

高职高专“十五”规划教材

GAOZHI  
GAOZHUAN  
SHIWU  
GUIHUA JIAOCAI

# 机械工程控制基础

蒋丽 主编



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

高职高专“十五”规划教材

GAOZHI  
GAOZHUAN  
SHIWU  
GUIHUA JIAOCAI

# 机械工程控制基础

---

主 编 蒋 丽  
编 写 李 岩 殷洪军  
郭永刚 王仲民  
主 审 杜太行



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

## 内 容 提 要

本书着重讨论了经典控制理论中线性连续系统的基本概念、基本原理和基本方法。内容包括：控制系统的组成，性能指标；控制系统的数学模型；控制系统的时域分析法；根轨迹分析法；频率特性分析法；控制系统的校正；以及现代控制理论的基本概念，基本理论的初步介绍。附录中提供了使用 MATLAB 语言编制的计算机仿真实验程序，以新的实验方法和实验手段配合本课程的教学实验环节。本书不仅适用于高等工科院校机械类以及其他非电类专业的学生学习，同时也可作为成人教育和继续教育的教材。

## 图书在版编目 (CIP) 数据

机械工程控制基础/蒋丽主编. —北京：中国电力出版社，2005

高职高专“十五”规划教材

ISBN 7-5083-3020-X

I. 机... II. 蒋... III. 机械工程—控制系统—高等学校：技术学校—教材 IV. TH

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 004973 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://jc.cepp.com.cn>)

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

\*

2005 年 3 月第一版 2005 年 3 月北京第一次印刷  
787 毫米 × 1092 毫米 16 开本 13.25 印张 305 千字  
印数 0001—3000 册 定价 19.80 元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换)

# 序

随着新世纪的到来,我国进入全面建设小康社会、加快推进社会主义现代化的新的发展阶段。新世纪新阶段的新任务,对我国高等职业教育提出了新要求。我国加入世界贸易组织和经济全球化迅速发展的新形势,也要求高等职业教育必须开创新局面。

高职高专教材建设是高等职业教育的重要组成部分,是一项极具重要意义的基础性工作,对高等职业教育培养目标的实现起着举足轻重的作用。为贯彻落实《国务院关于大力推进职业教育改革与发展的决定》精神,进一步推动高等职业教育的发展,加强高职高专教材建设,根据教育部关于通过多层次的教材建设,逐步建立起多学科、多类型、多层次、多品种系列配套的教材体系的精神,中国电力教育协会会同中国高等职业技术教育研究会和中国电力出版社,组织有关专家对高职高专“十五”教材规划工作进行研究,在广泛征求各方面意见的基础上,制订了反映电力及相关行业特点、体现高等职业教育特色的高职高专“十五”教材规划。同时,为适应电力体制改革和电力高等职业教育发展的需要,中国电力教育协会筹备组建全国电力高等职业教育教材建设指导委员会,以便更好地推动新世纪电力高职高专教材的研究、规划与开发。

高职高专“十五”规划教材紧紧围绕培养高等技术应用性专门人才开展编写工作。基础课程教材注重体现以应用为目的,以必需、够用为度,以讲清概念、强化应用为教学重点;专业课程教材着重加强针对性和实用性。同时,“十五”规划教材不仅注重内容和体系的改革,还注重方法和手段的改革,以满足科技发展和生产实际的需求。此外,高职高专“十五”规划教材还着力推动高等职业教育人才培养模式改革,促进高等职业教育协调发展。相信通过我们的不断努力,一批内容新、体系新、方法新、手段新,在内容质量上和出版质量上有突破的高水平高职高专教材,很快就能陆续推出,力争尽快形成一纲多本、优化配套,适用于不同地区、不同学校、特色鲜明的高职高专教育教材体系。

在高职高专“十五”教材规划的组织实施过程中,得到了教育部、国家电力公司、中国电力企业联合会、中国高等职业技术教育研究会、中国电力出版社、有关院校和广大教师的大力支持,在此一并表示衷心的感谢。

教材建设是一项长期而艰巨的任务,不可能一蹴而就,需要不断完善。因此,在教材的使用过程中,请大家随时提出宝贵的意见和建议,以便今后修订或增补。(联系方式:100761 北京市宣武区白广路二条1号综合楼9层 中国电力教育协会教材建设办公室 010-63416237)

中国电力教育协会

# 前 言

在机电一体化技术迅猛发展的进程中,自动控制技术发挥着越来越重要的作用。对于机械类和其他非电类专业的高等院校学生来说,学习掌握自动控制技术的基本概念、基本原理和基本方法并应用于工程实践,有助于学生提高辩证思维能力、分析问题和解决问题的能力。

本书立足于“高职、高专”的人才培养目标——技术应用型人才的培养,着重于基础知识及应用能力的培养,压缩了数理论证和推导,力求合理组织教材内容,适应专科教学。

本书着重讨论了经典控制理论中线性连续系统的基本概念、基本原理和基本方法。内容包括:控制系统的组成,性能指标;控制系统的数学模型;控制系统的时域分析法;根轨迹分析法;频率特性分析法;控制系统的校正;以及现代控制理论的基本概念,基本理论的初步介绍。本书对数学基础拉普拉斯变换及其应用作了简要介绍,以满足不同需要。附录中提供了使用 MATLAB 语言编制的计算机仿真实验程序,以新的实验方法和实验手段配合本课程的教学实验环节。

本书不仅适用于高等工科院校机械类以及其他非电类专业的学生学习,同时也可作为成人教育和继续教育的教材。

本书由天津工程师范学院蒋丽任主编,河北工业大学博士生导师杜太行教授任主审。全书包括 9 个部分,其中第 1、2 章和附录 A 由蒋丽编写,第 3 章由天津工业大学李岩编写,第 5 章由天津工业大学殷洪军编写,第 6 章由核工业理化工程研究院郭永刚编写,第 4、7 章由天津工程师范学院王仲民编写,附录 B 由天津工程师范学院李丽霞编写,全书由蒋丽定稿。

由于作者水平有限,在编写过程中如有不当之处,敬请读者批评指正。

作 者

2004 年 5 月

# 目 录

## 序 前言

|                          |    |
|--------------------------|----|
| 第 1 章 概述 .....           | 1  |
| 1.1 自动控制和自动控制系统 .....    | 1  |
| 1.2 控制系统的组成和基本环节 .....   | 5  |
| 1.3 控制系统的分类及基本要求 .....   | 6  |
| 1.4 自动控制理论发展简述 .....     | 8  |
| 小结 .....                 | 9  |
| 习题 .....                 | 9  |
| 第 2 章 控制系统的数学模型 .....    | 11 |
| 2.1 控制系统的微分方程 .....      | 11 |
| 2.2 拉普拉斯变换及其应用 .....     | 16 |
| 2.3 传递函数 .....           | 17 |
| 2.4 系统的动态结构图及其等效变换 ..... | 26 |
| 2.5 反馈控制系统的传递函数 .....    | 35 |
| 小结 .....                 | 37 |
| 习题 .....                 | 37 |
| 第 3 章 控制系统的时域分析法 .....   | 41 |
| 3.1 控制系统的时域性能指标 .....    | 41 |
| 3.2 一阶系统的时域分析 .....      | 46 |
| 3.3 二阶系统的时域分析 .....      | 49 |
| 3.4 高阶系统的时域响应 .....      | 64 |
| 3.5 控制系统的稳定性分析 .....     | 65 |
| 3.6 控制系统的稳态误差分析 .....    | 72 |
| 小结 .....                 | 81 |
| 习题 .....                 | 82 |
| 第 4 章 根轨迹法 .....         | 84 |
| 4.1 根轨迹法的基本概念 .....      | 84 |

|                                  |            |
|----------------------------------|------------|
| 4.2 绘制根轨迹的基本法则 .....             | 87         |
| 4.3 控制系统的根轨迹法分析 .....            | 94         |
| 小结 .....                         | 99         |
| 习题 .....                         | 99         |
| <b>第 5 章 频率特性法 .....</b>         | <b>101</b> |
| 5.1 频率特性 .....                   | 101        |
| 5.2 典型环节的频率特性 .....              | 106        |
| 5.3 控制系统的开环频率特性 .....            | 116        |
| 5.4 控制系统的频域稳定性分析 .....           | 122        |
| 5.5 用开环频率特性分析系统的动态性能 .....       | 128        |
| 5.6 用闭环频率特性分析系统的动态性能 .....       | 134        |
| 小结 .....                         | 137        |
| 习题 .....                         | 139        |
| <b>第 6 章 控制系统的校正 .....</b>       | <b>142</b> |
| 6.1 控制系统校正的一般概念 .....            | 142        |
| 6.2 常用校正装置及其特性 .....             | 146        |
| 6.3 串联校正 .....                   | 152        |
| 6.4 并联校正 .....                   | 158        |
| 小结 .....                         | 161        |
| 习题 .....                         | 162        |
| <b>第 7 章 现代控制理论初步 .....</b>      | <b>165</b> |
| 7.1 状态空间法的基本概念 .....             | 165        |
| 7.2 状态方程的导出与求解 .....             | 168        |
| 7.3 状态能控性和能观性 .....              | 172        |
| 7.4 稳定性问题 .....                  | 175        |
| 7.5 最优控制理论 .....                 | 176        |
| 小结 .....                         | 177        |
| 习题 .....                         | 177        |
| <b>附录 .....</b>                  | <b>179</b> |
| <b>附录 A 常用函数的拉普拉斯变换对照表 .....</b> | <b>179</b> |

|                                           |            |
|-------------------------------------------|------------|
| <b>附录 B 用 MATLAB 语言编制的计算机仿真实验程序 .....</b> | <b>180</b> |
| B.1 MATLAB 入门教程 .....                     | 180        |
| B.2 控制系统 SIMULINK 仿真实验 .....              | 184        |
| B.3 控制系统时域分析法 .....                       | 188        |
| B.4 根轨迹法与系统稳定性分析 .....                    | 194        |
| B.5 控制系统的频域分析 .....                       | 199        |
| <b>参考文献 .....</b>                         | <b>204</b> |



# 第1章

## 概 述

机械制造业是重要的基础工业，是国民经济发展的先导部门。现代制造已进入到机械电子、计算机和自动控制等技术有机结合的机电一体化阶段。制造业要与机电一体化的发展进程相适应，必面临许多新的课题，需要更广泛而深入地引入控制理论，应用工程控制的基础知识加以研究、分析，努力揭示其本质，以更有效地控制或改善其性能。

机械工程控制基础主要阐述的是自动控制技术的原理和方法，并应用它们来研究和解决工程技术领域中有关的实际问题。自动控制原理的研究对象是自动控制系统。本章首先介绍自动控制与自动控制系统的基本概念以及自动控制理论的发展概况。

### 1.1 自动控制和自动控制系统

在科学技术飞速发展的今天，无论是在宇宙飞船、导弹制导的尖端技术领域，还是在机器制造业、工业过程控制中，以及人们的日常生活中，自动控制技术所起的作用越来越重要。例如，日常生活中恒温工作室的室内温度不受室外温度高低的影响而基本保持不变；载人电梯为保证乘梯人的安全平稳，无论人多人少都应按预定的规律进行升速、匀速及降速的平稳运行。而室内温度的基本恒定和电梯运行速度的按规律变化都是应用了自动控制原理进行自动调节的结果；实现调温或调速控制的所有环节则构成了相应的自动控制系统。

#### 1.1.1 自动控制

所谓自动控制，是指在没有人的直接参与下，通过控制装置来操纵机器设备或工艺过程，使被控制的物理量保持恒定，或者按照希望的规律变化，达到控制的目的。

在自动控制系统中，被控制的机器设备或工艺过程称为受控对象；被控制的物理量称为被控量或系统的输出量；决定被控量的物理量或希望的规律（希望值）称为控制量或系统的给定量；影响被控量达到希望值的所有因素称为扰动，按其来源分为内部扰动和外部扰动；给定量和扰动都是系统的输入量。

自动控制的任務就是尽量克服扰动的影响，使系统按照给定量所预定的规律运行，即维持系统输出量与给定量之间的对应关系。

#### 1.1.2 自动控制系统的基本控制方式

自动控制系统的形式是多种多样的，某一个具体系统所应采取的控制手段要根据其用途

和目的而定。控制系统中最基本的控制方式，是按其结构来分的开环控制和闭环控制两种控制方式。

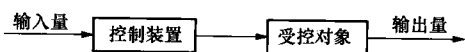


图 1-1 开环控制系统

### 一、开环控制

开环控制是最简单的一种控制方式，见图 1-1。它的特点是，控制系统的控制量与被控量之间只有前向通路（从输入端到输出端的单方向通路），而无反向通路。也就是说，系统中只有输入量对输出量产生控制作用，而输出量不参与系统的控制，控制作用的传递路径不是闭合的。开环控制方式按照输入信号的不同，又可分为按给定控制和按扰动补偿控制两种形式。

#### 1. 按给定控制

图 1-2 是一个简单的按给定进行控制的电动机转速控制系统。系统中，受控对象为电动机，是电枢控制的直流电动机，控制装置为电位器、功率放大器，为电动机提供所需要的电枢电压。当调节电位器滑臂位置，即改变给定电压  $U_g$  时，也就是改变了功率放大器的输入电压，功率放大器的输出电压即电动机电枢电压  $U_d$  也随之改变，最终改变了电动机的转速。

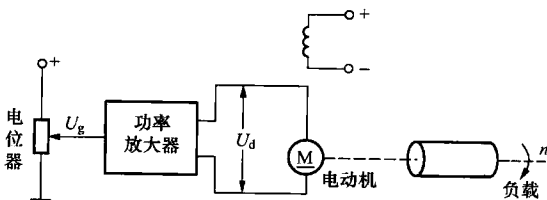


图 1-2 电动机转速控制系统

上面所述的电动机转速的控制过程，可用方框图来表示，见图 1-3。

在这里简要介绍下方框图。

把组成一个系统的各个部分都用一个方框来表示，并注上代表该部分的相应文字或代号，然后根据各组成部分之间的信息传递关系，用有向线段把各个方框依次连接起来，并注明各方框之间相应的信息，就得到了整个系统的方框图。

方框图是人们应用控制理论“信息传递”的重要观点，由控制系统原理图抽象而来的，是我们进行自控系统性能分析的最常用的手段。有了表明系统各部分及其连接的整个系统的方框图，就可以通过对各部分的功能进行分析而取得各部分的数学模型，从而得到整个系统的数学模型以便进行深入的定性、定量分析。所以方框图在自控系统性能分析过程中是不可缺少的。

从图 1-3 方框图可以很清晰地看到图 1-2 所示的电动机转速控制系统的控制作用施加的单一性（控制作用仅由系统的输入量决定）和控制作用传递的单向性（控制信息的传递是由输入端沿箭头传向输出端，控制作用路径不是闭合的），因而该系统是典型的开环控制方式。

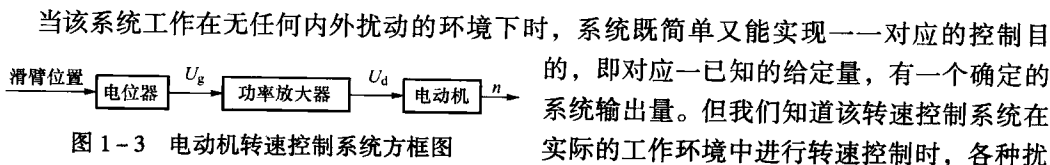


图 1-3 电动机转速控制系统方框图

当该系统工作在任何内外扰动的环境下时，系统既简单又能实现一一对应的控制目的，即对应一已知的给定量，有一个确定的系统输出量。但我们知道该转速控制系统在实际的工作环境中进行转速控制时，各种扰

动对系统的影响是随时存在的,只不过或大或小。当控制系统的给定量维持恒定,系统由于受到电网电压的波动,或负载的变化等扰动量的影响,就会引起输出量  $n$  的变化,而偏离原来的希望输出量。由于该系统的单向控制性,偏差不能反馈回来影响控制量,所以系统的抗干扰能力差。当干扰信号引起的偏差过大时,系统不能满足控制精度的要求。另外,组成该开环转速控制系统的所有元件的性能好坏也都会直接影响系统的控制精度的高低。

开环控制结构简单、调整方便、成本低、不会振荡,系统总能稳定工作,但抗扰能力差,在一些控制精度要求不高、扰动作用不大的场合,仍有较广泛的应用。如日常生活中所使用的普通的洗衣机、普通电烤箱、交通红绿灯及工业上使用的简易数控机床等。

## 2. 按扰动控制

为克服开环控制抗扰能力差的缺点,提高控制精度,在一些扰动可以预计、可以检测出的场合,可进行按扰动的补偿控制。其工作原理是,根据测得的扰动量的大小,对系统产生一种适当的补偿和修正,以减小或抵消扰动对输出量的影响。这种控制方式也称为顺馈控制。

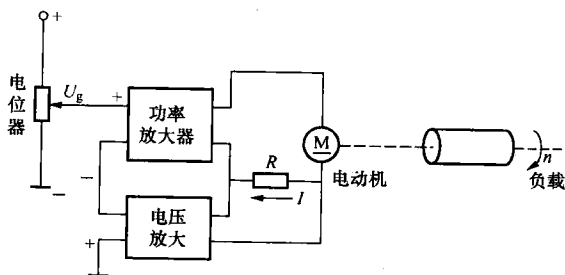


图 1-4 按扰动控制电动机转速控制系统

前面的转速开环控制系统,负载的

变化是可预计到的,也是可以测出来的。因此,可采取如下的补偿措施,见图 1-4。

该系统在运行时,当  $U_E$  一定时,系统的转速会由于负载的增大而降低,此时,为了克服负载的增大,电枢回路的电流将上升,测出由于负载变化而引起的电流的变化,按电流的变化大小来对系统施加一个附加的控制作用,补偿由于负载增加而引起的转速下降。因而称该控制方式为按扰动补偿控制。上述

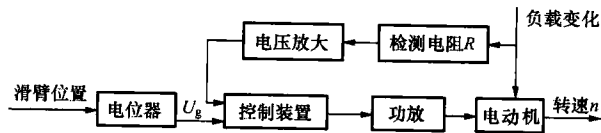


图 1-5 按扰动控制转速系统方框图

控制过程用方框图 1-5 表示。

由图 1-5 可看出控制作用的传递过程:该系统的输入量与扰动共同作用,使系统的输出量基本不受扰动的影响。可以看到,系统信号传递的方向仍然是单向的,输出量仍不能参与系统的控制,所以该系统仍属于开环控制。扰动补偿的抗扰性能较好,控制精度也较高,但它只能补偿可预计、可测得的扰动,对未知扰动则无能为力。

## 二、闭环控制

图 1-6 是闭环控制系统的典型方框图。

闭环控制系统不仅有一条从输入端→输出端的前向通路,还有一条从输出端→输入端的反馈通路;参与系统控制的不只是系统的输入量,还有输出量,控制作用的传递路径是闭合



图 1-6 闭环控制系统

元件变送返回到系统的输入端，并和系统的输入量作比较的过程。输入量与反馈量相减则称该反馈为负反馈，称输入量与反馈量之差为偏差信号；输入量与反馈量相加则称该反馈为正反馈。控制系统一般采用负反馈工作方式，因为只有负反馈才能减小偏差量，使系统最终能稳定工作。

要说明的是，根据自控理论“信息传递”观点，图 1-6 方框图中输出量的引出不反映能量分流与否，只表明信号的传递路径。

图 1-7 所示为采用转速负反馈的直流电动机闭环调速系统。该系统是在前面所述的按给定控制的开环调速系统的基础上增加一测速负反馈回路来检测输出量  $n$ ，并给出与  $n$  成正比的负反馈电压，去与给定电压信号作比较，以比较后所得到的偏差信号  $e = U_g - U_f$  控制转速  $n$ 。把上述原理图用方框图表示，见图 1-8。

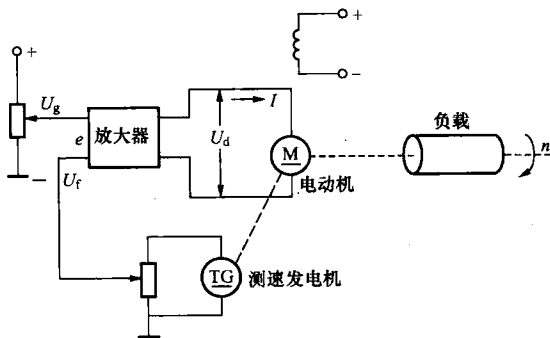


图 1-7 直流电动机闭环调速系统

该闭环系统对应于一个电位器滑臂的给定位置，即一定的  $U_g$ ；一个确定的测速反馈回路，即对应有一个输出转速值  $n$  和偏差量  $e$ 。当系统受到干扰时，如负载增大，即  $I \uparrow \rightarrow$  转速  $n \downarrow \rightarrow$  测速反馈回路的  $U_f \downarrow \rightarrow$  偏差量  $e \uparrow \rightarrow$  放大器输出  $U_d \uparrow \rightarrow n \uparrow$  恢复或接近原状态  $\rightarrow n$  偏差减小。

对于该系统可能受到的多种扰动如电网电压的波动、负载的变化及除测量装置以外的系统其他部分的元件参数的变化等可预见的、不可预见的扰动，最终都将导致输出量的变化，通过闭环反馈作用，将通过偏差量的变化来对闭环系统进行调整控制，以使系统的输出量  $n$  基本维持恒定。

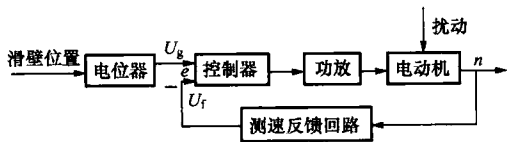


图 1-8 直流电动机闭环调速系统方框图

从上述闭环系统的调节过程可以看出，闭环控制系统能同时抵制多种扰动的影响，且对系统本身的元件参数也不敏感，因而有较高的控制精度和较强的抗扰能力，在对控制精度有较高要求的场合得到了广泛的应用。就目前得到广泛应用的数控机床的控制来说，在其各进给轴和主轴的伺服控制中，就采用了多个闭环反馈控制对位置信号、速度信号等被控量进行

自动调节,以使数控机床的加工精度满足设计要求。但闭环控制系统元件相对开环要多,成本高,功率大,调试工作量也较大。闭环控制系统若设计调试不当,易产生振荡甚至不能正常工作。自控原理讨论的主要是闭环控制系统。本书主要分析讨论如何使负反馈闭环控制系统能在稳定工作的前提下有满足实际需求的系统性能指标。

另外,还可采取复合控制,以达到更高的精度和快速性。

前面分析了在闭环控制中,无论何种干扰出现都要最终反映到输出量发生变化,再经反馈调整,使输出恢复或接近原状态。但在如航空航天、军事武器等高精度控制系统中,不允许输出有较大的波动,即使是系统的输出量最终调整恢复至原状态,这个控制过程在精度和快速性上也不能满足要求。利用开环控制系统的按扰动补偿控制,对一些可预计、可测量且影响严重的扰动进行补偿控制,一旦扰动出现时,未等扰动使输出量变化,已经将扰动测出并施加了补偿,快速克服了扰动的影响。所以在要求更高的场合,可采用闭环控制加按扰动补偿控制的复合控制方式。

## 1.2 控制系统的组成和基本环节

在以反馈控制为最基本的控制方式之一的形形色色的自控系统中,概括起来一般都以如下基本环节组成:

(1) 被控对象 自控系统需要进行控制的机器设备或生产过程。被控对象内要求实现自动控制的物理量称为被控量或系统的输出量。如前面所述转速控制系统中的电动机即为被控对象,电动机的转速即为系统的输出量。闭环控制系统的任务就是控制系统的输出量的变化规律以满足生产实际的要求。

(2) 给定环节 是设定被控制量的参考输入或给定值的环节,可以是电位器等模拟装置,也可以是计算机等高精度数字给定装置。

(3) 检测装置 又称传感器,用于检测受控对象的输出量,并将其转换为与给定量相同的物理量。例如用测速发电机回路检测电动机的转速并将其转换为相应的电信号作为反馈量送到控制器。检测装置的精度直接影响控制系统的控制精度,是构成自动控制系统的关键元件。

(4) 比较环节 将所检测到的被控量的反馈量与给定值进行代数运算,从而确定偏差信号,起信号的综合作用。该环节通常用符号“ $\otimes$ ”表示,其综合作用符号  $\frac{1}{(-)} \otimes \frac{3}{(+)} \uparrow 2$  中,箭头代表信息的作用方向,符号还表明1量与2量进行代数相减(-)或相加(+)后得到偏差量3。

(5) 放大环节 将微弱的偏差信号进行电压放大和功率放大。

(6) 执行机构 根据放大后的偏差信号直接对被控对象执行控制作用,使被控量达到所要求的数值。

(7) 校正环节 参数或结构便于调整的附加装置,用以改善系统的性能。有串联校正和并联校正等形式。

上述各环节构成图1-9的典型的闭环控制系统,它们各司其职,共同完成闭环控制任

务。各环节信号传递是有方向的，总是前一环节影响后一环节。

在闭环控制系统中，系统输出量的反馈称为主反馈。为改善系统中某些环节的特性而在部分环节之间附加的中间量的反馈称为局部反馈。

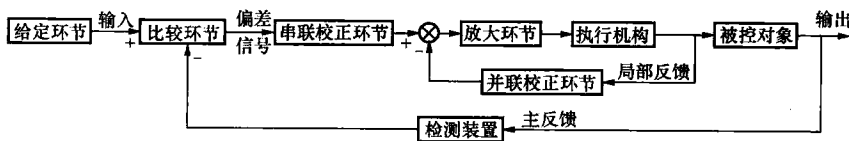


图 1-9 典型闭环控制系统方框图

## 1.3 控制系统的分类及基本要求

### 1.3.1 自动控制系统的分类

自动控制系统分类的方法很多，按照不同的分类方法可以把系统分成不同的类型。实际系统为了全面反映自动控制系统的特性，可能是几种方式的组合应用。

前面介绍的开环控制与闭环控制，是从控制信息传递路径上划分的。其他几种主要分类方式分别为

(1) 按系统输出量与输入量之间的关系，系统可分为线性系统和非线性系统。

系统都是由元器件构成的。如果组成系统的所有元器件均为线性元器件（即其输入/输出特性曲线为直线），则该系统为线性系统；如果组成系统的元器件中有一个为非线性元器件，则该系统为非线性系统。

对线性系统，我们就可以利用叠加原理的齐次性和叠加性方便地对系统进行分析。

所谓叠加性即为：当几个输入信号同时作用在系统上时，产生的总输出量等于各个输入信号单独作用时系统的输出量之和。齐次性即为：当系统的输入量增大或缩小多少倍时，系统的输出量也增大或缩小相同的倍数。

线性系统的数学模型为线性微分方程（对连续系统而言）或差分方程（对离散系统而言），方程中的各项系数都是不随方程变量的变化而改变的。

线性系统中，如果系统微分方程的系数既不随变量变化，也不随时间变化，为一常数，则该类系统为线性定常系统，系统的输出响应与施加输入的时间无关，只要输入信号一致，所得响应就必然一致；如果系统微分方程的系数是时间的函数，则该类系统为线性时变系统，不同时刻对系统施加相同的输入，所得到的响应将不同，系统的分析较复杂。线性定常系统的分析、讨论是我们阐述的重点。

(2) 按系统中信号对时间的关系，系统可分为连续系统和离散系统。

如果系统各部分的信号都是时间的连续函数，也即都为模拟量，则这种系统称为连续系统。如果系统的一处或几处的信号为时间的离散函数，如为脉冲序列或数码信号，则这种系统称为离散系统。通常，对于离散信号取脉冲形式的离散系统，又称为脉冲控制系统；对于

离散信号以数码形式传递的离散系统, 又称为采样数字控制系统。由于当前计算机产业的快速发展, 采样数字控制系统的应用越来越广泛, 大有取代传统的模拟量闭环控制系统的趋势。

(3) 按输入量的变化规律, 系统可分为恒值系统、程序控制系统和随动系统。

如果系统的给定量是一恒定值, 如恒温、恒速、恒压等自动控制系统, 系统的控制任务就是克服扰动, 使系统的输出量也维持恒定, 这类系统称为恒值系统, 是生产中应用最多的闭环控制系统。

如果系统的给定量是按一定的时间函数变化的, 同时也要求被控量按同样的规律变化, 则这类系统称为程序控制系统, 如数控机床的伺服运动控制等。

如果系统的给定量是按照事先未知的时间函数变化, 并要求被控量准确、快速地跟随给定量变化, 则这类系统称为随动系统, 如数控机床仿形刀架随动系统、火炮自动跟踪系统等。

自动控制系统除了上述几种分类方法外, 还可分为: 单变量(单输入单输出)系统和多变量(多输入多输出)系统; 机械系统、液压系统、气动系统及综合控制系统等。

本书的讨论着重以单变量、连续的线性定常系统为例, 阐明自动控制系统的基本原理。

### 1.3.2 对自动控制系统的基本要求

不同组成、不同目的的各类自动控制系统的共同要求就是希望被控量始终能与给定值保持一致。但是, 由于系统中各组成部分惯性(如机械惯性、电磁惯性、热惯性等)的存在、能源功率的限制等因素的影响, 系统中的各种变量值(如加速度、速度、位置、电压、温度等)难以瞬时变化。所以, 当系统给定发生变化时, 被控量不能立即突变等于给定值, 而需要经历一段时间的过渡过程, 即动态过程。

由于系统中控制装置以及各种功能部件的特征参数的匹配各不相同, 系统所表现出来的动态过程的快速性和达到新稳态时的准确性等性能差异很大, 当系统的各个参数分配不当时, 系统甚至不能稳定工作。因此工程上对自动控制系统提出了关于系统的稳定性、快速性和准确性三个方面的基本要求。

#### 1. 稳定性

所谓稳定性是指系统受到外加信号(给定值或扰动)作用而偏离相对稳定的平衡状态后, 系统动态过程的振荡倾向和重新恢复平衡的能力。我们把被控量处于相对稳定的平衡状态称为静态或稳态。

当系统在被施加新的给定或受到扰动后, 如果经过一段时间的动态过程, 由于反馈的作用, 通过系统内部的自动调节, 被控量随时间收敛而最终可达到一新的平衡状态或恢复至原来的平衡状态, 则系统是稳定的, 见图1-10; 如果被控量是发散的而失去平衡, 则系统是不稳定的, 见图1-11。

稳定是系统正常运行的前提, 不稳定的系统无法正常工作, 甚至会毁坏设备, 造成损失。对稳定的系统来说, 因工作目的不同, 对其在动态过程中振荡的大小即动态平衡性也有不同的要求。

## 2. 快速性

快速性是指系统动态调整过程的长短,即系统受到外信号作用后,重新达到稳定值的快慢程度。系统动态平稳性和输出响应的快速性反映了系统动态过渡过程中的性能,故称为系统的动态品质或动态性能。

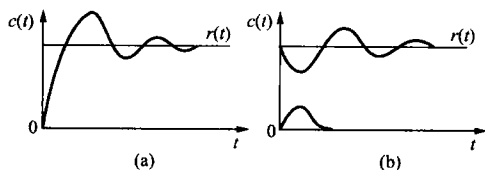


图 1-10 稳定系统的动态过程

(a) 施加新给定; (b) 受到扰动

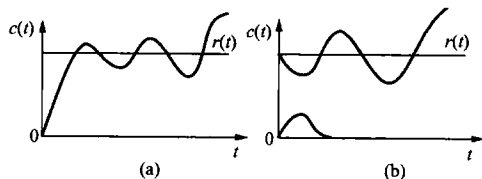


图 1-11 不稳定系统的动态过程

(a) 施加新给定; (b) 受到扰动

## 3. 准确性

准确性是指动态调整过程结束后实际输出值与希望输出值之间的偏差,即稳态精度,也可称为系统的稳态品质或稳态性能。

系统进入稳态后,输出响应能否准确跟踪给定,决定了系统是稳态误差为零的无差系统,还是存在稳态误差的有差系统,误差值有多大,能否满足控制的要求。

不同的系统对稳、快、准这三方面的要求各有侧重,如恒值系统对稳态精度的要求较严格,而随动系统对快速性要求较高。同一系统的稳、快、准这三方面的性能是相互制约的。改善稳定性,可能导致控制过程反应迟缓,精度降低;提高快速性,可能产生强烈振荡。

如何根据控制目的的不同,合理设定这三方面的性能指标,使它们有所侧重并能相互协调,正确分析和设计自动控制系统,以达到控制目标,是控制理论讨论的重要内容。

## 1.4 自动控制理论发展简述

自动控制理论来源于人们对生产实践的总结和理论领域的深入研究,又反过来作为工程技术设计和应用的理论依据。由于工业技术飞速发展的需要以及其它相关学科的发展促进,自动控制理论得以快速发展并且仍在无止境地延伸发展之中。

自动控制理论的一个最根本的思想就是反馈控制,人们利用负反馈控制进行的实践可以追溯到古代。我国古代人使用的弓箭、希腊人应用于水钟和油灯中的浮子调节器等就是负反馈原理的早期应用实例。1788 年瓦特发明了离心调速器对蒸汽机进行速度控制,被认为是工业上成功利用反馈原理构成自动控制系统的先例。麦克斯韦、维纳等人对反馈系统在理论上进行了不断深入的研究,自动控制理论在 20 世纪 40 年代形成了完整的以系统的传递函数作为数学模型,以时域法、频率法和根轨迹法为设计方法的经典控制理论,主要研究单输入、单输出的线性定常系统的分析和设计问题。

在 20 世纪 60 年代,由于空间技术发展的需要和计算机技术的日趋成熟,自动控制理论又逐渐发展形成了以状态空间法为基础的现代控制理论,主要研究多输入、多输出控制系统



的最优控制问题。

从20世纪80年代起,自动控制理论又在向模仿人类智能活动的智能控制理论研究阶段发展。

从自动控制的发展历史可见,自动控制技术的应用促进了社会经济的发展,而客观社会的需要又给自动控制理论的发展赋以动力。

应当指出,现代控制理论并不能完全取代经典控制理论。经典控制理论是自动控制理论中最基本、最重要的内容,仍然是工程实践中采用最多的、有效的分析方法。本书着重介绍经典控制理论的基本内容,并对现代控制理论作了初步的介绍。

## 小 结

1. 自动控制系统的基本控制方式有开环控制和闭环控制两种。开环控制系统结构简单、稳定性好,但抗扰能力差,控制精度较低。闭环控制系统具有反馈环节,抗扰能力强,控制精度高,但闭环系统的稳定性变差,甚至不能正常工作。

2. 系统的方框图直观地表明了系统的各部分及其连接,是进行自动控制系统性能分析的有力工具。

3. 自动控制系统通常由被控对象、给定环节、检测装置、比较环节、放大环节、执行机构和校正环节等部分组成。

4. 可将自动控制系统按照不同的分类方法进行归类。

5. 对自动控制系统要从稳定性、准确性和快速性三个方面进行综合考虑。

## 习 题

1-1 试列举开环与闭环控制系统的实例,画出系统的方框图并说明其工作原理。

1-2 自动控制系统主要是由哪些环节组成的?各组成环节都有些什么功能?

1-3 对自动控制系统的基本要求是什么?试举例说明。

1-4 如图1-12所示为一水位自动控制系统,试说明它的工作原理。

1-5 直流发电机电压控制系统如图1-13所示,图a为开环控制,图b为闭环控制。发电机电势与原动机转速成正比,同时与励磁电流成正比。当负载变化时,由于发电机电

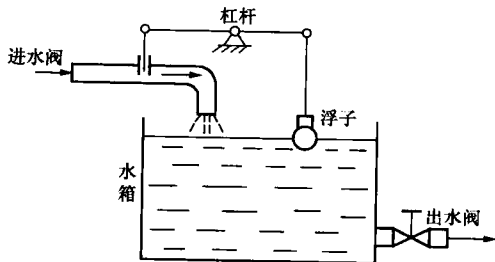


图 1-12 水位自动控制系统原理图