

Course: 自动控制原理 I

Principles of Automatic Control

Lecture: Wei, Yanling
School of Automation
Southeast University

Course Introduction

□ 课程的性质和特点

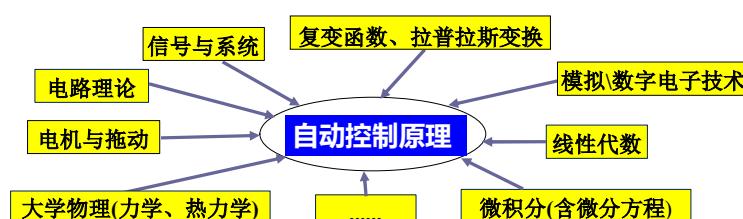
► 自动控制是一门技术学科，与信息科学、系统科学关系紧密，从方法论的角度来研究系统的建立、分析与设计

基本内容—控制论的基本理论、方法、特点、综合设计方法

研究对象—自动控制系统，揭示自动控制系统中存在的信息转换、传递和反馈

Course Introduction

► 《自动控制原理》是本学科的专业基础课，是自动控制理论的基础课程



Course Introduction

□ 课程教材

► 田玉平主编, 自动控制原理(第二版), 科学出版社, 2006

主要参考书:

- 胡寿松主编, 自动控制原理, 科学出版社, 2004
- Richard C. Dorf, Modern Control Systems 12th, 2011
- K. Ogata, Modern Control Engineering (Third edition), Prentice Hall, 1998

Course Introduction

□ 课程主要任务:

- ▶ 理解自动控制系统和反馈控制的基本概念;
- ▶ 掌握建立控制系统数学模型的基本方法;
- ▶ 掌握分析控制系统稳定性、动态性能和稳态性能的时域和频域方法;
- ▶ 掌握校正控制系统的常用方法

Course Introduction

□ 每章内容在控制系统分析和设计中作用

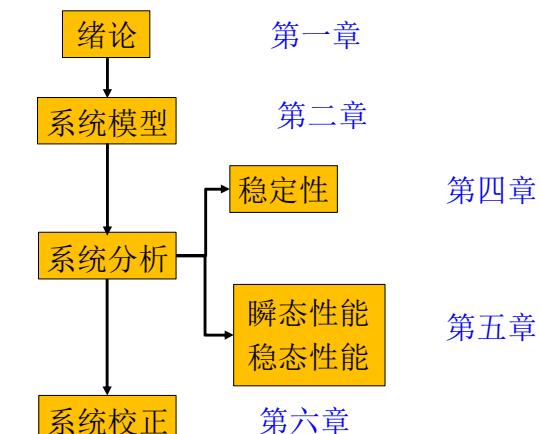
- ▶ Chap 1: 绪论--自动控制系统基本概念
- ▶ Chap 2: 系统的模型(根据系统工作机理得到模型)
- ▶ Chap 3: 系统的状态空间模型(另外一个模型体系)
- ▶ Chap 4: 控制系统稳定性分析(稳定!!!)
- ▶ Chap 5: 控制系统运动性能分析(稳定系统性能优劣分析和提高)
- ▶ Chap 6: 系统校正方法(性能不够好(添加环节, 改变系统模型)
→ 改善性能)
- ▶ Chap 7: 线性系统的状态空间分析(现代控制理论)
- ▶ Chap 8: 非线性系统(经典的非线性分析设计工具)

Course Introduction

□ 每章内容在控制系统分析和设计中作用

- ▶ Chap 1: 绪论--自动控制系统基本概念
- ▶ Chap 2: 系统的模型(根据系统工作机理得到模型)
- ▶ Chap 3: 系统的状态空间模型(另外一个模型体系)
- ▶ Chap 4: 控制系统稳定性分析(稳定!!!)
- ▶ Chap 5: 控制系统运动性能分析(稳定系统性能优劣分析和提高)
- ▶ Chap 6: 系统校正方法(性能不够好(添加环节, 改变系统模型)
→ 改善性能)
- ▶ Chap 7: 线性系统的状态空间分析(现代控制理论)
- ▶ Chap 8: 非线性系统(经典的非线性分析设计工具)

内容线索



Grading

□ 课程考核办法:

- ▶ 平时成绩(出勤+课堂表现+作业): 10%
- ▶ 实验成绩: 10%
- ▶ 期末考试: 笔试, 闭卷

第一章：绪论

1.1 引言

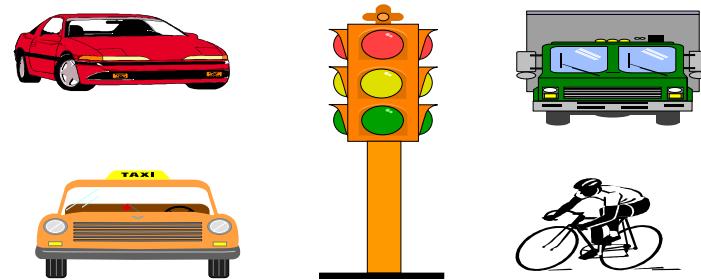
1.1 引言

自动控制：在没有人直接参与的情况下，利用自动控制装置（或称为控制装置或控制器），使机器、设备或生产过程（统称为被控对象）的某个工作状态或参数（称为被控量）自动地按照预定的规律运行

自动控制理论：研究有关自动控制共同规律的一门技术科学，是自动控制技术的基础理论，根据发展的不同阶段，其内容分为经典控制理论、现代控制理论和智能控制理论

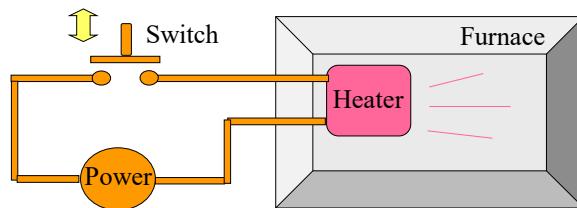
1.2 开环控制系统和闭环控制系统

什么是控制系统(control system)?



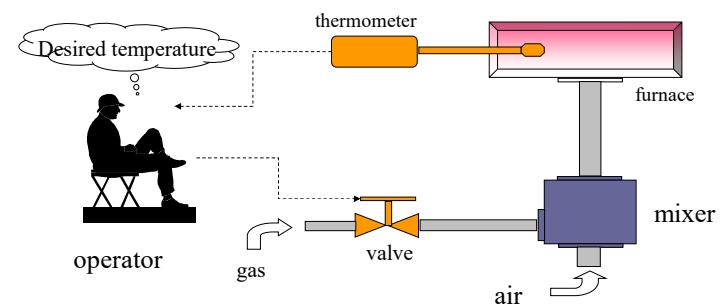
交通灯控制

什么是控制系统(control system)?



炉温控制系统

什么是控制系统(control system)?

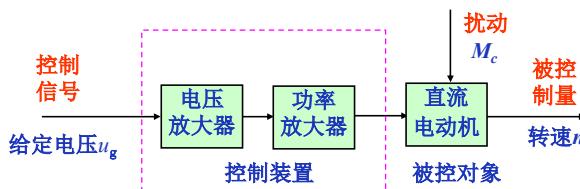


温度控制系统

控制系统的定义

由相互关联的部件按一定结构构成的系统，能够提供预期的系统响应

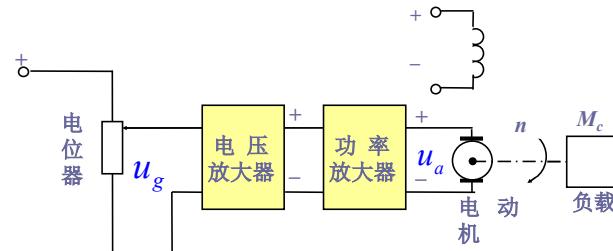
控制系统的类型很多，结构类型和所完成的任务也各不相同。控制系统中最常见的两种控制方式是开环控制和闭环控制，这两种控制的组合——即为复合控制，相对应的控制系统称为开环控制系统、闭环控制系统和复合控制系统



只有输入量的前向控制作用，输出量并不反馈回来影响输入量的控制作用，因而，将它称为开环控制系统（Open-Loop Control System）

1.2.1 开环控制系统

示例——直流电动机转速开环控制系统

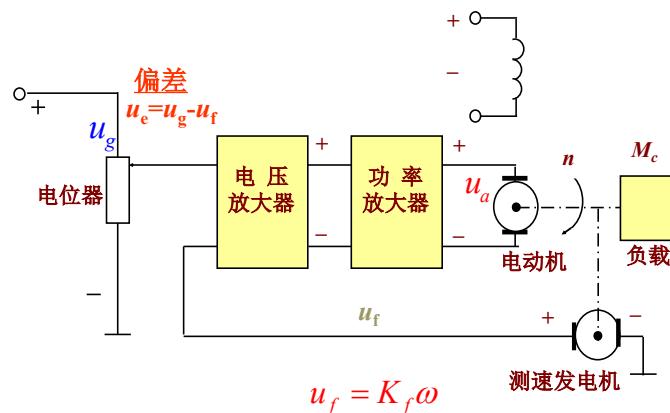


给定电压 u_g 经放大后得到电枢电压 u_a ，改变 u_g 可得不同的转速 n ，该系统只有输入量 u_g 对输出量 n 的单向控制作用。输出端和输入端之间不存在反馈回路。

开环系统的优点——结构简单，系统稳定性好，调试方便，成本低。因此，在输入量和输出量之间的关系固定，且内部参数或外部负载等扰动因素不大，或这些扰动因素可以预测并进行补偿的前提下，应尽量采用开环控制系统。

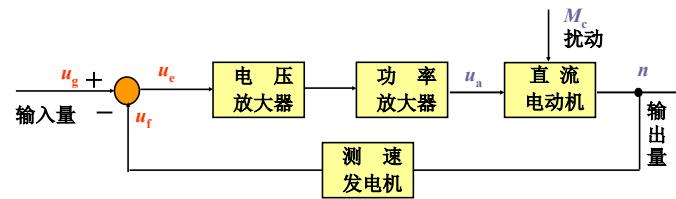
开环控制的缺点——当控制过程中受到来自系统外部的各种扰动因素，如负载变化、电源电压波动等，以及来自系统内部的扰动因素，如元件参数变化等，都将会直接影响到输出量，而控制系统不能自动进行补偿，抗干扰性差。因此，开环系统对元器件的精度要求较高。

1.2.2 闭环控制系统



偏差始终存在

正反馈不能进行控制，会使系统的偏差越来越大。



设上述系统原已在某个给定电压 u_g 相对于的转速 n 状态下运行，若一旦受到某些干扰（如负载转矩突然增大）而引起转速下降时，系统就会自动地产生相应的调整过程。

$$M_c \uparrow \rightarrow n \downarrow \rightarrow u_f \downarrow \rightarrow u_e (u_e = u_g - u_f) \uparrow \rightarrow u_a \uparrow \rightarrow n \uparrow$$

闭环控制系统(Closed-Loop Control System)，又称反馈控制系统(Feedback Control System)，是在闭环控制系统中，把输出量检测出来，经过物理量的转换，再反馈到输入端去与给定值(参考输入)进行比较(相减)，并利用比较后的偏差信号，以一定的控制规律产生控制作用，抑制内部或外部扰动对输出量的影响，逐步减小以至消除这一偏差，从而实现要求的控制性能。

闭环控制的优点——抑制扰动能力强，与开环控制相比，对参数变化不敏感，并能获得满意的动态特性和控制精度。

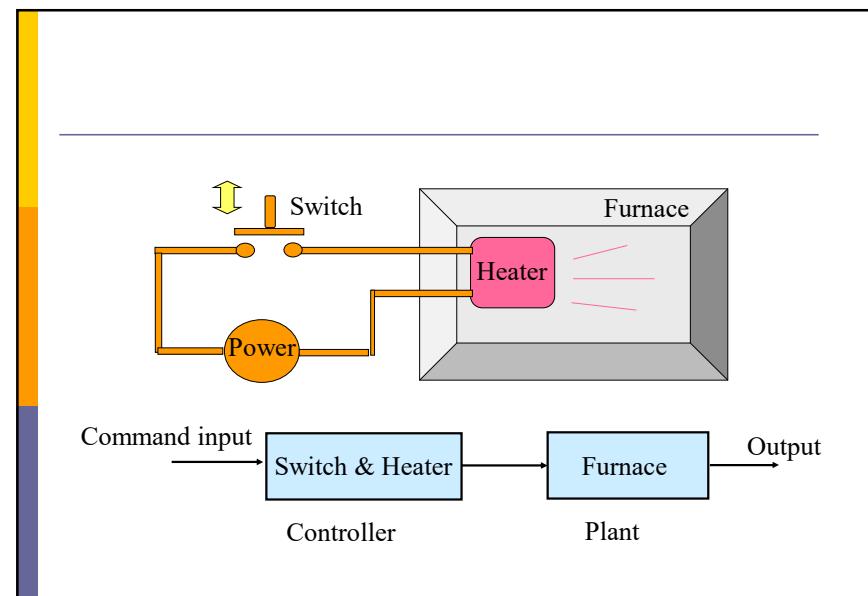
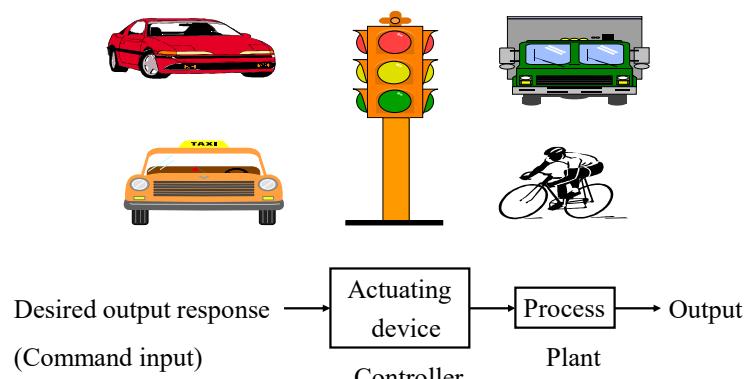
闭环控制的缺点——引入反馈增加了系统的复杂性，如果闭环系统参数的选取不适当，系统可能会产生振荡，甚至系统失稳而无法正常工作，这是自动控制理论和系统设计必须解决的重要问题。

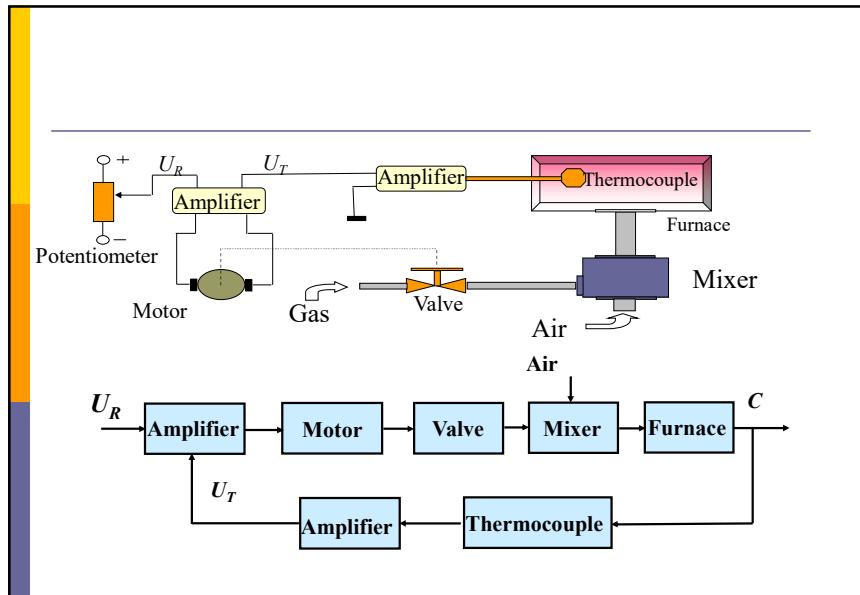
自动控制理论主要研究闭环控制系统

结论：

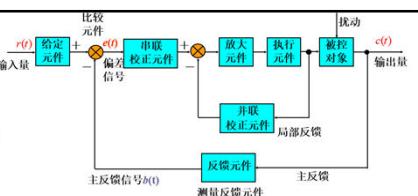
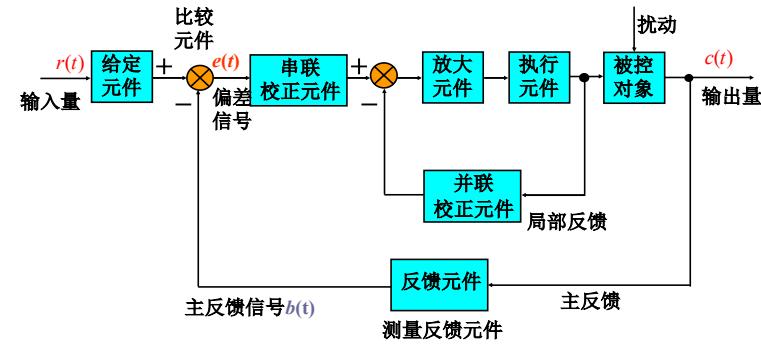
通过检测、比较得到偏差，由偏差产生控制作用，
由控制作用使偏差减少或消除的原理就是自动控制原理
也称反馈控制原理。（负反馈）

1.3 自动控制系统的组成





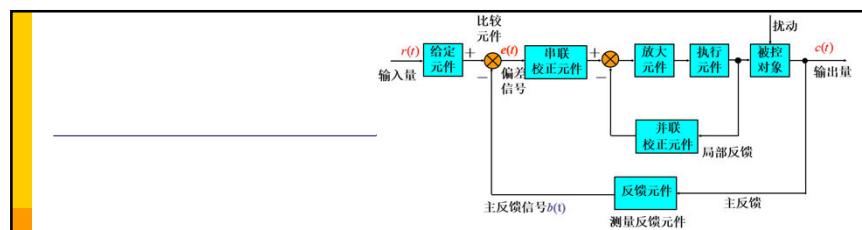
1.3.1 基本组成部分



被控对象(或过程)——又称控制对象或受控对象，指需要对它某个特定的量进行控制的设备或过程。**被控对象的输出变量是被控变量，常常记作输出信号或输出量。**被控对象除了受到控制作用外，还受到外部扰动作用

给定元件——其作用是给出与期望的输出相对应的系统输入量，是一类产生系统控制指令的装置

测量反馈元件——如传感器和测量仪表，感受或测量被控变量的值并把它变换为与输入量同一物理量后，再反馈到输入端以作比较



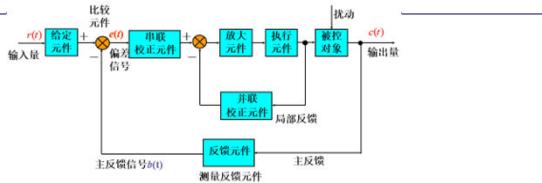
比较元件——比较输入信号与反馈信号，以产生反映两者差值的偏差信号

放大元件——将微弱的信号作线性放大

校正元件——也叫补偿元件，它是按某种函数规律变换控制信号，以利于改善系统的动态品质或静态性能

执行元件——根据偏差信号的性质执行相应的控制作用，以便使被控制量按期望值变化。如电动机、气动控制阀等

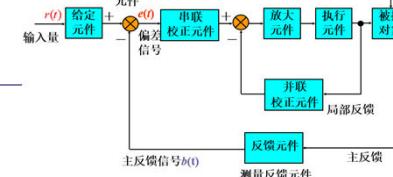
1.3.2 自动控制系统中常用的名词术语



自动控制系统：是由被控对象和自动控制装置按一定方式联结起来的，以完成某种自动控制任务的有机整体

输入信号：指参考输入，又称给定量或给定值，它是控制着输出量变化规律的指令信号

输出信号：指被控对象中要求按一定规律变化的物理量，又称被控量，它与输入量之间保持一定函数关系



反馈信号：由系统(或元件)输出端取出并反向送回系统(或元件)输入端的信号称为反馈信号。反馈分为主反馈和局部反馈

偏差信号：指参考输入与主反馈信号之差。偏差信号简称偏差

误差信号：指系统输出量的期望值与实际值之差，简称误差。在单位反馈情况下，误差值也就是偏差值，二者是相等的

扰动信号：简称扰动或干扰，与控制作用相反，是一种不希望的、影响系统输出的不利因素。扰动信号既可来自系统内部，又可来自系统外部，前者称为内部扰动，后者称为外部扰动。外部扰动是不希望的输入信号

1.4 自动控制系统的分类

1.4.1 按输入信号的特征分

1. 恒值调节系统：系统的输入信号为一常数，扰动使被控量偏离理想值而出现偏差，利用偏差该系统可使被控量恢复到理想值或接近理想值。转速闭环控制系统、水位控制系统均属于此类系统

2. 程序控制系统：输入信号为已知的时间函数，如机械加工中的数控机床工作台移动系统

3. 随动系统：系统给定量是时间的未知函数，系统能使被控量准确、快速地跟随给定量变化。随动系统又称伺服系统。火炮自动瞄准系统、船舶自动舵均属此类系统

1.4.2 按描述系统的动态方程分

1. 线性系统：组成系统的各环节的输入输出特性都是线性的，系统的性能可用**线性微分方程**（或差分方程）来描述。（满足齐次性与叠加性）

2. 非线性系统：系统中含有一个或多个非线性元件。系统的性能需用**非线性微分方程**（或差分方程）来描述

注意：在实际中，绝大多数对象都具有非线性特性，而大多数仪器仪表也是非线性的，所以很少有真正意义上线性系统，一般是采用线性化措施将非线性系统处理成线性系统，这样就可简化分析和运算。（本质非线性除外）

1.4.3 按系统参数是否随时间变化而分

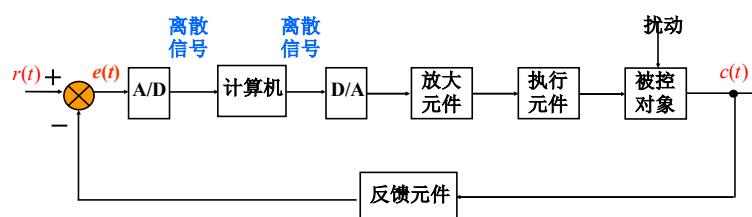
1. 定常系统：特性不随时间变化的系统，又称时不变系统。描述定常系统特性的微分方程或差分方程的系数不随时间变化。定常系统分为定常线性系统和定常非线性系统

2. 时变系统：特性随时间变化的系统。对于时变系统，其输出响应的波形不仅与输入信号波形有关，而且还与参考输入加入的时刻有关，这一特点，增加了对时变系统分析和研究的复杂性

1.4.4 按信号的传递是否连续分

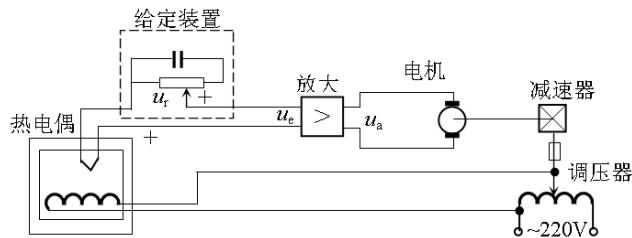
1. 连续系统：各环节间的信号均为时间 t 的连续函数

2. 离散系统：在信号传递过程中有一处或多处的信号是脉冲序列或数字编码。数字控制系统、采样系统为离散系统

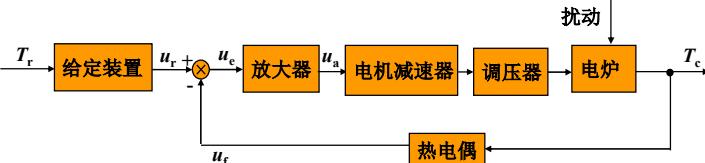


1.5 自动控制系统的应用实例

1.5.1 炉温控制系统



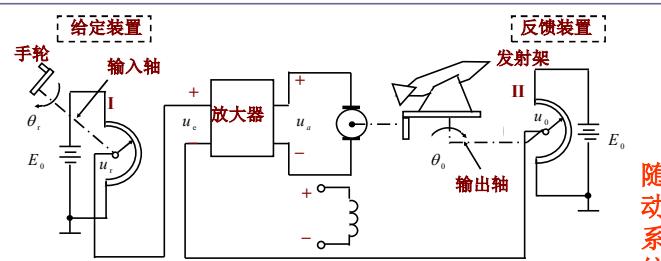
炉温控制系统的理想温度由电压 u_r 给出，热电偶检测箱温输出电压 u_f ，偏差电压 $u_e = u_r - u_f$ ，经电压和功率放大后控制电机的速度和转向，从而改变调压器滑动触头的位置，改变炉温控制系统的外施电压达到恒定炉温的目的



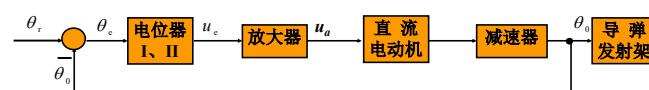
原理：即当恒温箱内温度偏高时，使调压器降压，反之升压，直到温度达到给定值为止。此时偏差电压 $u_e=0$ ，电机停转。

温度 T_c 下降， $T_c \downarrow \rightarrow u_f \downarrow \rightarrow u_e = u_r - u_f \uparrow \rightarrow u_a \uparrow \rightarrow$ 电机向增大调压器输出电压的方向加速旋转 $\rightarrow T_c \uparrow \rightarrow u_f \uparrow$ ，直到 $T_c = T_r$ ， $u_e = 0$ 。

1.5.2 导弹发射架方位控制系统

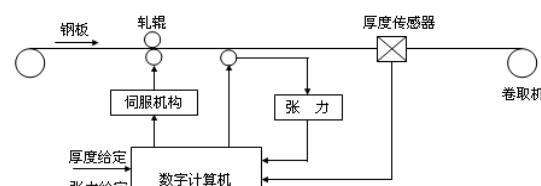


导弹发射架方位控制系统原理图

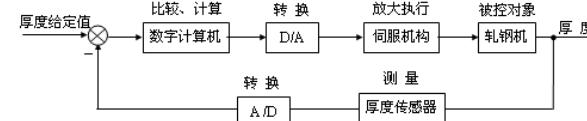


导弹发射架方位控制系统方块图

1.5.3 计算机控制系统



轧钢机计算机控制系统示意图



轧钢机计算机控制系统方块图

- 锅炉设备的压力和温度自动保持恒定
- 数控机床按照预定的程序自动地切削工件
- 导弹发射与制导系统，自动地使导弹攻击敌方目标
- 无人驾驶飞机按照预定航迹自动升降和飞行
- 人造卫星准确地进入预定轨道运行并回收

自动控制技术的应用范围已扩展到生物、医学、环境、经济管理和其它许多社会生活领域中，自动控制已成为现代社会活动中不可缺少的重要组成部分

1.6 自动控制理论发展简史

一、历史

1. 萌芽：18世纪第一次技术革命（机械化）时域分析

- ① 俄国人Polzonov发明锅炉水位调节器
- ② 英国人Watt发明蒸汽机离心飞锤式调速器，萌生自动控制基本原理
- ③ 100年后，Maxwell提出蒸汽机速度控制系统稳定性分析
- ④ 1877年，Routh, 1895年，Hurwitz分别提出系统稳定的代数判据，同期Lyapunov建立一般的运动稳定性理论
- ⑤ 1922年，Minovsky研制船舶操纵自动控制器，给出稳定性分析

2. 奠定基础（20世纪）——经典控制论

- ① 30~40年代，Nyquist提出系统稳定性的频率判据 频域分析
- ② 1934年，Hezen提出“伺服”概念，精确跟踪输入信号继电器伺服机构
- ③ 1940年，Bode在频率法中引入对数坐标系，伯德图
- ④ 1942年，Harris引入传递函数概念
- ⑤ 1948年，Evans提出根轨迹分析方法
- ⑥ 1949年，Wiener在火炮控制中引入反馈概念，出版《控制——关于在动物和机器中控制和通讯的科学》，奠定控制论基础

二战期间，飞机自动驾驶仪、大炮定位系统、雷达跟踪系统等军用装备

3. 发展 空间技术需求和数字计算机，时域方法为主

① 1950年开始，Kalman滤波理论、Pontryagin极大值原理、Bellman动态规划理论、自适应理论等

② 1954年，钱学森首创“工程控制论”，推广到其它领域：

➢ 生物控制论：生命系统

➢ 经济控制论：经济运行与发展问题

➢ 社会控制论：社会管理与社会服务问题

③ 1980年--，不确定系统鲁棒控制和非线性控制

SISO → MIMO

确定 → 随机

校正 → 确定性能指标最优综合方法

二、分类

1. 经典控制理论 40~50年代，高阶常微分方程

以传递函数为基础，研究单输入、单输出系统的分析和设计，针对线性定常系统，主要研究方法有时域分析法、根轨迹法和频率特性法。

2. 现代控制理论 60~70年代

以矩阵理论等近代数学方法作为工具，主要研究方法是状态空间法，把高阶常微分方程转化为一阶常微分方程组来描述系统，解决多输入多输出的问题，可处理多变量、非线性、时变系统。

3. 70年代至今 巨大发展

最优控制、系统辨识、多变量控制、自适应控制、专家系统、人工智能、神经网络控制、模糊控制、大系统理论等等。

1.7 对自动控制系统的基本要求

要提高控制质量，就必须对自动控制系统的性能提出一定的具体要求。尽管自动控制系统有不同的类型，对每个系统都有不同的特殊要求。但总的说来，都是希望设计的控制过程尽量接近理想的控制过程。工程上常常从稳、准、快三个方面来评价自动控制系统的总体精度。

1. 稳——指控制系统的稳定性和平稳定性

◆**稳定性**——指系统重新恢复平衡状态的能力，它是自动控制系统正常工作的先决条件。一个稳定的控制系统，其被控量偏离期望值的初始偏差应随时间的增长逐渐减小至稳态值或趋于零。

◆**平稳定性**——指过渡过程振荡的振幅与频率。即被控量围绕给定值摆动的幅度和摆动的次数。好的过渡过程摆动的幅度要小，摆动的次数要少。

2. 快速性——即过渡过程继续的时间长短。过渡过程越短，说明系统快速性越好，过渡过程持续时间越长，说明系统响应迟钝，难以实现快速变化的指令信号。

3. 准确性——是指系统在过渡过程结束后，偏差最终值的大小，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，被控量（输出量）的期望值与实际值之间的差值就越小。

被控对象的具体情况不同，各系统对稳、快、准的要求各有侧重。而且对同一系统，稳、快、准的要求常常是相互制约的。过分提高过程的快速性，可能会引起系统强烈的振荡，而过分追求稳定性，又可能使系统反应迟缓，最终导致准确性变坏。如何分析和解决这些矛盾，将是本学科研究的主要内容。

对于偏差始终存在的系统

准确性：希望放大环节的放大系数大

平稳定性：希望放大环节的放大系数小

本章小结

1. 通过自动控制系统的实例了解自动控制的定义，并了解控制对象、系统输入量、被控量、控制装置以及控制系统等概念。

2. 控制系统按是否存在反馈分为开环控制系统和闭环控制系统。闭环控制系统即反馈控制系统，主要特点是系统输出量经测量后返送到系统输入端构成闭环，并由偏差产生控制作用使被控量朝减少偏差，消除偏差的方向运动。因而有较高的控制精度。

3. 根据控制系统的工作原理及各元件信号的传送方向，画控制系统的方块图。方块图是分析控制系统的基础。

- 4. 按系统给定输入信号的时间特性进行分类，可分为恒值系统，随动系统和程序控制系统
- 5. 对自控系统的基本要求：系统必须是稳定的；系统的稳态控制精度要高，即稳态误差要小；系统的动态性能要好，即系统的单位接阶跃响应过程要平稳，响应过程要快