

# 电磁学教学中值得关注的几个问题

陈秉乾, 王稼军, 张瑞明

(北京大学 物理学院, 北京 100871)

**摘要:**讨论了电磁学教学中的 3 个基本问题即非静电力与非静电场、电流的定义与分类以及有电介质时静电场场强的计算. 作者在文中阐述了自己的观点, 希望引起重视和讨论.

**关键词:**非静电力; 电流; 场强

**中图分类号:**O 441

**文献标识码:**A

**文章编号:**1000-0712(2010)06-0003-02

近年来, 在审稿、会议、交往等活动中, 了解到不少电磁学教学的情况, 收获很大, 但也同时感到有一些值得关注的基本问题有待澄清, 现撰述如下, 希望引起重视和讨论.

## 1 非静电力与非静电场

静止电荷产生的静电场对置于其中的电荷的作用力称为静电力或静电场力. 除静电力外, 其他能作用于电荷的力称为非静电力. 非静电力揭示了电现象与其他现象(磁、热、化学等)之间的联系, 提供了把其他形式的能量转化为电能的途径. 为了描绘各种非静电力做功的本领, 引入电源电动势  $\mathcal{E}$  的概念:

$$\mathcal{E} = \int_{-}^{+} \mathbf{K} \cdot d\mathbf{l} \quad \text{或} \quad \mathcal{E} = \oint \mathbf{K} \cdot d\mathbf{l}$$

(电源内)

式中  $\mathbf{K}$  是单位正电荷所受非静电力.

以上叙述, 历来并无争议. 但有些教材把“非静电力”改称“非静电场”, 把  $\mathbf{K}$  改写为  $\mathbf{E}_K$ , 称为非静电场的场强. “力”与“场”一字之差, 看似平淡无奇, 却值得推敲一番.

所谓“场”, 本是数学概念, 指的是在一定空间范围内连续分布的空间函数, 如温度场、压强场为标量场, 速度场、电流场为矢量场等等. 简言之, 场的特征是弥散性.

电磁场是一种特殊的物理场, 它除具有弥散性外, 还是区别于实物粒子的特殊形态的物质, 具有能量、动量, 具有自身的运动变化规律, 可独立存在, 可与实物粒子交换能量、动量, 甚至互相转化(如高能正、负电子对撞湮没成两个  $\gamma$  光子)等等. 另外, 电磁场能对其中的电荷、运动电荷施予电磁力, 是电磁作用的媒体物. 简言之, 电磁场的特征是弥散性、物质

性和电磁作用.

现在, 根据上述理解, 让我们来分析一下各种非静电力. 洛伦兹力是磁场对运动电荷的作用力, 是一种典型的非静电力, 但它并不具有弥散性和物质性. 金属棒两端因温度不同产生的电动势称为汤姆孙电动势, 它是自由电子从高温端向低温端热扩散引起的, 这种热扩散作用等效于一种非静电力; 当两种材料的金属接触时, 因自由电子数密度不同引起的扩散在接触面两端产生的电动势称为帕耳帖电动势, 这种密度扩散作用也等效于一种非静电力, 这两种非静电力都对电荷有作用力且具有弥散性, 但不具有物质性. 变化磁场产生的涡旋电场能对其中的电荷施予作用力, 又具有弥散性和物质性, 涡旋电场是各种非静电力中唯一同时具有电磁场 3 种特征的, 甚至即使其中没有电荷, 不显示电力, 但涡旋电场依然存在.

对以上 3 类非静电力的分析表明, 把洛伦兹力称为非静电场明显不恰当, 因为它与任何含义的“场”无关. 涡旋电场同时具有 3 种特征, 称之为非静电场可谓实至名归. 至于产生汤姆孙电动势和帕耳帖电动势的非静电力等等, 虽也具有弥散性, 称之为“场”似亦无妨, 但我们认为, 为了强调与涡旋电场的区别, 特别是为了正确理解麦克斯韦电磁场方程和洛伦兹力公式中总电场的含义, 还是称之为非静电力更为恰当. 如所周知, 麦克斯韦电磁场方程中的总电场  $\mathbf{E}$  是各种电荷(自由电荷, 极化电荷, 无论静止或运动)产生的电场与涡旋电场  $\mathbf{E}_{\text{旋}}$  之和, 其他非静电力概不纳入, 若将其他非静电力都称为非静电场, 就容易与  $\mathbf{E}_{\text{旋}}$  混同, 使得对总电场  $\mathbf{E}$  的理解产生歧义. 又如洛伦兹力公式  $\mathbf{F} = q\mathbf{E} + q\mathbf{v} \times \mathbf{B}$  中的  $q\mathbf{E}$  是电力, 其中  $\mathbf{E}$  是总电场, 与麦克斯韦方程中  $\mathbf{E}$  的含义

相同应包括  $E_{\text{旋}}$ , 若除  $E$  外还有非静电力  $K$ , 则应将  $qE$  扩展为  $q(E+K)$ , 其中  $qE$  与  $qK$  是两种不同性质的作用力, 不应混同, 因此将与  $E_{\text{旋}}$  其他非静电力  $K$  从称呼到符号都加以区别是十分必要的。

历史上<sup>[1]</sup>, 麦克斯韦在 1855 年发表的《论法拉第力线》一文中, 提出了“感应电动力”的概念, 用以解释电磁感应中因磁场变化产生的感应电动势. 与当时已知的各种非静电力一样, 感应电动力也是一种非静电力. 1861 年麦克斯韦在《论物理力线》一文中, 把“感应电动力”改称为“涡旋电场”(curl electric field, 也译为有旋电场), 这表明麦克斯韦认为, 与其他非静电力有所不同, 涡旋电场不仅是一种非静电力, 而且与静电场一样也是一种具有弥散性、物质性和电作用的“电场”, 它是变化磁场产生的、有旋的. 涡旋电场概念的提出意味着麦克斯韦发现了一种新的“电场”, 揭示了磁场与电场的联系, 据此, 麦克斯韦进而提出“位移电流”的概念, 认为变化电场(和各种电流一样)也能产生磁场, 从此确立了电场和磁场的内在联系, 导致电磁波的预言以及光波就是电磁波的论断. 由此可见, 非静电力与非静电场, 虽然只是一字之差, 却寓意深长.

还应指出, 非静电力特指作用于电荷的力, 例如万有引力, 虽然不是静电力, 但因其对电荷无作用, 故不属于非静电力.

## 2 电流的定义和分类<sup>[2]</sup>

电流是电磁学中的一个基本概念, 种类很多, 但因散见于各章, 往往阐述不够完整全面, 因此, 集中地加以讨论, 比较其同异是有益的.

许多教材(包括我们写的书)都把电流定义为“电荷的定向流动”. 实际上它指的是导体中的宏观传导电流. 由于电流概念十分宽泛, 一般的定义以不加任何限制, 删除“定向”为好, 即所谓**电流, 就是“电荷的流动”**.

电流有微观电流和宏观电流之区分, 后者是前者的统计平均效果, 是大量载流子的集体行为, 前者是后者的微观本质. 例如, 安培当年提出的“分子电流”就是典型的微观电流(详见下文). 宏观电流种类很多, 有传导电流、极化电流、位移电流(极化电流与变化电场之和)之区分, 此外还有运流电流、超导电流等, 下面逐一阐述其特点, 以供比较.

导体(如金属)内脱离分子、原子束缚可以宏观地自由运动的电子称为自由电子. 无外电场, 导体内自由电子作无规则的热运动, 没有占优势的方向, 无宏

观电流; 加外电场, 自由电子在热运动背景下沿电场方向的定向运动(称为漂移)形成的宏观电流称为传导电流. 其中, 自由电子与晶格的碰撞导致电阻并散发热量, 遵循欧姆定律与焦耳定律, 同时传导电流产生磁场. 简言之, 传导电流具有热效应和磁效应.

电介质即绝缘体内不存在自由电荷. 电荷都被束缚在分子内, 整个分子呈电中性. 就对外电场的响应而言, 可将电介质看作大量分子电偶极子的集合. 无外电场, 分子电偶极子取向随机, 宏观上处处电中性; 外加电场, 分子电偶极子在外电场作用下趋于整齐排列(与之对抗的因素是热运动), 产生宏观的面电荷分布, 内部非均匀处还可能出现宏观的体电荷分布, 这就是极化. 外电场不同, 极化的强弱不同. 因此, 如果外电场发生变化, 虽然极化电荷都被束缚在分子内并未宏观移动, 但分子电偶极子排列的整齐程度有所不同, 极化电荷的宏观分布有所变化, 其宏观效果等价于极化电荷的宏观移动, 由此形成的电流称为极化电流. 所以, 极化电流只在非恒定条件下才在电介质中出现. 极化电流具有磁效应, 对于铁电体, 在反复极化的过程中有介质损耗.

就对外磁场的响应而言, 磁介质分子相当于微观的分子电流, 它是分子内电子绕核轨道运动、电子自旋、核自旋等的综合等效效果. 无外磁场, 各分子电流取向随机, 平均而言相互抵消, 磁介质内并无宏观电流, 不显磁性. 外加磁场, 磁介质分子趋于整齐排列, 由此形成的宏观电流称为磁化电流. 当然, 分子电流中的运动电荷都被束缚在分子内, 不能宏观移动, 磁化电流也是等效的宏观效果. **磁化电流有磁效应, 无热效应, 对于铁磁质, 在反复磁化的过程中有磁滞损耗.**

麦克斯韦把极化电流与变化电场之和称为**位移电流**, 尽管其中的变化电场与电荷的运动毫不相干, 但因变化电场(和各种电流一样)也能产生磁场, 也具有磁效应, 所以把它纳入广义的“电流”之中.

带电粒子束在空间运行形成的电流称为运流电流, 有磁效应, 无热效应.

超导体内超导电子(库珀对)运行形成的电流称为超导电流, 无电阻, 不散热, 有磁效应. 正常电流遵循的欧姆定律为  $j_e = \sigma E$ , 超导电流与电场的关系为  $\frac{d}{dt} j_s \propto E$  (伦敦第一方程), 两者截然不同.

总之, 磁效应是一切电流(包括变化电场)的共性, 其余可有所不同.

介绍给物理系高年级学生不但有必要而且成为可能. 这里我们将两者联系起来,对开拓学生的思路会有很大帮助.

### 参考文献:

- [1] 曾谨言. 量子力学:卷II [M]. 北京:科学出版社,2007: 210-218.

- [2] Tang Z, Finkelstein D. Geometric phase of polarized hydrogenlike atoms in an external magnetic field [J]. Phys Rev Lett, 1995, 74(16): 3134-3137.
- [3] Orszag M. Quantum Optics: Including Noise Reduction, Trapped Ions, Quantum Trajectories, and Decoherence [M]. Berlin, Heidelberg: Springer, 2000: 85-88.

## Geometric phase in the Jaynes-Cummings model

CUI Hui-chai, YAN Xue-qun

(Department of Physics, School of Science, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300160, China)

**Abstract:** By means of the concept of the Aharonov-Anandan phase, the geometric phase of the Jaynes-Cummings model system is presented for the initial state with the fixed photon number.

**Key words:** geometric phase; Jaynes-Cummings model; two-level system

(上接第4页)

### 3 有电介质时静电场场强的计算<sup>[2]</sup>

已知电荷分布计算静电场场强  $E$  的方法有三: 场强积分, 高斯定理, 电势梯度. 有电介质存在时, 若已知自由电荷  $q_0$  的分布而极化电荷  $q'$  未知, 则方法一、三无效, 可根据  $E$  的高斯定理  $\oint_S E \cdot dS = \frac{1}{\epsilon_0} \sum_{SPV} (q_0 + q')$ , 利用  $q'$  与极化强度  $P$  的关系  $\oint_S P \cdot dS = - \sum_{SPV} q'$ , 引入电位移  $D = \epsilon_0 E + P$ , 得出  $D$  的高斯定理  $\oint_S D \cdot dS = \sum_{SPV} q_0$ . 由  $q_0$  求出  $D$ , 再由  $D = \epsilon_0 \epsilon_r E$  求出  $E$ . 凡此种种, 众所周知, 问题在于如何介绍和评价这种方法.

不少教材认为, 这种方法的特点是“巧妙地把  $q'$  隐藏起来”或“绕过了计算  $q'$  的复杂性”等等, 其实不然. 不难看出,  $q'$ 、 $P$ 、 $E$ 、 $D$  一脉相承, 处处是极化电荷的身影, 它是不可能被“隐藏”或“绕过”的, 更无从“计算”. 实际上, 为了用高斯定理由  $q_0$  求出

$D$ , 既要求  $q_0$  的分布具有一定的对称性, 还要求电介质以及  $q'$  具有与之对应的对称性, 两者是相互影响相互制约的, 只有这样才能把  $D$  的高斯定理  $\oint_S D \cdot dS = \sum_{SPV} q_0$  简化为只含  $D$  和  $q_0$  的一个代数方程, 由  $q_0$  求出  $D$ . 进而, 为了由  $D$  求出  $E$ , 还需要补充  $D$  和  $E$  的关系式(介质方程), 并需已知描述电介质极化性质的  $\epsilon_r$ , 对于各向同性线性电介质,  $D$  和  $E$  的关系  $D = \epsilon_0 \epsilon_r E$ .

由此可见, 在有电介质、 $q'$  未知, 只有  $q_0$  已知的情况下, 场强  $E$  的计算受到了许多限制, 只在满足以上苛刻的条件下, 才能顺利地用  $D$  的高斯定理求解, 这就使得可以求解的题目几乎屈指可数.

### 参考文献:

- [1] 陈秉乾, 舒幼生, 胡望雨. 电磁学专题研究 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2001: 121-122.
- [2] 陈秉乾, 王稼军. 电磁学(大学物理通用教程) [M]. 北京: 北京大学出版社, 2003: 93, 75-77.

## Some problems concerned with the teaching of electromagnetics

CHEN Bing-qian, WANG Jia-jun, ZHANG Rui-ming

(The School of Physics, Peking University, Beijing 100871, China)

**Abstract:** Three problems concerned with the teaching of electromagnetic are discussed in this paper. The first problem is “the noelectrostatic force and the nonelectrostatic field”, the second is “definition and classify of electric current” and the last is “when the dielectric is exist, how to calculate the electric field intensity”. This paper describes the author's own point of view, we hope to attract everyone's attention and discussion.

**Key words:** noelectrostatic force; electric current; electric field intensity