

843262

5081

6621

高等学校教学参考书

自动控制基础

严伟孙 许鸿量 编



高等教育出版社



高等学校教学参考书

自动控制基础

严伟孙 许鸿量 编

内 容 提 要

本书是根据1980年6月在成都召开的高等学校工科电工教材编审委员会要求编写的教学参考书,可作为高等工科院校非电专业的选修课教材。

本书主要阐述自动控制的经典理论及其应用的基础知识。全书共分八章,前四章应用微分方程法、传递函数法及频率特性法分析典型环节和系统的特性,用代数法及频率法判别系统的稳定性,介绍了自动控制系统中的基本校正环节。后四章分别介绍了自动控制系统的检测和执行装置,定值控制系统的时域和频域分析,典型电-液伺服系统的组成及其稳定性分析和校正方法,以及顺序控制器等。

高等学校教学参考书

自动控制基础

严伟孙 许鸿量 编

高等教育出版社出版

新华书店上海发行所发行

祝桥新华印刷厂印装

开本 850×1168 1/32 印张 8.625 字数 204,000

1987年9月第1版 1987年9月第1次印刷

印数 00,001—6,800

书号 15010·0769 定价 1.75 元

前 言

本书是为非电专业学生在学习电工学课程后,为了解有关自动控制方面的基础知识而编写的。计划学时数约为50学时。

自动控制技术在现代工程和科学的发展过程中起着重要的作用,广泛地应用于工农业生产、交通运输和国防建设中。因此,对大多数工程技术人员和科学工作者来说,自动控制已成为必不可少的基础知识。许多非电专业继电工学课程后,没有这方面的课程,因此颇感不足,为此本书力求由浅入深地比较全面地介绍自动控制基础方面的主要内容,着重讲述了经典控制理论以及实际应用。

本书由西安交通大学王耀光、刘佩仙同志审阅。在编写过程中,上海交通大学孙文卿同志以及上海工程技术大学吉敖川同志对本书提出了许多宝贵意见。在此谨向上述同志表示衷心感谢。

本书第一至四章由许鸿量编写,其余各章由严伟孙编写。由于我们水平有限,书中一定仍有不少缺点和错误,殷切希望广大读者和使用本教材的兄弟院校师生提出批评。

编 者

目 录

绪论

第一章 自动控制系统的基本概念及系统的数学模型 3

1-1 自动控制系统的工作原理及其组成 3

一、自动控制系统的工作原理及其组成 3

二、自动控制系统的分类 9

1-2 自动控制系统运动方程的编写 11

一、简单元件微分方程式的建立 12

二、微分方程的线性化 17

三、系统微分方程的编写 20

四、拉普拉斯变换基础 23

第二章 传递函数和频率特性 30

2-1 传递函数 30

2-2 典型环节及其传递函数 32

一、放大环节 32

二、惯性环节 33

三、振荡环节 33

四、微分环节 34

五、积分环节 34

2-3 方块图和方块图的变换 35

一、串联 35

二、并联 36

三、反馈连接 37

四、系统传递函数 41

2-4 频率特性 46

一、频率特性的定义 46

二、频率特性曲线的作图法 49

第三章 自动控制系统稳定性分析 55

3-1	稳定性的基本概念	55
3-2	劳斯-霍维茨判据	59
3-3	米哈依洛夫稳定判据	63
3-4	奈魁斯特稳定判据	68
3-5	对数频率判据	70
3-6	稳定性裕量的概念	73
3-7	自动控制系统的结构稳定性	74
第四章	自动控制系统的校正	79
4-1	串联校正	79
一、	无源校正环节	79
二、	有源校正环节	84
4-2	并联校正	91
第五章	自动控制系统的检测和执行装置	96
5-1	传感器概述	96
5-2	电阻式传感器	98
一、	电位器式传感器	99
二、	电阻应变式传感器	101
5-3	电感式传感器	109
一、	可变磁阻型电感式传感器	109
二、	差动变压器型电感传感器	112
5-4	电容式传感器	117
5-5	压磁式传感器和压电式传感器	120
一、	压磁式传感器	120
二、	压电式传感器	122
5-6	自动控制系统中的气动执行器	126
一、	气动执行机构的结构和工作原理	127
二、	调节阀的结构和节流原理	129
三、	调节阀的流量特性	130
5-7	电动执行器	133
一、	有触点比例式电动执行机构中主要部件的工作原理	135

二、无触点比例式电动执行机构中主要部件的工作原理	133
第六章 定值控制系统	141
6-1 概述	141
6-2 具有转速负反馈的直流自动调速系统	142
一、静态调速指标	143
二、转速负反馈自动调速系统的组成及其静特性	147
三、直流调速系统的稳态误差分析	159
四、单闭环有静差调速系统的时域响应分析	163
五、单闭环调速系统的频域分析	185
6-3 电压负反馈加电流正反馈的晶闸管直流调速系统	189
一、电压负反馈自动调速系统	189
二、附加电流正反馈的电压负反馈自动调速系统	192
6-4 无静差调速系统及调速系统的限流保护	195
一、无静差调速系统的基本概念	195
二、具有比例积分调节器的无差自动调速系统	197
6-5 转速与电流双闭环调速系统	205
一、转速与电流双闭环调速系统的组成	205
二、转速与电流双闭环调速系统的静、动态分析	208
第七章 电气-液压伺服控制系统	215
7-1 概述	215
7-2 电液伺服阀	218
一、电液伺服阀的构造和工作原理	219
二、电液伺服阀的动态特性及其方块图	223
7-3 电液位置伺服控制系统	225
一、机械手电-液伺服系统的工作原理	225
二、机械手回转电-液伺服系统开环放大系数的确定	227
三、机械手回转伺服系统的稳定性	229
第八章 顺序控制器	235
8-1 概述	235
8-2 基本逻辑型顺序控制器	237

一、“与”、“或”、“非”基本逻辑关系	238
二、顺序控制器中基本逻辑的实现	241
三、组合逻辑和时序逻辑	244
四、基本逻辑型顺序控制器的基本结构及其应用电路图	245
8-3 步进型顺序控制器	252
一、步进型顺序控制器的基本结构及其工作原理	254
二、电子式步进器的典型电路分析	256
索引	261
主要参考书	265

绪 论

自动控制是随着生产的发展而不断地完善起来的一门介于许多学科之间的综合性应用科学。它涉及的范围很广，其基础理论在近年来获得了迅速的发展。

自动控制的应用领域非常广泛，从现代科技的成果来看，诸如导弹能准确地命中目标，人造卫星能按照预定轨道运行并能自动返回地面的指定地点，宇宙飞船能准确地星球上着陆并安全返回，机器能自动地按照预定程序自动地进行操作等，都是自动控制技术高度发展的卓越成果。

人们已清楚地意识到广泛地应用自动控制技术，对于提高产品质量和劳动生产率、降低生产成本、改善劳动条件都起着十分重要的作用。

我国社会主义革命和社会主义建设事业正在迅速发展，为了尽快地实现把我国建设成为具有现代农业、现代工业、现代国防和现代科学技术的社会主义强国这一宏伟目标，广泛地实现生产自动化以及大力提高人们有关自动控制理论的知识水平，将具有十分重要的意义。

自动控制是一门较为年轻的学科，至今只有将近 40 年的历史，但它确是一门理论性较强的工程技术学科，用以实现这种技术的理论一般叫作“自动控制理论”。根据不同的发展阶段和内容，通常可分为“经典控制理论”、“现代控制理论”等。

实现自动控制所采用的技术手段是多种多样的，可用机械的方法实现自动控制，也可以用电气方法，液压方法，气动方法，或者电气液压方法。其中以电气自动控制方法和电气液压自动控制方

法的应用最为普遍,本书将以它们为主要研究对象。

本书为初学自动控制理论及其应用的读者提供了必要的基础知识,其中对经典自动控制理论的基本内容作了必要的介绍,以期读者通过学习能初步掌握闭环反馈控制系统的基本概念、基本分析方法和校正方法,并为进一步学习控制理论打下基础。

第一章 自动控制系统的基本概念及系统的数学模型

1-1 自动控制系统的工作原理及其组成

一、自动控制系统的工作原理及其组成

自动控制技术已经在工程和科学技术发展的过程中起着重要的作用。无论是宇宙飞船、导弹自动制导等国防现代化建设，还是国民经济的各个领域中都渗透了自动控制技术。自动控制技术之所以得到如此广泛的应用，是因为它不仅能实现生产过程的自动化，提高劳动生产率，而且更为重要的是，有些人们难以或者根本无法实现的操纵，可以通过自动控制技术来完成，如原子能的生产，火箭或导弹的自动制导等。

所谓自动控制，即在不用人直接操纵的情况下，利用控制器使控制对象的某一物理量能够按照一定的规律变化，例如炼钢炉的温度、电机的转速、火炮的自动跟踪等等。对于实现自动控制功能的装置，包括控制对象在内，称为自动控制系统。那末控制系统又是如何实现对这些物理量的自动控制呢？我们通过电阻炉的恒温控制来说明自动控制系统的基本工作原理。

图 1-1 所示的就是一个温度控制系统原理图。控制系统的任务在于存在外扰（如电源电压的波动、环境温度的变化等）的情况下，保持

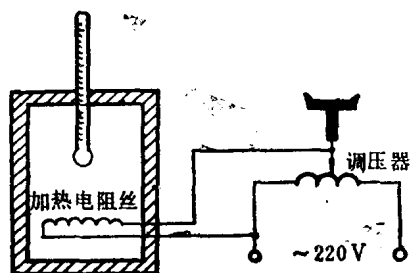


图 1-1 人工控制的恒温炉

炉子温度的恒定,以满足物体对温度的要求。要完成这一任务,可以采用人工控制和自动控制两种方法。人工控制的任务是:测量炉子的实际温度(称为被控制量)并与要求的温度(称为给定值)相比较,根据比较的结果(称为偏差),移动调压器活动触点的位置以改变电热丝中的电流大小,实现温度的恒定。由此可见,在人工控制中包含着这样几个步骤:

- (1) 测量被控制量(或称被调整量);
- (2) 将所测得的被控制量与给定值进行比较,得出偏差;
- (3) 根据偏差的大小和方向来转变为所需要的控制动作。

在这里,操纵人员的眼睛担负了测量被控制量值的作用,而将测量值通过大脑与记忆在脑子中的给定值进行比较,根据比较的结果,通过操纵人员的肌体转化为控制动作。所以在此例中,被控制量的反馈(即电阻炉的温度)与给定值的比较以及控制动作都是通过人来实现的。因此,这种系统可以叫做人工反馈系统,或叫做人工闭环控制系统。显然,倘若要用自动控制来代替人工控制,那末,在自动控制系统中必须包括三种机构,即测量机构、比较机构、执行机构。同时,由于在人工控制中,将被控制量与给定值进行比较是靠操纵人员来进行的,因此,关于给定值的问题,只要操纵人员心中有数就行了。而在自动控制系统中,则必须将给定值在系统中具体的体现出来,从而在系统中还应该有引入给定值的设备。我们把这种设备也称为命令机构。要把人工控制改变为自动控制,关键在于用自动控制器来取代操纵人员,如图 1-2 所示就变成自动控制系统,或叫做自动闭环系统。

在这个控制系统中,电阻炉的要求温度是由给定信号电压 u_1 来标定的,炉内的实际温度则由温度测量装置的热电偶转变为与之对应的电压信号 u_2 标定。 u_2 与 u_1 进行比较,所得到的偏差信号 $\Delta u = u_1 - u_2$,表示实际的炉温与要求的炉温之间的差值,经电压

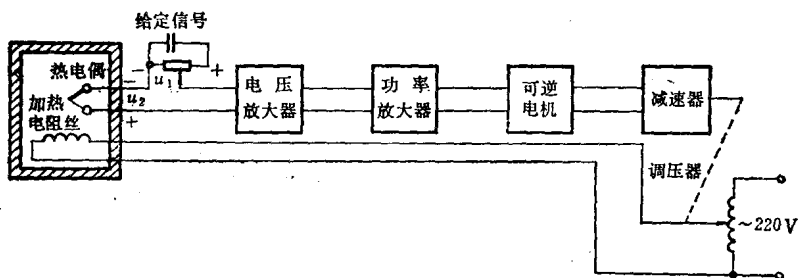


图 1-2 电炉炉温自动控制系统

放大和功率放大后去驱动执行电机。这样，当炉温偏高时通过调压器减小加热电流；反之，加大加热电流，直到温度达到与给定值对应的温度为止，此时偏差信号 $\Delta u = 0$ ，执行电机停止转动。所有这些装置组成了一个炉温的自动控制系统。

通过上述分析可以看出，不论是人工控制还是自动控制，它们的共同点都是基于“检测偏差，纠正偏差”这一原理，因此没有偏差便没有控制过程。通常所指的自动控制系统是指“按偏差进行控制的”自动控制系统，而这偏差则是通过输出量反馈到输入端建立的，因此也可称为反馈控制系统。

为了便于以后的讨论，有必要先介绍几个常用的术语：

对象 是一台设备，用以完成一个特定的动作（如上述的电阻炉）。

输出量 指自动控制系统被控制的物理量（如上述电阻炉的温度）。

扰动 是一种对自动控制系统输出量起相反作用的信号。如果扰动产生于系统的内部则称为内扰；扰动产生于系统的外部则称为外扰。外扰是系统的输入量。上面例子中的电源电压的波动、环境温度的变化都会对炉温起相反作用，称为系统受到外扰的作用。

给定值 系统输出量应达到的数值（例如与要求的炉温对应

的电压 u_1)。

反馈 将输出量的全部或一部分信号送到输入端称为反馈。如果反馈的结果是有利于输入信号的加强,则称为正反馈;反之,如果是削弱输入信号的,则称为负反馈。在自动控制系统中主要应用的是负反馈。

闭环和开环 系统的输出量和输入端之间存在着反馈回路的系统称为闭环系统。输出量与输入端之间不存在反馈回路的系统则称为开环系统。

为了更清楚地表达系统自动控制的原理,即系统中各个部件之间信号的作用情况,可以把图 1-2 表示系统各个部件结构的原理图用图 1-3 来表示。在此图中,各个部件的结构已用相应的方块来表示,在各方块中注明它所表示的部件的名称,而箭头则表示各部件之间信号的传递,这种用方块表示的图称为系统方块图。

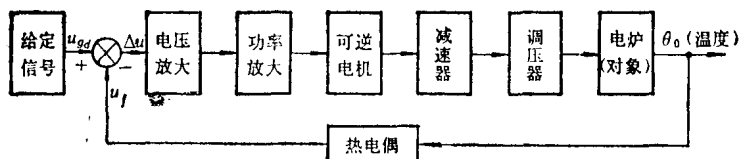


图 1-3 电炉炉温自动控制系统方块图

图中, $\rightarrow \otimes \rightarrow$ 表示比较器, 其中“-”(或“+”)表示两信号相减(或相加)。系统方块图清楚地表明了系统中各组成部分之间的信号传递过程, 这对于了解系统的控制过程是一种简单明了的方法, 因此被广泛应用于分析自动控制系统中。

由图 1-3 可见, 系统的输出量是炉温, 输入量是给定信号, 偏差则是输出量经热电偶反馈到输入端后与输入量相减所得到的量, 因此系统存在着反馈回路, 是一个负反馈闭环系统。

对于负反馈闭环系统, 我们还可以举一个采用晶闸管的电动

机调速系统的例子(图 1-4)。其中,控制对象是电动机,系统的输出量是电动机转速,利用测速发电机实现负反馈。下面我们来分析它的控制过程。

当电动机处于某转速正常运行时,作用于放大器输入端的电压为 Δu_k , 它使晶闸管整流电路送出一额定电压。如果突然加大负载(外扰作用),则电动机转速立即下降,使测速发电机输出电压 u_f 下降,将 u_f 与给定电压相比较,因此加到放大器输入端的电压 $\Delta u_k = u_{gd} - u_f$ 便自动增加了,它使晶闸管整流装置的输出电压也增加,从而使转速回升,因此电动机又重新处在一个新的稳定状态下运行,而使得转速近于维持不变。另外,如果由于交流电压的波动,例如下降,则会使晶闸管整流装置的输出电压下降,而使电动机转速下降,则 u_f 下降,同样可使 Δu_k 上升来促使晶闸管输出电压 u_a 上升,从而也可使转速近于维持不变。

从以上简单分析可以看出,对于系统由于外扰(负载的变化,交流电源电压的波动等)而引起的转速变化,可以通过系统的自动控制过程而得到一定程度的补偿。对于上例的系统同样可以通过相应的方块图(图 1-5)来描述其控制过程。在此方块图中,我们把扰动集中起来用一条作用线作用在控制对象(电动机)上来表示。

通过以上两例的简单叙述我们可以看出,尽管它们所要求完成的控制任务不一样以及具体结构也不一样,但工作原理都是基于“检测偏差、纠正偏差”,并且都是由一些控制功能相似的部件所组成。例如热电偶和测速发电机都是起着测量系统的输出量并与给定值相比较的功能,称为测量元件;调压器和晶闸管整流装置起着改变输出量,即纠正偏差的功能。有时为了保证有足够功率的输出来推动起纠正偏差功能的部件的动作,还必须功率输出部件(如执行电动机),这种部件统称为执行元件。两个例子中的放

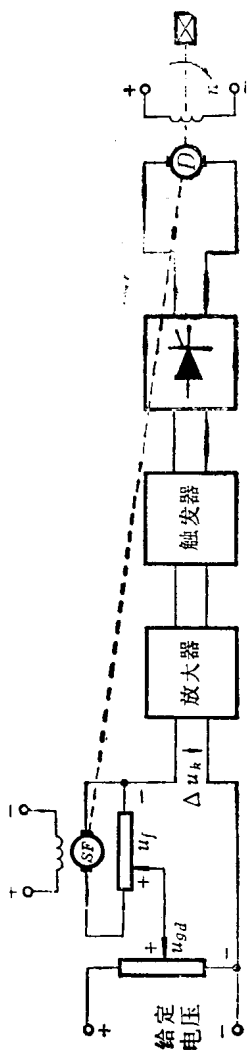


图 1-4 晶闸管电动机调速系统

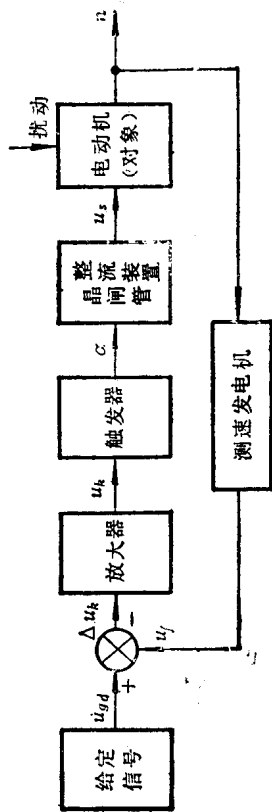


图 1-5 晶闸管电动机调速系统方块图

大器则是把检测到的偏差信号加以放大和进行能量形式的转换,并模拟人的判断、最终决定控制信号是增加还是减小系统的输出量,称为放大变换元件。

因此,一个自动控制系统不论其要完成的任务以及具体结构如何,其控制过程都可以用图 1-6 来分析。

需要指出的是,以上是构成自动控制系统的最基本的不可缺少的部分,即给定元件、比较元件、放大变换元件、执行元件、控制对象以及测量元件。此外,以后在后面的讨论中还会了解到,为了改善系统的控制性能而加入系统的校正元件,又可分为串联校正和并联校正。

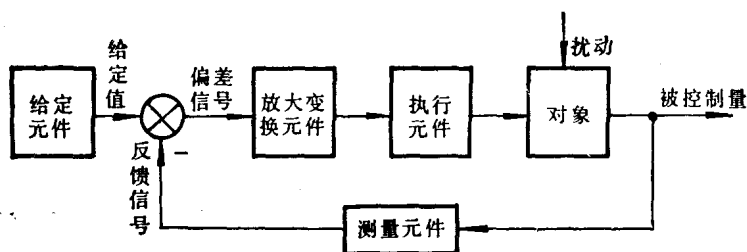


图 1-6 自动控制系统方块图

二、自动控制系统的分类

自动控制系统的种类很多,应用范围也很广,因此系统的分类方法也很多,其中有以下几种主要的分类法:

1. 按给定值变化的规律可以分为以下三类

(1) 恒值控制系统: 其特点是被控制量保持恒定或基本恒定的系统。例如前述的电阻炉炉温控制系统, 晶闸管电动机调速系统就属此类。在恒值控制系统中, 输入信号所保持的恒定值即为给定值, 它和被控制量所要求的值是对应的。

(2) 程序控制系统: 其特点是被控制量按一定的预先确定的规律变化。例如金属冶炼时, 冶炼炉的温度往往要按一定的规律