

# 控制理论基础

Fundamentals of Control Theory

# 第一章 绪 论

- 现代控制理论的产生与发展
- 现代控制理论的内容
- 现代控制理论与经典控制理论的差异
- 现代控制理论的应用
- 控制系统简介

# 1.1 现代控制理论的产生与发展

同学们，我们都知道：控制理论作为一门科学技术，已经广泛地运用于我们社会生活的方方面面。



洗衣机智能控制



电冰箱温度控制

控制理论的产生和发展要分为以下几个发展阶段：

## 第一阶段： 经典(自动)控制理论

经典控制理论即古典控制理论,也称为自动控制理论。它的发展大致经历了以下几个过程：

### 一、萌芽阶段

如果要追溯自动控制技术的发展历史,早在两千年前中国就有了自动控制技术的萌芽。

1. 两千年前我国发明的指南车，就是一种开环自动调节系统。



指南车

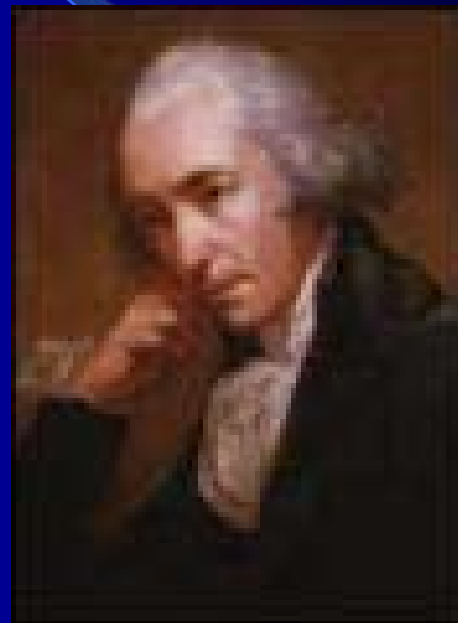
2. 公元1086—1089年（北宋哲宗元祐初年），我国发明的水运仪象台，就是一种闭环自动调节系统。



水运仪象台

## 二、起步阶段

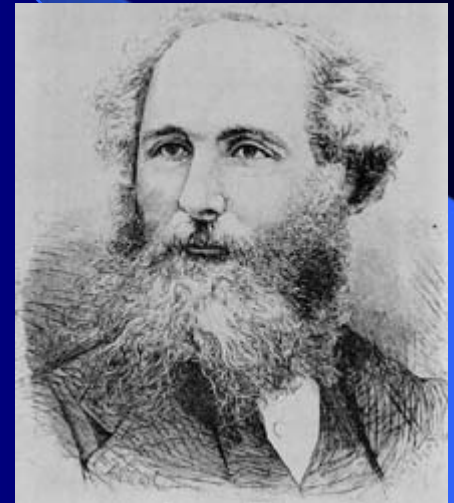
随着科学技术与工业生产的发展，到十八世纪，自动控制技术逐渐应用到现代工业中。其中最卓越的代表是瓦特 (J.Watt) 发明的蒸汽机离心调速器，加速了第一次工业革命的步伐。



瓦特

## 三、发展阶段

1. 1868年马克斯韦尔  
(J.C.Maxwell) 解决了蒸汽机调速系统中出现的剧烈振荡的不稳定问题，提出了简单的稳定性代数判据。



马克斯韦尔  
(J.C.Maxwell)



2. 1895年劳斯 (Routh) 与赫尔维茨 (Hurwitz) 把马克斯韦尔的思想扩展到高阶微分方程描述的更复杂的系统中,各自提出了两个著名的稳定性判据——劳斯判据和赫尔维茨判据。基本上满足了二十世纪初期控制工程师的需要。



赫尔维茨 (Hurwitz)



3. 由于第二次世界大战需要控制系统具有准确跟踪与补偿能力，1932年奈奎斯特 (H.Nyquist) 《再生理论》一文提出了频域内研究系统的频率响应法，为具有高质量的动态品质和静态准确度的军用控制系统提供了所需的分析工具。



奈奎斯特

4.1945年伯德 (Bode) 的《网络分析和反馈放大器设计》一文，奠定了经典控制理论的理论基础，在西方开始形成了自动控制学科。

5.1947年美国出版了第一本自动控制教材《伺服机件原理》；1948年美国麻省理工学院出版了另一本《伺服机件原理》教材，建立了现在广泛使用的频域法。（尼尔可斯）

6.1948年伊万斯 (W.R.Ewans) 提出了复数域内研究系统的根轨迹法。

建立在奈奎斯特的频率响应法和伊万斯的根轨迹法基础上的理论，称为经典（古典）控制理论（或自动控制理论）。

## 四、标志阶段

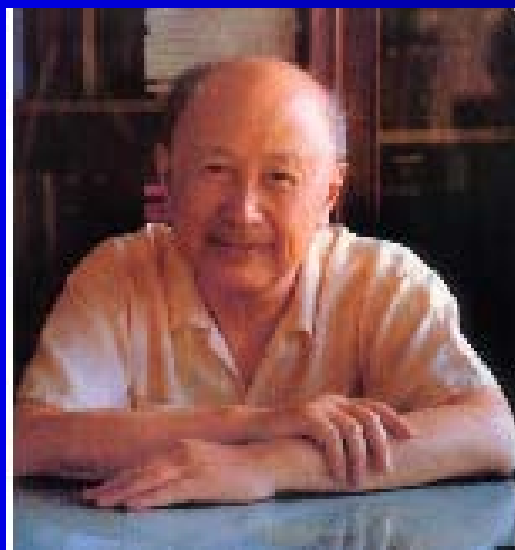
1. 1947年控制论的奠基人美国数学家维纳 (N.Weiner) 把控制论引起的自动化同第二次产业革命联系起来，并与1948年出版了

《控制论——关于在动物和机器中控制与通讯的科学》，书中论述了控制理论的一般方法，推广了反馈的概念，为控制理论这门学科奠定了基础。



控制论之父——维纳

2. 我国著名科学家钱学森将控制理论应用于工程实践，并于1954年出版了《工程控制论》。



钱学森

从二十世纪四十年代到五十年代末，经典控制理论的发展与应用使整个世界的科学水平出现了巨大的飞跃，几乎在工业、农业、交通运输及国防建设的各个领域都广泛采用了自动化控制技术。（可以说工业革命和战争促使了经典控制理论的发展）。

## 第二阶段 现代控制理论

科学技术的发展不仅需要迅速地发展控制理论，而且也给现代控制理论的发展准备了两个重要的条件——现代数学和数字计算机。

现代数学，例如泛函分析、现代代数等，为现代控制理论提供了多种多样的分析工具；而数字计算机为现代控制理论发展提供了应用的平台。

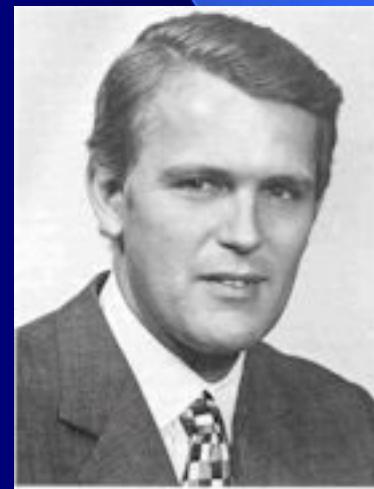
在二十世纪五十年代末开始，随着计算机的飞速发展，推动了核能技术、空间技术的发展，从而出现了多输入多输出系统、非线性系统和时变系统。



1960年在美国自动控制联合会第一届年会上首次提出“现代控制理论”这个名词。

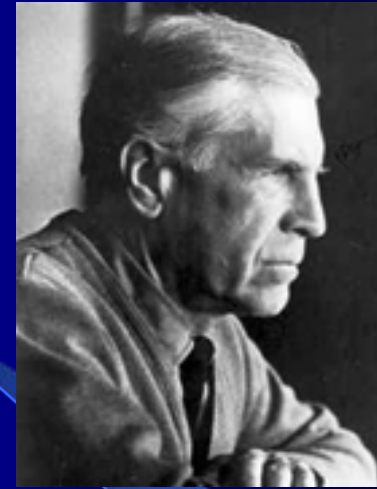
1.五十年代后期，贝尔曼 (Bellman) 等人提出了状态分析法；在1957年提出了动态规划。

2.1959年卡尔曼 (Kalman) 和布西创建了卡尔曼滤波理论；1960年在控制系统的研究中成功地应用了状态空间法，并提出了可控性和可观测性的新概念。



卡尔曼

3. 1961年庞特里亚金（俄国人）  
提出了极小（大）值原理。



庞特里亚金 L.S.Pontryagin

4. 罗森布洛克（H.H.Rosenbrock）、欧文斯（D.H.Owens）和麦克法轮（G.J.MacFarlane）研究了使用于计算机辅助控制系统设计的现代频域法理论，将经典控制理论传递函数的概念推广到多变量系统，并探讨了传递函数矩阵与状态方程之间的等价转换关系，为进一步建立统一的线性系统理论奠定了基础

5. 20世纪70年代奥斯特隆姆  
(瑞典) 和朗道 (法国,  
L.D.Landau) 在自适应控制理  
论和应用方面作出了贡献。



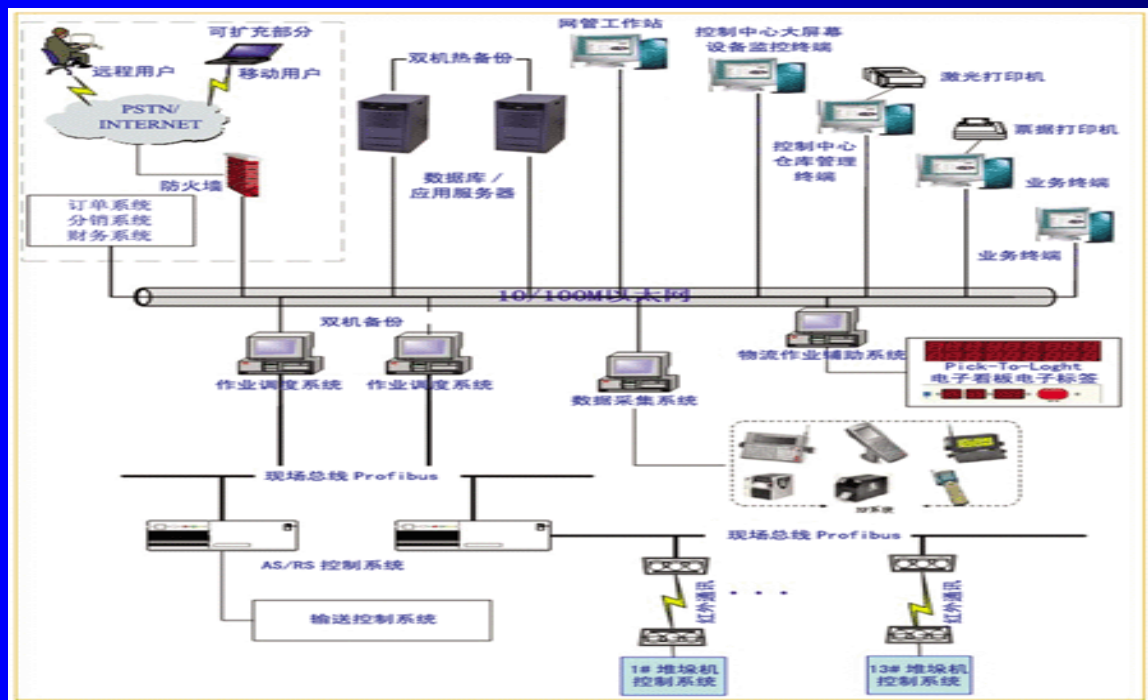
朗道L.D.Landau

与此同时, 关于系统辨识、最优控制、离散时间系统和自适应控制的发展大大丰富了现代控制理论的内容。

## 第三阶段 鲁棒控制理论阶段

1. 由于现代数学的发展，结合着 $H_2$ 和 $H_\infty$ 等范数而出现了 $H_2$ 和 $H_\infty$ 控制，还有逆系统控制等方法。
2. 20世纪70年代末，控制理论向着“大系统理论”、“智能控制理论”和“复杂系统理论”的方向发展：

➤大系统理论：用控制和信息的观点，研究各种大系统的结构方案、总体设计中的分解方法和协调等问题的技术基础理论。

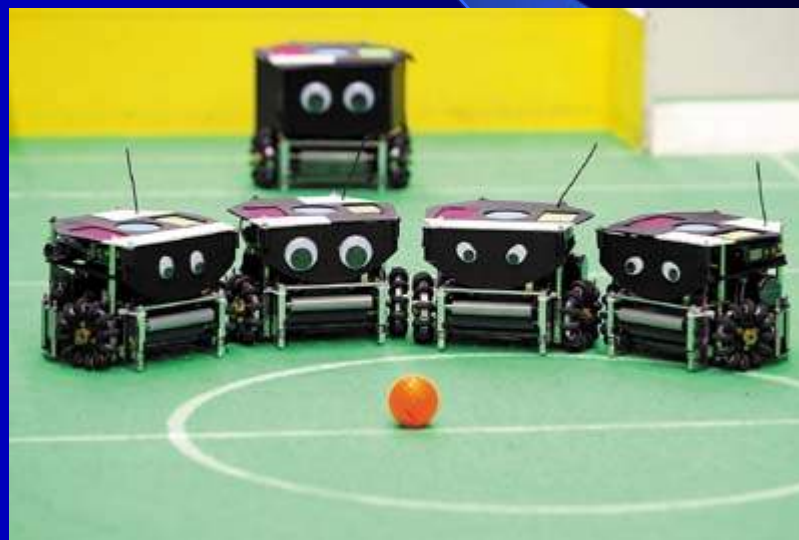


复杂大系统控制

➤ **智能控制理论** 研究与模拟人类智能活动及其控制与信息传递过程的规律，研制具有某些拟人智能的工程控制与信息处理系统的理论。



洗衣机智能模糊控制



机器人神经网络控制



➤复杂系统理论：把系统的研究拓广到开放复杂巨系统的范畴，以解决复杂系统的控制为目标。



复杂航天器控制

回顾控制理论的发展历程可以看出，它的发展过程反映了人类由机械化时代进入电气化时代，并走向自动化、信息化、智能化时代。



## 1.2 现代控制理论基础的内容

现代控制理论基础的内容为：

线性系统理论

最优控制理论

最优估计理论

系统辨识理论

自适应控制理论

智能控制理论

## 1.3 现代控制理论与经典控制理论的差异

	经典控制理论	现代控制理论
研究对象	单输入单输出系统(SISO) 高阶微分方程	多输入多输出系统(MIMO): 一阶微分方程组
研究方法	传递函数法(外部描述)	状态空间法(内部描述)
研究工具	拉普拉斯变换	线性代数矩阵
分析方法	频域(复域),频率响应和根轨迹法	复域、实域,可控和可观测
设计方法	PID控制和校正网络	状态反馈和输出反馈
其他	频率法的物理意义直观、实用, 难于实现最优控制	易于实现实时控制和最优控制

## 1.4 现代控制理论的应用

比起经典控制理论,现代控制理论考虑问题更全面、更复杂,主要表现在考虑系统内部之间的耦合,系统外部的干扰,但符合从简单到复杂的规律。现代控制理论已经应用在工业、农业、交通运输及国防建设等各个领域。

# 倒立摆稳定控制



单级倒立摆稳定控制



二级倒立摆稳定控制

# 导弹稳定控制



地空导弹稳定控制

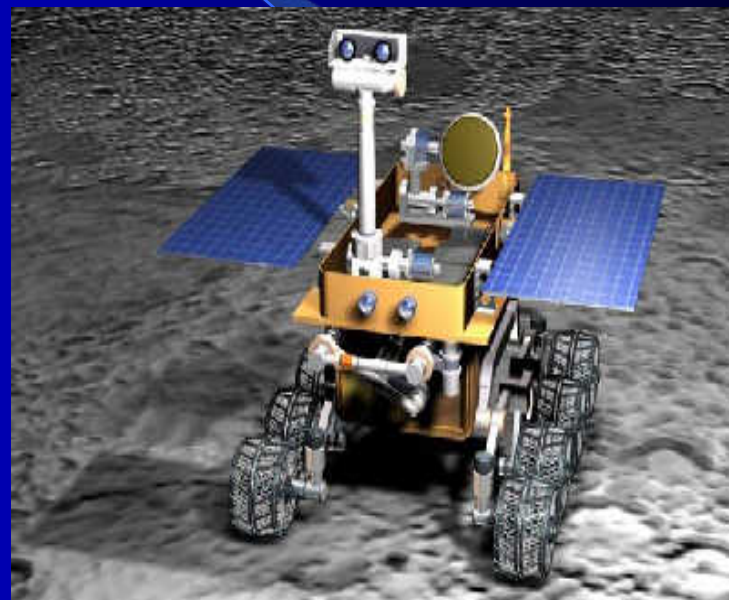


空空导弹稳定控制

# 航天器控制



卫星控制



月球车控制



# 机器人控制



空间机器人控制



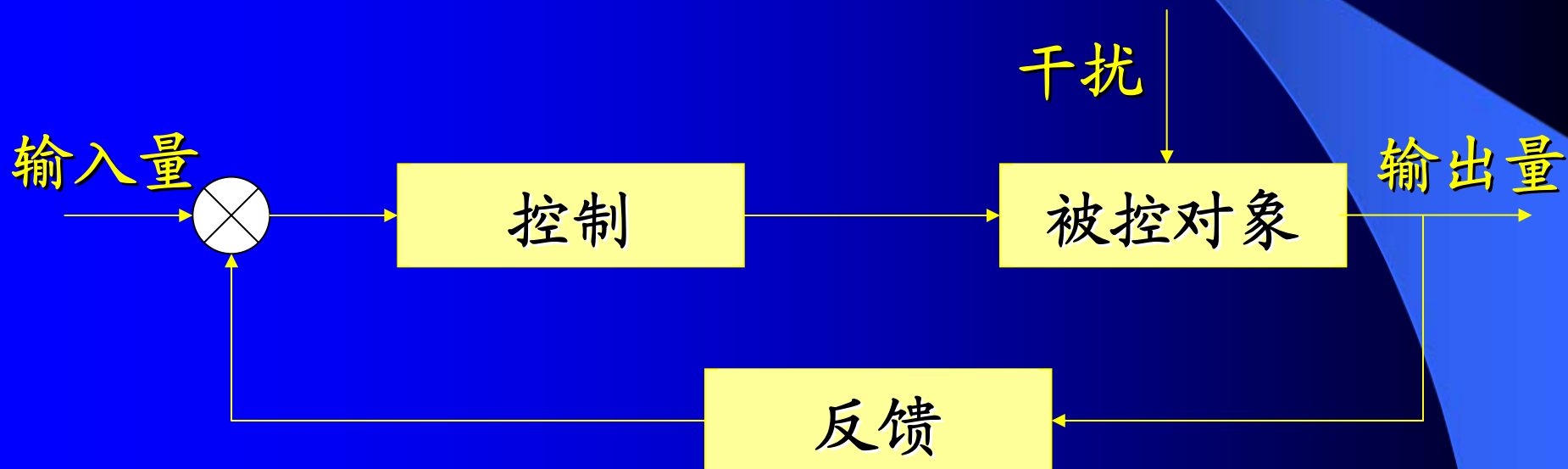
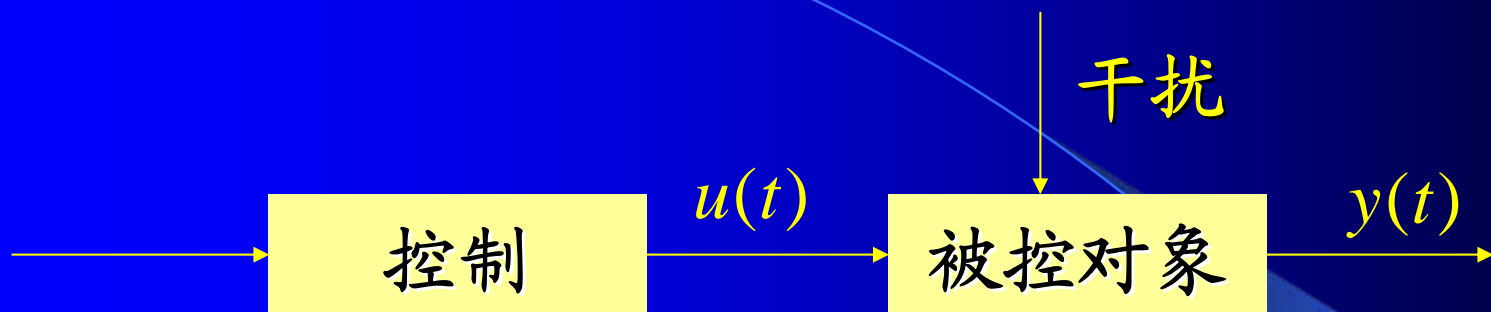
足球机器人控制



## 1.5 控制系统简介

- 自动控制：在无人直接参加的情况下，利用控制装置使被控对象和过程自动地按预定规律变化的控制过程。
- 自动控制系统：是由控制装置和被控对象所组成，它们以某种相互依赖的方式组合成为一个有机整体，并对被控对象进行自动控制。
- 自动控制理论：是研究自动控制问题共同规律的技术科学，主要讲述自动控制技术的基本理论与控制系统分析与设计的基本方法等内容

# 开环控制与闭环控制



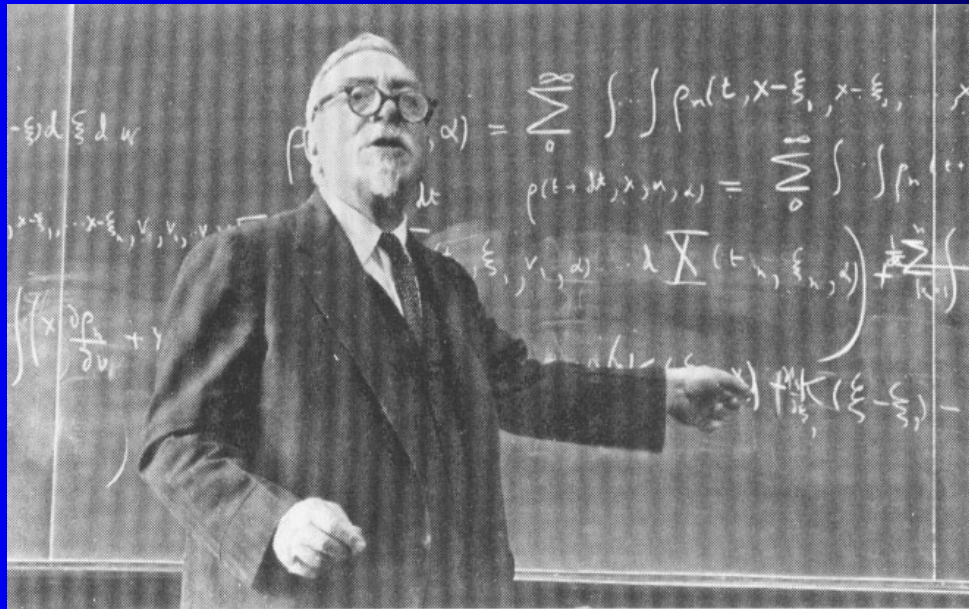
1927年8月2日 美国的H.S.Black提出了放大器负反馈方法 (Negative Feedback Amplifier)

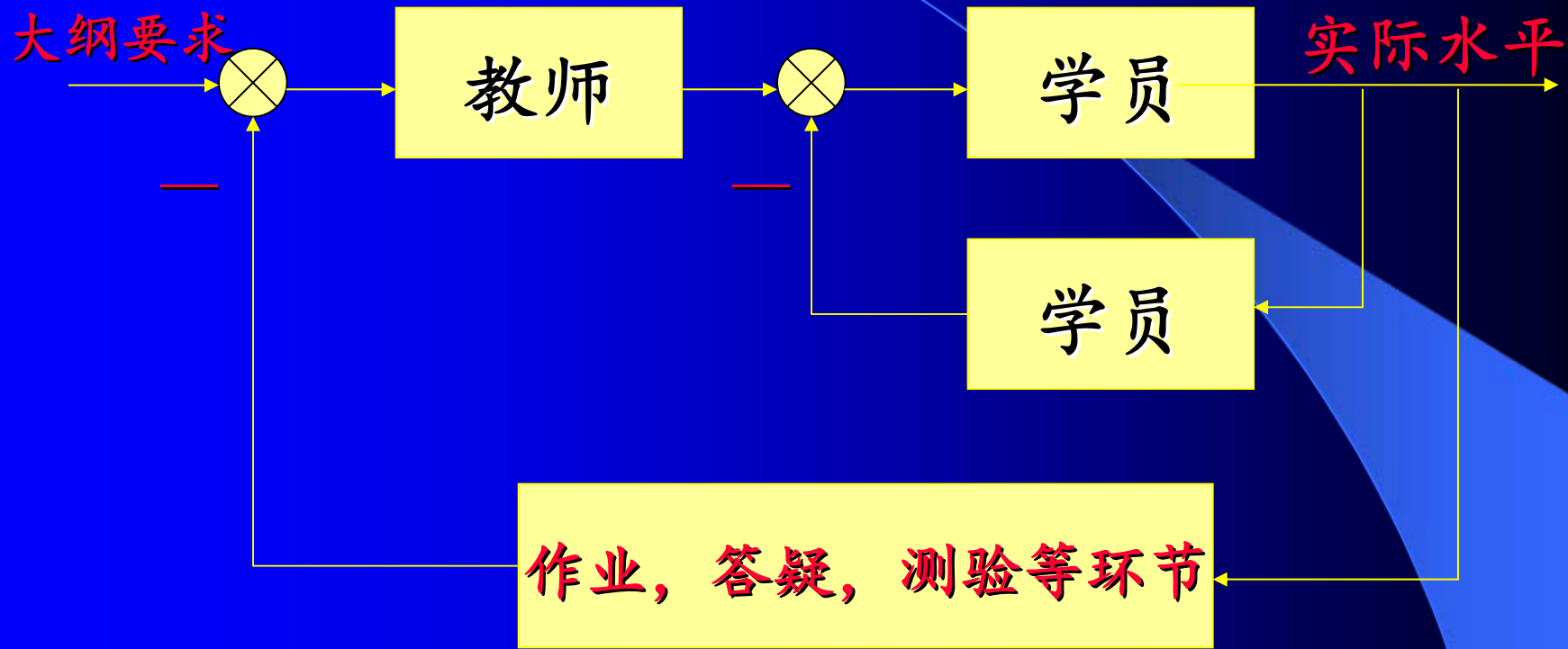


自动控制的基础为闭环控制。

控制论的奠基人N.Wiener给出的定义：

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





教学过程方框图

# 一、物理量

## 1. 输入量

控制系统的输入量分为给定输入量和扰动输入量。

## 2. 输出量

单输入单输出系统中输出量常常指定为被控量。

# 二、系统结构

## 1. 给定环节

设定被控制量给定值的装置，如电位器。

## 2. 比较环节

将所检测的被控量与给定量进行比较，确定两者间偏差。

## 3. 放大环节

将偏差信号变换为适于执行的物理量，如功率放大器。

## 4. 执行环节

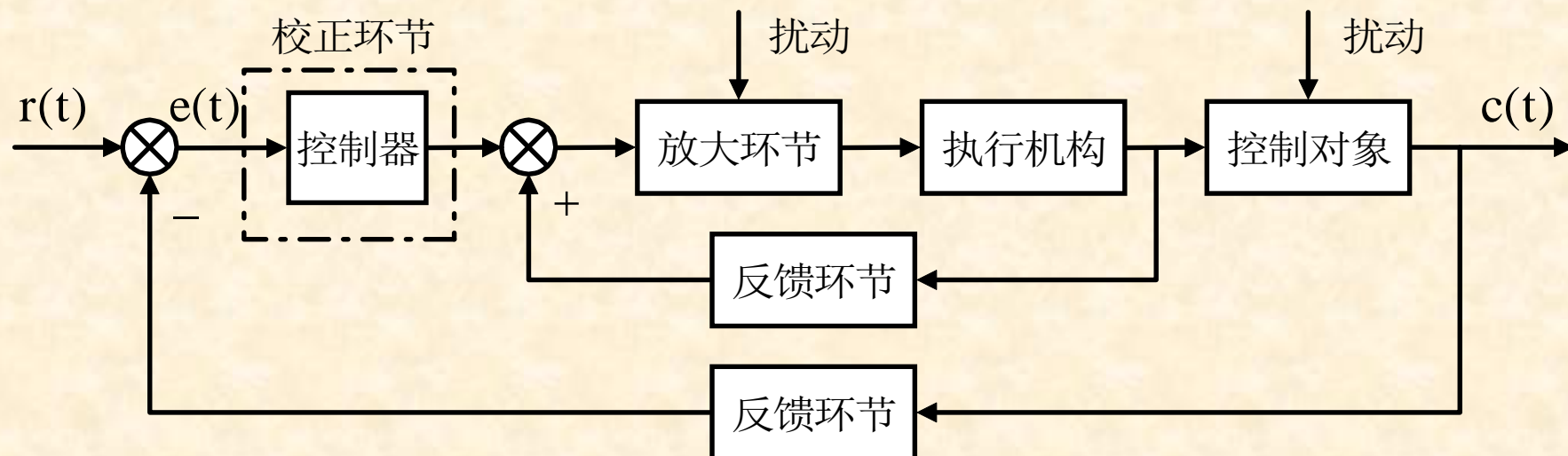
## 5. 控制环节

## 6. 被控对象

## 7. 反馈环节



## 系统的结构图



组成闭环控制系统的方块图

前向通道:

$r(t) \rightarrow$  控制器  $\rightarrow$  放大环节  $\rightarrow$  执行机构  $\rightarrow$  控制对象  $\rightarrow c(t)$  的路径

反馈通道: 反馈环节所在路径称为反馈通道。



# 控制系统的分类

## 一、按给定信号的特征分类

1. 恒值控制系统
2. 随动控制系统 (又称伺服系统)
3. 程序控制系统

## 二、按信号传输过程是否连续分类

1. 连续控制系统
2. 离散控制系统

## 三、按系统构成元件是否线性分类

1. 线性控制系统
2. 非线性控制系统

## 四、按系统参数是否随时间变化分类

1. 定常控制系统
2. 时变控制系统

# 控制系统的基本要求

1. 稳定性: 系统受到扰动后恢复平衡的能力
2. 快速性: 受外界作用后能否从一个平衡状态迅速达到另一个平衡状态
3. 准确性: 被控变量偏离设定值的程度

## 线性系统理论

研究对象:

线性动态系统

主要任务:

研究系统状态的运动规律和改变这种运动规律的可能性和方法, 建立和揭示系统结构、参数、行为和性能间的定性和定量的关系。

建立系统数学模型：时间域和频率域

系统分析：定性和定量

系统设计：开环控制和闭环控制

## [课堂小结]

1. 现代控制理论的产生、发展、内容、研究方法和应用；
2. 经典控制理论与现代控制理论的差异；
3. 现代控制理论的应用。

End

## 指南车

指南车是我国古代伟大的发明之一，也是世界上最早的控制论机械之一。用英国著名科学史专家李约瑟的话说，中国古代的指南车“可以说是人类历史上迈向控制论机器的第一步”，是人类“第一架体内稳定机”。



指南车与司南、指南针等相比在指南的原理上截然不同。它的车箱里装着非常巧妙而复杂的机械。是一种双轮独辕车。它的中央有一个大平轮，木头人就竖立在上面。在大平轮两旁，装着很多小齿轮。如果车子向左转，右边的车轮就会带动小齿轮，小齿轮再带动大平轮，使大平轮相反地向右转。如果车子向右转，同样地，大平轮则向左转。因此，只要指南车开动以前，先让木头人的右手指向南方，以后车子不论是向左转还是向右转，木头人的右手就总是指向南方。指南车是利用齿轮的原理造成的。这种齿轮传动类似现代汽车用的差动齿轮，相当于汽车中差动齿轮的逆向使用原理。这种指南车，可以说是世界上最早的自动化设备。

## 水运仪象台

水运仪象台是我国古代一种大型的天文仪器，由宋朝天文学家苏颂等人创建。它是集观测天象的浑仪、演示天象的浑象、计量时间的漏刻和报告时刻的机械装置于一体的综合性观测仪器，实际上是一座小型的天文台。



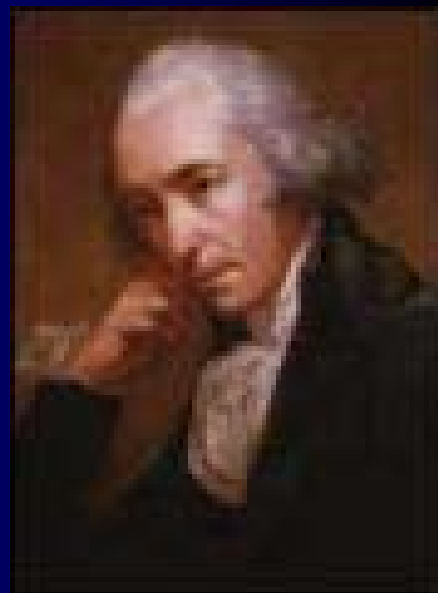
整个水运仪象台高12米，宽7米，共分3层，相当于一幢四层楼的建筑物。最上层的板屋内放置着1台浑仪，屋的顶板可以自由开启，平时关闭屋顶，以防雨淋，这已经具有现代天文观测室的雏形了；中层放置着一架浑象；下层又可分成五小层木阁，每小层木阁内均安排了若干个木人，5层共有162个木人，它们各司其职：每到一定的时刻，就会有木人自行出来打钟、击鼓或敲打乐器、报告时刻、指示时辰等。在木阁的后面放置着精度很高的两级漏刻和一套机械传动装置，可以说这里是整个水运仪象台的“心脏”部分，用漏壶的水冲动机轮，驱动传动装置，浑仪、浑象和报时装置便会按部就班地动作起来。

这台仪器的制造水平堪称一绝，充分体现了我国古代人民的聪明才智和富于创造的精神。



## 瓦特James Watt

(James Watt, 1736~1819) 英国发明家、工程师。1736年1月19日生于苏格兰的一个小镇格里诺克。1753年他在家钟表店学手艺。15岁学完了《物理学原理》并获得了丰富的木工、金属冶炼和加工等工艺技术。1753年他在一家钟表店学手艺。1753年又跟有名的机械师摩尔根当学徒。经过刻苦学习，努力实践，他已能制造难度较高的象限仪、罗盘、经纬仪等。1756年在格拉斯哥大学当了仪器修理员。1765年发明了把冷凝过程从汽缸中分离出来的分离式冷凝器。冷凝器的发明在蒸汽机的发展中起了关键性的作用。1768年他制成了一台单动作蒸汽机。1781年，他发明了行星式齿轮，将蒸汽机活塞的往运动变为旋转运动。1782年他发明了大动力的“双动作蒸汽机”并获得专利。1784年他发明了平行运动连杆机构，解决了双动作蒸汽机的结构问题。1788年他发明了离心式调速器和节气阀，用来自动控制蒸汽机的运转速度。1790年发明了蒸汽机配套用压力计。



到此为止，瓦特完成了对蒸汽机的整套发明过程。经过他的一系列重大的发明和改进，使蒸汽机的效率提高到原来纽科门机的3倍多，而且配套齐全、性能优良、切合实用。瓦特由此博得了第一部现代蒸汽机——高效率瓦特蒸汽机的发明者称号。

## 奈奎斯特



奈奎斯特，美国物理学家，1889年出生在瑞典。1976年在德克萨斯逝世。奈奎斯特对信息论做出了重大的贡献。奈奎斯特1907年移民到美国并于1912年进入北达克塔大学学习。1917年在耶鲁大学获得物理学博士学位。1917年~1934年在AT&T公司工作，后转入贝尔电话实验室工作。

为贝尔电话实验室的工程师，在热噪声(Johnson-Nyquist noise)和反馈放大器稳定性方面做出了很大的贡献他早期的理论性工作关于确定传输信息的需满足的带宽要求，在《贝尔系统技术》期刊上发表了《影响电报速度传输速度的因素》文章，为后来香农的信息论奠定了基础。

1927年，奈奎斯特确定了如果对某一带宽的有限时间连续信号（模拟信号）进行抽样，且在抽样率达到一定数值时，根据这些抽样值可以在接收端准确地恢复原信号。为不使原波形产生“半波损失”，采样率至少应为信号最高频率的两倍，这就是著名的奈奎斯特采样定理。奈奎斯特1928年发表了《电报传输理论的一定论题》。

1954年，他从贝尔实验室退休。

## 维纳



维纳生于哥伦比亚市一个犹太人家里。维纳4岁开始读书。9岁时读中学，11岁进入大学学习。他的数学知识已超过大学一年级学生的水平，所以转而热衷于研究化学、

物理、电学了。他18岁时取得了哈佛大学数学和哲学两个博士学位，后来又 to 德国、英国学习，拜著名哲学家罗素、数学家希尔伯特为师，进一步深造。

维纳已是一个很有名的数学家了，但他对其他学科也很有兴趣。在第二次世界大战末期，有两个大问题特别引起了他的兴趣，一个是电子计算机，另一个是火炮命中率问题。

维纳和一位年轻工程师合作，从驾驶汽车这种简单的动作中发现，人是采用了一种叫“反馈”的控制方法，使汽车按要求行驶。维纳又请来了神经专家进行共同研究，发现机器和人的控制机能有相似之处。后来，维纳又和许多有名科学家进行讨论，听取对方的批评意见，甚至是“攻击”意见，终于于1948年把自己的研究成果发表了出来，叫《控制论》。

## 钱学森

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，博士学位。

1929年至1934年在上海交通大学机械工程系学习。1935年至1939年在美国麻省理工学院航空工程系学习，获硕士学位。1936年至1939年在美国加州理工学院航空与数学系学习，获博士学位。1939年至1943年任美国加州理工学院航空系研究员。1943年至1945年任美国加州理工学院航空系助理教授（其间：1940年至1945年为四川成都航空研究所通信研究员）。1945年至1946年任美国加州理工学院航空系副教授。1946年至1949年任美国麻省理工学院航空系副教授、空气动力学教授。1949年至1955年任美国加州理工学院喷气推进中心主任、教授。

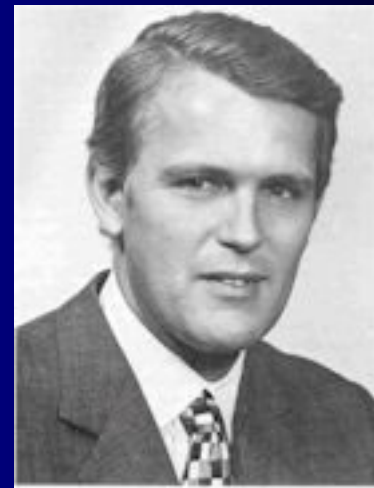
1955年回国。1955年至1946年任中国科学院力学研究所所长、研究员，国防部第五研究院院长。1965年至1970年任第七机械工业部副部长。1970年至1982年任国防科工委科学技术委员会副主任，中国科协副主席。还历任中国自动化学会第一、二届理事长，中国宇航学会、中国力学学会、中国系统工程学会名誉会长，中科院主席团执行主任、数学物理学部委员。1986年至1991年5月任中国科协第三届全委会主席。1991年5月在中国科协第四次全国代表大会上当选为科协名誉主席。1992年4月被聘为中科院学部主席团名誉主席。1994年6月当选为中国工程院院士。





## 卡尔曼

卡尔曼全名Rudolf Emil Kalman，匈牙利数学家，1930年出生于匈牙利首都布达佩斯。1953、1954年于麻省理工学院分别获得电机工程学士及硕士学位。



1957年于哥伦比亚大学获得博士学位。在现代控制理论中的卡尔曼滤波器，正是源于他的博士论文和1960年发表的论文《A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems》（线性滤波与预测问题的新方法）。