

高等学校试用教材

# 电 工 学

上 册

(电路原理)

大连工学院电工学教研室编

人民教育出版社

本书系根据一九七七年十二月高等学校工科基础课电工、无线电教材编写会议所通过的编写大纲编写的，经电工学教材审稿会议审查通过，可作为高等工科院校机械、动力类专业电工学课程的试用教材。

全书分上、中、下三册出版。上册为电路原理，包括直流电路、电压和电流的波形、电路的参数、正弦交流电路以及电路的时域响应等内容。

本书也可供有关科技人员参考。

本书责任编辑刘秉仁。

高等学校试用教材

电 工 学

上 册

(电路原理)

大连工学院电工学教研室编

\*

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 10 字数 240,000

1979年8月第1版 1980年4月第1次印刷

印数 00,001—16,000

书号 15012·0198 定价 1.00 元

## 序 言

本书系根据一九七七年十二月高等学校工科基础课电工、无线电教材编写会议所通过的编写大纲编写的。

全书分三册出版:上册为电路原理;中册为电子技术;下册为电机与自动控制。

本书是按照 150~180 的总教学时数编写的。教师可根据学生的实际水平与教学计划所规定的教学时数以及专业的要求等情况,对内容作适当的取舍。凡书中标有“\*”号的章节,均可删减。

本书是大连工学院电工学教研室集体编写的,由蒋德川主编,唐介(1、2、3、11、12章)、周武禄(4、5章)、赵宗武(6、7章)、刘志秀(13、15章)、马鋈(14、16、17章)协同执笔。全书初稿经上海工业大学凌松年、宋毓华、杨肇复、高联辉等同志主审。清华大学、吉林工业大学、哈尔滨工业大学、西安交通大学、西北工业大学、华中工学院、合肥工业大学、上海交通大学、浙江大学、华南工学院、重庆大学、贵州工学院以及其它兄弟院校有关教研室参与审阅,对初稿提出了很多极其宝贵的修改意见,编者谨致以最诚挚的谢意。

由于编者的水平所限,书中一定存在着许多缺点和错误,殷切希望使用本书的教师和读者提出批评,意见请寄大连工学院基础部电工学教研室。

编 者

1979年6月

# 目 录

绪论	1
----	---

## 第 一 篇 电 路 原 理

引言	3
第一章 直流电路	4
1-1 电路	4
(一) 电路的组成	4
(二) 电路中有关的名词和术语	7
(三) 电路中的电位	10
1-2 电压源和电流源	11
(一) 电压源	11
(二) 电流源	13
(三) 电压源与电流源的等效变换	14
1-3 克希荷夫定律	16
(一) 克希荷夫电流定律	17
(二) 克希荷夫电压定律	19
(三) 用克希荷夫定律解复杂电路	22
1-4 网孔电流法	25
1-5 节点电压法	30
1-6 叠加原理	35
1-7 Y- $\Delta$ 变换	39
1-8 单口网络	42
(一) 无源单口网络	42
(二) 有源单口网络	43

(三) 输送最大功率的条件	46
1-9 双口网络	49
(一) 无源双口网络	49
(二) 受控电压源和受控电流源	56
(三) 有源双口网络	59
1-10 非线性电阻电路	61
练习题	66
<b>第二章 电压和电流的波形</b>	<b>78</b>
2-1 常见的电压和电流的波形	78
2-2 指数波形的电压和电流	84
2-3 正弦波形的电压和电流	87
(一) 交流电的频率	88
(二) 交流电的有效值	88
(三) 交流电的相位	90
2-4 正弦交流电的表示法	92
(一) 矢量表示法	93
(二) 相量表示法	96
2-5 非正弦周期波形的电压和电流	102
练习题	109
<b>第三章 电路的参数</b>	<b>112</b>
3-1 电路的基本参数	112
3-2 电阻	114
(一) 电阻的物理性质	114
(二) 电阻在电路中的作用	115
3-3 电容	117
(一) 电容的物理性质	117
(二) 电容在电路中的作用	120
3-4 电感	123
(一) 电感的物理性质	123
(二) 电感在电路中的作用	126
3-5 实际的电路元件	129

(一) 实际的电阻元件	129
(二) 实际的电容元件	133
(三) 实际的电感元件	136
3-6 互感	137
(一) 自感与互感	137
(二) 互感线圈的串联和并联	145
(三) 理想变换器	148
练习题	151
<b>第四章 正弦交流电路</b>	<b>156</b>
4-1 串联交流电路	156
4-2 并联交流电路	163
4-3 交流电路的功率	172
(一) 瞬时功率	172
(二) 有功功率、无功功率和视在功率	173
(三) 功率因数的提高	178
4-4 电路的频率响应	181
(一) $RC$ 电路的频率响应	182
(二) 串联谐振	187
(三) 并联谐振	192
4-5 网络理论在交流电路中的扩展	196
(一) 电压源和电流源	197
(二) 网孔电流法	199
(三) 节点电压法	201
(四) 叠加原理	204
(五) 戴维南定理和诺顿定理	205
(六) 双口网络	206
4-6 三相电路	209
(一) 星形接法	210
(二) 三角形接法	216
(三) 不对称的概念	219
(四) 三相电功率	222
练习题	225

<b>第五章 电路的时域响应</b> .....	233
5-1 时域响应的概念.....	233
(一) 稳态和暂态.....	233
(二) 研究时域响应的意义.....	234
(三) 时域响应的分析方法.....	235
(四) 自然响应、强迫响应和全响应.....	236
5-2 $RC$ 电路的时域响应.....	237
(一) $RC$ 电路的自然响应.....	237
(二) $RC$ 电路的阶跃响应.....	240
(三) $RC$ 电路的矩形脉冲响应.....	246
(四) $RC$ 电路的指数响应.....	251
(五) $RC$ 电路的正弦响应.....	254
(六) 加速电容的作用.....	256
5-3 $RL$ 电路的时域响应.....	257
(一) $RL$ 电路的自然响应.....	257
(二) $RL$ 电路的阶跃响应.....	260
5-4 $RCL$ 电路的时域响应.....	263
*5-5 拉普拉斯变换.....	269
(一) 拉普拉斯变换的定义和基本定理.....	269
(二) 简单函数的拉普拉斯变换.....	273
(三) 拉普拉斯反变换.....	275
*5-6 运算阻抗和运算导纳.....	276
*5-7 传递函数.....	280
*5-8 极点和零点.....	285
5-9 电路的对偶原理.....	292
5-10 非电系统的电模拟.....	296
练习题.....	300
<b>练习题选答</b> .....	304
<b>索引(中英名词对照)</b> .....	309

## 绪 论

电工学是一门研究电的自然规律在工程上应用的科学。到了二十世纪接近八十年代的今天，电的应用越来越加广泛，无论是工、农业生产、国防建设和科学技术的各个方面，还是人们日常生活中的衣、食、住、行等等，全都离不了它。究其原因，这是由于电能具有为其它形态的能量所无可比拟的优越性的缘故。

电能是最容易转换的中间形态的能量。它可以很方便地由原子能、水位能、热能、化学能等转换而来，也可以相反地转换成为机械能、光能和热能等。这就使得人们能够从各种能源中获得电能，同时又能将它转换成为其它形态的能量以满足各种不同的需要。

电能能够迅速而且经济地输送到远处，因而使工业建设的布局问题得到了合理的解决。我们可以在储藏有大量动力资源的地方，例如煤矿的坑口和河川的附近兴建火力发电厂和水力发电厂，而使其它工厂尽量接近原料产地，通过长距离的输电线路将电能从发电厂输送到各个工厂中去。

电能以及与其相关联的一些电学量(例如电压或电流)可以用来代表信息，以有线或无线的方式高速而精确地进行传递、控制和处理，为远程通讯和生产自动化提供了可靠的技术基础。特别是电子计算机发明以来，自动化不仅减轻了人们繁重的体力劳动，而且也替代了脑力劳动的某些职能。

我国社会主义革命和社会主义建设新时期的总任务，是要在本世纪内把国家建设成为具有现代农业、现代工业、现代国防和现代科学技术的社会主义强国。不言而喻，学好电工学对实现四个现代化有着极其密切的关系。



学习不是容易的事情,但是“世上无难事,只要肯登攀”。让我们肩负起历史的重任,继承毛主席和周总理等老一辈无产阶级革命家的遗愿,在以华国锋同志为首的党中央的正确领导下,在新长征路上奋勇前进。

# 第一篇 电路原理

## 引言

各种电气设备在正常工作时都有电流通过。电流流通的路径就是电路。电能的输送和转换,信息的传递和处理,一般来说,都是通过电路来实现的。电路理论就是要研究各种电信号作用于电路时所发生的电磁现象及其分析计算方法。虽然它并不分析具体的电气设备,但是都是各种设备中所发生的电磁过程的高度概括和综合。因此,只有掌握好电路的基本理论,才能为今后学习电子技术、电机和自动控制等各篇打下扎实的基础。

一八〇〇年化学电池的发明,给电能为人类服务揭开了序幕。人们对于电的研究,开始从静电迈进到直流电的领域。随着生产的发展和人类对于自然界认识的深化,在十九世纪后期,电能的应用又从直流电演变成以交流电作为主要的形式。进入二十世纪,电能的应用愈加广泛,电压和电流的波形不再局限于直流和交流而扩展到更多种类。电路理论的研究范围也更加广阔,在反馈理论、动态分析、数字电路以及网络拓扑等方面都取得了重大成果。本篇所讨论的,就包括了直流电路、电压和电流的波形、电路参数、正弦交流电路以及电路的时域响应等内容。

在学习本篇时,既要明确地理解电路的基本概念,又要熟练地掌握电路的分析和计算方法。本篇的讨论,是以读者学习过普通物理学和高等数学等基础课程作为依据的,因而希望能在学习过程中,及时适当地复习一下物理学的电磁学和数学的行列式、复数、傅里叶级数、微积分、微分方程、拉普拉斯变换等内容。

# 第一章 直流电路

在物理学中大家已经学过了简单直流电路的分析和计算方法。本章是在物理学的基础上进一步研究复杂直流电路的分析和计算方法，从而使我们能够比较全面地了解和掌握直流电路的普遍规律。

本章首先讨论在分析和计算直流电路时所必须掌握的有关术语、知识和定律，然后讨论复杂电路的几种普遍的计算方法，接着再讨论如何运用网络的某些定理和原理来简化电路的分析和计算。本章主要讨论线性电阻电路，非线性电阻电路只在最后一节中简要地介绍一下。

本章虽然是以直流电路为研究的对象，但是只要把所涉及到的这些理论和方法稍加扩展，即可用来分析交流电路。所以本章的内容也是分析和计算电路的理论基础。

## 1-1 电 路

### (一) 电路的组成

电路或网络，是由许多电气元件或设备为实现能量的输送和转换，或者实现信息的传递和处理而组合后的总称。

常见的各种照明电路和动力电路就是用来输送和转换能量的。例如在图 1-1 这样简单的照明电路中，电池把化学能转换成电能供给灯泡，灯泡却把电能转换成光能作照明之用。凡是将化学能、机械能等非电能量转换成电能的供电设备，我们统称为电源，如干电池，蓄电池和发电机等；凡是将电能转换成热能、光能和机

机械能等非电能量的用电设备,我们统称为负载,如白炽灯、电热炉和电动机等;电源和负载之间的联接导线则起着沟通电路以达到输送和分配电能的作用。对于这些电路来说,一般要求它具有尽可能小的能量损耗和尽可能高的效率。



图 1-1 简单照明电路

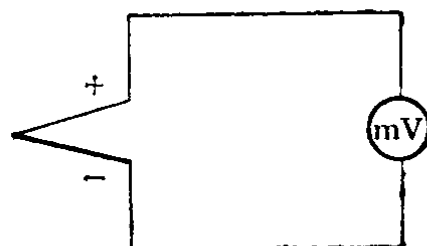


图 1-2 简单测温电路

在电子技术和非电量的量测中,还会遇到另一些以传递和处理信息(例如语言、音乐、文字、图象、温度和压力等)为主要目的的电路。例如在图 1-2 所示的用热电偶量测温度的简单电路中,热电偶将信息(温差)转换成电信号(热电动势),然后通过毫伏表将温度量测出来。这里,热电偶将热能转换成电能,起电源(通常称为信号源)的作用;毫伏表则将电能转换成机械能,使仪表的指针偏转以作出指示,起负载的作用。在这一类电路中,虽然也有能量的输送和转换问题,但其数量很小,一般所关心的是如何准确地传送和处理信息(例如保证信息不失真)等问题。

由此可见,电源、负载和联接导线是组成一个完整电路的三个最基本的部分。在实际的电路中,除了这三部分以外,还常常根据实际的需要增添了一些辅助设备,例如开闭电路用的控制电器(如刀开关)和保障安全用电的保护装置(如熔断器)等等。对于电源来说,由负载、联接导线、开关以及熔断器所组成的电流通路叫做外电路,电源内部的电流通路叫做内电路。

电源和负载等电气设备在工作时,电流、电压和功率都有一定的限额,这些限额是用来表示它们的正常工作条件和工作能力的,

称为电气设备的额定值。

额定电流是电气设备在一定的环境温度下长期连续工作时或在规定的时间内，所容许通过而不会引起设备损坏的最大电流。

额定电压是电气设备正常工作时的端电压。

额定功率是电气设备正常工作时的输出功率或输入功率。

上述这些额定值通常在铭牌上标出，亦可从产品目录中查出，使用时务必遵守这些规定。如果超过这些额定值，将会引起电气设备的损坏或者降低使用寿命。如果低于这些额定值，某些电气设备也会引起损坏或降低使用寿命，或者不能发挥正常的效能。

以上提到的电路只有一个闭合路径，这种电路称为无分支电路。当电路中的电流是不随时间而变化的恒定电流即直流电流时，这种电路称为直流电路。关于直流无分支电路的计算方法在物理学中已经学过，现在通过一个例题来复习一下。

**例 1-1** 某负载的电阻  $R_l = 10.5$  欧，由电动势  $E = 110$  伏、内电阻  $R_0 = 0.3$  欧的直流电源供电(图 1-3)。联接导线的电阻  $R_w = 0.2$  欧。求：(1)电路中的工作电流；(2)负载和电源的电压；(3)负载消耗的电功率、电源产生的电功率和输出的电功率；(4)在负载端和电源端短路时电源的电流和电压。

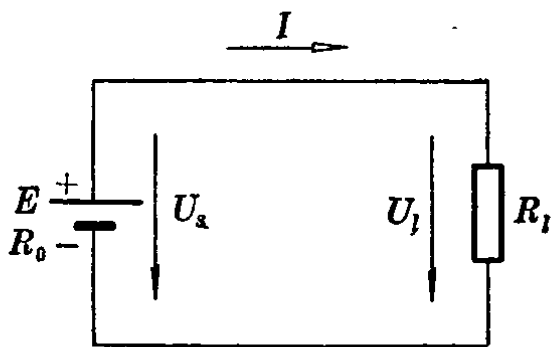


图 1-3 例 1-1 的电路

**解：**(1)根据物理学中的全电路欧姆定律，电路中的工作电流

$$I = \frac{E}{R_0 + R_w + R_l} = \frac{110}{0.3 + 0.2 + 10.5} = 10 \text{ A}$$

(2)根据一段无源电路的欧姆定律，负载电压

$$U_l = R_l I = 10.5 \times 10 = 105 \text{ V}$$

电源电压

$$U_s = (R_w + R_l) I = (0.2 + 10.5) \times 10 = 107 \text{ V}$$

或

$$U_s = E - R_0 I = 110 - 0.3 \times 10 = 107 \text{ V}$$

(3) 负载消耗的电功率

$$P_l = U_l I = 105 \times 10 = 1050 \text{ W}$$

电源产生的电功率

$$P_E = EI = 110 \times 10 = 1100 \text{ W}$$

电源输出的电功率

$$P_s = U_s I = 107 \times 10 = 1070 \text{ W}$$

(4) 当负载两端或电源两端被电阻小到可以忽略不计的导线接通时, 称为电源的短路。当短路发生在负载端时, 短路电流

$$I_{ss} = \frac{E}{R_0 + R_w} = \frac{110}{0.3 + 0.2} = 220 \text{ A}$$

这时的电源电压

$$U_{ss} = R_w I = 0.2 \times 220 = 44 \text{ V}$$

当短路发生在电源端时, 短路电流

$$I_{ss} = \frac{E}{R_0} = \frac{110}{0.3} = 367 \text{ A}$$

这时的电源电压

$$U_{ss} = 0$$

可见, 短路电流比正常工作电流大得多。因此, 通常都必须在电路中接入熔断器等短路保护装置, 以防止因短路而造成电源或其它设备的损坏。

## (二) 电路中有关的名词和术语

实际工作中常常会遇到比无分支电路复杂的电路, 那些电路有许多分支, 例如图 1-4, 这种电路称为有分支电路。电路中的每一条分支都是电路的一部分, 称为支路。每一条支路中通过的是

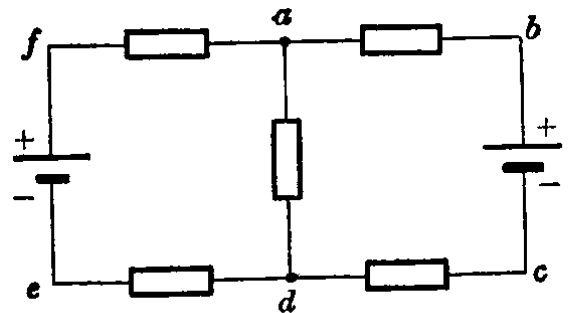


图 1-4 有分支电路

同一电流。在图 1-4 中有  $abcd$ 、 $ad$  和  $afed$  三条支路, 其中,  $abcd$  和  $afed$  两条支路内含有电源, 称为有源支路; 而  $ad$  支路是不含电源

的，称为无源支路。电路中三条或三条以上支路的联接点称为节点。图 1-4 中有  $a$  和  $d$  两个节点。支路就是联接在两个节点之间的。电路中任何一条闭合的路径称为回路。图 1-4 中有  $abcd$ 、 $adefa$  和  $abcdefa$  三个回路。无分支回路就是只有一个回路的电路。电路中的每一个网格，亦即未被其它支路分割的最简单的回路，称为网孔，图 1-4 中有  $abcd$  和  $adefa$  两个网孔。

对任何实际的电路进行分析计算时，常常将它们抽象成由一些电路元件所组合的电路模型来表示，例如图 1-1 电路中的负载和联接导线都可以用电阻元件来表示，电路可画成如图 1-5 所示。由于联接导线的电阻已抽象成集中的电阻元件，因此，图中各电阻之间及电阻与电源之间的联接线中就不必再计及其电阻了。今后我们所讨论的电路都是这种电路模型。

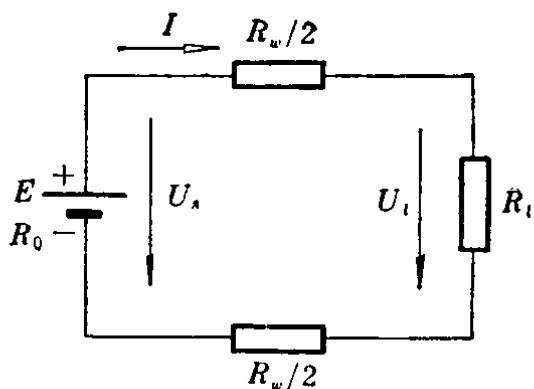


图 1-5 电路模型

电阻的倒数称为电导，即

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

式中，电阻  $R$  的单位用欧姆( $\Omega$ )；电导  $G$  的单位是西门子，简称西(S)。

如果电阻或电导是恒定不变的常数，其两端的电压和通过的电流之间是成正比的直线关系，也就是说，符合欧姆定律，即

$$R = \frac{U}{I} \quad (1-2)$$

或

$$G = \frac{I}{U} \quad (1-3)$$

这样的电阻或电导称为线性电阻或线性电导。由线性电阻或电导所组成的电路称为线性电路。若电路中包含有非线性电阻或电导,则这种电路称为非线性电路。

无分支电路,或者虽然是有分支电路,但是可以通过电阻或电导的串并联简化法将其简化成无分支电路的都称为简单电路,否则就称为复杂电路。本章主要研究复杂电路,简单电路的计算方法在物理中已经学过。下面通过一个例题来复习和讨论一下电阻和电导的串联和并联问题。

**例 1-2** 有两个电阻,  $R_1 = 4$  欧,  $R_2 = 10$  欧。(1)求它们的电导;(2)推导出两者串联时等效电导的公式,并算出其数值;(3)推导出并联时等效电导的公式,并算出其数值。

**解:** (1) 每个电阻的电导

$$G_1 = \frac{1}{R_1} = \frac{1}{4} = 0.25 \text{ S}$$

$$G_2 = \frac{1}{R_2} = \frac{1}{10} = 0.10 \text{ S}$$

(2) 串联时

从物理学中得知,串联等效电阻的公式为

$$R = R_1 + R_2$$

将式(1-1)代入,便得到了串联等效电导的公式:

$$\frac{1}{G} = \frac{1}{G_1} + \frac{1}{G_2}$$

因此

$$G = \frac{G_1 G_2}{G_1 + G_2} = \frac{0.25 \times 0.10}{0.25 + 0.10} = 0.0714 \text{ S}$$

(3) 并联时

从物理学中得知,并联等效电阻的公式为

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$

将式(1-1)代入,便得到了并联等效电导的公式:

$$G = G_1 + G_2$$

将数据代入得



$$G = G_1 + G_2 = 0.25 + 0.10 = 0.35 \text{ S}$$

可见电导串联时的公式与电阻并联时的公式形式上是相同的,电导并联时的公式与电阻串联时的公式形式上是相同的。

### (三) 电路中的电位

在分析和计算电路时,特别是在电子技术中,常常将电路中的某一点选作参考点,并将参考点的电位规定为零。于是电路中其它任何一点与参考点之间的电压便是该点的电位。例如在图 1-6 所示的电路中,若选择  $d$  点为参考点,则

$$\varphi_d = 0$$

$$\varphi_a = U_{ad}$$

$$\varphi_b = U_{bd}$$

$$\varphi_c = U_{cd}$$

$$\varphi_e = U_{ed}$$

电路一定时,电路中各点之间的电压是一定的,而各点的电位则是相对的,视参考点而定。只有在参考点选定以后,电路中各点的电位才有确定的数值,这就是所谓的电位的单值性。

原则上,参考点可以任意选择,但为统一起见,工程上常常选大地为参考点。机壳需要接地的设备,就可以把机壳作为参考点,凡与机壳直接相联接的各点电位均为零。有些电子设备,机壳虽不一定接地,但是许多元件需要接到某一公共线上,通常就把这一公共线选作参考点,称之为“地”,在电路图中用符号“ $\perp$ ”表示。

在象图 1-6 这样的电子电路中,由于电源的一端接“地”,电位为零,若电源的内电阻忽略不计,则电源的另一端的电位为一固定的数值,即等于电源的电动势。为了作图的简便和图面的清晰,习惯上常常在电路图中不画出电源来,而在电源非接“地”的一端,注明其电位的数值(图 1-7)。