

普通高等教育机电类规划教材

控制技术与系统

主编 黄惟一 胡生清

参编 金施群 张 辉 杨学友

刘宝坤 宋爱国

主审 于盛林



A0969844



机械工业出版社

本书是根据全国高等学校仪器仪表类教学指导委员会制订的“控制技术与系统”编写大纲编写的,是测控技术与仪器专业的一门专业课教材。主要内容有执行元件,控制技术的基本原理及使用方法,顺序控制系统与过程控制系统的理论分析与工程设计,控制系统的仿真技术和控制系统的设计方法与应用实例。

本书选取的内容适当、先进,对控制技术的内容,除着重介绍了常用的PID控制技术外,还介绍了模糊控制和神经网络等智能控制技术。书中有一章专门介绍了控制系统的仿真技术。

本书可作为“测控技术与仪器”专业的教材,也可供电子信息类专业、机械与电子类专业师生及有关工程技术人员学习和参考。

图书在版编目(CIP)数据

控制技术与系统/黄惟一,胡生清主编. —北京:机械工业出版社,
2002.5
ISBN 7-111-10015-8

I. 控... II. ①黄...②胡... III. 电子测量—控制系统
IV. TM93

中国版本图书馆CIP数据核字(2002)第033794号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

责任编辑:贡克勤 版式设计:霍永明 责任校对:张媛

封面设计:鞠杨 责任印制:路琳

北京机工印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2002年7月第1版·第1次印刷

787mm×1092mm¹/₁₆·15印张·368千字

0 001—6 000册

定价:22.00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、68326677-2527

封面无防伪标均为盗版

前 言

本书是根据全国高等学校仪器仪表类教学指导委员会制订的“控制技术与系统”编写大纲编写的，是“测控技术与仪器”专业的一门专业课教材。

本书的编写取材适当、概念清晰、深入浅出、层次分明。全书共分七章，第一章绪论介绍控制系统的基本概念、发展概况、分类与控制方法和性能指标等；第二章执行元件介绍控制系统常用的低压电器、执行电动机和阀等；第三章控制技术介绍模拟控制技术、数字控制技术和模糊控制与人工神经网络控制基础等；第四章顺序控制系统主要介绍数控系统（CNC）和可编程控制器（PLC）等；第五章过程控制系统主要介绍过程控制对象的动态特性、单回路控制系统、复杂控制系统、集散控制系统和现场总线简介等；第六章控制系统的仿真技术主要介绍控制系统的模拟仿真、数字仿真和仿真环境简介等；第七章控制系统的设计方法与实例主要介绍控制系统的设计思想、设计的技术指标、设计的一般方法和设计实例等。

本书编写的特色是强调基本原理和分析方法，突出重点，注重理论联系实际，在内容上能反映出控制技术与系统目前发展的先进水平。学生在学习本教材后不仅能掌握控制技术与系统的基本原理及使用方法，而且对控制系统还具有一定的工程设计能力。

本书由东南大学黄惟一和合肥工业大学胡生清主编。第一章由黄惟一编写，第二章由合肥工业大学金施群编写，第三章由合肥工业大学张辉编写，第四章由天津大学杨学友编写，第五章由天津大学刘宝坤编写，第六章和第七章由东南大学宋爱国编写。全书由南京航空航天大学于盛林教授主审。2001年10月在南京召开了本教材的审稿会，与会代表提出了宝贵意见。此外，在本书编写的过程中参阅了不少有关著作。在此对主审、参加审稿会的代表和参阅著作的作者表示诚挚的谢意！

由于编者的业务水平有限，书中定有不妥和错误之处，恳请广大读者和使用本书的师生不吝指正。

编 者
2002年2月

目 录

前言

第一章 绪论	1
第一节 控制系统的基本概念	1
一、什么是自动控制系统	1
二、控制系统的基本方式	3
第二节 控制系统的发展概况	4
第三节 控制系统的分类与控制方法	5
一、控制系统的基本类型	5
二、控制系统的控制方法	6
第四节 控制系统的性能指标	8
一、对控制系统的要求	8
二、性能指标	9
第二章 执行元件	12
第一节 常用低压电器	12
一、接触器	12
二、继电器	17
三、固态继电器	18
四、接近开关	19
第二节 执行电动机	20
一、伺服电动机	20
二、直流测速发电机	36
三、步进电动机	41
第三节 阀	50
一、电动调节阀	50
二、电磁阀	52
思考题与习题	53
第三章 控制技术	54
第一节 模拟控制技术	54
一、常用控制规律概述	54
二、PID 控制规律对系统过程控制的影响	59
三、控制器的选用原则	66
第二节 数字控制技术	66
一、模拟控制器的离散化	66
二、连续 PID 控制器微分方程的离散化	68
三、改进的 PID 算法	69

四、PID 参数整定方法	73
五、其他常用控制算法	74
第三节 模糊控制	81
一、模糊控制的数学基础	82
二、模糊控制原理	87
三、模糊控制器设计	92
第四节 人工神经网络控制基础	98
一、人工神经网络的基本概念	98
二、用于控制的人工神经网络	101
思考题与习题	106
第四章 顺序控制	108
第一节 概述	108
一、顺序控制系统的组成	108
二、基本逻辑运算	109
三、顺序控制系统的实现	109
四、顺序控制系统在工业生产过程控制及家电产品中的应用	110
第二节 数控系统 (CNC)	111
一、数控原理	111
二、机床数控系统的控制单元	114
三、插补器	117
第三节 可编程控制器 (PLC)	122
一、概述	122
二、可编程控制器的结构原理	123
三、程序设计	127
思考题与习题	135
第五章 过程控制系统	136
第一节 概述	136
一、过程控制	136
二、过程控制系统的组成	136
三、过程控制系统的分类	137
第二节 过程控制对象的动态特性	140
一、过程控制对象的主要特性	140
二、过程控制对象的动态描述	140
三、时域法辨识对象的动态特性	142
四、频域法辨识对象的动态特性	145
第三节 单回路控制系统	146

一、概述	146	第三节 控制系统的数字仿真	197
二、单回路控制系统设计	148	一、数值积分方法	197
三、控制器的参数整定	154	二、连续系统模型的离散化处理方法	201
第四节 复杂控制系统	156	三、仿真模型误差和稳定性问题	204
一、串级控制系统	157	四、仿真算法的选择和比较	205
二、前馈控制系统	159	第四节 控制系统仿真环境简介	206
三、选择性控制系统	162	一、概述	206
四、纯滞后过程控制系统	164	二、MATLAB 语言与 SIMULINK 仿真环境简介	207
五、解耦控制系统	167	思考题与习题	209
第五节 集散型控制系统	170	第七章 控制系统的设计方法与实例	210
一、概述	170	第一节 控制系统的设计思想	210
二、集散控制系统的硬件结构	171	一、设计思想	210
三、集散控制系统的软件体系	175	二、设计方法	212
四、集散控制系统的应用	178	第二节 控制系统设计的技术指标	213
第六节 现场总线简介	182	一、技术指标	213
一、概述	182	二、控制系统技术指标的转换	215
二、现场总线控制系统	183	第三节 经典理论设计控制系统的一般方法	216
三、通信模型	183	一、控制系统的特性设计	216
四、几种典型的现场总线	185	二、校正方式	216
思考题与习题	189	三、串联校正的基本方法	216
第六章 控制系统的仿真技术	190	第四节 控制系统的设计实例	218
第一节 概述	190	一、模拟转台的航向伺服系统设计	218
一、控制系统仿真技术的概念和分类	190	二、太阳跟踪器设计	225
二、控制系统仿真技术的一般过程和步骤	191	思考题与习题	229
三、控制系统仿真技术中的相似理论	191	附录 N-90 的功能块、功能码及说明	230
第二节 控制系统的模拟仿真	193	参考文献	233
一、电子模拟计算机	193		
二、控制系统的模拟仿真图	195		
三、上机模拟运算仿真步骤	197		

第一章 绪 论

第一节 控制系统的基本概念

一、什么是自动控制系统

自动控制系统及其理论从本质而言是物理学的一部分,是对物质运动规律的一种研究,其数学表征形式是运动微积分方程。自动控制主要是采用信息技术和控制、管理中的优化理论以达到部分取代或扩展人的体力活动和脑力活动。自动控制的原始思想,简单地说,就是为了消除“理想与现实之间的差距”,进一步的解释就是根据现在的“理想与现实之间的差距”来决定系统下一步做什么。人用手拿东西的过程就是一个典型的反馈过程:眼睛接收信号,大脑根据信号判断手与物体的距离,然后决定手的动作。一个自动控制系统的基本结构如下:控制器,相当于人的大脑;传感器,相当于眼睛;而对应于手的部分一般是电动或气动开关。控制理论所关心的,主要是控制器的结构问题。从研究的角度看,一个系统的输入和输出,就是我们感兴趣的量的期望值和实际值。例如在温度控制系统里,输入就是期望的温度,而输出是实际温度。本质上说,任何物理过程和化学过程都是物质运动过程,都可以用动力学方程进行描述。也都可以用自动控制理论加以研究。

人体就是一个十分复杂、灵敏、精确和完善的自动控制系统。和其他任何控制系统一样,人体的自动控制,也是通过“反馈”来完成的。所谓人体上的反馈,就是产生各种生理活动的各种效应器与控制这些活动的感受器之间互相作用的过程。以血糖为例,当胰岛素分泌时,血糖就被分解利用掉,或者储存起来,血液中糖的水平就降低;血糖的降低,又反过来影响胰腺,使胰岛素的分泌减少,这样,就停止了血糖的进一步降低。反过来,当血中葡萄糖的水平升高,就会影响胰岛使其多分泌。这样,人体血糖就能自动控制在一定的水平,而不致过高或过低。

人体内各种生理活动过程,只能在相对恒定的条件下进行,超出这个条件范围,就会危及生命。这种恒定的内环境是保证生命活动的必要条件。因此,可以说人体各种生理活动都是在自动控制下进行的。胰岛素的例子只不过是一种简单的例子。其实人体中的生理活动,诸如血压、心跳、呼吸、新陈代谢都是通过自动调节来控制的。可以说,人体是一个高度自动化的控制系统,它维持着人体恒定的内环境,以保持生命活动的正常进行。

恒温箱温度控制是另一个例子,控制使箱内实际的温度与期望的温度相一致。实现恒温控制有人工控制和自动控制两种办法。人工控制的任务是克服外界干扰(如电源电压波动、环境温度变化等等),保持箱内温度恒定,以满足物体对温度的要求。操作者可以通过调压器改变通过加热电阻丝的电流,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:

- 1) 测量元件(温度计)测出恒温箱内的温度(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。当恒温箱内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，使电流增大，温度升到正常范围。

恒温箱温度的自动控制系统如图 1-1 所示，在这个自动控制系统中，把恒温箱要求的温度变换成相应的电压量预先设定好，当外界因素引起箱内温度变化时，测量元件，如热电偶，把温度转换成相应的电压量，并反馈回去与设定的电压量相比较，所得结果即为温度的偏差信号 Δu 。经过电压、功率放大后用以驱动直流执行电动机，并通过传动装置拖动调压器的触头。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。

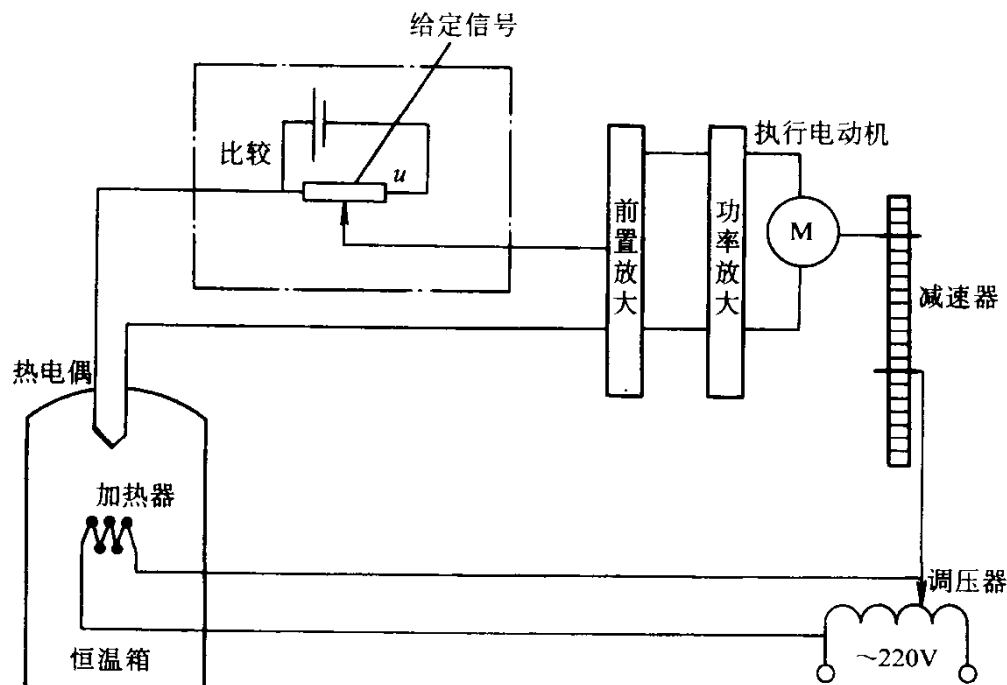


图 1-1 恒温箱温度的自动控制系统

而所有这些装置便组成了一个自动控制系统。分析上述恒温箱的两种工作过程可以看出，自动控制系统和人工控制系统非常相似。这里，测量装置相当于人的眼睛，控制器类似于人脑，执行机构好比于人手。它们的共同特点都是要检测偏差，并用检测到的偏差去纠正偏差。因此，可以说没有偏差就不会有控制调节过程。在控制系统中，给定量又称系统的输入量，被控制量也称系统的输出量。输出量的返回过程称为反馈，它表示输出量通过测量装置将信号的全部或一部分返回输入端，使之与输入量进行比较，产生的结果称为偏差。在人工控制中，这一偏差是通过人眼观测后，由人脑判断、决策得出的；而在自动控制中，偏差则是通过反馈，由控制器进行比较、计算产生的。综上所述，可以归纳自动控制系统的工作原理如下：

- 1) 检测输出量的实际值。
- 2) 将实际值与给定值（输入量）进行比较得出偏差值。
- 3) 用偏差值产生控制调节作用去消除偏差。

这种基于反馈原理、通过“检测偏差再纠正偏差”的系统称为反馈控制系统。可见，作为反馈控制系统至少应具备测量、比较（或计算）和执行三个基本功能。

从以上的论述可见，自动控制系统是指能够对被控制对象的工作状态进行自动控制的系统。它一般由控制装置和被控对象构成。控制装置是指对被控对象起控制作用的设备总体，例如有用来测量温度、压力、流量或运动物体（如飞行器）姿态等物理量的测量设备；有对位移、速度、加速度或电流、电压等物理量进行变换和放大的变换、放大设备；有操纵被控对象的执行设备。被控对象是指要求实现自动控制的机器、设备或生产过程，例如机床、机器人、飞行器以及工业生产过程等。

自动控制系统及其理论不仅在工业、国防等部门已经获得了广泛的应用，例如在宇宙飞船系统、导弹制导系统和机器人系统中，自动控制系统具有特别重要的应用，而且对生态系

统、社会系统和经济系统中的控制问题也可以用自动控制理论来进行研究和解决。

二、控制系统的基本方式

实际的控制系统，根据有无反馈作用可以分为开环控制系统与闭环控制系统以及它们两者的结合——复合控制系统。

（一）开环控制系统

如果系统只是根据输入量和干扰量进行控制，而输出端和输入端之间不存在反馈回路，输出量在整个控制过程中对系统的控制不产生任何

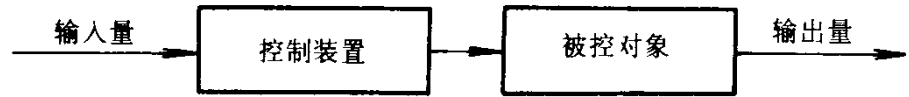


图 1-2 开环控制系统框图

影响，这样的系统称为开环控制系统，如图 1-2 所示。开环控制系统是由前馈通路构成，用一定的输入量产生一定的输出量，控制系统的输出量就是被控制量，它的期望值一般是系统输入量的函数。如果由于某种干扰作用使输出量偏离原始值，它没有自动纠偏的能力。如果要进行补偿，就必须再借助人工作改变输入量。所以开环系统的控制精度较低。但是如果组成系统的元件特性和参数值比较稳定，而且外界的干扰也比较小，则这种控制系统也可以保证一定的精度。开环控制系统的最大优点是系统简单，成本低廉，一般都能稳定可靠地工作，因此对于要求不高的系统可以采用。

（二）闭环控制系统

如果系统的输出端和输入端之间存在反馈回路，输出量对控制过程产生直接影响，这种系统称为闭环控制系统，如图 1-3 所示。闭环控制系统是由前馈通路和反馈通路构成，这里，闭环的作用就是应

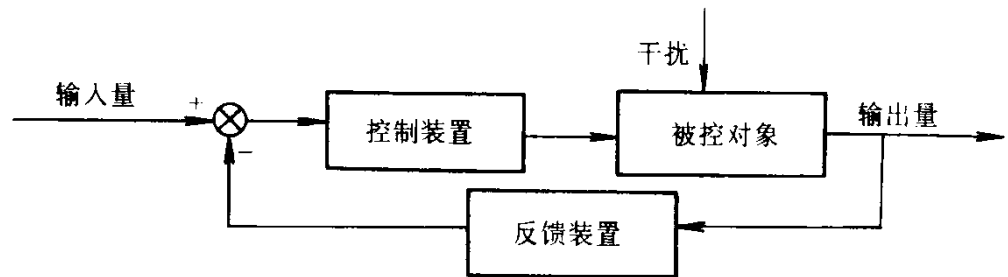


图 1-3 闭环控制系统框图

用反馈来减少偏差。因此，反馈控制系统必是闭环控制系统。例如，前述的恒温箱温度自动控制系统就是闭环控制系统。

闭环控制系统的突出优点是控制精度高，抗干扰能力强，只要被控制量的实际值偏离给定值，闭环控制就会产生控制作用来减小这一偏差。

闭环控制系统也有它的缺点，这类系统是靠偏差进行控制的，因此，在整个控制过程中始终存在着偏差，由于元件的惯性（如负载的惯性），若参数配置不当，很容易引起振荡，使系统不稳定，而无法工作。所以，在闭环控制系统中精度和稳定性之间总会存在着矛盾，必须合理地解决。

一般来说，闭环控制系统由以下几部分组成：

（1）给定元件 用来产生给定信号或输入信号是进行物理量大小和性质变换的元件。如在上述恒温箱例子中把恒温箱要求的温度变换成相应的电压值的产生部分，比如，电位器等。

（2）反馈元件 它量测被控制量或输出量，产生主反馈信号。一般，为了便于传输，主反馈信号多为电信号。因此，反馈元件通常是一些用电量（电物理量）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和用光栅测量装置将直线位移变换为数字信号等。

(3) 比较元件 用来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。比如, 一个电压比较器、运算放大器等。

(4) 放大元件 对偏差信号进行放大的元件。例如, 电压放大器、功率放大器、电液伺服阀、电气比例/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。

(5) 执行元件 直接对受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。

(6) 校正元件 为保证控制质量, 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。

尽管一个控制系统是由许多起着不同作用的元件所组成, 但从总体来看, 比较元件、放大元件、执行元件和反馈元件等共同起着控制作用, 而剩余部分就是受控对象。因此, 任何控制系统也可以说仅由控制部分和受控对象两部分组成。一般认为扰动信号不是由控制部分产生的, 而是由系统的外部环境或内部因素造成的, 它集中地表现在控制量与被控制量之间的偏差上。而闭环控制系统就是按偏差进行自动调节的, 所以, 闭环控制的一个核心思想就是反馈。

(三) 复合控制系统

当要求实现复杂且精度较高的控制任务时, 可将开环控制系统和闭环控制系统适当地结合起来, 组成一个比较经济且性能较好的复合控制系统。如图 1-4 所示, 复合控制系统实质上是在闭环控制系统的基础上, 附加一个输入量或干扰作用的前馈通路来提高控制精度。前馈通路通常由对输入量的补偿装置或对干扰作用的补偿装置组成, 分别称为按输入量补偿和按干扰作用补偿的复合控制系统, 如图 1-4a、b 所示。复合控制系统中的前馈通路相当于开环控制, 因此, 对补偿装置的参数稳定性要求较高, 否则, 会由于补偿装置的参数漂移而减弱其补偿效果。此外, 前馈通路的引入, 对闭环系统的性能影响不大, 但却可以大大提高系统的控制精度。

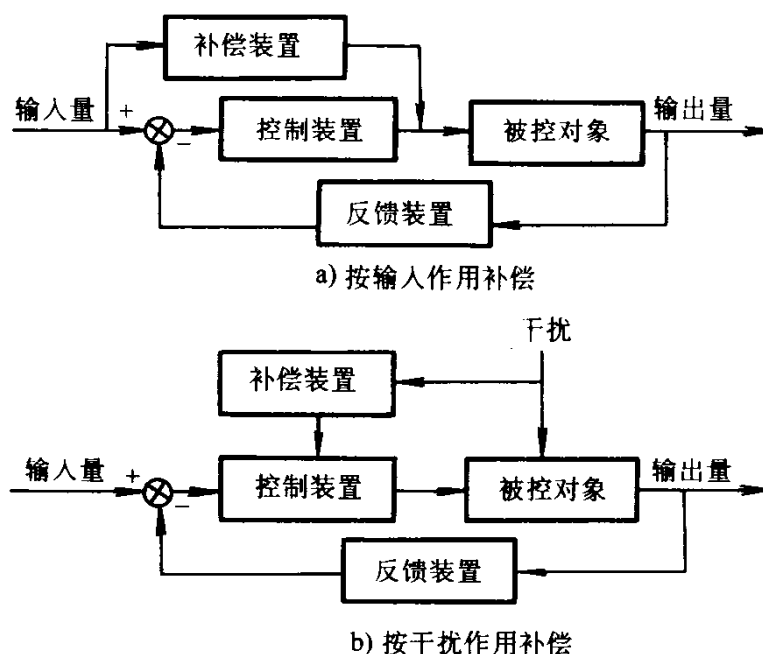


图 1-4 复合控制系统

第二节 控制系统的发展概况

让我们来简要地回顾一下自动控制理论和控制系统的发展历史。18 世纪, 詹姆斯·瓦特 (James Watt) 为控制蒸汽机速度而设计的离心调节器, 是自动控制领域的第一项重大成果。在控制理论发展初期, 做出过重大贡献的众多学者中有迈纳斯基 (Minorsky)、黑曾 (Hezen) 和奈奎斯特 (Nyquist)。1922 年, 迈纳斯基研制出船舶操纵自动控制器, 并且证明

了如何从描述系统的微分方程中确定系统的稳定性。1932年，奈奎斯特提出了一种相当简便的方法，根据对稳态正弦输入的开环响应，确定闭环系统的稳定性。1934年，黑曾提出了用于位置控制系统的伺服机构的概念，讨论了可以精确跟踪变化的输入信号的机电式伺服机构。

20世纪40年代，频率响应法为工程技术人员设计满足性能要求的线性闭环控制系统提供了一种可行的方法。从20世纪40年代末到50年代初，伊凡思（Evans）提出并且完善了根轨迹法。

频率响应法和根轨迹法是古典控制理论的核心。由这两种方法设计出来的系统是稳定的，并且或多或少地满足一组适当的性能要求。一般来说，这些系统是令人满意的，但它不是某种意义上的最佳系统。从20世纪50年代末期开始，控制系统设计问题的重点从设计许多可行系统中的一种系统，转变到设计在某种意义上的一种最佳系统。

由于具有多输入和多输出的现代设备变得越来越复杂，所以需要大量方程来描述现代控制系统。古典控制理论只涉及单输入、单输出系统，对于多输入、多输出系统就无能为力了。大约从1960年开始，数字计算机的出现为复杂系统的时域分析提供了可能性。因此，利用状态变量、基于时域分析的现代控制理论应运而生，从而适应了现代设备日益增加的复杂性，同时也满足了军事、空间技术和工业应用领域对精确度、重量和成本方面的严格要求。

从1960年到1980年这段时间，不论是精确性系统的最佳控制，还是随机系统的最佳控制，乃至复杂系统的自适应和学习控制，都得到了充分的研究。从1980年到现在，现代控制理论的进展集中于鲁棒控制、 H_∞ 控制及其相关的课题。

工业控制系统的发展经历了简单仪表系统、电动单元组合仪表系统、集中控制系统和集散控制系统几个阶段。20世纪80年代以来，依靠微电子工业的带动，微处理器和微控制器在工业控制领域全面应用，并逐渐发展出现了将控制技术、计算机技术和网络技术结合的新一代控制技术——现场总线控制系统（Field bus Control System），将网络概念全面引入控制现场，以实现控制结构的网络化、集成化和控制功能分布化、智能化的开放式控制系统。

纵观控制系统发展的历程，它与控制理论、计算机技术、现代应用数学的发展息息相关。目前，控制理论正在与模糊数学、分形几何、混沌理论、灰色理论、人工智能、神经网络、遗传基因等学科的交叉、渗透与结合中不断发展。

第三节 控制系统的分类与控制方法

一、控制系统的基本类型

控制系统的种类很多，在实际工程中，除按第一节所述根据有无反馈可分为闭环控制系统、开环控制系统和复合控制系统外，还可以从不同的角度对控制系统进行分类。

（一）按输入量的特征分

1. 恒值控制系统

这种控制系统的输入量是一个恒定值，一经给定，在运行过程中就不再改变（但可定期校准或更改输入量）。恒值控制系统的任务是保证在任何扰动下系统的输出量为恒值。工业生产中的温度、压力、流量、液面等参数的控制，有些原动机的速度控制，机床的位置控制，电力系统的电网电压、频率控制等，均属此类。

2. 程序控制系统

这种系统的输入量不为常值，但其变化规律是预先知道和确定的。可以预先将输入量的变化规律编成程序，由该程序发出控制指令，在输入装置中再将控制指令转换为控制信号，经过全系统的作用，使被控对象按指令的要求而运动。计算机绘图仪就是典型的程序控制系统。工业生产中的过程控制系统按生产工艺的要求编制成特定的程序，由计算机来实现其控制。这就是近年来迅速发展起来的数字程序控制系统和计算机控制系统。微处理机控制将程序控制系统推向更普遍的应用领域。

3. 随动系统

随动系统在工业部门又称伺服系统。这种系统的输入量的变化规律是不能预先确定的。当输入量发生变化时，则要求输出量迅速而平稳地跟随着变化，且能排除各种干扰因素的影响，以一定的精度复现输入量的变化规律（此即伺服的含义）。控制指令可以由操作者根据需要随时发出，也可以由目标物或相应的测量装置发出。机械加工中的仿形机床和武器装备中的火炮自动瞄准系统以及导弹目标自动跟踪系统等均属随动系统。

（二）按系统中传递信号的性质分

1. 连续控制系统

系统中各部分传递的信号都是连续时间变量的系统称为连续控制系统。连续控制系统又有线性系统和非线性系统之分。用线性微分方程描述的系统称为线性系统；不能用线性微分方程描述、存在着非线性部件的系统称为非线性系统。

2. 离散控制系统

系统中某一处或数处的信号是脉冲序列或数字量传递的系统为离散控制系统（也称数字控制系统）。在离散系统中，数字测量、放大、比较、给定等部件一般均由微处理机实现，计算机的输出经 D/A 转换加给伺服放大器，然后再去驱动执行元件或由计算机直接输出数字信号，经数字放大器后驱动数字式执行元件。

由于连续控制系统和离散控制系统的信号形式有较大差别，因此在分析方法上也有明显的不同。连续控制系统以微分方程来描述系统的运动状态，并用拉普拉斯变换法求解微分方程；而离散控制系统则用差分方程来描述系统的运动状态，用 Z 变换法引出脉冲传递函数来研究系统的动态特性。

此外，还可按系统部件的物理性质分为机械、电气、机电、液压、气动、热力等控制系统。

二、控制系统的控制方法

根据控制方法的不同可组成各种不同的控制系统，最常用的有比例积分微分（PID）控制方法。但是随着科学技术的突飞猛进，对工业过程控制的要求越来越高，不仅要求控制的精确性，更注重控制的鲁棒性、实时性、容错性以及控制参数的自适应和学习能力。另外，需要控制的工业过程日趋复杂，工业过程严重的非线性和不确定性，使许多系统无法用数学模型精确描述。这样建立在数学模型基础上的经典和现代控制方法将面临空前的挑战，同时也给新控制方法的发展带来了良好的机遇。由于生产过程迅速向着大型化、连续化的方向发展，于是出现了一些比较新的控制方法，现对其中的一些控制方法做简要的介绍。

（一）自适应控制（Adaptive Control）

自适应控制方法是经过不断地测量系统的输入、状态、输出或性能参数，逐渐了解和掌握对象，然后根据所得的信息按一定的设计方法，作出决策去更新控制器的结构和参数以适

应环境的变化，达到所要求的控制性能指标。自适应控制系统应具有三个基本功能：

- 1) 辨识对象的结构和参数，以便精确地建立被控对象的数学模型。
- 2) 给出一种控制策略以使被控系统达到期望的性能指标。
- 3) 自动修正控制器的结构参数。

因此，自适应控制系统主要用于过程模型未知或过程模型结构已知但参数未知且随机的系统。自适应控制系统的类型主要有自校正控制系统、模型参考自适应控制系统、自寻最优控制系统及学习控制系统等。

(二) 模糊控制 (Fuzzy Control)

模糊控制方法就是以模糊集合理论为基础的控制技术。模糊集合理论为控制技术摆脱建立精确数学模型提供了工具，使控制系统像人一样基于定性的模糊的知识进行控制决策成为可能。在模糊控制系统中，能够将人的控制经验和知识包含进来，从这个意义上说，模糊控制是一种智能控制。模糊控制既可以面向简单的被控对象，也可以用于复杂的控制过程。

模糊控制借助模糊数学模拟人的思维方法，将工艺操作人员的经验加以总结，运用语言变量和模糊逻辑理论进行推理和决策，对复杂对象进行控制。模糊控制既不是指被控过程是模糊的，也不意味控制器是不确定的，它是表示知识和概念上的模糊性。它完成的工作是完全确定的。

模糊控制技术已成为自动控制技术领域内的一个主要分支。模糊理论在控制领域取得广泛的应用，完全是由模糊控制本身的特点决定的。模糊控制器采用人类语言信息，模拟人类思维，故易于接受，设计简单，维修方便。

模糊控制的特点是不需要精确的数学模型，鲁棒性强，控制效果好，容易克服非线性因素的影响，控制方法易于掌握。模糊控制发展的前景是乐观的。随着相关学科日新月异的发展，其自身也在不断完善，潜在的能力也不断发挥出来，尤其是在工业中的应用将会日益广泛和成熟。

(三) 神经网络控制 (Neural Network Control)

神经网络控制方法就是基于人工神经网络的控制技术。神经网络具有高速并行处理信息的能力，这种能力适于实时控制和动力学控制；神经网络具有很强的自适应能力和信息综合能力，这种能力适用于复杂系统、大系统和多变量系统的控制；神经网络的非线性特性适用于非线性控制。神经网络具有学习能力，能够解决那些用数学模型或规则描述难以处理的控制过程。

神经网络是由所谓神经元的简单单元按并行结构经过可调的连接权构成的网络。神经网络控制就是利用神经网络这种工具从机理上对人脑进行简单结构模拟的新型控制和辨识方法。神经网络在控制系统中可充当对象的模型，还可充当控制器。

神经网络控制的主要特点是：可以描述任意非线性系统；用于非线性系统的辨识和估计；对于复杂不确定性问题具有自适应能力；快速优化计算能力；具有分布式储存能力，可实现在线、离线学习。

(四) 智能控制 (Intelligent Control)

智能控制的发展历史不长，目前尚无标准化的定义，但是面对现代工业系统的特点和要求，对一个理想的智能控制系统所应具备的功能则是比较统一的，那就是：

1. 具有关于人机环境的知识及如何利用这些知识的策略，包括人的控制策略、被控对象

的动态特征及环境的变化特性。

2. 有自适应、自组织、自学习和自协调的能力,也就是系统应具有能适应被控对象环境及控制过程变化的能力,能通过学习控制器和环境的信息而改善自身性能的能力。

3. 能满足多目标、多层次的高标准要求,有判断决策的能力。

4. 有容错性,即系统应具有对各类故障进行屏蔽和自修复的能力,以保持系统高度的可靠性。

5. 具有智能化的人—机界面,也就是将知识工程融入人机界面,不但能通过文字、图形等模式,而且可以通过语言、姿态等模式进行交互,具有自学习、自适应的能力,使界面能主动与用户交互,对人考虑问题起到良好的催化作用。

智能控制所具有的这些功能特点决定了它所研究的问题是多方面的、多层次的,所以尽管目前还不很成熟,但这并不妨碍智能控制的渐进应用,特别是在工业生产中的应用。事实也正是如此,目前一些成功的智能控制系统的开发也许功能并不是如上所述的完善,但都是结合具体的工业生产过程进行的,并正在生产实践中发挥着巨大的经济效益。智能控制面对不同的应用领域有着各种形式和结构,如分层递阶智能控制、分布式智能控制、仿人智能控制、学习控制、专家控制、智能 PID 控制、模糊控制、神经网络控制以及模糊神经网络控制等。

(五) 计算机控制 (Computer Control)

随着计算机技术的飞速发展,计算机已经成为自动控制技术不可分割的重要组成部分,并为自动控制技术的发展和應用开辟了广阔的新天地。

计算机控制方法就是利用计算机来实现生产过程自动化的技术。在计算机控制系统中,由于工业控制机的输入和输出是数字信号,因此需要有 A/D 和 D/A 转换器。从本质上讲,计算机控制系统的工作原理可归纳为以下三步:

(1) 实时数据采集 对来自测量变送装置的被控变量的瞬时值进行检测和输入。

(2) 实时控制决策 对采集到的被控量进行分析和处理,并按已定的控制规律,决定将要采取的控制行为。

(3) 实时控制输出 根据控制决策,适时地对执行机构发出控制信号,完成控制任务。

上述过程不断重复,使整个系统按照一定的品质要求进行工作,并对被控量的设备本身的异常现象及时做出处理。计算机控制系统由工业控制机和生产过程两大部分组成。工业控制机是指按生产过程控制的特点和要求而设计的计算机,它包括硬件和软件两部分。生产过程包括被控对象、执行机构、电器开关等装置,而生产过程中的测量变送装置、执行机构、电器开关都有各种类型的标准产品,在设计计算机控制系统时,根据需要合理地选型即可。

第四节 控制系统的性能指标

控制系统应用于不同场合,对它有不同的性能要求。但从控制工程的角度来看,对控制系统却有一些共同的要求,一般可归结为稳定、精确、快速、安全。

一、对控制系统的要求

(一) 稳定性

由于控制系统都包含储能元件,若系统参数匹配不当,便可能引起振荡。稳定性就是指

系统动态过程的振荡倾向及其恢复平衡状态的能力。对于稳定的系统，当输出量偏离平衡状态时，应能随着时间收敛并且最后回到初始的平衡状态。稳定性乃是保证控制系统正常工作的先决条件。

（二）精确性

控制系统的精确性即控制精度，一般以稳态误差来衡量。所谓稳态误差是指以一定变化规律的输入信号作用于系统后，当调整过程结束而趋于稳定时，输出量的实际值与期望值之间的误差值，它反映了动态过程后期的性能。这种误差一般是很小的。如数控机床的加工误差小于 0.02mm，一般恒速、恒温控制系统的稳态误差都在给定值的 1% 以内。

（三）快速性

快速性是指当系统的输出量与输入量之间产生偏差时，消除这种偏差的快慢程度。快速性好的系统，它消除偏差的过渡过程时间就短，就能复现快速变化的输入信号，因而具有较好的动态性能。

由于受控对象的具体情况不同，各种系统对稳定、精确、快速这三方面的要求是各有侧重的。例如，调速系统对稳定性要求较严格，而随动系统则对快速性提出较高的要求。即使对于同一个系统稳、准、快也是相互制约的。提高快速性，可能会引起强烈振荡；改善了稳定性，控制过程又可能过于迟缓，甚至精度也会变差。

（四）安全性

由于技术上的原因，安全控制的问题尚未很好解决，在国内外发生过不少次安全事故，损失巨大。因此国内外对于控制系统的故障诊断与安全十分重视，成立了专门的专业委员会，负责这一学科的组织和发展工作。

二、性能指标

控制系统虽然有各种不同的类型。但对它们需要研究解决的问题是相似的。例如，已知控制系统的结构和参数时，研究它在某种典型输入信号作用下的被控量变化的全过程，从这个变化过程得出其中的性能指标，并讨论性能指标和系统的结构、参数之间的关系。研究的这类问题通常叫做系统分析。

对系统分析可以采用时域分析法或频率响应法，时域分析法是一种直接分析方法，而且是一种比较准确的方法，可以提供系统时间响应的全部信息。频率响应法是应用频率特性研究控制系统的一种方法。实际上，频率特性和时间响应之间具有对应关系。

为了对各种控制系统的性能进行统一的评价，必须先确定一些典型的输入信号。通常是选用几种确定性函数作为典型输入信号，对它们的要求是在现场或实验室中容易产生；在典型输入信号作用下，系统的性能应能反映出系统在实际工作条件下的性能；这些典型输入信号的数学表达式比较简单，便于理论计算。目前在工程实际中常用的典型输入信号有阶跃函数、脉冲函数、斜坡函数和正弦函数。

实际应用时究竟采用哪一种典型输入信号，这取决于系统的常见工作状态。更多的情况是在所有可能的输入信号中，常选用最不利的信号作为系统的典型输入信号。例如，采用阶跃函数作为输入信号。

任何一个实际控制系统的时间响应，都是由过渡过程和稳态过程两部分组成，现分述如下：

（一）过渡过程和动态性能

控制系统从开始有输入信号起到系统输出量达到稳定之前的响应过程称为过渡过程，也叫动态过程。在这一期间，由于系统具有惯性、摩擦和其他一些原因，输出量不可能完全复现输入量的变化。根据系统结构和参数选择的情况，过渡过程表现为衰减、发散或等幅振荡形式。显然一个可以运行的控制系统，其过渡过程必须是衰减的，也就是系统必须是稳定的。过渡过程除提供有关系统稳定的信息外，还可提供输出量在各个瞬时偏离输入量的程度以及有关时间间隔的信息，这些信息就反映了系统的动态性能。

通常是在阶跃函数作用下来测定系统的动态性能，阶跃输入对系统来说是最严峻的工作状态，如果系统在阶跃函数作用下的动态性能满足要求，那么系统在其他形式的函数作用下，其动态性能也是令人满意的。图 1-5 是控制系统在单位阶跃函数作用下的响应曲线，称为单位阶跃响应，以 $h(t)$ 表示。反映控制系统动态性能的指标有：

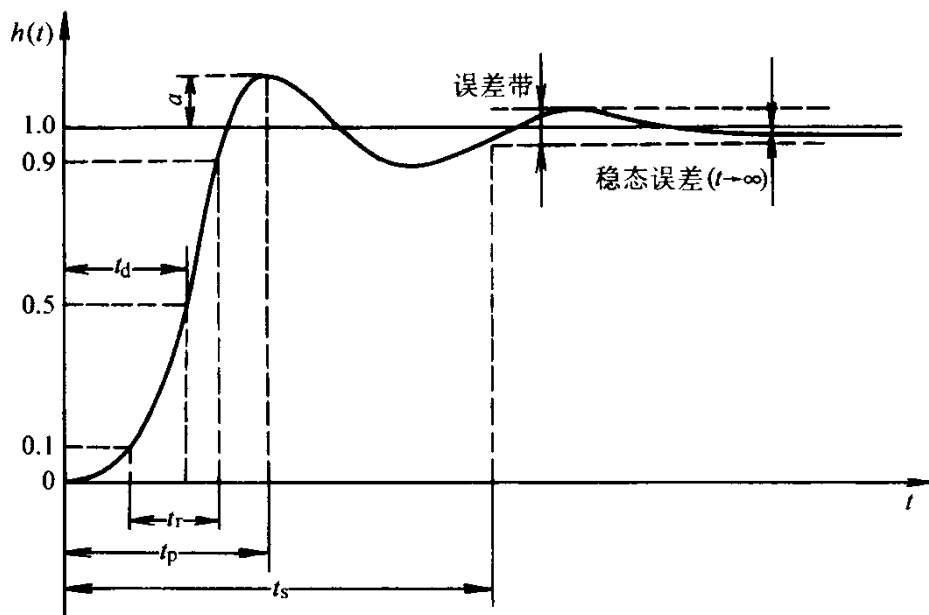


图 1-5 控制系统的单位阶跃响应

- 1) 延迟时间 t_d 响应到达稳态值 50% 所需的时间。
- 2) 上升时间 t_r 响应从稳态值 10% 升到 90% 所需时间。
- 3) 峰值时间 t_p 响应超过稳态值到达第一个峰值所需的时间。
- 4) 调节时间 t_s 响应到达并停留在稳态值的 $\pm 5\%$ 或 $\pm 2\%$ 误差范围内所需的最少时间。

调节时间又称为过渡过程时间。

5) 超调量 σ 在系统响应的过渡过程中，输出量的最大值为 $h(t_p)$ ，输入量的稳态值为 $h(t_\infty)$ ，如 $h(t_p)$ 小于 $h(t_\infty)$ ，则响应无超调；如 $h(t_p) > h(t_\infty)$ ，则有超调量 $h(t_p) - h(t_\infty)$ 。

6) 峰值百分比超调量 $\sigma\%$
$$\sigma\% = \frac{h(t_p) - h(t_\infty)}{h(t_\infty)} \times 100\%。$$

7) 振荡次数 N 在调节时间内， $h(t)$ 偏离 $h(t_\infty)$ 的振荡次数。

这些性能指标基本上可以体现控制系统过渡过程的特征，其中上升时间、峰值时间和调节时间是表示过渡过程进行的快慢，是快速性指标。超调量和振荡次数是反映过渡过程的振荡激烈程度，是振荡性指标。在实际应用中，最常用的动态性能指标是上升时间、调节时间和超调量。当获得控制系统的单位阶跃响应曲线后，就能很容易地从曲线上确定控制系统的性能指标。

以上介绍是控制系统的时域指标，其实还可以用频域指标来表征控制系统的动态性能，在控制系统中最重要的频域指标是频带宽度，简称带宽 ω_b ，通常 ω_b 的含义是指在系统的幅频特性曲线上，幅值下降至零频率时幅值的 70.7% 处的频率值（可参见图 7-3）。带宽表示了系统的响应的快慢，带宽越宽，则系统阶跃响应的上升速度越快。带宽还反映出系统对噪声的滤波能力，由于一般噪声的频率都较高，故带宽越宽，则系统对噪声的滤波能力越差。

(二) 稳态过程和稳态性能

控制系统在单位阶跃函数作用下，在经历过渡过程后，随着时间趋向于无穷时的响应过程，称为稳态过程。稳态过程表征系统输出量最终复现输入量的程度。如果当时间趋于无穷时，系统的输出量不等于输入量或输入量的确定函数，则认为系统存在稳态误差。稳态误差不仅反映了控制系统稳态性能的好坏，而且是表征控制系统精度的重要技术指标。

以上介绍的动态和稳态性能指标，在设计控制系统时都是需要满足的要求，有关性能指标的具体要求将根据各种不同控制任务的需要来确定。

第二章 执行元件

第一节 常用低压电器

电器是一种能根据外界的信号和要求,手动或自动地接通或断开电路,断续或连续地改变电路参数,以实现电路的切换、控制、保护、检测、变换和调节用的电气设备。低压电器通常指工作在交、直流电压 1200V 以下电路中的电气设备。

一、接触器

接触器是在正常工作条件下,主要用作频繁地接通或分断交、直流主电路,且可远距离控制的电器。其主要控制对象是电动机,也可以用于控制其他电力负载,如电热器、电焊机、电容器和照明器件等。

接触器的基本参数是主触头的额定电流、主触头允许切断电流、触头数、线圈电压、操作频率、动作时间、机械寿命和电寿命等。

现代生产的接触器,其额定电流最大可达 2500A,允许接通频数为每小时 150~1500 次,电寿命 50~100 万次,机械寿命 500~1000 万次。

接触器的触头系统可以用电磁铁、压缩空气或液体压力等来驱动,因而可分为电磁接触器、气动接触器与液压接触器等。近年来还出现了由晶闸管组成的无触头接触器。本节主要介绍电磁接触器。

电磁接触器由主触头、辅助触头、电磁铁、灭弧装置及支架和外壳等组成。当电磁铁通电吸合时,常开主触头和常开辅助触头接通,常闭主触头和常闭辅助触头分断;电磁铁断电释放时,则相反。接触器主触头用于接通和分断主电路,额定电流比较大,通常为数安到数百安,甚至高达数千安。而辅助触头用于接通和分断控制电路,额定电流只有 5~10A。

(一) 电磁机构

电磁机构是接触器的主要组成部分之一,它将电磁能转换成机械能,带动触头使之闭合或分断。电磁机构由吸引线圈和磁路两部分组成。其中磁路包括铁心、衔铁、铁轭和空气隙,利用气隙把电磁能转换成机械能。交流接触器的电磁

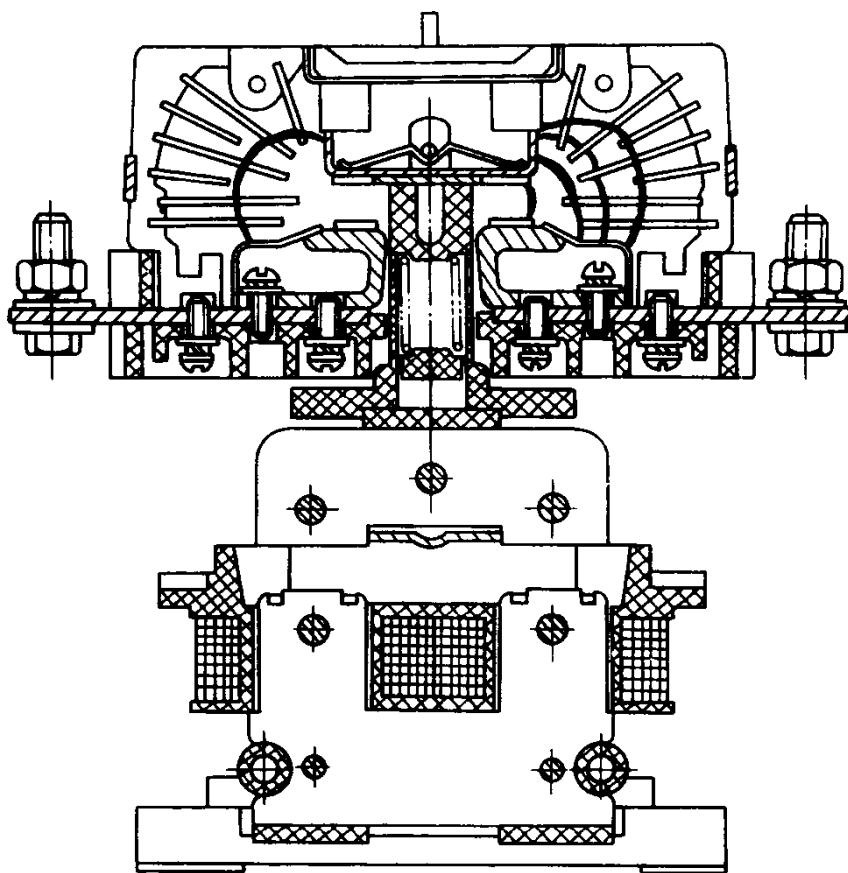


图 2-1 交流接触器的结构原理图

机构一般在电流较小时 (40A 以下), 采用图 2-1 所示的直动式, 而电流较大时, 则采用转