



21 世纪高等院校电气信息类系列教材

Electrical Information •
Science and Technology

自动控制理论基础 实验指导与习题解答

主编 李昌春



附赠电子教案

<http://www.cmpedu.com>



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

013067981

TP13-42
29

21 世纪高等院校电气信息类系列教材

自动控制理论基础实验指导 与习题解答

主编 李昌春

参编 左为恒 孙 韬

主审 周 林



北航

C1674033

机械工业出版社

TP13-42

29

180730810

“自动控制理论”是高等学校电气、自动化类专业的一门重要专业技术基础课程，本书为左为恒、周林主编的《自动控制理论基础》一书配套使用的实验指导与习题解答。全书共分为三篇：第一篇编写了6个物理仿真实验，在由运算放大器组成的模拟机上进行。通过常用设备在模拟机上的实际操作，加深理论知识的理解，培养学生动脑、动手的能力，使学生通过示波器显示的图线感受控制单元（系统）实时信号的变化。第二篇编写了6个MATLAB语言仿真实验，通过计算机上机实验，进一步加深对自动控制理论知识的理解。第三篇是各章教学要求、主要内容及习题解答。

本书可作为自动控制原理系列课程任课教师的教学参考书，也可作为本、专科学生及成人教育、继续教育学生学习自动控制原理的辅导教材。

图书在版编目（CIP）数据

自动控制理论基础实验指导与习题解答/李昌春主编. —北京：机械工业出版社，2013.6

21世纪高等院校电气信息类系列教材

ISBN 978-7-111-42851-0

I. ①自… II. ①李… III. ①自动控制理论—高等学校—教学参考资料 IV. ①TP13

中国版本图书馆CIP数据核字（2013）第125416号

机械工业出版社（北京市百万庄大街22号 邮政编码100037）

策划编辑：时 静 责任编辑：时 静

版式设计：霍永明 责任校对：王 欣

责任印制：乔 宇

北京机工印刷厂印刷（三河市南杨庄国丰装订厂装订）

2013年8月第1版第1次印刷

184mm×260mm·12.5印张·303千字

0 001—3 000册

标准书号：ISBN 978-7-111-42851-0

定价：29.00元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心：(010)88361066 教材网：<http://www.cmpedu.com>

销售一部：(010)68326294 机工官网：<http://www.cmpbook.com>

销售二部：(010)88379649 机工官博：<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线：(010)88379203 封面无防伪标均为盗版

出版说明

随着科学技术的不断进步，整个国家自动化水平和信息化水平的长足发展，社会对电气信息类人才的需求日益迫切、要求也更加严格。在教育部颁布的“普通高等学校本科专业目录”中，电气信息类（Electrical and Information Science and Technology）包括电气工程及其自动化、自动化、电子信息工程、通信工程、计算机科学与技术、电子科学与技术、生物医学工程等子专业。这些子专业的人才培养对社会需求、经济发展都有着非常重要的意义。

在电气信息类专业及学科迅速发展的同时，也给高等教育工作带来了许多新课题和新任务。在此情况下，只有将新知识、新技术、新领域逐渐融合到教学、实践环节中去，才能培养出优秀的科技人才。为了配合高等院校教学的需要，机械工业出版社组织了这套“21世纪高等院校电气信息类系列教材”。

本套教材是在对电气信息类专业教育情况和教材情况调研与分析的基础上组织编写的，期间，与高等院校相关课程的主讲教师进行了广泛的交流和探讨，旨在构建体系完善、内容全面新颖、适合教学的专业教材。

本套教材涵盖多层面专业课程，定位准确，注重理论与实践、教学与教辅的结合，在语言描述上力求准确、清晰，适合各高等院校电气信息类专业学生使用。

机械工业出版社

前 言

为了将新知识、新技术、新领域逐渐融合到教学、实践环节中去,培养出优秀的科技人才,机械工业出版社曾组织编写了“21世纪高等院校电气信息类系列教材”,其中由左为恒、周林主编的《自动控制理论基础》是该系列教材之一。该教材2007年出版后,已被多所高等院校电气信息类专业选用,效果良好。但是还没有与之配套使用的实验指导与习题解答辅助教材,基于这种情况,我们编写了这本《自动控制理论基础实验指导与习题解答》,以完善和丰富系列教材,也便于学生实验及自主学习。本书内容共分三篇:

第一篇 自动控制理论物理仿真实验。本篇共设计了6个实验,这部分实验是在运算放大器组成的模拟机上连接各种典型系统,在输入信号作用下熟悉和验证系统的各项性能指标,锻炼学生的动脑、动手及综合分析能力。

第二篇 自动控制理论 MATLAB 语言仿真实验。本篇介绍了 MATLAB 语言下的 Simulink 软件包及控制系统常用的函数命令,共设计了6个实验。通过计算机上机快速、准确的仿真结果,加深了对理论知识的理解。

第三篇 各章教学要求、主要内容及习题解答。本篇可与已出版的《自动控制理论基础》教材配套使用,编写了各章的教学要求、主要内容及习题解答,便于学生自主学习。

本书的第一篇内容由左为恒编写,第二篇内容由孙韬编写,第三篇内容由李昌春编写并负责全书的统稿和修改。重庆大学周林教授审阅了本书,并提出了许多宝贵的修改意见,在此我们表示诚挚的谢意。

由于编者水平有限,书中难免有错误和不妥之处,恳请同行专家和广大读者批评指正。

编 者

目 录

出版说明		第 2 章 控制系统的数学模型	57
前言		一、教学要求	57
第一篇 自动控制理论物理仿真实验	1	二、主要内容	57
一、物理仿真实验设备介绍	2	三、习题解答	60
二、实验内容	5	第 3 章 时域分析法	73
实验一 几种基本典型环节及其在模拟机上的实现方法	5	一、教学要求	73
实验二 二阶系统的阶跃响应时域分析	7	二、主要内容	73
实验三 线性系统频率特性测试综合实验	9	三、习题解答	81
实验四 控制系统稳定性分析	12	第 4 章 根轨迹法	90
实验五 控制系统的串联校正	14	一、教学要求	90
实验六 三种非线性环节的电模拟方法及其输入—输出特性	16	二、主要内容	90
第二篇 自动控制理论 MATLAB 语言仿真实验	19	三、习题解答	94
一、MATLAB 语言简介	20	第 5 章 频率特性法	107
二、上机实验内容	39	一、教学要求	107
实验一 用 Simulink 工具建立控制系统模型	39	二、主要内容	107
实验二 用控制系统工具箱建立数学模型及时域分析	42	三、习题解答	116
实验三 线性系统的复频域分析	43	第 6 章 控制系统的校正	129
实验四 线性系统基于频域分析的串联校正	45	一、教学要求	129
实验五 用 Simulink 工具对典型非线性环节的仿真	47	二、主要内容	129
实验六 线性系统的状态空间分析	48	三、习题解答	137
第三篇 各章教学要求、主要内容及习题解答	51	第 7 章 非线性系统	148
第 1 章 自动控制理论及 MATLAB 简介	52	一、教学要求	148
一、教学要求	52	二、主要内容	148
二、主要内容	52	三、习题解答	150
三、习题解答	54	第 8 章 现代控制理论基础	157
		一、教学要求	157
		二、主要内容	157
		三、习题解答	162
		第 9 章 采样控制系统	179
		一、教学要求	179
		二、主要内容	179
		三、习题解答	184
		参考文献	191

第一篇

自动控制理论物理 仿真实验

图 1 YB30250 型任意波发生器

2. DCS-2 型微机

微机是实验的主机，各模块均通过总线与微机相连。微机通过总线与各模块相连，实现数据的传输。微机通过总线与各模块相连，实现数据的传输。微机通过总线与各模块相连，实现数据的传输。

实验时使用的微机如下：

- (1) 在微机中安装任意波发生器，通过总线与各模块相连，实现数据的传输。
- (2) 在微机中安装任意波发生器，通过总线与各模块相连，实现数据的传输。

一、物理仿真实验设备介绍

1. 任意波形发生器

YB32020 型任意波形发生器如图 1 所示，它采用直接数字合成(DDS)技术，产生稳定、精确和低失真的输出信号。仪器前面板上共有 34 个按键，分 5 类：功能键，菜单选项键，数字输入键，方向键和 CHA、CHB(A 路、B 路)信号输出控制开关。通过对它们的使用，可以进入不同的功能菜单或直接获得特定的功能应用。实验三中使用的正弦波信号，可由该发生器获得：打开电源，按下正弦波(Sine)功能键，波形窗口显示正弦波信号，设置频率/周期、幅度、偏移、相位等参数，可以输出 $1\mu\text{Hz} \sim 20\text{MHz}$ 不同参数值的正弦波信号。

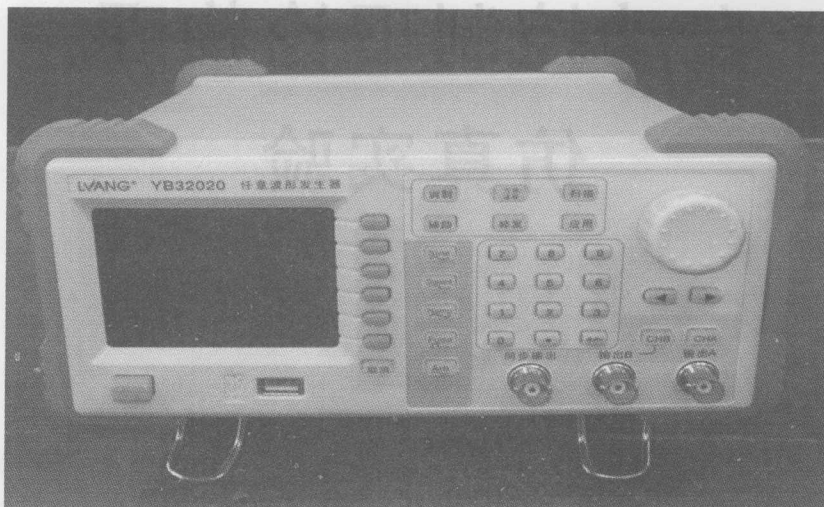


图 1 YB32020 型任意波形发生器

2. DCS-2 型模拟机

模拟机是实验的主体设备。该设备的核心部分是线性运算放大器，如图 2 所示，可模拟五阶系统。该机内部元器件之间的联系已直接在面板上画出，各放大器之间的连接以及放大器单元中阻容元件的连接可由外接线，通过面板上的插孔完成，设备使用方便直观。

实验时使用步骤及注意事项如下：

1) 在对模拟机通电前，检查模拟机上外接线是否正确，确保各运算放大器的输入、输出信号外接线没有对地短路，以防烧毁模拟机运算放大器或供电直流稳压电源。

2) 实验进行前必须先对各运算放大器调零以消除零点漂移对实验精度的影响。方法是按实验一中的比例环节把各运算放大器都接成 $K=1$ 的反相器，实验中不用的运算放大器可不调零，但须全部接成比例器。将万用表拨到直流电压最低档，两表笔分别插入运算放大器输出端和模拟机地线。旋动运算放大器对应的“调零”电位器，直到万用表上指示数值的绝对值为最小(应小于 100mV)。

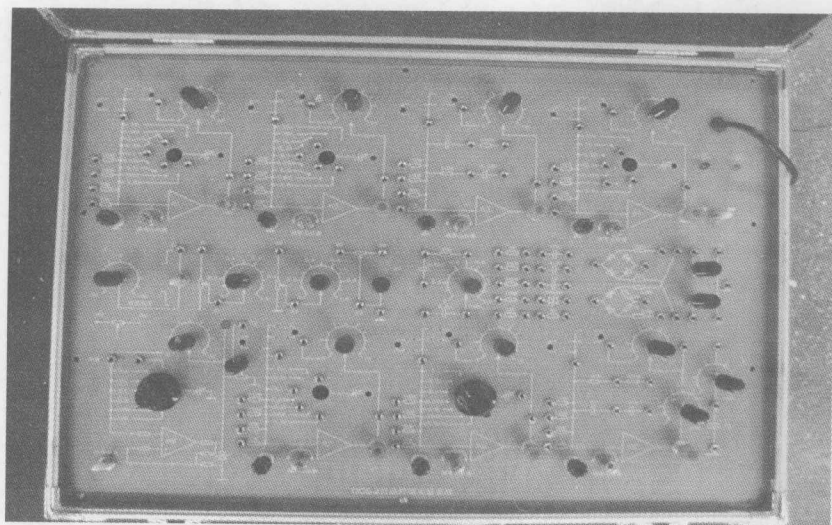


图2 DCS-2 型模拟机系统

测试和调整运算放大器反馈通路上的电位器阻值时,应在关机状态下断开反馈通路进行。

在模拟机上有一个由线性电位器构成的常系数比例器,比例系数 α 的取值范围为 $0 \sim 1.0$ 。

3) 运算放大器的饱和输出值约为 $\pm 13V$ (稳压电源的稳压值为 $\pm 15V$),对于线性系统的各个实验,运算放大器都只能在其线性段工作而不得进入饱和区,否则将直接影响实验效果。

4) 模拟机上的所有拨动开关,向下拨是“断开”,向上拨是“闭合”。本次实验中不用的开关,一律拨在“断开”位置。

3. 双踪示波器

使用有两路输入的双踪示波器对自动控制原理进行模拟实验观察最为直观。通过双踪示波器对被测系统的给定和响应进行比较,从而确定被测系统的性能。为了便于观测系统的动态响应曲线,又多使用长余晖慢扫描双踪示波器。

图3为YB43020D型示波器,它具有 $0 \sim 20MHz$ 的频带宽度,垂直灵敏度为 $2mV/div \sim 10V/div$,扫描系统采用全频带触发式自动扫描电路,长余晖慢扫描功能最慢扫描时间可达 $10s/div$ 。

若被测系统接线使输出 $c(t)$ 和输入 $r(t)$ 正、负极性相反,为了便于比较系统输出信号 $c(t)$ 响应与系统的给定 $r(t)$,使用示波器时应按下 CH_2 探头的倒相键,这样看到的 $c(t)$ 和 $r(t)$ 曲线就在示波器屏幕时基线的同一侧。若使用没有倒相功能的示波器,就应在系统输出 $c(t)$ 的后面再通过一个由运算放大器组成的倒相器接示波器探头,在做实验和完成实验报告中的波形图时都应注明波形是否被反相。

在本书中的各实验接线图中,若无特别说明,都以双踪示波器的 CH_2 探头接系统输出 $c(t)$, CH_1 探头接系统输入 $r(t)$ 。若实验中需要将系统给定 $r(t)$ 和响应 $c(t)$ 作比较,就必须要求示波器两探头 CH_1 和 CH_2 灵敏度相同,即对同一阶跃信号,两扫描线应跳跃同样高度,若两扫描线高度不同,需调整示波器上的灵敏度粗调和细调旋钮。不做这一步工作就直接比较系统的给定 $r(t)$ 和响应 $c(t)$ 的值是毫无意义的。

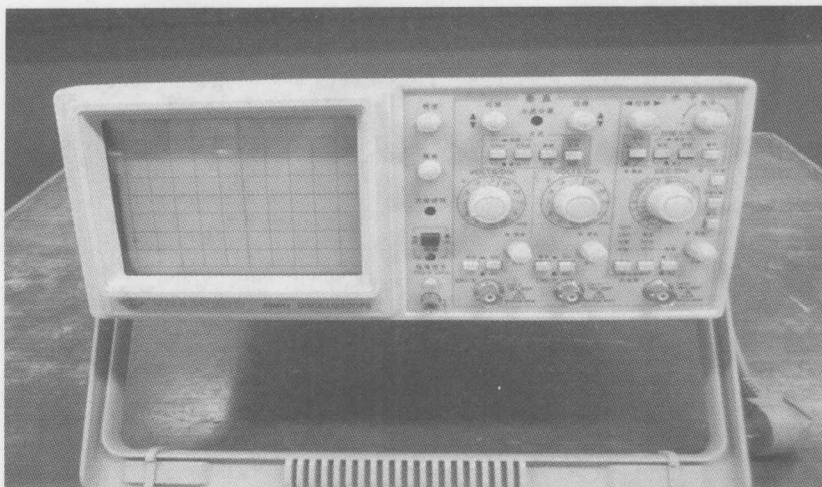


图3 YB43020D 型示波器

实验中经常采用示波器慢扫描功能进行时间测量，则应将“扫描时间”旋钮旋到合适的位置。例如要测量系统的单位阶跃响应的过渡过程时间，可由示波器光点每格水平秒时间(s/div)计算出来。

在做实验三的过程中用示波器测试系统频率特性时，应将“SEC/DIV”开关旋转至“X-Y”位置，调整位移旋钮可看到示波器屏幕上出现一光点，若从原来的 CH_1 探头输入信号，光点只做横向运动，若从 CH_2 探头输入信号，光点只做纵向运动。若从 CH_1 和 CH_2 两探头同时输入信号，根据运动叠加的方法，可看到光点在示波器屏幕上描出相应的图形。李沙育图形频率测试原理就是基于示波器的这一特性来测试的。

双踪示波器两探头 CH_1 和 CH_2 上的地线即探头上的鳄鱼夹，在接上示波器后是连通在一起且与示波器机壳相通的，因此在使用双踪示波器时，只需用两鳄鱼夹中的任一个接在被测系统的基准电压点上就可以了。通常，以系统的地线作为基准电压点。

必须注意的是：两鳄鱼夹绝对不允许接在被测系统的不等电位点上，否则将通过两鳄鱼夹引起很大的短路电流，导致烧毁被测系统和示波器的严重后果。

二、实验内容

实验一 几种基本典型环节及其在模拟机上的实现方法

1. 实验目的

- 1) 了解实验原理, 掌握比例、积分、惯性三种基本典型环节的电路图及其参数计算方法。
- 2) 熟悉模拟计算机和双踪示波器的使用方法。
- 3) 当已知系统传递函数 $G(s)$ 或 $\Phi(s)$ 时, 能正确画出系统电路图, 并在模拟机上正确接线。

2. 实验原理和意义

1) 实验原理: 如图 4a 所示, 从运算放大器反相端输入信号, 其传递函数为 $G(s) = C(s)/R(s) = -Z_2/Z_1$, 这里 Z_2 和 Z_1 分别指反馈支路和输入支路的阻抗。根据这一原理可实现对各种典型环节的电模拟。图 4b 是图 4a 的简化电路, 下面实验要做的各种典型环节均从运算放大器的反相端输入信号。

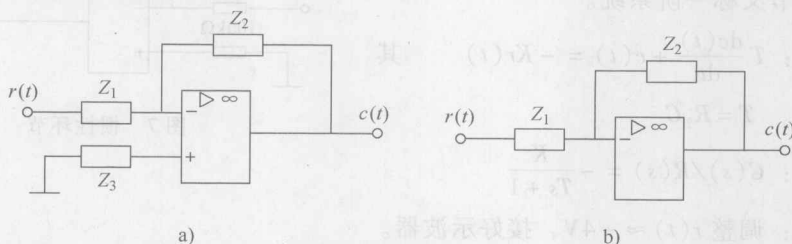


图 4 运算放大器电路

2) 实验意义: 若已知系统 $G(s)$ 或 $\Phi(s)$, 就可以用比例、积分、惯性三种基本典型环节在模拟机上实现各种线性系统, 这是用模拟机进行自动控制原理实验的基础。

3. 实验设备

DCS-2 型模拟计算机、双踪示波器、万用表、小螺钉旋具各一件, 连接导线若干。

4. 实验内容及步骤

(1) 比例环节

比例环节电路图如图 5 所示。

环节微分方程: $c(t) = -Kr(t)$

传递函数: $C(s)/R(s) = -K$ 其中 $K = R_2/R_1$

实验步骤: 闭合模拟机上电源开关和阶跃开关, 调整阶跃电位器使 $U_{E1} \approx -2V$ 。断开这两个开关, 将模拟机上的 E_1 接图 5 中的 $r(t)$, 示波器 CH_1 探头接 $r(t)$, CH_2 探头接 $c(t)$, 鳄鱼夹接模拟机地线。万用表两表笔分别接 $c(t)$ 和模拟机上地线。按照 $R_2 = 50k\Omega$ 、 $100k\Omega$ 、 $200k\Omega$ 、 $400k\Omega$ 分别进行实验, 观测示波器波形并记下各次的输出电压值。

(2) 积分环节

积分环节电路图如图 6 所示。

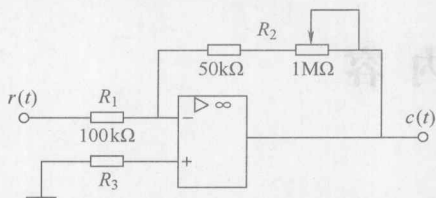


图 5 比例环节

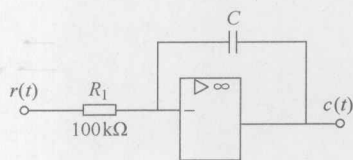


图 6 积分环节

环节微分方程: $T \frac{dc(t)}{dt} = -r(t)$ 其中 $T = R_1 C$

传递函数: $G(s) = C(s)/R(s) = -1/(Ts)$

实验步骤: 调整 $r(t) \approx -0.5V$, 按照比例环节方法接好示波器。在做本环节实验时, 只能用模拟机上的电源开关而不能用阶跃开关。分别用 $C = 0.5\mu F$ 、 $1\mu F$ 进行实验, 观察输出波形和运算放大器的饱和现象, 用示波器测出两次实验中, 从突加给定到运算放大器饱和的时间并作好记录。

(3) 惯性环节

惯性环节电路图如图 7 所示。

惯性环节的实质是由积分环节负反馈闭环构成。惯性环节又称一阶系统。

微分方程: $T \frac{dc(t)}{dt} + c(t) = -Kr(t)$ 其

中 $K = R_2/R_1$ $T = R_2 C$

传递函数: $C(s)/R(s) = -\frac{K}{Ts + 1}$

实验步骤: 调整 $r(t) \approx -4V$, 接好示波器。

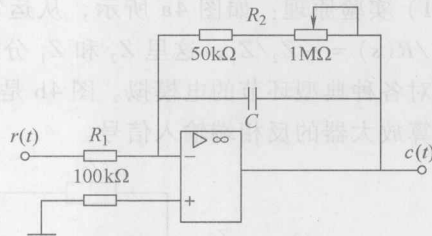


图 7 惯性环节

1) 保持 $R_2 = R_1 = 100k\Omega$ 不变, 分别用 $C = 0.5\mu F$ 、 $1\mu F$ 进行实验, 观察输入、输出波形, 用示波器测试出 t_s 并作好记录。

2) 保持 $T = R_2 C = 0.1s$ 不变, 取 $K = 1, 2$ 重复上述实验 (即当 $R_2 = 100k\Omega$ 时, 取 $C = 1\mu F$, 当 $R_2 = 200k\Omega$ 时, 取 $C = 0.5\mu F$)。

5. 实验报告要求完成以下作业

1) 用时间坐标分别画出比例环节当 $R_2 = 50k\Omega$ 、 $100k\Omega$ 、 $400k\Omega$ 时的 $c(t)$ 波形。

2) 用时间坐标分别画出积分环节当 $C = 0.5\mu F$ 、 $1\mu F$ 时的 $c(t)$ 波形, 并标出运算放大器积分到饱和的时间。

3) 用时间坐标分别画出惯性环节: a) 当 $R_2 = R_1 = 100k\Omega$ 不变, $C = 0.5\mu F$ 、 $1\mu F$ 时的输出 $c(t)$ 波形; b) 当 $T = R_2 C = 0.1s$ 不变, $K = 1, 2$ 时的输出 $c(t)$ 波形。

4) 根据实验结果, 分析惯性环节的 t_s 与 T 、 K 之间的关系。

5) 已知系统传递函数为

$$G(s) = \frac{1}{(0.001s + 1)(0.0001s^2 + 0.01s + 1)}$$

试画出由运算放大器组成的电路图 (规定各运算放大器输入电阻均为 $100k\Omega$)。

实验二 二阶系统的阶跃响应时域分析

1. 实验目的

- 1) 学习二阶系统阶跃响应的测试方法。
- 2) 了解二阶系统参数改变对阶跃响应各项性能指标的影响。

2. 实验电路和实验原理

(1) 实验电路

实验电路如图 8 所示。

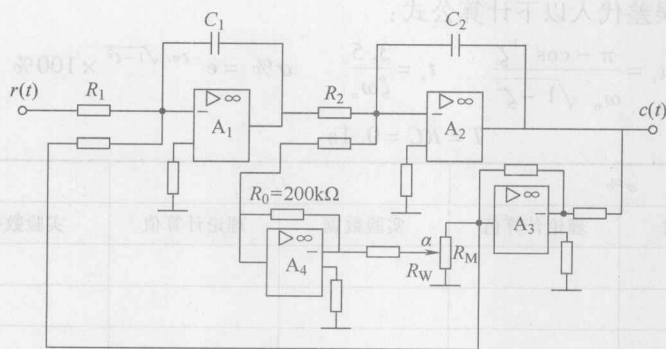


图 8 二阶振荡环节电路

(2) 实验原理

图 8 所示是一个由比例、积分两种典型环节构成的二阶 I 型系统。由 A_2 、 A_3 、 A_4 和线性电位器 RP (其总电阻值为 R_M) 构成一个负反馈内环, 内环实质上相当于一个一阶惯性环节。不难推出, 该系统的开环传递函数为

$$G(s) = \frac{1}{T_1 s (T_2 s + 2\alpha)} \quad \text{其中 } T_1 = R_1 C_1 \quad T_2 = R_2 C_2$$

可看出该系统是一个二阶 I 型系统, 且由此可推得

$$\Phi(s) = \frac{1}{T_1 T_2 s^2 + 2\alpha T_1 s + 1} \quad \text{取 } T_1 = T_2 = T \text{ 时, 可得}$$

$$\Phi(s) = \frac{1/T^2}{s^2 + 2\alpha \frac{1}{T}s + \frac{1}{T^2}} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\alpha\omega_n s + \omega_n^2}$$

把上式与典型二阶闭环传递函数进行比较, 有 $\alpha = \zeta$, 这样就很直观地把该二阶系统的阻尼比 ζ 用模拟机上线性电位器的比例系数 α 表示出来了。

前面已经指出, 模拟机上有一个由线性电位器构成的常数比例器, 比例系数 $\alpha = R_w / R_M$, α 的取值范围为 $0 \sim 1.0$ 。但在这里要特别声明, $\zeta = 0$ 的系统其本质是无能量损耗, 这在理论上存在但实际上却办不到, 因导线均有电阻值, 各种损耗总是存在的。所以在实验中即使取 $\alpha = 0$, 但实际系统的阻尼比 ζ 仍不为零, 即不可能看到二阶系统的等幅无收敛振荡的情况。

3. 实验设备

DCS-2 型模拟计算机、双踪示波器、万用表、小螺钉旋具各一件，连接导线若干。

4. 实验内容及步骤

- 1) 调整阶跃电位器使 $r(t) \approx 4V$ ，并调整示波器使得两探头增益一致。
- 2) 按图 8 接线并经老师检查无误后，接好示波器，取 $C_1 = C_2 = 1\mu F$ ，依次取 $\alpha = 0.2$ 、 0.7 、 1.0 进行实验，记录下对应的 $c(t)$ 曲线， t_r 、 $\sigma\%$ 和 t_s 。
- 3) 改换 $C_1 = C_2 = 0.5\mu F$ ，重复上述实验并作好记录。

5. 实验报告要求完成以下作业

- 1) 把实验记录和理论计算结果填入下表。

取 5% 的稳态误差代入以下计算公式：

$$t_r = \frac{\pi - \cos^{-1} \zeta}{\omega_n \sqrt{1 - \zeta^2}} \quad t_s = \frac{3.5}{\zeta \omega_n} \quad \sigma\% = e^{-\zeta \pi / \sqrt{1 - \zeta^2}} \times 100\%$$

$C = 1\mu F$

$T = RC = 0.1s$

α	$\sigma\%$		t_r		t_s	
	实验数据	理论计算值	实验数据	理论计算值	实验数据	理论计算值
0.2						
0.7						
1.0						

$C = 0.5\mu F$

$T = RC = 0.05s$

α	$\sigma\%$		t_r		t_s	
	实验数据	理论计算值	实验数据	理论计算值	实验数据	理论计算值
0.2						
0.7						
1.0						

- 2) 根据实验结果，分别说明二阶振荡系统的 t_r 、 t_s 、 $\sigma\%$ 与 T 和 ζ 之间的关系。

- 3) 根据实验结果，你认为二阶振荡系统的阻尼比 ζ 为多少时，其动态指标最好？（从 $\sigma\%$ 和 t_s 综合考虑，取 5% 的稳态误差带）

- 4) 该二阶系统的阶跃响应存在稳态误差吗？为什么？

- 5) 在时间坐标系中分别画出 $C_1 = C_2 = 1\mu F$ 和 $C_1 = C_2 = 0.5\mu F$ 时，当 $\zeta = 0.2$ 、 0.7 、 1 时的二阶系统的阶跃响应 $c(t)$ 曲线（坐标时间横轴刻度间隔取 100ms）。

实验三 线性系统频率特性测试综合实验

1. 实验目的

- 1) 掌握系统频率特性的测试原理和方法。
- 2) 将实验和理论的开环幅相曲线对比, 验证用李沙育图形法测试系统频率特性的精度。

2. 实验意义和原理

(1) 实验意义

频率响应法是利用系统的开环频率特性研究系统闭环性能的方法。对于未知内部结构或难以建立其数学模型的线性系统, 可考虑采用实验方法建立数学模型, 用频率响应实验法可描出被测系统的对数幅、相曲线, 从而近似地确定该系统的传递函数 $G(s)$ 或 $\Phi(s)$ 。

(2) 实验原理

当开环线性系统输入一个正弦波信号时, 其稳态输出是一个与输入信号同频率的正弦波信号。但其幅值和相位随输入信号频率的改变而变化。通常系统的传递函数中分母较分子的阶次高, 因此随着输入信号频率的升高, 输出响应的幅值降低, 相角滞后。记录下对应于不同输入信号频率系统输出的幅值和相位, 采用描点的方法, 就可以近似画出该系统的开环对数幅、相曲线, 从而确定系统闭环后的各项性能指标。

实验原理是借助双踪示波器用李沙育图形求幅频特性。当示波器屏幕上出现的是一个(且只有一个)封闭图形时, 说明系统输出和输入信号的频率是相同的。

测试原理框图如图 9 所示。李沙育图形原理如图 10 所示。

滞后角: (滞后图形为逆时针方向, 以输入频率的大小进行旋转)

$$0 \sim 90^\circ: -\arcsin \frac{2Y_0}{2Y_M}$$

$$90^\circ \sim 180^\circ: -(\pi - \arcsin \frac{2Y_0}{2Y_M})$$

$$180^\circ \sim 270^\circ: -(\pi + \arcsin \frac{2Y_0}{2Y_M})$$

当 $2Y_0$ 与 $2Y_M$ 相等时, 图形为一正椭圆, 此时滞后角为 -90° ;

当 $2Y_0 = 0$ 时, 图形为一合并的斜线, 滞后角为 -180° 。

在实验中对随频率逐渐增大得到的幅频特性和相频特性进行描点, 可绘出该被测系统的 Bode 图, 进而得出频率特性表达式。(注: 实验中以频率 f 为横轴)

3. 实验设备

正弦波低频信号发生器、DCS-2 型模拟计算机、双踪示波器、万用表、小螺钉旋具各一件, 连接导线若干。

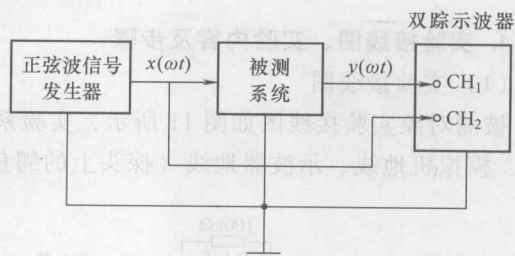


图 9 频率特性测试原理框图

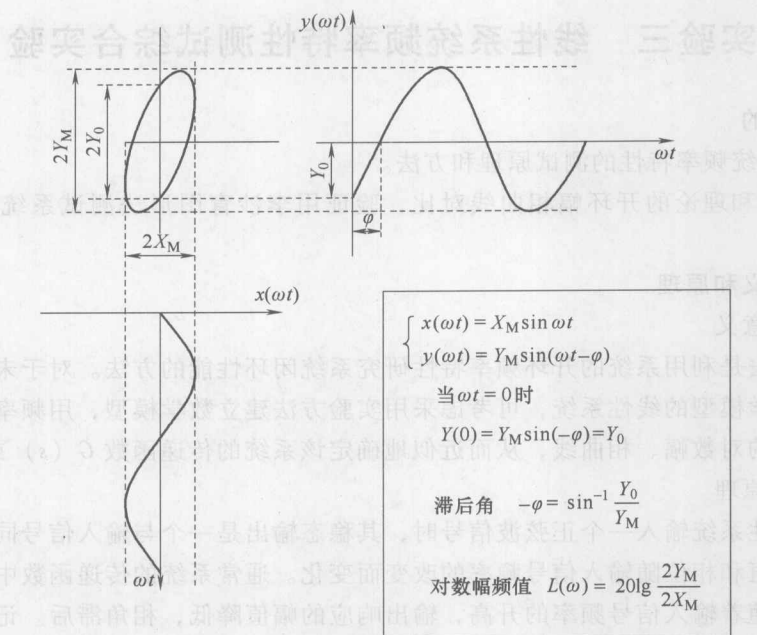


图 10 李沙育图形

4. 实验接线图、实验内容及步骤

(1) 实验接线图

被测对象实验接线图如图 11 所示，实验系统按图 9 接线。信号发生器地线（黑色接线柱）、模拟机地线、示波器地线（探头上的鳄鱼夹）应接在一起。

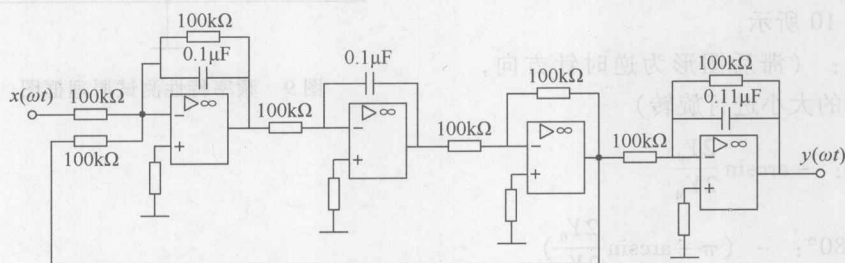


图 11 被测对象接线图

(2) 实验内容及步骤

将示波器上的“SEC/DIV”开关逆时针旋至“X-Y”位置，调整光点到屏幕正中心。

由于系统开环增益 $K=1$ ，且当输入频率很低时， $2Y_M$ 与 $2X_M$ 几乎相等。因此让信号发生器输出最低频率时，在被测系统不出现饱和（输出正弦波形不被削顶）的条件下，调整信号发生器的输出幅度到最大。

按实验报告书中的表格内容依次进行测试并将实验结果填入表中，“信号频率”两空格处要求分别找出相角 φ 滞后 90° 和 180° 时对应的频率并填入表中。

5. 实验报告要求完成以下作业

1) 将实验测试数据及计算数据填入下表

信号频率 /Hz	1	2	5	10	20	25	30	35	45	55	60	80	100	150	200
对应角频 率 ω															
$2X_M$															
$2Y_M$															
$2Y_0$															
$20lg$ $\frac{2Y_M}{2X_M}$															
图形															
相角 φ				-90°					-180°						

2) 用描点法在下面的半对数坐标 (见图 12) 上面画出实验的对数幅频、相频曲线。根据被测对象接线图 11, 推导出被测对象的传递函数, 再用理论折线法画出系统的对数幅频、相频曲线 (用不同色笔画), 比较两者的异同。你认为用李沙育图形法测试系统的频率特性精度如何?

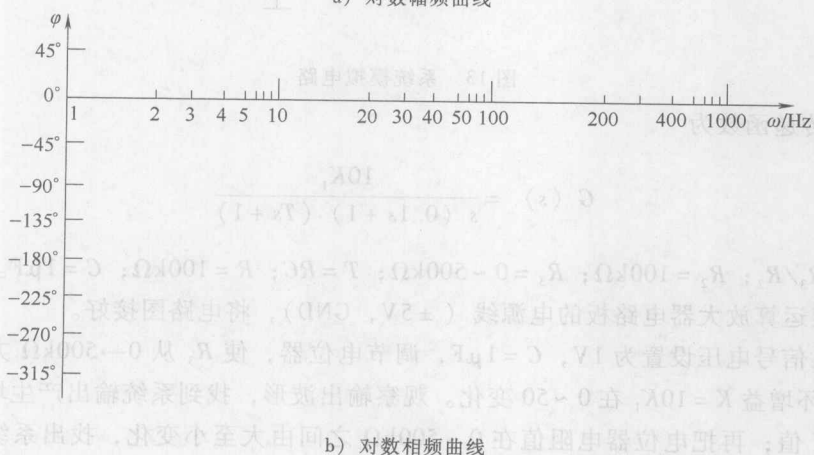
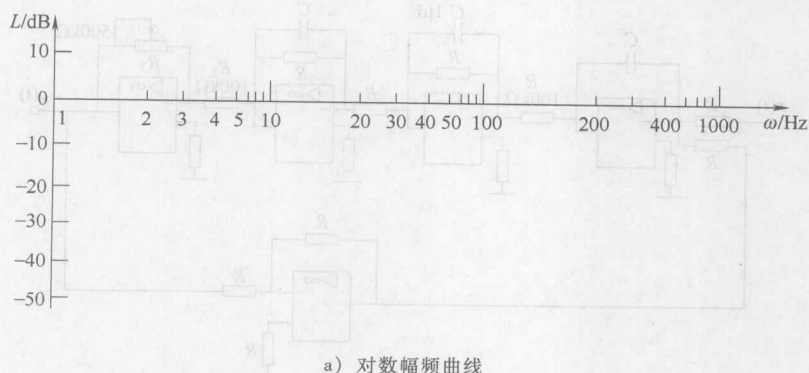


图 12 绘制幅频、相频特性曲线

3) 根据理论推导的传递函数, 理论计算系统滞后 -90° 和 -180° 时的频率值, 并将理论计算结果与实验结果进行比较, 解释误差的原因。