

高等学校教材

电 路 分 析

张永瑞 王松林 李小平

高等教育出版社

内容提要

本书是根据国家教育部修订的《高等工业学校电路分析基础基本要求》,并充分考虑各院校新教学计划时数及现代电子科技新的发展趋势,为电子信息类专业本科生编写的教材。全书由电路基本概念与定律、电阻电路一般分析法、电路定理、动态元件、动态电路时域分析、正弦稳态电路分析、频率特性、双口网络、非线性电阻电路、OrCAD/PSpice 用于电路分析、MATLAB 用于电路计算等十一章内容组成。基本概念讲述透彻,基本分析方法归类恰当、思路清晰、步骤明确;举例类型多、结合工程实际;所介绍的 OrCAD/PSpice 用于电路分析、MATLAB 用于电路计算,对读者学习、掌握现代电路分析的方法和工具,跟上电子科技发展的潮流非常有益。本书可作为通信工程、电子信息工程、信息工程、电子科学与技术、计算机科学技术等专业的本科生教材,对从事电子类专业的工程技术人员亦有重要的参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

电路分析 / 张永瑞, 王松林, 李小平. —北京: 高等教育出版社, 2004. 10

ISBN 7-04-014530-8

I. 电... II. ①张... ②王... ③李... III. 电路分析 - 高等学校 - 教材 IV. TM133

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 094409 号

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街 4 号
邮政编码 100011
总 机 010-58581000

购书热线 010-64054588
免费咨询 800-810-0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>

经 销 新华书店北京发行所
印 刷

开 本 787×960 1/16
印 张 26.75
字 数 480 000

版 次 年 月第 1 版
印 次 年 月第 次印刷
定 价 30.60 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

物料号: 14530-00

前 言

加强基础、拓宽专业口径、培养通用型人才,适应社会对人才知识结构的需求,这是各高等院校新教学计划共同的培养目标之一。而改革课程体系,科学地整合课程内容,使用现代化的教学手段与方法,这是更深层次、具体的教育改革内容。本书就是基于这样的时代背景,并考虑进入 21 世纪电工电子系列课程改革趋势、潮流及取得的新成果,特为通信工程、电子信息工程、探测制导与控制、计算机科学与技术、测控技术与仪器等专业的本科生编写的。

本书编写的主要特点是:

(1) 加强基本概念,筛选经典内容,突出基本、常用的电路分析方法。

(2) 不追求理论上的系统、完整、方方面面一应俱全,也不回顾电路理论发展的历史,但注重基础理论的应用。举例力求联系工程实际,具有典型性。

(3) 讲述概念力求简练、准确、清晰,问题讨论重视从物理概念上讲清道理,多做定性分析,对于必需的定量数学推导,交代清楚思路,过程简捷,结论明确醒目。

(4) 注重教学方法。作为教材应使教师教学实施方便,学生容易自学,本书融入了编者几十年在本课程教学中的经验、心得和体会。在结构安排上注重逻辑性和条理性,文字表述方面力求通俗易懂。

(5) 引入先进的电路分析方法及工具软件。时代在前进,科学技术在日新月异地发展,人才培养的模式也应与之适应,现代电路与系统中使用 OrCAD/PSpice、MATLAB 工具软件非常普遍,在本书的第十章和第十一章安排了这两部分的内容,目的是使本科生在大学学习阶段就基本学会现代电路分析中先进的分析方法并会使用现代的工具软件,待毕业后走上工作岗位,能很快地适应现代电路分析、设计工作的需要。

本书由电路基本概念与定律、电阻电路一般分析法、电路定理、动态元件、动态电路时域分析、正弦稳态电路分析、频率特性、双口网络、非线性电阻电路、OrCAD/PSpice 用于电路分析、MATLAB 用于电路计算等十一章内容组成。编写内

容与深浅度符合教育部教学指导委员会制定的电路分析基础课程的基本要求。张永瑞同志编写一、二章,王松林同志编写三、四、五、九、十、十一章,李小平同志编写六、七、八章,全书由张永瑞主编并负责统稿。本书承蒙国家教育部高等学校电子信息与电气学科教学指导委员会委员、西北工业大学段哲民教授审稿,段教授仔细审阅并提出了许多宝贵的意见,谨致以衷心的感谢。在编写本书稿的过程中得到了作者同事们的许多帮助,在这里也一并表示衷心的感谢,还要感谢我们参阅的所有文献的作者们,是他们编著的好教材为我们提供了丰富的资料。

限于编者水平,书中定有不少缺陷和错误,敬请读者批评指正。

编者于西安电子科技大学

2004. 8

目 录

第一章 电路的基本概念与定律

1.1 电路模型

1.1.1 实际电路组成与功能

1.1.2 电路模型

1.2 电路变量

1.2.1 电流

1.2.2 电压

1.2.3 电功率

1.3 电阻元件与欧姆定律

1.3.1 电阻元件

1.3.2 欧姆定律

1.3.3 电阻元件上消耗的功率与能量

1.4 理想电源

1.4.1 理想电压源

1.4.2 理想电流源

1.5 基尔霍夫定律

1.5.1 基尔霍夫电流定律(KCL)

1.5.2 基尔霍夫电压定律(KVL)

1.6 电路等效

1.6.1 电路等效的一般概念

1.6.2 电阻的串联等效与并联等效

1.6.3 理想电源的串联等效与并联等效

1.7 实际电源的模型及其互换等效

1.7.1 实际电源的模型

1.7.2 电压源、电流源模型互换等效

1.8 电阻 Δ 、Y 电路互换等效

1.8.1 Δ 形电路等效变换为 Y 形电路

- 1.8.2 Y形电路等效变换为 Δ 形电路
- 1.9 受控源及含受控源电路的等效
 - 1.9.1 受控源
 - 1.9.2 含受控源电路的等效
- 1.10 运算放大器概述
 - 1.10.1 理想运放的图形符号及电路模型
 - 1.10.2 理想运放三种输入方式与虚短路、虚断路的概念
 - 1.10.3 运放的两种典型运算

习题一

第二章 电阻电路的一般分析方法

- 2.1 图与电路方程
 - 2.1.1 网络(电路)的拓扑图
 - 2.1.2 回路、割集、树
 - 2.1.3 KCL和KVL的独立方程
- 2.2 $2b$ 法和 b 法
 - 2.2.1 $2b$ 法
 - 2.2.2 b 法
- 2.3 回路法与网孔法
 - 2.3.1 回路法
 - 2.3.2 网孔法
- 2.4 割集法与节点法
 - 2.4.1 割集法
 - 2.4.2 节点法

习题二

第三章 电路定理

- 3.1 齐次定理和叠加定理
 - 3.1.1 齐次定理
 - 3.1.2 叠加定理
- 3.2 替代定理
- 3.3 等效电源定理
 - 3.3.1 戴维宁定理
 - 3.3.2 诺顿定理
 - 3.3.3 等效电源定理应用举例
- 3.4 最大功率传输定理

3.5 特勒根定理

3.6 互易定理

习题三

第四章 动态元件

4.1 电容元件

4.2 电感元件

4.3 电容与电感的串、并联等效

4.4 耦合电感元件

4.4.1 耦合线圈

4.4.2 耦合电感的伏安关系

4.4.3 耦合电感的 T 形去耦等效电路

4.5 变压器

4.5.1 理想变压器

4.5.2 全耦合变压器的模型

4.5.3 实际变压器的模型

习题四

第五章 动态电路的时域分析

5.1 动态电路的方程及其解

5.1.1 动态电路方程的建立

5.1.2 微分方程的经典解法

5.2 电路的初始值

5.2.1 独立初始值

5.2.2 非独立初始值

5.3 一阶电路的零输入响应与时间常数

5.4 一阶电路的零状态响应

5.5 一阶电路的全响应——三要素公式

5.6 一阶电路的阶跃响应

5.6.1 阶跃函数

5.6.2 阶跃响应

5.7 二阶电路分析

5.7.1 零输入响应

5.7.2 阶跃响应

5.8 正弦激励下一阶电路的响应

习题五

第六章 正弦稳态电路分析

6.1 正弦量

6.1.1 正弦量的三要素

6.1.2 正弦量的有效值

6.1.3 相位差

6.2 正弦量的相量表示

6.2.1 正弦量与相量

6.2.2 正弦量的相量运算

6.3 电路定律的相量形式

6.3.1 无源元件 VAR 的相量形式

6.3.2 KCL 与 KVL 的相量形式

6.4 阻抗与导纳

6.4.1 阻抗与导纳

6.4.2 正弦稳态电路相量模型

6.5 正弦稳态电路的相量分析法

6.5.1 方程法

6.5.2 等效法

6.5.3 相量图的辅助解法

6.6 正弦稳态电路的功率

6.6.1 一端口电路的功率

6.6.2 最大功率传输条件

6.7 含耦合电感与理想变压器电路的正弦稳态分析

6.7.1 回路法分析

6.7.2 一次侧、二次侧等效电路

6.7.3 T 形去耦等效电路

6.8 三相电路

6.8.1 对称三相电源

6.8.2 Y-Y 电路分析

6.8.3 Y- Δ 电路分析

习题六

第七章 电路的频率响应

7.1 频率响应的基本概念

7.1.1 网络函数

- 7.1.2 频率响应
 - 7.2 一阶电路的频率响应
 - 7.2.1 RC 一阶低通电路
 - 7.2.2 RC 一阶高通电路
 - 7.2.3 RC 一阶全通电路
 - 7.3 RLC 二阶串联电路的频率响应
 - 7.3.1 RLC 二阶串联电路的频率响应
 - 7.3.2 RLC 串联谐振电路
 - 7.4 RLC 二阶并联电路的频率响应
 - 7.4.1 实用 RLC 并联谐振电路
 - 7.4.2 RLC 二阶并联电路的频率响应
- 习题七

第八章 二端口网络

- 8.1 二端口网络的方程与参数
 - 8.1.1 Z 参数方程和 Y 参数方程
 - 8.1.2 A 参数方程
 - 8.1.3 H 参数方程
 - 8.1.4 各种参数之间的关系
 - 8.2 二端口网络的网络函数
 - 8.2.1 用 Z 参数表示网络函数
 - 8.2.2 用 A 参数表示网络函数
 - 8.2.3 特性阻抗
 - 8.3 二端口网络的等效
 - 8.3.1 二端口网络的 Z 参数等效电路
 - 8.3.2 二端口网络的 Y 参数等效电路
 - 8.4 二端口网络的级联
- 习题八

第九章 非线性电阻电路分析

- 9.1 非线性电阻元件
- 9.2 非线性电阻的串联和并联
 - 9.2.1 非线性电阻的串联
 - 9.2.2 非线性电阻的并联
- 9.3 非线性电阻电路分析
 - 9.3.1 图解法

9.3.2 分段线性化法

9.3.3 小信号分析法

习题九

第十章 OrCAD/PSpice 用于电路分析

10.1 OrCAD/PSpice 软件的功能

10.1.1 OrCAD 的组成

10.1.2 OrCAD/PSpice 的功能

10.2 OrCAD 中与 PSpice 配套使用的软件

10.3 PSpice 的有关规定

10.3.1 PSpice 中的数字

10.3.2 PSpice 中的单位

10.3.3 PSpice 中的运算表达式和函数

10.3.4 电路图中的节点编号和输出变量表达式

10.3.5 OrCAD/Capture 常用元器件符号库

10.4 模拟电路分析的基本过程

10.4.1 绘制电路原理图

10.4.2 设置电路分析类型及其参数

10.4.3 电路模拟分析

10.4.4 电路模拟结果分析

10.5 PSpice 用于电路分析举例

10.5.1 直流分析

10.5.2 时域(瞬态)分析

10.5.3 交流分析

第十一章 MATLAB 用于电路计算

11.1 MATLAB 语言简介

11.1.1 MATLAB 语言的特点

11.1.2 MATLAB 使用入门

11.1.3 MATLAB 基本语法

11.1.4 获得 MATLAB 在线帮助

11.2 MATLAB 用于电路计算举例

11.2.1 电阻电路计算

11.2.2 时域电路计算

11.2.3 正弦稳态电路计算

部分习题参考答案

参考文献

第七章

电路的频率响应

第六章正弦稳态电路分析中,电源基本上是单一频率的正弦信号。在实际的通信与电子电路中,传输的大都不是单一频率的正弦量,而是具有许多不同频率的正弦信号,或占据一定频带宽度的电信号。我们知道,电路的响应与电路中元件类型、元件参数、元件连接方式有关。在动态电路中,因为电容、电感的阻抗是频率的函数,所以即使元件的类型或连接方式没有改变,但电源频率的变化也使电路响应随之变化。本章将讨论电路在不同频率电源作用下,电路响应(电流或电压)的变化规律和特点。

首先建立频率响应的基本概念,讨论典型一阶、二阶电路的频率响应特性,最后着重分析串联谐振及并联谐振电路的特点。

7.1 频率响应的基本概念

不同频率的正弦激励作用于电路,即使其振幅和初相相同,但电源频率变化时,电路响应也会发生相应变化。这种电路响应随频率变化的特性称为电路的频率响应。

研究频率响应,在通信与电子技术领域有着非常重要的意义。具有不同频率响应的电路,可以起到不同的作用。收音机中选频电路可以选择欲收听电台的信号,滤除其他频率的电台信号。在电话传输电路中,希望能让有用的音频信号顺利通过,对干扰音频的信号加以衰减,使传输话音清晰通畅。这种与频率有关的电路也称为滤波器,滤波器在通信线路、信号处理及电子设备中有着广泛的应用。

7.1.1 网络函数

在电路分析中,电路的网络函数(network function)定义为电路的响应相量与激励相量之比,以符号 $H(j\omega)$ 表示。即

$$H(j\omega) = \frac{\dot{Y}}{\dot{F}} \quad (7.1.1)$$

式(7.1.1)中响应相量 \dot{Y} 可以是电压相量,也可以是电流相量。同样,激励相量 \dot{F} 也可以是电压相量或电流相量。因此,网络函数的量纲根据不同的选择有不同的单位。根据响应与激励端位置的不同,网络函数又分为两类:若响应与激励为电路中同一端口的电压(或电流)、电流(或电压)相量,相应的网络函数称为策动点函数(instigate function);否则,称为传输函数或转移函数(transfer function)。

7.1.2 频率响应

一般含动态元件电路的网络函数为频率的复函数,表示为

$$H(j\omega) = |H(j\omega)| e^{j\varphi(\omega)} \quad (7.1.2)$$

式中, $|H(j\omega)|$ 是 $H(j\omega)$ 的模,是响应相量的模与激励相量的模之比, $\varphi(\omega)$ 是 $H(j\omega)$ 的辐角,是响应相量与激励相量的相位差。网络函数 $H(j\omega)$ 与角频率 ω 或 f 之间的关系称为电路(网络)的频率响应(frequency response)。一般称 $|H(j\omega)|$ 与 ω 的关系为幅频特性, $\varphi(\omega)$ 与 ω 的关系为相频特性。根据 $|H(j\omega)| - \omega$ 、 $\varphi(\omega) - \omega$ 画出的曲线称为频率响应曲线。

如图7.1.1(a)所示RC串联电路。若以电压源 u_s 为激励,以电容电压 u_C 为响应,试研究电路的频率特性,并画出幅频特性曲线和相频特性曲线。

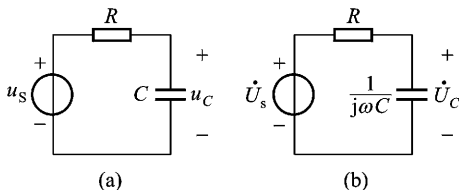


图 7.1.1 RC 串联电路

RC 电路的正弦稳态模型如图 7.1.1(b)所示。由分压公式得

$$\dot{U}_c = \frac{1}{R + \frac{1}{j\omega C}} \dot{U}_s \quad (7.1.3)$$

频率响应为

$$H(j\omega) = \frac{\dot{U}_c}{\dot{U}_s} = \frac{1}{1 + j\omega RC} \quad (7.1.4)$$

幅频特性和相频特性分别为

$$\left. \begin{aligned} |H(j\omega)| &= \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega RC)^2}} \\ \varphi(\omega) &= -\arctan(\omega RC) \end{aligned} \right\} \quad (7.1.5)$$

大致画出幅频响应曲线及相频响应曲线如图 7.1.2 所示。由图可见,当频率较低时, $|H(j\omega)|$ 较大,频率变高时, $|H(j\omega)|$ 随着 ω 变化而衰减。它表明,对于 RC 串联电路,当响应取之电容电压,在输入电压有效值保持不变的前提下,频率较低时,输出电压 U_c 较大,从传输的观点来看,表明低频信号较容易通过,输出电压 U_c 随着频率增加而减小,表明高频信号产生较大衰减。称这种电路为低通滤波器。

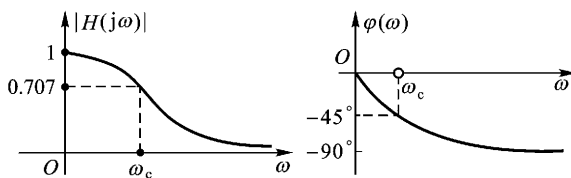


图 7.1.2 频率响应曲线

通常将 $|H(j\omega)|/H_{\max} \geq \frac{1}{\sqrt{2}}$ 的频率范围称为滤波器的通频带 (passband);

而将 $|H(j\omega)|/H_{\max} < \frac{1}{\sqrt{2}}$ 的频率范围称为滤波器的阻带或止带 (stopband); 二

者的边界频率称为截止频率 (outoff frequency) 或截止角频率,用 f_c 或 ω_c 表示。当 $\omega = \omega_c$ 时,电路的输出功率是最大输出功率的一半,因此又称 ω_c 为半功率点角频率。

按频率响应通带的位置可将滤波器划分为低通 (lowpass)、高通 (high-pass)、带通 (bandpass)、带阻 (bandstop) 和全通 (allpass) 滤波器。其理想特性如图 7.1.3 所示。通常将幅频响应 $|H(j\omega)|$ 在整个频率轴上为常数的电路称为全通滤波器。

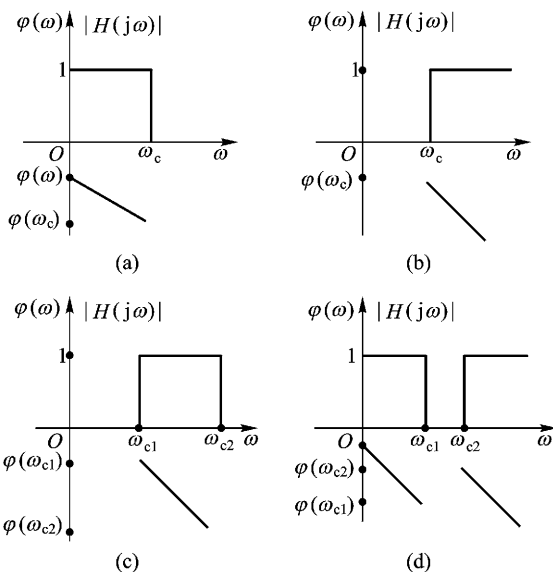


图 7.1.3 四种滤波器的理想频率响应曲线

(a) 理想低通 (b) 理想高通 (c) 理想带通 (d) 理想带阻

对于理想的低通和高通滤波器,它们只有一个截止频率,该频率将频域分为通带和阻带。带通滤波器与带阻滤波器有两个截止频率。带通滤波器将处于两个截止频率之间的信号传输到输出端,而带阻滤波器阻止处于两个截止频率之间信号的传输。注意这里所说频率的高和低,并不是指频率的绝对值,而是对截止频率而言的相对频率。

注意到理想滤波器相位特性曲线在通带内与频率是线性关系。在通带外没有意义,因为在通带外幅值为零。幅频特性与相频特性不是无关的。构造了具有某种幅频特性的电路,同时就会产生相应的相频特性,反之亦然。

一阶电路和二阶电路是典型的两类滤波电路,是构成高阶电路的基本单元模块。本章只分析无源电路,即由无源元件:电阻、电感、电容构成的一阶、二阶电路的频率响应。

7.2 一阶电路的频率响应

无源一阶电路有 RC 电路和 RL 电路。本节讨论以 RC 元件构成的一阶低通、一阶高通和一阶全通电路。

7.2.1 RC 一阶低通电路

上节讨论了以 RC 串联电路电容电压为输出的频率响应。式(7.1.4)改写为

$$H(j\omega) = \frac{1}{1 + j\omega RC} = \frac{\frac{1}{RC}}{j\omega + \frac{1}{RC}} = \frac{\omega_c}{j\omega + \omega_c} \quad (7.2.1)$$

其中 $\omega_c = \frac{1}{RC}$ 为截止频率, 电路为低通滤波器。幅频特性和相频特性分别为

$$\left. \begin{aligned} |H(j\omega)| &= \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega}{\omega_c}\right)^2}} \\ \varphi(\omega) &= -\arctan \frac{\omega}{\omega_c} \end{aligned} \right\} \quad (7.2.2)$$

频率响应曲线如图 7.1.2 所示。自然看出, 频率响应曲线与理想低通特性有明显的差异。实际上, 在实际滤波器设计中, 应使幅频特性在通带内尽可能平坦, 从通带到阻带的变化尽可能陡峭, 在阻带内幅频特性趋于零。滤波器的设计是一个广泛的课题, 在这里只做简单的概念性介绍。

从图 7.1.2 还可以看出, 随着角频率的增加, 相频特性 $\varphi(\omega)$ 从 0° 到 -90° 单调下降。说明输出电压总是滞后于输入电压, 滞后的角度取决于输入信号的角频率和元件的参数值。因此, 图 7.1.1 所示的 RC 一阶低通电路属于滞后电路。

7.2.2 RC 一阶高通电路

对于同样的 RC 电路, 若取电阻电压为输出, 如图 7.2.1(a)所示。其频率响应为

$$H(j\omega) = \frac{\dot{U}_R}{\dot{U}_s} = \frac{R}{R + \frac{1}{j\omega C}} = \frac{j\omega}{j\omega + \omega_c} \quad (7.2.3)$$

式中, $\omega_c = \frac{1}{RC}$ 。

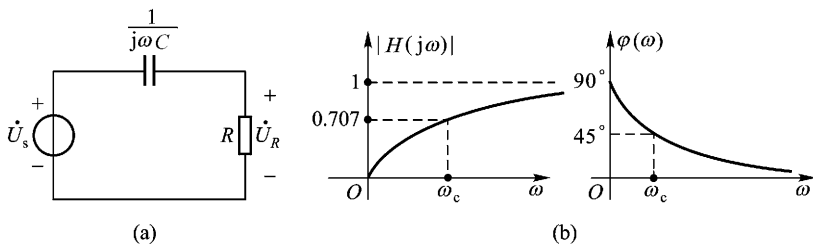


图 7.2.1 RC 高通电路的频率响应

改写表达式(7.2.3)为

$$H(j\omega) = \frac{1}{1 - j\frac{\omega_c}{\omega}} \quad (7.2.4)$$

幅频特性和相频特性分别为

$$\left. \begin{aligned} |H(j\omega)| &= \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega_c}{\omega}\right)^2}} \\ \varphi(\omega) &= \arctan \frac{\omega_c}{\omega} \end{aligned} \right\} \quad (7.2.5)$$

由式(7.2.5)得到:当 $\omega = 0$ 时, $|H(j0)| = 0$, $\varphi(0) = 90^\circ$;当 $\omega = \infty$ 时, $|H(j\infty)| = 1$, $\varphi(\infty) = 0^\circ$ 。大致画出幅频响应和相频响应曲线,如图7.2.1(b)所示。说明对于RC串联电路,当响应取之电阻电压时,在输入电压有效值保持不变的前提下,频率较低, $|H(j\omega)|$ 衰减较大,输出电压 U_R 较小,频率变高时, $|H(j\omega)|$ 随着 ω 变化而趋于1,输出电压 U_R 随着频率增加而增加。从传输的观点来看,表明高频信号较容易通过,低频信号得到抑制,称这种电路为高通滤波器。

从图7.2.1(b)还可以看出,随着角频率的增加,相频特性 $\varphi(\omega)$ 从 90° 单调地趋向于 0° 。说明输出电压总是超前于输入电压,超前的角度取决于输入信号的角频率和元件的参数值。因此,图7.2.1(a)所示的RC一阶高通电路属于超前电路。

ω_c 为滤波器的截止频率, $|H(j\omega_c)| = \frac{1}{\sqrt{2}}$, $\varphi(\omega_c) = \frac{\pi}{4}$ 。 $\omega > \omega_c$ 的频率范围

为滤波器的通带, $0 \sim \omega_c$ 的频率范围为滤波器的阻带。

因此,即使电路结构相同,激励源的位置、大小不变,但取不同的量为输出,也可以得到不同的频率响应,相同的电路可以起到不同的作用。