

高中物理专题分析丛书

电场与磁场

刘雪成

高中物理专题分析丛书编委会

- 主 编 陈熙谋
副 主 编 周誉蔼
编 委 (汉语拼音为序)
- 陈熙谋 北京大学
洪安生 北京市海淀区教师进修学校
缪钟英 四川联合大学
彭前程 人民教育出版社
施桂芬 上海教育出版社
王天谔 北京市东城区教育教学研究中心
张大昌 人民教育出版社
周誉蔼 北京十五中
- 本册作者 刘雪成 首都师范大学
本册审稿 张三慧 清华大学
梁竹健 北京师范大学
王 琦 中国人民大学附属中学

如发现印、装质量问题，影响阅读，请与出版社联系调换。

(联系地址：北京市方庄小区芳城园三区 13 号楼 邮编：100078)

前 言

全面推进素质教育，是当前我国现代化建设的一项紧迫任务，是我国教育事业的一场深刻变革，是教育思想和人材培养模式的重大进步。实施面向 21 世纪中小学教师继续教育工程，提高教师的素质，是全面推进素质教育的根本措施。

实施中小学教师继续教育，课程教材建设是关键。当务之急是设计一系列适合中小学各学科教师继续教育急需的示范性课程，编写一批基础性教材。

我司根据教育部《中小学教师继续教育课程教材建设方案》的统一规划，参考《中小学教师继续教育课程开发指南》，以中学物理教师继续教育课程教材建设引路，在调查研究和总结经验的基础上，首先设计急需的示范性课程，编制课程标准，经专家审定后，作为编写教材的依据。我们在设计示范性课程及课程标准时，遵循了以下原则：1. 从教师可持续发展和终生学习的战略高度，在课程体系中，加强反映现代科学技术的发展和应用的课程，加强中学物理专题研究的课程。2. 把教育理论和教师教育实践经验的总结与教育实践活动的改进密切结合。用现代教育观念和理论方法，优秀课堂教学范例，从理论和实践的结合上，总结教学经验，提高教师教学能力，推动教育改革，落实素质教育。3. 适应教师培训模式改革的需要，有利于培养教师的创造精神和主观能动性。4. 注意有效，即实效性。有限，即适量性。有别，即层次性。有序，即科学合理的系统性。兼顾整体性与个体性，科学性、先进性与针对性相统一，灵活性与统一性相结合。

根据专家审定的中学物理教师继续教育示范性课程和课程标

准，编写9种基础性教材：《初中物理专题分析》、《高中物理专题分析》、《初中物理教学设计》、《高中物理教学设计》、《中学物理与现代科技》、《物理学发展中的创新思维选例》、《中学物理实验教学与自制教具》、《中学教师物理教育研究方法》、《中学活动课指导》。这些教材从今年秋季开始陆续出版。中小学教师继续教育语文、数学，中学教师继续教育英语、化学、生物，小学教师继续教育自然、社会等7个学科2~3种急需的示范性课程以及课程标准的设计已经启动，相应的教材将于明年底出版。同时我们还从全国推荐的中小学教师继续教育教材中，组织专家评审筛选一批优秀教材和教学参考书。上述这些教材和新编的基础性教材将向全国教师进修院校、教师培训基地、中小学教师推荐，供开设中小学教师继续教育相关课程时选用。根据继续教育的需要，我们还将继续设计开发新的课程和教材。

中小学教师继续教育教材建设是一项系统工程，尚处在起步阶段，缺乏足够的经验，肯定存在许多问题。各地在使用教材过程中有什么问题和建议，请及时告诉我们，以便改进工作，把课程教材建设提高到一个新水平。

教育部师范教育司

一九九九年六月二十四日

主编的话

唐代著名的文学家、教育家韩愈在他著名的教育论著《师说》中指出，教师的基本任务有三：传道、授业、解惑。按照今天的理解，传道包含了传授做人的道理和治学研究的方法，授业就是讲解有关的专业知识，解惑就是解答学习中遇到的问题，这三者构成了当今实施素质教育的基本要素。

一个有责任感的教师在备课中总是不断地思考和研究传道、授业和解惑三者的统一，不断思考和研究如何才能使学生更好地理解和掌握教学内容，领悟治学研究的方法，从而迸发出创新的火花。这种思考和研究永无止境，而且也正是在这种思考和研究中，教师得到磨炼而更加干练和成熟。

呈现在读者面前的这套《初中物理专题分析》和《高中物理专题分析》丛书，是教育部师范司下达任务，人民教育出版社组织有经验教师撰写的中学物理教师继续教育教材的一种。作者们搜集了中学物理教学中可能出现的问题，有些是教师教学进一步深入可能会遇到的问题，有些则可能是学生进一步思考提出的问题，把它们组织起来，以更高层次的观点、近代物理的观点审视和给以分析。这不仅成为广大中学教师备课的好帮手，而且作为一种范例，它也是引导广大教师深入开展教学研究，并通过教学研究提高自身素养的好途径。

需要指出，《专题分析》只是就教学中可能遇到的问题作了分析，对于教师如何正确理解提供了说明，这并不是说要求教师原封不动地把这些专题分析搬到课堂教学中去给学生讲授。须知课堂讲授应根据教学大纲（或课程标准）的要求进行，随意改变教学大纲

(或课程标准)的要求,增加教学的深度和难度,从而增加学生的负担都是不适宜的和不可取的.诚然,《专题分析》中有些专题及其分析适于渗透在课堂教学中给学生讲解,有些适于对学生作个别解答,有些则适于组织学生课外学习探寻正确答案.这里存在一个掌握分寸的问题.

我们希望这套《专题分析》丛书能够切实解决广大中学教师教学中遇到的问题,并受到欢迎.

目 录

一、概述	(1)
1. 电场和磁场在中学物理教学中的地位与作用	(1)
2. 中学电场和磁场教学中若干问题的讨论	(4)
二、库仑定律的剖析与表述	(6)
1. 库仑定律	(6)
2. 库仑定律在空间充满均匀介质中的表述形式	(7)
3. 电荷静止是对观察者而言的	(8)
4. 非点电荷的库仑定律与叠加原理	(10)
5. 关于库仑定律的空间适用范围	(11)
6. 平方反比律的精度有多高? 平方反比律与光子静质 量为零的关系	(12)
7. 库仑定律涵义的确切理解	(15)
三、电荷、电荷守恒定律	(17)
1. 电荷的最小单位是什么?	(17)
2. 电荷守恒定律的发展与表述	(18)
四、电磁场的物质性 场的叠加性	(21)
1. 谁是电磁作用的传递者?	(21)
2. 电磁场具有物质性吗?	(22)
3. 场强定义的客观性与普适性	(25)
4. 场强的叠加原理	(27)
五、静电场的基本性质和规律	(34)
1. 高斯定理——静电场的有源性	(35)
2. 环路定理——静电场的保守性	(36)

3. 电场线性质与应用的讨论	(37)
六、电势差 电势 电势零点选取任意性中的原则	(44)
1. 电势差的定义	(44)
2. 从电势差到电势	(46)
3. 电势叠加原理	(47)
4. 关于电势零点选取任意性中的原则	(47)
5. 一个需要澄清的概念	(51)
6. “场强 E 是指向电势减少方向” 的说法严格吗?	(53)
七、电容器和电容	(55)
1. 组成电容器的两个导体应是不受外界环境影响的 静电独立系统	(56)
2. 电容器两极板所带电量不等量异号时, 怎样定义 它的电容呢?	(59)
八、有关磁场问题的讨论	(64)
1. 磁性起源于电流吗?	(65)
2. 磁场的方向是怎样确定的?	(66)
3. 为什么说磁感应强度 B 是赝矢量?	(66)
4. 怎样定义磁感应强度矢量 B ?	(67)
5. 磁场的特性是什么? 比较电场线与磁感线	(70)
6. 涡旋场的场线一定是闭合的吗?	(73)
九、是动生电动势还是感生电动势?	(75)
十、感应电动势在简单电路中的作用的讨论	(80)
1. 问题之一	(80)
2. 问题之二	(82)
3. 问题之三	(83)
十一、关于洛伦兹力问题的讨论	(86)
1. 电荷的运动速度 u 相对于什么参考系?	(87)
2. 论证 u 是电荷相对于观察者的运动速度	(88)

3. 洛伦兹磁力与安培力的关系	(91)
4. 磁场力做功, 能量来自何处?	(96)
十二、电磁场屏蔽问题的讨论	(98)
1. 磁路定律	(98)
2. 静磁屏蔽	(99)
3. 高频电磁场的屏蔽	(100)

1. 电场和磁场在中学物理教学中的地位与作用

在当前教育改革中，一个首要的课题是尽快摆脱应试教育的枷锁，跨越上素质教育的康庄大道。应试教育的一大弊端是培养的学生偏于高分低能，读死书、读书死和死读书，缺乏创新精神和创造能力。在经济全球一体化激烈竞争的新世纪里是难于适应、难于立足更难于取胜。为迎接二十一世纪的新时代，加强教育改革的力度，向素质教育转轨是英明之举，培养德智体美全面发展的新型人才，在智育方面绝不是低于应试教育的水平，恰恰相反，而是大大高于应试教育的水平。学生从被动学习转化为主动学习，从被动地接受知识转化为主动地攫取知识，创造一种生动活泼主动的学习局面；反对生吞活剥的死记硬背，但绝不是不记不背，而是在理解深消化透的基础上水到渠成地记得准背得牢！这样的记和背越多越好！现代教育中不是提倡开发人的右脑吗？右脑就是主管形象思维和记忆功能等作用的。如果学习中该记不记该背不背，那岂不是成狗熊掰棒子吗？前边学后边丢，最后所剩无几！任何一个在科学上有成就的人，都是有很强记忆力的！要提高学生的物理科学素质，必须使教与学两方面在物理概念上多下功夫，对每个物理概念要准确把握、反复推敲、纵横比较才能达到透澈理解的程度，我们一贯认为物理概念是物理学的灵魂，物理规律是物理学的脊梁。如果教学中对物理概念不求甚解囫圇吞枣，只能落个概念不清难有所成的结局。应试教育的一大弱点是过分注重进行现成知识的灌输，而忽视对学生进行人类在创造这些知识过程中科学精神、科学方法和创新能力的培养。在中学物理教学中，使学生牢固地掌握物理概念和

1

电
场
与
磁
场

物理规律既应当作为教学目的，又应当作为一种教育手段。通过物理知识的学习了解创造这些知识的科学精神和科学方法。吸取其中的科学养分，提高学生的科学文化素养，培养自己成为具有开拓创新精神的一代新人才是我们物理教育的最终目的。

从电磁学的内容及其在教学中的地位来看，在提高学生的科学文化素质方面应该而且能够发挥重要作用。经典电磁场理论是研究电磁运动规律及电磁场与电荷相互作用规律的理论。反映电磁场运动规律的是麦克斯韦电磁场方程，代表场与电荷相互作用的是洛伦兹力公式。它在经典物理学中是既古老又年轻的一个重要分支。说它古老是因为它的研究范围包括静电场、磁场、电磁感应、电磁振荡、电磁场与电磁波以及交直流电路。这些都是在十九世纪即已成熟的理论体系，在生产科研实践中的成功应用，推动了人类社会发生了划时代的巨大进步；说它年轻不仅由于黑体的电磁辐射的研究促成了量子物理的横空出世或电磁场方程组与伽利略坐标变换的矛盾导致相对论的诞生，而且电磁场理论的触角已经延伸到粒子物理和规范理论以及弱相互作用与电磁相互作用统一理论等现代物理的各个领域。不仅如此，电磁场理论在宇宙演化的研究中也扮演着重要角色。

由“场”和“路”构成的电磁学中，路是具体的，场则比较抽象，但是直流电路也好，交流电路也好，它们的理论基础都是相应的电场或电磁场，通过交直流电路的研究掌握电磁场的性质与规律，牢固地树立场的观念，用场的观点来分析一切电磁现象，在中学物理阶段就要打好这一基础，必将受益匪浅。

回溯历史，场的观念是英国出色的物理学家法拉第首先引入电磁学中的，法拉第对电磁现象进行了广泛深入地研究之后才逐渐形成了场的观念。在他的巨著《电学的实验研究》中没有一个数学公式，但有深刻的物理思想，他认为电荷与电流的出现就使空间的状态发生变化，这种变化是物质性的，他用电力线和磁力线来表达变

化后空间的状态. 这就是电、磁场. 法拉第对电磁学作出了巨大的贡献, 其中最重要的是电磁感应定律. 电磁感应定律的发现无论在电磁理论上还是在促进人类社会方面都产生了历史性深远影响. 另一位杰出的英国物理学家麦克斯韦就是在法拉第电磁感应定律基础上又创造性地提出, 变化的磁场在周围空间激发涡旋电场, 变化的电场在周围空间激发涡旋磁场, 并概括了库仑定律以后全部电磁规律, 建立了电磁场理论的完整体系——麦克斯韦方程组.

从麦克斯韦方程组可进一步导出电磁场的变化以波的形式传播, 预示了电磁波的存在. 麦克斯韦在 1862 年发表的题为《论物理力线》的论文中, 不仅提出存在电磁波, 并且指出光就是电磁波. 这些理论预言在十余年后于 1888 年被德国物理学家赫兹的实验所证实. 既证实了电磁波的存在, 也证实了电磁波速度和光速完全一样, 光的本性就是电磁波. 实验证实, 电磁波波谱覆盖很广, 从波长最长的无线电波波段、微波波段、红外波段、可见光、紫外线、X 射线直到波长最短的 γ 波段. 从电磁场完整理论的建立及各项预言被逐个证实, 是电磁场理论的黄金时代, 是登峰造极的年代, 但是科学的发展告诉我们, 任何一个真理都是相对的, 她只在一定的条件下成立, 越出这个范围就是不对的, 电磁理论在宏观范围内是成立的, 到原子尺度微观领域就必须由量子物理或量子场论所代替.

最后, 我们再次强调在中学电磁场教学中能实现掌握知识和培养能力相结合的原则, 能力包括有许多种, 如感受能力、观察能力、实验动手能力、抽象概括能力, 实践与创新能力等, 但最重要的能力则是物理思维能力, 这是新世纪科技人才应具备的一种有发展潜力的能力, 培养学生物理思维能力就要教给学生研究物理学的方法, 逐步学会独立思考独立分析, 才能成为新知识的开拓者.

2. 中学电场和磁场教学中若干问题的讨论

静电现象是整个电磁现象的基础，虽说它是电磁现象中最简单的部分，但也是最抽象和概念性最强的部分。静电场是继引力场之后教学中所面临的又一次讨论场的问题。众所周知，场也是物质，它是物质存在的一种形式，但是如果我们只局限在静电范围内，对它的客观真实性及其物质性，确实找不到一个实验能够作为一锤定音的判据。静电场是整个电磁理论的排头兵。库仑定律是一个地地道道的实验定律。它是描述两个静止电荷之间相互作用的规律，它是建立静电场概念的基础，也是电磁学中一个最古老的实验定律。即便如此，它的涵义也是相当丰富的，只有彻底弄清了它的涵义之后才能掌握它。诸如，什么是静止电荷？电荷相对于谁静止？两个电荷必须都静止吗？只让一个电荷静止行吗？哪个电荷必须静止？哪个电荷可静可动？库仑定律是对点电荷而言的，如果是体电荷该怎么办？叠加原理的根据是什么？平方反比律是实验结果，实验总有一定的精度限制，那么实验的精度有多高？如果定律分母 r 的指数与 2 有偏离的话，那将对物理学产生什么影响？任何规律都是相对真理各有一定适用范围、库仑定律的适用范围如何？怎样理解库仑定律的确切涵义？诸如此类的问题在教学实践中应该逐步弄明白。有些内容是属于书本之外文字背后的东西。前面提到，“场”与“路”比较起来，应该把场摆在起主导作用的首位，我们说场也是物质存在的另一种形式，这种说法的科学根据是什么？场是电磁作用的中介传递者，那它传递的具体物质是什么？现代科学对这个问题是怎样解释的？叠加原理是一个理论上很重要、实践中很得力的原理，作用力遵从叠加原理，场强遵从叠加原理，电势也遵从叠加原理，那场的能量却不遵从叠加原理！那是为什么？我们知道，电磁场中电场线和磁感线等都是人为虚构的，实际上并不真实存在

的，它是为描述电磁场性质而引入的一种工具，我们能不能扩大这个工具的用途？用它来分析讨论一些电磁现象和问题？辐射状的场线可以表述有源的保守场，闭合场线可以表述涡旋场，反过来，表示涡旋场一定必须用闭合力线吗？辐射状场线一定不能表示涡旋场吗？电势与电势差是表述保守场的特有物理量，它们两个究竟哪个应该摆在第一位？哪个摆在第二位？电势零点的选取为什么具有任意性？任意性中有没有一些原则？为什么通常都取地球电势为零？只要导体一接地导体的电量就一定为零吗？场强 E 的方向是沿电势减少的方向，这种说法确切吗？构成电容器的两个导体应该是不受外界干扰的静电独立体系，如果受到外界干扰对电容器有什么影响？电容器两极板一定带等量异号电荷，假设两板带电不是等量异号，怎样定义它的电容呢？电容器的电容最终由什么因素决定？磁场的方向性是怎样确定的？为什么比确定电场方向要复杂呢？就电场与磁场的方向比较，场强 E 与 B 二者的矢量性质有什么区别？洛伦兹力公式电荷运动速度是相对于什么参考系来说的？常说安培力是洛伦兹力的宏观表现，洛伦兹力是安培力的本质，但安培力可以做功，而洛伦兹力永远不做功。这个做功与不做功的矛盾怎样解决呢？动生电动势的机制是洛伦兹力的作用，感生电动势的机制是感生的涡旋电场作用结果，二者截然不同，但从相对论角度分析，二者的界限还这样森严壁垒吗？引力场可以局部消除（失重状态），静电场可以很容易屏蔽，磁场能够屏蔽吗？

以上这些问题以及其他一些相关问题，都在本书中进行详细的分析和讨论，希望对中学物理教学有所裨益，当然，涉及到电场与磁场教学问题还有很多很多，以上只猎取其中一小部分进行研究讨论，由于水平所限，分析讨论中不可避免的会有不妥之处，敬请同行朋友不吝指正，不胜感激！

二 库仑定律的剖析与表述

1. 库仑定律

库仑定律是一个相当重要的实验定律，它不仅奠定了静电学的基础，也是整个电磁理论的首要支柱，甚至应该说是物理学的基本定律之一。库仑定律所阐述的是真空中两个处于静止状态的点电荷之间相互作用的规律。一般教材中的表述是：真空中两个静止的点电荷 q_1 和 q_2 之间的相互作用力的大小与各自的电量 q_1 及 q_2 成正比，与它们之间距离 r 的平方成反比，作用力的方向沿着它们的连线，同号电荷相斥、异号电荷相吸。即

$$\mathbf{F}_{12} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} \hat{\mathbf{r}}_{12} \quad (2.1)$$

\mathbf{F}_{12} 代表 q_1 给 q_2 的作用力。 q_1 称施力的源电荷， q_2 是受力电荷。 $\hat{\mathbf{r}}_{12}$ 表示从 q_1 到 q_2 方向的单位矢径。 ϵ_0 是真空的介电系数。

从库仑定律(2.1)式的表述来看，它是一个平方反比定律，相互作用力是指作用力与反作用力是等值反向遵从牛顿第三定律的。此外还有三个条件的限制：即限制在真空中， q_1 与 q_2 都是点电荷、 q_1 与 q_2 都处于静止状态。这就从正面告诉我们，库仑定律的内容是很丰富的、所涉及到的问题也是广泛的。我们围绕以下几个问题对库仑定律进行剖析和表述：

1. 如果不是真空，空间充满均匀介质时将如何？
2. 电荷静止是相对于谁而言呢？如果只有一个电荷静止，另一电荷运动将如何？
3. 如果不是点电荷，而是带电体怎么办？
4. 库仑定律的空间适用范围怎么样？

5. 平方反比的精度有多高? 平方反比律与光子的静质量为零的必然联系.

6. 库仑定律精确含义的准确表述.

下面对上述问题逐个进行讨论.

2. 库仑定律在空间充满均匀介质中的表述形式

(2.1)式适用于真空状态电荷间相互作用. 但经常遇到的是空间中有介质存在, 最简单的介质是空气. 当电荷 q_1 与 q_2 两个点电荷处于均匀无限大流体介质中时, 它们之间的相互作用力就不再是(2.1)式, 理论与实验都证实, 库仑定律表述形式将变为

$$F_{12} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon_r} \frac{q_1 q_2}{r^2} \hat{r}_{12} \quad (2.2)$$

式中 $\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$, ϵ 称作介质的介电系数. ϵ_r 是介质的相对介质系数, 其值 $\epsilon_r > 1$, 空气最小 $\epsilon_r = 1.0005$, 水的 $\epsilon_r = 78$, 铁电体钛酸钡介电系数很大, ϵ_r 可达 $10^3 \sim 10^4$. (2.2)式就是介质中库仑定律的表述形式. 这种变形结果, 从库仑定律(2.1)式及力的叠加原理出发可以证明如下: 处于介质中的点电荷 q_1 与 q_2 都要使介质产生相应的异性宏观极化电荷 q_1' 与 q_2' . 由电磁理论可以证明, q_1' 与 q_2' 的符号及大小分别为

$$\left. \begin{aligned} q_1' &= -\left(1 - \frac{\epsilon_0}{\epsilon}\right) q_1 \\ q_2' &= -\left(1 - \frac{\epsilon_0}{\epsilon}\right) q_2 \end{aligned} \right\} \quad (2.3)$$

并紧紧地均匀包围着点电荷 q_1 与 q_2 . 因此, q_1' 对 q_1 的作用力为零; 同理, q_2' 对 q_2 的作用力也是零. 这样一来 q_1 所受到点电荷的作用力, 一个是点电荷 q_2 , 另一个是 q_2 在其邻域产生的极化电荷 q_2' . q_2' 本来匀分在 q_2 邻域小球面上, 但其对 q_1 的作用等效于集中

7

电场与磁场

在球心 q_2 处.

同理

$$\left. \begin{aligned} F_1 &= \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon_0 r^2} + \frac{q_1 q_2'}{4\pi\epsilon_0 r^2} \\ F_2 &= \frac{q_2 q_1}{4\pi\epsilon_0 r^2} + \frac{q_2 q_1'}{4\pi\epsilon_0 r^2} \end{aligned} \right\} \quad (2.4)$$

将式(2.3)代入式(2.4), 稍加整理, 可得(2.2)式的形式, 与(2.1)式相比, 只不过用介质的介电系数 ϵ 取代了真空的介电系数, 比真空中库仑力要小, 是真空中作用力的 $1/\epsilon_r$ 倍.

3. 电荷静止是对观察者而言的

电荷处于静止状态这句话不能只理解为两个点电荷之间相对静止. 必须正确地理解为电荷是相对于观察者是静止的. 在研究各种电磁现象中, 必须注意都是以观察者为参考系的. 在掌握了相对论之后, 这点是最清楚不过了. 两个点电荷都相对于观察者静止, 当然可以用库仑定律计算它们之间的相互作用力, 而且这对相互作用力遵从牛顿第三定律, 即二力大小相等方向相反作用在两个不同电荷且处于一条直线上. 如果现在情况有所变化, 其中只有一个点电荷静止, 另一点电荷相对于观察者运动起来. 这时它们之间的相互作用力是否还遵从库仑定律? 这时库仑定律是否完全失效了呢? 这要具体分析了, 静止电荷产生静电场仍保持原来的球对称分布, 没有因另一电荷的运动而发生任何变化, 因此, 运动电荷所受静止电荷的作用力仍十分准确的由库仑定律确定, 不过式中距离 r 是由运动电荷的瞬时位置决定. 但是反过来, 运动电荷对静止电荷的反作用力则不遵从库仑定律. 这是为什么呢? 我们可从以下三个方面来认识这个问题: 第一是有推迟效应存在, 运动电荷在相距 r 处产生电场需要经过 r/c 时间之后才能传播到静止电荷处, 而此一瞬时运动电荷又移到一个新的位置, 相距已经不再是 r 了. 而库仑定律中