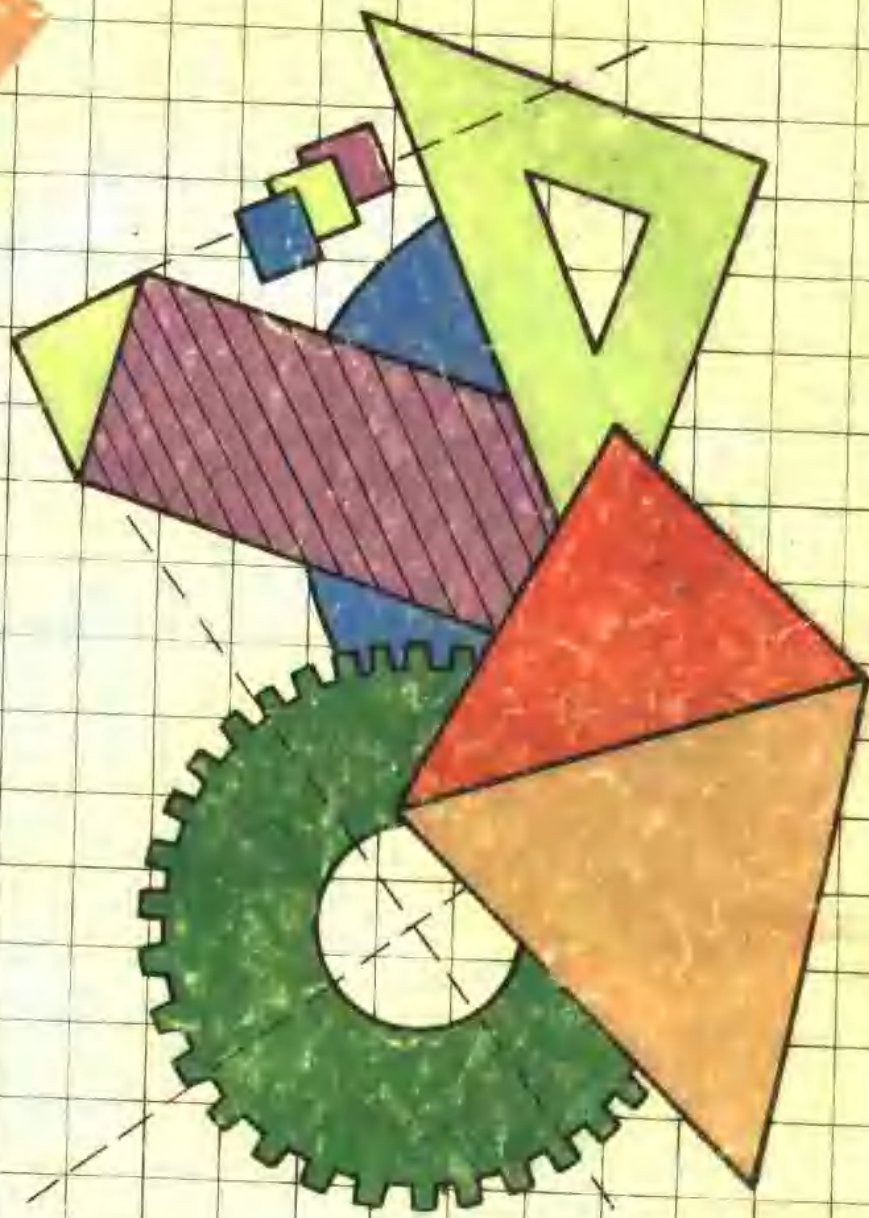


机械工人技术图解系列丛书

宁明栋 高保存 主编

山西科学技术出版社

维修电工



JIXIE GONGREN JI SHU TUXIE XILIE CONG SHU

维修电工

瞿世宏
宁明栋 程跃龙
高保存 石森
主编 王昆玉
编著

山西科学技术出版社

目 录

第一章 电工基础知识	(1)	第六节 电动机的安装与运行	(68)
第一节 直流电路.....	(1)	第七节 三相绕组异步电动机	(74)
第二节 磁与电磁.....	(7)	第五章 直流电动机	(77)
第三节 正弦交流电路.....	(10)	第一节 概述.....	(77)
第四节 三相交流电路.....	(17)	第二节 直流电动机的工作原理.....	(79)
第二章 电工常用工具、仪表	(22)	第三节 直流电动机的分类及机械特性.....	(80)
第一节 电工常用工具.....	(22)	第四节 直流电动机的控制.....	(82)
第二节 常用电工材料.....	(24)	第五节 直流电动机常见故障与排除.....	(85)
第三节 导线的连接.....	(25)	第六章 常用低压电器	(91)
第四节 常用电工仪表.....	(28)	第一节 低压开关.....	(91)
第三章 变压器	(36)	第二节 主令电器.....	(95)
第一节 概述.....	(36)	第三节 熔断器.....	(96)
第二节 变压器的基本结构.....	(38)	第四节 接触器.....	(97)
第三节 变压器的工作原理.....	(41)	第五节 继电器.....	(101)
第四节 几种常见变压器.....	(43)	第六节 常用低压电器的故障分析与维修.....	(108)
第五节 变压器的检查与维护.....	(44)	第七章 三相异步电动机的基本控制线路	(113)
第四章 异步电动机	(48)	第一节 概述.....	(113)
第一节 概述.....	(48)	第二节 电气控制线路原理图的有关知识.....	(113)
第二节 三相异步电动机的结构与铭牌.....	(49)	第三节 三相异步电动机的正转控制线路.....	(114)
第三节 三相鼠笼式异步电动机的工作原理.....	(52)	第四节 三相异步电动机的正反转控制线路.....	(117)
第四节 三相鼠笼式异步电动机的拆卸与装配.....	(56)	第五节 生产机械的位置控制与自动往返的控制线路.....	(122)
第五节 三相鼠笼式异步电动机的故障排除.....	(60)		

第六节	两台电动机的联动控制线路.....	(124)
第七节	三相异步电动机的降压启动控制线路.....	(125)
第八节	线绕式异步电动机的启动和调速.....	(131)
第九节	三相异步电动机的制动控制线路.....	(134)
第八章	常用生产机械控制线路.....	(142)
第一节	车床控制线路.....	(142)
第二节	钻床控制线路.....	(145)
第三节	磨床控制线路.....	(151)
第四节	万能铣床控制线路.....	(160)
第五节	镗床控制线路.....	(168)
第六节	皮带运输机控制线路.....	(175)
第七节	桥式起重机械控制线路.....	(178)

第八节	怎样看电气安装接线图.....	(184)
第九节	机床电气维修.....	(187)
第九章	直流电动机的基本控制线路.....	(192)
第一节	概述.....	(192)
第二节	他励直流电动机的启动控制线路.....	(192)
第三节	他励直流电动机的正反转动控制线路.....	(194)
第四节	他励直流电动机的制动控制线路.....	(195)
第五节	他励直流电动机的调速控制线路.....	(196)
第十章	输配电及安全用电.....	(200)
第一节	发电、输电和配电概况.....	(200)
第二节	安全用电.....	(201)
附录	常用电器、电机符号.....	(206)

第一章 电工基础知识

第一节 直流电路

一、电流的形成与电流的方向

在很多金属原子中,最外层轨道上的电子,距离原子核较远,受原子核的束缚力很小,很容易从轨道上挣脱出来成为自由电子。

如图 1-1 所示,铜原子核外有 29 个电子,它们有规则地分布在 4 层轨道上。这样在金属导体中就存在着大量的自由电子,这些自由电子在金属内部做着紊乱的、无规则的运动。

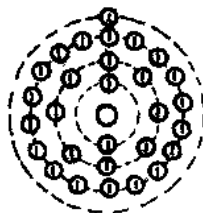


图 1-1 铜原子

当我们把金属导体和一个电池接成闭合电路时,导体中自由电子就会受到电池负极的排斥和正极的吸引,驱使它们朝着电池正极运动,如图 1-2 所示。自由电子的这种有规则的运动,就形成了金属导体中的电流。在这里,自由电子带负电荷,担负着运载电荷的使命,所以我们常把这种自由电子流动的方向称为电子流的方向,自由电子称为“载流子”。

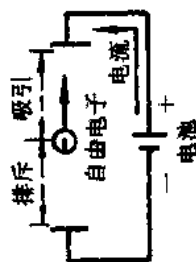


图 1-2 导体中的自由电子受到电池负极的排斥和正极的吸引

按理说,电流的流动方向与电子流动的方向应该是一致的,但

由于历史性错误,实际上我们所规定的电流方向却与电子流动的方向相反,如图 1-3 所示。这是因为从前人们对电流缺乏本质认识,认为电流是从电源的正极流向负极,因而确定的电流流动的方向与电子流动的实际方向刚好相反。由于习惯上一直沿用旧的规定,因此,现在规定的电流流动的方向仍然是从电源的正极流向负极。

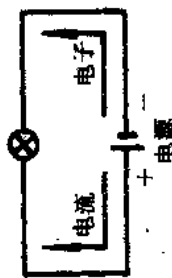


图 1-3 电流的方向

二、电流的大小

电流的大小取决于在一定时间内通过导体横截面的电荷量的多少,用电流强度来衡量。

若在 t 秒内通过导体横截面的电量是 Q 库仑,则导体中的电流强度 I 就可按下式表示

$$I = \frac{Q}{t} \quad (1-1)$$

式中 I : 电流强度,单位是安培(A)。

若在 1 秒内通过导体横截面的电量是 1 库仑,则导体中的电流强度就是 1 安培,简称安。除安培以外,常用的电流强度单位还有千安(kA)、毫安(mA)和微安(μA),换算关系如下:

$$1 \text{ 微安}(\mu A) = 10^{-3} \text{ 毫安}(mA) = 10^{-6} \text{ 安}(A)$$

在实际中,人们为了方便常把电流强度简称为电流。这样电流这一名词不但表示一种物理现象,而且也代表一个物理量。

电流又分为两大类：直流电与交流电。凡方向不随时间变化的电流都称为直流电，而大小和方向都不随时间变化的电流称为恒定直流电；凡大小和方向随时间不断变化的电流为交流电。

三、电路的组成

电流所流过的路径称为电路。如图 1—4 所示，一般电路都是由电源、负载、控制器（开关等）和导线 4 个基本部分组成的。电源



图 1—4 电路的组成

灯可将电能转变成光能，电炉可将电能转变成热能，扬声器可将电能转变成声能，而电动机可将电能转变成机械能等。开关是控制电路接通或断开的器件。连接导线担负传输及分配电能的任务。

在图 1—4 所示的电路中，如果将开关 K 打开，电流流不过去，这种情况叫开路或叫断路；把开关 K 闭合，电流就可畅通地流过去，这种情况叫通路；如果在负载 A、B 两点间用一根导线直接连通，没有加负载，这叫短路。电路若出现短路现象，这个电路就发生了故障，轻则烧坏电源，重则引起火灾。

四、电位与电位差

我们在分析电路中的电流时，常常拿它与水流的现象相比拟。如图 1—5 所示，假如有 A、B 两个水桶，水桶下部用管子连通。如果两个水桶的水面一样高，则水管中不会有水流动；只有当水桶的水位一个高、一个低时，

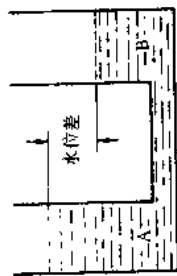


图 1—5 水位差

水才会从水位高的水桶通过连接管流向水位低的水桶。要使水流动，必须要有水位差，有了水位差，也就有了使水流动的压力。所以水位差也叫水压。水位差越大，水流就越急。

同理，为了在电路中产生电流，也需要有电位差，当电路中有电位差存在时，电流就会从高电位点流向低电位点；这两点之间就像有一种电的“压力”存在，这种压力叫“电压”。

这里所说的高电位或低电位是按照什么标准来规定的呢？电位的高低是一个相对的数值，是与一个参考点电位相比较所得到的结果。这正如同我们说一座高山的高度是海拔多少米时，是把海平面的高度作为零米来衡量的。为了确定电路中各点的电位，也要规定一个参考点作为零电位点，在实际中，常取大地作为零电位点。电路中某一点与零电位点之间的电位差（电压），也就是这一点的电位。比零电位点高的是正电位，比零电位低的是负电位。

电压在电路中常用 U 来表示，它的单位是伏特，用字母 V 来表示。电压高时用千伏 (kV) 作单位；电压很低时，则用毫伏 (mV) 或微伏 (μV) 作单位，它们之间的换算关系是：

$$1 \text{ 千伏 (kV)} = 1000 \text{ 伏特 (V)}$$

$$1 \text{ 毫伏 (mV)} = 10^{-3} \text{ 伏特 (V)}$$

$$1 \text{ 微伏 (μV)} = 10^{-6} \text{ 伏特 (V)}$$

我们再看电压与电位的区别。以一只干电池为例，电池两端的电压是 1.5V，这是指电池正极的电位 V_A 与负极电位 V_B 之差，即 $V_A - V_B = 1.5V$ 。在电路中常把负极接地（接地的零电位符号是 $\perp$ 、 $\perp$ 、 $\perp$ ）作为零电位点。这时负极电位 $V_B = 0$ ，正极电位 $V_A = 1.5V$ 。 $V_A - V_B = 1.5 - 0 = 1.5V$ ，电位差（电压）正好是 1.5V。

不能认为凡是带正电的物体都具有高电位，凡是带负电的物体都是低电位。在电路中，当某一元器件的两端都是正电位时，若

六、电阻和电阻率

电流通过导体时,不可避免地会遇到一定的阻力,这种阻力叫做“电阻”。用字母 R 或 r 表示。其单位是欧姆,简称欧。欧姆的符号是“ Ω ”。

除欧姆外,常用的电阻单位有千欧($k\Omega$)和兆欧($M\Omega$),即:

1 千欧($k\Omega$)= 10^3 欧(Ω)

1 兆欧($M\Omega$)= 10^6 千欧($k\Omega$)= 10^9 欧(Ω)

导体的电阻是客观存在的,它不随导体两端电压大小的变化而变化。即使没有电压,导体仍然有电阻。实验证明:在温度一定时,导体的电阻跟导体的长度 l 成正比,跟导体的横截面积 S 成反比,并与导体的材料性质有关。可用下式表示

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad (1-2)$$

式中 ρ : 与材料性质有关的物理量,称为电阻率或电阻系数,其单位是欧米(Ωm);

l : 导体的长度,其单位是米(m);

S : 导体的横截面积,其单位是平方米(m^2)。

表 1-1 列出几种材料在 $20^\circ C$ 时的电阻率。

表 1-1 几种材料在 $20^\circ C$ 时的电阻率

材 料	电阻率(Ωm)	材 料	电阻率(Ωm)
银	1.6×10^{-8}	镍	4.4×10^{-7}
铜	1.7×10^{-8}	康 铜	5.0×10^{-7}
铝	2.9×10^{-8}	铝合金	1.2×10^{-6}
铁	5.3×10^{-8}	电木、塑料	$10^{10} \sim 10^{14}$
橡胶	1.0×10^{-7}	橡 胶	$10^{13} \sim 10^{16}$

由表 1-1 可以看出,纯金属的电阻率很小,绝缘体的电阻率很大;银的导电性能最好。由于银的价格昂贵,用它做导线很不经

两点电位不同,这样电流就会从较高的正电位流向较低的正电位。同样,在电路中某一元器件的两端都是负电位时,则电流就会从较低负电位流向更低的负电位。

五、电源电动势

图 1-5 中的两个水桶有水位差时,水就会在管子里流动,但等到两个水桶的水面相平时,水的流动就停止了,为了使水管中的水能继续流动,可以用水泵来维持一定的水位差(水压),如图 1-6(a)所示。为了使电流在电路中持续流动,就需要接入电源,电源就如如同一个推动电子流动的“泵”,如图 1-6(b)所示。在电源内部有一种特殊的力量,它不断地把电子从正极搬运到负极,使正负缺少电子、负极增加电子,以建立并维持一定的电位差(电压)。实质上,电源内部发生的是一种能量的转换过程。在干电池内是把化学能转换成电能,在发电机中是把机械能转换成电能。为了衡量这种不同电源转换能量的本领,我们引入一个叫做电动势的物理量,来表示这种能维持一定电压的作用。由于有电动势(电势)的存在,就能保持电池两端有电压的存在,就能保持电路中有源源不断的电流。电动势通常用字母 E 来表示,单位也是伏特(V)。

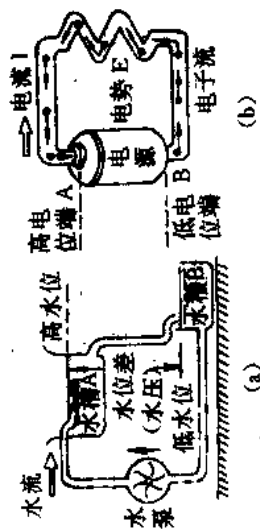


图 1-6 用水泵(电源)来维持一定的水位(电位)差

济,所以民用导线大都采用铜线或铝线。又因铝资源丰富、价格便宜,所以在很多场合下用铝线代替铜线使用。

例如:用康铜丝来绕制一个 10Ω 的电阻,问需要直径为 1mm 的康铜丝多少米?

解:由式 1-2 得

$$l = \frac{RS}{\rho}, \text{ 而 } S = \frac{\pi d^2}{4}$$

查表 1-1 得,康铜的 $\rho = 5 \times 10^{-7} (\Omega \cdot \text{m})$

则需康铜丝的长度为

$$L = \frac{10}{5 \times 10^{-7}} \times \frac{3.14 \times (10^{-3})^2}{4} = 15.7 (\text{m})$$

实验表明:导体的电阻与温度有关。通常,金属的电阻都是随温度的升高而增大。如民用 $220\text{V}40\text{W}$ 白炽灯灯丝不通电时,其电阻约为 100Ω ,而正常发光时的灯丝电阻却高达 1210Ω 。而有些物体的电阻是随温度升高而减小的,如半导体、电解液等。

七、欧姆定律

在导体两端加上电压,就能产生电流,电流流过导体,又会遇到阻力。那么,电流、电压和电阻这三个电学量之间究竟存在着什么关系呢? 1827 年德国科学家欧姆经过多次实验,得出实验定律——欧姆定律:流过导体的电流与这段导体两端的电压成正比,与这段导体的电阻成反比,其数学式为

$$I = \frac{U}{R}, \text{ 或 } R = \frac{U}{I}, U = IR \quad (1-3)$$

式中

I : 导体中的电流(A);

U : 导体两端的电压(V);

R : 导体的电阻(Ω)。

例如:在 100Ω 电阻的两端加上 220V 的电压,求流过电阻的电流为多少安培?

解:由式 1-3 得

$$I = \frac{U}{R} = \frac{220}{100} = 2.2 (\text{A})$$

八、电阻的串联与并联

两个或两个以上的电阻依次相连,中间无分支的连接方式叫电阻的串联。如图 1-7 所示。

串联电路有以下性质。

(1) 串联电路中流过每个电阻的电流都相等,即

$$I = I_1 = I_2 = \dots = I_n \quad (1-4)$$

式中脚标 1、2、……、 n 分别代表第 1、第 2、……、第 n 个电阻(以下相同)。

(2) 串联电路两端的总电压等于各电阻两端的电压之和,即

$$U = U_1 + U_2 + \dots + U_n \quad (1-5)$$

(3) 串联电路的等效电阻(总电阻)等于各串联电阻之和,即

$$R_g = R_1 + R_2 + \dots + R_n \quad (1-6)$$

根据欧姆定律 $U_g = IR_g$, $U_1 = I_1 R_1$, $U_n = I_n R_n$ 及性质(1)可得

$$\frac{U_1}{U_n} = \frac{R_1}{R_n} \quad \frac{U_n}{U_g} = \frac{R_n}{R_g} \quad (1-7)$$

上式表明,在串联电路中,电压的分配与电阻成正比,即阻值越大的电阻分配到的电压越大;反之电压越小。

两个或两个以上电阻接在电路中相同的两点之间的连接方式,叫做电阻的并联,如图 1-8 所示。

并联电路有以下性质。

(1) 并联电路中各电阻两端的电压相

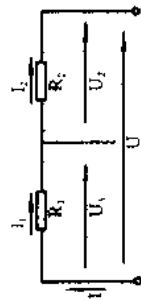


图 1-7 电阻串联



图 1-8 电阻并联

等,且等于电路两端的电压,即

$$U = U_1 = U_2 = \dots = U_n \quad (1-8)$$

(2) 并联电路中的总电流等于各电阻中的电流之和,即

$$I = I_1 + I_2 + \dots + I_n \quad (1-9)$$

(3) 并联电路的等效电阻(即总电阻)的倒数等于各并联电阻的倒数之和,即

$$\frac{1}{R_g} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n} \quad (1-10)$$

显然,并联电路中的总电阻一定比任何一个并联电阻的阻值小。

如图 1-8 所示电路中,总电阻由式 1-10 可得

$$R_g = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} \quad (1-11)$$

根据并联电路的性质(1)可得

$$\frac{I_1}{I_n} = \frac{R_n}{R_1} \quad \frac{I_n}{I} = \frac{R}{R_n} \quad (1-12)$$

上式表明,在并联电路中,电流的分配与电阻成反比,即阻值越大的电阻所分配到的电流越小,反之越大。

九、电功与电功率

电流流过用电器时,用电器就将电能转换成其它形式的能,如磁能、热能、光能、机械能等。我们把电能转换成其它形式的能,叫做电流做功,也称电功。电流在一段电路上所做的功,与这段电路两端的电压、流过的电流以及通电的时间成正比,即

$$\text{电流所做功} = \text{电压} \times \text{电流} \times \text{时间}$$

其数学式为

$$W = U \cdot I \cdot t = I^2 R t = \frac{U^2}{R} t \quad (1-13)$$

在上式中, W 代表电流所做的功。如果电压单位为伏特,电流单位为安培,时间单位为秒,则电功单位为焦耳,简称焦,用字母 J

表示。

电流在 1 秒钟内所做的功叫做电功率,用字母 P 表示,其数学式为

$$P = \frac{W}{t} = U \cdot I = I^2 \cdot R = \frac{U^2}{R} \quad (1-14)$$

在上式中,若电功单位为焦耳,时间单位为秒,则电功率的单位为焦耳/秒。焦耳/秒又叫瓦特,简称瓦,用字母 W 表示。

在实际工作中,电功率的常用单位还有千瓦(kW)、毫瓦(mW)等,它们的换算关系如下:

$$1 \text{ 千瓦}(kW) = 10^3 \text{ 瓦}(W)$$

$$1 \text{ 毫瓦}(mW) = 10^{-3} \text{ 瓦}(W)$$

例如,某电视机的功率为 $30W$,平均每天开机 2 小时,若每小时($kW \cdot h$)电费为人民币 0.24 元,则一年(以 365 天计算)要交纳多少电费?

解:电视机一年内消耗的电量为

$$30 \times 2 \times 365 = 21.9(kW \cdot h)$$

则一年的电费为

$$21.9 \times 0.24 = 5.265(\text{元})$$

电流通过导体时使导体发热的现象叫电流热效应。换言之,电流的热效应就是电能转换成热能的效应。

在生产生活中,根据电流的热效应,可以制成电烙铁、电烤箱等电气产品。但电流的热效应也有其不利的一面,如电流的热效应会使电路中不简要发热的地方(如导线、线圈)也发热,不但消耗电能,而且会使用用电设备的温度升高,加速绝缘材料老化,甚至烧坏设备,所以必须高度重视。

任何电气元件和设备在工作时都会发热。为保证电气元件和设备能长期安全工作,都规定有一个最高工作温度。很显然,工作

温度取决于发热量,发热量又取决于电流、电压或电功率。我们把元器件和设备安全工作时所允许的最大电流、电压和电功率分别叫做它们的额定电流、额定电压和额定功率。一般电器元件和设备的额定值都标在明显位置。

通常我们把元器件或设备在额定功率下的工作状态叫做额定工作状态,也叫满载;低于额定功率的工作状态叫轻载;高于额定功率的工作状态叫做过载或超载。由于过载或超载很容易烧坏电器,所以一般情况都不允许出现过载。

十、基尔霍夫定律

在简单电路(能用串联、并联的方法简化、分析与计算的电路)中要求出电流、电压或电阻,可用欧姆定律计算,在复杂电路(不完全能用串、并联的方法加以简化计算的电路)中就要应用基尔霍夫定律来分析计算。

1. 基尔霍夫第一定律(节点电流定律)

在电路中有3根或3根以上的导线接在一个节点上,那么,流入节点的电流的代数和,必然等于从该节点流出电流的代数和,或者说在电路中流经任一节点的电流的代数和等于零,这就是基尔霍夫第一定律或叫基尔霍夫电流定律,其数学式为

$$\sum I_A = \sum I_B \quad (1-15)$$

$$\sum I = 0 \quad (1-16)$$

式中 $\sum I_A$: 流入节点的电流代数和;

$\sum I_B$: 流出节点的电流代数和;

$\sum I$: 流经节点的电流代数和。

通常我们把式1-15、式1-16叫做基尔霍夫节点电流方程。

如图1-9所示电路,列出其求解的节点电流方程。

根据基尔霍夫定律,列写节点A的电流方程如下

$$\sum I_A = I_1 + I_2$$

$$\sum I_{出} = I_3$$

则方程为

$$I_1 + I_2 = I_3$$

注意:在列节点电流方程之前首先要标定各支路的电流方向。即对已知电流,按实际方向在图中标出,对未知电流的方向可任意标定。待全部支路电流方向标定后,就可列出节点电流方程进行计算。最后根据计算结果来确定未知电流的实际方向。即计算结果为正,支路未知电流的实际方向与标定方向相同;反之相反。在电路中,m个节点,只需列出m-1个方程即可。如图1-9中只有2个节点,故只能列出一个节点电流方程。

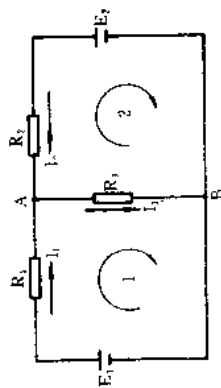


图1-9 复杂电路

2. 基尔霍夫第二定律(回路电压定律)

在任何一闭合回路中,所有电动势的代数和等于回路中各个电阻上电压降的代数和。其数学式为

$$\sum E = \sum IR \quad (1-17)$$

式中

$$\sum E = E_1 + E_2 + \dots; \text{回路中所有电动势的代数和};$$

$$\sum IR = I_1 R_1 + I_2 R_2 + \dots; \text{回路中各电阻上电压降之和}。$$

通常式1-17叫做基尔霍夫回路电压方程。

用基尔霍夫第二定律列回路电压方程步骤如下。

(1) 确定回路电压方程的回路。对于n条支路,m个节点的复杂电路,只需列出n个方程联立求解,由于已列出m-1个方程,所以基尔霍夫第二定律列方程数目为:n-(m-1)。如图1-9所示电路有3条支路、2个节点,故只需列出3个方程即可求解。

(2) 确定回路方向(任意选择,可顺时针,可逆时针),同时在电路图中标出。如图1-9所示。

(3) 列写回路电压方程。凡与回路方向一致的电流所在电阻上的电压降，在方程中用正号，反之取负号；凡与回路方向一致的电动势在方程中取正号，反之取负号。

如图 1-9，可列出方程如下

$$\begin{aligned} E_1 &= I_1 R_1 + I_3 R_3 \\ -E_2 &= -I_2 R_2 - I_3 R_3 \end{aligned}$$

如图 1-9 所示，若已知： $R_1=1\Omega$ ， $R_2=4\Omega$ ， $R_3=1\Omega$ ， $E_1=18V$ ， $E_2=9V$ ，求各支路电流。

解：由前列节点电流方程

$$I_1 + I_2 = I_3 \quad (1)$$

由前列回路电压方程

$$E_1 = I_1 R_1 + I_3 R_3 \quad (2)$$

$$-E_2 = -I_2 R_2 - I_3 R_3 \quad (3)$$

代入已知数，联(1)、(2)、(3)方程求解得

$$I_1 = 6(A), \text{ 电流方向与标定方向相同；}$$

$$I_2 = -3(A), \text{ 电流方向与标定方向相反；}$$

$$I_3 = 3(A), \text{ 电流方向与标定方向相同。}$$

第二节 磁与电磁

一、电流的磁场

远在 2000 多年前，我国人就发现了某种天然矿石 (Fe_3O_4) 能够吸引铁，并把它称做吸铁石，我国是世界上最早发明指南针并应用于航海的国家。

1. 磁的基本知识

(1) 磁性：能吸引铁、镍、钴等金属或它们的合金的性质。

(2) 磁体：具有磁性的物体就叫磁体。一般分为天然磁体与人

造磁体两大类。如图 1-10 所示。

(3) 磁极：磁体上磁性最强的部位。任何磁体都具有两个磁极，无论怎样把磁体分割开来，而所得的磁体总保持两个极——南极(用 S 表示)、北极(用 N 表示)。

磁极间相互作用的规律是：同性相斥，异性相吸。

(4) 磁力：磁极间的相互作用的力。

(5) 磁场：磁极周围存在的一种物理场。它具有力和能的特性。

(6) 磁力线：为形象描述磁场强弱和方向而引入的假想曲线。如图 1-11 所示，它具有以下几个特点。

① 磁力线是不互相交叉的闭合曲线；在磁体外部由 N 极指向 S 极，在磁体内部由 S 极指向 N 极。

② 磁力线上任意一点的切线方向，就是该点磁场方向(即小磁针 N 极的指向)。

③ 磁力线越密磁场越强，磁力线越疏磁场越弱。

2. 电流的磁场

在电流周围存在着磁场，我们把它叫做电流的磁效应。

电流与其产生的磁场方向可用安培定则来判断。一般可分两种情况来使用。

(1) 直线电流产生的磁场。如图 1-12 所示，以右手拇指的指向表示电流方向，弯曲四指的指向即为磁场方向。



图 1-11 磁力线

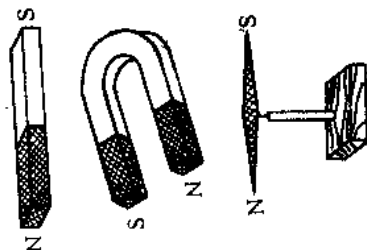


图 1-10 人造磁体 周围存在的一种物理场。

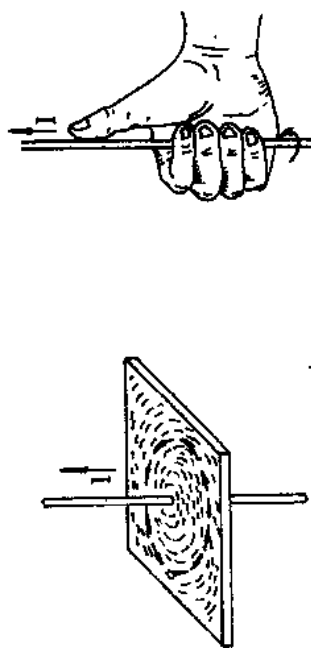


图 1—12 直线电流产生的磁场

(2) 环形电流产生的磁场。如图 1—13 所示,以右手弯曲的四指表示电流方向,则拇指所指的方向为磁场方向。

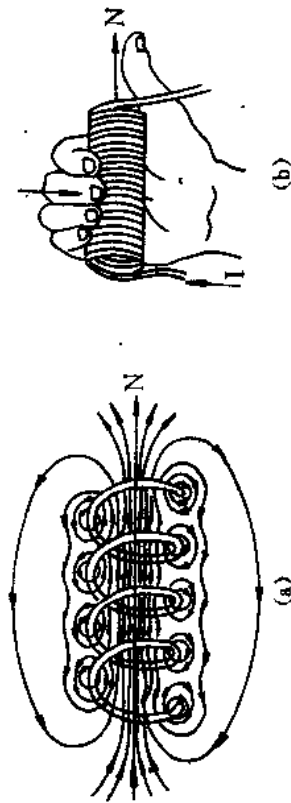


图 1—13 环形电流产生的磁场

二、磁场对电流的作用

1. 磁场对通电直导体的作用

如图 1—14(a)所示,在蹄形磁铁的两极中悬挂一根直导体,并使直导体与磁力线垂直。当导体中没有电流流过时,导体静止不

动;当电流流过导体时,导体就会向磁体内部移动,若改变电流流向,则导体向相反方向移动。不难看出,导体移动的原因是导体中电流受到磁场的作用力,通常把这种作用力叫电磁力。

电磁力的方向可用左手定则来判断。如图 1—14(b)所示,平伸左手,使拇指垂直其余四指,手心正对磁场的 N 极,四指指向表示电流方向,则拇指的指向就是通电导体的受力方向。

实验证明:通电导体在磁场中受到的电磁力的大小与导体在磁场中的有效长度(即垂直磁力线的长度)、导体中的电流以及磁场强度成正比。

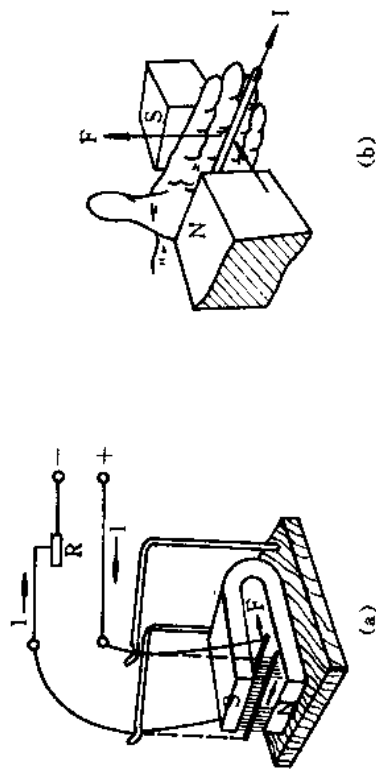


图 1—14 通电导体在磁场中受到电磁力作用

2. 磁场对通电线圈的作用

由于磁场对通电直导体有作用力,因此磁场对通电线圈也应有力。如图 1—15 所示,在磁场中,放一矩形通电线圈 $adcb$ 。当线圈平面与磁力线平行时,因 ab 和 dc 边与磁力线平行,不受力; ad 和 bc 边与磁力线垂直而受到力的作用。根据左手定则可知 ad 和 bc 边的受力方向是一上一下而构成一对力偶。线圈在这对力偶的作用下,将绕轴线 OO' 做顺时针方向转动。

当线圈平面与磁力线垂直时,线圈受到的转矩为零。

由此可见,通电线圈在磁场中,磁场总是使线圈平面转到与磁力线相垂直的位置上。

图 1—15 所示就是一个单匝线圈的直流电动机原理图。实际使用的直流电动机是较复杂的。

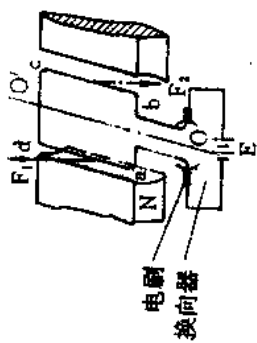


图 1—15 磁场对通电线圈的作用

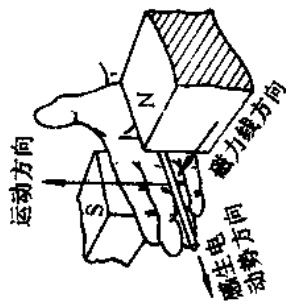
三、电磁感应

当导体相对于磁场运动而切割磁力线,或线圈中磁场发生变化时,在导体或线圈中都会产生电动势;若导体或线圈是闭合电路的一部分,则导体或线圈中将产生电流,这种现象称为电磁感应。由电磁感应引起的电动势叫做感生电动势,由感生电动势引起的电流叫做感生电流。

1. 直导体中产生的感生电动势

如图 1—16 所示,当导体在磁场中静止不动或沿磁力线方向运动时,检流计的指针都不偏转;当导体向下或磁体向上运动时,检流计指针向右偏转一下;当导体向上或磁体向下运动时,检流计指针向左偏转一下。检流计指针的偏转,说明了导体中产生了感生电动势与感生电流。

直导体中产生的感生电动势的方向可用右手定则来判断,如图 1—17 所示:平伸右手,拇指与其余四指垂直,让掌心正对磁场 N 极,拇指指向表示导体的运动方向,则其余四指的指向就是感生电动势的方向。



实验证明:感生电动势与导体切割磁力线的速度、切割导体的有效长度以及磁力线的密度成正比。

图 1—17 右手定则

2. 互感电动势

我们把由一个线圈中的电流发

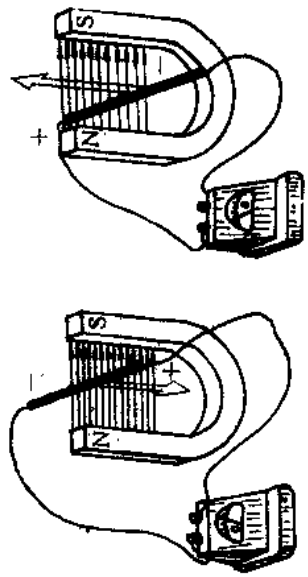


图 1—16 导电路切割磁力线时产生感生电动势和感生电流

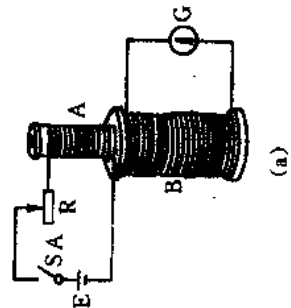


图 1—18 互感实验

生变化在另一线圈中产生的电磁感应叫互感现象,简称互感。由互感产生的感生电动势称为互感电动势。

为了进一步说明互感现象,先观察图 1—18 所示实验。实验分两步进行。

第一步,保持开关为接通状态,快速改变滑动变阻器的阻值,我们将看到检流计的指针在左、右偏转。说明在线圈 B 中产生了感生电动势与感生电流。

第二步,保持滑动变阻器阻值不变,然后接通、打开开关 SA 都将看到检流计指针左、右偏转。同样说明在线圈 B 中产生了感生电动势与感生电流。

以上现象实质上是:线圈 A 中的电流所产生的磁场穿过了 B 线圈;当 A 线圈中的电流变化时,穿过 B 线圈的磁场也跟着发生变化,这个变化的磁场就在 B 中引起了感生电动势、感生电流,使检流计指针发生偏转。

实验证明:互感电动势的大小正比于另一线圈中电流的变化率。计算较复杂,不作介绍。但当第一个线圈的磁通全部穿过第二个线圈时,互感电动势最大;当两个线圈互相垂直时,互感电动势最小。

第三节 正弦交流电路

所谓交流电是指大小和方向都随时间做周期性变化的电动势(电压或电流)。其变化是按正弦规律变化的交流电叫做正弦交流电。

一、正弦交流电动势的产生

正弦交流电动势是由交流发电机产生的,如图 1—19 所示是交流发电机示意图。在静止不动的磁极间装有能转动的圆柱形铁

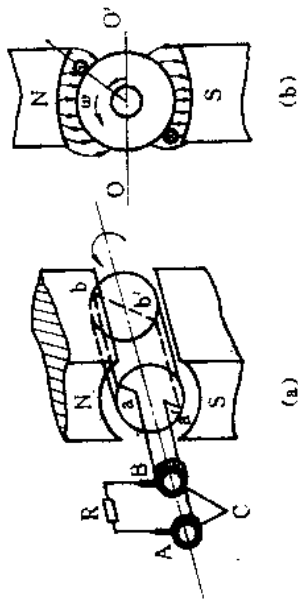


图 1—19 交流发电机示意图

芯,铁芯上紧绕着线圈 $aa'bb'$ 。线圈两端分别连接着两个彼此绝缘的铜环 C,铜环又通过电刷 A、B 与外电路相接。这样当线圈在磁场中沿逆时针方向转动时,线圈中就产生感生电动势。为获得正弦交流电,磁极被设计成特殊形状,如图 1—19(b)所示:在磁极中心处磁场最强,在中心处两侧磁场按正弦规律逐渐减小,在磁极分界面 OO' 处磁场正好为零(此分界面又称中性面)。这样,当线圈在磁场中沿逆时针方向转动时,线圈中必然也产生按正弦规律变化的交流电动势,如图 1—20 所示。其数学式如下

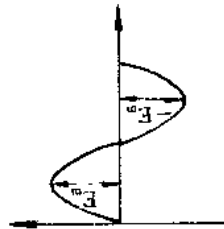


图 1—20 正弦交流电动势的曲线

$$e = E_m \sin \alpha \quad (1-18)$$

式中 e : 正弦交流电动势的瞬时值;
 E_m : 正弦交流电动势的最大值;
 α : 线圈平面与中性面的夹角。

二、正弦交流电的基本特征和三要素

1. 瞬时值

我们把任意时刻正弦交流电的数值称之为瞬时值,分别用字母 e, u, i 表示瞬时电动势、瞬时电压、瞬时电流。瞬时值有正、有负,也可能为零。

2. 最大值

最大的瞬时值称之为最大值(或峰值、振幅)。分别用字母 E_m, U_m, I_m 表示正弦交流电动势、电压、电流的最大值。实际中,最大值有正、有负,但习惯上最大值都以绝对值表示。最大值是交流电的三要素之一。

3. 周期、频率、角频率

(1) 周期。交流电每重复一次所需的时间称为周期,用字母 T 表示,单位是秒(s)。

(2) 频率。交流电 1 秒钟内重复的次数称为频率,用字母 f 表示。其单位是赫兹,简称赫(Hz)。

可见,周期和频率互为倒数,即

$$f = \frac{1}{T} \quad \text{或} \quad T = \frac{1}{f} \quad (1-19)$$

我国工农业及日常生活中使用的交流电其频率为 50Hz(习惯上称为工频),周期为 0.02s。

(3) 角频率(即电角度)。交流电在 1 秒钟内变化的电角度,用字母 ω 表示,其单位是弧度/秒(rad/s)。根据频率、角频率的定义可得

$$\omega = 2\pi f \quad (1-20)$$

$$\text{又: } \omega = \frac{\alpha}{t}, \quad \alpha = \omega t \quad \text{则 1-18 式可改写为}$$

$$e = E_m \sin \omega t \quad (1-21)$$

由此可见,1-21 式更加明确地表示了正弦交流电是随时间按正弦规律变化的。

通常把角频率(或频率或周期)称为正弦交流电的三要素之二。

(4) 初相角。我们把正弦交流发电机中,线圈刚开始转动的瞬时($t=0$ 时)线圈平面与中性面的夹角称为初相角,也称初相位或初相。如图 1-21 所示。用字母 φ 表示。则线圈在 t 时刻产生的感生电动势可表示为

$$e = E_m \sin(\omega t + \varphi) \quad (1-22)$$

初相角是正弦交流电的三要素之三。

由此可知; $e = E_m \sin(\omega t + \varphi)$ 中,只有 E_m, ω, φ 三个量确定时,正弦交流电才能被确定。所以称它们为三要素。

例如,已知某正弦交流电动势为 $e = 14.1 \sin(314t + \frac{\pi}{3})$ V。求该正弦交流电动势的三要素各为多少?

解:将已知式与公式 1-22 比较可得

$$E_m = 14.1 \text{ (V)}$$

$$\omega = 314 \text{ (rad/s)}$$

$$f = \frac{\omega}{2\pi} = 50 \text{ (Hz)} \quad T = \frac{1}{f} = 0.02 \text{ (s)}$$

$$\varphi = \frac{\pi}{3} = 60^\circ$$

三、正弦交流电的有效值

交流电的大小是随时间不断变化的,难以取一个数值来作为衡量交流电大小的标准。特别是在比较交流电和直流电的时候就

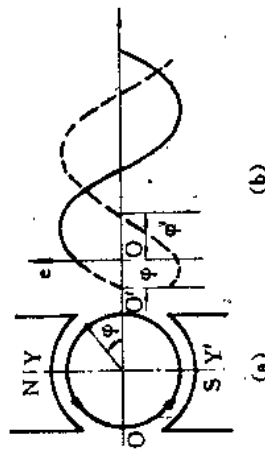


图 1-21 初相角示意图

更難用一個數值來說明問題。為此，必須引入一個既能準確反映交

流電的大小，又方便計算和測量的物理量。通常是根據交流電做功的多少來作為衡量交流電大小的標準，這個標準定義出來的量值就是交流電的有效值。如圖1—22所示，讓交

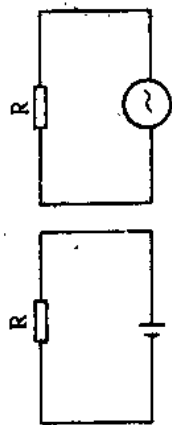


圖1—22 交、直流電熱效應比較圖

流電和直流電分別通過阻值完全相同的電阻，如果在相同的時間中這兩種電流所產生的熱量相等，我們就把此直流電的數值定義為該交流電的有效值。分別用字母 U 、 E 和 I 來表示交流電壓、交流電動勢和交流電流的有效值。

通過計算，正弦交流電的有效值與最大值之間關係如下

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \approx 0.707 I_m \quad (1-23)$$

$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}} \approx 0.707 U_m \quad (1-24)$$

$$E = \frac{E_m}{\sqrt{2}} \approx 0.707 E_m \quad (1-25)$$

特別指出的是，在實際中，若無特殊說明，凡說交流電的大小都是指它的有效值而言。一般儀表測量出的數值都是有效值，一最電器、儀表上所標注的交流電數值也是指有效值而言。顯然，有效值不隨時間變化。

四、單相交流電路

交流電源、用電器、連接導線和開關等組成的電路稱為交流電路。若電源中只有一個交變電動勢，則稱為單相交流電路。

1. 純電阻電路

由交流電源和純電阻性元件組成的電路，稱為純電阻電路（嚴格地講，幾乎沒有純電阻電路存在，但為分析電路的方便，有些電路可以近似地看成純電阻電路）。如白熾燈、電爐、電烙鐵等組成的交流電路。如圖1—23(a)所示。

設加在電阻 R 上的交流電壓為

$$U_R = U_m \sin \omega t$$

式中 U_m ：電壓最大值。

實驗證明，在任一瞬間流過電阻的電流 i 仍可用歐姆定律來計算。即

$$i = \frac{U_R}{R} = \frac{U_m \sin \omega t}{R} = \frac{U_m}{R} \sin \omega t$$

顯然，電流的最大值 I_m 為

$$I_m = \frac{U_m}{R} \quad (1-26)$$

則得出

$$i = I_m \sin \omega t$$

可見，流過電阻的電流與電阻兩端的電壓按同一頻率變化，其波形如圖1—23(b)所示。由圖上可以看出，電流 i 與電壓 U 在同一時刻到達零值，同一時刻到達最大值，即在純電阻電路中，電流與電壓同相位。

把式1—26兩邊同除以 $\sqrt{2}$ 得

$$\frac{I_m}{\sqrt{2}} = \frac{U_m}{\sqrt{2} R}$$

可得電流與電壓的有效值關係是

$$I = \frac{U_R}{R} \quad \text{或} \quad U_R = IR \quad (1-27)$$

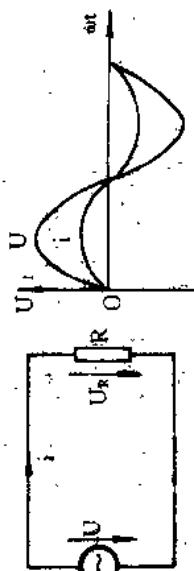


图 1-23 纯电阻电路及其电压、电流波形图

由此可知：在纯电阻电路中，电压与电流有效值仍符合欧姆定律。

2. 纯电感电路

电感是电路中基本元件之一，电机、电器的线圈，日光灯镇流器等都是电感器件。由电感线圈组成的电路，如果它的电阻很小，可以近似地看成是纯电感电路，如图 1-24 所示。

实验证明：电感在直流和交流电路中作用不同。如图 1-25 所示，电灯泡和一个带有铁芯的线圈串联成一电路，如果把它们接到直流电源上，见图 1-25

(a)，电灯泡发出较强的光；如果把它们接到交流电源上，见图 1-25(b)，并且使交流电压(有效值)和直流电压相同，电灯泡发出的光比刚才要弱得多。这表明，电感线圈对交流电有阻碍作用，这种阻碍作用叫做电感的感抗，常用符号“ X_L ”表示，其单位是欧姆(Ω)。

实验证明：感抗 X_L 与电感量 L 成正比，与交流电的频率成正比

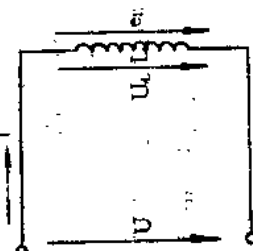


图 1-24 纯电感电路

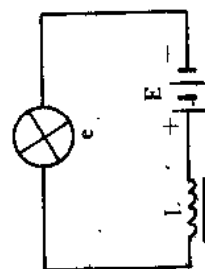


图 1-25 纯电感电路对交、直流电的作用

式 中 L ：电感量(电感量与线圈匝数、几何形状以及线圈中的媒质有关)，单位为亨利(H)。

$$X_L = \omega L = 2\pi fL \quad (1-28)$$

由式 1-28 可知：电感线圈对交流电的阻碍作用大，而对直流电阻阻碍作用却非常小。

经数学证明：正弦交流电通

过纯电感时，电感两端的电压 U 在相位上比流过电感的电流 i 要超前 90° ，其波形曲线如图 1-26 所示。

设加在电感 L 上的正弦电压是

$$U = U_m \sin \omega t$$

则流过电感的电流是

$$i = I_m \sin(\omega t - 90^\circ)$$

实验证明：电感线圈 L 两端

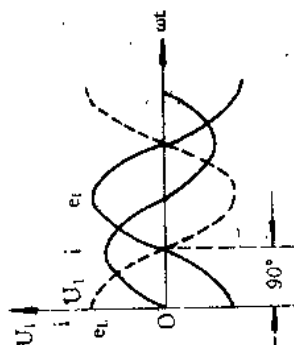


图 1-26 纯电感电路中电流与电压的曲线