

自动控制原理

教材：现代控制系统 谢红卫

对于我们每个人来说，最重要和最有成效的学习方法是，重新发现和创新前人已有的答案和方法。

教学的最佳境界则是，向学生提供方法、技能、案例和机会，由学生自己去寻求答案。

这样，他们就可以自豪地说，他们所学到的知识都是自己所发现的。

第一讲：控制系统导论 (2-3 学时)

- 1、控制系统导论
- 2、课程及教学安排
- 3、控制历史回顾与启示

导论——控制系统概要

控制系统是能够提供**预期响应**的系统。通俗地说，**控制**就是使被控对象按照我们**预定的方式**工作。

人类的支配欲无限，因此，被控对象有多种多样，如，

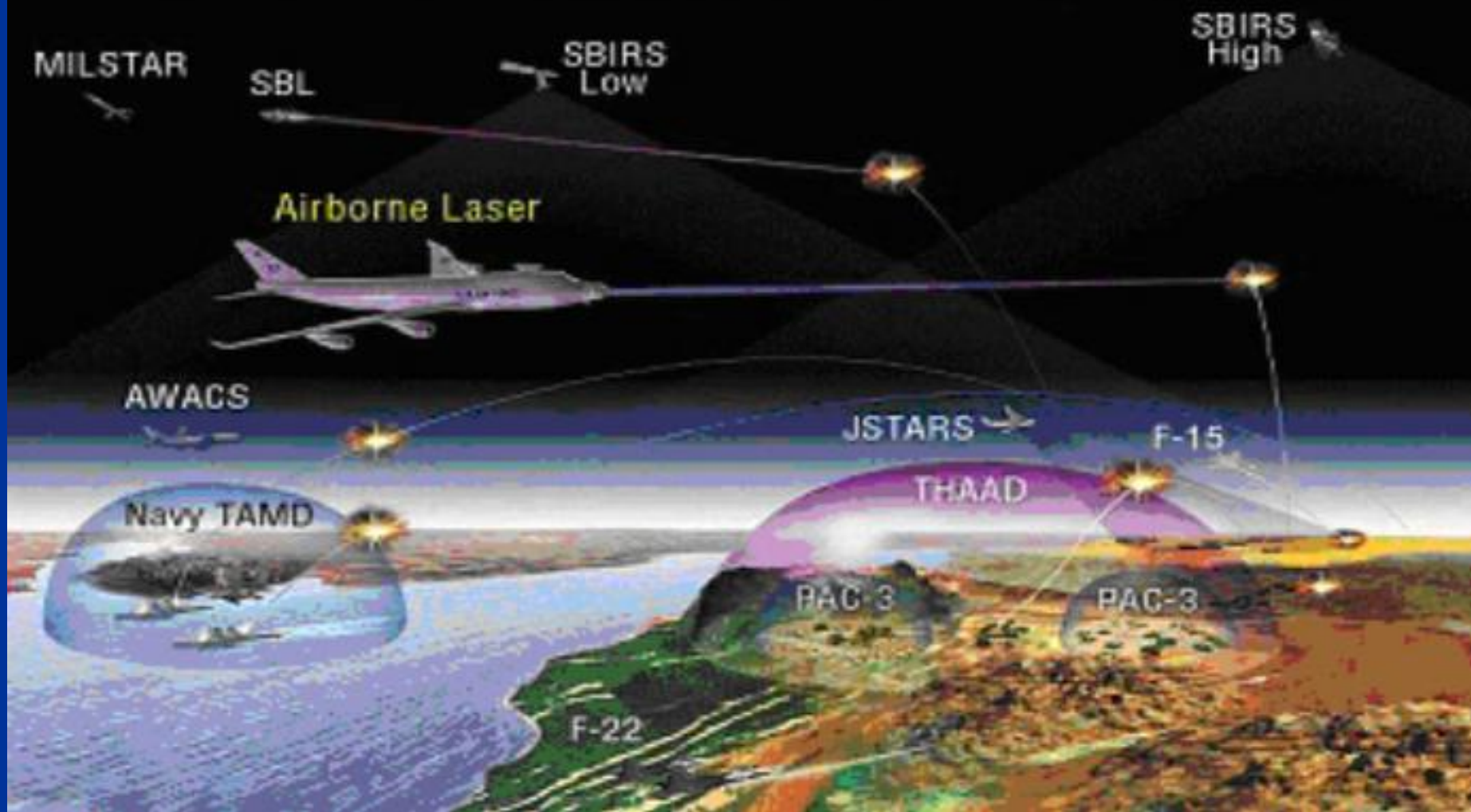
- 工程技术对象，简单如家电，复杂如工业自动化、精确制导、航天等
- 社会系统和经济系统
- 生态系统和生物系统

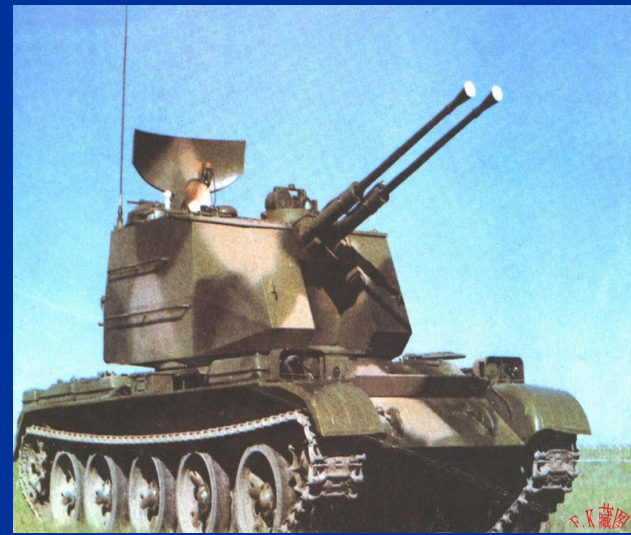


图1.1 被控对象



Theater Air and Missile Defense Family of Systems





导论——控制系统概要

被控对象：有什么共同的特点？

动

导论——控制系统概要

被控对象：数学上怎么来描述？

微分描述变化：

被控
对象



位置

速度

加速度

$$x(t) = s(t), \quad \dot{x}(t) = v(t), \quad \ddot{x}(t) = a(t), \dots$$

导论——控制系统概要

被控对象的基本描述：微分方程



$$f(y, \dot{y}, \ddot{y}, \dots, r, \dot{r}, \ddot{r} \dots) = 0$$

导论——控制系统概要

求解微分方程，是整个控制理论的数学基础

(1) $\dot{x}(t) = v$ 匀速运动

(2) $\ddot{x}(t) = a$ 匀加速运动

(3) $\dot{x}(t) + 3x(t) = 0$ 一般运动

导论——控制系统概要

变化的被控对象多种多样，这导致了控制理论应用的广泛性，甚至出现了具有哲学意义的控制论。例如：

钱老提倡的新三论（控制论、系统论、信息论）

管理中体现的控制论原理，等等

结论：学习本课程益处多多！

导论——控制系统概要

但是！

只有恰当地实施了控制，才能得到预期的响应。这是控制系统的核心和难点，也是本课程的主要内容。

导论——控制系统基本概念

- **被控对象**（部件或系统）：具有因果关系的物理过程（或工程对象），是指要求实现自动控制的机器、设备或生产过程，如宇宙飞船，火炮操瞄装置、飞机驾驶系统以及工业生产的某种过程等。
- **自动控制**：没有人**直接**参与的情况下，利用**控制装置**使**被控对象**的某一**物理量**（**被控量**）自动地按照预定的规律运行。

导论——控制系统基本概念

- **控制装置**：常被归纳成执行机构、观测器等。
- **反馈**：把输出量送回到输入端并与输入信号比较的过程。分为负反馈和正反馈。
- **控制系统**：为了达到**预期的目标**（响应）而设计出来的系统，它由相互关联的部件组合而成，主要由控制装置和被控对象组成。

导论——开环控制与闭环控制

控制方式（结构）粗略地可以分为两种：

开环控制和闭环控制



信号的单向传递

图1.2 开环控制系统
(无反馈)

导论——开环控制与闭环控制

例1：开环控制系统

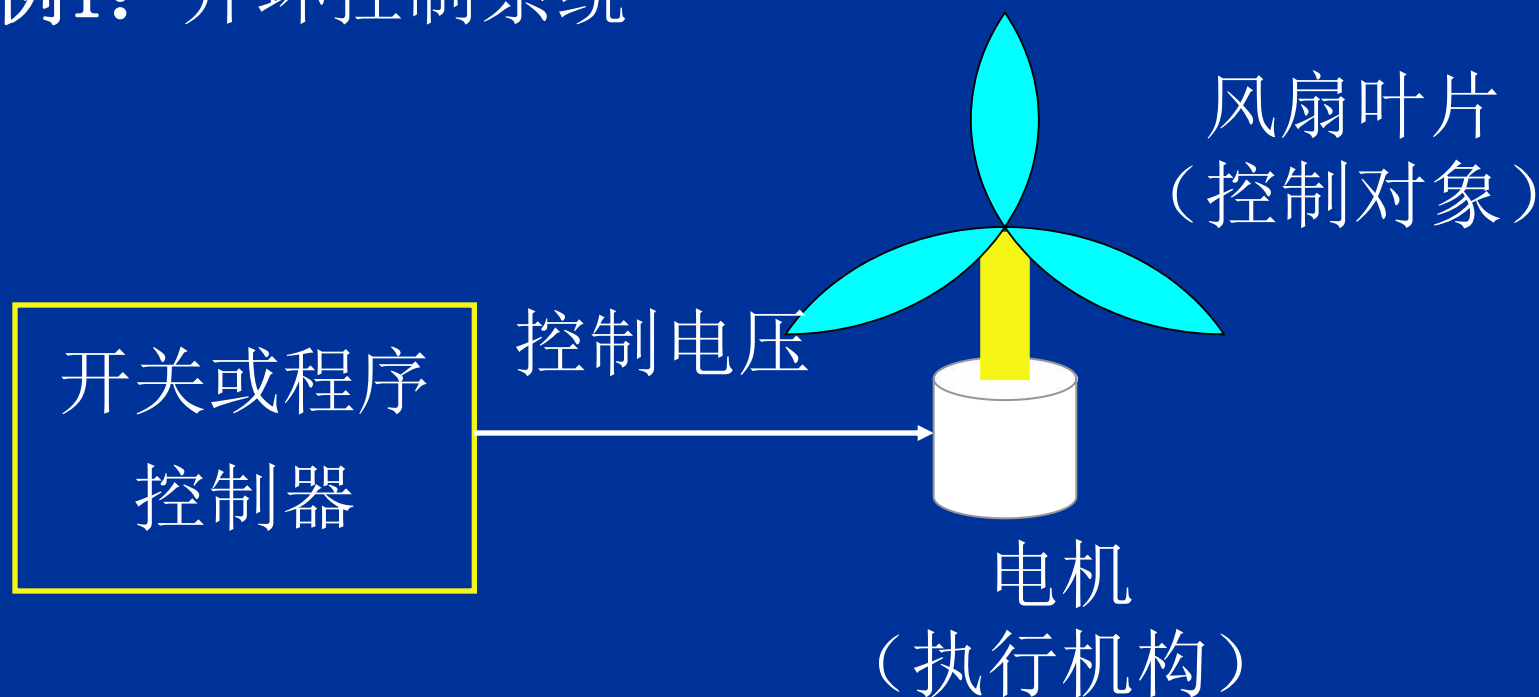
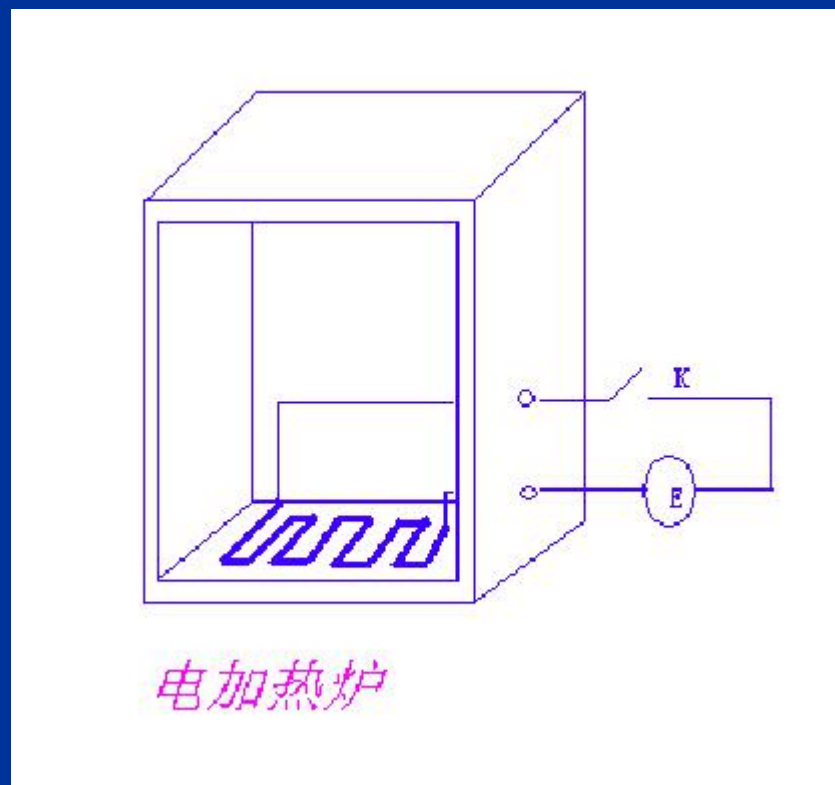


图1.3 电风扇的控制

导论——开环控制与闭环控制

例2：开环控制系统



控制目的：提高炉温

受控对象（物理实体）：炉子

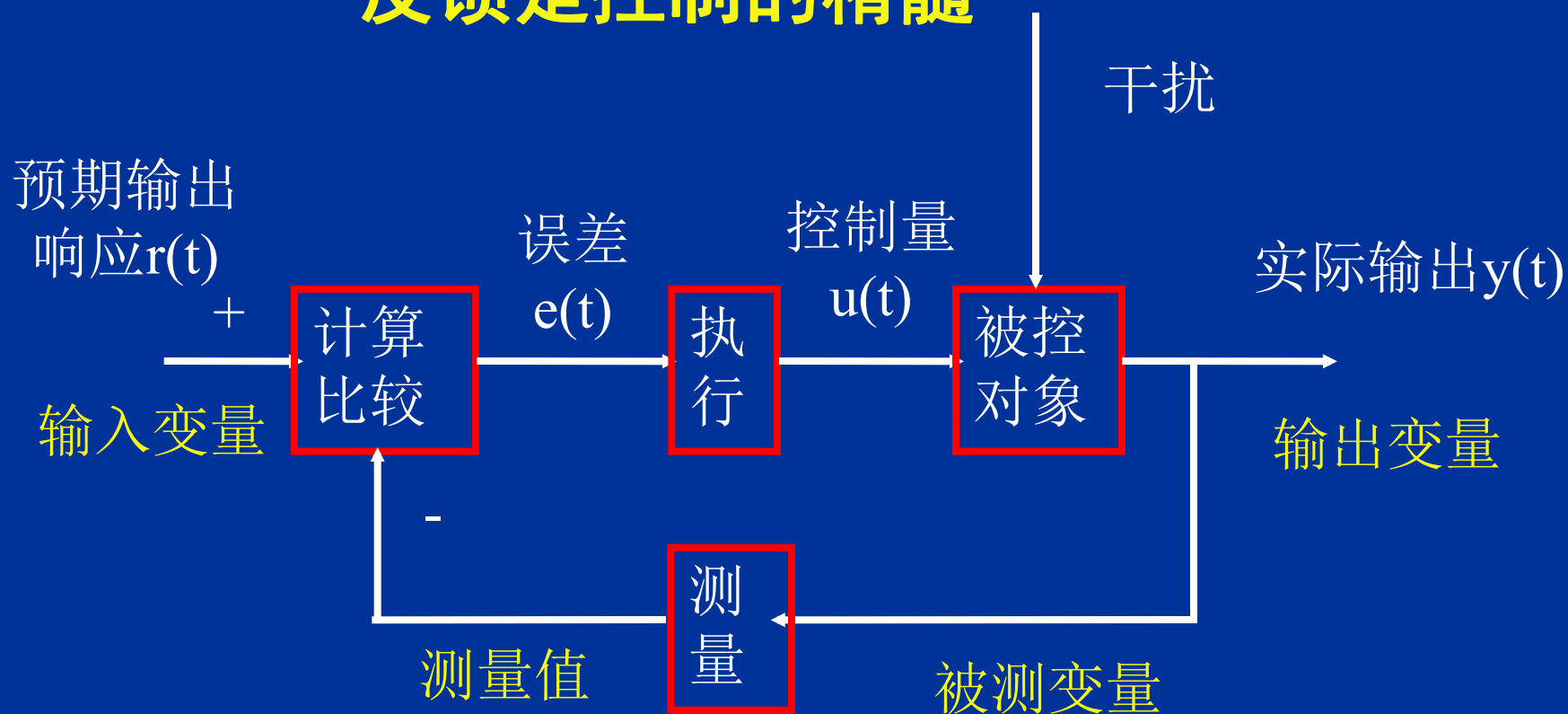
受控量（输出物理量）：炉温

控制装置：开关K和电热丝，对受控量起控制作用。

图1.4 加热炉的开环控制

导论——开环控制与闭环控制

反馈是控制的精髓



信号双向传递

图1.5 闭环(反馈)控制结构框图

导论——开环控制与闭环控制

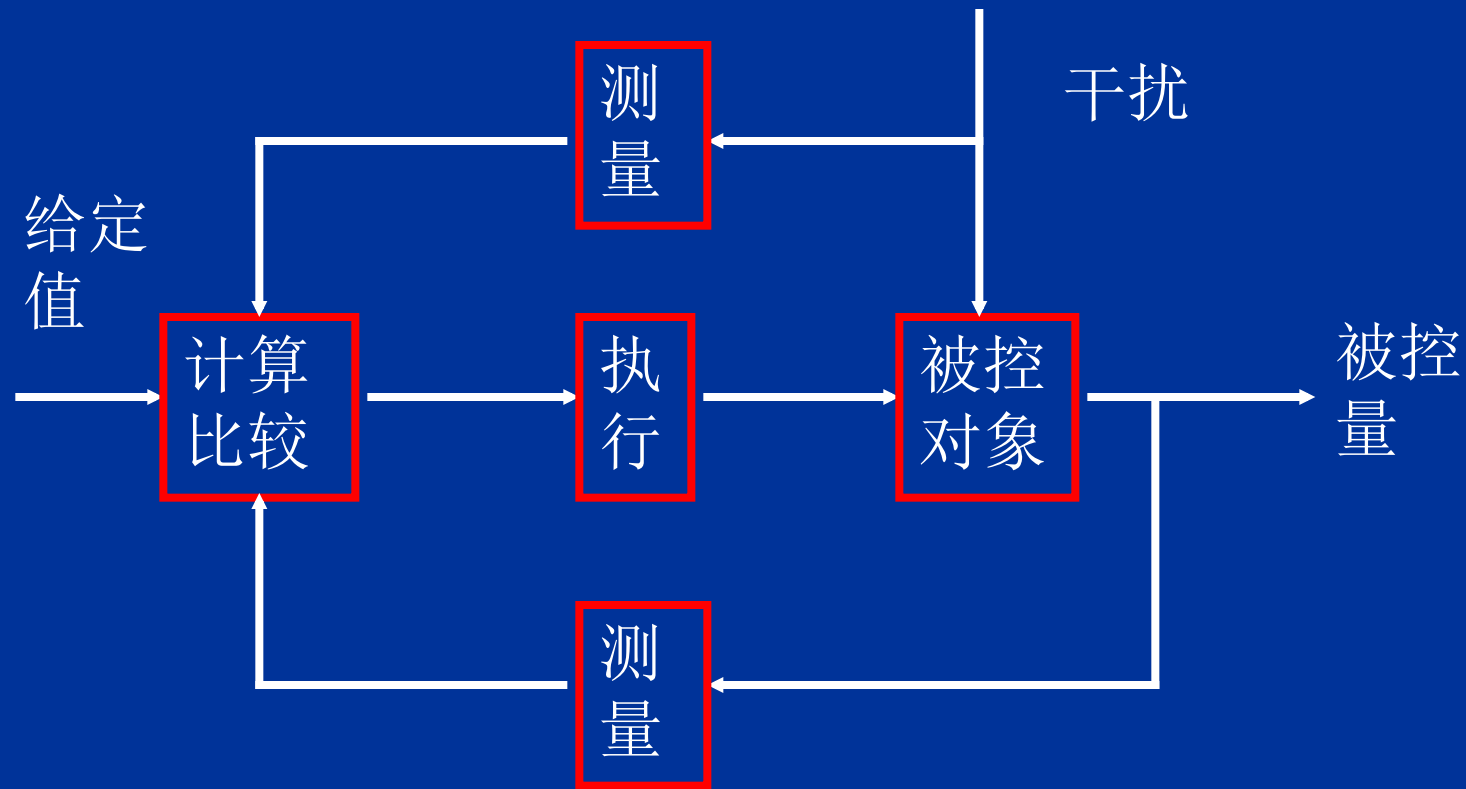


图1.6 自动控制系统的典型结构框图

导论——开环控制与闭环控制

反馈是控制的精髓。运用反馈的例子也是比比皆是。

例3：调节容器内液面位置的人工闭环控制系统

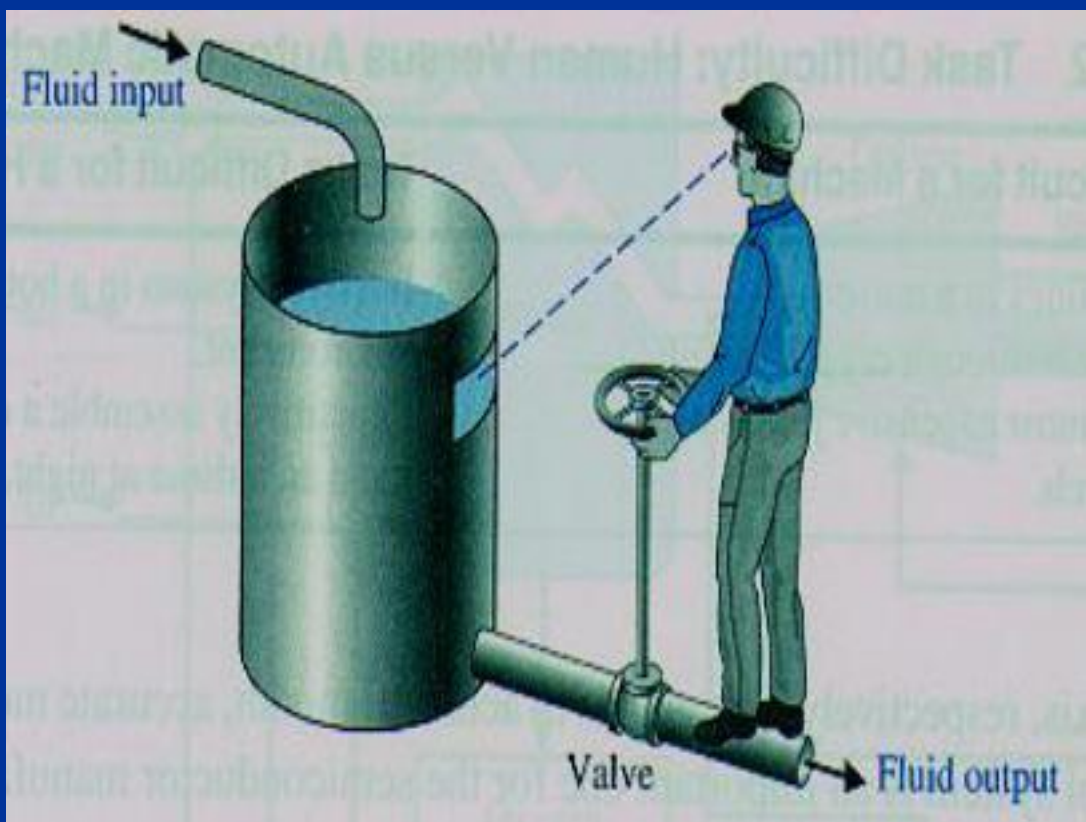


图1.7 液位控制示意图

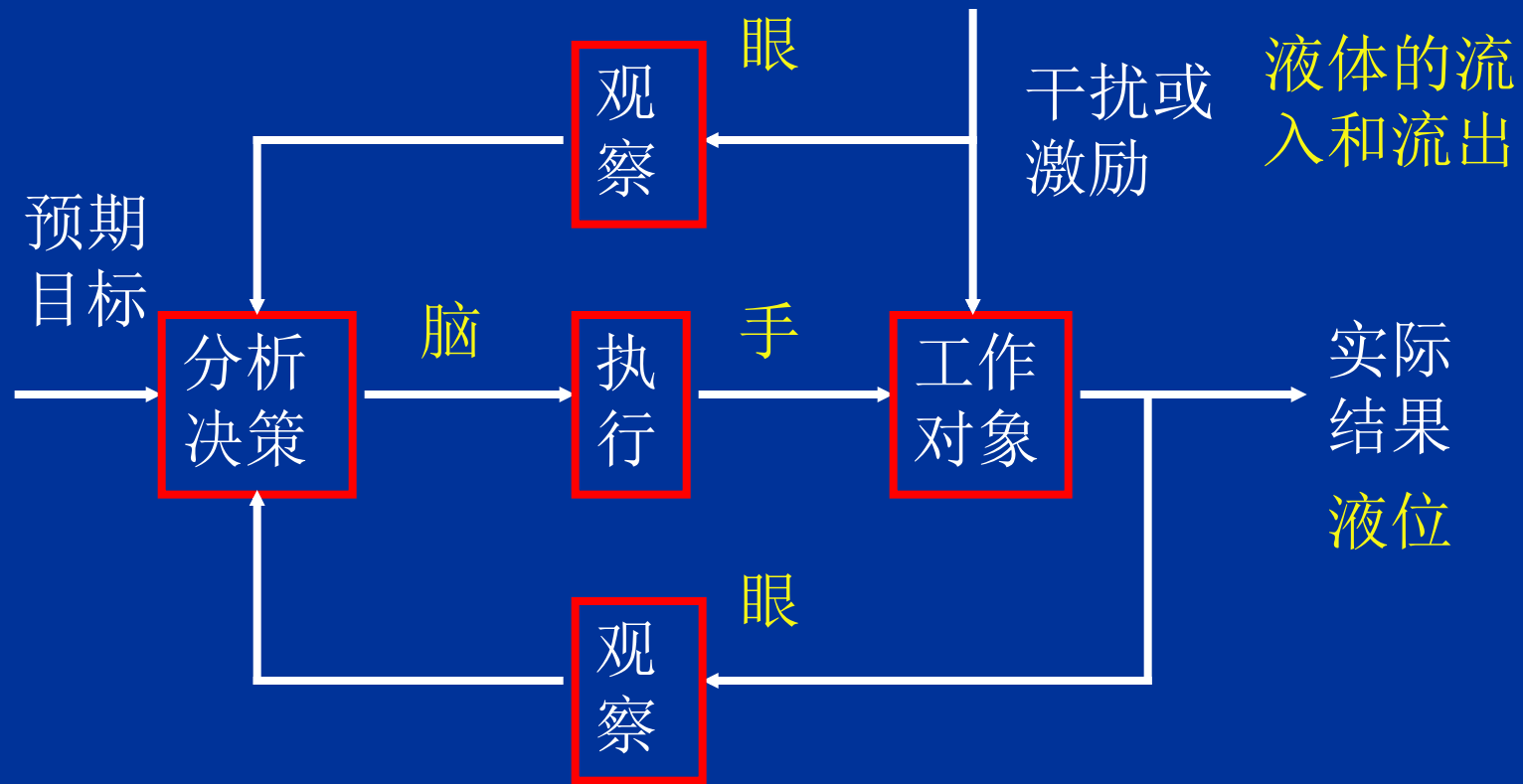


图1.8 液位控制人工职能图

导论——开环控制与闭环控制

例4：汽车方向控制系统



图1.9 汽车方向控制系统

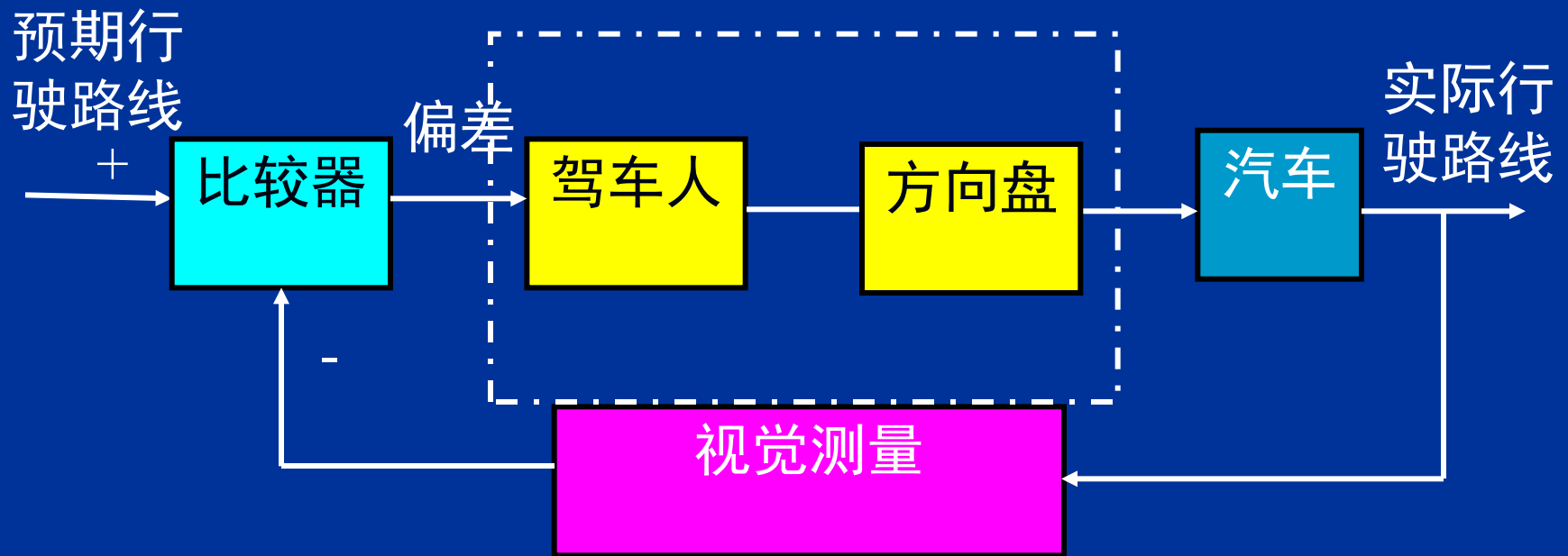


图1.10 汽车方向控制人工职能图

导论——开环控制与闭环控制

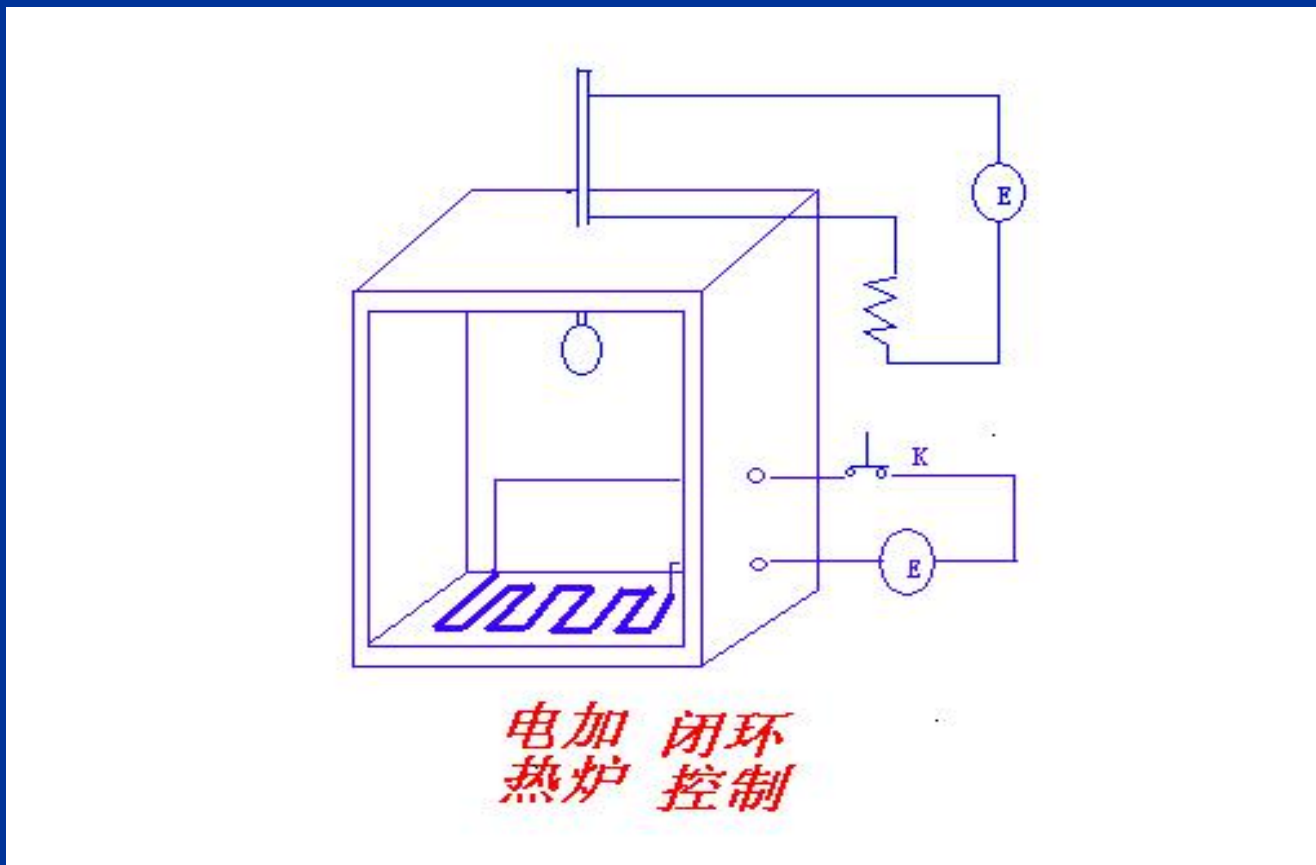


图1.11 开环向闭环控制转换的例子

导论——开环控制与闭环控制

反馈是现代控制的精髓，还例如：

火炮随动系统

领导实施管理

央行调整利息

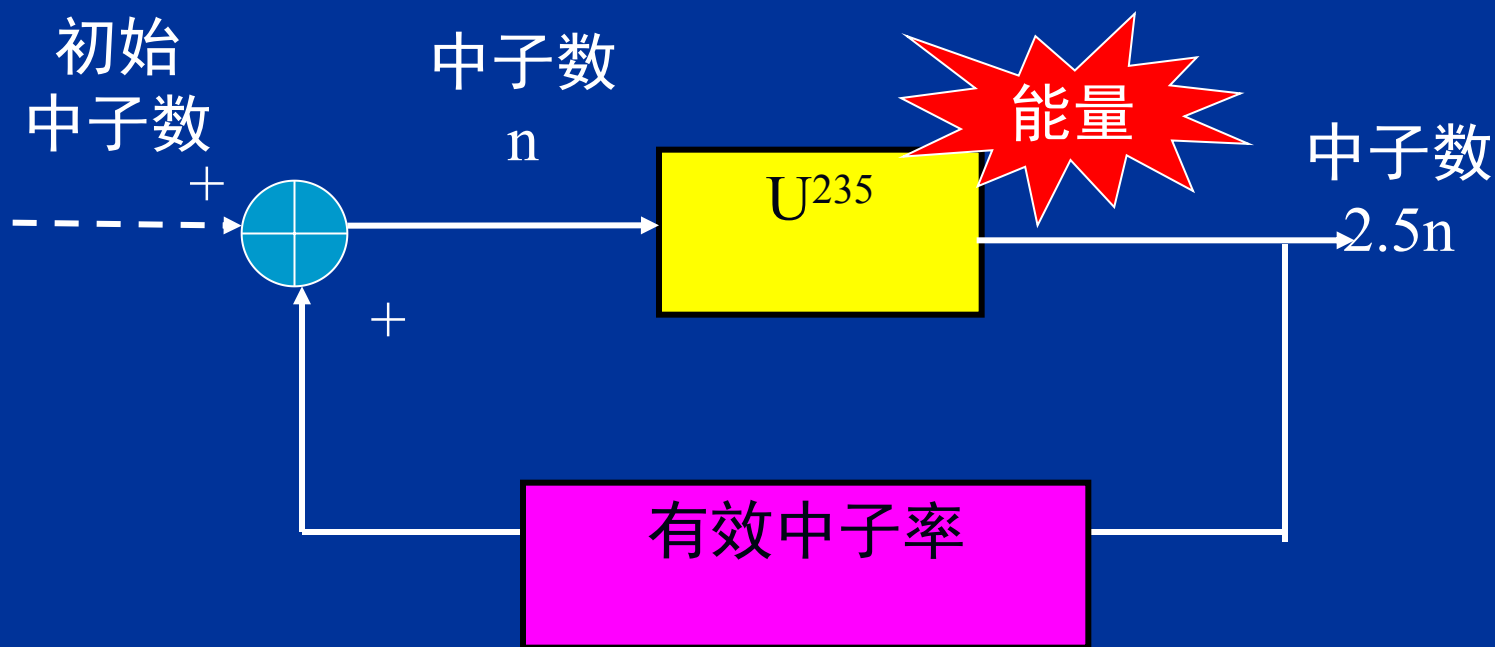
“没有调查就没有发言权”，等等

都体现了反馈的理念！

导论——开环控制与闭环控制

正反馈的例子

例5：已知铀²³⁵原子核在一个中子的撞击下，可发生核裂变反应，放出大量的能量，同时释放大约2.5个中子，放出的中子有可能再与铀²³⁵原子核发生核反应，这就是所谓核裂变的链式反应。



导论——开环控制与闭环控制

开环和闭环控制系统的特点

- ❖ **开环系统：**结构简单，稳定性好，容易设计和调整以及成本较低的优点，对那些负载恒定，扰动小，控制精度要求不高的实际系统，是有效的控制方式。
- ❖ **闭环系统：**由于增加了检测装置和反馈环节，结构较复杂，成本有所增加；但它提高了系统的控制精度和抗干扰能力；同时，负反馈会对系统稳定性产生不利影响。

导论——反馈控制系统的分类

按参考输入形式分为：

恒值系统：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，使被控量（即系统的输出量）保持在给定或希望的数值上。

随动系统：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。

导论——反馈控制系统的分类

按照系统的元件特性分为：

线性系统：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**齐次性和叠加原理**。

非线性系统：构成系统的元件中含有非线性元件的系统，只能用非线性微分方程描述，不满足叠加原理。

可以进行线性化处理的系统或元件特性又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。

导论——反馈控制系统的分类

按照系统内信号的形式分为

连续系统: 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: 系统内某处或数处信号是以脉冲序列或数码形式传递的系统。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。

导论——控制系统性能的基本要求

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；反之，系统是不稳定系统。

稳定性是保证系统能正常工作的必要条件，衡量指标有**稳定裕度**等。

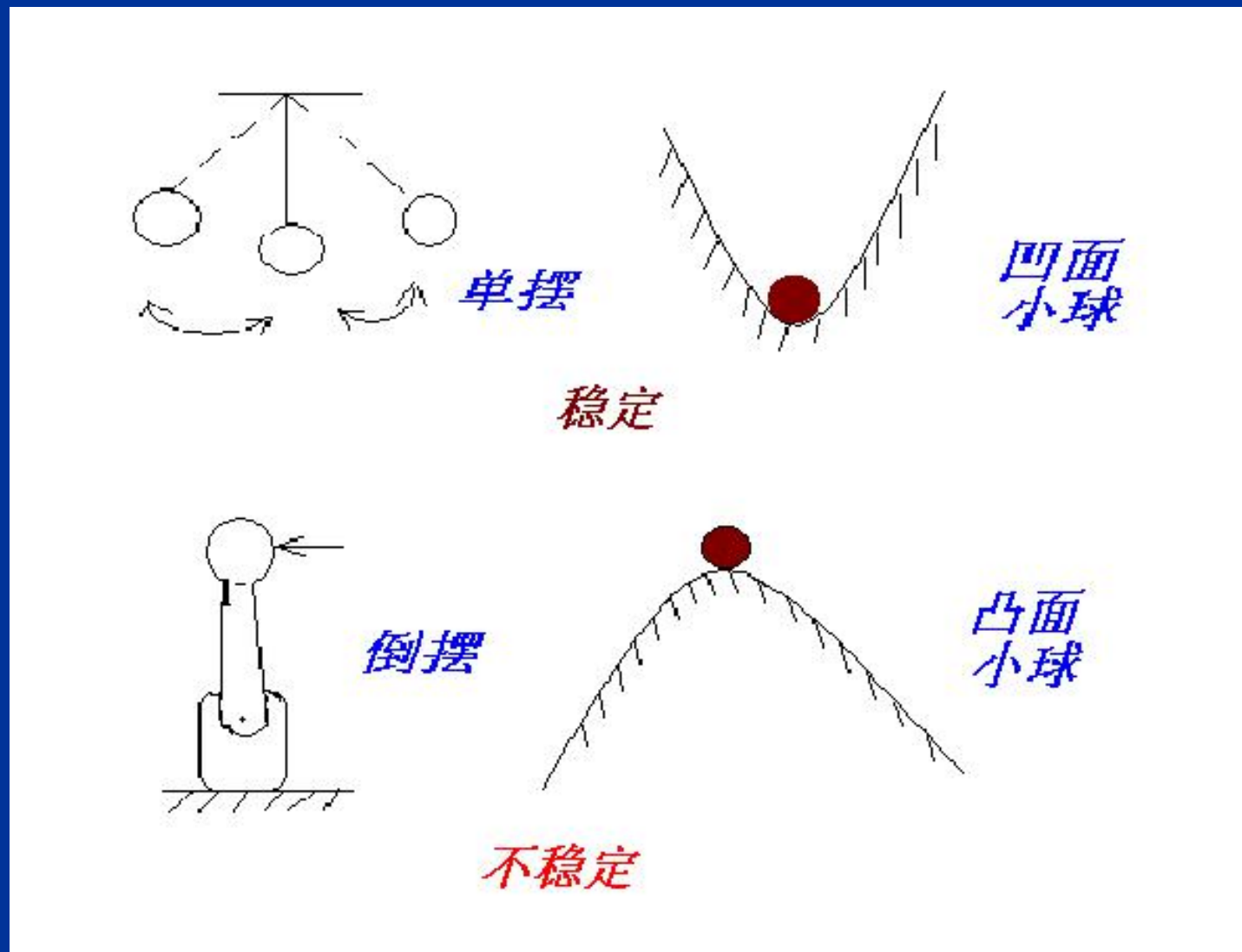


图1.13 稳定性示意图

导论----控制系统性能的基本要求

快速性：要求自动控制系统的过渡过程尽量短暂，输出尽快平稳地跟踪上输入的变化。

通常在时域中给出瞬态响应指标来衡量快速性。常用单位阶跃信号作用下，系统输出的超调量 σ ，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 等指标表示。

导论 --- 控制系统性能的基本要求

准确性：当过渡过程结束后，要求输出量最终应准确地达到希望值，否则将产生稳态误差。

准确性指标有**稳态误差**和**稳态误差系数**，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。

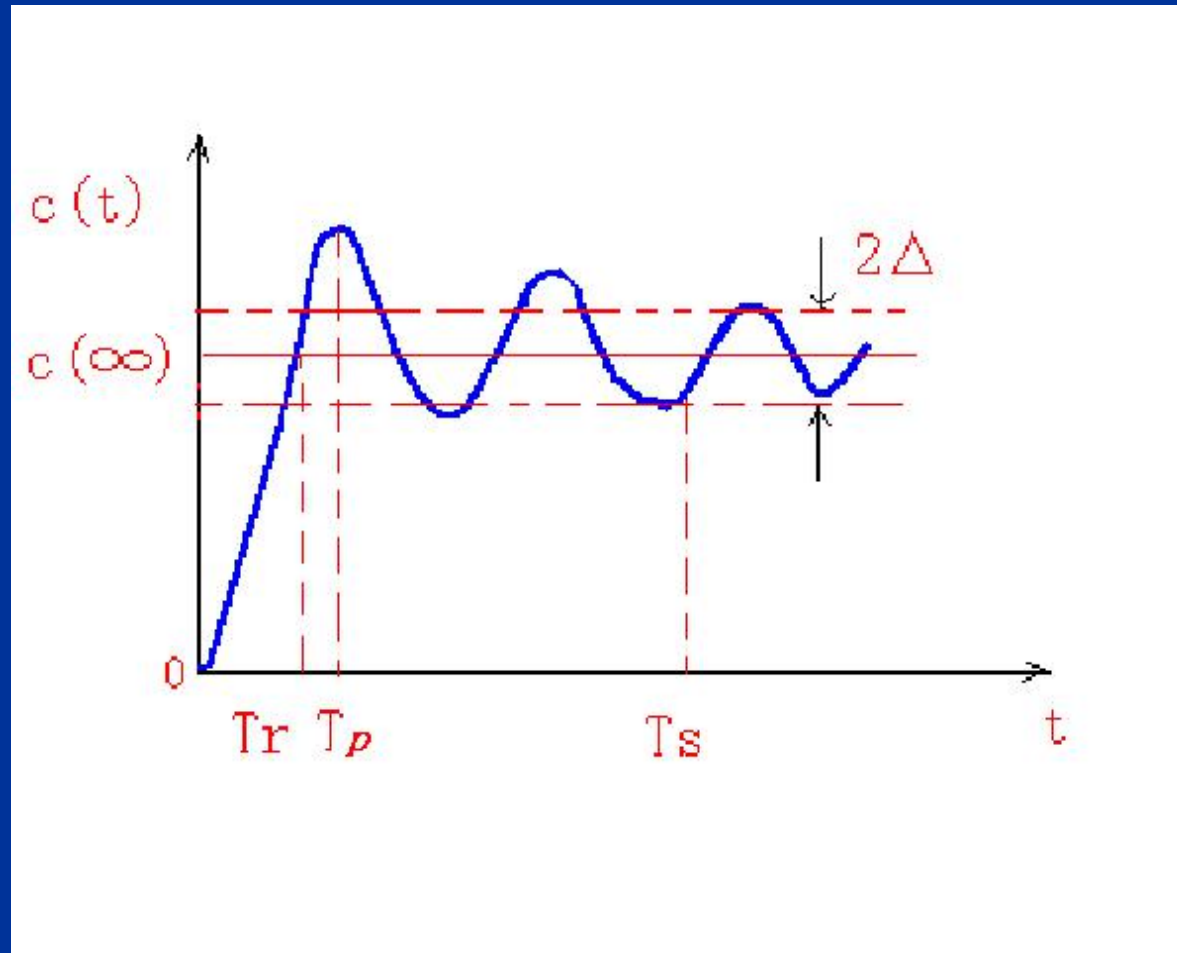


图1.14 稳定系统的典型单位阶跃响应曲线

课程及教学安排简介----目标

知道控制的概念，易！

实施恰当的控制，难！

复杂对象的控制，非不欲也，乃无能也！

因此，本课程采用有限目标、解剖麻雀的策略。

收缩对象→经典控制！

课程目标：

以简单的线性时不变系统为对象，学习控制系统的分析、设计与实现，切身体会实施控制的全过程，牢固建立反馈控制的理念，培养实施控制的能力。

课程及教学安排----目标

经典控制理论的基本特点

- (1) 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；
- (2) 只用于单输入，单输出的反馈控制系统；
- (3) 主要讨论系统输入与输出之间的关系，而忽视系统的内部状态，是一种对系统的外部描述方法。

应该指出的是，**反馈控制**是一种最基本最重要的控制方式。从某种意义上讲，经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。

课程及教学安排----目标

实施控制的全过程：

设计差异，反复改进。

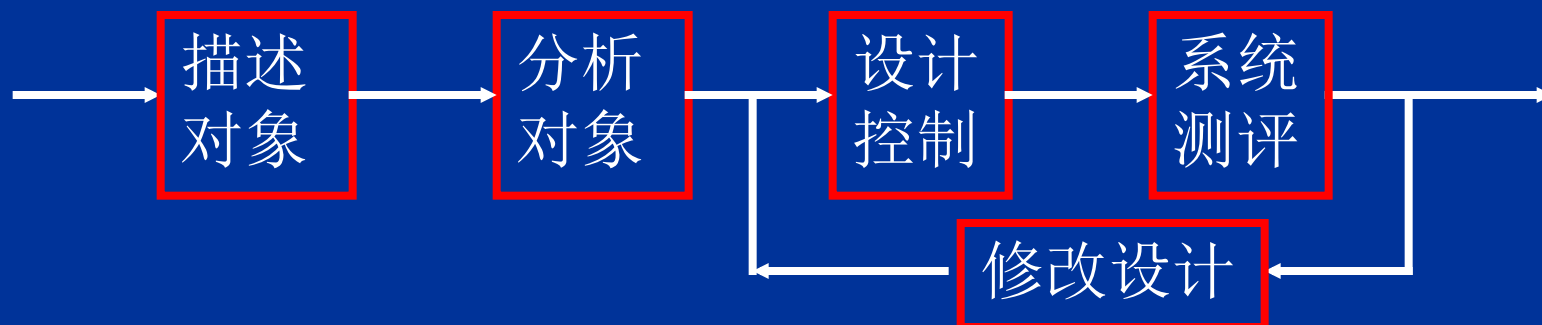


图1.15实施控制的全过程

课程及教学安排----目标

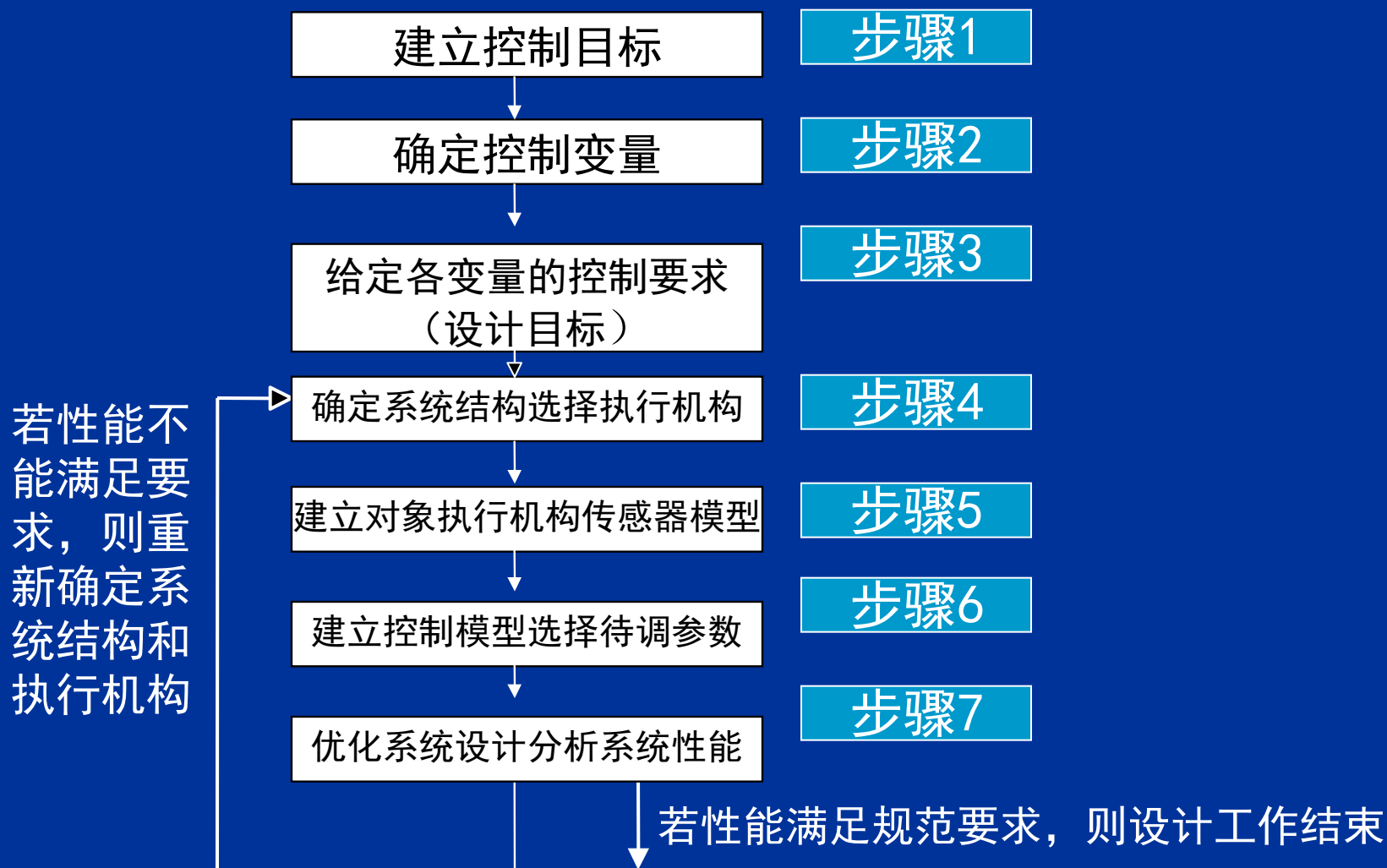


图1.16 控制系统设计过程

课程及教学安排----讲授时间安排

- 第一章 自动控制导论 (2)
- 第二章 控制系统的数学模型 (8)
- 第三章 控制系统的时域稳定性 (4)
- 第四章 时间响应分析 (9)
- 第五章 根轨迹法 (4)
- 第六章 频率响应分析 (5)
- 第七章 控制系统的频率域稳定性 (4)
- 第八章 反馈控制系统设计 (10)
- 实 验 Matlab辅导、测验等 (4)

课程及教学安排----学习建议

广泛阅读参考书，深刻理解理论体系

- 1、吴麒主编 “自动控制原理”，清华大学出版社。
- 2、胡寿松主编 “自动控制原理”，国防工业出版社。
- 3、K.Ogata. “Modern Control Engineering”, 科学出版社影印版。
或绪方胜彦著，卢伯英译，“现代控制工程”，科学出版社。
- 4、楼顺天等，“基于Matlab的系统分析与设计——控制系统”，西安电子科技大学出版社。

课程及教学安排----学习建议

利用网络资源

- 1、军网机电工程与自动化学院主页推荐站点：“自动控制原理”网上教学。
- 2、学研论坛—自动控制。
- 3、各个大学重点课程建设教学资料。

课程及教学安排—学习建议

完成大量练习，积极讨论问题；
学完每章要善于总结知识点，演绎归纳并重；
重视实验体验（Matalab实现）。

课程及教学安排----考核方式

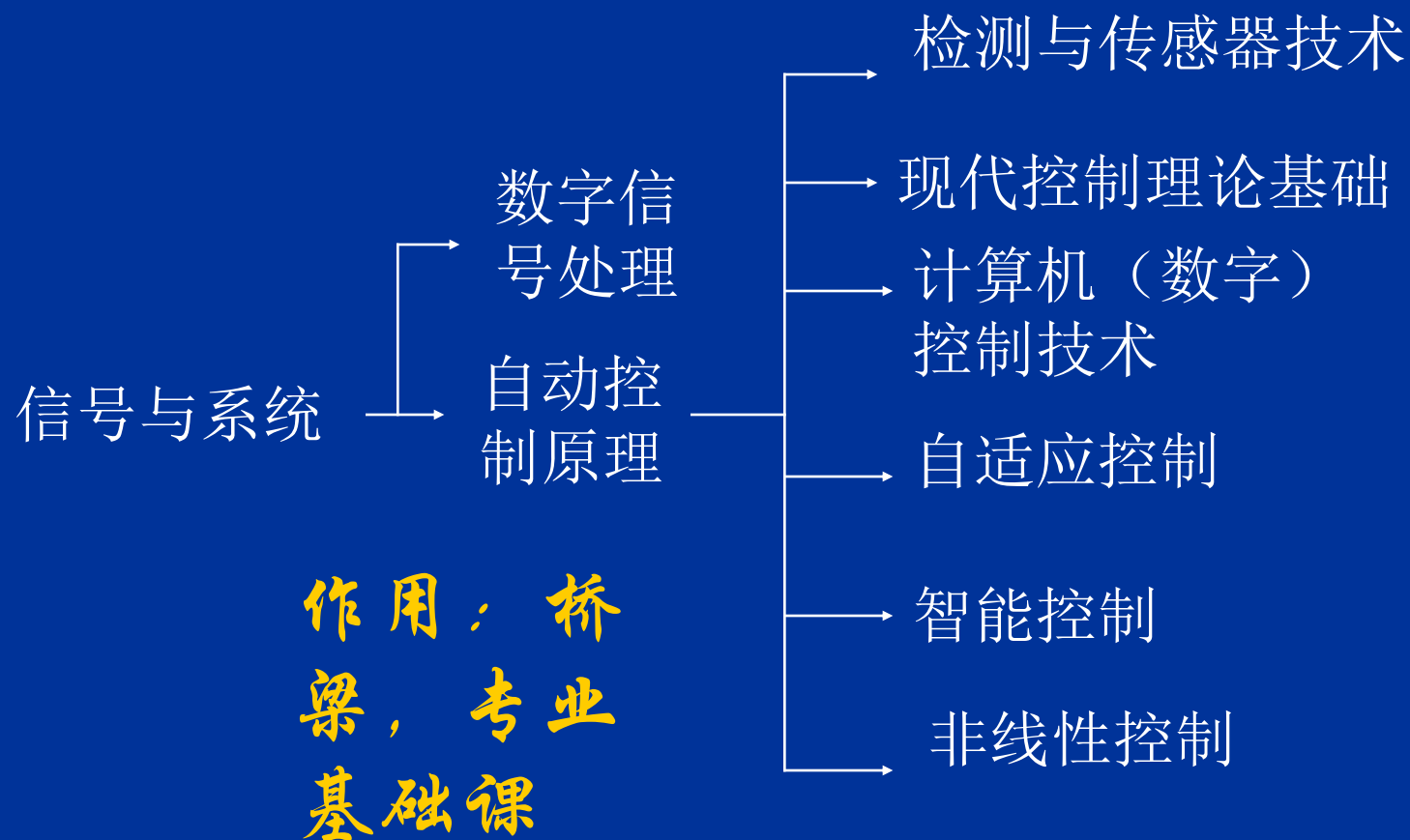
作业（20%）

+ 闭卷考试（80%）

课程及教学安排----后续课程展望

复杂对象的控制，非不欲也，乃无能也！
仅在工程控制领域，今后还有：
数字控制——手段更新
自适应控制——时变对象
非线性控制——非线性对象
智能控制——环境适应
等等

课程及教学安排----后续课程展望



自动控制简史漫谈与启示

1788 年前后，瓦特发明了蒸汽机的离心调速器。

科学技术发明的基础，是前人知识（风力磨坊）的积累与运用。

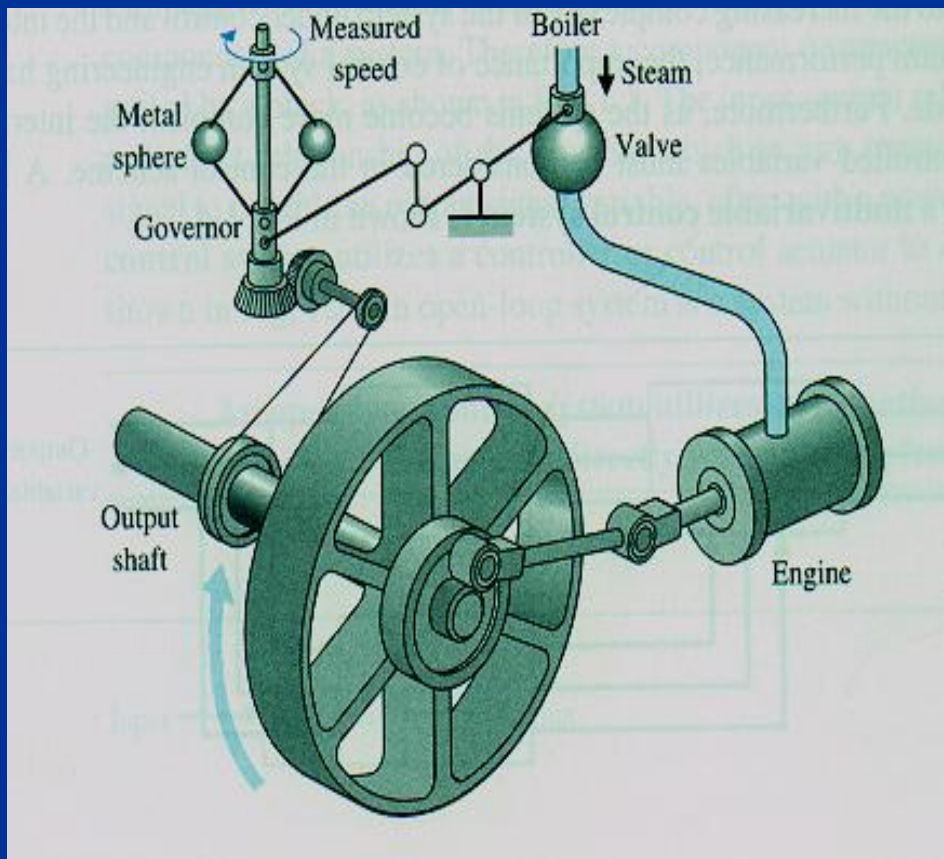


图1.17 离心调速器

自动控制简史漫谈与启示

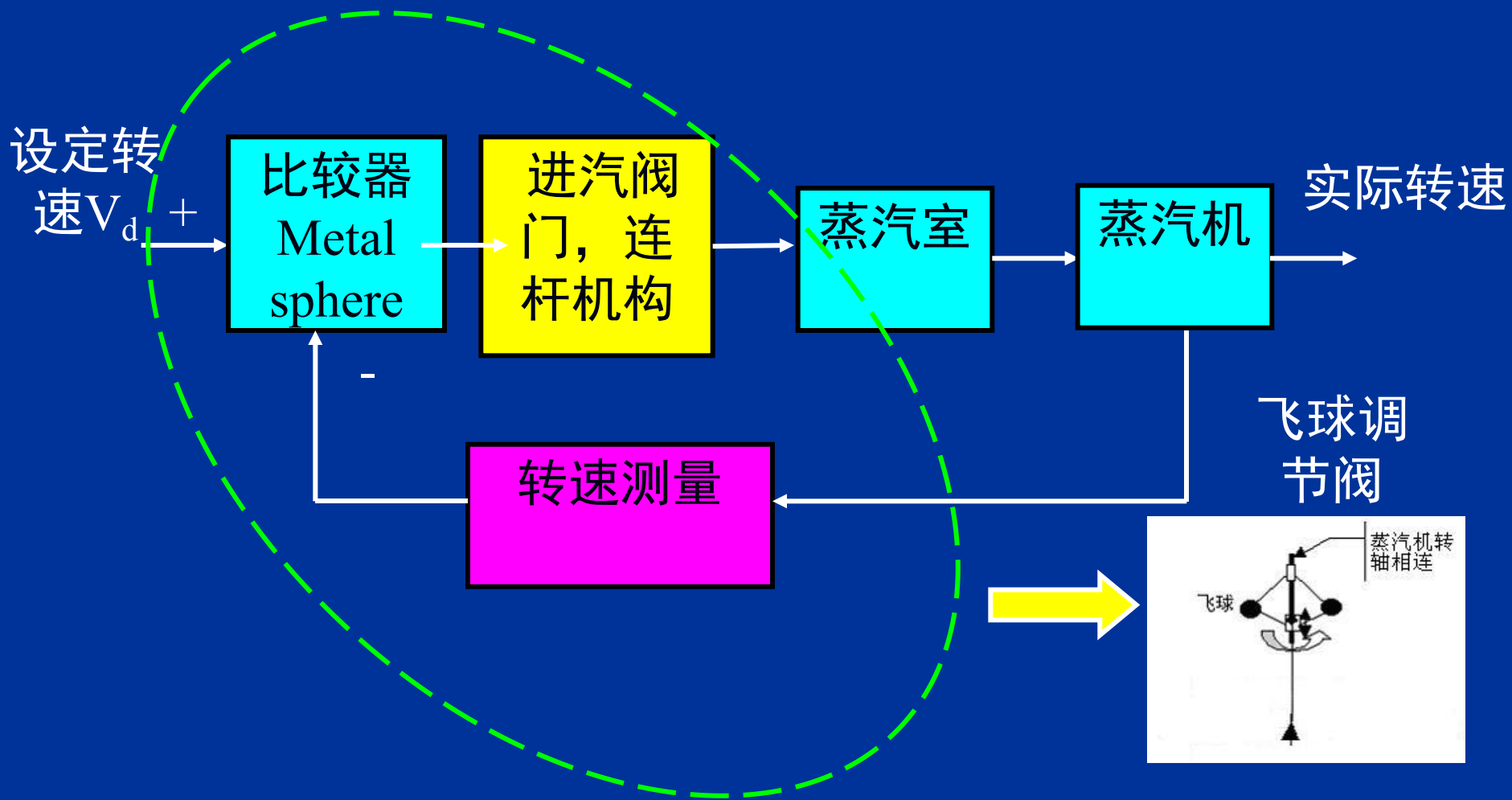


图1.18 离心调速器框图

自动控制简史漫谈与启示

早期的载波电话失真严重，解决放大器的非线性累积和无序振荡，成为电话远程传输的关键。1927年8月，贝尔实验室的布莱克在轮渡上的灵光一现，催生了最实用的负反馈控制装置。

负反馈信号放大器获得了极好的线性度，自激振荡问题的解决，极大地促进了电话的广泛应用。

灵感来自于长期的思考。

自动控制简史漫谈与启示

早期的防空火炮控制，一般需要 3 个人来实施伺服控制，（一个方位角，一个高低角，还有一个引信），与现在不可同日而语。

1940年，同样来自贝尔实验室的年轻的工程师帕金森用反馈控制方法，解决了这个问题。

自动控制简史漫谈与启示

当时，他是一个低职位的工程师，让他承担的任务是绕电位计，就在1940年春天的一个晚上，他做了一个梦。他梦到既然用电位计可以控制电压记录笔，那么，它也应该可以控制火炮的发射。他的这个梦，同样促进了自动控制技术的发展。

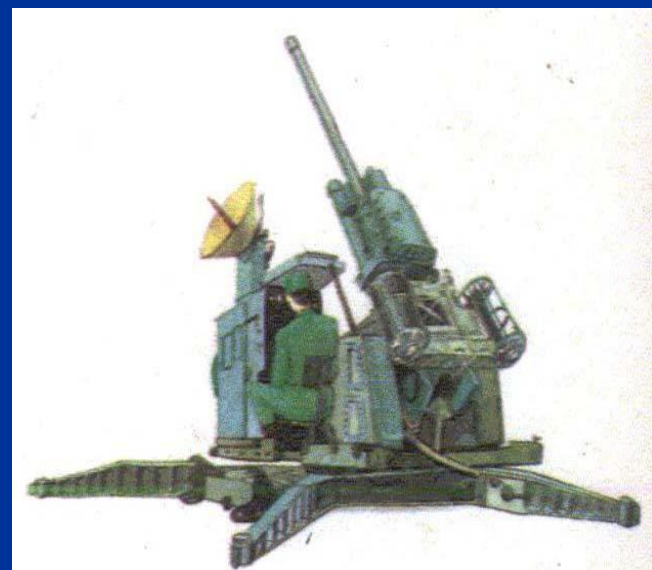


图1.19 火炮随动控制

教育的目的应该使每个人都充满
梦想！

自动控制简史漫谈与启示

瓦特离心调速器在调速过程中存在不稳定现象（“设备变得发狂！”），当时并没有理论指导，所有的努力都集中在改进调速器本身（重量、弹簧、摩擦）。

麦克斯维尔把调节器跟调节对象合在一起，看作一个系统，用微分方程来进行研究，指出微分方程的特征根在左半面或右半面，决定着系统稳定与否。

仅有实践是不够的！

自动控制简史漫谈与启示

1877年，麦克斯维尔的学生劳斯提出了劳斯代数稳定性判据，并获得了亚当奖。

1895年，胡尔维茨也提出了本质上与劳斯判据一致的代数稳定性判据，并在稳定性理论的指导下，为瑞士达沃斯电厂的一个蒸汽机设计了一个调速系统。胡尔维茨被认为是真正运用控制理论，来指导设计控制系统的第一人。

只有有了理论的指导，才能从自然王国走向必然王国。

自动控制简史漫谈与启示

到了二十世纪40年代，尼可尔斯深入研究了PID（Proportion, Integral, Differential）调节问题。

他在MIT仅有的一台模拟机（又叫微分分析仪）上做了大量的仿真实验，最后列出来了PID的整定表。控制工程中，有一项工作历经60多年，至今还在使用的，这就是尼可尔斯编排的这个PID整定表。

自动控制简史漫谈与启示

这一时期的主要代表人物还有

伯德（H.W.Bode 1905~）：1945年提出了简便而实用的伯德图法。

伊文思（W.R.Evans）：1948年提出了直观而又形象的根轨迹法。

自动控制简史漫谈与启示

经验的积累和总结，
逐渐形成了较完备的理
论。

值得自豪的是，
1954年，中国科学家钱
学森全面地归纳总结了
经典控制理论，在美国
出版了国际上第一本经
典控制理论的著作《工
程控制论》。



自动控制简史漫谈与启示

讨论
研究
的
内
容

20世纪50年代，**经典**控制理论

20世纪60~70年代，状态空间法、最优控制等

20世纪80~90年代，鲁棒控制、 H_∞ 控制等

目前已形成了多个重要分支，包括系统辨识、自适应控制、综合自动化、非线性系统理论、模式识别与人工智能、智能控制等。

现代
控制
理论

自动控制简史漫谈与启示

在“现代控制理论”时期（上世纪60~70年代），主要由于空间技术和计算机的飞速发展，用基于一阶微分方程组的状态空间模型来描述系统的动态过程更为方便。这种方法可以解决多输入多输出问题，系统既可以是线性的、定常的，也可以是非线性的、时变的。

这一时期的主要代表人物有庞特里亚金、贝尔曼（Bellman），以及卡尔曼（R.E.Kalman, 1930~）等人。庞特里亚金于1961年发表了极大值原理；贝尔曼在1957年提出了动态规划原则；1959年，卡尔曼和布西发表了关于线性滤波器和估计器的论文，即所谓著名的卡尔曼滤波。

自动控制简史漫谈与启示

目前，控制理论与实践正以“大系统”和“智能”为主题迅猛发展，形成了多个重要分支，包括系统辨识、自适应控制、综合自动化、非线性系统理论、模式识别与人工智能、智能控制等。

习 题

E1.1, P1.1, P1.6, P1.7, P1.19, P1.20, P1.24,
DP1.2