

高等教育“十三五”规划教材

# 控制工程

Kongzhi Gongcheng  
Jichu Yu Yingyong

# 基础与应用

第二版

赵丽娟 张建卓 李建刚 王洁 苏畅 编著

中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

非  
外  
借

高等学校“十三五”规划教材

# 控制工程基础与应用

(第二版)

编 著 赵丽娟 张建卓 李建刚  
王 洁 苏 畅



中国矿业大学出版社

## 内 容 提 要

本书为煤炭行业“十三五”教材规划,是在赵丽娟、张建卓、李建刚编著的高等学校“十一五”规划教材《控制工程基础与应用》的基础上,引入近年来控制工程领域及作者最新的研究成果修订而成的。

主要内容包括控制系统的动态数学模型、时域响应分析、线性系统的根轨迹法、控制系统的频率特性、控制系统的稳定性分析、控制系统的误差分析和计算、控制系统的综合与校正以及 MATLAB 软件工具在控制系统的设计、分析与综合中的应用,既注重理论的系统性,也注重方法的实用性。全书以雷达天线速度/位置控制系统、典型的液压位置伺服系统(阀控液压缸式位置系统)及晶闸管-电动机单闭环直流调速系统三个综合实例为主线,强调基本概念的分析掌握和在实践中予以应用的能力。教材引入和编写了较多典型例题、习题,便于读者分析理解所学内容。

本书既可满足高等学校机械类各专业及相关专业本科生和研究生教学的需要,也可供相关领域的科技人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

控制工程基础与应用 / 赵丽娟等编著. —2 版. —徐州: 中国矿业大学出版社, 2017. 9

ISBN 978 - 7 - 5646 - 3713 - 2

I. ①控… II. ①赵… 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(2017)第 238671 号

- 书 名 控制工程基础与应用(第二版)  
编 著 赵丽娟 张建卓 李建刚 王 洁 苏 畅  
责任编辑 王加俊  
出版发行 中国矿业大学出版社有限责任公司  
(江苏省徐州市解放南路 邮编 221008)  
营销热线 (0516)83885307 83884995  
出版服务 (0516)83885767 83884920  
网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com  
印 刷 江苏徐州新华印刷厂  
开 本 787×1092 1/16 印张 18 字数 449 千字  
版次印次 2017 年 9 月第 1 版 2017 年 9 月第 1 次印刷  
定 价 34.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)



## 前 言

本教材是根据煤炭行业“十三五”教材规划,在赵丽娟、张建卓、李建刚编著的高等学校“十一五”规划教材《控制工程基础与应用》的基础上,引入近年来控制工程领域及作者最新的研究成果修订的。这次修订,既注重了理论的系统性,又突出了方法的实用性。修订后,由原来的7章增加为8章。在保持原教材主体内容的基础上,增加了线性系统的根轨迹法,强化了MATLAB软件包应用技术,并将雷达天线速度/位置控制系统、典型的液压位置伺服系统(阀控液压缸式位置系统)及晶闸管-电动机单闭环直流调速系统三个综合实例贯穿内容始终。修订后,本教材的理论体系更加完整,内容更加充实新颖,理论联系实际更加紧密。我们相信,本教材有助于树立读者理论联系实际的科学观,掌握综合分析、设计控制系统的原则和方法,提高运用所学知识分析、解决工程实际问题的能力等方面,都具有重要作用。

本教材内容精炼、重点突出,并注意保持原教材的特色。教材采用启发式教学原则,既考虑新知识的不断增加,又考虑课程教学时数的限制,篇幅精简,具有独特风格和很好的教学适用性。本教材同时密切结合机械工程实际,系统地介绍了机械控制工程的基本内容,目的是使学生了解并掌握古典控制理论中控制系统动态数学模型的建立;进行系统的时域及频域分析;对系统的稳定性进行分析和判断;掌握对控制系统的误差进行分析、对系统的性能进行校正等涉及线性定常系统单输入、单输出的控制系统的分析与设计问题,重点强调对基本概念和工程背景的分析掌握以及在实践中予以应用的能力。

为了便于读者自学,各章均列举了大量的典型例题,并设计了练习与习题,既可满足高等学校机械类各专业及相关专业本科生和研究生教学的需要,也可供相关领域的科技人员参考。

参加本教材修订的除原作者赵丽娟教授、张建卓教授、李建刚讲师外,还有王洁、苏畅讲师,全书由赵丽娟教授统稿。

由于编者水平所限,教材中难免有不妥之处,敬请众位专家、学者及广大读者批评指正,提出宝贵意见。

编 者

2017年9月



# 目 录

<b>第一章 绪论</b> .....	1
第一节 控制理论的发展简史.....	1
第二节 自动控制系统的基本概念.....	2
第三节 控制系统的分类及性能要求.....	5
第四节 本课程主要内容.....	9
习题 .....	10
<b>第二章 控制系统动态数学模型</b> .....	12
第一节 数学模型的基本概念 .....	12
第二节 建立系统数学模型的一般步骤和方法 .....	13
第三节 典型元件及系统时域数学模型的建立 .....	16
第四节 数学模型的线性化 .....	23
第五节 拉氏变换与反变换 .....	25
第六节 传递函数及典型环节的传递函数 .....	37
第七节 系统方块图及其简化 .....	43
第八节 系统信号流图及梅逊公式 .....	49
第九节 实际物理系统数学模型建立举例 .....	56
第十节 MATLAB 在建立数学模型中有应用 .....	68
习题 .....	72
<b>第三章 时域响应分析</b> .....	76
第一节 引言 .....	76
第二节 典型输入信号 .....	76
第三节 一阶系统的时域响应 .....	77
第四节 二阶系统的瞬态响应分析 .....	81
第五节 高阶系统的响应分析 .....	90
第六节 控制系统的瞬态响应分析 .....	92
习题.....	100



<b>第四章 线性系统的根轨迹法</b> .....	102
第一节 引言.....	102
第二节 根轨迹和根轨迹图.....	102
第三节 根轨迹作图的一般规则.....	105
第四节 根轨迹图绘制实例.....	109
第五节 根轨迹的几点说明.....	116
第六节 控制系统的根轨迹分析.....	119
习题.....	130
<b>第五章 控制系统的频率特性</b> .....	132
第一节 引言.....	132
第二节 频率特性的基本概念.....	132
第三节 频域系统的稳态响应.....	135
第四节 频率响应的极坐标图(乃奎斯特图).....	136
第五节 频率响应的对数坐标图(伯德图).....	142
第六节 由系统传递函数绘伯德图.....	147
第七节 最小相位系统的概念.....	151
第八节 由对数频率特性求传递函数.....	153
第九节 频域分析的 MATLAB 实现.....	156
习题.....	159
<b>第六章 控制系统的稳定性分析</b> .....	161
第一节 引言.....	161
第二节 稳定性的概念.....	161
第三节 稳定性的充分必要条件.....	162
第四节 代数稳定判据(劳斯判据).....	163
第五节 奈奎斯特稳定判据(奈氏判据).....	169
第六节 伯德稳定判据.....	177
第七节 系统的相对稳定性.....	179
第八节 系统稳定性分析的 MATLAB 实现.....	184
习题.....	196
<b>第七章 控制系统的误差分析和计算</b> .....	199
第一节 引言.....	199
第二节 稳态误差的基本概念.....	199
第三节 输入引起的稳态误差.....	200
第四节 扰动引起的误差.....	207
第五节 改善系统稳态精度的方法.....	210
第六节 动态误差系数.....	212



第七节 稳态误差的工程实例计算分析·····	214
习题·····	219
<b>第八章 控制系统的性能校正·····</b>	<b>222</b>
第一节 引言·····	222
第二节 控制系统性能校正的基本概念·····	222
第三节 常用校正装置及其性能分析·····	228
第四节 串联校正·····	238
第五节 串联校正装置的期望对数频率特性设计·····	247
第六节 反馈校正·····	253
第七节 控制系统校正设计·····	259
习题·····	272
附表·····	274
参考文献·····	278



# 第一章

## 绪论

### 第一节 控制理论在工程中的应用

#### 一、控制理论的发展简史

控制工程是一门新兴的技术学科,也是一门边缘学科,是一个充满新奇和挑战的领域。控制工程以工程控制论为理论基础,综合应用了信息理论和计算机理论的相关概念。控制工程基础不局限于任何一个工程学科,在机械工程、采矿工程、管理工程、航空工程、电气工程、生物工程、土木工程等工程学科中都有广泛的应用。所以,从本质上讲,控制理论是一个跨学科的综合性工程学科,反过来又渗透到各个工程领域。

早在 1 000 多年前,我国就发明了铜壶滴漏计时器、指南针以及天文仪器等自动控制装置,促进了当时社会经济的发展。从 1788 年瓦特(J. Watt)发明蒸汽机飞球调速器起,控制工程已经有 200 多年的发展历史。然而,控制工程作为一门学科,它的形成并迅速发展却是近几十年的事。控制理论是自动控制技术、电子技术、计算机技术等多学科互相渗透的结果。第二次世界大战前,控制系统的设计因缺乏系统的理论指导而多采用试凑法。第二次世界大战期间,由于建造飞机自动驾驶仪、雷达跟踪系统、火炮瞄准系统等军事装备的需要,麦克斯韦(J. C. Maxwell)、劳斯(E. J. Routh)、赫尔维茨(A. Hurwitz)、奈奎斯特(H. Nyquist)、伯德(H. W. Bode)、伊万斯(W. R. Evans)等人推动了经典控制理论的发展。控制理论在 20 世纪 40 年代逐渐形成,而到 50 年代以后才迅速发展起来。控制理论的奠基人是美国数学家维纳(N. Wiener)。他在 1919 年就已经萌发了控制论的思想,1943 年维纳等发表了《行为,目的和目的论》,1948 年维纳出版了关于控制理论的专著《控制论》,标志着这门学科의 正式诞生。

20 世纪 50 年代以后,随着科学技术的飞速发展,控制理论也逐渐成熟。1954 年,我国科学家钱学森运用控制论的思想和方法,首创了“工程控制论”,把控制理论推广到工程技术领域,为控制工程这门技术科学的应用奠定了理论基础。在广大科研人员的努力下,又相继出现了“生物控制论”“经济控制论”和“社会控制论”等,从而把控制论进一步推广到了其他领域。

21 世纪的中国已经成为制造大国而让世人瞩目,现代制造装备技术的快速发展,将把“中国制造”推向“中国创造”,必然要求传统的机电产品向机电一体化方向发展。当今机电





一体化系统控制的显著特点是高度自动化、数字化、智能化。高度集成的复杂机电控制系统的产品技术含量高,附加值大,市场竞争优势强,已经成为机电一体化产品发展的主流。当今出现了许多现代机电结合的产品,诸如典型的神舟七号飞船、火车动车组、磁悬浮列车、智能机器人、三坐标测量仪、数控加工中心、自动导引车、大型盾构掘进机等都广泛应用了控制理论。

自动控制理论是研究自动控制共同规律的技术科学。根据自动控制技术发展的不同阶段,控制理论可分为古典控制理论和现代控制理论两大部分。

古典控制理论的内容是以传递函数为基础,主要研究单输入和单输出线性定常时不变这类控制系统的分析和设计问题。本书所探讨的主要内容就是古典控制理论。

现代控制理论是在古典控制理论的基础上,在 20 世纪 60 年代以后发展起来的。其主要内容是以状态空间方程为基础,研究多输入、多输出、变参数、非线性等控制系统的分析和设计问题。近现代以来,控制科学家们为现代控制理论的发展做出了重大贡献。1892 年,俄国的李亚普诺夫(A. M. Lyapunov)提出的判定系统稳定性的方法被广泛应用于现代控制理论;1956 年,苏联的庞特里亚金(Pontryagin)提出了极小(大)值原理;1957 年,美国的贝尔曼(R. Bellman)等人提出了状态分析法和动态规划理论;1959 年,美国的卡尔曼(R. Kalman)创建了卡尔曼滤波理论,1960 年在控制系统中成功地应用了状态空间法,并提出了可控性和可观测性的新概念。最优控制、系统识别、自适应控制理论等都是控制理论这一领域研究的主要问题。近年来,计算机技术及现代应用数学的迅速发展,又使现代控制理论在大系统理论和人工智能控制等方面有了相当快的发展。

半个世纪以来,控制理论的发展经历了经典控制理论、现代控制理论、最优控制、自适应控制、智能控制等阶段。智能控制中,复杂结构、环境及对象学习已成为发展主流,并发展了模糊逻辑推理、神经网络、遗传算法、专家系统、鲁棒控制、 $H_\infty$ 控制、逆控制、变结构控制、混沌控制等技术。同时,随着 MATLAB 技术的飞速发展和在工程中的广泛应用,以及 MATLAB 等控制系统计算机辅助设计工具的不断完善,控制理论在工程上的应用更加深入。

科学技术飞速发展的今天,人类控制自然的能力已经大大提高。无论是在载人宇宙飞船、登上外星球、导弹制导等尖端技术领域,还是在现代机械设计、机器制造和工业过程控制当中,自动控制理论的应用所取得的成就都是非常惊人的。随着机械工业的迅速发展,智能机器人、轧机系统、先进加工自动控制系统不断涌现,与控制理论的结合愈来愈广泛而密切。控制理论不仅是一门极为重要的学科,也是一种重要的方法论。比如,学科研究中高度抽象的方法、反馈原理等都是指导我们工作和学习的重要科学方法。因此,本课程无疑是一门十分重要的技术基础课程。

## 第二节 自动控制系统的基本概念

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(控制装置或控制器),使机器、设备(统称被控对象)或生产过程的某个工作状态或参数(被控量)自动地按照人们事先预定的规律运行。例如,数控加工中心能够按预先设定的工艺程序自动地进行刀切削,加工出预先设计的几何形状;焊接机器人可按工艺要求焊接流水线上的各个机械部件;温度控制系统能保持恒温;等等。所有这些系统都有一个共同点,即它们都是由一个或



一些被控制的物理量按照给定量的变化而变化,给定量可以是具体的物理量,例如电压、位移、角度等,也可以是数字量(如电机的开和关等)。一般来说,使被控制量按照给定量的变化规律而变化,是控制系统所要解决的基本任务。学习自动控制主要解决两个方面的问题:一是通过分析给定控制系统的结构及工作原理,建立系统数学模型,分析系统的稳定性、准确性、快速性等性能指标;二是根据对被控对象的特性要求进行控制系统的设计,并利用机、电、液、气等元部件实现这一控制系统。前者主要是系统分析问题,后者是系统综合和设计问题,但无论要解决哪方面的问题,都必须具有丰富的控制理论知识。

系统的输入就是控制量,它是作用在系统的激励信号,其中使系统具有预定性能的输入信号称为控制输入、指令输入或参考输入,而干扰或破坏系统预定性能的输入信号则称为扰动。系统的输出也称为被控制量,它表征控制对象或过程的状态和性能。

### 一、自动控制系统工作原理

以温度控制系统为例,实现恒温控制有两种办法:人工温度控制和自动温度控制。图 1-1 所示为人工控制的恒温控制箱。人们可以通过调压器改变电阻丝的电流,以达到控制温度的目的。箱内温度是由温度计测量的,人工调节过程可归结如下:

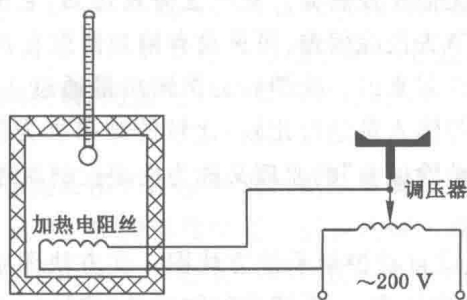


图 1-1 人工恒温控制系统

(1) 通过眼睛观测由测量元件(温度计)测出的恒温箱的温度(被控制量)。

(2) 将被测温度与要求的温度值(给定值)进行比较,得出偏差的大小和方向。此过程由人脑完成。

(3) 根据偏差的大小和方向再进行控制。此过程通过人脑发出信号,驱动人手完成。

其控制方法如下:当恒温箱温度高于所要求的给定温度时,就向左移动调压器滑动端使施加在加热电阻丝上的电压降低,减小通过加热电阻丝的电流,温度降低;当恒温箱温度低于所要求的给定温度时,则向右移动调压器滑动端增大施加在加热电阻丝上的电压,使电流增大,温度升高。因此,人工控制的过程就是人眼观测温度,通过人脑求偏差,再通过人手控制调压器以消除偏差的过程。简单地讲,控制就是不断地检测偏差并用以消除偏差的过程。

对于这样简单的一个控制形式,如果能找到一个控制器代替人的功能,那么人工调节系统就可以变成自动控制系统了。图 1-2 就是一个自动控制系统,其中,恒温箱的温度是由给定信号电压  $u_1$  控制的。当外界因素引起箱内温度变化时,作为测量元件的热电偶,把温度转换成对应的电压信号  $u_2$ ,并反馈回去与给定信号比较,所得结果即为温度偏差对应的电压信号。经电压放大、功率放大后,用以改变电机的转速和方向,并通过传动装置拖动调压



器动触头。当温度偏高时,动触头向着减小电流的方向运动,反之加大电流,直到温度达到给定值为止。即只有在偏差信号为零时,电机才停转。这样就完成了所要求的控制任务。而所有这些装置便组成了一个自动控制系统。

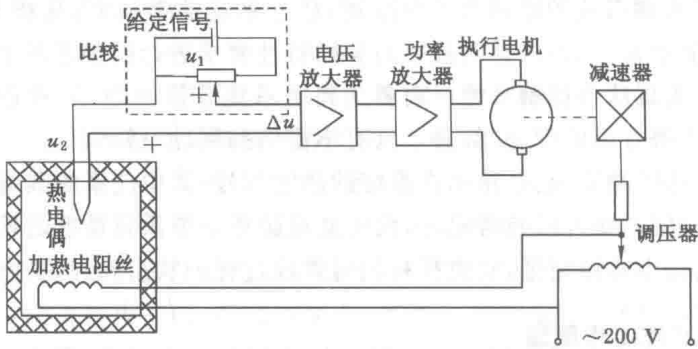


图 1-2 自动恒温控制系统

上述人工控制系统和自动控制系统的控制原理极相似的。人手类似于执行机构,人的眼睛相当于测量装置,人脑类似于控制器。从以上分析可知,它们具有一个共同的特点,就是都要检测偏差,并通过调节去消除偏差,可见没有偏差便没有调节过程。在自动控制系统中,这一偏差是通过反馈建立起来的。反馈就是指输出量通过适当的测量装置将信号全部或部分返回输入端,使之与输入量进行比较,比较的结果称为偏差。如前所述,基于反馈基础上的“检测偏差并用以消除偏差”的原理又称为反馈控制原理。利用反馈控制原理组成的系统称为反馈控制系统。

图 1-3 所示为恒温箱温度自动控制系统方块图。在方块图中,被控对象和控制装置各元部件(硬件)分别用一些方块表示,系统中的物理量(信号),如电流、电压、温度、位置、速度、压力等,标注在信号线上,其流向用箭头表示。用进入方块的箭头表示各元部件的输入量,用离开方块的箭头表示其输出量,被控对象的输出量便是系统的输出量,即被控量,一般置于方块图的最右端。系统的输入量,一般置于系统方块图的最左端。“ $\otimes$ ”代表比较元件,箭头代表作用的方向。从方块图中可以看到反馈控制的基本原理,也可以看到,各环节的作用是单向的,每个环节的输出是受输入控制的。总之,实现自动控制的装置可各不相同,但反馈控制的原理却是相同的,可以说,反馈控制是实现自动控制最基本的方法。

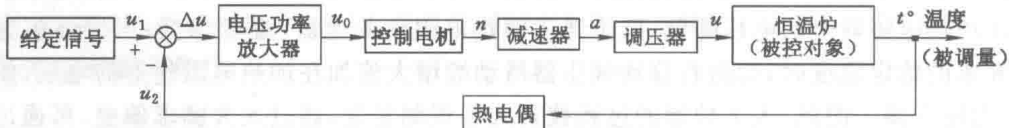


图 1-3 恒温箱温度自动控制系统方块图

## 二、反馈控制系统的基本组成

反馈控制系统是由各种结构不同的元部件组成的。从完成“自动控制”这一功能来看,一个系统必然包含被控对象和控制装置两大部分,而控制装置是由具有一定功能的各种基



本元件组成的。在不同系统中,结构完全不同的元部件却可以具有相同的功能。因此,组成系统的元部件按功能可以分为7类,图1-4是一个典型的反馈控制系统,该图表示了这些元件在系统中的位置和其相互间的关系。

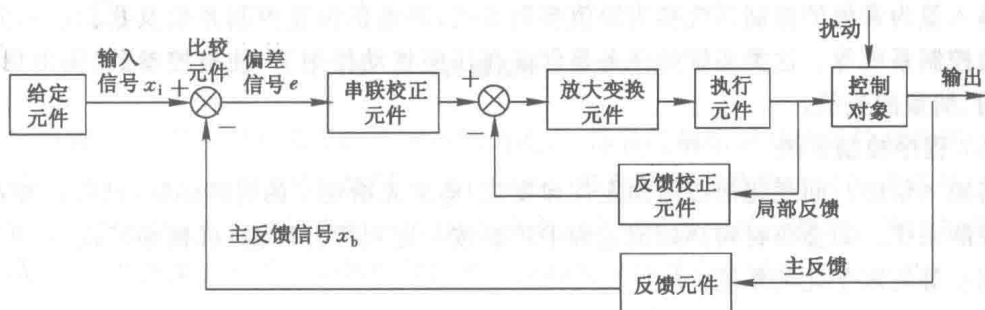


图 1-4 典型反馈控制系统的方块图

(1) 给定元件:其功能是给出与期望的被控量相对应的系统输入量,如前述的温度自动控制系统中所给出的与恒温值所对应的电压值。

(2) 反馈元件也叫测量元件,其功能是检测被控制的物理量,产生反馈信号(该反馈信号与被控制量具有确定的函数关系),如果这个物理量是非电量,一般要再转换为电量。例如,测速发电机用于检测电动机轴的速度并转换为电压;热电偶用于检测温度并转换为电压等。

(3) 比较元件:其功能是把反馈元件检测到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。常用的比较元件有差动放大器、机械差动装置、电桥电路等。如图1-2中,由于给定电压  $u_1$  和反馈电压  $u_2$  都是直流电压,故只需将它们反向串联便可得到偏差电压。

(4) 放大元件:其功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。电压偏差信号可用集成电路、晶闸管等组成的电压放大级和功率放大级加以放大。

(5) 执行元件:其功能是直接推动被控对象,使其被控量发生变化。用来作为执行元件的有阀、电动机、液压马达等。

(6) 控制对象:控制系统所要操作的对象,它的输出量为系统的被控制量,如恒温控制系统中的恒温箱。

(7) 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,用以改善系统的性能。最简单的校正元件是由电阻、电容、电感或运算放大器等组成的无源或有源网络,复杂的则用计算机通过编程实现。

### 第三节 控制系统的分类及性能要求

#### 一、自动控制系统的分类

从前面学习知道,控制系统的种类很多,应用的范围也很广泛,由于研究系统的角度不



同,自动控制系统的分类方法也很多,下面重点讨论几种常用的分类方法。

## 1. 按系统输入(或输出)信号的变化规律分类

### (1) 恒值(定值)控制系统

输入量为常值的控制系统称为恒值控制系统,如电机恒速控制系统及我们在前面讲过的炉温控制系统等。这类系统的任务是保证在任何扰动作用下,使被控参数(输出量)保持恒定的、期望的数值。

### (2) 程序控制系统

若输入量随时间变化而按照预定规律变化,即事先给定了的时间函数,则称这种系统为程序控制系统。如金属材料热处理过程中炉温按一定规律升降温,机械加工设备中数控机床的调控等均属于此类系统。

### (3) 随动控制系统

它指输入量随时间的变化而作任意变化的控制系统。这种系统的任务是保证在各种情况下系统的输出都要以很高的精度跟随输入信号的变化而变化,这种系统又称为跟踪系统。如导弹的自动跟踪瞄准和拦截系统,机械制造中的液压仿形加工系统,X-Y 记录仪等都属此类控制系统。前面讲过的炉温控制系统本属恒值控制系统,但当随意移动控制元件的滑动触点时,就可以发现,调压器的调压动触头也将随之来回移动,这实际上就构成了一个随动控制系统。因此,前两种控制系统也可以看作随动控制系统的一种特殊情况。

像车床、铣床和磨床等许多机器,都配有跟随器,用来复现模板的外形。图 1-5 所示就是这样一种刀具跟随控制系统。在此控制系统中,模板与原料同时固定在工作台上,刀具能在原料上复制模板的外形。其中,模板确定的触针位置是输入量,刀具是被控对象,Z 轴直流伺服马达是执行元件,刀具位置是输出量。

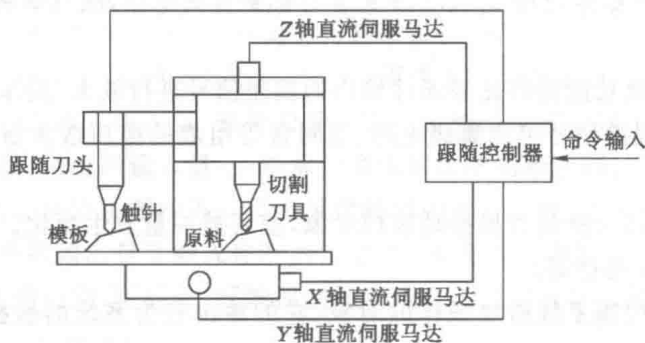


图 1-5 刀具跟随控制系统

刀具跟随控制系统的工作原理如下: X、Y 轴直流伺服马达用来接受跟随控制器的指令,根据输入命令带动工作台做 X、Y 方向运动。当模板随工作台移动时,触针会在模板表面滑动,跟随刀具中的位移传感器将触针感应到的反映模板表面形状的位移信号送到跟随控制器,控制器的输出驱动 Z 轴直流伺服马达带动切削刀具连同刀具架跟随触针运动,直到当刀具位置与触针位置一致时,表明两者的位置偏差为零,Z 轴直流伺服马达立即停止转动,最终原料被切割刀具加工成模板的形状。刀具跟随控制系统方块图如图 1-6 所示。

## 2. 按系统有无反馈分类

### (1) 开环控制系统

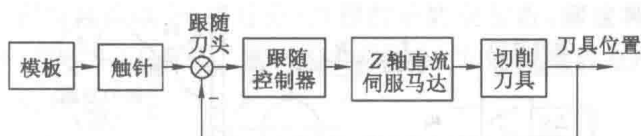


图 1-6 刀具跟随控制系统方块图

开环控制:系统被控量没有反向影响系统的能力,即系统输出对系统无控制作用。控制器与被控对象之间只有顺序作用,如图 1-7(a)所示。开环控制系统的特点就是系统中没有反馈回路。正因如此,该系统抗干扰的能力弱,这必然降低系统的控制精度。为了提高系统的控制精度,要求提高组成系统元器件的精度。这种系统的优点是系统无不稳定问题。



图 1-7 开环控制与闭环控制方块图

(a) 开环控制方块图;(b) 闭环控制方块图

## (2) 闭环控制系统

闭环控制:系统的输出量通过反馈通道返回到输入端与给定信号进行比较产生偏差信号,对系统进行控制。即系统输出对系统有反向控制能力,如图 1-7(b)所示。闭环控制系统的特点是系统中至少有一个反馈回路,因而它能随时对系统输入量及输出量进行比较并得到其偏差值去及时控制系统的输出,所以该种系统具有纠偏能力、抗干扰能力强的特点,可以得到很高的控制精度。但此类系统结构复杂、造价高,有不稳定问题,控制精度与稳定性之间存在矛盾。因而,它常需要设计人员在系统稳定性与控制精度之间进行合理的选择。闭环控制系统适用于控制精度要求高的场合。

图 1-8 是一个控制轮船尾舵的控制系统图。在轮船操纵室旋转方向盘,可通过传动链带动电位计 1 的滑柄 a 转动,同样舵(被控对象)的摆动,也将通过传动链带动电位计 2 的滑柄 b 转动。图中 L、R 分别表示电动机电枢线圈的电感和内阻,点画线代表了相应的传动机构。

通过分析图 1-8 可知:该控制系统属于闭环随动控制系统,差分及功率放大器分别属于方块图中的比较元件和放大元件,电动机属于执行元件,手轮(方向盘)在控制系统中起着使控制元件产生输入的作用,电位计 1 及电位计 2 均属于测量元件。图中  $u_r$  是系统的输入信号,  $u_c$  是反馈信号,舵的转角  $\theta_c$  是系统的输出信号。电位计 1、电位计 2 及电池组构成的电桥电路,在控制系统中起比较作用。图 1-8 中所示的  $\Delta u$  为偏差,在控制系统中起控制作用,其函数表达式为

$$\Delta u = u_r - u_c$$

图 1-9 所示是仓库大门自动开闭控制系统,该系统的工作过程叙述如下:

当操作人员合上开门开关时,由于桥式测量电路的平衡状态被破坏,电桥会自动测量出开门位置与大门实际位置间对应的偏差电压,而偏差电压经放大器放大后,直接去驱动伺服电动机带动绞盘转动,把大门向上提起。与此同时,和大门连在一起的电刷也向上移动,直

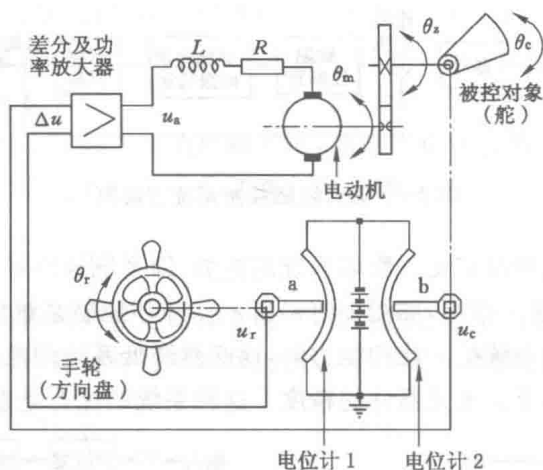


图 1-8 轮船尾舵控制系统

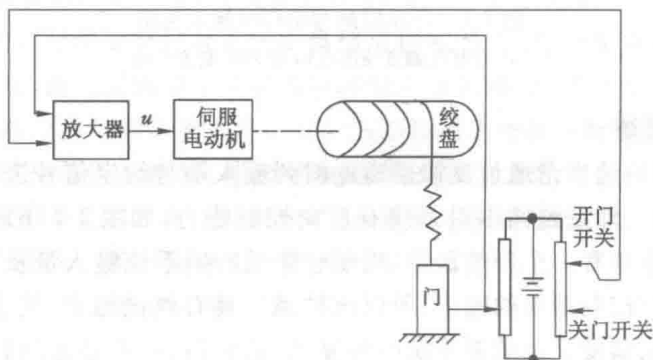


图 1-9 仓库大门自动开闭控制系统

到大门达到开启位置，桥式测量电路达到新的平衡，电动机停止转动。反之，当合上关门开关时，电动机带动绞盘反向旋转，使大门向下运动，直到大门达到关闭位置停止，从而实现仓库大门的自动关闭。仓库大门控制系统方块图如图 1-10 所示。

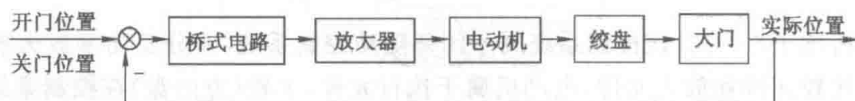


图 1-10 仓库大门控制系统方块图

### 3. 按系统的动态特性分类

#### (1) 线性控制系统

当系统中各组成环节或元件的状态或特性可以用线性微分方程(或差分方程)来描述时,这种系统为线性控制系统。线性控制系统的特点是可以运用叠加原理,即在系统存在几个输入时,系统的输出等于各个输入分别作用于系统时的输出之和;当系统输入增大或减小时,系统的输出也按比例变化。



如果描述系统动态特性的微分(或差分)方程的系数是常数,则这种线性系统称为线性定常(或时不变)系统,简称 LTI 系统。若微分(或差分)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。

## (2) 非线性控制系统

当系统中存在非线性特性的组成环节或元件时,系统的特性就需由非线性方程来描述,这样的系统就称为非线性系统。对于非线性系统,叠加原理是不适用的。本书中不介绍这类系统。

严格地讲,实际的控制系统都不是线性系统,都不同程度地存在非线性。只有当系统特性为非本质非线性时(即该系统输入与输出的关系曲线没有间断点和折断点,且呈单值关系),在系统变量变动范围很小的条件下,可以作线性化处理。这个问题在本书的后面章节中还会专门进行介绍。

## 二、自动控制系统性能的基本要求

一个自动控制系统要能正常工作,就必须满足一系列性能指标的要求。不同的控制系统要求的性能指标并不一样,但以下三点要求却是共同的、基本的。

### 1. 稳定性

稳定性是指当系统输入量(包括控制信号和扰动信号)发生变化但趋于某一稳态值后,系统的被控制量(输出信号)也跟着变化,且最终也能趋于某一稳态值,而不出现持续或发散型振荡现象的一种性质。不稳定的系统是无法正常工作的。因此,稳定性是系统正常工作的前提,反映了系统的平稳性。

### 2. 快速性

快速性是在系统稳定的前提下提出来的。快速性是指当系统的输出量与给定的输入量之间产生偏差时,系统消除这种偏差过程的快速程度。

以上这两个基本要求往往是通过控制系统的动态性能指标来体现,如超调量、上升时间、调整时间等。

### 3. 准确性

准确性是指系统在输入信号或干扰信号作用后,重新进入稳定状态时输出量与给定的输入量之间的偏差(也常称为静态精度)。

以上三点归纳起来,简称:“稳”“快”“准”。任何系统的稳定性、快速性、准确性都是互相制约的。快速性好,可能稳定性会差;改善稳定性,快速性又可能不好,精度也可能变坏。因此,分析和解决这些矛盾,也是本学科研究的重要内容。对于这些问题的处理方法在后续章节还将进行详细的讨论。

## 第四节 本课程主要内容

“控制工程基础与应用”课程主要阐述的是有关反馈控制技术的基础理论。当前机械工程领域正向着高度自动化、智能化的方向发展,各种先进的复杂自动控制系统不断出现,过去那种只侧重于局部和静态的研究方法已不能符合要求,应该将机电产品或过程看作一个由各个环节组合的动力系统,从控制论的角度来研究和解决生产实际中所出现的各种技术





问题。

本课程是一门重要的技术基础平台课,是机械类等非电本科专业的一门必修课程。它是适应机电工业的技术需求,针对机械设备等被控制对象的控制,重点阐述经典控制理论而形成的一门课程。本课程涉及经典控制理论的主要内容及其应用,注重机、电、液控制系统的特点及应用。

本课程内容较抽象,概括性强,且涉及知识范围广。学习本课程应具备较好的数学、理论力学、电工电子学等先修课的基础,这样才能掌握自动控制系统的基本原理及其应用。

经典控制理论是整个自动控制理论(包括现代控制理论)的基础,其主要内容包括了控制系统的动态数学模型、控制系统的时域和频域分析方法、控制系统的稳定性分析、控制系统的误差分析和计算、控制系统的综合与校正、MATLAB 软件工具在控制系统分析和综合中的应用等。该课程将使学生掌握机电闭环控制系统的基本原理及必要的实用知识。

课堂讲授应突出授课内容的基本思路,着重于基本概念的建立和解决机电控制问题的基本方法的阐明。除经典内容外,一方面引入 MATLAB 软件工具,使学生加深对经典控制理论的理解;另一方面突出机械对象的系统控制,使学生深化对机电控制系统的基本原理及必要的实用知识的理解和掌握。

该课程以讲授为主,同时为了促进应用创新型人才教学体系的建立,更应加重视实验研究,从传统的演示性、验证性实验,逐步向综合性、设计性实验发展,并进一步为研究创新性实验打下基础。本教材通过引入雷达天线速度/位置控制系统、典型的液压位置伺服系统(阀控液压缸式位置系统)及晶闸管-电动机单闭环直流调速系统三个综合实例,并将其贯穿始终,使读者系统掌握一个实际控制系统,从数学模型建立到对系统的稳定性、快速性、准确性进行时域、频域分析,最后对其进行校正,使系统各项性能指标达到要求的方法,提高运用所学知识分析、解决工程实际问题的能力。

## 习 题

- 1-1 什么是自动控制及自动控制系统?
- 1-2 什么是开环控制系统、闭环控制系统?它们各自有何优缺点?
- 1-3 什么是反馈及反馈通道?反馈包括什么?为什么稳定系统一定存在负反馈?
- 1-4 试解释反馈控制原理,并说明反馈控制系统的组成。
- 1-5 什么是方块图?其在研究系统时有何积极意义?
- 1-6 控制系统常用的分类方法有哪几种?
- 1-7 什么是程序控制系统及随动控制系统?
- 1-8 对自动控制系统的性能有哪些基本要求?
- 1-9 试叙述液位控制系统的工作原理(题图 1-1)、系统分类,并绘制其方块图。
- 1-10 叙述蒸汽机飞车离心调速系统的工作原理(题图 1-2),并绘制出其方块图。
- 1-11 绘制题图 1-3 所示的函数记录仪的方块图,并说明其工作原理。