

电路分析

[日] 森 真作 著

周武禄 郭建新 张华 译

人民教育出版社

电 路 分 析

〔日〕 森 真作 著
周武禄 郭建新 张 华 译

人民教育出版社

本书是根据日本庆应义塾大学教授森真作对该校未分系和专业的大学二年级学生讲授的电路理论教材译出的。

全书分十二章,内容有基尔霍夫定律、电路元件性质、电路方程、电路几个定理、基本电路的性质、拉氏变换、正弦稳态分析、耦合元件的性质、复杂电路的初始值、电路的输入、输出表达式、状态变量、二端口网络等。

该书特点是将电路的传统理论与近代理论有机地结合起来,用较少的篇幅、较多的例题阐明了基本理论。

本书可供我国高等工业学校电类专业电路课教学参考,也可供非电专业学生学习电路理论时参考。

本书责任编辑 王缉惠

电 路 分 析

[日] 森 真作 著

周武禄 郭建新 张 华 译

*

人民教育出版社出版

新华书店北京发行所发行

北京印刷一厂印装

*

开本 850×1168 1/32 印张 7.375 字数 170,000

1982年3月第1版 1983年6月第1次印刷

印数 00,001—24,000

书号 15012·0393 定价 0.94 元

译 者 序

本书是根据日本庆应义塾大学教授森 真作所著《電気回路ノ一ト》一书译出的。

本书的特点是把电路的传统理论与近代理论结合起来，推陈出新，精选内容，用较少的篇幅讲述了电路的基本理论。书中，重点突出，语言简练，并且通过大量的例题，深入浅出地阐明了重要物理概念。

如原序中所述，本书的对象是尚未分系和专业的工学院二年级学生，即其中不仅包括以后要学电专业的学生，也包括要学其它专业的学生，因此在教材的类别、内容和讲授方法上别具一格，这对于我国教学工作的改革也具有一定的参考价值。

本书的一至六章由周武禄翻译，七至十二章由郭建新翻译，最后，又参照张华根据同一本书翻译并作为教材试用过的译稿作了适当的修改。对本书的翻译工作，蒋德川、肖杰生同志曾给以多方面的支持与鼓励，在此谨致以衷心的感谢。由于我们的水平所限，译文中缺点和错误在所难免，殷切希望读者给予批评指正。

译 者

一九八一年三月

原 序

本书是工程基础课《电路理论》内容的汇编，该课程是为作者任教的大学工学院二年级未分系的学生开设的。因此，听讲的不全是将来要升到电气工程系的学生，所以书中没有过多地涉及一些详尽的细节，而主要讲述了电路理论的思考方法和处理方法。并且，作为理解本书所必要的基础知识，只需要高中毕业程度的微积分和初等矩阵的运算，至于更高深的内容，则根据需要作了补充说明。

在作者还是学生的时代，通常好象一谈到电路理论，首先提出来的就是交流电路理论，而学习过渡过程理论则是相当久后的事情。正因为如此，有的学生曾用交流电路理论去分析过渡过程问题，从而犯了令人啼笑皆非的错误。近几年来，电路理论的内容发生了很大的变化。这不仅是由于电工学的范围发生了变化，还因为电路理论的概念已直接应用于其它领域的缘故。这从下例可明显地看出，即在生理和医学工作者中间，象“电路模型”这类术语也已经司空见惯了。所以当前似乎已经迈进了这样的时代，即使把电路理论说成是工程理论的基础，也不算言过其实。

本书的读者如果愿意在电路理论这一领域继续深造的话，那就不必说了；即使已从事其它领域的工作，倘若能联想到电路理论，并且有志于将它应用到那个领域中，作为作者将会感到无比的幸运。

关于本书内容讲得更详细一些的参考书，有《网络分析序论》（末崎著）；作为接近电气工程专门课程的参考书，有《电路理论》（末崎等著）；作为更高深的电路理论，有《电路分析理论》（斋藤

著);另外,比电路理论从更广泛的角度加以论述的,有《网络与系统理论》(高桥等著),等等。还有很多其它参考书,希望有兴趣的读者广为参考。

值此本书出版之际,谨向给与鼓励的末崎辉雄名誉教授、参加过多方面讨论的藤田广一教授和高桥进一副教授等表示谢意。

森 真作

1977年3月

目 录

第一章 基尔霍夫定律	1
1.1 基尔霍夫电流定律	1
1.2 基尔霍夫电压定律	4
习题	6
第二章 电路元件的性质	7
2.1 电阻	7
2.1.1 电阻的性质	7
2.1.2 电阻消耗的电功率	8
2.2 电源	9
2.2.1 电压源	9
2.2.2 电流源	10
2.2.3 电源的变换	11
2.3 电容器	13
2.3.1 电容器的性质	13
2.3.2 电容器中储存的能量	18
2.4 电感	19
2.4.1 电感的性质	19
2.4.2 电感中储存的能量	22
2.5 电路元件的联接	23
2.5.1 电阻及电导的串联和并联	23
2.5.2 电容器的串联和并联	24
2.5.3 电感的串联和并联	25
2.5.4 电源的串联和并联	26
习题	27
第三章 电路方程	29
3.1 节点方程和网孔方程	29
3.1.1 节点方程	29
3.1.2 网孔方程	33

3.2	回路方程和割集方程	35
3.2.1	图论的基本概念	35
3.2.2	回路方程	37
3.2.3	割集方程	44
3.3	对偶性	49
	习题	51
第四章	电路中的几个定理	53
4.1	叠加原理	53
4.2	戴维南定理	55
4.3	互易定理	59
4.4	特勒根定理	62
	习题	64
第五章	基本电路的性质	65
5.1	用一阶微分方程表示的电路	65
5.1.1	RC 电路的性质	65
5.1.2	RL 电路的性质	76
5.1.3	一阶线性微分方程的解法	80
5.2	用二阶微分方程表示的电路	82
5.2.1	RLC 电路的性质	82
5.2.2	含有电源的 RLC 电路	88
5.2.3	二阶线性微分方程的解法	92
	习题	95
第六章	拉普拉斯变换	97
6.1	拉普拉斯变换的定义	97
6.2	拉普拉斯变换举例	98
6.3	拉普拉斯变换的性质和应用	100
	习题	112
第七章	正弦稳态分析	114
7.1	阻抗与导纳	114
7.2	正弦稳态时的电功率	122
7.3	正弦电压和电流的有效值	126
7.4	矢量轨迹	128

7.5 谐振电路	131
习题	134
第八章 耦合电路元件的性质	136
8.1 互感	136
8.1.1 互感系数 M	136
8.1.2 具有互感的电路	137
8.2 受控电源	140
8.2.1 受控电源的性质	140
8.2.2 受控电源的类型	140
习题	143
第九章 复杂电路的初始值	145
9.1 电荷与磁通的连续性	145
习题	148
第十章 电路的输入-输出表达式	150
10.1 电路的输入-输出微分方程	150
10.2 输入-输出微分方程运算形式的导出方法	153
10.3 零状态的阶跃响应	156
习题	160
第十一章 状态变量	162
11.1 状态变量和状态方程	162
11.2 状态方程的解法	172
11.3 转换矩阵的计算方法	175
11.3.1 运用拉普拉斯变换的方法	175
11.3.2 应用凯里·哈密尔顿定理的方法	176
习题	180
第十二章 二端口网络	182
12.1 二端口网络	182
12.2 二端口网络参数的意义	188
12.2.1 Y 参数	189
12.2.2 Z 参数	190
12.2.3 传输参数	192
12.3 二端口网络的等效	194

12.4 二端口网络的联接	197
12.4.1 级联	197
12.4.2 并联	199
12.4.3 串联	202
习题	204
习题解答	206
索引	223

第一章 基尔霍夫定律

本章将研究在建立电路方程方面起着极为重要作用的两个定律——基尔霍夫电流定律和基尔霍夫电压定律。这两个定律是有关流入与流出电路联接点的电流的代数和以及沿着电路的环形路径绕行一周时电压的代数和的定律。

1.1 基尔霍夫电流定律

以图 1.1 所示的电路为例来说明基尔霍夫电流定律。如果将图 1.1 中的电路元件 r_1, r_2, \dots, r_6 都用线段表示, 就可以得到如

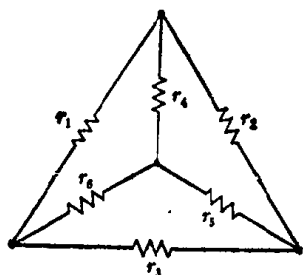


图 1.1 电路的例子

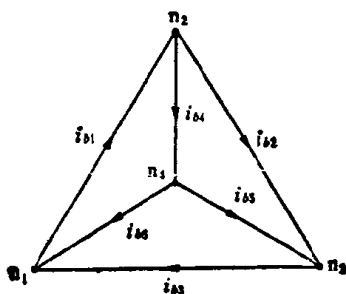


图 1.2 图 1.1 电路的图

图 1.2 所示的图形。这种图形称为电路的图(graph)。这时, 与电路元件对应的线段 b_1, b_2, \dots, b_6 称为支路(branch), 把支路互相联接起来的点 n_1, n_2, n_3 和 n_4 叫做节点(node)。另外, 从某一节点出发, 经过其它节点再返回原节点的路径称为回路(loop)。

基尔霍夫电流定律:

在任何瞬间流入任一节点的电流的代数和恒为零。

假设流过各支路的电流方向如图 1.2 的图中箭头所示, 并规定流出节点的电流为正, 就可以得到各节点的方程:

$$\begin{aligned} n_1 \quad & i_{b1} - i_{b3} - i_{b6} = 0 \\ n_2 \quad & -i_{b1} + i_{b2} + i_{b4} = 0 \\ n_3 \quad & -i_{b2} + i_{b3} - i_{b5} = 0 \\ n_4 \quad & -i_{b4} + i_{b5} + i_{b6} = 0 \end{aligned}$$

由此可以看到, 若求出 n_1 、 n_2 、 n_3 的各式之和, 就能得出 n_4 的方程。这就意味着上面的四个方程并不是彼此独立的。也就是说, 在四个方程当中有一个是不必要的。现在将节点 n_4 的方程舍去, 并以矩阵的形式表示, 则为

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{b1} \\ i_{b2} \\ i_{b3} \\ i_{b4} \\ i_{b5} \\ i_{b6} \end{bmatrix} = \mathbf{A} \mathbf{i}_b = \mathbf{0}$$

式中的 \mathbf{A} 称为关联矩阵 (incidence matrix)。这个定律表明, 流入某一节点的电荷不能在该节点堆积而必将流出去。这就意味着电荷是守恒的。

下面我们来讨论如图 1.3 所示的将一个电路分割成两部分的情况。这时, 联接两部分的各支路中的电流 i_1 、 i_2 和 i_3 之间的关系将是怎样的呢? 不难理解, 在这种情况下, 若考虑到电荷守恒, 方程

$$i_1 + i_2 + i_3 = 0$$

成立。这就是说, 在这种场合下, 与基尔霍夫电流定律一样的关系仍然成立。

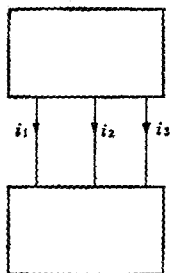


图 1.3 分割成两部分的电路

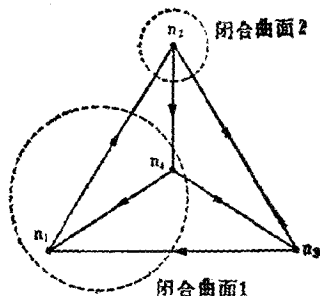


图 1.4 割集的例子

现在我们来研究一下电流定律的统一的表示方法。如图 1.4 所示, 用一个闭合曲面(用虚线表示)包围电路的一部分, 该曲面将电路分割成两部分。这时, 与闭合曲面相交的支路的集合称为割集(cut set)。假设从闭合曲面流出的电流为正, 如前面所述, 属于割集的各支路的电流总和为零。另外, 闭合曲面如果象图 1.4 中的曲面 2 那样只包围一个节点, 情况就和通常所讲的基尔霍夫电流定律一样了。因此基尔霍夫电流定律一般地可以叙述如下:

流经包含在一个割集内的各支路的电流之总和在任何瞬间恒为零。

[例题 1.1] 试列出所示的图中节点 n_1, n_2, n_3, n_4 的关联矩阵 A 。

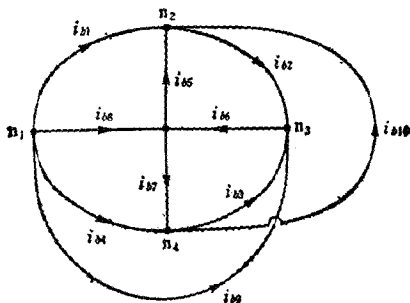


图 1.5

[解] A 为 4 行、10 列的矩阵。如果第 j 个支路不接在第 i 个节点上, 则矩阵的元素 a_{ij} 为零; 如果接在第 i 个节点上, 而且电流是流出的, 则 a_{ij} 为 1, 若电流是流入的, 则为 -1 。因此由图可以得到

$$A = \begin{matrix} & n & b & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 & 10 \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \end{matrix} & \left[\begin{array}{cccccccccc} 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ -1 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & -1 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right] \end{matrix}$$

1.2 基尔霍夫电压定律

基尔霍夫电压定律:

对任意一个回路, 按设定的方向沿回路绕行一周时, 各支路电压的代数和在任何瞬间恒为零。

让我们以图 1.6 所示的图为例来说明电压定律。沿着回路 l_1 、 l_2 、 l_3 和 l_4 , 应用电压定律可以得到如下方程:

$$l_1 \quad v_{b1} + v_{b4} + v_{b6} = 0$$

$$l_2 \quad v_{b2} - v_{b5} - v_{b4} = 0$$

$$l_3 \quad v_{b5} + v_{b3} - v_{b6} = 0$$

$$l_4 \quad v_{b1} + v_{b2} + v_{b3} = 0$$

如果求出 l_1 、 l_2 和 l_3 的方程之和, 就可以得出 l_4 的方程, 因此 l_4 的方程是不必要的。将 l_1 、 l_2 和 l_3 的方程以矩阵的形式表示, 即为

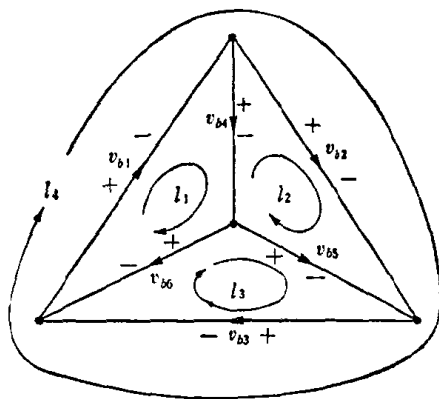


图 1.6 回路

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & -1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{b1} \\ v_{b2} \\ v_{b3} \\ v_{b4} \\ v_{b5} \\ v_{b6} \end{bmatrix} = \mathbf{B} \mathbf{v}_b = \mathbf{0}$$

式中的 \mathbf{B} 称为回路矩阵(loop matrix)。这个定律表明, 从某一节点出发, 将单位电荷沿着回路移动而又返回到原节点时, 所作的功为零。因此也可以认为电压定律体现着能量守恒定律。

[例题 1.2] 列出图 1.7 中所示的图的回路矩阵 \mathbf{B} 。假设支路电压如图所示, 箭头所指的一端为负。

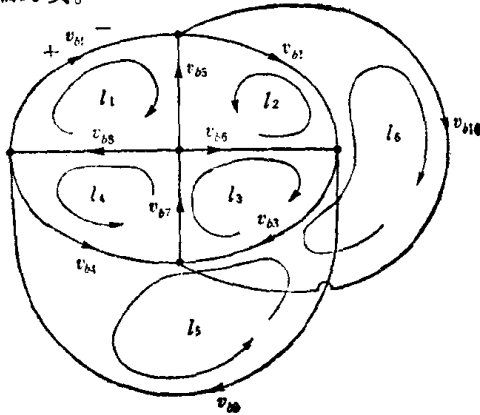


图 1.7

[解] 回路矩阵 \mathbf{B} 为 6 行、10 列的矩阵。在第 i 个回路中, 如果不包含第 j 个支路, 则元素 b_{ij} 为 0; 如果包含第 j 个支路, 当支路的方向与回路的方向一致时 b_{ij} 为 1, 方向相反时则为 -1 。因此由图可以得到

$$\mathbf{B} = \begin{matrix} & \begin{matrix} b & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 & 10 \end{matrix} \\ \begin{matrix} l \\ 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

习 题

- (1) 列出图 1.8 所示的图中节点 n_1, n_2, n_3, n_4, n_5 的关联矩阵 A 。
 (2) 列出图 1.9 所示的图的回路矩阵 B 。

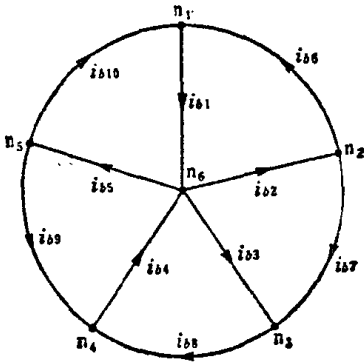


图 1.8

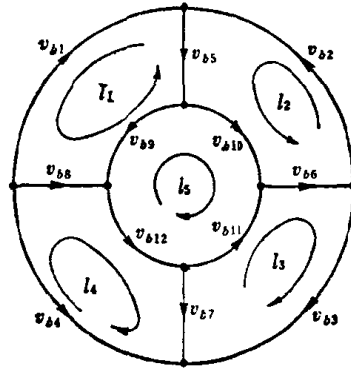


图 1.9

- (3) 列出图 1.10 所示的图中节点 n_1, n_2, n_3, n_4, n_5 的关联矩阵 A 。
 (4) 列出图 1.11 所示的图的回路矩阵 B 。

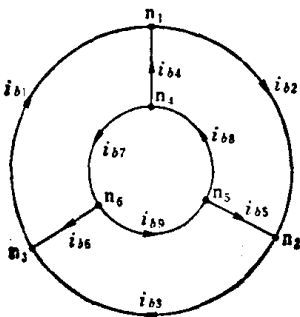


图 1.10

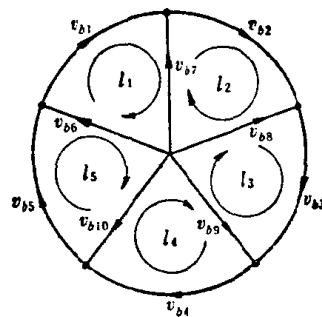


图 1.11

第二章 电路元件的性质

在这一章里，将要研究电路中所用的元件——电阻、电容、电感和电源。亦即，学习电阻的性质和消耗的能量、电容与电感的性质和它们所储存的能量以及电源的性质等。再进而对各电路元件串联与并联时的性质作一说明。

2.1 电 阻

2.1.1 电阻的性质

如图 2.1 所示，在线状导体两端的 a 、 b 两点之间加上电压 v (伏特, V) 时，流过导体的电流 i (安培, A) 一般地只是作为 v 的函

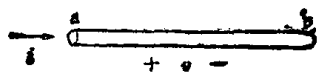


图 2.1 线状导体

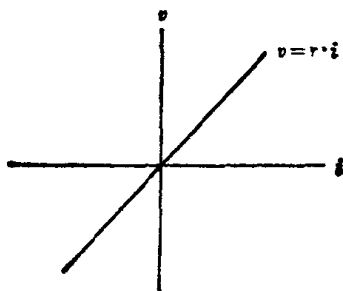


图 2.2 金属导线的电压-电流特性

数表示出来。例如，当导体为金属线时， v 与 i 之间的关系则为直线，如图 2.2 所示，可以用

$$v = r \cdot i \text{ 或 } i = \frac{1}{r} v \quad (r > 0)$$

表示。这个比例常数 r 叫做电阻(resistance)。电阻的单位是 [V/A]，用欧姆 (Ohm) [Ω] 表示。电阻的倒数 $1/r = g$ 叫做电导