

高等学校试用教材

电 工 学

上 册

华南师范学院物理系
廖玄九 郭木森 屠广霖等合编

高等教育出版社

高等学校试用教材

电 工 学

上 册

华南师范学院物理系

廖玄九 郭木森 屠广霖等合编

高等教育出版社

内 容 提 要

本书共十三章，分上、下两册。上册内容包括正弦交流电路、线性网络的计算、三相正弦交流电路、非正弦交流电路、过渡过程和电工仪表。另有电工实验指导，包括十三个实验，其中上册有六个实验。

本书可作为高等师范院校物理系电工学课程的试用教材。

本书原由人民教育出版社出版。1983年3月9日，上级同意恢复“高等教育出版社”，本书今后改用高等教育出版社名义继续印行。

高等学校试用教材

电 工 学

上 册

华南师范学院物理系

廖玄九 郭木森 屠广霖等合编

*

高 等 教 育 出 版 社 出 版

新华书店北京发行所发行

山东新华印刷厂德州厂印装

*

开本 787×1092 1/32 印张 11.5 字数 278,000

1979年3月第1版 1983年7月第5次印刷

印数 136,001—148,030

书号 15010·0152 定价 0.95 元

序

电工学是一门技术基础课。编写本教材时,我们力求做到以实验事实为基础,着重于基本规律和基本概念的阐述,并注意理论联系实际,力求做到深入浅出,便于自学。希望能使学生学完本课程后,既能较好地掌握电路理论基础,为学习电子线路等后继课程打好基础,又能掌握一定的实验技能和具备一定的解决实际问题的能力。

本书共十三章,分上、下两册出版,上册包括正弦交流电路、线性网路的计算、三相正弦交流电路、非正弦交流电路、过渡过程和电工仪表;下册包括变压器、异步电动机、低压电器及其应用、直流电机、同步电机、微型电机、可控硅及其应用。实验分成两部分,分别附在上、下两册的后面。为了适应不同院校教学的需要,在内容安排上,除必学的内容之外,还增加了一些选学的内容(标以*号)供进一步学习时参考。为了教学方便,书中各章、节附有内容提要、小结、思考题、习题等,书末还有附录。为了节省篇幅和学时,对某些理论问题,本书未给出严格的证明,而着重于它们的应用。另外,本书所用下标,除少数国际上通用者外,一律采用汉语拼音字母。

本书是在已出版的原广东师范学院物理系编《电工学》一书的基础上,根据1978年在济南召开的全国高等师范院校五门物理教材审选会议上草拟的《电工学》教材编写大纲重新改编而成的。廖玄九、屠广霖等同志参加了前书的编写工作。这次改编时,本书第一、二、三、四、五、六、七、八、十章由屠广霖同志负责执笔,第九、十一、十二、十三章以及电工实验指导部分由郭木森同志负责执笔;

廖玄九同志审阅了本教材的初稿。

在本教材审稿会上,承华中师院(主审)、天津师院,山西师院、广西师院、北京师大、安徽教育学院、河北师大、昆明师院、西南师院、上海师院、陕西师大、安徽师大、福建师大、海南师专等兄弟院校的同志们对本书初稿提出了十分宝贵的意见。此外,在编写过程中,上海师大、南京师院、吉林师大以及广州电器科学研究所、南京微电机厂、广东省机械学校等单位在提供资料,提出修改意见等方面都给了我们很大的帮助。李绍泉、陈汉等同志绘制了书中的插图。在此一并表示感谢。

由于编者水平有限,加上脱稿十分仓促,缺点和错误在所难免,恳切希望广大读者给以批评指正。

编者

1979年2月于广州

目 录

第一章 正弦交流电路	1
§ 1-1 交流电的产生和交流电的基本概念	1
§ 1-2 同频率正弦量的迭加 旋转矢量法和相量法	13
§ 1-3 纯电阻、纯电感和纯电容交流电路	23
§ 1-4 R 、 L 、 C 串联的交流电路	46
§ 1-5 串联谐振	60
§ 1-6 并联的交流电路 并联谐振	70
§ 1-7 提高功率因数的意义和方法	94
*§ 1-8 交流电路中的互感耦合	99
习题	110
第二章 线性网络的计算	115
§ 2-1 基尔霍夫定律的复数形式 支路电流法	115
§ 2-2 回路电流法	123
√§ 2-3 节点电压法 节点电位法	131
§ 2-4 电压源与电流源的等效变换	137
√§ 2-5 迭加原理	142
√§ 2-6 戴文宁定理 诺顿定理	146
√§ 2-7 星形与三角形网路的等效变换	153
*§ 2-8 无源四端网路	165
习题	177
第三章 三相正弦交流电路	182
§ 3-1 三相正弦交流电动势的产生和连接	182
§ 3-2 三相负载的连接法	191
§ 3-3 三相交流电路的功率	201
*§ 3-4 三相交流电的整流	207
习题	210
第四章 非正弦交流电路	212

§ 4-1	非正弦交流电的产生	212
§ 4-2	非正弦周期量的分解	214
§ 4-3	非正弦周期电动势或电压作用下线性电路的计算	226
§ 4-4	非正弦周期量的有效值与平均值	238
§ 4-5	非正弦交流电路中的平均功率	242
§ 4-6	非正弦周期量的等效正弦量	244
	习题	247
第五章 过渡过程		250
§ 5-1	过渡过程与换路定律	250
§ 5-2	RC 串联电路的过渡过程	254
§ 5-3	RL 串联电路的过渡过程	268
*§ 5-4	RLC 串联电路的过渡过程	276
	习题	286
第六章 电工仪表		288
§ 6-1	概述	288
§ 6-2	磁电系电表与电磁系电表	293
§ 6-3	电动系电表	297
§ 6-4	感应系电表	310
*§ 6-5	半导体整流系电表	318
*§ 6-6	兆欧表	325
电工实验指导		330
实验一	R, L, C 串联的交流电路	331
实验二	测量日光灯电路的功率、电功及提高电路的功率因数	334
实验三	交流电桥	341
实验四	迭加原理和等效电源定理	343
实验五	过渡过程	346
实验六	三相负载的接法与三相电功率的测量	350
附录一	复数的表示式及其基本运算规律	354
附录二	非正弦周期量的傅氏级数展开	356
附录三	二阶线性常系数齐次微分方程的解法	359

第一章 正弦交流电路

内 容 提 要

本章介绍正弦交流电的产生、基本概念及其表示法：三角函数法、波形图示法、旋转矢量法和相量法，着重分析各种交流电路中的基本规律、串联谐振与并联谐振的特点以及提高功率因数的意义和方法，最后介绍交流电路中的互感耦合。

§ 1-1 交流电的产生和交流电的基本概念

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，统称为交流电。

交流电在工业生产，科学实验和日常生活中都有很大的实用意义，它和直流电比较有两个重要优点：一是交流电可以用变压器改变电压，另一是交流电机比相同功率的直流电机结构简单，造价低。所以，学习交流电时除了注意它与恒定电流的共同点外，要特别注意两者之间质的区别，切不可轻易地把直流电路的结论套用到交流电路中去。

一、交流电的产生及其三角函数表示法和波形图示法

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 B 的方向以速率 v 运动时，所产生的感应电动势为

$$E = Blv$$

若 l 与 v 不变，而 B 按正弦规律变化，则感应电动势亦按正弦规律

变化。交流发电机就是根据这一原理制成的。

图 1-1-1 是一个简单交流发电机的结构示意图。磁极 N 、 S 固定不动，两磁极之间置有一圆柱形铁心^①，铁心上绕有线圈 AX ，铁心和线圈(称为电枢)可绕轴旋转，线圈的两端分别接到两个相

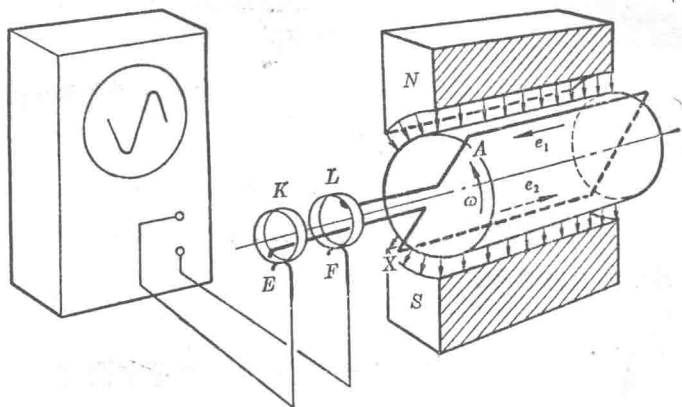


图 1-1-1

互绝缘的滑环 K 、 L 上，而电刷 E 、 F 分别与滑环 K 、 L 相接触，若用导线连接到示波器上，可以看到线圈的感应电动势是交变的电动势。

图 1-1-2 为交流发电机的横截面图。假设线圈 AX 在磁场中以角速度 ω 反时针方向旋转，并假定采取某种适当形状的磁极，使得气隙中的磁感应强度 B 的大小沿着圆周按正弦规律分布，即

$$B = B_m \sin \alpha \quad (1-1-1)$$

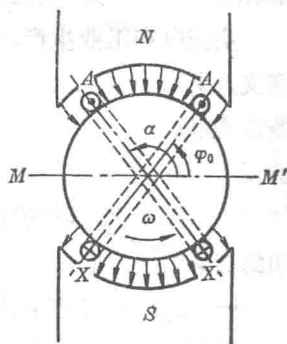


图 1-1-2

^① 磁力线由 N 极出发经过空气隙和铁心至 S 极。为了清晰起见，铁心中的磁力线在图中没有画出。

式中 α 角是线圈平面与中性面 MM' 的夹角，而且 B 的方向始终与铁心表面垂直。所谓中性面是指通过电枢表面磁感应强度为零的那些点的平面。由于线圈匀速转动时有两条边同时垂直地切割磁力线，分别产生感应电动势 e_1 和 e_2 ，其数值为

$$e_1 = e_2 = Blv = B_m l v \sin \alpha$$

整个线圈的感应电动势为

$$e = e_1 + e_2 = 2B_m l v \sin \alpha \quad (1-1-2)$$

若 $\alpha = 0$ ，即线圈位于中性面时，由上式得 $e = 0$ ，即感应电动势为零。设 $t = 0$ 时，线圈平面与中性面的夹角为 φ_0 ，经过 t 秒后，线圈平面与中性面的夹角将是 $\alpha = \omega t + \varphi_0$ （参看图 1-1-2），代入式 (1-1-2) 则有

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

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

$$e = E_m \sin(\omega t + \varphi_0) \quad (1-1-3)$$

因为感应电动势 e 在不同时刻有不同的数值，且时正时负（正负号的意义将在后面详细讨论）所以常把 e 称为电动势的即时值（或瞬时值）。习惯上用小写字母表示随时间变化的量，而用大写字母表示不随时间变化的量。

由式 (1-1-3) 可见，电动势随时间按正弦规律变化，这种按正弦规律变化的电动势称为正弦电动势。正弦电动势除了可用三角函数式 (1-1-3) 表示之外，还可以用波形图线来表示，如图 1-1-3 所示。

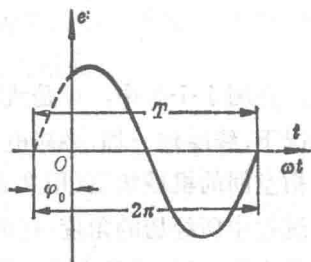


图 1-1-3

二、交流电的周期、频率和相位

1. 周期

在线圈转动一周的过程中，电动势要完成一次“零→最大→零→反向最大→零”的变化。如果再转第二周，电动势将按同样规律重演一次。这种周而复始的变化叫做周期性变化。完成一次周期性变化所需的时间叫做周期，用 T 表示，单位是秒，用 s 表示。

2. 频率

电动势在每秒钟完成周期性变化的次数，叫做频率。频率用 f 表示，单位是赫兹(即周/秒)，简称赫，用 Hz 表示。赫兹的一千倍称为千赫，用 kHz 表示，赫兹的一百万倍称为兆赫，用 MHz 表示。

电力网供电的频率称为“工频”。我国的工频标准是 50 赫(其他国家也有用 60 赫的)，航空工程有用 400 赫的，林业上有用 200 赫的。音频讯号频率在 20~20000 赫之间，射频频率在 500 千赫至几千兆赫。

若电动势的频率是 50 赫，即每秒变化 50 次，那么每变化一次就需要 $\frac{1}{50}$ 秒，所以周期是 $1/50$ 秒。推广到一般情况，若频率为 f 赫兹，周期就是 $1/f$ 秒，可见周期和频率有倒数的关系：

$$T = \frac{1}{f} \quad (1-1-4)$$

在图 1-1-2 中， ω 是线圈转动的角速度。在仅有一对磁极的情况下，线圈转一周，感应电动势 e 也变化一周。线圈转过的角度是指空间的机械角度(用 θ 表示)，而电动势(或其他正弦量)在交变过程中所经历的角度，在电工学中用电角度这一概念来描述。电动势变化一周，就是指其电角度变化了 2π 弧度或 360° ，为了与机械角度区别起见，我们用 α 表示电角度。在两极发电机中，电角度与机械角度相等，即

$$\alpha = \theta$$

但对于具有四个磁极的发电机(图 1-1-4), 电枢只要转过半周($\theta = \pi$), 电动势就变化一周($\alpha = 2\pi$); 电枢转过一周($\theta = 2\pi$), 电动势变化两周($\alpha = 4\pi$), 这就是说, 电角度等于机械角度的两倍(图 1-1-5), 即

$$\alpha = 2\theta$$

推广到一般的情形, 对于具有 $2p$ 个磁极的发电机, 应有

$$\alpha = p\theta \quad (1-1-5)$$

式中 p 为磁极的对数。



图 1-1-4

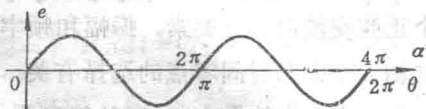


图 1-1-5

必须注意, 以后凡表示正弦量的式中的角度, 都是指电角度。

正弦量在单位时间内电角度的变化称为角频率, 用 ω 表示, 而单位时间内机械角度的变化则表示线圈旋转的角速度, 为了区别起见, 用 Ω 表示。显而易见二者应满足关系式

$$\omega = p\Omega \quad (1-1-6)$$

因为在一周期内, 电动势变化的电角度为 2π , 所以有

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f \quad (1-1-7)$$

上式即为角频率与周期(或频率)的关系式。

3. 相位与初相

由式(1-1-3)可见, 电动势的瞬时值 e 是由振幅 E_m 和正弦函数 $\sin(\omega t + \varphi_0)$ 共同决定的。式中的电角度

$$\alpha = \omega t + \varphi_0 \quad (1-1-8)$$

称为交流电的相位(或相位角, 简称相角)。因为 $(\omega t + \varphi_0)$ 中含有 t , 所以相位是随时间而变化的。当 $t=0$ 时, 相位角 $\alpha = \varphi_0$, 称为初相角(简称初相)。如果 $t=0$ 时, 线圈正好位于中性面上, 则电动势的初相位 $\varphi_0=0$ 或 $\varphi_0=\pi$ 。相位是表示正弦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, 还能表示出正弦交流电变化的趋势。当相位为零时, 正弦量变化到取零值的状态, (从负变正), 当相位为 90° 时, 正弦量变化到取正最大值的状态等等。

振幅 E_m 、角频率 ω (或频率 f 或周期 T) 和初相角 φ_0 是表示一个正弦交流电的三要素。振幅和频率与计时起点的选择无关, 而初相大小却与时间零点的选择有关。

三、交流电的最大值、有效值和平均值的关系

前面讲过, 正弦量在一个周期中所能达到的最大数值, 叫做正弦量的最大值。最大值虽然在某种程度上可以表征正弦量的大小, 但是在计算电功率时却尚嫌不够方便, 为了简化电功率的计算公式, 习惯上又引入有效值的概念。我们先用灯泡为例来说明。

说到灯泡, 立刻就会提出这样的问题: 流过灯泡的电流不断变化, 为什么看不出灯泡会一亮一暗呢? 我们说, 这是由于电流变化太快的缘故, 当电流变小时, 灯丝还来不及变冷, 电流又变大了, 所以灯丝总是热的, 也就是说, 灯泡的亮度是电功率按时间平均的效果。除了灯泡之外, 对于电炉、电烙铁、电动机及其他许多用电设备, 有实用意义的也常常是功率的平均值, 因此我们可以从交流电的热效应(亦即从电阻发热的功率)上看, 某个交流电与多大的直流电相当。从交流电与直流电发热相当的观点所规定的交流电的大小叫做交流电的有效值, 因此我们规定: 如果一个交流电通过一个电阻, 在一周期的时间内所产生的热量和某一直流电通过

同一电阻,且在相同时间内所产生的热量相等,那么这个直流电流的量值就叫做该交流电流的有效值。例如,某一交流电流通过一个电阻,在 T 时间内产生热量为 Q ,如果改用5安培的直流电流通过这个电阻,在 T 时间内也产生相同的热量,那么,这个交流电流的有效值就是5安培。

正弦交流电的有效值与最大值的关系可以用数学方法推导出来。设通过电阻 R 的交流电 $i = I_m \sin \omega t$,则在 dt 时间内产生的热量是 $dQ = i^2 R dt$,这是因为在极短时间 dt 内,交流电变化甚微,可以认为流经 R 的电流的瞬时值 i 是恒定的,所以可用直流电公式计算。在一周期 T 内所产生的热量是

$$Q = \int_0^T dQ = \int_0^T i^2 R dt = R \int_0^T i^2 dt \quad (1-1-9)$$

如果有直流电流 I 通过同一电阻,在同一时间 T 内所产生的热量为

$$Q' = I^2 RT$$

若 $Q' = Q$,则

$$I^2 RT = R \int_0^T i^2 dt$$

由此式得,交流电的有效值可表示为瞬时值的方均根值:

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt}$$

若为正弦交流电,以 $i = I_m \sin \omega t$ 代入上式,则

$$\begin{aligned} I &= \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T I_m^2 \sin^2 \omega t dt} = I_m \sqrt{\frac{1}{2T} \int_0^T (1 - \cos 2\omega t) dt} \\ &= I_m \sqrt{\frac{1}{2T} \left(t - \frac{\sin 2\omega t}{2\omega} \right) \Big|_0^T} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} = 0.707 I_m \end{aligned} \quad (1-1-10)$$

亦即正弦交流电的有效值等于最大值的 $\frac{1}{\sqrt{2}}$ 倍,有效值通常都用

大写字母来表示,即电流用 I , 电压用 U , 电动势用 E 表示。同理, 正弦电压和正弦电动势的有效值分别为

$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}} = 0.707U_m \quad (1-1-11)$$

$$E = \frac{E_m}{\sqrt{2}} = 0.707E_m \quad (1-1-12)$$

有效值和最大值都是反映电流强弱或电压高低的物理量, 在应用中将视实际需要选用其中一个来讨论问题。在计算平均功率时, 用有效值比较方便; 在选择电容器的工作电压时, 却必须考虑加在这个电容器上的实际电压的最大值。例如并联在有效值为 220 伏的电源上的电容器, 其工作电压必须大于 $\sqrt{2} \times 220 = 311$ 伏, 否则在电压达到最大值 311 伏的一瞬间就可能把它击穿。一般来说, 对于电流、电压和电动势等正弦量, 有效值比最大值用得更多, 平常说到交流电流、电压和电动势等正弦量, 如无特别说明, 一律是指有效值。比如, 我们说日常用的电压是 220 伏、380 伏, 就是指有效值而言。万用表的交流档以及一般的交流电流表和电压表的读数也都是反映有效值。

下面再谈谈交流电的平均值。因为正弦交流电正半周和负半周是对称的, 正、负半周所包含的面积相同(图 1-1-6), 所以在整个周期中交流电的平均值为零, 故这样的平均值没有什么意义。但是如果先取其绝对值, 然后求平均值, 则是有意义的(这种绝对值的平均值又叫均绝值, 正弦交流电的平均值通常都是指这种均绝值)。因此, 欲求交流电流的平均值, 只要取其正半周的平均值即可, 如图 1-1-6 所示, i 的平均值为

$$I_{Fj} = \frac{\int_0^{\frac{T}{2}} i dt}{\frac{T}{2}} = \frac{2}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} I_m \sin \omega t dt$$

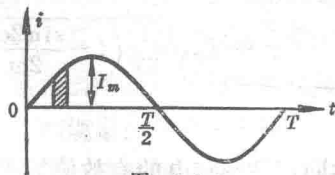


图 1-1-6

$$= \frac{2}{\pi} I_m = 0.637 I_m \quad (1-1-13)$$

因 $I_m = \sqrt{2} I$, 故平均值与有效值的关系为

$$I_{pj} = \frac{2}{\pi} \sqrt{2} I = 0.9 I \quad (1-1-14)$$

由此可见, 正弦交流电的平均值稍小于其有效值, 等于有效值的 0.9 倍, 而等于最大值的 0.637 倍。

同理, 正弦电压和正弦电动势的平均值分别为

$$U_{pj} = \frac{2}{\pi} U_m = 0.9 U \quad (1-1-15)$$

$$E_{pj} = \frac{2}{\pi} E_m = 0.9 E \quad (1-1-16)$$

四、交流电动势的正方向

前面讲过, 交流电的特点是它的大小和方向均随时间作周期性变化。怎样表示交流电的方向呢? 下面就来讨论这个问题。

在电路图中, 我们常常用图 1-1-7 的符号表示图 1-1-2 所示的交流发电机模型, 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, 我们先取 $\varphi_0 = 0$, 则由式(1-1-3)可得

$$e = E_m \sin \omega t \quad (1-1-17) \quad \text{图 1-1-7}$$

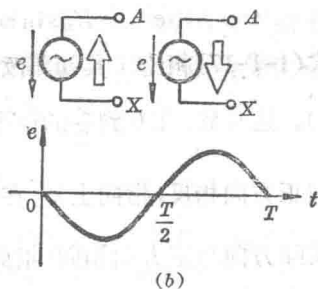
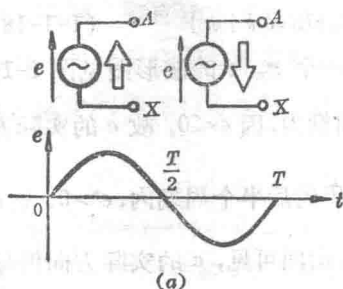
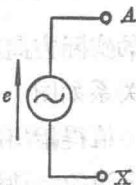


图 1-1-8

其波形如图 1-1-8(a) 所示。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、负值代表什么意思呢?

如果我们没有一个事先的规定, 那么正、负就没有明确的意义。因此, 若要用正、负号来表示电动势在某一瞬间的实际方向, 就必须预先选定一个正方向作为参考, 称为参考正方向或简称正方向。

正方向必须满足下面的规定: 当电动势 e 取正值时, 其实际方向与正方向相同; 当电动势 e 取负值时, 其实际方向与正方向相反。

这样一来, 电动势的正负号就能清楚地表明某一瞬间电动势的实际方向了。例如在图 1-1-7 中, 在电动势 e 旁边加一个实心的箭头表示电动势的正方向, 并设其正方向向上, (即从 X 指向 A) 那么

在前半个周期内(从 0 到 $\frac{T}{2}$), $e > 0$, 它的实际方向(用空心箭头表示)

与正方向相同(均指向上); 在后半个周期内($\frac{T}{2}$ 到 T), $e < 0$,

它的实际方向应指向下, 与正方向指向相反, 其实际方向与正方向的关系如图 1-1-8(a) 所示。

值得指出的是, 电动势的正方向是可以任意假定的。假如若将上述的电动势正方向改为指向下(即从 A 指向 X, 见图 1-1-8b), 则电动势 e 的表达式(1-1-17)应加一个负号, 即相应改为

$$e = -E_m \sin \omega t = E_m \sin(\omega t + \pi) \quad (1-1-18)$$

与式(1-1-17)相比, 其初相改变了一个 π 。 e 的波形图见图 1-1-8(b)。这时候, 在 0 到 $\frac{T}{2}$ 的前半个周期内, 因 $e < 0$, 故 e 的实际方向

与正方向相反(指向上); 在 $\frac{T}{2}$ 到 T 的后半个周期内, $e > 0$, 故 e

的实际方向与正方向相同(指向下), 由图可见, e 的实际方向仍与图 1-1-8(a) 一致。两种表示方式, 其结果是等效的。