




大学物理学

(下)



许迈昌 唐淑红 姚敏 主编



湘潭大学出版社

大学物理学

(下)

主 编：许迈昌 唐淑红 姚 敏
副主编：邓永和 熊文元 谢常清
参编人员：陈 桥 刘 辉 郭 仟
吴学庆 姜利群

湘潭大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

大学物理学：全2册 / 许迈昌, 唐淑红, 姚敏主编.
—湘潭：湘潭大学出版社, 2011.12
ISBN 978-7-81128-367-9

I. ①大… II. ①许…②唐…③姚… III. ①物理学
—高等学校—教材 IV. ①O4

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第267144号

大学物理学(下)

许迈昌 唐淑红 姚敏 主编

责任编辑：丁立松

封面设计：罗志义

出版发行：湘潭大学出版社

社 址：湖南省湘潭市 湘潭大学出版大楼

电话(传真)：0731-58298966 邮编：411105

网 址：<http://xtup.xtu.edu.cn>

印 刷：长沙理工大印刷厂

经 销：湖南省新华书店

开 本：787×1092 1/16

印 张：11

字 数：268千字

版 次：2011年12月第1版 2011年12月第1次印刷

书 号：ISBN 978-7-81128-367-9

定 价：全2册 52.00元 本册 22.50元

(版权所有 严禁翻印)

前 言

本教材是根据教育部高等学校物理学与天文学教学指导委员会物理基础课程教学指导分会编制的《理工科类大学物理课程教学基本要求》(2010年版)的基本精神,结合作者在基础物理课程教学实践中的多年教学经验及当前高等教育的新形势,适应普通高等教育二本和三本理工科学生需要编写而成的。非物理专业大学物理课程作为大学生科学教育的重要一环,一直在强调:让学生对物理学的基本概念、基本理论和基本方法有比较系统、正确的认识和理解,并为进一步学习其他知识打下必要的基础,同时着力培养学生树立科学的世界观,增强学生分析问题和解决问题的能力,培养学生的探索精神和创新意识,以实现学生知识、能力、素质的协调发展。

基于以上认识,本教材的编写始终立足于:

保证基础,加强近代。在内容的选取上,将《理工科类大学物理课程教学基本要求》中的A类知识点作为核心教学内容,同时有选择地编写了部分B类知识点所要求的教学内容,保证了基础知识的内容和结构形成一个有机的整体。例如,近代物理学部分除了讲述传统的狭义相对论、量子力学基础等内容外,还简单地介绍了量子力学内容中的力学量算符假设,突出了量子力学基本原理的完善性,另外,对激光、半导体、核物理、粒子物理等内容均作了简要的介绍。

联系实际,加强应用。物理学是一门以实验为基础的科学,知识理论和实际应用是不可分割的两个重要组成部分。在本教材的编写过程中,我们特别注意物理现象、实验事实和具体问题的处理对学生理解物理概念、物理规律和建立物理图像的作用,在例题、习题、规律应用介绍中尽可能地编入与物理现象、实验事实及工程技术有关的问题。

结构优化,内容精练。本教材整体编排依据传统大学物理课程知识内容,按照力学、机械振动与波动、热学、电磁学、光学、近代物理的顺序编写,同时对各部分内容的编排做了调整,把相关联的内容放到一起,减少了部分物理规律的严格推导。这样做一方面是为了便于学生进行比较学习,培养学生的学习能力,另一方面是充分考虑大学物理的教学实际。

本教材由许迈昌、唐淑红、姚敏担任主编,邓永和、熊文元、谢常清担任副主编,具体编写分工是绪论、力学部分(第1章、第2章)及机械振动和机械波部分(第3章)由许迈昌编写,气体动理论部分(第4章)由许迈昌、谢常清编写,热力学基础部分(第5章)由许迈昌、熊文元编写,电磁学部分(第6章、第7章、第8章)由邓永和、姚敏编写,光学(第9章)及近代物理学部分(第10章)由许迈昌、唐淑红编写,参加编写和讨论的还有陈桥、刘辉、郭仟、吴学庆、姜利群等,最后由许迈昌统稿并定稿。教材编写过程中参考了陈曙光、张三慧、胡盘新等编写的大学物理教材,融入了编者多年来在大学

物理教学中进行自主式、启迪式学生学习能力的教学成果，得到了 2010 年湖南省普通高等学校教学改革研究立项项目（湘教通 [2010] 243 号编号 325 号）“基础物理课程教学自主式学习和创新人才培养模式的探索”的资助，同时得到了湖南工程学院教务处、湖南工程学院理学院的大力支持与帮助，湘潭大学出版社对本书出版付出了辛勤的劳动，在此深表谢意。

由于本书编写作了新的探索与研究，但限于编者的经验和水平，书中难免有不当之处，尚有待于在教学过程中不断完善，恳请读者指正。

编者

2011 年 12 月

目 录

第 8 章 电磁场

§ 30 电流密度与电动势	(1)
30-1 电流与电流密度	(1)
30-2 电动势	(3)
§ 31 电磁感应定律	(4)
31-1 电磁感应现象	(4)
31-2 法拉第电磁感应定律	(6)
31-3 楞次定律	(7)
§ 32 动生电动势·感生电动势 涡旋电场	(9)
32-1 动生电动势	(9)
32-2 感生电动势	(11)
§ 33 自感 互感 磁场的能量	(13)
33-1 自感	(13)
33-2 互感	(15)
33-3 磁场的能量	(17)
§ 34 位移电流 麦克斯韦方程组	(19)
34-1 位移电流	(20)
34-2 麦克斯韦方程组	(22)
§ 35 电磁波的产生及其基本性质	(23)
35-1 电磁波的产生	(23)
35-2 电磁波的基本性质	(25)
§ 36 电磁波与人类文明	(26)

第 9 章 光学

§ 37 几何光学基本原理与应用	(34)
37-1 几何光学的基本定律	(35)
37-2 物和像	(36)
37-3 薄透镜	(37)
37-4 助视仪: 放大镜 显微镜 望远镜	(39)
§ 38 分波阵面干涉与光程	(42)
38-1 光波 光的相干性	(42)

38-2	光程与光程差	(43)
38-3	杨氏双缝干涉实验	(44)
§ 39	分振幅干涉; 薄膜干涉	(47)
39-1	等厚干涉	(47)
39-2	增透膜和增反膜	(50)
39-3	迈克尔逊干涉仪	(52)
§ 40	光的衍射 光学仪器的分辨本领	(53)
40-1	光的衍射现象 惠更斯-菲涅耳原理	(53)
40-2	光学仪器的分辨率	(54)
§ 41	夫琅和费单缝衍射	(56)
41-1	衍射条纹的位置	(56)
41-2	夫琅和费单缝衍射的光强分布	(58)
§ 42	光栅衍射	(59)
42-1	光栅衍射条纹的形成与特点	(59)
42-2	光栅衍射条纹的缺级	(61)
§ 43	光的偏振	(64)
43-1	自然光和偏振光	(64)
43-2	偏振片 起偏和检偏	(65)
43-3	反射光和折射光的偏振	(67)
43-4	光的双折射现象	(69)
43-5	旋光现象	(71)
43-6	光的吸收	(73)

第 10 章 近代物理学

§ 44	狭义相对论	(82)
44-1	狭义相对论的两个基本原理	(83)
44-2	洛伦兹坐标变换和速度变换	(84)
44-3	相对论时空观	(87)
44-4	相对论动力学基础	(91)
* 44-5	电磁场的相对性	(94)
* 44-6	广义相对论简介	(95)
§ 45	量子论的出现	(99)
45-1	热辐射 普朗克量子假说	(99)
45-2	光的粒子性	(101)
45-3	氢原子光谱和玻尔理论	(103)
§ 46	量子力学的基本原理	(106)
46-1	粒子的波动性	(107)
46-2	物质波是一种概率波	(108)
46-3	不确定关系	(109)

目 录

46-4	薛定谔方程及其应用	(111)
* 46-5	力学量算符与本征态	(117)
46-6	氢原子的量子力学处理	(121)
46-7	电子自旋	(123)
46-8	原子核外电子的壳层结构与排布	(124)
§ 47	激光的产生、特性及应用	(127)
47-1	激光的产生	(127)
47-2	激光器的种类	(131)
47-3	激光的特性及应用	(132)
§ 48	X 射线及其应用	(133)
48-1	X 射线的发现 布拉格公式	(133)
48-2	X 射线的产生机制	(135)
48-3	康普顿散射	(136)
48-4	X 射线的吸收	(138)
§ 49	能带与半导体	(139)
49-1	固体的能带结构	(139)
49-2	半导体及其应用	(141)
49-3	超导体	(144)
§ 50	核物理与基本粒子	(147)
50-1	原子核物理	(147)
50-2	粒子物理简介	(152)
附 录	(163)
参考文献	(167)

第 8 章 电磁场

前面分别讨论了静电场和稳恒磁场的基本属性,以及它们与物质相互作用的基本规律。本章将讨论恒定电流和电动势,对恒定电流有一个基本的认识。随着生产发展的需要,人们深入地研究了电磁现象的本质,从而对电磁场的认识有了一个质的飞跃。由实验发现,不但电荷产生电场,电流产生磁场,而且变化着的电场和磁场也可以相互产生,所以电场和磁场是一个统一的整体——电磁场。英国杰出的物理学家法拉第于 1831 年发现了电磁感应现象,被誉为电磁理论的奠基人。他丰硕的实验研究成果以及他提出的新颖的“场”的观念和力线的思想,为电磁现象的统一理论准备了条件。1862 年,英国物理学家麦克斯韦完成了这个统一任务,建立了电磁场的普遍方程组,称为麦克斯韦方程组,并预言电磁场以波动的形式运动,称为电磁波。它的传播速度与真空中的光速相同,这表明光也是电磁波。这个预言于 1888 年由德国物理学家赫兹通过实验所证实,从而实现了电、磁、光的统一,并开辟了一个全新的战略领域——电磁波的应用和研究。1895 年俄国的波波夫和意大利的马可尼分别实现了无线电信号的传输。…

本章首先讨论电磁感应现象,引出涡旋电场的概念,从而得到随时间变化的磁场产生电场的基本规律;然后研究非稳恒条件下的电流连续性方程,引出位移电流,说明随时间变化的电场产生磁场,从而得出在普遍情况下安培环路定理的推广形式;最后总结出电磁场运动的普遍规律——麦克斯韦方程组。

§ 30 电流密度与电动势

30-1 电流与电流密度

电流是电荷的定向漂移运动而形成的,从微观上看,电流实际上是带电粒子的定向运动,形成电流的带电粒子统称为载流子,它们可以是电子、质子、离子,在半导体中还可以是带正电的空穴。

1. 电流

我们知道,金属导体中存在着大量的自由电子,在静电平衡的条件下,金属导体内部的场强为零,自由电子没有宏观的定向运动。若金属导体内部的场强不为零,则自由电子将会在电场力的作用下,逆着电场的方向运动。我们把导体中电荷的定向运动称为**电流**。因此,产生电流的条件可以归纳为以下两个方面:① 导体中要有可以自由运动的带电粒子(电子或离子);② 导体内电场强度不为零。若导体内部的电场不随时间变化,驱动电荷的电场力

不随时间变化,因而导体中所形成的电流将不随时间变化,这种电流称为**恒定电流**,也称**稳恒电流**。

电流的强弱用电流强度来描述。设在 Δt 时间内,通过任一横截面的电量是 Δq ,则通过该截面的电流强度(简称电流)为

$$I = \frac{\Delta q}{\Delta t} \quad (30-1)$$

式(30-1)表示电流强度等于单位时间内通过导体任一截面的电量。如果 I 不随时间变化,那么,这种电流称为**恒定电流**,又称为**直流电**。

如果加在导体两端的电势差随时间变化,电流强度也随时间变化,这时需要用**瞬时电流**($\Delta t \rightarrow 0$ 时的电流强度)来表示

$$I = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta q}{\Delta t} = \frac{dq}{dt} \quad (30-2)$$

对于恒定电流,式(30-1)和式(30-2)是等价的。

在国际单位制(SI)中,电流强度的单位是安[培],符号为 A,它是一个最基本的物理量,其大小为每秒钟内通过导体任一截面的电量为 1 库仑时所对应的电流值,即 1 A。

电流强度是标量,所谓电流的方向只是表示电荷在导体内移动的去向。通常规定正电荷宏观定向运动的方向为电流的方向。

2. 电流密度

在粗细相同和材料均匀的导体两端加上恒定的电势差后,导体内存在恒定电场,从而形成恒定电流。电流在导体任一截面上各点的分布是相同的。如果在导体各处粗细不同,或材料不均匀(或是大块导体),电流在导体截面上各点的分布将是不均匀的。电流在导体截面上各点的分布情况可用**电流密度 J** 来描述,电流密度是矢量,如图 30-1 所示。

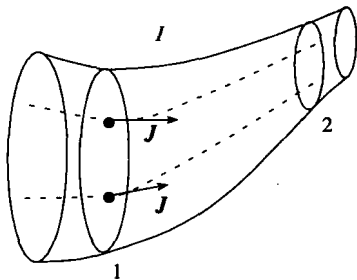


图 30-1 电流密度矢量

为方便起见,选定正电荷的运动来讨论。我们对电流密度的大小和方向作如下规定:导体中任一点电流密度 J 的方向为该点正电荷的运动方向(场强 E 的方向), J 的大小等于单位时间内通过该点附近垂直于该点正电荷运动方向的单位面积上的电量,用公式表示为

$$J = \frac{dq}{dt ds} = \frac{dI}{ds} \quad (30-3)$$

式(30-3)中, ds 为在导体中某点附近所取的面积元, dq 为 dt 时间内通过 ds 的电量。该式表明,电流密度的大小等于通过垂直正电荷运动方向单位面积上的电流。若以 e_n 表示面积元的正法线方向单位矢量,且 e_n 的方向与该点的电场 E 方向一致。则

$$\mathbf{J} = \frac{dI}{ds} \mathbf{e}_n \quad (30-4)$$

如果面积元 ds 的法线方向 \mathbf{e}_n 不与场强 \mathbf{E} 同方向,则在 \mathbf{E} 方向投影面的面积为 $ds \cos \theta$, θ 表示 \mathbf{e}_n 与 \mathbf{E} 所成的角度,则有

$$J = \frac{dI}{ds \cos \theta} \quad (30-5)$$

或写成

$$dI = \mathbf{J} \cdot d\mathbf{s} \quad (30-6)$$

通过任意面积 S 的电流强度应为

$$I = \int_S \mathbf{J} \cdot d\mathbf{s} \quad (30-7)$$

式(30-7)表明,通过某一面积的电流强度,等于该面积上的电流密度的通量。在国际单位制中,电流密度的单位为安培·米⁻²,符号 $\text{A} \cdot \text{m}^{-2}$,量纲为 IL^{-2} 。

假设导体中只有一种载流子,每个载流子的带电量都是 q ,但是运动速度可以各不相同。以 n_i 表示单位体积内以速度 v_i 运动的载流子数目,则在 dt 时间内通过面元 ds 的这种载流子的数目为 $n_i v_i dt \cos \theta$, $ds = n_i v_i \cdot ds dt$ 。在 dt 时间内通过面元 ds 的所有载流子的数目为 $\sum n_i v_i \cdot ds dt$,则单位时间通过面元 ds 的电流强度为

$$dI = \frac{q \sum n_i v_i \cdot ds dt}{dt} = q \sum n_i v_i \cdot ds = qn\mathbf{v} \cdot d\mathbf{s} \quad (30-8)$$

其中, $\mathbf{v} = \frac{\sum n_i v_i}{n}$ 表示载流子的平均微观漂移速度, $n = \sum n_i$ 表示单位体积内载流子的数目。则可以得到电流密度 \mathbf{J} 的微观表达式

$$\mathbf{J} = qn\mathbf{v} \quad (30-9)$$

那么,根据式(30-7)可以得到通过一个闭合曲面 S 的电流可以表示为

$$I = \oint_S \mathbf{J} \cdot d\mathbf{s} \quad (30-10)$$

由电流密度 \mathbf{J} 的意义可以知道,式(30-10)实际上表示净流出闭合面的电流,也就是单位时间内从闭合面内向外流出的正电荷的电量。根据电荷守恒定律,通过闭合面流出的电流应等于闭合面内电荷 q_{int} 的减少。因此式(30-10)应该等于 q_{int} 的减少率,即

$$\oint_S \mathbf{J} \cdot d\mathbf{s} = - \frac{dq_{\text{int}}}{dt} \quad (30-11)$$

式(30-11)称为**电流的连续性方程**。

30-2 电动势

1. 非静电力 电源

要产生持续不断的稳恒电流,必须要有稳恒电场,相应的要求空间的电荷分布不随时间变化,但是有电流存在时电荷的运动往往会破坏电荷和电场分布的稳定性。如图 30-2 所示,导体 A 、 B 分别带有一定的正负电荷,用导线将 A 、 B 连接起来, A 上的正电荷通过导线流向 B 而形成电流,但是这种电流是随时间变化的,且不可能持续下去,因为正电荷达到 B 后与 B 上的负电荷中和,电流很快就会减弱到零,为保证空间电荷与电场分布不变,应设法

将达到 B 上的正电荷及时送回 A , 静电力 F_e 是不可能做到的, 必须要某种非静电力 F_k 。电源就是一种提供非静电力 F_k 的装置。它使正(负)电荷由电源的负(正)极, 经过电源内部, 克服稳恒电场力回到电源的正(负)极。电源也是一种能源, 将其他形式的能量如化学能、机械能转化为电场能, 用以补偿回路中电场的能量损失。

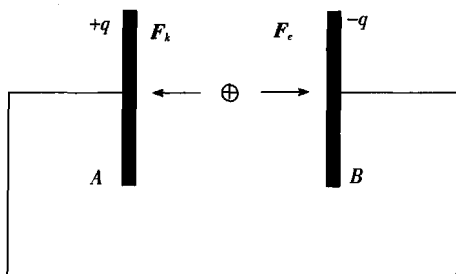


图 30-2 非静电力

2. 电动势

为了描述回路中这种非静电力做功的本领, 引入电动势的概念。电源的电动势定义为将单位正电荷从电源的负极经电源内部移动到正极, 非静电力所做的功, 记为 ϵ , 即

$$\epsilon = \frac{1}{q} \int_{-}^{+} \mathbf{F}_k \cdot d\mathbf{l} = \int_{-}^{+} \mathbf{E}_k \cdot d\mathbf{l} \quad (30-12)$$

上式中, \mathbf{E}_k 为非静电场, 定义为单位正电荷所受到的非静电力, 即

$$\mathbf{E}_k = \frac{\mathbf{F}_k}{q} \quad (30-13)$$

普遍情况下, 非静电场沿一段路径的线积分称为该段路径的电动势, 即沿此路径非静电力对单位正电荷所做的功。表示为

$$\epsilon = \int_L \mathbf{E}_k \cdot d\mathbf{l} \quad (30-14)$$

当路径是闭合路径时, 则称为回路的电动势, 即绕回路一周非静电力对单位正电荷所做的功, 表示为

$$\epsilon = \oint_L \mathbf{E}_k \cdot d\mathbf{l} \quad (30-15)$$

电动势是标量, 对于电源, 通常将负极经过电源内部指向正极的方向称为电源电动势的方向, 电动势在国际单位制中的单位是伏特(V)。

因与电动势对应的非静电力是一种非保守力, 故电动势的数值、符号与所选取的路径密切相关, 这是电动势与电势差的主要区别(电势差与路径无关, 只与始末位置有关, 因为静电场是保守场)。电动势正负极间的电势差的积分路径为电源外部的任意路径, 与电源内部的路径无关。

§ 31 电磁感应定律

31-1 电磁感应现象

自从发现了电流产生磁场的现象以后, 人们提出一个问题: 电流既然能够产生磁场, 那

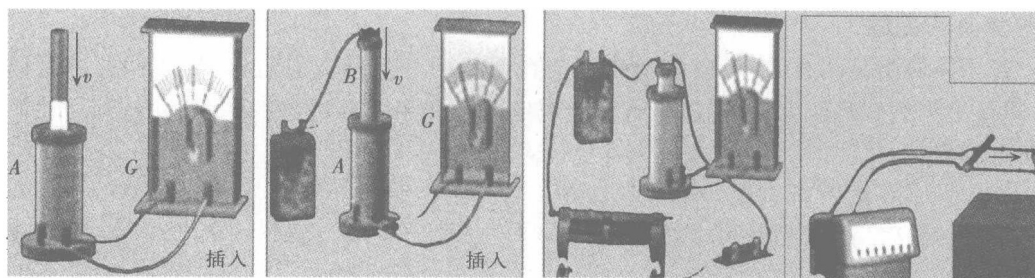
么,能不能利用磁场来产生电流呢?下面先通过几个实验说明什么是电磁感应现象,以及产生电磁感应现象的条件。

(1) 取一线圈 A , 把它的两端和一电流计 G 连成一闭合回路, 如图 31-1(a) 所示, 这时电流计的指针并不发生偏转, 这是因为在电路中没有电动势。再取一磁铁, 先使其与线圈相对静止, 电流计也不发生偏转。但若使两者发生相对运动, 电流计的指针将会发生偏转。当相对运动的方向改变时电流计指针偏转的方向也会发生变化。同时, 相对运动速度越大, 指针偏转越大。

(2) 前面讲过, 电流要激发磁场, 一个载流螺线管相当于一根磁棒。因此, 如果取一个载流螺线管 B 代替如图 31-1(a) 所示实验中的磁棒, 则当载流螺线管和线圈回路之间有相对运动时, 发现电流计的指针也会发生偏转, 说明闭合线圈回路中亦有电流, 如图 31-1(b) 所示。如果在线圈 B 中加进一个铁芯, 则电流计指针的偏转更大。

(3) 将通电螺线管放入线圈中, 调节可变电阻器的阻值 R , 观察连接在线圈回路中的电流计指针, 如图 31-1(c) 所示, 实验发现, 当 R 保持不变时电流计指针不动, 这表明线圈回路中没有电流; 当 R 变化时, 螺线管中的电流强度改变, 电流计的指针发生偏转, 这表示线圈回路中有电流。当 R 变化使螺线管中的电流强度增强时, 电流计的指针向一侧偏转, 而当螺线管中的电流强度减弱时, 电流计的指针向另一侧偏转, 并且, 螺线管中的电流改变得越快, 电流计指针的偏转角也越大, 显示出线圈回路中的电流强度也越大。

(4) 在如图 31-1(d) 所示的均匀磁场中, 电流计与一个 Π 形导线框相连, Π 形导线框上放有一个可以垂直于磁场 B 方向运动的导体棒, 导体棒与 Π 形导线框保持良好接触。实验发现: 当导体棒以一定速度向右或左移动 (即改变导体回路面积) 时, 这时, 回路中就有电流。虽然, 回路内各点的磁感强度 B 不改变, 但穿过回路的磁通量却在增加或减少。当磁通量增加时, 电流计指针向一个方向偏转; 磁通量减少时, 电流计指针向另一个方向偏转。进一步的实验还可以发现, 导体棒在磁场中运动得越快, 磁通量改变 (增加或减小) 越快, 电流计指针偏转越大, 表明回路中的电流也越大; 反之, 则越小。



(a) 磁棒情形

(b) 载流螺线管情形

(c) 可变电阻器情形

(d) Π 形导线框的情形

图 31-1 电磁感应现象

上面 4 个实验都是利用磁场产生电流, 那么产生电流的条件是什么呢? 分别考察每个实验, 似乎可有若干不同的说法。综合分析上述各实验, 尽管情况各不相同, 但有一点却是共同的, 即不论是 B 、 S 或 θ 改变, 它们都要使穿过闭合回路的磁通量发生变化。那么利用磁场产生电流的共同条件可概括为穿过闭合回路所包围面积的磁通量发生变化。对于实验 (1) 和实验 (2), 是由于闭合回路与磁铁间的相对运动时, 使回路包围面积中磁感强度 B 发

生变化而导致穿过闭合回路所包围面积的磁通量发生变化;对于实验(3),是由于磁场中各点磁感强度的变化而导致穿过闭合回路所包围面积的磁通量发生变化;对于实验(4),则由于闭合回路所包围面积的变化而导致穿过闭合回路所包围面积的磁通量发生变化。

因而可以得出如下结论:当通过一个闭合回路所包围面积的磁通量发生变化(增加或减少)时,不管这种变化是由于什么原因所引起的,回路中就有电流产生。这种现象称为电磁感应现象。在回路中所产生的电流称为感应电流。在磁通量增加和减少的两种情况下,回路中感应电流的流向相反,感应电流的大小取决于穿过回路中的磁通量变化快慢。变化越快,感应电流越大;反之,就越小。回路中产生电流,表明回路中有电动势存在。这种在回路中由于磁通量的变化而引起的电动势,称为感应电动势。

31-2 法拉第电磁感应定律

现在对上节中由实验所得到的结论,作进一步的分析,以便了解电磁感应的基本规律。

法拉第对电磁感应现象作了详细分析,总结出感应电动势与磁通量变化率之间的关系,这个关系就是法拉第电磁感应定律,它的内容是:不论任何原因,当穿过闭合导体回路所包围面积的磁通量 Φ_m 发生变化时,在回路中都会出现感应电动势 ϵ_i ,而且感应电动势的大小总是与磁通量对时间 t 的变化率 $\frac{d\Phi_m}{dt}$ 成正比,用数学公式可表示为

$$\epsilon_i = k \frac{d\Phi_m}{dt} \quad (31-1)$$

上式中, k 是比例系数,在国际单位制中, ϵ_i 的单位是伏特, Φ_m 的单位是韦伯, t 的单位是秒,则有 $k=1$ 。如果再考虑到电动势的“方向”,就得到法拉第电磁感应定律的完整形式,即

$$\epsilon_i = - \frac{d\Phi_m}{dt} \quad (31-2)$$

应当指出,式(31-2)是针对单匝回路而言的。如果回路是由 N 匝密绕线圈组成的,而穿过每匝线圈的磁通量都等于 Φ_m ,那么通过 N 匝密绕线圈的磁通量则为 $\Psi = N\Phi_m$ 。我们常把 Ψ 称为磁链。

若导体回路是闭合的,感应电动势就会在回路中产生感应电流;若导线回路不是闭合的,回路中仍然有感应电动势,但是不会形成电流。如果闭合回路的电阻为 R ,则回路中的感应电流为

$$I_i = - \frac{1}{R} \frac{d\Phi_m}{dt} \quad (31-3)$$

利用式(31-3)以及 $I = \frac{dq}{dt}$,可计算出在时间间隔 $\Delta t = t_2 - t_1$ 内通过回路的电量。设在时刻 t_1 穿过回路所围面积的磁通量为 Φ_{m1} ,在时刻 t_2 穿过回路所围面积的磁通量为 Φ_{m2} 。于是,在 Δt 时间内,通过回路的电量为

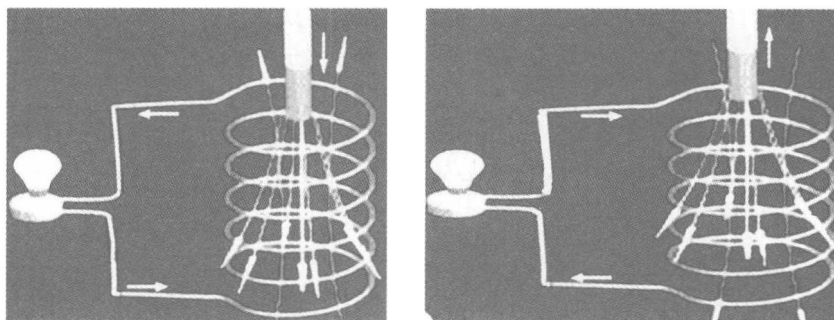
$$q = \int_{t_1}^{t_2} I dt = - \frac{1}{R} \int_{\Phi_{m1}}^{\Phi_{m2}} d\Phi_m = \frac{1}{R} (\Phi_{m1} - \Phi_{m2}) \quad (31-4)$$

比较式(31-3)和式(31-4)可以看出,感应电流与回路中磁通量随时间的变化率有关,变化率越大,感应电流越强;但回路中的感应电量则只与磁通量的变化量有关,而与磁通量的变化率(即变化的快慢)无关。在计算感应电量时,式(31-4)取绝对值。

31-3 楞次定律

式(31-2)中负号的物理意义是什么?楞次定律很好地说明了式中负号的意义。1833年楞次提出一种直接判定感生电流方向的方法:感应电流的方向总是要使感应电流所产生的磁场阻碍引起感应电流的磁通量的变化,这就是楞次定律。其具体步骤是:首先要判明通过闭合回路的原磁场 B 的方向,其次确定通过闭合回路的磁通量是增加还是减少,再次按照楞次定律来确定感应电流所激发的磁场 B' 的方向(磁通量增加时 B' 与 B 反向,磁通量减少时 B' 与 B 同向),最后根据右手螺旋定则从感应电流产生的磁场 B' 方向来确定回路中感应电流的方向。

在上述如图 31-1(a)所示的实验中,当磁铁棒以 N 极插向线圈或线圈向磁棒的 N 极运动时,通过线圈的磁通量增加,感应电流所激发的磁场方向则要使通过线圈面积的磁通量反抗线圈内磁通量的增加,所以线圈中感应电流所产生的磁感应线的方向与磁棒的磁感应线的方向相反,如图 31-2(a)所示。再根据右手螺旋法则,可确定线圈中的感应电流为逆时针方向。当磁铁棒的 N 极拉离线圈或线圈背离磁棒的 N 极运动时,通过线圈的磁通量减少,感应电流所激发的磁场则要使通过线圈面积的磁通量去补偿线圈内磁通量的减少,因而,它所产生的磁感应线的方向与磁棒的磁感应线的方向相同,如图 31-2(b)所示,则线圈中的感应电流方向与如图 31-1(a)所示中的相反,为顺时针。



(a) 感应电流逆时针流动

(b) 感应电流顺时针流动

· 图 31-2 楞次定律确定回路中感应电流的方向

其他几个实验也可以用同样的分析方法来确定感应电流的方向,读者可自行分析。

现介绍用法拉第电磁感应定律的表达式(31-2)中的负号来判定感应电动势的方向,我们规定:先选定回路的绕行正方向,再用右手螺旋法则确定此回路所围面积的正法线 n 的方向,如图 31-3 所示;然后确定通过回路面积的磁通量 Φ_m 的正负:凡穿过回路面积的 B 的方向与正法线方向相同者为正,相反者为负;最后再考虑 Φ_m 的变化,从式(31-2)来看,感应电动势 ϵ_i 的正、负只由 $\frac{d\Phi_m}{dt}$ 决定。若 $\frac{d\Phi_m}{dt} > 0$, 则 ϵ_i 为负值,即 ϵ_i 的方向与规定的绕行正方向相反;若 $\frac{d\Phi_m}{dt} < 0$, 则 ϵ_i 为正值,即 ϵ_i 方向与绕行正方向相同。

如图 31-3 (a)所示,因 B 与 n 一致,故 $\Phi_m > 0$;且知磁通量随时间增加,即 $\frac{d\Phi_m}{dt} > 0$,故依上面的规定, ϵ_i 为负值。即感应电动势 ϵ_i 方向与绕行正方向相反。

如图 31-3 (b) 所示, 因 B 与 n 一致, 故 $\Phi_m > 0$; 但磁通量随时间而减小, 即 $\frac{d\Phi_m}{dt} < 0$, 这时 ϵ_i 应是正值, 即 ϵ_i 方向与绕行正方向相同。

如图 31-3(c) 所示, 因 B 与 n 相反, 故 $\Phi_m < 0$; 当磁通量随时间增加时, 相对正法线方向则是减少, 因此, $\frac{d\Phi_m}{dt} < 0$, 这样 ϵ_i 是正值。即感应电动势 ϵ_i 方向与绕行正方向相同。

如图 31-3(d) 所示, 因为 B 与 n 相反, 故 $\Phi_m < 0$; 当磁通量随时间减少时, 即相当于沿正法线 n 方向增加, 因此, $\frac{d\Phi_m}{dt} > 0$, 很易确定出感应电动势 ϵ_i 方向与绕行正方向相反。

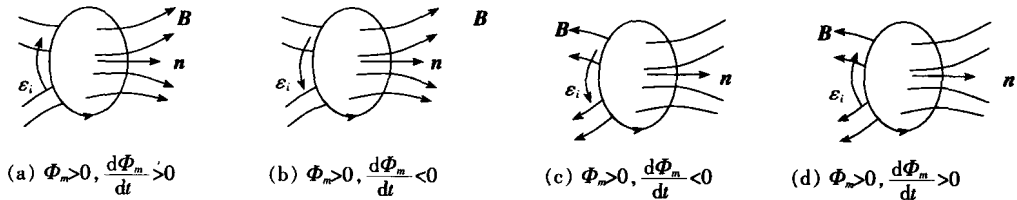


图 31-3 感应电动势的方向与磁通量变化的关系

用这种方法确定感应电动势的方向和用楞次定律确定的方向完全一致, 但在实际问题中用楞次定律来确定感应电动势的方向比较简便。

楞次定律是符合能量守恒定律的, 这里以在匀强磁场中导线框上活动的导线在磁场中运动时的能量转换来说明。活动导线移动时受到的磁场力总是反抗导线运动的。也就是说, 要使导线移动, 就需要外力做功, 这样就使其他形式的能量 (如机械能) 转化为感应电流通过回路时的电能。而由式 (31-2) 中负号决定的感应电动势方向和楞次定律所确定的方向一致, 这就恰恰说明了法拉第电磁感应定律式 (31-2) 中的负号所表明的感应电动势的方向与能量守恒定律有着内在的联系。

例 31-1 在时间间隔 $(0, t_0)$ 中, 长直导线通以 $I = kt$ 的变化电流, 方向向上, 式中 I 为瞬时电流, k 是常量, $0 < t < t_0$ 。如图 31-4 所示, 在此导线近旁平行地放一长方形线圈, 长为 b , 宽为 a , 线圈的一边与导线相距为 d , 设磁导率为 μ 的磁介质充满整个空间, 试求任一时刻线圈中的感应电动势。

解: 长直导线中的电流随时间变化时, 在它的周围空间里产生随时间变化的磁场, 穿过线圈的磁通量也随时间变化。所以在线圈中就产生感应电动势。先求出某一时刻穿过线圈的磁通量。在该时刻距直导线为 r 处的磁感强度 B 的大小为 $B = \frac{\mu I}{2\pi r}$ 。在线圈所在范围内, B 的方向都垂直于图面向里, 但它的大小各处一般不相同。将矩形面积划分成无限多与直导线平行的细长条面积元 $ds = bdr$, 设其中某一面积元 (图中斜线部分) ds 与 CD 相距为 r , ds 上各点 B 的大小视为相等。取 ds 的方向 (也就是矩形面积的法线方向) 也垂直纸面向里, 则穿过面积元 ds 的磁通量为

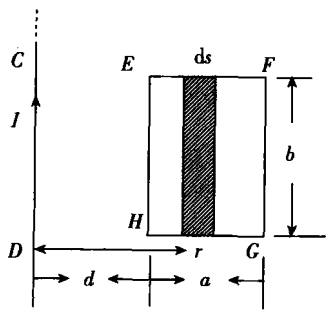


图 31-4 通电直导线与线圈

$$d\Phi_m = B \cdot ds = \frac{\mu I}{2\pi r} bdr = \frac{\mu kt}{2\pi r} bdr$$

在给定时刻(t 为定值),通过线圈所包围面积(S)的磁通量为

$$\Phi_m = \int_s d\Phi_m = \int_d^{a+d} \frac{\mu kt}{2\pi r} b dr = \frac{\mu bkt}{2\pi} \ln \frac{a+d}{d}$$

它随 t 而增加,所以线圈中的感应电动势大小为

$$\epsilon_i = \left| -\frac{d\Phi_m}{dt} \right| = \left| -\frac{d}{dt} \left(\frac{\mu bkt}{2\pi} \ln \frac{a+d}{d} \right) \right| = \frac{\mu bk}{2\pi} \ln \frac{a+d}{d}$$

根据楞次定律可知,为了反抗穿过线圈所包围面积、垂直图面向里的磁通量的增加,线圈中 ϵ_i 的绕行方向是逆时针的。

例 31-2 在磁感强度为 B 的均匀磁场中,有一平面线圈,由 N 匝导线绕成。线圈以角速度 ω 绕如图 31-5 所示的 OO' 轴转动, $OO' \perp B$, 设开始时线圈平面的法线 n 与 B 矢量平行,试求线圈中的感应电动势。

解: 因 $t=0$ 时,线圈平面的法线 n 方向与磁场强度 B 矢量方向平行,所以任一时刻线圈平面的法线 n 与 B 矢量的夹角为 $\theta = \omega t$ 。因此任一时刻穿过该线圈的磁链 $\Psi = N\Phi = NBS\cos\theta = NBS\cos\omega t$

根据电磁感应定律,这时线圈中的感应电动势为

$$\epsilon_i = -\frac{d\Psi}{dt} = -\frac{d}{dt}(NBS\cos\omega t) = NBS\omega\sin\omega t$$

式中 N 、 B 、 S 和 ω 都是常量,令 $NBS\omega = \epsilon_m$, 称为**电动势振幅**,则 $\epsilon_i = \epsilon_m \sin\omega t$ 。

如果回路电阻为 R ,则电路中的电流为

$$I_i = \frac{\epsilon_m}{R} \sin\omega t = I_m \sin\omega t$$

上式中, $I_m = \frac{\epsilon_m}{R}$ 称为**电流振幅**。由此可见在均匀磁场中做匀速转动的线圈能产生交流电。以上就是交流发电机的基本原理。

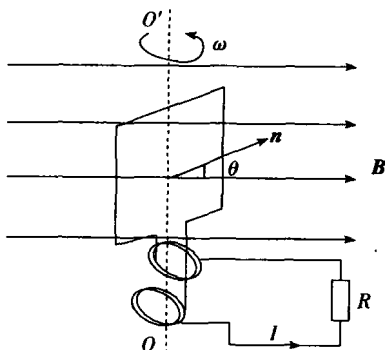


图 31-5 平面线圈在磁场中转动

§ 32 动生电动势 感生电动势 涡旋电场

上面已指出,不论什么原因,只要穿过回路所包围面积的磁通量发生变化,回路中就要产生感应电动势。而使回路中磁通量发生变化的方式通常有下述两种情况:一种是磁场不随时间变化,而回路中的某部分导体运动,使回路面积发生变化导致磁通量变化,使在运动导体中产生感应电动势,这种感应电动势称为**动生电动势**;另一种是导体回路、面积不变,由于空间磁场随时间改变,导致回路中产生感应电动势,这种感应电动势称为**感生电动势**。下面分别讨论这两种电动势。

32-1 动生电动势

如图 32-1 所示,在平面回路 $abcd$ 中,长为 L 的导

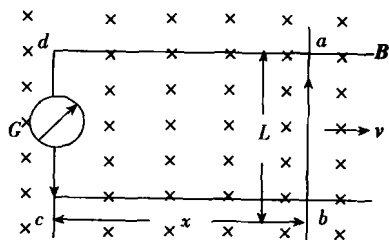


图 32-1 动生电动势