

★ 国家精品课程配套物理系列丛书

JIEXI SHENSUI SIXIANG LINGHUI WULI JINGSHEN DAXUE WULI JIAOCHENG

解析深邃思想 领会物理精神

—— 大学物理教程(下)

孙伟民 张军海 等编著
苏景辉 赵言诚 主审



NLIC 2970751896



国防工业出版社

National Defense Industry Press

国家精品课程配套物理系列丛书

解析深邃思想 领会物理精神

——大学物理教程（下）

孙伟民 张军海 程 丽

姜海丽 * 茅丽娟 * 刘永军

蘇景輝 藏言誠

编 著

主 审



NLIC 2970751896

國防工業出版社

• 北京 •

内 容 简 介

大学物理课程是以物理学基础为内容,所包含的基本概念、基本理论和基本方法是构成学生科学素养的重要组成部分。本书是根据教育部 2008 年《理工科类大学物理课程教学基本要求》,吸收了多部国内外著名物理教程精髓,充实了大量物理学史和最新科技进展后编写而成的。本书分为上下两册,共 7 篇。上册包括第 1 篇力学,第 2 篇振动与波动,第 3 篇热学和第 4 篇电学;下册包括第 5 篇磁学,第 6 篇光学和第 7 篇量子物理。

本书图文并茂,结合实际,适合作为工科学生的大学物理课程的教材和参考书。

图书在版编目(CIP)数据

解析深邃思想 领会物理精神:大学物理教程.下/孙伟民
等编著. —北京:国防工业出版社,2010.8 重印
(国家精品课程配套物理系列丛书)

ISBN 978-7-118-06460-5

I. 解… II. 孙… III. 物理学—高等学校—教材
IV. 04

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 116986 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

腾飞印务有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 14 字数 386 千字

2010 年 8 月第 2 次印刷 印数 5001—10000 册 总定价 57.60 元

上册 28.80 元
下册 28.80 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010) 68428422

发行邮购:(010) 68414474

发行传真:(010) 68411535

发行业务:(010) 68472764

前言

正如奥尔特加·加塞特在他的《大学的使命》(Mission of The University)中所指出的那样:“人类从事和热衷于教育是基于一个简单明了、毫无浪漫色彩的原因:人类为了能够满怀信心、自由自在和卓有成效地生活必须知道很多事情,但儿童和青年的学习能力都非常有限,这就是原因所在。假如童年期和青年期的时间分别都持续 100 年,或者儿童和青少年都具有无限的智慧和注意力,那么就不会有教学活动的存在。然而,童年和青年的时光非常短暂,儿童和青年的学习能力都非常有限,因此,需要教育的存在。”

“在原始时期,几乎没有什么教育存在。那时候知识内容严重不足,任何人都不必特别费力就能学会和掌握,几乎没有教育的必要。当需要获得的知识与学习能力不成比例时,教育就出现了。”中国教育在先秦时期由于十分丰富的诸子百家思想,形成了我国古代文化教育的繁荣期。“而欧洲,教育在接近 18 世纪中期时蓬勃兴起,持续发展到现在并影响了全球,理由很简单:正是那个时期近代文化首次走向繁荣,短时间内人类的知识宝库得以扩展。人类此时迫切需要学习远远超越其学习能力的大量知识,教育学也因此得以迅速发展。”

“缺乏学习能力是教育的基本原理。由于学习者不会学习,就必须要为教学作好恰如其分的准备。”物理学是一门实验科学,是理论和实验高度结合的精确科学。它研究物质、能量和它们之间的相互作用。物理学探索着自然,驱动着技术发展,是自然科学、人类文明、技术进步的基础。因而对于物理学的学习是培养理工科大学生基本实验技能和科学素质、形成主动探索精神的重要手段。

理论教学和实验教学是教育实践的两个重要方面。依据我国现阶段经济社会发展对人才培养的需要,为了实现培养具备综合的科学素质和创新精神的高级人才的目标,我们在物理理论和实验教学过程中,通过以下三个分阶段目标来达成“培养适应 21 世纪国民经济和社会发展的高素质人才”的目标,并以此搭建了三个功能目标清晰的教学平台。根据教学阶段功能,这三个教学平台被称为好奇心的唤醒平台、科学素质的养成平台和创新精神的激发教学平台。好奇心的唤醒教学平台的功能是,激发学生对物理学的好奇心和兴趣,催生获取知识的原动力,深化理解物理思想,为后续物理理论课打下良好的基础。科学素质的养成教学平台的功能是:在大学物理理论课程方面,通过给出清晰的图像的方法,建立物理概念,解析物理学的深邃思想,让学生深入领会物理精神;在实验方面,通过培养学生掌握物理实验基本知识、基本方法和基本技能,提高分析和解决问题的能力;作为科学素质的养成环节,采取开放式的教学模式,为学生提供一个自由、自主、自觉学习的环境。创新精神的激发教学平台的功能是:开阔眼界和思路,提高学

生对实验方法和技术的综合运用能力；通过实践过程，培养学生的创新意识、创新精神和创新能力；同时也培养了学生们的竞争意识、合作与协作能力以及团队精神，为学生创新能力的培养提供强有力的支撑。

要实现上述的教学目标，就要在教学实践中，针对我国目前高中教育的现状，面对高考应试教育的事实，来设计一系列切实有效的教学方案，以达成这一教育目标，我们具体搭建这些教学平台的尝试如下：

(1) 好奇心的唤醒——实验体验教学平台：对于绝大多数高校而言，物理实验是本科生入学后最先开始的实践课程，对于刚刚入学的大学生，他们经历了10多年的应试教育，尤其是中考和高考应试的激烈竞争，对于认识自然、探索未知的好奇心已经基本消磨殆尽。如何重新唤醒学生沉睡日久的好奇心，重新点燃他们探索未知的欲望，开启他们尘封多年的那些人类与生俱来的征服自然的本能，成为我们物理实验教学的首要任务和重要的教学目标。为此，我们结合物理学原理演示实验的内容，编写了物理原理展示的学习教材《触摸科学 体验发现》，再辅之以“诺贝尔物理学奖系列讲座”、系列“新生研讨课”、“科技发现影像展播”等多种课程形式，建设了好奇心唤醒实践平台，旨在唤醒学生沉睡日久的好奇心，重新点燃他们探索未知的欲望。

(2) 科学素质的养成——大学物理的理论与实验教学平台：我们知道，科学研究与探索仅靠热情与好奇心是不能完成的，因此，需要一系列具体的理论和实验培训环节来培养学生物理基础理论知识和基本的实验技能，教育并养成学生科学研究的能力和态度。针对这一教学目标，我们分别编写了大学物理教程（上、下）——《解析深邃思想 领会物理精神》和物理实验教程（上、下）——《操纵物理仪器 获取实验方法》。在理论上，不仅对于物理基本概念、定理和定律进行清晰的阐述，而且特别注重从物理本质上做出深刻的叙述与分析。在实验方面，建立了一系列逻辑上严密、操作过程严谨、结果要求准确严格的技能培训物理实验项目，透过“基础性”、“综合性”和“设计性”这三个层次系列实验项目，达到初步养成其科学素质的目的。

(3) 创新精神的激发——实践探索教学平台：当学生对于各种科技活动充满好奇的时候，当他们具备了一定的科学实验能力的时候，创造的冲动将会在其心中涌动。而创新是一个民族进步的灵魂，是国家兴旺发达的不竭动力。当今社会发展趋势要求高等学校能够培养出真正为社会所用的创新人才，为达此目的，我们创建了旨在激发学生创造与探索精神的创新实践教学平台，开设了具有创新特色的实验项目，为开展科学探究活动和参加丰富多彩的科技竞赛提供实践环境与条件。

在上述教学理念的指导下，我们试图通过对教学内容和训练方法等方面进行改革，探索一种旨在唤醒学生的好奇心、全面提高学生的科学素质和创新精神的物理理论与实验教学的新的教材与教法组织实施体系，并进一步尝试了这种人才培养的途径与模式。

该系列物理教材就是我们进行上述教学实践过程中所凝练的一项成果。《解析深邃思想 领会物理精神》是该系列教材中的一种。本教材是根据教育部2008年《理工科类大学物理课程教学基本要求》，吸收了多部国内外著名物理教程精髓，充实了大量物理学史和最新科技进展后编写而成的。

物理学是研究物质的基本结构、基本运动形式、相互作用及其转化规律的自然科学，是其他自然科学和工程技术的基础。大学物理课程是以物理学基础为内容，所包含的基本概念、基本理论和基本方法是构成学生科学素养的重要组成部分。大学物理课程的教

学,不能局限于讲解物理的定理或解题的方法,更重要的是帮助学生将物理原理与它所描绘的真实的世界以及与真实的世界所面对的实际问题联系起来。物理学不仅是课堂上的知识传递、黑板与作业本上的物理习题、以及试卷上问题的分析与求解,而更应该与生活实际联系起来,与生产实践联系起来,并应用于解决所面对的实际科学与技术问题。从而使学生真正体会物理理论的基础性作用,体会这门课程对后期专业知识的支撑作用。

本书共分7篇,分别介绍了力学、振动与波动、热学、电学、磁学、光学、量子物理。相应的内容选择主要按照2008版《理工科类大学物理课程教学基本要求》中的A类要求,适当补充了部分B类要求。

参加本教材编写工作的有:刘艳磊(第1篇中的第1章、第2章),刘永军(第1篇中的第3章和第7篇中的第1章),张建中(第2篇),王雷(第3篇和第4篇部分图的绘制),姜海丽(第4篇中的第1章,第5篇中的第1章),苏丽萍(第4篇中的第2章,第5篇中的第2章),程丽(第5篇中的第3章、第4章),孙伟民(第6篇),张军海(第7篇中的第2章、第3章)。苏景辉、赵言诚、孙秋华对本书进行了初审,苑立波、孙伟民负责全书结构的组织和最终的定稿。

本教材特点:

(1)本系列教材的命名是从教学目的出发,每本教材都将其教学目标进行凝练,作为教材书名。为了避免混淆,增加了副标题。这样做的目的是时时提醒教师和学生,不仅“教”要明确教的目标,而且“学”的目标更要明确。本书致力于将著名物理学家的深邃思想介绍给学生,使学生真正体会物理学的精神实质。

(2)为了使教材具有更好的可读性,本书采用了与国际接轨的彩版印刷,在编排方面注重版面设计、图文并茂,给人以赏心悦目的感觉。在内容的叙述上,力求做到生动形象、通俗易懂,强调物理图像和物理思想,使学生在欣赏的过程中体验并学习物理学知识。

(3)本书每篇以物理学史开篇,辅以丰富的实际生活、生产实例,补充了大量的最新科研成果,准备了很多具有实际背景的例题和习题。这种撰写方法的目的在于消除学生对物理的恐惧和排斥心理,明了物理学不是公式堆积的学说,而是反映客观世界的基础科学。引导学生在物理学习过程中要联系实际,体会物理学在解决实际问题、支撑专业知识方面的作用,找到每一个物理原理的生活原型或应用实例,真正理解物理学思想的精髓。

(4)本书从体例上采用了分篇撰写,各篇之间既相互联系又各成体系。教师和学生可以根据需要,灵活地选择讲授、学习的内容及次序。

本系列丛书在编写过程中,参考了国内外大量的文献资料,并在每个专题后面逐一标注。此外,也从网络上搜集了大量的有关资料和图片,并分别加注。对于部分网络上转引的资料,由于难于确定原作者,在此向原作者表示感谢,并请原作者与我们联络。正是由于如此广泛丰富的参考资料,才能为学生呈献出这样一本内容充实、生动的教材。仅此,我们向所有对本书做出贡献的同仁,致以深切的谢意。

限于编者的学术水平,书中难免存在错误和不妥之处,望老师和同学们在使用过程中多提宝贵意见,我们将会在今后的再版中加以纠正,使教材不断完善。

苑立波

2009年4月于哈尔滨

目 录

第 5 篇 磁 学

第 1 章 稳恒磁场	2
第 1 节 概述	2
第 2 节 毕奥—萨伐尔定律及其应用	6
第 3 节 磁场的高斯定理	11
第 4 节 磁场的安培环路定理	13
第 5 节 运动电荷的磁场	17
第 6 节 磁场对载流导线的作用力	19
第 7 节 国际单位制中电流单位“安培”的定义	23
第 8 节 磁场对载流线圈的作用	24
第 9 节 磁力的功	28
第 10 节 洛伦兹力	29
第 11 节 带电粒子在均匀磁场中的运动	31
第 12 节 荷质比的测定	33
第 13 节 霍耳效应	36
第 14 节 等离子体的磁约束	37
习题	39
第 2 章 物质的磁性	42
第 1 节 磁介质对磁场的影响	42
第 2 节 顺磁质和抗磁质的磁化	43
第 3 节 磁化强度	47
第 4 节 磁介质中的安培环路定理	49

第 5 节 铁磁质	52
习题	55
第 3 章 电磁感应	57
第 1 节 稳恒电流与电动势	58
第 2 节 电磁感应定律	60
第 3 节 动生电动势与感生电动势	63
第 4 节 自感与互感	69
第 5 节 磁场的能量	72
习题	74
第 4 章 电磁场和电磁波	77
第 1 节 位移电流	77
第 2 节 麦克斯韦电磁场方程组	79
第 3 节 电磁波	81
习题	88

第 6 篇 光 学

第 1 章 光	90
习题	92
第 2 章 几何光学	93
第 1 节 费马原理	93
第 2 节 费马原理的应用与分析	94
第 3 节 光学折射面成像条件	96
第 4 节 几何光学成像的基本概念与符号规则	97
第 5 节 实际光线的光路计算	98
第 6 节 近轴区域光线的光路计算	99
第 7 节 薄透镜的成像	100
第 8 节 眼睛	102
第 9 节 助视光学仪器	104
第 10 节 像差及其种类	105
习题	108

第3章 光的干涉	110
第1节 光程	110
第2节 光的干涉现象	111
第3节 两单色光波的干涉	112
第4节 获得相干光的方法	115
第5节 分波阵面的双光束干涉	116
第6节 分振幅的双光束干涉	119
第7节 平行平板的多光束干涉	126
第8节 干涉仪	129
习题	133
第4章 光的衍射	135
第1节 光的衍射现象	135
第2节 衍射的基本理论	136
第3节 单缝夫琅和费衍射	138
第4节 圆孔衍射与光学仪器分辨本领	141
第5节 光栅衍射	144
习题	148
第5章 光的偏振	150
第1节 光的偏振现象及马吕斯定律	150
第2节 反射和折射时的偏振效应	152
第3节 光的双折射	154
习题	160

第7篇 量子物理

第1章 量子物理学基础	162
第1节 黑体辐射与普朗克量子假设	162
第2节 光电效应与光的波粒二象性	165
第3节 康普顿散射效应	168
第4节 德布罗意物质波与戴维森—革末实验	170
第5节 不确定关系	173
第6节 波函数及其统计解释	174

习题.....	175
第2章 薛定谔方程	176
第1节 概述.....	176
第2节 一维无限深势阱.....	181
第3节 量子隧道效应.....	186
习题.....	191
第3章 原子中的电子	192
第1节 氢原子.....	192
第2节 电子自旋和角动量的耦合.....	199
第3节 元素周期表.....	205
习题.....	212
参考文献	214

第5篇 磁 学

人们发现磁象要比发现电现象早得多。早在公元前数百年，古籍中就有了磁石(Fe_3O_4)能吸引铁的记载。我国东汉时期的王允指出古代的“司南勺”是个指南器。12世纪初，我国已将指南针用于航海船上。指南针传入欧洲则已是12世纪末了。

在电磁学的发展史上，1820年是取得光辉成就的一年。丹麦物理学家奥斯特发现了在通电直导线附近小磁针有偏转，不久他又发现磁铁也可使通电导线发生偏转。他的发现在欧洲物理学界引起了极大的关注。随后，安培进而发现了圆电流和磁针有相似的作用，后来又报告了两平行通电直导线间和两圆电流间也存在相互作用。与此同时，毕奥和萨伐尔得出了电流元所激发磁场的毕奥—萨伐尔定律。后来，法拉第认为既然“电能生磁”，那么“磁也能生电”。从1821年开始，法拉第就从事“磁变电”的研究，直到1831年才发现了电磁感应现象，从而为现代电磁理论和现代电工学的发展和应用奠定了基础。

本章研究真空中的恒定磁场以及磁场对电流(运动电荷)的作用，在介绍描述磁场的重要物理量磁感应强度之后，着重讨论毕奥—萨伐尔定律、磁场的高斯定理、安培环路定理、洛伦兹力公式、安培定律以及它们的应用。

第1章 稳恒磁场

第1节 概 述

1.1 基本磁现象及其本质

发现磁现象已有悠久的历史。早在公元前7世纪,人们就知道磁石(Fe_3O_4)能吸引铁。但是,电现象和磁现象一直被当作两种本质不同的事物分别加以研究。直到19世纪,在发现了电流产生磁场及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。以后随着电磁场理论和物质电结构学说的发展,人们对磁现象的起源有了进一步的认识,认识到磁场也是物质存在的一种形式。磁力是运动电荷之间除电力以外的又一种相互作用力。

在研究磁场的基本性质和规律之前,先介绍一些基本磁现象。把磁铁放入磁粉中再取出来,可以看到它的两端吸引的铁粉最多,中间区域吸引的铁粉很少,甚至没有,这说明磁铁两端的磁性最强(图5-1-1)。把磁性最强的两端叫做磁铁的磁极。如把一条形磁铁悬挂在空中,它的两极会分别指向地球的南、北方向,其中指南的磁极叫南极(用S表示),指北的磁极叫北极(用N表示)。把一磁铁支撑起来使它能够自由转动,并用另一磁铁去接近它,则会发现同性磁极互相排斥,异性磁极互相吸引。悬挂着的磁棒或支撑着的磁针静止时沿地球南北方向取向,这个现象表明地球是一个大磁体,它的N极位于地球南极附近,S极位于地球北极附近。

若将一个具有N极和S极的磁棒分为两段,便会观察到被分出的每段磁棒均有一对N极和S极;继续上述实验会发现,无论将磁棒分成多少段,每一小段仍有N极和S极。这表明永远不存在独立的N极或S极。正如恩格斯所说的:“吸引和排斥,在磁那里开始了两极性,它在那里是在同一物体中显现出来的。”

在研究磁的过程中,一些自然现象激发了科学家们的思路。据记载,17世纪的末期,在欧洲一个小城镇的修鞋铺里。曾经发生了一件奇怪的事情:有一天夜里雷雨交加,突然一个落地雷闪进了这个鞋铺。第二天早上,修鞋师傅发现,掌鞋用的铁砧子粘满了铁钉,像一个“铁刺猬”。师傅费了很大劲,才把钉子拔下来。原来铁砧已经变成了磁铁。我们知道,打雷闪电是一种电现象,所以人们很自然就把铁砧变磁铁的原因跟“电”联系起来了。为了证实这种认识是不是对,从19世纪初开始,许多科学家都在进行这方面的探索研究。

1819年冬,丹麦物理学家奥斯特(1777—1851)在一所大学里做电学实验的时候,发现

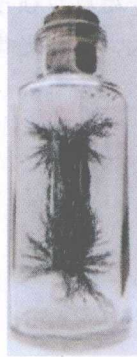


图5-1-1 条形磁铁吸引铁屑

了一个奇妙的现象：放在通电导线旁边的磁针发生了偏转，断电以后它又回到原来的位置。奥斯特有点不相信自己的眼睛，于是又多次重复这个实验，结果是千真万确的。那么，到底是什么力量控制磁针发生偏转呢？那时候人们已经知道，只有磁铁才能使磁针发生偏转。可是这里并没有磁铁，只有一根通电的导线，于是奥斯特想到了电流。他又进一步分析研究这种现象，终于在1820年7月发表了研究成果：导体中的电流在导体周围产生了一个环形磁场。这种现象叫做电流的磁效应。

电流的磁效应，第一次揭示出磁与电存在着联系，从而把电学和磁学联系起来，使电磁学进入一个新的迅速发展的阶段。奥斯特的发现使整个科学界大为震动。人们长期以来所信奉的电和磁没有内在联系的信条崩溃了。这个发现开启了一扇通向新的研究领域的大门，导致了进一步探索的激流。正如法拉第所说：“猛然打开了科学中一个黑暗领域的大门。”

下面通过几个实验来阐述磁现象的本质。

- (1) 通有电流的导线周围的磁针受到力的作用而偏转（图 5-1-2）。
- (2) 放在 U 形磁铁两极间的载流导线，会受到力的作用而运动（图 5-1-3）。

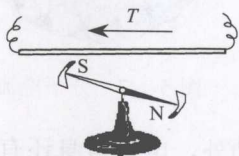


图 5-1-2 通电导线的磁场

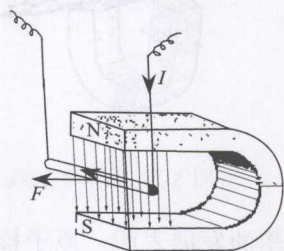


图 5-1-3 载流导线受到的磁力

(3) 载流导线之间也有相互作用力。当两平行载流直导线的电流方向相同时，它们相互吸引；电流方向相反时，则相互排斥（图 5-1-4）。

(4) 载流线圈对磁针有作用。如图 5-1-5 所示，在一长直螺线管的端部外面放一小磁针，当螺线管通以电流时，小磁针将发生偏转，好像在螺线管的两端部分别出现了 N 极和 S 极一样。就具有磁性来说，螺线管相当于条形磁铁。

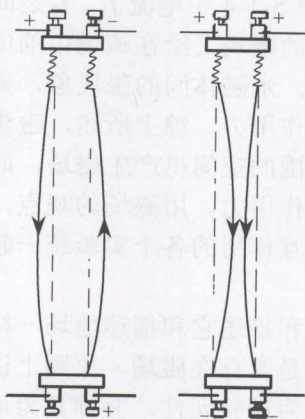


图 5-1-4 载流平行电流间的作用力

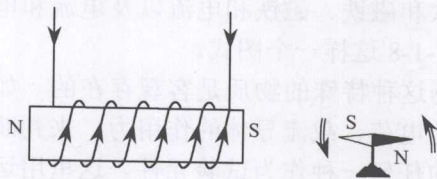


图 5-1-5 通电螺线管的磁效应

(5) 运动电荷通过磁极之间时受到力的作用。如图 5-1-6 所示, 当阴极和阳极分别接到高压电源的正极和负极上, 电子流通过狭缝形成一束电子射线。如果在电子射线管外面放一块磁铁, 可以看到电子射线的路径要发生弯曲。

上述一些事例表明, 电现象和磁现象有着一定的相互联系, 同时启发人们去探寻磁现象的本质: 磁现象是否起源于电流 (电荷的运动)。1821 年, 安培提出了分子电流假说。他认为任何物质的分子中都存在圆形电流, 称为分子电流, 分子电流相当于一个基元磁体 (图 5-1-7)。当物质不呈现磁性时, 这些分子电流无规则地排列着, 由于它们对外界所产生的磁效应互相抵消, 故使整个物体不显磁性。在外磁场作用下, 等效于基元磁体的分子电流将倾向于沿外磁场方向取向而显示磁性。安培的假说还说明了磁体的 N 极、S 极两种磁极不能单独存在的原因, 因为基元磁体的两极对应于圆电流的两个面, 显然这两个面是不能单独存在的。

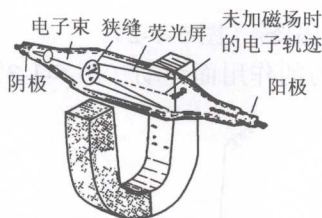


图 5-1-6 电子射线管

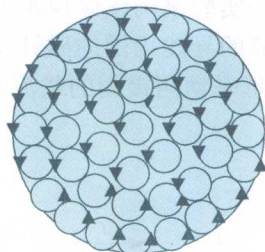


图 5-1-7 分子电流

现代物理学的发展表明, 原子核外电子除绕核运动外, 电子自身还有自旋。分子、原子等微观粒子内这些电子的运动, 构成了等效的分子电流。这些分子电流在其周围激发磁场, 它是物体磁性的来源。

1.2 磁场及磁感应强度

按照近代的观点, 电荷 (不论其运动与否) 在其周围激发电场, 而运动电荷 (电流) 在其周围激发磁场。与电场是一种特殊物质一样, 磁场也是一种特殊的物质。在磁场中的运动电荷 (电流) 受到该磁场给予的作用力 (磁场力)。图 5-1-4 中电流 I_1 、 I_2 之间的相互作用, 是 I_1 的磁场给在该场中的电流 I_2 以作用, 反过来, I_2 的磁场又给在该场中的电流 I_1 以作用。电流之间吸引或排斥的相互作用是通过磁场来传递的。永磁体间的磁现象, 来源于永磁体中分子电流所激发的磁场和磁场给永磁体内分子电流的作用力。综上所述, 磁极或电流之间的相互作用是通过磁场来传递的。磁极使电流在自己周围的空里产生磁场, 而磁场的基本性质之一是它对于任何置于其中的其他磁极或电流施加作用力。用磁场的观点, 就可以把上述关于磁铁和磁铁、磁铁和电流以及电流和电流之间相互作用的各个实验统一起来了。可以概括成图 5-1-8 这样一个图式。

磁场这种特殊的物质是客观存在的。如何来测量和描述它和描述电场一样, 可以通过磁场对运动电荷、载流导体的作用力, 来判断空间一点是否存在磁场。原则上讲, 可以用上述二者中的任何一种作为试验元件。这里用运动电荷作为试验元件, 并称其为运动试验电荷, 有时简称为运动电荷。如果该运动电荷通过观测点 (或称场点) 除了受到电场力之外, 还受到另一个力的作用, 便可得出结论, 该点存在磁场。当然, 运动试验电荷自身的磁场应该足

够弱，以至于可认为不改变原来磁场的分布。



图 5-1-8 磁铁和磁铁、磁铁和电流以及电流和电流之间相互作用

磁场内任一点的性质用磁感应强度矢量 $\mathbf{B}$ 来描写，它的数值反映该点磁场的强弱， $\mathbf{B}$ 的方向为该点磁场的方向。实验结果指出：①运动电荷通过场点 P ，在一般情况下都要受到磁场力的作用。但当其沿某一特定取向（图 5-1-9 (a)） MM' 通过 P 点时，运动电荷便不受力，即 $F=0$ 。为了便于描述，可称过 P 点的 MM' 线为零力线。它表明了场点 P 的一种属性。我们定义， P 点的磁感应强度矢量 $\mathbf{B}$ 的方向沿零力线取向。至于 $\mathbf{B}$ 的指向是由 P 指向 M 还是由 P 指向 M' ，将在下面规定。在作了这样规定之后，实验表明，沿着或逆着磁场 ($\mathbf{B}$) 的方向运动时运动电荷不受力。②无论运动电荷以多大速度和什么方向通过 P 点 (零力线方向除外)，运动电荷所受到的力 $\mathbf{F}$ 总是既垂直于该点磁场的方向 ($\mathbf{F} \perp \mathbf{B}$)，又垂直于运动电荷速度的方向 ($\mathbf{F} \perp \mathbf{v}$)，如图 5-1-9 (b) 所示。可见磁场给运动电荷的作用力为侧向力，它只改变运动电荷速度的方向，而不改变其速度的数值。③当运动电荷的速度 $\mathbf{v}$ 垂直于磁场方向 ($\mathbf{v} \perp \mathbf{B}$) 时，运动电荷所受磁场力最大，用 $\mathbf{F}_\perp$ 表示；而以相同速率沿其他方向运动时，所受力都较小。

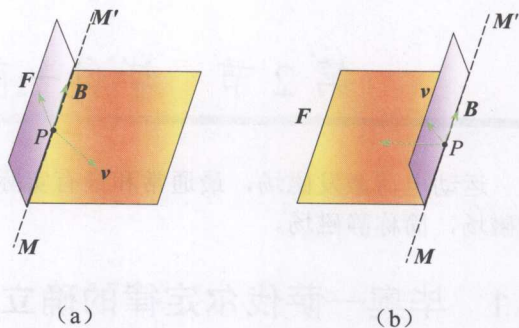


图 5-1-9 运动电荷所受磁场力

实验又表明：尽管运动电荷有不同电量 ($q>0$)，有不同的速度，它在垂直于磁场方向通过 P 点时，受到各自不同的力 $\mathbf{F}_\perp$ ，但其 $\mathbf{F}_\perp$ 与乘积 $qv_\perp$ 之比值相同，即

$$\frac{F_{\perp 1}}{q_1 v_{\perp 1}} = \frac{F_{\perp 2}}{q_2 v_{\perp 2}} = \dots = \frac{F_{\perp k}}{q_k v_{\perp k}} \quad (5.1.1)$$

式中： $F_{\perp k}$ 表示 q_k 以垂直于磁场方向的速度 $v_{\perp k}$ 通过 P 点时所受到的磁场力。可见比值 $F_\perp / qv_\perp$ 是一与运动电荷无关的量。在磁场中的不同点，这个比值一般不同，但对场中一确定点，它是一个确定的值，可见这个比值反映了该点磁场的特性。下面给磁感应强度矢量 $\mathbf{B}$ 下定义，令

$$\mathbf{B} = \frac{\mathbf{F}_\perp}{qv_\perp} \quad (5.1.2)$$

为场点磁感应强度 $\mathbf{B}$ 的数值。显然， $\mathbf{B}$ 的数值反映了该点磁场的强弱。

如前所述，磁场力 $\mathbf{F}$ 总是既垂直于 $\mathbf{B}$ ，又垂直于电荷的运动速度 $\mathbf{v}$ ，即 $\mathbf{F}$ 垂直于 $\mathbf{B}$ 和 $\mathbf{v}$ 所决定的平面。我们规定：运动电荷为正电荷的情况， $\mathbf{v} \times \mathbf{B}$ ($\mathbf{v}$ 与 $\mathbf{B}$ 的矢量积) 所决定的矢量方向与 $\mathbf{F}$ 的方向一致。因为 $\mathbf{v}$ 是给定的， $\mathbf{F}$ 由实验测得，则场点 P 的 $\mathbf{B}$ 沿零力线的指向 ($\mathbf{B}$

的方向)由上述规定唯一确定。这样规定 B 的方向,与历史上沿用已久的、以磁北极(小磁针 N 极)在场中同一点的受力方向作为磁场方向相一致。

如图 5-1-10 所示, v 、 B 、 F 方向之间的关系具有矢量积的右手关系:若右手半握,四个弯曲手指的方向由 v 转向 B ,这时大拇指表示 F 的方向。 B 的单位在国际制单位中是牛顿·秒/库仑·米,这个单位又称为特斯拉(简写为特(T))。

在磁学中经常还使用另一种单位制即“高斯制”。在高斯制中 B 的单位为 Gs,关系如下:

$$1\text{T} = 10^4\text{Gs}$$

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。长直螺线管内中部的磁场是常见的均匀磁场。

地球的磁场只有 $0.5 \times 10^{-4}\text{T}$,而大型电磁铁能产生 2T 的磁场。

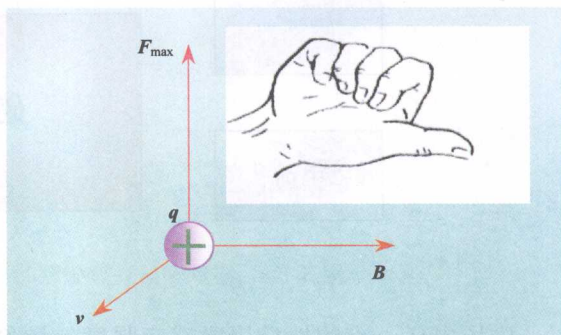


图 5-1-10 v 、 B 、 F 方向之间的关系

第2节 毕奥—萨伐尔定律及其应用

运动电荷激发磁场,最通常和最有实际意义的是稳恒电流所激发的磁场,叫做稳恒电流的磁场,简称静磁场。

2.1 毕奥—萨伐尔定律的确立

稳恒电流总是闭合的,又是多种多样的。为了求任意电流的磁场可将电流分成许多小元段。若能得知元电流与其所激发的场的磁感应强度之间的关系,再假设磁感应强度遵从叠加原理,则原则上就可以求得任意电流磁场的磁感应强度。

1820年8月法国物理学家阿拉果在瑞士听到了奥斯特发现电流磁效应的消息后,他在9月11日法国科学院的一次会议上报告了奥斯特的新发现并详细地描述了电流磁效应的实验。阿拉果的报告立即在法国引起了巨大的反响。

对这一效应首次进行精确分析的两位研究者是毕奥(1774—1862)和萨伐尔(1791—1841)。毕奥曾任法兰西学院物理学教授,萨伐尔早年曾行医,1819年他给毕奥呈送一篇论文,毕奥对这个年轻人发生了兴趣,鼓励他继续研究。1820年10月20日,在法国科学院的一次会议上,毕奥和萨伐尔宣读了题为《运动的电传递给金属的磁化力》的论文。报告了他们发现直线电流对磁针作用的规则:直线电流对磁极的作用正比于电流的强度,反比于它们之间的距离,作用的方向则垂直于阳极到导线的垂线。

他们的实验装置如图 5-1-11 所示,一条垂直的金属丝两端连接到仪器的两极,一根磁化的钢针用一根丝线悬挂在水平位置上,通过调节装置可以改变磁针与金属丝的距离,在一定位置和方向上放一磁铁以便消除地磁力的影响。当电流通过导线,磁针就转到与其中心到导线的距离相垂直的水平方向,和奥斯特所表示的旋转方向一致。毕奥—萨伐尔由此得出结论:

“一条无限长的载流导线作用在磁分子上的力垂直于该分子到导线的垂线。”

如何确定力的大小？毕奥—萨伐尔是通过测量磁针的振荡周期来确定的。根据单摆原理在小振幅的情形，力的大小与振荡周期的平方成反比。毕奥—萨伐尔得出结论：“载流导线对南磁分子或北磁分子的作用力与磁分子到导线之间的距离成反比。”又通过实验证明了载流导线对磁分子的作用力与电流强度的大小成正比。

毕奥—萨伐尔定律，就是关于电流元与其所产生的场的磁感应强度关系的定律，其数学表达式为

$$d\mathbf{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I d\mathbf{l} \times \mathbf{r}}{r^3} \quad (5.1.3)$$

式中： $d\mathbf{B}$ 为电流元 $I d\mathbf{l}$ 在 P 点所产生的磁感应强度； $\mathbf{r}$ 为 $d\mathbf{l}$ 到 P 点的矢径； μ_0 为真空中的磁导率。

$d\mathbf{B}$ 的方向垂直于 $I d\mathbf{l}$ 和 $\mathbf{r}$ 所组成的平面，如图 5-1-12 所示，并沿矢积 $I d\mathbf{l} \times \mathbf{r}$ 的方向，即由 $I d\mathbf{l}$ 经小于 180° 的角转向 $\mathbf{r}$ 时的右螺旋前进方向。它不能由实验直接加以证明，但由这个定律出发得出的结果都很好地和实验相符合。

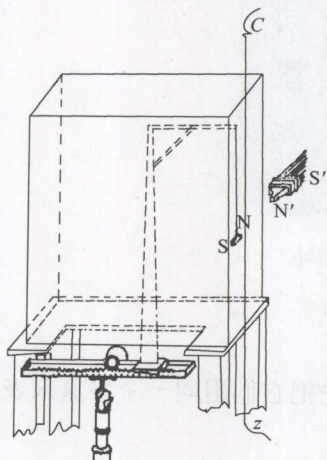


图 5-1-11 毕奥和萨伐尔的试验装置

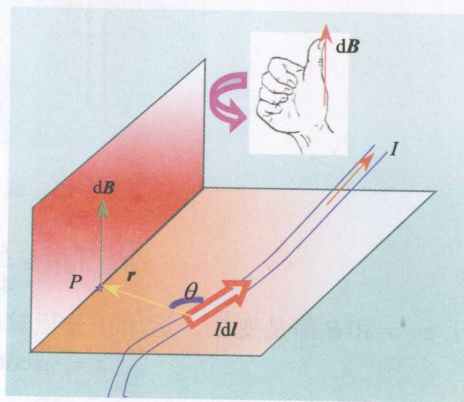


图 5-1-12 $d\mathbf{B}$ 的方向

毕奥—萨伐尔定律和磁场的叠加原理成为计算任意电流的磁场的出发点。毕奥—萨伐尔定律类似于电场中点电荷与场强的关系式。

如果要求出任意载流导线在 P 点处的磁感应强度 $\mathbf{B}$ ，根据矢量的叠加原理， $\mathbf{B}$ 等于导线上各个电流元 $I d\mathbf{l}$ 在 P 点所产生的磁感应强度 $d\mathbf{B}$ 的矢量和，即

$$\mathbf{B} = \int d\mathbf{B} = \int \frac{\mu_0 I}{4\pi} \frac{d\mathbf{l} \times \mathbf{r}}{r^3} \quad (5.1.4)$$

2.2 毕奥—萨伐尔定律的应用

1. 载流长直导线的磁场

设通过导线的电流为 I ，场点 P 到直导线距离为 a 。