



“十三五”普通高等教育本科规划教材  
高等院校电气信息类专业“互联网+”创新规划教材

# 自动控制原理

(第2版)

主编 | 丁红



北京大学出版社  
PEKING UNIVERSITY PRESS

“十三五”普通高等教育本科规划教材  
高等院校电气信息类专业“互联网+”创新规划教材

# 自动控制原理

(第2版)

主	编	丁	红		
参	编	刘	慧霞	李	学军
		王	昕	赵	玲玲
		李	晔	顾	九春



北京大学出版社  
PEKING UNIVERSITY PRESS

## 内 容 简 介

本书第2版是在原有第1版的基础上修订完成的,其中最大的特点是将视频微课、书中习题解答、扩展典型习题详细解答、课件等以二维码的形式嵌入书中,通过扫描书中的二维码就可以随时学习。

本书系统阐述了自动控制理论的基本分析和研究方法,包括自动控制系统数学模型的建立,控制系统的时域分析、根轨迹分析和频域分析,控制系统的频域设计方法,离散控制系统理论与分析,非线性系统分析中包括相平面法和描述函数法,附录中包括拉普拉斯变换和Z变换表。

本书可作为普通高等院校自动化、电气工程及其自动化、通信工程、电子信息工程、电子信息科学与技术、机械设计制造及其自动化等专业自动控制原理课程的教材,也可供从事自动控制类的各专业工程技术人员自学参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

自动控制原理/丁红主编. —2版. —北京: 北京大学出版社, 2017. 10

(高等院校电气信息类专业“互联网+”创新规划教材)

ISBN 978-7-301-28728-6

I. ①自… II. ①丁… III. ①自动控制理论—高等学校—教材 IV. ①TP13

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第216366号

书 名 自动控制原理(第2版)

ZIDONG KONGZHI YUANLI

著作责任者 丁红 主编

策划编辑 程志强

责任编辑 程志强

数字编辑 刘蓉

标准书号 ISBN 978-7-301-28728-6

出版发行 北京大学出版社

地 址 北京市海淀区成府路205号 100871

网 址 <http://www.pup.cn> 新浪微博: @北京大学出版社

电子信箱 [pup\\_6@163.com](mailto:pup_6@163.com)

电 话 邮购部 62752015 发行部 62750672 编辑部 62750667

印 刷 者 北京富生印刷厂

经 销 者 新华书店

787毫米×1092毫米 16开本 21印张 489千字

2010年2月第1版

2017年10月第2版 2017年10月第1次印刷

定 价 48.00元

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究

举报电话:010-62752024 电子信箱: [fd@pup.pku.edu.cn](mailto:fd@pup.pku.edu.cn)

图书如有印装质量问题,请与出版部联系,电话:010-62756370

## 第 2 版前言

自动控制技术已大量应用于空间科技、冶金、轻工、机电工程以及交通管理、环境保护等众多领域，其研究对象是实际自动控制系统，而分析和设计自动控制系统的理论基础就是自动控制原理。一般将自动控制原理分为经典控制理论和现代控制理论，考虑到实际工程的需要以及相当一部分院校分别开设这两门课程，本书以经典控制理论及其应用为主要内容，安排了 9 章内容。包括自动控制系统数学模型的建立，控制系统的时域分析、根轨迹分析和频域分析，控制系统的频域设计方法，离散控制系统理论与分析，非线性系统分析中包括描述函数法和相平面法，MATLAB/Simulink 简介及其仿真实验指导书。

本书第 2 版主要增加了大量的二维码素材，有针对各章知识点的 5 分钟左右的视频微课，简明扼要，还有书中习题解答或参考答案，学生做习题可以参考对照；扩展典型习题详细解答给出针对知识点的各类例题，对学生学习是很有帮助的，另外还有课件、名校考研究生试题解答、期末考试模拟题解答等，这些内容是以二维码的形式嵌入书中的，学生可以通过扫描书中的二维码随时学习相应内容，教师也可以利用书中的这些二维码素材进行翻转课堂教学。

本书第 2 版保留了第 1 版的大部分内容，对“第 8 章 非线性控制系统”中相平面法进行了较大修改，按内容调整了课后习题的顺序。力求从理论和工程应用的角度，比较全面和系统地阐述经典控制理论的基本内容，侧重基本概念、基本理论和基本方法的介绍。为了适应控制技术和控制理论发展形势的需要，引入了 MATLAB/Simulink 软件包应用技术，分别在各章的例题、习题中用 MATLAB 编程或在 Simulink 环境仿真，将手工运算与计算机仿真结合使问题更易理解，结果用图形表示也很直观。

本书主要具有以下几个特点。

- (1) 大量的二维码更方便学生全方位的随时学习。
- (2) 本着“易读，好教”的教材写作目的，内容简明扼要，简化数学推导，增加实例说明。
- (3) 每章由“本章教学目标与要求”开始，结束有习题精解，学习指导及小结、本章知识架构；每章都有阅读材料涉及本章内容的相关知识或控制理论的历史、发展、现状、未来等，增强理工科教材的可读性。
- (4) 每章都有案例分析和仿真，其中有一个实例（磁盘自动控制系统）始终贯穿全书，并用 MATLAB/Simulink 编程，得到仿真结果。
- (5) 各章的例题、习题精解大多数运用 MATLAB 语言编程，给出简单的程序，或在 Simulink 仿真环境中，构建仿真模型进行仿真。
- (6) 书中对一些需要特别注意的地方添加一些特别提示或评注，以引起学生重视。每章的习题除了常规的计算题之外，还设计了一定数量的思考题、选择题、判断题，另外



还配有几个全国高校研究生入学考试题,以满足不同需要的学生使用。

本书第2版增加的二维码素材中,第4章的微课由刘慧霞讲授,第1~6章的课件在第1版的基础上由刘慧霞进行了修改,全书其他的微课由丁红讲授,全书的其他二维码素材除了各章习题解答外由丁红提供。保留的第1版的内容中,第7章、第8章及其习题解答由李学军编写,第1章、第2章及其习题解答由王昕编写,第5章、第9章的9.3和附录由赵玲玲编写,第5章习题答案由赵玲玲提供,第4章及其习题解答由李晔编写,第9章的9.1和9.2由顾九春编写,第3章、第6章和第2版中对第8章的修改由丁红编写,全书由丁红统稿。

限于编者水平有限,书中所出现的缺点、错误,恳请广大读者批评指正。

编者

2017年8月

# 目 录

第 1 章 绪论 .....	1	2.2 传递函数 .....	21
本章教学目标与要求 .....	1	2.2.1 传递函数的概念 .....	21
引言 .....	1	2.2.2 传递函数的定义 .....	22
1.1 自动控制系统简介 .....	2	2.2.3 典型环节的传递函数 .....	23
1.2 自动控制系统的组成及术语 .....	4	2.2.4 传递函数与电气网络的 运算阻抗 .....	26
1.3 自动控制系统的类型 .....	5	2.3 结构图 .....	27
1.3.1 按系统输入信号划分 .....	5	2.3.1 结构图的组成 .....	27
1.3.2 按传送的信号性质划分 .....	6	2.3.2 系统结构图的建立 .....	28
1.3.3 按描述元件的动态方程 划分 .....	6	2.3.3 结构图的等效变换 .....	28
1.3.4 按系统参数是否随时间变化 划分 .....	6	2.3.4 控制系统的传递函数 .....	33
1.4 自动控制系统的性能指标 .....	7	2.4 信号流图 .....	35
1.5 自动控制系统实例 .....	8	2.4.1 信号流图中的术语 .....	35
1.5.1 液位控制系统 .....	8	2.4.2 控制系统信号流图的 绘制 .....	37
1.5.2 炉温控制系统 .....	9	2.4.3 信号流图的简化原则 .....	38
1.5.3 函数记录仪 .....	9	2.4.4 梅森公式 .....	38
学习指导及小结 .....	10	2.5 习题精解及 MATLAB 工具和 案例分析 .....	40
本章知识架构 .....	11	2.5.1 习题精解 .....	40
阅读材料 .....	12	2.5.2 案例分析及 MATLAB 应用 .....	42
习题 .....	12	学习指导及小结 .....	43
第 2 章 线性系统的数学模型 .....	15	本章知识架构 .....	45
本章教学目标与要求 .....	15	阅读材料 .....	46
引言 .....	15	习题 .....	47
2.1 控制系统的数学模型 .....	16	第 3 章 线性系统的时域分析 .....	50
2.1.1 线性系统微分方程的 建立方法 .....	16	本章教学目标与要求 .....	50
2.1.2 线性系统微分方程的 建立实例 .....	16	引言 .....	50
2.1.3 线性系统的基本特性 .....	20	3.1 性能指标 .....	51
2.1.4 非线性系统微分方程的 线性化 .....	20	3.1.1 典型输入信号 .....	51
		3.1.2 动态性能指标 .....	51
		3.1.3 稳态性能指标 .....	53



3.2 一阶系统的单位阶跃响应 .....	53	4.2 绘制系统根轨迹的 基本法则 .....	92
3.2.1 一阶系统的数学模型 .....	53	4.2.1 180°根轨迹的绘制规则 ...	92
3.2.2 一阶系统的单位阶跃 响应 .....	53	4.2.2 0°根轨迹的绘制规则 .....	104
3.3 二阶系统的单位阶跃响应 .....	54	4.2.3 参量根轨迹 .....	106
3.3.1 二阶系统的数学模型 .....	54	4.3 用根轨迹法分析系统的性能 .....	107
3.3.2 二阶系统的单位阶跃 响应 .....	54	4.3.1 增加开环零点、极点对 根轨迹的影响 .....	107
3.3.3 二阶系统阶跃响应的 性能指标 .....	57	4.3.2 利用根轨迹法分析参数调整 对系统性能的影响 .....	110
3.3.4 二阶系统的动态校正 .....	60	4.3.3 根据对系统性能的要求 估算可调参数的值 .....	112
3.4 高阶系统的时域响应 .....	64	4.4 习题精解及 MATLAB 工具和 案例分析 .....	113
3.5 自动控制系统的代数稳定 判据 .....	66	4.4.1 习题精解 .....	113
3.5.1 稳定的概念 .....	66	4.4.2 案例分析及 MATLAB 应用 .....	117
3.5.2 线性系统稳定的充分必要 条件 .....	67	学习指导及小结 .....	120
3.5.3 劳斯判据 .....	67	本章知识架构 .....	121
3.5.4 相对稳定性和稳定裕量 ...	69	阅读材料 .....	122
3.6 稳态误差 .....	70	习题 .....	122
3.6.1 稳态误差的定义 .....	70	<b>第 5 章 线性系统的频域分析</b> .....	127
3.6.2 系统类型 .....	71	本章教学目标与要求 .....	127
3.6.3 稳态误差计算 .....	72	引言 .....	127
3.6.4 扰动作用下的稳态误差 ...	73	5.1 频率特性的基本概念 .....	128
3.7 习题精解及 MATLAB 工具和 案例分析 .....	75	5.2 典型环节的频率特性 .....	132
3.7.1 习题精解 .....	75	5.3 控制系统的开环频率特性 .....	138
3.7.2 案例分析及 MATLAB 应用 .....	78	5.3.1 开环极坐标图 (奈奎斯特图) .....	138
学习指导及小结 .....	82	5.3.2 开环对数频率特性图 ...	140
本章知识架构 .....	83	5.3.3 最小相位系统与非最小 相位系统 .....	144
阅读材料 .....	84	5.4 映射定理与奈奎斯特稳定 判据 .....	145
习题 .....	84	5.4.1 映射定理 .....	146
<b>第 4 章 根轨迹</b> .....	89	5.4.2 奈奎斯特稳定判据 .....	147
本章教学目标与要求 .....	89	5.5 稳定裕度 .....	150
引言 .....	89		
4.1 根轨迹的基本概念 .....	90		
4.1.1 根轨迹的概念 .....	90		
4.1.2 根轨迹的条件 .....	91		

5.6 用闭环频率特性分析系统的性能 .....	152	7.1.2 离散控制系统分类及特点 .....	214
5.7 习题精解及 MATLAB 工具和案例分析 .....	155	7.2 采样过程和采样定理 .....	214
5.7.1 习题精解 .....	155	7.2.1 信号的采样 .....	214
5.7.2 案例分析及 MATLAB 应用 .....	159	7.2.2 采样定理(香农定理) .....	217
学习指导及小结 .....	160	7.3 信号恢复 .....	217
本章知识架构 .....	161	7.3.1 理想滤波器 .....	217
阅读材料 .....	162	7.3.2 零阶保持器 .....	217
习题 .....	162	7.4 Z 变换 .....	219
<b>第 6 章 控制系统的校正</b> .....	168	7.4.1 Z 变换定义 .....	219
本章教学目标与要求 .....	168	7.4.2 Z 变换性质 .....	222
引言 .....	168	7.4.3 Z 变换方法 .....	223
6.1 系统的设计及校正问题 .....	168	7.4.4 Z 反变换 .....	224
6.2 基本控制规律 .....	171	7.5 离散系统的数学模型 .....	226
6.3 超前校正 .....	174	7.5.1 差分方程 .....	226
6.4 滞后校正 .....	179	7.5.2 脉冲传递函数 .....	228
6.5 滞后-超前校正 .....	184	7.5.3 开环采样系统的脉冲传递函数 .....	229
6.6 串联综合校正 .....	190	7.5.4 闭环采样系统的脉冲传递函数 .....	233
6.7 反馈校正 .....	193	7.6 离散系统的时域分析 .....	236
6.8 复合校正 .....	196	7.6.1 离散系统的稳定性分析 .....	236
6.9 习题精解及 MATLAB 工具和案例分析 .....	198	7.6.2 离散系统的瞬态响应分析 .....	241
6.9.1 习题精解 .....	198	7.6.3 离散系统的稳态误差 .....	244
6.9.2 案例分析及 MATLAB 应用 .....	204	7.7 习题精解及 MATLAB 工具和案例分析 .....	248
学习指导及小结 .....	205	7.7.1 习题精解 .....	248
本章知识架构 .....	206	7.7.2 案例分析及 MATLAB 应用 .....	251
阅读材料 .....	207	学习指导及小结 .....	252
习题 .....	207	本章知识架构 .....	255
<b>第 7 章 离散控制系统</b> .....	212	阅读材料 .....	255
本章教学目标与要求 .....	212	习题 .....	255
引言 .....	212	<b>第 8 章 非线性控制系统</b> .....	260
7.1 离散系统的基本概念 .....	212	本章教学目标与要求 .....	260
7.1.1 采样控制系统 .....	212		



引言 .....	260	本章知识架构 .....	289
8.1 非线性控制系统概述 .....	260	阅读材料 .....	289
8.1.1 研究非线性理论的意义 .....	260	习题 .....	290
8.1.2 非线性系统的特征 .....	261	<b>第9章 用 MATLAB/Simulink 进行仿真实验 .....</b>	<b>294</b>
8.1.3 常见非线性特性 .....	262	9.1 MATLAB 简介 .....	294
8.1.4 非线性系统的分析方法 .....	265	9.2 Simulink 简介 .....	300
8.2 描述函数法 .....	266	9.2.1 Simulink 入门 .....	300
8.2.1 描述函数法的基本概念 .....	266	9.2.2 Simulink 库基本模块简介 .....	301
8.2.2 典型非线性特性的描述函数 .....	268	9.2.3 Simulink 的基本建模方法 .....	305
8.2.3 用描述函数法分析系统的稳定性 .....	271	9.2.4 Simulink 仿真举例 .....	307
8.3 相平面法 .....	274	9.3 仿真实验 .....	310
8.3.1 问题的提出 .....	274	9.3.1 实验一 典型环节动态特性及 PID 的控制作用 .....	310
8.3.2 相轨迹的特点 .....	274	9.3.2 实验二 二阶系统的瞬态响应分析 .....	316
8.3.3 相轨迹的绘制方法 .....	276	9.3.3 实验三 控制系统稳定性分析和瞬态响应分析 .....	318
8.3.4 非线性系统的相轨迹 .....	278	9.3.4 实验四 串联校正环节的设计 .....	319
8.4 习题精解及 MATLAB 工具和案例分析 .....	282	<b>附录 拉普拉斯变换-Z 变换表 .....</b>	<b>322</b>
8.4.1 习题精解 .....	282	<b>参考文献 .....</b>	<b>324</b>
8.4.2 案例分析及 MATLAB 应用 .....	285		
学习指导及小结 .....	288		

# 第1章

## 绪论



### 本章教学目标与要求

- 掌握自动控制系统的基本概念，熟悉自动控制系统的基本组成。
- 熟悉自动控制系统的分类方法。
- 了解自动控制理论的发展概况。
- 正确理解自动控制的概念。
- 正确理解三种基本控制方式及其特点。熟悉常见控制系统的工作原理，能绘制常见自动控制系统的原理方框图。
- 正确理解对控制系统的性能要求。



自动控制理论  
发展变迁



### 引言

当今社会计算机成了人们必不可缺的一种工具，我们可以通过它完成娱乐、购物、工作等，而磁盘驱动器则是各类计算机中广泛应用的装置之一。那么磁盘驱动器是依照什么原理来精确读取高速旋转的磁盘上的信息呢？图 1.1 所示为磁盘驱动器的结

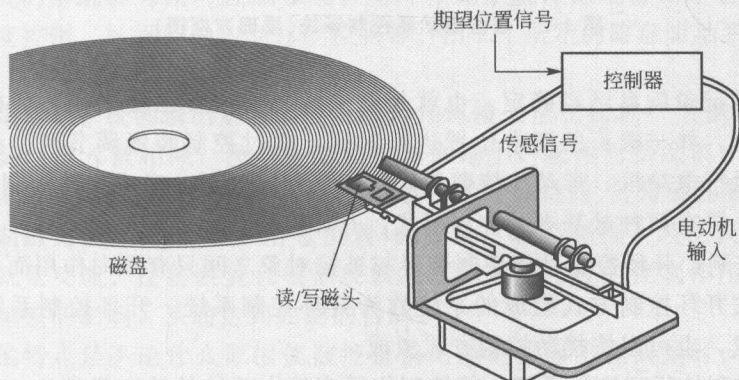


图 1.1 磁盘驱动器结构示意图

结构示意图,它是自动控制系统的一个重要的应用实例,什么是自动控制系统?它依据什么原理来工作?它的工作方式又是怎样的呢?这些就是本章要研究的问题。

本章首先介绍自动控制系统的基本概念和控制方式,其次还介绍了自动控制系统的组成、基本原理、分类和对自动控制系统的的基本要求,最后介绍常见自动控制系统的实例。

## 1.1 自动控制系统简介

所谓“自动控制”是指在没有人的直接干预下,利用物理装置对生产设备或工艺过程进行合理的控制,使被控制的物理量保持恒定,或者按照一定的规律变化。例如,数控车床按照预定程序自动地切削工件,化学反应炉的温度或压力自动地维持恒定,雷达和计算机组成的导弹发射和制导系统自动地将导弹引导到敌方目标,无人驾驶飞机按照预定航线自动升降和飞行,人造卫星准确地进入预定轨道运行并回收等。研究自动控制过程共同规律的技术学科就称为自动控制学科,它由自动控制技术和自动控制理论两部分组成。

自动控制技术的应用实际上是设计大大小小的控制系统完成对某个对象的控制作用,达到人们希望的预期目标。自动控制系统就是为实现某一控制目标所需要的所有物理部件的有机组合体。在自动控制系统中,被控制的设备或过程就称为被控对象,如图 1.1 所示的磁盘驱动器的执行电动机和支持臂(磁头安装在支持臂上)。而实施控制作用的部件就称为控制装置,如图 1.1 所示的磁盘驱动器的控制装置由磁头、放大器、直流电动机、支持臂和索引磁道等组成,磁盘驱动器必须保证磁头正确读取磁道的信息。磁盘旋转速度达到  $1800\sim 7200\text{r/min}$ ,磁头的位置精度要求为  $1\mu\text{m}$ ,且磁头在两个磁道间的移动时间小于  $50\text{ms}$ ,还存在物理振动、磁盘转轴轴承磨损、器件老化所引起的参数变化等干扰因素。可以利用自动控制系统使磁头达到预期的位置,其控制过程如图 1.2 所示。

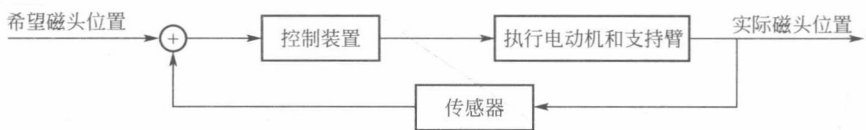


图 1.2 磁盘驱动器控制系统(原理方框图)

磁盘上磁道记录信息已经确定,也就是磁头的要求位置已经确定,而磁头的实际位置由传感器测出,并与磁头的要求位置进行对比,通过控制装置调节两个位置之间的误差,最后驱动执行电动机,带动支持臂使磁头到达预定位置,完成自动控制的要求。

自动控制系统有两种最基本的控制形式:开环控制和闭环控制。

(1) 开环控制:开环控制是指控制装置与被控对象之间只有顺向作用而没有反向联系的控制过程。按开环控制方式组成的系统称为开环控制系统。开环控制系统可以按给定量控制方式组成,也可以按扰动控制方式组成。

按给定量控制的开环控制系统,其控制作用直接由系统的输入量产生,给定一个输入量,就有一个输出量与之相对应,控制精度完全取决于所用的元件及校准的精度。因此,这



种开环控制方式没有自动修正偏差的能力,抗扰动性较差,但由于其结构简单、调整方便、成本低,在精度要求不高或扰动影响较小的情况下,这种控制方式还有一定的实用价值。目前,用于人们生活中的一些自动化装置,如自动售货机、自动洗衣机、产品生产自动线、数控车床以及指挥交通的红绿灯的转换等,一般都是开环控制系统。图 1.3 所示为自动洗衣机的控制过程框图,其工作过程一般为浸湿、洗涤和漂清,在洗衣机中是按照设定程序依次进行的,在洗涤过程中,无须对其输出信号即衣服清洁程度进行测量。

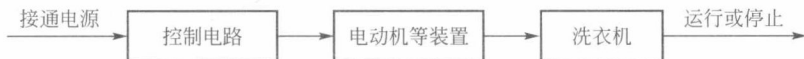


图 1.3 自动洗衣机的控制过程框图

按扰动控制的开环控制系统是利用可测量的扰动量,产生一种补偿作用,以减小或抵消扰动对输出量的影响,这种控制方式也称顺馈控制或前馈控制。在图 1.4 所示的直流调速控制系统中,转速常常随负载的增加而下降,且其转速的下降与电枢电流的变化有一定的关系。如果设法将负载引起的电流变化测量出来,并按其大小产生一个附加的控制作用,用以补偿由它引起的转速下降,就可以构成按扰动控制的开环控制系统。这种按扰动控制的开环控制方式是直接从扰动取得信息,并以此来改变被控量,其抗扰动性好,控制精度也较高,但它只适用于扰动是可测量的场合。

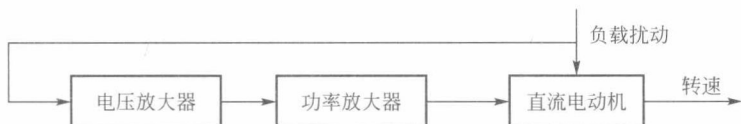


图 1.4 直流调速控制过程框图

综上所述,可以看出开环控制的特点是输出量不影响输入量,即输出量不会对系统的控制发生影响。

(2) 闭环控制:需要控制的是输出量,测量的也是输出量,比较给出的是输出量对输入量的偏差,系统根据该偏差进行控制,只要输出量偏离输入量,系统就自动纠偏。由于闭环系统是根据负反馈原理按偏差进行控制的,因此又称反馈控制或偏差控制。按闭环控制方式组成的系统称为闭环控制系统。闭环控制系统广泛地应用于各工业部门,例如加热炉的温度控制、轧钢厂的传动速度控制等。图 1.1 所示的磁盘驱动系统也属于闭环控制系统。

所谓反馈是指把系统的输出量送回输入端,并与输入量相比较产生偏差信号的过程。若反馈的输出量与输入量相减,使产生的偏差越来越小,就称为负反馈;反之,则称为正反馈。图 1.1 所示的磁盘驱动系统将输出量(磁头的实际位置)经传感器测量送回系统的输入端,与预期磁头位置(即磁道中信息位置)相比较,若不相符,经比较后控制装置会产生偏差,这就是反馈。控制装置会根据反馈的结果产生相应的控制作用,带动相应的装置减小这种偏差的影响,从而达到控制的目的。

闭环控制的特点是不论什么原因使被控量偏离期望值而出现偏差时,都必定会产生一个相应的控制作用去减小或消除这个偏差,使被控量与期望值趋于一致。可以说,按负反馈原理组成的闭环控制系统,具有抑制任何内、外扰动对被控量产生影响的能力,



有较高的控制精度。但这种系统使用的元件多，线路复杂，特别是系统的性能分析和设计也较麻烦，而且存在稳定性的问题，如果闭环控制系统的参数匹配得不好，会造成被控量的较大摆动，甚至使系统无法正常工作。尽管如此，它仍是一种重要的并被广泛应用的控制系统，自动控制理论主要的研究对象就是用这种闭环控制方式组成的系统。

在有些系统中，将开环控制和闭环控制结合在一起，构成复合控制系统，对于主要扰动采用适当的补偿装置实现按扰动控制，同时，再组成反馈控制系统实现按偏差控制，以消除其余扰动产生的偏差。这样，系统的主要扰动已被补偿，反馈控制系统就比较容易设计，控制效果也会更好。



动画【水位人工控制】



动画【水位自动控制】



动画【自动控制加热炉】

## 1.2 自动控制系统的组成及术语

自动控制系统是由控制装置和被控对象这两大部分组成的，它们以某种相互依赖的方式组合成为一个有机整体，并对被控对象进行自动控制。简单地讲，自动控制系统就是能对被控对象的工作状态进行自动控制的系统。其中控制装置又是由各种基本元部件构成的，每个元部件发挥一定的效用。在不同的系统中，结构完全不同的元部件可以具有相同的效用，典型的自动控制系统的的基本组成示意图如图 1.5 所示。

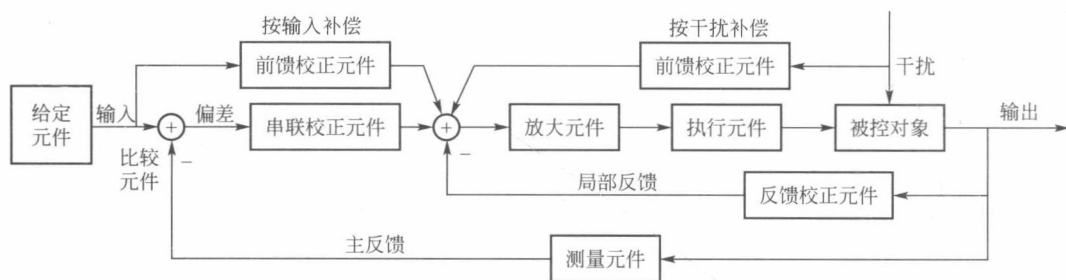


图 1.5 自动控制系统的组成示意图

常见的自动控制系统的的基本组成包括以下几部分。

- (1) 测量元件：用于测量被控对象的需要控制的物理量，如果这个物理量是非电量，一般需要转化为电量。
- (2) 给定元件：给出与期望的被控量相对应的系统输入量。
- (3) 比较元件：把测量元件检测的被控量实际值与给定元件给出的输入量进行比较，求出它们之间的偏差。
- (4) 放大元件：将比较元件给出的偏差进行放大，用来推动执行元件去控制被控对象。
- (5) 执行元件：直接作用于被控对象，使其被控量发生变化，达到预期的控制目的。



(6) 校正元件：也称补偿元件，它是结构或参数便于调整的元件，用串联或反馈的方式连接在系统中，用于改善系统性能。

在图 1.5 中，用圆圈表示比较元件，“+”（可省略）和“-”表示参与比较的信号的正负性。信号从输入端沿箭头方向到达输出端的传输通路称为前向通路；输出量经测量元件反馈到输入端的通路称为主反馈回路；前向通路和主反馈回路共同构成主回路。此外，还有经过反馈校正元件的局部反馈回路及由它构成的内回路。只包含主反馈回路的系统称为单回路系统或单环系统；包含两个或两个以上反馈回路的系统称作多回路系统或多环系统。

在整个系统中传递的信号也分为多种，包括：

(1) 输入信号：作用于控制对象或系统输入端，并可使系统具有预定功能或预定输出的物理量，又称给定量、输入量或参据量。

(2) 输出信号：指被控对象中按一定规律变化的物理量，即控制系统中被控制的物理量，又称被控量或输出量，它与输入信号之间保持一定的函数关系。

(3) 偏差信号：为控制输入信号与主反馈信号之差，简称偏差。

(4) 反馈信号：由系统(或元件)输出端取出经变换处理并反向送回系统(或元件)输入端的信号称为反馈信号。分为主反馈信号和局部反馈信号。

(5) 误差信号：指系统输出量的实际值与期望值之差，简称误差。系统的期望值是理想系统的输出，实际并不存在，只能用与输入信号具有一定比例关系的信号来表示。在单位反馈的情况下，误差信号等于偏差信号。

(6) 干扰信号：指所有妨碍控制量对被控量按要求进行正常控制的信号，又称为扰动、干扰量、扰动量。

(7) 控制信号(控制量)：也称操纵量，是一种由控制器改变的量值或状态，一般指控制器的输出。

## 1.3 自动控制系统的类型

自动控制系统的种类很多，其结构性能和完成的控制目的也各不相同，因此有多种分类方法，下面介绍几种常见的分类。

### 1.3.1 按系统输入信号划分

#### 1. 恒值控制系统(自动调节系统)

该系统的输入信号是一个常量，故称恒值控制系统。系统的任务是保持被控对象的被控量维持在期望值上。如果由于扰动的的作用使被控量偏离了期望值而出现偏差，恒值控制系统会根据偏差产生控制作用，使被控量按一定精度恢复到期望值附近，所以该系统又称为自动调节系统。例如工业生产过程中广泛应用的温度、压力、流量、速度等参数控制系统。

#### 2. 程序控制系统

该系统的输入信号是事先确定的按某种运动规律随时间变化的程序信号。系统的任务是使被控对象的被控量按照设定的程序变化，例如机械加工中的数控机床就属此类系统。



### 3. 随动系统

随动系统又称伺服系统。该系统的输入信号是预先不知道的随时间任意变化的量值。随动系统的任务是使被控量以尽可能高的精度跟随给定值变化。例如炮瞄雷达的自动瞄准系统、导弹制导、船舶自动驾驶仪、函数记录仪等均是典型的随动系统。

#### 1.3.2 按传送的信号性质划分

##### 1. 连续系统

该系统各环节的输入信号和输出信号均是时间  $t$  的连续函数，信号均是可任意取值的模拟量。例如直流电动机速度控制系统、火炮跟踪系统都属于连续系统。

##### 2. 离散系统

系统中传递的信号有一处或数处是脉冲序列或数字编码时，称为离散系统。连续信号经过采样开关的采样得到以脉冲形式传送的离散信号，这样的离散系统称为采样控制系统；而引入计算机或数字控制器，使离散信号以数码的形式传递的离散系统称为数字控制系统。例如炉温控制系统就是典型的离散系统，由于温度调节是一个大惯性过程，若采用连续控制，则无法解决控制精度和动态性能之间的矛盾。

#### 1.3.3 按描述元件的动态方程划分

##### 1. 线性系统

组成该系统的全部元件都是线性元件，其输入/输出静态特性均为线性特性，可用一个或一组线性微分方程描述该系统的输入和输出关系。线性系统的主要特征是具有齐次性和叠加性。

##### 2. 非线性系统

该系统中含有一个或多个非线性元件，其输入/输出关系不能用线性微分方程来描述。非线性系统还没有一种统一完整的分析方法，对非线性程度不严重的系统进行分析时，常采用线性系统的理论和方法进行近似处理。

#### 1.3.4 按系统参数是否随时间变化划分

##### 1. 定常系统

描述该系统的微分方程的各项系数不随时间变化，是与时间无关的常数。实际应用中的系统多数属于此类系统，或近似于此类系统。

##### 2. 时变系统

描述某系统的微分方程中只要有一项系数是时间的函数，该系统就称为时变系统。

自动控制系统还可以按照其他特征来分类，本书不再一一讨论，有兴趣的读者可自行参阅相关文献。本书讨论的系统一般指线性定常系统。



## 1.4 自动控制系统的性能指标

虽然我们希望控制系统的被控量时刻能与给定值保持一致,但因为实际系统往往包含惯性或储能元件,而且由于能源功率的限制,使控制系统受到外作用后,被控量并不能马上变化,有一个跟踪变化的过程。我们把系统受到外作用后,被控量随时间变化的全过程称为动态过程和稳态过程。

对控制系统的性能评价,多以动态过程的特性来衡量,工程上对自动控制系统性能的基本要求可以归结为稳(稳定性和平稳性)、快(快速性)和准(准确性)。

### 1. 稳定性

稳定性是保证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随时间的增长逐渐减小并趋于零。举例来说,对稳定的恒值控制系统,被控量因扰动而偏离期望值后,经过一定时间的调整能够回到原来的期望值;对稳定的随动系统,被控制量应能始终跟踪参变量的变化。反之,不稳定的系统,其被控量偏离期望值的初始偏差随时间的增长而发散,无法完成预定的控制任务。线性自动控制系统的稳定性通常由系统的结构决定,与外界因素无关。

平稳性指动态过程振荡的幅度与频率,对于稳定的控制系统,被控量围绕给定值振荡的幅度越小、次数越少,则平稳性越好。

图 1.6 中所示曲线①对应的控制系统的输出响应呈现衰减振荡的形式,经过一个过渡时间,输出量趋于给定值,系统是稳定的,且平稳性较好;曲线②对应的控制系统的输出响应呈现发散振荡的形式,随着时间的推移,输出量离给定值越来越远,系统是不稳定的。

### 2. 快速性

为了完成控制任务,仅满足稳定性的要求是不够的。例如稳定的高射炮射角随动系统,虽然炮身最终能跟踪目标,但如果目标变动迅速,而炮身行动迟缓,则仍然抓不住目标。说明系统响应迟钝,不能完成预期的任务,也就是对应的控制系统的过渡过程时间长,即系统的快速性不好。动态过程进行的时间长短表明了系统快速性的好坏。

图 1.7 中所示曲线①对应的控制系统的输出响应呈现单调递增的形式,输出量趋于给定值过程缓慢,系统的快速性不好;曲线②对应的控制系统的输出响应呈现衰减振荡的形式,且最大振荡幅度小,输出量趋于给定值过程迅速,系统的快速性好。

稳和快反映了系统动态过程性能的优劣。既快又稳,表明系统的动态精度高。

### 3. 准确性

理想状态下,当过渡过程结束、被控量达到稳态值时应与期望值一致。但实际上,由于系统结构、外界扰动等因素的影响,当过渡过程结束、系统达到稳态后,其稳态输出与参考输入所要求的期望输出之间仍会存在误差,称为稳态误差。显然,这种误差越小,表示系统的精度越高。稳态误差是衡量控制系统控制精度的重要标志。

由于被控对象具体情况的不同,各种系统对上述三方面性能要求的侧重点也有所不同。例如随动系统对快速性和稳态精度的要求较高,而恒值控制系统一般侧重于稳定性

能和抗扰动的能力。在同一个系统中，上述三方面的性能要求通常是相互制约的。例如为了提高系统动态响应的快速性和稳态精度，就需要增大系统的放大能力，而放大能力的增强，必然促使系统动态性能变差，甚至会使系统变为不稳定。反之，若强调系统动态过程平稳性的要求，系统的放大倍数就应较小，从而导致系统稳态精度降低和动态过程变缓。由此可见，系统动态响应的快速性、准确性与动态稳定性之间是一组矛盾。

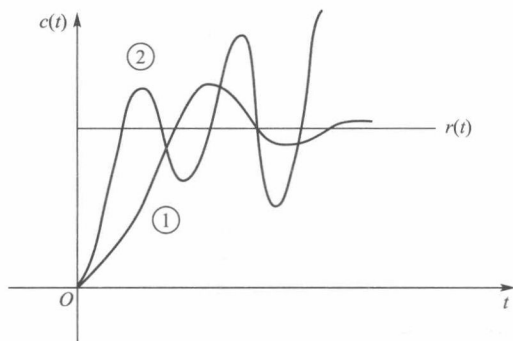


图 1.6 自动控制系统的输出响应示例 1

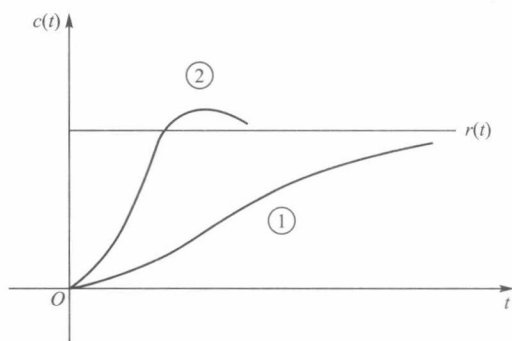


图 1.7 自动控制系统的输出响应示例 2

## 1.5 自动控制系统实例

在工程实践中有各种不同类型的自动控制系统，下面介绍一些实际例子。

### 1.5.1 液位控制系统

图 1.8 所示的存储槽液面自动控制系统常用于化工和制药行业当中，控制的任务是保持槽内液位高度  $H_0$  处在某个期望高度上。

被控对象为存储槽，被控量是液位高度  $H_0$ 。当液面的实际高度恰好等于某一期望高度时，浮子(测量元件)的位置就是槽内液面的实际高度，它与电位器(比较元件)的滑动端相连，电位器的中点接地(零电位)，滑动端正处于中点位置，电位器没有输出电压，电动机

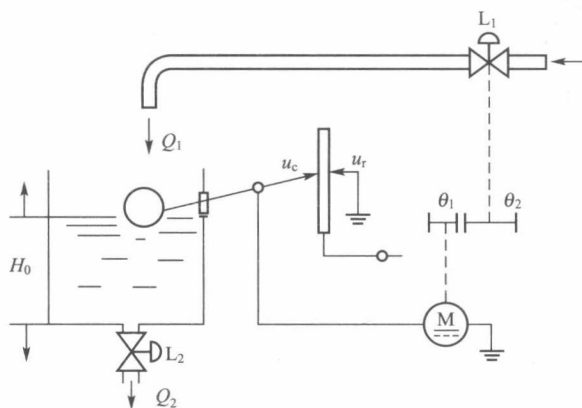


图 1.8 存储槽液面自动控制系统

(执行元件)不转动，经阀门  $L_1$  (执行元件)流入的液量  $Q_1$  等于经阀门  $L_2$  流出的液量  $Q_2$ ，液面高度保持不变。当存储槽内的液面高度偏离期望高度时，浮子带动电位器的滑动端偏离中点，于是电位器就输出一个偏差电压  $\Delta u = u_r - u_c$ ，作用于电动机上，随着电动机的旋转，带动齿轮系(执行元件)调节阀  $L_1$  的开度  $\theta_2$ ，从而调节流入的液量  $Q_1$ ，最终使  $Q_1 = Q_2$ ，液面高度回到期望值。此时，浮子使电位器复原，偏差电压  $\Delta u = 0$ ，电动机即停止转动。