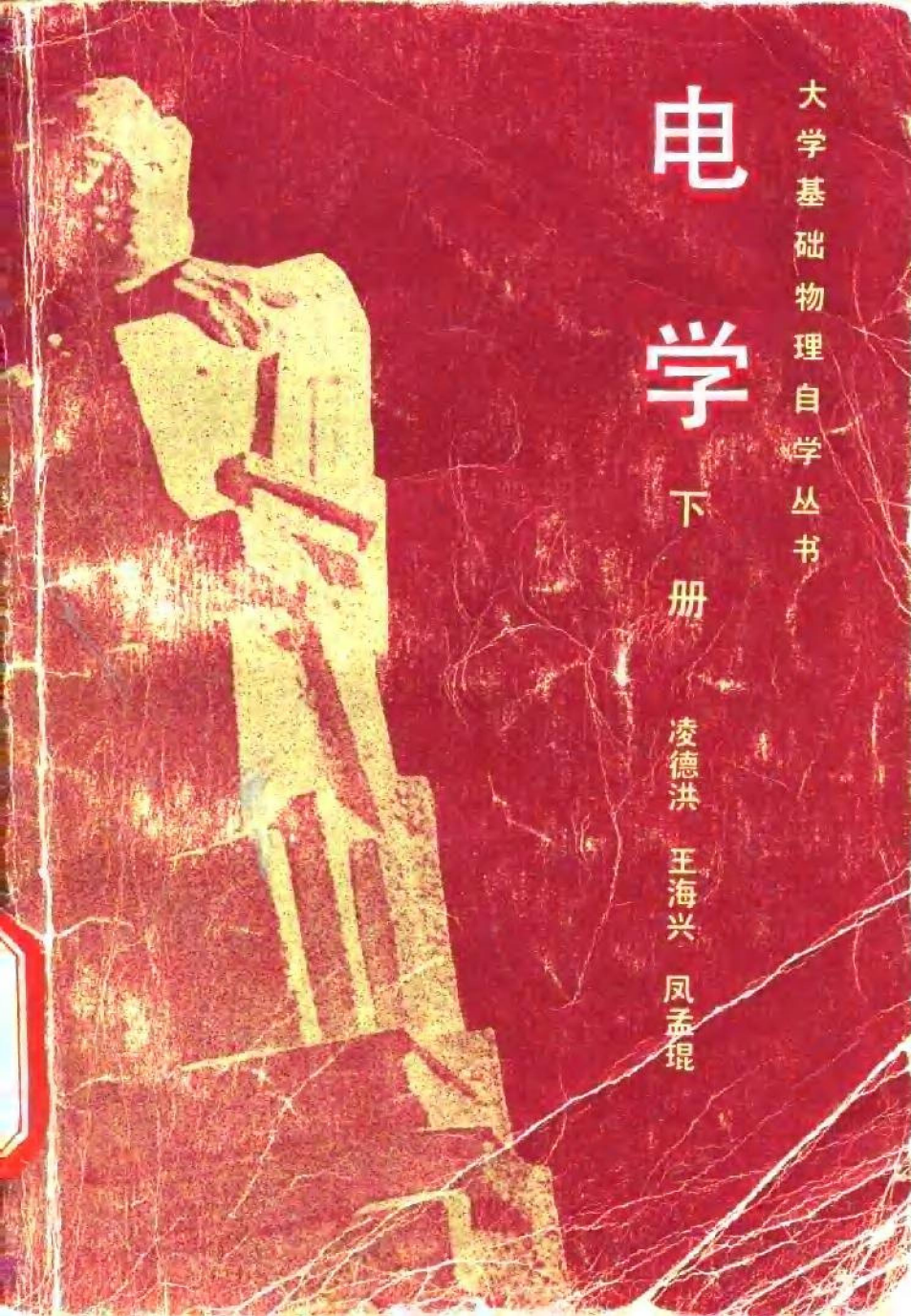


大学基础物理自学丛书

# 电学

下册

凌德洪 王海兴 凤孟琨



大学基础物理自学丛书

电 学

下 册

凌德洪 王海兴 凤孟琨 编

上海科学技术出版社出版

(上海瑞金二路 450 号)

新华书店上海发行所发行 丹阳人民印刷厂印刷

开本  $787 \times 1092$  1/32 印张 10.5 字数 232,000

1985 年 2 月第 1 版 1985 年 2 月第 1 次印刷

印数: 1—24,000

统一书号: 13119·1214 定价: 1.95 元

# 目 录

|                          |           |
|--------------------------|-----------|
| <b>第六章 电流与磁场</b>         | <b>1</b>  |
| § 6.1 磁与电流的磁效应           | 1         |
| § 6.2 磁场 磁感应强度           | 7         |
| § 6.3 磁场对电流的作用           | 12        |
| § 6.4 电流表                | 22        |
| § 6.5 带电粒子在磁场中的运动 洛仑兹力   | 25        |
| § 6.6 回旋加速器 霍耳效应         | 32        |
| § 6.7 电子荷质比的测定           | 40        |
| § 6.8 离子荷质比的测定           | 48        |
| § 6.9 平行载流长直导线的相互作用力     | 52        |
| § 6.10 安培环路定理            | 57        |
| § 6.11 磁场中的高斯定理          | 66        |
| § 6.12 毕奥-沙伐尔定律          | 72        |
| 第六章小结                    | 83        |
| 复习题六                     | 85        |
| <b>第七章 物质的磁性</b>         | <b>90</b> |
| § 7.1 磁介质的磁化             | 90        |
| § 7.2 有介质存在时的磁场基本定理 磁场强度 | 98        |
| § 7.3 磁介质中的磁场            | 103       |
| § 7.4 顺磁质和抗磁质            | 110       |
| § 7.5 铁磁质                | 117       |
| § 7.6 铁磁质的分类             | 123       |
| § 7.7 铁磁质的磁化机理           | 130       |
| § 7.8 原子核的磁性 核磁共振        | 134       |
| § 7.9 磁路                 | 139       |

|                            |            |
|----------------------------|------------|
| § 7.10 地磁 .....            | 152        |
| 第七章小结 .....                | 158        |
| 复习题七 .....                 | 160        |
| <b>第八章 电磁感应 .....</b>      | <b>162</b> |
| § 8.1 电磁感应现象 .....         | 162        |
| § 8.2 法拉第电磁感应定律 楞次定律 ..... | 165        |
| § 8.3 动生电动势和感生电动势 .....    | 174        |
| § 8.4 电子感应加速器 .....        | 184        |
| § 8.5 涡电流 .....            | 190        |
| § 8.6 自感 .....             | 199        |
| § 8.7 互感 .....             | 207        |
| § 8.8 直流电路中电感器的作用 .....    | 215        |
| § 8.9 感应圈 .....            | 224        |
| § 8.10 磁通的测量 冲击电流计 .....   | 226        |
| § 8.11 磁场的能量 .....         | 232        |
| 第八章小结 .....                | 239        |
| 复习题八 .....                 | 242        |
| <b>第九章 交流电路 .....</b>      | <b>247</b> |
| § 9.1 交变电流 .....           | 247        |
| § 9.2 交流电路中的电阻、电容和电感 ..... | 255        |
| § 9.3 矢量图解法 串联和并联电路 .....  | 261        |
| § 9.4 交流电路中的功率 .....       | 273        |
| § 9.5 复数解法 复阻抗 .....       | 280        |
| § 9.6 谐振电路 .....           | 284        |
| § 9.7 电感和电容的测量 .....       | 289        |
| § 9.8 变压器 .....            | 291        |
| 第九章小结 .....                | 295        |
| 复习题九 .....                 | 297        |
| <b>第十章 电磁场和电磁波 .....</b>   | <b>299</b> |
| § 10.1 宏观电磁理论 .....        | 299        |

## 第六章

# 电流与磁场

电荷激发电场,磁体和电流激发磁场。在本章中,我们介绍有关磁的基本现象,讨论磁场对电流的作用,并由此引入磁感应强度 $B$ 。然后讨论电流激发磁场的规律、磁场的基本性质以及磁场在近代科学技术中的一些重要应用。

### § 6.1 磁与电流的磁效应

磁是一切物质都具有的基本物理属性。宇宙中的天体,构成物质的基本粒子,都与磁现象紧密相联。自然界中复杂的生命现象,也与磁现象密切相关。我们先简要地介绍有关磁的一般现象和磁的基本性质,然后介绍一种宏观物质的磁性起源学说——磁的分子电流学说。

1. 基本磁现象 人类对磁现象的认识,起源于天然的磁铁矿。在我国,早在公元前的春秋、战国时代,就有“山上有慈石者,其下有铜金”(管子·地数篇)的文字记载。东汉王充《论衡》中,则有“顿牟掇芥,磁石引针”的论述,这时王充已开始将静电的吸引作用与磁石的吸引作用并提。在《论衡》一书中还有关于“司南勺”的描述,这是世界上最早将磁现象应用于生产实践的记录。到了北宋时代沈括在《梦溪笔谈》中明确记载了人工制作指南针的方法,并发现了存在地磁偏角的事实。到了公元十二世纪,我国已有利用指南针为航海定向的记载。以

— 1 —

上这些历史事实表明,在有关磁现象的早期发现中,我国在世界上是居于领先地位的。

天然磁铁矿的成分是四氧化三铁( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ )。近代用的磁体大多是用人工磁性材料充磁以后获得的。不论是天然磁体还是人造磁体,它们都有吸引铁制物品的性质,这种性质称为磁性。磁体上各部分的磁性强弱不同,磁性最强的部位叫做磁体的磁极。如果将条形磁体放进铁屑中,然后取出来,那么

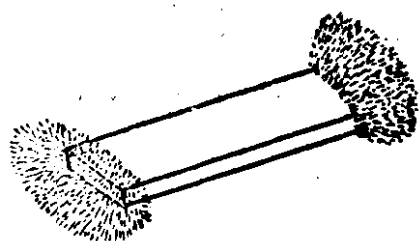


图 6-1 条形磁体的磁极

可以看到,条形磁体的两端吸附的铁屑特别多,这就是磁极,如图 6-1 所示。实验结果还表明,各种不同的磁体,不论其形状、大小如何,都有两个磁极。到目前为止,

自然界还没有找到只有一个磁极的磁体,这是磁现象与电现象之间的一个重要区别。

如果将条形磁体(或磁针)的中部用细线缚住并悬挂起来,让它能在水平方向自由地转动。当磁体因阻尼而逐渐停止下来时,磁体的两个磁极总是一端指北,另一端指南。通常,我们把磁体自由地指北的磁极叫北极(N极);而把指南的磁极叫南极(S极)。

电荷之间存在库仑相互作用,磁体的磁极之间存在着磁的相互作用。如果将一根条形磁体用线悬挂起来,让它能够自由转动,然后用另一根条形磁体去靠近它,

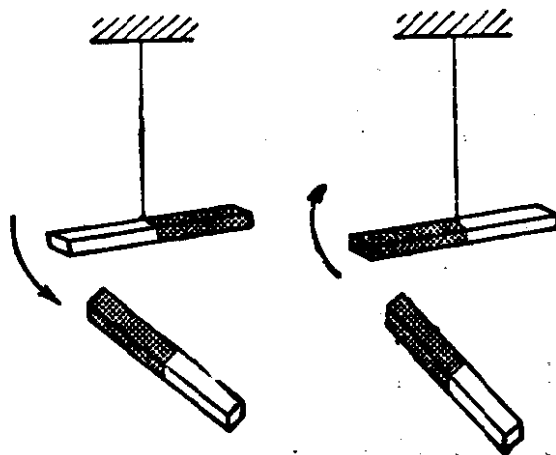


图 6-2 磁极之间的相互作用

那么我们可以看到,异名磁极互相吸引,同名磁极互相排斥,

如图 6-2 所示。磁极之间这种相互作用的规律，与电荷间相互作用的规律十分相似。在历史上，正是由于磁的相互作用与电的相互作用的相似性，人们才设想过在磁体上也存在着“磁荷”，而且曾经称  $N$  极上带“正磁荷”， $S$  极上带“负磁荷”。后来，经过长期的实验检测和理论研究，得到了否定的结果，人们才放弃了存在“磁荷”的假想。

根据磁极间相互作用的规律，可以推想地球本身就是一个巨大的磁体，它的  $N$  极位于地理南极附近， $S$  极位于地理北极附近。正是在地磁极的作用下，地球表面上能自由转动的磁针才会总是使  $N$  极指北， $S$  极指南。不过，地磁极与地理上的南北极并不完全重合。通常把指南针所在的与地面垂直的平面叫做磁子午面。实验表明，磁子午面与地理子午面之间存在一个偏角，叫做地磁偏角。地球表面上各处的磁偏角是不同的，而且每处的磁偏角还在随时间而变化。在我国大多数地区，磁偏角的范围大约在  $0^\circ \sim 5^\circ$  之间。

2. 电流的磁效应 在十九世纪前，磁学与电学是作为互相独立的两门学科平行地发展的。1820 年 7 月 21 日，丹麦物理学家奥斯特 (H. O. Oersted 1777~1851) 在经过长期的实验研究后，在题

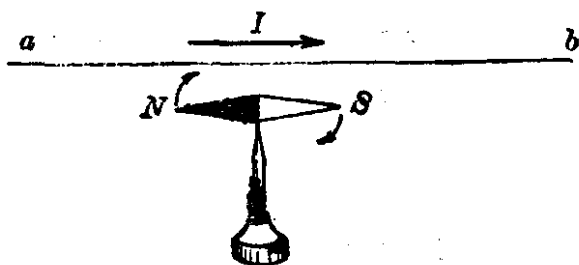


图 6-3 奥斯特实验

为《磁针遭受电冲击影响的实验》的论文中宣称“将闭合导线的一段(电流由南向北)放在磁针下面，磁极( $N$ )被推向东方；而将导线放在磁针上面时，磁极就被推向西方”。这就是著名的奥斯特实验。图 6-3 表示奥斯特实验的装置，其中直导线  $ab$  沿南北方向水平放置，导线下面放置一只可以在水平面内

自由转动的磁针.当导线中没有电流通过时,磁针在地磁的作用下指向南北方向;当导线中通过电流时,磁针就会如图 6-3 中那样发生偏转.当导线中的电流改变方向时,磁针偏转的方向也跟着改变.奥斯特实验表明: 电流具有磁效应.

电流的磁效应与通电导线的形状、导线中电流的大小和方向有关.如果将直导线绕成螺线管,再通以电流,那么通电螺线管的磁效应比通电直导线大为增强,而且其磁性与条形磁体十分相似,两端的磁性最强,形成一对磁极.通电螺线管的极性与管中电流方向之间的关系如图 6-4 所示.这个关系可用右手螺旋法则来记忆,用右手握住螺线管,伸直大拇指,让四个手指弯曲的方向与螺线管中电流的方向一致,大拇指所指的一端就是螺线管的  $N$  极.

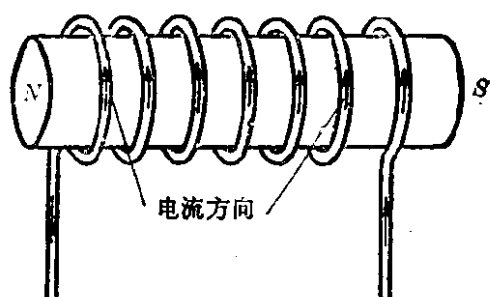


图 6-4 通电螺线管的极性与  
电流方向之间的关系

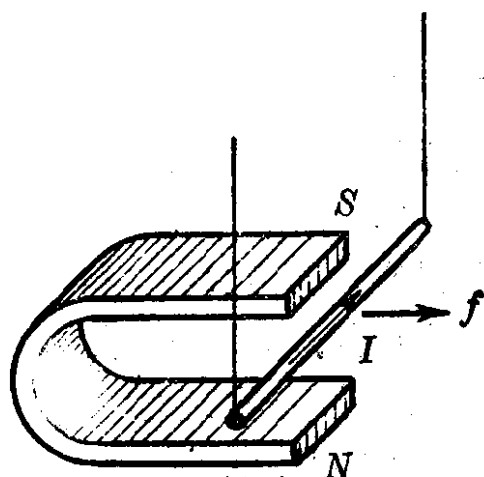


图 6-5 U 形磁体对通电直  
导线施加作用力

3. 电流与磁体之间的相互作用 奥斯特实验表明,电流对磁体能施加作用力.反过来,磁体对电流能不能施加作用力呢?这个问题也可以通过实验来回答.在图 6-5 中,在 U 形磁体的两个磁极之间,悬挂一根直导线,当直导线中通电流,可以观察到通电导线移动现象.切断电流以后,直导线又

回复到原来的位置。如果改变直导线中的电流方向，导线的运动方向也跟着改变。这个实验说明，磁体对通电直导线施加一个作用力。同样，其他形状的通电导线，如圆形的线圈、螺线管等，也会受到磁体的磁力作用。

4. 电流与电流之间的相互作用 1820 年法国工艺学院教授安培从实验中证实，电流与电流之间也存在着磁力的作用。安培并从数学上定量地计算了两根平行放置的直导线之间的作用力。如图 6-6 所示，当导线中通有同方向电流时，两根直导线互相吸引；当导线中通有相反方向电流时，两导线互相排斥。如果将导线弯成圆形，上述同向电流相吸、异向电流相斥的现象仍然存在。

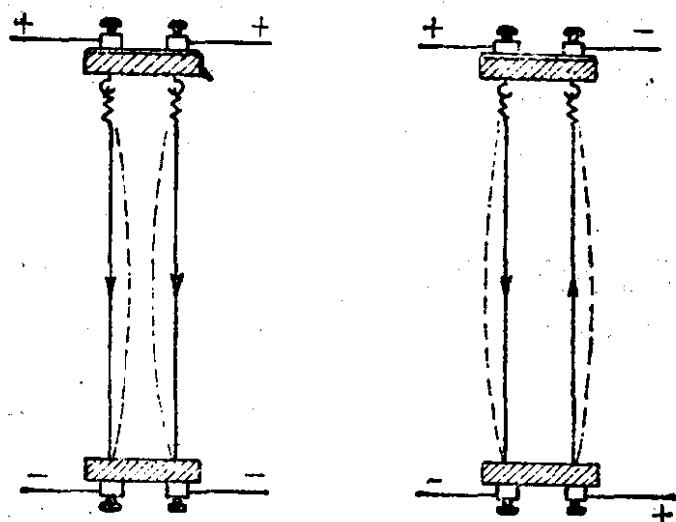


图 6-6 通电直导线之间的相互作用

5. 磁的分子电流假说 上述磁体与磁体之间、磁体与电流之间、电流与电流之间存在相互作用的客观事实给我们一个启示：磁体的磁性与电流的磁性之间有没有联系？它们的本质是否相同？安培根据一系列的实验现象归纳出磁性起源的分子电流假说，认为物质磁性的起源在于电流。组成磁体的最小单元磁分子中存在着一一种环形电流，称为分子电流。每

一分子电流就相当于一个小磁体，如图 6-7 所示。在磁体内部，存在着千千万万个分子电流。如果让这些分子电流能够有规则地定向排列起来，如图 6-8 所示的那样，那么这些分子电流的磁性迭加起来，就会使整个磁体显示出磁性来。而当分子电流无规则地排列时，物体对外不显示磁性。

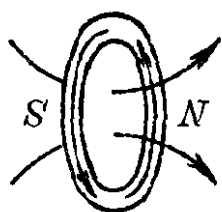


图 6-7 每一个环形分子电流相当于一个小磁体

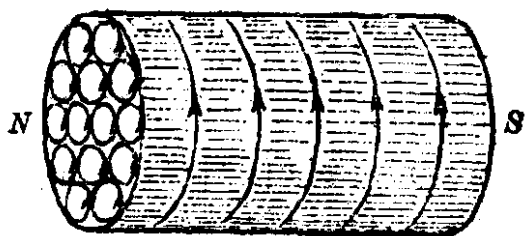


图 6-8 磁体的分子电流迭加起来形成磁体

安培的磁分子电流学说当时所以称为假说，是因为在安培提出这个学说的年代，人们还不十分了解物质的原子结构，因而更不能清楚地解释磁分子中环形电流的来源。现在，我们已经十分清楚地知道，原子中电子绕原子核的轨道运动以及电子本身的自旋，是形成磁体分子中“环形电流”的来源。安培的“磁性起源在于分子电流”的假说是正确的。

综上所述，无论是磁体还是导线中的电流，它们之间的磁相互作用的本质是相同的，都是由电流，或者说是电荷的运动引起。这种相互作用与电荷之间的库仑力作用是有区别的，它是由于电荷在运动而产生的一种附加作用，而库仑力作用是不管电荷是处于静止状态还是运动状态，这种力总是存在的。此外，我们在本章下面几节中还将看到，运动电荷间的磁相互作用规律也与库仑定律中与距离成平方反比的规律有所不同。

## 习 题 6.1

1. 一块没有磁化的铁片总是被磁铁所吸引,决不会被排斥,这是为什么?
2. 如果电子离开导线在真空中运动,这样的电子流也有磁效应吗?如果有,这种磁效应与导线中电流的磁效应有什么区别?导线的形状对磁效应的影响又体现在什么地方?
3. 人体“触电”会发生危险,目前还似乎没有听说过人体接触磁以后会发生什么危险.为什么会有这样的区别?磁对人体究竟有没有作用?这种作用不如电的作用那样明显的原因可能在哪里?
4. 图 6-9 中输电线把直流电源和用电器联结起来,如果给你一只直流伏特计和磁针,你根据什么理由来确定电源是在图的左边而用电器是在图的右边(图中 A、C 分别代表输电线上的两点)?

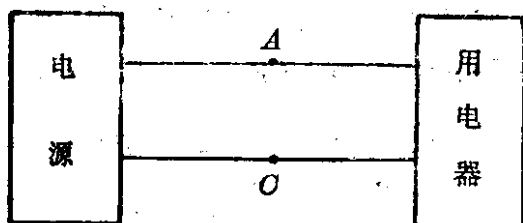


图 6-9 用伏特计和磁针确定  
电源和用电器

## § 6.2 磁场 磁感应强度

1. 磁场 在上节讨论磁体之间或磁体与电流之间相互作用的过程中,它们彼此并没有接触,这些相互作用力是靠什么来传递的呢?正如由电场传递电的相互作用一样,磁的相互作用靠磁场来传递.磁体内部及周围空间中存在着磁场;通电导线或者运动电荷的周围也存在着磁场.与电场相似,磁场也是一种特殊的物质,即使是在真空中也可以存在磁场.

磁场有两个重要的性质:第一,它总是与电流相联系着,或者说,电流周围总存在着磁场;第二,磁场对电流产生作用力.引入了磁场这个概念以后,上节中提到的磁体之间的相

— 7 —

互作用、磁体与电流之间的相互作用、电流与电流之间的相互作用都可以用磁场来加以说明：电流或磁体（其本质是分子电流）周围存在磁场；沉浸在磁场中的电流或磁体受到磁场的作用。

2. 磁感应强度  $B$  在 § 1.4 中，我们曾经引入电场强度  $E$  这个物理量来定量地描述电场的物理属性。引入电场强度  $E$  的根据是电场对位于场中的电荷有库仑力作用。与此相似，我们也可以根据磁场对位于场中的运动电荷具有作用力这一特性来引入一个能定量地描述磁场的物理量，这个物理量叫做磁感应强度矢量，用记号  $B$  表示。

磁场对运动电荷作用力的规律可以通过实验观察加以总结。在观察过程中，人们发现，这磁场力的规律要比电荷间的库仑力的规律复杂得多。关键在于磁场力  $f$  的大小和方向既与磁场的性质有关，又与运动电荷的电量  $q$ 、运动电荷的速度  $v$  的大小和方向有关。下面我们将从实验中归纳出磁场对运动电荷作用力的规律，并得出磁感应强度  $B$  的定义式。

① 在磁场中任何一点都存在一个特殊的方向，沿着这个特殊的方向（或者它的相反方向），运动电荷受到的磁场力等于零，即  $f=0$ 。

② 在与①中所述特殊方向相垂直的平面内，运动电荷受到的磁场力达到最大。实验表明，这个最大作用力  $f_{\max}$  与运动电荷的电量  $q$  和速度  $v$  的乘积成正比。实验还表明，在磁场中同一点，对于不同电荷的  $q$  和  $v$ ， $f_{\max}$  与  $qv$  的比值是不变的。可见，这个比值可以用来描述磁场本身的性质。我们就将这个比值定义为磁场的磁感应强度  $B$  的大小，即

$$B = \frac{f_{\max}}{qv}. \quad (6-1)$$

③ 根据①中的规律,我们可以定义磁场中运动电荷不受磁场力作用的那个特殊方向为磁感应强度  $B$  的方向。然而,由于这样的特殊方向存在着两个相反的指向,我们必须对  $B$  的方向作进一步规定,使  $B$  的指向与正电荷的速度方向  $v$  以及磁力方向  $f$  之间满足图 6-10 所示的右手螺旋法则\*。

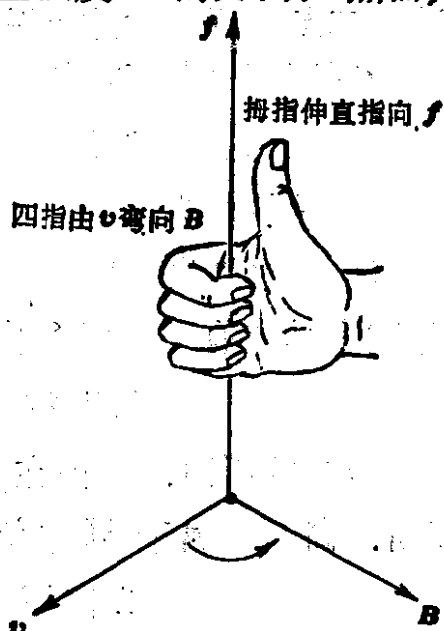


图 6-10 确定  $v$ 、 $B$ 、 $f$  之间方向关系的右手螺旋法则

④ 上述磁感应强度  $B$  的大小和方向的定义可以用一个统一的矢量式来概括,即

$$f = qv \times B. \quad (6-2)$$

由矢量的叉积的定义可知,当运动电荷的速度方向  $v$  与  $B$  平行或反平行时,  $f=0$ , 这就是①中所述的“特殊方向”;当运动电荷的速度  $v$  与磁感应强度  $B$  的方向垂直时, (6-2) 式中的  $f$

有最大值,  $f_{\max} = qvB$ , 这结果与 (6-1) 式一致。而且按照矢量叉积中的方向关系、矢量  $v$ 、 $B$  与  $f$  之间的关系满足图 6-10 所示的右手螺旋关系。

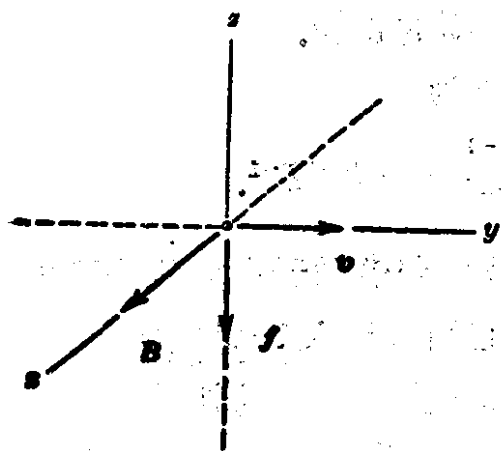


图 6-11 由  $v$ 、 $f$  确定  $B$  的方向

【例 6-1】有一正电荷在磁场中运动,当其在沿直角坐标系的  $x$  轴方向运动时不受力,当这电荷沿  $y$  轴方向运动时受到的力沿  $-z$  轴

\*  $B$  的定义方法不止这一种。但这样定义的  $B$  的方向也就是磁铁  $N$  极在磁场中的受力方向,或者说是一个可以自由转动的小磁针在磁场中处于平衡状态时  $N$  极所指的方向。

方向,问磁场的  $B$  指向什么方向?

【解】 由题设条件第一点,磁场  $B$  的方向肯定沿着  $x$  轴. 由题设条件第二点,即(6-2)式中  $v$  平行于  $Y$  轴,  $f$  平行于  $-z$  轴,由右手螺旋法则,  $B$  必须沿  $x$  轴正方向,如图 6-11 所示.

3. 磁感应强度  $B$  的单位和量纲 在 SI 中,  $f$  的单位为牛顿,  $q$  的单位为库仑,  $v$  的单位为米/秒,按照(6-1)式,磁感应强度  $B$  的单位为牛顿·秒/库仑·米,或者写成牛顿/安培·米,这个单位有个专门名称叫做特斯拉,则

$$1 \text{ 特斯拉} = 1 \text{ 牛顿/安培} \cdot \text{米}.$$

由于历史的原因,目前在实际应用中还用到另一个单位——高斯. 高斯不属于 SI 单位,

$$1 \text{ 高斯} = 10^{-4} \text{ 特斯拉}.$$

地球磁场的  $B$  大约有 0.5 高斯左右\*; 学校实验室用的棒形或蹄形磁铁磁极表面的  $B$  可以达到  $10^2$  高斯; 一般磁电式电表的永久磁铁气隙中的  $B$  大约有  $10^3$  高斯; 大型电机和变压器铁芯中的  $B$  可达  $10^4$  高斯; 而用超导材料制造的强超导磁体可以产生数量级达到  $10^5$  高斯的磁场.

在 SI 中,磁感应强度  $B$  的量纲为

$$[B] = \frac{[F]}{[q][v]} = \frac{LMT^{-2}}{ITL T^{-1}} = MT^{-2}I^{-1}.$$

4. 磁感应线 在 § 1.6 中,我们曾借助于电力线来形象化地描述电场. 与此相仿,我们也可以引入磁感应线(又称  $B$  线)来描述磁场的分布,在这曲线上每一点的切线方向都与该点的磁感应强度  $B$  的方向一致. 为了使磁感应线不仅能够表示矢量  $B$  的方向,而且同时能够表示  $B$  的大小,我们还可规定,通过磁场中某点处与  $B$  垂直的单位面积上的磁感

\* 这是指地面上的  $B$ ,在高空中要比这值小.

应线数等于该点处  $B$  的大小。因此，在磁场较强的地方  $B$  线画得密些；在磁场较弱的地方  $B$  线画得较疏些。

用实验也可以来显示磁场的磁感应线分布。在磁场中水平地放置一块平玻璃板(也可用平硬纸板)，板上均匀地撒一些铁屑，轻轻地敲敲玻璃板，铁屑就会沿着磁场方向排列起来，从而形象化地显示出磁感应线的分布，如图 6-12 所示。如果我们把它绘制成磁感应线的分布图，如图 6-13 所示。值得注意的是，在通电螺线管内部， $B$  线是从  $S$  极走向  $N$  极的。

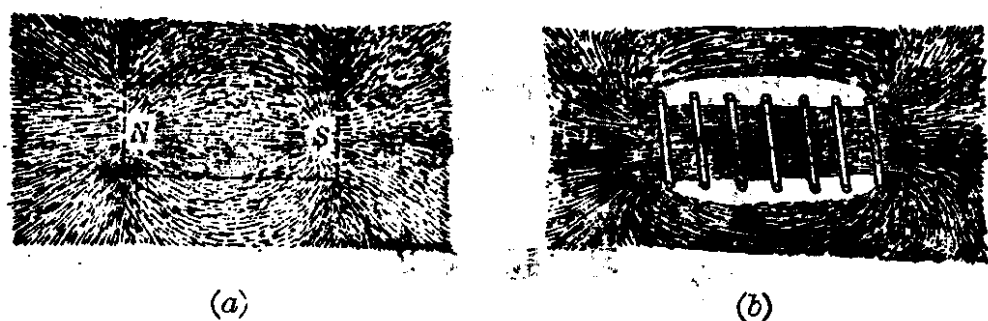


图 6-12 用铁屑显示磁感应线分布

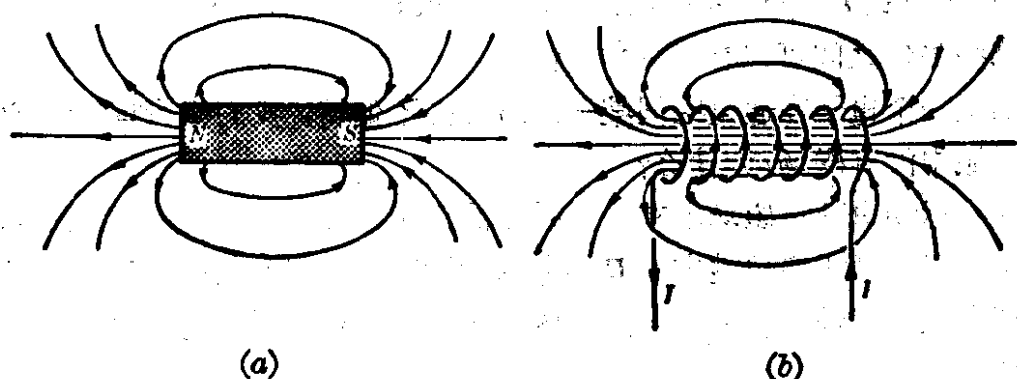


图 6-13 条形磁体和通电螺线管的磁感应线分布

从图 6-13(b) 中还可以看出，如果我们再次应用右手螺旋法则，让弯曲的四指代表螺线管中电流的方向，那么伸直的拇指方向就代表螺线管内部的磁感应线方向。从上面几次应用右手螺旋法则的过程中我们可以得到启示，右手螺旋法则是一种用来记忆某些物理量的方向之间关系的简便办法，它

的内容可以根据不同的研究对象而变换。

在图 6-13(b) 中, 通电螺线管内部的磁感应线画得基本上平行, 而且  $B$  线之间的间隔比较均匀。这就表示, 通电螺

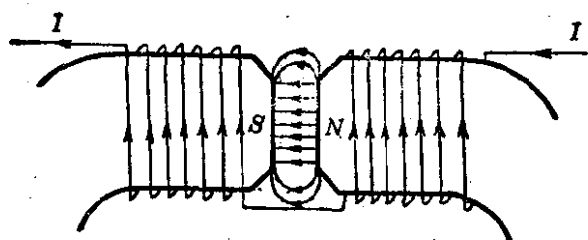


图 6-14 异名磁极中间  
接近于均匀磁场

线管内部的磁场基本上是一种均匀磁场。除了通电螺线管外, 两个距离很近、而又互相平行的异名磁极之间的中央区域, 也可近似地看作是一种均匀磁

场, 如图 6-14 所示。按照绘制磁感应线的规定, 均匀磁场中的磁感应线是一簇彼此互相平行的、而且间隔相等的直线。

## 习 题 6.2

1. 地球磁场的磁感应线是从南向北还是从北向南的?
2. 在(6-2)式  $f = q\mathbf{v} \times \mathbf{B}$  中, 三个矢量  $f$ 、 $\mathbf{v}$ 、 $\mathbf{B}$  之间哪些矢量必须正交, 哪些矢量之间可以有任意角度?
3. 如果一个电子在通过空间某一区域时并不偏转, 我们能否肯定这个区域中没有磁场? 为什么?
4. 既然运动电荷在磁场中有受到磁力的作用, 为什么我们不能象定义电场强度那样简单地定义  $\mathbf{B}$  的方向为运动电荷受到的磁力方向, 或者定义为运动电荷受到的最大磁力方向, 而要定义为不受磁力的方向?
5. 电力线不能相交, 磁感应线能相交吗? 为什么?

## § 6.3 磁场对电流的作用

我们已经讨论了运动电荷在磁场中受到磁力作用。因为导线中的电流是由自由电子的定向移动形成的, 这些受到磁

场力作用的自由电子不断地与导体的晶体点阵(原子实)相碰撞,把自由电子受到的磁场力传递给导线,因此载流导线也会受到磁场力的作用。磁场对载流导线的作用力通常称为安培力。

1. 安培力公式 为简单起见,我们先讨论一段放在均匀磁场中的直线电流,这直线电流的方向与磁场垂直。在图 6-15 中,直导线长度为  $l$ , 电流方向向右,导线中自由电子定向运动速度  $v$

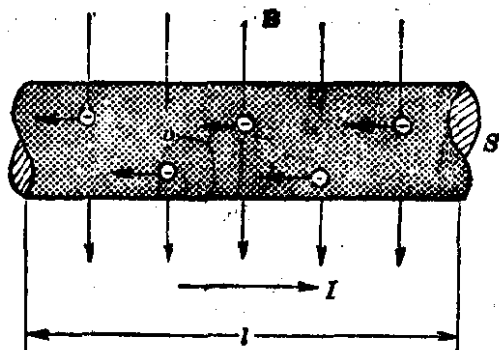


图 6-15 直线电流在均匀磁场中受到的安培力

向左,磁场的磁感应强度  $B$  由上向下。由于电子带负电,电子受到的磁力方向根据  $-e\mathbf{v} \times \mathbf{B}$  判断应该垂直于纸面向里。如果均匀导线的横截面积为  $S$ ,导线中单位体积内的电子数为  $n$ ,这段长直导线内共有自由电子数为  $n l S$ ,每个自由电子受到的磁场力为  $f = evB$ ,这段导线所受的安培力就是磁场对这些电子施加的作用力的总和,即

$$F = n l S e v B.$$

设导线中的电流强度为  $I$ ,则由公式(3-3),  $I = nevS$ ,这样通电直导线受到的安培力  $F$  为

$$F = IlB. \quad (6-3)$$

考虑到  $F$  与  $B$  和  $l$  的方向总是垂直的,我们还可将(6-3)式写成更普遍的矢量形式

$$\mathbf{F} = I\mathbf{l} \times \mathbf{B}. \quad (6-4)$$

这里要注意,(6-4)式中矢量  $\mathbf{l}$  的大小为直导线位于磁场中的长度,而  $\mathbf{l}$  的方向由直导线中电流的方向来决定。因为在(6-4)式中电流强度  $I$  为一标量,表明电流方向的箭头不能