

物理学

下 册

[美] P. A. 蒂普勒 著

科学出版社

721.126/21

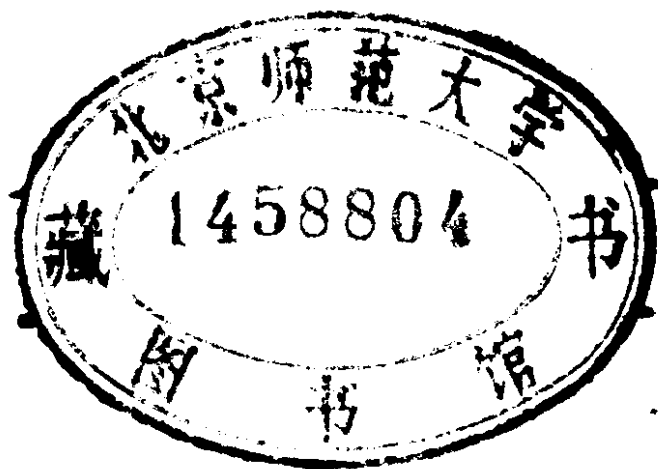
物 理 学

下 册

〔美〕P. A. 蒂普勒 著

李申生 韩辉翼 周炳辉 译

孙泽先 林 婉 校



科 学 出 版 社

1 9 8 8

内 容 简 介

本书是美国近年来较为流行的理工科用的物理学教材。1976年初版，1982年第二版，中译本是按原书第二版译的。

本书系统地论述了普通物理学的基本内容。全书共三十七章，分为力学，机械波和声学，热力学，电学和磁学，光学以及近代物理学六部分，每章均附有例题，思考题，练习题和综合题，共二千多题，书中还附有各有关专家撰写的短文十八篇。

中译本分三册出版，下册包括第二十六到三十七章：磁场；磁场的源；法拉第定律；物质的磁性；交流电路；麦克斯韦方程组及电磁波；光；几何光学；物理光学；干涉和衍射；相对论；量子化；核物理及附录。

本书可作为理工科院校物理专业和非物理专业普通物理学的教学参考书，也可供有关科技人员参考。

Paul A. Tipler

PHYSICS

(Second Edition)

Worth Publishers, 1982

物 理 学

下 册

〔美〕P. A. 蒂普勒 著

李申生 韩辉翼 周炳辉 译

孙泽先 林 婉 校

责任编辑 赵惠芝

科学出版社出版

北京朝阳门内大街137号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1988年4月第一版 开本：850×1168 1/32

1988年4月第一次印刷 印张：15

印数：0001—3,300 字数：396,000

ISBN 7-03-000135-4/O·38

定价：5.00元

目 录

第二十六章 磁场	1
26-1 磁感应强度 B 的定义	3
26-2 磁场中的磁铁	7
26-3 电流回路在均匀磁场中所受的转矩	9
26-4 点电荷在磁场中的运动	12
26-5 霍耳效应	21
第二十七章 磁场的源	32
27-1 毕奥-萨伐尔定律	33
27-2 安培和库仑的定义	40
27-3 安培定律	42
27-4 螺线管的磁场	46
27-5 条形磁体的磁场	51
27-6 磁通量	53
27-7 麦克斯韦位移电流	55
第二十八章 法拉第定律	70
28-1 动生电动势	72
28-2 楞次定律	73
28-3 法拉第定律的应用	75
28-4 涡流	79
28-5 电子回旋加速器	80
28-6 电感	83
28-7 LR 电路	87
28-8 磁能	91
28-9 LC 电路和 LCR 电路	93
短文 电动机(小鲁本 E. 艾雷)	98
第二十九章 物质的磁性	115
29-1 磁场强度 H	118

29-2	磁化率和磁导率	123
29-3	原子的磁矩	124
29-4	顺磁性	127
29-5	抗磁性	130
29-6	铁磁性	132
第三十章 交流电路		141
30-1	交流发电机	142
30-2	电阻器中的交流电	143
30-3	电容器中的交流电	145
30-4	电感器中的交流电	148
30-5	接在交流电源上的 LCR 电路	149
30-6	变压器	156
第三十一章 麦克斯韦方程组及电磁波		167
31-1	麦克斯韦方程组	168
31-2	电磁波的波动方程	169
短文 J. C. 麦克斯韦(1831—1879) (C. W. F. 埃弗列脱)		178
第三十二章 光		189
32-1	是波还是粒子?	190
32-2	电磁波	196
32-3	光的速率	198
32-4	反射	201
32-5	折射	204
32-6	偏振	211
短文 射电天文 (G. H. 彼坦吉尔)		221
第三十三章 几何光学		232
33-1	平面镜	232
33-2	球面镜	234
33-3	折射生成的象	241
33-4	透镜	243
33-5	像差	251
33-6	眼睛	252

33-7	简单放大镜	256
33-8	复合显微镜和望远镜	257
第三十四章 物理光学：干涉和衍射		269
34-1	薄膜干涉	270
34-2	迈克耳孙干涉仪	274
34-3	双缝干涉图样	276
34-4	谐波相加的矢量模型	279
34-5	三个或四个等距离光源的干涉图样	282
34-6	单缝衍射图样	287
34-7	衍射和分辨本领	295
34-8	衍射光栅	298
第三十五章 相对论		312
35-1	迈克耳孙-莫雷实验	313
35-2	爱因斯坦假设的推论	317
短文 A. 爱因斯坦 (1879—1955) (G. 霍尔顿)		319
35-3	时间膨胀和长度收缩	322
35-4	时钟的校准和同时性	327
35-5	多普勒效应	334
35-6	洛伦兹变换	335
35-7	孪生子佯谬	339
35-8	相对论动量	343
35-9	相对论能量	346
35-10	质量与结合能	349
35-11	广义相对论	352
短文 黑洞 (A. P. 莱特曼)		356
第三十六章 量子化		369
36-1	量子常数的由来：黑体辐射	371
36-2	电磁辐射的量子化：光子	374
36-3	原子能量的量子化：玻尔模型	379
36-4	电子波	385
36-5	波-粒二象性	390
36-6	测不准原理	390

正文 宇宙膨胀 (M. 里斯)	392
第三十七章 核物理	405
37-1 原子	406
37-2 原子核的性质	407
37-3 放射性	412
37-4 核反应	423
37-5 裂变、聚变和核反应堆	427
37-6 粒子与物质的相互作用	435
附录 A 国际单位	448
基本单位	448
导出单位	448
附录 B 数字资料	449
物理常数	449
地球的常数	450
天文数据	451
附录 C 换算因数	452
附录 D 数学符号及公式	455
数学符号及缩写	455
二次方程的根	455
二项展开式	455
三角公式	456
指数函数和对数函数	456
附录 E 导数和积分	458
表 E-1 导数的性质和特殊函数的导数	458
表 E-2 积分公式	461
答案	462

第二十六章 磁 场

目的与要求 学完本章应该:

1. 能够计算作用在已知磁场中电流元和运动电荷上的磁力。
2. 能够计算电流迴路的磁矩以及电流迴路在磁场中所受的转矩。
3. 能够讨论测量电子的 q/m 的汤姆孙实验。
4. 能够叙述选速器、质谱仪以及迴旋加速器。
5. 能够讨论霍耳效应。

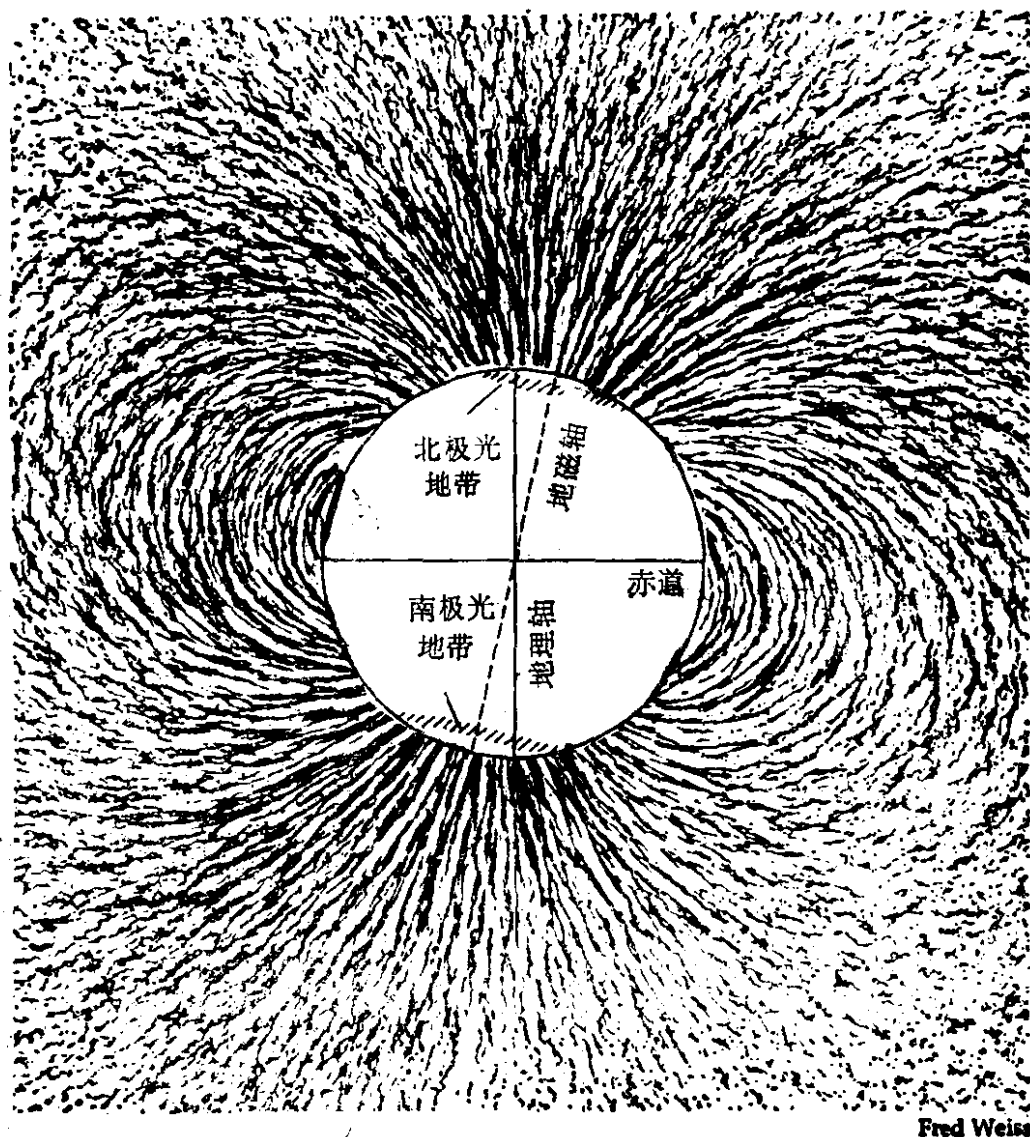
早在 2000 多年以前, 希腊人就知道产自麦格纳细亚的石料(现称磁铁)能吸引铁片¹⁾。早期的磁学实验主要是研究永磁铁的特性。我们不知道究竟何时人们首次将磁铁用于航海, 但是早在 12 世纪就有了关于这个应用的记载。德玛丽考特 (P. De Maricourt) 于 1269 年有一个重要发现: 他将一枚铁针放在一个天然的球形磁铁上不同的地方, 并记录铁针在那些地方的取向。这些取向线都通过该球体的两个相对的端点而环绕着球形磁铁, 正好象子午线环绕地球一样。由于与地球子午线相似, 他将这两个端点称为磁铁的极。下述诸现象曾引起许多实验者的注意: 所有的磁铁(不论其形状如何)都有两个极, 一个北极, 一个南极; 在这两个极上, 磁铁的磁力最强; 两个磁铁的同性极相斥, 异性极相吸。

1600 年, 吉尔伯特 (W. Gilbert) 发现指南针之所以取一定方向是因为地球本身就是一个永磁铁。由于指南针的北极被吸向地球的北极, 因而地球的北极实际上是南磁极。米歇尔 (J. Michell) 于 1750 年定量地研究了磁极间的吸引和排斥, 他利用扭秤证明了两个磁铁的磁极之间的吸引力和排斥力是相等的, 并与磁极间距

1) 关于这一论述的详细内容可参阅惠特克爵士 (Sir E. Whittaker) 所著 A History of the Theories of Aether and Electricity, Nelson, London, 1953; Torchbook edition, Harper, New York, 1960.

离的平方成反比。此后不久，库仑证实了上述这些结论。两个磁极间相互作用力的定律与两个电荷间相互作用力的定律相似，但是有一个重要的差别，即磁极总是成对地出现。要想分离出一个单一的磁极是不可能的。如果把一磁铁一分为二，则在断裂处立即出现强度相等而极性相异的磁极，因而就有了两个磁铁，每一磁铁具有相等而相异的两个磁极。库仑是这样解释上述现象的，即假定磁性是存在于磁铁的每一个分子中。

在十九世纪奥斯特 (H. C. Oersted) 发现电流影响指南针的指向之前，人们对于电与磁的关系是不了解的。安培和另一些人后来的实验证明了电流也会吸引小铁片，平行的电流互相吸引。



用均匀磁化球周围的铁屑表明地球的磁场线

安培提出了电流是一切磁性的起源这一理论；在铁磁体中，可以把这些电流认为是“分子电流”，当铁磁体被磁化时，这些分子电流排列整齐。虽然在十九世纪中，人们对于许多情况下磁性材料中的“电流”与内禀电子自旋有关以及电子的量子性等原理是不可能想象的；但是安培的这一模型仍是现今磁学原理的基础。法拉第和亨利的实验证明了变化的磁场产生非守恒的电场，而麦克斯韦的理论则表明变化的电场产生磁场，这就进一步说明了磁与电的关系。

基本的磁相互作用就是两个运动电荷之间的相互作用。正如静电相互作用的情况一样，将一个运动电荷作用于另一个运动电荷上的磁力看作由第三者——磁场——所传递的，这个看法是合适的。一个运动电荷产生一个磁场，而这个磁场又对另一个运动电荷产生一个作用力。因为运动电荷构成电流，所以磁的相互作用也可以认为是两个电流之间的相互作用。

在本章中，我们只考虑已知磁场对运动电荷和导线中电流的作用。关于磁场的起因问题将在第二十七章中讨论。

26-1 磁感应强度¹⁾ \mathbf{B} 的定义

我们可以用类似定义场强 \mathbf{E} 的方法来定义空间一点的磁感应强度矢量 \mathbf{B} (回忆一下，我们把空间一点的 \mathbf{E} 定义为置于该点的试验电荷 q_0 上每单位电荷所受的力)。由实验观测可知，当一个速度为 v 的电荷在磁体或载流导线附近运动时，将有一个附加的力作用在该电荷上，这个力取决于电荷速度的数值和方向。我们能够容易地区分这两个力：先测量当电荷静止时作用于该电荷上的电力，再从电荷运动时作用于该电荷上的总作用力中减去上述的电力。为了简明起见，假定在我们所考察的空间一点处不存在电场，用各种不同电荷以不同速度在空间这个点上运动，实验给出

1) 原文为“Magnetic Field”。本书作者经常将“磁场”与“磁感应强度”混用，我们在译文中视不同的场合将这两个概念加以区分。——译者

磁力的结果为

1. 磁力正比于电荷 q 的数值。
2. 磁力正比于速率 v 。
3. 磁力的大小和方向取决于速度 v 的方向。
4. 当该带电粒子的速度沿着空间某一直线时, 受力为零。
5. 当速度不是沿着上述这直线时, 则有一个既垂直于这条直线又垂直于这个速度的磁力作用在该带电粒子上。
6. 如果速度与这条直线成 θ 角, 则磁力正比于 $\sin \theta$ 。
7. 作用在负电荷上的磁力, 与作用在以同样速度运动的正电荷上的磁力方向相反。我们能够通过定义磁感应强度矢量 \mathbf{B} (它沿着上述第 4 条中所描述的那条直线), 并用下式来总结上列这些

实验结果:

$$\mathbf{F} = q \mathbf{v} \times \mathbf{B}. \quad (26-1)$$

由于历史的原因, 矢量 \mathbf{B} 通常称为磁感应矢量或磁通量密度。(另一个相关的矢量磁场强度 \mathbf{H} 将在第二十九章中当我们研究磁性材料时引入。在自由空间, 矢量 \mathbf{B} 和 \mathbf{H} 是互成比例的。按惯例, 我们把这个 \mathbf{B} 场称为磁感应, 虽然我们也可能称它为磁场。)

图 26-1 为当磁感应强度矢量 \mathbf{B} 为竖直方向时作用于各种运动电荷上的力。注意, \mathbf{B} 的方向能够用式 (26-1) 由实验求得。

磁感应强度的国际单位是特斯拉 (T)¹⁾。一个 1 库仑的电荷以 1 米每秒的速度垂直于 1 特斯拉的磁场而运动, 它受到 1 牛顿的力:

$$\begin{aligned} 1 \text{ 特斯拉} &= 1 \text{ 牛顿} \cdot \text{秒} / \text{库仑} \cdot \text{米} \\ &= 1 \text{ 牛顿} / \text{安} \cdot \text{米}. \end{aligned}$$

这个单位相当大, 另一个更常用的单位是高斯 (G), 它是由厘米·克·秒制导出的。高

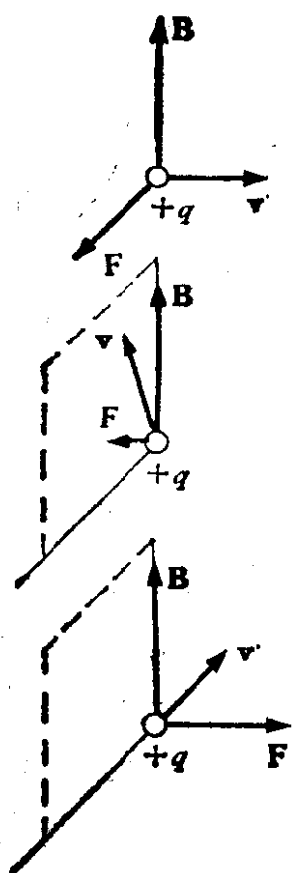


图 26-1 作用于磁感应 \mathbf{B} 中沿各不同方向、以速度 v 而运动的带电粒子上的磁力方向

1) 这个单位也称韦伯每平方米, 因为磁通量的单位是韦伯 (Wb)。

斯与特斯拉的关系如下:

$$1 \text{ 特斯拉} = 10^4 \text{ 高斯}. \quad (26-2)$$

由于磁感应强度常以高斯为单位给出, 而它并非国际单位, 所以计算时要记得将它变换为特斯拉.

例 26-1 地球的磁感应强度具有 0.6 高斯的数值, 方向是向下和向北, 与水平成大约 70° 的角. (这些数据对于美国中部大致是正确的.) 一个质子以速率 $v=10^7$ 米/秒水平地向北运动. 计算作用在该质子上的力.

图 26-2 示出磁感应强度 \mathbf{B} 和质子速度 \mathbf{v} 的方向, 它们之间的夹角 $\theta = 70^\circ$. 力的方向是 $\mathbf{v} \times \mathbf{B}$, 对于向北运动的质子来说, 它是指向西的. 磁力的数值为

$$\begin{aligned} F &= qvB \sin \theta = (1.6 \\ &\times 10^{-19} \text{ 库仑})(10^7 \text{ 米/秒})(0.6 \\ &\times 10^{-4} \text{ 特斯拉})(0.94). \\ &= 9.02 \times 10^{-17} \text{ 牛顿}. \end{aligned}$$

该质子的加速度是

$$a = \frac{F}{m} = \frac{9.02 \times 10^{-17} \text{ 牛顿}}{1.67 \times 10^{-27} \text{ 千克}} = 5.40 \times 10^{10} \text{ 米/秒}^2.$$

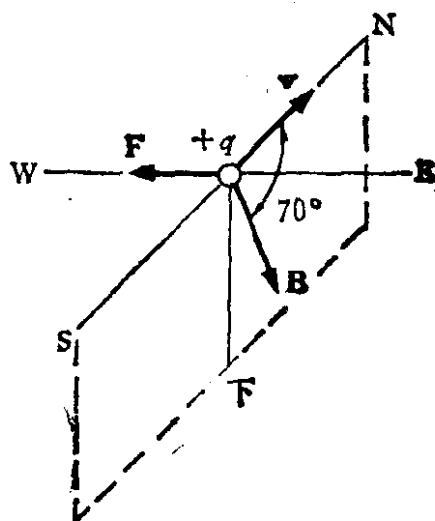


图 26-2 在地球的磁场中, 作用在一个向北运动的质子上的力. 地磁场方向向北, 与水平线成 70° 角, 力的方向向西

当磁场中的导线载有电流时, 就有一个力作用在该导线上, 这个力是作用在带电粒子 (它们的运动产生电流) 上的磁力之总和.

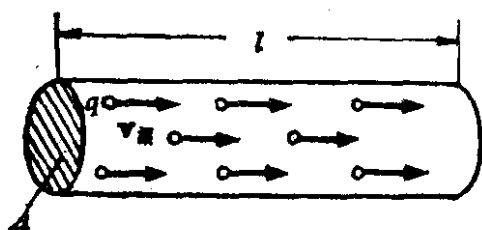


图 26-3 长度为 l 的电流元. 每一电荷受到磁力 $q \mathbf{v} \times \mathbf{B}$ 的作用

图 26-3 示出一小段横截面积为 A 、长度为 l 的导线载有电流 I . 如果该导线处于磁感应强度 \mathbf{B} 中, 作用于每一电荷上的磁力是

$q \mathbf{v}_d \times \mathbf{B}$, 其中 \mathbf{v}_d 是载流子的漂移速度。在这段导线中的电荷数是每单位体积中的电荷数 n 乘以体积 Al 。因此,作用在这段导线上总的力 \mathbf{F} 是

$$\mathbf{F} = (q \mathbf{v}_d \times \mathbf{B})nAl.$$

根据式(24-3),导线中的电流是

$$I = nqv_d A,$$

因此,力能写成

$$\mathbf{F} = I \mathbf{l} \times \mathbf{B}, \quad (26-3)$$

式中 \mathbf{l} 是一个矢量,其数值是导线的长度,而方向平行于 $q \mathbf{v}_d$,即平行于电流的方向。式(26-3)假设导线是直的,并且在这段导线的长度范围内磁感应强度是不变的。这个式子很容易被推广到在任一磁场中的一般任意形状的导线。我们只要选取很短一段导线 $d\mathbf{l}$,并写出作用于这段导线上的力 $d\mathbf{F}$:

$$d\mathbf{F} = Id\mathbf{l} \times \mathbf{B}, \quad (26-4)$$

式中 \mathbf{B} 是该线段处的磁感应强度矢量; $Id\mathbf{l}$ 称为电流元。我们根据所有的电流元以及和每个电流元相应的磁感应强度 \mathbf{B} ,用相加(或积分)的办法即可求得作用于该导线上的总力。

可把式(26-4)看作为 \mathbf{B} 的另一个定义,与式(26-1)等效。根据这个定义,可以借助于测量作用在一个电流元 $Id\mathbf{l}$ (任意方位的电流元)上的力求得 \mathbf{B} 的数值和方向。

思 考 题

1. 电荷 q 以速度 \mathbf{v} 通过磁感应强度 \mathbf{B} ,在此瞬间,它受到一个磁力 \mathbf{F} 。如果该电荷具有相反的符号;如果电荷的速度具有相反的方向;如果磁感应强度具有相反的方向,则磁力将分别具有什么样的结果?

2. \mathbf{B} 与 \mathbf{v} 之间成怎样的角度,作用在 q 上的磁力才最大和最小?

3. 一个运动电荷可能同时受到电力和磁力的作用。你怎样区分使电荷从直线路径上偏转的力是电力还是磁力?

4. 怎样才能使通过某磁感应区域的电荷不受任何磁力的作用?

5. 试证: 无论我们将电流看作是由正电荷还是负电荷、或者由正负电荷的混合物所形成的, 作用在一个电流元上的磁力的方向和数值总是相同的.

6. 怎样才能使一根载流导线通过磁场而不受任何磁力的作用? 为什么可能?

26-2 磁场中的磁铁

当将一个小的永磁铁(例如一个指南针)置于磁场中时, 它要把自己的北极指向 \mathbf{B} 方向的趋向. 这个效应也发生于原先未被磁化的铁屑由于 \mathbf{B} 场的存在而被磁化的情形中. 图 26-4

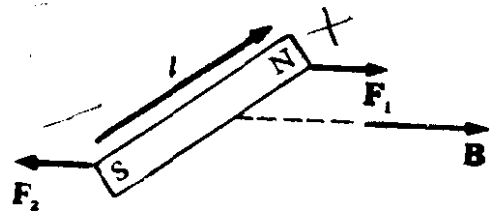


图 26-4 小磁铁在均匀磁场中受到一个转矩的作用

示出一个与磁感应强度 \mathbf{B} 成任意角的小磁铁, 在北极上有一个沿 \mathbf{B} 方向的力 \mathbf{F}_1 , 在南极上有一个相等而反向的力 \mathbf{F}_2 . 磁铁的磁极强度 q_m 定义为¹⁾: 作用在磁极上的力 \mathbf{F} 的数值与磁感应强度 \mathbf{B} 的数值之比:

$$q_m = F/B. \quad (26-5)$$

由于 1 特斯拉等于 1 牛顿每安·米, 所以磁极强度的国际单位是安·米 ($\text{A}\cdot\text{m}$). 如果我们采取惯用的符号, 将北极定为正的, 南极定为负的, 则作用在一个极上的力能写成如下的矢量式:

$$\mathbf{F} = q_m \mathbf{B}. \quad (26-6)$$

由图 26-4 可见, 有一个转矩作用在磁场中的磁铁上. 如果 \mathbf{l} 是从南极指向北极的矢量, 其数值为两极之间的距离, 那么转矩为

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{l} \times \mathbf{F} = \mathbf{l} \times q_m \mathbf{B} = q_m \mathbf{l} \times \mathbf{B}. \quad (26-7)$$

1) 用 q_m 作为磁极强度的符号, 使磁的公式与在电场中相应的电荷的公式相似. 下标 m 提醒我们, q_m 表示的是磁极而不是电荷.

磁铁的磁矩 \mathbf{m} 定义为

$$\mathbf{m} = q_m \mathbf{l}. \quad (26-8)$$

磁矩的国际单位是安·米² ($\text{A}\cdot\text{m}^2$). 用磁矩表示, 作用在磁铁上的转矩为

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{m} \times \mathbf{B}. \quad (26-9)$$

这些公式与表示作用在电场中电偶极子上的转矩公式完全相

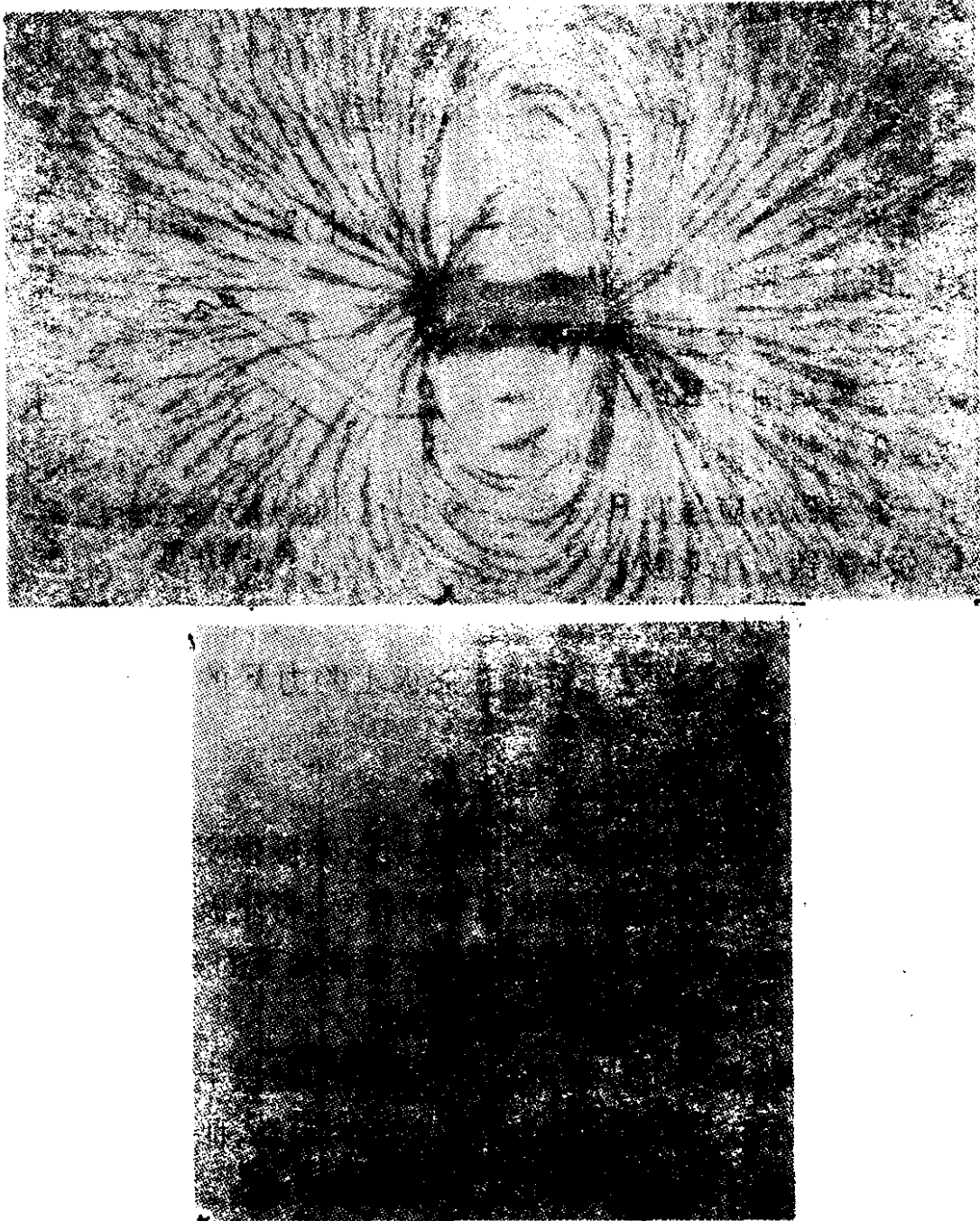


图 26-5 由铁屑的排列而显示出来的磁铁的磁感应线(上)以及长直载流导线的磁感应线(下)

似（见节 20-7）。然而，磁极强度 q_m 与电荷 q 有一个重要区别：实验上从未发现过单一的磁极，磁极总是成对出现的；即磁的基本单位是磁偶极子。用实验方法很容易测出的物理量是磁铁的磁偶极矩 m ，将磁铁置于一个已知强度的磁感应强度中，测出转矩即可。然后根据式 (26-8) 用磁铁的长度去除磁矩的数值，便得出磁极强度 q_m 。

通常用在空间的每一点上画平行于 \mathbf{B} 的线来表示磁感应强度 \mathbf{B} 的方向，并用这些线的密度表示 \mathbf{B} 的数值。这与表示电场强度 \mathbf{E} 的方法完全一样。这样的线称为磁感应线。对于给定的磁感应强度 \mathbf{B} ，磁感应线可以用指南针或铁屑来显现，因为这些小磁铁沿着 \mathbf{B} 的方向将它们自己排列起来。图 26-5 为靠近条形磁铁和长直载流导线周围的磁感应线。在磁铁的外部， \mathbf{B} 线离开北极而进入南极，这与作用在北极上的力是沿着 \mathbf{B} 的方向以及两个北极互相排斥这一事实相一致的。我们将在后面几章中研究如何计算这些情况下的 \mathbf{B} 。

思 考 题

7. 虽然作用在磁铁北极的力是沿着磁感应线的方向的，但是作用在通过磁感应强度 \mathbf{B} 区域的运动电荷上的力不是沿着磁感线的方向的，是否能画出一组线来表示作用于运动电荷位于空间每一点处所受磁力的方向？

8. 图 26-5 (下) 所示靠近长直载流导线处的磁感应线是以该导线为中心的同心圆。假定存在单磁极的话，那么如果将它放在这载流导线附近将会发生什么现象？

26-3 电流迴路在均匀磁场中所受的转矩

将载有电流 I 的导线置于均匀磁场中，就有力作用在该导线的每一部分。如果导线是闭合迴路，则没有净力作用在迴路上，因为作用在迴路不同部分导线上的力之总和为零（假定在迴路各部

分的磁感应强度 \mathbf{B} 是相同的)。然而，通常磁力产生一个转矩作用在迴路上，使迴路的平面趋向于转到与磁感应强度 \mathbf{B} 相垂直的位置。

图 26-6 画出一个载有电流 I 的矩形迴路，它被置于与迴路平面平行的均匀磁场中。作用在该迴路每一段导线上的力已在图中标出。迴路的上边及底边不受力，因为这两段导线中的电流与

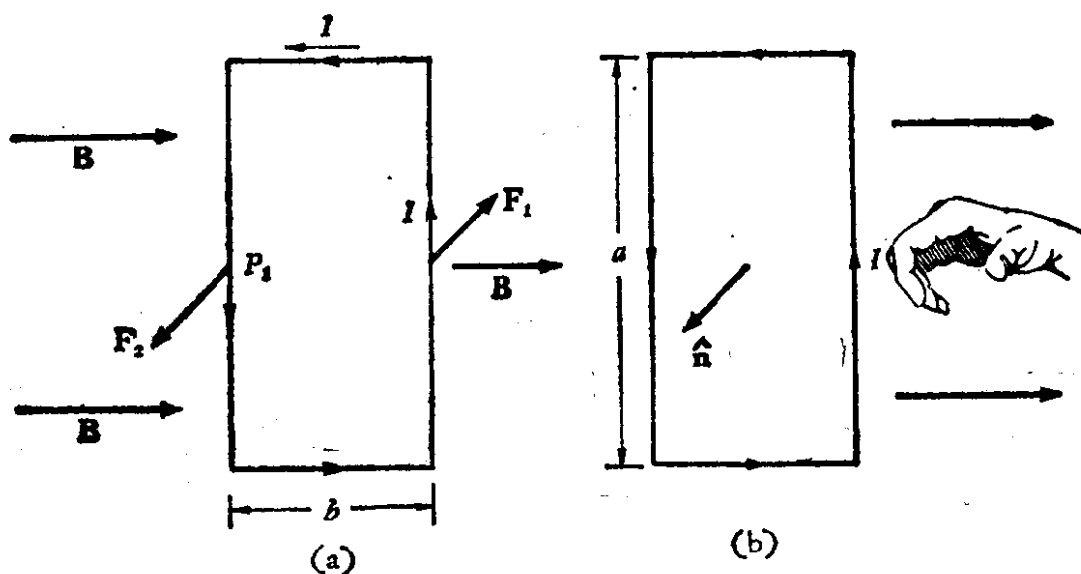


图 26-6 (a) 作用在处于均匀磁感应强度 \mathbf{B} 中的矩形电流迴路上的力 (\mathbf{B} 平行于迴路的平面)。 (b) 单位矢量 \hat{n} 垂直于迴路平面， \hat{n} 的方向用右手定则确定：将四指沿着电流方向弯曲，大拇指就表示 \hat{n} 的方向。(a) 中的力有使迴路的 \hat{n} 转到 \mathbf{B} 的方向的趋势

磁感应强度 \mathbf{B} 平行或逆平行，所以 $I d\mathbf{l} \times \mathbf{B}$ 为零。作用在迴路两边的力的数值为

$$F_1 = F_2 = IaB,$$

式中 a 是边的长度。这两个力是相等而反向的，因此它们形成一个力偶。净力为零，绕任意点的转矩都相等，即与所绕点的位置无关。 P_1 点是计算转矩的一个方便的点，转矩的数值是

$$F_1 b = IabB = IAB,$$

式中 b 是迴路的宽度， $A = ab$ 是迴路的面积。因此转矩是电流、迴路面积以及磁感应强度 \mathbf{B} 的乘积。这个转矩有使迴路的平面转到与 \mathbf{B} 相垂直的趋势。迴路的方向可以方便地用一个垂直于该