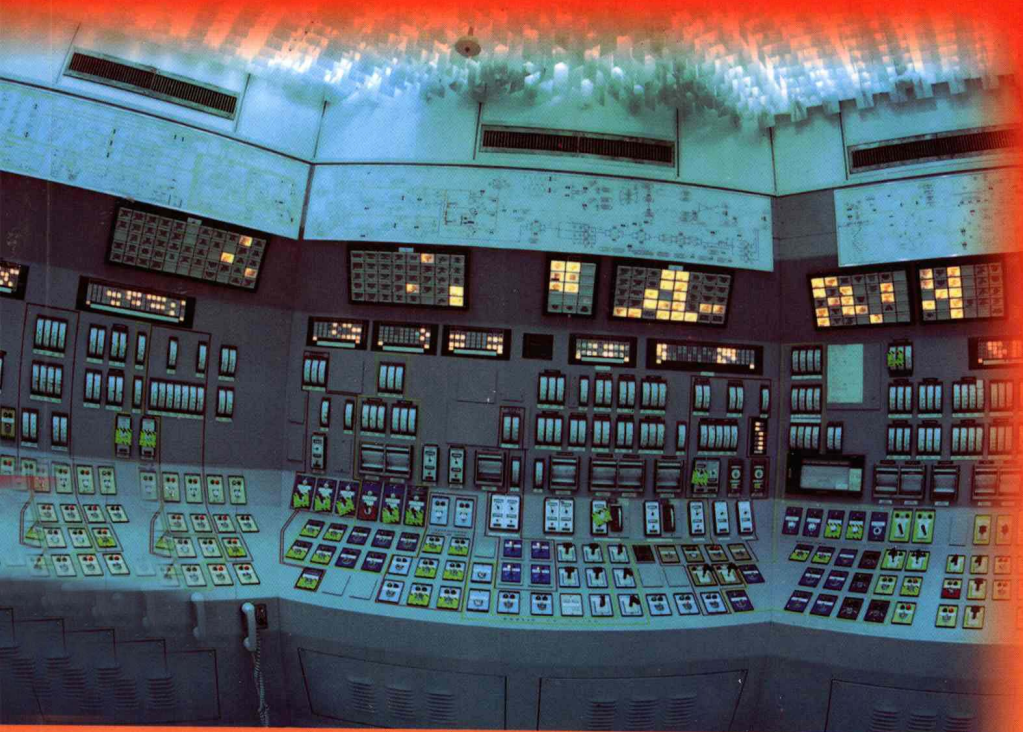


自动控制理论 实验教程

ZIDONG KONGZHI LILUN SHIYAN JIAOCHENG

周昌民 陆世宏 周江扬 编写



上海大学出版社

自动控制理论实验教程

周昌民 陆世宏 周江扬 编写

上海大学出版社

· 上 海 ·

图书在版编目(CIP)数据

自动控制理论实验教程/周昌民,陆世宏,周江扬编.
—上海:上海大学出版社,2004.8
ISBN 7-81058-097-3

I. 自... II. ①周... ②陆... ③周...
III. 自动控制理论—教材 IV. TP13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 074739 号

自动控制理论实验教程

周昌民 陆世宏 周江扬 编写

上海大学出版社出版发行
(上海市上大路 99 号 邮政编码 200436)
(E-mail: sdcbs@citiz.net 发行热线 66135110)
出版人: 姚铁军

*

南京展望文化发展有限公司排版
江苏句容排印厂印刷 各地新华书店经销
开本 787×1092 1/16 印张 9.5 字数 232 千
2004 年 8 月第 1 版 2004 年 8 月第 1 次印刷
印数: 1~2 100
定价: 16.00 元

内容提要

本书主要讲述了有关自动控制原理的模拟仿真、数字仿真和物理仿真实验,并简单介绍了自动控制原理常用仪器。本书介绍的实际物理系统多为上海大学自动化系控制与检测实验中心自行开发、研制的,可供实验应用,亦可参照自制。本书可作为工业院校工业自动化专业的自动控制原理实验教材。

再版说明

本书是根据工业自动化类专业自动控制原理实验教学大纲编写的。可作为工科院校工业自动化类专业的自动控制原理实验教材。

本书主要讲述了有关自动控制原理的模拟仿真、数字仿真和物理仿真实验,并简单介绍了自动控制原理实验常用仪器。书中介绍的实际物理系统多为上海大学自动化系控制与检测实验中心自行开发、研制的,可供实验应用,并可参照自制。

根据自动控制学科发展迅速和实验教育更注重综合性、设计性的发展趋势,结合几年来的教学实践,为进一步提高本书质量,特对本书进行了修订再版。本书的再版修订主要作了如下改动:一、增加了综合性、设计性实验内容,加强了数字仿真实验内容,适度削减了模拟仿真实验内容;二、对书稿的篇幅进行了调整,由原来十章及附录调整为八章及附录,重点改写了第一章、第二章、第五章,对其他章节也都作了相应的修改。

这里特别需要说明的是[陆世宏]、周江扬两位老师虽然由于各种原因未能参加本次再版修订工作,但他们对本书形成作出的巨大贡献是不可磨灭的。在本书修订再版过程中,得到了上海大学自动化系控制与决策教研室李渝曾教授等有关教师的支持和帮助,特此致谢。

作者的学识有限,书中难免疏漏、错误,敬请读者批评指正。

作者

2004年4月

目 录

第一章 概述	1
第一节 自动控制原理实验目的、方法与内容	1
第二节 实验要求	2
第三节 自动控制系统动态特性的测试方法	4
第四节 实验误差及测试数据处理	13
第二章 自动控制系统的模拟计算机仿真	17
第一节 简述	17
第二节 模拟计算机工作原理与组成	17
第三节 模拟计算机仿真的实用意义	21
第四节 典型环节的模拟	22
第五节 非线性特性的模拟	28
第六节 线性自动控制系统的模拟计算机仿真	32
第七节 非线性自动控制系统的模拟计算机仿真	37
第八节 采样控制系统的模拟计算机仿真	39
第三章 模拟计算机仿真实验	41
第一节 线性系统的典型环节特性研究	41
第二节 线性系统的特性研究	43
第三节 非线性系统的特性研究	48
第四节 采样控制系统的特性研究	51
第四章 自动控制系统的数字计算机仿真	54
第一节 简述	54
第二节 数字仿真基本概念	55
第三节 MATLAB 软件简介	56
第四节 经典控制原理实验	60
第五节 现代控制原理实验	85
第五章 小功率位置随动系统实验	94
第一节 简述	94
第二节 随动系统的结构原理	94
第三节 随动系统的主要部件及其传递函数	95
第四节 随动系统性能指标的测定与分析	104
第五节 小功率位置随动系统实验	108
第六章 分立部件单相电阻炉温度控制系统实验	111
第一节 简述	111
第二节 温度控制系统的主要部件	112

第三节	对象特性·····	116
第四节	单回路温度控制系统实验·····	117
第七章	数字温度控制系统实验·····	119
第一节	工作原理·····	119
第二节	硬件电路分析·····	120
第三节	软件设计·····	121
第四节	控制原理及算法实现·····	124
第五节	数字温度控制系统实验·····	126
第八章	数字位置随动系统实验·····	128
第一节	系统的工作原理和组成·····	128
第二节	系统应用程序·····	131
第三节	数字随动系统实验·····	133
附录	自动控制原理实验常用仪器·····	137
附录一	超低频长余辉示波器·····	137
附录二	采样-保持器实验装置 ·····	139
参考文献	·····	142

第一章 概 述

第一节 自动控制原理实验目的、方法与内容

自动控制原理是自动化及其他相关专业的重要专业基础课,该课程是研究自动控制共同规律的技术科学。其特点为理论性强,课堂教学侧重数学推导与图解分析,内容比较抽象;同时,其中相当部分内容实践性又较强,且有一定的实际工程背景,学生学习该课程有一定的难度,所以教学时必须辅以一定量的实验,做到理论联系实际,才能使学生对自动控制系统中的各种典型环节、典型系统的特性、信号响应情况以及控制指标的物理含义分析、设计及系统校正方法等内容有更深入的认识和理解,使得本课程的教学取得较为理想的效果。

一、自动控制原理实验的一般方法

由于技术和经济两方面的原因,自动控制原理实验不可能在实际运行的自动控制系统中进行,因此自动控制原理实验一般是用仿真模拟的方法进行的。所谓仿真,就是为了分析和研究系统的内部运动情况,先建立系统的模型,然后在模型上进行分析和研究的过程。实验教学就是结合理论教学的进程,用具体的物理装置、计算机或计算机软件构造或模拟一个自动控制系统,然后利用仪器仪表或计算机软件对该系统加入不同的给定信号,如阶跃、斜坡、脉冲、正弦波等典型激励信号,在系统的某一环节或输出端利用相应的记录显示仪器(如示波器、函数记录仪、显示器、打印机等),观察和记录系统的输出响应曲线,了解和分析系统的动态稳态特性,选择合适的控制调节方法,或是确定已有的调节控制方法是否合适,不合适则再行修正,同时验证和体会理论教学的内容。仿真模拟的方法按所用仿真模型不同,一般分为两种:物理仿真和数学仿真。

1. 物理仿真(物理模拟)

用缩小了或放大的尺寸制作成与真实物理系统相同的模型进行的实验叫物理仿真(物理模拟)。模型的变量和物理系统完全相同,如用小功率随动系统模拟大功率随动系统(雷达天线系统)。这种方法的优点是较直观、较全面地保持了物理现象,易建立对自动控制系统的感性认识,能加深对自动控制系统的理解;缺点是要想研究不同的对象(物理量)就要用不同的物理模型。这是很不方便的,且代价昂贵。

本书中介绍的实际物理系统实验就属于此类实验。

2. 数学仿真

将实际系统的运动规律用数学方程(一组微分方程或差分方程)来描述,然后再用计算机来求解这些方程的过程叫数学仿真。这种方法的优点是方便灵活,容易实现;缺点是不直观,无物理含义。该仿真方法依据所用计算机的不同而分成几种:模拟计算机仿真、数字计算机仿真、模拟计算机与数字计算机混合仿真。

本书中介绍的模拟、数字仿真实验就属于此类实验。

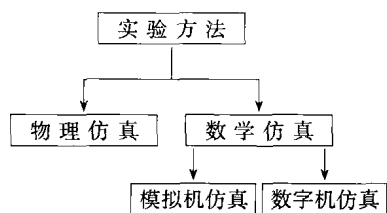


图 1-1

上述实验方法可用图 1-1 表示。

物理仿真和数学仿真是既有区别又有联系的。在控制系统分析和设计过程中，两者经常结合使用。例如，一个实际的自动控制系统分析设计，往往先依据系统的数学模型，在计算机上仿真运行，如可行，再进行物理仿真。在自动控制原理教学实验中，由于控制原理是研究自动控制共同规律的科学，由于数学仿真可以用计算机对物理性质截然不同的许多控制系统进行分析研究，由于物理仿真方法的局限性，所以数学仿真方法一般用得比较多。

二、自动控制原理实验的主要内容

为适应自动化专业自动控制原理教学的要求，本书介绍以下几部分内容：

1. 物理系统仿真

- (1) 被控制量为角度的小功率随动系统，含模拟量控制及数字量控制两类系统；
- (2) 被控制量为热工量的温度控制系统，含模拟量控制及数字量控制两类系统。

2. 模拟(计算机)仿真

- (1) 模拟计算机仿真典型环节及系统的时域特性；
- (2) 模拟计算机仿真控制系统综合、校正的时域特性；
- (3) 模拟计算机仿真带有典型非线性特性环节的非线性系统相图；
- (4) 采样定理及采样系统的实验研究。

3. 数字(计算机)仿真

- (1) 线性连续系统时域特性研究；
- (2) 线性连续系统频率特性(乃氏曲线、波德图)的绘制与分析；
- (3) 线性连续系统根轨迹的绘制与分析；
- (4) 线性连续系统的综合、校正；
- (5) 非线性系统的相平面分析；
- (6) 采样系统的特性研究；
- (7) 控制系统状态的能观、能控的研究。

第二节 实验要求

如何根据实验数据写出一份既简单扼要又有内容的实验报告是实验教学的重要一环，自动控制原理实验教学也不例外。对自动控制原理实验报告撰写有以下几个要求：

一、根据实验指导书提供的实验目的、要求，写出实验预习报告

1. 实验名称
2. 实验目的
3. 实验原理

4. 实验接线图
5. 仪器设备名称、型号
6. 实验内容
7. 预习思考题

二、实验报告

1. 实验数据、曲线
2. 对实验结果进行讨论、分析,并写出结论
3. 实验心得、体会

例:

实验名称: 惯性环节动态特性的研究。

实验目的:

- (1) 掌握用模拟计算机仿真惯性环节的方法;
- (2) 观察、测量惯性环节的阶跃响应;
- (3) 了解参数变化时对惯性环节动态特性的影响;
- (4) 学会有关实验仪器的使用方法。

实验原理:

- (1) 惯性环节的传递函数:

$$\frac{X_o(S)}{X_i(S)} = \frac{K}{TS + 1}$$

- (2) 惯性环节的方框图,如图 1-2 所示;

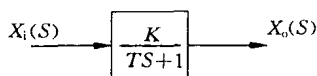


图 1-2

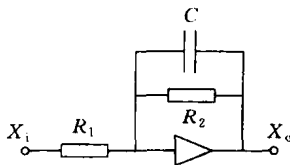


图 1-3

- (3) 模拟电路,如图 1-3 所示;

上式中:

$$K = \frac{R_2}{R_1} \quad T = R_2 C$$

- (4) 理论计算:

$$X_i(t) = E$$

$$X_i(S) = \frac{E}{S}$$

$$X_o(S) = \frac{K}{TS + 1} \cdot \frac{E}{S}$$

$$X_o(t) = KE(1 - e^{-\frac{t}{T}})$$

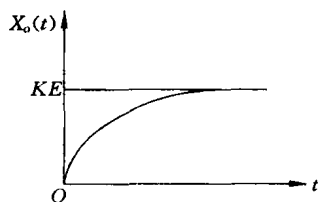


图 1-4

(5) $X_o(t)$ 的理论曲线(见图 1-4)。

实验仪器:

- (1) 控制原理模拟实验装置一台;
- (2) 超低频慢扫描示波器一台;
- (3) 数字万用表一台。

实验接线图:



图 1-5

预习思考题:

- (1) 当 K 和 T 增加或减小时, $X_o(t)$ 曲线有何变化?
- (2) 当 E 变化时, 对本环节动态特性有无影响?

实验内容:

- (1) 按模拟电路及实验接线图(见图 1-5)接好实验线路;
- (2) 当 $X_i(t)$ 、 K 、 T 取不同值时, 观察并记录惯性环节的输出曲线。

$X_i(V)$	K	$T(s)$
5	1	0.5
5	1	1
1	5	0.5
1	5	1

实验结果讨论:

- (1) 定量分析惯性环节的阶跃响应特性, 并且与理论计算进行比较, 分析误差原因;
- (2) 根据思考题写出实验体会。

第三节 自动控制系统动态特性的测试方法

自动控制原理实验包括自动控制系统的稳态特性实验和动态特性实验两个部分。由于控制系统(或环节)的稳态特性测试相对说来较为简单, 而且一般在动态特性实验时亦可得到所需的稳态结果, 因此控制原理实验主要介绍系统动态特性实验。动态特性的测试方法若依所施加的输入信号来划分, 主要有时域法、频域法和统计法。

一、自动控制系统动态特性测试的时域法

1. 动态特性的性能指标

控制系统的动态特性是指在典型输入作用下, 系统输出的时间响应特性。由自动控制

原理知道,系统的动态特性是由组成系统的结构参数决定的。当系统在稳定条件下工作,系统的动态特性通常以系统对单位阶跃输入信号的响应特性来衡量。为使不同系统有统一的衡量动态特性的标准,在时域法中提出如下测试指标:

(1) 最大超调量 $\sigma\%$: 指系统输出最大值与系统输出稳态值之差的百分比,即

$$\sigma\% = \frac{y(t_p) - y(\infty)}{y(\infty)} \times 100\% \quad (1-1)$$

式中: $y(t_p)$ ——系统输出最大值;

$y(\infty)$ ——系统输出稳态值。

(2) 峰值时间 t_p : 响应曲线达到第一峰值时的时间。

(3) 上升时间 t_r :

a. 响应曲线从稳态值的 10%~90% 的时间(用于无振荡系统);

b. 响应曲线由零值上升到第一次稳态值的时间(用于有振荡系统)。

(4) 过渡过程时间(调节时间) t_s : 响应曲线第一次进入稳态值的 $\pm 5\%$ (或 $\pm 2\%$) 区域并维持在此区域内的时间。

(5) 延迟时间 t_d : 响应曲线从零值达到稳态值的 50% 时所需的时间。

(6) 振荡次数 μ : 在 t_s 时间内响应曲线穿越稳态值 $y(\infty)$ 次数的 1/2。

对于恒值控制系统,扰动是主要的输入量,所以常用单位阶跃扰动作为输入信号。以系统对此信号的响应来衡量系统的动态特性。

2. 系统阶跃响应曲线测试

在被测系统输入端加一阶跃信号后,系统输出端的响应曲线称为系统的阶跃响应曲线。

测试原理如图 1-6 所示。

设: 被测系统初始值 $u_c(0) = 0$ 。

输入系统的阶跃信号 $u_r(t)$ 在 $+E$ 信号源上获取,经开关 K 加于被测系统输入端。被测系统输出端接到 X-Y 函数记录仪,实时记录系统输出 $u_c(t)$ 随时间增长而变化的曲线。

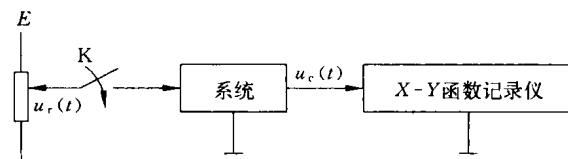


图 1-6

当开关 K 合上和打开时, $u_c(t)$ 曲线如图 1-7 所示。

测试时要注意:

(1) u_r 幅度大小的选择要考虑被测系统输出 u_c 波动幅度的允许范围。 u_r 幅度过大会使系统动态特性的非线性因素增大,甚至影响被测系统的正常运行。幅度过小会使曲线 u_c 不清楚,给分析系统带来困难和增加误差;

(2) 开关 K 在闭合和打开之前,应使系统有较长时间的稳定运行,且开关闭合、打开两种情况要重复几次,至少要得到两条基本相同的响应曲线,以消除偶然性因素的影响;

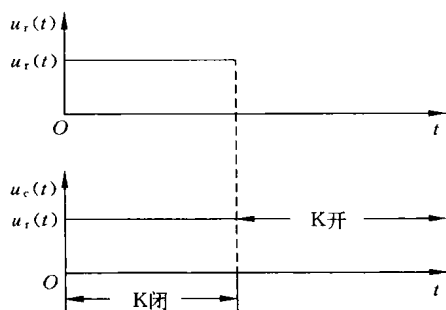


图 1-7

(3) $X-Y$ 函数记录仪的 X 轴坐标(时间)及 Y 轴坐标(系统输出幅值)比例的选取要恰当,以使得系统响应曲线能充分清楚地显示出各部分的特征,且便于定量计算。

3. 系统动态特性参数计算

下面介绍如何从实验曲线求取系统(环节)的动态特性参数。

(1) 一阶惯性环节参数的求取: 在一阶惯性环节的输入端加入阶跃信号 $Eu(t)$ 时(其中 E 为输入幅值)其响应曲线为 $y(t)$, 如图 1-8 所示。

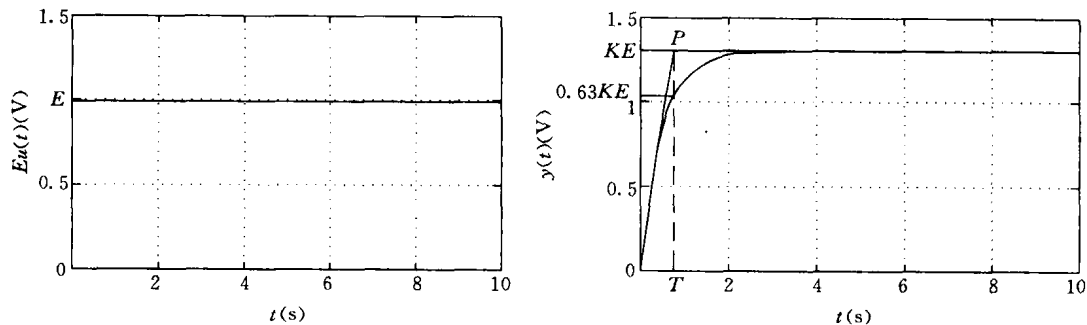


图 1-8

由曲线知: 曲线呈指数形状, 起点斜率最大, 随后逐步减小, 最后到达稳态值 $y(\infty) = KE$ 。

曲线 $y(t)$ 表达式如下:

$$y(t) = KE(1 - e^{-\frac{t}{T}}) \quad (1-2)$$

其传递函数为

$$W(S) = \frac{K}{TS + 1} \quad (1-3)$$

对于一阶惯性系统主要是确定静态放大倍数 K , 时间常数 T 。

1) 静态放大倍数:

$$K = \frac{y(\infty) - y(0)}{E} \quad (1-4)$$

$$y(0) = 0$$

所以

$$K = \frac{y(\infty)}{E} \quad (1-5)$$

2) 时间常数 T :

a. 切线法: 过坐标原点(曲线起点)作切线 OP 与 $y(\infty)$ 直线交于点 P , 再过点 P 作时间轴 t 的垂直线 PT , 则 T 就是时间常数。

b. 比例法:

$$y(t) = KE(1 - e^{-\frac{t}{T}})$$

当

$$t_1 = \frac{T}{2} \quad y\left(\frac{T}{2}\right) = 0.39KE$$

$$t_2 = T \quad y(T) = 0.632KE$$

$$t_3 = 2T \quad y(2T) = 0.87KE$$

则可先在曲线处作时间轴 t 的垂线 PT , 则 PT 与 t 轴交点 T 的数值就是时间常数 $T = t_2$ 。

(2) 积分环节参数的求取: 若环节的阶跃响应曲线的变化速度保持不变(见图 1-9), 则该环节的阶跃响应函数如式(1-6)所示, 传递函数如式(1-7)所示:

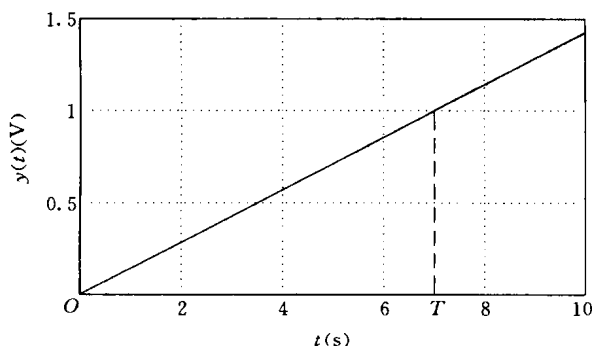


图 1-9

$$y(t) = \frac{t}{T} \quad (1-6)$$

$$W(S) = \frac{1}{TS} \quad (1-7)$$

对于积分环节要确定时间常数 T , T 代表了积分增长的快慢。当 $t = T$ 时, 环节的输出值等于输入值, 所以 T 值可用下式确定:

$$T = \frac{\Delta y(t)}{\tan \theta} \quad (1-8)$$

(3) 二阶振荡环节(系统)参数的求取: 若二阶振荡环节(系统)的阶跃响应曲线是以 $\omega_n \sqrt{1-\zeta^2}$ 的角频率作衰减振荡的曲线(见图 1-10), 则该环节(系统)的阶跃响应函数式为:

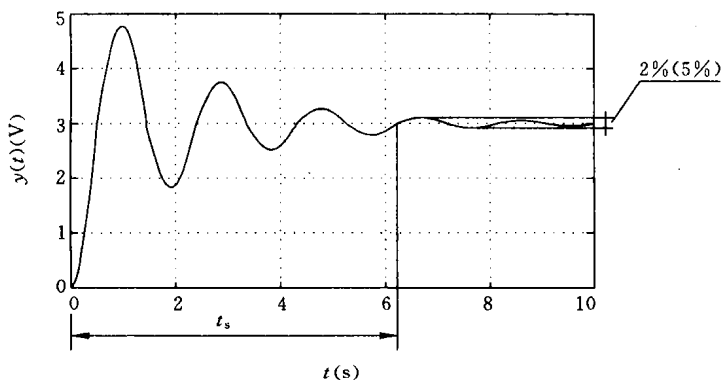


图 1-10

$$y(t) = E \left[1 - \frac{e^{-\zeta \omega_n t}}{\sqrt{1-\zeta^2}} \sin \left(\omega_d t + \arctan \frac{\sqrt{1-\zeta^2}}{\zeta} \right) \right] \quad (1-9)$$

式中： ζ ——阻尼比($0 < \zeta < 1$)；

$\omega_d = \omega_n \sqrt{1-\zeta^2}$ ——有阻尼振荡角频率；

ω_n ——无阻尼振荡角频率。

其传递函数为

$$W(S) = \frac{\omega_n^2}{S^2 + 2\zeta\omega_n S + \omega_n^2} \quad (1-10)$$

在传递函数中要确定无阻尼自然振荡频率 ω_n ，阻尼比 ζ 。

1) 阻尼比 ζ 的求取：由自动控制原理知最大超调量，即

$$M = e^{-\frac{\pi\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}}} \quad (1-11)$$

所以

$$\zeta = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{\pi}{\ln M}\right)^2 + 1}} \quad (1-12)$$

因此在图 1-10 响应曲线上，测得超调量 M 值后，即可按式(1-12)计算阻尼比 ζ 值了。

2) 无阻尼自然振荡频率 ω_n 的求取：由自动控制原理可知二阶系统的过渡过程时间

$$\begin{aligned} t_s &= \frac{3}{\zeta\omega_n} (5\%) \quad 0 < \zeta < 0.9 \\ t_s &= \frac{4}{\zeta\omega_n} (2\%) \quad 0 < \zeta < 0.9 \end{aligned} \quad (1-13)$$

当在图 1-10 响应曲线上测得 S_t 后，把 S_t 及由式(1-12)确定的 ζ 值代入式(1-13)即可求得 ω_n 值。

二、自动控制系统动态特性测试的频域法

令传递函数 $W(S) = \frac{Y(S)}{X(S)}$ 中的自变量 $S = j\omega$ ，

则有

$$W(j\omega) = \frac{Y(j\omega)}{X(j\omega)} \quad (1-14)$$

$W(j\omega)$ 称为频率特性函数。

对于线性系统，当输入为 $x(t) = A \sin(\omega t)$ 时，则系统稳态输出为 $y(t) = R \sin(\omega t + \phi)$ ，所以有

$$W(j\omega) = \frac{y(t)}{x(t)} = \frac{R \sin(\omega t + \phi)}{A \sin(\omega t)} \quad (1-15)$$

$$\text{或 } W(j\omega) = M(\omega) e^{j\phi(\omega)} \quad (1-16)$$

式中: $M(\omega)$ ——系统输出与输入间的幅值比(幅频特性);

$\phi(\omega)$ ——系统输出与输入间的相位差(相频特性)。

$W(j\omega)$ 又可表示为

$$W(j\omega) = P(\omega) + jQ(\omega) \quad (1-17)$$

式中: $P(\omega)$ ——实频特性;

$Q(\omega)$ ——虚频特性。

下面介绍两种直接记录法测试频率特性:

1. 李沙育图形法

测试原理如图 1-11 所示。根据频率特性表达式可知,当输入信号频率变化时,被测系统输出量和输入量的幅值比 M 、相位差 ϕ 都在变化。用毫伏表测得输出电压和输入电压,两者之比就是幅值比 $M(\omega)$ 。

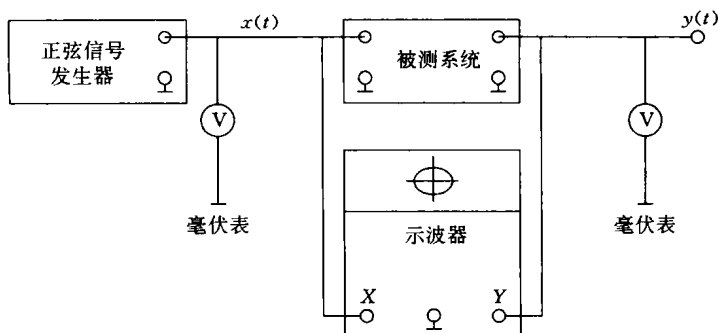


图 1-11

系统输出、输入间的相位差可用李沙育图形法测量。

当在示波器的 X、Y 输入端分别加入正弦波电压,则示波器荧光屏上显示出的波形为两正交的简谐运动的合成运动光点的轨迹。此图形称为李沙育图形。

形成椭圆的原理如图 1-12 所示。

设输入示波器 Y 端的信号 u_y 比输入示波器 X 端的信号 u_x 超前 $1/8$ 周期。并设 u_x 的初相为零,即 $\phi_2 = 0$ 。因此当 u_x 为零时, u_y 为一较大值,如图 1-12 中 O' 点。随着时间的变化, u_x 上升 u_y 也上升,则示波器荧光屏上的光点向右上方移动。经过 $1/8$ 周期后, u_x 、 u_y 分别达到 1 点,此时 u_x 为一较大值, u_y 为最大值。当 u_x 、 u_y 继续变化时,示波器荧光屏上的光点将描绘出一个顺时针旋转的椭圆。如果 u_y 滞后于 u_x ,则示波器荧光屏上的光点所描绘的椭圆将为逆时针方向。由上面分析可知,椭圆的形状是随两个正弦信号 u_x 、 u_y 的相位差不同而不同的。因此可根据椭圆的形状求出两个正弦信号的相位差 $\Delta\phi$ 。

在图 1-12 中设 A 是椭圆与轴交点的纵坐标, B 是椭圆上各点纵坐标的最大值。由图可见, A 是对应于 $t = 0$ 时的 u_y 瞬时电压,即 $A = u_{my} \sin \phi_1$; B 是对应于 u_y 的幅值,即 $B = u_{my}$ 。于是

$$\frac{A}{B} = \frac{u_{my} \sin \phi_1}{u_{my}} = \sin \phi_1 \quad (1-18)$$

前面假设 $\phi_2 = 0$,所以 $\Delta\phi = \phi_1 - \phi_2 = \phi_1$,

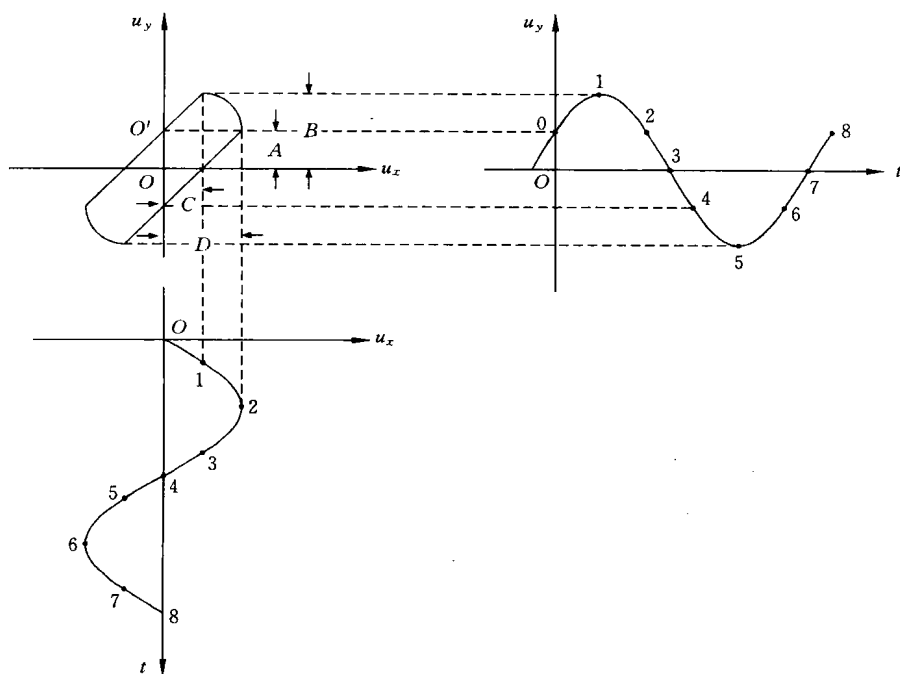


图 1-12

由此得

$$\Delta\phi = \phi_1 = \sin^{-1} \frac{A}{B} \quad (1-19)$$

同理,相位差也可用

$$\Delta\phi = \phi_1 = \sin^{-1} \frac{C}{D} \quad (1-20)$$

表示。

图 1-13 各图形分别表示两个正弦信号电压在不同相位差时的情况。如果椭圆主轴在 I、III 象限内,则相位差在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 或 $270^\circ \sim 360^\circ$ 之间,如果主轴在 II、IV 象限内,则相位差在 $90^\circ \sim 180^\circ$ 或 $180^\circ \sim 270^\circ$ 之间。

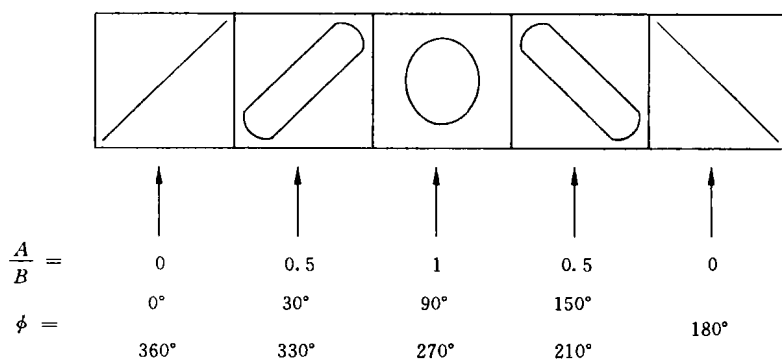


图 1-13