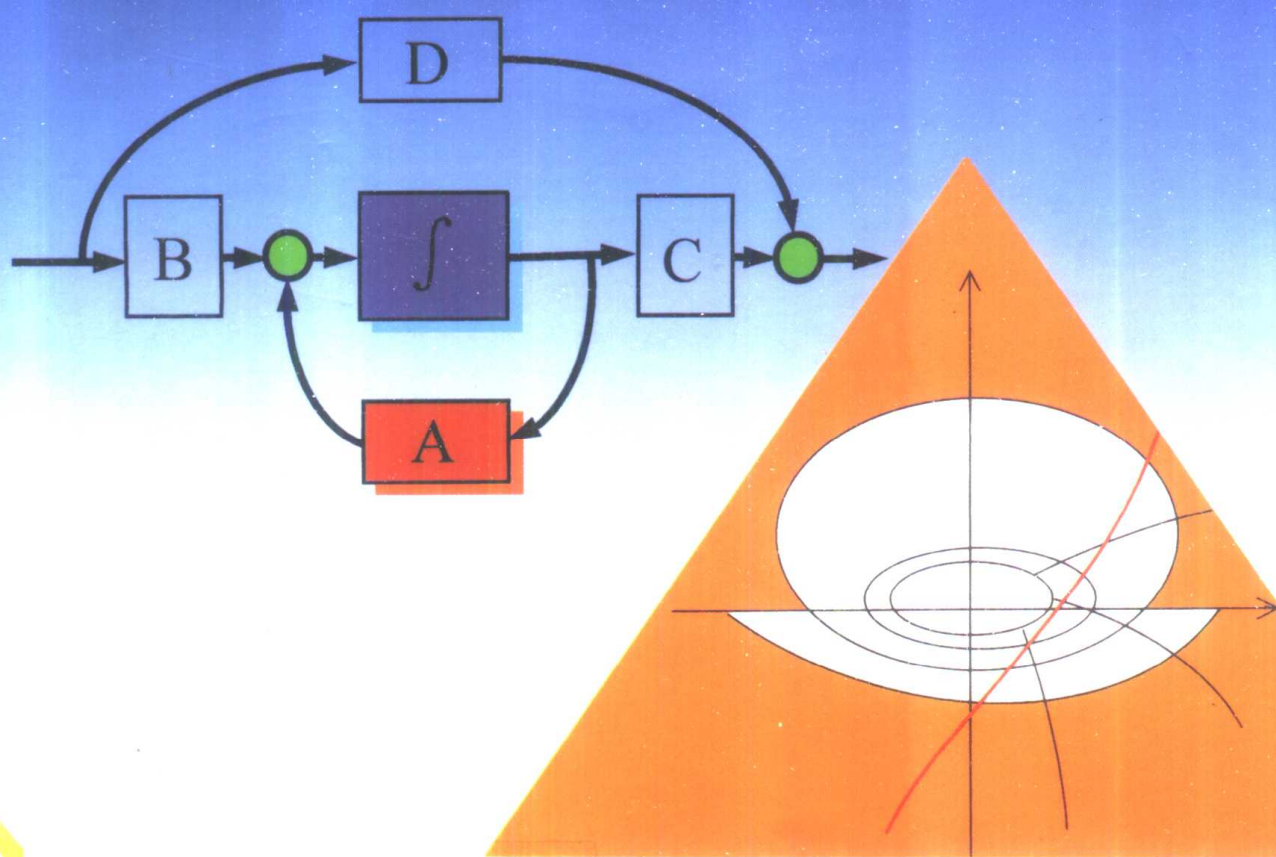


自动控制原理

翁思义
杨平

编著



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

自动控制原理

翁思义 编著
杨 平



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

内 容 提 要

本书比较全面地介绍了自动控制的基本原理。特别加重了离散控制理论和现代控制理论中的状态变量控制理论部分。本书除了具有注重系统分析的特色外,还加强了系统设计的基本理论部分。本书的主要内容包括:自动控制的基本概念、控制系统的时域分析、频域分析和根轨迹法、控制系统的经典设计和校正、离散控制系统、非线性控制系统、控制系统的状态空间分析。

本书可作为高等院校电气信息类专业和其他相关专业的本科教材,也可供从事自动化科技工作的工程技术人员自学和参考。

图书在版编目(CIP)数据

自动控制原理/翁思义,杨平编著. -北京:中国电力出版社, 2001

ISBN 7-5083-0568-X

I. 自… II. ①翁…②杨… III. 自动控制理论
IV. TP13

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2001) 第 12483 号

中国电力出版社出版、发行

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

实验小学印刷厂印刷

各地新华书店经售

2001 年 7 月第一版 2001 年 7 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 30.5 印张 693 千字

印数 0001—6000 册 定价 48.00 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)

前 言

本书是在作者 10 多年讲授《自动控制原理》课程的实践中,吸收各种“自动控制原理”教科书的优点及教学实践的经验编著而成的。本书根据高等学校电气信息类专业教学大纲的要求,系统地介绍了经典控制理论的主要内容以及现代控制理论的基础——状态空间法。它可用作高等学校电气信息类专业的本科教材,也可作为其他相关专业的“自动控制原理”课程的教材。还可供从事生产过程自动化工作的工程技术人员参考。

本书内容共分九章。第一章绪论,介绍自动控制的一些基本概念。第二章自动控制系统的数学描述,介绍自动控制系统分析和设计中应用的数学工具及建模方法。第三章~第五章为控制系统的时域分析、频域分析和根轨迹法,介绍自动控制系统的经典分析和研究方法。第六章控制系统的校正和设计,介绍自动控制系统的经典设计和综合的方法。第七章离散控制系统,介绍离散信号控制系统的分析和设计方法。第八章控制系统的状态空间分析,介绍控制系统的状态空间分析和设计方法。第九章非线性控制系统,介绍非线性系统的描述函数和相平面分析方法。

本书力求符合课程教学大纲的要求,讲清基本概念,同时注意到本门学科的系统性、科学性和联系实际等方面的要求。每章后附有一定数量的习题,书末有习题参考答案,可供读者练习和参考。

本书编著者参加并完成了由世界银行贷款资助的上海市高校重点课程建设项目——《自动控制原理》课程建设(已获得 2000 年上海市优秀教学成果奖)。该项目包括《自动控制原理》课程的教材编写、计算机辅助课堂教学软件(即电子教案)和计算机辅助实验教学软件的编制等。

本书的整套电子教案已由上海电力学院信息与控制技术系研制成功。该电子教案可生动地进行控制过程动态分析的课堂演示以及计算机辅助教学实验。任课教师用这套电子教案可实现无黑板的课堂教学。需用此电子教案的教师和读者可与本书编著者联系。

本书由上海电力学院翁思义、杨平编著。本书的成稿过程中,上海交通大学徐伟勇教授提出了许多宝贵意见和建议,还得到了上海电力学院教师王志萍、冯照坤、徐晓丽等的热情支持和帮助,在此一并表示感谢。

由于编者水平有限,书中存在的缺点和不足之处,敬请读者批评指正。

作 者

2000 年 2 月



前 言

第一章 绪 论

§ 1.1 引言	1
§ 1.2 反馈控制系统的基本概念	5
§ 1.3 自动控制系统的组成和方框图	6
§ 1.4 自动控制系统的分类	7
§ 1.5 控制系统性能分析	12
§ 1.6 自动控制系统的性能要求	15
习题一	16

第二章 自动控制系统的数学描述

§ 2.1 引言	18
§ 2.2 机理分析建模方法	19
§ 2.3 拉氏变换与传递函数	28
§ 2.4 典型环节的动态特性和传递函数	38
§ 2.5 系统方框图的等效转换和信号流图	50
§ 2.6 实验建模方法	60
§ 2.7 PID 控制器	71
习题二	89

第三章 控制系统的时域分析

§ 3.1 引言	93
§ 3.2 时域性能指标	94
§ 3.3 一阶系统的时域分析	97
§ 3.4 二阶系统的时域分析	101
§ 3.5 高阶系统的动态响应及简化分析	112
§ 3.6 零极点分布对系统动态响应的影响	116
§ 3.7 控制系统的稳定性与代数判据	119
§ 3.8 控制系统的稳态误差分析及误差系数	135
习题三	145

第四章 根轨迹法

§ 4.1 引言	149
§ 4.2 根轨迹的基本概念	149
§ 4.3 绘制根轨迹图的规则和方法	154
§ 4.4 开环零极点对根轨迹的影响	174
§ 4.5 参变量根轨迹族	178
习题四	182

第五章 控制系统的频域分析

§ 5.1 引言	183
§ 5.2 频率特性的基本概念	183
§ 5.3 频率特性的极坐标图	185
§ 5.4 频率特性的对数坐标图	191
§ 5.5 控制系统的奈氏图分析	200
§ 5.6 控制系统的伯德图分析	212
§ 5.7 闭环系统频率特性分析	219
习题五	229

第六章 控制系统的校正和设计

§ 6.1 引言	233
§ 6.2 串联校正典型环节特性	238
§ 6.3 用根轨迹法设计串联校正环节	243
§ 6.4 用频率特性法设计串联校正环节	253
§ 6.5 串联校正环节的其他设计方法	260
§ 6.6 局部反馈校正及其系统设计	267
§ 6.7 前馈校正及其系统设计	268
§ 6.8 纯迟延校正及其系统设计	272
习题六	273

第七章 离散控制系统

§ 7.1 引言	275
§ 7.2 连续信号的采样和复现	276
§ 7.3 z 变换	279
§ 7.4 离散控制系统的数学模型	287
§ 7.5 离散控制系统的性能分析	297
§ 7.6 离散控制系统的设计	306
习题七	332

第八章 控制系统的状态空间分析

§ 8.1 引言	336
§ 8.2 系统的状态空间描述	337
§ 8.3 连续状态方程的解	341
§ 8.4 离散状态方程的解	344
§ 8.5 连续状态方程与离散状态方程之间的转换	345
§ 8.6 状态转移矩阵的计算	346
§ 8.7 单变量连续系统状态空间描述的标准形	353
§ 8.8 化为标准形的变换	363
§ 8.9 系统的稳定性、能控性和能观性分析	368
§ 8.10 闭环控制系统的状态空间分析	378
§ 8.11 用极点配置法设计状态控制器	383
§ 8.12 用极点配置法设计状态观测器	389
§ 8.13 离散系统的状态反馈和状态观测器的设计	394
习题八	394

第九章 非线性控制系统

§ 9.1 引言	399
§ 9.2 描述函数法	406
§ 9.3 相平面法	427
习题九	451
附录习题参考答案	455
参考文献	479

第一章

绪论

§ 1.1 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。应用自动控制理论和技术，能使人类以前认为做不到的事情成为现实。人造卫星、宇宙飞船、人类登上月球、导弹制导、人工智能、自动驾驶等高精尖技术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，也都广泛采用自动控制技术。随着自动控制理论和实践的不断发展及完善，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理论和技术。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不可或缺的组成部分。

一、控制的含义

控制（control）这个概念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，后者如全自动洗衣机。如果主体是由人和机器共同组成，则称为半自动控制，例如普通洗衣机。

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、化工过程、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。

控制的目的是，或者说对控制的要求，常见的有稳定、快速、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。

(一) 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加洗衣粉的量、洗的次数、甩干时间等。

(二) 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 包括正确进入预定轨道；姿态控制，使太阳能电池板一直朝向太阳，无线电天线一直指向地球，卫星或飞船内部的环境条件适当；使它所携带的各种测试仪器自动地工作等等。

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、收录机、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、现代农业的生产，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几千个，需要控制的量有几十个到几百个。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，瞄准的角度误差只有几分，如果不用自动控制技术，这显然是做不到的。现代的军用飞行器速度很快，而高射炮炮身又很笨重，用人力直接转动炮身是完全不能适应现代战争的需要的。

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，尤其是近年来电子计算机和通信技术的成就，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。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。这两项重大贡献，是控制理论和控制技术发展史上的一个里程碑。建立在频率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、电子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（Bellman）等人提出了状态空间法。1960 年卡尔曼（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 年代以后迅速发展的新控制理论，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，都属于现代控制理论的范畴。与经典控制理论相比，现代控制理论内涵十分丰富。例如 20 世纪 70 年代后期，提出了大系统理论，它是指针对规模十分庞大的系统的控制理论。例如大型钢铁联合企业、大型电力系统、大型通信网、大型交通运输网等这样的大系统控制需要涉及运筹学、信息论、系统论等方面的理论，才能解决多级递阶控制、多目标综合优化等问题。

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，因此跨世纪的控制工程师，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、控制科学与工程的内涵

自动控制的科学与工程领域已发展成多种学科，经过许多专家的论证，认为可以划分为：

- (1) 一级学科 控制科学与工程。
- (2) 二级学科：
 - 1) 控制理论与控制工程；
 - 2) 检测技术与自动化装置；
 - 3) 模式识别与智能系统；
 - 4) 系统工程。

在上述二级学科中，“控制理论与控制工程”的内容，将在“自动控制原理”和“自动控制系统”两门课程中介绍。“检测技术与自动化装置”将在“测量技术”和“自动控制仪表”两门课程中介绍。“模式识别”和“智能系统”学科的内容将在“系统辨识”、“模式识别”、“智能控制”等课程中介绍，系统工程学科的内容将在“系统工程学”等课程中介绍。

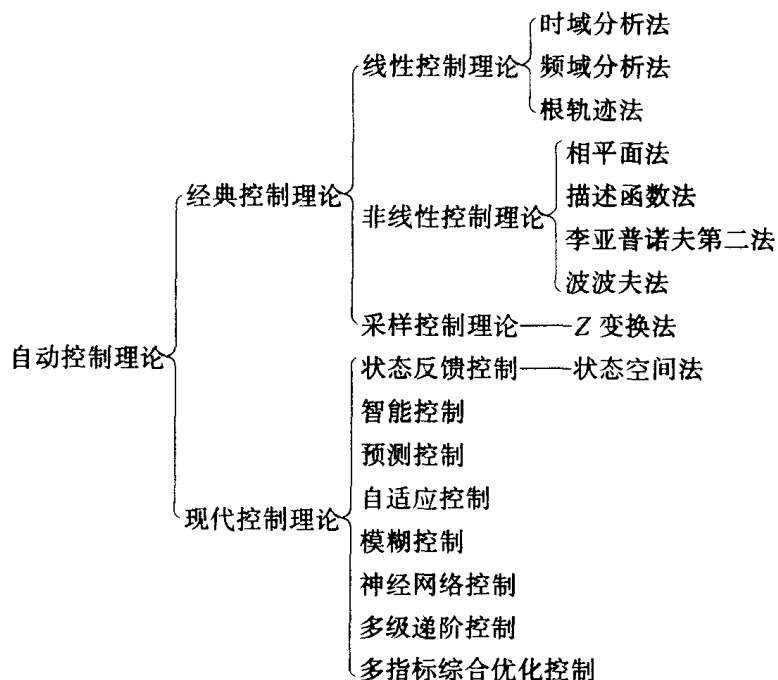
五、自动控制理论的内容

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：



随着科学技术和生产的发展，现代控制理论在不断持续发展。

六、自动控制理论的基本问题

自动控制理论需要解决的两大基本问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

这类问题是针对现有的控制系统分析它是否符合生产上要求的性能指标，如超调量、振荡次数、调整时间、稳态误差等。控制系统分析的方法有：

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

从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。解析法的前提是要能较方便、正确地建立控制系统的数学模型，因此比实验法要困难一些。

(二) 控制系统的设计

这类问题是要求根据生产上提出的性能指标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 可应用时域法、频域法、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，即整定 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。

§ 1.2 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**。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**。希望被控量应该具有的数值称为**额定值**或**给定值**，又称之为**参考输入**。引起被控量变化的外部和内部因素，称为**外扰**和**内扰**，通称为**扰动**。组成自动控制系统的另一部分是起控制作用的设备或装置，称为**控制器**或称为**调节器**。

工业生产过程的自动控制系统绝大部分为反馈控制系统，即控制系统的输出端的信号对系统的输入端有反馈作用。“反馈”是自动控制原理中最基本的概念之一，以后还会经常提到。

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 1-1 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，液位是被控量， H_0 为给定值。给定值 H_0 的大小，可以根据需要在控制器中加以改变。当外部负载（负荷）改变，即 Q_2 改变（即有了外扰）时， $Q_1 \neq Q_2$ ，将使液位上升或下降。图 1-1 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。测量信号送入控制器，在控制器中与液位的给定值信号进行比较而得出两者的偏差，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量信号。控制信号送到执行器，执行器去操作调节阀阀门。使液位保持在所希望的数值（给定值）上，从而实现了贮槽液位的自动控制。图 1-1 的贮槽液位控制系统中，我们把液位的变化量 $\Delta H = H - H_0$ 作为系统的输出信号，把扰动量 $\Delta Q = Q_1 - Q_2$ 和给定值的变化，即参考输入作为系统的输入信号，液位变化（输出信号）通过控制器、执行器、调节阀去改变 Q_1 ，即改变 $\Delta Q = Q_1 - Q_2$ 的作用，这就是反馈作用。因此图 1-1 所示的液位控制系统就是一种反馈控制系统。

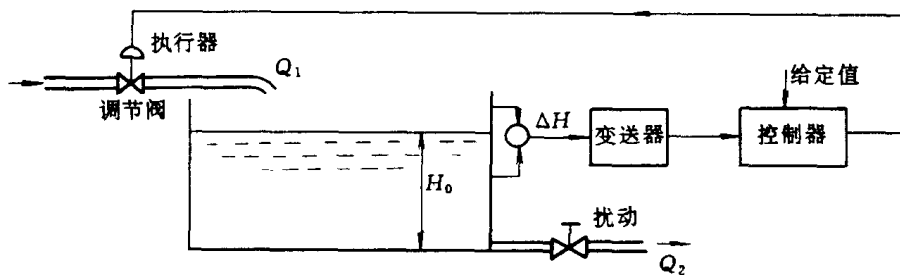


图 1-1 贮槽液位控制系统的原理结构图

§ 1.3 自动控制系统的组成和方框图

在研究自动控制系统时，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方框图（或称方块图）来表示。在方框图中，系统的每一个组成部分（或称环节）用一个方框来代表，环节间用带箭头的作用线连接起来，表示环节之间的信号传递关系，其中箭头方向代表作用方向。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。

从上节介绍的贮槽液位的自动控制系统中可以看出，它包括了受控对象、变送器、控制器、执行器、调节阀等五个主要环节，它的组成方框图如图 1-2 所示。在图中，当受控对象受到扰动 d 时（内扰或外扰），受控对象的输入能量与输出能量将发生变化，被控量 y 就要发生变化。经测量元件或变送器将被控量变化的值与给定值 r 进行比较，产生偏差值 $e = r - y$ 。偏差值（或称偏差信号） e 送入控制器，在控制器中进行控制规律的运算后输出控制信号 u 。该信号再经执行器到调节阀，改变调节阀开度，使受控对象的流入量和流出量（即流入的能量和输出的能量）重新达到平衡，使被控量 y 恢复到原有数值（即额定值或给定值）。

现将图 1-2 方框图中除了受控对象以外的其他元件（方块）介绍如下：

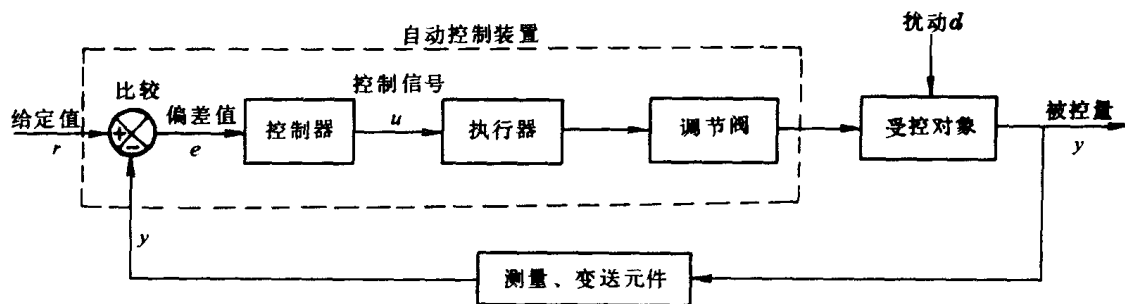


图 1-2 自动控制系统的组成方框图

(1) 测量变送元件(又称测量变送单元或变送器)用来测量被控量的大小,并把被控量(例如过程控制中的水位、压力、温度、流量、转速等)转换成电压、电流、气压或液压等信号后送到控制器(调节器)去。这些信号的类型选取,一般都要求与调节器(控制器)的信号相一致。

(2) 控制器(又称调节器、调节单元)接收测量变送单元送来的被控量信号,并将它与给定值比较,当被控量偏离给定值时,控制器将偏差值(偏差信号)按它的大小和方向以一定的控制规律运算[例如比例(P)、积分(I)、微分(D)等运算]后,发出控制信号给执行器。给定值可以由专门的给定单元取得,也可以由控制器内部设定。

(3) 执行器(又称执行单元或执行机构)它将控制器发来的控制信号经功率放大后去移动调节阀或调节机构(有些调节机构需要较大的功率),常用的执行机构有电动执行机构和气动执行机构。

(4) 调节阀(又称调节机构)它直接改变控制系统的输入能量(流入量),使被控量恢复到给定值。

§ 1.4 自动控制系统的分类

随着自动控制技术不断发展,生产过程的自动化水平的不断提高,生产过程的自动控制系统也在日益发展和完善,出现了各种各样新型的自动控制系统。因此,很难确切地列举他们的全部分类,下面仅介绍几种常用的分类方法。

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 1-3 是一台直流电动机转速的开环控制系统。电动机带动工作机械以一定的转速旋转,工作机械可以是各种机床的转动部件或者其他的要求转动的机械。电动机的转速由图 1-3 中的电位器来改变,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,从而改变电动机的转速。不同的电位器位置,就有相应的电动机转速。当接到控制指令,改变电位器位置,就可控制转速。从图 1-3 的控制系统可以看出,转速对电位器的控制作用没有反作用。这种控制系统的输出信号(图 1-3 中是转

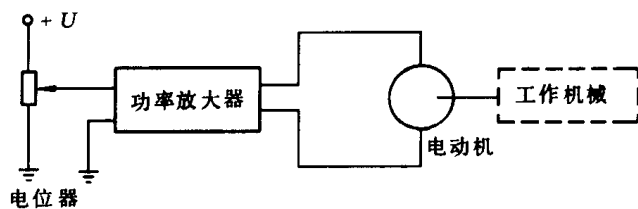


图 1-3 直流电动机转速开环控制系统

速)对输入信号(电位器位置改变)没有影响的系统,称为开环控制系统。图 1-3 的方框图如图 1-4 所示。在图 1-4 中,信号是单方向(自左至右)传递的,形成开环,这是开环控制系统的特点。

开环控制系统易受各种干扰的影响,所以控制精度较低,但结构简单,成本低,也容易实现,这是它的优点。

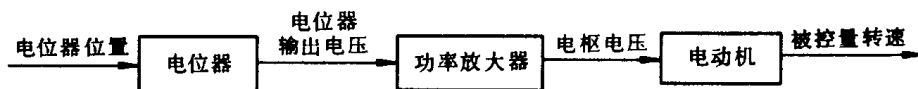


图 1-4 电动机转速开环控制方框图

2. 闭环控制系统

控制系统的输出量(被控量)对输入量(控制作用)有影响的系统,称为闭环控制系统或反馈控制系统。如果在图 1-3 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,从而实现控制电动机的转速,这就形成了电动机转速的闭环控制系统,如图 1-5 所示。电动机转速闭环控制的方框图如图 1-6 所示。

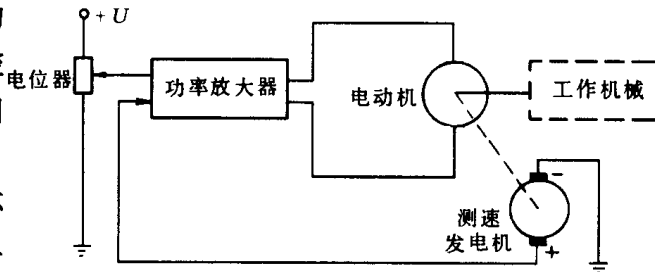


图 1-5 电动机转速闭环控制系统

从图 1-5 和图 1-6 可以看出,闭环控制系统的优点是只要电位器的位置一定,电动机就有一定的转速,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,从而可以自动地保持电动机的输出转速不变,提高了控制品质。

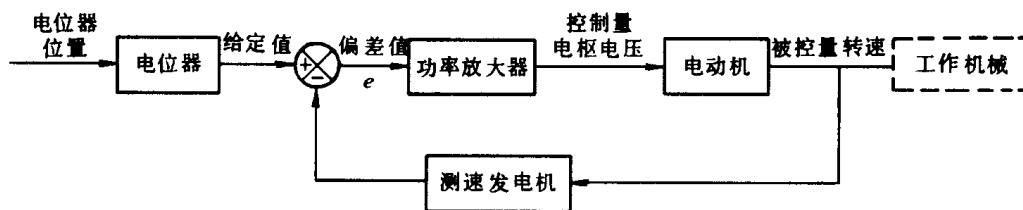


图 1-6 电动机转速闭环控制方框图

二、按信号的结构特点分类

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。图 1-5 和图 1-6 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调节器的输入端，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。它是生产过程控制系统中最基本的一种。一个复杂的控制系统，也可能有多个反馈信号（除被控量外，还有其他反馈信号）组成多个闭合回路。这称为多回路反馈控制系统。

2. 前馈控制系统

前馈控制系统直接根据扰动信号进行调节。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 1-7 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。但是由于前馈控制是一种开环控制系统，没有被控量的反馈作用，不能保证被控量控制的精度（例如当有其他不可测的扰动影响受控对象时），所以在实际生产过程的自动控制中是不能单独使用的。但是，针对如图 1-7 的可测扰动 $d(t)$ ，前馈控制将能十分有效地控制被控量的变化，这个特点是很有用的。因而一般在反馈控制系统中加入前馈控制作用，构成前馈-反馈复合控制系统，以达到兼备两者优点的目的。

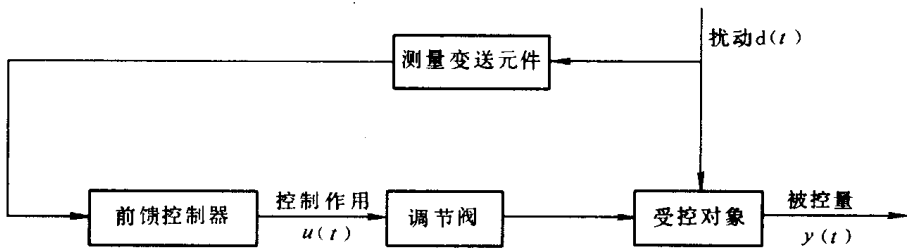


图 1-7 前馈控制系统方框图

3. 前馈—反馈复合控制系统

如图 1-8 所示，在反馈控制系统的基础上，增加了对于主要扰动 $d(t)$ 的前馈控制，便构成了前馈—反馈复合控制系统。当扰动 $d(t)$ 发生后，前馈控制器能及时消除扰动对被控量的影响，而反馈控制器的作用将保证被控量能较精确地等于给定值，改善了被控量的控制精度。

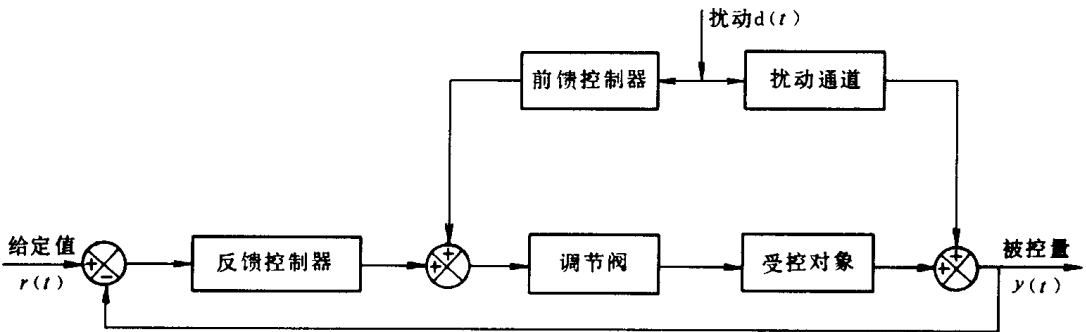


图 1-8 前馈—反馈复合控制系统方框图

三、按给定值信号的特点分类

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、空调器温度控制、容器的液位控制、电力网的频率控制等都是恒值控制系统。

2. 随动控制系统

随动控制系统又简称随动系统,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、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时间函数,控制的目的是保证被控量按确定给定值的时间函数来改变。例如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。又如热处理的升温加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

当控制系统各元件的输入/输出特性是具有线性关系,系统的动态过程可以用线性微分方程来描述时,则称这种系统为线性控制系统。线性元件的特性如图 1-9 所示。线性系统的特点是可以应用叠加原理。

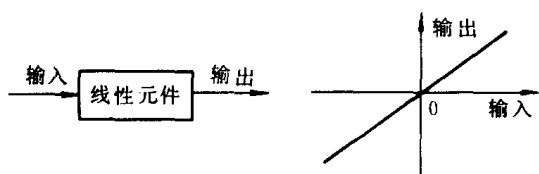


图 1-9 线性元件的特性

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,系统就要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有饱和非线性、死区非线性、继电器特性非线性等,如图 1-10 所示。图 1-10 中,(b) 为饱和非线性,(c) 为死区非线性,(d) 为继电器特性非线性。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。

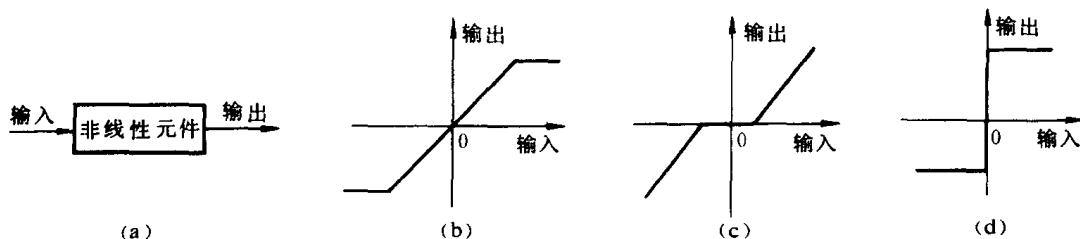


图 1-10 非线性元件的典型特性