



浅谈电磁学中的3种电场

王歌 张艺馨 冯杰

(上海师范大学数理学院 上海 200234)

(收稿日期:2017-05-05)

摘要:在普通物理学的电磁学理论层面上对电场的描述可以是3种电场,分别是静电场、稳恒电场和涡旋电场,它们既具有电场的共性,又有各自的特征.讨论了3种电场的本质属性、基本特征及其相互联系,以利于电磁学的教与学.

关键词:静电场 稳恒电场 涡旋电场

1 引言

电磁学中的静电场、稳恒电场和涡旋电场既具有电场的共性又有本质区别.静电场是由相对于惯性系静止的电荷在周围空间激发的电场,由其定义可知,静电场是由静止电荷激发的.稳恒电场与恒定电流相伴,它是不随时间改变的电荷分布产生的不随时间改变的电场.而涡旋电场是由变化的磁场在其周围激发的一种电场,并非是由电荷产生的.为了进一步理解这3种容易混淆的电场,下面具体介绍它们的主要内容及相互联系和区别.

2 电磁学理论中的3种电场

2.1 静电场

静电场源于1个定律,通过1个核心,可以演绎出3个定理,这3个定理是微电子学的理论基础之一.

2.1.1 1个定律:库仑定律

库仑定律:1875年英国物理学家库仑从实验上总结出两个点电荷之间相互作用力的规律,后人称之为库仑定律,它表明真空中带电荷量为 q_1 和 q_2 的两个点电荷之间作用力的大小与它们所带电荷量 q_1 和 q_2 的乘积成正比,与它们之间的距离 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.其数学表达式为

$$F = k \frac{q_1 q_2}{r^2}$$

式中 q_1 和 q_2 分别表示两个点电荷的电荷量, r 为两个点电荷之间的距离, k 是比例系数.为了使表达式既能表示力的大小又能表示力的方向,同时为了使今后由它推出的电学公式简单化,因此,通常令

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$$

则

$$\epsilon_0 = \frac{1}{4\pi k}$$

式中 $k = 9.0 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2$, ϵ_0 为真空的介电常数(或称为电容率),这样库仑定律的数学表达式可称为库仑定律的有理化形式.库仑定律的表达式写成矢量式即为

$$\mathbf{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} \mathbf{r}_0$$

式中 \mathbf{r}_0 表示施力电荷指向受力电荷方向的单位矢量.

2.1.2 3个定理:静电场的环路定理、高斯定理、叠加原理

定理一:静电场的环路定理——说明静电场是无旋场和保守场.

如果试验电荷在电场中经过任一闭合曲线又回到原来的位置,这样可得出电场力做的功为零,即

$$q_0 \oint_l \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = 0$$

因为试验电荷 $q_0 \neq 0$, 所以

$$\oint_l \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = 0$$

这说明, 静电场中场强沿任意闭合环路的线积分(称作环量)恒等于零, 这个结论称为静电场的环路定理.

定理二: 静电场的高斯定理 —— 说明静电场是有源场或散度场.

高斯定理是静电学中的一个重要定理, 它反映了静电场的一个基本性质, 即静电场是有源场, 其源即是电荷. 高斯定理可表述为: 在静电场中, 通过任意闭合曲面的电通量, 等于该闭合曲面所包围电荷的代数和的 $\frac{1}{\epsilon_0}$ 倍, 与闭合曲面外的电荷无关.

表达式为

$$\Phi = \oiint_S \mathbf{E} \cdot d\mathbf{S} = \frac{1}{\epsilon_0} \sum_{i=1}^n q_i$$

定理三: 静电场的叠加原理 —— 说明静电场可线性叠加, 有矢量的性质.

点电荷的电场强度

$$\mathbf{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2} \mathbf{r}_0$$

式中 \mathbf{r}_0 是由电场源电荷 q 指向试验电荷 q_0 的单位矢量. 当 $q > 0$ 时, \mathbf{E} 的方向与 \mathbf{r}_0 相同; 当 $q < 0$ 时, \mathbf{E} 的方向与 \mathbf{r}_0 相反.

点电荷系 q_1, q_2, q_3, \dots

$$\mathbf{F} = \sum_i \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_i q_0}{r_i^2} \mathbf{r}_{i0}$$

点电荷系的电场强度为

$$\mathbf{E} = \sum_i \frac{q_i}{4\pi\epsilon_0 r_i^2} \mathbf{r}_{i0}$$

即点电荷系在某点产生的电场强度等于各个点电荷单独存在时在该点所产生的电场强度的矢量和, 这个结论称为电场强度的叠加原理.

2.1.3 1 个核心: 静电场的强度

电场强度是用来表示电场的强弱和方向的物理量, 是描述电场本身性质的参量, 用 \mathbf{E} 表示, 公式为 $\mathbf{E} = \frac{\mathbf{F}}{q}$, 它表明: 电场中某点电场强度的大小等于单位电荷在该点所受的作用力, 其方向为正电荷在该点受力的方向.

2.2 稳恒电场

稳恒电场源于电荷守恒定律, 用欧姆定律加以

描述, 通过 2 个定理, 可以演绎出 2 个原理, 同样是微电子学的理论基础之二.

2.2.1 3 个定律: 电荷守恒定律、欧姆定律、基尔霍夫定律

定律一: 电荷守恒定律

大量实验表明: 电荷既不能被创造, 也不能被消灭, 它们只能从一个物体转移到另一个物体, 或从物体的一部分转移到另一部分, 在任何物理过程中电荷的代数和总是守恒的, 这个结论叫电荷守恒定律. 它不仅是一切宏观过程中成立, 而且在一切微观过程中也是成立的, 它是物理学中的普适守恒定律之一.

电荷守恒定律的数学表达式: 设闭合曲面内的电荷量为 q , 则有

$$\oiint_S \mathbf{j} \cdot d\mathbf{S} = -\frac{dq}{dt}$$

该式称为电流连续性方程. 对于稳恒电流, 由于 I 的大小和方向都不随时间发生变化, 这样形成电流的电场就必须是一个稳定场, 产生电场的电荷就必须是一个稳定的分布, 这样对于任一闭合曲面 S , 必有

$$\oiint_S \mathbf{j} \cdot d\mathbf{S} = 0$$

此即为稳恒电流的连续性方程, 也叫电流的稳恒条件. 它是电荷守恒定律的数学表达式.

定律二: 欧姆定律

在通有电流 I 的导体中, 沿电流线方向任取一个小圆柱体, 通过的电流为 dI , 长度为 $d\mathbf{l}$, 横截面积为 $d\mathbf{S}$, 使圆柱体的轴线和它所在处的电场强度 \mathbf{E} 的方向一致, 面积 $d\mathbf{S}$ 垂直于 \mathbf{E} . 沿电场方向圆柱体两端的电势为 U 和 $U + dU$, 圆柱体电阻为 R , 电流密度矢量为 \mathbf{j} . 则

$$dI = \frac{dU}{R}$$

$$\text{而} \quad dI = j dS \quad R = \rho \frac{dl}{dS} \quad E = \frac{dU}{dl}$$

$$\text{所以} \quad j dS = \frac{E dl}{\rho \frac{dl}{dS}} = \frac{1}{\rho} E dS = \gamma E dS$$

$$\text{即} \quad \mathbf{j} = \gamma \mathbf{E}$$

称作欧姆定律的微分形式. 它表明导体中任意一点的电流密度与该点的电场强度成正比, 且同方向.

定律三: 基尔霍夫定律

基尔霍夫第一定律, 即节点电流定律

$$\sum I_i = 0$$

其表述为:在任一节点处的电流之和为零,或者说流出节点的电流(一般规定流出为正)等于流入节点的电流(流入为负).

基尔霍夫第二定律,即回路电压定律

$$\sum \epsilon + \sum IR = 0$$

其表述为:对于电路中的任一回路,沿回路绕行方向各段电压的代数和等于零.或者说电势增高之量等于电势降落之量.

2.2.2 2个原理:电流源原理、电压源原理

原理一:电流源原理

电流源原理,其实就是把一个受控元件或器件串联在电流回路中,通过采样和负反馈电路使这个元件或器件的导通电阻受输出电流的实时控制,当因负载电阻减小或回路电压增大而发生回路电流增大的趋势时,这个元件或器件的导通电阻就增大,当因负载电阻增大或回路电压减小而发生回路电流减小的趋势时,这个元件或器件的导通电阻就减小,以维持回路电流的稳定.

原理二:电压源原理

电压源原理,其实就是把一个受控元件或器件并联在电流回路中,采集输出电压反馈到控制端,控制端根据反馈的电压来调节输出电压保证输出电压稳定.

这两个原理是微电子学的理论基础.

2.3 涡旋电场

2.3.1 2个定律:毕奥-萨伐尔定律、法拉第电磁感应定律

定律一:毕奥-萨伐尔定律

电流周围有磁场,稳恒电流的磁场是稳恒磁场.如图1所示,任意形状的导线 L ,通有电流 I ,在该导线上任意选取一线元 $d\mathbf{l}$,在该导线上任意电流元 $I d\mathbf{l}$,产生的磁场的磁感应强度为 $d\mathbf{B}$.毕奥-萨伐尔定律的数学表达式为

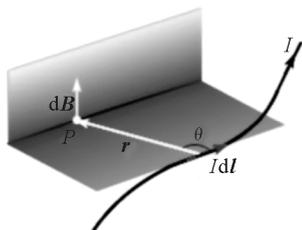


图1 电流元及其产生的磁场

$$d\mathbf{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I d\mathbf{l} \times \mathbf{r}_0}{r^2}$$

定律二:法拉第电磁感应定律

不论任何原因使通过回路面积的磁通量发生变化时,回路中产生的感应电动势与磁通量对时间的变化率成正比,这就是法拉第电磁感应定律,其表达式为

$$\epsilon = - \frac{d\Phi}{dt}$$

式中负号表明感应电动势的方向和磁通量变化率之间的关系,是楞次定律的数学表示.

2.3.2 2个假说

假说1:变化的磁场可以产生变化的电场.

假说2:为了使安培环路定理成立,必须假定变化的(涡旋)电场与一定的磁场相联系,即变化的电场可以产生变化的磁场.

3 3种电场的比较

3.1 共性

(1) 它们都是电场,是物质的一种客观存在形式,都储存着能量;

(2) 它们对处于其中的电荷都有电场力的作用;

(3) 在这3种电场中移动电荷时相应的电场力一般都要做功.

3.2 个性

静电场的场源电荷是静止电荷,稳恒电场的场源电荷是空间分布不随时间变化的电荷,它们都属于有源场,电场线始于正电荷而止于负电荷,在无电荷处不中断,是不闭合的.对于外电路中的稳恒电场,其电场线从电源正极指向负极,同时根据欧姆定律的微分方程可知,电场线和电流线相平行,简单说来,可理解为沿均匀导线的轴线方向,虽然有分析认为导体内电场存在径向分量,但其值较小,通常可忽略.涡旋电场由变化的磁场激发,没有场源电荷,属于无源场,它的电场线应是没有起点和终点的曲线,是闭合的.这是涡旋电场性质和前两种电场性质的区别之一.

静电场要对放入其中的电荷施加静电力,静电力是保守力,根据保守力的特点,电荷沿闭合路径移动一周时静电力的功恒为零.可见,静电场是势场或称为无旋场.由恒定条件可知,在稳恒电流场中选定任一闭合曲面 S ,该曲面内各点的电荷密度

三圆环型达曼光栅衍射与缺级

刘志伟 范 轶

(电子科技大学英才实验学院 四川 成都 611731)

王莹媛

(电子科技大学电子工程学院 四川 成都 611731)

吴明和 邬劭轶 滕保华

(电子科技大学物理电子学院 四川 成都 611731)

(收稿日期:2017-05-08)

摘 要:光栅和光栅衍射是波动光学中的一个重要内容,讨论利用多个圆环衍射的圆环型达曼光栅的衍射现象,首先设计了一种三圆环型达曼光栅,然后解析推导了圆环型达曼光栅的光强分布规律,并数值分析了其中出现的缺级现象,从而使学生对光栅及光栅衍射有一个更深入的了解.

关键词:圆环型达曼光栅 衍射 缺级

1 引言

光栅作为重要的分光元件和光谱仪器的核心元件,在计量学、天文学、集成光学、光通信、原子能等方面具有广泛的应用.达曼光栅就是一种利用空间坐标调制的位相光栅,通过特殊的孔径函数的衍射光栅产生一维或者二维的均匀光束,从而实现等强度的阵列光束^[1].通常可以用机械刻划的方法制作圆环型的达曼光栅,来实现对称的等强度光强分布的圆环型衍射场^[2],从而在图像编码、全息照相以及X光层析成像等领域,起着不可或缺的重要作用.但

是与直缝光栅相比,圆环型光栅的制作难度很大,因此圆环型达曼光栅远没有像直缝光栅那样得到深入的研究^[3~6].

本文首先介绍圆环型达曼光栅的基本性质,然后设计一种三圆环型达曼光栅,并解析推导该圆环型达曼光栅的光强分布,从而根据相关参数分析产生缺级现象的条件.

2 圆环型达曼光栅的基本性质

通常圆环型达曼光栅根据下列4个参数进行设

都不随时间变化,这和静止电荷在闭合曲面 S 内按同样电荷分布时产生的电场情况是相同的.因此,稳恒电场和静电场具有相同的性质,稳恒电场也是势场,基尔霍夫第二方程正是由稳恒电场的环路定理推导出来的.感生电场力对沿闭合电路移动一周的单位电荷做功等于感生电动势,由法拉第定律可知感生电场沿任意闭合曲线的环流不可能都为零,否则不会在实验上发现感生电动势存在的事实.可以看出感生电场不是势场,而是涡旋场.这是涡旋电场性质和前两种电场性质的另一区别.

4 结束语

通过对电磁学中的3种电场,静电场、稳恒电场

和涡旋电场的核心及其规律的归纳、对比和总结,分析了它们的共性和个性,不仅强化了我们对3种电场的认识和应用,而且扩大了3种电场与其他相关物理知识的联系,同时也锻炼了学生的物理思维能力,无论是对中学物理的教与学或是对大学生电磁学的学习,都有事半功倍的学习效果.

参 考 文 献

- 1 冯杰. 大学物理专题研究. 北京:北京大学出版社,2011
- 2 张三慧. 大学物理学. 北京:清华大学出版社,2000
- 3 温耐,王伟锋. 类比法在电磁学教学中的运用. 物理通报, 2013(6):11~12
- 4 尹彩流. 大学物理电磁学教学中类比法的应用. 广西民族大学学报(自然科学版),2011,17(2):98~100