

自动控制原理实验教程

王 瑛 主编

南京航空航天大学

2004年9月

自动控制原理实验规则

1. 每次实验时间由课代表提前与实验室联系安排。未做预习报告、无故缺席或迟到,则不允许参加实验;以后补做,需缴纳费用。

2. 实验前复习本课程的有关章节;认真阅读实验指导书,明确实验目的、要求、内容、方法和工作原理;了解有关实验设备的知识及使用注意事项;书写实验预习报告。

3. 实验预习报告内容包括:

(1) 设计实验线路及实验步骤;

(2) 设计实验数据记录表格;

(3) 实验仪器的使用方法;

4. 每次实验结束一周后交实验报告。

5. 实验成绩的评定分:预习报告、实验操作、实验报告三部分。

6. 实验课是必修课。

目 录

第一章 控制系统工程综述

1.1 自动控制系统的基本构成方式	1
1.2 自动控制系统的基本组成	2
1.3 自动控制系统的基本类型	2
1.4 对自动控制系统性能的基本要求	3
1.5 自动控制系统的基本体系	4

第二章 控制系统动态特性的基本测试方法

2.1 动态特性的时域测试	6
2.1.1 阶跃响应曲线法	6
2.1.2 阶跃响应曲线的分析	7
2.2 动态特性的频域测试	10
2.2.1 输入和输出波形直接记录法	10
2.2.2 李沙育图形法	11

第三章 控制理论实验常用仪器

3.1 电子模拟计算机	13
3.1.1 模拟机的常用运算部件	13
3.1.2 排版方法	19
3.1.3 时间比例尺和幅值比例尺	21
3.1.4 JM-1 自动控制原理模拟学习机	24
3.1.5 JM-S 离散系统理论模拟学习机	25
3.1.6 JM-M 现代控制理论模拟学习机	27
3.2 超低频信号发生器	30
3.3 笔式记录仪	31
3.3.1 X-Y 记录仪	31
3.3.2 LMZ-2 型描笔式记录仪	32
3.4 慢扫描电子示波器	34
3.5 数字万用表	35
3.6 自动控制系统虚拟实验平台	38

3.7 MATLAB 简介	42
---------------------	----

第四章 经典控制理论实验

4.1 线性系统的时域分析	48
4.1.1 线性系统的稳定性	48
4.1.2 控制系统的暂态响应	50
4.1.3 控制系统的稳态误差	52
4.1.4 控制系统数字模型中的小参量	53
4.2 线性系统的根轨迹分析	54
4.3 线性系统的频域分析	55
4.4 自动控制系统的校正	56
4.5 如何评价一个好的 SISO 控制系统	56
实验一、自动控制系统演示系统	60
实验二、小功率直流随动系统的研究	68
实验三、调速控制系统或角度控制系统的设计	72
实验四、典型环节的模拟研究	74
实验五、二阶系统的动态性能测试	77
实验六、系统的时域特性分析	78
实验七、控制系统的阶跃响应的数字机分析	80
实验八、二阶系统的幅频特性及串联超前校正	84
实验九、线性系统的性能分析与串联校正	86
实验十、非线性系统的相平面法研究	88
实验十一、非线性系统的描述函数法研究	90
实验十二、连续系统的离散化方法	92
实验十三、采样控制系统的研究(1)	94
采样控制系统的研究(2)	98
实验十四、数字控制的设计	100

第五章 现代控制理论实验

实验一、状态反馈的设计与实现	101
实验二、状态观测器的研究(1)	103
状态观测器的研究(2)	106
实验三、有限时间状态最优调节器的研究	109

的延迟特性等因素的存在,如果参数配合不当,将会引起反馈控制系统振荡,从而使系统不能稳定工作。而开环控制系统则不存在稳定性的问题。它的建造比较容易,结构也比较简单。

闭环系统还有一个缺点,就是其精度和稳定之间存在矛盾,当系统的精度达到相当满意的程度时,其稳定性可能会受到损害。精度和稳定性之间的矛盾始终是闭环系统存在的主要矛盾。

应当指出,如果系统的输入量能预先知道,不存在外界扰动并且系统中的元件参数也比较稳定时,最好采用开环控制。如果存在无法预计的扰动,或系统中的元件参数不稳定时,采用闭环控制的优点就显得特别突出。当对整个系统的性能要求比较高时,为了解决闭环控制时的精度和稳定性之间的矛盾,往往将开环和闭环结合在一起应用,即采用复合控制系统是比较适宜的。

1.2 反馈控制系统的基本组成

对于一个反馈控制系统来说,不管其结构多么复杂,但就其大体结构和组成而言,总可分为控制器、被控对象和检测反馈三个部分。三个部分相对独立,又紧密结合。作为一个典型的反馈控制系统应包括检测偏差所必须的反馈元件、控制元件、比较元件以及用以纠正偏差所必须的放大变换元件和执行元件等。

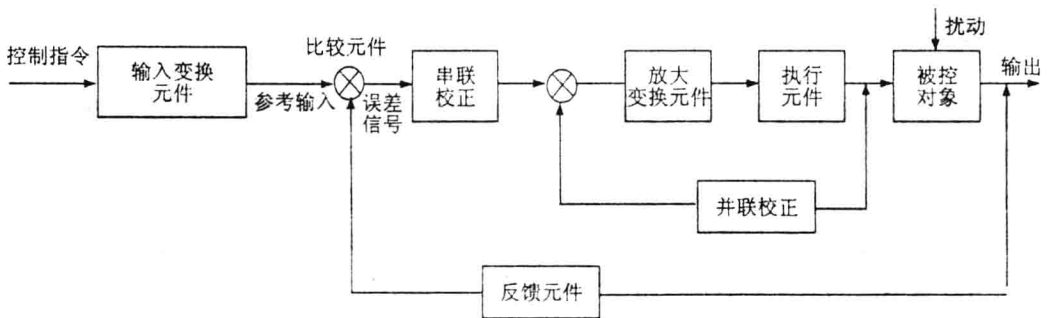


图 1-3 负反馈控制系统组成

1.3 自动控制系统的基本类型

现实生活中有各种各样的控制系统。从不同角度看来,其分类方法也不同。

1. 根据元件的静特性可分为线性系统和非线性系统。

线性系统:组成系统的每一个元件的静特性均为直线,系统的运动方程可用线性微分方程描述的系统,称为线性系统。线性系统的特点是可以应用叠加原理,即几个信号同时作用于系统时,可以分别研究它们单独作用的结果,再相加。

非线性系统:元件的静特性不能用直线表示的,为非线性特性。如:饱和非线性、死区非线性、齿轮间隙非线性等等。组成系统的元件中只有一个元件是非线性的,系统就为非线性系统。非线性元件的输出输入特性用非线性微分方程描述。这种系统不能应用叠加原理,其响应形式与初始状态有关。如:直流电动机由于摩擦和负载的阻力,当电枢电压低于某一值时,电机不

转;当电压大于临界值时,电机的电磁转矩足以克服堵转矩,电机开始转动,这是死区非线性。

2. 按输入信号的时间函数关系,系统可分为恒值系统和随动系统

恒值系统的输入信号或是一个常量,或是随时间缓慢变化的信号。系统的基本任务是在存在扰动的前提下,使输出量保持在给定的希望值上。如:常用的电力拖动自动控制系统、温度控制系统、刨花板的厚度控制系统等。

随动控制系统:随动系统的输入信号是平凡变化的,是随机的。系统的任务是在存在扰动的前提下,保证输出的被控制量以一定的精度跟随输入信号的变化而变化。随动系统也称为跟踪系统,或伺服系统。如:雷达跟踪系统、舰船的陀螺控制系统等。

3. 按信号时间函数的连续性可分为连续系统和离散系统。

连续控制系统是指系统中各部分作用信号都是时间的连续函数,是模拟量,如:水位、温度、速度控制系统,均为连续控制系统。

随着科学技术的发展,数字控制技术的应用越来越广泛。如单片机控制系统、计算机控制系统。这就要涉及到对离散控制系统的研究。在控制系统的信号传递过程中,若有一处或几处的信号是脉冲序列或数码的这种系统就是离散控制系统。在系统中,需要有将连续的模拟信号采样成离散信号的过程。在采样过程中必然会丢失有用信息,控制系统的性能必然会与连续系统不同。因此,从数学描述、系统分析直到系统综合都有它自己的特点,与连续系统之间存在本质的差别。所以对采样系统的研究不能直接采用连续系统理论,而是利用采样系统理论。

1.4 对自动控制系统性能的基本要求

一个自动控制系统要能正常满意地工作,必须满足生产过程所提出的一系列性能指标的要求。对于不同的生产过程和应用场合,可能要求的性能指标并不一样,但以下三点却是共同而基本的,稳定性、快速性和准确性(稳态精度),即稳、快、准。

1. 稳定性:我们知道,控制系统都包含有储能元件,存在着惯性,当系统的各个参数分配不当时,将会引起系统的振荡而失去工作能力。所以对于控制系统的稳定性分析和设计,乃是控制理论的主要研究课题之一。稳定性就是指动态过程的振荡倾向和系统能够恢复平衡状态的能力。输出量偏离平衡状态后应该随着时间收敛并且最后回到初始的平衡状态。稳定性的要求是系统工作的首要条件。

在一般机电式的随动系统中,激烈而持久的机械振荡,不仅容易损坏传动机械,而且会使功率元件过载。即使在一般的电子式系统中,大振幅的振荡也会引起部分元件的过载甚至烧毁。因此,系统的稳定性是最基本的要求。

系统的稳定性包括两方面的含义。一是系统稳定,叫作绝对稳定性,通常所说的稳定性就是这个含义。另一方面的含义是输出量振荡的强烈程度,称为相对稳定性。例如系统绝对稳定的,但是在受到扰动后,响应的振荡很强烈,而且振荡的衰减很慢,那么系统的相对稳定性就很差。

考虑到实际系统中各元件的参数和特性都会产生一些变化,因此,系统不但必须是稳定的,而且还应有一定的稳定裕度,以保证在元件性能略有变化时,系统仍能保持稳定。系统稳定性的优劣,常以它的稳定裕度的大小来衡量。

2. 快速性:这是在系统稳定的前提下提出的。在实际工作中,不仅要求系统稳定,而且要求

被控量能迅速地按照输入信号所规定的形式变化,即还要求系统具有一定的响应速度。但是,如前所述,系统中总包含一些惯性元件,因此在输入信号的作用下,其响应总要经过暂态过程之后才能达到稳态。系统在这一暂态过程中的工作情况,就反映了系统的响应速度。快速性是指当系统输出量与给定的输入量之间产生偏差时,消除这种偏差过程的快速程度。由于系统的暂态响应,随输入信号的不同而异,因此,通常以输入阶跃信号时系统的暂态响应来描述系统的响应的速度。

3. 准确性:系统在输入信号的作用下,其响应经过暂态过程之后进入稳态,这时系统的输出值与希望值之间存在一定的误差,叫作稳态误差。它是衡量系统工作性能的重要指标。

要求控制系统没有任何误差是不可能的,因此反馈控制系统本身就是建立在误差控制的基础之上的。如主反馈信号与输入信号之间不存在偏差,则系统不会产生任何控制作用。而且由于各种因素的存在,主反馈信号与输入信号之间的偏差也不可能完全消除。控制系统产生误差的主要因素有三个:

(1)系统本身的原理性误差。它既同系统的结构形式有关又同输入信号的性质有关。

(2)由于系统的结构和元件的特性不够完善以及非线性因素造成的误差。如传动机构中的齿隙,游隙、偏心,机械摩擦及电磁元件中的饱和、死区,磁滞回线等非线性特性引起的误差。这类误差通常称为结构误差或非线性误差。

(3)系统内部或外部存在的各种干扰所产生的误差。如放大器中的起伏噪声、温度漂移、电磁元件中的杂散耦合、机械振动和风力矩等所引起的干扰误差。

总之,稳态误差是由于控制输入量和扰动量的变化引起的,并与系统的结构有关,可以采用校正和补偿措施来减少或消除。

由于受控对象的具体情况不同,各种系统对稳、准、快的要求各有侧重,例如,随动系统对快速性要求较高,而调速系统对稳定性提出较严格的要求。

同一系统稳、准、快是相互制约的。快速性好,可能会有强烈振荡,改善稳定性,控制过程又可能过于迟缓,精度也可能变坏。分析和解决这些矛盾,也是本学科讨论的重要内容。对于机械动力学系统的要求,首要的也是稳定性,因此过大的振荡将会使部件过载而损坏,此外要防止自振,降低噪声、增加刚度等等。这些都是控制理论研究的核心问题。

1.5 自动控制的基本体系

控制系统的分析、综合与设计主要分三步:

1. 系统模型结构的建立;
2. 系统模型参数的整定;
3. 控制系统的分析与设计。

在自动控制系统中,所要处理的对象种类繁多,情况复杂。但是,不管怎样复杂的被控制的对象,一旦找到了它的数学模型(例如微分方程)就可以用一般控制理论进行研究、分析、处理。

分析和设计系统时系统的动态性能最为重要,因而首先必须知道被控对象的特性。为了便于分析系统的特性可用数学表达式来描述系统,描述系统的数学表达式称为系统的数学模型。求取系统的数学模型时,需要量测系统的特性,对系统进行辨识或计算机模拟。

在已知系统的结构和参数的情况下,研究系统在一些典型输入信号作用下的动态性能与

系统结构及参数的关系,谓之分析。分析系统不是研究自动控制理论的最终目的。最终目的是根据分析的结论去设计能完成给定任务(有一定稳定性、快速性和准确性)的系统。实现这个目的通常有两种方法:第一种方法是校正。一般说来它不是简单的一次能完成的过程,而是一个逐步试探的过程,所以也称为分析的方法;第二种方法是综合的方法。这是用直接步骤寻找一个按既定要求完成任务的系统,通常这种方法从设计开始到结束完全是数学的方法。

在控制系统的分析、综合与设计,无非是采用两种方法。一种方法就是解析方法,运用理论知识对控制系统进行理论方面的分析、计算,这往往有很大的局限性。另一种方法就是实验方法,利用各种仪器仪表与装置,对控制系统施加一定类型的信号测取系统响应的方法,确定系统的性能。大多数情况是两者兼用(在分析时也要用到实验,在实验中也要用到分析),而不是独立使用的。

实验可在真实系统(即系统原型)上进行,亦可在模型上进行。系统的模型可分为两类:物理模型与数学模型。例如,在导弹与飞机的研制过程中,可将导弹与飞机的模型置于风洞中,进行风洞实验,风洞则是真实空中情况的物理模型。利用物理模型进行实验研究,称为物理模拟或物理仿真。有许多场合采用物理模型进行动态实验研究,或者造价昂贵,或者耗时太长而不被采用,因而越来越多地采用数学模型,由计算机进行模拟研究。

所谓仿真,就是将数学模型经过转换变成仿真模型,放到计算机上进行运算的过程。

仿真实验就是利用模型进行系统动态特性研究的实验。

自动控制理论不仅是工程技术领域的基础理论之一,它在生物学、医学、经济学甚至社会科学中也获得广泛的应用,引起愈来愈广泛的重视。

目前,控制界较为流行的仿真分析软件是 MATLAB(Matrix Laboratory)。

第二章 控制系统动态特性的基本测试方法

控制系统特性包括静态特性和动态特性。在静态情况下,系统输入量与输出量的各阶导数均为零。通过静态特性的测试,可以得到系统或环节的各种静态特性参数,如死区、增益、传递系数、线性范围等。静态特性一般采用逐点测量法,即给定一个输入量,相应测量被测对象的一个输出量。若输入量从小到大取测试点,便可获得一组数据,并绘出静态特性曲线。求出静态特性曲线的斜率,就可确定被测对象的增益或传递函数。当输入量从零开始增加时,若输出量保持不变或为零(如电动机输入电压较小时,电动机的转速保持为零),只有当输入电压增加到一定数值后,输出量才开始随输入量的增加而增加,那么,输出量保持为零的不变部分就是死区。若输入量继续增加而输出量保持不变时,这就是到了饱和区。

控制系统的动态特性是指系统在动态过程中,输入量与输出量在每一时刻的关系。通过动态特性的测试,可以获得系统或环节的动态特性参数,例如超调量、调节时间、时间常数等,并通过计算可以确定被测对象的传递函数。本章主要介绍控制系统动态特性的时域测试法和频域测试法。

2.1 动态特性的时域测试

2.1.1 阶跃响应曲线法

若对系统或环节施加阶跃信号或脉冲信号,利用示波器或快速记录仪测量被测对象的输出响应,即阶跃响应或脉冲响应,这就是动态特性的时域测试。这里,只介绍阶跃响应曲线法。

借助于一个开关 K 如图 2-1(a),人为地操纵被测对象输入电压 U_i 的接通和断开,就可获得一系列的阶跃输入信号和连续出现的阶跃响应曲线,如图 2-1(b)所示。

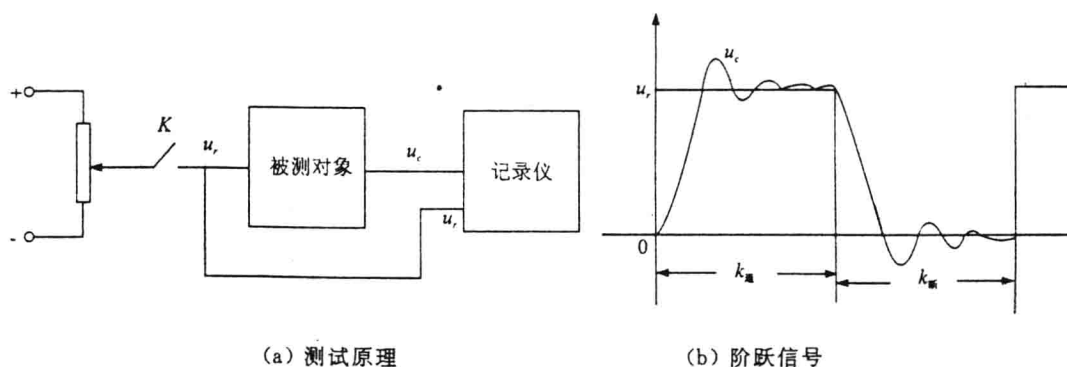


图 2-1 阶跃响应测试方法

操作开关时, K 通和 K 断的时间应稍大于被测对象的调节时间(即过渡时间)。这样,当一条阶跃响应曲线进入稳态后,才出现另一条响应曲线,获得完整的响应曲线波形。如果 K 通和

K 断的时间过长,则观察费时和浪费记录纸。图 2-1 所示的阶跃信号是离不开人操纵的。

阶跃信号的幅值不宜取得过大,以防止被测对象因输入过大而产生饱和。但阶跃幅值也不宜过小,否则,被测对象的输出响应曲线难以清楚地记录下来。通常,阶跃信号可取额定输入信号的 5~20%。

图 2-1 所示的阶跃信号是从零开始施加的。阶跃响应曲线法,一般应对被测对象分别施加正向和反向的阶跃信号,如果正向和反向的阶跃响应曲线基本相同,表明被测对象为线性系统,否则应按非线性系统处理。

阶跃信号也可采用超低频信号发生器输出的方波信号来实现,如图 2-2 所示。这时,阶跃信号的幅值和周期,可通过该仪器的有关旋钮来调节。如果采用三用表来测量阶跃幅值,因为频率很低,一般应采用直流电压档。

阶跃响应曲线可用超低频示波器或数字示波器测量,也可采用光线示波器或快速记录仪进行记录。所用记录仪的时间常数,应远小于被测对象的时间常数,也就是记录仪的频带宽度或频率响应,应远大于被测对象的频带宽度。通常,X-Y 记录仪记录 2 Hz 以下的

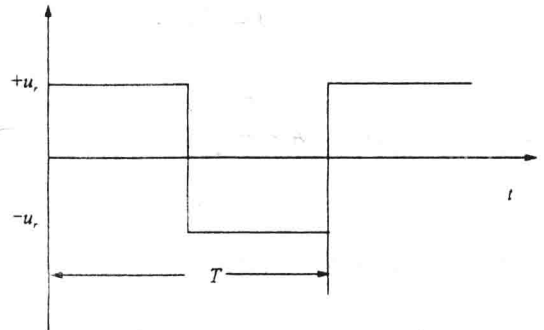


图 2-2 超低频信号发生器产生的阶跃信号

的正弦信号才不失真;快速记录仪一般可记 70 Hz 以下的正弦信号;光线示波器根据所选振子的不同,一般可记录 40 Hz~2000 Hz 以内的正弦信号。在记录非正弦的周期信号(如阶跃响应)时,应考虑高次谐波成分的影响,因此所能记录的非正弦信号的频率,要明显低于记录正弦信号的频率。

根据被测对象的不同,合理选择记录仪,可以减小动态特性的测量误差。必要时可采用几种记录仪进行测量比较,例如采用数字示波器来校验笔记录仪的测量结果等。

2.1.2 阶跃响应曲线的分析

在观察和记录系统的阶跃响应曲线后,应该对响应曲线进行分析和计算,以便确定系统的动态特性参数和传递函数。

(1)一阶系统的参数计算

一阶系统的传递函数为

$$G(S) = \frac{Y(S)}{X(S)} = \frac{K}{TS + 1} \quad (2-1)$$

式中, $Y(S)$ 为系统的输出量; $X(S)$ 为系统的输入量; K 为系统的静态放大系数或传递系数; T 为时间常数。

静态放大系数 K 可由下式确定

$$K = \frac{Y(\infty)}{X} \quad (2-2)$$

式中 $Y(\infty)$ 为系统阶跃响应的稳态值; X 为系统输入阶跃信号幅值。

时间常数 T 可由图 2-3 所示的一阶系统阶跃响应曲线求得。

一阶系统的阶跃响应曲线与时间常数 T 有确定的对应关系: 当 $t=T$ 时, $Y(T)=0.632Y(\infty)$; $t=2T$, $Y(2T)=0.865Y(\infty)$; $t=3T$, $Y(3T)=0.95Y(\infty)$; $t=4T$, $Y(4T)=0.982Y(\infty)$ 。根据这一规律, 一方面可用实验的方法确定被测对象是否为一阶系统; 另一方面, 可由实验所得的阶跃响应曲线, 求出一阶系统的时间常数, 其方法是: 取 $Y(t_1)=0.632Y(\infty)$, 在曲线上便得到一点 a , 则 $t_1=T$, 时间常数即为所求。

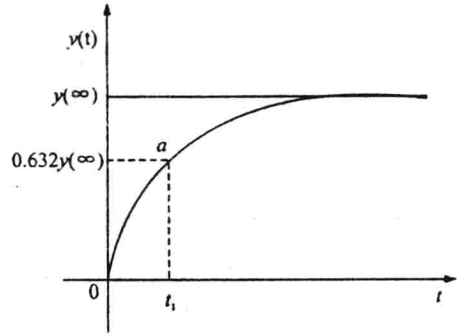


图 2-3 一阶系统的阶跃响应曲线

在记录曲线上, $Y(\infty)$ 一般以毫米(mm)度量。例如, 若 $Y(\infty)=20$ mm, 则 $Y(T)=12.6$ mm, 于是点 a 即被确定, 同时 ot_1 的长度也就确定, 则

$$T = \frac{ot_1}{v}$$

式中 v 是记录仪走纸速度, 其单位通常是毫米/秒(mm/s)。

如果采用示波器测量, 则在荧光屏上量取 ot_1 的长度(通常是以厘米或格数度量), 乘以示波器的扫描速度(s/cm 或 s/div)。

若阶跃响应曲线是一条 S 形的非周期曲线, 如图 2-4 所示, 则该系统可近似用具有延迟环节的一阶系统来描述, 其传递函数为

$$G(S) = \frac{K}{TS + 1} e^{-\tau s} \quad (2-3)$$

通过阶跃响应曲线的拐点作一切线, 交时间轴于 L 点, 交稳态值 $Y(\infty)$ 的渐近线于 M 点, 则 OL 即为延迟时间 τ 。切线 LM 在时间轴上的投影, 即为时间常数 T 。

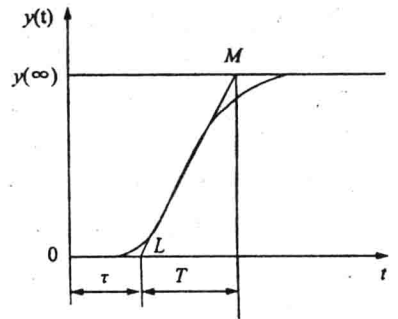


图 2-4 具有延迟环节的一阶系统阶跃响应曲线

(2) 积分环节阶跃响应曲线的参数计算

若系统的输入为阶跃信号, 而输出的阶跃响应是一条速度保持不变的直线时(如图 2-5 所示), 则该系统的特性可用积分环节的传递函数来描述

$$G(S) = \frac{Y(S)}{X(S)} = \frac{1}{TS} \quad (2-4)$$

其中, 积分时间常数 T 由下式确定

$$T = \frac{X}{\text{tg}\theta} \quad (2-5)$$

若被测对象的阶跃响应曲线起始变化速度不大, 以后逐渐上升达稳定速度(见图 2-6), 则可用具有延迟 τ 的积分环节来近似。被测对象的传递函数为

$$G(S) = \frac{1}{TS} e^{-\tau s} \quad (2-6)$$

T 的求法同式(1-5)。 τ 的求法是, 作响应曲线稳定部分的切线, 交横坐标于 N , 则 ON 即为延

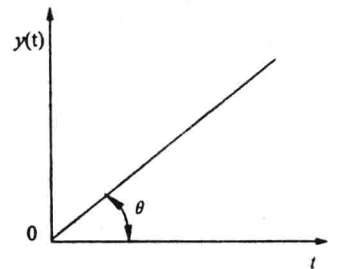


图 2-5 积分环节的阶跃响应

迟时间 τ 的值。

(3) 欠阻尼二阶系统的参数计算

欠阻尼二阶系统的阶跃响应曲线,如图 2-7 所示。

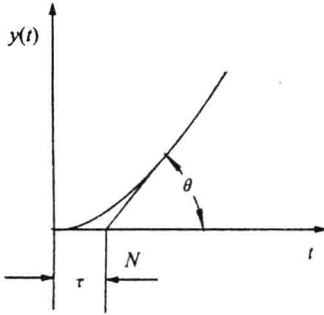


图 2-6 具有时延的积分环节的阶跃响应

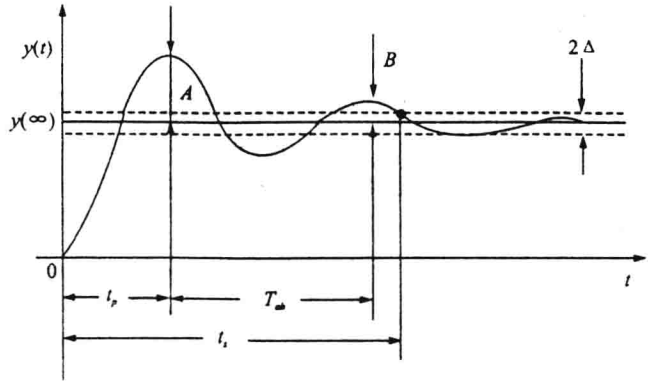


图 2-7 欠阻尼二阶系统的阶跃响应曲线

根据阶跃响应曲线,可以确定系统的动态性能指标:超调量 $\sigma\%$,峰值时间 t_p 及调节时间 t_s 等。

$$\text{超调量 } \sigma\% = \frac{Y(t_p) - Y(\infty)}{Y(\infty)} 100\% = \frac{A}{Y(\infty)} 100\% \quad (2-7)$$

在记录曲线上, A 和 $Y(\infty)$ 均以毫米度量。如果在示波器荧光屏上读取数据,最好借助于一个小三角尺。

峰值时间 t_p 的确定,应该量出 t_p 线段的长度(mm),再除以记录仪走纸速度(mm/S),便可确定 t_p 。

为了确定调节时间 t_s ,应该在阶跃响应曲线上作出误差带。误差带宽度 Δ ,通常取稳态值 $Y(\infty)$ 的 5% (或 2%)。具体作法是:假设 $Y(\infty) = 20 \text{ mm}$,则 $\Delta = 0.05Y(\infty) = 1 \text{ mm}$,然后在稳态值渐近线上下 1 mm 处,分别作平行于渐近线的直线,误差带即被作出。根据响应进入误差带后,不再出来的那一点,即可确定 t_s 。

欠阻尼二阶系统的动态特性,可用下面的传递函数描述

$$G(S) = \frac{K}{T^2 S^2 + 2T\zeta S + 1} \quad (2-8)$$

式中 ζ ——阻尼比, $0 < \zeta < 1$, T ——时间常数。

可以证明,时间常数 T 和阻尼比 ζ 均为阶跃响应曲线的第一个峰值超调量 A 和第二个峰值超调量 B (参见图 2-7) 有关,其关系为

$$\zeta = \ln \frac{A}{B} \left[\left(\ln \frac{A}{B} \right)^2 + (2\pi)^2 \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (2-9)$$

$$T = T_{d0} \left[\left(\ln \frac{A}{B} \right)^2 + (2\pi)^2 \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (2-10)$$

式中 A ——曲线第一次峰值的超调量

B ——曲线第二次峰值的超调量

T_{d0} ——衰减振荡周期,即 AB 两点之间的时间。

根据试验所得的阶跃响应曲线,求出 A 、 B 和 T_w 的数值,利用式(2-9)和(2-10),即可确定欠阻尼二阶系统的数学模型。

2.2 动态特性的频域测试

若令传递函数 $G(S)=Y(S)/X(S)$ 的自变量 $S=j\omega$,便得到频率特性

$$G(j\omega) = Y(j\omega)/X(j\omega)$$

对于一个稳定的线性系统,在其输入端施加一个角频率为 ω ,幅值为 X_m ,相角为零的正弦信号时,即

$$X(t) = X_m \sin \omega t$$

则系统的稳态输出量为

$$Y(t) = Y_m \sin(\omega t + \varphi)$$

$Y(t)$ 是与输入量同频率的正弦信号,但幅值 Y_m 和相角 φ 与输入信号不同,且 Y_m 和 φ 随输入信号频率变化而变化。

令 ω 从 0 到 ∞ 变化,测量不同频率下,系统稳态输出量与输入量的幅值比和相位差,即可求得被测对象的频率特性:

幅频特性 $|G(j\omega)| = \frac{Y_m}{X_m}$

相频特性 $\angle G(j\omega) = \varphi(\omega)$

幅相频率特性 $G(j\omega) = |G(j\omega)|e^{j\varphi(\omega)}$

利用实验方法所测的频率特性,通常都是一阶系统、二阶系统或某一环节的,一般不直接测量整个系统的开环频率特性。其原因是开环增益往往很高,不易测出频率特性。特别是当系统包含积分环节时,低频的输出量很大,由于零位电压的存在,往往没等读完一个数值,输出量已经饱和。设计控制系统需要的开环频率特性,一般是采用分段测量再迭加的办法得到,或者通过测量系统的闭环频率特性,再利用尼氏图纸求出相应的开环频率特性。

测量频率特性的方法有多种,这里仅介绍两种比较常用的方法。

2.2.1 输入和输出波形直接记录法

其测量原理图,如图 2-8 所示。由超低频信号发生器提供正弦输入信号,每调定一个频率,待输出稳定后,即可在双线记录仪上同时获得一组输入和输出波形,如图 2-9 所示。控制系统都是低通滤波器,在频率很低时,系统的输入信号基本能完全复现输入信号。通常,取被测对象交接频率(或称转折频率)的 1/10,作为起始的实验频率。如果被测对象的交接频率无法知道,则应先确定最大频率 ω_{max} 。为此,逐

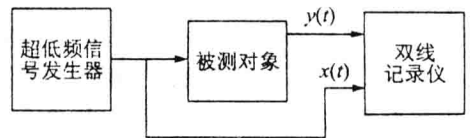


图 2-8 直接记录法

渐增大输入信号的频率,直到输出信号幅值只有 $\omega=0$ 时幅值的 $\frac{1}{20 \sim 100}$, ω_{max} 即可确定。然后在 $0 \sim \omega_{max}$ 范围内,确定若干个测试点。

在确定起始实验的频率后,利用双线记录仪的灵敏度旋钮,将输入和输出波形的峰—峰值调成一致,这时两波形的相位差应接近于零。然后逐步提高输入信号的频率,这时输出信号的

幅值和相角将发生变化。将两个波形直接进行比较,即可得到某一频率下的幅值比和相位差,即

$$\text{幅频特性 } |G(j\omega)| = 2Y_m / 2X_m \quad (2-11)$$

$$\text{相频特性 } \angle G(j\omega) = \varphi(\omega) = -\frac{360^\circ}{b} C \quad (2-12)$$

(度)

式中 $2Y_m$ 和 $2X_m$ 是输出和输入信号的峰值; b 和 c 表示相角占有宽度,以毫米为单位。

若输出相角超前输入,则 $\varphi(\omega) > 0$,符号应取正。将频率逐步提高,重复上述测量,就可得到一系列的幅值比和相位差,并绘出频率特性曲线。

在实验测试时,要注意以下几点:

- (1) 输入信号幅值不宜取得过大,以防饱和现象产生;输入信号过小,也会由于死区等影响而引起误差。
- (2) 测试过程中,输入输出波形幅值一旦调好,应严格保持信号发生器和记录仪有关幅值调节旋钮位置固定不变,要改变的仅仅是频率。
- (3) 实际输出曲线一般存在随机干扰,在确定幅值比时,通常采用峰峰值计算;在确定相位差时,也以波形最高点的间距取值。

2.2.2 李沙育图形法

将被测对象的输入和输出信号,分别接到慢扫描示波器的 X 轴和 Y 轴,在示波器上通常显示出一个椭圆图形,即李沙育图形,如图 2-10 所示。

设被测对象的输入量和输出量分别为

$$X(t) = X_m \sin \omega t$$

$$Y(t) = Y_m \sin(\omega t + \varphi)$$

当 $\omega t = 0$ 时,则

$$X(0) = 0$$

$$Y(0) = Y_m \sin \varphi$$

由此可得

$$\sin \varphi = Y(0) / Y_m$$

或

$$\varphi = \arcsin \frac{Y(0)}{Y_m} = \arcsin \frac{2Y_0}{2Y_m} \quad (2-13)$$

上式对于椭圆长轴在第一、三象限适用;当椭圆长轴在第二、四象限时,相位差计算公式应为

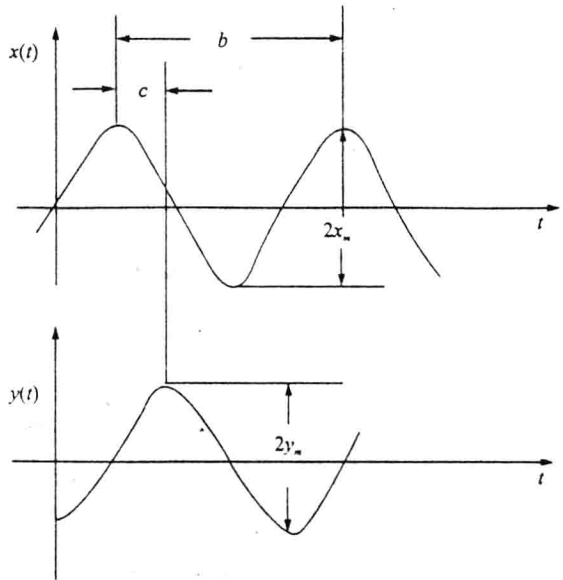


图 2-9 输入和输出波形

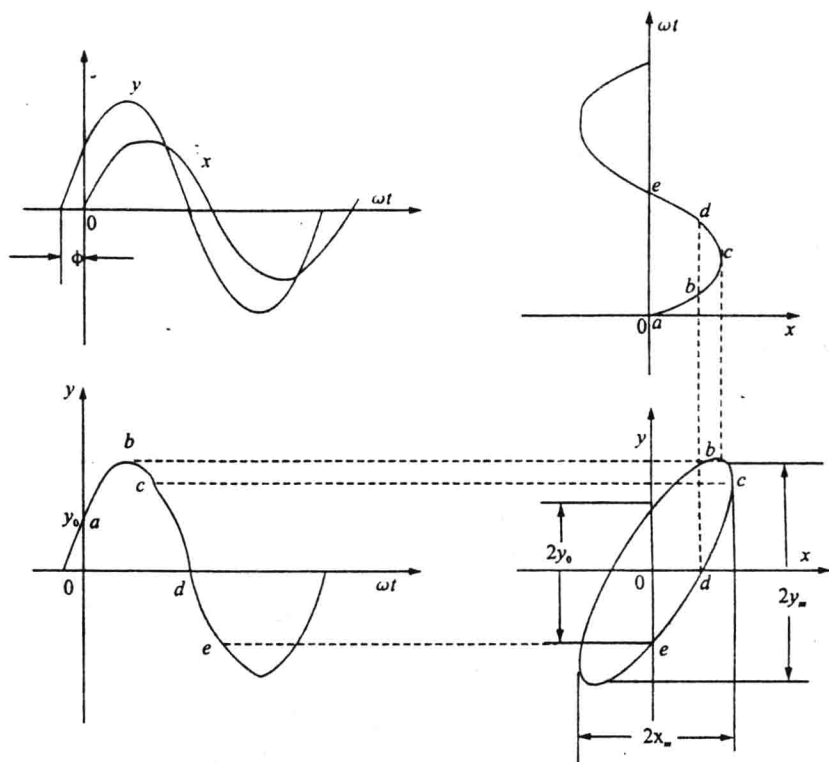


图 2-10 李沙育图形

$$\varphi = 180^\circ - \arcsin \frac{2Y_0}{2Y_m} \quad (2-14)$$

控制系统输出量的相角，一般都迟后于输入量的相角，光点绕行方向为逆时针，用以上两式计算的结果应加负号。如果输出量的相角超前于输入量，则光点绕行方向为顺时针，计算结果取正号。

利用小三角尺量出椭圆和 Y 轴交点的长度为 $2Y_0$ ，及椭圆在 Y 轴上的投影 $2Y_m$ ，即可按椭圆长轴所在位置分别按(2-13)或式(2-14)计算相角。

幅频特性的测量比较简单，只要将一频率时的 $X(t)$ 和 $Y(t)$ 分别加到示波器的 Y 轴。测出 $2X_m$ 和 $2Y_m$ ，改变频率重复测量，即可求得幅频特性。

上述两种测量频率特性的方法对仪器的要求不高，但测量中判读困难，精度较低。对记录仪一讲，它的频率范围要受到限制；对示波器来讲，频率很低时，光点移动缓慢，以致看不到完整的椭圆轨迹；当频率较高时，光点运动方向又不易看清。因此，在测量精度要求较高的场合，应采用比较先进和贵重的仪器，例如 BT6 型超低频频率特性测试仪及 CF930 型 FFT(快速傅里叶变换)分析仪等。

第三章 控制理论实验常用仪器

3.1 电子模拟计算机

借助数字计算机或电子模拟计算机对系统进行模拟研究,即所谓仿真研究,是分析和设计控制系统强有力的辅助方法。

电子模拟计算机利用模拟量进行运算。求解微分方程时,直接通过积分运算,立即得到模拟量的积分输出。数字计算机是利用数字量,通过大量迭代运算,才能求得积分的数值输出。因此,模拟机的优点是求解速度快,无论是简单的小型题目,还是复杂的大型题目,在运算时间上并无多大差别,几乎是瞬时完成的。另外,模拟机能方便地改变微分方程的系数和输入量的大小,求解结果是以直观的时间曲线表示。因此,电子模拟计算机便于研究系统参数变化或输入变化的系统动态过程。模拟计算机的缺点是计算精度较低。

我国生产的电子模拟计算机有 DMJ-16B(6 阶),DMJ-4(8 阶),DMJ-3A(20 阶)等型号。尽管它们的结构和功能有所不同,但模拟机的基本组成都是相似的,如运算部分包括能够完成加法、减法、积分等数学运算的部件。本书只介绍模拟学习机的组成及其使用方法。

3.1.1 模拟机的常用运算部件

组成各种运算部件的基本元件是运算放大器。它是一种高增益低漂移的直流放大器。由电子管构成的运算放大器,其输出电压范围为 ± 100 伏。由晶体管构成的运算放大器,其输出电压范围一般为 ± 13 伏。图 3-1(a)是运算放大器的表示符号。

运算放大器有一个输出端和两个输入端。图中,“ $-$ ”表示反相输入端;“ $+$ ”表示同相输入端。因为同相放大电路,由于出现共模电压,易于导致运算误差,因此在模拟计算机中,一般采用反相端输入。

运算放大器在使用时,其输入端要连接输入阻抗 Z_i ,在输出端和反相输入端之间要连接反馈阻抗 Z_f ,以构成电压负反馈,如图 3-1(b)所示。图中, U_i 、 U_o 、 U_x 分别表示输入、输出和求和点的电压,由图可知

$$I_i = I_f + I_x$$

$$I_i = \frac{U_i - U_x}{Z_i}$$

$$I_f = \frac{U_x - U_o}{Z_f}$$

$$I_x = \frac{U_x}{R_x}$$

式中, R_x 为运算放大器的输入电阻。

从以上关系可得

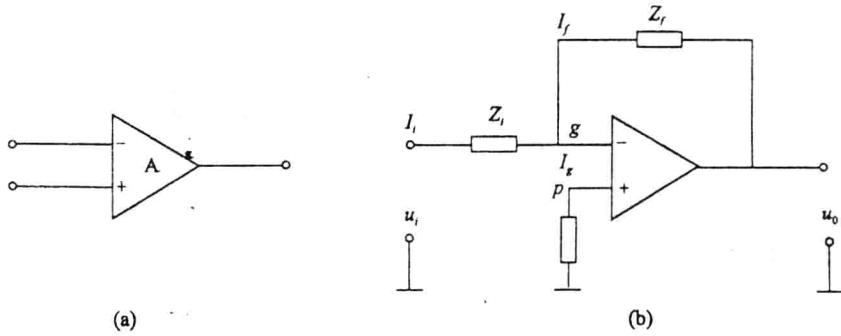


图 3-1 运算放大器的表示符号及基本电路

$$\frac{U_i - U_k}{Z_i} = \frac{U_k - U_o}{Z_f} + \frac{U_k}{R_k} \quad (3-1)$$

根据运算放大器的基本关系

$$U_o = -AU_k \quad (3-2)$$

式中, A 为运算放大器的增益, 通常 $A = 10^6 \sim 10^8$ 。

将式(3-2)代入式(3-1), 经整理得

$$\frac{U_i}{Z_i} = -\frac{(1+A)U_o}{AZ_f} - \left(\frac{U_o}{AR_k} + \frac{U_o}{AZ_i}\right) \quad (3-3)$$

由于 A 很大, 输出电压 U_o 是一个有限值, 电压 U_k 必定很小。这是由于输出电压通过 Z_f , 向输入端引入很强的电压并联负反馈, 迫使求和点的电压 U_k 降低到接近于地电位的缘故。通常称 g 点为“虚地”。另外, R_k 和 Z_i 一般都很大, 因此式(3-3)括号内的值近似为零, 且有 $\frac{(1+A)}{A} \approx 1$, 则式(3-3)可写成

$$\frac{U_o}{U_i} = -\frac{Z_f}{Z_i} \quad (3-4)$$

上式是运算放大器联系输出量与输入量的基本关系式。该式表明: 运算放大器输出电压和输入电压之比, 等于反馈阻抗与输入阻抗之比, 并差一个符号。只要适当选择输入阻抗和反馈阻抗 Z_f 的形式和数值, 就可实现各种不同的运算。

(1) 反号器

在图 3-1(b)中, 若选择 $Z_f = Z_i = R$, 则式(3-4)变成

$$\frac{U_o}{U_i} = -1 \quad (3-5)$$

这恰好把输入电压反了一个符号, 故称之为反号器或倒相器。在模拟机排题板上, 反号器可用图 3-2 所示符号表示, 其中, 图(a)为过去曾用的旧符号, 图(b)是国家标准规定的新符号(后面有关其它运算器的表示符号, 均列有新旧这两种)。

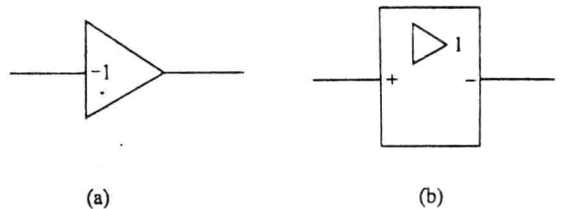


图 3-2 反号器的表示符号

(2) 比例器和比例加法器