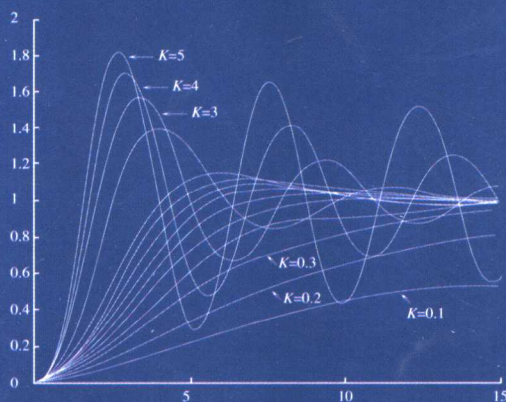


21世纪 **高职高专** 教材

自动控制原理

康晓明 主编



国防工业出版社

<http://www.ndip.cn>

中国大学精品教材

自动控制原理

—— 第二版 ——

清华大学出版社
Tsinghua University Press

21 世纪高职高专教材

自动控制原理

康晓明 主编

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

自动控制原理/康晓明主编·—北京:国防工业出版社,2004.6

21世纪高职高专教材

ISBN 7-118-03487-8

I.自... II.康... III.自动控制理论—高等学校:技术学校—教材 IV.TP13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 040751 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)

天利华印刷装订有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 13¼ 298 千字

2004 年 6 月第 1 版 2004 年 6 月北京第 1 次印刷

印数:1—4000 册 定价:19.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

《自动控制原理》编写人员名单

主 编 康晓明

副 主 编 (按姓氏笔画)

甘宇红 朱凤芝 黄 伟

参编人员 方维齐 霍淑珍

前 言

《自动控制原理》是电类专业一门重要的技术基础课。·高职高专院校及成人院校《自动控制原理》课长期沿用本科院校教材，而高职高专院校及成人院校人才培养的模式与教学体系与本科院校是有很大大不同的，学生基础也不一样。因此，我们根据教育部《关于加强高职高专教育工作的意见》精神，组织长期讲授高职高专《自动控制原理》课的教师，在认真研究和仔细论证 21 世纪高职高专教育模式和教学体系特点的基础上，结合学生实际情况编写了本书。

本书主要介绍了经典控制理论的基本概念、基本理论及基本分析方法，并通过对一些控制实例的分析引导学生深入思考。全书共七章，具有以下特点：

(1) 本书针对高等职业教育特点，突出理论联系实际，强调学生正确应用公式和结论能力的培养，减少了公式和结论理论推导过程；

(2) 本书讲理论从应用角度入手，重点内容讲清来龙去脉，辅助内容触类旁通，概念准确，条理清楚，叙述通俗易懂；

(3) 本书在例题选择上力求典型、简明、有说服力，并尽量结合实际；

(4) 参与本书编写的同志，全部是长期讲授高职高专《自动控制原理》课的教师，他们熟悉教学大纲，经验丰富，力图通过对此书的学习使学生掌握基本控制理论，熟悉分析控制系统的基本方法，会用典型控制理论分析一些实际控制对象。

参加本书编写的同志有：康晓明、甘宇红、朱凤芝、黄伟、方维齐、霍淑珍。

康巨珍教授、薛蔚副教授审阅了本书的初稿，并提出许多宝贵意见，深表感谢！

本书在编写过程中，得到很多高职高专院校及成人院校同行们的支持和帮助，在此表示由衷的谢意！

由于作者水平所限，书中不妥之处恳请读者批评指正。

作者

于天津职业大学

2004 年 2 月 29 日

目 录

第一章 自动控制系统概述	1
1.1 自动控制的基本原理与方式	1
1.1.1 自动控制的任务	1
1.1.2 自动控制的方式	2
1.1.3 自动控制系统的组成	7
1.2 自动控制系统的分类	8
1.3 自动控制系统的基本要求	9
1.4 自动控制理论的发展	11
习题	12
第二章 控制系统的数学模型	14
2.1 微分方程	14
2.2 非线性微分方程的线性化	20
2.3 拉氏变换及其应用	22
2.4 传递函数	31
2.5 结构图与信号流图	41
2.5.1 结构图	41
2.5.2 信号流图	52
习题	59
第三章 时域分析	62
3.1 引言	62
3.2 线性系统时间响应的性能指标	63
3.3 系统的暂态响应	64
3.3.1 一阶系统时域分析	64
3.3.2 二阶系统时域分析	66
3.3.3 高阶系统时域分析	74
3.4 控制系统稳定性分析	77
3.4.1 稳定的基本概念	77
3.4.2 劳斯判据	77
3.4.3 几种特殊情况	80
3.5 控制系统的稳态误差分析	82

3.5.1 稳态误差的基本概念.....	82
3.5.2 系统类型.....	83
3.5.3 参考输入信号作用下的稳态误差.....	84
3.5.4 扰动输入信号作用下的稳态误差.....	86
习题.....	88
第四章 根轨迹法	91
4.1 根轨迹的基本概念	91
4.2 根轨迹的绘制法则	92
4.2.1 根轨迹方程.....	92
4.2.2 根轨迹的一般绘制规则.....	93
4.3 控制系统根轨迹分析	102
习题.....	104
第五章 频域分析	106
5.1 频域特性.....	106
5.1.1 频率特性的基本概念.....	106
5.1.2 频率特性的图示方法.....	107
5.2 典型环节频域特性	108
5.2.1 比例环节.....	108
5.2.2 积分环节.....	109
5.2.3 微分环节.....	110
5.2.4 惯性环节.....	111
5.2.5 一阶微分环节.....	113
5.2.6 振荡环节.....	114
5.2.7 二阶微分环节.....	116
5.2.8 延迟环节.....	117
5.3 控制系统开环频率特性绘制	117
5.3.1 系统开环极坐标图的绘制.....	117
5.3.2 系统开环对数频率特性的绘制.....	121
5.3.3 最小相位系统与非最小相位系统的频率特性.....	126
5.4 频域稳定性判据	126
5.4.1 幅角原理.....	126
5.4.2 有理分式 $F(s)$ 的选取.....	126
5.4.3 封闭曲线 Γ_s 的选取.....	127
5.4.4 奈奎斯特稳定判据.....	128
5.4.5 稳定裕度.....	130
5.5 闭环频域特性分析	132
5.5.1 频域性能指标.....	132

5.5.2 闭环频域指标与时域指标的关系	133
5.6 开环频域特性分析	135
习题	139
第六章 自动控制系统的校正	141
6.1 控制系统校正基础	141
6.1.1 控制系统校正的概念	141
6.1.2 系统校正装置	141
6.2 根轨迹法校正	147
6.2.1 串联超前校正	148
6.2.2 串联滞后校正	151
6.3 频率法校正	153
6.3.1 比例校正	153
6.3.2 比例-微分校正环节(相位超前校正)	155
6.3.3 比例-积分校正环节(相位滞后校正)	156
6.3.4 比例-积分-微分校正(相位滞后-超前校正)	158
6.3.5 串联校正装置的设计	160
6.4 基于频率法的反馈校正	167
6.5 自动控制系统的结构设计	170
6.5.1 系统的简化处理	171
6.5.2 系统的期望对数频率特性的建立原则	171
习题	172
第七章 采样控制系统分析基础	174
7.1 连续时间信号的采样与采样定理	174
7.1.1 信号的采样	174
7.1.2 采样定理	175
7.2 信号的复现与零阶保持器	176
7.3 采样系统的Z变换	178
7.3.1 Z变换定义	178
7.3.2 Z变换方法	178
7.3.3 Z变换性质	180
7.3.4 Z反变换	183
7.4 脉冲传递函数	184
7.4.1 脉冲传递函数的定义	185
7.4.2 脉冲传递函数的求法	185
7.4.3 开环系统的脉冲传递函数	186
7.4.4 闭环系统的脉冲传递函数	187
7.5 采样系统的性能与控制	190

7.5.1 平面之间的映射	190
7.5.2 离散系统的稳定条件	191
7.5.3 Z-W 变换	191
7.5.4 数字控制器 $D(z)$ 的设计	193
习题	197
参考文献	200

第一章 自动控制系统概述

1.1 自动控制的基本原理与方式

本书作为一门基础理论课教材，主要介绍古典控制理论部分。

自动控制原理的研究对象是自动控制系统。为了使大家对本学科所要研究的对象和问题有个初步的认识，这里从介绍自动控制系统的任务、自动控制的方式以及自动控制系统的组成入手，来说明自动控制及其基本工作原理。

1.1.1 自动控制的任务

自动控制是现代工业生产中一种极其重要的技术手段，为达到质量和效益双提高、成本和污染双降低的目的，技术装备、机器设备和生产过程就必须按照预定的要求运行。例如在发电厂的生产过程中，要想使发电机不受负载变化和原动机转速波动的影响而正常供电，就必须保持其输出电压恒定；食品厂在生产熟食时，就必须按照加工要求严格控制烘炉的炉温；在机械加工的过程中，只有机床工作台和刀架的位置准确地跟随指令进给，才能加工出高精度的零件；轮船、飞机在航行中，要保证能按指定的航线行驶，就必须采取一定的措施使其运动轨迹满足要求而不受其他因素的干扰，等等。

在上面所讲述的例子中，发电机、烘炉、机床、轮船、飞机就是工作的机器设备。这些机器设备或技术装备在控制技术中被称为被控对象或受控对象；电压、工作台和刀架的位置、炉温、航线就是表征这些机器设备的物理参量，在控制技术中被称为被控量或被控参数；额定电压、规定的炉温、进给指令、要求的航线就是在运行过程中物理参量的期望值，在控制技术中被称为给定量；而为了使被控量与给定量一致所采取的措施就被称为自动控制；被控对象和自动控制装置所构成的总体被称为自动控制系统。

给定量以时间函数 $r(t)$ 表示，被控量以 $c(t)$ 表示，则自动控制的任务可以表示为

$$c(t) \equiv r(t)$$

或者

$$c(t) \equiv kr(t)$$

式中 k 为控制系数。

在自动控制系统中，虽然各种控制装置的具体任务不同，但其实质是一样的，即对被控对象的某些物理参量进行控制，使其能自动保持应有的规律性。那么自动控制是如何完成其任务的？接下来我们就将介绍完成自动控制的方式。

1.1.2 自动控制的方式

如果控制的任务是直接由人工来完成的话，那么就称为人工控制，如图 1.1 所示。

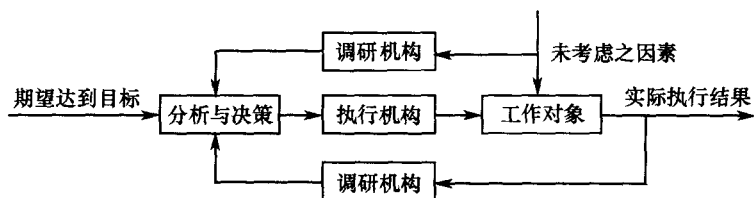


图 1.1 人工控制系统方框图

如果控制的任务是在没有人直接参与的情况下由一些自动控制装置来完成的话，那么就称为自动控制。用技术装置和工程描述语言对图 1.1 进行替换，就得到如图 1.2 所示自动控制系统方框图。

工作对象对应被控对象；实际执行结果对应被控量；期望达到目标对应给定量；分析与决策对应实现比较 / 计算功能的控制器或计算机系统；调研机构对应测量元件或传感器及变速装置；执行机构对应操纵改变被控对象物理参量的执行器。

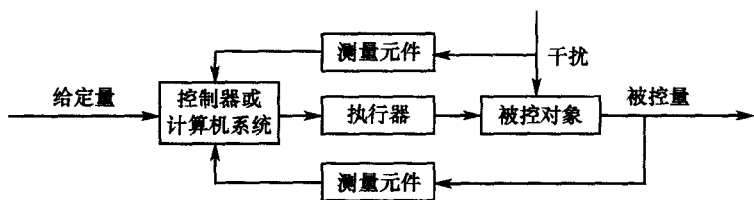


图 1.2 自动控制系统方框图

从这两个图中可以看出：控制装置应具备的三种基本功能是：测量、计算、执行，分别由相应的元器件来完成；系统控制的来源有三个，即给定量、干扰、被控量，是完成控制的主要依据。通过以上的分析，我们得出了自动控制的三种基本方式：按给定量进行操纵、按干扰进行补偿、按偏差进行控制。其中前两种属于开环控制方式，后一种属于闭环（反馈）控制方式。下面我们分别详细地介绍这两种控制方式的控制实例以及控制性能的优劣。

1. 闭环(反馈)控制

闭环控制方式的系统中控制信息的流动形成了闭合回路。下面我们通过四个例子来详细分析闭环(反馈)控制方式。

1) 炉温控制系统

炉温控制系统的工作原理图如图 1.3 所示。其控制任务是使炉温保持恒定。

让我们先来分析一下该系统的控制原理：假设系统在开始工作时，经过事先设定，这时炉温正好等于设定温度，此时与炉温相应的电压 U_t 与设定温度相应的电压 U_r 相等，即 $U_t = U_r$ ，故 $\Delta U = 0$ ，电动机、阀门都静止不动，燃油流量保持不变，燃油炉处于恒温状态，保持设定温度。

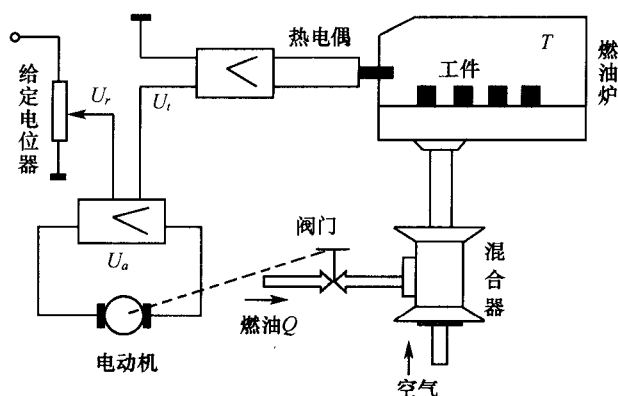


图 1.3 炉温控制系统工作原理图

如果这时负载（工件的数目）突然增大或燃油流量减小，则炉温开始下降，经过热电偶转换得到的与炉温相应的电压 U_i 变化会减小，故 $\Delta U > 0$ (ΔU 是个很小的量，不足以启动电动机。因此经过放大器放大为 U_a) 启动电动机正转，使阀门开度增大，从而增加燃油流量，炉温渐渐回升，直至重新等于设定温度（此时 $U_i = U_r$, $\Delta U = 0$ ）。可见该系统在负载增大的情况下仍能保持设定温度。

再来看看相反的情况。如果负载（工件的数目）突然减小或燃油流量增大，则炉温开始上升，经过热电偶转换得到的与炉温相应的电压 U_i 的变化也会随之增大，故 $\Delta U < 0$ ，电动机反转，使阀门开度减小，从而减小燃油流量，炉温渐渐下降，直至重新等于设定温度（此时 $U_i = U_r$, $\Delta U = 0$ ）。可见系统在此情况下也能保持设定温度。

通过以上对该系统控制原理的分析不难得出以下结论：该系统是通过测量炉温与给定温度的偏差值来进行控制工作的，故称为按偏差调节的控制系统。同时也能明确：该系统的被控对象是燃油炉；被控量是炉温；设定装置是给定电位器；测量变送装置是热电偶；干扰是负载大小、环境温度、燃油压力等；执行装置是电动机、阀门。由此可得到如图 1.4 所示的炉温控制系统的原理方框图。

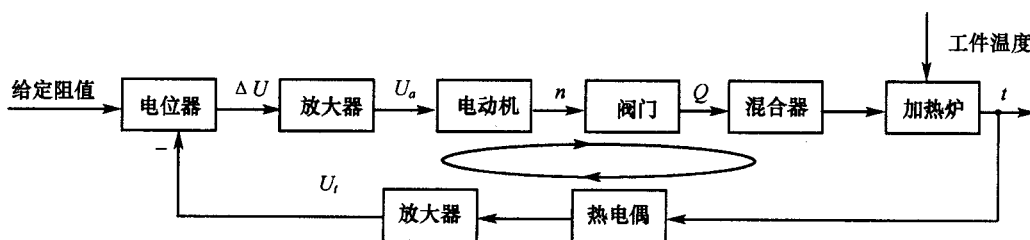


图 1.4 炉温控制系统原理方框图

在图 1.4 中，系统所传递的信号存在一个如图所示的闭合回路，而且反馈信号经过变换后与给定信号相减以便得到偏差信号，所以这类反馈(将检测出来的输出量送回到系统的输入端,并与输入信号比较的过程称为反馈)又称为负反馈。

2) 液位控制系统

液位控制系统的工作原理图如图 1.5 所示。其控制任务是使水池的液位保持恒定。

先进行系统控制原理分析：假设经过事先设定，系统在开始工作时液位 h 正好等于设定高度 H ， $\Delta h = 0$ ，浮子带动连杆位于电位器 0 电位，故电动机、阀门 L_1 都静止不动，进水量保持不变，液面高度 h 保持在设定高度 H 。

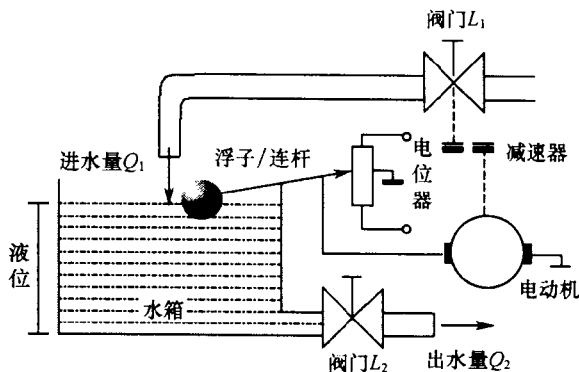


图 1.5 液位控制系统工作原理图

如果这时由于阀门 L_2 突然开大，出水量增大，则液位开始下降， $\Delta h > 0$ ，经过浮子测量，此时连杆上移，电动机正转，使阀门 L_1 开度增大，从而增加进水量，液位渐渐上升，直至重新等于设定高度。如果这时由于阀门 L_2 突然关小，出水量减小，则液位开始上升， $\Delta h < 0$ ，经过浮子测量，此时连杆下移，电动机反转，使阀门开度减小，从而减少进水量，液位渐渐下降，直至重新等于设定高度。可见系统在此两种情况下都能保持设定高度。

通过以上分析可以得出：此系统是通过测量液面实际高度与设定液面高度的偏差值来进行控制工作的，也是按偏差调节的控制系统。同时也能明确：该系统的被控对象是水箱；被控量是液面高度；设定装置是电位器；测量变送装置是浮子/连杆；干扰是出水量；执行装置是电动机、减速器、阀门 L_1 。这样就得到了如图 1.6 所示的液位控制系统的原理方框图。

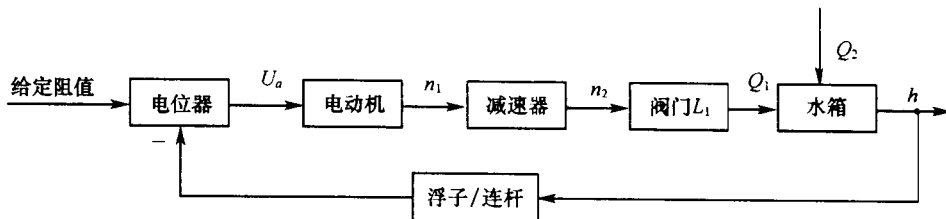


图 1.6 液位控制系统原理方框图

从图 1.6 可以看出液位控制系统也存在负反馈环节。

3) 直流电动机转速控制系统

直流电动机转速控制系统的任务是使直流电动机转速保持恒定。其工作原理图如图

1.7 所示。从图中可以得到系统的工作过程：由电位器输出电压控制触发器输出触发脉冲，在触发脉冲触发下整流器对三相交流电进行整流，输出的直流电压使电动机旋转。要保持电动机转速恒定，必须根据负载及时调整电动机的输入电压。

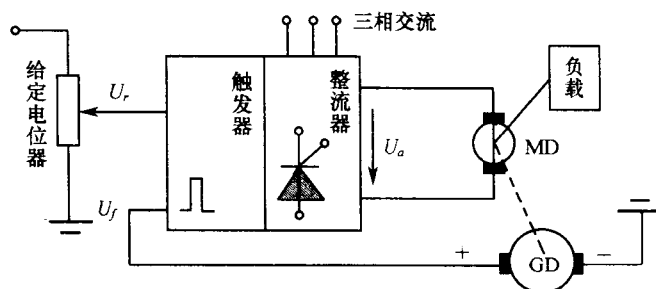


图 1.7 直流电动机转速控制系统工作原理图

接下来看看它是如何保证电动机转速恒定的：假设系统在开始工作时，经过事先调节，这时电动机的转速恰好等于希望转速，即 $\Delta n = 0$ ，电动机保持设定转速运转。

如果这时负载突然增大，则电动机转速开始下降，经过测速发电机测得的电压便会减小，那么该电压与给定电压的差值 $\Delta U > 0$ ，通过触发器去调整整流器的输出电压 U_a ，使 U_a 增大，则电动机加速，直至其速度重新等于设定速度（此时 $\Delta U = 0$ ）。

如果负载突然减小，则电动机转速开始上升，经过测速发电机测得的电压便会增大，那么该电压与给定电压的差值 $\Delta U < 0$ ，通过触发器去调整整流器的输出电压 U_a ，使 U_a 减小，这样电动机就开始减速，直至其速度重新等于设定速度（此时 $\Delta U = 0$ ）。可见系统在负载增大或减小的情况下都能保持设定的转速。

在这里系统是通过测量直流电动机输出转速与给定转速的偏差值来进行控制工作的，也存在负反馈，是按偏差调节的负反馈控制系统。

同时由控制原理的分析可以得出：该系统的被控对象是直流电动机；被控量是电动机的输出转速；设定装置是给定电位器；测量变送装置是测速发电机；干扰是负载的变化；执行装置是触发器及整流器。这样就得到了如图 1.8 所示的直流电动机转速控制系统的原理方框图。

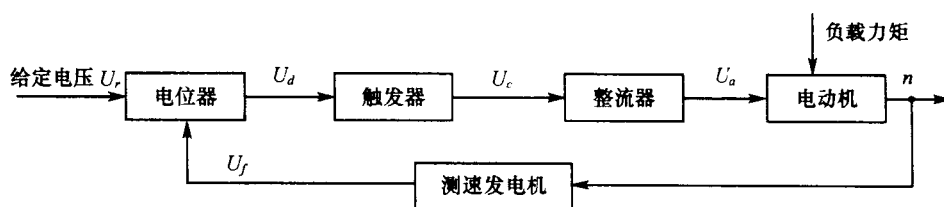


图 1.8 直流电动机转速控制系统原理方框图

4) 舵轮随动系统

舵轮随动系统的任务是使轮船的尾舵随时跟随舵轮的角度而旋转。其工作原理图如图 1.9 所示。

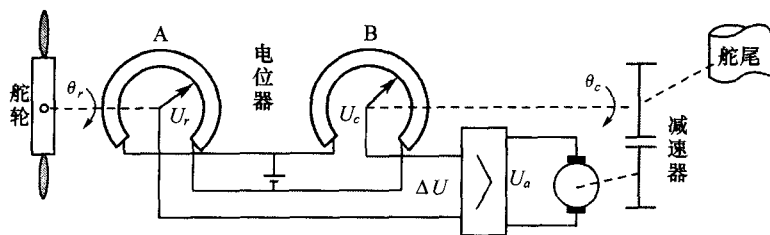


图 1.9 舵轮随动系统工作原理图

由图 1.9 可见，在轮船航行时，如果船的尾舵转角与舵轮的转角相等时，两电位器 A、B 的电压相等，此时的 $\Delta U = 0$ ，电动机不动，系统处于平衡状态。如果舵轮的输入角度 θ_r 变化了，而尾舵仍处于原位，则 $\Delta \theta \neq 0$ ，两电位器 A、B 的电压就不相等了，此时的 $\Delta U \neq 0$ ，电动机开始旋转，拖带尾舵朝所要求的方向旋转，直至尾舵的角度 θ_c 与舵轮的输入角度 θ_r 相等， ΔU 又恢复为零，电动机停转，系统即在新的位置上重新保持平衡直到舵轮的角度再次发生变化。也就是说此类系统是使被控量一直随给定量的变化而变化，而给定量的变化规律又无法事先确定。这种能够任意跟踪给定量的变化而变化的系统就称为随动系统。其原理方框图如图 1.10 所示。

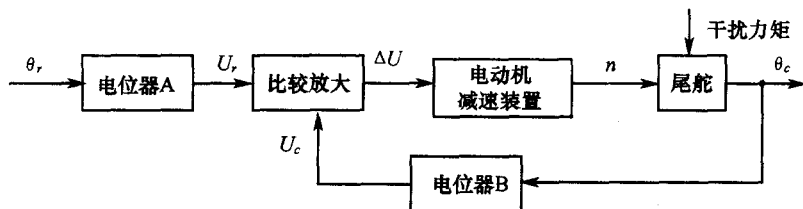


图 1.10 舵轮随动系统原理方框图

以上四个实例都有一个特点：需要控制的是被控对象的被控量，而测量的是被控量与给定量之间的。无论是外界干扰造成的、还是由自身结构参数的变化引起的被控量出现的偏差，系统都能够自行减小或消除，这也是为什么称这种控制方式为按偏差调节的道理。同时，系统中控制信号沿前向通道和反馈通道闭路，往复循环传送，又称反馈控制。这样就在原理上为我们提供了实现高精度控制的可能性。

2. 开环控制

开环控制系统与闭环控制系统正好相反，即是指在系统中控制信息的流动未形成闭合回路。常见的开环控制系统有以下两种。

1) 按给定量操作

假如在图 1.3 所示的炉温控制系统中，我们根据预先计算出的燃油流量（由设定炉温得到）操作阀门向加热炉内提供该流量即可，这种控制方式需要控制的是被控量，而测量的只是给定值，系统的信号由给定值至被控量单向传递，故称为按给定量操作的开环控制方式。其原理方框图如图 1.11 所示。



图 1.11 按给定量操作的开环控制原理方框图

显而易见,这种控制较简单,但有较大的缺陷,即当被控对象受到干扰影响而使被控量偏离设定值,或工作过程中特性参数发生变化时,系统无法实现自动补偿。因此,系统的控制精度难以保证。当然,如果系统的结构参数稳定,干扰很弱或对被控量要求不高,这种系统还是可以应用的。比如家用电风扇、空调机、包装机以及某些自动化流水线等的转速控制。

2) 按干扰补偿

如果在控制中,被控量易受干扰的影响,则稳定被控量,就是在干扰信号出现时对控制量进行一定操作,使干扰对被控量的影响在系统中能互相抵消以保持被控量不变,这种控制方式需要控制的是被控量,而测量的是破坏系统正常运行的干扰,故称按干扰补偿控制方式,也称前馈控制,其原理方框图如图 1.12 所示。

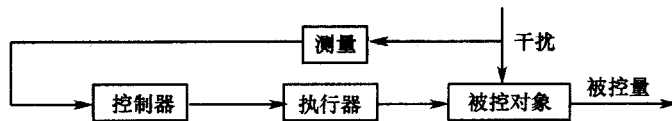


图 1.12 按干扰补偿的开环控制原理方框图

由图中可以看出,其一,干扰经测量、控制器、执行器等至被控对象的被控量,也是单向传递的,故亦属于开环控制;其二,我们测量的是干扰量,故只能对可测干扰进行补偿。对于不可测干扰以及对象、各部件内部参数变化给被控量造成的干扰,系统自身是无法控制的,所以控制精度受到了原理上的限制。在实际中工作机械的恒速控制(如稳定刀具转速)以及电源系统的稳压、稳频控制常用这种补偿方式。

3. 复合控制方式

反馈控制是自动控制系统中最基本的控制方式,在实际工程中获得了非常广泛的应用。但是由于反馈控制只有在偏差出现后才能工作,因此系统若处于强干扰工作环境下,被控量在控制过程中可能出现很大的波动。对于这种工作环境,宜采用复合控制方式。复合控制方式是把按偏差控制与按扰动控制结合起来,对于主要扰动采用适当的补偿装置实现按扰动控制,同时,再组成反馈控制系统实现按偏差控制,以消除其余扰动产生的偏差。

1.1.3 自动控制系统的组成

自动控制系统主要由两大部分组成,即控制装置及被控对象,如图 1.13 所示。其中控制装置根据其在系统中的功能可分为三个部分,即检测装置、执行装置和校正装置。

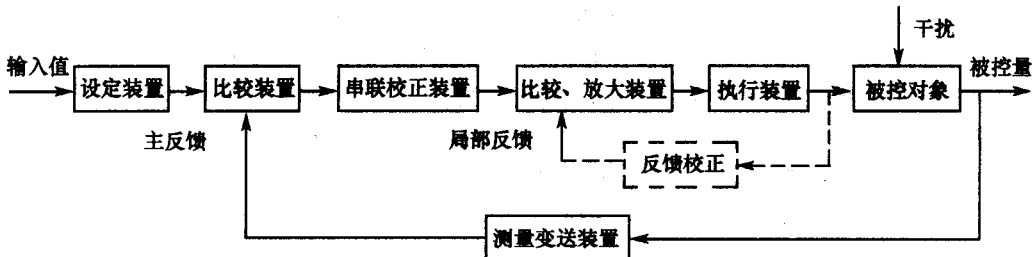


图 1.13 自动控制系统的组成