

轮机专业

中华人民共和国海船船员适任考试培训教材

船舶电气与自动化

(未满 750 kW 船舶)

中国海事服务中心组织编写

中华人民共和国海事局审定



大连海事大学出版社
Dalian Maritime University Press



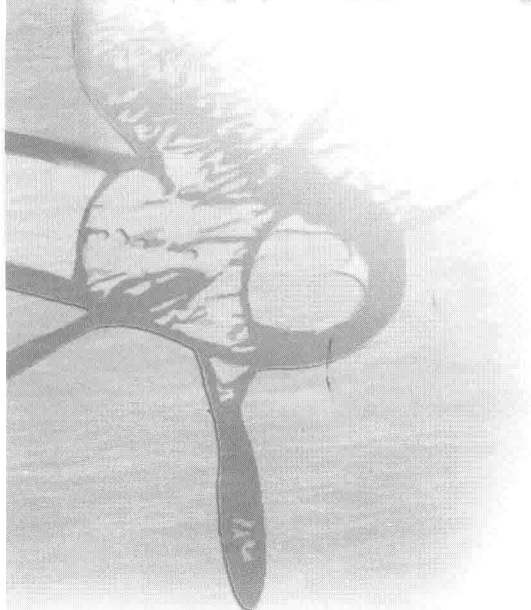
人民交通出版社
China Communications Press

中华人民共和国海船船员适任考试培训教材

船舶电气与自动化

(未满 750 kW 船舶)

中国海事服务中心组织编写
中华人民共和国海事局审定



大连海事大学出版社

Dalian Maritime University Press



人民交通出版社

China Communications Press

© 中国海事服务中心 2013

图书在版编目(CIP)数据

船舶电气与自动化: 未满 750 kW 船舶 / 郑志品, 林春熙主编. —大连: 大连海事大学出版社; 北京: 人民交通出版社, 2013. 5

中华人民共和国海船船员适任考试培训教材

ISBN 978-7-5632-2864-5

I. ①船… II. ①郑…②林… III. ①船用电气设备—职业培训—教材②船舶—自动化系统—职业培训—教材 IV. ①U66

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 096563 号

大连海事大学出版社出版

地址:大连市凌海路1号 邮编:116026 电话:0411-84728394 传真:0411-84727996

<http://www.dmupress.com> E-mail:cbs@dmupress.com

大连住友彩色印刷有限公司印装

大连海事大学出版社发行

2013年5月第1版

2013年5月第1次印刷

幅面尺寸:185 mm × 260 mm

印张:19.75

字数:449千

印数:1~3000册

出版人:徐华东

责任编辑:沈荣欣 刘若实

版式设计:海大

封面设计:王艳

责任校对:孙雅荻

ISBN 978-7-5632-2864-5 定价:59.00元

编委会成员

编委会主任 陈爱平

编委会常务副主任 郑和平

编委会副主任 郭洁平 李恩洪 侯景华

编委 韩杰祥 朱可欣 梁天才 王玉洋

陈国忠 梁军 郑乃龙 王长青

韩光显 葛同林 黄燕品 刘克坚

温宇钦



前 言

《中华人民共和国海船船员适任考试和发证规则》(简称 11 规则)已于 2012 年 3 月 1 日起生效,新的《中华人民共和国海船船员适任考试大纲》也于 2012 年 7 月 1 日开始实施。为了更好地指导帮助船员进行适任考试前的培训,进一步提高船员适任水平,在交通运输部海事局领导下,中国海事服务中心组织全国有丰富教学、培训经验和航海实际经验的专家共同编写了与《中华人民共和国海船船员适任考试大纲》相适应的培训教材。本教材编写依据 STCW 公约马尼拉修正案,采用图文并茂的形式,改变了长期以来以文字为主的教材编写方式。本教材的创新模式对今后的船员适任培训具有重要的指导意义。

本套教材知识点紧扣考试大纲,具有权威、准确、系统、实用的特点,重点突出船员适任考前培训和航海实践需掌握的知识,旨在培养船员具备在实践中应用知识的能力,并可作为工具书帮助船员上船工作使用。

本套教材是未满 500 总吨和 750 kW 船舶船员培训教材,由《船舶操纵与避碰》、《航海学》、《船舶结构与货运》、《船舶管理(驾驶)》、《船舶动力装置》、《主推进动力装置》、《船舶辅机》、《船舶电气与自动化》、《船舶管理(轮机)》组成。

本套教材在编写、出版工作中,得到了各直属海事局、各航海院校、海员培训机构、航运企业、人民交通出版社、大连海事大学出版社等单位的关心和大力支持,特致谢意。

中国海事服务中心

2012 年 12 月



编者的话

《船舶电气与自动化》(未满 750 kW 船舶)是我国船员考试的培训系列教材之一,是根据中华人民共和国海事局制定的《中华人民共和国海船船员适任考试大纲》编写的,覆盖未满 750 kW 船舶大管轮和二/三管轮“船舶电气与自动化”课程考试所要求的全部内容,适用于未满 750 kW 船舶的大管轮和二/三管轮适任证书考试培训,也可供海事管理机构和船员培训机构人员学习参考。

本书内容反映船舶电气与自动化在海船的实际应用,理论与实际密切结合,尽量体现新的科学技术在船舶电气与自动化中的应用,以适应对现代新型船舶管理的需要,在整体上体现了“新大纲”的要求。在编写过程中,本着精简、实用的原则,本书使用的语言通俗易懂、易于理解,便于学员自学。

本书共分九章,内容包括:第一章船舶电子、电气基础,第二章船舶电机与电力拖动,第三章船舶发电机和配电系统,第四章船舶电气设备的维护与修理、故障判断与排除,第五章船舶反馈控制系统基础,第六章船舶机舱辅助控制系统,第七章船舶主机遥控系统基本知识,第八章船舶机舱监测与报警系统,第九章船舶火灾自动报警系统。

《船舶电气与自动化》由宁波大学郑志品、广州航海高等专科学校林春熙共同主编(主编排名不分先后),第一章、第二章、第四章由郑志品编写,第三章、第五章至第九章由林春熙编写。全书由郑志品负责统稿,江苏海事职业技术学院查辅江主审,中国海事服务中心申益群参加了主要审定工作。

在教材编写过程中,得到了中华人民共和国海事局及兄弟院校有关单位的领导和众多专家的支持和指导,得到了宁波大学、广州航海高等专科学校众多老师的帮助,在此一并表示感谢。

由于编者水平有限、时间仓促,书中难免有不足之处,恳请读者批评指正。

编者

2012年12月



目 录

第一章 船舶电子、电气基础	1
第一节 直流电路	1
第二节 正弦交流电路	10
第三节 电与磁	29
第四节 电子器件	34
第二章 船舶电机与电力拖动系统	41
第一节 直流电机	41
第二节 变压器	44
第三节 交流异步电动机	48
第四节 控制电机及在船舶上的应用	59
第五节 船舶常用控制电器	61
第六节 异步电动机常用控制电路	72
第七节 锚机、绞缆机电力拖动控制系统	76
第三章 船舶发电机和配电系统	81
第一节 三相交流同步发电机	81
第二节 船舶电力系统的基本概念	84
第三节 船舶主配电板	89
第四节 船舶应急电源系统	92
第五节 船用发电机主开关的基本结构和功能	98
第六节 同步发电机有功功率调节与频率调节	102
第七节 同步发电机的自励恒压装置与发电机的无功功率调节	106
第八节 船舶电站运行的安全保护	115
第九节 船舶轴带发电机简介	120
第十节 船舶照明系统	125
第四章 船舶电气设备的维护与修理、故障判断与排除	138
第一节 船舶电气系统的工作安全要求	138
第二节 电气控制线路识图与控制线路装配	155



第三节	电气控制箱的常见故障查找与排除	156
第四节	船用电机的维修	157
第五节	船舶电力系统的继电保护及主要故障的判断和排除	161
第五章	船舶反馈控制系统基础	168
第一节	反馈控制系统的基本概念	168
第二节	船用自动化仪表的基本知识	173
第三节	船舶反馈控制系统的调节器及调节规律	182
第四节	船舶机舱中常用传感器	187
第五节	变送器	197
第六节	气动执行器与工作原理	201
第六章	船舶机舱辅助控制系统	205
第一节	柴油机气缸冷却水温度控制系统	205
第二节	船舶蒸汽锅炉控制系统	210
第七章	船舶主机遥控系统基本知识	218
第一节	主机遥控的基本概念	218
第二节	主机遥控的基本功能	221
√第八章	船舶机舱监测与报警系统	226
第一节	船舶机舱监测与报警系统基础知识	226
第二节	单元组合式监测与报警系统	230
第九章	船舶火灾自动报警系统	235
第一节	火灾自动报警系统基本类别和功能	235
第二节	火灾探测方法及探测器	238
练习题		248
参考文献		304



第一章

船舶电子、电气基础

第一节 直流电路

一、直流电路的基本物理量及单位

电路就是电流的通路,它是为了某种需要,将一些电气元件或设备按一定的方式组合起来的。按其所发挥的作用,电路可分为两大类:第一类是用来实现电能的转换和传输的电路,最典型的例子是电力系统,如图 1-1(a)所示;第二类是用来处理和传递信息的电路,即信息系统,常见的例子如扩音机,如图 1-1(b)所示。

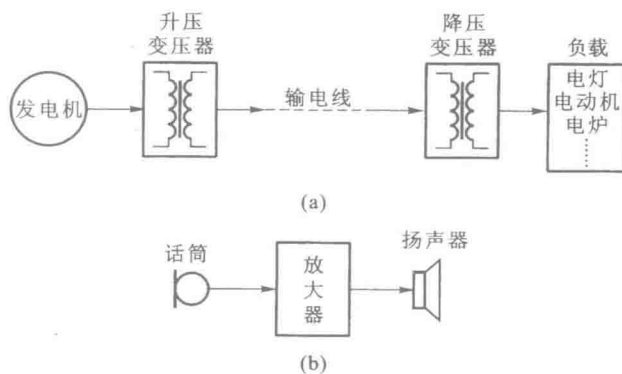


图 1-1 电路的组成与作用示意图

任何一个完整的电路都可以归纳为三个基本组成部分(图 1-1),即电源,负载和中间环节。

(1) 电源:产生和提供电能的装置,如发电机、电池等,是将非电能量转换为电能的装置。

(2) 负载:消耗电能的用电设备,如电动机、电灯等,是将电能转换为非电能的装置。

(3) 中间环节:电能的传输和控制装置,包括连接电源与负载之间的电缆、控制开关、



变压器、熔断器等各种控制设备。

(一) 电流

电流是电荷有规则的定向移动形成的。

电流的大小用电流强度(简称电流)来衡量。电流强度在数值上等于单位时间通过导体横截面的电荷量。

若在极短的时间 dt (s) 内通过导体横截面的微小的电荷量为 dq (C), 则电流为

$$i = dq/dt \quad (\text{A}) \quad (1-1)$$

上式表示的电流是随时间变化的。

如果电流不随时间变化, 即 $i = dq/dt = \text{常数}$, 则这种电流称为恒定的电流, 简称直流。当在 t (s) 内有 q (C) 的电荷量通过导体横截面, 则直流电流 I 可用下式计算, 即

$$I = q/t(\text{A}) \quad (1-2)$$

我国在工程计算中大多采用国际单位制(SI)。在国际单位制中, 电流(强度)的单位是安[培](A)。 $1\text{A} = \frac{1\text{C}}{1\text{s}}$ 。常用的小电流单位有毫安(mA)和微安(μA)。 $1\text{mA} = 1\,000\mu\text{A} = 10^{-3}\text{A}$, $1\mu\text{A} = 10^{-3}\text{mA} = 10^{-6}\text{A}$ 。

电流的实际方向: 规定正电荷移动的方向(负电荷移动的反方向)为电流的实际方向, 电流的方向一般用箭头表示。

电流的参考方向: 在分析和计算电路时, 需要根据电路中各电流的方向, 应用电路的基本定律写出分析计算式。但有时仅根据电路中给定的电源极性或条件还不能确定电流的实际方向时, 就需要在电路图中对未知电流先任意假设一个电流的参考方向, 如图 1-2 所示, 然后再根据参考方向, 应用电路的基本定律写出分析计算式。由于一个电流只有两种可能的方向, 因此可在假设参考方向的基础上用数学的正、负加以区别。如果分析计算的结果电流得正值, 则假定的参考方向就是该电流的实际方向, 如图 1-2(a) 所示; 如果得负值, 则其实际方向与参考方向相反, 如图 1-2(b) 所示。

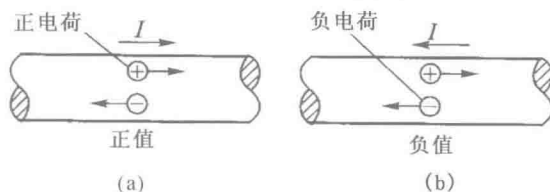


图 1-2 电流的参考方向

(二) 电压与电位

电场力和非电场力: 电场力即电荷之间作用力, 表现为同号电荷相斥、异号电荷相吸。非电场力是指作用于电荷上的与电场力的作用方向相反的力, 如发电机绕组导体切割磁场时产生的分离正、负电荷的力, 电池的化学反应所产生的分离正、负电荷的力, 电源内所产生的这种非电场力又称电源力。

任何带电现象都首先是非电场力克服电场力而分离异号电荷所形成的。电荷在非电场力的作用下移动, 非电场力做功, 使电荷的电位能增加。相反, 电荷在电场力的作用下移动, 则电场力做功, 使电荷的电位能减少。



电压是衡量电场力对电荷做功能力的物理量。电路中任意两点 a 和 b 间的电压 U_{ab} 在数值上等于电场力把单位正电荷从 a 点移到 b 点所做的功,也即单位正电荷从 a 到 b 所失去的电位能。因此电路中两点之间的电压等于该两点的电位之差(也即单位正电荷在该两点的电位能之差)。例如,电路中 a 和 b 两点的电位分别为 V_a 和 V_b ,则该两点之间的电压为

$$U_{ab} = V_a - V_b \quad (\text{V}) \quad (1-3)$$

电压的规定方向为由高电位指向低电位,因此电压又称电压降(或电位降)。

当电压的实际方向不能确定时,同样可以假设参考方向。但是在电源以外的电路中,电流总是从高电位流向低电位,电压和电流的方向是互相关联的,当两者的方向均不能确定时,假设了电流的参考方向也就关联地设定了电压降的方向。

电压的方向可用“+、-”极性表示,也可用箭头或双下标表示。(U_{ab} 表示方向由 a 指向 b)。

电位:电路中某点的电位等于该点到零电位点(或称参考电位)的电压。

零电位点可任意选取,所选的零电位点不同,则电路各点的电位也随之改变,所以电位值是相对的。例如选 b 点为零电位点,即 $V_b = 0$,则由式(1-3)可知, a 点的电位 $V_a = U_{ab}$ 。若选 $V_a = 0$,则 b 点的电位 $V_b = U_{ba} = -U_{ab}$ 。可见电位值是相对的,但两点之间的电位差(即电压)是绝对的,与零电位点的选择无关。通常选取电路的公共点作为零电位点,并用符号“⊥”表示。式(1-3)是计算电位的基本公式。只要已知电路中某点的电位,如已知 V_b (V_b 可以是 0,也可以不是 0),则其他任意一点 a 的电位 V_a 可通过计算 a 到 b 点的电压 U_{ab} 求得,即 $V_a = U_{ab} + V_b$ 。

电压、电位的国际单位是伏[特](V)。常用的单位还有千伏(kV)、毫伏(mV)和微伏(μV)。

(三) 电动势

电动势:是衡量电源力对电荷做功能力的物理量。电源的电动势 E 在数值上等于电源力把单位正电荷由电源的低电位(负)端经电源内部移到高电位(正)端所做的功,也即单位正电荷所获得的电位能。因此电动势的计量单位与电压的相同,即伏特。

电动势的规定方向:是由低电位(负)端指向高电位(正)端,与电压的方向相反。由于电源内存在电源力,正电荷不能通过电源内部由(正)端回到(负)端。但当电源与外部负载电路接通时,正电荷可在电场力的作用下通过外电路由高电位端向低电位端移动,从而形成电路电流。随着两端电荷及其电场力的减少,电源力又可以克服电场力的阻力继续将正电荷不断地移向高电位端,从而保持连续的电流。在电场力的作用下电荷通过外部负载电路移动的过程中,由于克服电路的阻力而使电荷的电位能逐渐减少,这是将电能转换为非电能(如热能)的过程。

二、电路基本定律

(一) 欧姆定律

1. 线性电阻电路的欧姆定律

欧姆定律指出:电阻两端的电压 U 与流过电阻的电流 I 成正比,其比值就是该电阻



R 。它是分析和计算电路的最基本定律。

当电路中某一电阻 R 的电压 U 和电流 I 的参考方向一致时,如图 1-3(a) 所示,欧姆定律的数学表达式为

$$R = \frac{U}{I} \quad (1-4)$$

如果遇到电路中某一电阻 R 的电压 U 和电流 I 的参考方向相反时,如图 1-3(b)、(c) 所示,则以上式子应加一负号,即

$$R = -\frac{U}{I} \quad (1-5)$$

这里应注意,一个式子中有两套正负号,式子中的正负号是根据电路上所选电压和电流参考方向得出的,此外,电压和电流本身还有正值和负值之分。

在国际单位制中,电阻的单位为欧[姆](Ω),计量高电阻时,常用千欧($k\Omega$)或兆欧($M\Omega$)。

欧姆定律 $U = IR$ 所表示的电流与电压的正比关系,是通过实验得出的。我们可以测量电阻两端的电压值和流过电阻的电流值,绘出的是一条通过原点的直线,如图 1-4 所示。因此,遵循欧姆定律的电阻称为线性电阻,它是一个表示该段电路特性而与电压和电流无关的常数。图 1-4 表示的直线称为线性电阻的伏安特性曲线。

2. 影响导体电阻的参数

导体电阻 R 的大小与导体材料的电阻率 ρ (Ωm) 成正比、与导体的长度 l (m) 成正比、与导体的截面 S (mm^2) 成反比,其计算式为

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad (\Omega) \quad (1-6)$$

导体材料不同,其电阻率 ρ 不同。电阻率小的为良导体,如银、铜和铝。锰铜和康铜电阻率较大,常用于制作线绕电阻器、电炉丝等。

实际导体电阻与温度的关系:金属导体的电阻随温度的增加而增大。不同的导体材料有不同的温度系数 α ($1/^\circ\text{C}$),其电阻值随温度变化的情况可用下式计算,即

$$R_2 = R_1 [1 + \alpha(t_2 - t_1)] \quad (\Omega) \quad (1-7)$$

式中 R_2 和 R_1 是同一个导体分别在温度为 t_2 ($^\circ\text{C}$) 和 t_1 ($^\circ\text{C}$) 时的电阻值。在实际工作中应当注意温度对电阻值的影响,有时它会影响设备的运行性能或引起故障。

根据欧姆定律,电阻的功率的计算式有三种形式,即

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

功率的单位是焦[耳]/秒(J/S),称为瓦特,简称瓦(W)。电气工程中常用千瓦(kW)单位。

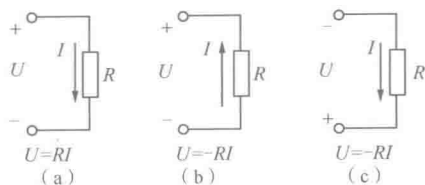


图 1-3 欧姆定律

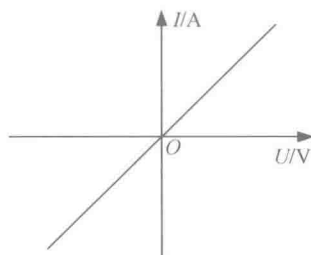


图 1-4 线性电阻的伏安特性曲线



电路的电能是指在一定时间 t 内所转换的电能,即

$$W = Pt = UIt \quad (\text{J}) \quad (1-9)$$

电能的单位为焦[耳](J)。因为焦[耳]这个单位太小,计量不方便,所以电气工程中常用千瓦时($\text{kW} \cdot \text{h}$)为电能的计量单位,1千瓦时俗称1度电。它们的换算关系是:1度电 $= 3.6 \times 10^6 (\text{J})$ 。

(二) 电路的有载工作、开路与短路

1. 电路的有载工作

如图 1-5 所示电路的开关闭合,电路的负载与电源接通,即为电路的有载工作状态。

电路有载工作状态的特征:

(1) 电路中的电流

当电路接通时,电路的电流为

$$I = \frac{E}{R_0 + R} \quad (1-10)$$

电流的大小主要是决定于负载电阻 R 。

(2) 电源的外特性

实际电压源的端电压 U 小于其电动势 E 。根据欧姆定律 $IR = U$,由此可得电路的电压平衡方程式:

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

上式表明,电源的电动势减去内阻电压降 IR_0 等于输出电压 U ,因此负载电流越大,其端电压越低。电压源的端电压 U 与其输出电流 I 的关系曲线称为电源的外特性曲线,如图 1-6 所示。其斜率与电源的内阻 R_0 有关,电源的内阻越小,输出电压就越稳定,当 $R_0 \ll R$ 时,则

$$U \approx E \quad (1-12)$$

上式表明,当负载电流变化时,电源的输出电压基本不变,近似是一个理想的恒压源。

(3) 电路的功率与功率平衡

将式 $U = E - IR_0$ 两边各项均乘以电流 I ,则变为电路的功率平衡方程式,即

$$UI = EI - I^2 R_0 \text{ 或 } P = P_E - P_0 \quad (1-13)$$

上式表明,电源实际输出的功率小于它产生的功率。电源所产生的电功率($P_E = EI$)减去内阻损耗率($P_0 = I^2 R_0$)等于负载电路消耗的功率($P = UI = I^2 R$),即电路中电源产生的功率与电路消耗功率总是相平衡的。

(4) 电源与负载的判别

电源大多是可逆的,即可工作在电源状态(输出电能),也可工作在负载状态(吸收电能)。例如蓄电池在放电时是工作在电源状态,在充电时是工作在负载状态。

通常根据电压与电流的实际方向来判别某个元件是电源还是负载。

当元件上电压 U 与电流 I 的实际方向相反,电流从“+”端流出,输出功率,是电源。当元件上电压 U 与电流 I 的实际方向相同,电流从“+”端流入,取用功率,是负载,如图 1-7。

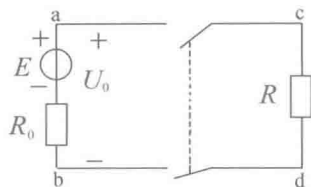


图 1-5 电路的有载工作

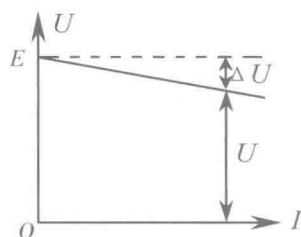


图 1-6 电源的外特性曲线

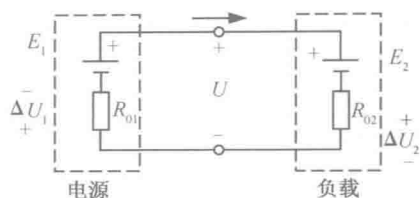


图 1-7 电源与负载的判别

2. 开路和短路状态

(1) 开路就是负载电路与电源断开(图 1-8)。无论是工作开路或故障开路,最主要的特征是:电路电流 $I = 0$,各电阻上的电压均为零,电路的功率为零,电源处于空载状态。

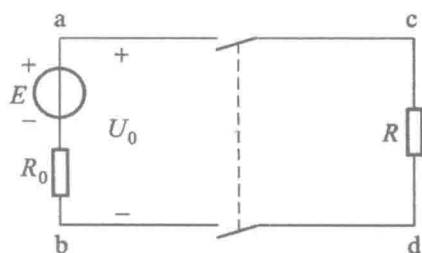


图 1-8 电路的开路状态

电源的开路端电压 U_0 (或开路点两端的电压)等于电源电动势 E ,即 $U_0 = E$ 。因此可通过测量实际电压源的开路电压 U_0 而得知其电动势 E ;或通过查测嫌疑开路点的电压来查找开路故障点。

电路开路时的特征可用下列各式表示:

$$\left. \begin{aligned} I &= 0 \\ U &= U_0 = E \\ P &= 0 \end{aligned} \right\}$$

(2) 短路即电源输出两端被电阻为零的导体联结(图 1-9)。其特征是:端电压 $U = 0$,而短路电流 I_s 很大。由电压平衡方程式可知,当 $U = 0$ 时,短路电流 $I_s = E/R_0$ 。

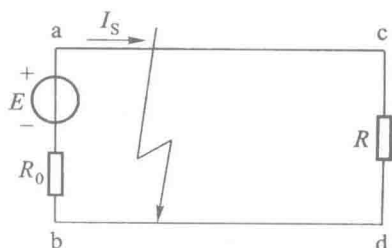


图 1-9 电路的短路状态

电路短路时的特征可用下列各式表示:



$$\left. \begin{aligned} U &= 0 \\ I &= I_s = \frac{E}{R_0} \\ P_E &= \Delta P = I^2 R, P = 0 \end{aligned} \right\}$$

一般电源的内阻 R_0 都很小,故短路电流比额定电流大很多倍,内阻上的电流热效应足以将电源烧毁。同时巨大的短路电流也会在短路的线路上产生巨大的热量而迅速燃烧起来。电路短路是引发火灾的重要原因之一,所以所有电路都必须采用短路保护措施,通常加装熔断器或自动断路器,当电路发生短路时,立即切断电路,避免事故进一步扩大。产生电路短路的原因主要有:一是电气设备绝缘老化或破损;二是操作不当。所以经常检查电气设备的绝缘是预防电路短路的重要措施,同时操作要规范。

(三) 基尔霍夫定律

欧姆定律是分析计算电路的基本定律之一,但只能用于简单电路,对复杂电路,就得用基尔霍夫定律来分析计算。

在介绍基尔霍夫定律之前,先介绍几个概念。

支路:电路中的每一个分支,称为支路,每一条支路都有一个支路电流。图 1-10 中有三个支路,其中 I_1 、 I_2 和 I_3 分别为三个支路电流。

结点:三条或三条支路相连接的点。图 1-10 中有 a、b 两个结点。

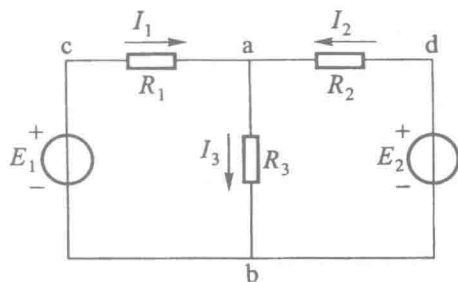


图 1-10 电路举例

回路:是由一条或多条支路所组成的闭合电路。图 1-10 中有 acba、adba 和 cabdc 三个回路。

1. 基尔霍夫电流定律

基尔霍夫电流定律(简称 KCL)指出:任一瞬时,流入一个结点电流之和等于流出该结点电流之和。若取流向结点的电流为正值,流出结点的取负值,则任一瞬时,一个结点电流的代数和等于零,即

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

根据 KCL,图 1-10 结点 a 的电流: $I_1 + I_2 = I_3$ 或 $I_1 + I_2 - I_3 = 0$ 。

基尔霍夫电流定律反映了电荷守恒定律和电流连续性原理。在电路中定向移动的电荷既不能创生,也不能消灭,而且还要保持连续的运动,所以在任何瞬时流入结点的电荷必然等于流出该结点的电荷。

根据电荷守恒定律和电流连续性原理,可把结点推广为封闭面,称为广义结点,流入



(或流出) 广义结点的电流的代数和等于零, 如图 1-11, 可得 $I_1 + I_2 + I_3 + I_4 = 0$ 。

在电路中结点电流的参考方向可以设为全部指向结点或背向结点, 这并不表明实际电流只进不出或只出不进, 通过计算其中必有负的电流。例如图 1-11 的部分电路, 四个电流参考方向都是流入电路, 但四个电流 I_1 、 I_2 、 I_3 、 I_4 不可能全为正, 也不可能全为负, 肯定有正有负。

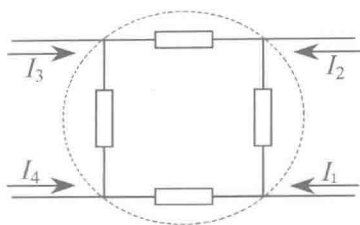


图 1-11 基尔霍夫电流定律的推广

2. 基尔霍夫电压定律

基尔霍夫电压定律 (简称 KVL) 指出: 任一瞬时, 沿任一回路绕行一周, 回路各段的电位降之和等于电位升之和, 或者这样表示: 任一瞬时, 沿任一回路绕行一周, 回路各段的电压代数和恒为零, 即

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

在这里, 可规定电位升为正, 电位降为负。

根据 KVL, 对图 1-12 所示回路, 如: 从 a 点出发, 沿逆时针方向绕行一周, 可得如下方程:

$$I_1 R_1 - E_1 + E_2 - I_2 R_2 = 0$$

基尔霍夫电压定律反映的是电路中电位能的变化关系, 从回路的某一电位点出发绕行回路一周, 尽管绕行过程中电位有升降, 但最后又回到原电位点, 故绕行一周电位变化的代数和为零。

基尔霍夫电压定律不仅满足回路, 也可推广用于开口电路。如图 1-13 电路, 有 $U - E + IR = 0$ 。

(四) 串、并联电阻电路

1. 电阻的串联

两个或多个电阻一个接一个地顺序相连, 各电阻通过同一电流, 即为电阻的串联电路。

串联等效电阻: 串联等效电阻 R 等于各串联电阻之和, 即

$$R = R_1 + R_2 + \cdots + R_n \quad (1-16)$$

等效条件就是用等效电阻代替串联电阻而不改变原串电阻电路的电压 U 和电流 I 。

对于图 1-14(a) 电路, 有: $I = I_1 = I_2$ 。

根据基尔霍夫电压定律:

$$U = U_1 + U_2 = IR_1 + IR_2 = I(R_1 + R_2)$$

对于图 1-14(b) 电路, 根据欧姆定律有: $U = IR$ 。

由以上两式可得: $R = R_1 + R_2$ 。

串联电阻的分压: 因串联电阻流过同一个电流, 故每个电阻的电压与其电阻成正比。

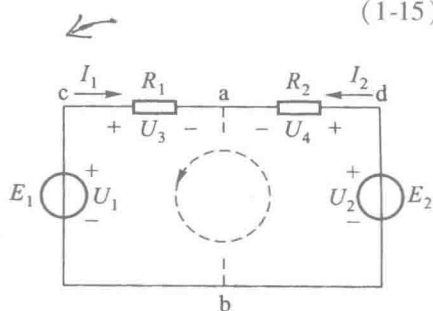


图 1-12 回路

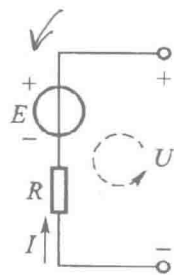


图 1-13 基尔霍夫电压定律的推广

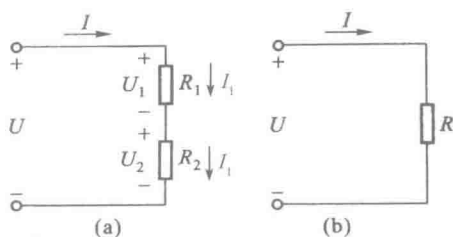


图 1-14 电阻的串联

例如如图 1-14(a) 两个电阻串联, R_1 和 R_2 的分压分别为

$$U_1 = IR_1 = \frac{R_1}{R_1 + R_2}U \quad (1-17)$$

$$U_2 = IR_2 = \frac{R_2}{R_1 + R_2}U \quad (1-18)$$

以上两式称为分压公式,其中分压电阻与串联总电阻之比称为分压系数。

串联电阻的电流相同,所以任一串联电阻的功率(I^2R_1 或 I^2R_2)也与其电阻成正比。

串联电阻的基本应用:常用串联电阻进行分压或限流。例如当电气设备的额定电压低于电源电压时,可采用串联一适当的电阻进行分压;再如电压表,用同一个表头串联几个分压电阻可作成多量程电压表。有时为了限制负载电流过大或调节负载电流也常采用串联电阻的办法。值得注意的是白炽灯的串联,每个灯实际分配的电压与灯丝电阻成正比,而不取决于它的标称电压,为保证各灯分配的电压相等,灯丝电阻必须相等,即串联各灯的额定电压和瓦数必须相同。

2. 电阻的并联

两个或多个电阻联结在两个公共节点之间,具有同一电压,即为电阻的并联。

并联等效电阻:并联等效电阻 R 的倒数等于各个并联电阻倒数之和,即

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \cdots + \frac{1}{R_n} \quad (1-19)$$

对于两个电阻并联,如图 1-15(a) 电路,有: $U = U_1 = U_2$

根据基尔霍夫电流定律:

$$I = I_1 + I_2 = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2} = U\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right)$$

对于图 1-15(b) 电路,根据欧姆定律有: $I = \frac{U}{R}$

由以上两式可得

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \text{ 或 } R = \frac{R_1R_2}{R_1 + R_2} \quad (1-20)$$

并联的电阻越多,其等效电阻越小,它比并联电阻中最小的一个还要小。

并联电阻的分流:由于结点电压 U 相同,故根据欧姆定律每一并联电阻的分支电流与其电阻成反比。例如如图 1-15(a) 电路中,两并联电阻的电流分别为