

对大学物理教材中导体静电平衡解释的补充

陈 逍

(北京工商大学轻工科学技术学院 北京 100088)

(收稿日期:2021-03-12)

摘 要:静电场中导体的静电平衡是指导体上的电荷及电场分布不随时间变化的现象. 该现象在高校物理课本中对学生进行了介绍. 文章旨在讨论大学物理课本中对静电场中导体静电平衡解释过程中所忽略的情况,即外电场的电场强度大于导体所能产生的最大感应电场强度. 通过简单易懂的计算证明了这种情况在自然界中是不可能存在的,解决了读者的困惑,并对教材内容进行了补充.

关键词:导体 静电平衡 电场强度

1 问题的提出

大学物理课本中对静电场中导体静电平衡现象有这样的描述:当把一个不带电的导体放入静电场,会产生静电感应现象. 静电感应改变了导体内的电荷分布,并削弱导体内的电场强度,最终使导体内的电场强度都等于零. 当导体内任一点的电场强度减为零时,导体中任意一个自由电子所受到的静电力

也为零,电子就不可能继续其宏观运动,电荷重新分布的过程也随之结束. 我们把导体中没有电荷做任何宏观定向运动的状态,称为静电平衡状态. 因此,导体静电平衡的必要条件,就是导体内任一点的电场强度都等于零^[1]. 见图 1. 然而这个描述中忽略了一种可能性:当外部电场很大时,导体内部所能产生的最大感应电场强度也无法抵消外电场时,导体内任一点场强都大于零,而导体中却没有电荷作任何

$$e^2 = 1 - \frac{4}{5} \sin 2\delta \tag{21}$$

故 $\delta = 45^\circ$ 时, $e_{\min} = \frac{1}{\sqrt{5}}$. 此时由式(18) 可得 $CD = \frac{\sqrt{2}}{2}mk$, 则

$$|\boldsymbol{p}_1 \times \boldsymbol{L}| = AC = \frac{2}{\sqrt{5}}AB = \frac{4}{\sqrt{5}}CD = \frac{2\sqrt{2}}{\sqrt{5}}mk \tag{22}$$

$$|\boldsymbol{p}_2 \times \boldsymbol{L}| = BC = \frac{1}{2}AC = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{5}}mk \tag{23}$$

由式(22) 和式(23) 结合式(13) 可得两点处的位置 $\cos \theta_1 = \frac{\sqrt{5}}{3}, \cos \theta_2 = -\frac{\sqrt{5}}{3}$, 代入式(11) 可得

$$v_1 = \sqrt{2\frac{GM}{a}} \qquad v_2 = \sqrt{\frac{1}{2}\frac{GM}{a}}$$

3 讨论与总结

LRL 矢量与角动量一样是一个守恒量,是平方有心力系统的一个结论,而且更进一步生动地反映了天体运动的轨迹形状及长轴的指向,其结果中有离心率参数,LRL 中包括了天体的速度、角动量、位置矢量,利用 LRL 矢量可以方便地将许多物理问题几何化,使求解简洁,计算量大大减小.

参 考 文 献

1 Abbas A. Rangwala and Vaman H. Kulkarni. Laplace - Runge - Lenz vector for a light ray trajectory in r^{-1} media[J]. *American Journal of Physics*, 2001, 69(7): 803 ~ 809

2 刘绘. 浅谈拉普拉斯-隆格-楞次矢量[J]. 大学物理, 2015, 34(10): 5 ~ 8

宏观运动,这种可能出现的情况与书中的描述出现了矛盾,引起读者的困惑,因此需要通过计算对这种矛盾进行解释,并为教材的修订提供一种参考.

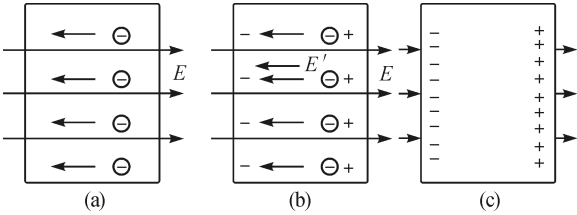


图 1 导体的静电感应过程

2 问题的解决

要解决这个问题,我们就要知道一个导体内部所能产生的最大感应电场强度的理论值,并分析我们能否创造出大于这个电场强度的外电场. 由于导体的材质、大小、形状多种多样,为了方便计算,我们只要选择一种日常生活中常见的材质、比较规则的形状和常规的尺寸即可. 在这里,我们不妨以边长为 1 cm 的正方体铁块为例,见图 2. 现在我们用 8 个步骤来求这个铁块所能产生的最大感应电场强度.(每步计算均保留 3 位有效数字)

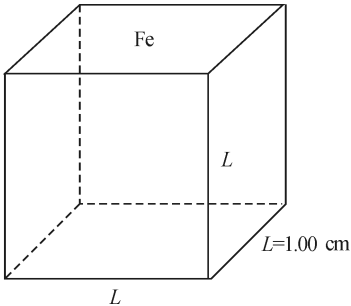


图 2 边长为 1 cm 的正方体铁块

(1) 求铁块的体积 V

$$V=L^3=1.00\text{ cm}^3$$

(2) 求铁块的质量 m (已知 $\rho=7.87\text{ g/cm}^3$)

$$m=\rho_{\text{铁}}V=7.87\text{ g}$$

(3) 求铁块的物质的量 n (已知 $M_{\text{铁}}=55.8\text{ g/mol}$)

$$n=\frac{m}{M_{\text{铁}}}=\frac{7.87\text{ g}}{55.8\text{ g/mol}}=0.141\text{ mol}$$

(4) 试求铁块中的铁原子个数 N (已知 $N_A=6.02\times10^{23}\text{ mol}^{-1}$)

$$N=nN_A=0.141\text{ mol}\times6.02\times10^{23}\text{ mol}^{-1}=8.49\times10^{22}$$

因为围绕原子核高速运转的依照一定规律排布的若干层电子受到质子施加的库仑力的束缚作用,所以只有距离原子核较远的价电子(最外层或最外层加上次外层的部分电子,对于铁原子来说价电子数为 16)才可能逆着外电场方向移动到导体的左表面. 因此,导体内部形成感应电场的负感应电荷最多为全部价电子. 同样的,导体右表面附近最多出现等量的过剩正电荷.

(5) 假设铁原子最外面两层 16 个价电子全部移到正方体铁块左表面,静电平衡后求右表面上过剩的正电荷数 $N_{\text{质}}$

$$N_{\text{质}}=16N=16\times8.49\times10^{22}=1.36\times10^{24}$$

(6) 求一个表面上的最大带电荷量 Q (取正值,已知 $e=1.60\times10^{-19}\text{ C}$)

$$Q=eN_{\text{质}}=1.60\times10^{-19}\text{ C}\times1.36\times10^{24}=2.18\times10^5\text{ C}$$

(7) 求一个面的最大电荷面密度 σ

$$\sigma=\frac{Q}{S}=\frac{Q}{L^2}=\frac{2.18\times10^5\text{ C}}{1.00\times10^{-4}\text{ m}^2}=2.18\times10^9\text{ C/m}^2$$

(8) 据导体静电平衡后表面附近的场强公式,可求得铁块能够产生的最大感应电场强度 E_{max} ,已知 $\epsilon_0=8.85\times10^{-12}\text{ C}^2/(\text{N}\cdot\text{m}^2)$,则

$$E_{\text{max}}=\frac{\sigma}{\epsilon_0}=\frac{2.18\times10^9\text{ C/m}^2}{8.85\times10^{-12}\text{ C}^2/(\text{N}\cdot\text{m}^2)}=2.46\times10^{20}\text{ V/m}$$

将单位 N/C 换为 V/m ,更具物理意义.

3 结论

通过计算,我们得到如果要让一个边长为 1 cm 的正方体铁块内部存在电场,则外电场强度至少要大于 $2.46\times10^{20}\text{ V/m}$. 这样强的电场,无论是人为还是自然界中都是几乎无法达到的. 所以这种情况只有理论上的可能,在现实中不会出现. 因此,当我们将导体置于静电场中,导体终会达到静电平衡,导体内部的场强也一定为零. 这就与课本中的描述完全相同.

参 考 文 献

1 程守洙,江之永. 普通物理学上册(第 6 版)[M]. 北京:高等教育出版社,2006