

进网电工考核培训教材

电工技能与安全

季运兴 主编



石油工业出版社

进网电工考核培训教材

电 工 技 能 与 安 全

季运兴 主编

石油工业出版社

内 容 提 要

本书内容包括：电工基本知识，电机与电器，电力系统与低压电网，电工仪表，中、低压变电和配电装置，电力线路，继电保护与二次回路，电工作业安全技术。本书为社会各行业高、低压电力用户电工上岗前考核培训、持证电工年审培训及工作票、操作票等特种培训的教材。

图书在版编目 (CIP) 数据

电工技能与安全/季运兴主编.

北京：石油工业出版社，2001.5

进网电工考核培训教材

ISBN 7 - 5021 - 3393 - 3

I . 电…

II . 季…

III . 电工技术 - 技术培训 - 教材

IV . TM

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2001) 第 029977 号

石油工业出版社出版

(100011 北京安定门外安华里二区一号楼)

北京乾坤灰色系统工程研究院计算机部排版

河北省徐水县印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

*

787×1092 毫米 16 开本 25.75 印张 665 千字 印 1—20000

2001 年 5 月北京第 1 版 2001 年 5 月河北第 1 次印刷

ISBN 7 - 5021 - 3393 - 3/TE·2535

定价：48.00 元

前 言

随着改革的深入进行，安全问题比以往更为突出。“安全第一，预防为主”，效益是中心，安全是基础，已逐渐成为人们的共识。特种作业人员持证上岗、按时年审、不断提高安全作业水平，是确保人身、设备及生产场所安全的重要环节。为适应社会各行业高、低压电力用户电工“新电工考证培训班”、“持证电工年审培训班”、“工作票与操作票”等特种培训的需要，我们在原有劳动部门电工安全技术培训教材、电力部门电工进网作业培训教材的基础上，结合新政策、新规程和实践经验，编写了本教材。

本书内容以少而精为原则，扼要地阐述了我国当今中、低压供、用电系统的技术与安全管理状况；阐明了持证电工应具备的基本知识、基本技能与基本安全作业水准，并顾及了用户电工的现状与要求。

本书知识层次结构，尽量按初学者认知规律编排。施教者应按培训班性质，选择有关内容并按有关章节的提示，准备教学器具及实习条件。

本书基本内容的讲授和实习约需 200 学时左右。书中复习思考题，可供学员课外复习消化或另外安排时间进行，带“*”者为必做操作题。

本书附有复习思考题答案，对各章的复习思考题逐一做了讲解和回答，供学员参考。在解答过程中，结合学员要求，围绕主题，引伸介绍了一些常识性知识和生产实践经验，故题目有所扩充。

本书由季运兴同志主编，其中第一章由许品元同志编写，其余章节及附录由季运兴同志编写。全书由陆继峰、伍捷增同志审定。

本书编写过程中，得到内蒙古自治区经济贸易委员会以及江苏、南通、海门、启东等供电部门及有关领导的大力支持，在此一并表示感谢。由于编者水平有限，书中不妥与错误之处恳请读者指正。

编 者
2001 年 5 月

目 录

第一章 电工基础知识	(1)
第一节 直流电路.....	(1)
第二节 电磁和电磁感应	(13)
第三节 单相交流电路	(20)
第四节 三相交流电路	(30)
第五节 电子技术基础及其应用	(36)
复习思考题	(51)
第二章 电机与电器	(56)
第一节 变压器、互感器	(56)
第二节 旋转电机	(62)
第三节 高低压电器与防雷、接地装置	(72)
复习思考题	(88)
第三章 电力系统与低压电力网	(89)
第一节 电力系统	(89)
第二节 低压电力网	(93)
复习思考题.....	(100)
第四章 电工仪表与电能表	(101)
第一节 电工仪表一般知识.....	(101)
第二节 指示型仪表.....	(105)
第三节 万用表与电阻测量仪器.....	(108)
第四节 电能表.....	(113)
复习思考题.....	(115)
第五章 变配电装置	(117)
第一节 10/0.4kV 变配电站接线	(117)
第二节 变配电装配安装与运行维护.....	(122)
复习思考题.....	(131)
第六章 电力线路	(133)
第一节 电力线路基本知识.....	(133)
第二节 架空配电线路.....	(135)
第三节 电力电缆线路.....	(141)
第四节 低压地埋电力线路.....	(143)
第五节 接户线与进户线.....	(144)
第六节 室内外配线.....	(145)
第七节 电力线路运行维护.....	(150)

复习思考题	(151)
第七章 用电装置	(153)
第一节 动力装置	(153)
第二节 照明装置	(165)
第三节 动力、照明工程施工图	(171)
复习思考题	(182)
第八章 小水电、小热电与自发电	(184)
第一节 小水电基本知识	(184)
第二节 小热电基本知识	(187)
第三节 自发电知识	(189)
复习思考题	(192)
第九章 继电保护与二次回路	(193)
第一节 继电保护基本知识	(193)
第二节 常用继电保护装置	(197)
第三节 二次回路	(204)
第四节 二次系统的运行维护	(210)
复习思考题	(211)
第十章 电工作业安全技术	(212)
第一节 电工培训、考核与安全职责	(212)
第二节 电气防火与防爆	(213)
第三节 触电预防与急救	(225)
第四节 防静电、防电磁场及防雷电	(238)
第五节 电气安全工作方法	(251)
第六节 工作票与操作票	(269)
复习思考题	(281)
附 录	(286)
附录一 按防触电方式的电器分类	(286)
附录二 常用导线规格及其允许载流量	(287)
附录三 低压电网电压损失表	(291)
附录四 导线穿管的管径选择表	(293)
附录五 各类导线管规格表	(294)
附录六 铅熔丝额定电流表	(296)
附录七 电器外壳防护等级	(297)
附录八 高、低压工作票、操作票及低压安全措施票	(298)
附录九 低压进户线、室内外配电线路导线、电缆截面按发热条件选择公式表	(306)
附录十 复习思考题答案	(307)
附录十一 职业资格证书考试初级电工基本技能练习项目	(399)

第一章 电工基础知识

第一节 直流电路

一、物体的带电和电场

1. 物质的结构

自然界的物质由分子组成，分子由原子组成，原子是由原子核和电子组成。原子核带有正电荷，电子带有负电荷并围绕原子核不停地高速运动着。由于正、负电荷之间存在吸引力，因此运动中的电子受到原子核的束缚力，而不会从原子中飞逸出去。

不同物质的原子具有不同的结构，主要表现为原子核内的正电荷及核外电子的数目不相同。图 1-1 所示为氢原子和铝原子的电结构。各种物质只有正电荷和负电荷两种电荷，同性电荷相互排斥，异性电荷相互吸引，这是电荷的基本特性。

2. 物体的带电

在通常情况下，原子核所带正电荷的总数，总是等于核外电子所带负电荷的总数，所以整个物体不呈现电的特性，物体处于中性状态。当由于某种原因使物体电子增多或减少时，物体内正负电荷的总数就不相等，这时物体就显示出电的特性，称为物体带电。

正负电荷都是自然界物质的组成部分，它们不会凭空产生或消失，只能从一个物体转移到另一个物体上。这种规律称为电荷守恒定律。

物体所带电荷的多少叫电荷量，用 Q 表示，单位是 C。一个电子带有最少量的负电荷，其电荷量等于 $1.60 \times 10^{-19} \text{C}$ ，1C 为 6.25×10^{18} 个电子所具有的电荷量。

3. 电场

两个带电体之间存在互相排斥或互相吸引的作用，这表明两个带电体之间有作用力。带电体周围存在着一种叫做电场的特殊物质，带电体之间的作用就是通过电场进行的。电场对处于电场中的电荷产生作用力，称为电场力，用 F 表示，单位是 N，它的大小可表示为

$$F = EQ \quad \text{或} \quad E = \frac{F}{Q} \quad (1-1)$$

式中 E ——电场强度，N/C 或 V/m；

Q ——电荷量，C。

电场强度 E 的方向跟正电荷在该点所受电场力的方向相同，跟负电荷在该点所受电场力的方向相反。

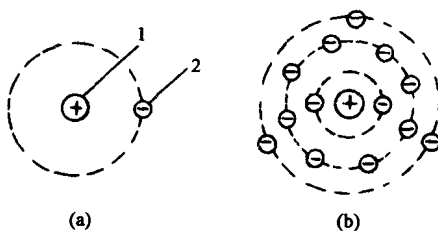


图 1-1 原子的电结构图

(a) 氢原子；(b) 铝原子

1—原子核；2—电子

二、电流、电位、电压与电动势

1. 电流

在金属导体中，金属原子的内层电子被原子核紧紧束缚着，不能脱离其运动轨道而自由运动；而原子的外层电子受原子核的束缚力较弱，在一定条件下可以脱离原子核的束缚而自由运动，这种电子又称为自由电子。金属中的自由电子是很多的。如果给导体两端加一个电压，导体内的自由电子就会在电场力的作用下产生定向的运动，这种现象称为电流。

电流具有一定的方向。习惯上规定正电荷运动的方向为电流的实际方向（在电解液中电流的方向与正离子运动的方向相同）。这与电子反方向运动的效果是相同的。在电路计算时，可任意选择一个方向作为电流的假定方向，简称正方向或参考方向。计算结果电流为“+”，说明实际方向与假定方向一致；反之，实际方向为假定方向的反方向。

单位时间流过导体横截面的电荷量称为电流强度，简称电流，用 I 表示，其表达式为

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

式中 Q ——通过导体截面的电荷量，C；

t ——通过电荷量 Q 所用的时间，s。

电流的单位为安培，简称安，用 A 表示。电流的实用单位除安外，还有 kA，mA 和 μA 。其换算关系为

$$1\text{kA} = 10^3\text{A}; 1\text{A} = 10^3\text{mA} = 10^6\mu\text{A}$$

电流的大小可用串联在电路中的电流表来测量。

2. 电位与电压

在电场中，把正电荷 Q 逆着电场力方向从无限远处沿任一路径移动到电场中 a 点处时，外力克服电场力所做的功称为 Q 电荷在 a 点的电位能 W_a 。在电场中 a 点处单位正电荷所具有的电位能称为 a 点的电位，用 V_a 表示，即

$$V_a = \frac{W_a}{Q} \quad (1-3)$$

式中 Q ——电荷的电荷量，C；

W_a ——在 a 点电荷 Q 所具有的电位能，J。

电位的单位是伏特，简称伏，用 V 表示。

为了确定电路中各点电位的高低，可在电路中任选一个参考点，令其电位为零（工程中常选大地为参考点），这时电路中其他各点电位的高低，都以这一点为标准进行比较，高于参考点的电位为正电位，低于参考点的电位为负电位。两点间的电位差称为两点间的电压，用 U 表示。

电压的方向是由高电位指向低电位的。如果电路中两点的电位相等，则电位差等于零，叫做等电位点。无源支路等电位点间没有电流流过。这是高压带电作业的理论依据。

跟电流计算一样，在无法确定电压方向时，可先假定一个参考方向进行电压计算，最后根据结果的正负来确定其实际方向。

电压的单位也是 V，其实用单位还有 kV，mV 和 μV 。其换算关系为

$$1\text{kV} = 10^3\text{V}; 1\text{V} = 10^3\text{mV} = 10^6\mu\text{V}$$

电压的大小可用并联在电路中的电压表来测量。

3. 电源和电动势

所谓电源，就是能将其他形式的能量转化为电能的设备，如发电机、蓄电池，分别可将机械能、化学能转化为电能。

各种电源都具有正负两个极性，而且都能在电源内不断将正电荷从低电位端（“-”极性）移动到高电位端（“+”极性），于是两极间就形成电场，保持着一定的电位差。电源内部这种移动电荷的作用力称为电源力。

电源力既然能使正电荷移动，就说明它能做功。电源力将单位正电荷从电源低电位端移到高电位端所做的功 W ，称为电源的电动势，用 E 表示，即

$$E = \frac{W}{Q} \quad (1-4)$$

和电压一样，电动势的单位也是 V。

电动势的方向是指在电源内部电源力移动正电荷的方向，是从低电位端指向高电位端，即电位升的方向。而电压方向指的是从高电位端指向低电位端，即电压降的方向。这两个物理量的含义不同（电位升与电位降），但实际上说明同一客观事实，即“+”极性端电位比“-”极性端电位高。

方向不随时间而改变的电流、电压、电动势都称为直流电。方向和大小都不随时间而改变的电流、电压、电动势称为稳恒直流，通常简称直流。本节所讲的直流都是指这种稳恒直流。

三、电阻、导体和绝缘体

1. 导体和导体的电阻

容易通过电流的物体叫导体。导体中的自由电子在电场力的作用下做定向运动时，由于不断地与导体内的许多原子发生碰撞，并受到邻近原子中正、负电荷的吸力和斥力，因此会受到一定的阻力。导电物体对电流的这种阻力称为电阻，用 R 表示，导体电阻的大小由下式决定

$$R = \rho \frac{L}{S} \quad (1-5)$$

式中 ρ ——电阻率，其大小与导体材料性质有关， $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ ；

L ——导体长度，m；

S ——导体横截面积， mm^2 。

导体的电阻还与导体的温度有关。一般金属材料的电阻随温度的升高而增加，电解液导体的电阻随温度的升高而降低。考虑温度影响时金属导体的电阻，应为

$$R_2 = R_1 [1 + \alpha (t_2 - t_1)] \quad (1-6)$$

式中 α ——导体材料的电阻温度系数， $1/^\circ\text{C}$ ；

R_1 ——温度为 t_1 时的电阻值， Ω ；

R_2 ——温度为 t_2 时的电阻值， Ω 。

常用金属材料的电阻率和电阻温度系数，见表 1-1。

电阻的常用单位是欧姆，简称欧，用 Ω 表示，实用单位还有 $\text{k}\Omega$ 和 $\text{M}\Omega$ 。其换算关系为

$$1\text{M}\Omega = 10^3\text{k}\Omega = 10^6\Omega$$

导体的电阻可用欧姆表和电桥来测量。

各种导体都有一定的导电能力。这种能力称为电导，以 G 表示，它与电阻都是说明导体的导电能力大小。电导与电阻的关系为

$$G = \frac{1}{R} \quad (1-7)$$

电导的单位是西门子，简称西，用 S 表示。

表 1-1 常用金属材料的电阻率和电阻温度系数

金属材料名称	电 阻 率 20℃, $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$	电阻温度系数 $10^{-3} 1/^\circ\text{C}$
银	0.0162	3.80
铜	0.0172	3.93
铝	0.0282	3.90
铁	0.100	5.00
镍铬合金	1.09	0.07

2. 绝缘体、绝缘材料的等级及耐热度

绝缘体的电阻很大，电流几乎不能通过，其电阻率一般为 $10^{12} \sim 10^{22} \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ 。测量绝缘体的绝缘电阻可用兆欧表，俗称绝缘摇表。

绝缘体在电力工业中也得到了广泛应用。但绝缘材料在长期的设备运行中会因热的、电的、环境的和机械的各种应力的作用而逐渐失去原有的绝缘性能，这种变化称为绝缘的老化。温度对绝缘老化的影响最甚，温度愈高，绝缘老化速度愈快，绝缘材料的绝缘性能也就愈差，很容易被高电压击穿，造成故障。严重过热会使绝缘变脆而破裂，导致导电体失去绝缘层而发生短路或接地故障。因此，电气设备在正常运行中，不允许超过绝缘材料所容许的温度。

不同种类的绝缘材料，所允许的最高工作温度也不同，例如制造电机和变压器所用的绝缘材料，按耐热能力的不同可分成 Y, A, E, B, F, H, C 等七级，如表 1-2 所示。

表 1-2 绝缘材料的等级及耐热温度

绝缘等级	Y	A	E	B	F	H	C
耐热温度, $^\circ\text{C}$	90	105	120	130	155	180	180 以上
材料举例	未处理过的有机材料	浸渍处理过的有机材料如纸、棉纱、木材等	聚乙烯类绝缘	云母带、云母纸、甘油树脂、虫胶	聚脂绝缘漆	硅有机绝缘	天然云母、玻璃、瓷料

导电能力介于导体和绝缘体之间的物质称为半导体。这一类材料有硅、锗、硒等。

导体、绝缘体和半导体的本质差别在于这些物体原子结构中最外层的电子与原子核结合的松紧程度不同，单位体积内所具有的自由电子数目不同，从而影响到它们的导电能力不同。

四、电路基本定律

1. 电路图（电路模型）

电路就是电流所流过的路径，它分实际电路和电路模型两种。实际电路由实际器件组成。图 1-2 (a) 是用两节干电池经刀开关向灯泡供电的实际电路。组成实际电路的实际器

件通常可分为四类：

(1) 电源，即供给电能的设备。它的作用是将其他形式的能量（如化学能、机械能等）转换成电能。

(2) 负荷，即用电设备。它的作用是耗用电能，将电能转换成非电能。

(3) 控制电器。在电路中起控制和保护作用的开关电器。

(4) 导线。其作用是将电源、负荷和控制电器连接起来。

将电路中的实际器件用理想元件表示后，就得到与实际电路相对应的电路模型，称为电气回路图，简称电路图，如图 1-2 (b) 所示。

在电路图上的灯泡应视为理想电阻元件，干电池视为理想电压源。它们都是电路元件，在表达方式上与实际器件是有区别的，但确实是等效的。在电路分析时，通常都是采用这种电路图（电路模型）来进行的。

2. 欧姆定律

欧姆定律是表示电压（或电动势）、电流和电阻三者关系的基本定律。

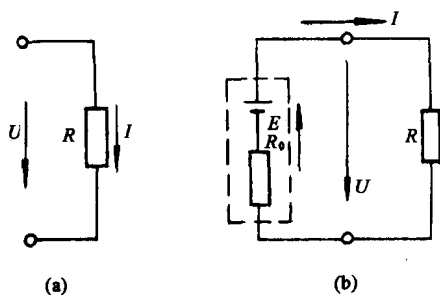


图 1-3 欧姆定律的图例

(a) 部分电路；(b) 全电路

图 1-3 (a) 所示为部分电路。实验证明，流过电阻的电流，与电阻两端的电压成正比，与电阻值成反比，称为部分电路欧姆定律，用公式表示为

$$I = \frac{U}{R} \quad (1-8)$$

欧姆定律也适用于如图 1-3 (b) 所示的全电路。在这样的闭合电路中，电路中的电流与电源的电动势成正比，与电路中负载电阻及电源内阻之和成反比，称为全电路欧姆定律，即

$$I = \frac{E}{R + R_0} \quad (1-9)$$

式中 E ——电源电动势，V；

R, R_0 ——分别为负载电阻和电源内阻， Ω ；

I ——电路中流过的电流，A。

式 (1-9) 又可变换成

$$\begin{aligned} E &= I(R + R_0) = IR + IR_0 = IR_0 + U \\ U &= E - IR_0 \end{aligned} \quad (1-10)$$

式中， U 为外电路电阻 R 两端的电压，即电源端电压。

【例 1-1】在图 1-3 (b) 中，若 $E = 12\text{V}$ ， $R_0 = 0.1\Omega$ ， $R = 3.9\Omega$ ，求电路中的电流 I ，电源内阻 R_0 上的电压降 U_0 及电源端电压 U 。

解：

$$I = \frac{E}{R + R_0} = \frac{12}{3.9 + 0.1} = 3 \text{ (A)}$$

$$U_0 = IR_0 = 3 \times 0.1 = 0.3 \text{ (V)}$$

$$U = E - U_0 = 12 - 0.3 = 11.7 \text{ (V)}$$

在应用欧姆定律时，应注意电压与电流的方向应一致。

当电阻中有电流通过时，两端必有电压。导线都是有电阻的，当用导线输电时，线路电阻将产生电压降，因此输电线路末端的电压总是比始端的电压低（只计电阻的影响时），其降低的数值称为电压损失。在线路较长、线路电流较大时，线路的电压损失也较大。特别在电源电压等级较低时，供电电压会明显下降，必须采取措施予以改进。

3. 基尔霍夫定律

欧姆定律只反映电阻元件的电压与电流的关系。对复杂电路（如多电源电路）的分析，必须采用电路的另一个基本定律——基尔霍夫定律。基尔霍夫定律包括两个方面的内容：节点上各支路电流之间的关系和回路中各电压之间的关系。

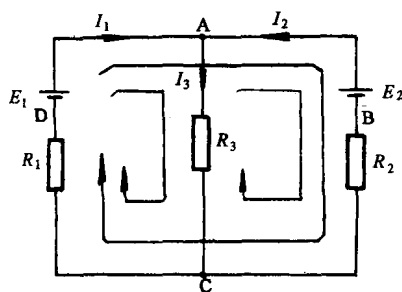


图 1-4 基尔霍夫定律例图

(1) 基尔霍夫第一定律 (KCL 节点电流定律)。

电路中三个或三个以上的支路相汇集的点称为节点，如图 1-4 中的 A, C 两点。基尔霍夫第一定律指出：对于电路中的任一节点，流入节点的电流之和必等于流出该节点的电流之和，即

$$\sum I_i = \sum I_o \quad (1-11)$$

若设流入节点的电流为正，则流出节点的电流应为负。式 (1-11) 可写成

$$\sum I = 0 \quad (1-12)$$

式 (1-12) 表明流入节点电流的代数和为零。在

图 1-4 中，对于节点 A 来说，有

$$I_1 + I_2 = I_3$$

或者

$$I_1 + I_2 - I_3 = 0$$

基尔霍夫节点电流定律的依据是电流的连续性原理，体现了在电路中电荷守恒的规律。

应用该定律分析计算电路时，应先在电路图中标出电流的正方向（通常称为参考方向）。如果计算结果出现负值，则说明假定的方向与实际方向相反。

(2) 基尔霍夫第二定律 (KVL 回路电压定律)。基尔霍夫第二定律指出：对于任一回路，沿任一方向绕行一周，各电源电动势的代数和等于各电阻电压降的代数和，即

$$\sum E = \sum IR \quad (1-13)$$

在图 1-4 中，对于回路 ABCDA，若按图示选定顺时针方向绕行一周，可列写出回路电压方程式为

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

这一定律体现了能量守恒的基本规律，即单位正电荷在电场作用下沿着回路流动一周时，各电动势的电源力对电荷做功使其获得的能量的代数和（即电位升的代数和），与电场力对电荷做功使其失去的能量的代数和（即电位降的代数和）相等。应用上式时应注意：

1) 绕行方向可任意选定（顺时针或逆时针）。

2) 绕行方向选定后，顺绕行方向从“-”极到“+”极的电源电动势取正号，反之

负；当电阻元件中电流正方向与绕行方向一致，电阻上的电压取正号，反之取负号。

【例 1-2】 在图 1-4 所示电路中，已知 $R_1 = 1\Omega$ ， $E_1 = 130\text{V}$ ， $E_2 = 117\text{V}$ ， $R_2 = 0.6\Omega$ ， $R_3 = 24\Omega$ ，求 I_1 ， I_2 和 I_3 。

解：先标出各电流的正方向和回路的绕行方向，如图 1-4 所示。

本题的节点数 n 有两个，可列出独立节点电流方程式 $n - 1 = 2 - 1 = 1$ (个)；回路数 m 为 3，可列出独立回路电压方程式为 $[m - (n - 1)] = 3 - (2 - 1) = 2$ (个)，故可得方程组

$$\left. \begin{aligned} I_3 &= I_1 + I_2 \\ E_1 - E_2 &= I_1 R_1 - I_2 R_2 \\ E_1 &= I_1 R_1 + I_3 R_3 \end{aligned} \right\}$$

将已知数据代入上述方程组，解得： $I_1 = 10\text{A}$ ， $I_2 = -5\text{A}$ （说明 I_2 的实际方向与所标正方向相反）， $I_3 = 5\text{A}$ 。

在电路计算中，除上述两个基本定律外，电流源、电压源的概念及其等效变换、叠加原理、戴维南定理等在解决实际问题中也很有用处，读者可以参阅有关书籍。

五、电路连接

1. 电阻串联

几个电阻头尾依次相接，没有分支地连成一串，称为电阻的串联，如图 1-5 (a) 所示。

串联电路有以下特点：

(1) 电路各电阻上流过的是同一个电流。

(2) 根据 KVL，各个电阻上电压降之和等于总

电压，即 $U = IR_1 + IR_2 + IR_3 = U_1 + U_2 + U_3$ 。由此可以看出，串联电阻可以起分压作用，各电阻分压的大小与其电阻值成正比。

(3) 串联电路的总电阻等于各电阻之和，即总电阻为

$$R_{\text{总}} = R_1 + R_2 + R_3 + \cdots \quad (1-14)$$

串联电路的总电阻通常也叫等效电阻。图 1-5 (b) 是图 1-5 (a) 是等效电路图。

【例 1-3】 在图 1-5 中，若 $U = 140\text{V}$ ， $I = 4\text{A}$ ， $R_1 = 10\Omega$ ， $R_2 = 15\Omega$ ，求 R_3 和 U_3 。

$$\text{解： } R_{\text{总}} = \frac{U}{I} = \frac{140}{4} = 35(\Omega)$$

$$R_3 = R_{\text{总}} - R_1 - R_2 = 35 - 10 - 15 = 10(\Omega)$$

$$U_3 = IR_3 = 4 \times 10 = 40(\text{V})$$

或

$$U_3 = U - U_1 - U_2 = 140 - 4 \times 10 - 4 \times 15 = 40(\text{V})$$

2. 电阻并联

将几个电阻的头与头接在一起，尾与尾接在一起，连接方式称为电阻的并联，如图 1-6 (a) 所示。

并联电路有以下特点：

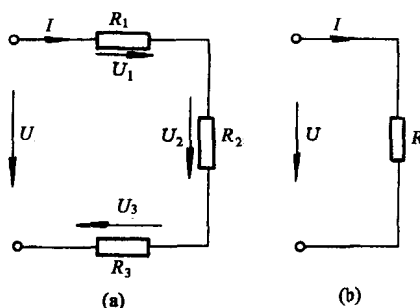


图 1-5 电阻的串联
(a) 原电路；(b) 等效电路

(1) 各并联电阻两端间的电压相等。

(2) 根据 KCL, 并联电路中的总电流等于各电阻支路电流之和, 即

$$I_{\text{总}} = I_1 + I_2 + I_3$$

从上式可看出, 电压一定时, 并联电阻可以使总电流增大; 在总电流一定时, 并联电阻可以起分流作用, 分流的数值按各支路电阻值的大小成反比分配。

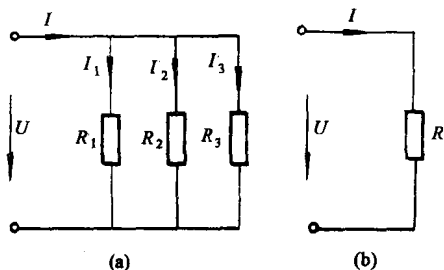


图 1-6 电阻的并联
(a) 原电路; (b) 等效电路

(3) 并联电路等效电阻的倒数等于各支路电阻的倒数之和, 即

$$\frac{1}{R_{\text{总}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \cdots \quad (1-15)$$

也可用电导表示为

$$G_{\text{总}} = G_1 + G_2 + G_3 + \cdots \quad (1-16)$$

并联适用于恒定电压的供电方式, 供电系统都是采用恒定电压供电的。负荷并联时, 其中一个支路负荷接通或切断一般不会影响其他支路负荷的正常工作, 因而负荷的并联形式得到了普遍的应用。

【例 1-4】 在图 1-6 中, 若 $R_1 = 20\Omega$, $R_2 = 30\Omega$, $R_3 = 60\Omega$, 求电路的总电阻 $R_{\text{总}}$ 。若 $U = 110$, 求 I_1 , I_2 , I_3 及 I 。

解: $\frac{1}{R_{\text{总}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} = \frac{1}{20} + \frac{1}{30} + \frac{1}{60} = \frac{1}{10}$

$$R_{\text{总}} = 10 (\Omega)$$

$$I = \frac{U}{R_{\text{总}}} = \frac{110}{10} = 11 (\text{A})$$

$$I_1 = \frac{U}{R_1} = \frac{110}{20} = 5.5 (\text{A})$$

$$I_2 = \frac{U}{R_2} = \frac{110}{30} = 3.67 (\text{A})$$

$$I_3 = \frac{U}{R_3} = \frac{110}{60} = 1.83 (\text{A})$$

3. 电阻混联

既有电阻串联, 又有电阻并联的电路称为电阻的混联电路, 如图 1-7 (a) 所示。

分析计算混联电路的方法如下:

(1) 应用电阻的串联、并联逐步简化电路, 求出电路的等效电阻。

(2) 由电路的等效电阻和总电压, 根据欧姆定律求电路的总电流。

(3) 根据基尔霍夫定律、欧姆定律, 以及分压、分流规律由总电流求各支路的电流和电压。

在分析和计算混联电路时, 首先应将电路中的串、并联关系搞清楚。当电路图中这些关系不易辨认时, 可以将电路图改画, 使其直观、清楚。图 1-7 (b) 就是图 1-7 (a) 的改画图。

【例 1-5】 在图 1-8 中, 若 $E = 120\text{V}$, $R_0 = 1\Omega$, $R_1 = 19\Omega$, $R_2 = 30\Omega$, $R_3 = 60\Omega$, 求内阻 R_0 上的电压降 U_{R_0} 和流过 R_2 的电流 I_{R_2} 。

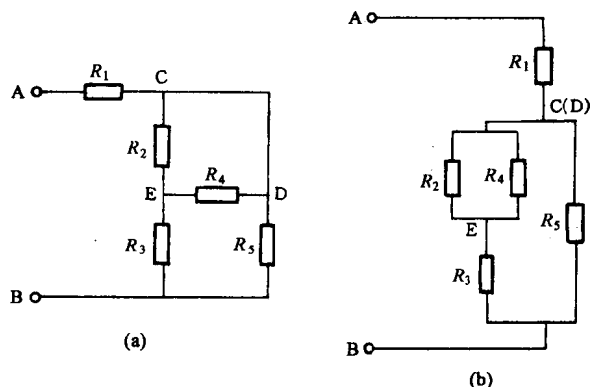


图 1-7 电阻的混联电路

(a) 混联电路; (b) 改画图

$$\text{解: } R_{2,3} = \frac{1}{\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}} = \frac{1}{\frac{1}{30} + \frac{1}{60}} = 20(\Omega)$$

$$R_{\text{总}} = R_0 + R_1 + R_{2,3} = 1 + 19 + 20 = 40(\Omega)$$

$$I = \frac{E}{R_{\text{总}}} = \frac{120}{40} = 3(\text{A})$$

$$U_{R_0} = IR_0 = 3 \times 1 = 3(\text{V})$$

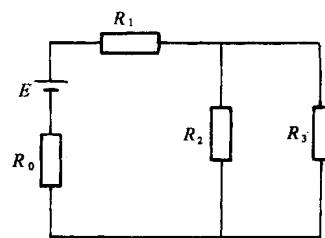


图 1-8 [例 1-5] 电路图

$$I_{R_2} = \frac{R_3}{R_2 + R_3} \cdot I = \frac{60}{30 + 60} \times 3 = 2(\text{A})$$

与电阻的串、并联相似, 电源也可以经串联、并联后使用。电源串联时, 等效电动势为各电源电动势的代数和, 其等效内阻为各电源内阻之和, 而在各电源上流过的电流相同。电源串联的效果是提高电路的总电动势, 使用时应注意:

- (1) 电源正负极必须是首尾相连, 防止接反而使电动势互相抵消。
- (2) 各电源内阻应尽量接近, 以免工作时内阻高的电源上压降过大而引起过热。

电动势和内阻值相同的电源并联时, 其等效总电动势仍为单个电动势值, 等效总内阻按各电源内阻并联关系算得, 而总电流为流过各电源的电流之和。显然, 电源并联的效果是提高电路的总电流, 使用时应注意:

- (1) 应将电源的所有正极和所有负极分别联在一起, 不能接反。
- (2) 各电源电动势和内阻应尽量相等, 以免造成各电动势之间的环流及电流分配不均。

六、电功、电功率及电流热效应

1. 电功

电源力或电场力在电路中移动正电荷所做的功称为电功, 又称为电能, 用 W 表示。其表达式为

$$W = IUt = I^2 Rt = \frac{U^2}{R} t \quad (1-17)$$

式中 I ——电路中的电流, A;

U ——电路两端的电压, V;

R ——电路的电阻, Ω ;

t ——通电时间, s。

电功及电能的单位是焦耳, 简称焦, 用 J 表示。它的实用单位是千瓦·时, 用 $\text{kW}\cdot\text{h}$ 表示。 $1\text{kW}\cdot\text{h}$ 俗称一度电。

$$1\text{kW}\cdot\text{h} = 3.6 \times 10^6 \text{J} = 3.6\text{MJ} \quad (1-18)$$

2. 电功率

电功率简称功率, 即单位时间内电源力 (或电场力) 所做的功, 是衡量电源力 (或电场力) 做功的能力, 以 P 表示, 其表达式为

$$P = \frac{W}{t} = IU = I^2 R = \frac{U^2}{R} \quad (1-19)$$

式中 I ——电路中的电流, A;

U ——电阻端电压, V;

R ——电阻, Ω 。

电功率的单位是瓦特, 简称瓦, 用 W 表示, 常用单位还有 kW, MW, mW, 其换算关系为

$$1\text{kW} = 10^{-3}\text{MW} = 10^3\text{W} = 10^6\text{mW}$$

某单位或地区所有已安装电器的铭牌功率之和称为装机容量, 而某时刻实际在使用电器的功率之和称为负荷。

3. 电流热效应

电流通过电阻时, 由于自由电子的碰撞, 电能不断地转换成热能, 因而使电阻发热。这种电流通过电阻会产生热的现象, 称为电流的热效应。

电流热效应产生的热量, 用 Q 表示, 其表达式为

$$Q = I^2 R t = I U t = \frac{U^2}{R} t \quad (1-20)$$

式中, I , U , R , t 的意义及单位如前所述; 热量 Q 的单位为焦耳, 简称焦, 用 J 表示。

4. 电器设备额定值和工作状态

电流的热效应是有实用价值的, 电炉、电烙铁等电热设备、工具就是利用电流的热效应为生产、生活服务的。但在非电热设备中, 电流产生的热量会引起设备温度升高, 而过高的温度又会加速绝缘材料的老化以至损坏, 这是不利的效果。

为保证电器设备的安全工作、一定的使用寿命及良好的经济指标, 根据使用的绝缘材料 (等级) 不同, 规定了设备的最高工作温度。而工作温度除取决于环境温度、连续工作时间外, 还取决于电流、电压或功率。使设备安全工作的最大允许电流、电压或功率, 分别称为额定电流、额定电压或额定功率, 用 I_N , U_N 或 P_N 表示。它们都标在设备的铭牌上, 也可从产品目录中查得。

用电设备实际所消耗的功率与加在用电设备上的电压的平方成正比, 见公式 (1-19)。如额定值为 220V, 100W 的白炽灯, 当接于 220V 电压时, 消耗的实际功率为 100W; 而接于 190V 或 240V 电压时, 消耗的实际功率分别约为 75W 或 120W。

用电设备在额定功率下的工作状态称为额定工作状态（满负荷）。低于额定功率的工作状态称为轻负荷（欠负荷），用电设备在此状态下工作时，一般运行效率会降低。高于额定功率的工作状态叫做过负荷（超负荷），此时用电设备将因温度过高而导致寿命缩短，甚至损坏。用电设备应尽量工作在满负荷或接近满负荷状态，对过负荷运行，应采取必要的限制措施。

七、电路中各点电位的计算

电路的工作状态，通过电路中各点的电位可以反映出来。因此在电工和电子技术中，经常要用到电位的计算。

电路中往往有很多元件或电源相互连接在一起。一个电气元件的工作状态往往是由某两点间的电压所决定的。但分析电路中的电压比较繁琐，改用电位进行分析就比较清楚。

计算电位的基本步骤是：

(1) 选定零电位点。零电位点就是前述的参考点，即参考点的电位为零。电路中每一点的电位高低，都是与零电位相比较而言的。电路图中有时已指定了零电位，以符号“⊥”表示。未指定时，可任意指定，但应以计算方便为好。

(2) 选择路径。要计算某点的电位，可从这点出发，通过一定的路径绕到零电位点。该点的电位就等于此路径上全部电压和电动势代数和。

(3) 确定正负。绕行路径上电压和电动势的正负可根据下列原则确定：电阻上的电压正负根据电阻上电流方向来确定。因为电流是从高电位流向低电位的。故电流进入电阻的一端是正极，而流出电阻的一端是负极。电源电动势的正负一般是给出的，即正极电位高于负极电位。

例图 1-1 所示电路，参考点设在 b 点，求 a 点电位。

先设定电流 I 方向，电路中三个电动势大小均不知，但可看出 E_1 , E_2 , E_3 是串联，假设对电流起主导作用，则电流方向如图所示。

求 a 点电位，从 a 点出发到零电位 b 点共有两条路径。

路径之一为： $a \rightarrow R_2 \rightarrow E_3 \rightarrow b$

a 点电位 $\varphi_a = IR_2 - E_3$

路径之二为： $a \rightarrow E_2 \rightarrow R_1 \rightarrow E_1 \rightarrow b$

a 点电位 $\varphi_a' = -E_2 - IR_1 + E_1$

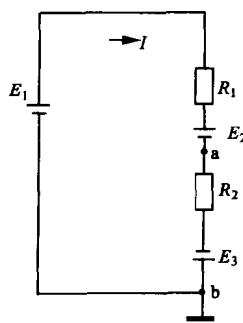
设 $E_1 = 18V$; $R_1 = 2k\Omega$; $E_2 = 6V$, $R_2 = 4k\Omega$; $E_3 = 18V$ 。计算 a 点电位，验算 φ_a , φ_a' 是否相等。

$$\text{解： } I = \frac{E_1 - E_2 + E_3}{R_1 + R_2} = \frac{18 - 6 + 12}{2000 + 4000} = 0.004(A)$$

$$\varphi_a = IR_2 - E_3 = 0.004 \times 4000 - 12 = 4(V)$$

$$\varphi_a' = -E_2 - IR_1 + E_1 = -6 - 0.004 \times 2000 + 18 = 4(V)$$

即 $\varphi_a = \varphi_a' = 4(V)$



例图 1-1 电路电位计算

八、电桥的平衡条件

1. 电桥电路

在实践中，经常会遇到例图 1-2 (a) 所示的电桥电路。其中 R_1 , R_2 , R_3 , R_4 是电桥的四个桥臂。电桥的一条对角线 ab 间接电阻 R ；电桥的另一条对角线接电源。整个电路就