

高等学校试用教材

# 电路、信号与系统

上册第二分册

管致中 沙玉钧 夏恭恪编

人民教育出版社

高等学校试用教材  
**电路、信号与系统**

上册第二分册

管致中 沙玉钧 夏恭恪编

责任编辑 农植伟

\*

人民邮电出版社出版

新华书店北京发行所发行

上海中华印刷厂印装

\*

开本  $787 \times 1092$  1/32 印张  $9 \frac{8}{16}$  字数 228,000

1979年6月第1版 1979年12月第1次印刷

印数 1—30,000

书号 15012·0161 定价 0.79 元

# 目 录

## 第四章 简单线性电路的频率特性

|                                |     |
|--------------------------------|-----|
| § 4.1 引言 .....                 | 273 |
| § 4.2 简单 $RC$ 电路的频率特性 .....    | 274 |
| § 4.3 常用的 $RC$ 选频网络 .....      | 288 |
| § 4.4 网络函数的一般表达式及其对数频率特性 ..... | 296 |
| § 4.5 $LC$ 回路的自由振荡 .....       | 305 |
| § 4.6 串联谐振回路 .....             | 312 |
| § 4.7 并联谐振回路 .....             | 331 |
| § 4.8 耦合谐振回路的耦合方式及谐振现象 .....   | 345 |
| § 4.9 耦合谐振回路的谐振曲线及通频带 .....    | 360 |
| § 4.10 纯电抗二端网络的频率特性 .....      | 369 |
| 习 题 .....                      | 384 |

## 第五章 二端对网络

|                            |     |
|----------------------------|-----|
| § 5.1 二端对网络的概念及其典型结构 ..... | 395 |
| § 5.2 二端对网络的参数 .....       | 398 |
| § 5.3 二端对网络的网络函数 .....     | 408 |
| § 5.4 二端对网络的等效电路 .....     | 413 |
| § 5.5 复合二端对网络的网络参数 .....   | 418 |
| § 5.6 二端对网络的影象参数 .....     | 436 |
| § 5.7 中分定理 .....           | 445 |
| § 5.8 工作传输函数与插入传输函数 .....  | 456 |
| § 5.9 衰减网络 .....           | 463 |
| § 5.10 影象参数滤波器 .....       | 476 |
| § 5.11 工作参数滤波器的频率特性 .....  | 488 |
| 习 题 .....                  | 498 |

## 第六章 传输线

|                            |     |
|----------------------------|-----|
| § 6.1 分布参数和分布参数电路 .....    | 509 |
| § 6.2 传输线方程及其正弦稳态解 .....   | 513 |
| § 6.3 均匀传输线上的波 .....       | 519 |
| § 6.4 无损耗传输线 .....         | 525 |
| § 6.5 终端短路及终端开路的无损耗线 ..... | 535 |
| § 6.6 低损耗传输线 .....         | 549 |
| 习 题 .....                  | 558 |

## 第四章 简单线性电路的频率特性

### § 4.1 引言

在前两章中分析的电路,电源都是以给定的角频率 $\omega$ ① 随时间按正弦规律变化的电压或电流。在这样的电源激励下,线性电路中任一支路或元件上的电压或电流,都是同一频率的正弦量,仅在幅值及相位上有不同。对电路的具体分析计算,在根据给定频率确定了各个元件的阻抗后, $\omega$ 即不再在计算过程中出现。用相量表示各个电压、电流等物理量,也都只表示出它们各自的幅值及相位。但在实际工作中,任何信号都不会是单一频率的正弦量,而是可分解为很多不同频率正弦量的线性组合,表示为 $\omega$ 的函数②。而且施加于网络的,除需要的信号外,还可能有其它频率的,不是所需要的干扰信号混杂进来。有时这些干扰信号还是大量的、不可避免的。例如收音机收听某一频率的无线电台广播,但所有不同频率的广播电台所发射的无线电广播信号,都同时从收音机的天线进入收音机,必须有一个选频网络,让需要的信号通过去,把不需要的干扰信号排除掉,为收音机选出所需要电台的信号,才能正常收听。为了分析一个具体网络在非单一频率信号源激励下的工作,或者为了研究选频网络的选频工作,都必须首先分析网络在不同频率下的响应与激励之间的关系,即研究网络的频率特性。

对于一个有具体工作目的的网络,激励信号以电压源或电流

---

① 在网络的频域分析中,频率 $f$ 在数学表达式及分析过程中都以角频率 $\omega=2\pi f$ 的形式出现。在本章及今后各章中,即称 $\omega$ 为频率,与实际的频率 $f$ 在用词上不再加以区分。

② 见第七章信号的频谱分析。

源的形式施加于网络的某一指定处所——串接入网络的某一指定支路或并接在网络的某两指定结点上。针对网络的具体工作目的分析网络的工作，一般并不要解出网络中每一条支路或每一个元件上的电压或电流，而只要根据工作目的求出所需要知道的响应电压或电流与激励信号之间的关系。在激励信号及其响应都表现为频率 $\omega$ 的函数时，响应与激励之间的关系，即它们的函数比，同样以 $\omega$ 的函数出现，统称为网络的网络函数。

本章只对一些简单的，也是电子线路中经常遇到的  $RC$  电路及  $RLC$  谐振电路分析它们的频率特性，虽然初步接触到一些网络函数，也只是为了分析频率特性的需要。有关网络函数的问题，将在第五章及第九章中进一步讨论。

## § 4.2 简单 $RC$ 电路的频率特性

全部由电阻元件组成的网络，由于电阻元件的电阻值与工作频率无关，因而这种网络在任何频率的信号源激励下产生的响应也与频率无关，不存在频率特性的问题。有电抗元件参加的网络，则由于电抗元件的电抗随频率而变，而对不同频率信号的激励产生不同的响应，所以需要分析它的频率特性。

由  $RL$  元件或  $RC$  元件组成的电路，都有频率特性问题。但一般电子设备中遇到的，大都是  $RC$  电路，因而这里也只讨论  $RC$  电路。从方法上说， $RL$  电路的频率特性分析与  $RC$  电路是完全类似的。至于由  $RLC$  元件组成的谐振回路，由于它们在高频电子线路中的特殊重要性，将对它们进行专门分析。

由  $RC$  元件串联、并联或简单串并联组合的电路，是在一般电子设备中最常遇见的电路，它们随着不同的频率特性而具有各种不同的用途。

先分析一个最简单的  $RC$  并联电路，在电子线路中常用它产

生电子管或半导体管的自给偏压。如图 4-1, 电流通过  $RC$  并联电路产生电压。这里电流是激励, 而电压是在电流激励下的响应。电压、电流之间的关系——幅值之间的关系与相位之间的关系, 都随频率而变。为了分析它的频率特性, 将激励电流及响应电压都写成  $j\omega$  的函数形式, 即  $\dot{U} = U(j\omega)$ ,  $\dot{I} = I(j\omega)$ 。它们的函数比即网络函数, 亦即这一  $RC$  并联电路的阻抗, 同样是  $j\omega$  的函数。如图 4-1 的电路, 易于写出

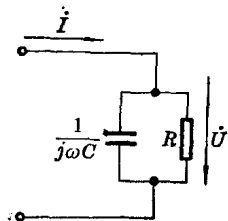


图 4-1  $RC$  并联电路

$$Z(j\omega) = \frac{R \cdot \frac{1}{j\omega C}}{R + \frac{1}{j\omega C}} \quad (4-1a)$$

在网络分析中, 这一网络函数称为网络的策动点阻抗或输入阻抗。

为了更便于表达及分析这一阻抗函数与变量  $j\omega$  之间的关系, 将  $j\omega$  改写为  $s$ ,  $s$  称为复频率<sup>①</sup>。式 (4-1a) 改写为如下形式:

$$Z(s) = \frac{R \frac{1}{Cs}}{R + \frac{1}{Cs}} = \frac{R}{RCs + 1} = \frac{\frac{1}{C}}{s + \frac{1}{RC}} = \frac{1}{C} \frac{1}{s - s_1} \quad (4-1b)$$

上式中

$$s_1 = -\frac{1}{RC} \quad (4-2a)$$

与复频率  $s$  具有相同的量纲, 因而同样可看成为复频率。 $s = j\omega$  是一实部为零的复频率, 它的虚部  $\omega$  是实际的角频率;  $s_1 = -\frac{1}{RC}$  可看成是虚部为零的复频率, 它的实部为虚拟的角频率。

<sup>①</sup> 在网络分析中, 复频率  $s$  是一个十分重要的概念。在第十章中将对它作较深入的讨论。这里将  $s$  作为  $j\omega$  的同义符号, 仅是在交流稳定工作条件下的一种特殊情况。

$$\omega_0 = -s_1 = \frac{1}{RC} \quad (4-2b)$$

常被称为  $RC$  电路的自然频率, 它的倒数  $RC$  具有时间的量纲, 被称为  $RC$  电路的时间常数

$$\tau = RC \quad (4-2c)$$

单位为秒, 是描述  $RC$  电路的一个重要参数。

现在由式(4-1b)具体看一下这一阻抗函数是怎样随频率而变的, 它随频率而变的关系表示为在单位电流激励下所产生的电压的幅度及相位随频率变化的关系, 分别称为这一网络的幅频特性与相频特性。为了将幅度与相位随频率的变化关系在数学表达式上分开, 将式(4-1b)改写为指数形式, 并为方便这一改写, 将  $s$  还原为  $j\omega$ 。

$$\begin{aligned} Z(j\omega) &= \frac{1}{C} \frac{1}{j\omega + \omega_0} = \frac{1}{C} \frac{1}{\sqrt{\omega^2 + \omega_0^2}} e^{-j \arctan \frac{\omega}{\omega_0}} \\ &= \frac{1}{C\omega_0} \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2 + 1}} e^{-j \arctan \frac{\omega}{\omega_0}} \\ &= \frac{R}{\sqrt{\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2 + 1}} e^{-j \arctan \frac{\omega}{\omega_0}} = |Z| e^{j\varphi} \end{aligned} \quad (4-3a)$$

上式中

$$|Z| = \frac{R}{\sqrt{\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2 + 1}} \quad (4-3b)$$

为幅频特性方程式

$$\varphi = -\arctan \frac{\omega}{\omega_0} \quad (4-3c)$$

为相频特性方程式。

由式(4-3b)及式(4-3c), 可以  $\frac{\omega}{\omega_0}$  为横坐标,  $|Z|$  及  $\varphi$  为纵坐

标绘成幅频特性曲线及相频特性曲线,如图4-2所示。从频率特性可知:当 $\omega=0$ 即在直流情况下, $C$ 相当于开路, $|Z|=R$ ;而当

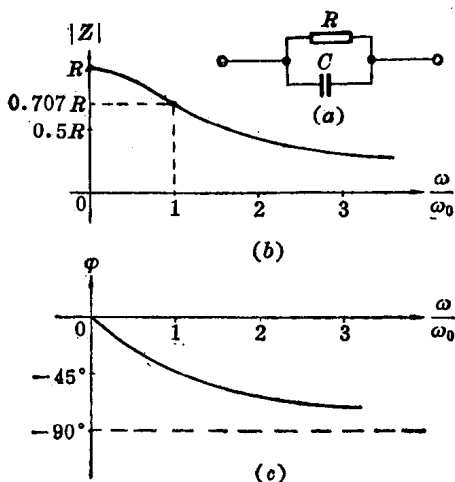


图4-2  $RC$  并联电路的频率特性

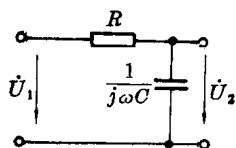
(a) 电路 (b) 幅频特性 (c) 相频特性

信号源频率为  $RC$  电路的自然频率即

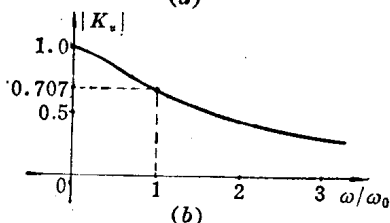
$$\omega = \omega_0 = \frac{1}{RC}$$

时,  $|Z| = \frac{1}{\sqrt{2}} R = 0.707R$ , 同样幅度的电流通过这一  $RC$  并联电路, 电压幅值减小为直流情况下的 70.7%; 频率越高, 阻抗越小, 电流通过它产生的电压也越小。这是由于电容器与电阻相并联, 它对通过电阻的电流起分流的作用。频率越高, 电容器的电抗越小, 从电阻分去的电流也就越多, 这就使电阻上的电压减得越小。因此,  $C$  被称为旁路电容器。它主要用于当信号电流既有直流分量, 又有交流分量时, 电容器将信号电流中的交流分量旁路掉, 使电阻上的电压(也就是这一阻抗通过信号电流时的电压)基本上只

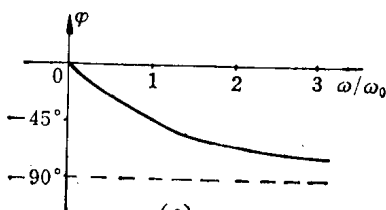
呈现直流电压；或在信号电流既有低频分量又有高频分量的情况下，利用电容器的电抗对高频电流的电抗远比对低频电流的电抗为小的频率特性，把信号中的高频分量滤除掉，使电压只呈现低频



(a)



(b)



(c)

图 4-3 RC 低通滤波电路

(a) 电路 (b) 幅频特性 (c) 相频特性

信号的电压。

利用图 4-3 所示的倒 L 形 RC 电路能对信号电压起相似的滤波作用。在这里信号电压  $\dot{U}_1$  是外加激励，而网络的响应则是电容元件上的电压  $\dot{U}_2$ 。网络函数是  $\dot{U}_2$  与  $\dot{U}_1$  的电压比  $K_u = \frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_1}$ 。由于  $\dot{U}_2$  与  $\dot{U}_1$  不在网络的同一处所，故称为网络的转移函数，具体称为电压传输函数。应用第二章的阻抗分压公式，极易得出

$$K_u(j\omega) = \frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_1} = \frac{1}{R + \frac{1}{j\omega C}} \quad (4-4)$$

仿照前面的分析方法，用复频率  $s$  代替上式中的  $j\omega$ ，并令  $s_1 = -\frac{1}{RC} = -\omega_0$ ，上式可改写为

$$K_u(s) = \frac{1}{R + \frac{1}{Cs}} = \frac{1}{RUs + 1} = \frac{-s_1}{s - s_1} \quad (4-5a)$$

或

$$\begin{aligned}
 K_u(j\omega) &= \frac{\omega_0}{j\omega + \omega_0} = \frac{\omega_0}{\sqrt{\omega^2 + \omega_0^2}} e^{-j \arctan \frac{\omega}{\omega_0}} \\
 &= \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2 + 1}} e^{-j \arctan \frac{\omega}{\omega_0}} \quad (4-5b)
 \end{aligned}$$

根据上式画出的幅频特性曲线及相频特性曲线见图 4-3, 它与图 4-2 的曲线完全相似, 仅是纵坐标由  $|Z|$  改为  $|K_u|$ ,  $\varphi$  则为  $\dot{U}_2$  相对于  $\dot{U}_1$  的相移。

从频率特性曲线可以看到, 信号的频率越高, 通过这一网络输出电压的幅值降低也越多。在  $\omega=0$  即在直流情况下, 输出电压最高。在  $\frac{\omega}{\omega_0}=1$  即  $\omega=\omega_0$  时, 输出电压降低为直流情况下的  $\frac{1}{\sqrt{2}}$  即 70.7%。由于功率与电压的平方成正比, 电压降低为  $\frac{1}{\sqrt{2}}$ , 功率将降低一半。因此这一频率常被称为半功率频率, 而幅频特性曲线上的这一点被称为半功率点。当信号电压的频率低于这一频率, 即  $\omega < \omega_0$ , 信号通过这一网络的输出电压幅值不小于其最大幅值的 70.7%, 即被认为能顺利通过这一网络。当信号电压的频率  $\omega > \omega_0$  时, 信号通过这一网络的输出电压幅值将降低到其最大幅值的 70.7% 以下, 即被认为是不能顺利通过这一网络。因此这一网络被称为 **RC 低通滤波器**, 而以 **RC 电路的自然频率  $\omega_0$  为界线**。  $0 < \omega < \omega_0$  称为它的通频带。当然, 以半功率点作为通频带的边界频率只是人为定出来的一个相对标准, 从图 4-2 及图 4-3 的幅频特性曲线可以看到, 实际上并没有信号能否顺利通过的明显界线。这一电路常用于电子设备的整流电源, 以滤除整流后电源电压中的交流分量。

现在进一步分析一下负载电阻对这一低通滤波器工作的影响。如图 4-4(a), 由于负载电阻与电容相并联, 使电压传输函数成为

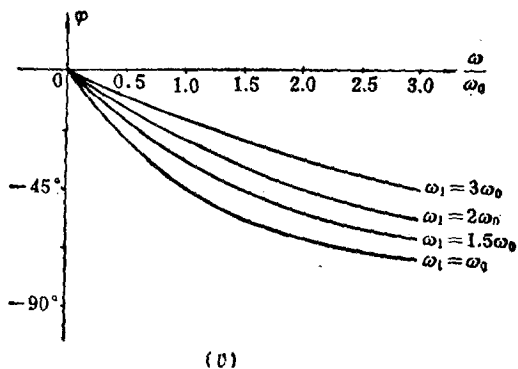
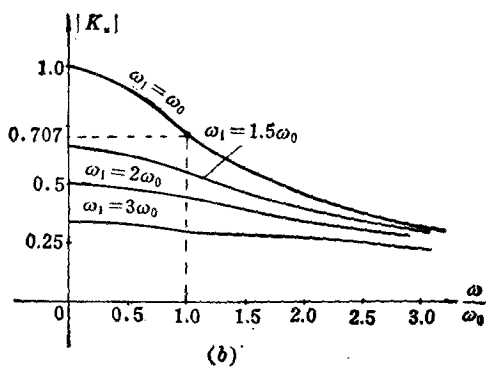
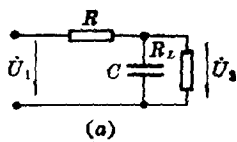


图 4-4 负载对  $RC$  低通滤波器工作的影响  
(a) 电路 (b) 幅频特性 (c) 相频特性

$$K_u(s) = \frac{U_2(s)}{U_1(s)} = \frac{\frac{R_L/Cs}{R_L + \frac{1}{Cs}}}{R + \frac{R_L/Cs}{R_L + \frac{1}{Cs}}} = \frac{\frac{1}{RC}}{s + \frac{R_L + R}{R_L RC}} \quad (4-6a)$$

令  $\omega_1 = \frac{1}{\frac{R_L R}{R_L + R} C}$ , 并将  $s$  还原为  $j\omega$ , 式(4-6a)成为

$$\begin{aligned} K_u(j\omega) &= \frac{\omega_0}{j\omega + \omega_1} = \frac{\omega_0}{\sqrt{\omega^2 + \omega_1^2}} e^{-j \arctan \frac{\omega}{\omega_1}} \\ &= \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2 + \left(\frac{\omega_1}{\omega_0}\right)^2}} e^{-j \arctan \frac{\omega}{\omega_1} \frac{\omega}{\omega_0}} \quad (4-6b) \end{aligned}$$

加负载后这一低通滤波器的幅频特性及相频特性见图 4-4(b) 及图 4-4(c)。可以明显看到,  $RC$  低通滤波器用于整流电源的滤波, 负载大小对输出直流电压的高低影响很大。负载加大(负载电阻减小)时, 输出直流电压明显降低, 对交流的滤除作用也相对减小。

同样的  $RC$  串联电路, 如将  $R$  上的电压作为输出电压, 便成为高通滤波器。如图 4-5(a), 这是放大器中最常用的  $RC$  耦合电路。前级放大器输出的信号电压, 通过这一  $RC$  耦合电路, 输送到下一级放大器去。 $C$  被称为耦合电容器。

应用前面的分析方法, 得出其电压传输函数为

$$K_u(s) = \frac{R}{R + \frac{1}{Cs}} = \frac{s}{s + \frac{1}{RC}} = \frac{s}{s - s_1} \quad (4-7a)$$

或

$$K_u(j\omega) = \frac{j\omega}{j\omega + \omega_0} = \frac{\omega}{\sqrt{\omega^2 + \omega_0^2}} e^{j\left(\frac{\pi}{2} - \arctan \frac{\omega}{\omega_0}\right)}$$

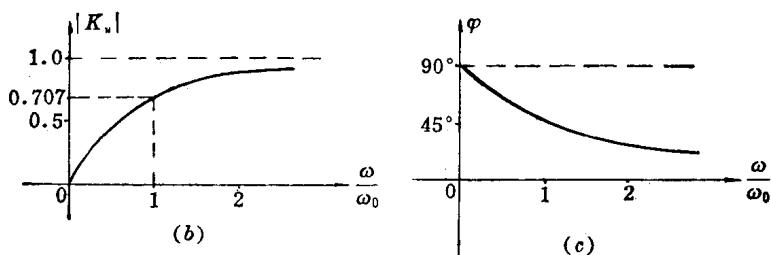
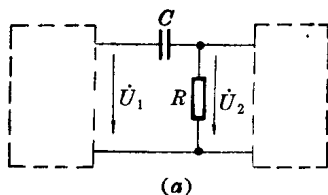


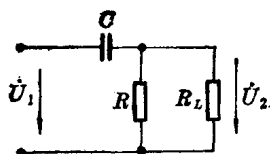
图 4-5  $RC$  高通滤波器

(a) 电路 (b) 幅频特性 (c) 相频特性

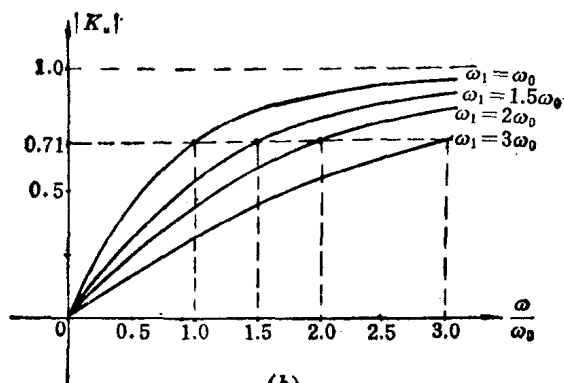
$$= \frac{\frac{\omega}{\omega_0}}{\sqrt{\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2 + 1}} e^{j\left(\frac{\pi}{2} - \arctg \frac{\omega}{\omega_0}\right)} \quad (4-7b)$$

根据式 (4-7b) 画出的幅频特性曲线及相频特性曲线见图 4-5 (b) 及图 4-5 (c)。从特性曲线可以看到, 通过这一网络的信号, 频率越高, 幅值降低及相位改变越少; 频率越低, 幅值降低越多, 相移越大。直流则根本通不过去。因而  $C$  常被称为隔直流电容器。同前面一样, 半功率点在  $\omega = \omega_0 = \frac{1}{RC}$  处, 通频带为  $\omega_0 < \omega < \infty$ , 因此, 它是  $RC$  高通滤波器。

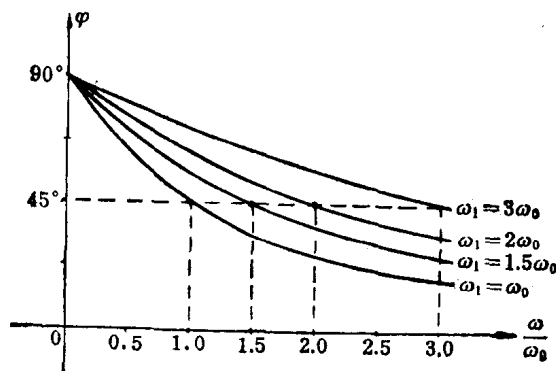
负载电阻对这一高通滤波器的性能影响也很大。如图 4-6(a), 滤波器接上负载后,  $R_L$  与  $R$  并联相当于使原来的  $R$  降低为  $\frac{R_L R}{R_L + R}$ , 令  $\omega_1 = \frac{1}{\frac{R_L R}{R_L + R} C}$ , 电压传输函数变为



(a)



(b)



(c)

图 4-6 负载对 RC 高通滤波器的影响  
(a) 电路 (b) 幅频特性 (c) 相频特性

$$\begin{aligned}
 K_u(j\omega) &= \frac{j\omega}{j\omega + \omega_1} = \frac{\omega}{\sqrt{\omega^2 + \omega_1^2}} e^{j(\frac{\pi}{2} - \arctan \frac{\omega}{\omega_1})} \\
 &= \frac{\frac{\omega}{\omega_0}}{\sqrt{\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2 + \left(\frac{\omega_1}{\omega_0}\right)^2}} e^{j(\frac{\pi}{2} - \arctan \frac{\omega}{\omega_1} - \frac{\omega}{\omega_0})} \quad (4-8)
 \end{aligned}$$

它的幅频特性曲线及相频特性曲线见图 4-6(b) 及图 4-6(c)。从曲线上可以明显看出, 负载对传输特性的影响是相当大的。例如, 当  $R_L = R$  时,  $\omega_1 = 2\omega_0$ , 频率为  $\omega_0$  的信号通过这一滤波器, 电压幅值不是降低为 70.7%, 而是降低为 45%, 而且相移也加大了。半功率频率提高到  $\omega_1 = 2\omega_0$ 。作为高通滤波器, 下限频率提高了一倍, 将使较低频率的信号不能顺利通过。

负载电阻对  $RC$  滤波器的工作影响大, 这是一切  $RC$  滤波器的特点。

$RC$  低通滤波器和  $RC$  高通滤波器还常用作移相网络。如图 4-7 为一应用三节  $RC$  高通滤波器的移相网络, 用于  $RC$  振荡器作为反馈网络, 一般都选用三个相同的  $R$  及  $C$ 。它对某一特定频率的信号产生  $180^\circ$  的相移。

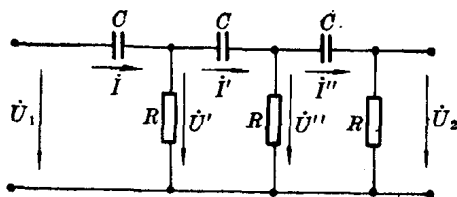


图 4-7 三节  $RC$  移相网络

这是一个典型的梯形网络, 可应用第一章中解梯形网络的方法推导出其电压传输函数, 具体推导过程如下:

$$I''(s) = \frac{1}{R} U_2(s)$$

$$U''(s) = \frac{1}{Cs} I''(s) + U_2(s) = \left( \frac{1}{RCs} + 1 \right) U_2(s)$$

$$I'(s) = I''(s) + \frac{1}{R} U''(s) = \left( \frac{1}{R^2Cs} + \frac{2}{R} \right) U_2(s)$$

$$U'(s) = \frac{1}{Cs} I'(s) + U''(s) = \left( \frac{1}{R^2C^2s^2} + \frac{3}{RCs} + 1 \right) U_2(s)$$

$$I(s) = I'(s) + \frac{1}{R} U'(s) = \left( \frac{1}{R^3C^2s^2} + \frac{4}{R^2Cs} + \frac{3}{R} \right) U_2(s)$$

$$U_1(s) = \frac{1}{Cs} I(s) + U'(s) = \left( \frac{1}{R^3C^3s^3} + \frac{5}{R^2C^2s^2} + \frac{6}{RCs} + 1 \right) U_2(s)$$

得

$$\begin{aligned} K_u(s) &= \frac{U_2(s)}{U_1(s)} = \frac{1}{\frac{1}{R^3C^3s^3} + \frac{5}{R^2C^2s^2} + \frac{6}{RCs} + 1} \\ &= \frac{R^3C^3s^3}{R^3C^3s^3 + 6R^2C^2s^2 + 5RCs + 1} \end{aligned} \quad (4-9a)$$

仍令  $\omega_0 = \frac{1}{RC}$ , 并将  $s$  还原为  $j\omega$ ,  $RCs = j\frac{\omega}{\omega_0}$ , 最后得电压传输函数

$$\begin{aligned} K_u(j\omega) &= \frac{-j\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^3}{-j\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^3 - 6\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2 + j5\frac{\omega}{\omega_0} + 1} \\ &= \frac{\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^3}{\sqrt{\left[1 - 6\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2\right]^2 + \left[5\frac{\omega}{\omega_0} - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^3\right]^2}} \\ &\quad \times e^{-j\left[\frac{\pi}{2} + \arctan \frac{5\frac{\omega}{\omega_0} - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^3}{1 - 6\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2}\right]} \end{aligned} \quad (4-9b)$$

当

$$1 - 6\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2 = 0$$