

高等院校自动控制类专业实验教材

生物医学工程专业实验

主编 韩建兵

国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

本书为高等院校自动控制类生物医学工程专业实验教材。书中包括了自动控制原理实验、微机原理实验、临床检验仪器学实验、生理生化学实验、工程光学实验、生物医学传感器与测量实验、医学仪器学实验、基础医学实验等生物医学工程专业必修和选修课程实验内容。各实验包括实验目的、实验仪器(设备)、实验内容、实验步骤、实验报告要求等。另外每章都介绍了与实验内容对应的实验仪器(设备)的使用方法。

本书的特点是:本着实际实用的原则,实验内容精简,理论与实践结合紧密,注重学生的实践操作与动手能力。

本书可作为高等院校生物医学工程专业实验教学教材,也可作为本专业工程技术人员参考用书。

书中加*内容为选做内容。

图书在版编目(CIP)数据

生物医学工程专业实验/韩建兵主编. —北京:国防工业出版社,2007.8

高等院校自动控制类专业实验教材

ISBN 978-7-118-05269-5

I. 生... II. 韩... III. 生物医学工程-实验-高等学校-教材 IV. R318-33

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第126917号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路23号 邮政编码100044)

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 8 1/4 字数 193 千字

2007年8月第1版第1次印刷 印数 1—3000册 定价 14.00元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

前 言

实验教学是高等院校教学中的重要环节,它既是学生学习基本知识的主要手段,又是深入理解基础理论课程和专业课程中抽象概念的主要方法,更是培养学生观察问题、分析问题和解决问题能力、动手能力、创新能力的重要途径。对培养学生理论联系实际学风、实事求是的科学态度和探究问题的科学方法都有着重要的意义。

为了适应新时期生物医学工程专业对实验教学的要求,加强实验教学环节,我们根据生物医学工程专业本科培养计划,实验教学大纲要求,结合多年的实验教学经验,将生物医学工程专业大部分课程所做实验内容编写成册,以方便教师的实验教学和学生的实验学习。全书共8章,可作为高等院校生物医学工程专业实验教学教材,也可作为本专业工程技术人员的参考用书。

本书的参编人员均具有多年的实验教学经验,在编写过程中我们力求做到实验内容与课本内容紧密联系,注重学生实践操作与动手能力的培养,编入大量的综合型、设计型实验,理论与实践结合,内容精炼实用。

本书由河北科技大学韩建兵主编,孔瓦玲、王军等编写。其中第1章由王军执笔,第2章由韩建兵执笔,第3章由黄公发执笔,第4、5、6、8章由孔瓦玲执笔,第7章由王春梅执笔,附录由付占稳执笔。本教材的出版受益于河北科技大学电气信息学院实验中心多年从事实验教学工作教师的经验积累与成果启示,特别得到了河北科技大学电气信息学院吴学礼院长热情鼓励 and 大力支持,在此表示诚挚的感谢。由于作者水平有限,书中难免有缺点和不当之处,敬请读者批评指正。

编 者

2007年7月

第1章 自动控制原理实验

第1节 概述及设备介绍

一、概述

自动控制原理作为电气自动化类专业的主干专业课程在教学中占有重要地位,同时该课程具有很强的实践性,其教学实验内容和教学实验设备作为这一课程的重要环节直接影响着教学和实验的效果。因此,在实验前首先对实验平台 XMN-2 型自动控制原理学习机进行介绍。

XMN-2 型自动控制原理学习机是专为《自动控制原理》课程而设计的电子模拟设备。它在积分器和加法器的基础上,配置了其他的一些电子器件,可以组成控制系统的各个环节,如:各种调节器、多阶调节对象等线性环节以及饱和、死区、迟滞等非线性环节,并且它可以与计算机中的 CAE98 接口卡连接,完善它的显示功能。

该学习机的主要特点是:①专为电气自动化类专业设计,整机结构合理,单元电路设置符合控制原理实验要求,参数改变灵活,排题方便。②选用进口的高精度运算放大器 OP07,它具有高增益,输入失调电压、失调电流较一般产品小等特点,由它组成的加法器、积分器的“调零”和“积分漂移”较小。③操作面板上设置了“复位”键,能方便地消除积分环节电容上的残余电荷,从而提高了本机重复运算的精度和重复工作的快速性。④自带双向双量程电压表,测量、调整方便。⑤具有计算机接口,可方便连接计算机,组成数字/模拟实验系统。

该学习机的主要技术性能:输入电源电压为 AC220V($1 \pm 10\%$),输出电压为 $\pm 15\text{V}$ 、额定输出电流为 400mA、电压调整率(ΔU)为 25mV、输出阻抗为 $\leq 1\Omega$ 。

二、XMN-2 型自动控制原理学习机的结构和使用方法

XMN-2 型自动控制原理学习机由以下几个部分组成:电源部分、模拟运算单元部分、CAE98 接口部分、幅度调节部分(阶跃信号)、测量显示部分。

(一)电源

学习机对外有专用的插头直接接 220V 的交流电压给学习机供电。学习机内部有变压器及集成稳压电路将 220V 的交流电转变成学习机可以使用的 $\pm 15\text{V}$ 的直流电压。这样,当接通电源开关,操作面板的左侧相应的插孔即有 $\pm 15\text{V}$ 的电压值,对应的 LED 指示灯亮。本机的 $\pm 15\text{V}$ 的稳压电压只供本机使用,不能提供其他使用。

(二)模拟运算单元

学习机的模拟运算单元有 8 个运算放大器和 1 个反向器,这 8 个运算放大器在反馈回路和输入回路提供了一些外接插孔,可连接配置外接的电阻、电容来组成所需要的各种运算单元,并且可以调节运算单元的各种参数,每个运算放大器的接线安排有所不同,其中运算放大

器“①”“②”方便实现加法器、惯性环节等,运算放大器“③”“④”方便实现积分器、惯性环节,运算放大器“⑤”“⑥”方便实现其他外接较多的电路,运算放大器“⑦”“⑧”方便实现 PID 调节器的功能。同时在运算放大器的同相端,除了接了固定的电阻外也安排了一对“外接”插口,供使用者调整补偿电阻,进一步减少漂移而引起的输出误差。

在学习机的面板中间部分,提供了一些无源的电阻、电容和一些二极管等非线性环节,可以供所有的 8 个运算放大器来使用,也可以用于组成饱和、死区和迟滞回路等非线性回路。这里的无源是相对 8 个运算放大器里所配置的电阻、电容而言的,因为配置的电阻、电容都是部分接入了电路,所以,这些配置的电阻、电容只能在它所在的运算放大器回路中使用,不能用于其他的运算放大器回路。

在面板 OP9 单元的右侧,有一个复位的按钮,其作用是给各个运算放大器回路中的电容放电。当每个运算放大器回路进行第二次运算前,按“复位”键,使每个积分器反馈回路中的电容都放电。需要注意的是,若反馈回路中只有电容,则放电很快就可以完成。若反馈回路中,既有电阻又有电容,则放电就较慢,需要按住按钮一段时间,直到运算放大器回路的输出为零,才完成放电。

(三)幅度调节部分(阶跃信号)

该部分有 3 种功能:①调节信号的幅值,我们在实验中,信号源信号常需要在这里进行信号幅值的调节。方法是将电源的 $\pm 15V$ 信号源的信号接入该部分的输入,开关 K1 拨在上面(这样,电位器就可调了),该部分的输出,通过调节电位器就可以得到我们所需要的信号幅值。②如果“输入”插口外接超低频信号发生器,则可做控制系统的频率特性实验。③本机还备有“输入”插口,可以与外加信号源配合使用。如果系统输入扰动信号为阶跃信号,则需要将“输入”插口接入 $+15V$ 电源端,拨动 K1,可以得到 $0V \sim 15V$ 的正、负阶跃信号。同理,“输入”插口也可以接入 $-15V$ 电源端。

(四)测量显示部分

在面板的右下方有一个电压表,它的上方有测量选择,这两部分结合使用,可以显示运算放大器的输出。当测量选择中的 K3 拨向右方时,电压表上所指示的电压值为拨码盘上数码所选定的运算放大器的输出电压值,同时由插口可供示波器观察响应数码的运算放大器的输出波形。当拨码盘为 0 时,电压表上所指示是幅度调节部分的输出。K3 拨向左边时电压表显示的是在外接端连接的电压值。电压表有两个量程,一般情况下,当电压表的量程为 $\pm 15V$ 时,可以显示各运算放大器的输出。当电压表的量程为 $\pm 1.5V$ 时,用来测量各运算放大器放电时输出是否为零。OP07 运算放大器在调零时,调整数字在毫伏级,因此需用数字电压表才可以精确调零。

(五)注意事项

- (1)熟悉本机的原理和结构,以及面板控制开关、旋钮的作用。
- (2)检查电源电压应符合 $AC220V(1 \pm 10\%)$ 的范围。
- (3)清理面板上的连线,将不用的线拔出,特别是 $\pm 15V$ 插孔不能接地,以防烧坏电源。
- (4)插头为自锁紧式,插头插入后顺时针方向旋转一定角度即可锁紧,拔出时需逆时针方向旋转后方可拔出,严禁拉着导线拔出。
- (5)仪器不使用时应拔去电源线,盖好机箱。

第 2 节 典型线性环节的模拟实验

一、实验目的

- (1) 熟悉 XMN-2 型自动控制原理学习机的结构与组成, 掌握其使用方法。
- (2) 掌握典型环节模拟电路的构成方法, 熟悉各种典型线性环节的阶跃响应曲线。
- (3) 了解参数变化对典型环节动态特性的影响。

二、实验设备

- (1) XMN-2 型机。
- (2) 示波器。
- (3) 万用表。

三、实验内容

本实验是《自动控制原理》课程的原理性、验证性实验。利用运算放大器的基本特性(开环增益高, 输入阻抗大, 输出阻抗小等), 设置不同的反馈网络来模拟各种典型环节, 使学生进一步理解自动控制系统的分析和设计方法。

1. 比例(P)环节

比例环节方块图和电路图如图 1-1 所示。

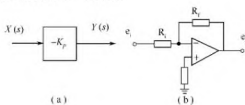


图 1-1 比例环节方块图和电路图
(a) 方块图; (b) 电路图。

在图 1-1(a)中:

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = -K_p \quad (1-1)$$

$$K_p = \frac{R_f}{R_i} \quad (1-2)$$

分别求取以下 3 种情况下的阶跃响应曲线, 并做好记录。

- (1) $R_i = 1\text{M}\Omega$, $R_f = 510\text{k}\Omega$ ($K_p = 0.5$);
- (2) $R_i = 1\text{M}\Omega$, $R_f = 1\text{M}\Omega$ ($K_p = 1$);
- (3) $R_i = 510\text{k}\Omega$, $R_f = 1\text{M}\Omega$ ($K_p = 2$)。

2. 积分环节

积分环节方块图和电路图如图 1-2 所示。

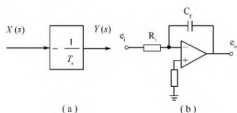


图 1-2 积分环节方块图和电路图

(a)方块图; (b)电路图。

在图 1-2(a)中:

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = -\frac{1}{T_i} \quad (1-3)$$

$$T_i = R_i C_f \quad (1-4)$$

分别求取以下 3 种情况下的阶跃响应曲线,并做好记录。

(1) $R_i = 1\text{M}\Omega$, $C_f = 1\mu\text{F}$ ($T_i = 1\text{s}$);

(2) $R_i = 1\text{M}\Omega$, $C_f = 4.7\mu\text{F}$ ($T_i = 4.7\text{s}$);

(3) $R_i = 1\text{M}\Omega$, $C_f = 10\mu\text{F}$ ($T_i = 10\text{s}$)。

3. 比例积分环节

比例积分环节方块图和电路图如图 1-3 所示。

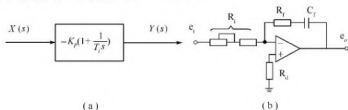


图 1-3 比例积分环节方块图和电路图

(a)方块图; (b)电路图。

在图 1-3(a)中:

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = -K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right) \quad (1-5)$$

$$K_p = \frac{R_f}{R_i} \quad (1-6)$$

$$T_i = R_i \times C_f \quad (1-7)$$

分别求取以下 3 种情况下的阶跃响应曲线,并做好记录。

(1) $R_i = R_f = 1\text{M}\Omega$, $C_f = 4.7\mu\text{F}$ ($K_p = 1$, $T_i = 4.7\text{s}$);

(2) $R_i = R_f = 1\text{M}\Omega$, $C_f = 10\mu\text{F}$ ($K_p = 1$, $T_i = 10\text{s}$);

(3) $R_i = 2\text{M}\Omega$, $R_f = 1\text{M}\Omega$, $C_f = 4.7\mu\text{F}$ ($K_p = 0.5$, $T_i = 4.7\text{s}$)。

4. 比例微分环节

比例微分环节方块图和电路图如图 1-4 所示。

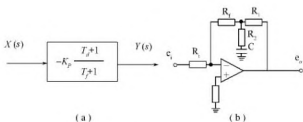


图 1-4 比例微分环节方块图和电路图
(a)方块图; (b)电路图。

在图 1-4(a)中:

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = -K_p \frac{T_d s + 1}{T_f s + 1} \quad (1-8)$$

$$K_p = \frac{R_f + R_1}{R_i} \quad (1-9)$$

$$T_d = \frac{R_1 R_2 + R_1 R_f + R_2 R_f}{R_i} C; T_f = R_2 C \quad (1-10)$$

分别求取以下 3 种情况下的阶跃响应曲线,并做好记录。

(1) $R_i = R_f = R_1 = R_2 = 1\text{M}\Omega$, $C = 2\mu\text{F}$ ($K_p = 2$, $T_d = 3.0\text{s}$);

(2) $R_i = 2\text{M}\Omega$, $R_f = R_1 = R_2 = 1\text{M}\Omega$, $C = 2\mu\text{F}$ ($K_p = 1$, $T_d = 3.0\text{s}$);

(3) $R_i = 2\text{M}\Omega$, $R_f = R_1 = R_2 = 1\text{M}\Omega$, $C = 4.7\mu\text{F}$ ($K_p = 1$, $T_d = 7.05\text{s}$)。

5. 一阶惯性环节

一阶惯性环节方块图和电路图如图 1-5 所示。

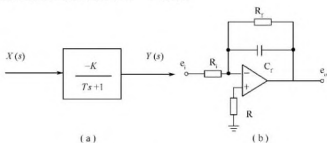


图 1-5 惯性环节方块图和电路图
(a)方块图; (b)电路图。

在图 1-5(a)中:

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{-K}{T_s s + 1} \quad (1-11)$$

$$K_p = \frac{R_f}{R_i} \quad (1-12)$$

$$T_i = R_f C_f \quad (1-13)$$

分别求取以下 3 种情况下的阶跃响应曲线,并做好记录。

(1) $R_i = R_f = 1\text{M}\Omega$, $C_f = 1\mu\text{F}$ ($K = 1$, $T_i = 1\text{s}$);

- (2) $R_i = R_f = 1\text{M}\Omega$, $C_f = 4.7\mu\text{F}$ ($K = 1$, $T_i = 4.7\text{s}$);
 (3) $R_i = 510\text{k}\Omega$, $R_f = 1\text{M}\Omega$, $C_f = 4.7\mu\text{F}$ ($K = 2$, $T_i = 4.7\text{s}$).

6. 比例积分微分环节

比例积分微分环节方块图和电路图如图 1-6 所示。

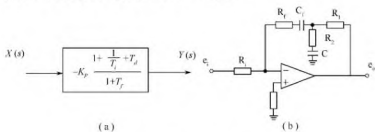


图 1-6 PID 方块图和电路图

(a) 方块图; (b) 电路图。

在图 1-6(a)中:

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = -K_p \frac{1 + \frac{1}{T_i} + T_d}{1 + T_f} \quad (1-14)$$

$$K_p = \frac{R_f + R_1}{R_i} + \frac{R_1 + R_2}{R_i} \cdot \frac{C}{C_f} \quad (1-15)$$

$$T_i = (R_f + R_1)C_f + (R_1 + R_2)C \quad (1-16)$$

$$T_d = \frac{(R_1 R_2 + R_1 R_f + R_2 R_f)C_f C}{(R_f + R_1)C_f + (R_1 + R_2)C} \quad (1-17)$$

$$T_i = R_i C_f \quad (1-18)$$

分别求取 $R_i = 4\text{M}\Omega$, $R_f = R_1 = R_2 = 1\text{M}\Omega$, $C_i = C = 4.7\mu\text{F}$ ($K_p = 1$, $T_d = 18.8\text{s}$), $T_i = 3.525\text{s}$ 时的阶跃响应曲线。

四、实验步骤与准备

如图 1-7 所示是阶跃信号源电路图。

1. 实验准备

阶跃信号源电路可采用图 1-7 所示电路: 调节电位器使输出电压为 1V。将 XMN-2 型自控原理学习机上信号源(OUT)端用导线连至幅度调节单元的输入端, 由输出端输出信号。

2. 实验步骤

(1) 按图 1-1(b) 连线, 搭接电路, 按实验要求分别选择不同参数进行搭接。

(2) 将模拟电路输入端(e_i)与图 1-7 的输出端相连接; 模拟电路输出端(e_o)接示波器的测试笔, 观测被测环节的阶跃响应曲线并记录。

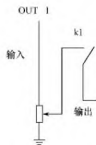


图 1-7 阶跃信号源电路图

(3) 分别按图 1-3(b)、图 1-4(b)、图 1-5(b)、图 1-6(b) 电路接线, 模拟电路输出端 (e_o) 接示波器的测试笔。观测积分、比例积分、惯性环节、比例微分和比例积分微分环节的阶跃响应曲线并记录。

五、实验报告的要求及注意事项

- (1) 写出实验环节的传递函数、网络构成及参数, 画出响应曲线并分析。
- (2) 讨论 P、I、T 这 3 个环节参数调整对其响应曲线的影响。

注意: 操作开关不可同时按下, 排题改线时, 要关闭电源, 切勿接错电路, 通电前要认真检查。

六、思考题

- (1) 在何种条件下, 一阶惯性环节可近似为积分或比例环节。
- (2) 如何设置必要条件, 使比例微分环节, 比例积分微分环节的的参数计算工作得以简化。

第 3 节 二阶系统的阶跃响应实验

一、实验目的

- (1) 学习二阶系统阶跃响应曲线的实验测试方法。
- (2) 研究二阶系统的两个重要参数 ζ 、 ω_n 对阶跃瞬态指标的影响。
- (3) 观测不同参数下二阶系统的阶跃响应并测出性能指标: 上升时间、超调量、峰值时间、调节时间、稳态误差。

二、实验设备

- (1) XMN-2 型机。
- (2) 示波器。
- (3) 万用表。

三、实验原理与电路

如图 1-8 所示是典型二阶系统原理方块图。

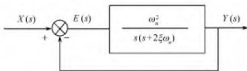


图 1-8 典型二阶系统原理方块图

其闭环传递函数:

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (1-19)$$

式中 ω_n ——无阻尼自然频率, $\omega_n = \frac{1}{T}$;

ζ ——阻尼比;

T ——时间常数。

应用模拟电路来模拟典型二阶系统

运算放大器运算功能:

OP1——积分器($-1/Ts, T = RC$);

OP2——积分器($-1/Ts, T = RC$);

OP9——反相器(-1);

OP6——反相比例器($-K, K = R_f/R_i$)。

$$\omega_n = \frac{1}{RC} = \frac{1}{T} \text{ (rad/s)} \quad (1-20)$$

$$\xi = \frac{K}{2} = \frac{1}{2} \times \frac{R_f}{R_i} \quad (1-21)$$

四、实验内容与步骤

(1)按图 1-9 接线并检查电路各环节是否正确,检查无误后,接通电源。

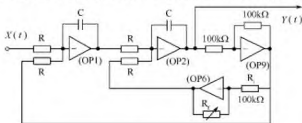


图 1-9 模拟电路图

(2)调整 XMN-2 型自控原理学习机上信号源输出使之为 1V。将信号源(OUT)端用导线连到 $X(t)$ 。

(3)调整 $R_f = 40K$, 使 $K = 0.4$ ($\zeta = 0.2$); 取 $R = 1M\Omega$, $C = 0.47\mu F$, 使 $T = 0.47s$ ($\omega_n = 1/0.47$), 加入单位阶跃扰动 $X(t) = 1(t)V$, 记录响应曲线 $Y(t)$, 记作 a 。

(4)保持 $\zeta = 0.2$ 不变, 阶跃扰动 $X(t) = 1(t)V$ 不变, 取 $R = 1M\Omega$, $C = 1.47\mu F$, 使 $T = 1.47s$ ($\omega_n = 1/1.47$), 记录响应曲线 $Y(t)$, 记作 b 。

(5)保持 $\zeta = 0.2$ 不变, 阶跃扰动 $X(t) = 1(t)V$ 不变, 取 $R = 1M\Omega$, $C = 1.0\mu F$, 使 $T = 1.0s$ ($\omega_n = 1/1.0$), 记录响应曲线 $Y(t)$, 记作 c 。

(6)保持 $\omega_n = 1/1.0$ 不变, 阶跃扰动 $X(t) = 1(t)V$ 不变, 调整 $R_f = 80K$, 使 $K = 0.8$ ($\zeta = 0.4$), 记录响应曲线 $Y(t)$, 记作 d 。

(7)保持 $\omega_n = 1/1.0$ 不变, 阶跃扰动 $X(t) = 1(t)V$ 不变, 调整 $R_f = 200K$, 使 $K = 2.0$ ($\zeta = 1.0$), 记录响应曲线 $Y(t)$, 记作 e 。

(8)分别标出(3)至(7)步的响应曲线的 $M_p(t_p)$ 、 t_s , 将曲线 a, b, c 进行比较; c, d, e 进行对比; 将 e 中的 $M_p(t_p)$ 、 t_s 与理论值进行比较。

以上内容可用表 1-1 表示。

表 1-1 二阶系统响应曲线统计比较表

响应曲线 $\omega_n = 1/T$	ζ	0.2	0.4	1.0
1/0.47		a		
1/1		c	d	e
1/1.47		b		

五、思考题

- (1) 推导模拟电路的闭环传递函数 $Y(s)/X(s) = ?$ 确定 ω_n 、 ζ 和 R 、 C 、 R_1 、 R_2 的关系。
- (2) 若模拟实验中 $Y(t)$ 的稳态值不等于阶跃输入函数 $X(t)$ 的幅值, 其主要原因可能是什么?

六、实验报告的要求

- (1) 按实验步骤要求记录并分析实验数据和结果。
- (2) 根据实验完成表 1-1(实验数据记录表)并绘制相应曲线。
- (3) 完成实验思考题并写出实验结果分析、体会和建议。

第 4 节 二阶系统的频率响应实验

一、实验目的

- (1) 学习频率特性的实验测试方法。
- (2) 掌握根据频率响应实验结果绘制 Bode 图的方法。
- (3) 根据实验结果所绘制的 Bode 图, 分析二阶系统的主要动态特性(M_p , t_s)。

二、实验设备

- (1) XMN-2 型机。
- (2) LZ3 系列函数记录仪或 CAE98。
- (3) DX 型超低频信号发生器或 CAE98。
- (4) 万用表。

三、实验内容与原理

典型二阶系统方块图如图 1-10 所示。

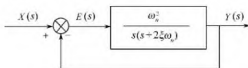


图 1-10 典型二阶系统方块图

ω_n —无阻尼自然频率; ζ —阻尼。

其闭环频率响应为

$$\frac{Y(j\omega)}{X(j\omega)} = \frac{1}{1 + 2\xi j\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right) + \left(j\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2} = \frac{1}{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right] + 2j\xi\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)} \quad (1-22)$$

其中 $\omega_n = \frac{1}{T}$ (rad/s)。

模拟电路图如图 1-11 所示。

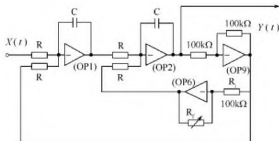


图 1-11 模拟电路图

运算放大器运算功能:

OP1——积分器($-1/Ts, T = RC$);

OP2——积分器($-1/Ts, T = RC$);

OP9——反相器(-1);

OP6——反相比例器($-K, K = R_f/R_i$)。

无阻尼自然频率和阻尼比:

$$\omega_n = \frac{1}{T} = \frac{1}{RC} \quad (1-23)$$

$$\xi = \frac{K}{2} = \frac{1}{2} \times \frac{R_f}{R_i} \quad (1-24)$$

四、实验步骤

(1) 选定 R, C, R_f 值, 使 $\omega_n = 1, \xi = 0.2$ 。

(2) 用 DX 型超低频信号发生器(或 CAE98)的正弦波作为系统的输入信号, 即 $X(t) = X\sin\omega t$, 稳态时其响应为 $Y(t) = Y\sin(\omega t + \Phi)$ 。

(3) 改变输入信号的频率, 使角频率 ω 分别等于(或接近等于) $0.2\text{rad/s}, 0.4\text{rad/s}, 0.6\text{rad/s}, 0.8\text{rad/s}, 0.9\text{rad/s}, 1.0\text{rad/s}, 1.2\text{rad/s}, 1.4\text{rad/s}, 1.6\text{rad/s}, 2.0\text{rad/s}, 3.0\text{rad/s}$ 。稳态时, 记录屏幕显示的正弦输入 $X(t) = X\sin\omega t$ 和正弦输出响应 $Y(t) = Y\sin(\omega t + \Phi)$ 。记录曲线序号依次记作: ①, ②...⑪。

(4) 按下述表格整理实验数据。

(5) 完成实验报告。根据表 1-2 所整理出的实验数据, 在半对数坐标纸上绘制 Bode 图, 标出 M_r, ω_r 。

表 1-2 实验数据记录表

记录曲线序号	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	⑪
$f/(\text{Hz})$											
$\omega/(\text{rad/s})$											
$A(\omega)$											
$L(\omega)(\text{dB})$											
$\phi(\omega)(\text{deg})$											
$T_{90}/(\text{s})$											
$T_{\Sigma}/(\text{s})$											

五、思考题

计算不同 ω 值时的 $L(\omega)$ 和 $\Phi(\omega)$ 理论值, 并与实验结果进行比较。

六、实验报告要求

- (1) 按实验步骤要求对试验数据和结果进行记录并分析。
- (2) 根据频率响应实验结果绘制 Bode 图并完成表 1-2 实验数据记录表。
- (3) 完成实验思考题并写出实验结果分析、体会和建议。

* 第 5 节 线性系统稳定性实验

一、实验目的

- (1) 研究线性系统的开环比例系数 K 对闭环系统稳定性的影响。
- (2) 研究线性系统的时间常数 T 对闭环系统稳定性的影响。

二、实验设备

- (1) XMN-2 型机。
- (2) LZ3 系列函数记录仪或 CAE98。
- (3) 万用表。

三、实验内容与原理

应用模拟电路来模拟典型三阶系统, 图 1-12、图 1-13 所示是典型三阶系统原理方块图和电路图。

在图 1-12 中: 放大倍数 $K_1 = 2$, 放大倍数 $K_2 = \frac{1\text{M}\Omega}{100\text{k}\Omega + W_R}$, 放大倍数 $K_3 = \frac{1\text{M}\Omega}{R_3}$, 系统放大倍数 $K = K_1 K_2 K_3$, $T_1 = 1\text{M}\Omega \times C_{11}$, $T_2 = 1\text{M}\Omega \times C_{22}$, $T_3 = 1\text{M}\Omega \times C_{33}$ 。

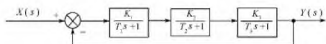


图 1-12 典型系统方块图

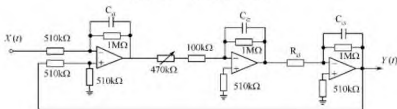


图 1-13 三阶模拟系统电路图

四、实验步骤

(1) 求取给定三阶系统的临界开环比例系数 K_{β} ; 给定三阶系统如图 1-13 所示。

其中 $C_{\beta 1} = C_{\beta 2} = C_{\beta 3} = 0.47 \mu\text{F}$, $R_{\beta 3} = 1\text{M}\Omega$ 。

临界开环比例系数 K_{β} 的求解方法:

① 现将电位器 W_R 置于最大值 (470kΩ)。

② 加入 $x = 0.5\text{V}$ 的阶跃扰动。

③ 调整 W_R 使系统输出 y 呈等幅振荡, 记录此输出 y 。($t = 5\text{s/cm}$, $y = 0.5\text{V/cm}$)

④ 调整 W_R 不变, 断开反馈线, 维持 $x = 0.5\text{V}$ 的扰动, 测取系统输出电压 U_y , 则: $K_{\beta} = U_y/X$ 。

(2) 系统的开环比例系数对稳定性的影响。

对于前面给定的三阶系统:

① 适当调整 W_R , 观察 K 增大, K 减小时的系统响应曲线。

② 记录 $K = 0.5K_{\beta}$ 时的系统响应曲线。($t = 5\text{s/cm}$; $y = 100\text{V/cm}$)

③ 记录 $K = 1.25K_{\beta}$ 时的系统响应曲线。($t = 5\text{s/cm}$; $y = 0.5\text{V/cm}$)

(3) 系统中各时间常数的比例系数 α 对稳定性的影响。

设三阶系统为

$$\frac{K}{(T_1 + 1)(T_2 s + 1)(T_3 s + 1)} \quad (1-25)$$

式中 $K = K_1 K_2 K_3$; $T = 0.47\text{s}$; $T_1 = \frac{T}{\alpha}$; $T_2 = T$; $T_3 = \alpha T$ 。

① 求取该三阶系统在 $\alpha = 2$ 时的临界开环比例系数 K_{β} , 记录此时系统响应曲线。($t = 5\text{s/cm}$, $y = 0.5\text{V/cm}$);

② 记录该系统在 $\alpha = 5$; $K = K_{\beta}$ 时系统响应曲线。($t = 5\text{s/cm}$, $y = 100\text{mV/cm}$);

③ 记录该系统在 $\alpha = 1$; $K = K_{\beta}$ 时系统响应曲线。($t = 5\text{s/cm}$, $y = 0.5\text{V/cm}$);

④ 绘制系统的稳定性能图谱:

对于上述三阶系统, 记 $K_{\beta 1}$, $K_{\beta 2}$, $K_{\beta 3}$, 分别为 $\alpha = 1$, $\alpha = 2$, $\alpha = 5$ 时的临界开环比例系数。以

②、③内容中的曲线为基础, 以表 1-3 所列格式, 绘制该系统的稳定性能图谱。

表 1-3 系统稳定性能图谱

曲线 α	K	K_1	K_2	K_3
		1	①	④
2		②	⑤	⑧
3		③	⑥	⑨

说明:

①曲线①-⑥, $X=0.5V$; 曲线⑦-⑨, $X=0.1V$ 。

②记录仪量程: t 全部取 $5s/cm$; 除曲线中的②, ③, ⑥取 $y=100mV/cm$ 挡外, 其余全部取 $y=0.5V/cm$ 。

③绘制图谱可按①, ②, ③, ⑤, ⑥, ④, ⑨, ⑧, ⑦的顺序进行(⑦可不作)。

④在绘制曲线⑦-⑨前, 要想 $K=K_3$, 需要使 $R_3=200k\Omega$ 。

五、思考题

(1) 计算 3 种三阶系数的临界开环比例系数 K_j 及其呈现等幅振荡的自振荡频率 ω_j , 并将它们与实验结果比较。

(2) 三阶系数的各个时间常数怎样组合, 系统的稳定性最好? 怎样组合时, 稳定性最差?

(3) 根据实验结果, 总结开环比例系数 K 及时间常数 T 影响系统的稳定性的规律。

六、实验报告要求

(1) 按实验步骤要求对实验数据和结果进行记录并分析。

(2) 根据实验数据完成表 1-3 系统稳定性能图谱并绘制在坐标纸上。

(3) 完成实验思考题并写出实验结果分析、体会和建议。

* 第 6 节 控制系统的校正实验

一、实验目的

(1) 研究校正装置对系统动态性能指标的影响。

(2) 学会校正装置的设计和实现方法。

二、实验设备

(1) XMN-2 型机。

(2) LZ3 系列函数记录仪或 CAE98。

(3) 万用表。

三、实验内容与原理

控制系统方块图如图 1-14 所示。

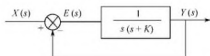


图 1-14 控制系统方块图

其开环传递函数:

$$G(s) = \frac{1}{s(s+K)} \quad (1-26)$$

控制系统模拟电路图:

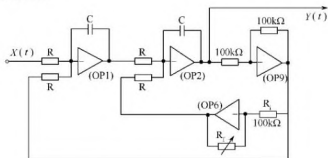


图 1-15 控制系统模拟电路

运算放大器运算功能:

OP1——积分器($-1/Ts, T = RC$);

OP2——积分器($-1/Ts, T = RC$);

OP9——反相器(-1);

OP6——反比例器($-K, K = R_1/R_2$).

在该系统中加入超前校正装置,使系统的相位裕量 $\geq 50^\circ$, 增益裕量 $\geq 10\text{dB}$, 同时保持静态速度误差系数不变。

超前校正装置的传递函数为

$$G_c(s) = K_c \frac{Ts + 1}{\alpha Ts + 1} \quad (0 < \alpha < 1) \quad (1-27)$$

超前校正装置参考模拟电路如图 1-16 所示。

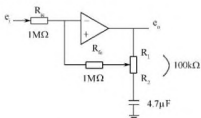


图 1-16 超前校正装置模拟电路

其传递函数:

$$G_c(s) = -K_c \frac{Ts + 1}{\alpha Ts + 1} \quad (1-28)$$