



面向21世纪课程教材
Textbook Series for 21st Century

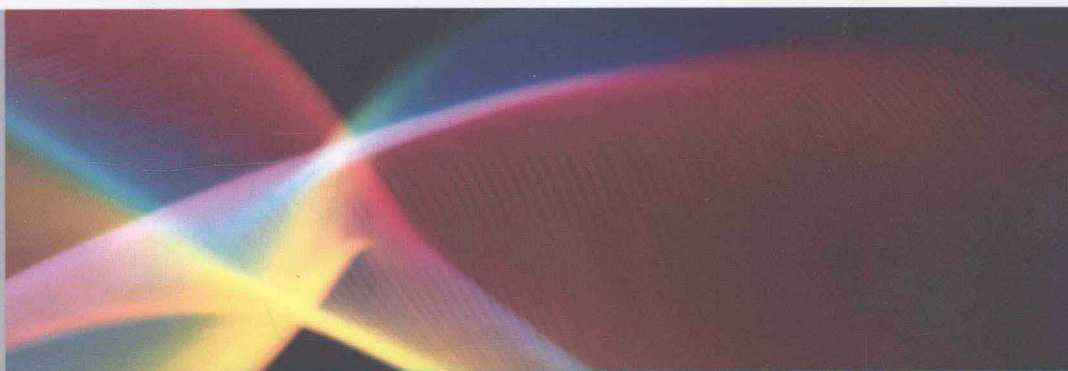


普通高等教育“十一五”国家级规划教材

物理学

(第四版)下卷

Physics



刘克哲 张承琚 编



高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS



面向 21 世纪 课 程 教 材
Textbook Series for 21st Century



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

物理学

(第四版) 下 卷



刘克哲 张承琚 编



高等教育出版社·北京
HIGHER EDUCATION PRESS · BEIJING

内容简介

本书第三版是普通高等教育“十一五”国家级规划教材,第二版是“面向21世纪课程教材”。以本书第二版为主讲教材的“物理学”课程被评为2004年度国家精品课程。本书根据教育部高等学校物理学与天文学教学指导委员会编制的《理工科非物理类专业大学物理课程教学基本要求》,从近代物理学的发展和 requirement 出发,将相对论和量子力学等近代物理内容融合到教材中,使物理学近代发展的新成果与物理学基本原理有机地结合起来。同时,为便于教学,本书保持了原教材深入浅出、紧贴教学实践和符合教学规律等特点,并适当降低了难度。与本书配套的有学习指导书、电子教案及网络虚拟课堂,通过书后所配学习卡上的账号、密码即可进入虚拟课堂学习。全书共20章,分上、下卷出版,本书为下卷。

本书可供理工科非物理类专业的基础物理课程作为教材使用,也可供其他相关专业选用,并可供中学物理教师进修、自学使用。

图书在版编目(CIP)数据

物理学.下卷/刘克哲,张承琚编.--4版.--北京:高等教育出版社,2012.7

ISBN 978-7-04-035729-5

I. ①物… II. ①刘…②张… 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(2012)第132431号

策划编辑 郭亚嫒
插图绘制 尹莉

责任编辑 郭亚嫒
责任校对 刘春萍

封面设计 张楠
责任印制 田甜

版式设计 马敬茹

出版发行 高等教育出版社
社址 北京市西城区德外大街4号
邮政编码 100120
印刷 北京宏伟双华印刷有限公司
开本 787mm×960mm 1/16
印张 24.25
字数 440千字
购书热线 010-58581118
咨询电话 400-810-0598

网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.landaco.com>
<http://www.landaco.com.cn>
版 次 1987年9月第1版
2012年7月第4版
印 次 2012年7月第1次印刷
定 价 33.90元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换
版权所有 侵权必究
物料号 35729-00

目 录

第十二章 电磁感应和麦克斯韦电磁理论	1
§ 12-1 电磁感应及其基本规律	1
一、电磁感应现象	1
二、电磁感应定律	3
三、感应电动势	4
§ 12-2 互感和自感	7
一、互感现象	7
二、自感现象	9
* § 12-3 涡流和趋肤效应	11
一、涡流	11
二、趋肤效应	12
§ 12-4 磁场的能量	13
§ 12-5 超导体的电磁特性	16
一、超导体的主要电磁特性	16
* 二、对超导体主要电磁特性的解释	18
§ 12-6 麦克斯韦电磁理论	21
一、位移电流	21
二、麦克斯韦方程组	24
§ 12-7 电磁波的产生和传播	25
一、从电磁振荡到电磁波	25
二、偶极振子发射的电磁波	26
* 三、赫兹实验	27
四、电磁波的波谱	28
* § 12-8 电磁波理论	29
* § 12-9 电磁场的能量和动量	32

一、电磁场的能量密度和能流密度	32
二、电磁场的动量和光压	35
习题	38
第十三章 电路和磁路	41
§ 13-1 基尔霍夫定律	41
一、基尔霍夫第一定律	41
二、基尔霍夫第二定律	42
三、注意几个问题	43
§ 13-2 交流电和交流电路的基本概念	44
一、交流电的类型	44
二、描述简谐交流电的特征量	45
三、单元件的阻抗和相位差	46
§ 13-3 交流电路的矢量图解法	49
一、串联电路	49
二、并联电路	50
§ 13-4 交流电路的复数解法	52
一、交流电简谐量与复数的对应关系	52
二、元件和电路的复阻抗	53
三、交流电路的基尔霍夫方程组及其复数形式	55
§ 13-5 交流电的功率	56
一、瞬时功率和有功功率	56
二、视在功率和无功功率	57
* 三、提高功率因数的意义和方法	59
* § 13-6 串联共振电路	60
一、串联共振现象	60
二、串联共振电路的品质因数(Q值)	61
三、串联共振电路的频率选择性	62
§ 13-7 磁路和磁路定律	63
一、在磁介质分界面上磁感应线的折射	63
二、磁路的概念	64
三、磁路定律	65
习题	67
第十四章 光学	70
§ 14-1 几何光学中的基本定律和原理	70
一、光的直线传播定律	70
二、光的反射定律和折射定律	71

三、全反射	72
四、光的可逆性原理	72
§ 14-2 光在球面上的折射	73
一、介绍几个概念	73
二、球面折射公式	73
三、高斯公式	75
四、球面折射成像的作图法	76
五、球面折射的横向放大率	77
§ 14-3 光在球面上的反射	78
§ 14-4 薄透镜	80
一、薄透镜	80
二、薄透镜成像	81
三、放大镜	82
§ 14-5 光波及其相干条件	83
一、光波	83
二、光程	85
三、相干条件	86
四、获得相干光波的方法	87
§ 14-6 分波前干涉	88
一、杨氏实验	88
* 二、对干涉条纹可见度的分析	90
§ 14-7 分振幅干涉	94
一、薄膜干涉	94
二、迈克耳孙干涉仪	98
§ 14-8 惠更斯-菲涅耳原理和衍射现象分类	100
一、惠更斯-菲涅耳原理	100
二、衍射现象的分类	102
§ 14-9 单缝和圆孔的夫琅禾费衍射	102
一、单缝的夫琅禾费衍射	102
二、圆孔的夫琅禾费衍射	105
§ 14-10 衍射光栅	107
§ 14-11 衍射规律的应用	111
一、光学系统分辨本领的分析	111
二、X射线在晶体中的衍射	112
* § 14-12 信息光学	113
一、光学信息处理	114

二、全息照相	116
§ 14-13 光的偏振态	118
一、自然光和线偏振光	118
二、部分偏振光	119
* 三、椭圆偏振光和圆偏振光	120
§ 14-14 偏振光的获得和检测	121
一、偏振光的获得	121
二、偏振光的检测	124
§ 14-15 旋光现象和电磁场的光效应	126
一、旋光现象	126
* 二、磁致旋光效应	127
* 三、电光效应	128
§ 14-16 光的吸收、色散和散射	129
一、光的吸收	129
二、光的色散	131
三、光的散射	133
习题	135
第十五章 波与粒子	139
§ 15-1 黑体辐射	139
一、热辐射	139
二、黑体辐射的基本规律	141
三、普朗克辐射公式和能量子的概念	142
§ 15-2 光电效应	144
一、光电效应的实验规律	144
二、经典理论遇到的困难	146
三、爱因斯坦的光子论及其对光电效应的解释	147
§ 15-3 康普顿效应	149
一、康普顿效应及其观测	149
二、光子论对康普顿效应的解释	149
三、光的波粒二象性	151
§ 15-4 氢原子光谱和玻尔的量子论	152
一、原子的核型结构模型及其与经典理论的矛盾	152
二、氢原子光谱的规律性	153
三、玻尔的量子论	155
§ 15-5 微观粒子的波动性	157
一、德布罗意波及其实验观测	157

二、不确定关系	159
习题	162
第十六章 量子力学基础	165
§ 16-1 波函数及其统计诠释	165
一、经典物理学中的波函数	165
二、在量子力学中波函数的统计意义	166
三、波函数的空间对称性——宇称的概念	167
§ 16-2 薛定谔方程	168
一、含时薛定谔方程	168
二、定态薛定谔方程	170
三、力学量的算符表示	171
四、本征函数、本征值和平均值	171
五、概率守恒和概率流密度矢量	172
§ 16-3 一维势阱和势垒问题	173
一、一维无限深方势阱	173
二、势垒穿透和隧道效应	176
§ 16-4 一维谐振子问题	178
一、一维谐振子的定态薛定谔方程	178
二、一维谐振子的本征函数和能量本征值	179
* § 16-5 氢原子	182
一、有心力场中的薛定谔方程	182
二、角动量的本征函数和相应的量子数	183
三、径向波函数和氢原子的能级	185
四、能量的本征函数和能级的简并度	186
五、类氢离子	186
* § 16-6 氢原子中电子的概率分布	187
一、电子概率的径向分布	187
二、电子概率的角度分布	189
习题	190
第十七章 电子的自旋和原子的壳层结构	192
§ 17-1 原子的轨道磁矩和正常塞曼效应	192
一、原子的轨道磁矩	192
二、外磁场对轨道磁矩的作用和正常塞曼效应	194
§ 17-2 电子的自旋	196
一、施特恩-格拉赫实验	196
二、电子自旋和自旋磁矩	198

三、碱金属原子光谱的精细结构	199
四、自旋-轨道相互作用	200
五、单电子体系的原子磁矩	203
* 六、反常塞曼效应	204
* § 17-3 <i>LS</i> 耦合和 <i>jj</i> 耦合	205
一、原子的电子组态	205
二、 <i>LS</i> 耦合	206
三、 <i>jj</i> 耦合	208
四、选择定则	209
§ 17-4 原子的壳层结构	210
一、元素性质的周期性	210
二、原子中电子的壳层结构	211
三、原子的基态	213
§ 17-5 X 射线	214
一、X 射线的发射和发射谱	214
* 二、俄歇电子和同步辐射	217
* § 17-6 激光	218
一、激光原理	218
二、激光的应用	221
习题	221
第十八章 热力学与统计物理学概述	223
§ 18-1 热力学第一定律	223
一、热力学中的基本概念	223
二、热力学第一定律	226
三、热容和焓	227
§ 18-2 理想气体的热力学过程	229
一、等体过程	229
二、等压过程	230
三、等温过程	231
四、绝热过程	231
* 五、多方过程	233
§ 18-3 卡诺循环	235
一、循环	235
二、卡诺循环	237
§ 18-4 热力学第二定律	239
一、可逆过程和不可逆过程	239

二、热力学第二定律的两种表述	240
三、热力学第二定律的实质	242
§ 18-5 卡诺定理	243
§ 18-6 熵增加原理	244
一、熵的概念	244
二、熵增加原理和热力学基本关系式	246
§ 18-7 自由能和自由焓	249
一、自由能和最大功原理	249
二、自由焓和化学势	250
§ 18-8 热力学第三定律	251
一、获得超低温的有效方法	251
二、热力学第三定律	252
§ 18-9 统计物理学的基本概念	255
一、粒子运动状态的描述	255
二、系统微观运动状态的描述	257
三、三种系统及其微观态数	258
四、等概率假设	260
§ 18-10 玻尔兹曼统计	260
一、玻尔兹曼系统的最概然分布——玻尔兹曼分布	260
二、麦克斯韦速度分布律	261
三、在重力场中粒子按高度的分布	263
* 四、固体的热容和爱因斯坦理论	264
§ 18-11 玻色统计和费米统计	266
一、玻色系统和费米系统的最概然分布	266
二、光子气体	266
* 三、玻色-爱因斯坦凝聚	268
* 四、金属中的自由电子气体	271
* 五、晶格振动——声子以及元激发的概念	272
习题	275
第十九章 原子核和粒子	278
§ 19-1 原子核的一般性质	278
一、原子核的组成	278
二、原子核的质量数和电荷数	279
三、原子核的大小和形状	280
* § 19-2 原子核的量子性质	281
一、原子核的自旋和磁矩	281

二、核磁共振	282
三、原子核的电四极矩	283
四、原子核的宇称和统计性	285
§ 19-3 核力	285
一、核力的性质	285
二、核力的介子场理论	286
三、核力的夸克模型	287
* § 19-4 原子核的结构模型概述	288
一、壳层模型	288
二、集体模型	290
§ 19-5 原子核的稳定性和结合能	292
一、核素图和 β 稳定线	292
二、原子核的结合能	294
三、结合能的释放和利用	295
§ 19-6 原子核衰变的基本规律	299
一、放射性衰变	299
二、放射性衰变的规律	299
* 三、放射系	302
§ 19-7 三类放射性衰变	303
一、 α 衰变和衰变能的概念	303
二、 β 衰变和中微子假说	305
三、 γ 衰变和穆斯堡尔效应	308
四、放射性同位素的应用	312
§ 19-8 对粒子的探索和研究	314
§ 19-9 粒子及其相互作用	318
一、关于“基本”粒子	318
二、粒子内在属性的描述	319
三、物质存在的基本形式	321
四、粒子的相互作用	323
五、粒子的分类	323
六、强子结构的夸克模型	324
§ 19-10 粒子物理的标准模型	325
一、三代费米子	325
二、基本相互作用	326
三、规范玻色子	327
习题	328

第二十章 天体和宇宙	330
§ 20-1 宇宙中的天体	330
一、恒星	331
二、太阳系	332
三、星际物质	332
四、星系和星系团	333
§ 20-2 太阳和它的八大行星	334
一、太阳的结构和活动	334
二、太阳的八大行星	338
§ 20-3 恒星及其演化	342
一、恒星的一般物理特性	343
二、恒星的演化过程略述	346
§ 20-4 致密天体	347
一、白矮星	348
二、中子星	349
三、黑洞	350
§ 20-5 标准宇宙学模型	351
一、大爆炸宇宙学的观测、实验基础	351
二、大爆炸宇宙学的理论基础	353
三、宇宙学的标准模型——大爆炸宇宙学	355
四、宇宙膨胀的规律	356
五、大爆炸宇宙学理论模型的疑难	358
习题	359
习题答案	361
附录	369
(一) 物理学常用常量	369
(二) 矢量分析中的常用关系式	370
(三) 国际单位制的有关规定	372
主要参考资料	373

第十二章 电磁感应和麦克斯韦电磁理论

电磁感应现象和规律的发现,揭示了电与磁之间的相互影响和相互转化的关系,这不仅对于预言电磁波的存在及其性质具有重要意义,并且为麦克斯韦总结电磁场理论提供了重要的实验依据,从而构成了电磁理论的基本组成部分。

麦克斯韦在系统地总结了前人的理论和实验的基础上,提出了涡旋电场和位移电流两个重要概念,得到了描述电磁场基本性质和规律的麦克斯韦方程组,从而建立了完整的电磁理论体系。同时,麦克斯韦用自己的理论预言了电磁波的存在,揭示了光的电磁本性。麦克斯韦的这些成就成为物理学发展历程中一次重大的认识上的飞跃。

§ 12 - 1 电磁感应及其基本规律

一、电磁感应现象

电磁感应现象虽然种类繁多,但可以把它们分成两大类,一类是磁场相对于线圈或导体回路改变其大小和方向而引起的电磁感应现象,另一类是线圈或导体回路相对于磁场改变其面积或取向而引起的电磁感应现象。让我们分别讨论这两类现象,并从中得出反映电磁感应现象规律的结论。

1. 磁场相对于线圈或导体回路改变大小或方向所引起的电磁感应现象

这类现象可以用图 12 - 1 来表示。图中,线圈 A 和电流表 G 构成闭合回路,若回路中出现电动势,必将形成电流,从电流表 G 的偏转情形可以判断回路中电流的大小和方向。通过导体回路的磁场是由通电螺线管 C 所产生,并且可以用变阻器 R 和换向开关 S 改变其大小和方向。首先,用变阻器 R 改变通过螺线管 C 的电流的大小,通过导体回路的磁场的大小也相应改变。我们发现,这时回路中出现了电流,并且变阻器改变的幅度越大、改变的速率越快,回路中产生的电流也越大。然后,固定螺线管电流的大小不变,而用换向开关 S 改变通过螺线管 C 的电流的方向,从而改变通过回路的磁场的方向。我们发现,当换向开关 S 从一端扳到另一端时,导体回路中出现了电流,并且换向改变得越快,回路中的电流也越大。

上述结果说明,磁场相对于线圈或回路改变大小或方向,会在回路中产生电流,并且改变得越迅速产生的电流越大。对于这一结果,我们可以用下面的关系

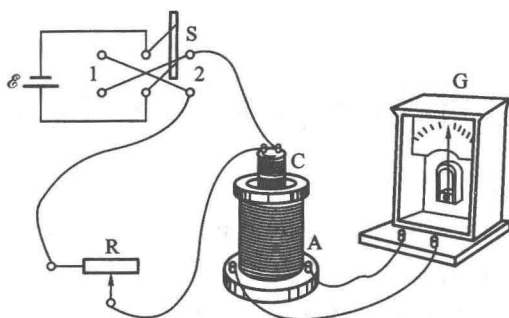


图 12-1

来表示：

$$I \propto \frac{d}{dt} B. \quad (12-1)$$

2. 线圈或导体回路相对于磁场改变面积或取向所引起的电磁感应现象

这类现象可以用图 12-2 来表示. 图 12-2(a) 表示, 导体回路 $ABCD$ 置于磁场中, 磁感应线穿过回路平面, 导线框的 AB 边可以沿 DA 边和 CB 边滑动, 以改变导体回路 $ABCD$ 的面积. 实验发现, 在 AB 滑动过程中, 灵敏电流计 G 的指针会偏转, 并且滑动得越快, 电表指针的偏转越大. 图 12-2(b) 表示, 处于磁场中的导体回路 $abcd$ 可以绕其轴线 OO' 旋转, 以改变回路相对于磁场的取向. 实验发现, 当导体回路 $abcd$ 转动时灵敏电流计 G 的指针会偏转, 并且导体回路转动得越快, 电流计指针的偏转也越大.

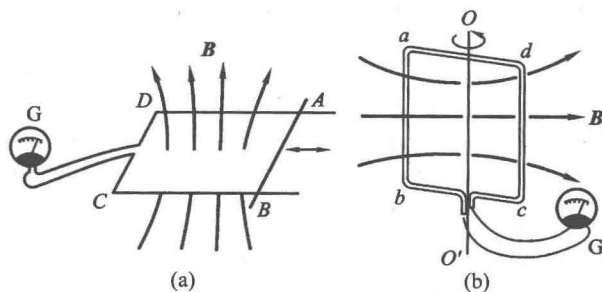


图 12-2

上述情况表明, 导体回路相对于磁场改变面积或取向会在回路中产生电流, 并且改变得越迅速产生的电流越大. 对于这一结果, 我们可以用下面的关系来表示:

$$I \propto \frac{d}{dt} S. \quad (12-2)$$

在以上两类实验中,虽然实验的具体情形不同,但都在导体回路中产生了电流,这说明这两类实验存在着共同的因素.显然,此共同因素就是实验中穿过导体回路的磁通量都发生了变化.因此,可以把式(12-1)和式(12-2)结合起来,写为

$$I \propto \frac{d}{dt}(\mathbf{B} \cdot \mathbf{S}) = \frac{d}{dt}(\Phi). \quad (12-3)$$

这就是说,只要穿过导体回路的磁通量发生变化,该导体回路中就会产生电流.

由磁通量的变化所引起的回路电流,称为感应电流.在电路中有电流通过,说明这个电路中存在电动势,由磁通量的变化所产生的电动势称为感应电动势.电流与电动势相比,电动势具有更根本的性质.于是我们可以得到这样的结论:当穿过导体回路的磁通量发生变化时,回路中必定产生感应电动势.我们把由于磁通量变化产生感应电动势的现象,统称为电磁感应现象.

二、电磁感应定律

1. 法拉第电磁感应定律

实验表明,导体回路中感应电动势 \mathcal{E} 的大小与穿过该回路的磁通量的时间变化率 $d\Phi/dt$ 成正比.这个结论就是法拉第(M. Faraday, 1791—1867)电磁感应定律.在国际单位制中,此定律可以表示为

$$\mathcal{E} = - \frac{d\Phi}{dt}. \quad (12-4)$$

首先让我们阐明式(12-4)中的负号的意义.式中包含了两个量 \mathcal{E} 和 Φ ,都是标量,其方向是用正、负号来表示的.是正号还是负号,要根据与预先设定的标定方向比较而得:与标定方向相同为正号,与标定方向相反为负号.任取绕行方向作为导体回路中电动势的标定方向(如图12-3中虚线箭头所示),取以导体回路为边界的曲面的法向单位矢量 e_n 的方向为磁通量的标定方向,并且规定这两个标定方向满足右螺旋关系.在图12-3中如果磁场由下向上穿过回路, $\Phi > 0$,并且磁场在增大, $d\Phi/dt > 0$,根据式(12-4),应有 $\mathcal{E} < 0$,所以感应电动势的方向与虚线箭头的方向相反.如果磁场不是在增大而是在减小,则此时 $d\Phi/dt < 0$,根据式(12-4),应有 $\mathcal{E} > 0$,感应电动势的方向与虚线箭头的方向相同(图中所画的就是这种情形).其他的情形请读者自行练习.由上面的分析可见,式(12-4)中的负号是由于规定了两个标定方向满足右螺旋关系而出现的.在不强调感应电动势的方向

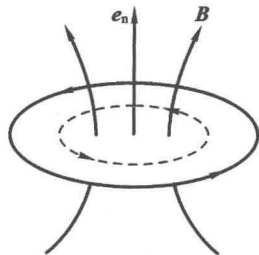


图 12-3

时,此负号可以省略.

式(12-4)中的 Φ 代表导体回路的总磁通量,如果回路不只一匝,而是有 n 匝的线圈,各匝线圈的磁通量分别为 $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_n$,那么

$$\Phi = \varphi_1 + \varphi_2 + \dots + \varphi_n.$$

如果每匝的磁通量都相等,并等于 φ ,则 $\Phi = n\varphi$,于是公式(12-4)成为下面的形式:

$$\mathcal{E} = -n \frac{d\varphi}{dt}. \quad (12-5)$$

2. 楞次定律

感应电动势的方向是反映电磁感应现象规律的一个重要方面.楞次(Э. X. Ленц, 1804—1865)定律可以表述为,闭合回路中感应电流的方向,总是使得它所激发的磁场阻碍引起感应电流的磁通量的变化的.也可以表述为,感应电流的效果总是反抗引起感应电流的原因的.

在一些实际问题中,特别是并不要求确定感应电流的具体方向而只要求判断感应电流所引起的机械效果的问题中,使用楞次定律的后一种表述是很方便的.

楞次定律中的“阻碍”或“反抗”是能量守恒定律在电磁感应现象中的具体体现.当把磁棒插入线圈回路时,按照楞次定律,线圈中感应电流产生的磁场方向是阻碍磁棒继续插入的,若要继续插入则必须克服该磁场力而做功.线圈中感应电流所释放出的焦耳热,正是为插入磁棒所付出的机械能转化而来的.

三、感应电动势

我们已经知道,电路中的电动势是由非静电性电场对电荷做功所提供的,那么提供感应电动势的非静电性电场是什么呢?

1. 动生电动势

由于导体在磁场中运动所产生的感应电动势,称为动生电动势.动生电动势实际上对应于前面所讨论的第二类电磁感应现象,在导体回路相对于磁场改变面积或取向的过程中,必定有导体的运动.所以,动生电动势可以用洛伦兹力来解释.长度为 l 的导体棒 CD 在磁感应强度为 B 的磁场中以速度 v 运动,如图12-4所示.在导体运动过程中,导体中的每个自由电子受到的洛伦兹力可以表示为

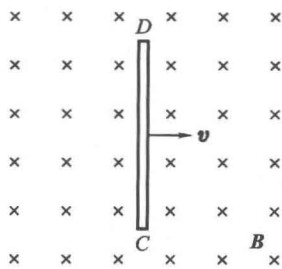


图 12-4

$$\mathbf{F} = -e \mathbf{v} \times \mathbf{B}, \quad (12-6)$$

式中 $-e$ 是电子的电荷量,力 \mathbf{F} 的方向由 D 指向 C ,在这个力的作用下,电子向 C 端运动,使 C 端带负电, D 端带正电,相当于一个电源.所以,作用于自由电子的洛伦兹力,就是提供动生电动势的非静电力.该非静电力所对应的非静电性电场 \mathbf{E}_D 就是作用于单位正电荷的洛伦兹力,即

$$\mathbf{E}_D = \frac{\mathbf{F}}{-e} = \mathbf{v} \times \mathbf{B}. \quad (12-7)$$

根据电动势的定义,在运动导体上产生的动生电动势可以表示为

$$\mathcal{E}_D = \int_{-}^{+} \mathbf{E}_D \cdot d\mathbf{l} = \int_{-}^{+} (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \cdot d\mathbf{l} \quad (12-8)$$

从以上讨论可以得到下面的结论:

(1) 动生电动势的产生并不要求导体必须构成闭合回路.构成回路仅仅是可以形成电流,而不是产生动生电动势的必要条件;

(2) 式(12-8)表明,只有在磁场中运动的导体才可能产生动生电动势,不运动导体或不在磁场中运动的导体,不存在产生动生电动势的可能性;

(3) 要产生有意义的动生电动势必须同时满足 \mathbf{v} 不平行于 \mathbf{B} ,并且 $(\mathbf{v} \times \mathbf{B})$ 不垂直于导线 l 这两个条件,这两个条件用一句通俗话表示,就是导线运动必须切割磁感应线.

2. 感生电动势

导体不动,而由于磁场的大小或方向变化所产生的感应电动势,称为感生电动势.感生电动势实际上对应于前面所讨论的第一类电磁感应现象.实验表明,变化的磁场能够在空间激发一种电场,称为感生电场(又名涡电场).感生电场也像静电场一样,能够对电荷产生作用力;但其电场线却与静电场的不同,是闭合线,因而感生电场不是保守场.正是由于这种非静性电场的出现,才使处于变化磁场中的导体产生感生电动势.如果用 \mathbf{E}_w 表示感生电场的电场强度,则它在闭合回路 L 中产生的感生电动势 \mathcal{E}_w 可以表示为

$$\mathcal{E}_w = \oint_L \mathbf{E}_w \cdot d\mathbf{l}. \quad (12-9)$$

感生电动势的产生同样不要求电路闭合,处于感生电场 \mathbf{E}_w 中的一段导线 ab 中产生的感生电动势可以表示为

$$\mathcal{E}_w = \int_a^b \mathbf{E}_w \cdot d\mathbf{l}. \quad (12-10)$$

将式(12-4)代入式(12-9),得

$$\oint_L \mathbf{E}_w \cdot d\mathbf{l} = -\frac{d\Phi}{dt} = -\iint_S \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \cdot d\mathbf{S}. \quad (12-11)$$