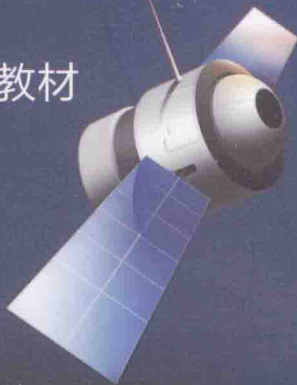


21世纪高等院校规划教材



大学物理学

(下)



许迈昌 邓永和 姚 敏 主编



湘潭大学出版社

大学物理学

(下)

主 编：许迈昌 邓永和 姚 敏
副 主 编：蒋纯志 唐淑红 谢常清
参编人员：陈 桥 赵 萍 陈亚琦

湘潭大学出版社

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、邓永和、姚敏担任主编，蒋纯志、唐淑红、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、蒋纯志编写，流体力学基础部分（第6章）由赵萍编写，电磁学部分（第7章、第8章、第9章）由邓永和、姚敏编写，光学（第10章）及近代物理学部分（第11章）由许迈昌、唐淑红编写，参加编写和讨论的还有陈桥、陈亚琦等，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

2014年7月

目 录

第 8 章 稳恒磁场

§ 28 洛伦兹力与安培力	(1)
28-1 磁场	(1)
28-2 洛伦兹力	(4)
28-3 安培力	(8)
§ 29 磁矩和磁力矩	(10)
§ 30 电流的磁场	(12)
30-1 毕奥-萨伐尔定律	(13)
30-2 磁场的高斯定理	(18)
30-3 安培环路定理	(20)
§ 31 磁介质	(26)
31-1 磁介质	(26)
31-2 相对磁导率和磁导率	(27)
31-3 介质中的安培环路定理	(28)
31-4 铁磁质的特性	(28)

第 9 章 电磁场

§ 32 电流密度与电动势	(37)
32-1 电流与电流密度	(37)
32-2 电动势	(40)
§ 33 电磁感应定律	(41)
33-1 电磁感应现象	(41)
33-2 法拉第电磁感应定律	(43)
33-3 楞次定律	(44)
§ 34 动生电动势 感生电动势 涡旋电场	(47)
34-1 动生电动势	(48)

34-2 感生电动势·····	(50)
§ 35 自感 互感 磁场的能量 ·····	(52)
35-1 自感·····	(52)
35-2 互感·····	(54)
35-3 磁场的能量·····	(56)
§ 36 位移电流 麦克斯韦方程组 ·····	(59)
36-1 位移电流·····	(60)
36-2 麦克斯韦方程组·····	(63)
§ 37 电磁波的产生及其基本性质 ·····	(64)
37-1 电磁波的产生·····	(64)
37-2 电磁波的基本性质·····	(66)
§ 38 电磁波与人类文明 ·····	(68)
 第 10 章 光 学	
§ 39 几何光学基本原理与应用 ·····	(77)
39-1 几何光学的基本定律·····	(78)
39-2 物和像·····	(80)
39-3 薄透镜·····	(80)
39-4 助视仪: 放大镜 显微镜 望远镜 ·····	(83)
§ 40 眼睛及其光学特性 ·····	(87)
40-1 眼睛的构造·····	(87)
40-2 人眼的调节与适应·····	(88)
40-3 人眼成像原理及其分辨本领·····	(91)
40-4 人眼的缺陷和目视光学仪器的视度调节·····	(94)
§ 41 分波阵面干涉与光程 ·····	(96)
41-1 光波 光的相干性·····	(96)
41-2 光程与光程差·····	(97)
41-3 杨氏双缝干涉实验·····	(98)
§ 42 分振幅干涉: 薄膜干涉·····	(101)
42-1 等厚干涉 ·····	(101)
42-2 增透膜和增反膜 ·····	(105)
42-3 迈克尔逊干涉仪 ·····	(107)
§ 43 光的衍射 光学仪器的分辨本领·····	(109)
43-1 光的衍射现象 惠更斯-菲涅耳原理 ·····	(109)

43-2 光学仪器的分辨率	(110)
§ 44 夫琅和费单缝衍射	(113)
44-1 衍射条纹的位置	(113)
44-2 夫琅和费单缝衍射的光强分布	(115)
§ 45 光栅衍射	(117)
45-1 光栅衍射条纹的形成与特点	(117)
45-2 光栅衍射条纹的缺级	(119)
§ 46 光的偏振	(122)
46-1 自然光和偏振光	(123)
46-2 偏振片 起偏和检偏	(124)
46-3 反射光和折射光的偏振	(126)
46-4 光的双折射现象	(128)
46-5 旋光现象	(132)
46-6 光的吸收	(133)

第 11 章 近代物理学

§ 47 狭义相对论	(144)
47-1 狭义相对论的两个基本原理	(145)
47-2 洛伦兹坐标变换和速度变换	(147)
47-3 相对论时空观	(151)
47-4 相对论动力学基础	(155)
* 47-5 电磁场的相对性	(158)
* 47-6 广义相对论简介	(160)
§ 48 量子论的出现	(164)
48-1 热辐射 普朗克量子假说	(165)
48-2 光的粒子性	(168)
48-3 氢原子光谱和玻尔理论	(170)
§ 49 量子力学的基本原理	(174)
49-1 粒子的波动性	(174)
49-2 物质波是一种概率波	(176)
49-3 不确定关系	(177)
49-4 薛定谔方程及其应用	(179)
* 49-5 力学量算符与本征态	(188)
49-6 氢原子的量子力学处理	(191)

49-7 电子自旋	(194)
49-8 原子核外电子的壳层结构与排布	(196)
§ 50 激光的产生、特性及应用	(198)
50-1 激光的产生	(199)
50-2 激光器的种类	(203)
50-3 激光的特性及应用	(205)
§ 51 X 射线及其应用	(206)
51-1 X 射线的发现 布拉格公式	(206)
51-2 X 射线的产生机制	(208)
51-3 康普顿散射	(210)
51-4 X 射线的吸收	(213)
§ 52 能带与半导体	(214)
52-1 固体的能带结构	(214)
52-2 半导体及其应用	(216)
52-3 超导体	(220)
§ 53 核物理与基本粒子	(224)
53-1 原子核物理	(224)
53-2 粒子物理简介	(230)
附 录	(244)
参考文献	(248)

第 8 章 稳恒磁场

前一章我们研究了相对于观察者静止的电荷所激发的电场的性质与作用规律。从本章起我们可以知道,在运动电荷周围,不仅存在着电场而且还存在着磁场。磁场和电场一样也是物质的一种形态。1820 年,丹麦的奥斯特发现了电流的磁效应,当电流通过导线时,引起导线近旁的小磁针偏转,开启了电磁学研究的新纪元,打开了电磁应用的新领域。1837 年惠斯通、莫尔斯发明了电动机,1876 年美国的贝尔发明了电话…迄今为止,无论科学技术、工程应用、人类生活都与电磁学有着密切关系。电磁学给人们开辟了一条广阔的认识自然、征服自然的道路。

在学习了静电场之后,本章主要介绍磁场的基本性质和规律,磁场与运动电荷和电流的相互作用产生微观的洛伦兹力和宏观的安培力,磁场对载流导线产生的磁力矩。

磁场的源是电流,电流与磁场的关系有两条基本规律,即毕奥-萨伐尔定律和安培环路定律。学习过程中注意和电场的处理方法进行对比,在磁场的求解过程中强调对称性的意义及分析方法。

在讨论了真空中稳恒电流产生磁场的基本概念和一般规律之后,分析磁介质中磁场的一些基本规律,讨论磁介质在磁场中的磁化以及相互影响的规律。

§ 28 洛伦兹力与安培力

28-1 磁场

磁现象的发现要比电现象早得多,早在公元前人们就知道磁石(Fe_3O_4)能吸引铁,11 世纪我国发明了指南针。但是,直到 19 世纪,发现了电流的磁场和磁场对电流的作用以后,人们才逐渐认识到磁现象和电现象的本质以及它们之间的联系,并扩大了磁现象的应用范围。到 20 世纪初,由于科学技术的进步和原子结构理论的建立和发展,人们进一步认识到磁现象起源于运动电荷,磁场也是物质的一

种形式,磁力是运动电荷之间除静电力以外的相互作用力。

1. 基本磁现象 磁场

无论是天然磁石或是人工磁铁都有吸引铁、钴、镍等物质的性质,这种性质称为磁性。条形磁铁及其他任何形状的磁铁都有两个磁性最强的区域,称为磁极。将一条形磁铁悬挂起来,其中指北的一极是北极(用 N 表示),指南的一极是南极(用 S 表示)。实验指出,极性相同的磁极相互排斥,极性相反的磁极相互吸引。

在相当长的一段时间内,人们一直把磁现象和电现象看成彼此独立无关的两类现象。直到 1820 年,奥斯特首先发现了电流的磁效应。后来安培发现放在磁铁附近的载流导线或载流线圈,也要受到力的作用而发生运动。进一步的实验还发现,磁铁与磁铁之间,电流与磁铁之间,以及电流与电流之间都有磁相互作用。上述实验现象导致了人们对“磁性本源”的研究,使人们进一步认识到磁现象起源于电荷的运动,磁现象和电现象之间有着密切的联系,主要表现在:

(1) 有电流经过的导线(也称为载流导线)附近的磁针,会受到力的作用而发生偏转,如图 28-1 所示。

(2) 放在蹄形磁铁两极间的载流导线,也会受力而运动,如图 28-2 所示。

(3) 载流导线之间也有相互作用力。当两平行载流直导线的电流方向相同时,它们相互吸引;电流方向相反时,则相互排斥,如图 28-3 所示。

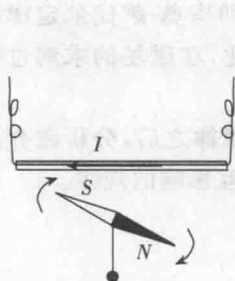


图 28-1 载流导线对
磁场的作用

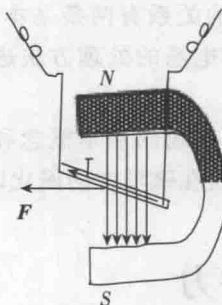


图 28-2 U 形永久磁铁两极
间的载流导线的受力作用

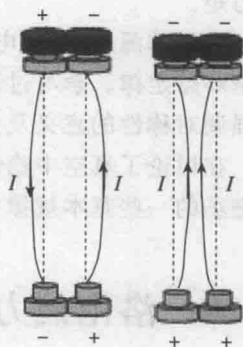


图 28-3 载流直导线间
的相互作用

(4) 通过磁极间的运动电荷也受到力的作用。例如,电子射线管,当阴极和阳极分别接到高压电源的正极和负极上时,电子流通过狭缝形成一束电子射线。如果我们在电子射线管外面放一块磁铁,可以看到电子射线的路径发生弯曲。

由于电流是大量电荷做定向运动形成的,所以,上述一系列事实说明,在运动电荷周围空间存在着磁场;在磁场中的运动电荷要受到磁场力(简称磁力)的作用。

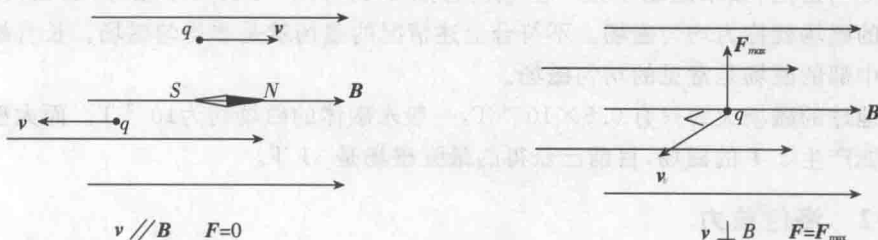
磁场不仅对运动电荷或载流导线有力的作用,它和电场一样,也具有能量。这正是磁场物质性的表现。

2. 磁感应强度

在静电学中,我们利用电场对静止电荷有电场力作用这一表现,引入电场强度 E 来定量地描述电场的性质。与此类似,我们利用磁场对运动电荷有磁力作用这一表现,引入磁感应强度 B 来定量地描述磁场的性质。其中, B 的方向表示磁场的方向, B 的大小表示磁场的强弱。运动电荷在磁场中的受力情况,如图 28-4 所示。

由大量实验可以得出如下结果:

(1) 运动电荷在磁场中所受的磁力随电荷的运动方向与磁场方向之间的夹角的变化而变化。当电荷运动方向与磁场方向一致时,它不受磁力作用,如图 28-4(a)所示。而当电荷运动方向与磁场方向垂直时,它所受磁力最大,用 $F_{\max}$ 表示,如图 28-4(b)所示。



(a) 电荷运动方向与磁场方向一致

(b) 电荷运动方向与磁场方向垂直

图 28-4 运动的带电粒子在磁场中的受力情况

(2) 磁力的大小正比于运动电荷的电量,即 $F \propto q$ 。如果电荷是负的,受力的方向与正电荷受力方向相反。

(3) 磁力的大小正比于运动电荷的速率,即 $F \propto v$ 。

(4) 作用在运动电荷上的磁力 F 的方向总是与该电荷的运动方向相垂直,即 $F \perp v$ 。

由上述实验结果可以看出,运动电荷在磁场中受的力有两种特殊情况:当电荷运动方向与磁场方向一致时, $F=0$;当电荷运动方向垂直于磁场的方向时, $F=F_{\max}$ 。根据这两种情况,我们可以定义磁感应强度 B (简称磁感强度)的方向和大小如下:

在磁场中某点,若正电荷的运动方向与在该点的小磁针 N 极的指向相同或相反时,它所受的磁力为零,我们把这个小磁针 N 极的指向方向规定为该点的磁感应强度 B 的方向。

当正电荷的运动方向与磁场方向垂直时,它所受的最大磁力 $F_{\max}$ 与电荷的电量 q 和速度 v 的大小的乘积成正比,但对磁场中某一定点来说,比值 $\frac{F_{\max}}{qv}$ 是一定的。对于磁场中不同位置,这个比值有不同的确定值。我们把这个比值规定为磁场中某点的磁感应强度 B 的大小,即

$$B = \frac{F_{\max}}{qv} \quad (28-1)$$

磁感应强度 B 的单位,取决于 F 、 q 和 v 的单位,在国际单位制中, F 的单位是牛顿(N), q 的单位是库仑(C), v 的单位是米/秒($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$),则 B 的单位是特斯拉,简称为特,符号为 T,所以

$$1 \text{ T} = 1 \text{ N} \cdot \text{C}^{-1} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s} = 1 \text{ N} \cdot \text{A}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$$

磁感应强度的单位特斯拉比较大,在工程中常用磁感应强度的单位是高斯(记作 G), $1 \text{ T} = 10^4 \text{ G}$ 。

应当指出,如果磁场中某一区域内各点 B 的方向一致、大小相等,那么,该区域内的磁场就称为均匀磁场。不符合上述情况的磁场就是非均匀磁场。长直螺线管内中部的磁场是常见的均匀磁场。

地球的磁场大约只有 $0.5 \times 10^{-4} \text{ T}$,一般永磁体的磁场约为 10^{-2} T 。而大型电磁铁能产生 2 T 的磁场,目前已获得的最强磁场是 31 T 。

28-2 洛伦兹力

1. 洛伦兹力

带电粒子在磁场中运动时,受到磁场的作用力,这种磁场对运动电荷的作用力称为洛伦兹力。实验发现,运动的带电粒子在磁场中某点所受到的洛伦兹力 f 的大小,与粒子所带电量 q 的量值、粒子运动速度 v 的大小、该点处磁感应强度 B 的大小以及 B 与 v 之间夹角 θ 的正弦值成正比。在国际单位制中,洛伦兹力 f 的大小可以表示为

$$f = qvB \sin \theta \quad (28-2)$$

洛伦兹力 f 的方向垂直于 v 和 B 构成的平面,其指向按照右手螺旋法则由矢积 $v \times B$ 的方向以及 q 的正负来确定:

对于正电荷($q > 0$), f 的方向与矢积 $v \times B$ 的方向相同;对于负电荷($q < 0$), f 的方向与矢积 $v \times B$ 的方向相反,如图 28-5 所示。洛伦兹力 f 的矢量式为

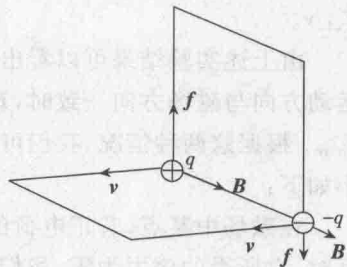


图 28-5 洛伦兹力示意图

$$\boldsymbol{f} = q\boldsymbol{v} \times \boldsymbol{B} \quad (28-3)$$

注意,上式中的 q 本身有正负之别,这由运动粒子所带电荷的电性决定。

当电荷运动方向平行于磁场时, $\boldsymbol{v}$ 与 $\boldsymbol{B}$ 之间的夹角 $\theta = 0$ 或 $\theta = \pi$,则洛伦兹力 $\boldsymbol{f} = 0$ 。

当电荷运动方向垂直于磁场时, $\boldsymbol{v}$ 与 $\boldsymbol{B}$ 的夹角 $\theta = \frac{\pi}{2}$,则运动电荷所受的洛伦兹力最大,其值为

$$f = f_{\max} = qvB$$

这是定义磁感应强度 $\boldsymbol{B}$ 的大小的基本方法。

由于运动电荷在磁场中所受的洛伦兹力的方向始终与运动电荷的速度垂直,所以洛伦兹力只能改变运动电荷的速度方向,不能改变运动电荷速度的大小。也就是说洛伦兹力只能使运动电荷的运动路径发生弯曲,但对运动电荷不做功。

例 28-1 速度选择器的原理图如图 28-6 所示。它是由均匀磁场(方向垂直纸面向外,设 $B = 1.0 \times 10^{-3} \text{ T}$)中两块金属板 P_1 、 P_2 构成。其中 P_1 板带正电, P_2 板带负电,于是两板间产生一匀强电场(设 $E = 300 \text{ V/m}$),电场的方向垂直于磁场。试求当速度 $\boldsymbol{v}$ 不同的正离子沿图示方向进入速度选择器时,离子受到的电场力 $\boldsymbol{f}_e$ 的方向和洛伦兹力 $\boldsymbol{f}_m$ 的方向。试问速度为多大的正离子才能沿原来的方向直线前进并穿过速度选择器?

解: 对于正离子 $q > 0$,则离子所受的电场力为 $\boldsymbol{f}_e = q\boldsymbol{E}$,其方向与板面垂直向右。设离子运动的速度为 $\boldsymbol{v}$,则离子所受的磁力为 $\boldsymbol{f}_m = q\boldsymbol{v} \times \boldsymbol{B}$,其方向与板面垂直向左,当离子速度大小恰好使离子所受的电场力与洛伦兹力等值反向时,离子方能够沿原来的方向直线前进,并穿过速度选择器,即要满足 $q\boldsymbol{E} = q\boldsymbol{v} \times \boldsymbol{B}$ 。由此可见,只有当速度 $v = E/B$ 的离子,才可通过速度选择器,所以能利用调节 $\boldsymbol{E}$ 或 $\boldsymbol{B}$ 的大小改变通过离子的速度。将该题中数据代入可得

$$v = \frac{E}{B} = 3.0 \times 10^5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

即只有速度等于 $3.0 \times 10^5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的离子才能穿过速度选择器。

2. 带电粒子在磁场中的运动

(1) $\boldsymbol{v} \perp \boldsymbol{B}$ 情形

当带电粒子以垂直于磁场的方向进入磁场时,粒子在垂直于磁场的平面内做

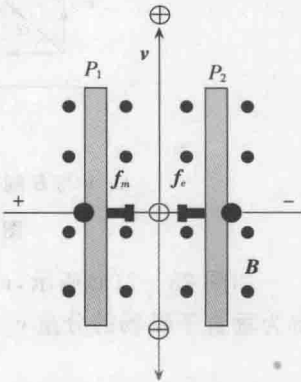


图 28-6 速度选择器原理图

匀速圆周运动,洛伦兹力提供了向心力,于是有下面的关系

$$qvB = \frac{mv^2}{R}$$

上式中, m 和 q 分别是粒子的质量和所带电量, R 是圆形轨道的半径。由上式可以求得粒子做圆形轨道运动的半径为

$$R = \frac{mv}{qB} \quad (28-4)$$

粒子运动的周期 T , 即粒子运动一周所需要的时间为

$$T = \frac{2\pi R}{v} = \frac{2\pi m}{qB} \quad (28-5)$$

以上关系表明, 尽管速率大的粒子在大半径的圆周上运动, 速率小的粒子在小半径的圆周上运动, 但它们运行一周所需要的时间却都是相同的。这个重要的结论是电子回旋加速器的理论依据。

(2) v 与 B 间有任意夹角 α

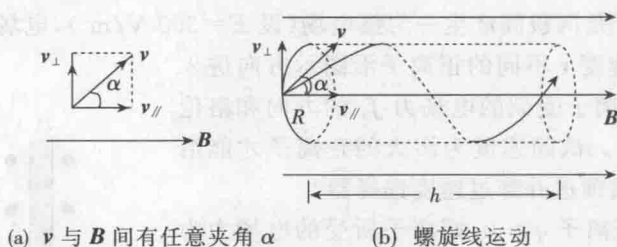


图 28-7 带电粒子在磁场中的运动

如图 28-7(a)所示, v 与 B 间有任意夹角 α , 我们可以将粒子的运动速度 v 分解为垂直于磁场的分量 $v_{\perp}$ 和平行于磁场的分量 $v_{\parallel}$, 它们的大小分别表示为

$$v_{\perp} = v \sin \alpha, \quad v_{\parallel} = v \cos \alpha$$

显然, 如果只有分量 $v_{\perp}$, 那么带电粒子的运动就是上面(1)中情形讨论的结果, 它将在垂直于磁场的平面内做圆周运动。如果只有 $v_{\parallel}$ 分量, 带电粒子将不受磁场力, 它将沿 B 的方向做匀速直线运动。一般情况下这两个分量都同时存在, 粒子则沿磁场的方向做螺旋线运动, 如图 28-7(b)所示, 在一个周期 T 内, 粒子回旋一周, 沿磁场方向移动的距离为螺距 h , 即

$$h = v_{\parallel} T = \frac{2\pi m v_{\parallel}}{qB} \quad (28-6)$$

由式(28-6)可知, 螺旋线的螺距 h 与 $v_{\perp}$ 无关。这意味着无论带电粒子以多大的速率进入磁场, 也无论沿何方向进入磁场, 只要它们平行于磁场的速度分量是相同的, 它们螺旋线运动的螺距就一定相等。如果它们是从同一点射入磁场, 那么

它们必定在沿磁场方向上与入射点相距螺距 h 整数倍的地方又会聚在一起,这与光束经透镜后聚焦的现象相类似,故称为**磁聚焦**。电子显微镜中的磁透镜就是磁聚焦原理的应用。

3. 洛伦兹力的应用——霍尔效应

将通有电流 I 的金属板(或半导体板)置于磁感应强度为 B 的均匀磁场中,磁场的方向和电流方向垂直,如图 28-8 所示,在金属板的第三对表面间就显示出横向电势差,这一现象称为**霍尔效应**, U_H 则称为**霍尔电势差**。经实验测定,霍尔电势差的大小与电流 I 及磁感应强度 B 的大小成正比,而与板的厚度 d 成反比。这种现象可用载流子受到洛伦兹力来解释。

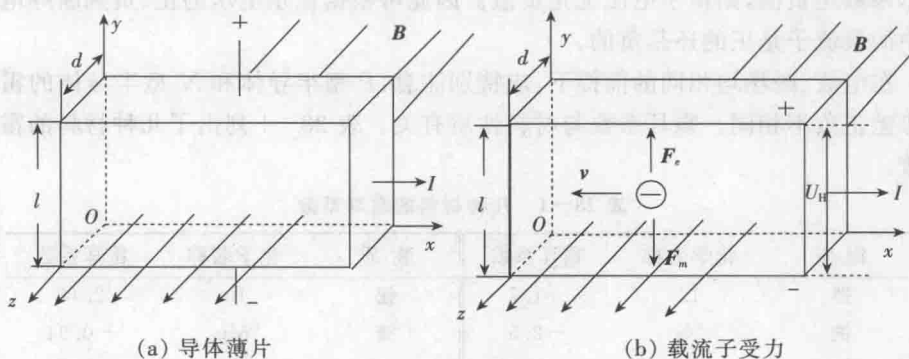


图 28-8 霍尔效应原理分析

设一导体薄片宽为 l 、厚为 d ,把它放在磁感应强度为 B 的均匀磁场中,通以电流 I ,方向如图 28-8(a)所示。如果载流子(金属导体中为电子)做宏观定向运动的平均速度为 v (也称为**平均漂移速度**,与电流 I 的方向相反),则每个载流子受到的平均洛伦兹力 F_m 的大小为 $F_m = qvB$,它的方向为矢积 $qv \times B$ 的方向,即如图 28-8(b)所示中沿宽度 l 向下的方向。在洛伦兹力作用下,使正载流子聚集于上表面,下表面因缺少正载流子而积累等量异号的负电荷。随着电荷的积累,在两表面之间出现电场强度为 E_H 的横向电场,使载流子受到与洛伦兹力方向相反的电场力 $F_e (=qE_H)$ 的作用。达到动态平衡时,两力方向相反而大小相等,于是有

—— $qvB = qE_H$
所以

$$E_H = vB$$

由于半导体内各处载流子的平均漂移速度相等,且磁场是均匀磁场,所以在达到动态平衡时,半导体内出现的横向电场是均匀电场。于是霍尔电压可表示为 $U_H = E_H \cdot l = vB$,由于电流 $I = nqvs = nqvld$, n 为载流子密度,由上面两式消

去 v 即可得

$$U_H = \frac{1}{nq} \frac{IB}{d} \text{ 或 } U_H = R_H \frac{IB}{d} \quad (28-7)$$

其中, $R_H = \frac{1}{nq}$ 称为材料的霍尔系数。霍尔系数越大的材料, 霍尔效应越显著。霍尔系数与载流子浓度 n 成反比。在金属导体中, 自由电子的浓度大, 故金属导体的霍尔系数很小, 相应的霍尔电势差也就很弱, 即霍尔效应不明显。而半导体的载流子浓度远比金属导体的小, 故半导体的霍尔系数比金属导体的霍尔系数大得多, 所以半导体的霍尔效应比金属导体明显。如果载流子是负电荷(则 $q < 0$), 霍尔系数是负值, 则霍尔电压也是负值。因此可根据霍尔电压的正、负判断导电材料中的载流子是正的还是负的。

在电流、磁场均相同的前提下, 应特别注意: P 型半导体和 N 型半导体的霍尔电势差正负不相同。霍尔系数与材料性质有关。表 28-1 列出了几种材料的霍尔系数。

表 28-1 几种材料的霍尔系数

物 质	化学名称	霍尔系数	物 质	化学名称	霍尔系数
锂	Li	-1.7	铍	Be	2.44
钠	Na	-2.5	镁	Mg	-0.94
钾	K	-4.2	锌	Zn	0.33
铯	Cs	-7.8	铬	Cr	6.5
铜	Cu	-0.55	铝	Al	-0.30
银	Ag	-0.84	锡	Sn	-0.048
金	Au	-0.72	铊	Tl	0.12

用半导体做成反映霍尔效应的器件称为霍尔元件。它已广泛应用于科学研究和生产技术上。例如, 可用霍尔元件做成测量磁感应强度的仪器——高斯计。

28-3 安培力

载流导线放在磁场中将受到磁力的作用。安培最早用实验方法, 研究了电流和电流之间的磁力作用, 从而总结出载流导线上一小段电流元所受磁力的基本规律, 称为安培定律。

假设在导线上沿电流方向取 $d\mathbf{l}$, 这个线元很短, 可看做直线, 方向为电流在该处沿电流的切线方向, 又设导线中电流为 I , 则 $I d\mathbf{l}$ 称为电流元。放在磁场中某点处的电流元 $I d\mathbf{l}$, 所受到的磁场作用力 $d\mathbf{F}$ 的大小与该点处的磁感应强度 $\mathbf{B}$ 的大小、电流元的大小以及电流元 $I d\mathbf{l}$ 和磁感应强度 $\mathbf{B}$ 所成的角 θ [或用 $(I d\mathbf{l}, \mathbf{B})$ 来表

示]的正弦成正比,即 $dF = kBI dl \sin\theta$, dF 的方向与矢积 $I dl \times B$ 的方向相同,如图 28-9 所示。式中的比例系数 k 的量值取决于式中各物理量的单位。在国际单位制中, B 的单位用特斯拉(T), I 的单位用安培(A), dl 的单位用米(m), dF 的单位用牛顿(N),则 $k = 1$,安培定律的表达式可简化为 $dF = BI dl \sin\theta$,写成矢量表达式,即

$$d\mathbf{F} = I d\mathbf{l} \times \mathbf{B} \quad (28-8)$$

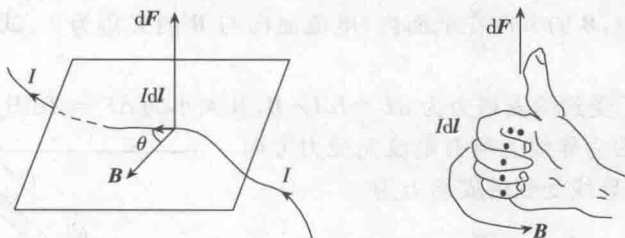


图 28-9 安培力方向判断示意图

载流导线在磁场中所受的磁力,通常也称为**安培力**,式(28-8)表达的规律称为**安培定律**。因为安培定律给出的是载流导线上一个电流元所受的磁力,所以它不能直接用实验进行验证。但是,任何有限长的载流导线 L 在磁场中所受的磁力 F ,应等于导线 L 上各个电流元所受磁力 dF 的矢量和,即

$$\mathbf{F} = \int d\mathbf{F} = \int_L I d\mathbf{l} \times \mathbf{B} \quad (28-9)$$

对于一些具体的载流导线,理论计算的结果和实验测量的结果是相符的。这就间接证明了安培定律的正确性。

式(28-9)是一个矢量积分的形式。如果导线上各个电流元所受的磁力 dF 的方向都相同,则矢量积分可直接化为标量积分。例如,长为 L 的一段载流直导线,放在均匀磁场 B 中,如图 28-10 所示。根据矢积的右手螺旋法则,可以判断导线上各个电流元所受磁力 dF 的方向都是垂直纸面向外的。所以整个载流直导线所受的磁力 F 的大小为

$$F = \int dF = \int_L IB \sin\theta dl$$

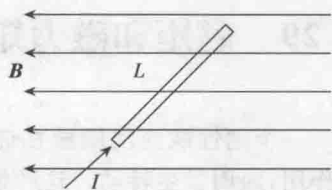


图 28-10 载流长直导线的安培力

其中, θ 为电流 I 的方向与磁场 B 的方向之间的夹角。 F 的方向与 dF 的方向相同,即垂直于纸面向外。由式(28-9)可以看出,当直导线与磁场平行时(即 $\theta = 0$ 或 π), $F = 0$,即载流导线不受磁力作用;当直导线与磁场垂直时(即 $\theta = \frac{\pi}{2}$),载