

电 工 学

廖 来 成
戚 焕 松 主 编

山 东 大 学 出 版 社

电 工 学

廖来成 戚焕松 主编

※

山东大学出版社出版发行
山东曲阜师范大学印刷厂印刷

※

787×1092毫米 32开本 9.75印张 218千字

1990年12月第1版 1990年12月第1次印刷

印数1—3500

ISBN7—5607—0446—8/G·59

定价：4.20元

序

本书包括电路、电工仪表、电机及输配电四部分，内容自成系统。其特点是：

(1) 考虑了师范院校及其函授教育的特点，在尊重《电工学》传统内容的前提下，突出了基本概念、基本原理的阐述。概念清楚、取材适中、文字简练、通顺易懂，便于讲授和自学。

(2) 体现了技术基础课的特征，在简述电机、电器基本结构的基础上，结合电磁学基础知识，既介绍它们的特殊性，也指出原理的普遍性。这不仅为后续课程奠定了基础，而且能帮助学生巩固专业理论，培养理论联系实际的思想方法。

(3) 采用循序渐进的论述方法，运用数学和物理的基础知识，对课程中的重点、难点由浅入深地予以阐述，条理清楚，较好地体现了内容的科学性、系统性和完整性。

(4) 书中的思考题和习题，都能有机地结合教材内容，这对加深理解基本概念和基本理论会有良好作用。

本书是高等师范物理专业较好的教材或参考书，也是有志自学者的良师益友。

冯传海

1990年12月

编 者 的 话

本书是根据高等师范院校物理专业和中学教师进修物理专业《电工教学大纲》编写的。初稿曾经作为曲阜师范大学1984年以来物理专业函授及家电维修培训教材试用过，参照第二届（1986年）、第三届（1990年）《全国高师电工学教学研讨会》的精神和兄弟院校《电工学》教学的实际安排最后定稿付印的。

全书共分九章，全部讲授大约需要78个学时。在《电磁学》课程中已讲过单相交流电的学校，第一章可以不讲，或进行概括性复习；如果教学学时不够，最后三章只作基本常识方面的介绍，有60个学时即可。

本书除了作高师物理专业《电工学》教学及函授教材之外，还可作教育学院、电视大学以及电力部门培训在职职工，提高业务技术的教材或参考书。

本书的出版，得到曲阜师范大学各级领导和山东大学出版社的热情支持，并承蒙山东大学电子工程系冯传海教授作序，编者表示衷心感谢！

限于编者学识水平，书中定有缺点和错误，恳请读者批评指正。

编者

1990年12月

目 录

序言

编者的话

第一章 简谐交流电路	1
§1—1 简谐交流电概述及参考正方向	1
§1—2 交流电路的特点	14
§1—3 简谐交流电的复数解法	28
§1—4 交流电路的功率和功率因数	46
习 题	58
第二章 线性网路的分析和计算	63
§2—1 支路电流法	63
§2—2 回路电流法	68
§2—3 节点分析法	71
§2—4 电压源与电流源及其等效变换	76
§2—5 有源二端网路定理	79
§2—6 迭加原理	85
§2—7 星形与三角形网路的等效变换	87
§2—8 受控源电路的分析方法	91
习 题	103
第三章 三相正弦交流电路	109
§3—1 三相正弦交流电动势的产生	110

§3—2	三相电源绕组的连接	112
§3—3	三相负载的连接	116
§3—4	三相交流电路的功率	127
习 题		133
第四章 电工仪表		136
§4—1	概述	136
§4—2	磁电系电表与电磁系电表	141
§4—3	电动系电表	147
§4—4	感应系电表	154
§4—5	兆欧表	159
习 题		163
第五章 变压器		165
§5—1	概述	165
§5—2	变压器的空载运行	167
§5—3	变压器的负载运行	175
§5—4	变压器的等效电路	181
§5—5	变压器的运行性能	182
§5—6	三相变压器	186
§5—7	特殊变压器	196
习 题		203
第六章 异步电动机		205
§6—1	异步电动机的结构和铭牌	205
§6—2	三相异步电动机的转动原理	210
§6—3	三相异步电动机的定子绕组	218
§6—4	异步电动机的电路分析	223
§6—5	异步电动机的工作特性	234

§6—6 单相异步电动机	244
§6—7 异步电动机的起动及简单控制电路	248
习 题	256
第七章 同步电机	259
§7—1 同步发电机的结构及原理	259
§7—2 同步发电机的运行特性	264
§7—3 同步发电机的并网运行	270
习 题	274
第八章 直流电机	277
§8—1 直流电机的基本原理及构造	277
§8—2 并励直流电动机	281
§8—3 并励直流发电机	286
习 题	289
第九章 输配电及安全用电	291
§9—1 发电与输配电简介	291
§9—2 配电线路及熔断器的选择	293
§9—3 安全用电	299

第一章 简谐交流电路

凡是方向和大小都随时间作周期性变化的电动势、电压和电流，分别称为交变电动势、交变电压和交变电流，它们统称交流电。相应的电路称作交流电路。

在不同场所应用的交流电随时间变化的波形是多种多样的。例如市电都是50赫的简谐波，电子示波器用来扫描的讯号是锯齿波，计算机采用的讯号是矩形波……电工学主要研究简谐交流电。因为这种电流在实践上或理论上都有十分重要的意义：发电厂提供的交流电都是简谐电流；按照数学分析理论，任何周期函数都可以写成许多不同频率的简谐函数之和，即使是非周期函数，也可以分解为频率连续变化的简谐分量，所以研究简谐交流电是分析其他波形电流的基础。

另外，需要说明的是，电工学所研究的交流电路都属于似稳电路。在这种电路中，任一瞬间电压、电流、功率等物理量间的关系都同直流电路相似，欧姆定律、基尔霍夫定律仍然是计算这种电路的基本依据。

§1—1 简谐交流电概述及参考正方向

一、正弦交流电的产生

根据电磁感应定律可知：长度为 l 的导线在磁场中沿垂直于 $\vec{B}$ 的方向以速度 v 运动时，所产生的感应电动势为

$$E = Blv$$

如果 l 与 v 不变，而 B 按正弦规律变化，感应电动势亦将按正弦规律变化。交流发电机就是根据这一原理制成的。

图1—1—1为交流发电机横截面示意图。线圈 AX 在磁场中以角速度 ω 逆时针方向旋转，如果采取某种适当形状的磁极，使气隙中的磁场 B 的大小沿着圆周按正弦规律分布，即

$$B = B_m \sin \alpha$$

式中 α 角是线圈平面与中性面 MM' 的夹角， $\vec{B}$ 的方向始终与铁芯表面垂直。当线圈匀速转动时，两个边同时切割磁力线，整个线圈中的感应电动势

$$e = 2NB_m l v \sin \alpha$$

式中 N 为线圈的匝数。假如初始时刻线圈平面与中性面的夹角为 φ_0 ，线圈旋转的角速度为 ω 弧度/秒，经过 t 秒后，夹角

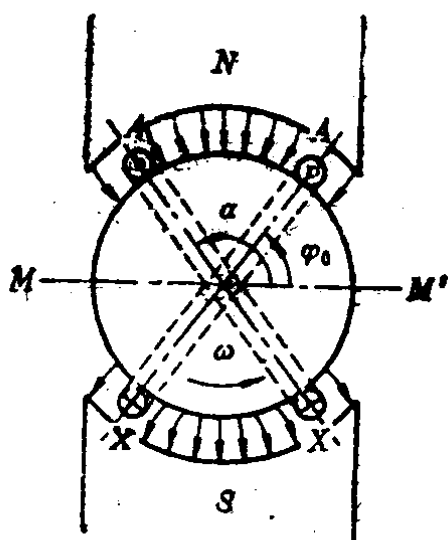


图1—1—1

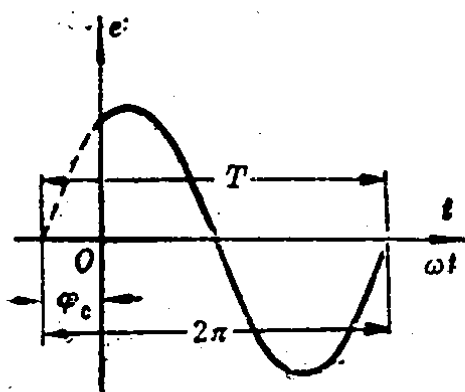


图1—1—2

变成 $\alpha = \omega t + \varphi_0$ ，于是感应电动势：

$$e = 2NB_m l v \sin(\omega t + \varphi_0)$$

令 $E_m = 2NB_m l v$ ， E_m 是电动势的最大值（又叫幅值）则得

$$e = E_m \sin(\omega t + \varphi_0) \quad (1-1-1)$$

由此可见，电动势是按照正弦规律变化的，因为不同时刻电动势 e 有不同的数值和方向，所以（1—1—1）式称作正弦电动势 e 的瞬时表达式。交流电除了用三角函数式表示外，还可以用波形曲线来表示，如图1—1—2所示。

二、交流电的三要素

1. 周期和频率

因为线圈在磁场中旋转，电动势要作周期性变化，完成一次周期性变化所需要的时间称作交流电的周期，用 T 表示，单位是秒。

交流电每一秒钟所能完成周期性变化的次数，叫做交流电的频率，用 f 表示，单位是赫兹。显然周期和频率互为倒数关系：

$$T = \frac{1}{f} \quad (1-1-2)$$

它们都能描述交流电变化的快慢。我国的工业用电和民用电都是50赫兹的简谐交流电。

在图1—1—1所示的发电机中，因为只有一对磁极，线圈旋转一周，电动势完成一次周期性变化。如果发电机有 p 对磁极，线圈旋转一周，电动势必将完成 p 次周期性变化。由于交流电变化一个周期，是指三角函数式中的电角度

$$\alpha = \omega t + \varphi_0$$

变化了 2π 弧度，显然和线圈旋转一周所经历的空间角 θ ，具有不同的物理内容。但二者在数值上满足关系式

$$\alpha = p\theta \quad (1-1-3)$$

α 、 θ 都是时间 t 的函数，如果两边求导数，

$$\frac{d\alpha}{dt} = p \frac{d\theta}{dt}$$

$\frac{d\alpha}{dt}$ 表示单位时间内电角度的变化，通常称作交流电的角频率，以 ω 表示；而 $\frac{d\theta}{dt}$ 表示单位时间内线圈所转过的空间角，

即线圈旋转的角速度，如果用 Ω 表示，则可得下列等式

$$\omega = p\Omega \quad (1-1-4)$$

由此可见，发电机一对磁极时，线圈旋转的角速度在数值上才和交流电的角频率相同。既然在一个周期内，交流电的电角度变化 2π 弧度，则不难写出角频率 ω 与周期 T 或频率 f 的关系：

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f \quad (1-1-5)$$

2. 相位和初相位

由(1-1-1)式可知，电动势的瞬时值 e 是由幅值 E_m 和正弦函数 $\sin(\omega t + \varphi_0)$ 共同决定的。式中的电角度

$$\alpha = \omega t + \varphi_0 \quad (1-1-6)$$

即为交流电的相位或相位角。当 $t=0$ 时的相位角 $\alpha = \varphi_0$ ，称作交流电的初相位。相位是描述交流电在某一时刻所处的状态的物理量，它不仅决定瞬时值的大小和方向，还能反映交流电的变化趋势。例如 t_1 时刻，正弦电动势的相位和瞬时值分别为

$$\alpha_1 = \omega t_1 + \varphi_0$$

$$e_1 = E_m \sin(\omega t_1 + \varphi_0)$$

经过 Δt 时间，电动势的相位和瞬时值将变成

$$\alpha_2 = \omega(t_1 + \Delta t) + \varphi_0$$

$$e_2 = E_m \sin(\omega(t + \Delta t) + \varphi_0)$$

如果 $e_1 > e_2$ ，我们则知电动势在该段时间内处于由强向弱变化状态。

根据上面的讨论可知，幅值 E_m 、频率 f （或角频率 ω ）是由发电机的自身结构及转速决定的，而初相位 φ_0 则和计时起点时刻线圈的位置有关。它们共同描述了简谐交流电的强弱及变化规律，所以称之为交流电的**三要素**。

顺便指出，交流电的幅值习惯上是指正的最大值，初相位也是以幅值为正值的前提下定义的，例如

$$e = -40 \sin(\omega t + \varphi_0)$$

不要认为幅值是 -40 、初相位是 φ_0 ，而应该把上式变成

$$e = 40 \sin(\omega t + \varphi_0 + \pi)$$

即幅值为 40 、初相位为 $\varphi_0 + \pi$ 。

三、正弦交流电的有效值

实验证明：交流电通过电阻时会放出热量，交流电的有效值就是根据电流热效应定义的。如果电流 $i = I_m \sin(\omega t + \varphi)$ 通过电阻 R ，在一个周期内放出的热量

$$Q = \int_0^T i^2 R dt$$

和稳恒电流 I 通过该电阻，在相同的时间内放出的热量相同，即

$$I^2 R T = \int_0^T i^2 R dt \quad (1-1-7)$$

我们则称 I 为这个交流电的有效值。由上式很容易得到

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt} = \frac{1}{\sqrt{2}} I_m \quad (1-1-8)$$

可见，有效值等于简谐交变电流最大值的 $\frac{1}{\sqrt{2}}$ 分之一。由于 I 等于 i 的平方在一个周期内的平均值再开平方根，所以有效值也叫方均根值。

交变电动势 e 、交变电压 u 的有效值都是根据方均根值定义的。它们和最大值间的关系同交变电流一样，都相差 $\frac{1}{\sqrt{2}}$ 因子，即

$$E = \frac{1}{\sqrt{2}} E_m \quad U = \frac{1}{\sqrt{2}} U_m$$

顺便说明的是，电器设备的铭牌上标示的额定电压和额定电流，以及平常说某交流电路中的电流为2安培、电压为220伏，都是指的有效值；常用的交流电压表、电流表测量时的读数也是有效值。因为有效值和最大值都能反映交变电流的强弱或电压的高低，并且在许多计算中，采用有效值往往比使用最大值更方便，所以在电工学中多应用有效值概念。例如(1-1-1)式正弦交流电动势通常写成如下形式

$$e = \sqrt{2} E \sin(\omega t + \varphi_0)$$

当然，在分析电器设备及元件的耐压、绝缘可靠性时，必须考虑交流电的最大值。例如并联在220伏交流电源上的电容器，耐压性能必须大于 $\sqrt{2} \times 220 = 311$ 伏才能安全工作。

四、交流电的正方向

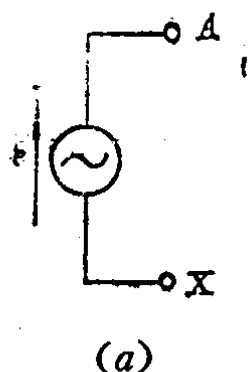
既然交流电的大小和方向都随时间作周期性变化，那么，怎样才能把交流电在某一时刻的大小和实际方向都准

确地反映出来呢？

我们常用图 1—1—3 (a) 的符号表示图 1—1—1 交流发电机模型， A 、 X 代表发电机线圈的两个出线端， e 表示交流电源的电动势。为了讨论方便，我们选取初相位 $\varphi_0 = 0$ ，由 (1—1—1) 式可得

$$e = E_m \sin \omega t \quad (1-1-9)$$

其波形图如图 1—1—3 (b) 所示。



(a) 图 1—1—3

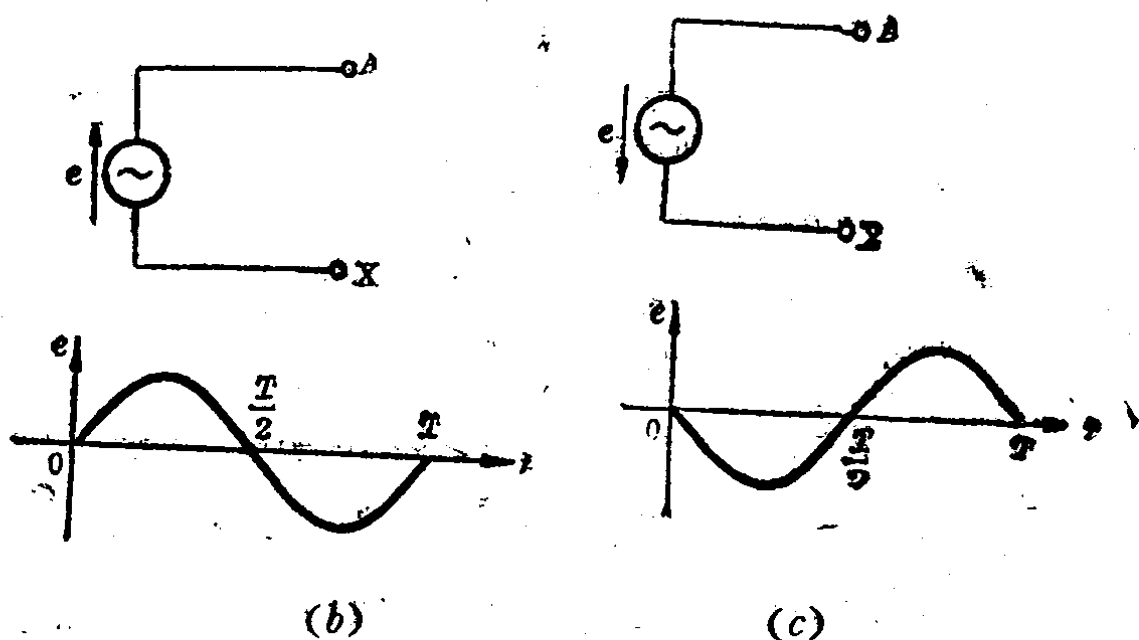


图 1—1—3

当 t 从 0 变化到 $\frac{T}{2}$ 时， e 为正值；当 t 从 $\frac{T}{2}$ 变化到 T 时， e 为负值。电动势的正、负代表什么意思呢？如果没有一个事先的规定，即参考正方向，那么，正、负就没有明确的物理意义。因此，若要用电动势的正、负值来确切反映电动势在任一瞬间的实际方向，就必须预先选定一个参考正方向。这个参考正方向要满足下面的规定：当电动势为正值时，其实际方向

和参考正方向一致；当电动势为负值时，其实际方向和参考正方向相反。这样一来，电动势的正、负值就能清楚地告诉人们某一瞬间电动势的实际方向了。

假如简谐交变电动势 e 的实际方向如下：从0至 $\frac{T}{2}$ 期间， A 端是正极， X 端是负极，电动势 e 的实际方向为 X 端经电源指向 A 端；而在 $\frac{T}{2}$ 到 T 期间， e 的实际方向变成 A 端经电源指向 X 端，怎样才能描述发电机的这一客观事实呢？我们可以采用两种方法：

利用三角函数式 $e = E \sin \omega t$ 和图1—1—3 (b)中的参考正方向相结合，或者利用三角函数式

$$e = -E \sin \omega t = E \sin(\omega t + \pi) \quad (1-1-10)$$

和图1—1—3 (c)中的参考正方向相结合，它们都可以确切反映电动势的大小和实际方向。

因为0至 $\frac{T}{2}$ 内， $e = E \sin \omega t > 0$ ，说明电动势的实际方向和图 (b) 的参考正方向一致，即 A 端是正极， X 端是负极。在 $\frac{T}{2}$ 至 T 期间， $e = E \sin \omega t < 0$ 说明电动势的实际方向

和 (b) 图的参考正方向相反，即 A 端是负极， X 端是正极。由此可见，采用三角函数式 $e = E \sin \omega t$ 和图 (b) 的正方向相结合，是可以描述电动势 e 的大小和实际方向的。

同样的讨论也可以知道：利用三角函数式

$$e = E \sin(\omega t + \pi)$$

和图 (c) 的参考正方向相结合，照样能够描述电动势 e 的大小和实际方向。

综上所述，要完整地确切地反映简谐交流电某一时刻的大小和实际方向，必须给出三角函数式的同时，还要选定一个参考正方向，二者不可缺一。如果改变参考正方向，相应的三角函数式也随之变化，其初相位增加了一个 π 。

例如图1—1—4 (a) 是简谐交流发电机横截面示意图，

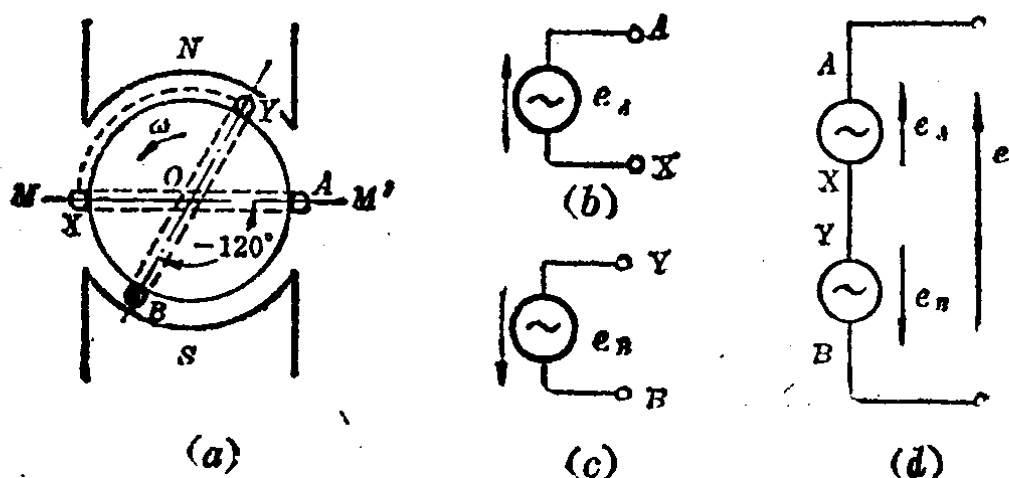


图1—1—4

AX、BY是两只结构相同的线圈，它们的初始位置如图所示，二者均以 ω 角速度逆时针旋转，如果每只线圈中的感应电动势的最大值用 E_m 表示，那么，电动势 e_A 、 e_B 的大小和实际方向应该怎样描述？如果X、Y端连在一起，A、B间总电动势 e 的大小和方向又该怎样描述？

首先根据法拉第电磁感应定律判断AX线圈中感应电动势 e_A 的实际方向：在0至 $\frac{T}{2}$ 内， e_A 的实际方向为 $X \rightarrow A$ ；在 $\frac{T}{2}$ 至 T 期间， e_A 的实际方向为 $A \rightarrow X$ 。根据前面的讨论可知，如果采用三角函数式

$$e_A = E_m \sin \omega t \quad (1-1-11)$$

和图1—1—4 (b) 所示的参考正方向相结合，则可反映 e_A 的

大小和实际方向。

e_B 的大小和实际方向，除了应用电磁感应定律进行判断外，还可以根据两只线圈的相对位置来确定：如果选择 e_B 的参考正方向如图1—1—4 (c) 所示，因为 BY 线圈比 AX 线圈落后 120° ，所以 BY 线圈中的感应电动势

$$e_B = E_m \sin(\omega t - 120^\circ) \quad (1-1-12)$$

因为 A 、 B 间总电动势 e 的大小和实际方向是由 e_A 、 e_B 决定的，所以利用 e_A 、 e_B 的三角函数式及参考正方向，即可确定 e 的大小和方向：如果 e 的正方向如图1—1—4 (d) 所示，从 $B \rightarrow A$ ，由图可知

$$e = e_A - e_B$$

利用三角知识读者很容易求出

$$e = \sqrt{3} E_m \sin(\omega t + 30^\circ) \quad (1-1-13)$$

需要再一次强调的是：只要参考正方向选定以后（例如 $B \rightarrow A$ ）与之对应的三角函数式也就确定了。读者可以自行验证一下，如果 e_A 、 e_B 的正方向都改变（当然它们的三角函数式中相应增加一个 π ），只要 e 的参考正方向保持不变， e 的三角函数式就是（1—1—13）式。

五、参考正方向的习惯选择

参考正方向不仅影响交流电的初相位，还会影响电路方程的形式。例如图1—1—5所示的纯电阻电路中，已知某一时刻 A 点电位高， B 点电位低。因为电压的实际方向是从高电位指向低电位的，

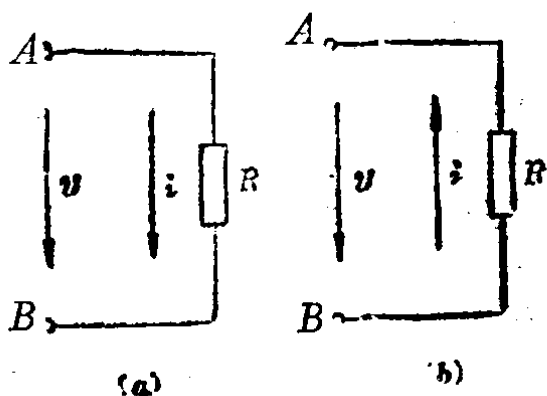


图 1—1—5