

内 容 提 要

本书共分十二章。一至四章介绍交、直流电路及电磁基本理论；五至七章为变压器、异步电动机及继电接触控制；八至十二章为电子技术，内容有整流、放大、开关电路、可控硅、逻辑元件、集成组件及其在顺控方面的应用。

本书为高等工业学校铸造专业电工学课程的教学参考书，也可供从事铸造生产的工程技术人员参考。

电 工 学

(铸造专业用)

华中工学院
西安交通大学 等编
陕西机械学院

*

人民教育出版社出版

新华书店上海发行所发行

上海中华印刷厂印装

*

1978年4月第1版 1978年8月第1次印刷

书号 15012·055 定价 2.20 元

目 录

第一章 直流电路	1
§1-1 直流电路的基本物理量.....	1
(一) 电路.....	1
(二) 电流.....	1
(三) 电压与电动势.....	2
(四) 电阻.....	5
§1-2 欧姆定律 电能和电功率.....	6
(一) 一段电路的欧姆定律.....	6
(二) 全电路欧姆定律.....	7
(三) 电路中各点电位的确定.....	8
(四) 电能和电功率.....	9
§1-3 电路的运行状态和电气设备的额定值.....	10
(一) 电气设备的额定值和额定工作状态.....	10
(二) 开路 短路及其保护.....	11
(三) 导线的选择.....	12
§1-4 克希荷夫定律.....	13
(一) 克希荷夫第一定律.....	14
(二) 克希荷夫第二定律.....	14
§1-5 电阻串联和并联电路.....	15
(一) 电阻串联电路.....	15
(二) 电阻并联电路.....	15
(三) 万用表电路原理.....	16
§1-6 复杂电路的计算.....	18
(一) 支路电流法.....	18
(二) 叠加原理.....	19
§1-7 电桥电路.....	20
(一) 不平衡电桥.....	21
(二) 测量电桥原理.....	22
(三) 平衡电桥.....	24
(四) 直流电位差计.....	24
§1-8 电容器及其接直流电压后的充电和 放电过程.....	25
(一) 电容器及其串联、并联接法.....	25
(二) 电容器接通直流电压的充电过程.....	27
(三) 电容器的放电过程.....	29
(四) 电容器中电场的能量.....	30
本章小结.....	31
习题与思考题.....	32
第二章 电磁的基本知识	36

§2-1 磁场及电流的磁效应.....	36
(一) 磁场.....	36
(二) 电流的磁效应.....	37
§2-2 铁磁物质.....	40
(一) 铁磁物质的磁化与磁化曲线.....	40
(二) 铁磁材料的分类.....	43
§2-3 磁路欧姆定律与磁路的计算.....	43
(一) 磁路欧姆定律.....	43
(二) 磁路的计算.....	45
§2-4 电磁感应.....	47
(一) 导体与磁场间有相对运动时的电磁感应.....	47
(二) 与线圈相链的磁场发生变化时的电磁感应.....	48
(三) 自感与互感.....	49
§2-5 具有电感的直流电路.....	51
(一) 电感电路的接通.....	52
(二) 磁场储能.....	53
(三) 电感电路的断开.....	54
§2-6 电磁作用力.....	55
§2-7 电磁吸力及其在生产中的应用举例.....	57
(一) 电磁吸力.....	57
(二) 应用举例.....	58
本章小结.....	60
习题与思考题.....	63
第三章 单相交流电路	65
§3-1 交流电的基本性质.....	65
(一) 什么是交流电.....	65
(二) 正弦交流电的三要素.....	65
(三) 交流电的相位差.....	67
(四) 交流电的有效值.....	67
§3-2 交流电的旋转矢量表示法.....	68
(一) 正弦量的旋转矢量表示法.....	69
(二) 同频率旋转矢量的加减法.....	69
(三) 简化的旋转矢量图.....	70
§3-3 交流电阻电路.....	71
(一) 电压与电流的关系.....	71
(二) 平均功率.....	72
§3-4 交流电感电路.....	73
(一) 电压与电流的关系.....	73
(二) 感性无功功率.....	75

§3-5 交流电容电路	76	(一) 三相变压器绕组的连接	140
(一) 电压与电流的关系	76	(二) 三相变压器的铭牌	140
(二) 容性无功功率	77	§5-7 其它变压器	143
§3-6 电阻与电感串联的交流电路	78	(一) 多绕组变压器	143
(一) 电压与电流的关系	79	附: 小功率电源变压器的计算	144
(二) 功率关系	80	(二) 自耦变压器	149
(三) 用试验方法求电感线圈的参数	82	(三) 仪用互感器	151
§3-7 电阻、电感与电容串联的交流电路	83	本章小结	152
§3-8 电阻、电感串联后和电容并联的交流电路	87	习题与思考题	153
(一) 并联补偿电路中各物理量的关系	87	第六章 异步电动机	155
(二) 并联补偿电容器的计算	89	§6-1 三相异步电动机的基本结构和工作原理	155
§3-9 计算交流电路的复数符号法	91	(一) 旋转磁场的产生	157
§3-10 非正弦交流电路	93	(二) 旋转磁场的方向	158
本章小结	97	(三) 旋转磁场的转速	158
习题与思考题	99	(四) 三相异步电动机的工作原理	159
第四章 三相交流电路	103	§6-2 三相异步电动机的转矩和机械特性	161
§4-1 三相交流电源	103	(一) 三相异步电动机的转矩	162
(一) 三相交流电动势的产生	103	(二) 三相异步电动机的机械特性	162
(二) 三相四线制电源	104	(三) 三相异步电动机的运行	164
§4-2 三相负载的连接	106	§6-3 三相异步电动机的使用	165
(一) 三相负载的星形连接	106	(一) 起动	165
(二) 三相负载的三角形连接	109	(二) 反转	168
§4-3 三相电路的功率及其测量	111	(三) 调速	168
(一) 三相电路的功率	111	(四) 制动	169
(二) 三相功率的测量	114	§6-4 三相异步电动机的选用	170
§4-4 安全用电常识	115	(一) 铭牌数据	170
§4-5 三相电阻炉电热元件的计算	116	(二) 种类的选择	172
(一) 对电热元件的要求	117	(三) 结构型式的选择	172
(二) 电热体的计算	117	(四) 额定电压与转速的选择	173
§4-6 工频感应电炉的三相平衡问题	121	(五) 容量的选择	173
(一) 工频炉中的电磁感应现象	121	§6-5 单相电动机与可逆电动机	176
(二) 工频炉的三相平衡问题	123	(一) 单相异步电动机	176
本章小结	127	(二) 电容式执行电动机	178
习题与思考题	128	§6-6 电动机的保护接地与保护接零	178
第五章 变压器	131	(一) 保护接地	178
§5-1 变压器的基本结构	131	(二) 保护接零	179
§5-2 变压器的工作原理	132	本章小结	179
§5-3 变压器的运行	134	习题与思考题	181
(一) 变压器的空载运行	134	第七章 常用电器及继电器接触器控制电路	182
(二) 变压器的负载运行	135	§7-1 常用电器	182
§5-4 变压器的外特性与电压调整率	138	(一) 手动电器	182
§5-5 阻抗变换	139	(二) 接触器	185
§5-6 三相变压器	139	(三) 中间继电器	191

§7-2 生产机械电气设备的基本控制电路	192
(一) 直接起动、有短路保护的鼠笼式异步电动机的控制电路	192
(二) 有长期过载保护装置的控制电路	194
(三) 有欠压及过流(短路)保护的电路	196
(四) 联锁控制电路	197
(五) 按时间原则的控制电路	199
(六) 按行程原则的控制电路	201
(七) 按次序控制的电路	205
小结	206
§7-3 阅读继电器接触器控制电路的步骤及方法	212
(一) 如何阅读继电器接触器控制电路	212
(二) 气动微振压实造型机控制电路的分析	213
(三) 电磁配铁秤控制电路	218
(四) 无芯工频感应电炉控制电路	221
§7-4 继电器接触器控制电路的设计	223
(一) 概述	223
(二) 几个具体问题	223
(三) 冲天炉爬式加料机控制电路的设计	225
(四) 无箱射挤压造型机的下芯机构控制电路的设计	229
本章小结	235
习题与思考题	235
附录	238
表 7-1 LA19 系列按钮的技术数据	238
表 7-2 CJ10 系列交流接触器的技术数据	238
表 7-3 JZ7 系列中间继电器的技术数据	238
表 7-4 RC1 型熔断器各种额定电流的熔丝规格表	238
表 7-5 常用低压熔丝规格表	239
表 7-6 低压(380V)电动机用熔丝选择表	239
表 7-7 JR-15 系列热继电器的技术数据	240
表 7-8 JS7-A 系列空气式时间继电器的技术数据	240
表 7-9 JLXK1 系列行程开关的技术数据	240
第八章 半导体二极管及整流电路	241
§8-1 半导体二极管	241
(一) 半导体二极管单向导电现象及半导体的物理特性	241
(二) PN 结的特性	243
(三) 半导体二极管的构造及伏安特性	244
(四) 晶体管的命名和极性辨别	246
§8-2 整流电路	248

(一) 单相半波整流电路	248
(二) 单相桥式整流电路	250
(三) 三相半波整流电路	253
§8-3 滤波电路	256
(一) 电容滤波器	256
(二) 电感滤波器	259
(三) 复式滤波器	260
§8-4 二倍压整流电路	261
§8-5 硅稳压管及简单直流稳压电源	261
(一) 硅稳压管及其特性与参数	262
(二) 简单直流稳压电源	263
本章小结	267
习题与思考题	267
附录一 常用晶体二极管参数	268
附录二 稳压二极管参数	269
第九章 放大与振荡	271
§9-1 晶体三极管	271
(一) 晶体三极管的结构	271
(二) 晶体三极管的电流分配关系及放大作用	272
(三) 晶体三极管的输入特性与输出特性	273
(四) 晶体三极管的主要参数	275
(五) 温度对晶体三极管参数的影响	276
(六) 用万用表检查晶体三极管	276
§9-2 单管交流放大电路	277
(一) 晶体三极管放大器的基本电路	277
(二) 静态工作点的设置	278
(三) 放大过程的分析	278
(四) 静态工作点的选择	279
(五) 放大倍数的估算	282
(六) 负反馈与偏置电路	286
§9-3 多级放大器与功率放大器	288
(一) 多级放大器概述	288
(二) 阻抗匹配与输出电阻	289
(三) 阻容耦合放大器	289
(四) 变压器耦合放大器	291
(五) 直接耦合放大器	292
(六) 功率放大器	292
§9-4 放大器的反馈	296
(一) 反馈放大器的一般关系式——开环放大倍数与闭环放大倍数的关系	296
(二) 负反馈对放大器性能的影响	297
(三) 射极输出器	298
(四) 反馈极性的判别——电路举例	299
(五) 放大器的自激振荡——振荡器基本原理	300
(六) LC 振荡器及其应用举例	301

§9-5 运算放大器及其集成组件	304	(二) 计数器	357
(一) 运算放大器的基本原理	304	(三) 译码、显示	361
(二) 运算放大器的运算功能	308	§11-4 顺序控制器	365
(三) 差分放大器	311	(一) 概述	365
(四) 集成运算放大器组件	313	(二) 基本逻辑型顺序控制器	366
(五) 集成运算放大组件的主要参数	315	(三) 步进型顺序控制器	373
(六) 集成运算放大组件在使用时的注意事项	315	(四) 顺序控制器小结	379
本章小结	316	§11-5 逻辑组件	379
习题与思考题	318	(一) 概述	379
第十章 开关电路	320	(二) DTL、HTL 集成电路	380
§10-1 晶体三极管的开关特性	320	(三) TTL 集成电路	382
(一) 有触点开关	320	(四) 集成电路触发器	382
(二) 晶体三极管作为无触点开关	320	(五) MOS 集成电路	389
(三) 晶体三极管的截止与饱和导通条件	321	本章小结	394
(四) 应用举例	322	习题与思考题	395
§10-2 双稳态触发器	323	第十二章 可控硅及其应用	398
(一) 双稳态电路的组成	323	§12-1 可控硅的结构和工作原理	398
(二) 触发电路	324	(一) 可控硅的结构及符号	398
§10-3 单稳态触发器与多谐振荡器	326	(二) 可控硅的工作原理	398
(一) 单稳态触发器	326	§12-2 可控硅的特性、主要参数及型号	399
(二) 多谐振荡器(无稳态电路)	329	(一) 可控硅的特性	399
§10-4 射极耦合双稳态触发器	332	(二) 可控硅的主要参数	400
(一) 工作原理	332	(三) 可控硅的型号	401
(二) 回差现象	333	(四) 使用可控硅时的注意事项	401
(三) 射极耦合双稳态触发器的应用	334	§12-3 可控硅的主电路	402
§10-5 延时电路	337	(一) 可控硅整流电路	402
(一) 概述	337	(二) 可控硅无触点开关	405
(二) 延时开关电路	338	(三) 可控硅交流调压电路	406
(三) 晶体管时间继电器——JSB 型	340	(四) 逆变器	407
本章小结	341	(五) 可控硅的保护装置	409
习题与思考题	342	§12-4 可控硅触发电路	410
第十一章 逻辑电路及其应用	343	(一) 单结晶体管的结构和特性	410
§11-1 基本逻辑电路	343	(二) 单结晶体管弛张振荡器电路	412
(一) 门电路	343	(三) 触发电路参数的选择	413
(二) 逻辑代数的一些基本运算规则	348	(四) 同步削波电源	414
(三) 二极管门电路应用举例	350	(五) 带有放大环节的单结晶体管触发电路	415
§11-2 半导体逻辑元件及其应用	352	(六) 触发脉冲的输出	415
(一) 概述	352	§12-5 可控硅应用实例	416
(二) 逻辑元件介绍	353	(一) 电磁吸盘的可控整流电路	416
(三) 应用举例	355	(二) 自动调压恒温控制	417
§11-3 计数、译码、显示	357	本章小结	418
(一) 概述	357	习题与思考题	418

第一章 直流电路

§1-1 直流电路的基本物理量

(一) 电路

电路,简单地说就是电流所经之路,它主要由电源、负载和连接导线组成,如图 1-1 所示。

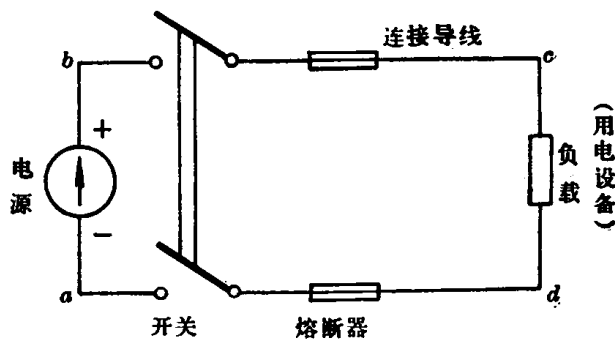


图 1-1 最简单的直流电路

1. 电源 电源的作用是将非电能量转换成电能。例如在常用的电源中,蓄电池把化学能转换成电能,发电机把机械能转换成电能。

2. 负载 负载的作用是将电能转换成其它形式的能量。例如在常用的负载中,电炉、电灯将电能转换成热能、光能,电动机将电能转换成机械能。

3. 连接导线 它是用来连接电源与负载,组成电流通路的中间环节。

由电源、负载和连接导线构成的最简单的直流电路,如图 1-1 所示。图中的开关和熔断器是作控制和保护用的电器。

电路中能量的转换、输送、分配和控制都是通过电流、电压和电动势等物理量来反映和表达的。所以在分析电路问题之前,首先讨论一下电路中这几个基本物理量。

(二) 电流

电荷的定向运动形成电流。我们从电流通过导体所产生的热效应、磁效应、发光、化学效应(如电解)与机械力效应等现象中,能觉察到电流的存在。

为了衡量电流的强弱,引进电流强度这个物理量。设在 Δt 时间内通过导体某一截面 S (图 1-2)的电荷量的代数和为 Δq ,则电流强度定义为

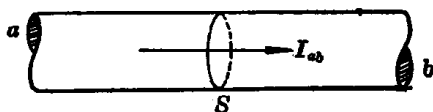


图 1-2 导体中的电流

$$i = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta q}{\Delta t} = \frac{dq}{dt}. \quad (1-1)$$

所以在—根导线中的电流强度，数值上等于单位时间内穿过导线任意截面的电荷量的代数和。电流强度也简称电流。(1-1)式是电流的一般表达式。在直流电路中，电流不随时间变化，即 $\frac{dq}{dt} = \text{常数}$ 。这种电流称为恒定电流，简称直流。恒定电流用大写字母 I 表示：

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

式中 q 是在 t 时间内通过导体截面 S 的电荷量的代数和。

习惯上规定，正电荷运动的方向或负电荷运动的反方向为电流的实际方向。在分析和计算电路时，由于电流沿导线流动的方向有两种可能性，所以常规定某一方向作为电流的正方向，并用箭头表示。电流的正方向与实际方向不一定一致。当电流的正方向与实际方向相同时，则电流取正值，如图 1-3(a) 所示；当电流的正方向与实际方向相反时，则电流取负值，如图 1-3(b) 所示。因此，在规定电流的正方向以后，电流可为正值或负值。



图 1-3 电流的实际方向与正方向

在实用单位制中，电荷量的单位是库仑，时间的单位是秒，则电流的单位是安培，简写为安，以符号 A 表示。当电流比较小时，可采用毫安(mA)或微安(μA)为单位。

$$1A = 1000mA = 10^3mA$$

$$1mA = 1000\mu A = 10^3\mu A$$

$$1A = 10^6\mu A$$

1 安的电流相当于每秒钟在导体的截面通过 1 库仑 (Coulomb) 的电荷量。1 库仑的电荷约为 6.4×10^{18} 个电子所带电荷的总和。

电路中的电流可用电流表来测量。电流表串接在电路中，使电流从电流表“+”端流入，从“-”端流出，电流表的指针即能指示出电流 I 的数值。

(三) 电压与电动势

电路中连续不断的电流是怎样产生的呢？当电源与外电路接通时，电源便驱使自由电子沿导体作定向的运动，这就构成了电流。在电源里，例如电池，有正极与负极。积聚正电荷的一端称为正极，积聚负电荷的一端称为负极。在它们周围都存在着电场。我们在物理学里已经学过，把电荷放在某一电场里，电荷会受到力的作用。这个力就称为电场力，用 $\bar{F}_a$ 表示。电源里积聚在正、负电极上的正、负电荷本身也因受到电场力而互相吸引。但由于在电源内部有化学力(例如电池)或其它外力(如光、热等)，这些外力称为电源力(局外力)，用 $\bar{F}_y$ 表示。 $\bar{F}_y$ 克服电场力 $\bar{F}_a$ ，将电源里的正、负电荷分开，使它们分别集中到电源的正、负两端。当电源两端所积聚的电荷量增多，电场力加强到 $\bar{F}_a = \bar{F}_y$ 时，电源两端的正、负电荷量不再增加，达到相对

平衡,如图 1-4(a) 所示。电场力 $\vec{F}_a$ 的方向是从正极指向负极。电源力使正、负电荷分别集中到电源的正、负极的过程中,电场力反对电荷继续移动和积累。这样,电源力克服电场力的反作用力而做功,使电荷获得能量。因此,在电源内部就发生了化学能(或其它形式的能量)转变为电能的过程。

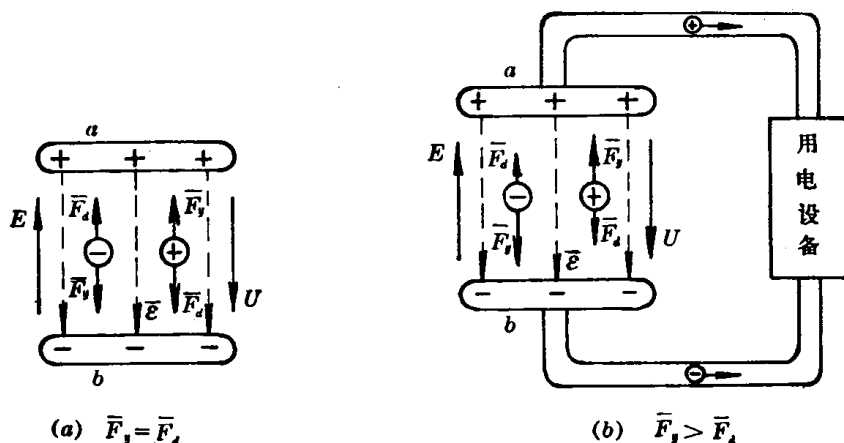


图 1-4

当用导线将负载与电源接通时,如图 1-4(b) 所示,在电场力的作用下,自由电子沿外电路流动形成电流,电流流过负载,释放出原来吸取的能量,将电能变为热能、光能或其它形式的能量。这时,电源内部, $\vec{F}_s > \vec{F}_a$, 电源力不断对正电荷做功,把它从负极移到正极;在外电路,电场力对正电荷做功,使它从正极经过负载流向负极。电路中便有持续不断的电流,形成了新的动平衡。

由于通常所说的电流方向与电子运动的方向相反,即将正电荷流动的方向规定为电流的正方向,故在电源外部,电流从正极流向负极;在电源内部,电流从负极流向正极。

电场力把单位正电荷从 a 点移到 b 点所做的功,称为 a 、 b 两点之间的电压 U_{ab} 。电压的单位为伏特,简称伏,以符号 V 表示。

电压 U_{ab} 的数学表达式为

$$U_{ab} = \frac{A_a}{q} = \frac{\int_a^b \vec{F}_a d\vec{l}}{q} = \int_a^b \vec{E} d\vec{l}. \quad (1-3)$$

式中 A_a ——电场力移动电荷 q 所做的功,

$\vec{F}_a$ ——作用于电荷上的电场力,

$\vec{E}$ ——电场强度。

在电场中,将电荷 q 移动一周回到原处时,所作的功为零,即 (1-3) 式的闭合线的积分为零。(1-3) 式的积分与电荷移动的路径无关,只由其起始点位置确定。

电场力做功的特性与重力相似。因此,与引入重力位能一样,我们也可认为电荷在电场里任何一个位置时,都具有一定的位能,而电场力所做的功便是这位能改变的量度。我们任选一点的电位为零,并作为参考点。电场力把单位正电荷从电路中的某一点 a 移到参考点所做的功称为该点的电位 φ_a 。

$$\varphi_a = \int_a^0 \vec{E} d\vec{l}. \quad (1-3a)$$

电位的单位也为伏。

电路中, a 、 b 两点(均以电路中的某一点作为参考点)间电位之差可用下式表示, 即

$$\varphi_a - \varphi_b = \int_a^0 \bar{\varepsilon} d\bar{l} - \int_b^0 \bar{\varepsilon} d\bar{l} \quad (1-4)$$

$$\begin{aligned} &= \int_a^0 \bar{\varepsilon} d\bar{l} + \int_0^b \bar{\varepsilon} d\bar{l} \\ &= \int_a^b \bar{\varepsilon} d\bar{l}. \end{aligned} \quad (1-4 a)$$

比较 (1-3) 式与 (1-4a) 式可知, $U_{ab} = \varphi_a - \varphi_b$. 这就是说, 电路中, a 、 b 两点间的电压等于这两点之间的电位差。

从 (1-3a) 式与 (1-4) 式可知, 电位随参考点的选择不同而变化, 但电路中两点之间的电压(即电位差)却与参考点的选择无关。

电压不是矢量, 而是一个代数量, 故在规定的正方向下, 它可以是正的, 也可以是负的。电压的正方向规定为从高电位到低电位, 也就是说, 在电压的作用方向上电位是降落的。

电源力把单位正电荷从电源负极(b 点)经电源内部移到正极(a 点)所做的功, 称为电源的电动势 E , 用公式表示为

$$E = \frac{A_y}{q} = \frac{\int_a^b \bar{F}_y d\bar{l}}{q}. \quad (1-5)$$

A_y 为电源力所作的功, $\bar{F}_y$ 为作用于电荷 q 上的电源力。所以电源的电动势是衡量电源力做功的能力的一个物理量。在电源内部电动势的正方向规定为电源力推动正电荷运动的方向, 即从负极(低电位)指向正极(高电位)的方向, 也就是电位升高的方向, 与电压的方向相反, 如图 1-5 所示。电动势的单位也为伏。

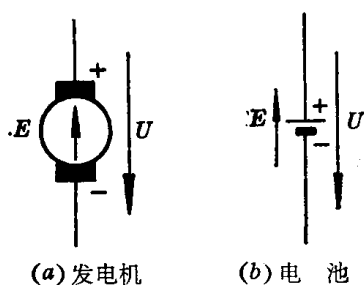


图 1-5 直流电源

当电路的电压较低时, 电压常用毫伏(mV)或微伏(μ V)作单位。

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

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

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

当电路的电压很高时, 电压常用千伏(kV)作单位。

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

常用电灯的电压为 220 伏, 交流电动机的电压为 380 伏, 配电电压为 10 千伏、35 千伏, 高压输电线电压为 220 千伏、500 千伏、750 千伏、765 千伏等。

电压可以用电压表测量。电压表上的“+”端接电源的正极, “-”端接电源的负极, 电压表的指针就能指示出所测量的电压数值。

(四) 电阻

电阻是电路中的一种基本元件。常用的电阻器件有电灯泡、电阻炉、电烙铁等，以及在电子线路中大量应用的炭膜电阻、金属膜电阻、线绕电阻等。

导体电阻的大小，主要与下面四个因素有关：

1. 导体的电阻与导体的长度成正比。即导体越长，电阻越大；导体越短，电阻越小。
2. 导体的电阻与导体的横截面积成反比。即导体越粗，电阻越小；导体越细，电阻越大。
3. 导体的电阻与导体的材料有关。即长短粗细相同的两种导体，其材料不同，电阻的大小也不同。

4. 导体的电阻与导体的温度有关。同一种导体，在不同的温度下有不同的电阻值。一般导体的电阻随温度的升高而增大。

对于一根材料均匀、截面积也均匀的长导体来说，在一定的温度下（一般是 20°C ），它的电阻值可用下式计算：

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

式中， ρ ——导体材料的电阻系数（又称为电阻率），它是表示导体材料阻碍电流传导能力的物理量。 ρ 的单位为欧·毫米²/米 ($\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$)。

l ——导体材料的长度，单位为米(m)。

S ——导体材料的截面积，单位为毫米²(mm^2)。 R 的单位为欧(Ω)。

电阻系数的倒数 $\gamma = \frac{1}{\rho}$ 称为导电系数（又称为导电率）。因此，(1-6)式可以改写为

$$R = \frac{l}{\gamma S} \quad (1-6a)$$

由于各种物质的结构和成分不同，电阻系数也不相同。绝缘体的电阻系数最大，半导体次之，导体的电阻系数最小。表 1-1 列出了部分金属材料 and 石墨的电阻系数。

表 1-1 金属材料和石墨的电阻系数和温度系数

材 料	银	铜	铝	钨	铂	铁	锰 铜
20°C时的电阻系数 $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$	0.0165	0.0172	0.0283	0.0551	0.1	0.1	0.20~0.48
0~100°C的电阻温度 系数 α , 1/°C	0.0038	0.00426	0.00439	0.0045	0.0039	0.005	2.0×10^{-5}
材 料	康 铜	镍铬铁	铝铬铁	石 墨	碳石墨电刷	碳	
20°C时的电阻系数 $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$	0.4~0.51	1.0~1.2	1.3~1.4	8~13	40~60	35	
0~100°C的电阻温度 系数 α , 1/°C	4.5×10^{-5}	$\sim 15 \times 10^{-5}$	$\sim 5 \times 10^{-5}$	-0.0005		-0.0005	

例 1-1 求截面积为 1mm^2 长度为 100m 的铜线和铝线在 20°C 时的电阻 R_{Cu} 和 R_{Al} 。

解：从表 1-1 查出 20°C 时的电阻系数 ρ_{Cu} 和 ρ_{Al} ，使得：

$$R_{Cu} = \rho_{Cu} \frac{l}{S} = 0.0172 \times \frac{100}{1} = 1.72 \Omega,$$

$$R_{Al} = \rho_{Al} \frac{l}{S} = 0.0283 \times \frac{100}{1} = 2.83 \Omega.$$

电阻与温度的关系。对于同一材料而言,如导线的温度改变,其电阻值亦随之变化。实验证明,电阻随温度的变化关系可由下式决定:

$$R_T = R_0 [1 + \alpha(T - T_0)]. \quad (1-7)$$

式中 R_0 是温度为 T_0 时的电阻值, R_T 是温度变为 T 时的电阻值, α 为电阻的温度系数(见表 1-1)。绝大部分导体材料的电阻系数是正的,它们的阻值随温度的上升而增加。金属导线的电阻就是这样。也有一些材料的电阻系数是负的,当温度升高时它们的阻值反而减小,如石墨、碳和半导体材料就是这样。

例 1-2 求例 1-1 两种导线在温度为 60°C 时的电阻值。

解: 由表 1-1 查出温度系数 α_{Cu} 和 α_{Al} , 根据(1-6)式求得:

$$\begin{aligned} R_{TCu} &= R_{0Cu} [1 + \alpha_{Cu}(T - T_0)] \\ &= 1.72 [1 + 0.004(60 - 20)] = 1.995 \Omega, \\ R_{TAl} &= R_{0Al} [1 + \alpha_{Al}(T - T_0)] \\ &= 2.83 [1 + 0.004(60 - 20)] = 3.28 \Omega. \end{aligned}$$

§1-2 欧姆定律 电能和电功率

在物理学中我们已经学过欧姆定律,它是反映电阻中电压与电流关系的基本定律。欧姆定律常用如下两种形式表示。

(一) 一段电路的欧姆定律

图 1-6 是一段电路,用箭头标明了电压 U 和电流 I 的正方向。已知负载电阻 R , 则据实验,这三者的关系可用一段电路的欧姆定律表示如下:

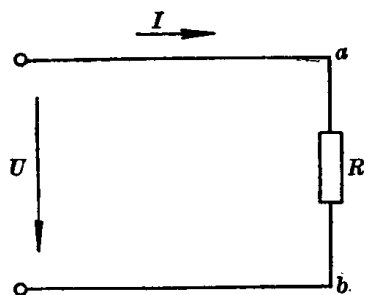


图 1-6 一段电路

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

式中电压的单位为伏,电阻的单位为欧,电流的单位为安。对(1-8)式可从三方面去理解:

第一,已知电压 U 和电阻 R ,则可求出电流 I 。电流与电压成正比,与电阻成反比。电流的实际方向是从 a 点经负载电阻流向 b 点。这时电流的实际方向与图中标明的正方向一致,故 U 、 I 均取正值。

第二,已知负载电阻两端的电压 U 和流过负载的电流 I ,则可求出负载的电阻, $R = \frac{U}{I}$ 。

第三,已知负载电阻 R 和流过负载的电流 I ,则可求出负载两端的电位差(即电压)为 $U_{ab} = \varphi_a - \varphi_b = IR$ 。这说明电流流过电阻 R ,要引起电位的变化,即电流流过电阻要引起电压降(实为电位降)。设已知 φ_a ,则 $\varphi_b = \varphi_a - IR$,反之 $\varphi_a = \varphi_b + IR$,即沿电流的实际方向电位降低,反之则升高。

例 1-3 设图 1-6 中已知 $I=0.91\text{A}$, $R=242\ \Omega$, $\varphi_b=0$ (即 b 点接地为参考点电位), 求 U_{ab} , φ_a 各为多少? 如改变参考点, 令 $\varphi_a=0$, 则 φ_b , U_{ab} 又各为多少?

解: (1) 设 $\varphi_b=0$, 据 (1-8) 式,

$$U_{ab}=IR=0.91\times 242=220\text{V},$$

$$\varphi_a=U_{ab}+\varphi_b=220+0=220\text{V}.$$

(2) 设 $\varphi_a=0$, 则据 (1-8) 式,

$$U_{ab}=IR=220\text{V},$$

$$\varphi_b=\varphi_a-IR=0-220=-220\text{V}.$$

可见电位随参考点选择不同而变, 电压的大小与参考点选择无关。

(二) 全电路欧姆定律

最简单的全电路如图 1-7 所示。如已知电源电动势 E , 电源内阻 R_0 和负载电阻 R , 则电流 I 可用全电路欧姆定律表示为

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

电流 I 的实际方向是从电源的正极经负载电阻 R 流向电源负极, 再由负极经电源内部流向正极, 形成闭合回路。

由于电动势 E 的精确测量较难, 一般用电压表测电源两端电压 U_{ab} 较方便, 故有必要找到电动势 E 和端电压 U_{ab} 的关系。

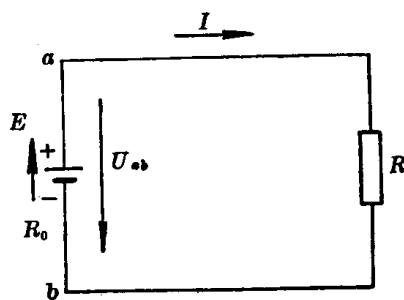


图 1-7 全电路

把 (1-8) 式代入 (1-9) 式, 经整理后得

$$U_{ab}=E-IR_0. \quad (1-10)$$

据 (1-10) 式, 作出电源的等效电路如图 1-8 所示。将内阻 R_0 人为地和电动势 E 分开, 这时电源从 ab 两端输出的电压 U_{ab} 正好满足 (1-10) 式, 与图 1-7 的端电压等效。

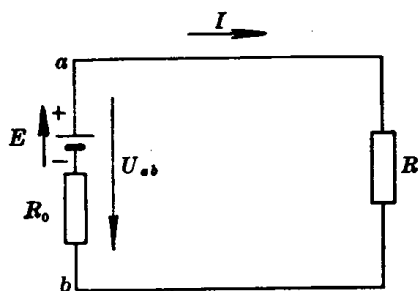


图 1-8 电源的等效电路

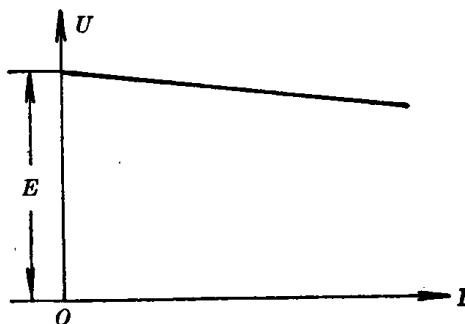


图 1-9 电源的外特性

由 (1-10) 式可知, 电源的端电压 U_{ab} 随电流增大逐渐下降, 如图 1-9 所示, 称它为电源的外特性。可见内阻越小时, 外特性越硬 (即随电流增大电源端电压下降得小), 反之越软。如果电源内阻 R_0 很小 (相对负载电阻 R 而言), 则可忽略其内阻压降而认为

$$U_{ab}=E-IR_0\approx E.$$

这种端电压几乎不随负载电流变化的电源称为恒压源。恒压源的符号如图 1-10(a) 所示。可见对恒压源来说, 沿电动势方向电位升高的数值等于电动势 E , 即 $\varphi_a=\varphi_b+E$, 或 $E=U_{ab}$ 。

反之,当电源内阻 R_0 很大,这时回路电流为

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

这种输出电流几乎不随负载电阻变化的电源称为恒流源。恒流源的符号如图 1-10(b)。恒压源和恒流源又称为理想电源。

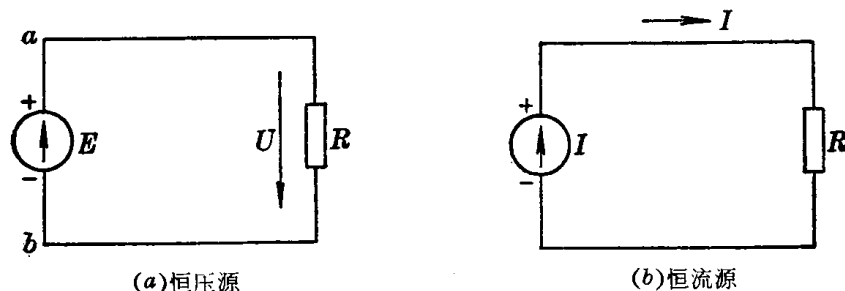


图 1-10 理想电源

(三) 电路中各点电位的确定

在分析电子线路时,经常需要确定电路中各点的电位。确定电路中各点的电位首先必须选定电位参考点。然后从电位参考点出发,沿着电路循行,并遵循以下三个原则,就可确定各点的电位:

1. 沿着连接导线电位不变(不考虑导线电阻)。
2. 经过电阻 R 时,顺着电流实际方向电位下降 IR 值,因此要在已有的电位上减掉 IR ; 逆着电流方向电位升高 IR 值,因此要在已有电位上加上 IR 。
3. 经过电源时,顺着电动势 E 的实际方向电位升高 E 值,因此要在已有的电位上加上 E ; 逆着电动势 E 的实际方向电位下降 E 值,因此要在已有的电位上减掉 E 。

例如,在图 1-11 的电路中欲确定 a 、 b 、 c 三点的电位,若选 b 为电位参考点,则 $\varphi_b = 0$ 。 a 点的电位可以选经电阻 R_1 路线计算,也可选经电阻 R_2 及电源 E 的路线计算。若选前者,则

a 点的电位为

$$\varphi_a = \varphi_b + IR_1 = IR_1.$$

若选经 R_2 及 E 的路线计算,则有

$$\begin{aligned} \varphi_a &= \varphi_b - IR_2 + E \\ &= -\frac{E}{R_1 + R_2} R_2 + E \\ &= \frac{-ER_2 + ER_1 + ER_2}{R_1 + R_2} = \frac{E}{R_1 + R_2} \cdot R_1 \\ &= IR_1, \end{aligned}$$

与上述结果相同。同理 c 点的电位为

$$\varphi_c = \varphi_b - IR_2 = -IR_2.$$

如以 a 点为电位参考点,则

$$\begin{aligned} \varphi_a &= 0, \\ \varphi_b &= \varphi_a - IR_1 = -IR_1, \\ \varphi_c &= \varphi_a - E = -E, \end{aligned}$$

或

$$\varphi_c = \varphi_a - IR_1 - IR_2 = -I(R_1 + R_2) = -E.$$

由此可知,从参考点出发,定其它各点电位时,可通过不同的路径,其结果是相同的。所以路径可视方便选择。

例 1-4 图 1-12 是电子开关电路的一个等效电路。已知 $E_1 = 6V$, $E_2 = 12V$, $R_1 = 30k$, $R_2 = 2.4k$, $R_3 = 15k$, 求开关 K 断开和接通两种情况下 b 点的电位。这里,电源 E_1 与 E_2 的内阻很小,略去不计。

解: 图中接地点是零电位点,它们实际上是连接在一起的。当开关 K 断开和接通时,它们的等效电路分别如图 1-13(a) 和 (b) 所示。

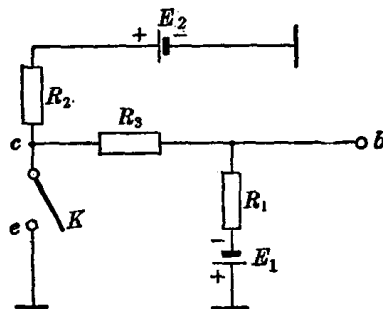


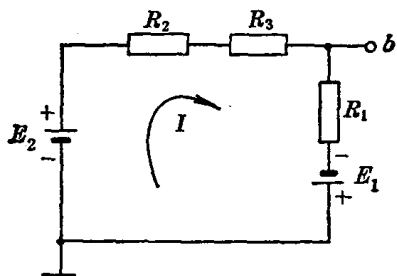
图 1-12

(1) 按图 1-13(a), 求 K 断开时 b 点的电位。

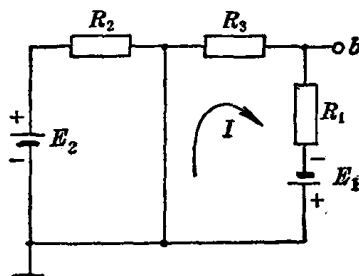
因为

$$I = \frac{E_1 + E_2}{R_1 + R_2 + R_3} = \frac{6 + 12}{2.4 + 15 + 30} = 0.38 \text{ mA},$$

$$\varphi_b = -E_1 + IR_1 = -6 + 0.38 \times 30 = 5.4 \text{ V}.$$



(a) 开关断开时的等效电路



(b) 开关接通时的等效电路

图 1-13

(2) 按图 1-13(b), 求 K 接通时 b 点的电位。由于电路的左右两个回路是独立的, 故可按图 1-13(b) 右边回路计算。

$$I = \frac{E_1}{R_1 + R_3} = \frac{6}{30 + 15} = 0.133 \text{ mA},$$

$$\varphi_b = -IR_3 = -0.133 \times 15 = -2 \text{ V}.$$

从计算结果可以看出,当 K 断开时, φ_b 为正值,当 K 闭合时, φ_b 为负值。

(四) 电能和电功率

1. 电能 根据电源力移动电荷做功的概念及电动势的定义,可知电源供给的电能为

$$A_d = Eq = EIt. \quad (1-11 \text{ a})$$

根据电场力做功的概念,可知外电路吸收的电能为

$$A_{tx} = Uq = UIt. \quad (1-11 \text{ b})$$

在实用单位制中,电能的单位为焦耳。由 (1-11) 式可知

$$\text{焦耳} = \text{伏} \times \text{库}.$$

2. 电功率 电源在单位时间内供给的电能称为电源的电功率。因此,电源的电功率为

$$P_d = \frac{A_d}{t} = EI. \quad (1-12 \text{ a})$$

相应地负载吸收的电功率为

$$P_{tz} = \frac{A_{tz}}{t} = UI. \quad (1-12b)$$

在实用单位制中, 功率的单位为焦耳/秒 = 瓦(W). 如负载是电阻性的(如电阻炉和电灯等), 则负载功率可表示为

$$\begin{aligned} P_{tz} &= (IR)I = I^2R \\ &= U\left(\frac{U}{R}\right) = U^2/R. \end{aligned} \quad (1-12c)$$

在工程上还使用另外一种单位来计算电能, 这种单位是千瓦小时(kW-hr), 又称一度电。

$$1 \text{ 度电} = 1 \text{ 千瓦} \times \text{小时}.$$

工程上和日常生活中用的电度表, 就是采用这种单位。

例 1-5 一盏 100 瓦的电灯, 每天平均照明四小时, 问 30 天内耗电多少?

解: $100W = 0.1 \text{ kW}$

$$A_{tz} = P_{tz}t = 0.1 \times 4 \times 30 = 12 \text{ 度电}.$$

3. 电流热效应 电流通过电阻时会产生热量, 这种现象称为电流的热效应。电流热效应在工业上得到广泛的应用, 例如, 电阻炉就是典型的把电能转化为热能的热电设备。但这一热效应有时也有害。如电流通过连接导线时, 导线电阻也会将电能转化为热能, 一部分失散在周围空间, 一部分使导线温度升高。这部分热量希尽量减小。当采用国际单位制时, 热量的单位就是能量的单位焦耳。但过去有些书籍采用卡作为热量的单位, 这时, 电阻在时间 t 内把电能转化为热能的数量可用下式表示:

$$Q = 0.24I^2Rt. \quad (1-13)$$

式中 I 的单位为安, R 的单位为欧, t 的单位为秒(sec), Q 用卡(cal)表示。0.24 为热功当量, 即一焦耳的功相当于 0.24 卡(cal)的热量。

例 1-6 有一功率为 1 kW 的电阻炉, 问在半小时内产生的热量是多少?

$$\begin{aligned} \text{解: } Q &= 0.24I^2Rt = 0.24Pt = 0.24 \times 1000 \times 30 \times 60 \\ &= 432000 \text{ cal} \\ &= 432 \text{ 千卡(kcal)}. \end{aligned}$$

§1-3 电路的运行状态和电气设备的额定值

电路在运行过程中, 通常有额定、开路和短路三种状态。

(一) 电气设备的额定值和额定工作状态

电气设备的电压、电流和功率都有一个额定值。电气设备的额定值是制造厂根据其使用的经济性、可靠性及其寿命等因素(特别是保证设备工作在容许的温度范围内)而规定的。电气设备工作时其电压、电流和功率等都为额定值, 是指该设备在正常工作状态下长期通电使用时, 不产生过热或绝缘击穿现象, 这便叫做该设备处在额定工作状态。处于额定工作状态的电气设备使工作安全可靠, 经济合理, 能保证一定的使用寿命。否则, 若电气设备所通过的电流超过额定值过多, 则由于发热过甚, 致使绝缘材料损坏; 若所加电压超过额定值过多, 则绝缘材

料可能被击穿。反之,如果电压、电流远低于额定值,则电气设备得不到充分的利用,效率降低。电气设备的额定电压、额定电流和额定功率用 U_e 、 I_e 和 P_e 表示。从(1-8)、(1-12)式可知,这三个量之间有一定的关系。一般电气设备的工作电压的变化不允许超过 $\pm 10\% U_e$ 。

例 1-7 一台额定电压为 220V、功率为 3kW 的电阻炉,如所加电压误差为 $\pm 40\text{V}$,问电炉的输入功率改变多少?

解: 由(1-12)式算出炉子的电阻为

$$R = \frac{U_e^2}{P_e} = \frac{220^2}{3000} = 16.1\Omega.$$

当电压超过额定电压 40V 时,炉子的功率为

$$P = U^2/R = (220 + 40)^2/16.1 = 4200\text{W} = 4.2\text{kW}.$$

当电压降低 40V 时,炉子的功率为

$$P = U^2/R = (220 - 40)^2/16.1 = 2010\text{W} = 2.01\text{kW}.$$

前一种情况,功率超过额定值

$$\frac{4.2 - 3}{3} \times 100\% = 40\%.$$

这使炉子过热,设备很快损坏。后一种情况功率低于额定值

$$\frac{3 - 2.01}{3} \times 100\% = 33\%.$$

这时功率过小,达不到应有的炉温。

(二) 开路 短路及其保护

1. 开路状态

设备不使用时,拉开开关,负载与电源断开,电路中没有电流,是正常现象。有时合上开关,电路中仍然没有电流,这是故障性断路,就需查出故障,予以排除。

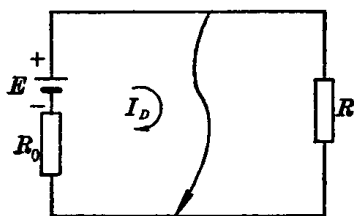


图 1-14 短路状态

2. 短路及其保护

电路中电位相差较大的两点被导体直接相连,称为短路。例如正电源线与负电源线直接相连叫电源短路。发生电源短路的原因主要是绝缘损坏或接线错误。此时短路电流为

$$I_D = \frac{E}{R_0 + R_l}.$$

式中 R_l 是线路电阻。因内阻 R_0 和线路电阻 R_l 很小,因此 I_D 很大,如无保护措施,必然导致供电线路和电源设备的损坏。为保护电源设备和线路的安全,通常在电源输出端和用电设备的输入端加接熔断器(通常叫保险丝),如图 1-15 所示。熔断器的熔丝是易熔合金(如铅锡合金)作成。短路时,熔丝立刻熔断,达到保护线路和电源的目的。熔断器的规格和选择方法在第七章介绍。

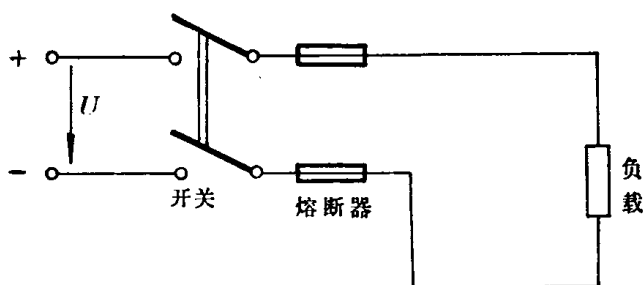


图 1-15 负载端所接熔断器

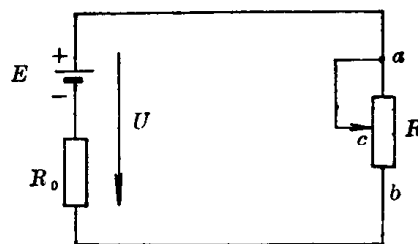


图 1-16

短路也可能发生在负载的局部,如图 1-16 所示。这时负载电阻的 ac 段短路,但还保留了 cb 段,所以这不是电源短路。负载的局部短路有时算故障(如不该短接时),有时是正常现象,例如为了使电路中的电流在预定范围内调节,常使用这种方法。

(三) 导线的选择

电流经过导线电阻使导线温度上升,经过一段时间(室内布线为 10 分钟,电机为 1~2 小时),当导线吸收和散发的热量相等时,达到稳定的温升。导线的电流越大,所达到的温升越高。导线温度超过绝缘材料允许的温度时,绝缘材料的寿命缩短,甚至立即烧坏。因此,室内布线和其它电气设备一样,都要有规定的连续允许电流,即额定电流,在这个限度内,导线的发热不会超过允许值。此种额定电流见表 1-2。表中额定电流是按周围温度为 25°C 定出来的。当周围温度超过 25°C 时,实际电流应当减小些,即允许的损耗和发热量应当小些。反之,当周围温度低于 25°C 时,实际的电流可相应加大一些。

表 1-2 室内布设用绝缘导线允许连续负载电流(安)

线芯截面 (毫米 ²)	铜芯塑料绝缘电线			铝芯塑料绝缘电线		
	明线布设	两线布设在 一支线管内	三线布设在 一支线管内	明线布设	两线布设在 一支线管内	三线布设在 一支线管内
0.5	8					
1.0	15	14	13			
1.5	20	17	15	17	13	12
2.0	23	20	18	20	15	13
2.5	27	24	22	21	18	17
4.0	36	34	31	28	25	25
6.0	46	41	37	35	32	28
10.0	70	60	55	50	45	42
16.0	90	75	70	70	55	55
25.0	125	100	90	95	75	70
35.0	150	120	110	115	99	85
50.0	190	165	150	145	125	115
70.0	240	200	185	185	155	145
95.0	290	245	225	225	190	175