

普通高等院校建筑电气与智能化专业规划教材



ZIDONG KONGZHI YUANLI 自动控制原理

马鸿雁 ○ 主编

中国建材工业出版社



图书在版编目(CIP)数据

自动控制原理 / 马鸿雁主编. —北京:中国建材工业出版社, 2012. 8

普通高等院校建筑电气与智能化专业规划教材

ISBN 978-7-5160-0240-7

I. ①自… II. ①马… 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(2012)第 169766 号

内 容 简 介

本书根据建筑类高等院校自动控制类课程的需求进行编写,主要介绍了经典控制理论的基本概念和方法。全书共 7 章,内容包括了自动控制系统的一般概念、控制系统的数学模型、控制系统的时域分析法、控制系统的根轨迹法、线性系统的频域分析法、控制系统的校正和自动控制系统实例。每章附有小结和习题,便于读者准确把握每章的重点和要点。

本书适用于应用型本科高等院校自动化、电气工程及其自动化专业“自动控制原理”课程少学时时的教学,可作为建筑类高等院校中建筑电气与智能化、建筑环境与设备工程、热能与动力工程、给水排水工程、交通工程等专业的教材,可供从事相关行业自动控制工作的工程技术人员参考。

本教材有配套课件,读者可登录我社网站免费下载。

自动控制原理

马鸿雁 主编

出版发行:中国建材工业出版社

地 址:北京市西城区车公庄大街 6 号

邮 编:100044

经 销:全国各地新华书店

印 刷:北京盛兰兄弟印刷装订有限公司

开 本:787mm × 1092mm 1/16

印 张:8.5

字 数:214 千字

版 次:2012 年 8 月第 1 版

印 次:2012 年 8 月第 1 次

定 价:20.00 元

本社网址:www.jccbs.com.cn

本书如出现印装质量问题,由我社发行部负责调换。联系电话(010)88386906

本书编委会

主 编 马鸿雁

副主编 胡玉玲 史晓霞 李壮举

前 言

随着科学技术的发展,自动控制技术已经成为许多高新技术产品的核心技术,广泛应用于工程技术领域。因此自动控制理论不仅是自动化、电气工程及其自动化等相关专业的主干课程,也是建筑类高等院校中的许多非自动化类专业的重要基础课程。

建筑类高等院校中建筑环境与设备工程、热能与动力工程、给水排水工程、交通工程等非自动化类专业陆续开设自动控制原理课程,经过多年已基本完成自动控制理论课程体系的建设。本书面向应用型本科院校自动控制原理少学时学生,从应用的角度介绍了自动控制的基本原理,用不同的分析方法分析系统的各项性能指标,适合于少学时自动控制原理教学的需要。全书共7章。第1章主要介绍了自动控制系统的一般概念;第2章主要介绍了控制系统的数学模型,包括微分方程、传递函数和结构图;第3章主要介绍了控制系统的时域分析法,包括一阶系统、二阶系统等稳定性、动态性能、稳态性能如稳态误差的定量计算和定性分析;第4章主要介绍了控制系统的根轨迹法,包括根轨迹绘制原则和参数根轨迹的绘制;第5章主要介绍了线性系统频域分析法,重点内容有频率特性的概念,极坐标图和对数坐标图的绘制,奈奎斯特稳定判据及其应用和相对稳定性分析;第6章主要介绍了控制系统的校正,包括校正的基本概念、PID控制器,重点阐述了串联超前校正和串联滞后校正;第7章主要介绍了自动控制系统实例。

本书由马鸿雁担任主编,胡玉玲、史晓霞和李壮举共同担任副主编。本书第1章、第4章和第6章由马鸿雁编写,第2章由史晓霞编写,第3章和第7章由李壮举编写,第5章由胡玉玲编写。

受编者学识所限,加之时间仓促,不足和错误之处恳请广大读者批评指正。

编者
2012.6

发展出版传媒 服务经济建设

传播科技进步 满足社会需求



图书出版、图书广告宣传、企业定制出版、团体用书、
会议培训、其他深度合作等优质、高效服务。



010-88386119



010-68361706



010-68343948



010-68001605

jccbs@hotmail.com

www.jccbs.com.cn



中国建材工业出版社
China Building Materials Press

(版权专有，盗版必究。未经出版者预先书面许可，不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分。举报电话：010-68343948)

目 录

前言

第1章 绪论	1
1.1 自动控制系统的一般概念	1
1.1.1 基本术语	1
1.1.2 反馈及反馈控制	1
1.2 开环和闭环控制系统	2
1.2.1 开环控制系统	2
1.2.2 闭环控制系统	3
1.2.3 复合控制系统	4
1.3 控制系统的分类及基本要求	5
1.3.1 控制系统的分类	5
1.3.2 控制系统的基本性能要求	6
本章小结	7
习题	8
第2章 控制系统的数学模型	10
2.1 微分方程	10
2.2 非线性方程的线性化	11
2.3 传递函数	12
2.3.1 拉氏变换	13
2.3.2 传递函数	15
2.4 控制系统的数学模型	18
2.5 控制系统的等效变换	20
2.5.1 结构图的组成	20
2.5.2 结构图的化简和变换规则	21
2.5.3 梅逊公式	25
2.6 控制系统的传递函数	27
2.6.1 闭环系统中的开环传递函数	28
2.6.2 闭环系统的传递函数	28
本章小结	30
习题	30
第3章 时域分析法	33
3.1 典型输入信号和时域性能指标	33
3.1.1 典型输入信号	33
3.1.2 时域性能指标	34
3.2 一阶系统的时域分析	35

3.2.1 单位阶跃响应	36
3.2.2 单位斜坡响应	36
3.2.3 单位脉冲响应	37
3.3 二阶系统的时域分析	37
3.3.1 典型的二阶系统	37
3.3.2 二阶系统的阶跃响应	37
3.3.3 系统的暂态性能指标	39
3.4 系统的稳定性分析	43
3.4.1 系统稳定性的概念和稳定的充分必要条件	43
3.4.2 劳斯判据	44
3.4.3 古尔维茨判据	46
3.4.4 代数判据的应用	47
3.5 系统的稳态特性分析	50
3.5.1 稳态误差的定义	50
3.5.2 系统的分类	51
3.5.3 给定作用下的稳态误差	51
3.5.4 扰动输入作用下的稳态误差	54
3.5.5 减小稳态误差的方法	56
本章小结	58
习题	59
第4章 根轨迹法	64
4.1 根轨迹法的基本概念	64
4.1.1 根轨迹	64
4.1.2 根轨迹方程	65
4.2 绘制根轨迹的基本规则	65
4.3 参量根轨迹的绘制	70
本章小结	71
习题	71
第5章 线性系统的频域分析法	73
5.1 频率特性的基本概念	73
5.1.1 频率特性的基本概念	73
5.1.2 由传递函数确定系统的频率特性	75
5.2 典型环节的极坐标图	76
5.3 典型环节的对数坐标图	79
5.4 控制系统的开环频率特性	84
5.4.1 系统开环奈氏图	85
5.4.2 系统开环伯德图	88
5.5 奈奎斯特稳定判据	91
5.5.1 系统开环频率特性和闭环特征式的关系	91
5.5.2 奈奎斯特(H. Nyquist)稳定判据	92

5.5.3 奈奎斯特(H. Nyquist)稳定判据的对数形式	94
5.6 相对稳定性分析	95
5.6.1 相角裕度	95
5.6.2 幅值裕度	95
本章小结	97
习题	98
第6章 控制系统的校正	100
6.1 校正的基本概念	100
6.1.1 校正的方式	100
6.1.2 校正的性能指标	100
6.1.3 校正目标	101
6.2 PID 控制器	101
6.3 串联超前校正	104
6.3.1 超前校正装置	104
6.3.2 超前校正设计	106
6.4 串联滞后校正	109
6.4.1 滞后校正装置	109
6.4.2 滞后校正设计	110
本章小结	112
习题	113
第7章 自动控制系统实例	114
7.1 十字路口交通信号灯的 PLC 控制	114
7.1.1 十字路口交通信号及其控制时序	114
7.1.2 十字路口交通信号灯的 PLC 控制	114
7.2 分体单冷空调自动控制系统	117
7.2.1 分体单冷空调的基本工作原理	117
7.2.2 分体单冷空调自动控制系统	118
7.3 锅炉设备的控制	119
7.3.1 汽包水位控制	119
7.3.2 蒸汽过热系统的控制	120
7.3.3 锅炉燃烧过程的控制	120
7.4 恒压供水控制系统	122
7.4.1 恒压供水	122
7.4.2 恒水压控制装置	124
7.4.3 其他方案	125
本章小结	125
习题	126
参考文献	127

第1章 绪 论

1.1 自动控制系统的一般概念

1.1.1 基本术语

1. 自动控制:在没有人直接参与的条件下,利用控制装置使被控对象(如机器、设备或生产过程)的某些物理量(或工作状态)能自动地按照预定的规律变化(或运行)。
2. 被控对象(受控对象):被控制的机器、设备或生产过程中的全部或一部分。
3. 控制装置(控制器):对被控对象进行控制的设备总体,称为控制装置或控制器。
4. 被控制量(被控量):在控制系统中,按规定的任务需要加以控制的物理量,也称为自动控制系统的输出量。
5. 自动控制系统:自动对被控对象的被控量(或工作状态)进行控制的系统,由被控对象和控制装置组成。
6. 系统输入:作用于控制系统的输入端,并使系统具有预定功能或预定输出的物理量,称为输入量,也称为给定值或参考输入。
7. 扰动输入:干扰或破坏系统按预定规律运行的输入量,也称为干扰输入或扰动量。

1.1.2 反馈及反馈控制

1. 反馈

(1)定义:将检测出来的输出量送回到系统输入端,并与参考输入信号比较产生偏差信号的过程称为反馈。送回到系统输入端的信号称为反馈信号。若反馈信号与参考输入信号的符号相反,称为负反馈;若符号相同,称为正反馈。

(2)偏差信号(误差信号) $e(t)$:参考输入信号 $r(t)$ 和反馈信号 $b(t)$ (反馈信号可以是输出信号本身,也可以是输出信号的函数或导数)之差。

2. 反馈控制

(1)反馈控制:采用负反馈并利用偏差进行控制的过程,称为反馈控制。误差信号加到控制器上,以减小系统的误差,并使系统的输出量趋于所希望的值。反馈控制应用反馈作用来减小系统的误差。

反馈控制实质上是一个按偏差进行控制的过程,也称为按偏差控制,反馈控制原理也就是按偏差控制原理。

(2)负反馈控制原理:检测偏差用以消除偏差。根据偏差信号产生相应的控制作用,力图消除或减少偏差的过程。负反馈控制原理是构成闭环控制系统的核心。

3. 反馈控制系统

(1)基本组成

反馈控制系统包含被控对象和控制装置两个部分,基本组成如图 1-1 所示。控制装置

由具有一定职能的各种基本元件组成,按职能分类主要有以下几种:

1) 测量元件(检测元件):一般为传感器,其职能是测量被控制的物理量,产生与被控制量有一定函数关系的信号。如果这个物理量是非电量,一般再转换为电量。例如:湿敏传感器是利用“湿—电”效应来检测湿度,并将其转换成电信号;热电偶是用于检测温度并转换为电压等。测量元件通常是系统的反馈元件。

2) 给定元件:给出与期望的被控量相对应的系统控制输入量,这个量的量纲要与主反馈信号的量纲相同。

3) 比较元件:把测量元件检测的被控量实际值即反馈信号 $b(t)$ 与给定元件给出的控制量即参考输入信号 $r(t)$ 进行比较,求出它们之间的偏差信号 $e(t) = r(t) - b(t)$ 。用 $\otimes$ ($\bigcirc$) 表示。常用的比较元件有差动放大器、机械差动装置和电桥等。有些比较元件与测量元件是结合在一起的。

4) 放大元件:将比较元件给出的偏差信号 $e(t)$ 进行放大以及信号形式的变换,用来推动执行元件去控制被控对象。如电压偏差信号,可用电压放大器和功率放大器加以放大。

5) 执行元件(执行机构):直接推动被控对象,使其被控量发生变化。执行元件有:阀、电动机、液压马达等。

6) 校正元件:亦称补偿元件,是使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,以改善系统性能。

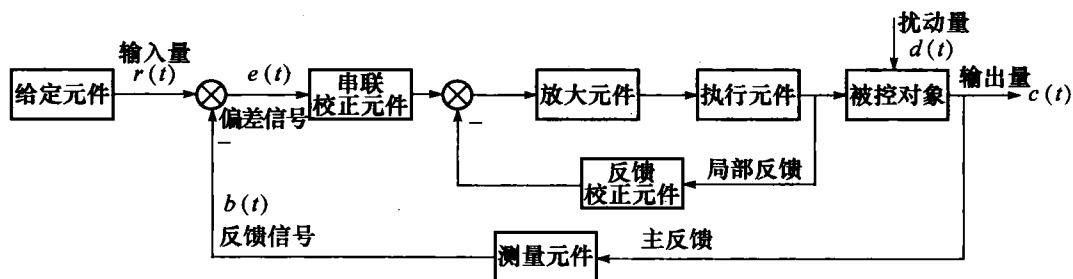


图 1-1 典型的反馈控制系统基本组成图

(2) 前向通路:信号沿箭头方向从输入端到达输出端的传输通路称前向通路。

(3) 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称主反馈通路。

1.2 开环和闭环控制系统

自动控制最基本的两种控制方式是开环控制和闭环控制,因此自动控制系统相应的有开环控制系统和闭环控制系统。

1.2.1 开环控制系统

1. 开环控制系统

系统参考输入量和输出量之间只有前向通路,不存在反馈回路,输出量对系统的控制作用没有影响,这样的系统称为开环控制系统。开环控制系统又分为无扰动补偿和有扰动补偿两种。

(1) 无扰动补偿的开环控制系统

无扰动补偿的开环控制系统原理方框图如图 1-2(a) 所示。信号由输入信号到输出信

号单向传递,对扰动引起的误差无补偿作用。这种方式结构简单,适用于结构参数稳定、扰动信号较弱的场合。

(2) 有扰动补偿的开环控制系统

有扰动补偿的开环控制系统如图 1-2(b) 所示,称为按扰动补偿的控制系统—前馈控制系统。如果扰动(干扰)能测量出来,则可以采用按干扰补偿的控制方式。其控制原理是:需要控制的是被控对象的被控量,而测量的是破坏系统正常运行的干扰信号。利用干扰信号产生控制作用,以补偿干扰对被控量的影响,故称干扰补偿。由于扰动信号经测量装置、控制器至被控对象是单向传递的,所以属于开环控制。对于不可测扰动及各元件内部参数变化给被控制量造成的影响,系统无抑制作用。

2. 优、缺点

(1) 优点:结构简单、成本低。

(2) 缺点:抗干扰能力差,控制精度低。

3. 适用场合

开环控制系统适用于干扰不强烈、控制精度要求不高的场合。

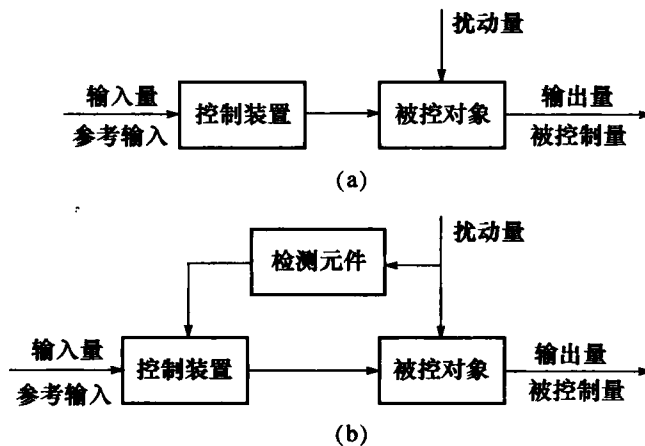


图 1-2 开环控制系统

(a) 无扰动补偿的开环控制系统; (b) 有扰动补偿的开环控制系统

1.2.2 闭环控制系统

1. 闭环控制系统

控制装置与被控对象之间不但有顺向联系,而且还有反向联系,即有被控量(输出量)对控制过程的影响,这种控制称为闭环控制,相应的控制系统称为闭环控制系统,如图 1-3 所示。闭环控制系统也称为反馈控制系统。

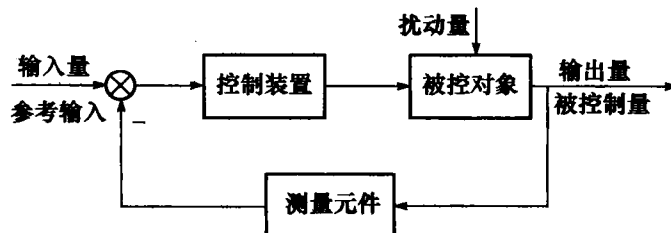


图 1-3 闭环控制系统

2. 控制实质

闭环控制的控制实质是按偏差控制,即检测偏差并纠正偏差。闭环控制系统不论造成偏差的扰动来自外部还是内部,控制作用总是使偏差趋于减小。

3. 优、缺点

(1) 优点:具有自动修正输出量偏差的能力,抗干扰性能好,控制精度高。

(2) 缺点:结构复杂,如果结构和参数设计不合理,系统将有可能不稳定。

4. 适用场合

闭环控制系统适用于干扰大且无法预知、控制精度要求高的场合。

1.2.3 复合控制系统

1. 复合控制系统

当闭环控制系统不能满足系统性能要求时,采用复合控制系统。复合控制系统是开环控制与闭环控制相结合的一种控制系统。在闭环控制的基础上引入一条由给定输入信号或扰动信号所构成的顺馈(前馈)通路。顺馈通路相当于开环控制。

2. 典型结构

复合控制系统通常有两种典型结构。按输入补偿的复合控制系统[如图 1-4(a)所示]和按扰动补偿的复合控制系统[如图 1-4(b)所示]。

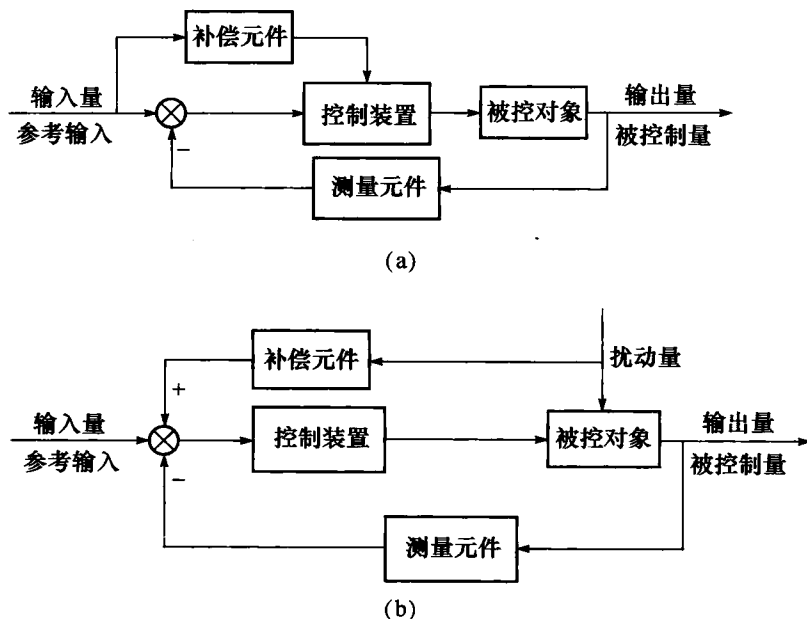


图 1-4 复合控制系统

(a) 按输入作用补偿; (b) 按扰动作用补偿

3. 特点

复合控制系统具有很高的控制精度;可以抑制几乎所有可测量的扰动,其中包括低频强扰动;补偿元件的参数要有较高的稳定性。

【例 1-1】 如图 1-5 所示为水温控制系统示意图。冷水在热交换器中由通入的蒸汽加热,从而得到一定温度的热水。冷水流量变化用流量计测量。试绘制系统方框图,并说明为

了保持热水温度为期望值,系统是如何工作的?系统的被控对象和扰动量各是什么?

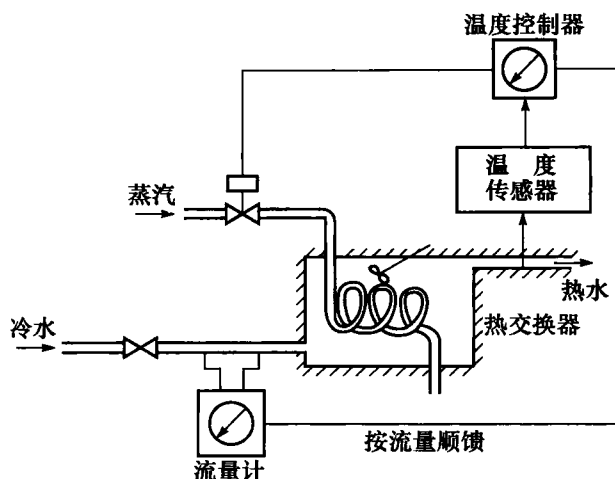


图 1-5 水温控制系统示意图

解:工作原理:温度传感器不断测量热交换器出口处的实际水温,并在温度控制器中与给定温度相比较,若低于给定温度,其偏差值使蒸汽阀门开大,进入热交换器的蒸汽量加大,热水温度升高,直至偏差为零。如果由于某种原因,冷水流量加大,则流量值由流量计测得,通过温度控制器,开大阀门,使蒸汽量增加,提前进行控制,实现按冷水流量进行顺馈补偿,保证热交换器出口的水温不发生大的波动。系统方框图如图 1-6 所示,是按干扰补偿的复合控制系统。

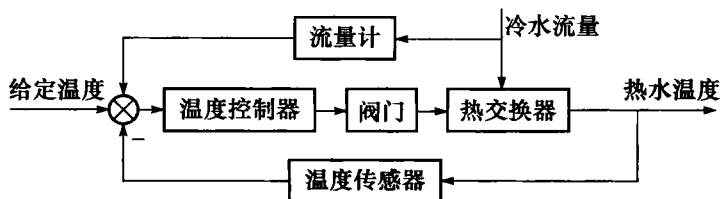


图 1-6 水温控制系统方框图

其中,热交换器是被控对象,实际热水温度为被控量,给定量(希望温度)在温度控制器中设定;冷水流量是扰动量。

1.3 控制系统的分类及基本要求

1.3.1 控制系统的分类

1. 按控制方式分类

- (1) 开环控制系统
- (2) 闭环控制系统

2. 按输入信号的特征分类

- (1) 恒值控制系统:该自动控制系统的任务是保持被控量恒定不变,也就是使被控量在

控制过程结束时,被控量等于给定值。如各种恒温、恒压、恒液位等控制。特点:输入信号为恒值。

(2)随动控制系统:简称随动系统,它是给定信号随时间的变化规律事先不能确定的控制系统,随动控制系统的任务是在各种情况下快速、准确地使被控量跟踪给定值的变化。如位置控制系统。特点:输入信号为未知函数。

(3)程序控制系统(过程控制系统):给定值按事先预定的规律变化,是一个已知的时间函数,控制的目的是要求被控量按确定的给定值的时间函数来改变。如加热炉自动温度控制系统。特点:输入信号为已知函数。恒值控制系统可看成输入等于常值的程序控制系统。

3. 按控制系统元件的特性分类

(1)线性控制系统:当控制系统的各元件的输入/输出特性是线性特性,控制系统的动态过程可以用线性微分方程(或线性差分方程)来描述时,其称为线性控制系统。线性控制系统的特点是可以应用叠加原理,当系统存在几个输入信号时,系统的输出信号等于各个输入信号分别作用于系统时系统输出信号之和。

(2)非线性控制系统:当控制系统中有一个或一个以上的非线性元件时,系统的特性就要用非线性方程来描述,由非线性方程描述的控制系统称为非线性控制系统。非线性控制系统不能应用叠加原理。

4. 按系统参数是否随时间变化分类

(1)定常系统:如果描述线性系统的线性微分方程的系数是不随时间而变化的常数,则这种线性控制系统称为线性定常系统,这种系统的响应曲线只取决于输入信号的形状和系统的特性,而与输入信号施加的时间无关。

(2)时变系统:若线性微分方程的系数是时间的函数,则这种线性系统称为线性时变系统,这种系统的响应曲线不仅取决于输入信号的形状和系统的特性,而且和输入信号施加的时间有关。

5. 按控制系统信号的形式分类

(1)连续控制系统:当控制系统的传递信号都是时间的连续函数,这种系统称为连续控制系统。连续控制系统又常称为模拟量控制系统(相对于数字量信号控制系统而言)。

(2)离散控制系统:控制系统在某处或几处传递的信号是脉冲序列或数字形式的,在时间上是离散的,其称为离散控制系统。

自动控制系统的分类方法还有很多,此处不一一列举。

1.3.2 控制系统的基本性能要求

当自动控制系统受到各种干扰(扰动)或人为要求给定值(参考输入)改变时,被控量就会发生变化,偏离给定值。通过系统的自动控制作用,经过一定的过渡过程,被控量又恢复到原来的稳态值或稳定到一个新的给定值。这时系统从原来的平衡状态过渡到一个新的平衡状态,被控量在变化中的过渡过程称为动态过程(即随时间而变的过程),被控量处于平衡状态时称为静态或稳态。

1. 动态特性

一般的自动控制系统被控量变化的动态特性有以下几种:

(1)单调过程。被控量 $y(t)$ 单调变化(即没有“正”、“负”的变化),缓慢地到达新的平衡状态(新的稳态值),如图 1-7(a)所示,一般这种动态过程具有较长的动态过程时间(即到

达新的平衡状态所需的时间)。

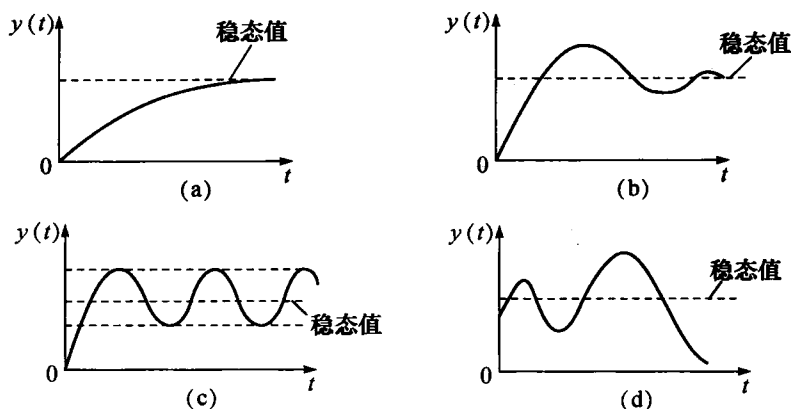


图 1-7 自动控制系统被控量的动态特性

(a) 单调过程; (b) 衰减振荡过程; (c) 等幅振荡过程; (d) 发散振荡过程

(2) 衰减振荡过程。被控量 $y(t)$ 的动态过程是一个振荡过程, 振荡的幅度不断衰减, 到过渡过程结束时, 被控量会达到新的稳态值。这种过程的最大幅度称为超调量, 如图 1-7(b) 所示。

(3) 等幅振荡过程。被控量 $y(t)$ 的动态过程是一个持续等幅振荡过程, 始终不能达到新的稳态值, 如图 1-7(c) 所示。这种过程如果振荡的幅度较大, 生产过程不允许, 则认为是一种不稳定的系统, 如果振荡的幅度较小, 生产过程可以允许, 则认为是一种稳定的系统。

(4) 发散振荡过程。被控量 $y(t)$ 的动态过程不但是一个振荡的过程, 而且振荡的幅度越来越大, 以致会大大超过被控量允许的误差范围, 如图 1-7(d) 所示, 这是一种典型的不稳定过程, 设计自动控制系统时要绝对避免产生这种情况。

2. 控制系统的性能要求

(1) 稳定性: 稳定性是保证控制系统正常工作的先决条件。所谓系统稳定, 就是当系统受到扰动作用后, 系统的被控量虽然偏离了原来的平衡状态, 但当扰动一消除, 经过一定的时间后, 如果系统仍能回到原来的平衡状态, 则称系统是稳定的。如稳定的恒值控制系统, 被控量偏离期望的初始偏差应随时间的增长而逐渐减小并趋于零。

(2) 快速性: 快速性为系统过渡过程的时间, 过渡过程的时间越短越好。

(3) 准确性(精确性): 准确性指系统的稳态精度, 用稳态误差来表示。稳态误差为控制系统进入稳定状态后, 系统的期望输出与实际输出之间的差值。稳态误差值越小, 准确性越好。

由于被控对象的不同, 系统对性能要求的侧重点也不同。随动控制系统对快速性和准确性要求较高, 恒值控制系统一般侧重于稳定性能和抗扰动的能力。各项性能指标间是相互制约的, 系统动态响应的快速性、准确性和动态稳定性之间是相互矛盾的。

本章小结

本章介绍了自动控制系统中的术语及反馈控制系统的组成。

1. 控制系统的基本形式有: 开环控制系统和闭环控制系统。开环控制系统的优缺点,

按干扰补偿的开环控制系统属于前馈控制系统。闭环控制系统因为有了反馈,也称为反馈控制系统,控制实质为按偏差控制,具有了控制精度高、抗干扰能力强等优点。目前实际系统多为闭环控制系统。

2. 控制系统根据不同的分类依据有不同的类别。本书中涉及到的绝大多数系统为线性定常系统。

3. 自动控制系统的基本性能要求:在稳定的前提下,动态性能指标的快速性为过渡过程时间,过渡过程时间越短,快速性越好;稳态性能指标为准确性,是稳态误差即系统进入稳态后系统的期望输出值与实际输出值之间的差值,稳态误差越小,准确性越好。系统的性能指标是相互制约的。

习 题

1-1 试列举家用电器中的开环控制系统和闭环控制系统,说明其工作原理并画出相应的示意图。

1-2 开环控制系统和闭环控制系统各有什么特点?

1-3 试分析家用电冰箱的控制方式是开环还是闭环控制方式?

1-4 图 1-8 是液位自动控制系统原理示意图。在任何情况下,希望液面高度 H 保持不变,试说明系统工作原理。

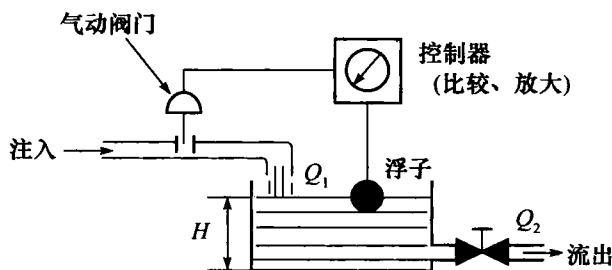


图 1-8 液位自动控制系统

1-5 电炉温度控制系统如图 1-9 所示。试分析系统保持电炉温度恒定的工作过程,指出系统的被控对象、被控量及各部件的作用,并画出系统的方框图。

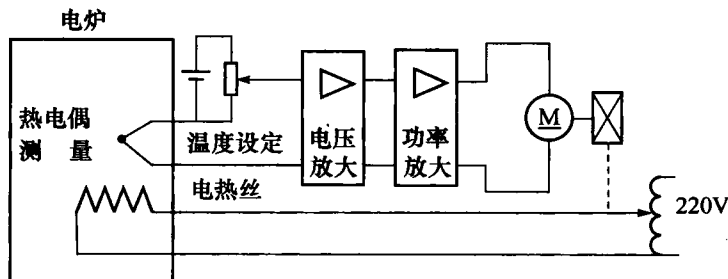


图 1-9 电炉温度控制系统

1-6 下列各式是描述系统的微分方程,其中, $r(t)$ 为输入量, $c(t)$ 为输出量,试判断下

列哪个方程表示的系统为线性定常系统,哪个是非线性系统?

$$(1) c(t) = 5 + r^2(t) + t \frac{d^2 r(t)}{dt^2}$$

$$(2) c(t) = 3r(t) + 6 \frac{dr(t)}{dt} + 5 \int_{-\infty}^t r(\tau) d\tau$$

$$(3) c(t) = \cos \omega t \cdot r(t) + 5$$

$$(4) c(t) = \begin{cases} 0 & t < 6 \\ r(t) & t \geq 6 \end{cases}$$