

(下) 山西教育出版社

主 編 王 杰
王紀龍
副主編 吳浩然
王玉成

大學 物理學

原理·應用·測試

大学物理学

(下)

山西教育出版社

王瑞娟 编

方济梁 周健萍

孟竹芳 周希坚

杨翼智 王钢柱

副主编 吴浩然 王玉成

主编 王杰 王纪龙

原理·应用·测试

〔晋〕新登字 3 号

责任编辑 李少林

封面设计 谢 成

大学物理学
原理·应用·测试
(下册)

王 杰 王纪龙 等

山西教育出版社出版 (太原并州北路11号)

山西省新华书店发行 山西新华印刷厂印刷

开本:787×1092 1/32 印张:16.125 字数:346千字

1993年9月第1版 1993年9月山西第1次印刷

印数: 1—5390册

ISBN 7—5440—0348—5

G·349 定价: 11.80元

目 录

第十一章	稳恒磁场	(1)
第十二章	磁场对电流的作用	(50)
第十三章	磁介质中的磁场	(89)
第十四章	电磁感应	(108)
第十五章	机械振动	(173)
第十六章	机械波	(225)
第十七章	光的干涉	(259)
第十八章	光的衍射	(303)
第十九章	光的偏振	(335)
第二十章	相对论基础	(358)
第二十一章	光的量子性	(384)
第二十二章	原子的量子理论	(408)
附录 I	考题选编与解答	(436)
附录 II	物理常数	(510)

第十一章 稳恒磁场

在静止电荷的周围，存在着电场。当电荷运动时，在运动电荷周围不仅要产生电场，而且还要激发磁场。

不随时间变化的磁场叫稳恒磁场，稳恒电流所激发的磁场就是一种稳恒磁场。稳恒磁场有时也称为“静磁场”。稳恒磁场的内容主要包含两方面的问题，一是研究电流产生磁场的规律，这包括真空中磁场和磁介质中磁场的问题，二是研究载流导体或运动电荷在磁场中受力的问题。

本章在引入描述磁场本身性质的物理量——磁感应强度 B 之后，着重讨论电流产生磁场的基本实验规律毕奥-萨伐尔定律和描述磁场性质的两个基本定理，即磁场的高斯定理和安培环路定律以及它们的应用。

在电磁学中稳恒磁场是与静电场并列的重要内容，在历史上电学和磁学曾是两门无关的独立发展的学科。自从发现了电流的磁效应以后，人们才把这两门独立的学科联系起来，逐渐认识了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，从而使电磁学获得了迅速的发展。电场与磁场常联系在一起并互相转化。有了磁的知识后，人们才有可能研究“把磁变成电”的问题，故本章是研究电磁感应、电磁波的基础知识。

磁场的高斯定理和安培环路定律是描述磁场性质的两个基本定理。磁场高斯定理是麦克斯韦方程之一，安培环路定

律经推广后变成全电流定律，成为麦克斯韦方程组中又一基本方程。所以磁场知识是掌握电磁场理论的主要基础知识。磁场与电场是同等重要的。

本章的研究方法与静电场类似，很多基本内容也与第八章有对应关系。学习这一章的内容时，应有意识地将稳恒磁场和静电场相对比，从中考察电场与静磁场的联系和区别，不仅有助于掌握本章内容，而且对学习以后各章也有帮助。

例如：点电荷在电场中受电场力，电流元在磁场中受安培力；由库仑定律可给出点电荷产生场强的公式，由毕萨定律可给出电流元产生磁感应强度的公式；静电场的基本方程是高斯定理和环流定律，而静磁场的基本方程也是磁场的高斯定理和安培环路定律，它们分别说明了静电场和静磁场的不同特性。

象静电场一样，本章也是根据实验规律说明电流和运动电荷产生磁场的规律，又从实验规律出发，说明反映磁场性质的两个基本定理——安培环路定律和磁场的高斯定理。但是我们应该注意到，稳恒磁场的问题比静电场复杂。这主要表现在以下几个方面。

首先是引入磁感应强度 $\mathbf{B}$ 的方式有好几种。它可以根据运动电荷在磁场中受力的规律（洛伦兹力公式）来定义；也可根据电流元在磁场中受力规律（安培力公式）来定义；或者根据两个电流元相互作用的规律来定义。

其次，在电场中的库仑力沿着两点电荷连线的方向，而相应的两个电流元之间的磁场力方向却不在两电流元连线的方向上，由此而造成的电流元产生的磁场的方向，也不在场源与场点之间的连线上，这说明磁场力与库仑力相比，在空

间方位和数学运算方面都较为复杂，具体表现在毕-萨定律及安培力和洛仑兹力等规律都是以矢量叉乘的形式给出的关系式，这就带来了两方面的困难：一是论证磁场的基本定理时需要用更复杂的数学工具，因此在本课程范围内常用特例加以推广，而不直接给出严格证明；另一方面，在具体求电流的磁场时（或求安培力和洛仑兹力时），由于矢量叉乘的关系，使得图象比较复杂，计算过程也相应增加了困难。要解决这些困难，例如，对于磁场的计算，应先着重学习计算的原则和方法，同时重点掌握几种最简单的也是最基本的模型，当再遇到求解一些复杂形状载流导线的磁场时，就可以利用几种典型载流导线求 $\mathbf{B}$ 的公式进行组合，不必再从电流元产生的 $d\mathbf{B}$ 公式算起。对于较复杂的计算，不必作为基本要求去花过多的精力。

对于反映磁场性质的两个基本定律——安培环路定律和磁场的高斯定理，应与静电场的两个基本定理相对比去认识，先承认磁场的高斯定理说明稳恒磁场是无源场，安环路定律说明磁场是有旋场。二者结合起来全面反映稳恒磁场的性质。而对这些内容的理解，留待以后再逐步加深。

一、基本要求

1. 掌握磁感应强度 $\mathbf{B}$ 的概念。
2. 掌握毕奥-萨伐尔定律，会根据毕-萨定律计算简单形状载流导线的磁场分布。
3. 正确理解磁场的高斯定理和安培环路定律的物理意义。明确这两个定理分别说明了稳恒磁场的哪些性质。

4.掌握用安培环路定律计算磁感应强度的条件和方法，并能熟练应用。

5.记住几种典型形状载流导线所产生的磁感应强度的计算公式。

二、重要概念与规律

(一) 磁感应强度 B

磁感应强度 B 是描写磁场客观性质的物理量。有多种方法来定义 B 。

1.用运动电荷在磁场中受的洛仑兹力来定义 B 。磁感应强度 B 的大小为：

$$B = \frac{F_{\max}}{qv}$$

即，磁场中某点磁感应强度 B 的大小等于当正电荷的运动与磁场方向垂直时，它所受到的最大磁力 $F_{\max}$ 与电荷电量 q 和速度 v 的大小的乘积的比值。

其方向就是小磁针在该点 N 极所指的方向。

2.用载流线圈在磁场中所受的磁力矩来定义 B 。磁感应强度的定义式为：

$$B = \frac{M_{\max}}{P_m}$$

(其中 $P_m = I \Delta S \sin \theta$ ， I 与 ΔS 分别为试验线圈中的电流强度和线圈面积) 即，磁场中某点磁感应强度的量值，等于具有单位磁矩的试验线圈所受到的最大磁力矩。

磁场中某点处磁感应强度的方向，与该点处试验线圈在平衡位置时 (线圈所受的磁力矩为零时) 法线的方向相同。

磁感应强度 $\mathbf{B}$ 的单位是特斯拉 (T)。

需要说明的是载流导线周围 $\mathbf{B}$ 的计算，主要是通过毕—萨定律和安培环路定律进行。

(二) 毕—萨定律

毕—萨定律是一条有关电流产生磁场的基本实验定律，一段电流元 $I d\mathbf{l}$ 在周围空间一点所产生的磁感应强度的表达式为：

$$d\mathbf{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I d\mathbf{l} \times \mathbf{r}^0}{r^2}$$

式中 μ_0 是真空的磁导率， μ_0 是国际单位制中选定的常数， $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ N/A}^2$ ， $\mathbf{r}^0$ 为矢径 $\mathbf{r}$ 方向的单位矢，矢径 $\mathbf{r}$ 的大小是由电流元到场点 P 的距离，方向是由电流元指向场点。

毕—萨定律在稳恒磁场中的地位与库仑定律在静电场中的地位是相当的，它是研究磁场问题的基础。磁场的计算与电场的计算一样也满足迭加原理。 $\mathbf{B} = \sum_{i=1}^n \mathbf{B}_i$ ，应用毕—萨定律和磁场的迭加原理，原则上就可以求出任意形状电流分布的磁感应强度 $\mathbf{B}$ 。载流导线的磁场是各个电流元产生磁场的矢量和

$$\mathbf{B} = \int_L d\mathbf{B} = \int_L \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{I d\mathbf{l} \times \mathbf{r}^0}{r^2}$$

在应用毕—萨定律时要注意以下几点：

1. 毕—萨定律所给出的是一段电流元产生的磁场。在求任意形状载流导线的磁场时，首先要将载流导线分割成许多小电流元 $I d\mathbf{l}$ ，根据毕—萨定律写出这任一小电流元 $I d\mathbf{l}$ 在 P 点产生磁感应强度的计算公式。

2. 毕—萨定律是矢量表示式，要熟练地运用矢量积的右

手螺旋法则确定各个电流元产生磁场的方向，然后再用矢量合成分析出总磁场的方向。具体计算时将 $d\mathbf{B}$ 投影在各个坐标轴上，然后再进行积分。

3. 毕-萨定律的微观本质是运动电荷的磁场，运动电荷在周围空间激发磁场是电流激发磁场的根源。

$$\mathbf{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{q\mathbf{v} \times \mathbf{r}^0}{r^2}$$

当 q 为正时， $\mathbf{B}$ 的方向与 $\mathbf{v} \times \mathbf{r}^0$ 的方向相同，当 q 为负时， $\mathbf{B}$ 的方向与 $\mathbf{v} \times \mathbf{r}^0$ 的方向相反。

4. 要记住由毕-萨定律导出的几种典型形状载流导线磁感应强度的计算公式。

① 一段有限长的直线电流的磁场

空间任一点 P 的磁感应强度的大小为

$$B = \frac{\mu_0 I}{4\pi a} (\sin\beta_2 - \sin\beta_1)$$

式中 β_1 是从 PO 转到电流的起点 C 时， PO 与 PC 之间的夹角； β_2 是从 PO 转到电流的终点 D 时， PO 与 PD 之间的夹角。当角 β 的旋转方向与电流方向相同时， β 取正值；当角 β 的旋转方向与电流的方向相反时， β 取负值，图 11-1 中的 β_1 和 β_2 均为正值。 a 为 P 到直线电流的垂线 PO 之长度。

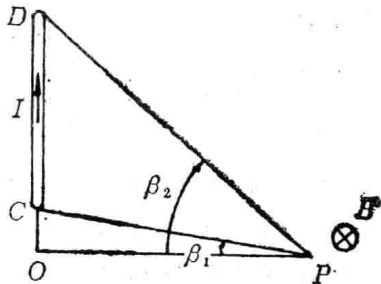


图 11-1

空间任一点 P 的磁感应强度 $\mathbf{B}$ 的方向，如图 11-1 所示，

若电流 I 向上流，用右手螺旋法则可确定 P 点的磁感应强度

$\mathbf{B}$ 的方向垂直纸面向里，用 $\otimes$ 表示。

如果载流导线是一无限长直导线，那么，可认为 $\beta_1 =$

$-\frac{\pi}{2}$ ， $\beta_2 = \frac{\pi}{2}$ 代入上式，可得无限长载流直导线的磁感应强度

②无限长载流直导线的磁感应强度大小为

$$B = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{I}{a}$$

③半无限长载流直导线的磁感应强度大小为（导线端点附近）

$$B = \frac{1}{2} \left(\frac{\mu_0}{2\pi} \frac{I}{a} \right)$$

④载流圆线圈在圆心 O 点处的磁感应强度大小为

$$B = \frac{\mu_0}{2} \frac{I}{R}$$

其方向沿轴线与电流成右手螺旋关系

对于载流的半圆形导线在圆心 O 点的磁感应强度，大小为

$$B = \frac{1}{2} \left(\frac{\mu_0}{2} \frac{I}{R} \right)$$

对于载流的 $\frac{1}{4}$ 圆弧在圆心 O 点的磁感应强度大小为

$$B = \frac{1}{4} \left(\frac{\mu_0}{2} \frac{I}{R} \right)$$

⑤无限长载流螺线管（或螺绕环）内部 $\mathbf{B}$ 的大小为

$$B = \mu_0 n I$$

其中 n 为单位长度线圈的匝数。

记住这些公式以后，解复杂形状载流导线的磁场时，可以直接利用这些公式去进行组合，而不必再用毕-萨定律从电流元算起。

(三) 磁场的高斯定理

磁场的高斯定理可表述为：穿过任意闭合曲面的磁感应通量等于零。其数学表达式为：

$$\oiint_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} = 0$$

高斯定理说明磁感应线都是环绕电流的闭合曲线，磁场是无源场，又称涡旋场。高斯定理是描述磁场性质的基本方程之一，它反映了磁场与静电场不同的性质。

(四) 安培环路定律

1. 安培环路定律可表达为：磁感应强度 $\mathbf{B}$ 沿闭合路径 L 的线积分 ($\mathbf{B}$ 的环流)，等于穿过这闭合路径电流代数和的 μ_0 倍，其数学表达式为

$$\oint_L \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = \mu_0 \sum I$$

规定凡电流方向与闭合路径的绕行方向符合右手螺旋关系的电流 I 取正号。反之，电流 I 取负号。

安培环路定律是描述磁场性质的另一基本方程。静磁场的环流不等于零反映了静磁场与静电场性质的不同，静电场 $\oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = 0$ ，而静磁场 $\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} \neq 0$ ，说明静磁场是非保守场 (非势场)，也叫涡旋场。因此线积分 $\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l}$ 与路径有关。

学习安培环路定律时，要注意以下几个问题：

① 磁感应强度 $\mathbf{B}$ 的环流，只与穿过环路的电流大小和方

向有关。与环路外的电流无关，也与环路内的电流如何分布无关。

②环路上各点的磁感应强度 $\mathbf{B}$ ，是闭合曲线内外的所有电流贡献的结果。不能错误地理解为 $\mathbf{B}$ 只由环路内的电流产生。

③注意 ΣI 是环路内所包围电流的代数和。 $\Sigma I = 0$ ，只能说明环路内所包围电流的代数和为零，不能说明环路内一定没有电流穿过， ΣI 为零，只能说明 $\mathbf{B}$ 的环流为零，而不能说明环路上处处 $\mathbf{B}$ 为零。从数学上可知 $\oint_L \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = 0$ ，积分结果为零被积函数不一定处处为零。

④要掌握安培环路定律的适用条件。安培环路定律只适用于稳恒电流的情况，而稳恒电流一定是闭合的（无限长载流直导线可认为在无穷远处闭合），对于有限长的载流导线（闭合电流的一部分），安培环路定律不适用，即是说这里指的电流是闭合电流，而不是闭合电流上的某一段。

2. 安培环路定律的应用

安培环路定律对稳恒磁场取任意形状的闭合回路都是普遍成立的，但在应用安培环路定律求磁场分布时，则要求电流及产生的磁场分布具有一定的对称性。这是应用安培环路定律求 $\mathbf{B}$ 的关键。

要求会应用安培环路定律求无限长载流直导线、无限长载流圆柱体、无限长载流圆柱面、无限长载流螺线管、载流密绕螺绕环的磁场。

应用安培环路定律求磁场的步骤：

①首先分析电流分布的对称性，从而确定磁场分布是否具有对称性（轴对称性或面对称性），判断能否用安培环路

定律求解。

②若磁场具有某种对称性，可以利用安培环路定律求磁场时，为了能够简便地通过 $\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = \mu_0 \Sigma I$ 求得 $\mathbf{B}$ ，还应选择合适的闭合曲线作为积分环路，环路应满足：

(a) 所求场点必须在环路上。

(b) 整个曲线上 $\mathbf{B}$ 的方向与曲线相切，或者该曲线的一部分满足上述条件，而其他部分的 $\mathbf{B}$ 与曲线垂直，使这部分积分为零。

(c) 环路的几何形状必须简单并有规则。

③应用安培环路定律，列出方程求解。

(五) 真空中稳恒磁场与静电场的对比

1. 稳恒磁场与静电场的对比

静止电荷在其周围产生静电场，稳恒电流在其周围产生稳恒磁场，虽然这两种场都不随时间变化，但两种场的性质是不同的，现对比如下：（见表1）

2. 计算场强方法的对比

①在元场源产生场的实验规律上，毕-萨定律与库仑定律的地位是相当的，由库仑定律导出的电荷元 dq 产生电场的规律为 $d\mathbf{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{dq}{r^2} \mathbf{r}^0$ ，由毕-萨定律给出的电流元

$$I d\mathbf{l} \text{ 产生磁场的规律为 } d\mathbf{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I d\mathbf{l} \times \mathbf{r}^0}{r^2}.$$

它们的相似之处是：

(a) 都是元场源产生场的实验规律，一是电荷元 dq ，一是电流元 $I d\mathbf{l}$ 。

(b) 都满足平方反比定律。

表11-1

	静 电 场	稳 恒 磁 场
场的描述	电场强度 $\mathbf{E}$, 真空介电常数 ϵ_0	磁感应强度 $\mathbf{B}$ 真空磁导率 μ_0
元场源的场	点电荷的电场 $d\mathbf{E} = \frac{dq\mathbf{r}^0}{4\pi\epsilon_0 r^2}$	电流元的磁场 $d\mathbf{B} = \frac{\mu_0 I d\mathbf{l} \times \mathbf{r}^0}{4\pi r^2}$
场的叠加原理	$\mathbf{E} = \int d\mathbf{E}$	$\mathbf{B} = \int d\mathbf{B}$
高斯定理 (场强的通量)	$\oint_S \mathbf{E} \cdot d\mathbf{S} = \frac{\sum q}{\epsilon_0}$ 有单独的电荷存在, 电力线有头有尾, 是不闭合的. 说明静电场是有源场.	$\oint_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} = 0$ 单独磁荷是不存在的. 磁力线是无头无尾的闭合线, 说明稳恒磁场是无源场.
环路定律 (场强的环流)	$\oint_L \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = 0$ 说明静电场是保守场, 无旋场, 可引入电势的概念.	$\oint_L \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = \mu_0 \sum I$ 说明稳恒磁场是非保守场, 涡旋场, 不能引入势能的概念.

(c) 都是计算场的理论基础，在这两个定律的基础上，再加上场的迭加原理，原则上都可求出任意形状带电体和电流周围场的分布。

它们的不同处是：

(a) 库仑定律是直接由实验总结出来的；而孤立的一小段电流元 $I dl$ 并不存在，所以毕—萨定律是从一些典型的闭合载流导体的实验中归纳总结而间接得到的。

(b) $d\mathbf{E}$ 的方向是在矢径 $\mathbf{r}$ 的方向上，而 $d\mathbf{B}$ 的方向既不在 $I dl$ 的方向上，也不在 $\mathbf{r}$ 的方向上，而是由 $I dl \times \mathbf{r}$ 来确定方向。

(c) $d\mathbf{E}$ 的大小与 dq 成正比，而 $d\mathbf{B}$ 的大小不仅与 $I dl$ 的大小成正比，还与 $I dl$ 和 $\mathbf{r}$ 夹角 θ 的正弦成正比。

② 在计算具有一定对称性场的分布方面，静电场的高斯定理和磁场的安培环路定律是对应的。

它们的相似之处是：

(a) 它们都表示场与场源之间的普遍关系，例如

$$\oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{S} = \frac{\sum q}{\epsilon_0} \text{ 表示了场强 } \mathbf{E} \text{ 与电荷 } q \text{ 之间的普遍关系。}$$

$$\oint_L \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = \mu_0 \sum I \text{ 表示了磁感应强度 } \mathbf{B} \text{ 与电流 } I \text{ 之间的普遍关系。}$$

(b) 在场的分布具有一定对称性的条件下，它们都给出了求场分布的一种简便方法。其解题步骤与方法也很相似。

三、典型例题详析

(一) 思考题

1. 有两根长导线接在电源上, 并使它们对称地接到一个铁环上, 如图 11—2 所示, 此时在环心的磁感应强度等于什么?

答: 对环心来说, 电流分布是对称的, 故上下半环在环心产生的磁感应强度数值相等, 但二者的方向却相反, 上半环在环心的磁场方向是垂直纸面向里, 而下半环的则是垂直纸面向外, 所以整个铁环在环心产生的磁感应强度等于零。

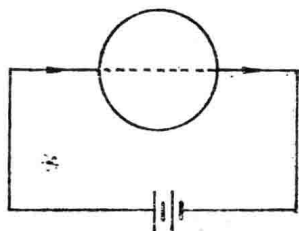


图 11—2

2. 设想把一电荷放在飞行着的飞机上, 是否会产生磁场? 若飞机作匀速直线运动, 那么在给定点 P 所产生的磁场是不是恒定的磁场?

答: 如果观察者也在飞机上, 电荷相对他是静止的, 这时只观察到静电场, 没有磁场。如果观察者对电荷有相对运动, 这时便会观察到既有电场又有磁场存在。若飞机相对观察者作匀速直线运动时, 如图

11—3, 由公式 $\mathbf{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{q\mathbf{v} \times \mathbf{r}}{r^3}$

知在给定点 P , $\mathbf{B}$ 的方向是不变的,

但 $\mathbf{B}$ 的大小 $B = \frac{\mu_0 q v \sin\theta}{4\pi r^2}$

因 θ 和 r 在变化, 所以 B 也在变化, 所以 P 点的磁场不是恒定的。

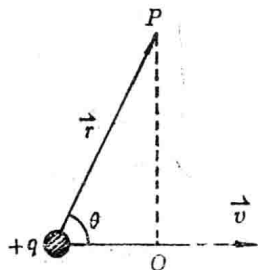


图 11—3