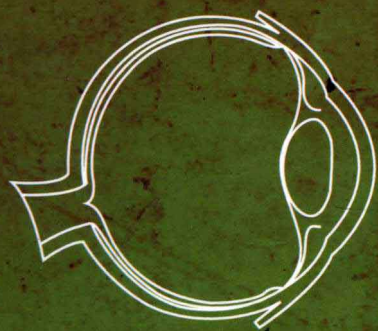
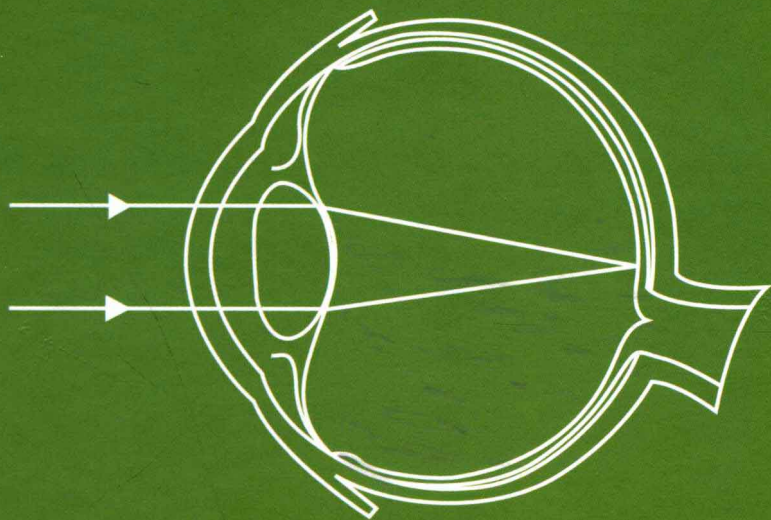


编著 徐 庆

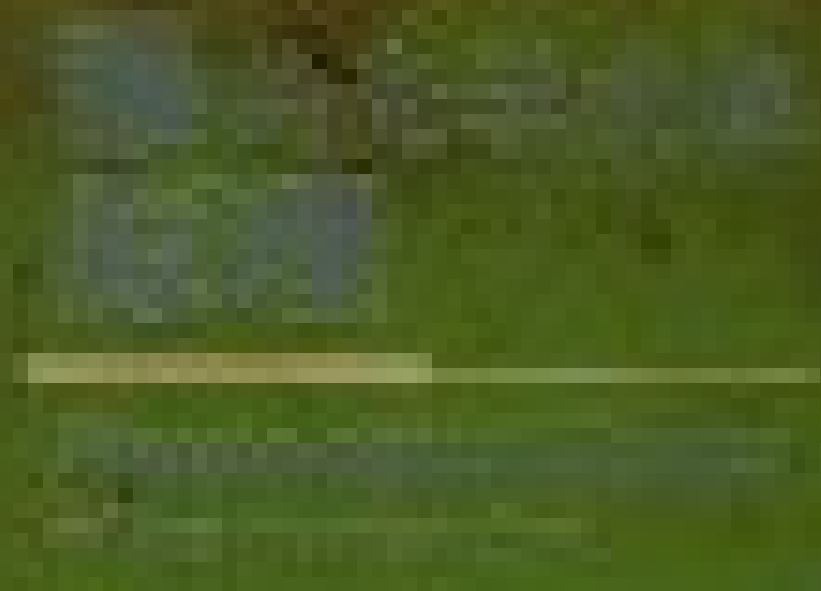


眼的光学成像 原理

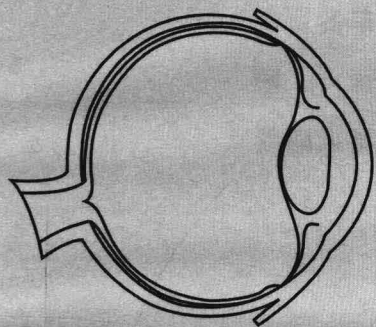
*Physiological Optics
of the Human Eye*



上海科技教育出版社

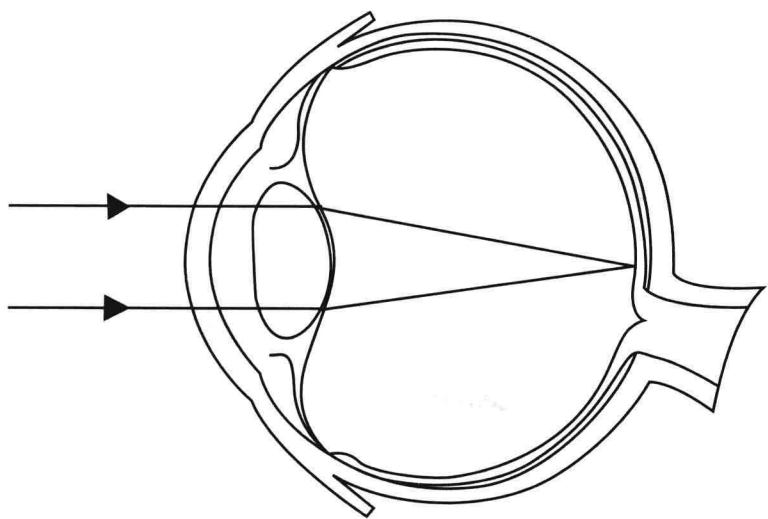


编著 徐 庆



眼的光学成像 原理

*Physiological Optics
of the Human Eye*



上海科技教育出版社

图书在版编目(CIP)数据

眼的光学成像原理 / 徐庆编著. -- 上海: 上海科技教育出版社, 2012.11

ISBN 978-7-5428-5289-2

I. ①眼… II. ①徐… III. ①眼科学: 光学 IV. ①R77

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第202606号

责任编辑 蔡 婷

封面设计 汪 彦 杨 静

眼的光学成像原理

编著 徐 庆

出版发行 上海世纪出版股份有限公司
上海科技教育出版社
(上海市冠生园路393号 邮政编码200235)

网 址 www.sste.com www.ewen.cc
经 销 各地新华书店
印 刷 上海中华商务联合印刷有限公司
开 本 889×1194 1/16
字 数 440 000
印 张 14.5
版 次 2012年11月第1版
印 次 2012年11月第1次印刷
书 号 ISBN 978-7-5428-5289-2/R·409
定 价 118.00 元

编写名单

编 著 徐 庆

参编人员 李 贞 武 静

内 容 提 要

本书共分十章,形象系统地介绍了眼屈光系统的组成和光学特征、光线与眼组织的相互作用、眼的光学成像过程、视网膜像的质量和评价方法、影响眼的光学成像质量的因素、眼的光学缺陷(即屈光不正)的测量和矫正,以及眼的年龄相关性光学变化等内容。本书详细介绍了模型眼的发展历史,常用模型眼的种类、参数以及研究应用,简要介绍了光学成像的理论、像差理论及其研究方法。本书配有大量的图表,图文并茂,通俗易懂,既可供医学院校学生尤其是视光学专业学生、眼科医生或视光学从业人员参考,也可供对眼的光学成像原理感兴趣的普通读者阅读。

眼作为人类最重要的感觉器官,在人类与自然和谐相处的过程中起着无可替代的重要作用。眼是人类感知世界、沟通自然的重要桥梁。人类所感受到的来自外部世界的刺激中,大约90%的信息量是由眼接受的,由此而产生的视觉感受除了能让人类更好地适应生存的环境外,同时也极大地丰富了人类的精神世界。对于如此重要的器官,目前的研究相对集中于对其生理和病理过程的探究,这从某种程度上来说,似乎忽略了对其最基本的功能,即光学成像功能的研究。

近些年来,随着视光学的兴起和准分子激光治疗近视等屈光不正手术的普及,人们又开始重新审视这个奇妙的生物光学系统。眼睛真的如同人们所比喻的那样,就像照相机一样吗?它的结构和照相机有什么不同?光线是如何进入眼内的?光线进入眼内后发生了什么情况?眼的光学成像过程和照相机一样吗?如何研究眼的光学成像过程?眼是如何调焦的?随着年龄的增长,眼的光学特性会发生哪些改变?诸如此类的问题,不一而足。

本书所介绍的仅仅是眼的屈光系统及其功能,以描述眼的最基本的光学成像功能为目的,根据光学成像的基本理论,比较在模型眼和真实眼中的研究成果,系统地探讨了眼的光学结构、光线与眼组织的相互作用、眼的光学成像原理、视网膜像的质量及评价方法,以及影响眼的光学成像质量的因素等问题。希望本书所介绍的内容能够部分解答上述问题,并为进一步深入研究眼的光学问题起到抛砖引玉的作用。

诚然,视觉功能的产生是一个复杂的生理过程,除了眼的屈光系统外,还与人体多个其他系统,如神经系统等共同参与、相互协同密切有关。视觉功能的产生也是一个涉及光学、神经生理学、心理学等诸多学科的完整的大脑皮质的心理认知过程,是人类感知和识别外物、确定自身和外物的各自方位,以及判断自身和外物之间相对时空关系的一个重要能力。视觉表现不仅取决于物体在视网膜上的成像质量——即眼光学系统的完善,还取决于神经系统的发育和成熟——即大脑中枢对图像的传输和处理能力。

笔者历时4年有余,参考了大量有关文献和书籍,数易其稿,撰写完成了本书。由于笔者学识有限,谬误之处在所难免,望读者批评指正,不吝赐教。

徐庆

2011年11月



001-039

第一章 眼光学系统概述

- 第一节 眼的光学构造和功能 / 002
- 第二节 眼的基本光学特征 / 005
- 第三节 眼的视觉表现 / 007
- 第四节 眼屈光系统及其光学描述 / 009
- 第五节 瞳孔及其光学意义 / 018
- 第六节 眼的轴线 / 026
- 第七节 景深 / 033

040-069

第二章 光线和眼

- 第一节 概述 / 040
- 第二节 光线进入眼内的过程及行为 / 046
- 第三节 视网膜上的光线水平 / 055
- 第四节 光线和眼底组织的相互作用 / 065

070-087

第三章 视网膜像的形成

- 第一节 近轴光学理论简介 / 070
- 第二节 近轴对焦像的形成 / 075
- 第三节 近轴散焦像的形成 / 079

088-103

第四章 视网膜像的质量

- 第一节 点和线扩散函数 / 089
- 第二节 光学传递函数 / 092
- 第三节 视网膜像的质量 / 097

104-132

第五章 屈光异常对视网膜像质量的影响

- 第一节 屈光异常 / 104

	第二节	屈光不正的测量 / 113
	第三节	透镜片的一些光学效应 / 125
133-163	第六章	其他影响视网膜像质量的光学因素
	第一节	单色像差 / 133
	第二节	色差 / 153
164-200	第七章	眼的光学模型
	第一节	近轴模型眼 / 164
	第二节	模型眼的单色像差 / 172
	第三节	模型眼的色差 / 184
	第四节	有限模型眼 / 187
	第五节	常用模型眼及其参数 / 193
201-210	第八章	眼的年龄相关性光学改变
	第一节	角膜 / 201
	第二节	晶状体 / 202
	第三节	折射率分布情况 / 202
	第四节	屈光不正和轴长度 / 202
	第五节	调节和老视 / 203
	第六节	瞳孔直径 / 206
	第七节	像差和视网膜像的质量 / 208
	第八节	光度测定 / 208
	第九节	模型眼 / 209
211-218	第九章	像差理论简介
	第一节	像差的定量评价 / 211
	第二节	波像差函数 / 212
	第三节	Seidel像差 / 214
219-222	第十章	从光学系统的像差中计算点扩散函数和光学传递函数
	第一节	点扩散函数 / 219
	第二节	光学传递函数 / 221



第一章 眼光学系统概述

眼球是人的视觉器官,是一种高度特异化的光感受器。左右两只眼球及其周围协助眼球运动和保护它的附属器、视路和视中枢一起构成了视觉系统。眼球在光学结构上和其他任何一种人造的光学系统极为相似。在光学功能上主要分成两部分,屈光传导系统和感光成像系统。前者主要包括角膜、晶状体和玻璃体,后者是视网膜。视神经、视路将视网膜感光成像后所发生的光化学反应诱发的神经冲动传导到视中枢,经大脑皮质整合,最终形成视觉感知。眼球的解剖结构如图 1-1 所示。

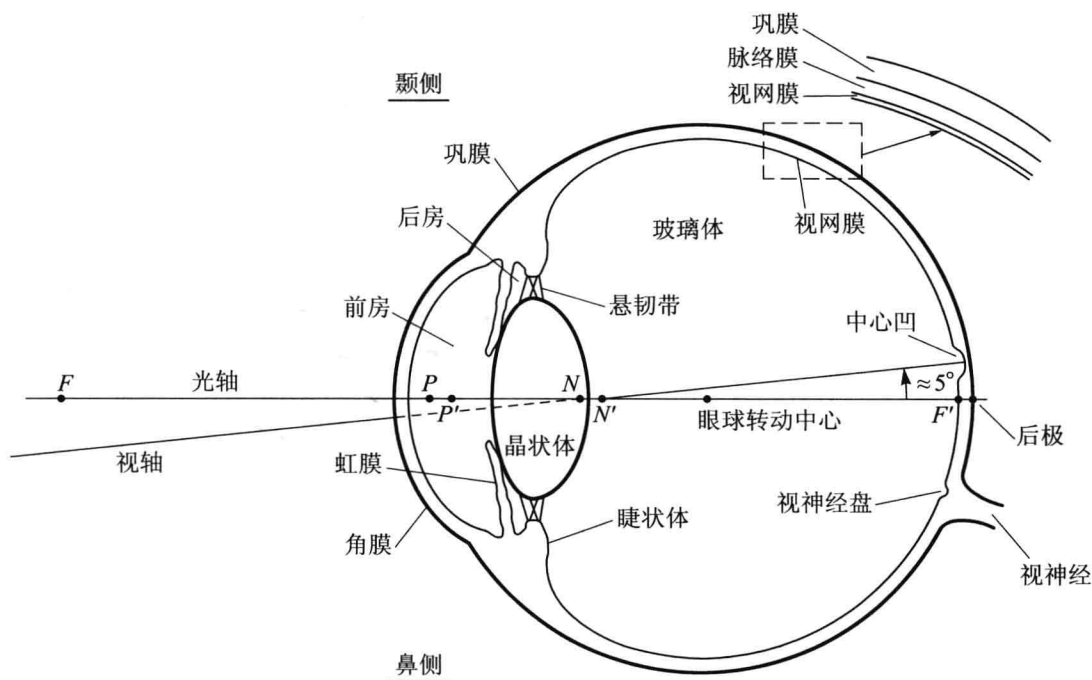


图 1-1 右眼的水平剖面俯视图
瞳孔是虹膜的开口, F 、 F' 、 P 、 P' 、 N 、 N' 为松弛眼的基点。

第一节 眼的光学构造和功能

眼球是一种特殊的生物性光学系统,它是由各种具有生命的活体有机生物组织构成。本节在介绍眼的解剖和生理的同时,还要讨论眼的光学构造和光学功能。

眼球在解剖上分为眼球壁和眼球内容两个部分。

一、眼球壁

眼球壁由外、中、内三层膜状组织构成,外层包括角膜和巩膜两部分,中层为葡萄膜,内层为视网膜。

(一) 外层

角膜位于眼球的最前端,面积约占眼外层纤维膜的 $1/6$,透明而无血管,外形近似于曲率半径约为 8mm 的球面,在其周边的角巩膜缘处和巩膜移行相连。角膜有两项重要的光学特性,即透光性和屈光性,这是产生视觉功能的光学基础。

巩膜是一层致密的、白色的、不透明的纤维组织,面积约占眼外层纤维膜的后 $5/6$,外形近似于曲率半径约为 12mm 的球面。

巩膜和角膜曲面中心的间距大约 5mm 。除了光学作用外,维持眼球的完整和保护眼内容物是角膜和巩膜共同担负的重要功能。

(二) 中层

葡萄膜(色素膜)由前面的虹膜、中间的睫状体和后面的脉络膜组成。虹膜通过调节其中央孔径(即瞳孔)的大小起着重要的光学作用。睫状体除了有产生房水和维持眼内压的重要功能外,还通过其中的睫状肌的收缩和舒张,对眼的调节起着重要的光学作用。睫状体和脉络膜两者一起对眼内组织起着重要的营养支持作用。脉络膜内所含的色素在吸收眼内光线,防止因其反射而干扰视网膜成像质量方面具有重要的光学作用。

(三) 内层

视网膜(如图 1-2 所示)是眼的感光组织,它是中枢神经系统的延伸,通过视神经和大脑皮质的视中枢连接。视网膜由神经上皮层与色素上皮层组成。各层组织具有不同水平的光学意义,其中入射光线被每一层组织所镜面反射和散射的数量具有特别重要的意义(参见第二章)。视网膜的厚度从最薄处的中央凹中心约 $150\mu\text{m}(0.15\text{mm})$,到视盘附近约 $600\mu\text{m}(0.6\text{mm})$ 而不等。

在视网膜的背面有一层感光细胞,光线必须穿过其他各层才能到达这层细胞。这些感光细胞分成两种类型,按照它们的形状分别命名为视杆细胞和视锥细胞。随着它们在视网膜上所处的位置不同,细胞形状呈现相当大的变化,中央凹中心的视锥细胞长度可达 $70\mu\text{m}$,因此有时很难从形状上对这两种细胞作出区别。图 1-3 显示的是它们在沿视网膜颞侧部分的水平切面中的分布情况。在视网膜中,有 1.1 亿~ 1.5 亿个视杆细胞,它们在距离中央凹大约 20° 处密度最大;视锥细胞有 630 万~ 680 万个,它们的最大密度位于中央凹中心,多达 $385 \times 10^3/\text{mm}^2$ 。

一般来说,视杆细胞比视锥细胞长而窄。与视锥细胞相比,视杆细胞有时被称为是高敏感的低水平光线探测器。然而,这两种感光细胞特性之间的差别不只是这一点,更多的差别是由于神经通路的不同所致的。在视网膜中,视杆细胞的神经连接网络是这样的,在信号传输途中,大约 100 个视杆细胞的输出信号可以整合在一起传入到大脑视中枢,这使得视杆细胞系统对光线有非常高的敏感性,但空间分辨力较差。相比之下,只有少量视锥细胞的输出信号可以整合在一起传入视中枢。因此,视锥细胞系统的功能

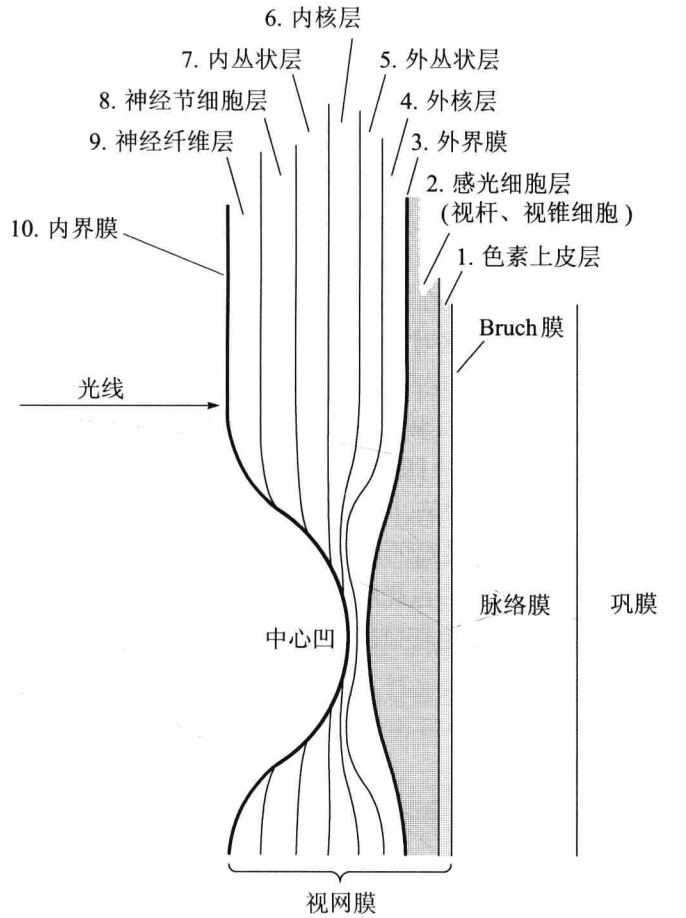


图 1-2 人眼后极部的各层组织结构

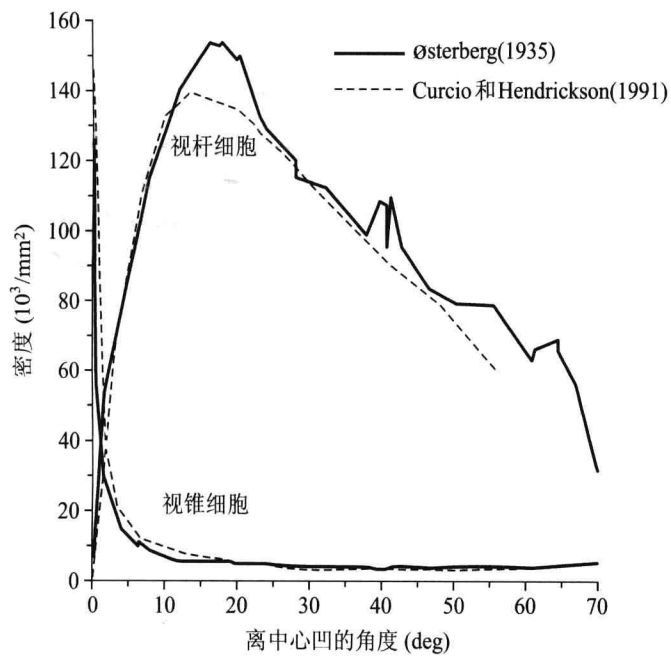


图 1-3 横跨颞侧视网膜的视杆细胞和视锥细胞的密度

是在较高的光线水平下,具有较高的空间分辨能力。视锥细胞接触光线漂白后,比视杆细胞恢复得更快。在色觉的第一阶段有三种类型的视锥细胞参与其中,每一种具有不同的波长敏感特性,它们是:L(长波)、M(中波)和S(短波)视锥细胞。

视锥细胞在宽 1.5mm 或大约 5°的中央凹占绝对优势,这里正好对应于眼的后结点 N' 。在中央凹中心 1°的范围内是没有视杆细胞的。在高光线水平下的最佳分辨能力是通过中央凹内的视锥细胞达到的,它只占据了整个视网膜面积的大约 1/1000。尽管在中央凹内,视锥细胞占优势,但它在视锥细胞总数中所占的比例很小(1%),而在具有高分辨能力的中央凹中心所发现的视锥细胞所占的比例更小(0.05%)。因而,绝大多数的视锥细胞是分布在视网膜周边部的。在低光线水平下,位于中央凹的视锥细胞不起作用,因此中央凹中心是“夜盲”的,这时必须作偏心注视,利用视杆细胞才能看见物体。在非常低的光线水平下,最大的视敏度和观察能力出现在距离中央凹 10°~15°处。

图 1-1 所示的是中央凹的位置。当眼固视在感兴趣的物体上时,物像的中心形成在中央凹的中心,它斜向偏离“最适合”的光轴大约 5°。在中央凹处,感光细胞层上面的神经上皮层比视网膜任何地方的都要薄(图 1-2),结果,中央凹便形成一个凹陷,凹陷的底部宽约 1°,相当于无视杆细胞区。底部凹陷的中心宽接近 0.5°,为无血管区,是分辨能力最高的区域。

中央凹处的视锥细胞的直径及其四周的包绕层都会影响到视敏度,在第三章中将简要地讨论这种关系。表 1-1 中列出了中央凹处的视锥细胞直径的估计值。

表 1-1 中央凹视锥细胞的直径(角度值是在假设后结点和中心凹之间的距离为 17mm 的条件下计算出的)

	μm	min. arc	
Polyak(1941)	1.0~1.5	0.2~0.3	中央凹中心
	3.5~4.0	0.7~0.8	中央凹外层
O'Brien(1951)*	2.3	0.46	

* 视锥细胞之间中心到中心的实际间距。

中央凹的位置位于轴外很令人费解,因为根据像差理论的预计,光学系统所形成的质量最佳的像通常是位于光轴上的。因而,位于中央凹的视网膜像的质量应该比位于后极的要差。中央凹处于轴外位置的一些视觉效果将在第六章中讨论。

中央凹是黄斑的中央部分,它的界限位于减少到单个排列的外核层的细胞。黄斑的直径是 5.5mm (19°)。

视网膜外层的血液供应由位于视网膜和巩膜之间的脉络膜血管供给。供养视网膜内层的血管——视网膜中央动脉从视盘进入眼内(图 1-1)。视盘处没有视锥和视杆细胞,因此这个区域是没有感光功能的。在视野中给予与此相对应的区域的名称是“生理盲点”。视盘水平径宽接近 5°,垂直径宽约 7°,它的中心偏鼻侧接近 15°,相对于中央凹向上 1.5°。相应地,生理盲点是偏颞侧 15°,相对于固视点向下 1.5°。图 1-4 所提供的是一种证实生理盲点的方法。



图 1-4 生理盲点的证实

用右眼(左眼闭着)在大约 20cm 的距离处稳定地注视十字。改变此距离直至发现黑点消失的位置。

二、眼球内容

眼球内容由眼内腔和眼内容物组成。

(一) 眼内腔

眼内腔分为前房、后房和玻璃体腔：

1. 前房是位于角膜和虹膜之间的腔隙,其间充满房水,容积约 0.25ml。
2. 后房是位于虹膜、睫状体和晶状体之间的腔隙,腔内充满房水,容积约 0.06ml。
3. 玻璃体腔是位于晶状体和视网膜之间的腔隙,其内填充无色透明、胶冻状的玻璃体,占眼球内容积的 4/5,约 4.5ml。

(二) 眼内容物

眼内容物包括房水、晶状体和玻璃体,三者均有很好的透明性,光线发生散射少,透射系数高,又有一定的折射率,是光线进入眼内到达视网膜的通路,它们与角膜一起构成眼的屈光系统。

1. 房水 充满前后房,由位于后房的睫状体的睫状突上皮产生,经瞳孔流入前房,再经前房角的小梁网流入 Schlemm 管,最后由房水静脉回流入眼静脉。房水对于产生一个高于大气压的眼内压,并使其维持于一个近似常数的水平,从而达到维持眼球的形状、眼内容物的正常解剖位置和眼屈光介质的透明性等目的,具有重要的生理和光学意义。

2. 晶状体 位于虹膜和玻璃体之间的后房内,是一个透明的生物双凸透镜,在无调节状态下,正常眼晶状体的屈光力相当于 20D 的凸透镜。晶状体一生都在生长,成人的晶状体直径为 9~10mm,中央厚度为 4~5mm,前折射面较为平坦,曲率半径为 10mm,后折射面较凸,曲率半径为 6mm。晶状体的主要光学功能有屈光、调节和吸收紫外线。

3. 玻璃体 为无色透明的胶体,位于玻璃体腔内。对眼内组织起支撑、减震和营养作用。

第二节 眼的基本光学特征

眼的成像原理和人造的光学系统(如照相机)相似。由物体发出的光线经过角膜进入眼内,经角膜和晶状体折射后对焦在视网膜上形成倒立的像。与晶状体相比,角膜的屈光力较大。对于任何一只确定的眼来说,由于角膜的屈光力是一个常数,因此当眼需要对焦于不同距离上的物体时,只能通过改变晶状体的屈光力来达到。这种由晶状体形状的交替变化而实现的自动变焦过程,称为调节(详见第八章)。进入眼内的光束直径是由虹膜控制的,它中央的开口形成了眼的孔径光阑(aperture stop),称为瞳孔(pupil)。对所有的光学系统来说,孔径光阑是非常重要的系统成分,它广泛地影响了整个光学过程,在本章第五节中将作进一步讨论。

图 1-5 显示的是两条发自物体的光束在视网膜上成像的过程。和照相机形成的像一样,视网膜上的像也是倒立的。视网膜像的形成过程将在第三章中讨论。本节仅介绍一些光学的基本概念。

一、基点

每一种拥有一个以上等效屈光力(即不是单焦点)的共轴光学系统,在其光轴上有六个基点(cardinal point)。它们两两成对,其中一对是焦点,用符号 F 和 F' 表示;一对是主点,用符号 P 和 P' 表示;一对是结点,用符号 N 和 N' 表示。这些基点在眼内的位置要根据眼的结构参数和调节的水平而定。图 1-1 显示了这些基点在一只对焦于无限远的眼中的近似位置。第七章中,在讨论模型眼及其特点时,会给出更为精确的位置。这些基点的光学特点如下所述:

1. 焦点(F 和 F') 光线离开前面的(也称第一或前)焦点 F 进入眼内,如果没有视网膜挡住,最后由晶状体折射之后形成的像将位于无限远处。平行于光轴的光线,从无限远的距离射来进入眼内形成的像位于后面的(也称第二或后)焦点 F' 上。因此,对于对焦在无限远的眼,视网膜恰好和后面的焦点重合。

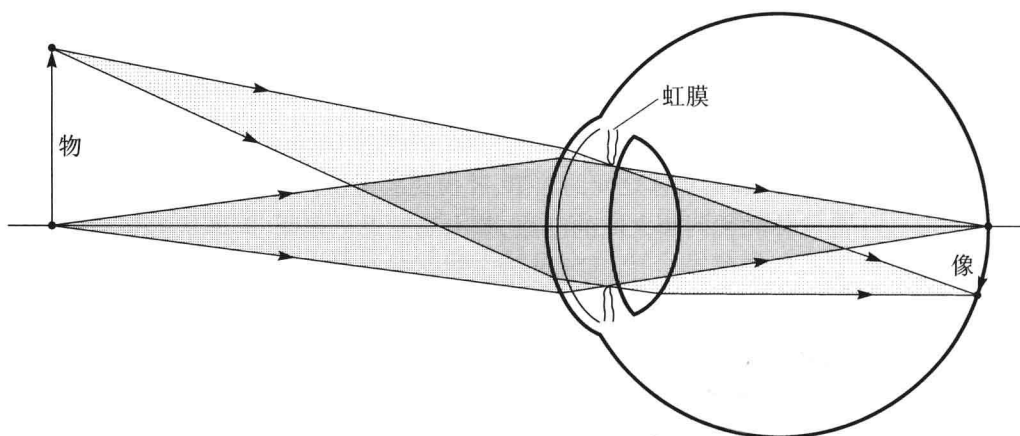


图 1-5 人眼中像的形成

2. 主点(P 和 P') 它们互为成像(或称为共轭),这样它们的横向放大率是+1。也就是说,如果将一个物体放置在它们之中的任一点上,在另一点上将形成同样大小的正立的像。

3. 结点(N 和 N') 它们也是互为成像,但有一个特有的性质,从轴外点射向 N 的光线,看似就像在系统的像一侧的 N'穿过,且在系统的每一侧的光线与光轴保持相同的夹角。这样的光线称为结点光线(nodal ray),当轴外点是固视的点时,这种光线又称为视轴(visual axis)。

二、等效屈光力和焦距

任何光学系统重要的特点之一是它的等效屈光力(equivalent power),它是对系统弯曲或偏离光线能力的度量。屈光力越高,偏离光线的能力越大。光学系统的等效屈光力用符号 F 表示。眼的等效屈光力与焦点和主点之间的距离相关,由下面方程给出:

$$F = -1/PF = n'/P'F' \quad (1.1)$$

式中: n' 是玻璃体腔的折射率。就成人而言,眼的平均屈光力大约是 60m^{-1} 或 60D ,但在特定的眼与眼之间,该值的变化很大。如果取上述的屈光力值和通常认可的玻璃体腔的折射率 $n'(1.336)$,那么,眼的焦距(focal lengths)是:

$$PF = -16.7\text{mm} \text{ 和 } P'F' = +22.3\text{mm} \quad (1.2)$$

虽然眼的等效屈光力是眼的一个重要的光学特点,但不容易直接测量。它的值通常受到其他测量值(如折射面曲率半径、折射面间距和眼轴长度)的准确性,以及所假设的眼屈光间质的折射率的干扰。

然而,比等效屈光力更重要的光学特点是屈光不正。屈光不正可以被认为是由于等效屈光力和眼轴长度之间不匹配所导致的等效屈光力的误差。例如,如果对于一个确定的眼轴长度,等效屈光力太高,像形成在视网膜前面,则导致近视屈光不正;如果等效屈光力太低,像形成在视网膜后面,则导致远视屈光不正。屈光不正将在第五章中讨论。

三、轴线

在眼的光学研究中,需要定义许多眼的轴线,详细情况将在本章第六节中进一步讨论。图 1-1 显示了其中的两条:光轴(optical axis)和视轴。光轴通常被定义为连接眼球各个折射面曲面中心的直线。然而,眼球并不是完美的旋转对称体,因此,即使四个折射面的每一个都是完美的旋转对称体,四个曲面中心仍不能共有一条直线。因此,在眼这种光学系统中,光轴的定义是一条穿过这些非共线点的最适合的直线。视轴则定义为一条经过结点的,连接被注视物体和中央凹的直线。

四、转动中心

眼球在六条眼外肌的作用下在眼眶内转动。受到这些肌肉位置和运动方式的影响,眼没有一个确定而唯一的转动中心,然而,可以求得一个此点的平均位置,并常常假设它位于光轴上。Fry 和 Hill(1962)研究了人眼在水平面中的旋转情况,他们测量了 31 位受测者后发现,平均转动中心大约位于角膜后 15mm 的光轴上。

五、经典的眼光学参数

在个体之间,所有的光学参数都有很大的变动,其中一些参数值取决于调节和年龄。图 1-6 中所标出的是代表性的数据。在第七章中将讨论用于构建模型眼的光学参数的平均值,许多详细的数据在以后的章节中会逐渐讨论到。

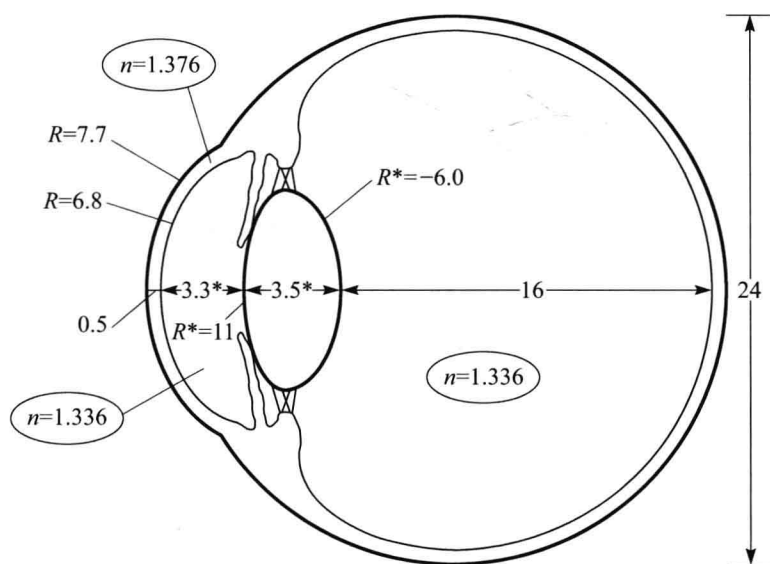


图 1-6 松弛眼的代表性数据(mm)和折射率(带星号的值取决于调节)

第三节 眼的视觉表现

眼的视觉表现是一个涉及光学、神经生理学、心理学等诸多学科的复杂的大脑皮质的心理认知过程,是人的感知和识别外物、确定自身和外物的各自方位,以及判断自身和外物之间相对时空关系的一个重要能力。视觉水平不仅取决于物体在视网膜上的成像质量,即眼光学系统的完善,还取决于神经系统的发育和成熟,即大脑中枢对图像的传输和处理能力。视觉表现主要有形觉、色觉、立体视觉等,本节主要介绍与光学相关的形觉和立体视觉。形觉的主要标志是视力,分为中心视力和周边视力,周边视力又称为视野。视力也是产生立体视觉的基础。

一、中心视力

(一) 视力的定义

中心视力分为远、近视力,为形觉的主要标志,是人眼分辨二维物体的形状、大小和位置的能力,代

视网膜黄斑中心凹处视觉的敏锐度。外界物体通过人眼光学系统在视网膜上成像后产生物体大小的感觉,取决于其在视网膜上所成的像的大小。通常,临床上为判定视力而做的视力检查,实际上是测定人眼的最小可分辨角。因此,视力可以定义为:人眼能够分辨二物点间最小距离的能力,以视角来度量。视角越小,视力越好,所以常常用视角的倒数来表达视力。

(二) 视觉分辨力极限理论

在正常情况下,人眼对外界物体的分辨力是有一定限度的,这个理论称为视觉分辨力极限理论,其理论基础为:光感受器理论(receptor theory of resolution)和光的波动理论(wave theory of resolution)。根据光感受器理论,只有当相隔一个未受刺激的视锥细胞的两个视锥细胞同时受到视觉刺激时,人眼才能区分两个物点。换言之,人眼的分辨率受到视锥细胞直径的限制。而光的波动理论则从光的衍射现象出发,认为即使是一个完美的光学系统,点光源经该系统形成的像也不是一个点,而是一个称为 Airy 盘的衍射盘。Airy 盘的半径值,就是人眼可分辨的最小距离(参见第三章)。

(三) 影响视力的生理因素

1. 最低可见度(minimum visible) 由于眼光学系统存在球面像差、色差和瞳孔边缘的衍射作用,点光源发出的光线进入眼内,在视网膜上形成的像不再是一个点,而是一个弥散斑(朦圆)。测定点光源可见度的因素不是取决于其所对应的视角,而是取决于落在感光细胞上的光能量和感光细胞的光敏感性。

2. 最低可辨性(minimum discriminable) 最低可辨性依赖于光强度的对比梯度,因而眼的分辨能力取决于视锥细胞探测出落在其上的光线的最小光强度之差的能力。

3. 衍射(diffraction) 衍射是光线在瞳孔边缘所发生的偏离直线传播的现象。由于衍射的作用,光线不能在视网膜上结成完全清晰的像。瞳孔越小,衍射作用越大,因此视网膜像越模糊。

4. 对比敏感度(contrast sensitivity) 常规的视觉测量是测试被检者识别逐级缩小的视标(字符或图形)的能力。视力测定是测量视网膜能分辨的最小视角。正常视觉不仅取决于识别边界清晰的视标的能力,还取决于能否探测出在无清晰边界轮廓的区域中亮度微小变化的能力,后者称为对比敏感度。

5. 最小可分性(minimum separability) 两个分开的目标能被眼分辨出时,对眼所成的最小视角,取决于每一单位面积的视网膜内感光细胞的数量。

6. 游标视力(vernier acuity) 是指人眼能区分出空间位置上细微差别的能力。如果两根线条是分开的,即使分开的间距小至 8 弧秒,仅为视锥细胞直径的 1/3,人眼也能探测出在一个正前方的平面中这两根线条互相之间没有对齐,这种非常精细的视觉分辨力仍值得研究。

二、视野

当眼固视前方的某一点时,黄斑中心凹区域以外的视网膜感光细胞所能见到的空间范围,称为视野。眼所注视的点为中心视力,约占视野中央 5°范围。距注视点 30°以内的范围称为中心视野,30°以外的范围称为周边视野。从不同角度察看瞳孔的结果显示,在角度大于 90°的颞侧视野还能看见瞳孔。如图 1-7 所示,光线可以从大约 105°的侧面进入瞳孔。尽管这提示视野的界限可能和 105°一样大,但视野的真实范围取决于极端方向的视网膜的范围。综合由于鼻的遮挡和受限于颞侧视网膜范围的两个原因,鼻侧视野被遮挡掉大约 60°。

三、双眼视觉和双眼视野重叠

同时运用两只眼比只用一只眼能提供更好的对外部世界的感知。双眼视觉提高了对比敏感度,所获得的视敏度也稍稍优于只用一眼的单眼视觉。向两侧偏移的眼具有得到三维视觉的潜力,它包括称为立体视觉(stereopsis)的深度感知。立体视觉的水平部分依赖两眼之间的距离,即瞳孔间距。光学装置如测距仪之所以可以使立体视觉获得相当的提高,就是因为增加了有效的瞳孔间距。如图 1-7 所示,在水平