

信号与系统

实验指导手册

上海宝徕科技发展有限公司

2014 年 4 月

目录

实验一 函数信号发生器

实验二 信号通过线性系统

实验三 线性系统瞬态响应及系统冲激响应的测量

实验四 模拟系统基本运算单元电路实现

实验五 连续时间系统的模拟

实验六 信号的合成与分解

实验七 T 型网络频率特性

实验八 无源、有源滤波器特性测试（低通、高通部分）

实验九 无源、有源滤波器特性测试（带通、带阻部分）

实验十 二阶网络状态轨迹的显示

实验十一 采样定理

软件实验

实验十二 滤波器设计（低通、高通部分）

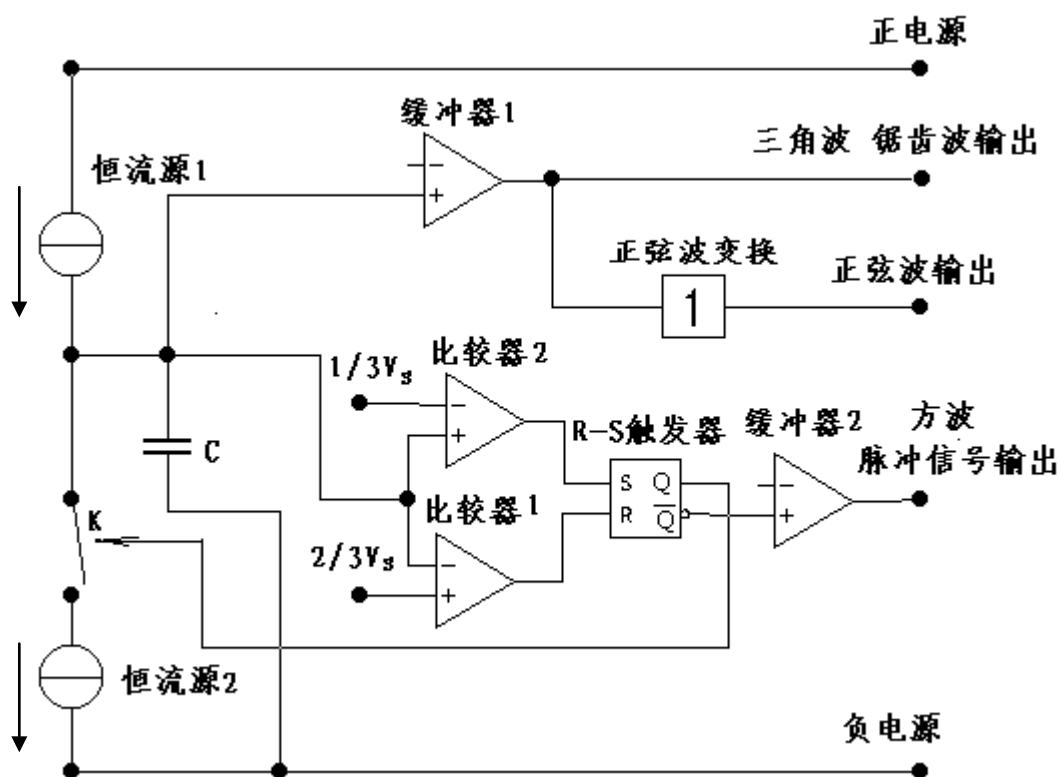
实验十三 滤波器设计（带通、带阻部分）

实验十四 信号的合成与分解(EDA 仿真)

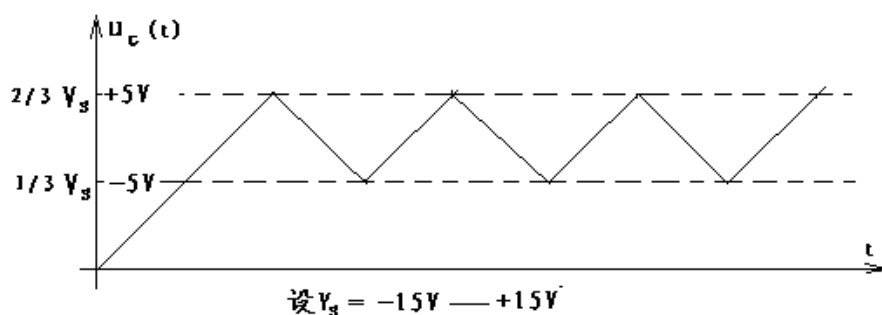
实验一 函数信号发生器

一. 实验目的

1. 制作一个函波形发生器，产生正弦信号、三角波、锯齿波、及频率可调，占空比可调的脉冲信号。
2. 掌握用示波器观察常用信号：阶跃（直流）信号、正弦信号、锯齿波、三角波以及脉冲信号的方法。



5G8038 精密函数波形发生器框图

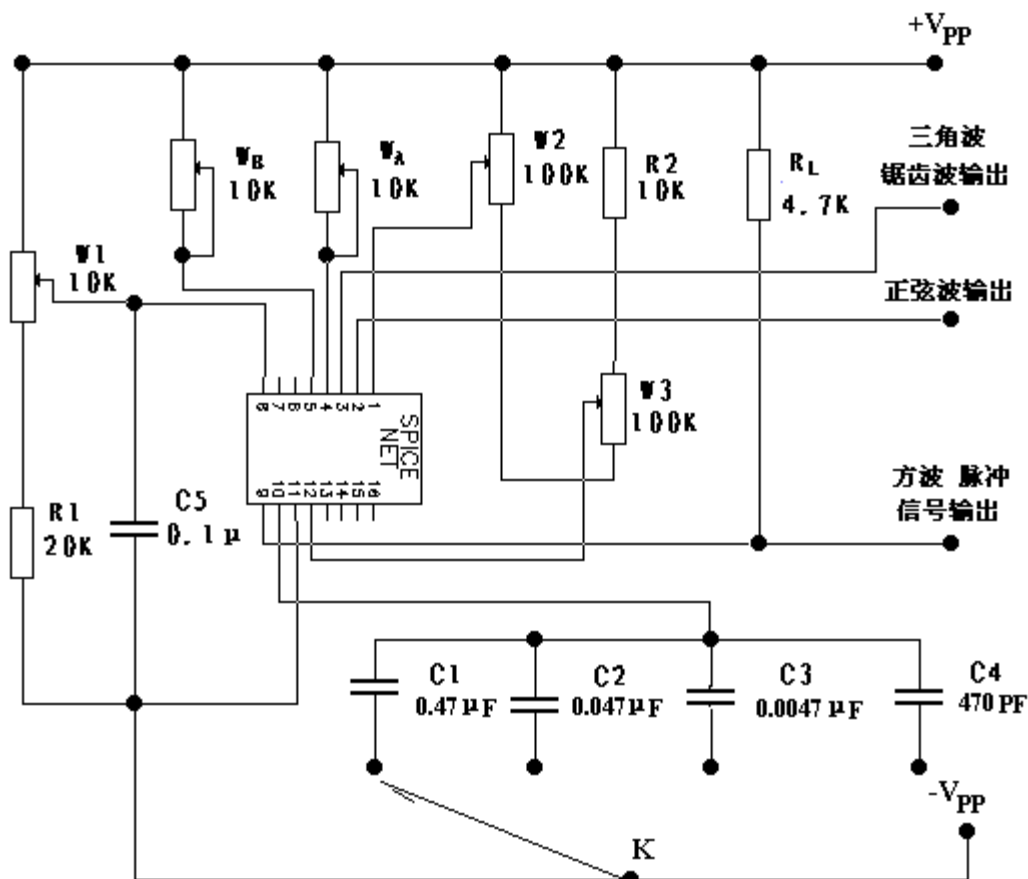


二. 工作原理：利用 5G8038 精密函数波形发生器

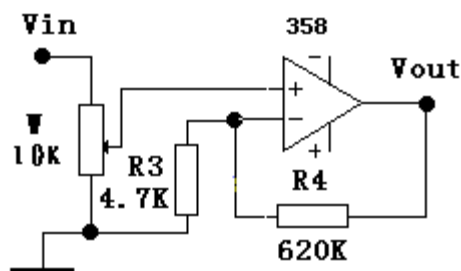
1. 三角波的产生：上图中外接电容器C，由两个电流源 I_1 ， I_2 充电和放电，

电容器C上的电压 $U_C(t)$ 在充电阶段： $U_C(t) = 1/C \int_0^t I_1 dt = I_1 t / C$

当 $U_C(t)$ 充电达到比较器 1 的门限电平，比较器 1 的输出信号置R-S 触发器FF为“1”即Q端为“1”，控制开关K闭合，电流源 I_2 （其中 $I_2 > I_1$ ）加到电容器C上反向充电，即电容C以 $(I_2 - I_1)$ 的电流放电，电容C两端电压转为直线下降，下降的斜率为 $(I_2 - I_1) / C$ ，当 $U_C(t)$ 下降到比较器 2 的门限电平时，比较器 2 的输出将触发器复位端 $\bar{Q} = “0”$ ，切断开关K，转为 I_1 对电容C充电进入下一次循环，若电容C的充放电电流相等，则充电时间与放电时间相等，产生的电压波形即为三角波（即 $I_1 = I$ ，充电 $I_2 = 2I$ ，放电电流 $I_2 - I_1 = I$ ）



（图 1—1）函数波形产生电路



(图 1—2) 输出波形放大器

2. 锯齿波：若充电电流设置为 $I_1=I$ ，放电电流 $I_2-I_1 \neq I$ ，由充电时间与放电时间不同，即可产生非对称的锯齿波输出。
3. 正弦信号的产生：对称三角波经非线性变换网络（正弦波变换电路），变换成正弦波信号输出。
4. 脉冲信号的产生：在触发器 FF 的输出端 Q 即可得到脉冲信号，当电容器 C 上输出对称三角波时，在触发器 Q 端输出对称方波，当电容器充电阶段 Q 端输出高电平，电容器放电阶段，Q 端输出低电平。

三. 预习练习

1. 示波器观察信号波形的原理？示波器显示屏 X 轴代表什么？Y 轴代表什么？
2. 如何用脉冲信号近似表示周期冲激序列及周期阶跃信号。

四. 实验内容

1. 三角波、锯齿波、正弦波及脉冲信号的产生
如图（1--1）连接电路，其中双电源 V^+ ， V^- 为： $\pm 5V \sim \pm 15V$
2. 观察正弦波信号
 - A) 通过调节电位器 W2, W3 使正弦波形失真最小。
 - B) 通过调开关 K 位置，改变正弦波频率的频段，用 W1 作频率微调。
 - C) 信号输出波形幅度调节：将正弦波输出 5G8038 第②脚接到图 1-2

所示的放大器输入端 V_{in} ，调节电位器W，在 V_{out} 端用示波器观察正弦波幅度变化。

3. 用示波器测定正弦信号频率

从低到高调节信号发生器频率，对比用频率计和示波器测定的正弦波频率并记录

| | | | | | |
|---------|-------|------|-------|-------|--------|
| 频率计测定频率 | 100HZ | 5KHZ | 15KHZ | 25KHZ | 100KHZ |
| 示波器 周期 | | | | | |

| | | | | | | |
|-----|----|--|--|--|--|--|
| 实 测 | 频率 | | | | | |
|-----|----|--|--|--|--|--|

- 2.
- 3.
4. 用示波器观察三角波输出端：调节外接定时电位器 **WA**，它能调节充电电流，单独控制三角波的上升时间，对应方波的“1”电平持续时间，三角波将变为锯齿波
5. 用示波器观察方波的输出端（5G8038 的第⑨脚）调节电位器 **WA** 可以改变脉冲信号的占空比。改变 $T=2\tau$, $T=4\tau$, $T=8\tau$, 观察波形的变化。
（其中 T 为脉冲信号的重复周期， τ 为脉冲信号的脉宽），用示波器测定调节得到的最大占空比和最小占空比）。

五. 实验设备

双踪示波器 频率计 九孔实验板 5G8038 (ICL8038)
 电容器 $0.47\mu\text{F}$ $0.1\mu\text{F}$ $0.047\mu\text{F}$ $0.0047\mu\text{F}$ 470pF
 电阻 $4.7\text{K}\Omega$ (2 个) $10\text{K}\Omega$ $20\text{K}\Omega$ $620\text{K}\Omega$
 电位器 $10\text{K}\Omega$ (4 个) $100\text{K}\Omega$ (2 个)
 双运放座 (带 LM358)

六. 注意事项

1. 线路连接时注意 5G8038 及运放的电源极性
2. 示波器测量信号的幅度及频率时，应将微调处于校正位置。
3. 注意示波器探头的衰减 1: 1 还是 10: 1

实验二 信号通过线性系统

一. 实验目的

1. 观察信号通过线性系统后波形失真。
2. 了解线性系统的频响对信号传输的影响。

二. 原理说明

1. 任何一个信号看作由不同频率成分组成（不同的频率成分的幅度、相位

各异），信号可以用它的频谱来表示， $F(j\omega) = |F(j\omega)|e^{j\theta(\omega)}$ ，其中

$|F(j\omega)|$ 为信号各频率成分的幅度。 $\theta(\omega)$ 为信号各频率成分的相位，当信号通过系统以后，会对信号的各种频率成分的幅度和相位产生不同的影响。由于系统对输入信号的各种频率分量的幅度的衰减不同，引起各频率分量间的相对幅度产生变化，使波形失真，称为“幅度失真”，而信号通过系统后，各频率分量所产生的相移与频率不成线性关系，造成各频率分量的相位的相对位置变化，而引起的失真，称为“相位失真”。

设系统的输入信号为 $f(t)$ ，系统的输出信号无失真的条件为：

$$y(t) = Kf(t-t_0) \quad \text{其中 } K \text{ 为常数。}$$

t_0 为信号通过线性系统后产生的延时，所以

$$Y(j\omega) = K e^{-j\omega t_0} F(j\omega)$$

其中 $Y(j\omega)$ 、 $F(j\omega)$ 分别为 $y(t)$ 、 $f(t)$ 的付里叶变换。由此得到无失真传输的系统的频响为：

$$|H(j\omega)| = \frac{Y(j\omega)}{F(j\omega)} = K e^{-j\omega t_0} = |H(j\omega)| e^{j\phi(\omega)}$$

则有： $|H(j\omega)| = K$ (常数) $\phi(\omega) = -\omega t_0$

结论：信号通过线性系统后不失真的条件是：系统的幅频特性在整个频率范围内 $(-\infty, +\infty)$ 为一个常数，系统具有无限带宽。系统的相频特性是通过原点的一条直线。

实际系统总是具有一定的频带宽度，且在此频带内幅频特性也不可能是严格的常数，所以信号通过系统后会产生不同程度的幅度失真，只要系统的通带能与信号的有效带宽相适应，且在信号所占有效频带内系统的幅频特性可近似看作一常数，使传输过程中产生的失真限制在允许的范围

2. 谐振电路是一种窄带选频电路，能传输窄带高频信号，其频率特性如图 (2-1a) 所示，这种电路不宜传输宽频带信号。若要传输如图 (2-1b) 所

示窄脉冲信号（为宽频带信号），其主要频率成分集中在 $\omega=0 \sim 1/\tau$ 范围内其频谱如图（2-1b），应采用通带足够宽的低通滤波器，通带越宽传输失真越小。

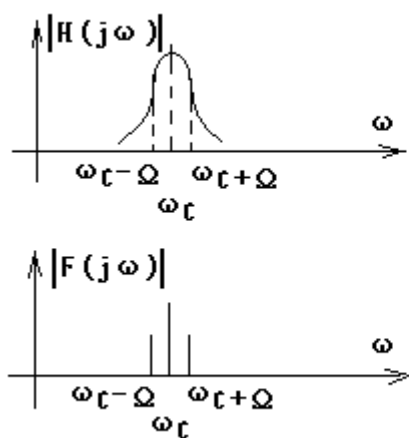


图 2-1a 窄带选频电路幅频特性

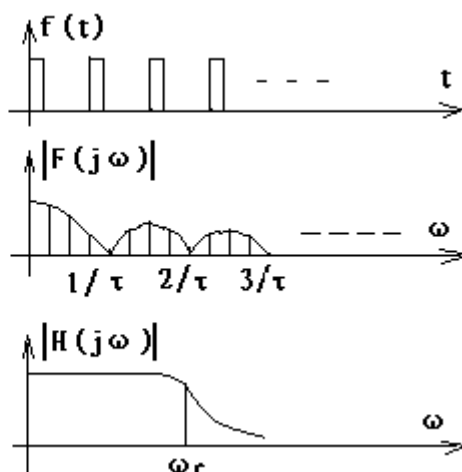


图 2-1b 窄脉冲信号频谱及低通滤波器特性

3. 低通滤波器可用 R-C 或 LC 电路实现，本实验采用 π 型 L-C 低通滤波器，如图（2-2）所示，其截止频率 $f_c = 1/(\pi \sqrt{LC})$ ，其特性阻抗 $R = \sqrt{L/C}$ ，由给定的设计要求 f_c 及 R 可计算：

$$L = R/(\pi f_c)$$

$$C = 1/(\pi f_c R)$$

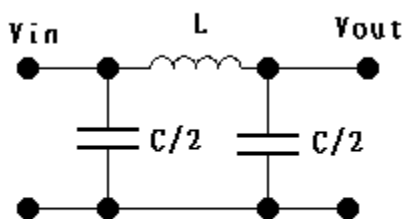


图 2-2 π 型 L-C 低通滤波器

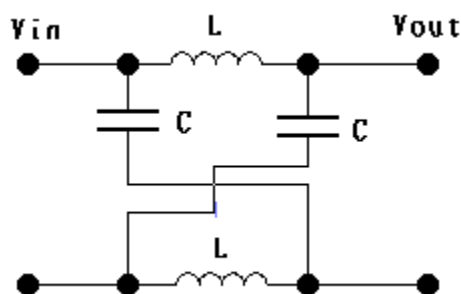


图 2-3 X 型全通相移网络

4. 相移网络为一种全通网络，要求对输入信号无衰减，仅有相移，且特性阻抗不随频率发生变化，可用如图 2-3 所示网络实现。

其中，网络特性阻抗为 Z_{cx} ，相移为 90° 的频率为 f_0 ，

其相移 $\beta = 2\text{tg}^{-1}f/f_0$

$$L = Z_{cx} / (2\pi f_0)$$

$$C = 1 / (2\pi f_0 Z_{cx})$$

三. 预习练习

1. 计算 π 型低通滤波器参数, 要求通带为 0~100KHz 和 0~600KHz 负载阻抗为 $R_{Ld}=150\Omega$ (取标准特性阻抗=负载阻抗)
2. 计算 90° 相移频率 f_0 分别为 10KHz 和 100KHz 的两个 X 型相移网络的元件 L, C 的参数, 特性阻抗均为 600Ω 。

四. 实验内容:

1. 方波信号通过低通滤波器。用频率为 100KHz 的对称方波信号通过截止频率 $f_c=100\text{KHz}$ 和 $f_c=600\text{KHz}$ 的两个低通滤波器, 观察通过滤波器前后信号波形失真情况。
2. 非正弦信号通过全通网络: 用一频率为 10KHz 的方波信号通过(1) 90° 相移频率为 10KHz 的 X 型网络和(2)通过 90° 相移频率为 100KHz 的 X 型网络, 观察通过 X 型网络前后信号的波形, 比较失真情况。

五. 仪器设备

EE1643 型函数信号发生器/计数器 1 台 双踪示波器 1 台
电感 $100\mu\text{H}$ $470\mu\text{H}$ 1mH (2 个) 10mH (2 个)
电容 2000pF (2 个) 3300pF (2 个) $0.01\mu\text{F}$ (2 个) $0.022\mu\text{F}$ (2 个)

六. 实验报告要求

1. 整理改变谐振回路 Q 值前后波形的变化, 以及改变低通滤波器的截止频率前后所观察到波形的变化, 说明电路频率特性对传输信号的影响。
2. 整理通过 90° 相移频率分别为 10KHz, 100KHz 的两个 X 型网络后波形的失真情况, 说明网络的相频特性对传输信号的影响。

实验三 线性系统瞬态响应及系统冲激响应的测量

一. 实验目的

1. 研究一阶系统的零输入响应，零状态响应和完全响应
2. 线性系统的阶跃响应和冲激响应的测量

二. 原理说明

1. 线性系统的响应可以分为零输入响应和零状态响应，当系统的初始状态为零，而仅由系统的输入信号激励而引起的响应，称为系统的“零状态响应”。当系统的输入（激励）为零，仅由系统的初始状态而引起的响应称为系统的“零输入响应”。系统的完全响应是由系统的初始状态和输入（激励）信号共同作用而引起的系统响应（输出）。
2. 零输入响应仅取决于系统的结构及元件参数，改变电路中元件参数可以改变其零输入响应。
3. 零状态响应除了取决于系统的结构和元件参数外，还取决于系统的激励。
4. 线性系统在零状态条件下，由单位冲激信号 $\delta(t)$ 引起的响应称为系统的单位冲激响应，记为 $h(t)$ ，可用它来描述一个线性系统。
5. 线性系统在零状态条件下，由单位阶跃信号 $\varepsilon(t)$ 引起的响应称为单位阶跃响应，记为 $s(t)$ 。因为冲激函数 $\delta(t)$ 是单位阶跃函数 $\varepsilon(t)$ 的导数，所以线性非时变系统的冲激响应 $h(t)$ 是阶跃响应 $s(t)$ 的导数， $h(t)$ 可以由 $s(t)$ 通过一个微分电路得到。
6. 系统的瞬态响应是一个十分短暂的变化过程，对于时间常数较小的系统必须使系统的暂态响应过程能周期性重复出现，以便能用示波器来观察周期性重复的暂态过程。用方波的上升沿代替阶跃信号，只要保证方波半个周期（平顶）持续时间远大于暂态过程（一般可取大于 3 至 5 倍的时间常数），在第一个方波还未结束，响应的暂态过程已结束，当方波周期性的激励一线性系统时，就可以观察到周期性的系统的阶跃响应波形。测量线性系统的冲激响应可用一个周期性极窄的脉冲序列 $P_T(t)$ 代替冲激信号，要保证窄脉冲重复周期远大于系统的冲激响应的暂态过程。

三. 预习练习

1. 观察实验图 3-1 中系统的零输入响应，零状态响应和完全响应，开关 K1, K2 应如何操作？
2. 计算实验图 3-2 电路的单位阶跃响应和单位冲激响应。

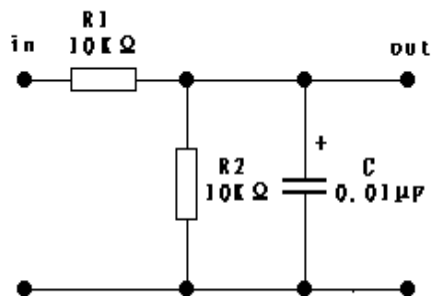
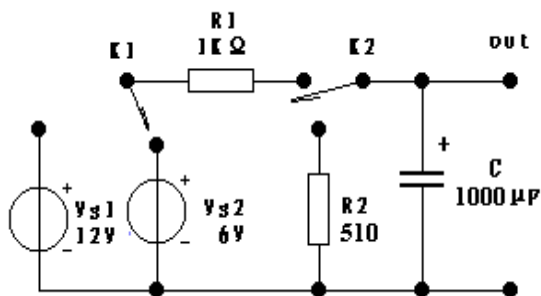


图 3-1 系统零输入响应，零状态响应 图 3-2 系统单位阶跃和冲激响应测试

3. 计算实验图 3-3 电路的时间常数及其对系统响应的影响。

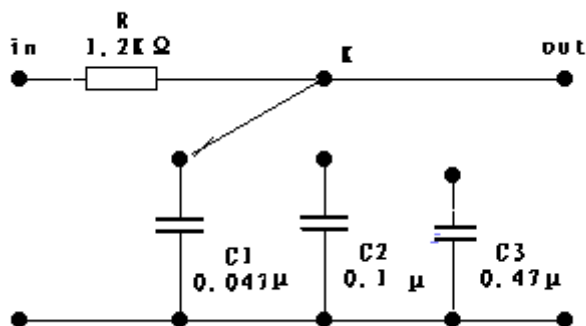


图 3-3 电路时间常数对系统响应影响

四. 实验内容

1. 观察一阶线性系统的零输入、零状态和完全响应

- A) 按实验图 3-1 接线，用示波器观察系统输出 V_0 变化的规律，要求能观察到零输入，零状态和完全响应，记录 K1, K2 操作次序和观察到的光点移动轨迹。
- B) 将输入信号源 V_{s1} 增加一倍，按 A) 步骤重复一遍，记录观察到的零状态，零输入和完全响应与 A) 所观察的结果比较。

2. 测量线性时不变系统的冲激响应和阶跃响应

- A) 按实验图 3-2 接线。
- B) 调节函数信号发生器输出幅度为 1V，输出频率为 1KHz 的对称方波，把它作为周期性出现的阶跃信号作用于实验图 3-2，用示波器观察系统的阶跃响应波形并记录之。
- C) 调节函数信号发生器：输出幅度为 1V，脉宽为 0.05~0.1ms，重复频率为 1KHz 的窄脉冲序列信号，把它作为冲激信号序列，作用于

实验图 3-2，用示波器观察系统的输出（响应）波形，并记录之。

D) 将图 3-2 的输出信号经过的微分电路组成如图 3-4 所示，观察微分电路的输出波形，与由 (C) 所得冲激响应相比较。

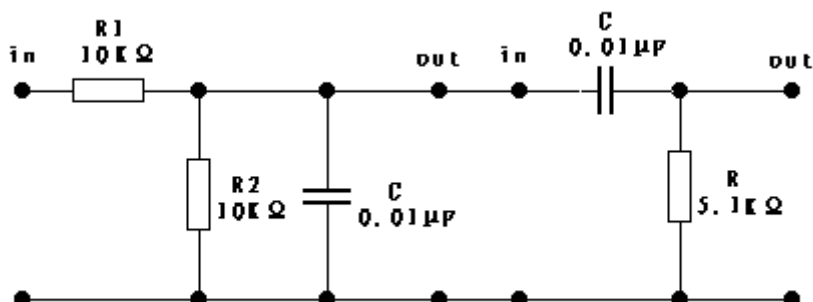


图 3-4 信号经微分电路后的响应

3. 观察一阶线性系统中，时间常数对系统响应的影响。

A) 如实验图 (3-3) 连接电路

B) 调节函数信号发生器，输出幅度为 5V，频率为 500Hz 的对称方波，去激励实验图 (3-3) 所示系统，用示波器观察电阻 R 和电容 C 两端的波形 V_R , V_C 改变开关 K 的位置，记录三种不同电容值时观察到的波形。

五. 仪器设备

示波器 1 台, 直流稳压电源 1 台, 函数信号发生器 1 台

电阻 510Ω 10KΩ (2 个) 1KΩ 1.2KΩ 5.1KΩ

电容 0.01μF (2 个) 0.047μF 0.1μF 0.47μF 1000μF/35V

开关 单刀双投 (2 个)

六. 注意事项

1. 观察系统瞬态响应波形时，使用示波器的触发扫描。
2. 分析实验结果时，应注意到实际元件中电感线圈的内阻及电容器的损耗电阻及激励信号源内阻的影响。

七. 实验报告要求

1. 在方格纸上绘出实验内容 1 所得到的各种响应的波形，验证完全响应零输入响应、零状态响应三者之间关系。验证激励信号与系统的零状态响应之间线性关系。用实验结果说明：在非零初始状态下，系统的完全响应不具有线性性质。
2. 在同一方格纸上，画出实验内容 2 所观察到的冲激响应和阶跃响应的波

形，说明两者之间的关系。

3. 整理实验内容 3 的观察结果，在同一方格纸上绘出激励方波及在三种不同参数时的响应波形（三个波形）并在所得的响应波形中求到各电路的实际的时间常数，并与计算得到的理论值相比较，说明时常数的改变对系统响应的影响。

实验四 模拟系统基本运算单元电路实现

一. 实验目的

连续的 LTI（线性时不变）系统通常由三种基本的功能单元组成：即加法器、系数乘法器和积分器。本实验的目的是：掌握加法器（减法器）、系数乘法器、积分器等基本单元电路的实现，验证其运算功能。

二. 原理说明

描述线性时不变的模拟系统的微分方程包含三种基本的运算，即加法、系数乘法和积分运算，它们的运算符号与功能如图 4-1 所示

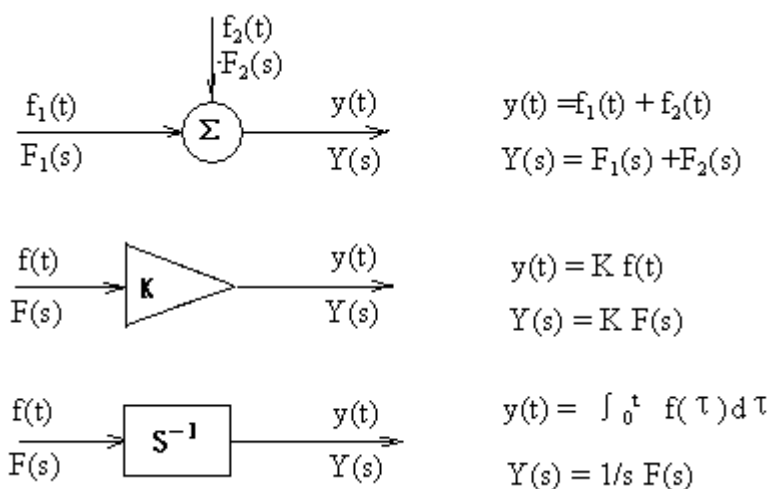


图 4-1 基本运算单元框图

1. 加法器：是输出信号等于几个输入信号之和的放大器，图 4-1（a）所示电路是反相加法器，其原理如下：

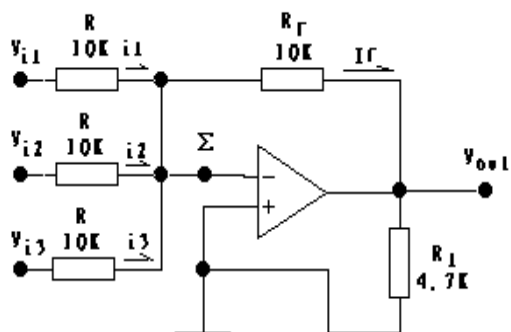


图4-1a 反相加法器

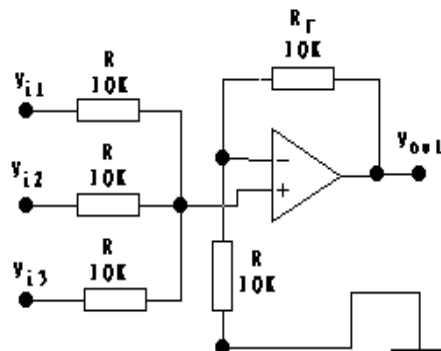


图4-1b 同相加法器

$$I_f = i_1 + i_2 + \dots + i_n = V_{i1} / R + V_{i2} / R + \dots + V_{in} / R$$

$$V_0 - V_\Sigma = -R I_f, \quad V_\Sigma = 0 (\text{虚地}),$$

$$V_0 = -R I_f = -(V_{i1} + V_{i2} + \dots + V_{in})$$

2. 减法器的输出信号是两个输入信号 V_{i1} 与 V_{i2} 之差，减法器的电路如图(4-2)所示，其原理如下：

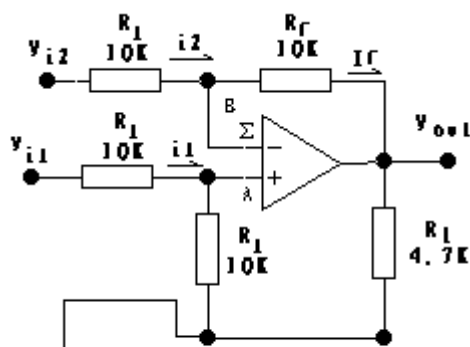


图 4 - 2 减法器

$$V_x=0 \quad I_x=0 \quad \therefore V_A = \frac{R_f}{(R_i+R_f)} V_{i1} \quad V_A=V_B$$

$$I_2 = \frac{V_{i2}-V_B}{R_i} = I_f = \frac{V_B-V_0}{R_f}$$

$$V_B = \frac{R_i}{R_i+R_f}(V_{i2}+V_0) = \frac{R_f}{R_i+R_f} V_{i1}$$

$$\therefore V_0 = \frac{R_f}{R_0} (V_{i1}-V_{i2}) \quad \text{若取 } R_f=R_i=R \quad \text{则 } V_0=V_{i1}-V_{i2}$$

3.

系数乘法器：可由比例放大器实现，放大器的输出信号是输入信号按一定比例放大（缩小），其数学模型为 $y=Kx$ ，其中 y 为输出信号， x 为输入信号， K 为一常数，系数乘法器的电路如图（4-3）所示，

（1）图 4-3（a）为反相比例放大器，图中

$$I_i = V_i / R_i = I_f \quad V_0 = V_\Sigma - I_f R_f = - (R_f / R_i) V_i$$

$$V_0 = K V_i \quad \text{式中 } K = - R_f / R_i \text{ 为乘法器的标乘系数}$$

放大器的输入阻抗为 $R_{in} = V_i / I_i = R_i$

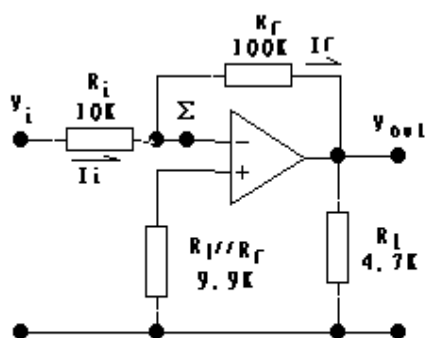


图4-3a 反相比例放大器

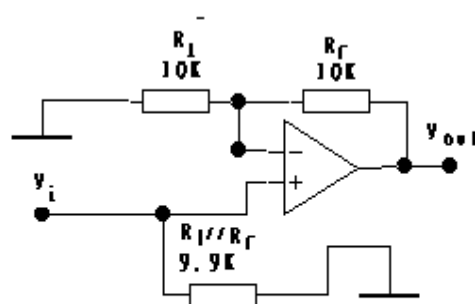


图4-3b 同相比例放大器

（2）图 4-3（b）为同相系数乘法器，可以证明：

$$V_0 = (1+R_f/R_i) V_i = K V_i$$

式中乘法器标乘系数 $K = 1 + R_f/R_i$ ，

放大器的输入阻抗为 $R_{in} = R_f // R_i$

4. 积分器的输出信号是输入信号积分后的结果，其数学关系为： $y = \int_0^t x dt$

积分器可用如图 4-4 所示电路实现，其工作原理如下：

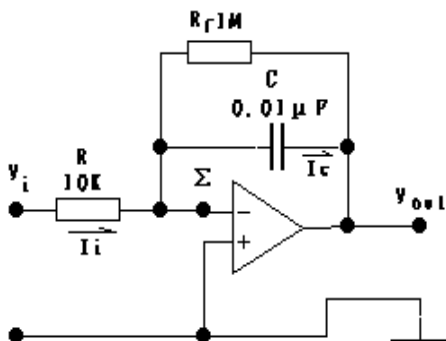


图 4-4 积分器电路

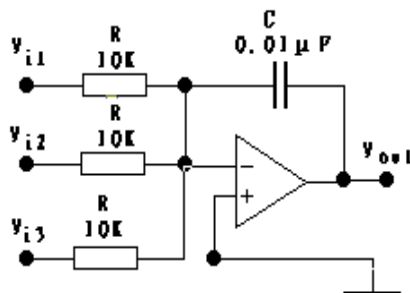


图 4-5 求和积分器电路

$$\because I_i = I_c, \quad V_\Sigma = 0, \quad \text{而} \quad I_i = (V_i - V_\Sigma) / R = V_i / R$$

$$I_c = -C dV_o(t) / dt \quad \text{则} \quad V_o(t) = -1 / RC \int_0^t V_i(t) dt$$

注：上式中所示的积分关系，是忽略了运算放大器输入失调电压，失调电流的影响，另外，为了积分器的稳定性可在电容 C 的两端并接大阻值的电阻。

5. 求和积分器：将积分器和加法器相结合，可以构成如图 4-5 所示的求和积分器，得到如下关系：

$$V_o(t) = -1 / RC \int_0^t (V_{i1} + V_{i2} + \dots + V_{in}) dt$$

三. 实验内容和步骤

1. 按图 4-1 (a) (b) 分别接成反相加法器，同相加法器

(1) 在 V_{i1} 端输入一方波，在 V_{i2} 端输入一直流电平，用示波器观察加法器输出信号 V_o 。求出 V_o 与 V_{i1} ， V_{i2} 关系。

(2) 在 V_{i1} 端输入一方波 1KHz（重复周期较长）信号，在 V_{i2} 端输入一个频率较方波高的正弦波，在 V_o 端用示波器观察，比较输出波形与两个输入信号之间的关系。将 V_{i2} 端正弦波频率调到 10KHz，用来测定方波的重复周期及脉宽（允许定标误差为 0.05ms）

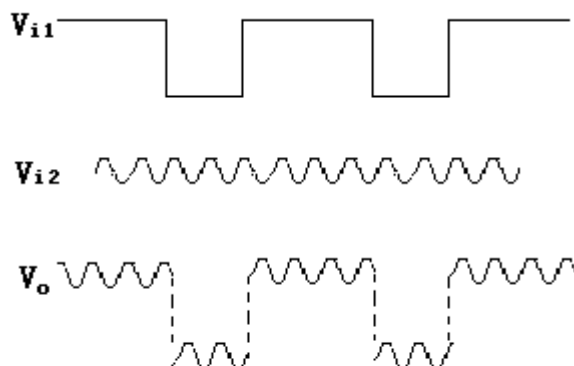


图4-6 用加法器测方波的
重复周期和脉宽

2. 按图 4-2 接成减法器，在 V_{i1} 端输入一方波， V_{i2} 端输入一直流电平分别用示波器观察 V_{i1} ， V_{i2} 及 V_o 波形，比较 V_o 与 V_{i1} ， V_{i2} 关系。
3. 按图 4-3 (a) (b) 接成反相系数乘法器，同相系数乘法器， R_f 用 100K 电位器代替电阻，在 V_i 端输入幅度为 2V 的方波，用示波器观察输出 V_o 的波形及幅度，并记录 V_o 为不同值时，电位器 R_f 应调到何阻值。

测试条件：, $V_i=2V$ $R_i=10K$

| | V_o | 1V | 2V | 4V | 6V | 8V |
|----|-------|----|----|----|----|----|
| 反相 | R_f | | | | | |
| 同相 | R_f | | | | | |

4. 按图 4-4 接成积分器电路，求出积分电路的时常数，
 - A) 在输入端 V_i 输入一方波信号，用示波器观察 V_o 的波形，分析输出与输入信号之间关系，以及方波重复周期与积分时常数关系
 - B) 积分器输入端 V_i 输入一正弦信号，用双踪示波器观察输出信号 V_o ，比较 V_i 与 V_o 波形关系。
 - C) 改变积分器电容 C 数值观察波形变化。

四. 仪器设备

示波器 1 台 函数信号发生器 1 台
 稳压电源 1 台 , 万用电表 1 只 , 九孔实验板
 电阻 4.7K Ω 10K Ω (5 个) 100K Ω (2 个) 1M Ω
 电容 0.01 μF
 脉冲模块 1 个

双运放座（带 LM358）

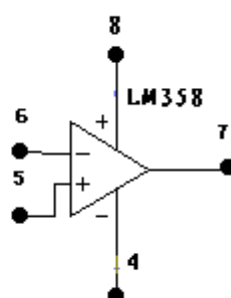
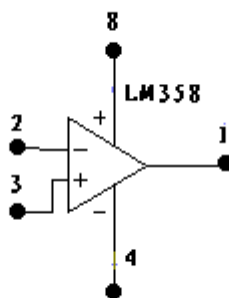
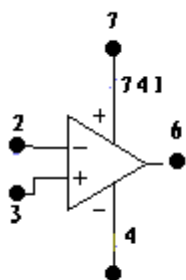
五. 实验报告要求

1. 绘出加法器的输入 V_{i1} , V_{i2} 及输出 V_o 的波形, 检验是否达到预期效果.
2. 整理乘法器实验数据, 在改变 R_i 与 R_f 比值时, 输出 V_o 与输入 V_i 信号幅度变化关系.
3. 绘出积分器输入、输出波形, 分析两者之间的关系.

六. 注意事项

1. 运算放大器正、负电源电压不超过 $\pm 15V$, 并不能接错极性, 以免损坏运放.
2. 作加法器实验时, 无信号输入的输入端应接地, 相当于该输入端输入为零, 而不能让无输入信号的输入端“悬空”.
3. 运放在实际使用中, 需要连接一些调零, 补偿电路(元件)在实验装配时不可少.

七. 附: 运算放大器 $\mu A741$ 和 LM358 引脚定义



实验五 连续时间系统的模拟

一. 实验目的

1. 用基本运算单元（加法器、系数乘法器、积分器）模拟系统的微分方程和传输函数。
2. 用模拟的方法求解 LTI 系统的微分方程。
3. 研究参数变化对响应的影响。

二. 原理说明

1. 一个线性的时不变的物理系统（电系统或非电系统），均能用线性常微分方程来描述。微分方程可以由基本的运算单元：加法器、标量乘法器，微分器或积分器组合成相应的电路进行模拟，尽管模拟的系统与所研究的实际物理系统的内容可以完全不同，但它们具有相同的微分方程，即系统的输入与输出之间的关系，传递函数完全相同，因而在对复杂系统或非电系统进行研究时，可以运用模拟的方法，构建一个与实际物理系统具有相同微分方程的模拟装置（电路），用以观察因激励信号和系统参数的变化，而引起的系统响应的变化，以便确定最佳工作状态的系统参数值。
2. 线性常系数微分方程一般形式为（全极点形系统）

$$y^{(n)}(t) + a_{n-1}y^{(n-1)}(t) + \cdots + a_1y'(t) + a_0y(t) = x(t)$$

其中 $x(t)$ 为系统的激励信号， $y(t)$ 为系统的输出或响应，可见微分方程的基本运算为：加法、标量乘法和微分。由于积分器比微分器抗干扰性能好，所以在模拟系统微分方程时采用积分器，可将微分方程改写为积分

$$\text{方程形式：} y(t) = \int^{(n)} x(t) dt - a_0 \int^{(n)} y(t) dt - \cdots - a_{n-1} \int y(t) dt$$

它的拉氏变换形式为： $Y(s) = S^{-n}X(s) - a_0 S^{-n}Y(s) - a_1 S^{-(n-1)} - \cdots - a_{n-1}S^{-1}Y(s)$

可画出 N 阶线性系统的模拟图如图 5-1 所示

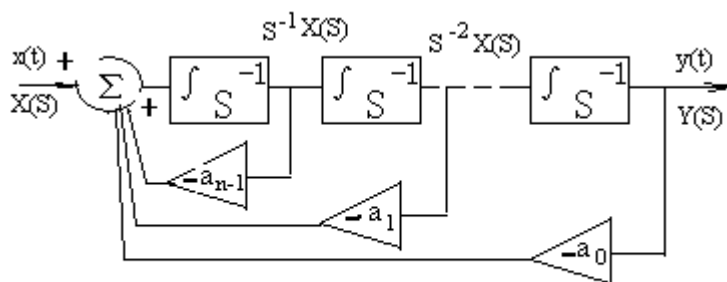


图5-1 N阶线性模拟系统框图

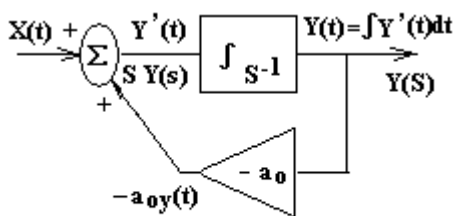


图 5-2a 一阶模拟系统框图

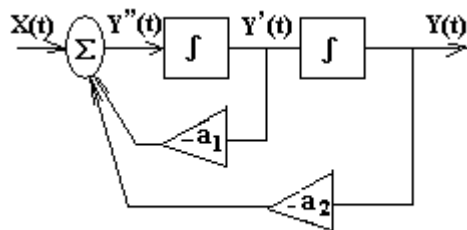


图 5-2b 二阶模拟系统框图

以一阶、二阶微分方程为例：

一阶微分方程： $y'(t) + a_0 y(t) = x(t)$ 或 $y'(t) = x(t) - a_0 y(t)$ ，其系统模拟框图如图 5-2 (a) 所示

二阶微分方程： $y''(t) + a_1 y'(t) + a_0 y(t) = x(t)$ 其系统的模拟框图如图 5-2(b) 所示

一阶系统和二阶系统的模拟电路如图 5-3(a) ,(b)所示

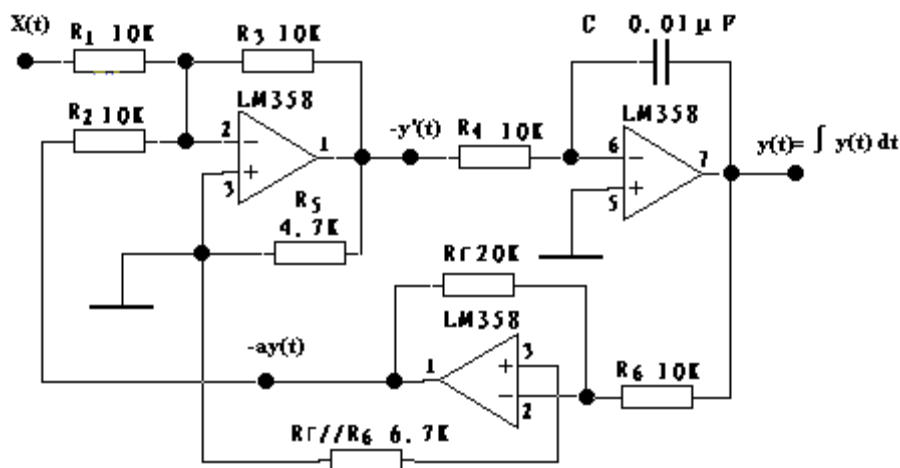


图5-3a 一阶系统模拟电路

由二阶系统电路列出方程组：

$$\begin{cases} (1/R_2 + 1/R_4)V_B - V_i/R_2 - V_b/R_4 = 0 \\ (1/R_1 + 1/R_3)V_A - V_t/R_1 - V_h/R_3 = 0 \\ V_A = V_B \end{cases}$$

对照图 5-2(b)与图 5-3(b)，其中 $V_i = x(t)$ ， $V_t = y(t)$ ， $V_b = -y(t)$ ， $V_h = y''(t)$

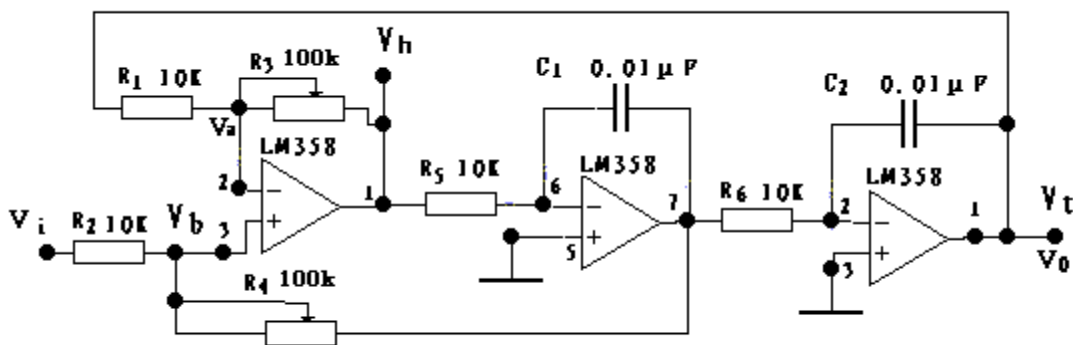


图5-3b 二阶系统模拟电路

可求得：

$$y''(t) + \frac{R_2}{R_1} \frac{R_1 + R_3}{R_2 + R_4} y'(t) + \frac{R_3}{R_1} y(t) = \frac{R_4}{R_1} \frac{R_1 + R_3}{R_2 + R_4} x(t)$$

$$a_1 = \frac{R_2}{R_1} \frac{R_1 + R_3}{R_2 + R_4} = 0.5 \quad a_2 = R_3 / R_1 = 1 \quad b_0 = \frac{R_4}{R_1} \frac{R_1 + R_3}{R_2 + R_4}$$

取 $R_2=10K$ $R_4=30K$ $R_1=10K$ $R_3=30K$ 求得 $a_1=+1$ $a_2=3$ $b_0=3$

$$y''(t) + y'(t) + 3y(t) = 3x(t)$$

设一个机械阻尼震动方程为： $y''(t) + 0.5y'(t) + y(t) = 0$

其中 $y(t)$ 表示位移，令 $x(t)=0$ ，即 V_i 接地。

由方程可知： $a_1=0.5$ ， $a_2=1$ 而

$$a_0 = + \frac{R_4}{R_1} \frac{R_1 + R_3}{R_2 + R_4} \quad a_1 = \frac{R_3}{R_1}$$

所以可取 $R_2=10K$ $R_4=30K$ $R_1=10K$ $R_3=30K$

- a) 实际系统的响应动态范围很大，持续时间可能很长，但是运算放大器输出电压是有一定限制的，大约在 ± 10 伏之间，积分时间受 RC 元件数值限制，也不能太长，要合理选择变量的比例尺度 M_y 和时间的比例尺度 M_t ，使得输出电压 $V_t = V_o = M_y * y$ ， $T_m = M_t * t$ ，式中 y, t 为实际系统方程中的变量 $y(t)$ 和时间 t ， V_t 和 T_m 为模拟方程中的变量和时间，对于方程

$y''(t) + 0.5y'(t) + y(t) = 0$ ，如果选择 $M_y = 10V/cm$ ， $M_t = 1$ ，则模拟解中的 $10V$ 代表位移 $1cm$ ，模拟解的时间与实际时间相同，如选 $M_t = 10$ ，

则模拟解中第 10 秒的位移，表示为实际第 1 秒时的位移。

- b) 若实际系统有初始状态，则进行模拟解时，要设置初始状态。设系统初始位移 $y(0)=1\text{cm}$ ， $y'(0)=0$ ，则按选定的比例尺度使得 $V_t(0)=M_y*y(0)$ $V_b(0)=M_y*y'(0)=0\text{V}$ ，可对电容 C_1 充电使之达到 10V，使电容 C_2 两端电压为零。

三. 预习练习

1. 例举一个一阶系统，写出系统的微分方程，初始状态为零，求解该系统在阶跃信号作用下的响应，并绘出响应的波形。
2. 某一物理系统如实验图 5-4 所示，摩擦系数 $\mu=0.2$ ，弹簧的倔强系数 $K=100$ 牛/米， $M=1\text{Kg}$ ，物体离开静止位置的位移为 y ，且初始状态 $y(0)=1\text{cm}, y'(0)=0$ ，列出位移 $y(t)$ 变化的方程，（提示 $F=Ma$ 列方程）
3. 确定求上述方程模拟解的比例尺度 M_y ， M_t ，确定实验电路及参数。

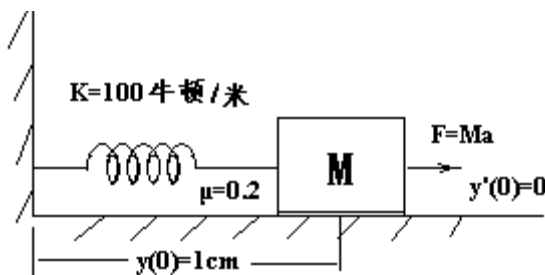


图 5-4 某力学系统的模拟

四. 实验内容

1. 用反相加法器、积分器及反相系数乘法器按图 5-1 (b) 连接成一阶系统的模拟电路，观察其阶跃响应，与预习练习 1 的结果比较。
2.
 - a) 在电容无初始状态和无输入的情况下，使输出电压为零。（调零电位器）
 - b) 对电容充电以建立初始条件
 - c) 观察模拟装置输出的响应，即模拟方程的解按比例尺度得到实际系统的响应。
 - d) 改变 R_3 与 R_1 比值及 R_3 、 R_4 与 R_1 比值，以及初始电压的大小和极性，观察响应的变化。
3. 在 V_i 端输入方波或正弦波，调节 R_3 ， R_4 观察 V_h ， V_b 点输出波形，使之不发生振荡和限幅现象。如用正弦信号输入，调节输入信号频率 20Hz~20KHz，分别从 V_b ， V_h 及输出 V_t 点观察输出波形随频率的变化，绘出其频率特性曲线，微调 R_3 观察输出 V_t 波形及频率特性曲线的变化，微调 R_4 观察输出 V_t 波形及频率特性曲线的变化。
- 4 列出图 5-4 所示系统的模拟电路的微分方程，并求解之。

五. 仪器设备

| | | | |
|----------------------|---------------------|--------------------|--------------------|
| 双踪示波器 | 1 台 | 函数信号发生器 | 1 台 |
| 稳压电源 | 1 台 | 毫伏表 | 1 台 |
| 万用表 | 九孔实验板 | | |
| 电阻 | 4.7K Ω | 10K Ω (6 个) | 20K Ω (2 个) |
| 电位器 | 100K Ω (2 个) | | |
| 电容器 | 0.01 μ F (2 个) | | |
| 双运放座 (带 LM358) (2 个) | | | |

六. 注意事项

1. 注意运算放大器的电源极性，电压范围在-15V~+15V，以免损坏运放。
2. 运放的输入端，若无信号输入时，应该接地，相当于零输入。

七. 实验报告要求

1. 绘出一阶系统微分方程的响应，与理论分析结果对照。
2. 绘出二阶系统微分方程的响应，与理论分析结果对照。
3. 记录实验内容 3 测量得到的数据，绘出二阶系统的频率特性曲线。(在 V_b, V_h, V_t 三点输出的频率特性) 改变 R_3, R_4 电位器值，注意 V_t 输出端的低通特性曲线的变化情况。
4. 实验的收获体会

实验六 信号的合成与分解

一、实验目的

观察方波信号的分解及合成，学习和掌握用傅里叶级数进行谐波分析的方法。

二、原理说明

任何电信号都是由各种不同频率、幅度和初相的正弦波叠加而成的。对于周期信号由它的傅里叶级数的展开式可知，各次谐波为基波频率的整数倍。而非周期信号包含了从零到无穷大的所有频率成分，每一频率成分的幅度趋向无穷小，但其相对大小是不同的。

通过一个选频网可以将电信号的所包含的某一频率成分提取出来。本实验采用最简单的选频网络，是一个 LC 谐振回路。对周期信号波形分解的实验方案如图 1 所示。

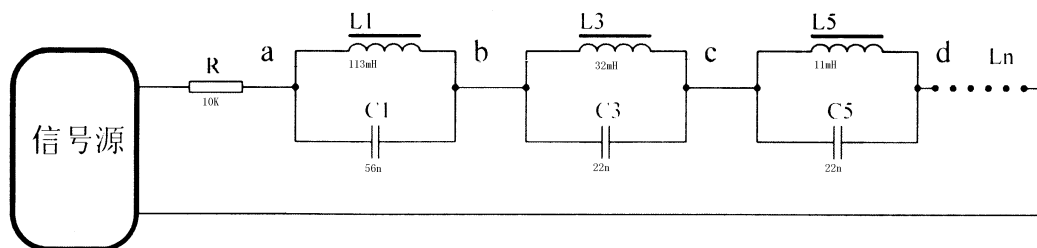


图 1 波形分解

将被测的方波信号加到分别调谐于基波和各次谐波频率的一系列并联谐振回路。从每一个谐振回路二端可以用示波器观察到被取出的各种正弦波。若被测信号是 2KHz 的方波，由傅里叶级数展开式可知，应使 L1C1 谐振于 2KHz、L3C3 谐振于 6KHz、L5C5 谐振于 10KHz、.....，那么，一定能从各谐振回路两端观察到基波和各次谐波。在理想的情况下各次谐波的比例为 1: (1/3): (1/5):

被测信号采用 2KHz、峰峰值 6V 的方波。R=10K 欧姆、L1C1 谐振于 2KHz、L3C3 谐振于 6KHz、L5C5 谐振于 10KHz。其 LC 满足

$$f \approx \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

| C | L | f | 线圈 |
|--------|---------|--------|------------|
| 0.056u | 113.1mH | 2000.9 | 1500 圈+硅钢芯 |
| 0.022u | 30 mH | 5992.1 | 1000 圈+硅钢芯 |
| 0.022u | 10.5 mH | 9967.8 | 500 圈+硅钢芯 |

电容可选用靠近以上值的，电感的值可通过内插的芯（不要用纯铁芯）调

节插入深度来改变电感值，最终获得满意的波形。

实际获得的波形基波较接近理想值，3次和5次谐波的波形与理想值有一些变化，主要是有不等幅现象，越是高次谐波越为严重。提高谐振Q值能减少这种现象。

根据谐振电路的品质因数公式：

$$Q \approx \frac{1}{R\sqrt{\frac{L}{C}}}$$

可自制高品质的谐振回路，设计回路参数，加深理解。

波形的合成实验电路如图2所示。方波信号通过选频网络（电路接法和图1有变化），L1C1谐振于2KHz，产生波形合成所需的基波；L3C3谐振于6KHz，产生波形合成所需的3次谐波；L5C5谐振于10KHz，产生波形合成所需的5次谐波。电阻R1、R2、R3通过变换其电阻值，可调整其幅度，使其高次谐波幅度分别为基波的1/3、1/5。波形的合成最终由加法器来完成。

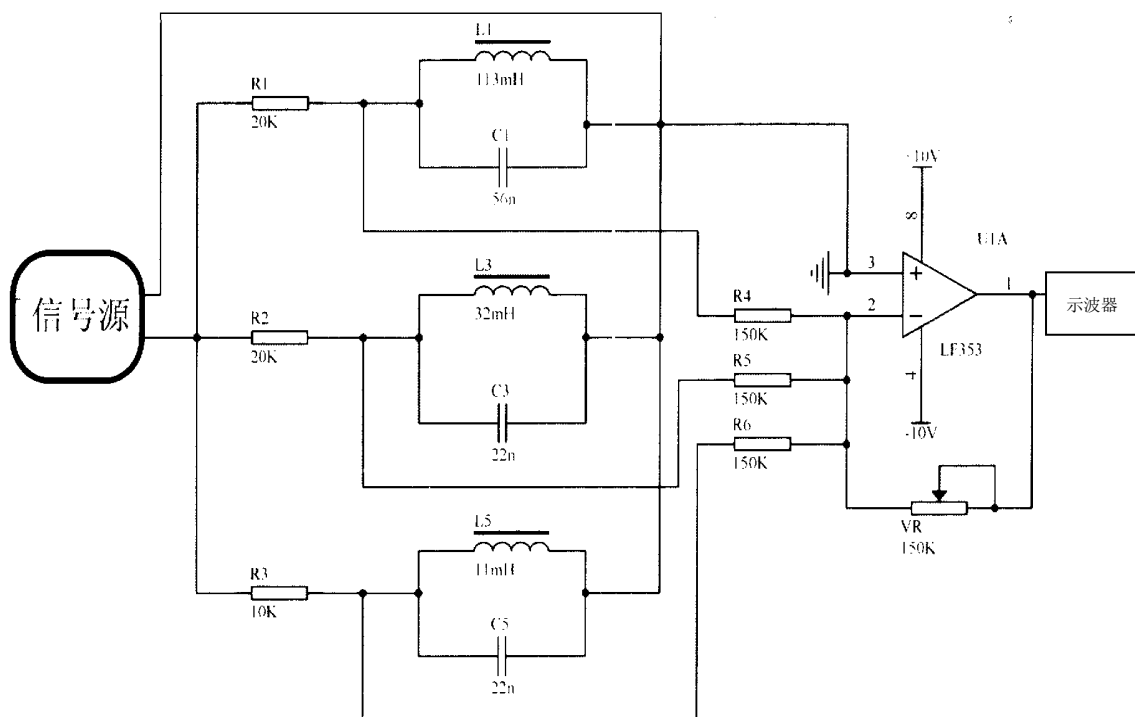


图2 波形的合成

用示波器观察合成的波形，接近理想值。如在R5边串一个1000pF电容，它相当与初相发生了变化，此时合成的波形发生了变化，这种由于谐波相位变化而使波形变化产生的失真称为“相位失真”；如移去R5，合成的波形中缺少了一种频率成分，合成的波形发生了变化，这种由于缺少某种谐波而使波形变化产生的失真称为“频率失真”。

三、 内容及步骤

1, 波形的分解

- a, 按照图 1 在九孔方板上排好器件, 调节信号源, 使其置为方波档、幅度峰峰值 6V、频率 2KHz。
- b, 频率 2KHz, 用导线短接 bd, 用示波器测 ab 点波形, 调节电感值使谐振于 2KHz, 幅度为____V。
- c, 改变频率, 调节到 6KHz, 用导线短接 ab、cd, 用示波器测 bc 点波形, 调节电感值使谐振于 6KHz, 幅度为____V。
- d, 去掉短接, 改变频率, 调节到 10KHz, 用导线短接 ac, 用示波器测 cd 点波形, 调节电感值使谐振于 10KHz, 幅度为____V。
- e, 去掉短接, 回调频率到 2KHz, 观察 ab、bc、cd 处的波形, 记录、分析。

2, 波形的合成

- a, 按照图 2 在九孔方板 (2 块) 上排好器件, 调节信号源, 使其置为方波档、幅度峰峰值 6V、频率 2KHz。
- b, 频率 2KHz, 用示波器测 L1 两端波形, 调节电感值使谐振于 2KHz,。
- c, 改变频率, 调节到 6KHz, 用示波器测 L2 两端波形, 调节电感值使谐振于 6KHz。
- d, 改变频率, 调节到 10KHz, 用示波器测 L3 两端波形, 调节电感值使谐振于 10KHz,
- e, 回调频率到 2KHz, 分别测 L1、L2、L3 波形, 调节 R1、R2、R3 值, 使其波形幅度接近 1: 1/3: 1/5。
- f, 用示波器观察加法器输出点的波形记录、分析。
- g, 在 R5 边串一个 1000pF 电容, 观察“相位失真”。
- h, 拔去电阻 R5, 观察“频率失真”。

四、 实验注意

在使用信号发生器时, 要观察信号类型是否置在方波档, 在断电重新开机时, 信号类型要重新设置。(针对按钮切换)

五、 实验仪器

信号发生器一台、示波器一台

九孔方板 (2 块), 双运放座 (带 LM358)

电阻 10K Ω 20 K Ω (2 个) 150 K Ω (3 个)

电位器 100 K Ω

电容 1000pF 0.022 μ F (2 个) 0.056 μ F

线圈+硅钢芯 500 圈 1000 圈 1500 圈

六、实验思考

观察到的 3 次、5 次谐波为什么会出现不等幅现象？

这是由于带通滤波器的 Q 值一般为 20 左右，二阶滤波器离中心频率较远处的斜率为 $-40\text{dB}/10$ 倍频，非中心频率的谐波不可避免地进入该带通滤波器，因而造成一定的失真。

实验七 T 型网络频率特性

一. 实验目的

1. 熟悉由电阻和电容组成的低通和高通的幅频特性。
2. 测量单 T 网络，双 T 网络的幅频特性、相频特性。

二. 实验原理

双 T 网络，作为选频网络，具有优良性能，其电路如图 7-1 所示，输入信号为 V_i ，输出信号为 V_o ，则该双 T 网络的传递函数为：

$$H(j\omega) = V_o(j\omega) / V_i(j\omega) = |H(j\omega)| e^{j\Phi(\omega)}$$

式中 $|H(j\omega)|$ 称为系统的幅频特性， $\Phi(\omega)$ 称为相频特性。

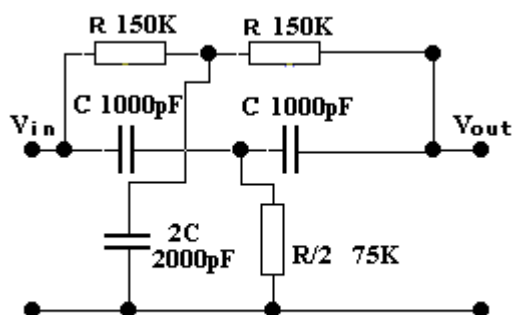


图 7-1 双 T 选频网络

1. 若合上开关 K1，断开 K2，则由两个电阻和电容 2C 构成 T 型网络，此时输出端电压 V_o 与电容 2C 上电压相等，所以该 T 型网络实质上是电阻 R 与电容 2C 构成的 R-C 电路其传递函数为：

$$H_1(j\omega) = 1 / (1 + j\omega 2CR) \quad \text{或} \quad H_1(S) = 1 / (1 + 2CRS)$$

$$\text{所以其幅频 } A_1(\omega) = |H(j\omega)| = 1 / \sqrt{1 + (2\omega RC)^2}$$

如图 7-2 所示

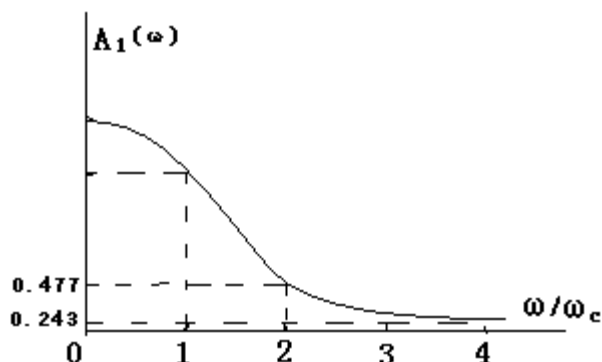


图7-2 单T型低通网络

当 $\omega=0$ 时, $A_1(\omega)=1$

当 $\omega=\omega_c=1/(2CR)$ 时, $A_1(\omega_c)=1/\sqrt{2}=0.707$

当 $\omega>\omega_c$, 幅频特性曲线急剧下降, 说明频率高于 ω_c 的输入信号经过系统后, 将被衰减, 仅能得到很小的输出幅度, 而频率低于 ω_c 的信号能较好地通过该网络, 所以又称为低通网络, ω_c 称为低通网络的截止频率, 频率为 ω_c 的信号通过该网络, 幅度将被衰减 3 分贝, 即 $20\lg 0.707=-3\text{dB}$

2. 若合上开关 K_2 , 断开 K_1 , 则得到二个电容 C 和电阻 $R/2$ 组成的 T 型网络, 其传递函数为:

$$H_2(j\omega) = \frac{1}{1-j(2/\omega CR)} \quad \text{其幅频特性} \quad A_2(\omega) = |H_2(j\omega)| = \frac{1}{\sqrt{1+(2/\omega CR)^2}}$$

如图 7-3 所示 当 $\omega=0$ 时, $A_2(\omega)=0$

当 $\omega=\omega_c=2/(RC)$ 时, $A_2(\omega_c)=1/\sqrt{2}=0.707$

或 $20\lg A_2(\omega_c)=-3\text{dB}$

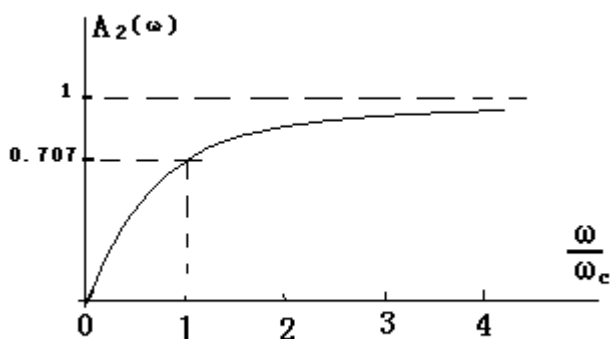


图7-3 单T型高通网络

当 $\omega > \omega_c$ 时, $A_2(\omega)$ 很快趋于 1, 即频率高于 ω_c 的信号能顺利通过该网络。

当 $\omega < \omega_c$ 时, $A_2(\omega)$ 急剧下降趋于 0, 说明频率低于

ω_c 的信号将被网络衰减, 所以该网络被称为高通网络, $\omega = \omega_c$ 称为高通网络的下截止频率。

3. 如果 K_1 , K_2 同时合上, 得到二个 T 型电路并联的网络, 称为双 T 型网络, 它的传递函数为:

$$H_3(j\omega) = \frac{(1 - \omega CR)^2}{1 - (\omega CR)^2 + 4j\omega CR}$$

当 $\omega = \omega_0 = 1/RC$ 时, $H_3(j\omega_0) = 0$, 称 $\omega = \omega_0$ 为 $H_3(j\omega)$ 的零点。即频率为 ω_0 的信号经过双 T 网络, 将被衰减为零。

其幅频特性

$$A_3(\omega) = |H_3(j\omega)| = \frac{(1 - \omega CR)^2}{\sqrt{[1 - (\omega CR)^2]^2 + (4\omega / (RC))^2}}$$

$$\omega_0 = 1/RC \quad A_3(\omega) = \frac{[1 - \omega / \omega_0]^2}{\sqrt{[1 - (\omega / \omega_0)^2]^2 + [4\omega / \omega_0]^2}}$$

其幅频特性曲线如图 7-4 所示

令 $A_3(\omega)=0.707$ 可求得 $\omega_{c1}=0.316\omega_0$ $\omega_{c2}=4.23\omega_0$

从 $\omega_{c1} \sim \omega_{c2}$ 为阻带， $B_\omega = \omega_{c2} - \omega_{c1}$ 称为阻带带宽

在 $\omega < \omega_0$ 特性取决于低通电路

在 $\omega > \omega_0$ 特性取决于高通电路

在 $\omega = \omega_0$ 无输出（输出为零）

（注意：双 T 网络的特性不是两单 T 网络的简单迭加）

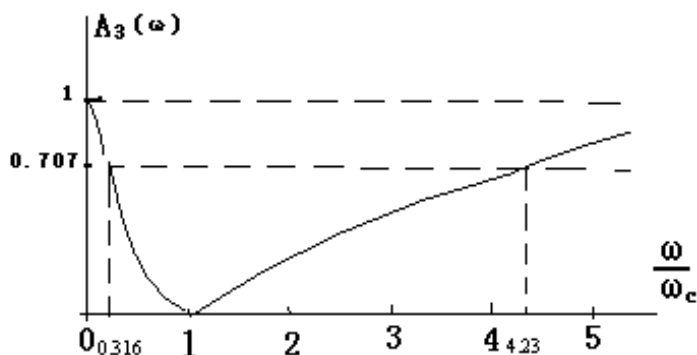


图7-4 双T型阻带网络

双 T 网络的相频特性，可由 $H_3(j\omega)$ 得到。

$$\phi_3(\omega) = \arctg \frac{-4(\omega/\omega_0)}{1-(\omega/\omega_0)^2} = -\arctg \frac{4(\omega/\omega_0)}{1-(\omega/\omega_0)^2}$$

其相频特性曲线如图 7 - 5 所示

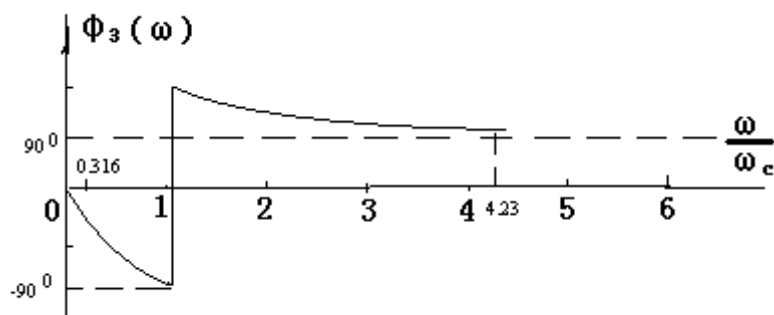


图7-5 双T型网络相频特性

三. 预习练习

1. 计算图 7 - 6 的传递函数，画出幅频特性曲线，求出截止频率 ω_c 和通带带宽 $B_\omega = ?$

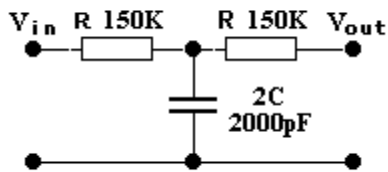


图7-6 低通网络

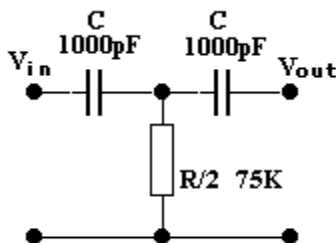


图7-7 高通网络

2. 求出图7-7的传递函数，画出幅频特性，求出截止频率 ω_c 。
3. 求出图7-8的传递函数，画出幅频、相频特性，求出 ω_0 ， ω_{c1} ， ω_{c2} 。

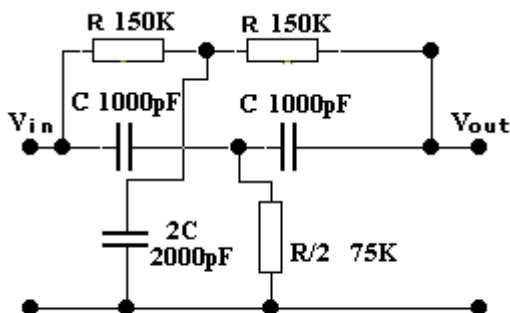


图7-8 双T选频网络

四. 实验内容

1. 测量图7-6所示单T低通网络的幅频特性，相频特性，将函数信号发生器的输出端接到图7-6的输入端 V_i ，将输入正弦信号的电压峰-峰值 $V_{ip-p} = 2V$ （在整个测试过程中，保持电压值恒定），调节信号源的频率，记录在各输入频率下，输出电压 V_o 的峰-峰值 V_{op-p} （由示波器测量）

表1：

| | | | |
|------------------------------------|--|--|--|
| 测量条件 $V_{ip-p}=2V$ ，正弦波（选九个以上测试频率） | | | |
| 输入信号频率 $f_i(KHZ)$ | | | |
| 输出端 V_o p-p(V) | | | |
| 输出信号 V_o 的相移 | | | |

2. 测量图7-7所示单T高通网络的幅频特性，相频特性，将函数信号发生器输出信号接到图7-7的网络输入端，重复实验内容1步骤

表2：

| | | | |
|-------------------------------------|--|--|--|
| 测量条件 $V_{ip-p}=2V$ ，正弦信号（选九个以上测试频率） | | | |
| 输入信号频率 $f_i(KHZ)$ | | | |
| 输出端 V_0 p-p(V) | | | |
| 输出信号 V_0 的相移 | | | |

3. 测量图 7-8 所示双 T 带阻网络的幅频、相频特性。将函数发生器输出信号接到图 7-1 网络的输入端，重复实验内容 1 的步骤，用示波器测量输出端 V_0 的峰一峰值 V_{0p-p} ，用双踪示波器测量 V_0 相对于 V_i 端的相移。

表 3:

| | | | |
|-------------------------------------|--|--|--|
| 测量条件 $V_{ip-p}=2V$ ，正弦信号（选九个以上测试频率） | | | |
| 输入信号频率 $f_i(KHZ)$ | | | |
| 输出端 V_0 p-p(V) | | | |
| 输出信号 V_0 的相移 | | | |

五. 仪器设备

函数信号发生器 1 台 双踪示波器 1 台
毫伏表 1 台 九孔实验板 1 块
电阻 $75K\Omega$, $150K\Omega$ (2 个)
电容 $1000pF$ (2 个) , $2000pF$

六. 实验报告要求

1. 整理实验数据，绘出各电路的幅频、相频特性曲线。
2. 将理论计算和实验曲线所得低通、高通的通频带，截止频率以及带阻电路的阻带 $\omega_{c2}, \omega_{c1}, \omega_0$ 等参数相比较。

七. 注意事项

在测量幅频特性时，要始终保持输入信号的幅度 V_{ip-p} 不变。

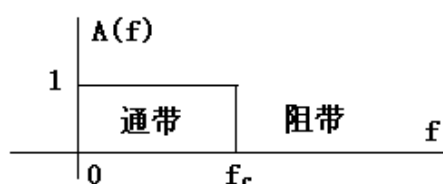
实验八 无源、有源滤波器特性测试（低通、高通部分）

一. 实验目的

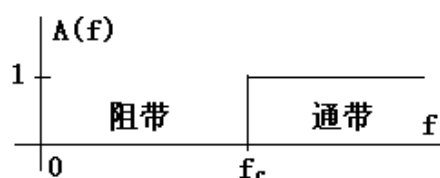
1. 了解无源、有源低通滤波器，高通滤波器的基本结构、特点，比较理想滤波器与实际滤波器的差别。
2. 用对比法研究测试 RC 低通滤波器及有源 RC 低通滤波器的频率特性。
3. 用对比法研究测试 RC 高通滤波器及有源 RC 高通滤波器的频率特性。

二. 实验原理

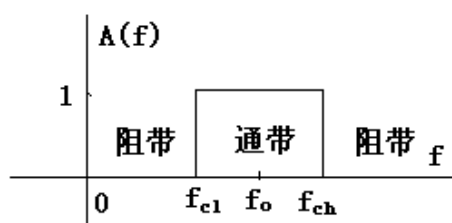
1. 滤波器可以用 R、L、C 无源元件组成，这类滤波器称为无源滤波器，当滤波器由无源元件和运算放大器等有源器件共同组成，称为有源滤波器。
2. 各种理想滤波器的幅频特性如图 8-1 所示



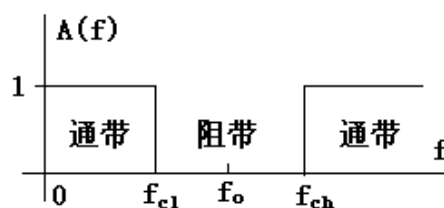
(a) 理想低通滤波器幅频特性



(b) 理想高通滤波器幅频特性



(c) 理想带通滤波器幅频特性



(d) 理想带阻滤波器幅频特性

图8-1各种理想滤波器幅频特性

信号能够通过的频率范围定义为通带，阻止或衰减信号的频率范围定义为阻带，通带与阻带的分界点频率称为截止频率 f_c ，亦称转折频率，对于带通、带阻滤波器 f_0 为中心频率， f_{c1} 和 f_{ch} 分别称为滤波器的低端和高端截止频率。

3. R-C 无源低通滤波器频率特性

二阶 R-C 无源低通滤波器电路 (LPF) 如图 8-2 (a) 所示

二阶无源 RC 低通滤波器的频响如图 8-2(b)所示:

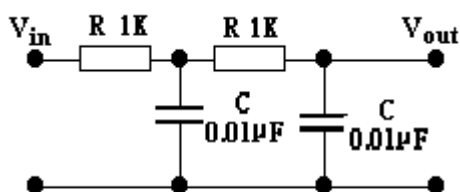


图8-2a 二阶无源LPP电路

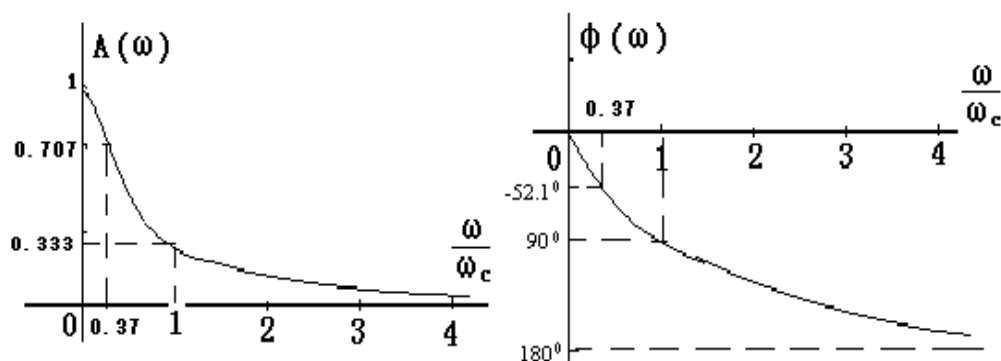


图8-2b 二阶无源LPP的频率特性

$$H(j\omega) = \frac{V_0(j\omega)}{V_1(j\omega)} = \frac{1}{(1 - \omega^2 R^2 C^2 + j3\omega RC)}$$

$$|H(j\omega)| = \frac{1}{\sqrt{(1 - \omega^2 R^2 C^2)^2 + (3\omega RC)^2}}$$

$$= \frac{1}{\sqrt{(1 - \omega^2 / \omega_0^2)^2 + (\omega / \omega_0)^2}}$$

其中 $\omega_0 = 1/RC$ 当 $\omega \ll \omega_0$ 时 $|H(j\omega)| \approx 1$

ω_0 为特征频率 当 $\omega \gg \omega_0$ 时 $|H(j\omega)| \approx 0$

当 $\omega = \omega_0$ 时 $|H(j\omega)| = 1/3$

令 $|H(j\omega)| = 1/\sqrt{2}$ 可求得 $\omega_c = 0.37 \omega_0$

其中 ω_c 为截止频率 $H(j\omega)$ 相频特性为

$$\Phi(\omega) = -\arctan \frac{3\omega/\omega_0}{1-(\omega/\omega_0)^2}$$

在 $\omega/\omega_0 = 0.37$ 时 $\Phi(\omega) = -52.1^\circ$

由上分析二阶无源 R-C 低通滤波器特性与理想 LPF 特性有很大差别。

4. R-C 有源低通滤波器的频率特性

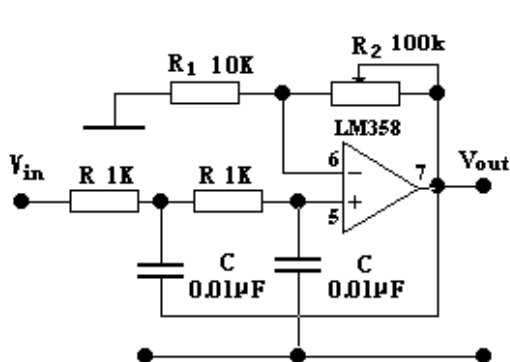


图 8-3a R-C 有源 LPF 电路

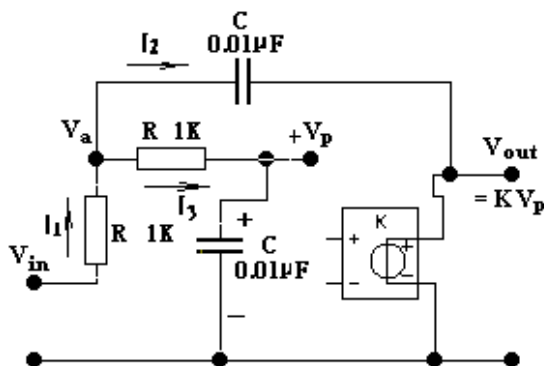


图 8-3b R-C 有源 LPF 等效电路

二阶 R-C 有源低通滤波器如图 8-3 a 所示

图 8-3 b 为图 8-3 a 所示的二阶 R-C 有源低通滤波器的等效电路。

$$\begin{cases} \frac{V_i - V_A}{R} = \frac{V_A - V_0}{1/j\omega C} + \frac{V_A - V_P}{R} \\ \frac{V_A - V_P}{R} = \frac{V_P}{1/j\omega C} \\ V_0 = KV_P \end{cases}$$

由此可得：

$$H(j\omega) = \frac{V_0(j\omega)}{V_i(j\omega)} = \frac{K}{1 - (\omega RC)^2 + j(3-K)\omega RC}$$

令 $\omega_0 = 1/RC$ ω_0 为特征频率

$$\text{则 } H(j\omega) = \frac{K}{1 - (\omega/\omega_0)^2 + j(3-K)(\omega/\omega_0)}$$

所以二阶 R-C 有源低通滤波器的幅频特性：

$$|H(j\omega)| = \frac{K}{\sqrt{(1 - \omega^2/\omega_0^2)^2 + (3-K)^2 (\omega/\omega_0)^2}}$$

$$\begin{aligned} \text{当 } K=1 \text{ 时} \quad \omega=0 \text{ 时} \quad |H(j\omega)| &= 1 \\ \omega \gg \omega_0 \text{ 时} \quad |H(j\omega)| &\approx 0 \\ \omega = \omega_0 \text{ 时} \quad |H(j\omega)| &= 0.5 \end{aligned}$$

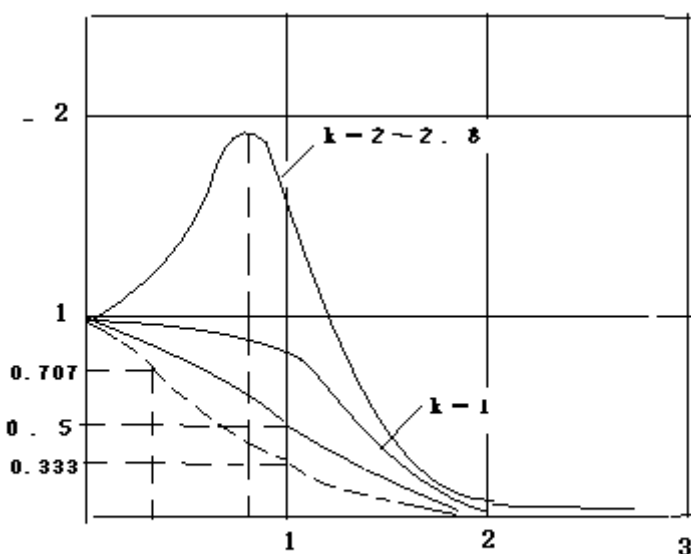


图 8-4 无源 有源低通滤波器幅频特性

图 8-4 为低通滤波器的幅频特性，图中虚线所示为无源低通的特性曲线。

5. 无源、有源高通滤波器特性

二阶的无源、有源高通滤波器的电路如图 8-5(a)、(b)所示

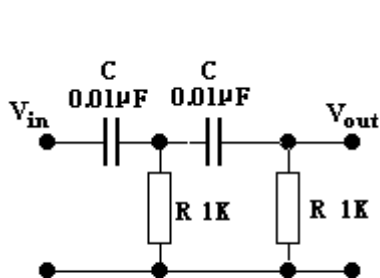


图8-5a 二阶无源高通滤波器电路

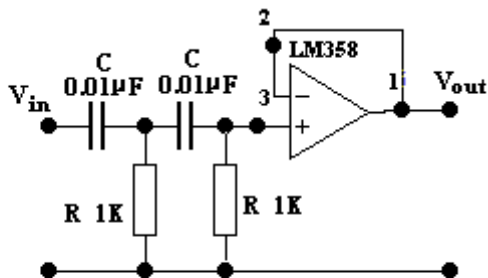


图8-5b 二阶有源高通滤波器电路

三. 预习练习

1. 仿照低通滤波器的分析方法，分析二阶无源高通滤波器及有源高通滤波器的频率特性。
2. 计算图 8-2(a)所示，RC无源低通滤波器的截止频率 ω_c 和特征频率 ω_0 的值为多少？并计算 $\phi(\omega_0)$ 和 $\phi(\omega_c)$ 的值各为多少？
3. 计算图 8-3(a)所示RC有源低通滤波器的截止频率 ω_c 和 $|H(j\omega_0)|$ 的值为多少？（K=1）？
4. 计算图 8-5(a) (b)所示的RC无源、有源高通滤波器的截止频率 ω_c 和特征频率 ω_0 的值为多少？计算K=1 时RC有源高通滤波器的 $|H(j\omega_0)|$ 的值为多少？

四. 实验内容和步骤

1. R-C 无源低通滤波器幅频特性，相频特性测试

将函数信号发生器接到RC无源低通滤波器输入端，函数信号发生器输出正弦波，调节其输出电压，使滤波器输入电压峰-峰值 $V_{ip-p}=2$ 伏，保持该电压恒定，调节信号源的正弦波输出频率，测量 $f=0\sim 5f_0$ 范围内各频率时，低通滤波器输出电压峰-峰值 V_{op-p} ，并用双踪示波器测出在各频率时，输出 V_o 相对于 V_i 的相移。

表一：无源低通滤波器测量数据

| 测量条件 $V_{ip-p}=2V$ ，正弦波（选九个以上测试频率） | | | |
|------------------------------------|--|--|--|
| 输入 V_i 的频率 $f(Hz)$ | | | |
| 输出 V_o 的幅值 $V_{op-p}(V)$ | | | |
| 输出 V_o 相位 ϕ （度） | | | |

2. R-C 有源低通滤波器幅频和相频特性的测试

将函数信号发生器接到 RC 有源低通滤波器输入端，调节信号发生器的正弦波输出电压，使滤波器的输入电压 $V_{ip-p}=200mV$ ，并保持该电压值恒定，调节信号源输出频率，用示波器测量各频率时滤波器的输出电压 V_{op-p} ，并测出在各频率时，输出信号 V_o 的相位

表二：K=1 时有源低通滤波器测量数据

| 测量条件 $V_{ip-p}=200mV$ ，正弦波（选九个以上测试频率） | | | |
|---------------------------------------|--|--|--|
| 输入 V_i 的频率 $f(Hz)$ | | | |
| 输出 V_o 的幅值 $V_{op-p}(V)$ | | | |
| 输出 V_o 相位 ϕ （度） | | | |

3. RC 无源高通滤波器幅频特性、相频特性测试

将函数信号发生器接到RC无源高通滤波器输入端，函数信号发生器输出正弦波，调节其输出电压，使滤波器输入电压 $V_{ip-p}=2$ 伏，保持该电

压恒定，调节信号源的正弦波输出频率，测量 $f=0\sim 5f_0$ 范围内各频率时，高通滤波器输出电压 V_{op-p} ，并用双踪示波器测出在各频率时，输出 V_o 相对于 V_i 的相移。并记录测试数据。

表三：无源高通滤波器测量数据

| 测量条件 $V_{ip-p}=2V$ ，正弦波（选九个以上测试频率） | | | |
|------------------------------------|--|--|--|
| 输入 V_i 的频率 $f(Hz)$ | | | |
| 输出 V_o 的幅值 $V_{op-p}(V)$ | | | |
| 输出 V_o 相位 ϕ （度） | | | |

4. RC 有源高通滤波器特性测试

将函数信号发生器接到 RC 有源高通滤波器输入端，调节信号发生器的正弦波输出电压，使滤波器的输入电压 $V_{ip-p}=200mV$ ，并保持该电压值恒定，调节信号源输出频率，用示波器测量各频率时滤波器的输出电压 V_{op-p} ，并测出在各频率时，输出信号 V_o 的相位，并记录测试数据。

表四：K=1 时有源高通滤波器测量数据

| 测量条件 $V_{ip-p}=200mV$ ，正弦波（选九个以上测试频率） | | | |
|---------------------------------------|--|--|--|
| 输入 V_i 的频率 $f(Hz)$ | | | |
| 输出 V_o 的幅值 $V_{op-p}(V)$ | | | |
| 输出 V_o 相位 ϕ （度） | | | |

五. 仪器设备：

函数信号发生器 1 台 双踪示波器 1 台
 九孔实验板 1 块
 电阻 $1K\Omega$ （2 个） $10K\Omega$ 电位器 $100K\Omega$
 电容器 $0.01\mu F$ （2 个）
 双运放座（带 LM358）

六. 实验报告要求

1. 整理各项实验数据，绘制各滤波器的幅频特性曲线和相频特性曲线。
2. 由幅频特性曲线找出各种低通、高通滤波器的截止频率 ω_c ，并与理论计算值比较。
3. 将 RC 无源低通、RC 有源低通的测量特性与理想低通特性比较，说明了什么？将 RC 无源高通、RC 有源高通的测量特性与理想高通特性比较，说明了什么？

七. 注意事项

1. 有源滤波器特性测试，采用+12V，-12V 给运放供电，接线注意极性。
2. 有源滤波器输入信号，峰一峰值在 $200mV$ 以内，以免运算放大器工作

在非线性状态，而造成测量误差。

3. 用示波器测量时，必须将示波器的“地”与信号源的“地”始终可靠连接！

实验九 无源、有源滤波器特性测试（带通、带阻部分）

一. 实验目的

1. 了解无源、有源带通、带阻滤波器的基本电路结构、特点。比较其与理想频率特性的差异。
2. 用对比法研究测试无源、有源带通、带阻滤波器的频率特性。

二. 实验原理

1. 理想的带通、带阻滤波器的频率特性如实验八（图 8-1）所示
2. 带通滤波器电路及其频率特性

二阶无源、有源带通滤波器如图 9-1（a）（b）所示

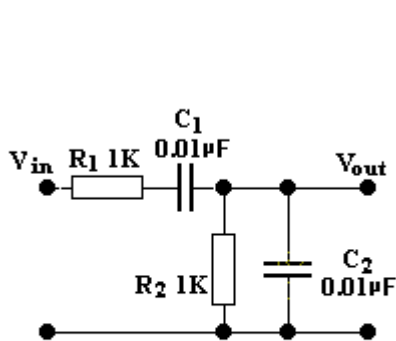


图9-1a 无源带通滤波器

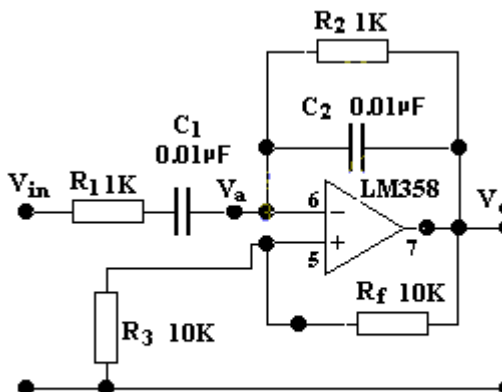


图9-1b 有源带通滤波器

（1）二阶无源带通滤波器的频率特性

由电路可计算得到系统传递函数：

$$H(S) = \frac{V_o(S)}{V_i(S)} = \frac{SC_1R_2}{1 + S(R_1C_1 + R_2C_2 + C_1R_2) + S^2R_1R_2C_1C_2}$$

系统的频响：

$$H(j\omega) = \frac{j\omega C_1R_2}{1 - \omega^2R_1R_2C_1C_2 + j\omega(R_1C_1 + R_2C_2 + C_1R_2)}$$

其幅频特性为：

$$|H(j\omega)| = \frac{\omega C_1R_2}{\sqrt{(1 - \omega^2R_1R_2C_1C_2)^2 + \omega^2(R_1C_1 + R_2C_2 + C_1R_2)^2}}$$

若取 $R_1=R_2=R$ $C_1=C_2=C$ $\omega_0=1/RC$ 则

$$|H(j\omega)| = \frac{\omega CR}{\sqrt{(1-\omega^2 R^2 C^2)^2 + 9\omega^2 R^2 C^2}} = \frac{\omega/\omega_0}{\sqrt{[1-(\omega/\omega_0)^2]^2 + 9(\omega/\omega_0)^2}}$$

式中 $\omega_0 = 1/RC$ 令 $\frac{d|H(j\omega)|}{d\omega} = 0$ 求得 $|H(j\omega)|$ 的最大值

当 $\frac{\omega}{\omega_0} = 1$ 时 $|H(j\omega)| = \frac{1}{3}$ 为最大值

当 $\omega = 0$ 时 $H(j0) = 0$ 当 $\omega \rightarrow \infty$ 时

$$|H(j\omega)| = \frac{\omega/\omega_0}{\sqrt{1+7(\omega/\omega_0)^2+(\omega/\omega_0)^4}} \approx \frac{\omega/\omega_0}{(\omega/\omega_0)^2} \rightarrow 0$$

其频率特性呈带通特性

求出 $|H(j\omega)| = 0.707 |H(j\omega)|_{\max}$ 的频率 ω_c ，求解下式

$$\frac{\omega/\omega_0}{\sqrt{1+7(\omega/\omega_0)^2+(\omega/\omega_0)^4}} = 0.707 \cdot 1/3$$

得到 $(\omega_{CH}/\omega_0) = 3.3028$ $(\omega_{CL}/\omega_0) = 0.3028$

中心频率为 $\omega'_0 = \frac{\omega_{CH} + \omega_{CL}}{2} = 1.8\omega_0$

其相频特性：

$$\Phi(\omega) = -\arctg \frac{1-(\omega/\omega_0)^2}{3(\omega/\omega_0)}$$

该二阶无源带通滤波器的幅频特性，相频特性如图 9-2 所示。

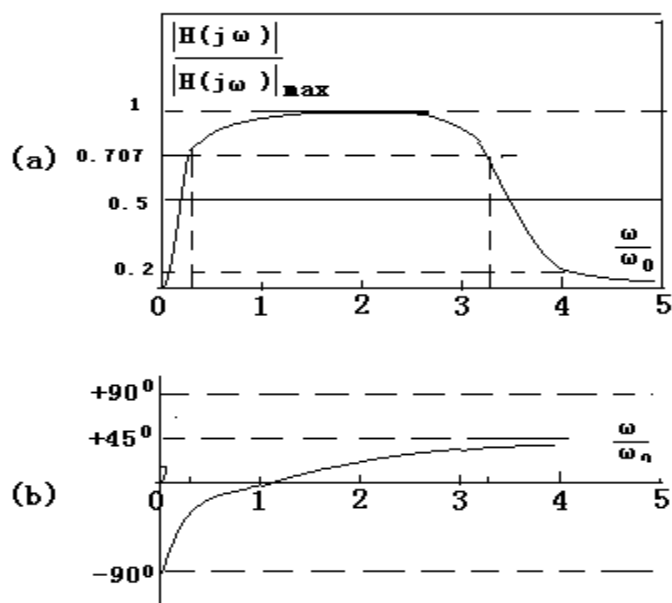


图9-2 二阶无源带通频率特性

(2) 二阶有源带通滤波器频率特性

根据图 9-1 (b) 所示电路，可列出方程

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{V_i - V_A}{R_1 + 1/j\omega C_1} = -\frac{V_A - V_0}{\frac{R_2/j\omega C_2}{R_2 + 1/j\omega C_2}} \\ V_0 = -KV_A \end{array} \right. \quad \text{或} \quad \left\{ \begin{array}{l} \frac{V_i - V_A}{R_1 + 1/SC_1} = -\frac{V_A - V_0}{\frac{R_2/SC_2}{R_2 + 1/SC_2}} \\ V_0 = -KV_A \end{array} \right.$$

可解得：

$$H(S) = \frac{-KSC_1R_2}{(1+K) + [C_1R_2 + (1+K)(R_1C_1 + R_2C_2)]S + (1+K)R_1R_2C_1C_2S^2}$$

或

$$H(S) = \frac{-KSC_1R_2 / [(1+K)R_1R_2C_1C_2]}{S^2 + S \frac{C_1R_2 + (1+K)(R_1C_1 + R_2C_2)}{(1+K)R_1R_2C_1C_2} + \frac{1}{R_1R_2C_1C_2}}$$

$$H(j\omega) = \frac{-j\omega K C_1 R_1}{(1+K)+j\omega[C_1 R_2+(1+K)(R_1 C_1+R_2 C_2)]-(1+K)R_1 R_2 C_1 C_2 \omega^2}$$

$$= \frac{-j\omega K C_1 R_1}{(1+K)(1-R_1 R_2 C_1 C_2 \omega^2)+j\omega[C_1 R_2+(1+K)(R_1 C_1+R_2 C_2)]}$$

若取 $R_1=R_2=R$ $C_1=C_2=C$ 则有:

$$H(j\omega) = \frac{-j\omega K C R}{(1+K)(1-R^2 C^2 \omega^2)+j\omega(3+2K)RC}$$

$$|H(j\omega)| = \frac{\omega K C R}{\sqrt{(1+K)^2(1-R^2 C^2 \omega^2)^2 + [\omega(3+2K)RC]^2}}$$

令 $\omega_0=1/RC$, 则

$$|H(j\omega)| = \frac{K \omega/\omega_0}{\sqrt{(1+K)^2[1-(\omega/\omega_0)^2]^2 + [(3+2K)(\omega/\omega_0)]^2}}$$

$$\text{设 } K=1 \quad |H(j\omega)| = \frac{\omega/\omega_0}{\sqrt{2^2[1-(\omega/\omega_0)^2]^2 + [5(\omega/\omega_0)]^2}}$$

$$\text{令 } \frac{d|H(j\omega)|}{d\omega} = 0 \quad \text{解得 } \omega = \omega_0 \text{ 时 } |H(j\omega_0)| = 1/5 = |H(j\omega)|_{\max}$$

$$\text{为求出 } \omega_{ch} \text{ 及 } \omega_{cl} \quad \text{令 } |H(j\omega_c)| = \frac{1}{\sqrt{2}} |H(j\omega)|_{\max} = \frac{1}{5\sqrt{2}}$$

解得: $\omega_{ch}/\omega_0=2.85$ $\omega_{cl}/\omega_0=0.35078$

计算得到带通的中心频率 $\omega_0'=(\omega_{ch} + \omega_{cl})/2 = 1.6\omega_0$

当 $\omega \rightarrow 0$ 及 $\omega \rightarrow \infty$ 时 $|H(j\omega)| \rightarrow 0$

二阶有源带通滤波器的幅频特性如图 9-3 所示

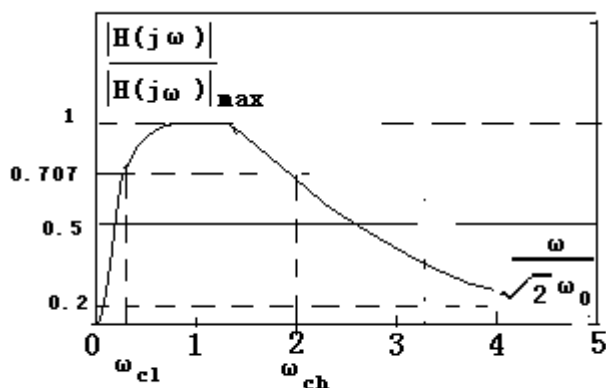


图9-3 有源带通滤波器幅频特性

3. 带阻滤波器电路及其频率特性

无源和有源带阻滤波器的电路如图 9-4 所示

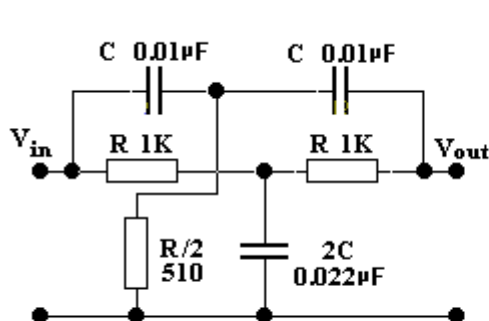


图9-4a 无源带阻滤波器电路

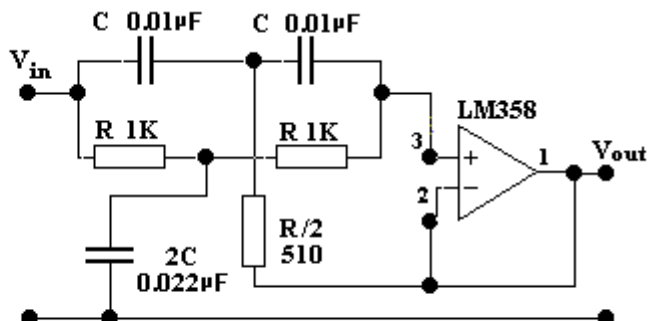


图9-4b有源带阻滤波器电路

无源带阻滤波器频率特性，详见实验 7 中双 T 网络频率特性

三. 预习练习

1. 计算图 9-1(a)所示带通滤波器的截止频率 ω_{CH} ， ω_{CL} 及其中心频率 ω'_o ，特征频率 ω_o 计算在这些频率上的相位， $\phi(\omega_{CH})$ ， $\phi(\omega_{CL})$ ， $\phi(\omega'_o)$ ， $\phi(\omega_o)$ 。
2. 计算 $K=1$ 时，图 9-1(b)所示有源带通的截止频率 ω_{CH} ， ω_{CL} 及其中心频率 ω'_o ，计算在这些频率点上的相位 $\phi(\omega_{CH})$ ， $\phi(\omega_{CL})$ ， $\phi(\omega'_o)$

3. 计算图 9-4(a)所示无源带阻滤波器的 ω_{CH} , ω_{CL} 及阻带的带宽（参见实验七 双T网络的频率特性）

四. 实验内容

1. 无源带通滤波器幅频特性、相频特性测试

将函数信号发生器接到图 9-1(a)所示电路的输入端，令信号源输出正弦信号，信号的幅值 $V_{p-p}=2$ 伏，并在整个特性测试过程中，保持该电压恒定，调节输出信号的频率，测量不同输入频率时，滤波器的输出信号 V_o 的幅度、相位，并记录于表一。

表一：无源带通滤波器测量数据

| 测量条件 $V_{p-p}=2V$ ，（选九个以上测试频率） | |
|--------------------------------|--|
| 输入信号 V_i 的频率 $f(Hz)$ | |
| 输出信号 V_o 的幅值 $V_{op-p}(V)$ | |
| 输出信号 V_o 的相移（度） | |

2. 有源带通滤波器幅频特性、相频特性测试

将函数信号发生器输出信号接到图 9-1(b)所示电路的输入端，令信号发生器输出正弦信号，幅值为 $V_{p-p}=200mV$ ，并在整个测试过程中保持恒定，调节正弦信号的频率，用双踪示波器测量，在不同输入频率下，滤波器的输出信号的幅度、相位，并记录于表二

表二：有源带通滤波器测试

| 测量条件 $V_{ip-p}=200mV$ ，（选九个以上测试频率） | |
|------------------------------------|--|
| 输入信号 V_i 的频率 $f(Hz)$ | |
| 输出信号 V_o 的幅值 $V_{op-p}(V)$ | |
| 输出信号 V_o 的相移（度） | |

3. 无源带阻滤波器频率特性测试

将信号源输出接到图 9-4(a)所示带阻滤波器的输入端 V_i ，令信号源输出正弦信号，信号的幅值 $V_{p-p}=2$ 伏，并在整个特性测试过程中，保持该电压恒定，调节输出信号的频率，测量不同输入频率时，滤波器的输出信号 V_o 的幅度、相位，并将测试的结果记录于表三

表三：无源带阻滤波器特性测试

| 测量条件 $V_{p-p}=2V$ ，（选九个以上测试频率） | |
|--------------------------------|--|
| 输入信号频率 $f(Hz)$ | |
| 输出信号的幅值 $V_{p-p}(V)$ | |
| 输出信号的相移（度） | |

4. 有源带阻滤波器频率特性测试

将信号源输出接到图 9-4(b)所示带阻滤波器的输入端 V_i ，令信号发生器输出正弦信号，幅值为 $V_{p-p}=200\text{mV}$ ，并在整个测试过程中保持恒定，调节正弦信号的频率，用双踪示波器测量，在不同输入频率下，滤波器的输出信号的幅度、相位，并将测试的结果记录于表四

表四：有源带阻滤波器特性测试

| 测量条件 $V_{p-p}=200\text{mV}$ ，（选九个以上测试频率） | |
|--|--|
| 输入信号频率 $f(\text{Hz})$ | |
| 输出信号的幅值 $V_{p-p}(\text{V})$ | |
| 输出信号的相移（度） | |

五. 仪器设备

函数信号发生器 1 台 双踪示波器 1 台
九孔实验板 1 块
电阻 510Ω $1\text{K}\Omega$ （2 个） $10\text{K}\Omega$ （2 个）
电容 $0.01\mu\text{F}$ （2 个） $0.022\mu\text{F}$
双运放座（带 LM358）

六. 实验报告要求

1. 整理各项实验数据，绘制各滤波器的幅频特性和相频特性曲线。
2. 由带通、带阻的特性曲线找出各自的截止频率 ω_{CH} ， ω_{LH} 并与理论计算值比较。
3. 将无源带通与有源带通的特性曲线分别与理想带通特性比较。
4. 将无源带阻与有源带阻的特性曲线分别与理想带阻特性比较。

七. 注意事项

1. 有源滤波器特性测试中，采用 $+12\text{V}$ ， -12V 给运放供电，注意接线极性。
2. 在整个特性测试过程中，必须随时检查输入信号的幅度，保证其幅度恒定不变。
3. 用示波器测量时，示波器的“地”必须与信号源的“地”可靠连接。

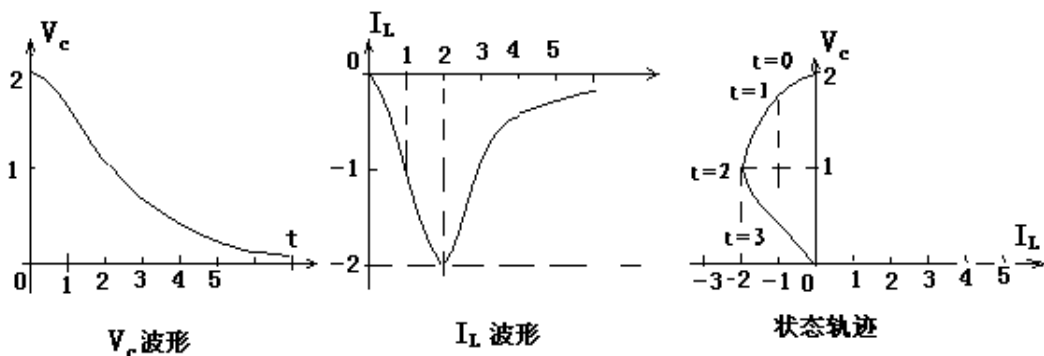
实验十 二阶网络状态轨迹的显示

一. 实验目的

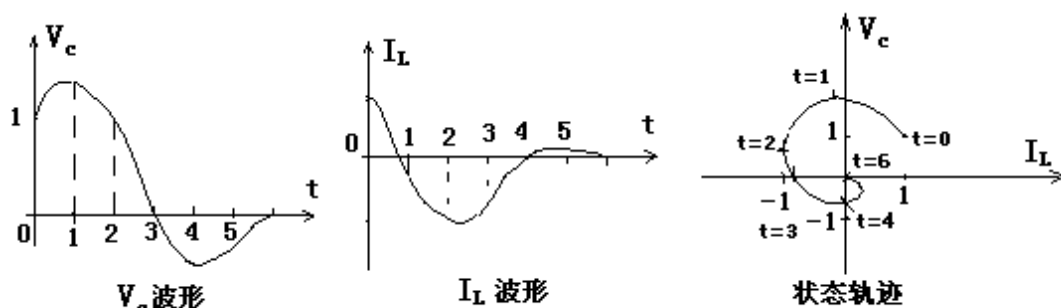
1. 观察 RLC 电路的状态轨迹
2. 掌握一种同时观察两个无公共接地端电信号的方法

二. 原理说明

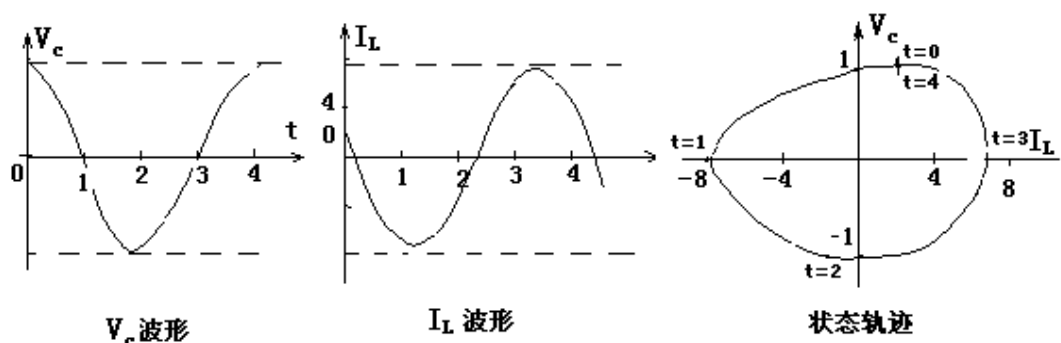
1. 任何变化的物理过程在每一时刻所处的“状态”，都可以用若干个“状态变量”来描述，电路中若含有储能元件，在不同时刻，电路中的各支路电压，电流均在变化，则电路在不同时刻所处的状态也不相同，在电路中选择电容上的电压和电感上的电流为状态变量，只要了解 V_C 和 I_L 的变化，就可以了解电路状态的变化。
2. N 阶的网络，要由 n 个状态变量来描述，可设想有一个 n 维空间，每一维表示一个状态变量，则 n 个状态变量，构成一个 n 维的“状态空间”。网络在每一时刻所处的状态可以用状态空间中一个点来表达，随着时间的变化，状态空间中点的移动，形成一个轨迹，称为“状态轨迹”。
特殊地一个二阶网络，用二个状态变量组成一个二维状态空间为一个平面，状态轨迹是平面上的一条曲线，电路参数改变时，相应的状态轨迹也随之改变，当电路处于过阻尼，欠阻尼和临界状态下的状态轨迹如图 10-1(a)(b)(c)所示



(a) RLC 电路过阻尼时状态轨迹



(b) RLC电路欠阻尼时状态轨迹



(c) RLC电路 $R=0$ 时状态轨迹

图10-1 RLC电路的状态轨迹

3. 状态变量是一些与储能直接有关的物理量（如电容上电压 V_c ，电感上电流 I_L 有关）所以状态变量一般是不能突变的，因而状态轨迹是一根连续的曲线。
4. 用双踪示波器显示二阶网络状态轨迹的原理与显示吕沙育图形完全一样，采用如图 10-2 所示电路，用方波作为激励，使过渡过程重复出现，以使用示波器观察，示波器X轴应接 V_R ，它与 I_L 成正比，而Y轴应接 V_c ，但因为电压 V_c 和 V_R 无公共接地端，给测试带来困难，为此来用图 10-3 所示减法器，其输出电压 $V_0 = R_2 / R_1 (V_2 - V_1)$ ，将 V_a ， V_b 分别接到减法器的输入端 V_2 ， V_1 处，则 $V_0 = R_2 / R_1 (V_a - V_b)$ ，若 $R_2 = R_1$ ，则 $V_0 = V_a - V_b = V_c$ ，该电压与 V_R 有公共接地端，从而使状态轨迹的观察成为可能。

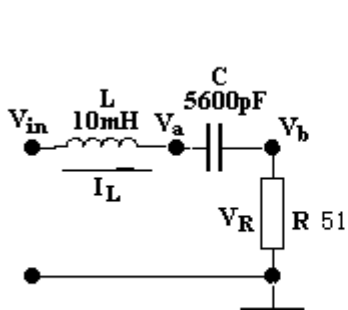


图10-2 RLC二阶网络

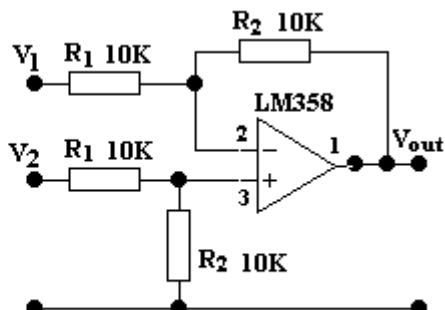


图10-3 减法器电路

三. 预习练习

1. 简述用示波器显示吕沙育图形的原理和观察状态轨迹时示波器与电路的联接方法？
2. 哪些是图 10-4 电路的状态变量，改变电位器的阻值，在不同阻值时它的状态轨迹形状如何？计算阻值分别为多少？
3. 观察状态轨迹时，示波器与电路如何接法？
4. 用什么方法能使二阶网络工作在无阻尼状态，而观察到如图 10-1(c)所示的状态轨迹？

四. 实验内容

1. 按图 10-4 联接电路和仪器，在 V_i 处输入方波作为二阶网络的激励，观察该网络的状态轨迹，并与预习练习 2 的结果比较。
2. 将方波激励（阶跃）改为周期性窄脉冲（冲激），观察冲激响应的状态轨迹。

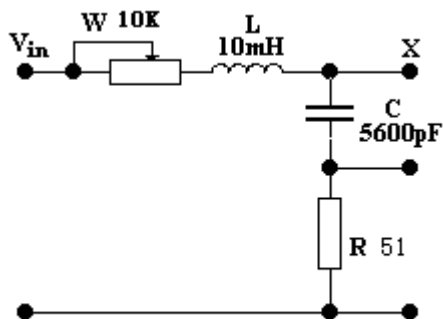


图10-4 状态轨迹观察实验图

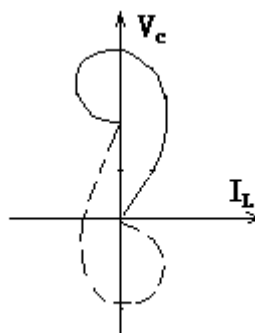


图10-5 阶跃输入下观察的状态轨迹

五. 仪器设备

函数信号发生器 1 台

双踪示波器 1 台

万用电表 1 只 九孔实验板
电阻 $51\ \Omega$ $10\ \text{K}\ \Omega$ (4 个)
电位器 $10\ \text{K}\ \Omega$
电感 $10\ \text{mH}$
电容 $5600\ \text{pF}$
双运放座 (带 LM358)

六. 注意事项

为了使瞬态过程周期性重复出现以便示波器观察, 采用方波激励代替阶跃信号它有正负两次跳变, 所以观察到的状态轨迹如图 10-5 所示, 图中实线部分对应正跳变引起的状态变化, 虚线部分则是负跳变相对应的状态变化, 应根据测试要求确定所需要的部分。

七. 实验报告要求

1. 绘出 R 取不同阻值时所观察到的各种状态轨迹, 与预习练习 2 估计的结果有什么差别, 说明产生差别的原因。
2. 绘出窄脉冲 (冲激) 激励时所观察到的状态轨迹。

整理二阶网络状态轨迹的测试方法。

实验十一 采样定理

一. 实验目的

1. 了解模拟信号的采样方法、过程及信号恢复的方法
2. 验证采样定理

二. 原理说明

1. 离散时间信号可以是按一定时间间隔输出的数的序列，也可以由连续时间信号采样得到，采样信号 $f_s(t)=f(t) \cdot S(t)$ ，其中 $f(t)$ 为连续时间信号， $S(t)$ 是一组周期性窄脉冲，称为采样脉冲序列，如图 11-1 所示，其中 T_s 为采样周期，其倒数 $f_s=1/T_s$ 称为采样频率。对 $S(t)$ 进行傅里叶分析， $S(t)$ 的频率成分为它的基波频率 f_s 及其各次谐波频率 $2f_s, 3f_s, 4f_s, \dots$

$$a_m = \frac{1}{T} \int_{-\tau/2}^{\tau/2} 1 e^{-jm\omega_s t} dt = \frac{\tau}{T} S_a(m\omega_s \tau/2)$$

$$S(t) = \frac{\tau}{T} \sum_{m=-\infty}^{+\infty} S_a(m\omega_s \tau/2) e^{-jm\omega_s t}$$

其中 $S_a(x) = \sin(x) / x$

可见各次谐波信号的幅度按 $S_a(m\omega_s \tau/2)$ 规律衰减，而采样信号 $f_s(t)$ 的频谱 $F_s(j\omega)$ 是原信号 $f(t)$ 的频谱 $F(j\omega)$ 的周期延拓，延拓的周期为 $\omega_s = 2\pi f_s$ ，所以 $F_s(j\omega)$ 的频带比原信号频谱宽得多。 $F_s(j\omega)$ 与 $F(j\omega)$ 频谱关系如图 11-2 所示。

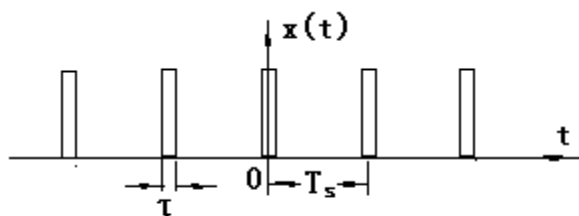


图11-1 采样脉冲序列

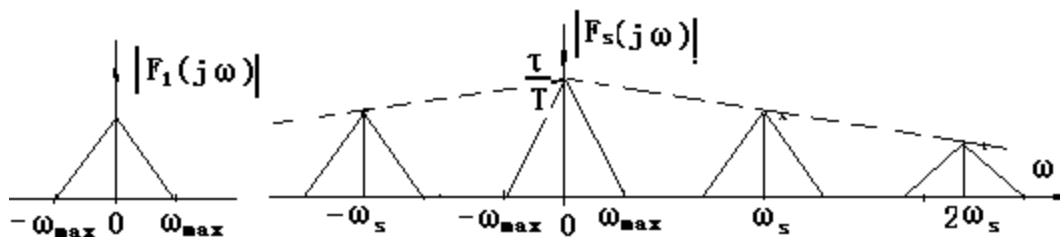


图11-2 模拟信号及其采样信号频谱

2. 要使原信号能不失真的恢复的条件是采样频率 $f_s > 2f_{\max}$ (为原信号的最高频率成分), 当 $f_s < 2f_{\max}$ 时, 采样信号的频谱会发生混迭, 在发生混迭后频谱中无法不失真地恢复原信号, 图 11-3 画出 $f_s > 2f_{\max}$ 和 $f_s < 2f_{\max}$ 两种情况下理想采样信号的频谱



图11-3 (a) 连续时间信号及其频谱

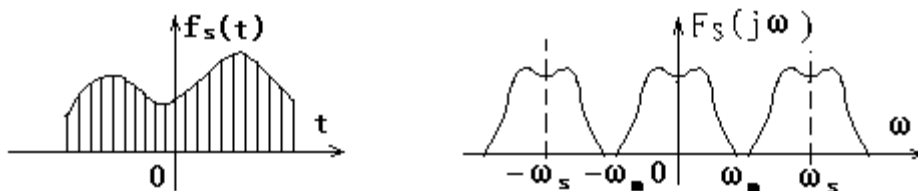


图11-3 (b) 采样信号及其频谱 ($f_s > 2f_{\max}$)

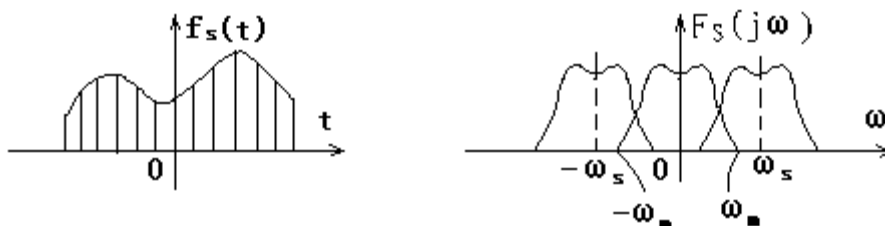


图11-3 (c) 采样信号及其频谱 ($f_s < 2f_{\max}$)

实验中选用 $f_s < 2f_{\max}$, $f_s = 2f_{\max}$, $f_s > 2f_{\max}$ 三种采样频率, 对连续时间信号采样来验证采样定理。

3. 为了对连续信号的采样，并对采样信号的恢复，可用实验原理框图 11-4 实现。

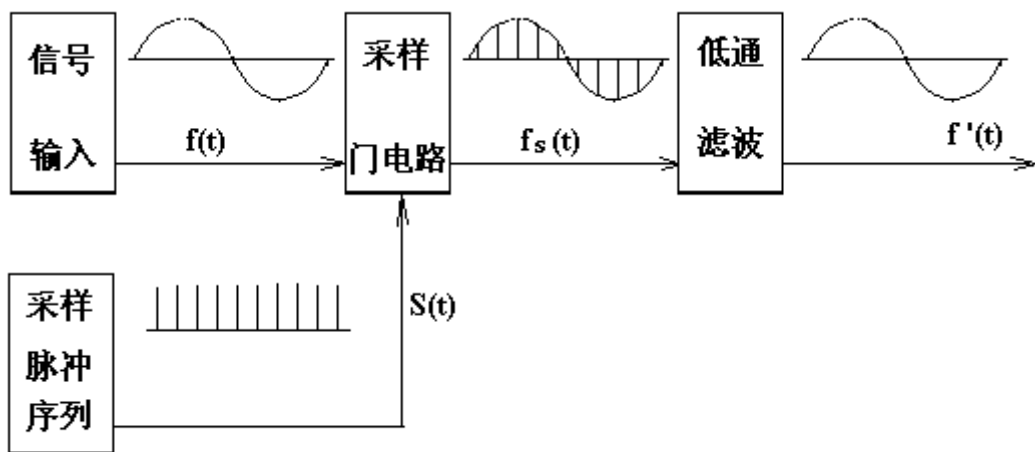


图11-4 采样定理实验框图

三. 预习练习

1. 若连续时间信号 $f(t)$ 为 50HZ 的正弦波，采样脉冲信号为 $f_s=2\text{KHZ}$ 的窄脉冲序列，试求采样后的信号 $f_s(t)$ 的频谱 $F_s(\omega)$ 。
2. 设计一个二阶 R-C 无源低通滤波器，截止频率为 500HZ，取 $R=5\text{K}\Omega$ 。
3. 若连续信号 $f(t)$ 为 200~300 (Hz) 的三角波、方波、计算其有效带宽 B，该信号用频率为 f_s 的采样脉冲序列采样后，若希望通过低通滤波器后，信号失真较小则采样频率 f_s 和低通滤波器的截止频率 f_c 应取多大？试设计一满足要求的低通滤波器。

四. 实验内容

1. 按预习练习 3 的计算结果，将信号 $f(t)$ 和采样脉冲 $s(t)$ 输入采样器，观察经过采样后的方波和三角波信号。
2. 改变采样频率 $f_s > 2f_{\max}$ ， $f_s = 2f_{\max}$ ， $f_s < 2f_{\max}$ 时，观察复原后的信号比较其失真的程度，以验证采样定理。
3. 将正弦信号 $f(t)$ 输入采样器， $f(t)$ 为 50HZ，幅度为 0.5V，观察采样后信号 $f_s(t)$ 的波形，再输入到预习练习 2 设计的低通滤波器，观察滤波器的输出信号。

五. 仪器设备

双踪示波器 函数信号发生器
稳压电源 九孔实验板

采样电路模块

电阻 $2\text{K}\Omega$ (2 个)

电容 $0.01\mu\text{F}$ (2 个)

六. 实验报告要求

1. 整理并绘出原信号 $f(t)$, 抽样信号 $f_s(t)$ 和复原信号的波形, 能得出什么结论。
2. 实验调试中体会。

实验十二 滤波器设计（低通、高通部分）

一、 实验目的：

4. 了解无源、有源低通滤波器，高通滤波器的基本结构、特点，比较理想滤波器与实际滤波器的差别。
5. 用 EDA 方法研究测试 RC 低通滤波器及有源 RC 低通滤波器的频率特性。
6. 用 EDA 方法研究测试 RC 高通滤波器及有源 RC 高通滤波器的频率特性。

二、 实验原理：

详见“实验八”

三、 预习练习：

1. 计算图 12-1 所示的无源低通滤波器的截止频率 f_c 。

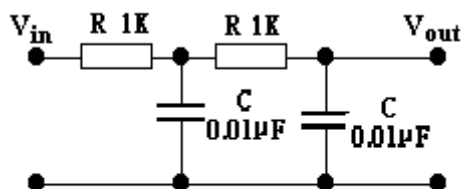


图 12-1 二阶无源 LPF 电路

2. 计算图 12-2 所示的二阶有源低通滤波器的截止频率 f_c 。

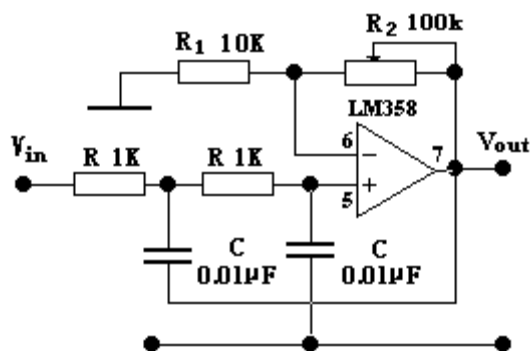


图 12-2 R-C 有源 LPF 电路

3. 计算图 12-3 所示的无源高通滤波器的截止频率 f_c 。

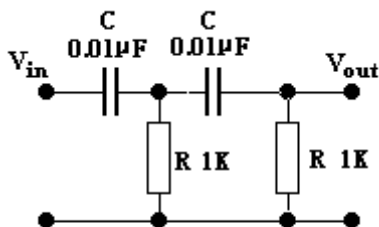


图 12-3 二阶无源高通滤波器电路

4. 计算图 12-2 所示的二阶有源高通滤波器的截止频率 f_c 。

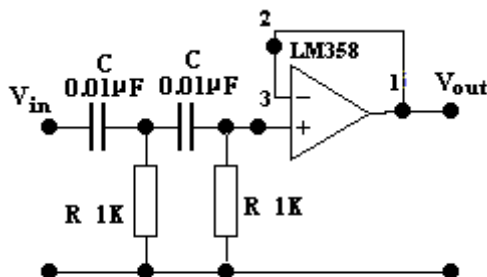


图 12-4 二阶有源高通滤波器电路

四、 实验内容和步骤：

1. 无源低通滤波器频率特性测试：

按图 12-1 连接，比较滤波器的输入和输出：

- A. 在滤波器输入端输入正弦波，将输入信号的峰--峰值调到 2 伏，并保持不变。用示波器观察输入和输出信号的幅度，相位有何不同。
- B. 保持输入信号的峰--峰值不变，将输入信号的频率从 2 KHz 开始，以每次 1 KHz 的频率递增，观察输出信号幅度的变化，记录输出信号幅度下降的开始频率和滤波器的截止频率 f_c ，并记录输出信号幅度下降段的各频率点对应的输出信号幅度值。观察并记录各频率点输出信号相对输入信号的相移。
- C. 用波特图仪观察电路的幅频特性，并观察输出信号和输入信号之间的相位关系。

表一：无源低通滤波器测量数据

| | | | |
|------------------------------------|--|--|--|
| 测量条件 $V_{ip-p}=2V$ ，正弦波（选九个以上测试频率） | | | |
| 输入 V_i 的频率 $f(Hz)$ | | | |
| 输出 V_o 的幅值 $V_{op-p}(V)$ | | | |
| 输出 V_o 相位 ϕ （度） | | | |

2. 有源低通滤波器频率特性测试:

按图 12-2 连接, 比较滤波器的输入和输出:

- A. 在滤波器输入端输入正弦波, 将输入信号的峰--峰值调到 200 毫伏, 并保持不变。用示波器观察输入和输出信号的幅度, 相位有何不同。
- B. 保持输入信号的峰--峰值不变, 将输入信号的频率从 2 KHz 开始, 以每次 1 KHz 的频率递增, 观察输出信号幅度的变化, 记录输出信号幅度下降的开始频率和滤波器的截止频率 f_c , 并记录输出信号幅度下降段的各频率点对应的输出信号幅度值。观察并记录各频率点输出信号相对输入信号的相移。
- C. 用波特图仪观察电路的幅频特性, 并观察输出信号和输入信号之间的相位关系。

表二: 有源低通滤波器测量数据

| 测量条件 $V_{ip-p}=2V$, 正弦波 (选九个以上测试频率) | | | |
|--------------------------------------|--|--|--|
| 输入 V_i 的频率 $f(Hz)$ | | | |
| 输出 V_o 的幅值 $V_{op-p}(V)$ | | | |
| 输出 V_o 相位 ϕ (度) | | | |

3. 无源高通滤波器频率特性测试:

按图 12-3 连接, 比较滤波器的输入和输出:

- A. 在滤波器输入端输入正弦波, 将输入信号的峰--峰值调到 2 伏, 并保持不变。用示波器观察输入和输出信号的幅度, 相位有何不同。
- B. 保持输入信号的峰--峰值不变, 将输入信号的频率从 50 KHz 开始, 以每次 1 KHz 的频率递减, 观察输出信号幅度的变化, 记录输出信号幅度下降的开始频率和滤波器的截止频率 f_c , 并记录输出信号幅度下降段的各频率点对应的输出信号幅度值。观察并记录各频率点输出信号相对输入信号的相移。
- C. 用波特图仪观察电路的幅频特性, 并观察输出信号和输入信号之间的相位关系。

表三: 无源高通滤波器测量数据

| 测量条件 $V_{ip-p}=2V$, 正弦波 (选九个以上测试频率) | | | |
|--------------------------------------|--|--|--|
| 输入 V_i 的频率 $f(Hz)$ | | | |
| 输出 V_o 的幅值 $V_{op-p}(V)$ | | | |
| 输出 V_o 相位 ϕ (度) | | | |

7. 有源高通滤波器频率特性测试:

按图 12-4 连接, 比较滤波器的输入和输出:

- A. 在滤波器输入端输入正弦波, 将输入信号的峰--峰值调到 200 毫伏, 并保持不变。用示波器观察输入和输出信号的幅度, 相位有何不同。
- B. 保持输入信号的峰--峰值不变, 将输入信号的频率从 50 KHz 开始, 以每次 1 KHz 的频率递减, 观察输出信号幅度的变化, 记录输出信号幅度下降的开始频率和滤波器的截止频率 f_c , 并记录输出信号幅度下降段的各频率点对应的输出信号幅度值。观察并记录各频率点输出信号相对输入信号的相移。
- C. 用波特图仪观察电路的幅频特性, 并观察输出信号和输入信号之间的相位关系。

表四: 有源高通滤波器测量数据

| 测量条件 $V_{ip-p}=2V$, 正弦波 (选九个以上测试频率) | | | |
|--------------------------------------|--|--|--|
| 输入 V_i 的频率 $f(Hz)$ | | | |
| 输出 V_o 的幅值 $V_{op-p}(V)$ | | | |
| 输出 V_o 相位 ϕ (度) | | | |

五、实验报告要求

1. 整理各项实验数据, 绘制各滤波器的幅频特性曲线和相频特性曲线。
2. 由幅频特性曲线找出各种低通、高通滤波器的截止频率 ω_c , 并与理论计算值比较。
3. 将 RC 无源低通、RC 有源低通的测量特性与理想低通特性比较, 说明了什么?
4. 将 RC 无源高通、RC 有源高通的测量特性与理想高通特性比较, 说明了什么?

实验十三 滤波器设计 (带通、高通部分)

五、实验目的:

8. 了解无源、有源带通滤波器, 带阻滤波器的基本结构、特点, 比较理想滤波器与实际滤波器的差别。
9. 用 EDA 方法研究测试带通滤波器及有源带通滤波器的频率特性。
10. 用 EDA 方法研究测试带阻滤波器及有源带阻滤波器的频率特性。

六、实验原理:

详见“实验九”

七、预习练习:

4. 计算图 13-1 所示带通滤波器的截止频率 ω_{CH} , ω_{CL} 及其中心频率 ω'_o , 特征频率 ω_o 计算在这些频率上的相位, $\phi(\omega_{CH})$, $\phi(\omega_{CL})$, $\phi(\omega'_o)$,

$\phi(\omega_0)$ 。

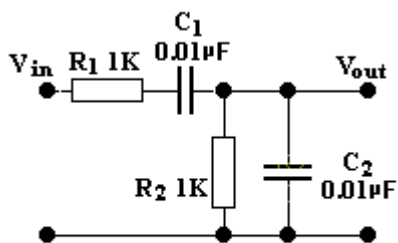


图13-1 无源带通滤波器

5. 计算 $K=1$ 时，图13-2所示有源带通的截止频率 ω_{CH} ， ω_{CL} 及其中心频率 ω_0 ，计算在这些频率点上的相位 $\phi(\omega_{CH})$ ， $\phi(\omega_{CL})$ ， $\phi(\omega_0)$ 。

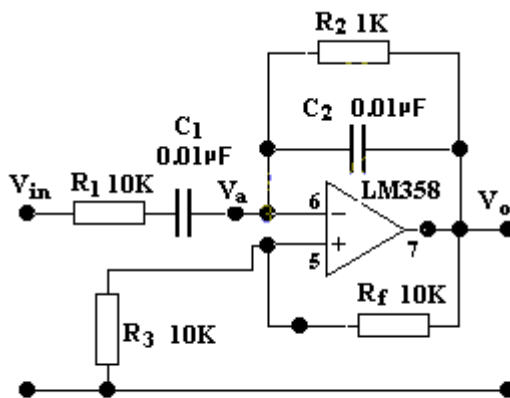


图13-2 有源带通滤波器

6. 计算图13-3所示无源带阻滤波器的 ω_{CH} ， ω_{CL} 及阻带的带宽（参见实验七 双T网络的频率特性）。

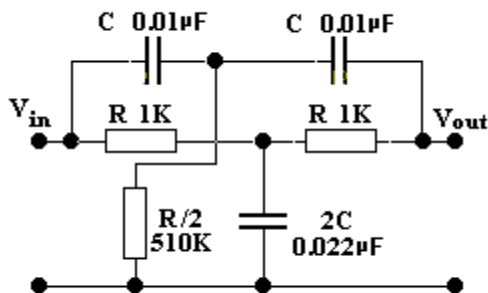


图13-3 无源带阻滤波器电路

八、 实验内容和步骤：

1. 无源带通滤波器频率特性测试:

按图 13-1 连接, 比较滤波器的输入和输出:

- A. 在滤波器输入端输入正弦波, 将输入信号的峰--峰值调到 2 伏, 并保持不变。用示波器观察输入和输出信号的幅度, 相位有何不同。
- B. 保持输入信号的峰--峰值不变, 将输入信号的频率从 1 KHz 开始, 以每次 1 KHz 的频率递增, 观察输出信号幅度的变化, 记录输出信号幅度上升的开始频率和滤波器的下截止频率, f_{CL} , 继续递增频率, 达到输出信号幅度最大, 再从幅度最大开始下降, 记录滤波器的上截止频率 f_{CH} , 并记录各频率点对应的输出信号幅度值。观察并记录各频率点输出信号相对输入信号的相移。
- C. 用波特图仪观察电路的幅频特性, 并观察输出信号和输入信号之间的相位关系。

表一: 无源带通滤波器测量数据

| 测量条件 $V_{ip-p}=2V$, 正弦波 (选九个以上测试频率) | | | |
|--------------------------------------|--|--|--|
| 输入 V_i 的频率 $f(Hz)$ | | | |
| 输出 V_o 的幅值 $V_{op-p}(V)$ | | | |
| 输出 V_o 相位 ϕ (度) | | | |

2. 有源带通滤波器频率特性测试:

按图 13-2 连接, 比较滤波器的输入和输出:

- D. 在滤波器输入端输入正弦波, 将输入信号的峰--峰值调到 200 毫伏, 并保持不变。用示波器观察输入和输出信号的幅度, 相位有何不同。
- E. 保持输入信号的峰--峰值不变, 将输入信号的频率从 1 KHz 开始, 以每次 1 KHz 的频率递增, 观察输出信号幅度的变化, 记录输出信号幅度上升的开始频率和滤波器的下截止频率, f_{CL} , 继续递增频率, 达到输出信号幅度最大, 再从幅度最大开始下降, 记录滤波器的上截止频率 f_{CH} , 并记录各频率点对应的输出信号幅度值。观察并记录各频率点输出信号相对输入信号的相移。
- F. 用波特图仪观察电路的幅频特性, 并观察输出信号和输入信号之间的相位关系。

表二: 有源带通滤波器测量数据

| 测量条件 $V_{ip-p}=2V$, 正弦波 (选九个以上测试频率) | | | |
|--------------------------------------|--|--|--|
| 输入 V_i 的频率 $f(Hz)$ | | | |
| 输出 V_o 的幅值 $V_{op-p}(V)$ | | | |
| 输出 V_o 相位 ϕ (度) | | | |

3. 无源带阻滤波器频率特性测试：

按图 13-3 连接，比较滤波器的输入和输出：

C. 在滤波器输入端输入正弦波，将输入信号的峰--峰值调到 2 伏，并保持不变。用示波器观察输入和输出信号的幅度，相位有何不同。

D. 保持输入信号的峰峰值不变，以每次 1 KHz 的频率递增，观察输出信号幅度的变化，记录输出信号幅度变化的开始频率和滤波器的截止频率 f_{CL}, f_{CH} ，并记录输出信号幅度上升和下降段的各频率点对应的输出信号幅度值。观察并记录各频率点输出信号相对输入信号的相移。

C.用波特图仪观察电路的幅频特性，并观察输出信号和输入信号之间的相位关系。

表三：无源带阻滤波器测量数据

| | | | |
|------------------------------------|--|--|--|
| 测量条件 $V_{ip-p}=2V$ ，正弦波（选九个以上测试频率） | | | |
| 输入 V_i 的频率 $f(Hz)$ | | | |
| 输出 V_o 的幅值 $V_{op-p}(V)$ | | | |
| 输出 V_o 相位 ϕ （度） | | | |

11. 有源带阻滤波器频率特性测试：

按图 13-4 连接，比较滤波器的输入和输出：

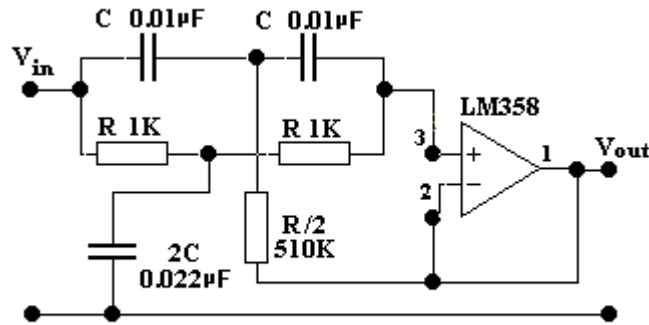


图13-4有源带阻滤波器电路

- D. 在滤波器输入端输入正弦波，将输入信号的峰--峰值调到 200 毫伏，并保持不变。用示波器观察输入和输出信号的幅度，相位有何不同。
- E. 保持输入信号的峰--峰值不变，将输入信号的频率从 1 KHz 开始，以每次 1 KHz 的频率递增，观察输出信号幅度的变化，记录输出信号幅度下降或上升的开始频率和滤波器的截止频率 f_{CL}, f_{CH} ，并记录输出信号幅度下降段和上升段的各频率点对应的输出信号幅度值。观察并记录各频率点输出信号相对输入信号的相移。
- F. 用波特图仪观察电路的幅频特性，并观察输出信号和输入信号之间的相位关系。

表四：有源带阻滤波器测量数据

| 测量条件 $V_{ip-p}=2V$ ，正弦波（选九个以上测试频率） | | | |
|------------------------------------|--|--|--|
| 输入 V_i 的频率 $f(Hz)$ | | | |
| 输出 V_o 的幅值 $V_{op-p}(V)$ | | | |
| 输出 V_o 相位 ϕ （度） | | | |

五、实验报告要求

1. 整理各项实验数据，绘制各滤波器的幅频特性曲线和相频特性曲线。
2. 由幅频特性曲线找出各种带通、带阻滤波器的截止频率 ω_c ，并与理论计算值比较。
3. 将无源带通、有源带通的测量特性与理想带通特性比较，说明了什么？
4. 将无源带阻、有源带阻的测量特性与理想带阻特性比较，说明了什么？

实验十四 信号的合成与分解(EDA 仿真)

一、 实验目的

1. 掌握采用 EDA 方法仿真，分析电路性能。
2. 采用选频网络进行信号的分解，分析元件参数对性能的影响。

二、 实验原理

1. 任何电信号都是由各种不同频率、幅度和初始相位的正弦波迭加而成，任何周期信号可以展开为傅里叶级形式，傅里叶级数的各项与信号的基波及各次谐波频率成分相对应，其频谱为离散的谱线。非周期信号则包含有无限多频率成分，其频谱为连续的，因此可以采用选频网络进行信号的分解量，用相应的并联谐振网络分别提取各频率分量。如图 14-1 所示。

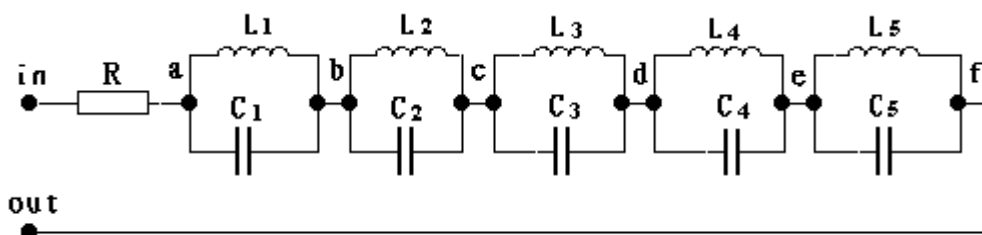


图14-1 信号分解

2. 任何周期信号可以由信号的基波及各次谐波频率成分合成。可采用图 14-2 所示电路，采用加法器将信号的基波及各次谐波按一定的幅度比例和相对相位关系叠加得到。

三、 预习练习

1. 将方波展开成付里叶变换，可知它是由基波及各奇次谐波组成。采用图 14-1 电路分解 2KHz 的方波，其中 L_1, C_1 组成的谐振电路谐振于基波， L_2, C_2 组成的谐振电路谐振于 3 次谐波， L_3, C_3 组成的谐振电路谐振于 5 次谐波， L_4, C_4 组成的谐振电路谐振于 7 次谐波， L_5, C_5 组成的谐振电路谐振于 9 次谐波。试确定各元件 $L_1, C_1, L_2, C_2, \dots, L_5, C_5$ 的值。
2. 试说明电阻 R 的作用及阻值选择原则。
3. 由图 14-1 分解得到的各频率分量分别取自谐振回路的两端，它们没有公共的地。所以可以用如图 14-2 所示的加法器来将它们合成。

4. 实验内容步骤

1. 按图 14-1 连接。在输入端连接信号源, 信号源输出 2KHz 方波, 用示波器分别观察 ab 端 bc 端 cd 端 de 端 ef 端 (即基波及各次奇次谐波)。比较各频率分量的幅度之比。
2. 按图 14-4 连接。按步骤 1 观察基波及各次奇次谐波。与步骤 1 的结果比较有何差别, 说明原因。

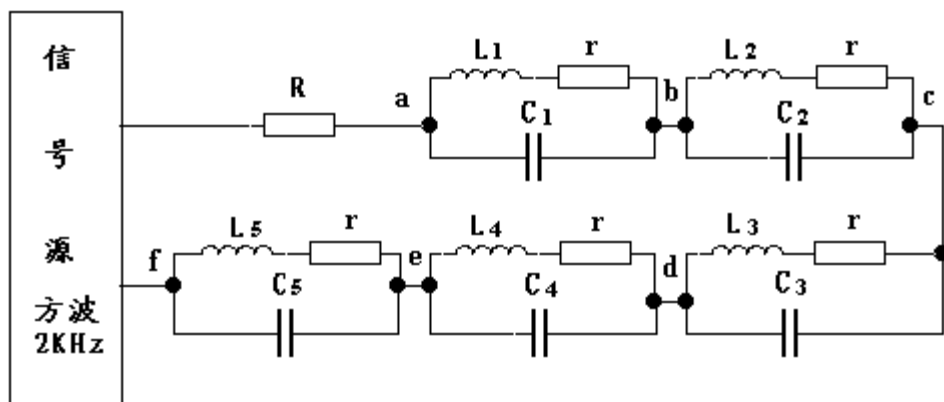


图14-4 信号合成 (谐振回路Q值的影响)

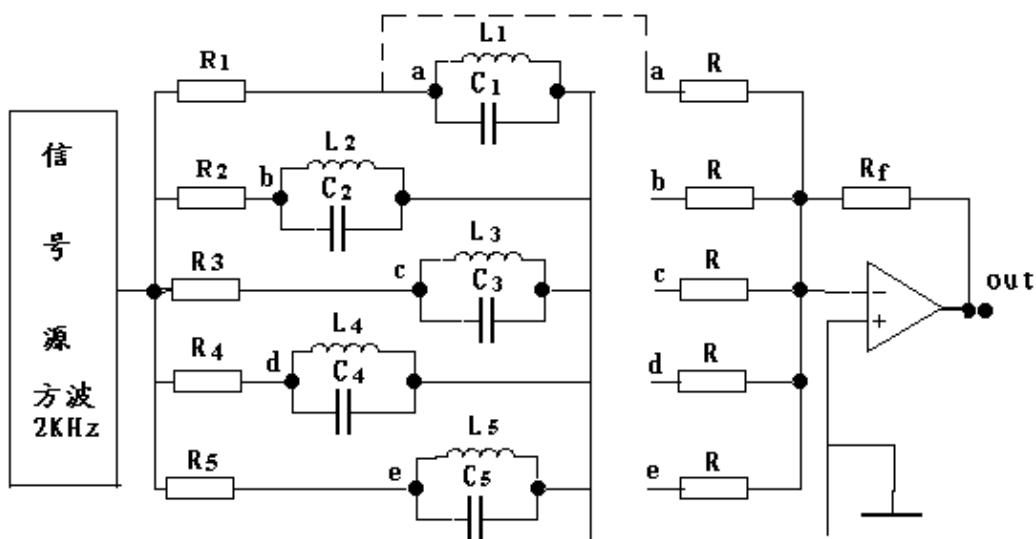


图14-2 信号的合成

- 按图 14-2 连接。其中 a-a , b-b, c-c d-d e-e 相连，将各次谐波由加法器叠加。合理选择 R_1, R_2, R_3, R_4, R_5 使得基波，三次，五次，七次，九次谐波的幅度之比为 $1: 1/3: 1/5: 1/7: 1/9$ 。相位保持一致。
- 若波形合成时，仅将基波和三次谐波相加，即 a-a , b-b 相连观察输出信号波形，与输入信号比较。输出信号因缺少某次谐波而引起波形失真称为得“频率失真”。
- 按图 14-3 连接，将某一频率成分引入一定相移，（在 b-b 端加入电容 C，使三次谐波产生相移，再进行叠加，观察合成的输出波形的失真，即“相位失真”。

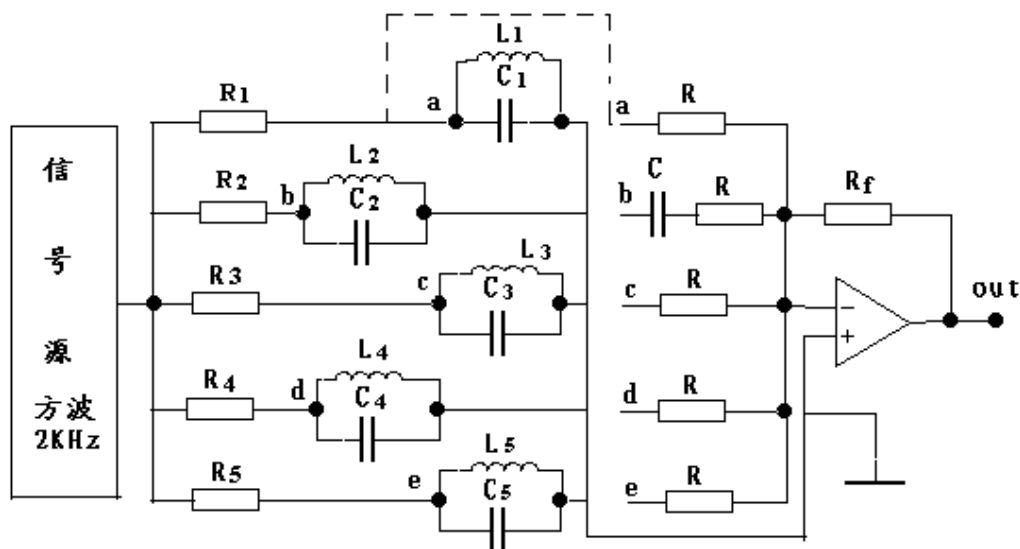


图14-3 信号的合成
(有相位失真)

5. 实验报告要求

1. 整理实验数据：基波及各次谐波的频率、幅度、相位。
2. 用方格纸，在同一坐标系下，绘制方波及其基波和各次谐波的波形。（频率和幅度按比例关系画出）
3. 将基波、三次谐波、及其合成波形绘制在同一坐标平面上，与输入波形相比较。讨论频率失真。
4. 将实验步骤 5 观察得到的数据，画出各分量的波形，并画出合成波形。讨论相位失真。