

姓名：\_\_\_\_\_ 学号：\_\_\_\_\_；

学院：\_\_\_\_\_ 专业：\_\_\_\_\_。

## 第9章 气体动理论

### 基本要求

- 1、理解物质的微观特征，理想气体分子模型，气体的分子状况、理想气体模型，理想气体状态的描述
- 2、掌握气体状态参量、理想气体状态方程；
- 3、掌握理想气体的压强和温度：理想气体的压强公式，温度的微观解释；
- 4、掌握能量均分定理、理想气体的内能：分子运动自由度，能量均分定理，理想气体的内能；
- 5、掌握麦克斯韦速率分布律：麦克斯韦速率分布律，三种特征速率；
- 6、掌握气体分子的平均自由程：气体分子的平均碰撞频率和平均自由程。

### 内容概述

#### 1. 物质的微观特征和理想气体分子模型

- (1) 物质的微观特征；
- (2) 理想气体分子模型：分子自身的线度比起分子之间的平均距离来说可以忽略不计；分子间以及分子与容器壁之间除碰撞发生相互作用外，分子不受力的作用；分子之间以及分子与器壁之间的碰撞都是完全弹性碰撞；分子的运动遵守牛顿运动定律。

#### 2. 气体状态参量和理想气体状态方程

- (1) 气体系统的平衡态及状态参量：体积  $V$ 、压强  $P$ 、温度  $T$ ；
- (2) 理想气体的状态方程：
$$PV = \frac{M}{\mu} RT$$
（ $M$  为气体质量， $\mu$  为气体的摩尔质量， $R$  为普适气体常数， $R = 8.31 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ ）

#### 3. 理想气体的压强和温度

(1) 理想气体的压强公式:  $P = \frac{2}{3} n \bar{\varepsilon}_k$  ( $n$  为单位体积分子数,  $\bar{\varepsilon}_k = \frac{1}{2} m \overline{v^2}$  为分子平均平动动能);

(2) 温度的微观本质:  $\bar{\varepsilon}_k = \frac{3}{2} kT$ , 即温度标志着气体内部分子无规则热运动的剧烈程度, 温度越高, 分子热运动就越剧烈。

#### 4. 能量均分原理和理想气体的内能

(1) 自由度: 单原子分子, 自由度为:  $i = t = 3$  平动自由度;

双原子分子, 自由度为:  $i = t + r + s = 3 + 2 + 1 = 6$ , 3 个平动自由度, 2 个转动自由度, 1 个振动自由度; (注: 温度较低时, 振动自由度为 0)

多原子分子, 自由度为:  $i = t + r + s = 3 + 3 + s = 6 + s$ , 3 个平动自由度, 3 个转动自由度,  $s$  个振动自由度;

(2) 能量均分原理: 在温度为  $T$  的平衡态下, 分子的每一个自由度上都具有相同的平均动能, 且等于  $\frac{1}{2} kT$ ;

(3) 理想气体的内能:  $U = \frac{M}{\mu} \frac{1}{2} (t + r + 2s) RT = \frac{M}{\mu} \frac{1}{2} (i + s) RT$ ;

1mol 单原子分子理想气体的内能:  $U_m = \frac{3}{2} RT$ ;

1mol 双原子分子理想气体的内能:  $U_m = \frac{7}{2} RT$ ;

#### 5. 麦克斯韦速率分布律

(1) 速率分布函数:  $f(v) = \frac{dN}{Ndv}$ , 它表示在速率  $v$  附近单位速率区间内的分子数占总分子数的比率;

速率分布在  $v_1 \sim v_2$  区间内的分子数占总分子数的比率:  $\frac{\Delta N}{N} = \int_{v_1}^{v_2} f(v) dv$ ;

速率分布函数的归一化条件:  $\int_0^{\infty} f(v) dv = 1$ ;

系统的平均速率:  $\bar{v} = \frac{\int_0^{\infty} v dN}{N} = \int_0^{\infty} v f(v) dv$ ;

系统的方均根速率:  $\sqrt{v^2} = \left[ \int_0^{\infty} v^2 f(v) dv \right]^{\frac{1}{2}}$ ;

(2) 麦克斯韦速率分布律:  $f(v) = 4\pi \left( \frac{m}{2\pi kT} \right)^{\frac{3}{2}} e^{-mv^2/2kT} v^2;$

(3) 理想气体的 3 个特征速率:

最概然速率  $v_p$ :  $v_p = \sqrt{\frac{2kT}{m}} = \sqrt{\frac{2RT}{\mu}} \approx 1.414 \sqrt{\frac{RT}{\mu}};$

平均速率  $\bar{v}$ :  $\bar{v} = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}} = \sqrt{\frac{8RT}{\pi \mu}} \approx 1.60 \sqrt{\frac{RT}{\mu}};$

方均根速率  $\sqrt{\overline{v^2}}$ :  $\sqrt{\overline{v^2}} = \sqrt{\frac{3kT}{m}} = \sqrt{\frac{3RT}{\mu}} \approx 1.732 \sqrt{\frac{RT}{\mu}}。$

## 6. 气体分子的平均自由程和平均碰撞次数

(1) 理想气体分子的平均碰撞次数:  $\bar{Z} = \sqrt{2} n \pi d^2 \bar{v};$

(2) 理想气体分子的平均自由程:  $\bar{\lambda} = \frac{1}{\sqrt{2} n \pi d^2} = \frac{kT}{\sqrt{2} \pi d^2 P}。$

## 练习题

### 一、选择题

1、一密封的理想气体的温度从  $27^{\circ}\text{C}$  起缓慢地上升, 直至其分子速率的方均根值是  $27^{\circ}\text{C}$  时的方均根值的两倍, 试问气体最终的温度为多高( )

- A、 $54^{\circ}\text{C}$     B、 $108^{\circ}\text{C}$     C、 $327^{\circ}\text{C}$     D、 $927^{\circ}\text{C}$     E、 $1200^{\circ}\text{C}$

2、下图表示了室温时某气体分子按速率的分布,  $v_p$  为室温时气体分子的最可几速率, 而  $n_p$  表示在速率  $v_p$  附近单位速率区间内的气体分子数, 若该气体的温度降低, 则  $n_p$  合  $v_p$  将如何变化( )

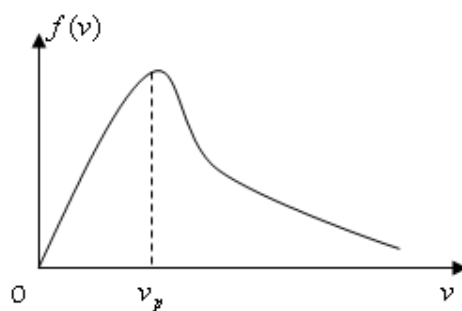
A、 $v_p$  变小而  $n_p$  保持不变

B、 $v_p$  和  $n_p$  均变小

C、 $v_p$  变小而  $n_p$  变大

D、 $v_p$  保持不变而  $n_p$  变大

E、 $v_p$  保持不变而  $n_p$  变小



3、一容器贮有气体, 其平均自由程为  $\bar{\lambda}_0$ 。当绝对温度降到原来的一半, 但体积不变, 分子作用球半径不变, 此时平均自由程为多少( )

- A、 $\bar{\lambda}_0/2$     B、 $\bar{\lambda}_0/\sqrt{2}$     C、 $\bar{\lambda}_0$     D、 $\sqrt{2}\bar{\lambda}_0$     E、 $2\bar{\lambda}_0$

4、某人造卫星测定太阳系内星际空间中物质的密度时, 测得氢分子的数密度为  $15/\text{cm}^3$ , 若氢分子的有效直径为  $3.57 \times 10^{-9}\text{cm}$ , 试问在这条件下, 氢分子的平均自由程为多少 m ( )

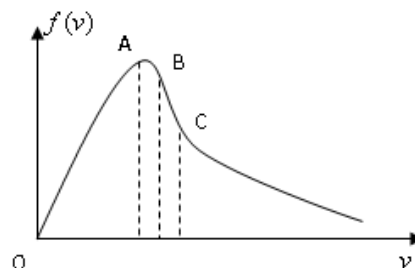
- A、1    B、 $1.5 \times 10^3$     C、 $1.5 \times 10^8$     D、 $1.18 \times 10^{13}$     E、 $1.5 \times 10^{18}$

5、如图为在室温下氧气分子的速率分布曲线。若曲线上 A、B、C 三点相对应的速率属于氧气分子的平均速率、方均根速率和最可几速率, 那么( )点对应的是方均根速率,

A、A

B、B

C、C



6、某气体分子的速率分布满足麦克斯韦速率分布律。现取相等的速率间隔  $\Delta v$  考察具有  $v \sim v + \Delta v$  速率的气体分子数  $\Delta N$ 。在  $v$  为( )时,  $\Delta N$  最大。

- A、平均速率      B、方均根速率      C、最可几速率

7、若某种理想气体在平衡温度  $T_2$  时的最可几速率与它在平衡温度  $T_1$  时的方均根速率相等, 那么这两个温度之比  $T_1 : T_2$  为 ( )

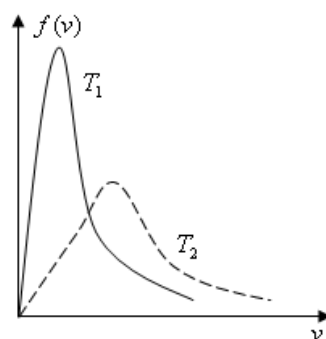
- A、2:3      B、 $\sqrt{3}:\sqrt{2}$       C、7:8      D、 $\sqrt{8}:\sqrt{7}$

8、1mol 单原子理想气体从  $0^\circ\text{C}$  升温到  $100^\circ\text{C}$ , 内能的增量约为 ( )

- A、12.3J      B、20.5J  
C、 $1.25 \times 10^3 \text{J}$       D、 $2.03 \times 10^3 \text{J}$

9、某种理想气体在不同温度  $T_1$  和  $T_2$  的速率分布曲线为图中的实线和虚线所示。若该气体在  $T_1$  和  $T_2$  时的压强相等, 那么它所对应的平均自由程为( )。

- A、 $\bar{\lambda}_1 > \bar{\lambda}_2$   
B、 $\bar{\lambda}_1 = \bar{\lambda}_2$   
C、 $\bar{\lambda}_1 < \bar{\lambda}_2$



10、一瓶氢气和一瓶氧气, 它们的压强和温度都相同, 但体积不同。下列哪些结论正确 ( )

- (1) 单位体积的分子数相同      (2) 单位体积的质量相同  
(3) 分子的平均平动动能相同      (4) 分子的方均根速率相同

- A、(2)(3)      B、(3)(4)      C、(1)(3)      D、(1)(2)

11、有二容器, 一盛氧气, 一盛氢气。若它们的方均根速率相等, 氧气与氢气的温度比  $T_{O_2} : T_{H_2}$  为( )

- A、1:1      B、1:4      C、16:1

12、密闭理想气体的温度从  $27^\circ\text{C}$  起一直缓慢地增加到它的分子的方均根速度为  $27^\circ\text{C}$  时的二倍时为止。气体最终温度是 ( )

- A、 $108^\circ\text{C}$       B、 $327^\circ\text{C}$       C、 $927^\circ\text{C}$       D、 $1200^\circ\text{C}$

13、相同条件下, 氧原子的平均动能是氧分子的平均动能的多少倍( )

- A、6/5 倍      B、3/5 倍      C、3/10 倍      D、1/2 倍      E、1/3 倍

14、在一容积不变的封闭容器内理想气体分子的平均速率若提高为原来的 2 倍, 则( )

- A、温度和压强都提高为原来的 2 倍  
B、温度为原来的 2 倍, 压强为原来的 4 倍

C、温度为原来的 4 倍，压强为原来的 2 倍

D、温度和压强都为原来的 4 倍

15、设某种气体的分子速率分布函数为  $f(v)$ ，则速率在  $v_1 \sim v_2$  区间内的分子的平均速率为( )

A、 $\int_{v_1}^{v_2} v f(v) dv$

B、 $v \int_{v_1}^{v_2} f(v) dv$

C、 $\int_{v_1}^{v_2} v f(v) dv / \int_{v_1}^{v_2} f(v) dv$

D、 $\int_{v_1}^{v_2} f(v) dv / \int_0^{\infty} f(v) dv$

16、两个体积相等的容器中，分别储有氦气和氢气，以  $E_1$  和  $E_2$  分别表示氦气和氢气的内能，若他们的压强相同，则 ( )

A、 $E_1 = E_2$

B、 $E_1 > E_2$

C、 $E_1 < E_2$

D、无法确定

17、 $f(v)$  为速率分布函数，则速率  $v < v_p$  的分子平均速率表达式为 ( )。

A、 $\bar{v} = \int_0^{v_p} f(v) dv$

B、 $\bar{v} = \frac{\int_0^{v_p} v f(v) dv}{\int_0^{v_p} f(v) dv}$

C、 $\bar{v} = \int_0^{v_p} v f(v) dv$

D、 $\bar{v} = \frac{1}{2} v$

18、体积固定的容器中，有一定量的理想气体，当温度逐渐升高时（设分子有效直径保持不变），分子的平均碰撞次数  $\bar{Z}$  和平均自由程  $\bar{\lambda}$  的变化为 ( )

A、 $\bar{Z}$  增大， $\bar{\lambda}$  增大

B、 $\bar{Z}$  增大， $\bar{\lambda}$  不变

C、 $\bar{Z}$  增大， $\bar{\lambda}$  减小

D、 $\bar{Z}$  和  $\bar{\lambda}$  都保持不变

19、一定质量的气体，保持体积不变，当温度升高时，单位时间内的平均碰撞次数将会 ( )

A、增大

B、不变

C、减小

20、根据经典的能量按自由度均分原理，每个自由度的平均动能为 ( )

A、 $kT/4$

B、 $kT/3$

C、 $kT/2$

D、 $3kT/2$

E、 $kT$

21、若体积保持不变，则一定量的某种理想气体的平均自由程  $\bar{\lambda}$  和平均碰撞次数  $\bar{Z}$  与温度的关系是：( )

A、温度升高， $\bar{\lambda}$  减少而  $\bar{Z}$  增大

B、温度升高， $\bar{\lambda}$  增大而  $\bar{Z}$  减少

C、温度升高， $\bar{\lambda}$  和  $\bar{Z}$  均增大

D、温度升高， $\bar{\lambda}$  保持不变而  $\bar{Z}$  增大

22、关于温度的意义，有下列几种说法：

(1) 气体的温度是分子平均平动动能的量度

(2) 气体的温度是大量气体分子热运动的集体表现，具有统计意义

(3) 温度的高低反映物质内部分子运动剧烈程度的不同

(4) 从微观上看，气体的温度表示每个气体分子的冷热程度

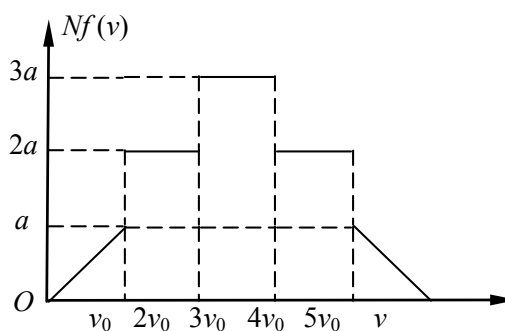
上述说法中正确的是 ( )

A、(1)、(2)、(4)      B、(1)、(2)、(3)      C、(2)、(3)、(4)

## 二、计算题

1、假想的气体分子，其速率分布如图所示，总分子数为  $N$ 。当  $v > 5v_0$  时分子数为零。试求：

- (1) 根据  $N$  和  $v_0$ ，表示常数  $a$  的值；
- (2) 速率在  $2v_0$  到  $3v_0$  间隔内的分子数；
- (3) 分子的平均速率。



2、导体中自由电子的运动可以看作类似于气体分子的运动，所以通常称导体中的自由电子为电子气。设导体中共有  $N$  个自由电子，电子气中电子的最大速率为  $v_f$ （称作费米速率）。

电子的速率分布函数为

$$f(v) = \begin{cases} 4\pi A v^2, & 0 \leq v \leq v_f \\ 0, & v > v_f \end{cases}$$

式中  $A$  为常量，试求：

- (1) 用  $v_f$  确定常数  $A$ ；
- (2) 电子气中一个自由电子的平均动能。

3、根据麦克斯韦速率分布律 ( $f(v) = 4\pi(\frac{\mu}{2\pi kT})^{3/2} e^{-\frac{\mu}{2kT}v^2} v^2$ )，试求速率倒数的平均值  $\overline{(\frac{1}{v})}$ 。



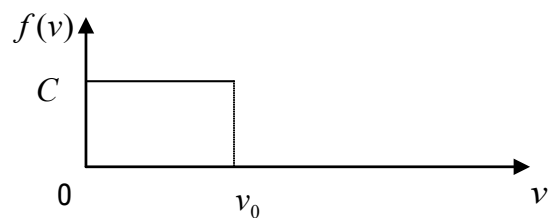
4、在 300 K 时, 空气中速率在①  $v_p$  附近; ②  $10v_p$  附近, 单位速率区间 ( $\Delta v = 1\text{m/s}$ ) 的分子数占分子总数的百分比各是多少? 平均来讲,  $10^5\text{mol}$  的空气中上述区间的分子数又各是多少? (空气的摩尔质量按  $29\text{g/mol}$  计)。

5、体积为  $V = 1.20 \times 10^{-2}\text{m}^3$  的容器中储有氧气, 其压强  $p = 8.31 \times 10^5\text{Pa}$ , 温度为  $T = 300\text{K}$ , 求:

- ① 单位体积中的分子数  $n$ ;
- ② 分子的平均平动动能;
- ③ 气体的内能。

6、若大量粒子的速率分布曲线如图所示（当  $v > v_0$  时,粒子数为零）。

- ① 由  $v_0$  确定常数  $C$ ；
- ② 求粒子的平均速率和方均根速率。



7、一容积为  $V = 1.0\text{m}^3$  的容器内装有  $N_1 = 1.0 \times 10^{24}$  个氧分子和  $N_2 = 3.0 \times 10^{24}$  个氮分子的混合气体，混合气体的压强  $p = 2.58 \times 10^4 \text{pa}$ 。试求：

- (1) 分子的平均平动动能；
- (2) 混合气体的温度。

8、一容器内某理想气体的温度为  $T = 273\text{K}$ ，压强为  $p = 1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$ ，密度为  $\rho = 1.25\text{kg/m}^3$ ，试求：

- (1) 气体分子运动的方均根速率？
- (2) 气体的摩尔质量，是何种气体？
- (3) 气体分子的平均平动动能和转动动能？
- (4) 单位体积内气体分子的总平动动能
- (5) 设该气体有  $0.3 \text{ mol}$ ，气体的内能？

9、一容积为  $12.6 \times 10^{-4} \text{ m}^3$  的真空系统已被抽到  $1.0 \times 10^{-5} \text{ mmHg}$  的真空。为了提高其真空度，将它放到  $500\text{K}$  的烘箱内烘烤，使器壁释放出所吸附的气体。若烘烤后压强增为  $1.0 \times 10^{-2} \text{ mmHg}$ ，试求器壁释放出的分子数。

10、. 储有氧气（处于标准状态）的容器以速率  $v = 100\text{m/s}$  作定向运动，当容器忽然停止运动，全部定向运动的动能都变为气体分子热运动的动能，此时气体的温度和压强为多少？

### 三、问答题

1、根据麦克斯韦速率分布率，试证明：速率在最概然速率  $v_p \sim v_p + \Delta v$  区间内的分子数与  $\sqrt{T}$  成反比。（设  $\Delta v$  很小）

2、一定质量的理想气体，当温度不变时，气体的压强随体积的减小而增大（玻意耳定律）；当体积不变时，压强随温度的升高而增大（查理定律）。从宏观上说，这两种变化同样是使压强增大，从微观上说，它们是否有区别？哪些是共同之处？哪些是具体过程中的差异之处？

院 系 \_\_\_\_\_ 专 业 \_\_\_\_\_  
姓 名 \_\_\_\_\_ 学 号 \_\_\_\_\_

## 第 11 章 静电场

### 基本要求

- 1、掌握电荷、电场、电势的概念及它们间的关系。
- 2、了解静电场的基本定律和电场的叠加原理，高斯定理的物理内涵。
- 3、能综合运用电场的叠加原理和高斯定理以及场强与电势的关系，计算简单的、电荷分布对称的带电体及其组合带电体系的场强和电势分布。

### 内容概述

#### 1. 电荷与库仑定律

电荷起源于物质得失电子。电荷分为正负两种，其总量遵循守恒定律。电荷间的相互作用是同号相斥、异号相吸。静电荷间作用力大小遵循库仑定律，呈现距离的平方反比律。

#### 2. 电场矢量 $\vec{E}$ 及其计算

电场是由电荷激发的一种特殊物质，它可以传递电荷之间的相互作用。具体表现为电场对位于其中的电荷产生力的作用，当电荷在电场内移动时，电场会对其做功。空间某点的电场强度规定为单位正电荷在该点受电场力的大小和方向。其计算方法包括：

a. 根据定义计算；b. 由点电荷电场强度定义，用矢量合成（求和或者积分）的方法计算；c. 根据高斯定理求解；d. 根据电场与电势的关系求解。 注意：电场强度的矢量特性。

请总结并牢记典型静电场公式：点电荷电场，均匀带电环轴线上的电场，无限长均匀带电直线的电场，均匀带电球面的电场，无限大均匀带电平面的电场。

#### 3. 高斯定理及其应用

由于电场的有源特性，电场线只能从正电荷发出，止于负电荷。因此通过任一闭合曲面的电场强度通量，由该曲面所包围的电荷的代数和决定（正电荷为源，负电荷为汇）。

当电场分布具有某种对称性时，可利用高斯定理求解该静电场。解题关键是找到合适的高斯面，面上电场强度为常数，可从积分号内移出。

#### 4. 电势及其计算

静电场中电场力对电荷所作的功，只与电荷的初末位置有关，与路径无关。因此电场是保守场，可用标量“电势”（类似于重力场中的高度）的概念表示电场的做功能力。电势的计算方法包括：

a. 场强积分法:  $U = \int_r^{u=0} \vec{E} \cdot d\vec{r}$ , 选最简便的积分路径。若积分路径上各点电场公式不同, 应分段积分。积分值与零势点选取有关。

b. 电势叠加法:  $U = \int dU$ , 由典型带电体电势公式, 选取相同零势能点。

请总结并牢记典型带电体电势: 点电荷的电势, 均匀带电圆环轴线上的电势, 均匀带电球面的电势。

## 练习题

### 一、选择题

1、两个同号电荷所带电量之和为  $Q$ , 它们各带电量为多少时, 其间相互作用力最大 ( )

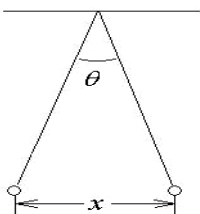
A、 $q_1 = \frac{Q}{2}; q_2 = \frac{Q}{2}$

B、 $q_1 = \frac{1}{4}Q; q_2 = \frac{3}{4}Q$

C、 $q_1 = -\frac{1}{4}Q; q_2 = \frac{5}{4}Q$

D、 $q_1 = -\frac{1}{2}Q; q_2 = \frac{3}{2}Q$

2、两大小相同的球, 质量均为  $m$ , 并带相同的电荷  $q$ , 悬挂在一长度为  $l$  的丝线下, 如图所示。设  $\theta$  较小,  $\tan\theta$  可以近似用  $\sin\theta$  表示, 若用  $k$  表示静电恒量, 则静电平衡时两球分开的距离  $x$  约等于 ( )



A、 $\left(\frac{kq^2l}{mg}\right)^{\frac{1}{3}}; B、\left(\frac{2lkq^2}{mg}\right)^{\frac{1}{3}}; C、\left(\frac{lkq^2}{2mg}\right)^{\frac{1}{3}}; D、\left(\frac{2mg}{kq^2l}\right)^{\frac{1}{3}};$

3、半径为  $R$  的均匀带电球面, 若其电荷密度为  $\sigma$ , 则在距离球面  $R$  处的电场强度为 ( )

A、 $\frac{\sigma}{\epsilon_0};$

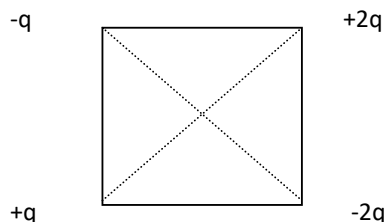
B、 $\frac{\sigma}{2\epsilon_0};$

C、 $\frac{\sigma}{4\epsilon_0};$

D、 $\frac{\sigma}{8\epsilon_0};$

4、正方体四个顶角上分别放有电量为  $+q, -q, +2q, -2q$  的点电荷, 正方形的边长为  $b$ , 则中心处  $O$  的场强大小与方向为 ( )

A、 $\frac{\sqrt{2}}{4\pi\epsilon_0 b^2}q$ , 向上; B、 $\frac{\sqrt{2}}{4\pi\epsilon_0 b^2}q$ , 向左;



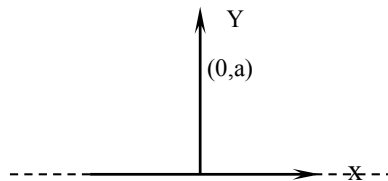
C、 $\frac{\sqrt{2}}{2\pi\epsilon_0 b^2}q$ ,向下; D、 $\frac{\sqrt{2}}{4\pi\epsilon_0 b^2}q$ ,向下;

5、面积为  $S$  的空气平行板电容器,极板上分别带电量为  $\pm q$ ,若不考虑边缘效应,则两极板间的相互作用力为( )

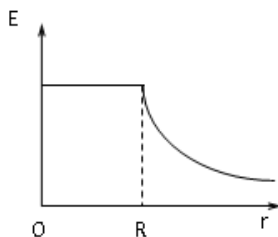
A、 $\frac{-q^2}{\epsilon_0 S}$       B、 $\frac{-q^2}{2\epsilon_0 S}$       C、 $\frac{q^2}{2\epsilon_0 S^2}$       D、 $\frac{q^2}{\epsilon_0 S^2}$

6、如图所示,一沿轴放置的”无限长”分段均匀的带电导线,电荷线密度为  $+\lambda$  ( $x < 0$ ),  $-\lambda$  ( $x > 0$ ),则  $xoy$  坐标平面内点  $(0,a)$  处的电场强度为( )

A、0 ;      B、 $\frac{\lambda}{4\pi\epsilon_0 a}\hat{i}$  ;  
C、 $\frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0 a}\hat{i}$  ;      D、 $\frac{\lambda}{4\pi\epsilon_0 a}(\hat{i} + \hat{j})$



7、如图所示是一球对称分布的静电场的  $E-r$  关系曲线,指出该静电场是由哪种带电体产生的( )



- A、半径为  $R$  的均匀带电球面;  
B、半径为  $R$  的均匀带电球体;  
C、半径为  $R$ ,电荷体密度为  $\rho = Ar$  ( $A$  为常量)的非均匀带电球体;  
D、半径为  $R$ ,电荷体密度为  $\rho = \frac{A}{r}$  ( $A$  为常量)的非均匀带电球体;

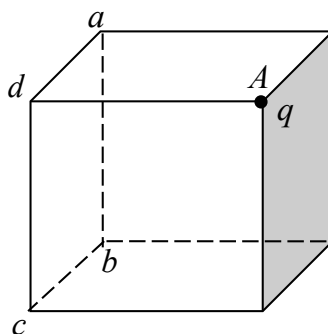
8、高斯定理告诉我们 ( )

- A、高斯面内不包围自由电荷,则面上各点的  $E$  处处为零;  
B、高斯面上各点的  $E$  仅与面内的自由电荷有关;  
C、穿过高斯面的  $E$  通量,仅与面内电荷有关;  
D、高斯面上的  $E$  处处为零,则面内无自由电荷。

9、电偶极子由相距  $l$  的  $\pm q$  组成,在电偶极子的中心( )

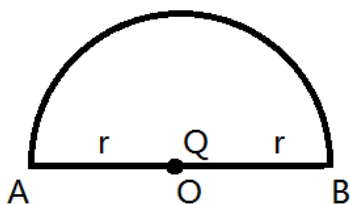
- A、电场强度为零;      B、电势为零;  
C、电场强度最大;      D、电势最高;

10、如图所示,一个带电量为  $q$  的点电荷位于立方体的  $A$  角上,则通过侧面  $abcd$  的电场强度通量为( )



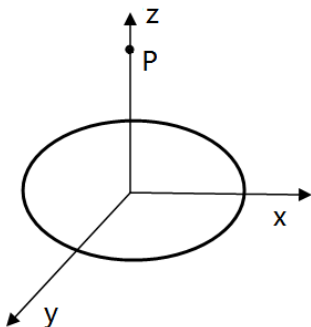
A、 $\frac{q}{6\epsilon_0}$ ; B、 $\frac{q}{12\epsilon_0}$ ; C、 $\frac{q}{24\epsilon_0}$ ; D、 $\frac{q}{48\epsilon_0}$

11、真空中有一电量为  $Q$  的点电荷，在与它相距为  $r$  的  $A$  点处有一检验电荷  $q$ ，现使检验电荷  $q$  从  $A$  点沿半圆弧轨道运动到  $B$  点，如图则电场力做功为( )



A、 $\frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r^2} \cdot \frac{\pi r^2}{2} \cdot q$ ; B、 $\frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r^2} \cdot 2rq$ ;  
C、 $\frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r^2} \cdot \pi rq$ ; D、0

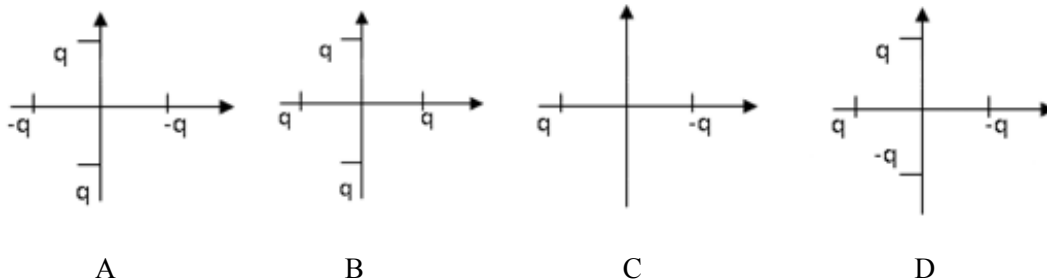
12、有  $N$  个电量为  $q$  的点电荷，以两种方式分布在相同半径的圆周上，一种是无规则地分布，另一种是均匀分布，比较在这两种情况下在通过圆心  $O$  并垂直于圆环面的  $Z$  轴上任意点  $P$  的场强与电势，则有( )



- A、场强相等，电势相等；  
B、场强不相等，电势不相等；  
C、场强分量  $E_z$  相等，电势相等；  
D、场强分量  $E_z$  相等，电势不相等；

13、下面四个图中有两个或四个大小相等的点电荷  $q$  与原点等距离分布在  $XOY$  平面上，设无限远处为电势零点，则原点处场强和电势均为零的是( )

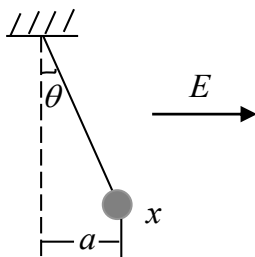




14、电子的质量为  $m_e$ ，电量为  $-e$ ，绕氢原子核（质子质量为  $m_p$ ）作半径为  $r$  的等速率圆周运动。则电子的速率为( )

- A、  $e\sqrt{\frac{1}{2\pi\epsilon_0 m_e r}}$       B、  $e\sqrt{\frac{1}{4\pi\epsilon_0 m_e r}}$
- C、  $e\sqrt{4m_e r \pi \epsilon_0}$       D、  $e\sqrt{8\pi\epsilon_0 m_e r}$

15、如图所示，带电球  $x$  用丝线悬挂，沿水平方向加一均匀电场  $E$ ，球偏离垂线的距离为  $a$ ，此时丝线与垂线间夹角为  $\theta$ ，则下列哪一叙述是正确的( )



- A、对于所有  $\theta$  值， $E$  与  $a$  成正比      B、对于所有  $a$  值， $E$  与  $\theta$  成正比
- C、对于所有  $\theta$  值， $E$  与  $\cos\theta$  成正比      D、仅当  $\theta$  值较小时， $E$  与  $\sin\theta$  成正比

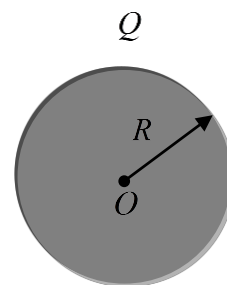
## 二、计算题

1、已知铜的摩尔质量为  $64 \text{ g/mol}$ ，阿伏伽德罗常数为  $6.02 \times 10^{23}$ ，铜原子质子数为  $27$ ，计算质量  $m = 1.77 \times 10^{-2} \text{ kg}$  的铜球所包含的正电荷电量。

2、氢原子由一个质子和一个电子组成。根据经典模型，在正常状态下，电子绕核作圆周运动，轨道半径是  $r_0 = 5.29 \times 10^{-11} \text{ m}$ ，质子的质量  $M = 1.67 \times 10^{-27} \text{ kg}$ ，电子的质量  $m = 9.11 \times 10^{-31} \text{ kg}$ ，它们的电量为  $e = 1.60 \times 10^{-19} \text{ C}$ 。(1)求电子所受的库仑力；(2)电子所受库仑力是质子对它的万有引力的多少倍？ $G = 6.67 \times 10^{-11} \text{ Nm}^2\text{kg}^{-2}$  (3)求电子绕核运动的速率。

3、如图是一电荷量为  $Q$ ，半径为  $R$  的均匀带电球体。

- (1) 用高斯定理计算电场强度在球内外空间的分布，并画出  $E-r$  曲线；
- (2) 根据电势与电场强度的关系，确定电势在球内外空间的分布，并画出曲线  $U-r$ 。



4、电量  $q$  均匀分布在长为  $l$  的细杆上，求杆的延长线上与杆一端距离为  $a$  的  $P$  点的电势（设无穷远处为电势零点）。

5、两个同心的均匀带电球面，半径分别为  $R_1 = 5.0\text{cm}$ ,  $R_2 = 20.0\text{cm}$ ，已知内球面的电势为  $V_1 = 60\text{ V}$ ，外球面的电势为  $V_2 = -30\text{ V}$ 。

(1) 求内、外球面上所带电量；(2) 在两个球面之间何处的电势为零。

6、在真空的环境中放置一个半径为  $R$  的均匀带电球面，所带总电量为  $Q$ 。

(1) 写出静电场的高斯定理的表达式；

(2) 求出球面内( $r < R$ )任一点的电场强度  $E_{\text{内}}$ ；

(3) 求出球面外( $r > R$ )任一点的电场强度  $E_{\text{外}}$ ；

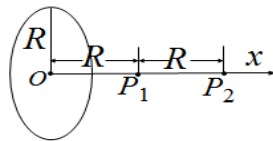
(4) 求出球面内、外任一点的电势  $U$  (设无穷远处为电位零点)。

7、一均匀带电圆环，其半径为  $R$ ，带电总量为  $Q$ ，试求出在圆环轴线上任一点的电势  $V$  (设该点至圆心之距用  $x$  表示)，并讨论  $x=0$  与  $x \gg R$  两种情况下的电势  $U$ ？

8、如图所示，一半径为  $R$ ，总电量为  $q$  的均匀带电圆环。

(1)请求出该圆环轴线上任一点的电势(设无穷远处电势为零)；

(2)设轴线上  $P_1$ 、 $P_2$  点到圆心具体分别为  $R$  和  $2R$ ，电势分别为  $U_1$  和  $U_2$ ，则  $\frac{U_1}{U_2}$  等于多少？



9、已知  $u = 6x - 6x^2y - 7z^2$  求  $(2, 3, 0)$  点的电场强度。

10、一个内外半径分别为  $R_1$  和  $R_2$  的均匀带电球壳，总电荷为  $Q_1$ ，球壳外同心罩一个半径为  $R_3$  的均匀带电球面，球面带电荷为  $Q_2$ ，求电场分布。试分析电场强度是否是场点与球心的距离  $r$  的连续函数？

11、一个半径为  $r$  的半球面均匀带电，面电荷密度为  $\sigma$ 。求球心的电场强度。

12、两个点电荷  $q_1$  C 和  $q_2$  C，相距 10 cm。设点 A 是它们连线的中点，点 B 的位置离  $q_1$  为 8.0 cm，离  $q_2$  为 6.0 cm。求：

(1) 点 A 的电势；

(2) 点 B 的电势；

(3) 将电量为  $C$  的点电荷由点 B 移到点 A 所需要作的功。

### 三、问答题

1、电场强度  $\vec{E}$  和电势  $U$  是描写电场分布的两个物理量，它们有什么样的区别和联系？若用场叠加原理计算场强  $\vec{E}$  和电势  $U$ ，应注意什么？

2、什么是静电场？写出静电场的高斯定理和环路定理的表达式，并阐述其物理意义？

3、写出物理量电场强度  $E$  与电势  $U$  之间的积分关系。

院 系 \_\_\_\_\_ 专 业 \_\_\_\_\_  
姓 名 \_\_\_\_\_ 学 号 \_\_\_\_\_

## 第 12 章 静电场中的导体和电介质

### 基本要求

- 1、理解并掌握导体的静电平衡条件及静电平衡导体的基本性质。
- 2、了解电介质极化的机制，了解极化规律；理解电位移矢量的定义和有介质时的高斯定理。
- 3、理解电容概念，掌握计算电容器的方法
- 4、掌握电容器储能公式，并通过电容器的储能了解电场的能量。。

### 内容概述

#### 1. 静电场中的导体

##### 金属导体的静电平衡

导体中自由电荷没有定向运动的状态，称为静电平衡。处于静电平衡的导体有如下三个重要的性质

- (1) 导体是个等势体，表面是个等势面；
- (2) 导体表面外侧的场强方向处处垂直于表面，并且有  $E = \frac{\sigma}{\epsilon_0}$ ；
- (3) 导体内部无净电荷，即电荷体密度  $\rho = 0$ ，电荷只分布在导体表面。

学习中需要注意以下几个问题：

(1) 静电平衡时导体中自由电荷没有定向移动（或宏观运动）的状态，而实现这一状态的必要条件，是导体内部的电场强度为零。

(2) 第 3 条性质是说导体内部不存在净电荷，所以过剩电荷都分布在导体的表面上。这里所说的导体“表面”，不仅包括导体的外表面，如果导体存在空间（或空腔）的话，也应该包括内表面。

(3) 这里所说的导体，是指均匀导体而言。所谓均匀，是指物理上的均匀和化学上的均匀。对于物理上不均匀（如温度不均匀）的导体，或化学上不均匀（如成分不均匀）的导体，其内部可能存在过剩电荷。

##### 导体表面的电荷和电场

(1) 对于孤立导体，电荷在其表面上分布的大致情形是：表面凸出且曲率较大处，电荷面密度较大；表面平坦处，电荷面密度较小；表面凹进处，电荷密度更小，甚至为零。

(2)导体表面附近的电场强度与该处电荷面密度有关。

### 导体空腔

导体空腔有如下性质:

- a) 若腔内无电荷,则腔内表面不存在净电荷,所有净电荷都只分布在外表面;若腔内放置电荷,则腔内表面上存在与腔内电荷等量异号的净电荷;
- b) 若腔内无电荷,则腔内无电场;若腔内放置电荷,并将空腔导体接地,则腔外空间不受腔内电荷的影响。

## 2. 电容和电容器

杨氏双缝干涉是利用分波阵面法获得相干光波的典型实验,学习时应注意以下问题:

$$(1) \text{ 电容器 } \left[ \begin{array}{l} \text{定义: } C = \frac{Q}{V_1 - V_2}; \\ \text{说明: 电容器的电容也仅与两极板的尺寸、几何形状及相对位置有关,} \\ \text{于 } q \text{ 无关。} \end{array} \right.$$

学习时有应该注意:

在电容器电容的定义中,  $Q$  到底是哪里的电荷? 正确的理解应是: 如果分母的电势差是  $V_A - V_B$ , 则分子的电荷量必定是 A 极板所带的电荷量  $Q_A$  (本身带符号); 如果分母的电势差是  $V_B - V_A$ , 则分子的电荷量必定是 B 极板 (内表面) 上所带的电荷量  $Q_B$  (本身带符号)。这样就保证了电容器的电容始终为正值。

$$(2) \text{ 电容器的串联和并联 } \left[ \begin{array}{l} \text{串联: } \frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}; \\ \text{并联: } C = C_1 + C_2 \end{array} \right.$$

### (3) 电容器的计算

电容器的计算大致可按照这样几个步骤进行:

- a) 先假设两个极板分别带有  $+Q$  和  $-Q$  的电荷量, 计算极板间电场强度的分布, 在一般情况下都可以利用高斯定理计算;
- b) 根据极板间电场强度的分布, 求出两极板的电势差;
- c) 将极板电荷量和两极板电势差带入电容器电容的定义式, 计算电容。

## 3. 静电场中的电介质

电极化强度矢量被定义为  $\vec{P} = \frac{\sum \vec{p}}{\Delta V}$  即等于单位体积内电偶极矩的矢量和, 它的大小:

$P = \sigma'$ ,  $\sigma'$  为极化电荷面密度。



电位移矢量  $\vec{D}$   $\left\{ \begin{array}{l} \text{定义: } \vec{D} = \varepsilon_0 \vec{E} + \vec{P} \Rightarrow \text{普遍适用;} \\ \text{引入目的: 是使 } \vec{P} \text{ 不直接出现而使高斯定理形式得到简化;} \\ \text{与 } \vec{E} \text{ 的关系: 为 } \vec{D} = \varepsilon_0 \varepsilon_r \vec{E} \Rightarrow \text{只对线性电介质成立。} \end{array} \right.$

有介质时的高斯定理

(1) 公式:  $\oint_S \vec{D} \cdot d\vec{S} = \sum_{i=1}^n (Q_0)_i$

(2) 说明:  $\left\{ \begin{array}{l} \vec{D} \text{ 的通量仅与面内包围的自由电荷有关;} \\ \vec{D} \text{ 本身则由面内外全部电荷 (包括极化电荷) 产生;} \\ \vec{D} \text{ 是个辅助矢量, 没有什么直接的物理意义。} \end{array} \right.$

(3) 应用: 可用于方便地处理电荷分布具有特殊对称性的带电体系的电场分布问题。

## 4. 静电场的能量

电容器的储能和电场能量

(1) 电容器储能:  $W_e = \frac{1}{2} \varepsilon E^2 S d = \frac{1}{2} \varepsilon E^2 V$ , 注意这个能量是储存在电场中的。

(2) 电场的能量密度:  $\omega_e = \frac{1}{2} \varepsilon E^2 = \frac{1}{2} \vec{D} \cdot \vec{E}$ , 它表明了电场中单位体积内所储存的能量。

## 练习题

### 一、 选择题

- 1、将一个试验电荷  $Q$  (正电荷) 放在带有正电荷的大导体附近  $P$  点处, 测得它所受力为  $F$ , 若考虑到电量  $Q$  不是足够小, 则( )
  - A、 $F/Q$  比  $P$  点处原先的场强数值大
  - B、 $F/Q$  比  $P$  点处原先的场强数值小
  - C、 $F/Q$  等于原先  $P$  点处场强的数值
  - D、 $F/Q$  与  $P$  点处场强数值关系无法确定
- 2、在一个不带电的导体球壳的球心处放入一点电荷  $q$ , 当  $q$  由球心处移开, 但仍在球壳内时, 下列说法中正确的是 ( )
  - A、球壳内、外表面的感应电荷均不再均匀分布
  - B、球壳内表面感应电荷分布不均匀, 外表面感应电荷分布均匀
  - C、球壳内表面感应电荷分布均匀, 外表面感应电荷分布不均匀
  - D、球壳内、外表面感应电荷仍保持均匀分布
- 3、在静电场中, 下列说法正确的是 ( )
  - A、带正电荷的导体, 其电势一定是正值

B、等势面上各点的场强一定相等

C、在导体表面附近处的场强，是由该表面上的电荷  $\sigma$  产生的，与空间其它地方的电荷无关

D、一个孤立的带电导体，表面的曲率半径愈大处，电荷密度愈小

4、带电体外套一导体球壳，则下列说法中正确的是 ( )

(1). 壳外电场不影响壳内电场，但壳内电场要影响壳外电场

(2). 壳内电场不影响壳外电场，但壳外电场要影响壳内电场

(3). 壳内、外电场互不影响

(4). 壳内、外电场仍相互影响

(5). 若将外球壳接地，则壳内、外电场互不影响。

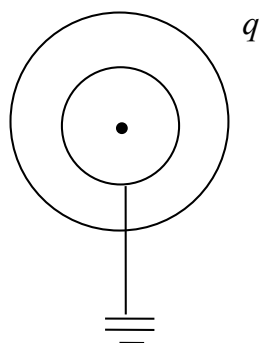
A、(2)(3)

B、(3)(5)

C、(1)(4)

D、(1)(5)

5、如图所示，两同心金属球壳，它们离地球很远。如果外球壳带上正电  $q$ ，当内球壳用细导线穿过外球壳上的绝缘小孔与地相接，则内球壳 ( )



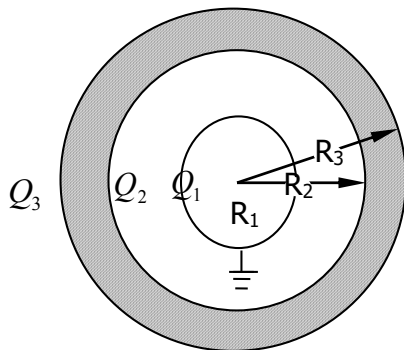
A、不带电荷

B、带正电荷

C、带负电荷

D、球壳外表面带负电荷，内表面带等量正电荷。

6、如图所示，半径为  $R_1$  的导体球带有电荷  $q$  ( $q > 0$ )，此球外有一内、外半径为  $R_2$ 、 $R_3$  的同心导体球壳、壳上带有正电荷  $q$ 。将内球接地，待重新静电平衡后，内球带电  $Q_1$ ，球壳内表面带电  $Q_2$  和外表面带电  $Q_3$ 。如果球壳离地面较远，那么  $Q_1$ 、 $Q_2$ 、 $Q_3$  的情况是 ( )



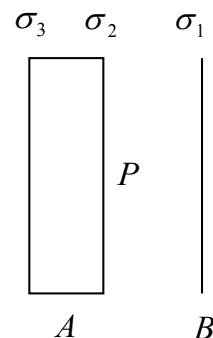
A、 $Q_1 = Q_2 = 0, Q_3 = q$

B、 $Q_1 > 0, Q_2 = -Q_1, Q_3 = q + Q_1$

C、 $Q_1 < 0, Q_2 = -Q_1, Q_3 = q + Q_1$

D、 $Q_2 = -Q_1 = q, Q_3 = 0$

7、如图所示，B 为面电荷密度为  $\sigma_1$  的均匀带电的无限大平面，A 为一无限大带电平行导体板。静电平衡后，A 板的面电荷密度分别为  $\sigma_2$  和  $\sigma_3$ ，那么极靠近 A 板的右侧面的一点 P 的场强大小为 ( )。



A、  $\frac{\sigma_2}{2\epsilon_0}$

B、  $\frac{\sigma_2}{\epsilon_0}$

C、  $\frac{\sigma_1}{2\epsilon_0} + \frac{\sigma_2}{2\epsilon_0} + \frac{\sigma_3}{2\epsilon_0}$

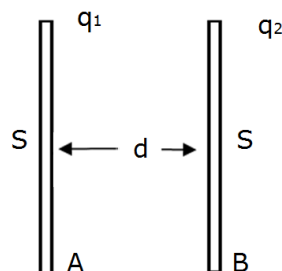
8、两块面积为  $S$  的金属板 A 和 B 彼此平行放置，板间距离为  $d$  ( $d$  远远小于板的线度)，设 A 板带电量  $q_1$ , B 板带电量  $q_2$ , 则 A, B 板间的电势差为( )

A、  $\frac{q_1 + q_2}{2\epsilon_0 S}$ ;

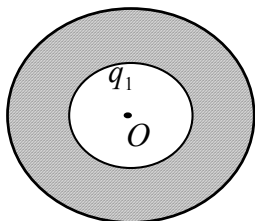
B、  $\frac{q_1 + q_2}{4\epsilon_0 S} \cdot d$ ;

C、  $\frac{q_1 - q_2}{2\epsilon_0 S} \cdot d$ ;

D、  $\frac{q_1 - q_2}{4\epsilon_0 S} \cdot d$



9、如图所示，金属球内有一球形空腔，金属球整体不带电，而在球形空腔中心处有一点电荷  $q_1$ 。当金属球外移来一点电荷  $q_2$ 。达到静电平衡后，下列说法成立的是 ( )



(1) 球外场强仍是球对称的

(2) 球内表面电荷分布仍是球对称的

(3) 球内、外表面之间的电位差不变

(4)  $q_1$  与  $q_2$  之间的静电作用力为 0

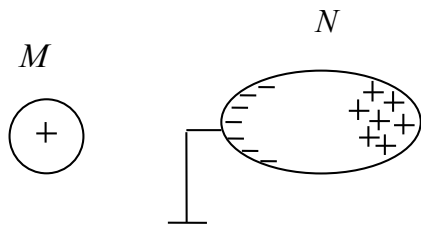
A、 (1)(2)

B、 (2)(3)

C、 (3)(4)

D、 (1)(4)

10、如图所示，一带正电荷的物体  $M$ ，靠近一不带电的金属导体  $N$ ， $N$  的左端感应出负电荷，右端感应出正电荷。若将  $N$  的左端接地，则 ( )



A、  $N$  上的负电荷入地

B、  $N$  上的正电荷入地

C、  $N$  上的电荷不动

D、  $N$  上所有电荷都入地

11、关于带电导体球中的电场和电位，下列叙述中哪些为错误的( )

(1) 导体内的电场大小和电位均为零;

(2) 导体电场大小不为零，电位为零;

(3) 导体内的电位与导体表面的电位相等;

(4) 导体内的电位较表面电位为低;

(5) 导体内的电位较表面电位为高。

A、(1)(2)(4)(5)      B、(2)(3)(4)(5)      C、(1)(2)(3)(4)      D、(1)(3)(4)(5)

12、平行板电容器的极板面积为  $S$ ，二极板内表面的间距为  $d$ ，极板间为真空。现使其中一个极板上带电荷  $+Q$ ，那么二极板间的电位差等于 ( )

A、0      B、 $\frac{Qd}{4\epsilon_0 S}$       C、 $\frac{Qd}{2\epsilon_0 S}$       D、 $\frac{Qd}{\epsilon_0 S}$

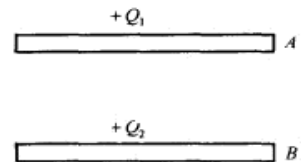
13、在真空中，一半径为  $R_1$  的金属球外同心地套上一个金属球壳，球壳内、外半径分别为  $R_2$  和  $R_3$ ，则此金属球和球壳组成的电容器的电容为( )

A、 $\frac{4\pi\epsilon_0 R_1 R_2}{R_2 - R_1}$       B、 $\frac{4\pi\epsilon_0 R_1 R_2}{R_2 + R_1}$   
C、 $\frac{4\pi\epsilon_0 (R_2 - R_1)}{R_3 R_1}$       D、 $\frac{4\pi\epsilon_0 R_1 R_3}{R_2 - R_1}$

14、一半径为  $R$  的导体球表面的面电荷密度为  $\sigma$ ，在距球面为  $R$  处，电场强度为 ( )

A.  $\frac{\sigma}{16\epsilon_0}$     B.  $\frac{\sigma}{8\epsilon_0}$       C.  $\frac{\sigma}{4\epsilon_0}$       D.  $\frac{\sigma}{2\epsilon_0}$

15、A、B 为两导体大平板，面积均为  $S$ ，平行放置，A 板带电荷  $+Q_1$ ，B 板带电荷  $+Q_2$ ，如果使 B 板接地，则 AB 间电场强度  $\vec{E}$  大小为 ( )。



A.  $Q_1 / 2\epsilon_0 S$       B.  $(Q_1 - Q_2) / 2\epsilon_0 S$   
C.  $Q_1 / \epsilon_0 S$       D.  $(Q_1 + Q_2) / 2\epsilon_0 S$

16、关于高斯定理，下列说法中哪一个是正确的？( )

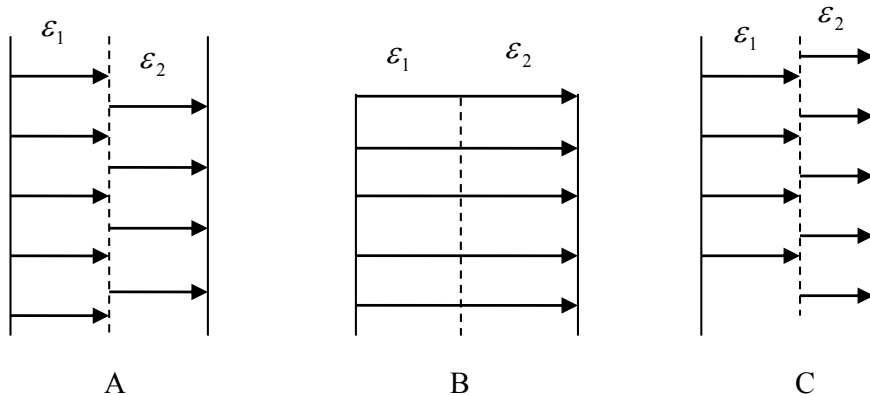
A. 高斯面内不包围自由电荷，则面上各点电位移矢量  $\vec{D}$  为零  
B. 高斯面上处处  $\vec{D}$  为零，则面内必不存在自由电荷  
C. 高斯面的  $\vec{D}$  通量仅与面内自由电荷有关  
D. 以上说法都不正确

17、在静电场中，作闭合曲面  $S$ ，若有  $\oint_S \vec{D} \cdot d\vec{S} = 0$  (式中  $\vec{D}$  为电位移矢量)，则  $S$  面内必定 ( )

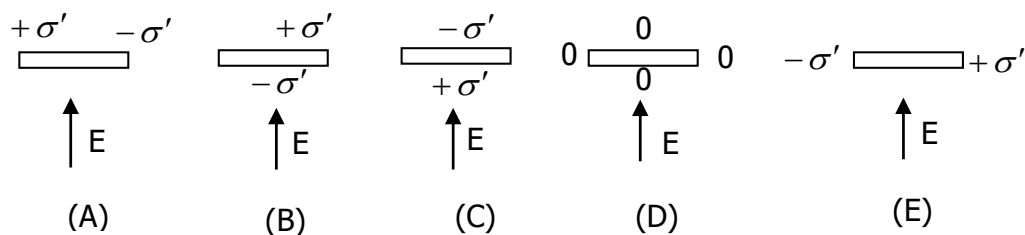
A. 既无自由电荷，又无束缚电荷      B. 没有自由电荷  
C. 自由电荷和束缚电荷的代数和为零      D. 自由电荷的代数和为零

18、如图所示，平行板电容器中，充填着两种各向同性的均匀电介质，介电常数  $\epsilon_1 > \epsilon_2$ 。

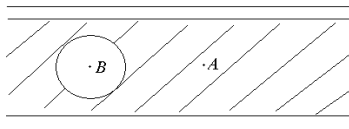
图中力线为  $\vec{D}$  线或  $\vec{E}$  线，其中正确反映了  $\vec{E}$  线分布的是 ( )



19、一无限大均匀介质，场强为  $E$ ，其中挖去一扁形的长方体，形成空腔，则中空长方体形表面极化电荷分布为图中的（ ）

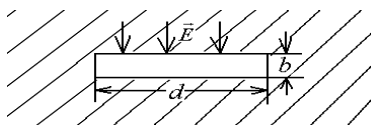


20、带电平行板电荷器中，均匀充满电介质，在其中挖一个球形空腔，则球心  $B$  与介质中  $A$  点的电场场强（ ）



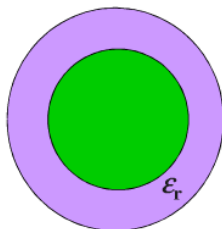
- A.  $E_A = E_B$ ;    B.  $E_A < E_B$     C.  $E_A > E_B$     D. 不一定

21、在相对介电常数为  $\epsilon_r$  的介质中挖去一扁平的圆柱体空腔，直径为  $d$ ，高为  $b$ ，( $d \gg b$ )，外电场  $E$  垂直通过圆柱体底面，则在此空腔中的电场强度为（ ）



- A.  $\epsilon_r E$     B.  $(\epsilon_r - 1)E$     C.  $\frac{E}{\epsilon_r - 1}$     D.  $\frac{E}{\epsilon_r}$

22、一导体球外充满相对介电常数为  $\epsilon_r$  的均匀电介质，若测得导体表面附近场强为  $E$ ，则导体球面上的自由电荷面密度为：（ ）



A、 $\varepsilon_0 E$     B、 $\varepsilon_0 \varepsilon_r E$     C、 $\varepsilon_r E$     D、 $(\varepsilon_0 \varepsilon_r - \varepsilon_0)E$

23、一空气平行板电容器充电后与电源断开，然后在两极板间充满各向同性均匀电介质，则场强的大小  $E$ 、电容  $C$ 、电压  $U$ 、电场能量  $W_e$  四个量各自与充入介质前相比较，增大（用  $\uparrow$  表示）或减小（用  $\downarrow$  表示）的情形为（    ）

A、 $E \downarrow, C \uparrow, U \uparrow, W_e \downarrow$     B、 $E \uparrow, C \downarrow, U \downarrow, W_e \uparrow$

C、 $E \uparrow, C \uparrow, U \uparrow, W_e \uparrow$     D、 $E \downarrow, C \uparrow, U \downarrow, W_e \downarrow$

24、一内外半径分别为  $R_1$  和  $R_2$  的同心球形电容器，其间充满相对电常数  $\varepsilon_r$  的电介质，当内球带电量为  $Q$  时，电容器中的储能为（    ）

A、 $W_e = \frac{Q^2}{16\pi\varepsilon_0\varepsilon_r} \left( \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right)$     B、 $W_e = \frac{Q^2}{8\pi\varepsilon_0\varepsilon_r} \left( \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right)$

C、 $W_e = \frac{Q^2}{8\pi\varepsilon_0\varepsilon_r} \ln \frac{R_2}{R_1}$     D、 $W_e = \frac{Q^2}{32\pi\varepsilon_0\varepsilon_r} (R_1 - R_2)$

25、如果某带电导体球其面电荷密度增大为原来的 2 倍，则其电场的能量变为原来的（    ）

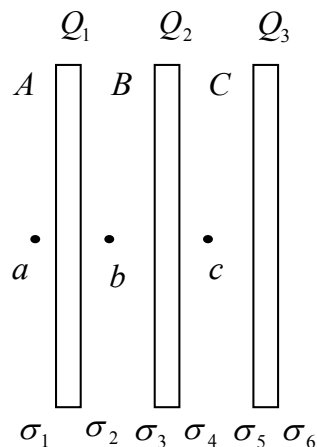
A. 2 倍    B. 1/2 倍    C. 4 倍    D. 1/4 倍

## 二、计算题

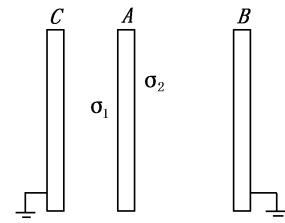
1、3 块面积均为  $S$ ，且靠的很近的导体平板 A、B、C，分别带电  $Q_1$ 、 $Q_2$ 、 $Q_3$ ，如图所示。试求：

(1) 6 个导体表面的电荷密度  $\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_6$ ；

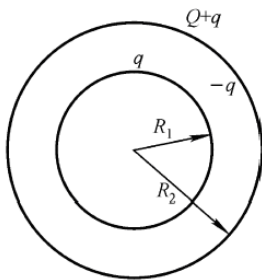
(2) 图中  $a, b, c$  三点的场强。



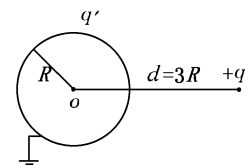
2、三个平行金属板 A，B 和 C 的面积都是  $200\text{cm}^2$ ，A 和 B 相距  $4.0\text{mm}$ ，A 与 C 相距  $2.0\text{mm}$ 。B，C 都接地，如题所示。如果使 A 板带正电  $3.0 \times 10^{-7}\text{C}$ ，略去边缘效应，问 B 板和 C 板上的感应电荷各是多少？以地的电势为零，则 A 板的电势是多少？



3、如附图所示，一导体球半径为  $R_1$ ，带电量为  $q$  ( $q>0$ )，外罩一半径为  $R_2$  的同心薄球壳，外球壳所带总电荷为  $Q$ ，求此系统的电势和电场分布。



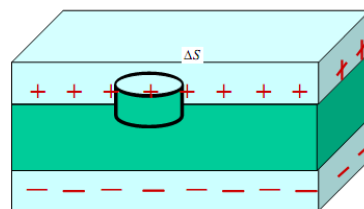
4、半径为  $R$  的金属球离地面很远，并用导线与地相联，在与球心相距为  $d=3R$  处有一点电荷  $+q$ ，试求：金属球上的感应电荷的电量。



5、在半径为  $R_1$  的金属球之外包有一层外半径为  $R_2$  的均匀电介质球壳，介质相对介电常数为  $\epsilon_r$ ，金属球带电  $Q$ 。试求：

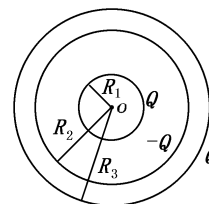
- (1) 电介质内、外的场强；
- (2) 电介质层内、外的电势；
- (3) 金属球的电势。

6、有一个平板电容器，充电后极板上电荷面密为  $\sigma_0 = 4.5 \times 10^{-5} \text{ C} \cdot \text{m}^{-2}$ ，现将两极板与电源断开，然后再把相对电容率为  $\epsilon_r = 2.0$  的电介质插入两极板之间，利用高斯定理计算此时电介质中的  $D$ 、 $E$  和  $P$  各为多少？



8、半径为  $R_1 = 2.0 \text{ cm}$  的导体球，外套有一同心的导体球壳，壳的内、外半径分别为  $R_2 = 4.0 \text{ cm}$  和  $R_3 = 5.0 \text{ cm}$ ，当内球带电荷  $Q = 3.0 \times 10^{-8} \text{ C}$  时，求：

- (1) 整个电场储存的能量；
- (2) 如果将导体壳接地，计算储存的能量；
- (3) 此电容器的电容值。

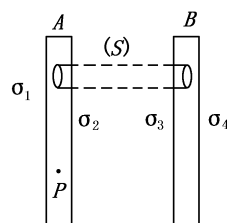




### 三、问答题

1、无限大均匀带点平面（面电荷密度为 $\sigma$ ）两侧场强为 $E = \sigma / 2\epsilon_0$ ，而在静电平衡状态下，导体表面（该处表面电荷密度为 $\sigma$ ）附近场强为 $E = \sigma / \epsilon_0$ ，为什么前者比后者小一半？

2、证明：对于两个无限大的平行平面带电导体板(题 6 图)来说，(1)相向的两面上，电荷的面密度总是大小相等而符号相反；(2)相背的两面上，电荷的面密度总是大小相等而符号相同。



3、试从机理、电荷分布、电场分布等方面来比较导体的静电平衡和电介质的极化有何异同。

4、电势能、电容器存储的能量、电场的能量三者之间有什么区别和联系？

院 系 \_\_\_\_\_ 专 业 \_\_\_\_\_  
 姓 名 \_\_\_\_\_ 学 号 \_\_\_\_\_

## 第 13 章 电流和稳恒磁场

### 基本要求

- 1、理解恒定电流条件和导电规律。
- 2、掌握毕奥-萨伐尔定律，磁感应强度的定义。
- 3、理解磁场的基本特征，重点掌握利用安培环路定理计算磁感应强度。
- 4、掌握磁场对运动电荷的作用，洛伦兹力和安培力的计算。
- 5、了解霍尔效应，理解载流线圈在磁场中的运动。

### 内容概述

#### 1. 恒定电流条件和导电规律

- (1) 电流强度和电流密度的定义

$$I = env_d S, I = \int_S \vec{j} \cdot d\vec{S}$$

- (2) 电流的连续性方程，稳恒电流条件

$$\int_S \vec{j} \cdot d\vec{S} = 0$$

- (3) 稳恒电场的建立，电源电动势的定义：

$$\varepsilon = \int_-^+ \vec{E}_k \cdot d\vec{l}, \text{ 其中 } \vec{E}_k \text{ 表示非静电场。}$$

- (4) 欧姆定律及特殊形状导体电阻的计算

$$\vec{j} = \frac{\vec{E}}{\rho} = \gamma \vec{E} (\sigma \vec{E}), \quad R = \rho \frac{l}{S}$$

#### 2. 磁感应强度 磁场对电流的作用

- (1) 运动的电荷产生磁，而磁又对运动着的电荷发生作用。

(2) 毕奥-萨伐尔定律： 
$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{Id\vec{l} \times \vec{r}}{r^3}$$

其中， $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{H/m}$ ，称为真空中的磁导率， $\vec{r}$  为电流元指向所求点的矢量。

$d\vec{B}$  的大小： 
$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{Idl \sin \theta}{r^2}$$
 ( $\theta$  为电流元  $Id\vec{l}$  与径矢  $\vec{r}$  之间的夹角)

整个稳恒电流回路  $L$  在场点  $P$  产生的磁感应强度:  $\vec{B} = \int_L d\vec{B} = \int_L \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{Id\vec{l} \times \vec{r}}{r^3}$

(3) 几种典型稳恒电流的磁场:

(a) 载流直导线的磁场:  $B = \frac{\mu_0 I}{4\pi} (\cos \theta_1 - \cos \theta_2)$ ,

特例: 无限长载流直导线附近一点的磁场:  $B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}$  ( $r$  为导线到场点的垂直距离)

(b) 圆电流轴线上的磁场:  $B = \frac{\mu_0}{2} \frac{R^2 I}{(R^2 + r^2)^{\frac{3}{2}}}$  ( $R$  为圆电流的半径)

特例: 圆电流圆心处的磁场  $B_O = \frac{\mu_0 I}{2R}$

(c) 载流螺线管轴线上的磁场:  $B = \frac{\mu_0 n I}{2} (\cos \theta_2 - \cos \theta_1)$

无限长 ( $L \gg R$ ) 螺线管内部的磁场  $B = \mu_0 n I$

半无限长螺线管内部的磁场  $B = \frac{1}{2} \mu_0 n I$

### 3. 磁场的基本特征

(1) 磁感线, 磁通量: 在磁场中穿过任意曲面  $S$  的磁感线的条数称为穿过该面的磁通量。

$$\Phi_m = \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = \int_S B \cos \theta dS$$

(2) 磁场的高斯定理: 通过任意闭合曲面  $S$  的磁通量恒等于 0, 即:  $\oint_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0$

(3) 安培环路定理: 在真空中的稳恒磁场中, 磁感应强度  $B$  的环流 (沿任何闭合回路  $L$  的线积分) 等于穿过该积分回路所有电流强度的代数和的  $\mu_0$  倍, 即:

$$\oint_L \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \sum I_i$$

### 4. 磁场对运动电荷的作用

(1) 带电粒子在磁场中运动

$$\text{洛伦兹力 } f: \vec{f} = q\vec{v} \times \vec{B}$$

带电粒子以垂直磁场方向的速度入射入匀强磁场中, 做匀速圆周运动。

$$\text{周期: } T = \frac{2\pi m}{qB}, \text{ 频率: } \nu = \frac{qB}{2\pi m}$$

带电粒子速度  $v_0$  和磁场成任意角度  $\theta$ , 进入匀强磁场中, 做螺旋线运动。

$$\text{半径: } R = \frac{mv \sin \theta}{qB}, \text{ 螺距: } h = v_{\parallel} T = \frac{2\pi m}{qB} v \cos \theta$$

(2) 霍尔效应, 霍尔电势差

$$\Delta U = R_H \frac{IB}{d}, \text{ } R_H \text{ 为霍尔系数}$$

(3) 安培力, 安培的定义, 安培力的做功

一段导线在磁场中受到的安培力:  $\vec{F} = \int I d\vec{l} \times \vec{B}$

安培力对运动载流导线做的功:  $dW = Id\Phi_m$

(4) 载流线圈磁矩的定义

载流  $I$  的刚性平面线圈  $S$  的磁矩:  $\vec{P}_m = IS\vec{n}$

载流线圈在匀强磁场中受到的磁力矩:  $\vec{M} = \vec{P}_m \times \vec{B}$

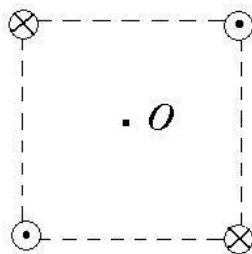
载流线圈在非匀强磁场中受到的磁力矩:  $\vec{M} = \int d\vec{M} = \int d\vec{P}_m \times \vec{B}$

磁力矩对载流线圈做的功:  $W = \int -Md\varphi = I\Delta\Phi_m$

## 练习题

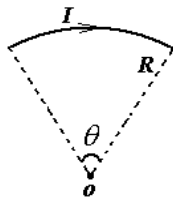
### 一、选择题

1、四条相互平行的载流长直导线中的电流强度均为  $I$ , 如图放置, 正方形的边长为  $2a$ , 正方形的中心的磁感应强度的大小为: ( )



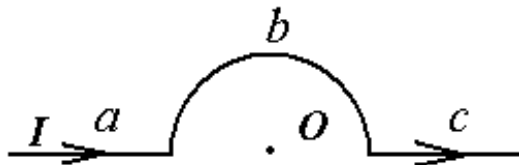
- A、 $B = 2 \frac{\mu_0}{\pi a} I$       B、 $B = \frac{2\mu_0}{\sqrt{2}\pi a} I$       C、 $B = 0$       D、 $B = \frac{\mu_0}{\pi a} I$

2、如图所示, 通有恒定电流  $I$  的一段弧圆, 其半径为  $R$ , 所张开的角度为  $\theta$ , 其在圆心  $O$  处的磁感应  $B$  的大小为 ( )



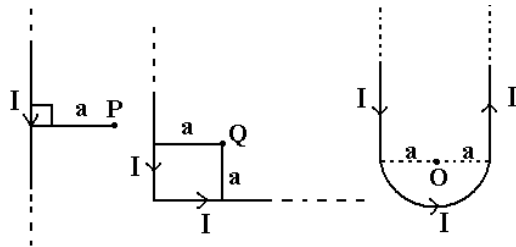
- A、0      B、 $\frac{\mu_0 I \theta}{2\pi R}$       C、 $\frac{\mu_0 I \theta}{4\pi R}$       D、 $\frac{\mu_0 I}{2\pi R}$

3、有一载流导线如图所示, a,c 部分为直导线, b 部分为半径为  $R$  的半圆线段, 圆心在直导线 a, c 的连线上。则圆心处的磁感应强度  $B$  的大小为 ( )



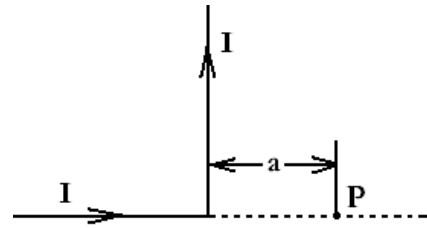
- A、 $\frac{\mu_0 I}{2R}$       B、 $\left(\frac{\mu_0 I}{2R}\right) + \left(\frac{\mu_0 I}{2\pi R}\right)$       C、0      D、 $\frac{\mu_0 I}{4R}$

4、通有电流  $I$  的无限长直导线弯成如图所示的三种形状，则 P、Q、O 各点磁感应强度的大小  $B_P$ 、 $B_Q$ 、 $B_O$  间的关系为 ( )



- A、 $B_P > B_Q > B_O$       B、 $B_Q > B_P > B_O$   
 C、 $B_Q > B_O > B_P$       D、 $B_O > B_Q > B_P$

5、如图所示，一条无限长载流导线在一处折成直角，P 点在折线的延长线上，到折点距离



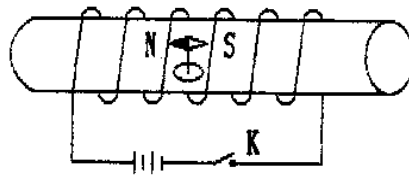
为  $a$ ，导线上电流为  $I$ ，则 P 点磁感应强度为 ( )

- A、 $\frac{\mu_0 I}{4\pi a}$       B、 $\frac{\mu_0 I}{2\pi a}$       C、 $\frac{\sqrt{2}\mu_0 I}{2\pi a}$       D、 $\frac{\sqrt{2}\mu_0 I}{4\pi a}$

6、一半径为  $R$  的金属圆环，载有电流  $I$ ，在其所在平面内的磁感应强度为 ( )

- A、方向相同，但是数值不同      B、方向不同，但是数值相同  
 C、方向相同，数值相同      D、方向不同，数值也不同

7、如图所示，螺线管内轴上放入一小磁针，当电键 K 闭合时，小磁针的 N 极的指向 ( )



- A、向外转  $90^\circ$ .      B、向里转  $90^\circ$ .      C、保持图示位置不动.  
 D、旋转  $180^\circ$ .      E、不能确定.

8、两根无限长直导线互相平行，分别通过同方向大小为  $I$  和  $4I$  的恒定电流，已知两长直导线相距为  $d$ ，则磁感强度  $B$  等于零的位置距通电  $I$  的导线为  $x$ ， $x$  大小等于 ( )

- A、 $\frac{1}{3}d$       B、 $\frac{1}{2}d$       C、 $\frac{1}{4}d$       D、 $\frac{1}{5}d$

9、一细长螺线管通有电流  $I$ ，若导线均匀密绕，单位长度匝数为  $n$ ，已知螺线管中部磁感强度大小为  $\mu_0 n I$ ，则下列说法正确的是 ( )

- A、边缘处磁场大小仍为  $\mu_0 n I$ ，因磁感应线不能中断；  
 B、边缘处磁场大小为  $\mu_0 n I$ ，但方向与内部反向；  
 C、边缘处磁场大小为  $\frac{1}{2}\mu_0 n I$ ，说明磁感应线在边缘处不连续；

D、边缘处磁场大小为  $\frac{1}{2}\mu_0 nI$ ，但磁感应线连续。

10、一载有电流  $I$  的细导线分别均匀密绕在半径  $R$  和  $r$  的长直圆筒上形成两个螺线管 ( $R = 2r$ )，两螺线管单位长度上的匝数相等，两螺线管中的磁感应强度大小  $B_R$  和  $B_r$  应满足:

A、 $B_R = 2B_r$

B、 $B_R = B_r$

C、 $2B_R = B_r$

D、 $B_R = 4B_r$

11、运动电荷产生的磁场由公式  $\vec{B} = \frac{\mu_0 q \vec{v} \times \vec{r}}{r^3}$  表示。点电荷在真空中作匀速直线运动，它在给定点 P 处的磁感应强度  $B$  的大小和方向的变化，下列哪种说法是正确的？ ( )

A、大小和方向都发生变化      B、大小不变，方向变化

C、方向不变，大小变化      D、大小、方向均不变

12、边长为  $L$  的一正方形导体框上通有电流  $I$ ，则此框中心点 O 的磁感应强度 ( )

A、与  $L$  无关      B、与  $L$  成正比      C、与  $L^2$  成正比      D、与  $L$  成反比

13、均匀磁场的磁感应强度  $\vec{B}$  垂直于半径为  $r$  的圆面。今以该圆周为边线，作一半球面  $s$ ，则通过  $s$  面的磁通量的大小为： ( )

A、 $2\pi r^2 B$ 。

B、 $\pi r^2 B$ 。

C、0。

D、无法确定。

14、下列对安培环路定理  $\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 I$  的说法中，正确的是 ( )

A、安培回路上的  $B$  完全是由公式中的  $I$  所产生的

B、如果  $I=0$ ，一定有  $B=0$

C、如果在安培回路上的  $B$  处处为零，一定有  $I=0$

D、以上说法都不对

15、取一闭合积分回路  $L$ ，使三根载流导线穿过它所围成的面。现改变三根导线之间的相互间隔，但不越出积分回路，则 ( )。

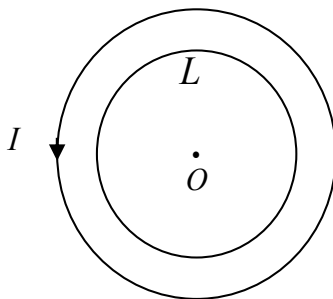
A、回路  $L$  内的  $\sum I$  不变， $L$  上各点的  $\vec{B}$  不变。

B、回路  $L$  内的  $\sum I$  不变， $L$  上各点的  $\vec{B}$  改变。

C、回路  $L$  内的  $\sum I$  改变， $L$  上各点的  $\vec{B}$  不变。

D、回路  $L$  内的  $\sum I$  改变， $L$  上各点的  $\vec{B}$  改变。

16、如图，在一圆形电流  $I$  所在的平面内，选取一个同心圆形闭合回路  $L$ ，则由安培环路定理可知 ( )



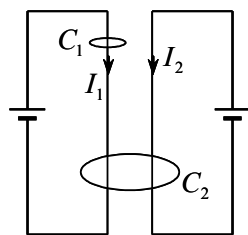
A、 $\oint_L \vec{B} \cdot d\vec{l} = 0$  且环路上任意一点  $B=0$ 。

B、 $\oint_L \vec{B} \cdot d\vec{l} = 0$  且环路上任意一点  $B \neq 0$ 。

C、 $\oint_L \vec{B} \cdot d\vec{l} \neq 0$  且环路上任意一点  $B \neq 0$ .

D、 $\oint_L \vec{B} \cdot d\vec{l} \neq 0$  且环路上任意一点  $B = \text{常量}$ .

17、如图两个载流回路，电流分别为  $I_1$  和  $I_2$ ，设电流  $I_1$  单独产生的磁场为  $\vec{B}_1$ ，电流  $I_2$  单独产生的磁场为  $\vec{B}_2$ ，下列各式中正确的是( )



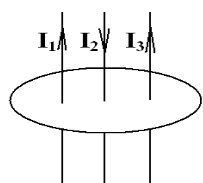
A、 $\oint_{C_2} \vec{B}_1 \cdot d\vec{l} = \mu_0(I_1 + I_2)$

B、 $\oint_{C_1} \vec{B}_2 \cdot d\vec{l} = \mu_0 I_2$

C、 $\oint_{C_1} (\vec{B}_1 + \vec{B}_2) \cdot d\vec{l} = \mu_0(I_1 + I_2)$

D、 $\oint_{C_2} (\vec{B}_1 + \vec{B}_2) \cdot d\vec{l} = \mu_0(I_1 + I_2)$

18、A、B、C 为三无限长直导线，通有电流  $I_1$ 、 $I_2$ 、 $I_3$  方向如图所示，其值  $I_2 = I_1 + I_3$ ，则任一环路有  $\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 I = 0$ ，故环路上的各点磁感应强度 ( )



A. 处处为零      B. 处处均不为零      C. 无法确定

19、在下述情况中，那些是可用安培环路定律来求磁感应强度的? ( )

A、有限长载流直导线

B、圆电流产生的磁场

C、有限长载流螺线管所产生的磁场

D、无限长载流螺线管产生的磁场

20、把一电流元依次放置在无限长的载流直导线附近的两点 A 和 B，如果 A 点和 B 点到导线的距离相等，电流元所受到的磁力大小( )

A、一定相等

B、一定不相等

C、不一定相等

D、A、B、C 都不正确

21、一电荷在均匀磁场中运动，以下说法正确的是 ( )

A、在速度不变的前提下，电荷  $q$  改为  $-q$ ，它所受的力将反向，而力的大小不变

B、电荷量  $q$  改变为  $-q$ ，同时其速度反向，则它所受的力也反向，而大小不变

C、只要电荷的速度大小不变，它朝任何方向运动时所受洛伦兹力都相等

D、以上说法都不对

22、真空中运动的两束平行电子束由于彼此的相互作用将会 ( )

A、电子束将会发散

B、电子束将会汇拢

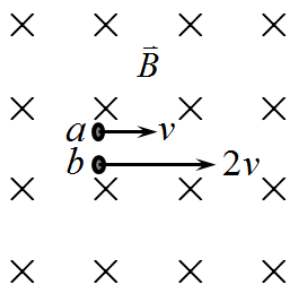
C、电子束将会发散或者汇拢

D、以上说法都不对

23、质量为  $m$ ，电量为  $q$  的带电粒子，以速率  $v$  与均匀磁场  $B$  成  $\theta$  角射入磁场，其轨迹为一螺旋线，若要增大螺距，则应该 ( )

- A、增大磁场  $B$                       B、减小磁场  $B$   
C、减小速度  $v$                       D、增加夹角  $\theta$

24、从电子枪同时射出两电子  $a$ 、 $b$ ，初速分别为  $v$  和  $2v$  方向如图所示，经均匀磁场偏转后 ( )

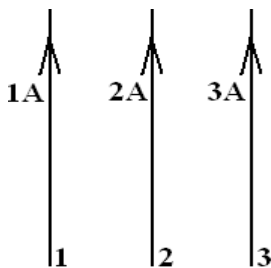


- A、同时回到出发点                      B、 $a$  先回到出发点  
C、 $b$  先回到出发点                      D、以上说法都不正确

25、关于带电粒子的运动，下列说法正确的是 ( )

- A、垂直于磁感线方向飞入匀强磁场中运动，磁场力不做功  
B、垂直于电场线方向飞入匀强电场中运动，电场力不做功  
C、沿着磁感线方向飞入匀强磁场中运动，磁场力做功，动能增加  
D、沿着电场线方向飞入匀强电场中运动，电场力做功，动能增加

26、在同一平面上有三根等距离放置的长直通电导线，如图所示，导线 1、2、3 载有电流分别为 1、2、3A，它们所受力分别为  $F_1$ 、 $F_2$ 、 $F_3$ ，则  $F_1/F_2$  为 ( )

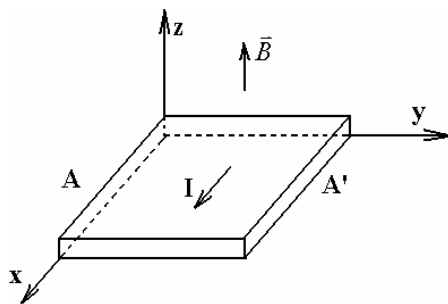


- A、 $7/16$                       B、 $5/8$                       C、 $7/8$                       D、1

27、有两个载有相同电流的通电导线，彼此之间的排斥力为  $F$ ，如果他们的电流均加倍，相互之间的距离也加倍，则彼此之间的排斥力将为 ( )

- A、 $F/4$                       B、 $F/2$                       C、 $F$                       D、 $2F$

28、一块半导体样品体积为  $abc$ ，如图所示，沿  $x$  轴方向通有电流  $I$ ，沿  $E$  轴方向加有均匀磁场  $B$ ，测得  $U_A - U_{A'} > 0$ ，则 ( )



- A、载流子是正电荷



B、载流子是负电荷

C、无法判定

29、以  $\vec{P}_m$  表示闭合电流的磁矩 ( $\vec{m} = I\vec{S}$ )，此闭合电流在磁场中所受磁力矩为 ( )

A、 $\vec{m} \times \vec{B}$       B、 $\vec{B} \times \vec{m}$       C、 $\vec{E} \times \vec{m}$       D、 $\vec{H} \times \vec{E} \times \vec{m}$

30、在均匀磁场中放置两个面积相等而且通有相同电流的线圈，一个是三角形，另一个是矩形，则两者所受到的( )

A、磁力相等，最大磁力矩相等      B、磁力不相等，最大磁力矩相等

C、磁力相等，最大磁力矩不相等      D、磁力不相等，最大磁力矩不相等

31、在均匀磁场中放置三个面积相等并且通过相同电流的单匝线圈；一个是矩形，一个是正方形，另一个是三角形。下列叙述中正确的是 ( )

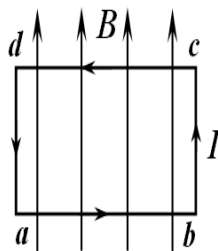
A、正方形线圈受到的合磁力为零，矩形线圈受到的合磁力最大

B、三角形线圈所受的最大磁力矩为最小

C、三线圈所受的合磁力和最大磁力矩均为零

D、三线圈所受的最大磁力矩均相等

32、匀强磁场中有一矩形通电线圈，它的平面与磁场平行，在磁场作用下，线圈发生转动，其方向是： ( )



(A) ad 边转入纸内，bc 边转出纸外.

(B) ad 边转出纸外，cd 边转入纸内.

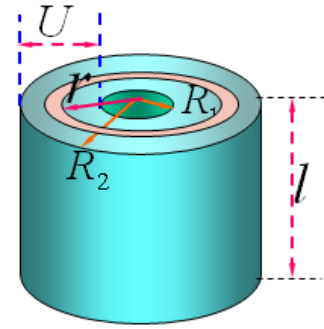
(C) ab 边转入纸内，cd 边转出纸外.

(D) ab 边转出纸外，cd 边转入纸内.

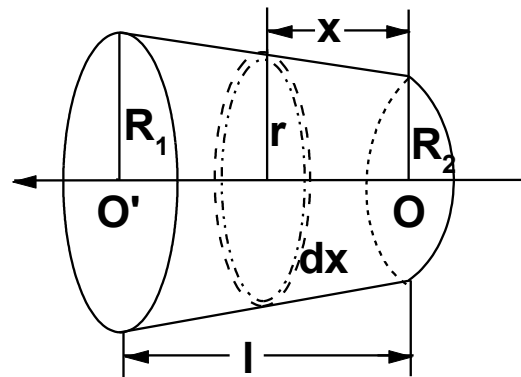
## 二、计算题

1、有一同轴电缆，内芯为半径为  $R_1$  的铜线，在铜线外包一层同轴的绝缘层，电阻率为  $\rho$ ，在绝缘层外用铝层保护起来，铝层半径为  $R_2$ ，求 (1) 长为  $l$  的这种电缆沿径向的电阻；(2) 当内芯铜线与铝层之间的电势差为  $U$  时，径向电流多大？

(另一种描述：有一内半径为  $R_1$ 、外半径为  $R_2$  的空心金属圆柱体，圆柱体长度为  $l$ ，其电阻率为  $\rho$ 。若内部电势比外侧高，且电势差为  $U$ ，求 (1) 此圆柱体径向电阻；(2) 沿径向的电流为多少？)

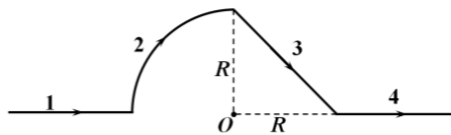


2、如图所示，一用电阻率为  $\rho$  的材料制成的圆台，其高为  $l$ ，两端面的半径分别为  $R_1$  和  $R_2$ 。试计算此圆台两端面之间的

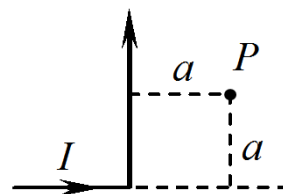


3、两个同心金属球壳的半径分别为  $a$  和  $b$  ( $b > a$ )，其间充满电导率为  $\sigma$  的材料。已知  $\sigma$  是随电场而变化的，且可以表示为  $\sigma = kE$ ，其中  $k$  为常量。求两球壳之间维持电势差  $U$  时，两球壳间的电流。

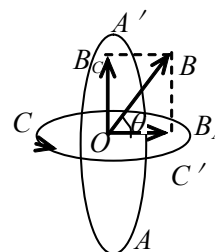
4、一根无限长导线完成如图所示形状，设导线都处于同一平面内，其中第二段是半径为  $R$  的  $1/4$  圆弧，其余部分为直线，导线中通有电流  $I$ ，求图中  $O$  点处的磁感应强度。



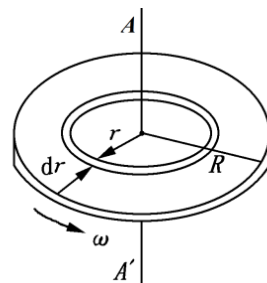
5、一无限长载有电流  $I$  的直导线在一处折成直角， $P$  点位于导线所在平面内，距一条折线的延长线和另一条导线的距离都为  $a$ ，如图。求  $P$  点的磁感强度  $\vec{B}$ 。



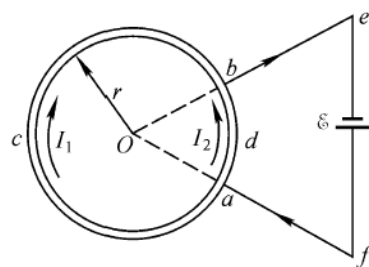
6、 $AA'$  和  $CC'$  为两个正交地放置的圆形线圈，其圆心相重合。  $AA'$  线圈半径为  $20.0\text{ cm}$ ，共  $10$  匝，通有电流  $10.0\text{ A}$ ；而  $CC'$  线圈的半径为  $10.0\text{ cm}$ ，共  $20$  匝，通有电流  $5.0\text{ A}$ 。求两线圈公共中心  $O$  点的磁感强度的大小和方向。 ( $\mu_0 = 4 \times 10^{-7} \text{ N} \cdot \text{A}^{-2}$ )



7、一半径为 $r$ 的薄圆盘,其电荷面密度为 $\sigma$ ,设圆盘以角速率 $\omega$ 绕通过盘心垂直盘面的轴 $AA'$ 转动,求圆盘中心的磁感应强度。



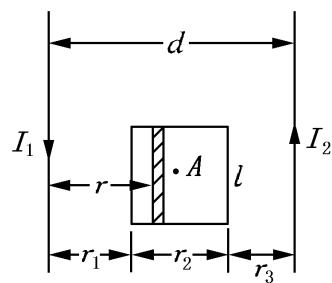
8、如图所示,有两根导线沿半径方向接触铁环的a、b 两点,并与很远处的电源相接。求环心O 的磁感强度。



9、两平行长直导线相距 $d=40\text{cm}$ , 每根导线载有电流 $I_1=I_2=20\text{A}$ , 如图所示. 求:

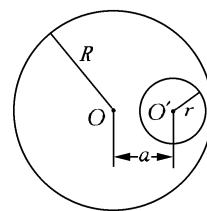
(1) 两导线所在平面内与该两导线等距的一点 $A$ 处的磁感应强度;

(2) 通过图中矩形框的磁通量; ( $r_1=r_3=10\text{cm}$ ,  $l=25\text{cm}$ ).



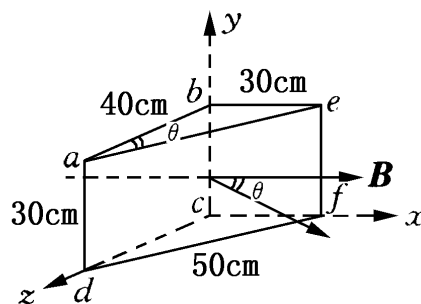
10、在半径为  $R$  的长直圆柱形导体内部，与轴线平行地挖成一半径为  $r$  的长直圆柱形空腔，两轴间距离为  $a$ ，且  $a > r$ ，横截面如图所示。现在电流  $I$  沿导体管流动，电流均匀分布在管的横截面上，而电流方向与管的轴线平行。求：

- (1) 圆柱轴线上的磁感应强度的大小；
- (2) 空腔部分轴线上的磁感应强度的大小；
- (3) 空腔部分任意点的磁感应强度的大小。

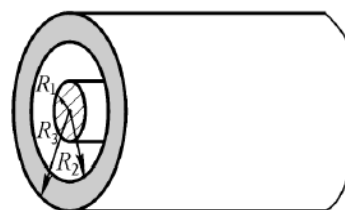


11、有一根无限长载流导体直圆管，内半径为  $a$ ，外半径为  $b$ ，电流强度为  $I$ ，电流沿轴线方向流动，并且均匀地分布在管壁的横截面上，求各处的磁感应强度。

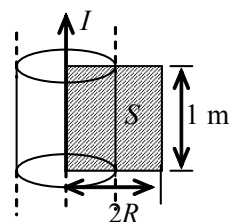
12、已知磁感应强度  $B = 2.0 \text{ Wb} \cdot \text{m}^{-2}$  的均匀磁场，方向沿  $x$  轴正方向，如图所示。试求：(1) 通过图中  $abcd$  面的磁通量；(2) 通过图中  $befc$  面的磁通量；(3) 通过图中  $ae fd$  面的磁通量。



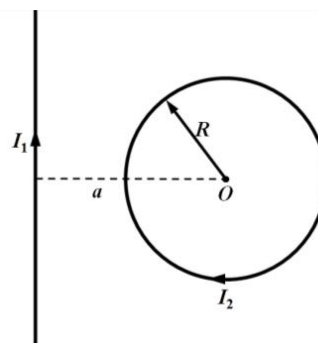
13、有一同轴电缆，其尺寸如图所示。两导体中的电流均为 $I$ ，但电流的流向相反，导体的磁性可不考虑。试计算以下各处的磁感强度：（1） $r < R_1$ ；（2） $R_1 < r < R_2$ ；（3） $R_2 < r < R_3$ ；（4） $r > R_3$ 。画出 $B-r$ 图线。



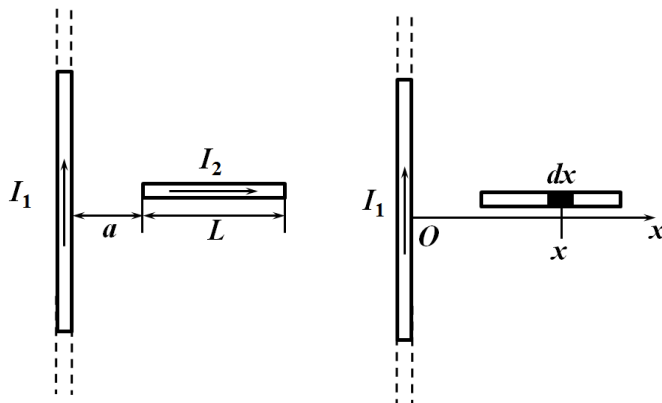
14、一无限长圆柱形铜导体(磁导率  $\mu_0$ )，半径为  $R$ ，通有均匀分布的电流  $I$ 。今取一矩形平面  $S$  (长为  $1\text{m}$ ，宽为  $2R$ )，位置如右图中画斜线部分所示，求通过该矩形平面的磁通量。



15、如图所示，一无限长载流直导线与一半径为 $R$ 的圆电流处于同一平面内，它们的电流分别为 $I_1$ 和 $I_2$ ，直导线与圆心相距为 $a$ ，求作用在圆电流上的磁力。

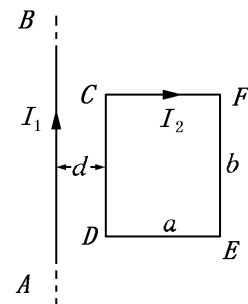


16、如图所示，在无限长载流长直导线 $I_1$ 旁，垂直放置另一长为 $L$ 的载流直导线 $I_2$ ， $I_2$ 导线左端距 $I_1$ 为 $a$ ，求导线 $I_2$ 所受到的安培力。



17、如图所示，在长直导线 $AB$ 内通以电流 $I_1=20\text{A}$ ，在矩形线圈 $CDEF$ 中通有电流 $I_2=10\text{A}$ ， $AB$ 与线圈共面，且 $CD$ ， $EF$ 都与 $AB$ 平行。已知 $a=9.0\text{cm}$ ， $b=20.0\text{cm}$ ， $d=1.0\text{cm}$ ，求：

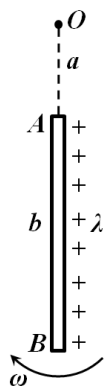
- (1) 导线 $AB$ 的磁场对矩形线圈每边所作用的力；
- (2) 矩形线圈所受合力和合力矩。



18、如图所示，均匀带电刚性细杆  $AB=b$ ，电荷线密度为  $\lambda$ ，绕垂直于直线的轴  $O$  以角速度  $\omega$  匀速转动（ $O$  点在细杆  $AB$  的延长线上），求：

(1)  $O$  点处的磁感应强度；

(2) 磁矩  $P_m$ ；

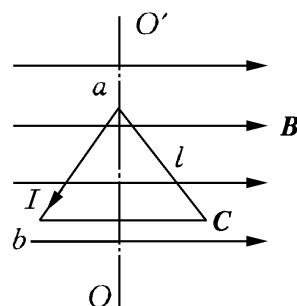


19、如图所示，边长为  $l=0.1\text{m}$  的正三角形线圈放在磁感应强度  $B=1\text{T}$  的均匀磁场中，线圈平面与磁场方向平行。使线圈通以电流  $I=10\text{A}$ ，求：

(1) 线圈每边所受的安培力；

(2) 对  $OO'$  轴的磁力矩大小；

(3) 从所在位置转到线圈平面与磁场垂直时磁力所作的功。





### 三、问答题

- 1、稳恒电流、恒定电场的特点？

院 系 \_\_\_\_\_ 专 业 \_\_\_\_\_  
 姓 名 \_\_\_\_\_ 学 号 \_\_\_\_\_

## 第 14 章 电磁感应

### 基本要求

- 1、了解电磁感应现象，理解楞次定律和法拉第电磁感应定律。
- 2、透彻掌握动生电动势和感生电动势的计算。
- 3、理解自感和互感现象，并会计算自感和互感系数。
- 4、了解磁场能量。

### 内容概述

#### 1. 电磁感应现象

当穿过闭合导体回路的磁通量发生变化时，闭合导体回路中就会出现电流的现象，称为电磁感应现象。

在处理电磁感应问题时，应注意：

- (1) 利用楞次定律判断感应电流/感应电动势的方向。

楞次定律：闭合回路中产生的感应电流具有确定的方向，它总是使感应电流所产生的通过回路面积的磁通量，去补偿或反抗引起感应电流的磁通量的变化。

- (2) 利用法拉第电磁感应定律计算感应电动势的大小。

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

- (3) 如果闭合电路的电阻为  $R$ ，则感应电流为：

$$I_i = \frac{\varepsilon_i}{R} = -\frac{1}{R} \frac{d\Phi_m}{dt}$$

通过回路任一截面的感应电量（迁移的电量）：

$$q = \int_{t_0}^{t_1} I_i dt = -\frac{1}{R} \int_{\Phi_0}^{\Phi_1} d\Phi = -\frac{1}{R} (\Phi_1 - \Phi_0)$$

#### 2. 动生电动势

- (1) 电源电动势的定义： $\varepsilon = \int_{-}^{+} \vec{E}_k \cdot d\vec{l}$ ，其中  $\vec{E}_k$  表示非静电场强。

(2) 当闭合导体回路的部分导线在磁场中切割磁感应线运动引起闭合导体回路面积的磁通量发生变化时，整个回路产生的动生电动势为：

$$\varepsilon = \oint \vec{E}_k \cdot d\vec{l} = \oint (\vec{v} \times \vec{B}) \cdot d\vec{l}$$

(3) 一根导线在磁场中切割磁感应线运动能产生感应电动势, 但没有恒定电流。

(4) 洛伦兹力传递能量, 不做功。

### 3. 感生电动势

当导体回路不动, 由于磁场变化引起磁通量改变而产生的感应电动势, 称为感生电动势。

(1) 麦克斯韦认为: 即使不存在导体回路, 变化的磁场也在其周围激发了一种电场, 称为感生电场或涡旋电场, 其电场线是闭合的, 是非保守场。

(2) 感生电动势的计算公式:

$$\varepsilon_i = \oint_L \vec{E} \cdot d\vec{l} = - \iint_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot d\vec{S}$$

(3) 当块状金属放在变化着的磁场中, 或者在磁场中运动时, 金属体内也将产生感应电流。这种电流的流线是闭合的, 所以称涡旋电流。

### 4. 自感应与互感应

(1) 由于回路中电流产生的磁通量发生变化, 而在自身回路中激发感应电动势的现象称为自感现象, 相应的电动势, 称为自感电动势。

$$\Psi_m = Li$$

$$\varepsilon_L = -L \frac{di}{dt}$$

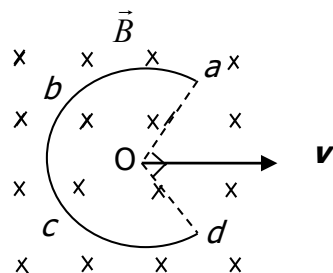
(2) 由一个回路中电流变化而在邻近另一个回路中产生感应电动势的现象称为互感现象, 这种感应电动势称为互感电动势。

## 练习题

### 一、选择题

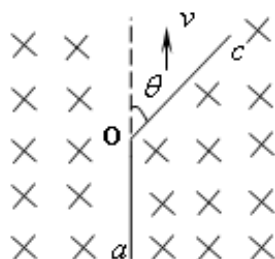
1、将一根导线弯折成半径为  $R$  的  $3/4$  圆弧  $abcd$ , 置于均匀磁场  $\vec{B}$  中,  $\vec{B}$  垂直于导线平面, 如图所示。当导线沿角  $aOd$  的角平分线方向以速度  $\vec{v}$  向右运动时, 导线中产生的感应电动势  $\varepsilon_i$  为 ( )。

- A、 0                      B、  $vRB$                       C、  $\sqrt{2}vRB$                       D、  $\frac{\sqrt{2}}{2} vRB$



2、如图,金属杆  $aoc$  以速度  $v$  在均匀磁场  $\vec{B}$  中作切割磁力线运动。如果  $oa = oc = L$ 。那么,杆中的动生电动势是 ( )

- A、  $\varepsilon = BLv$     B、  $\varepsilon = BLv \sin \theta$     C、  $\varepsilon = BLv \cos \theta$     D、  $\varepsilon = BLv(1 + \cos \theta)$



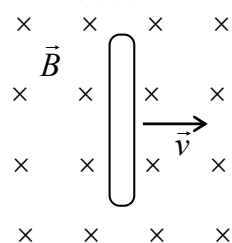
3、在图中,导线中能产生动生电动势的情况是( )

- A、 (1)(2)

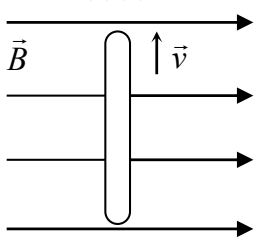
- B、 (2)(3)

- C、 (3)(4)

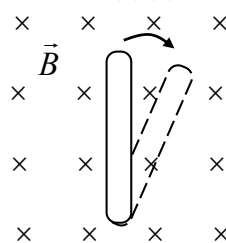
- D、 (1)(3)



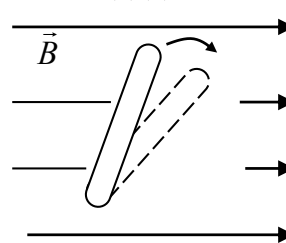
(1)



(2)

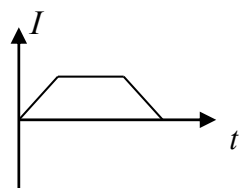
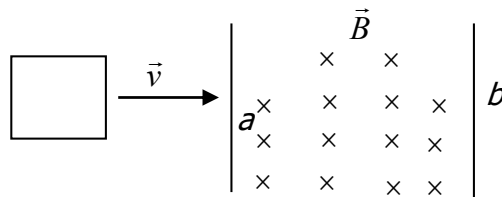


(3)

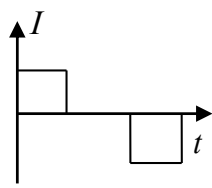


(4)

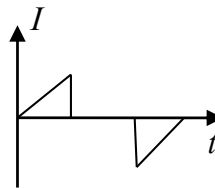
4、如图所示,一矩形导体框,以恒定速度  $\vec{v}$  从  $a$  处进入一均匀磁场并从  $b$  处出来.若不计导体框的自感,下面哪条曲线正确的表示了线圈中的感应电流随时间的变化关系(以顺时针方向为回路绕行的正方向)( )



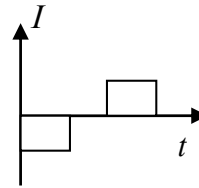
(A)



(B)



(C)



(D)

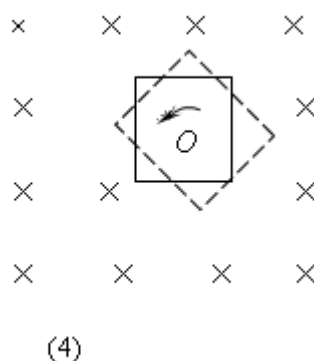
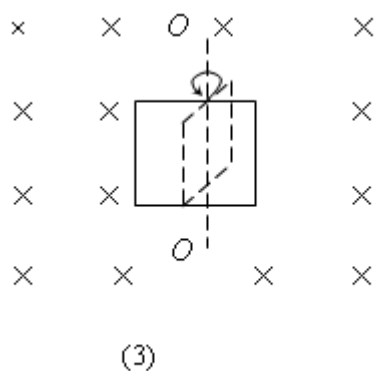
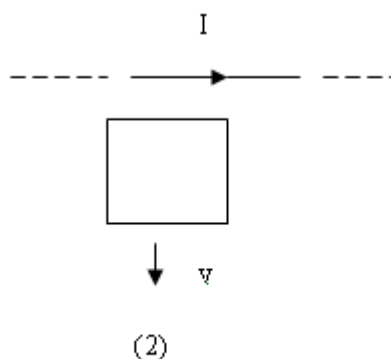
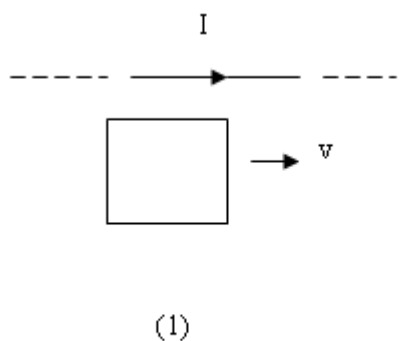
5、在图中,导线框中有感应电流的情况是( )

A、(1)(4)

B、(2)(3)

C、(1)(2)

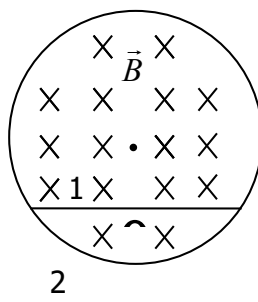
D、(2)(4)



6、在以下矢量场中,属于保守力场的是( )

A、静电场      B、涡流电场      C、稳恒磁场      D、变化磁场

7、在圆柱形空间内有一均匀磁场区,如图所示,在磁场内外各放有一长度相同的金属棒(在图中位置1,2处),当磁场 $\vec{B}$ 的大小以速率 $\frac{dB}{dt}$ 均匀变化时,下列说法正确的是( )。

(1) 1 处的棒相对磁场静止,故 $\varepsilon_1 = 0$ (2) 1 处的棒处在变化的磁场中,故 $\varepsilon_1 \neq 0$ (3) 2 处的棒处在磁场以外的空间,故 $\varepsilon_2 = 0$ (4) 2 处的棒虽处在 $\vec{B} = 0$ 的空间,但 $\vec{E}_{\text{涡}} \neq 0$ 。故 $\varepsilon_2 \neq 0$ 

A、(2)(4)

B、(2)(3)

C、(1)(4)

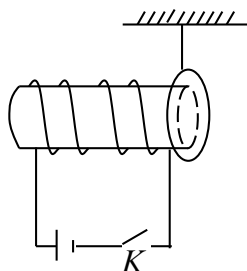
D、(1)(3)

8、如图所示,在螺线管外套着一个可以移动的金属环,此环靠近螺线管的右端。当电键 $K$ 接通的瞬间,金属环的摆动方向是:( )

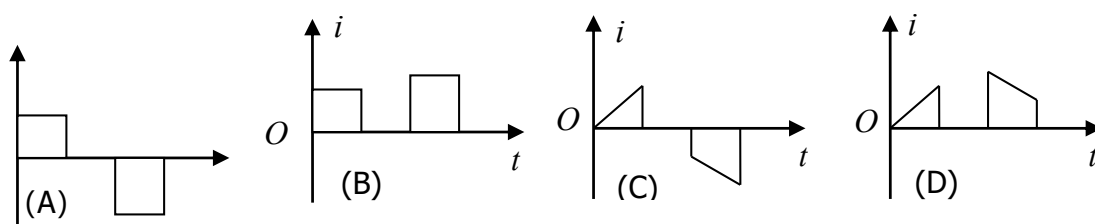
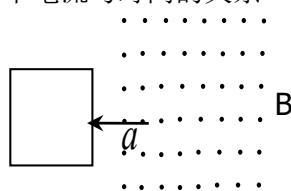
A、向左

B、向右

C、不动

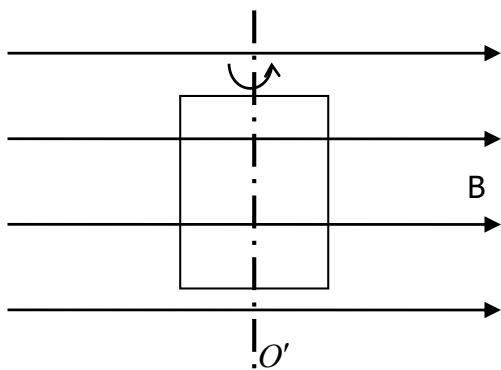


9、一个矩形线圈以不变的加速度  $a$  从均匀磁场中经过，磁感应强度  $\vec{B}$  的方向如图，如果线圈从静止开始进入磁场，亦以此作为计时起点，那么，在  $i-t$  图中，哪一个正确反映了线圈中电流与时间的关系？（ ）



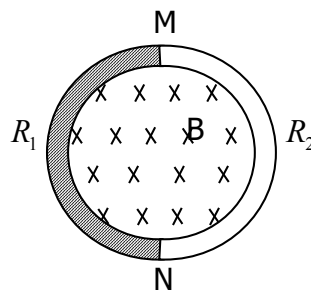
10、如图，矩形导线框在均匀磁场  $\vec{B}$  中绕轴  $OO'$  做匀角速度转动。已知导线框边长  $AB = 2\text{ cm}$ ,  $BD = 8\text{ cm}$ , 磁场大小  $B = 10\text{ T}$ , 角速度  $\omega = 5\text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$  当导线框转到图示位置时，框中动生电动势是（ ）

- A、 0  
B、  $5.1 \times 10^{-2}\text{ V}$ ，顺时针方向  
C、  $5.1 \times 10^{-2}\text{ V}$ ，逆时针方向  
D、  $8.0 \times 10^{-2}\text{ V}$ ，顺时针方向  
E、  $8.0 \times 10^{-2}\text{ V}$ ，逆时针方向



11、有一金属圆环，由两种材料的半圆组成，电阻分别为  $R_1$  和  $R_2$ ，且  $R_1 > R_2$ ，如图，现将该圆环置于对称分布的均匀磁场中，当磁感应强度随时间增加时，在圆环分界处  $M$ 、 $N$  两处之间的电压为（ ）

- A、  $U_{MN} < 0$   
B、  $U_{MN} = 0$   
C、  $U_{MN} > 0$



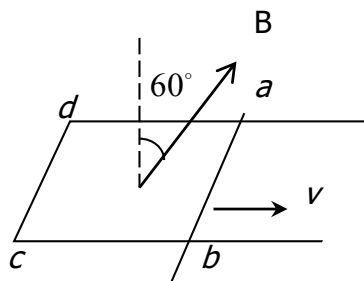
12、如图，长为  $l$  的导线杆  $ab$ ，以速率  $v$  在导线轨  $adcb$  上平行移动。已知导线轨处于均匀磁场中， $\vec{B}$  的方向与回路的法线成  $60^\circ$  角，其大小为  $B = Kt (K > 0)$ 。如果在  $t = 0$  时，杆位于导轨  $dc$  处，那么在任意时刻  $t$ ，导线回路中的感应电动势是 ( )

A、  $k l v$ ，顺时针方向

B、  $k l v t$ ，逆时针方向

C、  $\frac{1}{2} k l v t$ ，顺时针方向

D、  $\frac{1}{2} k l v t$ ，逆时针方向



13、如图所示为垂直于线圈平面通过的磁通量，它随时间变化的规律为， $\phi = 6t^2 + 7t + 1$ ，式中  $\phi$  的单位为  $\text{mWb}$ 。试问当  $t = 2.0 \text{ s}$  时，线圈中的磁感应电动势为多少  $\text{mV}$  ( )

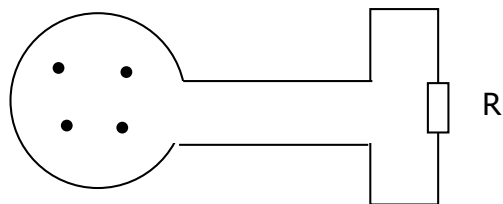
A、 14

B、 31

C、 41

D、 51

E、 61



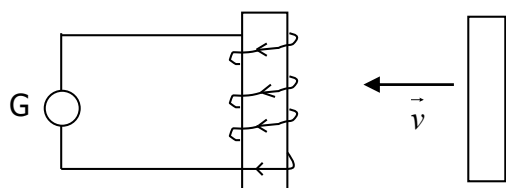
14、如图所示，当条形磁铁平行于螺线管，并向螺线管以速度  $v$  平移靠近的过程中，则在螺线管中 ( )

A、不产生感应电流

B、产生的感应电流如图所示

C、产生的感应电流于图示相反

D、有无感应电流不能判断，因条件不足



15、在感应电场中，电磁感应定律可写成  $\oint_L \vec{E}_K \cdot d\vec{l} = -\frac{d}{dt}\Phi$ ，式中  $\vec{E}_K$  为感应电场的电场强度。此式表明： ( )

A、闭合曲线  $l$  上  $\vec{E}_K$  处处相等

B、感应电场是保守力场

C、感应电场的电力线不是闭合曲线

D、在感应电场中不能像对静电场那样引入电势的概念

16、将形状完全相同的铜环和木环静止放置,并使通过两环面的磁通量随时间的变化率相等,则 ( )

- A、铜环中有感应电动势,木环中无感应电动势
- B、铜环中感应电动势大,木环中感应电动势小
- C、铜环中感应电动势小,木环中感应电动势大
- D、两环中感应电动势相等

17、若尺寸相同的铁环和铜环所包围的面积中穿过相同变化率的磁通量,则两环中( )

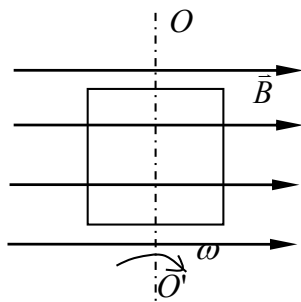
- A、感应电动势不同,感应电流不同
- B、感应电动势不同,感应电流相同
- C、感应电动势相同,感应电流相同
- D、感应电动势相同,感应电流不同

18、一导体圆线圈在均匀磁场中运动,能使其中产生感应电流的一种情况是 ( )

- A、线圈绕自身直径轴转动,轴与磁场方向平行
- B、线圈绕自身直径轴转动,轴与磁场方向垂直
- C、线圈平面垂直于磁场并沿垂直磁场方向平移
- D、线圈平面平行于磁场并沿垂直磁场方向平移

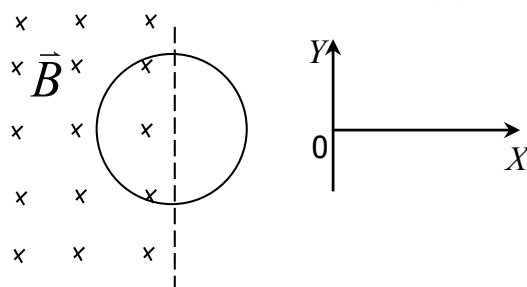
19、如图所示.一正方形闭合线圈放在均匀磁场中,绕通过其中心且与一边平行的转轴  $OO'$  转动,转轴与磁场方向垂直,转动角速度为  $\omega$ ,用下述哪一种办法可以使线圈中感应电流的幅值增加到原来的两倍(导线的电阻不能忽略)? ( )

- A、把线圈的匝数增加到原来的两倍
- B、把线圈的面积增加到原来的两倍,而形状不变
- C、把线圈切割磁力线的两条边增长到原来的两倍
- D、把线圈的角速度  $\omega$  增大到原来的两倍



20、一圆形线圈,它的一半处于均匀磁场中,另一半位于磁场之外,如图所示。磁感应强度  $\vec{B}$  的方向垂直地指向纸面内。欲使圆线圈中感应出顺时针方向的电流,则( )

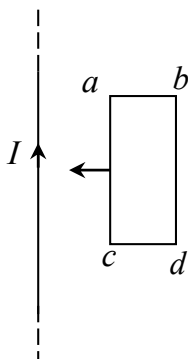
- A、线圈应沿  $X$  轴正向平动
- B、线圈应沿  $Y$  轴正向平动
- C、线圈应沿  $Y$  轴负向平动
- D、线圈应沿  $X$  轴负向平动





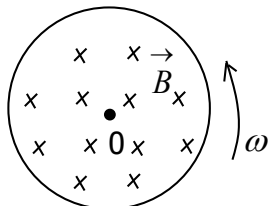
21、如图所示, 通有稳恒电流  $I$  的长直导线与矩形线圈  $abcd$  在同一平面内, 当线圈以速度  $v$  向长直导线移近时, 则( )

- A、线圈中出现逆时针方向的感应电流
- B、线圈中出现顺时针方向的感应电流
- C、线圈中没有感应电流
- D、只有当线圈加速移近时, 线圈中才能出现顺时针方向的感应电流



22、一薄金属圆盘, 放在均匀磁场中, 磁场的方向垂直盘面向里, 如图所示, 当圆盘以恒定的角速度  $\omega$  绕通过盘心  $O$  且与盘面垂直的轴逆时针旋转时, 则( )

- A、整个金属盘仍是一个等势体
- B、盘心的电势高于其他位置的电势
- C、盘心的电势低于其他位置的电势
- D、整个圆盘电势为零



23、有一圆形线圈在均匀磁场作用下作下列几种运动, 哪种情况在线圈中会产生感应电流( )

- A、线圈沿磁场方向平移
- B、线圈沿垂直于磁场方向平移
- C、线圈以自身的直径为轴转动, 轴与磁场方向平行
- D、线圈以自身的直径为轴转动, 轴与磁场方向垂直

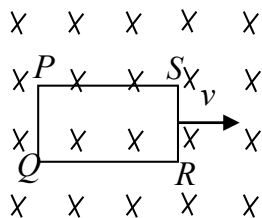
24、如图所示, 当左边电路中的电阻  $R$  增加时, 则在右边电路的感应电流为( )

- A、零
- B、沿顺时针方向
- C、沿逆时针方向



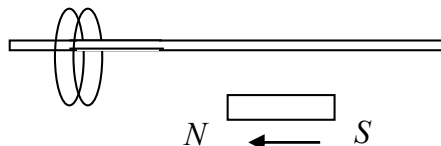
25、矩形线圈  $PQRS$  以匀速  $v$  沿垂直于均匀磁场方向运动, 如图所示。下面哪一个叙述是正确的( )

- A、线圈中的感应电流沿顺时针方向流动
- B、线圈中的感应电流沿逆时针方向流动
- C、没有感应电流流过线圈
- D、作用在  $PQ$  上的磁力和它运动方向相反
- E、作用在  $RS$  上的磁力和它运动方向相反



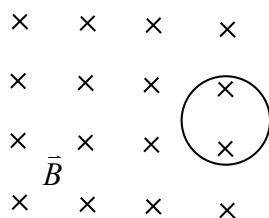
26、两个闭合的金属环，穿在一极光滑的绝缘杆上，如图所示，当条形磁铁 N 极自右向左插向圆环时，两圆环的运动是( )

- A、边向左移边分开                      B、边向左移边合拢  
C、边向右移边合拢                      D、同时同向移动



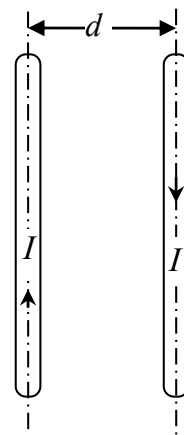
27、如图所示，一个圆形导线环的一半放在一分布在方形区域的匀强磁场  $\vec{B}$  中，另一半位于磁场之外，磁场  $\vec{B}$  的方向垂直指向纸内，欲使圆线环中产生逆时针方向的感应电流，应使 ( )

- A、线环向右平移                      B、线环向上平移  
C、线环向左平移                      D、磁场强度减弱



28、如图，两根平行导线载有大小相同方向相反的电流，。已知两根导线截面半径都为  $a$ ，中心轴相距  $d$  ( $d \gg a$ )。如果两根导线内部的磁通量略去不计，那么这一对导线的单位长度的自感系数为 ( )

- A、 $\frac{\mu_0 d}{2\pi a}$                       B、 $\frac{\mu_0 d}{\pi a}$   
C、 $\frac{\mu_0}{\pi} \ln \frac{d}{2a}$                       D、 $\frac{\mu_0}{\pi} \ln \frac{d}{a}$



29、两个相距不太远的平面圆线圈，怎样放置可使其互感系数近似为零（设其中一线圈的轴线恰通过另一线圈的圆心） ( )

- A、两线圈的轴线相互平行                      B、两线圈的轴线相互垂直  
C、两线圈的磁矩成反平行                      D、两线圈的磁矩相互平行

30、两个长度相同的密绕的直螺线管线圈，半径接近相等，欲使两线圈的互感系数最大，则两线圈的放置方式应为 ( )

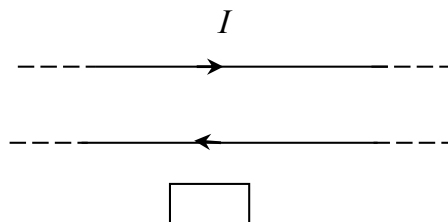
- A、两线圈的轴线互相垂直，并靠得很近  
B、两线圈的轴线在同一直线上，并靠得很近

- C、一个线圈套在另一个线圈的外面  
D、不能确定

31、两根无限长平行直导线载有相等的电流  $I$ ，但电流流向相反。而且电流的变化率  $\frac{dI}{dt}$  均

大于零。有一矩形线圈与两直导线共面，如图所示。则 ( )

- A、线圈中无感应电流  
B、线圈中感应电流为逆时针方向  
C、线圈中感应电流为顺时针方向  
D、线圈中感应电流方向不确定

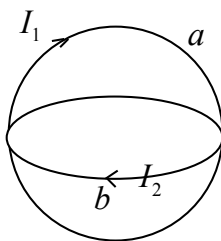


32、在真空中一个通有电流的线圈  $a$  所产生的磁场内有另一个线圈  $b$ ， $a$  和  $b$  相对位置固定。若线圈  $b$  中没有电流通过，则线圈  $b$  与  $a$  间的互感系数: ( )

- A、一定为零  
B、一定不为零  
C、可以不为零  
D、是不可能确定的

33、如图所示，两个环形导体  $a$ 、 $b$  互相垂直地放置，当它们的电流  $I_1$  和  $I_2$  同时发生变化时，则 ( )

- A、 $a$  环形导体产生自感电流， $b$  环形导体产生互感电流  
B、 $b$  环形导体产生自感电流， $a$  环形导体产生互感电流  
C、两环形导体同时产生自感电流和互感电流  
D、两环形导体只产生自感电流，不产生互感电流



34、有两线圈，线圈 1 对线圈 2 的互感系数为  $M_{21}$ ，而线圈 2 对线圈 1 的互感系数为  $M_{12}$ 。若

它们分别流过  $i_1$  和  $i_2$  的变化电流，且  $\left| \frac{di_1}{dt} \right| > \left| \frac{di_2}{dt} \right|$ ，并设由  $i_2$  变化在线圈 1 中产生的互感电动势为  $\varepsilon_{12}$ ，由  $i_1$  变化在线圈 2 中产生的互感电动势为  $\varepsilon_{21}$ ，判断下述哪个论断正确。 ( )

- A、 $M_{12} = M_{21}, \varepsilon_{21} = \varepsilon_{12}$   
B、 $M_{12} \neq M_{21}, \varepsilon_{21} \neq \varepsilon_{12}$   
C、 $M_{12} = M_{21}, \varepsilon_{21} > \varepsilon_{12}$   
D、 $M_{12} = M_{21}, \varepsilon_{21} < \varepsilon_{12}$

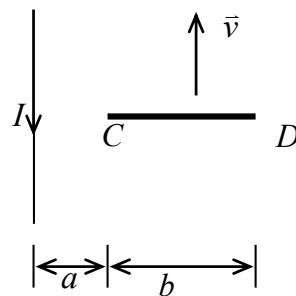
35、用线圈的自感系数  $L$  来表示载流线圈磁场能量的公式  $W_m = LI^2 / 2$  ( )

- A、只适用于无限长密绕螺线管  
B、只适用于单匝圆线圈  
C、只适用于一个匝数很多，且密绕的螺线环  
D、适用于自感系数  $L$  一定的任意线圈

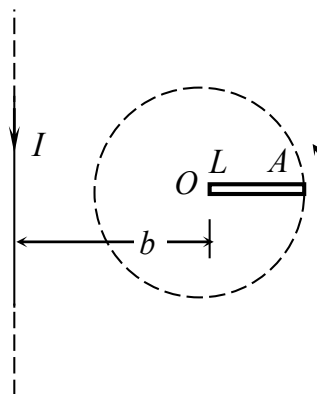
## 二、计算题

1、一无限长直导线载有电流  $I$ ，长度为  $b$  的金属杆  $CD$  与导线共面且垂直，相对位置如图。

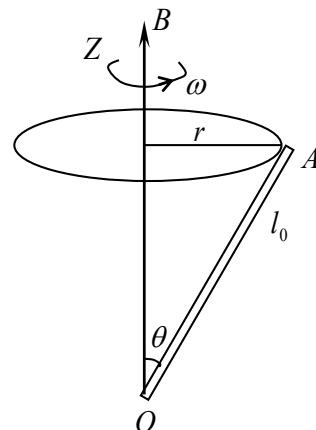
$CD$  杆以速度  $\vec{v}$  平行直线电流运动，求  $CD$  杆中的感应电动势，并判断  $C, D$  两端哪端电势较高？



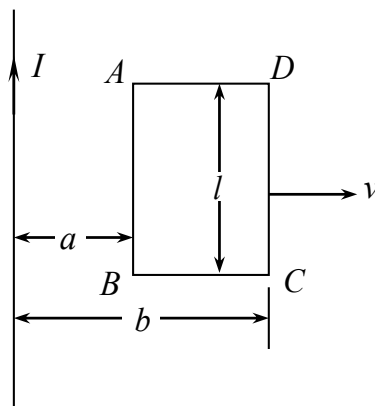
2、如图所示，一长为  $L$  的金属棒  $OA$  与载有电流  $I$  的无限长直导线共面，金属棒可绕端点  $O$  在平面内以角速度  $\omega$  匀速转动。试求当金属棒转至图示位置时（即棒垂直于长直导线），棒内的感应电动势。



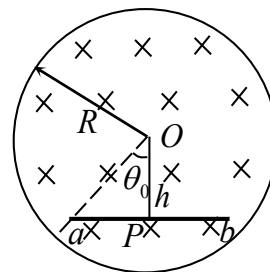
- 3、一金属棒 OA 在均匀磁场中绕通过 O 点的垂直轴 OZ 作锥形匀角速旋转，棒 OA 长  $l_0$ ，与 OZ 轴夹角为  $\theta$ ，旋转角速度为  $\omega$ ，磁感应强度为  $\vec{B}$ ，方向与 OZ 轴一致，如图所示。试求 OA 两端的电势差。



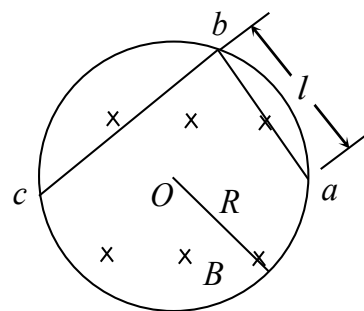
- 4、一无限长直导线载有  $5.0\text{A}$  直流电流旁边有一个与它共面的矩形线圈 ABCD，已知  $l = 20\text{cm}$ ,  $a = 10\text{cm}$ ,  $b = 20\text{cm}$ ; 线圈共有  $N=100$  匝，以  $v = 3.0\text{m/s}$  的速度离开直导线，如图所示。试求线圈里的感应电动势的大小和方向。



5、如图所示，在无限长直螺线管的磁场中放一段直导线  $ab$ ，轴  $O$  到  $ab$  的垂直距离为  $h$ ，垂足  $p$  为  $ab$  的中心， $p$  对  $O$  点的张角为  $\theta_0$ ，试求  $ab$  上的感生电动势。(设  $B$  以速率  $\frac{dB}{dt}$  变化)



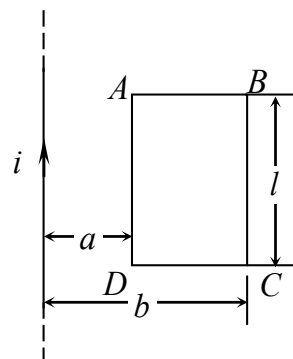
6、在无限长螺线管中，均匀分布变化的磁场  $B(t)$ 。设  $B$  以速率  $\frac{dB}{dt} = k$  变化 ( $k > 0$ ，且为常量)，方向与螺线管轴线平行，如图所示。现在其中放置一直角形导线  $abc$ 。若已知螺线管截面半径为  $R$ ， $\overline{ab} = l$ ，试求：



- (1) 螺线管中的感生电场  $E_V$ ；
- (2)  $\overline{ab}$ ,  $\overline{bc}$  两段导线中的感生电动势。

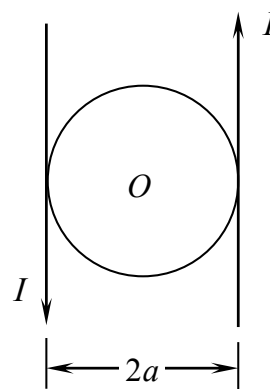
7、如图所示，一无限长的直导线中通有交变电流  $i = I_0 \sin \omega t$ ，它旁边有一个与其共面的长方形线圈  $ABCD$ ，长为  $l$  宽为  $(b-a)$ 。试求：

- (1) 穿过回路  $ABCD$  的磁通量  $\Phi$ ；

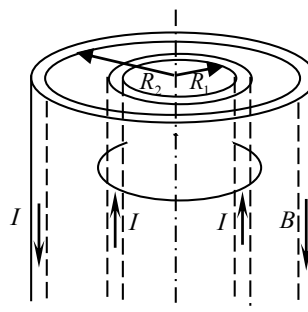


(2) 回路 ABCD 中的感应电动势  $\mathcal{E}$ 。

8、如图所示，两根无限长载流导线互相平行，相距为  $2a$ ，两导线中电流强度相同，但电流彼此反向。在两平行无限长直导线所在的平面内有一半径为  $a$  的圆环，环刚好在两平行长直导线之间并且彼此绝缘。试求圆环与两平行长直导线之间的互感系数  $M$ 。

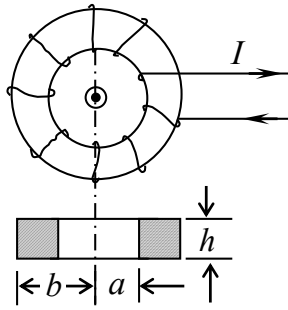


9、如图所示，二同轴无限长的导体薄壁圆筒，内筒的半径为  $R_1$ ，外筒的半径为  $R_2$ ，二筒上均匀地流着方向相反的电流，电流强度皆为  $I$ 。试求二筒单位长度上的自感系数。



10、截面为矩形的螺绕环共有  $N$  匝，如图所示，在螺绕环的轴线上另放有一无限长直导线。试求：

- (1) 螺绕环的自感系数；
- (2) 无限长直导线和螺绕环的互感系数。



### 三、问答题

1、涡旋电场与静电场有哪些区分?



院	系	专	业
姓	名	学	号

## 第 16 章 光的干涉

### 基本要求

- 1、了解普通光源所发射的光波的性质。
- 2、掌握相干条件和获得相干光波的方法。
- 3、透彻掌握杨氏双缝干涉、薄膜干涉的原理、干涉现象的规律、特点及应用。

### 内容概述

#### 1. 光波的干涉

当两列或多列光波在空间相遇时，在相遇区域，由于光波的叠加而引起光强度重新分布的现象，称为光的干涉。

在光的干涉问题中，应该注意以下几点：

(1) 波的干涉是波遵从叠加原理的结果，两列相干波相遇而叠加，得到波强度按以下规律重新分布：

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1^2 + I_2^2} \cos\left(\varphi_2 - \varphi_1 - 2\pi \frac{r_2 - r_1}{\lambda}\right)$$

需要注意，不是在任何介质中传播的波都能够应用叠加原理。波在真空中传播总是遵从叠加原理的，我们在《大学物理》中所涉及的介质，波总是遵从叠加原理的。

(2) 教材中把光波的相干条件归结为三点：频率相同，在相遇点具有相同的振动方向或具有用互平行的振动分量，以及相位差稳定，这三个条件与机械波的相干条件是相同的。

虽然光波也是横波，但光波毕竟有别于机械波，因此，除了上述相干条件外，对于光波的干涉，还有两点应该注意：

- 1> 由于光波是由大量有限长度的波列组成，要使不同的波列发生干涉，一般是办不到的，要观察到干涉现象，必须将同一个波列分解为两部分，再使这两部分相遇而发生干涉，这就要求光波的这两部分到达相遇点的光程差不能太大，以保证它们能够相遇，如果到达相遇点的光程差太大，波列的一部分已经通过，而另一部分尚未到达，同一波列的两部分之间无重叠，因而无干涉现象发生。
- 2> 两列波在相遇点的振幅不能相差太悬殊，否则两波叠加的结果与单一较强波在相遇点的光强并无实际差别，因而观察不到干涉现象。

总之，相干条件是产生干涉现象的必要条件，而后面的这两条可以作为获得光的干涉现象的补充条件。

(3) 能够发出相干光波的光源称为相干光源。对于机械波、无线电波,相干条件比较容易满足,相干波源比较容易获得。对于光波,即使两个完全相同的普通光源发出的光波,甚至从同一个普通光源的两个不同区域发出的光波,都不能发生干涉,这是光源发光过程的复杂性所决定的。

(4) 分波阵面法和分振幅法是从普通光源中获得相干光束的两种方法。

分波阵面法是让同一波阵面上的两个子波源发出的两列子波、经历不同的路径后相遇而发生干涉,因为这两个子波源处于同一个波阵面上,它们振动位相是相同的,所以由它们发出的子波的初位相也是相同的,使相干条件得以满足。杨氏双缝干涉就是用这种方法获得相干光波的。

分振幅法是利用反射和折射将同一列光波分解为强度不同的两部分,它们经不同的路径后又相遇,进而发生干涉。因光强正比于振幅的平方,故将这种方法称为分振幅法。被分解出来的两部分来自同一列光波,因此,它们的初位相是相同的,只是经历的反射和折射过程不同,所以振幅不同,光程不同,相干条件得到满足。薄膜干涉就是利用这种方法获得相干光的。

## 2. 杨氏双缝干涉

杨氏双缝干涉是利用分波阵面法获得相干光波的典型实验,学习时应注意以下问题:

(1) 在杨氏双缝实验中,若用两个完全独立的光源代替狭缝,光屏上不会出现干涉条纹。这是因为由两个独立光源发出的两列光波,各自都包含了大量断断续续的有限长度波列,它们之间不存在稳定的位相关系,相干条件不能得到满足。

(2) 在杨氏双缝实验中,放置在光源后的狭缝是必须的!这是因为,如果用普通光源代替狭缝去照射双缝,光屏上不可能出现干涉条纹。这是因为,由于狭缝自身很小,光波到达狭缝时,狭缝就成为发射柱面波的波源,又由于两个狭缝的对称性,正好处于同一个柱状波阵面上,所以,从两个狭缝中出射的光波具有相同的初相位,所以说,双缝干涉是利用分波阵面法获得相干光波的典型方法。

(3) 在杨氏双缝实验中,两个狭缝之间的距离不能太大,观察点到中心点的距离不能太远。要观察到干涉现象,必须保证由同一个波列分解出来的两部分能够互相交叠,如果观察点到中心点的距离太大,光程差也就太大,就会出现波列不能交叠的现象,故无法观测到干涉现象。

## 3. 薄膜干涉

薄膜干涉是入射光被薄膜的上、下两个表面反射和折射所分解的各部分光波之间的干涉现象。学习中应注意以下几点:

(1) 等倾干涉是在薄膜厚度均匀、而入射光具有不同的入射角的情况下,发生的干涉现象,具有相同入射角的光所形成的反射光位相差相同,处于同一条干涉条纹上。等厚干涉是在薄膜厚度不均匀、而入射光具有大致相同的入射角的情况下,发生的干涉现象,薄膜厚度相同的地方形成的反射光位相差相同,处于同一条干涉条纹上。

对于等倾干涉,薄膜上、下两个表面对同一条入射光线的反射光线是相互平行的,也就是说,它们将在无限远处相遇而发生干涉,所以干涉条纹必定出现在无限远处,若使用会聚

透镜,干涉条纹将呈现在焦面上。对于等厚干涉,当薄膜很薄时,只要光到达薄膜的入射角不大,可以认为干涉条纹出现在薄膜的表面,用眼睛可以直接观察到。

(2) 观察等倾干涉时常用面光源;观察等厚干涉一般采用平行光,或距薄膜较远的光源,或观察干涉条纹用的仪器的孔径很小,以致在整个视场内光线到达薄膜具有相同的入射角、使干涉光束之间的光程差完全由薄膜厚度的差异所决定。

(3) 通常把反射波位相发生突变的现象称为半波损失。在薄膜干涉的情况下,由薄膜上、下两表面反射的光束之间产生的附加位相差(不包括由光程差引起的位相差)有如下规律:

- 1> 当薄膜的折射率介于上、下方介质的折射率之间时,两束反射光之间没有附加相位差;
- 2> 当薄膜的折射率同时大于或同时小于上、下方介质的折射率时,两束反射光之间存在附加位相差,其值为 $\pi$ ,即附加光程差为 $\frac{\lambda}{2}$ ,故称半波损失。

上述规律对于入射角小于临界角的任意角度都成立。

值得注意的是,在光程差公式中,半波损失用加 $\frac{\lambda}{2}$ 表示,还是用减 $\frac{\lambda}{2}$ 表示,无本质差异,只是要注意 $k$ 值的取法。

(4) 劈尖干涉(楔形气隙干涉)和牛顿环都属于等厚干涉,形成相干光束的是两块玻璃板之间或玻璃板与透镜之间的空气隙。

## 练习题

### 一、选择题

1、一束白光通过双缝后在屏上观察到干涉条纹,除中央白色条纹外,两侧还有彩色条纹,其原因是 ( )

- A、各色光的波长不同,因而各色光分别产生的干涉条纹间距不同
- B、各色光的速度不同,造成条纹的间距不同
- C、各色光的强度不同
- D、各色光通过双缝的距离不同

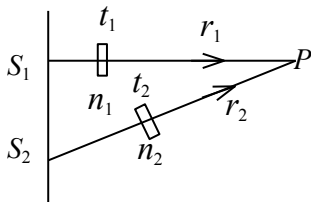
2、在真空中波长为 $\lambda$ 的单色光,在折射率为 $n$ 的透明介质中从 $A$ 沿某路径传播到 $B$ ,若 $A$ 、 $B$ 两点相位差为 $3\pi$ ,则此路径 $AB$ 的光程为 ( )

- A、 $1.5\lambda$
- B、 $1.5\lambda/n$
- C、 $1.5n\lambda$
- D、 $3\lambda$

3、真空中波长为 $\lambda$ 的单色光,在折射率为 $n$ 的均匀透明介质中,从 $A$ 点沿某一路径传播到 $B$ 点,路径的长度为 $l$ , $A$ 、 $B$ 两点光振动相位差记为 $\Delta\varphi$ ,则 ( )

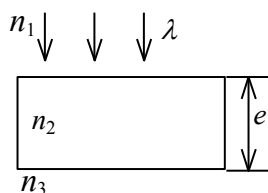
- A、 $l = \frac{3}{2}\lambda$ ,  $\Delta\varphi = 3\pi$
- B、 $l = \frac{3}{2n}\lambda$ ,  $\Delta\varphi = 3n\pi$
- C、 $l = \frac{3}{2n}\lambda$ ,  $\Delta\varphi = 3\pi$
- D、 $l = \frac{3n}{2}\lambda$ ,  $\Delta\varphi = 3n\pi$

4、如图,  $S_1$ 、 $S_2$  是两个相干光源, 它们到  $P$  点的距离分别为  $r_1$  和  $r_2$ . 路径  $S_1P$  垂直穿过一块厚度为  $t_1$ , 折射率为  $n_1$  的介质板, 路径  $S_2P$  垂直穿过厚度为  $t_2$ , 折射率为  $n_2$  的另一介质板, 其余部分可看作真空, 这两条路径的光程差可以表示成 ( )



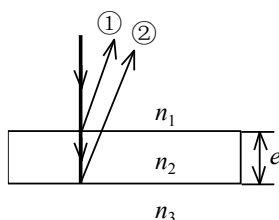
- A、 $(r_2 + n_2 t_2) - (r_1 + n_1 t_1)$   
 B、 $[r_2 + (n_2 - 1)t_2] - [r_1 + (n_1 - 1)t_1]$   
 C、 $(r_2 - n_2 t_2) - (r_1 - n_1 t_1)$   
 D、 $n_2 t_2 - n_1 t_1$

5、如图所示, 波长为  $\lambda$  的平行单色光垂直入射在折射率为  $n_2$  的薄膜上, 经上下两个表面反射的两束光发生干涉. 若薄膜厚度为  $e$ , 而且  $n_1 > n_2 > n_3$ , 则两束反射光在相遇点的相位差为 ( )



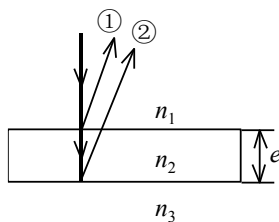
- A、 $4\pi n_2 e / \lambda$       B、 $2\pi n_2 e / \lambda$   
 C、 $(4\pi n_2 e / \lambda) + \pi$       D、 $(2\pi n_2 e / \lambda) - \pi$

6、如图所示, 折射率为  $n_2$ 、厚度为  $e$  的透明介质薄膜的上方和下方的透明介质的折射率分别为  $n_1$  和  $n_3$ , 已知  $n_1 < n_2 < n_3$ . 若用波长为  $\lambda$  的单色平行光垂直入射到该薄膜上, 则从薄膜上、下两表面反射的光束①与②的光程差是 ( )



- A、 $2n_2 e$       B、 $2n_2 e - \frac{\lambda}{2}$       C、 $2n_2 e - \lambda$       D、 $2n_2 e - \frac{\lambda}{2n_2}$

7、如图所示, 折射率为  $n_2$ 、厚度为  $e$  的透明介质薄膜的上方和下方的透明介质的折射率分别为  $n_1$  和  $n_3$ , 已知  $n_1 < n_2 < n_3$ . 若用波长为  $\lambda$  的单色平行光垂直入射到该薄膜上, 则从薄膜上、下两表面反射的光束①与②的光程差是 ( )



- A、 $2n_2e$       B、 $2n_2e - \frac{\lambda}{2}$       C、 $2n_2e - \lambda$       D、 $2n_2e - \frac{\lambda}{2n_2}$

8、用同一单色光做双缝干涉实验，关于干涉条纹的以下说法中不正确的是 ( )

- A、能观察到明暗相间的单色条纹。  
B、经双缝干涉后的明条纹距两缝的距离之差为该色光波长的整数倍。  
C、经双缝干涉后的明条纹距两缝的距离之差一定为该色光波长的奇数倍。  
D、经双缝干涉后的暗条纹距两缝的距离之差一定是该色光半波长的奇数倍。

9、在双缝干涉实验中，两缝间距为  $d$ ，双缝与屏幕的距离为  $D(D \gg d)$ ，单色光波长为  $\lambda$ ，屏幕上相邻明条纹之间的距离为 ( )

- A、 $\lambda D/d$       B、 $\lambda d/D$       C、 $\lambda D/(2d)$       D、 $\lambda d/(2D)$

10、在双缝干涉实验中，以下说法正确的是 ( )

- A、入射光波长越长，干涉条纹间距越大  
B、入射光波长越长，干涉条纹间距越小  
C、把入射光由绿光变成紫光，干涉条纹间距变大  
D、把入射光由绿光变成红光，干涉条纹间距变小

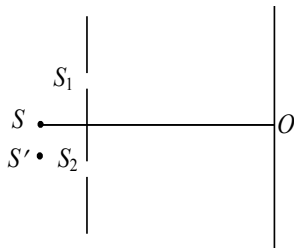
11、在双缝干涉实验中，光的波长为  $600 \text{ nm}$ ，双缝间距为  $2 \text{ mm}$ ，双缝与屏的间距为  $300 \text{ cm}$ 。在屏上形成的干涉图样的明条纹间距为 ( )

- A、 $0.45 \text{ mm}$       B、 $0.9 \text{ mm}$       C、 $1.2 \text{ mm}$       D、 $3.1 \text{ mm}$

12、在双缝干涉实验中，设缝是水平的。若双缝所在的平板稍微向上平移，其它条件不变，则屏上的干涉条纹 ( )

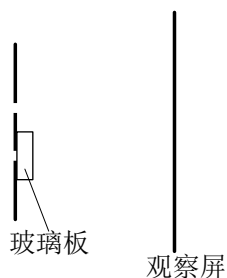
- A、向下平移，且间距不变      B、向上平移，且间距不变  
C、不移动，但间距改变      D、向上平移，且间距改变

13、如图所示，在双缝干涉实验中，若单色光源  $S$  到两缝  $S_1$ 、 $S_2$  距离相等，则观察屏上中央明条纹位于图中  $O$  处。现将光源  $S$  向下移动到示意图中的  $S'$  位置，则 ( )



- A、中央明条纹也向下移动，且条纹间距不变  
B、中央明条纹向上移动，且条纹间距不变  
C、中央明条纹向下移动，且条纹间距增大  
D、中央明条纹向上移动，且条纹间距增大

14、如图所示，在双缝干涉实验中，若在屏与狭缝间紧靠下面一条狭缝处加上一块厚玻璃，在观察屏上出现的干涉条纹位置与不加玻璃板时相应的这些干涉条纹位置相比，则 ( )



- A、相同      B、上移      C、下移      D、转过  $90^\circ$

15、把双缝干涉实验装置放在折射率为  $n$  的水中，两缝间距离为  $d$ ，双缝到屏的距离为  $D$  ( $D \gg d$ )，所用单色光在真空中的波长为  $\lambda$ ，则屏上干涉条纹中相邻的明纹之间的距离是 ( )

- A、 $\frac{\lambda D}{nd}$       B、 $\frac{n\lambda D}{d}$       C、 $\frac{\lambda d}{nD}$       D、 $\frac{\lambda D}{2nd}$

16、一束波长为  $\lambda$  的单色光由空气垂直入射到折射率为  $n$  的透明薄膜上，透明薄膜放在空气中，已知透明薄膜的折射率大于空气的折射率，要使反射光得到干涉加强，则薄膜最小的厚度为 ( )

- A、 $\frac{\lambda}{4}$       B、 $\frac{\lambda}{4n}$       C、 $\frac{\lambda}{2}$       D、 $\frac{\lambda}{2n}$

17、下列现象中，属于光的干涉现象的是 ( )

- A、肥皂泡上的彩色条纹      B、雨后天边出现彩虹  
C、早晨东方天边出现红色朝霞      D、荷叶上的水珠在阳光下晶莹透亮

18、取两块平行玻璃板，合在一起用手捏紧，玻璃板上会看到彩色条纹，这个干涉现象来自 ( )

- A、上、下两块玻璃板上、下表面反射的光  
B、第一块玻璃板上、下表面反射的光  
C、上、下玻璃板间空气膜上、下表面反射的光  
D、第二块玻璃板上、下表面反射的光

19、对增透膜的叙述，你认为不正确的是 ( )

- A、摄影机的镜头上涂一层增透膜后，可提高成像质量  
B、增透膜是为了增加光的透射，减少光的反射  
C、增透膜的厚度应为入射光在薄膜中波长的  $1/4$   
D、增透膜的厚度应为入射光在真空中波长的  $1/4$

20、为了减少光在透镜表面的损失，可在透镜表面涂上一层增透膜，一般用折射率为 1.38 的氟化镁，为了使波长为 552nm 的绿光在垂直表面入射时不发生反射，所涂膜的厚度应是 ( )

- A、100 nm      B、138 nm      C、276 nm      D、200 nm

21、在双缝干涉实验中，用单色自然光，在屏上形成干涉条纹。若在两缝后放一个偏振片，则 ( )

- A、干涉条纹的间距不变，但明纹的亮度加强  
B、干涉条纹的间距不变，但明纹的亮度减弱

C、干涉条纹的间距变窄，且明纹的亮度减弱

D、无干涉条纹

22、用波长为  $500\text{ nm}$  的单色光作杨氏双缝干涉实验，已知狭缝相距  $10^{-4}\text{ m}$ ，从屏上测得相邻的暗条纹间距为  $1\text{ cm}$ ，则双缝到屏之间的距离为 ( )

A、 $2\text{ m}$

B、 $1.5\text{ m}$

C、 $3.2\text{ m}$

D、 $1.8\text{ m}$

23、平行单色光入射到相距为  $d_1$  的双缝上，设在屏上某点  $P$  处出现第四级明条纹，若使双缝的距离变为  $d_2$ ，此时  $P$  点处出现第三条明条纹，则比值  $d_1/d_2$  为 ( )

A、 $3/4$

B、 $4/3$

C、 $7/9$

D、 $9/7$

24、半波损失是指光在以下哪种界面反射时，有位相  $180^\circ$  的突变。 ( )

A、从光疏介质射到光密介质

B、从光密介质射到光疏介质

C、从水中进入空气中

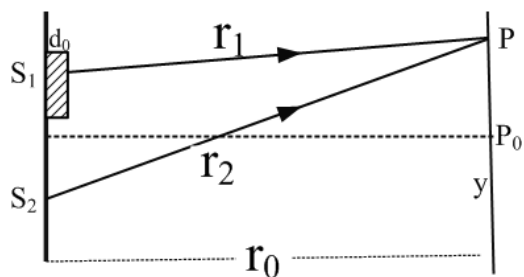
D、以上都不对

## 二、计算题

1、在双缝干涉实验中，所用单色光的波长为  $600\text{ nm}$ ，双缝间距为  $1.2\text{ mm}$ ，双缝与屏相距  $500\text{ mm}$ ，求相邻干涉明条纹的间距。

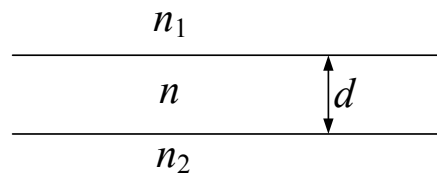
2、在双缝干涉实验中，双缝与屏间的距离  $D=1.2\text{ m}$ ，双缝间距  $d=0.45\text{ mm}$ ，若测得屏上相邻干涉明条纹的间距为  $1.5\text{ mm}$ ，求光源发出的单色光的波长  $\lambda$  是多少。

3、如图所示，把折射率为  $n=1.5$  的玻璃插入杨氏双缝干涉实验的一束光路中，光屏上原来第 5 级亮纹所在的位置变为中央亮条纹，已知光波长  $\lambda=6.0\times 10^{-7}\text{ m}$ ，求插入玻璃片的厚度。



4、如果在观察肥皂水薄膜（设肥皂水的折射率  $n=1.33$ ）的反射光时，薄膜呈  $500\text{ nm}$  的绿色，这时薄膜表面的法线方向和视线间的角度为  $i=45^\circ$ ，问薄膜的厚度应为多少？若垂直注视该肥皂水薄膜，将看见何种颜色？

5、如图所示，透镜表面通常镀一层折射率  $n$  为  $1.38$  的  $\text{MgF}_2$ （氟化镁）透明薄膜，目的是利用干涉来降低玻璃表面的反射。为了使透镜在中心波长为  $550\text{ nm}$  处产生极小的反射，则垂直入射情况下，镀层的最小厚度应为多少？





6、波长为 400-760nm 的可见光垂直入射到一块厚度  $d$  为  $1.2 \times 10^{-6} \text{ m}$ ，折射率  $n_2$  为 1.5 的玻璃片上，试问从玻璃片反射的光中哪些波长的光最强。

7、在双缝干涉实验中，波长  $\lambda=500\text{nm}$  的单色光入射在缝间距  $d=2 \times 10^{-4}\text{m}$  的双缝上，屏到双缝的距离为  $2 \text{ m}$ ，求：

- (1) 每条明纹宽度；
- (2) 中央明纹两侧的两条第 10 级明纹中心的间距；
- (3) 若用一厚度为  $e=6.6 \times 10^{-6}\text{m}$  的云母片覆盖其中一缝后，零级明纹移到原来的第 7 级明纹处；则云母片的折射率是多少？

8、某单色光照在缝间距为  $d=2.2 \times 10^{-4} \text{ m}$  的杨氏双缝上，屏到双缝的距离为  $D=1.8\text{m}$ ，测出屏上 20 条明纹之间的距离为  $9.84 \times 10^{-2}\text{m}$ ，则该单色光的波长是多少？

### 三、问答题

1、为什么窗户玻璃在日常的日光照射下看不到干涉现象？而有时将两块玻璃叠在一起却会看到无规则的彩色条纹？利用干涉条件讨论这两种情况。

2、简述光波半波损失的条件？

3、反射式牛顿环的中心圆斑总是暗纹，有办法让中心变成亮斑吗？如果有办法，应该怎么办？

4、用两个独立光源的光叠加为什么观察不到干涉现象？

院 系 \_\_\_\_\_ 专 业 \_\_\_\_\_  
姓 名 \_\_\_\_\_ 学 号 \_\_\_\_\_

## 第 17 章 光的衍射

### 基本要求

- 1、理解惠更斯-菲涅耳原理的物理内容和它对光的衍射现象的解释。
- 2、掌握单缝、圆孔和光栅的夫琅禾费衍射的规律和特点。

### 内容概述

#### 1、惠更斯-菲涅尔原理

惠更斯-菲涅尔原理是分析衍射现象的理论基础。这个原理可以概述为：波阵面  $S$  上的每一个面元  $dS$  发出的子波在空间任意一点  $P$  引起的振动的振幅，正比于  $dS$ ，反比于  $dS$  到  $P$  的距离，并与  $dS$  到  $P$  的倾角有关；整个波阵面  $S$  在  $P$  点引起的振动是所有这些子波在该点的相干叠加。

学习惠更斯-菲涅尔原理应注意以下两点：

(1) 菲涅尔对惠更斯原理注入了新的思想，该新的思想表现在：由同一波阵面上各个子波源发出的子波是相干波，它们在空间相遇可以互相叠加而发生干涉现象，这不仅弥补了惠更斯原理的缺陷，而且确认衍射现象中出现的亮条纹是子波干涉的结果，从而圆满地解释了波的衍射现象，成为研究衍射现象的理论基础。

(2) 尽管衍射现象中出现的亮暗条纹是子波干涉的结果，但是不能由此而把衍射现象归结为干涉现象，或用干涉包括或代替衍射。衍射现象与干涉现象是有区别的，它们的区别主要体现在以下三个方面。

1> 参与纯干涉的各束光本自是按几何光学规律传播的，而在衍射现象中，各束光本身的传播明显地不符合几何光学的规律。

2> 纯干涉现象是不同光束之间的相干叠加的结果，而衍射现象则是同一束光本身相干叠加的结果。

3> 参与纯干涉现象的是有限束相干波，而参与衍射现象的是由同一波阵面上发出的无限多子波。

值得注意的是，干涉现象与衍射现象除了具有以上三点区别之外，二者也具有密切的联系，最主要的联系是干涉和衍射的本质是统一的，都是相干波叠加的结果，所以在一般问题中，干涉和衍射的作用是同时存在的。

#### 2、单缝的夫琅禾费衍射

单缝的夫琅禾费衍射是利用惠更斯-菲涅尔原理分析衍射现象的最简单、最典型的例子。在学习时要着重注意以下问题。

(1) 在学习光的衍射现象时,着重体现惠更斯-菲涅尔原理的地方主要包括以下几个方面:

1> 当单色平行光垂直照射单缝时,单缝平面就处在波阵面上,根据惠更斯-菲涅耳原理,单缝上各点都是发射子波的波源。

2> 根据惠更斯-菲涅耳原理,波之所以会绕行,是由于子波源发出的子波是射向各个方向的,子波的包络面必然会偏离直线传播路径,所以,每个窄条发出的子波射线,即衍射光线也将向各个方向。我们将所有衍射光线加以分类组合,凡是具有相同衍射方向的衍射光线组成一组平行光,因此整个单缝将发射各个方向的平行衍射光,每一组平行光通过透镜后将会聚在处于焦面的屏上的同一点。

3> 根据惠更斯-菲涅耳原理,由各个子波源发出的子波在空间相遇时,要互相叠加而发生干涉,所以每一组平行光都将在无限远处发生干涉,通过透镜后将在焦面的会聚点上发生干涉,因而屏上就出现亮暗条纹。

(2) 在分析一组平行衍射光相干涉时,必然要将由不同窄条发出的这组平行光合成起来,半波带法是一个简化的处理方法,但是一个简单却很有效果的处理方法。

(3) 在单缝衍射图样的五个特点中,我们最关注的是中央亮条纹的宽度。对任何波长的单色光而言,中央亮条纹的宽度是由第一级暗条纹的位置决定的,因为中央亮条纹的半角宽度  $\theta$  就是第一级暗条纹所对应的衍射角,即

$$\theta = \arcsin \frac{\lambda}{a} \approx \frac{\lambda}{a}$$

可见,中央亮条纹的半角宽度  $\theta$  与单缝的宽度  $a$  成反比,与波长  $\lambda$  成正比。当  $a \gg \lambda$  时,中央亮条纹的半角宽度趋于零,这时整个衍射花样压缩成为一条亮线,这条亮线正好是单缝不存在时光源经透镜后所成的象。

(4) 若用白色平行光照射单缝,屏上将出现彩色条纹,这种彩色条纹称为衍射光谱,各色光的中央亮条纹基本重合,只是对于不同波长的光,中央亮条纹的半角宽度不同,红光为最大,紫光为最小。

### 3、光栅的夫琅和费衍射（光栅衍射）

在学习光栅衍射的知识时,我们着重要注意以下几个方面

(1) 光栅的衍射图样是单缝衍射和多缝干涉的共同结果。

我们可以把光栅看作为许多等宽度单缝作等间距平行排列而成,当单色平行光垂直地照射光栅时,从每条狭缝射出的衍射光一定遵从单缝衍射的规律;而由不同狭缝射出的衍射光都是相干光,必定发生干涉,所以,光栅的衍射图样一定是单缝衍射和多缝干涉两种规律的共同体现。

(2) 光栅方程

屏上出现的主极大亮条纹,其衍射角  $\varphi$  满足光栅方程:

$$(a+b)\sin\varphi = k\lambda \quad k=0, \pm 1, \pm 2;$$

在认识光栅方程时,有两点必须注意:

- 1> 因为光栅方程实际上是多缝干涉出现光强度极大的条件，并不涉及单缝衍射的作用，所以屏上的亮条纹一定满足光栅方程，但满足光栅方程的  $\varphi$  角并不一定在屏上形成亮条纹。

- 2> 这个形式的光栅方程只适用于入射光垂直照射光栅平面的情形。

### (3) 谱线缺级

在光栅衍射中，一些满足光栅方程应出现的主极大，但却不能在屏幕上出现的现象，称为谱线缺级。

谱线缺级是由于光栅衍射在单缝衍射的调制作用下形成的，其原理为：在光栅衍射中，如果第  $k$  级主极大满足光栅方程的主极大，即：

$$(a+b)\sin\varphi = k\lambda \quad k = 0, \pm 1, \pm 2,$$

但该主极大同时也正好满足单缝衍射光强度的极小值条件，即

$$a\sin\varphi = k'\lambda \quad k' = 0, \pm 1, \pm 2,$$

则会造成光栅衍射的谱线缺级。

在光栅衍射的谱线缺级情况下， $k$  与  $k'$  的关系为

$$k = \frac{(a+b)}{a} k'$$

这个公式称为光栅缺级公式。

## 练习题

### 一、选择题

- 1、根据惠更斯—菲涅耳原理，若已知光在某时刻的波阵面为  $S$ ，则  $S$  的前方某点  $P$  的光强度决定于波阵面  $S$  上所有面元发出的子波各自传到  $P$  点的（ ）

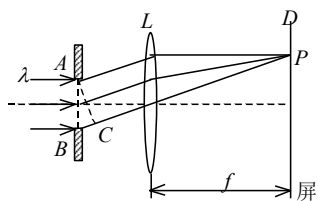
A、振动振幅之和

B、光强之和

C、振动振幅之和的平方

D、振动的相干叠加

- 2、如图所示，一束波长为  $\lambda$  的平行单色光垂直入射到一单缝  $AB$  上。在屏幕  $D$  上形成衍射图样，如果  $P$  是中央亮纹一侧第一个暗纹所在的位置，则  $\overline{BC}$  的长度为（ ）



A、 $\frac{\lambda}{2}$

B、 $\lambda$

C、 $\frac{3\lambda}{2}$

D、 $2\lambda$

- 3、波长为  $\lambda$  的单色平行光垂直入射到一狭缝上，若第一级暗纹的位置对应的衍射角为

$$\theta = \pm \frac{\pi}{6}, \text{ 则缝宽的大小为 } ( )$$

A、 $\frac{\lambda}{2}$

B、 $\lambda$

C、 $2\lambda$

D、 $3\lambda$

4、如果单缝夫琅禾费衍射的第一级暗纹发生在衍射角为  $\varphi = 30^\circ$  的方位上. 所用单色光波长为  $\lambda = 500 \text{ nm}$ , 则单缝宽度为: ( )

A、 $2.5 \times 10^{-5} \text{ m}$

B、 $1.0 \times 10^{-5} \text{ m}$

C、 $1.0 \times 10^{-6} \text{ m}$

D、 $2.5 \times 10^{-7} \text{ m}$

5、一单色平行光束垂直照射在宽度为  $1.0 \text{ mm}$  的单缝上, 在缝后放一焦距为  $2.0 \text{ m}$  的会聚透镜. 已知位于透镜焦平面处的屏幕上的中央明条纹宽度为  $2.0 \text{ mm}$ , 则入射光波长约为:

( )

A、 $100 \text{ nm}$

B、 $400 \text{ nm}$

C、 $500 \text{ nm}$

D、 $600 \text{ nm}$

6、在单缝夫琅禾费衍射实验中, 若减小缝宽, 其他条件不变, 则中央明条纹 ( )

A、宽度变小

B、宽度变大

C、宽度不变, 且中心强度也不变

D、宽度不变, 但中心强度变小

7、在夫朗和费单缝衍射实验中, 用单色光垂直入射缝面, 若入射光波长为  $500 \text{ nm}$ , 第一级暗条纹对应的衍射角为  $30^\circ$ , 则缝宽为 ( )  $\text{m}$ .

A、 $2 \times 10^{-6}$

B、 $10^{-6}$

C、 $0.5 \times 10^{-5}$

D、 $3 \times 10^{-7}$

8、在单缝夫琅禾费衍射实验中, 波长为  $\lambda$  的单色光垂直入射到单缝上. 对应于衍射角为  $30^\circ$  的方向上, 若单缝处波面可分成 3 个半波带, 则缝宽度  $a$  等于 ( )

A、 $\lambda$

B、 $1.5\lambda$

C、 $2\lambda$

D、 $3\lambda$

9、用单色光通过小圆盘和小圆孔做衍射实验时, 在光屏上得到衍射图形, 它们的特征是 ( )

A、用小圆盘时中央是暗的, 用小圆孔时中央是亮的

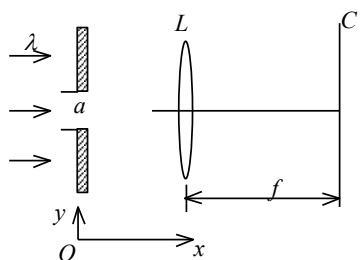
B、中央均为亮点的同心圆形条纹

C、中央均为暗点的同心圆形条纹

D、用小圆盘时中央是亮的, 用小圆孔时中央是暗的

10、在如图所示的单缝夫琅禾费衍射装置中, 设中央明纹的衍射角范围很小. 若使单缝宽度  $a$  变为原来的  $\frac{3}{2}$ , 同时使入射的单色光的波长  $\lambda$  变为原来的  $\frac{3}{4}$ , 则屏幕  $C$  上单缝衍射条纹

中央明纹的宽度  $\Delta x$  将变为原来的 ( )



A、 $\frac{3}{4}$  倍

B、 $\frac{3}{2}$  倍

C、 $\frac{9}{8}$  倍

D、 $\frac{1}{2}$  倍

11、一束平行单色光垂直入射在光栅上, 当光栅常数 ( $a+b$ ) 为下列哪种情况时 ( $a$  代表每条缝的宽度),  $k=3, 6, 9$  等级次的主极大均不出现? ( )

A、 $a+b=2a$

B、 $a+b=3a$

C、 $a+b=4a$

D、 $a+b=6a$

12、一束白光垂直照射在一光栅上，在形成的同一级光栅光谱中，偏离中央明纹最远的是（ ）

- A、紫光                      B、绿光                      C、黄光                      D、红光

13、对某一定波长的垂直入射光，衍射光栅的屏幕上只能出现零级和一级主极大，欲使屏幕上出现更高级次的主极大，以下做法中正确的是（ ）

- A、换一个光栅常数较小的光栅                      B、换一个光栅常数较大的光栅  
C、将光栅向靠近屏幕的方向移动                      D、将光栅向远离屏幕的方向移动

14、若用衍射光栅准确测定一单色可见光的波长，在下列各种光栅常数的光栅中选用哪一种最好？（ ）

- A、 $5.0 \times 10^{-1} \text{ mm}$                       B、 $1.0 \times 10^{-1} \text{ mm}$                       C、 $1.0 \times 10^{-2} \text{ mm}$                       D、 $1.0 \times 10^{-3} \text{ mm}$

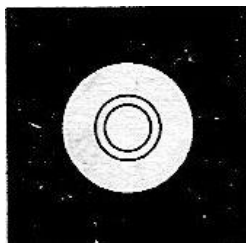
15、在光栅光谱中，假如所有偶数级次的主极大都恰好在单缝衍射的暗纹方向上，因而实际上不出现，那么此光栅每个透光缝宽度  $a$  和相邻两缝间不透光部分宽度  $b$  的关系为（ ）

- A、 $a = \frac{1}{2}b$                       B、 $a = b$                       C、 $a = 2b$                       D、 $a = 3b$

16、对衍射现象的定性分析，不正确的是（ ）

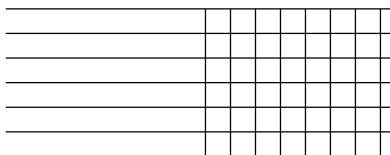
- A. 光的衍射是光在传播过程中绕过障碍物发生弯曲传播的现象  
B. 衍射花纹图样是光波相互叠加的结果  
C. 光的衍射现象为光的波动说提供了有力的证据  
D. 光的衍射现象完全否定了光的直线传播结论

17、在一次观察光衍射的实验中，观察到如图所示的清晰的明暗相间的图样，那么障碍物应是（黑线为暗纹）（ ）

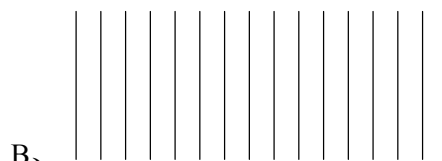
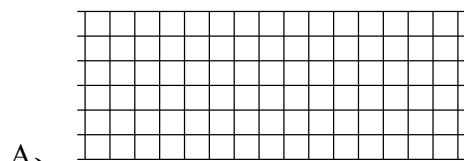


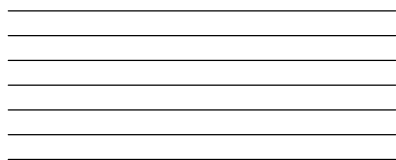
- A、很小的不透明的圆板  
B、很大的中间有大圆孔的不透明的圆板  
C、很大的不透明圆板  
D、很大的中间有小圆孔的不透明圆板

18、把两支笔杆并在一起够成一个狭缝，使狭缝距离下图距离约为 30cm，并与题图中横线平行，眼睛紧靠狭缝，看到图（ ）所示的图样。



题图





C、



D、

19、一束平行单色光，通过双缝后，在屏上得到明暗相间的条纹，则（ ）

- A、相邻的明条纹或暗条纹的间距不等
- B、将双缝中某一缝挡住，则屏上一切条纹将消失，而出现一亮点
- C、将双缝中某一缝挡住，屏上出现间距不等的明、暗条纹
- D、将双缝中某一缝挡住，则屏上条纹与原来一样，只是亮度减半

20、对于单缝衍射现象，以下说法正确的是（ ）

- A、缝的宽度  $d$  越小，衍射条纹越亮
- B、缝的宽度  $d$  越小，衍射现象越明显
- C、缝的宽度  $d$  越小，光的传播路线越接近直线
- D、入射光的波长越短，衍射现象越明显

## 二、计算题

1、在夫琅和费单缝衍射实验中，用单色光垂直于缝面照射。

(1) 已知入射光波长为  $500 \text{ nm}$ ，第一级暗纹对应的衍射角为  $30^\circ$ ，缝宽为多少？

(2) 如果所用单缝宽为  $a = 0.5 \text{ mm}$ ，在焦距等于  $1 \text{ m}$  的透镜焦平面上观察衍射条纹，中央明纹及第 1 级明纹的宽度是多少？

2、平面光的波长为  $480 \text{ nm}$ ，垂直照射到宽度为  $0.4 \text{ mm}$  的狭缝上，会聚透镜的焦距为  $60 \text{ cm}$ ，

分别计算当缝的两边到 P 点的相位差为  $\frac{\pi}{2}$  和  $\frac{\pi}{6}$  时，P 点离焦点的距离。



3、白光形成的单缝衍射图样中, 其中某一波长的第三个次最大值与波长为 600 nm 的光波的第二个次最大值重合, 求该光波的波长。

4、一束平行白光垂直入射在每毫米 50 条刻痕的全息光栅上, 问第一级光谱的末端和第二级光谱的始端的衍射角  $\theta$  之差为多少? (设可见光中最短的紫光波长为 400 nm, 最长的红光波长为 760nm)

5、用每毫米内有 400 条刻痕的平面透射光栅观察波长为 589nm 的钠光谱。试问:

(1)光垂直入射时, 最多能观察到几级光谱?

(2)光以  $30^\circ$  角入射时, 最多能观察到几级光谱?

6、白光垂直照射到一个每毫米 250 条刻痕的平面透射光栅上, 试问在衍射角为  $30^\circ$  处会出现哪些波长的光?其颜色如何?

7、用波长为 624 nm 的单色光照射一光栅，已知该光栅的缝宽  $b$  为 0.012mm，不透明部分的宽度  $a$  为 0.029 mm，缝数  $N$  为  $10^3$  条，试求：

- (1) 单缝衍射图样的中央角宽度。
- (2) 单缝衍射图样中央宽度内能看到多少级光谱？
- (3) 谱线的半宽度为多少？

8、一平面衍射光栅宽 2 cm，共有 8000 条缝，用钠黄光(589.3 nm)垂直入射，试求出可能出现的各个主极大对应的衍射角。

9、一平行单色光投射于衍射光栅上，其方向与光栅的法线成  $\theta_0$  角，在和法线  $11^\circ$  和  $53^\circ$  角的方向上发现第一级谱线，且位于法线的两侧。

- (1) 试求入射角  $\theta_0$
- (2) 试问为什么在法线两侧能观察到一级谱线，而在法线同侧能观察到二级谱线？

10、一衍射光栅，缝宽为  $a$ ，其光栅常数  $d = 4a$ 。当单色光垂直照射在光栅上时，在单缝衍射中央明纹范围内共出现几条明纹；在单缝衍射的正或负一级明纹范围内共出现几条明纹？

院 系 \_\_\_\_\_ 专 业 \_\_\_\_\_  
 姓 名 \_\_\_\_\_ 学 号 \_\_\_\_\_

## 第 19 章 早期量子论和量子力学基础

### 基本要求

- (1) 了解黑体辐射，了解普朗克量子化假设。理解光电效应和康普顿效应的实验规律以及爱因斯坦的光子理论对这两个效应的解释，理解光的波粒二象性。
- (2) 了解氢原子光谱的实验规律及玻尔的氢原子理论。
- (3) 理解实物粒子的波粒二象性、德布罗意的物质波假设与德布罗意关系。掌握动量不确定关系。
- (4) 理解描述物质波动性的物理量（波长、频率）和粒子性的物理量（动量、能量）间的关系。
- (5) 理解波函数及其统计解释。了解一维定态薛定谔方程。理解一维无限深势阱问题求解。

### 内容概述

#### 一、黑体辐射

##### 1、热辐射的概念：

假如有一个物体在任何温度下对任何波长的入射辐射能的吸收比都等于 1，则称这种理想物体为绝对黑体，简称黑体。

基尔霍夫辐射定律：

$$\frac{M_{\lambda}(T)}{\alpha(\lambda, T)} = M_{\lambda 0}(T)$$

这表示，任何物体的单色辐出度与单色吸收比之比，等于同一温度下绝对黑体的单色辐出度，这就是基尔霍夫辐射定律。

##### 2、黑体辐射的两个基本规律

(1) 斯特藩-玻耳兹曼定律：黑体的辐射出射度与黑体温度的四次方成正比，即  $M_0(T) = \sigma T^4$

其中  $\sigma = 5.67051 \times 10^{-8} \text{Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$  称为斯特藩常量。

维恩位移律：随着黑体温度的升高，其单色辐出度最大值所对应的波长  $\lambda_m$  按照  $T^{-1}$  的规律向短波方向移动，即  $\lambda_m T = b$ ，其中常量  $b = 2.897756 \times 10^{-3} \text{m} \cdot \text{K}$ 。

#### 二、普朗克辐射公式和能量子的概念

普朗克指出,如果作下述假定,物体若发射或吸收频率为  $\nu$  的电磁辐射,只能以  $h\nu$  为单位进行,这个最小能量单位就是能量子,物体所发射或吸收的电磁辐射能量总是这个能量子的整数倍,即:  $E = nh\nu$ ,  $n = 1, 2, 3, \dots$

那么就可以从理论上推导出黑体辐射的普朗克公式:

$$M_{\lambda 0(T)} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \left( \frac{1}{e^{hc/\lambda kT} - 1} \right)$$

#### 1、爱因斯坦的光子论及其对光电效应的解释

爱因斯坦提出:光是一粒一粒以光速运动的光子流。每一个光子的能量由光的频率所决定:  $E = h\nu$ , 对于一定频率的光,光子数越多,光的强度就越大。

#### 2、光子说对光电效应的解释:

金属中的自由电子从入射光中吸收一个光子后,能量变为  $h\nu$ , 这些能量一部分消耗于逸出金属表面时所必须的逸出功  $A$ , 另一部分转变为光电子的初动能:

$$h\nu = \frac{1}{2}mu^2 + A$$

此即为光电效应的爱因斯坦方程,其圆满地解释了光电效应的四条实验规律。

### 三、康普顿效应

#### 1、康普顿效应

康普顿效应: x 射线经金属、石墨等物质散射后的 x 射线中不仅有与入射线波长相同的射线,而且也有波长大于入射线波长的射线。这种现象就称为康普顿效应。

爱因斯坦的光子论圆满地解释了康普顿效应。X 射线光子与自由电子发生碰撞,导致 X 射线能量减小,从而波长变长

$$\Delta\lambda = \frac{h}{m_0c}(1 - \cos\varphi)$$

### 四、玻尔的量子论

玻尔关于氢原子结构的量子论主要包括以下三个假设:

(1) 原子存在一系列不连续的稳定状态,即定态,处于这些定态中的电子虽作相应的轨道运动,但不辐射能量;

(2) 作定态轨道运动的电子的角动量  $L$  的数值只能等于  $\hbar (= h/2\pi)$  的整数倍,即

$$l = m_e vr = n\hbar, \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

(3) 当原子中的电子从某一轨道跳跃到另一轨道时,就对应于原子从某一定态跃迁到另一定态,这时才辐射或吸收一相应的光子,光子的能量由下式决定

$$h\nu = E_A - E_B$$

式中  $E_a$  和  $E_b$  分别是初态和末态的能量,  $E_a < E_b$  表示吸收光子,  $E_a > E_b$  表示辐射光子。

氢原子系统的总能量量子化为能级

$$E_n = -\frac{m_e e^4}{8\varepsilon_0^2 h^2 n^2}$$

若原子处于能量为  $E_n$  的激发态, 电子是在主量子数为  $n$  的轨道上运动, 当它跃迁到主量子数为  $k(<n)$  的轨道上时, 所发出光子的频率为:

$$\nu_{kn} = \frac{m_e e^4}{8\varepsilon_0^2 h^3} \left[ \frac{1}{k^2} - \frac{1}{n^2} \right]$$

## 五、微观粒子的波动性

### 1、物质波

德布罗意提出一切实物粒子均具有波动性。从粒子性看, 可以用能量  $E$  和动量  $p$  描述它, 从波动性看, 可以用频率  $\nu$  和波长  $\lambda$  描述它, 这两个方面相互联系, 即德布罗意关系

$$E = h\nu \quad p = \frac{h}{\lambda}$$

### 2、不确定关系

对于具有波粒二象性的微观粒子来说, 其位置和动量是不可能同时准确测定的, 其规律由不确定关系来表示的。

位置与动量的不确定关系为:  $\Delta x \Delta p \geq \frac{\hbar}{2}$

在能量和时间之间的不确定关系为:  $\Delta E \Delta t \geq \frac{\hbar}{2}$

## 六、波函数

微观粒子的运动状态用波函数  $\psi(r, t)$  来描述, 其反映的微观粒子波动性。玻恩指出, 德布罗意波或波函数  $\psi(r, t)$  不代表实际物理量的波动, 而是描述粒子在空间的概率分布的概率波。在  $t$  时刻、在空间  $(x, y, z)$  附近单位体积内粒子出现的概率, 即概率密度可以表示为

$$\rho(x, y, z, t) = \psi^*(x, y, z, t) \psi(x, y, z, t)$$

如果粒子被限制在一个有限的空间内运动, 那么在任意时刻在全空间找到这个粒子的概率必定等于 1, 即

$$\int_V \psi^*(r, t) \psi(r, t) d\tau = 1$$

上式就称为波函数的归一化条件。

态叠加原理：如果波函数  $\psi_1(r, t), \psi_2(r, t), \dots$  都是描述系统的可能的量子态，那么它们的线性叠加

$$\psi(r, t) = \sum_i c_i \psi_i(r, t)$$

也是这个系统的一个可能的量子态。式中  $c_1, c_2, \dots$  一般也是复数。

## 七、薛定谔方程

### 1、含时薛定谔方程

薛定谔方程是波函数随时间和空间变化所普遍遵从的规律，是量子力学中的基本方程式。其一般形式为：

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \psi = \left[ -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 + U \right] \psi$$

它描述了粒子状态随时间的变化，反映了微观粒子运动的基本规律。

### 2、定态薛定谔方程

如果粒子所处势场只是坐标的函数而与时间无关，此时可将薛定谔方程的解写成坐标函数与时间函数的乘积，即

$$\psi(r, t) = \psi(r) e^{-iEt/\hbar}$$

其中定态波函数  $\psi(r)$  满足定态薛定谔方程：

$$\left[ -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 + U(r) \right] \psi(r) = E \psi(r)$$

## 八、一维无限深方势阱

所谓一维无限深方势阱就是粒子在势阱中的势能为零，而在势阱外势能等于无限大，即

$$U(x) = \begin{cases} 0 & (0 < x < a) \\ \infty & (0 \leq x \leq a) \end{cases}$$

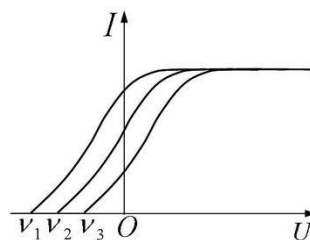
其对应的归一化波函数与能量本征值为

$$\psi_n(x) = \sqrt{\frac{2}{a}} \sin \frac{n\pi x}{a}, \quad E_n = \frac{\pi^2 \hbar^2 n^2}{2ma^2} \quad n=1, 2, 3, \dots$$

## 练习题

### 一、选择题

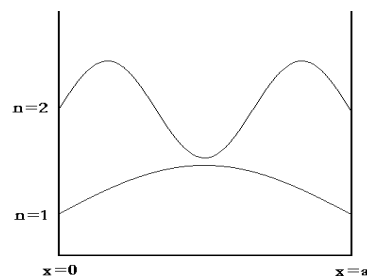
- 下列各物体，哪个是绝对黑体? ( )。
  - 不辐射可见光的物体；
  - 不辐射任何光线的物体；
  - 不能反射可见光的物体；
  - 不能反射任何电磁波的物体。
- 辐射能量仅仅是同面积、同温度的一绝对黑体所辐射能量的 40% 的钨丝，当其面积为  $4.4 \times 10^{-5} \text{m}^2$ ，功率为 100W 时，它的温度为多少 K。( ) (斯特藩常量  $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$ )
  - $3.16 \times 10^3$
  - $2.50 \times 10^3$
  - $2.00 \times 10^3$
  - $1.30 \times 10^3$
- 先后用三种不同频率的单色光照射同一光电管，三次测得的光电效应伏安特性曲线如图所示，则三种频率  $\nu_1$ 、 $\nu_2$ 、 $\nu_3$  的关系是 ( )
  - $\nu_1 > \nu_2 > \nu_3$
  - $\nu_1 = \nu_2 = \nu_3$
  - $\nu_1 < \nu_2 < \nu_3$
  - $\nu_1 > \nu_3 > \nu_2$
- 康普顿效应的主要特点是 ( )
  - 散射光的波长均比入射光的波长短且随散射角增大而减小，但与散射体的性质无关；
  - 散射光的波长均与入射光的波长相同，与散射角、散射体性质无关；
  - 散射光中既有与入射光波长相同的，也有比入射光波长长的和比入射光波长短的.这与散射体性质有关；
  - 散射光中有些波长比入射光的波长长，且随散射角增大而增大，有些散射光波长与入射光波长相同。这都与散射体的性质无关。
- 使氢原子中电子从  $n=3$  的状态电离，至少需要供给的能量为 ( )。(已知基态氢原子的电离能为  $13.6 \text{eV}$ )。
  - $-12.1 \text{eV}$
  - $12.1 \text{eV}$
  - $1.51 \text{eV}$
  - $-1.51 \text{eV}$
- 大量氢原子同时处在  $n=4$  的状态，当它们向低能态跃迁时，据玻尔理论，可能产生不同波长的谱线条纹是 ( )。
  - 9；
  - 7；
  - 6；
  - 5.





- 7、电子显微镜中的电子从静止开始通过电势差为  $U$  的静电场加速后，其德布罗意波长是  $0.4 \times 10^{-10} \text{ m}$ ，则  $U$  约为 ( ) ( $e = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$ ， $h = 6.63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ ，电子静止质量  $m_e = 9.11 \times 10^{-31} \text{ kg}$ )
- (A) 150 V      (B) 330 V      (C) 630 V      (D) 940 V
- 8、有两种粒子，其质量  $m_1 = 2m_2$ ，动能  $E_{k1} = 2E_{k2}$ ，则它们的德布罗意波长之比  $\lambda_1/\lambda_2$  为 ( )
- A.  $\frac{1}{4}$       B.  $\frac{1}{2}$       C.  $\frac{1}{\sqrt{2}}$       D.  $\frac{1}{8}$
- 9、下列关于微观粒子的波动性的说法中正确的是 ( )。
- A. 微观粒子本身就是粒子，只是它的运动路径象波；
- B. 波就是粒子的某种实际结构，即物质波包，波包的大小就是粒子的大小，波包的速度就是粒子的运动速度；
- C. 德布罗意波或者波函数不代表实际物理量的波动，而是描述粒子在空间的概率分布的概率波；
- D. 波动性就是由于大量微观粒子分布于空间而形成的疏密波。
- 10、一维无限深势阱波函数如图所示，则在基态粒子出现概率最大的位置处在 ( )

- A.  $x=0$ ;      B.  $x=a$ ;      C.  $x=a/3$ ;      D.  $x=a/2$ ;



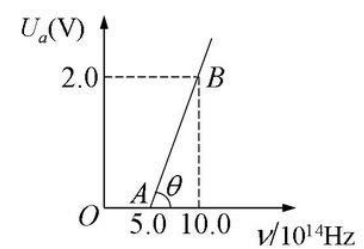
## 二、计算题

- 1、实验表明，黑体辐射实验曲线的峰值波长  $\lambda_m$  和黑体温度的乘积为一常数，即  $\lambda_m T = b = 2.897 \times 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K}$ 。实验测得太阳辐射波谱的峰值波长  $\lambda_m = 510 \text{ nm}$ ，设太阳可近似看作黑体，试估算太阳表面的温度。

- 2、铝表面电子的逸出功为  $6.72 \times 10^{-19} \text{J}$ ，今有波长为  $\lambda = 2.0 \times 10^{-7} \text{m}$  的光投射到铝表面上。试求：（1）由此产生的光电子的最大初动能；（2）遏止电势差；（3）铝的红限波长。

- 3、图中所示为在一次光电效应实验中得出的曲线。

- (1) 由图中数据求出该金属的红限频率；  
(2) 求证：对不同材料的金属，AB 线的斜率相同；  
(3) 由图上数据求出普朗克恒量  $h$ 。



- 4、 波长为  $0.04\text{ nm}$  的 X 射线经物质散射后产生康普顿效应。若散射角等于  $90^\circ$ ，试求：  
(1) 散射光波长；(2) 反冲电子获得的能量；(3) 反冲电子动量的大小和方向。  
(康普顿波长  $\lambda_c = 2.43 \times 10^{-12}\text{ m}$ ， $h = 6.63 \times 10^{-34}\text{ J}\cdot\text{s}$ )

- 5、  $\alpha$  粒子在磁感应强度为  $B = 0.025\text{ T}$  的均匀磁场中沿半径为  $R = 0.83\text{ cm}$  的圆形轨道运动。(1) 试计算其德布罗意波长，(2) 若使质量  $m = 0.1\text{ g}$  的小球以与  $\alpha$  粒子相同的速率运动。则其波长为多少？  
( $m_\alpha = 6.64 \times 10^{-27}\text{ kg}$ ， $h = 6.63 \times 10^{-34}\text{ J}\cdot\text{s}$ ， $e = 1.6 \times 10^{-19}\text{ C}$ )

- 6、 假定对某个粒子动量的测定可精确到千分之一，试确定这个粒子位置的最小不确定量。  
(1) 该粒子质量为  $5 \times 10^{-3}\text{ kg}$ ，以  $2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  的速度运动；  
(2) 该粒子是速度为  $1.8 \times 10^8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  的电子。