

新世纪
高等职业教育规划教材



汽车电工与电子技术基础

冯 渊 主 编

 机械工业出版社
China Machine Press



新世纪高等职业教育规划教材

汽车电工与电子技术基础

主 编 冯 渊

参 编 付晓光

杨志伟

吕 玫

余剑东

主 审 郭再泉



机械工业出版社

为了适应汽车专业教学改革的需要,特编写了《汽车电工与电子技术基础》一书。本书将电工技术、电子技术的基本知识,与汽车电器、电子设备等汽车专业教学内容进行了适当的整合,介绍了与汽车技术有关的直流电路、交流电路、电磁学、交流发电机与电动机、低压电器与控制电路等电工技术和模拟电子技术、数字电子技术等基本知识。

本书取材新颖、实用性强,兼有专业基础课程和专业课程的特点,可供高等工科大学、高等职业学校汽车专业作教材使用,也可供汽车使用、维修保养和检测技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

汽车电工与电子技术基础/冯渊主编. —北京:机械工业出版社, 2002.7

新世纪高等职业教育规划教材

ISBN 7-111-10357-2

I. 汽… II. 冯… III. 汽车—电工—高等学校:技术学校—教材
IV. U463.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2002) 第 035002 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑:赵爱宁 版式设计:张世琴 责任校对:韩 晶

封面设计:姚 毅 责任印制:付方敏

北京铭成印刷有限公司印刷·新华书店北京发行所发行

2003 年 1 月第 1 版·第 2 次印刷

787mm × 1092mm $1/16$ · 14.75 印张·360 千字

3 001—5 000 册

定价:21.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

本社购书热线电话(010)68993821、88379646

封面无防伪标均为盗版

新世纪高等职业教育规划教材编审委员会

主任委员	李维东	广东白云职业技术学院	常务副院长
副主任委员	陈周钦	广东交通职业技术学院	院长
	石令明	广西柳州职业技术学院	院长
	蔡昌荣	广州民航职业技术学院	副院长
	覃洪斌	广西职业技术学院	副院长
	姚和芳	湖南铁道职业技术学院	副院长
	韩雪清	机械工业出版社教材编辑室	副主任
委 员	沈耀泉	深圳职业技术学院	副院长
	郑伟光	广东机电职业技术学院	副院长
	张尔利	广西交通职业技术学院	院长
	谈向群	无锡职业技术学院	副院长
	刘国生	番禺职业技术学院	副院长
	陈大路	温州职业技术学院理工学区	主任
	邹 宁	广西机电职业技术学院	副院长
	成王中	济源职业技术学院	副院长
	管 平	浙江机电职业技术学院	副院长
	韦荣敏	广西柳州市交通学校	校长
	田玉柯	遵义航天工业学校	校长
	黄秀猛	厦门市工业学校	校长
	张毓琴	广东白云职业技术学院	兼委员会秘书

编写说明

20 世纪 90 年代以来,我国高等职业教育为社会主义现代化建设事业培养了大批急需的各类专门人才,提高了劳动者的素质,对建设社会主义精神文明,促进社会进步和经济发展起到了重要作用。中共中央、国务院《关于深化教育改革,全面推进素质教育的决定》指出:“要大力发展高等职业教育。”教育部在《关于加强高职高专教育人才培养工作的意见》中明确指出:“高职高专教育是我国高等教育的重要组成部分,培养拥护党的基本路线,适应生产、建设、服务第一线需要的,德、智、体、美等方面全面发展的高等技术应用性专门人才;学生应在具有必备的基础理论知识和专门知识的基础上,重点掌握从事本专业领域实际工作的基本能力和基本技能。”加入 WTO 以后,我国将面临人才资源的全球竞争,其中包括研究开发型人才的竞争,也包括专业技能型优秀人才的竞争。高等职业教育要适应我国现代化建设的需要,适应世界市场和国际竞争的需要,尽快为国家培养出大批符合市场需求的、有熟练技能的高等技术应用性人才。

教材建设工作是整个高等职业教育工作中的重要内容,在贯彻国家教改精神保证培养人才质量等方面起着重要作用。根据目前高等职业教育发展的趋势,机械工业出版社组织全国多所在高等职业教育办学有特色、在社会上有影响的高职院校成立了“新世纪高等职业教育规划教材编审委员会”,诚请教学经验丰富、实践能力强的专业骨干教师,组织、规划、编写了这套“新世纪高等职业教育规划教材”,首批教材含三个专业系列共 21 本书(书目附后)。系列教材凝聚了全体编审人员、编委会委员的大量心血,同时得到了各委员院校的大力支持,在此表示衷心感谢。

参加本套教材编写的作者均来自教学一线,他们对高职教育的专业设置、教学大纲、教学改革形势都有深刻的认识和体会。这为编写出具有创新性、适用性的高职教材奠定了良好基础。

本套教材的编写以保证基础、加强应用、体现先进、突出以能力为本位的职教特色为指导思想,在内容上遵循“宽、新、浅、用”的原则。所谓“宽”,即知识面宽,适用面广;所谓“新”,就是要体现新知识、新技术、新工艺、新方法;所谓“浅”,是指够用为度、通俗易懂;所谓“用”,就是要注重应用、面向实践。

本套教材的出版,将促进高等职业教育的教材建设,对我国高等职业教育的发展产生积极的影响。同时,我们也希望在今后的使用中不断改进、完善此套教材,更好地为高等职业教育服务,为经济建设服务。

新世纪高等职业教育规划教材编审委员会

前 言

汽车技术性能在安全、环保和节能方向上的日益提高,电工、电子技术在汽车上应用的比重逐渐加大,要求现代汽车的使用、维护与检测人员也应向机电复合型发展。为了适应这一要求,我们组织编写了本教材。

本书是汽车专业使用的电工与电子技术基础教材,其具有以下几方面特点:

(1) 应用性 本教材侧重理论联系实际,选材以实际应用为原则,简支强干,避免理论过深过偏。

(2) 专业性 结合汽车专业教学,本教材选择汽车典型电路作为教材内容,体现了基础理论与专业应用需要相结合的原则,具有高职教育的特点。

(3) 普适性 为了适应专业教学改革的不同需要,本教材在编写过程中,仍然保留了电工技术、电子技术的主体框架,便于相关人员组织教学和自学。

本书由冯渊主编,参加编写的有:冯渊(第一章、附录)、付晓光(第二、七章)、吕玫(第三章)、余剑东(第四、五章)、杨志伟(第六章)。

本书主审郭再泉对全书提出了许多修改意见,在此表示衷心感谢。

由于是初次进行本类教材的改革尝试,加上编者水平有限,疏漏谬误之处在所难免,欢迎广大读者批评指正。

编 者

2002年2月

目 录

前言

第一章 直流电路与分析 1

第一节 电路及其基本物理量 1

第二节 电路的三种状态 5

第三节 电压源和电流源及其等效变换 7

第四节 基尔霍夫定律 9

第五节 电路的一般分析方法 11

复习思考题 16

第二章 交流电路与分析 20

第一节 正弦交流电的三要素及相量表示法 20

第二节 电阻、电感、电容在交流电路中的特性 24

第三节 正弦交流电路的功率与功率因数 34

第四节 三相交流电路 36

第五节 电路的过渡过程及换路定律 42

第六节 RC 串联电路的过渡过程 46

第七节 RL 串联电路的过渡过程 48

第八节 RLC 振荡电路及在汽油机点火系统中的应用 50

复习思考题 51

第三章 电磁学基础 56

第一节 磁场与电磁感应 56

第二节 铁磁性材料 59

第三节 磁路基本定律 60

第四节 含有铁心线圈的交流电路 62

第五节 变压器 65

第六节 点火线圈与汽车传统点火系统的工作过程 70

复习思考题 74

第四章 发电机与电动机 76

第一节 三相异步电动机的构造与工作原理 76

第二节 异步电动机的转矩特性和机械特性 84

第三节 异步电动机的运转与控制 86

第四节 车用交流发电机 91

第五节 直流电动机 94

复习思考题 101

第五章 低压电器与控制电路 103

第一节 常用低压电器 103

第二节 基本控制电路 107

第三节 车用低压电器电路 111

第四节 安全用电 116

复习思考题 119

第六章 模拟电子技术基础 120

第一节 半导体简介 120

第二节 三极管与放大电路 125

第三节 反馈电路 136

第四节 运算放大器及其应用 142

第五节 正弦波振荡器简介 152

第六节 晶闸管及其应用 158

第七节 整流与稳压电路 168

复习思考题 177

第七章 数字电子技术基础 180

第一节 数字电路基本知识 180

第二节 基本逻辑门电路 184

第三节 TTL 集成电路 188

第四节 CMOS 集成电路 193

第五节 组合逻辑电路 194

第六节 时序逻辑电路 204

复习思考题 220

附录 225

附录 A 部分电气图用图形符号 225

附录 B 部分电路元件的图形符号 225

附录 C 机动车操纵、指示、信号装置图形标志 226

参考文献 227

第一章 直流电路与分析

本章首先介绍电路的基本概念,包括电路模型、电路的主要物理量、电路的状态、电压源与电流源及其等效变换,并介绍电流和电压的参考方向;然后介绍基尔霍夫定律、叠加定律和戴维南定律等直流电路的基本分析方法,并以汽车照明电路的分析为例介绍直流电路的一般分析。在分析时,先从直流电路出发,再将直流电路中的一般规律性结论扩展到交流电路中去。

第一节 电路及其基本物理量

一、电路

电路就是电流所通过的路径,它是由电路元件(电器设备)按一定方式联结起来的整体。其作用有两个方面:一是实现能量的转换、传输和分配(如电力系统电路等),即电力电路;二是实现电信号的处理与传递(如广播电视系统),即信号电路。电路也称电网络。

用规定的图形符号表示实际电路中的各器件联结关系的原理图称为电原理图(见图1-1b)。

由电阻器、电容器、电磁线圈、运算放大器等电路元件组成的实际电路,其工作时的电磁性质是非常复杂的,绝大多数元件都具有多种电磁效应。为了便于探讨电路的一般规律,简化电路的分析,通常将实际的电路元件用理想电路元件替代(或称模型化)。即在一定的条件下,突出实际元件主要的电磁性质,忽略其次要因素,把它近似地看作理想电路元件,用一个理想电路元件或由几个理想元件的组合来替代。用“电压源”等来替代主要供给能量的实际元件(如蓄电池、干电池、发电机等);用“电阻元件”来替代主要消耗电能并转换成其他形式能量的实际元件(如照明灯、车用点烟器、起动机、汽车喇叭等);用“电感元件”来替代主要储存磁场能量的实际元件(如磁化线圈、变压器线圈、点火线圈等);用“电容元件”来替代主要储存电场能量的实际元件(如电容器等)。用理想电路元件及其组合来代替实际电路元件构成的电路称为电路模型。

在电路分析时大都是对电路模型进行基本规律的研究和理论分析,并将得出的结论推广到实际电路中去。电路模型中的理想元件用规定的电路符号来表示时得到的电路模型图,简称电路图。以手电筒为例,图1-1a为实际电路,图1-1b为电原理图,图1-1c为电路模型。由图1-1c可见,通常干电池用电压源 u_s 和内部电阻 R_0 表示;灯泡(将电能转换成光能)用电阻元件 R_L 表示,有时也将这类取用电能的装置称为负载;手电筒的金属壳体或联结铜条,其消耗能量忽略不计,用联接线(无电阻)表示;电筒开关用S表示。

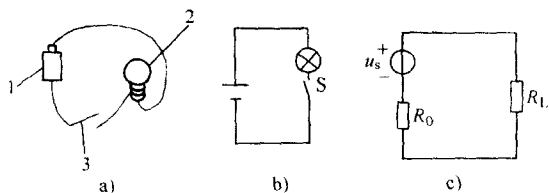


图1-1 手电筒电路

a) 实际电路 b) 电原理图 c) 电路模型

1—干电池 2—灯泡 3—开关

按实际电路的几何尺寸 d 与电路中电磁波的波长 λ 的关系,电路可分为集中参数电路

和分布参数电路。满足 $d \ll \lambda$ 条件的称为集中参数电路，其特点是电路中电磁量仅为时间的函数，电路可用有限个理想元件表示；不满足 $d \ll \lambda$ 条件的电路称为分布参数电路（如高频传输电路）。本书仅就集中参数电路进行分析。

二、电流及参考方向

电流是一种物理现象，是带电粒子有规则的定向运动形成的，通常将正电荷移动的方向规定为电流正方向。电流的大小用电流强度来衡量，其数值等于单位时间内通过导体某一横截面的电荷量。根据定义有

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

式中， i 为电流，其单位为安培（A）； dq 为通过导体截面的电荷量，电荷量的单位为库仑（C）； dt 为时间（s）。

上式表明，在一般情况下，电流是随时间变化的。如果电流不随时间而变化，即 $dq/dt = \text{常数}$ ，则这种电流就称为恒定电流（简称直流）。直流时，不随时间变化的物理量用大写字母表示，式（1-1）可写成

$$I = \frac{Q}{t} \quad (1-2)$$

电流的方向是客观存在的，但在电路分析中，一些较为复杂的电路，有时某段电流的实际方向难以判断，甚至有时电流的实际方向还在随时间不断改变，于是要在电路中标出电流的实际方向较为困难。为了解决这一问题，在电路分析时，常采用电流的“参考方向”这一概念。电流的参考方向可以任意选定，在电路图中用箭头表示。当然，所选的参考方向不一定就是电流的实际方向。当参考方向与电流的实际方向一致时，电流为正值（ $i > 0$ ）；当参考方向与电流的实际方向相反时，电流为负值（ $i < 0$ ）。这样，在选定的参考方向下，根据电流的正负，就可以确定电流的实际方向，如图 1-2 所示。在分析电路时，先假定电流的参考方向，并以此去分析计算，最后用求得答案的正负值来确定电流的实际方向。

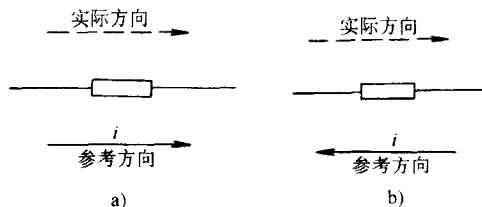


图 1-2 电流的参考方向

a) $i < 0$ b) $i > 0$

三、电压

电荷在电路中运动，必定受到力的作用，也就是电场力对电荷做了功，或者说带电粒子在电场中运动必然要做功。如图 1-3 所示， a 极板带正电， b 极板带负电， a 、 b 两极板间形成了电场，其方向由 a 指向 b 。在电场力的作用下，自由电子由 b 运动到 a ，电场力对负电荷做功。电场力做功的能力用电压来度量，电压的方向规定为由高电位点指向低电位点，并定义为：单位正电荷在电场力作用下，由 a 运动到 b 电场力所做的功，称为电路中 a 到 b 间的电压，即

$$u_{ab} = \frac{dw_{ab}}{dq} \quad (1-3)$$

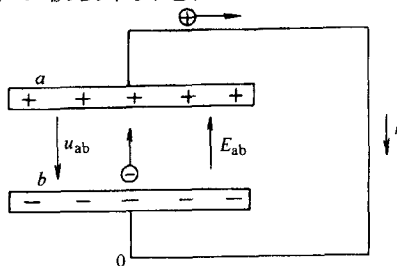


图 1-3 电压与电动势

式中, u_{ab} 为 a 到 b 间的电压, 电压的单位为伏特 (V); dW_{ab} 为 dq 的正电荷从 a 运动到 b 所做的功, 功的单位为焦耳 (J)。

在直流时, 式 (1-3) 可写成

$$U_{ab} = \frac{W_{ab}}{Q} \quad (1-4)$$

在电路分析时, 也需选取电压的参考方向, 当电压的参考方向与实际方向一致时, 电压为正 ($u > 0$); 相反时, 电压为负 ($u < 0$)。电压的参考方向可用箭头表示, 也可用正 (+)、负 (-) 极性表示, 如图 1-4 所示。

四、电位

在电路中任选参考点 0, 该电路中某点 a 到参考点 0 的电压就称为 a 点的电位。电位的单位为伏特 (V), 用 V 表示。电路参考点本身的电位 $V_0 = 0$, 参考点也称为零电位点。根据定义, 电位实际上就是电压, 即

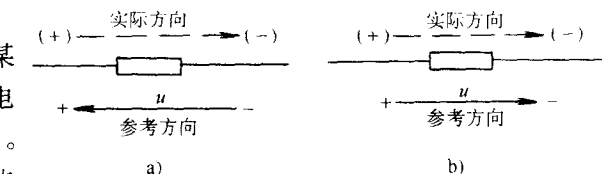


图 1-4 电压的参考方向

a) $u < 0$ b) $u > 0$

$$V_a = U_{a0} \quad (1-5)$$

可见, 电位也可正值或负值, 某点的电位高于参考点, 则为正, 反之则为负。在图 1-3 中, 任选参考点 0, 则 a 、 b 两点的电位分别为 $V_a = U_{a0}$ 、 $V_b = U_{b0}$ 。按照做功的定义, 电场力把单位正电荷从 a 点移到 b 点所做的功, 等于把单位正电荷从 a 点移到 0 点, 再移到 b 点所做的功的和, 即

$$U_{ab} = U_{a0} + U_{0b} = U_{a0} - U_{b0} = V_a - V_b$$

或

$$U_{ab} = V_a - V_b \quad (1-6)$$

式 (1-6) 表明, 电路中 a 、 b 两点间的电压等于 a 、 b 两点的电位差, 因而电压也称为电位差。

五、电动势

在图 1-3 所示的电路中, 正电荷在电场力作用下不断从 a 极板通过联接导线流向 b 极板, 如果没有其他外力作用, 运动到 b 极板的正电荷将增多使其电位逐渐升高, 而 a 极板正电荷的减少同时使其电位逐渐降低, a 、 b 两极板之间的电位差就会越来越小, 最后为零, 联接导线中的电流也将减小, 最后为零。为了维持导线中的电流, 就必须使 a 、 b 两极板间保持一定的电压, 但由于电场力的作用, 电极上的正电荷不能逆电场而上, 所以要借助于外力克服电场力做功, 使运动到 b 极板的正电荷经过另一路径再流向 a 极板。这种外力是非电场力, 称为电源力。衡量电源力对电荷做功的能力的物理量称为电动势。电动势在数值上等于电源力将单位正电荷由低电位 (b) 移到高电位 (a) 所做的功。电动势的单位为伏特 (V), 用 E 表示。电动势的方向规定为在电源内部由负极板指向正极板, 即从低电位点指向高电位点。

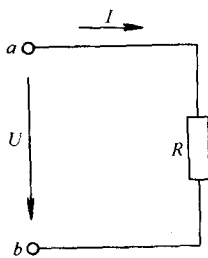


图 1-5 电能与电功率计算

六、电能和电功率

在图 1-5 所示的直流电路中, a 、 b 两点的电压为 U , 电路中的电流为 I , 由电压定义可知, 在 t 时间内, 电场力所做的功为

$$A = UQ = UI t \quad (1-7)$$

电阻元件在 t 时间内所消耗 (或吸收) 的电能为

$$W = UI t = I^2 R t = \frac{U^2}{R} t \quad (1-8)$$

单位时间内消耗的电能称为电功率 (简称功率), 即

$$P = \frac{W}{t} = UI = I^2 R = \frac{U^2}{R} \quad (1-9)$$

在我国法定计量单位中, 电能的单位是焦耳 (J); 功率的单位是瓦特 (W)。有时电能的单位用千瓦时 (kW·h) 表示, 1kW·h 就是指 1kW 功率的设备, 使用 1h 所消耗的电能。如 40W 的灯泡, 工作 25h, 其消耗的电能就是 1kW·h。1kW·h 俗称 1 度电。

$$1\text{kW}\cdot\text{h} = 1000\text{W} \times 3600\text{s} = 3.6 \times 10^6\text{J} = 3.6\text{MJ}$$

例 1-1 图 1-6 电路中, $R_1 = 3\Omega$, $R_2 = 4\Omega$, $R_3 = 3\Omega$, $R_4 = 1\Omega$, $I_3 = 1\text{A}$, 计算 a 、 b 、 c 各点的电位和电阻 R_1 消耗的电功率。

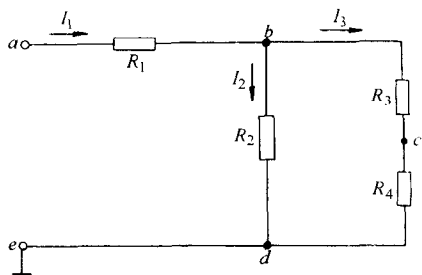


图 1-6 例 1-1 图

解 (1) 各点的电位计算

$$V_c = U_c = I_3 R_4 = (1 \times 1) \text{V} = 1\text{V}$$

$$V_b = U_{bc} + V_c = I_3 R_3 + V_c = (1 \times 3 + 1) \text{V} = 4\text{V}$$

$$U_{bd} = I_2 R_2 = V_b - V_d$$

$$I_2 = \frac{U_{bd}}{R_2} = \frac{4 - 0}{4} \text{A} = 1\text{A}$$

$$I_1 = I_2 + I_3 = (1 + 1) \text{A} = 2\text{A}$$

$$V_a = U_{ab} + V_b = I_1 R_1 + V_b = (2 \times 3 + 4) \text{V} = 10\text{V}$$

(2) 电阻 R_1 吸收的电功率

$$P_1 = I_1^2 R_1 = (2^2 \times 3) \text{W} = 12\text{W}$$

例 1-2 图 1-7 中, $I = 2\text{A}$, $R = 5\Omega$, $E = 6\text{V}$, 试计算 U_{ab} 。

解 (1) 图 1-7a 中

$$U_{ab} = IR + E = (2 \times 5 + 6) \text{V} = 16\text{V}$$

(2) 图 1-7b 中

$$U_{ab} = -IR + E = (-2 \times 5 + 6) \text{V} = -4\text{V}$$

注意: 图 1-7b 中电压与电流的参考方向相反。

例 1-3 图 1-8 中, $R_1 = 6\Omega$, $R_2 = 2\Omega$, $R_3 = 2\Omega$, 试求开关 S 在断开和闭合两种状态下 B 点的电位。

解 (1) 断开时

$$I = \frac{U_{AC}}{R_1 + R_2 + R_3} = \frac{6 - (-4)}{6 + 2 + 2} \text{A} = 1\text{A}$$

$$V_B = V_A - IR_1 = (6 - 1 \times 6) \text{V} = 0\text{V}$$

(2) 闭合时, R_3 被短路, 则

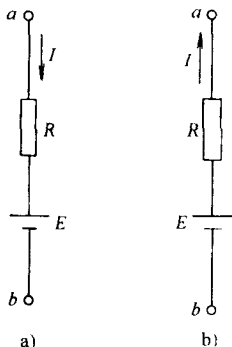


图 1-7 例 1-2 图

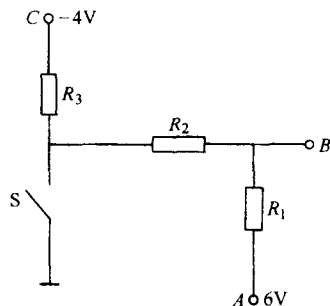


图 1-8 例 1-3 图

$$I = \frac{U_{AC}}{R_1 + R_2} = \frac{6}{6+2} \text{A} = 0.75 \text{A}$$

$$V_B = V_A - IR_1 = (6 - 0.75 \times 6) \text{V} = 1.5 \text{V}$$

第二节 电路的三种状态

一、空载状态

空载状态又称断路或开路状态（见图 1-9），它是电路中开关断开或联接导线折断引起的一种极端运行状态。电路空载时，外电路所呈现的电阻可视为无穷大，故电路具有下列特征：

1) 电路中的电流为零，即 $I = 0$ 。

2) $U_1 = E - IR_0 = E$ ，即电源的端电压等于电源的电动势。此电压称为空载电压或开路电压，用 U_0 表示。利用此特点可以测出电源的电动势。

3) 因为电源对外不输出电流，故 $P_1 = U_1 I = 0$ ， $P_2 = U_2 I = 0$ 。可见电源的输出功率 P_1 和负载所消耗的功率 P_2 均为零。

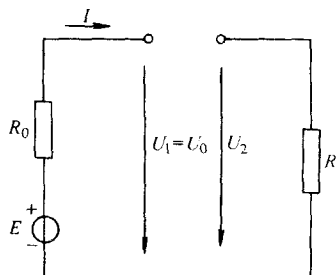


图 1-9 电路的空载状态

二、短路状态

由于电源线绝缘损坏或操作不当等引起电源的两输出端相接触，造成电源被直接短路的情况（图 1-10），是电路的另一种极端运行状态。当电源直接短路时，外电路所呈现的电阻可视为零，电路具有下列特征：

1) 电源中的电流最大，输出电流为零。因为： $I_s = \frac{E}{R_0}$ ，在一般供电系统中，电源的内阻 R_0 很小，故短路电流 I_s 很大，但对外电路无电流输出， $I = 0$ 。

2) $U_1 = E - I_s R = 0$ ， $U_2 = 0$ ，即电源和负载的端电压均为零。表明电源的电动势全部降落在电源的内阻上，因而无输出电压。

3) $P_1 = U_1 I = 0$ ， $P_2 = U_2 I = 0$ ，电源的输出功率 P_1 和负载所消耗的功率 P_2 均为零。

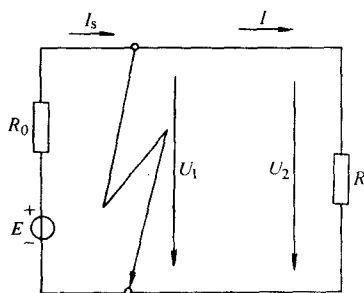


图 1-10 电路的短路状态

此时电动势所发出的功率为

$$P_E = \frac{E^2}{R_0} = I_s^2 R_0 \quad (1-10)$$

由于电源对外电路既不输出电压，也不输出电流，电源电动势所发出的功率全部消耗在内阻上。

例 1-4 图 1-11 为某汽车行李箱灯电气简图，蓄电池电动势 $E = 12 \text{V}$ ，内阻 $R_0 = 0.2 \Omega$ ，灯泡为 12V 、 6W ，试求：

1) 空载电压 U_0 ；

2) 短路电流 I_s 。

解 (1) 灯泡电阻

$$R = \frac{U_N^2}{P_N} = \frac{12^2}{6} \Omega = 24 \Omega$$

$$(2) U_0 \approx E = 12V$$

$$(3) I_s = \frac{E}{R_0} = \frac{12}{0.2} A = 60A$$

由上计算可知, 短路时电路中电流很大, 短路时强电流容易烧毁电源与设备, 另外, 它产生强大的电磁力会造成机械上的损坏, 因而实际电路中必须设置短路保护装置, 最常用的是熔断器。

三、负载状态

如图 1-12 所示, 负载状态是一般的有载工作状态。此时电路有下列特征:

1) 电路中的电流为

$$I = \frac{E}{R_0 + R}$$

当电源的电动势 E 和内阻 R_0 一定时, 电路中电流的大小取决于负载的大小。

2) 电源的端电压为

$$U_1 = E - IR_0 \quad (1-11)$$

电源的端电压总是小于电源的电动势。若忽略线路上的压降, 则负载的端电压 U_2 等于电源的端电压 U_1 。

3) 若不计线路损失, 则有 $P_1 = U_1 I = U_2 I = P_2$, 即电源的输出功率等于负载的消耗功率。

四、额定功率

电路元件在工作时都有一定的使用限度, 其限额值称为额定值。例如, 标明“220V40W”的白炽灯泡, 220V 和 40W 表明该灯泡的正常工作电压为 220V (用 U_N 表示), 且在此电压下工作, 灯泡消耗的电功率为 40W (用 P_N 表示)。如该灯泡接入低于额定电压的 110V 电路中, 由于其灯丝热电阻

$$R = \frac{U_N^2}{P_N} = \frac{220^2}{40} \Omega = 1210 \Omega$$

灯泡的实际功率为

$$P = \frac{U^2}{R} = \frac{110^2}{1210} W = 10W$$

可见, 此灯泡发光强度不足。反之, 若将该灯泡接入高于额定电压的 380V 电路中, 灯泡的实际功率为

$$P = \frac{U^2}{R} = \frac{380^2}{1210} W \approx 119W$$

远大于额定功率, 灯泡将很快被烧毁。因而电路元件应工作在额定条件下。如果电路元件长时间工作在高于额定电压的状态下, 会使电器设备和电源的温度迅速上升, 导致电源及电气设备烧毁, 甚至引起火灾。

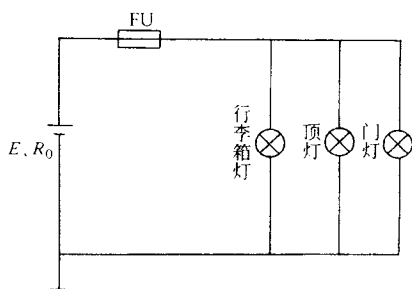


图 1-11 例 1-4 图

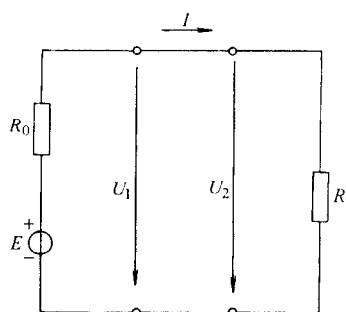


图 1-12 电路的负载状态

第三节 电压源和电流源及其等效变换

一个实际的电源对外电路所呈现的特性（外特性），即电源端电压与输出电流之间的关系，都可以用电压源模型或电流源模型来表示。

一、电压源

一个实际的电源可以用一个电动势 E 和内阻 R_0 相串联的理想元件组合来代替。这种电源的电路模型称为电压源。图 1-13a 为电压源与外电路的联接。由前述可知，电压源的电动势 E 、电流 I 及其端电压 U 的关系为： $U = E - IR_0$ ，这就是直流电压源的外特性方程。 E 、 R_0 是常数，外特性 $U = f(I)$ 呈线性关系。电源开路时， $I = 0$ ， $U = U_0 = E$ ；电源短路时， $U = 0$ ， $I = I_s = E/R_0$ 。图 1-13b 所示称为电压源的外特性曲线，它表征着电压源的端电压 U 与输出电流 I 之间的关系。电压源的外特性曲线表明，当输出电流 I 增大时，端电压 U 随之下降。 R_0 越小，则直线越平坦。在理想情况下， $R_0 = 0$ ，它的外特性是一条平行于横轴的直线，表明负载变化时，电源的端电压恒等于电源的电动势，即 $U = E$ 。这种端电压恒定，端电压不受输出电流影响的电源称为理想电压源，也称恒压源（见图 1-13c）。理想电压源的输出电流由负载电阻 R 和电压源的电压 U 确定。理想电压源实际上是不存在的，但如果电源的内阻远小于负载电阻（ $R_0 \ll R$ ），则端电压基本恒定，可忽略 R_0 的影响，认为是一个理想电压源。通常，稳压电源（或称稳压器）和新的干电池都可近似地认为是理想电压源。

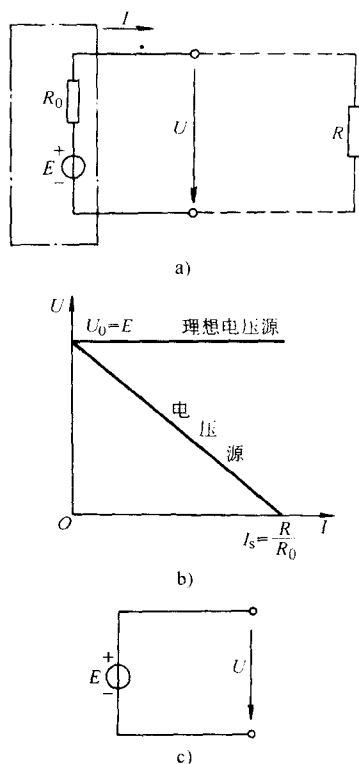


图 1-13 电压源与外特性曲线

a) 电压源与外电路联接

b) 外特性曲线 c) 理想电压源模型

二、电流源

电源的电路模型除了用电压源表示外，还可以用电流源来表示。变换上述直流电压源的外特性方程可得到如下关系式：

$$I = \frac{E}{R_0} - \frac{U}{R_0} = I_s - \frac{U}{R_0} \quad (1-12)$$

式 (1-12) 表明，一个实际电压源也可以用图 1-14a 所示的电路模型来表示，即可用一个电流为 I_s 和电阻为 R_0 相并联的理想元件的组合来代替，这种电源的电路模型称为电流源。式 (1-12) 是直流电流源的外特性方程式。式中 I_s 和 R_0 是常数， U 和 I 之间的关系是线性关系。电流源开路时， $I = 0$ ， $U = U_0 = I_s R_0$ ；电流源短路时， $U = 0$ ， $I = I_s$ （见图 1-14b）。 R_0 越大，则外特性曲线越陡。在理想情况下， $R_0 = \infty$ ，外特性曲线是一条与纵轴平行的直线，表明负载变化时，电流源的输出电流恒等于电源的短路电流，即 $I = I_s$ ，这种输出电流恒定，输出电流与端电压无关的电源称为理想电流源，也称恒流源（见图 1-14c）。理想电流源实际上也是不存在的，但如果电源的内阻远大于负载电阻（ $R_0 \gg R$ ），则电流基本恒定，也可认为是理想电流源。通常，稳流器和光电池等都可近似地认为是理想电流源。

三、电压源与电流源的等效变换

电压源与电流源的外特性是相同的, 因此电压源与电流源之间可以互等效变换。式 (1-12) 可知, 电压源与电流源之间的等效变换条件是内阻 R_0 相等, 且满足 $I_s = E/R_0$ 的条件。

在等效变换时还应注意:

1) 电压源是电动势为 E 的理想电压源与内阻 R_0 相串联, 电流源是电流为 I_s 的理想电流源与内阻 R_0 相并联, 是同一电源的两种不同电路模型。

2) 变换时两种电路模型的极性必须一致, 即电流源流出电流的一端与电压源的正极性端相对应。

3) 等效变换仅对外电路适用, 其电源内部是不等效的。

4) 理想电压源的短路电流 I_s 为无穷大, 理想电流源的开路电压 U_0 为无穷大, 因而理想电压源和理想电流源不能进行这种等效变换。

5) 扩展内阻 R_0 的内涵, 即有凡电动势为 E 的理想电压源与某电阻 R 串联的有源支路, 都可以变换成电流为 I_s 的理想电流源与电阻 R 并联的有源支路, 反之亦然。其相互变换的关系是

$$I_s = \frac{E}{R} \quad (1-13)$$

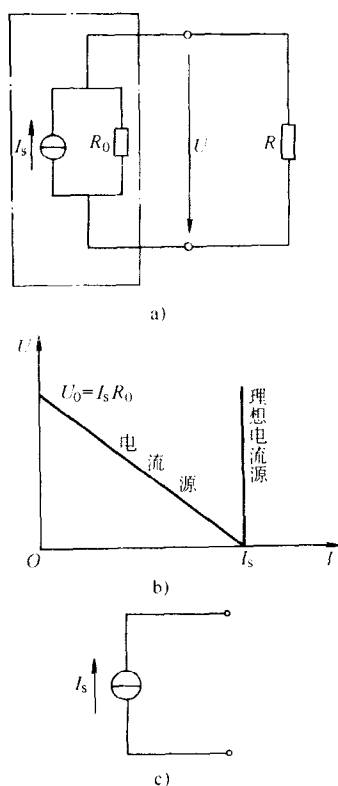


图 1-14 电流源与外特性曲线

a) 电流源与外电路联接
b) 外特性曲线 c) 理想电流源模型

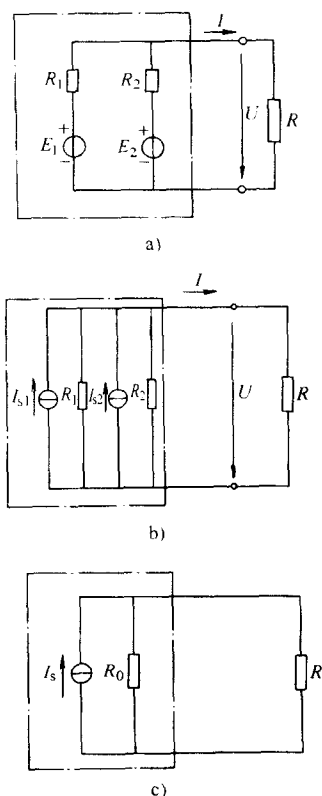


图 1-15 例 1-5 图

a) 电路图 b) 电压源转换成电流源
c) 等效电流源

式 (1-13) 中电阻 R 可以是电源的内阻, 也可以是与电压源串联或与电流源并联的任意电阻。

例 1-5 如图 1-15a 所示, 有两个电源同时向负载供给, $E_1 = 48\text{V}$, 内阻 $R_1 = 1\Omega$; $E_2 = 90\text{V}$, 内阻 $R_2 = 1.5\Omega$; $R = 25\Omega$ 。试求负载电流 I 。

解 (1) 将原电路中的电压源转换成电流源 (见图 1-15b), 由式 (1-13) 得

$$I_{s1} = \frac{E_1}{R_1} = \frac{48}{1}\text{A} = 48\text{A}$$

$$I_{s2} = \frac{E_2}{R_2} = \frac{90}{1.5}\text{A} = 60\text{A}$$

(2) 将两个电流源合并成一个等效的电流源 (见图 1-15c)

$$I_s = I_{s1} + I_{s2} = (48 + 60)\text{A} = 108\text{A}$$

(3) 负载电流

$$R_0 = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = \frac{1 \times 1.5}{1 + 1.5}\Omega = 0.6\Omega$$

$$I = \frac{R_0}{R_0 + R} I_s = \frac{0.6}{25 + 0.6} \times 108\text{A} \approx 2.5\text{A}$$

第四节 基尔霍夫定律

用串并联的方法能够最终化为单一回路的简单电路, 可以用欧姆定律来求解。用串并联的方法, 不能将电路最终化为单一回路的复杂电路, 其求解规律, 反映在基尔霍夫定律中。基尔霍夫定律是电路的基本定律之一, 它包含有两条定律, 分别称为基尔霍夫电流定律 (KCL) 和基尔霍夫电压定律 (KVL)。

一、基尔霍夫电流定律

基尔霍夫电流定律也称基尔霍夫第一定律, 是反映电路中任一节点各支路电流之间的关系。所谓节点, 就是三条或三条以上支路的汇合点。该定律可叙述为: 任一瞬时, 通过电路中任一节点的各支路电流的代数和恒等于零。用数学式来表达, 即

$$\sum I_k = 0 \quad (1-14)$$

式中 I_k 是联接于该节点的各支路电流, $k = 1, 2, \dots, n$ (设有 n 条支路汇接于该节点)。

对于电路中的某一节点, 分析计算是在指定的参考方向下进行的, 因而必须首先假定各支路电流的参考方向。若指定流入节点的电流为正时, 则流出节点的电流就为负 (相对于参考方向)。在图 1-6 所示的电路中, 选择节点 b , 在图示的参考方向下, 流入节点 b 的电流 1 个 (I_1), 流出节点 b 的电流 2 个 (I_2, I_3)。根据参考方向, 即有

$$I_1 - I_2 - I_3 = 0$$

基尔霍夫电流定律体现了电流的连续性原理, 因为对于电路中的任意一点 (包括节点), 单位时间内流入该点的电荷量必等于流出该点的电荷量, 所以流入某节点的电流必等于流出该节点的电流。必须指出, 基尔霍夫电流定律反映了电路中任一节点处各支路电流必须服从的约束关系, 与各支路上是什么元件无关。

基尔霍夫电流定律可以由节点扩展到任一假想闭合面。若假想有一闭合面 N 包围节点

A、B、C (见图 1-16), 对于节点 A、B、C 列出 KCL 方程

$$\text{节点 A: } I_1 - I_4 + I_6 = 0$$

$$\text{节点 B: } I_2 + I_4 - I_5 = 0$$

$$\text{节点 C: } I_3 + I_5 - I_6 = 0$$

上述三式相加得 $I_1 + I_2 + I_3 = 0$

可见, 通过电路中任一假想闭合面的各支路电流的代数和恒等于零。

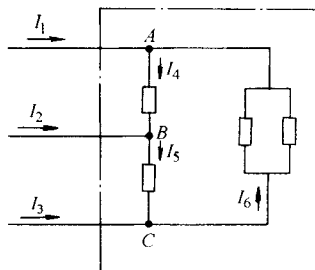


图 1-16 基尔霍夫电流定律的推广

例 1-6 如图 1-17 所示, $I_1 = 1\text{A}$, $I_2 = 3\text{A}$, $I_3 = 9\text{A}$, 试求 I_4 、 I_5 和 I_6 。

解 (1) 节点 E

$$I_4 = I_1 + I_2 = (1 + 3)\text{A} = 4\text{A}$$

(2) 节点 B

$$I_5 = I_2 + I_3 = (3 + 9)\text{A} = 12\text{A}$$

(3) 节点 F

$$I_6 = I_3 + I_4 = (9 + 4)\text{A} = 13\text{A}$$

二、基尔霍夫电压定律

基尔霍夫电压定律也称基尔霍夫第二定律, 是反映

电路中任一回路各支路电压之间的关系。所谓回路, 就是由若干支路所组成的闭合路径。该定律可叙述为: 任一瞬时, 作用于电路中任一回路各支路电压的代数和恒等于零。用数学式来表达, 即

$$\sum U_j = 0 \quad (1-15)$$

式中 U_j 是组成该回路的各支路电压, $j = 1, 2, \dots, m$ (设该回路有 m 个支路电压)。

对于电路中的某一回路, 必须首先指定回路的绕行方向 (顺时针或逆时针), 且假定各支路电压的参考方向, 当支路电压参考方向与回路绕行方向一致时取 “+” 号, 相反时取 “-” 号。同样, 基尔霍夫电压定律体现了电路中两点间的电压与路径选择无关, 是电路中任一回路各支路电压必须服从的约束关系, 与构成回路的各支路上是什么元件无关。推而广之, 从回路中的某一点出发, 经过任意路径绕行一周回到起始点, 该回路中的电压升等于电压降。

基尔霍夫电压定律可以由真实回路扩展到虚拟回路, 如图 1-18 所示。从虚拟回路的 B 点出发, $B \rightarrow D \rightarrow R_3 \rightarrow U_{s3} \rightarrow R_2 \rightarrow U_{s2} \rightarrow B$ 逆时针绕行, 则有

$$U_{BD} - U_{R3} + U_{s3} - U_{R2} - U_{s2} = 0$$

或

$$U_{BD} = U_{R3} - U_{s3} + U_{R2} + U_{s2}$$

例 1-7 如图 1-19 所示, $R_1 = 20\Omega$, $R_2 = 10\Omega$, $R_3 = 5\Omega$, $R_4 = 2\Omega$, $R_5 = 8\Omega$, $R_6 = 6\Omega$, $E = 12\text{V}$, 试求 I_1 和 V_a 。

解 由 KVL 可知

$$E - I_1 R_2 - I_1 R_3 = 0$$

$$I_1 = \frac{E}{R_2 + R_3} = \frac{12}{10 + 5}\text{A} = 0.8\text{A}$$

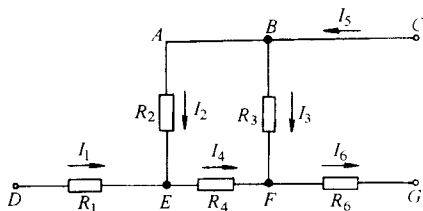


图 1-17 例 1-6 图