

高等职业学校电子信息类、电气控制类专业系列教材

自动控制原理与应用

焦 斌 编著

高等教育出版社

内容简介

本书是高等职业学校“自动控制原理”课程的规划教材。本着“必需、够用”的原则，教材从工程技术应用的角度，全面系统地介绍了自动控制理论基本分析和研究方法。内容包括：自动控制的基本概念，自动控制的数学模型，MATLAB 仿真软件，时域分析法，频域分析法，自动控制系统性能分析以及控制系统的校正等。全书将 MATLAB 仿真软件应用于自动控制理论分析，提高了学生对控制理论的理解，增强了高等职业学校学生分析问题、解决问题的能力。

本书可作为高等职业学校自动化技术、机电一体化技术、计算机及应用、应用电子技术等专业的教学用书，也适用于职工大学、函授大学的相近专业，并可供从事自动化技术的工程技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

自动控制原理与应用 焦斌编著. —北京：高等教育出版社，2004.7
ISBN 7 - 04 - 014935 - 4

. 自... . 焦... . 自动控制理论 - 高等学校：技术学校 - 教材 . TP13

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 062170 号

策划编辑 韦晓阳 责任编辑 李葛平 封面设计 于 涛 责任绘图 朱 静
版式设计 王艳红 责任校对 朱惠芳 责任印制

出版发行	高等教育出版社	购书热线	010 - 64054588
社 址	北京市西城区德外大街 4 号	免费咨询	800 - 810 - 0598
邮政编码	100011	网 址	http://www.hep.edu.cn
总 机	010 - 82028899		http://www.hep.com.cn

经 销 新华书店北京发行所
印 刷

开 本	787 × 1092 1/16	版 次	年 月第 1 版
印 张	12	印 次	年 月第 次印刷
字 数	290 000	定 价	15.10 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题，请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

目 录

第 1 章 自动控制系统概述	(1)	3.1.4 MATLAB 指令窗简介	(45)
1.1 自动控制系统基础知识	(1)	3.1.5 MATLAB 在仿真中的应用	(46)
1.2 自动控制的基本方式	(1)	3.1.6 MATLAB 的基本规定	(47)
1.2.1 开环控制系统	(2)	3.1.7 MATLAB 图形绘制	(48)
1.2.2 闭环控制系统	(2)	3.1.8 MATLAB 语言在控制系统分析	
1.3 自动控制系统的组成和分类	(4)	中的应用	(50)
1.3.1 自动控制系统的组成	(4)	3.2 SIMULINK 建模与仿真	(51)
1.3.2 自动控制系统的分类	(8)	3.2.1 SIMULINK 简介	(51)
1.4 自动控制系统的性能要求	(9)	3.2.2 SIMULINK 模块库的分类及其	
小结	(12)	用途	(53)
习题	(12)	3.2.3 用 SIMULINK 建立系统模型及	
第 2 章 自动控制系统的数学模型	(14)	仿真	(53)
2.1 拉普拉斯变换及其运用	(14)	3.3 仿真实例	(55)
2.1.1 拉普拉斯变换的定义	(14)	小结	(56)
2.1.2 拉普拉斯变换运算定理	(16)	习题	(56)
2.1.3 拉普拉斯逆变换	(19)	第 4 章 控制系统的时域分析	(58)
2.1.4 拉普拉斯变换应用举例	(20)	4.1 一阶系统的时域分析	(58)
2.2 自动控制系统数学模型的建立	(21)	4.1.1 一阶系统的数学描述	(58)
2.2.1 动态微分方程	(22)	4.1.2 一阶系统的单位阶跃响应	(58)
2.2.2 传递函数	(25)	4.1.3 一阶系统的单位斜坡响应	(60)
2.2.3 典型环节的传递函数	(26)	4.1.4 一阶系统的单位脉冲响应	(61)
2.2.4 系统结构框图	(32)	4.1.5 三种典型输入信号作用于	
2.2.5 结构框图的变换法则	(34)	系统的响应比较	(61)
2.2.6 系统结构框图化简及系统传递		4.2 二阶系统的时域分析	(62)
函数的求取	(37)	4.2.1 二阶系统的数学模型	(62)
小结	(40)	4.2.2 二阶系统的闭环极点	(63)
习题	(41)	4.2.3 二阶系统的单位阶跃响应	(64)
第 3 章 MATLAB 与 SIMULINK		4.2.4 二阶系统的单位脉冲响应	(67)
简介	(43)	4.3 控制系统稳定性分析	(67)
3.1 MATLAB 语言	(43)	4.3.1 稳定性的基本概念	(67)
3.1.1 MATLAB 语言简述	(43)	4.3.2 系统稳定的充要条件	(68)
3.1.2 MATLAB 6.X 版对外部系统的		4.3.3 劳思稳定判据	(69)
要求	(43)	4.4 MATLAB 在时域分析中的	
3.1.3 MATLAB 的安装及启动	(44)	运用	(70)

4.4.1 系统零极点分布	(70)	6.2 控制系统的动态性能分析	(103)
4.4.2 系统单位阶跃响应的仿真	(71)	6.2.1 典型二阶系统单位阶跃响应	(103)
4.5 根轨迹分析法	(72)	6.2.2 二阶系统的动态性能指标	(103)
4.5.1 根轨迹的基本概念	(72)	6.2.3 二阶系统动态性能分析	(105)
4.5.2 利用 MATLAB 进行根轨迹 绘制	(74)	6.2.4 利用 MATLAB 进行系统动态 性能分析	(108)
4.5.3 控制系统的根轨迹分析	(74)	6.3 利用频率特性分析系统性能	(108)
小结	(75)	6.3.1 用开环频率特性分析系统的 性能	(108)
习题	(76)	6.3.2 闭环频率特性与系统阶跃响应 的关系	(112)
第 5 章 控制系统的频率分析	(78)	小结	(113)
5.1 频率特性的基本概念	(78)	习题	(114)
5.1.1 频率特性的基本概念	(78)	第 7 章 自动控制系统控制器及其校 正与设计	(116)
5.1.2 频率特性与传递函数的关系	(79)	7.1 校正用的控制器	(116)
5.1.3 频率特性的几何表示法	(79)	7.2 校正的基本规律	(119)
5.2 典型环节的频率特性	(81)	7.2.1 无源校正	(119)
5.2.1 比例环节	(81)	7.2.2 比例 (P) 控制器校正	(121)
5.2.2 积分环节	(81)	7.2.3 积分控制器 (I) 校正	(125)
5.2.3 微分环节	(82)	7.2.4 比例积分 (PI) 校正	(129)
5.2.4 惯性环节	(82)	7.2.5 比例微分 (PD) 校正	(136)
5.2.5 一阶微分环节	(83)	7.2.6 比例积分微分 (PID) 校正	(142)
5.2.6 振荡环节	(84)	7.2.7 反馈校正	(148)
5.3 控制系统的开环频率特性	(85)	7.3 复合补偿	(154)
5.3.1 控制系统的型别	(85)	7.3.1 按扰动补偿的复合校正	(154)
5.3.2 控制系统的开环伯德图	(86)	7.3.2 按输入补偿的复合校正	(156)
5.4 控制系统的稳定判据	(88)	7.4 其他控制器	(158)
5.5 系统的稳定裕量	(90)	7.4.1 开关量控制器	(158)
5.6 MATLAB 绘制系统的频率特 性图	(92)	7.4.2 数字控制器	(161)
小结	(94)	小结	(164)
习题	(95)	习题	(165)
第 6 章 自动控制系统的性能分析	(98)	附录 1 SIMULINK 基本模块介绍	(167)
6.1 自动控制系统的稳态性能分析	(98)	附录 2 MATLAB 控制系统工具箱 函数介绍	(179)
6.1.1 系统稳态误差的概念	(98)	参考文献	(183)
6.1.2 系统稳态误差与系统型别、 开环增益间的关系	(100)		
6.1.3 系统稳态误差与输入信号间的 关系	(101)		
6.1.4 系统稳态性能分析综述	(102)		

前 言

20 世纪后期，自动控制理论得到了不断的完善与发展，各种先进控制算法也逐步应用于实际工程。“自动控制理论与应用”作为一门专业基础课程，不仅对工程技术有着指导作用，而且对培养学生的思维能力及综合分析问题的能力具有重要的作用。

高等职业教育作为高等教育的一个重要组成部分，在培养学生逻辑思维能力的同时，重点在于培养学生的实际应用能力。本书就是本着“必需、够用”的原则，以工程技术应用能力的培养为主线组织教学内容，突出实际应用，突出工程概念。全书注入了编著者的大量心血，总结了编著者多年在科研和教学上的经验，书中很多应用实例来自于作者的科研成果，力争做到重点突出，强化工程应用，减少繁琐的数学推演，同时注意到科研水平的发展，将现在非常流行的 MATLAB 软件的仿真贯穿于书中的每一重要知识点，使学生对所学知识建立起一个先进的、全面的工程理念。

全书共分七章。第 1 章介绍了自动控制的基本概念，给出了自动控制系统中常用的术语及性能指标。学生学完本章后应具有自动控制系统的整体概念。

第 2 章讲述了自动控制系统数学模型的建立，给出了结构框图、拉普拉斯变换及传递函数的概念，讨论了典型环节的传递函数。学生学完本章后应学会控制系统数学模型的建立，并能够运用拉普拉斯变换将微分量转变为复数域的数学模型。

第 3 章介绍了仿真软件 MATLAB 的基本组成及运用，给出了运用 MATLAB 来建立结构框图和仿真结果输出的方法。学生学完本章后应能运用 MATLAB 对系统进行建模和仿真输出。

第 4 章介绍了自动控制系统的时域分析方法和根轨迹分析方法，给出了典型输入函数在系统中的时域响应分析，讨论了系统稳定性的判别方法，最后给出了运用 MATLAB 进行仿真输出的结果。学生学完本章应具有自动控制系统时域分析的能力，并能运用 MATLAB 对系统进行时域仿真分析。

第 5 章自动控制系统的频域分析是工程上重点应用的方法，本章重点介绍了典型环节的频域特性和稳定性分析，给出了 MATLAB 仿真结果。学生学完本章后应具有自动控制系统的频域分析和运用 MATLAB 进行仿真的能力。

第 6 章全面介绍了自动控制系统的性能指标，并详细分析了稳态误差及动态指标对系统的影响。学生学完本章后应能正确评价自动控制系统的性能。

第 7 章介绍了自动控制系统中常用的控制器，重点介绍了工程中常用的校正控制器，并运用 MATLAB 对校正结果进行仿真。学生学完本章后应能正确运用常用校正控制器。

本教材由上海电机技术高等专科学校焦斌主编，焦斌编写第 3、6、7 章及附录；四川省职业技术学院郑辉编写第 1、2 章；上海电机技术高等专科学校刘军编写第 4、5 章。

全书由上海理工大学孔凡才教授审阅，上海电机技术高等专科学校苏中义教授也对本书提出了许多宝贵意见，在此一并表示衷心的感谢！

由于编写时间仓促，编者水平有限，书中难免有缺点和不妥之处，恳请读者批评指正。

编 者
2004年 3月

第 1 章 自动控制系统概述

在科学和技术的发展过程中，自动控制技术起着极其重要的作用。本章主要介绍自动控制的基本概念，开环、闭环控制系统的控制特点，重点讨论自动控制理论研究的对象和任务，并给出从系统结构到系统方框图的定性分析方法。

1.1 自动控制系统基础知识

自动控制技术从 20 世纪中叶以来逐渐在工农业生产、交通运输、国防和宇航等领域发挥越来越大的作用。例如温室的温度和湿度能自动保持恒定、导弹能够准确地命中目标、人造卫星能按预定的轨道运行并返回地面、宇宙飞船能准确地在月球着陆并重返地球等，都是自动控制技术迅速发展的结果。再如在工业生产过程中，对诸如压力、流量、频率、速度、物位、成分等方面的控制，也都离不开自动控制技术。可以说自动控制技术已渗透到生产、生活的各个领域。

所谓自动控制，是指在没有人直接干预的情况下，利用物理装置对生产设备和工艺过程进行合理的控制，使被控制的物理量保持恒定，或者按照一定的规律变化。例如要使一台发电机正常运行，工程师就要采取某种措施，比如负载变化时就要改变磁场以保持发电机的输出电压不变，这种工作可以人工进行，但如果通过一定的装置来完成这一工作过程，就不需要人的参与，这种控制就是自动控制。

自动控制系统是为实现某一控制目标所需要的各种物理部件的有机组合体。它一般包括控制器和被控制对象两大部分。被控制对象（简称被控对象）是指要求实现自动控制的生产设备或工艺过程；控制器则是指对被控对象起控制作用的设备。系统中被控制的物理量称为被控量或输出量；决定被控量的物理量称为控制量或给定量；妨碍控制量对被控量进行正常控制的所有因素称为扰动量。给定量和扰动量都是自动控制系统的输入量。扰动量按其来源可分为内部扰动和外部扰动。自动控制的任务实际上就是克服扰动量的影响，使系统按所要求的规律运行。

1.2 自动控制的基本方式

自动控制系统有两种最基本的形式，即开环控制和闭环控制。

1.2.1 开环控制系统

开环控制系统是一种最简单的控制系统。下面举例说明其结构特点和工作原理。

图 1.1 所示是一个电阻炉温度控制系统，希望电阻炉的温度 T_c 保持在允许范围内。在该系统中，可以通过调整自耦变压器滑动端的位置来改变电阻炉的温度，并使其保持在允许范围内。因而被控对象就是电阻炉，被控量就是电阻炉的温度。自耦变压器滑动端的位置对应了一个电压值 u_c ，也就对应了一个电阻炉的温度 T_c ，改变 u_c 也就改变了 T_c 。在这个控制系统中，没有对电阻炉的实际温度进行测量，就是说，实际温度 T_c 是多少不得而知。当系统中出现外部扰动（如炉门开关频繁变化）或内部扰动（如电源电压波动）时， T_c 将偏离 u_c 所对应的数值，结果温度可能比希望值偏高或偏低。

图 1.2 表明了该系统的输入量和输出量之间的作用关系。

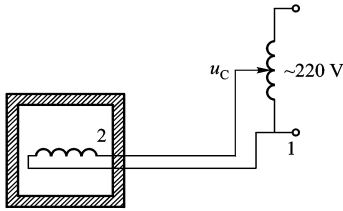


图 1.1 温度控制系统
1—自耦变压器 2—电阻炉

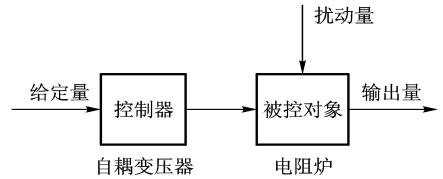


图 1.2 开环控制系统框图

在图 1.2 中表示了系统信号的流动，这种图称为方框图，箭头表示信号流动的方向。从图中可以看出，这种系统只有输入量经过一定方式影响输出量，而对输出量不进行测量，也不知它和输入量的要求究竟差多少，即输出量没有参与对系统的控制，所以这种系统称为开环控制系统。当出现扰动时，给定量与输出量之间的对应关系将改变，也即系统的输出量（实际输出）将偏离给定量所要求的数值（理想输出）。显然，图 1.1 所示系统实现不了保持温度恒定的控制目标。开环控制的特点决定了它不具备抗干扰的能力。因此，这类开环控制系统只能用于输出量和输入量之间的关系固定且内部或外部扰动影响不大、控制精度要求不高的场合。

1.2.2 闭环控制系统

为了解决抗干扰问题，必须采用闭环控制。闭环控制是由在开环控制基础上引入人工干预过程演变而来的。

例如，在图 1.1 中，如果要实现有无扰动都要保持炉温恒定，可以让操作者参与对被控制量的控制，那么操作者如何来保持炉温恒定呢？

首先，操作人员必须要测量炉子的实际温度，然后与工艺所要求的温度进行比较，再根据二者之间的差值（又称为偏差）调整自耦变压器的滑动端位置，来减少甚至消除偏差，从而保持炉温的恒定。从这里可以看出，操作者的关键作用是使系统输出量参与了系统的控制，系统一旦受到扰动的作用产生偏差，就及时调整控制量，从而保持输出量的恒定。如果用物理装置来取代操作者的上述功能，就构成了闭环控制系统。

图 1.3 就是用一系列装置来实现对炉温的闭环控制的。在这里，给定量由给定电位器滑动端所对应的电压值 U_{sT} 给出，炉内的实际温度由热电偶检测，并将其转换成电压 U_{fT} ，其与实际炉温成正比例，然后反馈到输入端与给定电压 U_{sT} 相比较（通过二者极性反接实现）。两者的差值 U 称为偏差电压（ $U = U_{sT} - U_{fT}$ ）。此偏差电压作为控制电压，经电压放大和功率放大后，去驱动直流伺服电动机，电动机经减速器带动自耦变压器的滑动端，改变电压来调节炉温。

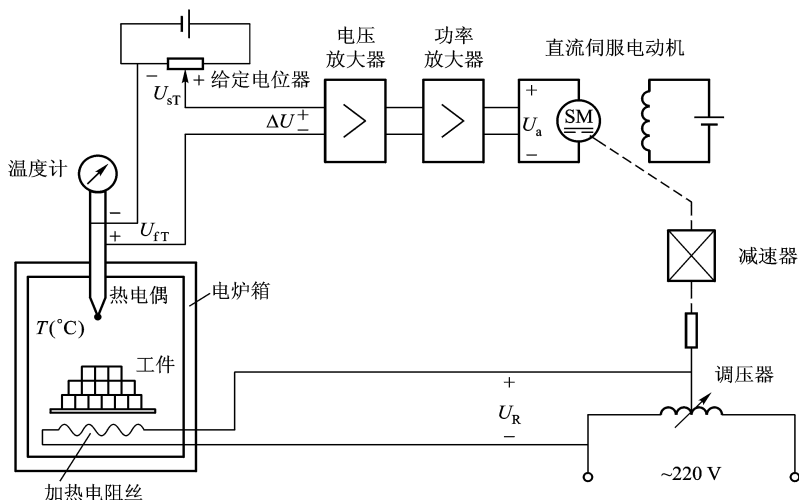


图 1.3 炉温闭环控制系统

该系统的结构框图如图 1.4 所示。

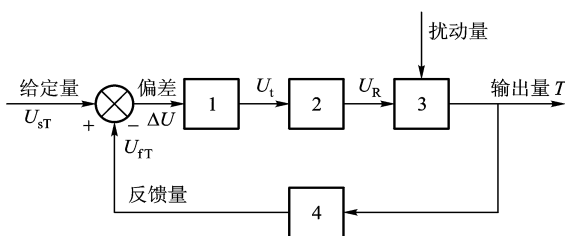


图 1.4 闭环控制系统框图

1—控制器 2—执行机构 3—被控对象 4—检测装置

炉温控制过程如图 1.5 所示。

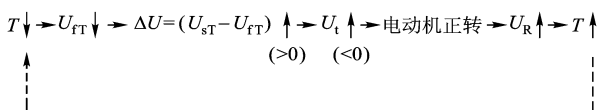


图 1.5 炉温闭环控制系统调节过程

下面对该系统的控制过程做一简单分析。当炉温由于扰动作用而偏低时， $U_{st} > U_{fr}$ ， $U = (U_{st} - U_{fr}) > 0$ ，此时偏差电压极性为正，此偏差电压经放大后，产生电压 U_t (设 $U_t > 0$)，供给电动机电枢，使电动机正转，带动变压器滑动端右移，从而使电炉供电压增加，炉温上升，直到炉温升至给定值，达到 $U_{fr} = U_{st}$ ，即 $U = 0$ 为止。这样炉温能够自动回升，并保持恒定。

反之，当温炉偏高时，则 $U_{fr} > U_{st}$ ， U 为负，经放大后使电动机反转，变压器滑动端左移，供电压减小，炉温降低至给定值。当炉温处于给定值时， $U = 0$ ，电动机停转。

这种系统是把输出量直接或间接地反馈到输入端形成闭环，使输出量参与了系统的控制，所以称为闭环控制系统。由于闭环系统是根据负反馈原理按偏差进行控制的，因此也称为反馈控制系统或偏差控制系统。

在工业生产中，按照偏差控制的闭环系统种类繁多，尽管它们完成的控制任务不同，具体结构可能不一样，但是从检测偏差、利用偏差信号对被控对象进行控制以减少或消除输出量的偏差这一控制过程却是相同的。通过这种反馈控制，使控制系统的性能得到显著的改善。

现将开环系统和闭环系统的特点归纳如下：

1. 在开环系统中，只有输入量对输出量产生控制作用。从结构上看，只有从输入端到输出端的信号传递通道（该通道称为正向通道），没有反馈。所以系统结构简单，系统稳定性好，成本也低，这是开环控制的优点。因为没有反馈，系统不具备抗干扰能力，这是开环控制系统的缺点。所以开环系统只能用在输入量与输出量之间关系固定，且内部或外部扰动不大或这些扰动因素可以预计确定并能进行补偿的场合。

2. 在闭环控制系统中，除输入量对输出量产生控制作用外，输出量也参与系统控制。从结构上看，除正向通道外，还必须有从输出端到输入端的信号传递通道，使输出也参与控制作用，该通道称为反馈通道。闭环系统就是由正向通道和反向通道组成的。因为有了反馈，闭环系统具有抗干扰能力，这是闭环控制系统最突出的优点。同时，由于有了反馈，就必须检测偏差，所以闭环系统必须有检测环节来直接或间接检测出输出量，并将其转换为与输入量相同的物理量，再与给定量比较得出偏差信号。因此闭环系统结构相对复杂，成本较高，而且使系统稳定性变差，这是闭环系统的缺点。

1.3 自动控制系统的组成和分类

1.3.1 自动控制系统的组成

根据控制对象和使用元件的不同，自动控制系统有各种不同的形式，但是概括起来一般均由六个基本环节组成。下面以图 1.3和图 1.4所示系统为例来说明系统的组成和相关术语。

图 1.6就是图 1.3所示系统的方框图，它只把系统各个环节用框图表示出来，并用箭头标明各作用量的传递情况，能简单明了地表达系统的组成，而不必画出具体线路。

从图 1.6中可以看出一般自动控制系统的组成如下：

1. 给定元件

是设定被控制量的给定值的装置。由它调节给定量，以调节输出量的大小。在此系统中是

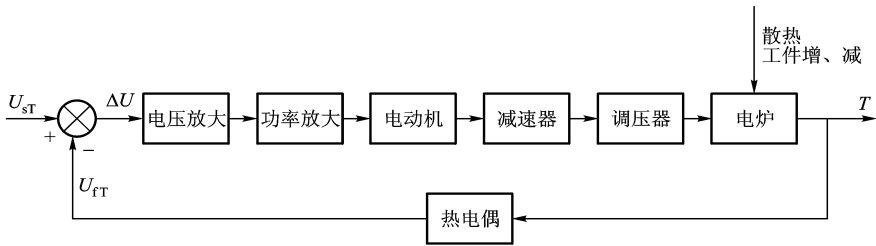


图 1.6 温度闭环控制系统框图

给定电位器。给定元件的精度对控制精度有较大影响，在控制精度要求较高时，常采用数字给定装置。

2. 比较环节

比较环节将所检测的被控量与给定量进行比较，确定两者之间的偏差量。在此处反馈信号与给定信号进行叠加。

3. 中间环节

将偏差信号转换成适于控制执行机构工作的信号。根据控制要求，中间环节可以是一个简单的环节，如电压放大器或功率放大器。除此之外，还希望中间环节能按某种规律对偏差信号进行运算，用运算结果控制执行机构，以改善被控制量的稳态和动态性能，这种中间环节常称为校正环节。此系统中为晶体管放大器或集成运算放大器构成的调节器。

4. 执行元件

直接作用于控制对象，完成对控制对象的驱动，使被控制量达到所要求的数值。此系统中为伺服电动机、减速器和调压器。

5. 控制对象

又称为被调对象，是指要进行控制的设备或过程。在此系统中是电炉。

6. 检测元件

该装置用来检测被控制量，并将其转换成与给定量相同的物理量。检测元件的精度和特性直接影响控制系统的控制品质，它是构成自动控制系统的关键部件。在此系统中是热电偶。

由图 1.6 可见，系统中作用量的被控制量如下：

给定量：又称为控制量或参考输入量。它通常由给定信号电压构成，或通过检测元件将非电量转换成电压信号。如图 1.6 中的给定电压 U_{sT} 。

输出量：又称为被控制量，它是控制对象的输出，是自动控制的目标。如图 1.6 中的炉温 T 。

反馈量：是通过检测元件将输出量转换成与给定量性质相同且数量级相同的信号。图 1.6 中的反馈量是由热电偶将炉温转换来的信号电压 U_{fT} 。

扰动量：它通常指妨碍控制量对被控制量进行正常控制的所有因素，来自系统内部的称为内部扰动，例如系统元件参数的变化、放大器零点漂移等。来自系统外部的称为外部扰动，例如电网电压波动、负载改变、外部环境改变等。在图 1.6 所示系统中，开门的频率、工件的增减等都是外部扰动。

中间变量：是系统中各环节之间的作用量，它既是前一环节的输出量，又是后一环节的输

入量。如 1.6 图中的偏差电压 U 。

根据以上分析可知，要了解一个实际的自动控制系统的组成，画出系统框图，必须明确以下问题：

(1) 系统的控制目标是什么？被控制量是什么？被控制对象是哪个？影响被控制量的扰动量有哪些？

(2) 什么元件实现对控制对象的驱动？它就是执行元件。

(3) 哪个元件实现对被控量的测量？它就是检测元件。它的信号是如何反馈的？

(4) 输入量由哪个元件给定？反馈量如何与给定量进行比较？

(5) 系统还有哪些元件，他们在系统中起什么作用？

对系统组成的分析和绘制系统的框图是分析和研究自动控制系统的基础，必须认真掌握。下面通过两个实际系统的例子来说明如何分析系统的组成及绘制系统框图的方法。

【例 1.1】试绘制图 1.7 所示直流调速系统的结构框图。

解：(1) 系统组成分析

由图 1.7 可见，系统的控制目标是保持直流电动机的转速稳定，系统的被控制量就是电动机的转速 n ，而系统的控制对象就是产生转矩的直流电动机。使转速变化的原因是受到内部或外部扰动作用，例如负载的变化等。对转速进行调节是通过调整晶闸管整流输出电压 U_d 的大小来实现的，晶闸管整流电路在这里既是执行单元，又是功率放大元件。而电压放大器对偏差电压进行放大，它是中间环节。而放大器的输入电压为给定电压与反馈电压比较后的偏差电压 $U = U_g - U_{fn}$ ，其中 U_g 是由给定电位器给定的， U_{fn} 是由测速发电机 TG 输出电压经电位器分压获得的， U_{fn} 的大小取决于转速的高低。因此，测速发电机和电位器构成检测元件和反馈单元。由于 U_g 和 U_{fn} 极性相反，所以构成负反馈。

根据以上分析，便可绘出系统的框图，如图 1.8 所示。

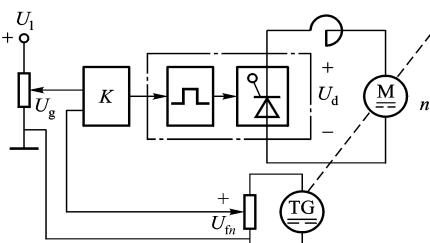


图 1.7 直流调速系统示意图

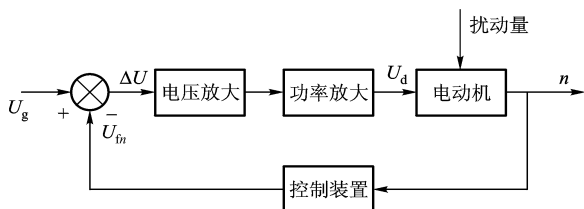


图 1.8 直流调速系统结构框图

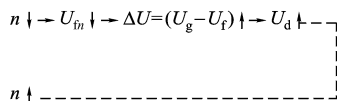


图 1.9 直流调速系统调节过程

(2) 工作原理

当系统处于稳态时，电位器滑动端处于某一位置，电动机就以一个指定速度运行。如果由于受到扰动的影 响，例如由于负载突然增加，使转速降低，那么测速发电机输出电压也减小，反馈电压 U_{fn} 也减小，使偏差电压 U 增大，经电压放大和功率放大后，使晶闸管输出电压 U_d

增大，而使电动机转速提高，从而减小电动机的转速偏差。其自动调节过程如图 1.9 所示。

【例 1.2】试绘制图 1.10 所示位置随动系统的结构框图。

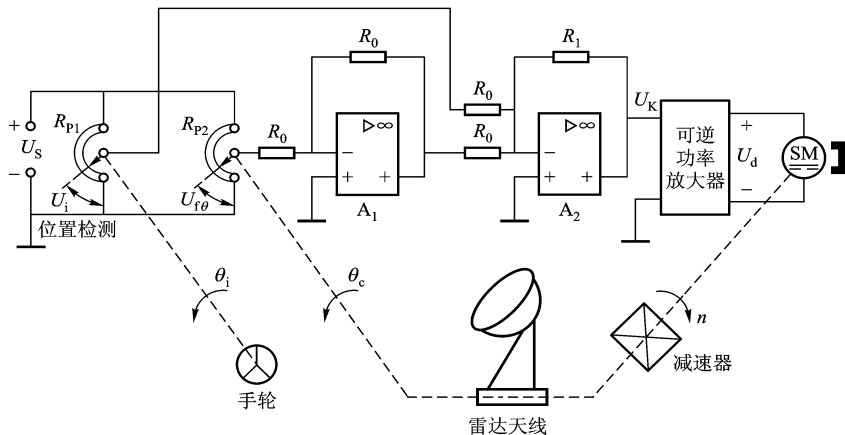


图 1.10 位置随动系统示意图

解：(1) 系统组成

图 1.10 所示是一位置随动系统的示意图。由图中可以看出，系统的控制目标是让雷达天线跟随手轮的转动而转动，那么被控制量就是雷达天线转动的角位移 θ_c 。控制对象为雷达天线的位移。而驱动雷达天线转动的是永磁式伺服电动机，因此，永磁式直流伺服电动机 SM 及减速器是执行元件。为电动机提供电能的可逆直流调压电路为功率放大器。图中的 A_2 为由运算放大器构成的反相加法器，它在系统中起比较器和电压放大作用（在其输入端给定量和反馈量进行比较叠加）。该系统的给定指令 θ_i 由手轮转动给出，它通过与之联动的给定电位器 R_{P1} 转为电压信号 U_i ，因此， R_{P1} 是给定元件。图中电位器 R_{P2} 与雷达天线联动，将被控量 θ_c 转换成与之成比例的反馈电压信号 $U_{f\theta}$ ，所以电位器 R_{P2} 是检测元件。图中 A_1 是反相器，它的作用是将反馈电压变成与给定电压极性相反的电压信号，以构成负反馈。根据以上分析就可绘出如图 1.11 所示的位置随动系统的框图。

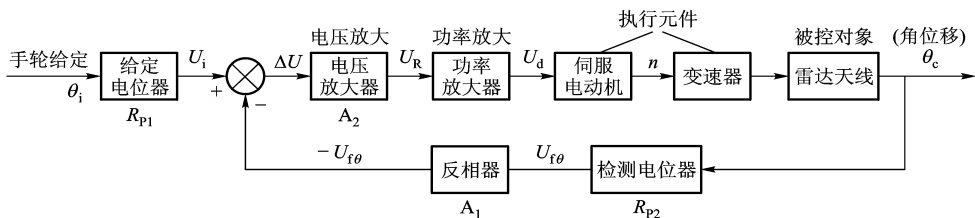


图 1.11 位置随动系统结构框图

(2) 工作原理

系统稳定时， $\theta_i = \theta_c$ ，即 $U_i = U_{f\theta}$ 。当手轮逆时针转动时，设 θ_i 增加，此时，通过电位器

转换成的给定电压 U_i 减小，则偏差电压 $U = (U_i - U_f)$ 必然小于零。由于 A_2 为反相输入，其输出 U_k 、 U_c 将为正值，从而使 U_d 为正，设此时电动机带动雷达天线作逆时针转动。这一过程一直持续到 $\theta_i = \theta_c$ ， $U = 0$ ， $U_k = 0$ ， $U_d = 0$ ，电动机停转为止。其控制过程如图 1.12 所示。

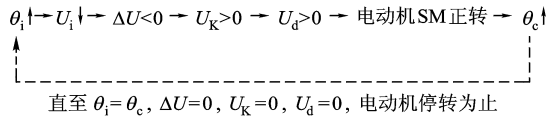


图 1.12 位置随动系统调节过程

1.3.2 自动控制系统的分类

由于自动控制系统广泛应用于各个领域，系统要执行各种各样的控制任务，因此自动控制系统的类型很多。为分析和研究方便，需要从不同的角度对自动控制系统进行分类。

1. 按输入量的变化规律分类

恒值控制系统

恒值控制系统的优点是：系统的控制目标是保持输出量恒定。换句话说，就是系统的输入量是恒量，并且要求系统的输出量也保持恒定。

恒值控制系统是生产中最常见的一种控制系统，如自动调速系统、恒温控制系统、恒张力控制系统等。只要是保持某一物理量稳定不变的控制系统的，一般都是恒值控制系统，如前面介绍的图 1.3 所示的炉温控制系统和图 1.7 所示的直流调速系统。

随动系统

随动系统的特点是：输入量是一随时间变化的量。随动系统的控制目标，是在各种情况下，保证输出量能快速、准确地跟随输入量的变化。

这种控制系统的最大优点是：可以用功率很小的输入信号去操纵功率较大的工作机械，并且可以进行远距离控制。

随动控制系统在工业生产和国防中有着广泛的应用，例如刀架跟随系统、火炮控制系统、自动跟踪卫星的雷达天线控制系统、工业自动化仪表中的显示记录系统等。

2. 按传输信号对时间的关系分类

连续控制系统

连续控制系统的优点是系统中各元件之间传递的信号都是连续量或模拟量，所以它又称为模拟控制系统。连续系统的运动规律通常用微分方程来描述。目前大部分控制系统都是连续控制系统。

离散控制系统

控制系统在某处或几处传递的信号是以脉冲序列或数字形式表示的系统，称为离散控制系统。离散控制系统的优点是系统中采用取样开关，将连续信号转换成离散信号。离散信号取脉冲形式的系统，称为脉冲控制系统；而采用数字计算机或数字控制器控制，其离散信号以数字编码形式传递的系统，则称为取样数字控制系统。

3. 按系统输出量和输入量的关系分类

线性控制系统

线性控制系统的特点是系统中各元件的输入输出特性都是线性的，控制系统的输出量与输入量之间的关系可以用线性微分（或差分）方程来描述。系统最重要的特性是可以应用叠加原理。当系统存在几个输入量时，系统的输出量等于各个输入量分别作用于系统时产生的输出量的叠加。

非线性控制系统

非线性控制系统的特点是系统中有一个或几个非线性元件，系统只能应用非线性方程来描述。非线性系统不能应用叠加原理。常见的非线性元件有饱和非线性、死区非线性、磁滞非线性、继电器非线性等元件。

4. 按系统中的参数对时间的变化情况分类

定常系统

定常系统又称时不变系统，它的特点是系统所有参数不随时间的变化而变化，实际中所遇到的系统大多属于这一类。

时变系统

时变系统的特点是系统中有的参数是时间的函数，它会随着时间的变化而变化。例如我国的运载火箭控制系统就是时变控制系统的一个例子，在飞行的过程中，火箭内燃料的质量、火箭所受到的重力都随时间在发生变化。

1.4 自动控制系统的性能要求

当自动控制系统受到各种扰动或给定量改变时，被控量就会偏离原来的值而产生偏差。通过自动控制系统的作用，并经过短暂的过渡过程，被控制量又趋近或恢复到原来的稳态值，或按照新的给定量要求而稳定下来，这时系统从原来的平衡状态过渡到新的平衡状态。把被控量处于变化状态的过程称为动态过程或暂态过程，而把被控量处于相对稳定的状态称为稳态或静态。自动控制系统动态品质和稳态性能可用相应的技术指标来衡量。

自动控制系统的技术指标通常是指系统的稳定性、稳态性能和动态性能。现分述如下。

1. 系统的稳定性

当有扰动作用（或给定量发生变化）时，输出量将偏离原来的稳定值，这时由于反馈的作用，通过系统内部的自动调节，系统可能回到（或接近）原来的稳定值（或跟随给定量）稳定下来，如图 1.13 (a) 所示。但也可能由于系统内部的相互作用，使系统输出出现发散而处于不稳定状态，如图 1.13 (b) 所示。显然，不稳定系统是无法正常工作的。因此，对任何自动控制系统，首要条件便是系统能稳定正常运行。对系统的稳定性分析将在第 4 章中介绍。

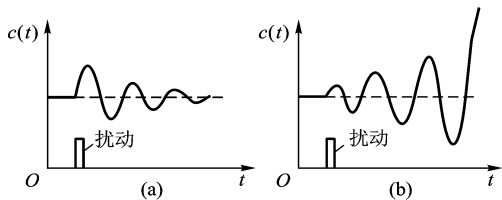


图 1.13 稳定与不稳定系统

(a) 稳定系统 (b) 不稳定系统

2. 稳态性能指标

当系统从一个稳态过渡到新的稳态，或系统

受到扰动作用又重新平衡后，系统可能会出现偏差，这种偏差称为稳态误差 (e_s)。一个控制系统的稳态性用稳态误差来表示，系统稳态误差的大小反映了系统的稳态精度，它也表明了系统控制的准确度。稳态误差越小，系统的稳态精度越高。若稳态误差为零，则系统称为无静差系统，如图 1.14 (b) 所示；若稳态误差不为零，则系统称为有静差系统，如图 1.14 (a)。对一个恒值系统来说，稳态误差是指在扰动作用下被控量在稳态下的变化量；对一个跟随系统来说，稳态误差是指在稳定跟随过程中输出量偏离给定量的大小。

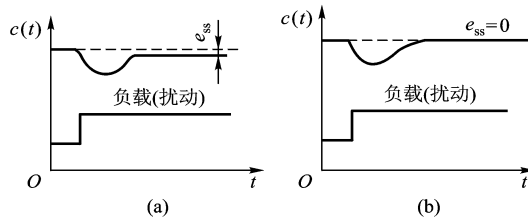


图 1.14 有静差与无静差系统
(a) 有静差系统 (b) 无静差系统

3. 动态性能指标

由于系统的对象和元件通常都有一定的惯性（如机械惯性、电磁惯性、热惯性等），并且由于能源功率的限制，系统中各种变量（如速度、加速度、位移、电压、温度等）的变化不可能是突变的。因此，系统从一个稳态到新的稳态都需要经历一段时间，也就是要经历一个过渡过程。表征这个过渡过程的性能指标称为动态性能指标。对于一般控制系统，在给定量或扰动量变化时，输出量的动态过程有以下几种情况。

单调过程。 输出量单调衰减变化，缓慢达到新的稳态值。这种过程具有较长的过渡时间，如图 1.15 (a) 所示。

衰减振荡过程。 输出量变化很快，经过几次振荡后，达到新的稳态值，如图 1.15 (b) 所示。

持续振荡过程。 输出量持续振荡，始终达不到新的稳定工作状态，如图 1.15 (c) 所示。这种系统是不稳定的。

发散振荡过程。 输出量发散振荡，不能达到所要求的稳定状态。这种情况下，系统不但不能减小偏差，反而使偏差越来越大，如图 1.15 (d) 所示。这种系统同样不稳定。

一般来说，在正常情况下，系统的动态过程多属于第二种情况。现以系统对突加给定信号（阶跃信号）的动态响应来说明系统的动态性能指标。

一个稳定系统的单位阶跃响应主要有衰减振荡和单调变化两种，如图 1.16 所示。

系统的性能指标主要有：

上升时间 t_r

对于衰减振荡系统，指响应从零值第一次上升到稳态值所需的时间。对单调上升系统，响应从稳态值的 10% 上升到稳态值的 90% 所需用的时间。

峰值时间 t_p

指输出响应超过稳态值到达第一个峰值即 C_{max} 所需的时间。

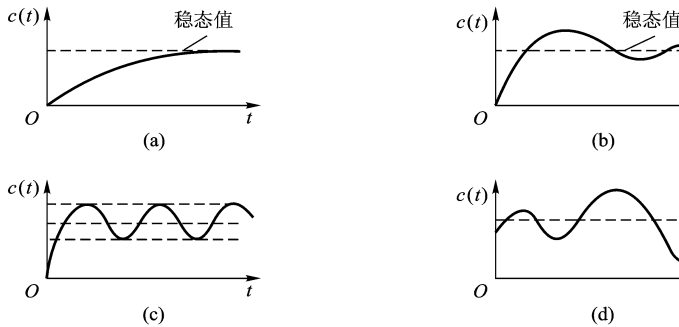


图 1.15 自动控制系统动态过程

(a) 单调过程 (b) 衰减振荡过程 (c) 持续振荡过程 (d) 发散振荡过程

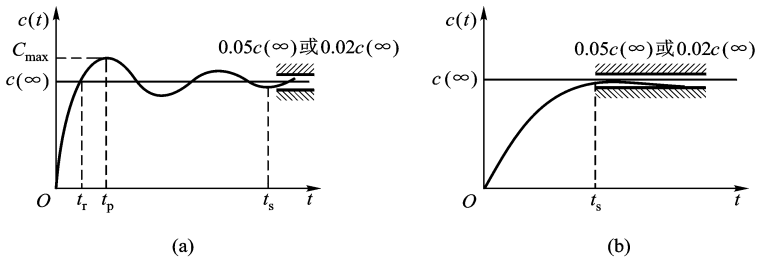


图 1.16 稳定系统的单位阶跃响应曲线

(a) 衰减振荡的响应曲线 (b) 单调上升的响应曲线

调节时间 (或称过渡过程时间) t_s

指响应输出 $c(t)$ 与稳态值 $c(\infty)$ 之间的误差达到规定允许值 $[\pm 5\% c(\infty)$ 或 $\pm 2\% c(\infty)]$, 且以后不再超出此范围的最短时间。

最大超调量 σ_p

指系统响应最大值超过稳态值的百分比。

$$\sigma_p = \frac{C_{\max} - c(\infty)}{c(\infty)} \times 100\% \quad (1.1)$$

稳态误差 e_{ss}

当时间 t 趋于 ∞ 时, 系统响应的期望值与实际值之差。对于单位负反馈系统,

$$e_{ss} = c_{理想} - c(\infty) \quad (1.2)$$

振荡次数 N

振荡次数是指在调整时间内, 输出量在稳态值上下波动的次数。它也反映系统的平稳性, 振荡次数 N 越小, 说明系统越平稳。

在上述各项性能指标中, t_r 、 t_p 表征了系统响应的快速性; t_s 表示了系统过渡过程的持续时间, 从总体上反映了系统的快速性; σ_p 、 N 反映了系统动态过程的平稳性; 稳态误差反映了系统稳态工作时的抗干扰能力及控制精度, 表征系统稳态性能。通常用 σ_p 、 t_s 及 e_{ss} 这三项指标来评价系统的暂态响应和稳态响应的性能指标。