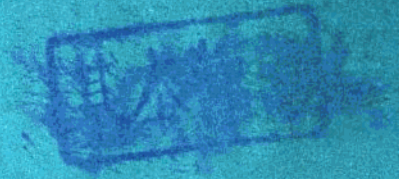


937111

自动控制原理 实验教程

邓为民 主编



航空工业出版社

13
37

自动控制原理实验教程

邓为民 主编

航空工业出版社

1991

内 容 提 要

本书阐述了自动控制实验的基本原理、测试技术及常用仪器设备。实验内容包括：随动系统实验，控制系统的电子模拟实验和数字机仿真实验。从利用典型元部件构成各种控制系统开始，到控制系统数学模型的建立和动态特性的测试，以及校正装置、状态观测器的设计与实现等，实验内容比较完整。选材注意了先进性和实用性。书中所列20个实验，都经过多次教学实践考验。

本书是控制理论联系工程实际和培养学生实验研究能力的有效教材。除供高等院校自动控制、工业自动化等专业师生使用外，还可作非控制专业《控制系统工程》等课程的实验教材，也可供从事自动控制的工程技术人员参考。

自动控制原理实验教程

邓为民 主编

航空工业出版社出版发行

(北京市和平里小关东里14号)

—邮政编码：100029—

全国各地新华书店经售

航空工业出版社印刷厂印刷

1991年8月第1版

1991年8月第1次印刷

开本：787×1092 1/16

印张：7

印数：1-5000

字数：179.2千字

ISBN 7-80046-346-X/TP·024

定价：1.95元

前 言

自动控制原理是一门理论性和工程应用性都很强的技术基础课。加强这门课的实验，不但有助于理论联系实际，深化理论教学，而且有助于培养学生的科学实验和工程实践能力。这就需要一本完整的实验教材，以便于学生自学和进行实验预习。《自动控制原理实验教程》，就是为了这一目的，并经航空工业部教材编审室审核大纲以后编写而成的。

本书首先介绍控制系统动态特性的基本测试方法和自动控制常用实验仪器设备，以便于学生掌握实验的基本原理和测试方法。实验内容分随动系统实验、电子模拟实验和控制系统数字机仿真实验三大类。在20个实验中，每个实验都介绍了实验目的、实验设备、实验内容、操作方法以及写实验报告的要求等。数字机仿真实验给出了全部程序清单。每个实验还附有思考题，以开拓实验者的思路。

书中所列实验，可根据教学时数和实验条件的不同选做，部分实验可供学生课余研究用。本书也可满足实验独立设课和进行随动系统课程设计的要求。

本书是在南京航空学院控制理论及应用教研室多年教学实践的基础上编写而成的。先后有多位教师对实验教材建设作过贡献。在编写过程中，也参考和采用了兄弟院校的一些实验资料。本书由邓为民主编，参加编写的还有吴庆宪（实验4.8、4.10及第五章）和林代业（实验3.4）。陈兴盛老师为实验4.5，4.6，4.7提供了初稿。

本书由北京航空航天大学程鹏副教授审稿。孙虎章教授对本书的编写提过宝贵意见。南京航空学院控制理论及应用教研室给予了大力支持和帮助。在此，一并致以诚挚的谢意。由于编者水平有限，书中错误和缺点在所难免，恳请读者批评指正。

编 者

1990, 12

0370/106

实 验 守 则

1. 实验前应充分做好预习,包括熟悉实验内容和方法、拟定实验线路、完成有关的理论计算以及了解实验仪器设备的使用方法等。

2. 连接线路或改变接线时,必须在关断电源的情况下进行。接好线路,务必认真检查,确认线路连接无误后,才可将电源接通。严禁在通电情况下改变接线。

3. 严格按仪器使用方法操作,培养严谨、求实的作风。

4. 实验结果应交指导教师审阅。整理好实验设备,才可离开实验室。

5. 认真写实验报告。实验数据处理、曲线绘制、理论计算、实验结果分析及心得体会等,应由实验者独立完成,严禁抄袭。

目 录

实验守则	
第一章 控制系统动态特性的基本测试方法	(1)
1.1 动态特性的时域测试	(1)
1.2 动态特性的频域测试	(5)
第二章 自动控制实验常用仪器	(9)
2.1 电子模拟计算机	(9)
2.2 超低频信号发生器	(22)
2.3 笔式记录仪	(23)
2.4 慢扫描电子示波器	(26)
2.5 磁电式光线示波器	(27)
2.6 BT6型 超低频频率特性测试仪	(29)
2.7 数字万用表	(30)
第三章 随动系统实验	(33)
3.1 自动控制系统演示实验	(33)
3.2 小功率直流随动系统研究	(39)
3.3 随动系统或调速系统设计	(42)
3.4 数字控制系统的实验研究	(44)
第四章 控制系统的电子模拟实验	(49)
4.1 典型环节的模拟研究	(49)
4.2 控制系统稳态误差的研究	(52)
4.3 频率特性的测试	(53)
4.4 控制系统的串联校正研究	(54)
4.5 串联校正装置的设计	(57)
4.6 非线性系统的相平面法研究	(58)
4.7 非线性系统的描述函数法研究	(60)
4.8 采样控制系统的研究	(61)
4.9 状态反馈的设计及实现	(65)
4.10 状态观测器的研究.....	(66)
第五章 控制系统的数字机辅助分析与计算	(70)
5.1 控制系统阶跃响应的数字机分析及实用计算程序	(70)
5.2 应用数字机绘制根轨迹	(80)
5.3 应用数字机绘制伯德图	(85)
5.4 应用数字机选择校正装置参数	(90)
5.5 有限时间状态最优调节器	(95)
5.6 动态规划的应用(最优路径问题)	(101)
参考文献	(106)

第一章 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系数。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。

1.1 动态特性的时域测试

1.1.1 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1-1(a)，人为地操纵被测对象输入电压 U_r 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1-1(b)所示。

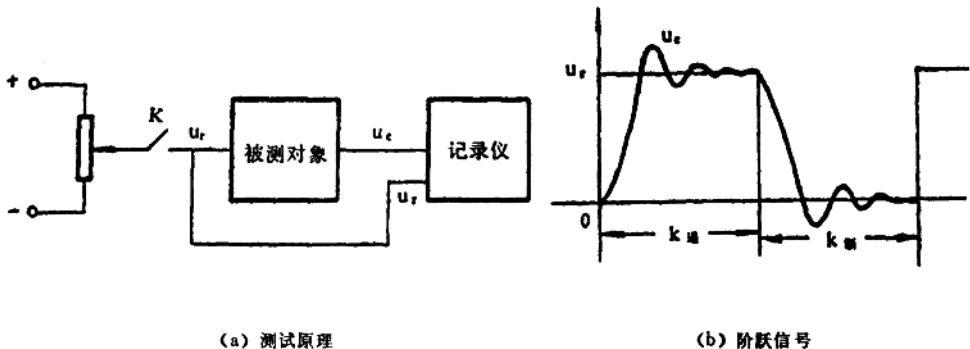


图 1-1 阶跃响应测试方法

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（即过渡过程时间），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1-1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1-1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1-2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。

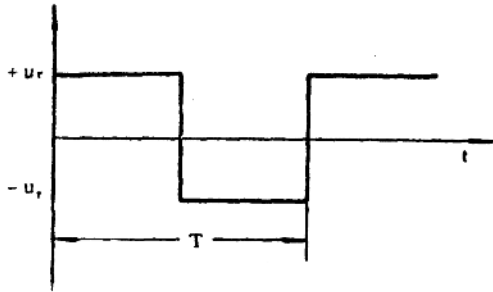


图 1-2 超低频信号发生器产生的阶跃信号

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2Hz以下的正弦信号才不失真；快速记录仪一般可记70Hz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40Hz~2000Hz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录仪的测量结果等。

1.1.2 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

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

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

$$K = \frac{Y(\infty)}{X} \quad (1-2)$$

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 1-3 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。

在记录曲线上， $Y(\infty)$ 一般以毫米 (mm) 度量。例如，若 $Y(\infty) = 20\text{mm}$ ，则 $Y(T) = 12.6\text{mm}$ ，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 1-4 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

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

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 。

(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 1-5 所示），则该系统的特性可用积分环节的传递函数来描述

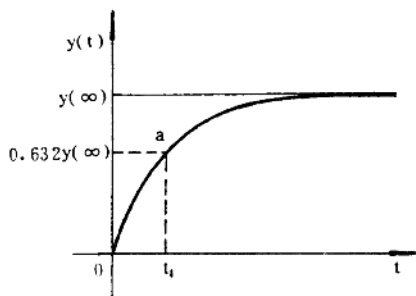


图 1-3 一阶系统的阶跃响应曲线

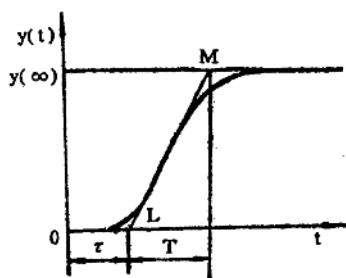


图 1-4 具有延迟环节的一阶系统阶跃响应曲线

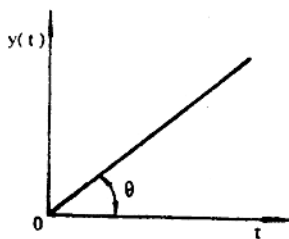


图 1-5 积分环节的阶跃响应

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

式中，积分时间常数T可由下式确定

$$T = \frac{X}{\text{tg}\theta} \quad (1-5)$$

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1-6），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

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

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1-7所示。

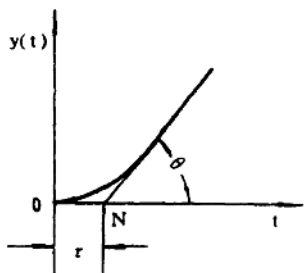


图 1-6 具有时延的积分环节的阶跃响应

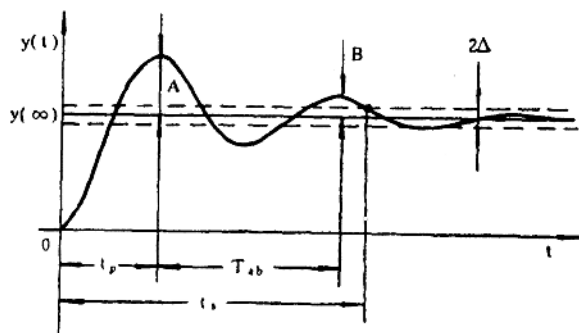


图 1-7 欠阻尼二阶系统的阶跃响应曲线

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。

$$\text{超调量 } \sigma\% = \frac{Y(t_p) - Y(\infty)}{Y(\infty)} 100\% = \frac{A}{Y(\infty)} 100\% \quad (1-7)$$

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1mm处，分别作平行于渐近线的直线，误差带即被作出。根据

响应曲线进入误差带后,不再出来的那一点,即可确定 t_{∞} 。

欠阻尼二阶系统的运态特性,可用下面的传递函数描述

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

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 均与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1-7)有关,其关系为

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

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

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_{∞} ——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_{∞} 的数值,利用式(1-9)和(1-10),即可确定欠阻尼二阶系统的数学模型。

1.2 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:

$$\text{幅频特性} \quad |G(j\omega)| = \frac{Y_m}{X_m}$$

$$\text{相频特性} \quad \angle G(j\omega) = \varphi(\omega)$$

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

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，再利用尼氏图线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。

1.2.1 输入和输出波形直接记录法

其测量原理图，如图 1-8 所示。由超低频信号发生器提供正弦输入信号，每调定一个

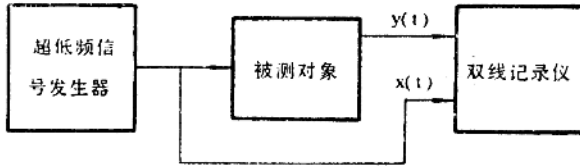


图 1-8 直接记录法

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 1-9 所示。控制系统都是低通滤波器，在频率很低时，系统的输出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

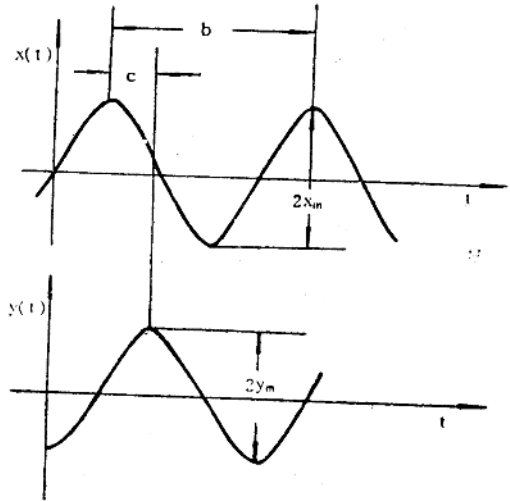


图 1-9 输入和输出波形

$0 \sim \omega_{max}$ 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一峰值调成一致，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

$$\text{幅频特性 } |G(j\omega)| = 2Y_m / 2X_m \quad (1-11)$$

$$\text{相频特性 } \angle G(j\omega) = \varphi(\omega) = -\frac{360^\circ}{b} C \text{ (度)} \quad (1-12)$$

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，以防止饱和现象产生；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。

1.2.2 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1-10所示。

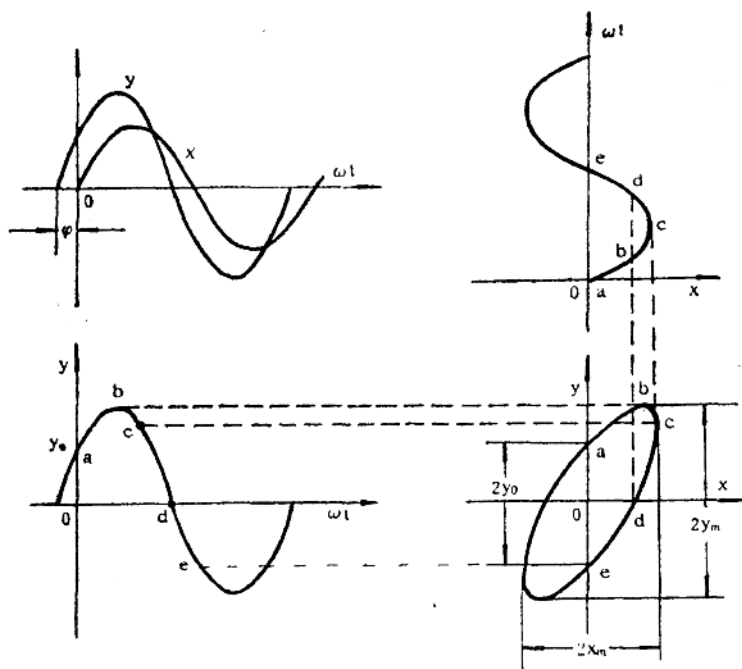


图 1-10 李沙育图形

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

$$\varphi = \arcsin \frac{Y(0)}{Y_m} = \arcsin \frac{2Y_0}{2Y_m} \quad (1-13)$$

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

$$\varphi = 180^\circ - \arcsin \frac{2Y_0}{2Y_m} \quad (1-14)$$

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 $2Y_0$ 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式(1-13)或式(1-14)计算相角。

幅频特性的测量比较简单，只要将某一频率时的 $X(t)$ 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。对记录仪来讲，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（见2.6节）及CF930型FFT（快速傅里叶变换）分析仪等。

第二章 自动控制实验常用仪器

2.1 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。

2.1.1 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感放大器。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2-1(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2-1(b)所示。图中， U_i 、 U_o 、 U_g 分别表示输入、输

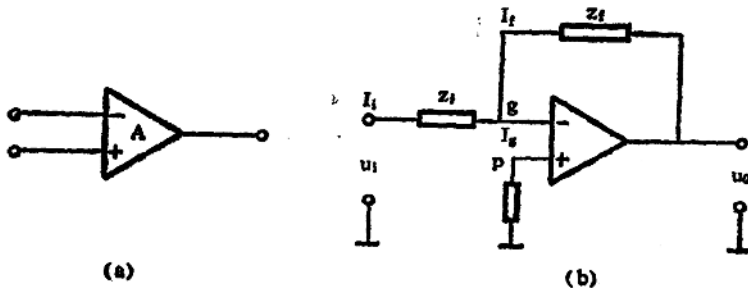


图 2-1 运算放大器的表示符号及基本电路

出和求和点的电压，由图可知

$$I_i = I_f + I_g$$

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

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

$$I_g = \frac{U_g}{R_g}$$

式中， R_g 为运算放大器的输入电阻。

从以上关系可得

$$\frac{U_i - U_g}{Z_i} = \frac{U_g - U_o}{Z_f} + \frac{U_g}{R_g} \quad (2-1)$$

根据运算放大器的基本关系

$$U_o = -AU_g \quad (2-2)$$

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

将式 (2-2) 代入式 (2-1)，经整理得

$$\frac{U_i}{Z_i} = -\frac{(1+A)U_o}{AZ_f} - \left(\frac{U_o}{AR_g} + \frac{U_o}{AZ_i} \right) \quad (2-3)$$

由于 A 很大，输出电压 U_o 是一个有限值，电压 U_g 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_g 降低到接近于地电位的缘故。通常称 g 点为“虚地”。另外， R_g 和 Z_i 一般都很大，因此式 (2-3) 括号内的值近似为零，且有 $\frac{(1+A)}{A} \approx 1$ ，则式 (2-3) 可写成

$$\frac{U_o}{U_i} = -\frac{Z_f}{Z_i} \quad (2-4)$$

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 2-1 (b) 中，若选择 $Z_f = Z_i = R$ ，则式 (2-4) 变成

$$\frac{U_o}{U_i} = -1 \quad (2-5)$$

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 2-2 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）。

(2) 比例器和比例加法器

在图 2-1 (b) 中, 若取 $Z_i = R_i$, $Z_f = R_f$ ($R_f \neq R_i$), 如图 2-3 (a) 所示, 则式 (2-4) 变成

$$\frac{U_o}{U_i} = -\frac{R_f}{R_i}$$

或
$$U_o = -\frac{R_f}{R_i} U_i$$

式中, R_f/R_i 即为比例系数。

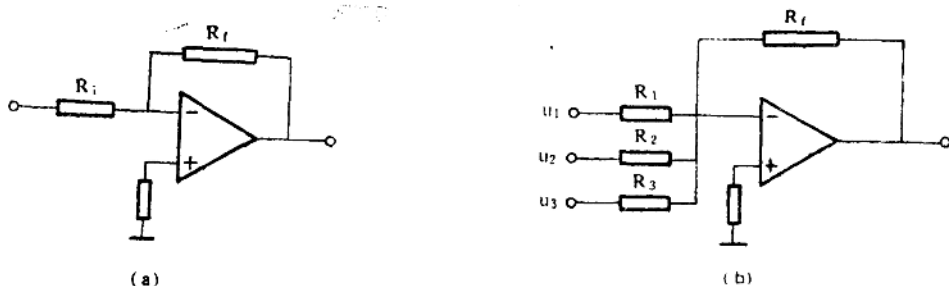


图 2-3 比例器和比例加法器电路

若运算放大器的输入, 是由多条 (例如 3 条) 不同电阻支路所组成, 如图 2-3 (b) 所示, 便构成比例加法器。

图 2-3 (b) 所示比例加法器的输出电压, 可用下式表示

$$U_o = -\left(\frac{R_f}{R_1} U_1 + \frac{R_f}{R_2} U_2 + \frac{R_f}{R_3} U_3\right)$$

在模拟机排题图上, 加法器可用图 2-4 所示符号表示, 其中, 图 (a) 为旧符号, 图 (b) 为新符号。

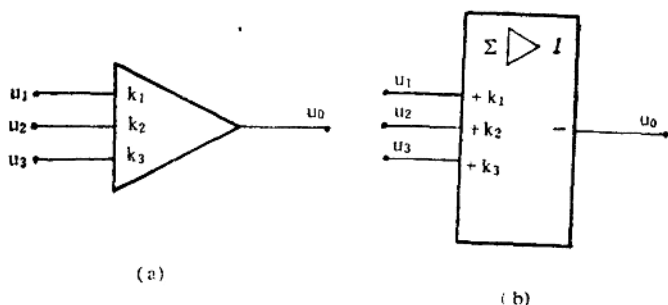


图 2-4 加法器的表示符号