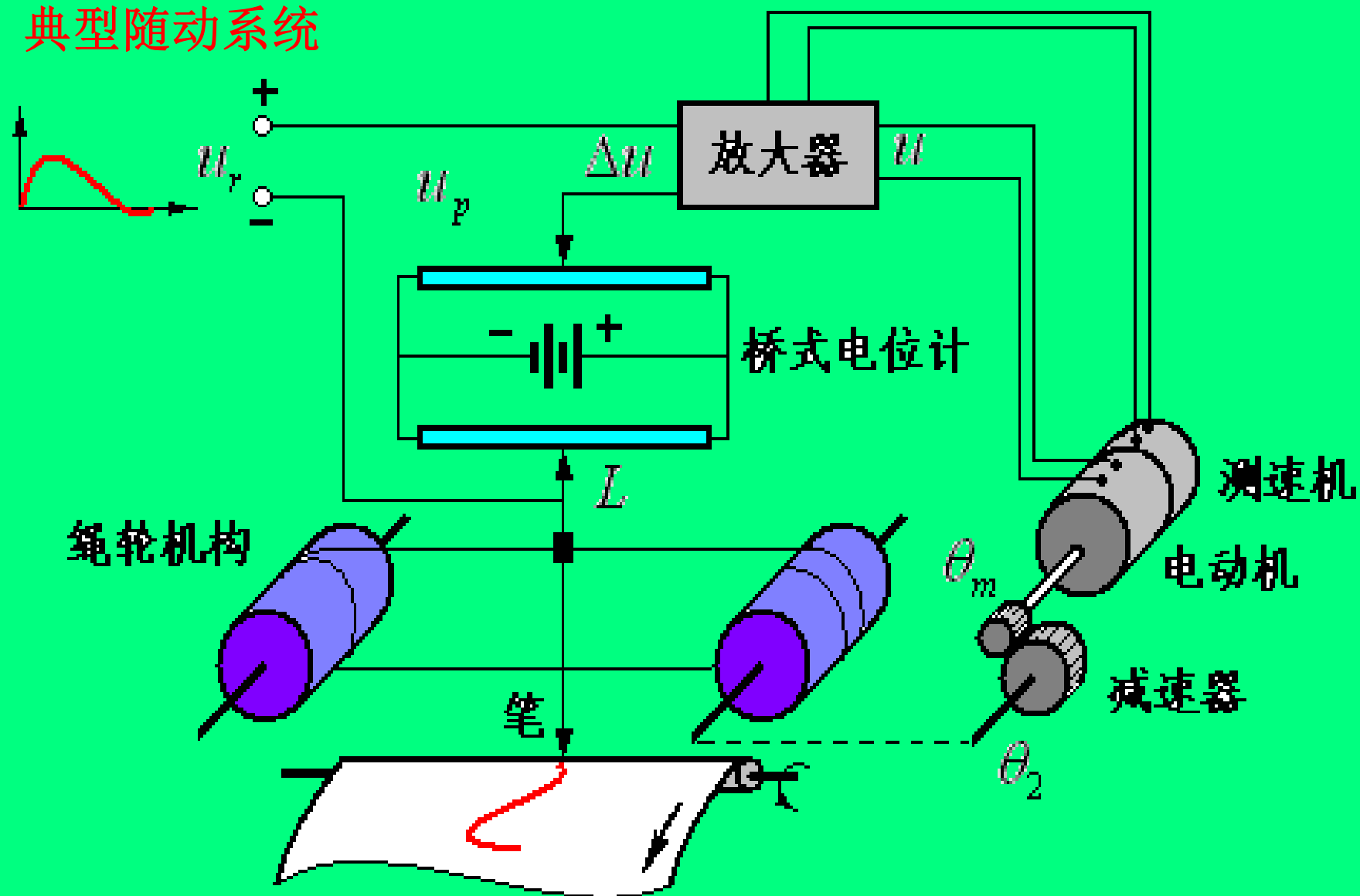
复合控制方式是指按偏差控制和按扰动控制相结合的控制方式。是反馈控制和开环控制的有机结合。



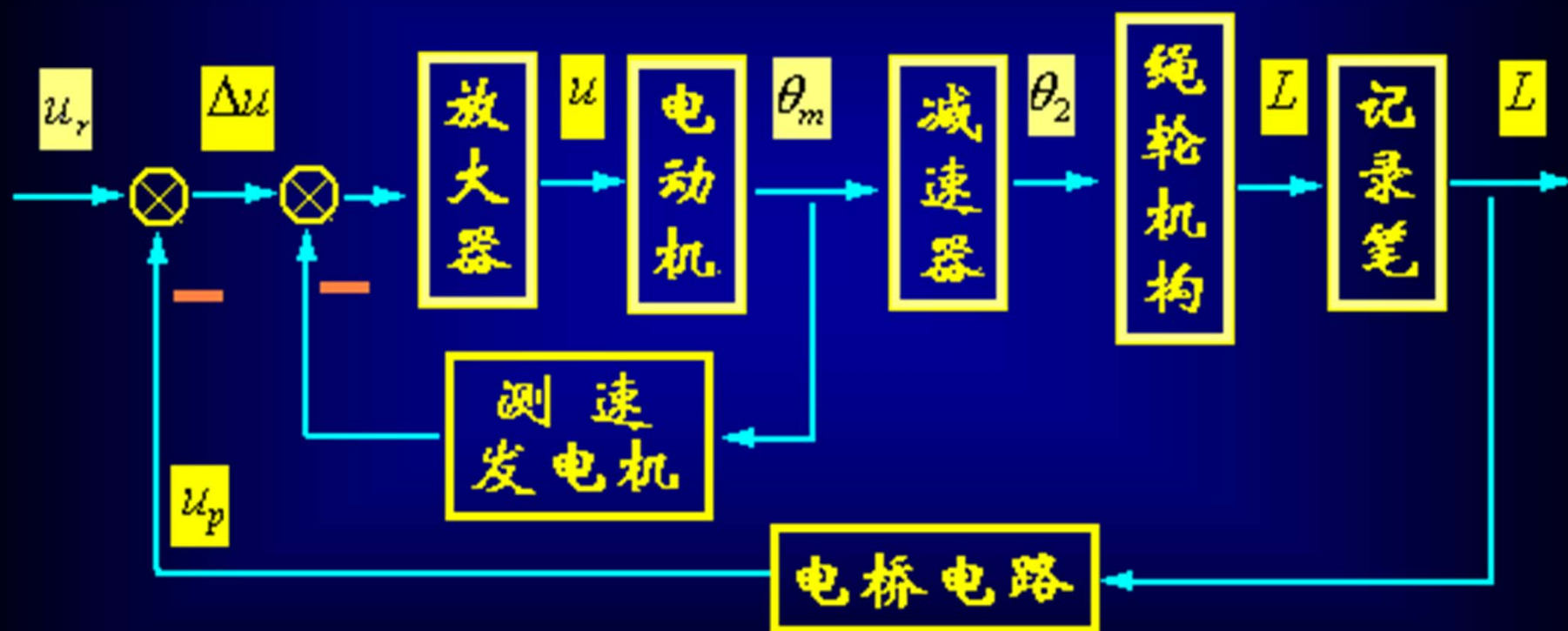
控制系统的分类（按控制目标）

- 恒值控制系统：又称自动调节系统，主要考虑各种扰动和负荷变化对系统的影响。在工业控制中，如果被控量是温度、压力、流量、液位等生产过程参量时，这种控制系统称为过程控制系统。
- 随动系统：输出信号快速而准确的跟踪未知输入的变化。在随动系统中，如果被控量是机械位置及其导数时，这类系统称为伺服系统。
- 程序控制系统：系统输入量按预定规律随时间变化。机械加工的数控程序控制机床是一类典型的程序控制系统。
- 最优控制系统：根据综合指标设计控制律，使被控系统实现综合指标的最优（最大或最小）。

典型随动系统



函数记录仪工作原理图



最优经济增长问题

新古典经济增长模型 (索洛经济增长模型 (Solow Growth Model))

$$\begin{cases} Y(t) = C(t) + I(t) \\ Y(t) = F(K(t), L(t)) \\ \frac{dK(t)}{dt} = I(t) - \delta K(t) \\ \frac{dL(t)}{dt} = rL(t) \end{cases}$$

$Y(t)$: 经济总产出

$C(t)$: 消费

$I(t)$: 投资 (储蓄全部转化为投资)

$F(K(t), L(t))$ 为生产函数

$K(t)$: 资本存量

$L(t)$: 劳动力

δ : 折旧率

r : 劳动力增长率

假设生产函数 F 是规模报酬不变的, 即 F 是一次齐次函数:

$$F(pK, pL) = pF(K, L)$$

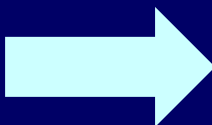
令

$$\begin{cases} y(t) = Y(t) / L(t) \\ k(t) = K(t) / L(t) \\ c(t) = C(t) / L(t) \end{cases}$$

分别为人均产出, 人均资本占有量和人均消费, 则有

$$y(t) = F(k(t), 1)$$

$$\begin{cases} \frac{dK(t)}{dt} = \frac{dk(t)}{dt} L(t) + k(t) \frac{dL(t)}{dt} \\ \quad = \frac{dk(t)}{dt} L(t) + rk(t) L(t) \\ \frac{dK(t)}{dt} = Y(t) - C(t) - \delta K(t) \end{cases}$$



$$\begin{aligned} \frac{dk(t)}{dt} &= \frac{Y(t) - C(t) - \delta K(t)}{L(t)} - rk(t) \\ &= F(k(t), 1) - c(t) - (\delta + r)k(t) \end{aligned}$$

设目标泛函为

$$J[c(\cdot)] = \int_0^{\infty} e^{-\rho t} U(c(t), k(t)) dt$$

其中 $\rho > 0$ 为贴现率, $U(c(t))$ 为社会具有“代表性”的个人消费和资产效用函数, 则最优经济增长问题可以表示为

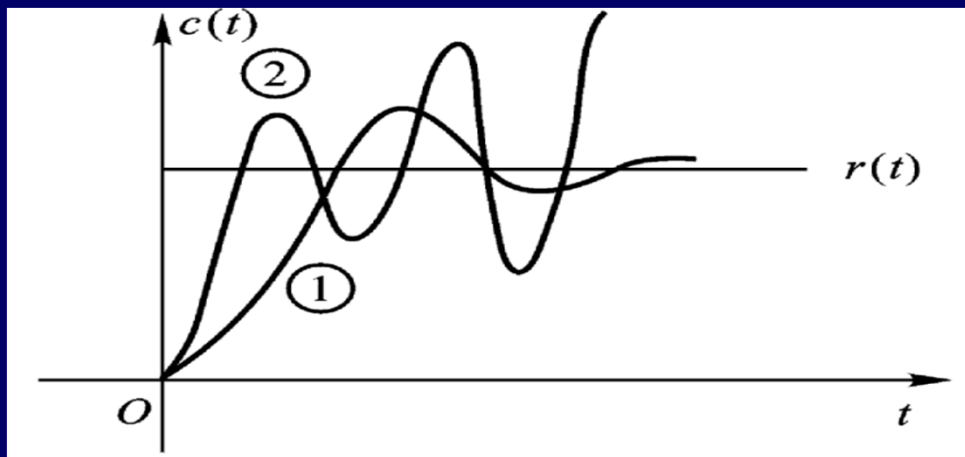
$$\begin{cases} \max_{c(\cdot)} J[c(\cdot)] \\ \text{s.t.} \begin{cases} \frac{dk(t)}{dt} = F(k, 1) - (r + \delta)k(t) - c(t) \\ k(0) = k_0 \text{ 给定} \end{cases} \end{cases}$$

控制系统的主要性能指标

- 稳定性

稳定性是指系统重新恢复平衡状态的能力，任何一个正常工作的系统首先必须是稳定的。

稳：指动态过程的平稳性



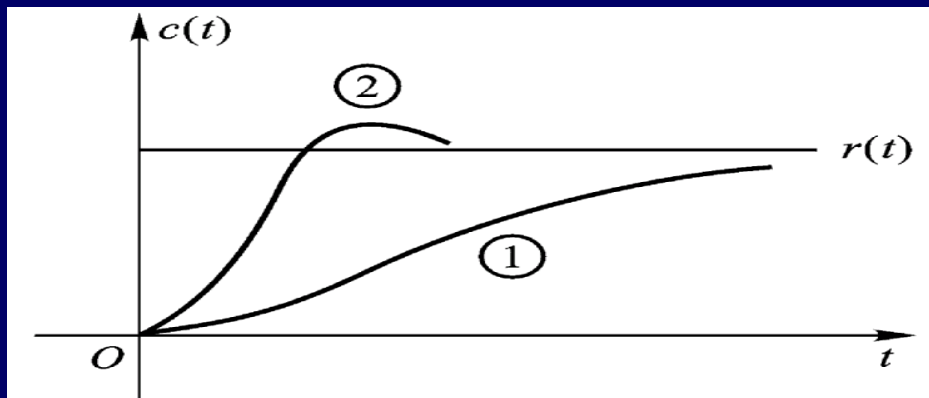
如左图所示，系统在外力作用下，输出逐渐与期望值一致，则系统是稳定的，如曲线①所示；反之，输出如曲线②所示，则系统是不稳定的。

控制系统动态过程曲线

控制系统的主要性能指标

- 快速性

由于被控对象通常具有一定的惯性，并受到能源功率的限制，因此，当输入(给定输入或扰动输入)信号改变时，在控制作用下，系统必然由原先的平衡状态经过一段时间才过渡到另一个新的平衡状态，这个过程称为过渡过程。过渡过程越短，表明系统的快速性越好。快速性是衡量系统质量高低的重要指标之一。



②系统快速性较好，
①系统反应迟钝。

控制系统的主要性能指标

- 准确性

对于一个稳定的系统而言，当过渡过程结束后，系统输出量的实际值与期望值之差称为稳态误差，它是衡量系统稳态精度的重要指标。

稳态误差越小，表示系统的准确性越好。

稳、准、快是相互制约的！