

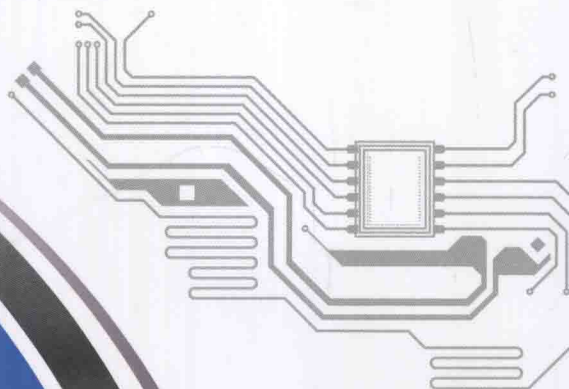
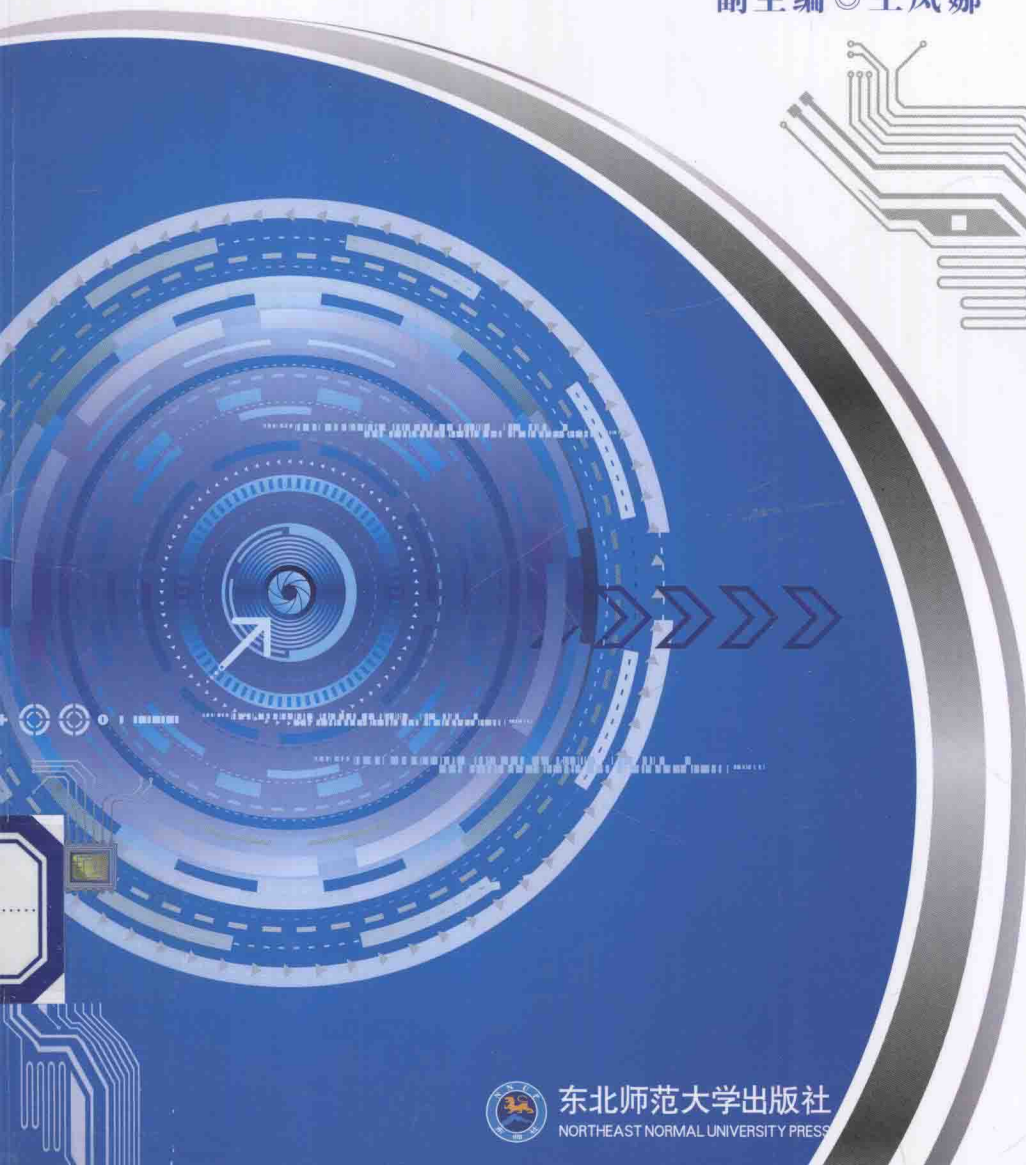


—大学教材—

自动控制原理

ZIDONG KONGZHI YUANLI

主 编◎陈秀华 陈长远 付亚坤
副主编◎王凤娜



东北师范大学出版社
NORTHEAST NORMAL UNIVERSITY PRESS

自动控制原理

主 编 陈秀华 陈长远 付亚坤

副主编 王凤娜



东北师范大学出版社

长 春

图书在版编目 (CIP) 数据

自动控制原理 / 陈秀华, 陈长远, 付亚坤主编. --长春 :
东北师范大学出版社, 2013. 5
ISBN 978-7-5602-9001-0

I. ①自… II. ①陈…②陈…③付… III. ①自动控
制理论 IV. ①TP13

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 110433 号

□策划编辑: 王春彦

□责任编辑: 王春彦 □封面设计: 魔弹文化

□责任校对: 汲 明 □责任印制: 张允豪

东北师范大学出版社出版发行
长春净月经济开发区金宝街 118 号 (邮政编码: 130117)

电话: 0431-84568070

传真: 0431-84568070

网址: <http://www.nenup.com>

电子函件: sdcbbs@mail.jl.cn

北京魔弹文化制版

北京市通县华龙印刷厂

2013 年 5 月第 1 版 2013 年 5 月第 1 次印刷

幅面尺寸: 185 mm × 260 mm 印张: 17 字数: 435 千字

定价: 35.00 元

preface 前言

自动控制原理是高等工科院校自动化专业和电子信息类专业的一门重要技术基础课程,它将抽象的数学、力学、电学等理论知识用于实际系统,如工业生产自动化、军事装备自动化、楼宇控制自动化等各个领域,对人而言,可以提高国家的综合国力。在许多人们无法接近的场合,自动控制将是唯一的技术手段。随着我国经济建设和高新技术的快速发展,市场对自动化技术应用型人才的需求量很大,为自动化学科的高速可持续发展提供了广阔的空间,同时对高校的人才培养提出了更高的要求。

本书是作者在进行多年应用型本科生教学改革实践的基础上,突出理论联系实际,学以致用为目的而编写的,全面地介绍了经典控制理论,主要内容包括控制系统的基本概念;控制系统的传递函数、方块图、信号流图;线性定常系统的时域分析法、根轨迹法、频域法;线性定常系统的校正方法;离散系统的稳定性、动态和稳态性能分析;非线性控制系统的相平面法和描述函数法。除此之外,在线性定常系统的校正方法中,还介绍了生产过程中常用的 PID 控制器。

自动控制原理的理论性强,控制对象明确,又具有实际工程的特点,为了使读者充分理解理论计算与工程求解之间的内在联系,更好地将理论知识应用于工程系统,在编写的过程中,力求做到“抽象问题具体化,数学问题工程化”,减少纯数学原因造成的困扰,建立直观、的工科理论体系结构和设计分析方法。

本书主编为:陈秀华(辽宁石化职业技术学院)、陈长远、付亚坤。其中,陈秀华编写第一章至第三章约 10 万字,陈长远编写第四章至第六章约 12 万字,付亚坤编写第七章至第八章约 8 万字。

在本书的编写中,既保持基本理论的完整性,又注重内容的实用性。在加强基本概念、基本理论和基本方法的基础上,注重控制系统的分析和设计方法的工程实用性,强调控制对象的物理背景及物理概念,对敌力于减少理论与工程应用之间的鸿沟,增加有工程应用背景的典型例题分析,使读者充分理解系统参数与性能指标之间的内在联系,由浅入深地引导读者理解和掌握经典控制理论的精髓,在不影响理论阐述的前提下,力求减少数学推导和数学证明。

编 者

第一章 自动控制系统的基本概念	1
第一节 自动控制的基本方式	1
第二节 闭环控制系统的基本组成	5
第三节 自动控制系统的分类	7
第四节 对控制系统的基本要求	8
第二章 控制系统的数学模型	12
第一节 系统数学模型概述	12
第二节 建立系统的时域数学模型	13
第三节 非线性系统的线性化	21
第四节 微分方程求解	24
第五节 建立系统的复域数学模型	24
第六节 系统的典型环节及传递函数	28
第七节 系统方块图	32
第八节 系统信号流图	42
第九节 利用 MATLAB 求解系统的传递函数	47
第三章 时域分析法	52
第一节 典型输入信号和时域性能指标	52
第二节 一阶系统时域分析	56
第三节 典型二阶系统时域分析	58
第四节 高阶系统分析	66
第五节 控制系统的稳定性分析	69
第六节 控制系统的稳态误差分析	73
第七节 PID 基本控制作用对系统性能的影响	80
第四章 控制系统的根轨迹分析法	100
第一节 根轨迹的基本概念	100
第二节 绘制根轨迹的基本条件和基本规则	101



第三节	系统根轨迹的绘制	108
第四节	参量根轨迹	111
第五节	系统性能的根轨迹分析	112
第五章	线性系统的频域分析法	117
第一节	用频率响应法概述	117
第二节	频率特性	118
第三节	对数频率特性图 (伯德图)	120
第四节	极坐标图 (奈奎斯特图)	137
第五节	奈奎斯特稳定判据	144
第六节	控制系统的相对稳定性	153
第七节	闭环系统频域性能指标	156
第八节	用 MATLAB 进行系统频域分析	160
第六章	控制系统的校正	169
第一节	校正的基本概念	169
第二节	频率法串联校正	173
第三节	控制系统的复合校正	192
第七章	非线性系统分析	198
第一节	控制系统中的典型非线性特性	198
第二节	描述函数法	201
第三节	用描述函数法分析非线性系统	208
第四节	改善非线性系统性能的方法	213
第五节	相平面分析法	217
* 第六节	非线性系统的相平面分析	223
第八章	线性离散系统的分析	228
第一节	离散系统基本概念及其应用	228
第二节	采样器和保持器	232
第三节	z 变换	236
第四节	脉冲传递函数	242
第五节	离散系统的稳定性分析	250
第六节	离散系统的稳态误差	255
第七节	离散系统的动态性能分析	258
参考文献		262

第一章 自动控制系统的基本概念

本章概述

在工程 and 科学的发展中,自动控制技术起着极其重要的作用。“自动控制原理”是自动控制技术的基础理论,是研究自动控制共同规律的理论性较强的一门技术学科。根据自动控制技术发展的不同阶段,目前自动控制原理一般分为“经典控制理论”和“现代控制理论”两大部分。经典控制理论以传递函数为基础,主要研究单输入、单输出线性定常系统的控制及综合问题。在工程实践中,经典控制理论已得到许多成功的应用,而且今后还将继续发挥其理论的指导作用。现代控制理论是 20 世纪 60 年代初为适应宇航技术发展需要而出现的新理论。它是以状态方程为基础,主要研究具有高性能的多输入、多输出、变参数系统的控制和综合问题。现代控制理论能解决经典控制理论难以解决的一些问题,而且随着计算机技术和现代应用数学研究的发展,目前现代控制理论正向大系统和人工智能理论等方面深入发展。

教学重点

- 自动控制的基本方式
- 闭环控制系统的基本组成
- 自动控制系统的分类
- 对控制系统的基本要求

第一节 自动控制的基本方式

自动控制,就是在没有人的直接参与的情况下,利用控制装置使某种设备、工作机械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或数值运行或变化。通常,把控制的装置称为控制器;把被控制的设备或工作机械称为被控对象;被控对象内要求实现自动控制的物理量称为被控量或系统的输出量;控制器和被控对象的总体,称为自动控制系统。在控制系统中,把影响系统输出量的外界输入称为系统的输入量。系统的输入量,通常指两种,即给定输入量和扰动输入量。给定输入,又称为参考输入,它决定系统输出量的变化规律或要求值。扰动输入是系统不希望但又客观存在的外作用。例如电源电压的波动、环境温度、压力的变化、电动机拖动负载的变化等,都是实际系统中存在的扰动作用。扰动



输入影响给定输入对系统输出量的控制。

一、闭环控制

闭环控制是指系统输出端与输入端之间存在反馈回路,或者说,系统的输出量直接或间接地参与了系统的控制作用。

图 1-1 所示的直流电动机调速系统,是闭环控制的一个例子。实际上,它是在开环调速系统的基础上引入一台测速发电机(TG)构成的。测速发电机检测系统输出量即转速 n 并把它转换成与给定电压 u_g 物理量相同的反馈电压 u_f 。反馈电压 u_f 与给定输入电压 u_g 相比较后产生一偏差电压 $\Delta u (=u_g - u_f)$,再经过放大器放大后去控制直流电动机的转速。当电位器滑动端处在某一位置时,电动机就以一个相对应的希望转速值带动生产机械运转。当出现外部或内部扰动时,例如,功率放大器的输出电压下降,或者电动机的拖动负载突然增加,电动机的转速就会下降。电动机转速的变化会被测速发电机检测出来,相应地使反馈电压 u_f 的值下降。这时,反馈电压与给定输入电压比较后使偏差电压值 Δu 增大,经放大器放大后,电动机电枢电压增加使转速回升,从而减小或消除了由于系统外部或内部的各种扰动所造成的输出量转速的偏差。

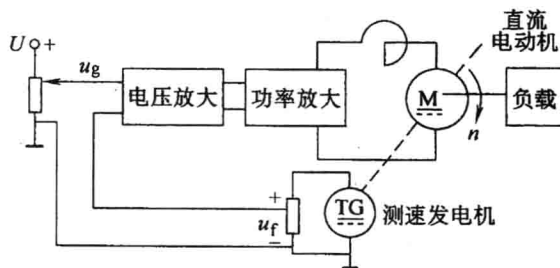


图 1-1 直流电动机闭环调速系统

从上述分析看出,闭环控制实际上是根据负反馈原理,按偏差量进行控制的。系统中无论是内部还是外部扰动引起输出量偏离期望值而产生偏差时,就会有相应的控制作用产生去消除偏差,使输出量重新恢复到希望值上。因此,闭环控制也称为反馈控制或偏差控制。闭环控制系统框图如图 1-2 所示。

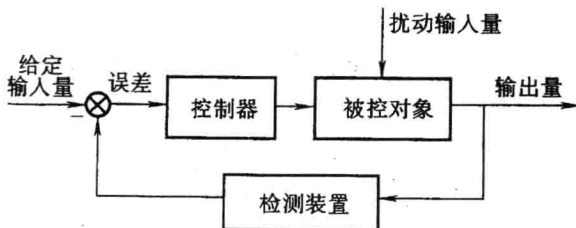


图 1-2 闭环控制系统框图



闭环控制系统广泛地应用于各工业部门。图 1-3 所示的发电机励磁控制系统,是闭环控制的又一实例。

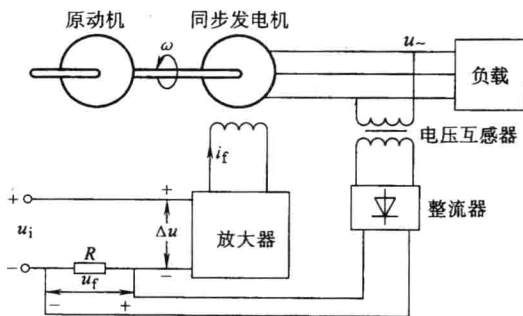


图 1-3 发电机励磁控制系统

图 1-3 中,三相交流同步发电机由原动机带动作恒速旋转,并向负载供给电力。系统的被控对象是发电机,系统的输出量是发电机端电压 $u_{\sim}$ 。电压 u_i 是系统的给定输入量。电压互感器检测发电机端电压 $u_{\sim}$,经整流后获得与发电机端电压 $u_{\sim}$ 成比例的直流反馈电压 u_f 。输入电压 u_i 与反馈电压 u_f 相减后产生偏差电压 Δu , Δu 经放大器放大去控制发电机的励磁电流。通过改变发电机的励磁电流去控制发电机的机端电压,使机端电压在系统受到各种干扰时,例如负载波动,都能使它维持在输入电压 u_i 对应的希望值上。

二、开环控制

开环控制是指系统输出端与输入端之间不存在反馈回路,或者说,系统的输出量不对系统的控制产生任何作用的控制过程。

图 1-4 所示的直流电动机调速系统是开环控制的一个例子。电动机拖动生产机械或其他部件运转,生产机械是被控对象,转速 n 是系统的被控量或输出量。电压 u_g 是系统的给定输入量。当改变电位器滑动端的位置时,相应地改变了给定输入量和电动机电枢两端的电压。由于电动机具有恒定的励磁电流,因此,随着电枢电压不同,电动机便以不同的转速带动生产机械运转。对应电位器滑动端的一个固定位置,换句话说,一个固定的给定输入量,生产机械就以一个相对应的转速要求值运转,从而达到了控制目的。

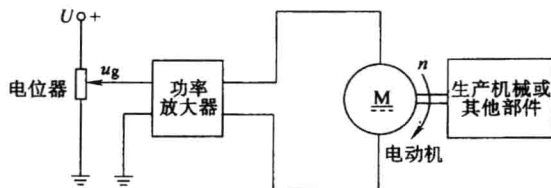


图 1-4 直流电动机开环调速系统

可以看出,上述控制系统的输出端与输入端之间没有反馈回路。系统只是根据给定输入量 u_g 进行控制,而输出量 n 在整个过程中对控制作用都没有影响。由定义可知,它属于



开环控制的系统。开环控制系统的职能框图可用图 1-5 表示。



图 1-5 开环控制系统职能框图

值得指出,当出现外部扰动输入或内部扰动作用时,若没有人的直接干预,开环控制系统的输出量将不能按照给定输入量所对应的希望值或状态运行。例如,在上例中当输入量 u_g 不变时,若功率放大器的供电电压突然下降或电动机负载突然上升,电动机的转速即系统的输出量都会下降。输出量的下降使它偏离了给定输入量 u_g 对应的期望值。这时,若要维持原输出值,操作人员就必须重新调整电位器滑动端位置,增加给定输入电压值后才能达到。

三、复合控制

复合控制是开环和闭环控制相结合的一种控制方式。实际上,它是在闭环控制基础上再引入一条由给定输入信号或扰动作用所构成的顺馈通路。顺馈通路相当于开环控制。复合控制通常有两种典型结构,分别称为按输入信号补偿结构和按扰动作用补偿结构,如图 1-6 所示。

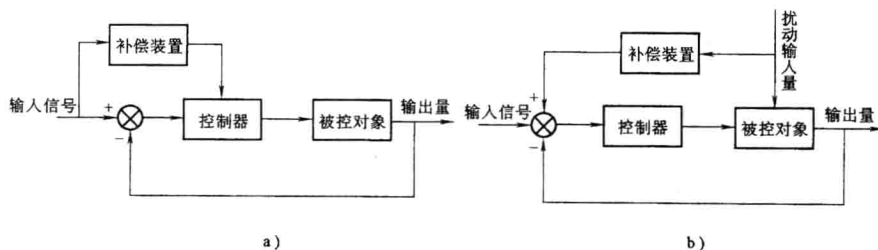


图 1-6 复合控制结构框图

a) 按输入信号补偿结构; b) 按扰动作用补偿结构

按输入信号补偿的复合控制系统,其补偿装置提供了一顺馈控制信号,此信号与原控制信号一起对被控对象进行控制以提高系统跟踪输入信号的能力(精度)。按扰动作用补偿的复合控制系统,其补偿装置利用干扰信号产生一控制作用以补偿或抵消干扰信号对被控量的影响,增强系统的抗干扰能力。

上面介绍了三种基本的控制方式。实际上目前许多新型的控制系统都是在这三种基本的控制方式上发展而成的。对于这三种控制方式,一般来说,开环控制的结构简单、成本低廉、调试容易,但控制精度较差,抗干扰能力不强,只适用于性能要求不高的控制系统;闭环控制的结构较复杂,成本相对较高,调试较困难,但具有自动修正系统输出量偏差的能力,能克服系统内部元部件参数变化或外界扰动所引起的误差,其控制精度较高。闭环控制系统



最广泛地应用于工业的各个部门;若要求实现较复杂且精度更高的控制任务,可采用复合控制结构或其他新型的控制策略。

第二节 闭环控制系统的基本组成

根据被控对象和使用的元部件不同,闭环控制系统有各种不同的形式,但是就其职能来看,一般均由以下的基本环节组成。

1. 被控对象

是指要进行控制的设备或过程。

2. 测量装置

对系统输出量进行测量。因为测量元件的精度直接影响系统精度,所以应尽可能采用精度高的测量元件和合理的测量线路。

3. 比较环节

对系统输出量与输入量进行比较,产生偏差信号,起信号的综合作用。在大多数控制系统中,比较环节常常是和测量环节或其线路结合在一起的,往往并不单独存在。

4. 给定环节

产生系统给定输入信号。给定环节的精度对系统的控制精度会有较大影响,因此应采用高精度元件构成给定环节。

5. 放大环节

对偏差信号进行放大并进行能量形式的转换,使之适合于控制执行机构工作的信号。

6. 执行机构

对被控对象进行控制的装置或元件。

7. 校正装置

用于改善系统的性能。校正环节可以加在由偏差信号至输出信号之间的通道内。这种校正方式,又称为串联校正;校正装置也可以加在某一局部反馈通道内,这种校正方式,也称为反馈校正或并联校正。某些情况下,可以同时应用串联校正及并联校正以进一步提高控制系统的性能。

由上述基本环节组成的闭环控制系统职能框图如图 1-7 所示。图中,系统的基本元部件用框表示;信号的传输方向,用箭头表示;信号的综合,用带“ $\times$ ”的圆圈表示,“ $+$ ”号表示两信号相加,即正反馈。正反馈只能在系统中的某局部环节间使用。“ $-$ ”号表示两信号相减,即负反馈。信号从输入端沿箭头方向到达系统输出端的传输通道,称它为前向通路或正向通道。系统输出量经由测量装置反馈到系统输入端的传输通道,称它为主反馈通路或主反馈通道,而其他的反馈通道,称为副反馈或局部反馈通道。只有一个反馈通道的系统,称为单回路系统,有两个以上反馈通道的系统,称为多回路系统。

例 1-1 根据图 1-8 所示的电动机速度控制系统工作原理图,完成:

(1) 将 a 、 b 与 c 、 d 用线连接成负反馈方式。

(2) 画出系统框图。

解:(1) 负反馈连接方式应为: $a \leftrightarrow d$ 相接; $b \leftrightarrow c$ 相接。因为,放大器输入端的电压应为给定电压与反馈电压两者之差,产生偏差电压,从而构成负反馈产生控制作用。根据基尔霍夫

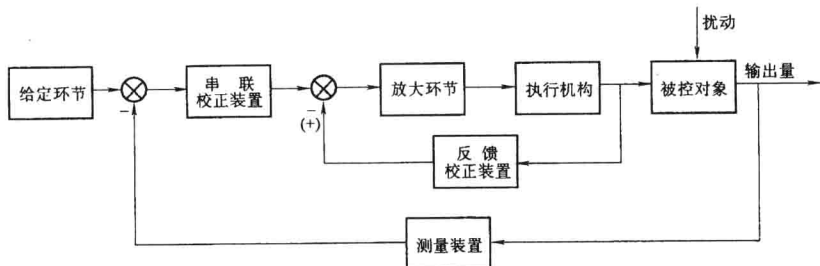


图 1-7 典型闭环系统框图

回路电压定律,应 $a \leftrightarrow d$ 相接; $b \leftrightarrow c$ 相接。

(2) 首先,系统中的每个部件各用一方框表示,各方框内写入该部件的名称;然后,根据系统信号的流向,方框间用带箭头的线段连接。图 1-8 所示系统的工作原理框图如图 1-9 所示。

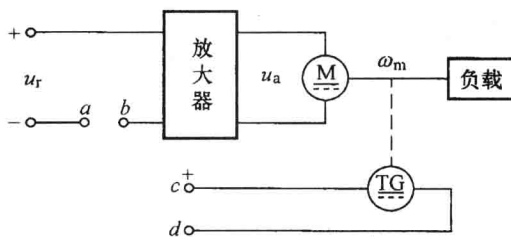


图 1-8 电动机速度控制系统工作原理图

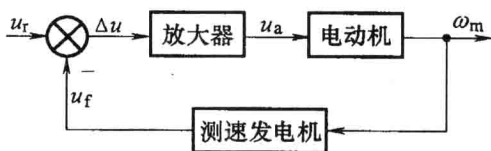


图 1-9 电动机速度控制系统的工作原理框图

例 1-2 图 1-10 为工业炉温自动控制系统的工作原理图。分析系统的工作原理,指出被控对象、被控量和给定量,画出系统框图。

解: 加热炉采用的是电加热的方式。电热器产生的热量与调压器输出电压 u_e 的平方成正比, u_e 增加,炉温就上升,反之,炉温就下降, u_e 的高低与调压器滑动触点的位置有关,而该滑动触点由可逆转的直流电动机驱动。

炉子的实际温度用热电偶测量,测量电压经放大后的输出电压为 u_f 。 u_f 作为系统的反馈电压与给定电压 u_r 进行比较,得出偏差电压 u_e ,经电压放大器、功率放大器放大后,作为电动机的电枢电压驱动电动机转动。

当炉温等于某个给定电压相对应的期望温度值(T)时,反馈电压 u_f 等于给定电压 u_r 。此时,偏差电压 $u_e = u_r - u_f = 0$,电动机的电枢电压也为 0,可逆电动机不转动,调压器的滑动

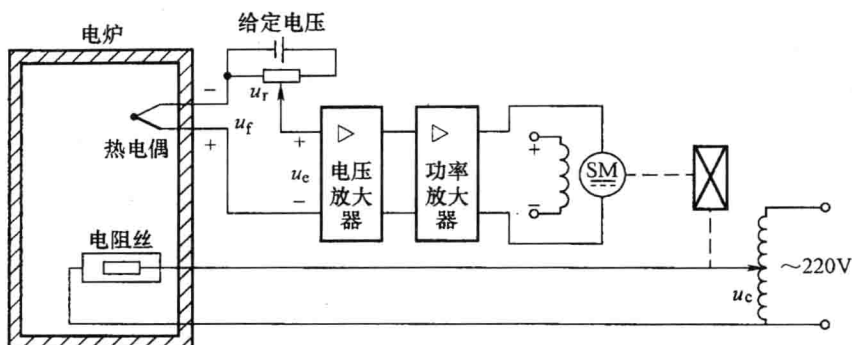


图 1-10 工业炉温控制系统工作原理图

出触点停留在某个合适的位置上,使 u_c 保持在相对应的电压值上。这时,炉子散失的热量正好等于从加热器吸取的热量,形成稳定的热平衡状态,炉温就保持在与给定电压 u_r 对应的期望温度值(T)上。

当炉膛温度由于某种原因突然下降(例如炉门打开造成的热量流失)时,则反馈电压 u_f 也会跟着下降,由于给定电压 u_r 不变,此时,偏差电压不为 0,电动机的电枢电压也不为 0,电动机的转动带动滑动触点上移使加热电压 u_c 上升,使炉膛温度回升,直至炉膛温度的实际值等于期望温度值(T)为止。

系统中,加热炉是被控对象,炉温是被控量(又称系统输出量),给定量(又称系统输入量)是由给定电位器设定的电压 u_r (表征炉温的期望值)。

系统中的每个部件各用一方框表示,各方框内写入该部件的名称,根据系统信号的流向,方框间用带箭头的线段连接。工业炉温控制系统框图如图 1-11 所示。



图 1-11 工业炉温控制系统框图

第三节 自动控制系统的分类

控制系统的分类方法不少。但是,通常人们很难确切地对自动控制系统进行分类,一是因为同一系统按不同的分类方法,其属性不同;二是由于控制技术发展很快,各式各样的新系统不断产生和发展。这里仅介绍常见的两种分类方法。

一、按给定输入信号特征分类

(1) 恒值系统 给定输入为恒值,要求系统在任何扰动作用下,系统输出量能以一定精



度接近给定希望值的系统,称为恒值系统。如生产过程中的温度、压力、流量、液位高度、电机转速等自动控制系统属于恒值系统。

(2) 随动系统 给定输入量是未知的时间函数,要求系统输出量跟随输入量变化的系统,称为随动系统。如雷达天线跟踪系统、卫星跟踪、自动火炮自动控制系统等属于随动系统。

(3) 程序控制系统 给定输入量是按照已知的时间函数变化的系统,称为程序控制系统。如程序控制车床、热处理炉温度的升温、保温、降温过程等都是按照预先设定的规律进行控制的,它们都属于程序控制系统。

二、按使用的数学模型分类

1. 线性系统和非线性系统

(1) 线性系统 系统输入量与输出量之间的关系可用线性微分方程或线性差分方程描述的系统。若方程的系数与时间 t 无关即为定常数,则该系统又称为线性定常系统。若方程的系数值随时间 t 变化而变化,则称该系统为线性时变系统。

线性系统有两个重要特性:叠加性和齐次性。

1) 叠加性 当系统同时存在几个输入量作用时,其输出量等于各输入量单独作用时所产生的输出量之和。

2) 齐次性 当系统的输入量增大或缩小若干倍时,系统输出量也按同一倍数增大或缩小。齐次性又称为均匀性。

(2) 非线性系统 系统输入量与输出量之间的关系可用非线性微分方程或非线性差分方程描述的系统。

应注意,在自动控制系统中,即使只含有一个非线性环节,这一系统也是属于非线性的;目前对于非线性系统的理论研究远不如线性系统那样完整和完善;严格来说,任何物理系统的特性,都是非线性的,但在一定的条件下若可以将某些非线性特性线性化,近似地用线性微分方程去描述,这样就可以按照线性系统来处理。

2. 连续系统和离散系统

(1) 连续系统 若系统中各元件的输入量和输出量均为时间 t 的连续函数时,称该系统为连续系统。连续系统的运动规律可用微分方程描述,系统中各部分信号都是模拟量。

(2) 离散系统 系统中某一处或几处的信号是以脉冲系列或数码的形式传递的系统,称为离散系统。离散系统的运动规律可用差分方程描述。计算机控制系统就是典型的离散系统。

第四节 对控制系统的基本要求

在分析和设计系统时,需要有评价系统的标准,这个标准通常用性能指标来表示。不同的被控对象,不同的控制任务,对性能的要求往往有所不同。但是,总体上来说,对任何控制系统的基本要求,集中体现在系统性能的“稳定性”“动态特性”和“稳态特性”三个方面,或简称为“稳”“快”“准”。



一、动态特性

稳定的控制系统,当受到阶跃输入信号作用后,由于系统内部机械部件的质量和惯性的作用,内部电路中存在的电容、电感等储能元件的原因,使系统的输出要经历一过程才能达到某一稳定值。系统输出随时间 t 变化的这一过程称为系统的响应过程。响应过程常常又以调节时间 T_s (或称过渡过程时间)为界,分为动态过程(又称暂态过程)和稳态过程(又称静态过程),如图 1-12 所示。动态特性就是反映系统在动态过程中,跟踪输入或抑制干扰的能力。动态特性好的系统,表现为动态过程具有较好的平稳性、调节时间短且振荡次数少。

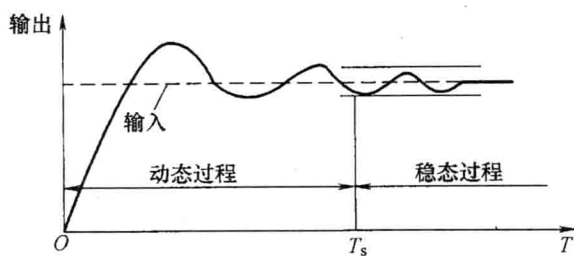


图 1-12 稳定系统的典型阶跃响应

二、稳定性

控制系统“稳定性”的定义,有多种表达。较通常的表达是,一个处于静止或某一平衡工作状态的系统,在受到任何输入(给定信号或扰动)作用时,系统的输出会离开静止状态或偏离原来的平衡位置;当作用消除后,若系统能回到原来的静止状态或平衡位置,则称系统是稳定的。否则称系统是不稳定的。

对于线性定常系统,也可表达为,在阶跃信号作用下,若系统输出有一个确定值相对应,则称系统是稳定的;若系统输出值越来越大,则称系统是不稳定的,如图 1-13 所示。

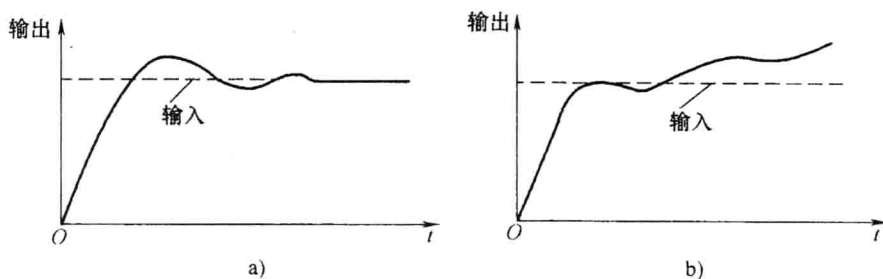


图 1-13 线性定常系统稳定性

a) 稳定系统; b) 不稳定系统

稳定性,是系统能够工作的前提条件,也是对系统最起码的要求。要想使系统能正常工作,系统必须是稳定的,而且往往要求有一定的“稳定裕量”。

三、稳态特性

系统在过渡过程结束后,其输出量的状态值一般用稳态误差来描述。稳态误差的大小反映



了系统控制的精确程度。稳态误差值越小的系统,说明系统的控制精度越高,稳态特性越好。

值得注意的是,对于同一个系统体现稳定性、动态特性和稳态特性的稳(定)、快(速)、准(确)这三个要求是互相制约的。提高响应的快速性,可能会引起系统的强烈振动;改善系统相对稳定性,则又可能会使控制过程时间延长,反应迟缓以及精度变差;提高系统的稳态精度,则可能会引起动态特性(平稳性及过渡过程时间)变坏。分析和解决这些矛盾,将是本学科讨论的重要内容。

每章一练

1-1 有一水位控制装置如图 1-14 所示。试分析它的控制原理,指出它是开环控制系统还是闭环控制系统?说出它的被控量、输入量及扰动输入量是什么?绘制出其系统框图。

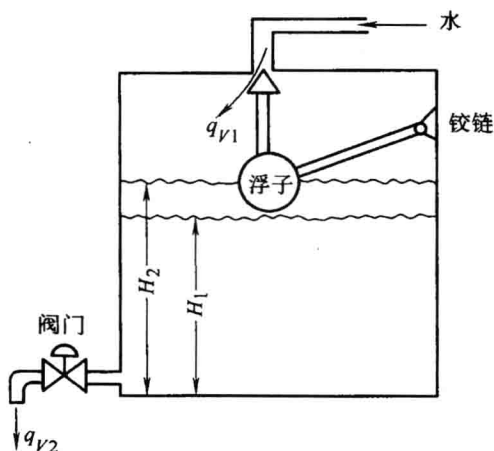


图 1-14

q_{v1} —输入流量 q_{v2} —输出流量 H_1 —实际水位 H_2 —希望水位

1-2 某生产机械的恒速控制系统原理如图 1-15 所示。系统中除速度反馈外,还设置了电流正反馈以补偿负载变化的影响。试标出速度负反馈、电流正反馈的信号的正、负号并画出框图。

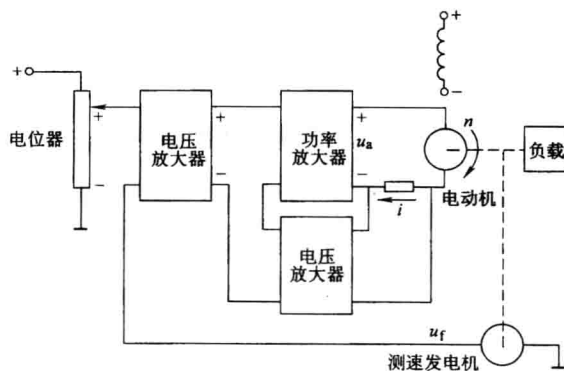


图 1-15



1-3 图 1-16 是船舶驾驶角位置跟踪系统的原理图。给定值 θ_r 表示命令的角位置, 被控量 θ_c 为船舵角位置。说明系统的工作原理, 画出系统框图。

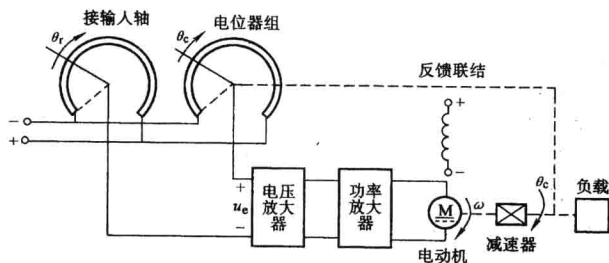


图 1-16

1-4 两台汽轮发电机组转速调节系统如图 1-17 所示。试分析它们的控制原理, 并指出它们是开环控制还是闭环控制系统? 画出系统框图。

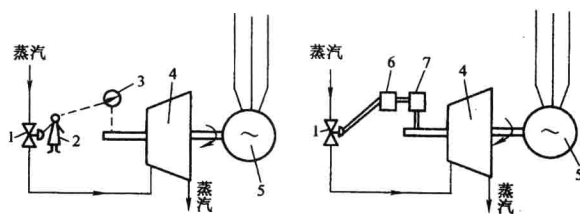


图 1-17

- 1—进气阀 2—操作人 3—转速表 4—汽轮机
5—同步发电机 6—调节器 7—转速检测元件