



普通高等教育“十一五”国家级规划教材  
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIYIWU GUOJIAJI GUIHUA JIAOCAI

ZIDONG KONGZHI YUANLI

# 自动控制原理

## ——理论篇

杨 平 翁思义 郭 平 编著



中国电力出版社

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



普通高等教育“十一五”国家级规划教材  
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIYIWU GUOJIAJI GUIHUA JIAOCAI

ZIDONG KONGZHI  
YUANLI

# 自动控制原理 ——理论篇

编著 杨 平 翁思义 郭 平  
主审 顾幸生 孙自强



中国电力出版社  
<http://jc.cepp.com.cn>

## 内 容 提 要

本书为普通高等教育“十一五”国家级规划教材。本书比较全面地介绍了自动控制系统分析与设计的基本理论和应用技术。内容包括：控制系统的数学模型，控制系统的时域分析与系统设计导论，控制系统的根轨迹分析与设计、频域分析与设计、状态空间分析与设计，离散控制系统的分析与设计以及非线性控制系统的分析。本书知识点分布较宽，难度适中，突出了控制系统特性分析方法和控制器初步设计理念，强调了建立基本概念和掌握基本分析技能，所举案例多在工业过程控制领域，尤其在电力工业领域，同时还给出了应用 MATLAB 工具进行辅助分析的提示。

本书可作为高等学校电气信息类及相关专业教材，也可供从事自动化技术的工程技术人员学习参考。

## 图书在版编目 (CIP) 数据

自动控制原理. 理论篇/杨平, 翁思义, 郭平编著. —北京:  
中国电力出版社, 2009

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

ISBN 978-7-5083-7262-4

I. 自… II. ①杨…②翁…③郭… 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 (2008) 第 198068 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

\*

2009 年 2 月第一版 2009 年 2 月北京第一次印刷  
787 毫米×1092 毫米 16 开本 24.5 印张 597 千字  
定价 36.80 元

## 敬告读者

本书封面贴有防伪标签，加热后中心图案消失  
本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究

# 前言

在自动控制技术被广泛应用的今天,越来越多的人想要了解和掌握自动控制原理,尤其是那些可能从事和接触自动化科技的科技人员。学习自动控制原理课程就成为熟悉自动控制的基础知识、理解控制系统的工作原理及掌握自动控制系统的分析和设计基本技能的主要途径。学习自动控制原理课程首先需要有一本好的教材。这对于学生来说,是请到了一个好的书本教师,而对于教授此课的教师来说,是得到了一个精心设计的参考教案。对于这个学生和教师在几个月的课程学习中共同依赖的课本,自然有许多理想特性的期待。这些期待也正是我们编书者的努力目标。

就知识点的分布而言,本书有较大的宽度,可以覆盖常用的原理性的全部基础知识。

就论述知识的深度而言,本书采用以建立基本概念和掌握基本分析技能够用为度的原则。因为所讲述的多种分析方法都是前人精心开发并已得到理论证明和多年实践检验的,所以本书不加证明地直接引用,只是为了让学生在有限时间内学习更多的有用知识和掌握更本质的概念和技能。为此,学生也应当采用“拿来先用”和“边用边理解其本质”的学习策略。

就自动控制原理课程的本质而言,本书突出的是自动控制系统的特性分析方法和控制器的初步设计理念。我们所期待的一个控制工程师或科技人员面对一个自动控制系统时可表现的能力是:首先,他会用方框图变换或信号流图法将该系统分解成环节或综合成大的系统;其次,他会用机理建模或实验建模法建立系统的数学模型,可能是传递函数、或是状态方程形式;第三,他会用系统分析方法分析出系统的基本特性,比如说,稳定性、快速性或稳态误差等;第四,他会用控制器的设计方法设计控制器或利用系统分析方法改进系统特性。

就自动控制原理课程的主要内容——系统特性分析方法而言,可谓丰富多彩、各有千秋。系统特性分析方法可主要分为时域法、根轨迹法、频域法和状态空间法四种。前三种方法都是基于传递函数模型,第四种方法基于状态方程模型。时域法是最基本的,它以阶跃响应直观地定义了时域性能指标,用劳斯判据可轻松判别系统稳定性,用稳态误差系数可定量分析系统的稳态误差。根轨迹法则利用变开环增益在闭环根平面上展示了系统的动态特性变化。频域法则利用对数幅频特性曲线直观地表示了系统的频率响应。状态空间法则可利用矩阵变换分析出系统的可控性和可观性。四种方法构成了控制理论的基础。不管是控制专业的学生还是非控制专业的学生都应该知道这四种方法,差别只在于程度上的深浅。

就控制系统的初步设计知识而言,在一般的自动控制原理教科书并不编入,而本书用了一整章的篇幅(第四章)。这是因为系统分析的目的就是为了设计和应用,连在一起考虑让学生更能体会到分析的用处和应用的效果。虽然控制专业的学生有后续的控制课程,但是早一点把设计和分析联系在一起对他们有很多益处,这对于非控制专业的学生更加有必要。

控制系统的分析要用大量的数学推导和数值计算,这使得人们一直在寻找更有效的方法和工具,事实上劳斯判据的发明就是为了避免解高阶代数方程。现在,有了高速运转的计算

机和高效的数值计算软件，控制原理中所需要的数值计算几乎都可交给计算机去完成。于是，在介绍过推算和图解方法之后，给出了可应用 MATLAB 工具的提示。读者可参考有关文献，自行实践，提高学习效率。

本书的第一、二、三、五、九章由翁思义编写，第四、六、八章由杨平编写，第七章由郭平编写，全书的统稿由杨平和翁思义完成。

本书的编写历史可以追溯到十余年前，几经重编后的最新版本呈现在读者面前。首先要感谢审阅过本书书稿的徐伟勇、蒋式勤、顾幸生和孙自强教授，是他们的认真把关和改进建议才保证了本书的较高质量。其次要感谢我校教学团队的众多成员的一贯支持，他们是完颜绍会、贾再一、王志萍、黄伟、余洁、徐晓丽、孙宇贞、李芹、徐春梅等老师。还想致谢多年来我们教过的学生，是他们深入思考后的大量提问使我们发现了教材编写和表达上的许多缺陷，从而及时地纠正过来。吴炯、顾猛、贺茂康等同学都给我们留下了深刻印象。当然，还要对多年来使用本教材的其他大学的多位教师表达感激之情，是他们提出的许多宝贵意见，使我们的教材更为完善。

无论何时，发现本书不妥之处，恳请来信指正 (yangping1201@126.com)，不胜感激。

作者

2008 年 8 月

# 目 录

## 前言

|                      |     |
|----------------------|-----|
| 第一章 绪论               | 1   |
| 第一节 引言               | 1   |
| 第二节 反馈控制系统的基本概念      | 5   |
| 第三节 方框图表示法和控制系统组成要素  | 6   |
| 第四节 自动控制系统的分类        | 6   |
| 第五节 控制系统性能分析         | 11  |
| 第六节 自动控制系统的性能要求      | 13  |
| 习题一                  | 14  |
| 第二章 控制系统的数学模型        | 16  |
| 第一节 引言               | 16  |
| 第二节 微分方程、传递函数和阶跃响应   | 16  |
| 第三节 机理分析建模方法         | 18  |
| 第四节 典型环节的动态特性        | 27  |
| 第五节 方框图等效转换和信号流图     | 41  |
| 第六节 状态空间模型及求解        | 49  |
| 第七节 状态空间模型的标准形       | 54  |
| 第八节 状态空间模型的标准形变换     | 61  |
| 第九节 实验建模方法           | 63  |
| 习题二                  | 73  |
| 第三章 控制系统的时域分析        | 78  |
| 第一节 引言               | 78  |
| 第二节 时域性能指标           | 78  |
| 第三节 一阶系统的时域分析        | 81  |
| 第四节 二阶系统的时域分析        | 84  |
| 第五节 高阶系统的动态响应及简化分析   | 94  |
| 第六节 零极点分布对系统动态响应的影响  | 97  |
| 第七节 控制系统的稳定性与代数判据    | 99  |
| 第八节 控制系统的稳态误差分析及误差系数 | 110 |
| 第九节 李亚普诺夫稳定性分析       | 117 |
| 习题三                  | 122 |
| 第四章 控制系统设计导论及时域设计    | 126 |
| 第一节 引言               | 126 |
| 第二节 系统结构设计           | 128 |

|            |                       |            |
|------------|-----------------------|------------|
| 第三节        | 控制规律选择                | 130        |
| 第四节        | 控制器参数整定               | 133        |
| 第五节        | 串级控制系统                | 136        |
| 第六节        | 多闭环控制系统               | 137        |
| 第七节        | 比值控制系统                | 139        |
| 第八节        | 前馈控制系统                | 140        |
| 第九节        | 解耦控制系统                | 144        |
| 第十节        | 迟延补偿控制系统              | 146        |
| 第十一节       | 其他控制系统                | 147        |
|            | 习题四                   | 151        |
| <b>第五章</b> | <b>控制系统的根轨迹分析与设计</b>  | <b>152</b> |
| 第一节        | 引言                    | 152        |
| 第二节        | 根轨迹的基本概念              | 152        |
| 第三节        | 绘制根轨迹图的规则和方法          | 156        |
| 第四节        | 开环零极点对根轨迹的影响          | 168        |
| 第五节        | 控制系统的根轨迹设计            | 171        |
| 第六节        | 参变量根轨迹族               | 177        |
| 第七节        | 零度根轨迹                 | 180        |
|            | 习题五                   | 182        |
| <b>第六章</b> | <b>控制系统的频域分析与设计</b>   | <b>184</b> |
| 第一节        | 引言                    | 184        |
| 第二节        | 频率特性的基本概念             | 184        |
| 第三节        | 频率特性的极坐标图             | 185        |
| 第四节        | 频率特性的对数坐标图            | 191        |
| 第五节        | 控制系统的奈氏图分析            | 200        |
| 第六节        | 控制系统的伯德图分析            | 210        |
| 第七节        | 闭环系统频率特性分析            | 216        |
| 第八节        | 控制系统的频域设计             | 222        |
|            | 习题六                   | 231        |
| <b>第七章</b> | <b>离散控制系统的分析与设计</b>   | <b>235</b> |
| 第一节        | 引言                    | 235        |
| 第二节        | 连续信号的采样和复现            | 236        |
| 第三节        | 离散控制系统的数学模型           | 239        |
| 第四节        | 离散控制系统的性能分析           | 247        |
| 第五节        | 离散控制系统的设计             | 255        |
|            | 习题七                   | 270        |
| <b>第八章</b> | <b>控制系统的状态空间分析与设计</b> | <b>273</b> |
| 第一节        | 引言                    | 273        |
| 第二节        | 离散状态方程及时域解            | 273        |

|             |                            |     |
|-------------|----------------------------|-----|
| 第三节         | 连续状态方程与离散状态方程之间的转换·····    | 275 |
| 第四节         | 状态转移矩阵的计算·····             | 275 |
| 第五节         | 系统的稳定性、能控性和能观性分析·····      | 280 |
| 第六节         | 线性定常系统的结构分解·····           | 287 |
| 第七节         | 闭环控制系统的状态空间分析·····         | 290 |
| 第八节         | 用极点配置法设计状态控制器·····         | 294 |
| 第九节         | 用极点配置法设计状态观测器·····         | 297 |
| 第十节         | 最优控制概论·····                | 301 |
| 习题八         | ·····                      | 304 |
| <b>第九章</b>  | <b>非线性控制系统的分析与设计</b> ····· | 307 |
| 第一节         | 引言·····                    | 307 |
| 第二节         | 非线性控制系统的描述函数分析·····        | 313 |
| 第三节         | 非线性控制系统的相平面分析·····         | 326 |
| 第四节         | 非线性控制系统设计·····             | 342 |
| 习题九         | ·····                      | 346 |
| <b>附录</b>   | ·····                      | 349 |
| 附录 1        | 拉普拉斯变换表及定理·····            | 349 |
| 附录 2        | 用拉氏变换求解微分方程·····           | 351 |
| 附录 3        | $z$ 变换表及定理·····            | 353 |
| 附录 4        | $z$ 反变换解算·····             | 355 |
| 附录 5        | 典型系统的根轨迹图·····             | 357 |
| 附录 6        | 习题参考答案·····                | 358 |
| <b>参考文献</b> | ·····                      | 380 |

## 第一章 绪 论

### 第一节 引 言

在工程和科学技术的发展过程中,自动控制技术起着十分重要的作用。应用自动控制技术,能帮助人类把曾认为做不到的事情变为现实。人造卫星、宇宙飞船、登上月球、导弹制导、自动驾驶等高精尖的项目和工程都离不开自动控制技术。在各种工业部门,例如石油、化工、冶金、机械、轻工、电子、汽车、通信、航空、航天、电力等部门,也都广泛应用自动控制技术。随着自动控制理论和实践不断发展及完善,在经济、管理、生物、社会学、生态等各种非工程领域,也广泛应用自动控制技术。因此,自动控制技术已成为最有发展前途的科学技术之一,它的发展趋势更是不可限量。可以毫不夸张地说,自动控制技术已经成为现代化社会中不可或缺的组成部分。

#### 一、控制的含义

控制(control)可定义为**某个主体使某个客体按照一定的目的来动作**。例如,一个人驾驶汽车去某处这样一种行为,就是实现了一种控制。这里,人是主体,汽车是客体,去某处为目的。因此可以说,上述行为是一个主体(人)为了一定的目的控制了一个客体(汽车)。我们通常把**主体是人的控制称为人工控制,把主体是机器的控制称为自动控制**。前者如人驾驶汽车,后者如无人驾驶飞机。如果主体是由人和机器共同组成,则称为半自动控制,例如用普通洗衣机洗衣,可以定时自动停止旋转,但要由人来设定时间。

客体的含义比较广泛,一个物体、一套装置、一个物理化学过程、一个系统等都是客体。例如,一个物体,可以是飞船、汽车、电炉、水箱等。一套装置,可以是发电机组、废水处理设备、造纸设备、轧钢设备等。一个物理化学过程,可以是燃烧过程、流动过程、离子变换过程、精馏过程等。一个系统,可以是电力系统、冶金系统、导弹制导系统、雷达导航系统等。无论何种客体,不论其规模大小,均可表现为控制的专业特点。例如,客体为锅炉的控制,则被称为锅炉控制。类似地,常可见到诸如燃烧控制、导弹飞行控制等等的提法。

控制的**目的**,或者说对控制的要求,常见的有稳定、快速、准确、经济、省力、节能、节水等。不同的生产过程对控制的要求不尽相同,各有其特点,因此有“稳定控制”、“无差控制”、“节能控制”、“环保控制”等不同的说法。

#### 二、人工控制和自动控制

在日常生活和生产过程中,人工控制和自动控制的应用非常广泛,现再举一些具体的例子以加深对“人工控制”和“自动控制”的理解。

##### 1. 人工控制举例

- (1) 人的体温控制:天冷时加衣服,天热时减衣服。
- (2) 自行车速度控制:根据马路的交通情况,人为的加快骑行速度或减慢骑行速度。
- (3) 汽车驾驶控制:转动方向盘改变方向,加油门、刹车等改变速度。
- (4) 收音机音量控制:调节音量旋钮,改变声音的强、弱程度。

(5) 普通洗衣机的控制：人们根据衣服的多少及脏的程度来控制加水和加洗衣粉的量、洗的次数、甩干时间等。

## 2. 自动控制举例

(1) 电饭煲温度的自动控制：根据人们事先设计好的顺序，自动进行定时加温、保温。

(2) 空调器的温度控制：根据人们设定的温度自动开关冷气机或调节电机转速以保持室内为一定的温度。

(3) 汽轮机的转速控制：汽轮机的转速高于或低于额定转速时，自动关小或开大主汽阀门，自动维持汽轮机的转速为额定值。

(4) 声控、光控的路灯：根据脚步声开灯关灯、根据天亮天黑程度关灯开灯等。

(5) 导弹飞行控制：飞行姿态控制、自动纠正方向、自动导向目标等。

(6) 人造卫星、宇宙飞船控制：正确进入预定轨道、姿态控制、使太阳能电池板一直朝向太阳、使无线电天线一直指向地球、使它所携带的各种测试仪器自动地工作等。

## 三、自动控制学科的特点

自动控制学科具有以下四个方面的特点。

### 1. 应用广泛

小至电子手表，大至宇宙空间站，各个领域都有自动控制理论的应用，都离不开自动控制技术。例如，农业中已广泛应用的塑料大棚，大棚内的温度、湿度自动控制可以使农业生产不受季节、气候的影响，一年四季都可以吃到新鲜的蔬菜和水果。家庭中的电冰箱、洗衣机、空调等，交通工业中的汽车、飞机、轮船等，电信工业中的移动电话、传真等，无论何种行业都会用到自动控制技术。

### 2. 日益重要

自动控制技术用得越广泛、越深入，就越显出它的重要性。现代工业、农业的生产，现代生活质量的提高，都可部分归功于自动控制技术的发展。许多现代化的工厂企业，如果没有自动控制技术，生产将无法进行。例如大型现代化发电厂，需要监测的测量点有上万个，需要控制的量有上百个，如果没有自动控制系统，没有自动监控和保护系统，现代电厂的运行就无法进行。又如工业加热炉，其炉温按照生产要求必须保持一定的水平，并要在经常变化的热负荷下维持炉温基本不变，只允许有很小的误差，此种情况下靠人力凭经验来控制就很难保证质量，不但会造成燃料（即能源）的浪费，还会影响产品的质量。再如现代化军事方面，以雷达高射炮为例。在敌方飞行器飞行时，雷达天线必须时刻旋转，随时自动保持指向敌方飞行器，雷达测出的敌方飞行器方位和仰角数据经过计算机数据处理后，用来控制高射炮的转动，使之能时刻瞄准敌方飞行器，随时准备开火，瞄准的角度误差必须很小，如果不用自动控制技术，这显然是做不到的。

### 3. 发展迅速

由于自动控制技术用途广泛，地位越来越重要，所以自动控制学科的发展非常迅速。而且其他方面的科技成就也促进了自动控制学科的发展，尤其是近年来计算机、通信和网络技术的成就，使得自动控制学科如虎添翼、日新月异。

自动控制学科包括控制理论和控制技术两个方面。它和其他学科一样，同样经历了由简单到复杂，由初级到高级的发展过程。一般认为控制理论可以分为经典和现代两部分。

经典控制理论是指 20 世纪 50 年代以前的控制理论。在工业化的历史发展中,经典自动控制技术也逐渐发展起来,18 世纪瓦特 (J. Watt) 发明的蒸汽机离心调速器是将自动控制技术应用到工业中的最早代表。1987 年劳斯 (E. J. Routh) 提出了判别控制系统稳定性的代数判据。1932 年奈奎斯特 (H. Nyquist) 提出了研究控制系统的频率响应法。1948 年伊文斯 (W. R. Evans) 提出了根轨迹法。这些重大贡献成为控制理论和控制技术发展史上的里程碑。建立在时域分析法、频率响应法和根轨迹法基础上的控制理论被称为经典控制理论。

20 世纪 50 年代末至 60 年代初,核能、计算机及空间技术的科技发展,对自动控制学科提出了更高的要求。大型复杂系统的控制,高速度控制操作及高精度控制品质的要求,使经典控制理论的局限性暴露出来,促使人们寻求更完善的控制理论和更高级的控制技术。在这种背景下,贝尔曼 (R. Bellman) 等人提出了状态空间法。1960 年卡尔曼 (R. E. Kalman) 在控制系统的研究中成功地应用了状态空间法,并提出了能控性和能观测性的新概念,这被认为是现代控制理论发展的开端。60 年代以后,新控制理论不断涌现,如最优控制、系统辨识、多变量控制、自适应控制、专家系统、人工智能、神经网络控制、模糊控制、大系统理论等等。

#### 4. 相关学科多

从上面自动控制学科的发展可以看出,自动控制理论和技术的发展,已经向多学科的综合应用方向发展,因此现代的控制工程师,不但要懂得控制理论,还要求能熟练地使用计算机,会编制控制软件,熟悉通信技术、网络技术、机器人理论等。

#### 四、自动控制学科的细分

根据国务院 1997 年颁布的《授予博士、硕士学位和培养研究生的学科、专业目录》,自动控制学科设在工学类,一级学科名称为“控制科学与工程”,其二级学科细分为五个,分别为“控制理论与控制工程”、“检测技术与自动化装置”、“模式识别与智能系统”、“系统工程”、“导航、制导与控制”。这五个学科表明了控制学科的内涵。一般认为,“控制理论与控制工程”学科侧重于控制理论及其应用的研究,偏软,偏理论;“检测技术与自动化装置”学科侧重于传感器、执行器和控制器等检测和控制类自动化仪表及其检测与执行技术的研究,偏硬,偏工程;“模式识别与智能系统”学科侧重于信号与图像的分析 and 模式识别及其智能分析和处理的研究,偏知识工程、人工智能理论和计算机信息处理技术;“系统工程”学科侧重于系统管理与过程控制的自动化和最优化的研究,偏经济,偏管理;“导航、制导与控制”学科侧重于航空、航天和航海的自动检测与控制技术研究,偏空间技术和军事科学。不管控制学科包含的内涵有多么广,它们共同的基础都是自动控制理论。

#### 五、自动控制理论的内容

自动控制理论可分为经典控制理论和现代控制理论两部分。

经典控制理论:以传递函数为基础,研究单输入、单输出控制系统的分析和设计。

现代控制理论:以状态空间法为基础,进行多输入、多输出、变系数、非线性等控制系统的分析和研究。

自动控制理论可粗略地按如下层次划分:



## 六、自动控制理论的基本研究课题

自动控制理论中的两大基本研究课题是控制系统的分析和控制系统的设计。

### (一) 控制系统的分析

这类课题是针对现有的控制系统，分析它是否符合所要求的性能指标，如超调量、振荡次数、调整时间、稳态误差等。控制系统分析的基本研究方法有三种：

#### 1. 实验法

在控制系统的输入端加入典型信号（例如阶跃信号、正弦信号等），分析系统的输出响应（例如阶跃响应、频率响应等），分析系统响应的特性是否符合所要求的性能指标。

#### 2. 解析法

根据控制系统数学模型的结构和参数，通过一定的计算求出系统的性能，分析其是否符合生产上提出的要求。解析法有效的前提是要能较方便和正确地建立控制系统的数学模型。

在经典控制理论中，时域分析法、频域分析法和根轨迹法就是分析控制系统的解析方法。在现代控制理论中，状态空间法也是一种解析方法。

#### 3. 计算机仿真法

当控制系统的模型建立后，可用计算机仿真法进行仿真试验。用针对系统模型的动态特性数值计算代替实际系统的测试实验。计算机仿真法已成为更高效和更常用的系统分析方法。

### (二) 控制系统的设计

这类课题是根据生产上提出的性能指标要求，设计控制系统及控制器的结构和参数。控制系统设计的步骤如下：

(1) 确定性能指标和约束条件。例如是否允许有稳态误差，误差允许范围如何，调整时间允许多长，是否允许被控制的对象有周期性变化，控制量是否有限制等等。

(2) 设计控制方案。例如单回路还是多回路，采用一个控制器还是多个控制器等。

(3) 设计控制器的结构和参数。可应用时域分析法、频域分析法、根轨迹法和状态空间

法来设计和计算。一般可用计算机来辅助设计 (CAD)。

(4) 进行性能校核及参数调整。一般可用现场调试或计算机仿真试验两种方式。用计算机仿真试验法整定后一般还需要通过现场试验来确认。

## 第二节 反馈控制系统的基本概念

一个自动控制系统主要由两部分组成：一部分是被控制的设备或过程，称为受控对象或受控过程；另一部分是起控制作用的设备或装置，称为控制装置，如图 1-1 所示。对于受控过程子系统而言，其输出变量是表征设备或过程的运行情况或状态且需要加以控制的参数称为被控量；其输入变量是可使被控量发生变化的控制量或称操作量。对于控制装置子系统而言，输入变量一般有两种：一是希望被控量应该具有的数值称为设定值或给定值，另一种是被控量的反馈量；输出变量就是受控过程子系统的输入量，即控制量或称操作量。引起被控量发生不期望的变化的外部和内部因变量，称为外扰和内扰，通称为扰动量。

现实中的自动控制系统绝大部分为反馈控制系统，即控制装置引入了被控量的反馈量，控制过程存在反馈工作机理。“反馈”是自动控制理论中最基本的概念之一，反馈控制是一种最基本的自动控制原理。

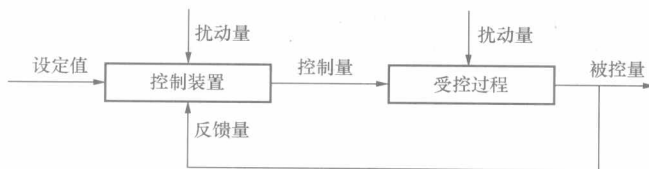


图 1-1 自动控制系统的组成

现以一贮槽的液位控制系统为例来进一步说明反馈控制系统的一些基本概念，图 1-2 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以一定的精度稳定于某一高度  $H_0$ 。这里贮槽即为受控对象，液位  $H$  是被控量， $H_0$  为期望值。期望值  $H_0$  的大小可以根据需要改变。当外部负荷改变，即  $Q_2$  改变时， $Q_1 \neq Q_2$ ，将使液位上升或下降。图 1-2 中的液位传感器将自动地检测液位

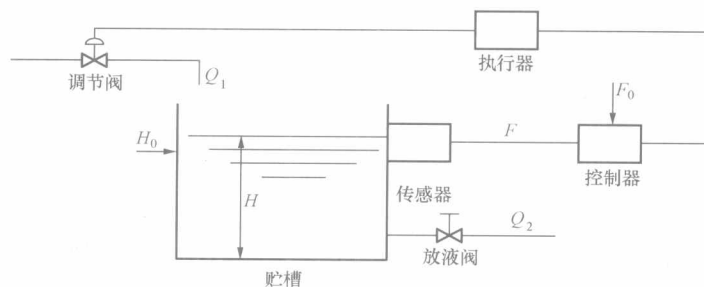


图 1-2 贮槽液位控制系统的原理结构图

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），此信号就是送入控制器的液位测量值  $F$ 。在控制器中液位给定值  $F_0$ （与  $H_0$  成比例）与液位测量值  $F$  比较而得出偏差值。控制器根据偏差值的大小，按某种运算规律计算出控制器应输出的控制量信号。控制量信号送到执行器，执行器去操作调节阀阀门，使  $Q_1$  改变，从而使液位保持在所希望的数值上。这就是贮槽液位的自动控制工作原理和基本过程。在这个控制过程中，控制器改变控制量不仅仅依据给定值还考虑了被控量的反馈量，形成了反馈控制机制。

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），此信号就是送入控制器的液位测量值  $F$ 。在控制器中液位给定值  $F_0$ （与  $H_0$  成比例）与液位测量值  $F$  比较而得出偏差值。控制器根据偏差值的大小，按某种运算规律计算出控制器应输出的控制量信号。控制量信号送到执行器，执行器去操作调节阀阀门，使  $Q_1$  改变，从而使液位保持在所希望的数值上。这就是贮槽液位的自动控制工作原理和基本过程。在这个控制过程中，控制器改变控制量不仅仅依据给定值还考虑了被控量的反馈量，形成了反馈控制机制。

### 第三节 方框图表示法和控制系统组成要素

在研究系统时，为了便于清楚地表示和分析系统各组成环节间的相互影响和信号传递关系，常采用方框图表示法。方框图表示法定义了四种图形元素：**长方形框**表示一个环节、一种功能或输入与输出之间的关系；**求和圆**表示输出变量是所有输入变量的代数和；**直线段**表示变量的传递路线；直线段一端的**箭头**表示变量信息传递的方向。当一个系统为某种分析的需要，定义了每一个组成部分或环节及其相应的输入和输出变量，就可以用方框图表示法绘制出该系统的方框图。对同一系统，可能由于环节和其输入输出变量的定义不同而绘制出多种方框图。由于方框图表示法既简单又直观，所以已成为系统分析中最常见的分析方法之一，在自动控制系统分析中也是如此。

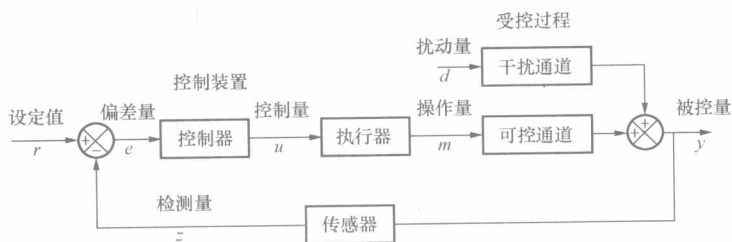


图 1-3 反馈控制系统方框图

应用方框图表示法，可以把最典型的反馈控制系统表示如图 1-3 所示。可以看出，典型的反馈控制系统包括了受控过程、传感器、控制器、执行器四个基本环节。传感器、控制器和执行器组成了控制装置。其中，

传感器用来测量被控量的大小，并把被控量（例如水位、压力、温度、流量、转速等）变换成统一的标准电气信号或数字信号，送往控制器；控制器将传感器反馈的被控量与给定值比较，生成偏差信号，并据此按一定的控制规律运算出控制信号（标准的电气信号或数字信号）给执行器；执行器将控制器发来的控制信号变换成受控对象的输入变量，例如，阀门开度、质量流量、力矩等。受控过程又可细分为两个部分：可控通道和干扰通道。可控通道建立了从操作量到被控量间的关系。干扰通道则反映了扰动量对被控量的影响。

图 1-3 所示的典型反馈控制系统中，还表示出典型反馈控制系统的七个基本变量：**设定值  $r$**  (Setpoint Value, SV)，**偏差值  $e$**  (Deviation Value, DV)，**被控量  $y$**  (Process Value, PV)，**控制量  $u$**  (Control Value)，**操作量  $m$**  (Manipulation Value, MV)，**扰动量  $d$**  (Disturbance Value)，**被控量  $y$  的检测量  $z$**  (Measurement Value)。在调节和显示仪表中，监控计算机的显示屏上常见缩写字母 SV、PV 和 MV，用以标记的设定值、被控量和操作量。当忽略执行器，或者把执行器归为受控过程的一部分时，则控制量就等同于操作量。当忽略传感器，或者把传感器归为受控过程的一部分时，则被控量就等同于它的检测量。在本书后面的论述中，常常只论及被控量和控制量。

### 第四节 自动控制系统的分类

根据分析和观察一个自动控制系统的不同视角和着眼点，可以做出不同的自动控制系统分类。以下列出十种分类方法。不同的分类方法将从不同的侧面反映控制系统的特征。

## 一、按自动控制系统是否形成闭合回路分类

### 1. 开环控制系统

图 1-4 表示了一个直流电动机转速控制系统。电动机带动工作机械以一定的转速旋转，工作机械可以是机床的转动部件或者其他要求转动的机械。由图 1-4 中的电位器可改变电动机的转速。当转动电位器时，电位器的输出电压发生变化，经过功率放大器后去改变电动机的电枢电压，从而改变了电动机的转速。不同的电位器位置，就有相应的电动机转速。图 1-4 的控制系统可以用图 1-5 方框图表示。可以看出，这个系统的信息传递是单方向的。电位器位置相当于转速设定值，功率放大器相当于控制器和执行器，电动机是受控对象，电动机转速是被控量。被控量没有反馈至控制器而形成一个闭合回路。这种控制系统就称为开环控制系统。当电动机所带动的工作机械有变化时，即使电位器位置不变，转速也会升高或降低。这就造成了转速设定值与实际转速值的不一致。所以，开环控制系统的最大的缺点就是易受干扰的影响，控制精度较低；而它明显的优点是结构简单，成本低，也容易实现。

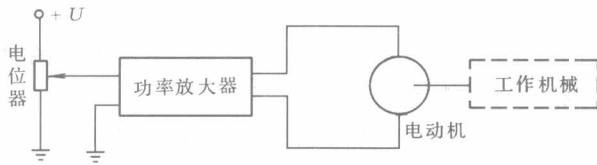


图 1-4 直流电动机转速开环控制系统



图 1-5 电动机转速开环控制方框图

### 2. 闭环控制系统

在图 1-4 所示系统的基础上，增加一个测速发电机来检测电动机转速，再将这个转速信号反馈到功率放大器输入端与电位器的电压进行比较，其偏差值使放大器的输出电压改变，再去控制电动机的转速，这就形成了电动机转速的闭环控制系统，如图 1-6 所示。这个控制系统可用图 1-7 所示的方框图表示。可以看出，这个系统的特点是其信息传递路线形成了一个闭合回路，被控量电动机转速被反馈至控制器。

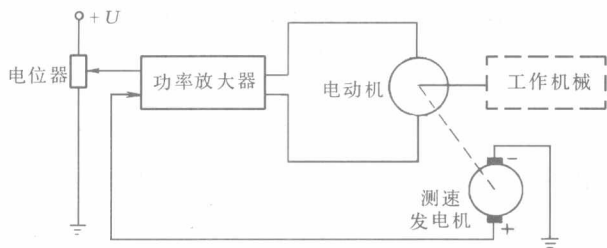


图 1-6 电动机转速闭环控制系统

这样一来，只要电位器的位置不变，无论电源变化（内扰）或负载变化（外扰）等扰动引起的转速（被控量）变化，都将使放大器输出发生相应变化，从而自动地保持电动机输出转速不变。因此，闭环控制系统的优点就是控制精度高，抗干扰，而缺点是结构复杂，成本高。

## 二、按控制器的馈入信号的特点分类

### 1. 反馈控制系统

反馈控制系统是根据被控量和给定值的偏差进行调节的，最后使之消除偏差，达到被控量等于给定值的目的。图 1-6 和图 1-7 都是反馈控制系统。因为反馈控制系统是将被控量

变化的信号反馈到控制器的输入端, 形成一个闭合回路, 所以反馈控制系统一定是闭环控制系统。一个复杂的控制系统, 也可能有多个反馈信号组成多个闭合回路, 这称为多回路反馈控制系统。

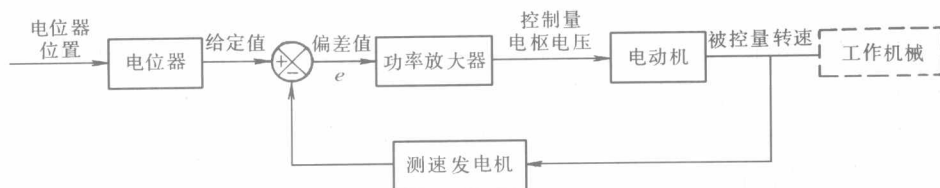


图 1-7 电动机转速闭环控制方框图

## 2. 前馈控制系统

前馈控制系统直接根据可测扰动信号进行调节。可测扰动量是控制量变化的依据。由于它没有被控量的反馈信号, 不能形成闭合回路, 所以它是一种开环控制系统。

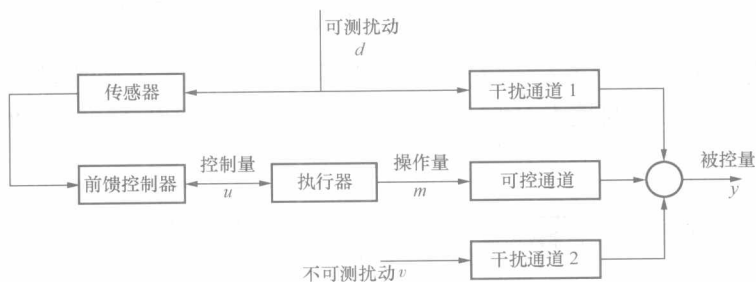


图 1-8 前馈控制系统方框图

图 1-8 所示为前馈控制系统方框图, 扰动  $d(t)$  将使被控量  $y(t)$  发生变化, 前馈控制器根据扰动量进行控制, 及时抵消扰动量  $d(t)$  对被控量  $y(t)$  的影响, 从而使被控量  $y(t)$  保持不变。当有其他不可测的扰动  $v$  影响受控

对象时, 这种开环结构的前馈控制系统就不能保证控制被控量到较高的精度, 所以, 单纯的前馈控制系统在实际过程中很少使用。注意, 图 1-8 中求和圆的表示用了更简约的形式: 不在圆内画分隔线和标注输入变量的正负号; 若某输入变量应带负号求代数和, 则在求和圆外该输入变量箭头附近标注负号; 若是带正号变量, 则省略标注。

## 3. 前馈—反馈复合控制系统

如图 1-9 所示, 在反馈控制系统的基础上, 增加了对于可测扰动  $d(t)$  的前馈控制, 便构成了前馈—反馈复合控制系统。当可测扰动  $d(t)$  发生后, 前馈控制器能及时消除扰动对

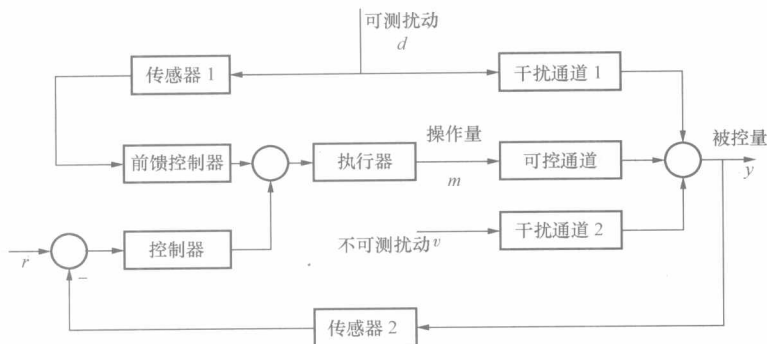


图 1-9 前馈—反馈复合控制系统方框图

被控量的影响,而对于其他的扰动,反馈控制器将发挥作用,两种控制作用优势结合,可得到更高的控制质量。

### 三、按给定值信号的特点分类

#### 1. 定值控制系统

当自动控制系统运行时,给定值保持恒定不变,也就是使被控量保持不变,这就是定值控制系统。它是实际中应用的最多的一种控制系统。例如,电动机转速控制、空调房间温度控制、容器的液位控制、电力网的频率控制等都是定值控制系统。

#### 2. 随动控制系统

随动控制系统简称随动系统,是给定值随时间变化频繁的控制系统。所以要求被控量能随时跟踪给定值的变化。例如在锅炉燃烧过程控制中,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、跟踪卫星的雷达天线控制系统、机械加工中的靠模加工控制系统等都属于随动控制系统。

#### 3. 程序控制系统

程序控制系统的给定值是一个已知的时间函数,控制的目的是让被控量按给定值时间函数变化。例如在发电厂汽机启动过程中,要求转速按预先规定的时间函数来升速。又如材料热处理时的升温保温过程控制及程序控制机床等,都属于程序控制系统的范畴。

### 四、按照控制系统主要元件的特性来分类

#### 1. 线性控制系统

当控制系统各环节的输入/输出特性具有线性关系,即系统的动态过程可以用线性微分方程来描述时,则称这种系统为线性控制系统。线性系统的特点是可以应用叠加原理,所以有符合叠加原理的系统就是线性系统的说法。线性元件的特性如图 1-10 所示。

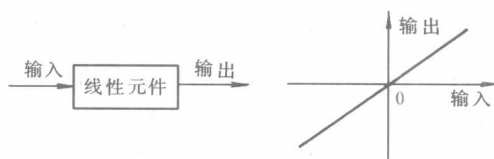


图 1-10 线性元件的特性

#### 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,系统就应该用非线性方程来描述。由非线性方程描述的控制系统称为非线性控制系统。在控制系统中典型的非线性元件特性有饱和非线性、死区非线性、继电器特性非线性等,如图 1-11 所示。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。

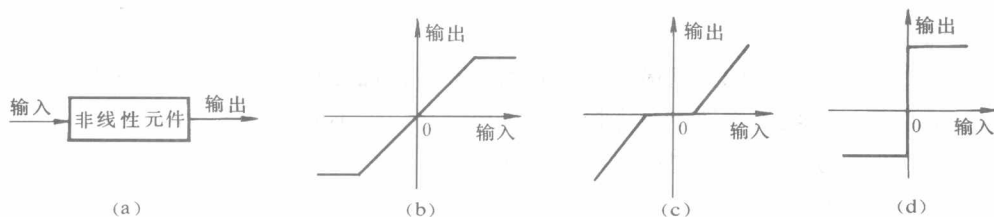


图 1-11 非线性元件的典型特性

(a) 非线性元件; (b) 饱和非线性; (c) 死区非线性; (d) 继电器特性非线性