



西南交通大学
Southwest Jiaotong University

自动控制原理

第一章

绪论

任课教师： 马磊

电气工程学院

2020



马磊

电邮: malei@swjtu.edu.cn

电话: 028-66367782

西南交通大学
电气工程
硕士

维尔茨堡大学机器
人与远程信息学研
究所研究助理

维尔茨堡大学机器人与
远程信息学研究所助理
教授、研究组组长

西南交通大学电
气工程学院教授

1993 1996 1999 2000 2003 2006 2007 2009.09

重庆大学
自动控制
专业学士

西南交通大
学电气工程
学院助教、
讲师

波鸿鲁尔大学自动
化与计算机控制研
究所研究助理

波鸿鲁尔大
学电气工程
博士学位

维尔茨堡大学机
器人与远程信息
学研究所副教授
教席（代理）

维尔茨堡远
程信息技术
研发中心
副主任

代表性科研项目

自主移动机器人



复杂机电系统控制

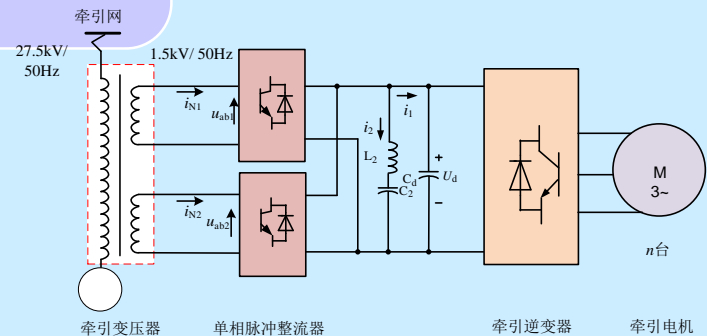


先进控制理论

信息处理



协作机器人



列车安全控制与健康管理



课程导论

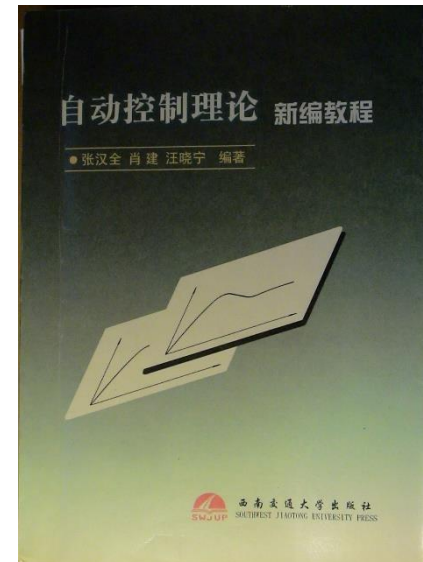
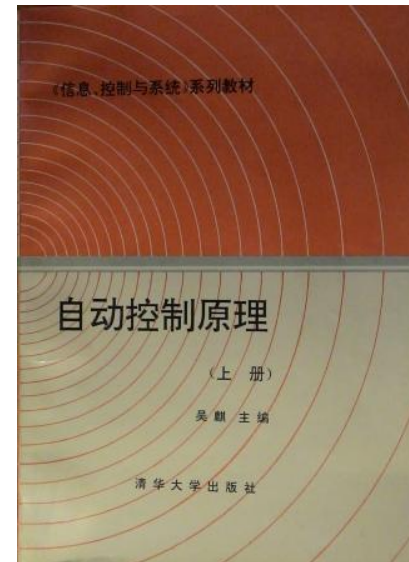
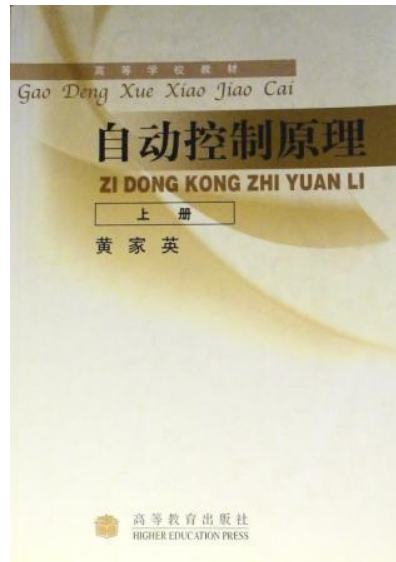
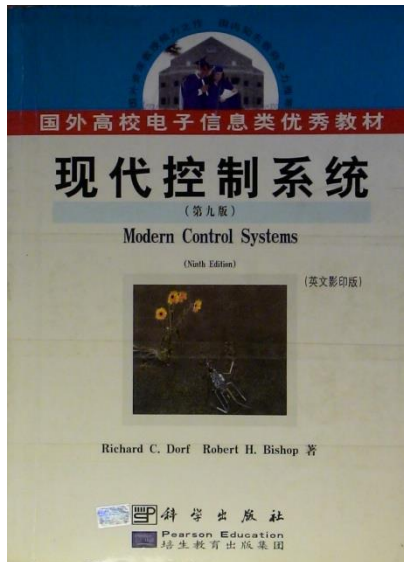
教学参考书:

- R. C. Dorf and R. H. Bishop, 谢红卫等译.
现代控制系统 (第八版). 高等教育出版社, 2001.
- Richard C. Dorf, Robert H. Bishop.
Modern Control Systems (10th Edition) 科学出版社 2002.
- 黄家英. 自动控制原理. 高等教育出版社
- 吴麒. 自动控制原理. 清华大学出版社
- 张汉全 等. 自动控制理论新编教材. 西南交通大学出版社



课程导论

教学参考书:





课程导论

■ 课程内容

- 掌握控制理论的基本思想
- 用控制理论进行一般应用问题的设计
- 熟悉采用软件工具进行仿真和程序设计技术
- 初步具备控制系统设计的能力

■ 自动控制理论的核心思想

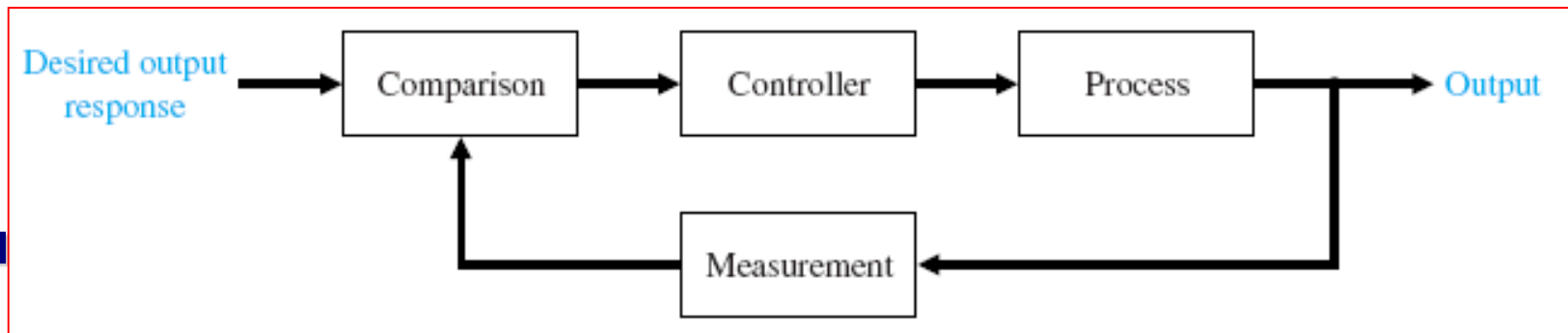
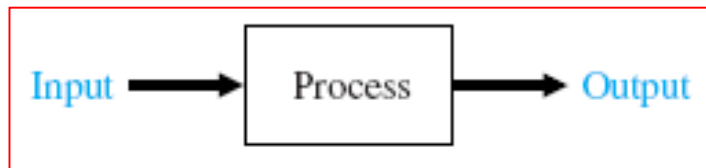
- 动力学和动态系统 – dynamics and dynamic systems
- 反馈控制 – feedback control

课程导论

■ 什么是系统？

- 系统一词来源于英文system的音译，即若干部分相互联系、相互作用，形成的具有某些功能的整体。
- 试举例说明 系统

■ 什么是系统动态？



- 获得期望的系统行为！
- 反馈：根据对系统输出/状态的观测进行控制



本章内容

-- 什么是自动控制？

- 1.1 控制理论与控制技术之发展简况
- 1.2 控制系统的基本形式
- 1.3 控制系统的分类
- 1.4 对控制系统的基本要求与研究内容
- 1.5 控制系统举例
- 1.6 设计实例

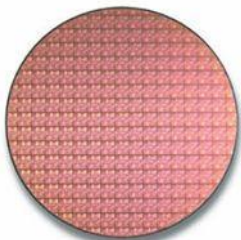
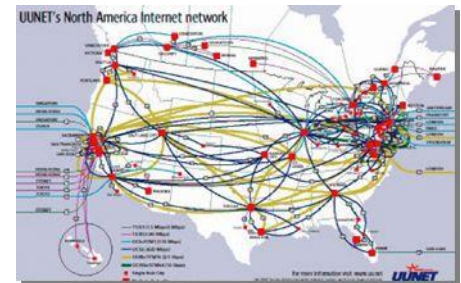
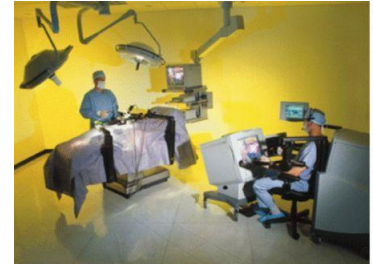


什么是自动控制？

- 自动控制系统的**功能**:
 - 通过控制装置使受控对象的被控量按照预定的规律变化
- 自动控制理论研究**自动控制系统运动的一般规律和分析、设计的基本方法**
- 自动控制理论讨论的**中心问题是控制系统的性能**

自动控制理论与技术的广泛应用

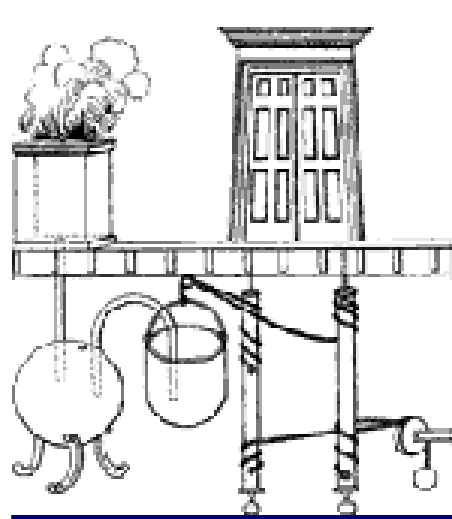
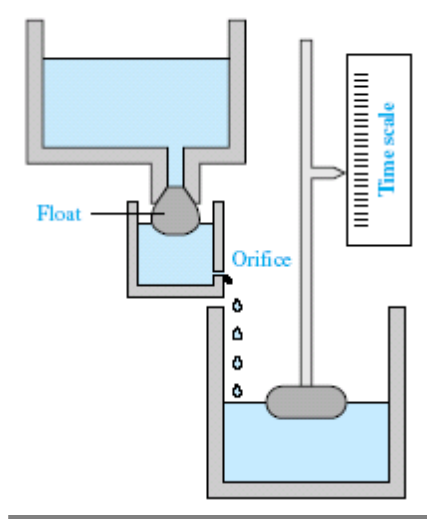
- 航空航天和运输
- 信息和网络
- 机器人与智能机器
- 生物和医药
- 材料和加工
- 环境科学、经济和金融
-



1.1 控制理论与技术之发展简况

■ 早期的朴素控制思想与技术

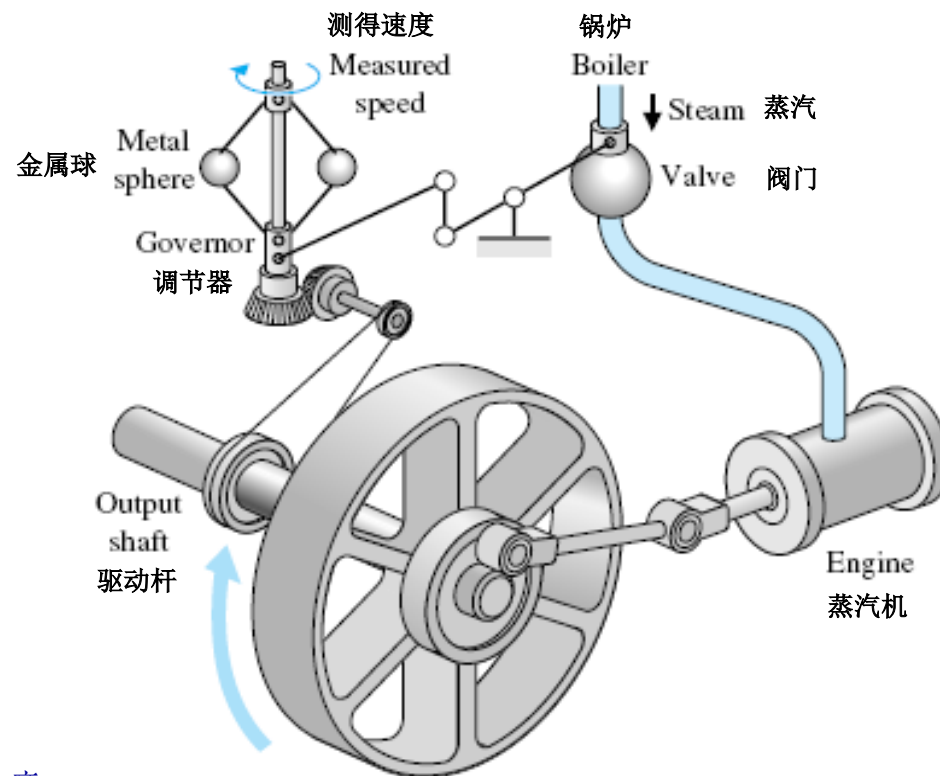
- 300BC 古希腊人发明浮球调节装置;
- 800AD 古代阿拉伯人利用浮球进行水钟控制;
- 1086AD 苏颂 韩公廉 发明水运仪象台;



1.1 控制理论与技术之发展简况

■ 机械控制机构和工业革命

- 1788 J. Watt （英国）用离心式调速机构控制蒸汽机的速度



1.1 控制理论与技术之发展简况

■ 经典控制理论的发展 – 数学基础

- 1840 英国 G.B.Airy 首次用微分方程研究控制系统讨论了反馈系统的不稳定性;
- 1868 英国 J.C.Maxwell 系统分析了反馈控制系统的稳定性;
- 1877 E.J.Routh 和 A.Hurwitz 1895 “Routh-Hurwitz Stability Criteria”
- 1892 俄国 A.M.Lyapunov “论运动稳定性的一般问题”;





1.1 控制理论与技术之发展简况

- 推动无线电技术的反馈系统理论与实践
 - 1927 美国 H.S.Black 提出了负反馈放大器
 - 1932 美国 H.Nyquist 提出了基于极坐标图的频率域的稳定性判据
 - 1938 美国 H.W.Bode 引入了对数坐标系,使控制系统的频率域响应方法更适于工程应用
 - 1948 美国 W.R.Evans 提出了根轨迹法
- 二战促使控制技术大发展
 - 火炮瞄准系统
 - 雷达技术



1.1 控制理论与技术之发展简况

- 建立在Nyquist的频率法和Evans的根轨迹法上的理论，通常称为经典(古典)控制理论。
- 经典控制理论：
 - 一个函数——传递函数；
 - 两种方法——频率响应法，根轨迹法；

1.1 控制理论与技术之发展简况



- 1948 美国 N.Wiener 出版了
“Cybernetics, or Control and Communication in the Animal and the Machine”
(《控制论——或关于在动物与机器中控制和通讯的科学》)
首先提出”控制论“，经典控制理论的辉煌总结。



1.1 控制理论与技术之发展简况

- 经典控制理论的三个局限性：
 - 限于线性定常系统(Linear time-invariant system);
 - 限于标量系统或单回路反馈系统——单输入单输出(SISO)系统;
 - 只提供分析方法而不是综合方法;



1.1 控制理论与技术之发展简况

■ 现代控制理论的理论基础

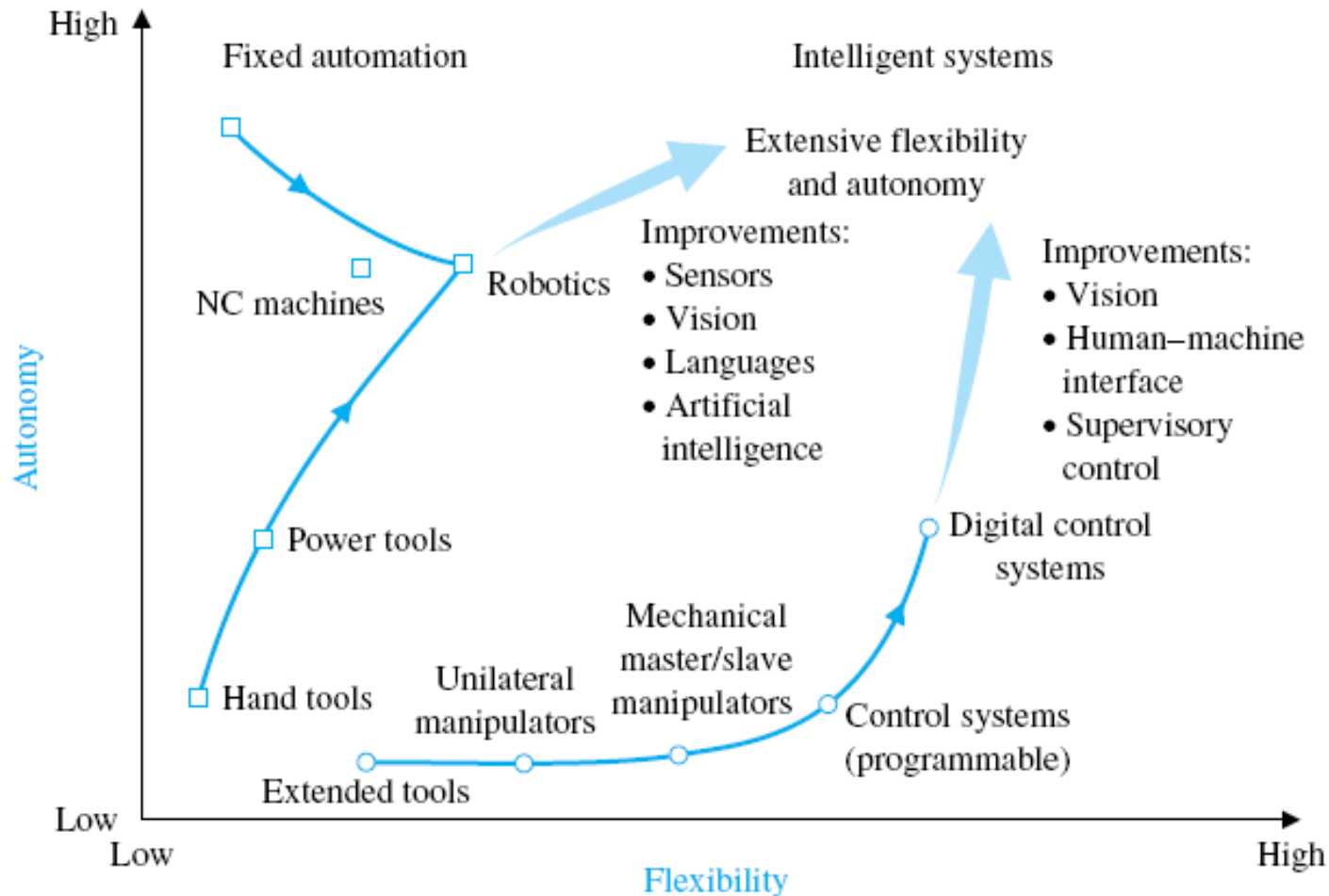
- 1957 美国 R.Bellman 动态规划理论
- 1958 前苏联 L.S.Pontryagin 极大值原理
- 1960 美国 R.Kalman 多变量系统最优控制、可控性和可观测性、最优滤波理论

■ 控制理论与技术的飞速发展

- 预测控制、自适应控制、鲁棒控制、.....
- 智能控制(综合传统控制学科、信息学科的计算机技术、网络技术和通信技术)

1.1 控制理论与技术之发展简况

■ 控制系统前瞻





1.1 控制理论与技术之发展简况

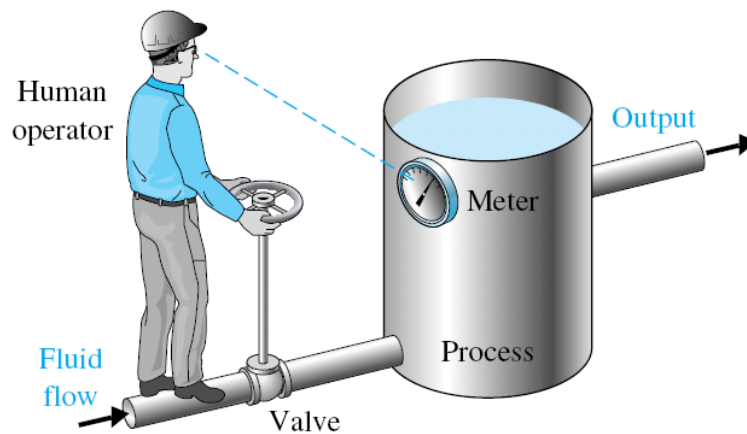
■ 控制系统前瞻

- 具有符号和连续动态的系统的控制
- 在分布式、异步网络环境中的控制
- 高级协作与自主控制
- 控制算法的自动综合
- 由不可靠的部件建立可靠的系统

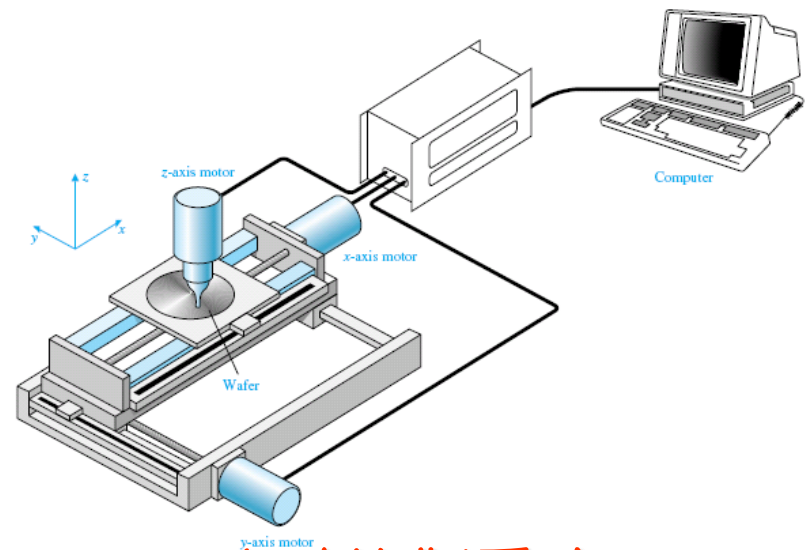
1.2 控制系统的基本形式

■ 控制系统(Control System):

- 由相互关联的部件按照一定的结构构成,提供预期的系统响应



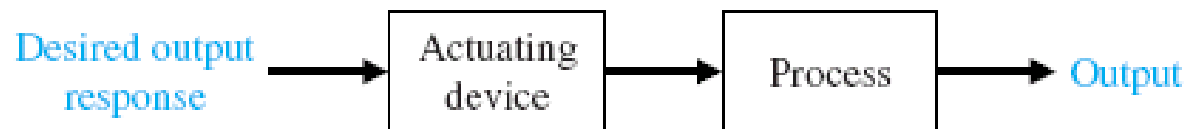
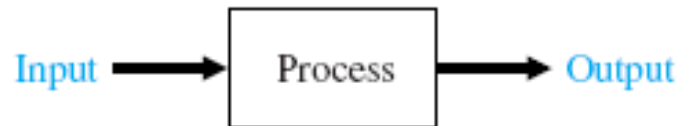
手动控制系统



自动控制系统

1.2 控制系统的基本形式

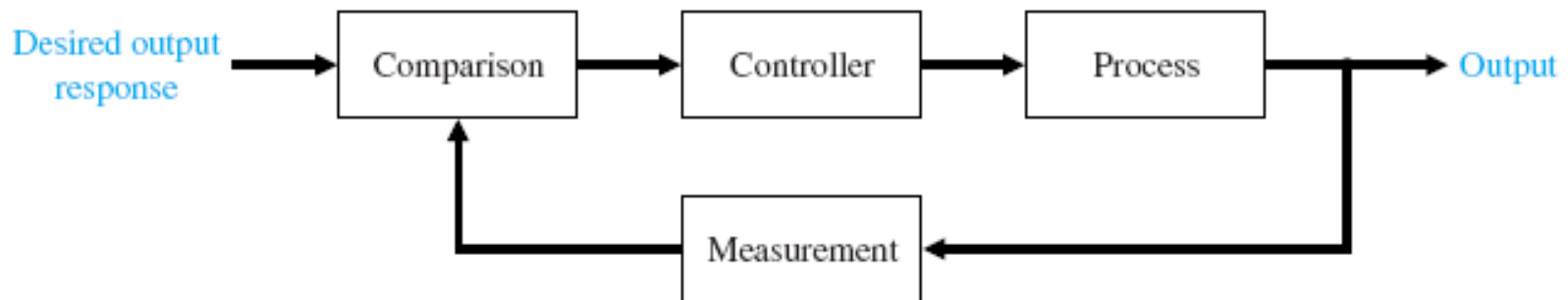
- 开环控制系统(Open-Loop Control System):
 - 在没有反馈的情况下,利用执行机构直接控制受控对象的控制系统.



1.2 控制系统的基本形式

■ 闭环控制系统(Closed-Loop Control System)

- 对输出进行测量,将此测量信号反馈, 并与预期的输入(参考或指令输入)进行比较的系统.





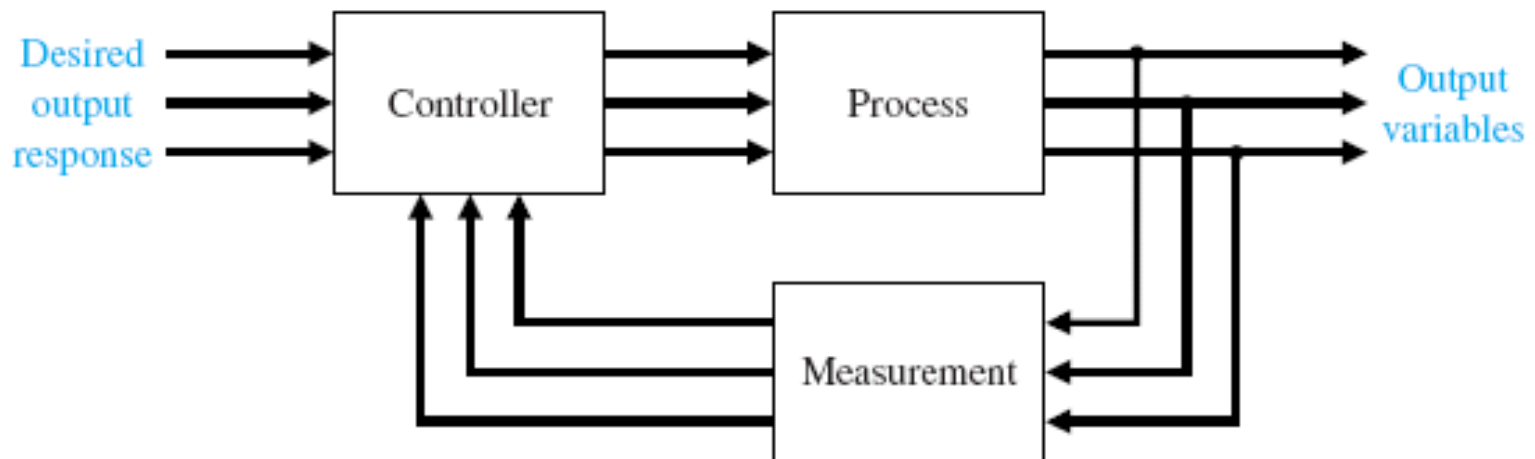
1.2 控制系统的基本形式

■ 自动控制系统的基本构成

- **(控制)对象**: 被控制的设备、装置或控制过程
- **输出量**: 被控制量
- **输入量(给定量)**: 反映控制系统要求, 预先给定的信号
- **控制器**: 根据系统要求按一定规则产生控制作用
- **检测环节**: 测量输出量, 并根据需要进行物理量的转换
- **比较环节**: 比较给定输入与反馈信号的差值, 产生偏差信号
- **扰动**: 是一种对系统输出量产生不同作用的信号

1.2 控制系统的基本形式和分类

- 多变量控制系统(Multivariable Control System): 有多个输入变量或/和多个输出变量的控制系统





1.3 控制系统的分类

■ 按照参考输入特征(运行方式)

- **恒值控制系统**: 参考输入为定值, 控制输出保持在恒定的要求值(克服扰动);
- **随动控制系统**(自动跟踪系统): 参考输入预先未知, 随时间变化控制输出; 控制输出以尽可能小的误差跟随输入的变化;



1.3 控制系统的分类

- 按照数学模型的特征——系统的本质分类
 - 线性系统与非线性系统;
 - 连续系统与离散系统;
 - 确定性系统与非确定性系统(随机系统);
 - 单输入单输出(SISO)系统与多输入多输出(MIMO)系统;
 - 集中参数系统与分布参数系统;
 -



1.3 控制系统的分类

■ 按照组成系统的元件分类

- ☐ 电气
- ☐ 机械
- ☐ 液动
- ☐ 气动
- ☐ 生物学
- ☐ 经济学
- ☐ 社会学
- ☐



1.4 对控制系统的基本要求 与研究内容

■ 基本要求

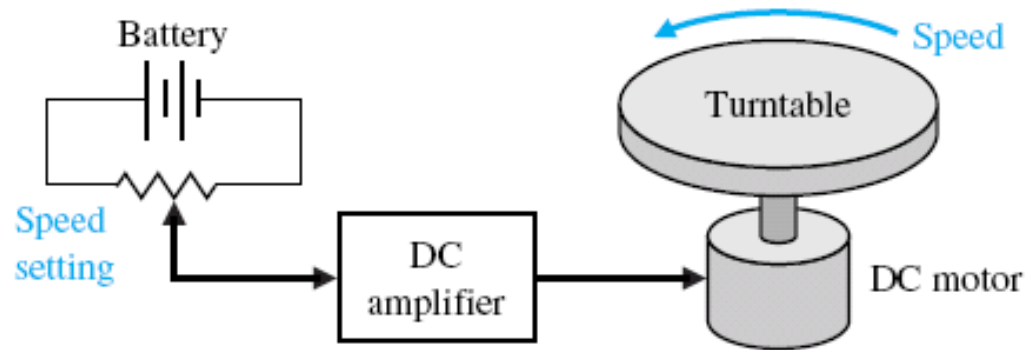
- 稳定：有一定的稳定裕量
- 满足要求的动态响应和稳态响应特性

■ 研究内容

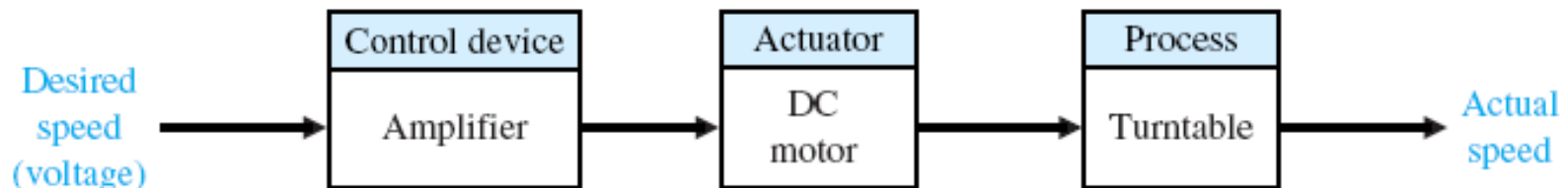
- 系统分析：已知系统的结构和参数，分析典型输入信号下系统的响应及指标
 - 恒值系统：典型扰动作用下引起被控量的变化过程；
 - 随动系统：典型给定量变化，被控制量(克服扰动)的跟随情况；
- 系统设计(系统综合)

1.5 控制系统举例

■ 开环控制系统



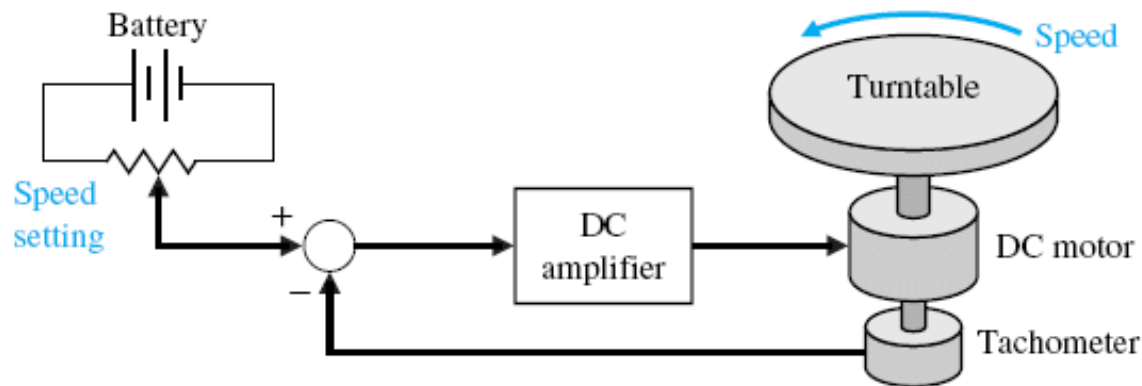
(a) Open-loop Control of the speed of a turntable



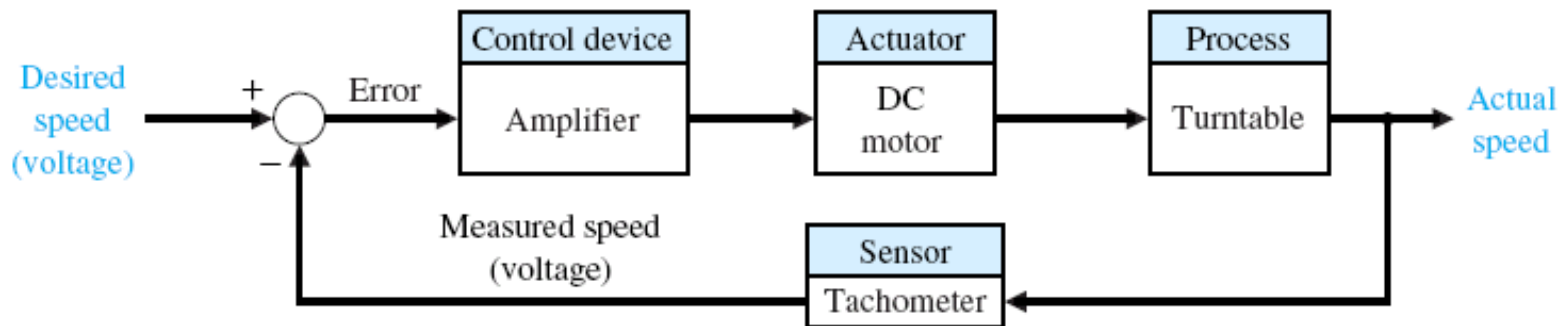
(b) Block Diagram

1.5 控制系统举例

■ 闭环控制系统



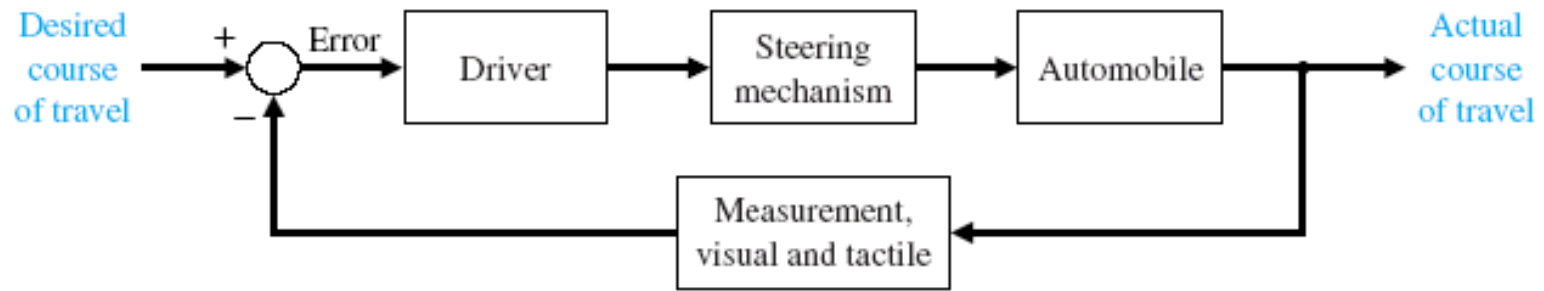
(a) Close-loop Control of the speed of a turntable



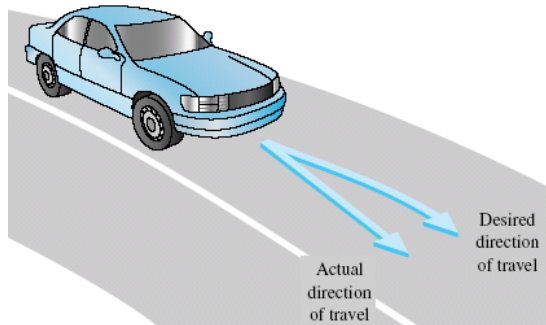
(b) Block Diagram

1.5 控制系统举例

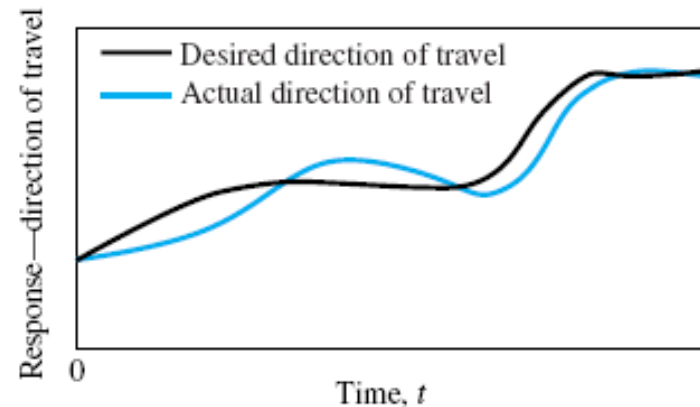
■ 汽车行进方向控制



(a) Block Diagram



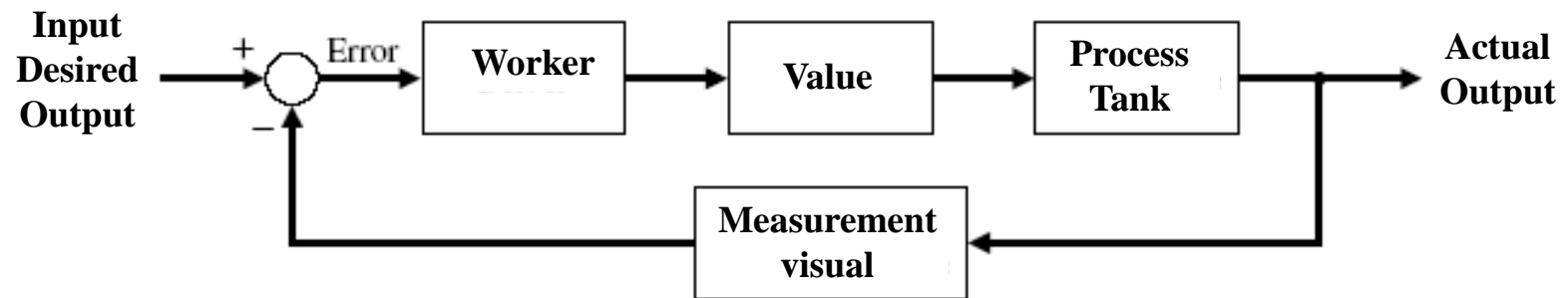
(b) Measure of Error



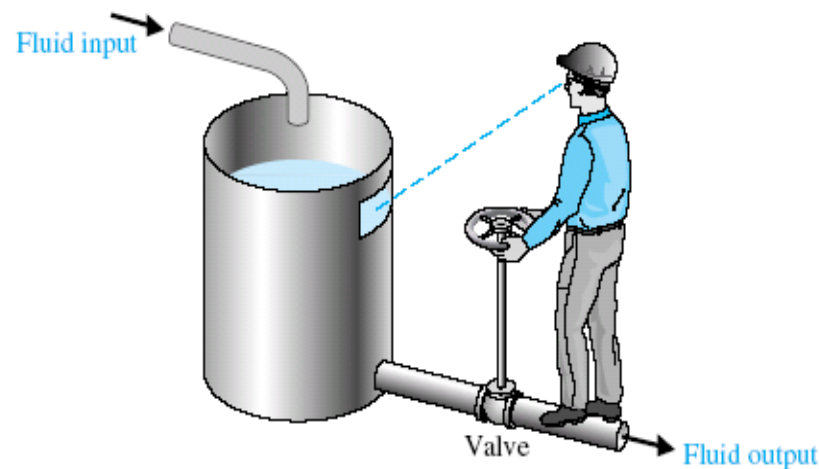
(c) Typical direction-of-travel response

1.5 控制系统举例

■ 人工液位控制



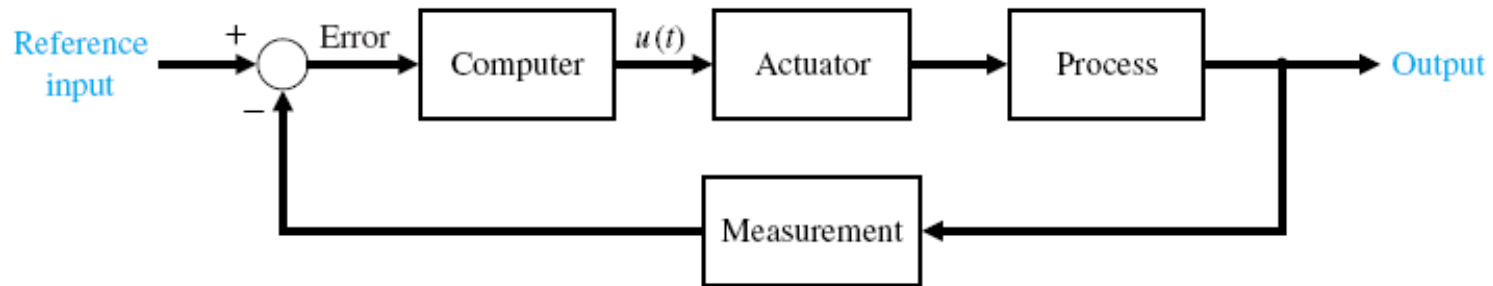
(a) Block Diagram



(b) Manual Control System

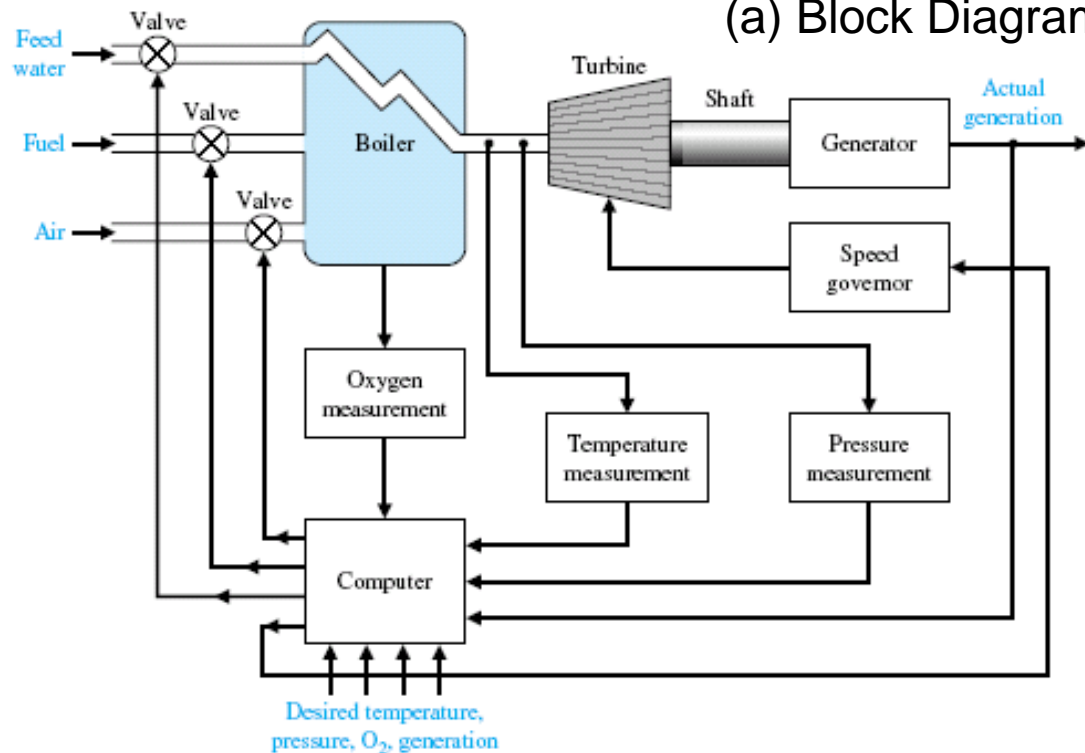
1.5 控制系统举例

■ 协调控制系统



(a) Block Diagram

(b) Coordinated Control System for Boiler Generator

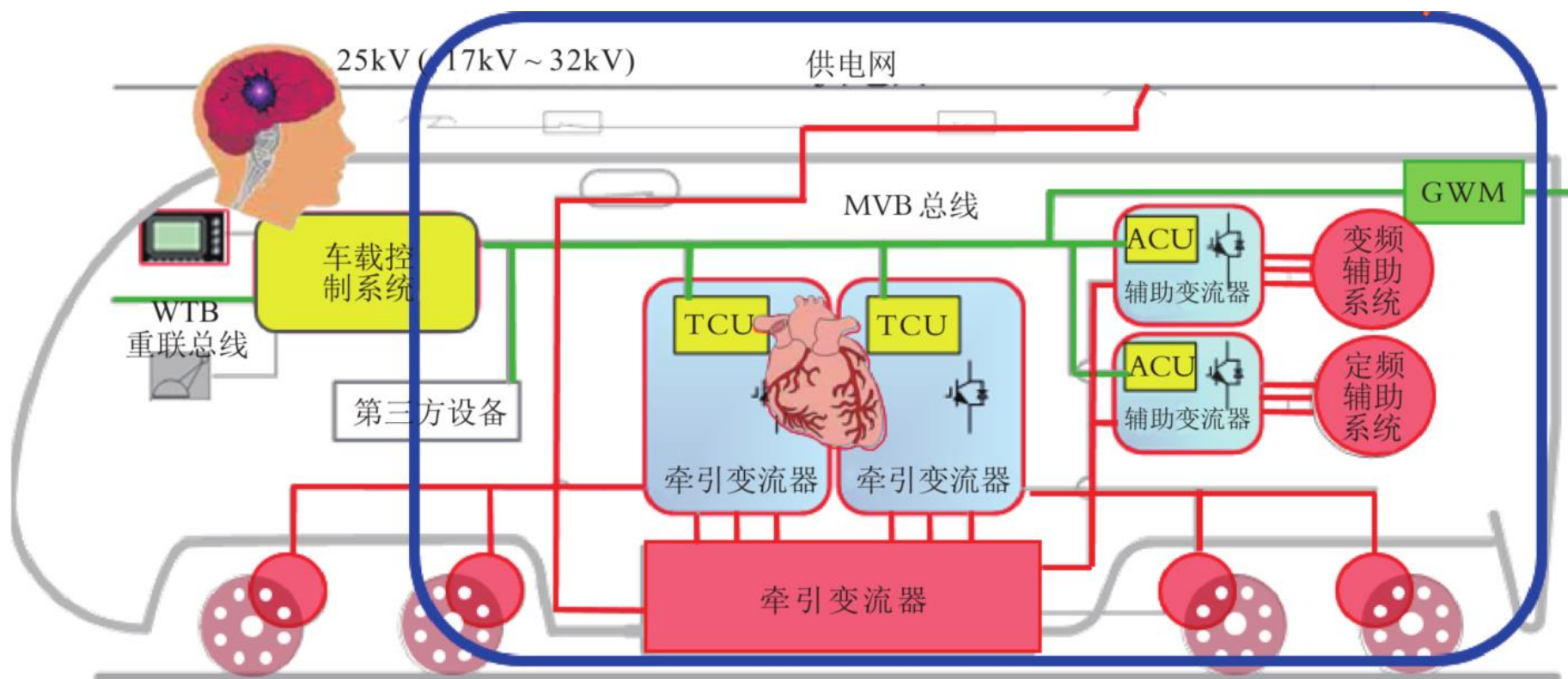




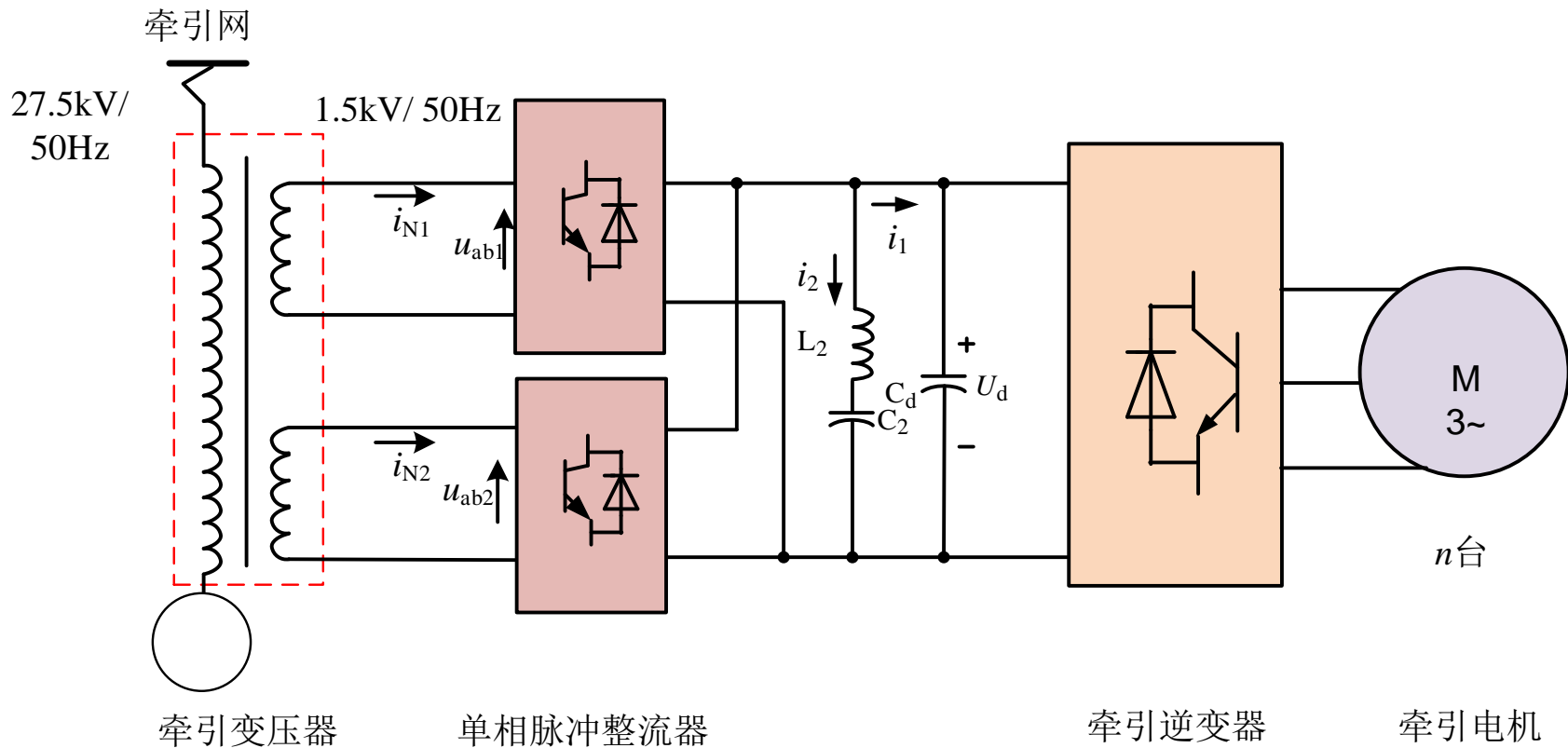
1.6 设计实例

- 确立控制目标
- 确定控制变量
- 拟定设计规范
- 确定系统结构配置
 - 执行结构
 - 传感器
 - 控制器
- 调节系统参数
 - 得到期望性能

1.6 设计实例-单相PWM整流器



1.6 设计实例-单相PWM整流器



牵引传动系统结构图

1.6 设计实例-单相PWM整流器

■ 控制目标

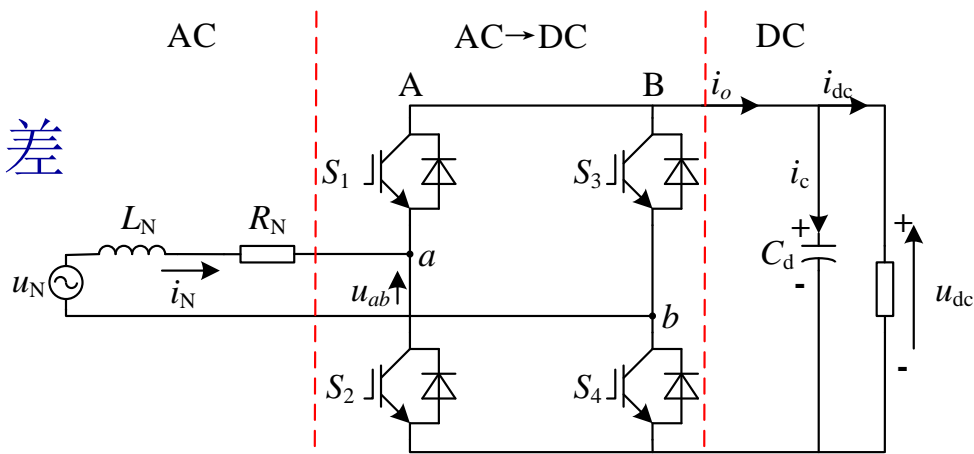
- 交流侧功率因数趋近1
- 直流侧输出电压稳定

■ 控制变量

- 交流侧电压/电流相位差
- 直流侧输出电压

■ 系统配置

- 双闭环串联控制系统
 - 电压环（外环）
 - 电流环（内环）
 - 前馈



1.6 设计实例-单相PWM整流器

■ 开关函数模型

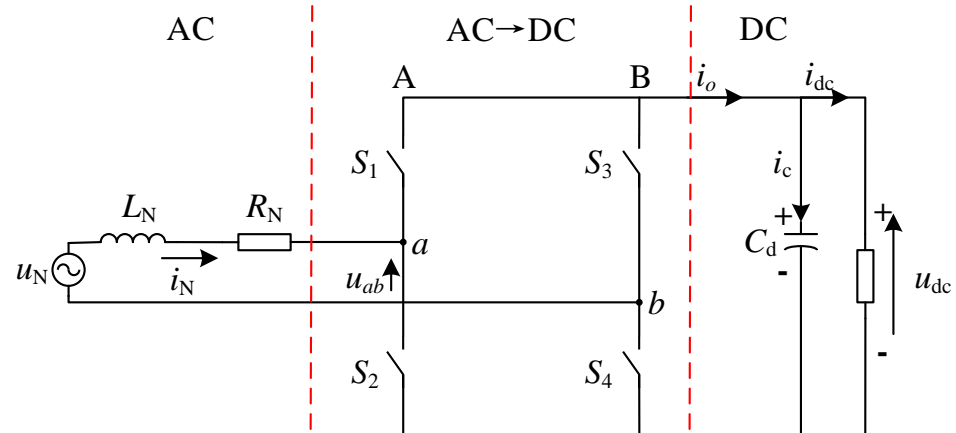
$$\square S_a = \begin{cases} 1, & S_1 \text{ 导通}, S_2 \text{ 关闭} \\ 0, & S_2 \text{ 导通}, S_1 \text{ 关闭} \end{cases}$$

$$\square S_b = \begin{cases} 1, & S_3 \text{ 导通}, S_4 \text{ 关闭} \\ 0, & S_4 \text{ 导通}, S_3 \text{ 关闭} \end{cases}$$

$$\square \begin{cases} u_N = L_N \frac{di_N}{dt} + R_N i_N + u_{ab} \\ i_o = i_c + i_{dc} \\ i_c = C_d \frac{du_{dc}}{dt} \end{cases} \quad \begin{cases} u_{ab} = (S_a - S_b)u_{dc} \\ i_o = (S_a - S_b)i_N \end{cases}$$

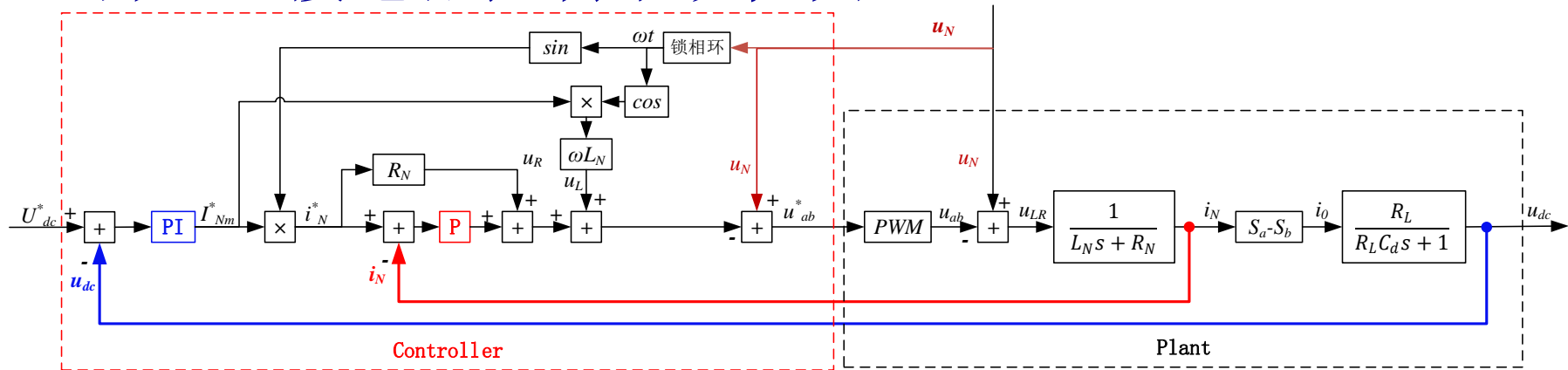
$$\square \begin{cases} L_N \frac{di_N}{dt} = -R_N i_N - (S_a - S_b)u_{dc} + u_N \\ C_d \frac{du_{dc}}{dt} = (S_a - S_b)i_N - \frac{u_{dc}}{R_L} \end{cases}$$

- 模型具有强非线性特性，包含了IGBT开关过程的高频分量，很难用于指导控制器设计

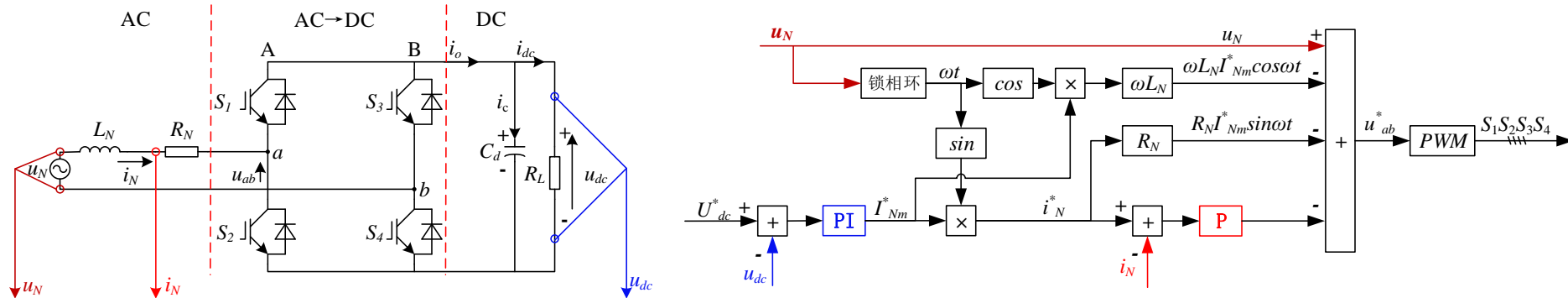


1.6 设计实例-单相PWM整流器

■ 瞬态直接电流控制系统框图



■ 瞬态直接电流控制仿真框图



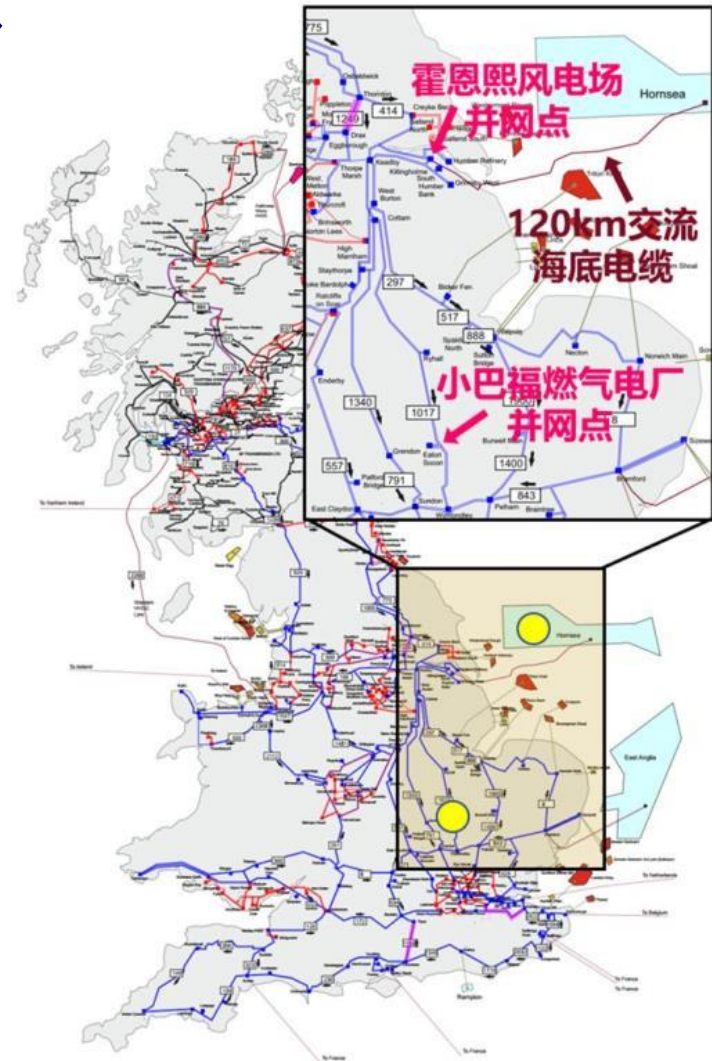


1.6 设计实例-电力系统低频振荡

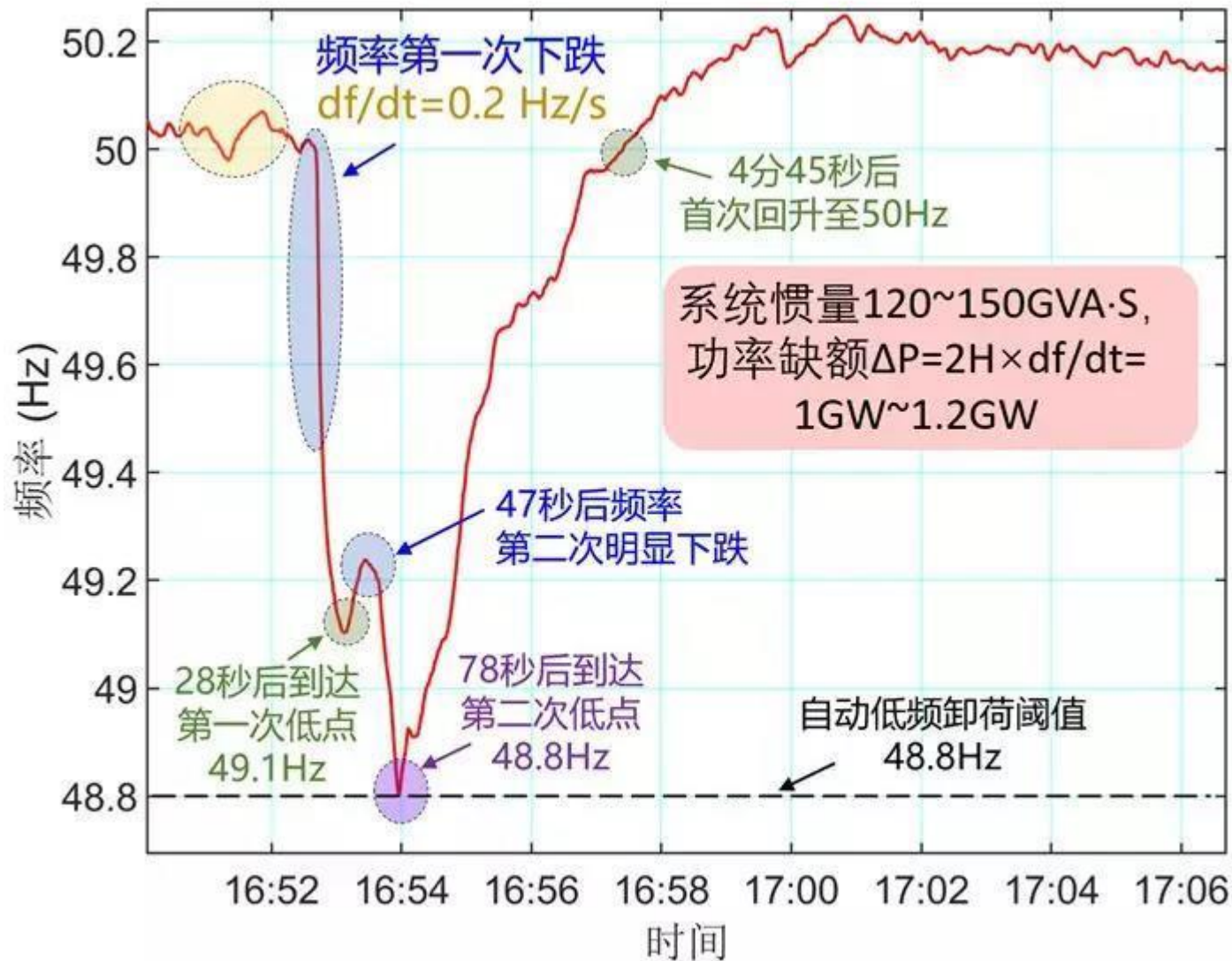
- 随着**电网互联**建设发展，电网系统规模不断增大，再加上大容量机组投运增多，快速励磁调节器的普遍采用，区域间低频振荡时有发生。
- 诱因：电力系统稳定运行时受到外界扰动后，**发电机转子之间相对摇摆**
- 表现：系统**阻尼不足**，在输电线路上出现功率波动、频率不稳
- 危害：影响系统的稳定运行，甚至引发系统解列的严重电网事故
- 措施：发电机组**附加励磁控制**装置，**增加系统阻尼**

1.6 设计实例-电力系统低频振荡

■ 2019.8.9英格兰大断电

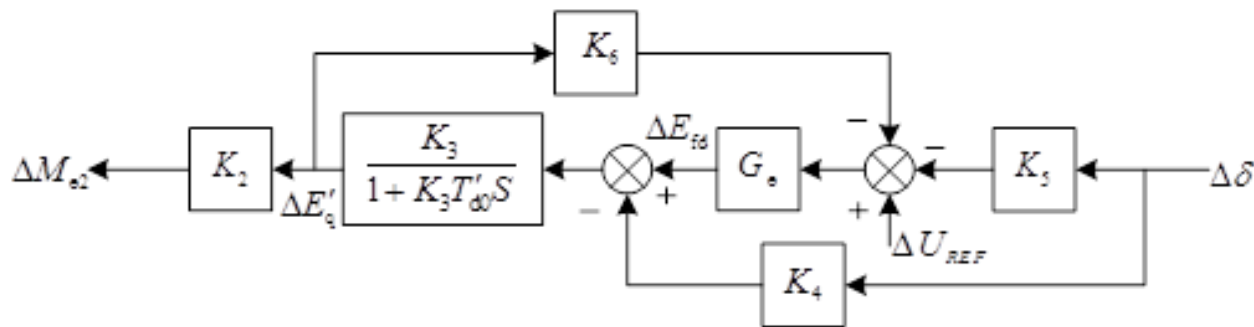
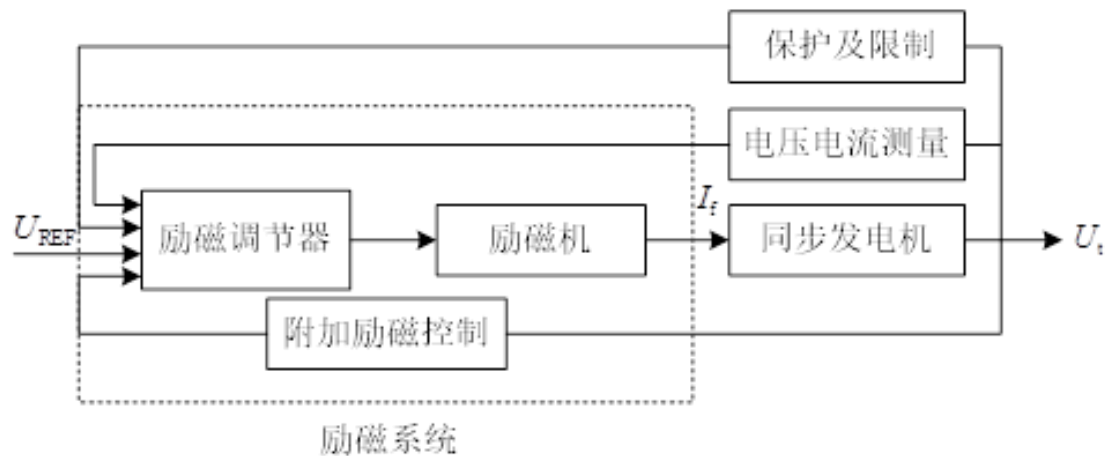


1.6 设计实例-电力系统低频振荡



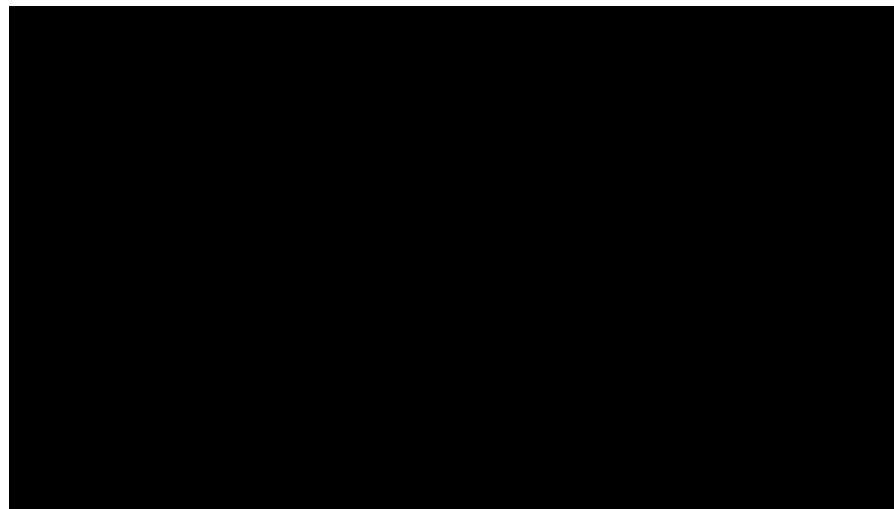
1.6 设计实例-电力系统低频振荡

- 措施：发电机组附加励磁控制装置，增加系统阻尼
- 实际上是一个典型的反馈控制问题



1.6 设计实例—旋翼飞行器控制

- 一种多面体结构的的全向旋翼飞行器
- 轨迹跟踪—控制率分配—旋翼倾角控制



- 陆空两栖、全向飞行、任意姿态定点悬停、安全性高，是国内目前唯一具备全向飞行能力的平台。
- 可用于搜救、侦查、巡检等领域，尤其用于隧道、桥梁巡检具有极大的优势，可实现无死角、无盲区的检测，最大限度排除安全隐患。



本章小结

- 控制理论与技术的发展简况
- 控制系统的基本形式和基本组成环节
- 控制系统的主要分类
- 对控制系统的基本要求与研究内容