

海运管理·技术丛书

高级船员适任证书考试用轮机培训教材

船舶电气

熊炬 主编

大连海运学院出版社

序

展现在我们面前的这套由八个分册组成的轮机培训教材，是伴随着我国高级船员适任证书考试制度的建立应运而生的。它的问世，是轮机界的专家与学者长期从事培训教学与生产管理的宝贵结晶。

目前，我国已拥有一支1900余万载重吨位的海洋运输船队，承担着我国与世界上160多个国家与地区之间的货物运输任务，其航迹之纵横，遍及全球的600多个港口。服务于这支船队的数万名船员，是完成这一光荣而繁重的海上运输任务的基本保证。船员队伍、特别是高级船员队伍的知识素养、技术水准与管理能力，对整个船队实现营运的安全性、经济性与科学性，对整个船队在竞争日趋激烈的世界航运市场上立于不败之地，均有举足轻重的作用。为了培养一支高质量的优秀船员队伍，采取适任证书考试制度，无疑是十分必要的。

然而，要充满信心地去迎接考试，顺利过关，对于日夜奋战在管理生产第一线的轮机人员来说，亦非易事。其主要难点之一，在于选择并获得一套理想的业务培训与复习应考的教材。在这方面，单凭学院式的高校教材、简略的考试大纲与感性的实践经验，都是于事不足的。而今，由高级船员适任证书考试用轮机培训教材编委会，根据中华人民共和国港务监督局《海船轮机长、轮机员考试大纲》的考试科目与知识要求，编写出这一套培训教材，实在是为我国轮机界做了一件大好事。它对于我国高级船员适任证书考试制度的顺利执行，对于广大船员业务学习的健康开展，对于我国海洋运输业的迅速繁荣，必将起到有力的推动作用，并产生积极的影响。我作为一位在轮机管理岗位上工作了数十年的老技术人员，对之额手称庆。

承编委会之错爱，谬以为我是识途老马，囑命赋序，乃得于是书付印之前先睹为快。我感到，这套培训教材较好体现了作为专业教材应有的科学性、系统性与先进性。具体而论，它至少有如下三大主要优点：

第一，深广度适中，具有较好的适用性。这套教材既符合考试大纲的要求，又适当考虑到新技术的发展，力求促进技术管理水平的提高。在选材取题与解释论述中，注意到人们认识事物的必然规律，由现象到本质，由具体到抽象，由感性到理性，由简单到复杂。在由浅入深，循序渐进的认识过程中，使读者对教材内容易于接受，便于掌握。难能可贵的是，教材以考试大纲为编撰的主要参照，然而又不拘泥于此。因此，做到了有一定的深度而不难涩，有必要的广度而不琐乱。全套教材抓住了基本要素，主次分明，详略得宜。既能满足具有高中以上文化程度的轮机员考证培训的需要，又能遂偿广大轮机员自学提高业务技术水平的冀求。

第二，理论联系实际，具有较好的针对性。这套教材力图避免从理论到理论的泛议，而是颇为注意通过对具体的研究成果与实际问题的分析，来说明理论的意义，并引出科学的结论。相当多的例题解释与论述内容，是为读者所关心与熟悉的。通过联系实际的运算、绘图和练习等，做到了有的放矢，体现了学以致用。令人尤为高兴的是，其中《轮机英语》分册，从轮机管理所涉及的会话、管理、修理、报表、对外联系等各方面的素材中，提炼精选出最有代表性与实用价值的内容，且可按读者需要酌配一套录音带，这对于广大船员的自学，殊为方便与有效。

第三，内容覆盖面大，具有较好的系统性。这套教材涉及专业学科众多，知识领域广泛，举凡船舶辅机、轮机自动化、轮机管理、船舶柴油机、轮机英语、船舶电气、轮机基础理论与造船大意等悉予囊括。然而由于各册均以“轮机”为中心，容量虽大而篇幅适中，逐卷而读，当可自成体系。故这套教材既可做轮机员的自学读物，又可做培训单位的教学用书，也可做考试发证机关的命题依据。

当然，应该看到编写培训教材是一件具有特殊困难的事情。高了不成，低也不就。故这套教材也不可避免地有一些未尽人意之处，如少数内容失之偏僻，某些理论阐述略嫌费解。然这均属白璧微瑕，当无损珠辉。我相信，随着轮机管理技术之不断发展与轮机人材素质之不断提高，这套教材的修订版将会得到相应的补充与完善，而它作为广大轮机员良师益友的历史使命也将与日俱隆。

徐以介

1989.9

前 言

根据1988年中华人民共和国港务监督局《海船轮机长、轮机员考试大纲》的考试科目和知识要求，由中国航海学会船舶机电专业委员会、大连海运学院轮机系和大连海运学院出版社组建的高级船员适任证书考试用轮机培训教材编委会，组织了有丰富教学经验和实践经验的专家编写了这套教材。

轮机培训教材有较强的针对性和较好的系统性，符合船员考试大纲的要求，篇幅适中，取材切题，联系实际，简明扼要。适用于海船轮机人员考证培训，也可用于渔船、舰艇轮机人员考证培训，对船员的业务学习也有裨益。

轮机培训教材共分八册：船舶柴油机、船舶辅机、轮机管理、轮机自动化、轮机基础理论、船舶电气、造船大意和轮机英语。

本书在编审、出版和征订工作中得到交通部安全监督局、航运企业等单位的关心和大力支持，特致谢意。

高级船员适任证书考试用轮机培训教材编委会

1989.7

轮机培训教材编委会

(以下按姓氏笔划为序)

主任委员 钱耀鹏

副主任委员 孙延顺、何维扬、吴 恒、卓东明、张维恂、殷佩海

委 员 刁东航、马钟相、文明国、公维书、卢景波、刘茂东、孙凤岐、初吉东、
陈千凯、杜荣铭、金以铨、周天声、周金根、邵其庠、赵兴贤、张德一、
钱 闪、钱天祉、徐以介、倪 暹、浦宝康、费 千、韩秀廷、韩寿家、
程豫曾、熊 炬、缪 军

编者的话

本书虽然是根据港监局《海船轮机长、轮机员考试大纲》编写的，但在内容编排上也兼顾到了学科的系统性。全书共十二章，第一章至第三章由隋克立编写，第四章至第六章由史际昌编写，第七章至第九章由朱周编写，第十章至第十一章由熊炬编写，第十二章由王鼎惠编写。全书由熊炬主编定稿，曾兆钰审稿。在编写审稿过程中，大连港监局何维扬、青岛港监局文明国等同志多次提出宝贵修改意见，特此致谢。

在编写过程中，编者虽然密切注意到新考试大纲对《船舶电气》的要求，拟尽做到新编培训教材既能满足考试大纲之要求，有较宽的覆盖面、较强的针对性，又能有较好的学科系统性，然而这往往是矛盾的。因为新考试大纲在居多内容方面只提出了一些原则性要求，所以本书内容之取舍，程度之难易和顺序之先后，只能根据编者多年之教学经验和我国航运之现状，并参照以往船员考试之有关范围来确定。本教材虽经各编者反复讨论，几经修改，但仍感仓促，不尽完善，误漏和不妥之处也在所难免，敬请读者批评指正。

编者

1990、5

目 录

第一章 直流电路	(1)
第一节 电路及电路图	(1)
第二节 电流、电压和电动势	(1)
第三节 导体的电阻	(4)
第四节 欧姆定律	(5)
第五节 电功率和电能	(8)
第六节 基尔霍夫定律和电路分析一般方法	(9)
第七节 电阻串并联电路、直流测量仪表 (A、V、 Ω)	(11)
第八节 电容	(16)
复习思考题	(18)
第二章 电磁	(20)
第一节 磁场及电流的磁效应	(20)
第二节 铁磁材料的基本性质和磁路	(21)
第三节 电流在磁场中的力效应	(24)
第四节 电磁感应	(25)
复习思考题	(29)
第三章 交流电路	(30)
第一节 正弦交流电的产生	(30)
第二节 决定正弦量的三要素	(32)
第三节 正弦交流电的有效值	(33)
第四节 正弦量的矢量表示法	(34)
第五节 单一元件正弦交流电路	(36)
第六节 R-L-C串联交流电路	(41)
第七节 三相交变电势的产生、电源的连接	(45)
第八节 三相负载的连接	(48)
第九节 三相电功率的计算	(51)
复习思考题	(51)
第四章 晶体二极管及整流电路	(54)
第一节 半导体特性及PN结的单向导电性	(54)
第二节 半导体二极管	(56)
第三节 整流电路	(57)
第四节 滤波电路	(59)
复习思考题	(60)
第五章 晶体管及其应用	(62)

第一节	晶体管及其电流放大作用	(62)
第二节	单管电压放大器的组成和基本工作原理	(65)
第三节	阻容耦合电压放大电路	(68)
第四节	直接耦合放大电路	(72)
第五节	功率放大器概述	(74)
第六节	集成电路的一般常识和应用 (运算放大器)	(74)
	复习思考题	(77)
第六章	晶闸管及其应用	(79)
第一节	晶闸管的可控单向导电性	(79)
第二节	可控整流电路	(82)
第三节	单结晶体管触发电路	(84)
	复习思考题	(86)
第七章	变压器	(87)
第一节	变压器的构造和工作原理	(87)
第二节	三相电压的变换、仪用互感器	(89)
	复习思考题	(92)
第八章	异步电动机	(93)
第一节	异步电机的构造、旋转磁场和转动原理	(93)
第二节	异步电动机的起动、反转、调速和制动概念	(97)
第三节	单相异步电动机和交流执行电动机	(99)
第四节	自整角机、舵角指示器和电车钟	(100)
	复习思考题	(102)
第九章	直流电机	(104)
第一节	直流电机的构造和励磁方式	(104)
第二节	发电-电动原理、电动势和电磁转矩	(106)
第三节	直流电动机的起动和反转	(108)
第四节	直流电动机的机械特性、调速和制动	(108)
第五节	电机的维修保养、兆欧表和绝缘电阻的测量	(111)
	复习思考题	(114)
第十章	控制电器及基本控制线路	(115)
第一节	接触器和继电器	(115)
第二节	异步电动机的简单控制线路	(117)
第三节	电动机的基本控制环节	(119)
第四节	主令控制器和零位保护环节	(122)
第五节	时间继电器及其基本控制线路	(123)
第六节	电流继电器及其基本控制线路	(125)
	复习思考题	(127)
第十一章	船舶机械的控制原理	(129)
第一节	主机 (增压器) 滑油泵的自动切换控制线路	(129)

第二节	机舱辅机几种按双位原理的自动控制线路	(131)
第三节	空压机自动控制原理	(133)
第四节	制冷装置自动控制原理	(135)
第五节	船舶辅助锅炉的自动控制	(138)
第六节	船舶起货机的电力拖动和控制	(142)
第七节	锚机的电力拖动和控制	(146)
第八节	舵机的电力拖动和控制原理	(149)
复习思考题		(155)
第十二章	船舶电力系统	(156)
第一节	船舶电力系统概述	(156)
第二节	船舶电源	(157)
第三节	船舶配电装置	(159)
第四节	船舶电网	(163)
第五节	船用电缆	(166)
第六节	同步发电机的并联运行	(167)
第七节	直流发电机的并联运行	(176)
第八节	船舶电力系统的保护	(176)
第九节	船舶电气系统接地保护	(185)
第十节	自动报警监视系统	(187)
第十一节	蓄电池	(188)
复习思考题		(194)
附录	考试大纲摘录—船舶电气部分	(196)

第一章 直流电路

在我们的工作和日常生活中，常接触到各种直流电路和交流电路。电路的结构和功用虽各有不同，但它们却有着共同的规律，例如各种类型的电路都存在着电动势、电压、电流、电阻、电感、电容、电能和电功率等物理量。在这一章中，我们将从直流电路入手，讲授电路的基本物理量和电路的基本定律（欧姆定律、基尔霍夫定律），应用这些基本定律分析和计算直流电路的电流、电位、能量转换和电功率等。这些定律和计算方法虽然在直流电路中提出，同样也适用于交流电路。它是分析和计算电路的基本理论。我们必须很好地掌握它。

第一节 电路及电路图

电路就是电流所通过的路径。在实际电路中，电流总是从电源的一端流出，经导线、开关（控制设备），流过用电设备（负载）后，再流回到电源的另一端的。这样的电路称为闭合电路，而其中的任何一部分电路就称为部分电路。闭合电路显然是由电源、负载、导线和控制设备所组成的。

电源。它是电路中提供电能的设备，其功能是将非电能转换为电能。例如常见的干电池和处于放电状态的蓄电池是将化学能转换为电能的电源，交、直流发电机是将机械能转换为电能的电源。

负载。它是在电路中消耗电能的设备，其功能是将电能转换为其他形式的非电能。例如，处于充电状态的蓄电池将电能转换为化学能；交、直流电动机将电能转换为机械能；各种灯具、电热器（电炉、电烙铁）将电能分别转换为光能、热能，这些用电设备统称为负载。

导线及控制元件。它们是使电源与负载构成通路的中间环节，除导线外，包括开关、熔断器等，其功能是用来实现电能的传输、分配和控制。

为了便于分析电路的实质，通常把组成电路的实际元件及其连线，用符号来表示，画成电路图，如图 1-1 所示。在直流电路中，电源可用 $\begin{matrix} + \\ | \\ - \end{matrix}$ 和字母“E”表示；负载用 \square 和字母“R”表示。

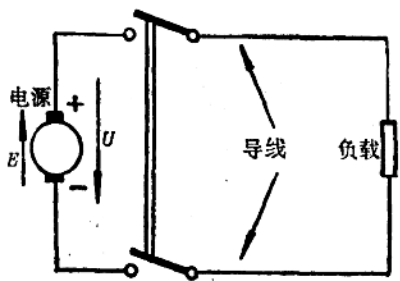


图1-1 简单电路的组成

第二节 电流、电压和电动势

一、电流

合上电源开关，电灯发光，电炉发热，电动机转动，这都是由于有电流流过负载，电场

力作了功的缘故。电流就是电荷（金属中的自由电子或气体、液体中的正、负离子）作有规则的定向运动而形成的。

电流的大小用电流强度来表示，简称电流。如果电流的大小和方向都不随时间而变化，这种电流称为恒定电流，简称直流。对于直流来说，电流强度在数值上等于单位时间内通过某一导体截面的电量，见图 1-2。电流强度用字母 I 表示，电流的计算公式是

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

式中： Q ——通过导线截面的电量，库仑（C）；

t ——通过电量 Q 所用的时间，秒（s）。

如果每 1 秒钟内有 1 库仑电量通过导线某截面，则电流是 1 安培（A）。电流很小时，常用毫安、微安来计量。

$$1 \text{ 安培 (A)} = 1000 \text{ 毫安 (mA)} = 10^3 \text{ 毫安 (mA)}$$

$$1 \text{ 毫安 (mA)} = 1000 \text{ 微安 } (\mu\text{A}) = 10^3 \text{ 微安 } (\mu\text{A})$$

电流的方向怎样确定呢？人们习惯上把正电荷运动的方向或负电荷运动的相反方向作为电流的实际方向。在导线中，实际电流是带负电的电子流，其效果与反方向带等量正电荷流完全相同，因此导线中的电流方向与电子流的方向相反。

电流的实际方向在确定的直流电路中是固定不变的，但在分析复杂的直流电路时，往往难以事先判断某支路中电流的实际方向，对交流来说，其方向是随时间而变的，就更不能用一个箭标来表示它的实际方向。为此，在分析与计算电路时，常采用任意选定的某一方向作为电流的正方向，或称为参考方向。所选的电流正方向并不一定与电流的实际方向一致，如果电流的实际方向与其正方向一致，则电流为正值，见图 1-3 (a)；反之，如果电流的实际方向与其正方向相反，则电流为负值，见图 1-3 (b)。因此，电流是一个代数量。如果在电路中没有选定电流的正方向，则电流的正、负值是完全没有意义的。通常在图中标出的电流方向，均为电流的正方向。

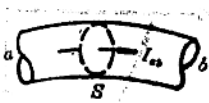


图 1-2 导体中的电流

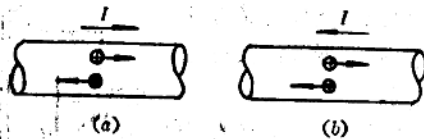


图 1-3 电流的正方向

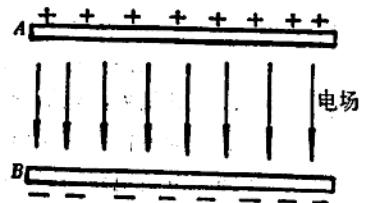


图 1-4 A、B 间的电场

二、电位、电压与电动势

在图 1-4 中， A 、 B 是两个电极， A 带正电， B 带负电，因此在 A 、 B 两极板之间产生电场，其方向由 A 指向 B 。

当我们将单位正电荷逆电场的方向由 B 移向 A 时，外力需要克服电场力做功，单位正电荷在电场中的电位能就增加，即单位正电荷在 A 点的电位能比 B 点的电位能要高。这一现象与物体在重力场中由较低处移向较高处相类似，物体在较高处的位能比在较低处的位能要高。

电场中某点的电位高低，标志着正电荷在该处所具有的电位能的大小。因为电场中各点

的电位能高低是相对的，为了确定电场中某点的电位能，必须选定一个参考点，认为这个点的电位能是零，这样把电场中各点的电位能与该参考点进行比较，就能确定某点的电位能。这与高山的高度要根据海拔这一标准来确定一样。

1. 电位 我们规定，单位正电荷从某点移到参考点电场力所作的功称为该点的电位，用字母 U 表示。如果在电场中某点 A 处有电荷 Q ，从 A 点移到参考点，电场力作的功为 W_A ，那么 A 点的电位为

$$U_A = \frac{W_A}{Q} \quad (1-2)$$

显然，参考点的电位为零。电位是一个代数量，有正有负：如果某点的电位为正（“+”），说明该点电位比参考点高；如果为负（“-”），则表示该点的电位比参考点低。

2. 电压 我们把图1-4中 A 、 B 两电极用导体（连接导线和负载）连接起来，如图1-5所示，在 A 、 B 间电场力的作用下， A 极上的正电荷经导体流向 B 极，电场对电荷作了功。为了衡量电场力对电荷做功的能力，我们引入电压这一物理量。 A 、 B 两点间的电压 U_{AB} 在数值上等于电场力把单位正电荷从 A 点移到 B 点所作的功，用公式表示则为

$$U_{AB} = \frac{W_{AB}}{Q} \quad (1-3)$$

式中： W_{AB} ——电场力移动正电荷从 A 到 B 所作的功，焦耳 (J)；

Q ——电场力移动的电荷量，库仑 (C)。

显然，从电位、电压的定义不难看出，电场内 A 、 B 两点间的电压也就是 A 、 B 两点间的电位差。

$$\begin{aligned} U_{AB} &= \frac{W_{AB}}{Q} = \frac{W_A - W_B}{Q} = \frac{W_A}{Q} - \frac{W_B}{Q} \\ &= U_A - U_B \end{aligned} \quad (1-4)$$

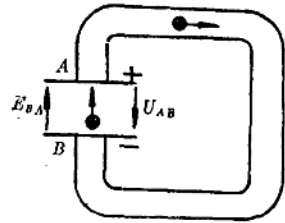


图1-5 电荷的回路

式中： U_A 、 U_B 分别为 A 、 B 点的电位。

正电荷在电场力的作用下，从高电位移向低电位，这样电极 A 因正电荷的减少而使电位逐渐降低，电极 B 因正电荷的增多而使电位逐渐升高，其结果是 A 和 B 两电极的电位差逐渐减小，直到等于零。与此同时，连接导体中的电流也相应地减小到零。

为了维持电流不断地在连接导体中流通，并保持恒定，就必须使 A 、 B 间的电压 U_{AB} 保持恒定，亦即必须使电极 B 上所增加的正电荷经另一路径再回到 A 极。但由于电场力的作用， B 极上的正电荷是不能逆电场而上的，必须用另一种外力，它能克服电场力而使正电荷由低电位到达高电位，这种力称为非电场力（局外力或电源力）。

3. 电动势 电源能产生非电场力。在发电机中，当导体在磁场中运动时会出现电源；在电池中，电极与电解液的作用所产生的化学力也是电源力。我们用电动势这个物理量来衡量电源力对电荷做功的能力。电源的电动势 E_{BA} 在数值上等于电源力把单位正电荷从电源的低电位端 B 经过电源内部移到高电位端 A 所作的功，用公式表示则为

$$E_{BA} = -\frac{W}{Q}$$

在电源力的作用下，电源不断地把其他形式的能量转换为电能，图 1-5 中的 A、B 就是电源的正负极。

和电流一样，电压和电动势都具有方向。电压的方向规定为由高电位端指向低电位端，即电位降低的方向。电源电动势的方向规定为在电源内部由低电位端指向高电位端，即电位升高的方向。可见，电源电动势的方向与电源两极间的电压方向正好相反，见图 1-5。

在国际单位制中，电压的单位是伏特，简称伏 (V)。当电场力把 1 库仑的电量从一点移到另一点所作的功为 1 焦耳时，该两点间的电压为 1 伏特。计量微小的电压时，常用毫伏 (mV) 或微伏 (μV)，计量高电压时，常用千伏 (kV) 为单位。

$$1\text{V} = 1000\text{mV} = 10^6\mu\text{V}$$

$$1\text{kV} = 1000\text{V} = 10^3\text{V}$$

电动势的单位也是伏特。

第三节 导体的电阻

我们知道，金属导体中的电流实质上是自由电子在电场力的作用下作定向运动的结果。自由电子在运动中由于跟其它的金属原子或离子的碰撞而受到阻碍。导体对电流的阻碍作用称为电阻，一般用 R 表示。电阻的单位是欧姆，简称欧，用字母“ Ω ”表示。

在某些场合（例如测量绝缘体的电阻时）下，常感欧姆的单位太小，而使用较大的千欧 ($\text{k}\Omega$) 和兆欧 ($\text{M}\Omega$)。

$$1\text{k}\Omega = 1000\Omega = 10^3\Omega$$

$$1\text{M}\Omega = 1000000\Omega = 10^6\Omega$$

对于不同的金属，由于单位体积内自由电子数目不同，内部结构不同，自由电子在运动中碰撞的机会和次数不同，因而同样长度和截面积而材料不同的导体，它的电阻不相同。为了从数量上表示不同导体的这一特性，我们引用电阻率这一物理量。电阻率用 ρ 表示，在数值上等于长 1 米、横截面为 1 平方毫米的导体所具有的电阻，它的单位是 $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ 。

表 1-1 给出了几种常见材料在 20℃ 时的电阻率。

表 1-1 几种常用材料的电阻率和电阻温度系数

材料名称	电阻率 (20℃) [$\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$]	电阻温度系数 (20℃) [$1/^\circ\text{C}$]	材料名称	电阻率 (20℃) [$\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$]	电阻温度系数 (20℃) [$1/^\circ\text{C}$]
银	0.0165	0.0038	锰 铜	0.42	0.000005
铜	0.0175	0.0040	康 铜	0.49	0.000005
铝	0.0263	0.0042	镍铬合金	1.00	0.00013
钨	0.0551	0.0045	铂铬合金	1.35	0.00005
铸铁	0.5	0.001	碳	10	-0.0005
铅	0.105	0.00389			

注①表中给出的是近似值，这些数值随材料纯度和成分不同而有所变化；

②表中碳的温度系数前有负号，表示碳的电阻值随温度升高而降低。

由表可见，银、铜和铝的电阻率都很小，是良导体。铜线和铝线广泛用于绕制电机、变压器的线圈，制作各种导线等；银的电阻率虽然最小，但由于它是贵金属，所以只在特殊场合采用，例如在某些电器的触头上镀有少量的银，而锰铜、康铜等材料，电阻率较大，一般用于制作绕线电阻、电炉丝、电铬铁心、变阻器等。

实验证明，同一材料的电阻与导体的长度 l (m) 成正比，与导体的截面积 S (mm^2) 成反比。也就是说，导体愈长，电阻愈大；而导体的截面积愈大，电阻则愈小。用公式表示就是

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

式中： ρ ——导体的电阻率 ($\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$)。

导体的电阻还随温度的变化而变化，即

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

式中： t_1 、 t_2 ——导体温度变化前、后的温度 ($^{\circ}\text{C}$)；

R_1 、 R_2 ——导体温度分别在 t_1 、 t_2 时的电阻值 (Ω)；

α ——导体的温度系数 ($1/^{\circ}\text{C}$)，见表 1-1。

第四节 欧姆定律

欧姆定律是分析和计算电路的最基本定律，应用时常分为以下几种形式：

一、一段电阻电路的欧姆定律

一段电阻电路（或称一段不含源电路），是指这段电路中不包含电源，如图 1-6 所示。

实验证明：通过电阻的电流与加在电阻两端的电压成正比。这就是一段电阻电路的欧姆定律，它的数学表示式为

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

式中： U ——加在电阻两端的电压 (V)；

I ——流过电阻元件的电流 (A)；

R ——电阻元件的电阻值 (Ω)。

式 (1-7) 表达了一段电路中电压、电流和电阻的关系，如果已知其中两个量，就能求出第三个未知的量。式 (1-7) 也可改写为

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

式 $U = IR$ 是电流在电阻上产生电压降的计算公式，它表明只要有电流流过电阻，就会产生电压降。

二、一段有源电路的欧姆定律

当一段电路中含有电源（即含有电动势 E ）时，确定这段电路中的电流、电压、电阻及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 1-7 (a) 中的 AB 段电路是有源的，电动势、电压及电流的正方向如图中所示，根据

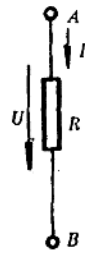


图 1-6 一段电阻电路

它们的正方向可列出下面的关系式，即

$$\begin{aligned} E &= U_A - U_0 & U_A &= E + U_0 \\ IR &= U_B - U_0 & U_B &= IR + U_0 \end{aligned}$$

将上两式代入 $U = U_A - U_B$ 中，得到

$$U = (E + U_0) - (IR + U_0) = E - IR$$

或

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

如果电动势、电压及电流的正方向如图1-7 (b) 所选定的那样，用上面的分析方法，可得到

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

根据以上的分析，可将一段有源电路的欧姆定律写成下列公式，即

$$I = \frac{\pm E \pm U}{R} \quad (1-9)$$

式 (1-9) 中电动势 E 和电压 U 前的正负号是这样确定的：如果电动势和电压的正方向与电流正方向一致，则取正号，相反则取负号。

三、全电路欧姆定律

欧姆定律如应用于闭合回路时，则称为全电路（或闭合电路）的欧姆定律。

在图 1-8 所示的闭合电路中，电源电动势为 E ，电源本身总有一定的内阻，用 R_0 表示，外电路电阻为 R 。根据欧姆定律的前两种形式，可以得出

$$U = E - IR_0 \quad \text{和} \quad U = IR$$

由此可得

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

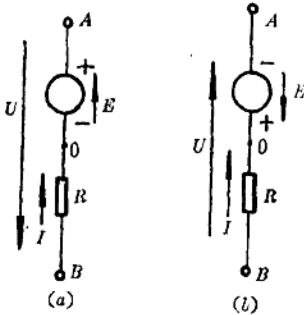


图1-7 一段有源电路

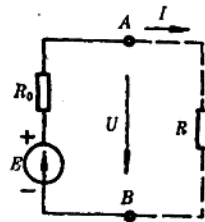


图1-8 简单的闭合回路

写成一般形式为

$$I = \frac{\sum E}{\sum R} \quad (1-11)$$

式中“ \sum ”是和的意思， $\sum E$ 是指回路中各电动势的代数和， $\sum R$ 是指回路中的总电阻。上

式表示：在闭合回路中，电流等于各个电动势的代数和与回路总电阻的比值，这就是全电路欧姆定律。

在一般情况下，电源电动势 E 和内阻 R_0 是不变的，从式(1-10)可知，外电路电阻的变化是影响电流大小的唯一因素，当 R 减小时，全电路总电阻减小，电流增大，随着电源输出电流 I 的增大，从 $U = E - IR_0$ 可知，电源的端电压 U 将要降低。

电源的端电压 U 与电源输出电流（或负载电流） I 之间的关系，即 $U = f(I)$ ，称为电源的外特性。将式 $U = E - IR_0$ 所确定的 $U = f(I)$ 关系绘成曲线，就得到图1-9所示的电源外特性曲线。

如果当外电路电阻变小，电流 I 逐渐变大（称负载增大）时，电源端电压 U 下降得很小，则认为这个电源的外特性较硬（即电源保持端电压稳定性能较强）；反之，则较软。另外，电源内阻 R_0 的大小，直接影响电源的外特性，电源内阻 R_0 愈小，电源端电压愈平稳。

下面再来分析一下电路中具有实际意义的两种工作状态。

1. 开路（或空载）。电源与外电路断开，电路中的电流等于零，这时电源的端电压（称为开路电压或空载电压 U_0 ），等于电源电动势，如图1-10 (a) 所示，这时电路的工作状态称为开路（或空载）状态。

如上所述，电路开路时的特征用式子表示是：

$$I = 0 \quad U = U_0 = E$$

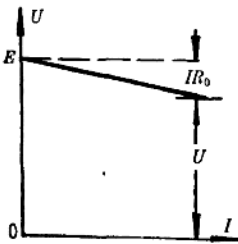


图1-9 电源外的特性

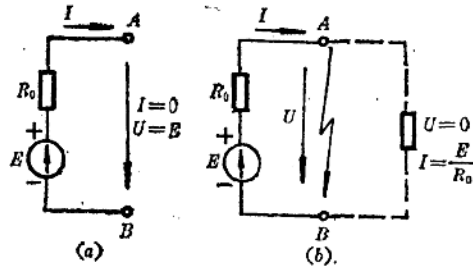


图1-10 电路状态

a) 开路状态； b) 短路状态

2. 短路状态。当电源的两端 A 和 B 由于某种原因而连在一起时，电源则被短路，如图1-10 (b) 所示，电源短路时外电路的电阻可视为零，电流有捷径可通，不再流过负载。由于电源的内阻 R_0 很小，因此发生短路时，电路中将有极大的电流，称为短路电流，如果短路状态不迅速排除，将会造成线路和电气设备的严重事故。

电源短路时，由于外电路的电阻为零，所以电源的端电压也为零，这时电源的电动势全部降在内阻上。

如上所述，电源短路时的特征用式子表示是：

$$U = 0 \quad I = I_s = \frac{E}{R_0} \quad (\text{短路电流})$$

第五节 电功率和电能

一、电功率

有一段电阻电路，在外加电压 U_{AB} 作用下，通过电阻 R 的电流为 I ，见图1-6。根据式(1-3)知道，电场力把 Q 库仑的电荷由 A 点移到 B 点所作的功为

$$W_{AB} = U_{AB}Q$$

我们把单位时间内，电场力所作的功称为电功率，简称功率，用 P 表示，即

$$P = \frac{W_{AB}}{t} = \frac{U_{AB}Q}{t} = U_{AB}I \quad (1-12)$$

式(1-12)适用于任何性质的负载。它表明，负载消耗的功率等于负载两端的电压与流过负载的电流的乘积。

对于纯电阻电路，运用欧姆定律，上式可变换为下面形式

$$P = I^2 R = \frac{U^2}{R} \quad (1-13)$$

功率的实用单位是瓦特，简称瓦，用 W 表示。

$$1 \text{ 瓦} = \frac{1 \text{ 焦耳}}{1 \text{ 秒}}$$

功率的较大单位是千瓦(kW)，较小的单位是毫瓦(mW)。

二、电能

电能就是电场力(或电源力)所作的功。当电路中有电流通过时，电源输出的电能被负载消耗。因为电功率是单位时间内电场力(或电源力)所作的功，所以在 t 秒时间内负载所消耗的电能

$$A = Pt = UI t \quad (1-14)$$

式(1-14)适用于任何性质的设备。

对于电阻电路，运用欧姆定律，上式可改写成下面形式

$$A = I^2 R t = \frac{U^2}{R} t$$

式中： t ——用电时间，秒(s)；

A ——负载所消耗的电能，焦耳(J)。

在电工工程上常用千瓦时(kWh)为电能单位，1kWh是指功率为1kW的负载，工作1h所消耗的电能，或500W的负载用电2h所消耗的电能。

三、电流的热效应和电气设备的额定值

1. 电流的热效应 电荷在电场力作用下，沿着导体移动时就会和导体内其它质点(分子、原子)发生碰撞和摩擦，于是就会使分子的热运动加剧，将一部分电能转变为热能，使导体温度升高。因此，当电流通过导体时，会使导体发热，这种现象就叫做电流的热效应。

在电阻电路中，电阻所消耗的电能全部转换为热能，所以电能电阻上所转换的热量为