

# 控制工程基础

KONGZHI GONGCHENG JICHU

胡贞 李明秋 编著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

TP13  
192

# 控制工程基础

胡 贞 李明秋 编著

江苏工业学院图书馆  
藏书章

国防工业出版社

· 北京 ·

## 内 容 简 介

本书主要介绍自动控制系统的一般概念、控制系统的数学模型、线性系统的时域分析、根轨迹法、线性系统的频域分析、自动控制系统的校正、非线性控制系统分析、线性离散系统的分析和综合。为了帮助学生学会运用计算机进行辅助分析和设计,各章简要介绍了 MATLAB 在系统分析和设计方面的应用。

本书编写力求内容精练,概念清晰,重点突出,易于自学。为了便于读者在学习过程中更好地掌握基本概念、基本理论和系统分析、综合的基本方法,各章都有一定量的例题和习题。

本书既可作为高等院校自动控制类各专业及相近专业的教材,也可供从事控制工程与自动化领域的工程技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

控制工程基础/胡贞,李明秋编著. —北京:国防工业出版社,2006.4

ISBN 7-118-03967-5

I. 控... II. ①胡...②李... III. 自动控制理论  
IV. TP13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 059636 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100044)

腾飞胶印厂印刷

新华书店经售

\*

开本 787×1092 1/16 印张 17½ 字数 400 千字

2006 年 4 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—4000 册 定价 29.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

# 前 言

在现代科学技术的众多领域中,自动控制技术起着越来越重要的作用。近几十年来,随着电子计算机技术的发展和应用,在宇宙航行、机器人控制、导弹制导以及核动力等高新技术领域中,自动控制技术更具有特别重要的作用。自动控制技术的应用范围现已扩展到生物、医学、环境、经济管理和其他许多社会生活领域中,自动控制已成为现代社会生活中不可缺少的重要组成部分。

本书是为工科类本科生编写的控制工程基础教材。全书共分8章:第1章深入浅出地介绍了自动控制的基本概念;第2章介绍了控制系统数学模型的建立方法以及结构图的表示方法;第3章至第6章系统地论述了线性控制系统的时域分析法、根轨迹法、频域分析法及系统的校正方法;第7章介绍了非线性系统理论的一般概念以及相平面和描述函数两种常用的分析方法;第8章介绍了线性离散系统的基本理论和离散控制系统的分析与综合。由于MATLAB在控制系统计算机辅助分析和设计方面获得了广泛的应用,本书还简要介绍了MATLAB工具箱中与本教材内容相关的函数以及在系统性能分析方面的应用。

控制系统在航天、电气、机械、化工等学科中的应用差异甚微,因此本书适用于所有工程学科。书中的实例和习题来自不同的学科领域,有利于拓宽学生的视野和思路,提高他们跨学科学习和研究的能力。

本书由胡贞、李明秋担任主编。第1、2、3、4、8章由胡贞、田成军编写,第5、6、7章由李明秋、姜淑华编写。张智群、于秋水等研究生承担了文稿的录入整理和校对工作,在此表示衷心感谢。

由于编者水平有限,不妥之处在所难免,真诚希望广大读者批评指正。

编著者

2004年12月

# 目 录

|                        |    |
|------------------------|----|
| 第 1 章 自动控制的基本概念        | 1  |
| 1.1 概述                 | 1  |
| 1.2 自动控制的发展简史          | 1  |
| 1.3 自动控制的基本方式          | 3  |
| 1.3.1 开环控制             | 3  |
| 1.3.2 闭环控制             | 4  |
| 1.3.3 复合控制             | 6  |
| 1.3.4 自动控制系统的基本组成      | 7  |
| 1.4 自动控制系统的分类          | 8  |
| 1.4.1 恒值系统、随动系统及程序控制系统 | 8  |
| 1.4.2 线性系统和非线性系统       | 9  |
| 1.4.3 连续控制系统和离散控制系统    | 9  |
| 1.5 对自动控制系统的基本要求       | 10 |
| 习题 1                   | 11 |
| 第 2 章 控制系统的数学模型        | 13 |
| 2.1 微分方程               | 13 |
| 2.2 非线性微分方程的线性化        | 17 |
| 2.3 传递函数               | 18 |
| 2.3.1 传递函数的基本概念        | 18 |
| 2.3.2 典型环节及其传递函数       | 19 |
| 2.4 结构图及其等效变换          | 25 |
| 2.4.1 结构图的基本概念         | 25 |
| 2.4.2 结构图的组成           | 25 |
| 2.4.3 系统结构图的建立         | 26 |
| 2.4.4 结构图的等效变换         | 29 |
| 2.4.5 结构图等效变换的应用       | 34 |
| 2.5 闭环控制系统的传递函数        | 35 |
| 2.5.1 系统的开环传递函数        | 36 |
| 2.5.2 系统的闭环传递函数        | 36 |
| 2.5.3 闭环系统的误差传递函数      | 37 |

|                                 |           |
|---------------------------------|-----------|
| 2.6 利用 MATLAB 求系统的传递函数 .....    | 38        |
| 2.7 设计实例:低通滤波器的设计 .....         | 40        |
| 习题 2 .....                      | 41        |
| <b>第 3 章 线性连续系统的时域分析 .....</b>  | <b>45</b> |
| 3.1 典型输入信号和动态性能指标 .....         | 45        |
| 3.1.1 典型输入信号 .....              | 45        |
| 3.1.2 动态性能指标 .....              | 47        |
| 3.2 一阶系统的时域分析 .....             | 49        |
| 3.2.1 一阶系统的数学模型 .....           | 49        |
| 3.2.2 一阶系统的单位阶跃响应及其动态性能指标 ..... | 49        |
| 3.3 二阶系统的时域分析 .....             | 51        |
| 3.3.1 二阶系统的数学模型 .....           | 51        |
| 3.3.2 二阶系统的闭环极点 .....           | 52        |
| 3.3.3 二阶系统的单位阶跃响应 .....         | 53        |
| 3.3.4 欠阻尼二阶系统的动态性能指标计算 .....    | 57        |
| 3.3.5 具有零点的二阶系统的时域分析 .....      | 59        |
| 3.4 高阶系统的时域分析 .....             | 61        |
| 3.4.1 典型三阶系统的时域分析 .....         | 61        |
| 3.4.2 高阶系统的时域分析 .....           | 62        |
| 3.5 线性系统的稳定性分析 .....            | 63        |
| 3.5.1 稳定的基本概念和线性系统稳定的充要条件 ..... | 63        |
| 3.5.2 劳斯(Routh)判据 .....         | 64        |
| 3.5.3 劳斯判据的特殊情况 .....           | 66        |
| 3.6 稳态误差分析 .....                | 67        |
| 3.6.1 误差及稳态误差的基本概念 .....        | 67        |
| 3.6.2 给定输入作用下的稳态误差分析 .....      | 68        |
| 3.6.3 扰动输入作用下的稳态误差分析 .....      | 73        |
| 3.6.4 减小或消除稳态误差的措施 .....        | 74        |
| 3.7 应用 MATLAB 分析控制系统的性能 .....   | 75        |
| 3.7.1 利用 MATLAB 分析系统的稳定性 .....  | 75        |
| 3.7.2 用 MATLAB 分析系统的动态性能 .....  | 77        |
| 3.8 设计实例:望远镜指向控制系统的设计 .....     | 78        |
| 习题 3 .....                      | 80        |
| <b>第 4 章 根轨迹法 .....</b>         | <b>84</b> |
| 4.1 根轨迹的基本概念 .....              | 84        |
| 4.1.1 根轨迹概念 .....               | 84        |
| 4.1.2 根轨迹与系统性能的关系 .....         | 85        |

|                          |            |
|--------------------------|------------|
| 4.1.3 根轨迹方程              | 85         |
| 4.2 根轨迹绘制的基本法则           | 87         |
| 4.2.1 根轨迹的起点和终点          | 87         |
| 4.2.2 根轨迹条数和对称性          | 88         |
| 4.2.3 实轴上的根轨迹            | 88         |
| 4.2.4 根轨迹的分离点或会合点        | 89         |
| 4.2.5 根轨迹的渐近线            | 90         |
| 4.2.6 根轨迹的出射角和入射角        | 92         |
| 4.2.7 根轨迹与虚轴的交点          | 93         |
| 4.2.8 闭环极点的性质            | 94         |
| 4.3 广义根轨迹                | 97         |
| 4.3.1 参数根轨迹              | 97         |
| 4.3.2 零度根轨迹              | 99         |
| 4.4 控制系统的根轨迹法分析          | 103        |
| 4.4.1 闭环零、极点与系统的阶跃响应     | 103        |
| 4.4.2 利用主导极点估算系统的性能指标    | 104        |
| 4.4.3 通过改变根轨迹改善系统的品质     | 105        |
| 4.5 利用 MATLAB 绘制系统的根轨迹   | 107        |
| 4.6 设计实例:激光操纵控制系统        | 108        |
| 习题 4                     | 110        |
| <b>第 5 章 线性连续系统的频域分析</b> | <b>114</b> |
| 5.1 频率特性的基本概念            | 114        |
| 5.2 频率特性的几何表示方法          | 116        |
| 5.2.1 幅相频率特性曲线           | 116        |
| 5.2.2 对数频率特性曲线           | 118        |
| 5.3 典型环节的频率特性            | 119        |
| 5.3.1 比例环节的频率特性          | 119        |
| 5.3.2 积分环节的频率特性          | 120        |
| 5.3.3 惯性环节的频率特性          | 121        |
| 5.3.4 振荡环节的频率特性          | 124        |
| 5.3.5 微分环节的频率特性          | 127        |
| 5.3.6 延迟环节的频率特性          | 128        |
| 5.4 开环系统频率特性的绘制          | 129        |
| 5.4.1 开环幅相曲线的绘制          | 129        |
| 5.4.2 开环对数频率特性的绘制        | 133        |
| 5.4.3 最小相位系统和非最小相位系统     | 137        |
| 5.5 频域稳定性判据              | 138        |
| 5.5.1 奈奎斯特稳定判据           | 139        |

|                               |            |
|-------------------------------|------------|
| 5.5.2 对数频率稳定判据 .....          | 146        |
| 5.6 稳定裕度 .....                | 147        |
| 5.7 开环频率特性与系统动态性能的关系 .....    | 149        |
| 5.8 闭环频率特性 .....              | 152        |
| 5.8.1 闭环频率特性和开环频率特性的关系 .....  | 152        |
| 5.8.2 等 M 圆图和等 N 圆图 .....     | 153        |
| 5.8.3 带宽频率和带宽 .....           | 155        |
| 5.8.4 闭环系统频域和时域指标的转换 .....    | 156        |
| 5.9 利用 MATLAB 绘制系统的频率特性 ..... | 158        |
| 5.10 设计实例:雕刻机位置控制系统 .....     | 160        |
| 习题 5 .....                    | 161        |
| <b>第 6 章 自动控制系统的校正</b> .....  | <b>165</b> |
| 6.1 控制系统校正的概念 .....           | 165        |
| 6.2 频率法串联校正 .....             | 167        |
| 6.2.1 串联超前校正 .....            | 168        |
| 6.2.2 串联滞后校正 .....            | 173        |
| 6.2.3 串联滞后—超前校正 .....         | 176        |
| 6.3 反馈校正 .....                | 179        |
| 6.4 复合校正 .....                | 182        |
| 习题 6 .....                    | 185        |
| <b>第 7 章 非线性控制系统分析</b> .....  | <b>189</b> |
| 7.1 非线性系统的一般概念 .....          | 189        |
| 7.1.1 典型非线性特性 .....           | 189        |
| 7.1.2 非线性系统的特征 .....          | 190        |
| 7.2 描述函数法 .....               | 191        |
| 7.2.1 描述函数的概念 .....           | 191        |
| 7.2.2 描述函数的求法 .....           | 192        |
| 7.3 非线性系统的描述函数法分析 .....       | 194        |
| 7.3.1 非线性系统的稳定性分析 .....       | 195        |
| 7.3.2 非线性系统自激振荡分析 .....       | 196        |
| 7.4 相平面分析法 .....              | 198        |
| 7.4.1 相平面分析法的基本概念 .....       | 198        |
| 7.4.2 相平面图的绘制 .....           | 198        |
| 7.4.3 奇点和奇线 .....             | 201        |
| 7.4.4 非线性系统的相平面分析 .....       | 205        |
| 习题 7 .....                    | 207        |



|                                  |     |
|----------------------------------|-----|
| 第 8 章 线性离散系统的分析与综合 .....         | 210 |
| 8.1 离散系统的基本概念 .....              | 210 |
| 8.1.1 采样控制系统 .....               | 210 |
| 8.1.2 数字控制系统 .....               | 212 |
| 8.1.3 离散控制系统的特点 .....            | 214 |
| 8.1.4 离散系统的研究方法 .....            | 214 |
| 8.2 信号的采样与保持 .....               | 214 |
| 8.2.1 采样过程 .....                 | 214 |
| 8.2.2 香农采样定理 .....               | 215 |
| 8.3 Z 变换 .....                   | 221 |
| 8.3.1 Z 变换的定义 .....              | 221 |
| 8.3.2 Z 变换方法 .....               | 221 |
| 8.3.3 Z 变换的基本定理 .....            | 224 |
| 8.3.4 Z 反变换 .....                | 226 |
| 8.3.5 差分方程及其解法 .....             | 228 |
| 8.4 脉冲传递函数 .....                 | 229 |
| 8.4.1 脉冲传递函数的定义 .....            | 229 |
| 8.4.2 开环系统脉冲传递函数 .....           | 231 |
| 8.4.3 有零阶保持器的开环系统脉冲传递函数 .....    | 233 |
| 8.4.4 闭环系统脉冲传递函数 .....           | 234 |
| 8.5 离散系统的性能分析 .....              | 238 |
| 8.5.1 离散系统的稳定性 .....             | 238 |
| 8.5.2 离散系统的稳态误差 .....            | 242 |
| 8.5.3 离散系统的动态性能 .....            | 245 |
| 8.6 离散系统的综合 .....                | 250 |
| 8.6.1 应用对数频率特性综合离散系统 .....       | 250 |
| 8.6.2 最少拍系统设计 .....              | 252 |
| 8.7 数字控制器的实现 .....               | 258 |
| 8.8 MATLAB 在离散系统中的应用 .....       | 259 |
| 习题 8 .....                       | 261 |
| 附录 .....                         | 264 |
| 附录 I - 1 常用函数拉普拉斯变换表 .....       | 264 |
| 附录 I - 2 拉普拉斯变换的一些定理 .....       | 265 |
| 附录 II 常用函数 $z$ 变换表 .....         | 266 |
| 附录 III MATLAB 控制系统工具箱部分函数表 ..... | 268 |
| 参考文献 .....                       | 269 |

# 第 1 章 自动控制的基本概念

## 1.1 概 述

在科学技术飞速发展的今天,自动控制技术起着越来越重要的作用。所谓自动控制,是指在没有人直接参与的情况下,利用控制装置使被控对象(机器设备或生产过程)的某个参数(即被控量)自动地按照预定的规律运行。例如,数控车床按照预定程序自动地切削工件,化学反应炉的温度或压力自动地维持恒定,人造卫星准确地进入预定轨道运行并回收,宇宙飞船能够准确地地在月球着陆并返回地面等,都是以应用高水平的自动控制技术为前提的。

自动控制以反馈理论和线性系统理论为基础,并综合应用了网络理论和通信理论的概念。因此,自动控制并不局限于任意单个工程学科,而是在航空工程、电气工程、机械工程、化工工程、环境工程等工程学科中都有同样广泛的应用。例如,一个控制系统通常会包括电子、机械和化工部件。

自动控制理论是控制工程的理论基础,是研究自动控制共同规律的技术科学。自动控制理论按其发展过程分成经典控制理论和现代控制理论两大部分。

经典控制理论在 20 世纪 50 年代末已形成比较完整的体系,它主要以传递函数为基础,研究单输入、单输出反馈控制系统的分析和设计问题,其基本内容有时域法、频域法、根轨迹法、描述函数法、相平面法、代数与几何稳定判据、校正网络设计等。

现代控制理论是 20 世纪 60 年代在经典控制理论的基础上,随着科学技术的发展和工程实践的需要而迅速发展起来的,它以状态空间法为基础,研究多变量、变参数、非线性、高精度等各种复杂控制系统的分析和综合问题,其基本内容有线性系统基本理论、系统辨识、最优控制等。近年来,由于计算机和现代应用数学研究的迅速发展,使控制理论继续向纵深方向发展。目前,自动控制理论正向以控制论、信息论、仿生学为基础的智能控制理论深入。

## 1.2 自动控制的发展简史

最早的自动控制可能是公元前 300 年至公元前 1 年之间在古希腊出现的浮球调节装置。大约在公元前 250 年,Philon 发明了油灯,该油灯使用浮球调节器来保持燃油的油面高度。公元 1 世纪前后的亚历山大人 Heron 曾在名为《气体力学》一书中介绍了几种利用浮球调节器控制水位的方法。

近代欧洲最早发明的反馈系统是荷兰人 Cornelis Drebbel(1572—1633)发明的温度调节器,Dennis Papin(1647—1712)则在 1681 年发明了第一个锅炉压力调节器,该调节器与

目前压力锅的减压安全阀类似。

人们普遍认为最早应用于工业过程的自动反馈控制器是 James Watt 于 1769 年发明的飞球调节器,它被用来控制蒸汽机的转速,如图 1-1 所示。图中的机械装置用来测量驱动杆的转速,并利用飞球的转动来控制阀门,从而控制进入蒸汽机的蒸汽流量。

俄国人断言,最早的具有历史意义的反馈系统是由 I. Polzunov 于 1765 年发明的用于水位控制的浮球调节器。该水位调节系统如图 1-2 所示,浮球探测水位并控制盖在锅炉入水口上的阀门。

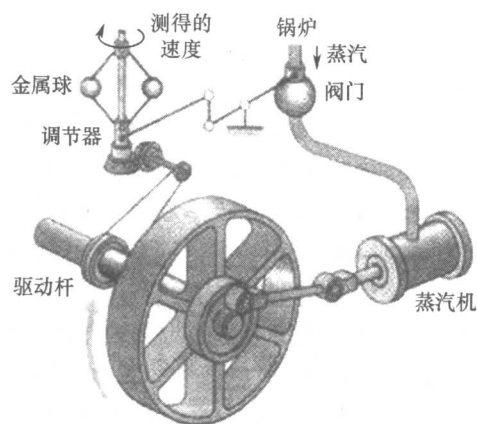


图 1-1 Watt 的飞球调节器

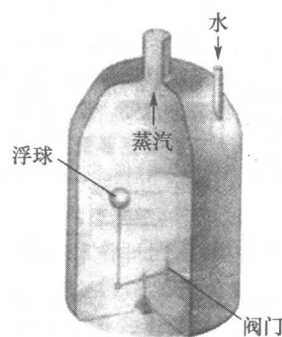


图 1-2 水位浮球调节器

1868 年之前,自动控制系统发展的主要特点是凭借直观的验证性发明。提高控制系统精度导致了人们要解决瞬态振荡的减振问题,甚至是系统的稳定性问题,因此发展自动控制理论便成了当务之急。J. C. Maxwell 用微分方程建立了一类调节器模型,发展了与控制理论相关的数学理论,研究了不同系统参数对系统性能的影响。在同一时期,I. A. Vyshnegradskii 建立了调节器的数学理论。

第二次世界大战以前,控制理论及应用在美国和西欧的发展与它在俄国和东欧的发展采取了不同的途径。在美国,Bode、Nyquist 和 Black 等人在贝尔电话实验室对电话系统和电子反馈放大器所做的研究工作,是促进反馈系统应用的主要动力,当初用来描述反馈放大器工作情况所用的是频域方法。与此相反,在前苏联,一些著名的数学家和应用力学家则倾向于用微分方程描述系统的时域方法。

第二次世界大战期间,自动控制理论及应用得到了巨大的发展。战争需要用反馈控制的方法设计和建造飞机自动驾驶仪、火炮定位系统、雷达天线控制系统以及其他军用系统。这些军用系统的复杂性和对高性能的追求,要求拓展已有的控制技术。这导致人们更加关注控制系统,同时也产生了许多新的见解和方法。1940 年以前,控制系统设计绝大部分用的是“试凑法”。在 20 世纪 40 年代,数学和分析的方法无论在数量上还是在实用性方面都有了很大发展,控制工程因而也发展成为一门工程科学。

随着 Laplace 变换和频域复平面的广泛应用,频域方法在第二次世界大战之后仍在控制领域占据着主导地位。20 世纪 50 年代,控制工程理论的重点是发展和应用  $s$  平面方法,特别是根轨迹法。到 80 年代,数字计算机用做控制部件,为控制工程师提供了前所

未有的运算速度和精度。

随着人造卫星和空间时代的到来,控制工程的发展又有了新的推动力。为导弹和空间探测器设计复杂、高精度的控制系统成了现实需要。此外,由于既要减轻卫星等飞行器的重量,又要对它们实施精密控制,最优控制因而变得十分重要。正是基于上述要求,最近 20 年来,由 Liapunov、Minorsky 等人提出的时域方法受到了极大的关注。由苏联的 L. S. Pontryagin 和美国的 R. Bellman 研究提出的最优控制理论,以及近期人们对鲁棒系统的研究,都为时域方法增色不少。众所周知,控制工程在进行控制系统分析和设计时应同时考虑时域和频域两种方法。表 1-1 给出了控制系统发展的主要过程。

表 1-1 控制系统发展历程简表

|        |                                                                             |
|--------|-----------------------------------------------------------------------------|
| 1769 年 | James Watt 发明了蒸汽机和飞球调节器。蒸汽机常常被认为是英国工业革命开始的标志。工业革命时期,机械化水平有了巨大的提高,这是自动化发展的前奏 |
| 1800 年 | Eli Whitney 的“可互换件生产”概念在滑膛枪生产中得到验证。Whitney 的成就常常被认为是大规模工业化生产开始的标志           |
| 1868 年 | J. C. Maxwell 为一类蒸汽机的调节器建立数学模型                                              |
| 1913 年 | Henry Ford 在汽车生产中引入机械化装配机                                                   |
| 1927 年 | H. W. Bode 分析反馈放大器                                                          |
| 1932 年 | H. Nyquist 研究出了系统稳定性分析方法                                                    |
| 1952 年 | MIT 为对机床实施轴向控制,开发出数控(NC)方法                                                  |
| 1954 年 | George Devol 开发出“程控物体运转器”,这被视为最早的工业机器人                                      |
| 1960 年 | 在 Devol 设计的基础上,Unimate 研制了第一台机器人,并于 1961 年用它向压铸机给料                          |
| 1970 年 | 发展了多变量模型和最优控制                                                               |
| 1980 年 | 鲁棒控制系统设计得到广泛研究                                                              |
| 1990 年 | 出口外向型产业公司强调自动化                                                              |
| 1994 年 | 汽车上广泛采用反馈控制系统。工业生产中迫切需要可靠性高、鲁棒性强的系统                                         |

### 1.3 自动控制的基本方式

自动控制系统是指由被控对象和控制装置按一定的方式连接起来,组成的一个有机整体。在自动控制系统中,被控对象是指要实现自动控制的机器、设备或生产过程。通常把控制系统的被控量称为系统的输出量,把影响系统输出的外界输入称为系统的输入量。一般系统有两类输入,即给定输入和扰动输入。给定输入决定系统输出量的变化规律或期望值,扰动输入则是系统不希望的外部作用,它影响给定输入量对系统被控量的控制。自动控制系统按结构可分为开环控制、闭环控制和复合控制三种基本控制方式。

#### 1.3.1 开环控制

开环控制是指控制装置与被控对象之间只有顺向作用而没有反向联系的控制过程,按这种方式组成的系统称为开环控制系统,其特点是系统的输出量不会对系统的控制作用发生影响。开环控制系统方框图如图 1-3 所示。图中控制装置与被控对象分别用方

框表示,系统中的物理量,如电流、电压等称为信号,信号的传递方向用箭头表示。进入方框的箭头表示输入信号(也称输入量),离开方框的箭头表示输出信号(也称输出量)。控制系统的输出量就是被控量,它的期望值一般是系统输入信号的函数。在开环系统中,控制作用直接由系统的输入量产生,给定一个输入量,就有一个输出量与之对应。因此,系统的控制精度完全取决于控制器、被控对象及校准精度。

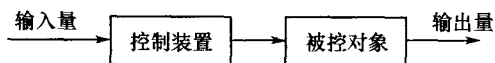


图 1-3 开环控制系统方框图

图 1-4 为电动机转速开环控制系统的原理图。设有一直流电动机  $M$ , 用它来带动一个需要以恒速转动的负载, 其电枢电压  $U_d$  由可控硅整流装置提供。通过调节电位器  $R_w$  可以控制可控硅整流装置输出电压  $U_d$  的大小。

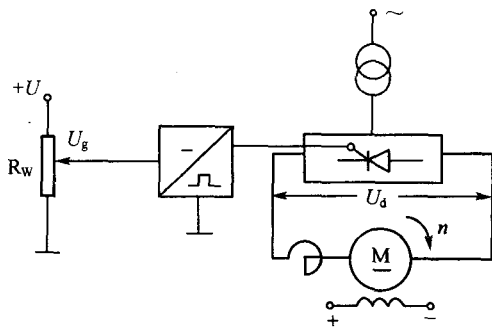


图 1-4 电动机开环控制原理图

当电位器  $R_w$  给出一个电压  $U_g$  后, 可控硅整流装置的触发电路便产生一串与电压  $U_g$  相对应的、具有一定相位的触发脉冲去控制可控硅的导通角, 从而控制可控硅放大器的输出电压  $U_d$ 。由于电动机  $M$  的励磁绕组中加的是恒定的励磁电流, 因此随着电枢电压  $U_d$  的变化, 电动机便以不同的转速带动负载运转。如果要求负载以某一恒定的转速运转, 则只要给定一个相应的恒定电压  $U_g$  即可。

在这个电动机转速的控制系统中, 电动机是被控对象, 控制电动机  $M$  转速的给定电压  $U_g$  为系统的给定输入量, 负载的转速  $n$  为系统的输出量或被控制量。

在图 1-4 所示的开环系统中, 若保证电动机  $M$  拖动负载以恒定转速转动, 仅调节给定电压  $U_g$  是不够的, 这是因为在电动机运行的过程中, 有许多因素会使电动机转速发生变化, 例如负载大小发生变化、电源电压波动、系统中各元件参数的变化等, 都会使电动机转速  $n$  偏离给定电压  $U_g$  所对应的转速期望值, 把这些因素都称为扰动量。

上述控制系统只是根据给定的输入量进行控制, 而输出量在整个控制过程中对系统不产生任何影响。如果输出量较预期值出现偏差, 上述系统没有自动修正的能力。由于开环系统的抗干扰能力差, 因此它的使用有一定的局限性。

### 1.3.2 闭环控制

闭环控制是指控制装置与被控对象之间既有顺向作用, 又有反向作用的控制过程, 按

这种方式组成的系统称为闭环控制系统。

闭环控制是自然界中一切生物控制自身运动的基本规律,也是工程自动控制的基本原理,它可以实现复杂而准确的控制。现在仍以前述的电机转速控制系统为例,说明闭环控制系统的组成及工作原理。图 1-5 为电动机转速闭环控制系统原理图。图中 TG 为测速发电机,也称为测量转换元件,其输出电压正比于电动机 M 的转速  $n$ ,它完成转速测量并将其转换成相应电压的任务。通过电位器可以给出与测速发电机转速成正比的电压  $U_f$ 。

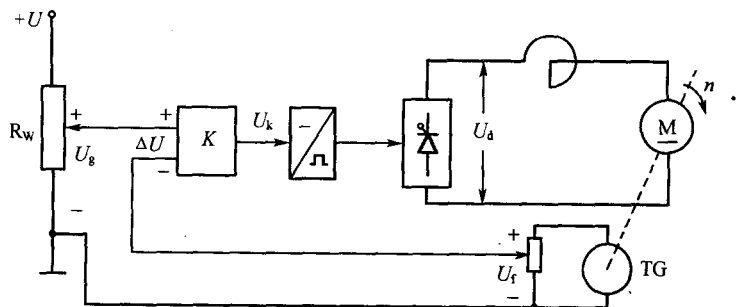


图 1-5 电动机转速闭环控制系统原理图

电压  $U_g$  为给定的基准电压,其值与电动机转速的期望值相对应。把  $U_f$  反馈到系统的输入端并与给定电压  $U_g$  进行比较,可以代替人观察电动机转速并判断是否与期望值发生偏差。图中  $U_g$  为系统的给定量,  $U_f$  则是与输出量  $n$  成正比的反馈量。给定量(输入量)  $U_g$  与反馈量反向串联得到的电压差  $\Delta U = U_g - U_f$  称做偏差量。如果  $\Delta U \neq 0$ , 意味着电动机转速在扰动作用下偏离了它的预期值。

一般情况下,偏差电压较小,故需经放大器放大后才能作为触发器的控制电压,控制可控硅功率放大器输出电压的大小,使电动机的转速得到控制,使  $\Delta U \rightarrow 0$ , 此时电动机的转速逐渐趋于期望值。

图 1-5 中,被控对象是直流电动机,触发器和整流装置起着执行控制任务的作用,称为执行元件。其控制过程如下:

- 设  $U_g$  与  $n$  有一一对应的关系。例如当已调整好  $U_g = U_{g1}$  时,  $n = n_1$ , 一旦扰动作用引起转速变化,如转速  $n$  小于  $n_1$ , 测速发电机输出电压  $U_f$  就降低,偏差电压  $\Delta U$  相应增大,该偏差电压使触发器控制电压  $U_k$  增加,控制可控硅整流装置的输出电压  $U_d$  也随之增加,转速上升。反之,转速大于  $n_1$ ,  $\Delta U$  减小,  $U_d$  减小,转速下降。

显而易见,这里对电动机转速的控制,完全是无人参与的。因此,把这种不需要人直接参与,而使系统输出量自动按照预定规律变化的控制过程叫做自动控制。在闭环控制中,输出量一般由测量装置检测并反馈到输入端,然后由比较装置将它与输入信号相减,这种连接形式称为负反馈。利用负反馈得到偏差产生控制作用,再去消除偏差,这种控制原理叫做自动控制原理,也称反馈控制原理。反馈控制实质上是一个按偏差进行控制的过程,因此它也称为按偏差控制,自动控制原理就是按偏差控制的原理。

图 1-6 为电动机转速控制系统功能框图。下面对开环控制与闭环控制的特点做简单比较。

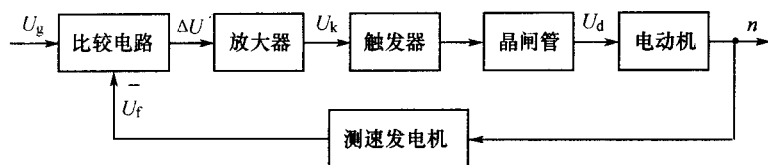


图 1-6 电动机转速控制系统功能框图

一般来说,开环控制结构简单,成本低廉,工作稳定。因此,当系统的输入信号及扰动作用预先知道时,采用开环控制即可取得较为满意的效果。但由于不存在输出量的反馈,因此对干扰造成的误差无自动修正能力。系统的控制精度完全取决于元件本身的抗干扰措施。

闭环控制系统的一个突出优点是,不管什么原因引起的输出量偏离预期值而产生偏差时,一定会有相应的控制作用产生,而这个控制作用将去减小或消除偏差,使输出量重新恢复到预期值上。从原理上说,闭环控制系统具有抑制内部和外部各种干扰引起系统输出发生变化的能力。

在闭环控制系统中,由于引入了负反馈,使输出量对外部和内部的干扰不甚敏感,从而有可能采用不太精密或成本低廉的元件来构成控制质量较高的系统。同时,也正是由于存在反馈,闭环控制也有其不足之处,这就是输出量可能出现振荡,严重时会使系统无法工作。原因是输出量出现偏离之后,经过反馈形成一个修正偏离的控制作用,但在这个控制作用和它所产生的修正偏离的效果之间,一般是有一定时间延迟的,此时输出量的偏离不能立即得到修正,从而有可能使输出量处于振荡状态。如果系统参数选择不当,不仅不能修正偏离,反而会使偏离越来越大,系统无法正常工作。因此,对闭环系统来说,稳定性始终是一个十分重要的问题。

### 1.3.3 复合控制

将开环和闭环控制结合在一起,构成开环—闭环控制方式,称为复合控制。按这种方式组成的系统称为复合控制系统,如图 1-7 所示。

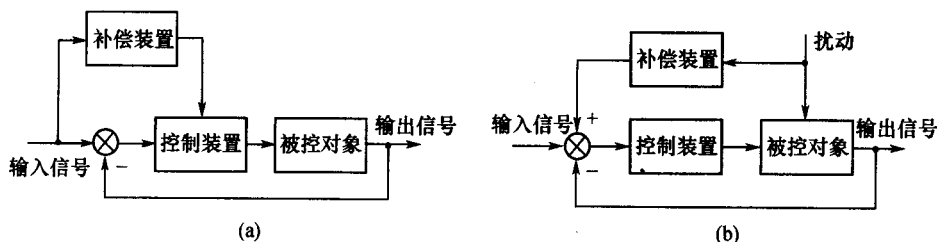


图 1-7 复合控制典型框图

(a) 按输入作用补偿; (b) 按扰动作用补偿。

复合控制实质上是在闭环控制回路的基础上,附加一个输入信号(给定或扰动)的前馈通道,对该信号实行加强或补偿,以达到精确的控制效果。常见的方式有以下两种。

#### (1) 按给定输入补偿

图 1-7(a)给出了这种复合控制的框图。通常,附加的补偿装置可提供一个前馈控

制信号,与原输入信号一起对被控对象进行控制,以提高系统的跟踪精度。这是一种对控制能力的加强作用,往往提供的是输入信号的微分作用,起到超前控制。

## (2) 按扰动输入补偿

图 1-7(b)给出了这种复合控制的框图。附加的补偿装置所提供的控制作用,主要起到对扰动影响“防患未然”的效果。故应按照不变性原理来设计,即保证系统输出与作用在系统上的扰动完全无关。

应当强调的是,附加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,否则会由于参数本身的漂移而减弱其补偿效果。此外,前馈通路对闭环回路性能影响不大,特别是对稳定性无影响,但能大大提高系统控制精度,因此获得了广泛应用。

## 1.3.4 自动控制系统的的基本组成

在各种自动控制系统中,闭环控制是最基本的控制方式之一。一个典型的闭环控制系统总是由被控制对象和各种结构不同的职能元件组成的。除被控制对象外,其他各部分可统称为控制装置。每一部分各司其职,共同完成控制任务。从以上闭环系统的实例可以看出,一个闭环控制系统一般由以下基本元件(或装置)组成。

(1) 给定元件:是给出与期望输出相对应的系统输入量的元件,或是一类产生系统控制指令的装置。如图 1-5 中的电位器  $R_w$ 。

(2) 测量元件:是检测被控量的元件。如果测出的物理量属于非电量,大多情况下要把它转换成电量,以便利用电的手段加以处理,如前例中的测速发电机,就是将电动机轴的速度检测出来并转换成电压。

(3) 比较元件:是把测量元件检测到的实际输出值与给定元件给出的输入值进行比较,求出它们之间的偏差的元件。常用的电量比较元件有差动放大器、电桥电路等。

(4) 放大元件:是将过于微弱的偏差信号加以放大,以足够的功率来推动执行机构或被控对象的元件。当然,放大倍数越大,系统的反应越敏感。一般情况下,只要系统稳定,放大倍数应适当大些。

(5) 执行元件:是直接推动被控对象,使其被控量发生变化的元件,如阀门、伺服电动机等。

(6) 校正元件:为改善或提高系统的性能,在系统基本结构基础上附加参数可灵活调整的元件,工程上称为调节器。常用串联或反馈的方式连接在系统中。简单的校正元件可以是一个 RC 网络,复杂的校正装置可含有微型计算机。

典型的自动控制系统基本组成如图 1-8 所示。

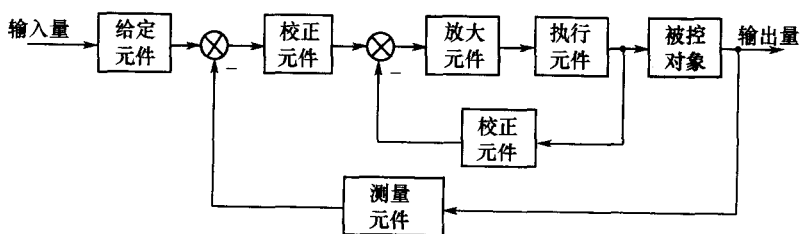


图 1-8 自动控制系统的的基本组成



## 1.4 自动控制系统的分类

自动控制系统的分类方法很多。例如,按控制方式可分为开环控制、闭环控制、复合控制等;按元件类型可分为机械系统、电气系统、机电系统、液压系统、气动系统、生物系统等;按系统功用可分为温度控制系统、压力控制系统、位置控制系统等;按系统性能可分为线性系统 and 非线性系统、连续系统和离散系统、定常系统和时变系统、确定性系统和不确定性系统等;按输入量变化规律又可分为恒值系统、随动系统和程序控制系统等。上节已介绍了开环控制系统、闭环控制系统和复合控制系统。下面根据不同的分类方法,说明常用自动控制系统的类型。

### 1.4.1 恒值系统、随动系统及程序控制系统

#### 1. 恒值系统

这种系统的特点是输入量保持为常量,要求输出量也等于一个常值。但由于扰动的存在,将使输出量偏离期望值,控制系统能根据偏差产生控制作用,使输出量恢复到期望值,以克服扰动作用的影响。前面所举的电动机转速控制系统,就是一个恒值系统。

#### 2. 随动系统

这种系统的特点是输入量为预先未知的、随时间任意变化的函数,要求系统的输出量能够以一定的准确度跟随输入量的变化。随动系统能克服多种扰动作用的影响,但一般来说,扰动的影响是次要的。随动系统亦称伺服系统。

图 1-9 所示为位置随动系统。该系统是控制工作机械的位置,使之按指令电位器(或称给定电位器)给定的规律变化。操作者移动指令电位器的滑臂,则滑臂的角度被转换为电压  $u_r$ ,被控对象的位置由反馈电位器检测并转换成反馈电压  $u_f$ 。当工作机械位置

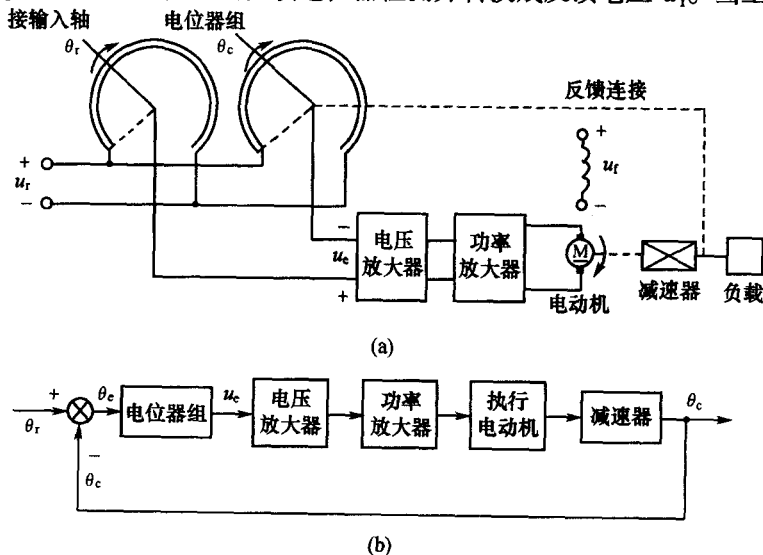


图 1-9 位置随动系统

(a) 位置随动系统原理图; (b) 位置随动系统框图。