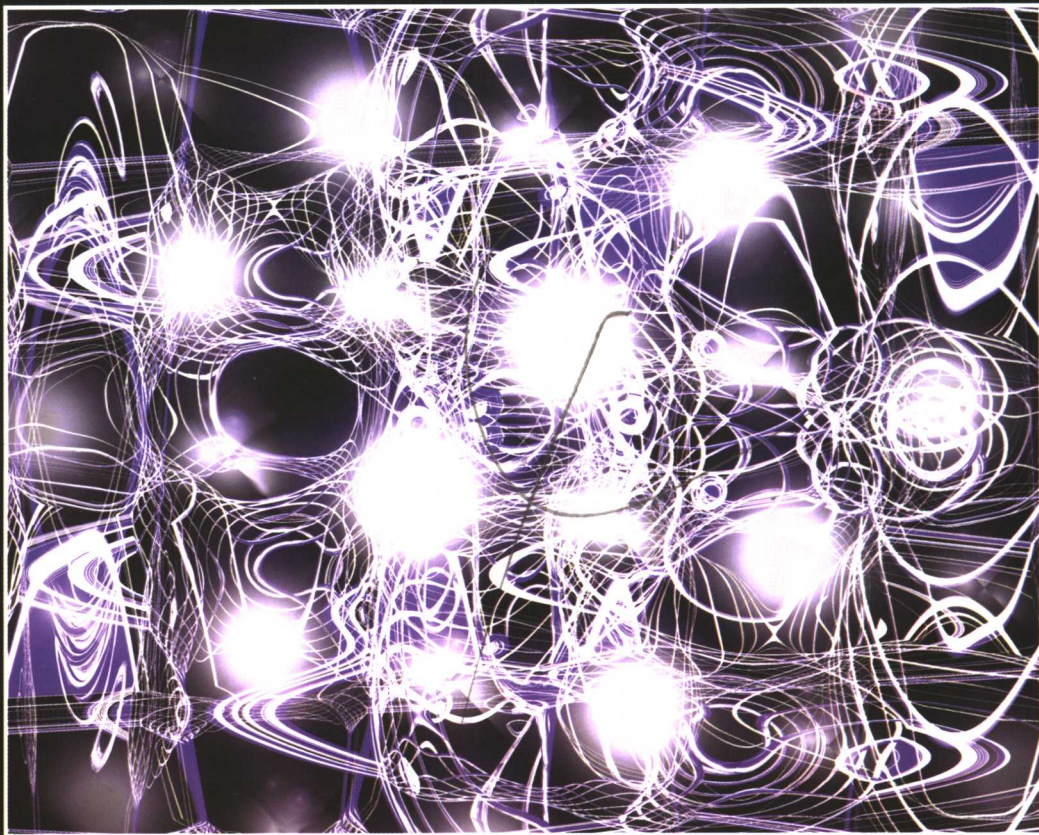




普通高等教育“十一五”国家级规划教材

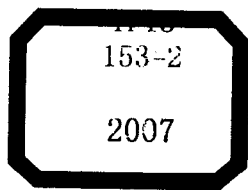
# 自动控制原理

任彦硕 主编



 机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS





普通高等教育“十一五”国家级规划教材

# 自动控制原理

主 编 任彦硕  
副主编 罗云林 吴成东  
参 编 马淑华 黄志钢 伍红英  
主 审 汪晋宽 白秋果

机械工业出版社

本教材是普通高等教育“十一五”国家级规划教材，是本科院校“自动控制原理”课程的教科书。全书共分八章，全面介绍了经典控制理论的内容，主要包括：控制系统数学模型的建立，时域分析，根轨迹分析，频域分析，频域校正和根轨迹串联校正，非线性系统分析，离散系统分析和校正。书中还介绍了 MATLAB 针对系统控制问题的应用。

本书注重理论结合工程实际，叙述精练，深入浅出，举例详实，引人入胜，适于教学和自学。本教材可作为本科电气信息类专业的教材，也可供高职高专相关专业选用。

本书配有电子课件，欢迎选用本书作教材的老师索取，电子邮箱：  
wbj@mail.machineinfo.gov.cn

## 图书在版编目 (CIP) 数据

自动控制原理/任彦硕主编. —北京: 机械工业出版社,  
2007.2

普通高等教育“十一五”国家级规划教材  
ISBN 978-7-111-20955-3

I. 自… II. 任… III. 自动控制理论-高等学校-教材  
IV. TP13

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 025050 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: 王保家 版式设计: 冉晓华 责任校对: 刘志文  
封面设计: 张 静 责任印制: 洪汉军  
北京京丰印刷厂印刷  
2007 年 2 月第 1 版·第 1 次印刷  
184mm × 260mm · 20.5 印张 · 482 千字  
标准书号: ISBN 978-7-111-20955-3  
定价: 35.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换  
销售服务热线电话: (010) 68326294  
购书热线电话: (010) 88379639 88379641 88379643  
编辑热线电话: (010) 88379711  
封面无防伪标均为盗版

# 前 言

本书按经典控制理论的内容分八章编写。第一章 绪论，通过实例分析介绍了自动控制系统的基本组成和分类；第二章 自动控制系统的数学模型，介绍了建立数学模型的理论方法；第三章 线性系统的时域分析法，介绍了控制系统的性能指标、暂态和稳态性能分析、系统的稳定性分析，应用 MATLAB 的时域分析方法；第四章 根轨迹分析法，介绍了根轨迹的绘制规则，根轨迹平滑性原理，广义根轨迹和零度根轨迹，多闭环系统的根轨迹，根轨迹法分析系统性能，应用 MATLAB 绘制根轨迹；第五章 频域分析法，介绍了用开环、闭环频率特性分析控制系统的性能，实验法建立数学模型，应用 MATLAB 绘制频率特性曲线；第六章 自动控制系统的校正，分别介绍了频域法超前、滞后、滞后-超前校正、按期望的频率特性的串联校正，根轨迹法串联校正，频域法反馈校正等；第七章 非线性控制系统分析，介绍了常见非线性环节对系统运动的影响，应用描述函数法分析非线性系统的稳定性和自振，应用相平面法分析非线性系统的动态和稳态响应性能；第八章 离散控制系统，介绍了离散系统数学模型的建立，离散系统的稳定性分析、稳态误差分析，离散系统的动态响应性能分析和离散系统的根轨迹校正，应用 MATLAB 分析离散控制系统。各章后均附有习题。

本书第一章由中国民航大学伍红英编写，第二章由沈阳理工大学黄志钢、东北大学马淑华编写，第三、四章由中国民航大学罗云林编写，第五、六、七章由东北大学任彦硕编写，第八章由沈阳建筑大学吴成东编写。罗云林教授和吴成东教授还对全书的编写提出了许多宝贵意见。全书由任彦硕主编，并完成统稿工作。

本书由东北大学汪晋宽教授和白秋果教授主审。汪晋宽教授和白秋果教授对书稿提出了许多宝贵意见和建议，在此谨表示衷心的感谢！

本书参考学时为 80 学时，其中授课 70 学时，上机及实验为 10 学时。非控制类专业可选讲第一~第六章，参考学时为 52 学时，其中授课 46 学时，上机及实验为 6 学时。

本书配有电子课件，欢迎选用本书作教材的老师索取，电子邮箱：wbj@mail.machineinfo.gov.cn

编 者

# 目 录

## 前言

## 第一章 绪论 ..... 1

- 第一节 概述 ..... 1
- 第二节 开环控制与闭环控制 ..... 2
- 第三节 自动控制系统的分类 ..... 5
- 第四节 自动控制系统举例 ..... 7
- 第五节 对自动控制系统的基本要求及  
本课程的任务 ..... 10
- 习题 ..... 12

## 第二章 自动控制系统的数学模型 ..... 14

- 第一节 线性连续系统微分方程的  
建立 ..... 15
- 第二节 传递函数 ..... 22
- 第三节 控制系统的动态结构图 ..... 37
- 第四节 信号流图 ..... 44
- 习题 ..... 48

## 第三章 线性系统的时域分析法 ..... 52

- 第一节 典型输入函数和时域性能  
指标 ..... 52
- 第二节 一阶系统的暂态分析 ..... 55
- 第三节 二阶系统的暂态分析 ..... 57
- 第四节 高阶系统的暂态分析 ..... 69
- 第五节 代数稳定判据 ..... 74
- 第六节 稳态误差分析 ..... 80
- 第七节 应用 MATLAB 进行时域分析 ..... 96
- 习题 ..... 99

## 第四章 根轨迹分析法 ..... 102

- 第一节 常规根轨迹 ..... 102
- 第二节 根轨迹的平滑性原理 ..... 119
- 第三节 广义根轨迹和零度根轨迹 ..... 123
- 第四节 多闭环控制系统的根轨迹 ..... 127
- 第五节 应用根轨迹法分析控制系统的

性能 ..... 128

- 第六节 应用 MATLAB 的根轨迹  
分析 ..... 134

习题 ..... 137

## 第五章 频域分析法 ..... 139

- 第一节 频率特性 ..... 139
- 第二节 频率特性曲线 ..... 144
- 第三节 奈奎斯特稳定判据及稳定  
裕度 ..... 164
- 第四节 应用开环对数频率特性分析  
系统的性能 ..... 184
- 第五节 应用闭环频率特性分析控制系  
统的性能 ..... 192
- 第六节 实验法建立数学模型 ..... 196
- 第七节 应用 MATLAB 绘制频率特性  
曲线 ..... 198
- 习题 ..... 200

## 第六章 自动控制系统的校正 ..... 203

- 第一节 控制系统校正的一般概念 ..... 203
- 第二节 校正装置及其特性 ..... 206
- 第三节 频域法串联校正 ..... 216
- 第四节 根轨迹法串联校正 ..... 230
- 第五节 频域法反馈校正 ..... 236
- 习题 ..... 239

## 第七章 非线性控制系统分析 ..... 242

- 第一节 非线性控制系统概述 ..... 242
- 第二节 常见的非线性环节对系统运动  
的影响 ..... 245
- 第三节 描述函数法 ..... 247
- 第四节 相平面法 ..... 257
- 习题 ..... 275

## 第八章 离散控制系统 ..... 278

第一节	离散控制系统的基本概念	278	第七节	离散控制系统的校正	310
第二节	信号的采样与复现	280	第八节	应用 MATLAB 分析离散控制 系统	315
第三节	离散系统的数学模型	285	习题		316
第四节	离散控制系统的稳定性 分析	297	附录	<b>MATLAB 应用的基础知识</b>	319
第五节	离散控制系统的稳态误差 分析	300	参考文献		322
第六节	离散控制系统的动态分析	303			

# 绪 论

## 第一节 概 述

自动控制技术在工程、军事和科学技术等各个领域，在国民经济的各个部门一直发挥着十分重要的作用，有着非常广泛的应用。例如，航空、航天、航海、冶金、机械、能源、电子、生物、医疗、化工、石油、建筑等各行业都应用控制理论解决相关的系统控制问题，有些应用甚至涉及像人口控制、成本控制等社会科学领域，至少用于解决优化问题。

能够完成自动控制功能的基本体系称为自动控制系统。自动控制系统有简单系统、复杂系统和大系统之分。一个复杂的控制工程可能汇集了几个甚至数量众多的自动控制系统。例如，一个机器人身上每个关节的动作由一个电动机来拖动，控制它就需要设置一个自动控制系统，所以机器人的自动控制系统数量自然很多。

自动控制作为一门学科常被划分为自动控制技术和自动控制理论两个部分。近年来，由于自动控制应用范围的扩大及被控对象技术含量的增加，对自动控制技术提出了更新、更高的要求，计算机及芯片业的发展也推动了控制技术的迅猛发展。控制技术的应用是以控制理论为基础的，当控制技术发展到所提问题现有理论无法解决的时候，新的理论便会产生。

控制理论按其发展的不同阶段分为经典控制理论和现代控制理论。经典控制理论通过传递函数来研究控制系统的输入输出关系，并且局限于单输入单输出的系统。现代控制理论则是基于状态空间表达式来研究控制系统，它可以是单输入单输出的，也可以是多输入

多输出的。即使是单输入单输出的系统，在应用现代控制理论研究时也可以是更高阶的。近年来将计算机引入控制系统完成一个或几个环节的控制功能已十分普遍，由于计算机编程灵活，在不同条件下可以使用不同的参数，采用不同的控制方式，于是便产生了类似于自适应控制、自学习控制、模糊控制、专家系统、神经元及其网络控制等智能控制理论和控制实践。目前的大系统理论和智能控制理论已经开始形成所谓的第三代控制理论。

自动控制原理是经典控制理论，属基础控制理论。由于实际应用中的控制系统仍以单输入单输出系统为多见，使得经典控制理论仍然有着广泛的应用基础。

人类最早应用自动控制的历史大约可以追溯到两千年前古希腊人发明的浮球调节装置，但是，真正意义上的自动控制应用是在 18 世纪蒸汽机发明以后。直到 1868 年以前的自动控制系统一直是凭直觉设计（发明）的实证性系统，工业革命导致了控制系统的应用迅速增多，从那时起，提高控制精度、减小振荡性以及解决稳定性等问题成为人们关心的理论性问题，于是产生了经典控制理论。劳斯稳定判据就是在 1877 年提出的。自动控制的应用最初在汽车制造业首先得到普及，二战期间，各参战国为了赢得战争的胜利，投入了大量的人力、物力和财力来研究自动控制系统。自动火炮定位系统、雷达天线控制系统、飞机自动驾驶仪以及其它一些军事控制系统相继得到了应用。这期间为解决系统设计的理论问题，相继产生了基于直接求解微分方程的时域法、基于特征根理论的根轨迹法和在频率域分析设计系统的频域法。这些方法奠定了经典控制理论的基础。20 世纪中叶，随着人造卫星和空间技术的到来，为发射火箭及空间探测器而设计的控制系统，要求用最少的能量完成更精确的控制，于是又产生了最优控制理论；复杂控制系统往往是多变量输入多变量输出的，一些变量之间存在耦合关系，甚至是强耦合，这样的系统需要用现代控制理论来研究。近年来，智能控制得到了长足发展，尤其是模糊控制，其控制方法简单、容易实现，并且不需要精确的系统数学模型，在包括家电等各类应用领域得到了普及。本书介绍经典控制理论。

## 第二节 开环控制与闭环控制

图 1-1 是开环控制的例子，控制的对象是炉膛温度，控制的要求是保持炉温在某一恒定值。炉内需要的热能由电加热器提供，自耦变压器的可调输出端与电加热器连接，以获得数值可调的交流电压。显然，在控制温度下当电加热器提供的热量与吸收及消耗的热量相等时，才能维持温度恒定不变。然而，加热过程中的工况是随时变化的，比如，被加热的物体初始温度比较低，初期吸热要比温度更接近要求值时单位时间内的吸热要多；热量散失也不同，由于是非绝热过程，炉温高时比炉温低时单位时间内散失的热量要多，还有进料、出料期间炉门开启等随机因素造成了热量散失等，这都要求供热的热量随之改

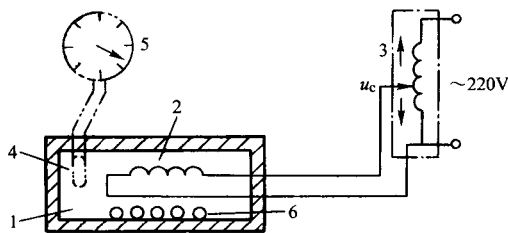


图 1-1 开环炉温控制系统

- 1—炉膛 2—电加热器 3—自耦变压器 4—温度检测元件 5—温度表 6—加热物体



变。如果不随时调节自耦变压器的滑动触头，以同步改变维持恒温所需的热能，温度将偏离期望的数值。调节滑动触头可由操作人员通过观察反映炉内温度的温度表来完成，属于人工控制。引入闭环控制可以实现自动控制。

图 1-2 是炉温控制的闭环控制系统，其中调节自耦变压器滑动触头的动作由直流伺服电动机经减速器来操动，炉内温度由热电偶检测出来，转换成电压信号与给定电压相比较（给定电压减去热电偶转换的电压），其差值被放大后加在直流伺服电动机的电枢上。直流伺服电动机得到电压后：①既可以正转也可以反转。电压为正时，它正转，经减速器拖动自耦变压器的滑动触头上移，电加热器得到较高的交流电压后为炉膛提供较多的热量；电压为负时，它反转，向下调节自耦变压器的滑动触头，电加热器得到较低的交流电压，向炉膛供给较少的热量。②当电动机上获得的电压大时它快转，获得的电压小时它慢转，电压为零则停止转动。这很像人工控制的功能：人通过观察反映炉内温度的温度表将炉温值输入了大脑，在大脑中将温度值与期望值作比较，小了，则调高输出电压；大了，则调低输出电压。其中，热电偶完成的是检测炉内温度并将观察到的温度值输入到大脑的功能；给定电位器与热电偶按图示的极性连接时，完成了人脑将期望的温度值减去温度计上检测值的减法计算，并判断出是应该提高自耦变压器的输出电压还是降低它。差值信号输入给运算放大器之后的过程相当于人操纵自耦变压器滑动触头的过程。从理论上讲，闭环自动控制可以做到快速、准确，甚至是无误差，而人工控制则有其笨拙的地方，有时需要经过反复试凑才能完成控制。由此可见自动控制的优越性。

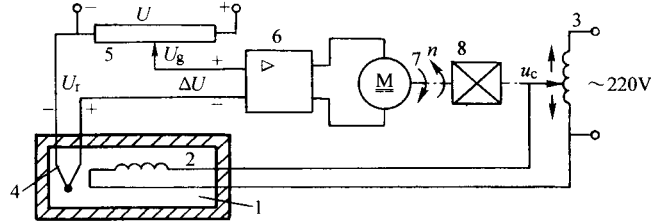


图 1-2 闭环炉温控制系统

1—炉膛 2—电加热器 3—自耦变压器 4—热电偶 5—给定电位器 6—放大器 7—直流伺服电动机 8—减速器

电压为正时，它正转，经减速器拖动自耦变压器的滑动触头上移，电加热器得到较高的交流电压后为炉膛提供较多的热量；电压为负时，它反转，向下调节自耦变压器的滑动触头，电加热器得到较低的交流电压，向炉膛供给较少的热量。②当电动机上获得的电压大时它快转，获得的电压小时它慢转，电压为零则停止转动。这很像人工控制的功能：人通过观察反映炉内温度的温度表将炉温值输入了大脑，在大脑中将温度值与期望值作比较，小了，则调高输出电压；大了，则调低输出电压。其中，热电偶完成的是检测炉内温度并将观察到的温度值输入到大脑的功能；给定电位器与热电偶按图示的极性连接时，完成了人脑将期望的温度值减去温度计上检测值的减法计算，并判断出是应该提高自耦变压器的输出电压还是降低它。差值信号输入给运算放大器之后的过程相当于人操纵自耦变压器滑动触头的过程。从理论上讲，闭环自动控制可以做到快速、准确，甚至是无误差，而人工控制则有其笨拙的地方，有时需要经过反复试凑才能完成控制。由此可见自动控制的优越性。

图 1-2 所示的炉温闭环控制系统虽然简单，但从物理量的作用关系上看，它有单输入单输出系统的特征；从系统的结构上看，有组成闭环控制系统的各个主要环节。由此可做出单输入单输出系统的一般抽象。

## 一、物理量

### 1. 输入量

控制系统的输入量分为给定输入量和扰动输入量。给定输入量是系统能够工作的源泉，若没有给定输入量，系统将处于停机状态。图 1-2 所示系统的输入量是给定输入量  $U_g$ （有时简称给定量），在单输入单输出系统中给定输入量只能有一个。扰动输入量是控制系统在工作期间出现的扰动量。扰动量可能有多个，比如，图 1-2 所示系统的扰动量可能是由环境温度的改变使电子放大器产生了零点漂移，炉门缝隙造成的炉内热量散失，电源电压的波动等。扰动量的存在对控制效果会带来不利影响，减小或消除它们是系统设计的一个任务。



## 2. 输出量

输出量可以是被控量，也可以是别的物理量。在单输入单输出系统中输出量只有一个，且常常指定为被控量。一般情况下，被控量也是被检测的量，所以输出量也是被测量。图 1-2 所示系统的输出量是炉膛温度。

## 二、系统结构

按控制系统的部件（元件）所完成的功能将它们划分为不同的环节（有时一个部件完成几个功能，于是它组成几个环节）。一般的控制系统常常有如下的环节（部分环节可以缺省）：

### 1. 给定环节

给定输入量通过给定环节作用于系统。图 1-2 所示系统的给定环节是接直流电压  $U$  的电位器 5，称为给定电位器，它将给定量  $U_g$  作用于控制系统的输入端。

### 2. 比较环节

比较环节完成将给定量与反馈量进行比较的功能。这里的“比较”有两种含义，一种是完成给定量减反馈量的减法运算；另一种是完成它们的加法运算。完成减法运算的，须将反馈量与给定量接成相反的极性（反馈量的作用削弱了给定量），称为负反馈，图 1-2 所示系统的反馈是负反馈，图中给定电位器与热电偶共同完成了比较环节的功能。反之，如果反馈量的极性与给定量的极性相同（反馈量的作用增大了给定量），则是正反馈。在多闭环控制系统中，为了得到好的响应性能，有时将某个内环接成正反馈，而外环则都接成负反馈。

### 3. 放大环节

闭环控制系统是靠给定量与反馈量的差值信号实现对输出量控制的。由于差值信号很小（有时为 0），直接加在控制设备上不足以使系统工作，所以需要经放大器的放大（这里的放大器并非仅指具有放大倍数的放大器，有的还具有积分功能和其他的功能，即使输入为 0，输出也可能存在有限值）。图 1-2 所示系统中的放大器 6 是放大环节。

### 4. 执行环节

执行环节（又称执行机构）是指由它的动作使被控量得到控制，是控制系统的末端环节。图 1-2 所示系统的执行环节是直流伺服电动机及其减速机构。

### 5. 控制环节

控制环节（有时又称校正环节或控制器、调节器）是系统本身以外的人为设置的环节。设置该环节的目的是为了取得好的控制效果，表现为输出量跟随输入量变化得更快、更稳、更精确。图 1-2 所示系统没有采用控制环节。

### 6. 被控对象

被控对象（也称控制对象）是指受系统控制的物理量，被控对象常被选为输出量。图 1-2 系统中的被控对象是炉膛温度。

### 7. 反馈环节

反馈环节将检测到的被控量反馈传输到输入端，与给定量进行比较以实现闭环控制。有的系统将被测量直接接入比较环节，称为单位反馈。图 1-2 所示系统的反馈是单位负反馈。



图 1-3 示出了一般控制系统的框图。图中符号“ $\otimes$ ”是比较环节的符号，前向箭头指向该环节的是它的输入量（不标正负号的寓指正号），反馈量须注明正负号。系统信号在各环节间的传输是有方向的，它指明了系统内各环节间物理量的控制与被控制关系，其间有能量的传递，但传递的能量只起控制作用而并非能量的完全传输。比如，图 1-2 所示系统比较环节的差值电压信号  $\Delta U$  经放大器放大后驱动直流电动机，放大后的电压事实上是由放大器的外接电源产生的；又比如，电动机的旋转移动了自耦变压器的滑动触头，从而改变了电加热器上交流电压的大小，但提供电加热器的能源来自于外接的 220V 交流电源。

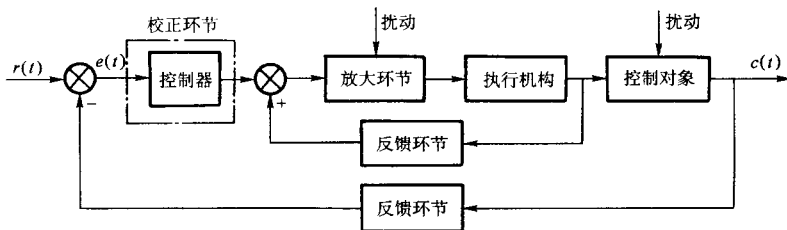


图 1-3 组成闭环控制系统的框图

图 1-3 中从输入信号  $r(t)$  → 控制器 → 放大环节 → 执行机构 → 控制对象 → 输出信号  $c(t)$  的信号传输路径称为闭环系统的前向通道。反馈环节所在路径称为反馈通道，图 1-3 有两个反馈通道，内环的称为局部反馈，是正反馈；外环的称为闭环主反馈，是负反馈。

从系统分析设计要完成的工作步骤上，将图 1-3 所示系统划分为两个部分。一部分为校正环节（这里的校正环节位于前向通道输入端处，有的校正环节在反馈通道或别的地方）；另一部分则是除校正环节以外的部分，称为系统的固有部分。系统设计时这两部分都要设计，首先是固有部分的设计，然后是校正环节的设计。设计固有部分要求满足：① 控制对象提出的基本要求；② 系统本身能够正常工作的要求。设计校正环节则是使系统输出响应跟随给定输入信号以及抑制扰动信号都更快、更平稳、更精确。

### 第三节 自动控制系统的分类

由于控制系统的多样性，需将它们进行分类。

#### 一、按输入信号的特征分类

##### 1. 恒值控制系统

恒值控制系统的给定输入量是个常值，希望被控制的输出量也是个常值，并且在除了给定输入量以外的工况发生变化时，能够维持常值不变，或经过短暂的过渡过程后稳定在原来常值或其附近。前述的图 1-2 所示温度闭环控制系统属于这种类型。

##### 2. 位置随动控制系统

位置随动控制系统（又称伺服系统）的给定输入量可以按设定的规律或事先未知的规律变化，要求被控制的输出量能够迅速准确地跟随输入量而变。自动火炮方位控制系统是



位置随动系统的一个例子，火炮的给定输入量来自于雷达探测器，雷达将随时间变化的目标方位传给计算机位置随动控制系统，计算机根据雷达测得的信息设置给定输入量，随动系统完成由给定输入量控制火炮方位的运动，这个运动过程要求既快速又准确。又比如， $\gamma$ 刀将放射线聚焦于人体肿瘤杀死癌细胞的手术，是通过核磁共振扫描肿瘤部位，将肿瘤部位的信息传给计算机，由计算机设定 $\gamma$ 刀位置随动控制系统的输入值以完成肿瘤部位放射线的准确聚焦，将散射的放射线聚焦在肿瘤上，从而杀死癌细胞又不伤害正常的组织细胞。

### 3. 程序控制系统

程序控制系统的输入信号可以是时间的函数、空间的函数，也可以是几何图形或者按照某种规律编制的程序等。这些函数、几何图形或者程序等由计算机输出后作用于自动控制系统的给定输入端，输出量便随变化的输入设定值而动。程序控制系统的输入量可以是常值，也可以是变化值。是常值的有恒值系统的特征，是变化值的有随动系统的特征。可见，这类系统关注的是其输入量是按某种规律而编制的程序。

## 二、按信号传输过程是否连续分类

### 1. 连续控制系统

系统中各处传输的信号均是时间 $t$ 的连续函数，这类控制系统称为连续控制系统。描述连续控制系统的动态方程是微分方程。

### 2. 离散控制系统

如果控制系统在信号传输过程中存在着间歇采样、脉冲序列等离散信号，则称为离散控制系统。描述离散控制系统的动态方程是差分方程。引入计算机参与控制的系统，由于有将模拟量转换成数字量的过程，属离散控制系统。有的控制系统对被控量或系统中某一物理量采用开关量控制，开关闭合时系统中有信号的传输，开关开启时信号传输中断，也属离散控制系统。比如在图 1-1 的炉温控制系统中，假设不调节电加热器的端电压而是采取开关控制电加热器的方式供热，只要通电和断电的时间间隔选择得好，也能达到控制炉温的效果。但这属于离散控制系统了。

## 三、按系统构成元件是否线性分类

### 1. 线性控制系统

均由线性元件构成的控制系统是线性控制系统。在实际应用的控制系统中，绝对线性的控制系统事实上是不存在的，一些元件或多或少存在着一定的非线性。一般情况下将非线性程度不甚严重的系统都划归为线性控制系统的范畴，这是由于闭环控制能使非线性产生的偏离得到及时纠正的缘故。

### 2. 非线性控制系统

控制系统内如果至少含有一个非线性元件，则该系统是非线性系统。这里的非线性元件是指其输出输入关系具有饱和限幅特性、死区特性、继电器特性、传输间隙特性等。它们的特点是不能用小信号线性化方法加以近似，其理想特性具有明显的拐点或间断点。



## 四、按系统参数是否随时间变化分类

### 1. 定常控制系统

系统参数不随时间变化的系统是定常控制系统。定常控制系统的微分方程或差分方程的系数是常数。线性的定常控制系统称为线性定常控制系统。

### 2. 时变控制系统

系统参数随时间变化的系统是时变控制系统。时变控制系统的微分方程或差分方程的系数是时间的函数。例如，发射卫星的火箭姿态控制系统，由于燃料的燃烧使质量参数随时减少，属于时变控制系统。

## 第四节 自动控制系统举例

### 一、速度给定（恒速）控制系统

图 1-4 是具有负反馈的速度给定控制系统原理图。给定负极性的电压  $U_n^*$  由给定电位器 8 设定。元件 1 是由反相输入端输入的运算放大器，它兼有比较环节和放大环节两个功能，其正相输入端经平衡电阻  $R_b$  接地，A 点为虚地点，对 A 点列稳态状态下的节点电流方程得：

$$I_1 = \frac{-U_n^*}{R_0}; I_2 = \frac{U_n}{R_0}; I_3 = 0。$$

由于稳定时运算放大器上反馈支路的电容已充好电，它建立了两个条件：①电容的隔直作用使  $I_1 = I_2$ ，即  $U_n = -U_n^*$ ， $I_3 = 0$ ；②建立了正值电压  $U_{ct}$ 。方框 2 和方框 3 合起来完成功率放大功能，将弱电电压  $U_{ct}$  放大为强电电压  $U_d$ ，驱动直流电动机。直流电动机是他励机，励磁磁通保持恒定，转速受端电压单变量控制。与直流电动机同轴相连的是直流测速发电机，其端电压近似与转速成正比，经分压后作为反馈信号  $U_n$ 。这里的  $U_n$  极性要接成与给定电压  $U_n^*$  的极性相反，即负反馈连接，只有这样才能使系统稳定运行时电容支路的电流为 0。

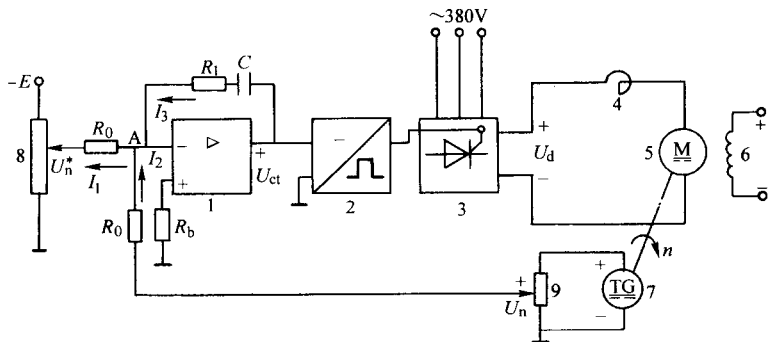


图 1-4 具有负反馈的速度给定控制系统原理图

- 1—运算放大器 2—触发电路 3—晶闸管整流器 4—平波电抗器 5—直流电动机  
6—直流他励绕组 7—直流测速发电机 8、9—电位器



现在分析扰动作用下系统稳定转速的动态过程。假设某一时刻开始直流电动机转轴上的负载转矩增加了一个恒定的量，在起始时刻，由于电动机轴上的输出功率还没来得及增大，转速将降低。降低的转速使测速发电机两端的电压降低，分压值  $U_n$  也降低，导致运算放大器输入端的电流平衡关系遭到破坏， $I_2 < I_1$ ， $I_3 \neq 0$ 。 $I_3$  给电容器  $C$  充电使  $U_{ct}$  增加，经功率放大后的  $U_d$  增大使电动机输出转矩增加，转速得以回升，稳定后进入新的平衡状态。新平衡状态仍然对应于电容器的隔直状态，转速回到了原来的数值，转速负反馈电压  $U_n$  回到了负的给定值  $-U_n^*$ 。但是，由于电容器经历了再充电的过程， $U_{ct}$  比原来的数值大了，电动机获得的电磁功率及输出转矩等都比原来的数值大，增大的输出转矩用来平衡增加的负载转矩。

假设经过一段时间的运行负载扰动量消失了，控制系统将按相反的过程运动。电动机提供的功率因负载的减少而出现过剩，起始时刻，电动机的输出功率还没来得及减小，转速将升高，升高的转速使  $U_n$  大于原来的值，导致  $I_2 > I_1$ ，电容器支路电流  $I_3$  在图 1-4 所示参考方向下为负值，电容器放电， $U_{ct}$ 、 $U_d$  均降低，电动机的输出转矩减小，转速下降，测速发电机的端电压降低， $I_2$  减小，平衡时  $I_2 = I_1$ ， $I_3 = 0$ 。同样，由于电容器经历了放电的过程， $U_{ct}$  和  $U_d$  值减小，电动机输出的转矩减小。

速度给定控制系统在工业控制中得到了广泛的应用。比如，轧制钢板的轧辊转速要求恒定才能轧制均匀厚度的钢板。

## 二、函数记录仪位置随动控制系统

图 1-5 所示系统为函数记录仪位置随动控制系统。它要求画笔能画出与输入信号成比例的图形。设放大器 1 为比例放大器，其输出量与输入量的比值是常数，当  $\Delta U$  作用于放大器输入端时，经放大后的输出量驱动伺服电动机 2 旋转，由于  $\Delta U$  有正负大小之分，伺服电动机正反转、快慢转受其控制， $\Delta U = 0$  时，电动机停止转动。测速发电机 3 将速度信号测出后反馈给放大器形成速度负反馈闭环控制。 $\Delta U$  是由电位器 5、滑线变阻器 6、电动势  $E$  构成的电桥电路在输入函数 10 的作用下形成的，其等效电路如图 1-6 所示。图中，电桥平衡支路满足如下电压方程：

$$u_{BA}(t) = \Delta U + u_r(t)$$

当 A 点位于电桥平衡点时， $u_{BA}(t) = 0$ 。若输入信号  $u_r(t) = 0$ ，则  $\Delta U = 0$ ，经放大器连接的电动机不运转，滑块画笔 9 不动； $u_r(t)$  随时间变化时，初始时刻滑块画笔 9 未动， $\Delta U = -u_r(t)$ ，放大后作用于伺服电动机 2 带动滑块移动，改变滑线变阻器的阻值  $R_{61}$  和  $R_{62}$ ，使电桥失去平衡，产生的电压  $u_{BA}(t)$  用于平衡  $u_r(t)$ ，使  $\Delta U \rightarrow 0$ 。只要

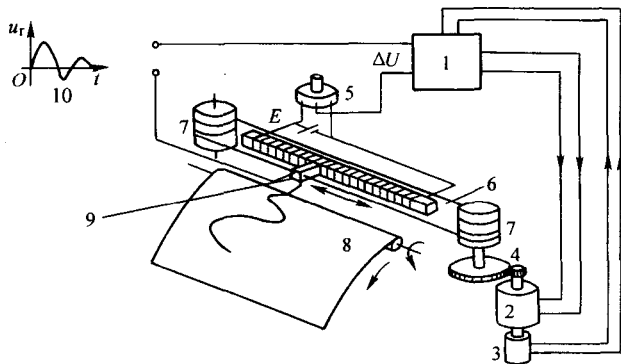


图 1-5 函数记录仪原理示意图

- 1—放大器 2—伺服电动机 3—测速发电机 4—减速器
- 5—电位器 6—滑线变阻器 7—线轮 8—纸带机
- 9—滑块画笔 10—输入函数

$\Delta U \neq 0$ , 电动机就拖动滑块画笔运动, 直至  $\Delta U = 0$ , 滑块画笔静止。可见, 滑块画笔是随  $u_r(t)$  而动的。由于电桥是线性电路, A 点的位移与输入信号  $u_r(t)$  成比例, 当纸带机 8 匀速运动时, 滑块画笔绘制的轨迹便是与  $u_r(t)$  成比例的函数曲线。

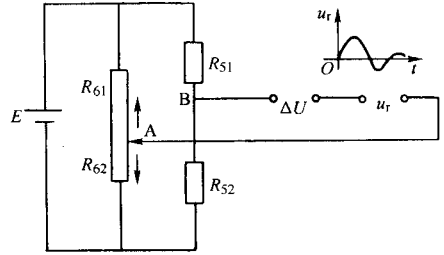


图 1-6 函数记录仪电桥等效电路

### 三、导弹发射架方位随动控制系统

图 1-7 是由单片机控制的导弹发射架方位随动控制系统的原理图。所谓方位是指水平面上的定位。输入信号  $\theta_r$  可以是反映三维空间位置的雷达信号在水平面的分量, 经模数转换器 6 转换成数字量输入到单片机 7; 另一路数字量来自于光电编码盘 5, 它将被控对象——导弹发射架 4 的旋转角度编成数码后输入给单片机。单片机将得到的输入量信息和反馈量信息经控制程序运行 (或查表) 后输出一个数字量, 经数模转换器 8 转换成离散的模拟量, 再由保持器 9 将离散信号连续化后作用于放大器 1, 控制电动机端电压  $u_d$  拖动发射架 4 沿水平面转动, 系统框图如图 1-8 所示。如果要控制导弹发射架的俯仰角, 则需要设置另一套电动机拖动的自动控制系统。

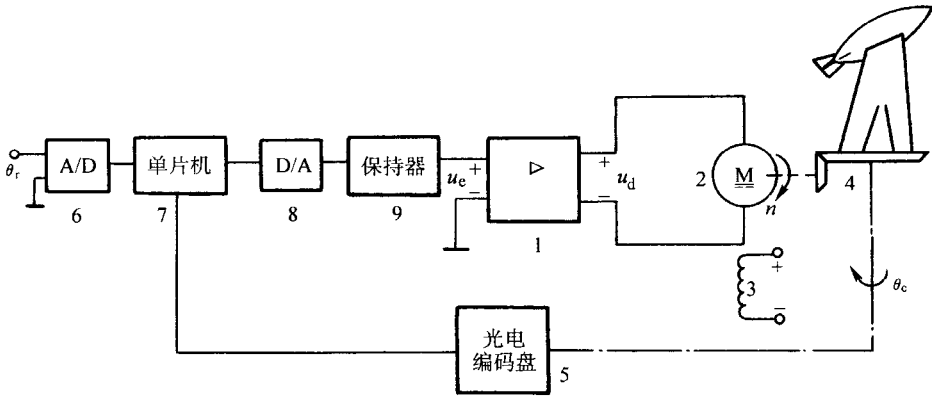


图 1-7 导弹发射架方位随动控制系统原理图

1—放大器 2—伺服电动机 3—他励绕组 4—减速器及发射架底座 5—光电编码盘 6—模数转换器 7—单片机 8—数模转换器 9—保持器

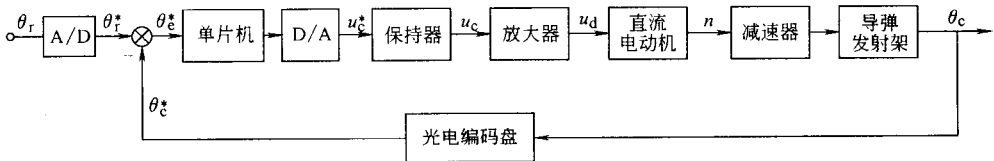


图 1-8 导弹发射架方位数字控制系统框图

自动火炮炮身的方位控制和俯仰角的控制, 机器人关节的运动控制等都是位置随动控制系统的例子。



## 第五节 对自动控制系统的基本要求及本课程的任务

### 一、对自动控制系统的基本要求

前面介绍的控制系统均需接成负反馈闭环方能实现自动控制。实现自动控制后，被控对象的输出量将在给定输入量或扰动输入量的作用下完成自动调节的控制过程。但是，若控制系统的结构或参数不同，在相同输入量作用下，其输出量被调节的过程会不相同。当结构和参数选择得适当时，输出量会被调节得快速、稳定，稳定后的误差小，甚至没有稳态误差；当系统的结构和参数选择得不适当时，输出量可能会因过度调节而反复振荡，或因调节太慢出现反应迟钝，稳定后的稳态误差大等。这说明控制系统有好坏之分。例如图 1-2 所示的炉温闭环控制系统，若放大器的放大倍数选择得过大，当给定输入量减去热电偶的电压信号是个很小值时，经放大后的电压也会很大，拖动电动机旋转有可能使  $u_c$  调得过高，炉膛内的热量骤增，温度也骤升，被热电偶检测出来后，反馈到输入端与给定电压进行比较，当转换的电压高于给定电压时，电压差的极性反了，放大后拖动电动机反转，降低  $u_c$ ，从而减少向炉膛释放热能。同样，由于放大器的放大倍数过大，电动机会将  $u_c$  调得过低，使炉膛温度低于给定电压所对应的稳态值。这样，控制系统会在稳态值上下反复振荡。振荡的情形有两种，一种是放大倍数虽然过大，但又不十分大，系统经多次振荡后能够稳定下来，稳定后的  $u_c$  被调到与输入量相适应的值，温度也稳定在稳定值。这说明系统是可以正常工作的，只是反复振荡的调节过程不太好，达到稳态的时间较长。

另一种情形是放大器的放大倍数太大，使系统工作在如下状态：只要在放大器的输入端有正的差值，电动机的转动就使自耦变压器的滑动触头抵达上限位， $u_c = 220V$ ，炉温升高使热电偶的输出电压升高，大于给定电压时，电动机反转拖动自耦变压器的滑动触头抵达下限位， $u_c = 0V$ ，温度降低后又反过来动作，滑动触头在上限位和下限位之间反复跳动，电压  $u_c$  在 220V 和 0V 之间反复跳变，没有一个与输入量相适应的稳定值，系统不能正常工作。事实上，这种情形是系统不稳定的表现。影响响应性能的因素不仅仅是放大器的放大倍数，其它的参数或别的因素也能使响应特性不好。可见，对自动控制系统提出基本要求是必要的。

一般说来，由于控制系统的类型不同，对它们提出的特殊要求是不同的。比如，位置随动控制系统特别要求输出量跟随输入量的变化要快、要准，而对克服扰动量的要求并不十分严格，是因为随动系统的主要矛盾是快速跟随性，抗扰动是次要矛盾。例如，函数记录仪位置随动控制系统，它的控制目标是要求画笔画出的曲线与输入的函数曲线完全相似，若输出量跟随输入量变化得不快、不准，画出的曲线会失真。而对扰动量而言，这类系统形成扰动的因素本来就少，所以是次要矛盾。速度给定系统则特别要求在扰动出现时能够迅速自动调节使输出量尽可能不受扰动的影响，而对输出量跟随给定输入量的变化要求得不太严格。例如，轧制钢板的轧钢机恒速控制系统，它的控制目标是轧制薄厚均匀的





钢板,要求轧机的速度保持恒定,若钢坯加热不均匀(烧红的钢坯中有黑钢),轧制时轧辊承受的负载转矩不相等,相当于出现了负载扰动,轧钢机还能否将钢板轧平是最为关心的,如果能够轧平,或有可以忽略的波动,需要控制系统有好的抗扰性能。所以抗扰性能是主要矛盾,而轧机起动时输出的转速是如何跟随输入量上升到稳态值并不十分重要,属于次要矛盾。这是对不同类型的控制系统提出的特殊性问题。对控制系统提出的基本要求是指各类系统均有的普遍性要求,可归结为:自动控制系统应有的稳定性、快速性和准确性。

### 1. 稳定性

稳定性是指控制系统稳定工作的能力。表现为在给定量或扰动量作用时系统重新恢复到平衡状态的能力。稳定的系统能够重新恢复到平衡状态,不稳定的系统则不能重新恢复到平衡状态。事实上,不稳定的控制系统是不能正常工作的,所以要求自动控制系统必须是稳定的。

### 2. 快速性

快速性是指输出量跟随输入量变化进入稳态的时间要快。由于控制系统中的元件和控制对象通常具有惯性,并且为系统提供的能量是有限的,所以输出量跟随输入量的变化是按惯性变化的,也就是说,具有滞后性。这种惯性表现为两种情形,一种是有振荡的惯性跟随,一种是单调的惯性跟随,进入稳态时都有时间快慢的问题。一般,自动控制系统都要求响应速度要快。比如自动火炮炮身的方位及俯仰角的自动控制,要求输出量跟随输入量的变化要足够快,这样才能不失时机地向目标开火,击中目标。又比如,轧制钢板的轧机控制系统,在扰动出现时要有足够快的反应速度使系统改变输出转矩,抵消扰动量,使钢板的厚度维持不变。

### 3. 准确性

当系统输出量的动态变化过程结束后,输出量达到了稳态值。如果输出稳态值与期望的稳态值之间有稳态误差,说明控制得不够准确;如果没有稳态误差,说明控制得准确。形成稳态误差的原因是多方面的,比如系统结构不合理,系统中含有摩擦、不灵敏区等非线性特性,检测元件有误差,甚至还与输入函数有关。好的控制系统应当具有小稳态误差,甚至为0,使控制精度高,控制得准。

在同一系统中,稳定性、快速性和准确性三者之间有时相互制约,过分强调某一方面有时会给其它方面带来麻烦,需要统筹考虑。

## 二、本课程的任务

自动控制系统按其结构上的特点、信号传输的形式及输入信号的特征分为多种不同称谓的系统,虽然它们各有特点,但就运动规律而言是有共性的,研究的方法也有共性。若将它们分成线性系统和非线性系统两大类,则每一类有相同的运动规律和研究方法。这里的“研究”有两层含义,一层含义是系统分析,它在数学模型的基础上研究系统的运动规律,通过已知的系统结构和参数,求解输出响应特性,分析改变系统结构和参数时会对响应特性带来什么影响。事实上,它解决了认识系统运动规律的问题。另一层含义是系统校正。系统校正属系统设计的部分,是指在完成了各环节的设备选型、参数计算、图纸绘制