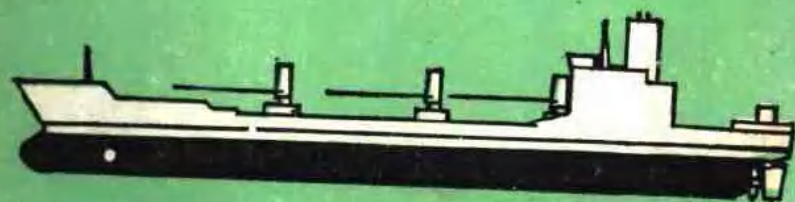


轮机员考证培训教材

船舶电气

章季亮 朱文玮 编著



交通部全国海洋运输情报网

前 言

为了满足广大船员业务学习及培训的需要，我们编写了全国海船轮机长（员）考证培训教材。新近出版的《轮机基础理论》、《船舶电气》、《造船大意》三本书是教材的第二部分，同第一部分的《船舶柴油机》、《船舶辅机》、《轮机管理》、《轮机自动化》、《轮机英语》配套。根据出版计划以及配合一九八八年一月一日开始实施的我国海船船员考试、发证规则，这套书共有8个分册，现已如期全部出齐。

本书可作为轮机长（员）各类等级考证培训教材。全书以突出“1988年海船船员考试大纲”为原则，结合短期培训的特点组织编写，文字通俗，条理清楚，实例丰富，对船员自学复习、院校轮管专业学生的专业课学习等都有一定的指导和参考价值。

全书在编写过程中，承蒙上海海运学院副院长张永令副教授、轮机系主任王家绂副教授、上海海运局科技办公室主任邵祖德高级工程师、上海港务监督王振禹副处长的多方关心和支持，交通部全国海洋运输情报网也为全书的出版做了大量工作，在此一并致谢。

由于编写时间仓促，教材内容涉及的范围广泛，加上编者的水平有限，本书中错误和不妥之处在所难免，恳望各位专家和同行批评指正。

编写组

一九八八年七月一日

编写人员

朱广源	上海海运局	高级工程师
张庆信	上海海运局	轮机长
李桂民	上海远洋运输公司	轮机长
杨百生	上海船舶运输研究所	研究员
周金根	上海海上安全监督局	轮机长
王家绂	上海海运学院	副教授
葛鸿翔	上海海运学院	副教授
卢士勋	上海海运学院	副教授
陈鸿璆	上海海运学院	副教授
张绍麟	上海海运学院	副教授
詹玉龙	上海海运学院	讲师
丁中一	上海远洋运输公司	工程师
蔡士鸣	上海海运学院	副教授
严家定	上海海运学院	副教授
章季亮	上海海运学院	副教授
朱文璋	上海海运学院	讲师

审阅人员

张永令	王家绂	张庆信	周金根	沈鼎新
陈鸿璆	蔡明罗	程永萱	严家定	蔡士鸣
姚水花				

船舶电气

目 录

第一章 电工与电子技术基础	
§ 1.1 直流电路	1
§ 1.2 电磁现象与磁性材料	12
§ 1.3 正弦交流电路	19
§ 1.4 三相电路	34
§ 1.5 常用测量仪表	43
§ 1.6 晶体二极管	50
§ 1.7 单相整流电路及滤波电路	54
§ 1.8 晶体三极管	59
§ 1.9 交流单级放大电路	65
§ 1.10 多级放大电路	67
§ 1.11 直流放大电路	69
§ 1.12 基本门电路	71
§ 1.13 触发器简介	73
§ 1.14 可控硅及其应用	74
第二章 船舶电机	
§ 2.1 变压器	78
§ 2.2 直流电机	83
§ 2.3 三相异步电动机	95
§ 2.4 特殊电机	106
第三章 船舶辅机电力拖动	
§ 3.1 常用控制电器	113
§ 3.2 电动机的控制线路	117
§ 3.3 船舶起货机电力拖动	127
§ 3.4 船舶锚机电力拖动	131
§ 3.5 电动舵机	133
§ 3.6 船舶辅锅炉的自动控制系统	143
§ 3.7 制冷装置的控制线路	147
第四章 船舶电站	
§ 4.1 船舶电力系统的组成及其基本参数	151

§ 4.2	直流电站	155
§ 4.3	交流电站	157
§ 4.4	船用发电机和船舶电网的继电保护及整定值要求	164
§ 4.5	船舶主配电板的组成及各测量仪表的作用	167
§ 4.6	船用蓄电池	168
§ 4.7	电机维修保养、电气设备接地的意义	173
第五章	船舶照明通讯及报警系统	
§ 5.1	船舶照明	177
§ 5.2	电钟	178
§ 5.3	自动报警系统	180

第一章 电工与电子技术基础

§ 1.1 直 流 电 路

一、电路的组成及其基本物理量

日常生活中我们会碰到各种电路。例如照明灯电路，电动机控制电路等，当合上开关后，电灯会发光，电动机会转动，这些都是因为有电流通过的缘故。因而我们就把电流所通过的路径称之为——电路。尽管电流是看不见的，但它的外部表现却是可以观察到的，例如电流通过电灯发光的热效应，电流通过电动机而转动的电磁效应等等。因而电路是实际存在的是看得见和摸得着的。不管电路的结构多么复杂，但就其作用来说，可以归纳为三个基本组成部分：电源，负载，联接导线(包括一定的控制，保护和测量装置)。

电源：是一种将非电能转换成电能的装置，船舶常用电源有发电机，蓄电池等，它们分别将机械能和化学能转换成电能。

负载：即用电设备，它是消耗电能的装置，将电能转换成非电能。例如船舶上的电动机和各种照明灯，它们将电能分别转换成机械能和光能。负载的大小是以单位时间内消耗的电量多少来衡量的。

联接导线及控制保护测量装置：它的作用是将电能从电源安全可靠地输送和分配到负载。

电路中的负载和联接导线等组成的部分称为外电路，而电源内部的通路则称为内电路。

在分析和计算电路时，经常用到电流，电位，电压，电动势等物理量。下面从电路的角度来分别加以讨论。

1. 电流

电荷的定向运动，形成电流。

金属内的自由电子，如果在电场作用下，又有一个闭合回路，它们就要作定向运动而形成电流。

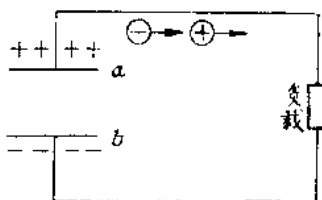


图1—1 电荷在电场力作用下作定向运动

如图1—1所示，a和b是两个电极，a带正电，b带负电，因此在a、b之间产生电场，其方向从a到b。如果用导线将负载和b，a联接起来，则正电荷将受到正极的排斥沿电场方向运动

(从a经过负载到b)，负电荷则逆电场方向运动(从b经负载到a)，这种定向运动即形成电流。我们可以通过测量仪表或电流的各种效应而察觉到它的存在。

电流的大小以单位时间内通过导体任一横截面的电量多少来衡量，称之为电流强度，工程上称之为电流，以字母*i*或*I*来表示。

一般地，电荷运动的速率是随时间而变化的，因此，电流也将随时间而变化，其表示式为

$$i = \frac{dq}{dt}$$

如果电流不随时间而变化，即在相同的时间间隔内，通过的电量相等，那末这种电流便称为恒定电流，或称直流，其表示式为

$$I = \frac{Q}{t}$$

式中：Q—电量，单位为库仑(1库仑等于 6.25×10^{18} 个电子电量)；

t—时间，单位为秒；

I—电流强度，单位为安培。

若在1秒钟中流过导体横截面的电量是1库仑，则导体内的电流就是1安培，通常用A表示。

$$1 \text{安培} = \frac{1 \text{库仑}}{1 \text{秒}}$$

在应用时，根据不同需要，例如船舶电机，常用大电流单位千安(KA)，照明灯常用小电流单位毫安(mA)以及电子技术还常用更小的单位微安(μ A)。

$$1 \text{千安(KA)} = 1000 \text{安(A)}$$

$$1 \text{安(A)} = 1000 \text{毫安(mA)}$$

$$1 \text{毫安(mA)} = 1000 \text{微安}(\mu\text{A})$$

电流的方向，习惯上以正电荷运动的方向作为电流的方向(与电子运动的方向相反)。在分析和计算电路的过程中，如果电路比较复杂，某些电流的方向开始还不能确定时，常任意假定某一方向为电流的正方向，并用箭头表示在电路图上。计算的结果，如电流为正值，则表示假定的正方向就是电流的实际方向；如电流为负值，则电流的实际方向与假定的正方向相反。

2. 电位

从上所知电场力推动电荷作定向运动即产生电流，而电流通过负载又可转换成机械能、光能和热能等，因而可知电荷本身也具有能量的。

在力学的重力场中处于不同位置的物体具有各自的重力位能。同样，在电场中不同点的电荷同样具有各自的位能，这就是电位能，由此我们可以得到电位的物理意义是：单位正电荷在电场中某一点所具有的电位能称为该点的电位，以字母 φ 表示。

$$\varphi = \frac{W}{Q}$$

式中：W—功(电位能)，单位为焦耳；

φ —电位，单位是伏特，也称伏(V)。

在重力场中，物体处于某一位置所具位能的大小是相对于另一参考点来说的，否则便无意义。讲电位的高低也要先指定一个参考点，通常令参考点的电位为零，将其它点与参考点做比较，便可以定出其它各点电位的高低。在电力工程中，常取地球作为参考点并令其电位为零。因此，凡是机壳接地的电气设备，其机壳都是零电位。在我们船舶电力系统中则船体就作为参考零电位。因而机舱，甲板上的电机其机壳都是接船体的因而都是零电位，在有些不接地的设备例如电子仪器等在分析问题，常选择许多元件汇集的公共点作为零电位点，并用符号“⊥”表示；接大地则用符号“⊥”表示，以示区别。

必须指出，参考点不同，电路中各点的电位便有不同的数值。例如有两个电源，一个3伏，一个6伏，把它们顺向联接起来，如将c点接地(图1—2, a)则

$$\varphi_a = 9V$$

$$\varphi_b = 6V$$

$$\varphi_c = 0V$$

若将b点接地(图1—2, b)，则

$$\varphi_a = 3V$$

$$\varphi_b = 0V$$

$$\varphi_c = -6V$$

说明参考点改变后，各点电位也随之改变。

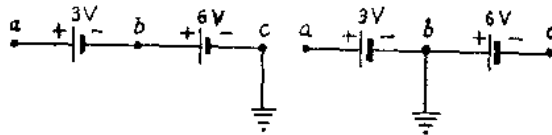


图1—2 电路中各点的电位与参考点有关

3. 电压

电路中某两点的电位之差称为这两点的电位差，电位差也叫电压，用 u 或 U 表示。如果对于电路中指定的某两点A和B来说，则用 u_{AB} 或 U_{AB} 表示，即

$$U_{AB} = \varphi_A - \varphi_B$$

显然，电压只对电路中的两点来说才有意义，仅对电路中的某点来讲，并不存在电压或电压差。如果在电路中指定某点为零电位，那末其它各点的电位就是这些点对零电位点的电压。根据电位的表达式，可得

$$\begin{aligned} U_{AB} &= \varphi_A - \varphi_B \\ &= \frac{W_A}{Q} - \frac{W_B}{Q} \\ &= \frac{W_A - W_B}{Q} \\ &= \frac{W_{AB}}{Q} \end{aligned}$$

可知，电压的物理意义是：电路中A、B两点之间的电压等于把单位正电荷从A点沿任一路径移到B点电场力所做的功。

电压的单位是伏特。我们规定：电场力把1库仑的电量从A点移到B点，如果做功为1焦

耳，那末A、B两点间的电压就是1伏特。伏特简称伏，用V表示。

$$1 \text{ 伏特} = \frac{1 \text{ 焦耳}}{1 \text{ 库仑}}$$

根据不同情况，高电压用千伏(KV)，低电压用毫伏(mV)或微伏(μV)作单位。

$$1 \text{ 千伏(KV)} = 1000 \text{ 伏(V)}$$

$$1 \text{ 伏(V)} = 1000 \text{ 毫伏(mV)}$$

$$1 \text{ 毫伏(mV)} = 1000 \text{ 微伏}(\mu\text{V})$$

电压的方向规定从高电位指向低电位，常用箭头表示。必须指出，电路中任意两点间的电压与电位的参考选择无关。

4 电动势

如图1—3所示，在电压 U_{ab} 的作用下，正电荷从a不断经过负载向b移动，便产生了电流。与此同时a点的电位逐渐降低，b点的电位渐渐升高。最后使a、b两点电位相等，电流为零。如果要使电流继续存在并保持恒定，则a、b两端必须始终保持一定的电压，这个电压就依靠电源来维持。在电源内部由于局外力的作用(如电磁感应，化学反应)，使正电荷逆电场方向从b移到a，如果没有这种局外力来完成这个把正电荷从低电位推向高电位的任务，在这个电路中要电流连续不断则是不可能的。局外力在电源内部把单位正电荷从低电位推向高电位所做的功叫做电源的电动势，用字母 e 或 E 表示。

$$E = \frac{W}{Q}$$

电动势与电压有相同的单位，都是伏特，但电动势的概念与电压的概念既有联系又有区别的。电压是指电路中两点间的电位之差，表示电场推动电荷做功的能力；电动势是指在电源内部借助外力所产生的推动电荷的能力。

如图1—3所示，电流在电路中流动说明下面两个问题：

(1) 在外电路中，电流在电场力作用下，从高电位a通过负载流向低电位b，这就规定了电压的正各向是从高电位到低电位，也就是电位降低(电压降)的方向。

(2) 在内电路中，电流在局外力的作用下，克服了电场的阻力，通过电源内部从低电位b流向高电位a，这就规定了电动势的正各向是从低电位到高电位，即电位升高的方向。

二、欧姆定律

欧姆定律是电路的基本定律之一，用来确定电路各部分的电压和电流的关系。

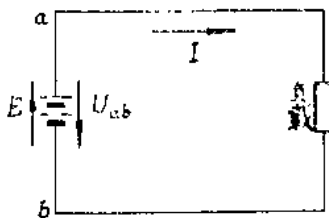


图1—3 电压和电源电动势

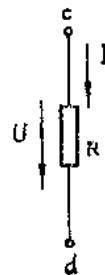


图1—4 一段无源电路

图1—4电路中cd段上加上电压 U ，电路中流过电流 I ，实验证明在这段没有电源的电路中cd段所加电压 U 在一般情况下是与通过的电流 I 有着正比的关系，即

$$\frac{U}{I} = R$$

式中比例系数 R 是一个表示该段电路特征的量，与电压、电流的大小无关。这就是欧姆定律的数学表达式。它说明在一段无源电路中流过的电流 I 与加于该段电路上的电压 U 成正比。 R 称为电阻，它在电路中起到阻碍电流流过的作用。其单位是欧姆(Ω)，简称欧。当电路中两端的电压为1伏特，通过的电流为1安培时，则该段电路的电阻为1欧姆。计算高电阻时，常用千欧($K\Omega$)，兆欧($m\Omega$)来计量

$$1 \text{ 千欧} = 1000 \text{ 欧}$$

$$1 \text{ 兆欧} = 1000 \text{ 千欧}$$

欧姆定律也可写成：

$$U = IR = U_c - U_d$$

即电流通过电阻时要引起电位的降落。电流流进的一端的电位高于电流流出的一端的电位，其差值等于电流与电阻的乘积，通常称之为电阻上的电压降。

当一段电路中含有电源时，确定这段电路中电流，电压和电源电动势间的关系的欧姆定律，就称为一段有源电路的欧姆定律。图1-5, a, b, 两图电路中有电源电动势，其与电压、电流的正方向如图所示，根据所标方向可以列出下面两式。

图a)

$$E = U_a - U_b$$

$$IR = U_b - U_a$$

将上列两式相减，则得

$$E - IR = U_a - U_b = U$$

$$I = \frac{E - U}{R}$$

如果按图1-5, b)所标的正方向则可得

$$I = \frac{-E + U}{R}$$

因此，对于一段有源电路的欧姆定律可写成下列一般公式：

$$I = \frac{\pm E \pm U}{R}$$

式中的正负号应这样确定：如果电动势和电压的正方向与电流正方向一致时，则取正号，反之则取负号。

欧姆定律应用于闭合回路时，则称为回路的欧姆定律，如图1-6所示，可得出：

$$U = E - IR, \quad \text{或} \quad U = I \cdot R$$



图1-5 一段有源电路

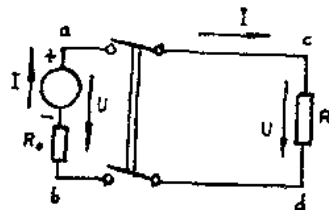


图1-6 简单电路

由此可得:

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

写成一般形式

$$I = \frac{\Sigma E}{\Sigma R}$$

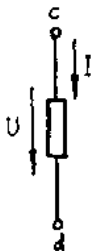
上式表示在简单电路中, 电流等于各个电动势的代数和与回路总电阻的比值, 这就是回路欧姆定律。

可知, 欧姆定律有三种不同的表示形式。

三、电功率和电能

通常用电的目的就是要将电能转换成其它形式的能量, 所以除了分析与计算电路中的电压和电流外, 还常常需要分析和计算电功率和电能。

设1—7所示电路中有电流I通过, cd间的电压为U, 根据电压的定义, 当电量q在电场作用下由c点移到d点时, 电场力在电路cd段所做的动力:



$$W = U \cdot q = UIt$$

上式表示为cd段电路在时间t内所取用的电能。

如果cd段, 负载是电阻元件R, 则

$$W = UIt = I^2Rt$$

图1—7 一段电路 式中电压U的单位是伏特, 电流I的单位是安培, 时间的单位是秒, 则能量的单位为瓦特秒, 在工程上的单位是度,

$$1 \text{度} = 1 \text{千瓦小时}$$

电度表就是专门测量用电器在一段时间内消耗多少电能的仪表。

在工程上常用电功率这一术语, 例如40瓦的照明灯、20千瓦的电动机等等, 所谓电功率就是能量的转换率, 即单位时间内电路各部分所取用或发出的电能, 即

$$P = \frac{W}{t} = UI$$

如果负载是电阻元件, 则

$$P = UI = I^2 \cdot R = \frac{U^2}{R}$$

功率的单位是瓦特(W)或千瓦(KW)。

四、电路的工作状态

1. 额定工作状态

为了使电气设备安全, 经济地运行, 并保证一定的使用寿命, 各种电气设备都规定了各种额定值。例如一台直流发电机的铭牌上标有40千瓦, 230伏, 174安。这些就是它的额定值。实际值不一定等于额定值。在实际使用时, 这台发电机并不总是发出40千瓦的功率和174安培的电流。发电机产生多大的功率和电流完全决定于负载的需要。当电气设备加上额定电压, 消耗额定功率时, 这种工作状态称为额定工作状态。额定值是设计, 制造部门对产品使用的规定, 只有在额定工作状态下电气设备才能充分发挥能力而达到预期的效果。

2. 空载状态

如图1—8所示，当开关打开时，这时电路的工作状态称为空载(开路)空载时外电路的电阻对电源来说等于无穷大，因此电路中电流为零。这时电源的端电压(称为空载电压 U_0)等于电源电动势，电源不能输出电能。

电路空载时的特征可用下列各式表示：

$$\begin{cases} I = 0 \\ U = U_0 = E \\ R = \infty \\ P = 0 \end{cases}$$

3. 短路状态

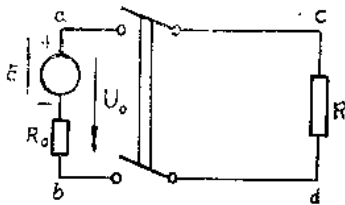


图1—8 空载

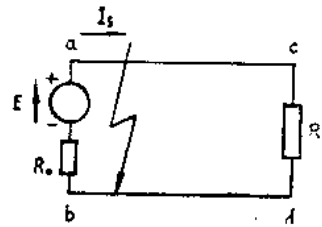


图1—9 短路

如图1—9所示，当电源的两端a、b由于某种原因而联在一起时，电源则被短路。这时外电路的电阻可视为零，电流有捷径可通，不再流过负载。因为在电流的回路中仅有很小的电源内阻 R_0 ，所以这时的电流很大，此电流称为短路电流 I_s 。短路电流可能使电源遭受机械的与热的损坏或烧坏。短路时电源所产生的电能全被电源内阻所消耗。

电源短路时由于外电路的电阻为零，所以电源的端电压为零。这时电源的电动势全部落在内阻上。

电路短路时的特征可用下列各式表示：

$$\begin{cases} U = 0 \\ I = I_s = \frac{E}{R_0} \\ P = I^2 \cdot R \\ R = 0 \end{cases}$$

短路可发生在负载端或线路的任何处。电源短路是一种严重事故，应该尽量加以预防。产生短路的原因往往是由于绝缘损坏或接线不慎，因此经常检查电气设备和线路的绝缘情况是一项最重要的安全措施。此外，为了防止短路事故所引起的后果，通常在电路中接入熔断器或自动空气断路器，以便发生短路时，能迅速将故障电路自动切除。

五、克希荷夫定律

在生产实践中有些电路的求解往往是欧姆定律所不能胜任的，这时就要应用克希荷夫定律。在讨论该定律前，先介绍几个与定律有关的名词。

(1) 节点：在分支电路中，三根或三根以上导线的联接处，称节点。如图1—10中有b、c两个节点。

(2) 支路：电路中任意两个节点之间的电路称为支路。如图1—10中有af, be, cd 三条支路。

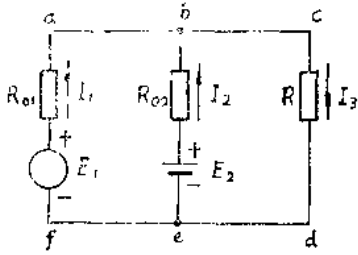


图1—10 两个电源并联电路

(3) 回路：电路中任一闭合路径称为回路。如图1—10中的abefa, bcdeb以及abcdefa都是回路，此电路有三个回路。其中abefa和bcdeb只含一个孔眼，叫单孔回路或网孔，abcceaf则不是单孔回路。

1 第一定律(节点电流定律)

在无分支电路中，电流只有一个流通过径，因此通过电路各部分的电流处处相等。在分支电路中，各支路电流就不一定相等，克希荷夫第一定律，就是关于电路中各部分电流之间相互关系的定律。

第一定律指出：流入一个节点的电流之和等于从这个节点流出电流之和。对于图1—10节点b来说，可以写出

$$I_1 + I_2 = I_3$$

或
$$I_1 + I_2 - I_3 = 0$$

这样，如果我们规定流入节点的电流为正，从节点流出的电流为负，则可写成一般式

$$\sum I = 0$$

亦即对于电路中的任一节点，电流的代数和恒等于零。

第一定律是既于电流的连续性原理，电路中任一点(包括节点在内)均不能发生电荷的堆积，否则会改变该点的电位，使电流不能连续下去。

2 第二定律(回路电压定律)

克希荷夫第二定律，是说明电路中各部分电压的相互关系的。

定律指出：对于电路中任一闭合回路，各部分电压的代数和恒等于零，即

$$\sum U = 0$$

例如对于图1—11所示电路中的一个闭合回路abcd，根据第二定律可以写出

$$\begin{aligned} U_{ab} + U_{bc} + U_{cd} + U_{da} \\ = (\varphi_a - \varphi_b) + (\varphi_b - \varphi_c) + (\varphi_c - \varphi_d) + (\varphi_d - \varphi_a) \\ = 0 \end{aligned}$$

第二定律是建立在能量不灭(守恒)原理基础上的。因为单位电荷从某点出发沿任一闭合回路绕行一周再回到该点时，它的电位是没有变化的，也就是说电场力所作的功等于零。

在应用回路电压定律计算电路时，常与欧姆定律联合应用，即将电路各支路两端的电压用电流，电阻和电动势来表示。如图1—11所示电路，根据欧姆定律有：

$$U_{ab} = I_3 \cdot R_3$$

$$U_{bc} = E_2 - I_2 R_{02}$$

$$U_{cd} = I_4 R_4$$

$$U_{da} = -E_1 + I_1 R_{01}$$

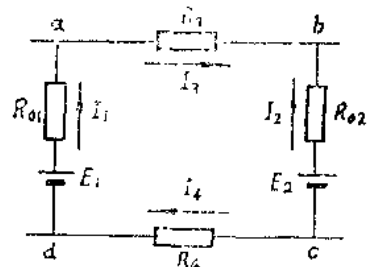


图1—11 闭合回路电路图

由 $U_{ab} + U_{bc} + U_{cd} + U_{da} = 0$

得 $I_3 R_3 + (E_2 - I_2 R_{02}) + I_4 R_4 + (-E_1 + I_1 R_{01}) = 0$

即 $E_1 - E_2 = I_1 R_{01} - I_2 R_{02} + I_3 R_3 + I_4 R_4$

将上式写成一般形式

$$\Sigma E = \Sigma IR$$

该式是第二定律的另一表达式，即在电路的任一闭合回路中，电动势的代数和等于各个电阻上电压降的代数和。

所谓代数和，就是要考虑到正负关系，正负号的规定如下：

首先任意规定绕行方向(如abcd)凡电动势的正方向与回路绕行正方向一致时，该电动势取正值(如 E_1)，反之取负值(如 E_2)；凡电流的正方向与回路绕行方向一致时，则它在电阻上的电压降取正值(如 $(I_1 R_{01}, I_3 R_3, I_4 R_4)$)，反之则取负值(如 $I_2 R_{02}$)。

六、电阻的串联与并联

1. 电阻串联

如果把几个电阻首尾相接地连接起来，在这几个电阻中通过同一电流，这种连接方式叫做串联。图1—12a)中 R_1 与 R_2 就是串联电阻，通过它们的电流是同一电流 I 。

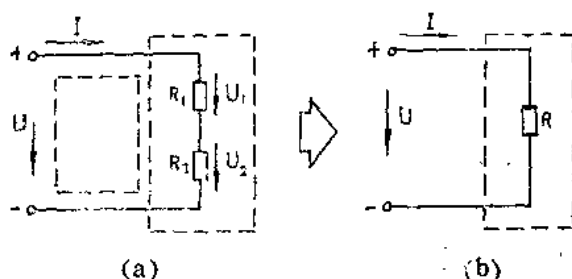


图1—12 电阻的串联

按逆时针的回路方向，根据克希荷夫第二定律，写出此回路的电压关系为

$$U - U_1 - U_2 = 0$$

根据欧姆定律可知

$$U_1 = IR_1 \quad U_2 = IR_2$$

所以

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

在上式中，可以用一个电阻 R 来代替原来的两个电阻，并保持原来电路的电压和电流都不变，于是，电路可简化成图1—12b)所示，因此：

$$U = IR$$

式中 R 是串联电阻 R_1 和 R_2 的等效电阻，也可称总电阻。可见等效电阻的大小等于相串联的各个电阻阻值之和，即

$$R = R_1 + R_2$$

从图1—12a)可知，电阻 R_1 和 R_2 上的电压降，都是总电压的一部分。已知

$$U_1 = IR_1 \quad U_2 = IR_2$$

所以

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{IR_1}{IR_2} = \frac{R_1}{R_2}$$

也就是说，在电阻串联的电路中，每个电阻上分得的电压大小，与电阻的大小成正比。即电阻大的分得的电压大，反之也一样。根据

$$U = U_1 + U_2$$

可得

$$I = \frac{U}{R_1 + R_2}$$

因此

$$U_1 = \frac{U}{R_1 + R_2} R_1 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} U = \frac{R_1}{R} U$$

$$U_2 = \frac{U}{R_1 + R_2} R_2 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} U = \frac{R_2}{R} U$$

上式说明，串联电阻中每个电阻上分得的电压决定于这个电阻与总电阻的比值。适当选择 R_1 和 R_2 的数值，就可以在每个电阻上获得相应的电压。比值 $\frac{R_1}{R_1 + R_2}$ 和 $\frac{R_2}{R_1 + R_2}$ 又称为分压比。

串联电阻的应用是很多的，例如额定电压为110伏的电灯要接到220伏电源上时，可以将二个功率相同的电灯串联起来使用。又如在负载的额定电压低于电源电压的情况下，通常就可用一电阻与负载相串联，以降落一部分电压。有时为了限制负载中流过大电流，也可以与负载串联一个限流电阻。如果需要调节电路中的电流时，一般也可以在电路中串联一个变阻器来进行调节。所以电阻串联是很常见的。

2. 电阻并联

几个电阻一齐接在两个节点之间，每个电阻两端所承受的是同一个电压，这种连接方式叫做并联。图1-13a)中 R_1 和 R_2 就是并联电阻，加在它们两端的是同一个电压。

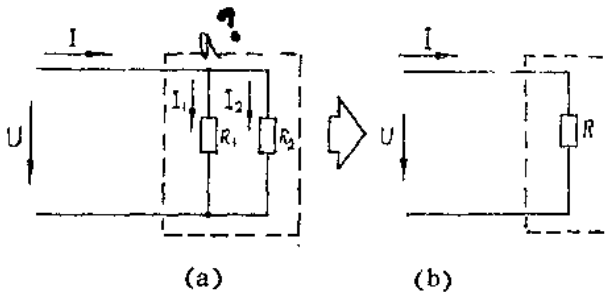


图1-13 电阻的并联

根据克希荷夫第一定律，对于节点A可以写出

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

我们可以用一个电阻 R 代替原来两个并联的电阻 R_1 和 R_2 ，并保持电路中其余部分的电压，电流不变，于是电路就可以化简成图1-13 b)的形式。根据欧姆定律写出：

$$I = U \left(\frac{1}{R} \right)$$

式中R即为并联电阻 R_1 和 R_2 的等效电阻。可见

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$

上式说明，并联电阻的等效电阻的倒数等于各并联电阻的倒数之和。整理后得：

$$R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

由此可见，两个并联电阻的总电阻，比其中任何一个电阻都要小；如果两个阻值相等的电阻并联，其总阻值等于一个电阻阻值的一半。如果两个电阻的阻值相差悬殊，并联以后的总电阻就接近于小电阻的阻值，于是估算总电阻时，就可以忽略那个高值电阻。

并联电路中，总电流I与支路电流间又有什么关系呢？已知：

$$I = I_1 + I_2 \quad I_1 = \frac{U}{R_1} \quad I_2 = \frac{U}{R_2}$$

所以

$$\begin{aligned} \frac{I_1}{I} &= \frac{I_1}{I_1 + I_2} = \frac{\frac{U}{R_1}}{\left(\frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2} \right)} \\ &= \frac{R_2}{R_1 + R_2} \end{aligned}$$

于是， R_1 支路中通过的电流是

$$I_1 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} I$$

同理， R_2 支路中通过的电流是

$$I_2 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} I$$

上面两式说明，在两个电阻并联时，某一个支路的电流等于总电流乘上一个分数，这个分数的分母是两并联电阻的和，分子是另外一条支路中的电阻。这就是两并联电阻电路的电流分配关系。

负载都有额定电压，因此总是并联运用的，负载并联运行时，它们处于同一电压之下，任何一个负载的工作情况基本上不受其它负载的影响。

当电路上并联的负载越来越多时，则总电阻越来越小，电路中总电流和总功率也越来越大，但是每个负载的电流和功率基本上没有变动。

有时为了某种需要，也可将电路中某一段与电阻或变阻器并联，起到分流的作用以调节电流的大小。

在日常生活及生产实践中负载的并联运行是很常见的。

七、电阻的温度系数

上面我们所提到的电阻值不仅和材料本身的性质以及材料的尺寸有关，而且还会受到外

界条件的影响，大量实验证明，各种导电材料的电阻值都和温度有关，银、铜、铝等金属导体的电阻值随温度的升高而增大，但碳的电阻值却随温度的上升而减小。

为了计算导电材料在不同温度下的电阻值，我们把导体的温度每增高 1°C 时，它的电阻值增大的百分数叫做电阻的温度系数，用符号 α 来表示。几种常用材料的平均电阻温度系数均可在有关手册中查到。例如铜的 α 为 $0.0041/^{\circ}\text{C}$ ，铝的 α 值同铜一样，银为 0.0036 ，低碳钢为 0.006 。

当然我们必须注意的是导电材料的 α 值也随温度略有变化。但在 $0\sim 100^{\circ}\text{C}$ 的范围内，可按平均电阻温度系数计算。

知道了导体材料的电阻温度系数，我们就可算出材料在温度变化时的电阻。例如， R_1 为温度 t_1 时的导体电阻， R_2 是温度为 t_2 时的导体电阻， α 是导体材料的电阻温度系数。当温度变化 1°C ，电阻的变化是 αR_1 ，现在温度变化了 $(t_2 - t_1)$ 度，所以电阻的变化量是 $\alpha R_1(t_2 - t_1)$ 。把这个变化量再加入到原来的电阻值 R_1 上，就是温度为 t_2 时的导体电阻了。所以它的完整计算公式为：

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

§ 1、2 电磁现象与磁性材料

大多数电气设备都是运用电与磁等基本物理现象实现能量的传递和转换的，例如直流电机，异步电动机是运用载流导体在磁场中将产生电磁力这种物理现象实现电能转换成机械能的。以及其它的如电表、电磁铁、继电器，接触器，变压器等器件的工作原理都是与电和磁有关的。因此，我们必须掌握有关电和磁的一些基本知识。

一、电磁的基本知识

1. 永久磁铁和磁场

地球上存在着天然的磁铁矿，而磁铁具有磁性而能吸铁。但由于天然磁铁的磁性是很弱的，所以现代工业上大都使用人造磁铁。人造磁铁又称永久磁铁是用钢铁和镨、钨、钴、镍等金属制成的，简称磁钢。图1—14是最常见的条形磁铁和马蹄形磁铁的外形。

任何磁钢都有两个磁极，一个叫南极，用S表示，另一个叫北极，用N表示。小铁钉能被磁钢吸引，小磁针在磁钢周围会有一定方向偏转。这都说明在磁钢周围空间存在着“磁场”两块磁钢通过磁场的相互作用，具有同极性相斥，异极性相吸的特征。指南针能指地球的南方就是因为地球本身就是一个大的磁体的道理。

永久磁铁的周围存在着磁场，尽管我们看不见，但从在条形磁铁上放一块玻璃板，再撒上一些铁屑的实验中可以从铁屑的有规则排列而看到磁场的存在。为了形象化，可以用磁力线来表示磁场的存在及分布情况。图1—15是条形磁铁的磁力线分布图。

磁力线有以下特征：

(1) 磁场的强弱可用磁力线的疏密来表示：在磁钢外部磁极附近的磁力线最密，说明磁极附近的磁场最强。

(2) 磁钢外部、磁力线从N到S极。在内部，磁力线从S极到N极。磁力线不会互相交叉，