

21世纪高职高专规划教材

# 控制工程基础

主 编	太原理工大学长治学院	陈瑞华
副主编	西安理工大学高等技术学院	李应松
	南京化工职业技术学院	朱光衡
参 编	包头职业技术学院	王志强
	安徽水利水电职业技术学院	耿道森



机械工业出版社

本书是适合 2 年制和 3 年制机电一体化或相关专业高职高专教育的规划教材。主要内容包括：自动控制的基本知识，控制系统的数学模型，控制系统的时域分析和频域分析，系统的稳定性和稳态误差分析，系统性能与校正，并在书中第 8 章介绍了现代控制理论的主要内容，为读者提供了学习和拓展控制理论的基础，第 9 章列举了工程实际中典型的控制系统及其分析与设计方法，是全书理论知识的总结和运用。

全书力求以简单、清晰的文字说明控制理论的基本概念和原理、分析思路及方法，并从工程实际的应用出发，通过大量的例题和习题来帮助读者理解和掌握内容。选材上适应高职高专院校的教育特点，以必需、够用、结合实际为原则，注重归纳与总结。每章后附有小结可以使读者理清思路、抓住重点。

本书既适用于高职、高专或成人高校的机电类专业学生，也可作为相关工程技术人员的参考。

## 图书在版编目 (CIP) 数据

控制工程基础/陈瑞华主编. —北京：机械工业出版社，2004.7  
21 世纪高职高专规划教材  
ISBN 7-111-14614-X

I. 控... II. 陈... III. 自动控制理论—高等学校：技术学校—教材 IV. TP13

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 053213 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)  
策划编辑：余茂祚 责任编辑：余茂祚 版式设计：冉晓华  
责任校对：李汝庚 封面设计：饶 薇 责任印制：洪汉军  
北京瑞德印刷有限公司印刷·新华书店北京发行所发行  
2004 年 8 月第 1 版第 1 次印刷  
787mm×1092mm  $\frac{1}{16}$ ·11.25 印张·276 千字  
定价：18.00 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换  
本社购书热线电话 (010) 68993821、88379646  
封面无防伪标均为盗版

# 21 世纪高职高专规划教材

## 编委会名单

编委会主任 王文斌 郝广发

编委会副主任 (按姓氏笔画为序)

马元兴	王茂元	王明耀	王胜利	王锡铭	田建敏
刘锡奇	杨文兰	杨 飒	李兴旺	李居参	杜建根
余元冠	沈国良	沈祖尧	陈丽能	陈瑞藻	张建华
茆有柏	徐铮颖	符宁平	焦 斌		

编委会委员 (按姓氏笔画为序)

王志伟	付丽华	成运花	曲昭仲	朱 强	齐从谦
许 展	李茂松	李学锋	李连邨	李超群	杨克玉
杨国祥	杨翠明	吴诗德	吴振彪	吴 锐	肖 珑
何志祥	何宝文	陈月波	陈江伟	张 波	武友德
周国良	宗序炎	俞庆生	恽达明	娄 洁	晏初宏
倪依纯	徐炳亭	唐志宏	崔 平	崔景茂	

总 策 划 余茂祚

策 划 助 理 于奇慧

# 前 言

自动控制技术从 20 世纪上半叶形成发展至今，已广泛应用于众多领域，控制理论的很多思想和方法不仅应用在工程技术中，而且已渗透进医学、生物学甚至社会、经济等方方面面，控制技术已成为国家、社会现代化的重要标志之一。因此，它也成为当今高科技时代各类、各层科技人员必备的技术基础知识之一。

近年来，随着机械加工技术朝着自动化的方向发展，机电结合的高素质工程技术人员在人才市场中供不应求，同时，也对培养这类人才的高职、高专教育提出了更高的要求。《控制工程基础》作为一门基础课程已在机电一体化技术、机械制造自动化、数控技术应用等机电类和其他非自控类专业中广泛开设。

本教材以机电控制的应用为对象，主要阐述经典控制理论的基本概念、基本原理、基本的分析方法和工程中常用的设计校正方法。全书的选材以必需、够用为度，注重结合实际，注重内容的归纳与总结，力求以简单、清晰的文字说明控制理论的基本概念和原理、分析思路及方法，并从工程实际的应用角度出发，通过大量的例题和习题来帮助读者理解和掌握内容。

全书共分 9 章。第 1 章概论，第 2 章控制系统的数学模型，第 3 章控制系统的时域分析，第 4 章控制系统的频域分析，第 5 章控制系统的稳定性分析，第 6 章控制系统的误差分析与计算，第 7 章控制系统的性能分析与校正，第 8 章现代控制理论概述，第 9 章典型控制系统举例。本书内容特点是：以时域分析为基础，以频域分析为重点，以现代控制理论为拓展，以实例分析为运用，充分体现适应高职高专学生使用的特点。每章后都有小结，并提供了大量的习题训练读者应用和解决问题的能力。以上内容需 90 个学时。

本书的编者在教材中充分体现了各兄弟院校在教学实践和科研实践中积累的经验。全书由陈瑞华担任主编，李应松、朱光衡任副主编。本书由陈瑞华编写第 1 章、第 3 章和第 9 章，李应松编写第 2 章和第 8 章，朱光衡编写第 4 章，耿道森编写第 5 章，王志强编写第 6 章、第 7 章。在编写过程中得到了太原理工大学长治学院刘振兴院长、茆有柏副院长的指导和程中宝等老师的大力支持，在此向他们表示诚挚的感谢。

本书根据 2 年制和 3 年制高职、高专机电类专业的要求，在内容的选择上有些新的尝试，由于编者水平有限，加之时间仓促，书中难免出现错误与不足，恳请广大读者批评指正。

编 者

# 目 录

前言	传递函数	71
第 1 章 概论	4.5 控制系统的闭环频率响应	74
1.1 概述	本章小结	77
1.2 自动控制系统的工作原理与组成	复习思考题	78
1.3 自动控制系统的的基本类型	第 5 章 控制系统的稳定性分析	81
1.4 对控制系统性能的基本要求	5.1 系统稳定性的基本概念	81
本章小结	5.2 系统的稳定条件	82
复习思考题	5.3 代数稳定判据	83
第 2 章 控制系统的数学模型	5.4 乃奎斯特稳定判据	91
2.1 控制系统的微分方程	5.5 对数幅相频率特性的稳定判据	96
2.2 传递函数	5.6 系统的相对稳定性	97
2.3 系统结构图	本章小结	101
2.4 系统信号流图及梅逊公式	复习思考题	101
2.5 控制系统的传递函数	第 6 章 控制系统的误差分析与计算	105
本章小结	6.1 稳态误差的基本概念	105
复习思考题	6.2 给定信号作用下的稳态误差及计算	106
第 3 章 控制系统的时域分析	6.3 扰动信号作用下的稳态误差及计算	110
3.1 时域分析的基本概念	6.4 改善系统稳态精度的方法	113
3.2 控制系统的典型输入信号	本章小结	114
3.3 一阶系统的瞬态响应	复习思考题	114
3.4 二阶系统的瞬态响应	第 7 章 控制系统的性能分析与校正	116
3.5 高阶系统的瞬态响应	7.1 控制系统的性能指标	116
本章小结	7.2 控制系统的校正	117
复习思考题	7.3 串联校正	118
第 4 章 控制系统的频域分析	7.4 反馈校正	127
4.1 频率特性的基本概念	7.5 工程最优模型及频率法的	
4.2 乃奎斯特图分析法		
4.3 开环系统的伯德图分析		
4.4 由频率特性曲线求系统		

校正设计 .....	130	本章小结 .....	154
本章小结 .....	139	复习思考题 .....	155
复习思考题 .....	140		
<b>第 8 章 现代控制理论概述 .....</b>	<b>142</b>	<b>第 9 章 典型控制系统举例 .....</b>	<b>156</b>
8.1 概述 .....	142	9.1 单闭环调速系统的 性能分析 .....	156
8.2 状态变量法 .....	142	9.2 双闭环调速系统的 设计举例 .....	161
8.3 控制系统的可控性与 可观测性 .....	146	9.3 随动系统的组成与特点 .....	166
8.4 状态反馈与输出反馈 .....	150	9.4 典型控制系统举例 .....	169
8.5 最优控制 .....	151		
8.6 自适应控制 .....	153	<b>参考文献 .....</b>	<b>172</b>

# 第 1 章 概 论

## 1.1 概述

控制工程基础课程主要阐述的是有关自动控制技术的基础理论。目前，精密仪器和机械制造工业发展的一个明显而重要的趋势是越来越广泛而深刻地引入了控制理论。例如，数控机床、工业机器人、电气液压伺服系统、机床动态分析、动态测试、精密仪器设备等都要用到控制工程的基础知识。21 世纪的机械产品将是整体最佳为目标、以自动控制为核心的高性能、多功能的机电一体化产品。因此，控制理论不仅是一门极为重要的学科，而且也是科学方法论之一。

所谓自动控制，就是在没有人直接参与的情况下，使生产过程或被控对象的某些物理量准确地按照预期的规律变化。例如：程序控制机床能够按预先排定的工艺程序自动地进刀切削，加工出预期的几何形状；焊接机器人可以按照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。所以这些系统都有一个共同点，即它们都是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、角度等等，也可以是数字量。如果给定量是恒定的，一般把这种控制系统叫做恒值调节系统，如稳压电源、恒温控制系统等。如果被调量随着给定量（也叫输入量）的变化而变化，则是调节系统或随动系统，例如转速调节系统、位置随动系统等。一般地说，如何使被控制量按照给定量的变化规律而变化，这就是控制系统所要解决的基本任务。

控制工程理论强调用系统的、反馈的、控制的方法来分析研究工程实际问题，它是自动控制、电子技术、计算机科学等多种学科相互渗透的产物。控制论是在本世纪 20 世纪 40 年代酝酿形成的，在 20 世纪 50 年代以后才得到蓬勃发展。新兴学科控制论的奠基人 N. 维纳从 1919 年就已经萌发控制论的思想，二次大战期间，维纳参加了火炮自动控制的研究工作，他把火炮自动打飞机的动作与人狩猎的行为做了对比，并且发现了极为重要的反馈的概念。像驾车一类的活动，都是由负反馈调节着，人们不是按照固定的模式来操纵车上的驾驶盘，而是发现方向靠左了，就向右边做一个调整，反之亦然。1948 年，维纳所著《控制论》的出版，标志着这门学科的正式诞生。20 世纪 50 年代以后是控制论的发展时期，一方面，火炮及导弹控制技术极大地发展，数控技术、电力、冶金自动化技术突飞猛进；另一方面，控制理论也日渐成熟。1954 年，我国科学家钱学森在美国运用控制论的思想和方法，首创了工程控制论，把控制论推广到工程技术领域。接着，又相继出现了生物控制论、经济控制论和社会控制论。

根据自动控制技术的不同发展阶段，控制理论课可分为“古典控制理论”和“现代控制理论”。20 世纪 60 年代以后，随着计算机技术的发展和航空航天等高科技的推动，产生了基于状态空间模型的控制理论。它主要研究多输入、多输出、变参数、非线性、高精度、高效能等控制系统的分析和设计问题。最优控制、最佳滤波、系统辨识、自适应控制等理论都是这一领域的研究课题。近年来，由于计算机技术和现代应用数学研究的迅速发展，

使现代控制理论在大系统论理论和人工智能控制方面有了重大发展。

## 1.2 自动控制系统的工作原理与组成

### 1.2.1 自动控制系统的工作原理

在各种生产过程和生产设备中，常常需要使其中某些物理量（如温度、压力、位置、速度等）保持恒定，或者让它们按照一定的规律变化。要满足这种需要，就应该对生产机械或设备进行及时的控制和调整，以抵消外界的扰动和影响。下面从恒温控制的例子中总结一般控制系统的工作原理。

实现恒温控制有两种办法：人工控制和自动控制。

图 1-1 为人工控制的恒温控制箱。

恒温箱内的温度是由温度计测量的，人工调节可以通过调压器改变电阻丝的电流，达到控制温度的目的。其过程可归结如下：

- 1) 观测由测量元件（温度计）测出的恒温箱的温度（被控制量）。
- 2) 与要求的温度值（给定值）进行比较，得出偏差的大小和方向。

3) 根据偏差的大小和方向再进行控制。当恒温箱温度高于所要求的给定温度值时，就移动调压器使电流减小，温度降低；若温度低于给定的值，则移动调压器，使电流增加，温度升到正常范围。

因此，人工控制的过程就是测量（温度计）、求偏差（人脑）、再控制（调压器）以纠正偏差的过程。简单地讲就是“检测偏差并用以纠正偏差”的过程。

对于这样简单的控制形式，如果能找到一个控制器代替人的职能，那么这样的一个人工调节系统就可以变成自动控制系统了。

在图 1-2 的恒温箱自动控制系统中，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  $u_1$  相比较，所得结果即为温度的偏差信号  $\Delta u = u_1 - u_2$ ，经过电压、功率放大后，用以改变电动机的

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  $\Delta u = 0$  时，电动机才停转。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。

上述人工控制系统和自动控制系统是极为相似的，执行机构类似于人手，测量装置相当

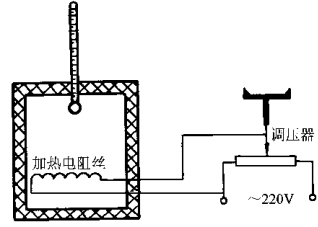


图 1-1 人工控制的恒温箱

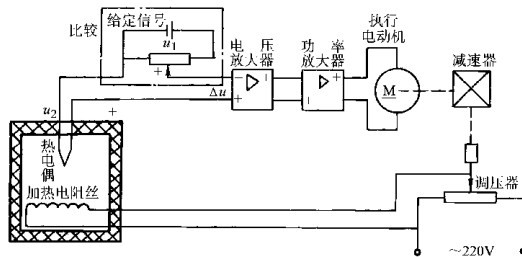


图 1-2 恒温箱的自动控制系统

于人的眼睛，控制器类似于人的大脑。另外，它们还有一个共同的特点，就是都要检测偏差，并用检测到的偏差去纠正偏差，可见，没有偏差就没有调节过程。在自动控制系统中，这一偏差是通过反馈建立起来的。给定量也叫控制系统的输入量，被控制量称为系统的输出量。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，比较的结果叫偏差。因此，基于反馈基础上的“检测偏差用以纠正偏差”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结构图。图中 $\otimes$ 代表比较元件，箭头代表作用的方向。从图中可以看到反馈控制的基本原理，各职能环节的作用是单向的，每个环节的输出都是受输入的控制。总之，实现自动控制的装置可以不同，但反馈控制的原理却是相同的，反馈控制是实现自动控制的最基本的方法。

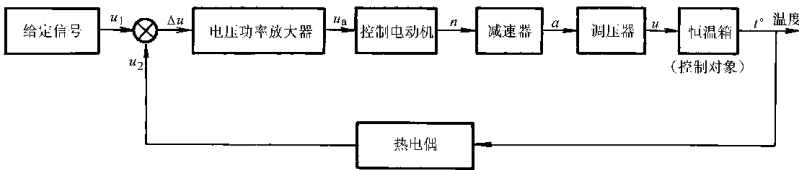


图 1-3 恒温箱温度自动控制系统结构图

### 1.2.2 开环控制与闭环控制

工业上用的控制系统，根据有无反馈作用可以分为两类：开环控制与闭环控制。

1. 开环控制 如果系统的输出端和输入端之间不存在反馈回路，输出量对系统的控制作用没有影响，这样的系统称为开环控制系统，如图 1-4 所示。

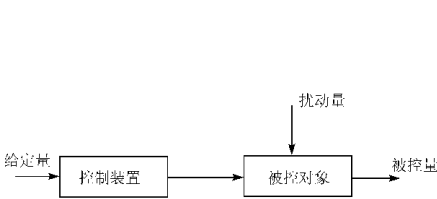


图 1-4 开环控制系统框图

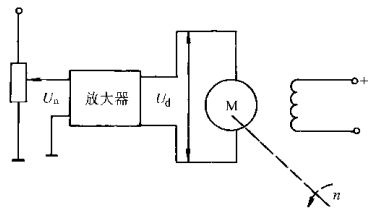


图 1-5 开环控制的调速系统

【例 1】电动机转速控制系统，如图 1-5 所示。

本例中，被控对象为电动机，控制装置为电位器、放大器。当改变给定电压  $U_n$  时，经放大器放大后的电压  $U_d$  随之变化，作为被控量的电动机转速  $n$  也随之变化。

如果由于电网电压的波动，或负载的改变等扰动量的影响使得转速  $n$  发生变化，则这种变化不能被反馈到控制装置并影响控制过程，因此，系统无法克服由此产生的偏差。

开环控制系统的特点是：系统结构和控制过程都很简单，但是，由于这类系统没有抗干扰能力，控制精度较低，因此，大大限制了它的应用范围。开环控制系统一般只应用于对控制性能要求不高的场合。

2. 闭环控制 如果系统的输出端和输入端之间存在反馈回路，即输出量对控制作用有直接的影响，这样的控制系统称为闭环控制系统。闭环的作用就是应用反馈来减少偏差。如图1-6所示。

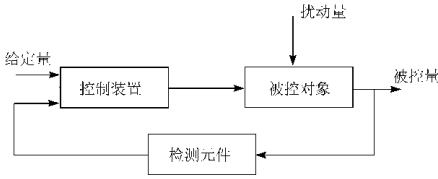


图 1-6 闭环控制系统框图

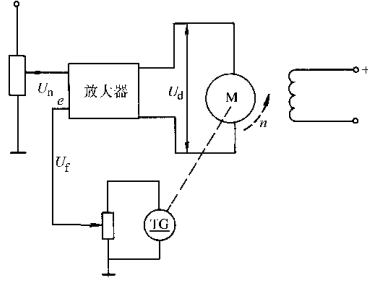


图 1-7 闭环控制的调速系统

〔例 2〕 采用转速负反馈的直流电动机调速系统，如图 1-7 所示。

本例中的系统与上述开环控制系统不同的是，增加了作为检测装置的测速发电机以及分压电位器。电动机的转速  $n$  被测速发电机转换成反馈电压  $U_f$ ，并反馈至输入端，形成闭合回路。加在放大器输入端的电压  $e$  为给定电压  $U_n$  与反馈电压  $U_f$  的差值，即  $e = U_n - U_f$ 。

此闭环控制系统中，输出转速  $n$  取决于给定电压  $U_n$ 。而对于由电网电压波动，负载变化以及除测量装置之外的其他部分的参数变化所引起的转速变化，都可以通过自动调整加以抑制。例如，如果由于以上原因使得转速下降 ( $n \downarrow$ )，将通过以下的调节过程使  $n$  基本维持恒定。

$$n \downarrow \rightarrow U_f \downarrow \rightarrow e \uparrow \rightarrow U_d \uparrow \rightarrow n \uparrow$$

由上述例子可见，闭环控制系统具有以下的特点：

1) 由于系统的控制作用是通过给定值与反馈量的差值进行的，所以，这种反馈控制系统常称为按偏差控制。

2) 这类系统具有两种传输信号的通道：由给定值至被控量的通道称为前向通道；由被控量至系统输入端的通道叫做反馈通道。

3) 不论取什么物理量进行反馈，作用在反馈环内前向通道上的扰动所引起的被控量的偏差值，都会得到减小或消除，使得系统的被控量基本不受该扰动的影响。正是由于这种特性，使闭环控制系统在控制工程中得到了广泛的应用。

另外，也可将闭环控制与开环控制相结合，形成复合控制。

### 1.2.3 自动控制系统的的基本组成

一个典型的反馈控制系统如图 1-8 所示，该系统包括给定元件、反馈元件、比较元件

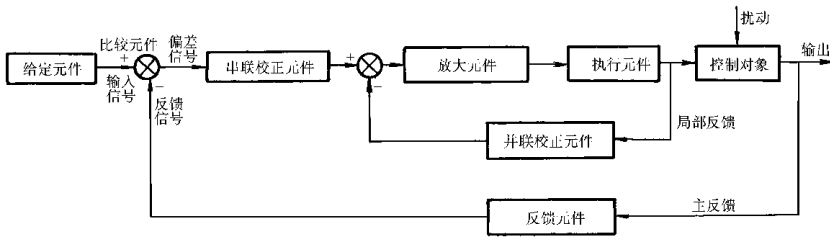


图 1-8 典型的反馈控制系统结构图

(或比较环节)、放大元件、执行元件及校正元件等。

**给定元件：**主要用于产生给定信号或输入信号，例如，调速系统中的给定电位计。

**反馈元件：**用于测量被调量或输出量，产生反馈信号，该信号与输出量之间存在着确定的函数关系（通常是比例关系）。例如，调速系统中的测速发电机。

**比较元件：**用来比较输入信号与反馈信号之间的偏差，它可以是物理比较元件（如旋转变压器等），也可以是差接的电路（见图 1-2），所以有时也称为比较环节。

**放大元件：**对偏差信号进行信号放大和功率放大的元件。例如，伺服功率放大器、电液伺服阀等。

**执行元件：**直接对控制对象进行操作的元件。例如，执行电动机、液压马达等。

**控制对象：**是控制系统所要操纵的对象。它的输出量即就是系统的被控制量，例如机床工作台等。

**校正元件：**也称校正装置，用以稳定控制系统，提高性能。有反馈校正和串联校正两种形式。

【例 3】图 1-9 为晶体管直流稳压电源。试画出其系统结构图。

图中，直流稳压电源的基准是稳压管的电压，输出电压通过  $R_3$  和  $R_4$  分压后与稳压管的电压  $U_W$  比较，如果输出电压偏高，则经  $R_3$  和  $R_4$  分压后电压也偏高，使与之相连的晶体管基极电流增大，集电极电流随之增大，降落在  $R_c$  两端的电压也相应增加，于是，输出电压减小；反之，如果输出电压偏低，则通过相类似的过程是输出电压增大，以达到稳压的作用。可画出其结构图（见图 1-10）。

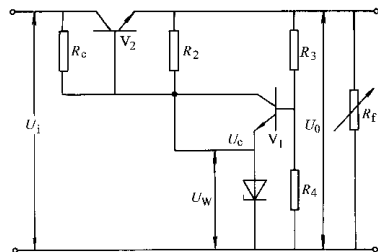


图 1-9 晶体管稳压电源

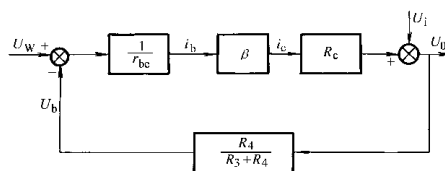


图 1-10 晶体管直流稳压电源系统结构图

## 1.3 自动控制系统的基本类型

自动控制系统的分类方法很多，常见的有以下几种：

### 1.3.1 线性系统和非线性系统

若一个元件的输入与输出的关系曲线为直线，则称该元件为线性元件；否则，称为非线性元件。

如果一个系统中所有的元器件均为线性元器件，则该系统称为线性系统；若系统中有一个非线性元器件，则该系统称为非线性系统。线性系统的数学模型为线性微分方程或差分方程。

### 1.3.2 定常系统和时变系统

从系统的数学模型来看，若微分方程的系数不是时间变量的函数，则称为定常系统；否则，称为时变系统。

如果系统微分方程的系数为常数，则称之为线性定常系统。这类系统是本书中主要的讨论对象。

### 1.3.3 连续系统和离散系统

从系统中的信号来看，若系统各部分的信号都是时间  $t$  的连续函数，即模拟量，则称系统为连续系统。

若系统中有一处或多处信号为时间  $t$  的离散函数，如脉冲或数码信号，则称之为离散系统。如果离散系统中既有离散信号又有模拟量，也称为采样系统。

### 1.3.4 恒值系统、随动系统和程序控制系统

若系统的给定值为一定值，而控制任务就是克服扰动，使被控制量保持恒值，此类系统称为恒值系统。例如，电动机速度控制，恒温、恒压、水位控制等。

若系统给定值按照事先不知道的时间函数变化，并要求被控制量跟随给定值变化，则此类系统称为随动系统。例如，火炮自动跟踪系统、轮舵位置控制系统等。

若系统的给定值按照一定的时间函数变化，并要求被控制量随之变化，则此类系统称为程序控制系统。例如，数控伺服系统以及一些自动化生产线等。

此外，根据系统元件的类型，自动控制系统还可以分为：机电控制系统、液压控制系统、气动系统以及生物系统等。还可根据系统的被控物理量分为：位置控制系统、速度控制系统、温度控制系统等。

## 1.4 对控制系统性能的基本要求

对控制系统性能的要求一般可归结为稳定、准确、快速三个方面。

### 1.4.1 稳定性

由于系统存在着惯性，当系统的各个参数分配不当时，将会引起系统的振荡而失去工作能力。稳定性就是指动态过程的振荡倾向和系统能够恢复平衡状态的能力。

如果系统受外力作用后，经过一段时间，其被控制量可以达到某一稳定状态，则称系统是稳定的，如图 1-11 所示。

如果系统受外力作用后，经过一段时间，其被控制量不能达到某一稳定状态，则称系统

是不稳定的,如图 1-12 所示。其中:图 1-12a 为在给定信号作用下,被控制量振荡发散的情况;图 1-12b 为受扰动作用后,被控制量不能恢复平衡的情况。另外,系统出现等幅振荡时,即处于临界稳定的状态,这种情况也视为不稳定。

显然,不稳定的系统是无法正常工作的。一个实际中应用的系统,不仅应该具有稳定性,而且在动态过程中的振荡也不能太大,否则就不能满足生产实际的需要,甚至会导致系统部件的损坏。

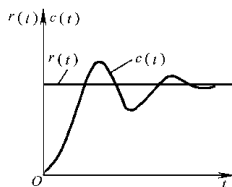


图 1-11 稳定系统的动态过程

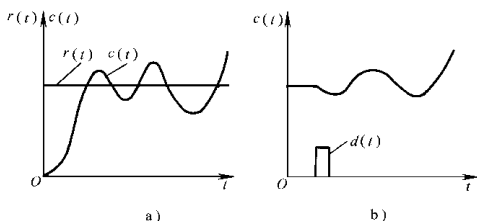


图 1-12 不稳定系统的动态过程

#### 1.4.2 快速性

快速性是在系统稳定的前提下提出的,它是指系统输出量与给定的输入量之间产生偏差时,消除这种偏差过程的快慢程度。如图 1-13 所示,快速性表明了系统输出对输入信号响应的快慢程度。系统响应越快,说明系统的输出复现输入的能力越强。

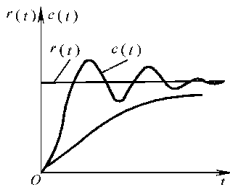


图 1-13 控制系统的快速性

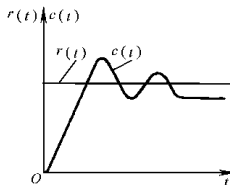


图 1-14 控制系统的稳态精度

#### 1.4.3 准确性

准确性是指系统在调整过程结束后,输出量与给定的输入量之间的偏差 ( $e_{ss}$ ),或称为稳态精度。如果系统的最终误差为零,称为无差系统,否则称为有差系统,如图 1-14 所示。准确性也是衡量系统工作性能的重要指标,例如数控机床精度越高,则加工精度也越高,而一般恒温、恒速系统的精度都可控制在给定值的 1% 以内。

## 本章小结

1. 自动控制就是在没有人直接参与的情况下，利用控制装置操纵受控对象，使被控量等于给定值。自动控制理论是分析和设计自动控制系统的理论基础，分为古典控制理论和现代控制理论两大部分。

2. 自动控制系统可按照不同的分类方法进行归类。其中，按照自动控制的基本方式可将自动控制系统分为开环控制和闭环控制两种。开环控制实现简单，但抗扰动能力较差，控制精度不高。自动控制原理中主要讨论闭环控制方式，其主要特点是抗扰动能力强，控制精度高，但存在系统能否稳定工作的问题。

3. 一般来讲，自动控制系统的性能从稳（能否正常工作）、准（控制精度）、快（快速响应能力）等几方面来评价。但控制系统中这几方面的性能往往是相互制约的，因而实际中需要根据不同的工作任务来分析和设计自动控制系统，使其在满足主要性能要求的同时，兼顾其他性能。

## 复习思考题

### 1. 选择题

1) 以同等精度元件组成的开环系统和闭环系统，其精度比较为（ ）。

- A. 开环高      B. 闭环高      C. 相差不多      D. 一样高

2) 系统的输出信号对控制作用的影响（ ）。

- A. 开环有      B. 闭环有      C. 都没有      D. 都有

3) 关于系统的抗干扰能力（ ）。

- A. 开环强      B. 闭环强      C. 都强      D. 都不强

4) 作为系统（ ）。

- A. 开环不振荡      B. 闭环不振荡      C. 开环一定振荡      D. 闭环一定振荡

2. 试列举一些开环控制和闭环控制的例子，并说明其工作原理。

3. 举例说明下列术语的基本涵义。

自动控制；控制装置与受控对象；给定值与被控量；开环控制与闭环控制；线性系统与非线性系统；连续系统与采样系统；恒值系统与随动系统；稳定性、快速性与准确性。

4. 图 1-15a、图 1-15b 是两种类型的水位自动控制系统，试画出它们的结构图，说明自动控制水位的

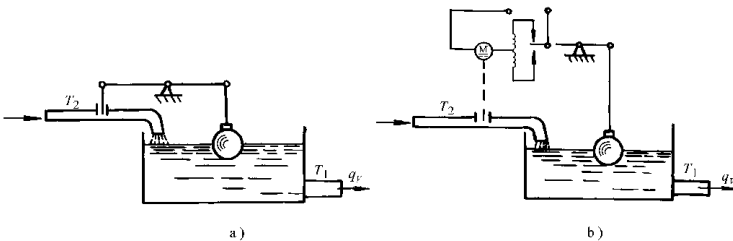


图 1-15 水位自动控制系统

过程，指出两者的区别，并比较它们的精度。

5. 如图 1-16 所示为液压助力器的工作原理图，其中， $x$  为输入位移， $y$  为输出位移，试画出该系统的结构图。

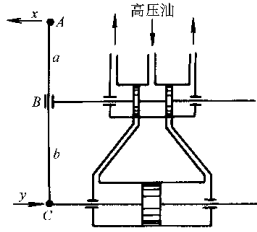


图 1-16 液压助力器

## 第 2 章 控制系统的数学模型

建立控制系统数学模型的目的，是为了对自动控制系统进行定性的分析和定量的计算。在经典控制理论中，常用的数学模型有微分方程、传递函数和系统结构图。系统的数学模型反映了系统的输出量、输入量和内部各种变量间的关系，也反映了系统的内在特性。

系统数学模型的建立，一般采用解析法或实验法。解析法是从元件或系统所依据的物理或化学规律出发，建立数学模型并经实验验证；实验法是对实际系统加入一定形式的输入信号，用求取系统输出响应的方法建立数学模型。本章只讨论解析法，关于实验法将在以后的章节中介绍。

### 2.1 控制系统的微分方程

#### 2.1.1 列写控制系统微分方程的步骤

用解析法建立微分方程的一般步骤是：

- 1) 全面了解系统的工作原理、结构、组成和支配系统运动的物理规律，确定系统和各元件的输入量和输出量。
- 2) 从系统的输入端开始，根据各元件或环节所遵循的物理规律，依此列写它们的微分方程。
- 3) 将各元件或环节的微分方程联立起来消去中间变量，求取一个仅含有系统的输入量和输出量的微分方程。
- 4) 将该方程整理成标准形式。即把与输入量有关的各项放在方程的右边，把与输出量有关的各项放在方程的左边，各导数项按降幂排列，并将方程式中的系数化为具有一定物理意义的表示形式，如时间常数等。

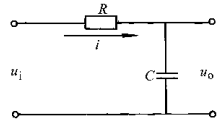


图 2-1 RC 无源网络

#### 2.1.2 建立微分方程举例

【例 1】 试列写图 2-1 所示 RC 无源网络的动态方程。给定  $u_i$  为输入， $u_o$  为输出。

解 根据电路理论中的基尔霍夫定律，可以写出

$$u_i = Ri + \frac{1}{C} \int i dt \quad (2-1)$$

$$u_o = \frac{1}{C} \int i dt \quad (2-2)$$

式中  $i$ ——流经电阻  $R$  及电容  $C$  的电流，是中间变量。

从上面两式中消去中间变量  $i$ ，即可得到

$$RC \frac{du_o}{dt} + u_o = u_i \quad (2-3)$$

在式(2-3)中，令  $RC = T$ ，则又可以写成如下形式

$$T \frac{du_o}{dt} + u_o = u_i \quad (2-4)$$

式中  $T$ ——网络的时间常数。

可见,  $RC$  无源网络的动态数学模型是一个一阶常系数线性微分方程。

【例 2】 图 2-2 所示为两级形式相同的  $RC$  电路串联组成的滤波网络。试列写出以  $u_i$  为输入,  $u_o$  为输出的网络的动态方程。

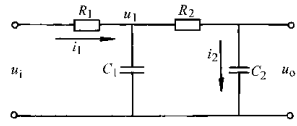


图 2-2 两级  $RC$  滤波网络

在这个电路中, 后一级电路中的电流  $i_2$  影响着前一级电路的输出电压, 即影响着  $C_1$  的端电压, 这就是负载效应。因此, 两级不能孤立地分开, 而必须作为一个整体来列写动态方程。

解 根据基尔霍夫定律, 可以写出下列方程组

$$u_i = R_1 i_1 + \frac{1}{C_1} \int (i_1 - i_2) dt \quad (2-5)$$

$$\frac{1}{C_1} \int (i_1 - i_2) dt = R_2 i_2 + \frac{1}{C_2} \int i_2 dt \quad (2-6)$$

$$u_o = \frac{1}{C_2} \int i_2 dt \quad (2-7)$$

消去中间变量  $i_1$ 、 $i_2$  后得到

$$R_1 C_1 R_2 C_2 \frac{d^2 u_o}{dt^2} + (R_1 C_1 + R_2 C_2 + R_1 C_2) \frac{du_o}{dt} + u_o = u_i \quad (2-8)$$

令  $R_1 C_1 = T_1$ ,  $R_2 C_2 = T_2$ ,  $R_1 C_2 = T_3$ , 则得到

$$T_1 T_2 \frac{d^2 u_o}{dt^2} + (T_1 + T_2 + T_3) \frac{du_o}{dt} + u_o = u_i \quad (2-9)$$

可见, 该滤波网络的动态数学模型是一个二阶常系数线性微分方程。

【例 3】 设有弹簧-质量-阻尼器动力系统, 如图 2-3 所示, 当外力  $F(t)$  作用于系统时, 系统将产生运动。试写出外力  $F(t)$  与质量块的位移  $y(t)$  之间的动态方程。

解 在外力  $F(t)$  作用下, 如果弹簧恢复力和阻尼器阻力与  $F(t)$  不能平衡, 则质量  $m$  将有加速度, 并进而使速度和位移发生变化。根据牛顿第二定律应有

$$F(t) + F_1(t) + F_2(t) = m \frac{d^2 y(t)}{dt^2} \quad (2-10)$$

式中  $F_1(t)$ ——阻尼器阻力;

$F_2(t)$ ——弹簧恢复力。

由弹簧、阻尼器的特性, 可写出

$$F_1(t) = -f \frac{dy(t)}{dt} \quad (2-11)$$

$$F_2(t) = -ky(t) \quad (2-12)$$

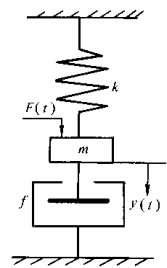


图 2-3 弹簧-质量-阻尼器系统