



高等学校“十一五”规划教材

自动控制原理

Zidong Kongzhi Yuanli

主 编 常俊林 郭西进
副主编 贾存良 孙晓燕

中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

高等学校“十一五”规划教材

自动控制原理

主 编 常俊林 郭西进
副主编 贾存良 孙晓燕

中国矿业大学出版社

内 容 提 要

本书系统地介绍了自动控制的基本原理、典型方法及应用实例。主要包括：控制系统的建模，线性系统的时域分析法、根轨迹分析法、频域分析法、线性系统的经典校正方法以及非线性系统的描述函数与相平面分析方法。同时每章还利用 MATLAB 进行了系统分析与设计。本书力求以深入浅出的方式阐述抽象的理论知识，并强化工程应用背景。

本书可作为普通高等院校自动化、电气工程及其自动化、电子信息工程、机械和化工过程自动化等专业的教材，也可供相关工程人员参考和作为报考自动化类专业研究生的复习资料。

图书在版编目(CIP)数据

自动控制原理/常俊林,郭西进主编. —徐州:
中国矿业大学出版社,2010.8
ISBN 978 - 7 - 5646 - 0705 - 0
I. ①自… II. ①常…②郭… 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(2010)第 134590 号

书 名 自动控制原理
主 编 常俊林 郭西进
责任编辑 仓小金
责任校对 何晓惠
出版发行 中国矿业大学出版社
(江苏省徐州市解放南路 邮编 221008)
营销热线 (0516)83885307 83884995
网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com
排 版 中国矿业大学出版社排版中心
印 刷 徐州中矿大印发科技有限公司
经 销 新华书店
开 本 787×1092 1/16 印张 18.5 字数 462 千字
版次印次 2010 年 8 月第 1 版 2010 年 8 月第 1 次印刷
定 价 25.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

前 言

自动化技术是当今举世瞩目的高技术之一,已广泛应用于制造业、农业、交通、航空航天、国防、生物工程、智能服务等众多产业部门,对人们的生产和生活产生了极大的影响。“自动控制原理”作为自动化技术领域的基础理论,是专门研究有关自动控制系统的基本概念、基本原理和基本方法的一门课程,是工科院校自动化类专业的核心专业基础课程。

目前,我国自动化技术发展非常迅猛,企业对从事自动化专业技术人员的技术水平要求也越来越高,这就使得我们的教学内容必须适应新的发展需求。为适应新时代创新人才培养的需要,使学生在牢固掌握理论基础之上能够得到良好的工程实践锻炼,具有一定的分析、研究和解决实际问题的能力,必须改革教学手段,不断地补充和完善教学内容。为此,我们根据国内外自动控制理论与技术的发展,参考国内外有关教材,总结多年来的教学经验,修订了教学大纲,组织编写了本教材。

本书是在中国矿业大学信息与电气工程学院历年所用教材基础之上考虑到目前控制理论教材的发展趋势而编写的,也是作者多年教学经验和科研成果的总结。从编写风格上突出了以下特点:

(1) 顺应科技发展的潮流,将当前国际上自动控制领域的计算机辅助设计首选软件MATLAB融入教材的编写中,用于系统的分析、计算、设计与仿真。便于读者直观地理解相关结论,同时又可掌握控制工程设计的必备软件。

(2) 自动控制理论数理概念强,要求读者有较好的数学基础,教材努力将数学描述的严谨性与物理系统的直观性相结合,理论联系实际,注重工程应用背景。并力求用朴实的语言深入浅出地讲述抽象深奥的理论知识,做到通俗易懂。

(3) 精心选择了大量例题和课后习题,以便于读者自学或考研复习。

本书主要讲述经典控制理论,共七章内容。其中前六章是线性定常系统的分析与综合,第七章介绍了非线性系统的常用分析方法。各章编写分工如下:第一章、第二章、第四章由常俊林副教授编写,第三章由贾存良教授编写,第五章、第六章由郭西进教授编写,第七章由孙晓燕副教授编写。李帅老师参与了部分章节的编写,陈颖副教授详细审阅了全书,并提出了宝贵意见。本书在编写过程中得到了李明教授和中国矿业大学出版社褚建萍老师、仓小金老师、何晓惠老师的大力支持和帮助,在此表示衷心的感谢。

由于编者水平有限,书中存在的不足之处在所难免,恳请读者提出宝贵意见,以便进一步修订和完善。

编者

2010年8月

目 录

第一章 绪论	1
第一节 自动控制系统的基本概念.....	1
第二节 自动控制系统的工作原理.....	2
第三节 控制系统示例.....	7
第四节 自动控制系统的分类.....	9
第五节 自动控制系统的基本要求和典型输入信号	10
第六节 自动控制理论的发展简史	13
习题	15
第二章 控制系统的数学模型	18
第一节 数学基础——拉普拉斯变换及其应用	18
第二节 控制系统微分方程的建立	28
第三节 传递函数	35
第四节 控制系统建模示例	41
第五节 控制系统的方框图及其等效变换	46
第六节 信号流图	58
第七节 控制系统建模的 MATLAB 方法	63
习题	70
第三章 线性系统的时域分析法	74
第一节 典型输入信号和线性系统的时域性能指标	74
第二节 一阶系统的时域分析	76
第三节 二阶系统的时域响应分析	79
第四节 高阶系统的时域分析	92
第五节 线性系统的稳定性分析	96
第六节 控制系统的稳态误差.....	103
第七节 线性系统时域分析的 MATLAB 方法.....	111
习题.....	112

第四章 线性系统的根轨迹法	116
第一节 根轨迹的基本概念.....	116
第二节 绘制根轨迹的基本规则.....	119
第三节 特殊根轨迹.....	135
第四节 控制系统的根轨迹分析.....	139
第五节 线性系统根轨迹分析的 MATLAB 方法.....	145
习题.....	150
第五章 线性系统的频率响应法	152
第一节 频率特性.....	152
第二节 典型环节的频率特性.....	154
第三节 典型环节的对数频率特性.....	158
第四节 系统开环频率特性的绘制.....	164
第五节 基于频率特性的稳定性判据	177
第六节 稳定裕度.....	186
第七节 闭环频率特性与时域性能指标.....	191
第八节 开环对数频率特性与时域指标.....	194
第九节 线性系统频域分析的 MATLAB 方法.....	196
习题.....	197
第六章 线性系统的校正	202
第一节 校正的概念.....	202
第二节 串联校正.....	204
第三节 反馈校正.....	226
第四节 复合校正.....	237
第五节 PID 控制器的设计.....	240
习题.....	245
第七章 非线性控制系统分析	248
第一节 典型非线性环节及非线性系统特性.....	248
第二节 描述函数法.....	251
第三节 相平面法.....	266
第四节 相轨迹的作图法.....	272
第五节 非线性系统的相平面分析法.....	275
习题.....	285
参考文献	288

第一章 绪 论

信息化代表着先进的生产力,是当今时代发展的大趋势,信息化水平已经成为衡量一个国家发达程度的重要标志之一。为传统产业插上信息化翅膀的自动化技术是我国今后重点发展的一个工程技术领域。自动控制理论是实现自动化技术的重要基础。所谓自动控制,是指在没有人直接参与的情况下,利用外加的设备或装置(称为控制器),使机器、设备或生产过程(称为被控对象)的某个工作状态或参数(称为被控变量)自动地按照预定的规律运行。读者现在可能并不理解自动控制的复杂细节,但却从现代生活中的洗衣机、电冰箱、空调等生活用品中可以感受到自动控制给人们带来的便利。随着科学技术的发展,人们的生活对自动控制系统的依赖程度越来越大。随着物联网技术的发展,智能家居得到快速推进。在不久的将来,回家前先发条短信,浴缸里就能自动放好洗澡水,电饭锅就开始自动做饭;家中开关只需一个遥控板就可全部控制,再也不用在寒冷的冬天下床关灯;家里漏气或漏水,手机短信会自动报警。在交通领域,无人驾驶的智能汽车是一种正在研制的新型高科技汽车,这种汽车不需要人去驾驶,人们只需舒服地坐在车上享受高科技的成果。这些系统在不需人工干预的情况下,自动执行某些功能,这对人们的生活产生了巨大的影响,自动控制的成就令人类着迷和兴奋。

“自动控制原理”是一门讲授自动控制基础知识的专业基础课。它不是研究某一个或者某一类被控变量的控制问题,而是研究自动控制系统的普遍性问题。

“自动控制原理”首先研究自动控制系统的组成和基本结构,然后建立各元件和控制系统的数学模型。在数学模型的基础上计算系统中各个信号之间的作用和关系,分析自动控制系统能否实现自动控制功能,研究怎样才能使自动控制系统达到更好的控制效果。所以,“自动控制原理”是一门理论性和工程意义都很强的课程。

第一节 自动控制系统的基本概念

一、被控对象

被控对象是控制系统要进行控制的受控客体。它可以是一种设备,也可以是某种过程,比如化学反应过程、经济学过程或者生物学过程。

二、被控变量

被控变量是一种被测量和被控制的量值或状态。所谓“控制”,其含义是使被控变量按照一定(期望)的规律变化。在工业技术领域,大多是对各种物理量的控制。被控制的物理量主要包括运动学、电学、热学和声学等方面的量,如物体的位置、转角、线速度、角速度、线加速度、角加速度、力、力矩、电压、电流、温度、压力、流量和湿度等。下面通过两个例子来说明“被控对象”与“被控变量”。

① 机械手的控制。图 1-1 是一个六自由度机械手的示意图。在生产线上,机械手可以完成各种动作,如从一个位置拿起工件放置到另一个位置。由图可以看出,机械手的臀部有 3 个关节,它们的夹角分别是 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$,机械手的腕部有 2 个关节,它们的夹角分别是 α_4, α_5 ,机械手的手爪有 1 个关节,它的夹角是 α_6 。令 $\alpha_1 \sim \alpha_6$ 这 6 个夹角按预定的规律变化,机械手就可以完成预定的动作。所以,机械手是被控对象,对机械手的控制就是使 6 个被控变量 $\alpha_1 \sim \alpha_6$ 按预定的规律变化。

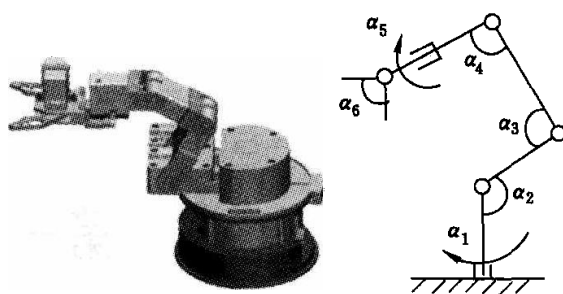


图 1-1 自由度机械手及其示意图

② 退火炉的温度控制。退火炉是一种换热设备,主要用于大型碳钢、合金钢零件的退火。退火是将金属缓慢加热到一定温度,保持足够时间,然后以适宜速度冷却(通常是缓慢冷却)的一种金属热处理工艺。目的是使经过铸造、锻轧、焊接或切削加工的材料或工件软化,改善塑性和韧性,使化学成分均匀化,去除残余应力,或得到预期的物理性能。退火炉内的

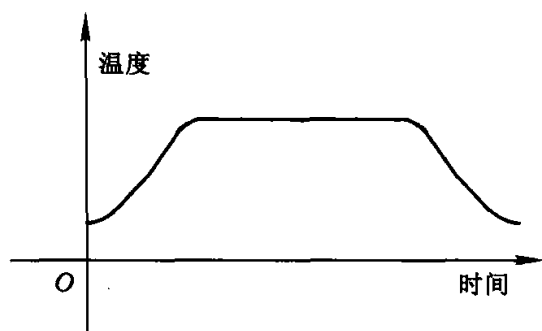


图 1-2 退火炉的温度变化曲线

的温度应按图 1-2 中曲线所示的规律变化。将退火炉作为被控对象,炉内的温度是被控变量。当外界环境温度改变对炉内温度产生干扰时,炉内温度仍应该按预定的规律变化,不应受到干扰的影响。

三、系统

系统是由一些对象互相作用,互相制约,组成一个具有一定运动规律的整体。广义而言,系统不限于物理系统,还包括生物学、社会学、经济学

等各领域的系统。控制器和被控对象构成一个相互作用的整体,称为控制系统。

四、扰动

扰动是对系统的输出量(被控变量)产生不利影响的信号。如果扰动产生在系统的内部,称为内部扰动;反之,当扰动产生在系统的外部时,则称之为外部扰动。外部扰动是系统的一种输入量。

第二节 自动控制系统的工作原理

如果一个控制系统中是由人来操作的,称该控制系统为人工控制系统;如果一个系统仅由机器构成,则称该系统为自动控制系统。自动控制系统的种类繁多,其功能和组成也是多种多样的,就其工作原理来说,可分为开环控制、闭环控制和这两种控制的组合——复合控制。相应的控制系统称为开环控制系统、闭环控制系统和复合控制系统。

一、开环控制系统

构建一个控制系统时,首先要明确哪一个量是被控变量。如,机床的转速、恒温箱内的温度、汽车的行驶速度和方向等。应根据实际的工程需要来确定被控变量。为了使被控变量发生变化,需要有一个装置对被控对象施加作用,这个装置称做执行装置或执行元件。如机床上装有电动机,电动机带动机床的旋转轴转动,使转速发生变化;恒温箱内有电阻丝,电

阻丝产生热量,使恒温箱内的温度发生变化;汽车内的发动机提供行驶所需要的动力,转向操纵机构提供转向所需要的动力。执行元件作用时往往需要较大的能量,因此需要有一个放大器为执行元件提供能量。这样,被控变量、被控对象、执行元件、放大器之间的作用关系可以用图 1-3 表示。

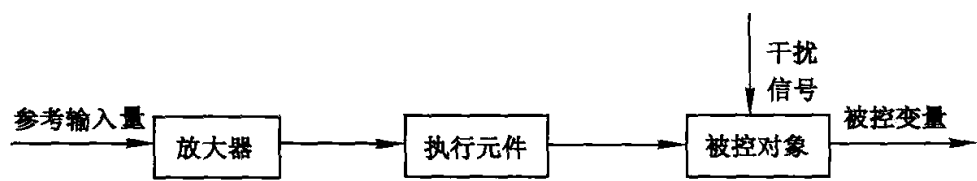


图 1-3 开环控制系统方框图

由图 1-3 可见,系统的输出量对控制作用没有影响,控制装置和被控对象之间只有顺向作用而没有反向联系,这类系统被称为开环控制系统。洗衣机就是一个开环控制的实例。在洗衣机中,浸湿、洗涤和漂清过程是按程序设定的顺序进行的,洗衣机不必对输出信号,即衣服的清洁程度进行测量。图 1-4 给出了一个电热炉温度开环控制的原理图。该控制系统要求炉温维持在给定值附近一定的范围内。给定炉温所要求的期望值(给定值,参考输入量)后,根据经验和实验数据,把调压器滑头置于某一固定位置上,接通电源后,电炉通过电阻丝加热。由于电源的波动以及炉门开闭的次数不同,炉内实际温度与期望的温度会出现误差,有时误差可能较大。但该系统不能根据误差自动调整调压器滑头的位置,即通过改变电阻丝的电流来消除温度误差,也就是说输出量对系统的控制作用没有任何影响。

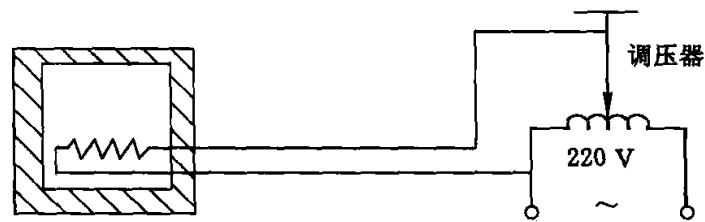


图 1-4 电热炉的开环控制原理图

开环控制有两种形式:一种形式是按给定值控制的开环控制,图 1-3 就是这种形式的开环控制;另一种形式是按干扰补偿的开环控制,如图 1-5 所示。图 1-5 所示系统对干扰进行测量,利用测量得到的干扰值修正控制作用,补偿干扰对被控变量的影响。从干扰作用端至输出端,也仅有顺向作用而无反向联系,因此该系统也是开环控制系统。这种控制方式使用的前提条件是干扰能够被测量到。

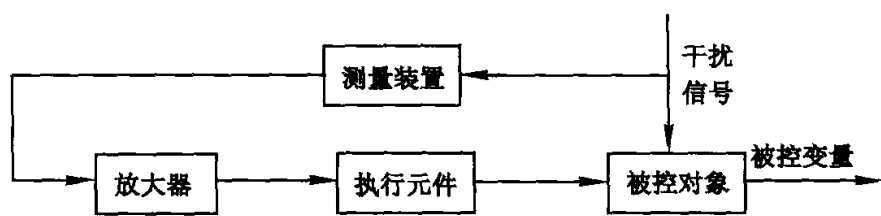


图 1-5 按干扰补偿的开环控制系统

开环控制是一种结构简单、成本低的控制方式,一般用于受干扰影响不大、控制精度要

求不高的场合。如电风扇、自动售货机、自动洗衣机、产品自动生产流水线以及用于交通指挥的红、绿灯转换等。

二、闭环控制系统

1. 反馈的基本原理

图 1-5 所示的按干扰补偿控制的开环控制方式虽然能具有补偿干扰影响的能力,但其使用范围具有很大的局限性。首先,其所能补偿的干扰必须是方便测量的,实际工作环境存在的干扰可能是多样的,并且有些是无法预知和测量的。其实,即便是在干扰能够测量的情况下,受控制装置的物理条件的限制,很难做到对干扰影响的完全补偿。

设计自动控制系统的目的是为了取代人的劳动,我们先来观察人在生活和工作中是如何实现控制的。如在洗澡之前,首先要调整好适宜的出口水温,调节的过程中会不断用手感知水温是否已经适宜。在这个人工控制系统里,热水器是被控对象,热水器的出口水温是被控变量,而人起到了控制装置(控制器和执行元件)的作用。在调节水温的过程中,人体的触觉器官起到了测量水温的作用,这个被测量到的信号传递到大脑里,由大脑来判断水温是否合适,从而进行调节,逐渐使水温趋于理想的状态。这个控制系统的工作原理如图 1-6 所示。

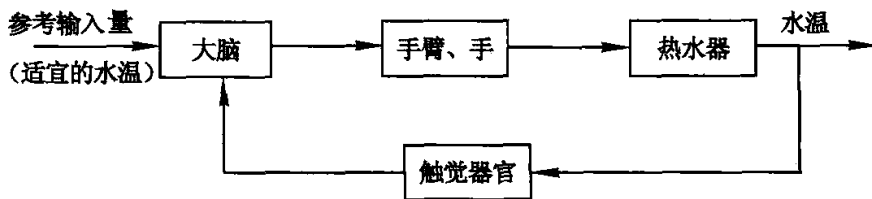


图 1-6 人工调节水温的反馈控制系统方框图

在上述过程中,人们先从被控对象获取信息,再把被控变量反馈给被控对象,这种控制方式称为反馈控制。在反馈控制系统中,获得被控变量的信息后,经过一些中间环节(手上的触觉器官,大脑,手,热水器的冷、热水阀门),最后又作用于被控变量自身,使之发生变化。这样,信息的传送途径是一个自身闭合的环,因此反馈控制也被称为闭环控制。既然反馈控制的目的是要消除(或减小)被控变量的实测值与期望值之间的偏差,那么控制作用必须使偏差变化的方向与偏差的极性相反,也就是说被控变量的期望值与实测值之间是相减的关系。为了强调说明这种性质,我们把这样的反馈称为负反馈。如果不采用负反馈而采用正反馈,在温度过高时,将阀门向加大热水流量的方向转动,出口水温会变得更高,这就与控制的目的背道而驰了。反馈控制的基本思想是按照被控变量偏离期望值的相反方向改变控制量,力图消除或者减小被控变量的实际值与期望值之间的偏差。因此,反馈控制是一种基于误差的控制方式,它是一种广泛使用的重要控制方式。

反馈是控制理论的灵魂和精髓。对反馈的应用不限于工程范畴,在各种不同的非工程领域,如社会经济领域、生态环境领域等,反馈的思想同样得到了广泛的应用。如,在社会经济领域,人们要求国民生产总值、物价水平等按一定的规律增长,否则便会失控;在生态学方面,人们要求某个濒危物种的种群数量快速上升,当种群数量达到一定程度后便保持稳定,维持其生态平衡。

2. 闭环控制系统的基本组成

在闭环控制系统中,为了纠正和消除被控变量可能出现的误差,需要做以下工作:① 为

了发现被控变量的误差,在系统中安装一个测量元件,对被控变量进行测量;② 为了计算被控变量的误差,在系统设置一个比较元件,作期望输入和测量结果的相减运算,得到的差值称做“偏差信号”;③ 将偏差信号作用在系统上,纠正被控变量出现的误差。这样可将图 1-4 表示的开环控制系统改造成为图 1-7 所示闭环控制系统。

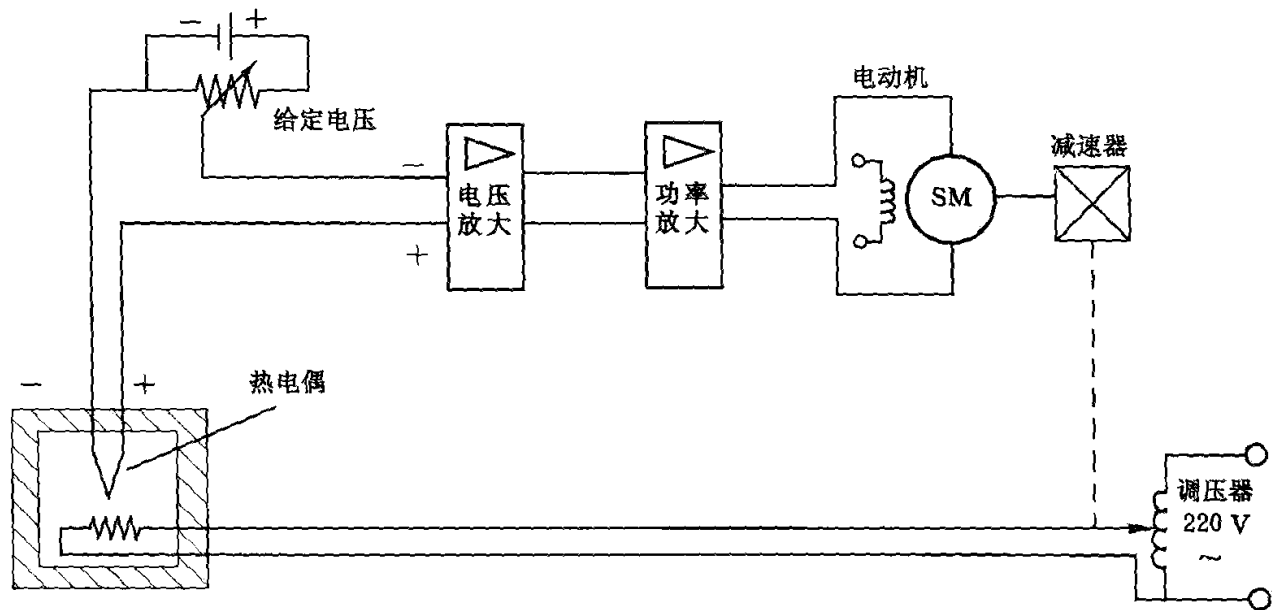


图 1-7 电热炉的闭环控制方式

在这个闭环控制系统中,热电偶是一种测量温度的器件,它将测量到的温度转化为电压信号。两端连接直流电源的电位器作为给定参考值输入的给定装置,电位器上分得的电压代表着电热炉的期望温度。在正常工作的时候,炉温等于期望值,热电偶的输出电压等于给定电压,电动机不转动,调压器的滑动触点停留在某个合适的位置上。这时,炉子散失的热量正好等于从电阻丝上获取的热量,形成温度的热平衡状态,温度保持恒定。当炉温因受某种扰动作用的影响突然下降时,热电偶输出电压下降,与给定电压比较后出现正偏差,经电压放大器、功率放大器放大后,驱动电动机使调压器电压升高,炉温回升,直至温度值等于期望值为止。当炉温受到扰动后高于期望温度时,调节的过程正好相反。

闭环控制系统可以采用图 1-8 所示的方框图表示。在图 1-7 所示的电热炉控制系统中,电动机、减速器和调压器共同构成执行元件,热电偶为测量元件。由于给定电压和热电偶输出的电压(反馈)都是直流电压,故只需将它们反向串联便可得到偏差电压。

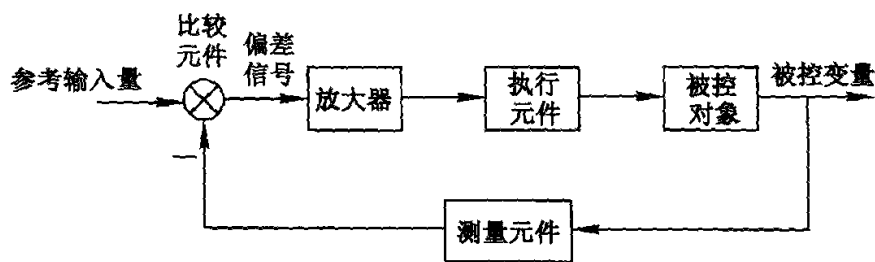


图 1-8 闭环控制系统方框图

但是,闭环控制系统可能会出现不稳定现象,或者在某些方面不能满足设计者和使用者的要求(详见本书第三章)。常常需要在闭环控制系统中增加串联校正环节和(或)局部反馈

校正环节,以改善闭环控制系统的性能。一个较完善的闭环控制系统如图 1-9 所示。

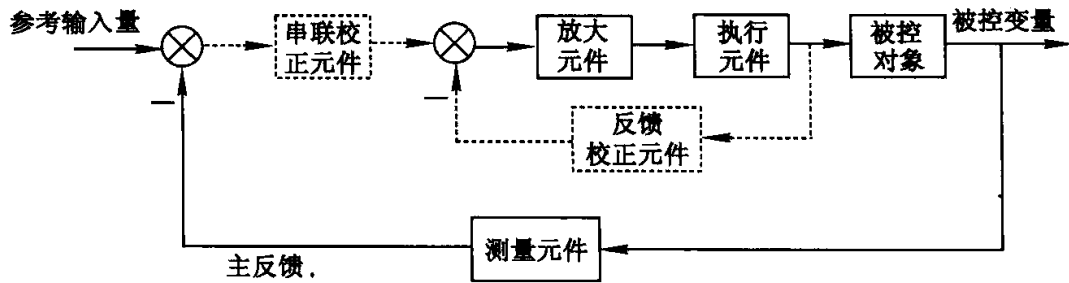


图 1-9 闭环控制系统的基本组成

从图 1-9 可以看出,组成闭环控制系统的元部件按职能可以分为以下几种:

测量元件——其职能是检测被控制的物理量,如果这个物理量是非电量,一般要转换成电量。例如,测试发电机用于检测电动机轴的转速并将其转换为电压;热电偶用于检测温度并将其转换成电压等。

给定元件——其职能是给出与期望的被控变量相对应的系统输入量,例如图 1-7 中的给定装置。

比较元件——其职能是把测量元件检测的被控变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——即放大器,其职能是将比较元件给出的偏差信号进行放大,用来推动执行元件去控制被控对象。

执行元件——其职能是直接控制被控对象,使被控变量发生变化。

校正元件——也叫补偿元件,它是结构或参数便于调整的元部件,用串联或反馈的方式连接在系统中,以改善系统的性能。

3. 闭环控制系统中的信号

闭环控制系统中,各个元部件之间的作用关系可以看做是信号的传递,如图 1-9 中箭头所示。闭环控制系统中的各个信号是随时间变化的,所以“信号”又称为“变量”。闭环控制系统中主要有以下信号:

输出信号——控制系统的被控变量,一般记做 $c(t)$ 。

输入信号——控制系统的参考输入量,一般记做 $r(t)$ 。被控变量应该按照输入信号的变化做规律变化。

反馈信号——被控变量的测量结果。

偏差信号——输入信号与反馈信号的差,一般记做 $e(t)$ 。

误差信号——输出信号与期望输出信号的差。误差反映了控制系统的质量,一般记做 $e'(t)$ 。广义上说的误差包括偏差的概念,偏差也被称为从输入端定义的误差。

干扰信号——使被控变量产生不应有的变化的信号,干扰信号可能会导致被控变量出现误差,一般记做 $n(t)$ 。

4. 闭环与开环控制系统的比较

闭环控制系统的优点是采用了负反馈,使系统的响应不受外部干扰和内部系统参数变化的影响。这样,对给定的被控制对象,有可能采用不太精密且成本较低的元件构成精确的控制系统。在开环情况下,就不可能做到这一点。概括来讲,闭环控制系统适用于反应快

速、精度高、动作复杂的场合。闭环控制系统的设计、计算也比较复杂,本课程重点研究闭环控制系统。

从稳定性出发,开环控制系统比较容易构造,因为对开环控制系统来说,稳定性不是主要问题。但是在闭环控制系统中,稳定性则始终是一个重要问题,因为闭环控制系统可能引起过调误差,从而导致系统进行等幅振荡或变幅振荡。

应当强调指出,当系统的输入量能够预知,并且扰动影响较小、控制精度要求较低时,采用开环控制比较合适。只有当存在着无法预计的扰动和(或)系统中元件的参数存在着无法预计的变化时,控制精度要求较高,闭环控制系统才具有优越性。还应当指出,系统输出功率的大小在某种程度上确定了控制系统的成本、重量和尺寸。闭环控制系统的成本和功率通常比较高。为了减小系统所需要的功率,在可能的情况下,应当采用开环控制系统。将开环控制系统和闭环控制系统适当地结合在一起,通常比较经济,并且能够获得满意的综合系统性能。

三、复合控制系统

反馈控制是在外部作用(输入信号或干扰)对被控对象产生影响后才能做出的控制,当被控对象具有较大延迟时,反馈控制不能及时地影响输出的变化。前馈控制能预测输出随外部作用的变化规律,在控制对象还没有产生影响之前就做出相应的控制,使系统在偏差即将产生之前就纠正了偏差。前馈控制是对可测量的输入信号变化或者可测量的扰动信号对系统输出的影响进行预先补偿的一种措施,它的信号流向不构成回路。前馈控制和反馈控制相结合构成了复合控制,也就是说复合控制是开环控制和闭环控制相结合的一种控制方式。复合控制是构成高精度控制系统的一种有效控制方式,使自动控制系统具有更好的控制性能。复合控制基本上具有两种形式:按干扰前馈补偿的复合控制和按输入前馈补偿的复合控制,如图 1-10 所示。图中, G_c 表示反馈控制器, G_p 表示由执行元件、被控对象和测量元件构成的广义被控对象, G_n 和 G_r 表示前馈补偿装置。

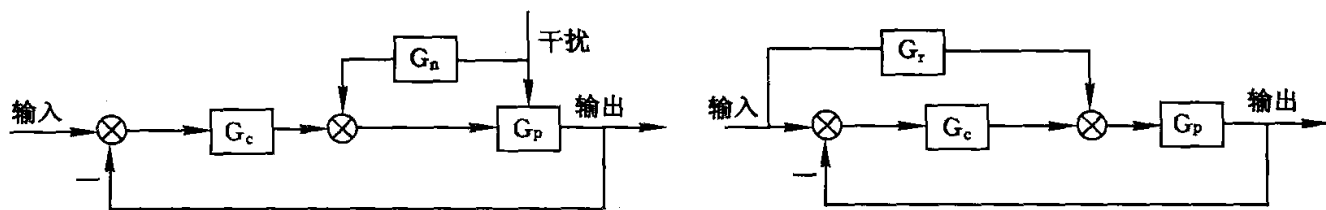


图 1-10 复合控制系统

第三节 控制系统示例

一、速度控制系统

在如图 1-11 所示的原理图中,展示了调节发动机转速的飞球式调速器的基本原理。飞球式调速器也被称为离心调速器,它根据发动机期望的转速与发动机的实际转速之差来调整进入发动机的蒸汽(或燃料)量,进而改变发动机的转速。

该系统的工作过程为:当工作于希望的速度时,两只重球绕着中心轴旋转,整体看起来就像一个圆锥,并且圆锥的母线与转动轴的角度已经确定。这个角度可以用于检测发动机

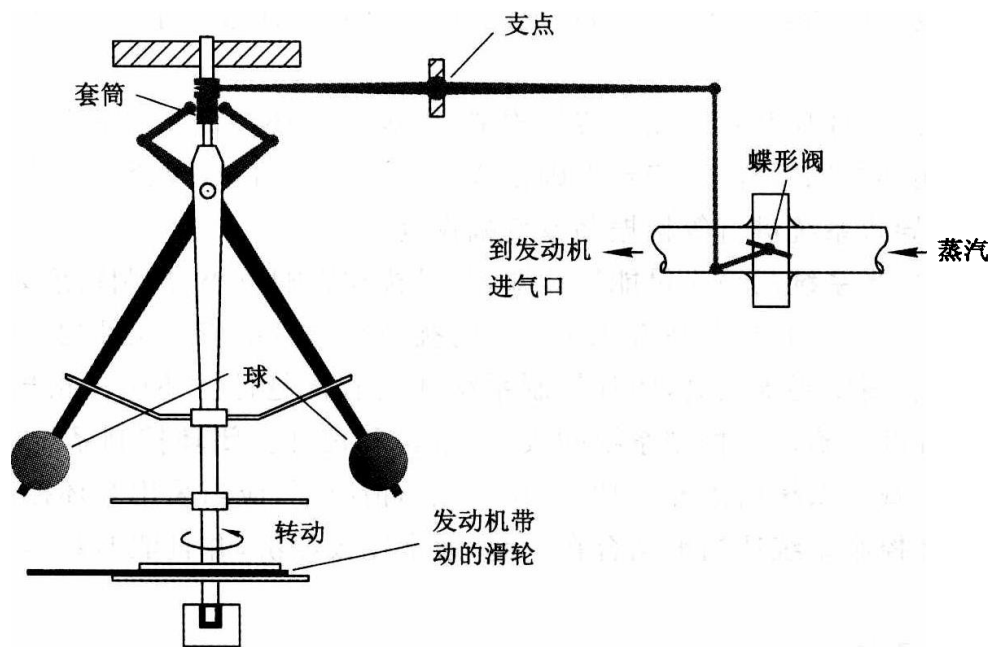


图 1-11 飞球式调速器的工作原理图

的输出转速。杠杆此时不动，蒸汽室的主阀门保持着一定的开度，恒定流量的蒸汽推动蒸汽发动机以恒速旋转。当突然给发动机施加负载时，发动机的速度降低，调速器的重球之间的夹角变小，这个动作控制杠杆打开阀门（也就是执行元件），让更多的蒸汽进入发动机，补偿了大部分因负载增加而减小的转速。为保持蒸汽阀停留在新的位置，必须使飞球在一个不同的角度继续旋转，这也意味着带负载时系统的速度并非精确地和原来一样。我们将在第三章的学习中进一步分析产生这种稳态误差的原因。后来的发明家给系统增加了一些机械装置，用于求取误差的积分，最终解决了稳态误差的问题。

在这个速度控制系统中，被控对象是发动机，而被控变量是发动机的转速。期望转速与实际转速之间的差形成误差信号。作用到被控对象（发动机）上的控制信号（蒸汽量）为驱动信号。对被控变量起干扰作用的外部输入量为扰动信号，不能预测的负载变化就是一种扰动信号。

飞球式调速器最早出现在欧洲风力磨坊里，解决了磨面机速度不稳定的问题，但直到 1788 年瓦特（James Watt）把这些原理应用到了蒸汽发动机上之后它才闻名于世，并称之为瓦特的离心调速器。

二、电热炉温度计算机控制系统

图 1-12 所示为用于工业生产的电热炉温度计算机控制系统的工作原理。图中，电阻丝通过晶闸管主电路加热，炉温期望温度用计算机键盘预先设定。炉内的温度值由热电偶测量后将温度信号转换成电压信号，电压信号经放大、滤波后，由 A/D 转换器将模拟量信号转变为数字量信号，数字量信号通过接口设备传送到控制器（计算机）。控制器将这个数字量信号转换成温度值与键盘输入的温度进行比较，如果存在某种差别（偏差），控制器就会根据预先编程实现的控制算法计算出相应的控制量，再通过 D/A 转换器变换成模拟量信号，通过触发器控制晶闸管的导通角，从而改变电阻丝中电流大小，达到控制炉温的目的。该系统既有精确控制炉温的功能，又有实时屏幕显示和打印功能，还有超温、电阻丝和热电偶损坏报警等功能。

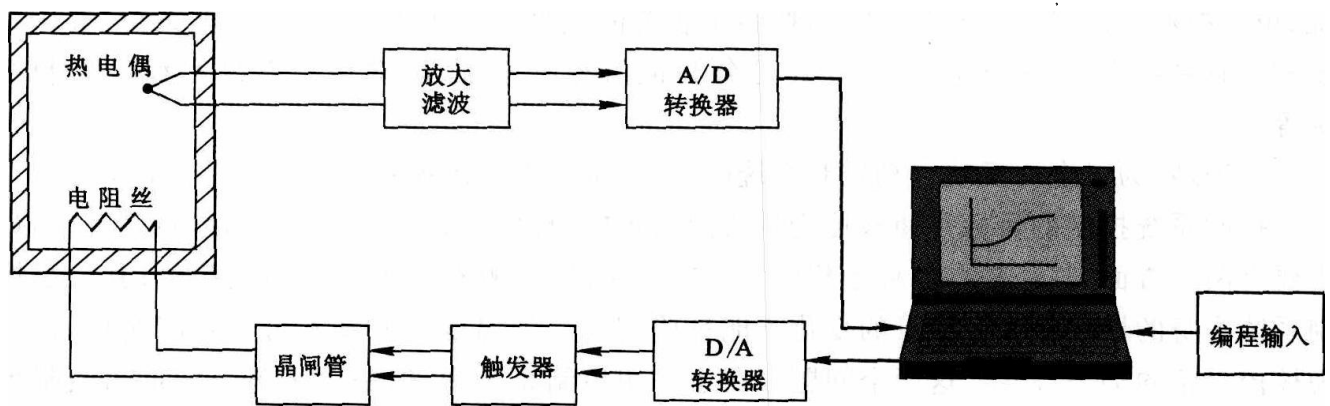


图 1-12 电热炉温度计算控制系统

三、业务系统

一个业务系统可以由许多部门组成,分配给每个部门的任务代表系统中的一个动态元件。为了保证系统正常运行,在这类系统中必须建立对每一个部门完成任务情况的反馈通报方法。为了减小系统的时间延误,必须使各个部门之间的相互牵连达到最小。这种相互牵连越小,工作信息和资料的传递就越顺利。业务系统是一个闭环系统,该系统的合理设计,将会减少必要的管理控制。应当指出,业务人员或资料的短缺、通信的中断和人员的失误是这类系统中的扰动量。虽然导出各组成部门的数学表达式的确是一项困难的任务,但是将最优化技术应用到业务系统中去确实能使业务系统的性能获得重大改进。

一个工程组织系统由下列主要部门组成:管理部门、研究和开发部门、样品设计部门、样品试验部门、产品设计和绘图部门、制造和装配部门以及产品检验部门。这些部门互相联系在一起,共同完成一项工程任务。通过将系统简化成必需的最基本的组成部分,并且用一组简单的方程表示每一个组成部分的动态特性,就可以对系统进行分析。这种系统的动态特性可以根据完成工作的顺序与时间之间的关系来确定。

利用表示功能的方框和表示系统工作时信息或产品输出之间的信号连线,可以画出功能方框图,如图 1-13 所示。

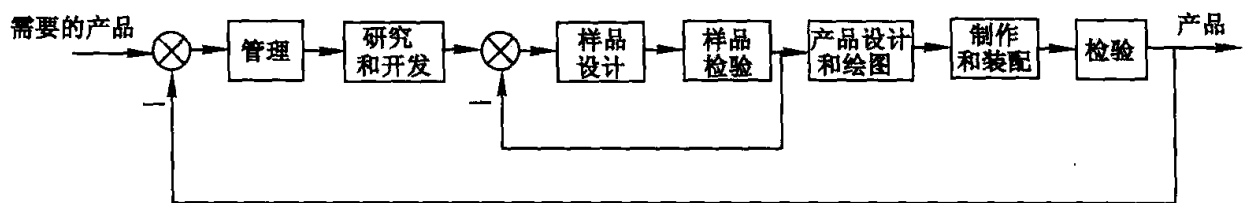


图 1-13 工程组织系统方框图

第四节 自动控制系统的分类

自动控制系统的功能和组成多种多样,因而自动控制系统有多种分类方法:按其工作原理可分为开环控制系统、闭环控制系统和复合控制系统;按其数学模型可分为线性系统和非线性系统、定常系统和时变系统、集中参数系统和分布参数系统、确定性系统和不确定性系统等;按系统内部的信号特征可分为连续系统和离散系统;按系统的功能可分为温度控制系

统、位置控制系统、压力控制系统等;按系统装置的类型可分为电气系统、机电系统、液压系统和生物系统等;按系统的运行方式可分为恒值控制系统、随动控制系统和程序控制系统等。

一般地,为了全面反映自动控制系统的特点,常常将上述各种分类方法组合应用。

控制系统控制的目标是使被控变量按照指定的规律变化。实现这一目标所面临的困难主要有两个方面:其一是各种干扰因素作用于系统,影响被控变量偏离期望值;其二是控制系统本身的惰性使被控变量的变化不能精确实现。如温度的升降不可能瞬间实现,这称为被控对象的动态特性。这两个问题存在于一切控制系统中,但是由于各个特定的控制系统的运行方式彼此不同,这两个因素的影响侧重也有不同。在研究控制系统的运行规律和设计方法时,需要特别注意的侧重也就不完全相同。下面详细论述一下按系统运行方式划分的三种系统的参考输入变化规律。

1. 恒值控制系统

恒值控制系统的输入量是一个常值,要求被控变量也等于一个常值,这类控制系统也被称为调节系统。但由于扰动的影响,被控变量会偏离输入量而出现误差,控制系统便根据误差产生控制作用,以克服扰动的影响,使被控变量恢复到给定的常值。因此,恒值控制系统的分析、设计重点是各种扰动对被控对象的影响以及抗扰动的措施。在恒值控制系统中,输入量可以随生产条件的变化而变化,但是一经调整后,被控变量就应与调整好的输入量保持一致。图 1-7 电热炉温度控制系统就是一种恒值控制系统,其输入量给定电压是常值。在工业控制中,如果被控变量是温度、流量、压力、液位等生产过程参量时,这种控制系统则称为过程控制系统,它们大多数都属于恒值控制系统。

2. 随动控制系统

这类控制系统的输入量是预先未知的随时间任意变化的函数,要求被控变量以尽可能小的误差跟随输入量变化,又称为跟踪系统、伺服系统。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变量跟随的快速性和准确性。随动系统的应用非常广泛,如高射炮自动瞄准系统、雷达自动跟踪系统等。

3. 程序控制系统

当输入量是已知给定值的时间函数时,控制作用将按预定的规律(程序)变化,这种系统称为程序控制系统,全自动洗衣机、电脑绣花机以及机械加工中的数字程序控制机床等都属于这种系统。程序控制系统可以做成开环形式,也可以是闭环形式。

第五节 自动控制系统的基本要求和典型输入信号

一、自动控制系统的基本要求

由于控制系统总是含有储能元件或惯性元件,因而系统的输出量和反馈量总是滞后于输入量的变化。因此,当输入量发生变化时,输出量从原平衡状态变化到新的平衡状态总是要经历一定时间。在输入量的作用下,系统的输出变量由初始状态达到最终稳态的中间变化过程称动态过程,又称暂态过程、瞬态过程或过渡过程。动态过程结束后的输出响应称为稳态过程。系统的输出响应由动态过程和稳态过程组成,工程上的各类控制系统都存在动态过程。

自动控制系统的种类繁多,控制功能、性能要求往往也不一样,但对控制系统的共同要求一般可归结为以下三点。

1. 稳定性

稳定性是系统受到短暂的扰动后其运动性能从偏离平衡点恢复到原平衡状态的能力。控制系统都含有储能或惯性元件,若闭环系统的参数选取不合适,系统会产生振荡或发散而无法正常工作。稳定性是一切自动控制系统必须满足的最基本要求,对稳定性的研究是自动控制理论的一个基本问题。

2. 动态性能

描述动态过程的性能可以用平稳性和快速性加以衡量。平稳性指系统由初始状态运动到新的平衡状态时,具有较小的超调(即最大振幅)和振荡性;系统由初始状态运动到新的平衡状态经历的时间表示系统动态过程的快速程度。良好的动态性能是指系统运动的平稳性和快速性满足要求。

3. 稳态误差

稳态误差是在系统过渡过程结束后,期望的稳态输出量与实际的稳态输出量之差。控制系统的稳态误差越小,说明控制精度越高。因此,稳态误差是衡量控制系统性能好坏的一项重要指标,控制系统设计任务之一就是在兼顾其他性能指标的情况下,使稳态误差尽可能小或者小于某个允许的限制值。

上面提到的三点是对控制系统的基本要求,对于不同用途的控制系统,还有一些其他要求,如被控变量应能达到的最大速度、最大加速度、最低速度以及在低速工作时的运动平稳性;对于参数变化的敏感性要求,即要求控制系统参数在某个范围内变化时,仍能稳定地工作;可靠性,成本要求;还有对环境的要求,如环境的温度、湿度、腐蚀性和防爆性等。

二、典型输入信号

在工程实践中,作用于自动控制系统的信号是多种多样的,既有确定性信号,也有非确定性信号,如随机信号。为了便于系统地分析与设计,常选用几种确定性信号作为典型输入信号。典型输入信号的选取原则是:该信号的函数形式容易在实验室或现场中获得;系统在这种信号作用下的性能可以代表实际工作条件下的性能;这种信号的函数表达式简单,便于计算。

工程设计中常用的典型输入信号有阶跃函数、斜坡函数、抛物线函数、脉冲函数、正弦函数和伪随机函数等。

1. 阶跃函数

阶跃函数的图形如图 1-14 所示,它的表达式为

$$f(t) = \begin{cases} R & t \geq 0 \\ 0 & t < 0 \end{cases} \quad (R \text{ 为常量}) \quad (1.5.1)$$

幅值为 1 的阶跃函数,称为单位阶跃函数。它的表达式为

$$f(t) = \begin{cases} 1 & t \geq 0 \\ 0 & t < 0 \end{cases} \quad (1.5.2)$$

单位阶跃函数常记为 $u(t)$,幅值为 R 的阶跃函数可表示为 $f(t) = R \cdot u(t)$ 。在任意时刻 t_0 出现的阶跃函数可表示为

$$f(t - t_0) = R \cdot u(t - t_0)$$