

“十二五”普通高等教育本科规划教材

国家工科物理教学基地 国家级精品课程使用教材

Nucleus
新核心

理工基础教材

大学物理

精讲与典型难题详解

李翠莲 主编

下册 电磁学、光学与量子力学



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

“十二五”普通高等教育本科规划教材

国家工科物理教学基地 国家级精品课程使用教材

Nucleus
新核心

理工基础教材

大学物理

精讲与典型难题详解

李翠莲 主编

下册 电磁学、光学与量子力学



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

内容提要

本书分上下两册,上册为力学与热学部分,下册为电磁学、光学和量子力学。每册包括 32 个知识点精讲和相应知识点课后习题中部分难题的详解。每个知识点从层层递进的若干问题出发揭示知识点的内涵和外延,并配设若干课后练习。

本书可作为非物理类大学本科生的物理教材,也可作为期末、考研复习时强化物理知识点和熟悉大学物理解题方法的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理精讲与典型难题详解.下册,电磁学、光学
与量子力学 / 李翠莲主编. —上海:上海交通大学出版社, 2017

ISBN 978-7-313-17266-2

I. ①大… II. ①李… III. ①物理学—高等学校—教学参考资料②电磁学—高等学校—教学参考资料③光学—高等学校—教学参考资料④量子力学—高等学校—教学参考资料 IV. ①04

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 127097 号

大学物理精讲与典型难题详解(下册电磁学、光学与量子力学)

主 编: 李翠莲

出版发行: 上海交通大学出版社

邮政编码: 200030

出 版 人: 郑益慧

印 制: 常熟市文化印刷有限公司

开 本: 710 mm×1000 mm 1/16

字 数: 353 千字

版 次: 2017 年 8 月第 1 版

书 号: ISBN 978-7-313-17266-2/O

定 价: 48.00 元

地 址: 上海市番禺路 951 号

电 话: 021-64071208

经 销: 全国新华书店

印 张: 17.25

印 次: 2017 年 8 月第 1 次印刷

版权所有 侵权必究

告读者: 如发现本书有印装质量问题请与印刷厂质量科联系

联系电话: 0512-52219025

前言

目前中国国内使用的大学物理教材版本众多：有上海交通大学基础物理教研室编的《大学物理教程》、清华大学出版社出版的《大学物理》（朱峰主编）、北京大学出版社出版的《简明大学物理》等。关于大学物理的习题集就更多了，这里不一一举例。这些教材为物理理论在工科学生中的普及和推广起到了重要的作用。然而，由于这些教材大都在“取其精华、去其糟粕，中学为体、洋为中用”的指导原则下完成，显示出物理学精干的一面，强调物理公式的应用，物理学的“血肉”却被削弱了。这直接导致大多数同学尤其是女同学觉得物理难学，也渐渐对物理失去了兴趣。如我的学生段嘉同学在她的读书报告中写道：“一直以来，我的物理学习都不是我的优势，因此有时会越学越没有耐心。经过这次读书报告，我有机会能够以深入了解为目的去研读课本以及论文资料，使我对麦克斯韦速度分布律有了更加深入详细的了解，而不是仅限于做题，它使我有机会感知每一个公式的详细来源和公式背后的努力与故事。”当然也有一些同学物理学得不错，那也是就考分而言的，欣赏物理的能力、用物理科学方法思考问题的能力还十分欠缺。如我的学生王裕杰同学在完成了仔细研读“多普勒效应”后写道：“第一次接触到这个知识是在高中的物理课本上，当时老师仅仅是一笔带过了，自己也没有多大的印象，觉得只需要记住一个公式就行了。然而在我为写这篇读书报告查找了许多资料之后，才发现多普勒效应的应用竟然如此广泛，作用如此之大，它在我们的生活中几乎无处不在。我深深感受到了多普勒效应的魅力所在，同时也认识到没有哪个物理知识是没有用的，一个物理知识的实现与应用只是时间问题。”所以，我写这本教材的第一个目的就是解开物理学神秘的面纱，让学习者明白物理是有故事的，是有趣的，是可以在等车、排队的间隙阅读的。

物理学不仅仅是“学霸”们的“游戏”，它更是关于自然运动的法则。学习它就像学习交通规则一样，只要是一个具有正常思维逻辑的人都可以去理解它，并且自觉遵守这些自然法则。反之，违反自然法则虽不像违反交通法则一样立即受到惩罚，但这种惩罚只可能迟到而不会缺席，而且其惩罚的程度远远大于违反交通法则。例如，明显违反自然法则的亩产“万斤”论造成的惩罚性后果让经历过这场灾难的中国人至今还铭心刻骨地痛。所以，编写一本理工科甚至文科学生都能读懂的且有兴趣读下去的物理学教材是物理教育工作者的责任。另外，本书对每一个知识点的相关方程都进行了较为详尽的数学推理，并且列举了一些该知识点在工业、医学中的应用例子，

所以本书完全可以满足理工科学生学习的需要。

由于当代学生生活在知识爆炸、信息畅通的时代,纯粹的知识灌输远远不能满足学生的需要,培养学生的学习能力、创新能力比任何时代都更加迫切。正如爱因斯坦指出的“发展独立思考和独立创新的一般能力,应当始终放在首位,而不应当把知识学习放在首位”。这是我写这本教材的第二个目的。

那么怎样才能提高学生的欣赏能力、学习能力和创新能力呢?我们知道爱因斯坦在他 26 岁时就完成论文《论动体的电动力学》,独立而完整地提出狭义相对论,开创了物理学的新纪元,他的创新能力是毋庸置疑的。那么,他的创新能力从哪里来呢?读过爱因斯坦传记的读者都知道,早在中学时代,他就从伯恩斯坦所著的多卷本《自然科学通俗读本》中了解了整个自然科学领域里主要的成果和方法。这套书第一卷的开始部分就论述了有关光速以及光和距离的内容,以至于当时 16 岁的爱因斯坦在无意中想到了一个奇特的“追光悖论”。从此,他开始了长达 10 年之久的关于光速相对性以及关于光的传播介质“以太”存在问题的探索。这样,在他 26 岁那年发表了《论动体的电动力学》,成功地解释了他的“追光悖论”,创立狭义相对论也就是水到渠成的事了。从这个事例中,我们明白了创新是需要源头、需要传承、需要视野的。再举一个例子:两只狼来到草原,其中一只狼很失落,因为它看不见肉,这是视力;另一只狼很兴奋,因为它知道有草就有羊,这是视野。在不创新就要落后的现代社会,物理学教学的目的不仅要培养学生的“视力”——观察、分析能力,更要培养学生的“视野”——推理、预测能力。笔者基于多年教学中遇到的这种困惑以及大量阅读国外教材的一些感悟,为了提高学生科学欣赏能力、科学思维和创新能力,在最近五年教学过程中逐渐引导学生在阅读物理教材和课外学术资料时重点关注物理学知识点的来源、现在发展到什么程度以及今后可能往哪里去等问题,追踪以前的物理学家遇到问题时思考解决问题的方法与解决问题的过程,让学生从六个方面去学习物理的每一个知识点,这六个方面分别为:① 当时遇到了怎样的难题需要建立该新知识点?② 建立该知识点过程中经历了哪些困难、歧途?最后怎样统一到目前这个认识的?③ 目前物理界对该知识点的解析有哪些?④ 该知识点有没有相似的其他描述?如果有,各有什么优缺点?⑤ 该知识点美在哪里?对自然科学的发展起了怎样的作用?对人类生活有哪些影响?举一例说明之。⑥ 该知识点建立后有怎样的发展?你对该知识点的发展有什么看法、建议?此外,要求每一个同学提交一份关于某个知识点的阅读报告。通过 5 年的实践,学生们收获很大。如杨若虚同学在他的读书报告里的个人感悟中写道:“最开始的时候对于热力学第二定律真的是一无所知,不过查了一下就被吓倒了,因为它引出了一个超级‘牛’的概念:熵。虽然我也不知道熵到底有多牛,不过但凡看过《生活大爆炸》的人或多或少都有点概念吧。不过从最开始来讲,热力学第二定律单单是指热量从高温物体向低温物体传导,到后来开始讨论宇宙的无序与黑洞,让我不得不佩服物理学家的巨大‘脑洞’(此处为褒义)。看了热力学第二定律的发展历程我不得不慨叹科学的发展,不过同时也感受到其实任何东

西都不是单一的,都应该是连续的(量子除外),科学的发展也是一步一步走出来的,罗马并非一日建成,吾辈需上下而求索。科学是美的,物理定理更是其中组成美的重要部分,简单的叙述、奇妙的公式,都很直观地显示世界的真理,展示宇宙的神秘。这可以说是物理让人着迷的地方”。另一位同学徐佳北在读了卡诺循环相关知识点后写道:“就我个人而言,我觉得卡诺循环的美,体现在它的简洁性,简约才是美,没有很复杂的推导,也没有很难理解的部分,就是很自然而然提出的理论,让人有一种豁然开朗的感觉,才是一种真正的科学的美。除此之外,卡诺循环背后的故事,更使这个理论平添了往常没有的一些人情故事在里面。在学习这个理论的同时,能感受到卡诺当年孤身一人,独自在属于自己的科学海洋里默默探索。可能学习科学本身就是孤独的,但也是注定辉煌的,即使生前不被认可,但卡诺的成就,已经写在了后世的教科书上。漫漫历史长河,无数物理学家,用他们自己的努力,揭示了一个又一个的真理,向世人展示物理的玄妙,卡诺循环不是其中最耀眼的那颗星,但是它确实在天空闪耀着、永存着”。潘淑媛同学说:“通过这次对简谐振动的探索,我对它有了更深的了解,也对物理更有兴趣了。有许多物理现象都很有趣,值得我们去学习和探索。”

在近 20 年的教学过程和 5 年的教改实验中,我与我的学生一起做了大量的调研工作,积累了大量的资料,现在利用暑假把这些资料整理、完善、出版,让好的东西与大家一起分享。另外,考虑到复习考试同学的需要,本书每个知识点后配设 3~5 道课后练习题,其中一道具有现代应用典型代表意义且具有一定难度。笔者对习题中的部分典型难题做了较为详细的解答并把它放在本书附录中,我们称之为典型难题详解。本书可作为非物理类本科生的物理教材,也可作为读者期末、考研复习准备考试时强化物理知识点和熟悉大学物理解题方法的参考书。

由于编者水平有限,书中存在的错误和不足之处,欢迎读者批评指正。

目 录

第 一 讲	电荷、库仑定律及电场	001
第 二 讲	电场线、电通量与高斯定理	011
第 三 讲	静电场的安培环路定理与电势	021
第 四 讲	静电场与导体的相互作用	028
第 五 讲	电介质与外加静电场的相互作用	034
第 六 讲	电容器与静电场能	042
第 七 讲	电源、稳恒电流	052
第 八 讲	磁感应强度与电流的磁效应	058
第 九 讲	磁场的高斯定理和安培环路定理	064
第 十 讲	磁场对载流导线的作用	071
第十一讲	霍尔效应	078
第十二讲	磁介质及其与磁场的相互作用	086
第十三讲	铁磁质	096
第十四讲	电磁感应现象及电磁感应定律	101
第十五讲	自感、互感以及磁场的能量	113
第十六讲	麦克斯韦方程组及电磁波	121
第十七讲	光的直线传播、光的反射及折射	130
第十八讲	光的偏振	136
第十九讲	光的干涉	147
第二十讲	薄膜干涉	156
第二十一讲	光的衍射	164

第二十二讲	光栅衍射	171
第二十三讲	黑体辐射规律及普朗克能量量子假说	178
第二十四讲	光电效应	186
第二十五讲	原子结构、氢原子光谱、玻尔理论	192
第二十六讲	德布罗意波	200
第二十七讲	不确定关系	205
第二十八讲	波函数统计诠释及态叠加原理	210
第二十九讲	薛定谔方程及其应用	215
第三十讲	一维散射问题	222
第三十一讲	氢原子的量子理论	227
第三十二讲	电子自旋和泡利不相容原理	232
附 录	典型难题详解	239

第一讲 电荷、库仑定律及电场

电荷是物质吸引或排斥另一物质的一种属性。库仑定律是关于两个静止点电荷相互作用的规律。库仑定律指出两个静止点电荷之间的相互作用力与其电量的乘积成正比,与两个点电荷之间的距离平方成反比,方向在两点电荷的连线上。

电场是电荷以及变化的磁场周围空间中存在的一种特殊媒介物质。电荷间的相互作用总是通过电场进行的,因此静电相互作用力又称为电场力。而电场强度是用来表示电场大小和方向的物理量,定义为检验电荷在电场中某一位置所受到的电场力与电荷量之比,其方向与正电荷在该位置所受电场力的方向相同。

一、电荷、库仑定律及电场研究背景

古希腊的哲学家泰勒斯发现琥珀经过毛皮摩擦以后可吸引轻小物体。1600年,英国医生威廉·吉尔伯特拓展了泰勒斯的研究,他用金刚石、蓝宝石、水晶、明矾、硫磺等物质做实验,同样发现了它们经摩擦后能吸引轻小物质。吉尔伯特在他的著作《论磁石》中首次把摩擦后的物质吸引轻小物体的性质称为物质的电性。1729年,史蒂芬·戈瑞发现了电传导现象,即通过特定的物体(特别是金属)可以让电相互传递。此后,一些研究者认为电是一种独立存在的物质,而不是与产生电的物体密不可分。1733年,查尔斯·渥费将电分为两种:玻璃电和琥珀电,即当玻璃与丝巾摩擦时,玻璃会生成玻璃电;当琥珀与毛皮摩擦时,琥珀会生成琥珀电。他认为这两种电会彼此相互抵消,并提出了电现象的双流体理论。1746年,富兰克林从一位英国朋友那里获得一个可以收集电荷的莱顿瓶,开始了对电现象长达十年的研究。富兰克林利用从雷云中收集到的电给莱顿瓶充电而得到电火花,从而证明雷也是一种电现象,天电与地电是一致的。在此基础上,富兰克林提出了电荷、正电、负电概念以及电荷守恒假说(电荷不因摩擦玻璃管而产生,而只是从摩擦物转移到了玻璃管,且摩擦物失去的电荷与玻璃管得到的电荷严格相等)。1748年,法国的让·安东尼·诺雷发明了验电器来测量物体带电量的多少。1766年,普列斯特里首先对静电力与距离的关系进行了猜测。普列斯特里在1767年出版的《电的历史和现状》中写道:“电的吸引应

该遵从与万有引力相同的定律,即按距离的平方而变化。”遗憾的是,他对电的排斥力没有做出猜测。1784年,法国物理学家库仑直接尝试通过类比万有引力定义的方法,定义静电力与两带电体间距离的关系为平方反比关系,然后通过实验来验证其正确性。库仑还根据对称性利用相同的金属球互相接触的方法,巧妙地获得了各种大小的电荷,得出了电荷间的作用力与它们所带电量的乘积成正比的关系,从而得出

$f \propto \frac{q_1 q_2}{r^2}$ 的结论。这个结论就是现代物理学中的库仑定律。库仑定律发现后,人们

对库仑定律中两个点电荷之间的作用力与其距离平方反比的精确程度和适用范围很感兴趣。根据库仑当时的实验条件,他发现 $f \propto \frac{1}{r^{2+\delta}}$, 其中 $\delta \leq 0.02$ 。另一方面,

库仑定律的指数为 2 与光子静止质量为零这一结论是可以互相推导的。也就是说,假如这一指数与 2 产生了即使是很小的偏差,也会动摇物理学大厦的重要基石,因为现有的很多重要理论都是以库仑定律中指数为 2 作为基本前提的。因此,很多物理学家意识到,必须对这一定律的精确性,即对平方反比律做更多的检验,才能确保这一重要定律能正确无误地贡献于其他领域的研究。1971年,威廉斯(E. R. Williams)等人的实验证明 $\delta \leq (2.70 \pm 0.31) \times 10^{-16}$, 这一实验结果有力地支持了库仑定律,让人们不再怀疑它的正确性。半个世纪后,高斯提出用库仑定律来定义电荷量的大小,即如果两个带有等量电荷的物体相距 1 m 受到的静电力是 9.0×10^9 N,则这两个带电物体带的电量为 1 库仑(C)。从此,电量的基本单位定义为库仑。

物体由于摩擦或者其他原因带了电,我们说物体带了电荷。电荷的多少可以用验电器来测量,电荷的单位也确定了。那么,接下来的问题是:物体带的电量是否有极限?如果有,极大值是多少?极小值又是多少?密立根与他的研究生一起对这个问题做出了很好的回答。

1907—1913年,美国实验物理学家罗伯特·安德鲁·密立根设计了一系列实验。他将两块水平放置的金属板分别与电源正、负极相接,使两块金属板上异种电荷。他首先想到的是用喷雾器喷出水滴,让水滴在平行板中电力和重力作用下运动以测出水滴带的电量。但由于水滴容易蒸发,很不稳定。他的研究生改进了他的实验,用油滴代替了水滴,让带电油滴进入两平板之间时,调节电压使油滴受到的电场力与重力平衡,由此他们获得了许多稳定的实验数据,并通过这些数据计算出油滴所带电荷量。1910年,密立根对实验进行了第三次改进,使油滴可以在电场力与重力平衡时上上下下地运动,而且在受到照射时还可看到因电量改变而致油滴突然变化,从而求出电荷量的改变值。1913年,密立根通过对 146 次试验中的 58 次实验数据(他剔出了自己认为不好的数据)比较分析,发现所有油滴带的电量都是一个基本量的整数倍!这个数据非常清楚地表明了基本电荷的存在,他进一步算出了基本电荷的精确值 $(4.774 \pm 0.009) \times 10^{-10}$ 静库仑(等于 $(1.592 4 \pm 0.001 7) \times 10^{-19}$ 库仑)。这个值与现代国际标准的测量值 $(1.602 176 53 \pm 0.000 000 14) \times 10^{-19}$ 库仑只差百分之一。

这是一个惊人的发现,证明研究者从实验中确证了元电荷的存在。这个精确值也结束了关于对电子离散性的争论,确定了电子作为基本粒子的地位。密立根因为他的关于基本电荷以及光电效应的工作被授予1923年的诺贝尔物理学奖。

根据库仑定律,人们明确了电荷与电荷之间相互作用力的大小和方向,但关于电荷与电荷之间的相互作用的性质还不十分清楚。以安培、韦伯、诺埃曼为代表的一批物理学家认为电荷与电荷之间的相互作用是直接的,不需要中介,也不需要任何传递时间。静电力的存在仅仅因为两个电荷都同时存在,如果只有单独一方时,就不存在这种作用能力,或者说这种力就突然在空间消失;当另一电荷再次出现时静电力又突然作用于对方。由于牛顿力学的成功,静电力的这种超距作用观点在物理学中得到广泛传播,而且以超距作用观点发展起来的电动力学在大量实际问题中获得成功,但它难以解释物质的相互作用通过“非物质”的虚空进行瞬时传递,这是这一理论的缺陷。以法拉第为代表的另一派物理学家受到磁力线思想的启发,认为电荷与电荷之间的作用也是近距离接触作用,并进而提出了电力线的思想。1820年,奥斯特发现了电流的磁效应,即电流能使小磁针偏转,而后安培发现了磁场中电流受力的规律。不久以后,法拉第发现当磁棒插入闭合线圈时,会在线圈中产生电流,自此,人们发现了电和磁有着密不可分的关系。科学家们注意到在电荷之间或者电流间产生作用时,若一方产生了变化,另一方则会马上对这种变化产生反应,即使两者相隔一定距离也是如此。当时的人们并不知道电荷之间的作用是以什么方式传播的。法拉第在晚年第一次提出了电磁力的作用并不仅限于导体与带电体中,而是存在于带电体周围的空間中,也就是我们现在常说的电场,并且尝试用场线形象地描述电场。1851年,法拉第在他出版的《论磁力线》一文中把磁力线、电力线类比为流体场,首次对场的物理图像做了直观的描述。他指出,场是由力线组成的,许多力线组成一个力管,它们将相反的电荷或者磁极联系起来。力线上任一点的切线方向就是该点场强的方向,力线的疏密程度则表示不同点场强的大小。法拉第在一张纸上撒上铁屑,用磁棒在下面轻轻振动,铁屑就连接成规则的曲线,他以此来证明力线和力管的存在。

法拉第在提出电场这一概念时并没有遇到太多困难,但是这一理论被世人接受的过程却很曲折。

人们最早对电现象的认识是电荷之间存在相互作用,而电荷移去后,相互作用的现象也就随之消失。在当时人们的印象中,电荷之间的作用是完全依附于电荷本身的。因此,在法拉第起初提出电现象是由电场这种特殊物质承载的概念时,人们并没有接受这一理论。法拉第去世后,麦克斯韦提出了相对完整的电磁理论,后又被赫兹所证实。这证明了电磁的作用并不完全依托于附近存在的电荷或磁体,而是可以在距离电荷很远的地方单独存在。人们这才意识到电荷周围的确存在着一种特殊的物质,也就是法拉第所说的电场。电场可以由静止电荷激发,也可以由变化的磁场激发。人们把静止电荷产生的电场叫静电场,把变化磁场激发的电场叫涡旋电场。这一讲中主讲静电场,涡旋电场将在电磁感应相关内容中讲述。

二、电荷、库仑定律及电场强度的数学描述及物理解析

1. 点电荷模型

为了研究带电物体的性质及其对周围环境的影响,我们需要先将带电物体本身做一简化。与质点的定义类比,当带电物体本身的几何尺度远远小于考察的空间点与带电体之间的距离时,可将这个带电体视为一个点电荷。明显地,点电荷也是描述带电物体的理想化模型,是一个相对性概念,没有绝对意义上的点电荷。一般来说,当考察的空间点到带电体的距离是带电体本身尺度的 100 倍以上时,就可以将该带电体视为点电荷。

2. 库仑定律

库仑定律:真空中两个点电荷之间的静电相互作用力的方向在两个点电荷的连线上,其大小与这两个点电荷所带的电量成正比,与它们之间距离的平方成反比。库仑定律的数学表达式为

$$\boldsymbol{F} = k \frac{q_1 q_2}{r^2} \boldsymbol{e}_r \quad (1-1)$$

式中, k 是比例常数, q_1, q_2 分别是两点电荷的电量的代数值,正电荷取正号,负电荷取负号, r 为两点电荷之间的距离, $\boldsymbol{e}_r$ 为从其中一个点电荷出发指向另一点电荷的方向单位矢量,如图 1-1 所示。式(1-1)与万有引力表达式 $\boldsymbol{F}_G =$

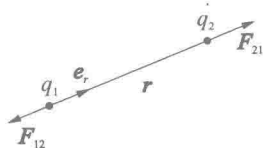


图 1-1

$-G \frac{m_1 m_2}{r^2} \boldsymbol{e}_r$ 相比,两式中力与距离的关系是一样的,但由

于质量没有正负,万有引力只能有吸引力;而电荷有正负,所以库仑力既可以是引力,也可以是斥力,即同号电荷相斥,异号电荷相吸。另外,为了使推导结果中不含无理数因子 4π ,令

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \quad (1-2)$$

式中, $\epsilon_0 = 8.584\ 187\ 82 \times 10^{-12} \text{ C}^2/\text{N} \cdot \text{m}^2$ 为真空介电常数,一般近似地取 $k = 9.0 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2$ 。因此式(1-1)可以改写为

$$\boldsymbol{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} \boldsymbol{e}_r \quad (1-3)$$

值得注意的是,电荷之间的作用是相互的,由式(1-3)可以得出

$$\boldsymbol{F}_{12} = -\boldsymbol{F}_{21} \quad (1-4)$$

即电荷与电荷之间的库仑力满足牛顿第三定律。

3. 电场及电场强度

按照法拉第提出的场的观点,任何电荷都会在其周围的空间产生电场,通过电场实现对其他电荷的静电作用力。或者说,电荷间的静电相互作用是通过电场这种媒介来传递的,这样静电相互作用力又称为电场力。另外,按照法拉第电场的观点,电场在空间传播速度有限,上限为真空中的光速 c , 因此,电荷在空间激发(或建立)电场是需要时间的,或者说电荷间静电相互作用的传递是需要时间的。一个置于空间某位置的点电荷 q , 我们说它产生了电场,用什么量来描述电场? 又怎样检验电场存在呢? 显然,需要从电场对另一电荷的作用来考察它的存在,我们把另一个电荷叫检验电荷。对于检验电荷,有两点基本要求: ① 电荷的体积很小,从而可用来研究电场中各点的性质; ② 电荷的电量很小,以不影响被检验电荷电场的分布为标准。实验发现,检验电荷在空间不同位置(如 a, b, c 三点)受到的电场力 $\mathbf{F}$ 大小和方向皆不同,这说明电场的强弱和方向与空间位置有关。在同一点(如 a 点)考察带不同电量的电荷受到的静电力时,实验结果证明,检验电荷受到的力与检验电荷带的电量 q_0 大小成正比,但其比值 $\mathbf{F}/q_0$ 却保持不变,是一常数。这说明在某一确定空间点的电场性质不因检验电荷的不同而不同, $\mathbf{F}/q_0$ 反映了被检验电荷产生的电场本身的属性,我们把它称为电场的**电场强度**,并用 $\mathbf{E}$ 来表示,即

$$\mathbf{E} = \mathbf{F}/q_0 \quad (1-5)$$

式(1-5)定义了电场的电场强度,即电场中一确定场点的电场强度等于该点处的单位正电荷所受到的静电力。实验发现不同场点上的电场强度大小和方向各不相同,所以电场强度是空间位置的矢量函数,可表示为 $\mathbf{E} = \mathbf{E}(x, y, z) = \mathbf{E}(\mathbf{r})$ 。在国际单位制中,电场强度的单位为 N/C 或 V/m 。这样,如果一个电场的空间分布确定,则在该电场中,点电荷 q 的受力可以由 $\mathbf{F} = q\mathbf{E}$ 来表示。下面我们举例讨论几种分布的电荷产生的电场的电场强度。

三、应用举例

1. 点电荷的电场

在电量为 q 的点电荷周围空间置入一个电量为 q_0 的检验点电荷,根据库仑定律,该检验电荷受到的力为

$$\mathbf{F} = \frac{qq_0}{4\pi\epsilon_0 r^2} \mathbf{e}_r \quad (1-6)$$

再利用电场强度的定义式(1-5)可得

$$\mathbf{E} = \frac{\mathbf{F}}{q_0} = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r^2} \mathbf{e}_r \quad (1-7)$$

式(1-7)就是单个点电荷产生的电场在空间点 $\mathbf{r}$ 处的电场强度表达式。明显地,电

场强度的大小与距离平方成反比,方向与电荷的正负性质有关。正电荷产生电场的电场强度方向从正电荷出发指向场点,负电荷产生的电场方向相反,如图 1-2 所示。

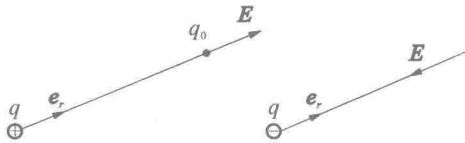


图 1-2

2. 点电荷系的电场

对于由 $q_1, q_2, \dots, q_i, \dots, q_N$ 组成的电荷系,根据力叠加原理,检验电荷 q_0 受到的力为

$$\mathbf{F} = \sum_i \mathbf{F}_i \quad (1-8)$$

根据电场强度的定义式(1-5)有

$$\mathbf{E} = \frac{\sum_i \mathbf{F}_i}{q_0} = \sum_{i=1}^N \frac{\mathbf{F}_i}{q_0} = \sum_{i=1}^N \mathbf{E}_i \quad (1-9)$$

将式(1-7)表示的单个点电荷产生的电场强度表达式代入式(1-9)有

$$\mathbf{E} = \sum_{i=1}^N \frac{q_i}{4\pi\epsilon_0 r_i^2} \mathbf{e}_{r_i} \quad (1-10)$$

式(1-10)就是点电荷系产生电场的电场强度表达式。

如果电荷连续分布在一个物体内部(或者表面),而这个物体又不能视为点电荷,则这个带电体(面、线)可以视为由无穷多个线度无限小的元电荷 dq 构成。将每个元电荷视为点电荷,则元电荷产生的电场强度为

$$d\mathbf{E} = \frac{dq}{4\pi\epsilon_0 r^2} \mathbf{e}_r \quad (1-11)$$

积分式(1-11)可以得到连续分布的电荷系统的电场强度为

$$\mathbf{E} = \int d\mathbf{E} = \int \frac{dq}{4\pi\epsilon_0 r^2} \mathbf{e}_r \quad (1-12)$$

3. 电偶极子产生的电场

两个相距很近、电量相等、符号相反的电荷组成的系统,称为电偶极子。假设电偶极子中一个点电荷带的电量为 q , 另一个电量为 $-q$, 且它们之间的距离为 l , 指定 l 的方向从 $-q$ 指向 q , $\mathbf{p} = q\mathbf{l}$ 定义为电偶极子的电偶极矩。下面分别计算电偶极子在其延长线上和垂直轴线上的电场强度。

设这对电荷的带电量分别为 $+q$ 和 $-q$, 如图 1-3 所示。根据式(1-9)和式(1-10),有

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_+ + \mathbf{E}_- = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r_+^2} \mathbf{e}_{r_+} + \frac{-q}{4\pi\epsilon_0 r_-^2} \mathbf{e}_{r_-} \quad (1-13)$$

式(1-13)是矢量求和式,原则上我们可以根据式(1-13)计算空间任一点的电场强

度,但由于任意点电场的方向随位置变化而变化,用电场叠加原理计算有一定的困难。我们暂且把研究的焦点放在两电荷的延长线和中垂线上。

1) 两异号电荷延长线上点的电场强度

以两电荷连线中点为坐标原点 O ,以该连线为 x 轴建立如图 1-3 所示坐标。 r 为两电荷延长线上点 A 到 O 的距离,对于这种情形,有

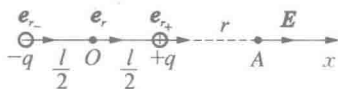


图 1-3

$$e_{r_+} \equiv e_{r_-} = e_r, \quad r_+ = r - \frac{l}{2}, \quad r_- = r + \frac{l}{2} \quad (1-14)$$

将式(1-14)代入式(1-13)可得

$$E = E_+ + E_- = \left[\frac{q}{4\pi\epsilon_0 \left(r - \frac{l}{2}\right)^2} + \frac{-q}{4\pi\epsilon_0 \left(r + \frac{l}{2}\right)^2} \right] e_r \quad (1-15)$$

考虑 $r \gg l$ 的点,简化式(1-15)可得

$$E = \frac{ql}{2\pi\epsilon_0 r^3} e_r \quad (1-16)$$

因为我们把距离保持相对不变的两个点电荷称为电偶极子,并定义

$$p = ql e_r \quad (1-17)$$

为电偶极子的电偶极矩,其中 e_r 是从负电荷指向正电荷的单位矢量,所以式(1-16)又可以表示为

$$E = \frac{p}{2\pi\epsilon_0 r^3} \quad (1-18)$$

式(1-18)说明电偶极子在其延长线上产生的电场的电场强度大小与电偶极矩的大小成正比,与空间点到偶极子的距离的三次方成反比,其方向与偶极矩方向相同。

2) 两异号电荷中垂线上的电场强度

对于这种情形,我们以两电荷连线中点为原点,以该连线为 x 轴,以垂直于该连线的直线为 y 轴,建立直角坐标 $O-xy$,如图 1-4 所示,设 r 为中垂线上点 B 到坐标原点 O 的距离,有

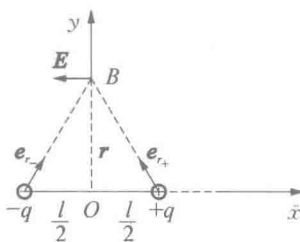


图 1-4

$$e_{r_+} = \frac{l/2}{\left[r^2 + \left(\frac{l}{2}\right)^2\right]^{1/2}} (-i) + \frac{r}{\left[r^2 + \left(\frac{l}{2}\right)^2\right]^{1/2}} j$$

$$\mathbf{e}_{r-} = \frac{l/2}{\left[r^2 + \left(\frac{l}{2}\right)^2\right]^{1/2}} \mathbf{i} + \frac{r}{\left[r^2 + \left(\frac{l}{2}\right)^2\right]^{1/2}} \mathbf{j}, \quad r_{+,-}^2 = r^2 + \left(\frac{l}{2}\right)^2 \quad (1-19)$$

将式(1-19)代入式(1-13)可得

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_+ + \mathbf{E}_- = -\frac{ql}{4\pi\epsilon_0 \left(r^2 + \frac{l^2}{4}\right)^{3/2}} \mathbf{i} \quad (1-20)$$

考虑 $r \gg l$, $p = qli$ 可得

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_+ + \mathbf{E}_- = -\frac{ql}{4\pi\epsilon_0 r^3} \mathbf{i} = -\frac{\mathbf{p}}{4\pi\epsilon_0 r^3} \quad (1-21)$$

式(1-21)就是电偶极子在其中垂线上电场的电场强度表达式。该式说明电偶极子在其中垂线上产生的电场的电场强度大小与电偶极矩的大小成正比,与空间点到偶极子的距离的三次方成反比,是延长线上电场强度大小的一半,其方向与偶极矩方向相反,如图1-4所示B点的电场。

两异号电荷在任意点的电场强度将在电势概念讲解以后补充。

4. 电荷线密度为 λ 的无限长均匀带电直线产生电场的电场强度

分析 由于电荷连续分布在无限长的导线中,需要首先在该直线上取一个元电荷 dq ,然后把已知条件代入式(1-12),并积分该式,以获得无限长带电直线产生电场的电场强度代数表达式。为了数学处理方便,我们需要建立以下坐标。

以该直线上任一点为坐标原点 O ,沿该直线方向为 y 轴,过 O 垂直该带电直线的直线为 x 轴,建立如图1-5所示的坐标。这样位于 y 轴上的元电荷 dq 可表示为

$$dq = \lambda dy \quad (1-22)$$

场点与 dq 之间的距离 r 为

$$r = (x^2 + y^2)^{1/2} \quad (1-23)$$

式(1-12)中表示方向的 $\mathbf{e}_r$ 可写为

$$\mathbf{e}_r = \frac{x}{(x^2 + y^2)^{1/2}} \mathbf{i} - \frac{y}{(x^2 + y^2)^{1/2}} \mathbf{j} \quad (1-24)$$

将式(1-22)、式(1-23)和式(1-24)代入式(1-12)可得

$$\mathbf{E} = \int \frac{dq}{4\pi\epsilon_0 r^2} \mathbf{e}_r = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\lambda}{4\pi\epsilon_0} \frac{(x\mathbf{i} - y\mathbf{j})}{(x^2 + y^2)^{3/2}} dy \quad (1-25)$$

式(1-25)中的被积函数的第二项是关于原点的奇函数,所以第二项积分为零,故

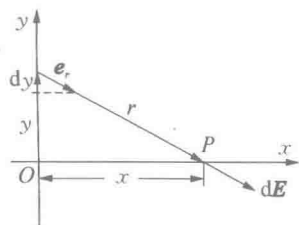


图1-5

$$E = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\lambda}{4\pi\epsilon_0} \frac{x \mathbf{i}}{(x^2 + y^2)^{3/2}} dy = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0 x} \mathbf{i} \quad (1-26)$$

式(1-26)就是无限长带电直线在它周围空间产生电场的电场强度分布。由于 x 代表空间点到该直线的垂直距离,因此该电场强度的大小与距离成反比。这样,在与带电直线同一个垂直距离的圆柱面上电场强度大小相等,方向垂直于柱面。因此,我们说无限长的带电直线产生的电场具有柱对称性。

四、电场与电场强度概念的科学意义及影响

最初,人们在研究电现象时,曾经认为电荷间的相互作用是电荷自身的特性,电荷与电荷之间的作用是超距作用。法拉第电场概念的提出对传统科学观念是一个重大突破。场的概念抛弃了超距作用观,把近距媒介传递作用观引进物理学中,对于整个电磁学以及物理学的发展都产生了深远的影响。它很好地解决了这些问题:① 电荷之间的作用力是以什么为媒介的;② 电能存储于什么地方;③ 为什么变化的磁场自身不存在电荷,却能对其他电荷产生力的作用,等等。

人类长时间把电与磁当成存在一定联系的两种不同事物来分别进行研究,走了不少弯路。直到电场被提出后,人们才真正踏上了研究“电磁学”的正轨。所以劳厄说,法拉第是正确理解电磁现象的带路人。

可能有人认为,电场只属于物理中很小的一个部分,但是实际上,我们研究的绝大多数力的本质都是电场力。摩擦力与弹力的本质主要是电场力;生化反应的动力是电场力;电学中包括电流、电压在内的几乎所有现象都由电场引起;磁场是由变化的电场所产生的;电场也是电磁波的重要组成部分。在物理学的终极目标大统一理论的研究中,弱、强、电三种基本作用力已被统一。可以说,电场其实涵盖了自然科学中绝大部分的内容。

五、静电场在工农业中的应用

静电场在工农业生产和日常生活中有很多应用。在工业方面,静电场在电力、机械、轻工、纺织、航天航空以及高科技领域都有广泛的应用。例如,静电纺纱是美国1949年首先进行研究的自由端新型纺纱技术,现在已大量用于纺纱工业;静电喷涂是利用静电吸附作用将聚合物涂料微粒涂敷在接地的金属物体上,然后将其送入烘炉以形成厚度均匀的涂层;静电复印是利用静电感应使带静电的光敏材料表面在曝光时,按影像使局部电荷随光线强弱发生相应的变化而存留静电潜影,经一定的干法显影、影像转印和定影而得到复制件,具有简便、迅速、清晰、可扩印和缩印,还可复印彩色原件等优点。在农业方面,静电喷雾能大大提高效率和降低农药的使用,既经济又环保;静电处理的种子抗病能力强,可减小病害发生,而且发芽率高,产量得到了提高;静电放电产生的臭氧是强化剂,有很强的杀菌作用,经过静电处理的水,既能杀菌