

总电场强度为

$$\mathbf{E}_B = \mathbf{E}_+ + \mathbf{E}_-$$

$$E_{By} = 0$$

$$E_B = E_{B_x} = E_{+x} + E_{-x}$$

$$= -E_+ \cos\theta - E_- \cos\theta$$

$$= -2E_+ \cos\theta$$

$$= -2 \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2 + \left(\frac{l}{2}\right)^2} \frac{\frac{l}{2}}{\sqrt{r^2 + \left(\frac{l}{2}\right)^2}}$$

$$= -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{ql}{\left[r^2 + \left(\frac{l}{2}\right)^2\right]^{\frac{3}{2}}}$$

$$\mathbf{E}_B = -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{p}{\left[r^2 + \left(\frac{l}{2}\right)^2\right]^{\frac{3}{2}}}$$

当 $r \gg l$ 时有 $\mathbf{E}_B = -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{p}{r^3}$ 。

【例 11-4】设均匀带电直线长为 L ，带电荷量为 q ，线外一点 P 到直线的垂直距离为 a ，它与直线两端的连线和直线的夹角分别为 θ_1 和 θ_2 ，如图 11-7 所示。求点 P 处的电场强度。

【解】过场点 P 和带电直线建立坐标系 Oxy ，在 x 处选取电荷元 $dq = \lambda dx$ ，则元电场强度为 $dE = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{\lambda dx}{r^2}$ ，方向如图 11-7 所示。

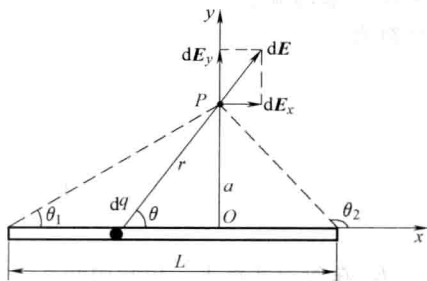


图 11-7

$$r^2 = a^2 + x^2$$

$$E_x = \int dE_x = \int dE \cos\theta$$

$$E_y = \int dE_y = \int dE \sin\theta$$

由图中的几何关系得

$$r = a \csc\theta, \quad x = -a \cot\theta, \quad dx = a \csc^2\theta d\theta$$

$$E_x = \int_{\theta_1}^{\theta_2} \frac{\lambda}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{\cos\theta}{a^2 \csc^2\theta} a \csc^2\theta d\theta = \frac{\lambda}{4\pi\epsilon_0 a} (\sin\theta_2 - \sin\theta_1)$$

$$E_y = \int_{\theta_1}^{\theta_2} \frac{\lambda}{4\pi\epsilon_0 a} \cdot \sin\theta d\theta = \frac{\lambda}{4\pi\epsilon_0 a} (\cos\theta_1 - \cos\theta_2)$$

点 P 的电场强度 E 的大小以及 E 与 Ox 轴正方向的夹角 β 由下式确定

$$E = \sqrt{E_x^2 + E_y^2}, \quad \tan\beta = \frac{E_y}{E_x}$$

$$\oint_S \mathbf{j} \cdot d\mathbf{S} = \int_{S_1} \mathbf{j}_1 \cdot d\mathbf{S}_1 + \int_{S_2} \mathbf{j}_2 \cdot d\mathbf{S}_2 + \int_{S_3} \mathbf{j}_3 \cdot d\mathbf{S}_3 + \int_{S_4} \mathbf{j}_4 \cdot d\mathbf{S}_4 + \int_{S_5} \mathbf{j}_5 \cdot d\mathbf{S}_5 = 0$$

设置外法线为正方向, 流出节点为正值, 流入节点为负值, 上式积分后得

$$I_1 - I_2 + I_3 - I_4 - I_5 = 0$$

上式也可以表示为

$$I_1 + I_3 = I_2 + I_4 + I_5$$

即将流出节点的电流放在等式左端, 流入节点的电流放在等式右端。当然, 反过来放置也是可以的。

所以, 流出节点电流之和等于流入节点电流之和, 这称为恒定电流的节点电流定律, 也称为基尔霍夫第一定律。

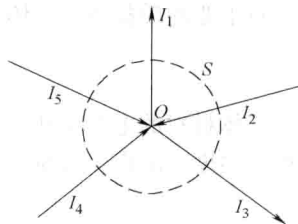


图 13-3



应用能力训练

【例 13-1】 (1) 有根半径 $R = 1.9\text{mm}$ 、通有电流 $I = 1.5\text{A}$, 单位体积内的电子数 $n = 8.47 \times 10^{28}/\text{m}^3$ 的铜导线, 求电流密度 j 和电子漂移速率; (2) 有一根硅制成的半导体导线, 电流密度 $j = 0.65\text{A}/\text{cm}^2$, 其电子密度 $n = 1.5 \times 10^{23}/\text{m}^3$, 求电子的漂移速率。

【解】 (1)

$$j = \frac{I}{\pi R^2} = 0.1323\text{A}/\text{mm}^2$$

$$v_{\text{Cu}} = \frac{j}{ne} = 9.8 \times 10^{-6}\text{m/s}$$

(2)

$$v_{\text{Si}} = \frac{j}{ne} = 0.27\text{m/s} \approx 2.755 \times 10^4 v_{\text{Cu}}$$

13.2 欧姆定律和焦耳-楞次定律的微分形式



物理学基础内容

13.2.1 欧姆定律及其微分形式

1. 电阻

实验发现: 一段导线上的电流 I 与导线两端的电压 U 成正比。比例系数可以用 R 的倒数来表示, R 叫导线的电阻。这个结论叫欧姆定律, 即

$$I = \frac{U}{R} \quad (13-16)$$

由一定材料制成的横截面均匀的导体, 如果长度为 l 、横截面积为 S , 则可以证明这段导体的电阻为

$$R = \rho \frac{L}{S} \quad (13-17)$$

式中， ρ 为导体材料的电阻率，其倒数为导体材料的电导率，用 γ 表示， $\gamma = \frac{1}{\rho}$ 。

对于非均质材料，导体的电阻为

$$R = \int_L \rho \frac{dl}{S} \tag{13-18}$$

导体材料的电阻率决定于材料自身的性质。各种材料的电阻率都随温度而变化。在通常温度范围内，金属材料的电阻率随温度作线性变化，变化关系可以表示为

$$\rho_2 = \rho_1 [1 + \alpha(t_2 - t_1)] \tag{13-19}$$

式中， ρ_1, ρ_2 分别是 $t_1^\circ\text{C}$ 与 $t_2^\circ\text{C}$ 时的电阻率； α 是电阻温度系数。表 13-1 给出了几种常用材料的电阻率和电阻温度系数。

电阻的倒数称为电导，用 G 表示，即 $G = \frac{1}{R}$ 。电阻的单位是欧姆，符号为 Ω ；电导的单位为西门子，符号为 S 。电导率的单位为西门子每米，符号为 $\text{S} \cdot \text{m}^{-1}$ 。

表 13-1 几种常用材料的电阻率和电阻温度系数

材 料	电阻率 (20℃) $\rho / (\Omega \cdot \text{m})$	平均电阻温度系数 (0 ~ 100℃) $\alpha / ^\circ\text{C}^{-1}$
银	1.62×10^{-8}	3.5×10^{-3}
铜	1.75×10^{-8}	4.1×10^{-3}
铝	2.85×10^{-8}	4.2×10^{-3}
黄铜 (铜锌合金)	$(2 \sim 6) \times 10^{-8}$	2.0×10^{-3}
铁 (铸铁)	5×10^{-7}	1.0×10^{-3}
钨	5.48×10^{-8}	5.2×10^{-3}
铂	2.66×10^{-8}	2.47×10^{-3}
钢	1.3×10^{-7}	5.77×10^{-3}
汞	4.8×10^{-8}	5.7×10^{-4}
康铜	4.4×10^{-7}	5.0×10^{-6}
锰铜	4.2×10^{-7}	5.0×10^{-6}
镍铬合金	1.08×10^{-6}	1.3×10^{-6}
铁铬铝合金	1.2×10^{-6}	8.0×10^{-5}

2. 欧姆定律的微分形式

设想在导体中取一长为 dl ，截面积为 dS 的柱体，且 j 与 dS 垂直，如图 13-4 所示。由欧姆定律可得，通过这段柱体的电流为

$$dI = \frac{U - (U + dU)}{R} = \frac{-dU}{R} \tag{13-20}$$

式中， dU 为柱体两端的电压； R 为柱体的电阻。设

导体中电场强度为 E ，导体的电导率为 γ ，则 $-dU = E \cdot dl = Edl$ ， $R = \frac{1}{\gamma} \frac{dl}{dS}$ 。把这些式

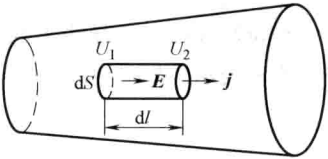


图 13-4

1. 支路、节点、回路

(1) 支路 支路就是由电源、用电器(如电阻)串联而成的电流相同的通路,如图 13-13 中 AB , BC , CD 皆是,而 $ABCD$ 则不是。

(2) 节点 节点就是由三个或三个以上支路汇交的点,如点 B 和点 C 。

(3) 回路 回路就是由支路构成的闭合通路,如 ABD , BCD , $ABCD$ 。

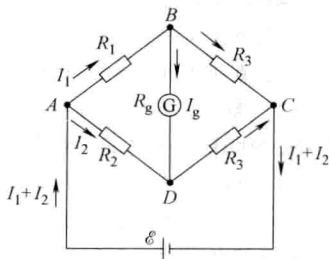


图 13-13

2. 基尔霍夫定律

(1) 节点电流定律(基尔霍夫第一定律)

$$\sum I_i = 0 \quad (13-42)$$

它表述为:在任一节点处的电流之和为零,或者说流出节点的电流(一般规定流出为正)等于流入节点的电流(流入为负)。这实质上就是电流连续性方程或者说就是电荷守恒定律的反映。例如,图 13-13 中节点 B 的电流方程为

$$-I_1 + I_g + I_3 = 0 \quad (13-43)$$

(2) 回路电压定律(基尔霍夫第二定律)

对闭合回路而言,

$$\sum_i (\pm \mathcal{E}_i) + \sum_i (\pm I_i R_i) = 0 \quad (13-44)$$

上式称为闭合回路的欧姆定律,亦即回路电压方程,或基尔霍夫第二定律,其表述为:沿任意闭合回路一周的电压为零,或者说电势增高的量等于电势降落的量。其中, $\mathcal{E}$ 和 IR 的正负完全与前面介绍的符号法则相同。回路电压定律实质上就是能量守恒定律的反映。

应用基尔霍夫定律可以计算任何复杂的电路问题,其解题步骤为:

1) 假定电流方向和回路方向。

2) 找节点,若有 n 个节点,就可列出 $(n-1)$ 个独立的节点电流方程。

3) 找回路,只要回路内有一段新电路,则这个回路就是独立的。或者找网孔,因为网路中每一网孔必然是独立的。这样又可列出 m 个(网孔数)回路电压方程。

4) 联立求解,当 $I > 0$ 时,表明真实方向与假定方向一致,当 $I < 0$ 时,则相反。

【例 13-6】 求图 13-14 所示电路中的电流 I_1 , I_2 和 I_3 。

【解】 设 I_1 , I_2 , I_3 指向如图 13-14 所示,对节点 b 有

$$I_1 + I_3 - I_2 = 0$$

对于回路 $a \rightarrow b \rightarrow e \rightarrow f \rightarrow a$ 有

$$-I_1(2+4) + 10I_3 + 10 = 0$$

对于回路 $b \rightarrow c \rightarrow d \rightarrow e \rightarrow b$ 有

$$-I_2(6+1) - 10I_3 + 8 = 0$$

解以上三个方程得

$$I_1 = \frac{125}{86} = 1.45$$

$$I_2 = \frac{57}{43} = 1.32$$

$$I_3 = -\frac{11}{86} = -0.13 \text{ (负号表示与图中所示指向相反)}$$

(2) 无限大载流平面的磁场分布 设电流均匀地流过一无限大平面导体薄板, 电流面密度为 j (即通过与电流方向垂直的单位长度的电流), 如图 14-21a 所示。

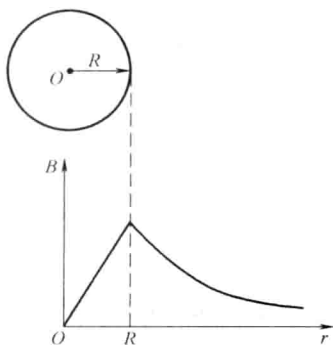


图 14-20

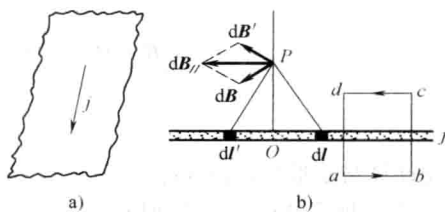


图 14-21

将无限大载流薄板视为由无限多根平行排列的长直电流组成。对板外任意场点 P , 相对 OP 对称地取一对宽度相等的长直电流 $jd\mathbf{l}$ 和 $jd\mathbf{l}'$, 它们在点 P 产生的磁感应强度分别为 $d\mathbf{B}$ 和 $d\mathbf{B}'$, 如图 14-21b 所示。由对称性可知, 它们的合磁场 $d\mathbf{B}_{\text{合}}$ 的方向平行于载流平面, 因而无数对对称长直电流在点 P 产生的总磁场也一定平行于载流平面。由相同的分析可知, 对平面另一侧的场点, 其总磁场也与载流平面平行, 但方向与点 P 的磁场方向相反, 即载流平面两侧 $\mathbf{B}$ 的方向相反。又由于载流平面无限大, 故磁场分布对载流平面具有对称性, 即在与平面等距离的各点处 $\mathbf{B}$ 的大小相等。

根据磁场分布的面对称性, 取一相对载流平面对称的矩形回路 $abcd$ (见图 14-21b) 为安培回路 L , 由于在回路的 ab 及 cd 段上 $\mathbf{B}$ 的量值处处相等, 且 $\mathbf{B}$ 的方向与积分路径的方向相同, 在回路的 bc 和 da 段上 $\mathbf{B}$ 的方向处处与积分路径垂直, $\mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = 0$, 所以沿回路 $\mathbf{B}$ 的环流为

$$\oint_L \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = 2B \overline{ab} \quad (14-31)$$

穿过该回路的电流为 $j \overline{ab}$, 根据安培环路定理得

$$2B \overline{ab} = \mu_0 j \overline{ab} \quad (14-32)$$

$$B = \frac{1}{2} \mu_0 j \quad (14-33)$$

上式表明, 无限大均匀载流平面两侧的磁场大小相等、方向相反, 并且是均匀磁场。

(3) 无限长载流直螺线管内的磁场 设螺线管是均匀密绕的, 缠绕密度 (即单位长度上的线圈匝数) 为 n , 通有电流 I 。由电流分布的对称性可知, 管内的磁感应线是平行于轴线的直线, 方向沿电流的右手螺旋方向, 而且在同一磁感应线上 $\mathbf{B}$ 的量值处处相等。管外的磁场很弱, 可忽略不计。过管内任意场点 P 作如图 14-22 所示的矩形回

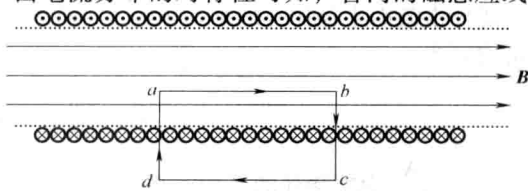


图 14-22

对环外任意一点,若过该点作一与环共轴的圆周为安培环路 L ,则因穿过 L 的总电流为0,因而有 $B=0$ 。

上述结果说明,密绕螺绕环的磁场全部限制在环内,磁感应线是一些与环共轴的同心圆,环外无磁场。当环的横截面半径远小于环的平均半径时,环内的磁场 $B = \mu_0 nI$,与无限长直螺线管的磁场相同。这是因为,当环的半径趋于无限大时,螺绕环的一段就过渡为无限长的螺线管。



航理及军事应用

电磁继电器

继电器(relay)是一种电控制器件,是当输入量(激励量)的变化达到规定要求时,在电气输出电路中使被控量发生预定的阶跃变化的一种电器。它具有控制系统(又称输入回路)和被控系统(又称输出回路)之间的互动关系。通常应用于自动化的控制电路中,是用小电流控制大电流运作的一种“自动开关”。故在电路中起着自动调节、安全保护、转换电路等作用。

电磁继电器一般由铁心、线圈、衔铁、触点簧片等组成(见图14-24)。只要在线圈两端加上一定的电压,线圈中就会流过一定的电流,从而产生磁场,衔铁就会在磁场力的吸引下克服返回弹簧的弹力吸向铁心,从而带动衔铁的动触点与静触点(常开触点)吸合。当线圈断电后,磁场也随之消失,衔铁就会在弹簧的作用下返回原来的位置,使动触点与原来的静触点(常闭触点)释放。这样吸合—释放,从而达到了导通、切断电路的目的。对于继电器的“常开、常闭”触点可

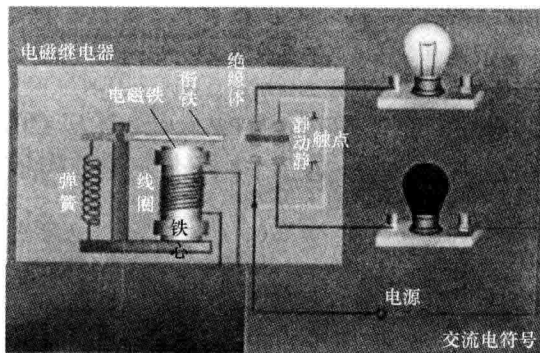


图 14-24

以这样来区分:继电器线圈未通电时处于断开状态的静触点,称为“常开触点”;处于接通状态的静触点称为“常闭触点”。继电器一般有两个电路,分别为低压控制电路和高压工作电路。



物理知识拓展

磁单极

我们知道电场由电荷产生。我们很容易在空间产生一个独立的电荷,如电子、质子等。这种独立的电荷正是静电场的源。而磁场的高斯定理表明:磁场是无源的,即磁场不是由与独立的电荷相对应的“磁荷”产生的,而是由运动电荷产生的。比较电场与磁场的规律,人们会发现,电场与磁场的规律非常对称(在讨论了麦克斯韦方程组以后这点将更清楚),除了高斯定理中电场是有源场,而磁场是无源场以外。但是,为什么唯独在这一点上显示出不同呢?因为在自然界还没有发现自由的“磁荷”(或称磁单极)存在。

然而,在1931年,狄拉克从量子力学原理出发,经过理论分析指出,量子理论允许“磁

3. 艇壳采用低磁钢及附体低磁化

艇体磁场大约占潜艇磁场的80%以上,故用低磁材料替代铁磁性材料可大幅度降低潜艇磁场。例如,俄罗斯采用无磁性的钛合金制造耐压壳体;德国采用低磁不锈钢建造艇体,还采用低磁化设备。不过,低磁钢在耐压性能上还需进一步提高。值得注意的是,潜艇艇体本身并不是一条完全光滑的曲线,在上面有指挥室围壳和舵、固定翼等附体。这些附体本身很难安装消磁绕组,对艇体造成了杂散磁场,故附体低磁化是潜艇消磁系统中一项重要的内容,且在工艺上相对容易实施。

4. 消磁控制方式

第一种方式是安装三分量磁探仪,根据探测结果调节消磁电流,其优点是不受地域限制,但缺点也很明显:一是磁探仪距艇体应有一定的距离,故安装位置受限制,艇上很难找到地方布置磁探仪;二是磁探仪易受艇体干扰,需预先扣除艇体固定磁场的影响,且每过一段时间就要重新测量调整。第二种方式是根据全球磁场模式、潜艇的经纬度和航态(纵倾、横倾、纵摇、横摇)等参数,利用软件进行地磁解算,计算出各组消磁绕组的消磁电流大小并发送给消磁绕组的电源,它的精度关系到消磁效果,其优点是精度不随时间推移发生积累误差,但与地球磁场模式有密切关系,该方式在水面舰船上已有应用。

5. 潜艇安装消磁系统的难点

能源功率:常规潜艇在水下依靠蓄电池航行,能源有限,消磁系统会缩短水下续航力。需辩证地看待这个问题,应把消耗能源代价与作战效能进行比较。通过技术创新和灵活使用,降低消磁系统的能源消耗,以较小的代价换取更大的作战效能。例如,只在敌方水雷封锁区和反潜机活动海区开启消磁系统,在其他磁威胁较小的区域则关闭消磁系统。

重量重心:消磁系统的主要重量集中在消磁绕组上,而消磁绕组是全船分布的,而且在总体设计时可以通过调整压铁和纵向力矩来解决消磁系统带来的重心问题。

总体布置:这是安装消磁系统设计中最关键、困难的一部分,直接关系到消磁效果。总体布置时应注意以下几条原则:

1) 绕组应避免艇上对电磁波敏感的设备或采取必要的防护或补偿措施,例如,磁罗经(利用地磁场工作)、监视器(阴极射线管)、电流表、电压表、继电器(利用磁偏转原理工作)等。

2) 在舱内布置绕组时,应尽量避免内部液舱(油舱和水舱),若无法避开内部液舱,应在液舱区域的绕组外部加装套管。

3) 在舱内布置绕组,应尽量避免蓄电池舱。

4) 在非耐压壳外布置时应避开声呐基阵。

消磁技术在潜艇上的应用是隐身技术发展的必然趋势,也是作战的需要。可以预见的是,随着一些关键性技术的突破,消磁系统在潜艇上的成熟应用指日可待,潜艇的隐身性能也必将取得长足的进步。

培环路定律得到回路中的磁场 B ，再将 B 对回路所围面积积分求出磁通量 Φ ，然后由 $L = \frac{\Phi}{I}$ 即可求出自感，进而就能很容易地求自感电动势了。

【例 16-9】一长直螺线管，长度为 l ，横截面积为 S ，线圈的总匝数为 N ，管中介质的磁导率为 μ ，试求其自感。

【解】对于长直螺线管，其磁感应强度大小为 $B = \mu \frac{N}{l} I = \mu n I$ 。

通过螺线管的磁通量为

$$\Phi = NBS = \mu \frac{N^2}{l} IS$$

自感为

$$L = \frac{\Phi}{I} = \mu \frac{N^2}{l} S = \mu n^2 V$$

螺线管在体积一定的情况下，若想增加自感，则可增加单位长度上的线圈匝数，也可增加管内磁介质的磁导率。

16.3.2 互感

1. 互感现象

由于一个回路中电流的变化引起另一个回路中磁通量变化并激起感应电动势的现象称为互感现象。

2. 互感

与自感类似，我们讨论两个回路的形状、相对位置和周围介质的磁导率 μ 不变的情况，并且首先讨论两个回路相互产生磁通量的规律。如图 16-21 所示，有两个回路 l_1 和 l_2 ，它们各自所围面积 S_1 和 S_2 的法向如图 16-21 所示。若 l_1 中有电流 I_1 ，则 I_1 将在 S_2 上产生一个磁通量 Φ_{21} ，称为回路 l_2 中由电流 I_1 所激起的磁通量。显然， Φ_{21} 应正比于 I_1 ，即

$$\Phi_{21} = M_{21} I_1 \quad (16-45)$$

式中， M_{21} 称为回路 1 对回路 2 的互感。同理，若 l_2 中有电流 I_2 ，也有

$$\Phi_{12} = M_{12} I_2 \quad (16-46)$$

式中， M_{12} 称为回路 2 对回路 1 的互感。可以证明：在任意情况下， M_{12} 和 M_{21} 都相等，记为 $M = M_{12} = M_{21}$ ，称 M 为两回路之间的互感。于是上面两个式子可记为

$$\Phi_{21} = M I_1 \quad (16-47)$$

$$\Phi_{12} = M I_2 \quad (16-48)$$

对于互感，有如下几点值得注意。第一， M 的大小仅取决于两回路的形状、相对位置及周围介质的磁导率而与电流无关。第二，上式可改记为

$$M = \frac{\Phi_{21}}{I_1} = \frac{\Phi_{12}}{I_2} \quad (16-49)$$

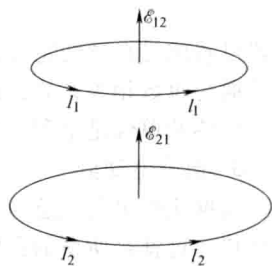


图 16-21

是均匀的。若介质的磁导率为 μ ，磁感应强度为 B ，则由磁场能量密度公式即可求出体元内的磁场能量密度 w_m ，进而求出体元内的磁场能量

$$dW_m = w_m dV = \frac{B^2}{2\mu} dV$$

而空间中某一体积 V 中的磁场能量为

$$W_m = \int_V w_m dV = \int_V \frac{B^2}{2\mu} dV \quad (16-63)$$

一般来说，若研究的对象是一个回路，而且回路的自感 L 是已知的，则用载流自感线圈的储能公式计算磁场能量更为方便。



航理及军事应用

电磁振荡电路

1. 无阻尼自由电磁振荡电路

无阻尼自由电磁振荡电路由自感线圈 L 和电容器 C 组成，回路中电阻为零。在电容器开始放电之前的一瞬间，电路中没有电流，电能全部集中在电容器的两极板之间的电场中，如图16-26a所示，电容器两极板之间的电势差使正电荷从正极板经自感线圈流至负极板，由于线圈 L 的自感作用，电路中的电流不能立刻达到最大值，而是随着电容器极板上电荷的减少而逐渐增大。当电容器两极板的电荷为零时，电路中的电流达到最大值，与电流相联系的磁场能量也达到最大，此时，电容器两极板间的电场为零，电场能量全部转换成自感线圈内的磁场能量，如图16-26b所示。当电流达到最大值开始减小时，由楞次定律可知，电路中感应电流的方向应与原电流方向一致，使电容器反向充电，直到两极板的电荷量达到最大值，反向充电过程结束。此时，磁场完全消失，电路中的电流为零，磁场能量全部转换成电容器两极板之间的电场能量，如图16-26c所示。在这以后，电容器又开始反向放电过程，直至两极板上的电荷全部消失，电路中的电流达到反向最大值，电场能量又全部转换成磁场能量，如图16-26d所示，此后，电容器又被充电。当电路中反向电流减小为零时，电容器两极板上的电荷达到最大值并恢复到原始状态，以后又重复上述一系列过程。这种电荷和电流、电场和磁场随时间作周期性变化的现象

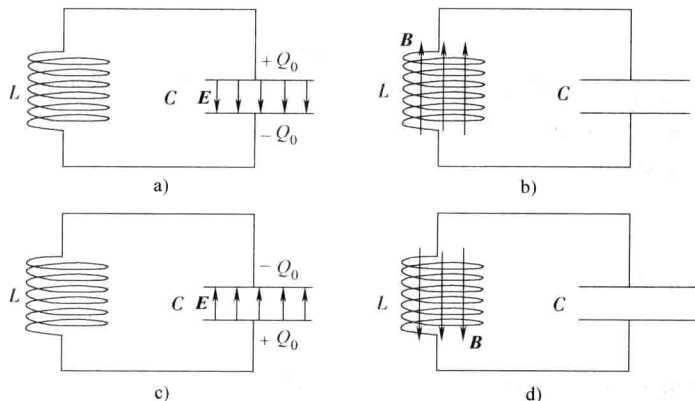


图 16-26

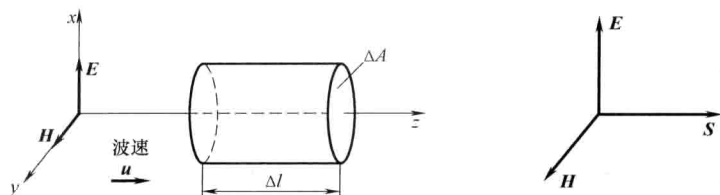


图 16-36

$$w = w_e + w_m = \frac{1}{2}(\epsilon E^2 + \mu H^2) \quad (16-104)$$

代入式 (16-103) 中, 得

$$S = \frac{1}{2}u(\epsilon E^2 + \mu H^2) \quad (16-105)$$

再把 $u = \frac{1}{\sqrt{\mu\epsilon}}$ 和 $\sqrt{\mu}H = \sqrt{\epsilon}E$ 代入上式, 得

$$S = \frac{1}{2\sqrt{\epsilon\mu}}(\sqrt{\epsilon}E\sqrt{\mu}H + \sqrt{\mu}H\sqrt{\epsilon}E) = EH \quad (16-106)$$

由于 E , H 和波的传播方向三者相互垂直, 并且组成一个右手螺旋系, 所以上式可用矢量式表示为

$$S = E \times H \quad (16-107)$$

S 被称为电磁波的能流密度矢量, 或坡印廷矢量。

将 S 对时间取平均值, 并以 I 表示, 即

$$I = \bar{S} = \overline{EH} = \sqrt{\frac{\epsilon}{\mu}} \overline{E^2} \quad (16-108)$$

称 I 为电磁波的波强。

5. 偶极振子发射的电磁波

要想产生电磁波, 首先要有适当的振源, 任何 LC 振荡电路原则上都可以作为发射电磁波的振源。但要想有效地把电路中的电磁能发射出去, 除了连续不断地给电路补充能量外, 还必须具备以下条件:

(1) 必须有足够的频率 以后将看到, 电磁波在单位时间内辐射的能量与频率的四次方成正比, 振荡电路的固有频率越高, 越能把能量有效地发射出去。由 LC 振荡电路的固有频率 $f_0 =$

$\frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ 可知, 要加大 f_0 , 必须减小电路中 L 和 C 的值。

(2) 必须有开放的电路 LC 振荡电路是集中性元件的电路, 即电场和电能都集中在电容元件中, 磁场和磁能都集中在自感线圈中。为了把电磁场和电磁能发射出去, 必须对电路加以改造, 以便使电磁场能够分散到空间去。为此, 设想把 LC 振荡电路按图 16-37a ~ d 的顺序逐步加以改造, 改造的趋势是使电容器的极板面积越来越小, 间隔越来越大, 并使自感线圈的匝数越来越少。这样, 一方面可以使 C 和 L 的数值减小, 以提高固有频率 f_0 ; 另一方面使电路越来越开放, 使电场和磁场分布到空间中去, 最后振荡电路完全演变为一根直导线, 电流在其中往复振荡, 两端出现正负交替的等量异号电荷。这样的电路叫做振荡偶极子 (或偶极振子), 它适合于作为有效地发射电磁波的振源。广播电台或电视台的天线都可以看成是这类偶极振子。

采用可收放天线,等等。

材料隐身技术就是采用能吸收或透过雷达波的涂料或复合材料,使雷达波有来无回、多来少回。目前主要使用的是雷达吸波材料,此类材料可将雷达波能量转化为其他形式的能量。

对消技术是通过目标产生与雷达反射波同频率、同振幅但相位相反的电磁波,与反射波发生相消干涉,从而消除散射信号。对消技术分为无源对消技术和有源对消技术。

等离子体隐身技术的原理是当对方雷达发射的电磁波遇到等离子体的带电粒子后,便发生相互作用,电磁波的部分能量传递给带电粒子,其自身能量逐渐衰减,其余电磁波受一系列物理作用的影响,绕过等离子体或产生折射,使电磁波探测失去功效。

我国研制的准四代战斗机歼 20,自从它首次试飞的那一天起就被高度关注。其性能被认为接近 F22,强于 T-50 而且载弹量都超过二者。歼 20 采用了单座、双发、双垂尾、带边条的鸭式气动布局。根据图片可看出,该机属于一款双发重型战斗机,机头、机身呈现菱形、垂直尾翼也向外倾斜,起落架舱门采用锯齿边设计,具备隐形战斗机的特征。隐身方面,歼 20 总体上采用了隐身设计,同时鸭翼和腹鳍的存在对隐身性能构成了不利影响,正面 RCS 值(即雷达反射截面积,飞机对雷达波的有效反射面积)应该会大于 F22。

对付隐身飞机,即雷达反隐身技术可以从三个方面着手:研制和发展新式雷达,从更广阔的频域和空域对抗隐身飞机;通过采用一些新技术来提高现有雷达的探测能力;针对隐身飞机的弱点采取相应的战略、战术部署。

由于隐身飞机只是在一定频率范围和一定空间内才具有隐身性能,因此,扩大雷达探测系统在频域、空域的探测范围和能力,就可以减小隐身飞机的威胁,如采用①米波、毫米波雷达;②超宽带雷达;③超视距雷达;④无源雷达;⑤谐波雷达;⑥激光雷达;⑦极化雷达;⑧天基/空基雷达探测系统;⑨双/多基地雷达等。

采用新技术提高现有雷达的反隐身能力不失为一种效费比更高的反隐身技术手段。提高雷达探测能力的主要技术手段有:采用频率捷变、扩频技术、低旁瓣或旁瓣对消、窄波束、置零技术、多波束、极化变换、伪随机噪声、恒虚警电路等技术来提高雷达的抗干扰能力;采用大时宽脉冲压缩技术、功率合成技术、增大雷达发射功率等措施来提高雷达的发射功率等。提高雷达接收机的信号处理质量,可以增加对低 RCS 目标回波的探测概率和抗干扰能力,主要改进手段有:降低接收机的噪声系数;采用高性能的数字滤波器等。雷达组网技术是通过不同频段的雷达在大角度范围内从不同方位照射隐身飞机,既可利用隐身飞机的空域窗口,又可利用其频域窗口;所有截获的信号由数据处理中心进行数据融合处理,即使某部雷达受到干扰或不能覆盖某一区域时,其他雷达也可提供相关信息,从而在公共覆盖域内获得比单部雷达更多的目标数据。

从战略、战术部署上对抗隐身飞机的手段包括:建立综合一体化的多传感器预警探测系统;建立军民两用的统一雷达系统;采用雷达接力的形式,即远程预警雷达或预警机搜索发现目标,给引导雷达指示目标,组织隐身飞机航路两侧的引导雷达从侧面进行交替掌握,为航空兵部队和防空部队指示目标并保障其攻击隐身飞机;实施目标推测和机动作战手段等。

第二阶段从 20 世纪 50 年代开始。由于红外、微光、激光等光电子技术的发展,主动红外夜视仪、红外制导空—空导弹、微光夜视仪、激光测距机等先后装备部队。自 20 世纪 70 年代以来,红外技术、激光技术与电子技术结合,研制出红外热像仪、激光制导武器、光学遥感设备、激光通信器材等,显著提高了作战效能。这就是军用光学装备的光电子仪器时期。

近年来,由于光电子技术的飞速发展和图像处理技术的广泛应用,加之计算机技术的迅猛普及和快速发展,军用光学装备正以崭新的面貌跻身于先进武器装备的行列,成为一个国家军事实力的显著标志。

军用光学技术通常按工作原理和技术发展分为:光学仪器、微光夜视技术、红外技术、激光技术和光电综合应用技术等几大类。

光学仪器:主要指可见光波段范围内的普通光学仪器,主要涉及前述光学机械式仪器。它们在军事上应用最早,技术比较成熟,有扩大和延伸人的视觉、发现人眼看不清或看不见的目标、测定目标的位置和对目标瞄准等功能。普通光学仪器具有图像清晰、使用方便和成本较低等优点,仍然是武器系统配套装备的重要组成部分。

微光夜视技术:在可见光和近红外波段范围内,将微弱的光照图像转变为人眼可见的图像,扩展人眼在低照度下的视觉能力。微光夜视仪器可分为直接观察和间接观察两种类型。直接观察的微光夜视仪,由物镜、像增强器、目镜和电源、机械部件等组成,人眼通过目镜观察像增强器荧光屏上的景物图像,已被广泛用于夜间侦察、瞄准、驾驶等。间接观察的微光电视,由物镜、微光摄像器件组成微光电视摄像机,通过无线或有线传输,在接收显示装置上获得景物的图像,可用于夜间侦察和火控系统。

红外技术:由于一切温度高于热力学温度零开的物体都有红外辐射,所以红外技术为探测和识别目标提供了客观基础,因而它在军事上得到了广泛应用。红外系统的工作方式分主动式和被动式。主动式红外系统是用红外光源照射目标,仪器接收目标反射的红外辐射而工作,由于它易暴露自己,应用范围已逐渐减小,并逐渐为被动式微光夜视仪和热像仪所取代。被动式红外系统是接收目标自身发射或反射其他光源(如日光)的红外辐射,隐蔽性好,是军用红外系统的主要工作方式。为了满足军事应用的需要,主要发展了以下三项红外技术:红外跟踪与制导技术、红外夜视技术和红外遥感技术。机载或星载的红外侦察系统通过一维扫描和载体运动获取景物的二维红外图像信息,可记录在胶片或磁带上,供事后处理,也可实时传输到地面记录和处理。

激光技术:激光具有单色性好、方向性强、亮度高等特点。现已发现的激光工作物质有几千种,波长范围从软 X 射线到远红外。为了满足军事应用的需要,主要发展了以下五项激光技术:①激光测距技术:它是在军事上最先得到实际应用的激光技术。②激光制导技术:激光制导武器精度高、结构比较简单、不易受电磁干扰,在精确制导武器中占有重要地位。20 世纪 70 年代初,美国研制的激光制导航空炸弹在越南战场首次使用。③激光通信技术:激光通信容量大,保密性好,抗电磁干扰能力强。④强激光技术:用高功率激光器制成的战术激光武器,可使人眼致盲和使光电探测器失效。利用高能激光束可摧毁飞机、导弹、卫星等军事目标。用于致盲、防空等的战术激光

3. 使用偏振片观看立体电影

在观看《阿凡达》这类立体电影时,观众要戴上一副特制的眼镜,这副眼镜就是一对偏振方向互相垂直的偏振片。

拍摄立体电影一般是用两个镜头如人眼那样的摄影机,从两个不同方向同时拍摄下景物的像,并制成电影胶片。在放映时,通过两个放映机,把用两个摄影机拍下的两组胶片同步放映,使这略有差别的两幅图像重叠在银幕上。这时如果用眼睛直接观看,看到的画面是模糊不清的,要看到立体电影,就要在每架放映机前装一块偏振片,它的作用相当于起偏器。从两架放映机射出的光,通过偏振片后,就成了偏振光。左、右两架放映机前的偏振片的偏振化方向互相垂直,因而产生的两束偏振光的偏振方向也互相垂直。这两束偏振光投射到银幕上再反射到观众处,偏振光方向不改变。观众用上述的偏振眼镜观看,每只眼睛只看到相应的偏振光图像,左眼只能看到左边放映物镜投射到银幕上的画面,右眼只能看到右边放映物镜投射到银幕上的画面,两者在大脑中汇合,产生立体感,这就是立体电影的原理。

4. 液晶显示原理

液晶是一种规则性排列的有机化合物,也是一种介于固体和液体之间的物质,目前一般采用的是分子排列最适合用于制造液晶显示器的向列相细柱型液晶。液晶本身并不能发光,它主要通过电压的改变来产生电场,从而使液晶分子排列发生变化来显示图像。

偏振光通过多个偏振片时,其 E 矢量方向逐步转向的行为也类似地发生在液晶显示器电控光开关的实验原理中。这里介绍扭曲向列型液晶盒显示器,其结构如图19-15所示。向列型液晶的棒状液晶分子是同向排列的,其排列方向由液晶盒玻璃基片的表面定向处理方式决定,图中,显示器液晶盒上、下玻璃基片表面处理层的取向是互相垂直的,这将导致液晶盒内两个基片之间的棒状液晶分子自上而下随着位置的改变而逐步扭转,累积的转向总量为 90° 。图19-5所示的液晶盒被夹在上下两片偏振化方向相互垂直的偏振片之间。自然光通过液晶盒上面的偏振片后成为线偏振光,该光线通过扭曲向列型液晶层时,其 E 矢量方向随着分子扭曲结构而同步旋转,线偏振光到达扭曲向列型液晶盒的下端时,其 E 矢量方向也旋转了 90° ,此时出射光 E 矢量方向恰与液晶盒下方偏振片的偏振化方向平行,可以通过该偏振片,这时的液晶盒呈现“亮”状态,也就是液晶盒光开关的“开”状态,如图19-17a所示。

这里对 E 矢量方向旋转现象作一个定性解释:液晶材料的相对介电常数 ϵ_r 是各向异性的,棒状液晶分子沿着长轴方向和垂直于长轴方向的相对介电常数分别为 $\epsilon_{//}$ 和 $\epsilon_{\perp}$,假设这里使用的液晶材料的介电性质为 $\epsilon_{//} > \epsilon_{\perp}$ 。我们知道,电介质被极化时,极化电场将使原来的电场削弱,合成电场为原电场的 $1/\epsilon_r$,所以偏振光的 E 矢量与液晶分子长轴平行的分量将被较大地削弱,而偏振光的 E 矢量在液晶分子长轴的垂直方向的分量将被较小地削弱。当光波的波长远远小于液晶分子扭曲的螺距时,在与光线垂直的平面薄层内大致同向排列的液晶分子构成了局部偏振片,偏振光的 E 矢量与该局部区域内的所有液晶分子电偶极矩的矢量和有关,而该平面薄层内的各个棒状液晶分子长轴的垂直方向相当于该局部偏振片的偏振化方向,由于各层局部偏振片的偏振化

物体不仅能辐射电磁波, 而且还能吸收和反射电磁波。当电磁波射至某一不透明物体的表面时, 一部分能量被物体吸收, 另一部分能量被物体的表面所反射, 吸收和反射的情形既与物体自身的温度有关, 也与入射电磁波的波长有关。为了定量描述物体对电磁波的吸收和反射, 我们引入物体的单色吸收比和单色反射比。物体的单色吸收比 $\alpha(\lambda, T)$ 定义为, 温度为 T 的物体吸收波长在 λ 到 $\lambda + d\lambda$ 范围内的电磁波能量与相应波长的入射电磁波能量之比; 物体的单色反射比 $r(\lambda, T)$ 定义为, 温度为 T 的物体反射波长在 λ 到 $\lambda + d\lambda$ 范围内的电磁波能量与相应波长的入射电磁波能量之比。因为物体是不透明的, 所以同一物体的单色吸收比与单色反射比有下面的关系

$$\alpha(\lambda, T) + r(\lambda, T) = 1 \quad (20-3)$$

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, 即 $\alpha(\lambda, T) = 1$, 则称这种理想物体为绝对黑体, 简称黑体。

我们把绝对黑体称为理想物体, 是因为自然界并不存在这种物体, 它仅是一种理想模型。然而, 我们可以用人工方法制作一种十分接近于绝对黑体的物体, 图 20-1 所示的一个用不透明材料制成的带有小孔的空心容器空腔, 就是这种物体。因为通过小孔射入空腔的电磁波需经多次反射才有可能再从小孔射出, 而每次反射, 腔壁都要吸收一部分电磁波, 以致最后从小孔射出的电磁波已微乎其微了, 所以空腔的电磁辐射就可以被认为是黑体辐射。

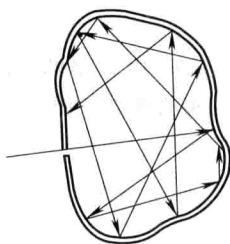


图 20-1

黑体热辐射的基本规律是红外科学和辐射热交换领域中许多理论研究和应用技术的基础。黑体热辐射规律将揭示黑体发射与吸收的辐射将如何随辐射波长和黑体温度的变化而变化。

下面我们来探讨物体热辐射的单色辐出度与单色吸收比之间的内在联系。试设想, 在一个真空容器内有若干个不同的物体 $a_1, a_2, a_3, \dots$ 和一个绝对黑体 b 。在真空中不发生对流和传导, 各物体之间以及物体与容器壁之间的辐射和吸收就成为它们彼此传递能量的唯一途径。当达到热平衡后整个系统的温度为 T , 并保持不变。由于系统中每个物体的温度都恒定不变, 所以任一物体辐射出去的能量必定等于在相同时间内吸收的能量, 这种热辐射称为平衡辐射。在平衡辐射的情况下, 尽管不同物体的单色辐出度和吸收比各不相同, 但是可以肯定, 辐出度大的物体, 其吸收比一定大, 辐出度小的物体, 其吸收比也一定小, 只有这样才能使空间保持恒定的辐射能密度和各个物体的热平衡。因此, 各物体的单色辐出度与其单色吸收比之间必定存在正比关系, 即

$$\frac{M_{\lambda 1}(T)}{\alpha_1(\lambda, T)} = \frac{M_{\lambda 2}(T)}{\alpha_2(\lambda, T)} = \dots = \frac{M_{\lambda 0}(T)}{\alpha_0(\lambda, T)} \quad (20-4)$$

式中, $M_{\lambda 0}(T)$ 和 $\alpha_0(\lambda, T)$ 分别是绝对黑体 b 的单色辐出度和单色吸收比。根据绝对黑体的性质, $\alpha_0(\lambda, T) = 1$, 所以式 (20-4) 可以改写为

$$\frac{M_{\lambda}(T)}{\alpha(\lambda, T)} = M_{\lambda 0}(T) \quad (20-5)$$

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 (G. R. Kirchhoff, 1824—1887) 辐射定律。基尔霍夫辐射定

中电子的状态,那么波振幅模的平方 $|\Psi(x, y, z, t)|^2$ 就表示在 t 时刻空间某处 (x, y, z) 波的强度。对比上述两种观点,我们可以这样使波和粒子的概念统一起来:如果粒子的状态用波函数 $\Psi(x, y, z, t)$ 来描写,那么波函数模的平方 $|\Psi(x, y, z, t)|^2$ 与 t 时刻在空间 (x, y, z) 处单位体积内找到粒子的数目成正比。也就是说,在波的强度为极大的地方,找到粒子的数目为极大,在波的强度为零的地方,找到粒子的数目为零。

2. 波函数的统计解释

上述波函数物理意义的解释是对处在同一状态下的大量粒子而言的(在电子干涉实验中指的是含有大量粒子的电子束),对于单个粒子而言,描述它的运动状态的波函数又将怎样解释呢?实验中可以控制电子束的强度,以致让电子一个一个地通过。假如时间不长,则在照相底片上呈现的是一些无规则的点,而不是扩展开的整个干涉图样。就这个意义而言,电子是粒子而不是扩展开的波,但时间一长,则感光点在底片上的分布显示出干涉图样,与强度较大的电子束在较短时间内得到的干涉图样相同。根据这种一个电子在相同条件下多次重复实验的结果,我们可以认为,尽管我们不能确定每一个电子一定到达照相底片的什么地点,但是它到达干涉图样极大值的概率必定较大,而到达干涉图样极小值处的概率必定较小,甚至为零。所以对一个粒子而言,描述其状态的波函数中 $\Psi(x, y, z, t)$ 可以解释为:波函数模的平方 $|\Psi(x, y, z, t)|^2$ 与 t 时刻在空间 (x, y, z) 处单位体积内发现粒子的概率(称为概率密度) $W(x, y, z, t)$ 成正比。

波函数的上述解释是由玻恩首先提出的。他不仅成功地解释了电子的衍射实验,而且在解释其他许多问题时,所得结果也与实验相符合。按照这样的解释,波函数所描述的是处于相同条件下的大量粒子的一次行为或者是一个粒子的多次重复行为。一般来说,我们不能根据描述粒子状态的波函数来预言一个粒子某一时刻一定在什么地方出现,但是可以指出在空间各处找到该粒子的概率。所以波函数所表示的是概率波。

波函数与经典波有着本质的区别,波函数描述微观粒子的状态,它按波动的方式变化和传播,充分体现了微观粒子的波动性。但在对微观粒子进行探测时,它总是作为一个整体的概率被发现,这又充分地表现出它的粒子性。这样,就把波粒二象性有机地统一起来了。

3. 波函数的归一化条件和标准条件

由于粒子肯定存在于空间中,在整个空间粒子出现的概率应等于1,所以有

$$\int_V |\psi_0|^2 dV = 1 \quad (20-61)$$

该式称为波函数的归一化条件。

微观粒子的状态必须由波函数描述,但并不是随便哪一个函数都可以作为波函数。前面讲过,波函数模的平方表示粒子在空间某处出现的概率密度。量子力学认为,某一时刻在空间给定点粒子出现的概率应该是唯一的,不可能既是这个值又是那个值,并且还应该是有限的;从空间一点到另一点,概率的分布应该是连续的,不能逐点跃变或在任何点处发生突变。一句话,粒子的概率在空间随时间的演化应该是单值、连

- 17-17 1.2
- 17-18 $2d/\lambda$
- 17-19 $2d/N$
- 17-20 589nm
- 17-21 $\frac{3}{2k+1}\text{cm}$ ($k = 0, 1, 2, \dots, 14$)
- 17-22 400nm, 444.4nm, 500nm, 571.4nm, 666.7nm
这五种波长的光在所给定观察点最大限度地加强
- 17-23 562.5nm
- 17-24 $8.0 \times 10^{-6}\text{m}$
- 17-25 (1) 0.910mm
(2) 4mm
(3) 不变
- 17-26 (1) 0.11m
(2) 7级明纹处
- 17-27 (1) $3D\lambda/d$
(2) $D\lambda/d$
- 17-28 $1/4$
- 17-29 600nm 和 428.6nm
- 17-30 $7.78 \times 10^{-4}\text{mm}$
- 17-31 (1) 514nm, 绿光
(2) 603nm, 橙光
- 17-32 (1) 最薄处 $d = 0$, 因此对应的区域为亮区
(2) 第3个蓝区对应的油层厚度为 600nm
(3) 因为油膜厚到一定程度后, 其上、下表面反射光的光程差接近或大于光的相干长度, 因而干涉条纹消失, 彩色消失
- 17-33 $1.7 \times 10^{-4}\text{rad}$
- 17-34 $4.0 \times 10^{-4}\text{rad}$
- 17-35 $8.46 \times 10^{-4}\text{mm}$
- 17-36 $\lambda_2 = l_2^2 \lambda_1 / l_1^2$
- 17-37 (1) $9\lambda/4$
(2) $\lambda/(2n_2)$
- 17-38 (1) 500nm
(2) 50
- 17-39 0.38cm

- 17-40 1.03m
- 17-41 $5.154 \times 10^{-6}\text{m}$
- 17-42 1.000029

第18章

- 18-1 6; 第1级明
- 18-2 3.0mm
- 18-3 2π ; 暗
- 18-4 1.2mm; 3.6mm
- 18-5 $7.6 \times 10^{-2}\text{mm}$
- 18-6 500nm
- 18-7 0.36mm
- 18-8 $\lambda/\sin\theta$
- 18-9 2λ
- 18-10 $2\lambda D/l$
- 18-11 8.9
- 18-12 $3 \times 10^{-2}\text{rad}$; 2m
- 18-13 $1.6 \times 10^{-4}\text{rad}$
- 18-14 1.9
- 18-15 1.45
- 18-16 21.1m
- 18-17 9836m
- 18-18 23.3° 和 52.3°
- 18-19 625
- 18-20 3
- 18-21 1; 3
- 18-22 30°
- 18-23 $0, \pm 1, \pm 3$
- 18-24 (1) 1.2cm
(2) 1.2cm
- 18-25 500nm
- 18-26 400mm
- 18-27 (1) $\lambda_1 = 2\lambda_2$, 即 λ_1 的任一 k_1 级极小都有 λ_2 的 $2k_1$ 级极小与之重合
(2) 略
- 18-28 0.15mm
- 18-29 5.00mm
- 18-30 1.65mm
- 18-31 $7.26 \times 10^{-3}\text{mm}$
- 18-32 5.46mm