

自动化导论

Automation: An Introduction

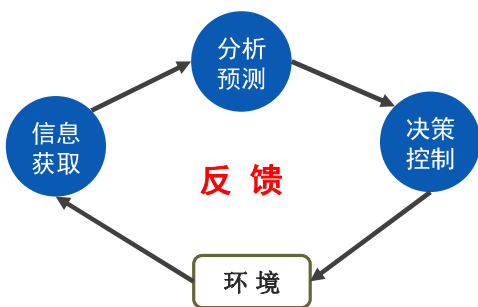
南京大学控制科学与智能工程系

陈春林

Email: clchen@nju.edu.cn

2025年2月18日

控制（自动化）的一般形式



0 开场白

0.1 课程说明

0.2 漫谈维纳与控制论

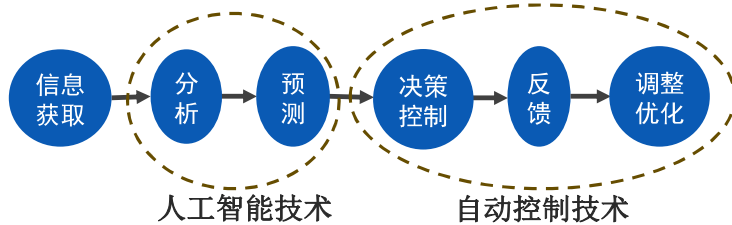
0.3 控制系统与信息反馈

0.1 课程说明

课程学习目的:

通过本课程的学习，建立对控制学科/专业的性质、技术特点、服务领域等建立较清晰的概念，在学科/专业思想和自动化技术整体概念上建立较系统化的认知和学习体系，并为专业知识群（链）的学习和理解起到导向性作用。

问题求解的一般模式

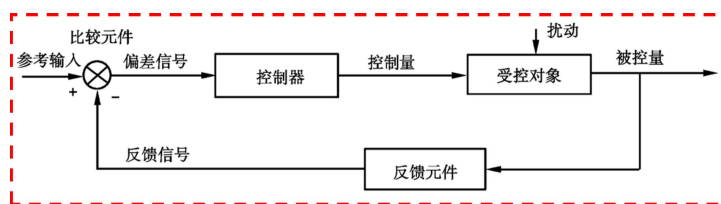


对象可为物（控制）：如机器人

对象可为人或企业（管理）：如项目管理

发展趋势：智能技术与控制技术深度融合，并以**自动化系统**的形式渗透各行业。

控制（自动化）系统的一般方框图



系统 (System)、信息 (Information)、反馈 (Feedback)
鲁棒 (Robust) 与优化 (Optimization)

0.1 课程说明

课程简介:

以“感知—认知—反思”为主线，结合大量案例和多媒体素材，对控制的基础概念、自动控制的基本原理、自动控制系统的技术体系、自动化技术的应用、信息化时代的控制等进行系统的讲解和演示。

本课程为自动化专业的平台基础课，也可作为理工类、管理类各专业及其他对自动化技术感兴趣的同学们的开放选修课程。

0.1 课程说明

以课堂教学为主，采用实例演示、概念讲解、课堂讨论和实验室实验体验相结合的教学方式，要求：

- 了解控制论的基本思想
- 了解控制学科与技术的发展和影响
- 理解控制理论和技术的基本原理和核心概念有较深刻的理解和体会
- 能对控制系统进行较为系统分析与认识

考核方式：平时成绩30%+期末考试（开卷）70%

0.1 课程说明

教材:

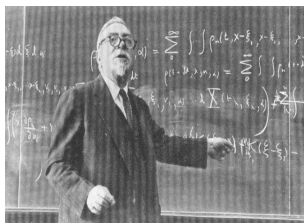
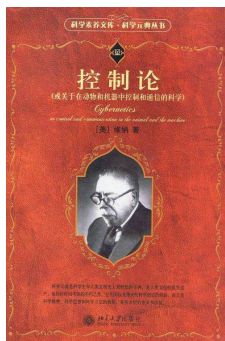
- 周献中、陈春林, 自动化导论 (第三版), 科学出版社, 2022



0.1 课程说明

| 序号 | 教学内容 | 周次 |
|----|------------------------------|-------|
| 0 | 开场白: 课程说明及Cybernetics漫谈 | 1 |
| 1 | 绪论: 自动化的历史与未来 | 2 |
| 2 | 自动控制系统的基本概念 | 3 |
| 3 | 自动控制系统的元件与设备 | 4 |
| 4 | 自动控制系统的描述原理 | 5 |
| 5 | 自动控制系统的控制过程 | 6 |
| 6 | 自动控制系统的控制方法 | 7-9 |
| 7 | 综合案例分析: 机电系统、人工智能系统、机器人、智能制造 | 10-15 |
| 8 | 自动化专业介绍 | 16 |

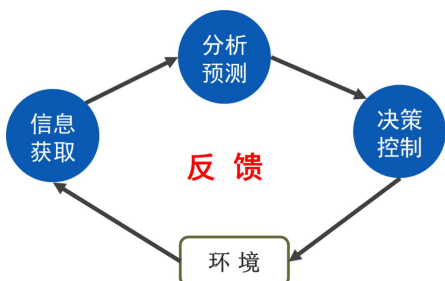
0.2 漫谈维纳与控制论



《控制论 (Cybernetics)》或
《关于在动物和机器中控制和通信的科学
(Control and Communication in the Animal and the Machine)》

0.3 控制系统与信息反馈

1. 控制系统无处不在
2. 信息反馈是保证控制性能的必要环节, 尤其对于较复杂系统 (反馈的必要性)



0.1 课程说明

主要参考资料:

- 维纳著. 控制论, 北京大学出版社, 2007
- 理查德等. 信息爆炸时代的控制, 科学出版社, 2004
- 戴先中等. 自动化学科概论. 高等教育出版社. 2006.4
- 万百五等. 自动化 (专业) 导论. 武汉理工大学出版社. 2003.9
- 汪晋宽等. 自动化概论. 北京邮电大学出版社. 2005.12
- 胡寿松编. 自动控制原理. 国防工业出版社. 2005.4

0.2 漫谈维纳与控制论

- 信息时代背后的“思想的力量”
- Cybernetics(控制学或控制论)与Control Theory (控制理论)
- MIT的Norbert Wiener研究随机过程的预测(1942), 提出Wiener滤波理论(1942), 发表《控制论》(Cybernetics) (1948), 标志着控制论学科的诞生。

0.2 漫谈维纳与控制论

诺伯特·维纳 (Norbert Wiener)
(1894.11.26-1964.3.18)

- 昔日神童
 - 幼受庭训, 通才教育: 数学、物理、化学、哲学与心理学、生物学
- 现代大师
 - 建立维纳测度 (1923)
 - 引进巴拿赫-维纳空间 (1920)
 - 阐述位势理论 (1925)
 - 发展调和理论 (1926)
 - 发现维纳-霍普夫方法 (1930)
 - 提出维纳滤波理论 (1942)
 - 开创维纳信息论
 - 创立控制论 (1948): 计算机设计、防空火炮自动控制理论、通信与信息理论和神经生理学

0.3 控制系统与信息反馈

3. 信息反馈的质量直接影响到控制的效果, 如:
 - 准确性、快速性
 - 甚至包括系统的稳定性
4. 控制系统的三种性能 (准确性、快速性、稳定性) 通常是相互制约的

自动化导论

Automation: An Introduction

南京大学控制科学与智能工程系

陈春林

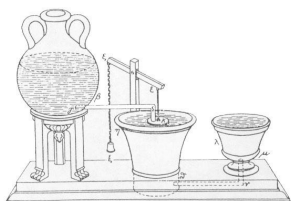
Email: clchen@nju.edu.cn

2025年3月4日

1.1 自动控制发展简史

(1) 控制的概念和思想由来已久 (1900年以前)

(2) 亚历山大的**希罗**发明开闭庙门和分发圣水等自动装置(100年)

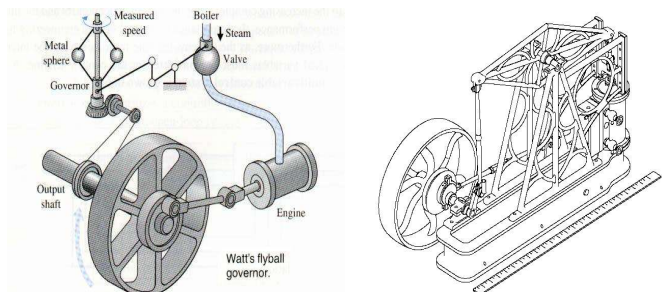


(3) 中国**张衡**发明水运浑象，研制出自动测量地震的**候风地动仪**(东汉,132年)



(6) 英国**J. Watt**用离心式调速器控制蒸汽机的速度(1788年)

(7) 英国**J. C. Maxwell**发表“论调速器”(On Governors)论文(1868年)



1 绪论——自动化的历史与未来

1.1 自动控制发展简史

1.2 自动控制主要研究领域

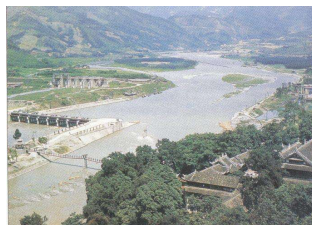
1.3 一个小例子：倒立摆

(0) 中国，埃及和巴比伦出现**自动计时漏壶**(1400B.C. ~1100B.C.)。孙武著《孙子兵法》(600B.C.)

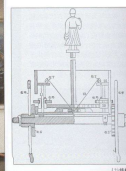
西汉漏壶



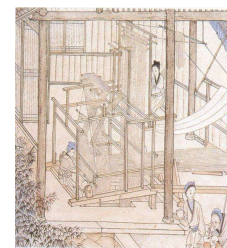
(1) 秦昭王时，**李冰**主持修筑**都江堰**体现的系统观念和实践(300B.C.)



(4) 中国**马钧**研制出齿轮传动的自动指示方向的**指南车**(三国,235年)



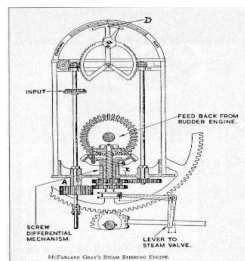
(5) 中国明代**宋应星**所著《天工开物》记载有程序控制思想(CNC)的**提花织机**结构图(1637年)



(8) 英国**E.J. Routh**建立**Routh判据**(Routh-Hurwitz Stability Criteria) (1875年)

(9) 俄国**A.M. Lyapunov**博士论文“论运动稳定性的一般问题”(1892年)

(10) 英国**J. M. Gray**设计出第一艘全自动蒸汽轮船“东方”号(Great Eastern) (1866年)



McFarlane Gray's steam steering engine (reproduced from Proceedings Institution of Mechanical Engineers).



(11) 由徐寿设计的中国第一艘蒸汽轮船“黄鹄”号(L20m, 25T, 10km/hr)在安庆内军械所下水(1866)。次年, 中国第一艘木质明轮蒸汽舰船“恬古”号在江南造船厂下水。

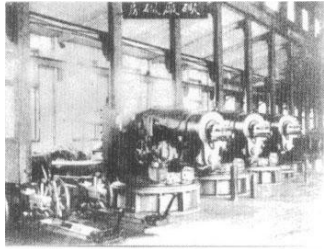


徐寿

操江号(62mx10m), 392匹马力, 600T排水, 备炮9门



“操江”号木质明轮蒸汽舰船



江南制造总局炮厂厂房

(2) 自动控制理论的发展和现状

1. 经典控制理论
 - 线性控制理论
 - 非线性控制理论
 - 采样控制理论
2. 现代控制理论
3. 大系统理论
4. 智能控制理论

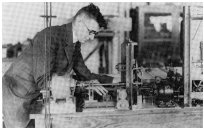
经典控制前期(The Pre-classical Period) (1900-1935)

(1) 美国福特(Ford Motor)汽车公司建成最早的汽车装配流水线(1913)

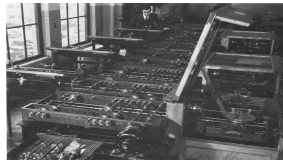


(2) 美国N. Minorsky研制出用于船舶驾驶的伺服结构, 提出PID控制方法(1922)

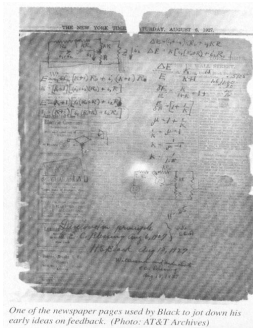
(3) 美国MIT的Vannevar Bush研制成第一台大型模拟计算机(Differential Analyzer)(1928)



V. Bush



(4) 美国H.S. Black提出放大器性能的负反馈方法(Negative Feedback Amplifier) (1927)



One of the newspaper pages used by Black to jot down his early ideas on feedback. (Photo: AT&T Archives)



(5) 美国E. Sperry以及C. Mason研制出火炮控制器(1925), 气压反馈控制器(1929)

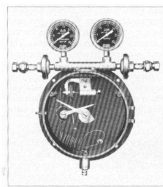
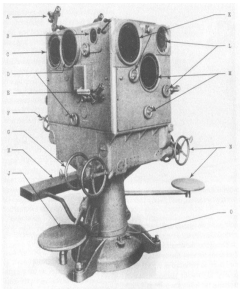


Fig. A simple Foshoro Company pneumatic controller. The controller was introduced in about 1922.

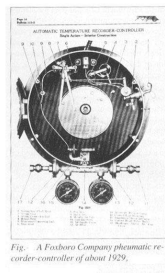


Fig. A Foshoro Company pneumatic recorder controller of about 1929.

经典控制(Classical Control) (1935-1950)

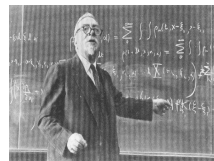
★(1) 美国贝尔实验室的H. Bode(1938), 以及Nyquist(1940)提出频率响应法

(2) 美国Taylor仪器公司的J. G. Ziegler和N. B. Nichols提出PID参数的最佳调整法(1942)

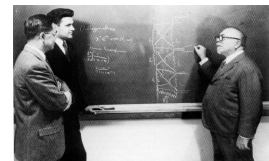


N.B. Nichols

★(3) 美国MIT的N. Wiener研究随机过程的预测(1942), 提出Wiener滤波理论(1942), 发表《控制论》(Cybernetics)一书(1948), 标志着控制论学科的诞生。



N. Wiener

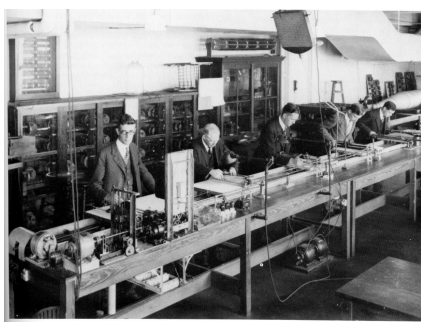


N. Wiener, shown here in 1954 with Yuk Wing Lee (left) and Amar G. Bose, discussing an aspect of statistical communication theory

(4) 美国的H. Hazen发表“关于伺服结构理论”(Theory of Servomechanism) (1934), 并在MIT建立伺服机构实验室(Servomechanism Laboratory) (1939)



H. Hazen

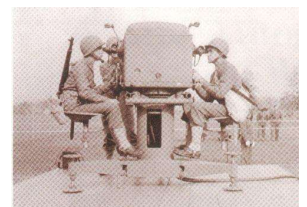


(5) 英国A. M. Turing提出图灵计算机的设想(1937)

(6) 在贝尔实验室Bode领导的火炮控制系统研究小组工作的C. Shannon提出继电器逻辑自动化理论(1938), 随后, 发表专著《通信的数字理论》(The Mathematical Theory of Communication), 奠定了信息论的基础(1948)



C. E. Shannon



The tracker of the M-9 electrical gun director in action. As one soldier orients the telescopes in elevation, the other orients them in azimuth by turning the entire tracker head.

(7) MIT Radiation Laboratory在研究SCR-584雷达控制系统的过程中, 创立了Nichols Chart Design Method, **R. S. Philips**的工作 On Noise in Servomechanisms, 以及 **Hurwicz** (1947)的数字控制系统(Sampled Data System)



★(8) 美国**W. Evans**提出**根轨迹法(Root Locus Method)** (1948), 以单输入线性系统为对象的经典控制研究工作完成。

(9) 多本有关经典控制的经典名著相继出版, 包括

Ed. S. Smith的**Automatic Control Engineering** (1942),

H. Bode的**Network Analysis and Feedback Amplifier**(1945),

L.A. MacColl的**Fundamental Theory of Servomechanisms** (1945), 以及**钱学森**的《**工程控制论**》(**Engineering Cybernetics**) (1954)

现代控制(Modern Control) (1950-)

二次世界大战中火炮, 雷达, 飞机以及通讯系统的控制研究直接推动了经典控制的发展。五十年代后兴起的现代控制起源于冷战时期的军备竞赛, 如导弹(发射, 操纵, 指导及跟踪), 卫星, 航天器和星球大战, 以及计算机技术的出现。



(1) 苏联**L.S. Pontryagin**发表“最优过程数学理论”, 提出**极大值原理(Maximum Principle)**(1956)

L.S. Pontryagin



(2) 美国**R. Bellman**在RAND Corporation数学部的支持下, 发表著名的**Dynamic Programming**, 建立最优控制的基础(1957)

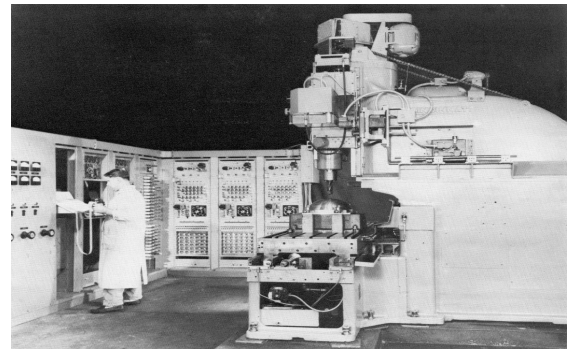


Mi-6 helicopter aircraft with two General Electric J-79 turbojet engines.

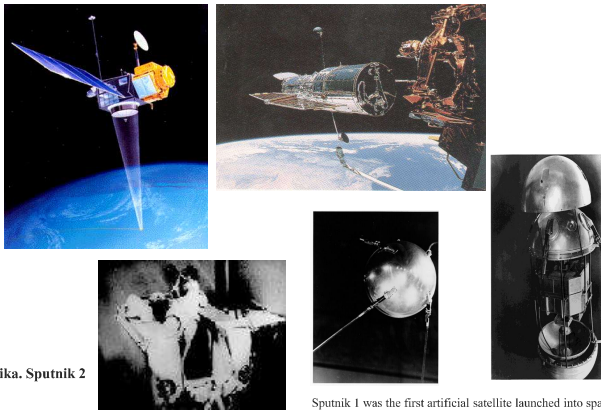
Red ground for an aircraft carrier of the Russian Navy.

(3) 国际自动控制联合会(IFAC)成立(1957), 中国为发起国之一, 第一届学术会议于莫斯科召开(1960)

(4) 美国MIT的**Servomechanism Laboratory**研制出第一台数控机床(1952)



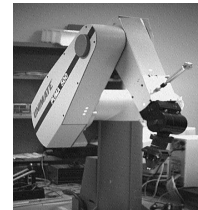
(5) 世界第一颗人造地球卫星(Sputnik)由苏联发射成功 (1957)



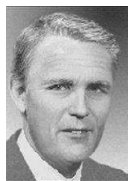
1957. Laika. Sputnik 2

Sputnik 1 was the first artificial satellite launched into space

(6) 美国**George Devol**研制出第一台工业机器人样机(1954), 两年后, 被称为**机器人之父**的**Joseph Engelberger**创立了第一家机器人公司, **Unimation**

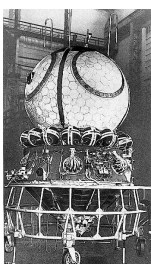


★(7) 美籍匈牙利人**R. E. Kalman**发表“On the General Theory of Control Systems”等论文, 引入状态空间法分析系统, 提出能控性, 能观测性, 最佳调节器和Kalman滤波等概念, 奠定了现代控制理论的基础(1960)



R.E. Kalman

(8) 苏联东方-1号飞船载着加加林进入人造地球卫星轨道, 人类宇航时代开始了(1961)



Capsule used in first manned orbit of earth



In 1961, the first human to pilot a spacecraft, Yuri Gagarin, was launched by the Soviet Union aboard Vostok I.



1961, at the age of 27, Gagarin left the earth. It was April the 12th, 9:07 Moscow time (launch-site, Baikonur). 108 minutes later, he was back. The period of orbital revolution was 89:34 minutes (this figure was "calculated by electronic computers"). The missions maximum flight altitude was 327 000 meters. The maximum speed reached was 28 260 kilometers per hour.



A stamp issued by Russia to memorize Y. Gagarin

(9) 1963年, 美国的**Lofti Zadeh**与**C. Desoer**发表**Linear Systems - A State Space Approach**. 1965年, Zadeh提出模糊集合和模糊控制概念



Lofti A. Zadeh

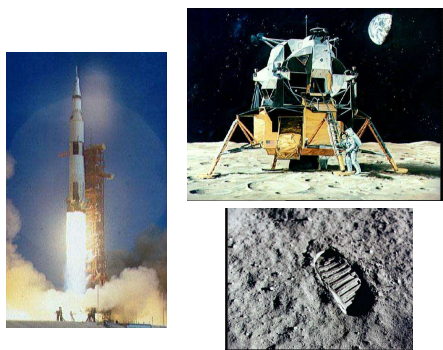


C. Desoer



(10) 美国的**E.I. Jury**发表“数字控制系统”(Sampled-Data Control System), 建立了数字控制及数字信号处理的基础(1958)

(11) 苏联发射“月球”9号探测器，首次在月面软着陆成功(1966)，三年后(1969)，美国“阿波罗”11号把宇航员N. A. Armstrong送上月球。



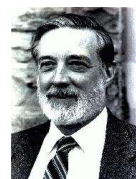
N.A. Armstrong

(12) 瑞典Karl J. Astrom提出最小二乘辨识，解决了线性定常系统参数估计问题和定阶方法(1967)，六年后，提出了自启调节器，建立自适应控制的基础。Astrom于1993年获得IEEE Medal of Honor。

★(13) 英国H.H Rosenbrock发表State Space and Multivariable Theory(1970)。加拿大W.M Wonham发表Linear Multivariable Control: A Geometric Approach(1974)。



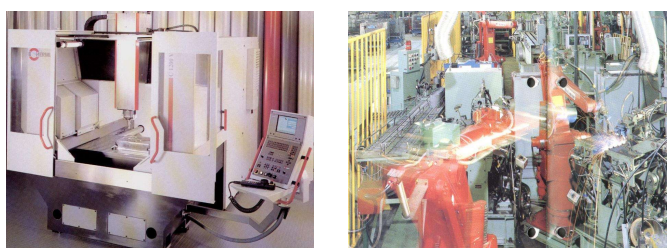
K. J. Astrom



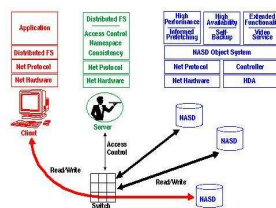
W.M Wonham

大系统理论 (Large Scale System) (1970-)

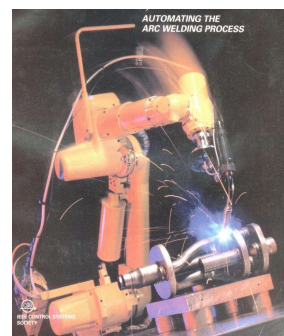
(1) 美国的M. E. Merchant提出计算机集成制造的概念(1969)



(2) 美国ARPA计算机网络初步建成(1971)



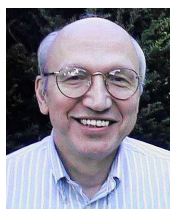
(3) 日本Fanuc公司研制出由加工中心和工业机器人组成的柔性制造单元(1976)



(4) 美国R. Brockett提出用微分几何研究非线性控制系统(1976)，意大利A. Isidori出版(Nonlinear Control Systems) (1985)。



From left to right, the participants of the special invited session on History of Control at the 4th CDC: S. Shabrin (session co-organizer), Drena Lazicek, Karl Astrom, Art Kronez, Irwin Sandberg, Roger Brockett, Tom Kailath, and Linda Bushnell (session co-organizer).



R. Brockett



A. Isidori

(5) 加拿大G. Zames提出H_∞鲁棒控制设计方法(1981年)

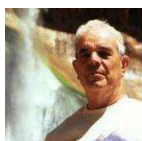
Gorge Zames



(6) 美国“哥伦比亚”号航天飞机首次发射成功(1981年)



(7) 美国A. Bryson和Y.C Ho发表Applied Optimal Control(1969)。Y.C Ho和X.R Cao等提出离散事件系统理论(1983)



A. Bryson



Yu C. Ho (何毓琦)



X.R.Cao (曹希仁)

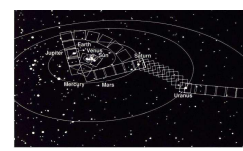
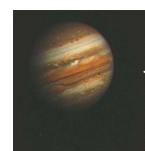
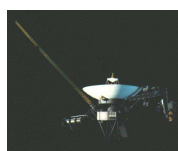
(8) 中国批准863高技术计划，包括自动化领域的计算机集成制造系统和智能机器人两个主题(1986)



(9) 第一台火星探测器Sojourner在火星表面软着陆(1996)



(10) 旅行者Voyager 一号，二号开始走出太阳系，对茫茫太空进行探索



(11) 火星探测器(勇气号2003)



(12) 神舟十号载人飞船(2013)



智能自动化(Automation of Intelligence) (2000-)

(13) BigDog (2008)



(14) Vijay Kumar 群无人机系统 (2012)



(15) AlphaGo (2016)



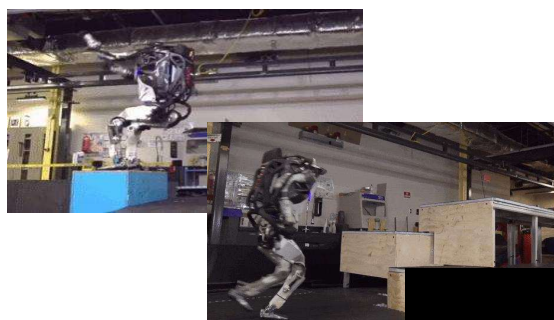
(16) Deep Reinforcement Learning for Artari 2600 (2015)



(17) Deep Reinforcement Learning for Mujoco (2016)

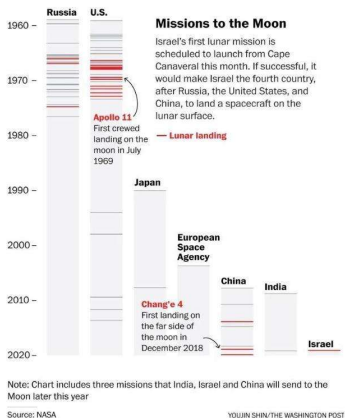
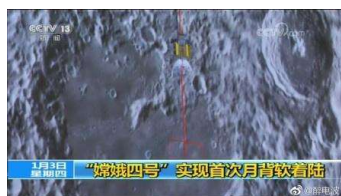


(18) 足式机器人

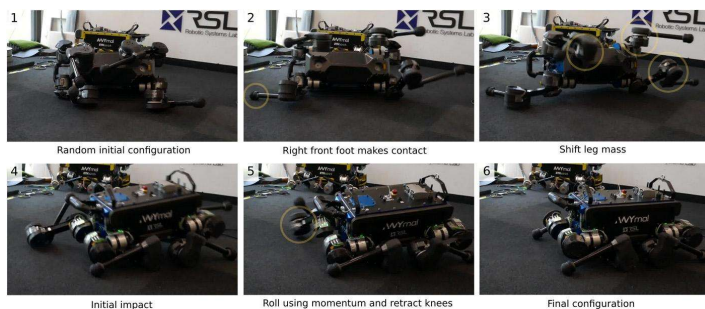


Mini Cheetah is our new 9 kg quadruped robot. It's powerful, robust, and inexpensive.

(19) 嫦娥四号登录月球背面 (2019年1月3号)

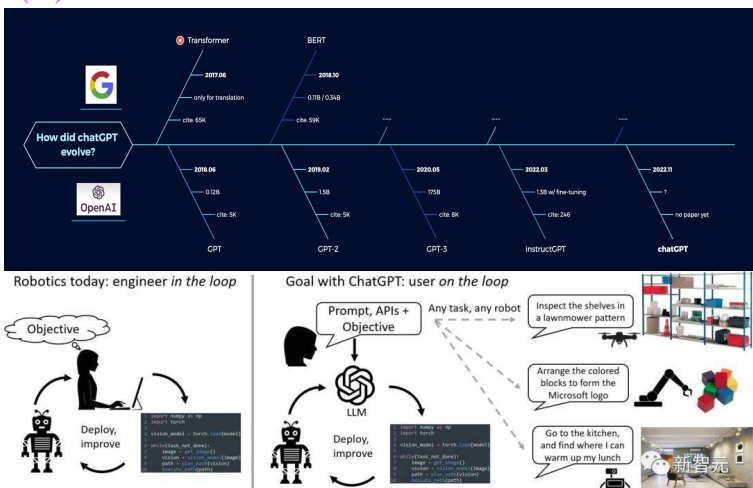


(20) ANYmal



Jemin Hwangbo et al. Sci. Robotics 2019;4:eau5872

(21) ChatGPT



小结

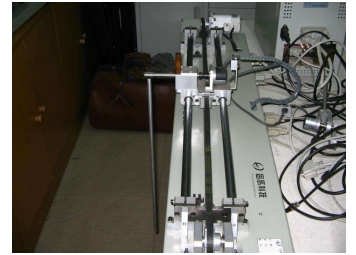
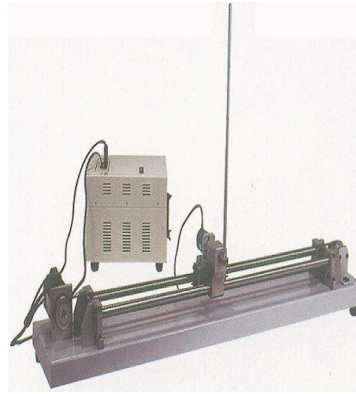
- 人类很早以前就进行过自动化的尝试
- 经典控制(Classical Control)理论的内容主要以传递函数为基础, 研究单输入、单输出一类自动控制系统的分析和设计问题
- 现代控制(Modern Control)理论的内容主要以状态空间法为基础, 研究多输入、多输出、定常数或变参数、线性或非线性质一类自动控制系统的分析和设计问题
- 随着现代科学技术的发展, 又出现了最优控制、最佳滤波、模糊控制、系统辨识、自适应控制、时变系统控制、分布参数系统控制、随机控制等一些新的控制方式。具有向智能自动化(Automation of Intelligence)方向发展的趋势。

1.2 自动控制的主要研究领域

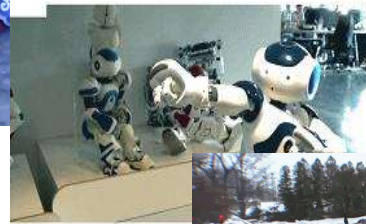
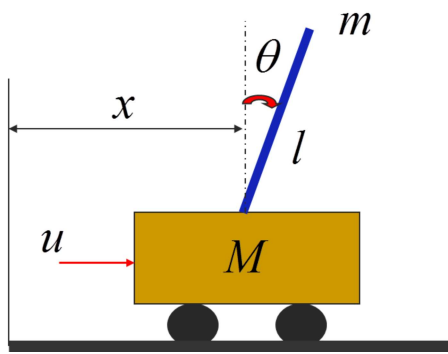
- 0811 控制科学与工程
 - 081101 控制理论与控制工程
 - 081102 检测技术与自动化装置
 - 081103 系统工程
 - 081104 模式识别与智能系统
 - 081105 导航、制导与控制

1.3 一个小例子：倒立摆 (Inverted Pendulum)

固高公司的直线一级倒立摆, 通过GT400运动控制卡对倒立摆进行控制。整个装置包括伺服机构、倒立摆本体和光电码盘几大部分。



一级倒立摆简化模型



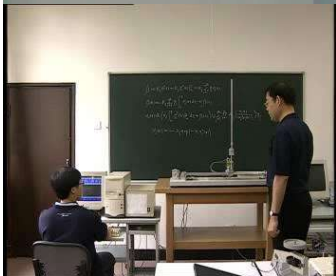
Boston Dynamics



一及倒立摆



二及倒立摆



三及倒立摆



四及倒立摆

自动化导论

Automation: An Introduction

南京大学控制科学与智能工程系
陈春林

Email: clchen@nju.edu.cn

2025年3月11日

2.1 无处不在的自动化

1. **控制无处不在，无时不有**：在现实生活、生产、军事、科技等各行各业中，控制关系、控制活动是一种普遍现象（活动）
2. **自动化（Automation）**：机器设备、系统或过程（生产、管理过程）在没有人或较少人的直接参与下，按照人的要求，经过自动检测、信息处理、分析判断、操纵控制，实现预期的目标的过程。
3. **自动化的发展**：机械自动化、电气自动化、信息自动化、智能自动化

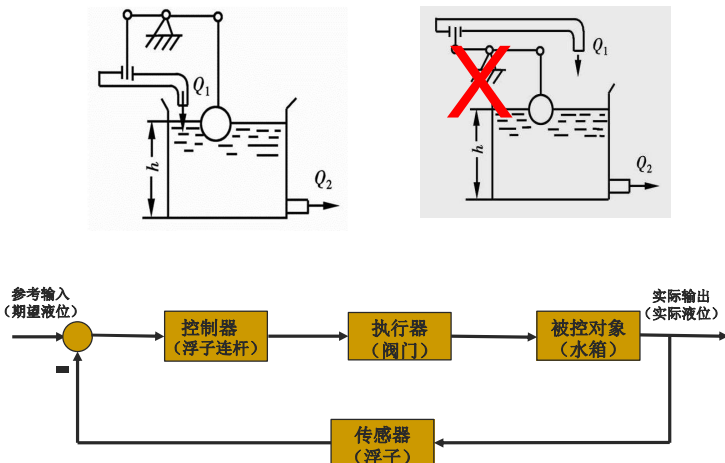
无处不在的自动化

自然界的活动



无处不在的自动化

A flush toilet



2 自动控制系统的基本概念

2.1 无处不在的自动化

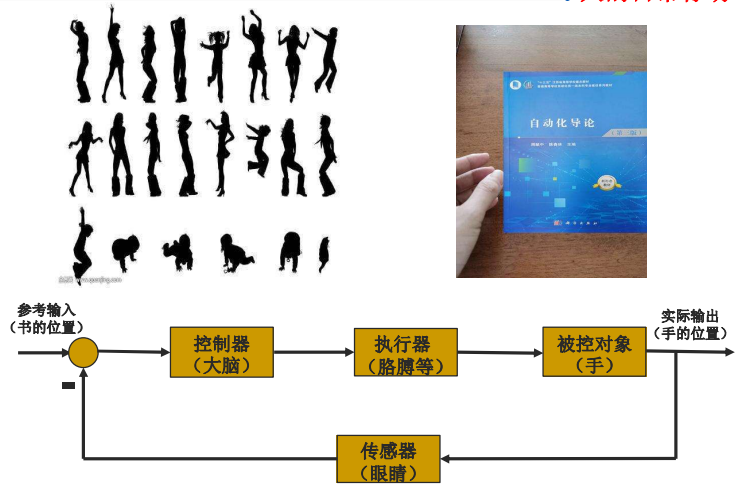
2.2 自动控制系统的的基本概念

2.3 系统建模之方框图

2.4 自动控制系统设计过程

无处不在的自动化

人的日常行动



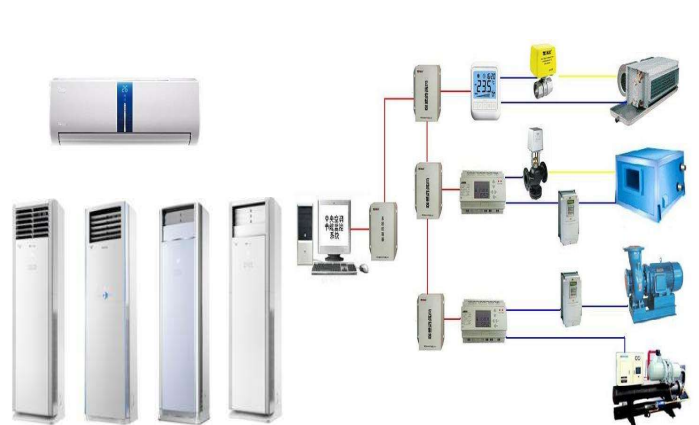
无处不在的自动化

A flush toilet



无处不在的自动化

空调



无处不在的自动化

BigDog



Support - Bounce on springy legs



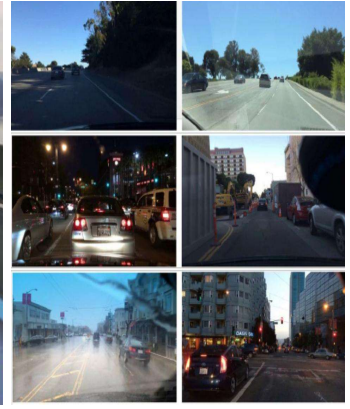
Balance - Move legs with symmetry to achieve balance



Posture - Keep body level using stance legs

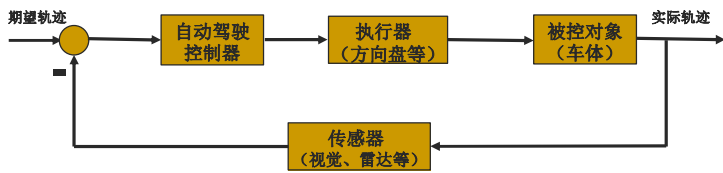
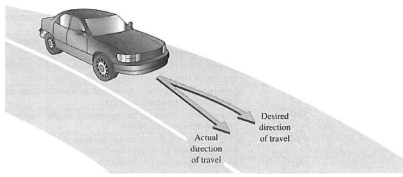
无处不在的自动化

无人驾驶汽车



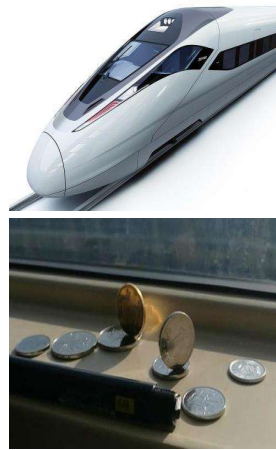
无处不在的自动化

无人驾驶汽车



无处不在的自动化

高铁



无处不在的自动化

港澳大桥施工



振华30号
起重船
世界最大
起重量12000
吨
总重约14万吨



无处不在的自动化

棋类游戏



Arthur Samuel
西洋跳棋
(1962)



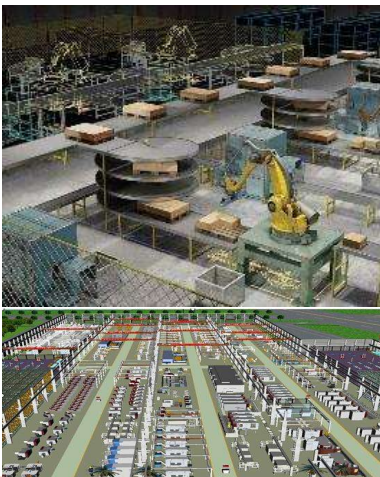
卡斯帕罗夫
与深蓝国际
象棋
(1997)



AlphaGo
围棋
(2015~)

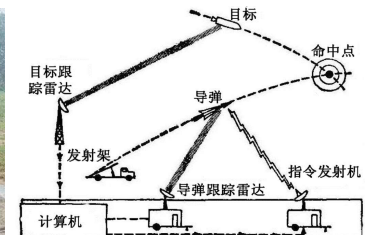
无处不在的自动化

工业系统



无处不在的自动化

武器系统



无处不在的自动化

机器人系统



FMS

KIVA

IkeaBot

- ✓ 工业机器人
- ✓ 智能(移动)机器人
 - 轮式
 - 腿式(多足)
 - 人形
 - 无人车
 - 无人机
 - 无人船
 -



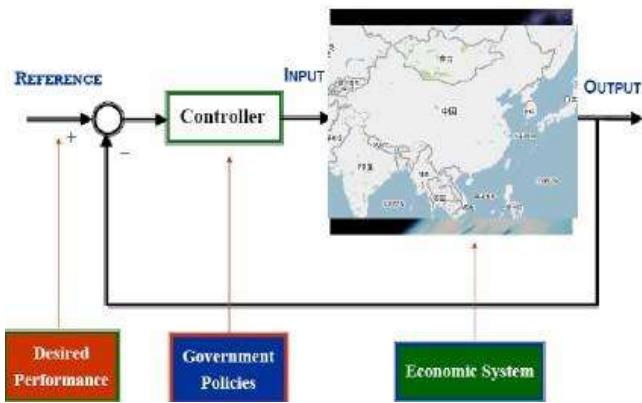
NAO

BigDog

Vijay Kumar

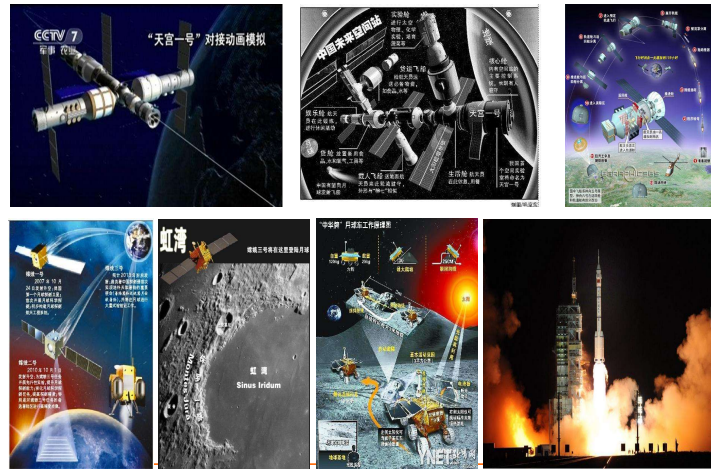
无处不在的自动化

经济系统



无处不在的自动化

航空航天



案例分析

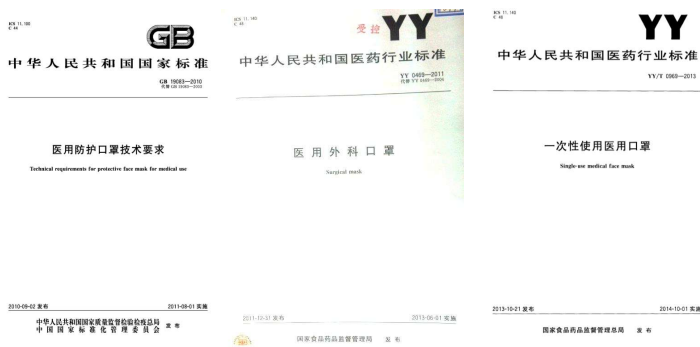
口罩机

假冒伪劣口罩



案例分析

口罩机



案例分析

口罩机

一次性使用医用口罩的技术要求

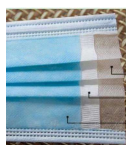
| | | | | |
|---|------------|---|-------|---------|
| 1 | 外观 | 9 | 微生物指标 | 细菌菌落总数 |
| 2 | 结构尺寸 | | | 大肠菌群 |
| 3 | 鼻夹 | | | 金黄色葡萄球菌 |
| 4 | 口罩带 | | | 绿脓杆菌 |
| 5 | 压力差(通气阻力) | | | 溶血性链球菌 |
| 6 | 细菌过滤效率 BFE | | | 真菌 |
| 7 | 颗粒过滤效率 PFE | | | |
| 8 | 环氧乙烷残留量 | | | |

灭菌型的指标要求

案例分析

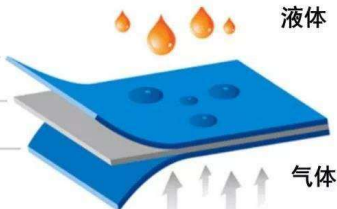
口罩机

口罩的基本结构机理



常见口罩的SMS结构

- 纺粘层 (Spunbound, 简写S)
- 单层聚丙烯
- 熔喷层 (Meltblown, 简写M)
- 单层或多层聚丙烯
- 纺粘层 (Spunbound, 简写S)
- 单层聚丙烯



案例分析

口罩机



智能化改进点:

1. 对关键的部件进行**动态检测与分析**, 以做故障预诊, 以提高设备运行的可靠性;
2. 对一些量化的电气、机械运动数据进行采集, 以作为应用**建模分析**的方法以提高生产效率的依据;
3. 电气控制系统实现**数据通信**功能;
4. 对原材料的消耗进行数据采集与监控, 其数据给**人工智能分析系统**, 可进行产能匹配、物料消耗、生产计划与调度的依据。



通过微信扫描包装盒上的二维码进行追溯查询

2.2 自动控制系统的基本概念

- **系统:** 系统是由**相互联系、相互作用**的许多要素结合而成的具有特定目的和功能的**有机整体**。
- **信息:** 信息是对数据的解释，是一切控制活动的基础。
- **反馈:** 把输出量（信号/信息）传输出去后，又将其取出送回到输入端，并与输入信号相比较产生**偏差信号**，再**对控制系统的再输出产生影响的过程**。
- **鲁棒、优化**
- **开环控制系统、闭环控制系统**

反馈 (feedback)

把**输出量 (信号/信息)** 传输出去后，又将其取出**送回到输入端**，并与输入信号**相比较产生偏差信号**，再**对控制系统的再输出产生影响的过程**。

(By “closing the loop”, effect is connected with cause, so that the cause—effect relationship is now one of interdependence.)

反馈 (续)

负反馈 (Negative feedback)

如反馈的信号是与输入信号相减，使产生的偏差愈来愈小，则称为负反馈

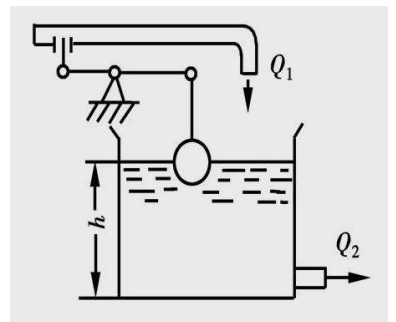
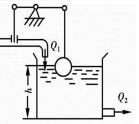
举例:

- 手取书
- 机床速度控制系统
- 防空导弹系统

反馈 (续)

正反馈 (Positive feedback)

如反馈的信号是与输入信号相加，使产生的偏差愈来愈大，则称为正反馈。

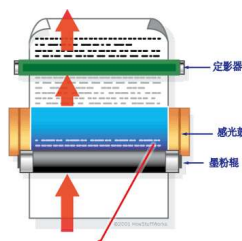


前馈 (feedforward)

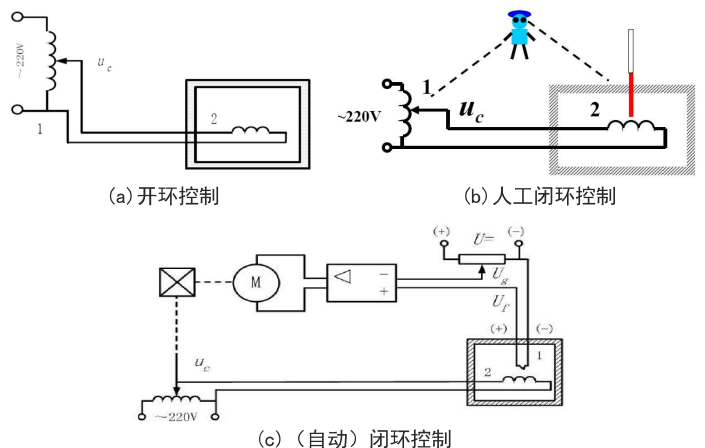
使控制对象跟随命令动作作为前提的控制方式。因为没有反馈控制中所必需的输出状态检测器，即使出现误差，也无法修正。

举例:

打印机的工作过程



下面三张图中的系统各自采用了什么控制方式 (开环、闭环) ?



自动控制 (Automatic Control)

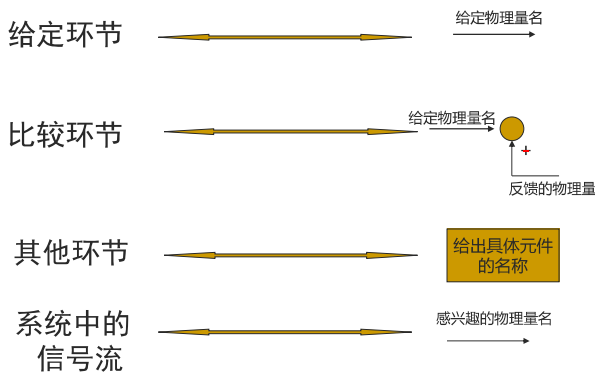
指在无人直接干预的情况下, 利用外加的设备或装置 (简称控制装置或**控制器**), 使机器、设备或生产过程等 (统称**被控对象**) 的某一工作状态或参数 (称**被控量**, 如温度、压力、PH值等) 自动、准确地**按照预期的规律运行**。

自动控制系统 (Automatic Control System)

指实现上述控制目的, 由**相互制约**的各部分**按一定规律**组成的具有特定功能的**有机整体**。

(A Control System is an interconnection of components forming a system configuration that will provide a desired system response.)

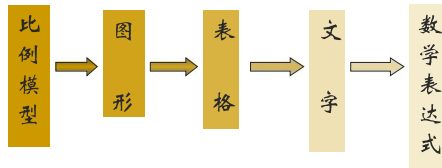
方块图(Block Diagram)描述的构图要素



2.3 系统建模之方框图

模型: 是对实际物理系统的一种抽象。

模型形式:



模型各有特点, 使用时可灵活掌握。

若**分析研究系统的动态特性**, 取其**数学模型**比较方便;
若**分析研究系统的内部结构情况**, 取其**物理模型**比较直观;
若两者皆有, 则取其**图模型**比较合理。

2.3 系统建模之方框图

常用的控制系统模型示例:

图模型: 原理图 **方框图** 结构图 信号流程图

文字模型: 算法及程序语言

数学模型: 时域模型 **微分方程** 或差分方程

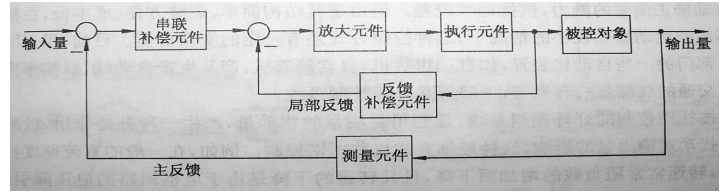
复域模型 传递函数

频域模型 频域特性

自动控制系统的组成要素 (Basic Components)

- (1) 给定元件: 用以给出与期望的被控量相对应的系统输入量 (即被控量 (输出量) 应取得值)。
- (2) 测量元件: 用以检测被控量的大小。 (**各类传感器**)
- (3) 比较元件: 用以比较给定值与被控量之间的误差。 (**常用差动放大器、电桥等**)
- (4) 放大元件: 用以将误差信号放大, 以便驱动执行机构。 (**常用电子元件网络、或功率放大器等**)
- (5) 执行元件: 用以执行控制命令, 推动被控对象 (**电机**)
- (6) 校正元件: 用以改善系统的动、静态性能的元部件。

自动控制系统的方框图 (通路与回路)



前向通路: 从输入端沿箭头方向到达输出端的信号传输通路。

主反馈通路: 系统输出量经测量元件反馈到输入端的传输通路。

主回路: 前向通路与主反馈通路共同构成的回路。 (**注意: 内回路**)

单回路: 只有一个主反馈通路的系统。 (**注意: 多回路**)

2.3 系统建模之方框图

广义的控制系统模型定义:

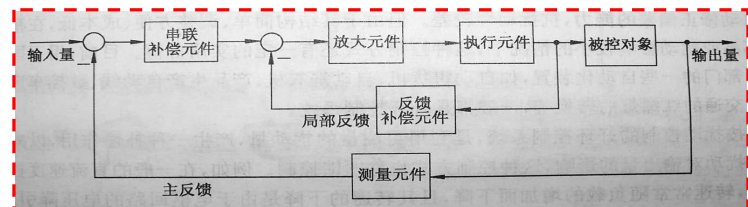
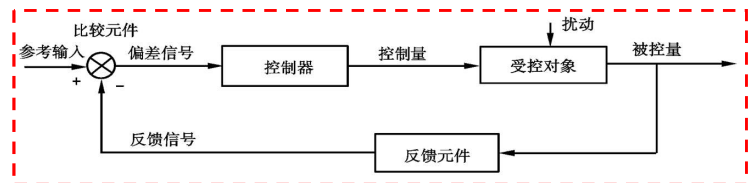
揭示控制系统各变量内在联系及关系的图形表示或解析式。

控制系统的数学模型定义:

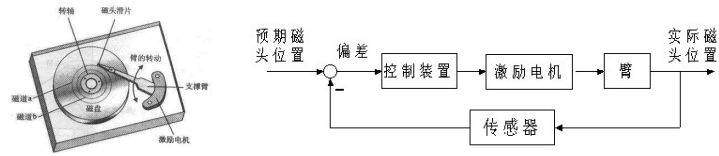
描述系统或元件的动态特性的数学表达式。

可用于揭示系统结构、参数与性能特性的内在关系

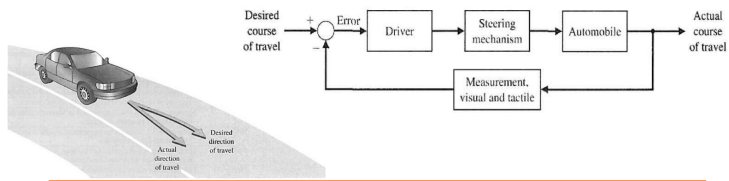
2.3 系统建模之方框图



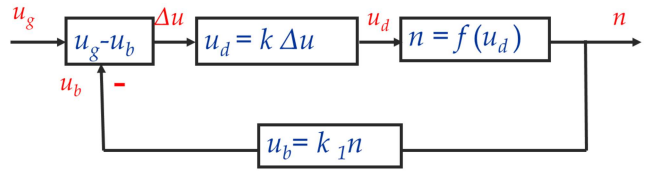
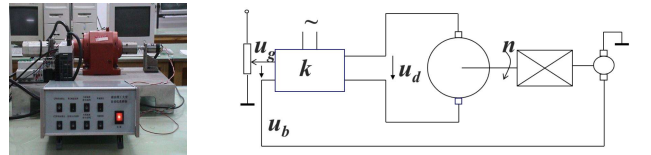
例：磁盘驱动读取系统



例：汽车驾驶系统



例：直流电机调速系统



按偏差调节: $n \uparrow \rightarrow u_b \uparrow \rightarrow (u_g - u_b) \downarrow \rightarrow u_d \downarrow \rightarrow n \downarrow$

2.4 控制系统设计过程



自动化导论

Automation: An Introduction

南京大学控制科学与智能工程系

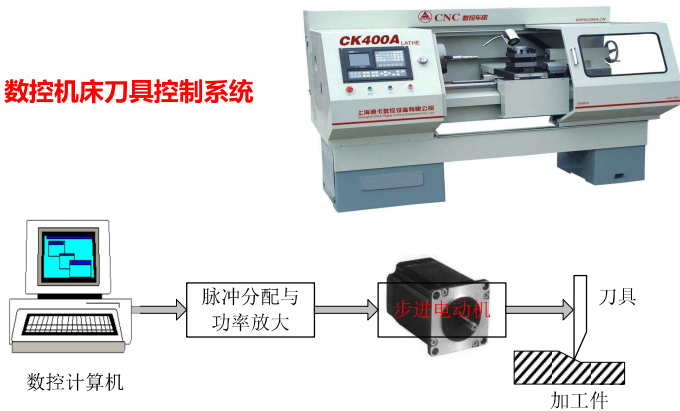
陈春林

Email: clchen@nju.edu.cn

2025年3月18日

3.1 自动控制系统的组成

例：数控机床刀具控制系统



3 自动控制系统的描述原理

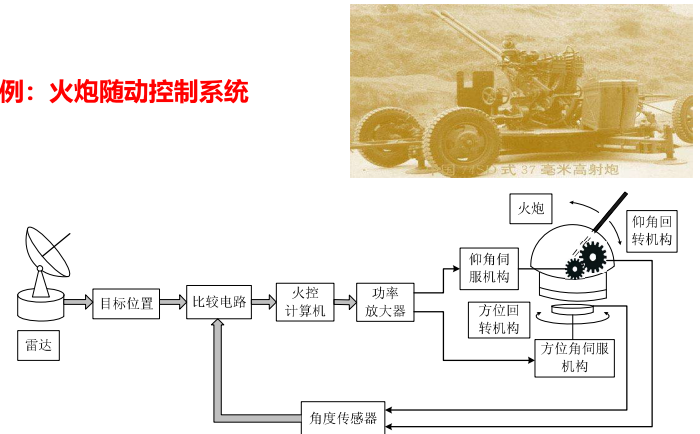
3.1 自动控制系统的组成

3.2 自动控制系统的模型体系

3.3 自动控制系统的性能描述

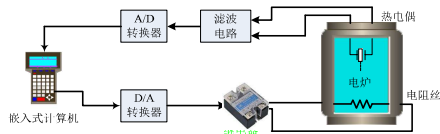
3.1 自动控制系统的组成

例：火炮随动控制系统

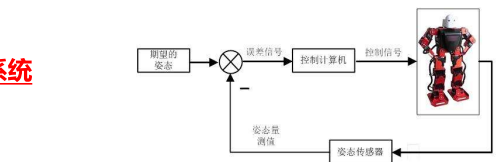


3.1 自动控制系统的组成

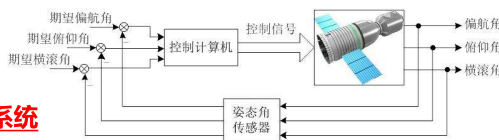
电加热炉温控系统



类人机器人控制系统



航天器姿态控制系统

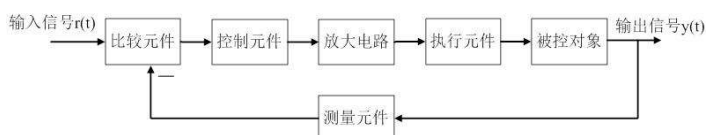


3.1 自动控制系统的组成

各元件之间的关系



如数控机床的刀具控制系统——开环控制



如火炮随动控制系统——闭环控制

3.1 自动控制系统的组成

- (1) 给定元件：给出与被控量的期望值相对应的系统参考输入信息（参考量）。
- (2) 测量元件：即传感器，其作用是测量被控对象的某些状态信号，并将测量信息转换为适当的信号（如电信号）送往比较元件。
- (3) 比较元件：将测量装置（元件）测得的被控对象的被控量与系统参考输入信息相对比，并将所产生的偏差信号送往控制元件。
- (4) 控制元件：又称控制器，是自动控制系统实现控制的核心部件，其功能是根据输入信号或比较元件所给出的偏差信号按照一定的规律（即控制规则或控制算法），产生相应的控制信号。
- (5) 放大元件：其作用是将控制信号进行功率放大，以提供执行元件所需要的能量。
- (6) 执行元件：又称为执行机构或执行器，其作用是直接驱动被控对象，使被控对象的某些被控量（如温度、位置、速度等）发生变化。
- (7) 被控对象：广义上讲，包括进行物理、生化等过程生成被控量的实际物体。

讨论：分别列出下列系统对应的各“元件”具体形式

| | 电加热炉温控系统 | 类人机器人控制系统 | 航天器姿态控制系统 |
|----------|----------|-----------|-----------|
| (1) 给定元件 | | | |
| (2) 测量元件 | | | |
| (3) 比较元件 | | | |
| (4) 控制元件 | | | |
| (5) 放大元件 | | | |
| (6) 执行元件 | | | |
| (7) 被控对象 | | | |

3.2 自动控制系统的模型体系

系统模型是一个系统某一方面本质属性的描述，以某种确定形式(文字、符号、图表、实物、数学公式等)提供关于该系统的知识。

理解要点:

- (1) 系统模型一般不是系统对象本身，而是现实系统的描述、模仿或抽象。
- (2) 系统模型只是系统某一方面本质属性的描述，本质属性的选取完全取决于研究该系统的目的。

3.2 自动控制系统的模型体系

系统与模型的关系

◆ 同一个系统模型，可以代表多个系统。

$$y = kx$$

- (1) 电压与电流、电阻之间的关系;
- (2) 运动距离与速度、时间之间的关系;
- (3) 力与质量、加速度之间的关系
- (4)

3.2 自动控制系统的模型体系

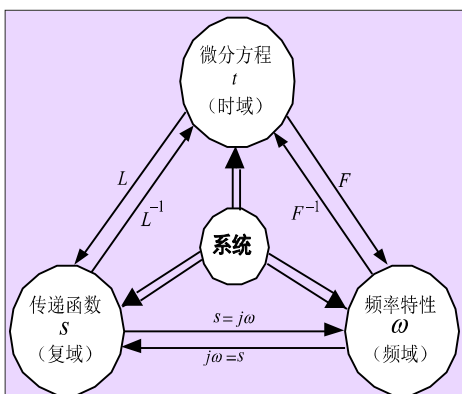
控制系统的模型

(广义的) 控制系统模型定义:

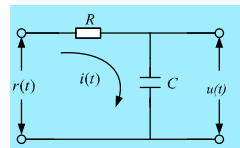
揭示控制系统各环节及变量内在联系及关系的文字描述、图形表示形式或数学表达式。

3.2 自动控制系统的模型体系

控制系统“三域”数学模型之间的相互关系



例: 一个简单的RC电路



$$RC \frac{du(t)}{dt} + u(t) = r(t)$$

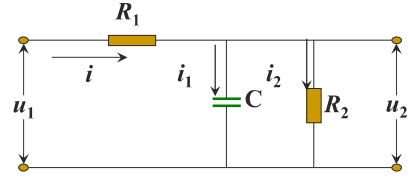
$$G(s) = \frac{U(s)}{R(s)} = \frac{1}{RCs + 1}$$

$$G(j\omega) = \frac{U(j\omega)}{R(j\omega)} = \frac{1}{jT\omega + 1}$$

3.2 自动控制系统的模型体系

系统与模型的关系

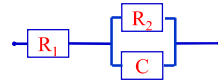
◆ 同一个系统根据不同研究目的，可以建立不同的系统模型。



(1) 考虑总电流 \$i\$ 与分电流 \$i_1\$、\$i_2\$ 之间的关系，可建立数学模型 $i = i_1 + i_2$

(2) 考虑输入电压 \$u_1\$ 与输出电压 \$u_2\$ 之间的关系可得到数学模型 $u_2 = L^{-1} \left[u_1 \frac{1/C // R_2}{R_1 + R_2 // 1/C} \right]$

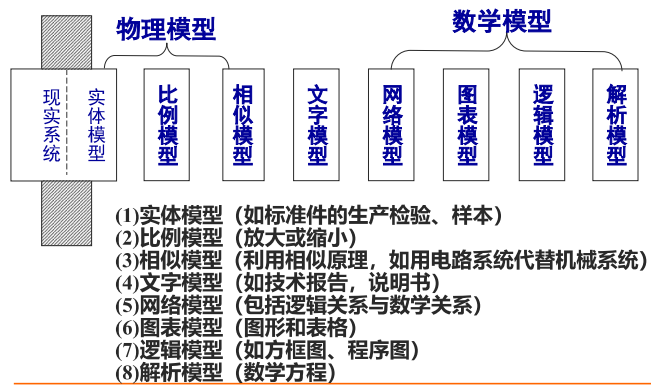
(3) 考虑可靠性关系



3.2 自动控制系统的模型体系

系统模型的分类

常用的几种系统模型如下图所示:



3.2 自动控制系统的模型体系

常用的控制系统模型

图模型: 原理图 方块(框)图 结构图 信号流程图

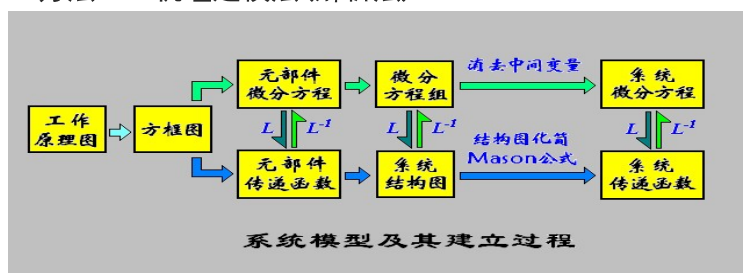
文字模型: 算法及程序语言

数学模型: 时域模型 (微分方程(含状态空间模型) 差分方程)
 复域模型 (传递函数)
 频域模型 (频率特性)

3.2 自动控制系统的模型体系

控制系统模型的建模方法

方法一: 机理建模法(解析法)

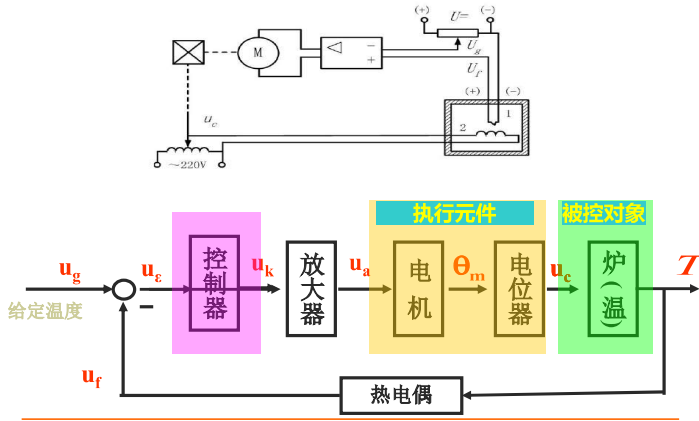


方法二: 实验辨识法

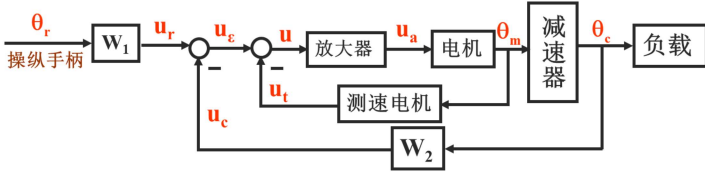
思路: 根据人为施加给系统的某种测试信号，通过记录和分析系统的基本输出响应来确定系统的数学模型。

3.2 自动控制系统的模型体系

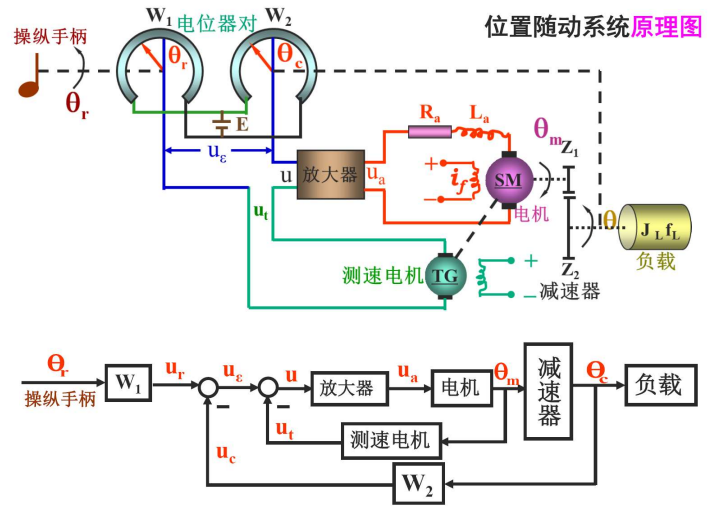
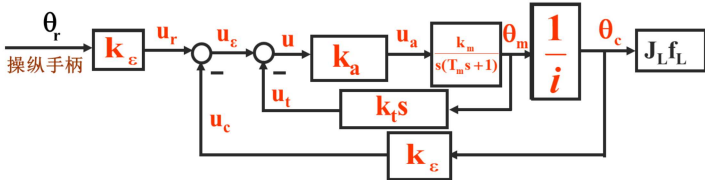
控制系统的图模型 (结构图)



位置随动系统方框图



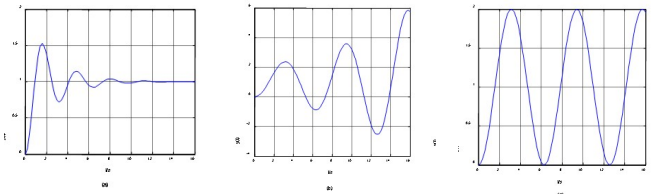
位置随动系统结构图



3.3 自动控制系统的性能描述

- A. 稳定性
- B. 准确性
- C. 快速性
- D. 鲁棒性

控制系统的稳定性



稳定!

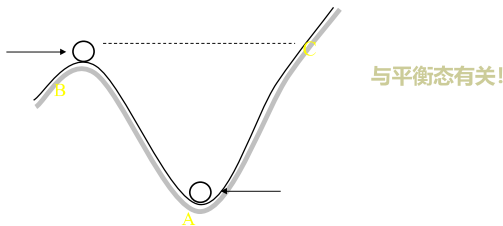
不稳定!

临界稳定!

稳定是系统工作的首要条件!

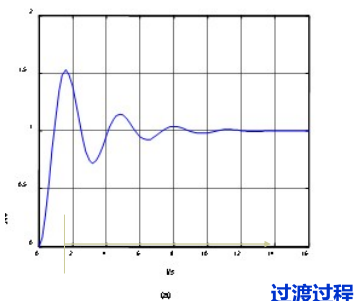
A 稳定性

何为稳定性?



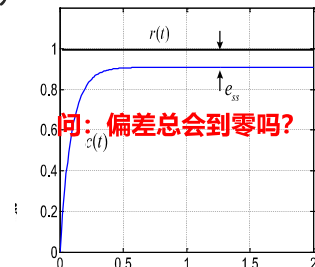
B. 准确性

■ **过渡过程**: 被控对象在响应期望输入信号时, 不可能立刻达到期望的位置或状态, 而是有一定的响应过程, 这一过程又称为过渡过程。



B. 准确性

■ **控制系统的准确性**: 即是指过渡过程结束后, 实际输出量与期望输入量之间的偏差大小, 也称为系统的静态精度 (Static Precision) 或稳态精度 (Steady Precision)

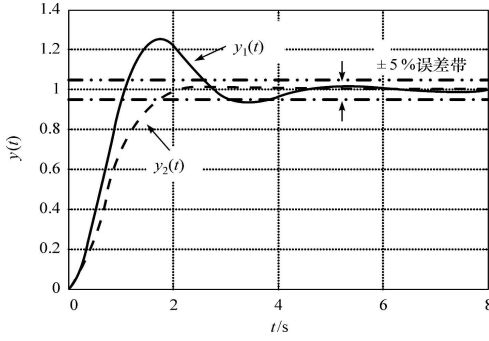


对稳定系统: 实际的输出与期望输出的偏差逐渐减小, 并趋于一定值, 理想情形是0。

问: 偏差总会到零吗?

C. 快速性

- 自动控制系统被控对象对输入量的响应是需要一定的过渡过程的，实际工程中，我们总是希望这个过程能够尽快地结束，这就是对控制系统快速性的要求。



快速性性能指标 (单位阶跃函数作用下的定义)

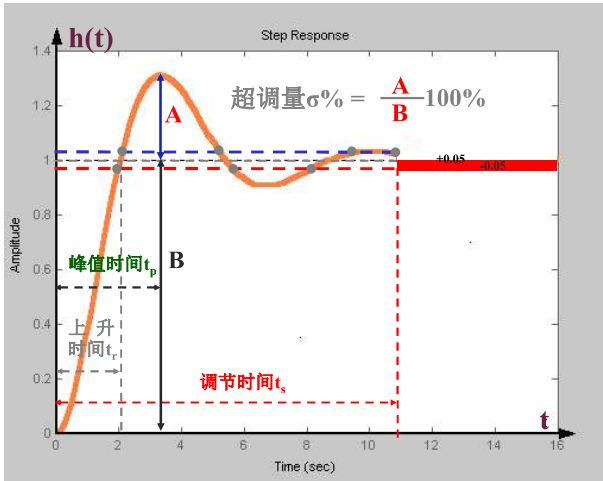
- (1) 延迟时间 t_d (Time Delay): 响应曲线第一次达到终值的一半所需的时间。
- (2) 上升时间 t_r (Rise Time): 响应从终值的10%上升到终值的90%所需的时间; 有振荡时, 可定义为从0到第一次达到终值所需的时间。
- (3) 峰值时间 t_p (Peak Time): 响应超过其终值, 达到第一个峰值所需要的时间。
- (4) 调节时间 t_s (Settling Time): 响应达到并保持在终值的 $\pm 5\%$ 或 $\pm 2\%$ 误差范围内所需的最短时间。
- (5) 超调量 $\sigma\%$ (Percent overshoot): 峰值超出终值的百分比。

$$\sigma\% \triangleq \frac{h(t_p) - h(\infty)}{h(\infty)} 100\%$$

D. 鲁棒性

- “鲁棒性”:

指控制系统在一定(结构, 大小)的参数摄动下, 维持某些性能的特性。根据对性能的不同定义, 可分为稳定鲁棒性和性能鲁棒性。



自动化导论

Automation: An Introduction

南京大学控制科学与智能工程系
陈春林

Email: clchen@nju.edu.cn

2025年3月25日

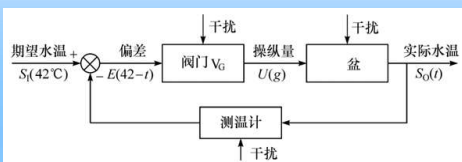
实例:



如何调节水温和液位在期望状态?

4.1 人工控制和自动控制

◆ 单考虑温度控制情景

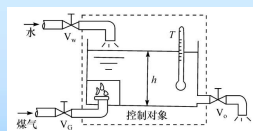


人工控制: 对温度感知和对阀门的操作完全由用水者自己完成。

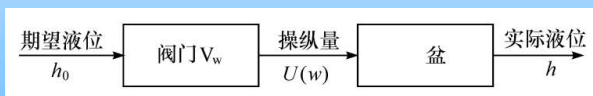
自动控制: 没有人直接参与, 从测量到操作阀门等全部过程都用相关装置(设备)代替人来完成。

思考4-1: 人在此控制系统中担当了哪些角色和功能?

4.2.1 开环控制方式



一种液位控制系统方框图:



- 其信号是沿箭头方向单方面流动, 不存在反馈, 是典型的开环控制。
- 优点: 结构简单、功耗小、动作快。
- 缺点: 对于干扰无能为力, 会使系统存在(不允许的)误差, 控制精度低



拓展4-1: 打印机的打印控制方式?

4 自动控制系统的的基本控制过程

4.1 人工控制和自动控制

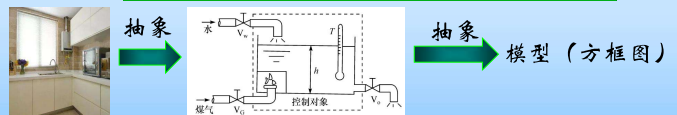
4.2 自动控制系统的的基本控制方式

4.3 不同输入作用下的控制

4.4 不同特性信号下的控制

4.5 控制系统中的非线性现象

回顾: 一个自动控制系统的描述原理

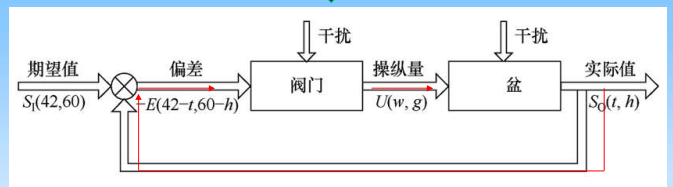


含物质、能量的流动过程

抽象

仅含信息的流动过程

自己试画



控制过程的模型化(方框图)

4.2 自动控制系统的的基本控制方式

控制的目的?

要求系统状态(实际水温)向期望状态(理想的水温)转移!

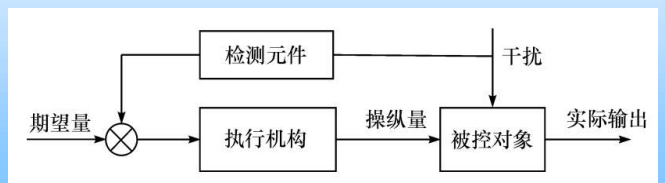
有哪些控制的方式?

开环控制方式

反馈控制方式

复合控制方式

● 按扰动控制的开环控制方式(顺馈控制)



- ◆ 利用可测量的扰动经测量变换后, 作为补偿作用, 用来消除或削弱扰动对被控量的影响。但当扰动作用较多时, 将使得控制系统复杂化, 很难协调地进行控制。

思考4-2: 可实施顺馈控制的条件有哪些?

拓展4-2: 随气温增减衣服的控制过程是什么?

4.2.2 反馈控制方式

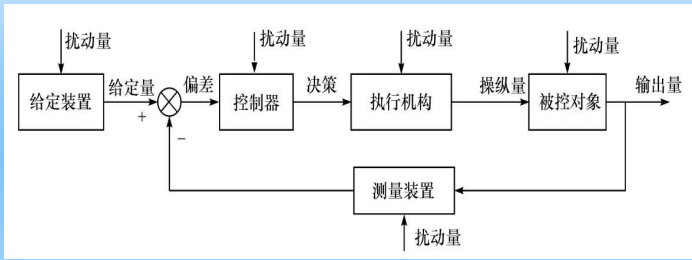
• 复习：什么叫反馈？

把输出量（信号/信息）传回输入端，又将其取出送回输入端，并与输入信号相比较产生偏差信号，再对控制系统的再输出产生影响的过程。

• 示例：人工液位控制过程



• 更一般的反馈控制方式



思考4-3：那么多扰动该怎么办？

4.3 不同输入信号作用下的控制

4.3.1 控制系统的基本类型

(1) 恒值控制（或称自动调节、自动镇定）

控制系统的特点：参据量是一个恒定的数值（常值），要求被控量也是一个常值。

典型应用：空调、工业生产中的恒温、恒压、恒液位等过程控制系统等。



分析与设计的重点：各种扰动对被控对象的影响及抗扰动的措施。

4.3 不同输入信号作用下的控制

4.3.1 控制系统的基本类型

(3) 程序控制

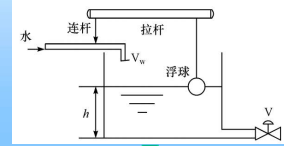
控制系统的特点：参据量是预先规定的随一定规律变化的函数，要求被控量快速、准确地加以复现。

典型应用：数控机床、家用电器、航（空）天器、先进制造车间等。

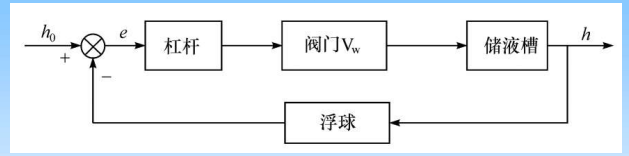


分析与设计的重点：控制精度准确性、控制算法快速性和控制程序可靠性。

- 如果能用一些相应的元部件来代替人工控制对各部分的功能，可以组成仿人液位控制系统：

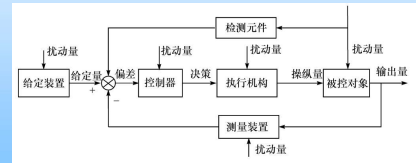


自己试画



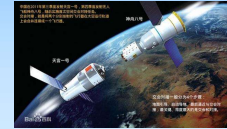
液位控制系统的控制过程

4.2.3 复合控制方式



- 复合控制是顺馈控制和反馈控制的有机结合，系统中的补偿控制（顺馈控制）能及时地抵消可测扰动对被控量的不利影响，而反馈控制能保证系统的高精度。这是一种得到广泛应用的控制方式。

拓展4-3：神舟飞船与天宫空间站交会对接为什么要进行人工手控和自动控制两种方式实验？（冗余/冗余控制）



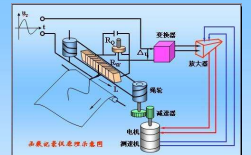
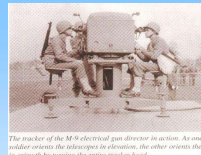
4.3 不同输入信号作用下的控制

4.3.1 控制系统的基本类型

(2) 随动控制（如被控量为机械量，又称伺服控制）

控制系统的特点：参据量是一个预先未知的随时间任意变化的函数，要求被控量以尽可能小的误差跟随参据量的变化。

典型应用：火炮（伺服）、雷达记录仪等系统。



分析与设计的重点：被控量跟随未知的任意变化量的快速性和准确性。

4.3 不同输入信号作用下的控制

4.3.2 不同控制系统的典型输入信号

◆ 先思考几个问题：（思考4-4）

- (1) 输入信号有什么作用？
- (2) 为什么要引入典型输入信号？
- (3) 有哪些类型的输入信号？

◆ 可选作典型输入信号的函数应具备的条件（与数学的关联）

- (1) 这种函数在现场和实验中容易得到；
- (2) 控制系统在这种函数作用下的性能应代表在实际工作条件下的性能；
- (3) 这种函数的数学表达式简单，便于理论分析和计算。

4.3.2 自动控制系统的典型输入信号

(1) 阶跃信号

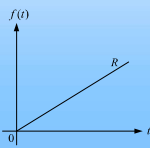


$$f(t) = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ R & t \geq 0 \end{cases} \quad f(t-t_0) = \begin{cases} 0 & t < t_0 \\ R & t \geq t_0 \end{cases}$$

典型应用: 一般用于恒值控制系统的分析、设计、调试和检验等。 (时域)

4.3.2 自动控制系统的典型输入信号

(3) 斜坡信号



$$f(t) = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ Rt & t \geq 0 \end{cases}$$

典型应用: 一般用于随动控制系统的分析、设计、调试和检验等。 (时域)

4.4 不同特性信号作用下的控制

思考4-5: 当控制系统中存在数字式环节时该怎么办?

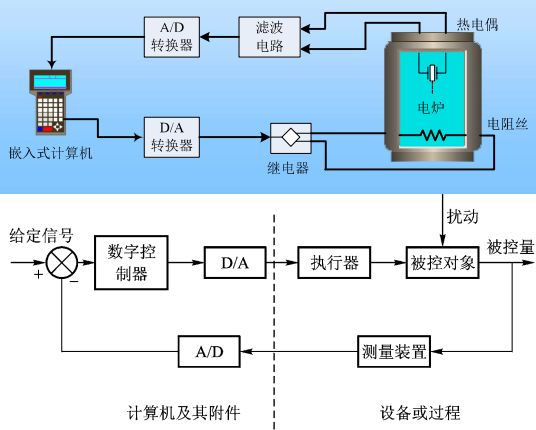
4.4.1 连续与离散控制

从控制信号的特性角度，我们可以简单地将所有控制系统分为连续控制系统和离散控制系统两大类。

连续控制系统: 指系统中所有传递的信号都是时间上的连续函数。

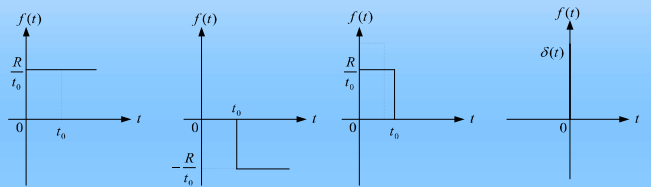
离散控制系统: 指在系统的局部或全部是时间上的断续信号。
(即离散信号)

典型的离散控制系统结构



4.3.2 自动控制系统的典型输入信号

(2) 脉冲信号

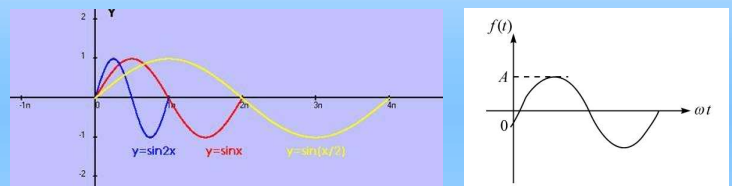


$$f(t) = \lim_{t_0 \rightarrow 0} \frac{R}{t_0} [1(t) - 1(t-t_0)] = \delta(t)$$

典型应用: 一般用于控制系统的稳定性分析。 (时域)

4.3.2 自动控制系统的典型输入信号

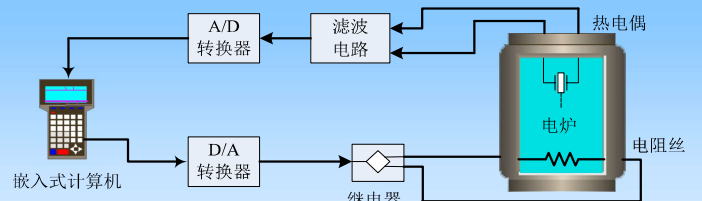
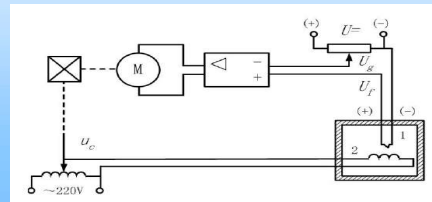
(4) 正弦信号



$$f(t) = A \sin(\omega t - \varphi)$$

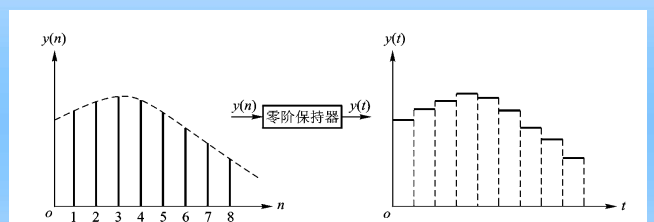
典型应用: 一般用于控制系统的分析、设计、调试和检验等。 (频域)

1、连续与离散控制系统



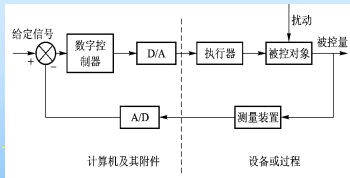
2、连续信号的离散化

保持

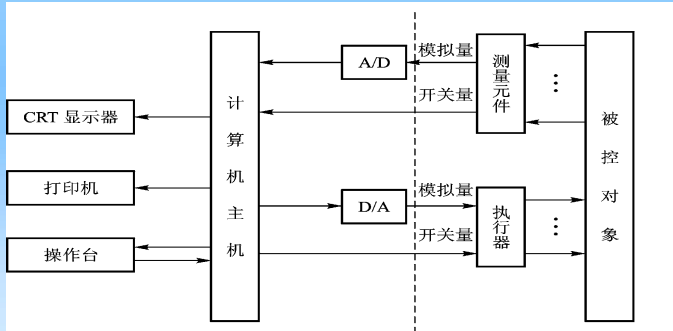


思考4-5: 如用高阶保持器会得到什么样的y(t)?

4.4.2 数字计算机控制



典型的计算机控制系统结构



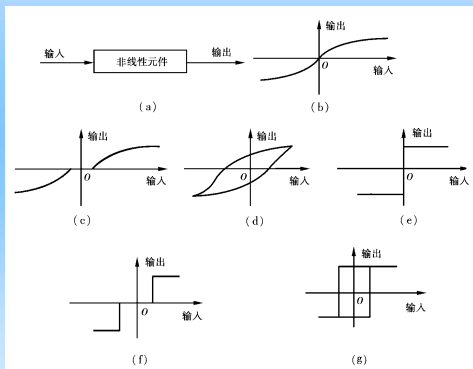
4.5 控制系统中的非线性现象

思考4-6: 实际控制系统中的所有环节都呈线性特性吗?

- A. 理想的线性系统是不存在的，仅是实际系统的一种近似；
- B. 只要控制系统中存在非线性元件，则系统必是非线性的；
- C. 要**基本了解**非线性环节对控制系统性能影响的有利和不利面。

B. 非线性元件及其特性

如元件（环节）的**输入/输出特性不满足叠加原理**，则称该元件（环节）**具非线性特性**，或称该元件（环节）是非线性的。



非线性元件特性举例：

- (a) 方框图
- (b) 饱和非线性；
- (c) 死区非线性；
- (d) 磁滞非线性；
- (e) 继电型非线性；
- (f) 带有死区的继电型非线性；
- (g) 具有磁滞的继电型非线性

4.5 控制系统中的非线性现象

4.5.2 非线性特性元件对控制系统的影响

- 不同非线性特性元件对控制系统性能的影响是不同的；
- 要一分为二地看待不同非线性特性元件对控制系统性能的有利和不利影响；
- 有时，人们会有意识地利用非线性特性元件的特性，获得特定的系统输出信号形式。

几点说明

◆ 数字计算机控制系统是典型的离散控制系统，因此类控制系统的主要信息处理设备是数字计算机，故常称其为计算机控制系统。

◆ 计算机控制系统的硬件组成

- 1) 计算机主机
- 2) 输入输出设备
- 3) 人机接口设备

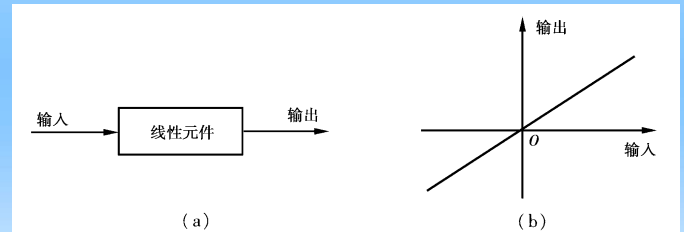
◆ 计算机控制系统的软件组成

- 1) 系统软件
- 2) 应用软件

5.5 控制系统中的非线性现象

A. 线性元件及其特性

如元件（环节）的**输入/输出特性满足叠加原理**，则称该元件（环节）**具线性特性**，或称该元件（环节）是线性的。



线性元件的特性 (a) 方框图； (b) 特性图

4.5 控制系统中的非线性现象

4.5.1 线性与非线性控制系统

线性控制系统：

如控制系统中各元件的**输入/输出特性均是线性的**，则该控制系统被称为**线性控制系统**，其动态过程**可以用线性微分方程或（线性）状态空间模型描述**

非线性控制系统：

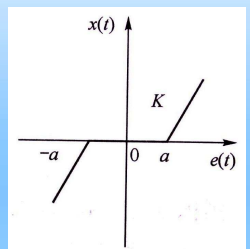
如控制系统中有一个或一个以上元件的**输入/输出特性是非线性的**，则该控制系统被称为**非线性控制系统**，其动态过程就要**用非线性方程来描述**。

不同非线性特性元件对控制系统性能的影响

◆ 死区特性

常见于测量（如反馈）、变换、放大等元件

$$x(t) = \begin{cases} 0 & |e(t)| \leq a \\ K[e(t) - a \cdot \text{sign}e(t)] & |e(t)| > a \end{cases}$$



I-O过程：当输入的绝对值小于等于a时，无输出。

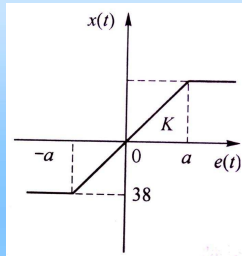
缺点：(1) 会导致系统产生稳态误差；(2) 会导致系统输出滞后输入。

优点：可抑制输入端的小扰动信号，对提高系统的抗干扰能力有积极作用

◆ 饱和特性

常见于反馈、放大、执行等元件

$$x(t) = \begin{cases} ke(t) & |e(t)| \leq a \\ K \cdot a \cdot \text{signe}(t) & |e(t)| > a \end{cases}$$



I-O过程：当输入绝对值大于等于a时，输出保持不变。

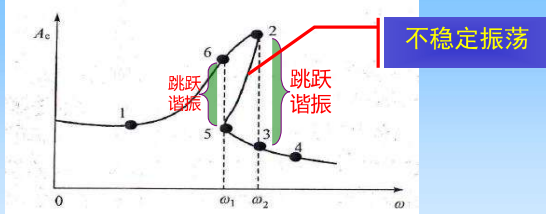
缺点：进入饱和时系统等效开环增益下降，导致过渡时间增加和稳态误差增大，甚至会使系统丧失闭环控制作用！

优点：可抑制系统的振荡（但可能出现等幅振荡）；
可保护元件正常工作等。

4.5 控制系统中的非线性现象

4.5.3 非线性控制系统的典型特征

- **自持振荡**——系统在没有外界周期变化信号的作用下，系统中就能产生具有固定振幅和频率的稳定周期运动。
- **对正弦信号的响应**——非线性系统输出的幅值 A_c 与 ω 的关系可能会发生跳跃谐振和多值响应。



4.5 控制系统中的非线性现象

4.5.3 非线性控制系统的典型特征

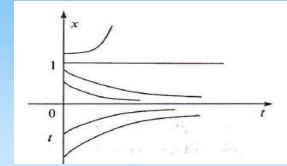
- **稳定性**不仅与系统的结构和参数有关，而且与运动的初始条件、输入信号有直接关系。

对于非线性系统，不存在系统是否稳定的笼统概念，必须针对系统某一具体的运动状态，才能讨论其是否稳定的问题。

$$\dot{x} = -x + x^2 = -x(1-x)$$

设 $t=0$ 时，系统的初始条件为 x_0 ，可以求得上述微分方程的解为：

$$x(t) = \frac{x_0 e^{-t}}{1 - x_0 + x_0 e^{-t}}$$



几个平衡态？

几个稳定态？

小结

- 控制的目的是要求系统状态向期望状态转移，而要实现这种转移则必须采用适当的控制方式。在自动控制系统中，有**前（顺）馈控制（开环控制）、反馈控制（闭环控制）和复合控制**三种基本的控制方式。
- 根据系统响应的参据量的特点，自动控制系统可分为**恒值控制、随动控制和程序控制**三种基本类型。每种类型下的系统各有其分析和设计的重点话题。
- 根据系统中采集、传输、处理和使用诸环节信号的特性，自动控制系统可以分为**连续控制系统和离散控制系统**。
- 正确认识非线性特性元件对控制系统带来的有利和不利影响。

自动化导论

Automation: An Introduction

南京大学控制科学与智能工程系

陈春林

Email: clchen@nju.edu.cn

2025年4月1日

5 自动控制系统的的基本控制方法

5.1 比例积分微分 (PID) 控制

5.2 最优控制

5.3 自适应控制

5.4 智能控制

5.5 非线性控制

5.1 比例积分微分 (PID) 控制

◆ 比例控制 (器)

$$u(t) = K_C \left[e(t) + \frac{1}{T_I} \int_0^t e(t) dt + T_D \frac{de(t)}{dt} \right]$$

$$u(t) = K_C e(t)$$

I-O过程：只要一出现偏差，控制器即产生控制作用。

优点：控制及时，通过与偏差量大小成正比的“纠差力”减少偏差

缺点：不能消除偏差

5.1 比例积分微分 (PID) 控制

◆ 微分控制 (器)

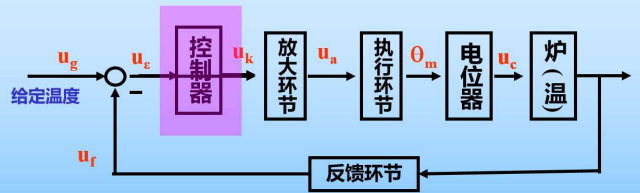
$$u(t) = K_C \left[e(t) + \frac{1}{T_I} \int_0^t e(t) dt + T_D \frac{de(t)}{dt} \right]$$

$$u(t) = T_D \frac{de(t)}{dt}$$

I-O过程：输出u(t)与输入偏差e(t)的变化速度成正比。

优点：减少超调量，缩短调节时间，提高系统的稳定性——超前控制作用

缺点：从工程实现上考虑，短时内偏差变化量大可能引起元件的性能变化。



$$e(t) \rightarrow \text{控制器} \rightarrow u(t)$$

核心问题：控制器产生控制律的可能方法有哪些？

5.1 比例积分微分控制

PID (Proportional Integral Derivative) Controller

$$e(t) \rightarrow \text{控制器} \rightarrow u(t)$$

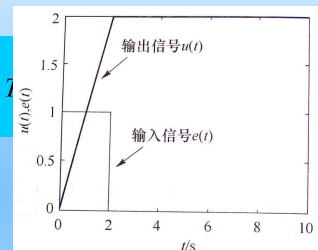
$$u(t) = K_p \left[e(t) + \frac{1}{T_I} \int_0^t e(t) dt + T_D \frac{de(t)}{dt} \right]$$

5.1 比例积分微分 (PID) 控制

◆ 积分控制 (器)

$$u(t) = K_C \left[e(t) + \frac{1}{T_I} \int_0^t e(t) dt + T_D \frac{de(t)}{dt} \right]$$

$$u(t) = \frac{1}{T_I} \int_0^t e(t) dt$$



I-O过程：输出u(t)与输入偏差e(t)的积分成正比。

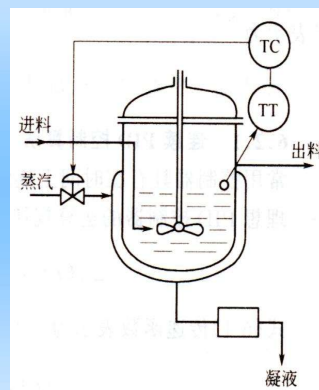
优点：(1) 积累作用——只要偏差存在，积分就起作用——可消除系统静差

(2) 记忆作用——不会因一时的偏差为零而失去积分作用

缺点：延缓作用——输入突变时，输出不会突变——降低了系统的反应速度

“滞后”控制作用

以蒸汽加热反应釜为例说明P、I、D的作用及控制律的定义过程：



设反应温度：85度，轻微放热反应

➢ 操纵变量：蒸汽流量

➢ 被控变量：反应温度

➢ 干扰：蒸汽压力、进料流量等

E-O、人工开关控制

◆ 若温度低于85度，蒸汽阀门全开

◆ 若温度高于85度，蒸汽阀门全关

现象：温度持续波动，过程处于振荡中。

结果：控制品质差，满足不了生产要求。

反应器的温度控制

E-1、比例(P)控制

- ◆ 温度为85度，蒸汽阀门开度是3圈
- ◆ 若温度高于85度，每高5度就关一圈阀门
- ◆ 若温度低于85度，每低5度就开一圈阀门

即开启圈数 = $3 + \frac{1}{5}(85 - y)$

相应控制规律可写为: $u(t) = u(0) + K_C \times e'(t)$

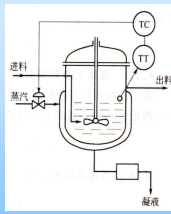
$u(0)$: 偏差为0时控制器输出 设 $e(t) = 85 - y(t)$,

K_C : 控制器比例放大倍数

$$e'(t) = \begin{cases} INT(e) & \text{if } y \leq 85 \\ INT(e) + 1 & \text{if } y > 85 \end{cases}$$

现象: 温度控制得比较平稳

结果: 控制品质有一定改善, 但负荷变化时, 会有余差。如工况有变动, 当阀门开3圈时, 温度不再保持在85度。



E-2、增加积分作用

首先按照比例控制操作, 然后不断观察

- ◆ 若温度低于85度, 慢慢地持续开大阀门
- ◆ 若温度高于85度, 慢慢地持续开小阀门直到温度回到85度。

即控制器输出变化的速度与偏差成正比:

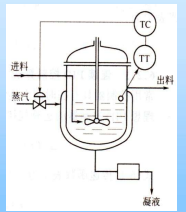
$$\frac{du(t)}{dt} = S_C e(t)$$

$$u(t) = u(0) + S_C \int_0^t e(t) dt$$

S_C : 积分控制作用放大倍数

现象: 只要有偏差, 控制器输出就不断变化。

结果: 输出稳定在设定的85度上, 即消除了余差。



E-3、增加微分作用

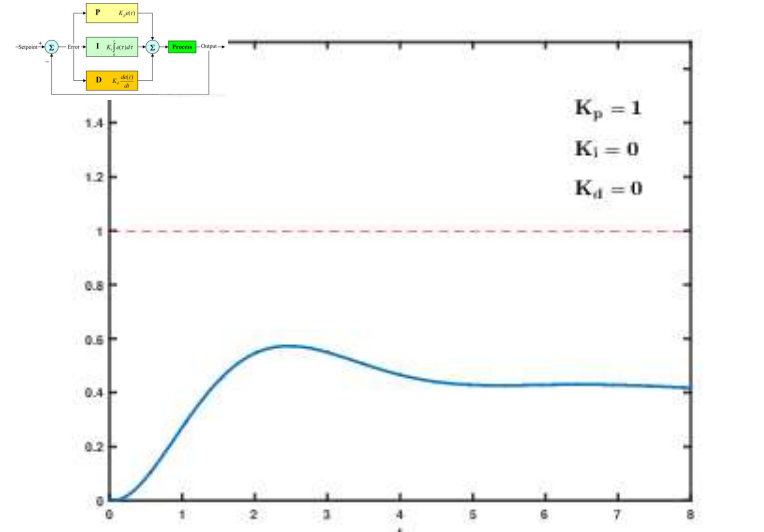
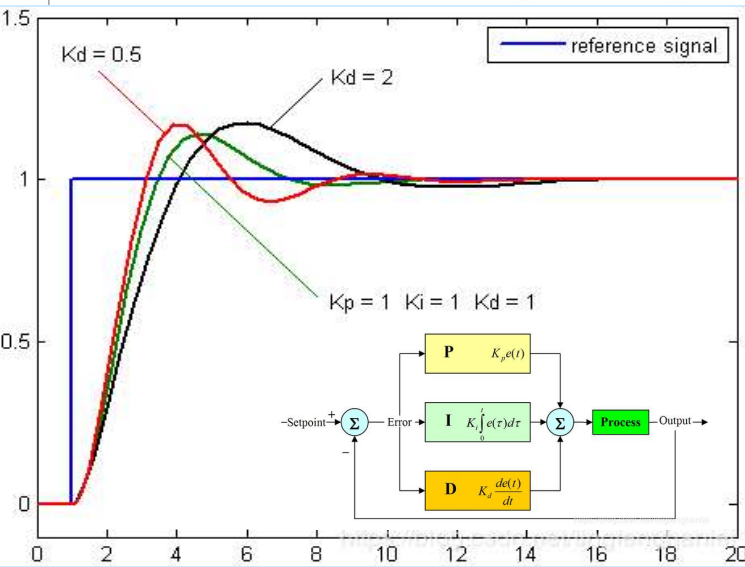
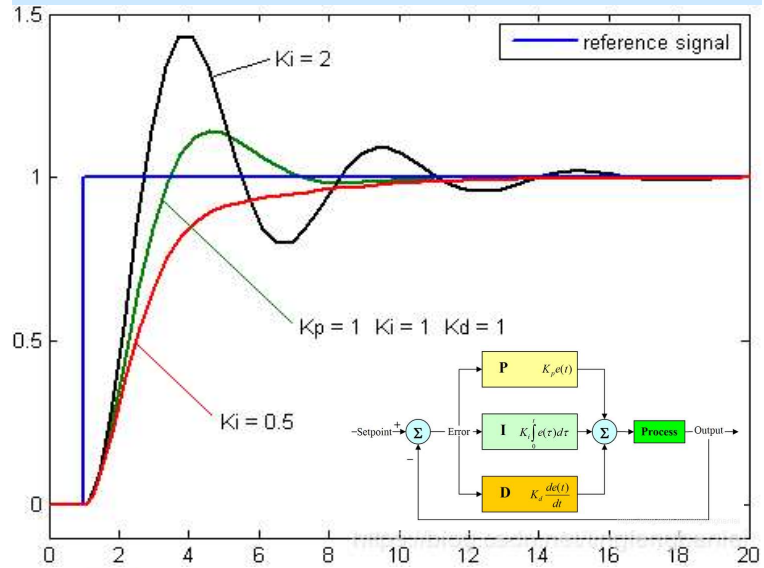
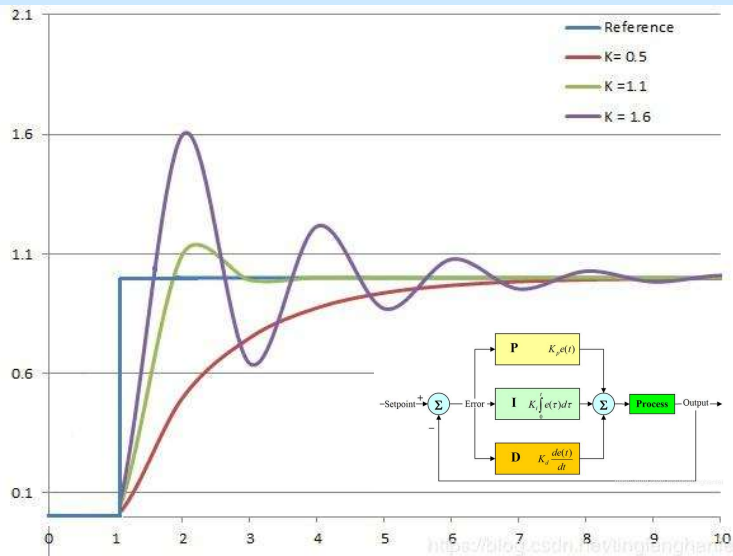
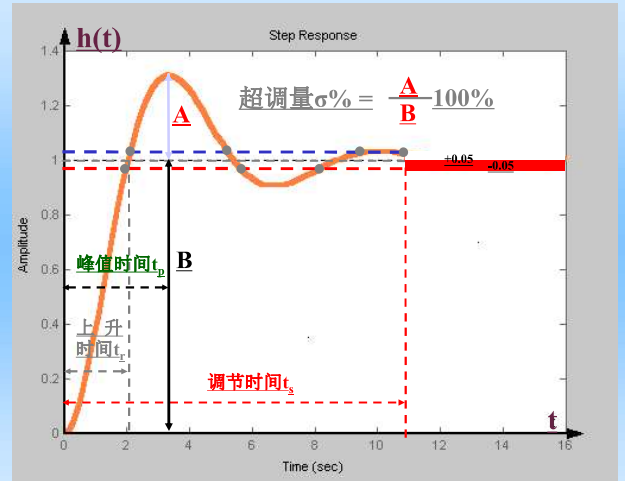
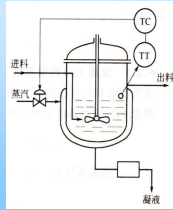
- 由于温度过程容量滞后大, 当出现偏差时, 其数值已经较大
- 补充经验: 根据偏差变化的速度来开启阀门, 从而抑制偏差的幅度, 使控制作用更加及时。

$$u(t) = T_D \frac{de(t)}{dt}$$

通用PID控制器 (从误差 $e(t)$ 到控制量 $u(t)$ 转化的) 数学表达式:

$$u(t) = K_C [e(t) + \frac{1}{T_I} \int e(t) dt + T_D \frac{de(t)}{dt}]$$

思考5-1 表达式中各参数的作用及获取方法?



5.1 比例积分微分 (PID) 控制

◆ PID控制器的参数整定方法

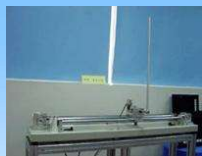
- **理论计算整定法**：依据系统的数学模型，经过理论计算确定控制器参数。（未必可以直接用）
- **工程整定方法**：依赖工程经验，直接在控制系统的试验中进行。（简单、实用）
- **PID参数的工程整定方法**：**临界比例法**、**反应曲线法和衰减法等**。

思考5-2 什么情况下一般不用PID控制？

5.2 最优控制

◆ 产生的背景

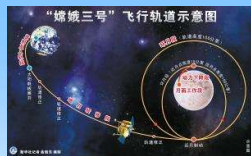
- (1) 要求被控对象的性能指标多样化；
- (2) 要求某些被控量或系统的某个性能指标达到最佳值（如最短时间）或给定值（如速度为零）；



倒立摆控制



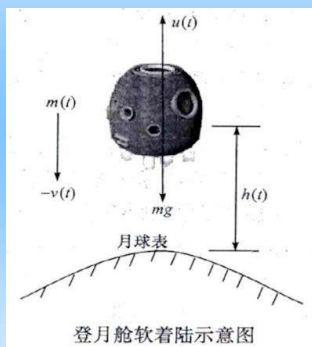
导弹轨迹控制



“嫦娥三号”飞行轨道控制

5.2 最优控制

◆ 登月舱的月球软着陆例



登月舱软着陆示意图

最优控制任务是在满足控制约束的条件下，寻求发动机推力最优变化律

$$u^*(t)$$

使得登月舱由已知的初态转为要求的末态，并使性能指标

$$J = m(t_f) = J_{\max}$$

从而实现登月过程中燃料消耗量最少。

5.2 最优控制

◆ 常见的最优控制问题

(1) 最短时间问题

$$J = t_f - t_0 = \int_{t_0}^{t_f} dt \rightarrow \min$$

$$F[x(t), u(t), t] = 1$$



拦截导弹最短时间控制

5 自动控制系统的基本控制方法

5.1 比例积分微分 (PID) 控制

5.2 最优控制

5.3 自适应控制

5.4 智能控制

5.5 非线性控制

5.2 最优控制

◆ 最优控制的一般提法

对一个控制系统，在给定限制条件和性能指标下，寻求使系统性能在一定意义下为最优的控制规律（或控制器）。

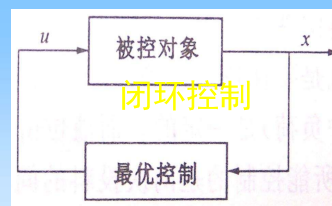
◆ 最优控制的形式化提法

最优控制的问题就是：从所有可供选择的允许控制中寻找一个最优控制 $u^*(t)$ ，使状态 $x(t)$ 由 $x(t_0)$ 经过一定时间转移到目标集 S ，并且沿此轨线转移时，使相应的性能指标达到极值（极大或极小）。

思考5-2 允许控制与最优控制的关系？

5.2 最优控制

◆ 最优控制的基本方式



◆ 最优控制的研究方法

- (1) 解析法
 - 变分法；
 - 极大值原理和动态规划法
- (2) 数值法
 - 最优化算法（运筹学的内容）
- (3) 基于二次型性能指标的最优线性系统理论
 - Kalman 的状态空间系统理论

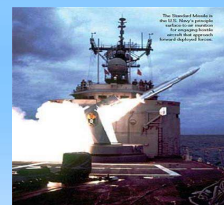
5.2 最优控制

◆ 常见的最优控制问题

(2) 最小燃料消耗问题：控制量 $u(t)$ 与燃料消耗量成正比。

$$J = \int_{t_0}^{t_f} |u(t)| dt \rightarrow \min$$

$$F[x(t), u(t), t] = |u(t)|$$



导弹最小燃料控制

5.2 最优控制

◆ 常见的最优控制问题

(3) 最小能量控制问题：考虑与消耗功率成正比。

$$J = \int_{t_0}^{t_f} u^2(t) dt \rightarrow \min$$

$$F[x(t), u(t), t] = u^2(t)$$



航天飞机最小能量控制

5.2 最优控制

◆ 常见的最优控制性能指标

(2) 终值型性能指标

$$J = \theta[x(t_f), t_f]$$



卫星的指向控制

在变分法中称为迈耶尔问题。它只要求状态在过程终止时满足一定要求，但在整个动态过程中对状态及控制的演变不作要求。

5.3 自适应控制

◆ 产生背景

- (1) 系统复杂，很难精确建模和分析（模型不确定性）——如化工过程中的反应器、换热器；
- (2) 环境变化会引起被控对象的结构和参数发生变化（系统本身的不确定性）——如人的血压控制；
- (3) 环境变化对被控系统的干扰——当不可测量时——将直接导致被控量的不确定性变化，且不能通过前馈控制方式给以补偿。

在这些情况下，常规控制就往往达不到预定的控制要求。

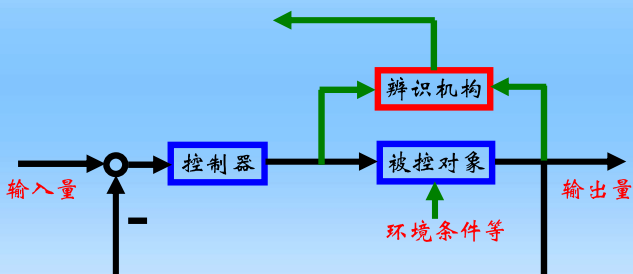
因此出现了很多研究控制方法的改进问题，例如容错控制，鲁棒控制，自适应控制，智能控制。

◆ 自适应控制出现于 20 世纪 50 年代

5.3 自适应控制

◆ 基本原理

在自适应控制系统中，根据被控对象的输入输出信号对对象的参数或性能指标连续地或周期地进行在线辨识，



5.2 最优控制

◆ 常见的最优控制性能指标

(1) 积分型性能指标：

$$J = \int_{t_0}^{t_f} F[x(t), u(t), t] dt$$



导弹稳定控制

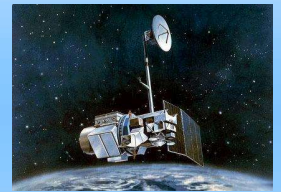
变分法中这类问题称为拉格朗日问题。它要求状态向量及控制向量在整个动态过程中都应满足一定要求。

5.2 最优控制

◆ 常见的最优控制性能指标

(3) 复合型性能指标

$$J = \theta[x(t_f), t_f] + \int_{t_0}^{t_f} F[x(t), u(t), t] dt$$



卫星的指向和稳定控制

在变分法中称为波尔扎问题。它要求状态不但在过程终止时满足一定要求，而且状态向量及控制向量在整个动态过程中都应满足一定要求。

5.3 自适应控制

◆ 基本思想

在系统运动过程中，控制系统不断地测量被控对象的状态，估计出对象的性能或参数，从而“认识”或“掌握”被控对象；然后，根据掌握的被控对象信息，与期望的性能相比较，进而作出决策，来改变控制器的结构、参数，并根据自适应规律来改变控制作用，以保证系统达到期望的或某种意义上最优或接近最优的性能。

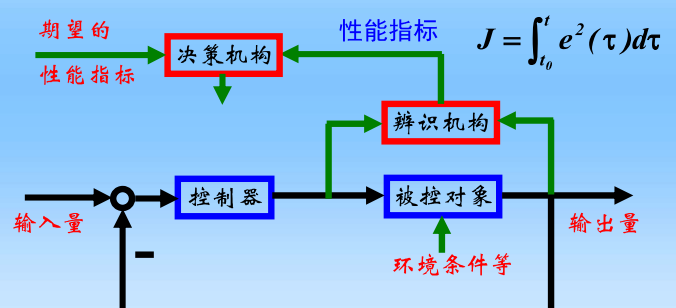
其中：估计（辨识）、比较（决策）、改变（修正）三方面的功能是自适应控制系统所必须具有的功能。

按照这样的思想所建立的控制系统，称之为自适应控制系统。

5.3 自适应控制

◆ 基本原理

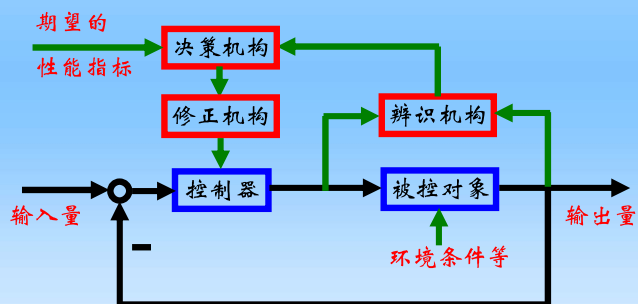
然后根据所获得的信息并按照一定的评价系统优劣的性能准则，判断决定所需的控制器参数或所需的控制信号。



5.3 自适应控制

◆ 基本原理

最后通过**修正装置**实现这项控制决策,使系统趋向所期望的性能。



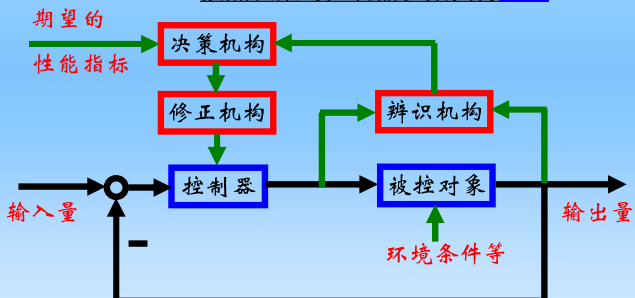
5.3 自适应控制

◆ 基本原理——小结

a 辨识被控对象的特性

b 在辨识的基础上作出控制决策

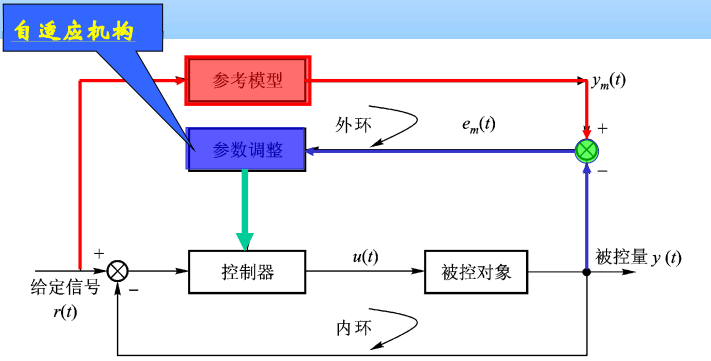
c 按照决策对控制器参数实行修正



5.3 自适应控制

◆ 基本类型

(2) 模型参考自适应控制系统 (目前的主要方法)



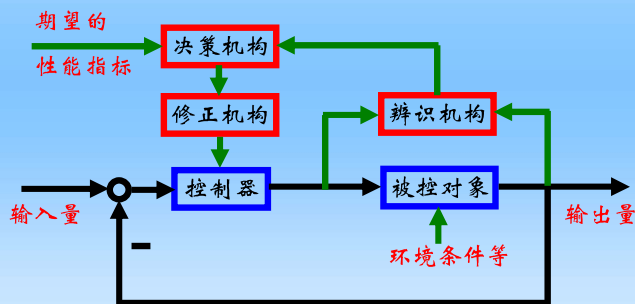
智能控制是自动控制发展的一个新阶段,是人工智能、控制论、系统论和信息论等多种学科的综合与集成,是控制理论研究持续的热点。

5.3 自适应控制

◆ 基本原理——常见修正方法

a 参数修正法: 主要是修正控制器中有关参数。

b 信号综合法: 根据需要综合出控制信号, 直接加到被控对象上。

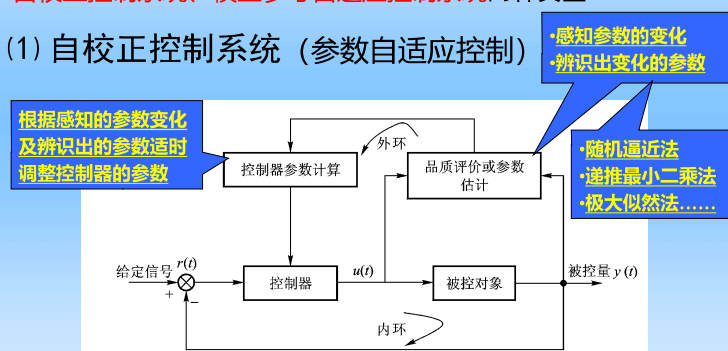


5.3 自适应控制

◆ 基本类型

自适应控制实质上是系统辨识与控制技术的结合, 通常有**自校正控制系统**、**模型参考自适应控制系统**两种类型。

(1) 自校正控制系统 (参数自适应控制)



5.4 智能控制

◆ 产生背景

(1) 被控对象与其环境的复杂性及不确定性的存在, 使基于数学模型的控制方法已无能为力, 但**熟练的操作工、技术人员或专家却能凭他们的经验施加控制仍能获得满意的控制效果**;

(2) **人工智能 (AI)** 的发展及其与自动控制的结合, 使人的经验知识与思维方式参与系统的控制成为可能。

智能控制是一种应用拟人化的思维方式和决策方法产生控制规律, 以实现对被控对象有效控制的技术。

5.4 智能控制

◆ 智能控制的基本概念

智能控制已经出现了相当长的一段时间, 并且已取得了初步的应用成果.但是究竟什么是“智能”, 什么是“智能控制”等问题, 至今仍没有统一的定义。

归纳起来, 主要有如下三种说法 (见教材90-91)

5.4 智能控制

◆ 智能控制的基本概念

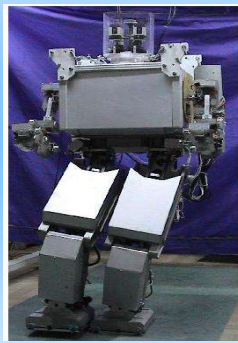
- **定义一（依行为特征定义）**：智能控制是有知识的“行为舵手”，它把知识和反馈结合起来，形成感知—交互式、以目标导向的控制系统。系统可以进行规划、决策，产生有效的、有目的的行为，在不确定环境中，达到既定的目标。



5.4 智能控制

◆ 智能控制的基本概念

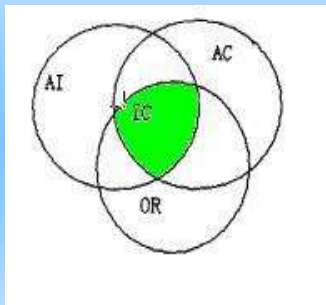
- **定义三（依机器智能定义）**：智能控制是认知科学、多种数学编程和控制技术的结合。它把施加于系统的各种算法和数学与语言方法融为一体。



5.4 智能控制

◆ 智能控制的结构理论（对应定义三）

- $IC=AI \cap AC \cap OR$
- IC — 智能控制 (Intelligent Control);
 - OR — 运筹学 (Operation Research)
 - AI — 人工智能 (Artificial Intelligence);
 - AC — 自动控制 (Automatic Control);
 - \cap — 表示交集.



5.4 智能控制

◆ 智能控制与传统控制的关系

传统控制 (Conventional control)：经典反馈控制和现代理论控制。它们的主要特征是基于精确的系统数学模型的控制。适于解决线性、时不变等相对简单的控制问题。

智能控制 (Intelligent control) 以上问题用智能的方法同样可以解决。智能控制是对传统控制理论的发展，传统控制是智能控制的一个组成部分，在这个意义下，两者可以统一在智能控制的框架下。

5.4 智能控制

◆ 智能控制的基本概念

- **定义二（依人类认知定义）**：智能控制是一种计算上的有效过程，在非完整的指标下，通过最基本的操作，即归纳（Generalization）、集注（Focusing Attention）、和组合操作（Component Search），把不确定的复杂系统引向规定的目标。

5.4 智能控制

◆ 智能控制的特点

- 智能控制器具有**非线性**特性；
- 智能控制具有**变结构**特点；
- 智能控制器具有**总体自寻优**特性；
- 智能控制系统应能满足**多样性目标的高性能**要求；
- 智能控制是一门**边缘交叉学科**；
- 智能控制是一个**新兴的研究领域**。

5.4 智能控制

◆ 智能控制的结构理论

- **人工智能 (AI)**：是一个知识处理系统，具有记忆、学习、信息处理、形式语言、启发式推理等功能。
- **自动控制 (AC)**：描述系统的动力学特性，是一种动态反馈。
- **运筹学 (OR)**：是一种定量优化方法，如线性规划、网络规划、调度、管理、优化决策和多目标优化方法等。

5.4 智能控制

◆ 智能控制的类型

智能控制系统一般包括

- ◆ 专家控制系统
- ◆ 模糊控制系统
- ◆ 神经网络控制系统
- ◆ 强化学习控制系统
- ◆ ……

5.4 智能控制

◆智能控制的类型

(1) 专家控制系统 (Expert System)

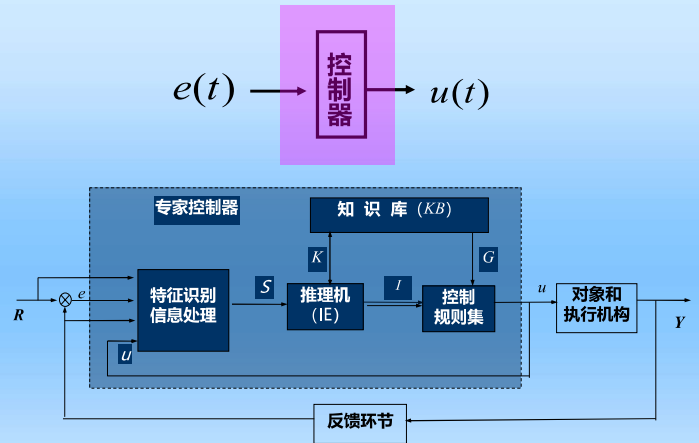
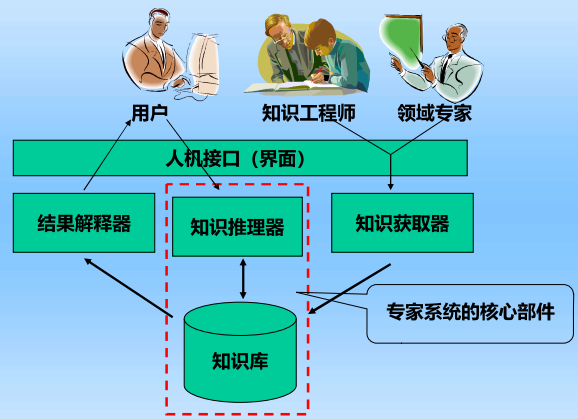
专家指的是那些对解决专门问题非常熟悉的人们，他们的这种专门技术通常源于丰富的经验，以及他们处理问题的详细专业知识。

专家系统主要指的是一个智能计算机程序系统，其内部含有大量的某个领域专家水平的知识与经验，能够利用人类专家的知识解决问题的经验方法来处理该领域的高水平难题。它具有启发性、透明性、灵活性、符号操作、不确定性推理等特点。**应用专家系统的概念和技术，模拟人类专家的控制知识与经验而建造的控制系统，称为专家控制系统。**

① **专家控制系统** 是应用专家系统于自动控制的理想形式，它把自动控制系统视为基于知识的系统，并把有关控制的知识分类组织，形成数据库和规则库。

② **专家控制器** 直接用专家系统作为传统反馈控制系统的控制器，使控制器具有智能。

专家系统主要由**知识库**和**推理机**两部分组成。



5.4 智能控制

◆智能控制的类型

(2) 模糊控制系统

所谓模糊控制，就是在**被控制对象的模糊模型的基础上**，运用模糊控制器近似推理手段，实现系统控制的一种方法。

模糊模型是用模糊语言和规则描述的一个系统的动态特性及性能指标。

“模糊量”是现实生活中人们最常用的对事物状态进行描述的“量”，如：



5.4 智能控制

◆模糊控制的基本思想

是用**机器去模拟人对系统的控制**。它是运用模糊理论、模糊语言变量和模糊逻辑推理的知识，把这些模糊的语言上升为数值运算，从而能够利用计算机来完成对这些规则的具体实现，达到以机器代替人对某些对象进行自动控制的目的。

通常，操作人员根据他的知识和经验在对被控量（输出）的特征进行识别，后者常常是用语言信息表示的。**例如**，炉温作为一个语言变量，其温度集T可为：

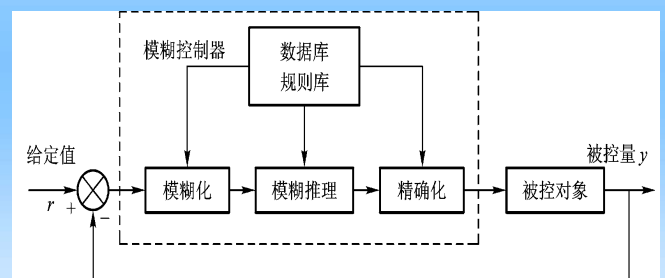
$T(\text{温度}) = \{\text{超高, 很高, 较高, 中等, 较低, 很低, 过低}\}$.

5.4 智能控制

(2) 模糊控制系统

◆模糊控制器

它用模糊控制器替代了传统的控制器，模糊控制器由知识库、模糊化处理器、模糊推理器、精确化处理器四部分组成。

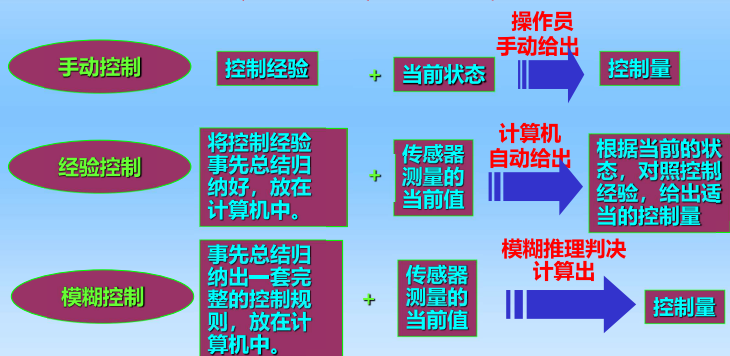


5.4 智能控制

(2) 模糊控制系统

◆ 模糊控制器的特点

手动控制、经验控制和模糊控制的比较



5.4 智能控制

(2) 模糊控制系统

模糊集合:

如果 X 是对象 x 的集合, 则 X 的模糊集合 A :

$$A = \{(x, \mu_A(x)) | x \in X\} \quad X \text{ 称为论域或域}$$

$\mu_A(x)$ 称为模糊集合 A 的隶属函数 (简称为 MF)

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 1 & x \in A \\ (0,1) & x \text{ 属于 } A \text{ 的程度} \\ 0 & x \notin A \end{cases}$$

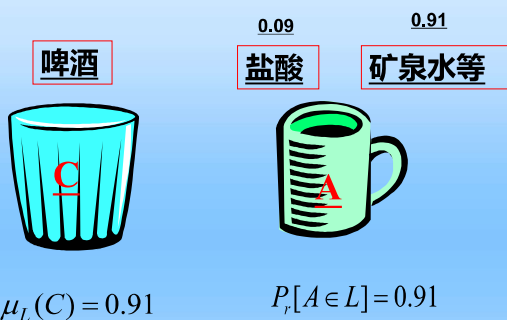
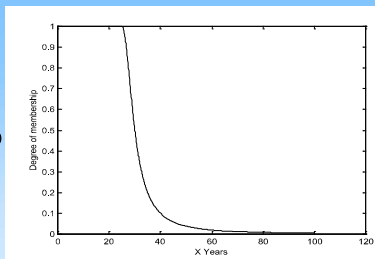
5.4 智能控制

(2) 模糊控制系统

模糊集合连续形式:

令 $X = R^+$ 为人类年龄的集合, 模糊集合 $Y = \text{"年轻"}$ 则表示为:

$$\mu_Y(x) = \begin{cases} 1 & 0 \leq x \leq 25 \\ \left[1 + \left(\frac{x-25}{5}\right)^2\right]^{-1} & 25 < x \leq 100 \end{cases}$$



1) 模糊隶属函数表示物体 (对象) 对不精确定义性质的相似程度

2) 概率把信息转变为事件发生或出现的频度

5.4 智能控制

(2) 模糊控制系统

模糊控制发展的三个阶段

1965年-1974年

模糊控制发展的第一阶段, 即模糊数学发展和形成阶段(L.A. Zedeh, 1965)

1974年-1979年

模糊控制发展的第二阶段, 产生了简单的模糊控制器

1979年—现在

模糊控制发展的第三阶段, 即高性能模糊控制阶段

5.4 智能控制

(2) 模糊控制系统

模糊集合离散形式 (有序或无序) :

例: $X = \{\text{上海, 北京, 天津, 西安}\}$ 为城市的集合

模糊集合 $C = \text{"对城市的爱好"}$ 可以表示为:

$$C = \{(\text{上海}, 0.8), (\text{北京}, 0.8), (\text{天津}, 0.8), (\text{西安}, 0.8)\}$$

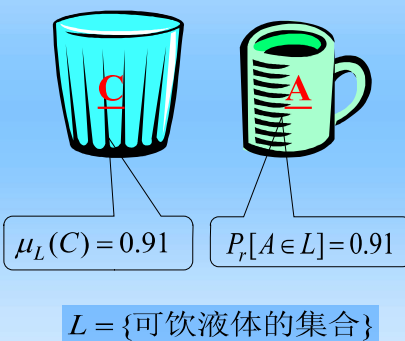
例: $X = \{0, 1, 2, 3, 4, 5, 6\}$ 为一个家庭可拥有自行车数目的集合

模糊集合 $C = \text{"合适的可拥有的自行车数目"}$

$$C = \{(0, 0.1), (1, 0.3), (2, 0.7), (3, 1.0), (4, 0.7), (5, 0.3), (6, 0.1)\}$$

模糊与概率的差别

口渴的人饮用哪杯液体?



5.4 智能控制

(2) 模糊控制系统

模糊推理

$$\mu_{A \rightarrow B}(x, y) \cong \min[\mu_A(x), \mu_B(y)]$$

$$\mu_{A \rightarrow B}(x, y) \cong [\mu_A(x) \cdot \mu_B(y)]$$

工程险言: 出于计算的简单性, 保留因果关系, 但非因果关系, 不同于传统的命题逻辑推理

$$(p \rightarrow q) \leftrightarrow \sim [p \wedge (\sim q)]$$

$$(p \rightarrow q) \leftrightarrow (\sim p) \vee q$$

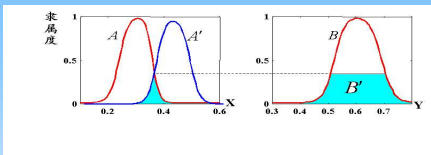
5.4 智能控制

(2) 模糊控制系统

模糊推理

1. 单个前提单个规则:

前提1(事实) x 是 A'
 前提2(规则) *if* x 是 A , *then* y 是 B
 结果(结论) y 是 B'



$$\begin{aligned} \mu_{B'}(y) &= \bigvee_x [\mu_{A'}(x) \wedge \mu_A(x) \wedge \mu_B(y)] \\ &= [\bigvee_x (\mu_{A'}(x) \wedge \mu_A(x))] \wedge \mu_B(y) \\ &= \omega \wedge \mu_B(y) \quad (\text{max-min 复合运算}) \end{aligned}$$

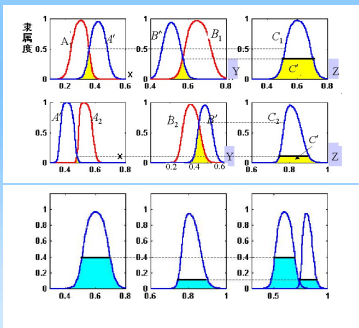
5.4 智能控制

(2) 模糊控制系统

模糊推理

3. 多前提多规则

前提1(事实) x 是 A' , y 是 B'
 前提2(规则1) *if* x 是 A_1 和 y 是 B_1 , *then* Z 是 C_1
 前提3(规则2) *if* x 是 A_2 和 y 是 B_2 , *then* Z 是 C_2
 结果(结论) z 是 C'



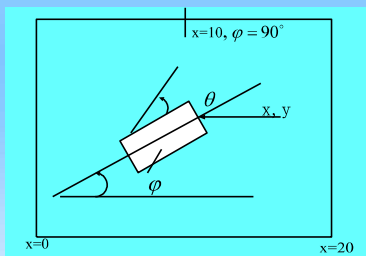
$$\begin{aligned} \mu_{C'}(z) &= \bigvee_{x,y} [\mu_{A'}(x) \wedge \mu_{B'}(y)] \wedge [\mu_{A_1}(x) \wedge \mu_{B_1}(y) \wedge \mu_{C_1}(z)] \vee \\ &\quad \bigvee_{x,y} [\mu_{A'}(x) \wedge \mu_{B'}(y)] \wedge [\mu_{A_2}(x) \wedge \mu_{B_2}(y) \wedge \mu_{C_2}(z)] \\ &= \{(\omega_1 \wedge \omega_2) \wedge \mu_{C_1}\} \vee \{(\omega_2 \wedge \omega_2) \wedge \mu_{C_2}\} \end{aligned}$$

5.4 智能控制

(2) 模糊控制系统

例: 货车倒车

装卸站台



$$\varphi \in [90^\circ, 270^\circ]$$

$$\theta \in [-40^\circ, 40^\circ]$$

$$x \in [0, 20]$$

货车终点位置
 $(x_f, \varphi_f) = (10, 90)$

5.4 智能控制

(2) 模糊控制系统

规则:

$R^{(1,2)}$: *if* φ 是 S_2 和 x 是 S_1 , *then* θ 是 S_3 ;
 $R^{(3,5)}$: *if* φ 是 S_1 和 x 是 B_2 , *then* θ 是 S_2 ;
 $R^{(4,3)}$: *if* φ 是 CE 和 x 是 CE , *then* θ 是 CE ;

 $R^{(7,5)}$: *if* φ 是 B_3 和 x 是 B_2 , *then* θ 是 B_2 ;

| | | | | | | |
|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| φ | S_3 | S_2 | S_3 | | | |
| | S_2 | S_2 | S_3 | S_3 | S_3 | |
| | S_1 | B_1 | S_1 | S_2 | S_3 | S_2 |
| | CE | B_2 | B_2 | CE | S_2 | S_2 |
| | B_1 | B_2 | B_3 | B_2 | B_1 | S_1 |
| | B_2 | | B_3 | B_3 | B_2 | |
| | | | | B_3 | B_2 | |
| | S_2 | S_1 | CE | B_1 | B_2 | |
| | | | | x | | |

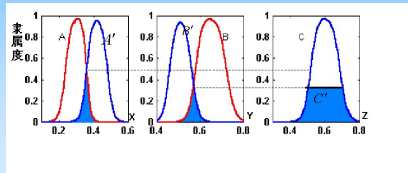
5.4 智能控制

(2) 模糊控制系统

模糊推理

2. 多前提单规则:

前提1(事实) x 是 A' , y 是 B'
 前提2(规则1) *if* x 是 A 和 y 是 B , *then* Z 是 C
 结果(结论) z 是 C'



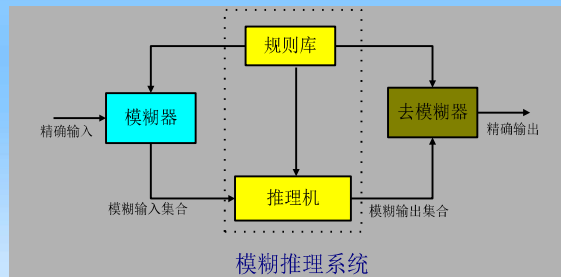
$$\begin{aligned} \mu_{C'}(z) &= \bigvee_{x,y} [\mu_{A'}(x) \wedge \mu_{B'}(y)] \wedge [\mu_A(x) \wedge \mu_B(y) \wedge \mu_C(z)] \\ &= \bigvee_{x,y} [\mu_{A'}(x) \wedge \mu_{B'}(y) \wedge \mu_A(x) \wedge \mu_B(y) \wedge \mu_C(z)] \\ &= [\bigvee_x (\mu_{A'}(x) \wedge \mu_A(x))] \wedge [\bigvee_y (\mu_{B'}(y) \wedge \mu_B(y))] \wedge \mu_C(z) \\ &= (\omega_1 \wedge \omega_2) \wedge \mu_C(z) \end{aligned}$$

5.4 智能控制

(2) 模糊控制系统

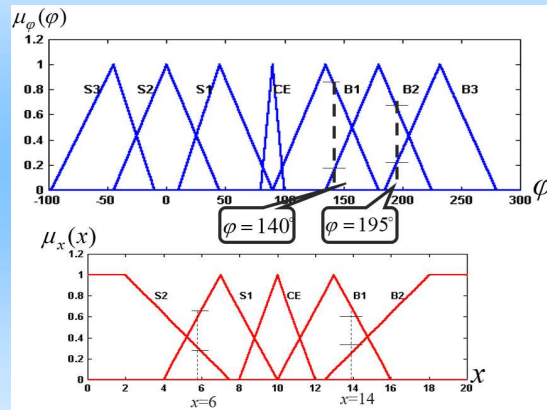
模糊推理

模糊推理系统



5.4 智能控制

(2) 模糊控制系统

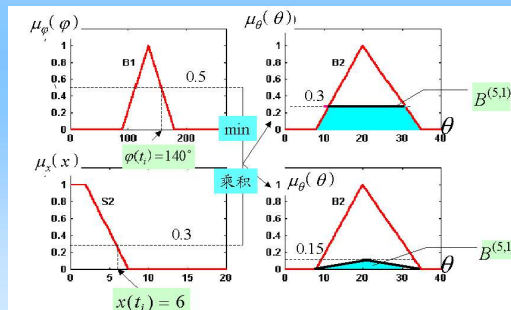


5.4 智能控制

(2) 模糊控制系统

当货车状态为 $\varphi(t_i) = 140^\circ, x(t_i) = 6$ 时, 激活3条规则:

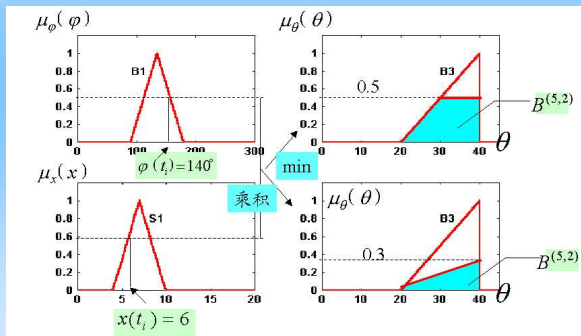
1) $R^{(5,1)}$: *if* φ 是 B_1 和 x 是 S_2 , *then* θ 是 B_2



5.4 智能控制

(2) 模糊控制系统

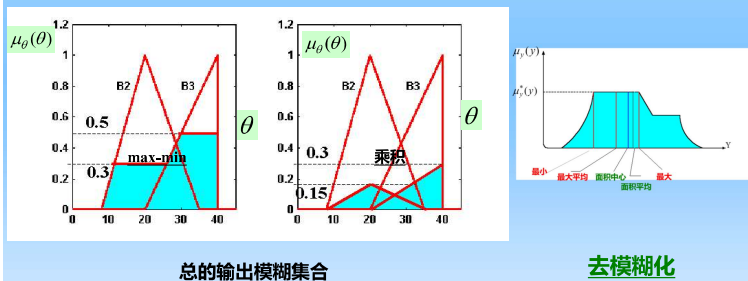
2) $R^{(5,2)}$: if φ is B_1 and x is S_1 , then θ is B_3



5.4 智能控制

(2) 模糊控制系统

3条规则合成所获得的输出为:



总的输出模糊集合

去模糊化

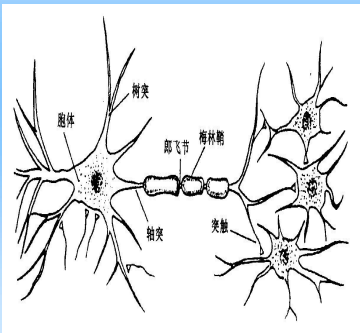
5.4 智能控制

◆智能控制的类型

(3) 人工神经网络控制系统

人脑大约包含 10^{11} 个神经元，分成约1000种类型，每个神经元大约与 $10^2 \sim 10^4$ 个其他神经元相连接，形成极为错综复杂而又灵活多变的神经网络。

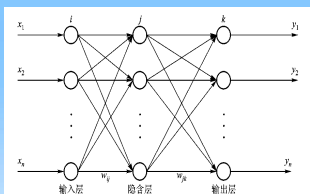
每个神经元虽然都十分简单，但是如此大量的神经元之间、如此复杂的连接却可以演化出丰富多彩的行为方式。同时，大量的神经元与外部感受器之间的多种多样的连接方式也蕴含了变化莫测的反应方式。



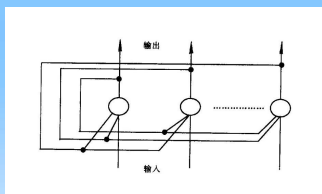
(3) 人工神经网络控制系统

◆人工神经网络

- 利用人工神经元可以构成各种不同拓扑结构的神经网络，它是生物神经网络的一种模拟和近似。
- 不同的神经网络模型有数十种，其中前馈型网络和反馈型网络是两种典型的结构模型。



三层前馈神经网络

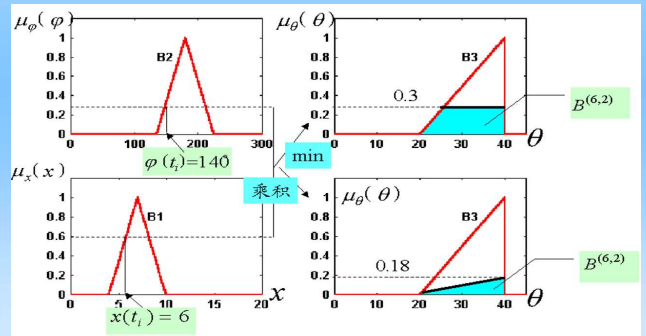


单层反馈神经网络

5.4 智能控制

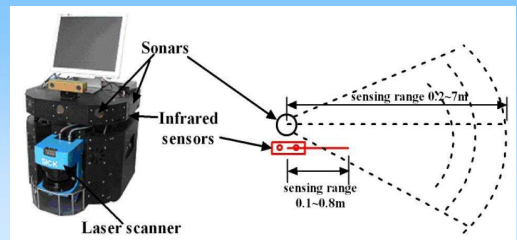
(2) 模糊控制系统

3) $R^{(6,2)}$: if φ is B_2 and x is S_1 , then θ is B_3



例：某移动机器人的距离传感器共六组均匀分布于机器人四周，每组距离传感器由一个超声波传感器和一个红外传感器组成，负责测量某方向距离障碍物的距离，测距范围如图，注意由于有两种传感器配合使用，0.2~0.8m范围内的测距结果是较为精确的。

- 试建立一个模糊系统，用来表示每个方向上机器人距离障碍物的距离{极近、很近、近、中、远、很远、极远}；
- 假定只取左、中、右三个方向上距离障碍物的距离信息作为输入，输出为机器人的前进方向（前进角度范围：正负 45° ，分为负大、负小、零、正小、正大五个语言变量），给出其隶属函数图形；
- 根据常识，设计推理规则，基于模糊控制实现机器人的避障漫游。

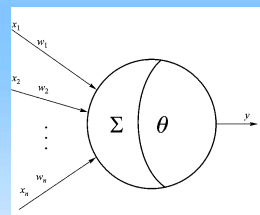


(3) 人工神经网络控制系统

◆人工神经网络

人工神经网络(Artificial Neural Network, 即ANN)模拟大脑神经元之间的连接，实现信息处理、存储等功能。一个简单的人工神经网络模型，它的输入 $x_1 \sim x_n$ 和输出 y 关系可以描述为

$$y = f\left[\sum_{i=1}^n w_{ij}x_i - \theta\right]$$



其中， $x_j (j=1, 2, \dots, n)$ 是从其他神经元传来的输入信号； w_{ij} 表示从神经元 j 到神经元 i 的连接权值； θ_i 为阈值； $f(\bullet)$ 称为激发函数或作用函数。

◆人工神经网络工作原理

学习算法是神经网络的主要特征，也是当前研究的主要课题。学习的概念来自生物模型，它是机体在复杂多变的环境中进行有效的自我调节。

神经网络具备类似人类的学习功能。一个神经网络若想改变其输出值，但又不能改变它的转换函数，只能改变其输入，而改变输入的唯一方法只能修改加在输入端的加权系数。

5.4 智能控制

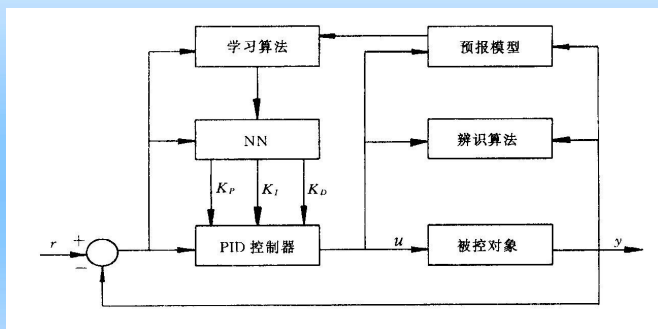
◆智能控制的类型

(3) 人工神经网络控制系统

◆神经网络在控制中的应用

1. 在传统的控制系统中用以动态系统建模，充当对象模型；
2. 在反馈控制系统中直接充当控制器的作用；
3. 在传统控制系统中起优化计算作用；
4. 与其他智能控制方法如模糊逻辑、遗传算法、专家控制等相融合。

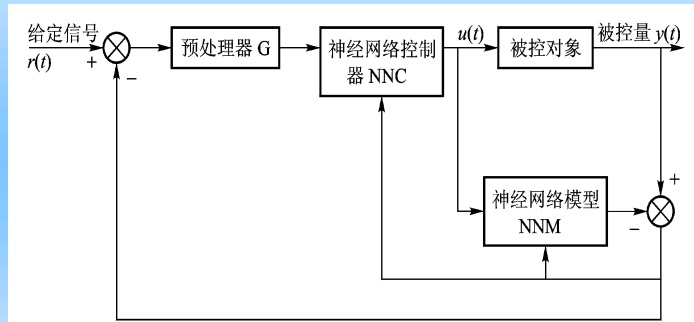
□采用预测模型的NN控制参数自学习PID控制



将神经网络用于控制器的设计或直接学习计算控制器的输出（控制量）

□神经网络内模控制

系统中NNM为被控对象的模型，用于充分逼近被控对象的动态特性，而NNC（神经网络控制器）为对象的逆模型。



在传统的控制系统中用以动态系统建模，充当对象模型

5.5 非线性控制

◆非线性控制系统的主要分析方法

(1) 相平面法

相平面法是时域分析法在非线性系统中的推广应用。但相平面法仅适用于一、二阶非线性系统的分析。

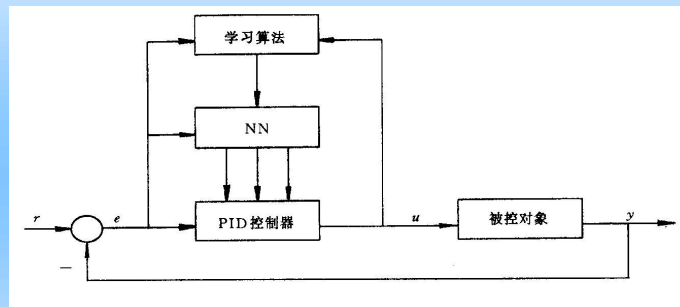
(2) 描述函数法

描述函数法是一种频域的分析方法，它是线性理论中的频率法在非线性系统中的推广应用，有较广泛应用。

(3) 计算机求解法

用计算机直接求解非线性微分方程，对于分析和设计复杂的非线性系统，几乎是唯一有效的方法。随着计算机的广泛应用，这种方法定会有更大的发展。

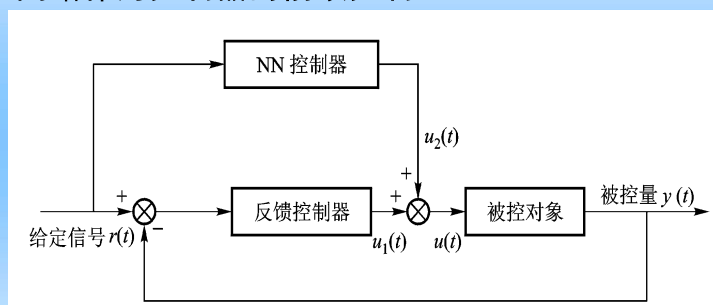
□基于神经网络控制参数自学习PID控制



在传统控制系统中起优化计算作用

□神经网络监督控制

系统在原有反馈控制的基础上增加人工神经网络作为控制器的前馈控制。



在反馈控制系统中直接充当控制器的作用

5.5 非线性控制

◆非线性控制系统的主要特点

- (1) 叠加原理不适用；
- (2) 动态性能不仅与系统的结构和参数有关，而且还与输入的信号和初始条件有关；
- (3) 当输入是正弦信号时，输出会出现畸变的波形；
- (4) 输出响应模态呈复杂形态（如突变、分岔等）；
- (5) 没有成熟的精确分析方法，多采用近似分析法。

5.5 非线性控制

◆非线性控制系统研究方法的特点

- (1) 主要解决非线性控制系统的“分析”方法
强调稳定性分析
- (2) 对非线性控制系统的“综合”方法研究不够
尚未出现某种简单且实用的综合方法。
- (3) 新理论、新方法正在不断出现

本章小结

- PID控制方法是一种经典的、在实际工业过程控制中最常用的方法，可通过对P、I、D的不同组合及其参数的选取获得较理想的控制效果；
- 最优控制是在要求被控对象的性能指标多样化、及要求某些被控量或系统的某个性能指标达到最佳值（如最短时间）或给定值（如速度为零）时产生的，具有强烈的工程背景和较丰富的理论成果；
- 自适应控制实质上是系统辨识与控制技术的结合，可根据环境变化对被控对象（系统）的结构和参数的影响自适应地调整控制器的参数，通常有自校正控制系统、模型参考自适应控制系统两种类型；
- 智能控制是对传统控制理论的发展，是自动控制发展的新阶段，是人工智能、控制论、系统论和信息论等多种学科的综合集成。

《自动化导论》

《Automation: An Introduction》

南京大学工程管理学院

陈春林

clchen@nju.edu.cn



6 自动控制系统的的基本元件与设备

- 6.1 信息获取元件——传感器
- 6.2 信息传输设备——信号转换与传输网络
- 6.3 信息处理设备——控制器
- 6.4 信息应用设备——执行器

6.1 信息获取元件——传感器

自动控制系统的信息获取是通过**测量**实现的。

◆ 什么是测量？

定义：测量就是以同性质的标准量与被测量比较，并确定被测量对标准量的倍数。标准量称为单位量，测量的结果称为**测量量**。



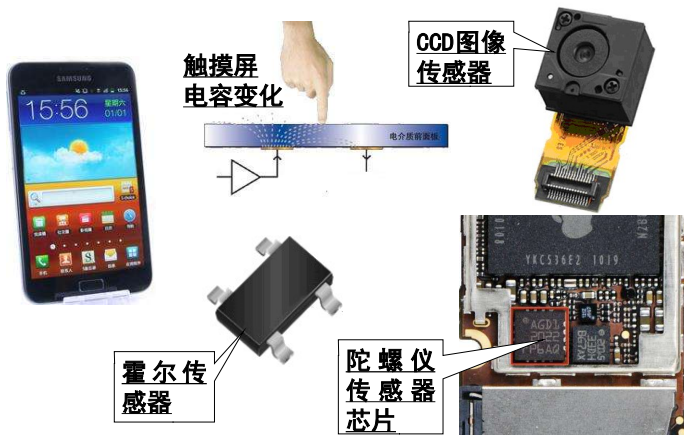
6.1 信息获取元件——传感器

◆ 用什么来测量？

在自动化系统中，实现测量任务的元器件被称为信息获取元件，主要是**各种传感器**。



6.1 信息获取元件——传感器



6.1 信息获取元件——传感器

◆ 什么是传感器？

关于传感器的定义有很多种说法，一般有广义和狭义之分。

传感器广义上的定义：

能感受规定的被测量并按照一定规律转换成可用输出信号的器件和装置，通常由敏感元件和转换元件组成。

——国标GB/T 7665 - 2005

传感器狭义上的定义：

一种将物理量转变为电量的机械电子装置。

传感器的英文sensor，顾名思义，就是可以像我们的身体器官一样感受周围环境的一种装置。

6.1 信息获取元件——传感器

► 人体系统和机器系统比较

- 眼（视觉）
- 耳（听觉）
- 鼻（嗅觉）
- 舌（味觉）
- 皮肤（触觉）

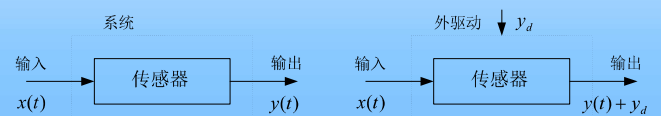


感知外界信息 → 大脑 → 肌体



6.1 信息获取元件——传感器

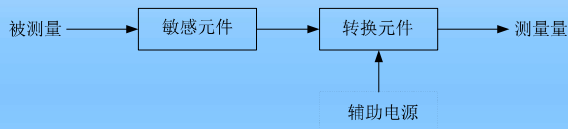
◆ 什么是传感器？



具体来说，**传感器就是一个具有输入和输出的系统**。左图表示自激发式传感器系统，而右图则表示调制式传感器系统。

6.1 信息获取元件——传感器

◆ 传感器的组成



传感器通常由**敏感元件**和**转换元件**组成。其中，敏感元件是指传感器中能直接感受被测量的部分，转换元件是指传感器中能将敏感元件输出转换为适于传输和测量的信号部分。

6.1 信息获取元件——传感器

几种常见的传感器



长距离漫反射光电传感器



温度传感器



位移传感器



压力传感器

6.1 信息获取元件——传感器

医疗中的传感器



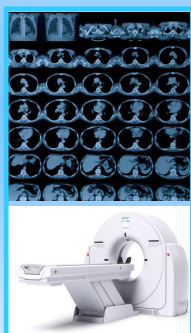
B超



全自动电子血压计



电子听诊器

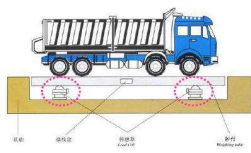


CT

6.1 信息获取元件——传感器

工作中的传感器

◆ 计量测试



6.1 信息获取元件——传感器

◆ 传感器的分类

- 1) 按传感器测量原理分类，传感器可分为电阻式传感器、电容式传感器和超声波传感器
- 2) 按信号变换特征分类，传感器可分为物性型和结构型。
- 3) 按敏感元件与被测对象之间的能量关系，传感器可分为能量转换型与能量控制型。
- 4) 按被测量分类即按用途分类，传感器可分为三大类：
 - 按传感器上所依据转换原理可分为：物理、化学、生物传感器等；
 - 按传感器测量量的性质可分为：压力、加速度、气体浓度、离子浓度等；
 - 按传感器应用可分为：汽车、医学、航天等。

6.1 信息获取元件——传感器

生活中的传感器



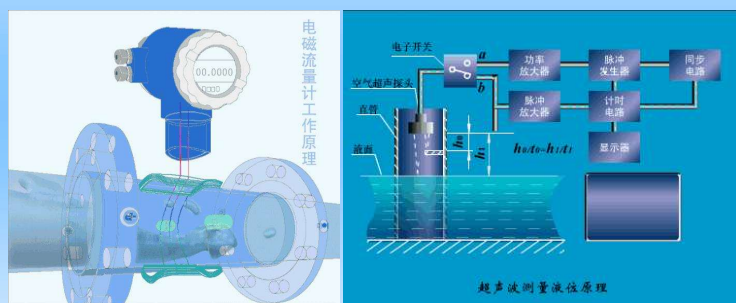
6.1 信息获取元件——传感器

计算机外围设备



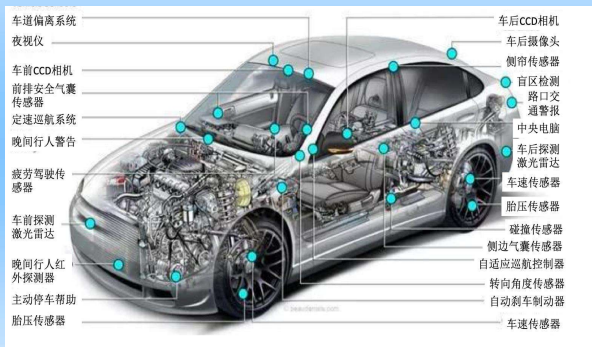
6.1 信息获取元件——传感器

工作中的传感器



6.1 信息获取元件——传感器

新型汽车主要传感器分布图



拓展思考：无人驾驶汽车上该装哪些传感器？

6.2 信息传输设备——信号转换与传输网络

◆ 点对点控制系统

传统控制理论研究的系统大多是“点对点控制系统”，其结构也就是一般反馈控制系统的结构图所示，它认为系统中信息由一个元件向下一个元件的传输是**立即发出并立即到达**的，可以认为没有传输的时间延迟（时延）。

6.2 信息传输设备——信号转换与传输网络

◆ 自动控制系统对信号（信息）传输网络的要求

- (1) 高实时性要求
- (2) 高可靠、高安全性要求
- (3) 良好的确定性要求

6.3 信息处理设备——控制器

◆ 控制器的作用

控制器的作用是把控制对象输出的实际值和参考输入（参数量）进行比较，以得到偏差，并根据偏差产生一个控制信号，使偏差减小期望的范围。自动控制以这种方式产生控制信号，称为控制作用。

简单地说，控制器即是指在控制系统中**根据控制算法而进行决策的装置**。

在自动控制系统中，控制器是其核心，一个控制系统的设计工作主要任务是设计合适的控制器以达到控制目的。

6.2 信息传输设备——信号转换与传输网络

◆ 自动控制系统中信息传输

自动控制系统的信息传输要求具有快速性、可靠性和准确性，但这些性能的保证要受信息传输环节的影响，传输网络结构的差异决定了系统信息传输的特点和性能。

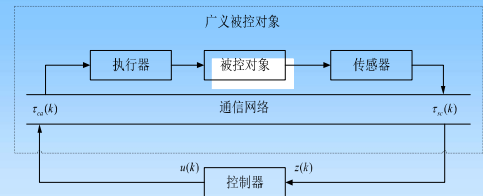
自动控制系统按照其信息传输的途径和特点可以分为

“**点对点控制系统**”和
“**网络控制系统**”两大类。

6.2 信息传输设备——信号转换与传输网络

◆ 网络控制系统

“网络控制系统”的信息传输要经过通讯网络，其信号的传输相对比较复杂，如**存在传输时延和数据包的丢失等现象**。网络控制系统已被广泛应用于大型工业过程控制及小型局域系统（如航天器、船舶和新型高性能汽车等）中；由于将通讯网络引入了实际控制系统，系统的信号传输要经过实时网络，从而使系统的分析和设计变得非常复杂。



6.2 信息传输设备——信号转换与传输网络

◆ 控制网络的任务

控制网络要将现场运行的各种信息传送到远离现场的控制室，在将生产现场设备的运行参数、状态以及故障信息等送往控制室的同时，又将各种控制、维护、组态命令等送往位于现场的测量控制现场设备中，起着提供现场级控制设备之间**数据联系与沟通**的作用。

同时控制网络还要在与操作终端、上层管理网络的**数据连接和信息共享**中发挥作用。近年来，随着互联网技术的发展，已经开始对现场设备提出了参数的网络浏览和远程监控的要求。

6.3 信息处理设备——控制器

◆ 控制器的分类

如果按照控制器所采用的控制方法来分类，主要有：

- **PID控制器**（目前是工程上最常用的模拟控制器）
- **智能控制器**
 - 专家系统控制器
 - 模糊控制器
 - 神经网络控制器等等

在这里，控制器的分类是一个发展的概念，随着控制方法的日新月异，新的控制器也将不断出现。

6.4 信息应用设备——执行器

◆ 执行器的作用

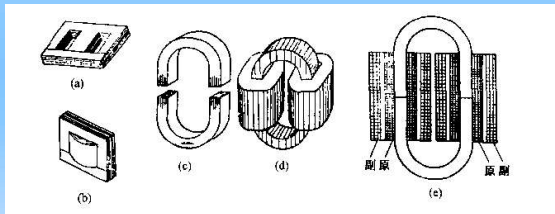
执行器是控制系统中的功率部件，是**被控对象的直接驱动装置**，控制器的指令一般要通过执行器得以实现，而执行器的驱动输出取决于控制器的控制作用。

从信息传输和处理角度看，执行器是信息处理的落足点，是**信息流对能量流、物质流的转换装置**，执行器可实现对信息的应用，将控制信号变换为导致被控量按要求变化所需要的能量或物质。

6.4 信息应用设备——执行器

◆ 常用工业执行器

变压器



6.4 信息应用设备——执行器

◆ 常用工业执行器

交流电机



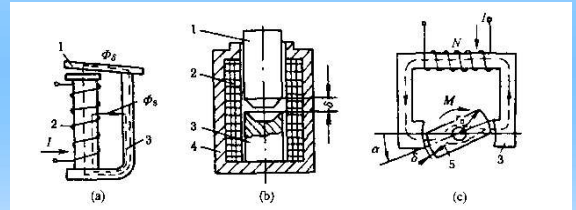
本章小结

- 一个具有反馈结构的自动控制系统，其本质是信息的处理和控制在，其功能的发挥必须通过一系列基本元件和设备来完成，其中最关键的基本元件和设备是**传感器、控制器和执行器**。
- 自动控制系统的信息获取主要是通过各种传感器的感测实现的。在复杂的控制系统中，往往存在多种不同特性的传感器，因此学习并掌握不同传感器的原理和特性对完成自动控制系统的设计十分重要。
- 控制器是整个自动控制系统的“大脑”，也是整个控制系统的核心。控制器的组成会根据控制要求和设计要求各不相同。一个复杂的智能控制器则需要由单片机（一种微型计算机）构成，不仅包括硬件，还包括含复杂控制算法的软件。
- 执行器是一系列动作和驱动元件在控制系统的统称，其主要功能是执行控制器的控制指令，并将控制信号变换为导致被控量按要求变化所需要的能量或物质。

6.4 信息应用设备——执行器

◆ 常用工业执行器

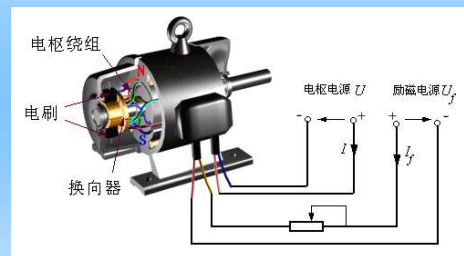
电磁铁和电磁继电器



6.4 信息应用设备——执行器

◆ 常用工业执行器

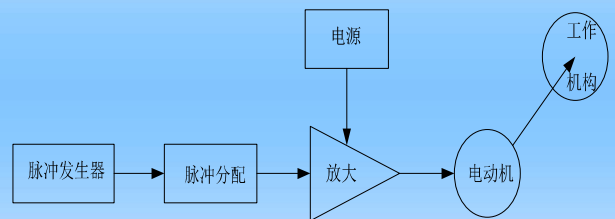
直流电机



6.4 信息应用设备——执行器

◆ 常用工业执行器

步进电机



《自动化导论》习题一

学号：_____ 姓名：_____

一、选择题

1. 课件中提到的中国、埃及和巴比伦都出现过的自动计时漏壶，属于哪种控制形式？（ A ）

A. 开环控制 B. 闭环（反馈）控制

2. 由相互联系、相互作用的许多要素结合而成的具有某种特定功能的有机整体称为（ C ）。

A. 设备 B. 信息 C. 系统 D. 控制

3. 在“人手取杯”过程中，被控量是（ B ）。

A. 手 B. 手和杯子的距离 C. 眼睛 D. 杯子的位置

4. 对“老鹰捕兔”和“导弹跟踪与打击目标”两类系统，前者属自然生物系统，后者属人造技术系统；它们在运行过程中均遵循了相同的原理，即（ B ）原理。

A. 飞行控制 B. 反馈控制 C. 运动控制 D. 目标识别

5. 如果反馈的信号是与输入信号相减，使产生的偏差愈来愈小，则称为（ B ）；如反馈的信号是与输入信号相加，使产生的偏差愈来愈大，则称为（ A ）。

A. 正反馈 B. 负反馈

二、简答题

1. 请从自动化角度分析信息时代与智能时代的区别，举例说明智能时代下的自动化会有哪些应用场景？

2. 结合实际例子，论述开环控制和闭环控制在自动化系统中的应用及其优缺点。

3. 请绘制空调系统的方框图，并解释各部分的作用。

《自动化导论》习题二

学号：_____ 姓名：_____

一、判断题

1. (√) 复合控制是顺馈控制与反馈控制的有机结合。
2. (X) 工业应用中 PID 控制器参数的确定一般是采用理论计算的方法获取。
3. (X) 微分控制器的延缓作用会降低系统的反应速度。
4. (X) 积分控制器容易受到系统中高频噪声干扰的影响。

二、选择题

1. 在哪种控制系统中一般采用阶跃信号作为典型参考输入信号？（ A ）
 - A: 恒值控制系统
 - B: 随动控制系统
 - C: 程序控制系统
 - D: 前馈控制系统
2. 下述哪几项是死区非线性特性对控制系统动态过程的影响？（ ABD ）
 - A: 导致系统产生稳态误差
 - B: 导致系统输出滞后输入
 - C: 可抑制系统的振荡，保护元件正常工作
 - D: 可抑制输入端的小扰动信号，对提高系统的抗干扰能力有积极作用

三、简单题

1. 试简要比较恒值控制系统、随动控制系统和程序控制系统的特点，并分别举例说明。
2. 试简述 PID 控制器的基本原理以及 PID 控制器各部分参数的作用。

《自动化导论》习题三

学号：_____ 姓名：_____

一、判断题

1. () 深度学习是机器学习中的一种方法，其广泛应用是推动最近一次人工智能浪潮的主要原因之一。
2. () KNN 和 K-Means 方法都使用了最近邻算法。
3. () KNN 和 K-Means 方法中的参数 K 的含义都是分成 K 类。(X)
4. () 强化学习起源于动物心理学，后又融入了运筹学、随机优化等理论与技术。
5. () 强化学习的模型框架是基于马尔科夫决策过程的。

二、选择题

1. 从是否需要样本标签信息来看，机器学习大体可分为哪几类方法？(ABD)
 - A: 监督式学习
 - B: 非监督式学习
 - C: 深度学习
 - D: 强化学习
2. 下面几种机器学习方法不属于监督式学习的是(C)
 - A: 线性回归
 - B: 逻辑回归
 - C: K-Means
 - D: KNN
3. 强化学习属于(C)
 - A: 符号主义人工智能
 - B: 联结主义人工智能
 - C: 行为主义人工智能
 - D: 其他
4. 下列不属于强化学习特性的是(C)
 - A: 目标导向
 - B: 试错学习
 - C: 使用最近邻算法
 - D: 延迟回报
5. 关于监督式学习与强化学习的区别，下述说法正确的有(ABD)
 - A: 监督式学习一般静态、无反馈，强化学习一般是动态、有反馈
 - B: 监督式学习依靠有标记的样本进行学习，强化学习通过与环境的交互产生样本进行学习
 - C: 监督式学习依赖数据，而强化学习不依赖数据，依靠推理进行学习
 - D: 监督式学习的训练数据独立不相关，但强化学习的训练数据高度相关