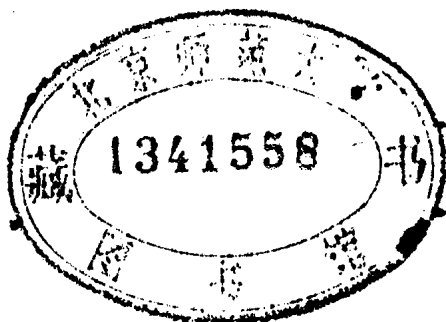


应用光学例题与习题集

上海机械学院 顾培森 编

JY1153/09



机械工业出版社

本书是“应用光学”课程的辅助教材之一，与高等学校试用教材“应用光学”（张以谟主编，82年版）配套使用。全书也分为十九章：第一至五章为几何光学；第六章为光能及其计算；第七至十二章为象差理论；第十三、十四章为典型光学系统；第十五至十七章为光学设计；第十八、十九章为象质评价和象差自动平衡。本书每章前有重点内容及主要公式，全书共编入了236个例题、146个思考题及333个习题。

本书可供光仪专业及其它有关专业的师生使用，也可供从事光学工作的科技人员和工人参考。

应用光学例题与习题集

顾培森 编

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南街一号）

（北京市书刊出版业营业登记证出字第117号）

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

开本 $850 \times 1168^{1/32}$ · 印张 $19^{3/8}$ · 字数 513 千字

1985年10月北京第一版·1985年10月北京第一次印刷

印数 0,001—7,800 · 定价 4.80 元

统一书号，15033·6037

前 言

《应用光学例题与习题集》是高等学校光学仪器专业《应用光学》课程及其它有关专业《工程光学》课程的辅助教材之一。它有助于学生在课内练习、课外复习和温课迎考时进一步理解和掌握课程内容。本书除作教学用书外,对于从事光学工作的科技人员也是一本有益的参考书。本书分为十九章,以结合机械工业出版社1982年出版的由天津大学张以谟主编的《应用光学》教材,第一至第五章为几何光学,第六章为光能及其计算,第七至第十二章为象差理论,第十三至第十四章为典型光学系统,第十五至第十七章为光学设计,第十八章为象质评价,第十九章为象差自动平衡。书中每一章突出该教材的重点内容及主要公式,举出多方面的例题,收集整理了大量的思考题和习题,其中不少是光学设计中的经验积累。全书有237个例题及146个思考题和333个习题。

本书的指导思想是配合《应用光学》的课堂教学,通过本书例题和习题的课内外练习,试图使学生巩固和加强所学知识,如光学系统外形尺寸计算,初始结构选择及设计,象差校正及象质评价等,并得到解决实际问题能力的锻炼。这将有助于《应用光学》课程教学中解决好理论联系实际的问题。

本书由天津大学张以谟教授主审,上海机械学院曹祖植同志参加了审校工作。

本书在编写过程中,上海机械学院光仪81届学生李云生、顾晓云、刘文山、叶鸣结合毕业设计参加了部分解题工作。同时得到了新添光学精密仪器公司、上海光学仪器厂、上海照相机总厂、上海光学镜头厂、218厂、318厂、上海光学仪器研究所、205所等有关同志的大力支持,特致谢意。

由于本书参考资料仅列出公开出版的书籍和一级学报上登载的文章,而本书在编写过程中又同时参考了各单位的应用光学教

IV

材、习题集和有关技术资料，但未能一一列出，为此，谨向被引用资料的作者表示谢意和歉意。

本书在编写过程中得到上海机械学院顾问教授王之江同志和上海光学仪器研究所所长庄松林博士的关心和支持，特别是上海机械学院光仪教研室全体同志的大力支持和帮助，对此表示衷心感谢。

由于水平有限，时间仓促，书中难免有不妥甚至错误之处，望读者指正。

编者

1984年5月

目 录

第一部分 几 何 光 学

第一章 几何光学的基本定律和成象概念	1
一、基本定律	1
二、矢量形式的折射定律和反射定律	2
三、光的全反射与临界角	5
第二章 球面和球面系统	10
一、正负号的规定	10
二、光线经球面折射时的光路计算公式	11
三、近轴光及其光路计算公式	11
四、单个折射球面成象的放大率, 拉赫不变量	16
五、共轴球面系统	17
六、球面反射镜	18
第三章 理想光学系统	28
一、理想光学系统	28
二、光学系统的基点和基面	28
三、理想光学系统的物象关系	29
四、理想光学系统二焦距之间关系	38
五、理想光学系统的拉赫公式	38
六、理想光学系统的放大率及其相互关系	38
七、光学系统的光焦度、折光度和光束的会聚度	39
八、光学系统的组合	39
九、透镜	44
十、近轴光学中矩阵方法	47
第四章 平面镜和棱镜	63
一、平面反射镜的成象特征	63
二、双平面镜(角镜)成象特征	64
三、玻璃平板(平行平板)	64
四、反射棱镜	68
五、折射棱镜 光楔	77
六、用矢量形式描述反射镜的反射	78

第五章 光学系统中的光阑	90
一、光学系统中的光阑及其作用	90
二、确定孔径光阑和视场光阑的方法	91
三、渐晕	95
四、景深	107
五、远心光路	109
六、消杂光光阑	111
第六章 光能及其计算	117
一、光度学的基本概念与物理量	117
二、光通量和光亮度在光学系统中的传递 象面光照度	123
三、光学系统中光能损失的计算	126

第二部分 象 差 理 论

第七章 光线的光路计算及象差概述	139
一、子午平面内光线的光路计算	139
二、轴外点细光束的光路计算	147
三、空间光线的光路计算	150
四、单色象差	165
五、色差	170
第八章 球差、正弦差	178
一、光学系统的球差分布公式	178
二、单个折射球面的实际球差分布 不晕点	178
三、初级球差	182
四、带球差和高级球差	183
五、正弦条件	188
六、等晕条件与正弦差	189
七、薄透镜的初级球差及初级正弦差	195
第九章 轴外象差	201
一、单个折射球面的初级象差普遍表示式	201
二、用象差普遍式分析各种初级象差	202
三、单个折射球面, 单个平行平板及反射球面的初级几何象差系数	204
四、初级象差及实际象差计算	205

五、象差级数展开式	220
第十章 色差	226
一、介质的光学特性	226
二、消色差谱线的选择	228
三、初级色差分布系数及初级色差	229
四、由消色差决定光学系统中各透镜的光焦度分配	233
五、薄透镜系统的初级倍率色差	236
六、色差级数展开式	254
七、二级光谱	258
八、平行平板的色差	260
第十一章 象差综述及计算结果处理	265
一、光学系统的象差特性曲线	265
二、象差曲线综合分析	273
第十二章 波象差	311
一、轴上物点球差与波象差的关系	311
二、轴外点的波象差与垂轴象差的关系	314
三、波象差的一般表达式	316
四、参考点移动产生的波象差 焦深	323
五、色差的波象差表示	324
六、初级波色差的一般表示式	332
七、光学系统的象差容限	333

第三部分 典型光学系统

第十三章 眼睛与目视仪器	339
一、眼睛	339
二、放大镜	342
三、显微镜	345
四、望远镜	352
五、双目立体视觉, 体视测距机	360
第十四章 摄影及投影系统	369
一、摄影系统的特性	369
二、放映与投影物镜	375

第四部分 光学设计

第十五章 光学系统初始结构计算方法	392
一、 PW 形式初级象差系数	392
二、薄透镜系统的基本象差参量	395
三、双胶合透镜组、单透镜的 $\bar{P}^\infty$ 、 $\bar{W}^\infty$ 、 $\bar{C}_I$ 和结构参数的关系	397
四、具有必要厚度的透镜曲率半径的确定	418
第十六章 典型光学系统设计	430
一、光学系统设计的一般过程和步骤	430
二、变焦距光学系统概述	451
三、照明系统光学设计	460
第十七章 非球面及其在光学系统中的应用	474
一、曲面方程	474
二、非球面子午和弧矢曲率半径	476
三、非球面空间光线光路计算	480
四、柱面空间光线光路计算	489
五、非球面的初级象差概述	494
六、二次圆锥曲面	496
七、施密特校正板的设计	497
八、菲涅尔透镜的设计	500
九、偏轴偏心非球面系统光路计算	508
第十八章 象质评价	515
一、光学系统设计质量评价方法	515
二、 OTF 计算实例	526
三、利用光学传递函数评价象质的优点	539
第十九章 象差自动平衡	548
一、评价函数及其构成	548
二、阻尼最小二乘法	549
三、使用象差自动平衡程序时应注意的几个问题	554
思考题提示	556
习题答案	560
参考文献	610

第一部分 几何光学

第一章 几何光学的基本定律和成象概念

一、基本定律

从光线的观点出发，几何光学可以归纳为四个基本定律：

1. 光的直线传播定律

在各向均匀的介质中，光是沿着直线传播的，这就是光的直线传播定律。

2. 光的独立传播定律

当多束光线通过空间某点时，各光线传播不受其它光线的影响，称为光的独立传播定律。当二束光会聚在空间某点时，其作用为简单的相加。

3. 光的折射定律和反射定律

当一束光投射到两种透明介质的分界面上，如图 1-1 所示，将有一部分光被反射，另一部分光被折射，两者分别遵守反射定律和折射定律。

(1) 反射定律

入射光线、反射光线和投射点法线三者共面，且入射光线和反射光线对称于法线，入射角和反射角绝对值相等。

(2) 折射定律

入射光线、折射光线和投射点法线共面，且入射角和折射角正弦比在一定压力和温度条件下，对于一定的波长为常量，即

$$n \sin I = n' \sin I' \quad (1-1)$$

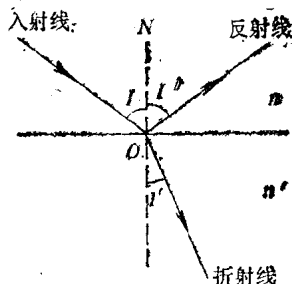


图 1-1

式中 n 和 n' 为两种透明介质的折射率, I 和 I' 为入射角和折射角。

例1-1 有一束白光以 30° 的入射角由空气射向ZF6玻璃内, 已知ZF6玻璃的 $n_D = 1.7550$, $n_C = 1.74733$, $n_F = 1.77476$, 求折射后各色光的折射角为多少?

〔解〕 根据折射定律有

$$n \sin 30^\circ = n_D \sin I_D$$

即

$$\sin I_D = \frac{\sin 30^\circ}{n_D} = \frac{1}{2 \times 1.7550}$$

得

$$I_D = 16.55288^\circ$$

同理可得 $I_C = 16.62765^\circ$, $I_F = 16.36337^\circ$

例1-2 如图

1-2所示, 有两平面反射镜 M_1 、 M_2 , 其夹角为 α , 今在两反射镜之间有一条光线以 50° 入射到 M_1 反射镜上,

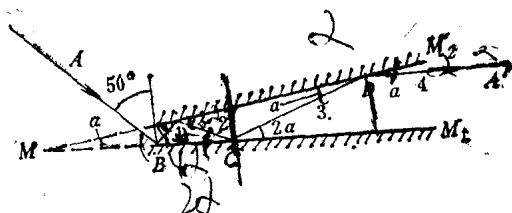


图 1-2

经 M_1 、 M_2 四次反射后, 其反射光线与 M_1 反射镜平行, 求 α 角。

〔解〕 如图 1-2 所示, 1、2、3、4 为一、二、三、四次反射光线, 已知 4 与 M_1 反射镜平行, $\angle M_2 M M_1 = \alpha$ 所以 $\angle M_2 D A'$ 也等于 α 。根据反射定律有 $\angle MDC = \angle M_2 D A' = \alpha$, 而根据平面几何定理, 有 $\angle D C M_1 = \angle MDC + \angle DMC = \alpha + \alpha = 2\alpha$ 。依此类推, 可得 $\angle A R M = 4\alpha = 90^\circ - 50^\circ = 40^\circ$, 所以两反射镜之间的夹角 $\alpha = 10^\circ$ 。

二、矢量形式的折射定律和反射定律

如果介质的分界面在空间分布很复杂, 为了解决任意一条光线经反射和折射后的传播方向, 用矢量形式进行计算是比较方

便的。

矢量形式的折射定律:

$$\mathbf{A}^{0'} = \frac{n}{n'} \mathbf{A}^0 + \frac{\Gamma}{n'} \mathbf{N}^0 \quad (1-2)$$

式中

$$\begin{aligned} \Gamma &= n' (\mathbf{A}^{0'} \cdot \mathbf{N}^0) - n (\mathbf{A}^0 \cdot \mathbf{N}^0) \\ &= n' \cos I' - n \cos I \end{aligned} \quad (1-3)$$

而

$$n' \cos I' = \pm \sqrt{n'^2 - n^2 + n^2 \cos^2 I} \quad (1-4)$$

上述式中符号意义见图 1-3 所示, $\mathbf{A}^0$ 和 $\mathbf{A}^{0'}$ 分别表示入射和折射光线的单位矢量, n 和 n' 表示折射面两边的介质的折射率。矢量 $\mathbf{A}^0$ 和 $\mathbf{A}^{0'}$ 规定自左向右为正, 反之为负。法线 $\mathbf{N}^0$ 方向以顺着光线传播方向为正, 反之为负。

矢量形式的反射定律如图 1-4 所示, 有

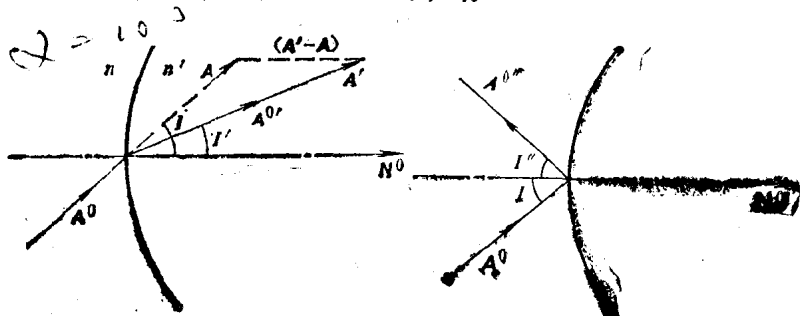


图 1-3

图 1-4

$$\mathbf{A}^{0''} = -\frac{n}{n'} \mathbf{A}^0 + 2\frac{n}{n'} \mathbf{N}^0 (\mathbf{A}^0 \cdot \mathbf{N}^0) \quad (1-5)$$

因为反射定律是折射定律的一个特殊形式, 所以式 (1-2) 和 (1-5) 可合并统一为

$$\mathbf{A}^{0'} = \pm \frac{n}{n'} (\mathbf{A}^0 + \frac{\Gamma}{n} \mathbf{N}^0) \quad (1-6)$$

折射时式 (1-6) 和 (1-4) 同取正号, 反射时式 (1-6) 和 (1-4)

同取负号, 而得 $n = -n'$.

例1-3 已知入射光线 $A^0 = \cos \alpha i + \cos \beta j + \cos \gamma k$, 反射光线 $A^{0''} = \cos \alpha'' i + \cos \beta'' j + \cos \gamma'' k$, 求此时平面反射镜法线的方向。

〔解〕 根据上面导出的计算反射光线时有 $n' = -n$, 将它代入式 (1-5) 得

$$A^{0''} = A^0 - 2N^0 (A^0 \cdot N^0) \quad (1-7)$$

在上式两边对 A^0 作标积, 有

$$A^0 \cdot A^{0''} = 1 - 2 (A^0 \cdot N^0)^2$$

由此可得

$$(A^0 \cdot N^0) = + \sqrt{\frac{1 - A^0 \cdot A^{0''}}{2}}$$

将上式代入式 (1-7) 得

$$\begin{aligned} N^0 &= \frac{A^0 - A^{0''}}{\sqrt{2(1 - A^0 \cdot A^{0''})}} \\ &= \frac{\cos \alpha i + \cos \beta j + \cos \gamma k - \cos \alpha'' i - \cos \beta'' j - \cos \gamma'' k}{\sqrt{2[1 - (\cos \alpha i + \cos \beta j + \cos \gamma k)(\cos \alpha'' i + \cos \beta'' j + \cos \gamma'' k)]}} \\ &= \frac{(\cos \alpha - \cos \alpha'') i + (\cos \beta - \cos \beta'') j + (\cos \gamma - \cos \gamma'') k}{\sqrt{2[1 - (\cos \alpha \cos \alpha'' + \cos \beta \cos \beta'' + \cos \gamma \cos \gamma'')]}} \end{aligned}$$

例1-4 如图 1-5 所示, 由 A^0 所决定的光线投射到折射平面 xoz 上, 该面为折射率 n 和 n' 的分界面, 求在第一介质 n 中的反射光线 $A^{0''}$ 及在第二介质 n' 中的折射光线 $A^{0'}$ 。

〔解〕 如图 1-5 所示, $x = \sin \theta$, $y = \cos \theta \cos \varphi$, $z = \cos \theta \sin \varphi$, $N^0 = j$ 。

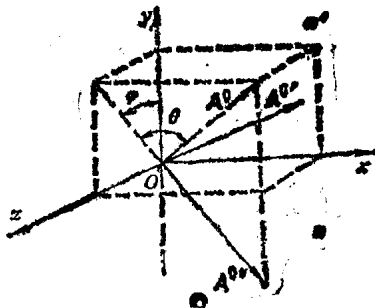


图 1-5

又根据式 (1-7), 有

$$\begin{aligned}
 \mathbf{A}^{0''} &= \mathbf{A}^0 - 2\mathbf{N}^0(\mathbf{A}^0 \cdot \mathbf{N}^0) \\
 &= \sin \theta \mathbf{i} + \cos \theta \cos \varphi \mathbf{j} + \cos \theta \sin \varphi \mathbf{k} \\
 &\quad - 2\mathbf{j}[(\sin \theta \mathbf{i} + \cos \theta \cos \varphi \mathbf{j} + \cos \theta \sin \varphi \mathbf{k}) \cdot \mathbf{j}] \\
 &= \sin \theta \mathbf{i} + \cos \theta \cos \varphi \mathbf{j} + \cos \theta \sin \varphi \mathbf{k} - 2\cos \theta \cos \varphi \mathbf{j} \\
 &= \sin \theta \mathbf{i} - \cos \theta \cos \varphi \mathbf{j} + \cos \theta \sin \varphi \mathbf{k}
 \end{aligned}$$

由式 (1-2) 得

$$\begin{aligned}
 \mathbf{A}^{0'} &= \frac{n}{n'} \mathbf{A}^0 + \frac{\Gamma}{n'} \mathbf{N}^0 \\
 &= \frac{n}{n'} \mathbf{A}^0 + \frac{\sqrt{n'^2 - n^2 + n^2(\mathbf{A}^0 \cdot \mathbf{N}^0)^2} - n(\mathbf{A}^0 \cdot \mathbf{N}^0)}{n'} \mathbf{N}^0 \\
 &= \frac{n}{n'} (\sin \theta \mathbf{i} + \cos \theta \cos \varphi \mathbf{j} + \cos \theta \sin \varphi \mathbf{k}) \\
 &\quad + \frac{\sqrt{n'^2 - n^2 + n^2 \cos^2 \theta \cos^2 \varphi} - n \cos \theta \cos \varphi}{n'} \mathbf{j} \\
 &= \frac{n}{n'} (\sin \theta \mathbf{i} + \cos \theta \sin \varphi \mathbf{k}) + \frac{\mathbf{j} \sqrt{n'^2 - n^2 + n^2 \cos^2 \theta \cos^2 \varphi}}{n'}
 \end{aligned}$$

三、光的全反射与临界角

光线从两介质折射面折射时, 若 $n > n'$, 当入射角增大到某一值 I_m 时, 按折射定律, 有

$$\sin I_m = \frac{n'}{n} \sin I' = \frac{n'}{n} \sin 90^\circ = \frac{n'}{n} \quad (1-8)$$

此入射角 I_m 称为临界角。当入射角大于临界角时, 光线便全部反射回原来的介质。发生全反射条件可以归纳为: 光线由光密介质 (折射率高的介质) 进入光疏介质 (折射率低的介质), 入射角大于临界角。

例1-5 有一折射率为1.54的等腰直角棱镜, 求入射光线与该棱镜直角边法线成怎样的角度时, 光线经斜面反射后其折射光线沿斜边出射?

〔解〕 如图 1-6 所示, 有

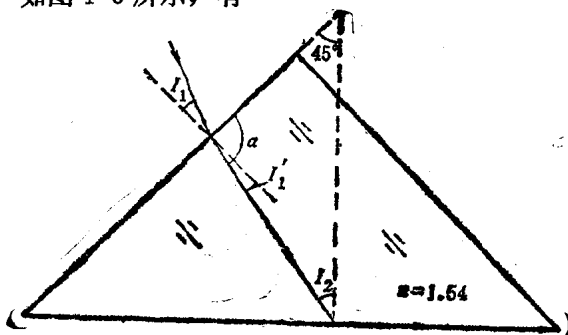


图 1-6

$$I_2 = \sin^{-1} \frac{1}{n} = \sin^{-1} \frac{1}{1.54} = 40.49266^\circ$$

由该图得

$$\alpha = 180^\circ - 45^\circ - I_2 = 180^\circ - 45^\circ - 40.49266^\circ = 94.50734^\circ$$

$$I_1' = \alpha - 90^\circ = 94.50734^\circ - 90^\circ = 4.50734^\circ$$

又根据折射定律, 有

$$I_1 = \sin^{-1} n \sin I_1' = 6.95118^\circ$$

例1-6 一块折射率为1.50的全反射棱镜浸没在折射率为1.33的水中, 光自一个直角棱面垂直入射, 问能否发生全反射?

〔解〕 计算光线由 $n_k=1.50$ 的玻璃射向水 ($n_w=1.33$) 时发生全反射的临界角:

$$I_m = \sin^{-1} \frac{n_w \sin 90^\circ}{n_k} = \sin^{-1} \frac{1.33}{1.50} = 62.45732^\circ$$

这一角度大于入射光线在斜面上的入射角 45° , 所以入射光线在斜面上不能全反射, 如图 1-7 所示, 在斜面 AC 上入射点 D 处将

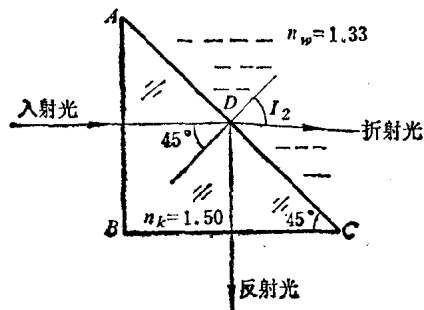


图 1-7

$$I_m = \sin^{-1} \frac{1}{n'} = \sin^{-1} \frac{1}{1.5163} = 41.26175^\circ$$

由此可见, $I_2 > I_m$, 所以该斜面能发生全反射, 不需要再镀金属反射膜。

〔思考题〕

1-1 当射击水底目标时, 是否可以和射击地面目标一样进行瞄准?

1-2 光线以任意方向由空气射向水中, 而在空气与水的分界面上能否发生全反射? 为什么?

1-3 弯曲的光学纤维可以将光线由一端传到另一端, 这是否和光在均匀介质中直线传播定律有矛盾?

1-4 例1-3中 $(A^0 \cdot N^0) = \pm \sqrt{\frac{1 - A^0 \cdot A^{0n}}{2}}$ 式根号前的正、负号如何确定?

〔习题〕

1-1 已知光在真空中的速度为 $3 \times 10^8 \text{ m/s}$, 试求下列各介质中的速度:

水 ($n = 1.33$), 冕牌玻璃 ($n = 1.50$), 重火石玻璃 ($n = 1.65$), 加拿大树胶 ($n = 1.53$).

1-2 一个玻璃球, 折射率为 $\sqrt{3}$. 若以入射角为 60° 的光线射到球表面, 求反射光线和折射光线的方向, 并求折射光线和反射光线间的夹角 (用矢量方法).

1-3 为了从坦克内部观察外界目标, 需要在坦克壁上开一个孔, 假定坦克壁厚 200mm, 孔宽 120mm, 在孔内装一块折射率 $n = 1.5163$ 的玻璃, 厚度与装甲厚度相同, 问能看到外界多大角度范围?

1-4 水面上浮一层油 ($n = 1.41$), 若光线由空气以 45° 角入射到油层上表面, 试求出光在油层中以及水中的走向。

1-5 在一块厚为 d 的平行平板 (其折射率 $n = 1.50$) 前 15cm 处放置一小物体, 人眼在板后透过该板且垂直于板观察该物。求人眼看到该物的位置较其实在位置向人眼移近了还是移远了?

1-6 设 $n = 1$ 和 $n' = 1.5$ 的两介质的分界面对无限远和象距 $l' = 100 \text{ mm}$ 处的点为等光程面, 求此分界面的表示式。