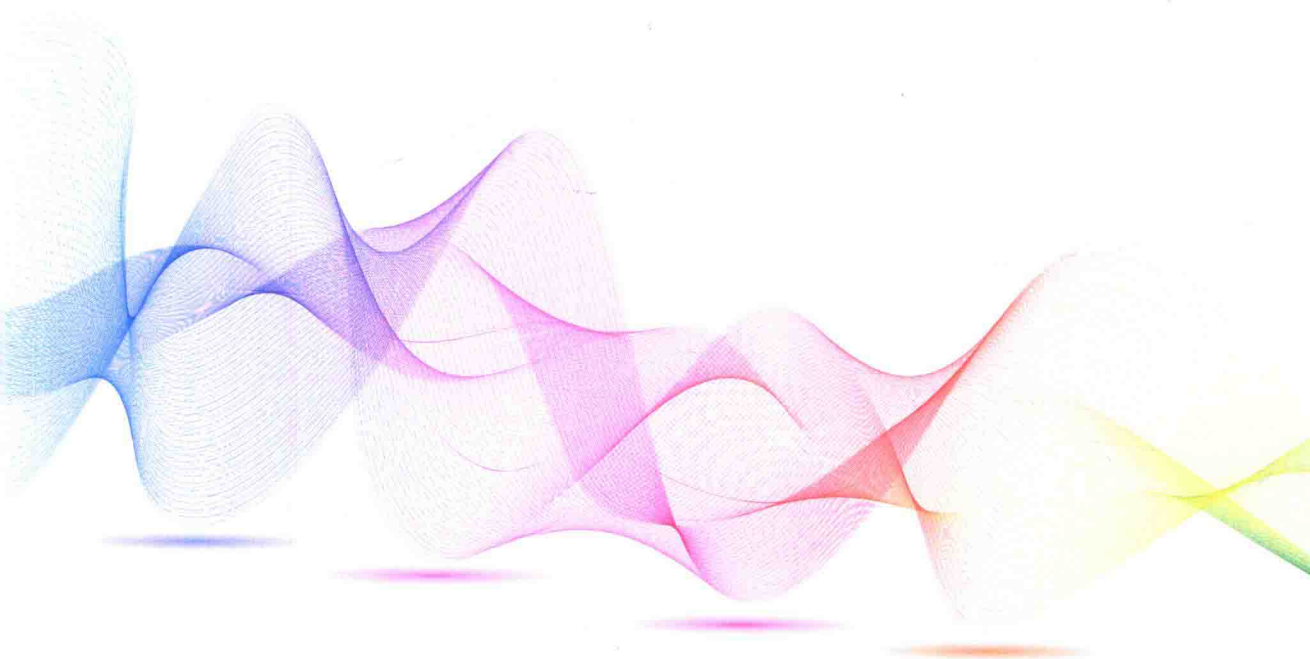




GEOMETRICAL
AND VISUAL OPTICS

几何光学与视觉光学

[美] 蒋百川 编著



 復旦大學 出版社



GEOMETRICAL
AND VISUAL OPTICS

几何光学与视觉光学

[美] 蒋百川 编著

 復旦大學 出版社

图书在版编目(CIP)数据

几何光学与视觉光学/[美]蒋百川编著. —上海:复旦大学出版社,2016. 11
ISBN 978-7-309-12618-1

I. 几… II. 蒋… III. ①几何光学②眼科学 IV. ①0435②R77

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第256795号

几何光学与视觉光学

[美]蒋百川 编著

责任编辑/魏 岚 谢 强

复旦大学出版社有限公司出版发行

上海市国权路579号 邮编:200433

网址:fupnet@fudanpress.com <http://www.fudanpress.com>

门市零售:86-21-65642857 团体订购:86-21-65118853

外埠邮购:86-21-65109143

上海肖华印务有限公司

开本 787×1092 1/16 印张 8.25 字数 176 千

2016年11月第1版第1次印刷

ISBN 978-7-309-12618-1/O·609

定价:25.00元

如有印装质量问题,请向复旦大学出版社有限公司发行部调换。

版权所有 侵权必究

内容简介

《几何光学与视觉光学》是视光学专业的基础课程之一。本书在第一章便提出了光束聚散度的概念，并以此作为一个重要的概念贯穿在以后几章之中，从而导出各种光学元件：单折射面（第二章）、薄透镜（第三章）、厚透镜（第四章）、球面镜（第六章）、柱镜（第九章）等的成像关系。然后，在第八章中讨论了棱镜对光线的偏转。本书的特点是：从第五章开始，几何光学的内容与视觉光学的内容便相互交织，这是为了使学生学习如何将几何光学知识去解释或解决眼睛和视觉的实际问题；在第四章之后，便开始介绍模型眼和简约眼，并用来讨论正视眼及屈光不正眼的校正（第五章）；在学习球面反射镜之后便讨论浦肯野像（第六章），以及眼的焦点调节理论（第七章）；在学习棱镜对光线的偏转后，介绍如何将棱镜用于有斜视的患者（第八章）；同样，学习柱镜与球柱镜是为了用以校正有散光患者的视力（第九章）；在第十章中，主要介绍放大镜与望远镜两种光学仪器，目的在于初步学习如何为低视力患者提供助视的工具；在第十一章中，介绍视网膜像的大小，这也是验光配镜时必须考虑的一个重要方面；最后一章涉及视觉光学的一个基本目的，即提高成像质量或成像质量的评价。

本书可作为视光专业学生的教材，也可供眼科医务工作者、验光配镜从业人员、有关科研人员、光学工程技术人员阅读与使用。

序

中国眼科学领域包括视光学专业的快速发展，得益于国际上先进诊疗技术和设备的不断引入及学术界交流的常态化。其中，少有中国自己原创性的成果。究其原因，个人认为我们的教育问题是基本因素之一。2015年6月，与复旦大学上海医学院眼科学与视觉科学系顾问教授、美国诺瓦东南大学视光学院（Nova Southeastern University, College of Optometry）教授蒋百川讨论有关研究生教育问题时，蒋教授提出想出版一本结合我国视光学专业及眼科医务人员实际情况的视觉光学教材，我很是欣然。蒋教授根据多年来与国内眼科及眼视光学界合作交流的实际情况，分析我国国内存在的问题是：虽然有不少高等院校开设了视光学专业，但所用的是光学仪器专业的光学教材，缺乏真正视觉光学的内容，造成视光学或眼科学学生学了光学课，在临床上应用起来却很困难。同时，发现这些教光学的教师多数是从光学仪器专业或物理专业毕业的，他们原来的知识面可能与视觉光学、眼科学有所脱节。因此触发了蒋教授编写《几何光学与视觉光学》一书。目的是针对我国视光学现有的状况，结合自己数十年在美国的视觉光学研究经历和教育经验，从实际应用出发，以视光学的语言介绍几何光学与视觉光学的基本知识，使光学的基础知识与视觉光学有较好的衔接。本书编写特点在于：每在叙述几何光学的基本概念和公式后，以视光学中的问题为例，说明它们的实际应用；在叙述几何光学与视觉光学诸多经典内容的同时，密切临床应用，使读者更容易解决他们遇到的实际问题。

本书不仅是视光学专业的教材，也是眼科学专业的参考书，更适合从事视光学和眼科学实际工作的医务人员和技术人员的继续教育。相信它会给读者带来理论联系实际的更多益处，不仅能够完善我国视光学教材体系建设，而且还能为我国视光学、眼科学及视觉科学的人才培养和相关专业的发展起到促进作用。

我有幸在出版前读到本书书稿，应蒋教授盛情邀请，是当介绍为序。感谢复旦大学出版社对本书出版的大力支持！感谢蒋百川教授的辛劳和对祖国医学事业的关心！在社会发展和不断改革的进程中，我们需要更多像蒋教授这样的学者来助力。

孙兴怀

复旦大学上海医学院眼科学与视觉科学系主任

前复旦大学附属眼耳鼻喉科医院院长

卫生部近视眼重点实验室（复旦大学）主任

2016年9月14日

前 言

中国眼视光学学科的确立是改革开放的结果。温州医学院于1992年成立“卫生部视光学研究中心”。1993年眼视光系招收首届28名五年制学生入学。其后天津医科大学、中山医科大学分别开始设立眼视光专业，上海医科大学等开始招收视光学研究生。1994年“卫生部视光学研究中心”首届国际顾问委员会在北京举行，1997年第2届国际顾问委员会在上海和温州举行。两届会议邀请美国、加拿大、澳大利亚等国多位视光学院的院长、教授，讨论“optometry”的中文译名与定义，介绍国外眼视光学院的教学大纲。通过讨论与交流，与会者达成共识：眼视光学学科旨在培养处理眼睛和视觉卫生和健康问题的医务工作者。紧接着这两次会议，中方的温州医学院、中山医科大学、上海医科大学、华西医科大学、天津医科大学等与美方的新英格兰视光学院、休士顿大学视光学院、加州大学伯克利分校视光学院共同发起“中美视光学高等教育人才资源发展计划（CORD）”。该计划通过中美视光学教师的互派和交流，在近3年时间内为中国培养了第一批视光学的教学队伍，也初步引进了国外视光学的课程资源和架构。我当时在休士顿大学视光学院工作，有幸参加了中国视光学初创时期的所有会议和活动。在CORD期间，我不仅负责接待国内院校来休士顿大学学习进修的医生和教师，也被派往中山医科大学、上海医科大学及温州医学院教授相关的课程。

《几何光学与视觉光学》是视光学的一门主要的基础课。我在美国休士顿大学视光学院（1990~2000年）及佛罗里达州诺瓦东南大学视光学院（2000~2013年）任教多年，主要的教学内容与这门课程相关。所以我希望通过本书与国内同行交流，提高国内视光学的教学质量，并促进眼视光学在中国的进一步发展。现在国内视光学院从事光学有关课程教学工作的老师，多数毕业于工科大学的光学仪器专业或综合性大学的物理专业，他们要

在视光学专业胜任几何光学与视觉光学的教学，我认为首先要熟悉眼的生理学和视觉的生物物理学知识，并且在教学中使用视光学其他课程中（如临床视光学、验光学、眼镜学、角膜接触镜学、低视力、视觉训练等）相同的语言和思维。只有这样，才能使学生运用光学这门课程中学到的知识用于别的课程和临床。我在大学是学物理的，做研究生时进入视觉生理领域。到美国进了视光学院工作后，才发现原来物理系中的光学与视光学院中的光学在教学内容和方法上存在很大的不同。所以，简单地将理、工科大学里的光学教材和内容搬到视光学院的教学上，容易造成学生的光学基础与其他视光学课程相脱节。

几何光学的要义是假设光在均匀媒质中以直线的形式传播。它遵从费马原理，即光从一点传播到另一点时，总是取所需时间最少的路径。由这个物理学的基本原理出发，可以导出光在两个不同媒质的交界面上所遵循的反射定律与折射定律。在引入了光线的概念之后，本书在第一章进一步定义光束，建立光束聚散度的概念。光束的聚散度作为一个重要的概念贯穿在以后几章中，利用这个概念建立了各种光学元件：单折射面（第二章）、薄透镜（第三章）、厚透镜（第四章）、球面镜（第六章）、柱镜（第九章）等的成像关系。在以上这些章节讨论成像关系时除了确定物、像的位置，还讨论了像相对于物的大小，即各种元件成像时的放大率问题。除了上述的光学元件，在视光学的光学课程中还必须讨论棱镜（第八章）。与物理或工程专业不同之处在于，我们对于棱镜的色散暂时不感兴趣，而专注于讨论其对光线的偏转。

本书的另一个特点是，从第五章开始，几何光学的内容与视觉光学的内容便开始交织在一起。这是为了使学生会将几何光学的基础知识应用到解释或解决眼睛和视觉的实际问题。基于这样的考虑，所以在掌握处理单折射面和薄透镜的知识后，便介绍模型眼和简约眼，用以讨论正视眼及屈光不正眼的校正问题（第五章）。在学习球面反射镜之后讨论光线在角膜与晶状体表面的反射，即浦肯野像（第六章）及眼的焦点调节理论（第七章）。在学习棱镜对光线的偏转后，便介绍如何将棱镜用于有斜视的患者（第八章）。同样，学习柱镜与球柱镜的目的是为了校正有散光患者的视力（第九章）。第十章主要介绍放大镜与望远镜两种光学仪器，目的在于学习如何为低视力患者提供助视的工具。第十一章介绍视网膜像的大小，这也是验光配镜时必须考虑的一个重要方面。最后一章涉及视觉光学的一个基本目的，即对眼睛成像质量的评价（第十二章）。详细讨论这些问题，会涉及较多的数学、物理光学等基础知识，并受到教学时间的限制，所以本书仅为读者提供一些深入学习的基础知识。同时必须指出，视力的改善主要应该在于对离焦（近视或远视方面的问题）及散光的校正。在学习这一门课程时，教师与学生应该把当前十分热门的波前像差理论和应用放在一个适当的位置。

本书的主要目的是向国内视光学院的学生提供一本合适的教材，或者作为他们学习几何光学与视觉光学内容时的参考书。此外，对于广大从事眼科的医务工作者、验光配镜的从业人员，也可以通过本书的学习进修这方面知识。同时本书对有关科研人员或光学工程技术人员在了解关于眼睛与视觉的光学问题时也有一定的参考价值。

本书的编写得到前复旦大学附属眼耳鼻喉科医院院长孙兴怀先生的大力支持与帮助。本书的插图在上海根植眼视光企业管理咨询有限公司总经理钟立先生的热心支持下，由该公司周轶先生帮助绘制。在此对他们表示衷心的感谢。本书的出版也得到了复旦大学出版社医学分社王珑玫老师及出版社其他有关工作人员的大力支持，在此一并致谢。

蒋百川

博士、荣誉教授

美国佛罗里达州诺瓦东南大学视光学院

2016年9月30日

目 录

第一章 光的基本概念	1
第一节 光的频率、速度、波长、能量	1
第二节 光波、光线、光束	3
第三节 聚散度	4
第四节 光学材料的折射率	6
第五节 光在两种介质界面上的反射与折射	7
第六节 费马原理	8
第七节 光的全反射	10
习题	11
第二章 球形表面对光的折射与成像	12
第一节 平行光经过一个球形表面的折射及焦点的概念	12
第二节 焦距和球形表面的光焦度	13
第三节 单一球形表面成像时的物空间与像空间	14
第四节 球形表面的成像公式	14
第五节 符号规则	16
第六节 屈光度计	17
习题	19
第三章 薄透镜	20
第一节 薄透镜的焦点、焦距、光焦度	20
第二节 在近轴光假定下的光路追迹	21
第三节 物像关系、横向放大率	23
第四节 牛顿公式	24
习题	25

第四章 厚透镜	26
第一节 将厚透镜看作两片薄透镜	26
第二节 等效透镜的定义和公式	26
第三节 厚透镜的成像公式与放大率	30
习题	33
第五章 模型眼和正视眼	35
第一节 古尔斯特兰德模型眼和简约眼	35
第二节 正视眼	37
第三节 远点的概念	37
第四节 近视眼及其校正, 有效光焦度	38
第五节 远视眼及其校正	40
第六节 屈光不正眼的分类	42
习题	43
第六章 反射	44
第一节 平面反射镜	44
第二节 球面反射镜	47
第三节 光在角膜及晶状体上的反射	49
第四节 第1浦肯野像	50
第五节 第3浦肯野像	50
第六节 浦肯野像的应用	52
习题	53
第七章 眼的焦点调节	54
第一节 人眼的焦点调节机制	54
第二节 正视眼的调焦	56
第三节 未经校正的非正视眼的调焦	57
第四节 调焦的近点	58
第五节 非正视眼经过校正后的调焦	59
习题	60
第八章 棱镜	62
第一节 棱镜的偏向角	62
第二节 棱镜的度数	65
第三节 透镜的棱镜效应和普伦蒂斯法则	66
第四节 临床应用	67
习题	69

第九章 柱镜、象散的校正	70
第一节 柱镜、球柱镜及其表述	70
第二节 球柱镜的成像和等效球镜光焦度	73
第三节 眼睛的象散及相关定义和分类	76
第四节 交叉柱镜及其临床应用	77
习题	79
第十章 成像的放大	80
第一节 放大镜	80
第二节 近距离使用放大镜时对眼睛调节的要求	82
第三节 定焦立式放大镜	83
第四节 望远镜系统	84
习题	87
第十一章 视网膜像的大小	88
第一节 在未经校正的非正视眼中视网膜像的线度	88
第二节 框架眼镜的放大率	89
第三节 在校正后的非正视眼中的角放大率	90
第四节 在校正后的非正视眼中的视网膜像的线度	91
习题	92
第十二章 光学成像质量	94
第一节 赛德尔像差	94
第二节 人眼的像差	99
第三节 色差	100
第四节 人眼的色差	103
第五节 波前像差	104
第六节 人眼的分辨率	105
第七节 人眼的对比敏感度	108
习题	112
主要参考文献	113
习题答案	114

第一章 光的基本概念

第一节 光的频率、速度、波长、能量

在眼视光领域，光是指电磁波谱中的可见部分，即可见光。从图 1-1 可以看出可见光仅是整个电磁波谱中一个很狭窄的范围。

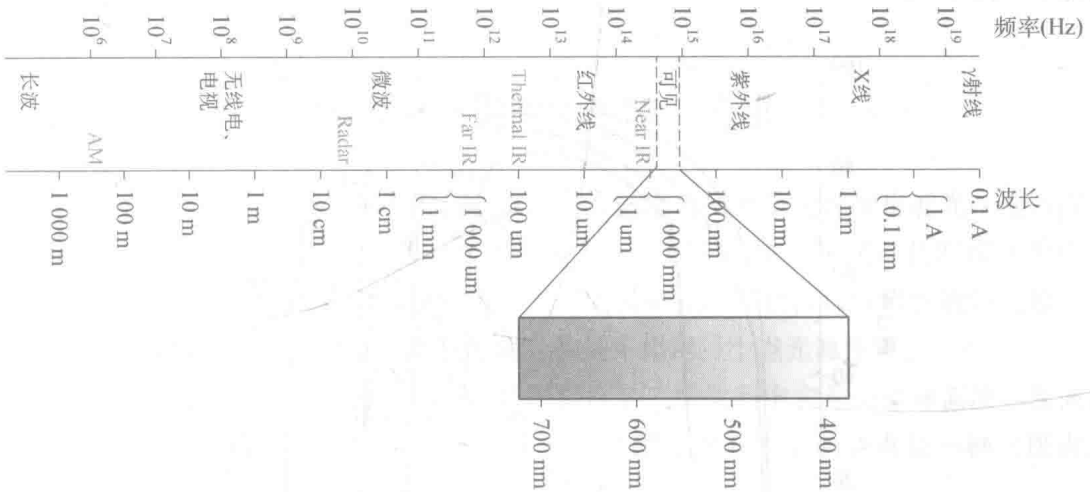


图 1-1 可见光在电磁波谱上的位置

表 1-1 为在真空条件下，可见光的颜色、波长、频率之间的关系。

表 1-1 真空条件下可见光的颜色、波长、频率之间的关系

颜色	在真空中的波长 (nm)	频率 ($\times 10^{14}$ Hz)
红	760~622	3.94~4.82
橙	622~597	4.82~5.03
黄	597~577	5.03~5.20
绿	577~492	5.20~6.10
蓝	492~455	6.10~6.59
紫	455~390	6.59~7.69

光作为电磁波动，通常可以用波长或频率来描述。公式为：

$$\nu = \frac{c}{\lambda} \quad (1-1)$$

光辐射的能量载体称为光子或光量子 (photons or quanta)。一个光子的能量大小与其频率或波长有关。公式为:

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad (1-2)$$

以上两式中, E 表示一个光子的能量; h 表示普朗克 (Planck) 常数, 等于 $6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$; ν 表示光的频率; c 表示光的速度, 在真空中它是一个常数, 约为 $3.00 \times 10^8 \text{ m/s}$; λ 表示光的波长, 现通常用 nm 作为单位, $1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$ 。

从式 (1-2) 可见, 短波长 (较高频率) 的光子比长波长 (较低频率) 的光子有更高的能量。因此, 生理组织较易被短波长的光损伤, 这可用以解释白内障或皮肤癌的成因。但在考虑不同波长的光子对眼睛各生理组织的损伤时, 还需要注意相应组织对光的透过率 (图 1-2)。

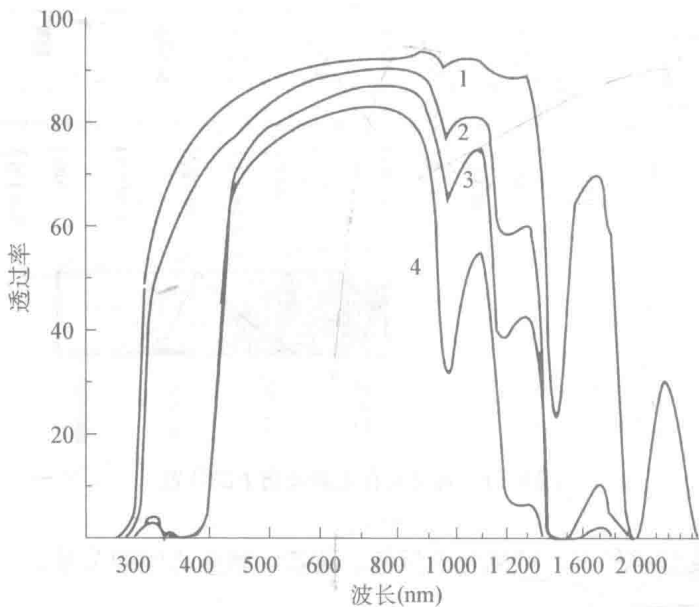


图 1-2 人的眼球中各组织的光谱透射率

注: 曲线 1 为房水; 2 为晶状体; 3 为玻璃体; 4 为视网膜

除了透过率, 与任何光敏元件一样, 人眼对不同波长光的敏感性不一样, 这通常用视见函数曲线来描述。由于人眼的视网膜上有两种光感受细胞 (视杆细胞与视锥细胞), 因此有两条视见函数曲线 (图 1-3), 分别对应暗视情况下工作的视杆细胞与在明视情况下工作的视锥细胞。这里暗视是指亮度 $< 10^{-3} \text{ cd/m}^2$, 明视是指亮度范围在 $10 \sim 10^7 \text{ cd/m}^2$ 。在明视与暗视亮度范围之间, 尚有一区域称为间视。高于明视范围的亮度, 很容易造成视网膜损伤。

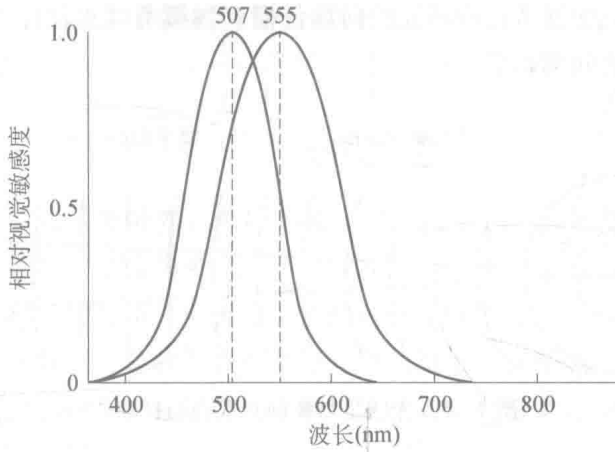


图 1-3 明视与暗视情况下的视见函数 $V(\lambda)$ 与 $V'(\lambda)$

注：明视条件下视见函数 $V(\lambda)$ 的峰值在 555 nm，而暗视条件下视见函数 $V'(\lambda)$ 的峰值在 507 nm

第二节 光波、光线、光束

我们可以看见一个物体，是因为它能发出光或能反射由其他光源发出的光，进而被眼睛成像到视网膜上。如果这个发光的物体是一个点，如天空中的星星，我们称其为点光源。这是最简单的一种光源的形式。其他发光（或反射光）的物体均可以看成是无数点光源的叠加。所以在讨论各种光的传播问题时，往往可以用一个点光源作为出发点。

点光源发出的光是一种电磁波动，在各向同性的三维空间中它是一个球面波。其向各个方向发出球面波的包络称为波前。进一步还可以假设球面波上的各点是一种次级点光源，继续向外发出下一个球面波，并形成下一个波前（图 1-4）。

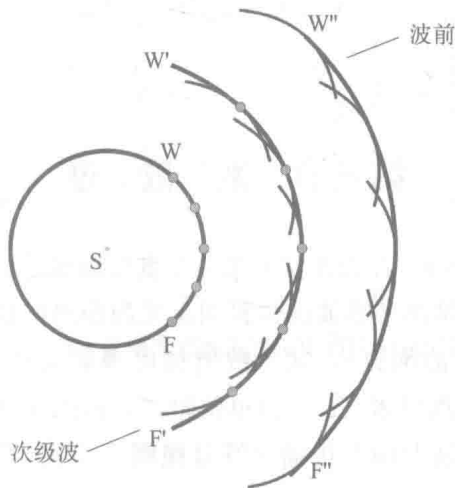


图 1-4 波前为在同一时间各次级点光源发出球面波的包络

几何光学中假定光的能量是沿着光线向前传播。当所考察点的距离与光源变大时，波前变得平坦，而光线之间则趋于平行（图 1-5）。

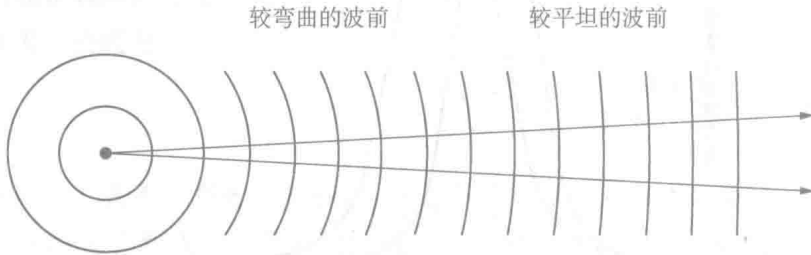


图 1-5 光线是与波前相垂直的直线

由点光源为起点，与波前相垂直的直线称为光线。由相同点光源发出光线的集合称为光束（pencil of rays）。光束可以有 3 种形式，即发散、会聚和平行（图 1-6）。

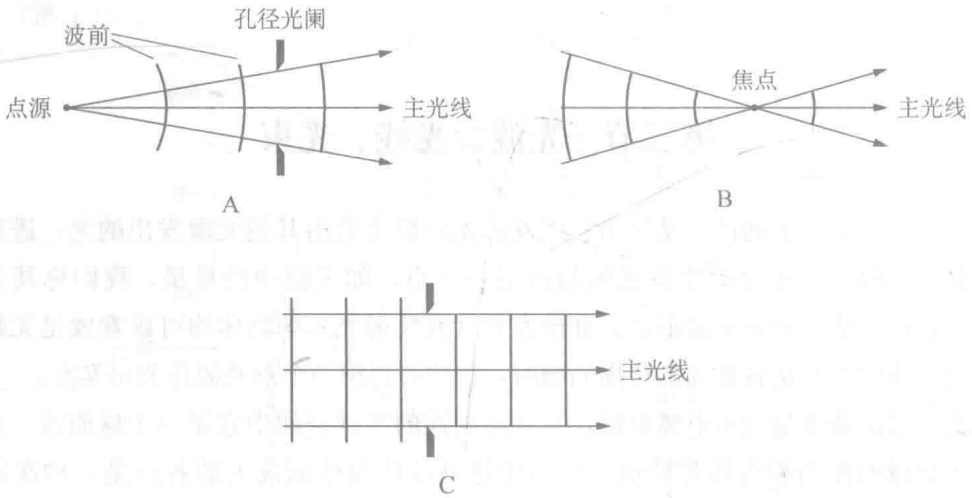


图 1-6 光束的 3 种形式
注：A. 发散；B. 会聚；C. 平行

第三节 聚散度

光束的聚散度（vergence），在视光学中是一个重要的概念，用于表示光束的会聚与发散的程度。聚散度的定义是从所考察波前位置到点光源距离的倒数（对会聚光束，则是从所考察波前位置到焦点距离的倒数）。这个数值也可理解为在这个位置上该波前的曲率（即曲率半径的倒数）。当距离以米（m）为单位时，波前的聚散度以屈光度（diopter, D）为单位。我们总是假定光线从左向右传播（符号规则）。当所考察的波前（点）在点光源的右边时，上述距离为负（即光束为发散的情形）；当所考察的波前（点）在焦点的左边

时,上述距离为正(即光束为会聚的情形);当光束为平行时,可想象光源(或焦点)在无穷远处,故而聚散度为0。

$$V(D) = \frac{1}{\text{distance}(m)} \quad (1-3)$$

式(1-3)中, V 表示聚散度,单位为屈光度(D); distance 表示从所考察的波面到点光源(或焦点)的距离,单位为米(m)。注意它的正、负号:与光的传播方向一致时取正,与光的传播方向相反时取负(假定光总是自左向右传播)。

图1-7和图1-8分别为发散光束与会聚光束的聚散度随距离(距离的测量须从波面到点光源或焦点)变化的情况。根据符号规则,发散光束的聚散度总为负值,而会聚光束的聚散度总为正值。

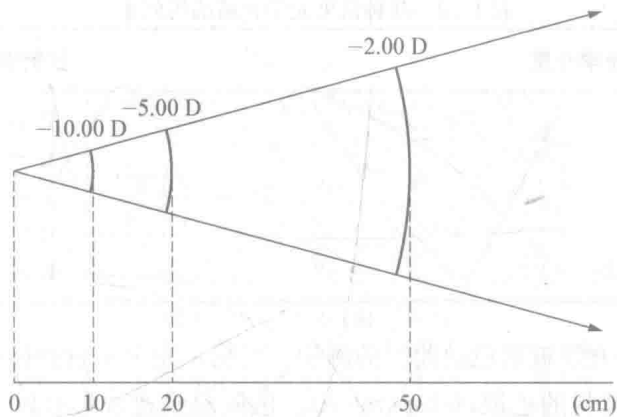


图 1-7 发散光束聚散度随距离的变化情况

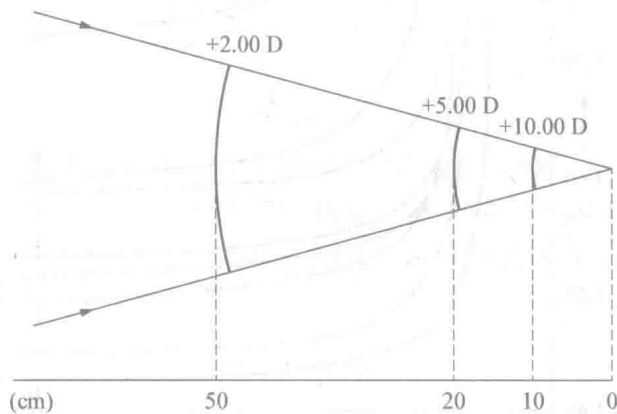


图 1-8 会聚光束聚散度随距离的变化情况