

文章编号: 1001-3806(2008)04-0370-04

## 人眼光学模型的研究与发展

孔梅梅<sup>1</sup>, 高志山<sup>1\*</sup>, 陈 磊<sup>1</sup>, 李新华<sup>2</sup>

(1. 南京理工大学 光电学院, 南京 210094 2 金陵科技学院 视光学技术学院, 南京 210001)

**摘要:** 以适宜光刺激为主的人眼是人类获取外界信息最多的重要感觉器官。从光学角度而言, 人眼是一个有多个界面的复杂光学系统, 每一个界面都具有复杂的几何特征和光学特性。结合光学测量, 对人眼建立光学模型, 研究每个界面的光学特征, 在视光学和眼科学领域都有着重要的实际应用意义。通过对国内外模型眼的研究与发展的介绍, 总结了各种典型人眼模型的光学结构与特性, 并给出了人眼光学模型的研究发展趋势——个性化与精密性。

**关键词:** 医用光学与生物技术; 眼屈光学; 模型眼; 综述

**中图分类号:** R778 **文献标识码:** A

### Research and development of the optical model of human eyes

KONG Meimei<sup>1</sup>, GAO Zhi-shan<sup>1</sup>, CHEN Lei<sup>1</sup>, LI Xin-hua<sup>2</sup>

(1 School of Electronic Engineering & Optoelectronic Techniques Nanjing University of Science & Technology Nanjing 210094 China 2 Ophthalmic Technology of College, Jinling Institute of Technology, Nanjing 210001, China)

**Abstract** Human eyes are the important sense organ that can gain the outside information by the light stimulation primarily. In fact human eyes are complex optical systems including many interfaces. Each interface has the complex geometric properties and optical characteristics. The optical model of human eyes can be established with the data obtained by different kinds of tools such as optical measurements or anatomical methods. It can be used to study the optical properties of each interface which is of great significance in the field of ophthalmology and optometry. The optical structures and properties of the several representative eye models were summarized. And the trend of development of the optical model of human eye, i.e., individualization and precision was presented.

**Key words** medical optics and biotechnology; ophthalmic dioptrics; schematic eye model; review

### 引 言

人类从外界获得的信息超过 90% 来自于视觉<sup>[1]</sup>, 所以, 以适宜光刺激为主的人眼是人类获取外界信息最多的重要感觉器官。从光学角度而言, 人眼是一个复杂的光学系统, 其主要成分由外向里为: 角膜、房水、晶状体和玻璃体, 从角膜到眼底视网膜前的每一界面都是该复合光学系统的组成部分。虽然每个界面都具有复杂的几何特征和光学特性, 但对于不同的对象, 人眼有很多共同的特征, 如各介质的折射率、各折射面的曲率等都大致相同, 因此可以用一个相对比较简单示意眼模型来表示一般的人眼。对光学模型眼研究的一般方法是: 对人眼各光学常数的大量实测结果取平均值作为人眼的光学常数, 设定各折射面面型和折射

率, 这样的光学系统就称为“模型眼”(或“示意眼”, “标准眼”)<sup>[2]</sup>。设计模型眼的目的是为了建立一个适用于进行眼球光学系统理论研究并能够模拟人眼成像状态的光学结构<sup>[3]</sup>。

近些年, 结合光学测试在眼视光学领域应用的最新成果, 基于生理解剖学数据, 研究每一个界面和内部介质的光学特征, 对人眼建立个性化光学模型, 不仅能够理解眼内各介质和整个眼球的屈光状态, 而且, 在准分子激光角膜表面切削术、准分子激光原位角膜磨镶术等角膜屈光手术和治疗白内障的人工晶体植入术等眼科手术中, 都可在术前通过收集患者眼睛的数据, 通过建立个性化光学模型, 进行模拟分析, 选择术前方案、预测术后效果等等。所以, 人眼光学模型在视光学和眼科学领域都有着重要的应用价值。

### 1 国内外人眼模型的研究与发展

从 1851 年高斯的学生 LISTING 提出第 1 个近轴眼模型(包括 3 个折射球面)开始<sup>[4]</sup>, 对于人眼模型的研究一直是国内外光学和眼科学领域的热门课题, 到

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60678048)

作者简介: 孔梅梅(1983-), 女, 博士研究生, 主要从事光学测试技术与眼视光学方面的研究。

\* 通讯联系人。E-mail: zhishga@mail.njust.edu.cn

收稿日期: 2007-05-08; 收到修改稿日期: 2007-07-20

现在为止,人们已经提出了多种示意眼模型。

### 1.1 国外早期研究的典型模型眼

20世纪初瑞典眼科专家 GULLSTRAND 提出的示意眼是后来在眼视光学领域应用最广泛的眼光学模型<sup>[5]</sup>,至今为止,一直是人们提出和改进新模型的研究基础。

GULLSTRAND 把人眼作为一个光学系统,最早研究了角膜的散光,并提出了模型眼的概念。GULLSTRAND 设计了 3 种模型眼<sup>[6]</sup>,其中, Gullstrand I 号,又称 Gullstrand 精密模型眼,共有 6 个折射面,分别为角膜前、后面,晶状体皮质前、后面和晶状体核前、后面<sup>[7]</sup>,通过晶状体的曲率和厚度的改变表示了人眼非调节和调节时的屈光状态。图 1 和表 1 中分别给出了非调节状态时的结构图和光学数据。

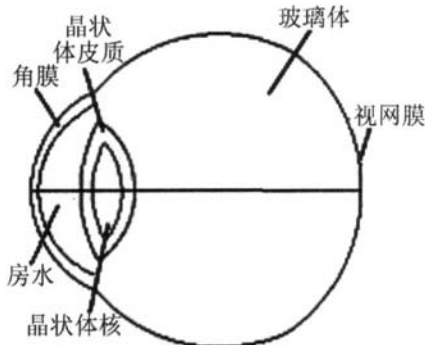


图 1 Gullstrand I 号模型眼

表 1 Gullstrand I 号模型眼的光学参量

眼球光学系统	面型(球面) 半径 /mm	厚度 /mm	折射率 $n_d$
角膜	前表面	7.7	1.376
	后表面	6.8	
房水	/	3.1	1.336
晶状体	皮质前表面	10.0	3.6
	核前表面	7.911	
	核后表面	-5.76	
	皮质后表面	-6.0	
玻璃体	/	17.2	1.336
视网膜	-12	/	/

1952年, EM SLEY 又改良了 Gullstrand I 号模型眼,形成了 Gullstrand-Em sley 模型眼<sup>[3]</sup>。若将人眼光学系统简略为仅有一个折射面而又保持其基本光学性质的光学结构,即成为简略眼<sup>[8]</sup>,常见的 Em sley 简略眼<sup>[3,8]</sup>就是基于 Gullstrand-Em sley 模型眼的数据设计的。

后来 Gullstrand I 号模型眼进一步被 Le GRAND 改进为 4 个球面折射系统,被广泛应用于计算人眼近轴光学的成像特性<sup>[9]</sup>。图 2 和表 2 分别为 Gullstrand-Le Grand 眼模型的结构示意图和具体参量列表。与

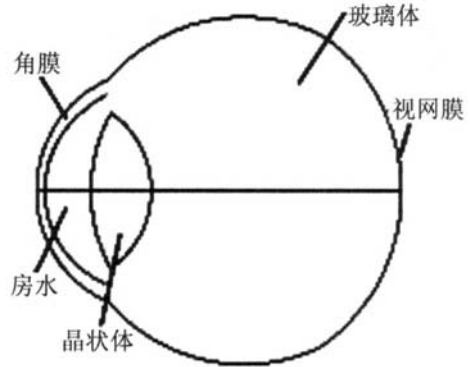


图 2 Gullstrand-Le Grand 模型眼

表 2 Gullstrand-Le Grand 模型眼的结构参量

眼球光学系统	面型(球面) 半径 /mm	厚度 /mm	折射率 $n_d$
角膜	前表面	7.8	1.3771
	后表面	6.5	
房水	/	3.05	1.3374
晶状体	前表面	10.2	1.420
	后表面	-6.0	
玻璃体	/	16.60	1.336
视网膜	-12.3	/	/

Gullstrand I 号模型眼相比,其特点为角膜仍用两面表示,晶状体的折射率则采用均匀分布式的固定值表示。

随着各种测量技术应用水平的不断提高,如,可利用光学测试中的部分相干原理用于非接触非侵入式的人眼内部介质间距的高精度测量<sup>[10]</sup>等,人们对人眼内部结构形态的研究逐步深入,于是,在 Gullstrand 模型眼的基础上,又提出了折射面为非球面形式的,晶状体折射率采用梯度渐变分布形式的等多种示意眼模型。

1971年瑞士的 LOTMAR<sup>[11]</sup>在 Gullstrand-Le Grand 球面人眼模型基础之上,将非球面首次应用于人眼模型的面型——角膜前表面和晶状体后表面采用了旋转对称的非球面形式,他以 BONNET 的实验数据为基础建立了角膜多项式,用一个二次抛物面表示晶状体后表面。

1980年美国的 BLAKER<sup>[4]</sup>提出了一个可调节的人眼模型。该模型基于 Gullstrand I 号模型眼,采用梯度渐变形式来表示晶状体的折射率,是人们提出的模型眼中第 1 个包括梯度折射率特性的调节性晶状体的人眼可调节模型。1983年荷兰的 KOOLMAN<sup>[12]</sup>通过在 Le Grand 模型眼中的角膜与晶状体的前后表面以及视网膜上引入非球面,提出一个用于分析视网膜照度的模型眼。1985年西班牙光学研究机构的 NAVARRO 等<sup>[13]</sup>提出了角膜前表面、晶状体前后表面用圆锥曲面系数表示的非球面的人眼调节模型,及调节

过程中人眼屈光力的增加量。该模型是以 Gullstrand-Le Grand 眼模型中的数据为基础的, 具体结构参量见表 3。

表 3 Navarro 模型眼的结构参量

眼球光学系统		面型		厚度 /mm	折射率 $n_d$
		半径 /mm	非球面系数		
角膜	前表面	7.72	-0.26	0.55	1.367
	后表面	6.5	0		
房水	/	/	/	3.05	1.3374
晶状体	前表面	10.2	-3.1316	4	1.42
	后表面	-6	-1		
玻璃体	/	/	/	16.4	1.336
视网膜	-12.3	0	/	/	/

## 1.2 国外近期发展的典型模型眼

人眼解剖研究的结果已经表明眼光学系统中的各折射面均为非球面, 并且晶状体的折射率是梯度分布的(晶状体由多层不同折射率的物质组成, 向着中心在光学上变得更为致密, 这使得晶状体的光学复杂化。于是, 从前极到后极, 从中心到赤道, 有一个折射率梯度<sup>[14]</sup>)。但 Navarro 模型没用上晶状体的折射率梯度渐变特性。

1997年澳大利亚墨尔本大学的 LIU 等<sup>[15]</sup>提出了基于解剖数据的人眼模型, 也是目前为止比较全面的一个人眼模型, 其光学参量见表 4。它是一个由

表 4 Liou 模型眼结构参量

眼球光学系统		面型		厚度 /mm	折射率 $n_d$
		半径 /mm	非球面系数		
角膜	前表面	7.77	-0.18	0.50	1.376
	后表面	6.40	-0.60		
房水	/	/	/	3.16	1.336
晶状体	前表面	12.4	-0.94	4.02	梯度分布 Grad A Grad P
	假想面	无穷大	0		
	后表面	-8.10	0.96		
玻璃体	/	/	/	16.27	1.336
视网膜	-12.3	0	/	/	/

个非球面和渐变折射率系数表示的晶状体组成的模型眼, 其中通过在晶状体中定义一个假相面将其分为前后两部分引入梯度折射率。而且, 模型中考虑了  $\alpha$  角即反映眼睛光轴和视轴不重合的  $5^\circ$  的偏差角。该模型不仅提供了准确的光学参数, 还是一个比较精确的解剖模型。

前面所述的各种模型眼和简略眼都只适合于研究人眼的近轴光学特性, 即属于高斯光学中屈光的概念, 若分析人眼轴外大视场的成像, 则它们与实际的人眼

成像有较大的误差, 所以, 需要以成像取代“屈光”, 建立用于研究人眼周边部分光学成像的广角光学模型眼<sup>[8, 16]</sup>。1999年英国帝国理工学院的 ESCUDERO-SANZ 与西班牙著名专家 NAVARRO 合作<sup>[17]</sup>, 以 1985年 NAVARRO 提出的模型眼为基础<sup>[13]</sup>, 研究了 5 面大视场人眼光学模型, 尤其定义了视网膜的球面面型用于人眼轴外视场的成像, 视场增大扩大了该模型的应用范围, 表 5 为该模型的具体参量。

表 5 Escudero-Sanz 大视场模型眼的结构参量

眼球光学系统		面型		厚度 /mm	折射率 $n_d$
		半径 /mm	非球面系数		
角膜	前表面	7.72	-0.26	0.50	1.3777
	后表面	6.50	0		
房水	/	/	/	3.05	1.3391
瞳孔(光阑面)	无穷大	0	0	0	/
晶状体	前表面	10.20	-3.1316	4	1.4222
	后表面	-6.00	-1.0		
玻璃体	/	/	/	16.3203	1.3377
视网膜	-12.00	0	/	/	/

2004年波兰 Wrocław 科技大学的 SIEDLECKI 等<sup>[18]</sup>提出的新型示意眼中, 非球面型的晶状体的折射率定义为径向渐变形式, 通过光线追迹, 与已有的 5 个模型眼进行了成像质量的比对研究。

## 1.3 国内人眼模型的研究

与国外发达国家相比, 我国的眼视光学起步较晚, 差距很大。温州医学院在视光学方面在国内同行中较为突出, 在 1973 年温州医学院发表了“精密模型眼”一文, 介绍了模型眼的参量计算<sup>[5]</sup>。除此以外, 关于人眼光学模型的建立与研究, 到目前为止国内相关的总结或报道都较少, 近些年来有一些基于国外人眼模型之上的应用研究。如 2002 年 ZHAO 等<sup>[9]</sup>在 Gullstrand-Le Grand 眼模型基础上, 研究非球面和晶状体梯度折射率在眼光学成像中的作用; 2005 年 LIU 等分别在 Liou 与 Gullstrand-Le Grand 眼模型基础上, 研究含泪膜<sup>[19]</sup>、晶状体层状折射率分布<sup>[20]</sup>的模型眼; 2007 年 ZHU 等<sup>[21]</sup>以 Liou 眼模型为基础, 研究不同因素对可调节人工晶体屈光调节力的影响。

人眼的结构具有人种的差别, 然而, 上述的这些模型眼基于的数据来源仅局限于西方人眼, 基于西方人眼结构的眼科检测手段和手术方案的设计对我国人眼手术效果具有一定的影响, 这对我国自主研发的各类现代眼科仪器也非常不利, 我国尚未建立具有我国人种特点的人眼光学模型。

## 2 人眼模型的发展趋势——个性化与精密性

随着手术技术和眼科临床水平的不断提高,人们发现对人眼建立个性化光学模型的需求度越来越高,因为由于个体间的差异,在应用人眼模型时,单单使用平均模型不能完全反映个性化,相应的诊断或手术都不能完全符合不同患者的特点,不能真正完成“个性化”屈光手术。所以,在人眼平均模型的基础上,人们逐渐展开了对个性化模型的研究。

目前人眼个性化模型的研究还在探索阶段,2002年澳大利亚 Griffith 大学工程学院的 ISKANDER 与 Queensland 科技大学眼科研究中心 MORELAND 合作<sup>[22]</sup>利用 Bhatia-Wolf 多项式研究了角膜表面的数字模型,为个性化角膜屈光矫正磨镶术提供了方便;2005年国内南开大学的 WANG 等<sup>[23-24]</sup>基于人眼波像差在 Gullstrand-Le Grand 模型眼基础上应用 ZEMAX 光学设计软件,探索了个性化人眼模型的建立;2006年西班牙的 NAVARRO 等<sup>[25]</sup>也用实际测得的解剖数据替换一般模型眼的数据,并将晶状体的折射率分为均匀分布和梯度渐变分布两种形式,分别建立个体模型眼对比。

而且由于现有的眼模型都属于旋转对称系统,很难描述实际手术中许多非对称因素对屈光和成像的影响。所以,人眼光学模型的另一发展方向就是建立更精密的三维立体非对称人眼光学系统。

因而,关于人眼光学模型的研究,需要从符合我国人种特点的人眼光学模型角度出发,同时结合个性化和精密性的要求,做进一步的探索。

### 参 考 文 献

- [1] GUAN H J, GONG Q R. Modern foundation ophthalmology [M]. Beijing People's Military Medical Press, 1998: 309-310 (in Chinese).
- [2] CHIZ Y. Applied optics [M]. Nanjing East China Institute of Technology, 1984: 257-259 (in Chinese).
- [3] QU J. Optometry theory & method [M]. Beijing People's Medical Publishing House, 2004: 82-83 (in Chinese).
- [4] BLAKER J W. Toward and adaptive model of the human eye [J]. JO S A, 1980, 70(2): 220-224.
- [5] PENG H F. The establishment and application of human model eye [D]. Nanjing Nanjing University of Science and Technology, 2004: 8 (in Chinese).
- [6] LIX H. The establishment and evaluation methods of the human corneal topography model [D]. Nanjing Nanjing University of Science and Technology, 2006: 6 (in Chinese).
- [7] GOBBIP G, CARONES F, BRANCATO R. Optical eye model for phoror refractive surgery evaluation [J]. Proc SPIE, 1999, 3591: 10-21.
- [8] LIF M. Ophthalmologic encyclopedia [M]. Beijing People's Medical Publishing House, 1996: 2523-2527 (in Chinese).
- [9] ZHAO Q L, WANG Z Q, ZHANG Ch Sh. The actions of aspheric surfaces and gradient index on optical image of the eye [J]. Acta Optica Sinica, 2002, 31(11): 1409-1412 (in Chinese).
- [10] HRZENBERGER C K. Optical measurement of the axial eye length by laser Doppler interferometry [J]. Investigative Ophthalmology & Visual Science, 1991(32): 616-624.
- [11] LOTMAR W. Theoretical eye model with aspherics [J]. JO S A, 1971, 61(11): 1522-1528.
- [12] KOO IMAN A C. Light distribution on the retina of a wide angle theoretical eye [J]. JO S A, 1983, A73(11): 1544-1550.
- [13] NAVARRO R, SANTAMARIA J, BESCOS J. Accommodation-dependent model of the human eye with aspherics [J]. JO S A, 1985, A2(8): 1273-1281.
- [14] LÜ F. Eyeball optics (1st lecture) [J]. Chinese Journal of Optometry & Ophthalmology, 2001, 3(1): 53-55 (in Chinese).
- [15] LIU H L, BRENNAN N A. Anatomically accurate finite model eye for optical modeling [J]. JO S A, 1997, A14(8): 1684-1695.
- [16] POMERANTZEF O, FISH H, GOVIGNON J *et al*. Wide-angle optical model of the eye [J]. Optica Acta, 1972, 19(5): 387-388.
- [17] ESCUDERO-SANZ I, NAVARRO R. Off-axis aberrations of a wide-angle schematic eye model [J]. JO S A, 1999, A16(8): 1881-1891.
- [18] SIEDLECKI D, KASPRZAK H, PIERSCZONEK B K. Schematic eye with a gradient index lens and aspheric surfaces [J]. Opt Lett, 2004, 29(11): 1197-1199.
- [19] LIU Y J, FANG Zh L, WANG Zh Q. A new model of human eye considering tear film and the optical characters [J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2005, 16(4): 488-491 (in Chinese).
- [20] LU Y J, WANG Zh Q, SONG L P, *et al*. An anatomically accurate eye model with a shell structure lens [J]. Optik, 2005, 116(6): 241-246.
- [21] ZHU H F, FANG Zh L, LIU Y J *et al*. Influence of different factors on diopter accommodation of accommodative intraocular lens [J]. Journal of Applied Optics, 2007, 28(1): 109-114 (in Chinese).
- [22] ISKANDER D R, MORELANDE M R, COLLINS M J *et al*. Modeling of corneal surfaces with radial polynomials [J]. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 2002, 49(2): 320-328.
- [23] WANG Z Q, GUO H Q. The construction of individual eye model based on eye's wavefront aberration measurement [J]. Proc SPIE, 2005, 5894: 1-9.
- [24] WANG Y, WANG Zh Q, LU M, *et al*. Study on wavefront aberrations of human eyes at wide field of view based on individual eye model [J]. Acta Optica Sinica, 2006, 26(11): 1727-1733 (in Chinese).
- [25] NAVARRO R, GONZALEZ L, HERNANDEZ-MA TAMOROS J L. On the prediction of optical aberrations by personalized eye models [J]. Optometry and Vision Science, 2006, 83(6): 371-381.

• 简 讯 •

### 重要声明

请广大作者注意,《激光技术》只接收在本刊网站或中国光学期刊网上的在线投稿及网上订阅(网址是: <http://www.gjst.net.cn> 或 <http://www.opticsjournal.net>),除此之外,没有授权其他任何网站代理广告投放、杂志订阅和论文投稿等业务!特此声明。

《激光技术》编辑部

2008-06