

[美] F. W. SEARS 等著

大学物理学

第四册

习题解答

人民教育出版社

〔美〕 F. W. Sears 等著

大学物理学

第四册

习题解答

周永平 冯洛珩 等编

人民教育出版社

本书将 F. W. Sears 等著《大学物理学》(第五版)中译本中的习题(除思考题外)全部作了解答。全书共分四册,第一册为力学习题解答,第二册为热学习题解答,第三册为电磁学习题解答,第四册为光学和原子物理学习题解答。

本书主要供电视大学及有关高等学校教师与辅导人员内部参考。

本书责任编辑:奚静平

[美] F. W. Sears 等著

大学物理学

第四册

习题解答

周永平 冯洛玟等编

*

人民教育出版社出版

新华书店北京发行所发行

杭州书刊装订厂印装

*

开本 787×1092 1/32 印张 4.5 字数 105,000

1980年3月第1版 1981年3月第3次印刷

印数 251,001—301,000

书号 13012·0442 定价 0.35 元

(教师用书)

编者的话

本书将 F. W. Sears 等著《大学物理学》(第五版)中译本第三十八章至第四十六章习题(除思考题外)全部作了解答。为了更好地配合原书的使用,在解答过程中,我们注意了以下几点:

1. 习题的解法力求逻辑严密、步骤简练。但为了结合习题所在章节的教学内容,对有多种解法的题目,我们只用了该章教学内容所要求的解法,因此不一定是最佳解法。

2. 所用公式、符号及解题格式,力求与原书一致。

3. 单位换算均采用原书所附“换算因子”表中所列的数据,答案一般取三位有效数字。

由于解答工作是在很短时间内仓促完成的,难免有不妥或错误的地方,敬希读者指正。

参加本册题解工作的人员有:薛豪、凌甘宁、冯洛珩、周永平。

目 录

第三十八章	光的本性和传播·····	1
第三十九章	在平面上的反射和折射·····	7
第四十章	单反射或单折射成像·····	22
第四十一章	透镜与光学仪器·····	34
第四十二章	干涉与衍射·····	69
第四十三章	偏振·····	86
第四十四章	光子 电子 原子·····	99
第四十五章	原子、分子与固体·····	124
第四十六章	原子核物理·····	132

第三十八章 光的本性和传播

38-1 下列射线的波长用米、微米、毫微米和埃几种单位来表示各是多少: a) 频率为 2×10^{17} Hz 的软 x 射线, b) 频率为 5.6×10^{14} Hz 的绿光.

解 a)
$$\lambda = \frac{c}{f}$$
$$= \frac{3 \times 10^8}{2 \times 10^{17}} = 1.5 \times 10^{-9} \text{ m} = 1.5 \times 10^{-3} \mu\text{m} = 1.5 \text{ nm} = 15 \text{ \AA}$$

b)
$$\lambda = \frac{c}{f}$$
$$= \frac{3 \times 10^8}{5.6 \times 10^{14}} = 5.36 \times 10^{-7} \text{ m} = 0.536 \mu\text{m} = 536 \text{ nm} = 5360 \text{ \AA}$$

38-2 可见光谱的波长范围约从 400 nm 到 700 nm. 将这些波长用英寸表示.

解 $1 \text{ m} = 39.37 \text{ in}$

$$\lambda_1 = 400 \text{ nm} = 1.575 \times 10^{-5} \text{ in}$$

$$\lambda_2 = 700 \text{ nm} = 2.76 \times 10^{-5} \text{ in}$$

38-3 假设地球轨道的半径为 92,900,000 mi, 取光速的最佳值, 计算光通过一段与地球轨道的直径相等的距离时所需的时间. 与罗麦所得的值 22 min 相比较.

解 $1 \text{ m} = 6.214 \times 10^{-4} \text{ mi}$

$$t = \frac{2R}{c}$$

$$= \frac{2 \times 9.29 \times 10^7 / 6.214 \times 10^{-4}}{2.99792458 \times 10^8} = 997 \text{ s} = 16.6 \text{ min}$$

38-4 斐索对光速的测量, 由考纽继续进行, 他用斐索的装

置, 但将两镜间距离增至 22.9 km, 所用齿轮的直径为 40 mm, 并有 180 个齿. 他选定齿轮的转速, 使得齿轮转动时, 透过某一开口的光线反射回来正好透过下一开口. 试求齿轮的角速度.

$$\text{解 } \omega = \frac{\theta}{t} = \frac{2\pi/2z}{\frac{2L}{c}} = \frac{c\pi}{2Lz}$$

$$= \frac{3 \times 10^8 \times 3.14}{2 \times 22.9 \times 10^3 \times 180} = 114 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$$

38-5 光在某物质中的速率比在真空中小一因子, 这因子就是这种物质的折射率. 波长为 600 nm 的橙色光射入一块折射率为 1.5 的玻璃, 试求光在此玻璃材料中的 a) 波长, b) 频率.

$$\text{解 } a) \lambda = \frac{\lambda_0}{n} = \frac{600}{1.5} = 400 \text{ nm}$$

$$b) f = \frac{c}{\lambda_0} = \frac{3 \times 10^8}{600 \times 10^{-9}} = 5.0 \times 10^{14} \text{ Hz}$$

38-6 一立方体的一内角镶装三个镜子. 一条光线相继地从这三个相互垂直的镜子上反射; 试证: 这光线的最终方向总是和它初始入射方向恰好相反. 这个原理可用于汽车尾灯透镜和公路反射信号灯.

解 略.

38-7 越接近地球表面地球大气的密度越大. a) 作图表示: 来自恒星或行星的光经过大气层时是如何弯曲的. b) 指出光源的视位置. c) 解释日落后人们怎么还能见到太阳. d) 解释为什么下落的太阳看起来是扁了一些.

解 略.

38-8 a) 为什么一条光滑公路的表面在酷日下从一掠角看去是湿润的? b) 说明沙漠中的海市蜃楼.

答 略.

38-9 一光线以速率 c 离开图 38-8 中的点 1, 并反射到点 2, 试证: 光线从 1 到 2 所需的时间为 $(y_1 \sec \theta_1 + y_2 \sec \theta_2) / c$.

$$\begin{aligned} \text{证 } t &= \frac{L}{c} = \frac{1}{c} \left(\frac{y_1}{\cos \theta_1} + \frac{y_2}{\cos \theta_2} \right) \\ &= \frac{1}{c} (y_1 \sec \theta_1 + y_2 \sec \theta_2) \end{aligned}$$

38-10 试证: 当一平面镜绕着垂直于入射面的轴转过 θ 角时, 从这平面镜反射的光线转了 2θ 角.

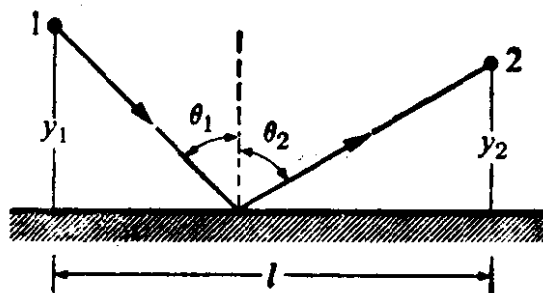


图 38-8

证 设原来的人射角为 ϕ_a , 则入射线和反射线之间的夹角为 $2\phi_a$. 当镜面转动了 θ 角后, 入射角变为 $\phi_a + \theta$, 则入射线和反射线之间的夹角变为 $2(\phi_a + \theta)$, 可见当镜面转动了 θ 角度后, 反射线转动的角度为

$$2(\phi_a + \theta) - 2\phi_a = 2\theta$$

38-11 一束平行光入射于一棱镜, 如图 38-9 所示, 一部分从棱镜的一个面反射, 另一部分从另一面反射. 试证两反射光束的夹角 θ 与两反射面的夹角 A 有如下关系:

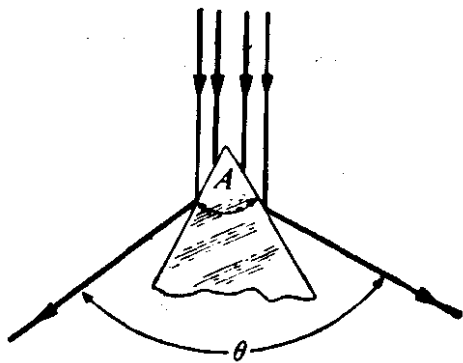


图 38-9

$\theta = 2A$.

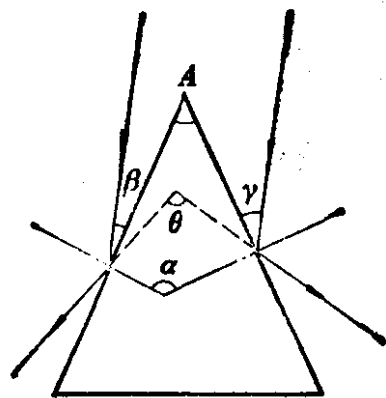
证 作右图, 从图中可知

$$\alpha + A = \pi$$

$$\beta + \gamma = A$$

$$\text{又 } \alpha + \theta + \left(\frac{\pi}{2} - \beta \right) + \left(\frac{\pi}{2} - \gamma \right) = 2\pi$$

$$\text{则得 } \theta = \pi - \alpha + \beta + \gamma = A + A = 2A$$



题 38-11 图

38-12 一平行光束与一玻璃板的表面成 30° 角, 这玻璃的折射率为 1.50, a) 折射光束与玻璃面的夹角是多少? b) 如果折射角为 $\phi/2$, 对此板面的入射角 ϕ 应为多少?

解 a) 由 $\frac{\sin 60^\circ}{\sin \phi_b} = 1.50$ 得

$$\sin \phi_b = \frac{\sin 60^\circ}{1.50} = 0.5774$$

$$\phi_b = 35.26^\circ$$

所以折射光束与玻璃面间的夹角是

$$90^\circ - 35.26^\circ = 54.74^\circ$$

b) $\frac{\sin \phi}{\sin \phi/2} = 1.50$, 又因 $\sin \phi = 2 \sin \frac{\phi}{2} \cos \frac{\phi}{2}$, 所以

$$2 \cos \frac{\phi}{2} = 1.50$$

$$\phi = 82.82^\circ$$

38-13 光以 60° 的入射角射到一玻璃板上, 一部分光反射, 一部分折射. 观察到反射光和折射光互成 90° 角. 试问玻璃的折射率是多少?

解 $n = \frac{\sin 60^\circ}{\sin 30^\circ} = 1.732$

38-14 一光线入射到平面上, 这平面是折射率为 1.60 和 1.40 的两种透明物质的分界面, 入射角为 30° 且光线从折射率较大的媒质中发出. 试计算其折射角.

解 由 $\frac{\sin \phi_a}{\sin \phi_b} = \frac{n_2}{n_1}$ 得

$$\sin \phi_b = \frac{n_1}{n_2} \sin \phi_a = \frac{1.60}{1.40} \sin 30^\circ$$

$$\phi_b = 34.85^\circ$$

38-15 折射率为 1.60 的一玻璃平板, 用手拿着放在水箱的

水面上,一光线从上方射来,与玻璃板的上表面成 45° 的入射角.

a) 这光线与水中法线的夹角是多少? b) 这个角随玻璃的折射率如何变化.

解 设玻璃折射率为 n_a , 水折射率为 n_b , 空气折射率为 n .

a) 由 $n_a \sin \phi_a = n_b \sin \phi_b$ 和 $n_a \sin \phi_a = n \sin \phi$ 得

$$\sin \phi_b = \frac{n_a}{n_b} \sin \phi_a = \frac{n_a}{n_b} \frac{n}{n_a} \sin \phi$$

$$= \frac{1}{1.33} \sin 45^\circ$$

$$\phi_b = 32.12^\circ$$

b) 因为 $\sin \phi_b = \frac{n}{n_b} \sin \phi$, 可见角 ϕ_b 与玻璃折射率 n_a 无关.

38-16 一太阳眼镜的透镜是用灰色玻璃制成的,其吸收系数为 500m^{-1} . 如果光线经过这透镜后光强度减小 $1/4$, 这透镜的厚度应为多少?

解 由 $I = I_0 e^{-\alpha x}$ 得

$$x = -\frac{1}{\alpha} \ln \frac{I}{I_0}$$

$$= -\frac{1}{500} \ln \frac{\left(1 - \frac{1}{4}\right) I_0}{I_0} = -\frac{1}{500} \ln \frac{3}{4} = 5.75 \times 10^{-4} \text{m}$$

38-17 假设一游泳池水深 5m , 水的吸收系数为 2m^{-1} , 光从池面到池底, 光强度将减弱到几分之几?

解 $\frac{I}{I_0} = e^{-\alpha x} = e^{-10} = 4.54 \times 10^{-5}$

38-18 设海水的吸收系数为 2m^{-1} , 而人的眼睛所能觉察的光强为太阳光的强度的 10^{-18} , 试问在海洋水面之下多少深度, 人还能看见亮光?

解 $\frac{I}{I_0} = e^{-\alpha x}$

$$10^{-18} = e^{-2x}$$

$$x = \frac{18 \ln 10}{2} = 9 \ln 10 = 20.7 \text{ m}$$

38-19 直射太阳光的光照度约为 10^5 lx ，如果一只照相闪光灯在某一方向的光强度是 $5 \times 10^6 \text{ cd}$ ，试问这闪光灯应放在距一表面多远处，才能在表面上产生与太阳光相同的光照度？

解 由 $E = \frac{I \cos \alpha}{R^2}$ 和 $\alpha = 0$ 得

$$R = \sqrt{\frac{I \cos \alpha}{E}} = \sqrt{\frac{5 \times 10^6}{10^5}} = 7.07 \text{ m}$$

38-20 一灯的发光效率定义为光通量与电功率输入之比。某一灯装在离桌面 3 m 高处，其发光效率为 $20 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1}$ ，如果在桌面上的光照度等于太阳光的照度，即约为 10^5 lx ，这灯的电功率输入应为多少？假设这灯对它的下半球是均匀地辐射的。

$$\begin{aligned} \text{解 } P &= \frac{F}{\eta} = \frac{2\pi I}{\eta} = \frac{2\pi}{\eta} \frac{E}{\cos \alpha} R^2 \\ &= \frac{2 \times 3.14}{20} \frac{10^5}{\cos 0^\circ} 3^2 = 2.83 \times 10^5 \text{ W} = 283 \text{ kW} \end{aligned}$$

38-21 某一棒球场，是边长 140 m 的正方形场地，为夜间比赛照明，立了 6 个灯塔，用以支装 6 组 1000 W 白炽灯，其发光效率（参看习题 38-20）为 $30 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1}$ ，球场需用的光照度为 200 lx ，假设这些灯发出的光通量有 50% 到达球场。a) 每一灯塔需用多少盏灯？b) 每一个灯塔的电功率输入是多少？c) 如果所有六座灯塔所需电功率都由汽油机驱动的发电机供给，这汽油机的功率容量应多大？

$$\text{解 } a) N = \frac{EA}{6P\eta 50\%} = \frac{200 \times 140^2}{6 \times 1000 \times 30 \times 0.50} = 44 \text{ 盏}$$

$$b) NP = 44 \times 1000 = 44 \text{ kW}$$

$$c) 6NP = 6 \times 44 = 264 \text{ kW}$$

第三十九章 在平面上的反射和折射

39-1 a) 某种光的波长为 500 nm (在真空中), 玻璃对这种波长的折射率为 1.50, 问这种光在玻璃中的速率是多少? b) 这种光在玻璃中的波长是多少?

解 a) 光在玻璃中的速率为

$$v = \frac{c}{n_{\text{玻}}} = \frac{3 \times 10^8}{1.50} = 2 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

b) 在玻璃中, 这光的波长为

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{n_{\text{玻}}} = \frac{5.00 \times 10^{-7}}{1.50} = 3.33 \times 10^{-7} \text{ m} = 333 \text{ nm}$$

39-2 一块 3 mm 厚的玻璃板, 折射率为 1.50, 被置于波长为 600 nm (在真空中) 的点光源和屏幕之间。从光源到屏幕的距离是 3 cm。问在光源和屏幕之间有多少个波?

解 光在玻璃中经过的几何路程 $L_1 = 3 \text{ mm}$, 故光在玻璃中的波数

$$\frac{nL_1}{\lambda_0} = \frac{1.50 \times 3 \times 10^{-3}}{600 \times 10^{-9}} = 7.5 \times 10^3 \text{ 个}$$

光源到屏幕的距离 $L = 3 \text{ cm}$, 故在真空中的波数

$$\frac{L - L_1}{\lambda_0} = \frac{3 \times 10^{-2} - 3 \times 10^{-3}}{600 \times 10^{-9}} = 4.5 \times 10^4 \text{ 个}$$

共有波数

$$7.5 \times 10^3 + 4.5 \times 10^4 = 5.25 \times 10^4 \text{ 个}$$

39-3 在重火石玻璃中, 波长为 656 nm 的光速是 $1.60 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。问这种玻璃的折射率是多少?

解 $n = \frac{c}{v_{\text{水}}}$

$$= \frac{3 \times 10^8}{1.60 \times 10^8} = 1.875$$

39-4 某种频率的光在水中的波长为 442 nm, 当这光通过二硫化碳时, 其波长为多少? (参看表 38-1)

解 由表 38-1 查得 $n_{\text{CS}_2} = 1.6276$, 设光在水中的波长为 λ_1 , 在二硫化碳中为 λ_2 , 则

$$\lambda_2 = \frac{\lambda_1 n_1}{n_{\text{CS}_2}}$$

$$= \frac{442 \times 10^{-9} \times 1.3330}{1.6276}$$

$$= 362 \times 10^{-9} \text{ m}$$

$$= 362 \text{ nm}$$

表 38-1 对黄钠光($\lambda = 589\text{nm}$) 的折射率

物 质	折 射 率	物 质	折 射 率
固体		液体(在 20°C 时)	
冰(H ₂ O)	1.309	甲醇(CH ₃ OH)	1.3290
萤石(CaF ₂)	1.434	水(H ₂ O)	1.3330
岩盐(NaCl)	1.544	乙醇(C ₂ H ₅ OH)	1.3618
石英(SiO ₂)	1.544	四氯化碳(CCl ₄)	1.4607
铈石(ZrO ₂ ·SiO ₂)	1.923	松节油	1.4721
金刚石(C)	2.417	甘油	1.4730
Fabulite(SrTiO ₃)	2.409	苯	1.5012
金红石(TiO ₂)	$\left. \begin{array}{l} 2.616 \\ 2.903 \end{array} \right\}$	二硫化碳(CS ₂)	1.6276

39-5 如图 39-17 所示, 一光线从光速为 v_1 的媒质中的 A 点出发, 到达光速为 v_2 的媒质中的 B 点. 求证: a) 这光从 A 点到 B 点所需时间为

$$t = \frac{h_1 \sec \theta_1}{v_1} + \frac{h_2 \sec \theta_2}{v_2}$$

b) 当两个角之间的关系为 $n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$ 时, 这时间为最短(注意 $l = h_1 \operatorname{tg} \theta_1 + h_2 \operatorname{tg} \theta_2$).

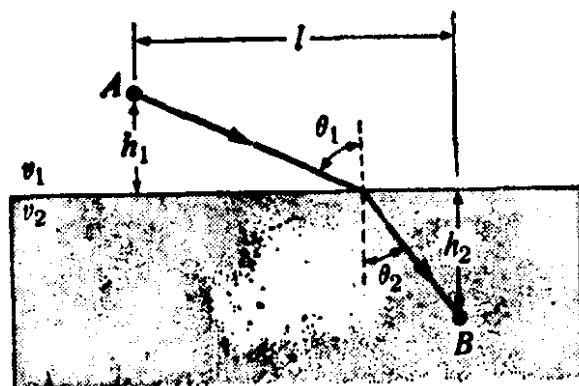


图 39-17

解 a) 参看图 39-17 光在上面介质中传播的时间

$$t_1 = \frac{h_1 \sec \theta_1}{v_1}$$

光在下面介质中传播到达 B 点的时间为

$$t_2 = \frac{h_2 \sec \theta_2}{v_2}$$

故总共需要时间

$$\begin{aligned} t &= t_1 + t_2 \\ &= \frac{h_1 \sec \theta_1}{v_1} + \frac{h_2 \sec \theta_2}{v_2} \end{aligned}$$

b) 由 $l = h_1 \operatorname{tg} \theta_1 + h_2 \operatorname{tg} \theta_2$ 得

$$dl = h_1 \sec^2 \theta_1 d\theta_1 + h_2 \sec^2 \theta_2 d\theta_2 = 0$$

$$\text{即} \quad h_1 \sec^2 \theta_1 d\theta_1 = -h_2 \sec^2 \theta_2 d\theta_2 \quad (1)$$

$$\text{又因} \quad t = \frac{h_1 \sec \theta_1}{v_1} + \frac{h_2 \sec \theta_2}{v_2} \text{得}$$

$$dt = \frac{h_1}{v_1} \operatorname{tg} \theta_1 \sec \theta_1 d\theta_1 + \frac{h_2}{v_2} \operatorname{tg} \theta_2 \sec \theta_2 d\theta_2$$

时间最短时 $dt = 0$, 故

$$\frac{h_1}{v_1} \operatorname{tg} \theta_1 \sec \theta_1 d\theta_1 = -\frac{h_2}{v_2} \operatorname{tg} \theta_2 \sec \theta_2 d\theta_2 \quad (2)$$

由(1)式除以(2)式得

$$\begin{aligned} \frac{1}{v_1} \frac{\operatorname{tg} \theta_1}{\sec \theta_1} &= \frac{1}{v_2} \frac{\operatorname{tg} \theta_2}{\sec \theta_2} \\ \frac{1}{v_1} \frac{\sin \theta_1}{\cos \theta_1} \cos \theta_1 &= \frac{1}{v_2} \frac{\sin \theta_2}{\cos \theta_2} \cos \theta_2 \end{aligned}$$

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1}$$

即 $n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$

39-6 一点光源位于水和空气的分界面下 5 cm 处. 如从光源发出的光线与法线成 10° 、 20° 、 30° 和 40° 的夹角, 试计算其折射角, 并以全尺寸仔细地画出这些光线.

解

$$\begin{aligned} \phi'_1 &= \arcsin(n \sin \phi_1) \\ &= \arcsin(1.33 \sin 10^\circ) \\ &= 13.4^\circ \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \phi'_2 &= \arcsin(n \sin \phi_2) \\ &= \arcsin(1.33 \sin 20^\circ) \\ &= 27.1^\circ \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \phi'_3 &= \arcsin(n \sin \phi_3) \\ &= \arcsin(1.33 \sin 30^\circ) \\ &= 41.7^\circ \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \phi'_4 &= \arcsin(n \sin \phi_4) \\ &= \arcsin(1.33 \sin 40^\circ) \\ &= 58.8^\circ \end{aligned}$$

图略.

39-7 一玻璃立方体, 放在空气中, 其折射率为 1.50. 平行光线从立方体的顶面斜射进来, 然后投射到它的一侧面. 这光线能否从这侧面射出去呢?

解 光从玻璃立方体顶面的空气中, 射到立方体的顶面, 进入玻璃时, 折射角总是小于 41.8° . 因此, 入射光线在玻璃立方体的侧面的入射角总是大于 48.2° , 即大于全反射的临界角 42° , 故此光线不能从该侧面射到空气中.

39-8 一点光源位于水面下 20 cm 处, 光从水中出射, 试求在

水面上光所能出射的最大圆的直径:

解 光线由水中射入空气中全反射时, 临界角为 θ

$$\theta = \arcsin \frac{1}{1.33} = 48.75^\circ$$

故水面上光所到达的最大直径

$$\begin{aligned} D &= 2h_1 \operatorname{tg} \theta \\ &= 2 \times 0.2 \times \operatorname{tg} 48.75^\circ \\ &= 0.456 \text{ m} \end{aligned}$$

39-9 如图 39-18 所示棱镜的折射率为 1.56. 一条光线从 a 点处进入棱镜, 然后在棱镜中沿路径 ab 行进, ab 平行于 cd 线. a) 仔细画出这光线所走的路径, 从棱镜的左外方开始, 经过玻璃, 然后又再进入空气而到达某一距离. b) 试计算在空气中原来的方向和最后的方向间的夹角(图中虚线只是作图线).

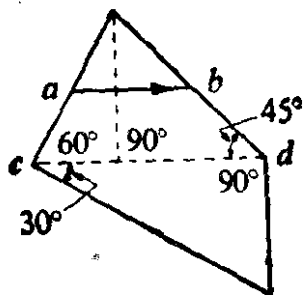
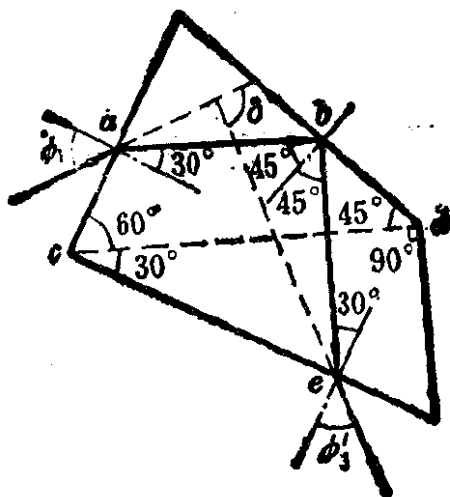


图 39-18



题 39-9 图

解 a)

b) 由折射定律得

$$\begin{aligned} \phi_1 &= \arcsin (n \sin 30^\circ) \\ &= \arcsin (1.56 \sin 30^\circ) \\ &= 51.3^\circ \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\phi_3' &= \arcsin(n \sin 30^\circ) \\ &= \arcsin(1.56 \sin 30^\circ) \\ &= 51.3^\circ\end{aligned}$$

$$\delta = \phi_1 + 90^\circ - \phi_3' = 90^\circ$$

39-10 如图 39-19 所示, 光线正入射于一个 $30^\circ-60^\circ-90^\circ$ 棱镜的窄面上, 有一液滴在棱镜的斜面上, 设棱镜的折射率为 1.50, 如果光线被全反射, 试求此液体的最大折射率可能为多少?

解 见图 39-19. 设玻璃的折射率为 n_1 , 液体的折射率为 n_2 , 因入射角 $\phi_1 = 60^\circ$, 故液体最大折射率

$$\begin{aligned}n_2 &= n_1 \sin \phi_1 \\ &= 1.50 \sin 60^\circ \\ &= 1.30\end{aligned}$$

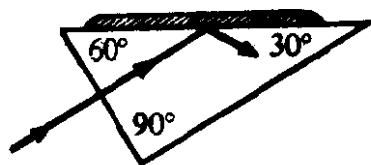


图 39-19

39-11 一个 $45^\circ-45^\circ-90^\circ$ 的棱镜浸没在水中, 如果一光线正入射到此棱镜的一个窄面, 此光线将全反射, 问此棱镜的最小折射率应为多少?

解 设棱镜的折射率为 n_1 , 水的折射率为 n_2 , 则棱镜的最小折射率

$$\begin{aligned}n_1 &= \frac{n_2}{\sin \phi_1} \\ &= \frac{1.333}{\sin 45^\circ} = 1.89\end{aligned}$$

39-12 声波在空气中的速度为 $330 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 而在水中为 $1320 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. a) 当声波入射到空气和水的分界面上, 其临界角为多少? b) 对声波来说, 哪一种媒质有较高的“折射率”?

解 设声波在空气中的速度为 v_1 , 在水中为 v_2 . 对声波而言, 空气的折射率为 n_1 , 水的折射率为 n_2 .

a) 声波由空气射到水的表面, 其临界角为 $\phi_{\text{临界}}$