



“十二五”职业教育国家规划教材
经全国职业教育教材审定委员会审定



普通高等教育“十一五”国家级规划教材
全国高等专科教育自动化类专业规划教材

第2版

自动控制原理

陈铁牛 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



赠电子课件
及习题解答等

传递函数为数学工具，频率法为主要研究方法，研究单输入-单输出的线性定常系统的分析和设计问题，并在工程上比较成功地解决了如恒值控制系统与随动控制系统的设计与实践问题。

20 世纪 60 年代初期，随着现代应用数学新成果的推出和电子计算机技术的应用，特别是制导、宇航等技术的发展，推动自动控制理论跨入了一个新阶段——现代控制理论。它主要研究多输入-多输出、时变和非线性等控制系统的分析与设计问题，其基本方法是基于时域的分析方法，研究内容十分广泛，主要有线性系统、最优控制、最佳滤波、自适应控制、系统辨识和随机控制等。

近年来，随着技术革命和大规模复杂系统的发展，已促使自动控制理论开始向第三代发展，即大系统理论和智能控制理论。

作为自动化类专业的一门专业基础课教材，本书将重点放在经典控制理论。

1.2 自动控制的基本原理与方式

1.2.1 人工控制与自动控制

自动控制作为一种重要的技术手段，在工程技术和科学研究中起着极为重要的作用。什么是人工控制？什么是自动控制？为说明这些概念，首先用控制一台直流电动机转速不变的例子来说明。

图 1-1 所示为人工控制直流电动机转速的示意图。人通过肉眼观察电动机同轴的转速表，看电动机转速是否符合希望的转速值，如果某种原因使转速偏离了希望值，人根据偏差作出判断，并及时向正确方向调节电位器，使电动机转速恢复到（或接近）希望值。上述过程中，人起到了“观测、比较、执行”的作用，因此在这种控制系统中人是主导因素。这一过程可用框图 1-2 表示。图中箭头方向表示各部分的联系。

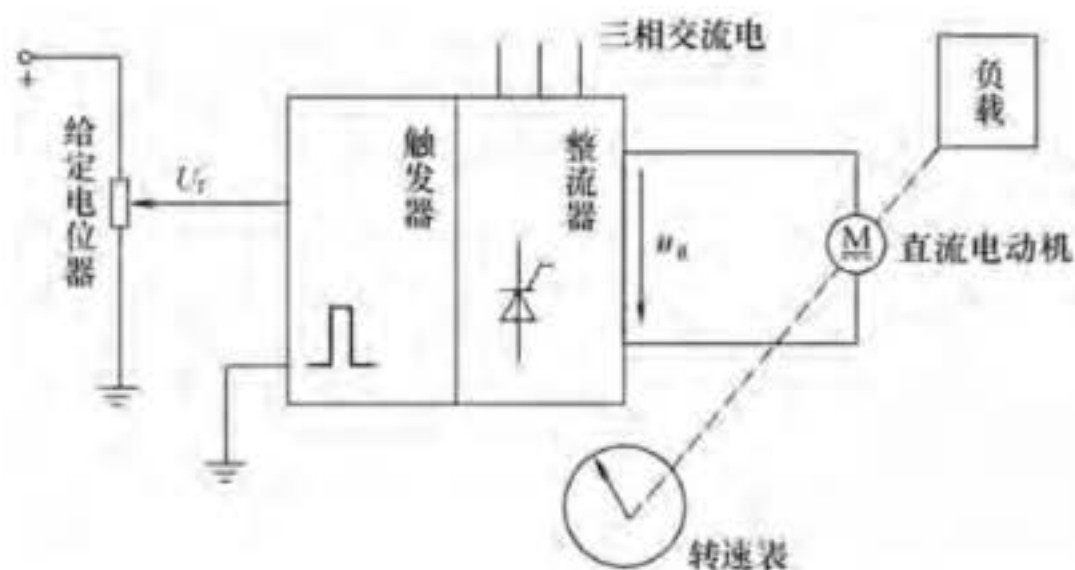


图 1-1 人工控制直流电动机转速的示意图



图 1-2 人工控制框图

通过研究上述人工控制电动机转速的过程可以看到,所谓控制就是使某个对象中的某些物理量按照一定的目标来动作。本例中,对象指电动机,其中物理量指电动机的转速,一定目标就是事先要求的转速希望值。显然若要求电动机的转速稳定精度高,由人来控制就很难满足要求,这时就需要用控制装置代替人,形成转速自动控制系统,如图1-3所示。

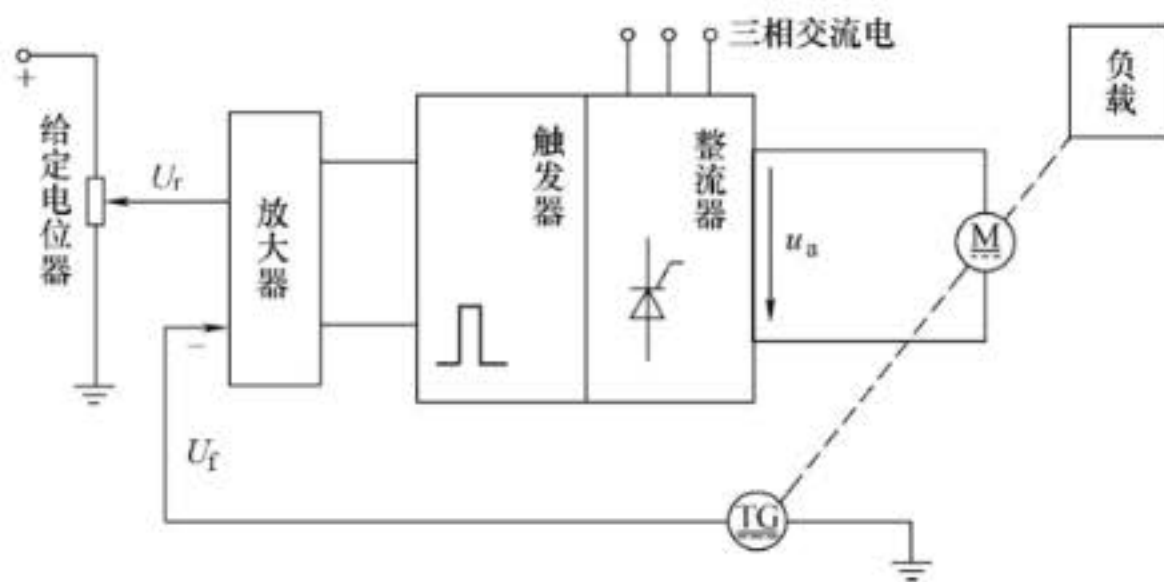


图 1-3 直流电动机转速自动控制系统

该系统中测速发电机 \$TG\$ 为测速装置,将电动机的转速测量出来并转换为电压信号 \$U_f\$,与输入给定电压 \$U_r\$ 比较,得到的偏差电压经放大器放大后送去控制电动机,以缩小转速的偏差。其自动控制的信号流动及相互关系,可由图1-4所示的框图表示。



图 1-4 直流电机转速控制系统的原理框图

自动控制和人工控制的基本原理是相同的,它们都是建立在“测量偏差,修正偏差”的基础上,并且为了测量偏差,必须把系统的实际输出反馈到输入端。自动控制 and 人工控制的区别在于自动控制用控制器代替人完成控制。

1.2.2 开环控制和闭环控制

1. 开环控制 开环控制系统是指无被控量反馈的系统,即在系统中控制信息的流动未形成闭合回路。这种控制方式需要控制的是被控量,而系统可以调节的只是给定值,系统的信号由给定值至被控量单向传递。其原理框图如图1-5所示。

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希望值,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,在系统的结构参数



图 1-5 开环控制原理框图

当然,在系统的结构参数

稳定, 干扰很弱或对被控量要求不高的场合, 这种控制简单的系统还在被广泛应用着。比如家用电风扇的转速控制、传统的空调机、包装机以及某些自动化流水线等。

2. 闭环控制 闭环控制就是有被控量反馈的控制, 其原理框图如图 1-6 所示。从系统中信号流向看, 系统的输出信号沿反馈通道又回到系统的输入端, 构成闭合通道, 故称闭环控制, 或反馈控制。

反馈控制又分为正反馈和负反馈两种情况。负反馈使被控量起到与给定量相反的作用, 其控制思想是通过给定量与被控量之间的差值作用于控制系统的控制器(执行器), 控制器(执行器)的任务就是不停地减小这个差值, 以使系统的被控量与给定量尽量接近, 并促使系统趋于稳定。因此负反馈控制是自动控制系统最基本最常用的控制系统。

正反馈使被控量起到与给定量相似的作用, 使系统偏差不断增大, 控制器(执行器)的输出不断增大, 造成系统被控量更加偏离给定量, 并使系统振荡不稳定。因此正反馈是助长系统的扰动, 一般在控制系统中应该避免。



图 1-6 闭环控制原理框图

在闭环负反馈控制中, 无论是由于外界干扰造成的、还是由自身结构参数的变化引起的被控量与给定量之间的偏差, 系统都能够自行减小或消除这个偏差, 因此这种控制方式也称为按偏差调节。闭环控制系统的突出优点就是利用偏差来纠正偏差, 使系统达到较高的控制精度。但与开环控制系统比较, 闭环系统的结构比较复杂, 构造起来比较困难。需要指出的是, 由于闭环控制存在反馈信号, 利用偏差进行控制, 如果设计不当, 有可能引起系统振荡使系统无法正常工作。另外, 控制系统的精度与系统的稳定性之间也常常存在矛盾。

1.2.3 自动控制系统的组成

自动控制系统主要由两大部分组成, 即控制器及被控对象。如图 1-7 所示, 其中控制器根据其在系统中的功能可分为 3 个部分, 即检测装置、执行装置和校正装置。图中各部分的功能如下。



图 1-7 自动控制系统的组成

(1) 给定装置。给定装置的功能是设定与被控量相对应的给定量, 并要求给定量与测

量变送装置输出的信号在种类和纲量上一致。

(2) 比较、放大装置。比较、放大装置的功能是首先将给定量与测量值进行运算,得到偏差量,然后再将其放大到足以推动下一级工作的程度。

(3) 执行装置。执行装置的功能是根据前面环节的输出信号,直接对被控对象作用,以改变被控量的值,从而减小被控量的偏差,最好能消除偏差。

(4) 测量与变送装置。测量与变送装置的功能是检测被控量,并将检测值转换为便于处理的信号(常见的如电压、电流等),然后将该信号输入比较装置。

(5) 校正装置。当自控系统由于自身结构及参数问题而导致控制结果不符合工艺要求时,必须在系统中添加一些装置以改善系统的控制性能。这些装置就称为校正装置。

(6) 被控对象。被控对象是指控制系统中所要控制的对象,一般指工作机构或生产设备等。

1.2.4 自动控制系统实例分析

下面通过实例来了解自动控制系统的分析方法。自动控制系统的分析,首先从了解系统的组成及工作原理开始,进而画出组成系统的原理框图。自动控制系统的原理框图既是分析系统的结果,又是以后建立数学模型的基础,它是认识分析系统的基础。但由于实际系统往往比较复杂,各部件究竟属于组成框图中的哪一个单元,往往不明显,因此常使人感到无从下手。常用的方法是先明确以下问题:

- (1) 哪个是控制对象?被控量是什么?影响被控量的主扰动量是什么?
- (2) 哪个是执行装置?
- (3) 测量被控量的装置是什么?反馈环节在哪里?
- (4) 输入量是由哪个装置给定的?反馈量与给定量是如何进行比较的?
- (5) 还有哪些装置(或单元)?它们在系统中起什么作用?

然后依次画出各单元的框图,标明各变量的传递关系,分析清楚给定量、反馈量、扰动量、各中间变量的位置,依次把各单元框图联系组合起来,最后形成给定量置于系统框图的最左边,被控量置于系统框图的最右边,即得其系统的控制原理框图。

1. 炉温控制系统

炉温控制系统是工业领域中最常见的控制类型和广泛应用的系统。如图1-8所示是一燃油炉的炉温控制系统的工作原理图,其控制任务是使炉温保持恒定。

现在的任务是:

- (1) 画出系统的原理框图。
- (2) 正确分析系统的控制原理。

分析:燃油炉的实际温度 t 由热电偶传感器测量,将温度信号转换为电压信号 U_t ,燃油炉期望温度由电压 U_r 给定,并与实际温度 U_t 比较得到温度偏差信号 $\Delta U = U_r - U_t$,温度偏差信号经功率放大器放大后,用以驱动执行电动机转动,从而带动燃油阀门转动,调节燃油量的供给,实现炉温的调节,直到温度达到给

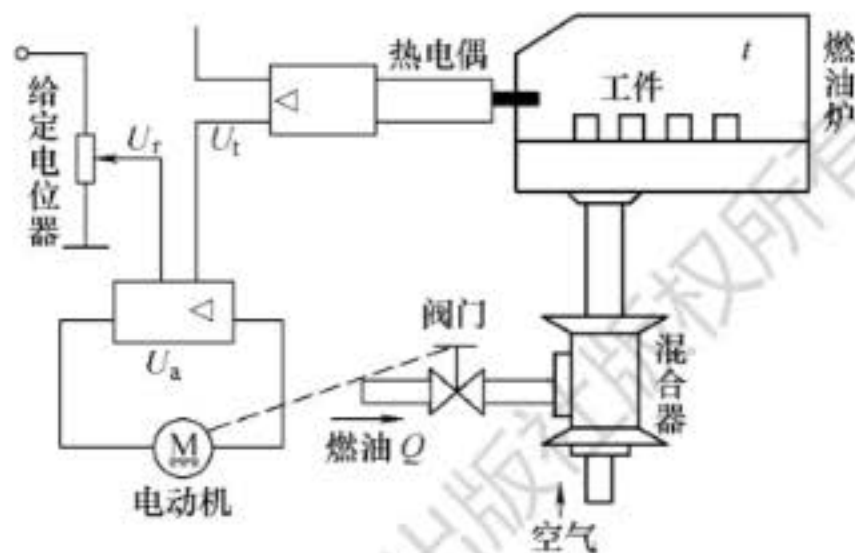


图 1-8 炉温控制系统的工作原理图

定值为止。此时偏差信号 $\Delta U = 0$ ，电动机停止转动。由此可见：

系统被控对象：燃油炉。

被控量：炉温。

给定装置：给定电位器。

测量变送装置：热电偶。

比较放大装置：电压功率放大器。

执行装置：电动机、阀门。

扰动：工件的数量、燃油压力、环境温度等的变化。

根据以上分析，可得到图 1-9 所示的炉温控制系统的原理框图。

如果这时负载（工件的数目）突然增大或燃油减小，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 便会减小，故 $\Delta U > 0$ ，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希望温度。

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 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希望温度。

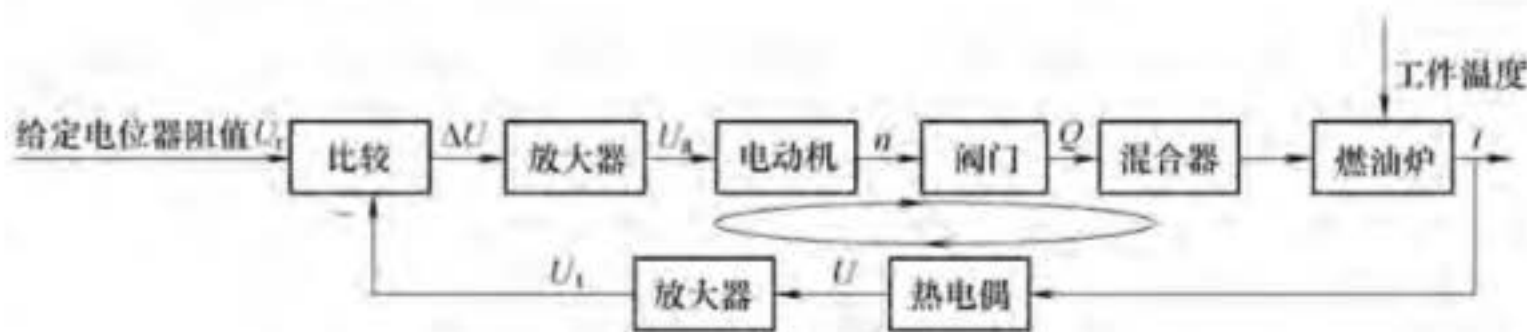


图 1-9 炉温控制系统的原理框图

2. 液位控制系统 液位控制系统的工作原理图如图 1-10 所示，其控制任务是使水池的液位保持恒定。

系统的控制原理分析：假设经过事先设定，系统在开始工作时液位 h 正好等于给定高度 H ，即 $\Delta h = 0$ ，浮子带动连杆位于电位器 0 电位，故电动机、阀门 V_1 都静止不动，进水量保持不变，液面高度 h 保持设定高度 H 。

如果这时由于阀门 V_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，电动机得电正转，使阀门 V_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 V_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，电动机得电反转，使阀门 V_1 开度减小，从而减少进水量，液位渐渐下

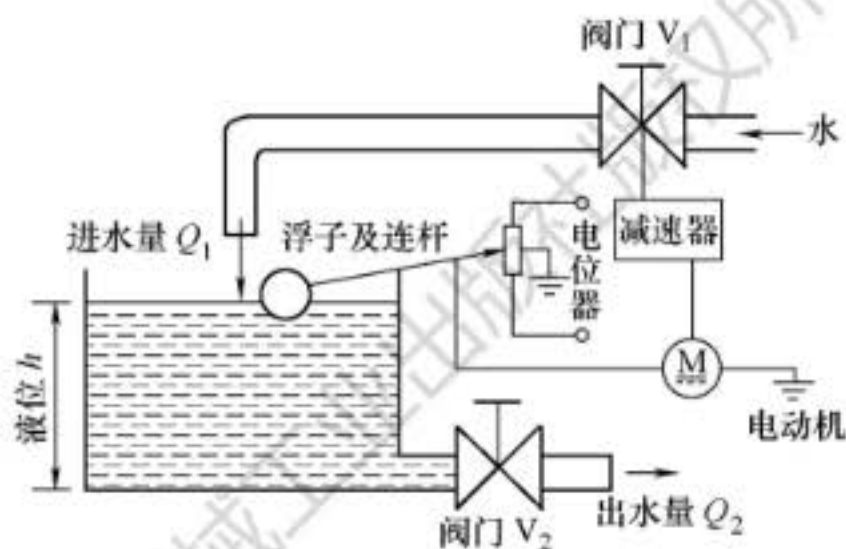


图 1-10 液位控制系统的工作原理图

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希望高度。

通过分析可以得出:此系统是通过测量液面实际高度与给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。同时不难看出:该系统的被控对象是水池;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 V_1 。这样就得到了如图1-11所示的液位控制系统的原理框图。



图 1-11 液位控制系统的原理框图

从上图可以看出液位控制系统也存在负反馈环节。

3. 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1-12所示。由图可见,在船只航行时,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 又恢复为零值,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。这种能够任意操纵和跟踪的系统就称为随动系统。其原理框图如图1-13所示。

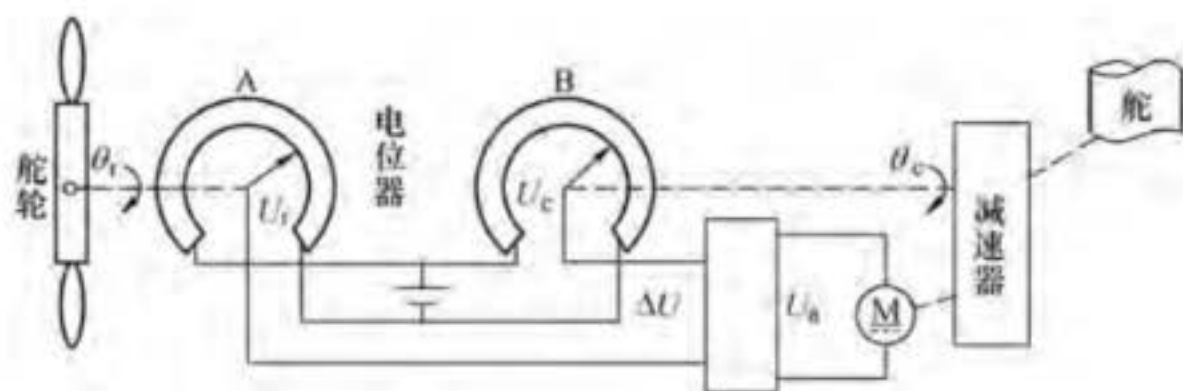


图 1-12 舵轮随动系统的工作原理图

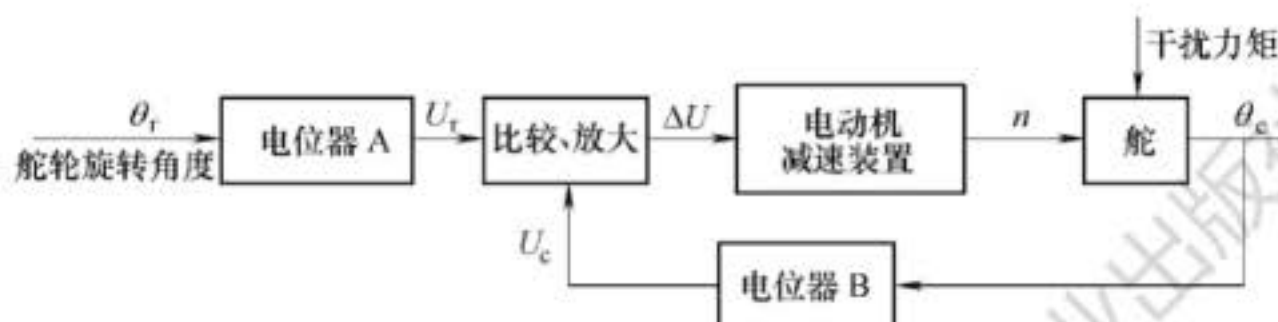


图 1-13 舵轮随动系统的原理框图



以上3个实例都有以下特点：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偏差。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偏差，这也是为什么称这种控制方式为按偏差调节的原因。

1.3 自动控制系统的分类

随着自动化技术的飞速发展和控制理论的日趋完善，自动控制系统在广泛应用的同时也日趋复杂，出现了各式各样的系统。这里从不同的角度对系统进行分类，而分类的目的是为了在对系统分析、设计之前，从不同的角度来认识系统，以便于选择恰当的分析方法和设计手段。

1.3.1 按给定量的特征分类

按给定量的特征分类，自动控制系统可分为恒值给定控制系统、随动控制系统、程序控制系统。

(1) 恒值给定控制系统。恒值给定控制系统的特征是给定量一经设定就维持不变。系统的主要任务是：当被控量在扰动作用下偏离给定量时，通过系统的控制作用尽快地恢复到给定量。即使由于系统本身的原因不能完全恢复，误差也应该控制在规定的允许范围内。注意，若生产工艺要求被控量改变，可通过改变给定量来实现，但这种改变是控制系统根据工艺要求重新设定的过程，而且一经设定，长时间不再变化，即生产工艺要求不会频繁改变。因此，对被控量能否快速而准确地跟踪给定量的变化可不作重点研究。分析和研究该类系统的重点应放在系统能否有效、快速地克服各类干扰量对被控量的影响使被控制量维持在给定量上。这类系统有恒速（直流电动机调速系统）、恒温（炉温自动控制系统）、恒压、恒流、恒定液位等。

(2) 随动控制系统。随动控制系统，也常常称作伺服系统，它的特征为给定量是变化的，而且其变化规律是未知的。系统的主要任务是：使被控量快速、准确地随给定量的变化而变化。因此，分析和研究这类系统的重点应放在系统的被控量跟踪输入信号变化而变化的能力上。例如前面讲过的轮船的尾舵随动系统就是一个位置随动系统的实例。

(3) 程序控制系统。程序控制系统的特征是给定量按事先设定的规律而变化。系统的主要任务是：使被控量随给定的变化规律而变化。因此，在设计该类控制系统时需要先设计一个给定器，用来产生按一定规律变化的信号，作为系统的给定量。这类系统有仿形机床、程序控制机床等。

1.3.2 按系统中元件的特性分类

按自动控制系统中元件的特性分类，可分为线性控制系统和非线性控制系统。

(1) 线性控制系统。线性控制系统特点是系统中所有元件都是线性元件，分析这类系统时可以应用叠加原理，即当有多个信号同时作用于系统时，系统总输出为每个输入信号作用于系统的输出之和。同时，该类系统的状态和性能可以用线性微分方程来描述。

(2) 非线性控制系统。非线性控制系统的特点是系统中含有一个或多个非线性元件。实际应用的自动控制系统都不同程度存在非线性。严格地说，任何物理系统的特性都是非线