

实验五 RC 电路的特性与应用

1. 实验目的

(1) 通过实验, 掌握 RC 电路的时域特性和频域特性, 以及它们之间的关系, 为今后的具体应用打下基础。

(2) 初步了解 RC 电路的简单应用。

2. 实验原理与电路

RC 电路是电子电路的重要组成部分, 应用很广泛。常用来定时、延时、选频、移相、耦合、去耦等, 配合有源器件可以构成许多功能电路。电子电路中许多现象和指标都和 RC 电路特性有关。所以, 掌握 RC 电路的各种特性十分重要。

本实验的重点是 RC 电路的时域特性和频域特性。研究时域特性主要是研究 RC 电路的暂态响应特性, 亦即研究其零输入响应和零状态响应特性; 研究频域特性就是研究其幅频特性和相频特性。实验电路分别如图 5.38、图 5.39 和图 5.40 所示。

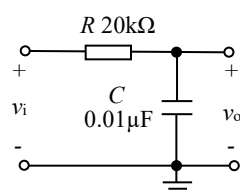


图 5.38 一阶 RC 低通电路

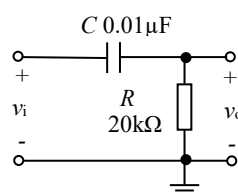


图 5.39 一阶 RC 高通电路

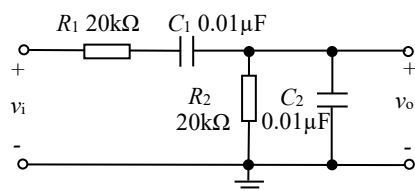


图 5.40 二阶 RC 带通电路

(1) 一阶 RC 电路的暂态响应

以图 5.38 所示电路为例, 假设输入电压 v_i 为图 5.41(a)所示的理想方波电压, 其低电平为 0, 高电平为 V_m , 信号的半周期 $T/2$ 远大于电路的时间常数 $\tau = RC$, 则输出电压 v_o 的波形如图 5.41(b)所示。

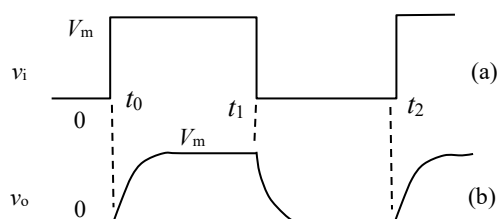


图 5.41 电路的输入波形和输出波形

在 $t=t_0$ 时刻，输入电压 v_i 从 0 跳变到 V_m ，它通过电阻 R 给电容 C 充电，输出电压（亦即电容上的电压） v_o 指数上升（充电电流指数下降）。当充电时间大于 5τ 之后充电电流接近为 0， $v_o \approx V_m$ ，可以认为电容充电结束，电路达到稳态。所以， RC 电路对输入电压上升沿的响应就是电路的零状态响应。

类似地，在 $t=t_1$ 时刻，输入电压 v_i 从 V_m 跳变到 0，电容 C 通过电阻 R 放电，输出电压 v_o 指数下降。当放电时间大于 5τ 之后电容放电基本结束， $v_o \approx 0$ ，电路达到稳态。所以， RC 电路对输入电压下降沿的响应就是电路的零输入响应。

电路的暂态响应有时也称时域响应。

（2） RC 电路的频率响应

若图 5.38、图 5.39 和图 5.40 所示电路的输入电压 v_i 是幅度不变，频率变化的正弦信号（ $v_i = V \sin \omega t$ ），则输出电压 v_o 的幅度和相位将随频率的变化而变化。其中 v_o 相对于 v_i 的幅度随频率的变化称为电路的幅频特性， v_o 相对于 v_i 的相位随频率的变化称为电路的相频特性。二者合起来称为电路的频域特性。

① 一阶 RC 低通电路的频率响应特性

图 5.38 所示电路为一阶 RC 低通电路，实际上就是阻容分压电路。因为电容的容抗为

$$Z_c = \frac{1}{j\omega C} \quad (5.16)$$

故该网络的传递函数为：

$$H(j\omega) = \frac{\dot{V}_o}{\dot{V}_i} = \frac{\frac{1}{j\omega C}}{R + \frac{1}{j\omega C}} = \frac{1}{1 + j\omega RC} \quad (5.17)$$

可见当信号频率 f 很低时， $j\omega RC = j2\pi fRC$ 很小，输出电压近似等于输入电压。随着频率的不断提高，电容的容抗随之减小，输出电压幅度不断下降，与输入信号之间的相移也随之加大，通常将输出电压幅度下降到通带电压幅度（在这个电路中，通带电压幅度等于输入电

压幅度)的 $1/\sqrt{2}$ 时的频率称为上限截止频率 f_H , 理论分析可得 $f_H=1/(2\pi RC)$ 。当频率足够高时, 输出电压趋近为 0, 相移接近 -90° 。由于此电路具有允许低频信号通过, 抑制高频信号传输的特性, 所以称为低通电路。

② 一阶 RC 高通电路的频率响应特性

图 5.39 所示电路为一阶 RC 高通电路。类似的分析可知, 该电路具有阻止低频信号通过, 允许高频信号传输到输出端的特性, 所以称为高通电路。这里将输出电压幅度下降到通带电压幅度的 $1/\sqrt{2}$ 时的频率称为下限截止频率 f_L , 理论分析可得 $f_L=1/(2\pi RC)$ 。

③ 二阶 RC 带通电路的频率响应特性

图 5.40 所示电路为二阶 RC 带通电路, 它是一个 RC 串、并联电路。一般取 $R_1=R_2=R$, $C_1=C_2=C$, 令 R_1 、 C_1 串联的阻抗为 Z_1 , R_2 、 C_2 并联的阻抗为 Z_2 , 则有:

$$Z_1 = R + \frac{1}{j\omega C}, \quad Z_2 = \frac{R}{1 + j\omega RC}$$

若令 $\omega_0 = \frac{1}{RC}$, 不难推出其网络的传递函数为

$$H(j\omega) = \frac{\dot{V}_o}{\dot{V}_i} = \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} = \frac{1}{3 + j(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega})} \quad (5.18)$$

由此可得二阶 RC 带通电路的幅频特性与相频特性分别为

$$|H(j\omega)| = \frac{1}{\sqrt{3^2 + (\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega})^2}} \quad (5.19)$$

$$\varphi(\omega) = -\arctan \frac{\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega}}{3} \quad (5.20)$$

由式(5.19)和式(5.20)可知, 当输入信号频率为 $\omega_0 = \frac{1}{RC}$, 即 $f_0 = \frac{1}{2\pi RC}$ 时, $|H(j\omega)| = \frac{1}{3}$ 为最大, $\varphi(\omega) = 0$, 即输出信号与输入信号之间的相移为零。输入信号频率偏离 $\omega_0 = \frac{1}{RC}$ 越远, 被衰减得越厉害。说明该电路允许以 $\omega_0 = \frac{1}{RC}$ 为中心的一定频率范围内的信号通过, 而抑制其他频率信号, 因此该电路也称为带通网络或选频网络, ω_0 或 f_0 称为电路的中心频率。当 $|H(j\omega)| = \frac{1}{\sqrt{2}} |H(j\omega)|_{\max} = \frac{1}{\sqrt{2}} |H(j\omega_0)|$ 时对应的两个频率称为截止频率, 用 f_L 和 f_H 表示。

3. 实验内容

(1) 一阶 RC 电路的暂态响应

本实验重点研究图 5.38 所示电路的暂态特性。

- ① 选取周期和幅度合适的方波电压作为输入电压 v_i ，并记录下来。加到图 5.38 电路的输入端，观测并记录电路输入电压 v_i 和输出电压 v_o 的波形，观察该电路的零输入响应和零状态响应。
- ② 根据元件参数值计算得到 τ ，测量电容充、放电时间分别为 τ 、 2τ 、 3τ 和 5τ 以及稳态时输出电压的值，并与用三要素法进行理论计算得到的值进行比较。
- ③ 测量并记录输出电压 v_o 波形的上升时间 t_r 和下降时间 t_f 。讨论它们与电路时间常数 τ 之间的关系。

(2) RC 电路的频率响应

① 一阶 RC 低通电路的频率响应特性

在图 5.38 所示电路的输入端加峰峰值为 4V 的正弦信号。在实验过程中保持输入信号幅度不变，改变输入信号的频率，选择合适的频率点，测量各频率点下输出电压的幅度以及与输入电压之间的相位差，从而计算并画出电路的幅频特性曲线及其对应的相频特性曲线，重点测量电路的上限截止频率 f_H 。

通过第 (1) 部分测得的输出电压的上升时间 t_r 和这里测得的截止频率 f_H ，验证它们之间满足 $f_H \cdot t_r \approx 0.35$ 的关系。这就是图 5.38 所示电路时域特性和频域特性之间的关系。

③ 一阶 RC 高通电路的频率响应特性

在图 5.39 所示电路的输入端加峰峰值为 4V 的正弦信号。在实验过程中保持输入信号幅度不变，改变输入信号的频率，选择合适的频率点，测量各频率下输出电压的幅度以及与输入电压之间的相位差，从而计算并画出电路的幅频特性曲线及其对应的相频特性曲线，重点测量出电路的下限截止频率 f_L 。

③ 二阶 RC 带通电路的频率响应特性

在图 5.40 所示电路的输入端加峰峰值为 4V 的正弦信号。在实验过程中保持输入信号幅度不变，改变输入信号的频率，选择合适的频率点，测量各频率下输出电压的幅度以及与输入电压之间的相位差，从而计算并画出电路的幅频特性曲线及其对应的相频特性曲线，重点测量出电路的中心频率 f_0 和截止频率 f_L 、 f_H 。

4. 预习要求

- (1) 认真复习理论课中所学到的 RC 电路知识。
- (2) 进行相关理论计算或仿真分析，并设计实验记录表格备用。

5. 实验报告要求

(1) 将一阶 RC 低通电路、一阶 RC 高通电路和二阶 RC 带通电路的三者的幅频特性画在同一张图上，将相频特性画在另一张图上。注意三条曲线之间的关系。

(2) 将实验结果与理论计算结果进行比较，分析对比结果。

8. 思考题

(1) 在图 5.38 所示的电路中，输入为 200Hz 的正弦信号，用万用表的交流电压档（可测量的频率范围为 40Hz~400Hz）测量发现电阻上的电压幅度和电容上的电压幅度相加不等于输入电压幅值，那么基尔霍夫电压定律还成立吗？如何解释这个问题？

(2) 是否可以用万用表的交流电压档配合信号源测量一个二端口网络在某个频率下的相移？如果可以，请给出方法。（测试频率在万用表的工作频率范围内，忽略万用表内阻，分布电容等的影响，必要时可以使用额外的电阻电容元件）

(3) 有时候可以将图 5.38、图 5.39 的电路作为近似的积分器和微分器应用，结合实验结果说明这样近似使用的条件。

(4) 现有一个正弦信号源和一些 RC 元件，如何产生一对相位相差 90 度的信号？

(5) 推导图 5.38 所示 RC 低通电路的截止频率 f_H 与上升沿时间 t_r 满足 $f_H t_r \approx 0.35$ 的关系。如果使用本实验使用的示波器，测量一个理想的方波信号，在示波器的屏幕显示上测量得到的上升沿时间应当是多少？