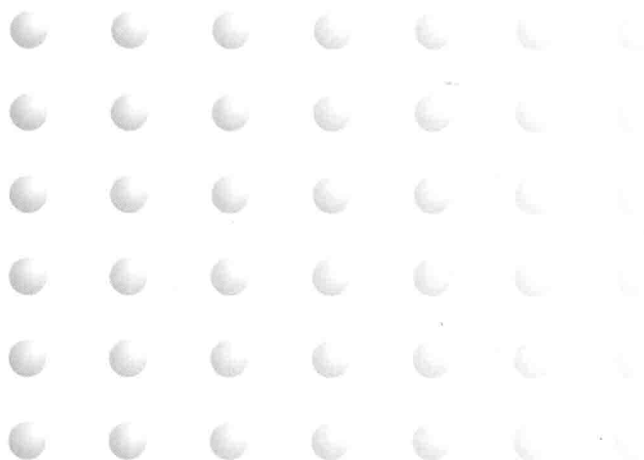




高等学校机电工程类“十二五”规划教材

自动控制原理

邹 恩 漆海霞 编著
杨秀丽 邢 航



西安电子科技大学出版社
<http://www.xduph.com>

高等学校机电工程类“十二五”规划教材

自动控制原理

邹 恩 漆海霞 编著
杨秀丽 邢 航

西安电子科技大学出版社

内 容 简 介

本书是根据高等工科院校自动化、电气工程、电子信息等电类专业对“自动控制原理”课程的要求编写的。全书共7章,内容有自动控制原理的基本概念,控制系统数学模型,控制系统时域分析法,控制系统的根轨迹法,控制系统的频域分析,控制系统的校正以及线性离散系统分析。每章都配有适当的例题和习题。

本书可作为高等工科院校自动化、电气工程、电子信息、检测技术与自动化装置等电类专业和机械类专业的教学用书,还可供相关工程技术人员参考。

为了满足使用本书的教师和学生的教与学要求,与本书配套的《〈自动控制原理〉学习指导与习题解答》也同期出版。

图书在版编目(CIP)数据

自动控制原理/邹恩等编著. —西安:西安电子科技大学出版社,2014.8

高等学校机电工程类“十二五”规划教材

ISBN 978-7-5606-3390-9

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

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 110773 号

策 划 邵汉平

责任编辑 邵汉平 王晓燕

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路2号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

网 址 www.xduph.com 电子邮箱 xdupfxb001@163.com

经 销 新华书店

印刷单位 陕西天意印务有限责任公司

版 次 2014年8月第1版 2014年8月第1次印刷

开 本 787毫米×1092毫米 1/16 印 张 17.5

字 数 414千字

印 数 1~3000册

定 价 32.00元

ISBN 978-7-5606-3390-9/TP

XDUP 3682001-1

* * * 如有印装问题可调换 * * *

前 言

自动化技术是当代发展迅速、应用广泛、最引人瞩目的高新技术之一，是推动新的技术革命和新的产业革命的核心技术。近年来，自动化技术已广泛应用于机械加工、采矿冶炼、化学工业、电力系统、交通运输、农业生产、环境保护、医药卫生、军事技术、航空航天、科学研究、办公服务、家庭生活等领域；自动化的实现改善了工作环境，提高了生产效率和生产能力以及产品质量和经济效益，丰富了人民的生活水平。自动化技术推进了传统产业现代化，代替了人的体力劳动和部分脑力劳动，实现了高水平自动化生产，在某种程度上，可以说自动化是现代化的同义词，因此自动化程度可反映一个国家工业发展的水平。在当今社会的家庭、办公室、工厂、公共场所等，都离不开自动化设备，自动化为人类文明进步做出了重要贡献。例如，空调机可在炎热的夏天使室内自动保持适宜的温度；全自动洗衣机能自动地把衣服洗干净；订票系统可以预订到世界各地任何一家航空公司的任何一条航线的机票；电子银行可以快速地完成银行或用户之间的资金转移；农业机器人可移植秧苗、灌溉田地、栽培蔬菜、采摘果实、养猪养鱼、挤牛奶、剪羊毛；港口能自动地根据编号将集装箱装上船舶；宇航员在天宫一号上的太空授课同步发送到地面；等等。

自动控制原理是一门应用性较强的专业课，起着承上启下的作用，学生学习的兴趣、掌握的程度都会直接影响后续专业课程的学习。为了适应自动化、电气工程及其自动化、通信等电类专业学习自动控制原理的需要，我们编写了这本教材。本书涵盖了经典控制理论的基本内容，强化控制理论与控制工程学科的实践性，介绍了控制系统在时域和频域中的分析方法、传递函数、方框图和信号流图模型；详细阐述了用于控制系统分析和设计的时域法、根轨迹法和频域法；介绍了系统的校正设计方法；对离散系统的稳定性、瞬态和稳态性能进行了讨论。书中特别注意结合控制系统分析与设计，比一般教材增加了大量的实际例题，大部分例题除采用计算方法解题外还采用了 MATLAB 的解题方法，并给出了一些实际系统的 MATLAB 仿真示例，以利于培养学生理论联系实际的科学观点，提高学生综合分析问题和解决问题的能力。

全书图文并茂，理论联系实际，特别注重工程实用性。在附录中加入了拉普拉斯变换和 MATLAB 常用函数，可供读者在学习中查询。

与本书配套的《〈自动控制原理〉学习指导与习题解答》同期出版，它对本书中所有习题都提供了详细解题过程。

本书可作为高等工科院校电类和机械类相关专业的教材，也可供相关工程技术人员参考。

本书由邹恩教授、漆海霞副教授、杨秀丽及邢航讲师编著，编写中得到张铁民教授的支持，在此表示感谢。本书由华南农业大学重点教改项目“自动化专业实践教学改革的研

究与探索”(JG12014)、华南农业大学“自动控制原理”精品课程、广东省 2014 年民办高校质量工程“专业综合改革试点——电气工程及其自动化专业学生应用能力培养的综合改革”等项目资助。

由于时间仓促和编者水平所限，书中不妥之处在所难免，敬请广大读者不吝赐教。

编 者

2014 年 1 月

目 录

第一章 引论	1	2.3 典型环节的数学模型	24
1.1 自动控制的基本原理	1	2.3.1 典型元件的传递函数	24
1.1.1 自动控制和自动控制系统	1	2.3.2 最小相位环节和非最小相位 环节传递函数	29
1.1.2 自动控制系统的工作原理	1	2.3.3 各环节间负载效应	30
1.1.3 自动控制系统的 基本控制方式	2	2.4 控制系统结构图	31
1.2 自动控制系统示例	3	2.4.1 结构图的组成和绘制	31
1.2.1 液位控制系统	3	2.4.2 结构图的等效变换和简化规则	33
1.2.2 温度控制系统	3	2.4.3 结构图的化简	38
1.2.3 转速自动调节系统	4	2.5 控制系统的信号流图	41
1.2.4 自整角机位置随动系统	5	2.5.1 信号流图的组成及术语	41
1.2.5 热工水温控制系统	5	2.5.2 信号流图的性质	42
1.3 自动控制系统的类型	6	2.5.3 信号流图的绘制和化简	42
1.3.1 按控制方式分类	6	2.5.4 梅逊(Mason)公式	43
1.3.2 按执行部件分类	6	2.6 闭环系统的传递函数	47
1.3.3 按系统信号特性分类	6	2.6.1 系统的开环传递函数	47
1.3.4 按控制参量分类	7	2.6.2 系统的闭环传递函数	48
1.3.5 按系统性能分类	7	习题二	49
1.3.6 按输入量变化规律分类	8		
1.4 自动控制系统的的基本要求	8	第三章 控制系统时域分析法	55
1.5 自动控制系统的术语和定义	9	3.1 系统时域性能指标	55
习题一	11	3.1.1 典型输入信号	55
		3.1.2 时域性能指标	58
第二章 控制系统数学模型	12	3.2 一阶系统时域分析	59
2.1 控制系统时域数学模型	12	3.2.1 一阶系统数学模型	59
2.1.1 电路元件微分方程	12	3.2.2 一阶系统的单位阶跃响应	60
2.1.2 弹簧-质量-阻尼器系统的 微分方程	14	3.2.3 一阶系统的单位脉冲响应	61
2.1.3 机械传动系统的微分方程	16	3.2.4 一阶系统的单位斜坡(速度) 响应	62
2.1.4 直流电动机电枢控制方式 微分方程	16	3.2.5 一阶系统的单位抛物线(加速度) 响应	63
2.1.5 控制系统微分方程的 列写步骤	18	3.3 二阶系统的时域分析	64
2.2 控制系统的复数域数学模型	20	3.3.1 二阶系统的数学模型	64
2.2.1 传递函数	20	3.3.2 二阶系统的单位阶跃响应	66
2.2.2 传递函数的几种表达形式	21	3.3.3 二阶系统动态性能指标计算	69
2.2.3 传递函数的性质	23	3.3.4 二阶系统的单位斜坡响应	75
		3.3.5 改善二阶系统动态性能的措施	76

3.4 高阶系统的时域分析	80	5.3.2 对数频率特性	148
3.4.1 高阶系统单位阶跃响应	80	5.4 开环系统的幅相频率特性曲线绘制	153
3.4.2 闭环主导极点	81	5.5 开环系统对数频率特性曲线绘制	161
3.5 线性系统的稳定性分析	82	5.5.1 对数频率特性曲线绘制方法	161
3.5.1 稳定性的基本概念	82	5.5.2 最小相位系统与 非最小相位系统	164
3.5.2 线性系统稳定的充分必要条件	83	5.6 奈奎斯特稳定判据	165
3.5.3 劳斯稳定判据	84	5.6.1 理论基础	166
3.5.4 劳斯稳定判据的应用	87	5.6.2 稳定判据	170
3.6 线性系统的稳态误差计算	89	5.6.3 开环传递函数中含有积分环节和 等幅振荡环节时的奈氏稳定判据 应用	172
3.6.1 误差与稳态误差	90	5.7 对数频率稳定判据	175
3.6.2 终值定理法计算稳态误差	91	5.7.1 开环幅相特性与对数频率特性 之间的关系	175
3.6.3 静态误差系数法计算稳态误差	91	5.7.2 稳定判据	176
3.6.4 扰动信号作用下的 稳态误差分析	95	5.8 频域稳定裕度	177
3.6.5 减小或消除稳态误差的措施	97	5.9 用频率特性分析系统品质	181
习题三	100	5.9.1 闭环频率特性及其特征量	181
第四章 控制系统的根轨迹法	104	5.9.2 频域性能指标与时域性能指标的 关系	182
4.1 根轨迹的基本概念	104	5.10 系统传递函数的实验法	187
4.1.1 根轨迹的涵义	104	习题五	189
4.1.2 根轨迹与系统性能分析	106	第六章 控制系统的校正	194
4.1.3 闭环零、极点与开环零、 极点之间的关系	106	6.1 系统设计与校正问题	194
4.1.4 根轨迹的条件	107	6.1.1 系统的性能指标	194
4.2 常规根轨迹的绘制法则	109	6.1.2 系统的校正方式	196
4.3 广义根轨迹	129	6.1.3 基本控制规律	197
4.3.1 参数根轨迹	129	6.2 常用校正装置及其特性	199
4.3.2 零度根轨迹	133	6.2.1 超前校正装置	199
4.4 根轨迹系统性能分析	135	6.2.2 滞后校正装置	202
4.4.1 条件稳定系统的分析	135	6.2.3 滞后-超前校正装置	205
4.4.2 闭环零、极点和系统的 瞬态性能分析	136	6.3 串联校正	210
4.4.3 开环零、极点对根轨迹形状的 影响	137	6.3.1 串联超前校正	211
习题四	138	6.3.2 串联滞后校正	214
第五章 控制系统的频域分析	141	6.3.3 串联滞后-超前校正	217
5.1 频率特性的定义及表示形式	141	6.4 并联校正	220
5.2 典型环节的幅相频率特性	142	6.4.1 并联校正原理	220
5.2.1 基本概念	142	6.4.2 并联校正设计	221
5.2.2 幅相频率特性曲线	142	习题六	224
5.3 典型环节的对数频率特性	146	第七章 线性离散系统的分析	228
5.3.1 半对数坐标	146		

7.1 离散系统的基本概念	228	7.5 离散系统的稳定性和稳态误差	252
7.1.1 采样控制系统	228	7.5.1 s 域到 z 域的映射	252
7.1.2 数字控制系统	230	7.5.2 线性定常离散系统稳定的 充分必要条件	252
7.1.3 离散控制系统特点	232	7.5.3 离散系统的稳定性判据	254
7.2 信号采样与保持	232	7.5.4 离散系统的稳态误差	255
7.2.1 信号的采样	232	7.6 离散系统的动态性能分析	258
7.2.2 信号保持	236	7.6.1 离散系统的时间响应	258
7.3 Z 变换	238	7.6.2 采样器和保持器对动态 性能的影响	260
7.3.1 Z 变换的定义	238	习题七	260
7.3.2 Z 变换的方法	238	附录 A 拉氏变换和拉氏反变换	263
7.3.3 Z 变换的基本性质	241	附录 B MATLAB 系统与常用函数	268
7.3.4 Z 反变换	243		
7.4 离散系统的数学模型	245		
7.4.1 线性常系数差分方程及其解法	245		
7.4.2 脉冲传递函数	247		
7.4.3 开环系统脉冲传递函数	248		
7.4.4 闭环系统脉冲传递函数	250		

第一章 引 论

本章介绍了自动控制基本概念和自动控制系统基本原理,自动控制系统示例和分类,自动控制系统基本要求和术语。

1.1 自动控制的基本原理

1.1.1 自动控制和自动控制系统

18 世纪下半叶,瓦特发明了蒸汽机,使传统的手工业过渡到机器大工业,引起了第一次技术和工业革命的高潮;19 世纪 70 年代,发电机的发明,使电力在生产和生活中得到广泛的应用,第二次工业技术促成了一大批工业部门的诞生;随着现代科学技术的发展,自动控制技术成为当代发展迅速、应用广泛、最引人瞩目的高技术之一,是推动新的技术革命和新的产业革命的核心技术。

自动控制是指在没有人直接干预的情况下,控制装置(如机器设备或生产过程)按照预先设定的控制过程(如测量、运动等),对被控对象的工作状态(如被控制量,温度、压力、流量、速度等)进行控制。自动控制系统是指能够对被控对象的工作状态进行自动控制的系统,它一般由控制装置和被控对象组成。

自动控制系统已被广泛应用于工业、农业、军事、交通等各个领域。在工业上,冶金、化工、机械制造等生产过程中遇到的各种物理量,如温度、流量、压力、厚度、张力、速度、位置、频率、相位等,都有相应的自动控制系统。在此基础上通过采用数字计算机还建立起了控制性能更好、自动化程度更高的数字控制系统,以及具有控制与管理双重功能的过程控制系统。在农业上,包括水位自动控制系统、农业机械的自动操作系统等。在军事技术上,有各种类型的伺服控制系统、火力控制系统、制导与控制系统等。在航天、航空和航海上,除了各种形式的控制系统外,还包括导航系统、遥控系统和各种仿真器。办公室自动化、图书管理、交通管理乃至日常家务,也离不开自动控制技术。

随着控制理论和控制技术的发展,自动控制系统的应用领域还在不断扩大,几乎涉及生物、医学、生态、经济、社会等所有领域。

1.1.2 自动控制系统的工作原理

自动控制系统的组成和工作原理与人体的构成和工作机理有很多相似之处:人体的许多功能可以在不需要有意识地干涉的情况下完成,从而维持我们的生命,如人体的体温恒定调节系统、心跳自动控制系统、自动平衡系统等都是人体内在复杂的控制系统。

同时,人的生活和生产等活动也无不体现出自动控制系统的工作,如打羽毛球,运动员要根据对手打过来的球的位置,调整自己的位置接球;水位人工控制系统,通过人工目测水位在目标水位的上或下位置,关闭或打开进水阀,以保证水平面的高度。在人参与的活动中,眼睛作为传感器,人脑和神经系统作为控制装置(或控制器),人的手、腿、肌肉作为执行元件。传感器用来测量被控量的状态信息,并转换为电信号,传送给控制器;控制器计算出控制对象当前状态与目标状态的差值,按一定规律产生控制信号,经信号放大,送给执行机构操作,直到检测到当前状态与目标状态的差值为零为止。这是一种控制和消除偏差的过程,是按偏差控制的反馈控制。

如果传感器检测的输出信号与输入信号叠加后,使系统产生的偏差越来越小,则称为负反馈(控制);反之,如果输出信号与输入信号叠加后,偏差信号越来越强,则称为正反馈(控制)。正反馈在自动控制系统中主要用来对小的变化进行放大,从而可以使系统在一个稳定的状态下工作。如核反应就是一个正反馈的例子:在反应堆工作之前,要通过几个触发中子使系统工作起来,一旦反应开始后,系统本身会产生大量的中子来维持反应的进行,利用这种正反馈机制可以形成大规模的核反应。由于正反馈总是起放大作用,会使系统中的作用越来越剧烈,最后可能导致系统损坏。所以一般正反馈都与负反馈配合使用,以使系统的性能更优,有的时候会在正反馈后面加上非线性环节(如限幅环节)。本教材中提到的反馈控制系统如果无特殊说明,一般都指负反馈控制。

1.1.3 自动控制系统的 basic 控制方式

自动控制系统的基本控制方式包括:开环控制、闭环控制、前馈控制、复合控制。

自动控制系统大多都是闭环(反馈)控制系统,系统方框图如图 1-1 所示。其特点是:输出影响输入,所以能削弱或抑制干扰;可由低精度元件组成高精度系统。

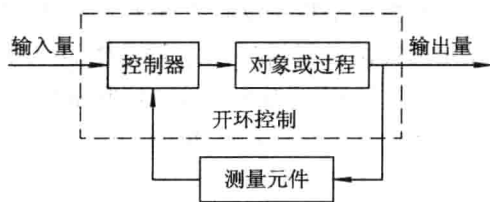


图 1-1 闭环控制系统方框图

当自动控制系统构成元件的精度较高,或系统本身要求的精度不高时,无需反馈,就构成了如图 1-1 中虚线部分的开环控制系统。开环控制是指控制器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。此时,系统构成没有传感器对输出信号的检测部分。

开环控制的特点是:输出不影响输入,通常容易实现;系统的精度与组成的元器件精度密切相关;系统的稳定性不是主要问题;系统的控制精度取决于系统事先的调整精度,对于工作过程中受到的扰动或特性参数的变化无法自动补偿。开环控制方式结构简单,成本低廉,多用于系统结构参数稳定和扰动信号较弱的场合,如自动售货机、自动报警器、自动流水线等系统中。

还有一种控制方式是按扰动进行补偿的,称为前馈控制,系统方框图如图 1-2 所示。这种控制方式的原理是:利用对扰动信号的测量产生控制作用,以补偿扰动对输出量的影响。前馈控制是

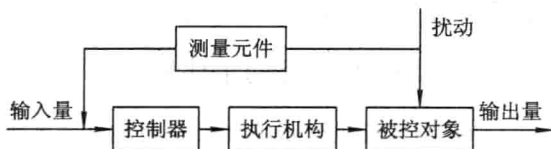


图 1-2 按扰动补偿的系统方框图

直接按扰动而不是按偏差控制,干扰发生后,被测量还未显现出变化之前,控制器就产生了控制作用,所以,前馈控制对干扰的抑制要比反馈控制更及时。由于扰动信号经测量元件、控制器至被控对象的输出量是单向传递的,故按扰动补偿方式是开环控制方式的一种特例,对于不可测扰动以及被控对象及各功能部件内部参数变化给输出量造成的影响,系统自身无法控制,因此控制精度有限,常用于工作机械的恒速控制(如稳定刀具转速)以及电源系统的稳压、稳频控制。

复合控制方式是指同时包含按偏差的闭环控制和按扰动或输入的开环控制的控制方式。前馈控制用来作为补偿装置,只能补偿一种扰动,而对其他的扰动并不起补偿作用;反馈控制是按偏差确定控制作用以使输出量保持在期望值上。对于滞后较大的控制对象,反馈控制作用不能及时影响系统的输出,常引起输出量的过大波动。如果引起输出量变化的外扰是可量测的(例如在汽轮机调速系统中,汽轮机的负荷就是可以量测的),则用外扰信号直接控制输出就能更迅速和有效地补偿外扰对输出的影响。影响输出量变化的扰动因素很多,但可量测并用来进行控制的只能是主扰动。按扰动控制一般不能单独采用,常需与按偏差控制结合使用,构成复合控制。复合控制将按扰动的补偿控制与按偏差的反馈控制结合起来,发挥各自的优点,能显著减小扰动对系统的影响,有利于提高系统控制精度。

1.2 自动控制系统示例

1.2.1 液位控制系统

液位控制系统可根据系统的实际需要有不同的构成,如图 1-3 所示。图(a)为机械式液位自动控制系统,图(b)为电控式液位自动控制系统。从图 1-3 可见,液位控制是基本的反馈控制。图(a)的工作原理:水箱出水,液位逐渐下降,当液位低于设定的水位高度时,浮球下降,带动控制杠杆使控制阀门打开,增加水流入量;当水位渐渐上升时,控制阀门随之关小,减少水流入量,使水箱内液位保持在设定的高度上。此时,控制杠杆起着液位测量和调节的作用。图(b)的工作原理:自动控制器通过比较实际液位与期望液位,得到两者之间的误差并通过调整气动阀门的开度,对误差进行修正,从而保持液位不变。

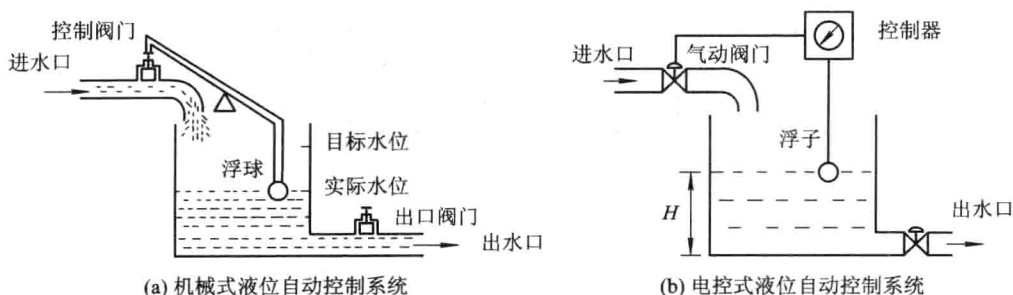


图 1-3 液位自动控制系统

1.2.2 温度控制系统

如图 1-4 为热处理炉温度自动控制系统。热处理炉需要保持温度在某一恒定值,该目

标温度是由给定的电压信号 u_1 控制的。炉内温度由热电偶测量，热电偶把炉内温度转换成电压 u_2 输出， u_2 与 u_1 比较，所得电压偏差 $\Delta u = u_1 - u_2$ 经放大器放大，驱动电动机。 Δu 改变时，对应的电动机转速和方向也发生改变，通过传动装置拖动调压器触头。当温度偏低时，动触头向着增加电流方向运动；反之，当温度偏高时，动触头向着减小电流方向运动，直到所测实际温度与设定温度相等， $\Delta u = 0$ ，电动机才停转。

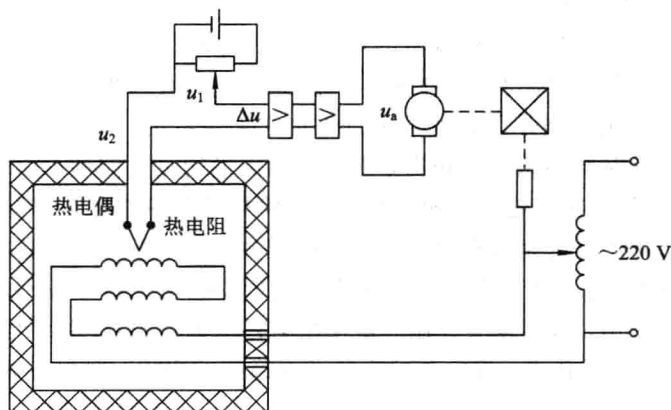
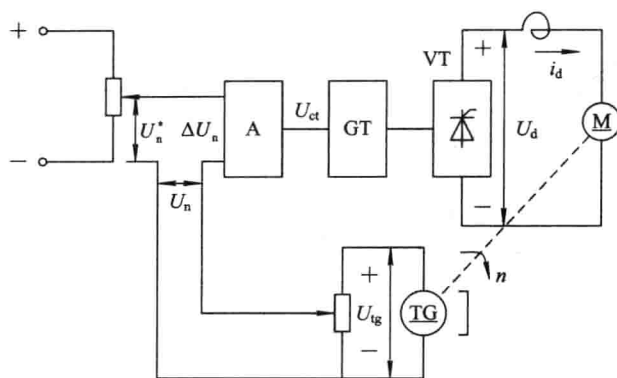


图 1-4 热处理炉温度自动控制系统

1.2.3 转速自动调节系统

在直流电动机单闭环转速自动调节系统中，直流电动机电枢电压变化会引起电动机转速的变化，给定电枢电压值，实际上是给定了电动机的输出转速。直流电动机转速自动调节系统如图 1-5 所示。在电动机轴上安装一台测速发电机 TG，随着电动机转子同速转动，输出与转速成正比的电压 U_n ，将 U_n 与设定值 U_n^* 比较，得到偏差 ΔU_n ，该偏差经放大器放大为 U_{ct} ， U_{ct} 送给调节触发装置 GT，产生一定触发角的触发信号，控制晶体管可控整流器 VT 输出相应电枢电压 U_d 驱动直流电动机转动。当电动机转速低时， U_{tg} 就小，相应的 U_n 就小，与设定电压比较后得到偏差 ΔU_n 就大，则输出的 U_d 就大，电动机转速就提高；反之亦然。



A—放大器；GT—触发器；VT—晶体管可控整流器；M—直流电动机；TG—测速发电机

图 1-5 直流电动机转速自动调节系统

1.2.4 自整角机位置随动系统

自整角机位置随动系统的功能是使自整角发送机 TX 转子角位移 θ_i 总是跟随着自整角接收机 TR 的转子角位移 θ_o 。图 1-6 为自整角机位置随动系统，该位置随动系统实际上是火炮瞄准系统，初始状态应该是自整角发送机的位置角 θ_i 和自整角接收机的位置角 θ_o 相等。当火炮手向某方向摇动手轮时， $\theta_i > \theta_o$ ，产生的失调角 $\theta = \theta_i - \theta_o \neq 0$ ，则自整角接收机输出一个与 θ 成正比的电压 U ，经放大器放大，加到直流伺服电动机上，伺服电动机转动，带动火炮一起转动，同时，与伺服电动机转子联结的自整角接收机转子也跟着一起转动，则 θ_o 增加， θ 值就会减小，当 $\theta_i = \theta_o$ 时， $\theta = 0$ ， $U = 0$ ，伺服电动机停转，这时，火炮转过的角度实际上就是火炮手摇动的角度。

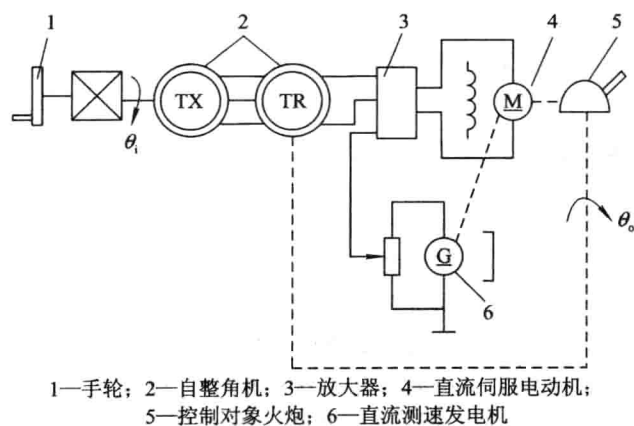


图 1-6 自整角位置随动系统

1.2.5 热工水温控制系统

图 1-7 为热工水温控制系统。冷水在热交换器中由通入的蒸汽加热，得到一定温度的热水，冷水流量变化用流量计测量，温度传感器不断测量热水温度，并在温度控制器中与给定温度比较，当实际水温高于设定温度值时，输出的偏差会控制蒸汽阀门关小，进入热

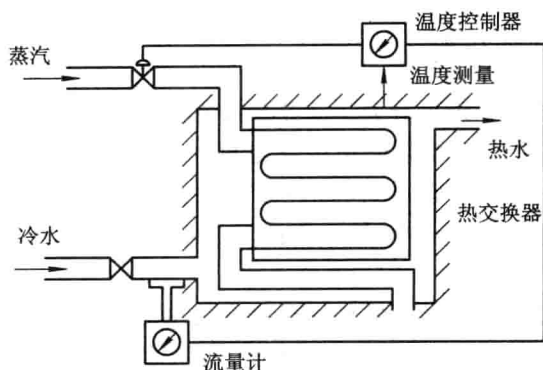


图 1-7 热工水温控制系统

交换器的蒸汽量减少,水温降低,直至偏差为零。在该系统中,冷水流量为扰动量。当冷水流量变大时,热水温度有所降低,流量计测得冷水流量变化,按前馈控制加到温度控制器中加以补偿,使阀门开大,蒸汽量增加,补偿冷水量变大引起的热水温度的降低。

1.3 自动控制系统的类型

自动控制系统的类型不是单一的,根据不同的分类方法有不同的类型,同一控制系统可能是属于多种类型。自动控制系统分类方法如下。

1.3.1 按控制方式分类

自动控制系统控制方式主要指控制系统中信号的流动方向。按控制方式分类,可以分为开环控制、闭环控制、前馈控制和复合控制等4种类型。前面已对这4种控制方式作了介绍,不再重复。

1.3.2 按执行部件分类

按执行部件不同,自动控制系统可以分为机械控制系统、气动控制系统、液压控制系统、机电控制系统和电气控制系统等5种。

机械控制系统是指用机械方法对元件或系统的工作特性进行调节或操纵的控制系统,前面提到的机械式液位控制系统,是最简单的机械控制系统;

气动控制系统和液压控制系统分别是指系统中的动力分别是气压和液压的控制系统。液压控制系统一般是由阀体、电磁阀、油泵及连接所有零部件的流体通道及执行器组成的,如伺服液压缸。气动控制系统一般由压力控制阀、流量控制阀、方向控制阀和逻辑元件、传感元件以及气动辅件连接起来组成。在气动控制系统中,气动发生装置一般为空气压缩机,它将原动机供给的机械能转换为气体的压力能,如公交车的上下乘客的车门控制是常见的气动控制。

机电控制系统是指由机械结构和电气控制相结合构成的整个控制系统,包括数控系统、可编程控制系统、生产线控制和物流控制系统等。比如机电控制技术工程应用中的位置控制系统、速度控制系统、过程控制系统及综合机电控制系统。

1.3.3 按系统信号特性分类

按系统信号特性,控制系统可分为运动控制系统、过程控制系统和顺序控制系统。

运动控制系统大都基于伺服电机和步进电机;运动控制就是对机械运动部件的位置、速度等进行实时的控制管理,使其按照预期的运动轨迹和规定的运动参数进行运动。早期的运动控制技术主要是伴随着数控技术、机器人技术和工厂自动化技术的发展而发展的。

运动控制是自动化的一个分支,它使用通称为伺服机构的一些设备如液压泵、线性执行机构或者是电机来控制机器的位置和(或)速度,被广泛应用在包装、印刷、纺织和装配工业中。

过程控制系统是指自动调整系统温度、压力、流量、液面或 PH 值(氢离子浓度)等这

样一些输出变量的系统。过程控制在工业中获得广泛应用,如在加热炉的温度控制中,炉温是根据预先制定的程序进行控制的,也叫程序控制。程序控制是经常采用的一种过程控制系统,例如,炉温在一定的时间间隔内,先上升到某一给定温度,然后在另一段时间间隔内再下降到另一给定温度。在这类程序控制中,给定量是按照预先制定的规律变化的,而控制器则保持炉温紧紧地跟随给定量的变化。应当指出,大多数程序控制系统都包含随动系统,作为系统的整体部件。

顺序控制系统是指按照规定的时间或逻辑的顺序,对某一工艺系统或主要辅机的多个终端控制元件进行一系列操作的控制系统。顺序控制在控制系统中用得最多,通常是采用继电器控制电路实现整个系统的操作功能。

1.3.4 按控制参量分类

控制系统的控制参量有温度、压力、流量、位置、速度等,按控制参量不同,控制系统可分为温度控制系统、压力控制系统、位置控制系统和流量控制系统等。

1.3.5 按系统性能分类

按系统性能,控制系统可分为线性系统、非线性系统、连续系统、离散系统、定常系统、时变系统、确定性系统和不确定性系统。

线性系统是实际系统的一类理想化的模型,常用的数学模型有时间域模型和频率域模型。经典线性控制理论数学基础是拉普拉斯变换,模型是传递函数,分析和综合方法是频率响应法。线性系统满足线性叠加原理。

线性连续系统常用微分方程来描述,其一般表达式为

$$\begin{aligned} & a_0 \frac{d^n}{dt^n} y(t) + a_1 \frac{d^{n-1}}{dt^{n-1}} y(t) + \cdots + a_{n-1} \frac{d}{dt} y(t) + a_n y(t) \\ & = b_0 \frac{d^m}{dt^m} x(t) + b_1 \frac{d^{m-1}}{dt^{m-1}} x(t) + \cdots + b_{m-1} \frac{d}{dt} x(t) + b_m x(t) \end{aligned}$$

式中, $x(t)$ 为系统输入量; $y(t)$ 为系统输出量; $a_i (i=0, 1, 2, \cdots, n)$ 、 $b_j (j=0, 1, 2, \cdots, m)$ 均由系统结构决定。若 $a_i (i=0, 1, 2, \cdots, n)$ 、 $b_j (j=0, 1, 2, \cdots, m)$ 为常数,则微分方程所表达的系统为线性定常系统;若随时间变化,则为线性时变系统。宇宙飞船控制系统就是时变控制的一个例子(宇宙飞船的质量随着燃料的消耗而变化)。

非线性系统输入与输出间的关系是非线性的,非线性系统不满足线性叠加原理。上述系统中只要有一个元部件的输入输出特性是非线性的,这类系统就称为非线性控制系统,例如某非线性控制系统微分方程描述:

$$\ddot{y}(t) + y(t)\dot{y}(t) + y^2(t) = r(t)$$

可见,非线性系统微分方程中系数和变量有关,或者方程中含有变量及其导数的高次幂或乘积项。典型的非线性特性有饱和特性、死区特性、间隙特性、继电特性、磁滞特性等。非线性系统的理论研究远不如线性系统的那么完整,一般只能近似地定性描述和数值计算。

严格来说,任何物理系统的特性都是非线性的。但为了研究问题的方便,许多系统在一定的条件下,一定的范围内,可以近似地看成线性系统来加以分析研究,其误差往往在

工业生产允许的范围之内。

离散系统是指系统的信号在时间上是离散的,系统的某一处或几处,信号以脉冲序列或数码的形式传递的控制系统。工业计算机控制系统就是典型的离散系统。随着计算机的发展,利用数字计算机进行控制的系统越来越多,连续信号经过开关的采样可以转换成离散系统。离散系统可分为脉冲控制系统和数字控制系统。离散系统用差分方程描述。

1.3.6 按输入量变化规律分类

线性定常系统按其输入量的变化规律不同,可分为恒值控制系统、随动系统和程序控制系统。

恒值控制系统:这类系统的输入量是一个常值,要求被控量亦等于一个常值。温度控制系统——恒温箱(刚出生的早产儿要放在保温箱里)温度一经调整,被控量就应与调整好的输入量保持一致。压力控制系统、液位控制系统等,都是典型的恒值控制系统。

随动系统:这类系统的输入量是预先未知的随时间任意变化的函数,要求被控制量以尽可能小的误差跟随输入量的变化而变化。典型的随动系统有函数记录仪、高炮自动跟踪系统和工业伺服控制系统。在随动系统中,扰动的影响是次要的,系统分析、设计的重点是研究被控制量跟随的快速性和准确性。

程序控制系统:这类系统的输入量是按预定规律随时间变化的函数。如机械加工数字程序控制机床。程序控制系统要求被控制量迅速、准确地复现。

1.4 自动控制系统的基本要求

设计和控制一个系统就是希望系统的性能指标能达到某一范围内,衡量一个系统的好坏也就是看系统的性能是否满足控制要求,那么,如何评价一个自动控制系统的性能呢?

理想情况下,总是希望控制系统的输出量不受干扰信号的影响,始终等于输入信号决定的理想值。但实际系统,由于扰动的作用或输入信号的变化及系统本身的结构参数决定的性能,系统的实际输出与理想输出值之间总是存在误差。当自动控制系统受到干扰或者人为要求给定值改变,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,被控量又被恢复到原来的稳定值或稳定到一个新的给定值。被控量在变化过程中的过渡过程称为动态过程,被控量处于平衡状态称为静态或稳态。图 1-8 为自动控制系统被控量变化的动态特性。

自动控制系统动态过程多属于图 1-8(b)的情况。希望过渡过程时间(又称调整时间)越短越好,振荡幅度越小越好,衰减得越快越好。自动控制系统最基本的要求是被控量的稳态误差(偏差)为零或在允许的范围内。对于一个好的自动控制系统来说,一般要求稳态误差在被控量额定值的 2%~5%。

自动控制系统的基本要求概括来讲,就是要求系统具有稳定性、快速性和准确性。

稳定性是对系统的基本要求,不稳定的系统不能实现预定任务,也无从谈起对其的控制。线性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。稳定性反映的是系

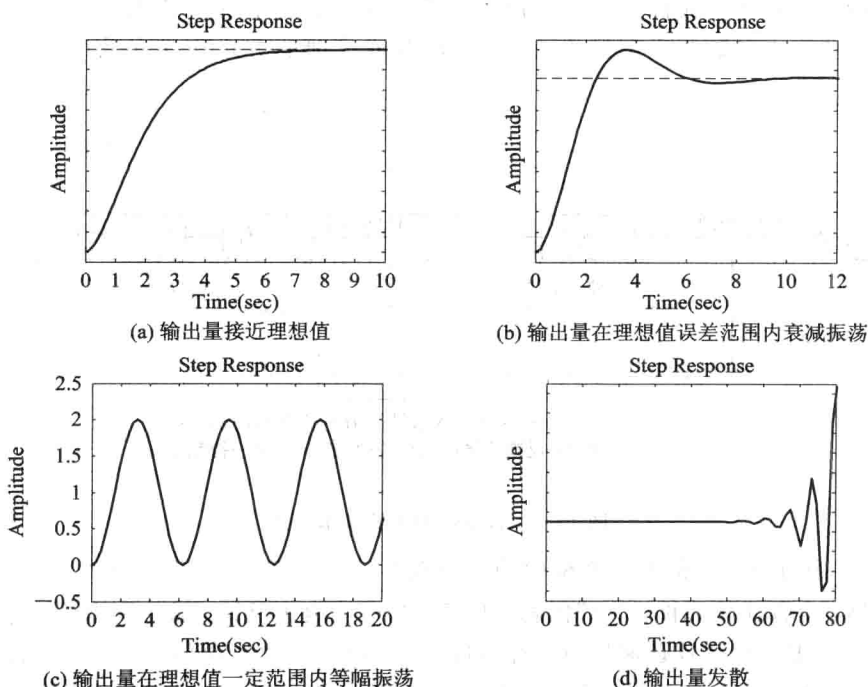


图 1-8 自动控制系统被控量变化的动态特性

统受到扰动信号作用或输入量变化后,经过一个振荡衰减的过渡过程,系统最终达到平衡状态。对于恒值稳定系统,当系统受到扰动后,经过一定时间的调整能够回到原来的期望值。对于随动系统,被控制量应能始终跟踪输入量的变化。

快速性是对过渡过程的形式和快慢提出要求,因此快速性一般也称为动态性能。在系统稳定的前提下,希望过渡过程进行得越快越好,但如果要求过渡过程时间很短,可能使动态误差过大,合理的设计应该兼顾这两方面的要求。

准确性用稳态误差来衡量。在参考输入信号作用下,当系统达到稳态后,其稳态输出与参考输入所要求的期望输出之差叫做给定稳态误差。显然,这种误差越小,表示系统的输出跟随参考输入的精度越高。当准确性与快速性有矛盾时,应兼顾这两方面的要求。

1.5 自动控制系统的术语和定义

自动控制系统一般都是反馈控制系统,主要由控制装置、被控部分、测量元件组成。控制装置是由具有一定职能的各种基本元件组成的。在不同系统中,结构完全不同的元部件都可以具有相同的职能。组成控制装置的元部件按职能分类,主要有给定元件、比较元件和校正元件和放大元件。图 1-9 所示为自动控制系统基本组成。

从图 1-9 可见,自动控制机理是:测量元件测量被控制的物理量;给定元件给出系统输入量;比较器(○)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;放大元件将比较器给出的偏差进行放大,用来驱动执行元件