



高等院校核心课程辅导丛书

电路分析基础

答疑解惑与典型题解

DIANLU FENXI JICHU

DAYI JIEHUO YU DIANXING TIJIE

北京邮电大学“电路分析基础”教学团队 编写



北京邮电大学出版社
www.buptpress.com

电路分析基础答疑解惑与典型题解

北京邮电大学“电路分析基础”教学团队 编写



北京邮电大学出版社
www.buptpress.com

内 容 简 介

“电路分析基础”是电气与电子信息类学科重要的学科基础课,也是学生接触的第一门学科基础课。本课程前后内容联系紧密,系统性和逻辑性强,且概念、定理、定律、分析方法多,学生要想较好地掌握这门课程的知识,必须进行一定量的习题练习。

本书以近十年的期中、期末试题为索引,首先介绍课程的基本内容,然后说明各题涉及的知识点,并给出详细解答,有些题目还给出了不同的求解方法,从而让学习者更好地掌握课程基本内容以及电路的基本分析方法。

本书可作为高校电路教学及课余学习的指导用书。

图书在版编目(CIP)数据

电路分析基础答疑解惑与典型题解 / 北京邮电大学“电路分析基础”教学团队编写. -- 北京: 北京邮电大学出版社, 2019. 5

ISBN 978-7-5635-5723-3

I. ①电… II. ①北… III. ①电路分析—高等学校—题解 IV. ①TM133-44

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 088511 号

书 名: 电路分析基础答疑解惑与典型题解
作 者: 北京邮电大学“电路分析基础”教学团队
责任编辑: 刘春棠
出版发行: 北京邮电大学出版社
社 址: 北京市海淀区西土城路 10 号 (邮编: 100876)
发 行 部: 电话: 010-62282185 传真: 010-62283578
E-mail: publish@bupt.edu.cn
经 销: 各地新华书店
印 刷: 保定市申画美凯印刷有限公司
开 本: 787 mm×1 092 mm 1/16
印 张: 10.75
字 数: 266 千字
版 次: 2019 年 5 月第 1 版 2019 年 5 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5635-5723-3

定 价: 32.00 元

· 如有印装质量问题,请与北京邮电大学出版社发行部联系 ·

前 言

“电路分析基础”是电气与电子信息类学科重要的学科基础课,也是学生接触的第一门学科基础课,因此对学生来说不太容易掌握。同时,由于该课程概念多,定理、定律多,分析方法多,而且前后内容联系紧密,系统性和逻辑性强,所以对初学者来说有一定的难度。为了帮助学习者更好地掌握课程知识和基本的电路分析方法,同时也考虑一些考研学生的需求,“电路分析基础”教学团队编写了本书。

基于知识学习与能力培养并重的理念,为了培养学习者科学的思维方式和分析问题、解决问题的能力,并遵循先学习后巩固的学习规律,本书先对课程的概要、特点进行了阐述,对章节内容按照知识点进行了梳理,说明了学习过程中的注意事项;然后整理了近十年来的期中期末考试试题,并逐题进行了解析和解答,某些题目还给出了不同的解题思路和解题方法。

本书主要包括:电路模型和电路元件,电阻电路的基本分析方法,电路的基本定理,一阶和二阶动态电路的分析,正弦稳态电路和非正弦周期稳态电路的分析,对称三相电路的分析,电路的频率特性,耦合电感电路的分析,二端口网络。

本书既可以作为“电路分析基础”课程的辅助学习资料,也可以作为考研的复习练习册;既可以作为教师的教学参考书,也可以作为各类培训班的培训材料。此外,本书也可以供自学人员参考阅读。

本书由“电路分析基础”教学团队的俎云霄、李巍海、侯宾、张勇、张金玲、吴帆、李宁、张轶和吴国华编写,全书框架结构由俎云霄拟定,内容由俎云霄审阅。

限于作者水平,书中难免存在不当之处,恳请广大读者批评指正。如有任何批评和建议请发至电子邮箱 zuyx@bupt.edu.cn。

作 者
于北京邮电大学

目 录

第一部分 课程内容概要	1
一、课程简介	1
二、主要知识点	1
(一) 电路模型和电路元件	1
(二) 电阻电路的基本分析方法	4
(三) 电路的基本定理	6
(四) 一阶动态电路	8
(五) 二阶动态电路	10
(六) 正弦稳态电路	11
(七) 三相电路	13
(八) 非正弦周期稳态电路	14
(九) 电路的频率特性	15
(十) 耦合电感电路	17
(十一) 二端口网络	18
第二部分 往年考试试题、答案和解析	20
2010 年考试试题、答案和解析	20
期中试题	20
期中试题答案和解析	24
期末试题	28
期末试题答案和解析	31
2011 年考试试题、答案和解析	38
期中试题	38
期中试题答案和解析	41
期末试题	46
期末试题答案和解析	50
2012 年考试试题、答案和解析	55
期中试题	55
期中试题答案和解析	59
期末试题	65
期末试题答案和解析	68
2013 年考试试题、答案和解析	73

期中试题	73
期中试题答案和解析	76
期末试题	82
期末试题答案和解析	85
2014 年考试试题、答案和解析	91
期中试题	91
期中试题答案和解析	94
期末试题	102
期末试题答案和解析	105
2015 年考试试题、答案和解析	111
期中试题	111
期中试题答案和解析	115
期末试题	119
期末试题答案和解析	124
2016 年考试试题、答案和解析	131
期中试题	131
期中试题答案和解析	133
期末试题	135
期末试题答案和解析	138
2017 年考试试题、答案和解析	143
期中试题	143
期中试题答案和解析	145
期末试题	147
期末试题答案和解析	150
2018 年考试试题、答案和解析	154
期中试题	154
期中试题答案和解析	156
期末试题	158
期末试题答案和解析	161

第一部分

课程内容概要

一、课程简介

“电路分析基础”是电气与电子信息类、计算机类、机械类、仪器类、自动化类专业第一门重要的专业基础课,重点讨论线性集总参数电路的基本理论和基本分析方法。

课程的主要内容包括:电路模型和电路元件,直流电阻电路的基本分析方法,电路的基本定律和定理,一阶动态电路的基本分析方法和二阶动态电路的基本特性,正弦量及其相量,电路元件及正弦稳态电路的相量模型,正弦稳态电路的分析,电路的频率特性,耦合电感电路与理想变压器,二端口网络。

“电路分析基础”课程概念多,定理、定律多,分析方法多,而且前后内容联系紧密,系统性和逻辑性强,学习过程中要注意掌握基本概念、基本原理和基本分析方法,做到概念清楚、计算熟练、思路灵活,还要通过适当的练习题巩固所学的知识。此外,该门课程与工程应用相关,所以在学习和解题时还要注意定性分析与理论计算相结合。

通过本课程的学习,应该掌握电路的基本概念、基本理论和基本分析方法,理解并建立“参考方向”“等效”及“分解”的概念,学会用不同的方法分析解决简单电路的基本问题,同时还要注意培养分析问题、解决问题的能力,抽象思维能力以及初步的理论联系实际的能力。

该课程还是“电子电路基础”“信号与系统”课程的前导课,所以学习好此门课程能为后续课程的学习打下良好的基础。

二、主要知识点

(一) 电路模型和电路元件

1. 电路和电路模型

集总参数元件:当实际电路的尺寸远小于其使用时最高工作频率所对应的波长时抽象出的理想元件。

集总参数电路:由集总参数元件组成的电路。

注意:集总参数电路对应的是分布参数电路。分布参数电路是当实际电路的尺寸大于其最高工作频率所对应的波长或两者属于同一数量级时所对应的一种电路。在这种电路中,每一种器件不能用一种理想元件去表示,如电阻还存在电感,晶体管有结电容,导线与导线之间存在电容与电感,将这些元件的参数考虑进去即为分布参数电路。

2. 电路变量

最常用的电路基本物理量有:电流、电压和功率。

参考方向:任意选定的方向(正方向)。参考方向是为分析问题的方便而引入的。

关联参考方向:对一个元件或支路来说,电流的参考方向由电压的参考“+”极性端指向“-”极性端,如图1所示;否则即为非关联参考方向。



图1 关联参考方向

注意:判断参考方向是否关联一定是针对某一元件或者某条支路的。

功率:单位时间内电荷获得或失去的能量。计算某元件或网络消耗的功率计算式为

$$p = \pm ui$$

电压、电流为关联参考方向时,取正号;否则,取负号。根据计算的功率正负可以判断元件或网络是消耗功率(能量)还是产生功率(能量)。大于零,则表示消耗(吸收)能量;否则,则表示提供(发出)能量。

3. 基尔霍夫定律

基尔霍夫电流定律(KCL):在集总参数电路中,任一瞬间,流入(或流出)电路中任一节点的电流代数和恒等于零。

KCL反映了电路在节点上的电流约束关系——电荷守恒。KCL也适用于广义节点(封闭面)。

基尔霍夫电压定律(KVL):在集总参数电路中,任一瞬间沿任一回路各支路电压的代数和等于零。

KVL反映了电路在回路中的电压约束关系——能量守恒。

注意:KCL、KVL适用于集总参数电路,二者是电路的拓扑约束。运用KCL、KVL时需要清楚两套符号:一是方程中各项前的正、负号;二是电流或电压本身数值的正、负号。

4. 电阻元件

电阻元件的定义:任意时刻,二端元件的电压 u 与电流 i 之间存在代数关系 $f(u, i) = 0$,即为 $u-i$ 平面上的一条曲线,则称此二端元件为电阻元件(resistor)。

线性电阻元件的VCR遵循欧姆定律,即

$$u = \pm Ri$$

伏安特性曲线:在 $u-i$ 平面(或 $i-u$ 平面)上绘出元件的VCR,即为该元件的伏安特性曲线。线性电阻元件的伏安特性曲线是一条经过坐标原点的直线,电阻值决定了直线的斜率。

电阻元件的功率:

$$p = \pm ui = Ri^2 = \frac{u^2}{R}$$

实际电阻元件是一种耗能元件。

5. 电压源

电压源分理想电压源和实际电压源。

理想电压源具有两个特点:(1)端电压是定值或是固定的时间函数,与流过的电流无关;(2)流过电压源的电流由与之相连接的外电路决定。

实际电压源:可以看作是理想电压源和电阻的串联组合,其输出特性曲线是由短路电流和开路电压决定的一条直线;随着供出的负载电流加大,其输出电压降低。

6. 电流源

电流源分理想电流源和实际电流源。

理想电流源具有两个特点:(1)供出的电流是定值或是固定的时间函数,与其两端的电压无关;(2)电流源两端的电压由与之相连接的外电路决定。

实际电流源:可以看作是理想电流源和一个电导或电阻的并联组合。

7. 受控源

受控源是由某些电子器件抽象而来的一种电源模型,这些电子器件都具有输出端的电压或电流受输入端的电压或电流控制的特点。晶体管、变压器、运算放大器等电子器件都可以用受控源作为其电路模型。

受控源与独立源有本质的区别。独立源的电压或电流是独立存在的,而受控源的电压或电流受电路中某些量的控制,控制量消失,则受控源也不存在。

在分析电路时,通常先把受控源看作独立源对待,并将控制量代入。

受控源的功率是受控支路的功率,即

$$p = \pm u_2 i_2$$

8. 电阻的等效变换及输入电阻

等效的概念:如果一个单口网络 N 和另一个单口网络 N_1 端口处的电压电流关系完全相同,即它们在平面上的伏安特性曲线完全重合,则称这两个单口网络是等效的。

注意:等效是指对任意外电路等效。

电阻的等效:串联等效,并联等效,星-三角等效。

输入电阻的概念:对不含独立电源(可以含有受控源)的单口网络,定义端口的电压和电流之比为该单口网络的输入电阻(入端电阻)。用公式表示为

$$R_i \stackrel{\text{def}}{=} \pm \frac{u}{i}$$

对于同一单口网络,等效电阻和输入电阻相等,但概念不同。等效电阻可以通过输入电阻计算。

9. 电源的等效变换

电压源的串联:多个串联连接的电压源可以等效为一个电压源,其值为相串联的各电压源电压的代数和。

注意:任何元件与电压源并联,对外电路的作用与一个电压源的作用等效。

电流源的并联:多个并联连接的电流源可以等效为一个电流源,其值为相并联的各电流源电流的代数和。

注意:任何元件与电流源串联,对外电路的作用与一个电流源的作用等效。

实际电压源模型(如图 2(a)所示)与实际电流源模型(如图 2(b)所示)可以进行等效变换。

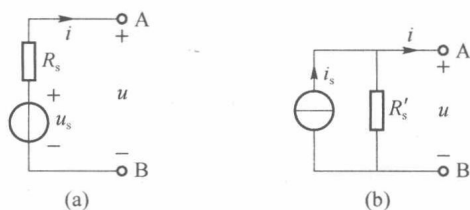


图2 实际电源模型间的等效变换

参数间的关系为

$$R_s = R'_s, \quad i_s = \frac{u_s}{R_s}, \quad u_s = R'_s i_s$$

变换后电源的参考方向:等效电流源电流的参考方向由电压源的参考方向的负极端指向正极端。等效电压源电压的参考正极性端为电流源电流流出的一端。

注意:两种电源模型对于外电路可以等效替代,但电源内部不一定等效。

(二) 电阻电路的基本分析方法

1. 图论的初步知识

树(tree-T):树是连通图 G 的一个连通子图;包含图 G 所有的节点;不包含任何回路。

树枝:组成树的支路,树枝数 $n_t = n - 1$ 。

连支:其余的支路,连支数 $l = b - n_t = b - n + 1$ 。

基本回路:只含有一条连支的回路(单连支回路)。

注意:基本回路数等于连支数,一般以连支的方向为基本回路的绕行方向。

割集(cutset):图 G 的割集是 G 的一些支路集合,把这些支路移去将使 G 分离为两个部分,而如果少移去其中一条支路,图仍将是连通的。所以,割集是使图分为两部分的最少边集。

基本割集:由一条树枝和若干条连支构成的割集,即单树枝割集,是一组独立的割集。

注意:基本割集的方向一般选为树枝支路的方向。

2. 支路电流法和支路电压法

KCL、KVL的独立方程数:对于节点数为 n 、支路数为 b 的电路,其独立的 KCL 方程数为 $n - 1$ 个;独立的 KVL 方程数为 $b - n + 1$ 个。

支路电流法:以各支路电流为未知量列写方程求解的方法。

注意:方程个数等于支路数。

支路电压法:以各支路电压为未知量列写方程求解的方法。

支路法说明:根据支路电流法(支路电压法)求得各支路的电流(电压)后,则各支路的电压(电流)就可由相应支路的 VCR 求得,进而求得电路的响应(支路电流和支路电压)。

3. 完备的独立电路变量

完备:是指利用 KCL 或 KVL 以及元件的 VCR 能够由该组变量求出电路中其他支路的电压和电流。

独立:是指该组变量中的任意一个变量不能用该组中其他变量表示,即这些变量线性无关、相互独立。

完备的独立电流变量:连支电流和网孔电流。

注意:完备的独立电流变量个数=连支数=网孔数= $b-n+1$

完备的独立电压变量:树枝电压和节点电压。

注意:完备的独立电压变量个数=树枝数=节点电压数= $n-1$

4. 节点电压法

节点电压法:以节点电压为电路变量列写方程求解电路响应的一种分析方法。

参考节点:在电路中选定任一节点,令其电位为零,即表明与“大地”相连,并用符号“⊥”或数字“0”表示,称此节点为电路的参考节点(零电位点)。

节点电压:电路中其他节点与参考节点之间的电压。通常参考节点被认为是节点电压的“-”端,即节点电压的方向是由其他节点指向参考节点。

节点电压法的实质:节点的 KCL 方程。

具有 n 个节点的电路的节点电压方程的一般形式为

$$\begin{cases} G_{11}u_{n1} + G_{12}u_{n2} + \cdots + G_{1(n-1)}u_{n(n-1)} = i_{s11} \\ G_{21}u_{n1} + G_{22}u_{n2} + \cdots + G_{2(n-1)}u_{n(n-1)} = i_{s22} \\ \vdots \\ G_{(n-1)1}u_{n1} + G_{(n-1)2}u_{n2} + \cdots + G_{(n-1)(n-1)}u_{n(n-1)} = i_{s(n-1)(n-1)} \end{cases}$$

注意:自电导恒为正,互电导恒为负。电流源的电流流向节点为正;否则为负。

列写节点电压法方程时的注意事项如下。

(1) 若支路为电压源与电阻串联,则等效为电流源与电阻并联。

(2) 电路中含有理想电压源(没有与之串联的电阻)支路时分两种情况:

① 电压源接在两个非参考节点之间,则设电压源所在支路电流 i 为未知量,并将此电流当作电流源处理,同时增列一个电压源支路电压与相关节点电压的方程;

② 电压源接在参考节点和非参考节点之间,则该节点电压可用电压源电压直接表示。

(3) 电路中含有电流源与电阻串联:在列节点方程时不考虑此电阻。

(4) 电路中含有受控源:把受控源当作独立源对待,并把控制量用节点电压表示。

5. 网孔电流法

网孔电流法:以网孔电流作为电路变量列写方程求解电路响应的一种方法。

网孔电流:一种假想的、沿着网孔边界流动的电流。

注意:网孔电流是“假想”的沿着网孔流动的电流。

网孔分析法的实质:网孔的 KVL 方程。

具有 n 个网孔的电路的网孔电流方程的一般形式为

$$\begin{cases} R_{11}i_{m1} + R_{12}i_{m2} + \cdots + R_{1n}i_{nm} = u_{s11} \\ R_{21}i_{m1} + R_{22}i_{m2} + \cdots + R_{2n}i_{nm} = u_{s22} \\ \vdots \\ R_{n1}i_{m1} + R_{n2}i_{m2} + \cdots + R_{nm}i_{nm} = u_{snm} \end{cases}$$

注意:自电阻恒为正。互电阻的正负与两网孔通过公共支路电阻时的方向有关,如果方向一致,则互电阻为正;否则为负。如果将各网孔电流的方向设为同一绕行方向,则互电阻恒为负。计算网孔 i 中各电压源电压的代数和时,若沿网孔绕行方向为电压源电位升的方向,则为正;否则为负。

列写网孔电流方程时需注意以下几点。

(1) 若支路为电流源与电阻的并联,则先变成电压源与电阻的串联。

(2) 如果电路中有理想电流源(没有与之并联的电阻)支路,则有两种情况:

① 如果电流源支路是两个网孔的公共支路,则假设电流源所在支路电压为一个未知量,并在列方程时当作电压源电压对待,同时增列一个电流源支路电流与相关网孔电流的方程;

② 如果只有一个网孔电流通过该理想电流源支路,此时该网孔电流可由电流源电流表示。

(3) 若电路中含有电压源与电阻并联的支路,则在列网孔方程时不考虑此电阻。

(4) 若电路中含有受控电源,则把受控源当作独立源对待,并把控制量用网孔电流表示。

6. 回路电流法

回路电流法:以基本回路电流作为电路变量列写方程求解电路响应的一种方法。

基本回路电流:一种假想的、沿着基本回路边界流动的电流。回路电流方程的列写方法与网孔电流方程的列写方法类似。

网孔电流法和回路电流法的区别在于:

(1) 列写回路电流方程时要先选一棵树,进而确定基本回路,然后对基本回路列写方程;

(2) 网孔电流法只适用于平面电路,回路电流法适用于任何电路,网孔电流法是回路电流法的特例;

(3) 选择树时,尽量选择电压源支路为树支,电流源支路为连支,这样可使方程数减少。

(三) 电路的基本定理

1. 齐性定理

齐性定理的内容:在单一激励的线性电路中,如果激励增加 K 倍或减小为原来的 $1/K$,则响应也同样增加 K 倍或减小为原来的 $1/K$ 。

注意:齐性定理只适用于线性电路,表明线性电路中响应与激励之间存在线性关系。

2. 叠加定理

叠加定理的内容:在由线性电阻、线性受控源及独立源组成的电路中,每一元件的电流或电压可以看成是每一个独立源单独作用于电路时,在该元件上产生的电流或电压的代数和。

单独作用的含义:当某一独立源单独作用时,其他独立源应为零值,即独立电压源短路,独立电流源开路。

注意:

(1) 受控源不能单独作用,即独立源单独作用时,受控源必须保留在电路中,而且要注意控制量的变化;

(2) 叠加时注意电压、电流的方向;

(3) 叠加定理只适用于线性电路;

(4) 叠加定理不适用于功率的计算;

(5) 也可以让独立源分组作用, 一组独立源同时作用求响应, 然后将各组独立源作用时的响应进行叠加。

3. 替代定理

替代定理的内容: 若某网络中的所有支路电压和支路电流都有唯一解, 且已知某支路 k 的电流 i_k 或电压 u_k , 则可以用一个电流为 i_k 的电流源或电压为 u_k 的电压源等效替代这条支路, 替代后网络其他部分的电压和电流值保持不变。

注意:

- (1) 只有当替代前后的网络具有唯一解时, 才可以应用替代定理;
- (2) 替代定理不仅适用于线性网络, 也适用于非线性网络;
- (3) 替代后, 只能求解电路各部分的电压、电流等, 不能进行等效转换求等效电阻等, 因为电路已经改变;
- (4) 如果某支路有控制量, 而替代后该控制量将不复存在, 则该支路不能被替代。

4. 戴维南定理和诺顿定理

戴维南定理的内容: 任何含有独立源、线性电阻及线性受控源的线性单口网络, 不论其结构如何复杂, 就其端口特性而言, 都可用电压源与电阻的串联支路等效替代。等效电压源的电压等于端口的开路电压, 等效电阻为单口网络内所有独立源置零后端口的等效电阻。

戴维南等效电阻的确定方法如下。

- (1) 外加电源法: 基于单口网络输入电阻的概念。应用此方法时需将网络中的独立源置零。
- (2) 短路电流法: 基于单口网络的伏安特性。应用此方法时单口网络中的独立源要保留。注意开路电压与短路电流的参考方向。
- (3) 如果电路中没有受控源, 则直接用电阻串并联、星-三角变换的方法。

说明: 戴维南等效电路还可以应用 VCR 确定法求得, 此法基于单口网络的端口 VCR。

诺顿定理的内容: 任何含源线性单口网络都可以用一个电流源与一个电阻的并联支路等效替代。等效电流源的电流等于该网络的短路电流, 等效电阻等于该网络除源后所得网络的等效电阻。

等效电阻的求解方法与戴维南等效电阻求解方法相同。

应用戴维南定理和诺顿定理需要注意以下问题。

- (1) 对同一个单口网络, 戴维南等效电阻与诺顿等效电阻相等。
- (2) 一个单口网络的戴维南等效电路和诺顿等效电路之间可以等效变换。
- (3) 利用戴维南定理和诺顿定理求电压、电流时, 将待求支路与电路其他部分分开(将电路进行分解), 求其他部分的戴维南等效电路或诺顿等效电路, 然后再与待求支路连接进行求解。但注意: 分解电路时一定要把受控源及其控制量放在同一部分, 即单口网络中不能含有控制量在外部电路的受控源, 但控制量可以是端口电压或电流。

5. 最大功率传输定理

最大功率传输定理的内容: 由含源线性单口网络传递给可变负载的功率为最大的条件是负载电阻等于单口网络的戴维南等效电阻, 获得的最大功率为

$$P_{L\max} = \frac{u_{oc}^2}{4R_{eq}}$$

6. 特勒根定理

定理 1 设某网络 N 有 b 条支路、 n 个节点,各支路电流和支路电压分别为 i_1, i_2, \dots, i_b 和 u_1, u_2, \dots, u_b ,如果同一支路的电压、电流取关联参考方向,则有如下关系:

$$\sum_{k=1}^b u_k i_k = 0$$

此定理表明,任一电路的所有支路吸收的功率之和恒等于零,因此也将其称为功率平衡定理。

定理 2 如果有两个具有 b 条支路、 n 个节点的网络 N 和 \hat{N} ,它们由不同的二端元件组成,但其有向图完全相同。设网络 N 的各支路电流和电压分别为 i_1, i_2, \dots, i_b 和 u_1, u_2, \dots, u_b ,且同一支路的电压、电流取关联参考方向;网络 \hat{N} 的各支路电流和电压分别为 $\hat{i}_1, \hat{i}_2, \dots, \hat{i}_b$ 和 $\hat{u}_1, \hat{u}_2, \dots, \hat{u}_b$,且同一支路的电压、电流也取关联参考方向,则有如下关系:

$$\sum_{k=1}^b u_k \hat{i}_k = 0, \quad \sum_{k=1}^b \hat{u}_k i_k = 0$$

定理 2 虽然也是电压和电流乘积项之和,但不能用功率平衡解释,因为它是不同网络的对应支路电压与电流的乘积,所以将其称为似功率平衡定理。

7. 对偶原理

电路中的一些对偶元素和对偶关系。

(四) 一阶动态电路

1. 电容元件

电容元件的定义:若在任意时刻 t ,一个二端元件的端电压 $u(t)$ 与其储存的电荷 $q(t)$ 之间的关系可以用 $q-u$ 平面上的一条曲线确定,则称此二端元件为电容元件。其中,线性电容元件满足关系: $q=Cu$ 。

VCR:在电压、电流为关联参考方向下, $i=C \frac{du}{dt}$ 。

电容元件的基本性质:动态性,电容电压的记忆性和连续性,无源性。

电容的储能:某一时刻的储能 $w_C(t) = \frac{1}{2}Cu_C^2(t)$;某一时间段内,电容储存或释放的能量 $w_C(t_1, t_2) = w_C(t_2) - w_C(t_1)$ 。

电容元件的串联: $\frac{1}{C_s} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n}$

电容元件的并联: $C_p = C_1 + C_2 + \dots + C_n$

2. 电感元件

电感元件的定义:若在任意时刻 t ,一个二端元件的端电流 $i(t)$ 与其磁链 $\Psi(t)$ 之间的关系可以用 $\Psi-i$ 平面上的一条曲线确定,则称此二端元件为电感元件。其中,线性电感元件满足关系: $\Psi=Li$ 。

VCR:在电压、电流为关联参考方向下, $u=L \frac{di}{dt}$ 。

电感元件的基本性质:动态性,电感电流的记忆性和连续性,无源性。

电感的储能:某一时刻的储能 $w_L(t) = \frac{1}{2} Li_L^2(t)$; 某一时间段内,电感储存或释放的能量 $w_L(t_1, t_2) = w_L(t_2) - w_L(t_1)$ 。

电容元件的串联: $L_s = L_1 + L_2 + \cdots + L_n$

电容元件的并联: $\frac{1}{L_p} = \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \cdots + \frac{1}{L_n}$

3. 换路定则及初始值的确定

换路:由于某种原因,电路由一种工作状态变化到另一种工作状态,这种工作状态的改变称为换路。

换路定则:在电容电流和电感电压为有界值的情况下,电容电压不能跃变,电感电流不能跃变,即

$$\begin{cases} u_C(0^+) = u_C(0^-) \\ i_L(0^+) = i_L(0^-) \end{cases}$$

过渡过程:电路由一种工作状态变化到另一种工作状态的过程。

初始值:换路后瞬间(通常如果 0 时刻换路,则用 0^+ 表示)各电量的值。

初始值的确定:

(1) 由 0^- 等效电路(直流激励下,电容开路,电感短路)计算 $u_C(0^-)$ 和 $i_L(0^-)$, 根据换路定则求 $u_C(0^+)$ 和 $i_L(0^+)$;

(2) 画出 0^+ 等效电路,此时电容用电压等于 $u_C(0^+)$ 的电压源等效替代,电感用电流等于 $i_L(0^+)$ 的电流源等效替代,激励取其在 0^+ 时的值;

(3) 用分析直流电路的方法计算其他量的初始值。

4. 一阶电路的零输入响应

动态电路:至少含有一个动态元件的电路,用一阶微分方程描述。用二阶微分方程描述的动态电路称为二阶动态电路。

状态变量:如果已知某量在初始时刻的值,则根据该时刻的输入就能确定电路中任何变量在随后的值,具有这种性质的物理量称为状态变量。在动态电路中,通常都以状态变量作为未知量来列写方程。

电容电压和电感电流是状态变量。

零输入响应:外加激励为零,仅由动态元件的初始储能产生的响应。

零状态响应:动态元件的初始储能为零,仅由外加激励产生的响应。

全响应:电路中的动态元件处于非零初始状态且在外加激励作用下的响应。

一阶电路的零输入响应: $y(t) = y(0^+)e^{-\frac{t}{\tau}}, t \geq 0^+$ 。零输入响应是放电过程。

时间常数:表征过渡过程快慢的参数。时间常数越小,过渡过程越快;时间常数越大,过渡过程越慢。同一电路中各响应量的时间常数相同。

RC 电路: $\tau = R_{eq}C$

RL 电路: $\tau = \frac{L}{R_{eq}}$

5. 一阶电路的零状态响应

稳态值:换路后电路再达到新的稳定工作状态(通常用 ∞ 表示)时的值。

状态变量的零状态响应： $y(t) = y(\infty)(1 - e^{-\frac{t}{\tau}})$, $t \geq 0^+$, 零状态响应是充电过程。

非状态变量的零状态响应根据电路的拓扑结构和电压电流关系求出。

6. 一阶电路的全响应

全响应 = 零输入响应 + 零状态响应。

全响应可分解为稳态响应和暂态响应, 以及强制分量和自由分量。

根据初始值和稳态值的大小, 可以判断过渡过程是充电还是放电。

7. 一阶电路的三要素法

三要素法: 已知待求量的初始值、稳定值和电路的时间常数, 就可根据三要素公式求出该量的响应。三要素法适用于求直流激励的一阶动态电路的任何待求量的任何响应。

三要素公式:

$$y(t) = y(\infty) + [y(0^+) - y(\infty)]e^{-\frac{t}{\tau}}, \quad t \geq 0^+$$

(五) 二阶动态电路

1. 二阶动态电路的微分方程

根据所给电路, 应用 KCL、KVL 和元件的 VCR 列写以状态变量为未知量的微分方程。

2. RLC 并联电路的零输入响应

基本分析方法: 以电感电流为未知量, 列写微分方程 → 特征方程 → 特征根 → 响应表达式 → 根据初始条件确定待定系数。

阻尼系数的概念及计算公式。

特征根的 4 种可能情况与电路元件参数、电路状态和过渡过程的关系如下。

(1) 不相等的负实数根: $R < \frac{1}{2}\sqrt{\frac{L}{C}}$, 过阻尼状态, 非振荡的过渡过程。

(2) 共轭复根(实部不为零): $R > \frac{1}{2}\sqrt{\frac{L}{C}}$, 欠阻尼状态, 衰减振荡的过渡过程。

(3) 相等的实数根: $R = \frac{1}{2}\sqrt{\frac{L}{C}}$, 临界阻尼状态, 非振荡的过渡过程。

(4) 共轭虚根: 电导 $G = 0$, 无阻尼状态, 等幅振荡的过渡过程。

3. RLC 并联电路的零状态响应和全响应

零状态响应: 动态元件的初始状态为零, 即 $u_C(0^-) = 0$, $i_L(0^-) = 0$, 仅由外加激励引起的响应。分析方法与零输入响应相同。

全响应: 动态元件的初始状态不为零, 且有外加激励作用时电路的响应。

求电路全响应的两种方法如下。

(1) 零输入、零状态方法: 全响应 = 零输入响应 + 零状态响应。

(2) 求解微分方程的经典方法: 全响应 = 通解 + 特解。

4. RLC 串联电路

基本分析方法: 以电容电压为未知量, 列写微分方程 → 特征方程 → 特征根 → 响应表达式 → 根据初始条件确定待定系数。

阻尼系数的概念及计算公式。

特征根的 4 种可能情况与电路元件参数、电路状态和过渡过程的关系如下。

(1) 不相等的负实数根: $R > \frac{1}{2}\sqrt{\frac{L}{C}}$, 过阻尼状态, 非振荡的过渡过程。

(2) 共轭复根(实部不为零): $R < \frac{1}{2}\sqrt{\frac{L}{C}}$, 欠阻尼状态, 衰减振荡的过渡过程。

(3) 相等的实数根: $R = \frac{1}{2}\sqrt{\frac{L}{C}}$, 临界阻尼状态, 非振荡的过渡过程。

(4) 共轭虚根: 电阻 $R=0$, 无阻尼状态, 等幅振荡的过渡过程。

学习指导: 掌握二阶常系数线性微分方程的求解方法及不同特征根对应的电路状态和过渡过程。

(六) 正弦稳态电路

1. 正弦量

正弦量的三要素: 频率、振幅、相位。

同频率正弦量的比较如下。

(1) 超前关系: 两个同频信号的相位差大于零, 则被减数表示的信号超前减数表示的信号。

(2) 滞后关系: 两个同频信号的相位差小于零, 则被减数表示的信号滞后减数表示的信号。

(3) 同相: 两个同频信号的相位差等于零, 则被减数表示的信号与减数表示的信号同相。

(4) 正交: 两个同频信号的相位差等于正负 90° , 则被减数表示的信号与减数表示的信号正交。

(5) 反相: 两个同频信号的相位差等于正负 180° , 则被减数表示的信号与减数表示的信号反相。

同频率正弦量的运算: 加、减、微分和积分运算结果仍为同频率的正弦量。

周期信号的有效值: 有效值的定义及物理意义, 与幅值的关系, 符号表示。

2. 正弦量的相量、相量图

正弦量的相量: 借助于复数的形式, 用正弦信号的模和初相位组成一个复数, 采用复数的运算规则, 简化同频率的正弦函数的运算。该运算符合矢量的平行四边形法则或三角形法则。

相量的线性性质和微分性质。

相量图: 在复平面上表示的各相量之间的关系。

注意: 相量是用复数表示的正弦量, 相量与正弦量之间存在一一对应的关系, 二者之间不能画等号, 因为二者在不同的域。相量运算是针对同频信号的运算。

3. 基尔霍夫定律和 R 、 L 、 C 元件的相量形式

基尔霍夫电流定律(KCL)的相量形式: 在集总参数电路中, 任一瞬间, 流入(或流出)电路中任一节点的电流相量代数和恒等于零。

基尔霍夫电压定律(KVL)的相量形式: 在集总参数电路中, 任一瞬间, 沿任一回路各支路电压相量的代数和等于零。