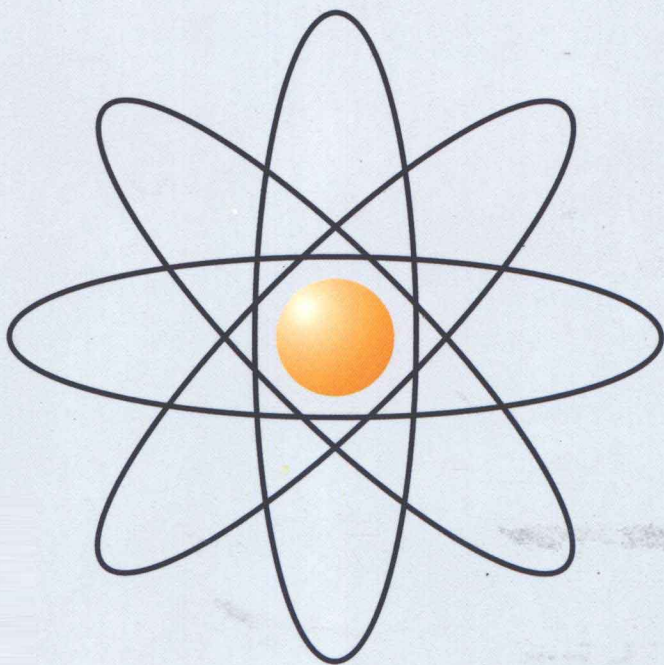


# 大学物理学

下册

魏 崇 岳俊峰 主编



吉林人民出版社

# 大学物理学

(下册)

魏 崇 岳俊峰 主编

吉林人民出版社

## 前 言

大学物理学是高等工科院校大学生必修的一门重要的基础理论课。近几十年来,物理学和工业技术有了迅速的发展,相应地工科大学物理课的教学内容和教学方法也应有较大的改革。为适应这一变革的需要,我们在总结大学物理课教学实践基础上,借鉴了国内外比较流行的部分优秀教材,编写了本教材。同时也是国家教委《高等农林教育面向 21 世纪教学内容和课程体系改革》研究计划的子项目:“高等农林院校面向 21 世纪物理改革”的研究成果。本教材是根据全国工科物理课程指导委员会制定的《工科(大学物理课)教学基本要求》编写的,包括了基本要求的全部内容。

在编写过程中,我们注意到以下几个方面的问题:

1. 在阐明物理学的基本规律时,以辩证唯物主义为指导思想,突出物质运动的基本形式、基本规律及其相互联系;

2. 尽量避免与中学物理教学内容的简单重复,与中学物理教学内容衔接好,如在力学部分,着重运用高等数学阐述和表达物理规律,解决物理问题;

3. 在内容选取上,力求教学内容的现代化,加强近代物理学

的内容及其在工业科技上的应用,同时保留经典物理学的精髓;

4.在讲述方法上力求做到深入浅出,文字力求简明扼要,通俗易懂,简化了一些繁杂的推导过程,必要时将有些推导过程放在主要内容的后面,方便教学,便于自学。

本书全部采用国际单位制(SI),并列于附录Ⅱ、以供使用。

本书全部讲授学时为110学时左右,其中包括10—15学时的习题课。带\*号的内容可根据各专业的特点,由教师自行取舍。

本册由魏崇、岳俊峰主编;张伟森主审。参编的有刘维、郝金行。

赵宝忱教授审阅了部分文稿,对成书提供了很大帮助;王德洪老师绘制了本书的全部插图。在此一并表示感谢。

由于编者水平有限,书中难免有不足之处,衷心希望使用本书的老师和同学提出宝贵意见。

编者

1999年12月

# 目 录

<b>第九章 磁场</b> .....	(1)
§ 9-1 磁场 磁感应强度 磁通量.....	(1)
§ 9-2 毕奥—萨伐尔定律 .....	(10)
§ 9-3 安培环路定理 .....	(21)
§ 9-4 磁场对运动电荷的作用力—洛仑磁力 .....	(28)
§ 9-5 磁场对载流导线的作用 安培定律 .....	(36)
§ 9-6 磁介质的磁化 磁化强度 .....	(49)
§ 9-7 磁场强度 磁介质中的安培环路定理 .....	(54)
§ 9-8 铁磁质 .....	(59)
问题 .....	(64)
习题 .....	(66)
<b>第十章 电磁感应 麦克斯韦方程组</b> .....	(74)
§ 10-1 电磁感应的基本定律 .....	(74)
§ 10-2 动生电动势 .....	(82)
§ 10-3 感生电动势 感生电场 .....	(89)
§ 10-4 自感和互感 .....	(96)
§ 10-5 磁场的能量 .....	(109)
§ 10-6 麦克斯韦方程组 .....	(113)
问题 .....	(119)
习题 .....	(121)

<b>第十一章 振动和波动</b> .....	(126)
§ 11-1 简谐振动 .....	(127)
§ 11-2 单摆和复摆 电磁振荡 .....	(140)
§ 11-3 阻尼振动 受迫振动 共振 .....	(144)
§ 11-4 简谐振动的合成 .....	(152)
§ 11-5 机械波的产生和传播 .....	(161)
§ 11-6 平面简谐波的波函数 .....	(169)
§ 11-7 波的能量传播 .....	(177)
§ 11-8 惠更斯原理 波的衍射 .....	(183)
§ 11-9 波的干涉 驻波 .....	(189)
§ 11-10 多普勒效应 .....	(200)
§ 11-11 声波 噪声 .....	(204)
§ 11-12 电磁波 .....	(210)
问题 .....	(221)
习题 .....	(225)
<b>第十二章 波动光学</b> .....	(236)
§ 12-1 光的电磁理论 相干光源 .....	(237)
§ 12-2 杨氏双缝实验 洛埃镜 .....	(241)
§ 12-3 光程 薄膜干涉 .....	(249)
§ 12-4 劈尖 牛顿环 .....	(260)
§ 12-5 迈克尔孙干涉仪 .....	(269)
§ 12-6 惠更斯—菲涅耳原理 单缝衍射 .....	(272)
§ 12-7 衍射光栅 .....	(283)
§ 12-8 圆孔衍射 光学仪器的分辨率 .....	(293)
§ 12-9 X射线衍射 布喇格公式 .....	(298)

§ 12-10	自然光和偏振光 马吕斯定律 .....	(301)
§ 12-11	反射和折射时光的偏振 .....	(309)
§ 12-12	光的双折射现象 .....	(312)
§ 12-13	偏振光的干涉 人为双折射 .....	(320)
§ 12-14	旋光现象 .....	(327)
	问题 .....	(329)
	习题 .....	(334)
<b>第十三章</b>	<b>量子物理基础 .....</b>	<b>(342)</b>
§ 13-1	热辐射 黑体辐射 .....	(343)
§ 13-2	光电效应 光的波粒二象性 .....	(351)
§ 13-3	康普顿效应 .....	(358)
§ 13-4	原子光谱的实验规律 .....	(364)
§ 13-5	玻尔的氢原子理论 .....	(367)
§ 13-6	实物粒子的波粒二象性 .....	(374)
§ 13-7	测不准关系 .....	(379)
§ 13-8	波函数 薛定谔方程 .....	(383)
§ 13-9	一维势阱 .....	(388)
§ 13-10	氢原子的量子条件 电子自旋 .....	(392)
	问题 .....	(399)
	习题 .....	(401)
<b>第十四章</b>	<b>激光 .....</b>	<b>(405)</b>
§ 14-1	受激吸收 自发辐射和受激辐射 .....	(405)
§ 14-2	粒子数反转 .....	(409)
§ 14-3	光学谐振腔 .....	(413)
§ 14-4	激光的特性和应用 .....	(419)

问题 .....	(423)
习题 .....	(424)
<b>第十五章 固体的能带结构 .....</b>	<b>(426)</b>
§ 15-1 晶体的基本性质 .....	(426)
§ 15-2 原子的壳层结构 .....	(429)
§ 15-3 晶体的能带 .....	(432)
§ 15-4 半导体 .....	(439)
问题 .....	(445)
习题 .....	(446)
<b>下册习题答案 .....</b>	<b>(447)</b>



## 第九章 磁场

在静止电荷的周围,存在着电场。在运动电荷周围,不仅存在着电场,同时还存在着磁场。当电荷运动形成稳恒电流时,在它周围激发的磁场也是稳恒的,即磁场是不随时间变化的。本章首先引入描述磁场性质的基本物理量——磁感应强度,然后介绍电流激发磁场的基本规律——毕奥·萨伐尔定理,以及反映磁场性质的两条基本定理——磁场高斯定理和安培环路定律,再介绍磁场对运动电荷、载流导线作用的规律——洛仑兹力公式和安培定律,最后讨论磁介质与磁场的相互作用。

### § 9-1 磁场 磁感应强度 磁通量

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( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ )能吸引铁,但是,直到十九世纪,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。到二十世纪初,由于科学技术的进步和原子结构理论的建立和发展,人们对磁现象起源的认识有了进一步的发展,认识到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。

在研究磁场的基本性质和规律之前,我们先简单地介绍一

些基本磁现象。

无论是天然磁石或是人工磁铁都能吸引铁、镍、钴等物质，这一性质叫做磁性。条形磁铁的两端磁性最强，而中部几乎无磁性，磁铁两端磁性最强的部位称为磁极。若把一条形磁铁悬挂起来，磁铁的两极会分别指向地球的南、北极方向，其中指南的极叫做南极(用 S 表示)，指北的极叫做北极(用 N 表示)。两块磁铁的磁极之间有相互作用力，磁为磁力，同号磁极之间相互排斥，异号磁极之间相互吸引。每一块磁铁，无论把它分得多么小，总是同时存在着南北两极，到目前为止，我们在自然界中还没发现过单极。即只有 S 极或 N 极的磁铁。

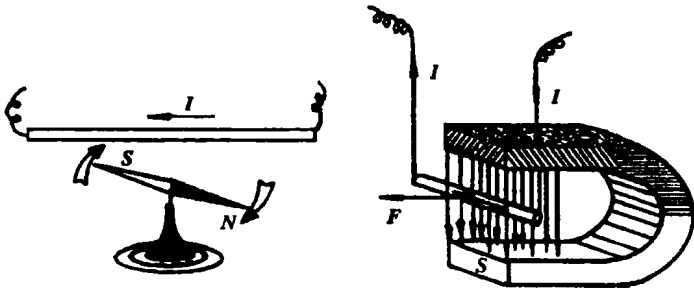


图 9-1 载流导线对磁针的作用 图 9-2 载流导线受磁力作用而运动

1891 年，奥斯特发现，放在载流导线周围的磁针会受到磁力的作用而发生偏转(图 9-1)，揭示了磁现象和电现象之间的密切联系。1820 年，安培又发现，放在磁铁附近的载流导线或载流线圈也会受到磁力的作用而发生偏转(图 9-2)。其后又发现，载流导线之间或载流线圈之间也有相互作用。如图 9-3

所示,两根平行载流导线,当两电流的流向相同时,会相互吸引,相反时则相互排斥。实验还发现,运动电荷本身也受到磁力的作用。如图9-4所示,电子射线在磁场中受到磁力作用而发生偏转。

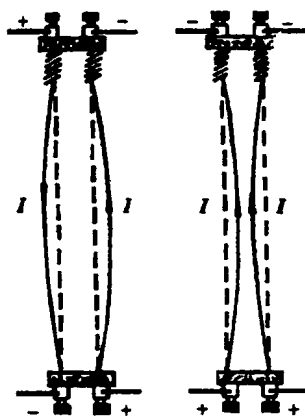


图9-3 两平行载流导线间的相互作用

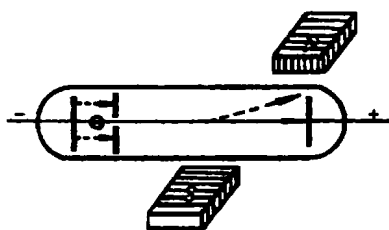


图9-4 电子射线在磁场中的偏转

上述的实验说明,磁现象和电现象之间的联系是非常密切的,一切磁现象起源于电荷的运动。因此电流的磁效应可看成是作定向运动的电荷所产生的,磁铁对电流的作用可看成是对运动电荷的作用。

### 一、磁场 磁感应强度

任何运动电荷或电流,均在周围空间产生磁场,无论是磁铁与磁铁之间的作用力,还是电流与磁铁之间的作用力,以及电流

与电流之间的作用力,本质上都是通过磁场而作用的,这种力统称为磁力或磁场力。因此,运动电荷之间,除了电荷之间的库仑力作用之外,还受到各自产生的磁场力的作用。磁场对运动电荷或载流导体以及磁体有力的作用;当载流导体在磁场中移动时,磁力将对载流导体作功,这说明磁场具有一定的能量。

实验表明,磁场有强弱也有方向,但在磁场中不同点上,磁场的强弱、方向是不同的。为了描述磁场中各点的这种性质,我们引进磁感应强度  $B$ 。在静电学中,我们从静电场对试验电荷  $q_0$  的作用力  $F$ ,引出了电场强度  $E = F/q_0$  来定量地描述电场,与此类似,我们将从磁场对运动电荷的作用力,引出磁感应强度  $B$  来定量地描述磁场。但是,磁场作用在运动电荷上的力不仅与运动电荷所带的电量有关,而且还与电荷运动的速度大小及方向有关,作用在运动电荷上的磁场力比作用在静止电荷上的电场力要复杂得多。因此,对  $B$  的定义比  $E$  的定义也要复杂些。我们从电子射线在磁场力的作用下发生偏转,可以测定电子所受磁力的大小和方向。由大量实验可以得出如下结果:

1. 作用在运动电荷上的磁力  $F$  的方向,总是与电荷的运动方向垂直,即  $F \perp v$

2. 磁力的大小正比于运动电荷的电量,即  $F \propto q_0$ 。

3. 磁力的大小正比于运动电荷的速率,即  $F \propto v_0$ 。

4. 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改变而变化,当电荷的运动方向与磁场方向一致时,(图 9-5a)它不受磁力作用,而当电荷的运动方向与磁场方向垂直时(图 9-5b),它所受的磁力为最大,用  $F_{\max}$  表

示。

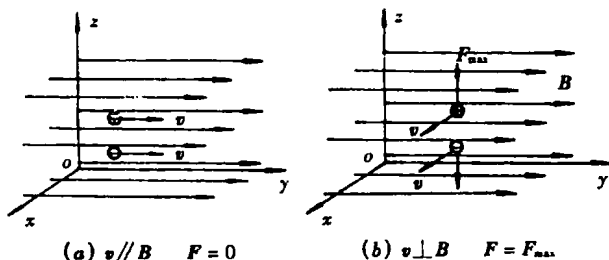


图 9-5 运动电荷在磁场中所受的力与电荷运动方向有关

由上述实验结果可以看出,运动电荷在磁场中所受的力有两种特殊情况:当电荷的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  $B$  的方向和大小:

1. 在磁场中某点,若正电荷的运动方向与在该点的小磁针 N 极的指向相同时,它所受的磁力为零,我们就把这个方向规定为该点的磁感应强度  $B$  的方向。

2. 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,但对磁场中某一点来说,比值  $F_{\max}/qv$  是一定的,对于磁场中不同的点,这个比值则有不同的确定值。我们把这个比值规定为磁场中某点磁感应强度  $B$  的大小,即

$$B = \frac{F_{\max}}{qv} \quad (9-1)$$

在国际单位制中,按  $B$  的上述定义,力  $F$  的单位是牛顿,电

量  $q$  的单位是库仑,速率  $v$  的单位是米/秒,则磁感应强度  $B$  的单位定义为特斯拉(Tesla)。符号为 T,即

$$1\text{T} = \frac{1\text{N}}{1\text{C} \times 1\text{m/s}}$$

由于  $1\text{C} \cdot \text{s}^{-1} = 1\text{A}$ ,所以

$$1\text{T} = 1\text{N}/(\text{A} \cdot \text{m})$$

$B$  的单位有时还用高斯(Gauss)。符号 G,它与特斯拉的关系是

$$1\text{G} = 10^{-4}\text{T}$$

如果磁场中某一区域内各点的磁感应强度  $B$  都相同,即该区域内各点  $B$  的方向一致,大小相等,那么,该区域内的磁场就叫做均匀磁场,不符合上述情况的磁场就是非均匀磁场。长直密绕螺线管内中部的磁场,是常见的均匀磁场。

地球的磁场是随位置而变化的,赤道的地磁感应强度约为  $3 \times 10^{-4}\text{T}$ ,地球两极地磁的感应强度约为  $6 \times 10^{-4}\text{T}$ 。一般永磁体的磁场约为  $10^{-2}\text{T}$ ,而大型电磁铁能产生  $2\text{T}$  的磁场,近年来,由于超导材料的新发展,已能取得  $40\text{T}$  的强磁场。

## 二、磁力线、磁通量、磁场中的高斯定理

### 1. 磁力线

为了形象地反映磁场的分布情况,我们将象在静电场中用电力线来表示静电场分布那样,用一些设想的曲线来表示磁场的分布,我们知道给定磁场中某一点磁感应强度  $B$  的大小和方向都是确定的,因此,我们规定曲线上每一点的切线方向就是该点的磁感应强度  $B$  的方向,而曲线的疏密程度则表示该点磁感应强度  $B$  的大小。磁力线是人为地画出来的,并非磁场中真的

有这种线存在。图 9-6 所示几种不同形状的电流所产生的磁力线图。

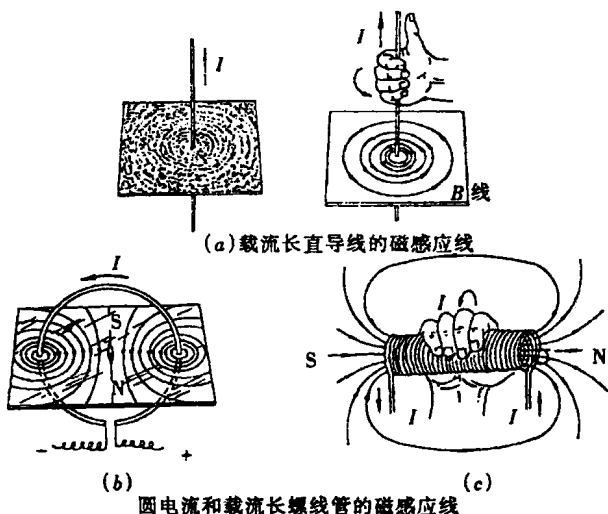


图 9-6 电流磁场中的磁力线

由上述几种典型的载流导线磁力线图象可以看出,磁力线具有如下特性:

(1) 由于磁场中某点的磁场方向是确定的,所以磁场中的磁力线不会相交,磁力线的这一特性和电力线是一样的。

(2) 载流导线周围的磁力线都是围绕电流的闭合曲线,没有起点,也没有终点。磁力线无头无尾,因此称磁场为涡旋场。这个特性与静电场中电力线不同。

由于电流方向和磁场方向是密切相关的,因此它们之间的关系可以用右手定则表示。对长直载流导线,可用右手握住导线,使大拇指伸直并指向电流方向,这时其他四指弯曲的方

向,就是磁力线的回转方向(图 9-6a),对于圆形电流或载流直螺线管,可用右手握住螺线管(或圆电流),使四指弯曲的方向沿着电流方向,而伸直大拇指的指向就是螺线管内(或圆电流中心处)磁力线的方向(图 9-6b、c)。

为了使磁力线不但能表示磁场方向,而且能描述磁场的强弱,象静电场中规定电力线密度那样,我们规定:通过磁场中某点处垂直于  $B$  矢量的单位面积上的磁力线数目(称磁力线密度)等于该点  $B$  的数值。

因此, $B$  大的地方,磁力线就密集; $B$  小的地方,磁力线就稀疏。对均匀磁场来说,磁场中的磁力线相互平行,且各处磁力线密度相等,对非均匀磁场来说,或者磁力线相互不平行,或者磁力线密度不相等,或两者均有。

## 2. 磁通量

类似电通量,我们定义,通过磁场中某一给定曲面的磁力线数,称为通过该曲面的磁通量,用  $\Phi_m$  表示。

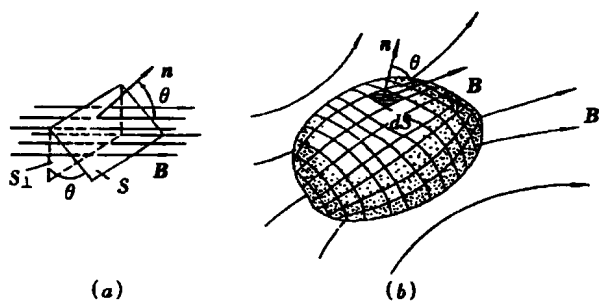


图 9-7 磁通量

如图 9-7(a)所示,在磁感应强度  $B$  的均匀磁场中,取一



面积为  $S$  的平面, 它的法线矢量  $\boldsymbol{n}$  与  $\boldsymbol{B}$  之间的夹角为  $\theta$ 。由于面  $S$  在垂直于  $\boldsymbol{B}$  方向的投影为  $S_{\perp} = S \cos \theta$ , 所以, 按磁通量的定义, 通过面  $S$  的磁通量为

$$\Phi_m = BS \cos \theta \quad (9-2)$$

当  $\theta = 0^\circ$ , 即平面的法线矢量  $\boldsymbol{n}$  与  $\boldsymbol{B}$  的方向一致时, 通过平面  $S$  的磁通量最大,  $\Phi_m = BS$ , 当  $\theta = 90^\circ$ , 即平面的法线矢量  $\boldsymbol{n}$  与  $\boldsymbol{B}$  垂直时, 通过平面  $S$  的磁通量为零,  $\Phi_m = 0$ 。

在不均匀磁场中, 通过任意曲面的磁通量怎样计算呢?

在如图 9-7(b) 所示的曲面上取一面积元  $dS$ , 此面积元所在处的磁感应强度  $\boldsymbol{B}$  与法线矢量  $\boldsymbol{n}$  之间的夹角为  $\theta$ , 通过面积元  $dS$  的磁通量则为

$$d\Phi_m = B dS \cos \theta$$

式中  $dS \cos \theta$  为面积元  $dS$  在垂直于  $\boldsymbol{B}$  方向的投影。而通过某一有限曲面的磁通量  $\Phi_m$  就等于通过这些面积元  $dS$  上的磁通量  $d\Phi_m$  的总和, 即

$$\Phi_m = \int_S d\Phi_m = \int_S B \cos \theta dS$$

或

$$\Phi_m = \int_S \boldsymbol{B} \cdot d\boldsymbol{S} \quad (9-3)$$

数学上规定, 正法线矢量  $\boldsymbol{n}$  的方向垂直于曲面向外, 依照这个规定, 当磁力线从曲面内穿出时 ( $\theta < \frac{\pi}{2}$ ,  $\cos \theta > 0$ ), 磁通量是正的, 而当磁力线从曲面外穿入时, ( $\theta > \frac{\pi}{2}$ ,  $\cos \theta < 0$ ), 磁通量是负的。由于磁力线是闭合的, 因此对任意闭合曲面来说, 有多少条磁力线进入闭合曲面, 就一定有多少条磁力线穿出闭合曲