HUAZHONG UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY PRESS

电路理论学习指导书

DIAN LU LI LUN XUE XI ZHI DAO SHU

杨传谱 黄冠斌
孙亲锡 孙 敏

华中理工大学出版社

电路理论学习指导书

杨传谱　黄冠斌　孙亲锡　孙敏

华中理工大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

电路理论学习指导书/杨传谱等
武汉:华中理工大学出版社, 1998年4月
ISBN 7-5609-1734-8

Ⅰ. 电…
Ⅱ. ①杨… ②黄… ③孙… ④孙…
Ⅲ. 电路理论-高等学校-学习参考资料
Ⅳ. TM13

电路理论学习指导书
杨传谱等
责任编辑:李德
*
华中理工大学出版社出版发行
(武昌喻家山 邮编:430074)
华中理工大学出版社照排室排版
新华书店湖北发行所经销
华中理工大学出版社沔阳印刷厂印刷
*
开本:850×1168 1/32 印张:16.875 字数:428 000
1998年4月第1版 1998年4月第1次印刷
印数:1—3 000
ISBN 7-5609-1734-8/TM·71
定价:16.00元
(若有印刷质量问题,请与出版社发行部调换)

内容提要

本书是为适应广大读者，特别是在校本、专科生学习电路理论的需要而编写的，可作为同步学习或期末复习时的参考书。

全书共分十七章，每章均由三部分组成：内容提要、例题分析和自测题。内容提要扼要叙述每章所应掌握的基本内容、要点及应注意的问题；例题分析列举了许多典型例题，有的还给出了多种解法；自测题便于读者自我检查对本章内容掌握的情况。本书内容精练、叙述流畅、例题典型丰富，有助于培养学生分析和解决电路理论问题的能力。

本书对从事理论电工教学的教师及准备报考研究生的读者具有一定的参考价值。

前　言

《电路理论学习指导书》是为适应广大读者，特别是在校本、专科学生学习电路理论课程的需要而编写的。电路理论是电类专业的一门技术基础课，由于它本身勿庸置疑的重要性，学好电路理论已成为广大初学者的迫切愿望和要求。多年的教学实践表明，电路理论具有较强的理论性、系统性和灵活性，使广大初学者感到有相当的难度。为帮助广大初学者克服学习上的困难，掌握好电路理论的基本概念、基本定理和基本的分析方法，具有比较坚实的电路理论功底，特编写《电路理论学习指导书》。本书在一定程度上体现了作者对电路理论体系的认识和理解，以及作者多年从事电路理论教学实践的经验。期望本书能对广大读者学习电路理论有所帮助，成为广大读者身边的“辅导教师”。

编写本书参照了高等工业学校《电路》课程教学基本要求，参考了目前国内多数院校使用的多种电路理论教材的版本，尽量做到具有广泛的适用性。全书共分十七章(详见目录)，每章的结构均由三部分组成。第一部分为内容提要，扼要叙述本章所应掌握的基本内容、要点及应注意的问题；第二部分为例题分析，列举了许多典型例题，不少例题还给出了多种解法；第三部分为自测题，便于读者自我检查对本章内容掌握的情况。本书第一、七、八、十四、十五章由杨传谱编写，第二、三、四、五章由黄冠斌编写，第六、十二、十六、十七章由孙亲锡编写，第九、十、十一、十三章由孙敏编写，杨传谱任主编。陈崇源教授对全书进行了认真审阅，提出了许多宝贵意见。编写本书时，参考了许多电路理论教材版本及相关的教学参考书，在此一并对这些书的作者表示诚挚的谢意。本书中的不当之处，恳请广大读者批评指正。

本书对从事理论电工教学的教师及准备报考研究生的读者具有一定的参考价值。

编者

1997.6.于华工

目　录

第一章　电路变量及波形表示……………………………………（1）
1-1　内容提要 ……………………………………………（1）
1-2　例题分析 ……………………………………………（9）
1-3　自测题…………………………………………………（18）
第二章　基尔霍夫定律与电路元件 …………………………（21）
2-1　内容提要………………………………………………（21）
2-2　例题分析………………………………………………（29）
2-3　自测题…………………………………………………（49）
第三章　网络图论的基本概念 ………………………………（54）
3-1　内容提要………………………………………………（54）
3-2　例题分析………………………………………………（58）
3-3　自测题…………………………………………………（69）
第四章　等效变换 ……………………………………………（72）
4-1　内容提要………………………………………………（72）
4-2　例题分析………………………………………………（81）
4-3　自测题 ……………………………………………（101）
第五章　网络的一般分析方法………………………………（104）
5-1　内容提要 ……………………………………………（104）
5-2　例题分析 ……………………………………………（109）
5-3　自测题 ………………………………………………（127）
第六章　网络定理……………………………………………（130）
6-1　内容提要 ……………………………………………（130）
6-2　例题分析 ……………………………………………（135）
6-3　自测题 ………………………………………………（162）

第七章　一阶电路……………………………………（166）
7-1　内容提要 ……………………………………（166）
7-2　例题分析 ……………………………………（171）
7-3　自测题 ……………………………………（214）
第八章　二阶电路……………………………………（217）
8-1　内容提要 ……………………………………（217）
8-2　例题分析 ……………………………………（219）
8-3　自测题 ……………………………………（243）
第九章　正弦稳态电路……………………………………（245）
9-1　内容提要 ……………………………………（245）
9-2　例题分析 ……………………………………（253）
9-3　自测题 ……………………………………（285）
第十章　谐振电路……………………………………（289）
10-1　内容提要……………………………………（289）
10-2　例题分析……………………………………（294）
10-3　自测题……………………………………（312）
第十一章　耦合电感电路……………………………………（315）
11-1　内容提要……………………………………（315）
11-2　例题分析……………………………………（320）
11-3　自测题……………………………………（345）
第十二章　三相电路……………………………………（348）
12-1　内容提要……………………………………（348）
12-2　例题分析……………………………………（353）
12-3　自测题……………………………………（374）
第十三章　周期性非正弦稳态电路……………………………………（377）
13-1　内容提要……………………………………（377）
13-2　例题分析……………………………………（381）
13-3　自测题……………………………………（405）
第十四章　运算法……………………………………（408）

14-1　内容提要 …………………………………………… (408)
14-2　例题分析 …………………………………………… (413)
14-3　自测题 ……………………………………………… (439)
第十五章　状态方程 ………………………………… (442)
15-1　内容提要 …………………………………………… (442)
15-2　例题分析 …………………………………………… (444)
15-3　自测题 ……………………………………………… (465)
第十六章　双口网络 ………………………………… (468)
16-1　内容提要 …………………………………………… (468)
16-2　例题分析 …………………………………………… (474)
16-3　自测题 ……………………………………………… (498)
第十七章　均匀传输线 ……………………………… (500)
17-1　内容提要 …………………………………………… (500)
17-2　例题分析 …………………………………………… (507)
17-3　自测题 ……………………………………………… (521)
附录:自测题答案 …………………………………… (523)

第一章　电路变量及波形表示

1-1　内 容 提 要

一、电路变量

描述电路中电磁现象的物理量称为电路变量。在集中参数电路中，电路变量仅为时间 t 的函数，在分布参数电路中，为时间 t 和空间坐标 x 的函数。一个实际电路，只有当电路的几何尺寸 d 远小于电路最高工作频率所对应的波长 λ 时才能用集中参数电路来模拟，用式子表示这一条件即

$$d \ll \lambda$$

本书 1～16 章所讨论的电路均属集中参数电路，17 章为分布参数电路。

电路变量可分为基本变量和复合变量。

1. 基本变量

电路的基本变量有四个：电荷 q、磁链 ψ、电流 i 和电压 u*。

学习基本变量时，特别要掌握好电流、电压的参考方向。参考方向是电路理论中最重要、最基本但又最容易出错的重要概念之一。为此，特强调以下几点：

(1)论及电流、电压时必须指定其参考方向。不标参考方向谈电流、电压的正负是没有意义的。

(2)电流、电压的参考方向可以任意指定。

(3)电流、电压的参考方向与真实方向是两个不同的概念。若

---

* 电压 u 包含了电位的概念，电位即电路中任一点到参考点之间的电压。

电流、电压为正值，说明它们的真实方向与参考方向相同；若电流、电压为负值，说明它们的真实方向与参考方向相反。

(4)关联参考方向和非关联参考方向。对任一二端元件（或二端电路），当标定电流、电压的参考方向后，若电流从电压“＋”极性端指向“－”极性端，则称此为关联参考方向，否则称为非关联参考方向。

2. 复合变量

功率 p 和能量 w 均为复合变量。

对任一二端元件（或电路），设端口电压为 u，电流为 i，则功率的表达式为

$$p=\pm ui$$

当 u、i 采用关联参考方向时，$p=ui$；当 u、i 采用非关联参考方向时，$p=-ui$。无论端口电压、电流采用关联还是非关联参考方向，按上述表达式求解功率，当 $p>0$时，称此二端元件吸收功率；当 $p<0$ 时，称此元件发出（或产生）功率。需要说明的是，有的作者采用其它符号规则，读者可参考比较，本书则均按上述符号规则讨论功率。

功率守恒 在一个系统中，部分电路元件所产生的功率一定等于其它电路元件所吸收的功率。

能量 对任一二端元件，设其功率为 p，则从 t_0 到 t 其所吸收的能量为

$$W=\int_{t_0}^{t}p\mathrm{d}\tau=\int_{t_0}^{t}\pm ui\mathrm{d}\tau$$

能量守恒是一个自然法则，也是电路理论中一个最重要的基本公设。

需要强调指出：上述功率和能量的表达式与二端元件的性质无关。

二、常用函数及其波形

1. 正弦函数

正弦函数表达式为

$$f(t)=A_m\sin(\omega t+\varphi)$$

式中，A_m 称为振幅，ω 为角频率，它与频率 f、周期 T 的关系为

$$\omega=2\pi f=2\pi\frac{1}{T}$$

φ 为初相位。A_m、ω 和 φ 称为正弦函数的三要素。正弦函数的波形示于图 1-1 中。

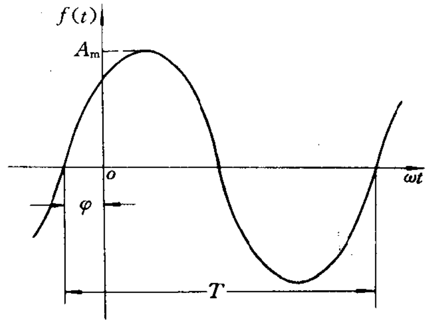

图 1-1

2. 常量

常量表达式为

$$f(t)=K$$

其波形如图 1-2 所示。式中 K 为常量。

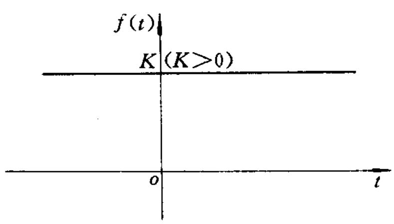

图 1-2

3. 指数函数

指数函数表达式为

$$f(t)=Ke^{-at}$$

其波形如图 1-3 所示。式中 K、a 为常量。

4. 单位阶跃函数 $\mathbf{1}(t)$

单位阶跃函数定义为

$$\mathbf{1}(t)=\begin{cases}0 & t<0\\ 1 & t>0\end{cases}$$

其波形如图 1-4(a)所示。

$\mathbf{1}(t-t_0)$称为延迟单位阶跃函数，其波形如图 1-4(b)所示。一

般地，可定义

$$\mathbf{1}(x)=\begin{cases}0 & x<0\\ 1 & x>0\end{cases}$$

为延迟单位阶跃函数，式中 x 称为宗量，原则上可以是 t 的任意函数。当 $x=-t+t_0$ 时，$\mathbf{1}(x)$ 的波形如图 1-4(c)所示。

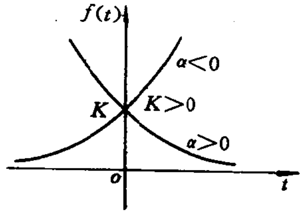

图 1-3

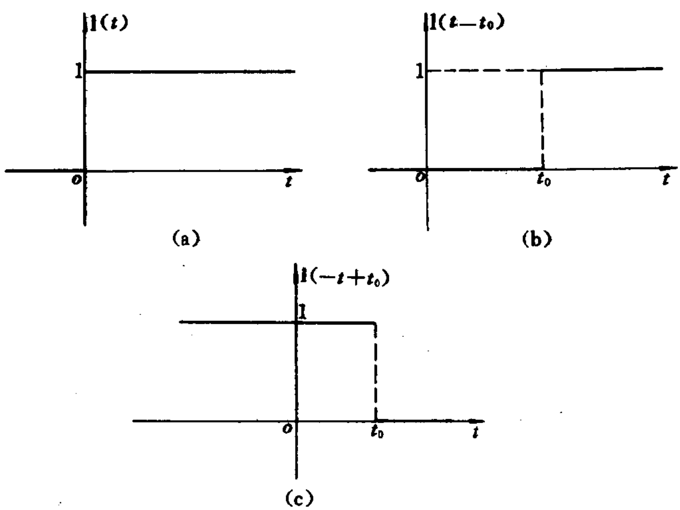

图 1-4

单位阶跃函数的重要功能是截取波形。设 $f(t)$ 为任意连续函数，将 $f(t)$ 与 $\mathbf{1}(t)$ 相乘可截取 $t>0$ 的波形，即

$$f(t)\cdot\mathbf{1}(t)=\begin{cases}0 & t<0\\ f(t) & t>0\end{cases}$$

5. 脉冲函数 $p_\Delta(t)$

脉冲函数定义为

$$p_\Delta(t)=\begin{cases}0 & t<0\\ \frac{1}{\Delta} & 0<t<\Delta\\ 0 & t>\Delta\end{cases}$$

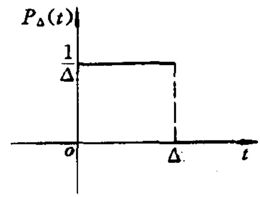

图 1-5

其波形如图 1-5 所示。$p_\Delta(t)$函数的显著特征是其波形与时间轴所围的面积为 1，即

$$\int_0^\Delta p_\Delta(t)\mathrm{d}t=\Delta\cdot\frac{1}{\Delta}=1$$

$p_\Delta(t)$可用阶跃函数表示，即有

$$p_\Delta(t)=\frac{1}{\Delta}[\mathbf{1}(t)-\mathbf{1}(t-\Delta)]$$

6. **单位冲击函数 $\delta(t)$**

单位冲击函数定义为

$$\delta(t)=\begin{cases}0 & t\neq 0\\ \text{奇异} & t=0\end{cases}$$

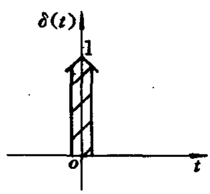

图 1-6

其波形示意如图 1-6 所示。$t=0$ 时奇异，系指该奇异性必须满足

$$\int_{0_-}^{0_+}\delta(t)\mathrm{d}t=1$$

即从 0_- 到 0_+，$\delta(t)$波形所围的面积为 1。$\delta(t)$可用 $p_\Delta(t)$当 $\Delta\to 0$ 时的极限加以表示，即

$$\delta(t)=\lim_{\Delta\to 0}p_\Delta(t)=\lim_{\Delta\to 0}\frac{1}{\Delta}[\mathbf{1}(t)-\mathbf{1}(t-\Delta)]$$

设 $f(t)$为任意连续且处处有界函数，显然，

$$f(t)\cdot\delta(t)=f(0)\delta(t)$$

$$f(t)\delta(t-t_0)=f(t_0)\delta(t-t_0)$$

$\delta(t)$的一个重要性质是筛分性，即

$$\int_{0_-}^{0_+} f(t)\delta(t)\mathrm{d}t = f(0)$$

一般地

$$\int_{-\infty}^{+\infty} f(t)\delta(t-t_0)\mathrm{d}t = f(t_0)$$

7. 单位对偶冲击函数 $\delta'(t)$

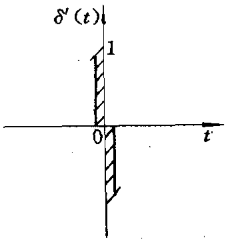

图 1-7

单位对偶冲击函数定义为

$$\delta'(t) = \begin{cases} 0 & t \neq 0 \\ \text{奇异} & t = 0 \end{cases}$$

在 $t=0$ 的奇异性必须满足 $\int_{-\infty}^{t} \delta'(t)\mathrm{d}\tau = \delta(t)$，其波形示意如图 1-7 所示。值得指出的是

$$\int_{0_-}^{0_+} \delta'(t)\mathrm{d}t = 0$$

$$f(t)\delta'(t) = \delta'(t)f(0) - f'(0)\delta(t) \neq \delta'(t)\cdot f(0)$$

这点在使用时应予注意。

8. 单位斜坡函数 $r(t)$

单位斜坡函数定义为

$$r(t) = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ t & t \geqslant 0 \end{cases}$$

其波形如图 1-8(a)所示。显然

$$r(t) = t\mathbf{1}(t)$$

宗量的概念同样适用于斜坡函数。如 $2r(t-3)$ 的波形如图 1-8(b)所示。

9. 闸门函数 $G(t)$

闸门函数定义为

$$G(t) = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ 1 & 0 < t < t_0 \\ 0 & t > t_0 \end{cases}$$

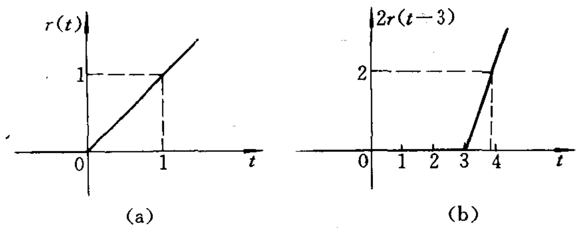

图 1-8

其波形如图 1-9 所示。闸门函数 $G(t)$ 有多种表达式，常用的主要有以下两种：

(1) $G(t)=\mathbf{1}(t)-\mathbf{1}(t-t_0)$

(2) $G(t)=\mathbf{1}(t)\cdot\mathbf{1}(-t+t_0)$

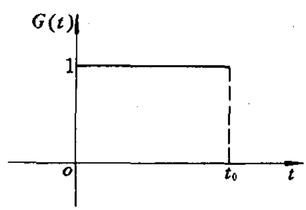

图 1-9

闸门函数的主要功能是分段截取波形。设 $f(t)$ 为任意连续函数，则 $f(t)$ 与 $G(t)$ 相乘可截取 $f(t)$ 在 $0<t<t_0$ 的波形，即

$$f(t)G(t)=\begin{cases}0 & t<0\\ f(t) & 0<t<t_0\\ 0 & t>t_0\end{cases}$$

三、奇异函数及相关奇异函数之间的关系

函数本身不连续，或其微分或其积分具有不连续点的函数统称为奇异函数。如 $\mathbf{1}(t)$、$r(t)$、$\delta(t)$、$\delta'(t)$ 等均属奇异函数。这些函数之间的关系可用下列关系式表示

$$\frac{1}{2}t^2\mathbf{1}(t)\underset{\int_{0_-}^{t}d\tau}{\overset{\frac{d}{dt}}{\rightleftharpoons}}r(t)\underset{\int_{0_-}^{t}d\tau}{\overset{\frac{d}{dt}}{\rightleftharpoons}}\mathbf{1}(t)\underset{\int_{0_-}^{t}d\tau}{\overset{\frac{d}{dt}}{\rightleftharpoons}}\delta(t)\underset{\int_{0_-}^{t}d\tau}{\overset{\frac{d}{dt}}{\rightleftharpoons}}\delta'(t)$$

即对左边函数式微分而得下一个函数式，对右边函数式从 $0_-\sim t$ 积分可得前一个函数式。如

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\frac{1}{2}t^2\mathbf{1}(t) = r(t)$$

而

$$\int_{0_-}^{t} r(\tau)\mathrm{d}\tau = \frac{1}{2}t^2\mathbf{1}(t)$$

其余类推。

更一般地有

$$\frac{1}{2}(t-t_0)^2\mathbf{1}(t-t_0) \underset{\int_{0_-}^{t}\mathrm{d}\tau}{\overset{\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}}{\rightleftharpoons}} r(t-t_0) \underset{\int_{0_-}^{t}\mathrm{d}\tau}{\overset{\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}}{\rightleftharpoons}} \mathbf{1}(t-t_0)$$

$$\underset{\int_{0_-}^{t}\mathrm{d}\tau}{\overset{\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}}{\rightleftharpoons}} \delta(t-t_0) \underset{\int_{0_-}^{t}\mathrm{d}\tau}{\overset{\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}}{\rightleftharpoons}} \delta'(t-t_0)$$

熟记上述关系对于求解奇异函数的微积分十分有益。

四、波形表示

由已知波形写出其函数表达式称为波形表示。对较复杂的波形，波形表示有多种方法，常用的有：

1. 分段表示法

按波形的变化规律分段写出其表达式。如 $\mathbf{1}(t)$、$r(t)$、$p_\Delta(t)$ 等函数的定义式即为分段表示法。这种方法虽然简单，但不便于对函数进行加、减、微分和积分等数学运算。

2. 分段叠加表示法

按波形变化规律，用单位阶跃函数或闸门函数分段截取波形，然后叠加而得函数表达式。如 $p_\Delta(t)=\frac{1}{\Delta}[\mathbf{1}(t)-\mathbf{1}(t-\Delta)]$，即为最简单的分段叠加表示法。这种方法较易掌握，但进行数学运算有诸多不便。

3. 直接叠加表示法

对于具有直线段的波形，可利用奇异函数的直接叠加加以表示，称为直接叠加表示法。如闸门函数 $G(t)=\mathbf{1}(t)-\mathbf{1}(t-t_0)$ 即为