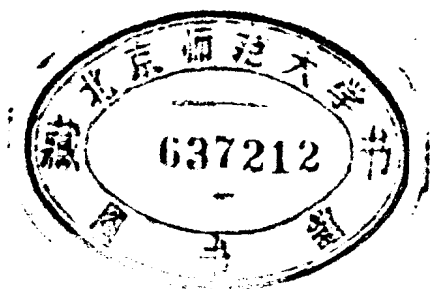


色 度 学

荆其诚 焦书兰 编著
喻柏林 胡维生



科 学 出 版 社

1 9 7 9

内 容 简 介

色度学是研究颜色测量和颜色视觉规律的一门综合性科学。本书用通俗的语言论述色度学的基础知识和测色原理,着重介绍国际照明委员会(CIE)近年来正式推荐的色度学规定和测色方法,简单介绍测色仪器,同色异谱问题、表面色的标定、光源的色度学及色度学应用等。书中附有大量图表和实际运算例证。书末所附色度学的常用数据表,可供色度计算时查阅。

本书可供光源研制、光色计量、彩色电视、电影、颜色灯光信号、彩色印染、印刷、颜料涂料、医药化工、建筑照明、军事伪装等部门的工作者及有关大专院校师生阅读参考。

色 度 学

荆其诚 焦书兰 编著
喻柏林 胡维生

*

科学出版社出版

北京朝阳门内大街 137 号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1979 年 10 月第 一 版 开本: 850×1168 1/32
1979 年 10 月第一次印刷 印张: 13 3/4 插页: 2
印数: 0001—18,660 字数: 363,000

统一书号: 13031·1046

本社书号: 1468·13—3

定价: 1.80 元

序

在人们的生活中,每天都接触到各种颜色,而颜色是什么,怎样测量它,却不是一个能够简单回答的问题。近代科学技术和生产的发展更迫切地提出了这个问题。大约五十年以前,科学家开始研究这个问题,并逐渐形成了一门新兴的科学——色度学。

色度学是一门涉及物理光学、视觉生理、视觉心理、心理物理等交叉研究领域的学科。在我国实现四个现代化过程中,许多科技和生产部门都要遇到大量的有关颜色测量的问题。为了适应这方面的需要,我们编写了这本书。本书大体上分为四个部分:引言和第一、二章主要介绍颜色科学的基础知识,色度学的物理学、生理学和心理学基础知识;第三至第六章介绍国际照明委员会(CIE)最新公布的颜色测量原理和方法,各种测色仪器,以及表面色的标定方法等;第七、八章是关于色度学在光源和彩色电视等领域中的应用;最后,为了读者计算方便,在附录里收集了色度学的各种常用数据表,读者根据书中的原理查表,就可以进行色度学的各种计算。我们希望本书能起到介绍色度学的原理和实践的作用,同时又可作为查阅数据的实用手册。

色度学涉及的知识面较广,我国这方面的工作正在开展。有关的知识和经验我们还很不足。在编写过程中,各方面的同志给予了大力支持和帮助。王大珩同志细心地审阅了全稿,并指导我们完成定稿工作。赫葆源、林仲贤、朴大植、王振常、陈遐举等同志审阅了书稿的大部分章节。审阅过部分章节的或曾给予热情帮助的还有张方华、李亚璋、藤秀金、尹演子等同志。他们无论从书的内容到形式都提出了极为宝贵的意见。俞钰和赵苓同志耐心地绘制了全部插图。我们谨向这些同志致以衷心的感谢。由于我们业务水平限制,书中的错误和缺点一定还很多,希望读者批评指正。

编 著 者

(1978年1月于中国科学院心理研究所)

目 录

序.....	iii
引 言	1
第一章 光与视觉	3
第一节 可见光谱	3
第二节 视觉的生理基础	5
第三节 明视觉与暗视觉	12
第四节 视觉功能	22
第五节 辐射度学和光度学的常用单位	30
第二章 颜色视觉	36
第一节 颜色视觉现象	36
第二节 颜色的分类和特性	42
第三节 颜色匹配	49
第四节 色觉缺陷	56
第五节 颜色视觉理论	60
第三章 CIE 标准色度学系统	68
第一节 CIE 1931 标准色度学系统	68
第二节 CIE 1964 补充色度学系统	84
第三节 CIE 色度计算方法	91
第四节 CIE 1960 均匀色度标尺图	112
第五节 CIE 1964 均匀颜色空间	124
第四章 颜色测量和测色仪器	131
第一节 颜色测量	131
第二节 光谱光度测色仪器	138
第三节 光电积分测色仪器	149
第四节 目视色度计	157
第五节 色度标准	161
第六节 荧光材料的色度测量	173
第五章 同色异谱颜色	178

第一节 颜色的同色异谱概念	178
第二节 颜色的同色异谱程度的评价	186
第三节 颜色的同色异谱差异	190
第六章 孟塞尔颜色系统	193
第一节 孟塞尔颜色立体	193
第二节 孟塞尔新标系统	197
第七章 光源的色度学	217
第一节 光源的色温	217
第二节 CIE 标准照明体和标准光源	226
第三节 光色的舒适感	244
第四节 光源的显色性	246
第八章 色度学的应用	272
第一节 彩色电视	272
第二节 交通运输中所用的颜色灯光信号	292
第三节 彩色涂料、印刷、摄影的减色复现	296
附录 I CIE 1931 标准色度观察者和 CIE 1964 补充标准色 度观察者数据	303
附录 II CIE 标准照明体 A 和 D_{65} 的相对光谱功率分布	343
附录 III CIE 标准照明体 A, B, C, D_{55} , D_{65} , D_{75} 与 CIE 1931 标准 观察者光谱三刺激值加权值	354
附录 IV CIE 标准照明体 A, B, C, D_{55} , D_{65} , D_{75} 与 CIE 1964 补 充标准观察者光谱三刺激值加权值	362
附录 V CIE 1931 色度图标准光源 A, B, C, E(等能光源)恒定 主波长线的斜率	370
附录 VI CIE 1931 Y 值向 CIE 1964 W^* 值换算表	384
附录 VII 孟塞尔新标系统颜色样品的 CIE 1931 色度坐标 (Y, x, y)	389
附录 VIII 计算光源显色指数的数据表	404
附录 IX 色度学常用词汇英汉对照表	428

引 言

感觉是认识的开端,知识的泉源。客观世界作用于感觉器官,通过感觉器官、神经系统和大脑的活动,我们就有了感觉,就对外界事物与现象开始有了认识。也就是说,感觉是外在世界作用于感觉器官的结果,是客观现实的反映。

在动物的发展进化中,感觉器官经历着一个完善化的过程。低等动物的感官对外界刺激不能分化,只能产生笼统的、一般的感觉。各种感官的分工合作是在外界环境影响下历史发展的结果。在动物种族发展的进程中,动物为了适应环境,更精确与更全面地反映外界事物的各方面,感官随着动物的进化而分化了,使每种感官只对一类刺激发生最完善的反应,而对其它刺激则不发生反应的情况。因此人类具有不同机能的各种感官,如视觉、听觉、嗅觉、味觉等感官。

正因为感官是在适应环境过程中发生和发展的,所以每种感官的机能与结构都适合某些外界事物的特性。太阳光线的物理特性形成了脊椎动物的视觉器官的特殊结构,使眼睛向着光学系统的形式发展。由于眼睛的透镜作用,使来自外界物体的光线成象在视网膜上面。人眼视网膜的锥体细胞和杆体细胞的作用适应白昼和黑夜的转化,瞳孔的张缩适应光线的强弱变化。外界物体有不同的光学特性,当可见辐射——光——照射某一物体时,物体的透射、反射和吸收特性使辐射的空间分布、功率大小和光谱组成发生变化。物体各点发出强弱不同的光,刺激人眼的锥体和杆体细胞,产生神经兴奋传导到脑,从而看到物体表面的明暗差别和整体形象。

人眼所能看见的光谱范围,只是太阳射到地球表面的全部辐射波段的一小部分。太阳辐射通过大气层吸收射到地球表面,其

大部分辐射都在波长 $380-780\text{nm}$ 的范围内,人的视觉也是对这—光谱段的辐射最敏感。眼睛对于一定范围的辐射的选择性反应是感受光能的有利条件,而不应看作是视觉器官的缺陷。例如,若对光谱红外线部分的感受范围加大,热辐射将会破坏眼睛组织而妨碍视觉。由于来自外界物体的辐射的光谱组成不同,而人眼能对 $380-780\text{nm}$ 波长范围的辐射作出选择性反应,从而看到各种颜色。这就是颜色视觉。

我们的周围世界具有不同的光学特性,通过光的辐射作用,使我们看到既有明暗差别,又有丰富绚丽色彩的景物。人们认识这种客观现象的本质,揭示其固有的内在规律,从而利用这些规律来改造客观世界。人们可以利用颜色来提高生产力,改善劳动条件,美化生活环境。在人类生产活动中,很早就应用了颜色技术。我国劳动人民在古代就将有关颜色的知识应用于纺织印染、陶瓷等工艺美术品的生产,构成了我国灿烂文化的一部分。随着科学技术和生产的发展,人们对于颜色的本质、色彩技术和测色方法的认识也在逐步加深。

色度学是研究人的颜色视觉规律、颜色测量的理论与技术的科学。这是一门本世纪发展起来的,以物理光学、视觉生理、视觉心理、心理物理等学科领域为基础的综合性科学。由于色度学的建立,颜色工作者就能以统一的标准,对颜色作定量的描述和控制。随着我国社会主义建设的发展,在工农业生产、科学技术和文化事业等部门,将越来越广泛地应用颜色科学。彩色电视、彩色摄影和彩色印刷、染料和涂料、纺织、造纸、交通信号、照明技术等都涉及到颜色测量问题。在这些工业和技术部门中,颜色指标是评定产品质量的重要一环。随着科学技术的进一步发展,色度学将进一步得到广泛的利用和普及。

第一章 光 与 视 觉

第一节 可 见 光 谱

光是属于一定波长范围内的一种电磁辐射。电磁辐射的波长范围很广，最短的如宇宙射线，其波长只有千兆分之几米(10^{-14} — 10^{-15} m)，最长的如交流电，其波长可达数千公里。在电磁辐射范围内，只有从 380nm^1 到 780nm 波长的电磁辐射能够引起人的视觉，这段波长叫做可见光谱（图 1-1）。电磁辐射的振动频率与波长成反比。可见光谱的红色一端的长波每秒钟振动 400·

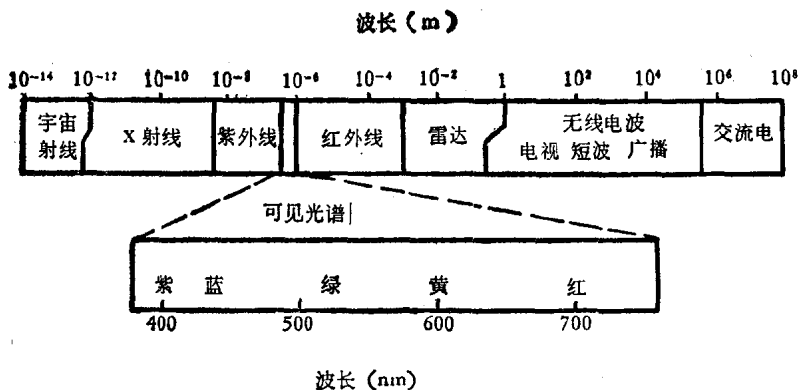


图 1-1 电磁辐射波范围及可见光谱

10^{12} 次，紫色一端的短波每秒钟振动 $800 \cdot 10^{12}$ 次。在电磁辐射范围内，还有紫外线、X 射线、 γ 射线以及红外线、无线电波等。可见光、紫外线和红外线是原子与分子的发光辐射，称为光学辐

¹⁾ nm(nanometer)=毫微米(10^{-9}m), $1\text{nm}=10\text{埃}(\text{\AA}; \text{Angstrom})$ 。.

射。X射线和 γ 射线等是激发原子内部的电子所产生的辐射，称为核子辐射。电振动产生的电磁辐射称为无线电波。这些范围广泛的电磁辐射都具有共同的电磁特性——在真空中以相同的速度传播，能呈现干涉和衍射现象。电磁辐射是麦克斯韦首先从理论上预言的，以后由赫兹在实验中予以证实。

对于人来说，能为眼睛感受并产生视觉的光学辐射称为可见辐射；不能为眼睛感受，也不产生视觉的光学辐射称为不可见辐射。因而，光学辐射可进一步分为可见辐射和不可见辐射。来自外界的可见辐射刺激人的视觉器官，在脑中产生光、颜色、形状等视觉印象，而获得对外界的认识。不可见辐射刺激眼睛时不能产生视觉，而作用在皮肤上有时会产生其它感觉，如紫外线产生疼痛感觉，红外线产生灼热感觉。严格地说，只有那种能够被眼睛感觉到的、并产生视觉现象的辐射才是可见辐射或可见光，简称光。但是，光这个词有时也被借用来表示一部分不可见辐射，如红外或紫外光谱、红外或紫外激光、X光等。这里讲的“光”已经不是光度学和色度学所研究的主要对象了。

前面讲过，可见光谱的波长范围在380—780nm之间，比380nm更短的一段波长的辐射是紫外线；比780nm更长的一段波长的辐射是红外线。在特殊情况下，人眼的感受范围可以扩大到红外线和紫外线部分。在实验室内的测量表明，用高能量辐射照射眼睛，视觉范围可以扩大到312.5nm的紫外线一端及1150nm的红外线一端。但是为了看到1000nm波长的光，光的强度要比看到562nm波长的光增加兆兆($10 \cdot 10^{12}$)倍以上。

在可见光谱范围内，不同波长的辐射引起人的不同颜色感觉：700nm为红色；580nm为黄色；510nm为绿色；470nm为蓝色。光的颜色决定于进入人眼的可见光谱不同波长辐射的相对功率分布，简称相对光谱功率分布。由于不同波长光波的折射系数不同，一束白光通过三棱镜便分解为不同颜色的光谱，简称色散。单一波长的光表现为一种颜色，称为单色光。

第二节 视觉的生理基础

一、眼睛的构造

人的眼睛是一个前后直径大约为 23mm 的近似球状体,由眼球壁和眼球内容物构成(图 1-2)。

眼球壁的正前方,占整个眼球壁面积的 $\frac{1}{6}$ 是一层弹性的透明组织,叫做角膜。角膜厚约 1mm,横径约 11mm,含有大量的感觉神经纤维。角膜具有屈光功能,光线经角膜发生屈折进入眼内。眼球壁外层的其余 $\frac{5}{6}$ 是白色的不透明膜,叫做巩膜。巩膜厚约 0.5—1mm,它主要起巩固、保护眼球的作用。

眼球壁的中层包括虹膜、睫状体和脉络膜。脉络膜含有丰富

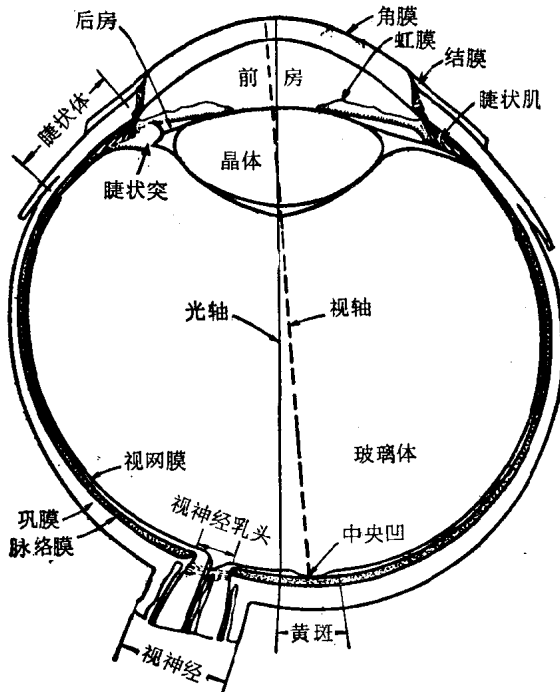


图 1-2 眼睛解剖图

的色素细胞,呈黑色,起着吸收外来杂散光的作用,消除光线在眼球内部的乱反射。

虹膜在角膜后面,根部与睫状体前端相连,位于晶体前面。虹膜中央有一圆孔,即瞳孔。虹膜组织内的扩大肌和括约肌促使瞳孔扩大和缩小。睫状体位于虹膜后面,其内部有睫状肌,起调节晶体的作用。

眼球壁内层包括视网膜与视神经内段。视网膜位于脉络膜里层,为眼球的最内层,是眼球的感光部分。它为一透明薄膜,其中有视觉感光细胞——锥体细胞与杆体细胞。在眼球后极的中央部分,视网膜上有一特别密集的锥体细胞区域,其颜色为黄色,称黄斑,直径约2—3mm。黄斑中央有一小凹,叫做中央窝。这是视觉最敏锐的地方。视网膜神经纤维从四周向黄斑的鼻侧约4mm处汇集,成为一圆盘状,叫做视神经乳头。视神经乳头没有感光能力,所以也叫盲点。神经纤维由视神经乳头穿过脉络膜和巩膜壁而成为视神经。

眼球内容物包括晶体、房水及玻璃体,它们都是屈光介质。晶体为一扁球形的弹性透明体,位于玻璃体与虹膜之间,厚为3.6—4.4mm,直径约9mm。睫状肌的收缩可改变晶体的屈光力,使外界的对象能在视网膜上形成清楚的影象。角膜和晶体之间是前房,虹膜和晶体之间是后房,其内部都充填着房水。玻璃体在晶体后、视网膜前,占眼球内容物的4/5,这是一种胶状的透明体。

当眼睛注视外界物体时,由物体发出的光线通过角膜、房水、晶体及玻璃体,使物象聚焦在视网膜的中央窝部位。视网膜的锥体细胞和杆体细胞是感光的细胞。它们接受光刺激,转化为神经冲动,经视神经到丘脑的外侧膝状体,再传导到大脑枕叶皮层的高级视觉中枢,就产生了物体大小和形状的感觉。

视网膜可以粗略地分为三层(图1-3)。最外层是锥体细胞和杆体细胞。这两种细胞是以它们的形状命名的。图中的D, E, F, G是锥体细胞系统; A, B, C是杆体细胞系统, H是锥体与杆体细胞混合系统。锥体细胞b和杆体细胞a的末端靠近脉络膜,它们

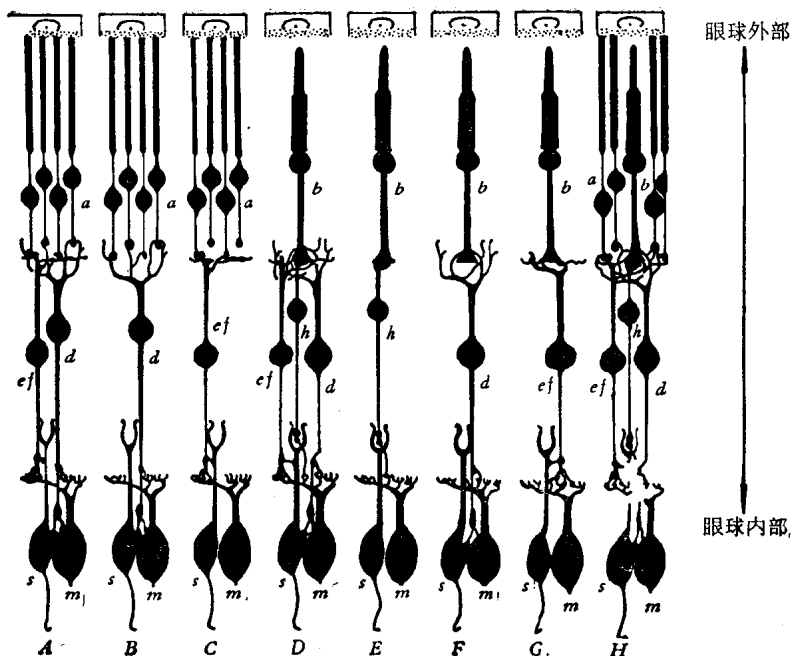


图 1-3 脊椎动物的视网膜结构

位于视网膜的最后层。光线由角膜进入眼球至视网膜，先通过视网膜的其它层次，最后才到达锥体细胞和杆体细胞。人和其它脊椎动物的眼睛都具有这种感光细胞在最后层的“倒置”的视网膜。第二层为双极细胞(d, e, f, h)和其它细胞。锥体细胞和杆体细胞都与双极细胞联结。一般情况，每一个锥体细胞都与一个双极细胞联结。这是为了在光亮条件下，每一锥体细胞作为一个单元，能够精细地分辨外界对象的细节。杆体细胞则不同，几个杆体细胞只联结一个双极细胞。这是为了在黑暗条件下通过几个杆体细胞对外界的微弱光刺激起总和作用。第三层是最内层，主要含有神经节细胞(m, s)。神经节细胞与视神经相联结。

人眼的锥体细胞的长度为 $0.028-0.058\text{mm}$ ，直径为 $0.0025-0.0075\text{mm}$ 。杆体细胞比锥体细胞细长，其长度为 $0.04-0.06\text{mm}$ ，

平均直径只有 0.002mm 。在视网膜中央的黄斑部位和中央窝大约 3° 视角范围内主要是锥体细胞,几乎没有杆体细胞。在黄斑以外杆体细胞逐渐增多,而锥体细胞大量减少。奥斯特伯格(G. Osterberg)以视网膜的 164 个代表区为取样,计算了锥体细胞和杆体细胞的分布情况(图 1-4)。他发现,人眼视网膜大约有 650 万个锥体细胞和 1 亿个杆体细胞。视网膜的中央窝每平方毫米有 140000—160000 个锥体细胞。离开中央窝,锥体细胞急剧减少,而杆体细胞急剧增多,在离开中央窝 20° 的地方,杆体细胞的数量最多。视网膜锥体细胞与杆体细胞的这种分布状态,与视网膜中央及边缘的不同功能是有关系的。

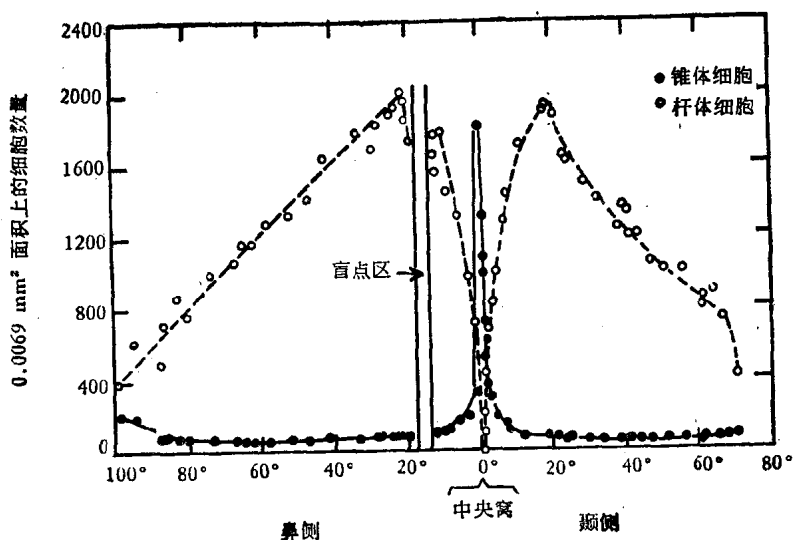


图 1-4 锥体细胞与杆体细胞的分布

二、视网膜象的形成

人的眼睛的作用类似于照相机。外界物体发出的光线,通过眼睛的屈光介质,在视网膜上聚焦成象,其基本原理与照相机相似。但这只能是一种类比,二者仍有重要的差别。

光线射入玻璃棱镜再从棱镜进入空气都会发生屈折(图1-5). 在空气中,一个凸透镜对光的作用正象棱镜对光的作用一样,因为

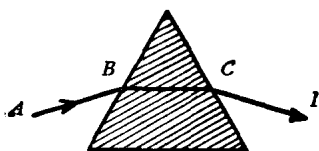


图 1-5 光线通过棱镜的折射作用

光线与透镜表面各点相切的平面均可当作棱镜看待(图 1-6).我们在透镜轴线上的 A 点放一个点光源,该光源向空间的各个方向发光.从轴线方向入射到透镜中心的光线沿直线传播,没有发生屈折;

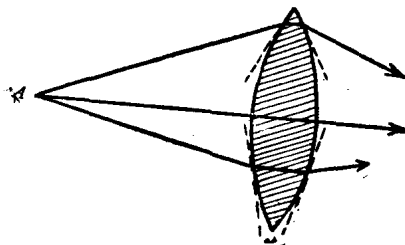


图 1-6 光线通过凸透镜的会聚作用

入射到透镜的其它部分的光线则偏离直线方向,而且离开透镜中心愈远,屈折程度愈大.于是从光源发出的光穿过透镜后再会聚起来,并且一个理想的透镜应使这些光线聚焦于一点 B (图 1-7).如果在暗室内,于透镜另一边的适当距离放一块纸板,那么在纸板上将形成明亮而清晰的点光源的象.

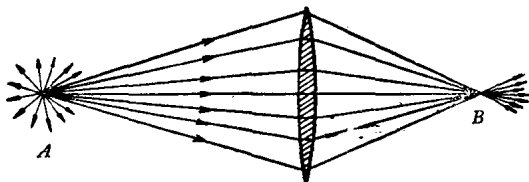


图 1-7 点光源 A 发射的光线通过透镜聚焦于 B 点

点光源以上述原理在照相机底板上成象,光线也以相似的原

理在眼睛的视网膜上成象。但是眼睛和照相机不同,眼球内没有空气,而有房水和玻璃体,都是透明液体介质,比空气有更高的折射率。晶体的前面曲率半径大于后面曲率半径,这又和简单的玻璃透镜不同。眼睛对光线的折射作用主要由角膜来实现,晶体在眼内的折射力较低,只起部分的折射作用。在暗室内,若在眼睛前面放一个点光源 A ,这个光源向空间各个方向发射光线(图 1-8)。有

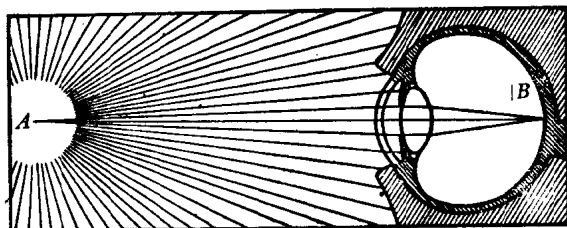


图 1-8 点光源在视网膜上成象

些光线照射在眼白上,有些光线照射在皮肤上,而某些光线通过角膜和瞳孔进入眼球内部。光线经过角膜和晶体的折射形成一个圆锥形的光束,会聚于 B 点。如果眼睛的屈光介质正常, B 点将落在视网膜上。

任何光源(例如太阳光)照射到物体上时,物体各部分的反射率不同,物体表面的每一点均起点光源的作用。我们可把物体表面的各个单一点视为一个第二光源。如图 1-9 所示,由于物体 AB 不是单一点光源,而是若干个光源,每个光源的光线进入眼球以后

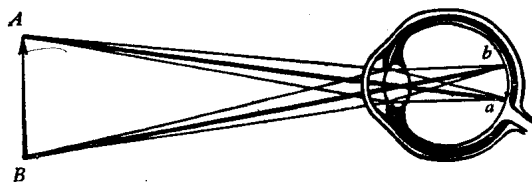


图 1-9 物体 AB 在视网膜上形成倒象

会聚到视网膜的不同点上,这些点在视网膜上形成一个左右换位、上下倒立的影象。换句话说,人的形象在视网膜上是头朝下,脚朝上的。

这种在视网膜上形成倒立影象的过程是一种简单的光学作用。但是我们并不把外界物体看成倒立的，而看成正的。这是为什么？首先，外界物体的光学刺激，作用到视网膜的感光细胞，再以神经冲动的形式传导到大脑皮层。在传导过程中，刺激作用不再具有原来固定的空间关系。另外，心理学家为了解答这个问题，还在自己身上作实验：他戴上一副特制的眼镜，通过这副眼镜的光学系统，能够使外界物体投射在视网膜上的影象成为正象。就是说，对象的上部落到视网膜上部，对象的左侧也落到视网膜的左侧。这时心理学家看到的视场却是颠倒的，一切东西看起来都是倒转的。当然，在开始的时候他非常不习惯这种情景，视觉与触摸觉、动觉之间经常发生矛盾。他用手触摸物体，在空间行动都发生困难。想拿上面的物体时，手常常伸到下面；想拿右面的物体时，手常常伸到左面。但是经过一定的主观努力，力求使自己的行动符合于客观实际，在一个星期以后，视觉逐渐与触摸觉、动觉协调起来，行动的错误减少了。到了21天以后，他又能够行动自如，完善地适应这种新的空间关系了。不仅如此，他所看到的景物又都正过来，周围的一切都恢复正常了。不过，在取掉眼镜以后，又出现整个环境倒转的现象，再需要几天的时间才能恢复常态。

这个有趣的实验说明，我们的视觉反映现实并不是由视网膜上的影象单独决定的，而是以客观刺激物为依据的。人在认识外在世界的时候，是作为一个统一的主体进行活动的，各种感觉器官——触摸觉、运动觉、视觉器官等——协同活动、相互验证，通过实践活动，最后终于能够正确地反映客观现实。

人的视觉能看清不同距离的物体，是由于眼睛调节机制的作用。眼睛的调节机制依据所看到物体的远近，增大和减小晶体的曲率，以使不同距离的物体在视网膜上形成清晰的影象。当看远距离的物体时，调节处于松弛状态，晶体的曲率减小而成扁平状；当看近距离的物体时，调节处于紧张状态，晶体的厚度增加，其表面的曲率加大，从而增强晶体对光线的会聚力。晶体起着一个透镜的作用，保证物象聚焦在视网膜上，而获得外界物体的清晰的影