

全国中等农业学校试用教材

电 工 学

全国中等农业机械化专业《电工学》编写组编

农 业 机 械 化 专 业 用

农 业 出 版 社

编写者	山西省农业机械化学校	戴宜灯
	陕西省农业机械化学校	官相印 张镇函
	广西壮族自治区农业机械化学校	李道绳
	山东省农业机械化学校	钱厚义
	四川省农业机械化学校	张德炳
审阅者	西北农学院	国培光

全国中等农业学校试用教材

电 工 学

全国中等农业机械化专业《电工学》编写组编

农业出版社出版 (北京朝内大街130号)

新华书店北京发行所发行 农业出版社印刷厂印刷

787×1092 毫米 16 开本 23.75 印张 527 千字

1980 年 3 月第 1 版 1980 年 3 月北京第 1 次印刷

印数 1—22,000 册

统一书号 15144·571 定价 2.20 元

前 言

本书是受农林部的委托，根据农林部有关编写中专教材的文件精神和一九七八年一月拟定的全国中等农业机械化专业《电工学》编写大纲（草案）编写的。

按照实现农业现代化的要求和本专业培养目标的需要，本书适当地加强了基础理论和晶体管电路基础部分的内容，反映了我国生产技术的新成就。并力求做到删繁就简，少而精，理论联系实际。在内容阐述方面，以物理概念为主，辅以必要的数学推导，力求通俗易懂，便于自学。

本书内容的深度和广度除了考虑农业机械化的需要外，还适当地兼顾了其他农业机械类各专业的需要。编写学时为160，讲授学时为140。书中排小五号字的章节内容，可根据专业的需要和教学实际情况予以取舍。

本书由山西省农业机械化学校（主编）、陕西省农业机械化学校（副主编）、广西壮族自治区农业机械化学校、山东省农业机械化学校、四川省农业机械化学校集体编写。初稿于一九七八年五月完成，并寄送各省、市、自治区的有关学校征求意见，于一九七八年八月审定。

在编写过程中，承山西、陕西、广西等省（自治区）农机局领导的关怀，广西、安徽农业机械化学校的有力支持。在审定会议期间承西安交通大学、西北农学院、西安公路学院及各省、市、自治区农业机械化学校提出了许多宝贵意见，我们对此表示衷心感谢。

由于我们的业务水平及时间所限，书中的缺点和错误在所难免，殷切希望使用本书的教师和学员给予批评指正。

编 者

1978年12月

符 号 说 明

符号	意义
A	功
a	直流电机电枢绕组支路对数
B	磁感应强度 (磁通密度)
C	电容
	直流电机的电动势常数
C_m	直流电机的转矩常数
D	电动机
	二极管
E	直流电源电动势
	交流电源电动势的有效值
e	交变电源电动势的瞬时值
e_L	自感电动势
F	磁动势
f	频率
$f(F)$	力
$G(g)$	电导
H	磁场强度
I	电流 (直流)
	交流电流的有效值
I_{X-X}	线电流 (三相电路)
I_X	相电流 (三相电路)
I_0	中线电流 (三相电路)
I_p	交流电流的平均值
i	交变电流的瞬时值
j	电流密度
K	开关
K_u	变压器的变压比
K_i	变压器的变流比
L	自感系数 (自感、电感)

符号	意义
l	长度
M	转矩
N	线圈匝数
P	功率
	交流电路中的有功（平均）功率
P	电机磁极对数
p	交流电路中的瞬时功率
$Q(q)$	电量（电荷量）
Q	交流电路中的无功功率
	热量
Q_L	电感性无功功率
Q_C	电容性无功功率
q	交流电机中每极每相槽数
$R(r)$	电阻
r_0	内阻
S	视在功率
	面积
T	周期
t	时间
	温度
U	直流电压
	交流电压的有效值
U_{x-x}	线电压（三相电路）
U_x	相电压（三相电路）
u	交变电压的瞬时值
W	电能、能量
X	电抗
X_L	电感电抗（感抗）
X_C	电容电抗（容抗）
Z	直流电机的电枢总槽数
	交流电机的定子总槽数
z	阻抗
α	电阻温度系数
Δ	变化量（增量）
δ	气隙宽度

符号	意义
γ	电导率
ϵ	电场强度
η	效率
λ	过载系数
μ	铁磁性材料的磁导率
μ_0	真空的磁导率 (非磁性材料的磁导率)
ρ	电阻率
τ	极距
Φ	磁通
ϕ	磁通的瞬时值
φ	电位
	初相位、相位差
$\cos\varphi$	功率因数
Ψ	磁链
ψ	磁链的瞬时值
ω	角频率、角速度
ω_0	谐振角频率
BG	晶体管
BU_{ceo}	集—射极击穿电压
E	直流电动势
e	发射极
b	基极
c	集电极
F	反馈系数
f_0	振荡回路固有频率、谐振频率
f_α	共基极截止频率
f_B	共发射极截止频率
I_{cbo}	集电极反向饱和电流
J_{ceo}	集—射极反向饱和电流 (穿透电流)
I_{CM}	最大集电极电流
I_F	可控硅额定正向平均电流
I_g	可控硅控制极电流
I_H	可控硅维持电流
I_p	单结晶体管峰值电流
I_V	单结晶体管谷点电流

符号	意义
U_p	单结晶体管峰值电压
U_v	单结晶体管谷点电压
T_K	脉冲宽度
t_K	开通时间
t_g	关闭时间
η	单结晶体管分压比
τ	时间常数
R_{s1}	放大器输入电阻
r_{so}	放大器输出电阻

符 号 下 标

符号	意义	举 例
DL	短路	I_{DL} 短路电流
dc	电磁	M_{dc} 电磁转矩
e	额定值	U_e 额定电压
f_z	负载	R_{fz} 负载电阻
L_j	临界状态	n_{Lj} 临界转速
L	励磁	I_L 励磁电流
l	漏	Φ_l 漏磁通
m	最大值	U_m 正弦交流电压的最大值
P	平均值	B_P 平均磁感应强度
q	起动	M_q 起动转矩
s	电枢	I_s 电枢电流
sc	输出	U_{sc} 输出电压
sr	输入	U_{sr} 输入电压
X	相	I_X 相电流
$X-X$	线	U_{X-X} 线电压
Y	星形接法	P_Y 星形连接时, 三相电路的有功功率
Δ	三角形接法	P_Δ 三角形连接时, 三相电路的有功功率
d	电	α_d 电角度
j	机械	α_j 机械角度
f	反抗	M_f 反抗转矩
T	调整	R_T 调整电阻
wg	无功	I_{wg} 无功电流
yg	有功	I_{yg} 有功电流
f	反馈	U_f 为反馈电压
max	最大	$I_{W\max}$ 稳压管最大允许电流
min	最小	$I_{W\min}$ 稳压管最小工作电流

目 录

第一章 直流电路.....	1
第一节 电路和电流	1
第二节 电压和电位	3
第三节 电源的电动势	6
第四节 电阻	8
第五节 欧姆定律	11
第六节 电功、电功率和电流的热效应	13
第七节 简单直流电路与计算	16
第八节 复杂电路与计算	23
思考题和习题	26
第二章 电磁	32
第一节 磁场和磁力线	32
第二节 电流的磁场	33
第三节 磁场对载流导体的作用	34
第四节 磁场的基本物理量	36
第五节 磁路与磁路欧姆定律	38
第六节 铁磁材料的磁化与反复磁化	40
第七节 电磁感应和楞次定律	43
第八节 自感电动势和自感系数	48
第九节 互感电动势和线圈的极性	50
第十节 涡流	51
思考题和习题	53
第三章 单相交流电路	58
第一节 交流电的概念	58
第二节 正弦交流电动势的产生	59
第三节 相位和相位差	62
第四节 正弦交流电的有效值与平均值	63
第五节 正弦交流电的矢量表示法	66
第六节 交流电路的概念	70
第七节 纯电阻交流电路	71
第八节 纯电感交流电路	73
第九节 具有电阻与电感串联的交流电路	76
第十节 电容与纯电容交流电路	81
第十一节 线圈与电容串联的交流电路	86
第十二节 线圈与电容并联的交流电路	91

第十三节 提高功率因数的意义	94
第十四节 交流电路中的集肤效应	97
思考题和习题	98
第四章 三相交流电路	103
第一节 三相交流电动势的产生	103
第二节 发电机绕组的星形接法	104
第三节 发电机绕组的三角形接法	106
第四节 负载的星形连接和中线的作用	107
第五节 负载的三角形连接	111
第六节 三相交流电路的功率	114
思考题和习题	116
第五章 电气测量	119
第一节 电气仪表的分类	119
第二节 直流电流和电压的测量——磁电式仪表	121
第三节 交流电流和电压的测量——电磁式仪表	123
第四节 功率的测量——电动式仪表	125
第五节 电能的测量——感应式仪表	127
第六节 电阻的测量	129
第七节 万用表	131
思考题	132
第六章 直流电机	133
第一节 直流发电机的基本原理	133
第二节 直流电机的构造	135
第三节 直流电机的电枢绕组	137
第四节 直流电机的电枢反应	143
第五节 直流电机按励磁方式的分类	145
第六节 并励发电机	146
第七节 直流电动机的运行原理	148
第八节 直流电动机的机械特性	149
第九节 直流电动机的起动、调速和反转	151
思考题和习题	153
第七章 变压器	156
第一节 概述	156
第二节 变压器的工作原理	156
第三节 三相变压器	160
第四节 自耦变压器	164
第五节 仪用互感器	165
第六节 电焊变压器	167
第七节 小型电源变压器的计算	168
思考题和习题	171
第八章 交流电机	172

第一节	异步电动机的构造	172
第二节	异步电动机的工作原理	175
第三节	三相异步电动机的定子绕组	179
第四节	三相异步电动机工作情况的分析	185
第五节	异步电动机的起动	189
第六节	三相异步电动机的使用和维护	191
第七节	单相异步电动机	197
第八节	异步发电机	200
第九节	同步发电机	202
	思考题和习题	204
第九章	控制电器及基本控制线路	206
第一节	手动电器	206
第二节	自动控制电器和三相异步电动机的正转控制线路	219
第三节	自动保护电器及保护类型	223
第四节	三相异步电动机的正、反转控制线路	226
第五节	生产机械的限位控制线路	229
第六节	三相异步电动机的制动控制线路	231
第七节	三相异步电动机的降压起动自动控制线路	240
第八节	X62W型万能铣床电气自动控制线路的分析	242
	思考题和习题	245
第十章	低压输配电与照明	248
第一节	低压输配电概述	248
第二节	低压输配电	249
第三节	室内配线	257
第四节	电照明	261
	思考题和习题	265
第十一章	安全用电	267
第一节	触电及抢救	267
第二节	技术保安措施	270
	思考题	274
第十二章	晶体管电路基础	275
第一节	半导体和PN结	275
第二节	晶体二极管	279
第三节	单相整流电路	282
第四节	三相整流电路	289
第五节	倍压整流电路	294
第六节	滤波器	295
第七节	稳压管及简单稳压电路	298
第八节	晶体三极管	301
第九节	单管放大器	311
第十节	晶体管多级放大器	320

第十一节	晶体管振荡器	329
第十二节	晶体管开关电路	334
第十三节	可控硅元件及其应用	349
思考题和习题		363

第一章 直流电路

在现代工业、农业以及国民经济的其他各个部门中，电能的应用日益广泛。特别是半导体电子技术的迅速发展及其在控制、测量、通讯、计算等方面的广泛应用，使电工技术进入一个新的领域。

电工学就是一门研究电磁现象在工程技术上应用的科学，其实践性和理论性均较强。学习电工学就是要掌握一定的电工基础理论，并获得必要的电工技术知识和技能，为农业、工业、国防和科学技术现代化服务。

本章是电工基础理论的一个重要组成部分。其内容是在物理学的基础上，进一步讲述电路各基本物理量的意义及欧姆定律。在此基础上进而对电路的联接进行分析，并从电流热效应出发说明电气设备额定值和熔断器的作用。最后介绍克希荷夫定律与复杂电路的计算。

第一节 电路和电流

一、电路 所谓电路就是电流通过的路径。图 1—1 是一轮式拖拉机前大灯的电路。

由图 1—1 可见，从蓄电池的负极用导线依次连接总保险器、电流表、钥匙总开关、分路保险器、变光开关，到前大灯。蓄电池的正极用导线和机体相连（叫做搭铁），将总开关合上，电流便从蓄电池正极流出，经机体进入灯头，通过灯丝、变光开关、分路保险器、总开关及电流表、总保险器回到蓄电池负极，成为完整的回路。

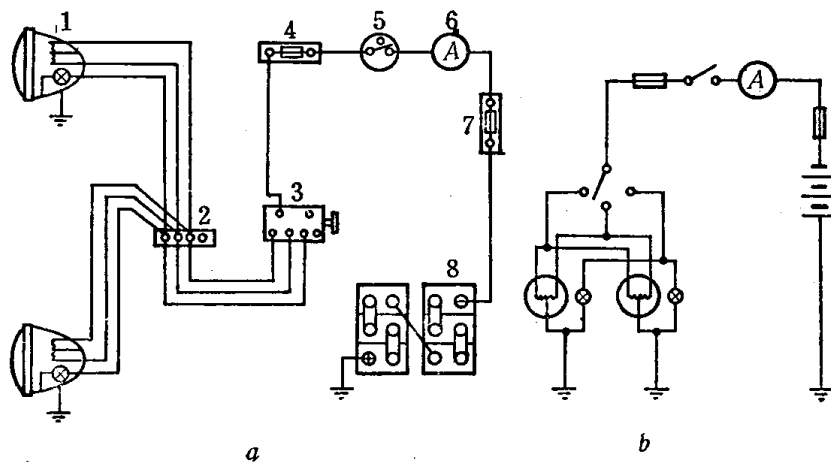


图 1—1 轮式拖拉机前大灯电路

a—线路联接图 b—原理图

1.前大灯 2.接电板 3.变光开关 4.分路保险器
5.钥匙总开关 6.电流表 7.总保险器 8.蓄电池

在工农业生产中广泛应用的许多电气设备的电路比此电路更为复杂。但不管复杂程度如何，任何电路都是由电源、负载和连接导线（包括开关）三个部分所组成。在分析电路时一般用图 1—2 所示的接线原理图表示。

电路中的电源是把其他形式的能量转换为电能的设备。例如，蓄电池是将化学能转变成电能；发电机是将机械能转变成电能。

负载是电路中消耗电能的设备。例如，电灯是把电能转变成光能和热能；电动机是把电能转变成机械能。

导线和开关是电源和负载之间必不可少的连接和控制部分。

电路可分为两段：从电源的一端起，经过和它连接的全部负载再回到电源的另一端为止的电流路径，叫做外电路；电源内部的电路叫做内电路。

电路通常有三种状态：

1. 通路 开关接通，构成闭合回路，电路中有电流。电路处于正常运行状态。
2. 断路（开路） 开关或电路中某一处断开，电路中无电流。
3. 短路 电路被短接。如图 1—3 中，若 B、C 两点用一根电阻等于零的导线连接起来，就叫做灯泡 2 被短路。若 A、C 两点直接联接，就叫做电源被短路。

二、电流 电路接通后，电荷做有规则的移动就形成了电流。为什么电路中会有电流产生呢？其内因是导体中有自由电子存在，外因则是导体两端有电场力的作用。

在电场力的作用下，导体中的带电质点作有规则的定向移动，这就形成了导体中的电流。在金属导体中，移动的带电质点是自由电子。在电解液中，移动的带电质点是正负离子，正负离子在电场力的作用下，相互作反方向的移动。

电流的方向：习惯上规定正电荷移动的方向作为电流的正方向，它与金属导体中自由电子移动的方向刚好相反，如图 1—4 所示。在外电路中，电流的正方向是由电源的正极经过负载回到电源的负极。

用来衡量电流大小或强弱的物理量，称为**电流强度**。它可用单位时间内通过导体某一截面的电量来量度。用公式表示为

$$I = \frac{Q}{t} \tag{1-1}$$

电流强度的单位：

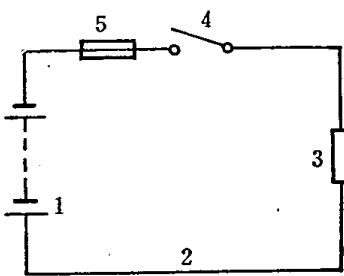


图 1—2 用接线原理图表示电路
1. 电池 2. 导线 3. 负载
4. 开关 5. 保险丝

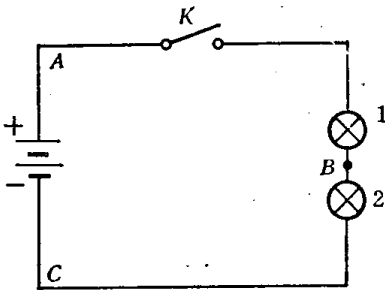


图 1—3 电路的三种状态

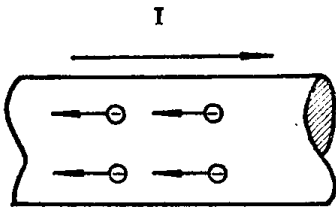


图 1—4 电流的方向

$$[I] = \left[\frac{Q}{t} \right] = \frac{\text{库仑}}{\text{秒}} = \text{安培(A)}, \text{简称“安”}$$

较小的单位有毫安 (mA)、微安(μA)；较大的单位有千安 (kA)。

$$1 \text{ 安} = 10^3 \text{ 毫安} = 10^6 \text{ 微安} = 10^{-3} \text{ 千安}$$

同一电流通过不同截面的导体，其单位面积上通过的电流是不同的。我们把单位截面通过的电流称做电流密度，用 j 表示：即

$$j = \frac{I}{S} \quad (1-2)$$

电流密度的单位：

$$[j] = \left[\frac{I}{S} \right] = \text{安/米}^2$$

通常导体的截面常以平方毫米计算，故电流密度多采用较大的单位：安/毫米²

$$1 \text{ 安/米}^2 = 10^{-4} \text{ 安/厘米}^2 = 10^{-6} \text{ 安/毫米}^2$$

〔例 1—1〕 一台小变压器内部导线的截面积是 0.5027 毫米²，它的电流密度不允许超过 2.5 安/毫米²。问它允许通过的最大电流是多少？

〔解〕 导线的允许电流密度 j 是 2.5 安/毫米²，截面积 S 是 0.5027 毫米²。所以

$$I = jS = 2.5 \times 0.5027 = 1.26 \text{ 安}$$

允许通过导线的最大电流为 1.26 安。

第二节 电压和电位

一、电压 在物理学中已经学过：电荷在电场中要受到电场力的作用。如果电荷在电场力的作用下移动了一段距离，电场力就做了功，这说明电场具有能量。反之，如果使电荷逆着它所受的电场力的方向移动，就需要由外力克服电场力做功，这时外界能量储存在电场之中。为了表示电场做功本领的大小，我们引入电压这个物理量。

以均匀电场为例（图 1—5），设电场力把正电荷 Q 从 a 点移到 b 点所做的功为 A_{ab} ，则其值为电场力与 a 、 b 两点间距离的乘积，即

$$A_{ab} = Fl_{ab}$$

而实验电荷在电场某一点中所受的力 F 和该电荷所带的电量 Q 的比值就是该点的电场强度 ϵ ，即

$$\epsilon = \frac{F}{Q}$$

或 $F = Q\epsilon$

所以，在电场力的作用下，电场把电荷 Q 从 a 点移至 b 点所做的功为

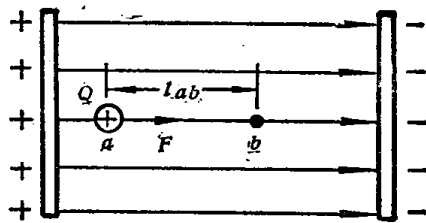


图 1—5 电场力移动电荷做功

$$A_{ab} = Fl_{ab} = \epsilon Ql_{ab} \quad (1-3)$$

在 l_{ab} 一定的情况下, 若被移电荷量 Q 越大, 则 A_{ab} 也越大, 但 $\frac{A_{ab}}{Q}$ 始终是一个固定的数值, 这个比值反映了在某电场中, a 、 b 两点间的一种特性, 它表明了电场做功本领的大小。我们把这一物理量叫做 a 、 b 两点间的电压, 用 U_{ab} 表示, 即

$$U_{ab} = \frac{A_{ab}}{Q} = \epsilon l_{ab} \quad (1-4)$$

同理, 在电路中(图 1—6), 电场力移动实验电荷从 a 点到 b 点所做的功与实验电荷电量的比值, 就叫做该电路 a 、 b 两点间的电压。即

$$U_{ab} = \frac{A_{ab}}{Q}$$

上式说明, 电场中 a 、 b 两点间电压的大小等于电场力把单位正电荷从 a 点移到 b 点时所做的功。

电压的正负, 决定于电场力做功的正负, 我们规定电场力移动正电荷所做的功为正, 即电场力做功的方向为电压的正方向, 采用双下标来表示, 如 U_{ab} 是正, 就表示正电荷由 a 移至 b 时, 是电场力做功; 若 U_{ab} 是负, 就表示正电荷由 a 移至 b 时是外力做功。于是

$$U_{ab} = -U_{ba}$$

在图形中, 电压的正方向一般用箭头表示, 以箭头所指的方向为电压的正方向, 如图 1—6 所示。

显然, 在没有规定正方向的情况下, 说某两点间的电压是正或是负, 是没有意义的。说明某两点的电压的量值时, 必须同时说明所选定的正方向。这一点必须注意。

一般规定电压的正方向是由电源的正极到负极, 这是因为电场力移动正电荷的方向是由正极到负极的缘故。在一些问题中, 常需先假定电压的正方向来进行计算, 如果计算结果为正, 就表示真实方向与假设方向相符; 如果为负, 就表示真实方向和假设方向相反。

电压的单位:

$$[U] = \left[\frac{A}{Q} \right] = \frac{\text{焦耳}}{\text{库仑}} = \text{伏特 (V)}, \text{简称伏}$$

即把 1 库仑的电荷量, 从一点移到另一点, 电场力所做的功为 1 焦耳时, 这两点的电压就是 1 伏。

较大的单位有千伏 (kV), 较小的单位有毫伏 (mV)、微伏 (μV)。

$$1 \text{ 千伏} = 10^3 \text{ 伏}$$

$$1 \text{ 伏} = 10^3 \text{ 毫伏} = 10^6 \text{ 微伏}$$

二、电位 在实际工作中, 有时我们需要比较某两点的电性能, 这就需要引入一个“电

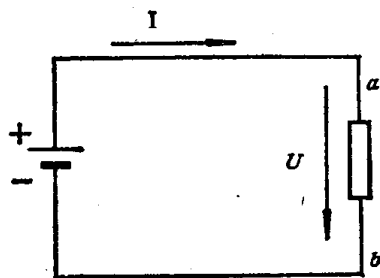


图 1—6 在电路中电场力移动电荷做功

位”的概念。例如图 1—7 a 中的 a 、 b 两点相距很远，不便于直接测量出它们之间的电压，但我们可以通过它们与公共参考点（零电位点）之间的电压来进行比较。

在该电路中，如果我们选择机壳 d 为公共参考点，一个表笔固定在机壳上，测量各点与机壳之间的电压。显然，其测量结果为

$$U_{ad} = 9 \text{ 伏} \quad U_{bd} = -6 \text{ 伏} \\ U_{cd} = 3 \text{ 伏}$$

我们把电场中各点到选定的参考点之间的电压，称为各点对

参考点的电位。用 φ 表示。如图 1—7 a 中 a 、 b 、 c 、 d 各点的电位为 $\varphi_a = U_{ad} = 9 \text{ 伏}$ ； $\varphi_b = U_{bd} = -6 \text{ 伏}$ ； $\varphi_c = U_{cd} = 3 \text{ 伏}$ ； $\varphi_d = U_{dd} = 0$ 。知道 a 点比 d 点高 9 伏（ $\varphi_a = 9 \text{ 伏}$ ），而 b 点比 d 点低 6 伏（ $\varphi_b = -6 \text{ 伏}$ ）后，就可推知 a 点比 b 点高 15 伏。

参考点的选择是任意的，但必须指出，在同一系统中，只能选一个参考点。在工程技术中，因为一般设备常与大地相接，所以常取大地为参考点（零电位点），以便对各点进行比较和判断。

当没有明确接地点时，也可以任选一点为电位参考点。如图 1—7 b 选 b 点为参考点，这时各点电位绝对值虽然不一样了，但是相对数值，即相对关系却仍然不变。在图 1—7 b 中， $\varphi_b = 0$ ， $\varphi_d = 6 \text{ 伏}$ ， $\varphi_a = 15 \text{ 伏}$ ， $\varphi_c = 9 \text{ 伏}$ ，但 a 、 b 两点的电位差 $\varphi_a - \varphi_b = 15 - 0 = 15 \text{ 伏}$ 不变。

在电场中 a 至 b 间的电位差，也称做 a 至 b 点间的电压。即

$$U_{ab} = \varphi_a - \varphi_b \quad (1-5)$$

电位的正负是相对于参考点而言的，某点的电位为正，表示该点至参考点间的电压为正；某点的电位为负，表示该点至参考点间的电压为负。

由此可知，不选定参考点，而说某点的电位是多少，是没有意义的。选定了参考点，电场中各点的电位是一定的。参考点选择得不同，同一点的电位便不同，但不管参考点如何选，任意两点间的电压总是一定的，即两点间的电压与参考点的选择无关。

最后说明一点，在外电路中电流总是由高电位流向低电位的，也就是说，电流流过外电路时，后端电位总要比前端电位低，我们把这种电位的降低称为**电位降**，也叫**电压降**。而在电源内部电流则是由低电位流向高电位的，因而称其为**电位升**，这是因为电源内部是外力做功的缘故。

〔例 1—2〕 如图 1—8 所示，已知 $U_{BC} = 30 \text{ 伏}$ ，

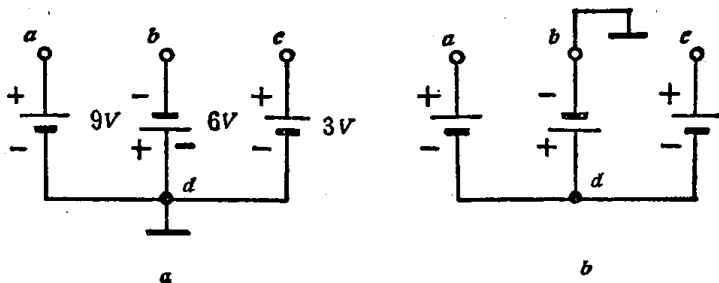


图 1—7 电路中各点对机壳之间的电位

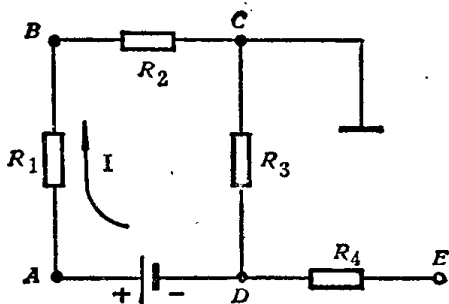


图 1—8