

沈世锐 编

电路 与 电机

电工学及电子学(I)

高等教育出版社

本书是高等学校工科电工教材编审委员会拟定编写的教学参考书之一。全书分为两册,即《电路和电机——电工学及电子学(I)》、《电子技术——电工学及电子学(II)》。

本书既可作为高等工科院校某些对电的要求较高的非电专业作为 200~250 学时电路、电机和电子技术的试用教材,又可作为一般非电专业的教学参考书,还可供电视大学师生及其他业余自学者及工程技术人员参考。

本书第 I 册《电路和电机》共十七章,分上、下篇。上篇为电路,下篇为电机。全书叙述详尽,例题和习题很多,便于教学。

本书责任编辑 王缉惠

电路与电机

——电工学及电子学(I)

沈世锐编

*

高等教育出版社出版

新华书店北京发行所发行

北京印刷三厂印装

*

开本 787×1092 1/16 印张 38.25 字数 875,000

1986年1月第1版 1986年2月第1次印刷

印数 00,001—6,430

书号 15010·0669 定价 6.50 元

前 言

本书是教育部 1980 年在成都召开的高等学校工科电工教材编审委员会扩大会议拟定编写的教学参考书之一。它可作为一般非电专业学习电路、电机和电子技术的教学参考书,亦可作为轻工、化工、石油等自动化专业及计算机、精密机械、仪器仪表、工程物理、物探等专业 200~250 学时电路、电机和电子技术的试用教材。

全书分两册,即《电工学及电子学》I 和 II,其中第 I 册为《电路与电机》,由沈世锐编写,第 II 册为《电子技术》由刘学宏、刘蕴陶合编。

第 I 册共十七章,分上、下两篇。上篇电路,包括电路的基本概念和基本定律、电路的简化和等效变换、网络分析和网络定理、含受控源电路的分析、动态电路、正弦交流电的基本概念、稳态交流电路的分析、三相交流电路、正弦激励的频率响应及谐振、周期性非正弦交流电路及双口网络等十一章。下篇为电机,包括磁路、变压器、异步电机、同步电机、直流电机、低压电器和异步电机的继电-接触控制等六章。

上述各章内容与一般电工学教材相比,在电路部分增加了含受控源电路的分析、正弦激励的频率响应和双口网络、对动态电路采用零输入响应和零状态响应的方法分析全响应等,在电机部分,对等效电路和相量分析方法及常用微型电机的基本原理作了较详细的介绍。

编写本书时,力求作到内容由浅入深、文字通顺易读、章节前后连贯,对基本概念和重点、难点的论述解释详细并用例题配合加以说明。

本书第 I 册编入例题计约 180 个、练习题约 410 个、选作习题约 150 个。其中练习题紧密配合学习内容,这些练习题对掌握书中基本内容和培养计算能力有较大帮助,计算题均附有答案,可供自学参考。选作习题一般难度较大,综合性较强,完成这些习题,学习水平会有较大的提高。

本书目录中带“*”号的节次系加深加宽内容,使用者可根据专业的不同要求选学。

如用本书第 I 册作教材,电路部分用 50~65 学时可授完,电机部分用 25~35 学时可授完。若包括实验,共需 100~120 学时。

本书第 I 册承华东化工学院电工教研室张大恒教授、王春田副教授及张南副教授仔细审阅,并提出许多宝贵意见;北京化工学院电工教研室吕砚山副教授和洪纯一同志对本书也提了不少可贵的建议。

本书第 I 册初稿还经北京工业学院电工教研室黄孝和副教授及王宏甫、张振玲、李学志同志先后在 10 余个班级试用,并提出许多改进意见;北京工业学院附属工厂高级工程师熊威廉同志

对本书第十七章也提过一些修改意见。

编者谨在此对以上同志表示诚挚的谢意。

限于编者的水平,本书难免存在不少缺点和错误,恳请读者批评指正。

编者

1984. 12

目 录

上篇 电 路

第一章 电路的基本概念和基本定律.....1

1-1 引言.....1

一、电路和电路的组成.....1

二、模型化的概念.....1

三、电路的功能.....2

四、电路分析.....2

1-2 电路的基本物理量及其参考方向.....3

一、电流.....3

二、电位和电压.....4

三、电动势.....7

四、功和功率.....8

1-3 电工常用单位.....11

1-4 电阻元件.....12

一、电阻的线性和非线性.....12

二、电阻的正和负.....14

1-5 电源元件.....16

一、电压源.....16

二、电流源.....17

1-6 电路的状态.....18

一、开路.....19

二、短路.....19

三、带负载.....20

1-7 克希荷夫定律.....24

一、引言.....24

二、克希荷夫电流定律——KCL.....24

三、克希荷夫电压定律——KVL.....26

第二章 电路的简化和等效变换.....33

2-1 引言.....33

2-2 电阻串并联网络的等效变换.....33

一、串联电路的等效变换及分压关系.....33

二、并联电路的等效变换及分流关系.....35

三、串并联电路的等效变换.....37

2-3 星形和三角形网络的等效变换.....39

一、将三角形变换为星形.....40

二、将星形变换为三角形.....40

2-4 入端电阻的求法.....42

2-5 利用电位概念简化电路.....45

一、利用电位概念简化电路图的绘制.....45

二、利用等电位点的性质简化电路计算.....45

2-6 电压源与电流源的简化和等效变换.....50

一、理想电源的简化.....50

二、电压源与电流源的等效变换.....51

第三章 网络分析和网络定理.....57

3-1 支路电流法.....57

3-2 网孔电流法.....61

3-3 节点电位法.....65

3-4 线性网络的基本性质和定理.....71

一、比例性.....71

二、叠加性.....73

三、互易性.....77

3-5 等效电源定理.....82

一、戴维南定理.....82

二、诺顿定理.....87

3-6 对偶性概念.....91

第四章 含受控源电路的分析.....96

4-1 引言.....96

4-2 受控源的基本概念.....96

一、分类.....96

二、参数.....98

三、性质.....99

4-3 含受控源电路的基本运算.....100

一、要点	100
二、简单受控源电路的计算和举例	100
4-4 含受控源电路的等效变换	102
一、受控源的等效变换	103
二、戴维南等效电路及诺顿等效电路	106
*4-5 含受控源电路的网络分析	110
一、网孔分析法	110
二、节点分析法	111
三、叠加法	112
第五章 动态电路	113
5-1 动态元件	118
一、电容元件	118
二、电感元件	123
三、实际的电容器和电感器	128
5-2 分析动态电路的任务	130
一、产生瞬变过程的原因及研究的意义	131
二、激励与响应	131
三、研究瞬变过程的具体任务	132
5-3 换路定则及初始值和稳态值的确定	133
一、换路定则	133
二、初始值的确定	133
三、稳态值的确定	134
5-4 一阶电路的零输入响应	137
一、RC电路的零输入响应	137
二、时间常数 τ	139
三、RC电路的能量平衡关系	143
四、RL电路的零输入响应	145
5-5 一阶电路的零状态响应	149
一、RC电路的零状态响应	149
二、RL电路的零状态响应	152
5-6 一阶电路的全响应	156
一、由零输入响应和零状态响应计算全响应	156
二、由稳态及暂态计算全响应	159
三、三要素法	161
*5-7 一阶电路的正弦响应	165
5-8 阶跃函数和阶跃响应	168
一、阶跃函数及单位阶跃函数	168
二、阶跃响应及单位阶跃响应	171

5-9 脉冲响应	174
一、单脉冲响应	174
二、复脉冲响应	179
*5-10 强迫跳变	188
一、出现强迫跳变的原因	188
二、强迫跳变的初值计算	188
5-11 二阶电路解法初论	193
一、零输入响应式	193
二、方程式讨论之一: $R > 2\sqrt{\frac{L}{C}}$	195
三、方程式讨论之二: $R = 2\sqrt{\frac{L}{C}}$	198
四、方程式讨论之三: $R < 2\sqrt{\frac{L}{C}}$	199
五、经典法求解动态电路的一般法则	208
第六章 正弦交流电的基本概念	214
6-1 引言	214
6-2 正弦交流电的三要素	215
一、变化的快慢	215
二、变化的起点和相位	216
三、交流电量的大小	220
6-3 交流电的有效值	221
6-4 正弦量的相量表示法	223
一、正弦量几种表示方法及其比较	223
二、复数	224
三、用复数表示正弦量——相量法	226
6-5 正弦交流电路中的电阻元件	229
一、电压与电流关系	229
二、功率	230
6-6 正弦交流电路中的电容元件	232
一、电压和电流关系	232
二、功率	235
6-7 正弦交流电路中的电感元件	237
一、电压与电流关系	237
二、功率	239
第七章 稳态正弦交流电路的分析	243
7-1 克希荷夫定律的相量式	243
7-2 欧姆定律相量式 阻抗及导纳	244
一、单参数交流电路的欧姆定律及阻抗	244
二、多参数交流电路的欧姆定律及阻抗	244

三、导纳	246
四、复阻抗与复导纳的等效变换	249
7-3 简单交流电路的计算	252
一、阻抗串联电路	252
二、阻抗并联电路	254
三、阻抗的串并联电路	259
四、相量分析法的一般解题步骤	262
7-4 复杂交流网络的分析	265
7-5 交流电路的功率	271
一、有功功率和功率因数	271
二、视在功率,无功功率和功率三角形	274
三、复功率	277
四、功率因数的提高	279
五、负载获得最大传输功率的条件	281
第八章 三相交流电	288
8-1 引言	288
8-2 三相对称电动势的产生	288
8-3 三相电路的连接	290
一、星形连接	290
二、三角形连接	291
8-4 三相电路中相与线间各量关系	291
一、若干术语的意义	291
二、相电压与线电压、相电流与线电流的关系	292
8-5 负载与三相电源的连接及计算	294
一、负载为单个的单相负载	295
二、负载为多个单相负载	295
三、对称三相负载	299
8-6 三相电路的功率	301
8-7 两相交流电源的获得	302
8-8 安全用电常识	303
一、电流对人体的危害	303
二、触电情况	303
三、预防触电的基本措施	304
第九章 正弦激励的频率响应及谐振	309
9-1 RC 电路的频率特性	309
一、 RC 高通电路	309
二、 RC 低通电路	311
9-2 RLC 串联电路的频率响应——串联谐振	315

一、阻抗随频率的变化	315
二、串联谐振和能量关系	316
三、品质因数	318
四、串联谐振的主要特点	319
五、频率特性	320
六、通频带	322
9-3 RLC 并联电路的频率响应·并联谐振	325
一、导纳随频率的变化	325
二、并联谐振	326
三、品质因数	326
四、并联谐振的特点	326
五、频率特性	327
9-4 电感元件与电容器的并联	329
一、谐振条件和谐振频率	329
二、品质因数	330
三、主要特点	330
四、频率特性	331
第十章 周期性非正弦电路	335
10-1 引言	335
10-2 周期性非正弦量的分解	335
一、不同频率正弦量的合成	335
二、周期性非正弦量分解成三角级数	336
三、几种常见非正弦波形的谐波分析	337
四、频谱分析的概念	339
10-3 周期性非正弦量的有效值、平均值及功率	341
一、有效值	341
二、平均值	342
三、功率	343
10-4 周期性非正弦电路的计算	346
*10-5 滤波器的概念	350
一、低通滤波器	350
二、高通滤波器	351
三、谐振滤波器	351
第十一章 双口网络	355
11-1 引言	355
11-2 双口网络的基本方程组	356
一、导纳参数	357
二、阻抗参数	363

三、混合参数	369	二、已知网络阻抗参数 Z 求等效T形电路的参数	382
四、传输参数	373	三、已知网络混合参数 H , 求 Π 形和T形等效电路的参数	383
11-3 双口网络参数间的关系	377	四、已知网络传输参数 T , 求 Π 形和T形等效电路的参数	384
一、参数的独立数	377	五、 Π 形和T形电路的等效变换	385
二、网络参数间的等效互换	379		
*11-4 参数已知的网络等效互换	381		
一、已知网络导纳参数 Y , 求等效 Π 形电路参数	382		

下篇 电 机

第十二章 磁路	392	13-4 变压器的相量图和等效电路	448
12-1 引言·基本物理量	392	一、相量图	448
12-2 磁性材料	393	二、等效电路	449
一、磁性材料的磁性	393	13-5 变压器使用中的几个问题	454
二、常用磁性材料的分类和用途	397	一、额定值	454
三、铁磁材料的损耗	399	二、变压器的同名端和绕组的连接	456
12-3 磁路的组成和磁路定律	404	*三、干扰与抗干扰措施	459
一、磁路的组成	404	13-6 常用小型变压器	462
二、磁路计算的基本定律	405	一、电源变压器	462
三、有关磁路的几个问题	410	二、自耦变压器	463
12-4 恒定磁通的磁路计算	414	*三、仪用互感器	465
一、已知磁通求磁动势	415	*四、音频变压器	467
二、已知磁动势求磁通	418	*五、脉冲变压器	469
三、含气隙磁路的简化计算	421	第十四章 异步电机	473
12-5 电磁铁	424	14-1 引言	473
一、简介	424	14-2 异步电动机转动原理及旋转磁场的产生	473
二、电磁吸力及直流电磁铁	424	一、转动原理及转差率	473
*三、交流电磁铁	427	二、三相两极旋转磁场的产生	475
第十三章 变压器	434	三、磁场旋转方向的改变	477
13-1 变压器的类别和构造	434	四、旋转磁场的极对数和转速之间的关系	477
一、变压器的类别	434	14-3 异步电动机的构造	479
二、变压器的基本构造	434	一、定子	479
13-2 变压器的工作原理	435	二、转子	481
一、变压器空载状态的分析	435	14-4 异步电动机的铭牌和技术数据	482
二、变压器负载状态的分析	441	一、铭牌	482
13-3 变压器的主要功能	444	二、型号及额定值	483
一、变电压	444	三、技术数据举例	485
二、变电流	445	14-5 异步电动机定子和转子各电量	486
三、变阻抗	445		

一、定子电路中各电量的关系	486
二、转子电路中各电量的关系	487
三、定子和转子各量的相互关系	492
14-6 转矩及转矩特性	494
一、转矩的平衡关系	494
二、转矩基本方程	494
三、转矩特性	497
四、对转矩曲线的几点说明	498
五、机械特性的实用公式	501
14-7 异步电动机的起动	505
一、直接起动法	505
二、降压起动法	506
三、转子加电阻起动法	508
*14-8 异步电动机的调速	510
一、变频调速	510
二、变极调速	510
三、变转差率调速	511
14-9 异步电动机的制动	511
一、能耗制动	511
二、反接制动	512
14-10 异步电动机的效率和功率因数	513
一、效率	513
二、功率因数	514
三、异步电动机功率因数的改善	514
14-11 单相异步电动机	516
一、工作原理	516
二、各种类型的单相异步电动机	519
14-12 两相交流伺服电动机	522
一、引言	522
二、两相交流伺服电动机的结构	523
三、旋转磁场的形成	524
四、转矩特性和机械特性	528
五、伺服电动机的基本运行特点	528
六、控制方法	530
七、常用两相交流伺服电动机的技术数据	531
*14-13 两相异步测速发电机	532
一、引言	532
二、工作原理	533
第十五章 同步电动机	536
15-1 同步电动机概述	536

一、引言	536
二、起动问题	536
15-2 反应式同步电动机	537
一、结构	537
二、工作原理	538
15-3 永磁式同步电动机	540
一、结构	540
二、工作原理	542
15-4 磁滞式同步电动机	543
一、结构	543
二、工作原理	544
三、磁滞电动机的特点	546
15-5 步进电动机	547
一、引言	547
二、反应式步进电动机工作原理	548
三、步进电动机的技术性能	553
*第十六章 直流电机	555
16-1 引言	555
16-2 直流电机的基本结构	555
一、定子	555
二、电枢	556
16-3 直流伺服电动机的基本原理	556
一、直流伺服电动机的转动原理	556
二、电磁转矩	557
三、电枢电动势	558
四、机械功率	559
16-4 直流伺服电动机的平衡方程式	559
16-5 直流伺服电动机的控制方法和性能	560
一、电枢控制	561
二、磁场控制	563
16-6 直流伺服电动机的额定值和型号	565
一、额定值	565
二、型号	566
16-7 直流测速发电机简介	567
第十七章 低压电器和异步电动机的继电-接触控制	570
17-1 引言	570

17-2 手控电器.....	570	四、互锁环节及正转反转控制线路.....	582
一、刀开关.....	570	17-5 异步电动机继电-接触控制的基本	
二、按钮开关.....	571	线路.....	583
三、转换开关.....	572	一、多点控制.....	583
17-3 自控电器.....	573	二、次序控制.....	584
一、接触器.....	573	三、时间控制.....	585
二、继电器.....	574	四、行程控制.....	585
17-4 异步电动机继电-接触控制电路		17-6 阅读继电-接触控制线路的要点和	
的基本环节.....	580	举例.....	587
一、点动环节.....	580	一、读图要点.....	587
二、自锁环节及单向长动(起停)控制线路.....	580	二、读图举例.....	588
三、具有短路保护和过载保护的环节.....	581		

* 为选学内容。

上篇 电 路

第一章 电路的基本概念和基本定律

1-1 引 言

一、电路和电路的组成

电流流通的路径叫电路。在讨论电路的普遍规律或复杂的电路问题时,通常把电路称作“网络”。网络是电路的泛称,它具有更为普遍的含义。在讨论比较简单或具体的电路问题时,常用“电路”。“电路”和“网络”两词意义相近,有时通用。

最简单的电路,一般是由电源,负载(用电设备)、联接导线和控制设备等四部分组成。它们通称为电路元件。所以电路就是电路元件组合的总体。图 1-1-1a 所示的例子,即是一个基本电路的示意图①。当开关 K 接通时,电流沿着电源—开关(控制设备)—灯泡(负载)—导线—电源流通,从而形成电路。

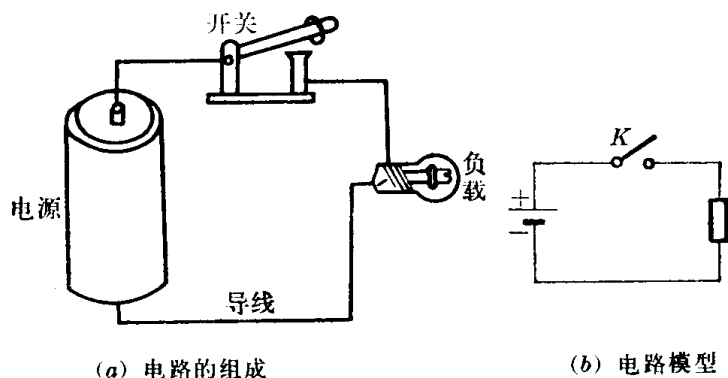


图 1-1-1 基本电路图

二、模型化的概念

实际的电路由实际的电路元件组成,而实际电路元件的性能往往很复杂。例如一个很简单的白炽灯泡,它有具体的结构和材料,除有电阻特性外,当电流通过它时还会产生磁场,所以它还具有电感性质。随着电子技术的飞跃发展,新的电器元件不断涌现,它们的实际现象和电磁特性比白炽灯泡更加复杂,且不利于用数学方法描述。为了分析和计算电路方便起见,在一定条件下,我们常采用模型化的方法来表征实际电路元件。

模型化就是突出实际电路元件的主要电磁特性,忽略其次要因素,用理想的模型、近似地反映实际元件。例如白炽灯,不考虑它的具体结构和材料等问题,在电感很小、电流变化不大的条

① 电路中白炽灯还常用符号  表示。

作下,略去它的电感性,只保留它的主要特性,即电阻特性。因而可以把它看作是一个理想的纯电阻模型。一个实际的新电池,当我们忽略它的具体结构及内电阻作用等问题后,就可用一个电压恒定的理想电源来表示。连接导线在导体较短的情况下,其电阻可忽略不计,因而可视为无电阻的理想导线等等。为简便起见,今后理想二字,常省略不写。

模型化,是工程技术中常用来分析实际问题的一种科学方法,它把实物抽象成模型,以对模型的研究代替对实物的研究,用对模型研究的结果去指导解决实际问题。

本书所要讨论的电路,就是将实际元件模型化了的电路。在这些电路中所发生的物理现象及过程比实际电路简单、明了,从而为用简便的数学方法来研究复杂电路的规律,进行电路分析,创造了条件。

三、电路的功能

电路的功能很多,主要有两个,其一是通过电路进行能量的传送和转换。在电力系统中,电源(例如发电机、电池等)将其它形式的能量转换为电能;导线传送能量;负载(如电灯、电热器、电动机等)将电能转换成其它形式的能量,如图 1-1-1 所示。

电路的第二个功能是进行信号的传递和处理,即通过电路把输入的信号经过传送、转换或加工处理成为所需要的输出信号。如自动控制设备、电子计算机、电视机、收音机及电话等的电路。现以图 1-1-2 所示电话系统为例,其中话筒将语言转换成电信号,它是一种信号源,导线是传递电信号的通道,耳机接收信号,它是信息的终端设备。随着电子技术的不断发展,电路对信号处理的作用愈来愈多,它包括滤波、放大、存贮、运算等多种过程,但是信号的传递和处理,仍是通过电压和电流的变化来实现的,所以从本质上看,仍是能量的转换。与前一功能相比,它们仅是在形式上、要求上、变换的过程上有所不同而已。

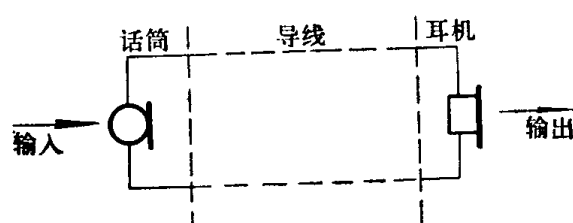


图 1-1-2 传递信号的电路

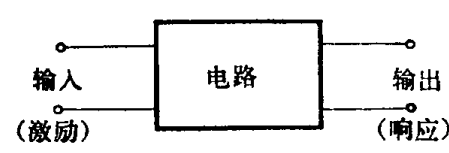


图 1-1-3 电路的激励和响应

在上述两种功能中,电源或信号源的电压或电流是电路的输入,它推动电路工作,故又称为激励;负载或终端装置的电压、电流是电路的输出,又称响应。于是电路的功能也可用图 1-1-3 所示框图表示。

四、电路分析

本课程的电路部分,主要是学习电路分析。所谓电路分析,就是在已知电路结构、元件参数的情况下,计算电路激励与响应之间的定量关系;分析电路在实现其功能的过程中的各种现象、状态及性能。为此,必须学习电路的基本概念和基本理论,掌握好电路的一般规律,这就是本章的任务。

1-2 电路的基本物理量及其参考方向

电路的能量转换和信息处理,通常都是通过电路的基本物理量,如电流、电压及电动势等量来计算的,这些物理量虽然已在物理学里学过,但它们是分析电路的基础,所以还需在此作一简要的回顾。

一、电流

在内部没有电场的金属导体中,自由电子仅作不规则的热运动,但是在电场力作用下,自由电子将形成有规则的定向运动,这种电子的有规则定向运动即形成电流。电流的大小,用电流强度来衡量。它定义为:

$$i = \frac{dq}{dt} \quad (1-2-1)$$

式中 q 是通过导体横截面的电荷量。

电流强度简称电流。“电流”一词既代表一种物理现象,又代表一个物理量。

在国际单位制(SI)里,电流的单位是安培,简称安,用大写字母 A 表示。

尽管电流的大小不能凭肉眼直接观察到,但可通过它所产生的效应,如光效应、热效应和电磁效应等间接得知。日常生活所用 40W 电灯的电流为 0.182A; 人体对电流有感觉的最小值约 0.005A, 通过人体的电流超过 0.05A 就有致命危险。

电流种类很多。大小和方向不随时间变化的电流叫做恒定电流,简称直流,用符号 DC 表示,如图 1-2-1a 所示。大小和方向随时间变化且平均值为零的电流叫交变电流,简称交流^①,用字母 AC 表示,如图 1-2-1b 和 c 所示。其中随时间按正弦规律变化的交流电叫正弦交流电,如图

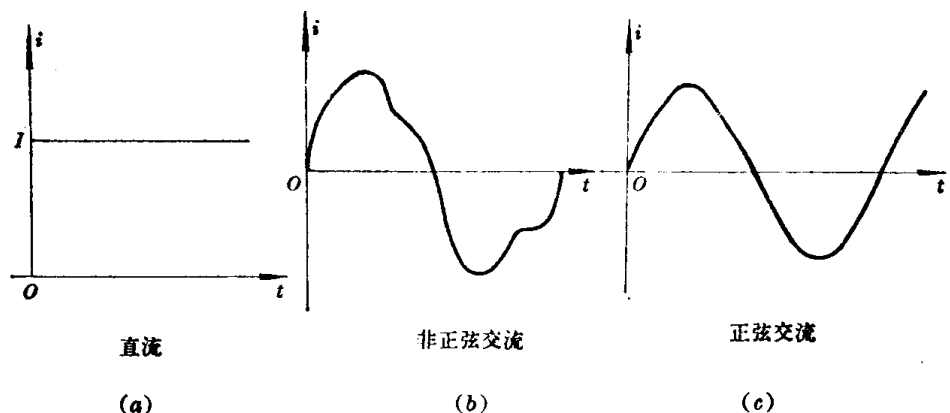


图 1-2-1 电流的种类

1-2-1c 所示。由于正弦交流电应用十分广泛,本书中凡未特殊指明的交流电,都是指正弦交流电。此外,还有按指数规律变化、按脉冲形式出现的各种不同形状的交流电,不一一列举。

由式(1-2-1)可知,当通过导体断面的总电荷量 q 随时间 t 增加时,电流 i 为正值;当 q 随时

^① 交流电流 i 的平均值即 $I_0 = \frac{1}{T} \int_0^T i d(\omega t)$, 其中 T 为周期, ω 为角频率。

间 t 减少时, 电流 i 为负值。电流可正可负, 它是一个既有大小又有方向的代数量。

电流的实际方向, 在物理中规定为正电荷运动的方向, 或负电荷运动的反方向。实际方向是客观存在不能任意改变的。“实际”二字在电工里常省略不写。电流在导体中流动有两种可能的方向, 如图 1-2-2 所示, 虚线箭头表示电流实际方向。但在具体电路里, 除简单电路中电流的实际方向比较易于通过直观确定外, 对于一些复杂电路的电流方向, 往往难于预先确定。例如图 1-2-3

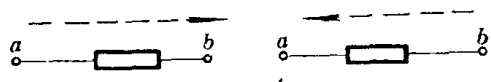


图 1-2-2 电流的两种可能的实际方向
(虚箭头表示电流的实际方向)

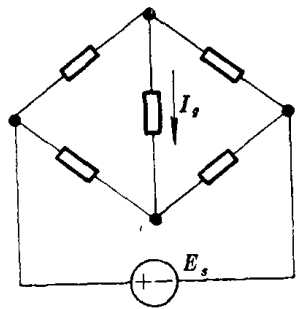
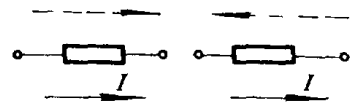


图 1-2-3 电桥电路

所示电路的电流 I_s , 其实际方向就很难预先得知。特别是对交变电流而言, 电流的实际方向是随时间不断往复变化的。为了分析电路的需要, 我们引入了电流参考方向的概念。对电流两种可能的方向, 任意主观选择其中一个方向作为参考标准, 我们把它叫做参考方向(如同数学分析中坐标系的正方向)。当电流的实际方向与参考方向相符时, 此电流定为正值; 相反时, 定为负值。如图 1-2-4a 电流为正, 图 1-2-4b 电流为负。另一方面因参考方向不同, 同一电流有两种不同的表示法, 如实际由电阻左端流向右端、电流强度为 3A 的电流, 可有图 1-2-5 的两种表示法。在未选



(a) I 为正值 (b) I 为负值
图 1-2-4 参考方向
(实线箭头表示参考方向, 虚线箭头表示实际方向。)

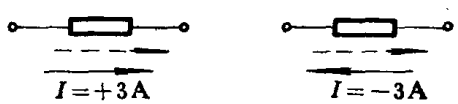


图 1-2-5 同一电流的两种表示法

定参考方向之前, 讨论电流的正负是没有意义的, 只有电流的参考方向选定之后, 才能按照实际方向与参考方向是否相同而确定电流的正、负值或根据电流的正、负值确定电流的实际方向。

今后在电路图中, 用实线箭头标注出的电流方向都是指参考方向。参考方向一经选定, 在计算过程中不得更改。

参考方向又称假定正方向, 简称正方向。

二、电位和电压

1. 电位

在重力场中, 每一个物体在任一点都有一定的位能(物理学中叫势能)。电路从本质上看是一个有限范围的电场, 在电路内的电场中, 每一电荷 q 都具有一定的电位能 W 。我们定义电位

V (或 φ) 表征电场中任一点的特征:

$$V = \frac{dW}{dq}$$

它在数值上等于单位正电荷在电场中某一点所具有的电位能, 即等于电场力将单位正电荷从该点沿任意路径移到参考点所做的功(电位在物理学中称为电势)。

电位是一个相对物理量, 即各点电位的极性和大小与所选取的参考点有关。参考点不同, 各点电位相应不同; 但是参考点一经选定, 则该电路中各电位就唯一确定了, 即电位具有单值性。不指定参考点, 讨论电位就没有意义。

参考点的电位常规定为零, 所以参考点又叫零电位点。原则上, 零电位点可以任意选定, 但习惯上取大地为零电位点, 用符号 $\perp$ 表示。认为大地的电位为零, 这是因为大地容纳电荷的能力很大, 它的电位很稳定, 不会因局部电荷量的变化而影响大地电位的高低。在电子线路中常取公共点或机壳作为电位的参考点, 用符号 $\perp$ 表示。对于某些设备, 虽然不需接地, 但在分析时, 为了方便起见, 可以把它们之中元件汇集的公共端点规定为零电位点。

电位虽是对某一点而言, 但实质上还是指两点间的电位之差, 只是其中一个参考点电位预先指定为零而已。

2. 电压

电路中任意两点电位之差称为电位差, 又叫电压。它是度量电场力做功能力的物理量。在数值上, 它等于单位正电荷在电场力作用下, 从一点移到另一点所做的功。它的实际方向是电场力移动正电荷作正功所循的方向, 因此它的实际方向, 规定由高电位到低电位, 即电位能降低的方向, 如图 1-2-6 所示。图中电压和电流的实际方向都用虚线箭头标出, 即已知正电荷由 a 点移到 b 点, 这样, 电场力做了正功, 正电荷所具有的电位能减少。可见, 这里 a 点电位高, b 点电位低。于是电压

$$U_{ab} = V_a - V_b$$

我们有时把高电位点称为电压的正极, 低电位点称为负极, 在图中用“+”、“-”符号分别表示。

如果在外力作用下, 逆着电场方向, 把单位正电荷从 b 点移到 a 点, 则正电荷获得位能, 它具有的电位能必将增加, 即电场对该电荷做了负功。由 b 点到 a 点的电压为

$$U_{ba} = V_b - V_a = -U_{ab}$$

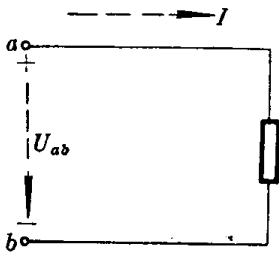


图 1-2-6 电压实际方向

电压也是具有大小和方向的代数量, 如同电流要假定正方向一样, 也应该指定电压的正方向 (或参考极性), 特别是在实际运算中当电压极性难于判别或电压随时间变化时, 我们应事先任意选取一端的极性为正, 另一端为负, 这样由假定的正极指向负极的方向, 即为电压的正方向。当电压的实际方向与正方向一致时, 电压为正, 反之为负。在电路图上如不标明电压正方向, 谈论电压的正负是没有意义的。具体解题时, 要求算出各量的实际大小和方向, 这些只有在假定正方向的配合下才能通过计算求出来。

在电路图上标注正方向后,同一电压可以有两种不同的表示形式,如图 1-2-7 所示两种表示法均表示 a, b 两点之间的实际电压为 $2V$ 。

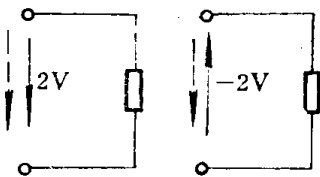


图 1-2-7 同一电压的两种表示法

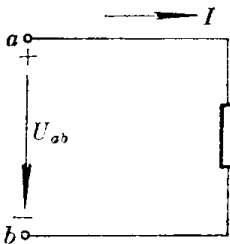


图 1-2-8 电压正方向的三种表示法

所有电压的正方向一旦选定,在计算中途都不能更改。

图 1-2-8 示出电压正方向的三种表示法: (1) 用箭头指向表示由假定的高电位到低电位, (2) 用符号“+”和“-”表示假定的正负极性, (3) 用双下标的表示法,如图中 U_{ab} , 它的前一个下标代表起点,后一个下标代表终点。这三种标记法意义相同,可以通用,实际使用时任选其中一种即可。

这里需要指出: 譬如电压正方向定为 U_{ab} , 并不意味 a 点电位必须高于 b 点电位, 而是说如果实际电位 a 点高于 b 点, 则电压 U_{ab} 为正, 反之为负。其次要说明, 在一个电路里, 电压和电流的正方向, 原则上都是任意选取的, 这两者的正方向并非必须对应一致, 但为了计算方便起见, 一般情况下应尽可能使同一段电路的电流和电压正方向选取一致, 即电流的正方向为从电压的正极流向负极。这样就称为关联正方向。例如欧姆定律, 当按电压电流正方向关联一致的原则选取方向时, 如图 1-2-9a 所示, 列得公式是

$$U=IR \quad \text{或} \quad I=\frac{U}{R}$$

如果假定正方向相反, 如图 1-2-9b 所示, 则列得的公式应是

$$U=-IR \quad \text{或} \quad I=-\frac{U}{R}$$

即多了一个负号。今后在计算电路时, 非特殊说明, 我们均按电流与电压正方向关联一致的原则选取。如果在电路中只标注出电流或电压两者之中的一个正方向时, 另一个量的正方向根据关联一致的原则可随之确定。

实际运算中, 在选定正方向时, 尽可能使它与实际方向相符; 只有在不确知实际方向时, 正方

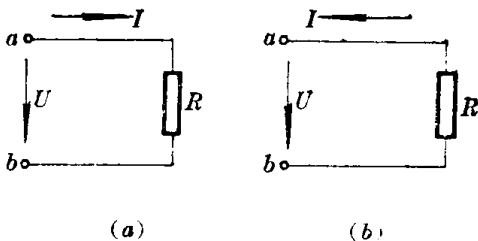


图 1-2-9 欧姆定律

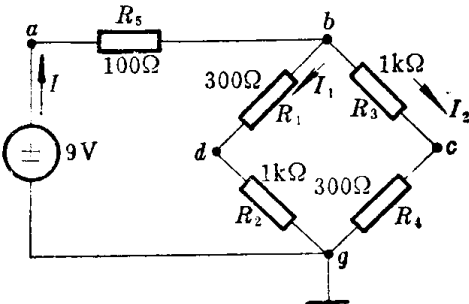


图 1-2-10 例 1-2-1 图

向才任意选定。

例 1-2-1 已知电路如图 1-2-10 所示, 如参考点分别选为 g 点和 d 点, 试计算各点电位和相邻两点间的电压。

解: 本题是一个简单串并联电路, 其中各量可以用欧姆定律计算得到。

电路总电流 $I = \frac{9}{100 + \frac{1300}{2}} = 0.012 \text{ A}$

支路电流 $I_1 = I_2 = \frac{I}{2} = 0.006 \text{ A}$

各点电位等于各点与参考点间的电压, 各相邻两点的电压等于该两点间的电位差。

表 1-2-1 给出各点电位及对应相邻点间电压的关系。由此表可见, 选取不同参考点时, 将引起电路中各点电位的变化, 但不影响各点之间的电压。这是因为电位是相对物理量, 而电压与参考点无关。

例 1-2-1 表

参考点	V_a	V_b	V_c	V_d	U_g	U_{ba}	U_{bc}	U_{bd}	U_{dg}	U_{cd}
g 点	9	7.8	1.8	6	0	-1.2	6	1.8	6	1.3
d 点	3	1.8	-1.2	0	-6	-1.2	6	1.8	6	1.3

* 表中各数值的单位为 V。

三、电动势

由物理学可知电动势是度量电源内非静电力(如化学力、电磁力等)作功能力的物理量, 数值上等于非静电力将单位正电荷从负极移到正极所作的功, 其实际方向规定为非静电力移动电荷做正功所循的方向, 也即在电源内使电位能升高的方向, 就是由低电位指向高电位, 所以电动势的实际方向规定为电位升的方向, 它和电压的实际方向相反。

图 1-2-11 给出各种参考方向下电压和电动势的方向关系。图中实线箭头分别表示电压和电动势的正方向, $\begin{smallmatrix} + \\ \text{---} \\ - \end{smallmatrix}$ 代表电池。此后对于信号源或泛指一般激励电源还常用符号 $\oplus$ 表示。通常符号上标注的正负极表示假定正方向。

图 1-2-11a 表明在规定方向下, 电源两极间, 从高到低的电位降落 (U_{ab}), 等于从低到高的电位升 (E), 图(b)表明在规定方向下, 从高到低的电位降落 (U_{ab}) 等于负的从低到高的电位升 ($-E$), 余类推。

在近代电路理论中, 为了叙述和分析的方便, 经常不提电动势, 而用电位升表示电动势或是用正方向相反、大小相等的电压来等效表示电动势。

在国际单位制中电位、电压及电动势的单位都是伏特, 简称伏, 用大写正体字母 V 表示。