

# 电网络的计算机辅助分析

〔美〕托马斯W·戴维斯 著  
瑞W·帕默尔

齐立特 侯自立 译  
吴景棠 王持志

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，拓补网络分析，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，供读者练习和参考。

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

## 序言

|      |              |         |
|------|--------------|---------|
| 第一章  | 电路分析中有关专题的复习 | ( 1 )   |
| 1—1  | 无源网络特性       | ( 1 )   |
| 1—2  | 电源           | ( 2 )   |
| 1—3  | 电路方程的表示      | ( 9 )   |
| 1—4  | 直流分析         | ( 12 )  |
| 1—5  | 正弦交流稳态分析     | ( 18 )  |
| 1—6  | 微分方程的解       | ( 27 )  |
| 1—7  | 拉普拉斯变换法      | ( 44 )  |
|      | 习题           | ( 67 )  |
|      | 参考书目         | ( 80 )  |
| 第二章  | 矩阵代数         | ( 82 )  |
| 2—1  | 引言           | ( 82 )  |
| 2—2  | 行列式          | ( 82 )  |
| 2—3  | 克拉莫定则        | ( 92 )  |
| 2—4  | 用计算机求行列式的值   | ( 94 )  |
| 2—5  | 基本的矩阵运算      | ( 99 )  |
| 2—6  | 矩阵乘法子程序      | ( 106 ) |
| 2—7  | 特殊矩阵         | ( 107 ) |
| 2—8  | 逆矩阵          | ( 111 ) |
| 2—9  | 矩阵逆变换子程序     | ( 115 ) |
| 2—10 | 线性方程的矩阵解法    | ( 118 ) |
| 2—11 | 矩阵的秩         | ( 123 ) |
| 2—12 | 矩阵分块         | ( 126 ) |

|                           |         |
|---------------------------|---------|
| 习题 .....                  | ( 129 ) |
| 参考书目 .....                | ( 136 ) |
| 第三章 网络拓扑学.....            | ( 137 ) |
| 3—1 引言.....               | ( 137 ) |
| 3—2 基本定义.....             | ( 137 ) |
| 3—3 电网络方程.....            | ( 146 ) |
| 3—4 非定向脉图的矩阵.....         | ( 156 ) |
| 3—5 定向脉图的矩阵.....          | ( 163 ) |
| 3—6 矩阵的相互关系.....          | ( 167 ) |
| 3—7 节点分析.....             | ( 172 ) |
| 3—8 E和I电源的可动性 .....       | ( 182 ) |
| 3—9 直流电路的计算机分析.....       | ( 184 ) |
| 3—10 回路分析 .....           | ( 190 ) |
| 3—11 割集分析 .....           | ( 194 ) |
| 3—12 从属电源 .....           | ( 199 ) |
| 习题 .....                  | ( 205 ) |
| 参考书目 .....                | ( 215 ) |
| 第四章 瞬态分析.....             | ( 216 ) |
| 4—1 引言.....               | ( 216 ) |
| 4—2 网络方程的表示.....          | ( 216 ) |
| 4—3 微分方程的数值解.....         | ( 224 ) |
| 4—4 用拉普拉斯变换列出广义的网络函数..... | ( 231 ) |
| 4—5 微积分方程的数值解.....        | ( 237 ) |
| 习题 .....                  | ( 245 ) |
| 参考书目 .....                | ( 249 ) |
| 第五章 电网络的状态方程.....         | ( 250 ) |
| 5—1 引言.....               | ( 250 ) |

|            |                     |                |
|------------|---------------------|----------------|
| 5—2        | 由直观法得出状态方程          | ( 250 )        |
| 5—3        | 由网络脉图得到状态方程         | ( 254 )        |
| 5—4        | 由微分方程得到状态方程         | ( 262 )        |
| 5—5        | 特征方程和特征矢量           | ( 265 )        |
| 5—6        | 凯莱—汉米尔顿定理           | ( 270 )        |
| 5—7        | 状态方程的时域解            | ( 275 )        |
| 5—8        | 状态方程的数值解            | ( 283 )        |
| 5—9        | 状态方程的拉普拉斯解          | ( 294 )        |
| 5—10       | 拉普拉斯变换函数的状态方程表示     | ( 300 )        |
|            | 习题                  | ( 304 )        |
|            | 参考书目                | ( 309 )        |
| <b>第六章</b> | <b>拓扑网络分析</b>       | <b>( 310 )</b> |
| 6—1        | 引言                  | ( 310 )        |
| 6—2        | 策动点阻抗和导纳            | ( 310 )        |
| 6—3        | 系统行列式的拓扑计算          | ( 313 )        |
| 6—4        | 用计算机生成树             | ( 318 )        |
| 6—5        | 策动点函数的拓扑计算          | ( 322 )        |
| 6—6        | 用计算机求 $Z_{dp}(s)$ 值 | ( 327 )        |
| 6—7        | 二端口网络参数集的拓扑公式       | ( 336 )        |
| 6—8        | 其他转移函数              | ( 346 )        |
|            | 习题                  | ( 351 )        |
|            | 参考书目                | ( 363 )        |
| <b>第七章</b> | <b>灵敏度和容差分析</b>     | <b>( 364 )</b> |
| 7—1        | 引言                  | ( 364 )        |
| 7—2        | 经典灵敏度               | ( 365 )        |
| 7—3        | 灵敏度分析               | ( 368 )        |
| 7—4        | 最坏情况分析              | ( 373 )        |

|      |          |         |
|------|----------|---------|
| 7—5  | 蒙特卡罗分析   | ( 376 ) |
|      | 习题       | ( 380 ) |
|      | 参考书目     | ( 382 ) |
| 第八章  | 电子电路分析程序 | ( 383 ) |
| 8—1  | 引言       | ( 383 ) |
| 8—2  | 直流分析     | ( 384 ) |
| 8—3  | 交流分析     | ( 395 ) |
| 8—4  | 瞬态分析     | ( 403 ) |
| 8—5  | 差错信息     | ( 415 ) |
| 8—6  | 模型化      | ( 420 ) |
|      | 习题       | ( 426 ) |
|      | 参考书目     | ( 434 ) |
| 附录 A | 绘图设备     | ( 435 ) |
| 附录 B | 计算机术语汇编  | ( 461 ) |
| 附录 C | 部分习题答案   | ( 473 ) |

# 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

$$e(t) = Ri(t) \quad (1-1)$$

电阻的倒数是电导  $G$ ，用姆欧来计量，即

$$i(t) = Ge(t) \quad (1-2)$$

**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。

$$e(t) = \frac{Ldi(t)}{dt} \quad (1-3)$$

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

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

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：

$$i(t) = \frac{1}{L} \int_{-\infty}^0 e(t) dt + \frac{1}{L} \int_0^t e(t) dt \quad (1-5)$$

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

$$i(t) = \frac{1}{L} \int_0^t e(t) dt + i(0) \quad (1-6)$$

**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

$$i(t) = \frac{C de(t)}{dt} \quad (1-7)$$

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

$$e(t) = \frac{1}{C} \int_0^t i(t) dt + e(0) \quad (1-8)$$

## 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。

**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：

$$U(t-a) = \begin{cases} 0 & \text{当 } t < a \\ 1 & \text{当 } t \geq a \end{cases} \quad (1-9)$$

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

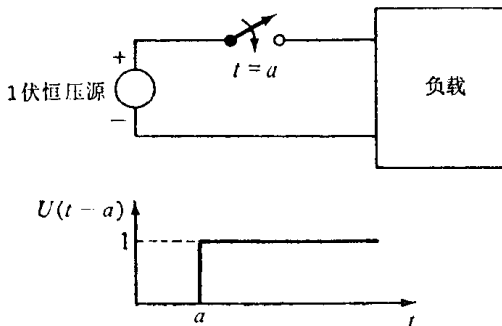


图 1-2 单位阶跃在  $t = a$  时加到负载上

电源即可生成这一函数，如图 1-2 所示。

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：

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

$(t-a)U(t-a)$  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

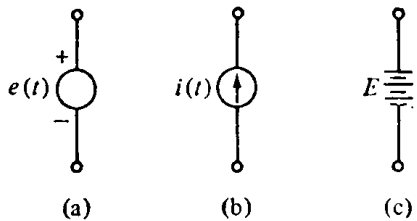


图 1-1 电源：(a)一般的电压源，(b)一般的电流源(c)电池

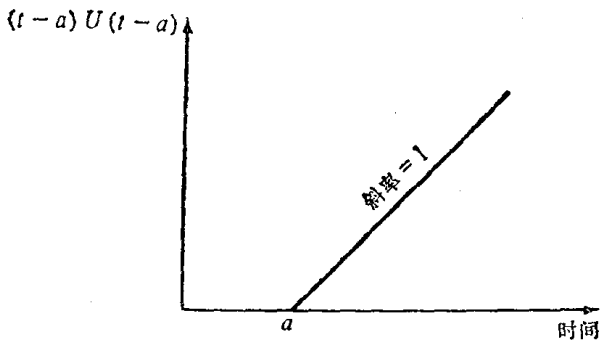


图 1-3 单位倾斜函数  $(t-a)U(t-a)$

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 $\Delta$ 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 $\Delta$ 减小时，在 $g'(t-a)$ 函数下面的面积始终是1。

当 $\Delta \rightarrow 0$ 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 $1/\Delta$ 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

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

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。

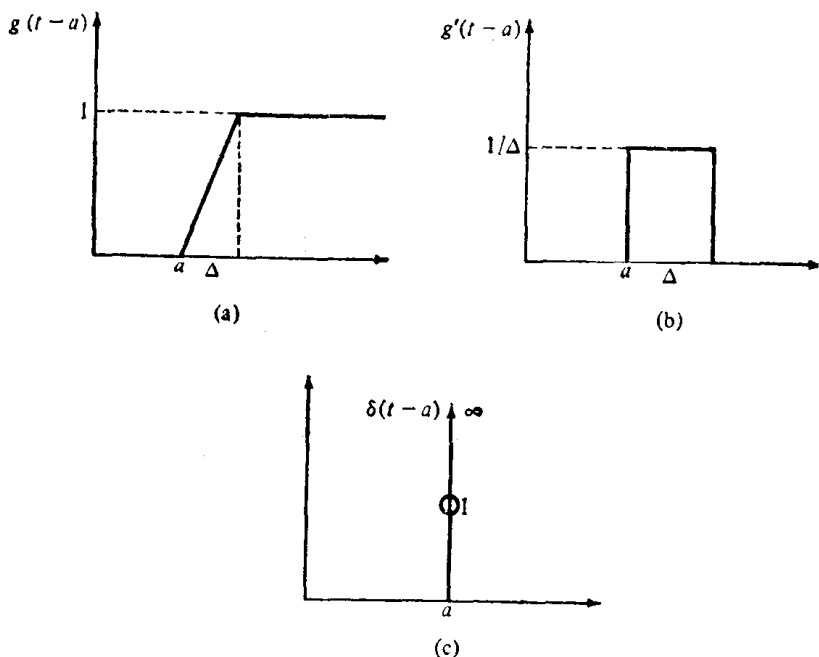


图 1-4 (a)单位阶跃和(b)单位冲击的函数近似, (c)冲击

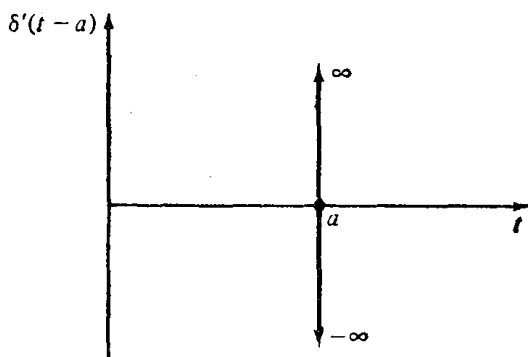


图 1-5 单位偶极子 $\delta'(t-a)$

**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。

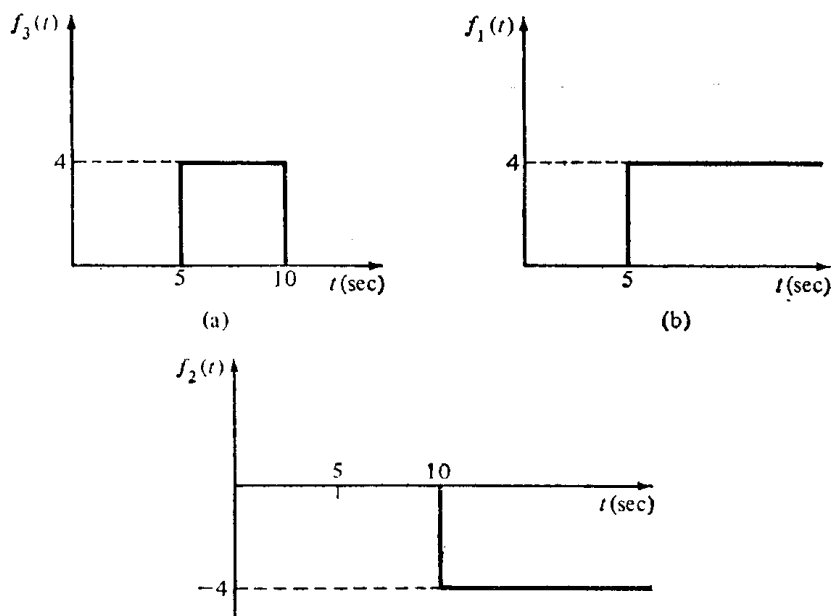


图 1-6 由阶跃函数构成脉冲

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

$$\begin{aligned}f_3(t) &= f_1(t) + f_2(t) \\ f_3(t) &= 4U(t-5) - 4U(t-10)\end{aligned}$$

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，

$$\begin{aligned}f_4(t) &= 2(t-4)U(t-4) - 4(t-6)U(t-6) \\ &\quad + 2(t-8)U(t-8)\end{aligned}$$

### 例1-3

对图1-8的波形确定一适当的表达式。

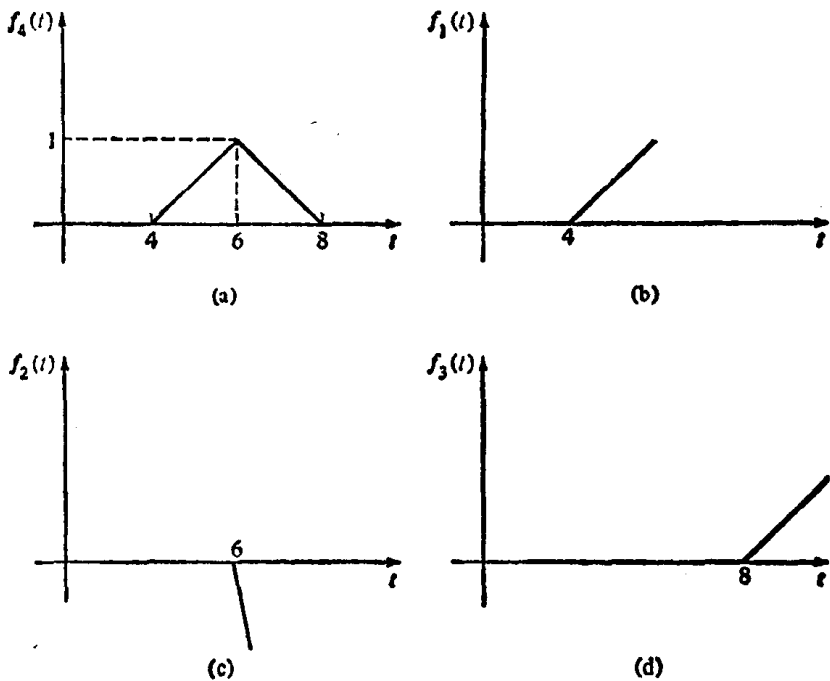


图 1-7 三角脉冲  $f_4(t)$  的构成步骤

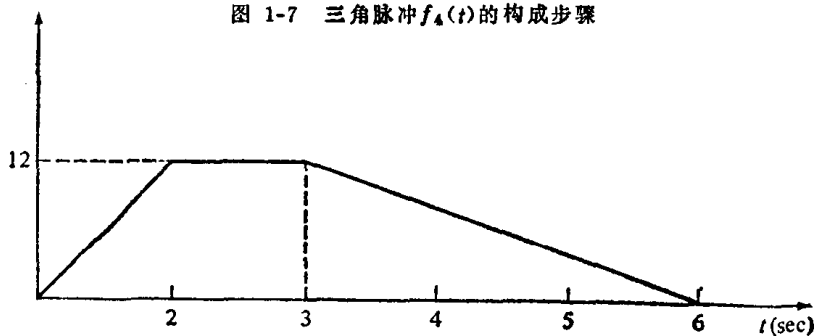


图 1-8 例1-3的梯形波

必须考虑四个区间，即  $0 \leq t < 2$ ， $2 \leq t < 3$ ， $3 \leq t < 6$  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 $e(t)$ 是要确定的未知量。应用KCL得

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

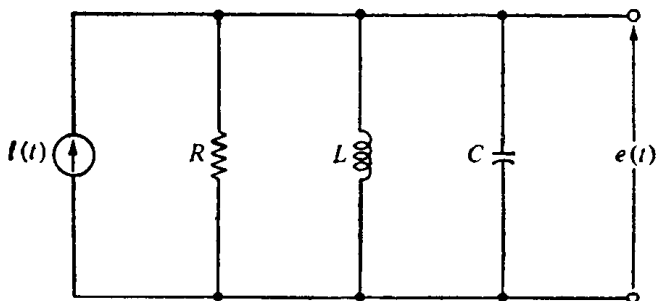


图 1-9 一般的RLC网络

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：

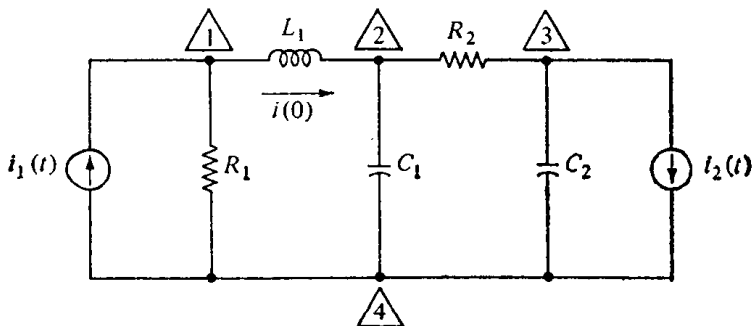


图 1-10 例1-5的电路



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

$$\begin{aligned} \text{节点 2} \quad 0 = & \frac{1}{L} \int_0^t (e_2 - e_1) dt + C_1 \frac{de_2(t)}{dt} \\ & + \frac{e_2 - e_3}{R} - i(0) \end{aligned}$$

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

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：

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

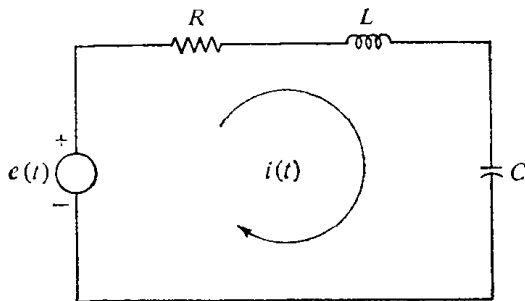


图 1-11 RLC 串联电路