

# 自动控制原理

蒋燕君摇主编

重庆大学出版社

## 内 容 简 介

本书主要介绍分析和设计控制系统的经典理论及应用方法。全书共分 7 章,内容包括:绪论、控制系统的数学模型、时域分析法、根轨迹法、频域分析法、控制系统的校正、配平等在控制理论中的应用。

全书叙述清楚,理论联系实际,注重理论的物理背景和工程实用性。

本书可作为高等学校机电类专业的教材,也可作为电气工程与自动化、电子信息类专业的教学用书,还可供从事控制工程的技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

自动控制原理 / 蒋燕君主编. — 重庆:重庆大学出版社,

2012.12

ISBN 978-7-5624-5812-1

I. ①自... II. 蒋... III. 自动控制理论 IV. 62-7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 238700 号

## 自动控制原理

蒋燕君主编

责任编辑:周瑶立 钟加勇 版式设计:周瑶立  
责任校对:文瑶鹏 瑶瑶瑶 责任印制:张瑶策

\*

重庆大学出版社出版发行

出版人:张鸽盛

社址:重庆市沙坪坝正街 8 号重庆大学(南区)内

邮编:401331

电话:(023) 65103322 65103321

传真:(023) 65103323 65103324

网址:www.cqup.com.cn

邮箱:zhanggs@cqup.com.cn (市场营销部)

全国新华书店经销

重庆华林天美印务有限公司印刷

\*

开本:787mm×1092mm 1/16 印张:16.5 字数:380千字

2012 年 12 月第 1 版 2012 年 12 月第 1 次印刷

印数:1—5000

ISBN 978-7-5624-5812-1 定价:35.00 元

本书如有印刷、装订等质量问题,本社负责调换  
版权所有,请勿擅自翻印和用本书  
制作各类出版物及配套用书,违者必究

# 前言

摇摇“自动控制原理”是高等学校机电类各专业的一门重要的专业基础课。其作用与任务是使学生掌握自动控制系统的基本概念,掌握开环控制、闭环控制和复合控制系统的基本原理,掌握时域分析法、根轨迹法和频域分析法等基本分析方法,为后续专业课程的学习和运用奠定良好的基础。

为了在较少的学时内使学生能较系统地掌握控制理论中最基本的分析和设计方法,本书内容按控制理论的发展过程组织编排,由浅入深,重在基础,突出应用。在加强基本概念、基本理论和基本方法的基础上,注重理论的物理背景及物理概念的建立,强调控制理论的工程意识和工程实用性。

全书由蒋燕君老师担任主编并对全书进行统稿。本书第员章和第远章由浙江工业大学之江学院的田建创老师编写,第圆章和第猿章由陕西工业职业技术学院的段峻老师编写,第源章和第苑章由浙江工业大学的仇翔老师编写,第缘章和附录由浙江树人大学的蒋燕君老师编写。

在编写过程中,得到了上述学校相关部门领导和老师的关心与支持,在此表示衷心的感谢。

由于编者水平有限,书中难免存在一些错漏之处,恳请广大读者批评指正。

编摇者

圆园园年 怨月

# 目 录

第 1 章 绪论 .....	1
1.1 开环控制和闭环控制 .....	1
1.2 闭环控制系统的组成 .....	2
1.3 自动控制系统的类型 .....	3
1.4 对控制系统的基本要求 .....	3
小结 .....	4
习题 .....	4
第 2 章 控制系统的数学模型 .....	5
2.1 系统微分方程式的编写 .....	5
2.2 非线性数学模型线性化 .....	6
2.3 传递函数 .....	6
2.4 系统框图及其化简方法 .....	7
2.5 信号流图和梅逊增益公式 .....	7
小结 .....	8
习题 .....	8
第 3 章 时域分析法 .....	9
3.1 典型输入信号 .....	9
3.2 控制系统的时域性能指标 .....	9
3.3 一阶系统的暂态响应 .....	10
3.4 二阶系统的暂态响应 .....	10
3.5 高阶系统的暂态响应 .....	11
3.6 控制系统的稳定性 .....	12
3.7 劳斯稳定判据 .....	12
3.8 控制系统的稳态误差 .....	12
3.9 给定稳态误差 .....	12
3.10 扰动稳态误差 .....	12

小结.....	缘怨
习题.....	缘怨
第 源章摇根轨迹法.....	远猿
源源摇根轨迹的概念 .....	远猿
源源摇绘制根轨迹的基本条件和基本规则 .....	远源
源源摇参数根轨迹的绘制 .....	苑源
源源摇正反馈回路和滞后系统的根轨迹 .....	苑缘
源源摇用根轨迹法分析系统的性能 .....	苑怨
小结.....	愿员
习题.....	愿员
第 缘章摇频域分析法.....	愿猿
缘源摇频率特性的概念和表示方法 .....	愿猿
缘源摇典型环节的频率特性 .....	愿苑
缘源摇系统开环频率特性的绘制 .....	怨猿
缘源摇奈奎斯特稳定判据和系统的相对稳定性 .....	怨苑
缘源摇开环频域性能指标与时域性能指标间的关系.....	员猿猿
缘源摇闭环频域性能指标与时域性能指标间的关系.....	员猿远
小结 .....	员猿怨
习题 .....	员肆园
第 远章摇控制系统的校正 .....	员源源
远源摇系统校正的概念.....	员源源
远源摇根轨迹法校正.....	员源员
远源摇频域分析法校正.....	员源远
远源摇串联控制器及其参数的整定 .....	员源猿
远源摇反馈校正.....	员源愿
远源摇复合校正.....	员源员
小结 .....	员源源
习题 .....	员源缘
第 苑章摇配网技术在控制理论中的应用 .....	员源愿
苑源摇杂题云平台下的控制系统建模与仿真 .....	员源愿
苑源摇系统数学模型间的相互转换.....	员源猿
苑源摇控制系统时域响应的绘制与分析.....	员源远

振荡系统根轨迹的绘制与分析	页码
振荡系统(伯德)图和奈奎斯特)图的绘制与分析	页码
振荡系统控制器的建模与参数整定	页码
小结	页码
习题	页码
附录拉普拉斯变换对照表	页码
部分习题答案	页码
参考文献	页码

# 第 1 章

## 绪论

自动控制原理是控制论中工程控制论的一个分支,作为自动化学科的重要基础理论,研究自动化控制的基本理论和控制系统的设计、分析的基本方法。本章通过描述自动控制的基本概念、任务、控制方式及控制过程的简单分析,从而建立对本学科的一个较为明确的认识。

自动控制理论是理论性较强的工程技术科学。通常将控制理论划分为经典控制理论与现代控制理论两大部分。经典控制理论又称为古典控制理论,是在二次世界大战前后,为适应军事及工业控制的需要逐步发展起来的完整的理论体系。它是以传递函数为基础,研究单输入单输出、线性定常系统的分析和设计问题。20世纪40年代,为适应航空航天技术的发展,自动控制理论迎来了新的发展阶段——现代控制理论。它以状态空间法为基础,主要研究变参数、非线性、高精度的多输入多输出系统的最优控制问题。目前,控制理论正朝着以控制论、信息论、仿生学为基础的智能控制理论方向发展。现代控制理论的发展并不意味着经典控制理论已经过时了。不同的理论有着不同的适用范围。同时,随着数学与计算机的发展,经典控制理论在其本身范畴内的研究也在不断的深入。本书将只讨论经典控制理论,研究的系统主要是反馈控制系统。

### 1.1 开环控制和闭环控制

在开始课程内容的学习之前,先让我们简要回顾一下自动控制理论的发展简史。自动控制理论是研究自动控制共同规律的技术科学。它既是一门古老的、发展成熟的学科,又是一门正在发展的、具有强大生命力的新兴学科。从1789年麦克斯威尔(1791-1859)提出低阶系统稳定性判据至今一百多年里,自动控制理论的发展可分为四个主要阶段,即经典控制理论的产生、发展和成熟阶段,现代控制理论的兴起和发展阶段,大系统控制兴起和发展阶段,以及智能控制发展阶段。

控制理论的发展初期,是以反馈理论为基础的自动调节原理,主要用于工业控制。第二次世界大战期间,为了设计和制造飞机及船用自动驾驶仪、火炮定位系统、雷达跟踪系统等基于反馈原理的军用装备,进一步促进和完善了自动控制理论的发展。在这个时期,1942年,麦克斯威尔(1791-1859)提出了低阶系统的稳定性代数判据。1933年,数学家劳斯(1830-1882)和赫

尔维茨(匀稳判据)分别独立地提出了高阶系统的稳定性判据,即 0 判据和 0 判据。二战期间,奈奎斯特(匀稳判据)提出了频率响应理论。1945年,伊万斯(宰援援援)提出了根轨迹法。至此,控制理论发展的第一阶段基本完成,形成了以频率法和根轨迹法为主要方法的经典控制理论。需要指出的是,反馈控制是一种最基本最重要的控制方式,引入反馈信号后,系统对来自内部和外部干扰的响应变得十分迟钝,从而提高了系统的抗干扰能力和控制精度。与此同时,反馈作用又带来了系统稳定性问题,正是这个曾一度困扰人们的系统稳定性问题激发了人们对反馈控制系统进行深入研究的热情,推动了自动控制理论的发展与完善。因此从某种意义上讲,古典控制理论是伴随着反馈控制技术的产生和发展而逐渐完善和成熟起来的。关于反馈控制,将在后面的内容里中具体展开。

由于经典控制理论只适用于单输入、单输出的线性定常系统,只注重系统的外部描述而忽视系统的内部状态。因而在实际应用中有很大局限性。随着航天事业和计算机的发展,20世纪 50年代初,在经典控制理论的基础上,以线性代数理论和状态空间分析法为基础的现代控制理论迅速发展起来。期间,1959年贝尔曼(0 判据)提出动态规划理论。1959年庞特里雅金(0 判据)提出极大值原理。1960年卡耳曼(0 判据)提出多变量最优控制和最优滤波理论。运用现代控制理论研究和分析系统,不仅能提供系统的外部信息(输出量和输入量),而且还能提供系统内部状态变量的信息。无论对线性系统或非线性系统,定常系统或时变系统,单变量系统或多变量系统,都是一种有效的分析方法。

20世纪 70年代开始,现代控制理论继续向深度和广度发展,出现了一些新的控制方法和理论。如现代频域方法、自适应控制理论、鲁棒控制方法等。随着控制理论应用范围的扩大,从个别小系统的控制,发展到若干个相互关联的子系统组成的大系统进行整体控制,从传统的工程控制领域推广到包括经济管理、生物工程、能源、运输、环境等大型系统以及社会科学领域。大系统理论是过程控制与信息处理相结合的系统工程理论,具有规模庞大、结构复杂、功能综合、目标多样、因素众多等特点。它是一个多输入、多输出、多干扰、多变量的系统。大系统理论目前仍处于发展和开创性阶段。

智能控制是近年来新发展起来的一种控制技术,是人工智能在控制上的应用。智能控制的概念和原理主要是针对被控对象、环境、控制目标或任务的复杂性提出来的,它的指导思想是依据人的思维方式和处理问题的技巧,解决那些目前需要人的智能才能解决的复杂的控制问题。被控对象的复杂性体现为:模型的不确定性,高度非线性,分布式的传感器和执行器,动态突变,多时间标度,复杂的信息模式,庞大的数据量,以及严格的特性指标等。智能控制是驱动智能机器自主地实现其目标的过程,对自主机器人的控制就是典型的例子,而环境的复杂性则表现为变化的不确定性和难以辨识。智能控制是从“仿人”的概念出发的。一般认为,其方法包括学习控制、模糊控制、神经网络控制和专家控制等方法。

整个自动控制理论的发展过程,始终在围绕“自动控制”而展开。所谓自动控制,就是指在没有人直接参与的情况下,利用控制器使被控对象(如机器、设备和生产过程)的某些物理量(或工作状态)能自动地按照预定的规律变化(或运行)。完成这一过程的所有元件与装置组成的整体就称为自动控制系统。与之相对应的,如果要通过我们人类自身参与控制,完成预先的目标就是人工控制了。也正是由于人类在参与控制的过程中,无可避免地体现出一些不足之处,无法达到很高的控制效果,对高性能的追求使得自动控制广泛地应用于工农业生产,交通运输,国防和航天等各个领域。随着生产和科学技术的发展,自动控制技术起的作用越来越

越重要,自动化水平越来越高,如人造卫星能按预定轨道运行,并能返回地面,导弹能正确地命中目标,宇宙飞船能准确地地在目标上着陆,并能返回地球。这都是由于自动控制技术高速发展的结果。近几十年来,随着计算机技术的发展和应用,在宇航、机器人控制、导弹制导及核动力等高新技术领域中,自动控制技术更具特别重要的作用。不仅如此,自动控制技术的应用范围现在已扩展到生物、医学、环境、经济管理和其他许多社会生活领域中,自动控制已成为现代社会生活中不可缺少的一部分。如果以我们日常生活中常见的为例,也同样可以举很多例子,如电冰箱、空调能够按照我们的意愿将温度控制在预先设定的范围,全自动洗衣机能够按照预定的程序完成洗涤工作,这样的例子日常生活中有很多,不再一一例举。

在进行进一步的学习之前,先定义一些术语,以便于后续的内容进行。

**自动控制**:在无人直接参加的情况下,利用控制装置使被控对象和过程自动地按预定规律变化的控制过程。

**自动控制系统**:是由控制装置和被控对象所组成,它们以某种相互依赖的方式组合成为一个有机整体,并对被控对象进行自动控制。

**被控对象**:要求实现自动控制的机器、设备或生产过程。

**控制器**:对被控对象起控制作用装置的总体,称作控制装置或控制器。

**输出量**:表现于控制对象或系统输出端,并要求实现自动控制的物理量。

**输入量**:作用于控制对象或系统输入端,并可使系统具有预定功能或预定输出的物理量。

**扰动**:所有妨碍控制量对被控量按要求进行正常控制的因素,称为干扰量或扰动量。扰动也是系统的输入信号,但是是系统不希望的外作用,一般情况下,扰动将会破坏有用信号对输出量的控制。通常所说的系统输入量,一般指有用信号,反映对输出量的控制要求。

## 1.1 开环控制

### 1.1.1 定义

开环控制指控制装置与被控制对象之间只有正方向作用而没有反向联系的控制过程。在开环系统中,不需要对输出量进行测量,其结构图如图 1-1 所示。如交通指挥的红绿灯转换,自动生产线等。普通洗衣机同样也是开环控制系统的例子。浸湿、洗涤和漂清过程,在普通洗衣机中是依次进行的,在洗涤过程中,无需对其输出信号,即衣服的清洁程度进行测量。

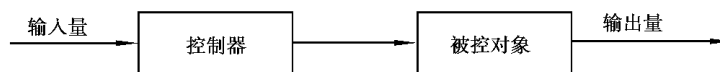


图 1-1 开环控制系统结构图

### 1.1.2 开环控制的特点

- (1) 输出不影响输入,对输出不需测量,通常较易实现。
- (2) 组成系统的元、部件精度高,系统精度才能高。
- (3) 系统的稳定性不是主要问题。

### 1.1.3 开环系统存在的问题

- (1) 要求元、部件的精度要高。
- (2) 当存在变化规律无法预测的干扰时,不容易实现。

在该类系统中,对于每一个输入量,都有一个与之对应的工作状态和输出量,系统的精度

仅取决于元器件的精度和特性调整的精度。这种控制比较简单。控制作用直接由系统的输入量产生。系统对于可能的干扰及工作过程中特性参数的变化都没有自动补偿的作用,因而控制的精度完全取决于元件及校准的精度。由于其结构简单,调整方便,在精度要求不高或扰动影响较小的场合还是适用的。一些自动化的流水线、数控车床、自动售货机等多为这类开环控制系统。如果在控制器或控制对象上存在干扰,或者由于控制器元器件老化,控制对象结构或参数发生变化,均会导致系统输出的不稳定,使输出值偏离预期值。正因为如此,开环控制系统一般适用于干扰不强或可预测,控制精度要求不高的场合。

### 员源 闭环控制

#### 员定义

闭环系统指控制对象之间既有正方向的作用,又有反方向联系的控制过程。在闭环系统中,需对输出量进行测量,图 员源 所示为闭环控制系统结构图。

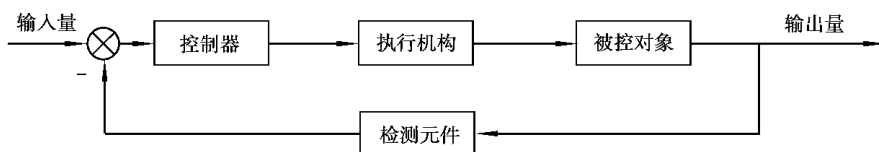


图 员源 闭环控制系统结构图

闭环控制系统中的控制器和被控对象之间,不仅存在正向作用,而且存在着反向的作用,即系统的输出量对控制量具有直接的影响。该类系统将检测出来的输出量送回到系统的输入端,并与输入信号比较,称为反馈。因此,闭环控制又称为反馈控制,系统的控制器和控制对象共同构成了前向通道,而反馈装置构成了系统的反馈通道。

在控制系统中,反馈的概念非常重要。在图 员源 中,如果将反馈环节取得的实际输出信号加以处理,并在输入信号中减去这样的反馈量,再将结果输入到控制器中去控制被控对象,我们称这样的反馈为负反馈;反之,若由输入量和反馈量相加作为控制器的输入,则称为正反馈。在一个实际的控制系统中,具有正反馈形式的系统一般是不能改进系统性能的,而且容易使系统的性能变坏,因此不被采用。而有负反馈形式的系统,它通过自动修正偏离量,使系统趋向于预先的设定值,并抑制系统中存在的干扰的影响,最终达到自动控制的目的。通常,反馈控制就是指负反馈控制。

反馈控制是自动控制系统最基本的控制方式,也是应用最广泛的控制方式。反馈控制原理的实质就是利用偏差去控制偏差。从信号的流向来,反馈控制系统形成了一个闭环。

#### 员 闭环控制的特点

(员)与开环系统比较,闭环控制系统的最大特点是检测偏差,纠正偏差。

(圆)从系统结构上看,闭环系统具有反向通道,即反馈。

从功能上看:

(员)由于增加了反馈通道,系统的控制精度得到了提高,若采用开环控制,要达到同样的精度,则需要高精度的控制器,从而大大增加了成本。

(圆)由于存在系统的反馈,可以较好地抑制系统各环节中可能存在的扰动和由于器件的老化而引起的结构和参数的不稳定性。

(3) 反馈环节的存在,同时可较好地改善系统的动态性能。当然,如果引入不适当的反馈,如正反馈,或者参数选择不恰当,不仅达不到改善系统性能的目的,甚至会导致一个稳定的系统变为不稳定的系统。

在现实世界中,反馈控制系统的形式是多样的,但一般均可化为图 1-1 的形式。下面我们举一个实例加以说明。

一个水池水位自动控制系统如图 1-2 所示。在这个水位控制系统中,水池的进水量  $Q_1$  来自电动机控制开度的进水阀门,出水量  $Q_2$ 。在用户用水量  $Q_2$  随意变化的情况下,保持水箱水位在希望的高度不变。

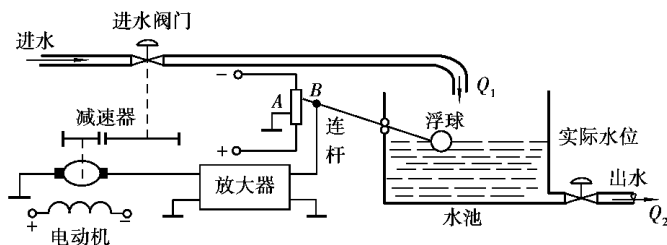


图 1-2 水池水位自动控制系统结构示意图

希望水位高度由电位器角头  $\theta_0$  设定,浮子测出实际水位高度。由浮子带动的电位计触头的位置反映实际水位高度。 $\theta_0, \theta$  两点的电位差  $U_0 - U$  反映希望水位与实际水位的偏差。当实际水位低于希望水位时, $U_0 - U > 0$ ,通过放大器驱使电动机转动,开大进水阀门,使进水量  $Q_1$  增加,从而使水位上升。当实际水位上到希望值时, $\theta_0, \theta$  两个触头在同一位置, $U_0 - U = 0$ ,电动机停转,进水阀门开度不变,这时进水量  $Q_1$  和出水量  $Q_2$  达到了新的平衡。若实际水位高于希望水位, $U_0 - U < 0$ ,则电动机使进水阀门的开度关小,以使进水量减少,实现水位下降到原有位置的要求。

反馈控制是按偏差进行控制的,其特点是对反馈环内前向通道上的各种扰动都具有控制作用。但是,对于给定本身的误差及反馈通道上的扰动,系统不具有调节作用。从这一角度来说,反馈控制系统的精度取决于给定精度及检测元件的精度。和开环控制系统比较,闭环控制系统有较高的精度,但是结构要复杂得多,系统的分析与设计也相应比较麻烦。可以说,闭环控制系统是以增加系统的复杂程度来换取系统某些方面性能的提高。在设计自动控制系统时,要根据具体的工艺要求,综合考虑技术与经济指标,不能一味追求性能上的高标准。在对系统的性能及成本都有一定要求时,可以考虑一种折中的方案——复合控制方式。关于复合控制的有关具体内容,将在后面的章节里加以说明。

### 1.3 闭环与开环控制系统的比较

闭环控制(偏差控制),可以抑制内、外扰动对被控制量产生的影响。精度高、结构复杂,设计、分析麻烦。

开环控制(顺向作用),没有反向的联系,没有修正偏差能力,抗扰动性较差。结构简单、调整方便、成本低。在精度要求不高或扰动影响较小的情况下,这种控制方式还有一定的实用价值。

## 典型闭环控制系统的组成

闭环控制系统是由各种结构的元件构成的。从完成“自动控制”这一目的来看,一个控制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职能的各种基本元件组成的。在不同的系统中,结构完全不同的元件却可以具有相同的功能。一般来说,一个典型的闭环控制系统基本组成可以用图 1-1 表示。将组成系统的元件按在系统中的职能来划分,主要有以下几种。

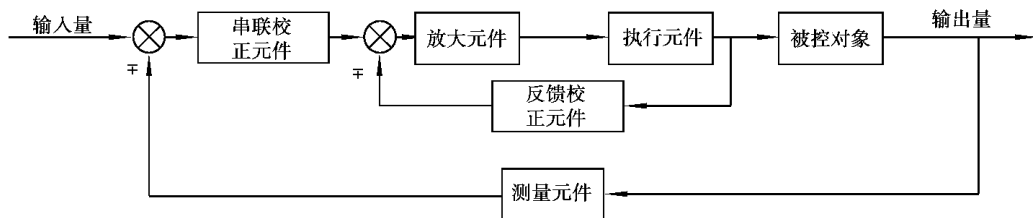


图 1-1 典型闭环控制系统结构图

(1) 给定元件 给出与期望输出相对应的系统输入量。

(2) 比较元件 求输入量与反馈量的偏差,常用的比较元件有差动放大器、机械差动装置、电桥电路等。

(3) 放大元件 由于偏差信号一般都较小,不足以驱动负载,故需要放大元件,包括电压放大及功率放大。放大元件的职能在于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。

(4) 执行元件 直接推动被控对象,使输出量发生变化。常用的有电动机、阀、液压马达等。

(5) 测量元件 检测被控的物理量并转换为所需要的信号。在控制系统中常用的有用于速度检测的测速发电机、光电编码盘等,用于位置与角度检测的旋转变压器、自整机等,用于电流检测的互感器及用于温度检测的热电偶等。这些检测装置一般都将被检测的物理量转换为相应的连续或离散的电压信号。

(6) 校正元件 也叫补偿元件,是结构与参数便于调整的元件,以串联或反馈的方式联接在系统中,完成所需的运算功能,以改善系统的性能。

图中用“ $\otimes$ ”号代表比较元件,它将测量元件检测到的被控量与输入量进行比较,“ $\ominus$ ”号代表两者符号相反,即负反馈,“ $\oplus$ ”号代表两者符号相同,即正反馈。信号沿箭头方向从输入端到达输出端的传输通路称前向通路,系统输出量经测量元件反馈到输入端的传输通路称主反馈通路。前向通路与主反馈通路共同构成主回路。此外,还有局部反馈通路以及由它构成的内回路。包含一个主反馈通路的系统称单回路系统,有两个或两个以上反馈通路的系统称多回路系统。

下图是一个电炉温度控制系统的原理示意图。为了控制炉温,系统使用温度计检测炉膛当前温度。通过温度传感器将温度这一物理信号转成电信号,和我们预期的温度值也就是输

入量进行比较,两者的偏差信号送入控制器,控制器输出控制量,经过放大器放大,驱动电加热器来改变炉膛温度。整个过程中,温度计和温度传感器就是系统的测量元件,将被控的物理量温度转换为我们实施自动温度控制所需的电信号。功率放大器就是系统的放大元件。而执行元件就是加热器。这个系统中没有加入校正元件,如果今后有进一步的要求,可以考虑加入。

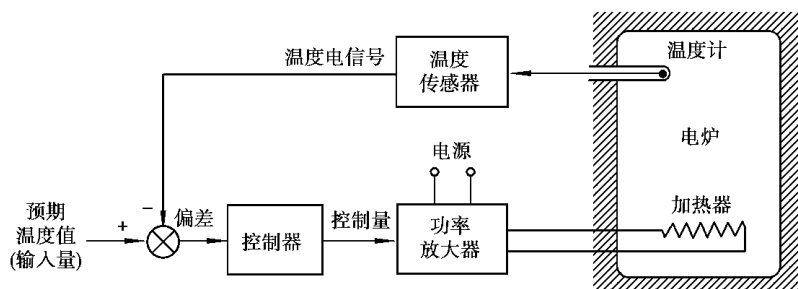


图 1-1 电炉温度控制系统示意图

## 1.2 自动控制系统的类型

自动控制系统的分类方法种类繁多、错综复杂。以下介绍几种常用的分类方法。

### 1.2.1 按控制方式划分

可分为开环控制、闭环控制和复合控制系统。

#### 1) 开环控制系统

信号流动由输入端到输出端单向流动,如图 1-2 所示。

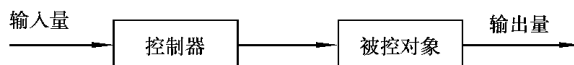


图 1-2 开环控制系统结构

#### 2) 闭环控制系统

若控制系统中信号除从输入端到输出端外,还有输出到输入的反馈信号,则构成闭环控制系统,也称反馈控制系统,如图 1-3 所示。

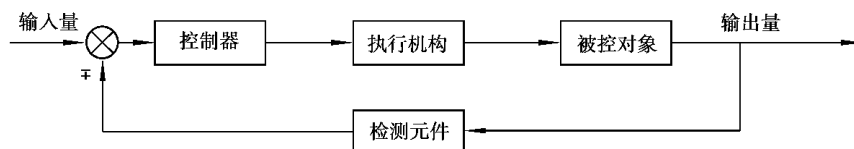


图 1-3 闭环控制系统结构

#### 3) 复合控制系统

反馈控制只有在出现偏差后才能产生控制作用,因此系统在受到强烈扰动后,在控制过程中,被控量可能有较大的波动。为了提高系统的快速性与精度,除了主反馈回路外,宜采用设

置在主回路以外前置滤波或扰动补偿装置,这种开环与闭环组合的系统称为复合控制系统,如图 1-15 所示。

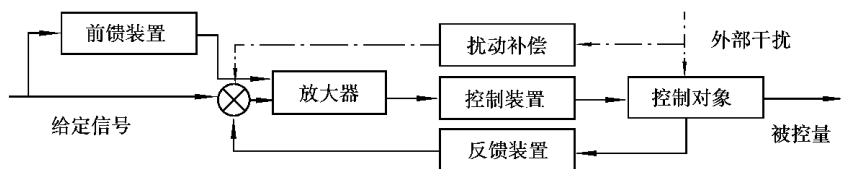


图 1-15 复合控制系统

由上图可见,复合控制是开环控制与闭环控制相互配合的系统。系统按开环进行粗调,而以闭环进行细调(或称校正),兼有开环控制动作迅速、闭环控制精度高的优点,当对系统性能要求较高而闭环反馈控制难以达到要求时可以考虑采用,但系统的复杂程度同时也在增加。

### 1-1-2 按输入信号的变化规律划分

可分为恒值、随动、程序控制系统。

#### 1) 恒值调节系统(自动调节系统)

这种系统的特征是输入量为一恒值,通常称为系统的给定值。控制系统的任务是尽量排除各种干扰因素的影响,使输出量维持在给定值(期望值)。如工业过程中恒温、恒压、恒速等控制系统。

#### 2) 随动系统

该系统的控制输入量是一个事先无法确定的任意变化的量,要求系统的输出量能迅速平稳地复现或跟踪输入信号的变化。如雷达天线的自动跟踪系统和高炮自动瞄准系统就是典型的随动系统。

#### 3) 程序控制系统

系统的控制输入信号不是常值,而是事先确定的运动规律,编成程序装在输入装置中,即控制输入信号是事先确定的程序信号,控制的目的是使被控对象的被控量按照要求的程序动作。如数控车床就属此类系统。

### 1-1-3 按数学模型是否满足叠加原理划分

可分为线性控制系统和非线性控制系统。

#### 1) 线性系统

这类系统中,组成系统元器件的特性均为线性的,可用一个或一组线性微分方程来描述系统输入和输出之间的关系。线性系统的主要特征是具有齐次性和满足叠加定律。

#### 2) 非线性系统

在系统中只要有一个元器件的特性不能用线性微分方程描述其输入和输出关系,则称为非线性系统。非线性系统还没有一种完整、成熟、统一的分析法。通常对于非线性程度不很严重,或做近似分析时,均可用线性系统理论和方法来处理。

### 1-1-4 按系统中输入、输出信号是否是时间的连续函数划分

可分为定常系统和时变系统。

### 1.1 定常系统

如果描述系统特性的微分方程中各项系数都是与时间无关的常数,则称为定常系统。该系统只要输入信号的形式不变,在不同时间输入下的输出响应形式是相同的。

### 1.2 时变系统

如果描述系统特性的微分方程中只要有一项系数是时间的函数,此系统称为时变系统。

### 1.3 按系统结构参数是否是时间的函数划分

可分为连续系统和离散系统。

#### 1.3.1 连续系统

如果系统中所有元件的信号都是随时间连续变化的,而且信号的大小均是可任意取值的模拟量,称为连续系统。

#### 1.3.2 离散系统

离散系统是指系统中有一处或数处的信号是脉冲序列或数码。若系统中采用了采样开关,将连续信号转变为离散的脉冲形式的信号,此类系统称为采样控制系统或脉冲控制系统。若采用数字计算机或数字控制器,其离散信号是以数码形式传递的,此类系统称为数字控制系统。

### 1.4 按系统输入输出信号的数量划分

可分为单输入单输出和多输入多输出系统。

#### 1.4.1 单输入单输出(SISO)

系统的输入量和输出量各为一个,称为单输入单输出系统。

#### 1.4.2 多输入多输出(MIMO)

若系统的输入量和输出量多于一个,称为多输入多输出系统。对于线性多输入多输出系统,系统的任何一个输出等于数个输入单独作用下输出的叠加。

自动控制系统的分类方式还有很多,比如按系统结构参数是否是确定的、已知的可分为确定性系统和不确定性系统,按执行元件物理特性的不同可分为机械、电气、液压和气动控制系统。按控制器是否采用计算机可分为数字控制系统和模拟控制系统。按被控对象的行为范畴可分为运动控制系统和过程控制系统。

本书将主要以线性定常系统来展开研究。

## 1.5 对控制系统的基本要求

自动控制系统是否能很好地工作,是否能精确地保持被控量按照预定的要求规律变化,这取决于被控对象和控制器及各功能元器件的特性参数是否设计得当。对于一个闭环控制系统而言,在理想情况下,控制系统的输出量和输入量,在任何时候均相等,系统完全无误差,且不受干扰的影响。这种状态称为平衡状态或静态、稳态。显然,系统在稳态时的输出量是我们关心的。实际系统中,由于各种各样原因,当输入量或扰动量发生变化,反馈量将与输入量之间产生新的偏差,通过控制器的作用,从而使输出量最终稳定,即达到一个新的平衡。但由于系统中各环节总存在惯性,系统从一个平衡点到另一个平衡点无法瞬间完成,即存在一个过渡过

程 称为动态过程或暂态过程。

过渡过程的形式不仅与系统的结构和参数有关,也与参考输入和外加扰动有关。一般有单调过程、衰减振荡过程、等幅振荡过程等形式;此外,我们关心系统会否稳定,如果会稳定,系统到达新的平衡状态需要多少时间。总体而言,系统在受到输入信号(也包括扰动信号)的激励时,被控量将偏离输入信号作用前的初始值,经历一段动态过程(过渡过程),而系统控制性能的优劣,可以从动态过程中较充分地表现出来。总的来说对自动控制系统性能的基本要求可以归结为稳定性(长期稳定性)、准确性(精度)和快速性(相对稳定性),简单说就是“稳准快”。

稳即稳定性。稳定性是保证控制系统正常工作的先决条件。一个稳定的控制系统,其被控量偏离预期值的初时偏差应该能够随着时间的增长逐渐减小或者趋向于零。具体来说,对稳定的恒值系统要求当系统受到扰动后,经过一定时间的调整能够回到原来的期望值。而对稳定的随动系统,被控制量始终跟踪输入量的变化。反之,不稳定的控制系统,其被控量偏离期望值的初始偏差将随着时间的增长而发散,无法完成预定的控制任务。

稳定性是对系统的基本要求,不稳定的系统不能实现预定任务,是自动控制系统首要考虑的问题。稳定性通常由系统的结构决定与外界因素无关,这是因为控制系统中一般含有储能元件或惯性元件,比如绕组的电感、电枢转动惯量、电炉热容量、物体质量等。储能元件的能量不可能突变,因此,当系统受到扰动或有输入量时,控制过程不会立即发生,而是有一定的延缓,这就使得被控量恢复期望值或跟踪输入量有一个时间过程,也就是过渡过程。过渡过程通常呈现振荡形式,在期望值附近来回摆动。如果这个振荡过程是逐渐减弱的,系统最后能够达到平衡状态,控制目的可以实现,这样的系统就是稳定的。关于稳定的定义及分析比较复杂,在后续各章节及现代控制理论中都要对它做详细的讨论。

一般来说,对于线性定常系统,稳定的充要条件是“有界的输入产生有界的输出”。

快即指过渡过程的快速性。为了很好地完成控制任务,控制系统仅仅满足稳定性要求是不够的,还必须要对系统的过渡过程的形式和快慢提出要求。若过渡过程持续的时间很长,将使系统长时间处于大偏差的情况,会降低系统的工作效率;同时也说明系统响应很迟钝,难以跟踪复现快速变化的信号。比如稳定高射炮射角随动系统,虽然炮身最终能跟踪目标,但如果目标变动迅速,而炮身行动迟缓,仍然抓不住目标;对于稳定的自动驾驶仪系统,当飞机受到阵风扰动而偏离预定航线时,能够自动恢复预定航线。但是在恢复过程中,如果机身摇晃幅度过大或者恢复速度过快,会使乘员感到不适,当然,如果恢复速度过慢,同样也是不能令人接受的。函数记录仪记录输入电压时,如果记录笔移动很慢或者摆动幅度过大,不仅使记录曲线失真,而且还有可能损坏记录笔。因此,对控制系统过渡过程的时间和最大振荡幅度一般都会有具体要求。

准就是准确性。准确性反映系统的稳态性能,通常用稳态误差来表示。过渡过程结束后,系统的输出与期望值的差值称为稳态误差。显然,这种误差越小,表示系统的输出跟随参考输入的精度越高。理想的情况是当时间趋于无穷时,稳态误差为零。然而在实际系统中,由于系统结构、外作用的形式及非线性因素的影响,稳态误差一般总是存在的。对于同一系统,稳、快、准是相互制约的。提高快速性,可能会影响过渡过程的平稳性。改善平稳性,可能会导致快速性下降。提高稳态精度,可能会导致稳定性下降。而由于被控对象具体情况的不同,各种系统对上述三方面性能要求的侧重点也有所不同。例如随动系统对快速性和稳态精度的要求较高,而恒值系统一般侧重于稳定性能和抗扰动的能力。由于系统动态响应的快速性、高精度与动态稳定性之间是相互矛盾的,在设计控制系统的时候,就需要根据具体情况和具体要求来

争取达到一种各种性能之间的相对折中,这也是本课程的主要任务之一。

## 小结

自动控制是在没有人直接参与的情况下,利用控制装置使被控对象自动地按照要求的运动规律变化。

自动控制系统可以是开环控制、闭环控制和复合控制。最基本的控制方式是闭环控制,也称反馈控制,它的基本原理是利用偏差纠正偏差。

自动控制系统讨论的主要问题,是系统动态过程的性能,归结为三个字:稳、准、快。

## 习题

试列举几个常见的开环和闭环控制系统,并简要说明原理。

图 1-1 是仓库大门自动控制系统原理示意图。试说明系统自动控制大门开闭的工作原理并画出系统方块图。

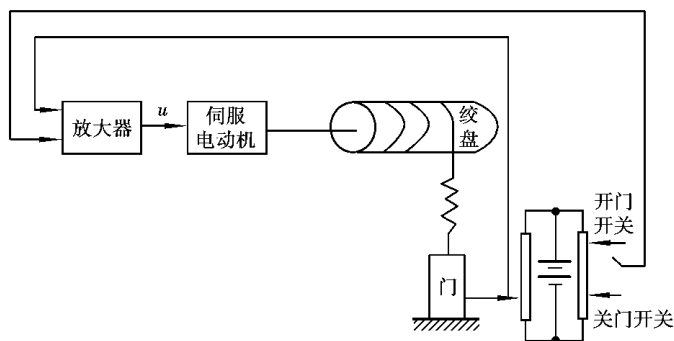


图 1-1 仓库大门自动控制系统原理图

图 1-2 为一电炉温度控制系统的示意图,试分析系统保持电炉温度恒定的工作原理。

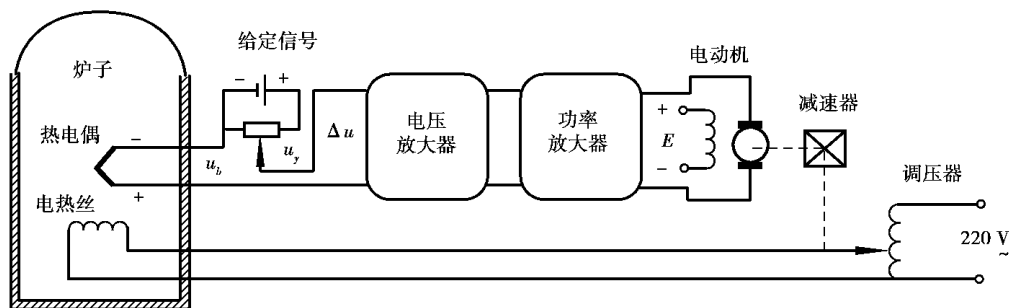


图 1-2 电炉温度控制系统示意图