

普通物理学教程丛书

# 电 磁 学

(下册)

贾起民 郑永令 编著

复旦大学出版社



普通物理学教程丛书

# 电 磁 学

(下册)

贾起民 郑永令 编著

复旦大学出版社

## 内 容 简 介

本书是《普通物理学教程丛书》中的一种,是作者在复旦大学物理系长期使用的电磁学讲义基础上改编而成的。全书系统地阐述电磁学的现象、概念及其规律,以及处理电磁学问题的基本方法。共十章,前三章讨论静电场,第四章讨论稳恒电流,五、六两章讨论静磁场,第七章用狭义相对论观点讨论电与磁的联系,第八章讨论电磁感应,第九章讨论交流电路,第十章讨论麦克斯韦方程和电磁波。分上下两册,各五章。本书内容全面,对有些问题进行了较深入的分析 and 讨论,适合于不同层次的读者参考。

本书可作为理工科大学及师范院校物理类专业学生的教材,也可用作有关专业师生的教学参考书。

## 电 磁 学

(下 册)

复旦大学出版社出版

上海国权路 579 号

新华书店上海发行所发行 复旦大学印刷厂印刷

字数 358 千字, 开本  $850 \times 1168$  1/32 印张 12.5

1987 年 8 月第一版 1987 年 8 月第一次印刷

印数: 1—8,000

书号: 13253·060 定价: 2.80 元

# 目 录

(下 册)

|                                                               |    |
|---------------------------------------------------------------|----|
| <b>第六章 静磁场与介质</b> .....                                       | 1  |
| § 6.1 顺磁性和抗磁性 .....                                           | 1  |
| 1. 顺磁性物质和抗磁性物质 2. 原子中的电流 电子的磁矩                                |    |
| 3. 顺磁性和抗磁性                                                    |    |
| 思考题 .....                                                     | 6  |
| § 6.2 磁化强度和磁化电流 .....                                         | 7  |
| 1. 磁化强度 2. 磁化电流 3. 磁化电流的面密度与体密度 4. 例题                         |    |
| 思考题 .....                                                     | 15 |
| § 6.3 介质中的磁场 .....                                            | 15 |
| 1. 磁介质中的磁感应强度 2. 磁化强度与磁感应强度的关系                                |    |
| 3. 例题                                                         |    |
| 思考题 .....                                                     | 20 |
| § 6.4 磁场强度 介质中静磁场的基本方程式 .....                                 | 20 |
| 1. 磁场强度 介质中磁场的安培环路定理 2. 介质中静磁场的基本方程式 3. 磁场的边界条件 4. 几点说明 5. 例题 |    |
| 思考题 .....                                                     | 30 |
| § 6.5 铁磁性 .....                                               | 32 |
| 1. 磁化曲线 2. 磁滞回线 3. 铁磁性起因简介 4. 永磁体的磁场 假想磁荷 5. 磁路定理 6. 例题       |    |
| 思考题 .....                                                     | 45 |
| 习题 .....                                                      | 45 |
| <b>第七章 匀速运动电荷的电场和磁场</b> .....                                 | 55 |
| § 7.1 狭义相对论的基本概念和主要结论 .....                                   | 56 |
| 1. 爱因斯坦假设 2. 洛伦兹变换 3. 相对论的长度测量                                |    |
| 4. 相对论的时间测量 5. 相对论的速度变换 6. 相对论                                |    |

的质量 7. 相对论的动量和能量 8. 相对论中力的变换

公式 9. 例题

§ 7.2 匀速运动点电荷的电场 ..... 69

1. 狭义相对论与电磁学 2. 匀速运动电荷对静止的检测电荷的作用力 3. 匀速运动的点电荷的电场 4. 几点说明

思考题 ..... 82

§ 7.3 匀速运动点电荷的磁场 ..... 82

1. 以相同速度运动的点电荷之间的作用力 2. 速度不同的点电荷之间的作用力 3. 两匀速运动点电荷间的作用力的一般情况 4. 匀速运动点电荷的磁场

思考题 ..... 92

§ 7.4 线分布运动电荷的场 电场与磁场的变换 ..... 92

1. 匀速运动的均匀分布线电荷的电场与磁场 2. 通有稳恒电流的长直导线附近的场 3. 电场与磁场的变换式 4. 几点说明 5. 例题

思考题 ..... 111

习题 ..... 111

**第八章 电磁感应** ..... 116

§ 8.1 电磁感应现象和电磁感应规律 ..... 116

1. 基本的电磁感应现象 2. 感应电动势及其大小和方向 3. 法拉第电磁感应定律 4. 例题

思考题 ..... 126

§ 8.2 电磁感应现象的物理实质 ..... 128

1. 动生电动势 2. 感应电场及其性质 3. 涡电流和电磁阻尼 4. 几点说明 5. 例题

思考题 ..... 143

§ 8.3 动生电动势、感生电动势与狭义相对论的关系 ..... 145

1. 导体杆在磁场中运动产生的感应电动势 2. 磁铁与闭合导体回路的相对运动所产生的感应电动势 3. 导线框与载流长直导线间的相对运动产生的电磁感应现象 4. 单极感应现象

思考题 ..... 155

§ 8.4 互感与自感 ..... 156

|                                      |     |
|--------------------------------------|-----|
| 1. 互感现象与互感系数 2. 自感现象与自感系数 3. 例题      |     |
| *4. 关于通过磁感应通量计算自感系数的进一步讨论            |     |
| 思考题 .....                            | 167 |
| § 8.5 $LR$ 电路中的暂态过程 磁场的能量 .....      | 168 |
| 1. 似稳电流 可变电流的电路方程 2. $LR$ 电路中的暂态过程   |     |
| 3. 可变电流电路中的能量转换 自感能 4. 两个载流回路的磁能 互感能 |     |
| 5. 磁场的能量和能量密度 6. 例题                  |     |
| 思考题 .....                            | 182 |
| § 8.6 超导体的基本电磁学性质 .....              | 182 |
| 1. 超导电性 2. 零电阻导体的特性 3. 迈斯纳效应         |     |
| 附录 8.A 关于导线回路在变化的磁场中运动的电磁感应定律 .....  | 191 |
| 习题 .....                             | 192 |

## 第九章 交流电路.....206

|                                        |     |
|----------------------------------------|-----|
| § 9.1 简谐交流电的产生和表示方法 .....              | 206 |
| 1. 简谐交流电的产生 2. 简谐交流电的三个参量 3. 简谐交流电的有效值 |     |
| 4. 简谐交流电的振幅矢量表示法                       |     |
| 5. 例题                                  |     |
| 思考题 .....                              | 212 |
| § 9.2 交流电路中的元件 .....                   | 213 |
| 1. 交流电路中的电阻 2. 交流电路中的电感 3. 交流电路中的电容    |     |
| 思考题 .....                              | 224 |
| § 9.3 $RLC$ 串联电路 .....                 | 225 |
| 1. 似稳条件和集中参量 2. $RLC$ 串联电路的电路方程及其解     |     |
| 3. $RLC$ 串联电路的振幅矢量算法 4. 例题             |     |
| 思考题 .....                              | 236 |
| § 9.4 简谐交流电的复数表示 并联电路 .....            | 236 |
| 1. 简谐交流电的复数表示 2. $RLC$ 串联电路方程的复数表示     |     |
| 3. 基尔霍夫方程的复数形式 阻抗的串联和并联                |     |
| 4. 并联电路的计算 5. 例题                       |     |
| 思考题 .....                              | 250 |
| § 9.5 交流电路的功率 .....                    | 250 |
| 1. 交流电路的功率 2. 有功功率和无功功率 3. 提高电路        |     |

|                                  |     |
|----------------------------------|-----|
| 功率因数的意义和方法                       |     |
| 思考题 .....                        | 256 |
| §9.6 谐振电路和品质因数 .....             | 257 |
| 1. $RLC$ 串联电路的谐振和谐振条件            |     |
| 2. $RLC$ 串联电路谐振时电路上的电压分布 品质因数    |     |
| 3. $RLC$ 串联谐振电路中的能量转换 $Q$ 值的普遍含义 |     |
| 4. 谐振曲线 通频带                      |     |
| 5. 并联谐振电路                        |     |
| 6. 例题                            |     |
| 思考题 .....                        | 269 |
| §9.7 变压器的基本原理 .....              | 269 |
| 1. 含有互感的电路方程式                    |     |
| 2. 理想变压器 电压变比公式                  |     |
| 3. 变压器输入和输出的等效电路                 |     |
| *4. 趋肤效应 及其一种定性解释                |     |
| 思考题 .....                        | 277 |
| §9.8 三相交流电 .....                 | 277 |
| 1. 三相交流电的产生                      |     |
| 2. 三相电路中负载的连接                    |     |
| 思考题 .....                        | 281 |
| 习题 .....                         | 283 |

## 第十章 麦克斯韦方程组与电磁波.....295

|                               |     |
|-------------------------------|-----|
| §10.1 位移电流 麦克斯韦方程组 .....      | 295 |
| 1. 位移电流                       |     |
| 2. 位移电流的物理实质                  |     |
| 3. 麦克斯韦方程组的积分形式               |     |
| 4. 麦克斯韦方程组的微分形式 边界条件          |     |
| 5. 例题                         |     |
| 6. 几点说明                       |     |
| 思考题 .....                     | 314 |
| §10.2 电磁场的传播 自由空间的平面电磁波 ..... | 315 |
| 1. 电场与磁场的传播                   |     |
| 2. 自由空间的平面电磁波                 |     |
| 3. 光的折射率                      |     |
| 4. 偏振                         |     |
| 5. 例题                         |     |
| §10.3 电磁场的能量与动量 .....         | 332 |
| 1. 电磁场的能量 能流密度                |     |
| 2. 电磁场的动量                     |     |
| 3. 例题                         |     |
| §10.4 电磁波的产生 .....            | 340 |
| 1. 辐射电磁波的条件                   |     |
| 2. 加速运动电荷的辐射                  |     |
| 3. 辐射场的能流                     |     |
| 4. 振动偶极子的辐射                   |     |
| 5. 例题                         |     |
| *§10.5 传输线 .....              | 355 |

|                       |          |            |          |             |      |
|-----------------------|----------|------------|----------|-------------|------|
| 1. 平行导体板传输线           | 2. 传输线方程 | 3. 传输线方程的解 | 传输线的特征阻抗 | 4. 传输线的终端反射 | 阻抗匹配 |
| 5. 四分之一波长变换器          |          |            |          |             |      |
| 习题                    |          |            |          |             | 369  |
| 附录 A. 高斯单位制和 MKSA 单位制 |          |            |          |             | 375  |
| 附录 B. 常用矢量公式          |          |            |          |             | 383  |
| 参考书目                  |          |            |          |             | 385  |
| 习题(双数)答案              |          |            |          |             | 387  |



# 6

## 静磁场与介质

前面一章,我们讨论了真空中的静磁场。在这一章中,我们要讨论实物中的磁场和实物对磁场的响应。几乎所有气体,液体和固体等实物,不论它的内部结构如何,对磁场都会有响应。这表明所有的物质都有磁性。但大部分物质的磁性都比较弱,只有少数如金属铁、镍、钴以及某些合金等所谓铁磁性物质,才有较强的磁性。物质的磁性起源于原子的磁性,而原子磁性又与量子力学密切相关。甚至可以这样说,按照严格的经典理论,处在热平衡状态下的系统,即使在磁场中,亦不会出现磁性。但是,早在量子力学诞生以前,人们已从经典理论出发,对物质的磁性起源作出了某些说明,这些说明尽管并不严格,但对人们认识磁性仍然是有益的。在本课程中讨论物质的磁性,当然不可能以量子力学为基础。研究磁介质的目的也只能着眼于建立介质中的磁场方程,并从微观的角度对某些宏观现象作出一些定性说明。我们将在对物质磁性进行微观定性分析的基础上,建立物质磁化的简单模型。最后通过几个可以用实验测量的参量来表示物质的磁性。

### § 6.1 顺磁性和抗磁性

#### 1. 顺磁性物质和抗磁性物质

我们先研究非铁磁性物质的磁性。这类物质的磁性都比较弱。图 6.1-1 为一付电磁铁,它的一个磁极是平板状的,另一磁极为尖角形。尖角附近的磁场比平板附近的磁场强得多。利用这样的磁铁,我们可以研究非均匀磁场对磁性物质的作用力。用一根细长的线把磁性物质的样品悬挂在磁场中。一般讲来,样品将受到磁场的作用力,使样品发

生位移。根据位移的大小和方向,可以判断样品受力的大小和方向。实

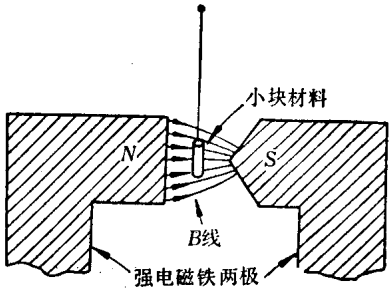


图 61-1 磁性物质在非均匀磁场中受到的作用力

验发现,除了铁、镍、钴等铁磁性物质制成的样品受到尖角磁极的强烈吸引外,其他物质制成的样品只受尖角磁极的微弱吸引或排斥。受尖角磁极吸引的物质有铝、钠、氯化铜等,受该极排斥的物质有铋、铜、铅、氯化钠等。被吸引至磁场较强区域的物质称为顺磁性物质,被排斥离磁场较强区域的物质称为抗磁性物质。在磁感应强度  $B=1.8$  特斯

拉、梯度为每米 17 特斯拉的非均匀磁场中,质量为 1 克的顺磁性物质(或抗磁性物质)受到的作用力如下表所示:

表 6.1-1 几种磁性物质在不均匀磁场中受到的作用力

| 物 质              | 化 学 式             | 所受到的力(牛顿)              |
|------------------|-------------------|------------------------|
| <b>顺 磁 性 物 质</b> |                   |                        |
| 钠                | Na                | $+2 \times 10^{-4}$    |
| 铝                | Al                | $+1.7 \times 10^{-4}$  |
| 氯化铜              | CuCl <sub>2</sub> | $+2.80 \times 10^{-3}$ |
| 硫酸镍              | NiSO <sub>4</sub> | $+8.30 \times 10^{-3}$ |
| 液态氧              | O <sub>2</sub>    | $+0.75(90K)$           |
| <b>抗 磁 性 物 质</b> |                   |                        |
| 水                | H <sub>2</sub> O  | $-2.2 \times 10^{-4}$  |
| 铜                | Cu                | $-2.6 \times 10^{-5}$  |
| 铅                | Pb                | $-3.7 \times 10^{-4}$  |
| 氯化钠              | NaCl              | $-1.5 \times 10^{-4}$  |
| 石英               | SiO <sub>2</sub>  | $-1.6 \times 10^{-4}$  |
| 硫                | S                 | $-1.6 \times 10^{-4}$  |
| 石墨               | C                 | $-1.10 \times 10^{-3}$ |

表中的正负号分别表示受到强磁场区域的吸引或排斥两种不同的情况。从所给出的数据可以看出,两种作用力都很小,而 1.8 特斯拉的磁

场已非常强了。内径为 10 厘米、长为 40 厘米、外径为 40 厘米的多层密绕大型螺线管,当导线中通过 400 千瓦功率的电流时,线圈中心处的磁场的磁感应强度也只有 3 特斯拉。

## 2. 原子中的电流 电子的磁矩

如果磁场只对电流或运动电荷才有力作用,那么磁介质在磁场中受到作用力这一事实表明磁介质内部存在着运动的电荷或电流。按照经典的想法,原子内部的电子绕原子核沿圆或椭圆的轨道运动。由于电子带电,电子的轨道运动犹如一闭合的圆电流,因而具有一定的磁矩,称为轨道磁矩。另一方面,由于电子具有质量,电子的轨道运动还具有一定的角动量,称为轨道角动量。

若电子轨道运动的速率为  $v$ 、轨道的半径为  $r$ ,则电子沿轨道运动一周所经历的时间为  $2\pi r/v$ ,单位时间内通过轨道上任一“截面”的电量(即电流强度)为

$$i = \frac{ve}{2\pi r} \quad (6.1-1)$$

于是,电子轨道运动的磁矩为

$$m_{\text{电(轨)}} = i \cdot \pi r^2 = \frac{1}{2} evr \quad (6.1-2)$$

电子轨道运动的角动量为

$$J_{\text{电(轨)}} = mvr \quad (6.1-3)$$

由于电子带负电荷,电子轨道运动的磁矩如图 6.1-2 所示,即与角动量的方向相反:

$$m_{\text{电(轨)}} = -\frac{e}{2m} J_{\text{电(轨)}} \quad (6.1-4)$$

电子轨道运动的磁矩与角动量的关系式(6.1-4)对于其他非圆形轨道也适用。它虽然是从经典的观点求得的,但在量子力学中也成立。

原子中的电子除轨道运动外,还有绕其自身轴的自旋运动,电子的

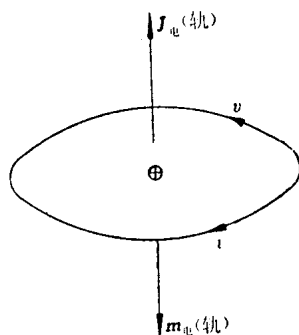


图 6.1-2 电子轨道运动的磁矩与角动量

自旋也有角动量和磁矩，且自旋磁矩与自旋角动量的比值为轨道磁矩与轨道角动量比值的两倍，即

$$m_{\text{电}}(\text{自}) = -\frac{e}{m} J_{\text{电}}(\text{自}) \quad (6.1-5)$$

这一结论，经典理论无法解释。

尽管这里无法说清电子的磁矩和角动量的起因，但原子中每个电子都有一定的磁矩  $m_{\text{电}}$  和一定的角动量  $J_{\text{电}}$ ，磁矩与角动量成正比，两者的方向相反，这些结论是肯定的。

一个分子或原子的磁矩，是它内部所有电子磁矩的迭加，即

$$m_{\text{分}} = \sum m_{\text{电}}$$

显然，分子或原子的磁矩取决于各电子磁矩的大小和方向。按经典的想法，电子磁矩的方向完全是任意的，但按照量子力学的观点，电子磁矩只能取空间某些特定的方向。在本课程中，我们仅表明，原子或分子的磁矩是由组成该原子或分子的电子磁矩迭加而成的。大多数原子或分子内部电子磁矩的排列使原子或分子的磁矩为零，因此这种原子或分子本身并无固有的分子磁矩；也有一些原子或分子其电子磁矩的合磁矩并不为零，因而这种原子或分子就具有固有分子磁矩。

### 3. 顺磁性和抗磁性

顺磁性物质由具有固有磁矩的原子或分子组成。组成顺磁性物质的每个原子或分子虽然都有磁性，但由于分子的热运动，分子固有磁矩在空间取任何方向都有相同的几率。所以，就大量分子组成的介质而言，平均说来各分子磁矩的磁效应相互抵消，故在宏观上，介质并不显示磁性。但是，当介质处在外磁场中时，磁场对分子磁矩有力矩作用，使分子磁矩有转向磁感应强度  $B$  的方向的趋势。但是，由于分子还具有固有的分子角动量，因此一个孤立的分子，即使受到磁场力矩作用，也并不会完全转向  $B$  的方向。不过外磁场使空间出现一个特殊方向，磁矩取磁场方向的几率大于取其他方向的几率（因为这一方向是能量最低的方向）；磁介质内部大量分子彼此间的碰撞，使每个分子磁矩不断改变自己的方向，但平均说来，在热平衡情况下，磁矩取磁场方向排

列的分子占优势,各分子的磁效应不再完全抵消,于是介质呈现出宏观的磁性。

组成抗磁性物质的原子或分子没有固有磁矩,但由于原子或分子内部的每个电子都具有电子磁矩  $m_{\text{电}}$ ,当介质处在外磁场中时,每个电子磁矩都受到力矩

$$L = m_{\text{电}} \times B$$

的作用。这情况与一磁矩为  $m$  的载流线圈一样。但是,两者在力矩作用下的运动很不一样。载流线圈在磁场力矩作用下将发生转向磁场方向的简单运动;电子因具有角动量,力矩的作用,引起角动量改变,力矩作用一段时间  $\Delta t$  后,电子的角动量由  $J_{\text{电}}$  变为  $J'_{\text{电}}$ ,

$$J'_{\text{电}} = J_{\text{电}} + \Delta J_{\text{电}} = J_{\text{电}} + L \Delta t$$

由于力矩的方向始终与角动量的方向互相垂直,使角动量的增量与角动量本身互相垂直,结果,磁场对电子的作用并没有使电子磁矩转到磁场方向,而是使电子绕磁场方向进动,就象陀螺的运动那样(图 6.1-3)。在进动过程中,电子磁矩方向与磁场方向间的夹角保持恒定不变。这种进动称为拉摩进动。由图可以求得,拉摩进动的角速度为

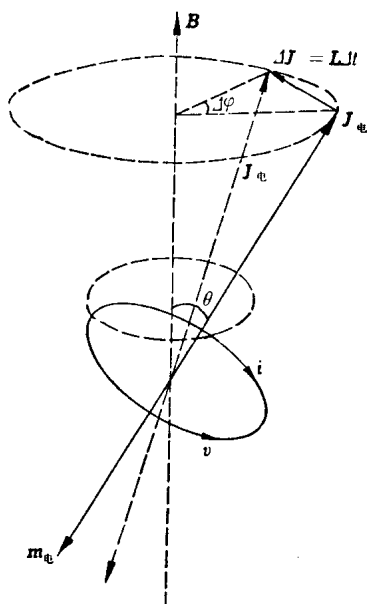


图 6.1-3 电子在磁场作用下发生绕磁场方向的进动

$$\Omega = \frac{\Delta \varphi}{\Delta t} = \frac{\Delta J_{\text{电}}}{J_{\text{电}} \sin \theta \cdot \Delta t} = \frac{m_{\text{电}}}{J_{\text{电}}} B = \frac{e}{2m} B$$

进动角速度的方向与磁场的方向相同,故有

$$\Omega = \frac{e}{2m} B \quad (6.1-6)$$

(6.1-6) 式表明,电子进动的角速度与磁场的磁感应强度成正比,比例系数决定于电子的荷质比。这样,当原子或分子处在磁场中时,原子内部的每个电子都以相同的角速度绕磁场方向进动,这种进动既不会改变各电子磁矩与磁场方向之间的夹角,亦不改变各电子磁矩之间的夹角。原子内部的各电子在保持各磁矩间的相对方向不变的前提下一起绕磁场方向进动,这一结论称为拉摩定理。

电子的进动产生一附加磁矩  $m_{\text{电}}(\Omega)$ , 其方向与  $\Omega$  的方向相反,因而也与磁场的方向相反。因此,在磁场作用下,电子的磁矩由其原来的磁矩  $m_{\text{电}}$  和因进动产生的附加磁矩  $m_{\text{电}}(\Omega)$  两部分组成。于是原子或分子的磁矩为

$$m_{\text{分}} = \sum [m_{\text{电}} + m_{\text{电}}(\Omega)] = \sum m_{\text{电}} + \sum m_{\text{电}}(\Omega)$$

其中  $\sum m_{\text{电}}$  取决于原子或分子的结构,与外磁场无关。对于抗磁性物质,  $\sum m_{\text{电}} = 0$ 。但  $\sum m_{\text{电}}(\Omega)$  异于零,且方向与磁场方向相反。这样,由于磁场的作用,每个分子产生一与外磁场方向相反的分子磁矩,使介质呈现磁性,这就是物质抗磁性的起源。

物质的抗磁性取决于原子内部电子磁矩与磁场的相互作用。对于组成顺磁性介质的分子,在磁场作用下,分子内部的电子也发生进动,亦产生与磁场方向相反的附加磁矩  $m_{\text{电}}(\Omega)$ , 结果分子亦有一定的附加分子磁矩  $\sum m_{\text{电}}(\Omega)$ , 从而出现抗磁性。可见抗磁性是所有分子都具有的共同特性。不过在通常情况下,大量分子的固有磁矩所表现出的磁效应大于各分子附加磁矩的磁效应,即顺磁性超过抗磁性,故物质仍呈现顺磁性。

## 思 考 题

1. 一顺磁性物质制成的样品被吸引到磁场较强的一侧,当它与磁极接触后,其运动情况怎样?
2. 试估算与电子的进动相联系的附加磁矩  $m_{\text{电}}(\Omega)$ , 并证明附加磁矩与磁场的方向相反。
3. 一电子的轨道磁矩与磁场的方向相反,讨论电子在磁场作用下的附加

运动。

4. 为什么称  $\Sigma m_{\text{分}}$  平行于磁场方向的物质为顺磁性物质,  $\Sigma m_{\text{分}}$  反平行于磁场方向的物质为抗磁性物质?

## § 6.2 磁化强度和磁化电流

### 1. 磁化强度

上一节我们从经典的观点出发,对磁介质的磁性作了一些说明。严格讲,这些说明并不正确,因为没有量子力学的帮助,要正确地说明物质的磁性实际上是不可能的。但是,由于我们的注意力主要是在建立磁介质中的磁场方程式,因而上节的讨论仍然是有益的。为此,我们可以不去研究磁性的起源,而认为在磁场中磁介质的每一个分子都具有磁性,可以用分子的磁矩  $m_{\text{分}}$  来表示远离分子处分子的磁效应。分子磁矩可以是分子固有的,亦可以是因受磁场作用而诱发出来的。根据上节的讨论,各分子磁矩都倾向于沿着或逆着磁场方向排列。根据电流的磁效应,每个分子磁矩又等效于一个圆电流,称为分子电流,分子圆电流与分子磁矩的关系为

$$m_{\text{分}} = i_{\text{分}} \cdot a \quad (6.1-1)$$

$a$  为分子圆电流所圈围的面积,方向如图 6.2-1 所示。

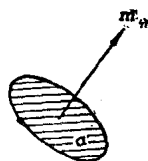


图 6.2-1 分子电流与分子磁矩

磁介质的磁化程度取决于组成介质的每个分子磁矩  $m_{\text{分}}$  的大小以及它们排列整齐的程度。我们用磁化强度  $M$  来描写介质磁化的程度。磁化强度定义为单位体积内各分子磁矩的矢量和,即

$$M = \frac{\Sigma m_{\text{分}}}{\Delta V} \quad (6.2-2)$$

其中  $\Sigma m_{\text{分}}$  为  $\Delta V$  内所有各分子的磁矩的矢量和,  $\Delta V$  为物理无限小的体积元,它在宏观上是非常小的,从而可以反映出介质中可能存在的宏观上的差别;但在微观上它又是足够大的,其中仍包含有大量原子或

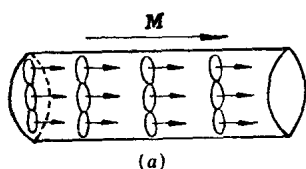
分子。

顺磁性物质的磁化强度与磁场的方向相同，抗磁性物质的磁化强度与磁场的方向相反。真空的磁化强度为零，因为真空中不存在分子磁矩。

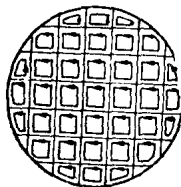
磁化强度是一个宏观量，它反映了磁介质的磁效应，但并不同于个别分子或原子的磁效应。一般讲来，磁化强度很大时，每个分子的磁矩不一定很大，反之亦然。

## 2. 磁化电流

考察一被均匀磁化的圆柱形磁介质，磁化强度沿圆柱轴线。在介



(a)



(b)



(c)

质内，磁化强度处处相等，并假定各分子磁矩都与磁化强度同方向，如图 6.2-2 a 所示。在介质外，磁介质的磁效应为每个分子磁矩的磁效应的总和，而每个分子磁矩又等效于一个闭合电流，该闭合电流可以是圆电流，亦可以是任意形状的闭合电流，如图 6.2-2 b 所示。可以看出，在介质内部与各分子磁矩等效的分子电流相互抵消，而在介质的表面，各分子电流相互迭加。结果在磁化棒的表面上分布有电流，好象一载流螺线管。这种电流束缚在磁介质的表面上，我们称它为磁化电流。实际上并没有电荷沿磁棒表面上流动，所谓磁化电流，只是一种等效电流，是大量分子磁效应的一种表示。

图 6.2-2 均匀磁化的磁介质中的分子磁矩和分子电流的分布

磁化强度与磁化电流都可用于表示介质的磁化程度，两者密切相关。假定磁介质已被磁化，各分子磁矩基本上顺着磁感应强度  $B$  的方向排列。设想在介质中作一平面  $S$ ，其边界为  $C$ ， $S$  面的法线与  $C$  的绕行方向组成右手螺旋，现计算通过  $S$  面的磁化电流的强度  $I_M$ 。显



然, 离开  $S$  面较远的分子, 它们的等效分子圆电流根本未与  $S$  面相交, 因而对通过  $S$  面的电流没有贡献。那些位于  $S$  面附近的且位于  $S$  面的边界线  $C$  内侧的分子, 它们的等效分子圆电流都与  $S$  面相交两次, 一次是进入  $S$  面, 另一次是自  $S$  面流出, 因而这些分子对通过  $S$  面的电流也没有贡献。只有那些位于  $S$  面的边界线  $C$  附近的分子, 它们的等效分子圆电流与  $S$  面只相交一次, 如图 6.2-3 所示。其中有些分子的等效分子圆电流流入  $S$  面, 有的则流出  $S$  面, 通过  $S$  面的电流强度将由这些分子共同决定。

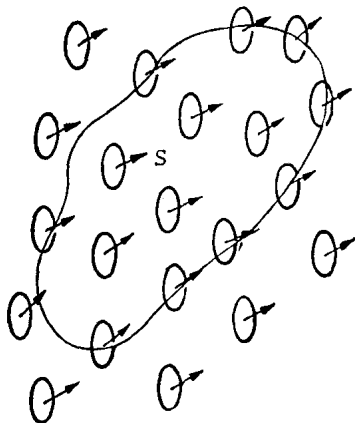


图 6.2-3  $S$  面附近的各分子的等效分子电流对通过面的电流的贡献

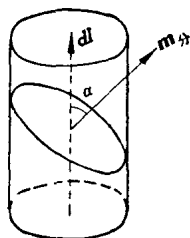


图 6.2-4 计算  $dl$  附近的分子所产生的磁化电流  $dI_M$

在  $S$  面的边界上任取一线段元  $dl$ ,  $dl$  沿  $C$  的绕行方向与分子磁矩  $m_{分}$  成  $\alpha$  角, 如图 6.2-4 所示。若  $a$  为等效分子圆电流所围的面积, 则凡是处在以  $dl$  为高,  $a \cos \alpha$  为底的柱体内的分子圆电流都与  $S$  面相交一次。当  $\alpha < \frac{\pi}{2}$  时, 分子电流从  $S$  面穿出; 而当  $\alpha > \frac{\pi}{2}$  时, 分子电流进入  $S$  面。若单位体积内的分子数为  $N$ , 则这圆柱体内的分子数为

$$N \cdot a \cos \alpha dl$$

设每个分子圆电流的电流强度为  $i_{分}$ , 则这些分子对通过  $S$  面的电流