



“十三五”普通高等教育本科规划教材

ZIDONG KONGZHI LILUN

# 自动控制理论

尤小军 主编



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



“十三五”普通高等教育本科规划教材

# 自动控制理论

主编 尤小军  
参编 朱 宁 童 佳  
王瑞明 赵巧娥



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

## 内 容 提 要

本书主要介绍自动控制理论中分析和设计反馈控制系统的经典理论和应用方法。全书共分8章和2个附录,内容包括自动控制与自动控制系统的基本概念,控制系统的数学模型,控制系统的时域分析法,根轨迹法,控制系统的频域分析法,控制系统的综合与校正,非线性控制系统,离散控制系统, MATLAB 软件工具在控制系统分析和综合中的应用等。在每章后均有一定数量的习题并配有部分习题参考答案,为读者提供一个自主学习的闭环条件,便于读者学习和巩固所学知识,以帮助其准确理解控制系统的基本概念并正确掌握控制系统的分析设计方法。

本书主要面向本科机、电类专业的“自动控制理论”课程教学,对专科和少学时本科专业教学可适当调整内容和学时数。读者通过本书的使用学习,在掌握经典控制理论分析与设计自动控制系统方法的同时,在使用计算机辅助工具(MATLAB)对控制系统进行分析和设计的能力也能有所提高。

### 图书在版编目(CIP)数据

自动控制理论/尤小军主编. —北京:中国电力出版社, 2016.12

“十三五”普通高等教育本科规划教材

ISBN 978-7-5123-9061-4

I. ①自… II. ①尤… 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(2016)第 048278 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街19号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

\*

2016年12月第一版 2016年12月北京第一次印刷

787毫米×1092毫米 16开本 17印张 415千字

定价 36.00元

### 敬告读者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪  
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

# 前 言

自动控制理论属于技术基础性课程，其知识内容体系与高等数学类似，相对稳定，理论性较强，同时又是指导控制工程实际应用的基础，实践性较强。为此，在教材编写中注重理论与实际的结合，强调基本知识、基本概念、基本分析方法的叙述表达清晰准确，符合学生的认知心理，力求达到教与学的和谐统一，使学生很好地掌握自动控制理论并具备将其运用到自动控制工程实际中的能力。

本书针对培养应用型高级工程技术人才的目标要求，围绕自动控制理论的基本概念、基本知识内容体系这条主线，对自动控制系统数学模型的建立、性能分析、综合校正方法做了详细介绍。其中对实际控制工程中常见的线性定常连续控制系统的稳定性、暂态性能和稳态性能的分析方法和综合校正方法做了重点介绍，对非线性系统和当前日见增多的离散系统的分析方法也做了较深入的讨论。此外，为培养学生具有掌握应用新知识新技术手段解决自动控制工程问题的能力，具备在以后工作中独立分析研究问题的素质，在附录 A 中编排了用于自动控制系统分析和综合的计算机辅助工具——MATLAB 的内容介绍及应用。本书中例题和习题的编排从体系结构和内容覆盖上都进行了优化，所编排习题附有参考答案，形成闭环学习模式，便于学生对学习内容掌握状态进行自我检查反馈、自主控制纠偏。本书可读性较强，便于自学，也可供从事自动控制工程领域工作的工程技术人员参考。

参加本书编写的有：嘉兴学院尤小军（第 1 章，第 2 章的部分内容，第 6 章的部分内容）、朱宁（第 2 章的部分内容）、童佳（第 3 章，第 5 章，第 6 章的部分内容，附录 A）、王瑞明（第 8 章），山西大学工程学院赵巧娥（第 4 章，第 7 章）。全书由尤小军任主编并担任统稿工作。

本书由上海电力学院杨平教授主审，主审老师对书稿提出了不少宝贵的修改意见和建议，在此深表感谢。

限于编者水平，书中难免存在不足之处，恳请广大读者和同行专家批评指正。

编者

2016 年 12 月

## 目 录

前言	
<b>第 1 章 概述</b>	1
1.1 自动控制基本概念	1
1.2 自动控制系统	2
1.3 自动控制理论	9
习题	10
<b>第 2 章 控制系统的数学模型</b>	11
2.1 微分方程	11
2.2 拉普拉斯变换与反变换	16
2.3 传递函数	23
2.4 控制系统的框图	31
2.5 信号流图与梅逊公式	42
习题	48
<b>第 3 章 控制系统的时域分析法</b>	51
3.1 典型输入信号与一阶系统的时域分析	51
3.2 线性定常系统的重要结论	55
3.3 二阶系统的时域分析	55
3.4 高阶系统的时间响应	64
3.5 线性控制系统稳定性的时域分析	66
3.6 稳态性能分析	73
习题	81
<b>第 4 章 根轨迹法</b>	84
4.1 根轨迹的基本概念	84
4.2 根轨迹方程	85
4.3 绘制根轨迹的规则	88
4.4 控制系统根轨迹分析	98
4.5 参数根轨迹	109
习题	112
<b>第 5 章 控制系统的频域分析法</b>	115
5.1 频率特性	115
5.2 幅相频率特性及其绘制	118
5.3 对数频率特性及其绘制	122

5.4	稳定判据 .....	130
5.5	稳定裕度 .....	137
5.6	闭环系统的频率特性 .....	140
	习题 .....	147
<b>第 6 章</b>	<b>控制系统的综合与校正 .....</b>	<b>151</b>
6.1	控制系统校正的基本概念 .....	151
6.2	基本控制规律 .....	154
6.3	常用校正装置及其特性 .....	158
6.4	频域校正方法 .....	164
6.5	复合控制方法 .....	178
	习题 .....	180
<b>第 7 章</b>	<b>非线性控制系统 .....</b>	<b>183</b>
7.1	概述 .....	183
7.2	描述函数法 .....	185
7.3	相平面法 .....	200
7.4	利用非线性特性改善系统的性能 .....	206
	习题 .....	207
<b>第 8 章</b>	<b>离散控制系统 .....</b>	<b>209</b>
8.1	离散系统的基本概念 .....	209
8.2	信号的采样与保持 .....	210
8.3	Z 变换 .....	212
8.4	脉冲传递函数 .....	218
8.5	离散控制系统的稳定性分析 .....	222
8.6	稳态误差分析 .....	225
8.7	暂态性能分析 .....	227
	习题 .....	229
<b>附录 A</b>	<b>MATLAB 软件工具在控制系统分析和综合中的应用 .....</b>	<b>230</b>
A.1	MATLAB 简介 .....	230
A.2	应用 MATLAB 分析控制系统的性能 .....	234
	习题 .....	246
<b>附录 B</b>	<b>习题参考答案 .....</b>	<b>248</b>
	<b>参考文献 .....</b>	<b>265</b>

## 第 1 章 概 述

本章介绍自动控制的基本概念、自动控制系统的基本组成、自动控制理论的发展简史及基本内容,使读者对自动控制学科所涉及的问题有一个较为基本的认识。

### 1.1 自动控制基本概念

人们为了把自己从繁重的甚至危险的生产劳动中解放出来,以及为了使生活更加方便等目的,在很早以前就产生了使机械本身自动工作而不需要人工控制的想法,并且在某些实践中获得了成功。例如我国古代计时用的铜壶漏滴、记录地震用的地动仪、西方国家近代航海舰船的大舵控制、蒸汽机的调速等,都是在某些方面实现了不需人的干预而能自动工作的例子。

在现代,随着科学技术的迅猛发展,工农业的大规模、高速度、高效率生产,人类物质生活水平的提高,改造与驾驭自然世界能力的提高,所有这些所涉及的范围之广、领域之深,仅靠人本身的体力、精力和反应能力已经远远不能适应了,越来越多的工作需要交给机器才能完成。如无人驾驶飞机、导弹、人造卫星、电子计算机、无人工厂,以及化工厂、炼油厂、核电站的某些设备,它们都有一个明显的特点——工作时没有人参与,自动地进行。这种方式就称为自动控制。

确切地说,自动控制就是应用控制装置自动地、有目的地控制或操纵机器设备或过程,使之具有一定的状态和性能。

被控制的机器或物体称为被控对象;所用的控制装置称为控制器。

**例 1.1** 水位自动控制的分析。

图 1-1 是一个水位自动控制的原理示意。水位自动控制的目的是维持水箱内水位恒定。当水的流入量与流出量平衡时,水箱水位维持在预定的(希望的)高度上。预定高度或希望高度由自动控制器刻度盘上的指针设定。当水流出量增大(用水量增加)或流入量减少(例如供水管网水压下降)时,平衡被破坏,水箱水位下降,出现偏差(误差),该偏差由浮子检测出来。自动控制器在偏差作用下将阀门开大,增大水的流入量,使水位向预定高度回升从而维持水位不变。反之,当水流出量减少或流入量增大时,水位上升超过了预定高度,反向偏差则使阀门关小,减少水的流入量,使水位向预定高度回落,从而达到控制水箱水位不变的目的。

在本例中,自动控制器不言而喻就是控制器;水箱就是被控对象。

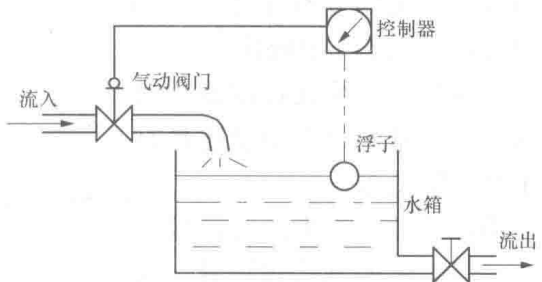


图 1-1 水位自动控制

## 1.2 自动控制系统

### 1.2.1 自动控制系统的基本组成和工作原理

一般地说,只要具有控制器和被控对象两个基本组成部分,能够对被控对象的工作状态进行自动控制的实体就可称为自动控制系统。一个最基本的自动控制系统示意如图 1-2 所示。



图 1-2 自动控制系统的基础结构

系统的输入,是作用于系统的激发信号,其中使系统具有预定性能或预定输出的输入,称为控制输入、希望输入或参考输入;干扰或破坏系统具有预定性能或预定输出的输入,称为扰动输入。根据具体情况,扰动输入可有不同的作用点。系统内部控制器的输出也就是施加到被控对象的输入,称为控制量。系统的输出就是被控制的量,它表征被控对象的响应或过程的状态。

在例 1.1 中实现水位自动控制的控制系统中,控制器刻度盘指针设定的希望水位高度为参考输入;水流出量或流入量的变化影响水箱保持一定的水位,是扰动量,但水流入量是系统内部产生的扰动量(简称内扰),因此不是扰动输入,而水流出量是外部施加予系统的扰动量(简称外扰),因此称为扰动输入;水流入量控制着水箱的水位,是控制量;水箱实际水位高度,即为系统的输出。一定的输入,就有相应的一定的输出,这个系统的输出,常常叫作系统对输入的响应。自动控制就是为了一定的目的,保证对输入要有满意的响应。即:

- (1) 保证系统输出具有控制输入指定的数值;
- (2) 保证系统输出尽量不受扰动的影响。

例如上述水位自动控制系统的任务,就是保证水箱水位这个系统输出尽量不受外部扰动输入以及内部扰动的影响;保证水箱水位这个系统输出具有参考输入指定的数值,即刻度盘指针所设定的位置不变。

在控制工程实际中,各种自动控制系统都是在具有控制器和被控对象这两个基本部分的基础结构上,根据完成控制任务需要适当增加元件装置(或称环节、机构)而组成的。图 1-3 是水位自动控制系统的示意,是在图 1-2 的自动控制系统基础结构上增加了反馈元件(浮子)、比较元件(刻度盘)、执行元件(气动阀门)组成的。这个控制系统能够完成保持水箱水位恒定的控制任务,其工作原理已如例 1.1 中所述。

自动控制系统在控制器与被控对象两大基础之上通常还具有以下几个组成部分:

给定元件:产生给定信号或输入信号。例如刻度盘指针,为便于信号的产生,常应用电位计来实现电信号。

反馈元件:测量被控制量或

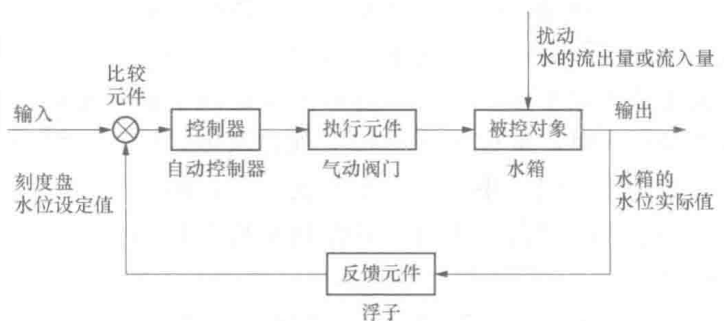


图 1-3 水位自动控制系统的组成



输出量，产生反馈信号。为便于传输，反馈信号多为电信号，因此反馈元件通常是一些使用电量来测量非电量的元件。例如用电位器或旋转变压器将机械转角变换为电压信号，用测速发电机将转速变换为电压信号，用热电偶将温度变换为电压信号等。

**比较元件：**接收输入信号和反馈信号并进行比较，产生反映两者差值的偏差信号。例如电位计。

**放大元件：**对偏差信号或变量进行放大的元件，例如电压放大器、功率放大器、电液伺服阀等。放大元件的输出一定要有足够的能量，才能驱动执行元件，实现控制功能。

**执行元件：**直接对被控对象进行操纵的元件，例如伺服电动机、液压（气）马达、伺服液压（气）缸等。

**校正元件：**为保证控制质量要求，使系统获得良好的动、静态性能而加入系统的元件。校正元件又称校正装置。串接在系统前向通路上的称为串联校正装置，并接在反馈回路上的称为并联校正装置。

图 1-4 所示是一个较为完整的自动控制系统框图。图中的串联校正元件实际上就是控制器，通常由无源电网络、有源电网络（运算放大器电路）或数字计算机等元件组成。而双点画线所包含的部分常被称为广义控制器。

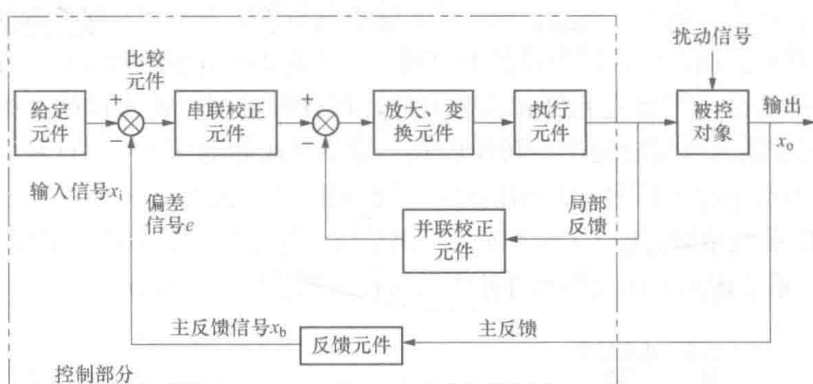


图 1-4 自动控制系统的组成

下面再以图 1-5 所示的恒温箱温度自动控制系统为例，分析其基本组成和工作原理。

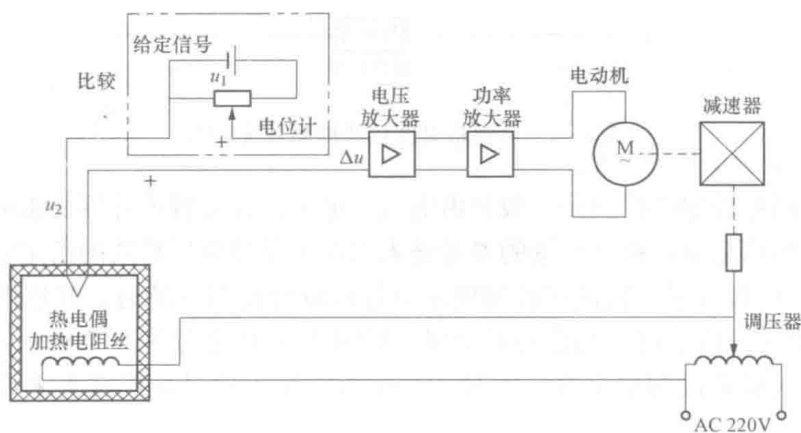


图 1-5 恒温箱温度自动控制系统

恒温箱温度自动控制系统被控对象恒温箱的被控制量为箱内温度，是系统的输出。希望箱内所达到的温度为系统的输入，这个输入量由给定元件电位计转换成电压信号  $u_1$  给定。当外界因素引起箱内温度变化时，作为测量反馈元件的热电偶，把温度转换成对应的电压信号  $u_2$  反馈回去与给定信号  $u_1$  相比较，所得结果即为温度的偏差信号  $\Delta u = u_1 - u_2$ 。偏差信号经过电压、功率放大后驱动电动机改变转速（或角位移）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，反之向加大电流的方向运动，直至温度达到给定值为止。此时，偏差信号  $\Delta u = 0$ ，电动机停转，系统的输出被控制在输入指定值上，系统就完成了所要求的控制任务。

恒温箱温度自动控制系统的组成结构如图 1-6 所示。在前述中已知系统的参考输入就是系统的希望输出或预定输出，因此与系统的实际输出在数值和量纲上是对应一致的。例如如图 1-6 中系统输入（参考输入或希望输出）为温度  $t$ ，系统输出（实际输出）也为温度  $t$ ；若参考输入（希望输出）为  $100^\circ\text{C}$ ，则实际输出也为  $100^\circ\text{C}$ 。但在工程实际中往往很难做到将希望输出作为参考输入直接施加到系统的输入端，主要有两个问题：一是系统的输出量不仅是信息流，而且是量值很大的能量流，不能直接施加到诸如电子元器件、计算机等只能接受信息流的控制设备装置上，否则会损毁系统；二是系统的输出量的量纲是多样化的，如转速、位移、温度、湿度、压力、流量、电流、电压等，除电气量外大多不能直接施加到电气、电子装置为主的比较元件和控制器中，因为设备不识别、不接纳非电量纲的物理量。在控制工程中解决这两个问题的办法是采用给定元件和反馈元件，将各种量纲形式并且量值很大的参考输入（希望输出）和系统输出（实际输出）转换成同一量纲（比如电压  $u$ ）并且量值很小（比如几伏、几十毫伏）的给定输入信号和反馈信号，只有相同量纲的信号才能进行比较。例如在图 1-6 中虚线所示的系统希望温度  $t$ （参考输入）由给定元件电位计转换成给定输入信号电压  $u_1$ ；系统实际温度  $t$ （系统输出）由反馈元件热电偶转换成反馈信号电压  $u_2$ 。

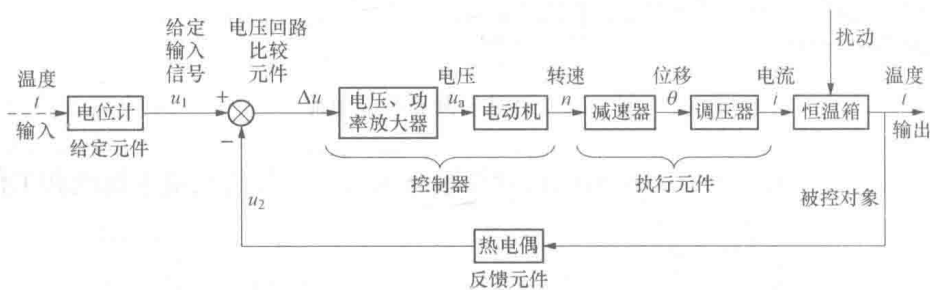


图 1-6 恒温箱温度自动控制系统框图

由于自动控制系统中的控制器一般是由电气、电子元件装置或计算机组成的，易于接纳处理如电压这样的信息量，所以系统的参考输入实际上是被电压形式的给定输入信号（例如如图 1-6 中的  $u_1$ ）所取代了，因此在控制理论中分析设计控制系统时，其框图中的参考输入（希望输出）和给定元件这部分通常并不出现，则图 1-6 转化为图 1-7 所示。这时系统输入是一个与参考输入成正比的给定输入信号。这个给定输入信号从广义上来说也可称为参考输入。

### 1.2.2 开环控制系统

观察这样一个控制系统（见图 1-8）：给控制器设定一个希望发电机组要达到的转速值，

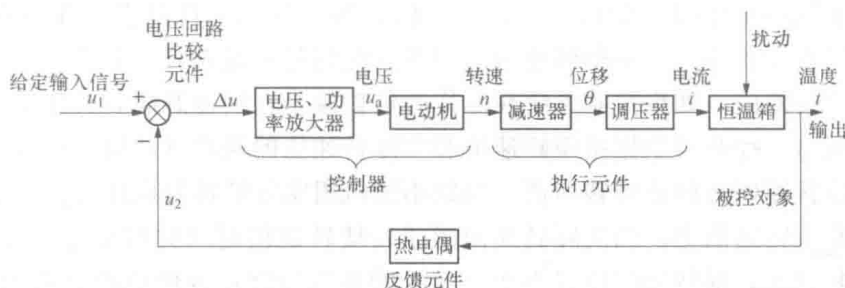


图 1-7 恒温箱温度自动控制系统框图

控制器就会使阀门动作到一个相应的位置，这时一定量的蒸汽进入汽轮机使转速达到设定的转速值，也即使发电机转速达到希望的转速，从而达到控制这个系统转速的目的。

如果用框图（见图 1-9）来表示，就能清楚地看出系统中各个变量（或称信号）的流通过程。

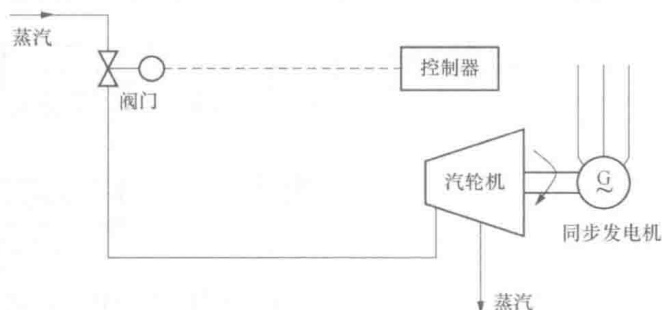


图 1-8 汽轮发电机组转速开环控制系统



图 1-9 转速开环控制系统框图

显然变量的流通过程是开路径。这种从输入到输出只有顺向作用而没有从输出到输入的反向（反馈）作用的控制系统称为开环控制系统。

开环控制系统的优点是结构比较简单，成本较低。缺点是控制精度较低，抗干扰能力差，这是开环控制系统最致命的弱点。在这个系统中，实际是很难保证转速在希望值上的。例如机组负荷增大（这对转速控制系统是一个干扰），转速就要下降，而这时控制器仍按负荷增大前的那个位移值来控制阀门的供汽量，因为控制器并不知道此时的转速已经下降，所以虽然控制器给定的是希望转速值，而机组真正的转速值却不是希望值了。控制系统的目的是控制实际转速为希望值，而现在实际转速值低于希望值，即有误差存在，控制精度不高。

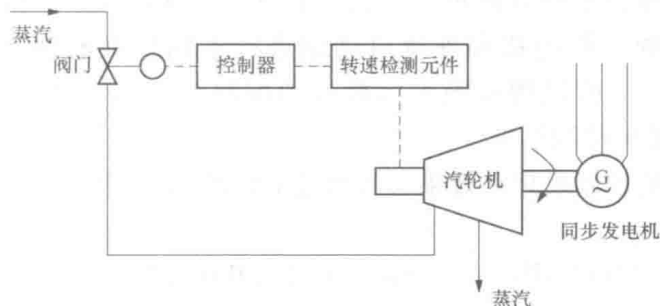


图 1-10 汽轮发电机组转速闭环控制系统

### 1.2.3 闭环控制系统

观察这样一个控制系统（见图 1-10）：

给控制器设定一个希望发电机组要达到的转速值，控制器就会使阀门动作到一个相应的位置，这时一定量的蒸汽进入汽轮机使汽轮机达到设定的转速值，使发电机转速达到希望值，从而达到控制这个系统转速的目的。

的。如果控制系统在工作时负荷增大，转速下降，转速检测元件就会立刻发现并告知控制器，控制器根据希望转速值和实际转速值的误差（此时是正误差）控制增大阀门进汽量，使转速回升到希望转速值。如果控制系统在工作时负荷减小，转速升高，转速检测元件就立刻发现并告知控制器，控制器根据希望转速值和实际转速值的误差（此时是负误差）控制减小阀门进汽量，使转速回降到希望转速值。因此不论机组实际转速升高还是降低，控制系统均能控制转速在希望转速值上。当实际转速值等于希望转速值时（此时是零误差），控制器便维持此时的控制状态，保持阀门位置不变，此时的进汽量就正好使机组在希望转速上运转。显然，这个控制系统的控制精度是很高的。

如果用图 1-11 所示框图来表示，就能清楚地看出系统中各个变量的流通过程。

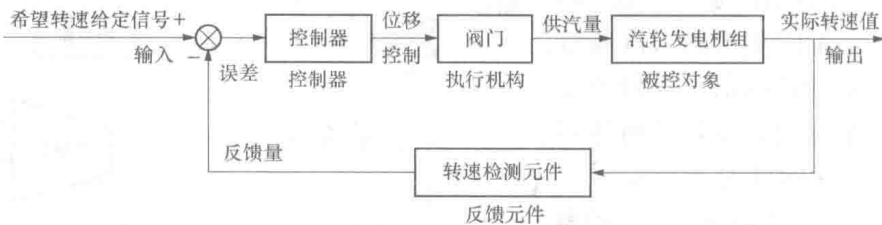


图 1-11 转速闭环控制系统框图

显然，变量的流通过程是闭合路径。这种从输入到输出既有顺向作用又有输出到输入的反向（反馈）作用的控制系统称为闭环控制系统（又称反馈控制系统）。

闭环控制系统的优点是控制精度高，抗干扰能力强。缺点是结构较为复杂（与开环控制系统相比，至少多了反馈部分），成本较高，使用时要注意稳定性问题。

在现代，人们使用自动控制系统总是希望它具有良好的控制精度。在保证同一精度的前提下，使用开环控制系统就必须将元件制造得非常精密，不允许在使用中出现元件参数值的变化（如电气元件的电阻、电感、电容值发生变化）；甚至元件非常精密，也很难达到规定的控制精度（效果）。而使用闭环控制系统，对组成系统的元件的要求就大大降低了。这是什么道理呢？通过上述汽轮发电机组转速闭环控制系统的例子予以说明：当系统中的某些元件参数值发生变化（这称为内部干扰），或同时兼有外部干扰（例如系统的负荷增大或其他来自外部的干扰），最终都会使系统的输出（转速）发生变化。输出（转速）通过反馈元件（转速检测元件）反馈到输入端与输入（希望转速值）进行比较，控制器便知道被控制的量（即系统的输出量——转速）已不是希望值，便会控制阀门动作，使机组转速回到希望转速值，从而保证了控制精度。可见闭环控制系统能针对影响控制系统目的的一切内扰和外扰自动地进行不同程度的抑制，而对系统所采用元件的精密要求不高。所以现在绝大多数自动控制系统都设计成闭环控制系统。本书所讨论的系统都是闭环控制系统。

关于开环控制系统和闭环控制系统的控制机理和效果，可通过下面的例子进一步理解体会：

军事上打坦克可以用反坦克火箭弹，也可以用反坦克导弹。前者是开环控制系统，后者是闭环控制系统。当使用前者时，射手瞄准了坦克（给系统设定了输入希望值）扣动扳机，火箭弹发射出去直到命中目标，这个系统完成控制目的。但我们知道使用这种控制系统是很

难保证每发火箭弹都命中目标的,这是因为火箭弹在飞行过程中受到各种方向气流的干扰,并且坦克往往不是静止的,而是在做各种机动行进,火箭筒瞄得再准,火箭弹也难以命中目标。当使用后者时,导弹在射向目标的过程中,制导元件不断观察锁定的目标位置方向(给系统设定的输入希望值)和导弹的实际位置方向(系统的输出值),如果发现两者有误差就及时控制导弹改变航向,没有误差就保持控制作用不变,这时导弹必然正对着目标而去,直至最终击中目标。这就是闭环控制根据输入与输出之间的误差进行控制的机理。这个误差是输入与输出比较的结果,所以一定要利用反馈将输出量引回输入端,与输入量进行比较才能知道有否误差、以及误差的大小和正负,故一定要形成反馈环。我们知道用反坦克导弹打坦克的精度是很高的,而且不容易受天气和其他因素的影响,这就是应用闭环自动控制系统来达到目的的一个很好的实例。

#### 1.2.4 控制系统的分类

所有的自动控制系统都可以根据各种不同的特征从各种角度进行分类。

(1) 按系统中信号流动的路径可分为开环系统(从输入到输出单向传递,没有反向联系)和闭环系统(既有从输入到输出的作用,又有从输出到输入的反向联系)。

图1-9所示系统是开环系统;图1-11所示系统是闭环系统。

(2) 按数学模型可分为线性系统(线性方程)和非线性系统(非线性方程)。

例如,  $y(t) = kx(t)$  或  $\frac{d^2 y(t)}{dt^2} + \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = kx(t)$  所描述的系统,是线性系统。

又如  $y^2(t) = kx(t)$  或  $\left(\frac{dy(t)}{dt}\right)^2 + y(t) = kx(t)$  所描述的系统,是非线性系统。

(3) 按系统的信号是否是时间的连续函数可分为连续系统(各信号为时间的连续函数)和离散系统(一个或数个信号甚至全部信号为时间的离散函数)。

如图1-9所示系统,希望转速给定信号、位移、供汽量、实际转速值这四个信号全部是时间的连续函数,因此是连续系统。

又如数字计算机控制系统,计算机作为控制器,将经过采样器(模/数转换)在时间上离散的采样信号进行计算处理,然后通过保持器(数/模转换)将时间上离散的数字信号恢复为时间上连续的模拟信号去控制被控对象,至少在计算机的数据输入接口和数据输出接口这两处的信号为时间的离散函数,因此是离散系统。

(4) 按参考输入(希望输入)的特征可分为恒值调节系统(参考输入为常值)和随动系统(参考输入是任意变化的)。

例如前述的水箱水位控制系统、恒温箱温度控制系统、汽轮发电机转速控制系统等,它们的参考输入均为设定的恒定值,在系统工作时不发生变化,因此是恒值调节系统。

又如军事工程中的跟踪瞄准系统,其参考输入是敌方的活动目标,是任意变化的,因此是随动系统。

(5) 按系统中结构参数(方程中各项系数)是否随时间变化可分为定常系统(参数、系数不随时间变化)和时变系统(参数、系数要随时间变化)。

例如汽车运动控制系统,汽车质量这个参数在整个控制过程中不随时间发生变化,可视为一个常量  $M$ 。设输入为汽车动力  $r(t)$ ,输出为汽车水平位移  $c(t)$ ,理想条件下系统数学

模型为  $M \frac{d^2 c(t)}{dt^2} = r(t)$ ，可见系数  $M$  为常值，因此是定常系统。

又如航天飞机运动控制系统，其质量这个参数在发射升空到返回地面的整个控制过程中发生变化，是一个随时间变化的量  $m(t)$ 。设输入为航天飞机推力  $r(t)$ ，输出为航天飞机垂直位移  $c(t)$ ，在垂直发射阶段理想条件下系统数学模型为  $m(t) \frac{d^2 c(t)}{dt^2} + m(t)g = r(t)$ ，可见系数  $m(t)$  为时变量，因此是时变系统。

(6) 按系统输入、输出量的个数可分为单输入单输出系统（一个输入，一个输出）和多输入多输出系统（多个输入，多个输出）。

要注意以上从不同角度特征对系统进行分类的概念并不是彼此独立的，而是互相兼容的。举例说明：如图 1-10 所示的自动控制系统，它是闭环系统、线性系统（可建立描述它的线性方程）、连续系统（系统中所有物理量均是时间的连续函数）、恒值调节系统（参考输入是给定的希望转速值，为一常量）、定常系统（系统中各元件参数不随时间变化）、单输入单输出系统（一个希望转速值输入，一个实际转速值输出），若考虑到负荷干扰则是两输入单输出系统（除了希望转速值输入之外，还有一个扰动输入）。

本书所讨论的内容主要是针对线性定常系统的自动控制理论，是控制理论中应用最多，也是最主要、最基本的内容。另外，对于非线性系统理论做了一般介绍。对于时变系统理论，限于篇幅本书不做讨论，读者有兴趣可翻阅其他有关自动控制理论的书籍。

### 1.2.5 对控制系统的性能要求

对应用于不同场合的自动控制系统，其性能要求各有所侧重，例如机床转速控制系统，它是恒值调节系统，加工工艺要求其以某一设定值做恒速转动。当负载发生变化时，这是施加到控制系统的干扰输入，将引起转速发生变化，此系统就要进行控制使转速尽快恢复到设定值，否则就会使加工的机件产品出现质量问题，甚至生产出废品。因此对这个系统的性能要求是动态响应时间短，即要求快速性。又如雷达瞄准系统，它是随动系统，其工程要求是尽快发现并锁定目标。因此对此系统的性能要求是动态响应快且稳态精度高，即要求快速性和精确性。对某些在温度、湿度剧烈变化，多粉尘、强振动等恶劣条件下工作的系统，还要求性能不受或少受系统内部元件参数变化的影响，即对自身参数变化的不敏感性，实际上反映出了系统的强健性，因此在控制工程中这一性能被称为鲁棒性（Robust），这是现代控制理论中对控制系统的—个性能要求。

对自动控制系统的性能要求主要有三个方面，分别是稳定性、动态性能、稳态性能，即“稳定”、“快速”、“准确”。这三大性能是要求自动控制系统必须具备的基本性能，将在本书的有关章节中详细介绍。下面通过系统输入输出动态特性图来说明三大性能的基本概念。

在图 1-12 (a) 中，系统输入  $r(t)$  为一个恒值（阶跃）输入，两个不同系统的输出  $c(t)$  分别为曲线①和曲线②，可以看出曲线①所属的系统是稳定的，曲线②所属的系统是不稳定的。在图 1-12 (b) 中，曲线①所属的系统动态响应要快于曲线②所属系统。在图 1-12 (c) 中，系统输入  $r(t)$  为一个速度（斜坡）输入，曲线①所属系统在稳态时  $c(t) = r(t)$ ，控制精度高；曲线②所属系统在稳态时  $c(t) \neq r(t)$ ，控制精度低。

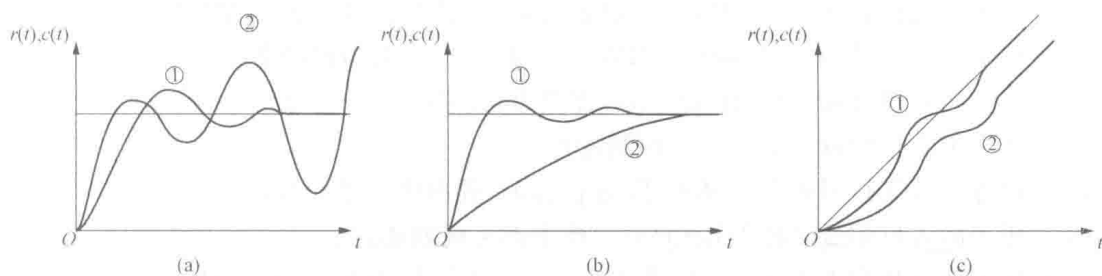


图 1-12 系统输入输出动态特性图

### 1.3 自动控制理论

自动控制理论是用定性和定量的数学方法分析和设计实际自动控制系统的一种理论。

从自动控制理论的发展史来看,可分为两大部分——经典控制理论部分和现代控制理论部分。

大约从 20 世纪初到 50 年代初期,这是经典控制理论部分创立发展并达到相当成熟的阶段。尤其是在第二次世界大战结束后一个时期,分析和设计自动控制系统的理论已经形成了一个较完整的体系,这就是现在常说的经典控制理论。它的主要内容可以这样来概括:一个函数,两种方法。一个函数就是传递函数,两种方法就是根轨迹法和频率法。经典控制理论以传递函数为基础,在复频域( $s$ 域)讨论问题,主要针对线性、定常、单输入单输出系统,几何图形的表现形式较多,比较简单、直观,计算量不大。

从 20 世纪 50 年代中期至今所发展的控制理论统称现代控制理论。现代控制理论以状态空间为基础,在时间域( $t$ 域)讨论问题,主要针对经典控制理论解决困难或不能解决的时变、多输入多输出、非线性系统(但对经典控制理论能解决的系统现代控制理论也能够解决,只不过使用起来不如经典控制理论简单方便),计算量比较大(电子计算机出现后已解决),比较抽象。现代的控制理论如雷达跟踪系统、卫星控制系统、中远程与洲际弹道导弹系统、巡航导弹系统、卫星定位系统、飞船登月系统等高、精、尖系统,只有应用现代控制理论才能解决问题,经典控制理论已经无能为力了。但这绝不是说现代控制理论可以取代经典控制理论,经典控制理论无用了;恰恰相反,大多数一般控制系统问题都能用经典控制理论很好地解决,比用现代控制理论更加行之有效,更能为并不具有高深数学水平的一般工程技术人员所接受和掌握。

自动控制工程与理论发展过程中的一些标志性成果如下:

公元前 14—11 世纪中国、埃及、巴比伦用于计时的自动计时漏壶;

1788 年英国人瓦特 (J. Watt) 发明蒸汽机离心式飞锤调速器;

1868 年英国人麦克斯韦 (J. C. Maxwell) 发表《论调速器》论文;

1884 年英国人劳斯 (E. J. Routh) 提出稳定判据(代数判据);

1895 年德国人赫尔维茨 (A. Hurwitz) 提出稳定判据(代数判据);

1892 年俄国人李雅普诺夫 (A. M. Lyapunov) 发表《论运动稳定性的一般问题》;

1932 年美籍瑞典人奈奎斯特 (H. Nyquist) 提出稳定判据(几何判据);

1945年美国人伯德 (H. W. Bode) 出版《网络分析和反馈放大器设计》;

1948年美国人维纳 (N. Wiener) 出版《控制论》(此为划时代文献);

1950年美国人伊文斯 (W. R. Evans) 提出根轨迹法;

1954年中国人钱学森出版《工程控制论》;

1956年苏联人庞特里亚金 (Л. С. Понтрягин) 提出极大值原理;

1957年美国人贝尔曼 (R. I. Bellman) 提出动态规划法;

1960年美籍匈牙利人卡尔曼 (R. E. Kalman) 提出卡尔曼滤波理论;

1968年美籍华人傅京孙提出用模糊神经元研究复杂大系统的方法。

时至今日,大系统理论、智能控制理论等现代控制理论内容发展迅速,方兴未艾。

本书主要介绍讨论经典控制理论的内容,为读者在自动控制工程领域里的学习与应用,以及今后进一步深入学习控制理论打下一定的基础。

## 习 题



1.1 试举几个你所熟悉的自动控制系统的例子,画出它们的原理框图,指出系统中的控制器部分和被控对象部分。

1.2 说明开环控制系统和闭环控制系统的主要特征,以及它们的主要优缺点。

1.3 针对家用洗衣机和家用电冰箱自动控制系统,试指出它们各自的控制器是什么,被控对象是什么?系统输入是什么?系统输出是什么?干扰输入是什么?它们是开环还是闭环控制系统?

1.4 针对图 1-1 的水箱水位自动控制系统画出原理框图,指出是开环还是闭环控制系统,系统的输入量是什么?输出量是什么?干扰输入量是什么?控制量是什么?



## 第 2 章 控制系统的数学模型

本章介绍控制系统数学模型的形式，建立数学模型的方法与步骤。

从理论上分析研究以至设计自动控制系统，不是解释其表面现象，而是抓住本质，把控制系统的必然运动规律和属性抽象成数学模型，根据控制系统的数学模型讨论问题。因此建立控制系统数学模型是自动控制工程技术人员的一个基本功。这一章讨论如何建立控制系统的数学模型。

数学模型就是描述控制系统的数学表达式或图形图表。本书中的数学模型有本章介绍的微分方程、传递函数、框图、信号流图，还有第 4 章介绍的根轨迹，第 5 章介绍的频率特性、极坐标图、伯德图。但通常所说的数学模型主要是指微分方程和传递函数。

### 2.1 微分方程

#### 2.1.1 微分方程的建立

图 2-1 所示是一个 RLC 网络，可以把它看成是一个环节，也可看成是一个规模很小的控制系统。

可以根据物理定律、原理、定理推导出描述此网络系统动态特性的数学模型——微分方程。

在推导前首先要明确一个问题，系统的输入量和输出量各是什么？在这里输入量是电压  $u_1(t)$ ，输出量是电压  $u_2(t)$ 。

据基尔霍夫回路电压定律有

$$L \frac{di(t)}{dt} + Ri(t) + u_2(t) = u_1(t) \quad (2-1)$$

式中， $i(t)$  是数学模型中并不希望出现的量（既不是输入量也不是输出量），称为中间变量。由电路的基本理论知

$$i(t) = C \frac{du_2(t)}{dt} \quad (2-2)$$

将式 (2-2) 代入式 (2-1) 可消去中间变量  $i(t)$ ，得

$$LC \frac{d^2 u_2(t)}{dt^2} + RC \frac{du_2(t)}{dt} + u_2(t) = u_1(t) \quad (2-3)$$

或

$$T_1 T_2 \frac{d^2 u_2(t)}{dt^2} + T_1 \frac{du_2(t)}{dt} + u_2(t) = u_1(t) \quad (2-4)$$

式中  $T_1 = RC$  ——时间常数，s；

$T_2 = \frac{L}{R}$  ——时间常数，s。

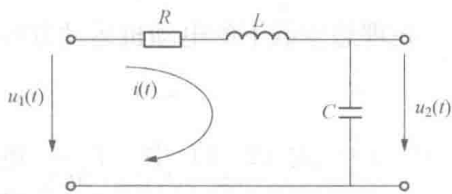


图 2-1 RLC 网络