

21世纪 高等学校本科系列教材



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

# 自动控制原理

ZI DONG KONG ZHI YUAN LI

(第二版)

晁 勤 傅成华 编 著  
王 军 陈 华



重庆大学出版社

<http://www.cqup.com.cn>

TP13/180-2

2007



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

# 自动控制原理

(第二版)

晁 勤 傅成华 编著  
王 军 陈 华

重庆大学出版社

## 内 容 提 要

本书以经典控制理论为主,同时也介绍了现代控制理论基础部分内容。内容编排上先对控制系统的基本概念做必要的叙述,继而讨论实际系统在时域和复域中数学模型建立方法及其结构图和信号流图的表示方法,再给出线性控制系统的时域分析法、根轨迹法、频域分析法以及设计校正方法,同时用适当篇幅介绍线性离散控制系统的理论及其应用和非线性控制系统的分析方法,最后阐述线性控制系统的状态空间分析与综合设计方法,并增加 MATLAB 在自动控制原理中的应用方面的内容,使学员能用 MATLAB 软件快速分析和解决问题,进一步加深对基本概念的理解。

本书是高等院校电气类专业本科教材,也可作为其他电类专业的本科教材,并可供从事电气自动化工作的工程技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

自动控制原理/晁勤等编著. —2 版. —重庆:重庆大学出版社,2007. 8

(电气工程及其自动化专业本科系列教材)

ISBN 978-7-5624-2451-2

I. 自… II. 晁… 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 127685 号

## 自动控制原理

### (第二版)

晁 勤 傅成华 王 军 陈 华 编著

责任编辑:周 立 版式设计:周 立

责任校对:夏 宇 责任印制:张 策

\*

重庆大学出版社出版发行

出版人:张鸽盛

社址:重庆市沙坪坝正街 174 号重庆大学(A 区)内

邮编:400030

电话:(023) 65102378 65105781

传真:(023) 65103686 65105565

网址:<http://www.cqup.com.cn>

邮箱:fxk@cqup.com.cn (市场营销部)

全国新华书店经销

重庆华林天美印务有限公司印刷

\*

开本:787×1092 1/16 印张:24 字数:599 千

2001 年 8 月第 1 版 2007 年 8 月第 2 版 2007 年 8 月第 5 次印刷

印数:15 001—20 000

ISBN 978-7-5624-2451-2 定价:30.00 元

---

本书如有印刷、装订等质量问题,本社负责调换

版权所有,请勿擅自翻印和用本书

制作各类出版物及配套用书,违者必究

# 第二版前言

本书是2006年被国家教育部批准的普通高等教育“十一五”国家级规划教材,根据普通高等教育“十一五”国家级规划教材的要求在2001年出版第一版的基础上改编而成,可作为高等学校电气工程及其自动化专业及其他电类专业本科教材。

本教材在电气工程专业教学改革基础上编写,注重理论联系实际,积累了教师多年教学经验和成果,增加了应用MATLAB仿真软件形象化理解概念和难点的内容,2001年出版以来,受到好评,效果良好。本次再版,各章内容做了少的改动和改错。主要修改了MATLAB在各章中的应用内容,加大MATLAB软件应用实例介绍。各章习题部分均增加了MATLAB应用方面的习题。

国内外同类教材较多,基本是分成经典控制理论和现代控制理论两本书。本教材将两者合为一本书,注意互相关系,融会贯通,利于电气工程专业学生自动控制理论学时少的特点。所举例题均为电气类工业实例,每章都增加MATLAB软件仿真部分,利于学生对重点和难点的理解和掌握。

教材的内容以经典控制理论为主,削减不实用的内容,同时增加现代控制理论基础部分内容。教材重在物理概念的阐述,力求深入浅出,层次分明,说明清楚,循序渐进,贯彻“少而精”的原则,尽量避免繁琐的数学推导及证明。为了便于组织教学,经典控制理论和现代控制理论部分分开叙述。内容编排上以对控制系统进行分析与综合的体系为线索,首先对控制系统的基本概念作必要的叙述,继而讨论实际系统在时域和复域中数学模型建立方法及其结构图和信号流图的表示方法,在此基础上给出线性控制系统的时域分析法、根轨迹法、频域分析法以及设计校正方法。由于计算机控制技术的发展以及非线性控制在工程中的大量应用,用适当篇幅介绍线性离散控制系统的理论及应用和非线性控制系统的分析方法。为使学员具有一定的现代控制理论的知识,最后阐述线

性控制系统的状态空间分析与综合设计方法。并在每章后增加一节 MATLAB 在自动控制原理中的应用方面的内容,使学生学会用 MATLAB 软件来快速分析和解决问题,同时可进一步加深对基本概念的理解。每章结束后进行重点内容的小结并附一定数量的习题。教材的各节都有相应的例题,以有助于学生对本章基本概念的理解和分析与综合能力的提高。各章的作业分一般和较难两部分。本书各部分内容所占全书比例为:经典控制理论的线性部分和离散部分为 66.7%,非线性部分为 10.8%,现代控制理论部分为 22.5%。本课授课学时为 72 学时左右。其中理论部分为 64 学时,实验课为 8 学时。

全书共分 9 章。由晁勤教授主编,其中的第 4 章和第 7 章由傅成华副教授编写,第 3 章和第 9 章由王军副教授编写,第 2 章和第 8 章由陈华副教授编写,第 1、5、6 章由晁勤编写。此外,在此次修改的第二版教材中增加的 MATLAB 例题和习题都由新疆大学的研究生进行了资料收集和编程验证,四川轻化工学院的研究生对第一版的印刷错误进行了详细的标注。在此,对研究生们付出的辛勤劳动表示由衷的感谢。

由于编者水平有限,编写时间比较仓促,书中肯定还存在许多缺点和错误,因此恳请广大读者批评指正。

主编

2007 年 8 月 8 日

# 前言

本书是根据高等学校电气工程及其自动化专业《自动控制原理》教材编写大纲的要求编写的,可作为高等学校电气工程及其自动化专业及其他电类专业的本科教材。

本书的内容以经典控制理论为主,削减不实用的内容,同时增加现代控制理论基础部分内容。本书着重物理概念的阐述,力求深入浅出,层次分明,知识清楚。贯彻“少而精”的原则,尽量避免繁琐的数学推导及证明。为了便于组织教学,经典控制理论和现代控制理论分开叙述。内容编排以对控制系统进行分析与综合的体系为线索,首先对控制系统的基本概念作必要的叙述,继而讨论实际系统在时域和复域中数学模型建立方法及其结构图和信号流图的表示方法,在此基础上给出线性控制系统的时域分析法、根轨迹法、频域分析法以及设计校正方法。由于计算机控制技术的发展以及非线性控制在工程中的大量应用,用适当篇幅介绍线性离散控制系统的理论及应用和非线性控制系统的分析方法。为使学员具有一定的现代控制理论的知识,最后阐述线性控制系统的状态空间分析与综合设计方法。在每章后增加一节 MATLAB 在自动控制原理中的应用使学生学会用 MATLAB 软件快速分析和解决问题,同时可进一步加深对基本概念的理解。每章结束后进行重点内容的小结并附一定数量的习题。各节都有相应的例题,有助于学生对本章基本概念的理解和分析与综合能力的提高。各章的作业分一般和较难两部分。各部分内容所占全书比例为:经典控制理论的线性部分和离散部分为 66.7%,非线性部分为 10.8%,现代控制理论部分为 22.5%。本书讲授总学时为 72 学时左右。其中理论部分为 64 学时,实验课为 8 学时。

全书共分 9 章。由晁勤教授主编,陈玉宏教授主审。其中的第 4 章和第 7 章由傅成华编写,第 3 章和第 9 章由王军编写,第 2 章和第 8 章由陈华编写,第 1、5、6 章由晁勤完成。此外,主审及许多同行在教材的编写内容上都提出过不少宝

贵的修改意见,许多同事对教材的录入及出版给予了热情的支持和帮助,也付出了辛勤的劳动。在此,一并表示由衷的感谢。

由于编者水平有限,编写时间较为仓促,书中一定还存在不妥之处,恳请读者批评指正。

编者

2000年5月1日

# 目 录

|                                     |    |
|-------------------------------------|----|
| 第 1 章 绪论 .....                      | 1  |
| 1.1 自动控制系统的基本概念 .....               | 1  |
| 1.2 开环控制与闭环控制 .....                 | 2  |
| 1.3 自动控制系统的分类 .....                 | 7  |
| 1.4 对自动控制系统的基本性能要求 .....            | 12 |
| 1.5 基于 MATLAB-Simulink 搭建模型仿真 ..... | 13 |
| 小结 .....                            | 16 |
| 习题 .....                            | 17 |
| 第 2 章 自动控制系统的数学模型 .....             | 19 |
| 2.1 系统动态微分方程模型 .....                | 19 |
| 2.2 非线性数学模型的线性化 .....               | 22 |
| 2.3 传递函数 .....                      | 25 |
| 2.4 系统结构图及其等效变换 .....               | 29 |
| 2.5 信号流图与梅逊公式 .....                 | 39 |
| 2.6 应用 MATLAB 处理系统数学模型 .....        | 43 |
| 小结 .....                            | 44 |
| 习题 .....                            | 45 |
| 第 3 章 时域分析法 .....                   | 50 |
| 3.1 典型输入信号和时域性能指标 .....             | 50 |
| 3.2 一阶系统的时域分析 .....                 | 52 |
| 3.3 二阶系统的时域分析 .....                 | 54 |
| 3.4 高阶系统的时域分析 .....                 | 61 |
| 3.5 系统的稳定性分析 .....                  | 62 |
| 3.6 系统的稳态特性分析 .....                 | 69 |
| 3.7 应用 MATLAB 进行时域分析 .....          | 77 |
| 小结 .....                            | 81 |
| 习题 .....                            | 81 |

|                             |     |
|-----------------------------|-----|
| <b>第 4 章 根轨迹法</b>           | 86  |
| 4.1 根轨迹的基本概念                | 86  |
| 4.2 绘制根轨迹的规则和方法             | 88  |
| 4.3 控制系统根轨迹的性能分析            | 99  |
| 4.4 应用 MATLAB 绘制根轨迹图        | 104 |
| 小结                          | 106 |
| 习题                          | 107 |
| <b>第 5 章 频域分析法</b>          | 112 |
| 5.1 频率特性                    | 112 |
| 5.2 频率特性的极坐标图 (Nyquist 图)   | 115 |
| 5.3 奈奎斯特稳定判据及稳定裕度           | 125 |
| 5.4 频率特性的对数坐标图 (Bode 图)     | 138 |
| 5.5 用开环频率特性分析系统的性能          | 150 |
| 5.6 用闭环频率特性分析系统的性能          | 160 |
| 5.7 应用 MATLAB 进行频域分析        | 163 |
| 小结                          | 169 |
| 习题                          | 170 |
| <b>第 6 章 控制系统的综合与校正</b>     | 176 |
| 6.1 PID 控制作用                | 177 |
| 6.2 基于频率法的串联校正设计            | 180 |
| 6.3 基于根轨迹法的串联校正设计           | 190 |
| 6.4 反馈校正设计                  | 200 |
| 6.5 复合控制校正设计                | 202 |
| 6.6 应用 MATLAB 进行校正设计        | 206 |
| 小结                          | 213 |
| 习题                          | 213 |
| <b>第 7 章 离散控制系统</b>         | 219 |
| 7.1 离散控制系统基本概念              | 219 |
| 7.2 信号的采样与复现                | 220 |
| 7.3 离散控制系统的数学模型             | 227 |
| 7.4 离散系统分析                  | 241 |
| 7.5 应用 MATLAB 进行离散系统分析      | 258 |
| 小结                          | 264 |
| 习题                          | 264 |
| <b>第 8 章 控制系统的状态空间分析与综合</b> | 271 |
| 8.1 控制系统的状态空间描述             | 271 |
| 8.2 线性定常系统状态方程的解            | 289 |
| 8.3 线性定常系统的能控性和能观性          | 294 |

|              |                            |            |
|--------------|----------------------------|------------|
| 8.4          | 对偶性原理 .....                | 301        |
| 8.5          | 线性定常系统的极点配置 .....          | 302        |
| 8.6          | 状态观测器 .....                | 308        |
| 8.7          | 李雅普诺夫稳定性分析 .....           | 315        |
| 8.8          | 应用 MATLAB 进行状态方程分析求解 ..... | 322        |
|              | 小结 .....                   | 325        |
|              | 习题 .....                   | 326        |
| <b>第 9 章</b> | <b>非线性控制系统 .....</b>       | <b>332</b> |
| 9.1          | 非线性控制系统概述 .....            | 332        |
| 9.2          | 描述函数法 .....                | 336        |
| 9.3          | 用描述函数法分析非线性控制系统 .....      | 343        |
| 9.4          | 相轨迹 .....                  | 348        |
| 9.5          | 奇点与极限环 .....               | 350        |
| 9.6          | 非线性系统的相平面分析 .....          | 352        |
| 9.7          | 应用 MATLAB 进行非线性系统分析 .....  | 357        |
|              | 小结 .....                   | 359        |
|              | 习题 .....                   | 360        |
|              | <b>附录 .....</b>            | <b>364</b> |
|              | 附录 1 .....                 | 364        |
|              | 附录 2 .....                 | 365        |
|              | <b>参考文献 .....</b>          | <b>370</b> |

# 第 1 章

## 绪 论

自 20 世纪中叶以来,在工程和科学发展中,自动控制技术的应用起着极为重要的作用。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,都是自动控制技术迅速发展的结果。在工业生产过程中,诸如对压力、温度、湿度、流量、频率、物位、成分等方面的控制,都是自动控制技术的重要组成部分。

《自动控制原理》是自动控制技术的理论基础,是一门理论性较强的工程科学。根据自动控制技术发展的不同阶段,自动控制理论一般可分为“经典控制理论”和“现代控制理论”两大部分。

经典控制理论的内容主要以传递函数为基础,研究单输入、单输出一类自动控制系统的分析和设计问题。由于发展较早,现已成熟。在工程上,相当成功地解决了大量实际问题,因此它是研究自动控制系统的重要理论基础。

现代控制理论的内容主要以状态空间法为基础,研究多输入、多输出、定常数或变参数、线性或非线性一类自动控制系统的分析和设计问题。随着现代科学技术的发展,已出现最优控制、最佳滤波、模糊控制、系统辨识、自适应控制等一些新的控制方式。因此它也是研究庞大的系统工程和模仿人类的智能控制等方面必不可少的理论基础。

本书对两大部分都给予了介绍,主要内容以经典控制理论为主,对现代控制理论介绍了基础部分内容。同时由于 MATLAB 软件的诞生,使控制系统的分析与设计由相当繁琐变得简单,它为控制系统的设计与仿真提供了一个强有力的工具。为此,在大部分章节中都简单介绍了 MATLAB 软件在自动控制系统中的应用。

### 1.1 自动控制系统的基本概念

所谓**自动控制**,是指在没有人直接参与的情况下,利用外加的设备或装置,使机器、设备或生产过程的某个工作状态或参数自动地按照预定的规律运行。例如,无人驾驶飞机按照预定的飞行航线自动升降和飞行,这是典型的自动控制技术应用的结果。

何谓自动控制系统?现以无人驾驶飞机为例:

无人驾驶飞机按预先给定的飞行航线参数(高度、方向等)飞行,则预先给定的飞行航线

参数称为参考输入或给定输入。在飞行过程中受到大气气流的影响使飞机偏离预定的航线,大气气流使飞行参数改变称为扰动。飞机的测量比较装置测出实际飞行参数与预定飞行参数存在偏差,就会使飞机的某些设备装置进行控制调节,能起控制作用的设备装置称为控制器。控制器发出的控制输出信号称为控制量。飞机称为被控对象。飞机实际飞行参数称为被控制量。在控制器作用下使飞机回到预定的航线或偏差在允许范围内,这就形成了无人驾驶飞机的自动控制系统。

## 1.2 开环控制与闭环控制

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。其中闭环自动控制系统是工业生产用得最为广泛的系统,也是本书讨论的主要内容。

### 1.2.1 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,在控制器与被控对象之间只有正向控制作用而没有反馈控制作用,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 1.1 所示。即系统中控制信号的流动未形成闭合回路。常见的开环控制系统有以下两种:

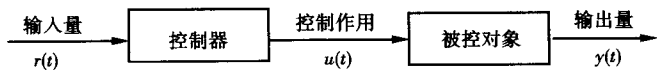


图 1.1 开环控制系统方框图

#### (1) 按给定值操作的开环控制系统

加热炉是工业生产中常见的工艺设备。其加热能源通常是燃油、煤气和电力等。在加热炉温度控制系统中,要求炉内的温度应保持在一定的数值上。为控制炉温通常通过阀门向炉内加入燃油,即燃油流量是控制量。而被加热工件的数量和环境温度影响炉温就是干扰量了。这样,所谓对炉温的控制就是用某种方式操作燃油流量以抵消干扰因素对炉温的影响。如果事先计算出希望炉温所需的燃油流量,然后操作阀门向加热炉内提供该流量后就不管它了,那么这种系统就是所谓的按给定值操作的开环控制系统,如图 1.2 所示。

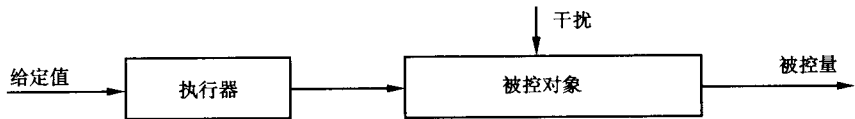


图 1.2 按给定值操作的开环控制系统方框图

显然,这种系统当被控对象受到某种干扰而使被控参数偏离预期值时无法实现自动补偿。因此,系统的控制精度难于保证。当系统的结构参数稳定,干扰极弱或控制精度要求不高时,可采用这种开环控制方式。

#### (2) 按干扰补偿的前馈控制系统

通过前面对炉温控制的分析可知,要想稳定被控制量(炉温),就要在干扰信号出现时,操作控制量(燃油流量)使之对被控量的影响与干扰量对被控量的影响互相抵消以保持被控量

不变。这样就产生了利用干扰去克服干扰的控制思路。其原理方框图见图 1.3。

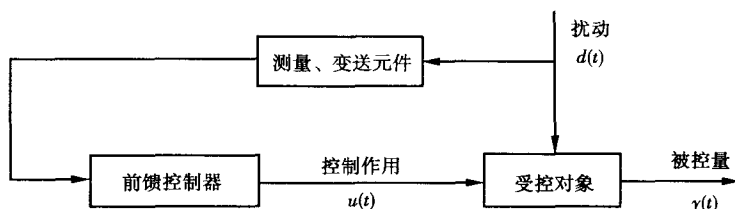


图 1.3 按干扰补偿的前馈控制系统方框图

在这种系统中,由于测量的是干扰量,故只能对可测干扰进行补偿。对不可测干扰,系统自身无法控制,因此,控制精度受到原理上的限制。

### 1.2.2 闭环控制系统

闭环控制的特点:在控制器与被控对象之间,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有直接影响。闭环控制系统的示意框图如图 1.4 所示。

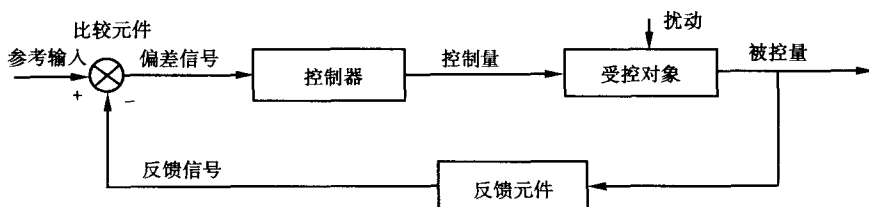


图 1.4 闭环控制系统方框图

图 1.4 中“⊗”为比较元件(又称比较器),在比较元件中,参考输入信号(给定值信号)与反馈信号进行比较,其差值输出即为偏差信号,偏差信号就是控制器的输入。即系统中控制信号的流动形成了闭合回路,故称之为闭环控制系统。

在加热炉温度控制系统中,当干扰量影响炉温使其偏离希望温度时,通过检测装置测出实际炉温,送到比较器与希望温度进行比较,得出偏差信号控制阀门开度,由此增加或减小燃油流量,进而使炉温升高或降低回到希望温度。将检测出来的输出量送回到系统的输入端,并调节流量,进而使炉温升高或降低回到希望温度。将检测出来的输出量送回到系统的输入端,并与输入量比较的过程称为反馈。若反馈信号与输入信号相减,则称为负反馈,反之,若相加,则称为正反馈。输入信号与反馈信号之差,称为偏差信号。偏差信号作用于控制器上,使系统的输出量趋向于给定的数值。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。

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,具体结构不一样,但是,从检出偏差、利用偏差信号对控制对象进行控制,以减小或纠正输出量的偏差这一控制过程却是相同的。归纳起来,这种系统的特点如下:

①在开环系统中,只有输入量对输出量产生控制作用;从控制结构上来看,只有从输入端到输出端从左向右的信号传递通道(该通道称为正向通道)。闭环控制系统中除正向通道外,还必须有从右向左、从输出端到输入端的信号传递通道,使输出信号也参与控制作用,该通道

称为反馈通道。闭环控制系统就是由正向通道和反馈通道组成的。

②为了检测偏差,必须直接或间接地检测出输出量,并将其变换为与输入量相同的物理量,以便与给定量比较,得出偏差信号。所以闭环系统必须有检测环节,给定环节和比较环节。

③闭环控制系统是利用偏差量作为控制信号来纠正偏差的,因此系统中必须具有执行纠正偏差这一任务的执行结构。闭环系统正是靠放大的偏差信号来推动执行结构,进一步对控制对象进行控制。只要输出量与给定量之间存在偏差,就有控制作用存在,力图纠正这一偏差。由于反馈控制系统是利用偏差信号作为控制信号,自动纠正输出量与其期望值之间的误差,因此可以构成精确的控制系统。

在本书中,重点研究闭环控制系统。下面再举几个控制系统的例子,说明开环和闭环控制系统的工作原理及应用。

### 〔例 1〕 直流电动机速度控制系统

在直流电动机速度控制系统中,被控量是直流电动机的速度,如图 1.5 所示。图中受控对象是电枢控制的直流电动机 SM,其电枢电压由功率放大器(晶闸管整流器 KZ 和触发器 CF)提供,通过调节触发器的控制电压  $u_K$ ,可改变电动机的电枢电压  $u_a$ ,从而改变电动机的速度。电动机的期望速度值由事先调节触发器的控制电压  $u_K$  确定,在工作过程中,负载电流  $I_a$  变化使电动机的速度偏离期望值,但它不会反过来影响控制电压  $u_K$ ,这可视为按给定量控制的开环控制系统。它没有自动修正偏差的能力,抗干扰性较差。实际上,电动机的转速常常随负载电流  $I_a$  的增加而下降,其转速的下降是由于电枢回路的电压下降引起的。如果设法将负载引起的电流变化测量出来,并按其大小产生一个附加的控制作用,用以补偿由它引起的转速下降,这就构成按扰动控制的开环控制系统,如图 1.6 所示。

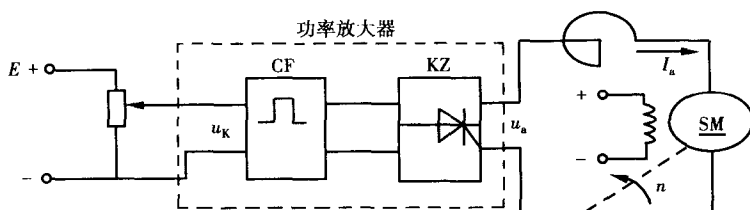


图 1.5 直流速度控制系统原理结构图

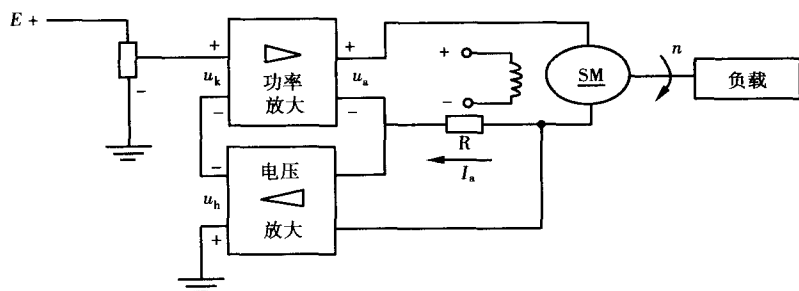


图 1.6 按扰动控制的开环控制系统结构图

可见这种按扰动控制的开环控制系统是直接由扰动取得信息并据以改变被控量,因此它只适用于扰动量是可测量的场合。而且一个补偿装置只能补偿一个扰动因素,对其余扰动均不起补偿作用。因此,再增加一种按偏差控制的反馈控制系统,如图 1.7 所示。

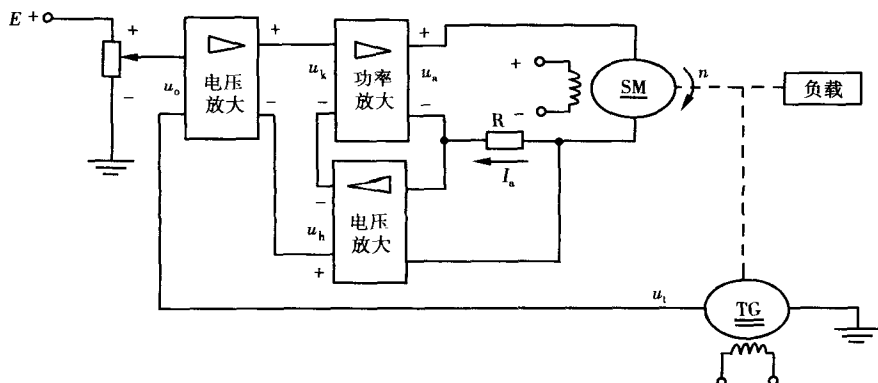


图 1.7 按偏差控制的反馈控制系统结构图

测速发电机 TG 是测量元件,用来测量电动机速度并给出与速度成正比的电压  $u_i$ ,然后,将  $u_i$  反馈到输入端并与给定电压  $u_o$  比较得到偏差电压  $\Delta u = u_o - u_i$ 。由于偏差电压一般比较微弱,故需经电压放大器放大后才能作为触发器的控制电压  $u_k$ 。如果电动机所带负载增加使电动机速度降低而偏离给定值,则测速发电机电压  $u_i$  减小,偏差电压  $\Delta u$  将因此增大,触发器控制电压  $u_k$  也随之增大,从而使晶闸管输出整流电压  $u_a$  升高,逐步使速度回升到给定值附近。这种按偏差控制和按扰动控制相结合的控制方式称为复合控制方式。其原理方框图如图 1.8 所示。

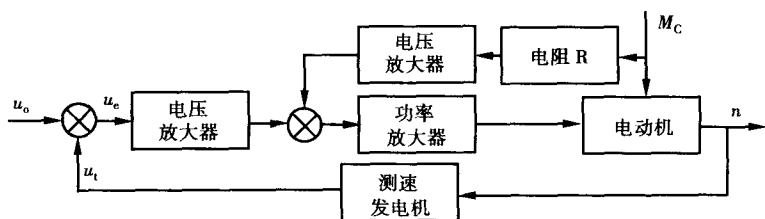


图 1.8 复合控制方式原理方框图

### [例 2] 交流发电机电压控制系统

在交流发电机电压控制系统中,被控量是交流发电机的电压,如图 1.9 所示。图中受控对象是励磁控制的三相交流同步发电机,其励磁电压由自动电压调节器 AVR 提供,通过调节电压调节器 AVR 的参考输入电压  $u_r$ ,可改变供给发电机励磁绕组的励磁电压  $u_f$ ,从而改变发电机机端电压  $u_G$ 。控制器是自动电压调节器 AVR,它的输出变量(即控制量)对其输入变量的因果关系,称为控制器的控制规律。这里的控制规律可以表示为

$$u_f = f(u_r) \quad (1.1)$$

在图 1.9 中,发电机机端电压  $u_G$  受负荷电流  $i_G$  影响,则应将  $i_G$  视为外界负荷变动影响的一个扰动输入,因此,受控对象(发电机)有两个输入——励磁电压  $u_f$  和负荷电流  $i_G$ 。即被控量  $u_G$  可由两个量来确定:

$$u_G = \phi(u_f, i_G) \quad (1.2)$$

发电机由原动机带动旋转,并向所接负载供应电力。控制的目的是在随机变化着的负载电流  $i_G$  干扰之下,保持机端电压  $u_G$  为要求的给定值  $\hat{u}_G = \text{const}$ (常数)。这种控制又可称为调

节,而相应的系统,则可称之为自动励磁调节系统。系统的参考输入信号  $u_r$  是与  $\hat{u}_G$  对应(成比例)的直流电压,通常  $u_r$  从恒压直流电源的一个可调分压器上取得所需电压。

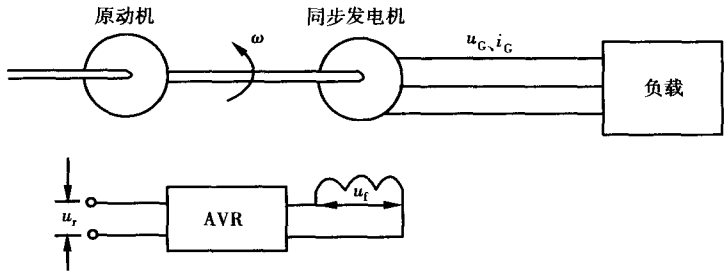


图 1.9 发电机开环励磁控制系统原理结构图

从图 1.9 可以看出,由于控制器 AVR 的输出  $u_f$  只由参考输入信号  $u_r$  确定而与扰动输入  $i_G$  无关,所以要在随机变化(即无规律可循的变化)的  $i_G$  的干扰下保持发电机机端电压  $u_G$  为给定值  $\hat{u}_G$  是不可能的。因此,这种开环控制系统很少能当做实用的控制系统来使用。若如图 1.10 所示将被控量(发电机的机端电压  $u_G$ )通过电压互感器和整流器输出(电压为  $u_b$ ),再反馈到电压控制器 AVR 的输入端与参考输入电压  $u_r$  进行比较得偏差信号  $u_e$ 。则:

$$u_e = u_r - u_b \quad (1.3)$$

反馈电压  $u_b$  极性与  $u_r$  相反为负反馈信号,即可构成按偏差控制的反馈控制系统。

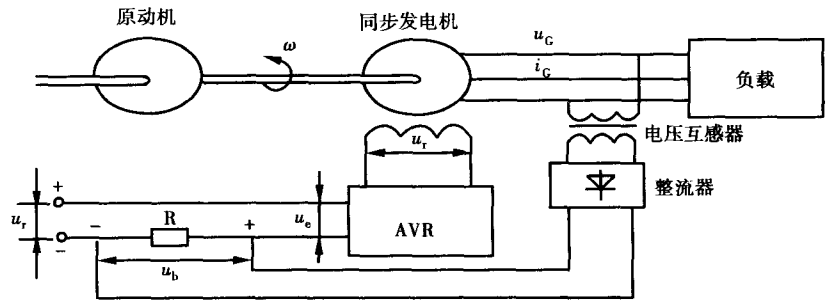


图 1.10 发电机自动励磁控制电压闭环控制系统原理结构图

发电机闭环励磁控制系统方框图如图 1.11 所示。当发电机机端电压(被控量)  $u_G$  偏离了要求的给定值  $\hat{u}_G$  时,它们的差值(误差)为

$$\Delta u_G = \hat{u}_G - u_G \quad (1.4)$$

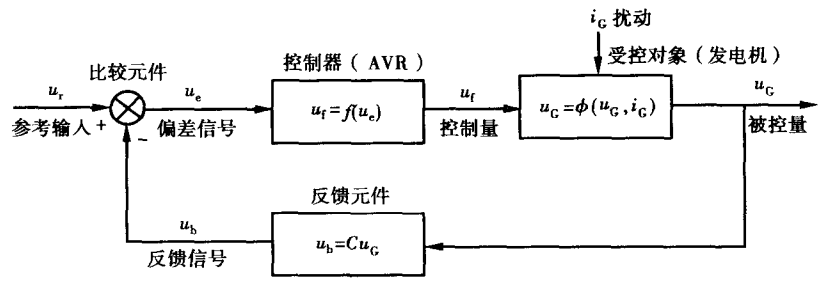


图 1.11 发电机闭环励磁控制系统方框图

对于任意一个控制系统,当受控对象的被控量受外界扰动的影响而发生变化时,都希望通过控制器的自动控制作用,尽量使被控量恢复到给定值或者使误差在很小的可允许的范围内。

现假设发电机负荷发生变化,使发电机机端电压  $u_G$  下降,则反馈电压  $u_b$  也下降,偏差信号  $u_e = u_r - u_b$  增大,使控制器 AVR 动作,于是发生以下的自动调节过程:

$$u_G \downarrow \xrightarrow{\text{反馈环节}} u_b \downarrow \xrightarrow{\text{比较元件}} u_e = (u_r - u_b) \uparrow \xrightarrow{\text{控制器}} u_f \uparrow \xrightarrow{\text{发电机}} u_G \uparrow \longrightarrow \text{使 } \Delta u_G \rightarrow 0$$

实际的调节过程往往不能一次完成,在几次波动以后,偏差逐渐减少,最后使  $u_G$  恢复到  $\hat{u}_G$ ,  $\Delta u_G = \hat{u}_G - u_G \rightarrow 0$ 。

通过上述发电机机端电压  $u_G$  的自动调节过程可以看出,闭环控制系统(也即反馈控制系统)属于按偏差信号的大小进行调节的系统,并且调节的过程是尽量减少产生的偏差。加到比较元件的反馈信号的的正负符号,起着重要的作用。图 1.11 所示的符号下的反馈称为负反馈,对于以减少误差为目的的闭环控制系统,都应采取负反馈的方式。

如果将图 1.11 中比较元件上的反馈信号变成“正”信号,则将构成一个具有正反馈的闭环控制系统,在这种情况下,如果还是以发电机负荷发生变化,使发电机机端电压  $u_G$  下降的调节过程为例,则调节过程将发生以下情况:

$$u_G \downarrow \xrightarrow{\text{反馈环节}} u_b \downarrow \xrightarrow{\text{比较元件}} u_e = (u_r + u_b) \downarrow \xrightarrow{\text{控制器}} u_f \downarrow \xrightarrow{\text{发电机}} u_G \downarrow \longrightarrow \text{使 } \Delta u_G = (\hat{u}_G - u_G) \uparrow$$

即调节过程使误差  $\Delta u_G$  越来越大,因此这样的励磁控制系统是不能工作的。

### 【例 3】 水位控制系统

在水位控制系统中,被控量是水池的水位高度  $h$ ,出水量  $Q_2$  为干扰量,如图 1.12 所示,1.12(a) 图为开环控制系统,事先固定进水阀和出水阀的位置,使水位在希望高度上,只要进水量  $Q_1$  等于出水量  $Q_2$ ,就可保持希望水位高度。一旦出水量  $Q_2$  变化,就不能保持希望水位高度了。1.12(b) 图为负反馈闭环控制系统,水位高度由浮子测出,通过杠杆控制进水阀位置,水位越高,进水量  $Q_1$  越小,使水位下降回到希望高度。1.12(c) 图为正反馈闭环控制系统,水位越高,进水量  $Q_1$  越大,使水位继续升高,可见正反馈闭环控制系统将无法保证水池的水位高度恒定。

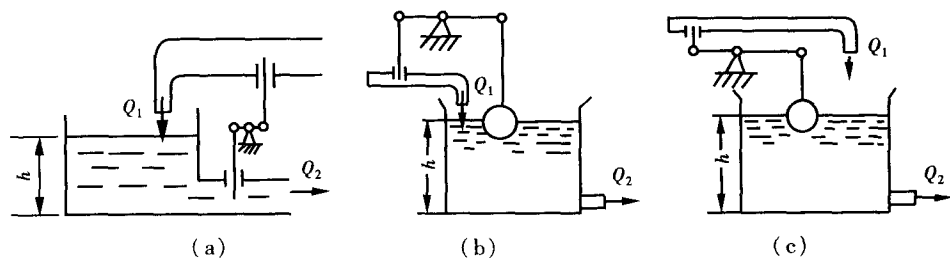


图 1.12 水位控制系统图

## 1.3 自动控制系统的分类

随着自动控制理论和自动控制技术的不断发展,生产过程的自动化水平不断提高,生产过程的自动控制系统也在日益发展和完善,目前已出现了各种各样的新型的自动控制系统。因