


电路基础

A handwritten mark or signature in black ink, consisting of several connected, sweeping strokes, located in the lower right quadrant of the page.

# 电 路 基 础

上海交通大学电工原理教研组编

1975年

# 毛主席语录

教育必须为无产阶级政治服务，必须同生产劳动相结合。

我们的教育方针，应该使受教育者在德育、智育、体育几方面都得到发展，成为有社会主义觉悟的有文化的劳动者。

不破不立。破，就是批判，就是革命。破，就要讲道理，讲道理就是立，破字当头，立也就在其中了。

学制要缩短。课程设置要精简。教材要彻底改革，有的首先删繁就简。

# 目 录

<b>第一章 直流电路基本规律</b> .....	1
§ 1-1 电路图和电路图上所用的几个术语.....	2
§ 1-2 基尔霍夫定律.....	7
§ 1-3 基尔霍夫定律的应用.....	25
<b>第二章 直流电路的分析及其等效变换</b> .....	35
§ 2-1 回路电流法.....	35
§ 2-2 节点电压法.....	41
§ 2-3 迭加原理.....	47
§ 2-4 等效发电机定理.....	54
§ 2-5 星形联接和三角形联接的等效互换.....	64
§ 2-6 电路分析中的估算法.....	68
<b>第三章 正弦交流电路的基本概念</b> .....	73
§ 3-1 正弦交流电的表示法.....	73
§ 3-2 正弦交流电的有效值.....	81
§ 3-3 正弦交流电路中的电阻.....	83
§ 3-4 正弦交流电路中的电感.....	86
§ 3-5 正弦交流电路中的电容.....	93
<b>第四章 正弦交流电的矢量表示法</b> .....	103
§ 4-1 正弦电流的矢量表示法.....	103
§ 4-2 电阻——电感串联电路.....	110

§ 4-3 电阻——电容串联电路·····	121
§ 4-4 具有电阻、电感和电容的正弦电流电路·····	133
<b>第五章 复数符号法·····</b>	<b>139</b>
§ 5-1 正弦量的复数表示法·····	139
§ 5-2 电路参数的电压相量与电流相量的关系·····	148
§ 5-3 复数形式的基尔霍夫定律·····	151
<b>第六章 用符号法分析计算正弦交流电路·····</b>	<b>154</b>
§ 6-1 复数形式的欧姆定律·····	154
§ 6-2 简单电路的计算·····	162
§ 6-3 电路中的谐振·····	173
§ 6-4 复杂正弦交流电路的计算·····	179
<b>第七章 正弦交流电路的功率·····</b>	<b>193</b>
§ 7-1 有功功率和功率因数·····	193
§ 7-2 视在功率、无功功率和功率三角形·····	195
§ 7-3 功率的测量·····	200
§ 7-4 交流电路的元件和参数·····	201
§ 7-5 功率因数的提高·····	205
<b>第八章 三相电路·····</b>	<b>210</b>
§ 8-1 三相电路的基本规律·····	210
§ 8-2 对称三相电路的计算·····	217
§ 8-3 不对称三相电路的计算·····	232
§ 8-4 三相电路的功率及其测量·····	242

<b>第九章 周期性非正弦电流电路</b> .....	254
§ 9-1 概述.....	254
§ 9-2 周期性非正弦电流电路的分析和计算.....	257
§ 9-3 电路参数对电压和电流波形的影响.....	264
§ 9-4 非正弦周期量的有效值和平均值.....	269
§ 9-5 周期性非正弦电流电路的功率.....	277
附表 工程中常用一些曲线的福里哀级数展开式.....	282
<b>第十章 线性电路的过渡过程</b> .....	284
§10-1 为什么要研究过渡过程.....	284
§10-2 $r-C$ 电路的过渡过程.....	287
§10-3 电压电流初始值的确定.....	298
§10-4 $r-C$ 电路过渡过程小结和应用举例.....	303
§10-5 $r-L$ 电路的过渡过程.....	312
§10-6 正弦交流电路过渡过程的特点.....	321
§10-7 只含有一个储能元件较复杂电路的过渡过程.....	326
§10-8 电容通过电阻、电感放电时的过渡过程.....	335
<b>附录(一) 复数的计算尺拉法</b> .....	346
§ 1 序言.....	346
§ 2 复数计算的转换公式.....	346
§ 3 计算尺的种类.....	347
§ 4 计算尺拉法的基本原理.....	347
§ 5 三角函数尺度在滑尺上的计算尺拉法.....	350
§ 6 三角函数尺度在定尺上的计算尺拉法.....	354
§ 7. 无小角度尺度的计算尺拉法.....	357

<b>附录(二) 电工测量的基本知识</b> .....	<b>360</b>
§ 1 关于测量和测量仪器的基本知识.....	360
§ 2 磁电式仪表.....	368
§ 3 电磁式仪表.....	393
§ 4 电动式仪表.....	401
§ 5 感应式电度表.....	412
§ 6 直流电桥.....	420
§ 7 直流电位差计.....	426
附表 常用四种直读仪表的结构原理和技术特性比较表	432

# 第一章 直流电路基本规律

通过学工劳动和典型任务的实践，我们接触了一些不同类型的电路，获得了一定的感性认识。

结合典型任务我们又学完了“基础物理”中的电磁学部分。在实践的基础上，初步掌握了一些分析电磁现象和计算电路的方法，但是我们一定有这样的一种感觉，就是：对一些简单电磁现象和电路能够进行分析和计算，但对一些较为复杂的便无从下手了。

本课程的目的就是：在“基础物理”中电磁学部分的基础上，配合典型任务，对电路再作进一步研究，把我们对电路已有的认识再作进一步提高和深化，以便对一些较为复杂的电路能够进行分析和做一些计算。应该说明，对电路的认识是不能一次完成的，因此需要其它课程在本课程的基础上，结合典型任务再提高、再深化。

在实践中，我们已经看到：有的电路中的电流、电压、电动势等是恒定的，即不随时间而变化的；有的电路中的电流、电压、电动势是交变的，即随时间而变化的；人们就根据电流、电压、电动势等变与不变的特点，把电路进行了分类，把其中电流、电压、电动势等不随时间而变化的电路称为直流电路；把其中电流、电压、电动势等随时间而变化的电路，又按它们（指电流、电压、电动势等）的变化形式，区分为正弦电流电路、非正弦电流电路等等\*。

---

\* 应当指明，这仅是对电路进行分类的一种方法，通过今后的学习和实践大家还会看到其它分类方法。

与其它电路相比，直流电路较为简单和便于分析，而且，存在于直流电路内的一些规律，对于我们初学者来说，也是易于理解和掌握的，因此，便把直流电路的基本规律作为本课程第一章的主题。在这一章里，将本着不与“基础物理”内容有过多重复的原则，配合课堂实验，结合典型任务，阐明一些存在于直流电路内的基本规律。

最后，强调指出：本章所提到一些规律，在一定的条件下，同样也存在于和适用于其它一些电路\*，因此，希望同志们务必在政治统帅业务的前提下，通过认真学习，切实掌握本章的内容，这不仅有利于本课程后续章节的学习，而且也有利于其它课程的学习。

## § 1-1 电路图和电路图上 所用的几个术语

### 1. 电路图

在实践中，我们已经接触到不少电路，发现它们（电路）都是由各种设备组合而成的，而这些设备又是各有各的形状，各有各的大小。显然，要如实地把它们画出来是很不容易的。有没有简单的画法？这个问题，劳动人民在长期的生产斗争和科学实验中已经解决了。

大量的、长期的实践活动使劳动人民认识到，不管电路是多么复杂，按其组成部分的作用，一般可以分成四个主要部分：

(1) 电源，其作用是将其它形式的能量（如化学能、热能、光能等）转换为电能。在电路内作电源用的有：发电机、蓄电池、热电偶等等。

---

\* 关于这一点，将来学到有关章节自会明瞭。

(2) 负载或称用电器，其作用是将电能转换为其它形式的能量。在电路中最常见的负载有：电灯泡、电动机、电炉等等。

(3) 联结导线，其作用是传输和分配电能。

(4) 控制设备，其作用是执行控制任务，如开关等等。

有了上述分类后，劳动人民便创造了不同的简单符号（如图 1-1 所示）来代替电路的不同组成部分，而不考虑构成电路

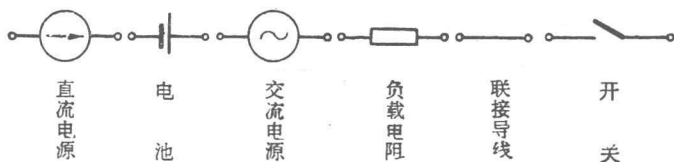


图 1-1

各组成部分的设备的具体形状和大小。直流电源符号中的箭头表示电动势的方向，交流电源符号中 $\sim$ 表示电动势是随时间而变的。有了这些代表符号后，就可以把任何一个实际电路（不管它是如何的庞大或是如何的小巧）画成一个由上述各种符号组合而成的图形。这种图形就是所要说的电路图。

图 1-2 就是我们日常使用的手电筒的电路图，图上的 $\ominus\text{---}\oplus$ 代表手电筒里的干电池，旁边的 $\uparrow$ 表示电动势  $E$  的方向是由负极指向正极； $\circ\text{---}\text{---}\circ$ 代表手电筒的按钮，旁边的字母“K”是开关的意思； $\circ\text{---}\square\text{---}\circ$ 代表手电筒的电珠，旁边的字母“r”是电阻的意思；将各个符号联接起来的线段，是手电筒上提供电流通路的部分，如手电筒外部的铁壳等。

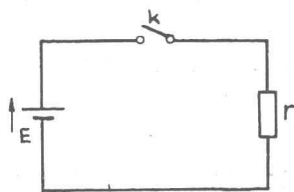


图 1-2

今后便要根据电路图来研究电路。这样一来，便要求我们要牢牢记住在电路图上所用的符号代表的实物是什么？而这些实物的作用又是什么？不然，我们面对内容极为丰富的电路图便会茫然不知所措。

## 2. 电路图上所用的几个术语

在日常生活中，为了反映一个实物结构上的特点，我们往往给这个实物的不同的部位以不同的名称。例如，一件上衣有所谓衣领、袖子、口袋等名称；一个茶壶有所谓壶嘴、壶盖、壶底、壶把等名称等等。同样，在我们这里，为了反映电路图结构上的特点，也有一些名称或者说一些术语，下面我们分别介绍一下。

### (1) 支路

右图(图 1-3)是测试电阻值经常用到的惠斯登电桥的电路图，仔细观察一下，可以发现，它上面有好多分支，象 A、B 之间含有  $r_1$  的一段，B、C 之间含有  $r_x$  的一段，A、D 之间含有  $r_2$  一段等等，并且，这些分支有一个共同特点是：除了两个端点外，再没有其它的地方与其它分支联接，而且与端点联接的其它分支不少于两个。这样的分支，以后就称它是支路。根据上述特点，显然图 1-3 除了上面已提到的三个支路外，尚有位于 B、D 之间含有检流计 G、开关  $K_2$  的支路；位于 C、D 之间含有  $r_3$  的支路；位于 A、C 之间含有电池、电池内阻  $r_n$  和开关  $K_1$  的支路，总共是六个（见图上的编号）。

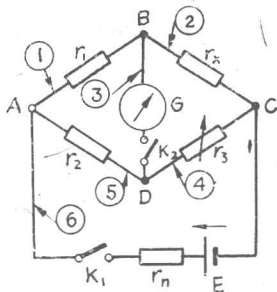


图 1-3

支路并不都是一样的，例如支路⑥就不与其它支路一样，

它含有电源，而其它则无。为了区别，凡是含有电源的皆称为含源支路，否则称为无源支路。

### 思考题

在图 1-3 上，位于 A、C 之间含有电阻  $r_2$ 、 $r_3$  的一段是不是支路？

#### (2) 节点

有支路，就必定有支路相汇合的点（支路与支路相互联接在一起的点），因为，只有这样才能构成电流的通路。以后规定，凡是三个或三个以上支路相汇合的点称为节点（也有称为结点的）。显然图 1-3 上的 A、B、C、D 符合上述规定，故皆是节点。

### 思考题

判断一下，右图 [1-4(a)] 上那几个点是节点？那几个点不是节点？再数一数有几个支路？当 H、G 之间；G、F 之间和 F、E 之间的电阻都等于零，图 1-4(a) 便变成图 1-4(b) 的形式。此时，有人说：H、G、F、E 四点可看成是一个点，而且是个节点，你说对吗？为什么？

[提示：从 H、G、F、E 四点的电位是否相同来考虑。]

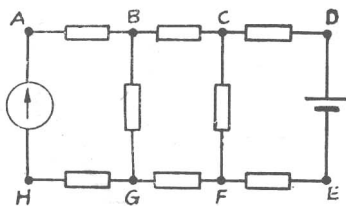


图 1-4(a)

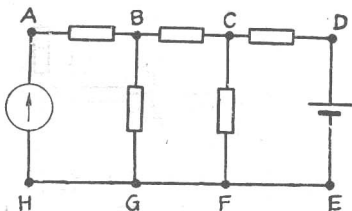


图 1-4(b)

### (3) 回路

再留意一下,我们又可看出,无论是在图 1-3, 图 1-4(a)、还是图 1-4(b)上, 都有一些从任意一个点出发, 通过支路又可以返回这一个点的闭合路径, 象图 1-3 上的  $A B C D A$ ; 图 1-4(a) 上的  $B C F G B$  等等就是这种闭合路径。我们就称这种闭合路径为回路。

回路也并不都是一样的。一个电路被确立后, 其中必出现一些由支路围成的空格。

这些空格的边界是闭合路径, 所以都是回路 (见图 1-5 上的 ①, ②, ③)。显然, 它们不同于由支路围成的其它回路 (见图 1-5 上的 ④, ⑤, ⑥, ⑦)。为了表明这种不同, 又把前者称为网孔。

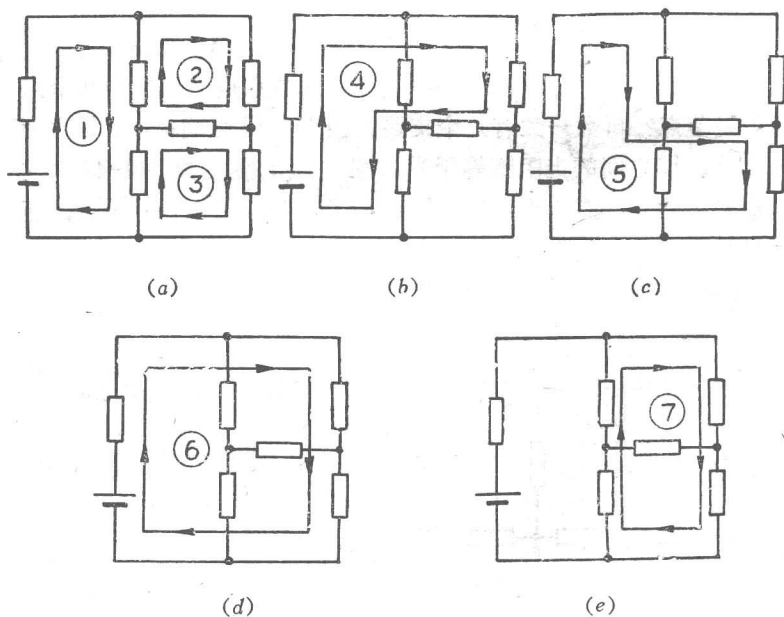


图 1-5 图上的①②……是回路的编号。

## 思 考 题

(1) 数一数图 1-3 上有多少回路，其中有几个是网孔？

(2) 现有四个电路图如图 1-6 所示，请数一下各有支路若干？节点若干？网孔若干？如果以字母  $p$  代表支路数， $q$  代表节点数， $n$  代表网孔数，试根据这四个电路图归纳出  $p$ 、 $q$ 、 $n$  之间的关系。

答案  $n = p - q + 1 = p - (q - 1)$

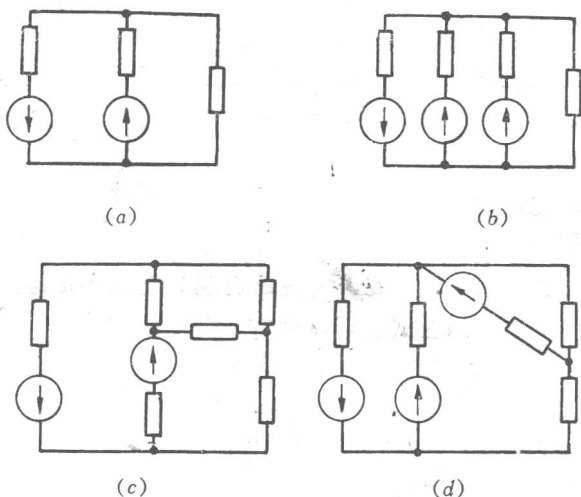


图 1-6

## § 1-2 基尔霍夫定律

1. 欧姆定律和闭合电路（回路）欧姆定律在电路计算中的局限性。

设有一个电路，其电路图如图 1-7 所示，现在要算出流过

负载  $r$  的电流  $I$ 。

要求出流过负载的电流，我们很自然地想到在“基础物理”课程里学到的欧姆定律和闭合电路（回路）欧姆定律，因为应用它们，根据已知的电压，电阻，电动势，的确是可以求出一个支路（电阻）里和一个闭合电路的

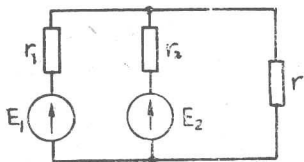


图 1-7

电流。但是，现在对图 1-7 所表示的电路仅用欧姆定律和闭合电路欧姆定律能求出流过负载的电流吗？要回答这个问题我们应该按照毛主席的教导“辩证唯物论的认识论把实践提到第一的地位，认为人的认识一点也不能离开实践。”来实践一下，换句话说，就是来具体地算一算看。

#### (1) 先用欧姆定律

欧姆定律说的是：在一无源支路中，当导线的温度不变时，通过支路电阻中的电流与支路两端的电压成正比，与电阻的大小成反比。用公式表示，则有

$$I = \frac{U^*}{r},$$

式中电压  $U$  的单位是伏特（用符号  $V$  表示），电阻的单位是欧姆（用符号  $\Omega$  表示），电流的单位是安培（用符号  $A$  表示）。

上式表明：在电流  $I$ ，电压  $U$  和电阻  $r$  三者之间只要有二个是已知的，第三个便可求出，例如：已知电压、电阻，便可求出电流。

现在再回到我们的问题上。观察一下图 1-7，可见在负载  $r$  所在的支路里，已知的仅有负载电阻  $r = 2 K$ （即 2000 欧

\* 这里我们采用目前我国常用的代表电压的符号  $U$ ，而不用符号  $V$ ，符号  $V$  在我们这里用来代表电压的单位伏特（或简称伏）。这与“基础物理”不同，应该注意！

姆)，支路两端（节点 A 和节点 B）之间的电压并未给出，因此，想用欧姆定律求出流过负载的电流显然是办不到的，我们的问题仅凭欧姆定律是不能解决的。

## (2) 再用闭合电路欧姆定律

用欧姆定律不行，那么用闭合电路欧姆定律行不行？在回答这个问题之前，有必要复习一下这个定律。

在基础物理里是这样描述这个定律的：闭合电路中的电流强度与电源的电动势成正比与总电阻成反比。用公式表示，则有

$$I = \frac{E}{r + r_n}$$

式中  $E$  代表电源电动势，单位是伏特； $r$  代表负载电阻，单位是欧姆； $r_n$  代表电源的内阻，单位是欧姆； $I$  代表电流，单位是安培。

上式中，我们是用负载电阻  $r$  和电源内阻  $r_n$  之和来表示闭合电路（回路）的总电阻，但决不能认为，不管什么回路，其总电阻都是此两电阻之和，例如，图 1-8 所示电路是一个回路，其总电阻不是  $r + r_n$ ，而应该是  $r + r_1 + r_2 + r_n$ 。另外，有时由于电源的内电阻与回路所有的其它的电阻相比较可以略去时，显然在总电阻中也就不包括  $r_n$  这一项了。

作了以上的复习后，我们来着手解决上面提出的问题。在图 1-7 上，负载  $r$  显然是包含在两个回路里；一个是由电动势  $E_1$ 、电阻  $r_1$  和负载  $r$  构成的回路；另一个则是由电动势  $E_2$ 、电阻  $r_2$  和负载  $r$  构成的回路。这一点表明了流过负载  $r$  的电流既有

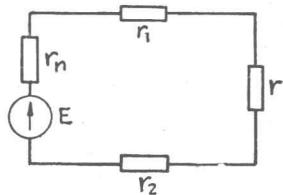


图 1-8

由含有电动势  $E_1$  和  $r_1$  的支路里流来的，也有由含有电动势  $E_2$  和  $r_2$  的支路里流来的（见图 1-9）。很显然， $I \neq I_1$  和

$I \neq I_2^*$ ，也就是在每一个回路内电流并非到处都是是一样的。这样一来，上述包含有负载  $r$  的两个回路便都不具备应用闭合电路(回路)欧姆定律的条件了。为什么?因为闭合电路(回路)欧姆定律是在回路内各处电流都一样的

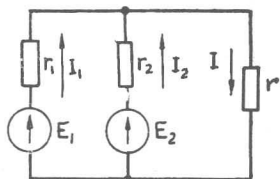


图 1-9

的情况下,说明电流、电动势和电阻三者之间关系的,所以要应用它时,回路必须具备在其内各处电流都一样的条件,否则,不行。

不能应用这个定律的事实说明,仅凭掌握了这个定律我们还解决不了上面的问题。

难道上面的问题真的解决不了吗?不!问题是可以解决的。但是,它却要求我们必须进一步探索存在于电路中的其它规律。这个其它规律就是下面讲的基尔霍夫定律。当我们掌握了这个定律以后就会发现上面的问题是不难解决的。

## 2. 基尔霍夫定律

学了第一节后,我们知道电路不外乎是一些含源支路和无源支路相互联接而成的,就以本节一开始便提到的电路(图 1-7)为例来说,它就是由两个含源支路和一个无源支路相互并联而成的。正是由于相互间有了一定的联接关系,各支路中的电流不是孤立的,而是互相联系,互相制约的;各支路端点间的电压也不是孤立的,而是互相联系,互相制约的。

诸支路的汇合点是节点。图 1-10 的  $A$  点就是某个电路的节

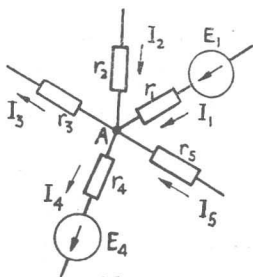


图 1-10

\* 符号  $\neq$  是不等于的意思。