



高职高专“十二五”规划教材

自动控制原理

ZIDONG KONGZHI YUANLI

(第2版)

王划一 杨西侠 主 编
马爱君 王 菁 副主编



国防工业出版社
National Defense Industry Press

高职高专“十二五”规划教材

自动控制原理

(第2版)

王划一 杨西侠 主 编

马爱君 王 菁 副主编



国防工业出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

本书内容包括自动控制系统的基本分析和设计方法,全书共分7章,前6章介绍连续控制系统的建模、时域分析、根轨迹分析、频域分析、系统校正等方法。特别是在时域分析中重点介绍了工程实际中常用的PID控制器,以及PID控制作用对系统性能的影响。第7章较详细地介绍了MATLAB仿真软件的基本知识和常用命令,并针对前6章内容,采用MATLAB方法进行了研究,即使是没有接触过MATLAB的读者,也能够轻松地学会MATLAB仿真方法。最后编排了模拟实验内容,可供初学者作为学习电子模拟方法的实验指导书。

本书的特点是实用性突出,注重能力的培养。书中配有的各章学习指导、小结、解题示范,以及最后的模拟实验方法,无不有效地训练了学生解决实际问题的能力和动手能力。通过理论与实际的有效结合,使学生能够打下较牢固的理论基础。MATLAB方法的掌握,为系统的分析和设计提供了有力的工具,进一步提高了学生的研发能力。

本书可作为高等职业技术学院、高等工程专科学校、成人高校电气工程自动化、通信、计算机、自动控制等专业,以及少学时或非自动化专业本科生教材。同时,还可作为自动化类岗位培训教材以及供从事自动化的科技人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

自动控制原理 / 王划一, 杨西侠主编. —2版. —北京:
国防工业出版社, 2012. 8
高职高专“十二五”规划教材
ISBN 978-7-118-08172-5

I. ①自... II. ①王... ②杨... III. ①自动控制理论—
高等职业教育—教材 IV. ①TP13

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第157935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100048)

北京奥鑫印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 18 1/4 字数 424 千字

2012年8月第2版第1次印刷 印数 1—3000册 定价 38.00元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

第2版前言

为了适应自动化技术的快速发展,满足培养应用型人才的需要,我们对2004年出版的面向高职高专的《自动控制原理》进行了全面的修订。第1版教材是根据教育部制定的《高职高专自动控制原理教学基本要求》编写的面向21世纪规划教材。针对高等职业技术教育及高等工程专科教育培养技术应用型人才的特点,以基本知识、概念、理论“必需、够用”为原则,加强理论与实际的结合,并在内容的选取上,基础理论讲解以应用为目的,内容简明易懂,注重实例,突出技能的培养。经过多年的教学实践,不断地探索改进,收到较好的教学效果。

这次修订,是前期教学改革的经验总结,除保持原书深入浅出、注重工程实用和便于自学的特点外,我们突出了削枝强干、精益求精的思想,加强了控制系统基本概念的培训,强化物理意义的理解,结合数学解析结果使学生牢固建立工程分析的思想,提高现场分析问题的能力。全书的各章均进行了全面修改,特别加强了第3章时域分析的讲解,增加了工程实际中常用的PID控制器时域分析,以及PID控制作用对系统性能的影响,并在第6章系统校正中介绍了PID控制器的理论设计。教学实践中考虑到时域分析中应用零极点的重要概念,增加了第4章根轨迹的内容,同时考虑到专科学习注重打好基础,以便以后继续深造,删除了离散系统的内容,以保证重点。培养应用型专业人才,最重要的一点是实践性。本书保留了控制原理模拟实验与MATLAB仿真内容,它可以作为学生的实验指导书使用。学会目前国际控制界流行的仿真软件MATLAB,并通过模拟实验加深对理论知识的理解,训练学生实际动手能力。

本书的突出特色仍是三位一体,既利于讲又利于学。在内容安排上将课堂讲授、课后练习及技能训练有机结合,融为一体。书中每章附有学习指导与小结,以指导学生掌握学习的重点。每章内容都配有精心编排的解题示范,以帮助学生拓宽思路,训练解决问题的能力,真正掌握各章的理论精华。

本书共分7章,主要内容是研究连续控制系统数学模型建立,时域分析方法,根轨迹法,频率法分析法,系统的校正方法,其中加强了工程上常用的PID控制器介绍。最后,用MATLAB方法对各章内容进行了仿真研究,并介绍了模拟实验的基本方法。

本书可作为高等职业技术学院、高等工程专科学校、成人高校电气工程自动化、通信、计算机、自动控制等专业,以及少学时或非自动化专业本科生教材。同时,还可作为自动化类岗位培训教材以及供从事自动化的科技人员参考。本书配有电子课件,可向本书责任编辑索取。

本书第1章由王菁编写,第2章由马爱君编写,第5、6章由杨西侠编写,其他各章及附录由王划一编写。因编写时间仓促,水平有限,书中难免有不足之处,恳请读者批评指正。

编者

2012年5月

目 录

第1章 绪论 1

1.1 自动控制的基本概念 1

1.1.1 自动控制问题的提出 1

1.1.2 自动控制系统的定义 2

1.2 自动控制的基本方式 3

1.2.1 开环控制 3

1.2.2 闭环控制 4

1.2.3 闭环控制系统的基本组成 5

1.2.4 复合控制 6

1.3 自动控制系统的分类 6

1.3.1 按给定信号的特征划分 6

1.3.2 按系统参数的变化特性划分 7

1.3.3 按系统的数学描述划分 7

1.3.4 按信号传递的连续性划分 8

1.3.5 按系统的输入与输出信号的数量 划分 9

1.4 自动控制系统的要求 9

1.4.1 对系统的要求 9

1.4.2 控制系统的分析与设计 10

1.5 解题示范 11

学习指导与小结 13

习题 13

第2章 自动控制系统的数学 模型 15

2.1 自动控制系统的微分方程 15

2.1.1 微分方程建立的一般方法 15

2.1.2 线性常系数微分方程的求解 16

2.2 传递函数 17

2.2.1 传递函数的定义及求取 17

2.2.2 传递函数的性质及局限 19

2.3 典型环节及其传递函数 20

2.4 动态结构图及其等效变换 24

2.4.1 结构图的组成 24

2.4.2 绘制结构图的一般步骤 25

2.4.3 结构图的等效变换及其简化 26

2.5 自动控制系统的的重要传递 函数 30

2.6 解题示范 32

学习指导与小结 36

习题 37

第3章 时域分析法 39

3.1 典型输入信号和时域性能 指标 39

3.1.1 典型输入信号 39

3.1.2 阶跃响应性能指标 41

3.2 一阶系统时域分析 42

3.2.1 一阶系统的数学模型 42

3.2.2 一阶系统单位阶跃响应 43

3.2.3 一阶系统的性能指标 44

3.3 典型二阶系统时域分析 45

3.3.1 典型二阶系统的数学模型 45

3.3.2 典型二阶系统的单位阶跃 响应 46

3.3.3 典型二阶系统的参数 ζ 、 ω_n 对性能 的影响 49

3.3.4 欠阻尼二阶系统暂态性能指标 估算 50

3.4 高阶系统分析 54

3.4.1 高阶系统的单位阶跃响应 54

3.4.2 闭环零、极点对系统性能的 影响 55

3.4.3 闭环主导极点 56

3.5 控制系统的稳定性分析 57

3.5.1 稳定性的概念及线性系统稳定的 充要条件	57	5.1.1 基本概念	126
3.5.2 劳斯稳定判据	58	5.1.2 频率特性的定义	129
3.5.3 两种特殊情况	59	5.1.3 频率特性的几何表示法	129
3.5.4 劳斯稳定判据在系统分析中的 应用	61	5.2 典型环节的频率特性	130
3.6 控制系统的稳态误差分析	61	5.3 控制系统的开环频率特性	138
3.6.1 稳态误差的定义及一般计算 公式	61	5.3.1 开环极坐标图	138
3.6.2 控制系统的型别	62	5.3.2 开环伯德图	143
3.6.3 给定信号作用下的稳态误差 分析	63	5.3.3 最小相位系统与非最小相位 系统	144
3.6.4 扰动信号作用下的稳态误差 分析	67	5.4 奈奎斯特稳定判据	146
3.7 PID 基本控制作用对系统性能的 影响	69	5.4.1 辅助函数 $F(s)$	146
3.7.1 比例(P)控制	69	5.4.2 幅角原理	147
3.7.2 比例加微分(PD)控制	73	5.4.3 奈氏判据	148
3.7.3 积分(I)控制	78	5.4.4 伯德图上的稳定性判据	155
3.7.4 比例加积分(PI)控制	79	5.5 用开环频率特性分析系统 性能	157
3.7.5 比例加积分加微分(PID) 控制	85	5.5.1 稳定裕度	157
3.8 解题示范	87	5.5.2 开环频域指标与时域性能指标的 关系	160
学习指导与小结	93	5.5.3 三频段与系统性能	163
习题	96	5.6 闭环频率特性	165
第4章 根轨迹法	100	5.6.1 闭环频率特性与开环频率特性的 关系	165
4.1 根轨迹的基本概念	100	5.6.2 闭环频域指标	165
4.2 根轨迹的定义及根轨迹方程	102	5.7 解题示范	166
4.3 绘制根轨迹的基本法则	104	学习指导与小结	173
4.3.1 绘制根轨迹的基本法则	104	习题	175
4.3.2 闭环极点的确定	115	第6章 控制系统的校正	178
4.3.3 增加开环零、极点对根轨迹的 影响	116	6.1 校正的基本概念	178
4.4 解题示范	118	6.1.1 校正的定义	178
学习指导与小结	123	6.1.2 校正方式	179
习题	124	6.1.3 设计方法	180
第5章 线性系统的频率响应法	126	6.2 频率法串联校正	181
5.1 频率特性	126	6.2.1 串联超前校正	181
		6.2.2 串联滞后校正	185
		6.2.3 串联滞后—超前校正	191
		6.2.4 PID 调节器	192
		6.3 控制系统的复合校正	201
		6.3.1 按扰动补偿的复合校正	202

6.3.2 按输入补偿的复合校正	204
6.4 解题示范	205
学习指导与小结	213
习题	214

第7章 控制系统的 MATLAB 仿真 与模拟实验

7.1 MATLAB 简介	218
7.1.1 MATLAB 的安装	218
7.1.2 MATLAB 工作界面	219
7.1.3 MATLAB 命令窗口	220
7.2 MATLAB 基本操作命令	221
7.2.1 简单矩阵的输入	221
7.2.2 复数矩阵输入	222
7.2.3 MATLAB 语句和变量	222
7.2.4 语句以“%”开始和以分号“;” 结束的特殊效用	223
7.2.5 工作空间信息的获取、退出和 保存	223
7.2.6 常数与算术运算符	223
7.2.7 MATLAB 图形窗口	224
7.2.8 MATLAB 编程指南	224

7.3 MATLAB 在控制系统中的 应用

7.3.1 用 MATLAB 建立传递函数 模型	225
7.3.2 用 MATLAB 求系统的零点、极点 及特征多项式	229
7.3.3 用 MATLAB 绘制二维图形	232
7.3.4 用 MATLAB 分析控制系统 性能	235

7.4 Simulink 方法建模与仿真

7.5 自动控制理论模拟实验 与 Simulink 仿真

实验一 典型环节及阶跃响应测试	258
实验二 系统频率特性测量	263
实验三 连续系统的频率法串联 校正	269

附录1 拉普拉斯 (Laplace) 变换

附录2 MATLAB 常用命令

参考文献

第1章 绪论

1.1 自动控制的基本概念

在科学技术飞速发展的今天,自动控制技术和理论所起的作用越来越重要。无论是在航空航天、导弹制导的尖端技术领域,还是在机器制造业及工业过程控制中,所取得的成就都是惊人的。所谓自动控制,是指在无人直接参与的情况下,利用外加的设备或装置(称控制装置或控制器)代替人的控制,使机器、设备或生产过程(统称被控对象)的某个工作状态或参数(即被控量)维持预期水平或按一定的规律(即给定量)运行。例如,数控车床按照预定程序自动地切削工件;无人驾驶飞机按照预定航迹自动升降和飞行;人造卫星准确地进入预定轨道运行并回收等,这一切都是以应用高水平的自动控制技术为前提的。

自动控制理论是研究关于自动控制系统组成、分析和设计的一般性理论,是研究自动控制共同规律的技术科学。它的发展初期,是以反馈理论为基础的自动调节原理,并主要用于工业控制。第二次世界大战期间,由于战争的需要,进一步促进并完善了自动控制理论的发展。到战后,已形成完整的自动控制理论体系,称为经典控制理论。它以传递函数为工具,主要研究单输入单输出、线性定常系统的分析和设计问题,主要研究方法是根轨迹法和频率法。这些理论成熟,并在工业实践中得到了广泛的应用。本教材主要介绍这部分内容。

20世纪60年代初期,随着航天技术、微电子技术、计算机技术等科学技术的发展和工程实践的需要,自动控制理论跨入了一个新阶段——现代控制理论。它的主要内容是,以状态空间法为基础,研究多输入多输出、变参数、非线性、高精度系统的分析和设计问题。最优控制、最佳滤波、系统辨识、自适应控制、模糊控制、人工智能等理论都是这一领域研究的主要课题。

1.1.1 自动控制问题的提出

在许多工业生产过程或生产设备运行中,为了保证正常的工作条件,往往需要对某些物理量(如温度、压力、流量、液位、电压、位移、转速等)进行控制,使其尽量维持在某个数值附近,或使其按一定规律变化。要满足这种需要,就应该对生产机械或设备进行及时的操作,以抵消外界干扰的影响。这种操作通常称为控制,用人工操作称为人工控制,用自动装置来完成称为自动控制。

图1-1所示的是一个简单的水箱液面。为满足生产和生活的需要,希望水位 h 维持恒定(或在允许的偏差范围以内)。水箱中的水位是被控制的物理量,简称被控量。水箱这个设备是控制的对象,简称被控对象。当水位在给定位置且流入、流出量相等时,它处于平衡状态。当流出量发生变化或水位给定值发生变化时,就需要对流入量进行必要的控制。

图1-2所示是液面人工控制系统。在人工控制方式下,人通过眼睛观看水位情况,用脑比较实际水位与期望水位的差异并根据经验及时做出决定,确定进水阀门的调节方向与幅度,然后用手操作进水阀门,对进水量进行相应的修正,最终使水位等于给定值。只要水位偏离了期望值,人便要重复上述调节过程。但是人工控制在复杂、快速、精确的系统中是不能满足

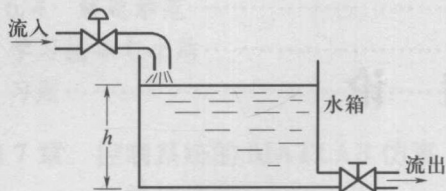


图 1-1 水箱液面

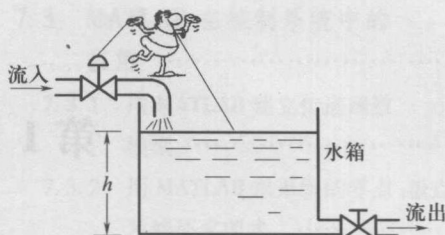


图 1-2 液面人工控制

要求的,也不利于减轻劳动强度。于是,没有人直接参与的自动控制,随着控制工程的发展而逐步发展起来了。

图 1-3 所示是液面自动控制系统。液面的希望水位由自动控制器刻盘上的指针标定。图中用浮子代替人的眼睛,测量水位高低;用控制器代替人的大脑,进行比较、计算误差;另用气动阀门代替人手的功能,对水位实施控制。当出水与进水的平衡被破坏时,水箱水位下降(或上升),出现偏差。该偏差由浮子检测出来,自动控制器在偏差的作用下,控制气动阀门使阀门开大(或关小),对偏差进行修正,从而保持液面高度不变。整个过程中无需人工直接参与,控制过程是自动进行的。

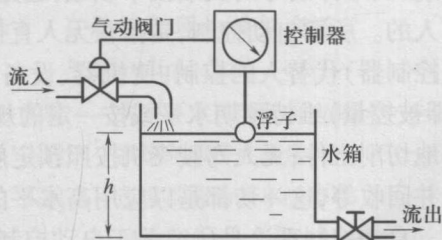


图 1-3 液面自动控制

1.1.2 自动控制系统的定义

由上例可知,自动控制和人工控制极为相似,自动控制系统只不过是把某些装置有机地组合在一起,以代替人的职能而已。任何一个控制系统,都是由被控对象和控制器(又称控制装置)两部分所组成的。画出以上人工控制与自动控制的功能方框图分析自动控制系统的组成,如图 1-4 所示。

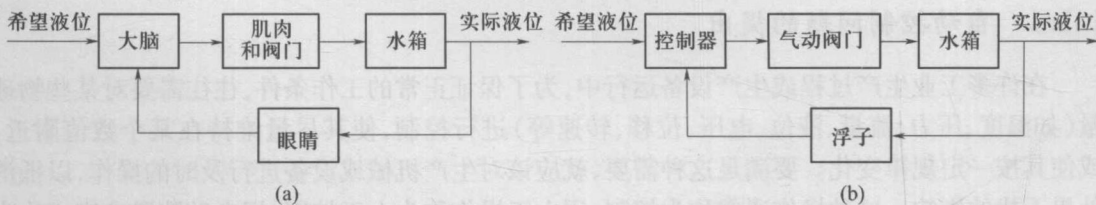


图 1-4 控制功能框图
(a) 人工控制; (b) 自动控制。

比较(a)、(b)两图可以看出,用自动控制实现人工控制的功能,存在必不可少的三种代替人的职能的基本元件:测量元件与变送器(代替眼睛);自动控制器(代替大脑);执行元件(代替肌肉、手)。这些基本元件与被控对象相连接,一起构成一个自动控制系统。图 1-5 示出了典型控制系统方框图。

以上我们在列举简单控制的实例中,应用了方框图来帮助阐述系统各元件的功能及相互之间的连接。我们在具体讨论一个控制过程中,并不特别关心系统中各部件的详细构造,包括体积、重量、材料等,也不特别关心能量流通的路径、功率的大小、效率的高低等。我们特别注

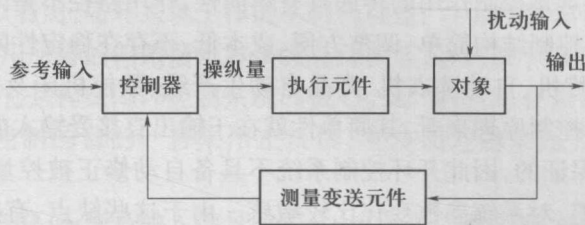


图 1-5 控制系统典型方框图

意的是“信息”的传递、“信息”传递的路径、“信息”的变换等。在控制理论的讨论中,这种“信息传递”的观点,是一个非常重要的观点。方框图正是从控制系统信息流程图上抽象出来的。它突出了系统中各环节输入与输出的关系及各环节之间的相互影响,对于定性和定量分析,都比原理图清晰方便。

今后我们将系统中各个元件都用一个方框来表示,并注上相应的文字或符号,再根据各方框之间的信息传递,用有向线段把它们依次连接起来,并标明相应的信息,就得到整个系统的方框图,便于定性分析。此外还会看到,在方框中写出各元件数学模型,可用来进行定量运算,在进行理论分析时,这将是十分有利的工具。

1.2 自动控制的基本方式

自动控制系统的形式是多种多样的,对于某一个具体的系统,采取什么样的控制手段,应该根据具体的用途和目的而定。本节主要介绍控制系统中最常见的几种控制方式。

1.2.1 开环控制

如果系统的输入端与输出端之间,只有信号的前向通道而不存在由输出端到输入端的反馈通路,这种控制方式为开环控制。按这种方式组成的系统,其输出量不会对系统的控制作用产生影响,称为开环控制系统。其系统方框图如图 1-6 所示,由图可见,系统的控制信息的传递路径不是闭合的,故称为开环。

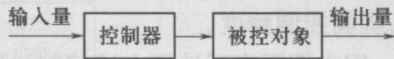


图 1-6 开环控制系统方框图

图 1-7 是一个直流电动机转速控制系统。图中电动机是电枢控制的直流电动机,要求带动负载以一定的转速转动。其电枢电压由功率放大器提供,当调节电位器滑臂位置时,可以改变功率放大器的输入电压,从而改变电动机的电枢电压,最终改变电动机的转速。

以上控制过程可用方框图简单直观地表示成图 1-8 的形式。由方框图可明显地看出控制信息的传递过程是由输入端沿箭头方向逐级传向输出端,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相应。控制精度完全取决于信息传递过程中所用元件性能的优劣及校准的精度。

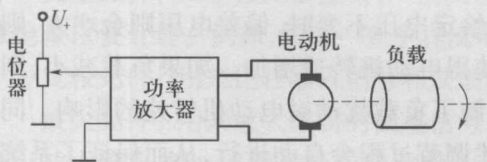


图 1-7 直流电动机转速开环控制

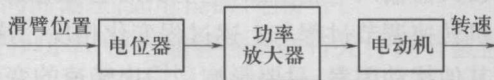


图 1-8 直流电动机转速开环控制方框图

这种控制方式的特点是控制作用的传递具有单向性,作用路径不是闭合的,属于典型的开环控制方式。由于开环控制结构简单、调整方便、成本低、不存在稳定性问题,在国民经济各部门均有采用,如自动售货机、自动洗衣机、产品自动生产线、数控机床及交通指挥红绿灯转换等。但是从开环控制的控制原理来看,其简单性就在于输出直接受输入的控制,至于控制的精度,是不能由输入值来保证的,因此开环控制系统不具备自动修正被控量偏差的能力,故系统的精度低、抗干扰能力差、对系统参数变化比较敏感。由于这些缺点,有些控制精度要求较高的场合,开环控制是无法满足要求的。

1.2.2 闭环控制

通常,我们把将系统的输出信号引回到输入端,并与输入信号比较产生偏差信号的过程,称为反馈。若反馈信号与输入信号相减,使产生的偏差逐步减小,称负反馈;反之,则称为正反馈。反馈控制就是采用负反馈并利用偏差进行控制的过程,而且,由于引入了被控量的反馈信息,整个控制过程成为一个闭合环路,因此反馈控制也称闭环控制。按这种方式组成的系统,其输出量对系统的控制作用有直接影响,称为闭环控制系统,或称为反馈控制系统,其系统方框图如图 1-9 所示。

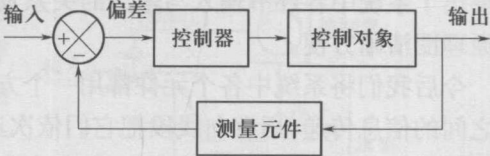


图 1-9 闭环控制系统方框图

在图 1-7 所示的直流电动机转速开环控制系统中,加入一台测速发电机,并对电路稍作改变,便构成了如图 1-10 所示的直流电动机转速闭环控制系统。该系统增加了由测速发电机构成的反馈回路,用来检测输出的转速,并给出与电动机转速成正比的反馈电压。将这个代表实际输出转速的反馈电压与代表希望输出转速的给定电压进行比较,所得到的偏差信号作为产生控制作用的基础,通过功率放大器来控制电动机的转速,常称为按偏差控制。可以看出,在控制过程中,只要偏差存在,控制作用总是存在的。控制的最终目的是减小以至消除偏差,提高控制精度。

用方框图直观地把上述控制过程描述出来,方便进行性能分析,方框图如图 1-11 所示。

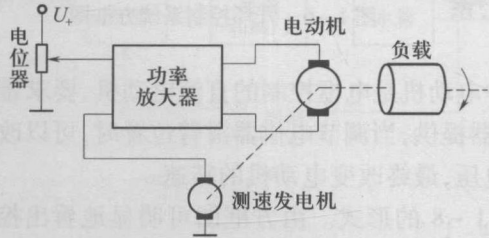


图 1-10 直流电动机转速闭环控制系统

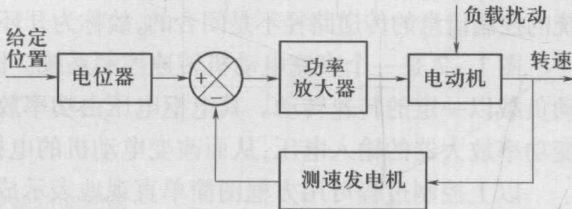


图 1-11 直流电动机转速闭环控制方框图

由方框图分析电动机转速自动调节的过程如下:当系统受到扰动影响时,例如负载增大,则电动机转速降低,测速发电机的端电压减小。在给定电压不变时,偏差电压则会增大,则功率放大器输入电压增加,电动机的电枢电压上升,使得电动机转速增加。如果负载减小,则电动机转速调节过程与上述过程变化相反。这样,抑制了负载扰动对电动机转速的影响。同样对其他扰动因素,只要影响到输出转速的变化,上述调节过程会自动进行,从而保证了系统的控制精度,提高了抗干扰能力。

由上述实例可以看出,闭环系统工作的本质机理是:将系统的输出信号引回到输入端,与输入信号相比较,利用所得的偏差信号对系统进行调节,达到减小偏差或消除偏差的目的。这就是反馈控制原理,它是构成闭环控制系统的核心。必须指出,在系统主反馈通道中,只有采用负反馈才能达到控制的目的。若采用正反馈,将使偏差越来越大,导致系统发散而无法工作。

在闭环控制系统中,不论是输入信号的变化,或者干扰的影响,或者系统内部的变化,只要是被控量偏离了规定值,都会产生相应的作用去消除偏差。因此,闭环控制抑制干扰能力强,与开环控制相比,系统对参数变化不敏感,可以选用不太精密的元件构成较为精密的控制系统,获得满意的动态特性和控制精度。但是采用反馈装置需要添加元部件,造价较高,同时也增加了系统的复杂性。如果系统的结构参数选取不适当,控制过程可能变得很差,甚至出现振荡或发散等不稳定的情况。因此,在闭环系统中,稳定性始终是一个重要问题。如何分析系统,合理选择系统的结构参数,从而获得满意的系统性能,是自动控制理论必须研究解决的问题。

1.2.3 闭环控制系统的基本组成

闭环控制是最常用的控制方式,我们所说的控制系统,一般都是指闭环控制系统。闭环控制系统是本课程讨论的重点。图 1-12 是一个典型闭环控制系统的基本组成。图中的每一个方框,代表一个具有特定功能的元件。除被控对象外,控制装置通常是由给定元件、测量元件、比较元件、放大元件、执行元件以及校正元件组成。这些功能元件各司其职,共同完成控制任务。

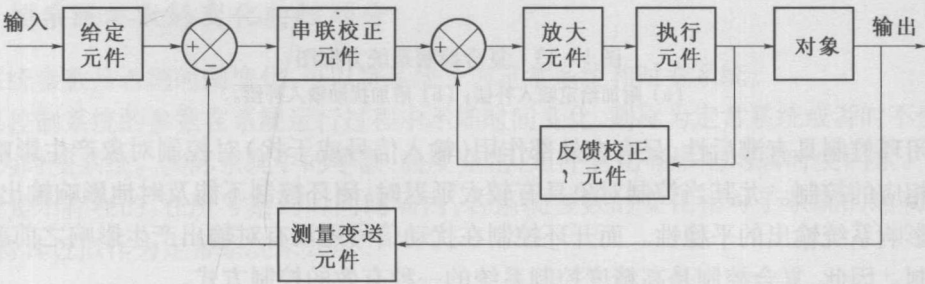


图 1-12 闭环控制系统基本组成

被控对象: 自动控制系统需要进行控制的工作机械或生产过程。被控对象要求实现控制的物理量就是被控量或输出量。

给定元件: 主要用于给出与期望的被控量相对应的系统输入量(即给定量)。例如,图 1-10 中直流电动机转速控制闭环系统中的电位器。

测量元件: 用于检测被控量,产生反馈信号。如果测出的物理量属于非电量,一般要转换成电量以便处理。例如,图 1-10 中直流电动机转速闭环控制系统中的测速发电机。

比较元件: 用来比较输入信号和反馈信号之间的偏差,如电位器、电桥等。

放大元件: 用来放大微弱的偏差信号的幅值和功率,使之能够推动执行元件调节被控对象。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。

执行元件: 用于直接对被控对象进行操作,使被控量达到期望值的元件,如阀门、伺服电

动机等。

校正元件：用来改善或提高系统的性能，也称为调节器。

图中，用“ $\otimes$ ”代表比较元件，它将测量元件检测到的被控量与给定量进行比较，“-”号表示两者符号相反，即负反馈；“+”号表示两者符号相同，即正反馈。信号从输入端沿箭头方向到达输出端的传输通路称前向通路；系统输出量经测量元件反馈到输入端的传输通路称主反馈通路。由主反馈通路与前向通路两部分共同构成主回路。此外，还有局部反馈通路以及由它构成的内回路。只包含一个主反馈通路的系统称单回路系统；有两个或两个以上反馈通路的系统称多回路系统。

1.2.4 复合控制

根据开环控制和闭环控制的特点可以看出：将两者适当地结合在一起，通常比较经济，并且能够获得满意的系统性能，这种控制方式称为复合控制。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（给定信号或扰动信号）的顺馈通路，对该信号实行加强或补偿，以达到精确的控制效果。复合控制有两种基本形式：按输入前馈补偿的复合控制和按扰动前馈补偿的复合控制，如图 1-13 所示。

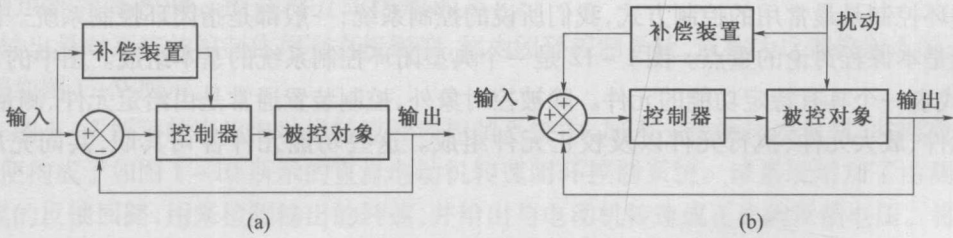


图 1-13 复合控制系统方框图
(a) 附加给定输入补偿；(b) 附加扰动输入补偿。

因闭环控制具有滞后性，只有在外部作用（输入信号或干扰）对控制对象产生影响之后才能做出相应的控制。尤其当控制对象具有较大延迟时，闭环控制不能及时地影响输出的变化，最终会影响系统输出的平稳性。而开环控制在扰动信号还没有对输出产生影响之前就做出相应的控制。因此，复合控制是高精度控制系统的一种有效的控制方式。

1.3 自动控制系统的分类

自动控制系统的形式是多种多样的，用不同的标准划分，就有不同的分类方法。前面介绍的开环控制与闭环控制，是从控制信息的传递路径上来划分的。其他常见的分类方法有如下几种。

1.3.1 按给定信号的特征划分

给定信号是系统的指令信号，它代表了系统希望的输出值，反映了控制系统完成的基本任务和职能。

1. 恒值控制系统

恒值控制系统的特点是，给定输入一经设定就维持不变，希望输出量维持在某一特定值

上。这种系统主要任务是当被控量受某种干扰而偏离希望值时,通过自动调节的作用,使它尽可能地恢复到希望值。系统结构设计的好坏,直接影响到恢复的精度。如果由于结构的原因不能完全恢复到希望值时,则误差应不超过规定的允许范围。

前面提到的液位控制系统、直流电动机调速系统,以及其他恒定压力、恒定流量、恒定温度等都属于这一类系统。显然,要想使系统输出维持恒定,克服扰动的影响是系统设计中要解决的主要矛盾。

2. 随动控制系统

随动控制系统的主要特点是,给定输入的变化规律是预先未知的随时间任意变化的随机信号。这种系统的任务是使输出快速、准确地跟随给定值的变化而变化,故称作随动控制系统。显然,由于输入在不断变化,设计一个好的跟随性就成为这类系统中要解决的主要矛盾。当然,系统的抗干扰性也不能忽视,但与跟随性相比,应放在第二位来解决。

用于军事上的自动火炮系统、雷达跟踪系统,用于航天、航海中的自动导航系统、自动驾驶系统等都属于典型的随动系统,在工业生产中的自动测量仪器也属于这一类。

3. 程序控制系统

程序控制系统的主要特点是,给定输入是预先设定的、按预定规律变化的信号。这类系统往往适用于特定的生产工艺或工业过程,按所需要的控制规律给定输入,要求输出迅速、准确地加以复现。设计这类系统比随动系统有针对性。由于变化规律已知,可根据要求选择方案,保证控制性能和精度。

在工业生产中广泛应用的程序控制有仿形控制系统、机床数控加工系统、加热炉温度自动变化控制等。

1.3.2 按系统参数的变化特性划分

按系统参数是否随时间变化,可以将系统分为定常系统和时变系统。

如果控制系统的参数在系统运行过程中不随时间变化,则称为定常系统或者时不变系统;否则,称为时变系统。实际系统中的零漂、温度变化、元件老化等影响均属时变因素。严格的定常系统是不存在的,在所考察的时间间隔内,若系统参数的变化相对于系统的运动缓慢得多,则可将其近似作为定常系统来处理。

1.3.3 按系统的数学描述划分

任何系统都是由各种元件组成的。从控制理论的角度,这些元件的特性可用其输入输出特性来进行分析。按照描述元件特性方程式的不同,可将其构成的系统分为线性系统和非线性系统。

当系统中各元件输入输出特性是线性特性,系统的状态和性能可以用线性微分(或差分)方程来描述时,则称这种系统为线性系统。系统中只要存在一个含非线性特征的元件,系统由非线性方程来描述,这种系统称为非线性系统。

所谓线性特性是指元件的静特性是一条过原点的直线,也称其为线性元件。故此,由线性元件组成的系统则必是线性系统。线性系统的一个突出特点就是满足叠加原理,叠加原理指出:当几个输入信号同时作用在系统上,产生的总输出等于各个输入单独作用时系统的输出之和,称为叠加性;当系统输入增大或缩小多少倍时,系统的输出也增大或缩小相同的倍数,称为齐次性。用公式表示为

当

$$r(t) = ar_1(t) + br_2(t) \quad (1-1)$$

则有

$$c(t) = ac_1(t) + bc_2(t) \quad (1-2)$$

式中: $r(t)$ 表示输入, $c(t)$ 表示输出。系数 a 、 b 若均为常数, 则称为线性定常系统; 若是时间的函数, 则称为线性时变系统。

可以运用叠加原理作为鉴别系统是否为线性系统的依据。

本课程重点研究线性定常系统。因为对这一类系统已经形成了完整、成熟的分析与设计方法, 并且在实践中获得了广泛的应用。而非线性控制系统很难用数学方法处理, 叠加原理也不成立, 目前尚无解决各种非线性系统分析设计问题的通用方法。

严格地说, 实际物理系统在某种程度上都是非线性的, 线性系统只是在一定条件下的理想化模型, 实际上不存在。然而在很多情况下通过近似处理和合理简化, 大量的物理系统都可以在一定范围内足够准确地化作线性系统来处理。

1.3.4 按信号传递的连续性划分

1. 连续系统

连续系统的特点是系统中各元件的输入信号和输出信号都是时间的连续函数。这类系统的运动状态是用微分方程来描述的。

连续系统中各元件传输的信息在工程上称为模拟量, 多数实际物理系统都属于这一类, 其输入、输出一般用 $r(t)$ 和 $c(t)$ 表示, 见图 1-14。

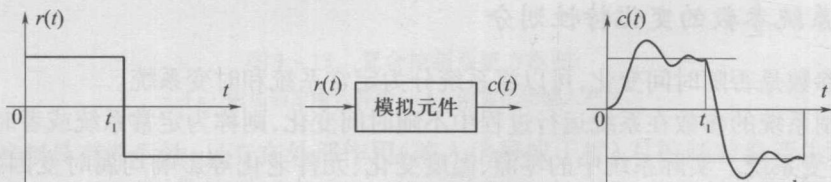


图 1-14 模拟量输入输出

2. 离散系统

控制系统中只要有一处的信号是离散信号(脉冲序列或数字编码), 则称为离散系统(包括采样系统和数字系统)。这种系统的状态和性能一般用差分方程来描述。实际物理系统中, 信息的表现形式为离散信号的并不多见, 往往是控制上的需要, 人为地将连续信号离散化, 我们称其为采样。采样过程如图 1-15 所示。

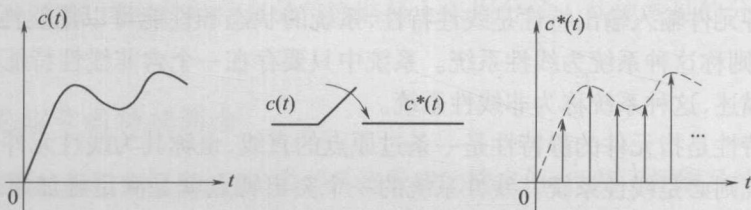


图 1-15 采样过程

随着计算机应用技术的迅猛发展,大量自动控制系统都采用数字计算机作为控制手段。计算机进行采样的过程,是把采样信号转换成数码信号来进行运算处理的,A/D 转换器承担了这一任务。计算机控制系统如图 1-16 所示。在计算机引入控制系统之后,控制系统就成为离散系统了。

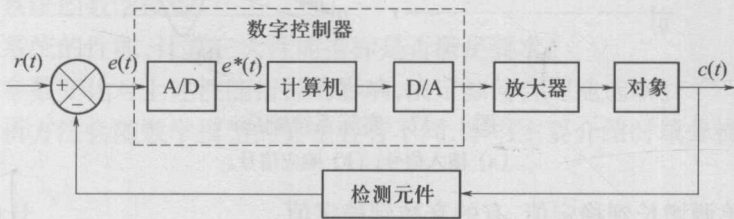


图 1-16 计算机控制系统

离散系统的数学描述形式与连续系统不同,分析研究方法则有不同的特点。随着计算机控制的广泛应用,离散系统理论方法也越显重要。

1.3.5 按系统的输入与输出信号的数量划分

按照输入信号和输出信号的数量,可将系统分为单输入单输出(SISO)系统和多输入多输出(MIMO)系统。

单输入单输出系统通常称为单变量系统,这种系统只有一个输入(不包括扰动输入)和一个输出。多输入多输出系统通常称为多变量系统,有多个输入和多个输出。

1.4 自动控制系统的要求

1.4.1 对系统的要求

一般,加到反馈控制系统上的外作用有两种类型,一种是有用输入,另一种是扰动。有用输入决定被控量的变化规律,例如给定量;而扰动是系统不希望有的外作用,它破坏有用输入对系统的控制。在实际系统中,扰动总是不可避免的,而且它可以作用于系统中的任何元件上,也可能一个系统同时受到几种扰动作用。由此可见,各类控制系统为达到理想的控制目的,必须具备以下两个方面的性能:

- (1) 使系统的输出快速准确地按输入给出的期望输出值变化。
- (2) 使系统的输出不受任何扰动的影响。

这是对所有控制系统提出的基本要求。但实际物理系统一般都含有储能元件或惯性元件,例如机械装置中的惯性、质量,电路中的电容、电感等,因而系统的输出量和反馈量总是迟后于输入量的变化。因此,当输入量发生变化时,输出量从原平衡状态变化到新的平衡状态总是要经历一定时间,即系统运动必然有一个渐变的调节过程。如图 1-17 所示,实际响应与理想响应之间的差异越小,系统的调节质量越高。

通常把系统受到外加信号(给定值或干扰)作用后,输出信号(即被控量)随时间 t 变化的全过程称为系统的响应过程,以 $c(t)$ 表示。系统的输出响应由过渡过程和稳态过程组成。在输入量的作用下,系统的输出变量由初始状态达到最终稳态的中间变化过程称过渡过程,又称瞬态过程。过渡过程结束后的输出响应称为稳态过程。响应过程的曲线形状随系统的不同而

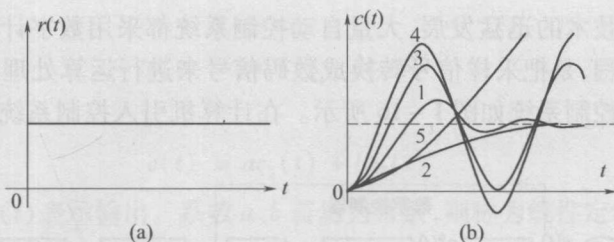


图 1-17 实际系统响应
(a) 输入信号; (b) 响应信号。

有所差异,有的单调增长到稳定值,有的衰减到稳定值。

尽管各种实际的自动控制系统类型不同,并且对每个系统的性能要求也往往不同,但对控制系统的共同基本要求都是一样的,且可以归结为稳定性、快速性和准确性,即稳、准、快的要求。

(1) 稳定性。是对自动控制系统的最基本要求。稳定性是系统重新恢复平衡状态的能力。任何一个能够正常工作的控制系统,首先必须是稳定的,只有稳定的系统才有使用价值。线性自动控制系统的稳定性是由系统结构所决定,与外界因素无关。并不是只要连接成负反馈形式后系统就一定能正常工作,若系统设计不当或参数调整不合理,系统响应过程可能出现振荡甚至发散。如图 1-17(b)中曲线 3(等幅振荡)、曲线 4(增幅振荡)或曲线 5(单调发散)所示。这种情况就称系统不稳定。不稳定的系统是无法使用的,系统激烈而持久的振荡会导致功率元件过载,甚至使设备损坏而发生事故,这是绝不允许的。

(2) 快速性。是对系统动态(过渡过程)性能的要求。为了很好地完成控制任务,控制系统仅仅满足稳定性要求是不够的,还必须对其过渡过程的形式和快慢提出要求,一般称为动态性能。描述系统动态性能可以用快速性和平稳性加以衡量。快速指系统运动到新的平衡状态所需要的调节时间较短,如图 1-17(b)中曲线 1(衰减振荡)。平稳指系统由初始状态运动到新的平衡状态时,具有较小的过调和振荡性,如图 1-17(b)中曲线 2(单调上升)。动态性能是衡量系统质量高低的重要指标。

(3) 准确性。是对系统稳态(静态)性能的要求。对一个稳定的系统而言,过渡过程结束后,系统输出量的实际值与期望值之差称为稳态误差,它是衡量系统控制精度的重要指标。稳态误差越小,表示系统的准确性越好,控制精度越高。

由于被控对象的具体情况不同,各种系统对三项性能指标的要求应有所侧重。例如恒值系统一般对稳态性能限制比较严格,随动系统一般对动态性能要求较高。同一个系统,上述三项性能指标之间往往是相互制约的。提高过程的快速性,可能会引起系统强烈振荡;改善了平稳性,控制过程又可能很迟缓,甚至使最终精度也很差。分析和解决这些矛盾,将是本课程讨论的重要内容。

1.4.2 控制系统的分析与设计

自动控制原理是一门研究自动控制共同规律的工程技术科学,是研究自动控制技术的基础理论。自动控制系统虽然种类繁多,形式不同,但所研究的内容和方法却是类似的。本课程研究的内容主要分为系统分析和系统设计两个方面。分析和设计是两个互逆的研究过程,前者是从已知确定系统出发,分析计算系统所具有的性能指标,而后者则是根据要求的性能指标