

# 自动控制原理

**徐炜**

Email: [weixu@seu.edu.cn](mailto:weixu@seu.edu.cn)

手机: 13916926545

**东南大学电气学院**

第一章 绪论

第二章 控制系统的数学模型

第三章 线性系统的时域分析

第四章 线性系统的根轨迹法

第五章 线性系统的频域分析法

第六章 线性系统的校正方法

## ➤ 自控的重要性

人造控制系统的历史很长，有几百年，从我国古代的自动计时器到太空飞行。人类正在往高度自动化方向发展，自动控制无处不在。能量的产生与传输系统、运输系统、制造系统以及娱乐等的技术系统都有自动控制系统。所有科研领域的高精度仪器与实验设备中都使用了反馈控制。

## ➤ 自控的重要性

在工程和科学技术发展过程中，自动控制担负着重要的角色，它不仅在宇宙飞船系统、导弹制导系统和机器人系统等领域中具有特别重要的作用，而且自动控制也已成为现代制造和工业生产过程中的重要而不可缺少的技术。自动控制从系统论的角度强调的是系统的输入、输出关系的建模、系统信息的收集与处理以及为达到系统所设定目标的控制策略设计。由于这一理论的系统普遍性，因而在所涉及到系统信息处理的诸多专业如自动化、电气工程、仪器仪表、电子工程等，均把自动控制原理这门课程作为主要的专业基础课，这一状况与海外许多知名高校是一致的。

## ➤ 自控的重要性

国外大都采用Richard C. Dorf教授的《Modern Control System》。我国几个著名的出版社如科学出版社、高等教育出版社和电子工业出版社等最近几年也出版了上述原版教材的翻译本或影印本。我国还有很多自编教材，多数高校以国内教材为主，以国外教材作为教学参考资料，与国际上一些主要大学在该课程的教学是相似的，标志着我国在《自动控制原理》的教学上与国际著名大学是一致的。

## ➤ 自控的重要性

近年来，尽管随着控制原理研究工作的重心从以**理论研究**为主向以**应用研究**为主的转移，但是该门课程的教学在自动化专业对于人才培养的需要上不是削弱了，而是**加强了**。实际上，在淡化专业、拓宽知识的平台下，除了作为信息控制工程的专业基础理论课程之外，各工程专业都提出了不同学时对于自动控制原理课程的教学需求，甚至包括**经济管理工程**，**环境工程**等专业。

## ➤ 自控的重要性

在国外，各高校以及各种教育机构均开设了内容基本一致、学时和要求不尽相同的相关课程。例如，美国排名在前的斯坦福大学、普林斯顿大学、加利福尼亚大学等著名高校。

另外，随着系统论、信息论、控制论三者归一学说的发展趋势，控制、反馈等术语在概念范畴上的泛化，以及自然科学与人文科学的辨正统一，该课程越来越显出它的重要地位。

# 自动控制理论课程的特点

8

**应用性强**：自动控制在工业、农业、军事、航空和社会科学等各个领域都得到了广泛的应用。

**涉及知识面广**：由于课程涉及的研究对象是大量具体的自动控制装置及过程，为了建立其理论，需要定义的概念较多。课程一开始就涉及到大量新概念。如，受控对象、被控量、测量、开环、负反馈等，其中某些概念还是容易混淆的。

**所包含的图形多**：例如工程应用的原理图、结构图、根轨迹图、极坐标图和对数坐标图等。

**数学要求高**：基础数学中的微积分、复变量函数论、矩阵论等知识始终贯穿全课程，这就要求学生具有较好的数学素养。



**稳定性概念**：稳定是系统正常工作的前提，**稳定压倒一切**。全局稳定、渐进稳定、稳定边界、稳定裕量等重要概念。

**分层分级控制的思想**：控制是可以**分级**进行的，控制模拟人脑的分层结构，由**组织级**、**协调级**和**执行级**组成，组织级进行推理、决策和学习，协调级用于按照加识和实际的输出进行控制参数的调整，而执行级则用于高精度的局部控制。

**自适应、自学习、自组织控制的思想**：对外界环境变化及不确定性的出现，系统具有修正或重构自身结构和参数的能力；对一个过程或未知环境所提供的信息，系统具有进行识别记忆、学习，并利用积累的经验进一步改善系统的性能和能力。

**系统与集成的思想**：由于现实世界存在的系统其多样性与复杂性程度各异，需要对系统进行分门别类地研究，如线性系统、非线性系统、分布参数系统、随机系统、离散事件系统、混合系统等。对各类系统的研究都涉及到系统的分析与系统的集成两个方面。即建立系统的数学模型，对系统作定性、定量的研究；以改造系统为目的的系统科学需要研究如何有效地获取系统的信息，并实现不同层次的信息集成，以达到系统的局部或整体的最优化状态。

研究一个控制系统，是从认识它的**数学模型起步**的。控制系统的数学模型，是通过对**客观系统及其相互联系**的研究，是寻求**系统本质和规律**的一种**理性的思维**形式和认识手段。建立控制系统的数学模型，是对系统进行分析和设计的基础。

由于实际系统**具有的非线性、复杂性和外部环境**的不确定性，使得人们仅凭自己的感觉或经验无法达到高精度的控制要求，因此必须建立控制系统的数学模型。

控制系统的数学模型，反映了控制系统运行规律中的**主要因素和主要矛盾**，而**忽略**了一些**次要因素和次要矛盾**，因此方便了在工程上对系统的分析与设计。针对机械系统、电气系统和液压系统等而建立的**具有相似数学模型**的方法可以称之为**标准化方法**，标准化方法是人们认识事物最强有力的思想工具之一，正如数学大师**华罗庚**教授曾如此描述**标准化思想**：“把一个比较复杂的问题‘退’到最简单、最原始的问题，把这个最简单、最原始的问题想通、想透了，然后再用数学归纳法来一个飞跃上升，于是问题就迎刃而解了。”

控制系统的数学模型分为时域模型和复频域模型。其中，微分方程模型是时域模型，它是控制系统中最基本和最里要的数学模型，但是微分方程模型求解相对比较复杂。

通过拉氏变换，将微分问题变换为代数问题，将时域表达式变换为复频域表达式，从而得到控制系统的传递函数模型，极大地方便了系统的分析与设计。

频率特性数学模型，从某种意义上说，是传递函数模型的一种特例，但是，它不仅继承了传递函数的所有内容，还发展出了新的形式，可以用曲线表示系统对不同频率信号的响应特性。频率特性的物理概念清晰，工程应用广泛。

从时域模型到复频域模型、从复频域模型再到时域模型这过程充分体现了辩证法否定之否定螺旋式发展过程，它们之间互相联系，相辅相成，是一个认识论深化的过程。

## 自动控制理论课程的性质、任务和要求

要求先修课程为：高等数学，线性代数，复变函数，模拟电子技术，电路原理，电机及拖动等。这些课程的学习，为自动控制原理奠定**数学基础**和自动控制必需的基本电气知识和**电学基础**。

自动控制原理作为一门技术基础课，课程内容**侧重于方法论**，教学上应尽可能结合自动化及相关专业的特点，所以与一般技术基础课合所不同。

课程结束后，为学生分析、设计各类实际控制系统**打下良好的专业理论基础**，以此为出发点，才能进入**计算机控制、过程控制系统、控制系统数字仿真**等课程的学习阶段。故该课程是一门重要的**承前启后的理论基础课**，理论性强且与专业课有密切联系。

本课程需要较坚实的高等数学、工程数学（复变函数和积分变换等）、大学物理、电路等基础知识。

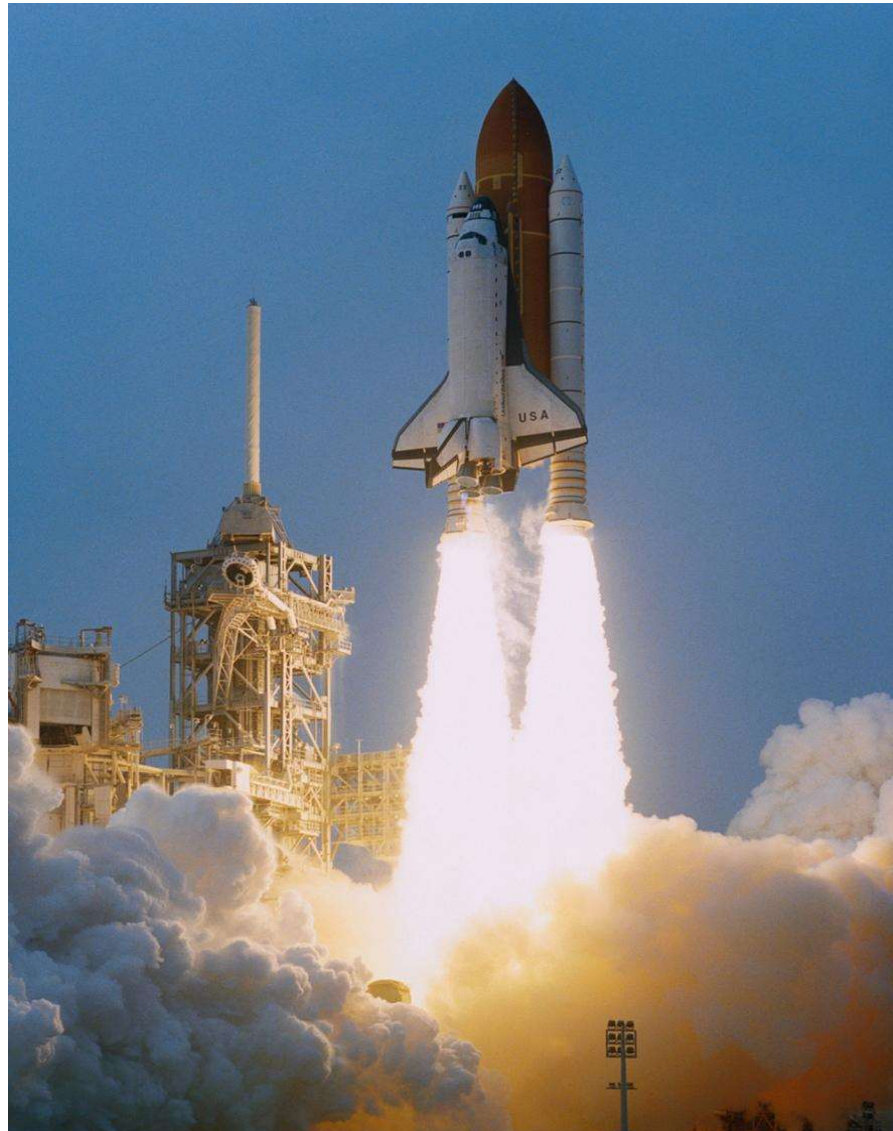
具体内容有系统数学模型的建立、时域分析、复频域分析、根轨迹分析、系统综合与校正、非线性系统分析和离散系统等。



控制科学在过去几十年中在技术进步中起了重要作用，它对解决当今社会的许多挑战性问题都产生了积极的影响。

尤其是在最近50年，控制工程帮助实现了太空旅行，发射了通讯卫星，辅助设计了更安全、更有效的飞机、汽车、火车、轮船，帮助开发了更清洁、更有效的化学工艺。







医  
用  
机  
器  
人



## 一、自动控制技术应用于军事、航天领域

- 火炮、雷达、跟踪系统
- 人造卫星
- 宇宙飞船(神州飞船)

## 二、自动控制技术应用于工业生产过程

- 轧钢过程
- 工业窑炉
- 石油化工
- 水泥建材
- 玻璃、造纸等

## 三、自动控制技术应用于现代农业生产

- 自动灌溉
- 农产品质量检测
- 疫情检测等

## 四、自动控制技术应用于其他领域

由于计算机等技术的诞生和飞速发展，使得控制技术水平不断提高，已扩大到经济与社会生活的各个领域，如通信、交通、医学、环境保护、经济管理等领域，控制技术已成为现代社会不可缺少的重要组成部分。

## 自动控制先进技术应用

智能制造

医疗器械

在科学和工程技术的发展过程中，自动控制技术起着重要的作用。除了在宇宙飞船、导弹发射和飞机驾驶等系统中，自动控制技术具有特别重要的作用之外，它在智能制造和医疗器械中也是不可缺少的重要组成部分。



控制原理是关于**控制系统建模、分析和综合**的一般理论，也可以看做是控制系统应用的**数学分支**。但它不同于数学，而是一门**技术科学**。一般情况下，人们认为控制原理经历了**经典控制原理、现代控制原理和智能控制原理**3个阶段。

20世纪40—50年代为“经典控制原理”发展时期。早期的控制系统分析建立在微分方程组知识基础上，其做法是将控制系统各部件的运动微分方程列写出来后，将它们联立求解，得出整个系统的运动规律。所以，系统分析是建立在时间域的基础上的。

随着自动化技术的发展，系统越来越复杂，微分方程的阶次也越来越高，直接用求解微分方程的方法就越不容易，于是人们采用拉普拉斯变换这一数学工具，将时间域问题变为频率域问题，也就是将微分方程问题变为代数方程来处理，并将整个系统分解为几种基本的典型环节，如放大环节、惯件环节、振荡环节等，再应用各种图解的方法(如伯德国、奈奎斯特图、根轨迹图等)来分析、设计系统的参数，这就是经典控制原理，它适用于线性、定常、单输入单输出系统。经典控制原理的基础是拉普拉斯变换，用传递函数与频率法来研究系统，研究的重点是系统的反馈控制。

# 控制理论发展概述

---

随着社会的进步, 现代工业、科学技术的迅猛发展, 对控制系统提出了更高的要求

- 更高的控制精度
- 更快的控制速度
- 更大的控制范围
- 更强的对环境和对象变化的适应能力
- 更广泛的应用领域

控制理论和技术如今已不再仅限于工业和军事国防领域, 而深入到农业、社会、经济等领域, 例如如经济控制论、计量历史学等相应地急需发展相适应的控制理论。

# 控制理论发展概述

---

控制理论的发展一般划分为三个时期

经典控制理论

(1930–1950)

现代控制理论

(20世纪50–70年代)

大系统理论、智能控制理论、复杂系统等

(20世纪60年代至今)

# 控制理论发展概述

---

第一个时期：

经典控制理论

(1930–1950)

# 控制理论发展概述

---

控制理论的发展历史可分为两个阶段

经典控制理论

现代控制理论

下面简单介绍这两个发展阶段的主要历程。

# 控制理论发展概述

---

- 1. 经典控制理论
  - 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:
    - 萌芽阶段
    - 起步阶段
    - 发展阶段
    - 标志阶段



# 控制理论发展概述

- 经典控制理论——萌芽阶段

- 早在古代, 劳动人民就凭借生产实践中积累的丰富经验和对反馈概念的直观认识, 发明了许多闪烁控制理论智慧火花的杰作。
- 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

➤ 例如, 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

公元前300年，古希腊的浮球调节装置——最早的反馈控制实例。

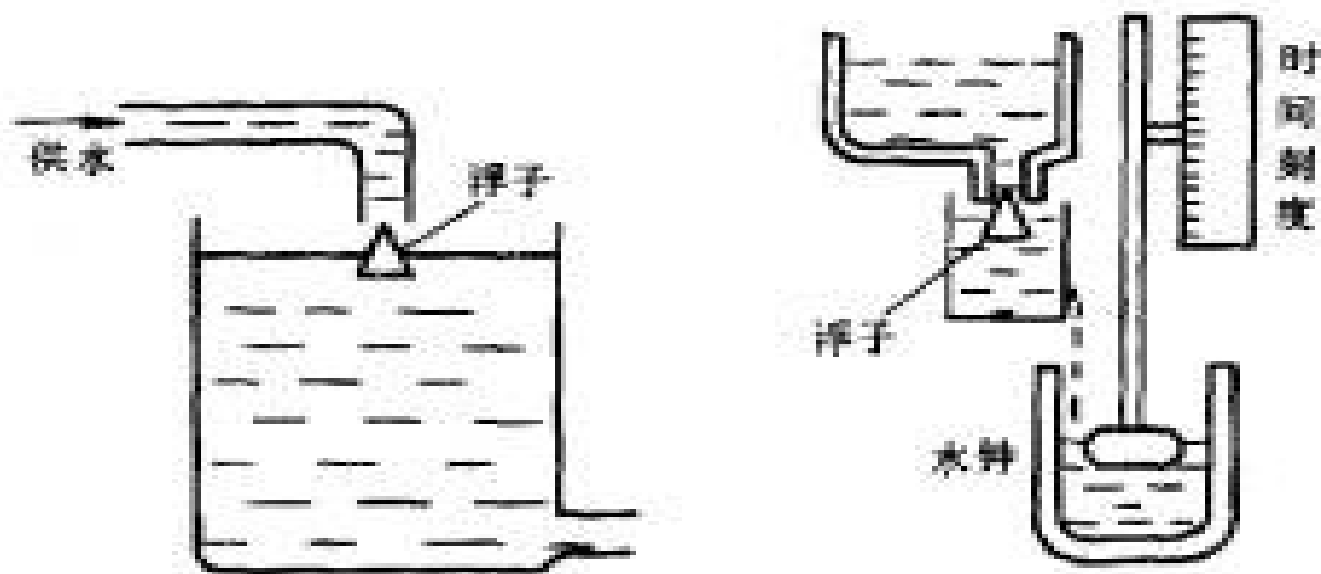


图 1-1 古代的液面和流量控制装置原理图

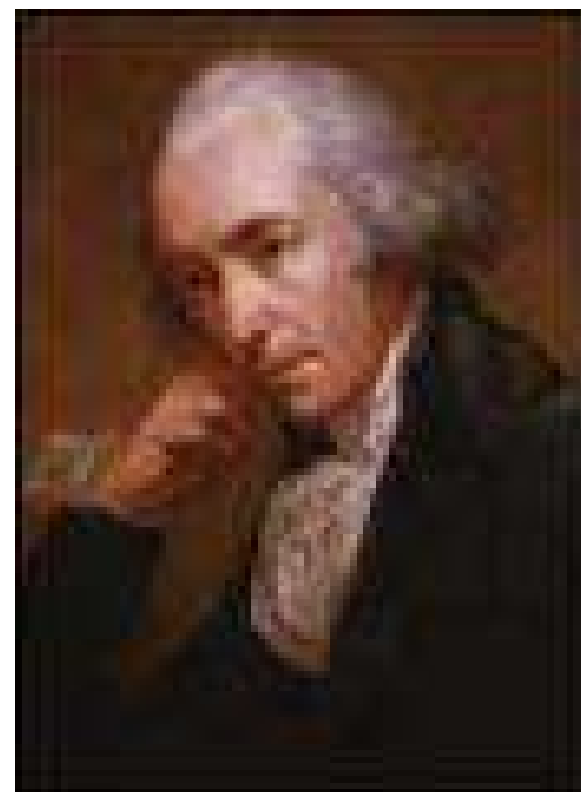
# 控制理论发展概述

---

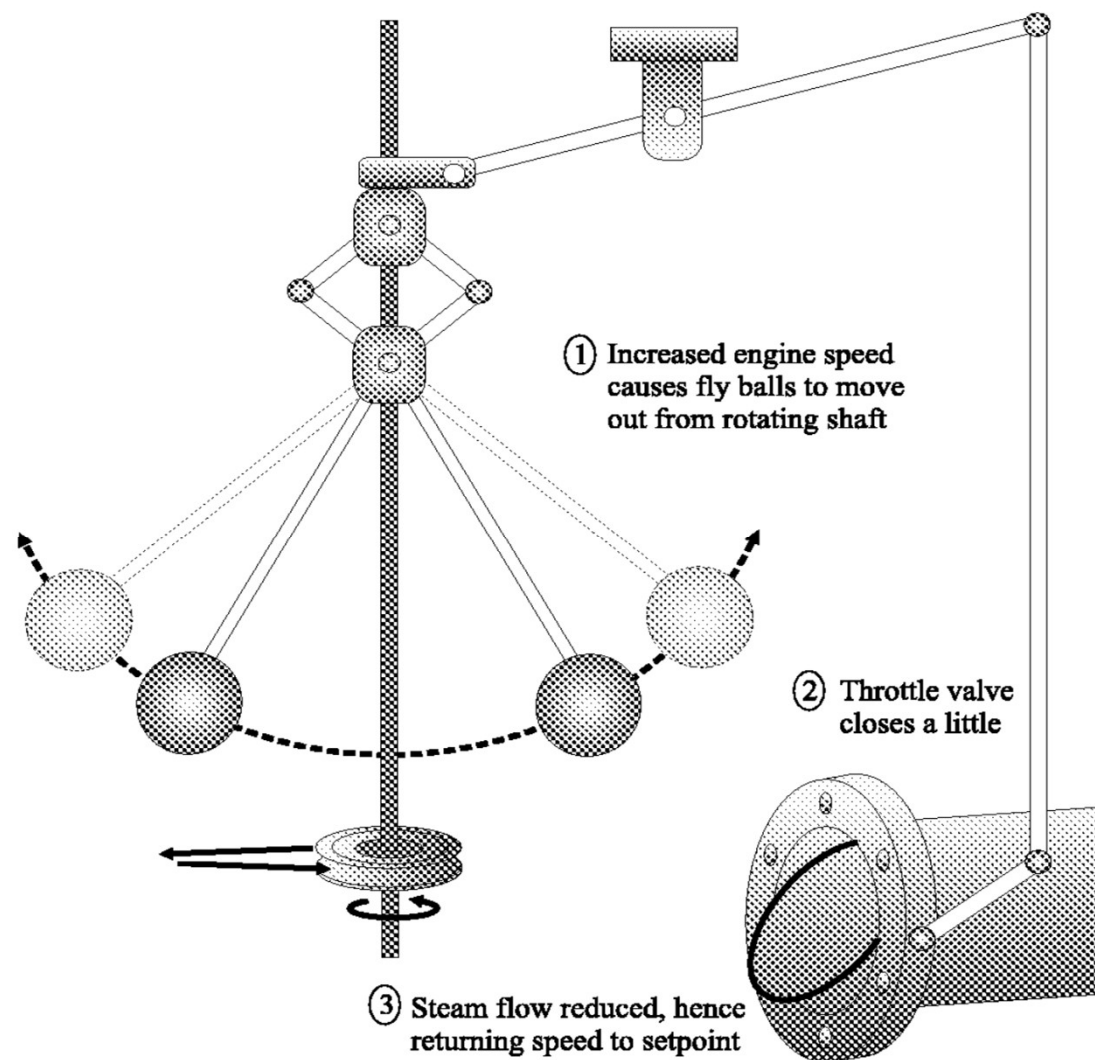
- 经典控制理论——起步阶段
- 随着科学技术与工业生产的发展, 到十七、十八世纪, 自动控制技术逐渐应用到现代工业中。
  - 1681年法国物理学家、发明家巴本 (D. Papin) 发明了用做安全调节装置的锅炉压力调节器;
  - 1765年俄国人普尔佐诺夫 (I. Polzunov) 发明了蒸汽锅炉水位调节器等;

# 控制理论发展概述

- 经典控制理论——起步阶段
- 1788年, 英国人瓦特(J. Watt)在他发明的蒸汽机上使用了离心调速器, 解决了蒸汽机的速度控制问题, 引起了人们对控制技术的重视。
- 以后人们曾经试图改善调速器的准确性, 却常常导致系统产生振荡。
- 自动控制技术的逐步应用, 加速了第一次工业革命的步伐。



瓦特



Watt's fly ball governor

# 控制理论发展概述

- 经典控制理论——发展阶段
- 实践中出现的问题, 促使科学家们从理论上进行探索研究
- 1868年, 英国物理学家麦克斯韦 (J. C. Maxwell) 通过对调速系统线性常微分方程的建立和分析, 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。
  - ✓ 提出了简单的稳定性代数判据。
  - ✓ 开辟了用数学方法研究控制系统的途径。



麦克斯韦

# 控制理论发展概述

- 经典控制理论——发展阶段
- 此后, 英国数学家劳斯 (E. J. Routh) 和德国数学家胡尔维茨 (A. Hurwitz) 把麦克斯韦的思想扩展到高阶微分方程描述的更复杂的系统中, 分别在1877年和1895年各自提出了直接根据代数方程的系数判别系统稳定性的准则两个著名的稳定性判据——**劳斯判据**和**胡尔维茨判据**

。



劳斯



胡尔维茨

## 控制理论发展概述

这些方法基本上满足了20世纪初期控制工程师的需要, 奠定了经典控制理论中时域分析法的基础。

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年美国物理学家**奈奎斯特** (H. Nyquist) 提出了频域内研究系统的**频率响应法**, 建立了以频率特性为基础的稳定性判据, 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



## 控制理论发展概述

---

随后, 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, 形成了经典控制理论的频域分析法。

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, 称为经典控制理论 (或称古典控制理论、自动控制理论), 为工程技术人员提供了一个设计反馈控制系统的有效工具。

# 控制理论发展概述

- 经典控制理论—— 标志阶段
- 1947年控制论的奠基人美国数学家维纳(N. Wiener)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

1948年,美国科学家伊万斯(W.R. Evans)创立了**根轨迹**分析方法,为分析系统性能随系统参数变化的规律性提供了有力工具,被广泛应用于反馈控制系统的分析、设计中。

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

以传递函数作为描述系统的数学模型,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,构成了经典控制理论的基本框架。

到20世纪50年代,经典控制理论发展到相当成熟的地步,形成了相对完整的理论体系,为指导当时的控制工程实践发挥了极大的作用。

## 经典控制理论主要研究线性定常系统

所谓线性控制系统是指系统中各组成环节或元件的状态或特性可以用线性微分方程描述的控制系统。

如果描述该线性系统的微分方程的系数是常数,则称为线性定常系统。

描述自动控制系统输入量、输出量和内部量之间关系的数学表达式称为系统的数学模型,它是分析和设计控制系统的基础。

## 经典控制理论主要研究线性定常系统

经典控制理论中广泛使用的频率法和根轨迹法,是建立在传递函数基础上的。

线性定常系统的传递函数是在**零初始条件下**系统输出量的拉普拉斯变换与输入量的拉普拉斯变换之比,是描述系统的频域模型。

## 经典控制理论—标志阶段(5/9)

经典控制理论主要用于解决反馈控制系统中控制器的分析与设计的问题。反馈控制系统的简化原理框图如图1-1所示

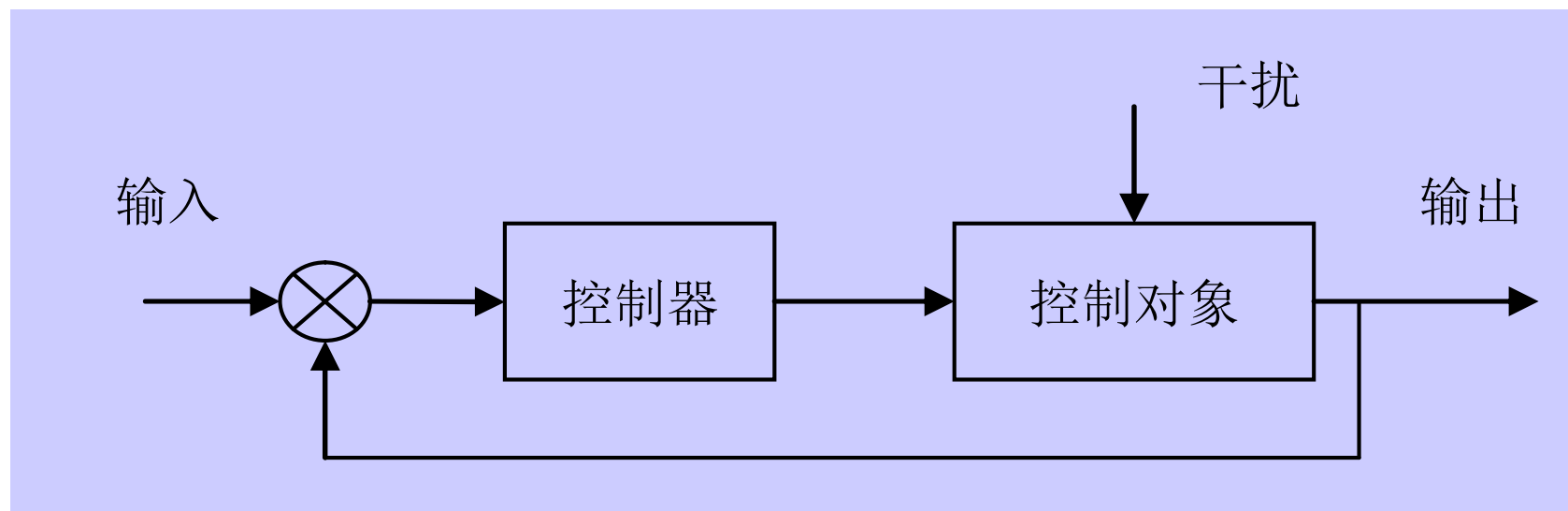


图1-1 反馈控制系统的简化原理框图

经典控制理论主要解决**单变量控制系统的分析与设计**，**研究的对象主要是线性定常系统**。它是以拉氏变换为数学工具，采用以传递函数、频率特性、根轨迹等为基础的经典频域方法研究系统。

**对于非线性系统**，除了线性化及渐近展开等计算外，主要采用相平面分析和谐波平衡法(即描述函数法)研究。



这一时期的主要代表人物除了奈奎斯特等人以外，还有美国的伯德 (H.W.Bode) 和埃文斯 (W.R.Evans) 。

1945年，伯德出版了《网络分析和反馈放大器设计》一书，提出了频率响应分析方法，即简便而实用的伯德图法。

1948年，埃文斯提出了直观简便的图解分析法，即根轨迹法，这一方法在控制工程上得到了广泛的应用。

**经典控制理论着重研究单机自动化**，较好地解决了单输入单输出 (SISO-Single Input Single Output) 系统的控制问题。

**主要数学工具**是微分方程、拉普拉斯变换和传递函数

**主要研究方法**是时域法、频域法和根轨迹法

**主要问题**是控制系统的快速性、稳定性及其精度

**“经典控制理论” 具有明显的局限性**

突出的是难以有效地应用于时变系统和多变量系统，也难以揭示系统更为深刻的特性。

## 经典控制理论虽然具有很大的实用价值,但也有着明显的局限性,主要表现在:

1.经典控制理论只适用于SISO线性定常系统,推广到多输入多输出(Multi-Input Multi-Output, MIMO)线性定常系统非常困难,对时变系统和非线性系统则更无能为力。

2.用经典控制理论设计控制系统一般根据幅值裕度、相位裕度、超调量、调节时间等频率域里讨论的指标来进行设计和分析。

这些指标并不直观易于接受,与我们通常所讨论的性能指标,如最快、最小能量等,难以建立直接对应关系;

## **经典控制理论虽然具有很大的实用价值,但也有着明显的局限性,主要表现在:**

3.经典控制理论在系统设计分析时无法考虑系统的初始条件,这对于高精度的位置、速度等控制系统设计难以达到要求。

4.经典控制理论在进行控制系统设计和综合时,需要丰富的经验进行试凑以及大量的手工计算。

**第二个时期：**

**现代控制理论**

**(20世纪50-70年代)**

## 1.1.2 现代控制理论

20世纪50年代中期,科学技术及生产力的发展,特别是空间技术的发展,迫切要求解决更复杂的多变量系统、非线性系统的最优控制问题(例如火箭和宇航器的导航、跟踪和着陆过程中的高精度、低消耗控制,到达目标的控制时间最小等)。

实践的需求推动了控制理论的进步,同时,计算机技术的发展也从计算手段上为控制理论的发展提供了条件,适合于描述航天器的运动规律,又便于计算机求解的状态空间模型成为主要的模型形式。

由于计算机技术、航空航天技术的迅速发展，控制理论有了**重大的突破和创新**。

它研究的对象不再局限于单变量的、线性的、定常的、连续的系统，而扩展为多变量的、非线性的、时变的、离散的系统。

现代控制理论以**线性代数**和**微分方程**为主要数学工具，以**状态空间法**为基础，分析和设计控制系统。

所谓**状态空间法**，本质上是一种时域分析方法，它不仅描述了系统的外部特性，而且揭示了系统的内部状态和性能。



现代控制理论分析和综合系统的目的是**在揭示系统内在规律的基础上，实现系统在某种意义上的最优化，同时，使控制系统的结构不再限于单纯的闭环形式。**

这个时期的主要代表人物有美国的**贝尔曼 (R. Bellman)**、原苏联的**庞特里亚金**和美籍匈牙利人**卡尔曼 (R.E.Kalman)** 等人。

俄国数学家李雅普诺夫1892年创立的稳定性理论被引入到现代控制中。



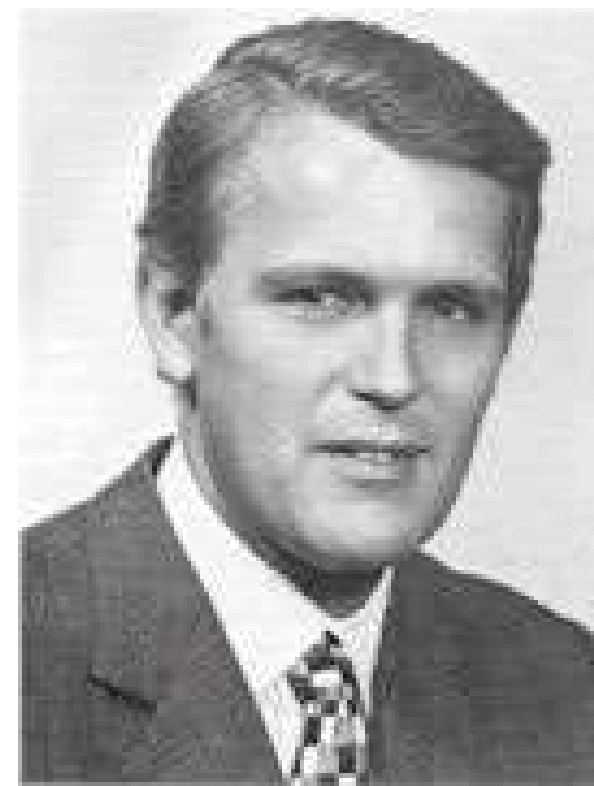
李雅普诺夫

1956年,美国数学家**贝尔曼(R. Bellman)**提出了离散多阶段决策的最优性原理,创立了动态规划。

之后,**贝尔曼**等人提出了状态分析法; 并于1964年将离散多阶段决策的动态规划法解决了连续动态系统的最优控制问题。

美国数学家卡尔曼(R. Kalman)等人于1959年提出了著名的卡尔曼滤波器,

1960年又在控制系统的研究中成功地应用了状态空间法,提出系统的能控性和能观测性问题。

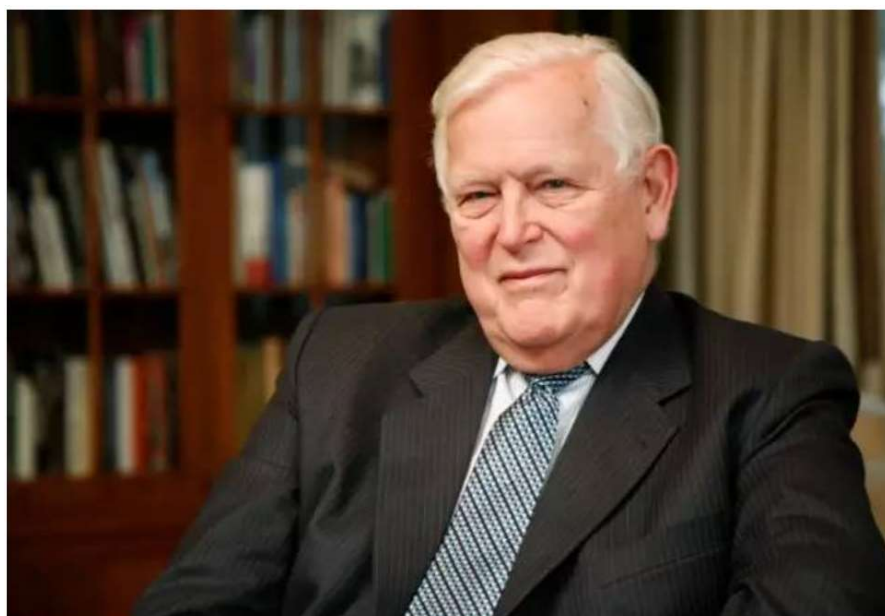


卡尔曼

- 利用时间域法容易给人以时间上的清晰性能指标,如最快、最小能量等,易于理解接受和优化设计;
- 易于考虑系统的初始条件,使得所设计的控制系统有更高的精度和更佳的性能品质指标;
- 易于用计算机进行系统分析计算和实现计算机控制,显示了所设计的控制系统的实现具有极大的可行性、优越性、先进性。

## 改变世界的伟人

### ---鲁道夫·卡尔曼



鲁道夫·卡尔曼

许多引发数字革命的发明家，像史蒂夫·乔布斯、比尔·盖茨、马克·扎克伯格，都对改变我们日常生活和社会的技术进步做出了巨大贡献，他们也理所应当地成为家喻户晓的大名人。

但是，有一位重要的发明家，如果不是专业的工程师，可能不会知道他的名字。他就是**鲁道夫·卡尔曼 (Rudolf Kálmán)**，一位出生于匈牙利的才华横溢的美国工程师和数学家。

鲁道夫·卡尔曼于60年前发明的**卡尔曼滤波算法**，仍然持续地对现代技术发生着重要影响。

改变世界的伟人

---鲁道夫·卡尔曼

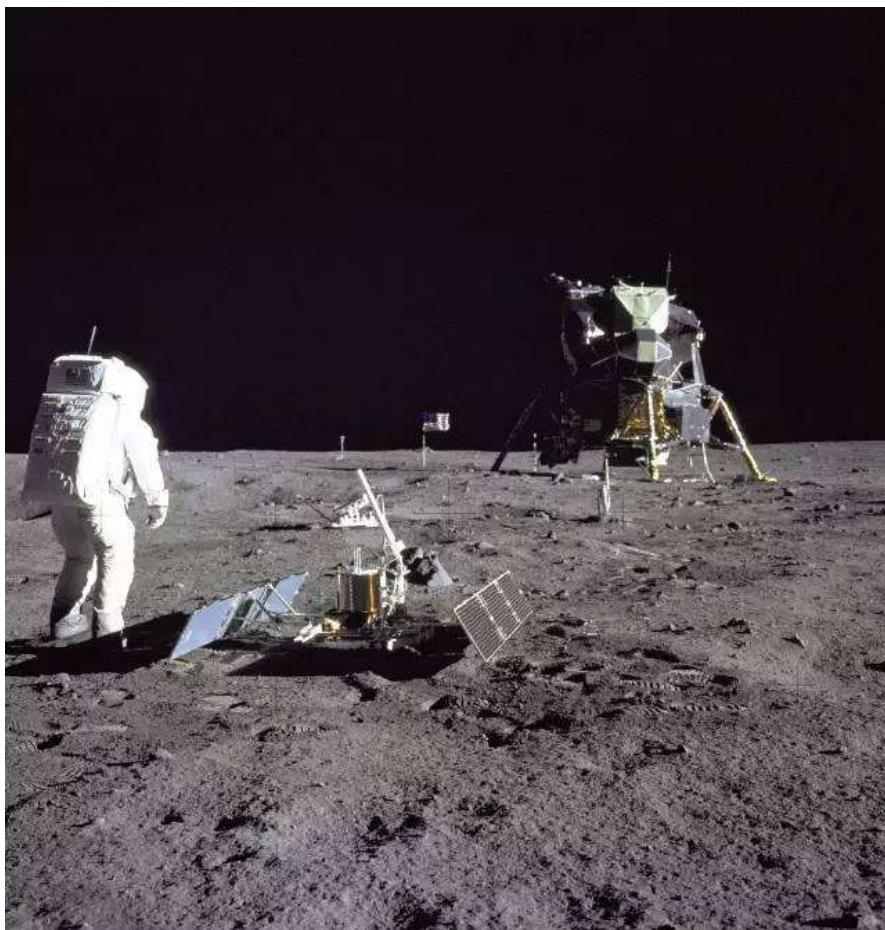
## 卡尔曼滤波算法 (The Kalman Filter Algorithm)

### 尖端科学领域应用

- 航空航天： 阿波罗号宇航员送上月球的航天计算机系统
- 机器人技术： 人类探索世界的触角伸向深海和外行星的机器人
- 机器人技术： 所有需要从噪声数据中估算现实世界状态的发明成果

有人甚至把包括环绕地球的卫星系统、卫星地面站及各类计算机系统在内的整个GPS系统，统称为一个巨大的**卡尔曼滤波器**。

## 改变世界的伟人



## ---鲁道夫·卡尔曼

- 以19世纪60年代设计阿波罗飞行控制计算机的工程师们面临的挑战为例。
- 当时，计算机从陀螺仪、加速度计和雷达等传感器获取的原始测量数据，充满了包括随机错误和难以处理误差在内的固有噪声。当宇宙飞船高速飞向月球的岩石表面时，这些错误可是致命的。
- 必须以某种方式从测量结果中过滤噪声，并尽可能对宇宙飞船所处的位置和运动速度做出精确估算。还必须知道这些估算在统计意义上的好坏程度，因为过于乐观的估算结果可能是灾难性的——在宇宙飞船飞向月球、尝试登月或重返地球大气层时穿越狭窄入口通道的旅途中，所有这些都必须在几分之一秒内完成！



## 改变世界的伟人

---鲁道夫·卡尔曼

尽管在大众中寂寂无名，卡尔曼在其专业领域中却广为人知并备受赞赏，曾获得无数的奖项和荣誉，其中包括2009年由奥巴马总统授予的美国国家科学奖章

控制工程师都知道，我们只能控制我们能测量的东西，而且测量得越精确，控制得越好。



卡尔曼获奖

## □ 经典控制理论和现代控制理论的发展和主要特点可总结如下:

### ➤ 经典控制理论

- 19世纪末~1940年代
- 起源于: 伺服机械的调节/控制设计方法  
数学界的常微分方程稳定性理论  
基于Fourier变换的频率域分析设计
- 经典文献: 钱学森的《工程控制论》
- 主要特征: 频率域分析设计

## ➤ 现代控制理论

- 1950年代~至今
- 起源于: (美国)卡尔曼线性系统结构性理论和最优滤波理论  
(前苏联)庞特里亚金的极大值原理  
(美国)贝尔曼的动态规划理论
- 主要特征: 现代时间域分析设计

# 经典控制理论(频域法) vs 现代控制理论(时域法)

58

	经典(频域法)	现代(时域法)
理论基础	建立在以 <ol style="list-style-type: none"><li>1. 常微分方程稳定性理论</li><li>2. Fourier变换</li></ol> 为基础的根轨迹和奈奎斯特判据理论之上	<ol style="list-style-type: none"><li>1. 常微分方程稳定性理论</li><li>2. 状态空间分析</li><li>3. 泛函分析、微分几何等现代数学分支</li></ol>
数学模型	传递函数 (研究系统外部特性,属于外部描述,不完全描述。)	状态空间表达式 (深入系统内部,是内部描述,完全描述。)
适用对象	仅适用于: 单输入单输出 线性 定常 集中参数	可推广至: 多输入多输出 非线性 时变 分布参数

# 经典控制理论 vs 现代控制理论(续)

	经典	现代
性能指标	<p>幅值裕度、相位裕度、超调量、调节时间、阻尼比等频域指标;</p> <p>性能指标不直观,难于接受</p> <p>满足单个性能指标为目的,无法设计出最优、综合性的系统;</p>	<p>时间最短、能量最少、综合性能指标最优等时间域指标</p> <p>性能指标直观,易于接受</p> <p>可以达到性能指标最优、多个性能指标综合最优</p>
初始条件处理	<p>初始条件处理困难</p> <p>对高精度的位置、速度等性能指标难于达到要求</p>	<p>易于处理初始条件</p> <p>更易达到高精度的位置、速度等性能指标</p>

# 经典控制理论 vs 现代控制理论(续)

60

	经典	现代
设计与综合	<p>是分析方法而不是最佳的综合方法</p> <p>针对某个性能指标,设计方案多样</p> <p>分析与设计需要丰富的经验及试凑</p> <p>设计和实时控制难于计算机实现</p>	<p>是分析综合方法</p> <p>分析与设计多为解析和优化计算</p> <p>设计和实时控制易于计算机实现</p>

# 经典控制理论与现代控制理论的关系

---

- 并不是截然对立
- 相辅相成、互为补充
- 两者各自的长处和不足分别为:

- 现代控制理论对描述系统动态特性的数学模型要求较高,需要用到更多的数学知识,利于计算机实现,在控制系统的设计与实现时对控制设备和系统所处的环境要求也高一些。
- 经典控制理论对数学模型和数学方法的要求相对较低,更依赖于控制领域设计和应用的经验。

# 自动控制系统的组成、分类和发展

---

## 控制理论的发展：（工业控制理论）

### 1 经典控制理论

40~50年代形成 SISO系统

基于：二战军工技术

目标：反馈控制系统的镇定

基本方法：传递函数，频率法，PID调节器 (频域)

### 2 现代控制理论

60~70年代形成 MIMO系统

基于：冷战时期空间技术，计算机技术

目标：最优控制

基本方法：状态方程 (时域)



## 3 智能控制技术

90年代开始发展

专家系统

模糊控制

神经网络

## 4 正在发展的各个领域

自适应控制

大系统理论

$H_\infty$ 鲁棒控制

非线性控制（微分几何，混沌，变结构）

□ 1.1 引言

□ 1.2 控制系统的一般概念

□ 1.3 控制系统的性能指标

## 1. 自动控制技术及其应用

在现代科学技术的众多领域中，自动控制技术起着越来越重要的作用。所谓**自动控制**，就是在**没有人**直接参与的情况下，**利用外加**的设备或**装置**（控制装置），**使**机器、设备或生产过程（**控制对象**）的**某个工作状态或参数**（被控量）**自动地按照**预定的**规律运行**。如数控机床按预定程序自动切削，人造卫星准确进入预定轨道并回收等。

# 工厂自动化系统



工厂自动化:指自动完成产品制造的全部或部分加工过程的性质,整个工厂实现综合自动化,包括设计制造加工等过程的自动化,企业内部管理、市场信息处理以及企业间信息联系等信息流的全面自动化;它的常规组成方式是将各种加工自动化设备和柔性生产线(FML)连接起来,配合计算机辅助设计(CAD)和计算机辅助制造(CAM)系统,在中央计算机统一管理下协调工作,使整个工厂生产实现综合自动化。

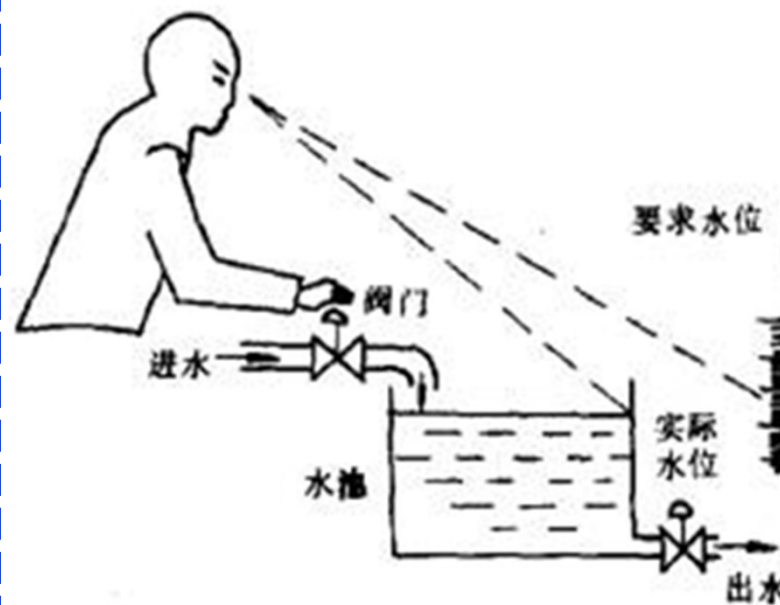
## 自动控制的概念

水箱水位的**手动控制**:

观测实际水位，将实际水位与要求的水位值比较，得出两者偏差

根据偏差的大小和方向调节进水阀门的开度，即当实际水位**高于**要求值时，**关小**进水阀门开度，否则**加大**阀门开度以改变进水量。

改变水箱水位，使之与要求值保持一致



# 一、自动控制

78

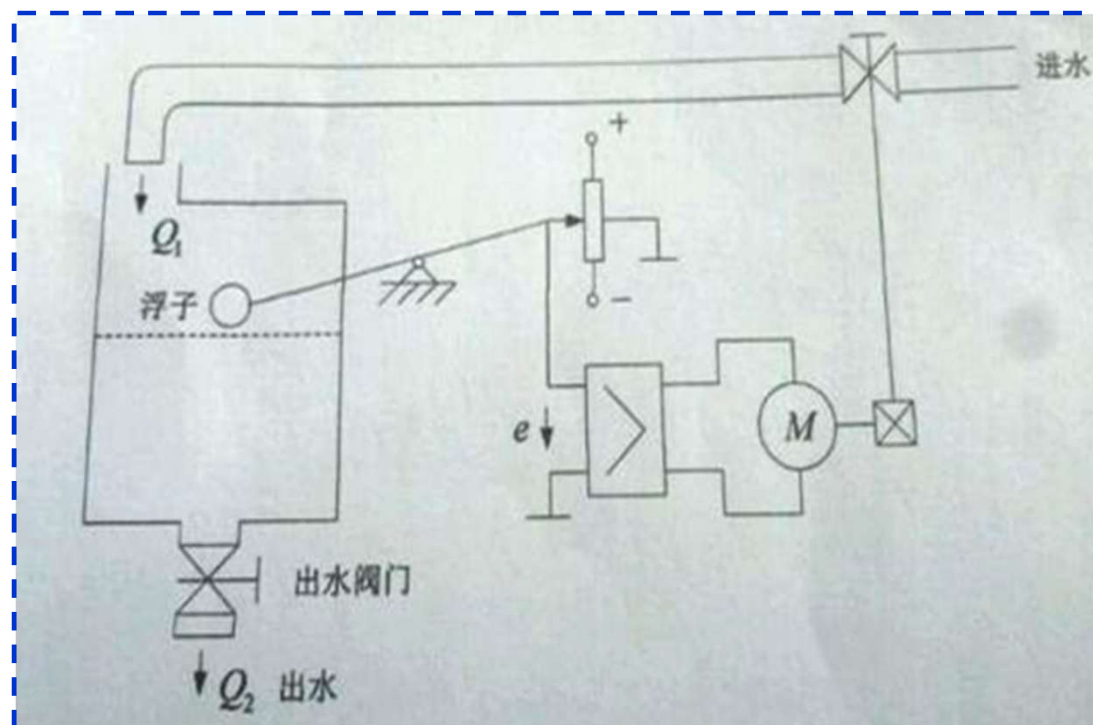
**自动控制**是在人不直接参与的情况下，利用外加设备或装置（称为**自动控制装置**）使被控对象（如机器、设备、生产过程等）**自动**地按照预定的规律运行，使被控对象的一个或多个物理参数（如温度、流量成分等）能够自动地在一定的精度范围内，按照给定的规律变化。

**浮子**：测量作用

**连杆**：比较作用

**放大器、伺服电动机和减速器**：  
调节作用

**阀门**：执行元件作用



- 当实际水位低于要求水位时，电位器输出电压值为**正**，且其大小反映了实际水位与水位要求值的差值。

- 放大器输出信号将有**正**的变化，电动机带动减速器使阀门开度增加，直到实际水位重新与水位要求值相等时为止。

- **水位自动控制的目的是：**

使偏差消除或减小，使实际水位达到要求的水位值。

■ 为达到某一目的，由相互制约、相互联系的各个部件按照一定规律构成且具有独立功能的整体称为**系统**。

**自动控制系统**是由被控对象和自动控制装置按照一定方式连接起来，能完成一定自动控制任务的总体。



## 二、自动控制系统

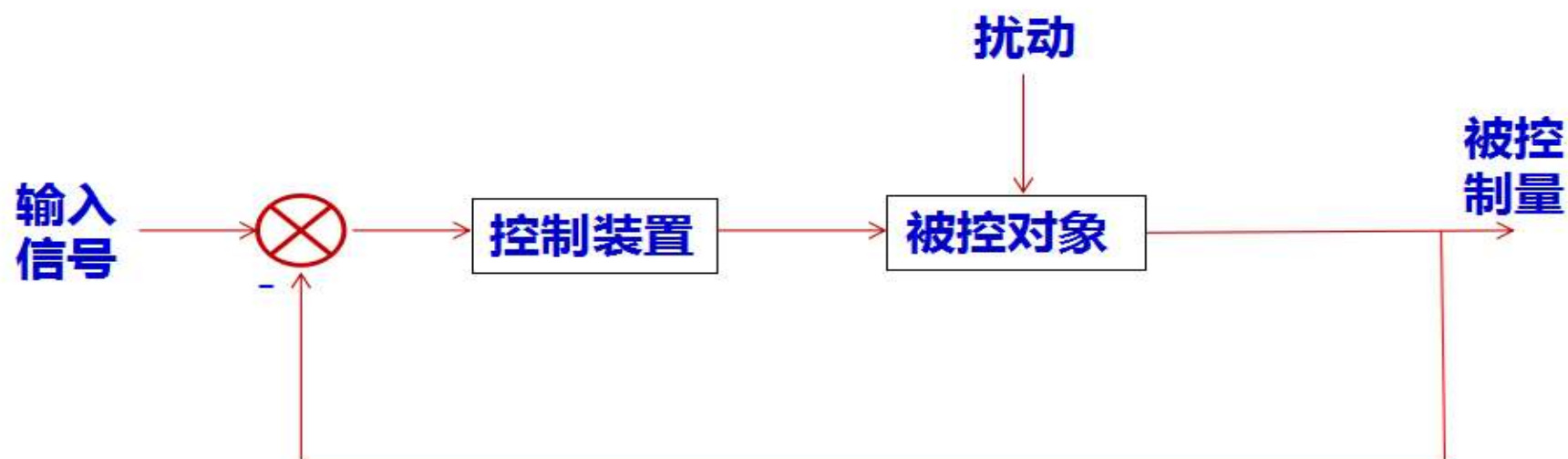
81

### ■ 输入量分类：

**给定输入（或称参考输入、希望值等）：**指对系统输出量的要求值

□ **扰动输入：**指对系统输出量有不利影响的输入量

■ 自动控制系统的被控制量称为**系统输出量**



## 二、自动控制系统

---

### 自动控制：

是指在没有人直接参与的情况下，利用控制装置使被控对象（如机器、设备或生产过程）的一个或数个物理量（**如电压、电流、速度、位置、温度、流量、化学成分等**）自动的按照预定的规律运行（或变化）。

### 自动控制系统：

是指能够对被控对象的工作状态进行**自动控制**的系统。它一般由控制装置和被控对象组成。

**被控制对象** 是指那些要求实现自动控制的机器、设备或生产过程

**控制装置** 是指对被控对象起**控制作用**的设备总体。

## 二、自动控制系统

---

- **自动控制系统**的功能和组成是多种多样的，其结构有简单也有复杂。
- 它可以只控制一个**物理量**，也可以控制多个物理量甚至一个企业机构的全部生产和管理过程；
- 它可以是一个**具体**的工程系统，也可以是比较**抽象**的社会系统、生态系统或经济系统。

- (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) 只讨论**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。

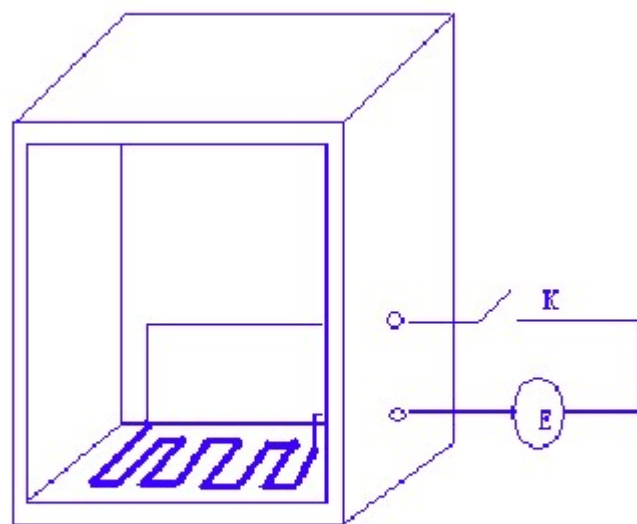
- **反馈控制**是一种最基本最重要的控制方式，引入反馈信号后，系统对来自内部和外部干扰的响应变得十分迟钝，从而提高了系统的**抗干扰能力**和**控制精度**。
- 但是，反馈作用又带来了**系统稳定性问题**，也推动了自动控制理论的发展与完善。
- 因此从某种意义上讲，古典控制理论是伴随着**反馈控制技术**的产生和发展而逐渐完善和成熟起来的。

## 1. 开环控制与闭环控制

### 开环控制：

是指系统的被控制量（**输出量**）只受控于控制作用，而对控制作用不能反施任何影响的控制方式。

- 采用开环控制的系统称为**开环控制系统**。例如：[图1-2 电加热炉](#)



电加热炉

被控制对象：炉子

被控制量（输出量）：炉温

控制装置：开关K和电热丝，对被控制量起控制作用。

图1—2



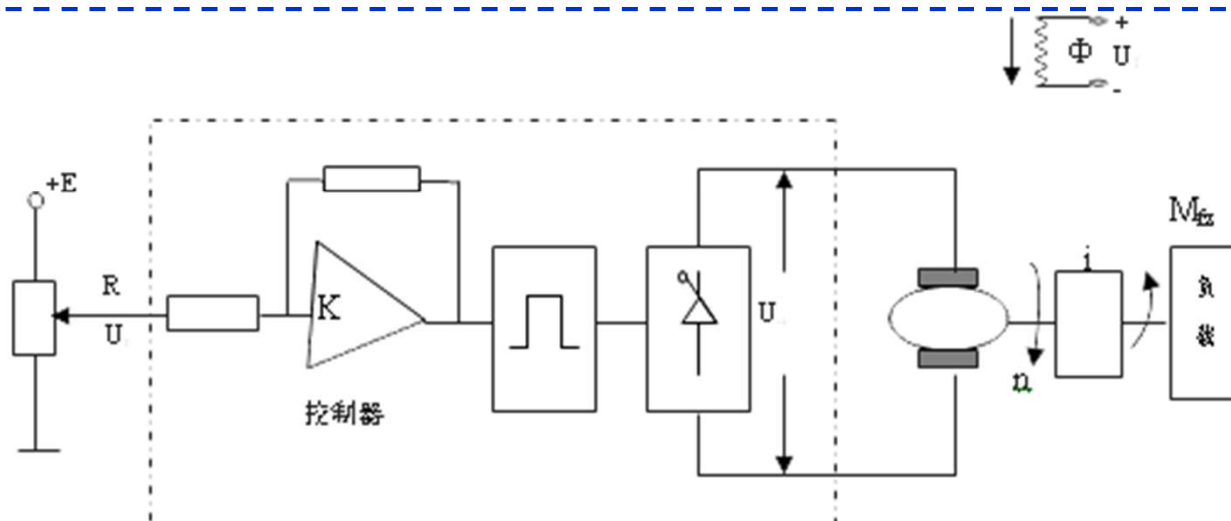
## 开环控制的特点

---

- 由于开环控制的特点是控制装置只按照给定的输入信号对被控制量进行**单向控制**，而不对控制量进行测量并反向影响控制作用。这样，当炉温偏离希望值时，开关K的接通或断开时间不会相应改变。
- 因此，开环控制不具有修正由于扰动（**使被控制量偏离希望值的因素**）而出现的被控制量与希望值之间偏差的能力，即**抗干扰能力差**。

■ 给定电压 $u_g$ 经放大后产生电枢电压 $u_a$ ，当电动机励磁电压恒定时，改变 $u_a$ 可得到不同的转速 $n$ 。 $n$ 与 $u_a$ 具有一一对应的关系。例如当 $u=u_{a1}$ 时， $n=n_1$ ；该系统的信号通路不闭合，所以是开环系统。

□ 当有扰动引起转速变化时，无法克服扰动造成的影响，因此 $u_a$ 与 $n$ 之间的对应关系是不准确的。要进行补偿就必须借助人工改变输入电压 $u_a$ 。



# 方框图的有关概念



- **方框** 控制装置和被控对象分别用方框表示
- **信号线** 方框的输入和输出以及它们之间的联接用带箭头的信号线表示
- **输入信号** 进入方框的信号
- **输出信号** 离开方框的信号

■ 控制系统的输出量就是被控量,它的希望值一般是系统输入信号的函数。

# 开环控制系统方框图

---

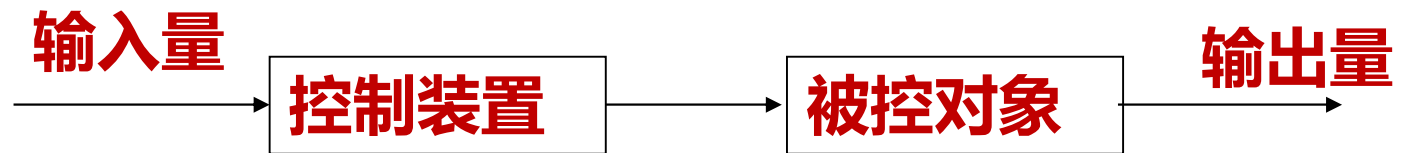


图1 - 3

**闭环控制**是指系统的被控制量（**输出量**）与控制作用之间存在着负反馈的控制方式。采用闭环控制的系统称为**闭环控制系统**或**反馈控制系统**。

□ 闭环控制是一切生物控制自身运动的基本规律。人本身就是一个具有高度复杂控制能力的**闭环系统**。

## 系统方框图：

为了清楚地表示控制系统的组成及各组成部分之间信号的传输关系，画出的控制系统元件作用图称为**系统方框图**。共有四种图例：

- 装置用方框表示
- 信号用带箭号的线段表示
- 信号引出点
- 信号相加点（比较点）

**自动控制系统**由两大组成部分，即被控对象和自动控制装置（有时也称为控制器）

**自动控制装置**又可分为下列几个部分：

- (1) **测量元件（或测量装置）**。用于测量被控量的实际值或对被控量进行物理量变换的装置。
- (2) **比较元件（或比较器）**。它将被控量的实际值（常取负号）与被控量的要求值（常取正号）相比较，得到偏差的大小和符号。
- (3) **调节元件**。通常包括放大器和校正装置。它可将偏差信号放大，并使输出控制信号与偏差信号之间具有一定的数值运算关系（也称为调节规律或控制算法）。
- (4) **执行元件**。接受调节元件的输出控制信号，产生具体的控制效果，使被控制量产生预期的改变。

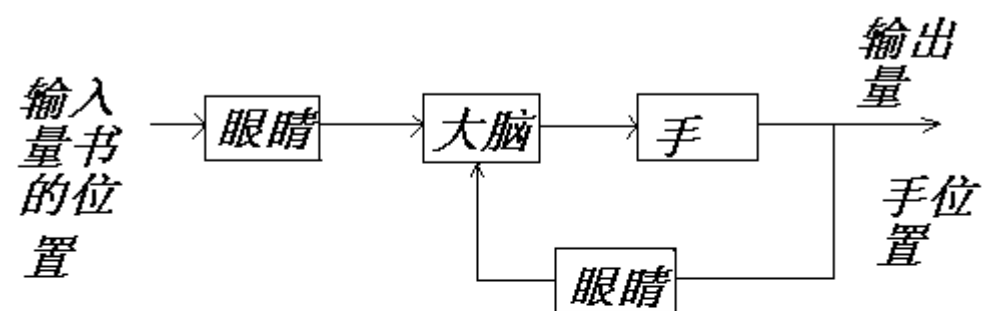


图1-4



**反馈**：把**输出量送回**到系统的**输入端**并与输入信号**比较**的过程。若反馈信号是与输入信号相减而使偏差值越来越小，则称为**负反馈**；反之，则称为**正反馈**。显然，负反馈控制是一个利用偏差进行控制并最后消除偏差的过程，又称**偏差控制**。同时，由于有反馈的存在，整个控制过程是闭合的，故也称为**闭环控制**。

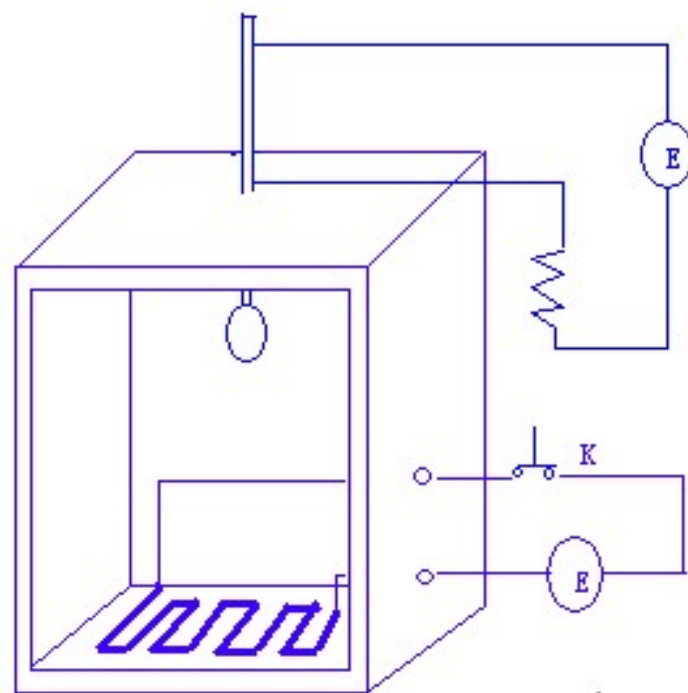


图1-5 电加热炉闭环控制

# 闭环控制的电加热炉方框图

99

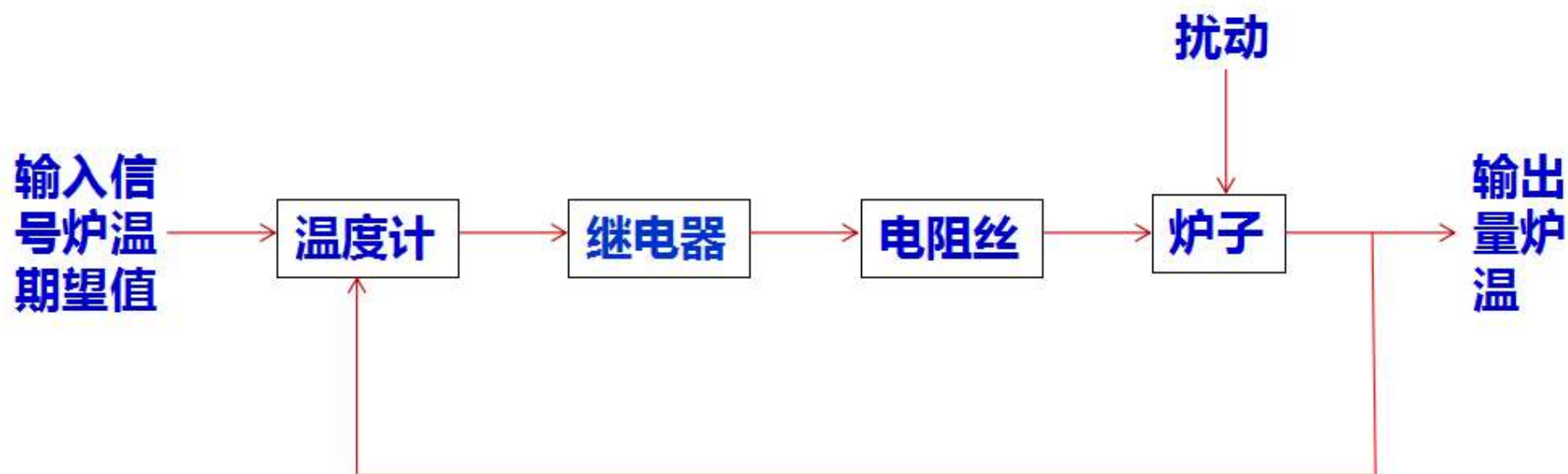
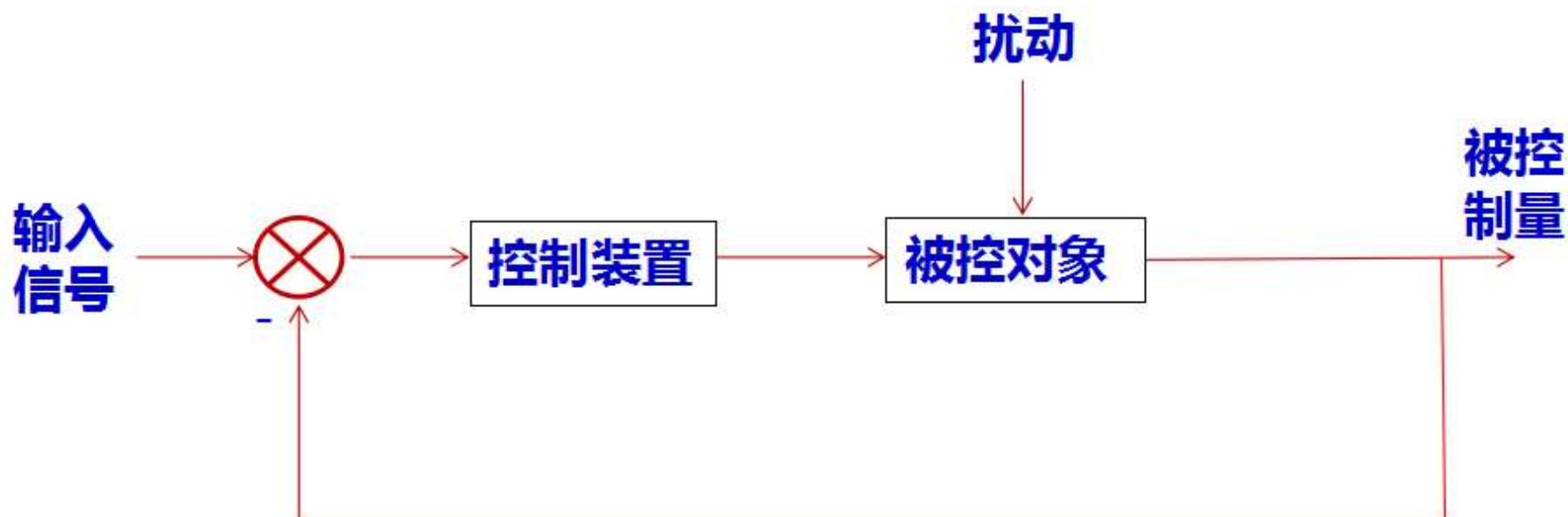


图1-6



**只有按负反馈原理组成的闭环系统才能实现自动控制的任务。**

图1-7

# 开环控制直流电动机速度调节系统示意图

101

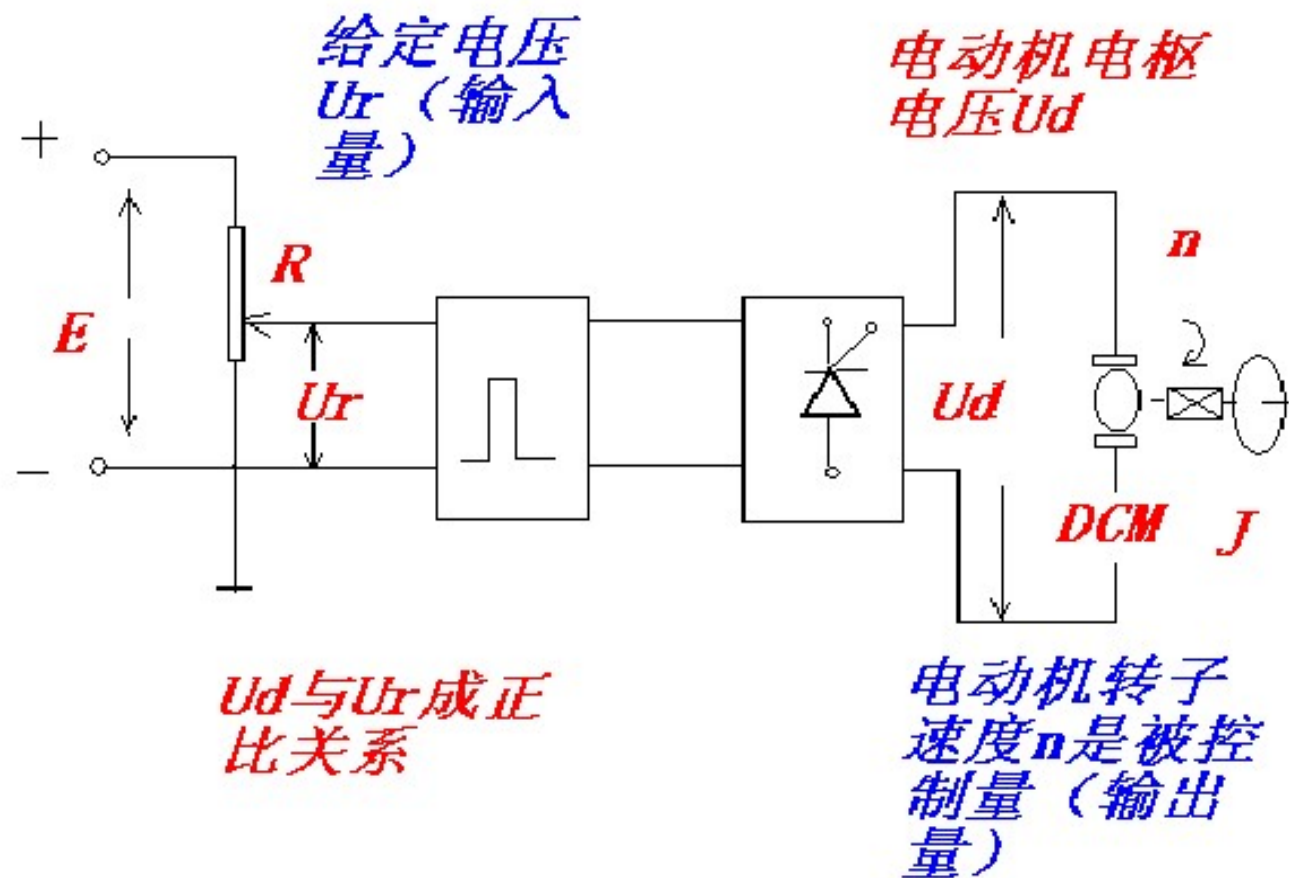


图1-8

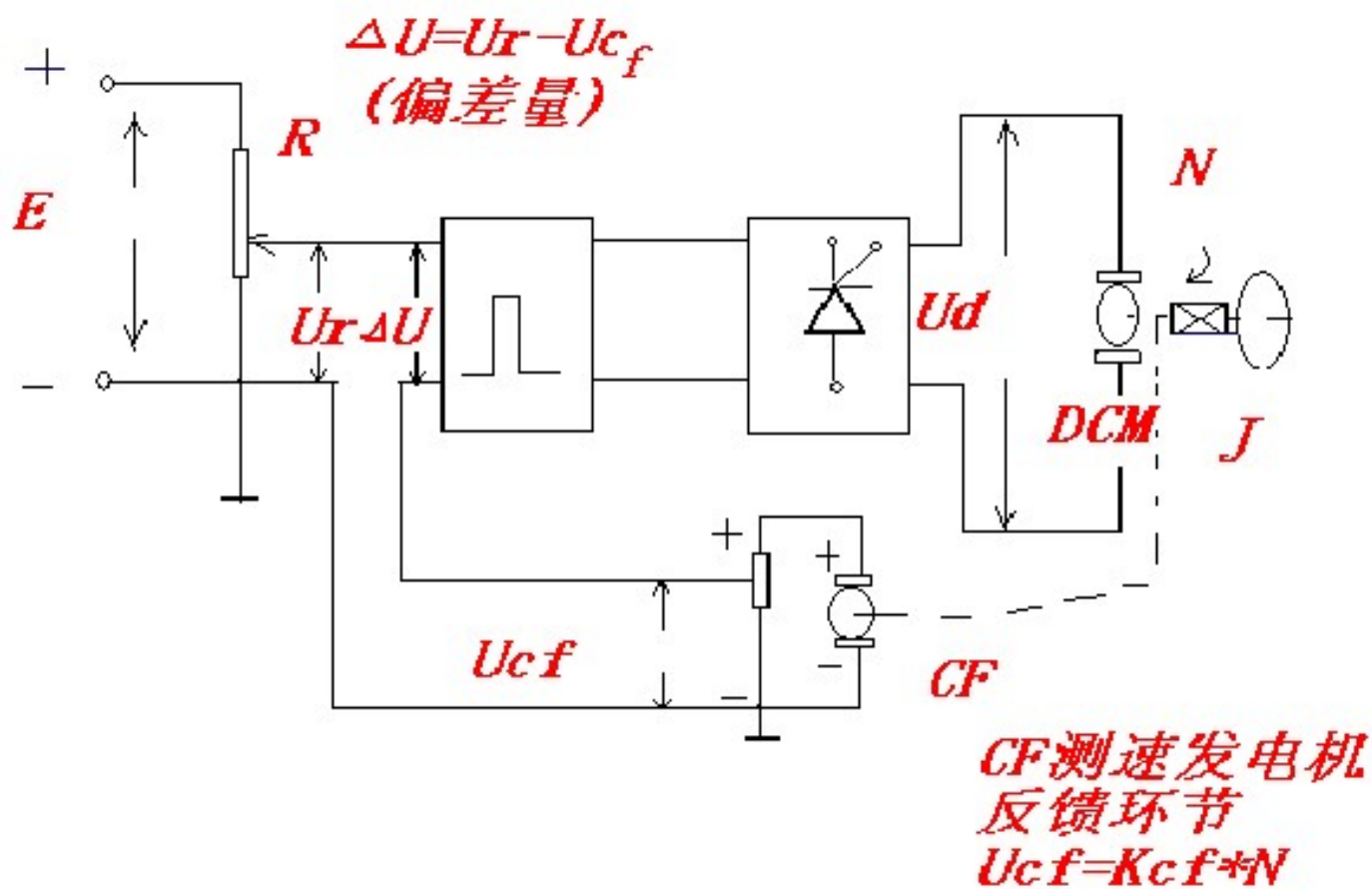
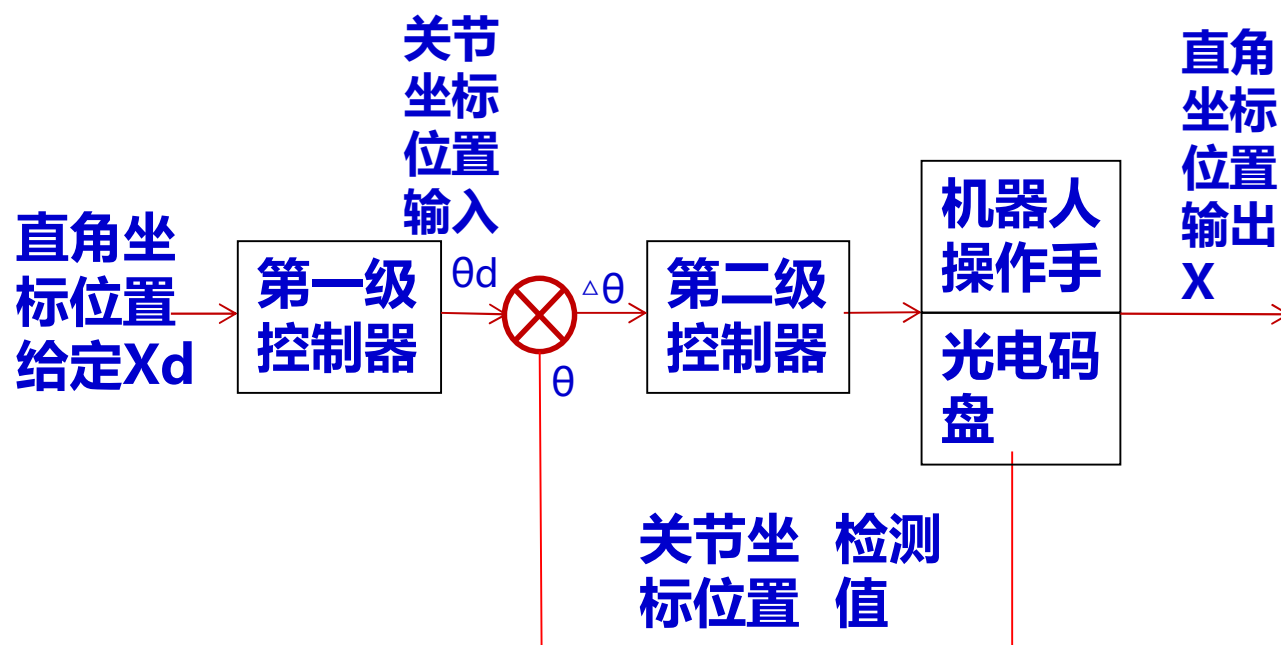


图1-9

**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；同时负反馈对系统稳定性产生不利影响。

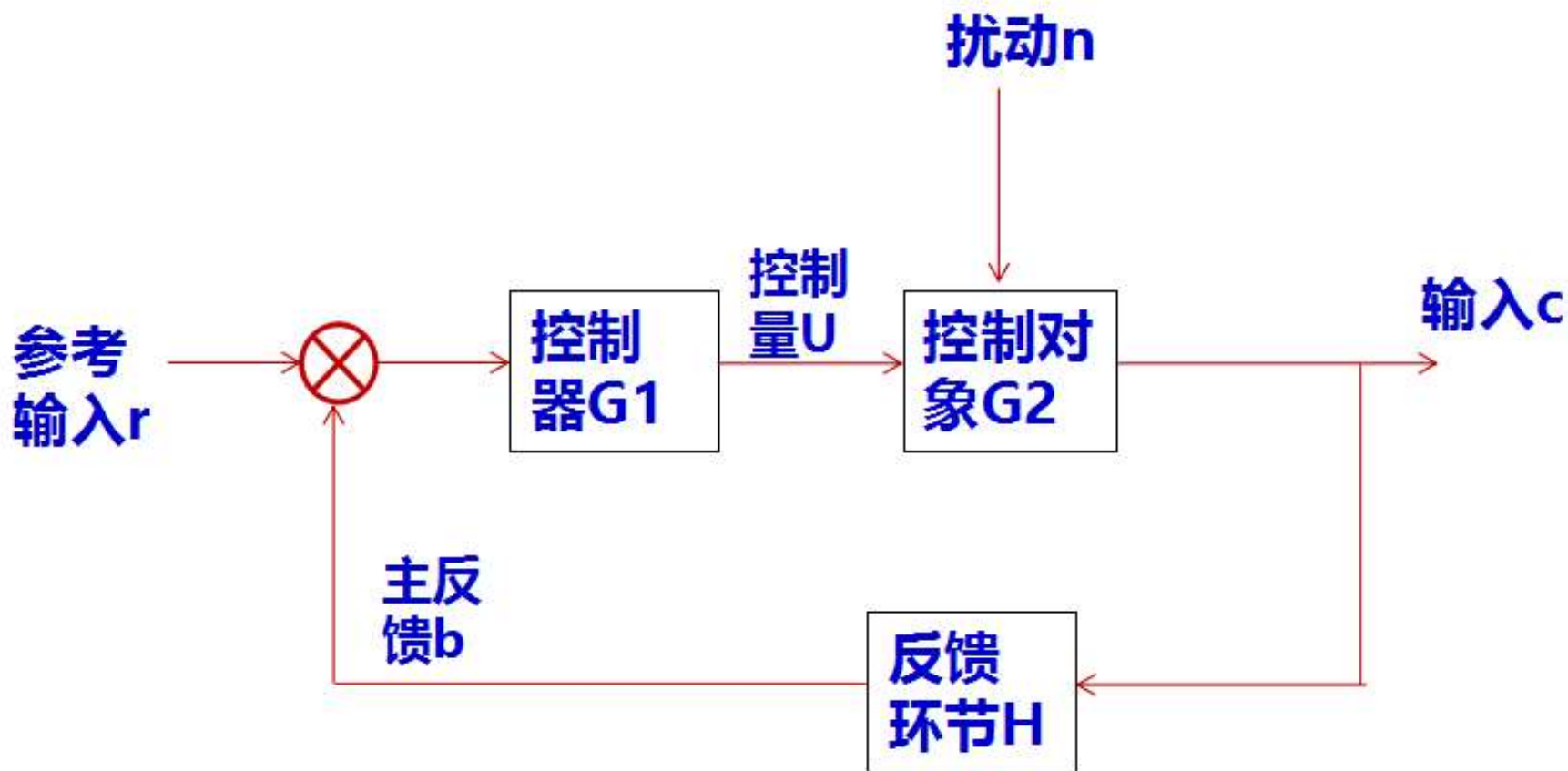
- 第一级直角坐标位置控制（开环）
- 第二级关节坐标位置控制（闭环）



工业机器人系统控制框图

图1-10





反馈控制系统框图

图1-11

**参考输入 $r$ :** 输入到控制系统中的指令信号;

**主反馈 $b$ :** 与输出成正比或某种函数关系且与参考输入量纲相同的反馈信号;

**偏差 $e$ :** 参考输入与主反馈之差, 即 $e=r-b$ ;

**控制量 $u$ :** 从控制器输出并作用于被控制对象的信号;

**扰动 $n$ :** 来自系统内部或外部, 对系统输出产生不利影响的信号。

**输出 $c$ :** 反馈控制系统的被控制量, 即被控制对象的输出量;

**比较环节:** 将参考输入与主反馈信号进行比较的环节, 它的输出等于参考输入与主反馈信号的差值, 即偏差 $e$ , 比较环节又称为偏差检测器;

**控制对象:** 被控制的机器, 设备, 过程或系统;

**控制器:** 用来对被控制对象施加控制作用的装置; 反馈环节: 将输出量转化为主反馈信号的装置; 反馈环节中通常含有信号检测装置。

## (一)恒温箱控制系统

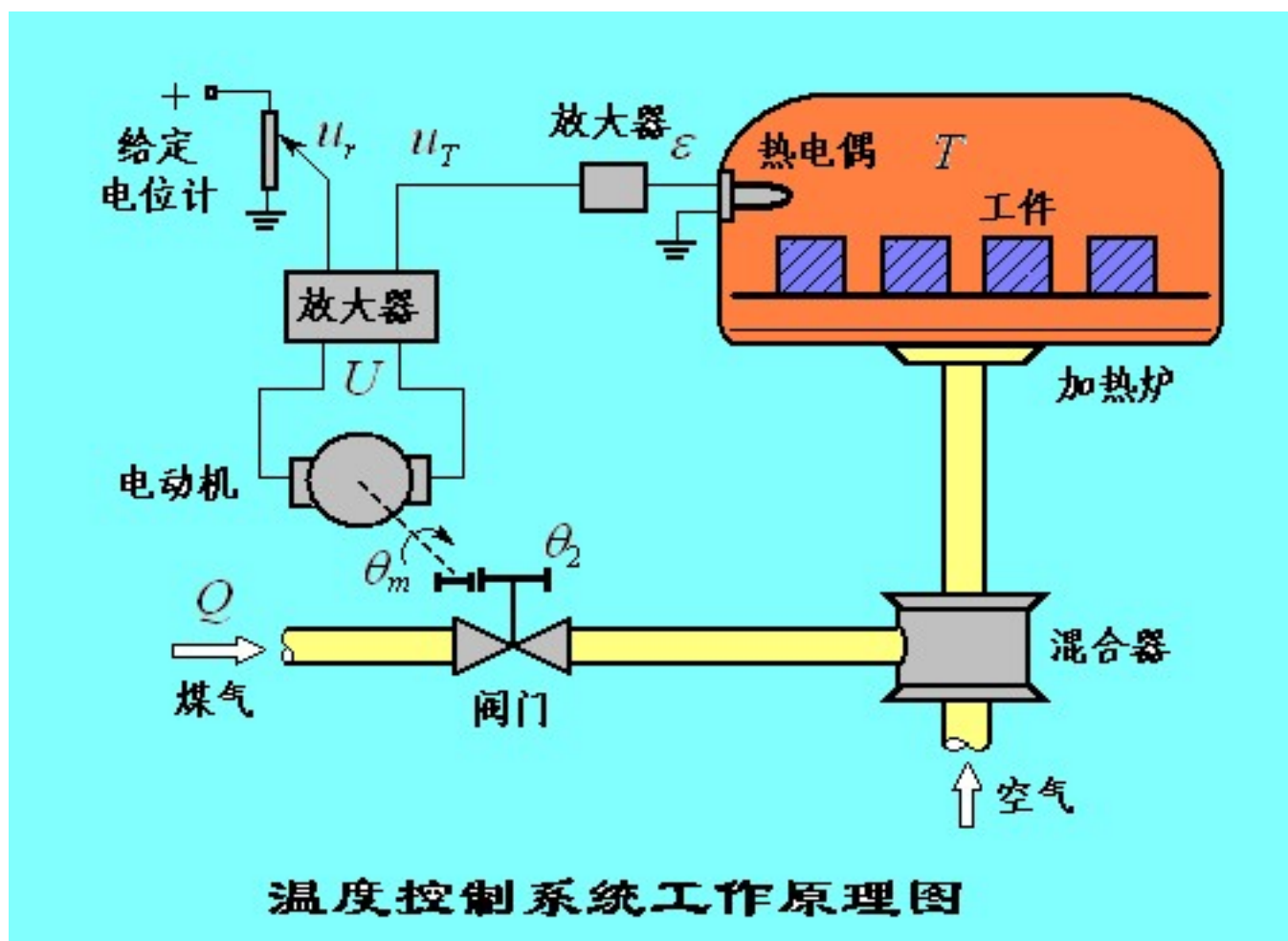
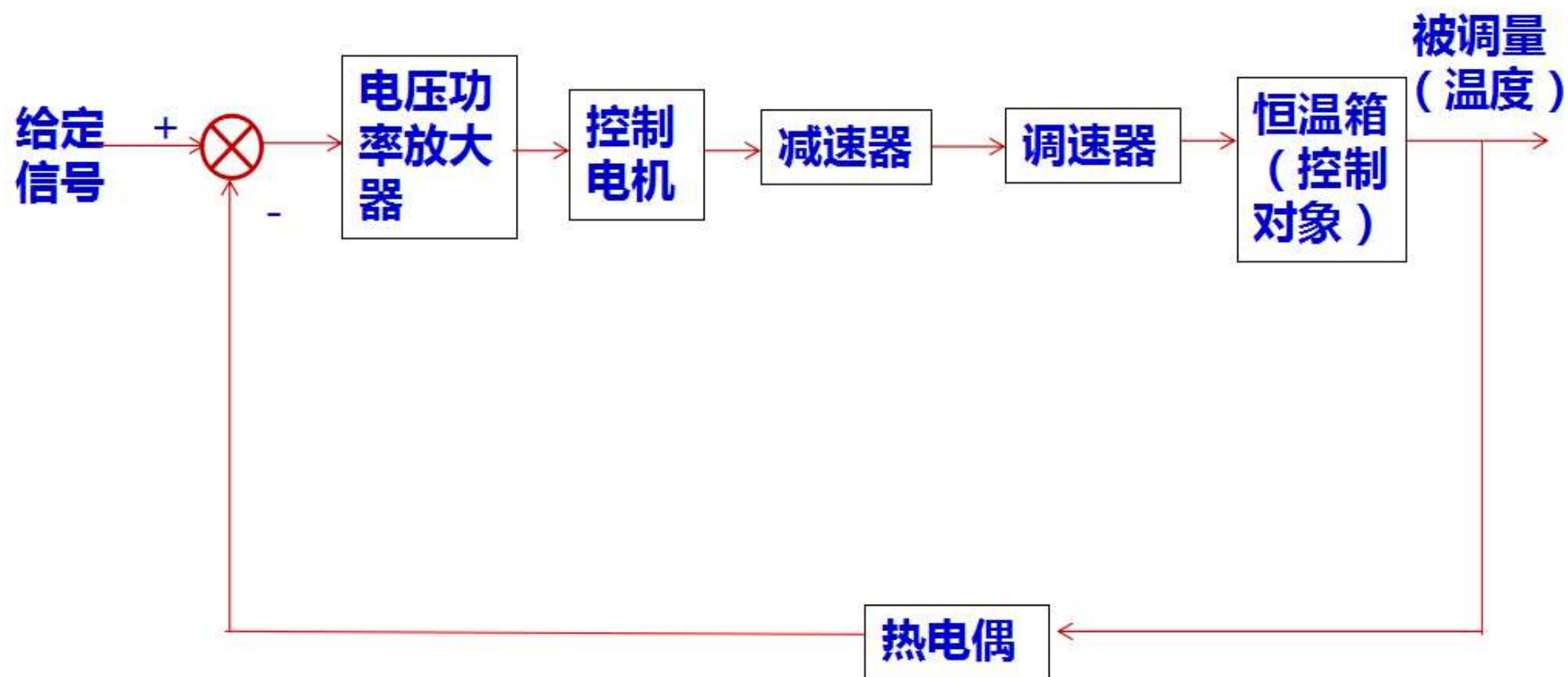


图1-12

## (一)恒温箱控制系统



恒温箱控制系统框图

图1-13

## (二)机床工作台位置控制系统

控制作用

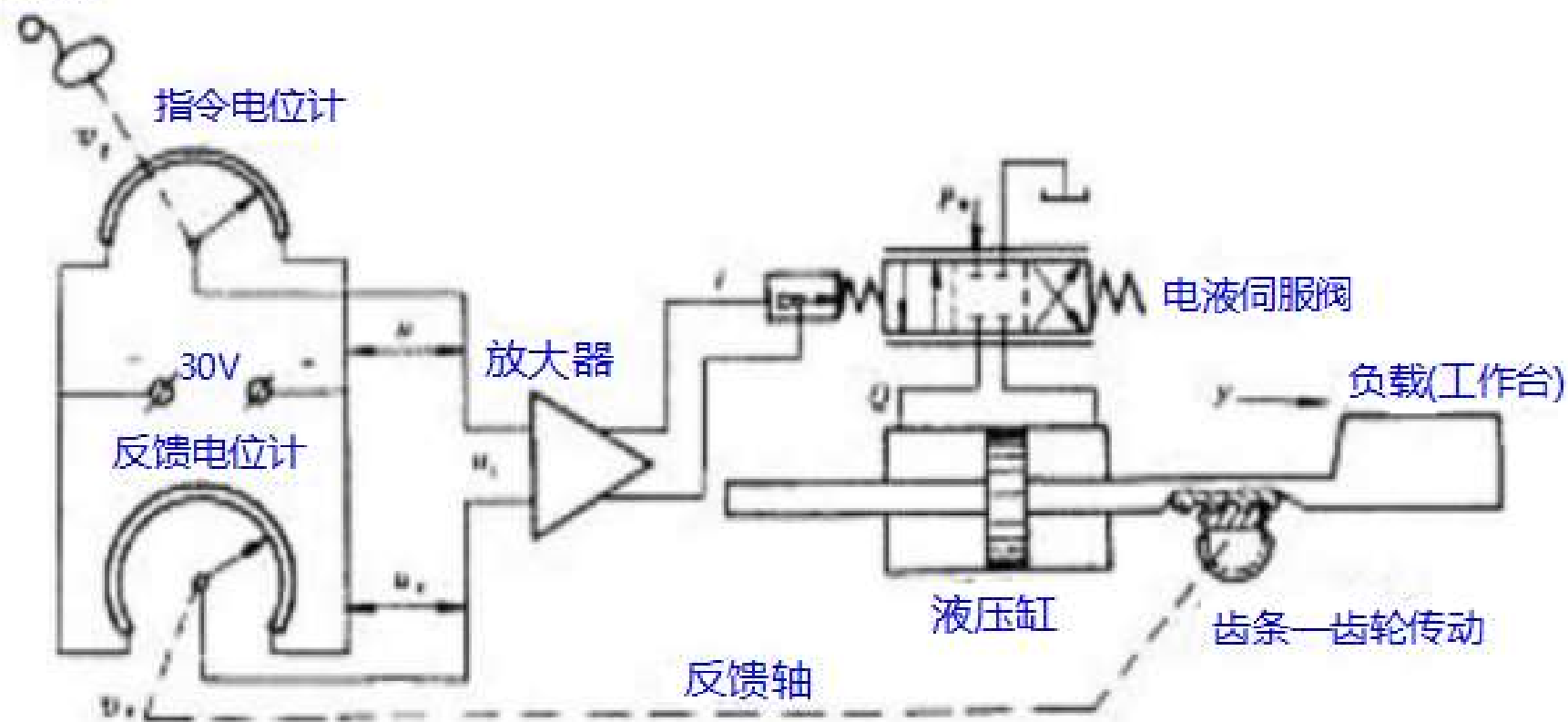
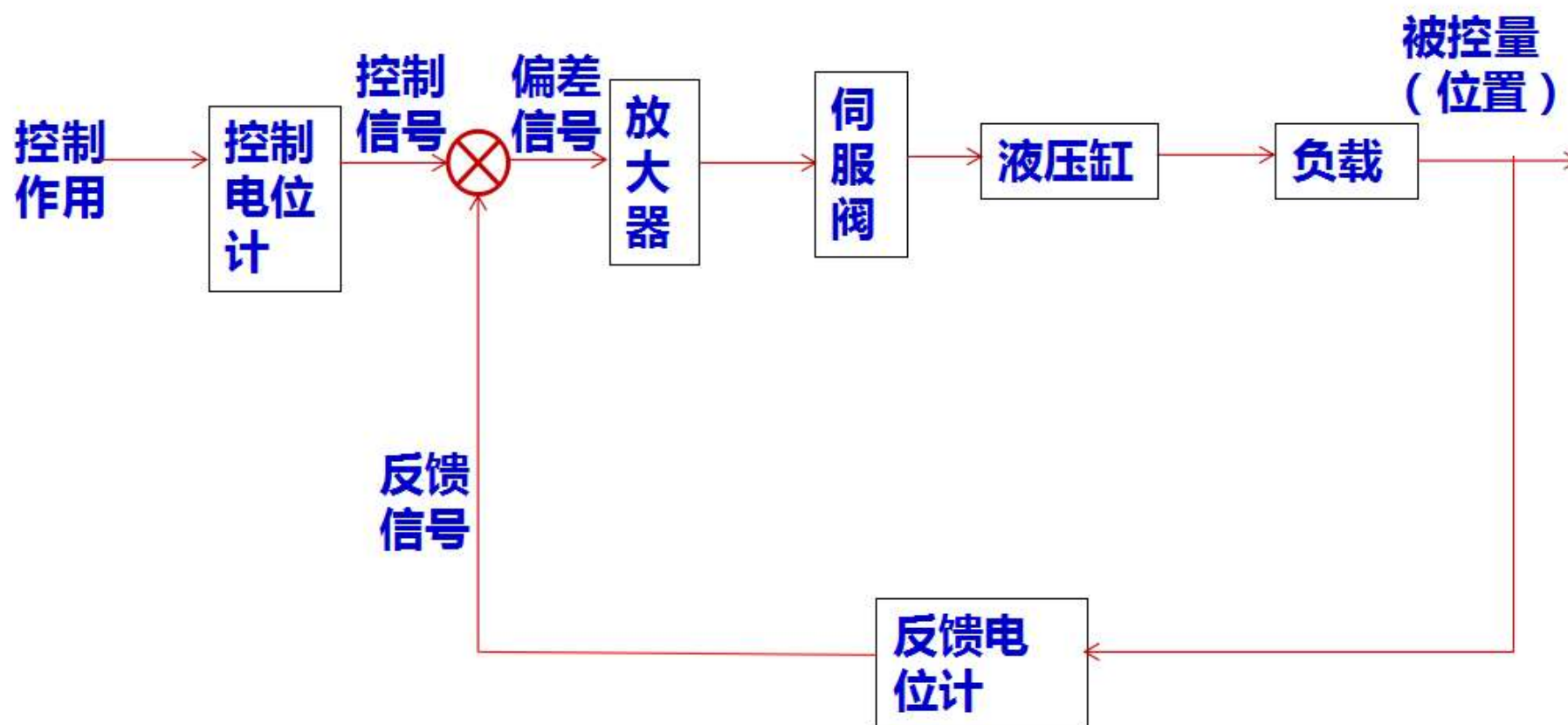


图1-14

## (二)机床工作台位置控制系统



机床工作台位置控制系统框图

图1-15

## (三) 飞行器仰视角控制系统

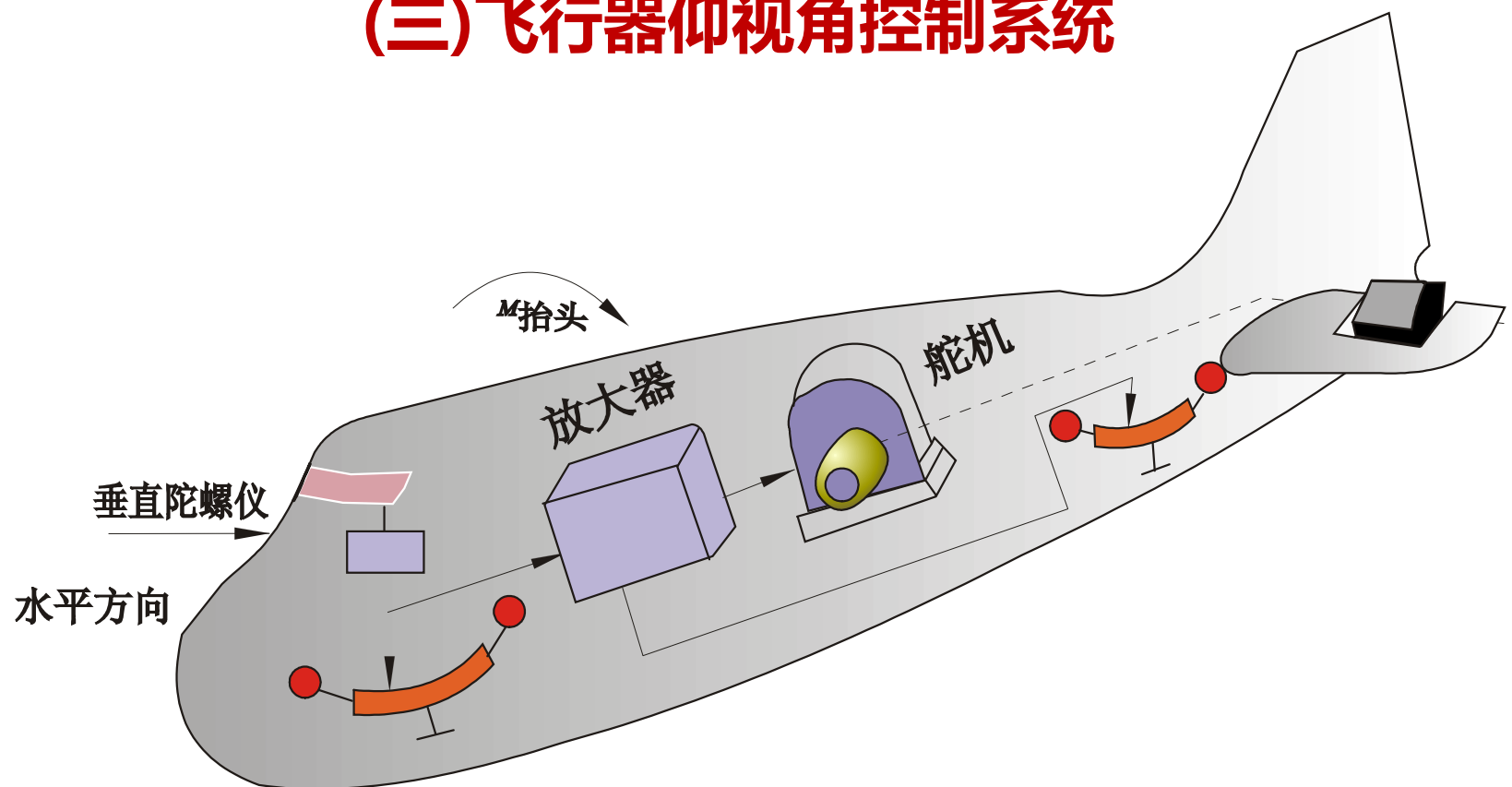
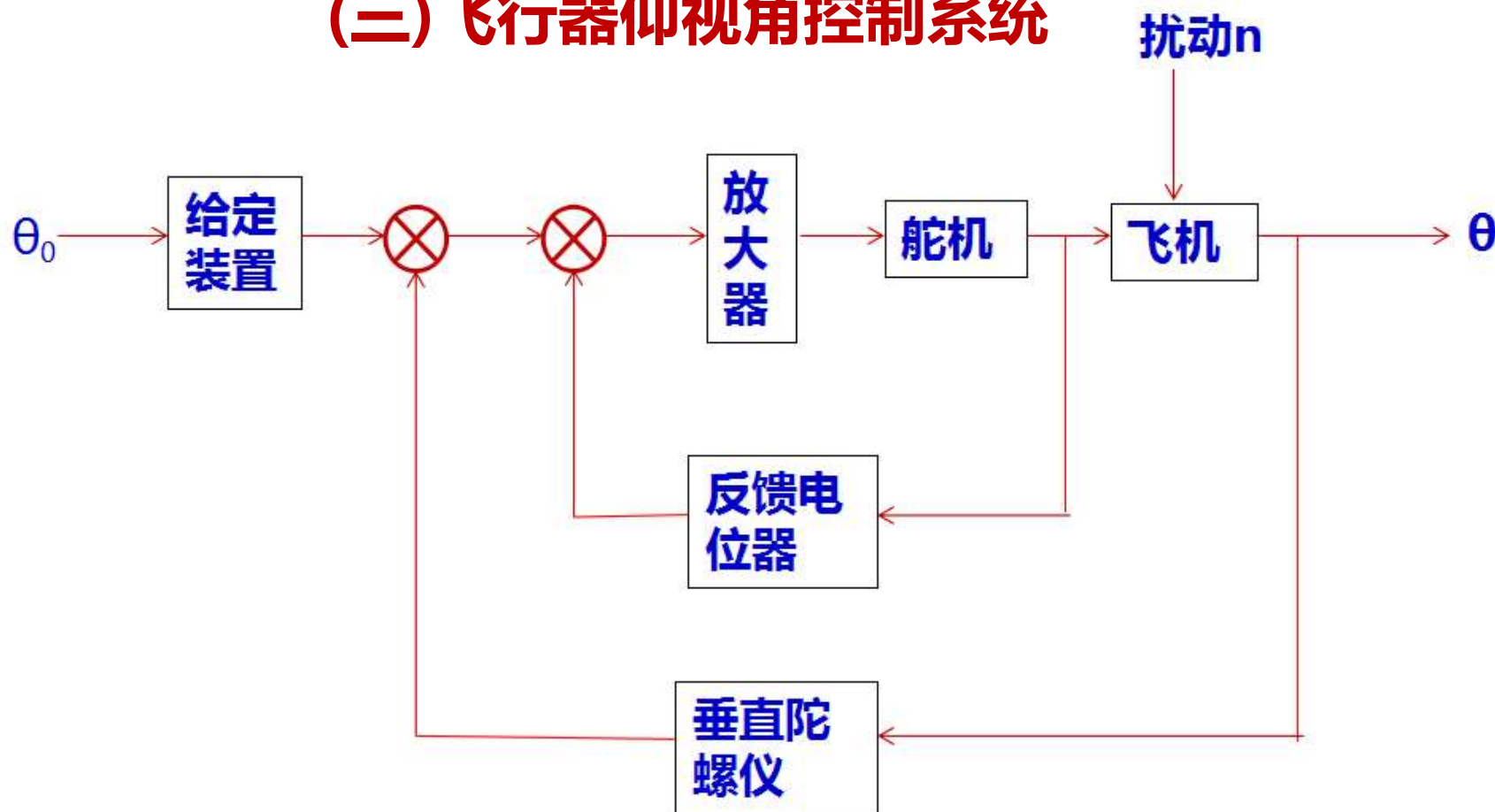


图1-16



## (三)飞行器仰视角控制系统



仰视角控制系统框图

图1-17

## 按参考输入形式分类:恒值系统和随动系统

**恒值系统**是指参考输入量**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，使被控制量（即系统的输出量）保持在给定或希望的数值上。

**随动系统**是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。

## 按照组成系统的元件特性分类:线性系统和非线性系统

**线性系统**是指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，系统满足叠加原理。

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

同时把可以进行线性化处理的系统或元件特性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。

## 按照系统内信号的传递形式分类:连续系统和离散系统

**连续系统**是指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**是指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。

离散系统的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。

# 控制系统的一般概念：本课程的内容和特点

## ●自动控制理论的内容:

### □控制系统的分析:

①**稳定性分析**:给出判断系统稳定性的基本方法，并阐述系统的稳定性与系统结构（或称控制规律）及系统参数间的关系。

②**稳态特性分析**:系统稳态特性表征了系统实际稳态值与希望稳态值之间的差值，即稳态误差，表征了控制系统的控制精度。给出计算系统稳态误差的方法，指出系统结构和参数对稳态特性的影响。

# 控制系统的一般概念：本课程的内容和特点

---

## ● 自动控制理论的内容:

### □ 控制系统的分析:

③动态特性分析: 系统的输入一定时, 一般将由初始稳态向终止稳态过渡。初始稳态与终止稳态之间的过渡过程称为系统的动态过程 (或瞬态过程、暂态过程)。分析系统结构、参数与动态特性的关系, 并给出计算系统动态性能指标的方法和讨论改善系统动态性能的途径。

# 控制系统的一般概念：本课程的内容和特点

## ●自动控制理论的内容：

### □控制系统设计与综合：

设计一个系统比分析一个系统要复杂得多，要有控制理论的知识，并对控制元件、控制规律都要十分熟悉，还要将理论与实际问题结合起来。

本课程的一个重要内容是讨论当控制系统的主要元器件和结构形式确定以后，为满足动态性能指标和稳态性能指标的要求，需要改变系统的某些参数或附加某种装置的方法。这种方法称为控制系统的校正。改变系统参数或附加校正装置的过程称为系统的综合。

## 1.3 控制系统的性能指标

---

### 1.3 控制系统的性能指标

1.3.1 稳定性

1.3.2 稳态误差

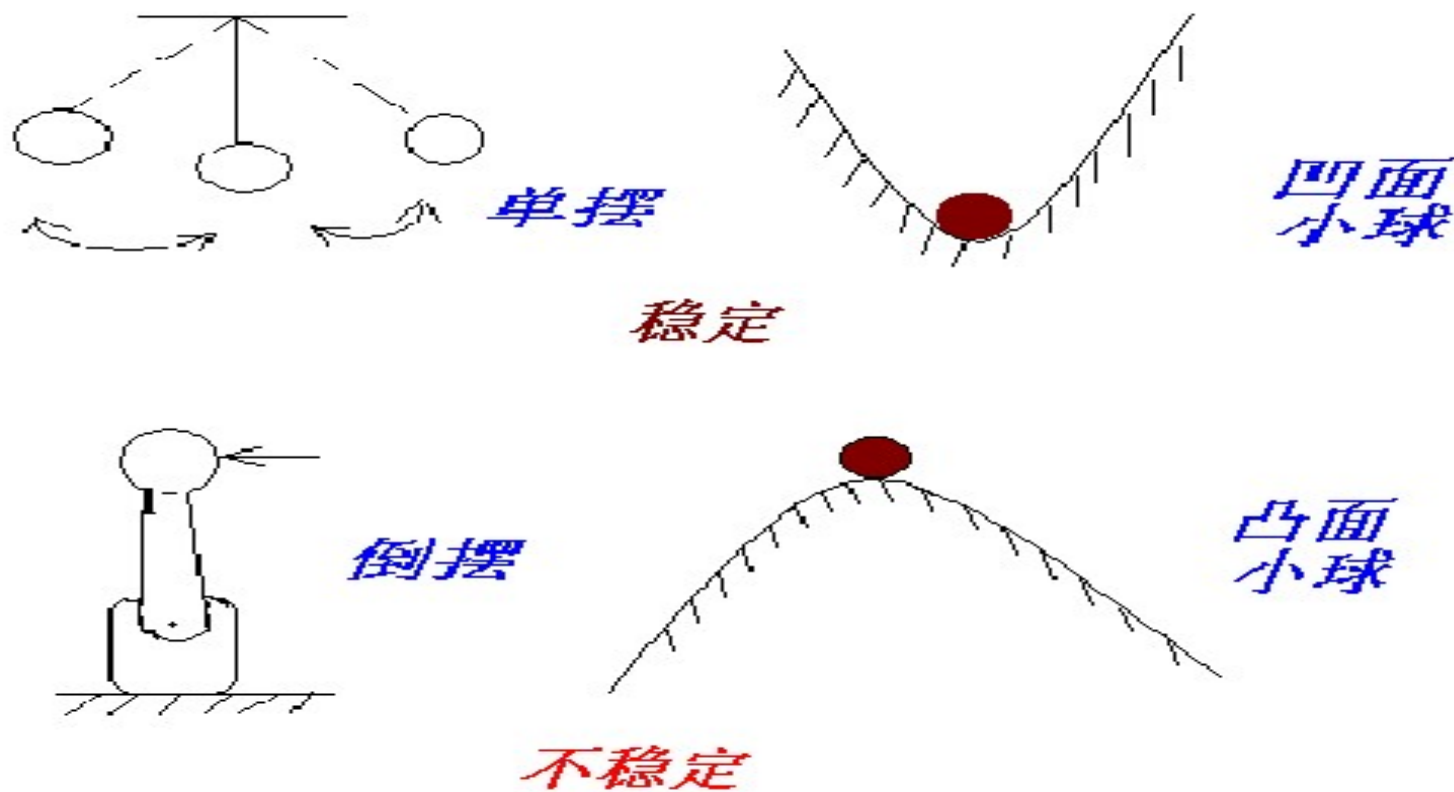
1.3.3 瞬态响应指标



## □ 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。

## 稳定性示意图 (1-12)



## 控制系统的性能指标:稳态误差

### □ 稳态误差:

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。开环控制系统的稳态误差通常与系统的增益或放大倍数有关，而反馈控制系统（闭环系统）的控制精度主要取决于它的反馈深度。稳态误差越小，系统的精度越高，它由系统的稳态响应反映出来。

## 控制系统的性能指标:稳态误差

### □ 稳定系统的典型单位阶跃响应曲线

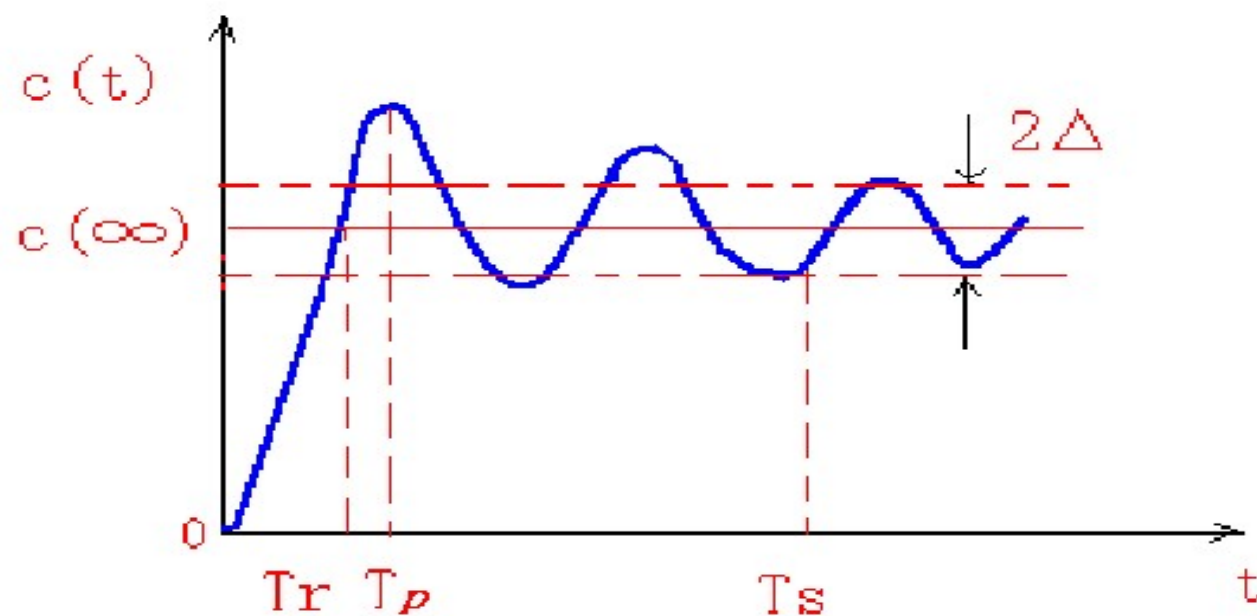


图 1-13

## 1.4 本章总结

---

### 1.4 本章总结

1.4.1 学习内容

1.4.2 学习要求

1.4.3 本章小结

## (一)学习内容

自动控制理论在阐述自动控制与自动控制系统相关基本概念的基础上，从控制系统的数学模型入手，分别介绍**时域分析法、根轨迹分析法、和频率特性分析法**。

上述三种分析方法虽然不同，但都围绕着**系统稳定性、稳态特性和动态特性的分析**这条主线来进行的，各种分析方法之间具有内在的联系。

掌握上述基本分析方法后，将进行系统校正与综合的讨论，这是比系统分析更深层次的内容，主要介绍根轨迹法和频率特性法校正与系统综合的原理与思路。

## (二)学习要求

- (1) 明确什么叫自动控制，正确理解**被控对象、被控量、控制装置和自控系统**等概念。
- (2) 正确理解三种控制方式，特别是**闭环控制**。
- (3) 初步掌握由系统工作原理图**画方框图**的方法，并能正确判别系统的控制方式。
- (4) 明确系统常用的**分类方式**，掌握各类别的含义和信息特征，特别是按数学模型分类的方式。
- (5) 明确对自控系统的基本要求，正确理解**三大性能指标**的含义。

## (三)本章小结

**自动控制：**在没有人直接参与的情况下，利用控制器使被控对象的被控量自动地按预先给定的规律去运行。

**自动控制系统：**指被控对象和控制装置的总体。这里控制装置是一个广义的名词，主要是指以控制器为核心的一系列附加装置的总和。共同构成控制系统，对被控对象的状态实行自动控制，有时又泛称为控制器或调节器。

**负反馈原理：**把被控量反送到系统的输入端与给定量进行比较，利用偏差引起控制器产生控制量，以减小或消除偏差。



## (三)本章小结：三种基本控制方式

实现自动控制的基本途径有二：**开环和闭环。**

实现自动控制的主要原则有三：

**主反馈原则**——按被控量偏差实行控制。

**补偿原则**——按给定或扰动实行硬调或补偿控制。

**复合控制原则**——闭环为主开环为辅的组合控制。

## (三)本章小结：正确绘制系统方框图

绘制系统方框图一般遵循以下步骤：

- (1) 搞清系统的**工作原理**，正确判别系统的**控制方式**。
- (2) 正确找出系统的**被控对象**及控制装置所包含的**各功能元件**。
- (3) 确定**外部变量**（即给定值、被控量和干扰量），然后按典型系统方框图的连接模式将各部分连接起来。

## (三)本章小结：对自控系统的要求

对自控系统的要求用语言叙述就是两句话：

- (1) 要求输出等于给定输入所要求的期望输出值。
- (2) 要求输出尽量不受扰动的影响。

衡量一个系统是否完成上述任务，把要求转化成三大性能指标来评价

- (1) 稳定——系统的工作基础；
- (2) 快速、平稳——动态过程时间要短，振荡要轻。
- (3) 准确——稳定精度要高，误差要小。