

普通高等教育“十二五”规划教材

电路及电工 技术基础

DIANLU JI DIANGONG JISHU JICHU

主 编 李昌春
副主编 余传祥 许弟建



重庆大学出版社

<http://www.cqup.com.cn>

普通高等教育“十二五”规划教材

电路及电工技术基础

主 编 李昌春
副主编 余传祥 许弟建

重庆大学出版社

内 容 提 要

本书是为普通高校非电专业编写的少学时电工学教材,侧重于电路与电工技术方面的知识讲解,适用于建筑、土木、采矿、环境等专业的电工学课程的教学用书,具有教材体系科学、教学适应强的特点。

本教材从基础知识、基本原理出发,由浅入深、循序渐进的对电路、变压器、电动机及其控制等知识进行了分析和讲解。可作为工科类主讲电路及电工技术知识模块的非电专业的教学用书,也可作为一般工程技术人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

电路及电工技术基础/李昌春主编. —重庆:重庆大学出版社,2012.4
ISBN 978-7-5624-6592-8

I. ①电… II. ①李… III. ①电路—高等学校—教材
②电工技术—高等学校—教材 IV. ①TM

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 027110 号

普通高等教育“十二五”规划教材

电路及电工技术基础

主 编 李昌春

副主编 余传祥 许弟建

责任编辑:曾令维 杨粮菊 版式设计:杨粮菊

责任校对:刘 真 责任印制:赵 晟

*

重庆大学出版社出版发行

出版人:邓晓益

社址:重庆市沙坪坝区大学城西路 21 号

邮编:401331

电话:(023) 88617183 88617185(中小学)

传真:(023) 88617186 88617166

网址:<http://www.cqup.com.cn>

邮箱:fxk@cqup.com.cn (营销中心)

全国新华书店经销

重庆川外印务有限公司印刷

*

开本:787×1092 1/16 印张:14.75 字数:368 千

2012 年 4 月第 1 版 2012 年 4 月第 1 次印刷

印数:1—3 000

ISBN 978-7-5624-6592-8 定价:28.00 元

本书如有印刷、装订等质量问题,本社负责调换

版权所有,请勿擅自翻印和用本书

制作各类出版物及配套用书,违者必究

电工学是高等学校非电类重要的技术基础课,随着科学技术的不断发展,课程教学内容不断扩大。另一方面,由于电工学课程教学对象的多样化,各个专业在教学中的学时数及要求不尽相同,为了规范教学,教育部 2003 年开始重新对基础课程制订教学基本要求,2004 年 8 月教学指导委员会提出了新的教学基本要求。

按照新的教学基本要求,电工学课程教学要求分为最低要求和可选基本要求两部分,最低基本要求是各专业、学校都必须达到的教学合格标准,而可选部分则可以根据专业培养计划的要求,选择适当模块组织课程教学大纲。

随着科学技术的不断发展,各学科之间的相互联系进一步加强,电工学课程已是不少非电类理工科专业的必修课程。因此,各高校开设电工学课程的专业和学科也就越来越多,只是根据学科专业的不同,选择不同部分的模块内容组织教学。目前,重庆大学用于机自、车辆、热能、动力等非电专业的电工学教材是由电工学课程组老师与其他高校相关老师联合编写的多学时(70~90 学时)“十一五”规划教材,由电工学Ⅰ、电工学Ⅱ上下两本组成,包括的内容有:电路分析、电子技术、电机及其控制、EDA 等。而对于土木、安装、环境、给排水等专业还没有相应的电工学教材,以上专业对电工学学时数要求不多(36 学时左右),而侧重于电路理论与电工应用方面的知识学习,对电子技术则不作要求。基于这种情况,编写了本教材,适合于 32~40 学时的非电专业,且主要讲授电路与电工技术基础及应用方面的知识。

本书从基础知识、基本原理出发,由浅入深、循序渐进地对电路及电工技术方面的知识进行了分析和讲解。内容选材适用性强,前后章节内容联系紧密,逻辑严谨,语言简洁,易于学生理解和接受。在内容的编排上,加强了异步电动机及其控制方面的内容,注重培养学生建筑电气方面的基本技能,奠定学生学习相关专业课和从事专业技术工作的基础。教材每节后

的练习与思考以及每章后的习题编写都注意趣味性与知识性相结合,注意与日常生活现象相结合,从而激发学生的学习积极性与主动性。教材中标有“*”的章节内容可作为选讲内容。

本书是重庆大学国家电工电子基础课程教学基地建设的成果之一,是重庆大学电工学课程组全体教师多年教学与科研实践的结晶。李昌春编写第1,4,6章,彭光金编写第2,3章,邓力编写第5章,余传祥编写第7章,李利编写第8,9章。李昌春、许弟建两位老师负责全书的修改和统稿。

本书由重庆大学廖瑞金、侯世英两位教授审阅,并提出了许多宝贵的修改意见,对此表示诚挚的谢意。在本书的编写出版过程中,还得到了重庆大学韩力教授及重大出版社的大力支持和帮助,在此也表示衷心的感谢。

由于编者水平有限,书中难免有疏漏和不足之处,恳请同行专家和广大读者批评指正。

编 者
2011年12月

目 录

第 1 章 电路的基本定律与分析方法	1
1.1 电路的基本概念	1
1.1.1 电路的作用与组成	1
1.1.2 电路元件、参考方向及电路模型	2
1.1.3 电路的运行状态	6
1.1.4 受控电源	6
练习与思考	7
1.2 基尔霍夫定律	7
1.2.1 电路结构名词	7
1.2.2 基尔霍夫电流定律(KCL)	8
1.2.3 基尔霍夫电压定律(KVL)	8
练习与思考	9
1.3 电源模型的等效变换	9
1.3.1 理想电压源的连接	10
1.3.2 理想电流源的连接	11
1.3.3 两种实际电源模型的等效变换	12
练习与思考	13
1.4 支路电流法	14
练习与思考	15
1.5 电位的概念与节点电压法	16
1.5.1 电位的概念	16
1.5.2 节点电压法	16
练习与思考	17
1.6 齐次性与叠加原理	18
1.6.1 齐次性	18
1.6.2 叠加原理	18
练习与思考	19
1.7 等效电源定理	20
1.7.1 二端网络	20
1.7.2 戴维南定理	21
1.7.3 最大功率传输定理	23

练习与思考	24
本章小结	25
习题1	25
第2章 正弦交流电路	30
2.1 正弦交流电的基本概念	30
2.1.1 正弦交流电的三要素	31
2.1.2 正弦量的相量表示法与相量图	33
练习与思考	34
2.2 单一元件的正弦交流电路	34
2.2.1 电阻元件	34
2.2.2 电感元件	35
2.2.3 电容元件	37
练习与思考	39
2.3 正弦交流电路的分析计算	40
2.3.1 串、并联正弦交流电路的分析	40
2.3.2 RLC 串联电路	41
2.3.3 串联谐振现象	43
2.3.4 RLC 并联电路及其谐振现象	44
练习与思考	45
2.4 功率因数及功率补偿	46
练习与思考	47
本章小结	48
习题2	48
第3章 三相交流电路	52
3.1 三相电源	52
3.1.1 对称三相电源的产生	52
3.1.2 对称三相电源的连接	53
练习与思考	54
3.2 三相交流电路分析	55
3.2.1 负载星形(Y)连接的三相电路	55
3.2.2 负载三角形(D)连接的三相电路	58
3.2.3 三相功率	60
练习与思考	61
*3.3 建筑供配电简介	62
3.3.1 供配电系统的电源连接	62
3.3.2 常用建筑供电形式	65
练习与思考	67
本章小结	68

习题3	68
第4章 变压器	70
4.1 交流铁芯线圈电路分析	70
4.1.1 电磁关系	70
4.1.2 电压平衡关系式	71
4.1.3 电路的功率	71
练习与思考	71
4.2 变压器	72
4.2.1 变压器的基本结构与工作原理	72
4.2.2 变压器额定值的意义与外特性	75
4.2.3 变压器绕组的极性与连接	76
练习与思考	79
4.3 三相变压器	79
4.3.1 三相变压器的连接方式与变比	79
4.3.2 三相变压器的连接组别	79
4.3.3 电力变压器并联运行特点及条件	81
练习与思考	82
4.4 特殊变压器	82
练习与思考	84
本章小结	84
习题4	84
第5章 电动机	86
*5.1 直流电动机	86
5.1.1 直流电动机的工作原理与基本结构	86
5.1.2 直流电动机的机械特性	88
练习与思考	92
5.2 三相异步电动机	92
5.2.1 三相异步电动机的基本结构和工作原理	93
5.2.2 三相异步电动机的功率、转矩和机械特性	99
5.2.3 三相异步电动机的启动与制动方法	103
5.2.4 三相异步电动机的调速	109
5.2.5 三相异步电动机的铭牌数据	110
练习与思考	111
*5.3 单相异步电动机	112
5.3.1 单相电容式异步电动机的结构与工作原理	112
5.3.2 单相异步电动机的启动	114

5.3.3 三相异步电动机的单相运行	115
练习与思考	115
本章小结	115
习题5	116
第6章 低压电器及控制电路	118
6.1 常用低压控制电器	118
6.1.1 手动电器	118
6.1.2 自动控制电器	120
练习与思考	124
6.2 基本控制电路	125
6.2.1 点动控制	125
6.2.2 直接启停控制	125
6.2.3 两地控制	126
6.2.4 电动机正反转控制	126
练习与思考	128
6.3 行程控制	128
6.3.1 行程开关	129
6.3.2 限位行程控制	129
6.3.3 自动往返控制	130
练习与思考	130
6.4 时间控制	131
6.4.1 时间继电器	131
6.4.2 鼠笼式异步电动机的 Y-D 换接启动控制	131
6.4.3 鼠笼式电动机自耦降压或定子串电阻降压启动控制	132
6.4.4 绕线式异步电动机的启动控制	135
6.4.5 鼠笼式异步电动机的能耗制动控制	135
6.4.6 反接制动控制	136
练习与思考	137
* 6.5 常用建筑电气控制电路	137
6.5.1 混凝土搅拌机的电气控制	137
6.5.2 塔式起重机的电气控制	137
6.5.3 水泵水位的电气控制	143
本章小结	145
习题6	145
第7章 可编程序控制器	150
7.1 概述	150

7.1.1 发展历史	150
7.1.2 应用领域和发展趋势	151
练习与思考	151
7.2 可编程序控制器的硬件配置	152
7.2.1 基本组成	152
7.2.2 工作原理	153
7.2.3 西门子 S7-200 系列可编程序控制器简介	154
练习与思考	156
7.3 可编逻辑控制器编程元件和基本指令	156
7.3.1 编程语言	156
7.3.2 S7-200 编程的基本概念	157
7.3.3 S7-200 的编程元件	158
7.3.4 S7-200 基本指令系统	163
练习与思考	169
7.4 可编程序控制器系统程序设计	169
7.4.1 PLC 系统设计的基本过程	169
7.4.2 梯形图设计方法	170
练习与思考	176
本章小结	176
习题 7	177
第 8 章 电工测量	179
8.1 电工测量的基础知识	179
8.1.1 电工测量的概念及特点	179
8.1.2 测量的分类及误差	179
练习与思考	182
*8.2 电工测量仪表	182
8.2.1 电工测量仪表的分类	182
8.2.2 常用直读式仪表的特点	185
8.2.3 电工测量仪表的选择	185
练习与思考	186
8.3 常见电量的测量	187
8.3.1 电阻、电流、电压的测量	187
8.3.2 功率的测量	189
练习与思考	193
*8.4 非电量测量与传感器应用	193
8.4.1 非电量的测量	193
8.4.2 传感器的构成及工作原理	193
*8.5 电工测量新技术	195

8.5.1 智能仪器	196
8.5.2 虚拟仪器	197
练习与思考	199
本章小结	199
习题 8	199
第 9 章 安全用电	200
9.1 触电及其对人体的伤害	200
9.1.1 触电的原因及方式	200
9.1.2 触电对人体的伤害及因素	202
练习与思考	203
9.2 防止触电的保护措施	204
9.2.1 接地与接零	204
9.2.2 安全电压及漏电保护器	207
练习与思考	207
9.3 触电急救与预防	208
9.3.1 触电急救	208
9.3.2 预防触电	208
练习与思考	209
*9.4 雷电及其防护	209
9.4.1 雷电的形成及种类	209
9.4.2 防雷措施	210
练习与思考	211
本章小结	211
习题 9	211
习题参考答案	213
参考文献	223

第 1 章

电路的基本定律与分析方法

本章主要介绍电路的基本概念、基本物理量、电路模型、电路的组成与工作状态、电路的基尔霍夫基本定律。同时,以直流稳态电路为例,介绍电路常用的几种分析方法:电源的等效变换、支路电流法、节点电压法、叠加原理和戴维南定理。这些基本定律与分析方法不仅适用于直流电路,也适用于交流电路。

1.1 电路的基本概念

1.1.1 电路的作用与组成

电路即电流的通路,它是为了某种需要由不同的电气元件按一定的顺序用连接导线依次连接而成的。根据电流性质的不同,电路有直流电路和交流电路之分。电路的结构将以它所完成的任务不同而不同,简单的电路由几个元件构成,复杂的电路可由成千上万个元件构成。

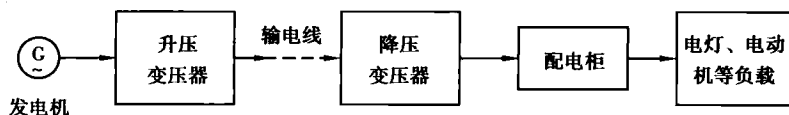


图 1.1.1 电力系统电路示意图

例如城乡供电线路就是一种复杂电路,如图 1.1.1 所示,它的作用是实现电能的传输和转换。图 1.1.2 所示的手电筒电路则为简单电路,它将电能转换为光能、热能。另一种是以收音机电路为典型代表的信号电路,用于信号的传递和处理。本章主要讨论实现电能的传输和转换的电路。

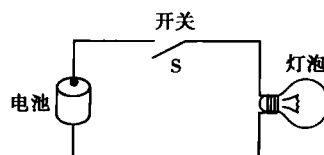


图 1.1.2 手电筒电路

电路的基本组成部分是:电源、负载和连接电源与负载的中间环节。

电源:它是将其他形式的能量(化学能、机械能等)转换为电能的设备。电源分为直流电

源(DC)和交流电源(AC)两大类,在电路图中分别用“—”和“~”表示。常用的直流电源有干电池、蓄电池、直流发电机、整流电源等。民用供配电网提供的是交流电源,由交流发电机产生。图 1.1.3 为常用电源的图形符号与文字符号。

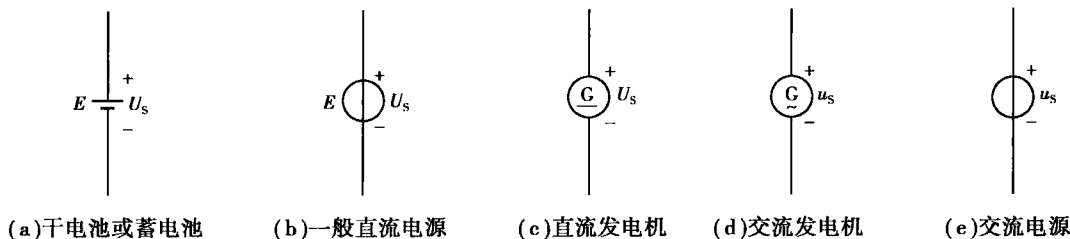


图 1.1.3 常用电源的符号

负载:它是取用电能的设备,将电能转换为其他形式的能量(如光能、热能、机械能等)。在电路图中一般负载用“”表示,文字符号标注阻抗“ Z ”。

中间环节:它是连接电源与负载之间必不可少的环节,由导线、开关和实现控制、测量、保护等功能的元件构成。其中用来传输和分配电能的导线是必不可少的,导线一般用包着绝缘层的铜线或铝线制成。

1.1.2 电路元件、参考方向及电路模型

电路是由电路元件构成的,理想的电路元件有 5 种,即电阻元件、电感元件、电容元件、理想电压源、理想电流源,它们的图形符号与文字符号如图 1.1.4 所示。

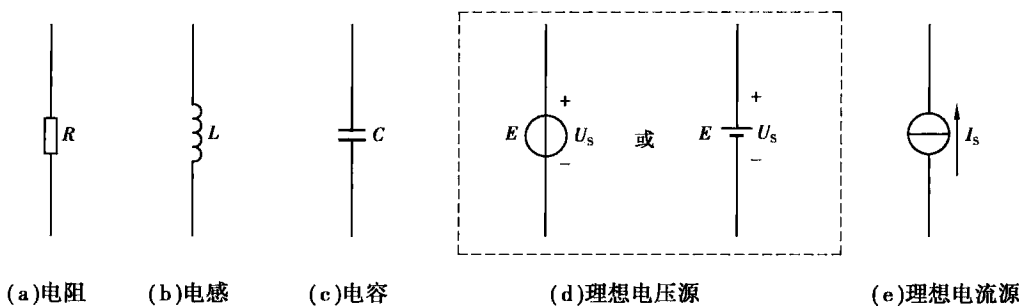


图 1.1.4 理想电路元件

电阻:理想电阻元件只具有消耗电能的电磁性质,其参数用 R 表示。当电阻参数 R 为一常数时,称为线性电阻,否则为非线性电阻。电阻元件的电压 u 与电流 i 满足欧姆定律,其特性方程为:

$$R = \frac{u}{i} \quad \text{或} \quad u = Ri \quad \text{或} \quad i = Gu \quad \text{其中} \quad G = \frac{1}{R} \quad (1.1.1)$$

R 的单位: Ω (欧[姆])、 $k\Omega$ (千欧)、 $M\Omega$ (兆欧); G 称为电导(电阻的倒数),单位: S(西[门子])。

u 的单位: V(伏[特])、kV(千伏)、mV(毫伏); i 的单位: A(安[培])、kA(千安)、mA(毫安)。

实际方向:电流的实际方向定义为正电荷运动的方向;电压的实际方向定义为高电位指向低电位的方向;电动势的实际方向定义为电源内部电位升高的方向,即从电源“-”极指向

“+”极,而电源的端电压是从“+”极指向“-”极,与电动势方向相反。

参考方向:在分析、计算复杂电路时,电路中某段支路电流的实际方向很难作出判断。对于交流电路,电流的实际方向还随时间改变,为了便于分析、计算,引入了参考方向的概念。

电流参考方向的选择是任意的,并在电路中以有向线段标注,如图 1.1.5 所示。

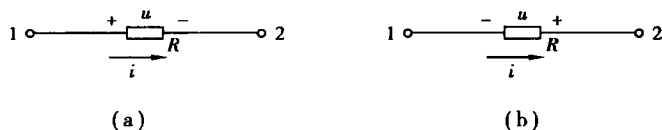


图 1.1.5 电压、电流参考方向

元件电压参考极性“+”、“-”是任意标注的,电压参考方向由“+”极指向“-”极。在图 1.1.5(a)所示电路中,元件电压、电流参考方向一致,称为关联一致;在图 1.1.5(b)所示电路中,元件电压、电流参考方向不一致,称为非关联一致。为简化分析,一般把电路中电压、电流参考方向都选得关联一致,且常常只标出元件电流参考方向。

按参考方向列写电路方程并求解。若求解结果为正值,说明实际方向与参考方向一致;否则,实际方向与参考方向相反。

在任一瞬间,电压瞬时值 u 与电流瞬时值 i 的乘积,称为瞬时功率,用小写字母 p 表示。电阻是耗能元件,其消耗的瞬时功率为:

$$p = ui = Ri^2 = \frac{u^2}{R} \quad (1.1.2)$$

瞬时功率在一个周期内的平均值,称为平均功率,它表征了一个周期内电路消耗电能平均速率,因此,也称有功功率,用大写字母 P 表示,即

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p dt \quad (1.1.3)$$

直流电路中,电阻 R 上的电压、电流恒定,即 $u = U, i = I$,所以瞬时功率就等于有功(平均)功率,即

$$p = P = UI = Ri^2 = \frac{U^2}{R} \quad (\text{直流}) \quad (1.1.4)$$

P 的单位:W(瓦)、kW(千瓦)、MW(兆瓦)

瞬时功率 p 表明元件在单位时间内所消耗的能量,因此,对式(1.1.2)积分可求得在时间间隔 $[0, t]$ 内消耗的电能为:

$$W[0, t] = \int_0^t p dt = \int_0^t u i dt = \int_0^t Ri^2 dt = \int_0^t \frac{u^2}{R} dt \quad (1.1.5)$$

对于直流电路:

$$W[0, t] = \int_0^t P dt = \int_0^t UI dt = UIt = Ri^2 t = \frac{U^2}{R} t \quad (1.1.6)$$

上式中电压的单位为 V,电流的单位为 A,电阻的单位为 Ω ,时间的单位为 s,电能 W 的单位为 J(焦[尔])。在日常生产和生活中,电能也常用“度”计量:

$$1 \text{ 度} = 1 \text{ kW} \cdot \text{h} = 1 \text{ kV} \cdot \text{A} \cdot \text{h}$$

电感:理想电感元件是只具有储存磁场能量这样一种电磁特性(电感性)的二端元件。电感的参数用 L 表示,当 L 为一常数时为线性电感,其磁通链与线圈电流成正比,定义式为:

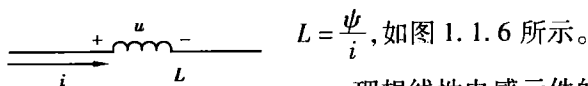


图 1.1.6 电感元件

$L = \frac{\psi}{i}$, 如图 1.1.6 所示。

理想线性电感元件的电压、电流关系, 即特性方程表示为:

$$u = L \frac{di}{dt} \quad (1.1.7)$$

L 的单位: H(亨利)、mH(毫亨)

线性电感在时间间隔 $[0, t]$ 内储存的磁场能量是瞬时功率 p 的积分, 其表达式如下:

$$W[0, t] = \int_0^t p dt = \int_0^t u i dt = \int_0^t L i di = \frac{1}{2} L i^2(t) - \frac{1}{2} L i^2(0) \quad (1.1.8)$$

若初始时刻电流 $i(0) = 0$, 则上式简化为:

$$W[0, t] = \frac{1}{2} L i^2(t) \quad (1.1.9)$$

此式表明, 在任一瞬时通有电流的线性电感元件的磁场能量与电感电流的平方成正比。

电容: 理想电容元件是只具有储存电场能量这样一种电场特性(电容性)的二端元件, 如图 1.1.7 所示。电容的参数用 C 表示, 当 C 为一常数时为线性电容, 定义式为:

$$C = \frac{q}{u}$$

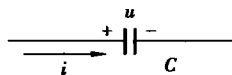


图 1.1.7 电容元件

理想线性电容元件的电压、电流关系, 即特性方程表示为:

$$i = C \frac{du}{dt} \quad (1.1.10)$$

C 的单位: F(法拉)、 μF (微法)、pF(皮法)

$$1 F = 10^6 \mu F = 10^{12} pF \quad (1.1.11)$$

线性电容在时间间隔 $[0, t]$ 内储存的电场能量是瞬时功率 p 的积分, 其表达式如下:

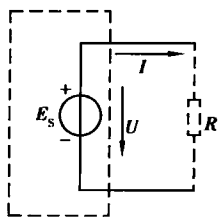
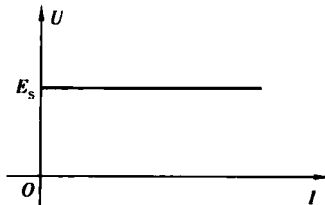
$$W[0, t] = \int_0^t p dt = \int_0^t u i dt = \int_0^t C u du = \frac{1}{2} C u^2(t) - \frac{1}{2} C u^2(0) \quad (1.1.12)$$

若初始时刻电压 $u(0) = 0$, 则上式简化为:

$$W[0, t] = \frac{1}{2} C u^2(t) \quad (1.1.13)$$

此式表明, 在任一瞬时带有电压的线性电容元件的电场能量与电容电压的平方成正比。

理想电压源: 理想电压源是一个二端元件, 其端电压在任意瞬时与其端电流无关: 或者恒定不变(直流电压源, 如图 1.1.8 所示), 或者按某一固有函数规律随时间变化(交流电压源)。


 (a) 理想电压源特点: $U = E_s$ $R_0 = 0$


(b) 理想电压源外特性曲线

图 1.1.8 理想电压源

电源输出端电压随输出端电流变化的关系曲线,称为电源的外特性曲线。

实际电压源是电源内阻不为零的电压源,其输出端电压随负载大小而变,即 $U \neq E_s, R_0 \neq 0$,如图 1.1.9 所示。

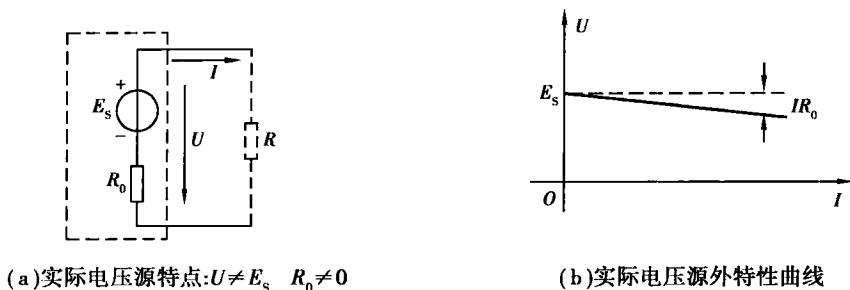


图 1.1.9 实际电压源

理想电流源:理想电流源是一个二端元件,其端电流在任意瞬时与其端电压无关;或者恒定不变(直流电流源,如图 1.1.10 所示),或者按某一固有函数规律随时间变化(交流电流源)。

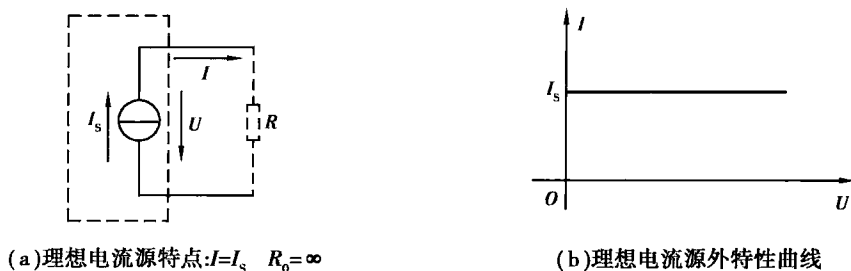


图 1.1.10 理想电流源

实际电流源是电源内阻不为无穷大的电源,其输出端电流随负载大小而变,即 $I \neq I_s, R_0 \neq \infty$,如图 1.1.11 所示。

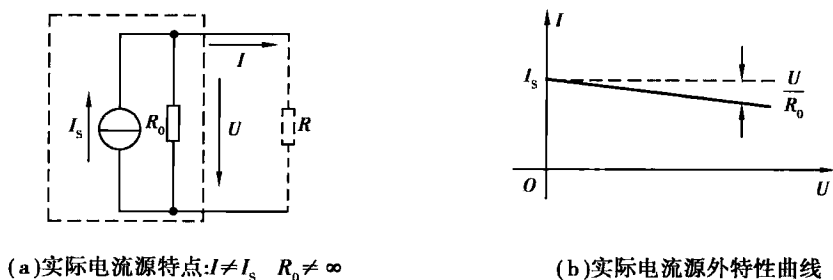


图 1.1.11 实际电流源

电路模型:为便于电路的分析与计算,将实际元件理想化,即在一定的条件下,只考虑其主要的电磁性质。由理想电路元件构成的电路模型是对实际电路的科学抽象与概括。如手电筒电路对应的电路模型,如图 1.1.12 所示。

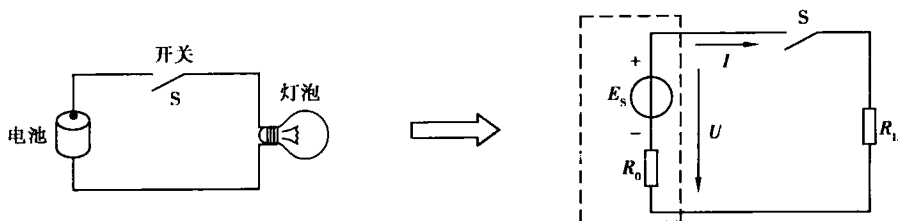


图 1.1.12 手电筒电路对应的电路模型

1.1.3 电路的运行状态

电路有断路、通路和短路三种运行状态,下面以手电筒电路模型如图 1.1.12 所示电路为例加以说明。

断路:当开关 S 断开时所处的状态即为断路状态。断路时电源输出端电流 $I=0$,但输出端电压不等于 0,此电压称为开路电压用 U_0 表示,且 $U_0 = E_s$ 。

通路:当开关 S 闭合时所处的状态即为通路状态,也称有(负)载工作状态。电源对外输出电流 I 、电压 U 、功率 P ,其中:

$$I = \frac{E_s}{R_0 + R_L} \quad U = IR_L = E_s - IR_0 \quad P = IU = IE_s - I^2 R_0$$

接在电路中的电气设备,它们的工作电流和电压都有一个规定的使用数值,这个数值称为**额定值**。按厂家规定的额定值使用电气设备,可使设备达到最佳工作状态,同时安全可靠、保证正常的使用寿命。一般的电气设备都有额定电压 U_N 、额定电流 I_N 、额定功率 P_N 等参数。

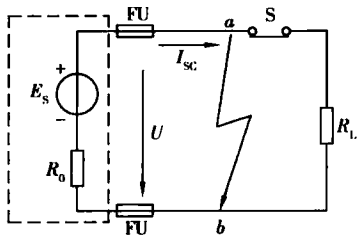


图 1.1.13 电路的短路状态

短路:当开关 S 闭合时由于某种原因 a 、 b 两点连在一起了,称为 a 、 b 处被短路,如图 1.1.13 所示。此时电源输出的端电压 $U=0$,电源对外输出功率 $P=0$,输出电流不经过外接负载,而通过短路线形成短路电流 I_{sc} ,其大小为: $I_{sc} = \frac{E_s}{R_0}$,电源产生的功率全部被内阻耗掉。由于电

源内阻 R_0 很小,所以短路电流很大,会引起电源或导线绝缘的损坏,严重时会引起火灾。为此,在电路中需设置短路保护元件。简单可行的方法是在电源出线端串接熔

断器 FU,一旦发生电源或负载短路,熔丝立即熔断,切断电源和用电设备。

1.1.4 受控电源

前面提到的电源如发电机、电池等,由于能独立地为电路提供能量,所以被称为独立电源。受控电源是另一类电源模型,它的输出具有理想电源的特性,但其参数却受电路中其他电量的控制。受控电源是为了描述电子器件的特性而提出的电路元件模型。受控电源按控制量和被控制量的关系分为 4 种类型:电压控制电压源(VCVS)、电压控制电流源(VCCS)、电