

电 工 基 础

上 册

哈尔滨船舶工程学院电工教研室 编

国防工业出版社

73.1
456.1
121

电 工 基 础

(上 册)

哈尔滨船舶工程学院电工教研室 编

24.126



内 容 简 介

本书分上下两册。上册内容有直流电路、交流电路、互感、三相及周期性非正弦电路。下册内容有电路过渡过程、非线性直流电路、磁路、铁心线圈及变压器、网络拓扑、双口网络及状态变量方程。

书中较详尽地阐述了电路的基本概念及基本分析方法。叙述深入浅出，通俗易懂。例题及习题也较完整，且于书后附有习题答案。这是一本较便于自学的书籍。

本书可作为工科院校及七·二一工人大学电类专业的教学参考书，也可供工程技术人员自学之用。

电 工 基 础

(上册)

哈尔滨船舶工程学院电工教研室 编

国防工业出版社 出版

北京市书刊出版业营业许可配出字第 074 号

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

850×1168¹/₃₂ 印张 12³/₈ 317千字

1979年5月第一版 1979年5月第一次印刷 印数：000,001-340,000册

统一书号：15034·1786 定价：1.55元

前 言

为了适应当前我院教学工作和部属厂办工人大学发展的需要,我们在总结历年教学实践的基础上,参考了一些院校的电工教材,编成这本《电工基础》。全书分两册。上册包括直流电路、交流电路及互感、三相、周期性非正弦电路等九章;下册包括线性电路过渡过程、非线性直流电路、磁路、铁心线圈及变压器、网路拓扑、双口网路及状态变量方程等八章。

本书删去了一些较陈旧的内容,增加了电路理论方面的新内容。编写时注意到理论与实际的联系,在数学推导的同时,加深了物理概念的阐述。为了切实加强基本理论的学习,提高分析问题解决问题的能力,本书注意到习题及例题的选配。按照教材要便于自学的要求,叙述力求详尽,深入浅出,通俗易懂;并在书末附以习题答案,便于自学时查阅。

编写过程中,第六机械工业部教育局组织了编写大纲的讨论及初稿的审查。参加讨论的单位有:上海交通大学、大连工学院、华中工学院、华南工学院、西北工业大学三系、镇江船舶工业学校及江南造船厂、沪东造船厂、红旗造船厂、汾西机械厂、九江仪表厂等厂办工人大学。讨论中各单位代表提出了大量宝贵意见。在此一并致以深切的谢意。

由于我们业务知识有限,加上时间仓促,书中错误在所难免,恳切希望广大读者批评指正。

哈尔滨船舶工程学院电工教研室

34636

目 录

第一章 直流电路的基本定律	1
§ 1-1 电路、电路图	1
§ 1-2 电路的基本物理量	5
§ 1-3 欧姆定律	12
§ 1-4 基尔霍夫电流定律 (KCL)	15
§ 1-5 基尔霍夫电压定律 (KVL)	20
§ 1-6 功率、焦耳-楞次定律	25
§ 1-7 恒压源、恒流源、实际电源的外特性	29
本章小结	33
习题	33
第二章 直流电路的分析与计算(一)	
——电路图的等效化简	41
§ 2-1 电阻的串联	41
§ 2-2 电阻的并联	44
§ 2-3 混联电路的计算	50
§ 2-4 MF108-1 型万用表线路分析	56
§ 2-5 电阻的三角形与星形联接的等效变换	80
§ 2-6 桥形电路的分析	84
§ 2-7 有源网络的等效化简	90
本章小结	93
习题	94
第三章 直流电路的分析与计算(二)——网络分析	101
§ 3-1 支路电流法	101
§ 3-2 网孔电流法	106
§ 3-3 节点电位法	110
§ 3-4 迭加原理	116
§ 3-5 戴维南定理	120

本章小结	126
习题	127
第四章 正弦电流的基本概念	133
§ 4-1 波形图	134
§ 4-2 正弦量的最大值、频率及相位	138
§ 4-3 正弦量的有效值与平均值	143
§ 4-4 用矢量表示正弦量、矢量图	146
本章小结	151
习题	152
第五章 简单交流电路	155
§ 5-1 电阻元件在正弦电路中的作用	156
§ 5-2 线圈的自感系数与自感电动势	159
§ 5-3 电感元件在正弦电路中的作用	164
§ 5-4 电容器及其充放电过程	167
§ 5-5 电容元件在正弦电路中的作用	171
§ 5-6 电阻电感串联电路	174
§ 5-7 电阻电容串联电路	180
§ 5-8 电阻电容并联电路	184
§ 5-9 导线的分布参数及等效电路	186
§ 5-10 实际元件的等效电路	188
§ 5-11 集肤效应	191
本章小结	192
习题	195
第六章 复杂交流电路	201
§ 6-1 复数的基本知识	201
§ 6-2 正弦量的复数表示法	206
§ 6-3 电阻、电感、电容元件复电压与复电流的关系	208
§ 6-4 基尔霍夫定律的复数形式	212
§ 6-5 欧姆定律的复数形式、复数阻抗	213
§ 6-6 复数导纳及其与复数阻抗的等效变换	216
§ 6-7 串并联交流电路的计算	220
§ 6-8 复杂交流电路的计算	230
§ 6-9 电路中的谐振	236
§ 6-10 交流电路的功率	247

本章小结	254
习题	255
第七章 互感电路	267
§ 7-1 互感系数、互感电动势	267
§ 7-2 互感线圈的同名端	270
§ 7-3 具有互感的正弦电路	273
§ 7-4 互感线圈的联接	274
§ 7-5 互感电路举例	277
§ 7-6 空心变压器	280
本章小结	285
习题	285
第八章 三相电路	290
§ 8-1 三相电动势	290
§ 8-2 三相电路的联接	293
§ 8-3 对称三相电路的计算	301
§ 8-4 不对称三相电路的计算	309
§ 8-5 三相电路的功率	322
§ 8-6 三相功率的测量	326
本章小结	330
习题	332
第九章 非正弦交流电路	337
§ 9-1 周期函数分解为付里叶级数	338
§ 9-2 谐波的近似计算法	346
§ 9-3 周期性非正弦量的有效值和平均值	349
§ 9-4 非正弦交流电路的计算	352
§ 9-5 非正弦交流电路的功率	355
§ 9-6 滤波器的概念	358
§ 9-7 对称三相电路中的高次谐波	360
本章小结	364
习题	366
附录 I 电工系统图常用图形符号(摘自 GB312—64)	370
附录 II 用算尺进行复数运算	372
附录 III 周期函数的付里叶级数	378
习题答案	380

第一章 直流电路的基本定律

电压、电流不随时间变化的电路，叫做恒定电流电路或直流电路。这种电路中的物理现象较为简单，因为与电路联系着的电场、磁场都不随时间而变化，不必考虑电磁感应现象及与变化的电场有关的物理现象，它是电路的一种特殊情况。但是，普遍性即存在于特殊性之中。直流电路包含着电路共有的普遍规律。直流电路中所介绍的基本概念、基本定律及分析方法，原则上也适用于其它电路。所以说，学好直流电路是学习其它电路的基础。

§ 1-1 电路、电路图

什么叫电路？简单地说，就是电流流过的全部通路。图 1-1 是一个很简单的电路。用两条导线把灯泡和干电池联接起来，形成一个闭合通路，便有电流在其中流过，于是灯泡发亮，可用来照明。利用这个简单电路，可以说明一些带有普遍意义的电路概念。

关于电路的作用。上述电路可用于照明，或者说，利用这装置可以获得光能。实际上是把干电池中的电能通过电流的形式转换为灯泡的光能（还有热能）。其它形式的电路可能是把电能转换成热能（如电炉）、机械能（如电动机）或声能（如扬声器）。

所以，一般地说，电路是用来产生电流，使电能和其它形式的能量相互转换的设备的总称。

由上述电路也可看出，组成电路的主要部分是干电池、导线

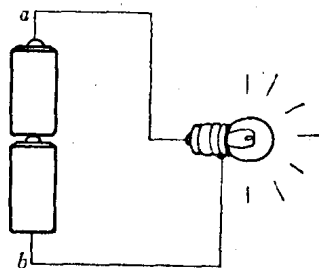


图 1-1

及灯泡。灯泡是将电能转换为光能的元件，是消耗电能的。在其它情况下，这个元件则可能是电炉、电动机等等设备，统称为负载。也有叫做用电器或换能器的。直流电路中的负载，通常用它的电阻值的大小表示（若负载是电动机则还有反电势）。干电池、蓄电池、发电机等设备，是供给电能的源，通称电源。电源在电路中的作用，用电动势和内阻表示。电动势是表示推动电荷能力的物理量，是由电源内部的非静电力的作用（在电池中是化学作用，在发电机中则是电磁感应作用）引起的。内阻是表示电源内部也有电能的消耗。导线是引导电流所必需的，在电路中呈现一定的阻力，故分析电路时应计及导线的阻值。总之，一般说，电路主要是由电源、负载及导线三部分组成的。实际电路为安全及使用方便起见，尚需有各种控制设备，最常见的是开关。

图 1-1 是依照各元件的实物图形画出来的，比较麻烦，所以国家统一规定各种元件的图形符号，文件编号是 GB312—64，参阅附录 I。用这些符号画出的图叫电路图。电路图应能正确反映实际电路中各元件的联接关系，但其具体位置并不一定与实际电路中各元件的安装位置相同。图 1-2(a) 就是图 1-1 实际电路的

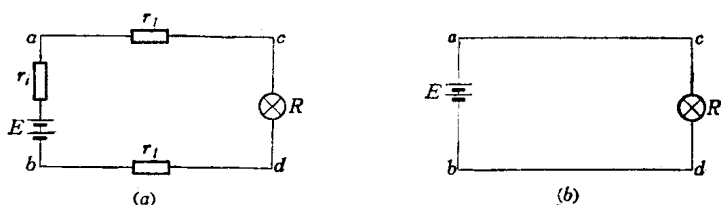


图 1-2

电路图。其中 E 、 r_i 表示干电池组， E 是电动势， r_i 是内阻。 r_l 表示导线的电阻，灯泡的电阻用 R 表示。在正常情况下，电源内阻较小（干电池约为 $0.6 \sim 0.8 \Omega$ ，蓄电池内阻更小），可以忽略不计。此外若导线不是很长或截面不是很小的，其电阻也往往可以略去不计，其电路图可简化成图 1-2(b) 的形式，图中 ac 及 bd

表示两条没有电阻的导线。

应该指出，由其他设备如蓄电池与灯泡或发电机与电炉组成的电路，它们的电路图也与图 1-2 相似。所以，当我们着重于研究电路的共同性的理论时，可以只考虑各元件在电路中的作用而不计及具体是什么设备。例如用图 1-3(a) 中圆内加一箭头的图形表示没有内阻的电源，它可能是干电池，也可能是蓄电池或发电机；用图 1-3(a) 中长方形的图形表示电阻元件，它可能是灯泡或电炉。图 1-3 就是按这个原则画出来的电路图，这是比图 1-2(b) 更抽象些的图形。如果我们对图 1-3(a) 电路的物理实质及数量关系研究清楚而且得出结论以后，这些结论当然也适用

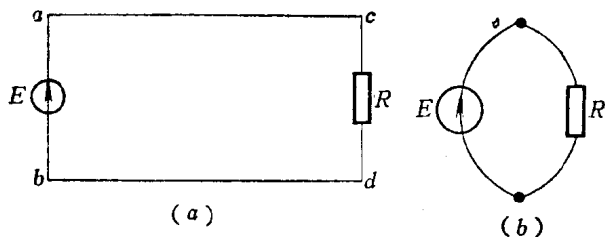


图 1-3

于由于电池与灯泡、蓄电池与灯泡或发电机与电炉等类型的电路。在今后的讨论中，经常碰到的是图 1-3(a) 这种形式的电路图。工作中，当我们着手分析实际电路时，往往要先根据各部分的作用，画出符合情况的电路图，然后运用电路的基本定律进行分析。

上面已说过，图 1-2(b) 或图 1-3(a) 中， ac 及 bd 是没有电阻的线段，可以任意伸缩而不影响电路中的物理现象。就是说可以画成图 1-3(b) 的形式，在电的作用方面，图 1-3(a) 与图 1-3(b) 是没有差别的。在比较复杂的电路图中，将这类线段伸缩以改变电路图的外形，就能更清楚地说明各部分的联接关系，如图 1-3(b) 很明显表示电阻元件两端点与电源的两个端点是一一对

应联接在一起的。为整齐起见，一般还是画成图 1-3(a) 的形式。

图 1-4(a) 是一个结构比较复杂的电路图。复杂电路的外形好象一张网，所以也叫做网络。为便于今后讨论起见，现以此网

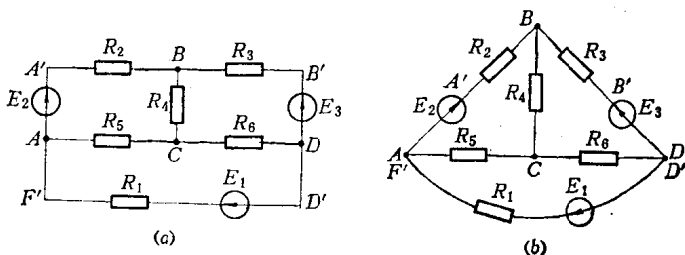


图 1-4

络为例介绍一些名称。

网络中没有分支的一段电路叫做支路。例如 R_4 是其中的一个支路， E_1 、 R_1 也组成一个支路。这个网络共有六个支路。直流电路中最简单的支路只包含一个电阻元件，没有电源，叫做无源支路。如分别由 R_4 、 R_5 、 R_6 组成的三个支路。包含有电阻元件及电源的支路则叫做有源支路。如由 E_1 与 R_1 、 E_2 与 R_2 及 E_3 与 R_3 组成的支路。三个或三个以上的支路联接在一起的点叫做节点。这个网络有 A 、 B 、 C 、 D 四个节点。而 A' 、 B' 、 D' 及 F' 则不算成节点，因为只要按上面说过的方法将有些线段伸缩可整理成图 (b) 形式，就很容易判别了。由几个支路组成的一部分闭合电路叫回路。这个网络共有下列七个回路： $AA'BCA$ 、 $BB'DCB$ 、 $ACDD'F'A$ 、 $AA'BB'DD'F'A$ 、 $AA'BB'DCA$ 、 $AA'BCDD'F'A$ 、 $ACBB'DD'F'A$ 。没有被支路穿过的回路，叫做网孔。它好象一张网的网眼。显然，网孔是回路的一种特例，上述七个回路中只有前面三个才能算作网孔，即这个网络只有三个网孔。

现在仍用图 1-4(a) 的网络来阐明网络分析的含意。所谓网

络分析，简单地说，是指在已知网络结构（即给定电路图）及元件参数——电阻元件的阻值，如 R_1 、 R_2 ... R_n 均已知，电源则知其电动势、内阻数值及极性的条件下，要求确定各支路电流（大小及流向）或各节点电位。对此网络而言，即要确定六个支路电流或四个节点电位。这是一个比较典型的例子，有的则是已知部分元件的参数及支路电流，求其余部分元件的参数及支路电流。不过从分析方法的原则上看，其实质是一致的。就是说如已掌握分析前一问题的方法，其所需的基本概念及基本定律，也足以用来解决后一类型的问题。顺便指出，网络分析的反面问题，即确定电路结构及其参数使满足预定要求，叫做网络综合。本书将只介绍有关网络分析的基本理论。

本章在简要地复习电流、电位等物理量的意义以后，着重讨论电路的基本定律，即电流电压及功率所应服从的自然规律及它们之间的联系。网络分析是建立在这些定律的基础之上的，所以务求正确理解，熟练运用这些基本定律。

§ 1-2 电路的基本物理量

用来描述（或反映）电路状态的物理量主要有电流强度及电位或电位差。

（一）电流强度

电荷的有规则的运动，叫做电流。导体内的电流是由于金属内部自由电子在电场力作用下运动而形成的；而在电解液或被电离后的气体的导电过程中，电流是由正、负离子在电场力作用下沿着相反方向运动而形成的。负电荷的运动其效果与等量正电荷作反方向运动相同。上述导体、液体或气体中的电流都叫做传导电流。电路中一般只涉及到导体的传导电流。

图 1-5 是导体中电流的示意图。自由电子在电场力作用下自 B 向 A 运动，其效果是与等量正电荷自 A 向 B 流动一样的，由于习惯上人们都把正电荷流动的方向作为电流的方向，所以电流 i ；

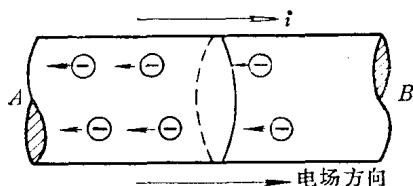


图 1-5

的方向应是从 A 至 B 。电路图上规定用空心箭头表示电流的方向，也可用 i_{AB} 表示电流从 A 点流向 B 点。

电流的大小取决于一定时间内通过导体截面 S 的电荷量的多少。设 dt 时间内通过 S 的电量为 dq ，则

$$i = \frac{dq}{dt} \quad (1.1)$$

叫做电流强度，简称电流。所以，电流一词不仅表示一种物理现象，而且也代表一个物理量。不随时间变化的电流叫做恒定电流或直流电流，规定用大写字母 I 表示，小写字母 i 则表示随时间变化的交变电流。直流电流 I 与电量 q 的关系可简化为

$$I = \frac{q}{t} \quad (1.2)$$

电流强度的单位是安培，简写作安(A)。对于较小的电流，则用毫安(mA)或微安(μA)做单位，它们的关系是

$$1(A) = 10^3(mA) = 10^6(\mu A)$$

或
$$1(\mu A) = 10^{-3}(mA) = 10^{-6}(A)$$

电路中，不仅电流的大小而且其方向都对电路的工作状态有很大影响，所以在测定或计算电路的电流时，应包括电流大小及方向。

现在介绍电流方向的标记方法。图 1-6 表示某网络中的一个支路，设这支路电流数值等于 $2(A)$ ，从节点 A 流向节点 B 。为了用数学方式表达这一客观事实，用文字 I_1 表示这一支路电流，用空心箭头表示电流方向，显然应有 $I_1 = 2(A)$ 。但是，如果电

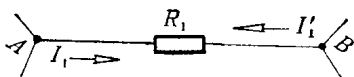


图 1-6

流用 I_1' 表示且箭头方向反过来, 如图所示, 那么, 为了反映同一客观事实, 此时其数学表达式应为 $I_1' = -2(\text{A})$ 。数值前的负号表示电流的实际方向与电路图中标记的方向相反。由此可见, 电路图中标记的电流方向, 并不需要一定与实际方向一致, 所以为了便于区分, 把图上用空心箭头标记的方向, 叫做电流的参考方向。在选取一定的参考方向的前提下, 电流是个代数量。电流的实际方向由参考方向及数值的正负来决定, 不能只看一方面。当数值为正时, 实际方向便与参考方向一致; 反之, 若数值为负, 则实际方向与参考方向是相反的。对于电流方向的这种标记方法(电压也有同样问题), 在分析简单电路, 即电流实际方向容易直观确定的情况下; 似无必要。但当我们分析复杂电路时, 不采用这种方法就难以着手讨论。为了逐步熟悉这种标记方法, 在分析简单电路时就开始使用。

(二) 电压、电位

上面说过, 电荷在电场力作用下运动形成电流。这过程中电场力推动电荷移动而做功, 电场力做功的本领用电压表示。在图 1-7 的一段电路中, 设正电荷 dq 从 A 至 B 时电场力做功为 dA , 则 A 、 B 间电压为

$$u_{AB} = \frac{dA}{dq} \quad (1.3)$$

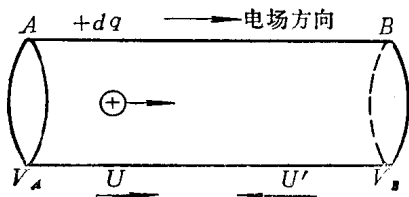


图 1-7

从数值上看, 电压也就是电场力把单位正电荷从 A 移至 B 时所做的功。如功的单位为焦耳, 电量单位为库仑, 则电压单位为伏特, 简写为伏(V), 也可用千伏(kV)或毫伏(mV), 及微伏(μ V)做单位。其关系为

$$1(\text{kV}) = 10^3(\text{V}) \quad 1(\text{mV}) = 10^{-3}(\text{V})$$

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

不随时间变化的电压即为直流电压, 用大写字母 U 表示, u 则表示交变电压。直流电压 U_{AB} 与电流 A 、电量 q 的关系可简化为

$$U_{AB} = -\frac{A}{q} \quad (1.4)$$

电压也是一个代数量, 可以用双下标或在电路图中标记参考方向(用实心箭头)的方法表示。图 1-7 中, 若选定参考方向为 U , 则应有 $U_{AB} = U$; 而当选定 U' 为参考方向时, 则 $U_{AB} = -U'$ 。与确定电流方向的方法相似, 电压的实际方向也是由参考方向及数值的正负两方面确定的。测定或计算电路中某两点的电压时, 数值与方向都是重要的, 因为有些元件(如晶体二极管)对于不同方向的电压会表现出显然不同的作用。

由电压定义可知, 图 1-7 中, 若 $U_{AB} > 0$, 则表示正电荷从 A 至 B 通过这段电路时电场力是作功的, 即这段电路是吸收电能的。换句话说, 正电荷在 A 点时具有的能量较之移至 B 点时为大, 其差额即等于这段电路吸收的能量。与在静电场中相似, 我们把正电荷在电路中某点所具有的能量叫做正电荷在该点的电位能。电位能与电量的比值叫电位●, 用 V 表示。如 V_A 、 V_B 分别表示 A 点及 B 点的电位。电位的单位也是伏特。按照上面的论述, 可知电路中两点之间的电压应等于两点电位之差, 即

$$U_{AB} = V_A - V_B \quad (1.5)$$

● 直流电路中, 在电源外部, 导体内的电场是稳恒电场, 它与静电场相似, 其电场强度向量的闭合线积分恒为零, 故可引用电位概念。而且据此特性可导出电位单位性及电位差与路径无关等结论。

故电压也可以叫做电位差。由图 1-7 可见, 当选定 U 为电压参考方向, 则所谓电压的方向是指电位降落的方向 (正电荷电位能减少的方向)。如果选定参考方向为 U' , 则应指 B 点至 A 点的电位差, 即 $U' = U_B - U_A$, 所以有 $U' = -U$ 。这与上段的结论是一致的。

在物理中曾指出, 无限远处或大地的电位为零, 故若所研究的电路有接地点, 则认为该点电位为零。电位比此点高者为正, 低者为负。如电路没有接地点, 则为了说明各点电位的高低, 可以指定电路中任一点 (只能指定一点) 的电位为零, 叫做参考点。一般的仪器设备都有一个公共端联至机壳, 这端点习惯上就叫做“地”。通常就选这一点为电位参考点。

参考点选定以后, 电路中各点的电位便都有一定的数值。在图 1-8 所示电路中, 已知 (或已计算出) $U_1 = 3(\text{V})$, $U_2 = 2(\text{V})$, 电路中 a 、 b 、 c 点电位分别用 V_a 、 V_b 、 V_c 表示, 则

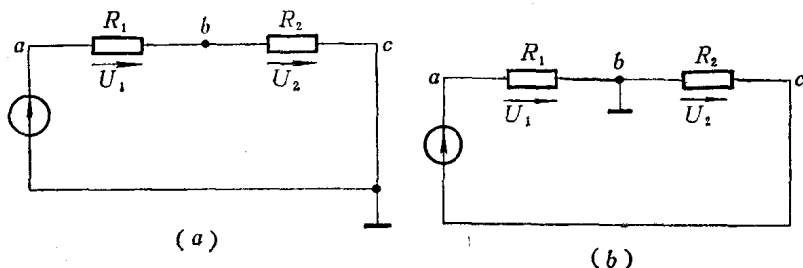


图 1-8

$$U_1 = V_a - V_b$$

$$U_2 = V_b - V_c$$

如选 c 点为参考点, 即 $V_c = 0$, 如图 (a), 则由上面关系式及已知条件, 可得 $V_b = U_2 + V_c = U_2 = 2(\text{V})$, 而 $V_a = U_1 + V_b = 5(\text{V})$ 。各点电位都有唯一的数值, 这叫做电位的单值性。如把 b 点当作参考点, 即 $V_b = 0$, 如图 (b), 则可得 $V_a = 3(\text{V})$, $V_c = -2(\text{V})$ (负值表示电位比参考点低)。这时各点电位的数值

也是一定的，但与选 c 作参考点时不同。就是说电路各点电位的数值是单值的，而具体数值与参考点的选取有关。这好比测量一栋大楼各层地板的高度，如选取海平面作为高度参考点，可以测出一组数据，它自然与另一个高度作参考点（例如选二层楼地板为参考点）所得的数据是不同的。

经过上面讨论已不难看出，电压或电位差是与参考点的选取无关的，如图 1-8 中不论选 c 或 b 为参考点， a 、 b 之间电位差恒为 $3(V)$ ，而 b 、 c 间电位差恒为 $2(V)$ 。实质上所谓某点电位，应理解为该点与参考点之间的电位差。电位差或电压是更为基本的物理量。运用电位概念时，必须指明它的参考点。在生产实践中，如上面已指出的，通常把电路作为一个完整的系统时，它具有公共端，所以应用电位概念还是较为方便的。

电路的工作状态，可以通过电路各点的电位反映出来。分析电路时经常要用到电位的概念。

一台设备安装后要调试，出了故障要检查，其中一个主要方法就是测量各点电位值（对同一参考点），看其是否符合设计要求。由于用伏特表测量电压时不必切断电路，所以

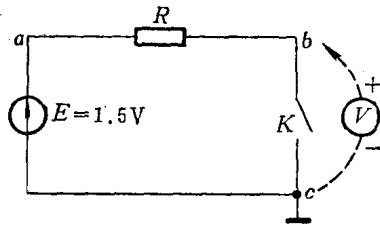


图 1-9

这种方法是比较便当的。例如图 1-9 中开关 K 的工作状态，就可以用电位表示。令图中 c 为参考点，即 $V_c = 0$ ，用伏特表测量 b 点电位，若读数为零，即 $V_b = 0$ ，便知开关是闭合的，因开关闭合后 b 、 c 是同一导体应该是等电位的。若伏特表读数为 $1.5(V)$ ，则可知开关是打开的，因 K 打开时电路不通，无电流， R 上无电压，故 $V_a = V_b = 1.5(V)$ 。

思 考 题

1. 晶体三极管可以作为开关来使用。管子截止时电路不通，好比一