

高等学校试用教材

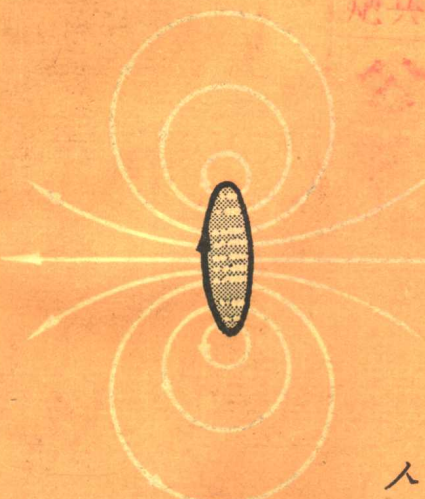
# 电 磁 学

下 册

赵凯华 陈熙谋

炮兵学院大教办公室

物理教研室



人民教育出版社

高等学校试用教材

# 电 磁 学

下 册

赵凯华 陈熙谋

人 民 教 育 出 版 社

本书是由赵凯华、陈熙谋两同志，在北京大学物理系使用的电磁学讲义的基础上，根据1977年10月全国高等学校理科物理教材会议所订的教材编写大纲改编而成的。

本书内容较丰富，较系统地阐述了电磁现象的基本规律和基本概念，收集了较多的思考题和习题。全书分上、下两册。上册内容包括：静电场、静电场中的导体和电介质、稳恒电流、稳恒磁场；下册内容包括：电磁感应和暂态过程、磁介质、交流电、麦克斯韦电磁理论和电磁波、电磁单位制。

本书可作为高等学校物理专业电磁学课程试用教材，也可供其它专业有关教师、学生参考。

## 简装本说明

目前850×1168毫米规格纸张较少，本书暂以787×1092毫米规格纸张印刷，定价相应减少20%。希鉴谅。

# 电 磁 学

下 册

赵凯华 陈熙谋

•  
人民教育出版社出版  
新华书店北京发行所发行  
河北新华印刷一厂印装

•  
1978年7月第1版 1979年5月第2次印刷  
书号 13012·0128 定价 0.90元

# 目 录

## 下 册

第五章 电磁感应和暂态过程 .....	1
§ 1 电磁感应定律 .....	( 1 )
1.1 电磁感应现象(1) 1.2 法拉第定律(5) 1.3 楞次定律(10) 1.4	
涡电流和电磁阻尼(12) 1.5 趋肤效应(15)	
思考题(18) 习题(19)	
§ 2 动生电动势和感生电动势 .....	( 22 )
2.1 动生电动势(22) 2.2 交流发电机原理(25) 2.3 感生电动势 涡	
旋电场(28) 2.4 电子感应加速器(30)	
思考题(32) 习题(33)	
§ 3 互感和自感 .....	( 35 )
3.1 互感系数(35) 3.2 自感系数(38) *3.3 两个线圈串联的自感系	
数(43) 3.4 自感磁能和互感磁能(44)	
思考题(47) 习题(48)	
§ 4 暂态过程 .....	( 50 )
4.1 $LR$ 电路的暂态过程(51) 4.2 $RC$ 电路的暂态过程(54) *4.3 微	
分电路和积分电路(56) 4.4 $LCR$ 电路的暂态过程(59)	
思考题(61) 习题(62)	
§ 5 灵敏电流计和冲击电流计 .....	( 65 )
5.1 灵敏电流计(65) *5.2 冲击电流计(70)	
思考题(77)	
附录 B 二阶线性常系数微分方程 .....	( 78 )

## 第六章 磁介质 .....82

### § 1 分子电流观点 ..... (82)

1.1 磁介质的磁化 磁化强度矢量  $M$  及其与束缚电流的关系(82) 1.2 介质内的磁感应强度  $B$ (89) 1.3 磁场强度矢量  $H$  与有磁介质时的安培环路定理和“高斯定理”(90)

习题(93)

### \*§ 2 等效的磁荷观点 .....(94)

\*2.1 磁的库仑定律 磁场强度矢量  $H$  磁偶极子(94)

\*2.2 介质的磁化 磁极化强度矢量  $J$  及其与磁荷的关系(98)

\*2.3 退磁场与退磁因子(100) \*2.4 两种观点的等效性(103)

习题(110)

### § 3 介质的磁化规律 .....(113)

3.1 磁化率和磁导率(113) 3.2 顺磁质和抗磁质(115) 3.3 铁磁质的磁化规律(120) 3.4 磁滞损耗(125) 3.5 铁磁质的分类(127) 3.6 铁磁质的微观结构(130)

习题(132)

### § 4 边界条件 磁路定理 .....(135)

4.1 介质的边界条件(135) 4.2 磁感应线在边界面上的“折射”(137)

4.3 磁路定理(138) 4.4 磁屏蔽(144)

习题(146)

### § 5 磁场的能量和能量密度 .....(150)

习题(153)

## 第七章 交流电 .....155

### § 1 交流电概述 .....(155)

1.1 各种形式的交流电(155) 1.2 描述简谐交流电的特征量(158)

习题(161)

### § 2 交流电路中的元件 .....(162)

2.1 概述(162) 2.2 交流电路中的电阻元件(163) 2.3 交流电路中的电容元件(164) 2.4 交流电路中的电感元件(166) 2.5 小结(169)

思考题(170) 习题(171)

• 2 •

§ 3 元件的串联和并联(矢量图解法)·····	(172)
3.1 用矢量图解法计算串、并联电路(172)	
3.2 用矢量图解法计算同频简谐量的迭加(173)	
3.3 串联电路(175)	
3.4 并联电路(178)	
*3.5 串、并联电路的应用(旁路、相移、滤波) (180)	
思考题(184) 习题(185)	
§ 4 交流电路的复数解法·····	(189)
4.1 用复数法计算同频简谐量的迭加(190)	
4.2 复电压、复电流及复阻抗的概念(191)	
4.3 串、并联电路的复数解法(192)	
*4.4 复导纳(196)	
4.5 交流电路的基尔霍夫方程组及其复数形式(197)	
*4.6 等效电源定理和Y- $\Delta$ 阻抗代换公式的运用(201)	
*4.7 有互感的电路计算(205)	
思考题(207) 习题(208)	
§ 5 交流电的功率·····	(211)
5.1 瞬时功率与平均功率 有效值和功率因数(211)	
5.2 有功电流与无功电流 提高功率因数的第一个作用(215)	
5.3 视在功率和无功功率 提高功率因数的第二个作用(217)	
5.4 有功电阻和电抗(219)	
*5.5 电导与电纳(222)	
5.6 品质因数( $Q$ 值)、损耗角( $\delta$ )和耗散因数( $\tan\delta$ )(223)	
思考题(226) 习题(227)	
§ 6 谐振电路与 $Q$ 值的意义·····	(229)
6.1 串联谐振现象 谐振频率和位相差(229)	
6.2 储能与耗能和 $Q$ 值的第一种意义(232)	
6.3 频率的选择性和 $Q$ 值的第二种意义(235)	
6.4 电压分配和 $Q$ 值的第三种意义(238)	
* 6.5 阻尼振荡和 $Q$ 值的第四种意义(241)	
6.6 并联谐振电路(242)	
思考题(244) 习题(245)	
§ 7 交流电桥·····	(245)
7.1 基本原理(245)	
7.2 几种常用的交流电桥(247)	
思考题(250) 习题(250)	
§ 8 变压器原理·····	(251)
8.1 理想变压器(251)	
8.2 变比公式(252)	
8.3 输入和输出等效电路(256)	
8.4 阻抗的匹配(259)	
8.5 变压器的用途(260)	
思考题(261) 习题(263)	

§ 9 三相交流电 ..... (264)

9.1 什么是三相交流电 相电压与线电压(264) 9.2 三相电路中负载的联接(267) 9.3 三相电功率(270) 9.4 三相电产生旋转磁场(271)

9.5 三相感应电动机的运行原理、结构和使用(275)

思考题(278) 习题(279)

附录 C 矢量图解法和复数法 ..... (279)

C.1 一维同频简谐量的迭加问题(279) C.2 矢量图解法(281) C.3 复数的基本知识(283) C.4 复数法(285) C.5 小结(287)

**第八章 麦克斯韦电磁理论和电磁波 ..... 289**

§ 1 麦克斯韦电磁理论 ..... (289)

1.1 麦克斯韦电磁理论产生的历史背景(289) 1.2 位移电流(291) 1.3 麦克斯韦方程组(295) \*1.4 边界条件(297)

习题(300)

§ 2 电磁波 ..... (300)

2.1 电磁波的产生和传播(300) 2.2 偶极子发射的电磁波(304) 2.3 电磁波的性质(310) 2.4 光的电磁理论(315) 2.5 电磁波谱(318)

§ 3 电磁波的能流密度与动量 ..... (321)

3.1 电磁波的能流密度(321) \*3.2 电磁场的动量 光压(325) \*3.3 电磁场是物质的一种形态(327)

习题(331)

\*§ 4 似稳电路和迅变电磁场 ..... (331)

\*4.1 似稳条件和集中参量(332) \*4.2 高频时杂散参量的处理(334)

\*4.3 传输线与电报方程(335) \*4.4 微波的特点(339)

习题(340)

附录 D 矢量分析提要 ..... (341)

D.1 标量场和矢量场(341) D.2 标量场的梯度(342) D.3 矢量场的通量和散度 高斯定理(344) D.4 矢量场的环量和旋度 斯托克斯定理(345) D.5 一些公式(347) D.6 矢量场的类别和分解(348) D.7 麦克斯韦方程组的微分形式(349) D.8 平面电磁波的性质(350) D.9 电磁场的能量原理(353)

<b>第九章 电磁学的单位制</b> .....	357
§ 1 单位制和量纲 .....	(357)
1.1 单位制 基本单位和导出单位(357)	
1.2 物理量的量纲式(360)	
§ 2 电磁学的单位制 .....	(361)
2.1 MKSA 有理制(361)	
2.2 高斯单位制(363)	
§ 3 两种单位制中物理公式的转换 .....	(372)
习题(378)	
下册习题答案 .....	(380)



## 第五章 电磁感应和暂态过程

电磁感应现象是电磁学中最重大的发现之一，它揭示了电与磁相互联系和转化的重要方面。它的发现在科学上和技术上都具有划时代的意义。它不仅丰富了人类对于电磁现象本质的认识，推动了电磁学理论的发展；而且在实践上开拓了广泛应用的前途。在电工技术中，运用电磁感应原理制造的发电机、感应电动机和变压器等电器设备为充分而方便地利用自然界的能源提供了条件，在电子技术中，广泛地采用电感元件来控制电压或电流的分配、发射、接收和传输电磁信号；在电磁测量中，除了许多重要电磁量的测量直接应用电磁感应原理外，一些非电磁量也可用之转换成电磁量来测量，从而发展了多种自动化仪表。

本章在电磁感应现象的基础上，逐步深入地讨论电磁感应的规律，以及有关的问题。

### § 1 电磁感应定律

1820年奥斯特的发现第一次揭示了电流能够产生磁。善于抓住新事物苗头的法拉第，从朴素的唯物主义和自发的辩证法思想出发，很快就想到磁能否产生电。为了寻找答案，他以坚韧不拔的精神，精心地实验研究了十年，终于在1831年第一次发现了电磁感应现象，并总结出电磁感应定律。

#### 1.1 电磁感应现象

下面结合几个演示实验来说明：什么是电磁感应现象？产生电磁感应现象的条件是什么？

实验一 如图5-1，把线圈A的两端接在电流计上。在这个

回路中没接电源，所以电流计的指针并不偏转。

现在把一根磁棒插入线圈，在插入的过程中，电流计的指针发生偏转，这表明线圈中产生了电流(图5-1a)。这种电流叫做感应电流。当磁棒插在线圈内不动时，电流计的指针就不再偏转，这时线圈中没有感应电流。再把磁棒从线圈内拔出，在拔出的过程中，电流计指针又发生偏转，偏转的方向与插入磁棒时相反，这表明感应电流与前面相反(图5-1b)。

在实验中，磁棒插入或拔出的速度越快，电流计指针偏转的角度就越大，也就是说感应电流越大。

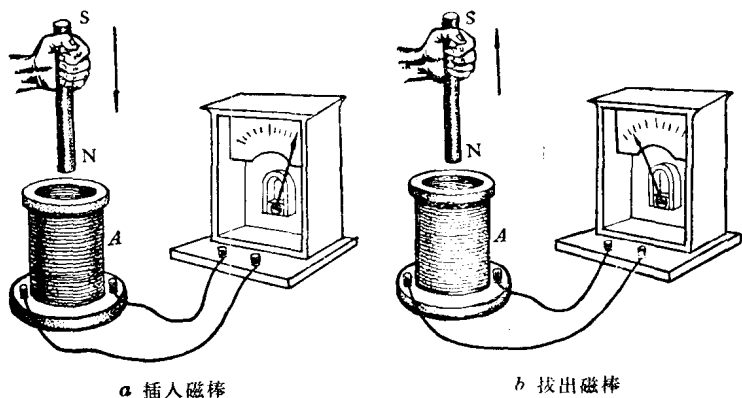


图5-1 电磁感应现象的演示之一——插入或拔出磁棒

如果保持磁棒静止，使线圈相对磁棒运动，那么可以观察到同样的现象。

在上一章中曾经说过，一个通电线圈和一根磁棒相当。那么，使通电线圈和另一个线圈作相对运动，是否也会产生感应电流呢？这需要通过实验来检验。

实验二 如图5-2，取另一个线圈  $A'$  与直流电源相连。用这个通电线圈  $A'$  代替磁棒重复上面的实验，可以观察到同样的现象。也就是说，在通电线圈  $A'$  和线圈  $A$  相对运动的过程中，线圈

A 中产生感应电流；相对运动的速度越快，感应电流越大；相对运动的方向不同(插入或拔出)感应电流的方向也不同。

现在对上面两个实验做一些分析。当磁棒或通电线圈  $A'$  和线圈  $A$  做相对运动时，磁棒或通电线圈  $A'$  与线圈  $A$  之间的距离发生了变化；同时，它们在线圈  $A$  处激发的磁场也发生了变化。这样，自然会产生一个问题：感应电流的起因究竟是由于磁棒或通电线圈  $A'$  这个实物和线圈  $A$  的相对运动，还是由于线圈  $A$  处磁场的变化呢？让我们观察下面的实验。

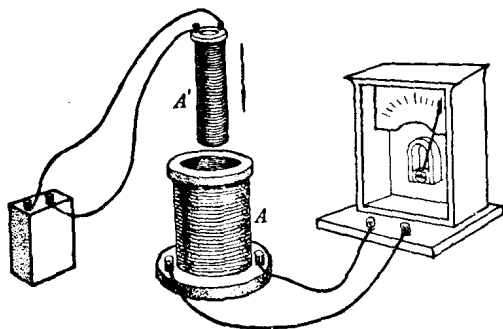


图 5-2 电磁感应现象演示之二——插入或拔出载流线圈

实验三 如图 5-3，把线圈  $A'$  跟开关  $K$  和直流电源串联起来，再把  $A'$  插在线圈  $A$  内。接通开关  $K$ ，在接通的瞬间，可以看

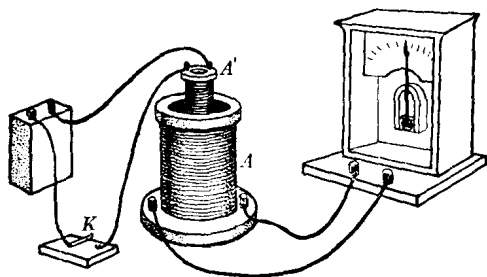


图 5-3 电磁感应现象演示之三——接通或断开初级线圈的电流

到, 电流计的指针偏转一下, 以后又回到零点。再把开关  $K$  断开, 在断开的瞬间, 电流计的指针朝反方向偏转一下, 然后回到零点。这表明在线圈  $A'$  通电或断电的瞬间, 线圈  $A$  中产生感应电流。

如果用一个可变电阻代替开关  $K$ , 那么当调节可变电阻来改变线圈  $A'$  中电流强度的时候, 同样可看到电流计的指针发生偏转, 即线圈  $A$  中产生感应电流。调节可变电阻的动作越快, 线圈  $A$  中的感应电流就越大。

在这个实验里, 线圈  $A'$  和线圈  $A$  之间并没有相对运动。这个实验和前两个实验的共同点是, 在实验中线圈  $A$  所在处的磁场都发生了变化。在前两个实验中, 是通过相对运动使线圈  $A$  处的磁场发生变化的; 在这个实验中, 是通过调节线圈  $A'$  中的电流(即激发磁场的电流)使线圈  $A$  处的磁场发生变化的。因此, 综合这三个实验就可以认识到: 不管用什么方法, 只要使线圈  $A$  处的磁场发生变化, 线圈  $A$  中就会产生感应电流。

这样的认识是否完全了呢? 我们再观察一个实验。

实验四 如图 5-4, 把接有电流计的导体线框  $ABCD$  放在均匀的稳恒磁场中, 使线框平面跟磁场方向垂直。线框的  $CD$  边可以沿着  $AD$  和  $BC$  边滑动并保持接触。实验表明, 当使  $CD$  边朝某一方向(如朝右)滑动时, 电流计的指针发生偏转, 即在线框  $ABCD$  中产生感应电流。 $CD$  边滑动得越快, 电流计指针偏转的角度越大, 即感应电流越大。当  $CD$  边朝反方向(如朝左)滑动时, 感应电流的方向相反。

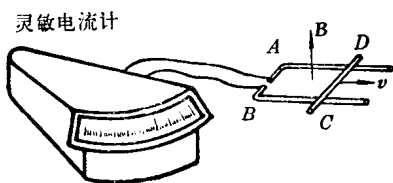


图 5-4 电磁感应现象演示之四——导线作切割磁感线的运动

在这个实验里, 磁场是稳恒的, 所以当  $CD$  边滑动时, 线框所

在处的磁场并没有变化。 $CD$  边的移动只是使线框的面积发生了变化,结果,同样产生了感应电流。由此可见,把感应电流的起因只归结成磁场变化的认识,是不够完全的。

从直接引起的效果来看,磁场的变化和线框面积的变化有一个共同点,这就是它们都使得穿过线圈或线框的磁感应强度的通量,即磁通量  $\Phi_B$  发生了变化。

概括以上四个实验中共同的东西,我们可以得到结论:当穿过闭合回路(如线圈  $A$  和电流计组成的回路,线框  $ABCD$  等)的磁通量发生变化时,回路中就产生感应电流。这也就是产生感应电流的条件。

由第三章可知,闭合回路中有电流产生,那就意味着回路中有电动势存在。所以当闭合回路中有感应电流产生时,这回路中就一定存在着某种电动势。这种由于磁通量变化而引起的电动势,叫做感应电动势。感应电动势比感应电流更能反映电磁感应现象的本质。以后我们将看到,当回路不闭合的时候,也会发生电磁感应现象,这时并没有感应电流,而感应电动势却仍然存在。另外,感应电流的大小是随着回路的电阻而变的,而感应电动势的大小则不随回路的电阻而变。总之,确切地讲,对于电磁感应现象应这样来理解:当穿过导体回路的磁通量发生变化时,回路中就产生感应电动势。

## 1.2 法拉第定律

在上述实验中我们已经看到,穿过导线回路的磁通量变化得越快,感应电动势越大。此外,在不同的条件下,感应电动势的方向亦不同。为了表述电磁感应的规律,设在时刻  $t_1$  穿过导线回路的磁通量是  $\Phi_1$ , 在时刻  $t_2$  穿过导线回路的磁通量是  $\Phi_2$ , 那么,

---

① 为了符号的简化,本章以及后文凡不致引起误会的地方,我们均略去  $\Phi_B$  的下标  $B$ 。

在  $dt = t_2 - t_1$  这段时间内穿过回路的磁通量的变化是  $d\Phi = \Phi_2 - \Phi_1$ , 则磁通量的变化率  $\frac{d\Phi}{dt}$  反映了磁通量变化的快慢和趋势。

精确的实验表明, 导体回路中感应电动势  $\mathcal{E}$  的大小与穿过回路的磁通量的变化率  $\frac{d\Phi}{dt}$  成正比。这个结论叫做法拉第电磁感应定律。用公式来表示就是

$$\mathcal{E} \propto \frac{d\Phi}{dt}, \text{ 或 } \mathcal{E} = -k \frac{d\Phi}{dt},$$

式中  $k$  是比例常数, 它的数值决定于式中各量的单位。如果  $d\Phi$  的单位用韦伯, 时间单位用秒,  $\mathcal{E}$  的单位用伏特, 则  $k=1$ <sup>①</sup>,

$$\mathcal{E} = -\frac{d\Phi}{dt}, \quad (5.1)$$

式中的负号代表感应电动势方向, 这个问题我们将在下面讨论。在有些场合中不着重研究方向问题, 这个负号也可不写。

式 (5.1) 只适用于单匝导线组成的回路。如果回路不是单匝线圈而是多匝线圈, 那么当磁通量变化时, 每匝中都将产生感应电动势。由于匝与匝之间是互相串联的, 整个线圈的总电动势就等于各匝所产生的电动势之和。令  $\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_N$  分别是通过各匝线圈的磁通量, 则

$$\begin{aligned} \mathcal{E} &= -\frac{d\Phi_1}{dt} - \frac{d\Phi_2}{dt} - \dots - \frac{d\Phi_N}{dt} \\ &= -\frac{d}{dt}(\Phi_1 + \Phi_2 + \dots + \Phi_N) = -\frac{d\Psi}{dt}, \end{aligned} \quad (5.2)$$

式中  $\Psi = \Phi_1 + \Phi_2 + \dots + \Phi_N$  叫做磁通匝链数或全磁通。如果穿过每匝线圈的磁通量相同, 均为  $\Phi$ , 则  $\Psi = N\Phi$ ,

<sup>①</sup> 其实, 在国际单位制(SI)中, 正是选定  $k=1$  从而导出磁通量的单位韦伯, 详见第九章。当一个线圈中在 1 秒钟内产生的感应电动势为 1 伏时, 磁通量的变化正好为 1 韦伯。

$$\mathcal{E} = -\frac{d\Psi}{dt} = -N\frac{d\Phi}{dt} \quad (5.3)$$

〔例题1〕如图5-5，磁感应强度为  $B=1000$  高斯的均匀磁场垂直纸面向里，一矩形导体线框  $ABCD$  平放在纸面内，线框的  $CD$  边可以沿着  $AD$  和  $BC$  边滑动。设  $CD$  边的长度为  $l=10$  厘米，向右滑动的速度为  $v=1.0$  米/秒。求线框中感应电动势的大小。

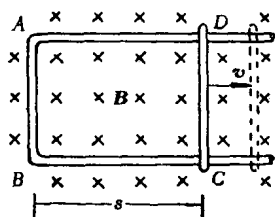


图5-5 例题1——一边可滑动的矩形线框

〔解〕 设  $BC$  之间的距离为  $s$ ，则通过导体线框的磁通量为

$$\Phi = B \cdot l \cdot s.$$

代入式(5.1)，并用  $\frac{ds}{dt} = v$ ，得

$$\mathcal{E} = \frac{d\Phi}{dt} = Bl\frac{ds}{dt} = Blv.$$

代入  $B=1000$  高斯  $=0.10$  韦伯/米<sup>2</sup>， $l=10$  厘米  $=0.10$  米， $v=1.0$  米/秒，得

$$\mathcal{E} = 0.10 \times 0.10 \times 1.0 = 1.0 \times 10^{-2} \text{ 伏特}.$$

〔例题2〕把磁棒的一极用1.5秒的时间由线圈的顶部一直插到底部。在这段时间内穿过每一匝线圈的磁通量改变了  $5.0 \times 10^{-5}$  韦伯，线圈的匝数为60，求线圈中感应电动势的大小。若闭合回路的总电阻为800欧姆，求感应电流的大小。

〔解〕 已知  $\Delta t=1.5$  秒， $\Delta\Phi=5.0 \times 10^{-5}$  韦伯， $N=60$ ， $R=800$  欧姆。代入式(5.3)即得

$$\begin{aligned} \mathcal{E} &= N \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = 60 \times \frac{5.0 \times 10^{-5}}{1.5} \text{ 伏特} \\ &= 2.0 \times 10^{-3} \text{ 伏特} \end{aligned}$$

由闭合电路的欧姆定律可知

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R} = \frac{2.0 \times 10^{-3}}{800} \text{ 安培} = 2.5 \times 10^{-6} \text{ 安培}。$$

感应电动势的方向问题<sup>①</sup>是法拉第电磁感应定律的重要组成部分。在每个具体场合里，我们可以根据实验记下感应电动势的方向。然而为了把各种场合中感应电动势的方向用一个统一的公式表示出来，就得先规定一些正负号法则。电动势和磁通量都是标量(代数量)，它们的方向(更确切地说，应是它们的正负)都是相对于某一标定方向而言的。为了描述电动势的方向，先得标定回路的绕行方向。有了它，电动势取正值表示其方向与此标定方向一致；取负值表示其方向与此标定方向相反。磁通量 $\Phi$ 是磁感应强度矢量 $\mathbf{B}$ 沿以回路为边界的曲面的积分， $\Phi$ 的正负有赖于此曲面的法线矢量 $\mathbf{n}$ 方向的选择。选定 $\mathbf{n}$ 的方向之后，若 $\mathbf{B}$ 与 $\mathbf{n}$ 的夹角为锐角，则 $\Phi$ 取正值；若 $\mathbf{B}$ 与 $\mathbf{n}$ 的夹角为钝角，则 $\Phi$ 取负值。有了 $\Phi$ 的正负，其变化率 $\frac{d\Phi}{dt}$ 的正负也就有了确定的意义。设在时间间隔 $dt$ 内 $\Phi$ 的增量为

$$d\Phi = \Phi(t + dt) - \Phi(t)，$$

若正的 $\Phi$ 随时间增大，或负的 $\Phi$ 的绝对值随时间减小，则 $d\Phi > 0$ ， $\frac{d\Phi}{dt} > 0$ ；反之，若正的 $\Phi$ 随时间减小，或负的 $\Phi$ 的绝对值随时间增大，则 $d\Phi < 0$ ， $\frac{d\Phi}{dt} < 0$ 。

至此，我们按照两个标定方向，即回路的绕行方向和曲面的法线方向，赋予了两个代数量——电动势 $\mathcal{E}$ 和磁通量 $\Phi$ (从而它的变化率 $\frac{d\Phi}{dt}$ )正负的含义，但这里每个标定方向本来都有正、反两

---

① 感应电动势是标量，这里更确切地应该说非静电力 $\mathbf{K}$ 的方向。



种可能的选择。按照通常的习惯，我们规定如下右手定则：如图 5-6，将右手四指弯曲，用以代表选定的回路绕行方向，则伸直的拇指指向法线  $n$  的方向。有此规定之后，两个标定方向就只能任选其一了。

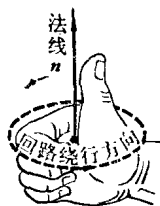


图 5-6 右手定则

明确了上述所有规定，我们就有可能把感应电动势的方向用统一的数学公式表示出来，这就是上面的式(5.1)和(5.3)。两式归纳了大量实验的结果，用一个负号表达了  $\mathcal{E}$  和  $\frac{d\Phi}{dt}$  之间方向的关系。两式表明，在任何情况下，而且无论回路的绕行方向怎样选择，感应电动势  $\mathcal{E}$  的正负总是与磁通量变化率  $\frac{d\Phi}{dt}$  的正负相反。

图 5-7 给出四个线圈中磁通量变化的情形，在这四种情形里，

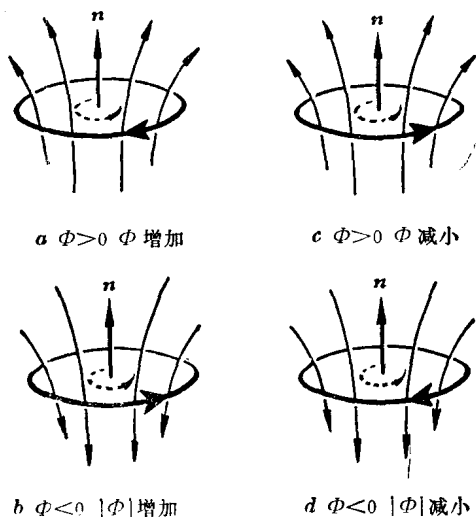


图 5-7 根据公式  $\mathcal{E} = -\frac{d\Phi}{dt}$  判断感应电动势的方向