

邮电中等函授教材

电路分析基础

孙希纯 编著

人民邮电出版社



邮电中等函授教材

电路分析基础

孙希纯 编著

人 民 邮 电 出 版 社

内 容 提 要

本书较系统地讨论了线性电路的基本概念、基本理论和主要的分析方法。全书共计九章。分为三大部分：直流电阻电路（第一章），正弦交流电路与非正弦交流电路（第三章至第七章），过渡过程（第八、九两章）。

在内容的编写上，本书既着重于物理过程的定性分析，也强调各电路变量的定量分析。本书具有深入浅出、通俗易懂、易于接受的特点。书中编有大量的例题、思考题与习题（书末附有答案）便于自学。

本书是邮电中等函授电信专业的教学用书，也可供同类中等专业技术学校的学生和工程技术人员学习时参考。

邮电中等函授教材

电路分析基础

孙希纯 编著

※

人民邮电出版社出版

北京东长安街27号

中国铁道印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

※

开本：750×1168 1/32 1990年6月 第一版
印张：19 4/32 页数：306 1990年6月北京第1次印刷
字数：508千字 印数：1—3850册

ISBN7-115-04215-2/G·032

定价：3.85元

前 言

本书是邮电中等函授电信各专业教学用书,同时本书也适用于同类专业中等技术学校教学和供中等技术人员自学参考。

本书的主要课题是讨论在直流信号和周期信号作用下以及过渡过程中,线性电路的各电流变量和电压变量。

直流电路部分的讨论是以物理概念和电路的基本分析方法为主要内容而进行的。由于直流电路的各种分析方法不仅适用于交流电路,同时也适用于过渡过程的分析,所以这部分内容在本门课程中占有十分重要的地位。

交流电路部分所讨论的内容则相当广泛。它包括谐振电路、互感电路、三相电路、变压器电路和非正弦电路等。由于使用了相量分析法而使所有适用于直流电路的各种分析方法也适用于交流电路,从而简化了交流电路的分析过程。

三要素法、付里叶变换以及拉普拉斯变换是分析过渡过程的重要方法。由于两种变换,使得直流电路的各种分析方法可以用于过渡过程的分析。除三要素法外这部分内容有一定的难度,在教学中可根据实际情况进行适当的取舍,不会影响全书的完整性。

由于时间仓促和编者水平的限制,书中可能有不妥之处,请将使用本书时发现的问题告诉我们,以便再版时改进和更正。

编者

1989年8月

目 录

绪 论	(1)
第一章 直流信号作用下的电阻电路	(3)
§ 1—1 电路变量与电路模型	(3)
§ 1—2 电路基本定律	(9)
§ 1—3 电功率与电功率守恒定律	(19)
§ 1—4 简单直流电阻电路分析	(23)
§ 1—5 电压、电流与电阻的测量	(36)
§ 1—6 电压源、电流源及其等效转换	(50)
§ 1—7 受控源及受控源电路分析	(67)
§ 1—8 复杂电路分析	(73)
§ 1—9 负载取得最大功率的条件	(111)
小 结	(114)
习 题	(117)
第二章 正弦信号作用下的交流电路	(128)
§ 2—1 正弦交流电的基本概念	(128)
§ 2—2 正弦交流电的表示法	(141)
§ 2—3 正弦交流电路的基本元件	(148)
§ 2—4 单一元件电路分析	(155)
§ 2—5 正弦交流电路的相量分析法	(176)
§ 2—6 R 、 L 、 C 三元件串、并联电路分析	(182)
§ 2—7 复数阻抗与复数导纳的等效转换	(204)
§ 2—8 正弦交流电路的功率	(208)
§ 2—9 正弦交流电路分析举例	(217)
§ 2—10 电感与电容的交流电桥测量法	(225)

附录 2—1	复数及其运算	(227)
小 结		(233)
习 题		(240)
第三章	谐振电路	(251)
§ 3—1	电磁谐振现象	(251)
§ 3—2	串联谐振电路	(254)
§ 3—3	串联谐振电路的品质因数	(261)
§ 3—4	谐振电路的频率特性	(268)
§ 3—5	品质因数与通频带的关系	(276)
§ 3—6	并联谐振电路	(279)
§ 3—7	并联谐振电路的频率特性	(286)
§ 3—8	信号源内阻 $R_{\text{内}}$ 对谐振特点的影响	(289)
小 结		(293)
习 题		(297)
第四章	互感电路	(300)
§ 4—1	互感现象与互感系数	(300)
§ 4—2	同名端与互感电压确定	(304)
§ 4—3	含互感的简单电路分析	(309)
§ 4—4	含互感的复杂电路分析	(328)
§ 4—5	互感现象的应用实例	(332)
小 结		(334)
习 题		(335)
第五章	三相交流电路	(342)
§ 5—1	三相电与独立的三相供电系统	(342)
§ 5—2	星形联接的三相电路分析	(347)
§ 5—3	三角形联接的三相电路分析	(358)
§ 5—4	三相电路的功率分析	(366)
小 结		(368)
习 题		(369)

第六章 周期性非正弦交流电路	(372)
§ 6—1 三角形式的付里叶级数	(372)
§ 6—2 余弦形式的付氏级数	(393)
§ 6—3 指数形式的付氏级数	(396)
§ 6—4 周期性交流电的有效值与功率	(404)
§ 6—5 非正弦电路分析举例	(409)
小 结	(412)
习 题	(413)
第七章 铁芯线圈与变压器	(417)
§ 7—1 磁感应强度与磁场强度	(417)
§ 7—2 铁芯线圈与铁磁性材料	(428)
§ 7—3 铁磁性物质的磁化过程	(430)
§ 7—4 磁化时的能量损失与线圈中电流的畸变	(435)
§ 7—5 变压器与理想变压器	(439)
§ 7—6 含变压器电路分析举例	(447)
§ 7—7 全耦合变压器及其等效电路	(453)
小 结	(459)
习 题	(460)
第八章 线性电路的过渡过程	(465)
§ 8—1 过渡过程的基本概念	(465)
§ 8—2 电阻、电容电路的过渡过程	(476)
§ 8—3 电阻、电感电路的过渡过程	(492)
§ 8—4 一阶电路的三要素分析法	(502)
§ 8—5 阶跃信号与阶跃响应	(516)
§ 8—6 R 、 L 、 C 三元件电路过渡过程的定性 分析	(526)
小 结	(531)
习 题	(533)
第九章 线性电路的变换域分析法	(537)

§ 9—1	付里叶变换.....	(537)
§ 9—2	付氏变换的性质.....	(542)
§ 9—3	常见信号的付氏变换.....	(545)
§ 9—4	付氏反变换.....	(551)
§ 9—5	线性电路的频域分析法.....	(555)
§ 9—6	拉普拉斯变换.....	(562)
§ 9—7	拉氏变换的性质.....	(566)
§ 9—8	拉氏反变换.....	(572)
§ 9—9	线性电路的复频域分析法.....	(575)
§ 9—10	S 域分析法举例.....	(581)
小 结		(588)
习 题		(591)
习题答案		(594)

绪 论

《电路分析基础》是一门重要的技术基础课，主要介绍电路的基本理论和电路变量——电流与电压的确定方法。本门课程为后续课的学习提供了必要的基础理论和基本的分析方法。只有掌握了这些理论与方法，才有学好后续课程的可能。

由于“电”具有十分突出的特点，所以在现今社会里得到了极为广泛的应用，并占有非常重要的地位。只有借助“电”，才能使信息的传递速度、传递距离和质量达到当前社会发展所需要的水平。

在电力系统中，我们通过不同大小的电流与电压将电能传送给各种形式的电气设备。我们将能够供出电能的装置称为电源，而将接受能量的电气设备称为负载。在电信技术中，则是依靠按一定规律变化的电流与电压将信息传递出去的。我们将带有信息的电流与电压称为电信号（简称信号），而将能够产生信号的装置称为信号源。由于电力系统中的电流、电压以及电源与电信技术中的信号和信号源并没有本质上的差异，因此，为叙述上的方便，在今后的课文中，我们将电流、电压与信号以及电源与信号源认为是具有相同含意的技术用语，而不再加以区别。从这一观点看，本课程的第一、二两章实质上所讲述的也就是：在直流电与正弦交流电作用下的电路分析。

本课程共计九章。从内容上看，基本上分属于三大部分，第一部分是直流电阻电路分析；第二部分是正弦与非正弦交流电路分析；第三部分是过渡过程分析。

第一部分主要介绍在直流电阻电路中，电流、电压以及功率的确定方法。这部分内容所涉及到的概念、理论和方法并不深奥，也不

难懂，但它在电路理论中占有相当重要的地位。在学习时必须充分注意。

第二部分包括第二章到第七章的内容，主要介绍在正弦交流电路中，电流、电压与功率的确定方法。其中包括互感电路、变压器电路、谐振电路、三相电路与周期性非正弦电路。这部分内容所涉及的范围相当广泛，所讨论的概念与理论也比直流多而且深。在学习这部分内容时还应具有较清楚的复数数学知识和熟练的复数运算技能。

第三部分包括第八、九两章，主要介绍处于过渡过程中的电路变量——电流与电压的确定方法。这部分内容具有一定的难度。

电路分析基础课是电信技术人员必须学好而又具有一定难度的一门重要课程。如果能坚持按教学计划进行自学，认真并独立地完成作业，相信是有把握将本门课程学好的。

最后还需指出，为计算上的方便，本课程的例题、思考题和习题中所给出的各个已知量均为任意的，有些已知数值不一定符合实际情况，例如 $L = 1$ 亨利、 $C = 2$ 法拉等高值电感和电容，这样做对基本概念的理解应不产生影响。

第一章 直流信号作用下的电阻电路

内容提要

本章主要介绍在直流信号作用下，在电阻电路中的电流、电压与功率的确定方法。

学完本章以后，应当熟知电路的基本概念、基本定律和基本分析方法，应能选用适当的方法以确定复杂电路中的电流与电压。

§ 1-1 电路变量与电路模型

所谓电路变量，是指电路中的电流与电压。关于什么是电流与电压，物理课已进行过讨论，这里只作复习性的说明。

一、电流与电压

当导体两端有电压（即电位差）存在时，导体中必有电流通过。所谓电流，就是电子的规则运动所形成的电子流。我们规定，电子运动的反方向（相对而言，也就是正电荷的运动方向）为电流的方向。

单位时间内穿过导体横截面的电量是定量地描述电流强弱的物理量，称为电流强度，简称电流。应当注意，“电流”具有两个含义，它既表示一种物理现象：电子的规则运动，又是一个描述电流强弱的物理量。

如果电流的方向与大小始终保持恒定，这个电流就称为直流电流，通常用大写的英文字母 I 表示。对直流电流而言，如果 t 秒内穿

过导体横截面的电量为 Q 库 (仑), 则其电流强度为:

$$I = \frac{Q}{t} \quad (1-1)$$

显然电流的单位为 $\frac{\text{库 (仑)}}{\text{秒}}$ 。我们规定 $1 \frac{\text{库 (仑)}}{\text{秒}} = 1$ 安培, 即规

定电流的单位为安培。安培简称安, 代表符号为 A。除安外, 电流的常用单位还有毫安 (mA) 和微安 (μA), 它们与安的关系为

$$1\text{mA} = 10^{-3}\text{A}, \quad 1\mu\text{A} = 10^{-6}\text{A}$$

前面曾经指出, 当导体两端间有电压存在时, 在该导体中必有自高电位的一端流向低电位的一端的电流。这也就是说, 当导体中有电流通过时, 在导体的两端间必有电压存在, 电流由高电位的一端流向低电位的一端。

电压的单位是伏特, 1 伏特在数值上等于移动 1 库 (仑) 电荷时电场力所作的功。即

$$1 \text{ 伏特} = 1 \frac{\text{焦 (尔)}}{\text{库 (仑)}}$$

伏特简称伏, 它的代表符号为 V, 除伏外, 常用的电压单位还有毫伏 (mV)、微伏 (μV) 以及仟伏 (kV) 和兆伏 (MV)。它们与伏的关系为

$$1\text{mV} = 10^{-3}\text{V}, \quad 1\mu\text{V} = 10^{-6}\text{V},$$

$$1\text{kV} = 10^3\text{V}, \quad 1\text{MV} = 10^6\text{V}.$$

通常用 “+” 与 “-” 表示导体两端的高电位点与低电位点。由高电位点指向低电位点的方向称为电压的方向, 显然它是与电流的方向一致的。

综合以上所述可知, 通过某种方法使导体两端分别 “带上” 等量的正负电荷后, 在导体两端间即形成电压, 此时导体中必出现由高电位一端流向低电位一端 (即由带正电荷的一端流向带负电荷的一端) 的电流。由于导体中电流的出现, 必将导致导体两端所带的初始电荷的减少, 即导致电压的下降, 最终当电荷下降到零时, 电

流也随之消失。显然，为保持导体中电流的不停地流动，必须及时和适量地向导体两端补充正负电荷，以补偿由于电流所带来的影响。这个向导体及时补充电荷以维持导体两端保持恒定电压的装置称为电源。从能量角度看，当电流流经导体时，在导体中必有能量的耗散，电源则是向通有电流的导体及时补充能量以补偿耗散掉的能量的装置。

当接在电源正负极间的导体一定时，电压愈高的电源所供出的电流愈强。

二、电路与电路变量的正方向

前面曾经提到，为保持导体内的电流继续流动，在导体两端间应当接上电源。可以想像，这时在导体中将出现由高电位点流向低电位点的电流，同时在电源内部出现由低电位点流向高电位点的电流。这时，导体与电源给电流提供了一个完整的通路。简单地说，电流经过的路径称为电路。最简单的电路由电源、负载以及联接它们的导线组成。

电源是电能的提供者，是电子流动的动力来源。负载则是能量的承受者，通过它可以将来自电源的电能转换成其它种形式的能量。图 1—1 就是一个最简单的电路示意图，称为电路模型。

图中左侧的符号 U_s 表示电源，它既可能是干电池或蓄电池也可能是信号源。图中的“+”、“-”号表示电源的高、低电位点。图中右侧的符号 R 表示负载，它既可能是白炽灯或电热炉也可能是电信设备。图中 K 表示开关，其余部分则是联接电源与负载的导线。

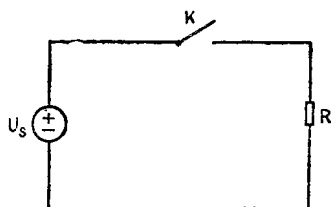


图 1—1 最简单电路的示意图

当开关 K 闭合后，电流自电源 U_s 的高电位点（称为电源的正极）“流出”，经开关 K 和负载 R “回到”电源的低电位点（称为

电源的负极)，然后再经电源内部“流向”电源正极。只要开关 K 不打开，电流即可一直“流动”下去，直至电源供电能力消失。

简单地说，电路分析主要课题之一就是确定负载中的电流与负载两端的电压。要求出电流与电压就要先利用电路的结构，写出各个变量与电源电压以及负载之间的关系式，然后再进行求解。显然只有知道变量的方向才有可能列出所需的关系统。

对如图 1—2 所示的简单电路来说，不需要经过具体计算即可直观地看到电流的方向，但在图 1—3 所示的比较复杂的电路中，有些负载上的电流方向则是难以预先估计到的。

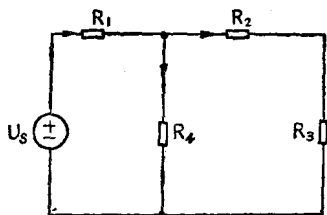


图 1—2 简单电路图

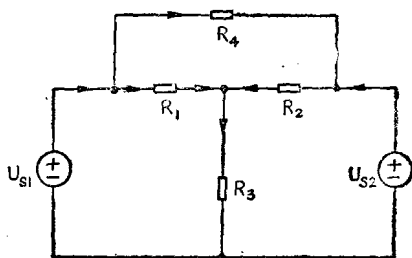


图 1—3 复杂电路图

在难以预见的情况下，我们可以假设它们的方向。例如，图 1—3 中各个箭头所表示的电流方向就是预先假定的电流方向。这些事先假定的方向称为电流的正方向或电流的参考方向。

如果根据正方向求得的结果为正，则表示图示正方向就是电流的真实方向；如果求得的结果为负，则表示电流的真实方向与图示的正方向相反。

由于导体中的电流是由高电位点流向低电位点的，所以根据电流的正方向即可得知电压的正方向。电流与电压所具有的这种正方向称为关联正方向。

三、理想化电路模型

电路中的负载是各式各样的，有的负载是将来自电源的能量转

变为热能，这类负载在电路分析中可用电阻元件等效，有的则是将来自电源的能量转变为磁场能量或电场能量贮存起来，这类负载可分别用电感元件和电容元件等效。电阻元件（以 R 表示）、电感元件（以 L 表示）和电容元件（以 C 表示）称为电路的三个基本元件（关于这三个元件，后面还将进行详细说明），它们既可单独作为负载组成单一元件电路，又可组合成各种形式的负载而成为多种元件的电路。本章只限于电阻性负载的讨论。

为了便于进行电路分析，我们总是将基本元件： R 、 L 和 C 看作是仅仅具有其自身所应有的性能，而不附有其它元件的性能，这种元件称为理想化元件。例如，电感元件是由铜线绕制而成的，所以电感元件除具有电感的性能外，同时还附有电阻的性能。而理想化的电感元件将被认为它只具有电感的性能而不附有电阻的性能。由理想化元件组成的电路图称为理想化电路模型，简称电路模型或电路图。

下面再介绍几个有关电路模型的技术用语。

图 1—4 是一个具有 4 个电源 6 个负载的电路模型。如欲确定各负载的电流和电压，除应设定各电流的正方向外，还要用到以下几个技术用语。

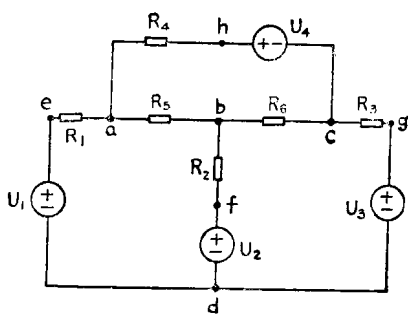


图 1—4 复杂电路模型

1. 节点

电路中三个或三个以上元件的联接点称为节点（亦称结点）。例如图 1—4 中的 a 点、 b 点、 c 点和 d 点就是图示电路的节点。

2. 支路

两个节点间所联接的分支称为支路。例如图 1—4 所示的电路共有 6 条支路，它们是 aed 支路、 ab 支路、 bc 支路、 bfd 支路、 cgd 支路和 ahc 支路。

3. 回路

由节点和支路所组成的任何闭合路径称为回路。图 1—4 所示电路共有 7 个回路。例如： $ABFDEA$ 回路， $AHCBFDEA$ 回路（其余 5 个回路请自行找出）。

4. 网孔

在某电路的所有回路中，有几个是构成该电路的基本“框架”，在这些基本“框架”的内部不存在任何新的支路。这些内部不存在支路的回路称为网孔。例如图 1—4 所示的电路共有 3 个网孔，它们是 $abfdea$ 网孔， $bcgdfb$ 网孔和 $abcha$ 网孔。

节点、支路、回路与网孔是电路分析中经常用到的技术用语，应注意它们的含义。

练习题与思考题

1. 设想在某种外力作用下，使一段金属导体的 A 、 B 两端分别带上正负电荷（见图 1—5）。试用箭头表示此段导体中将要出现的电流的方向，同时指出导体内正、负电荷的移动方向。

2. 在图 1—5 中，说明当电流发生时， A 、 B 两端电荷的变化情况。



图 1—5 练习题与思考题图

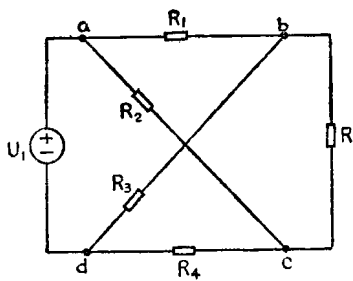


图 1—6 练习题与思考题图

3. 若图 1—5 中 A 、 B 两点间的电压为 10V 。问若以 A 点电位为零伏， B 点电位为多少？若以 B 点的电位为零伏，则 A 点电位为多少？

4. 指出图 1—6 所示电路的节点、支路、回路与网孔。

图中 R_2 与 R_3 未曾直接相联。

§ 1-2 电路基本定律

欧姆定律与基尔霍夫定律是电路理论中的两个十分重要的定律，它们是进行电路分析的主要依据。欧姆定律描述了电路中电阻元件上的电压与电流间的关系；基尔霍夫定律则描述了，汇聚于某个节点处，各支路中的电流之间的关系和某个回路里各段电压间的关系。我们习惯上将这两条定律称为电路的基本定律。

学完这部分内容以后，应能熟知这两条定律并能熟练地应用它们进行电路分析。

一、欧姆定律

实验表明，导体两端的电压 U 与通过导体的电流 I 成正比。即

$$U \propto I. \quad (1-2)$$

上述关系就是通常所说的欧姆定律。如果将式 (1—2) 写成等式，即可得到欧姆定律的数学表达式：

$$U = RI. \quad (1-3)$$

式 (1—3) 中的比例常数 R 称为导体的电阻。从数学意义看电阻 R 仅是一个表示正比关系的比例常数，但从物理意义看，电阻 R 的大小却描述了导体的电特性。现对这一问题作如下说明。

由式 (1—3) 可以清楚地看到，当导体两端的电压 U 一定时，导体中的电阻愈大电流愈小，而电阻愈小，导体中的电流愈大。这表明电阻的大小反映了导体对电流“阻力”作用的大小，电阻愈大的导体的“阻力”愈高。

由式 (1—3) 还可看到，电阻的单位为 $\frac{\text{伏 (特)}}{\text{安 (培)}}$ ，我们规定

$$1 \frac{\text{伏 (特)}}{\text{安 (培)}} = 1 \text{ 欧姆},$$