

电路分析

潘士先 杜裕曾 刘昭华

内 容 简 介

本书是为无线电、电子、通讯等类型专业大学本科“电路分析”课程编写的一本教科书。本书的内容覆盖了《高等工业学校电路分析基础课程教学基本要求》所规定的范围；除此以外，还包括了现代电路理论中的一些重要内容，如线性电路的矩阵分析，特勒根定理及其应用，灵敏度分析，线性电路的复频域分析以及状态空间分析，电路的计算机辅助分析简介等。这使本书作为教科书对于不同的课程搭配和分工具具有较广的适应性，也使本书可以作为有关专业人员的参考读物。

本书责任编辑 杨昌竹

DS82/17

电 路 分 析 DIANLU FENXI

潘士先 杜裕曾 刘昭华

*

北京航空航天大学出版社出版
新华书店总店科技发行所发行 各地新华书店经售
地质出版社印刷厂印装

*

开本 $850 \times 1168 \frac{1}{32}$ 印张：20 字数：610千字

1989年6月第1版 1989年6月第1次印刷

印数7500 定价：4.50元

ISBN7-81012-100-6/TN·007

序 言

本书是为无线电、电子、通讯等类型专业电路分析基础课程编写的一本教科书。

本书的内容覆盖了《高等工业学校电路分析基础课程教学基本要求》所规定的范围。除此以外，还增加了如下一些内容：非线性电阻电路的牛顿-拉夫逊伴随网络分析法，特勒根定理及其在灵敏度分析中的应用，一些常用谐振电路的分析，线性电路的复频域分析法和状态空间分析，以及电路的计算机辅助分析简介。《基本要求》差不多是一般公认的，本书的重点无疑是落在它所规定的基本内容上。至于这些增加的内容，大部分是电路分析基本概念和方法的延拓和发展，属于现代电路理论的一些重要组成部分，小部分则具有重要的实用价值。增加这些内容是为了使本书对于不同的课程搭配、分工和学时具有较广泛的适用性，同时也是为了满足那些基础较好和求知欲旺盛的学生的需要。对于他们，有指导地或者独立地阅读这些内容有助于提高其基础理论水平。

本书采用了基本上是传统的体系，即先直流后交流，先稳态后暂态的结构。在这种体系中，读者是从电路分析中最特殊和局限的情况——直流稳态——被一步步地引向一般的。这样做的缺点是使读者不能一下子看到电路分析的全貌以及其各部分之间的联系。但是教学经验使我们相信，这种做法比较有利于使初学者逐步由浅入深地掌握电路分析中最基本的概念和方法，而且也并不妨碍他最终对于电路分析一般概念的全面理解和掌握。因此，尽管现在电路分析有一些不同的体系，这种传统的体系仍有其继续存在下去的理由。但是，在基本上选择这种体系的同时，我们也作了努力使本书具有自己的特点而不与同类的教科书相雷同。

我们希望这种努力多少是有效的。

在本书中，我们力求捕捉电路分析各个组成部分中那些具有关键意义的概念作为各部分发展的基本线索，并且力图通过简明易懂的叙述，配合以富有启发性的例题来阐明这些概念。相对于其内容而言，本书的篇幅似乎不算大。但是我们仍然希望它有较好的可读性。

电路分析是一门实践性很强的学科。因此联系实际极为重要。为了强调这一点，在作为本书一个有机组成部分的例题和习题中，有相当一部分是我们从大量实际电路中精选来的。我们不但希望利用它们来帮助读者掌握本书的内容，而且希望通过它们为读者提供在某种意义上联系实际的机会——使他们领略电路分析的理论是如何应用于实际的。

杜裕曾写了第一章到第十章的初稿，刘昭华写了第十一章到第十六章的初稿，邀请张存滢写了最后一章，在此基础上，潘士先统一编撰了全书。

北方交通大学的杜锡钰教授和周宝珀副教授审阅了全书，在此谨致谢意。

本书必有不妥和错误之处，我们期待着专家们和读者的批评指正。

编 者

1988年2月

目 录

第一章 简单直流电路	1
§ 1-1 电压和电流的表示方法	1
§ 1-2 电阻：欧姆定律	2
§ 1-3 电源	4
§ 1-4 全电路欧姆定律	5
§ 1-5 电源的输出特性	7
§ 1-6 电源的电路模型：电压源和电流源	9
§ 1-7 回路中的功率传输	13
§ 1-8 电阻的串联和并联	15
习题	22
第二章 线性直流电路的分析方法	29
§ 2-1 直流网络的基本概念	29
§ 2-2 基尔霍夫定律	31
§ 2-3 支路电流法	35
§ 2-4 回路法	38
§ 2-5 节点法	44
§ 2-6 叠加原理	52
§ 2-7 互易原理	58
§ 2-8 二端网络	61
§ 2-9 星形和三角形网络的等效变换	69
习题	73
第三章 含受控源的直流电路分析	86
§ 3-1 受控源	86
§ 3-2 含受控源网络的分析方法	88
§ 3-3 非互易性	96
§ 3-4 含受控源电路分析的例子	97
§ 3-5 具有运算放大器的电路	102
习题	106
第四章 非线性直流电路	113
§ 4-1 非线性电阻	113
§ 4-2 静态电阻和动态电阻	117
§ 4-3 非线性直流电路的图解法	119

§ 4-4 折线近似法	123
§ 4-5 牛顿-拉夫逊法	123
§ 4-6 增量分析	139
习题	141
第五章 线性网络的矩阵分析	149
§ 5-1 网络图论中的几个基本定义	150
§ 5-2 关联矩阵, 基本割集矩阵与基尔霍夫电流定律	153
§ 5-3 基本回路矩阵与基尔霍夫电压定律	156
§ 5-4 节点分析法	158
§ 5-5 修正节点分析法	163
§ 5-6 回路分析法	165
§ 5-7 节点分析: 含受控源网络	166
§ 5-8 特勒根定理	171
§ 5-9 电路的灵敏度分析	174
习题	185
第六章 正弦稳态分析的基本概念	190
§ 6-1 时变电压和电流	190
§ 6-2 电路元件	191
§ 6-3 基尔霍夫定律	200
§ 6-4 线性电路的分析问题	203
§ 6-5 正弦量及其表示方法	206
§ 6-6 电阻、电容、电感中正弦电压和电流的关系	217
§ 6-7 基尔霍夫定律的复数形式	221
习题	223
第七章 线性电路的正弦分析	228
§ 7-1 阻抗和导纳	228
§ 7-2 正弦分析的一般方法	242
§ 7-3 正弦电路的功率	245
§ 7-4 共轭匹配	250
§ 7-5 实际电容器和线圈的电路模型	251
§ 7-6 特勒根定理及其应用	254
§ 7-7 网络函数的概念 (频域)	259
习题	266
第八章 三相电路	282
§ 8-1 三相电路	282

§ 8-2 相电压和线电压	285
§ 8-3 基本三相电路的分析	287
习题	293
第九章 有互感的电路	297
§ 9-1 互感方程式	297
§ 9-2 有互感电路的分析方法	301
§ 9-3 空芯变压器	307
§ 9-4 理想变压器	309
习题	318
第十章 谐振电路	324
§ 10-1 串联和并联谐振	324
§ 10-2 谐振电路作为带通滤波器	331
§ 10-3 加载回路	337
§ 10-4 Π 式谐振电路	344
§ 10-5 双调谐电路	348
§ 10-6 LC 滤波器的概念	354
习题	359
第十一章 RC电路	365
§ 11-1 简单的 RC 滤波器	365
§ 11-2 比较复杂的 RC 网络	373
§ 11-3 RC 平衡网络	377
§ 11-4 含源 RC 网络的概念	380
习题	386
第十二章 二端口网络	388
§ 12-1 二端口网络的概念	388
§ 12-2 无源二端口网络	389
§ 12-3 含源二端口网络	399
§ 12-4 负导抗变换器和回转器	401
§ 12-5 二端口网络的联接	409
§ 12-6 二端口网络的工作分析	413
习题	415
第十三章 非正弦周期电路	423
§ 13-1 非正弦电压和电流	423
§ 13-2 谐波的合成和分解	425
§ 13-3 傅立叶级数的复数形式	434

§ 13-4 频谱的概念	436
§ 13-5 谐波分析法	440
§ 13-6 非正弦电路的功率	445
习题	448
第十四章 线性电路的暂态分析: 时域分析法	456
§ 14-1 开关定理	457
§ 14-2 一阶电路的暂态分析	461
§ 14-3 一阶电路暂态分析的若干例子	472
§ 14-4 一阶非常态电路	478
§ 14-5 二阶电路的暂态分析	483
§ 14-6 高阶电路	496
§ 14-7 阶跃响应和冲激响应	499
§ 14-8 线性电路对任意激励的响应: 卷积公式	505
习题	513
第十五章 线性电路的暂态分析: 复频域分析法	528
§ 15-1 拉普拉斯变换	528
§ 15-2 拉普拉斯变换定理	531
§ 15-3 拉普拉斯反变换	536
§ 15-4 线性电路分析的 $\mathcal{Z}$ 变换法	543
§ 15-5 网络函数的概念	553
习题	557
第十六章 线性电路的暂态分析: 状态变量法	561
§ 16-1 状态变量	561
§ 16-2 状态方程	563
§ 16-3 状态方程的列写方法	566
§ 16-4 齐次状态方程的解: 零输入解	572
§ 16-5 非齐次状态方程的解	580
§ 16-6 传递矩阵的概念	584
习题	587
第十七章 电路的计算机辅助分析 (简介)	589
§ 17-1 节点分析: 无受控源情况	589
§ 17-2 节点分析: 含受控源情况	596
§ 17-3 节点分析的应用	599
§ 17-4 线性电路的暂态分析	601
参考书目	610
附录 DCA: 线性电路直流分析程序 (FORTRAN)	611
习题答案	619

第一章 简单直流电路

在本书的第一章里，我们将围绕图 1-1 所示那样的简单直流电路展开我们的讨论。这个电路仅由一个直流电源和一个电阻所构成，其中直流电源可以代表任何一种发生直流电能的器件如电池、直流发电机等，电阻则代表负载，即用电器件如电热器等。这样一个电路尽管十分简单，但是包含了电路作为一种能量传输方式的最基本的因素。读者在物理学中已经熟悉关于简单直流电路的知识，如欧姆定律，全电路欧姆定律等。我们将复习这些知识，同时在此基础上引入电路分析的一些基本概念，这些概念对于学习电路分析是十分重要的。



图 1-1 简单直流电路

下面首先将说明电路分析中电压和电流的表示方法，复习欧姆定律和全电路欧姆定律；在此基础上，我们将分析电源的输出特性，并由此引入电源的电路模型：电压源和电流源；最后，我们将讨论简单回路中电源和负载间的功率传输以及负载扩展——电阻的串并联。

§ 1-1 电压和电流的表示方法

电压和电流是电路的基本物理量。为了讨论方便，我们先来说明电路理论中电压和电流的表示方法。

在图1-2中，方框表示电路的一个部分（例如电源或负载）， A 和 B 是这一部分的两个端子。我们用一个标以字母“ U ”的箭头来表示端子 A 、 B 间的电压： U 表示电压之值，箭头指示出电压

降落的方向。要特别指明的是，我们容许 U 取负值，即 U 是一个代数量： U 为正时表示真实的电压降落方向与箭头所指的一致， U 为负时表示真实的电压降落方向和箭头所指相反。换言之，箭头给出电压的一个“参考指向”（或叫“正指向”）， U 值的正负

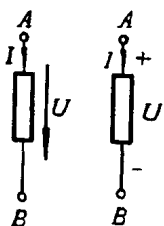


图 1-2 电压和电流的表示

是据此确定的。例如 $U = -1\text{ V}$ 表示端子 A ， B 间电压之值 1 V ，电压降落的方向是从 B 至 A ，即 B 为高电位， A 为低电位。实际上，为了简单起见，常常用正负号代替箭头（正号对应于箭尾，负号对应于箭头），如图 1-2 右图所示。有时候，我们也采用双下标来表示电压；例如 U_{AB} 表示 A 、 B 两端的电压；例如 U_{AB} 表示 A 、 B 两端的电压；

其参考指向是从 A 至 B 。显然，在采用双下标时，就无须在图上标出正指向了。

电流的表示与电压类似。在图 1-2 中，我们用一个标以字母“ I ”的箭头表示流过那一部分的电流； I 表示电流之值，它是一个代数量，而箭头是电流的参考指向，即 I 取正值时表示电流的真实流向与此参考指向一致，取负值时表示其真实流向与参考指向相反。和电压一样，我们也可以用双下标来表示电流。

对于电路的同一部分，电压和电流的参考指向并不是互相关联的，它们可以互相独立地任意选取。尽管如此，习惯上常常将电路同一部分电压和电流的参考指向取作一致，这叫“关联正指向”。图 1-2 中所取的电压和电流参考指向就是关联正指向。

以上所述就是电路理论中一般采用的电压和电流表示方法。

§ 1-2 电阻：欧姆定律

我们用图 1-3 的符号来表示电阻。

欧姆定律

实验证明, 对于一大类电阻 (主要是金属电阻), 流过电阻的电流与其两端的电压成正比, 即

$$I = \frac{U}{R} \quad (1.1)$$

或

$$U = RI \quad (1.2)$$

式中 R 是一常数, 称为电阻的阻值。这就是欧姆定律。让我们提醒一句, 欧姆定律的表示式 (1.1) 或 (1.2) 是就图 1-3 中的关联正指向写出的。



图 1-3 欧姆定律

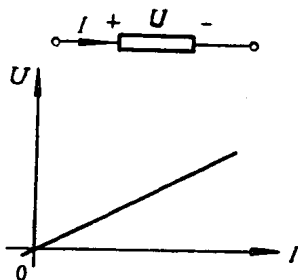


图 1-4 线性电阻的伏安特性

欧姆定律也可以写作

$$I = GU \quad (1.3)$$

当然

$$G = \frac{1}{R} \quad (1.4)$$

G 称为电导。

通常, 电压以伏(V)为单位; 电流以安(A)为单位; 电阻以欧(Ω)为单位; 电导以西($S = \Omega^{-1}$)为单位。

凡是服从欧姆定律的电阻称为线性电阻。

并非所有的电阻都服从欧姆定律。例如, 对于真空器件, 半导体器件以及某些特殊材料制成的电阻, 欧姆定律失效。不服从欧姆定律的电阻称为非线性电阻。

我们可以将电阻上电压和电流的关系画成曲线以描述电阻的特性。这叫做电阻的伏安特性。线性电阻的伏安特性是过原点的直线, 如图1-4所示。非线性电阻的伏安特性是各种形状的曲线。

在这一章以及第二、三、五章里，我们将讨论包含线性电阻的电路。第四章将讨论非线性电阻以及包含非线性电阻的电路。

电阻的功耗

如果电阻上的电压为 U ，电流为 I （图1-3），则电源供给电阻的功率（即电场力对于电阻中运动电荷作功的速率）为

$$P = UI \quad (1.5)$$

根据能量守恒和转化定律，这也就是电阻向其周围介质放出热量的速率，即电阻的功耗。

对于阻值为 R 的线性电阻，以式(1.2)代入式(1.5)得

$$P = RI^2 \quad (1.6)$$

或以式(1.1)代入式(1.5)，得

$$P = \frac{U^2}{R} \quad (1.7)$$

以上两式又可写作

$$P = \frac{I^2}{G} \quad (1.8)$$

和

$$P = GU^2 \quad (1.9)$$

功率的单位为瓦($W = V \cdot A$)。

电阻在时间 t 内消耗的电能为

$$W = UIt \quad (1.10)$$

能量的单位为焦耳(J)*。

§ 1-3 电 源

我们知道，一个电源具有一定的电(动)势。依照惯例，电势用图 1-5 的符号表示。这里，与电压和电流类似，电势 E 也通过一个参考指向而被定义为代数量。这个参考指向用圆圈中的正负号示出：正号指示高电位，负号指示低电位。如果电源的正负极

* 实用上，电能一般用“度”即千瓦时(kW·h)量度。



图 1-5 电势的表示

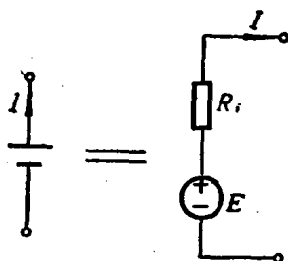


图 1-6 用电势和内阻表示电源

恰和这一对正负号相吻合，则 E 为正；否则， E 为负。

由物理学知道，从电源负极经其内部到正极的电势等于电源两极断开时从其正极到负极的电压，即开路电压。因此，我们也可以通过开路电压 U 来表示电势。如取 U 的参考指向如图 1-5 所示，则我们有

$$E = U \quad (1.11)$$

尽管电势和电压这两个概念具有不同的物理意义，在电路理论中我们将它们视为等价物，即说“一个电势作用于电路”和“一个电压作用于电路”等价。

电源一般具有内阻 R_i 。考虑到内阻，我们用电势和内阻的串联来表示电源，如图 1-6 所示。

当电源中有电流 I 时（图 1-6），电源产生的功率为

$$P = EI \quad (1.12)$$

§ 1-4 全电路欧姆定律

在由电势为 E ，内阻为 R_i 的电源以及负载电阻 R_L 构成的闭合回路（图 1-7）中，电流为

$$I = \frac{E}{R_i + R_L} \quad (1.13)$$

这个公式就是全电路或闭合回路的欧姆定律。

负载电阻 R_L 上的电压，也就是电源的输出电压，根据欧姆

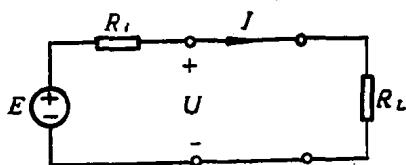


图 1-7 电源—负载闭合回路

定律，是

$$U = R_L I \quad (1.14)$$

以此代入式 (1.13) 得

$$U = E - R_i I \quad (1.15)$$

以上两式都表示负载上的电压或电源输出电压，不过前一式是从负载一侧来看的，后一式是从电源一侧来看的。以式 (1.13) 代入这两个式子，便一致地得出

$$U = \frac{R_L}{R_i + R_L} E \quad (1.16)$$

由此可见，负载电压是电源电势的一部分，此部分的大小取决于 R_L 和 R_i 之比。显然，为了从电源取得尽可能大的电压，应使 $R_L \gg R_i$ 。

以 I 同乘式 (1.15) 两方，得

$$UI = EI - I^2 R_i \quad (1.17)$$

可是我们知道， UI 是负载获得的功率，也就是电源输出的功率， EI 是电源产生的功率， $I^2 R_i$ 是电源内阻消耗的功率；可见式 (1.17) 就是回路中的功率平衡方程式：电源产生的功率减去内阻消耗的功率等于负载获得的功率。

例 1-4-1 一付电池，开路电压为 $6V$ ，内阻为 20Ω ，若接上 $R_L = 130\Omega$ ，求其输出电压和输出功率。

解：电路如图1-8所示，其中

$$I = \frac{E}{R_i + R_L} = \frac{6}{20 + 130} = 0.04A = 40mA$$

电源输出电压为

$$U = R_L I = 130 \times 0.04 = 5.2V$$

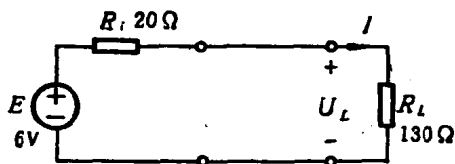


图1-8 例1-4-1

输出功率为

$$P = UI = 5.2 \times 0.04 = 0.208 \text{ W} = 208 \text{ mW}$$

例 1-4-2 一付供晶体管收音机用的电池，开路电压为5.8V；当收音机工作时，量得其输出电压为5.6V，电流为40mA；求电池内阻。

解：由式 (1.15) 有

$$R_i = \frac{E - U}{I} = \frac{5.8 - 5.6}{40 \times 10^{-3}} = 5 \Omega$$

§ 1-5 电源的输出特性

从方程式 (1.15) 可以看出，当负载电阻 R_L 变化因而电流 I 变化时，电源输出电压 U 是随电流的增加而直线下降的。实际上，该式是一条直线的方程式。为了画出此直线，只要确定其上任意两点就行了。特别，可由下列两点确定此直线。

开路点：电源两极断开；此时 $I = 0$, $U = E = U_0$ (U_0 表示电源的开路电压)。开路点确定直线式 (1.15) 在 U 轴上的截距 (图 1-9)。

短路点：电源两极短路；此时 $U = 0$ ，而

$$I = \frac{E}{R_i} = I_s \quad (1.18)$$

I_s 表示电源的短路电流。短路点确定直线式 (1.15) 在 I 轴上的截距 (图 1-9)。

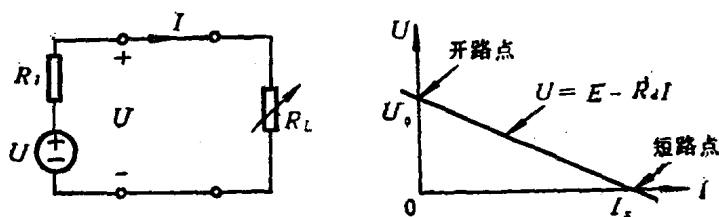


图 1-9 电源的输出特性

将开路点和短路点连接起来就得直线式 (1.15)，如图1-9所示。这条直线表示出电源输出端上电压和电流的关系，叫做电源的输出特性。电源的输出特性完全是电源本身的特性，它由电势和内阻确定。

例 1-5-1 设一电源的开路电压为24V，内阻为4Ω，则其输出特性为

$$U = 24 - 4I$$

当 $I = 0$ 时， $U = U_0 = 24\text{V}$ ；当 $U = 0$ 时， $I = I_s = 24/4 = 6\text{A}$ 。由此可画出输出特性如图1-10所示。假如接负载电阻 $R_L = 4\Omega$ ，则 $I = 24/8 = 3\text{A}$ ， $U = 3 \times 4 = 12\text{V}$ 。这对应于输出特性上的P点。

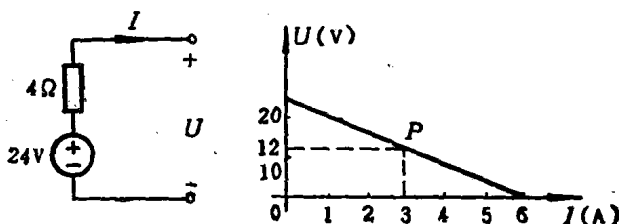


图 1-10 例1-5-1

实际电源的输出特性未必是严格的直线。这是因为电势或内阻可能随电流的变化而有所变化。但是一般电源在其正常工作范围内输出特性是很接近于直线的。

§ 1-6 电源的电路模型:

电压源和电流源

在以上的讨论中,我们从物理学的观点把电源表示为电势和内阻的串联,然后得到电源的输出特性式(1.15)。实际上,在电路分析中,人们并不关心电源内部的物理或化学过程,而只关心其输出特性,并且通过一般地假定电源具有图1-9那样的直线输出特性而用适当的电路模型来表示它们。电源的电路模型有两种,即电压源模型和电流源模型。下面先分别加以讨论,然后再说明它们的等效性。

电压源模型

假定电源具有图1-11-(a)那样的直线输出特性。我们显然可以用图1-11-(b)的电路来表示它,因为这个电路的方程式(输出电压和电流的关系)

$$U = U_0 - IR_i \quad (1.19)$$

(其中 $R_i = U_0/I_s$)正好对应于图1-11-(a)的直线。不过,除了这一点以外,我们并不认为这个电路具有任何其他物理意义。就是说,它只在输出特性上或即对于负载的作用上代表了电源。

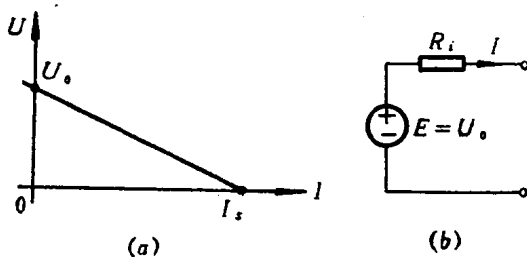


图 1-11 (a) 电源的输出特性 (b) 电压源模型

图1-11-(b)的电路称为电源的电压源模型,其中 $E = U_0$ 称为电势源或电压源,又叫电压发生器, R_i 称为电源的内阻。我们要