

第13篇 自动控制

- 主 编** 叶正明 (中国科学院自动化所)
- 编 写 人** 叶正明 (中国科学院自动化所)
张平子 (中国社会科学院数学物理研究所)
莫少敏 (总参61所)
易允文 (中国科学院沈阳自动化所)
- 审 稿 人** 严筱钧 (机械电子工业部北京自动化研究所)
曾 英 (机械电子工业部北京自动化研究所)
罗江一 (北京市自动化系统成套设计研究所)
- 责任编辑** 曹敬曾
李书全

1 概 述

1.1 定义

为了达到某种目的,把所需的操作或策略加到对象上去的作用称为控制。对象是指物体、机器、过程及系统等广泛的控制对象;目的可以是一个或多个。最简单的只需保持某一工艺状况的参数稳定,如炉内温度保持在多少度等等,而复杂的则要使生产中的某一目标函数达到最优,如锅炉的热效率最高等等。操作是指改变控制对象的输入量的动作,如改变输入到加热炉中去的燃料或空气等。而策略是指组织各种操作的方法及准则,如对一条生产线,要尽量发挥其装备能力和缩短加工周期,就得制订一套方法,根据生产线的任务计划,不断调整各个加工中心、各个机床的作业加工顺序和参数,这样的方法就称为策略。而改变各个机床的加工顺序和参数,则称为操作。

由人直接考虑目的和操作,称为手动控制。不用人参加,全部由自动装置根据控制目的来进行操作,称为自动控制。由这些自动装置连同控制对象组成的一个既相互联系又安排有序的系统称为自动控制系统。

1.2 分类

自动控制系统由于控制原理不同,可以分为线性系统、非线性系统、最优控制系统……顺序控制系统等;也可以根据控制参数不同,而分为温度控制系统、流量控制系统……等^[1]。而由于控制对象的特性不同,也可以分为(工业)过程控制系统、运动物体控制系统……等。机械工业中的自动控制系统,按控制对象来说,都属于过程控制系统。假如按照工业过程的生产特点来说,又可分为连续生产过程和间歇生产过程两大类,它们的自动控制系统又各有其特点。但是按照控制原理来分,各种工业的自动控制系统可分为反馈控制系统、

顺序控制系统和综合控制系统三种。其中顺序控制系统在机械工业中使用较多，因此单独予以叙述。

在反馈控制系统中，控制对象的输出量送回来与控制的目标值进行比较，这就称为反馈。然后根据目标和输出的差值来变化对控制对象的操作量，以求减少或消除两者的差值，这就称为反馈控制。工业生产中，对生产工艺状况保持稳定或跟踪某些规定的时间函数都需要采用这类系统。工业革命后的蒸汽机，就有调速系统，这是早期采用的自动化系统，也属于反馈控制系统。反馈控制系统目前在工业生产中用得最广泛，它的理论也比较成熟。

在顺序控制系统中，顺序控制器按照预定的顺序，对被控制的生产设备自动地依次完成一系列的操作。生产设备的动作通过检测元件送回到顺序控制器的命令处理部分；但送回的信号是逻辑量，如开、关、到、未到等，这和反馈控制信号不同。反馈控制信号都是定量的、连续增减的量。顺序控制器对信号的处理都是逻辑性的，而反馈控制系统对信号的处理主要是算术运算性质的。因此两者的控制作用不同，系统结构也截然不同。顺序控制系统广泛用于生产设备的操作控制。

在工业生产还是小规模的产品工厂时，往往只是某些生产设备的个别参数或个别动作需要控制。随着生产工艺日益复杂，整个生产设备必须考虑全面自动化问题，而各个生产设备间的相互联系也必须在设计自动化系统时予以考虑。如一条生产线中几台机床，每台机床有自己的转速控制、进刀量控制等；但由于它们在生产上的联系，因此各台机床要有统一的顺序控制，甚至某两台机床要有备品库，而备品库的贮存量要受整个生产线运行情况的控制。因此整个生产线要另有一个控制系统。同样，在生产线上，也应有另一车间级的控制系统，对各生产线制订计划，协调生产，也对车间各生产要素诸如能源、原材料、运输等问题进行统一调度。这种从上到下的一整套控制系统，称为综合控制系统。这种系统通常是多层次的，最高一级可到联合企业的公司管理，最低一级可为生产设备的控制。综合控制系统中有反馈控制及顺序控制，还有生产的监督检测系统，经营的管理系统，是现代化生产必不可少的手段。

2 反馈控制系统

2.1 反馈控制系统的设计

反馈控制系统的结构图见图13-1。试以热处理炉的温度控制为例，输出量 $x(t)$ 是控制对象的输出参数，亦即要求控制的参数。在热处理炉中，炉内温度即为输出量。操作量 $v(t)$ 代表在控制对象的输入参数中选出来改变输出量 $x(t)$ 的输入参数。热处理炉的电加热功率即为操作量。扰动 $d(t)$ 代表外界作用于控制对象而能影响输出量 $x(t)$ 的参数，如炉门打开时，冷空气进入炉膛等。输出量 $x(t)$ 通过检测元件变为检测量 $y(t)$ 。如热处理炉的测温热电偶输出即为 $y(t)$ 。目标值代表要求输出量 $x(t)$ 达到的数值，如炉温要求稳定在 700°C ，这就是目标值。误差信号 $e(t)$ 为目标值与检测信号反馈回来的差值。由于在物理上只能获得检测信号 $y(t)$ ，在使用镍铬镍铝热电偶为检测元件， 700°C 时输出为 29.13mV ，则使用的目标值即为 29.13mV ，这一数值与热电偶输出信号之差为 $e(t)$ 。控制器的输入信号为 $e(t)$ ，输出为 $u(t)$ 。 $u(t)$ 加在操作部件上，操作部件的输出即为操作量 $v(t)$ 。如采用DDZ型调节器（见第12篇）作为控制器，晶间管加热器作为操作部件，则实际的结构图见图13-2。

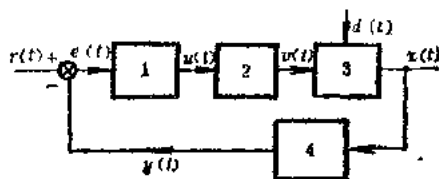


图13-1 反馈控制系统的结构图

1—控制器 2—操作部件 3—控制对象 4—检测元件

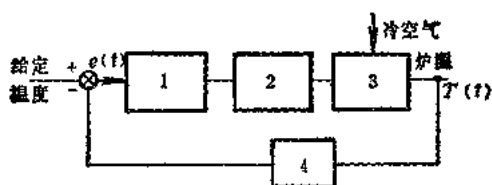


图13-2 热处理炉温控制系统图

1—DDZ调节器 2—晶闸管加热器 3—热处理炉 4—热偶

对反馈控制系统的设计任务是，根据生产工艺的要求以及控制对象的特性来选定检测部件、操作部件和控制器，使整个控制系统的性能符合生产上的要求。

反馈控制系统的各种目标要求以及对控制系统应提的性能要求大致分下列几种：

(1) 定值控制 要求输出量 $x(t)$ 稳定在一定值。这定值可以人工给定，也可以由计算机或其他设备给定。如热处理炉的保温段控制即为这一类要求。性能要求为给定值 $r(t) = r_g$ 不变时，稳态最大误差 $e_{smax} \leq \alpha \cdot r_g$ (α 为百分数)；当系统出现可能有的大扰动时，瞬间最大误差 $e_{imax} \leq \beta \cdot r_g$ (β 为百分数， $\beta > \alpha$)，恢复到稳态误差的时间 $T_s \leq T_n$ (给定时间)。

(2) 程序曲线控制 要求输出量 $x(t)$ 按事先规定的曲线 $r(t)$ 变化。这一曲线必需由计算机或其他设备自动产生。如程序控制机床加工零件时，零件在各坐标上的尺寸按事先规定的曲线变化。性能要求为 $x(t)$ 与 $r(t)$ 的差值 $|e(t)| \leq \epsilon$ (ϵ 为一给定数值)。这一系统的扰动应尽量小，或设法减少其影响，并且系统的操作量 $u(t)$ 应有足够的变化范围，使之能适应 $r(t)$ 的最大变化率。

(3) 比例控制 要求输出量 $x(t)$ 和目标值 $r(t)$ 成比例变化，即 $x(t) = kr(t)$ 。如锅炉的鼓风机应和燃料的单位时间内进入量成比例，即可用比例控制。性能要求与程序曲线控制相同。

(4) 跟踪控制 要求 $x(t)$ 和 $r(t)$ 一致。 $r(t)$ 事先是不知

道的,也可能有突变。如生产线上飞锯、飞剪对原材料的锯、剪就属于这种控制。这一系统要求在 $v(t)$ 受物理条件的限制下, $x(t)$ 尽可能快速跟踪 $r(t)$ 。 $x(t)$ 与 $r(t)$ 的差值 $e(t)$ 通常要求很小,是比较精密的控制系统。

明确了反馈控制系统的目标要求及输出量 $x(t)$ 的最大稳态误差 $e_{s\max}$ 和最大动态误差 $e_{d\max}$,我们可以初步选定系统中各部件。

检测部件的检测量、测量范围、环境要求只和控制对象有关,和控制系统无关。但它的测量精度和分辨力和系统要求 $e_{s\max}$ 、 $e_{d\max}$ 密切相关。通常如上述第(1)种目标要求,检测部件的分辨力 $s \leq 0.1 \sim 0.3e_{s\max}$,如为第(2)、(3)、(4)种目标要求时, $s \leq 0.1 \sim 0.2e_{\max}$ ($e_{\max} = \max |x(t) - r(t)|$),至于测量精度,它的等级比分辨力差一些,即测量误差要比分辨力大。工业测量仪表一般为0.5级,误差在0.5%左右,但其分辨力可以达到0.2%~0.3%。在选择检测部件的精度时要注意这一点。假如测量精度高于0.5级,一般多采用数字型检测部件,其分辨力相当于一位码的检测量。为了提高分辨力,可以使用两个甚至两个以上的数字检测部件。其中有粗测件,量程宽而分辨力粗,依次是中测件和精测件,量程逐次变窄而分辨力逐次变细。这可以弥补单个检测部件的缺点。精密的数控机床就是这样使用检测部件的。

检测部件的响应速度对控制系统同样是很重要的。在目标要求第(1)类中如出现扰动,要求恢复很快,以及在第(4)类中如 $r(t)$ 变化较快,都要求检测部件的输出快速接近于检测量的变化。在热处理炉中,当冷工件进入炉膛后,希望工件温度迅速达到要求值而又不超过,经常将热电偶的端点从保护套中露出,就是为了减少测温的反应时间,有利于控制精度。

反馈控制系统中的操作部件大致可分两类,一类是连续型,另一类是断续型。前者的输入函数 $u(t)$ 和它的输出 $v(t)$ 都是连续的时间函数,象锅炉上送风阀的开度和送风量都是连续的时间函数,因此送风阀属于连续型的操作部件。后者的输出 $v(t)$ 只有两种状态,开或关,如冷冻机用于空调,只能启动或停车,因此空调中的冷冻机属

断续型的操作部件。几种常用的操作部件见表13-1。连续型的操作部件可以构成连续型的控制系统，控制精度较高。断续型的操作部件只能构成断续型的控制系统，控制精度较低，一般稳态误差也在5%左右。假如一定要用断续型的操作部件，又要改善控制精度，可以使用采样控制系统（见2-3）或使用非线性控制系统的方法（见2-4）。

表13-1 操作部件分类表

操作部件类别	电动机	阀 门	电加热器	液压控制装置
连续型	能调速的各种电动机	气动薄膜调节阀，电动调节阀	脉冲移相式的晶闸管控制加热器	电液伺服阀和液压缸组成的液压随动系统
断续型	不能调速的交流异步电动机	电磁阀，只能开关的气动阀	双向晶闸管或继电器控制的加热器	双作用式的液动装置

操作部件按使用传输能量的不同分为电、气、液三种，根据使用场合和性能、价格来选择。如有气源而又需防爆，则使用气动阀门较电动阀门来得合适。铸造车间用气压方法来控制浇注速度，显然用气动阀门方便，而在锅炉送风系统的风量阀门，则习惯用电动执行器件。但需注意，电动阀门的价格比气动阀门和电气转换部件合起来的价钱贵1.5倍左右。液压系统作用力大而反应快，电动系统相对来说作用力小而反应慢，但使用起来方便。小功率电动跟踪系统（分马力电机）跟踪目标的变化频率也只为1Hz左右，功率稍大（1000W以上）往往要几秒一个行程；而液压跟踪系统的变化频率可在10Hz以上，且作用力可在1MN以上。所以生产线上的冲床习惯用液压控制，而电锯、电剪则多用电动控制。

选择控制器要分析控制对象的静特性和动特性。静特性是指控制对象各输入参数和各输出参数间的静态关系式，动特性多用这些参数的微分方程式表示。设热处理炉的炉壁和炉加热体的温度都是集中参

数，则其微分方程式为

$$C_R \frac{dT_R}{dt} + \lambda T_R = P_R - \lambda T_S \quad (13-1)$$

$$C_S \frac{dT_S}{dt} + \lambda T_S + k T_S^4 = \lambda T_R + k T_M^4 \quad (13-2)$$

式中 C_R ——炉加热体的热容； T_R ——炉加热体的温度； P_R ——炉加热体的电功率； C_S ——炉壁的热容； T_S ——炉壁的温度； T_M ——炉内加热件温度； λ ——炉壁和炉加热体的传热系数； k ——辐射系数。

式(13-1)为常系数线性微分方程，描述的对象称为常系数线性控制对象。式(13-2)为非线性微分方程，描述的对象称为非线性控制对象。假如式(13-1)中 λ 是时间的函数，则称为时变系数线性控制对象；在微分方程式通解的时间段内，时变很小，则称为慢时变。工业对象一般为慢时变。某些热交换器由于热传递造成一段时间延滞，其微分方程式为：

$$C_W \frac{dT_W}{dt} + \lambda T_W = \lambda T_S (t - \tau)$$

式中 C_W ——热交换器输出物质的单位热容； T_W ——热交换器输出物质的温度； T_S ——热交换器输入热量物质的温度； λ ——传热系数； τ ——因传递热而出现的时间延滞。

T_S 变化后，要延后 τ 时间才能使 T_W 发生变化。这种控制对象称为时间延滞后的线性控制对象。

上述三式中，令微分项为零，即为对象的静特性。

除此之外，我们还要分析控制对象的扰动和测量信号的噪音，式(13-2)如计及冷空气的进入量则应改为

$$C_S \frac{dT_S}{dt} + \lambda T_S + k T_S^4 = \lambda T_R + k T_M^4 - C_A V_A (T_M - T_A) \quad (13-3)$$

式中 C_A ——冷空气的单位体积热容； V_A ——冷空气进入的总体

积, T_A ——冷空气的温度。

其中 F_d 是时间函数, 即为扰动信号, 相当于图13-2中的 $d(t)$ 。
测量炉壁温度的热偶要经过放大器, 两者都有误差, 因此

$$m_S = h \cdot T_S + n \quad (13-4)$$

式中 m_S ——测量信号; h ——常数; n ——噪音, 等价于所有的测量误差。

当控制对象为有大的时间常数或积分环节的线性对象或非线性对象, 对象的时变性不明显, 这时在控制精度要求不高, 使用二位控制 (即只有开、关两种状态, 见1·4) 就可以了。当控制精度一般 (稳态误差为1~3%, 动态误差在3~10%左右), 使用习惯的P-I-D (比例-积分-微分), P-I (比例-积分), P-D (比例-微分) 或 P (比例) 控制, 选用调节仪表或运算放大器做控制器是比较合适的。只有控制精度要求较高 (稳态误差低于0.5%, 位置误差低于微米级的), 才要求使用数字计算机 (如微处理器, 可编程控制器, 单板计算机等) 做控制器。当控制对象有大的时间滞后时, P-I-D 控制会变得不合适, 这时必需用数字计算机控制 (见2·3)。同时假如对象特性的时变现象非常明显, 使用适应控制和自适应控制 (见2·6) 就有必要。

当控制对象的扰动量较大, 要使其影响减弱甚至消除, 则可使用前馈控制 (见2·2), 实现时仍可用调节仪表或放大器, 也可用数字计算机。当扰动量较小又带有随机性质的, 则连同测量信号中的噪音, 一起用滤波的方法 (见2·5) 加以解决, 这时需要用数字计算机。

控制对象的微分方程式可以用数学物理方法来推导出来。但是参数往往很难计算得准确, 而必需需要通过测试方法来得到。由于微分方程式联系到控制对象的动态特性, 所以, 这种测试方法称为动态特性测试方法。在现代控制理论中, 有一套完整的系统辨识方法, 主要是根据控制对象的输入、输出数据, 确定控制对象微分方程式的参数。这两种方法虽有不同, 但目的是统一的。简单的动态测试方法是飞升法, 就是在对象的输入加入一个阶跃函数, 而后根据输出曲线来确定对象的参数。这种方法要求输入的阶跃信号很大, 往往会影响生产, 而在对象有非线性微分方程式时, 又不能用。因此, 后来又有频率法

(输入信号是可变频率的正弦函数), 伪随机码法^[4] (输入是伪随机码)。目前在使用计算机控制时, 最通用的是用手动调整加伪随机码输入到对象中去, 而用系统辨识的方法来确定微分方程参数。在没有计算机时, 则用飞升法。

在现场调试时, 假如控制对象只是一阶、二阶, 同时又有实践经验, 这时不一定要测试对象的参数, 而直接变化控制器的参数, 根据对象的控制性能来确定之。只有在控制对象的微分方程式阶数较高, 又有比较复杂的特性, 才需要进行动态特性测试。同时, 在现场调试前, 需要用一套设备, 在试验室内复现对象的动态特性, 用来与实际的控制器或假设的控制方案进行联试, 以期得到控制器参数或验证某一方案。这种方法就称为仿真技术。仿真技术用模拟机、混合模拟机、数字计算机等几种工具, 但是近年来数字计算机仿真得到普遍的使用, 这是因为数字计算机可以解线性、非线性微分方程式, 也可解偏微分方程, 因此对所有的单参数、多参数控制以至分布场的控制, 都可用数字机仿真。除此之外, 机械制造业基本上是零件加工形式, 假如用统计方法来分析这些加工过程, 要用到离散事件的理论, 而离散事件的仿真又须用数字计算机。因此数字仿真技术是自动控制研究必需掌握的一种有效工具^{[5][6]}。

2.2 线性控制系统

2.2.1 控制系统的线性化

在(2.1)中已经提到, 控制对象的微分方程式是常系数线性微分方程, 则称为常系数线性控制对象。如整个反馈控制系统的组成部件都可用常系数线性微分方程表示, 则称为常系数线性控制系统, 习惯上又泛称为线性控制系统。工业上的时变控制对象变化较慢, 因此, 在需要研究的一段过渡过程内, 时变系数等价于某一常数, 而这对象也变成常系数线性对象。非线性微分方程式在稳定工作点附近用泰勒级数展开, 忽略高次项式, 即得常系数线性方程, 这种方法称为线性化。如式(13-2)中 kT_s 是非线性项, 线性化的步骤为

$$k(T_S)^4 = k(T_{S0} + \Delta T_S)^4 = k \left[T_{S0}^4 + \frac{d(T_S^4)}{dT_S} \bigg|_{T_S=T_{S0}} \cdot \Delta T_S + \frac{d^2(T_S^4)}{dT_S^2} \bigg|_{T_S=T_{S0}} \cdot (\Delta T_S)^2 + \dots \right] \triangleq k(T_{S0}^4 + 4T_{S0}^3 \cdot \Delta T_S)$$

代入式(13-2)得

$$C_S \frac{d(T_{S0} + \Delta T_S)}{dt} + \lambda(T_{S0} + \Delta T_S) + kT_{S0}^4 + 4kT_{S0}^3 \cdot \Delta T_S \triangleq \lambda T_R + kT_M^4$$

化为

$$C_S \frac{d(\Delta T_S)}{dt} + (\lambda + 4kT_{S0}^3) \Delta T_S \triangleq \lambda T_R + kT_M^4 - \lambda T_{S0} - kT_{S0}^4 \quad (13-5)$$

式(13-5)即为常系数线性微分方程。更为复杂的线性化步骤见参考文献[3]。

线性控制系统的微分方程式可以用矩阵形式表示，这对多变量控制系统更为方便，在现代控制理论中称为状态方程。如热处理炉中渗碳气氛的气体浓度的微分方程组为

$$\frac{d[CO]}{dt} = -\alpha_1[CO] + k_1 F(t) + k_2 G(t)$$

$$\frac{d[CO_2]}{dt} = \alpha_2[CO] - \beta_2[CO_2]$$

$$\frac{d[C]}{dt} = \alpha_3[CO] + \beta_3[CO_2] + k_3 F(t)$$

式中 $[CO]$ ——一氧化碳气体浓度； $[CO_2]$ ——二氧化碳气体浓度； $[C]$ ——活性碳气体浓度； $F(t)$ ——输入炉中的富化气的流量； $G(t)$ ——输入炉中的稀释气的流量。

上方程组写成状态方程为，

$$\dot{X} = AX + BU \quad (13-6)$$

$X = [x_1, x_2, x_3]^T$, $U = [u_1, u_2]^T$, $x_1 = [CO]$, $x_2 = [CO_2]$,
 $x_3 = [C]$, $u_1 = F(t)$, $u_2 = G(t)$, 而

$$A = \begin{bmatrix} -a_1 & 0 & 0 \\ a_2 & -\beta_2 & 0 \\ a_3 & \beta_1 & 0 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} k_1 & k_2 \\ 0 & 0 \\ k_3 & 0 \end{bmatrix}$$

2.2.2 传递函数

若线性控制对象的输入信号为 $u(t)$, 输出信号为 $y(t)$, 其微分方程为

$$\begin{aligned} a_n \frac{d^n y(t)}{dt^n} + \dots + a_1 \frac{dy(t)}{dt} + a_0 y(t) \\ = b_m \frac{d^m u(t)}{dt^m} + \dots + b_1 \frac{du(t)}{dt} + b_0 u(t) \end{aligned} \quad (13-7)$$

设 $y(t)$, $u(t)$ 及其高阶导数 ($y(t)$ 为 $n-1$ 阶以下, $u(t)$ 为 $m-1$ 阶以下) 的初始条件为零, 将式(13-7)两边逐项进行拉氏变换, 得

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = G(s) = \frac{b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \dots + b_0}{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_0} \quad (13-8)$$

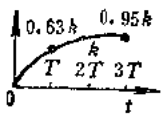
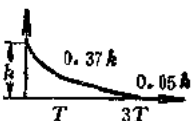
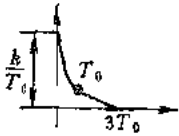
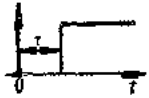
$Y(s)$, $U(s)$ 为 $y(t)$, $u(t)$ 的拉氏变换式, 而 $G(s)$ 定义为该控制对象的传递函数。传递函数只对线性常系数控制对象才是有意义的。控制系统的其他部件, 只要它的微分方程式是线性常系数方程, 也存在传递函数。控制系统中各部件 (包括对象) 按照传递函数的特点, 可分为几种典型环节, 详见表13-2。

控制系统各部件通过串联、并联及反馈联结等形式组成闭环反馈控制系统。最终反馈控制系统的传递函数可以通过各部件的传递函数来求得⁽³⁾。在表13-3中, 仅列出了三种基本形式的等价的传递函数。

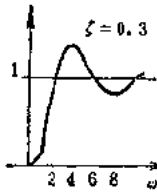
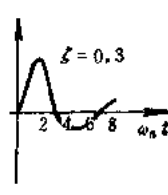
传递函数 $G(s)$ 中当 $s = j\omega$ 时得到的 $G(j\omega)$ 称为频率特性, 代表一个部件输入正弦信号时输出、输入信号间的关系。

$$G(j\omega) = A(\omega) \cdot e^{j\varphi(\omega)} = U(\omega) + jV(\omega) \quad (13-9)$$

表13-2 典型环节的动态特性

典型环节	传递函数	阶跃响应	脉冲响应
比例环节	k		
惯性环节	$\frac{k}{1+T_s}$		
积分环节	$\frac{k}{s}$		
微分环节	$\frac{ks}{1+T_0s}$		
时间延迟环节	e^{-Ts}		

(续)

典型环节	传递函数	阶跃响应	脉冲响应
振荡环节	$\frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}$		

$A(\omega)$ 表示两者的振幅比(增益), $\varphi(\omega)$ 表示两者的相移。如用图示法画出频率特性, 一种方法是以 $A \angle \varphi$ 作为矢量, 这一矢量顶点与 ω 的轨迹图称为矢量轨迹图

(见图13-3a), 另一种方法在Y轴上用线性坐标, 数值用 $20\lg A$ 及 φ , X轴上用对数坐标, 数值用 ω , 这组曲线称为对数幅相频率特性, 又称伯德图(见图13-3b)。

当一个部件的输入信号为阶跃函数时, 输出信号的时间函数称阶跃响应。输入信号为 δ 脉冲函数时, 输出信号的时间函数称脉冲响应。典型环节的阶跃响应及脉冲响应均见表13-2。

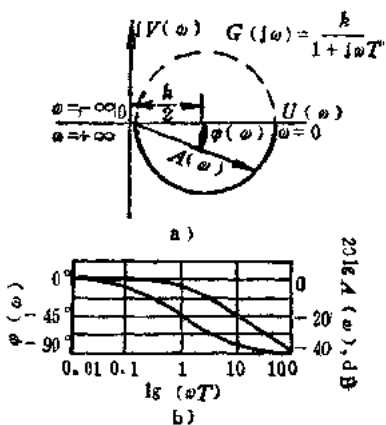
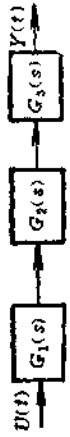
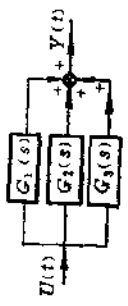
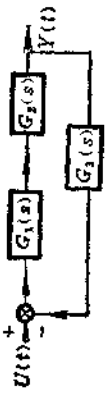


图13-3 惯性环节的频率特性

2.2.3 稳定性判据

在一个控制系统中, 当输入信号为一恒定值时, 输出信号在经历一段时间后, 也应为某一稳定值。假如系统中突然出现扰动, 使输出信号偏离稳定值, 在扰动消除后, 输出信号仍能回到原来的稳定值, 则称系统是稳定的。在线性控制系统中, 只要它的传递函数的极点

表13-3 三种基本结构形式的等价传递函数

结构形式	各部件传递函数	等价传递函数
串联		$G(s) = G_1(s) G_2(s) G_3(s)$
并联		$G(s) = G_1(s) + G_2(s) + G_3(s)$
反馈		$G(s) = \frac{G_1(s) G_2(s)}{1 + G_1(s) G_2(s) G_3(s)}$

(分母中的根) 在 s 的左半开面 (即根有负的实数部分), 系统一定是稳定的。而极点在 s 的右半开面 (即根有正的实数部分), 系统一定是不稳定的。当极点在 s 虚轴上, 则称为临界稳定。所谓稳定性判据, 是指一种判别式, 根据它即能决定系统是否稳定 (即根是否在 s 左开半面)。如控制系统的传递函数是表 13-2 中的惯性环节, 则极点为 $-\frac{1}{T}$, 在左半开面, 因此是稳定的。如为积分环节, 则极点为零, 不在左半开面, 不符合稳定条件。

反馈控制系统的稳定性判据, 通常有两种。

(1) 代数判据

普遍用的是赫尔维茨 (Hurwitz) 判据, 式 (13-8) 中分母上的系数 $a_n, a_{n-1}, \dots, a_0$ 构成一行列式 H_i :

$$H_i = \begin{vmatrix} a_{n-1} & a_{n-2} & a_{n-3} & \dots & a_k & \dots & a_{n-(2i-1)} \\ 0 & a_{n-1} & a_{n-2} & \dots & a_k & \dots & a_{n-(2i-2)} \\ 0 & 0 & a_{n-1} & \dots & a_k & \dots & a_{n-(2i-3)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & a_{n-i} \end{vmatrix} \quad (13-10)$$

行列式中 a_k , 若 $k < 0$, 或 $k > n$ 时取零。如

$$H_1 = a_{n-1}, H_2 = a_{n-1} \cdot a_{n-2} - a_n \cdot a_{n-3}, \dots$$

设式 (13-8) 分母的阶次为 n , 则 $H_i (i = 1 \dots n)$ 都大于零, 系统稳定。例如 $n = 3$, $H_1 = a_2$, $H_2 = a_2 a_1 - a_3 a_0$, $H_3 = a_2 a_1 a_0 - a_3 a_0^2$ 。若 $H_1 > 0$, $H_2 > 0$, $H_3 > 0$, 则系统稳定。

(2) 乃氏 (Nyquist) 判据

如式 (13-8) 中 $G(s)$ 是反馈控制系统的闭环传递函数。在表 13-3 的反馈图中, 如将反馈点断开, 这时输出、输入间的传递函数为 $G_1(s) \cdot G_2(s) \cdot G_3(s)$, 这称为开环传递函数。乃氏判据要用开环传递函数来判定。设开环传递函数分母中有 p_0 个根在 s 的右半开面, 画出它的从 $\omega = 0$ 到 $\omega = \infty$, 和从 $\omega = -\infty$ 到 $\omega = 0$ 的频率特性曲线 (如图 13-3 的矢量轨迹图), 如曲线按逆时针方向绕 $(-1, j0)$ 点 p_0 圈, 则系统是稳定的。这就是乃氏判据。例: 表 13-3 反馈结构图