



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

清华大学测控技术与仪器系列教材

Optical Engineering Fundamentals (Second Edition)

光学工程基础 (第2版)

毛文炜 编著
Mao Wenwei

清华大学出版社



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

清华大学测控技术与仪器系列教材

Optical Engineering Fundamentals (Second Edition)

光学工程基础 (第2版)

毛文炜 编著

Mao Wenwei

清华大学出版社
北 京

内 容 简 介

本书是作者 40 多年来,在清华大学精密仪器与机械学系讲授光学课程所积淀经验的部分小结。全书内容共分 9 章:光波、光线和成像;近轴光学;理想光学系统;平面反射镜、反射棱镜与折射棱镜;常用光学系统;光学系统中的光束限制;光学系统的分辨率、景深及光能的传递;梯度折射率光线光学;变焦距镜头的理想光学分析。书中附有 92 道习题及部分参考答案,分章列有百余篇参考文献。

本书系统而深入地阐述了几何光学的基本概念、基本原理和规律,并详细介绍了几何光学的应用,加深了基础理论的阐述,同时也加强了基础理论的应用。书中引入了国外教材中的一些新方法、新原理、新理论、新表述。与传统内容相比,本书增添了一些新的章节和内容。

本书适用于光学工程、测控技术与仪器及机电类专业大专院校师生和从事相关领域的工程技术人员。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

光学工程基础/毛文炜编著. --2 版. --北京:清华大学出版社,2015

清华大学测控技术与仪器系列教材

ISBN 978-7-302-39906-3

I. ①光… II. ①毛… III. ①工程光学—高等学校—教材 IV. ①TB133

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 079926 号

责任编辑:庄红权

封面设计:常雪影

责任校对:王淑云

责任印制:何 芊

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编:100084

社 总 机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者:北京鑫海金澳胶印有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm 印 张:15.25 字 数:371 千字

版 次:2006 年 5 月第 1 版 2015 年 5 月第 2 版 印 次:2015 年 5 月第 1 次印刷

印 数:1~2000

定 价:36.00 元

产品编号:062953-01

“测控技术与仪器”系列教材编委会

顾 问 (按姓氏笔画序)

金国藩(中国工程院院士)

温诗铸(中国科学院院士)

主 任 李庆祥

副主任 丁天怀 申永胜 贾惠波

委 员 刘朝儒 陈 愚 王东生 王伯雄

毛文炜 郁鼎文 郝智秀 季林红

秘 书 冯 涓 陆体军

序言

近年来,我国的科教事业突飞猛进,教育与科研的投入使全国各地的高校如雨后春笋般蓬勃发展。大学的根本使命是培养人才,而要培养高水平、高素质的人才,优秀教师和高质量教材是不可或缺的两个关键因素。

回顾清华大学近 50 年的教材情况,1952 年院系调整,全面学习前苏联,所用教材几乎都源自前苏联。“文革”期间,教育事业遭到了空前的摧残,教材是“各科一本”的油印讲义。由于学生入学质量差,加之其他各种因素的干扰,导致学生只认得自己这本“讲义”,见了别的书也不知道如何去读。1978 年改革开放以后,在教育领导部门组织下,曾编写了部分统编教材。应该说统编教材集许多教师之智慧,搜集、整理、吸收了一些国内外教材的精华,但也应看到它们参差不齐。更为遗憾的是,科学技术发展日新月异,而我们的教材建设却总是滞后。

最近,我系组织教师编写本科生系列教材,总结我系教学改革成果,配合新教学计划的落实,创出新课程体系系列教材,跟上教学改革步伐,与时俱进,是值得称赞的。我感到作为大学的教材应具有科学性、可读性和新颖性。教材的内容必须科学严谨,是科学技术规律的总结,深入浅出,符合认识规律,适时新颖,适应时代的要求,反映当代科学技术的发展前沿。我系将最新的科研成果转化到教材中,融入最新的教学和科研成果,全面提升教材质量,并符合教学规律和特点。

测控技术与仪器系列教材主要涉及光学工程、仪器科学与技术两个学科本科生课程中的基础课、专业课和实践课,内容新颖,实用性强;微机电系统工程是当代学科前沿,该系列教材则几乎囊括了微机电系统的原理、器件的设计与加工等内容,立论科学,内容新颖,引人入胜。

当然,任何一本教材都需要经过教师反复使用,不断更新改进,才能成为一本优秀教材。在此,谨希望作者们在教学中多多实践,听取学生的良好意见,不断提高质量,使之成为一套优秀系列丛书。

不断提高教学和教材质量,培养高水平的学生永远是我们教师的追求。

清华大学机械学院首任院长

中国工程院院士

A handwritten signature in black ink, consisting of stylized Chinese characters '金国华' (Jin Guohua).

于清华园

再版前言



第二版对原书作了勘误和校正,补充了一些最新的或对解释初学者们的学习困惑更具针对性的参考文献;为使讲述“平面元件”的内容完整,增加了“折射棱镜与光楔”一节。折射棱镜是一个很有“特性”的光学元件,它的折射顶角在实践上相当于柱面系统中的光焦度。它是一个面对称系统,主截面中的光束压缩作用与垂直于主截面中的光束压缩作用不一样,是一种颇具特色的变形系统。在这一节中利用矢量形式的折射定律导出了旋转双光楔偏角计算公式,这个推导在教科书中鲜有反映;根据原书在使用中的体会,简化了1.4节中“非均匀介质中光线微分方程”的示意性推导过程;针对初学者们提出的问题,加写了一段说明显微镜系统使用光路和设计计算光路的区别与联系;为方便教与学,增加了“部分习题的参考答案”,并给出了全书的课件。

第二版去掉了原书名中的后缀(一),一是原书已包含了光学工程的基础内容,二是因为没有看见原由他人要编写的(二)出版。

课件是杨利峰协助笔者完成的,在此致谢。

作者于清华大学

2015/3/2

前言



为总结教学改革成果,配合新教学规划的落实,创出新课程体系的系列教材,清华大学精密仪器与机械学系学术委员会组织相关课程的授课教师编写本科生系列教材。本书是该系列教材中的一本,内容主要涉及光学工程学科中的几何光学。

全书共分9章。第1章讨论几何光学的基本原理和成像。其中对费马原理的数学表述作了一个粗浅的说明,主要是为便于应用费马原理分析问题。本章加入“非均匀介质中的光线微分方程”内容是为了将光线光学导向梯度折射率媒质。增加“几何光学中常用的曲面形状”这一小节有两个考虑,其一是随着透镜加工工艺的发展和透镜检测技术的进步,非球面透镜(反射镜)在光学系统中的应用已不少见了;其二是想说明近轴光学的原理及方法不仅适用于球面,同样也适用于非球面。第2章讨论近轴光学。沿用 Kidger Michael J 的做法,根据费马原理导出了整套近轴光学的理论,用意在于应用费马原理分析问题。应用矩阵工具处理近轴光学问题,虽然不如光线光路那么直观,但利用它有便利之处,即光线参量与系统参量是完全分离的,所以对诸如激光谐振腔稳定性、近轴光线相关性等问题的分析更为简便。第3章讨论理想光学系统。除介绍传统内容外,增加了一点对于“正切算法”的再认识,意图在于利用矩阵光学说明理想光学系统与近轴光学在教学上的相互兼容性。第4章讲述平面反射镜与反射棱镜,不仅讨论了反射棱镜的成像问题,也讨论了棱镜调整及棱镜的制造误差计算等基础理论问题,其目的是想尽可能多地反映反射棱镜的研究全貌。第5章在讨论常用的放大镜、显微镜和望远镜等光学系统时,引出一些小问题让读者思考,为以后几何光学与光学设计的再学习做一点铺垫。第6章讲述光学系统中的光束限制,简述了光阑的定义和功能以及一些要注意的问题后,转入具体光学系统中的光阑分析,其目的在于简化繁琐的光阑理论,使讨论更加切合实际。将光学系统的分辨率、景深及光能的传递等问题都放在第7章中,一是为了节省篇幅,二是因为它们与光学系统的孔径大小有关。第8章讨论梯度折射率光线光学。梯度折射率介质是一种很有应用前景的介质,研究在其中行走光线的规律,并熟悉研究方法是学习光学工程的学生不可缺少的。最后一章在讨论变焦距镜头的理想光学分析时,努力将理想光学系统的知识应用于此,并努力理出一个清晰的解题思路,分清什么是未知的,什么又必须是已知的,相互之间还有一些什么制约。同时给出几个具体的设计实例和分析计算过程,方便读者分析参考。

以上罗列了编写这本教材的一些考虑,受限于作者本人的学识,不一定正确。另外从动

笔到完稿,时间比较紧促,如有不妥之处,请读者指正,在此先表谢意。

书中插图,由杨利峰、肖晓晟、傅建曦绘制,在此表示感谢。

作 者

2005 年 10 月于清华园

目录

1	光波、光线和成像	1
1.1	引言	1
1.2	透镜对波面和光线的作用与透镜成像	5
1.3	费马原理	8
1.4	非均匀介质中的光线微分方程	14
1.5	几何光学中常用的曲面形状	15
	习题	18
	参考文献	19
2	近轴光学	20
2.1	近轴范围和近轴成像光线	20
2.2	单个近轴球面的成像性质	23
2.3	单个近轴球面成像的放大率	26
2.4	近轴球面系统中的近轴光线追迹	29
2.5	近轴矩阵光学	37
	习题	44
	参考文献	45
3	理想光学系统	46
3.1	理想光学系统与共线成像理论	46
3.2	理想光学系统的基点与基面	48
3.3	理想光学系统的物像关系	53
3.4	理想光学系统的放大率	59
3.5	理想光学系统的组合	62
3.6	透镜	70
	习题	72
	参考文献	73

4	平面反射镜、反射棱镜与折射棱镜	75
4.1	平面反射镜	75
4.2	反射棱镜	78
4.3	反射棱镜转动引起的光轴方向和成像方向变化的分析和计算	85
4.4	反射棱镜作用矩阵的特征值与特征方向	96
4.5	从棱镜成像到棱镜转动定理	100
4.6	反射棱镜的几何误差	101
4.7	折射棱镜与光楔	111
	习题	118
	参考文献	119
5	常用光学系统	120
5.1	简眼	120
5.2	放大镜	123
5.3	显微镜的工作原理	125
5.4	望远镜的工作原理	128
	习题	133
	参考文献	133
6	光学系统中的光束限制	135
6.1	光阑	135
6.2	照相系统和光阑	139
6.3	望远系统中成像光束的选择	141
6.4	显微镜系统中的光束限制与分析	144
	习题	146
	参考文献	147
7	光学系统的分辨率、景深及光能的传递	148
7.1	光学系统的分辨率	148
7.2	圆孔的夫琅禾费衍射和艾里斑	148
7.3	衍射分辨率与瑞利判据	150
7.4	人眼的分辨率	152
7.5	望远镜系统的分辨率	153
7.6	显微镜系统的分辨率	154
7.7	照相物镜的理论分辨率	155
7.8	光学系统的景深	156
7.9	数码照相机镜头的景深	162
7.10	显微镜系统的景深	164
7.11	光度学中的物理量	166

习题.....	172
参考文献.....	174
8 梯度折射率光线光学	175
8.1 引言	175
8.2 自然界的梯度折射率介质	176
8.3 径向梯度介质中的光线方程	178
8.4 自聚焦透镜及其成像	185
8.5 自聚焦透镜成像的矩阵表述	191
习题.....	195
参考文献.....	196
9 变焦距镜头的理想光学分析	197
9.1 变焦距镜头概述	197
9.2 两组元机械补偿法变焦系统的光学运动分析	203
9.3 两组元机械补偿法变焦系统理想光学分析的计算步骤及实例	208
9.4 光学补偿法变焦系统理想光学分析实例	212
习题.....	226
参考文献.....	227
部分习题参考答案	228



光波、光线和成像

1.1 引言

1864 年麦克斯韦提出电磁场的学说之后,从理论上和实验上都已经证实光是一种电磁波。从本质上来说,光和一般的无线电波并没有大的区别,它们的区别仅仅在于各自涵盖的波长范围不同。这是物理光学中的结论。如果所讨论的光波波长与光学系统的口径大小(或说光学系统的粗细)相比小到可以忽略,则可以抽象出在几何光学和光学工程中广泛应用的光线模型。光线模型在几何光学和光学工程中是一个十分重要的模型,可以说没有光线模型,几何光学和光学工程就寸步难行。

1. 光是电磁波

光学工程中涉及的光波是从深紫外光波到远红外光波,它们的波长范围是 $0.1 \sim 30.0 \mu\text{m}$,其中波长在 $0.40 \sim 0.75 \mu\text{m}$ 范围内的光波能被人眼所感知,称为可见光。图 1-1 是电磁波按波长分类的情况。

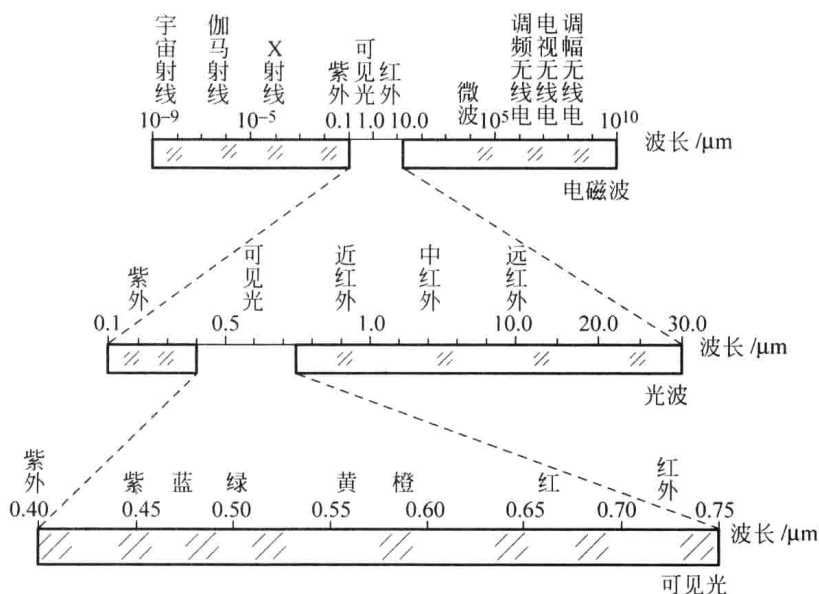


图 1-1 电磁波按波长分类的情况

光在真空中的传播速度是 $c=299792458\text{m/s}$ 。在不同的各向同性、均匀的透明介质中,同一波长光波的传播速度不同;在同一种各向同性、均匀的透明介质中,不同波长光波的传播速度也不同。若某一波长的光波在某种介质中的传播速度为 v ,它在真空中的传播速度为 c ,就将 c 与 v 之比定义为介质的绝对折射率,简称折射率,常用 n 表示。对同一种介质,折射率 n 是光波波长 λ 的函数, $n(\lambda)$ 反映的是介质的色散。

光波的速度 v 、波长 λ 和频率 ν 这三个参量之间有 $\nu \cdot \lambda = v$ 的关系。某种频率的光波在不同的介质中其波长是不同的(通常说某光波的波长是指它在真空中的波长),它在不同介质中的传播速度也是不同的,但频率不因介质不同而改变。

在各向同性的均匀介质中,点光源发出的光波波面是一系列以该点光源为球心的球面,简称球面波。如果点光源与观察者相距无穷远,则点光源发出的光波到达观察者时,曲率为零,称为平面波。如图 1-2 所示。

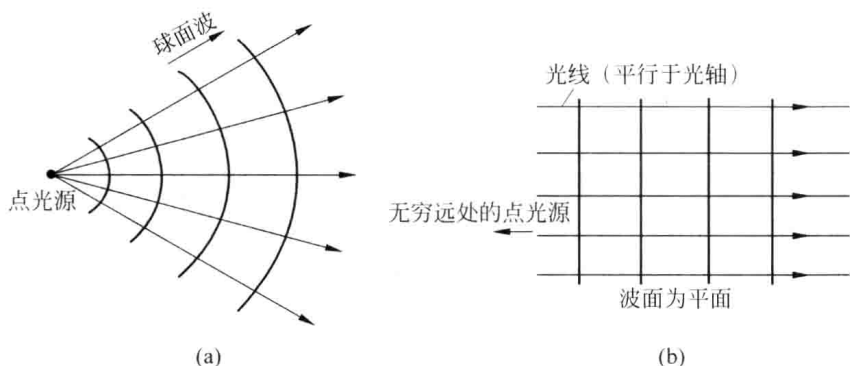


图 1-2 光波波面示意图

(a) 球面波; (b) 平面波

在几何光学和光学工程中,光的传播问题是一个主要研究的内容。例如,在非均匀介质中点光源发出的光波是如何传播的;又例如,球面波从一种均匀介质通过两种介质的分界面传到另一种均匀介质中时波面是如何变化的。对波面的研究也有一个变通的办法,即不直接讨论波面而去研究波面的法线,因为如果波面上逐点的法线讨论清楚了,波面上逐点的情况也就掌握了。另外从几何学的角度考虑,研究“线”比研究“面”要简便得多。在图中画出波面的法线后,从另一个角度说,点光源发光就是发出了能量沿这些法线传播的光线。事实上,如果我们在点光源发出的波面上取定一点,当光往前传播时,这一点所描出的轨迹就是光线。在均匀介质中,点光源发出球面波,其对应的光线就是从点光源出发的直线。这里是从方法论的角度,引出了光线的概念。事实上,在光学发展的历史长河中,人类从日食、月食、影子这些客观事实,早已总结出了光线模型。应当说,光线模型在几何光学和光学工程中的重要作用如何强调也不过分。曾经有位美国学者在回答有关光线和波动理论应用问题时,睿智地说:“你用光线理论设计照相机镜头,尽管是近似理论,但你用一个星期可以完成;然而你若用衍射理论设计照相机镜头,虽然你用的理论很严格,也许你一辈子才能设计出一个镜头。”在几何光学和光学工程中,研究光的传播主要就是研究光线的传播问题。

2. 光线的性质

众所周知,光线的传播遵守如下几个基本定律:

(1) 在均匀介质中, 光线沿直线传播。

(2) 在两种介质的分界面上, 光线发生反射时遵守反射定律(如图 1-3 所示)。反射定律的要点是入射光线、反射光线和过入射点的分界面法线共面, 入射光线和反射光线分居法线两侧, 入射光线与法线所夹的入射角等于反射光线和法线所夹的反射角, 即

$$i' = i \quad (1-1)$$

(3) 在两种介质的分界面上, 光线发生折射时遵守折射定律(如图 1-4 所示)。折射定律的要点是入射光线、折射光线和过入射点的分界面法线共面, 入射光线和折射光线分居法线两侧, 入射光线与法线所夹的入射角的正弦与入射光线所在介质折射率的乘积等于折射光线和法线所夹的折射角的正弦与折射光线所在介质折射率的乘积, 即

$$n' \sin i' = n \sin i \quad (1-2)$$

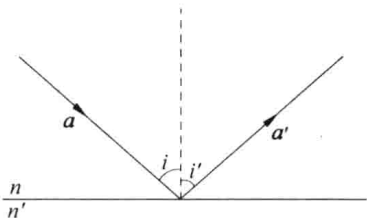


图 1-3 光线的反射

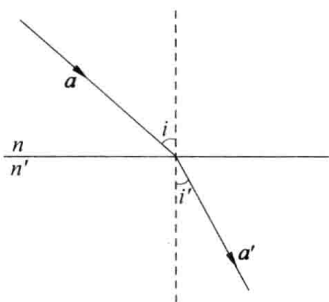


图 1-4 光线的折射

(4) 如果在图 1-3 中, 光线沿 a' 的反方向, 即沿 $-a'$ 的方向射向反射面, 则反射光线一定沿 $-a$ 的方向离开反射面, 即光路是可逆的。同样在图 1-4 中, 若入射光线从介质 n' 中沿 a' 的反方向, 即沿 $-a'$ 的方向入射到 n' 和 n 这两种介质的分界面上, 则折射光线一定沿着 $-a$ 的方向, 同样说明光路是可逆的。考查反射定律和折射定律, 会看到它们是支持光路可逆这一结论的。

应用光路可逆, 可以简化许多问题的分析与计算。例如, 我们要求图 1-5 中从玻璃块中出射的光线平行于玻璃块的底面, 入射光线的入射角应为多少? 假定玻璃块的折射率为 $n=1.5$, 玻璃块周围是空气, 其折射率为 $n_0=1.0$ 。可以利用光路可逆来解这个问题, 具体的计算作为练习留给读者。

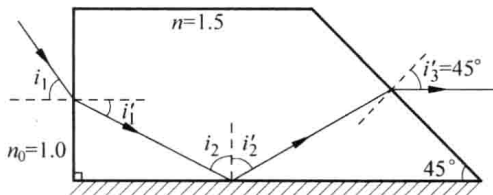


图 1-5 光线在玻璃块中的折射和反射

(5) 若光线是由折射率(n)大的光密介质射向折射率(n')小的光疏介质, 且入射角 i 大于临界角 $\arcsin\left(\frac{n'}{n}\right)$, 则在这两种介质的分界面上只有反射现象发生而不产生折射, 这就是我们熟知的光的全反射。

3. 光学玻璃的色散

如前所述,在同一种介质中不同波长光波的折射率是不同的。当白光光线以某一入射角入射到一块由普通光学玻璃做成的牛顿三棱镜上时,则分出红、绿、蓝各色光线,如图 1-6(a)所示。

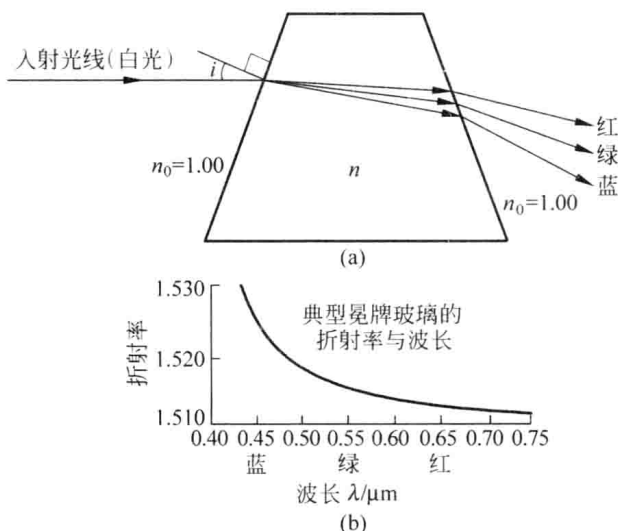


图 1-6 光的色散示意图

(a) 光的色散; (b) 典型玻璃的色散曲线

由于白光是由许多不同波长的光波混合组成的,而不同波长的玻璃折射率是不同的,所以进入三棱镜后,不同波长的光线走不同的路径,到达三棱镜的出射面后折射走出。由于不同波长光波的颜色不同,人们看到的现象是白光入射,出射的是从红到蓝不同颜色的光谱。这种现象称为色散。图 1-6(b)是一种典型光学玻璃的折射率随波长变化的色散曲线。可以看出,对于波长长的红光其折射率较小,而波长较短的蓝光其折射率较大。对于其他光学玻璃,色散规律也是如此。

各种光学玻璃都可以用某个特定波长的折射率和色散来表征。如果没有特别指出,一般都用黄色氦光作为标准波长(波长为 587.5618nm; 谱线标号以字母 d 表示)。d 线的折射率写为 n_d 或简写为 n 。选择 d 线作为标准波长的原因是它非常接近人眼最敏感的波长。

色散可以用两个不同波长的折射率的差 $\delta n = n_F - n_C$ 来描述。选择红光 C 线(波长为 656.2725nm)和蓝光 F 线(波长为 486.1327nm)来定义色散,是因为它们几乎涵盖了光谱中的可见光部分。

另一种表明色散的通用方法是利用阿贝(Abbe)数 V :

$$V = \frac{n_d - 1}{n_F - n_C} \quad (1-3)$$

很显然,阿贝数越大意味着色散越小,而阿贝数越小则意味着色散越大。用阿贝数来表达色散是为了便于光学设计中的应用。

由式(1-3)可知,要确定阿贝数我们需要知道 n_d , n_F 和 n_C ,事实上往往可以仅用 n_d 和 V 就能表征光学玻璃的光学性质。这个由两个参量确定出三个数值的难处可利用柯西(Cauchy)色散公式克服。所有光学玻璃的色散都与波长相关,其关系可用下面的柯西色散

公式以相当好的精度近似:

$$n(\lambda) = A + \frac{B}{\lambda^2} + \frac{C}{\lambda^4} \quad (1-4)$$

对大多数光学玻璃来说,系数 C 在可见光范围内很小,所以即使去掉上式中的第三项,只保留前两项,上式也有足够的精度。利用式(1-4)和式(1-3),可得

$$B = \frac{(n_d - 1)\lambda_c^2 \lambda_F^2}{V(\lambda_c^2 - \lambda_F^2)} \quad (1-5)$$

这样就可以得到第一个系数 A :

$$A = n_d - \frac{B}{\lambda_d^2} \quad (1-6)$$

值得注意,系数 A 是无量纲的,系数 B 的量纲是长度的平方(例如 nm^2 或 μm^2)。利用式(1-5)和式(1-6)确定的两个系数,由柯西色散公式(1-4)就可以计算出任意波长上的折射率。

例如有一种玻璃,它的 $n_d = 1.51680$, $V = 64.17$, 求这种玻璃 C 光的折射率 n_c 。

由前已知, $\lambda_d = 587.5618\text{nm}$, $\lambda_c = 656.2725\text{nm}$, $\lambda_F = 486.1327\text{nm}$ 。将 n_d , V , λ_c 和 λ_F 的值代入式(1-5),有

$$\begin{aligned} B &= \frac{(1.51680 - 1) \times 656.2725^2 \times 486.1327^2}{64.17 \times (656.2725^2 - 486.1327^2)} \\ &= 4.2173773 \times 10^3 \end{aligned}$$

将此结果代入式(1-6),有

$$A = 1.5168 - \frac{4.2173773 \times 10^3}{587.5618^2} = 1.5045838$$

利用式(1-4)的近似式,即只保留该式的前两项,并将 A , B 和 λ_c 代入,得

$$n_c \approx A + \frac{B}{\lambda_c^2} = 1.5045838 + \frac{4.2173773 \times 10^3}{656.2725^2} = 1.514$$

这种玻璃是德国肖特(Schott)玻璃 BK_7 ,它与我国牌号的 K_9 玻璃极为接近。这种玻璃 C 光折射率 n_c 的名义值是 1.51432,可见此处的计算结果是很好的。

1.2 透镜对波面和光线的作用与透镜成像

1. 透镜对波面的作用与透镜成像

如图 1-7 所示, P 是一个单色点光源,位于空气中,它发出了一系列的球面波。 L 是一块曲面玻璃,它的两个表面是凸形的曲面,这种曲面玻璃称为透镜。照相机镜头就是由若干片类似的透镜组合而成的。当球面波传至透镜的前表面时,波面上的 A 点即将进入透镜,以后的传播速度将变慢;而 B 点离透镜还有一段距离,它仍然在空气中高速前进,这样透镜前表面对波面的迟滞作用在透镜中间部位(A 点)比透镜边缘处大,待波面完全进入透镜后再经历第二个透镜表面的类似作用,则波面弯曲的方向将有可能发生颠倒,如图 1-7 所示。在透镜的左侧,点光源 P 发出了发散的球面波,在透镜 L 的作用下,在透镜右侧波面会成为汇聚于 P' 点的球面波。所以我们说,这块透镜对波面的作用是将发散的球面波转换成了汇聚的球面波。