

普通物理学

第三分册：电 磁 学

★ 梁绍荣 刘昌年 盛正华 主编



★ 高等教育出版社

GAODENG JIAOYU CHUBANSHE

内 容 提 要

本书是适应当前师专教学改革的要求及培养提高初中物理师资、实施九年制义务教育的需要,参照现行师专、教育学院、中学教师进修等三种教学大纲的基本要求编写而成的。全书分力学、热学、电磁学、光学、近代物理学等五个分册。第三分册的内容为真空中的静电场、导体周围的静电场、静电场中的电介质、稳恒电流和电路、稳恒电流的磁场、磁场对运动电荷和电流的作用、磁介质、电磁感应和暂态过程、交流电路、电磁场与电磁波等十章。

全书加强了普通物理学各部分的内在联系,力求具有深入浅出、知识面宽、概念准确、叙述简明、便于自学等特点。为适应日校、卫星电视教育的需要,书中以大字排印部分为基本内容、小字和*号为加强或参考性内容,附有一定数量的例题、习题与思考题,每分册并配有《学习指导书》一本。

本书是国家教委高等学校理科物理教材编审委员会普通物理编审小组委托编写的,可作为师专、卫星电视教育、教育学院、函授、自学等各种形式物理专业师生适用的教材。

普 通 物 理 学

第三分册:电磁学

梁绍荣 刘昌年 盛正华 主编

高等教育出版社出版

新华书店北京发行所发行

文字六〇三厂印刷

开本 850×1168 1/32 印张 19 字数 470 000

1988年5月第1版 1988年5月第1次印刷

印数 0001—21,210

ISBN 7-04-000990-0/O·554 定价 3.55元

前 言

本书是师范专科学校和师资培训(卫星电视教育、教育学院、函授、自学)教材《普通物理学》的第三分册——电磁学部分。在理论系统方面,注意电磁现象本身的规律和全书各册之间的配合;在对概念、定律和定理等的阐述方面,力求简洁、明确,突出物理图象;在数学运算方面,避免了繁难的推导同时又注意科学的严谨;在理论和实验方面,尽量从实验出发,以体现物理学是实验性的科学,同时也说明理论的重要性。总之,本书拟用较少的篇幅,讲清电磁现象的基础理论,讲授时数为75学时左右。书中的基本内容皆用大字排印;选学内容在其开始处加上*号;进一步说明的部分和注解皆用小学排印。

本书是由北京师大梁绍荣同志、浙江师大詹养正同志、运城师专王华伦同志以及唐山师专和唐山教育学院王天泰同志等编写的。第一、二章由詹养正执笔;第四、五、六章由王天泰执笔;第八、九章由王华伦执笔;第三、七、十章由梁绍荣执笔。在编写过程中,编者彼此间进行了多次讨论,反复推敲,尽量采纳有益的建议和意见,然后分别编写。最后,由梁绍荣对全书进行修改、复核和定稿。

本书承山东大学余寿绵教授(主审)、上海第二教育学院吴村湖同志、南京大学徐游同志、徽州师专汪昭义同志、南昌师院钟采池同志以及北京师大梁竹健同志等审稿,提出了许多宝贵的意见和建议。审稿会后,对全书又作了必要的修改。高等教育出版社的同志们对本书的结构编排、文字图表等方面提出了许多有益的建议,在此一并表示深切的谢意。

由于编者水平不高,编写时间仓促,书中的缺点、错误在所难免,诚恳地希望得到批评指正。

编 者

一九八七年七月

目 录

引言	1
第一章 真空中的静电场	5
§ 3-1-1 电荷 电荷守恒定律	5
§ 3-1-2 库仑定律	10
§ 3-1-3 电场强度	19
§ 3-1-4 高斯定理	38
§ 3-1-5 电力线	56
§ 3-1-6 静电场的环路定理	63
§ 3-1-7 电位 电位差	67
§ 3-1-8 场强与电位的微分关系	78
§ 3-1-9 带电粒子在电场中的运动	86
思考题	91
习 题	94
第二章 导体周围的静电场	104
§ 3-2-1 导体的静电平衡条件	104
§ 3-2-2 导体的静电性质	107
§ 3-2-3 电力线的应用	119
§ 3-2-4 空腔导体的静电性质 静电屏蔽	132
§ 3-2-5 电容和电容器	146
思考题	156
习 题	160
第三章 静电场中的电介质	166
§ 3-3-1 电介质的极化	166
§ 3-3-2 极化强度矢量	169
§ 3-3-3 介质中的电场	174
§ 3-3-4 介质存在时的高斯定理	178

§ 3-3-5 静电场的能量	185
思考题	195
习 题	196
第四章 稳恒电流和电路	200
§ 3-4-1 电流强度 电流密度矢量	200
§ 3-4-2 欧姆定律及其微分形式	205
§ 3-4-3 焦耳定律 电功率	217
§ 3-4-4 电阻的串联和并联	220
§ 3-4-5 气体导电 液体导电	223
§ 3-4-6 电源 电动势	231
§ 3-4-7 闭合电路的欧姆定律	239
§ 3-4-8 含源支路的欧姆定律	242
§ 3-4-9 基尔霍夫定律	250
§ 3-4-10 化学电源	258
§ 3-4-11 温差电现象	261
思考题	267
习 题	269
第五章 稳恒电流的磁场	274
§ 3-5-1 磁的基本现象	274
§ 3-5-2 磁感应强度矢量 磁感应线	278
§ 3-5-3 毕奥-萨伐尔定律	286
§ 3-5-4 磁通量 通量定理	298
§ 3-5-5 安培环路定理	303
思考题	315
习 题	317
第六章 磁场对运动电荷和电流的作用	321
§ 3-6-1 带电粒子在磁场中的运动 回旋加速器	321
§ 3-6-2 汤姆孙实验 质谱仪	329
§ 3-6-3 霍尔效应	334
§ 3-6-4 磁场对载流导线的作用	337

§ 3-6-5 平行无限长载流直导线间的相互作用	347
思考题	350
习 题	351
第七章 磁介质	355
§ 3-7-1 物质的磁化 磁介质的分类	355
§ 3-7-2 磁化强度矢量	360
§ 3-7-3 磁介质存在时的安培环路定理	363
§ 3-7-4 铁磁质	371
§ 3-7-5 等效磁荷观点	376
思考题	383
习 题	383
第八章 电磁感应和暂态过程	385
§ 3-8-1 法拉第电磁感应定律	385
§ 3-8-2 楞次定律	393
§ 3-8-3 动生电动势	402
§ 3-8-4 感生电动势	413
§ 3-8-5 自感和互感	422
§ 3-8-6 涡电流	434
§ 3-8-7 磁场的能量	441
§ 3-8-8 暂态过程	447
思考题	456
习 题	460
第九章 交流电路	465
§ 3-9-1 交流电	465
§ 3-9-2 三种理想电路	472
§ 3-9-3 矢量图解法	482
* § 3-9-4 复数解法	497
§ 3-9-5 交流电路中的功率 功率因数	512
§ 3-9-6 谐振电路和 Q 值	528
思考题	542

习 题	546
第十章 电磁场与电磁波	551
§ 3-10-1 电磁场理论 位移电流	551
§ 3-10-2 麦克斯韦方程组 平面电磁波	552
§ 3-10-3 电磁波的辐射	566
思考题	575
习 题	575
附录 电磁学的单位制	576
习题答案	589

引 言

带电粒子之间的相互作用在自然界中到处可见；在生产领域和科学技术中与电力、磁力有关的问题也十分普遍。作为《普通物理学》的第三分册——《电磁学》，它并不直接回答上述各种问题，而只是为研究这些问题奠定初步而可靠的基础。具体地说，《电磁学》的研究对象是电磁场以及它和带电粒子之间相互作用的基本规律。

电磁学以力学为基础，主要研究“场”和与“场”有关的电路问题。原来，带电粒子之间的相互作用是通过“场”来传递的，而不是象机械力那样，通过它们之间的直接接触。与“实物”相对应，“场”（电场、磁场和电磁场）是自然界中物质存在的另一种形式。电场和磁场的概念是法拉第最先提出的，1865年麦克斯韦在前人的理论和实验基础上建立了完整的电磁场理论——麦克斯韦方程组，它在电磁学中所起的作用与牛顿运动定律在力学中所起的作用是同等重要的。麦克斯韦从理论上推断出，光的本性是电磁的，从而建立了光学与电磁学的直接联系；麦克斯韦理论的应用范围很广，涉及电力系统、电磁探矿、粒子加速器以及无线电、雷达等。

学习电磁学是学习力学、热学的继续，在学习时应注意的问题除共同点外，仅提出下面两点：

（1）描述场的方法

电磁学主要是讲场，而场是分布在空间中，并且还可能随时间变化。所以，描述场的变量是 (x, y, z, t) ，这四个参数是彼此独立的。这与力学中描述质点的方法不同，质点在空间的位置用 $(x, y,$

z)表示,或以矢量 $\mathbf{r}(x, y, z)$ 表之,而 $\frac{d\mathbf{r}}{dt} = \mathbf{v}$ 表示质点的速度。

对于场,其空间变量也可以 $\mathbf{r}(x, y, z)$ 表之,但一般说来, $\frac{d\mathbf{r}}{dt}$ 是无意义的。还有,描述场的空间变量是表示场在空间的分布,是某时刻某处场的状态,其中时间和空间变量是彼此独立的。因此,描述场的性质的物理量皆为时间、空间点函数;不随时间变化的场只是空间点函数,如静电场强 $\mathbf{E} = \mathbf{E}(x, y, z)$ 为矢量点函数,电位 $U = U(x, y, z)$ 为标量点函数等。

(2) 关于代数数量的运用

物理量按其数学性质来分有矢量(如力、场强等)和标量(如质量、电荷等),而标量又可分为算术量(如质量)和代数数量(如电荷)。矢量虽然复杂,但有专门论述;算术量很简单,因为它只有正值;代数数量可正可负,看起来也不怎么复杂,似无专门论述的必要,但在运算过程中却常常出错。

在电磁学中,电荷、电位差等都有正负之分;电流由A至B或由B至A也以正负来区别;其它,如电动势、电通量等也都可正可负。所以,在学习电磁学时,必需对这些代数数量的正、负的由来和所代表的意义给予充分的重视。

本书共分十章,前三章都是讲静电学问题:第一章讲真空中静电场的基本规律,第二、三章分别讲导体、绝缘体(电介质)存在时的静电场。在讲述中,除基本内容外,对电力线的定义、性质和应用作了较多的论证。第四章讲稳恒电流问题,主要注意阐明“场”和“路”的关系;同时,对一些用代数数量描述物理量时出现的问题作了简要的讲解。第五、六、七章都是讲静磁场问题,它与静电场有类似之处,但由于“磁单极”不存在,其结论就不尽相同,其中除讲基本内容外,还对“磁荷”观点作了简要的介绍。第八章讲电磁感应的基本规律,这是将电场和磁场联系起来的重要一步,这时电场和

磁场都是随时间变化的。第九章讲交流电路,它与第四章相比,主要是多了一个“位相”概念,就变得复杂多了,由此而引出矢量图解法和复数解法等。最后一章讲电磁场和电磁波,对麦克斯韦理论(描述电磁场的完整规律)从特例出发作了概要的说明。

第一章 真空中的静电场

本章讨论相对于观察者静止的电荷产生的场——静电场。首先从静电现象的观察开始,认识电荷和物质的电结构,从实验得到电荷间相互作用的规律——库仑定律和叠加原理。然后从库仑力是怎样作用的这一问题的讨论,引入电场,定义描述电场属性的两个概念——电场强度和电位,同时介绍描述电场的形象工具——电力线和等位面。在理论体系方面,本章从库仑定律和叠加原理出发,导出静电场的两个定理——高斯定理和环路定理,进而说明由已知电荷分布求场强和电位的计算方法。最后分别从力和能的观点讨论带电粒子在电场中的运动。

§ 3-1-1 电荷 电荷守恒定律

雷鸣电闪也许是映入人类眼帘最早的静电现象,原始人不可能懂得这种神秘闪光的来由,只能把它归结为一种超自然的力量。到公元前六世纪,古希腊人发现琥珀与毛织物摩擦后能吸引轻小物体,我国在汉代也有“顿牟掇芥”^①的记载,当时人们也不可能知道这是怎么回事,更不可能知道这种现象与雷鸣电闪有什么关系。但是,正是从这些现象的观察开始,经过长期的实验、思考,人们终于了解这些都是电的作用的结果。

下面,我们从静电现象的实验和观察开始,来学习静电学知识。

(一) 摩擦起电 两种电荷

用丝绸摩擦过的玻璃棒去接近纸屑、羽毛等轻小物体,我们发现,玻璃棒能吸引这些轻小的物体。同样,用毛皮摩擦过的硬橡胶

^① 顿牟即玳瑁,是一种海龟类爬行动物的甲壳,可做装饰品,在加工和使用过程中常因摩擦而带电,从而能吸引轻小的物体。

棒,也有吸引这些轻小物体的能力。这表明,经摩擦后的玻璃棒和橡胶棒获得了一种属性,处于一种与原来不同的状态,我们称它为带电状态,或者说它们带了电荷。这种处于带电状态的物体,叫做带电体。

那么,不同带电体(如摩擦过的玻璃棒和橡胶棒)带电状态是否都是一样的呢?或者说,它们所带的电荷是否都是相同的呢?看下面的实验:把丝绸摩擦过的玻璃棒放在能绕竖直轴转动的绝缘支架上(图 3-1-1),然后用另一根丝绸摩擦过的玻璃棒去接近它的一端,我们看到,它们是互相排斥的(注意它们带同种电荷)。再用毛皮摩擦过的橡胶棒去接近它,可以看到,它们是互相吸引的。由此可见,玻璃棒与橡胶棒带的电荷是不同的。

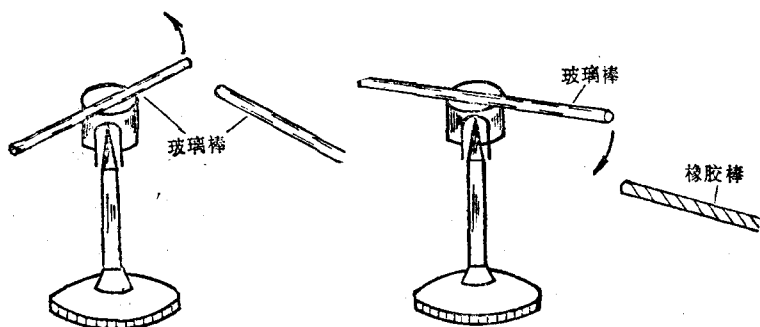


图 3-1-1

那么,不同带电体所带的电荷是否都互不相同呢?所有实验结果表明,凡是和丝绸摩擦过的玻璃棒吸引的带电体,必定和毛皮摩擦过的橡胶棒排斥;凡是和丝绸摩擦过的玻璃棒排斥的带电体,必定和毛皮摩擦过的橡胶棒吸引。由此说明,电荷有两种,且只有两种;同种电荷互相排斥,异种电荷互相吸引。上述实验中,玻璃棒和毛皮所带的是同一种电荷,橡胶棒和丝绸所带的是另一种电

荷。

同种电荷或异种电荷加在一起，其结果又是怎样呢？为了说明这个问题，我们先介绍一个检测物体是否带电和带电多少的仪器——箔片验电器，构造如图 3-1-2 所示。它的主要部分是一根金属杆，下端挂着一对金属箔，上端装着一个金属球。当带电体与金属球接触时，就有部分电荷通过金属杆传到下端的箔片上，箔片因带同种电荷相互排斥而张开，电荷越多张角越大。下面我们来看一个实验：先用丝绸摩擦过的玻璃棒和验电器的金属球接触，

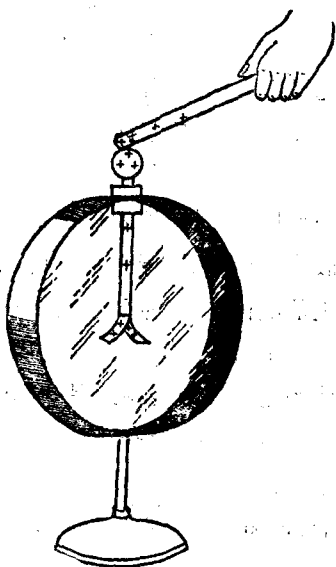


图 3-1-2

验电器的箔片就张开一定的角度，说明验电器已带上玻璃棒传给它的电荷。这时，如果再用丝绸摩擦玻璃棒，并再将它去和验电器的金属球接触，箔片的张角就增大，这表明，同种电荷加在一起，其效应是相互增强的；如果改成用毛皮摩擦过的橡胶棒去和原已带电的验电器金属球接触，随着橡胶棒上的电荷不断传给验电器，箔片的张角跟着减小，闭合后复而又张开，这表明，异种电荷加在一起，其效应是互相抵消的。两种电荷完全抵消的现象叫做中和。验电器的箔片后来复而张开，是后面加上去的电荷和前面的电荷抵消后剩余的电荷互相排斥所致。为了区别两种电荷，人们把其中一种（用丝绸摩擦过的玻璃棒所带的电荷）叫做正电荷，另一种（用毛皮摩擦过的橡胶棒所带的电荷）叫做负电荷。电荷的多少，叫做电荷量^①，简称电荷。在电荷量的运算中，正电荷的电荷量取

① 关于电荷量的定义详见 § 3-1-2。

正数,负电荷的电荷量取负数,所以电荷量可作为代数量来运算。至于电荷正、负的定名,那完全是人为的,上述定名,是由富兰克林首先提出来的,国际上一直沿用至今。

(二) 电荷守恒定律

实验表明,两种物体因摩擦而带的电荷,是等值异号的。如丝绸与玻璃棒摩擦,玻璃棒带正电荷,丝绸带等量的负电荷;毛皮与橡胶棒摩擦,橡胶棒带负电荷,毛皮带等量的正电荷。摩擦起电实际上是电荷转移的过程,它并不创造电荷。大量实验表明,电荷既不能创生,也不能消灭,只能从一个物体转移到另一个物体,或从物体的这一部分转移到另一部分。在一个与外界无电荷交换的封闭系统中,无论进行什么过程,该系统的正负电荷的代数和始终保持不变,这就是电荷守恒定律。这个定律不仅在一切宏观过程中成立,也为一切微观过程所遵守。化学反应、放射性衰变、核反应和基本粒子的转变,都遵守电荷守恒定律,它是物理学中最基本的定律之一。

(三) 电荷和物质结构

前已讲过,物体带电使它多了一种属性。电学中最原始的概念就是电荷,它是一切电现象的源。那么,究竟什么是电荷呢?电荷是自然界中物质的一种属性,而不是存在于物质之外的。原来,人们常见的物质由分子、原子组成,而原子由电子和原子核组成,核内有质子和中子,电子带负电,质子带正电,两者所带电量相等;中子不带电,质子和中子在巨大的核力作用下,牢固地束缚在原子核内,核半径的数量级为 10^{-15}m 。电子以电子云的形式围绕原子核高速运动,电子云半径(也就是原子半径)的数量级为 10^{-10}m ,比核半径约大 10^5 倍。正是物质内部这些带电粒子之间的互相吸引和排斥,使电子围绕核运动而形成稳定的原子;使原子以不同的形式结合形成不同的分子;使分子以不同的形式结合形成物质的各种形态(固体、液体、气体等)和千变万化的物质种类。物质

的这种电结构,正是各种宏观电现象的原因和根据。在正常状态下,物体中微观上足够大的任意部分所包含的电子数和质子数相等,正、负电荷对外的影响互相抵消,所以不呈现电性。摩擦为什么能起电呢?比如,丝绸和玻璃棒摩擦时,玻璃棒上的一些电子转移到了丝绸上,丝绸因获得过剩的负电荷而带负电,玻璃棒则失去部分电子致使正电荷过剩而带正电。

根据导电性能的不同,物质可分为导体、绝缘体、半导体三类。能传导电荷的物体叫导体,金属、石墨和酸、碱、盐的水溶液(统称电解液)等就是良好的导体,人体、地球也是导体,但导电性能不如金属。几乎不能传导电荷的物体叫绝缘体,也叫电介质,如玻璃、橡胶、干燥且未被电离的气体等。导电性介于上述两者之间且有特殊电性质的那类物体叫半导体,如锗、硅等。物体导电性能的不同,可用物质的电结构来解释。金属之所以导电,是因为内部存在大量摆脱了原子核束缚的自由电子,它们能在金属内部自由运动;电解液之所以导电,是因为内部存在许多能自由运动的正、负离子。绝缘体之所以不导电,是因为内部的电子受到原子核的束缚,基本上没有自由电子。至于半导体的导电规律,也是由它特殊的电结构决定的,这将在电子技术课程中介绍。

(四) 电荷的量子性

在历史上,密立根的油滴实验发现,微小粒子带电量的变化不是连续的,它只能是某个基本电荷的整数倍,密立根测出的这个基本电荷是 $1.64 \times 10^{-19} \text{C}$ 。这就是电荷的量子性。电荷的量子性从物质的电结构来看,是很清楚的。因为电子是自然界存在的最小负电荷,质子是最小正电荷,这个最小电荷就是基本电荷,其值为 $e = 1.602 \times 10^{-19} \text{C}$, 所以一切带电体的电荷量都只能是 e 的整数倍。近代物理从理论上预言有夸克(或层子)存在,它是组成质子、中子等的基本粒子,它的电荷量为 $\pm \frac{1}{3}e$ 或 $\pm \frac{2}{3}e$ 。不过,