电网络的计算机辅助分析

〔美〕托马斯W.戴维斯
瑞W.帕默尔 著

齐立特 侯自立
吴景棠 王持志 译

胡 健 栋 校

人 民 邮 电 出 版 社

Computer—Aided
Analysis of
Electrical Networks
Thomas W. Davis Ray W. Palmer

1978

CHARLES E. MERRILL PUBLISHING COMPANY
A Bell & Howell Company

内容提要

《电网络的计算机辅助分析》是机助分析方面的一本入门教科书，内容主要是介绍初学机助分析的读者需要掌握的基本知识，如矩阵代数，网络拓补学，瞬态分析，电网络的状态方程，拓扑网络分析，电子电路分析程序（*ECAP*）等。本书的特点是没有繁琐的数学推导，也不需要艰深的数学知识，只要具备基本电路理论知识都可以读懂。每章都有习题及部分习题答案和参考书刊目录，供读者练习和查考。

本书可供从事电子电路工作的科技人员，大学和中等专科学校有关专业的师生，以及具备电路理论知识的读者阅读参考。

电网络的计算机辅助分析

〔美〕托马斯W.戴维斯　瑞W.帕默尔著
齐立特　侯自立　吴景棠　王持志　译
胡健栋　校

•

人民邮电出版社出版
北京东长安街27号
河北省邮电印刷厂印刷
新华书店北京发行所发行
各地新华书店经售

•

开本：787×1092　1/32　　1981年7月　第一版
印张：15 16/32　页数：248　　1981年7月河北第一次印刷
字数：355千字　　印数：1—6,900册

统一书号：15045·总2483—有5202
定价：1.60元

目　　录

第一章　电路分析中有关专题的复习

1-1　无源网络特性

电路的三个基本无源参数电阻、电感和电容。在许多情况下，这些参数是分布参数，不易分辨。例如一段导线的电阻和带电导体与机壳之间的电容就是如此。但是，根据我们的目的，假定这些参数为理想元件，仅有单一的特性（即电感器只有电感的特性，等等）。这些理想元件是所谓$LLTPFB$元件，因为它们是线性的、集中的、不随时间变化的、无源的、有限的和双向的元件。

电阻　仅有电阻特性的元件称为电阻器。对于电阻器，其电流和电压成比例，其比例常数是电阻，用欧姆来计量，即

$$e(t)=Ri(t) \tag{1—1}$$

电阻的倒数是电导G，用姆欧来计量，即

$$i(t)=Ge(t) \tag{1—2}$$

电感　对于所谓电感器这种元件，其电压与电流对时间的导数成比例，比例常数是电感，用亨利来计量。

$$e(t)=\frac{Ldi(t)}{dt} \tag{1—3}$$

从式(1-3)可以看出，如果电流突变，电压一定是无限大。电流特性在不连续点（突变）的导数是无限大。因此，如果电感器两端的电压保持有限值，则电流不能突变。

由(1-3)式解$i(t)$，得

$$i(t)=\frac{1}{L}\int_{-\infty}^{t}e(t)dt \quad (1\text{—}4)$$

积分上下限表示从$-\infty$到任一指定时间 t 的总和。式(1-4)还可以写为：

$$i(t)=\frac{1}{L}\int_{-\infty}^{0}e(t)\,dt+\frac{1}{L}\int_{0}^{t}e(t)dt \quad (1\text{—}5)$$

式(1-5)的第一部份指出，在时间 $t=0$ 以前的电流可以用一常数$i(0)$表示。所以

$$i(t)=\frac{1}{L}\int_{0}^{t}e(t)dt+i(0) \quad (1\text{—}6)$$

电容 对于电容器，其电流与电压对时间的导数成比例，比例常数是电容，用法拉计量。此方程式为

$$i(t)=\frac{Cde(t)}{dt} \quad (1\text{—}7)$$

注意，式(1-7)和式(1-3)是相似的，差别是电压和电流对换。因此，把电容器叫作电感器的对偶。所以，如果电流在电容器中保持有限值，则电压不能突变。和式(1-6)一样，可以推导出下式

$$e(t)=\frac{1}{C}\int_{0}^{t}i(t)dt+e(0) \quad (1\text{—}8)$$

1-2 电源

这里首先注意的是两种一般的电源类型，理想的电流源和电压源。电压源不论负载大小，提供恒定的电压，而电流源不论负载大小，提供恒定的电流。本书采用的电压源和电流源符号如图1-1所示。

这些电压源和电流源可代表不同的强制函数。这包括恒定值、正弦函数、指数函数或上述几种的组合形式。

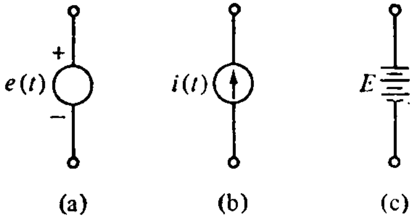

图 1-1 电源：（a）一般的电压源，（b）一般的电流源（c）电池

奇异函数 可能对读者来说不大熟悉的一个特殊类别叫作奇异函数。

第一种奇异函数是单位阶跃。其定义如下：

$$U(t-a)=\begin{cases}0 & 当\ t<a\\ 1 & 当\ t\geqslant a\end{cases} \tag{1—9}$$

这就是说，这函数在小于 a 的所有时间内取值为零而在大于 a 的所有时间内取值为 1 。注意，在 $t=a$ 时，函数是不连续的。实际上，只要在 $t=a$ 时用开关接通一幅度为一单位的电源即可生成这一函数，如图1-2所示。

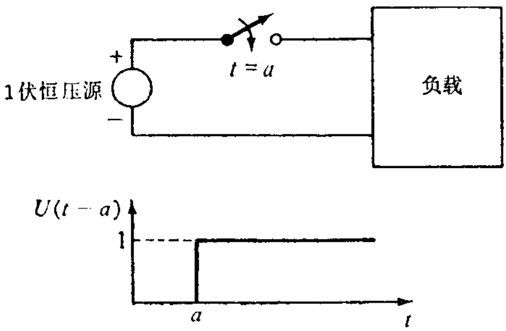

图 1-2 单位阶跃在 $t=a$ 时加到负载上

其他奇异函数，可以将单位阶跃函数逐次微分或积分来获得。单位倾斜函数 $tU(t)$，则是由单位阶跃函数积分得到：

$$(t-a)U(t-a)=\int_{-\infty}^{t}U(\tau-a)d\tau \tag{1—10}$$

$(t-a)U(t-a)$绘于图1-3。在代入时间上下限时，注意式(1-10)内变量的变换，以免弄错。

用相似的积分过程，可获得$[(t-a)^2/2]U(t-a)$(单位抛物线函数)，所有更高阶函数可用同样的方法得到。将单

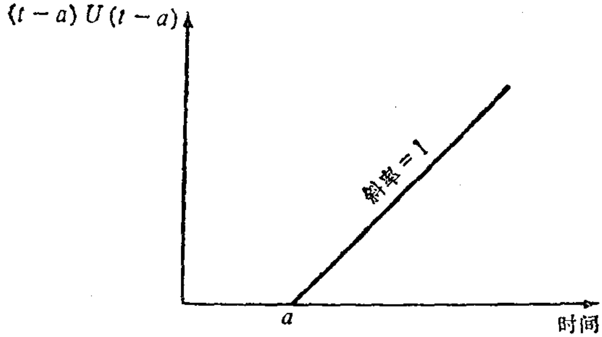

图 1-3　单位倾斜函数$(t-a)U(t-a)$

位阶跃函数微分可得到单位冲击函数。阶跃函数的导数除了不连续点外均为零。在不连续点的导数趋于无限大。为了更细致地研究冲击函数的性质，研究一下图1-4。假定△很小，$g(t-a)$近似于单位阶跃$U(t-a)$。$g(t-a)$的导数是$g'(t-a)$。应特别注意，当△减小时，在$g'(t-a)$函数下面的面积始终是１。

当△→０时，以下特性定义一个单位冲击函数，如图1-4c所示，

1． 面积是单位值（有时叫作强度）。

2． 其高1/△的极限是无限大。

3． 脉冲宽度是零。

１、２和３是描述冲击函数的必要和充分条件。

再进行微分运算，得下式

$$\delta'(t-a)=\frac{d\delta(t-a)}{d(t-a)} \tag{1—11}$$

这定义为单位偶极子，如图1-5所示。再一次求导数得到一单位三极子，等等。

在本书和别的课本中，大多数问题只要求冲击、阶跃、

倾斜和抛物线、奇异函数等方面的知识。更特殊的函数将留在高级的教程中去解决。

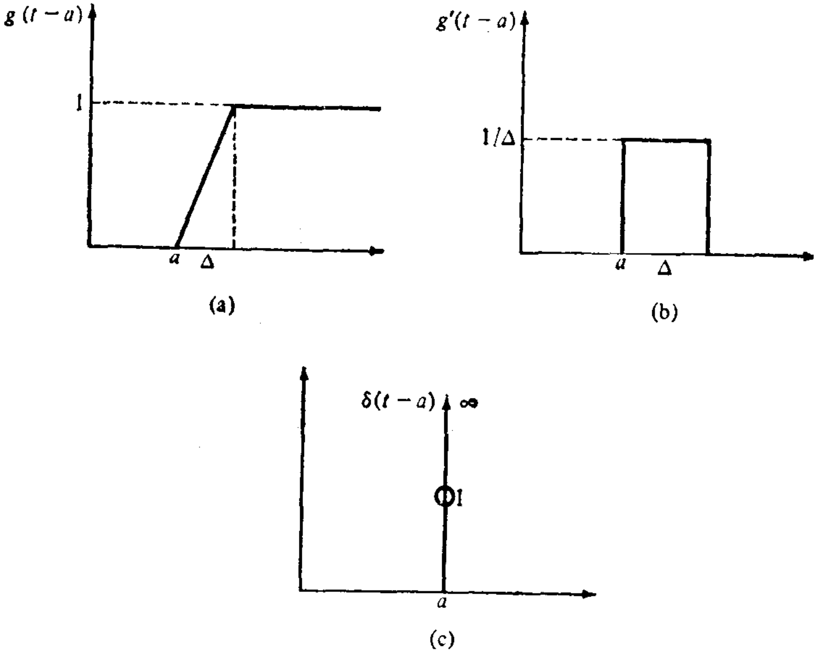

图 1-4 （a）单位阶跃和（b）单位冲击的函数近似，（c）冲击

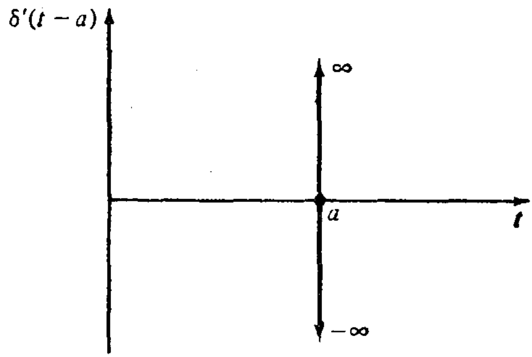

图 1-5 单位偶极子$\delta'(t-a)$

一般波形综合 为了描述一般波形常常用分解法，唯一能够用来描述各种波形的是奇异函数的概念。

例1-1

写出图1-6 a 的波形方程式，这是一个幅度为 4 单位、起始于 $t=5$ 秒、终止于 $t=10$秒的脉冲。

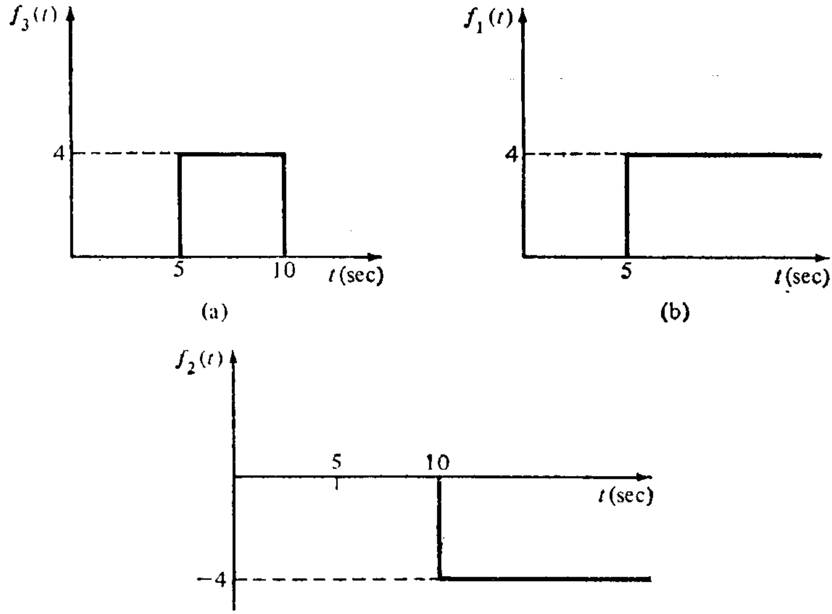

图 1-6 由阶跃函数构成脉冲

这一脉冲可用两个阶跃函数来描述。第一个如图 1-6 b 所示，起始于 $t=5$ 秒，它的方程是

$$f_1(t)=4U(t-5)$$

因而欲在10秒以后终止上述函数，我们需要一个大小相等而方向相反的阶跃函数，并且错开适当的时间 如图 1-6 c 所示，即

$$f_2(t)=-4U(t-10)$$

最终波形$f_3(t)$可从下式得到

$$f_3(t)=f_1(t)+f_2(t)$$

$$f_3(t)=4U(t-5)-4U(t-10)$$

故这一函数可以描述为两个奇异函数的差。

例1-2

写出如图1-7a所示三角函数的方程式。

这一问题利用倾斜奇异函数相加的过程同样可以解出。最终波形的各段必须辨别并表示如下：在图1-7b中

$$f_1(t)=2(t-4)U(t-4)$$

这表示倾斜函数有正斜率为2，起始于$t=4$秒，〔$U(t-4)$〕。在图1-7c中，

$$f_2(t)=-4(t-6)U(t-6)$$

这表示函数斜率为－4，起始于$t=6$秒，〔$U(t-6)$〕。这个－4的斜率用来抵消＋2的作用外，并另加一个－2的斜率。在图1-7d中，

$$f_3(t)=2(t-8)U(t-8)$$

这是初学分析的读者在解析波形的步骤中通常容易疏忽的一步。不能忘记，函数一旦建立即假设其永远延续下去。若没有$f_3(t)$，这一合成函数在$t=6$秒以后就永远是斜率为－2的倾斜。但是，加上$f_3(t)$，下降的倾斜在$t=8$秒时即终止。因此，总的波形可以利用叠加特性得到：

$$f_4(t)=f_1(t)+f_2(t)+f_3(t)$$

即，

$$f_4(t)=2(t-4)U(t-4)-4(t-6)U(t-6)+2(t-8)U(t-8)$$

例1-3

对图1-8的波形确定一适当的表达式。

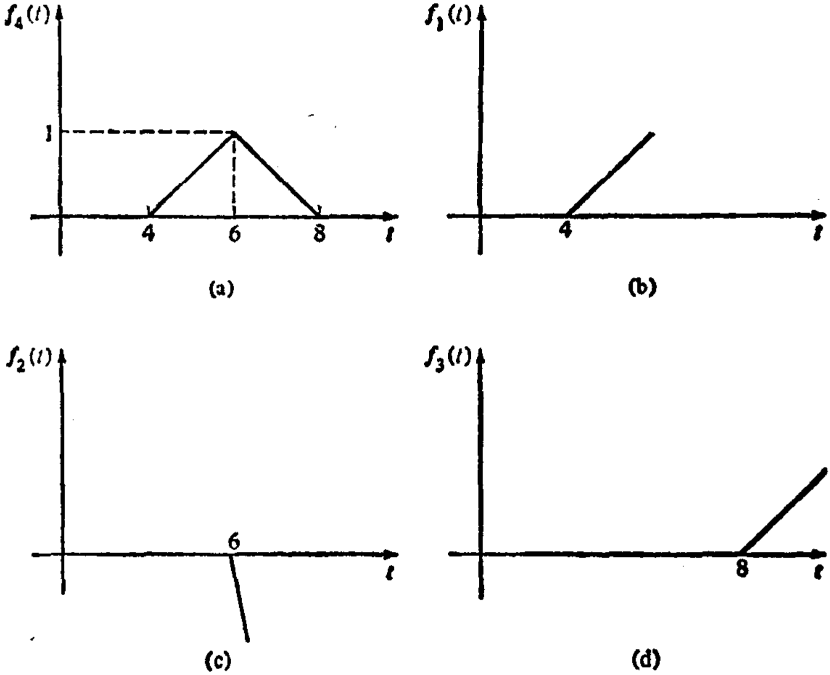

图 1-7　三角脉冲$f_4(t)$的构成步骤

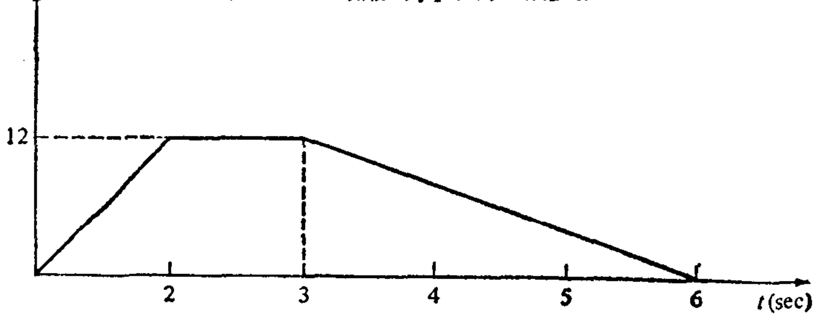

图 1-8　例1-3的梯形波

必须考虑四个区间，即 $0 \leqslant t < 2$，$2 \leqslant t < 3$，$3 \leqslant t < 6$ 和 $t > 6$。对于第一区间，其倾斜开始于 $t = 0$，它的斜率是 6。在第二区间必须确切地终止第一区间产生的倾斜。第三区

间要求一个斜率为−2的倾斜，始于 $t=3$秒。最后，在 $t=6$秒时需要取消先前的倾斜。最后方程式为

$$f(t)=6tU(t)-6(t-2)U(t-2)$$
$$-2(t-3)U(t-3)+2(t-6)U(t-6)$$

现在读者应当了解到，用奇异函数相加和移位的过程可以表示各种各样的波形。

1-3 电路方程的表示

电路中的电压和电流可以用联立方程组求解。这些方程用策动函数和网络中的元件未表示电压和电流的关系。

当电路中元件都是电阻器时，方程自然是代数方程。如果电路由电感器和（或）电容器组成，则方程变为积分微分方程。

方程式可由第1-1节中的电压和电流关系，以及 *KVL*（*Kirchhoff Voltage Law*克希荷夫电压定律）和*KCL*（*Kirchhoff Current Law*克希荷夫电流定律)得到。一般情况下，*RLC*电路的最终方程是积分微分方程，在方程两边进行微分，它们就变成单纯的微分方程了。

节点方程 我们考虑的第一类问题是电流源激励的电网络。为了解这种电路，为完整起见，重复叙述电路分析的基本定律如下：流入节点的所有电流的代数和等于零。这是非常熟悉的克希荷夫电流定律方程。

例1-4

写出图1-9网络的*KCL*方程。

电压$e(t)$是要确定的末知量。应用*KCL*得

$$i(t)=i_R(t)+i_L(t)+i_c(t)$$

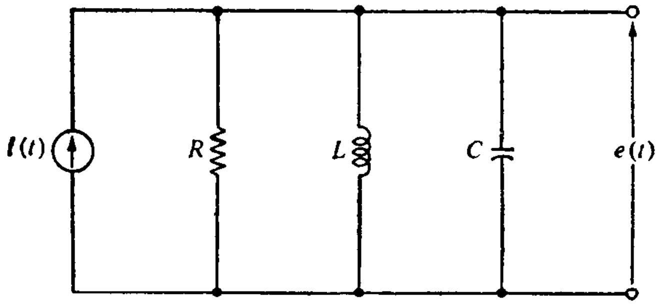

图 1-9 一般的*RLC*网络

当然此式说明，流入节点的电流等于分别通过电阻器、电感器和电容器而流出节点的电流。结合 1-1 节所述元件的伏安关系式，可以得到所需的积分微分方程：

$$i(t)=\frac{e(t)}{R}+\frac{1}{L}\int_0^t e(t)dt+i(0)+C\frac{de(t)}{dt}$$

例1-5

要求写出图1-10电路的节点方程。

根据观察这网络需要三个节点方程才能解出电压$e_1(t)$、$e_2(t)$和$e_3(t)$。方程的数量很容易确定，它比节点数少一个，因为有一个节点(4)是作为参考点。这些方程是：

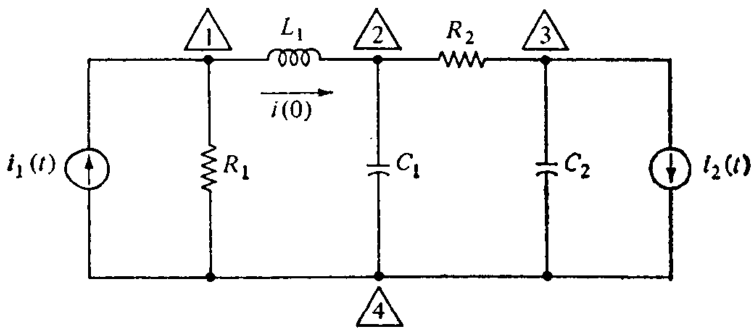

图 1-10 例1-5的电路

节点 1 $\quad i_1(t)=\dfrac{e_1(t)}{R}+\dfrac{1}{L}\int_0^t(e_1-e_2)dt+i(0)$

节点 2 $\quad 0=\dfrac{1}{L}\int_0^t(e_2-e_1)\,dt+C_1\dfrac{de_2(t)}{dt}$

$$+\frac{e_2-e_3}{R}-i(0)$$

节点 3 $\quad -i_2(t)=\dfrac{e_3(t)-e_2(t)}{R_2}+C_2\dfrac{de_3(t)}{dt}$

这些方程都是独立的，可以解出$e_1(t)$、$e_2(t)$、$e_3(t)$。这些方程的实际解答在以后各节中讨论。

回路方程 这些方程的建立是用克希荷夫电压定律完成的。该定律指出，沿一闭合回路，其电压升和电压降的代数和等于零。

例1-6

写出图1-11电路的KVL方程。

按照KVL写出回路方程得：

$$e(t)=e_R(t)+e_L(t)+e_c(t)$$

此方程说明，电源电压（电压升）等于电阻电压加电感电压加电容电压（电压降）。代入1-1节的伏安关系式，可得到所需的积分微分方程式：

$$e(t)=Ri(t)+L\frac{di(t)}{dt}+\frac{1}{C}\int_0^t i(t)+e(0)$$

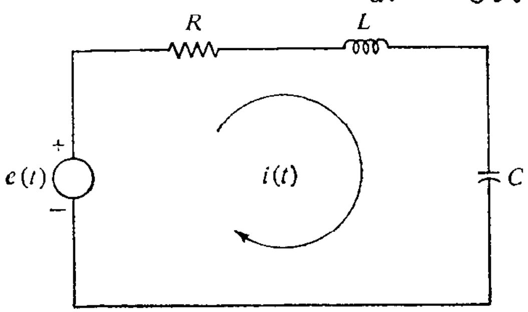

图 1-11 *RLC*串联电路