

李培芳 主编

电路分析基础

清华大学出版社

李培芳 主编

电 路 分 析 基 础

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书共分16章,主要包括:直流电路基础、电路基本分析方法及电路基本定理、正弦交流电路基础和对称三相电路、非正弦电路分析和电路过渡过程、双口网络和网络矩阵方程、非线性电路、分布参数电路、拉普拉斯变换、网络函数以及状态变量分析法。

本书着重于基本概念、基本原理和基本方法的阐述,力求精炼、准确、易懂,以利于学生理解电路原理的基本概念和掌握电路分析的基本方法。

本书取材适当,内容全面,可作为电气、电子、信息、自动化、仪表测量等工科电类专业电路原理课程的教材,也可作为远程教学、电大、学历自学考试、专升本等的教材或教学参考书。

版权所有,翻印必究。举报电话:010-62782989 13901104297 13801310933

图书在版编目(CIP)数据

电路分析基础/李培芳主编. —北京:清华大学出版社,2004.9

ISBN 7-302-08966-3

I. 电… II. 李… III. 电路分析—高等学校—教材 IV. TM133

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 064076 号

出 版 者: 清华大学出版社 地 址: 北京清华大学学研大厦

<http://www.tup.com.cn> 邮 编: 100084

社 总 机: 010-62770175 客 户 服 务: 010-62776969

组稿编辑: 陈国新

文稿编辑: 陈 力

印 装 者: 北京鑫海金澳胶印有限公司

发 行 者: 新华书店总店北京发行所

开 本: 185×260 印 张: 20 字 数: 458 千字

版 次: 2004 年 9 月第 1 版 2004 年 9 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 7-302-08966-3/TM·54

印 数: 1~4000

定 价: 26.00 元

本书如存在文字不清、漏印以及缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请与清华大学出版社出版部联系调换。联系电话: (010)62770175-3103 或 (010)62795704

前 言

FOREWORD

电路原理是电类专业学生接受专业教学的第一门公共技术基础课程。当今时代科学技术飞速发展,新兴学科不断增加,知识总量不断增长,迫使本科教育不断向着基础化方向发展。因此在电路原理课程的教材内容编排上必须强调其基础性和综合性。本书是出于上述考虑而为电类专业大学本科学子学习“电路原理”而编写的教科书。

本书具有如下特点:

- (1) 以讲稿内容为基础编写而成,内容精炼,篇幅紧凑。
- (2) 为便于学生自学,每章开头先介绍本章主要内容、教学要求,章末附有本章小结、思考题和一定数量的习题,书末附有习题解答。
- (3) 本书内容涵盖了电气、电子、信息类专业电路原理课程的基本内容,也包含了近代电路理论的一些基础知识。
- (4) 在教材内容的编排上,前面4章是电路原理的最基础内容,后面各章相对独立,以便不同专业按需取舍。
- (5) 考虑到网络函数、状态变量等内容在现代电工技术中的重要地位,这两章单独成章,并在内容上相对于传统教材有所加强。
- (6) 考虑到强弱电专业对三相电路知识的不同要求,对称三相电路单独成章,以供不同专业选用。
- (7) 在叙述方法上,对于基础内容力求精炼、准确、易懂,不追求解题技巧,习题与教学内容相配合,不介绍难题、偏题,以利学生理解电路原理的基本概念,掌握电路分析的基本方法和应用。

本书共分16章,讲授全部内容约需68学时,对于不同专业可按需进行筛选。本书可作为高等院校工科电类专业电路原理课程的教材,也可作为远程教学、电大、学历自学考试、专升本等的教材或教学参考书。

本书由李培芳主编,并负责统稿,杜鹏英编写第1~4章,李江编写第5~9章,李玉玲编写第10~16章。全书由孙士乾教授审稿。

鉴于编写者水平有限,本书难免在许多方面存在缺点、错误和不足,衷心欢迎读者批评和指正。

编 者

2003年11月于浙江大学

目 录

CONTENTS

第 1 章 直流电路基础	1
1.1 电阻 欧姆定律	1
1.2 独立电源	2
1.3 受控电源	4
1.4 参考方向及功率	5
1.5 基尔霍夫定律	7
1.6 一端口网络	8
小结	10
思考题	10
习题	10
第 2 章 电路基本分析方法	13
2.1 支路电流法	13
2.2 回路电流法	15
2.3 节点电压法	18
小结	21
思考题	21
习题	22
第 3 章 电路基本定理	25
3.1 叠加定理	25
3.2 替代定理	28
3.3 戴维南定理(等效电源定理)	29
3.4 特勒根定理	33
3.5 互易定理	34
小结	36
思考题	37
习题	37
第 4 章 正弦交流电路基础	39
4.1 正弦量 相量	39

4.2 有效值	42
4.3 正弦电路元件	43
4.4 基尔霍夫定律相量形式	46
4.5 RLC 串联电路	47
4.6 RLC 并联电路	48
4.7 无源一端口网络	49
4.8 交流电路功率	51
4.9 正弦交流电路分析	57
小结	60
思考题	61
习题	61
第5章 电路谐振	64
5.1 电路谐振定义	64
5.2 RLC 电路串联谐振	64
5.3 RLC 电路并联谐振	66
5.4 电路频率特性	67
小结	69
思考题	70
习题	70
第6章 互感电路	72
6.1 互感	72
6.2 同名端	73
6.3 互感电路分析	74
6.4 理想变压器	75
小结	77
思考题	77
习题	77
第7章 对称三相电路	80
7.1 对称三相电源	80
7.2 三相电源电路	81
7.3 对称三相电路的性质	82
7.4 对称三相四线制电路分析	84
7.5 三相电路的功率	86
小结	87
思考题	87

习题	87
第 8 章 非正弦电路分析	89
8.1 傅里叶级数	89
8.2 对称波形的分解	90
8.3 傅里叶级数复指数形式	91
8.4 频谱	93
8.5 非正弦周期信号的有效值	94
8.6 非正弦周期信号的平均功率	95
8.7 非正弦电路分析	95
8.8 傅里叶变换 连续频谱	99
8.9 滤波器简介	102
小结	102
思考题	103
习题	103
第 9 章 电路过渡过程	106
9.1 换路定则	106
9.2 RL 电路过渡过程	108
9.3 三要素法	112
9.4 RC 电路过渡过程	117
小结	119
思考题	120
习题	120
第 10 章 网络矩阵方程	122
10.1 图论的基本概念	122
10.2 关联矩阵 KCL 矩阵形式	125
10.3 基本回路矩阵 KVL 矩阵形式	126
10.4 基本割集矩阵	127
10.5 节点电压方程矩阵形式	128
10.6 回路电流方程矩阵形式	131
小结	133
思考题	133
习题	133
第 11 章 非线性电路	135
11.1 非线性元件	135

11.2	直流非线性电阻电路	137
11.3	小信号分析法	142
	小结	145
	思考题	145
	习题	145
第 12 章	双口网络	148
12.1	双口网络的定义和分类	148
12.2	线性无源双口网络的方程和参数	149
12.3	Y 参数方程和 Y 参数	149
12.4	Z 参数方程和 Z 参数	151
12.5	A 参数方程和 A 参数	152
12.6	互易双口网络的等效电路	154
12.7	有载互易双口网络的特征阻抗	155
12.8	无源双口网络的联接	157
12.9	含受控源双口网络	162
	小结	167
	思考题	167
	习题	168
第 13 章	分布参数电路	171
13.1	分布参数电路概述	171
13.2	分布参数电路的解	172
13.3	入端阻抗和输入阻抗	176
13.4	均匀传输线的行波	177
13.5	均匀传输线的特性参数	179
13.6	波的反射与无反射均匀传输线	181
13.7	无畸变均匀传输线	184
13.8	无损耗均匀传输线	185
13.9	均匀传输线与双口网络的等效变换	190
	小结	191
	思考题	192
	习题	193
第 14 章	拉普拉斯变换	194
14.1	概述	194
14.2	拉普拉斯变换	195
14.3	拉普拉斯反变换	198

14.4 运算电路	202
14.5 用运算法分析电路的过渡过程	206
小结	210
思考题	211
习题	211
第 15 章 网络函数	213
15.1 网络函数的定义及形式	213
15.2 网络函数的计算	214
15.3 由网络函数求零状态响应	215
15.4 网络函数的零极点分析	218
15.5 叠加积分	229
小结	230
思考题	231
习题	231
第 16 章 状态变量分析法	233
16.1 状态变量法的基本概念	233
16.2 借助网络图论编写状态方程	235
16.3 状态方程的拉普拉斯变换解法	238
小结	239
思考题	240
习题	240
习题解答	242
参考文献	310

直流电路基础

本章内容

分析电路必须首先掌握电路的基本元件、基本关系和基本定律。本章首先介绍电阻、独立电源、受控电源等基本元件,然后对参考方向及功率等电路中最重要概念进行详细的阐述,并讨论电路分析的基本定律,即基尔霍夫电流定律(KCL)和基尔霍夫电压定律(KVL),最后介绍一端口网络及其简化。

本章教学要求

应掌握电路中的电源和负载的概念;掌握独立电源和受控电源的概念;熟练掌握电路分析中参考方向的概念;牢固掌握电路基本定律:欧姆定律、KCL 和 KVL;了解无源和有源一端口网络的概念。

1.1 电阻 欧姆定律

电路元件按其能否产生电能可分为有源元件和无源元件。有源元件即电源,包括独立电源和受控电源;无源元件有电阻 R 、电感 L 、电容 C 等。

对于稳恒直流电路,电感 L 相当于短路,电容 C 相当于开路(这里的 L 、 C 均为常数,将在第4章中详细介绍)。所以,在直流电路中只讨论两类元件:电阻和电源。

电阻 R 的符号如图 1-1 所示。设电阻上流过的电流为 I ,端电压为 U ,且方向如图 1-1 所示,即

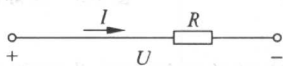


图 1-1 电阻元件

根据欧姆定律,则有

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

电阻的单位是欧[姆], Ω 。

电阻的倒数称为电导,用 G 表示,即

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

G 的单位是西[门子],S。所以式(1-1)还可写为

$$I = UG \quad (1-3)$$

当 $R = \text{const}$ 时,称为线性电阻,否则称为非线性电阻。由线性元件构成的电路称为线性电路。线性电路满足叠加定理。关于叠加定理将在第3章中讲述。

电阻 R 上消耗的功率为

$$P = UI = RI^2 = GU^2 = \frac{U^2}{R} \quad (1-4)$$

功率的单位为瓦[特],W。

1.2 独立电源

独立电源分为独立电压源和独立电流源,是指电压源的电压或者电流源的电流是独立的,不受电路中其他部分的电压或者电流的控制。

1. 电压源

电压源是提供电压的电源,如发电机、稳压电源、电池等都是电压源。

图1-2所示为实际电压源(虚线框内部分)与负载 R 相连接的电路。实际电压源的电动势为 E_s ,并具有内阻 r ,当外接负载 R 时,电源端电压即为负载电压 $U = \frac{E_s}{R+r}R$ 。可见, U 随负载而变,其关系如图1-3所示。

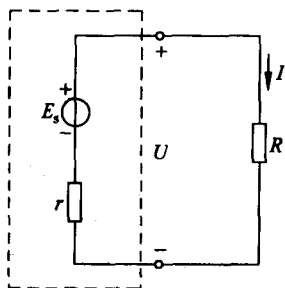


图 1-2 电压源外接负载 R

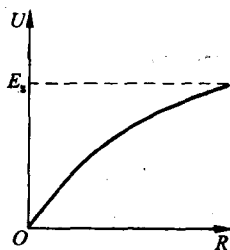


图 1-3 实际电压源的端电压与负载 R 的关系曲线

若 $r=0$,则 $U=E_s=\text{const}$,这样的电压源称为理想电压源。它提供恒定的电压, E_s 表示理想电压源的大小,“+、-”号表示理想电压源的极性,如图1-2所示。实际电压源总有内阻,但一般情况下内阻较小,在进行电路分析时可将内阻 r 近似为零,即可把电压源看作电动势为 E_s 的理想电压源;若分析时必须考虑内阻 r ,则可将内阻 r 作为独立电阻处理,而将电动势 E_s 作为理想电压源。

由上分析可知,理想电压源电压恒定,电压源输出电流由外电路确定。因此,理想电

压源不可短路。

2. 电流源

电流源是提供电流的电源。实际电流源如图 1-4 所示(虚线框内部分),由 I_s 和内阻 r 组成,当外接负载 R 时,负载电流 $I = \frac{r}{R+r} I_s$,可见, I 随负载而变。

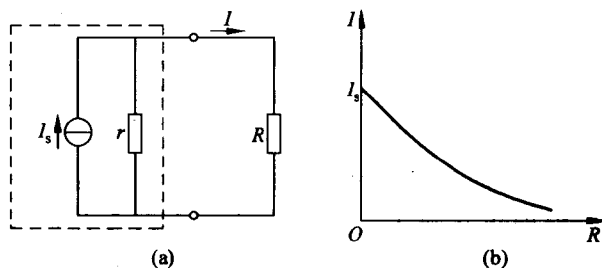


图 1-4 实际电流源的电流 I 与负载 R 的关系

若 $r = \infty$, 则 $I = I_s = \text{const}$, 这样的电流源称为理想电流源, 它提供恒定的电流 I_s 。表示理想电流源的大小, 箭头表示其方向。实际电流源内阻很大, 可视为理想电流源。

由上分析可知, 理想电流源电流恒定, 端电压由外电路确定。显然理想电流源不可开路。在电路分析中, 实际电源均被抽象为理想电源, 即理想电压源和理想电流源。

3. 电压源和电流源之间的等效变换

当进行电路分析时, 为便于分析, 可将电压源和电流源互相转换, 而对外电路不变。这种转换称为等效变换(见图 1-5)。可见, 为使外电路不变, 等效变换的条件是变换后电源的端电压不变, 比较图 1-5(a) 和 (b) 两电路的端电压, 可得等效变换条件

$$E_s = r I_s \quad (1-5)$$

即在满足式(1-5)的条件下, 图 1-5(a) 和 (b) 所示的电压源和电流源可相互转换, 等效变换后对于外电路不变。

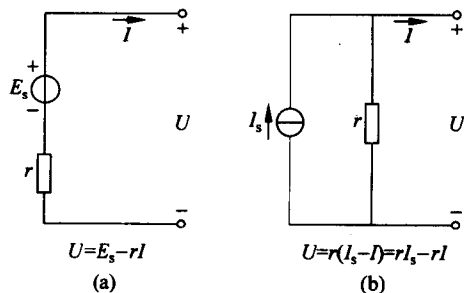


图 1-5 电压源与电流源间的等效变换

1.3 受控电源

有这样一类元件,它们有与独立电源相类似的特性(如可提供功率等),但又不同于独立电源,它们的电压或电流不像独立电源那样是给定的时间函数,而是受电路中某部分电压或电流的控制。这种元件称为受控电源,又称非独立电源。例如晶体三极管集电极电流 I_c 受基极电流 I_b 控制,因此在电路分析中可将三极管视为受控电源。

独立电源在电路中起“激励”作用,受控电源不起“激励”作用,而是受其他电压或电流控制的,它只是反映电路中某处的电压或电流被另一处的电压或电流控制的关系,它们不是真正的激励型的电源。

按控制量和被控制量不同,有四种受控源:电压控制的电流源 VCCS、电压控制的电压源 VCVS、电流控制的电压源 CCVS 和电流控制的电流源 CCCS,符号分别如图 1-6(a)、(b)、(c)、(d)所示。图中 k_G 、 k_U 、 k_R 和 k_I 称为控制系数。控制系数一般为常数,且不同控制系数有不同量纲。

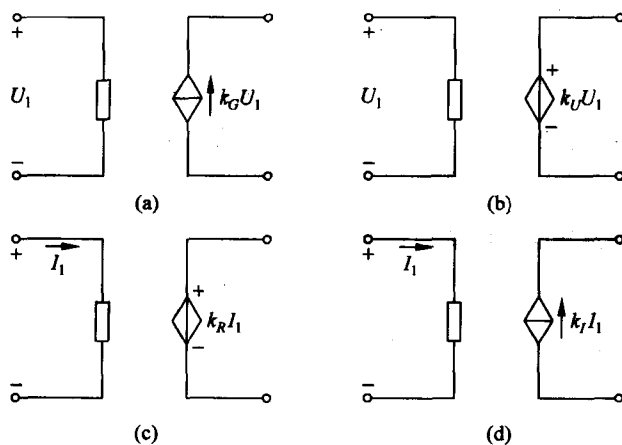


图 1-6 受控电源

(a) VCCS; (b) VCVS; (c) CCVS; (d) CCCS

例 1-1 在如图 1-7 所示电路中,设 $I_s = 1\text{A}$, $R_1 = 2\Omega$, $k_G = 3\Omega^{-1}$, $R_2 = 4\Omega$, $k_U = 5$, $R_3 = 6\Omega$,求 I_3 。

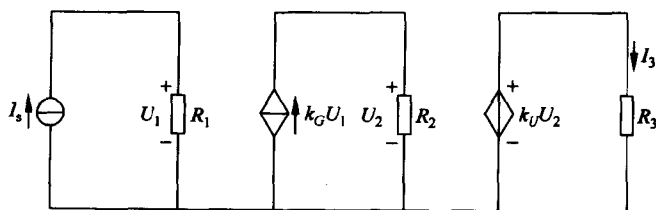


图 1-7 例 1-1 图

解 由于独立电流源 I_s 和受控电源 $k_G U_1$ 、 $k_U U_2$ 分别与电阻 R_1 和电阻 R_2 、 R_3 构成回路,因此可单独求解这三个回路。

欲求 I_3 ,必须先求得 $k_U U_2$,为此,需根据控制关系从左向右分别解三个电路,求解过程如下:

$$U_1 = R_1 I_s = 2(\text{V})$$

$$U_2 = k_G U_1 R_2 = 3 \times 2 \times 4 = 24(\text{V})$$

所以

$$I_3 = k_U U_2 / R_3 = 5 \times 24 / 6 = 20(\text{A})$$

为了说明图 1-7 所示电路中的能量关系,需要先计算三个电阻 R_1 、 R_2 、 R_3 上的功率消耗:

$$P_{R_1} = I_s^2 R_1 = 2(\text{W})$$

$$P_{R_2} = (k_G U_1)^2 R_2 = (I_s R_1 k_G)^2 R_2 = (3 \times 2)^2 \times 4 = 144(\text{W})$$

$$P_{R_3} = I_3^2 R_3 = 20^2 \times 6 = 2400(\text{W})$$

P_{R_1} 、 P_{R_2} 、 P_{R_3} 分别由 I_s 、 $k_G U_1$ 、 $k_U U_2$ 提供。正如前述,独立源 I_s 是激励型电源,提供功率为 2W,受控源 $k_G U_1$ 、 $k_U U_2$ 不是激励型电源,它们只描述电路中控制关系, R_2 、 R_3 上消耗功率来自其所在电路以外的电源。只有当 I_s 激励时,才有 P_{R_2} 、 P_{R_3} 输出。但在电路分析中可以认为受控源也提供(或消耗)功率。

1.4 参考方向及功率

在任一确定时刻,电路元件的电流(电压)都有一个确定的方向,如果我们事先并不知道该电流(电压)的实际方向,则必须首先假定一个正方向,称为参考方向。参考方向是电路分析中的一个重要概念,只有在固定的参考方向下,才能判断列出的电压、电流关系是否正确;不同的参考方向下,元件具有不同的电流、电压关系式,离开参考方向,谈论电压、电流的关系是毫无意义的。

参考方向可任意取定,可以与实际方向一致,也可以不一致。

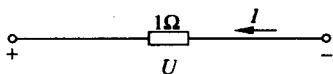


图 1-8 取定 U 、 I 方向相反的参考方向

在图 1-8 所示电路中,若 $I=2\text{A}$,则实际电流方向与参考方向一致。而 $U=-2 \times 1 = -2(\text{V})$,表示电阻上实际压降与参考方向相反。

元件上电流和电压参考方向一致,则称为关联方向;若相反,则称为非关联方向。对于电阻,常取关联方向;对于电源,常取非关联方向。在图 1-8 中,电阻上电压和电流正方向取的是非关联方向。

在电阻上对电压、电流取关联方向时,必有 $P=UI>0$ 。因为实际电流和电压必同向,即同时为正或同时为负,所以电阻恒消耗功率。

在电源上常取为非关联方向。例如,图 1-9 中所示的电压源。图中, E_s 为电动势; U 为电压。

若 $P=UI=E_s I>0$, 则电压源发出功率; 若 $P=UI=E_s I<0$, 则电压源吸收功率。

在一个电路中, 所有元件发出的总功率必等于所有元件消耗的总功率, 称为功率守恒 (或称功率平衡)。

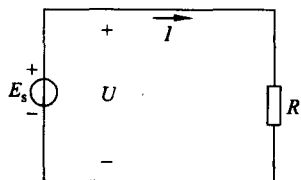


图 1-9 电阻和电源上的电压和电流的参考方向

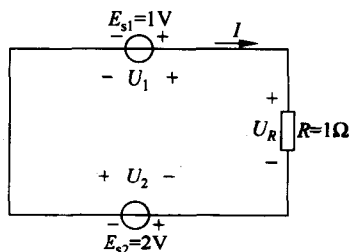


图 1-10 例 1-2 图

例 1-2 在图 1-10 所示电路中, 取各元件的电流、电压参考方向如图所示。若电流 I 为正方向, 则电阻上压降 U_R 与 I 为关联方向, 两个电源上压降 U_1, U_2 与 I 为非关联方向。求三个元件消耗的功率, 并验证功率平衡。

解 因为

$$I = \frac{E_{s1} - E_{s2}}{R} = \frac{1 - 2}{1} = -1(\text{A})$$

$$U_R = IR = -1 \times 1 = -1(\text{V})$$

所以

$$P_R = (-1) \times (-1) = 1(\text{W})$$

表明 R 消耗功率。

因为

$$U_1 = E_{s1} = 1(\text{V})$$

所以

$$P_{s1} = U_1 I = 1 \times (-1) = -1(\text{W})$$

表明电源 E_{s1} 吸收功率。

因为

$$U_2 = -E_{s2} = -2(\text{V})$$

所以

$$P_{s2} = (-U_2) \times (-I) = 2 \times 1 = 2(\text{W})$$

表明电源 E_{s2} 发出功率。

可见

$$P_{s2} + P_{s1} = P_R$$

表明功率平衡。

例 1-3 求图 1-11 所示电路中三个元件发出或消耗的功率, 并验证功率平衡。

解 已知 $I = I_s = 1(\text{A})$, $U_R = RI = 1(\text{V})$, 则 $P_R = 1(\text{W})$, 表明电阻消耗功率。

因为

$$U_1 = IR - E_s = U_R - E_s = 1 - 2 = -1(\text{V})$$

所以

$$P_{I_s} = U_1 I = -1(\text{W})$$

表明电源 I_s 吸收功率。

又因为

$$U_2 = E_s = 2(\text{V})$$

所以

$$P_{E_s} = U_2 I = 2 \times 1 = 2(\text{W})$$

表明电源 E_s 发出功率。

可见

$$P_{E_s} + P_{I_s} = P_R$$

表明功率平衡。

思考：图 1-12 所示电路中，电流源电压源各发出或吸收多少功率？

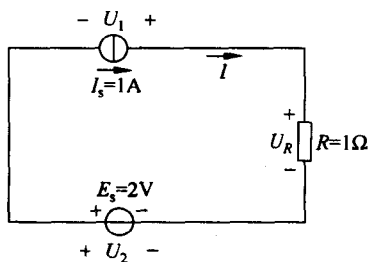


图 1-11 例 1-3 图

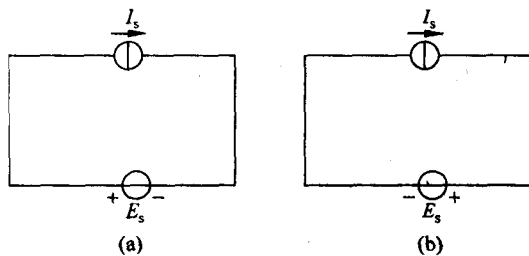


图 1-12 思考题图

1.5 基尔霍夫定律

基尔霍夫定律分为基尔霍夫电流定律(又称基尔霍夫第一定律, KCL)和基尔霍夫电压定律(又称基尔霍夫第二定律, KVL), 是电路分析中最基本的定律。

从拓扑学观点看, 电路组成包括支路、节点、回路等元素, 分别定义如下:

支路 单个或若干个元件串联成的分支。

节点 两个以上的支路的交汇点。

回路 若干条支路组成的闭合路径。

基尔霍夫定律是基于以上电路元素的定义而表述的。

1. 基尔霍夫电流定律

基尔霍夫电流定律可表述为: 任一节点各支路电流代数和恒等于零。

设与某节点相联的支路数为 k , 记任一支路电流为 I_i , 则 KCL 可表示为

$$\sum_{i=1}^k I_i = 0 \quad (1-6)$$

KCL 的物理意义是十分明显的, 电流为单位时间内电荷的移动量, 因为电荷守恒, 流入电流必等于流出电流, 故 KCL 恒成立。需注意, 电流求和必须是代数和, 即除电流大小外还必须考虑电流方向。现用一个例子来说明 KCL。如规定电流流出节点为正, 则对于图 1-13 中的 3 个节点, 分别有

$$\text{节点①} \quad -I_1 + I_2 + I_3 = 0$$

$$\text{节点②} \quad -I_3 + I_4 + I_5 = 0$$

$$\text{节点③} \quad I_1 - I_2 - I_4 - I_5 = 0$$

因为由此三式中任两式可得第三式, 故三个式子中只有两个是独立方程。于是可得一般性结论: 对于具有 n_i 个节点的电路, 仅有也必有 $n = n_i - 1$ 个方程独立。

显然 KCL 可以扩展到任何一个闭合面。

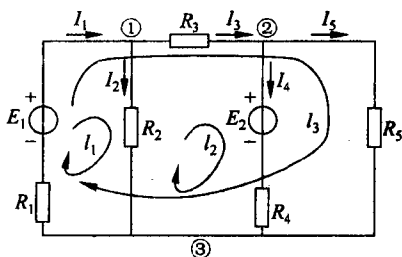


图 1-13 基尔霍夫定律

2. 基尔霍夫电压定律

基尔霍夫电压定律可表述为: 任一回路中各支路电压代数和恒等于零。

设构成某回路的支路数为 k , 记任一支路电压为 V_i , 则 KVL 可表示为

$$\sum_{i=1}^k V_i = 0 \quad (1-7)$$

KVL 的物理意义是十分明显的, 因电压为电位差, 回路中各支路电压降之和为同一点的电位, 故必为零。同样需注意, 电压求和必须是代数和, 即必须考虑电压正方向。如规定沿回路方向的电压降为正, 则对于图 1-13 中的 3 个回路 l_1 、 l_2 、 l_3 分别有

$$\text{回路 } l_1 \quad R_1 I_1 + R_2 I_2 - E_1 = 0$$

$$\text{回路 } l_2 \quad -R_2 I_2 + R_3 I_3 + R_4 I_4 + E_2 = 0$$

$$\text{回路 } l_3 \quad R_1 I_1 + R_3 I_3 + R_5 I_5 - E_1 = 0$$

回路的取法不是惟一的, 本例中可以取 6 个回路, 但其中只有 3 个是独立的。对于简单电路容易判断有几个独立回路, 而对于复杂的大型电路则较难判断独立回路及总的独立回路数。本书的第 10 章将初步介绍有关这方面的知识。

KCL 和 KVL 对各种电路, 如直流电路、交流电路、稳态电路、暂态电路、线性电路、非线性电路等均成立。

1.6 一端口网络

电路又可称为电网络。从电路(或网络)向外引出的一对端子称为端口, 端口用于测量或与其他电路相连接。按照上述端口的定义, 两个端子上的电流必须是一个流进网络, 一个流出网络, 且两者应大小相等。

有一个端口的网络称为一端口网络。一端口网络又分为无源一端口网络和有源一端