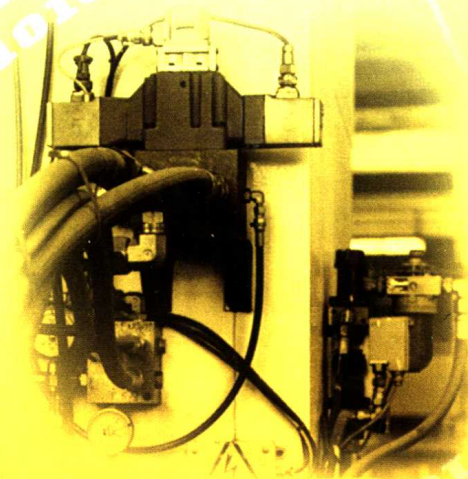




中等职业教育国家规划教材  
全国中等职业教育教材审定委员会审定

# 电气自动控制系统

张耀 主编



571.2  
9

 机械工业出版社



7A11/21.2

8299

中等职业教育国家规划教材  
全国中等职业教育教材审定委员会审定

# 电 气 自 动 控 制 系 统

主 编 张 耀  
参 编 金文兵 宋 丹 朱玉堂  
责任主审 吴锡龙



机 械 工 业 出 版 社

本书是教育部中等职业教育规划教材。本书以电气自动控制系统为主线、从应用角度出发,阐述了自动控制的基础知识,重点介绍了直流调速系统,交流调速系统,伺服系统,计算机控制系统的基本结构、组成、工作原理及其应用。全书分五章,内容包括自动控制理论的基础知识、直流调速系统、交流调速系统、伺服系统、计算机控制系统。本书强调面向现场的应用,淡化定量推导、定量分析。每章配有一定量的习题。

本书面向中等职业教育,内容简明易懂,理论联系实际,实用性强。

本书可作为中等职业学校电气、自动化、机电一体化等专业的教材,也可供广大一线技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

电气自动控制系统/张耀主编. —北京:机械工业出版社, 2002.9  
中等职业教育国家规划教材  
ISBN 7-111-10802-7

I. 电... II. 张... III. 电气控制—自动控制系统—专业学校—教材 IV. ①TM571.2②TP273

中国版本图书馆CIP数据核字(2002)第065265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:周娟 苏颖杰 版式设计:冉晓华 责任校对:张媛  
封面设计:姚毅 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  
2003年3月第1版·第1次印刷  
787mm×1092mm<sup>1/16</sup>·7.75印张·187千字  
0 001—4 000册  
定价:9.50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

## 出版说明

为了贯彻《中共中央国务院关于深化教育改革全面推进素质教育的决定》精神，落实《面向 21 世纪教育振兴行动计划》中提出的职业教育课程改革和教材建设规划，根据《中等职业教育国家规划教材申报、立项及管理意见》（教职成〔2001〕1 号）的精神，教育部组织力量对实现中等职业教育培养目标和保证基本教学规格起保障作用的德育课程、文化基础课程、专业技术基础课程和 80 个重点建设专业主干课程的教材进行了规划和编写，从 2001 年秋季开学起，国家规划教材将陆续提供给各类中等职业学校选用。

国家规划教材是根据教育部最新颁布的德育课程、文化基础课程、专业技术基础课程和 80 个重点建设专业主干课程的教学大纲编写而成的，并经全国中等职业教育教材审定委员会审定通过。新教材全面贯彻素质教育思想，从社会发展对高素质劳动者和中初级专门人才需要的实际出发，注重对学生的创新精神和实践能力的培养。新教材在理论体系、组织结构和阐述方法等方面均做了一些新的尝试。新教材实行一纲多本，努力为教材选用提供比较和选择，满足不同学制、不同专业和不同办学条件的教学需要。

希望各地、各部门积极推广和选用国家规划教材，并在使用过程中，注意总结经验，及时提出修改意见和建议，使之不断完善和提高。

教育部职业教育与成人教育司

2002 年 5 月

## 前 言

本书是教育部中等职业教育规划教材。本书在编写中充分汲取了电气自动控制系统课程多年来的教学成果，在理论够用的条件下，强调应用性和实践性。

本书以电气自动控制系统为主线，从应用角度出发，阐述了自动控制系统的基础知识，重点介绍了直流调速系统，交流调速系统，伺服系统，计算机控制系统的基本结构、组成、工作原理及其应用。全书分五章，内容包括自动控制系统的基础知识、直流调速系统、异步电动机变压变频调速系统、伺服系统、计算机控制系统。本书强调面向现场的应用，淡化定量推导、定量分析。全书简明易懂，理论联系实际，实用性强。每章配有一定量的习题。本教材的参考学时为 80 学时，也可删除部分内容，安排为 60 学时。本课程的先修课程为电子技术基础、电机与拖动基础、自动检测技术、电力电子技术、微机原理及其应用等。

本书的编写特色主要表现在以下几个方面：

1. 根据中职电类人才培养目标与中职学生的特点，对自动控制理论进行了认真分析、取舍，根据必须、够用为度，着重介绍基本概念、基本原理。
2. 理论联系实际，重视实例教学，重点培养学生现场定性分析能力。
3. 简要介绍了典型工业控制网络的基本知识，使学生了解这些先进应用系统的基本结构、组成及工作原理。

为了加深对相关系统的理解，建议开设下列 5 个实验：

1. 单闭环直流调速系统。
2. 直流脉宽调速系统。
3. 由变频器构成的开环交流调速系统。
4. 由变频器构成的闭环交流调速系统。
5. 步进电动机调速系统。

关于计算机控制系统可组织学生到相关企业参观。建议开设一周电气控制系统综合实训，以提高学生解决实际问题的能力。实训内容可由各学校根据教材内容，结合自己的设备情况确定。

本书由浙江机电职业技术学院张耀、金文兵、宋丹、朱玉堂四位教师共同编写，其中第一、五章由张耀副教授编写，第二章由金文兵高级工程师编写，第四章由宋丹工程师编写，第三章由朱玉堂工程师编写，张耀任主编，负责全书的编写组织工作。责任主审吴锡龙教授仔细审阅了本书，并提出了许多宝贵意见，谨在此表示衷心的感谢！

由于编者水平有限且成书仓促，难免有疏漏、欠妥和错误之处，恳请读者批评指正。

编者

# 目 录

## 前言

## 第一章 自动控制系统的基础知识 ..... 1

### 第一节 自动控制系统的基本概念 ..... 1

#### 一、控制与自动控制 ..... 1

#### 二、自动控制系统的组成及术语 ..... 1

#### 三、自动控制系统的分类 ..... 3

#### 四、自动控制系统的性能指标 ..... 6

### 第二节 自动控制的典型环节 ..... 6

#### 一、比例环节 ..... 6

#### 二、非周期环节 ..... 6

#### 三、积分环节 ..... 7

#### 四、振荡环节 ..... 7

#### 五、微分环节 ..... 8

#### 六、延迟环节 ..... 8

### 第三节 控制器与控制规律 ..... 9

#### 一、控制器简介 ..... 9

#### 二、比例控制规律 ..... 9

#### 三、比例积分控制规律 ..... 9

#### 四、比例微分控制规律 ..... 10

#### 五、比例积分微分控制规律 ..... 10

### 小结 ..... 10

### 习题 ..... 10

## 第二章 直流调速系统 ..... 11

### 第一节 直流调速系统概述 ..... 11

### 第二节 单闭环有静差调速系统 ..... 13

#### 一、转速控制的要求和调速指标 ..... 13

#### 二、开、闭环调速系统性能的比较 ..... 14

#### 三、系统的自动调节过程及其机械特性 ..... 16

#### 四、电压负反馈调速系统 ..... 17

#### 五、电流截止负反馈在系统中的作用 ..... 18

#### 六、电流正反馈和补偿控制规律 ..... 20

#### 七、小功率有静差直流调速实例分析 ..... 21

### 第三节 单闭环无静差调速系统 ..... 27

#### 一、实现无静差的方法——积分（I）调节器和比例积分（PI）调节器 ..... 27

#### 二、比例积分（PI）调节器的实用线

路 ..... 30

#### 三、比例积分（PI）调节器的应用和无静差的实现 ..... 33

### 第四节 转速、电流双闭环直流调速系统 ..... 35

#### 一、双闭环调速系统的组成 ..... 36

#### 二、双闭环调速系统的工作原理 ..... 37

#### 三、双闭环调速系统的机械特性 ..... 38

#### 四、双闭环调速系统的起动特性 ..... 39

#### 五、双闭环调速系统的优点 ..... 40

### 第五节 直流可逆调速系统 ..... 40

#### 一、可逆运行的基本知识 ..... 40

#### 二、逻辑无环流直流调速系统分析 ..... 43

### 第六节 直流脉宽调速系统 ..... 48

#### 一、不可逆 PWM 变换器 ..... 48

#### 二、可逆 PWM 变换器 ..... 50

#### 三、脉宽调速系统的开环机械特性 ..... 53

#### 四、脉宽调制控制电路 ..... 53

### 补充说明 ..... 56

### 小结 ..... 56

### 习题 ..... 56

## 第三章 异步电动机变压变频调速

### 系统 ..... 58

### 第一节 交流调速的基本类型 ..... 58

### 第二节 变频调速的基本概念 ..... 58

#### 一、基频以下调速 ..... 59

#### 二、基频以上调速 ..... 59

### 第三节 静止式变频装置 ..... 59

#### 一、间接变频装置（交-直-交变频装置） ..... 60

#### 二、直接变频装置（交-交变频装置） ..... 60

#### 三、电压源变频器和电流源变频器 ..... 60

### 第四节 通用变频器中的逆变器及其

#### SPWM 控制 ..... 61

#### 一、六脉波方波逆变器 ..... 61

#### 二、SPWM 控制 ..... 62

### 第五节 异步电动机变频调速时的转矩

特性 .....	63	一、步进电动机的基本工作原理 .....	80
一、以气隙磁链为参变量的转矩特性 .....	63	二、步进电动机的驱动电源 .....	81
二、以转子全磁链为参变量的转矩特性 .....	66	第五节 直流伺服系统 .....	82
第六节 变频器的控制方式 .....	66	一、直流伺服电动机 .....	82
一、V/F 控制 .....	66	二、直流伺服系统介绍 .....	84
二、转差频率控制 .....	67	第六节 交流伺服系统 .....	85
三、矢量控制 .....	67	一、交流伺服电动机 .....	85
第七节 变频器的选用、运行及维护 .....	67	二、交流伺服系统介绍 .....	86
一、负载的分类 .....	67	小结 .....	87
二、变频器的选型 .....	68	习题 .....	87
三、变频器的安装、运行及维护 .....	68	<b>第五章 计算机控制系统</b> .....	88
第八节 变频调速系统应用实例 .....	69	第一节 计算机控制系统基础知识 .....	88
一、西门子变频器 MM420 在包装机上的运用 .....	69	一、概述 .....	88
二、西门子变频器 MM440 在门机操作上的运用 .....	69	二、计算机控制系统的组成 .....	88
三、富士变频器在恒压控制系统中的运用 .....	70	三、计算机控制系统的分类 .....	89
小结 .....	72	四、计算机控制系统的发展趋势 .....	91
习题 .....	72	五、直接数字控制系统与模拟控制系统的比较 .....	91
<b>第四章 伺服系统</b> .....	73	第二节 温度控制系统 .....	92
第一节 伺服系统的分类及特点 .....	73	一、概述 .....	92
第二节 伺服系统的组成及工作原理 .....	74	二、系统组成及工作原理 .....	92
第三节 常用检测装置 .....	75	三、硬件电路设计 .....	93
一、旋转变压器 .....	75	四、软件设计 .....	94
二、感应同步器 .....	76	第三节 控制网络简介 .....	106
三、光栅测量装置 .....	76	一、可编程序控制器 (PLC) 网络 .....	106
四、光电编码器 .....	78	二、集散控制系统 .....	109
第四节 步进伺服系统 .....	79	三、现场总线控制系统 .....	112
		小结 .....	115
		习题 .....	115
		<b>参考文献</b> .....	116

# 第一章 自动控制系统的基础知识

## 第一节 自动控制系统的基本概念

人类企图控制自然的要求，一直是整个历史发展的动力。控制自然的目的是完成超出人们力所能及的任务。长期以来，人们一直进行着不懈的努力，自动控制技术是人们实现这一要求的重要手段，人们利用自动控制技术已把人类的许多希望和梦想变成了现实。

自动控制是一门介于许多学科之间的科学，又渗透到各个专业领域。不仅高精尖领域（如人造卫星、宇宙飞船、人类登上月球、人工智能等）离不开它，在工业领域（如电气、机械、航空、化工、核反应等）及非工业领域（如经济、管理、生物工程、社会学等）也都广泛采用自动控制技术。自动控制这门多科性的学科，今天已被列为最有前途的领域之一，它的发展趋势是无可限量的。

### 一、控制与自动控制

在日常生活、生产过程、军事、航天等领域中，控制和自动控制的应用非常广泛。例如，自行车速度控制、汽车驾驶、热处理炉的恒温控制、导弹飞行控制、人造卫星和宇宙飞船控制等。

控制就是指通过控制装置，使生产设备或生产过程的某些物理量按特定的规律变化。在没有人直接参与的情况下完成的控制称之为自动控制；相反，在有人直接参与的情况下完成的控制称之为人工控制。能对生产设备或生产过程的工作状态进行自动控制的系统称为自动控制系统。

自行车速度控制是人根据道路的交通情况，人为地加快骑行速度或减慢骑行速度。汽车驾驶是驾驶员根据道路的交通情况，通过转动方向盘改变方向，通过加油门、刹车等改变速度。这两者属于人工控制。热处理炉的恒温控制是人根据生产工艺要求，在系统的温控器上设定一个设定值，随后整个系统自动完成恒温控制，当炉温高于用户所设定的温度时，温控系统工作，使炉内温度下降；当炉温低于用户所设定的温度时，温控系统工作，使炉内温度上升。导弹飞行控制包含飞行姿态控制、自动纠正方向、自动导向目标等。在茫茫太空中，人造卫星、宇宙飞船控制系统要确保它们严格按预定轨道飞行，对它们的姿态进行控制，使太阳能电池板一直朝向太阳，无线电天线一直指向地球。这三者属于自动控制。

显然，自动控制是控制发展的方向。

### 二、自动控制系统的组成及术语

#### 1. 反馈与反馈控制

反馈就是把系统的输出信号回送到系统的输入端并加到输入信号中。

反馈分为正反馈和负反馈两种类型。如果由于反馈的存在，使得系统的输出信号单调地朝着某一个方向变化并趋于极限，或者说使系统的被控量与给定值之间的偏差不断增大的反馈，这样的反馈称为正反馈，这样的系统称为正反馈系统。如炸药的爆炸、军备竞赛、电子振荡过程等。如果由于反馈的存在，使得系统的输出信号趋于稳定在原来的水平上，或者更严



格地说,使输出信号与给定值的差趋于减小,这样的反馈称为负反馈,这样的系统称为负反馈系统。几乎所有的自动控制系统都是负反馈系统。

反馈控制就是利用负反馈的作用来减小系统的误差(输出信号与给定值的差),又称闭环控制。反馈控制是一种基本的控制规律,它具有自动修正被控制量偏离给定值的作用,因而可以抑制内扰和外扰所引起的误差。在组成系统的元器件精度相对不高的条件下,采用反馈控制可以达到较高的控制精度,因此应用很广。

现以某贮槽的液位控制系统为例来说明反馈控制的基本工作原理。图 1-1 所示为贮槽液位控制系统的原理结构图,图中  $Q_1$  为进入贮槽的液体流量, $Q_2$  为流出贮槽的液体流量。控制的目的是使贮槽中的液位  $H$  以一定的精度稳定于某一高度  $H_0$ 。当外部负载(负荷)改变,即  $Q_2$  改变时, $Q_1 \neq Q_2$ ,液位将上升或下降。图中的液位变送器(差压变送器)将自动地检测液位的变化,并把液位高低的变化变换成与之成比例的统一信号(一般为电气信号),此信号称为测量信号。将测量信号送入控制器,并与控制器中的液位给定值进行比较,得出两者的差,称之为偏差信号。控制器根据偏差信号的大小,按某种运算规律计算出控制器应输出的控制信号。控制信号送到执行器,执行器去调整调节阀的开度,使  $Q_1$  发生变化,从而使液位保持在所希望的数值  $H_0$ (液位给定值)上,实现了贮槽液位的自动控制。

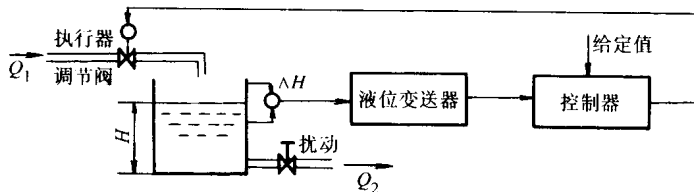


图 1-1 贮槽液位控制系统的原理结构图

## 2. 自动控制系统的组成与框图

一个控制系统由若干个环节组成,每个环节有其特定的功能。在讨论一个自动控制系统时,若将系统中所有环节的内部结构都画出来,会十分麻烦,甚至非常繁杂。为了便于分析并能清楚地表示系统各组成环节间的相互影响和信号传递关系,一般习惯于把自动控制系统用框图(或称方块图)来表示。在框图中,系统的每一个组成部分(或称环节)用一个方框来代表,环节间用带箭头的的作用线连接起来,表示环节之间的信号传递关系,箭头的方向代表作用方向。一个环节所接受的作用称为该环节的输入量,而输入量在该环节中引起的变化称为该环节的输出量。

图 1-2 所示是一般自动控制系统框图。图中的每个方框是一个环节,每个环节都有输入端和输出端,所有方框配合起来组成控制系统。各环节的作用及有关术语含义如下:

- (1) 反馈环节 对系统输出量的实际值进行测量,将它转换成反馈信号,并使反馈信号成为与给定信号同类型、同数量级的物理量。
- (2) 比较器 将给定信号和反馈信号进行比较,产生偏差信号。
- (3) 控制器 根据输入的偏差信号,按一定的控制规律产生相应的控制信号。
- (4) 执行器 将控制信号进行功率放大,并带动执行机构工作。
- (5) 调节机构 直接改变控制系统的输入量,使被控量恢复到给定值。
- (6) 被控对象 控制系统所要控制的设备或生产过程,它的输出量就是被控量。

(7) 被控量 对象的某个变量。控制系统的目的通常就是要使该变量与设定值或给定值相符。控制系统也用该变量的名称来称呼,如温度控制系统、压力控制系统等。

(8) 调节量 对被控装置的被控量具有较强的直接影响且便于调节的变量。

(9) 干扰 对象中除了调节量以外,能对被控变量具有影响作用的所有变量。

(10) 偏差 给定值与反馈量之差。

(11) 给定值 也称为设定值,是被控量的期望值。它可以是恒定值,也可以按程序变化。

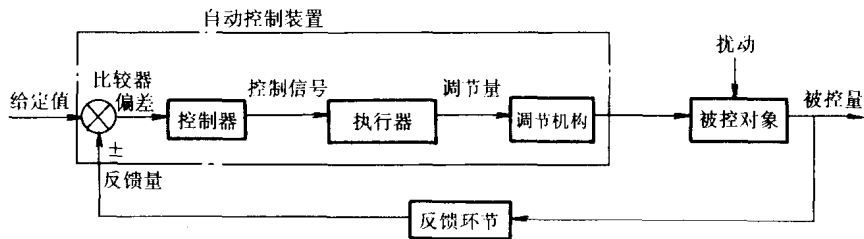


图 1-2 自动控制系统的组成框图

从上面介绍的贮槽液位的自动控制系统中可以看出,它包括了被控对象、变送器、控制器、执行器、调节阀五个主要环节,它的组成框图就如图 1-2 所示。当被控对象贮槽受到扰动影响时,被控量液位就发生变化,测量元件、变送器将被变化的值与给定值进行比较,产生偏差。偏差值(或称偏差信号)送入控制器并按一定控制规律运算后输出控制信号,该信号再经执行器控制调节阀,改变调节阀的开度,使被控量恢复到原有数值  $H_0$ 。

### 三、自动控制系统的分类

随着自动控制技术的不断发展,生产过程自动化水平的不断提高,各种各样的新型自动控制系统不断出现。因此,很难确切地列举它们的全部分类,下面仅介绍几种常用的分类方法。

#### 1. 按自动控制系统是否形成闭合回路分类

(1) 开环控制系统 开环控制是一种最简单的控制方式,其特点是在控制器与被控制对象之间只有正向作用而没有反馈作用,即系统的输出量对控制量没有影响。开环控制系统的示意框图如图 1-3 所示。

在开环系统中,对于每一个输入量,都有一个与之相对应的工作状态和输出量。系统的精度取决于元器件的精度和特性调整的精度。开环系统结构简单,设计、调整容易。当系统的内扰和外扰影响不大并且控制精度要求不高时,可以考虑采用开环控制系统。

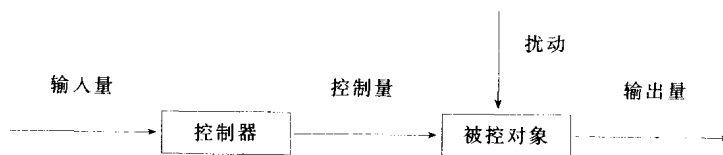


图 1-3 开环控制系统的示意框图

图 1-4 所示的直流电动机速度控制系统是开环控制的一个实例。在系统中,被控量即输出量是电动机 M 的转速  $n$ 。控制器是晶闸管整流装置,它输出的控制作用  $U_m$  仅由输入电压  $U_r$  决定,而不受输出量转速  $n$  的影响。因此,确定了输入电压  $U_r$  的大小,就确定了对输出量期望值的要求,输入电压  $U_r$  称为给定输入或参考输入。在  $U_r$  已经确定的情况下,由于负载转矩的变化(例如负载增大),使电动机转速偏离了原来的设定值时,系统没有使转速恢复的能力。影响输出量转速  $n$  大小的负载转矩称为扰动输入。

从图中可看出,只有从输入端到输出端的信号作用路径,而没有从输出端到输入端的信号作用路径。当扰动作用(如晶闸管整流装置特性的变化或负载转矩变化等)引起电动机转速偏离原来校准的数值时,系统没有修正偏差的能力。该系统的精度取决于系统校准精度和系统中元器件特性的稳定程度。因此,开环控制系统对所采用的元器件的精度和稳定性,提出了较高的要求。

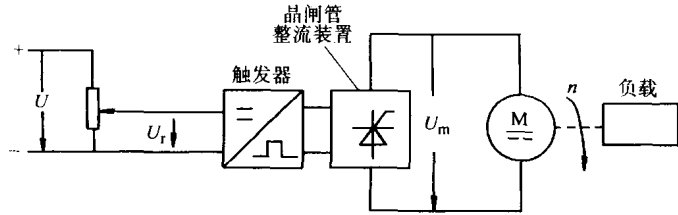


图 1-4 直流电动机速度开环控制系统示意图

(2) 闭环控制系统 闭环控制系统的优点是,在控制器和被控对象之间不仅存在着正向作用,而且存在着反馈作用,即系统的输出量对控制量也发生直接影响。闭环控制的实质,就是利用负反馈的作用来减小系统的误差,因此闭环控制又称为反馈控制,其示意框图如图 1-5 所示。

反馈控制是一种基本的控制规律,它具有自动修正被控量偏离给定值的作用,因而可以抑制内扰和外扰引起的误差。在组成系统的元器件精度相对不高的条件下,采用反馈控制也可以达到较高的控制精度,因此应用很广。与此同时,反馈的引入使本来是稳定运行的开环系统可能出现强烈的振荡,甚至出现不稳定的现象,这是在采用反馈控制构成的闭环控制系统时必须注意并应当解决的问题。

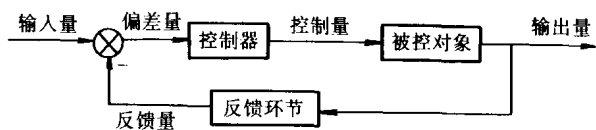


图 1-5 闭环控制系统示意框图

反馈控制是一种基本的控制规律,它具有自动修正被控量偏离给定值的作用,因而可以抑制内扰和外扰引起的误差。在组成系统的元器件精度相对不高的条件下,采用反馈控制也可以达到较高的控制精度,因此应用很广。与此同时,反馈的引入使本来是稳定运行的开环系统可能出现强烈的振荡,甚至出现不稳定的现象,这是在采用反馈控制构成的闭环控制系统时必须注意并应当解决的问题。

图 1-6 所示为直流电动机速度闭环控制系统。图中 TG 为测速发电机,它将电动机 M 的转速  $n$  变换成与其成正比的反馈电压  $U_f$ ,并与给定电压  $U_r$  相比较,得到偏差信号  $\Delta U = U_r -$

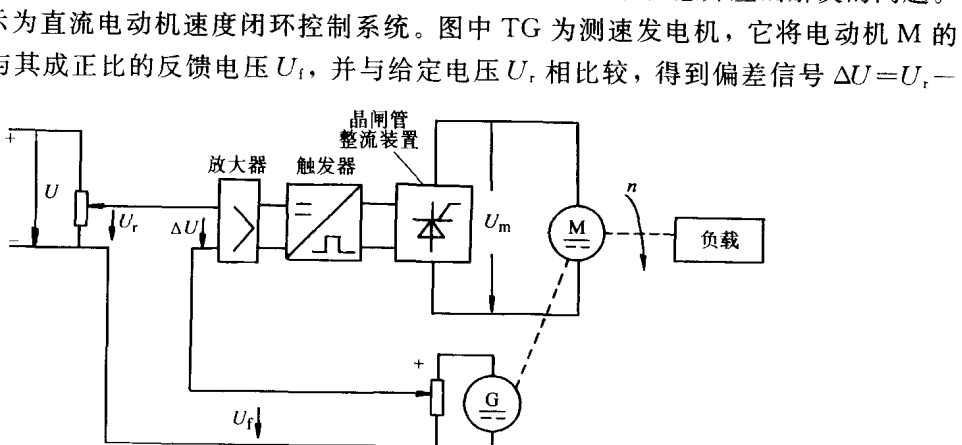


图 1-6 直流电动机速度闭环控制系统示意图

$U_i$ 。  $\Delta U$  经过放大器放大后，送到晶闸管整流装置，晶闸管整流装置输出的控制信号  $U_m$  取决于  $\Delta U$  的大小。在运行时，如果因负载增加使电动机转速下降，反馈电压  $U_f$  也随之下降，在给定电压  $U_r$  不变的情况下，偏差  $\Delta U$  将增大，控制信号  $U_m$  也将增大，使电动机的转速恢复或接近扰动作用前的数值。

在有些情况下，适当地把开环控制与闭环控制结合起来，组成复合控制系统，往往能取得较好的效果。

## 2. 按给定信号的特点分类

(1) 恒值控制系统 当自动控制系统运行时，被控量保持恒定不变，也就是使被控量始终与给定值保持一致，这是生产过程自动控制系统中应用得最多的一种控制系统。例如电动机转速控制系统、空调器温度控制系统、容器的液位控制系统、电力网的频率控制系统等都是恒值控制系统。

(2) 随动控制系统 随动控制系统简称随动系统，它是被控量的给定值随时间任意变化的控制系统。它的作用是使被控量随时跟踪给定值的变化。例如，在锅炉燃烧过程的控制中，要求空气量随时跟踪燃料量的变化而成比例地变化；运动目标的自动跟踪；跟踪卫星的雷达自动控制系统；工业控制中的位置控制系统等都属于随动控制系统。

(3) 程序控制系统 被控量的给定值是一个已知的函数，控制的目的是保证被控量按确定的给定值的时间函数来改变。程序控制系统可以是开环系统，也可以是闭环系统。例如，发电厂汽轮机的起动过程中，要求转速按预先规定的时间函数进行升速。又如热处理中的升温、加温过程控制系统等都属于程序控制系统。

## 3. 按控制系统的传递信号是时间的连续函数还是断续函数分类

(1) 连续(时间)控制系统 当控制系统的各个环节的输入信号和输出信号都是时间的连续函数时，这种系统称为连续控制系统。连续控制系统又常称为模拟量控制系统(相对于数字量控制系统而言)。目前大部分控制系统都是连续控制系统。

(2) 离散(时间)控制系统 在控制系统中有一处或几处的信号是脉冲序列或以数字编码形式出现的系统称为离散控制系统。离散控制系统的主要特点是，在系统中采用采样开关，将连续信号转变为离散信号。如果系统中的连续信号被采样成脉冲序列，这种系统称为脉冲控制系统；如果系统中的连续信号采样后被量化成数字信号，这种系统称为数字控制系统。

## 4. 按控制系统主要元件的特性分类

(1) 线性控制系统 当控制系统各元件的输入输出特性具有线性关系，系统的动态过程可以用线性微分方程来描述时，这种系统称为线性控制系统。线性系统的特点是可以应用叠加原理。

(2) 非线性控制系统 当控制系统中含有一个或一个以上的非线性元件时，系统就要用非线性方程来描述。由非线性方程描述的系统称为非线性控制系统。在控制系统中，典型的非线性特性有饱和非线性、死区非线性、继电器特性非线性等。非线性系统不能应用叠加原理，而且其动态特性与初始条件有关，而线性系统的动态过程则与初始条件无关。

## 5. 其他分类

计算机技术和应用的发展，为现代控制理论在生产过程控制系统中的应用开辟了广阔的空间，控制系统向着更高层次发展，各类新型控制系统层出不穷，如最优控制系统、模糊控制系统、预测控制系统、神经控制系统等。

#### 四、自动控制系统的性能指标

结合生产实际,对于自动控制系统的性能要求可以概括为五个方面:稳定性、快速性、准确性、适应性和经济性。

(1) 稳定性 稳定是任一控制系统正常工作的必要条件,不稳定的系统是不能工作的。所谓稳定,是指系统受到扰动偏离原来的平衡状态后,若去掉扰动,系统仍能恢复到原状态或达到新的平衡状态,否则称系统不稳定。

(2) 快速性 在系统稳定的前提下,希望控制过程(过渡过程)进行得愈快愈好,但如果过渡过程时间太短,可能会使动态偏差过大。合理的设计应兼顾这两方面的要求。

(3) 准确性 准确性要求动态误差(偏差)和稳态误差(偏差)都愈小愈好。当与快速性有矛盾时,应兼顾两方面的要求。

(4) 适应性(或称鲁棒性) 适应性要求自动控制系统能适应生产过程较大范围的工况变化。因为工况变化后被控对象的特性将会发生变化。因此,要求参数也能够有较大范围的调整余地,从而使控制系统仍可获得良好的控制品质。

(5) 经济性 经济性要求控制系统消耗的能量最少,波动最小,成本低,投资省。

### 第二节 自动控制的典型环节

一个控制系统是由许多元器件组合而成的。虽然元器件的结构和作用原理多种多样,但若考察其数学模型,却可以划分成为数不多的几种基本类型,称之为典型环节。这些典型环节是比例环节、非周期环节、积分环节、振荡环节、微分环节和延迟环节。

下面分别介绍这些典型环节。

#### 一、比例环节

比例环节又称放大环节,它的输出量  $y(t)$  与输入量  $u(t)$  之间,在任何时候都是一个固定的比例关系,或者说它的输出量能毫无失真和滞后地以一定比例复现输入量,具体表示为

$$y(t) = Ku(t) \quad (1-1)$$

应用实例有分压电路(输入电压-输出电压)、放大电路(输入电压-输出电压)、测速发电机(转速-电压)、齿轮箱(主动轴转速-从动轴转速)等。

#### 二、非周期环节

非周期环节又称惯性环节,其输入量  $u(t)$  与输出量  $y(t)$  之间的关系是输出量变化落后于输入量的变化。

由图 1-7 可知,当输入量  $u(t)$  发生突变(即输入量为阶跃信号)时,输出量不能突变,只能按指数规律逐渐变化,即两者之间存在时间上的延迟,说明该环节具有惯性。常用时间常数  $T$  来度量惯性,时间常数愈大,惯性愈大。 $K$  为比例系数,在自动控制系统中,比例系数不一定是无量纲的。因为输入与输出不一定是同一量纲的物理量。前述比例环节及以后各环节都有这一特点。

实际物理系统中,惯性环节是经常遇见的,如他励直流发电机(励磁电压-电动势)、RC 滤波器(输入

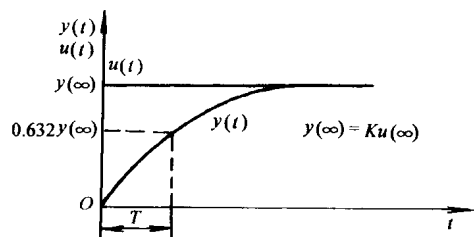


图 1-7 惯性环节的阶跃响应

电压-电容电压)等。

### 三、积分环节

积分环节的输出量是输入量对时间的累积,即输出量是与输入量的积分成正比例。积分时间常数是积分环节的重要参数。

当积分环节的输入  $u(t)$  为单位阶跃信号时,即

$$u(t) = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ 1 & t > 0 \end{cases}$$

响应为

$$y(t) = \frac{1}{T}t \quad (1-2)$$

上式表明只要有一个不变的输入量作用于积分环节,其输出量就会随时间成正比地增长,而不是在某一稳态值上固定下来;只有在输入为零时,输出才固定在某一稳态值。积分环节的阶跃响应如图 1-8 所示,其中  $T$  为积分时间常数。

积分环节的实例也很多,如以电动机轴的转速  $n(t)$  (r/min) 为输入量,以减速齿轮最后带动负载运动时轴的角位移  $\theta$  (rad) 为输出量,此时电动机就是一个积分环节。当转速稳定后,转速与角位移的关系为

$$\theta(t) = \frac{2\pi}{60i}nt$$

式中,  $i$  是减速齿轮的减速比。

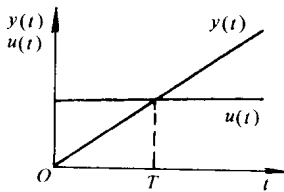


图 1-8 积分环节的阶跃响应

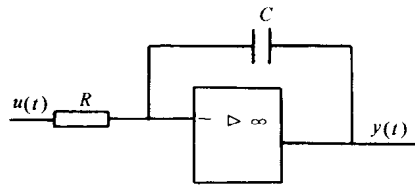


图 1-9 运算放大器做成的积分器

用运算放大器做成的积分器如图 1-9 所示。根据运算放大器的特点可知,当输入信号为单位阶跃信号时

$$y(t) = \frac{1}{RC}t$$

应该指出,这些实际元件或电路用上述理想的积分环节去描述,都是有条件的。如前例仅在不考虑弹性变形、间隙等非线性因素时,才有该式的结果。对于后例,同样没有考虑放大器的非线性及惯性,由于放大器都有饱和特性,故输出电压不可能无限增大,  $y(t)$  与  $u(t)$  的积分关系仅在极限输出值以下时才成立。

### 四、振荡环节

在自动控制系统中,若包含着两种不同形式的储能单元,这两种单元的能量又能相互交换,在能量的储存

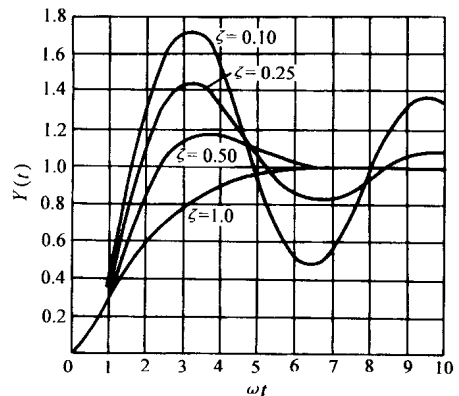


图 1-10 振荡环节的阶跃响应

和交换过程中, 就可能出现振荡而构成振荡环节。振荡环节的单位阶跃响应曲线如图 1-10 所示。

该图说明了输出量经短时间的周期振荡后, 最后趋于稳定。振荡的程度与阻尼比  $\zeta$  有关,  $\zeta$  值越小, 则振荡越强。当  $\zeta=0$  时, 输出量作自持振荡, 这时的振荡频率称为无阻尼自然振荡频率  $\omega$ ; 当  $\zeta \geq 1$  时, 其输出量则为单调上升曲线 (这时已不是振荡环节了)。

$RLC$  振荡电路是振荡环节的典型例子。

### 五、微分环节

微分环节的特点是在暂态过程中, 输出量是输入量的微分。因此可以说该环节可完成微分运算。

理想的微分环节的输出量  $y(t)$  与输入量  $u(t)$  的变化率成正比关系。

$$y(t) \approx T \frac{\Delta u(t)}{\Delta t}$$

式中,  $T$  称为微分时间常数,  $\Delta u(t)$  为  $u(t)$  在一定时间间隔  $\Delta t$  内的变化量。

若对理想微分环节输入单位阶跃函数  $u(t)=1(t)$ , 则其输出的单位阶跃响应为

$$y(t) = T\delta(t) \quad (1-3)$$

这是一个脉冲函数, 脉冲的宽度为零, 面积 (强度) 为  $T$ , 幅度是无穷大。脉冲过后 ( $t > 0$ ), 其幅度立即降为零, 即

$$y(t) = 0(t > 0)$$

在实际物理系统中是得不到这种理想微分环节的。下面介绍一种实际微分环节的例子。

$RC$  串联电路如图 1-11 所示, 以电压  $u(t)$  为输入量, 电阻  $R$  上的压降  $y(t)$  为输出量。这个电路不是纯微分环节, 而是相当于一个微分环节与惯性环节的串联组合, 称为实用微分环节。显然, 当这个电路的  $RC=T \ll 1$  时, 近似得到微分环节。

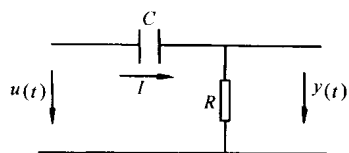


图 1-11  $RC$  串联电路

### 六、延迟环节

延迟环节又称纯滞后环节, 是指在输入量作用后, 一段时间内环节的输出来一直未变, 但等到一定时间后, 输出量却能无偏差地复现输入量 (或按比例复现输入量)。其关系式为

$$y(t) = u(t - \tau) \quad (1-4)$$

式中,  $\tau$  为纯滞后时间。

若纯滞后环节的输入函数  $u(t)$  为阶跃函数, 则输出结果如图 1-12 所示。

在自动控制系统中, 晶闸管整流装置 (控制电压-输出电压) 便是延迟环节的典型例子。

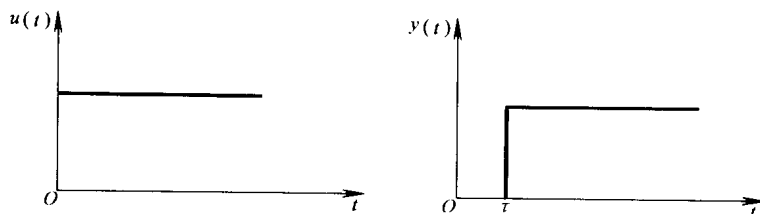


图 1-12 延迟环节的阶跃响应

### 第三节 控制器与控制规律

在控制系统中，对象的特性是固定的，不易改变；测量元件及变送器的特性比较简单，一般也是不可以改变的；执行器可有一定程度的调整，但灵活性不大；主要可以改变参数的就是控制器。系统设置控制器的目的，就是通过它改变整个控制系统的特性，以达到控制目的。

#### 一、控制器简介

控制器的功能示意图如图 1-13 所示，由比较点和控制规律两大部分构成。在控制系统框图中，控制规律方框通常就标为控制器。

对恒值系统而言，控制器的给定值是不变的，因此控制器就只有一个输入变量，即反馈信号；也仅有一个输出变量，即控制信号。

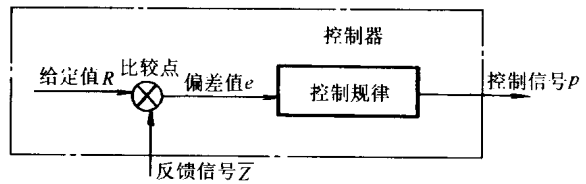


图 1-13 控制器功能示意图

控制器的控制规律种类很多，常见的有比例控制、比例积分控制、比例微分控制和比例积分微分控制四种。具有这四种控制规律

的控制器分别称为比例（P）控制器、比例积分（PI）控制器、比例微分（PD）控制器和比例积分微分（PID）控制器。

比例作用的强度、积分时间和微分时间的数值随着对象的不同而不同，对于具体的对象可以通过调试确定。

#### 二、比例控制规律

控制规律方框的输入信号（即偏差信号） $e$  与输出信号（即控制信号） $p$  之间具有如下比例关系

$$p = K_P e \quad (1-5)$$

式中， $K_P$  是比例放大系数。

比例控制是最简单的一种控制，它的特点是控制作用比较及时，过渡时间短，抗干扰能力强；缺点是控制过渡过程存在偏差。因此，比例控制适用于一些允许有偏差存在的且不太重要的场合。几乎所有的控制规律都包括比例控制。

#### 三、比例积分控制规律

控制规律方框的输入信号  $e$  与输出信号  $p$  之间具有比例关系和积分关系

$$p = K_P e + \frac{1}{T_I} p_I \quad (1-6)$$

式中， $K_P$  还是比例放大系数； $T_I$  是积分时间； $p_I$  是积分控制规律（积分项）。

比例积分控制器比例控制器多了积分项。由于这个积分项的存在，只要偏差  $e$  不为零，控制器的输出就不断地增加或减小，直至偏差为零。因此，带有积分作用的控制系统，其过渡过程偏差为零，这是积分控制作用的最突出的优点。但加上积分作用后，系统的稳定性有所下降，这是精确性与稳定性之间的矛盾。

由于比例作用控制及时、反应快，而积分作用可以克服偏差，这两者的结合是当前应用最普遍的控制规律。它适合于调节通道滞后小、负荷变化小、不允许有偏差的参数，如流量和压力等。



#### 四、比例微分控制规律

输入信号  $e$  与输出信号  $p$  之间具有比例关系和微分关系

$$p = K_p e + T_D p_D \quad (1-7)$$

式中,  $T_D$  是微分时间;  $p_D$  是微分控制规律 (微分项)。

引入微分作用以后, 当  $e$  有变化时, 微分项起作用; 当  $e$  保持不变时, 微分项为零, 对系统不起作用。这可以克服过程的容量滞后, 加快控制作用, 增加系统的稳定性, 减小偏差。它可用于容量滞后较大的场合。

#### 五、比例积分微分控制规律

输入信号  $e$  与输出信号  $p$  之间同时具有比例、积分和微分关系

$$p = K_p e + \frac{1}{T_I} p_I + T_D p_D \quad (1-8)$$

比例积分微分规律综合了三种基本控制规律的优点, 适当调整  $K_P$ 、 $T_I$  和  $T_D$ , 可以获得相当好的控制系统过渡过程及很高的控制精度。它适用于容量滞后大、负荷变化大且控制精度要求高的场合。

## 小 结

本章介绍了自动控制的基本概念, 着重介绍了反馈控制原理。负反馈控制的原理是检测偏差, 抑制或消除偏差。本章还通过分析开、闭环控制系统的工作原理和框图, 介绍了分析控制系统的方法, 指出了各组成环节的作用, 同时介绍了自动控制理论的一些常用术语。对自动控制系统的要求及分类方法作了简单介绍。简述了控制系统典型环节的输入-输出特性、常见控制规律及常见控制器。

## 习 题

1. 试举几个开环和闭环自动控制系统的例子, 画出它们的框图, 并说明它们的工作原理。
2. 什么叫闭环控制系统? 试比较开环与闭环系统各自的优缺点。
3. 图 1-14 所示是电炉恒温自动控制系统。要求 (1) 画出系统的结构图; (2) 当电源电压下降时, 试述系统的调节过程; (3) 系统为什么能维持温度不变?

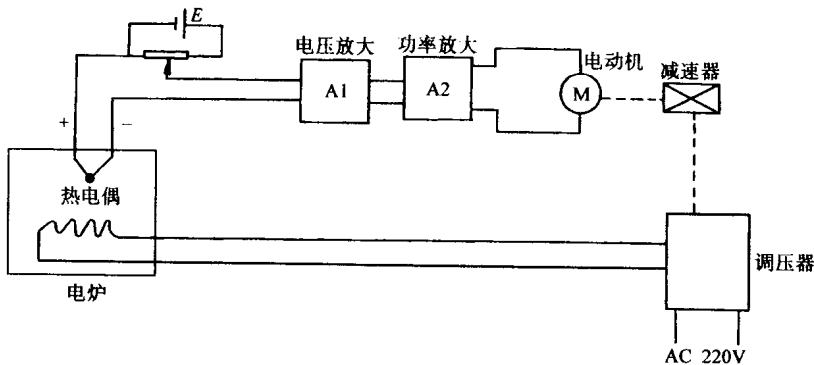


图 1-14 电炉恒温自动控制系统

4. 试举出比例环节、惯性环节的例子各一个。
5. 控制器的常用控制规律有哪些? 各有什么特点? 适合于什么场合?