



高等学校“十一五”规划教材

# 控制工程基础与应用

Kongzhi Gongcheng Jichu Yu Yingyong

编著 赵丽娟 张建卓 李建刚  
主审 解中宁

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

# 控制工程基础与应用

编 著 赵丽娟 张建卓 李建刚  
主 审 解中宁

中国矿业大学出版社

## 内 容 提 要

本书为高等学校“十一五”规划教材,是在赵丽娟、解中宁编著的《控制工程基础》的基础上,引入近年来控制工程领域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,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。本书在注重理论的系统性的同时又注重方法的实用性,强调基本概念的分析掌握和在实践中予以应用的能力,并引入和编写了较多的典型例题、习题,便于读者分析理解所学内容。

本书主要作为高等学校机械类各专业及相关专业的本科教材,也可供相关领域的科技、工程人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

控制工程基础与应用/赵丽娟,张建卓,李建刚编著.

徐州:中国矿业大学出版社,2009.8

ISBN 978-7-5646-0429-5

I. 控… II. ①赵…②张…③李… III. 自动控制理论—  
教材 IV. TP13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 137617 号

书 名 控制工程基础与应用  
编 著 赵丽娟 张建卓 李建刚  
责任编辑 杨传良 刘红岗  
责任校对 何晓惠 潘利梅  
出版发行 中国矿业大学出版社  
(江苏省徐州市中国矿业大学内 邮编 221008)  
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 13.75 字数 340 千字  
版次印次 2009 年 8 月第 1 版 2009 年 8 月第 1 次印刷  
定 价 22.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)



## 前 言

本教材根据高等学校(矿业)“十一五”教材规划,在赵丽娟、解中宁编著的《控制工程基础》的基础上,引入近年来控制工程领域最新的研究成果进行修订而成。这次教材修订,既注重理论的系统性,也注重方法的实用性,由原来的10章调整为7章,强调基本概念和工程背景;在保持原教材主体内容的基础上,增加了MATLAB软件在建立系统数学模型中的应用和用MATLAB进行瞬态响应分析、系统的频域分析、稳定性分析,以及系统校正设计的MATLAB实现等内容,以增强本教材的实用性和先进性。

本教材理论体系更加完整,内容精炼,重点突出,并注意采用启发式教学方法,既考虑新知识的增加,又考虑课程教学课时的压缩,具有独特风格和较好的教学适用性。同时,本教材紧密结合机械工程实际,系统地介绍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分析、对系统的性能校正等涉及线性定常系统单输入和单输出控制系统的分析与设计问题,强调基本概念的分析掌握和在实践中的应用能力。

为了便于读者自学,在各章均列举了大量的典型例题,并设计了练习与习题。

参加本教材修订的除原作者赵丽娟教授(辽宁工程技术大学)外,还有辽宁工程技术大学张建卓、李建刚。全书由赵丽娟教授统稿,解中宁教授主审。

由于作者水平所限,书中难免有不妥之处,敬请各位专家、学者及广大读者批评指正,提出宝贵意见。

作 者

2009年6月



# 目 录

|                              |    |
|------------------------------|----|
| <b>第一章 绪论</b> .....          | 1  |
| 第一节 控制理论在工程中的应用.....         | 1  |
| 第二节 自动控制系统的基本概念.....         | 4  |
| 第三节 自动控制系统的构成及方块图.....       | 6  |
| 第四节 控制系统的分类及性能要求.....        | 7  |
| 第五节 本课程主要内容 .....            | 12 |
| 习题 .....                     | 12 |
| <b>第二章 控制系统动态数学模型</b> .....  | 14 |
| 第一节 数学模型的基本概念 .....          | 14 |
| 第二节 建立系统数学模型的一般步骤和方法 .....   | 15 |
| 第三节 典型元件及系统时域数学模型的建立 .....   | 18 |
| 第四节 数学模型的线性化 .....           | 25 |
| 第五节 拉氏变换与反变换 .....           | 27 |
| 第六节 传递函数及典型环节的传递函数 .....     | 39 |
| 第七节 系统方块图及其简化 .....          | 46 |
| 第八节 系统信号流图及梅逊公式 .....        | 55 |
| 第九节 实际物理系统数学模型建立举例 .....     | 61 |
| 第十节 MATLAB 在建立数学模型中的应用 ..... | 64 |
| 习题 .....                     | 68 |
| <b>第三章 时域响应分析</b> .....      | 75 |
| 第一节 引言 .....                 | 75 |
| 第二节 典型输入信号 .....             | 75 |
| 第三节 一阶系统的时域响应 .....          | 76 |
| 第四节 二阶系统的瞬态响应分析 .....        | 80 |
| 第五节 高阶系统的响应分析 .....          | 89 |
| 第六节 用 MATLAB 进行瞬态响应分析 .....  | 90 |
| 习题 .....                     | 93 |
| <b>第四章 控制系统的频率特性</b> .....   | 95 |
| 第一节 引言 .....                 | 95 |



|             |                           |            |
|-------------|---------------------------|------------|
| 第二节         | 频率特性的基本概念 .....           | 95         |
| 第三节         | 系统对谐和函数输入的稳态响应的计算 .....   | 97         |
| 第四节         | 频率响应的极坐标图(乃奎斯特图) .....    | 99         |
| 第五节         | 频率响应的对数坐标图(伯德图) .....     | 105        |
| 第六节         | 由系统传递函数绘制伯德图 .....        | 110        |
| 第七节         | 最小相位系统的概念 .....           | 114        |
| 第八节         | 由系统的对数频率特性求对应的传递函数 .....  | 115        |
| 第九节         | 频域分析的 MATLAB 实现 .....     | 118        |
|             | 习题 .....                  | 121        |
| <b>第五章</b>  | <b>控制系统的稳定性分析</b> .....   | <b>123</b> |
| 第一节         | 引言 .....                  | 123        |
| 第二节         | 稳定性的概念 .....              | 123        |
| 第三节         | 稳定性的充分必要条件 .....          | 124        |
| 第四节         | 代数稳定判据(劳斯判据) .....        | 125        |
| 第五节         | 乃奎斯特稳定判据 .....            | 130        |
| 第六节         | 伯德稳定判据 .....              | 138        |
| 第七节         | 系统的相对稳定性 .....            | 140        |
| 第八节         | 系统稳定性分析的 MATLAB 实现 .....  | 144        |
|             | 习题 .....                  | 149        |
| <b>第六章</b>  | <b>控制系统的误差分析和计算</b> ..... | <b>152</b> |
| 第一节         | 引言 .....                  | 152        |
| 第二节         | 稳态误差的基本概念 .....           | 152        |
| 第三节         | 输入引起的稳态误差 .....           | 153        |
| 第四节         | 扰动引起的误差 .....             | 161        |
| 第五节         | 改善系统稳态精度的方法 .....         | 162        |
| 第六节         | 动态误差系数 .....              | 164        |
|             | 习题 .....                  | 166        |
| <b>第七章</b>  | <b>控制系统的性能校正</b> .....    | <b>168</b> |
| 第一节         | 引言 .....                  | 168        |
| 第二节         | 控制系统性能校正的基本概念 .....       | 168        |
| 第三节         | 常用校正装置及其性能分析 .....        | 172        |
| 第四节         | 系统性能校正装置的设计方法 .....       | 182        |
| 第五节         | 串联校正装置的期望对数频率特性设计 .....   | 190        |
| 第六节         | 系统校正设计的 MATLAB 实现 .....   | 196        |
|             | 习题 .....                  | 206        |
| <b>附录</b>   | <b>拉普拉斯变换表</b> .....      | <b>209</b> |
| <b>参考文献</b> | .....                     | <b>213</b> |



## 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同样广泛的应用。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。二战前,控制系统的设计因缺乏系统的理论指导而多采用试凑法。二战期间,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,麦克斯威尔(J. C. Maxwell)、劳斯(E. J. Routh)、赫尔维茨(A. Hurwitz)、乃奎斯特(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》,标志着这门学科的正式诞生。

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。

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。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。

## 二、本课程研究的基本问题

如前所述,本课程主要研究的是古典控制理论。具体地说,是研究工程技术领域中广义系统的动力学问题,或者说是研究系统的动态特性。

控制理论的研究对象是各种各样的系统。下面,首先对一些重要的名词定义作必要的介绍:

**系统:**按一定规律运动变化或实现人们一定目的而运动变化的物质的有机组合体(前者指自然系统,后者指人工系统)。这种组合体可以是物理性质的、生物性质的或是社会性质





的;同时,也可以是一个过程(如生产过程)等。总之,根据人们研究的需要,这种组合体可以是一个分子、一个细胞,也可以是一个像卫星发射这样一项大的工程。从这个意义上讲,这种系统即所谓广义系统。

**子系统:**某一个系统如果是另一个系统的组成部分,则该系统称为另一系统的子系统。

**动态特性:**系统在自身以足够高的速率运动、变化的过程中,或在足够高的速率的外界条件作用下,所表现出的系统本身固有的性能或属性。

既然如此,那么应该怎样研究系统的动态特性呢?

大家知道,人们研究任何系统(或称事物),实际上总是通过系统对外界所表现出的种种现象进行分析、综合来进行的。从控制工程或信息论的角度考虑,这种种现象可称之为“信号”,即系统的输出信号(粗略地说,对研究有用的信号又可称为“信息”)。但在研究系统时,并不总能自然得到系统传送给外界的信号,从而常常需要对系统施加特定的作用,以促使系统产生必要的输出信号。系统的输出称为被控制量(被控量或输出量),一般用来表征被控对象或过程的状态或性能。

通常把引起系统某种信号输出的作用称为系统的输入(信号)。系统的输入称为控制量(输入量),它是作用于系统的有用信号。

除了研究必需的输入信号外,几乎不可避免的是还会有对研究系统性能不利的各种输入信号作用于系统,这种对研究系统有害的输入信号通常专门称之为“干扰信号”或“扰动”。

综上所述,在研究系统的动态特性时,系统的输入信号、系统本身的特性及系统的输出信号是必不可少的三个基本要素。为了研究方便,常用图 1-1 所示的方块图形式来表示:

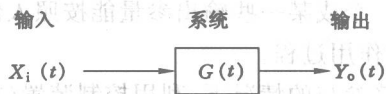


图 1-1 方块图

为了进一步说明怎样研究系统动态特性,现在列举两个实际的例子:

**【例 1-1】** 假设要研究某物体的表面颜色,可以利用阳光照射到物体表面,那么“阳光”可看做是系统的输入,而物体反射(或漫反射)的光就是系统的输出。如果该物体表面只反射纯红色光而吸收其他所有光线,因此可以得出结论:该物体表面的颜色属性是纯红色。

**【例 1-2】** 仍然是同一个物体,现在感兴趣的是构成物体的材料是什么。这时可以用锤头敲击物体,向它输入一个脉冲信号(注意:不是输入锤头),于是得到一个声波的输出。利用积累的经验,人们可以通过对声波的分析来判断物体是由木材还是由金属制成的。在日常生活中,可以看到工人用锤子敲击火车车轴来检查车轴是否正常,以及人们用手拍击西瓜来判断西瓜的生熟,等等,这些都是上述研究系统特性(不一定是动态特性)方法的具体应用。

因此,可以说控制工程所研究和所要解决的最基本的问题就是如何处理输入、输出和系统三者之间的关系问题。归纳起来,主要有如下五个方面的研究内容:

(1) 已知系统的动态特性  $G(t)$  及系统输入  $X_i(t)$ , 求解系统输出  $Y_o(t)$ 。这就是常说的“系统分析”问题。

(2) 已知  $G(t)$ , 而由期望的最佳输出  $Y_o(t)$  来确定理想的输入  $X_i(t)$ , 这就是所谓“最优



控制”问题。

(3) 已知输入  $X_i(t)$ , 由期望的最佳输出  $Y_o(t)$  确定系统的动态特性  $G(t)$ , 此即“最优设计”问题。

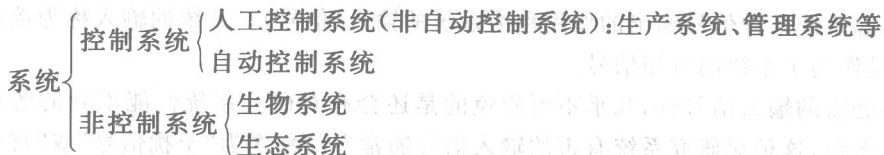
(4) 如果已知系统的输入  $X_i(t)$  及输出  $Y_o(t)$  而来确定未知系统的动态特性  $G(t)$ , 则为“系统识别”问题。

(5) 由已知的系统输出  $Y_o(t)$  中提取需要的信号(信息)或根据已知的  $Y_o(t)$  来估计  $Y_o(t)$  现在和将来的变化——前者称为“滤波”, 后者则称为“预测”。

## 第二节 自动控制系统的基本概念

### 一、自动控制系统的工作原理

系统根据划分方式的不同, 可以有多种分类方法。按系统有无控制功能分类如下:



因此, 自动控制系统只是控制系统中的一种。为了更好地理解什么是自动控制系统, 先要弄清下面几个概念:

**控制:** 使被控制对象的某一个或某一些输出参量能按照人们预期(或给定)的目标值(期望值、给定值)得以实现的一种作用过程。

**自动控制:** 指在没有人直接参与的情况下, 利用控制装置(控制器)使被控对象或过程的被控量(输出参量)能按照人们事先预定的规律变化。

**控制系统:** 包括能够产生作用过程的控制装置和被控对象两个子系统的系统。

**自动控制系统:** 控制是由控制装置自动完成的控制系统。它是一个带有反馈装置的动力学系统。

**非自动控制系统:** 控制是由人工来完成的控制系统。

在学习上述概念的基础上, 我们对控制系统已经有了初步的认识。实现控制有两种方法: 人工控制和自动控制。很多自动控制都是受到人工控制的启发后, 采用适当的控制方式或策略而实现的。下面通过一个手动控制加热炉温度恒定的例子来理解什么是人工控制, 如图 1-2 所示。

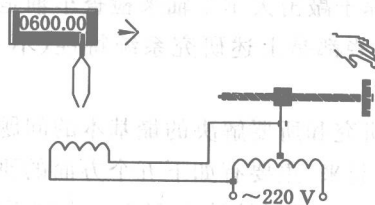


图 1-2 人工温度控制系统



首先假定,在热平衡状态下,炉温保持一定(设为  $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ ),此时测温热电偶输出的电压设为  $600\text{ mV}$ (可以通过数字电压表读出)。现在的任务是在保证外界条件发生变化,从而引起炉温也发生变化时,将炉温仍控制在  $(600\pm 2)\text{ }^{\circ}\text{C}$ [即电压表读数为  $(600\pm 2)\text{ mV}$ ]的范围内。

这个系统中,唯一可以人为调整的部件是调压器。操作者可以通过转动手轮减小或增加其输出电压,以此来控制电热丝产生的热量。

现在请想一下,如由你来操作,你的操作过程是否如下所述?你始终用你从电压表上读到的炉内实际温度  $T_c$ (被控对象也即系统的输出信号)与记忆在头脑中的期望的温度值  $T_r$ (系统的输入信号)进行比较(当然这个比较过程是由人脑来完成的)。如果  $T_c = T_r$ ,则不需进行调整。如果  $T_c < T_r$ ,则有  $\Delta T = T_r - T_c$  为正差值。这时则用手调节调压器(即控制系统中的执行元件),以增大调压器输给电热丝的电压,增大电热丝产生的热量,从而实现提高炉内温度使之接近或达到期望温度值的目的。反之亦然。当然,这个过程可能会有几次反复,但最后总会将温度控制在一个接近期望值的一个温度范围内。

上面的炉温控制系统,其控制显然是由人工来完成的,因此是一个典型的人工控制系统。如果炉温的控制是由控制装置自动完成的,那么该系统就是自动控制系统。现在仍然以炉温的控制为例,来看一看自动控制系统是怎样完成对炉温的自动控制的。

图 1-3 是这个自动控制系统的工作原理图。当移动控制元件(即电位计)的滑柄时,可以调定被控制对象——电炉的温度期望值(系统输入信号  $T_r$ )。这可以通过数字电压表  $B_2$  读出。仍然假定  $600\text{ mV}$  电压相当于炉内  $600\text{ }^{\circ}\text{C}$  的温度。电热丝被通电后,炉内温度(系统输出  $T_c$ )上升到热平衡时为止(热电偶测得的炉温可以由数字电压表  $B_1$  读出)。这时如果合上  $K_3$  开关,因为温度  $T_r$  及  $T_c$  均已分别由电位计及热电偶变换为相应的电压信号,所以比较  $T_r$  与  $T_c$  差值的任务改由控制装置中专门的差分放大器(在控制系统中称比较元件)一类的元器件来完成。差分放大器比较  $T_r$  及  $T_c$  的大小并对其差值进行放大。如果差值( $\Delta u$ )为零,则放大器后的驱动电机(执行元件)没有动作,而如果差值为正或为负,则驱动电机相应地正转或反转,通过齿轮等传动机构,带动调压器的电刷运动。于是自动控制装置将自动控制炉内温度与温度期望值保持一致。

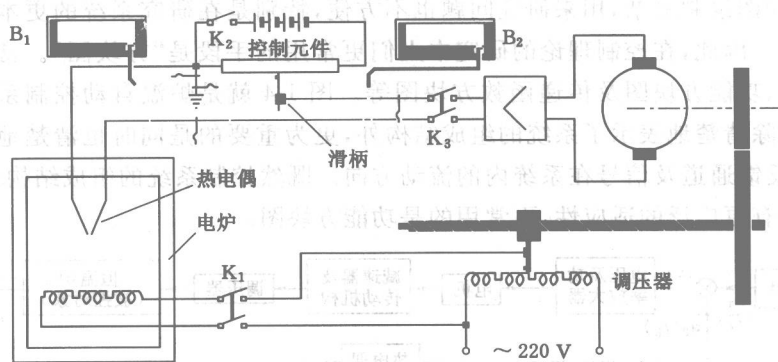


图 1-3 炉温自动控制系统工作原理图

除了人为调整控制系统的期望值外,系统因外界因素的影响(如电源电压波动),也会引



起炉温的变化。这时自动控制系统同样能对其实现自动控制。

## 二、反馈

从前面讲的人工控制及自动控制两个例子可以看到,控制系统中常常存在着一种重要的信号流动方向,即输出信号经过一定的路线,也可能经过某种变换,然后送到输入端与输入信号进行比较,如果比较的结果出现偏差值(即检测偏差),则用经放大后的偏差值去控制执行机构(元件),以达到改变输出信号使其与输入信号一致(即纠正偏差),从而实现控制的目的。

从上面的综合分析中,可以引出两个十分重要的概念:以偏差值实现控制以及系统反馈。以偏差值实现控制的原则,通过前述的例子已经很清楚了。现在重点讲一下“反馈”。

反馈是指系统中输出量返回输入端并与输入量进行比较的一种“作用过程”。返回输入端的输出量通常称为“反馈信号”。而反馈信号经过的路径叫做“反馈通道”。与之相对应,输入信号由输入端到输出端所经过的路径则称“前向通道”。

反馈分负反馈与正反馈两种。所谓负反馈是指反馈信号与输入量(输入信号)的量值符号相反的反馈。其作用是使输出信号与期望的输入信号的偏差值愈来愈小,直至系统趋于稳定。这是控制系统希望的一种反馈形式。正反馈的作用与负反馈相反,它的作用是使偏差值愈来愈大,输出信号也愈来愈大地偏离期望值,从而使系统失去稳定性而无法正常工作。除振荡器等有特定目的的系统外,一般的系统都要避免正反馈的发生。因此,通常把基于反馈基础上的“检测偏差用以纠正偏差”的这一原理称为反馈控制原理。把采用反馈控制原理组成的系统称为反馈控制系统。

如果输出量经过反馈通道时信号能量没有任何衰减,这样的反馈称为全反馈或单位反馈。

## 第三节 自动控制系统的基本构成及方块图

控制系统的构成是千差万别的。在研究前面的两个控制系统时,都利用了系统的工作原理图,但这种图绘制复杂,用来研究问题也不方便,特别是在研究系统的更本质的内在特性时尤其如此。因此,在控制理论的研究中人们更常用的手段是“方块图”。常用的方块图有结构方块图、功能方块图及传递函数方块图等。图 1-4 就是炉温自动控制系统的结构方块图。这个图除清楚地表示了系统的组成结构外,更为重要的是同时也清楚地表示出系统的前向通道、反馈通道及信号在系统内的流动方向。既然控制系统的组成结构千差万别,为了使得方块图有更广泛的适应性,更常用的是功能方块图。

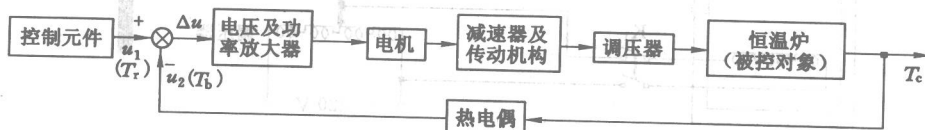


图 1-4 炉温自动控制系统的结构方块图

在功能方块图中(图 1-5),方块中不再写上系统组成中各物理结构的名称,而是改写成



各物理结构在控制系统中所起的具体作用。显然,这样表示的方块图更具典型性,也更能表现出控制系统物理构成的本质。只要比较一下图 1-4 和图 1-5 两个方块图,自然就能体会到它们各自的优缺点。



图 1-5 炉温自动控制系统的功能方块图

如前所述,尽管控制系统的物理结构种类繁多,但就其在控制系统中的功能而言,则可以归纳出如下的基本元件(现仍以炉温自动控制系统为例)。

(1) 控制元件(给定元件):产生系统输入信号的元件,即图 1-3 中标着“控制元件”的电位器。它的控制作用是使控制元件产生系统输入信号。在此即滑柄的来回移动。

(2) 比较元件:用来比较(或称运算)输入信号与反馈信号,并产生两者之差(即偏差)的元件。

(3) 放大元件:用于将比较元件输出的偏差信号进行放大或在放大的同时进行能量形式变换的元件。

比较元件和放大元件都放在开关  $K_3$  右侧的放大器中。放大器中包括由运算放大器构成的差分放大器,差分放大器既起到比较元件的作用,也起到电压放大的作用。此外,放大器中通常还包括功率放大器,它输出足够功率的控制信号驱动后面的执行机构。

(4) 执行元件:根据放大后的偏差信号的量值和方向对被控制对象进行操作的元件。图 1-4 中的电动机及常用的油缸、液压马达等均可作执行元件。

(5) 检测元件(反馈元件):测量被控制对象的输出信号量值(包括方向)的元件,通常也是反馈元件。如图 1-4 中的热电偶。注意:在一些机、电、液、气等系统中存在着内在反馈,这种反馈无需专门的反馈元件。

(6) 变换元件:将一种物理量变换成另一种物理量的元件。前述元件大多属于此类元件。图 1-4 中的齿轮副、丝杠副及调压器亦属变换元件。应特别注意调压器是给系统提供电能的,而不能看做控制元件,电源电压更不能看做输入信号。

(7) 校正元件(校正装置):专用于有目的地改变系统动态特性的元(组)件,但不是每个系统都有。它分为串联校正元件和并联校正元件两种。通常把串联在系统前向通道内的校正元件称为串联校正元件;而把接成反馈形式的校正元件称为并联校正元件。

在分析系统的功能元件时,应该注意到元件功能的多样性,比如测量元件既是反馈元件又是变换元件。此外,系统中一些对系统特性没有重要影响的元件或机构,也没有必要都放到方块图里去。

## 第四节 控制系统的分类及性能要求

### 一、自动控制系统的分类

从前面的学习知道,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

若输入量随时间的变化而发生一定规律的变化,即为事先给定了的时间函数,则称这种系统为程序控制系统。如金属材料热处理炉炉温按一定规律升降温,机械加工中的程序控制机床(包括数控机床)等均属于此类系统。

### (3) 随动控制系统

输入量随时间的变化而有一定规律变化的控制系统。这种系统的任务是在各种情况下保证系统的输出都要以很高的精度随输入信号的变化而变化。这种系统又称为跟踪系统。运动目标(如飞机、导弹等)的自动跟踪瞄准和拦截系统,机械制造中的液压或电气仿形加工系统, $X-Y$  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柄时,就可以发现,调压器的滑柄也将随之来回移动,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做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 1-6(a)表示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。

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,原料最终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(b)所示。

## 2. 按系统有无反馈系统分类

### (1) 开环控制系统

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。

### (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

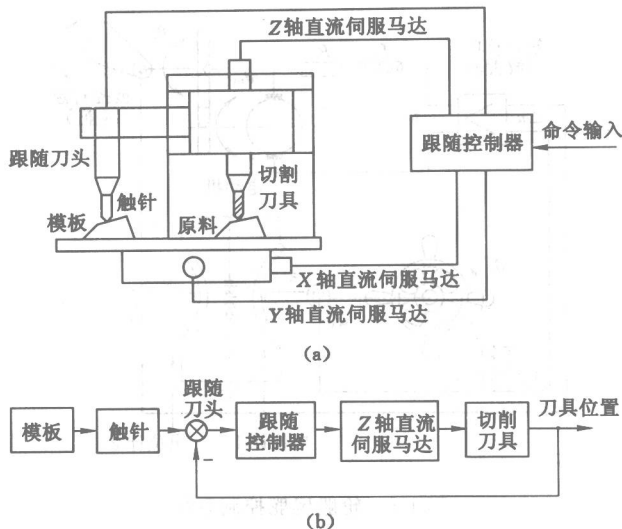


图 1-6 刀具跟随控制系统  
(a) 刀具跟随控制系统; (b) 刀具跟随控制系统方块图

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并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,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,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。它适用于控制精度要求高的场合。



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

图 1-8 表示一个控制轮船尾舵的控制系统。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,同时,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 1-8 中 L、R 分别表示的是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功能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  $u_i$  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;图中所示的  $\Delta u$  通常称为差值(偏差),在控制系统中起控制作用,其函数表达式为

$$\Delta u = u_i - u_c$$

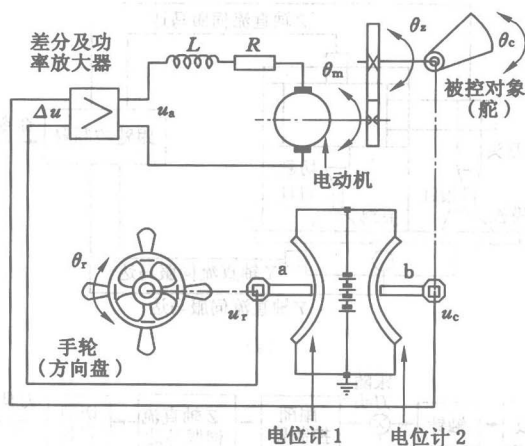


图 1-8 轮船尾舵控制系统

图 1-9(a)表示仓库大门自动开闭控制系统图。该系统的工作过程如下：

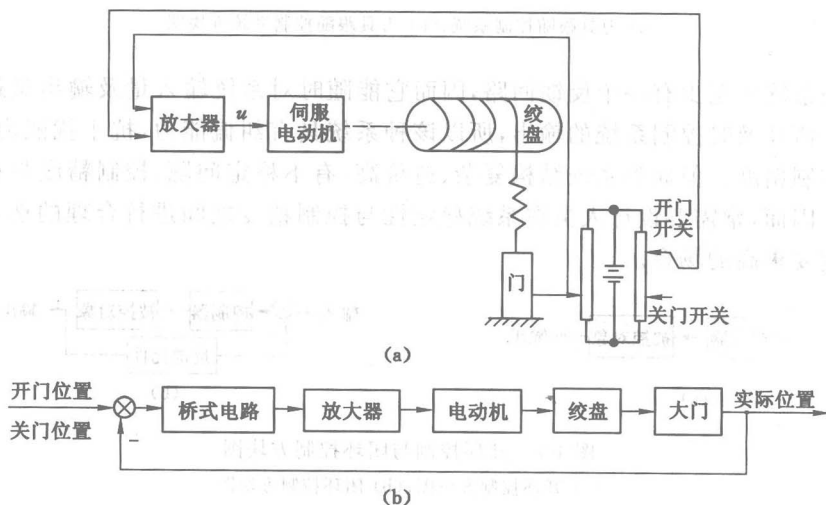


图 1-9 仓库大门控制系统

(a) 仓库大门自动开闭控制系统；(b) 仓库大门控制系统方块图

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，此时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纹盘转动，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，直到大门达到开启位置，桥式测量电路达到新的平衡，电动机才会停止转动。反之，当合上关门开关时，电动机带动纹盘旋转使大门关闭，从而可以实现远距离自动控制仓库大门的开闭。仓库大门控制系统方块图如图 1-9(b)所示。

### 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,称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,即在系统存在有几个输入时,系统的输出等于各个输入分别作用于系统时系统输出之和;当系统输入增大或减小时,系统的输出也按比例增大或减小。

如果描述系统动态特性的微分(或差分)方程的系数是常数而不随时间变化,则这种线性系统称为线性定常(或时不变)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,因为各种系统总是不同程度地具有非线性。当系统特性是非本质非线性时(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),可以在系统变量变动范围很小的条件下,作线性化处理。这个问题在本书的后面章节中还要专门进行介绍。

## 二、对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满意地工作,必须满足一系列性能指标的要求。对于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,它是系统正常工作的前提,反映了系统的平稳性。

### 2. 快速性

这是在系统稳定的前提下提出来的。所谓快速性就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

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)。

归纳起来,简称:稳、准、快。任何系统的稳定性、快速性、准确性是互相制约的。快速性好,可能稳定性差;改善稳定性,快速性又可能不好,精度也可能变差。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。