

控制系统设计与实践

刘春生 主编

南京航空航天大学

二〇〇六年一月

TP273/1581-1

273/1581



2007057694

TP273
158H

内容简介

随着科学技术的不断发展和计算机的广泛应用以及各个学科知识的相互渗透, 自动控制在机械工程中的应用越来越深入。集控制、检测、计算机等多项技术于一体的控制系统和产品已得到广泛应用, 其优越的性能在当今的“知识经济时代”产生了巨大的经济效益和社会效益。

为了适应形势的发展和人才培养的需要, 本书力求以素质教育为基础, 以能力培养为主线, 优化知识结构, 体现先进技术水平, 重点介绍控制系统的组成、设计和调试。主要内容为系统的检测(包括常用的一些传感器)、系统的建模(包括分析法和实验法)、系统的综合(包括常用的模拟 PID 控制, 数字 PID 控制、系统校正等)、系统的仿真(包括常用的数值算法和先进的 MATLAB 语言)以及计算机控制系统的组成和调试, 并配有相应计算机控制系统实验。

本门课程是面向非电专业学生开设的, 假设学生学完“自动控制原理”课程。

本书是南京航空航天大学“211 工程”建设的资助项目, 全书内容的安排和吴庆宪老师反复磋商后定稿完成的。由于时间仓促, 再加上作者水平有限, 错误之处在所难免, 敬请读者批评指正。



2001.2.19

2007057694

第一章 控制系统的组成和分类	(1)
§ 1.1 控制系统的组成	(1)
§ 1.2 控制系统的分类和举例	(1)
§ 1.2.1 温度控制系统	(2)
§ 1.2.2 压力控制系统	(2)
§ 1.2.3 位移、速度控制系统	(3)
§ 1.2.4 液位控制系统	(4)
第二章 控制系统的设计(性能)指标	(6)
§ 2.1 动态指标	(6)
§ 2.1.1 时域动态指标	(6)
§ 2.1.2 频域动态指标	(7)
§ 2.1.3 各种指标间的关系	(9)
§ 2.2 稳态指标	(10)
第三章 控制系统的典型部件	(13)
§ 3.1 测量元件	(13)
§ 3.1.1 位置测量元件	(13)
§ 3.1.2 转速测量元件	(17)
§ 3.1.3 温度测量元件	(19)
§ 3.1.4 压力测量元件	(21)
§ 3.1.5 流量传感器	(22)
§ 3.1.6 液位传感器	(24)
§ 3.1.7 传感器正确使用	(25)
§ 3.2 执行元件	(28)
§ 3.2.1 直流伺服电动机	(28)
§ 3.2.2 直流力矩电动机	(28)
§ 3.2.3 交流伺服电动机	(29)
§ 3.2.4 步进电机	(29)
§ 3.2.5 液压执行装置	(31)
第四章 控制系统的建模	(32)
§ 4.1 分析法建模	(32)
§ 4.1.1 线性系统的数学模型	(33)
§ 4.1.2 非线性系统的数学模型	(41)
§ 4.1.3 具有时间纯滞后的系统的数学模型	(43)
§ 4.2 实验法建模	(44)
§ 4.2.1 时域法	(44)
§ 4.2.2 频域法	(46)
§ 4.3 辨识法建模	(47)
第五章 控制系统的综合	(50)
§ 5.1 频率法	(50)
§ 5.1.1 对开环频率特性的要求	(51)
§ 5.1.2 开环频率特性高频段的的小时间常数的处理	(52)

§ 5.1.3 串联校正	(53)
§ 5.1.4 反馈校正	(64)
§ 5.2 PID 控制	(65)
§ 5.2.1 PID 控制的原理	(65)
§ 5.2.2 数字 PID 控制	(72)
§ 5.2.3 改进型数字 PID 控制	(76)
§ 5.2.4 智能 PID 控制	(80)
§ 5.3 开关控制 (双位控制或 bang-bang 控制)	(80)
§ 5.3.1 双位控制的定义	(80)
§ 5.3.2 双位控制的特点	(81)
§ 5.4 复合控制	(82)
§ 5.4.1 按扰动补偿的复合控制	(82)
§ 5.4.2 按输入补偿的复合控制	(85)
第六章 控制系统的数字仿真	(89)
§ 6.1 绪论	(89)
§ 6.2 连续系统仿真的数值积分法	(89)
§ 6.2.1 数值积分法仿真的基本原理	(89)
§ 6.2.2 欧拉方法	(91)
§ 6.2.3 龙格-库塔法	(92)
§ 6.3 常用仿真软件 MATLAB	(97)
§ 6.3.1 MATLAB 语言简介	(97)
§ 6.3.2 MATLAB 在控制系统中的应用	(102)
§ 6.3.3 Simulink 模型库简介	(107)
第七章 微型计算机控制系统概述	(115)
§ 7.1 微型计算机控制的发展概况	(115)
§ 7.2 微机工业控制系统的组成	(115)
§ 7.3 微机工业控制系统的设计	(117)
§ 7.3.1 控制任务调研	(117)
§ 7.3.2 控制计算机选型, 各种接口板的选择, 有关硬件电路设计	(118)
§ 7.3.3 控制软件的设计	(120)
§ 7.3.4 硬件、软件的实验室联调	(121)
§ 7.3.5 现场调试	(121)
第八章 典型控制系统的分析	(121)
§ 8.1 汽车悬架系统的振动控制	(121)
§ 8.2 磁力轴承控制系统	
§ 8.3 电阻炉温度控制系统	
§ 8.4 液位控制系统	
§ 8.5 转速控制系统	
§ 8.6 位置控制系统	
§ 8.7 倒立摆控制系统	
第九章 控制系统应用实验	(123)
实验一 MATLAB 仿真实验	(123)
实验二 A/D、D/A 实验	(123)
实验三 模拟对象的 PID 控制	(124)

实验四 温度系统的计算机控制	(125)
实验五 直流电动机的计算机控制	(125)
实验六 步进电动机的控制	(126)
实验七 压力传感器的使用	(126)

§ 1.1 控制系统的组成

一个典型控制系统主要有以下几个部分组成：控制器，传感器，执行机构，被控对象，结构框图如图 1-1 所示。

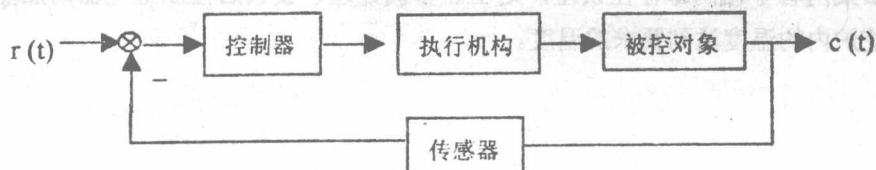


图 1-1 典型控制系统的框图

控制器是控制系统的核心，是产生控制律的载体，其作用是使被控制量 $c(t)$ 按照预定的要求 $r(t)$ 而变化。控制器可以由一般的物理器件组成，如电子部件中的运算放大器、RC 电路或机械部件中的各种液压装置或控制阀，用以产生比例、比例积分等调节作用，也可以由计算机或单片机来实现控制器的作用，产生比例、比例积分控制律甚至于产生高级控制律如自适应控制，模糊控制律等。

执行机构是带动被控对象按输入信号的规律运动的部件，它将系统的电能或液压能转换成机械能，从这种观点来看，执行机构也是一种动力传动装置。常用的执行元件有直流伺服电动机、交流伺服电动机、直流力矩电动机、步进电动机、液（气）压马达、液（气）压缸等。

传感器即测量元件，是控制系统中的重要组成部分，它以被控物理量作为输入信号，并把它们转换成与给定信号量纲相同的输出信号。在计算机控制系统中，传感器把被控物理量转换为电信号以便通过 A/D 转换器送到计算机中。

被控对象是指被控制的机器、设备或生产过程，如电动机，加热炉、化学反应器等。

§ 1.2 控制系统的分类和举例

控制系统是一个很大的概念，对其没有一个标准的分类方法，分类方法不同结果也不同。本书从工程角度出发，分类方式以被控物理量为标准，对常用的控制系统进行简单的介绍。

§ 1.2.1 温度控制系统

温度在控制系统中是一个非常重要的物理量，在很多场合中都需要对温度的控制。例如炉温的控制、热轧制中工件温度的控制，焊接中也需要对温度进行控制。温度控制的如何将直接影响到产品的质量。

图 1-2 表示了电炉温度控制系统的原理。电炉内的温度由热电偶测量得到模拟电压信号，放大后经过 A/D 转换器转变为温度的数字量，然后与给定温度（数字量）进行比较，如果两者不相同即存在误差，则由计算机处理、放大后控制继电器向加热器发出信号，以使炉内的温度达到要求的温度。

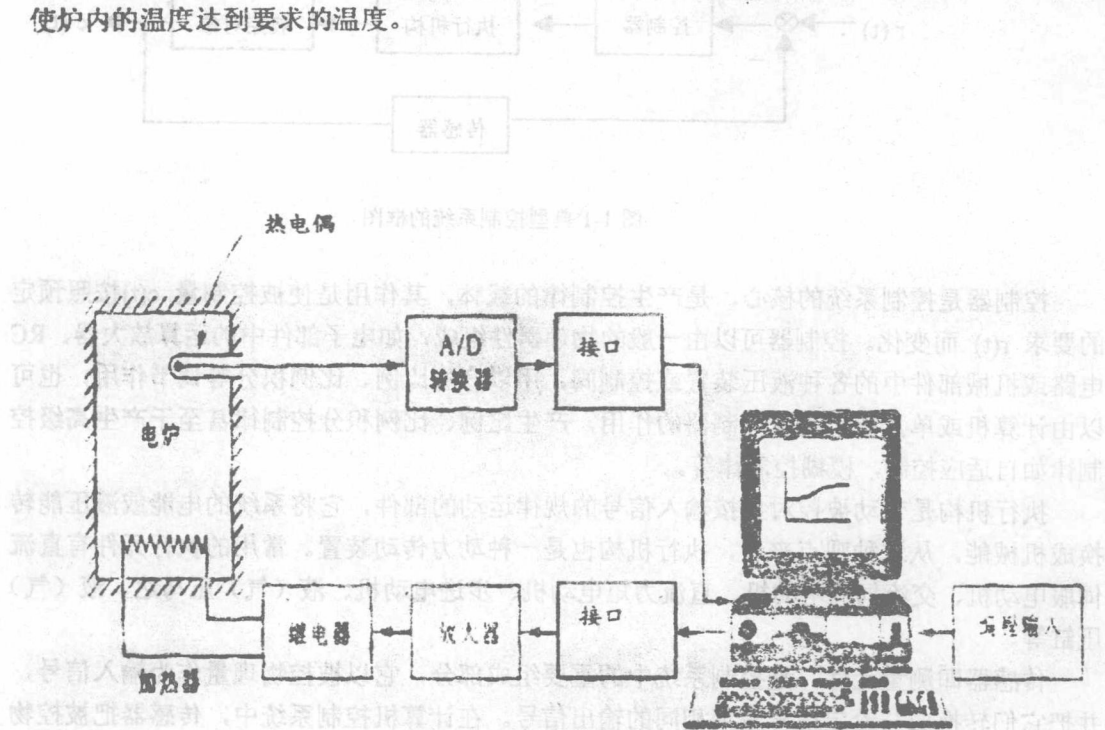


图 1-2 温度控制系统

§ 1.2.2 压力控制系统

力的控制分为多种，但绝大多数过程控制系统中均包含对液体或气体压力的测量与控制。如液压系统中油压的控制，锅炉内蒸汽压力的控制。当然，有的机械系统中还需要对力的测量、力矩的测量、功率的测量等。

在大多数工业自动控制系统中，测量元件和执行机构是独立的部分，但在特别简单的自动控制系统中，测量元件和执行机构装在同一个组件内。自操作控制器就是这样一个例

子, 如图 1-3 所示。设定点可以通过调整弹簧弹力来设定。压力由薄膜进行测量。误差信号为作用在薄膜上的净压力。薄膜的位置确定了阀的开度。

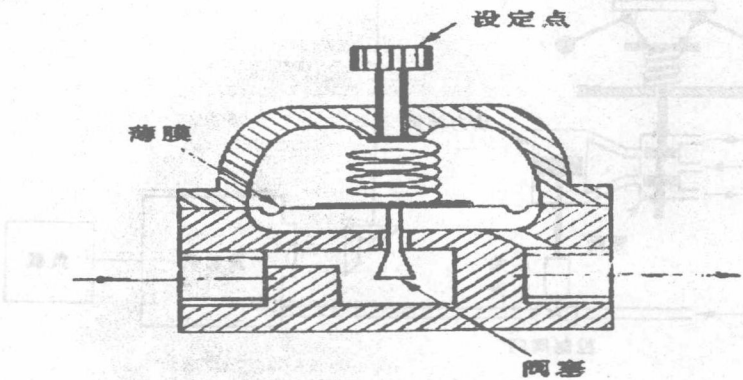


图 1-3 自操作控制器

其工作原理如下：假设输出压力低于由设定点确定的希望值，那么向下的弹簧弹力大于向上的压力，结果导致薄膜向下运动，即阀塞向下运动，阀的开度变大，从而增大了流量，并且增加了输出压力。当向上的压力等于向下的弹簧力时，阀塞处于稳定状态，并且流量保持不变。反之，当输出压力高于希望压力时，导致薄膜向上运动，阀的开度变小，从而减小了流量，并且减小了压力。这类自操作控制器常在水和煤气的压力控制中。其系统的框图如图 1-4 所示

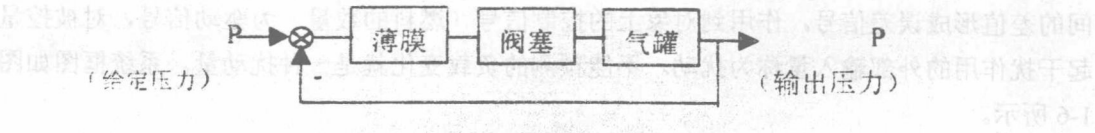


图 1-4 自操作控制器的系统框图

§ 1.2.3 位移、速度控制系统

位移和速度是两个相互关联的物理量，往往要求对两个量进行同时控制，如常用的位置控制系统或随动系统中：天线控制系统，火炮随动系统，导弹发射架随动系统，飞机自动驾驶仪中控制舵机的位置随动系统等既需要对速度进行测量控制，也需要对位置进行测量控制。

图 1-5 所示的原理图中,展示了发动机的瓦特式速度调节器的基本原理。通过控制进入到发动机的燃烧量来控制发动机的实际速度使其接近其希望速度。

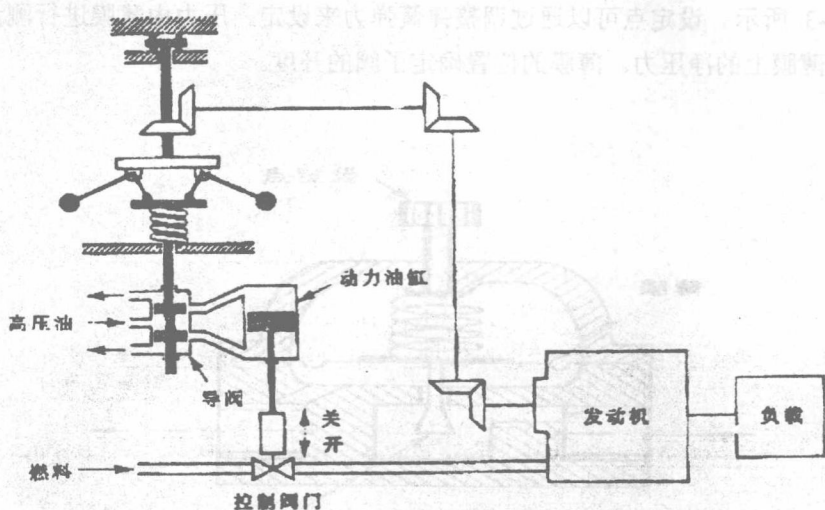


图 1-5 发动机速度控制系统

该系统的工作过程如下：当发电机的实际速度等于希望速度时，高压油将不进入动力油缸的任何一侧。如果由于扰动，使得实际速度低于希望速度，则速度调节器的离心力下降，导致控制阀向下移动，从而对发动机的燃料供应增多，发动机的速度增大，直到达到希望的速度为止。另一方面，如果发动机速度的增大，以至超过了希望的速度，则速度调节器的离心力增大，从而导致控制阀向上移动。这样就会减少燃料供应，导致发动机的速度减小，直到达到希望的速度时为止。

在这个速度控制系统中，发动机是被控对象，速度是被控量。希望速度与实际速度之间的差值形成误差信号，作用到对象上的控制信号（燃料的数量）为驱动信号，对被控量起干扰作用的外部输入量称为扰动。不能预测的负载变化就是一种扰动量。系统框图如图 1-6 所示。

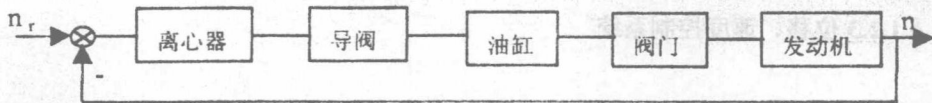


图 1-6 发动机速度控制系统框图

§ 1.2.4 液位控制系统

在大多数工业过程中，液位也是一个重要的物理量，对此参数控制的好坏直接影响到产品的质量。如在电视机显象管厂，对玻璃窑炉中处于熔化状态的玻璃液位的控制十分重要，液位的波动对显象管的质量很有影响。

值得一提的是，在控制系统中，往往被控的物理量不只是一个，而是需要对多个物理

量进行控制，如在上面提到的大型玻璃窑炉，既要控制炉内的玻璃液位的高度，又要控制炉内的温度和压力，以达到最好的控制效果。

图 1-7 是液位控制系统的原理图。在这里自动控制器通过比较实际液位与希望的液位，并通过调整气动阀门的开度，对误差进行修正，从而保证液位不变。

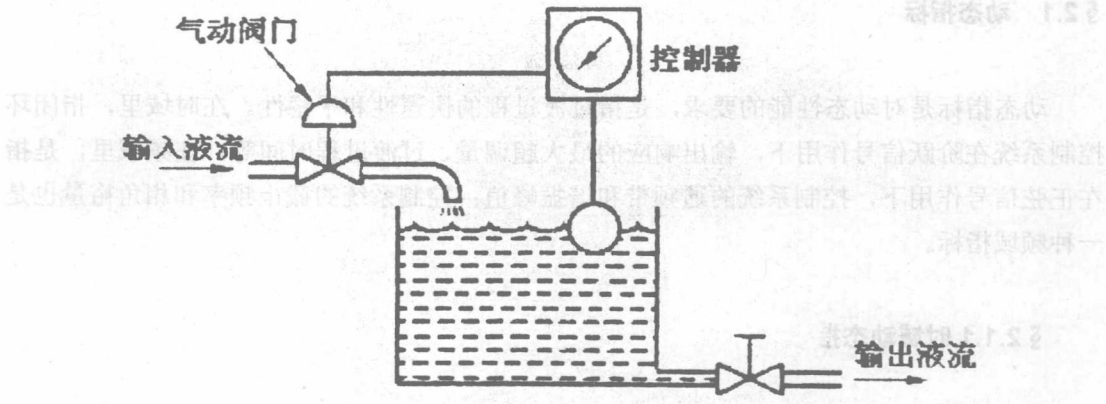


图 1-7 液位控制系统

习题 1

1. 说明图 1-8 中速度控制系统的工作
原理并画出框图。

2. 画出图 1-7 系统的框图。

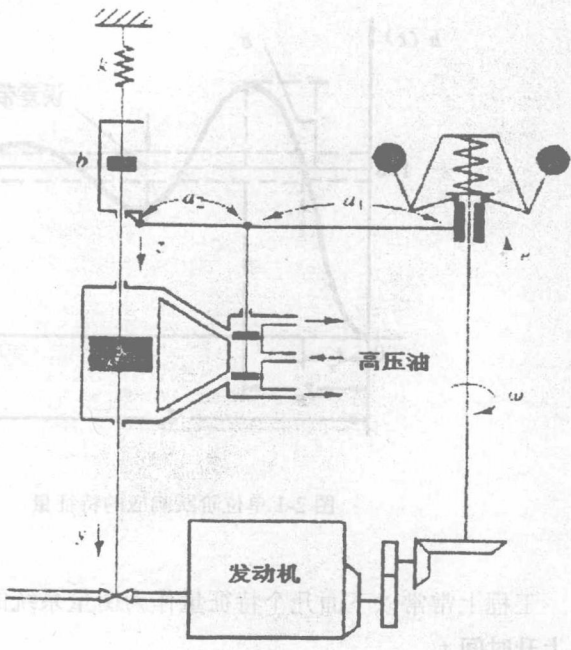


图 1-8 速度控制系统

第二章 控制系统的设计（性能）指标

评价系统性能的指标有多种形式，它随研究方法的不同而不同，但概括起来有两大类：动态指标和稳态指标。

§ 2.1 动态指标

动态指标是对动态性能的要求，是指过渡过程的快速性和平稳性。在时域里，指闭环控制系统在阶跃信号作用下，输出响应的最大超调量、过渡过程时间等。在频域里，是指在正弦信号作用下，控制系统的通频带和谐振峰值；控制系统的截止频率和相角裕量也是一种频域指标。

§ 2.1.1 时域动态指标

对于一般的控制系统，可以用单位阶跃函数作用下系统的输出响应来衡量系统的品质。实际系统的阶跃响应往往设计为如图 2-1 所示的衰减振荡过程。

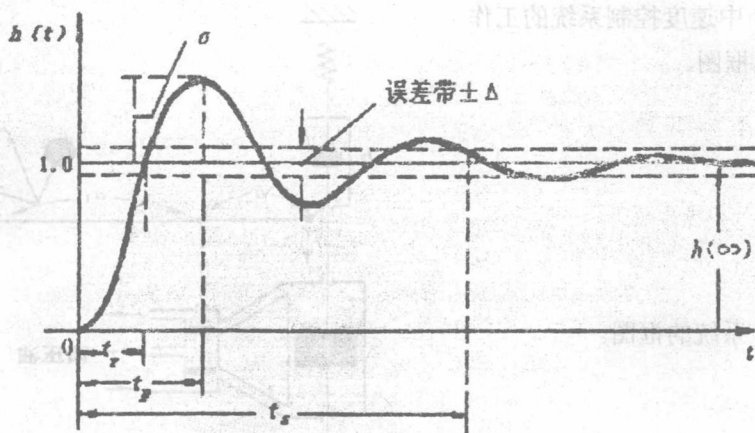


图 2-1 单位阶跃响应的特征量

工程上常常下面几个特征量作为衡量系统的指标。

1 上升时间 t_r

响应曲线从零首次上升到稳态值所需的时间。

2 峰值时间 t_p

响应曲线到达第一个峰值所需时间。

3 过度过程时间 t_s

响应曲线进入并保持在稳态值的 $\pm 5\%$ （或 $\pm 2\%$ ）的允许误差范围内所需的时间。

4 超调量 $\sigma\%$

响应曲线超出稳态值的最大偏离量与稳态值之比，即

$$\sigma\% = \frac{h(t_p) - h(\infty)}{h(\infty)} \times 100\%$$

5 振荡次数 N

在过渡过程时间内，响应曲线穿过其稳态次数的一半。

有了以上这些指标，系统的过渡过程也就大致确定了。不过，在设计控制系统的开始阶段，要同时照顾到这些指标是困难的。实际上最常用的是过渡过程时间 t_s 和超调量 $\sigma\%$ ，它们更具有典型性和代表性。过渡过程时间反映了系统的快速性，超调量则反映了系统的相对稳定性或阻尼的程度。利用简化的动态指标可使控制系统的设计和综合变的比较方便。当然，有时仅利用这两个指标还不能完全确定系统的过渡过程。可能两个不相同的过渡过程而具有相同的过渡过程时间和超调量，因此，其它的指标如上升时间 t_r ，峰值时间 t_p 等可以作为这两个主要动态指标的补充。

§ 2.1.2 频域动态指标

闭环频域动态指标

频域动态指标是对闭环幅频特性的几个主要特征量提出的要求，用的最多的是闭环谐振峰值 M_r 和带宽频率 ω_b ，它们的定义如图 2-2 (a) 所示，其中 $\Phi(s)$ 是系统的闭环传递函数。

带宽频率 ω_b 的大小表示闭环系统通频带的宽度。闭环系统的频带越宽，则系统对输入的反应越迅速，即过渡过程的时间越短。因此带宽频率 ω_b 反映了系统的快速性。

闭环谐振峰值 M_r 小，则系统不容易振荡； M_r 大，则系统振荡厉害。极限情况下，当 $M_r \rightarrow \infty$ 时，如图 2-2 (b) 所示，系统将出现以 $\omega = \omega_r$ 为频率的不衰减振荡。因此， M_r 反映了系统的相对稳定性。

由于闭环系统的谐振值 M_r 反映了系统趋向振荡的程度，显然，它与时域动态指标中的超调量 $\sigma\%$ 的关系比较密切， M_r 大的系统 $\sigma\%$ 也大。工程上使用的随动系统，闭环谐振峰值一般在 1.2~1.6 之间，最大不超过 2。

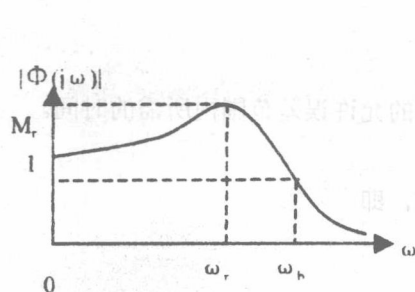


图 2-2 (a) 典型系统的闭环幅频特性

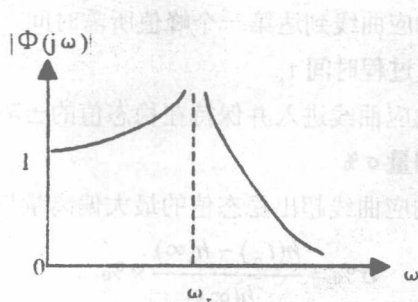


图 2-2 (b) 处于临界稳定状态的系统的闭环幅频特性

开环频域动态指标

用频率法分析和综合控制系统时，应用最多的是直接利用系统的开环频率特性，尤其是应用对数频率特性（伯德图），这种方法设计系统十分方便。设系统的开环伯德图如图 2-3 所示，其中 $A(\omega)$ 是系统的开环幅频特性。通常提出的指标是开环系统的截止频率 ω_c ，（也称零分贝频率）、相角裕量 γ （°）或幅值裕量 h （dB）作为开环频域指标。

ω_c 和闭环频带宽度或闭环截止频率 ω_b 有密切关系。同样，它反映了系统的快速性，是设计系统时的重要指标。在截止频率 ω_c 处，使系统达到临界稳定所需附加的相位滞后量称为相角裕量 γ ，它在一定程度上反映了系统的相对稳定性，和闭环的谐振峰值 M_r 关系密切。当相角为 -180° ，对应幅值曲线的负分贝数叫幅值裕量 h 。他在一定程度上也反映了系统相对稳定性。由于 h 计算起来不如 γ 方便，且两者反映控制系统的性能类似，因而一般只提出指标 γ 就可以了。

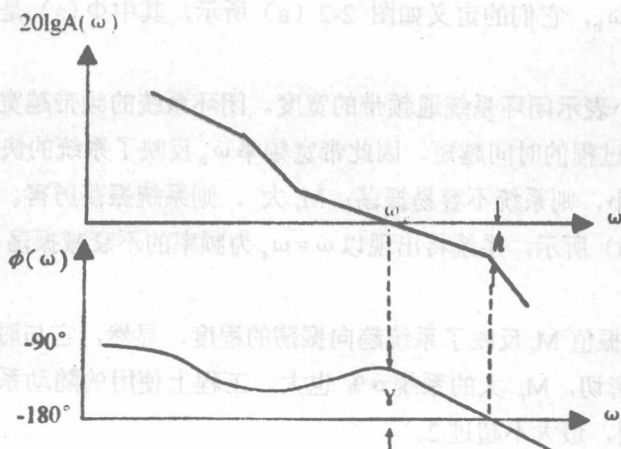


图 2-3 系统开环伯德图

§ 2.1.3 各种指标间的关系

动态性能指标的以上三种不同的提法,反映了系统的同样性能。例如 ω_b , ω_c , t_s 都反映了控制系统的快速性,而 $\sigma\%$, M_r , γ , 和 h 都反映了系统的相对稳定性。因此,这些指标间必然存在着内在的联系。对于二阶系统,它们之间的关系有着确定的数学表达式,下面将作简单的介绍。而对于高阶系统,则只有近似的经验公式。

设二阶系统结构如图 2-4 所示,

它有两个特征参数 K 和 T ,

闭环传递函数为:

$$\Phi(s) = \frac{\frac{K}{T}}{s^2 + \frac{1}{T}s + \frac{K}{T}}$$

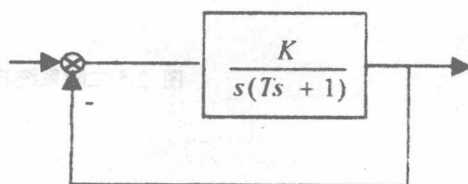


图 2-4 典型二阶系统

写成标准形式

$$\Phi(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}$$

以上两式相比较,可得

$$\omega_n = \sqrt{\frac{K}{T}}$$

$$\zeta = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{1}{KT}}$$

当参数 K 、 T 给定,即可求出 ω_n 、 ζ 。

1. 二阶系统的时域指标

$$\sigma\% = e^{-\frac{\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}}} \times 100\%$$

$$t_r = \frac{\pi - \lg^{-1} \frac{\sqrt{1-\zeta^2}}{\zeta}}{\sqrt{1-\zeta^2} \omega_n}$$

$$t_p = \frac{\pi}{\sqrt{1-\zeta^2} \omega_n}$$

$$t_s = \frac{4}{\zeta \omega_n} \text{ 或 } \frac{3}{\zeta \omega_n}$$

2. 二阶系统的开环频域指标

图 2-4 所示系统的开环伯德图如图 2-5 所示，截止频率和相角裕度分别为：

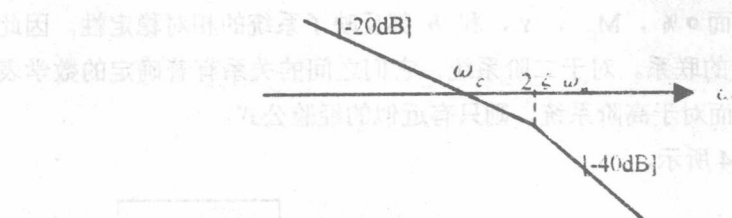


图 2-5 二阶系统开环伯德图

$$\omega_c = \sqrt{\sqrt{1+4\zeta^4} - 2\zeta^2} \omega_n$$

$$\gamma = 18^\circ \frac{2\zeta}{\sqrt{1+4\zeta^4} - 2\zeta^2}$$

3. 二阶系统闭环频域指标

带宽频率为：

$$\omega_b = \sqrt{\sqrt{4\zeta^4 - 4\zeta^2 + 2} - (2\zeta^2 - 1)} \omega_n$$

谐振峰值为：

$$M_r = \begin{cases} 1 & (\zeta \geq 0.707) \\ \frac{1}{2\zeta\sqrt{1-\zeta^2}} & (0 < \zeta < 0.707) \end{cases}$$

谐振频率为：

$$\omega_r = \sqrt{1-2\zeta^2} \omega_n$$

§ 2.2 稳态指标

对控制系统提出的一个共同要求是被控对象的某些物理量（速度、位移、温度、压力等）按照指定的规律变化。然而对于任何一个实际的控制系统都不能完全地做到这一点，而总是存在一定的误差即控制精度。在设计时，只要求控制系统的误差保持在允许的范围

内。产生误差的原因主要为：（1）控制系统各元件中存在着静摩擦、间隙、不灵敏区、零

点飘移以及由于元件老化而产生的波动等。对此,通过提高系统某些环节的增益、减小放大器零点漂移及选取高精度测量元件等措施,可以将其限制在允许的范围之内;(2)误差也与系统结构与控制规律有关;(3)在推导数学模型时,为了使问题分析方便,忽略了许多非线性因素。

设系统结构如图 2-6 所示,系统开环传递函数 $G(s)$ 具有以下一般形式:

$$G(s) = \frac{K(b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \cdots + b_1 s + 1)}{s^p (a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \cdots + a_1 s + 1)}$$

系统的类型是按照前向通道的传递函数 $G(s)$ 所含积分环节的个数来划分的。在上式中, $p=0,1,2,\cdots$ 时,分别称为 0 型系统, I 型系统, II 型系统, ……

系统在 $r(t)$ 作用下,误差 $e(t)$ 的拉斯变换为

$$E(s) = \frac{1}{1+G(s)} R(s)$$

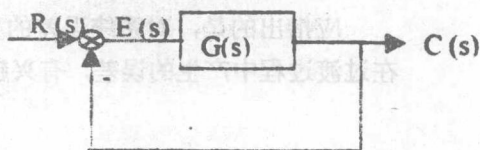


图 2-6 系统结构图

1. 当 $r(t)=1(t)$ 时:

$$e_{ss} = \lim_{s \rightarrow 0} sE(s) = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{s}{1+G(s)} \cdot \frac{1}{s} = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{1}{1+G(s)}$$

对于 0 型系统有:

$$e_{ss} = \frac{1}{1+K}$$

对于 I 型、II 型系统有:

$$e_{ss} = 0$$

2. 当 $r(t)=t$ 时:

$$e_{ss} = \lim_{s \rightarrow 0} sE(s) = \lim_{s \rightarrow 0} s \frac{1}{1+G(s)} \cdot \frac{1}{s^2} = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{1}{sG(s)}$$

对于 0 型、I 型、II 型系统,其稳态误差分别为:

$$e_{ss} = \infty$$

$$e_{ss} = \frac{1}{K}$$

$$e_{ss} = 0$$

3. 当 $r(t) = \frac{1}{2}t^2$ 时:

$$e_{ss} = \lim_{s \rightarrow 0} sE(s) = \lim_{s \rightarrow 0} s \frac{1}{1+G(s)} \cdot \frac{1}{s^3} = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{1}{s^2 G(s)}$$

对于 0 型、I 型、II 型系统,其稳态误差分别为:

$$e_{ss} = \infty$$

$$e_{ss} = \infty$$

$$e_{ss} = \frac{1}{K}$$

通常，在工程上称 0 型系统为有差系统，I 型系统为一阶无差系统，II 型系统为二阶无差系统。更高阶的无差系统因含有三个以上的积分环节，容易引起系统的不稳定，在实际系统中很少用。由以上可以看出，系统含有积分环节越多，越容易消除稳态无差。系统的开环增益大，稳态误差越小。

应指出的是，对系统误差的要求除了稳态误差这个指标外，还有动态误差的概念，即在过渡过程中产生的误差，有兴趣的读者可查阅有关的参考书。

习题 1

1 用 MATLAB 语言求单位负反馈系统的单位阶跃响应曲线，并求系统的超调量和调节时间。其中开环传递函数 $G(s) = \frac{s+50}{s^2+2s+50}$ 。

2 用 MATLAB 语言求单位负反馈系统的单位斜坡响应曲线，求出系统的稳态误差。其中开环传递函数 $G(s) = \frac{10}{s(s+5)}$ 。